

# 上昇気泡による脱ガスプロセスの理論解析\*

70557

藤井 徹也\*\*・鞭

巖\*\*\*

## Theoretical Analysis on the Degassing Process by Rising Bubbles

Tetsuya FUJII and Iwao MUCHI

### Synopsis:

A mathematical model for degassing process by rising bubbles is developed on the basis of material and heat balances in gas phase and material balance in liquid phase. From this model, the volume of inert gas which is necessary to degass hydrogen, oxygen and carbon in molten steel down to the required concentrations can be estimated.

The effects of the initial diameter of inert gas bubble, the depth of blowing point of inert gas, the pressure of gas at the surface of molten steel, the residence time of rising bubble and the concentration ratio of carbon to oxygen on the degassing rate and on the concentrations of CO and H<sub>2</sub> in rising bubble were determined by numerical calculations of the model with the aid of digital computer.

(Received July 26, 1969)

### 1. 緒 言

不活性ガスの気泡吹き込みを伴う取鍋脱ガスでは、取鍋内溶鋼表面からの直接の脱ガス、および、溶鋼中を上昇する不活性ガス気泡による脱ガスの2つの機構が考えられる。本報ではこれら2種類の脱ガスのうち、上昇気泡による脱ガスプロセスについて数学的モデルを展開し、脱ガス速度に及ぼす操作条件の影響について検討する。

GELLER<sup>1)</sup>は、吹き込まれた不活性ガス気泡は、溶鋼中の着目成分と平衡に達した後に取鍋内の溶鋼を去るという仮定のもとに、所定の脱ガス率を得るに必要な不活性ガス量を求めているが、その解析では、不活性ガスの利用効率が最大(100%)の場合について取り扱っている。すなわち、所定の脱ガス率を得るのに必要な最少限の不活性ガス量が示されているが、このままでは実際のプロセスの説明はできない。また、BRADSHAW<sup>2)</sup>、渡辺ら<sup>3)</sup>は脱ガス成分についての気泡側での物質収支式に基づいて上昇に伴って起こる気泡内の脱ガス成分の濃度変化を求めている。

本報では、一酸化炭素と水素ガスについて気泡側での物質収支、炭素、酸素、水素について溶鋼側での物質収支、および、気泡側での熱収支を行ない、これらの収支式に基づいて数学的モデルを展開し、不活性ガスの気泡の最初の大きさ、気泡の溶鋼内滞留時間、気泡吹き込み深さ、溶鋼内でのOとCとの濃度比などが脱ガス速度に及ぼす影響について、東京大学の大型電子計算機(HIT AC5020E)を使用して、数値解析を行なう。

### 2. 解析および考察

#### 2.1 平衡論的解析

溶鋼中に吹き込まれた不活性ガスの気泡は、脱ガス成分と平衡に達した後に取鍋を去るという仮定のもとで、GELLER<sup>1)</sup>は、HおよびOとCについてそれぞれ別々に物質収支を行なって次の(1)、(2)式を得ている。

$$Q_{iH} = \frac{11 \cdot 2W}{\rho RT_l} \left\{ \left( \frac{1}{C_{iH}} - \frac{1}{C_{iH}^0} \right) \cdot H_H^2 \cdot P_a + RT_l (C_{iH} - C_{iH}^0) \right\} \dots \dots \dots (1)$$

$$Q_{iO} = \frac{22 \cdot 4W}{\rho RT_l} \left\{ \left( \frac{P_a \cdot H_{CO}}{C_{iO}^0 - C_{iC}^0} \right) \cdot \log \left( \frac{C_{iO} \cdot C_{iC}^0}{C_{iO}^0 \cdot C_{iC}} \right) + RT_l (C_{iO}^0 - C_{iO}) \right\} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、Q<sub>iH</sub>は、C<sub>iH</sub><sup>0</sup>からC<sub>iH</sub>まで脱ガスするのに必要な不活性ガス量であり、Q<sub>iO</sub>も同様である。さて、(1)、(2)式では、脱水素の場合に、H<sub>2</sub>と同時に脱ガスされたCOガスが、不活性ガスとしてHの脱ガス速度を促進する効果が無視されている。

本報では上述のような脱水素に及ぼすCOガスの効果、および、逆に、脱炭、脱酸に及ぼす脱水素の効果を加味した解析を以下に示す。すなわち、溶鋼側、および気泡側での脱ガス成分の濃度は常に平衡に達しているという仮定のもとで、所定の脱ガス率を得るのに必要な不

\* 昭和43年4月本会講演大会にて発表

昭和44年7月26日受付

\*\* 川崎製鉄(株)技術研究所

\*\*\* 名古屋大学工学部 工博

活性ガス量を求める。このような仮定のもとで得られる計算結果は実測値と一致しないが、不活性ガスの最高の利用効率での所要の吹き込みガス量を知る上で意義があると考えられる。まず、平衡仮定から、 $H$ に対して(3)式、 $C$ 、 $O$ に対して(4)式を書く。

$$C_{IH} = K_H \sqrt{C_{gH}} \dots\dots\dots (3)$$

$$C_{IO} \cdot C_{IC} = K_{CO} \cdot C_{gCO} \dots\dots\dots (4)$$

また、理想気体の状態方程式は(5)式で示される。

$$P_a = (C_{gH} + C_{gCO} + n_i / Q'_g) RT_l \dots\dots\dots (5)$$

(3), (4), (5)式から  $Q'_g$  を表わすと、(6)式となる。

$$Q'_g = \frac{n_i \cdot RT_l}{P_a - \{(C_{IH} / K_H)^2 + C_{IO} \cdot C_{IC} / K_{CO}\} RT_l} \dots\dots\dots (6)$$

さて、 $H$ および $O$ についての溶鋼側での物質収支からそれぞれ、

$$d C_{IH} / d Q'_g = -2 \rho \cdot C_{gH} / W \dots\dots\dots (7)$$

$$d C_{IO} / d Q'_g = -\rho C_{gCO} / W \dots\dots\dots (8)$$

が得られ、さらに、(3)~(8)式から(9), (10)式が得られる。

$$\frac{d C_{IO}}{d n_i} = -\frac{\rho \cdot C_{IO} \cdot C_{IC} \cdot RT_l}{W K_{CO}} / \left[ P_a - \left\{ \left( \frac{C_{IH}}{K_H} \right)^2 + \frac{C_{IO} \cdot C_{IC}}{K_{CO}} \right\} RT_l \right] \dots\dots\dots (9)$$

$$1 / C_{IH} = 1 / C_{IH}^0 - 2 \cdot K_{CO} \cdot \log (C_{IO}^0 \cdot C_{IC} / C_{IO} \cdot C_{IC}^0) / \{ K_H^2 (C_{IO}^0 - C_{IO}) \} \dots\dots\dots (10)$$

ただし、 $C$ と $O$ はCOガスとして等モルずつ脱ガスされるから、(11)式が書ける。

$$C_{IC} = C_{IC}^0 + C_{IO} - C_{IO}^0 \dots\dots\dots (11)$$

初期条件:

$$n_i = 0 \text{ で } C_{IO} = C_{IO}^0, C_{IH} = C_{IH}^0,$$

$$C_{IC} = C_{IC}^0 \dots\dots\dots (12)$$

(9)~(11)式を(12)式のもとで解けば、不活性ガス吹き込み量  $n_i$  と溶鋼内の脱ガス成分の各濃度  $C_{IH}$ ,  $C_{IO}$ ,

$C_{IC}$  の関係が求められる。

電子計算機を利用して数値計算した結果を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。Fig. 2 には、GELLER<sup>1)</sup> が求めた(1), (2)式による計算結果も示したが、Fig. 2 からわかるように、脱酸および脱炭速度については、(1), (2)式と本解析で得た(9)~(11)式による計算結果の間には大きな差は認められない。しかし、Fig. 1 の中央の線図で曲線5がGELLERの式による脱水素に相当するので、脱水素の場合には大きな差があることがわかる。このことは、一般に、COガスの発生量がH<sub>2</sub>ガスの発

