

R-H環流脱ガス装置の上昇管内における脱ガスの解析*

75523

藤井 徹也**・鞭

巖***

Theoretical Analysis on the Degassing Process in Upper Leg of R-H Degassing Plant

Tetsuya FUJII and Iwao MUCHI

Synopsis:

It may be considered that the degassing rate in R-H degassing plant is mainly determined the rate of each the following processes, i.e., degassing process by inert gas bubbles in upper leg and one from the splash and the free surface of molten steel in vacuum chamber, and that these processes are affected by circulation flow rate of molten steel.

To obtain the fundamental informations on the design of this plant and on the determination of the operating conditions, a particular attention is devoted to the degassing process by inert gas bubbles in upper leg, and a mathematical model of this degassing process in two-phase flow including gas bubbles and molten steel is developed in this paper. And, this model consists of material and momentum balance in metal phase, material balance in bubble phase and equation of continuity for two-phase flow.

Numerical calculations on the degassing rate in upper leg and the circulation flow rate of molten steel have been conducted with the aid of digital computer. Longitudinal distributions of process variables such as bubble size, pressure, concentrations of CO and H₂ in bubble phase and that of C, O and H in metal phase have been obtained over the range from the blowing point of inert gas to the exit of upper leg under various blowing rates of inert gas. Calculated results on the circulation flow rate of molten steel were found reasonable by comparing them the comparison with previous data reported by other investigators.

(Received Nov. 19, 1969)

1. 緒 言

R-H 環流脱ガス装置では、上昇管内に吹きこまれた不活性ガス気泡による脱ガス、真空槽での溶鋼粒滴の飛散による脱ガス、および、真空槽溶鋼表面からの脱ガスが、主要な脱ガス過程と考えられ、そして、これらの脱ガス過程や取鍋内での混合は、溶鋼の環流速度に依存するものと推察される。

著者らは、R-H 環流脱ガス装置の設計や、操作条件を決定するのに有用な基礎資料を求めるために、R-H 環流脱ガス装置で重要な変数と考えられる溶鋼の環流速度、および、上昇管内での溶鋼と気泡との混相流における脱ガス速度について数学的モデルを展開した。

本報に示したモデルは、溶鋼側での物質収支と運動量収支、気泡側での物質収支、および混相流の連続の式に基づいて展開されており、上昇管の大きさ、上昇管入口での溶鋼中での脱ガス成分の濃度、真空槽内圧力、および不活性ガスの吹き込み速度が与えられた場合、本モデルによって、溶鋼の環流速度、および、上昇管における脱ガス速度が計算できる。

本モデルに基づく数値計算の結果得られた環流速度は、従来発表されている実測値と比較してほぼ妥当な値になっているが、脱ガス速度については、実測が装置全体の脱ガス速度について行なわれているので、上昇管における脱ガス速度の比較はできなかつた。なお、本研究は、大型電子計算機（東京大学、HITAC 5020 E）を使用した。

2. 解 析

上昇管内の溶鋼と気泡の混相流では、上昇に伴う圧力減少や、溶鋼から気泡中への脱ガス成分の物質移動などによつて上昇ガスの容積流量は急激に増加し、それに伴つて溶鋼の流速も増加する。これらの現象を数式化するに当たり、次のような仮定を設ける。

(a) 上昇管内での気泡相と溶鋼相はともにピストン流れとし、軸方向の混合拡散は考慮しない。(b) 気泡群の

* 昭和43年4月本会講演大会にて発表
昭和44年11月19日受付

** 川崎製鉄(株)技術研究所

*** 名古屋大学工学部 工博

合体は起こらないものとし、気泡の形状は球形とする。
(c) 上昇気泡による脱ガス過程は、溶鋼側での物質移動が律速であるとする。

以上の仮定のもとで、溶鋼側で H , O , C について物質収支を行なうと次の(1)~(3)式が得られる。

$$dC_{IC}/dz = -k_{IC}Aa(C_{IC} - C_{IC}^i)/Q_I \dots\dots\dots (1)$$

$$dC_{IO}/dz = -k_{IO}Aa(C_{IO} - C_{IO}^i)/Q_I \dots\dots\dots (2)$$

$$dC_{IH}/dz = -k_{IH}Aa(C_{IH} - C_{IH}^i)/Q_I \dots\dots\dots (3)$$

気泡側での H_2 と CO ガスについての物質収支は、(4), (5)式で表わされる。

$$dC_{gH}/dz = k_{IH}aA(C_{IH} - C_{IH}^i)/2Q_g - (C_{gH}/Q_g)(dQ_g/dz) \dots\dots\dots (4)$$

