

転炉出鋼時の溶鋼の酸素および窒素吸収の推算

長 隆郎*・岩田 勝吉*²・井上 道雄*³

Estimation of Oxygen and Nitrogen Absorption of Molten Steel during Tapping from Converter

Takao CHOH, Katsuyoshi IWATA, and Michio INOUE

Synopsis:

The amounts of nitrogen and oxygen absorbed during tapping from the converter are estimated. The mass transfer coefficient in the liquid phase during tapping becomes large as 0.1~0.2 cm/s, due to the violent agitation of molten steel in the ladle. Absorption efficiencies of nitrogen by air entrainment, η_E , and through the surface of tapping stream, η_{st} , decrease with increasing oxygen content in the molten steel. Although the amounts of nitrogen and oxygen absorbed during tapping are practically independent of the tilting rate, the heat size, and the profile of the converter, they decrease with decreasing tapping height and somewhat increase with increasing slag depth in the converter. It is also estimated that those amounts increase with decreasing tapping hole diameter and with increasing its length.

A nomograph for the estimations of oxygen and nitrogen absorptions by the gas entrainment and also through the surface of tapping stream was proposed. The estimated amounts of nitrogen absorbed during tapping agreed well with the values reported in the literature.

1. 緒 言

転炉操業法の進歩につれて終点窒素濃度は 10 ppm 以下に低下するようになったが、低窒素鋼製造にはさらにその後の出鋼あるいは造塊時の窒素吸収を極力おさえないければならない¹⁾。またその他溶鋼成分の調整のためにも出鋼時の空気酸化量を知ることは重要である。著者らはこの点を考えすでに溶鋼注入時のガス巻き込みに関するモデル実験を行うとともに²⁾、ここで得た関係を用いて溶鋼注入時の空気酸化を推定し、実測値をほぼ説明することができた³⁾。本研究はこれらの報告に続き溶鋼出鋼時にみられる酸素および窒素吸収量の推算を試みることにした。

2. 計 算 方 法

2.1 注入流のガス巻き込み速度 V_g

著者らはさきに数種の液体を用いたモデル実験の結果から注入流のガス巻き込み速度 V_g を推算することを試みた。垂直液体の巻き込み速度 V_g^0 は(1)式で表されるが、 V_g^0 の計算に用いる(2)~(10)式の詳細は既報²⁾を参照されたい。

$$V_g^0 = 0.02V_1 \{(R_c - a)/a_0\}^3 \dots\dots\dots (1)$$

$$R_c = \{(1.14 + 0.00089E_1)^{1/2} - 1.067\}^{1/2} \dots (2)$$

$$E_1 = (1/2)mu^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$m = \pi\rho\lambda(2a\varepsilon - \varepsilon^2/2) \dots\dots\dots (4)$$

$$\lambda = 8.38a \dots\dots\dots (5)$$

$$a = a_0\xi^{-2} \dots\dots\dots (6)$$

$$\xi = (2gz/u_0^2 + 1)^{1/8} \dots\dots\dots (7)$$

$$u = u_0\xi^4 \dots\dots\dots (8)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \exp[(2/7) \cdot Fr \cdot We^{-0.35}(\xi^7 - 1)] \dots\dots (9)$$

$$\ln(a_0/\varepsilon_0) = 44.3(l_0/D_0)^{-0.75}Re^{-0.1} \dots\dots (10)$$

いま(10)式から ε_0 を計算し、これを(9)式に代入して ε を計算すれば(3)~(8)式から E_1 が、さらに(1)、(2)式から V_g^0 を推算できる。ただし転炉傾動時には取鍋内溶鋼に対する出鋼流の入射角度 θ' を考慮し、ガス巻き込み速度 V_g は $V_g = V_g^0/\sin\theta'$ から求める⁴⁾。

2.2 出鋼モデル

いま半径 R_1 の取鍋に半径 R_2 、高さ H の円筒状転炉をまず傾動しながら出鋼し、水平状態に達したのちはその状態で出鋼を継続するモデルを考える。ただし Fig. 1 に示すように傾動時には出鋼孔入口から転炉内溶鋼面までの深さ h を一定に保つことを条件とし、出鋼孔は炉

昭和 57 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 57 年 5 月 11 日受付 (Received May 11, 1982)

* 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University, Furo-cho Chikusa-ku Nagoya 464)

*² 名古屋大学大学院 (現:住友金属工業(株)) (Graduate School, Nagoya University, Now Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*³ 名古屋大学工学部 (現:名古屋大学名誉教授 (Faculty of Engineering, Now Professor Emeritus, Nagoya University))

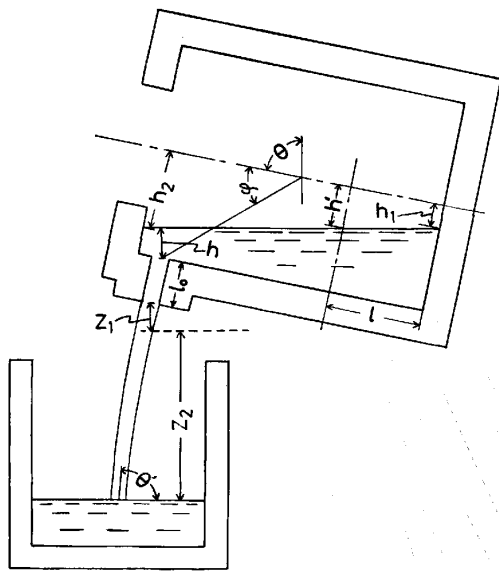


Fig. 1. Schematic diagram of model for tapping from the converter.

底から $(9/10)H$ の位置に設けた。また 2.1 の諸式から V_g を算出するために、転炉内溶鋼量 M_c 、出鋼高さ Z および出鋼孔出口流速 u_0 を次のように求める。

2.2.1 転炉内溶鋼量 M_c

(a) 傾動時：傾動角度 θ において炉底から l の位置で炉底に平行に切断するとき、溶鋼の切断面積 S_1 は (11) 式となる。

$$S_1 = 2 \int_{h'}^{R_2} (R_2^2 - x_1^2)^{1/2} dx_1$$

$$= (\pi/2) R_2^2 - h' (R_2^2 - h'^2)^{1/2} - R_2^2 \sin^{-1}(h'/R_2) \dots \dots \dots (11)$$