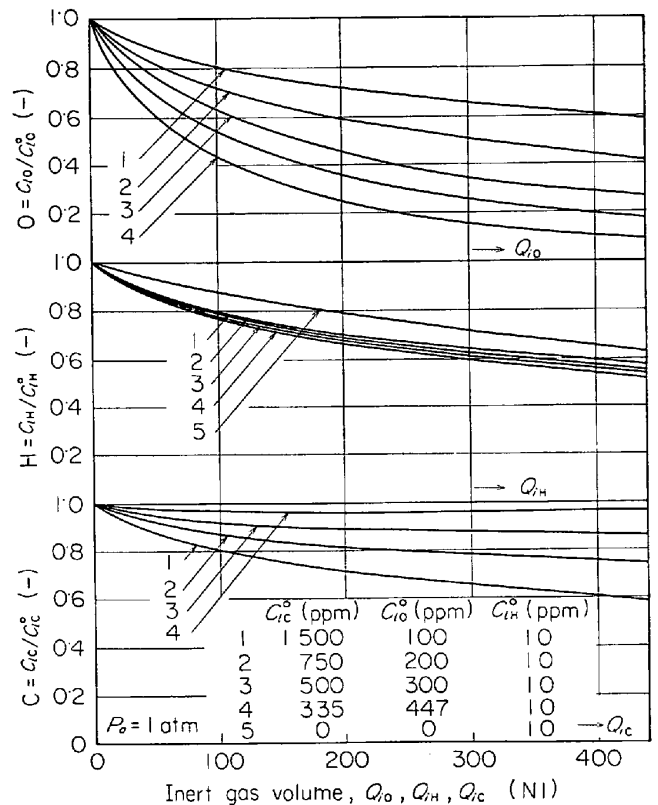


Fig. 1. Effect of decarburization and deoxidation reaction on degassing rate.

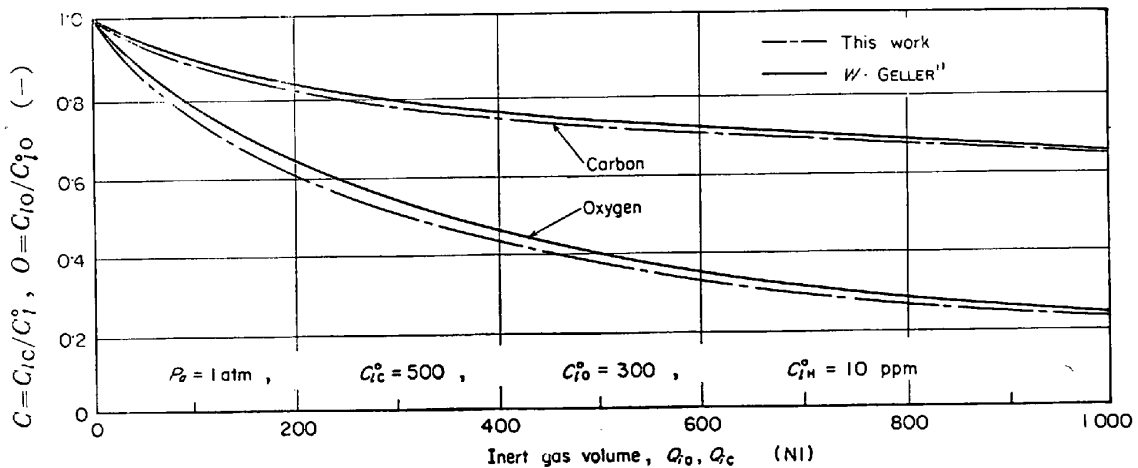


Fig. 2. Comparison of Eqs. (9)~(10) with Eqs. (1) and (2).

生量よりもかなり多量であるため、脱水素の場合には、CO ガスが不活性ガスとして作用して脱水素を促進する効果が現われていることを示している。逆に、H<sub>2</sub> ガスは CO ガスよりも発生量がかなり少量であるため、脱酸や脱炭の場合には、H<sub>2</sub> ガスが不活性ガスとして作用して脱酸や脱炭を促進するという効果はほとんど無視することができるものと推察される。

以上の数値解析の結果から、とくに、脱水素の計算をする場合には、GELLER の式によると数倍の誤差が生じることがわかる。しかし、脱炭や脱酸の場合には、本解析で示した式によらなくても、さらに簡単な GELLER の式から不活性ガスの最高の利用率での所要の吹き込みガス量を推算することができよう。

## 2.2 速度論的解析

前節で示したような平衡仮定に基づいた解析では、脱ガスに必要な不活性ガスの吹き込み量の限界を推算することはできるが、実際の脱ガス操作における脱ガス速度を操作条件の関数として示すことはできない。ここでは、気泡吹き込みによる取鍋脱ガスプロセスについて、速度論的解析を行なう。

溶鋼中に吹き込まれた不活性ガスの気泡は、温度上昇や、気泡中への脱ガス成分の物質移動、および、溶鋼の静圧の減少などのために、上昇に伴って急激に体積が増加する。その結果、溶鋼と気泡との界面積が増大し、また、気泡の上昇速度も増加する。

CO ガス、H<sub>2</sub> ガスについての気泡側での物質収支、 $\underline{C}$ 、 $\underline{O}$ 、 $\underline{H}$  についての溶鋼側での物質収支、および、ガス側での熱収支を行なって脱ガスプロセスを理論的に解析する。

### 2.2.1 解析

解析にあたり、次の仮定を設ける。

(1) 溶鋼中から気泡中への脱ガス過程は、溶鋼側での物質移動が律速となる。

(2) 気泡間での合体や分裂は起こらないとし、浮上に伴って、気泡の大きさは変化するが、その形状は球状を保つものとする。

(3) 気泡相内ガスは溶鋼中をピストン流れ\*の状態\*で上昇し、溶鋼は完全混合とする。

ここで、これらの仮定について若干の検討を加える。

溶鋼から気泡への脱ガス過程は溶鋼中から溶鋼と気泡の界面への物質移動、界面での反応、および、界面から気泡中への物質移動の3段階が考えられるが、ここで、

界面での反応は十分速いものと考えれば、溶鋼側と気泡側での物質移動の抵抗  $R_l$  と  $R_g$  は、脱酸および脱炭の場合について(13)~(15)式のように示される。

$$R_{lO} = 1/k_{lO} \dots \dots \dots (13)$$

$$R_{lC} = 1/k_{lC} \dots \dots \dots (14)$$

$$R_{gCO} = K_{CO}/k_{gCO} \cdot C_{lC}, R_{gCO} = K_{CO}/k_{gCO} \cdot C_{lO} \dots \dots \dots (15)$$

さて、界面において slip が無いものとするれば、更新時間は溶鋼側と気泡側の境膜内で等しくなるが、気泡周辺での物質移動係数として Higbie 型の物質移動係数を使用すると、溶鋼側と気泡側での物質移動の各抵抗の比は

$$R_{lO}/R_{gCO} = \sqrt{D_{gCO}/D_{lO}} (C_{lC}/K_{CO}) \dots \dots \dots (16)$$

で示される。(16)式によれば、通常の脱ガスの場合には、 $R_{lO} \gg R_{gCO}$  となり、溶鋼側での物質移動が律速となる。

気泡は大きくなるにしたがって、回転楕円体、あるいは、キノコ状となつて球形からずれてくるが、このことによる界面積の評価の誤差は、BAIRD ら<sup>4)</sup>の大型気泡に対する物質移動係数を使用することによつて、ある程度さげられるので、ここでは、計算を簡単化するために気泡は球形とした。

また、気泡の上昇に伴つて取鍋内の溶鋼には激しい流動が起こるものと考えられる。なお、川和ら<sup>5)</sup>は、気泡吹き込み中の取鍋内溶鋼の温度分布の測定を行ない、気泡吹き込み中は溶鋼はほぼ完全混合であることを確かめている。したがって、溶鋼が完全混合状態にあるという仮定はほぼ妥当なものとして推察される。

さて、気泡は離散的に存在するが、気泡吹き込み点から溶鋼の表面までの領域の各レベルで時間平均をとって考え気泡を連続関数として取扱うことにする。

CO ガスについて気泡側での物質収支を行なうと(17)、(18)式が得られる。

$$(\partial n_{gH}/\partial z) + (\partial n_{gH}/\partial \theta) (1/u) = 0.5k_{lH} \cdot aA \cdot (C_{lH} - C_{iH}) \dots \dots \dots (17)$$

$$(\partial n_{gCO}/\partial z) + (\partial n_{gCO}/\partial \theta) (1/u) = k_{lC} \cdot aA (C_{lC} - C_{iC}) \dots \dots \dots (18)$$