$$dC_{gCO}/dz = k_{IC}aA(C_{IC} - C_{IC}^i)/Q_g - (C_{gCO}/Q_g)(dQ_g/dz) \dots\dots\dots (5)$$

ここで a は混相流単位体積当たりの界面積であり、(6)式で示される。

$$a = 6Q_g/DA(n_l + u_r) \dots\dots\dots (6)$$

混相流の連続の式は、上昇管の任意の断面において、(7)式で示される。

$$Q_I/u_l + Q_g/(u_l + u_r) = A \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 u_l は溶鋼の上昇速度であり、 u_r は溶鋼に対する気泡の相対速度であるが、 u_r は混相流の特性に依存し、溶鋼の上昇速度や、溶鋼と気泡の容積流量比 Q_l/Q_g および、気泡径などで決まるが¹⁾²⁾、ここでは(8)式によつて表わされるものとする。

$$u_r = B\sqrt{D} \dots\dots\dots (8)$$

ただし、 B : 定数である。さて、(7)式を z に関して微分し、(8)式を代入し、 $(Q_g/Q_g^0)^{1/3} = D/D^0$ の関係を適用すると、次の(9)式が得られる。

$$(2Au_l - Q_l - Q_g + AB\sqrt{D}) \times \frac{du_l}{dz} - u_l \frac{dQ_g}{dz} + \frac{B}{2\sqrt{D}} (Au_l - Q_l) \frac{dD}{dz} = 0 \dots\dots\dots (9)$$

環流速度を求めるためには、上昇管における圧損失を求める必要がある。気泡の混相流における圧降下については、従来多くの理論的および実験的な研究^{3)~6)}が行なわれているが、ここでは取り扱いが比較的簡単な STENNING⁷⁾の理論を拡張して解析を進める。

溶鋼と気泡の混相流に対して、上昇管の任意の断面で運動量収支を行なう。外力として重力 F_g , 圧力 F_p , および、管壁での摩擦力 F_f を考えると、これら外力は、それぞれ、(10)~(12)式で表わされる。

$$F_g = -A\rho_l g(1 - \epsilon) dz \dots\dots\dots (10)$$

$$F_p = -AdP \dots\dots\dots (11)$$

$$F_f = -(1/2)\rho_l u_l^2 \pi D_u f dz \dots\dots\dots (12)$$

ただし、 ϵ は混相流の空間率、すなわち混相流中の気泡の容積比率であり、(13)式で示される。

$$\epsilon = Q_g/A(u_l + u_r) \dots\dots\dots (13)$$

(12)式中の f は混相流と管壁表面での摩擦係数であり f は u_r のほか、レイノルズ数および混相流の特性値に依存する⁸⁾が、ここでは f を定数として取り扱う。

さて、厳密には、溶鋼側とともにガス側での運動量収支も考慮しなければならないが、解析を簡単にするために次のように考える。

混相流中の気泡の直径は上昇に伴つて変化するが、ここで、気泡の上昇速度は常にその直径に基づいた終末速度に等しいと考えると、気泡に作用する有効な浮力は、そのまま溶鋼を引き上げる力に相当することとなり、その力 F_b は(14)式のように表わされる。

$$F_b = A\epsilon(\rho_l - \rho_g)g \cdot dz = A\epsilon\rho_l g \cdot dz \dots\dots\dots (14)$$

また、 dz 部分で流入および流出する溶鋼の各運動量の差 dm は、(15)式で表わされる。

$$dm = Au_l^2 \rho_l (1 - \epsilon) - A(1 - \epsilon - d\epsilon)(u_l + du_l)^2 \rho_l \dots\dots\dots (15)$$

