

(74) 出鋼時の窒素ガス吸収モデル

名古屋大学工学部

○浅井 滋生・工博 鞭 巖

Mathematical Model of Nitrogen Absorption at Tapping from LD Converter

Shigeo Asai and Dr. Iwao Muchi

1. 緒 言

鋼材によつては、溶鋼の窒素含有量が重要な問題になる場合があるが、ここでは、転炉から溶鋼を取鍋へ移す過程に伴つて起こる窒素ガス吸収について、数学的モデルをたてて理論的に解析する。この際、溶鋼中の諸元素が窒素ガス吸収へおよぼす影響が著しいことが報告²⁾~⁵⁾されているので、諸元素の影響を加味した非定常ガス吸収理論に基づいて解析し、操作条件から溶鋼中の窒素濃度が予知できるようなモデルの展開を試みる。

2. 窒素ガス吸収モデル

転炉や平炉から出鋼する際、Fig. 1 に示すように、溶鋼が円筒状となつて取鍋内に落下し、溶鋼の表面から空気中の窒素ガスが吸収される現象について、炉から出て取鍋内に入るまでの落下時 1. と取鍋内での蓄積時 2. にわけて考える。さらに、蓄積時は、からの取鍋内を溶鋼が厚さ δ でもつて取鍋底面に広がるまで (a) と、底面いつばいに広がつてしまつてから出鋼終了までを (b) にわけて解析する。

2.1 落下時

溶鋼は、炉から円筒状で落下するとし、半径方向速度分布はないとし、取鍋に入るまでは溶鋼内で、その表面と内部との混合はないとする。溶鋼の微小部分に着目して、窒素に関する物質収支から基礎式 (1) がえられる。

$$\text{基礎式: } (1/D)(\partial c/\partial \theta) = (\partial^2 c/\partial r^2) + (1/r)(\partial c/\partial r) \dots \dots \dots (1)$$

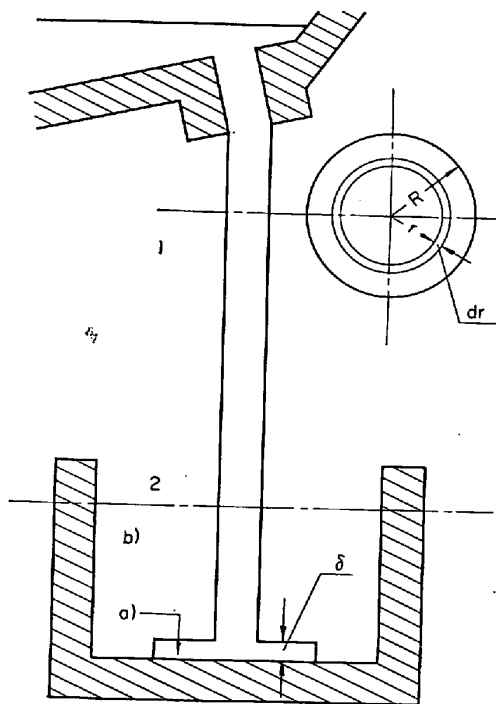


Fig. 1. Model in tapping.

初期条件: $\theta=0, r>0$ で $c=c_i$

境界条件: $r=R, \theta>0$ で $D(\partial c/\partial r) = k(c^* - c)$;

$r=0, \theta>0$ で c : 有限

解: $c = c^* + (c_i - c^*)(k/2DR)$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-a_n^2 D \theta) J_0(a_n r)}{\{(k/D)^2 + a_n^2\} J_0(a_n R)} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、 a_n は $a_n J_1(a_n R) - (k/D) J_0(a_n R) = 0$ の根である。

断面平均濃度 c_m は:

$$c_m = \frac{\int_0^R 2\pi r \cdot c dr}{\int_0^R 2\pi r \cdot dr} = c^* + (c_i - c^*)(4k^2/R^2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-a_n^2 D \theta)}{a_n^2 (a_n^2 D^2 + k^2)} \dots \dots \dots (3)$$