また、 $\underline{C}$ 、 $\underline{O}$ 、 $\underline{H}$  について、溶鋼側での各物質収支を行なうと(19)、(20)式が得られる。

$$\frac{dC_{lC}}{d\theta} = \frac{dC_{lO}}{d\theta} = -\frac{\rho}{W} \int_0^{z_f} \left( \frac{\partial n_{gCO}}{\partial z} \right) dz \dots \dots \dots (19)$$

$$\frac{dC_{lH}}{d\theta} = -\frac{2 \cdot \rho}{W} \int_0^{z_f} \left( \frac{\partial n_{gH}}{\partial z} \right) dz \dots \dots \dots (20)$$

なお、気泡側での熱収支は(21)式で表わされる。

$$\frac{\partial T_g}{\partial z} + \frac{1}{n} \left( \frac{\partial T_g}{\partial z} \right) = \frac{Q_c + Q_m + Q_r}{n_{g_i} \cdot c_{p_i} + n_{g_H} \cdot c_{p_H} + n_{g_{CO}} \cdot c_{p_{CO}}} \dots \dots \dots (21)$$

\* 気泡がピストン流れ(または押し出し流れ)ということは、どの高さでも気泡内ガス濃度や気泡の速度について、半径方向の分布がないことを意味している。

ただし、 $Q_c$ ,  $Q_m$  は熱伝導、物質移動による気泡への入熱、 $Q_r$  はふく射による気泡への入熱であり、それぞれ、(22)~(24)式で示される。

$$Q_c = haA(T_l - T_g) \dots\dots\dots (22)$$

$$Q_m = \{c_{pH}(\partial n_{gH}/\partial z) + c_{pCO}(\partial n_{gCO}/\partial z)\} \cdot (T_l - T_g) \dots\dots\dots (23)$$

$$Q_r = \sigma \varepsilon_m a A (T_l^4 - T_g^4) \dots\dots\dots (24)$$

(24)式中の  $\varepsilon_m$  は、CO ガスだけについて考慮すればよく、気泡径、温度および CO の分圧の関数として文献(12)の線図から求めた。

さて、(17), (18), (21)式において、左辺の第1項と第2項の間には次の関係が書ける。

$$(\partial n_{gH}/\partial z) \gg (\partial n_{gH}/\partial \theta) \cdot (1/u) \dots\dots\dots (25)$$

$$(\partial n_{gCO}/\partial z) \gg (\partial n_{gCO}/\partial \theta) \cdot (1/u) \dots\dots\dots (26)$$

$$(\partial T_g/\partial z) \gg (\partial T_g/\partial \theta) \cdot (1/u) \dots\dots\dots (27)$$

(25)~(27)式の関係を用いると、(17), (18), (21)式の各偏微分方程式は常微分方程式となり、(28), (29), (30)式が得られる。そこで、(19), (20)式は積分可能となり、(31), (32)式のように表わされる。

$$dn_{gH}/dz = 0.5k_{IH} \cdot aA(C_{IH} - C_{IH}^i) \dots\dots\dots (28)$$

$$dn_{gCO}/dz = k_{IC} \cdot aA(C_{IC} - C_{IC}^i) \dots\dots\dots (29)$$

$$dT_g/dz = (Q_c + Q_m + Q_r) / (n_{gi} \cdot c_{pi} + n_{gCO} \cdot c_{pCO} + n_{gH} \cdot c_{pH}) \dots\dots\dots (30)$$

$$dC_{IC}/d\theta = dC_{IO}/d\theta = -\rho(n_{gCO})_{z=z_f} / W \dots\dots\dots (31)$$

$$dC_{IH}/d\theta = -2\rho(n_{gH})_{z=z_f} / W \dots\dots\dots (32)$$

ただし、 $(n_{gH})_{z=z_f}$ ,  $(n_{gCO})_{z=z_f}$  は、それぞれ、 $z=z_f$  点における  $H_2$  および CO ガスのモル流量である。

$$z=0 \text{ で } n_{gH}=n_{gCO}=0, T_g=T_g^0 \dots\dots\dots (33)$$

$$\theta=0 \text{ で } C_{IC}=C_{IC}^0, C_{IO}=C_{IO}^0, C_{IH}=C_{IH}^0 \dots\dots\dots (34)$$

で与えられる。(28)~(32)式を(33), (34)式のもとで、電子計算機により数値計算を行なつて解く。

さて、溶鋼単位体積当たりの気泡の界面積  $a$  は(35)式で表わされる。

$$a = 6Q_g / AuD \dots\dots\dots (35)$$

なお、ガスの容積流量  $Q_g$  と気泡直径  $D$  との間には(36)式の関係式が成り立つ。

$$D = D^0 (Q_g / Q_g^0)^{1/3} \dots\dots\dots (36)$$

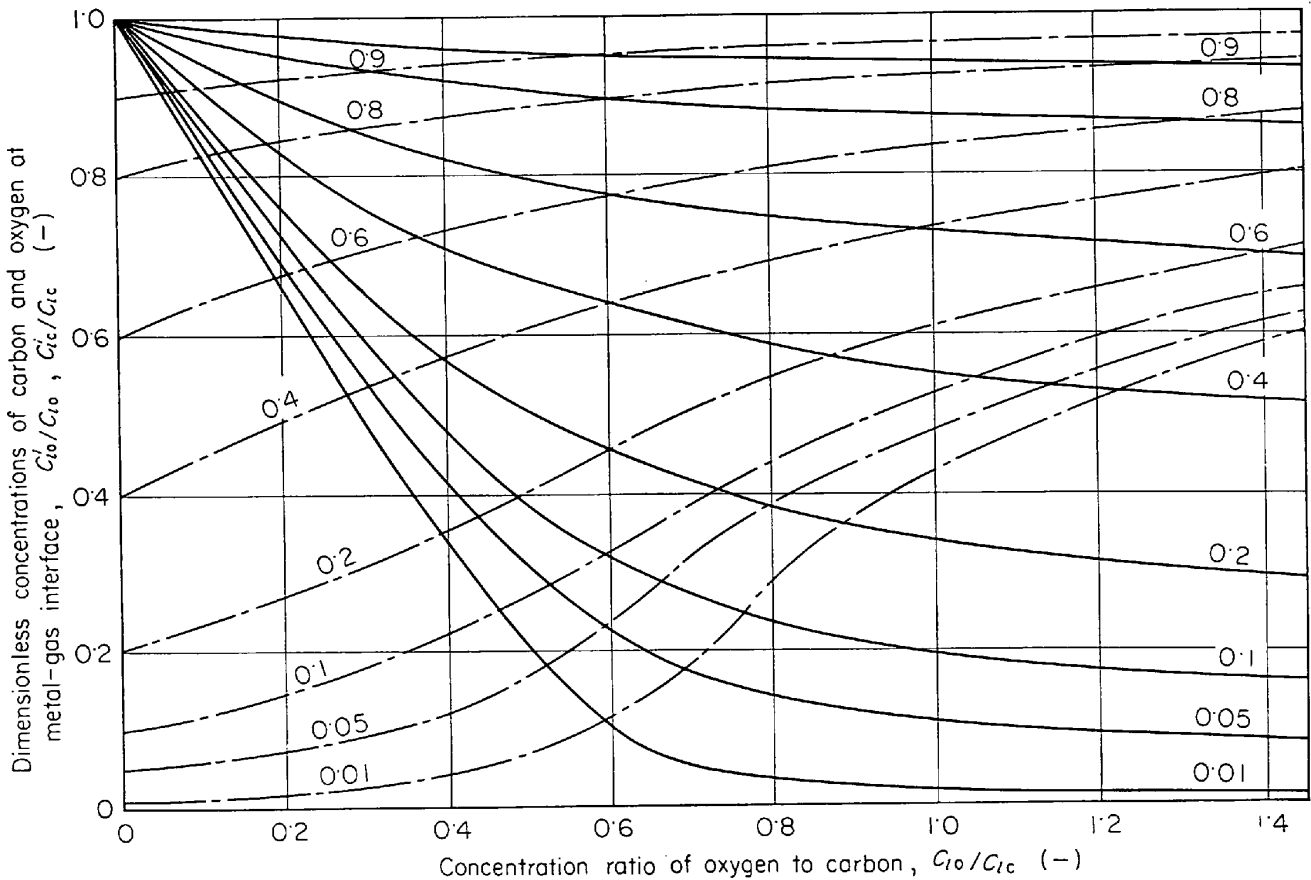


Fig. 3. Calculated results from Eqs. (43) and (44).  
 — carbon concentration at metal-gas interface  
 - - - oxygen concentration at metal-gas interface  
 Parameter: dimensionless concentration of CO gas,  $H_{CO}T_gC_{gCO}/C_{i0}C_{ic}$  (-)

