

この3種の反応の割合をきめると  $Fe_xO(l)$  emulsion の延べの全量が約 32.15 t なければならないことになる。すなわち Fig. 2 に示すごとく 25 t の pig iron 中に含有されていた  $\underline{C}$  と  $\underline{Si}$  は直接酸化をうけ、残り 75 t の pig iron 中に含有されていた  $\underline{C}$  と  $\underline{Si}$  は  $Fe_xO(l)$  (計算では  $x=1.0$  とした) エマルジョンによつて間接的に酸化されることがわかる。なお、残りの 7.63 t の FeO は slag 中成分や dust loss になるとした。

#### 4. 結 言

純酸素上吹転炉による脱炭反応は約 1/4 は溶鉄表面における直接脱炭、残りの約 3/4 は平均寿命の非常に短い  $Fe_xO(l)$  の temporary emulsion による間接脱炭と仮定して、吹錬中の脱炭反応の進行の具合を定性的に解釈すれば次のごとく推定される。(Fig. 3 は脱炭速度と %C の関係の一例である<sup>9)</sup>。

(a) 吹錬初期に  $dc/dt$  が小さいのは脱炭が直接脱炭のみによるからで、初期においては  $Fe_xO(l)$  emulsion はほとんどすべて  $\underline{Si}$  の酸化に費されるためと考えられる。

(b) 中期において  $dc/dt$  がほぼ一定しているのは  $Fe_xO$  emulsion の total interface area がほぼ一定し、下記の反応における CO の nucleation rate が脱炭速度が脱炭反応の律速段階になつているためではないかと思われる。



(c) 吹錬後期において  $dc/dt$  が時間とともに次第に下るのは、 $Fe_xO(l)$  emulsion の interface  $\sim \underline{C}$  が

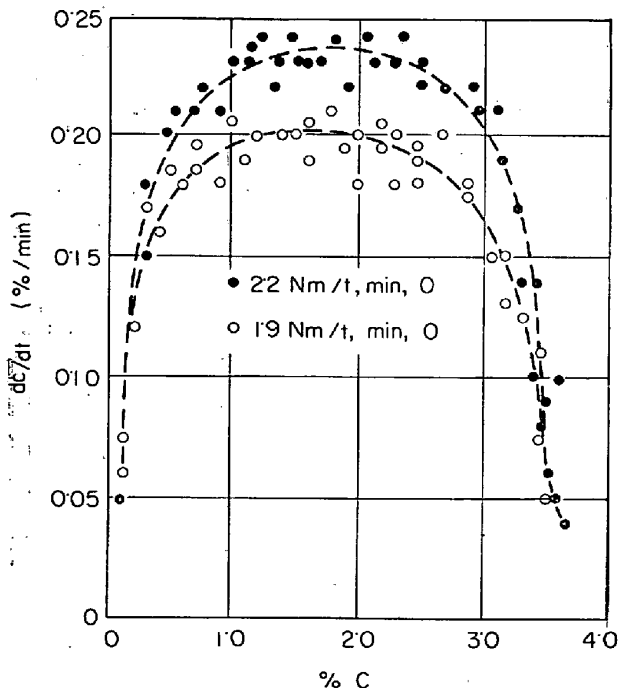


Fig. 3. An example of the relation between the carbon content and the rate of decarburization in an oxygen converter.

transport される rate が律速になるためである。また、%C が下るにしたがつて火点における直接脱炭の割合はいつそう少なくなつてくる。

ある時期における溶鋼全体の全脱炭反応は (1)  $Fe_xO(l)$  emulsion によるもの (2) 火点溶鋼表面における直接脱炭、(3) 炉壁、slag 中の鉄 slopping、slag-metal 界面における脱炭の3種の相対的な割合によつて決まるのであつて、単一の反応機構や律速段階で全脱炭速度は解明できない。

また転炉内における反応は脱炭の他に  $\underline{Si}$ ,  $\underline{Mn}$ ,  $\underline{P}$ ,  $\underline{S}$  などが関与したものが数多くあり、これらについては今後検討したいと思う。なおエマルジョンに関する文献はあまりないが、2, 3の<sup>9)</sup>ここに示しておく。ご参考になれば幸である。