となる。

(3) 式を無次元化して表わし、 F とおく、

$$\frac{c_m - c^*}{c_i - c^*} = (4k^2/R^2) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\exp(-a_n^2 D \theta)}{a_n^2 (a_n^2 D^2 + k^2)} \equiv F \dots \dots (4)$$

(4) 式より、溶鋼中第 3 元素の影響を加味した平衡濃度 c^* は熱力学的計算から求められる。出鋼時炉内濃度 c_i がわかれば、炉から出て取鍋に入るときの濃度 c_m が求められる。

2.2 取鍋内での蓄積時

取鍋内の広がり厚さや取鍋内での溶鋼層の厚さは、濃度境界層厚さにくらべて無限の厚さをもつとみなすことができるので、半無限平面へのガス吸収速度を次のように、Higbie の浸透説に基づいて解析する。

$$\text{基礎式: } (\partial c/\partial t) = D(\partial^2 c/\partial x^2) \dots \dots \dots (5)$$

初期条件: $t=0, x>0$ で $c=c_B$

境界条件: $x=0, t>0$ で $-D(\partial c/\partial x) = k(c^* - c)$;

$x=\infty, t>0$ で $c=c_B$

$$\text{解: } c = c^* + (c_B - c^*) \{ \text{erf}(x/2\sqrt{Dt}) + \exp(kx/D + k^2 t/D) \times \text{erfc}(x/2\sqrt{Dt} + k\sqrt{t/D}) \} \dots \dots \dots (6)$$

となるから任意時間での窒素移動速度 N は:

$$N = -D(\partial c/\partial x)_{x=0} = k(c^* - c_B) \exp(k^2 t/D) \text{erfc}(k\sqrt{t/D}) \dots \dots \dots (7)$$

となる。Higbie の浸透説による時間平均物質移動速度

$$\text{は: } \bar{N} = (1/t_e) \int_0^{t_e} N dt = (c^* - c_B)(D/t_e k) \times \{ \exp(k^2 t_e/D) \text{erfc}(k\sqrt{t_e/D}) - 1 + 2k\sqrt{t_e/\pi D} \} \dots \dots (8)$$

となる。

(a) 底面に広がるまでの過程

円筒状で落下してきた溶鋼が厚さ δ で取鍋底面に広がる際、任意の時間での窒素ガス吸収面積 S は

$$S = (\pi R^2 U_{av} \theta / \delta) \dots \dots \dots (9)$$

となる。

取鍋内窒素量は、ガス吸収面からの吸収窒素量と円筒状で取鍋内に濃度 c_m で落下してくる窒素量との和に等しくなる。窒素に関して物質収支をとると、

$$0 \leq \theta \leq \delta A / \pi R^2 U_{av} \text{ では (10) 式がえられる。}$$

$$\text{基礎式: } d(Vc_B)/d\theta = S \cdot N + \pi R^2 U_{av} c_m \dots \dots \dots (10)$$

初期条件: $\theta=0$ で $c=c_m$

$$\text{解: } c = c^* + \{ \exp(-k\theta/\delta) - 1 \} (\delta/k)(c^* - c_m) / \theta \dots \dots (11)$$

底面いつばいに広がる時間は: $\theta_1 = \delta A / \pi R^2 U_{av}$ だから、

$\theta = \theta_1$ での濃度 c_1 は

$$c_1 = c^* + \{ \exp(-k\theta_1/\delta) - 1 \} (\delta/k) (c^* - c_m) / \theta_1 \dots (12)$$