ただし x_1 は炉半径方向の長さ、 h' は距離 l における高さ方向炉中心線と溶鋼表面間距離を表す。このとき炉内溶鋼量 $M_c(t)$ は (12) 式で与えられる。

$$M_c = (\rho/10^6) \int_0^H S_1 dl \dots \dots \dots (12)$$

ここで $h' = l \tan(90 - \theta) + h_1$ の関係を使用し、(11) 式を (12) 式に代入して積分すれば (13) 式になる。

$$M_c = \frac{\rho H}{10^6} \left[\frac{\pi}{2} R_2^2 - \frac{1}{3(h_2 - h_1)} \times \{ (R_2^2 - h_1^2)^{3/2} - (R_2^2 - h_2^2)^{3/2} \} - \frac{R_2^2}{(h_2 - h_1)} \times \{ h_2 \sin^{-1}(h_2/R_2) - h_1 \sin^{-1}(h_1/R_2) + (R_2^2 - h_2^2)^{1/2} - (R_2^2 - h_1^2)^{1/2} \} \right] \dots \dots \dots (13)$$

ただし Fig. 1 に示す h_1 および h_2 は (14)、(15) 式で与える。

$$h_1 = h_2 - H \cot \theta \dots \dots \dots (14)$$

$$h_2 = R_2 - h (1 + \cot^2 \theta)^{1/2} + (H/10) \cdot \cot \theta \dots (15)$$

(b) 水平時：水平到達時の溶鋼量 M_c^0 は (16) 式

$$M_c^0 = \frac{\rho H}{10^6} [\pi R_2^2/2 - h_0 (R_2^2 - h_0^2)^{1/2} - R_2^2 \sin^{-1}(h_0/R_2)] \dots \dots \dots (16)$$

で示される。ただし (11) 式の h' を h_0 で表した。また水平到達以後の溶鋼量 M_c は (16) 式で h_0 を h' とし、 $dh'/dt = \pi D_0^2 / (8H)$

$$\times \{ 2g(R_2 - h' + l_0) / (R_2^2 - h'^2) \}^{1/2} \dots \dots \dots (17)$$

から Runge Kutta 法によつて h' を求め、各時間について (16) 式に代入すれば算出できる。

2.2.2 出鋼高さ Z

(a) 傾動時： Z の値は取鍋内溶鋼の上昇及び炉の傾動自身で低下する。そこでまず Fig. 1 の破線で示す水平時の出鋼孔先端位置と傾動中の先端位置との差 Z_1 を求める。いま Fig. 1 で炉中心点から出鋼孔入口までの長さを $B (= \sqrt{R_2^2 + (4H/10)^2})$ とし、炉中心線となす角を φ で表せば、 Z_1 は θ によつて次の 2 式で与えられる。

$$(1) \quad 90 - \varphi \geq \theta \geq 0; \quad Z_1 = B \cos(\varphi + \theta) + B \sin \varphi \dots \dots \dots (18)$$

$$(2) \quad 90 \geq \theta \geq 90 - \varphi; \quad Z_1 = B \sin \varphi - B \sin(\theta + \varphi - 90) \dots \dots \dots (19)$$

通常は (2) の条件下で出鋼されるので (19) 式のみを用いる。一方破線から取鍋内湯面までの高さ Z_2 は取鍋内溶鋼の上昇分 $(D_0/2R_1)^2 u_0 t$ だけ減少するので、全体の高さ Z は Z_2 の初期値を Z_{2i} とすれば (20) 式で表される。

$$Z = Z_1 + Z_2 = [R_2^2 + (2H/5)^2]^{1/2} \times \{ \sin \varphi - \sin(\theta + \varphi - 90) \} + z_{2i} - (D_0/2R_1)^2 u_0 t \dots \dots \dots (20)$$

(b) 水平時：この条件下では $Z_1 = 0$ となるので、水平到達時の Z_2 、および (11) 式の S_1 および h' をそれぞれ Z_2^0 、 S_1^0 および h_0 とするとき、水平到達後の出鋼体積は $(S_1^0 - S_1)H$ となり、 Z は $Z = Z_2^0 - \{ H(S_1^0 - S_1) / (\pi R_1^2) \}$ で表される。いまこれに (11) 式を代入して整理すれば Z は結局

$$Z = Z_2^0 + H / (\pi R_1^2) \cdot \{ R_2^2 [\sin^{-1}(h_0/R_2) - \sin^{-1}(h'/R_2)] + h_0 (R_2^2 - h_0^2)^{1/2} - h' (R_2^2 - h'^2)^{1/2} \} \dots \dots \dots (21)$$

で示され、(17) 式から h' を求めて代入すれば得られる。

2.2.3 出口流速 u_0

出鋼孔出口の溶鋼線速度 u_0 は次式で表される。

$$(a) \quad \text{傾動時：} \quad u_0 = [2g(l_0 \sin \theta + h)]^{1/2} \dots \dots (22)$$

$$(b) \quad \text{水平時：} \quad u_0 = [2g(R_2 + l_0 - h')]^{1/2} \dots \dots (23)$$

2.2.4 取鍋内溶鋼への入射角度 θ'

Fig. 1 に示す出鋼流入射角度 θ' は (24) 式で表される。

$$\theta' = \tan^{-1} [(2gZ + u_0^2 \sin^2 \theta)^{1/2} / (u_0 \cos \theta)] \dots (24)$$

2.3 巻き込み空気からの平均窒素吸収量 $\Delta[\bar{N}]_E$

2.3.1 完全窒素吸収量 $\Delta[\bar{N}]_E^0$

巻き込み気泡内の窒素がすべて吸収される場合を完全窒素吸収量 $\Delta[\bar{N}]_E^0$ とするとき、この値は微小時間 Δt 間の V_g を一定と仮定し、巻き込みガス量 $V_g \Delta t$ を逐次加算した全巻き込み量 $G(m^3)$ と全出鋼量 $M_1(t)$ から(25)式で表される。

$$\Delta[\bar{N}]_E^0 = 1.44 \times 10^{-2} G / M_1 \dots\dots\dots (25)$$

2.3.2 窒素吸収モデル

モデルの簡単化のために気相内物質移動抵抗を無視し、酸素の影響を考慮した界面反応速度 \dot{n}_r 、液相内物質移動速度 \dot{n}_1 および総括速度 \dot{n}_{ov} をそれぞれ

$$\dot{n}_r = k_r (C_e^0 - C_i^0) \dots\dots\dots (26)$$

$$\dot{n}_1 = k_1 (C_i - C_b) \dots\dots\dots (27)$$

$$\dot{n}_{ov} = k_{ov} (C_e - C_b) \dots\dots\dots (28)$$

で表す⁵⁾。ここで定常状態を仮定し、また

$$\phi = k_1 / k_r \dots\dots\dots (29)$$

とおけば、 k_{ov} は(30)式で与えられる。

$$k_{ov} = k_1 \left[\frac{\sqrt{4C_b\phi + \phi^2 + 4C_e^0} - (2C_b + \phi)}{2(C_e - C_b)} \right] \dots\dots (30)$$