#### 文 献

- 1) 鞭: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 1079
- 2) 丹羽: 鉄と鋼, 52 (1966) 4, p. 505
- 3) 森, 堤, 川合: 鉄と鋼, 52 (1966) 4, p. 507
- 4) 坂上: 鉄と鋼, 52 (1966) 12, p. 1738
- 5) 藤井, 荒木, 丸川: 学振19委8011第3-118 (1966)
- 6) 後藤, 塩見, 松下: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1421
- 7) E. S. RAJA GOPAL: "Rheology of Emulsion" Edited by p. Sherman Pergamon Press (1963)
- 8) 五味, 川添: 化学工学, 21 (1957), p. 153

#### (討-8) LD 転炉の脱炭反応と伝熱解析

名古屋大学工学部 工博○鞭 巖  
名古屋大学大学院

大槻 満・浅井 滋生

Theoretical Analysis of Decarburization Reaction and Heat Transfer in LD Converter

Dr. Iwao MUCHI, Mitsuru ÔTSUKI and Shigeo ASAI

#### 1. 緒 言

純酸素上吹転炉で、凹み接触面の近傍での温度変化と関連づけて、操作条件から脱炭反応の反応径路を予知するために、凹み周辺でのガスと溶鋼の流れに着目して理論解析を行ない、運動量、熱、物質の各移動速度、および複合反応の反応速度を考慮した脱炭反応の数学的モデルを展開した。

この数学的モデルに基づいて、操業時間の経過に伴つて起こる凹みプロフィールの変化、接触面上での温度分布の変化、ガス主流の温度分布の変化、溶鋼本体の浴内温度の変化、および浴内での炭素、ケイ素、酸素の濃度変化を近似的に推算することができる。なお、このモデルは、実操業での LD 転炉の脱炭反応径路の予知に活用できるものと考えられる。

#### 2. 理 論

##### 2.1 凹み形状、ガス流の挙動

凹み形状を  $y=ax^2$  と仮定し、最大浸入深さを  $h$  とすると、凹み周辺でのガス流に対して、次の(1)、(2)式が得られ、両式に基づいて凹みのプロフィールが決定できる。

$$G_1 U_1 + \alpha G_1 U_2 \sin \theta = F_{cy} + F_{fy} \dots (1)$$

$$U dU = -(g_c/\rho) dP \dots (2)$$

ここで

$$U_1 = [2\gamma/(\gamma-1) \cdot (Rt_{bo}/g_c) \{1 - (P_0/P_1)^{(1-\gamma)/\gamma}\}]^{1/2} \dots (3)$$

$$G_1 = \{\gamma(2/(\gamma+1))^{(\gamma+1)/(\gamma-1)} (Rt_{bo}/g_c)\}^{1/2} (\pi D^2/4) P_0 \dots (4)$$

$$\alpha = \pi \rho U_1 D^2 Y^2 / 2KG_i (Y - D^* Y_0) + \alpha_2 \dots (5)$$

$$\theta = \tan^{-1}(2\sqrt{ah}) \dots (6)$$

$$F_{cy} = \pi \rho_L g h^2 / 2a \dots (7)$$

ただし (5) 式の右辺、第一項は噴流への周囲ガスの巻き込み量、 $\alpha_2$  は反応による流量増加率を示している。 $F_{fy}$  は  $F_{cy}$  にくらべて小さいので無視する。