となる。

(b) 底面に広がってから出鋼終了までの過程

この過程では窒素ガス吸収面積は一定であり、窒素に関する物質収支をとると、 $\theta_1 < \theta < T$ では(13)式がえられる。

$$\text{基礎式: } d(Vc_B)/d\theta = A\bar{N} + \pi R^2 U_{av} c_m \dots (13)$$

初期条件: $\theta = \theta_1$ で $c = c_1$

$$\text{解: } c = b/a + (c_1 - b/a)(\theta/\theta_1)^{-a} \dots (14)$$

となる。ただし、

$$a = (A \cdot D / \pi R^2 U_{av} \cdot t_e \cdot k) \cdot \{ \exp(k^2 t_e / D) \operatorname{erfc} (k \sqrt{t_e / D}) - 1 + 2k \sqrt{t_e / \pi D} \} + 1$$

$$b = (a - 1)c^* + c_m$$

なる定数である。また溶鋼平均落下速度: $U_{av} = V / T \pi R^2$ と定義する。出鋼終了時の濃度は、 $\theta = T$ において

$c = b/a + (c_1 - b/a)(T/\theta_1)^{-a}$ と求められる。これを無次元化して表わすと

$$(c - c^*) / (c_1 - c^*) = [1 - (T/\theta_1)^{-a} \{ \exp(-k\theta_1/\delta) - 1 \} \times (\delta/k\theta_1) \cdot a - (T/\theta_1)^{-a}] \cdot F/a \dots (15)$$

となる。

もしも出鋼の際の k がえられると、それらの値に対して(4)、(15)式から溶鋼の窒素の無次元化濃度が求められることになるが、実際には出鋼時の k を求めた実験がないので、従来比較的良好に研究されている高周波誘導炉での実験結果を利用した。すなわち、高周波誘導炉で第3元素を添加した場合の窒素ガス吸収速度を非定常ガス吸収理論で取り扱うことにより k を求めた。

3. 高周波誘導炉における k と t_e

高周波誘導炉で窒素についての物質収支をとると(16)式がえられる。

$$\text{基礎式: } V(dc_B/d\theta) = A\bar{N} \dots (16)$$

初期条件: $\theta = 0$ で $c = c_0$

$$\text{解: } \ln \frac{c^* - c_0}{c^* - c} = \frac{D}{t_e \cdot k} \{ \exp(k^2 t_e / D) \operatorname{erfc} (k \sqrt{t_e / D}) - 1 + 2k \sqrt{t_e / \pi D} \} (A\theta / V) \dots (17)$$

となる。そこで縦軸に $\ln(c^* - c_0)/(c^* - c_B)$ 、横軸に $(A\theta/V)$ をとつて実験データをプロットして直線関係がえられている^{1)~4)}。その勾配 m から k と m との関係が理論

Table 1. Estimation of the value of M.

Temp. °C	Element	Slope			
1600	Si [%]	M [cm/sec]			
		0.0	0.025		
		0.60	0.031		
		1.02	0.040		
		2.02	0.043		
4.44	0.048				
1550	S [%]	M [cm/sec]			
		0.03	0.010		
		0.11	0.006		
		0.23	0.004		
		0.62	0.003		
1600	O [%]	M [cm/sec]			
		0.005	0.036		
		0.012	0.029		
		0.022	0.010		
		0.021	0.008		
0.074	0.005				
Temp. °C	Element	Element	Slope		
1550	O [%]	S [%]	M [cm/sec]		
			0.059	0.130	0.0033
			0.047	0.175	0.0022
			0.050	0.326	0.0016
			0.084	0.035	0.0034
			0.087	0.144	0.0020
			0.079	0.359	0.0018
			0.047	0.175	0.0022
			0.104	0.281	0.0013
			0.142	0.300	0.0011
0.059	0.130	0.0033			
1650	C [%]	Cr [%]	M [cm/sec]		
			3.00	0.00	0.045
			2.30	4.47	0.041
			2.34	14.53	0.031
			3.55	1.93	0.040
3.81	14.75	0.030			