ここで、 $H_2$ ,  $CO$ , および、不活性ガスをすべて理想気体とみなすと、 $Q_g$  は(37)式で表わされる。

$$Q_g = (n_{gH} + n_{gCO} + n_{gi}) RT_g / P \dots\dots\dots (37)$$

また、気泡周辺の物質移動係数  $k_l$  はBOWMAN ら<sup>6)</sup>が水中で  $CO_2$  ガス気泡について行なつた実験結果、および RICHARDSON ら<sup>7)</sup>が溶融銀中で  $O_2$  ガス気泡について行なつた実験結果から Higbie 型の物質移動係数が適用できることが認められているので、ここでも、 $k_l$  を(38)式で表わすことにする。

$$k_l = 2\sqrt{D_l / \pi t_e}, \quad t_e = D/u \dots\dots\dots (38)$$

気泡の界面積は、気泡の変形によつて球の場合からずれてくるが、ここでは spherical cap 状の気泡に対する BAIRD ら<sup>4)</sup>の計算方法に従うことにする。

気泡周辺での伝熱係数  $h$  は、RÜCKENSTEIN<sup>8)</sup>が、沸騰で生じた気泡が過冷却領域で消滅する場合について実験し

て求めた次の(39)式によつて推算する。

$$h = 2\lambda\sqrt{1/\pi t_e\alpha} \dots\dots\dots (39)$$

なお、不活性ガスと  $H_2$ ,  $CO$  との混合ガスの熱伝導度  $\lambda$  は BIRD らの著書<sup>9)</sup>によつて推算した。

溶鋼と気泡との界面における濃度  $C_{iH}$ ,  $C_{iO}$ ,  $C_{iC}$  は、次に述べる方法によつて決定する。すなわち、溶鋼側での物質移動が律速であるとの仮定から、 $H$ の界面濃度  $C_{iH}$  は気泡内の  $H_2$  ガス濃度  $C_{gH}$  と平衡していると考えられるので、(40)式で表わされる。

$$C_{iH} = H_H \sqrt{C_{gH} T_g} \dots\dots\dots (40)$$

また  $C$  と  $O$  の界面濃度  $C_{iC}$ ,  $C_{iO}$  も、同様に気泡内の  $CO$  ガス濃度  $C_{gCO}$  と平衡していると考えられるので(41)式で示される。

$$C_{iO} \cdot C_{iC} = H_{CO} \cdot C_{gCO} \cdot T_g \dots\dots\dots (41)$$

さて、 $C$  と  $O$  は  $C + O \rightarrow CO$  の反応によつて等モルずつ脱ガスされるので、溶鋼中から界面への  $C$  と  $O$  のフラックスが等しくなるように界面濃度が決定される。したがつて、(42)式の関係が成り立つ。

$$k_{iC}(C_{iC} - C_{iC}^*) = k_{iO}(C_{iO} - C_{iO}^*) \dots\dots\dots (42)$$

そこで、(41), (42)式から  $O$  と  $C$  の界面濃度は

$$C_{iO} = (C_a + \sqrt{C_a^2 + C_b}) / 2k_{iC} \dots\dots\dots (43)$$

$$C_{iC} = (-C_a + \sqrt{C_a^2 + C_b}) / 2k_{iO} \dots\dots\dots (44)$$

で表わされる。ただし、 $C_a \equiv k_{iC}C_{iC} - k_{iO}C_{iO}$ ,  $C_b \equiv 4k_{iO} \cdot k_{iC}H_{CO} \cdot C_{gCO}T_g$  である。

(43), (44)式による計算結果を Fig. 3 に示す。縦軸は溶鋼中での  $C$ ,  $O$  の濃度でもつて無次元化した  $C$ ,  $O$  の界面濃度であり、パラメータは溶鋼中の  $C$ ,  $O$  濃度と平衡する  $CO$  ガス濃度でもつて無次元化した気泡内  $CO$  ガス濃度である。

溶鋼中での  $O$  と  $C$  の各濃度、および、気泡内での  $CO$  ガス濃度が決まれば、Fig. 3からそのときの  $C$  と  $O$  の界面濃度を求めることができる。

SCHWERDFEGER<sup>10)</sup>, RICHARDSON ら<sup>7)</sup>が液体金属中で

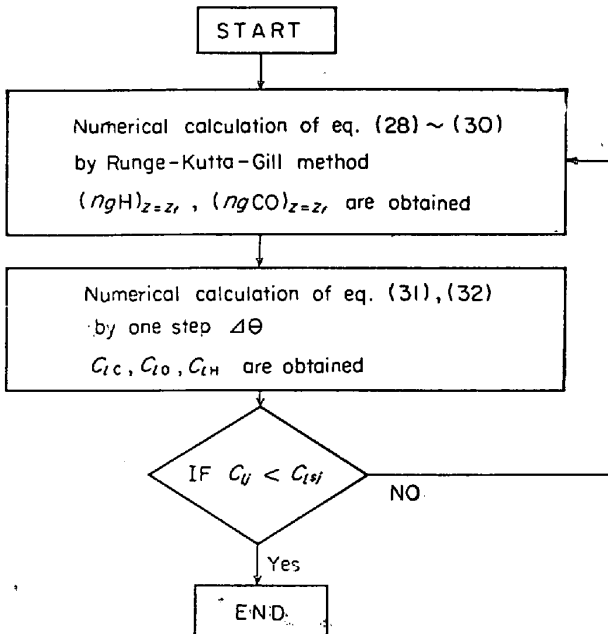


Fig. 4. Flow chart of calculation with the aid of digital computer.

Table 1. Data for calculation.

Molar heat	
of argon :	$c_{pAr} = 4.97 \text{ cal/mol} \cdot ^\circ\text{C}$
of carbon monoxide :	$C_{pCO} = 6.60 + 1.2 \times 10^{-3} T_g \text{ cal/mol} \cdot ^\circ\text{C}$
of hydrogen :	$c_{pH} = 6.62 + 0.8 \times 10^{-3} T_g \text{ cal/mol} \cdot ^\circ\text{C}$
Diffusion coefficient	
of $H$ in molten steel :	$D_{iH} = 1.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$
of $C$ in molten steel :	$D_{iC} = 7.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$
of $O$ in molten steel :	$D_{iO} = 2.0 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$
Equilibrium constant	
defined by Eq. (40) :	$H_H = 1.7 \times 10^{-3} \text{ mol}^{1/2}/\text{cm}^{3/2} \cdot ^\circ\text{K}^{1/2}$
defined by Eq. (41) :	$H_{CO} = 5.2 \times 10^{-6} \text{ mol}/\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{K}$

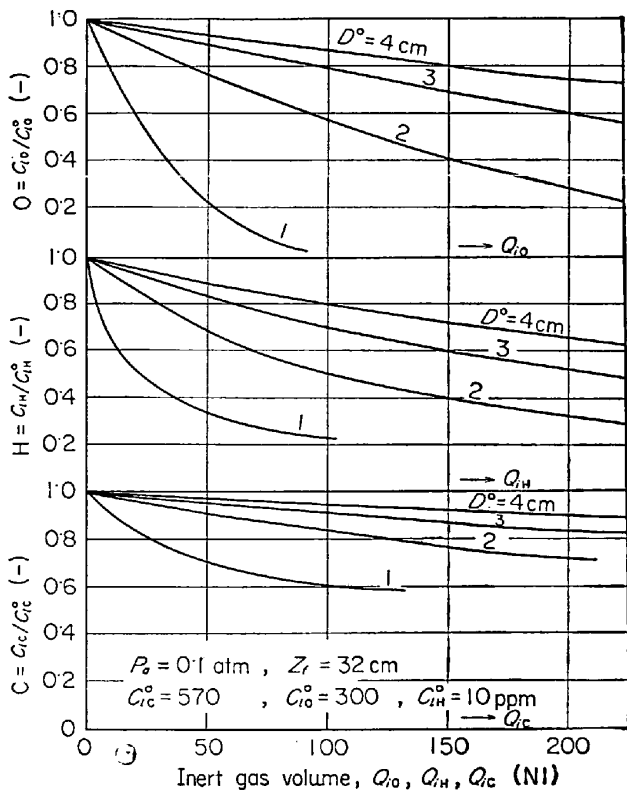


Fig. 5. Effect of initial diameter of inert gas bubble on degassing rate.