ただし、 k_r は窒素の移行方向は反対であるが、著者ら⁶⁾が Fe-Cr 溶融合金の脱窒過程に適用した(31)式を用いる。

$$k_r = 10f_N / (1 + 953f_o[O\%]) \dots\dots\dots (31)$$

すなわち、溶解酸素の影響は(31)式で表される。

2.3.3 巻き込み気泡からの窒素吸収量 $\Delta[\bar{N}]_E$

いま巻き込み気泡内の窒素のうち溶鋼と反応する機会を持つ割合を η_B とし、その窒素は溶解酸素濃度が零ならばすべて吸収されると仮定する。さらにそのときの物質移動係数を k_{ov}^0 で表し、酸素の影響に関する吸収効率 η_E を $\eta_E = k_{ov} / k_{ov}^0$ で定義すると、 $\Delta[\bar{N}]_E$ は(32)式で示される。

$$\Delta[\bar{N}]_E = \Delta[\bar{N}]_E^0 \eta_B \eta_E \dots\dots\dots (32)$$

すなわち、 η_B および η_E (k_1 , k_r および酸素濃度によって定まる。)を推定すれば、 $\Delta[\bar{N}]_E$ は計算できる。

2.4 出鋼流側面を通じた窒素吸収量 $\Delta[\bar{N}]_{st}$

出鋼流側面では酸素・窒素同時吸収が生ずる。すでに著者ら⁷⁾は高周波誘導炉によって溶鉄をるつぽ溶解し、20%O₂-80%N₂ 混合ガス下の k_{ov} (●印) が、Fig. 2 に示すように 100%N₂ 下の値 (○印) より低いことを明らかにした。そこでこの結果は O₂-N₂ 雰囲気下の気液界面酸素濃度が bulk 濃度 [O]_b より高いことに原因すると考え、側面については(31)式の酸素濃度を(33)式の補正濃度 [O]' に変換した[†]。

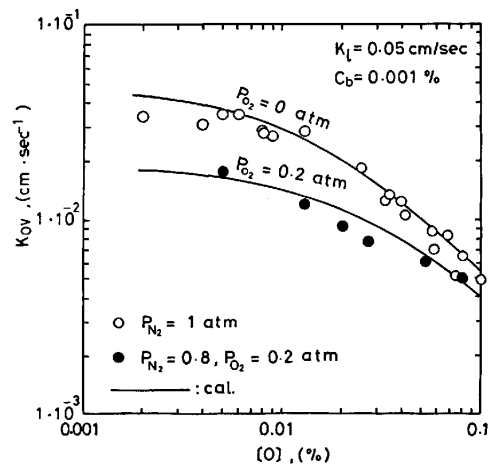


Fig. 2. Comparisons between the measured and calculated over-all mass transfer coefficients of nitrogen absorption.

$$[O]' = [O]_b + 800P_{O_2}kg / \{RT([O]_s - [O]_b)\} \dots (33)$$

ただし、(33)式の適用は [O]_b ≤ 0.1% の範囲とする。なお側面注入流の k_g は前報³⁾と同様に(34)式

$$k_g = 1.162(u_0/Z)^{1/2} \dots\dots\dots (34)$$

を用いる。いま側面積 F_1 も同様に(35)式

$$F_1 = \{4\pi a_0 u_0^2 / (3g)\} \cdot \{(2gZ/u_0^2 + 1)^{3/4} - 1\} \dots (35)$$

で表すとき、この値を微小時間 Δt 間は一一定と仮定すると、その間の吸収量は $F_1 \dot{n}_{ov} \Delta t$ となる。この吸収量を(28)~(31)および(33)~(35)式から算出後、逐次加算すれば累積吸収モル数 n_N が得られ、平均側面吸収量 $\Delta[\bar{N}]_{st}$ は(36)式

$$\Delta[\bar{N}]_{st} = n_N \times 14 / (M_1 \times 10^4) \dots\dots\dots (36)$$

で示される。なおこの場合にも酸素濃度零における吸収量を $\Delta[\bar{N}]_{st}^0$ とし吸収効率を $\eta_{st} = k_{ov} / k_{ov}^0$ で定義すれば、側面吸収量は(37)式で与えられる。

$$\Delta[\bar{N}]_{st} = \Delta[\bar{N}]_{st}^0 \eta_{st} \dots\dots\dots (37)$$

2.5 出鋼流の空気巻き込みに伴う酸素吸収量 $\Delta[\bar{O}]_E$

巻き込み気泡内の酸素はすべて吸収されると仮定し、前報³⁾と同様に平均吸収酸素量 $\Delta[\bar{O}]_E$ を(38)式で表す。

$$\Delta[\bar{O}]_E = 4.37 \times 10^{-3} (G/M_1) \dots\dots\dots (38)$$

† まず補正濃度 [O]' を (A1) 式で表す。

$$[O]' = [O]_b + \alpha \dots\dots\dots (A1)$$

いま補正量 α は界面への気相側酸素供給量を定める $k_g P_{O_2} / (RT)$ に比例し、また界面から液相 bulk への酸素の液相内物質移動を支配する駆動力 $([O]_s - [O]_b)$ に反比例すると仮定すると (A2) 式で表される。

$$\alpha = K k_g P_{O_2} / \{RT([O]_s - [O]_b)\} \dots\dots\dots (A2)$$

ここで (A1) 式に (A2) 式を代入して変形した (A3) 式

$$([O]' - [O]_b)([O]_s - [O]_b) = K' \dots\dots\dots (A3)$$

から K' の値を求める。ただし

$$K' = K k_g P_{O_2} / (RT) \dots\dots\dots (A4)$$

とする。すなわち Fig. 2 の両測定結果のうち○印を [O]', ●印を [O]_b とみなし、同一 k_{ov} となる [O]' および [O]_b を数レベルの k_{ov} について求めて (A3) 式に代入すると平均値として $K' = 0.005$ を得る。次にこの値および酸素吸収の測定で求めた $k_g' = k_g / (RT) = 3 \times 10^{-5} \text{ mol} / (\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{atm})$, $P_{O_2} = 0.2 \text{ atm}$ を (A4) 式に代入すると $K = 800\% \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^2 / \text{mol}$ となり、結局補正濃度は(33)式で表される。

2.6 出鋼流側面を通した酸素吸収 $\Delta[\bar{O}]_{st}$

酸素吸収速度を気相内物質移動律速とみなし

$$\dot{n}_{O_2} = k_g(P_{O_2} - P_{O_{21}}) / (RT) \dots\dots\dots (39)$$

で表す。ここで(34)式の k_g , (35)式の F_1 を使用すれば, $\Delta[\bar{O}]_{st}$ は(40)式から算出できる。

$$\Delta[\bar{O}]_{st} = \sum F_1 \dot{n}_{O_2} M_{O_2} \Delta t / (M_l \times 10^4) \dots\dots\dots (40)$$