次に (2) 式を積分すると (8) 式となる。

$$U \cdot (x) = (2\rho_L a g/\rho)^{1/2} x = mx \dots (8)$$

(8) 式の  $x \sim x_e = \sqrt{h/a}$  を入れると

$$U_2 = (2\rho_c h g/\rho)^{1/2} \dots (9)$$

$h$  は次の (10)~(12) で  $Y=L+h$  とおき、さらに (11) 式 (12) 式を使って求められる。

$$U_{ym}/U_1 = K/(Y/D^* - Y_0) \dots (10)$$

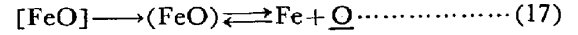
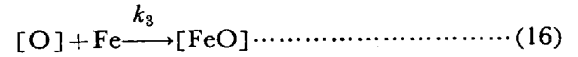
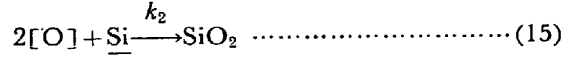
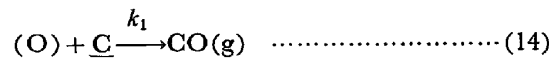
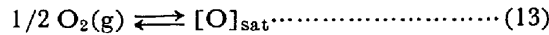
$$Y_0 = 1.817 \times 10^{-4} P_0 - 3.434 \dots (11)$$

$$(k/2) \rho U_{ym}^2 = \rho_L g h \dots (12)$$

ここに、 $K$ 、 $k$  はそれぞれ超音速噴流の特性を示すパラメータであり、以前に実験により求めた<sup>1)</sup>。(3)~(12) 式を (1) 式へ代入すれば  $a$  だけの方程式となり、 $a$  が求められる。

### 2.2 凹み接触面での反応

凹み接触面での反応は、吹錬初期においては脱ケイ反応と脱炭反応が併発し、吹錬末期にはスラッグ中の酸化鉄の増加とともに鋼浴中の酸素の増加が起ると考え、ガス側での物質移動の抵抗を無視した場合に、次の反応機構に基づいて、理論解析を行なう。



(13) 式は、酸素ガスが瞬間的に凹み表面で飽和していることを表わしている。ここで [ ] は、凹み表面にきわめて近い浴側での状態を表わすものとし、非常に高温にさらされる凹み接触面の近くでの反応と、より低温の浴内での反応とを区別して考える。(14)、(15)、(16) 式の反応は、浴内から鋼浴運動に伴って凹み周辺部に現われてくる炭素、ケイ素、および、鉄がそれぞれ、反応速度定数  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  でもつて凹み接触面で吸収された酸素 [O] と同時に反応することを示している。(17) 式の反応は、凹み部分で生成した [FeO] が浴内を液滴となつて循環する間に、その一部は分解して浴内酸素  $\underline{O}$  と Fe になり、残りがスラッグ (FeO) となる。すなわち、ここでは、浴内酸素は、鉄中への解け込みによつて生じると考えるのではなく、いつたん酸化鉄 [FeO] の形となつてから生じるものとする。凹み部分での浴側の微小な素片に着目して、酸素 [O] に関する物質収支をとると、基礎式 (18) 式がえられる。

$$\begin{aligned} \partial C_A / \partial t = & D_A \partial^2 C_A / \partial n'^2 - k_1 C_A C_B \\ & - k_2 C_A C_C - k_3 C_A C_D \dots (18) \end{aligned}$$

ここで、解析を簡単化するために、着目素片が Fig. 1 の (3) から (2) へ移行するのに必要な時間を接触時間と考え、この短い接触時間内では  $C_B$ 、 $C_C$ 、 $C_D$  が素片内部で更新初期の浴内濃度  $C_{Bb}$ 、 $C_{Cb}$ 、 $C_{Db}$  に保たれていると仮定し、さらに、 $\zeta \equiv k_3 C_{Cb} / k_1 C_{Bb}$ 、 $\xi \equiv k_3 C_{Db} / k_1 C_{Bb}$  とおくと、(18) 式は次の (19) 式で表わされる。

$$\partial C_A / \partial t = D_A \partial^2 C_A / \partial n'^2 - k_1 (1 + \zeta + \xi) C_{Bb} C_A \dots (19)$$

$$\text{初期条件: } t=0 \text{ で } C_A=0 \text{ (} n' > 0 \text{)} \dots (20)$$

$$\text{境界条件: } n'=0 \text{ で } C_A=C_{Asat} \text{ (} t > 0 \text{)} \dots (21)$$

$$n'=\infty \text{ で } C_A=0 \text{ (} t > 0 \text{)} \dots (22)$$

$$\begin{aligned} \text{解: } C_A = & C_{Asat} \{ (1/2) \exp(-\sqrt{C_{Bb}}(1+\zeta+\xi)k_1/D_A n') \\ & \operatorname{erf}(n'/2\sqrt{D_A t} - \sqrt{C_{Bb}}(1+\zeta+\xi)k_1 t) + (1/2) \\ & \exp(\sqrt{C_{Bb}}(1+\zeta+\xi)k_1/D_A n') \operatorname{erf}(n'/2\sqrt{D_A t} \\ & + \sqrt{C_{Bb}}(1+\zeta+\xi)k_1 t) \} \dots (23) \end{aligned}$$