単一気泡の上昇速度を測定した結果、DAVIES<sup>11)</sup>が提出している(45)式によつて推算できることを示しているので、気泡の上昇速度の計算には(45)式を採用する。

$$u = \sqrt{g D / 2} \dots\dots\dots (45)$$

2.2.2 計算方法

距離  $z$  に関する (28)~(30) 式の微分方程式と、時間  $\theta$  に関する (31), (32) 式の微分方程式を、(33), (34) 式で条件で解くに当たつて、(28)~(32) 式は非線形であるため、解析解を得ることはできないので、以下に述べるような数値計算法によつて解く。

まず (33) 式の境界条件のもとで、Runge-Kutta-Gill 法によつて (28)~(30) 式の数値計算を行なう。

鋼浴表面  $z = z_f$  でのガスの流量  $(n_{gH})_{z=z_f}$ ,  $(n_{gCO})_{z=z_f}$  が求めれば、それらを (31), (32) 式に代入して、 $\Delta\theta$  時間後の溶鋼濃度  $C_{IH}$ ,  $C_{IO}$ ,  $C_{IC}$  を求める。これら溶鋼濃度  $C_{ij}$  の値を使用して、再び (28)~(30) 式の数値計算を行ない、 $(n_{gH})_{z=z_f}$ ,  $(n_{gCO})_{z=z_f}$  を求める。さらに (31), (32) 式から得られる  $C_{ij}$  が設定された最終濃度  $C_{Isj}$  になるまで計算を繰り返す。この計算のフローチャートを Fig. 4 に示す。

なお、計算において使用した数値を Table 1 に示す。

2.2.3 計算結果と考察

上述の数学的モデルに従つて、操作条件が脱ガス速度

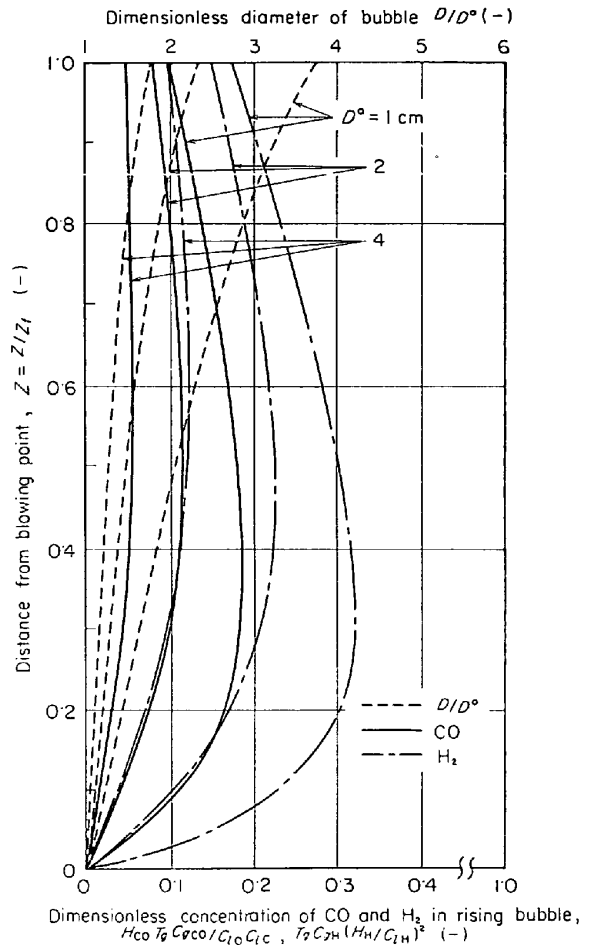


Fig. 6. Effect of initial diameter of inert gas bubble on concentrations of CO and H<sub>2</sub> in rising bubble.

に及ぼす影響を調べた。

吹き込まれた不活性ガスの初期泡径の大きさが脱ガス速度に及ぼす影響を Fig. 5 に、また気泡の上昇に伴つて起こる気泡内ガス濃度の変化に及ぼす初期気泡径の影響を Fig. 6 に示す。Fig. 6 で気泡内ガス濃度は、溶鋼中の脱ガス成分濃度と平衡するガス濃度でもつて無次元化した値である。したがつて、気泡内ガス濃度が 1 となれば、溶鋼中の脱ガス成分濃度は気泡内ガス濃度と平衡に達していることを意味している。また、気泡吹き込み点から溶鋼の表面方向への距離は溶鋼深さで無次元化した値である。

Fig. 5 から、初期気泡径の大きさは脱ガス速度に大きな影響を及ぼすことがわかる。その理由は、Fig. 6 で初期気泡径が小さくなると、離脱時の気泡内脱ガス成分の濃度が高くなることから推察される。

特に溶鋼中の脱ガス成分濃度が高い脱ガスの初期においては、この傾向が顕著である。その理由は次のように考えられる。すなわち、溶鋼中の脱ガス成分の濃度が高いときには、気泡は、溶鋼との平衡からほど遠い状態で

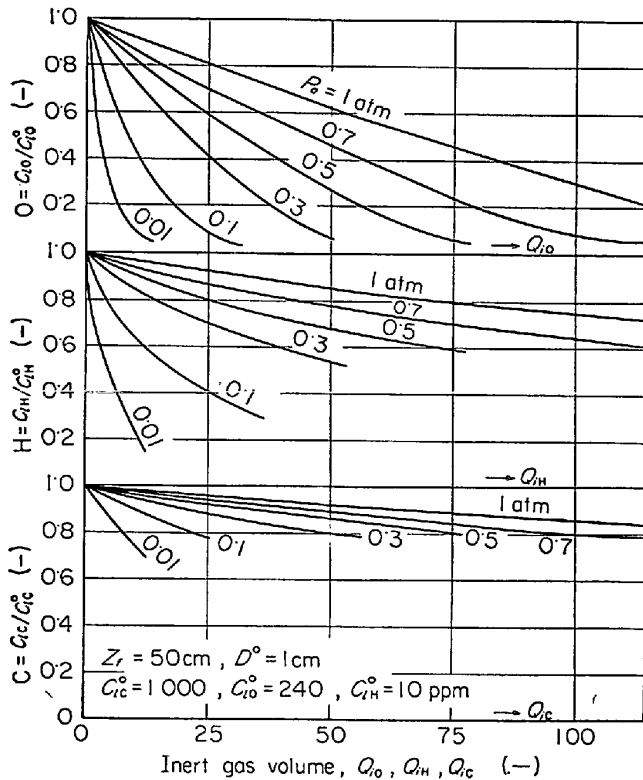


Fig. 7. Effect of pressure at steel-bath surface on degassing rate.

鋼浴を離脱するので、溶鋼単位体積当たりの気泡の界面積が増加するほど脱ガス速度は大きくなるが、脱ガスの末期になつて、鋼浴中の脱ガス成分の濃度が低下してくると、鋼浴を離脱するときの気泡内ガス濃度は溶鋼と平衡に近づくために、界面積の影響が小さくなる。ところで、溶鋼単位体積当たりの界面積は、(35)式で表わされるように気泡径に反比例するために、鋼浴中の脱ガス成分の濃度が高い時期に気泡径の影響が大きくなるものと推察される。

鋼浴表面の圧力  $P_a$  の影響を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。Fig. 7 から、表面圧力が脱ガス速度に大きな影響を及ぼすことがわかる。また、Fig. 8 からわかるように、鋼浴表面の圧力が低くなると、上昇に伴つて起こる気泡の成長速度が増加し、気泡内の脱ガス成分の濃度は低下して脱ガスの推進力が大きくなる。また、溶鋼の単位体積当たりの界面積も大きくなる。これらの効果のために、鋼浴表面圧力の低下とともに脱ガス速度は増大する。しかし、鋼浴深さが深い場合には、鋼浴表面近傍の気泡だけがこれらの効果を受けることになるので、本計算結果ほどの影響はなくなるものと思われる。

次に気泡吹き込み深さ  $z_f$  の効果を Fig. 9 と Fig. 10 に示す。深い位置から吹き込むほど、鋼浴内での気泡の滞留時間が大きくなり、その結果、気泡内のガス濃度は