溶鋼側での運動量収支式は、(10)~(15)式から次の(16)式で表わされる。

$$Q_l \rho_l \frac{du_l}{dz} + A\rho_l g(1 - 2\epsilon) + A \frac{dP}{dz} + \frac{1}{2} \rho_l u_l^2 \pi D_u f = 0 \dots\dots\dots (16)$$

さて、理想気体の状態式は、(17)式で表わされる。

$$P = (C_{gI} + C_{gCO} + C_{gH})RT_g \dots\dots\dots (17)$$

(17)式を z に関して微分し、(4), (5)式を適用すると次の(18)式が得られる。

$$\frac{dP}{dz} = \frac{RT_g a A}{Q_g} \left\{ \frac{k_{IH}}{2} (C_{IH} - C_{IH}^i) + k_{IC} (C_{IC} - C_{IC}^i) \right\} - \frac{P}{Q_g} \frac{dQ_g}{dz} \dots\dots\dots (18)$$

以上の解析によつて得られた(1)~(5), (9), (16), (18)式の8元の連立微分方程式を数値計算することによつて、溶鋼の環流速度と上昇管内での脱ガス速度が計算できる。なお、初期条件は

$$z = 0 \text{ で } C_{IC} = C_{IC}^0, C_{IO} = C_{IO}^0, C_{IH} = C_{IH}^0, C_{gCO} = C_{gH} = 0, u_l = u_l^0, Q_g = Q_g^0 \dots\dots\dots (19)$$

(1)~(5), (18)式中の溶鋼側での界面濃度 C_{IC}^i , C_{IO}^i , C_{IH}^i は、前報⁹⁾の方法によつて決定する。すなわち、 C_{IC}^i と C_{IO}^i は、溶鋼本体から界面への C と O の各物質移動が等しいという条件と、 C_{IC}^i と C_{IO}^i がガス側の CO 分圧と平衡になつているという条件から得られ、 C_{IH}^i は、ガス側の H_2 分圧と平衡しているとして、

SIEVELT の法則から得られる。また、物質移動係数 k_{IO} , k_{IH} , k_{IC} についても、前報⁹⁾と同様な浸透説に基づく Higbie 型の物質移動係数を使用した。

3. 計算方法

溶鋼側での C , O , H についての物質収支の (1)~(3)式と、気泡側での H_2 と CO ガスについての物質収支(4), (5)式, 混相流の連続の式の(9)式, および溶鋼側での運動量収支の(16)式, さらに理想気体の状態式に基づいて得られた (18) 式の 8 元の連立微分方程式を (19) 式の条件のもとで電子計算機によつて RUNGE-KUTTA-GILL 法で数値計算する。

計算に当たつて、まず、操作条件として、不活性ガスの吹き込み速度 Q_g^0 , 上昇管入口で C , O , H の濃度 C_i^0 , C_{iO}^0 , C_{iH}^0 の値を決める。次に、環流速度 Q_l を仮定すると不活性ガスの吹き込み点における圧力 P^0 が求められる。

また、ガス側での H_2 と CO ガスの濃度は、不活性ガスの吹き込み点では、 $C_{gH} = C_{gCO} = 0$ である。以上の値を不活性ガスの吹き込み点 $z = 0$ での初期条件として、(1)~(5), (9), (16), (18)式の計算を進め、上昇管出口 $z = z_f$ での圧力 P_{zf} を求める。得られた P_{zf} の値から上昇管出口での圧損失 ΔP_{zf} を差し引いたものが真空槽内の圧力 P_r に相当することになるが、もしもこの値が真空槽内圧力と一致しないならば、溶鋼の環流速度 Q_l の仮定値を変更して一致するまで以上の計算を繰り返す。上述の値が真空槽内圧力に一致すれば、溶鋼の環流速度 Q_l の仮定値が真の環流速度となり、また、