素片の移動速度を  $dx/dt = U_L =$  一定と仮定すれば単位面積当たりの酸素吸収速度  $N_A$  は  $x$  の関数となり、(24) 式で表わされる。

$$\begin{aligned} N_A(x) = & -D_A (\partial C_A / \partial n') n' = 0 \\ = & C_{Asat} \{ \sqrt{D_A U_L / \pi x} \\ & \exp(-k_1(1+\zeta+\xi)C_{Bb}x/U_L) \\ & + \sqrt{k_1(1+\zeta+\xi)C_{Bb}D_A} \times \\ & \operatorname{erf} \sqrt{k_1(1+\zeta+\xi)C_{Bb}x/U_L} \} \dots (24) \end{aligned}$$

さて、 $\sigma_1 \equiv 1/(1+\zeta+\xi)$ 、 $\sigma_2 \equiv \zeta/(1+\zeta+\xi)$ 、 $\sigma_3 \equiv \xi/(1+\zeta+\xi)$  とおくと、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  は脱炭、脱ケイ、酸化鉄の各生成反応の割合を示す分率となる。

### 2.3 接触面温度分布、ガス流の濃度と温度分布

浴面にそつたガス流の微小部分についての  $O_2$  と  $CO$  の物質収支および熱収支をとると、(24)~(27) 式がえられる。

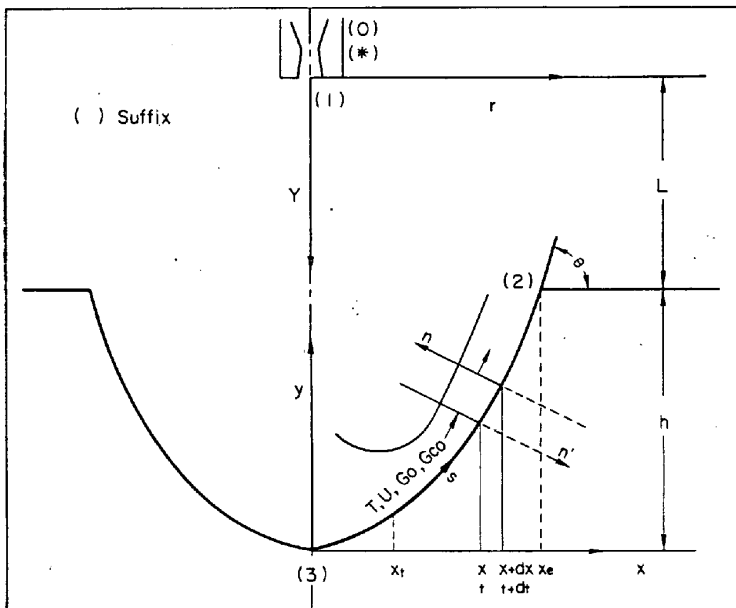


Fig. 1. Sketch for model of LD converter.

$$dG_o/dx = -N(x)A(x) = g_1(x) \dots\dots\dots (25)$$

$$dG_{Co}/dx = (7/4)\sigma_1 N(x) = g_2(x) \dots\dots\dots (26)$$

$$dt_b/dx = [A(x)h_G\{q + (T_t - t_b)h_L\}/C_p(h_L + h_G) - t_b(g_1(x) + g_2(x))]/(G_o + G_{Co}) \dots\dots\dots (27)$$