3. 計算結果

3.1 完全窒素吸収量と k_1 の見積り

転炉出鋼時の窒素吸収量 $\Delta[\bar{N}]$ と溶解酸素の関係は石黒ら⁹⁾ によつて測定され Fig. 3 に・印で示されるものである。この測定値は厳密には巻き込み気泡および出鋼流側面を通した吸収量の総和であるが、後述するように側面吸収量はきわめて小さく、これを $\Delta[\bar{N}]_E$ による値とみて差しつかえない。さて本モデルにより石黒らの出鋼条件下で $\Delta[\bar{N}]_E^0$ を計算してみる。すなわち出鋼孔の直径 $D_0=11.5$ cm, 長さ $l_0=80$ cm, 転炉の半径 $R_2=200$ cm, 高さ $H=770$ cm, 初期出鋼高さ $Z_1=310$ cm および取鍋半径 $R_1=120$ cm を用い, 前述の諸式により計算すると, $h=40$ cm では $\Delta[\bar{N}]_E^0=40$ ppm, $h=60$ cm では $\Delta[\bar{N}]_E^0=41$ ppm となる。この値は石黒らが測定した低酸素側の $\Delta[\bar{N}]$ にほぼ等しく, 出鋼時には $\eta_E=1$ とできるのみならず, 低酸素ならば巻き込み気泡内の窒素は 100% 吸収されるとみなすことができる。そこで出鋼時の酸素濃度零での窒素吸収量は $\Delta[\bar{N}]_E^0$ そのものを考えることにした。一方 $C_b=0.001\%$ での k_{ov} を種々の酸素濃度および k_1 について(30)式から算出後, $\eta_E=k_{ov}/k_{ov}^0$ から得られる η_E と $\Delta[\bar{N}]_E^0=40$ ppm を(32)式に代入して $\Delta[\bar{N}]_E$ を計算すると, Fig. 3 に

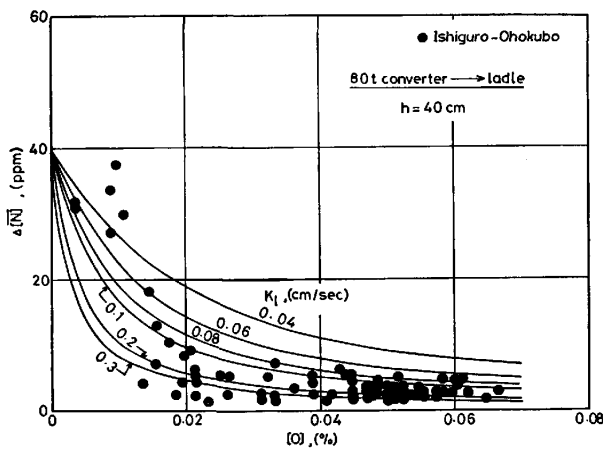


Fig. 3. The nitrogen content in liquid steel absorbing the whole of entrained nitrogen and the comparisons between the measured and the calculated nitrogen content for the selection of the mass transfer coefficient in the liquid phase during tapping.

示すように石黒らの結果に最もよく一致する計算値は $k_1=0.1\sim 0.2$ cm/s のときに得られる。逆にこの k_1 は出鋼時の“たきつぼ”での値であり, 高周波溶解で求めた $k_1=0.05$ cm/s¹⁰⁾ の 2~4 倍に相当し, 出鋼時の強攪拌が示唆されている。そこで以後の計算ではすべて $k_1=0.2$ cm/s を仮定した。

3.2 吸収効率 η_E および $\bar{\eta}_{st}$

3.1 で用いた η_E のうち $k_1=0.1$ および 0.2 cm/s での値を Fig. 4 に示すが, k_1 が大きくなると k_r が相対的に低下し η_E は小さくなる。一方 η_{st} は以下の方法で求める。いま浸透説において液体素片が気相と接する長さを液柱乱れの 1 波長 λ と仮定すると k_1 は $k_1=2\sqrt{D_N u / (\pi \lambda)}$ で表される。ここで 200t 転炉を例にとり $D_0=15$ cm, $l_0=90$ cm, $h=40\sim 80$ cm の条件下で転炉傾動初期および末期の出鋼高さ Z の k_1 を計算すると, $k_1\approx 0.05$ cm/s となる¹²⁾。この値および(29)~(31), (33), (34)式から側面吸収効率 $\bar{\eta}_{st}$ を算出し Fig. 4 に示した。ただし η_{st} は(33)および(34)式からみて u_0 および Z の関数となるので, $Z=100\sim 500$ cm, $u_0=400\sim 600$ cm/s の間の平均値 η_{st} として表した。

3.3 出鋼時の窒素, 酸素および巻き込みガス量の挙動

200t の溶鋼を出鋼するときの計算結果を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。ただし条件は図中に示した。このうち Fig. 5 は転炉の傾動角度 θ , 取鍋内出鋼流入射角度 θ' , 出鋼高さ Z_1 および Z_2 , 平均側面酸素吸収量

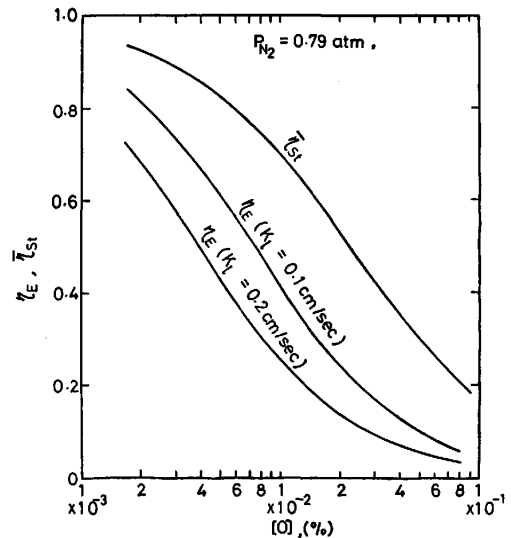


Fig. 4. Effect of oxygen on the efficiencies of nitrogen absorption by entrained bubbles and through the surface of tapping stream.

^{†2)} D_N は 9.2×10^{-5} cm²/s を用いる。いま $h=40$ cm の場合を一例として示すと, 初期には $Z=483$ cm, $u=1096$ cm/s, $\lambda=43$ cm から $k_1=0.055$ cm/s. 末期には $Z=194$ cm, $u=797$ cm/s, $\lambda=50$ cm から $k_1=0.043$ cm/s が得られる。

$\Delta[\bar{O}]_{st}$, 巻き込みガスからの平均酸素吸収量 $\Delta[\bar{O}]_E$, および累積巻き込み空気量 G の推移を表すが, 酸素吸収量は出鋼終了時の $\Delta[\bar{O}]_E = 10.7$ ppm, $\Delta[\bar{O}]_{st} = 2.1$ ppm から合計 $\Delta[\bar{O}] = 12.8$ ppm となり, また G の最終値は約 48.85 m^3 に達する. 一方窒素に関しては Fig. 6 に示すように最終値は $\Delta[\bar{N}]_E^0 = 35.2$ ppm, $\Delta[\bar{N}]_{st}^0 = 1.2$ ppm であり, ここで酸素濃度を決定できるならば, Fig. 4 の η_E あるいは $\bar{\eta}_{st}$ を使用し, 実際に吸収される窒素量を (32) または (37) 式から推算できる. いずれにしても $\Delta[\bar{N}]_{st}^0 + \Delta[\bar{N}]_E^0$ に占める $\Delta[\bar{N}]_{st}^0$ の割合は極めて低く, 無視してもよい. なおこれらの計算では最終取鍋内容積 V_c と取鍋半径 R_1 の間に $h_{1f}/(2R_1) = 1$ の条件を設けた.