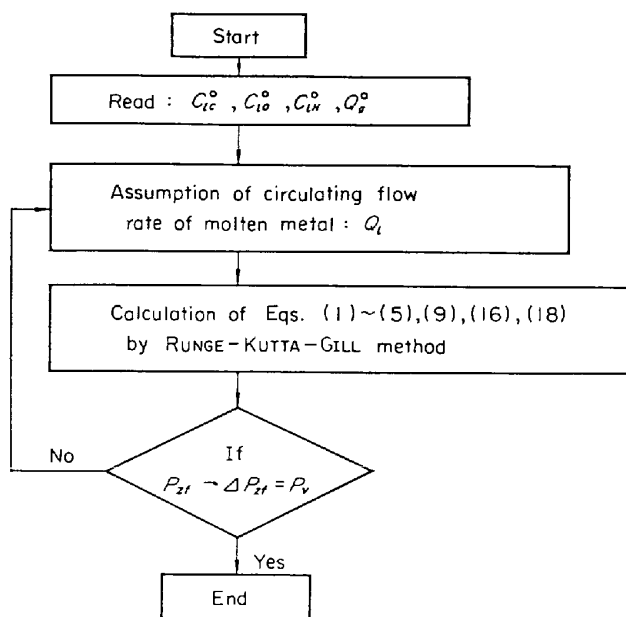


Fig. 1. Flow chart for calculation.

Table 1. Data for calculation.

Length of upper leg : $z_f = 130$ cm
Diameter of upper leg : $D_u = 30$ cm
Friction factor : $f = 0.04$
Density of molten steel : $\rho_l = 7.2$ g/cm ³
Constant defined by Eq.(8) : $B = 150$ cm ^{1/2} /sec
Diffusion coefficient of oxygen : $D_{IO} = 2 \times 10^{-4}$ cm ² /sec
Diffusion coefficient of carbon : $D_{IC} = 7 \times 10^{-5}$ cm ² /sec
Diffusion coefficient of hydrogen : $D_{IH} = 1.5 \times 10^{-3}$ cm ² /sec
Pressure of vacuum chamber : $P_v = 0.01$ atm

そのときの $z = z_f$ 点での C_{iH} , C_{iO} , C_{iC} が上昇管出口における H , O , C の濃度となる。計算の手順を Fig. 1 に、なお、計算に使用したパラメータおよび装置寸法を Table 1 に示す。

次に本研究で計算に採用した各種定数の数値について考察する。溶鉄中での酸素の分子拡散係数については、たとえば、1600°C で NILLES¹⁰⁾は 3.0×10^{-4} cm²/sec, SCHWERTFEGER¹¹⁾は $(1.2 \pm 0.3) \times 10^{-4}$ cm²/sec, SHURYGIN¹²⁾は 0.61×10^{-4} cm²/sec と報告し、NOVOKHATSKII ら¹³⁾は 1550°C で 1.22×10^{-4} cm²/sec, McCARRON ら¹⁴⁾は 1560°C で $(0.23 \pm 0.03) \times 10^{-4}$ cm²/sec と報告しているが、これだけのデータを見てもかなり広い範囲にわたつて測定値がばらつていることがわかる。本研究で採用した $D_{IO} = 2.0 \times 10^{-4}$ cm²/sec は一応これらの範囲内にはいつているがその数値の妥当性についてはわからない。

しかし、本研究では前述のように、液側物質移動係数として Higbie 型の係数を採用しているので、たとえ分子拡散係数の値が大きく違つていても、物質移動係数の値は前者の変化高の 1/2 乗の違いに留まるため、物質移動速度への影響は大きくはならないことが推察される。

溶液中の炭素の分子拡散係数については、たとえば、MORGAN ら¹⁵⁾は炭素濃度 0.03% の場合 1550°C で 7.9×10^{-5} cm²/sec, 1590°C で 7.2×10^{-5} cm²/sec, なお、1550°C で炭素濃度 2.1% の場合には 7.8×10^{-5} cm²/sec, 3.5% の場合には 6.7×10^{-5} cm²/sec と報告している。また、KOZLOV ら¹⁶⁾は炭素濃度 0.2~0.9% で、1580~1640°C の範囲で $(4 \sim 19) \times 10^{-5}$ cm²/sec と発表している。なお、炭素濃度や温度についての条件はわからないが、 $(7 \sim 8) \times 10^{-5}$ cm²/sec というデータ¹⁷⁾も示されている。これらのデータから、本研究で採用した $D_{IC} = 7 \times 10^{-5}$ cm²/sec は妥当なものと考えられる。

溶液中の水素の分子拡散係数については、たとえば、

TAYEB ら¹⁹⁾は 1600°C で $(1.3 \pm 0.5) \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$, また, HAMRIN ら¹⁹⁾は 1550°C で $1.5 \times 10^3 \text{ cm}^2/\text{sec}$ と報告している. 本研究で採用した D_{IH} のデータは後者のそれと同じである.