ここで

$$A(x) = 4a\pi x\{x^2 + (1/2a)^2\}^{1/2} \dots\dots\dots (28)$$

$$q = (\sigma_1\Delta H_{Co}/16 + \sigma_2\Delta H_{SiO_2}/32 + \sigma_3\Delta H_{FeO}/16) N(x) \dots\dots\dots (29)$$

$$N(x) = 32N_A(x) \dots\dots\dots (30)$$

境界条件:

$$x=0 \text{ で } G_o = G_{O_3}, G_{Co} = G_{Co_3}, t_b = t_{b3} \dots\dots (31)$$

(25)~(27)式を連立させ、(31)式を用いて解くと凹み界面でのガス流の温度変化が求められる。さらに浴側の熱収支を考えると界面温度が求められる。ここで式中の  $h_G, h_L, T_t$  は次に示されるように  $x$  の関数となる。

ガス側に着目した場合、噴流が衝突するよどみ点近傍と、さらに発達した乱流域での伝熱機構は異なる。すなわち、よどみ点近傍では界面に対してガス、溶鋼とも垂直に入り、その後は、お互に並流となつて移動していくと考えて、以下の解析を行なつた。

2.3.1 よどみ点近傍での伝熱

$$v\partial t/\partial n = K_G\partial^2 t/\partial n^2, K_G = k_G/C_p\rho \dots\dots\dots (32)$$

$$n=0 \text{ で } t = T_w, n=\delta_t \text{ で } t = t_b \dots\dots\dots (33)$$

ここで

$$v = -m\delta\{\eta^2 - \eta^4/2 + \eta^5/5 + (\lambda/6)(\eta^2/2 - \eta^3 + 3\eta^4/4 - \eta^5/5)\} \dots\dots\dots (34)$$

$$= -m\delta f(\eta)$$

$\eta \equiv n/\delta$  であり、 $(t - T_w)/(t_b - T_w) \equiv \varphi$  と無次元化する

$$\varphi'' + (Pr \cdot \lambda)f(\eta)\varphi' = 0 \dots\dots\dots (35)$$

$$\eta=0 \text{ で } \varphi=0, \eta=\delta_t/\delta \equiv \Delta \text{ で } \varphi=1 \dots\dots\dots (36)$$

解は

$$\varphi = (t - T_w)/(t_b - T_w) = \int_0^\eta \exp(F(\eta))d\eta / \int_0^\Delta \exp(F(\eta))d\eta \dots\dots (37)$$

また

$$F(\eta) = -(Pr \cdot \lambda)\{\eta^3/3 - \eta^4/10 + \eta^6/30 + (\lambda/6)(\eta^3/6 + 3\eta^5/20 - \eta^6/30)\} \dots\dots\dots (38)$$

$$\lambda = \delta^2\varphi/\mu(dU/dx) = m\delta^2\rho/\mu \dots\dots\dots (39)$$

ここで  $-k_G(\partial t/\partial n)_{n=0} = h_G(T_w - t_b)$  より

$$h_G = k_G/\{\delta \int_0^\Delta \exp[F(\eta)]d\eta\} \dots\dots\dots (40)$$

また、 $\delta$  は  $x$  の関数である<sup>1)</sup>。  $v$  は、(41)式と連続の式より求められる。

$$v = U\{2\eta - 2\eta^3 + \eta^4 + (\lambda\eta/6)(1 - \eta)^3\} \dots\dots\dots (41)$$

2.3.2 乱流域での伝熱

ガスの流れは  $Re = U\delta\rho/\mu$  が臨界レイノルズ数を越えると乱流に移行する。乱流域での熱伝達は、運動量と熱移動のアナロジーに基づいて解析されているが、まだ十分定量的に説明されていない点が多いので、ここでは(42)式のような実験式を適用する。

$$h_G/\rho UC_p = C_f/2\{1 + \varepsilon(C_f/2)^{1/2}\} \dots\dots\dots (42)^2)$$