3.4 ガス吸収量に及ぼす転炉および出鋼条件の影響

出鋼時のガス巻き込み量は転炉および出鋼条件によつ

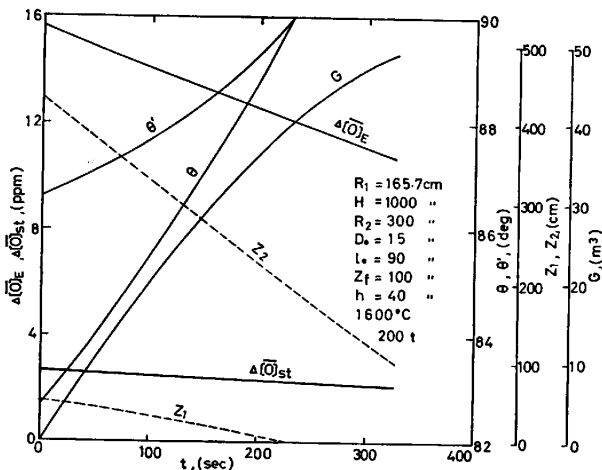


Fig. 5. Example of tapping of 200 t molten steel: time dependences of oxygen absorbed by entrained bubbles $\Delta[\bar{O}]_E$ and $\Delta[\bar{O}]_{st}$, the tilting angle θ , the angle between the tapping stream and the pool surface θ' , the tapping height Z_1 and Z_2 , and the accumulated volume of entrained bubbles G .

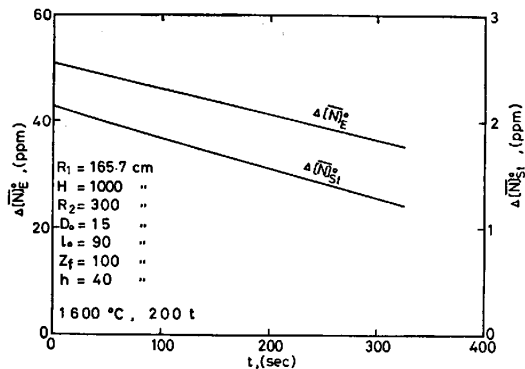


Fig. 6. Time dependences of nitrogen contents $\Delta[\bar{N}]_E$ and $\Delta[\bar{N}]_{st}$ during tapping of 200 t molten steel.

て変わることが予想される. そこでここでは出鋼孔直径 D_0 と転炉半径 R_2 の比 D_0/R_2 , 出鋼孔長さ l_0 とその直径 D_0 の比 l_0/D_0 , 転炉内容積 V_c と溶解量 M_c の比 V_c/M_c , 転炉高さ H とその直径 $2R_2$ の比 $H/(2R_2)$, 出鋼末期取鍋内容積 V_c と取鍋直径 $2R_1$ の比 $h_{1f}/(2R_1)$ さらには末期出鋼高さ Z_f を種々の値にとり, ガス吸収量を推算してみた. なお条件は図中に付記した.

3.4.1 炉容量の影響

まず炉容量を変化して出鋼時のガス吸収量を推算した結果, Fig. 7 に示すように炉容量が大きくなると, $\Delta[\bar{O}]_{st}$, $\Delta[\bar{O}]_E$, $\Delta[\bar{N}]_E$ はいずれもやや低下している. また転炉傾動時の炉内容積 V_c が深くなると, $\Delta[\bar{O}]_{st}$ は低下するが, $\Delta[\bar{O}]_E$ および $\Delta[\bar{N}]_E$ は上昇している. しかしながら吸収量に及ぼす h の影響, つまり傾動速度の影響は小さい.

3.4.2 転炉形状 $H/(2R_2)$ の影響

250 t 転炉をとりあげ, 炉の形状をほつそり形からずんぐり形に変化して吸収量を計算した. その結果 Fig. 8 に示すように $H/(2R_2)$ が大きいほつそり形の場合やや低い吸収量となることが明らかである.

3.4.3 出鋼高さ Z の影響

Fig. 9 は 250 t 転炉で出鋼高さ Z を変化したときの結果を示すが, Z の低下とともに吸収量は低下し, しかもこの影響は前述の炉容量や炉形状の効果より大きい.

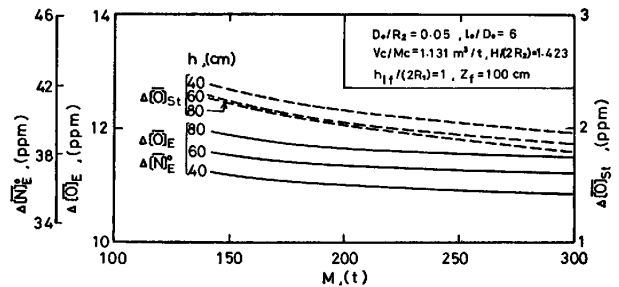


Fig. 7. Effect of heat size on the oxygen and nitrogen absorption of liquid steel during tapping.

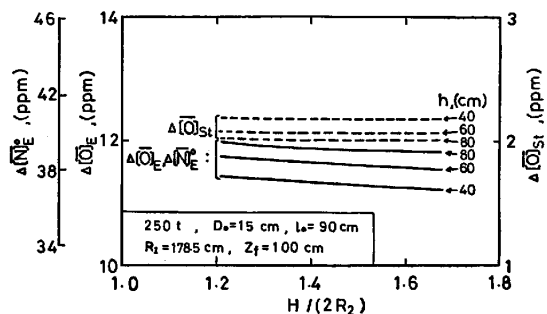


Fig. 8. Effect of furnace profile on the oxygen and nitrogen absorption of liquid steel during tapping.