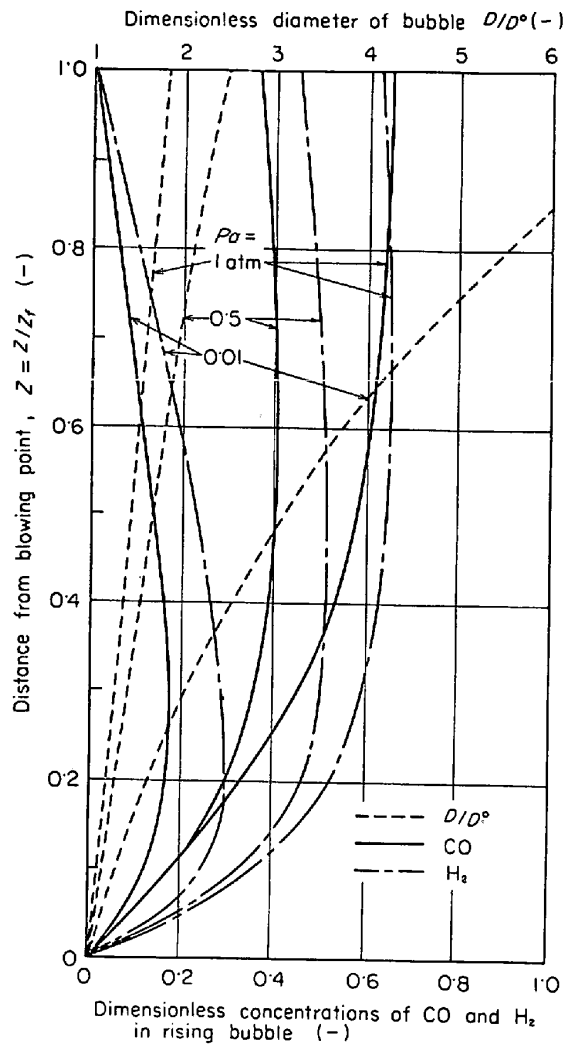


Fig. 8. Effect of pressure at steel-bath surface on concentration of CO and  $H_2$  in rising bubble.

溶鋼濃度と平衡に近づき、不活性ガスの利用率が大となる。しかし、ある程度以上深くなるとこの効果はほとんどなくなつて不活性ガスの利用率はほぼ一定となる。これは次に述べる理由によるものと考えられる。

すなわち、深い位置から吹き込まれた気泡は上昇の途中で一時的にガスの利用率が大きくなるが、浅い位置から吹き込まれた気泡と比較して、鋼浴表面近傍で体積増大が著しく、気泡内のガス濃度は急激に低下する。その結果、鋼浴から離脱するときには、ガス濃度が低下して不活性ガスの利用率が低下する。Fig. 10 はそのようすを示している。したがつて、Fig. 9 からわかるように、ある程度以上に深くなると(本計算では60cm程度)吹き込み深さの効果は期待できなくなる。

鋼浴中での気泡の滞留時間  $\theta$  の影響を Fig. 11 および Fig. 12 に示す。気泡の取鍋中での滞留時間に影響

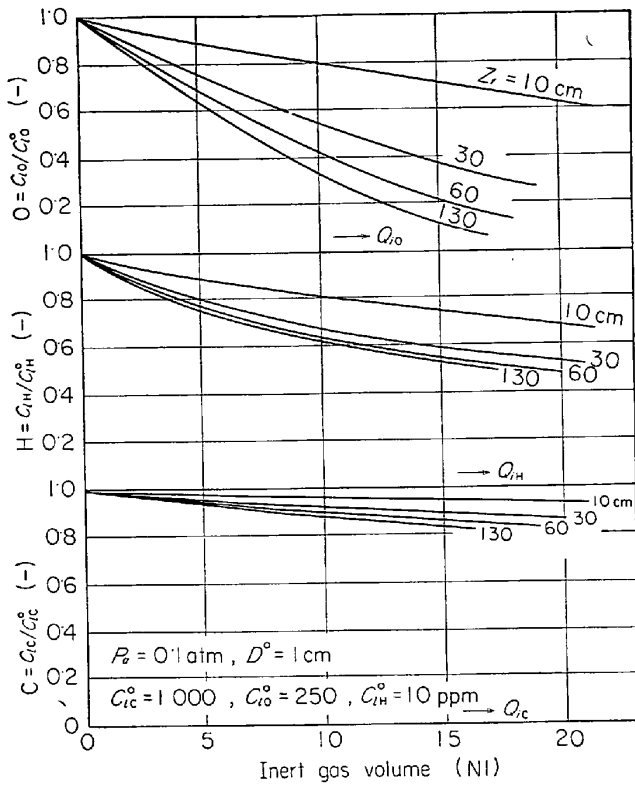


Fig. 9. Effect of blowing-point depth on degassing rate.

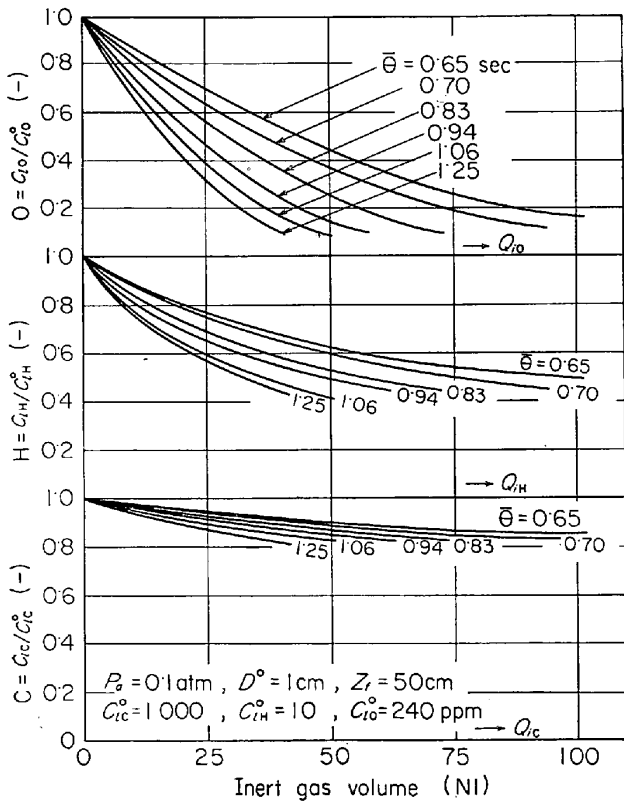


Fig. 11. Effect of residence time of rising bubble in steel bath on degassing rate.

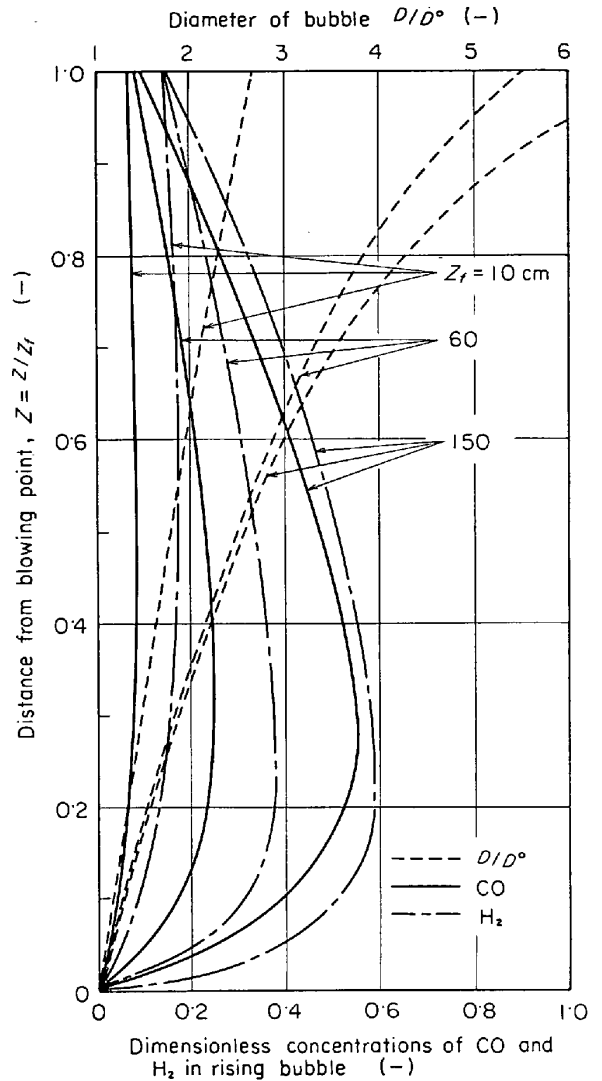


Fig. 10. Effect of blowing-point depth on concentrations of CO and  $H_2$  in rising bubble.