ここで、 $\varepsilon$  は面の粗さを示すパラメータ (滑らかな場合は 1.0) であり、 $C_f$  は (43)式で示される。

$$C_f = 2\tau_{ot}/\rho U^2 \dots\dots\dots (43)$$

(41)式の  $\tau_{ot}$  は  $x$  の関数となる<sup>1)</sup>。

2.3.3 凹み接触面の浴側での伝熱

凹み近くの浴面での熱伝達は溶鋼の  $Pr$  が非常に小さく、また、乱れが大きいため評価が困難である。ここでは、Fig. 1で浴側の素片に着目し、着目素片が  $(x - dx) \sim x$  の位置で  $dt$  時間ガスと接触し、次の瞬間 ( $t$  時刻) に接触初期温度  $T_t$  で接し始め、 $dt$  時間接触した後、深さ  $ne'$  までの平均温度となつて、次の位置に移るものとする。ただし、 $ne'$  は  $\Phi = (t - T_t)/(T_w - T_t)$  とすると  $\Phi \equiv 0.05 \sim 0.01$  となる深さを意味する。

素片内での伝熱解析

$$\partial T/\partial t' = K_L \cdot \partial^2 T/\partial n'^2 \quad (0 \leq t' \leq dt), K_L = k_L/C_{pL}\rho_L \dots\dots\dots (44)$$

$$t'=0 \text{ で } T = T_t \quad (n' > 0) \dots\dots\dots (45)$$

$$n'=0 \text{ で } T = T_w \quad (t' > 0) \dots\dots\dots (46)$$

$$n' = \infty \text{ で } T = T_t \quad (t' > 0) \dots\dots\dots (47)$$

$$\text{解: } T = (T_w - T_t)\text{erfc}(n'/2\sqrt{K_L t'}) + T_t \dots\dots\dots (48)$$

$$\therefore q_L = 2(K_L/\pi dt)^{1/2}(T_w - T_t) \dots\dots\dots (49)$$

$$h_L = 2(K_L/\pi dt)^{1/2} \dots\dots\dots (50)$$

ここで  $T_t$  は次の(51)、(52)式から求められる。

$$(T_t - T_{t-dt})/(T_w - T_b) = \Phi = \text{erfc}\{ne'/2(K_L dt)^{1/2}\} \dots\dots\dots (51)$$

$$ne' \rho_L C_{pL} (T_t - T_{t-dt}) = q_L (t - dt) dt \dots\dots\dots (52)$$

なお、接触面での熱収支から、浴側伝熱速度が(53)式のように求められる。

$$q_L = h_L\{q - h_G(T_b - t_b)\}/(h_L + h_G) \dots\dots\dots (53)$$

また、(29)、(50)式と(40)式あるいは(42)式を(53)式に代入し、(49)式とあわせると接触界面での温度分布が得られる。

2.4 浴内濃度および温度変化

(24)、(53)式を接触面全体にわたつて積分することにより、操業時間  $\theta$  に対して、浴内各成分の濃度変化が(54)~(57)式より求められ、溶鋼本体の浴内温度変化が(58)式から求められる。

$$VdC_{Bb}/d\theta = -\sigma_1 \int_0^{x_e} N_A(x)A(x)dx \dots\dots\dots (54)$$

$$VdC_{Cb}/d\theta = -\sigma_2 \int_0^{x_e} N_A(x)A(x)dx \dots\dots\dots (55)$$

$$VdC_E/d\theta = \{\sigma_3/(1 + \beta)\} \int_0^{x_e} N_A(x)A(x)dx \dots\dots (56)$$

$$VdC_{Ab}/d\theta = \{\sigma_3\beta/(1 + \beta)\} \int_0^{x_e} N_A(x)A(x)dx \dots\dots\dots (57)$$

$$VdT_b/d\theta = (1/C_{pL}\rho_L) \int_0^{x_e} q_L A(x)dx \dots\dots\dots (58)$$

以上の計算によつて、タンク圧  $P_o$  と、ランス高さ  $L$  を与えて、操業時間  $\theta$  の変化に伴う  $C_{Bb}, C_{Cb}, C_E, C_{Ab}, T_b$  の変化が求められる。

使用記号

- $C_A, C_{Ab}$ : 凹み部分、浴内での酸素濃度 [kgmol/m<sup>3</sup>]
- $C_B, C_{Bb}$ : " " "炭素" [ " ]
- $C_C, C_{Cb}$ : " " "ケイ素" [ " ]
- $C_{A \text{ sat}}$ : 凹み表面飽和酸素濃度 [kgmol/m<sup>3</sup>]
- $C_E$ : 浴平均 FeO 濃度 [kgmol/m<sup>3</sup>]
- $C_p$ : ガス比熱 [kcal/kg °C]
- $C_{pL}$ : 液比熱 [ " ]