3.4.4 溶鋼溶解量および取鍋直径の影響

同一転炉で溶解量を変化し、また取鍋直径を変えたときの吸収量を計算した。Fig. 10 の細い実線および破線は同一炉で溶解量を減少すると、 $\Delta[\bar{O}]_E$ および $\Delta[\bar{O}]_{St}$ が若干低下することを表す。ただしこの場合には溶解量の低下とともに取鍋直径を小さくし、 $h_{1f}/(2R_1)=1$ の条件を維持している。一方、太い実線と破線も同じように溶解量低減の影響を表すが、この場合には末期出鋼高さを $Z_f=100$ cm、取鍋直径を $2R_1=357$ cm とともに一定にしたために、溶解量低減に伴って取鍋内容鋼深さが浅くなり、取鍋内容鋼が扁平 ($h_{1f}/(2R_1)<1$) になった状態での吸収量を示す。すなわち、 $h_{1f}/(2R_1)$ の値を図中に付記したように、太い線と細い線の差、つまり取鍋内容鋼形状が扁平になると吸収量はさらに低下することが見込まれる。

3.4.5 転炉内スラッグの影響

転炉内の溶鋼表面にはつねにスラッグ層が存在しているが Fig. 11 は 250 t 出鋼時のガス吸収量に及ぼすスラッグ層厚さ h_s の影響を示す。それによればスラッグ層が厚くなるにつれて出鋼孔出口流速が上昇して吸収量はやや

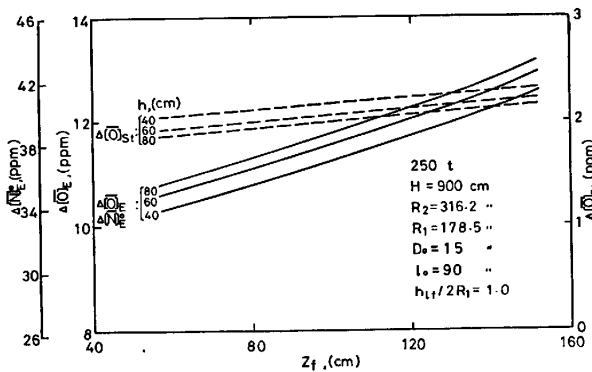


Fig. 9. Effect of tapping height on the oxygen and nitrogen absorption of liquid steel during tapping.

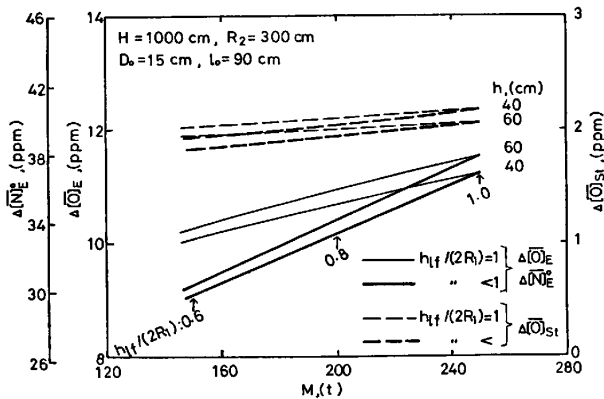


Fig. 10. Effects of melting weight and ladle profile on the oxygen and nitrogen absorption during tapping.

増加する。

3.5 出鋼時ガス吸収量の推算図及び出鋼孔形状の影響

Fig. 12(a) は 200 t 転炉において出鋼孔の直径 D_0 およびその長さ l_0 を任意にとつたときの $\Delta[\bar{O}]_E$ および $\Delta[\bar{O}]_{St}$ の推算図を示す。たとえば $\Delta[\bar{O}]_E$ の値は任意の直径 D_0 の①から出発し、そのときの出鋼孔長さ l_0 (実線) で上方向に折れるならば、上横軸から得られる。また $\Delta[\bar{O}]_{St}$ は①→③と進み、任意の l_0 (破線) で下方向に折れて下横軸の値を読取ればよい。一方、Fig. 12(b) はこの条件下での $\Delta[\bar{N}]_E$ さらには任意の酸素濃度における $\Delta[\bar{N}]_E$ (ただし $k_1=0.2$ cm/s での計算値)

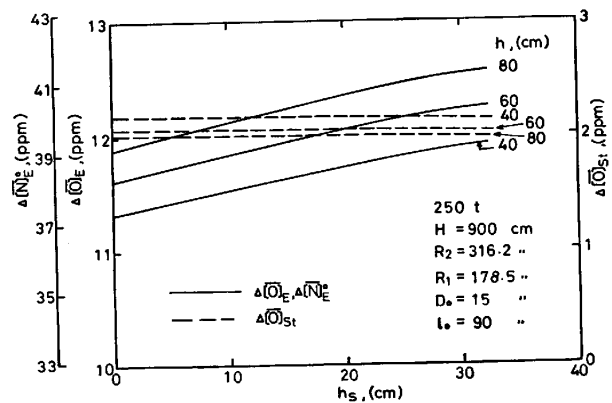


Fig. 11. Effect of the slag depth in the converter on the oxygen and nitrogen absorption during tapping.

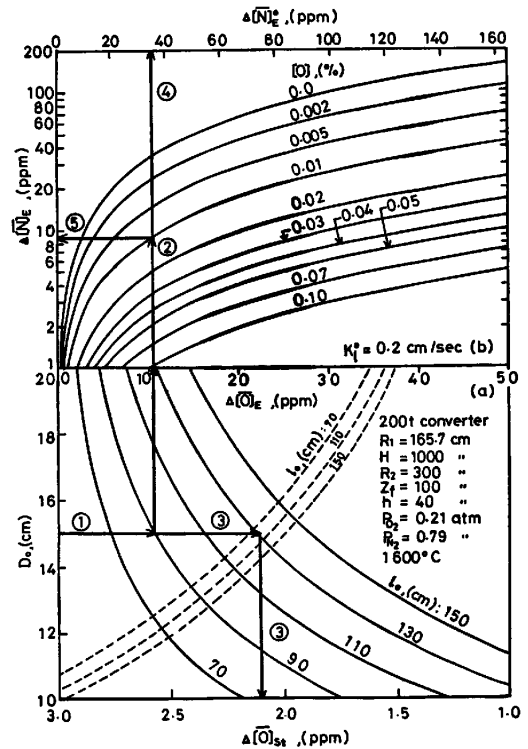


Fig. 12. A nomograph for the estimation of amounts of oxygen and nitrogen absorbed during tapping.