を及ぼす因子としては、気泡の上昇速度、気泡の吹き込み深さ、および、鋼浴の流動状態が考えられる。気泡径が決まれば、溶鋼に対する上昇気泡の相対速度が決定される。また、前述のように、気泡吹き込み深さには限界がある。ここでは、鋼浴の流動状態が脱ガス速度に及ぼす影響について検討する。

さて、気泡群の上昇によって生じる鋼浴の流動は、気泡の吹き込み方法や取鍋の形状によっても変化するので推定が困難である。そこで、取鍋底部から溶鋼表面までにわたって、取鍋底部で溶鋼の速度を0とし、表面で溶鋼にある速度を与えて、溶鋼に垂直方向で直線的に増加する速度分布を設定し、この溶鋼の流れに乗って気泡が上昇するものとして、脱ガス速度に及ぼす気泡の滞留時間の影響を計算した。その結果が Fig. 11, 12 である。Fig. 11 および Fig. 12 から、溶鋼の流動状態が脱ガス



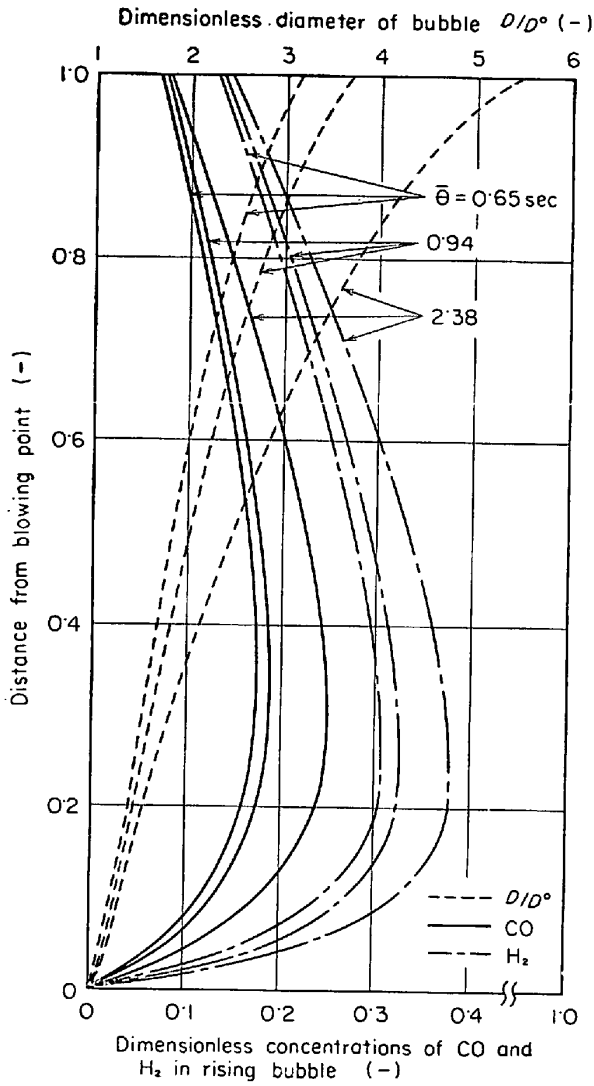


Fig. 12. Effect of residence time of rising bubble in steel bath on concentrations of CO and H<sub>2</sub> in rising bubble.

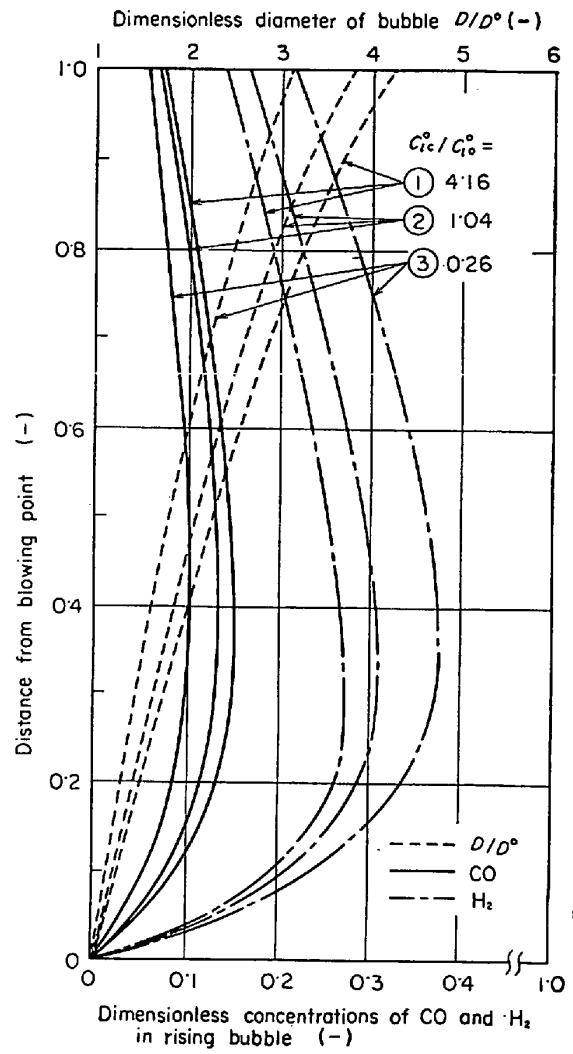


Fig. 14. Effect of concentration ratio of carbon to oxygen on concentrations of CO and H<sub>2</sub> in rising bubble.

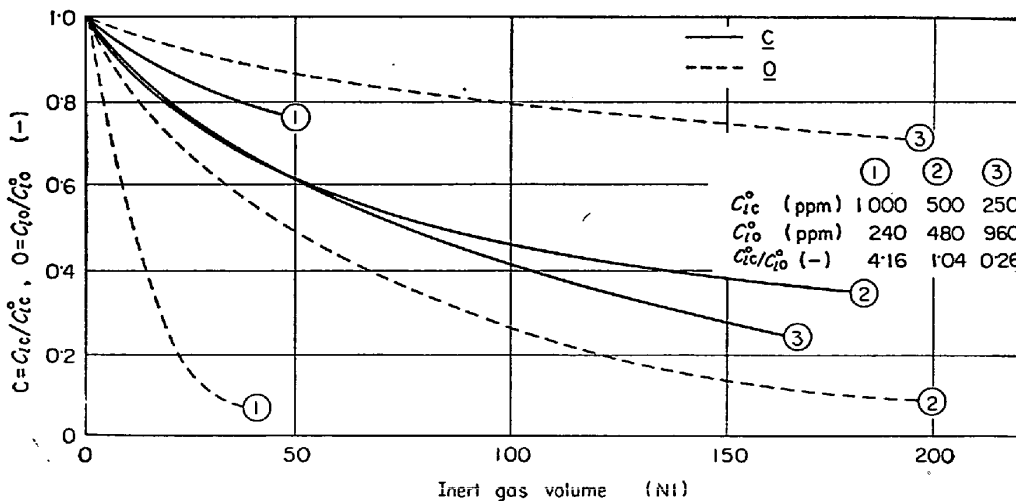


Fig. 13. Effect of concentration ratio of carbon and oxygen on degassing rate.

速度に大きな影響を及ぼしており、気泡の滞留時間が増加すれば、鋼浴表面から離脱するときの気泡内の脱ガス成分濃度は大きくなり、その結果、脱ガス速度が大きくなることを示されている。なお、溶鋼中での気泡の滞留時間が無限大となった場合は 2・1 で述べた平衡論による解析結果と一致し、不活性ガスの利用率は最大となる。

次に溶鋼中の  $\underline{C}$  と  $\underline{O}$  の濃度比が脱炭および脱酸速度に及ぼす影響について述べる。Fig. 13 および Fig. 14 には、1 atm の CO ガスと平衡する  $\underline{C}$  および  $\underline{O}$  の 3 種類の初濃度の場合について、溶鋼の脱ガス曲線を示す。1 atm の CO ガスと平衡する溶鋼濃度においても、 $\underline{C}$  と  $\underline{O}$  の濃度比  $C_{i0}^c/C_{i0}^o$  が大きくなるほど、 $\underline{O}$  濃度の低下速度は大きくなることを Fig. 13 からわかる。このことは、濃度が低いほど脱ガス速度は低下することと矛盾するが Fig. 3 の界面濃度の線図から明らかなように、 $\underline{C}$  と  $\underline{O}$  の気泡界面へのフラックスが等しくなるように  $\underline{C}$  と  $\underline{O}$  の界面濃度が決定されるので、 $\underline{O}$  濃度が小さく、 $\underline{C}$  濃度が大きい場合には  $\underline{O}$  の界面濃度が小となり、 $\underline{C}$  の界面濃度は逆に大きくなって、両者のフラックスは等しくなる。その結果、CO ガスとしての脱ガス量にはそれほど大きな変化は生じなくなり、 $\underline{O}$  濃度が小となつても、それに相当する  $\underline{C}$  濃度の増加があれば、酸素の脱ガス速度は低下しないことになる。