- $D_A$ : 酸素の分子拡散係数 [ $m^2/sec$ ]  
 $D^*$ : ノズルのスロート径 [ $m$ ]  
 $F_{cy}$ : 凹みの表面によつてガスに与えられる  $y$  方向での体積力 [ $kg\ m/sec^2$ ]  
 $F_{fy}$ : 凹みの表面によつてガスに与えられる摩擦力の  $y$  方向成分 [ $kg\ m/sec^2$ ]  
 $G$ : 質量流量 [ $kg/sec$ ]  
 $G_o$ : 浴面にそつた酸素流量 [ $kg/sec$ ]  
 $G_{co}$ : 浴面にそつた一酸化炭素流量 [ $kg/sec$ ]  
 $g_c$ : 換算係数 [ $kg \cdot m/Kg\ sec^2$ ]  
 $h_G$ : ガス側熱伝達係数 [ $kcal/m^2\ sec\ ^\circ C$ ]  
 $h_L$ : 液側熱伝達係数 [ $kcal/m^2\ sec\ ^\circ C$ ]  
 $\Delta H_i$ : 反応熱 [ $kcal/Kg\ -mol$ ]  
 $k_1, k_2, k_3$ : 反応速度定数 [ $kg\ mol/m^3 \cdot sec$ ]  
 $k_G, k_L$ : ガス液の熱伝導度 [ $kcal/m\ sec\ ^\circ C$ ]  
 $L$ : ノズル出口と鋼浴面間の距離(吹錬中) [ $m$ ]  
 $P$ : 静圧 [ $Kg/m^2$ ], [ $kg/m \cdot sec^2$ ]  
 $R$ : 気体定数 [ $kg\ m/kg\ ^\circ K$ ]  
 $s, n, n'$ : よどみ点を原点とする. 浴表面にそつたの軸とそれに垂直なガス方向の軸と浴方向の軸  
 $t_b$ : ガス主流温度 [ $^\circ K$ ]  
 $t$ : 温度境界層内温度 [ $^\circ K$ ], 液の(3)の位置からの接触時間 [ $sec$ ]  
 $t'$ : 素片の接触時間 [ $sec$ ]  
 $T_t$ : 素片の接触開始温度 [ $^\circ K$ ]  
 $T_w$ : 接触界面温度 [ $^\circ K$ ]  
 $v$ : ガスの浴面に垂直方向速度 [ $m/sec$ ]  
 $V$ : 鋼浴体積 [ $m^3$ ]  
 $U$ : ガス主流速度 [ $m/sec$ ]  
 $U_L$ : 凹み表面での溶鋼速度 [ $m/sec$ ]  
 $x_t, x_e$ : 層流より乱流への遷移点, ガスが凹みを離れる点 [ $m$ ]  
 $Y$ : ノズル出口から下方への距離 [ $m$ ]  
 $\beta$ : (17)式で  $O$  と  $(FeO)$  とのモル比 [-]  
 $\gamma$ : 比熱比 [-]  
 $\delta_t$ : 温度境界層厚さ [ $m$ ]  
 $\delta$ : ガスの速度境界層厚さ [ $m$ ]  
 $\theta$ : 操業時間 [ $sec$ ]  
 $\mu$ : ガスの粘度 [ $kg/m\ sec$ ]  
 $\rho$ : ガスの密度 [ $kg/m^3$ ]  
 $\rho_L$ : 浴鋼の密度 [ $kg/m^3$ ]  
 $\tau_{ot}$ : ガスの浴面に働く剪断応力(乱流域) [ $kg/sec^2\ m$ ]

## 文 献

- 1) 浅井, 鞭: 鉄と鋼, 52(1966) 11, S. 27
- 2) P. R. OWEN and W. R. THOMSON: Journal of Fluid Mechanics, (1963), p. 321