の概算図に相当する。すなわち①→②→④と Fig. 12 (b) に進むならば上横軸から $\Delta[\bar{N}]_E^0$ を、①→②→⑤のように任意の酸素濃度で左側に折れると、左側縦軸から $\Delta[\bar{N}]_E$ を推算することができる。ところで Fig. 12 によれば $\Delta[\bar{O}]_{st}$ は値自身が小さく問題にならないが、 $\Delta[\bar{O}]_E$, $\Delta[\bar{N}]_E^0$ あるいは $\Delta[\bar{N}]_E$ の D_0 及び l_0 への依存は 3.4.1~3.4.5 で述べた諸条件の影響に比較して顕著である。すなわち出鋼孔が小さく長くなると、ガス巻き込み量はかなり増大することが推察される。以上の結果から極端な出鋼あるいは転炉条件をとらないならば、Fig. 12 は大部分の転炉出鋼に適用できると思われる。

4. 考 察

4.1 窒素吸収および転炉出鋼モデルの妥当性

まず (31) 式および高周波溶解炉で推定した $k_1=0.05$ cm/s¹⁰⁾ を (30) 式に代入し、 $P_{N_2}=1$ atm で k_{ov} を算出した結果、Fig. 2 に示すように計算値は実測値 (○印) とよく一致した。また Fig. 2 には $[O]_S=0.23\%$, $P_{O_2}=0.21$ atm, $P_{N_2}=0.79$ atm の条件下で (30), (31) および (33) 式から計算した k_{ov} 曲線も示すが、この場合にも実測値 (●印) に対してよく対応し、本モデルは妥当なものと思われる。なお、本モデルでは転炉の傾動出鋼時に h を一定と仮定したが、実際には変化していると思われる。しかしながら、Fig. 7~11 から明らかのように、 h が 40~80 cm の間で変動しても $\Delta[\bar{O}]_E$ には 1 ppm 以内の変化しかない。また出鋼口の位置を炉底から $(9/10) \cdot H$ の高い位置から $(3/4) \cdot H$ と低位置に変更しても、 $\Delta[\bar{O}]_E$ は 0.2~0.3 ppm の低下が見積られるに過ぎない。

4.2 従来の研究結果への本モデルの適用

まず出鋼時の酸化反応をとりあげる。本間ら¹¹⁾は取鍋内にフェロマンガンを添加しない条件下で 80 t を出鋼し、マンガンおよび炭素濃度減少量 $\Delta[Mn]=0.02\sim 0.07\%$, $\Delta[C]=0\sim 0.02\%$ を示した。しかしながら、酸化物を MnO および CO として算出される酸素量は $\Delta[O]=0.0058\sim 0.047\%$ に達し、本モデルから推定される酸素量よりもかなり大きい。これは転炉内の溶鋼が出鋼期間中にもスラグから酸素を吸収することに起因し¹²⁾、出鋼時の酸素吸収量を本モデルと対応させて論ずることは容易ではない。一方転炉内の溶鋼はスラグで被覆され、大気からの窒素吸収は抑制されている。しかもスラグ-メタル間の窒素の授受も少ないと考えられるので、窒素吸収について本モデルを適用することにした。ただしこの場合取鍋内の溶鋼酸素濃度の評価が重要な点となる。そこで本研究では取鍋内に脱酸剤を添加しない

Table 1. Application of the present model to the previous results by Y. ABE, et al¹⁾.

Y. ABE, et al.		Present work	
[C], (%)	$\Delta[\bar{N}]$, (ppm)	[O], (%)	$\Delta[\bar{N}]_E$, (ppm)
0.6~0.8	10~28	0.005~0.010	10.3~17.2
0.1~0.2	2.5~12.5	0.015~0.030	4.1~ 7.6
<0.1	-2~5	0.03 ~0.06	2.0~ 4.1

Table 2. Application of the present model to the previous results by H. OHOTAKI et al¹⁴⁾.

H. OHOTAKI et al.		Present work	
Composition	$\Delta[\bar{N}]$, (ppm)	[O], (%)	$\Delta[\bar{N}]_E$, (ppm)
E 0.02%C, 0.05%Mn	-4~4	0.08 ~0.10	1.2~1.6
A 0.09%C, 0.37%Mn	-2~4	0.02 ~0.04	2.9~5.6
B 0.17%C, 0.41%Mn	1~10	0.015~0.03	3.8~7.3

条件ないしは添加しても脱酸が弱いリムド鋼に主眼点をおき、キルド鋼については参考に留める。また酸素濃度が記されていない測定結果では LD 転炉の C-O 関係¹³⁾から推定した。阿部ら¹⁾は Table 1 第1および第2列に示すように 70 t の未脱酸鋼出鋼時の炭素濃度と $\Delta[\bar{N}]$ の関係を示した。そこで $\Delta[\bar{N}]_E$ を簡単に推算するためにまず出鋼条件は相違するが、Fig. 7 の結果を延長して $\Delta[\bar{N}]_E^0=40$ ppm を仮定した。次に第3列の推定酸素濃度および Fig. 4 から $k_1=0.2$ cm/s での η_E を読み取り、第4列の $\Delta[\bar{N}]_E$ を推算した。それによれば推算値はいずれも阿部らの測定範囲内にある。一方大滝ら¹⁴⁾は出鋼時に Mn および Al を少量添加し、Table 2 第2列の組成のリムド鋼を 50 t 出鋼し、第3列の $\Delta[\bar{N}]$ を報告した。この場合第3列の推定酸素濃度は Fe-Mn 系の酸素溶解度¹⁵⁾より低いので Mn の影響を無視し Fig. 4 から η_E を求めるとともに、 $\Delta[\bar{N}]_E^0=40$ ppm を仮定し、実測値に近い第5列の推算値を求めた。また大矢ら¹⁶⁾は 60 t 転炉から 0.04~0.11%C の極軟リムド鋼を出鋼し、 $\Delta[\bar{N}]=1.6$ ppm を測定したが、同様に $\Delta[\bar{N}]_E^0=40$ ppm から推算すると $\Delta[\bar{N}]_E=1.7\sim 3.8$ ppm となる。他方キルド鋼に関しては真鍋ら¹⁷⁾が 250 t 転炉出鋼途中で取鍋へ脱酸剤を添加し、初期と末期の窒素濃度差 5~10 ppm を示した。この場合には脱酸処理が出鋼中期に行われたので、前半は初期値の 0.06%O ($\eta_E=0.046$) および Fig. 7 の $\Delta[\bar{N}]_E^0=38$ ppm から $\Delta[\bar{N}]_E=2$ ppm を、また後半は脱酸後の値として 0.002%O ($\eta_E=0.68$) を仮定し、 $\Delta[\bar{N}]_E=26$ ppm を推定した。いまこれらを平均すると $\Delta[\bar{N}]_E=14$ ppm となるが、この値は実測値よりやや高い。また阿部ら¹⁾の測定でも出鋼時に Al および Si 脱酸を行つた場合には $\Delta[\bar{N}]=10\sim 23$ ppm と報告されている。いま仮に脱酸

は中期になされたとして扱ると、前半は推定濃度 $0.03\% \text{O}$ ($\gamma_E=0.096$) $\sim 0.06\% \text{O}$ ($\gamma_E=0.046$), $\Delta[\bar{N}]_E^0=40 \text{ ppm}$ から $\Delta[\bar{N}]_E=4\sim 2 \text{ ppm}$ が、後半は同様に $0.002\% \text{O}$ ($\gamma_E=0.68$) から $\Delta[\bar{N}]_E=27 \text{ ppm}$ が見積られ、平均値 $\Delta[\bar{N}]_E=16\sim 15 \text{ ppm}$ は測定値にほぼ一致する。なお脱酸時の推算を厳密に扱うには脱酸前後の時間割合で前後の $\Delta[\bar{N}]_E$ に重みをつければよい。このように未脱酸および脱酸鋼について $\Delta[\bar{N}]$ の推算を試みたが、実測値にかなり近い値を推算できた。