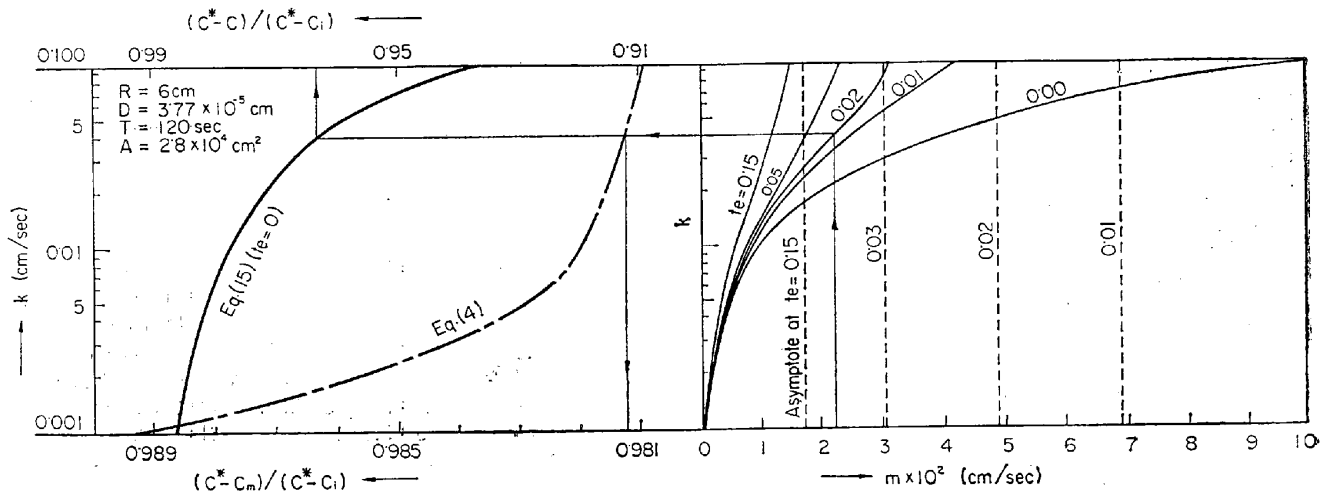


Fig. 2. Relations of k vs. m and of k vs. dimensionless concentrations.

669.13.096.517
: 666.76

的に次のように求められる。

$$m = (D/t_e k) \{ \exp(k^2 t_e / D) \operatorname{erf} c \times (k \sqrt{t_e / D}) - 1 + 2k \sqrt{t_e / \pi D} \} \dots \dots \dots (18)$$

誘導炉での実験の際の t_e がわかっておれば、第3元素添加により変化する m の値を与えて(18)式から k の値が求められる。このようにして得た k の値は、第3元素添加による影響が含まれていることになる。Fig. 2の右半の図は、 m 対 k の関係曲線を t_e をパラメータにして書いた図であり、左半の図は、(4)式、(15)式の計算例を k の変化に基づいて図示したものである。実験データから、出鋼時溶鋼中の第3元素の影響を加味した m の値を知り、右半の図で t_e を与えて矢印のようにして k が求められ、左半の図で落下時濃度が横軸(下)から、出鋼終了時濃度が横軸(上)から求められる。

大きな m の値は大きな吸収速度を意味しているが、Table 1 の中で最大の m の場合を $k = \infty$ であつたとみなすと、(18)式より $t_e \leq 4D\pi m^2 = 0.021(\text{sec})$ となる。

なお、 δ が窒素濃度へおよぼす影響について検討した結果、 $\delta = 0.1 \sim 5 \text{ cm}$ の範囲では無視できることがわかつた。

高周波誘導炉実験解析結果を Table 1 に示す。

4. 結 言

溶鋼中に溶け込んだ諸元素が窒素ガス吸収におよぼす影響については、従来、吸着や表面張力の変化などに基づいて論じられているが、ここではその影響を物質移動係数 k に基づいて考慮した。高周波誘導炉で k を推察する際、非定常ガス吸収理論に基づいて解析したが、高周波誘導炉での接触時間 t_e を適確に知る点、および k と第3元素との関係を得ることに問題が残されている。