なお、鋼浴中に吹き込まれた不活性ガスの温度は急速に上昇し、吹き込まれるとほとんど瞬間的に溶鋼温度にほぼ等しくなることが計算結果からわかったがさらに、気泡側での熱収支の(21)式中のふく射の項  $Q_r$  を無視した場合についても計算したところ同様な結果が得られた。したがって、これらの計算結果から、吹き込み不活性ガスの温度は脱ガス速度に影響しないものと推察される。

### 3. 結 言

上昇気泡による脱ガスプロセスでは、気泡群の上昇速度、気泡周辺の物質移動係数など、物理的あるいは化学的に未知な問題が多く、現段階では十分研究がなされているとはいえない。ここでは、液体金属あるいは水系で得られた他の研究者の実測値を採用し、不活性ガスの吹き込みによる脱ガスプロセスについて、移動速度に基づいた数学的モデルを展開した。

そして、このモデルに基づいて、不活性ガスの初期気泡径、鋼浴表面での圧力、気泡吹き込み深さ、溶鋼中での気泡の滞留時間、および、 $\underline{C}$  と  $\underline{O}$  の初期濃度比などの操作条件が脱ガス速度に及ぼす影響を明らかにした。

なお平衡論的解析を行なつて従来、GELLER の式では

検討できなかった脱酸、脱炭速度が脱水素速度へ及ぼす影響についても検討した。

### 記 号

$A$ : 取鍋断面積	( $\text{cm}^2$ )
$a$ : 溶鋼単位体積当たりの気泡の界面積	( $\text{cm}^2/\text{cm}^3$ )
$C_{ij}$ : $j$ 成分の溶鋼中での濃度 ( $j = \text{C, O, H}$ )	( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
$C_{ls}$ : 目的とする最終濃度	( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
$C_{gj}$ : $j$ 成分の気泡中での濃度	( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
$c_{pj}$ : $j$ 成分の平均分子比熱	( $\text{cal}/\text{mol}\cdot^\circ\text{C}$ )
$D$ : 気泡直径	( $\text{cm}$ )
$D_{gj}$ : $j$ 成分の気相中での分子拡散係数	( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
$D_{lj}$ : $j$ 成分の溶鋼中での分子拡散係数	( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )
$g$ : 重力加速度	( $\text{cm}/\text{sec}^2$ )
$h$ : 熱伝達係数	( $\text{cal}/\text{cm}^2\cdot\text{sec}\cdot^\circ\text{C}$ )
$H_H$ : (40)式で定義される $\text{H}_2$ ガス濃度と溶鋼中の $\underline{\text{H}}$ の濃度との平衡定数	( $\text{mol}^{1/2}/\text{cm}^{3/2}\cdot^\circ\text{K}^{1/2}$ )
$H_{\text{CO}}$ : (41)式で定義される CO ガス濃度と溶鋼中の $\underline{\text{C}}$ , $\underline{\text{O}}$ の濃度との平衡定数	( $\text{mol}/\text{cm}^3\cdot^\circ\text{K}$ )
$K_H$ : (3)式で定義される $\text{H}_2$ ガス濃度と $\underline{\text{H}}$ 濃度との平衡定数	( $\text{mol}^{1/2}/\text{cm}^{3/2}$ )
$K_{\text{CO}}$ : (4)式で定義される CO ガス濃度と $\underline{\text{C}}$ , $\underline{\text{O}}$ 濃度との平衡定数	( $\text{mol}/\text{cm}^3$ )
$k_{lj}$ : $j$ 成分の溶鋼側での気泡周辺の物質移動係数	( $\text{cm}/\text{sec}$ )
$k_{gj}$ : $j$ 成分のガス側での気泡周辺の物質移動係数	( $\text{cm}/\text{sec}$ )
$n_{gj}$ : $j$ 成分のガス側のモル流量	( $\text{mol}/\text{sec}$ )
$n_i$ : 不活性ガスのモル数	( $\text{mol}$ )
$P$ : 気泡内圧力	( $\text{atm}$ )
$P_a$ : 溶鋼表面での圧力	( $\text{atm}$ )
$Q_g$ : ガスの容積流量	( $\text{cm}^3/\text{sec}$ )
$Q'_g$ : ガス容積	( $\text{cm}^3$ )
$Q_{ij}$ : $j$ 成分を脱ガスするのに必要な不活性ガス量	( $\text{NI}$ )
$Q_c$ : 熱伝導による気泡への伝熱速度	( $\text{cal}/\text{sec}\cdot\text{cm}$ )
$Q_m$ : 物質移動に伴つて起こる気泡への伝熱速度	( $\text{cal}/\text{sec}\cdot\text{cm}$ )
$Q_r$ : ふく射による気泡への伝熱速度	( $\text{cal}/\text{sec}\cdot\text{cm}$ )
$R$ : ガス定数	( $\text{cm}^3\cdot\text{atm}/\text{mol}\cdot^\circ\text{C}$ )
$R_{lj}$ : 溶鋼側での $j$ 成分の物質移動抵抗	( $\text{sec}/\text{cm}$ )
$R_{gj}$ : ガス側での $j$ 成分の物質移動抵抗	( $\text{sec}/\text{cm}$ )
$T_l$ : 溶鋼温度	( $^\circ\text{K}$ )
$T_g$ : 気泡温度	( $^\circ\text{K}$ )
$t_e$ : 気泡周辺での溶鋼の更新時間	( $\text{sec}$ )

- $u$  : 気泡上昇速度 (cm/sec)  
 $W$  : 取鍋内溶鋼の質量 (g)  
 $z$  : 気泡吹き込み点から上方への距離 (cm)  
 $\alpha$  : 熱拡散係数 (cm<sup>2</sup>/sec)  
 $\lambda$  : 熱伝導度 (cal/cm·sec·°C)  
 $\rho$  : 溶鋼の密度 (g/cm<sup>3</sup>)  
 $\theta$  : 脱ガス時間 (sec)  
 $\bar{\theta}$  : 気泡の滞留時間 (sec)  
 $\sigma$  : ステファン・ボルツマン定数 (cal/cm<sup>2</sup>·sec·°K<sup>4</sup>)  
 $\epsilon_m$  : 気泡内ガスの吸収能 (—)  
 (添字) C : 炭素, CO : 一酸化炭素,  $f$  : 溶鋼表面,  
 $g$  : ガス,  $H$  : 水素,  $i$  上付きは気泡と溶鋼との界面,  
 下付きは不活性ガス,  $l$  : 溶鋼, O 酸素,  $\circ$  : 初期値

## 文 献

- 1) W. GELLER: Z. Metallk., 35 (1943), p. 213
- 2) A. V. BRADSHAW and F. D. RICHARDSON: Vacuum Degassing of Steel, (1965), p. 24, [The Iron and Steel Inst.]
- 3) 渡辺, 浅野, 佐伯: 鉄と鋼, 53 (1967) 3, p.297
- 4) M. H. BAIRD and J. F. DAVIDSON: Chem. Eng. Sci., 17 (1962), p. 87
- 5) 川和, 根本: 鉄と鋼, 54 (1968) 3, S89
- 6) C. W. BOWMAN and A. I. JOHNSON: Can. J. Chem. Eng., 40 (1962), p. 139
- 7) W. G. DAVENPORT, A. V. BRADSHAW, and F. D. RICHARDSON: J. Iron Steel Inst., 205 (1967), p. 1034
- 8) E. RÜCKENSTEIN: Chem. Eng. Sci., 10 (1959), p. 22
- 9) R. B. BIRD, W. E. STEWART, and E. N. LIGHTFOOT: Transport Phenomena, (1960), p. 258 [John Wiley & Sons, Inc.]
- 10) K. SCHWERDTFEGER: Chem. Eng. Sci., 23 (1968), p. 937
- 11) R. M. DAVIES and G. I. TAYLOR: Proc. Roy. Soc., A200 (1950), p. 375
- 12) 化学工学協会編: 化学工学便覧, (1968), p. 274 [丸善]