5. 結 言

転炉出鋼時の酸素および窒素吸収量を推算し、次の結果を得た。

- 1) 出鋼時の“たきつぼ”近辺における液相内物質移動係数は $k_1=0.1\sim 0.2 \text{ cm/s}$ の様に大きく、出鋼時の取鍋内溶鋼はかなり強く攪拌されることを示唆している。
- 2) 出鋼時の転炉傾動角度あるいは傾動速度はガス巻き込み量に対してあまり影響しない。
- 3) 出鋼時のガス吸収量は転炉容量あるいは炉形状にほとんど依存しない。
- 4) 同一炉で少量溶解するとガス吸収量は若干低下するが、取鍋直径を大きくして出鋼高さを低くすれば、吸収量は減少する。
- 5) 転炉内スラグ層が厚くなると吸収量はやや増える。
- 6) 出鋼孔が細く、又長くなると吸収量は増加する。
- 7) 任意の出鋼孔直径および長ささらには酸素濃度における酸素および窒素吸収量を推算する線図を求めた。
- 8) 本モデルの推算値は窒素吸収に関する実測値にほぼ一致することが明らかとなった。

終わりに本研究の遂行にあたり出鋼時窒素吸収に関する詳細な測定条件をご提示頂いた日本鋼管(株)京浜製鉄所管理部石黒守幸氏に謝意を表します。

記 号

- a_0, a : 出鋼孔出口および高さ Z における液柱半径 (cm)
 C_b, C_i : 液相バルクおよび気液界面の濃度 (mol/cm³)
 C_e : 気相バルクと平衡する濃度 (mol/cm³)
 D_0 : 出鋼孔直径 (cm), E_1 : 運動エネルギー (erg)
 f_N, f_O : 窒素および酸素の活量係数 (cm³/mol)
 F_1 : 気液界面積 (cm²), F_r : Froude 数 ($=u_0^2/(D_0g)$)
 G : 累積巻き込みガス量 (m³)
 h : 転炉内溶鋼表面から出鋼孔入口までの深さ (cm)
 h_{if} : 出鋼末期取鍋内溶鋼深さ (cm)
 h' : 転炉の炉中心軸から溶鋼表面までの高さ (cm)
 H : 転炉高さ (cm), k_1 : 液相内物質移動係数 (cm/s)
 k_0, k_0^* : 任意の酸素濃度および酸素濃度零での総括物質移動係数 (cm⁴/(mol·s))
 k_r : 反応速度定数 (cm⁴/(mol·s))
 l : 転炉底面から高さ方向の距離 (cm)
 l_0 : 出鋼孔長さ (cm), m : 乱れ部分の質量 (g)

- M_C : 転炉内溶鋼重量 (t), M_1 : 全出鋼重量 (t)
 \dot{n}_l, \dot{n}_r : 液相内物質移動速度および界面反応速度 (mol/(cm²·s)), \dot{n}_{ov} : 総括速度 (mol/(cm²·s))
 $\Delta[\bar{N}]_E, \Delta[\bar{N}]_E^0$: 巻き込み気泡からの平均窒素吸収濃度およびその完全吸収濃度 (%)
 $\Delta[\bar{N}]_{st}, \Delta[\bar{N}]_{st}^0$: 平均側面窒素吸収濃度および酸素濃度零でのその値 (%)
 $[O]_b, [O]_s$: 溶鉄バルクの酸素濃度および酸素飽和濃度 (%)
 $\Delta[O]_E, \Delta[O]_{st}$: 巻き込み気泡および側面を通した平均酸素吸収濃度 (%)
 $P_{O_2}, P_{O_{2i}}$: 酸素分圧とその界面分圧 (atm)
 R_1 : 取鍋半径 (cm), R_2 : 転炉半径 (cm)
 R_c : キャピティ半径 (cm)
 R_e : Reynolds 数 ($=\rho D_0 u_0/\mu$)
 u_0, u : 出鋼孔出口および距離 Z での流速 (cm/s)
 V_c : 転炉内容積 (m³)
 V_g^0, V_g : 垂直液柱およびある角度で入射する液柱のガス巻き込み速度 (cm³/s)
 V_1 : 出鋼速度 (cm³/s), W_e : Weber 数 ($=u_0^2 \rho D_0/\sigma$)
 x_1 : 転炉半径方向距離 (cm)
 Z, Z_f : 出鋼高さとその末期高さ (cm)
 ϵ, ϵ_0 : 出鋼流の乱れとその初期値 (cm)
 θ, θ' : 転炉傾動角度および取鍋内出鋼流入射角度 (deg), λ : 乱れの波長 (cm), ρ : 密度 (g/cm³)

文 献

- 1) 阿部泰久, 片山裕久, 西村光彦, 高橋利徳: 学振 19 委 No. 10342 (昭和 56 年 5 月)
- 2) 岩田勝吉, 長 隆郎, 井上道雄: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1922
- 3) 長 隆郎, 岩田勝吉, 井上道雄: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2461
- 4) E. van de SANDE and J. M. SMITH: Chem. Eng. Sci., 31 (1976), p. 219
- 5) T. CHOH, T. MORITANI, and M. INOUE: Trans. ISIJ, 19 (1979), p. 221
- 6) 長 隆郎, 竹部 隆, 井上道雄: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 1176
- 7) T. CHOH, M. KURATA, and M. INOUE: Proc. ICSTIS. Isuppl. Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 548
- 8) T. CHOH and M. INOUE: Trans. ISIJ, 20 (1980), p. 768
- 9) 石黒守幸, 大久保益太: 鉄と鋼, 55 (1969) 11, S492 一部私信
- 10) 長 隆郎, 岡村正義, 井上道雄: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 1176
- 11) 本間悦郎, 大矢竜夫, 松永 久: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 1725
- 12) 津田信二, 池田隆果, 丸川雄浄: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 186
- 13) 藤井毅彦, 荒木泰治, 丸川雄浄: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 151
- 14) 大滝 浩, 川上公成, 野田明夫, 板岡 隆: 鉄と鋼, 48 (1962), p. 1371
- 15) J. F. ELLIOTT, M. GLEISER, and V. RAMAKRISHNA: Thermochemistry for Steelmaking, (1963), p. 553 [Addisonwesley Pub. Co. Inc.]
- 16) 大矢龍夫, 古垣一成, 松永 久, 牧野 勝: 鉄と鋼, 52 (1966) p. 358
- 17) 真鍋 浩, 丸川雄浄, 姉崎正治, 佐藤一昌: 鉄と鋼, 59 (1973) 11, S 396