本報の解析は、取鍋から鑄型への注入プロセスにも適用できる。

文 献

- 1)~4) 井上, 長: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 416; p. 1448; 51 (1965), p. 884; p. 1832
- 5) V. SCHENCK: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), p. 593
- 6) H. S. CARSLAW: Conduction of Heat in Solids, p. 201
- 7) D. D. PERLMUTTER: Chem. Eng. Sci., 16(1962) p. 287

記 号

- c_B : 取鍋(誘導炉)内の窒素濃度 [% (wt)/cm³]
- A : 取鍋(誘導炉)の内表面積 [cm²]
- V : 取鍋(誘導炉)内の溶鋼の容積 [cm³]
- T : 出鋼所要時間 [sec]
- t : 溶鋼とガスの接触時間 [sec]
- θ : 落下および操作時間 [sec]
- R : 落下中の溶鋼の半径 [cm]
- c^* : 平衡窒素濃度 [% (wt)/cm]
- c_i : 出鋼時炉内窒素濃度 [% (wt)/cm]
- k : 物質移動係数 [cm/sec]

(77) 溶鋼の真空脱ガス用耐火材に関する研究

(造塊用耐火材に関する研究—II)

神戸製鋼所中央研究所

理博工博 成田貴一・○富田昭津・村上康雄

On the Reaction between Liquid Steel and Refractory under Vacuum

(Fundamental study on refractory bricks for ingot-making—II)

Dr. Kiichi NARITA, Akitsu TOMITA and Yasuo MURAKAMI

1. 結 言

近年、減圧下における溶鋼の脱ガス処理が急速に発展し、とくに転炉、電弧炉および平炉溶製鋼を対象とした大規模な生産ベースによる溶鋼の脱ガスが各種の方法でおこなわれている。これらの脱ガスは主として、出鋼時あるいは受鋼後の取鍋内でおこなわれており、造塊用耐火材を真空処理容器として、たえず耐火材との接触状態下でおこなわれている。溶鋼の脱ガスは理論的には減圧度の大きいほど、また、脱酸力の強い元素を含まない未脱酸の状態であるほど効果的であることが一般に知られている。したがってこのような条件下の溶鋼と耐火材の反応は大気圧下にくらべて激しく、その反応機構も異なることが予想される。

そこで中炭素鋼を対象にして、反応前の溶鋼の Si および Mn 量によつて脱酸度を変え、シャモット質、ジルコン質および高アルミナ質について、その反応機構を究明することを目的として本実験をおこなつた。

2. 実験条件と実験方法

実験は Fig. 1 に示した高周波真空誘導溶解装置を使用し、ルツボ法によつて 10 mmHg 圧下で溶鋼と耐火材との反応をおこなわせた。実験に使用した炭素鋼および耐火材の化学成分組成は Table 1 および Table 2 に示したとおりである。

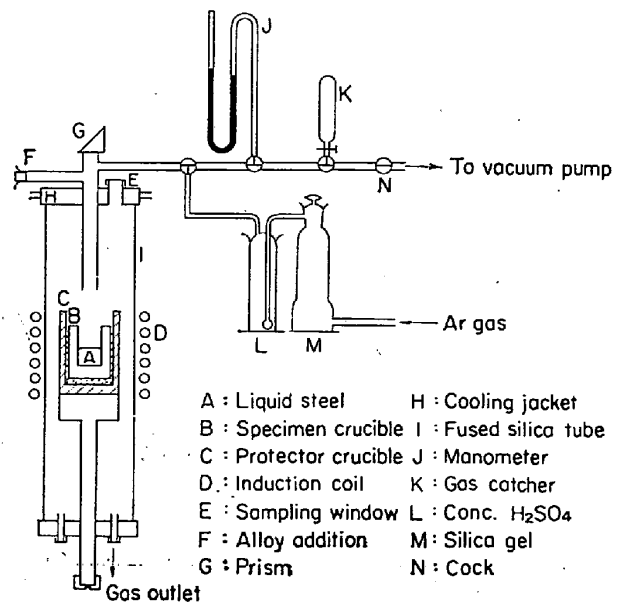


Fig. 1. Experimental apparatus.