Table 1 中の B , f はともにパラメータであるが, 摩擦係数 f については, 単相流の乱流域で, 滑らかなセメント管の場合²⁰⁾ $f = 0.03 \sim 0.08$, 粗雑なセメント管の場合²⁰⁾ $0.1 \sim 0.2$, よいれんが積の場合²⁰⁾ $0.12 \sim 0.25$ というデータが示されている. 一方, 佐々木⁹⁾ は気液混相流の垂直上昇流に伴う圧降下を実測した結果, 混相流の場合の摩擦係数は同じレイノルズ数の場合, 単相流の f よりも下回ることを報告している. これらを参考にして, 本研究では上昇管内での混相流の摩擦係数の概略値として $f = 0.04$ を採用したが, その妥当性については検討するのに十分な資料がない現状では不明であるが, 見当はずれのデータではないと推察される.

次に, (8) 式中の定数 $B = 150 \text{ cm}^{1/2}/\text{sec}$ という数値を採用した根拠について述べる. 後述の Fig. 2~4 からわかるように, 上昇管出口での気泡径は吹き込み時の気泡径の 2.6~4 倍程度になつている. 一方, 空気泡と水との上昇混相流の相対速度については植田²⁾ の研究があり, 相対速度は水流量にはあまり関係がなく, 空気量に対してほぼ直線的に増大し, 液の空塔速度 6~67 cm/sec の範囲で, 空気の空塔速度 5~44 m/sec に対して相対速度は 100~600 cm/sec になるという実験結果が報告されている. そこで, 上昇管内での平均気泡径として吹き込み時の気泡径の 3.5 倍, すなわち, 1.75 cm とし, 気泡と溶鋼との相対速度 u_r として 200 cm/sec をとると, (8) 式から $B = 150 \text{ cm}^{1/2}/\text{sec}$ が得られるが B の数値は

上昇管径 D_u の増加とともに大きくなる必要があるように推察される.

吹き込み時の気泡径 D^0 については, LEIBSON ら²¹⁾ は, オリフィスから水中に空気泡を吹き込んだ場合, 生成気泡径が高レイノルズ域 ($Re > 1 \times 10^4$) では D^0 がオリフィス径に依存しなくなり, 次の(20)式が書けること, および, 液の物性値が D^0 へ及ぼす影響はレイノルズ数の増加に伴って減少することを報告している.

$$D^0 = 0.71 (Re)^{-0.05} \quad (Re > 1 \times 10^4) \quad \dots (20)$$

本研究で採用した $D^0 = 0.5 \text{ cm}$ の値は, (20) 式に基づいて推算すると, $Re = 11110$ の場合に相当する. この Re の数値は R-H 脱ガス装置の上昇管での Re としてまず, 妥当なものと推察される.

4. 計算結果と考察

上昇管内で, 溶鋼と気泡の上昇に伴う各プロセス変数の変化の様子を Fig. 2, 3, 4 に示す. 縦軸は不活性ガスの吹き込み点から上方への距離を z 上昇管長さ z_f で無次元化した距離である. 曲線に示した気泡内ガス濃度 C_{gj}^* ($j = \text{CO}, \text{H}$) は, 溶鋼の濃度と平衡するガス濃度で気泡内のガス濃度 C_{gj} を無次元化した濃度である. したがって, 気泡内の脱ガス成分の濃度が 1 となれば, 気泡内脱ガス成分濃度は溶鋼と平衡に達したことになる. また, 曲線に示した気泡径 D^* , および, 溶鋼中の脱ガス成分濃度 C_{lk} ($k = \text{C}, \text{H}, \text{O}$) は, 不活性ガスの吹き込み口でのそれぞれの値 D^0 および C_{lk}^0 で無次元化した値である.

Fig. 2 は, 不活性ガス吹き込み速度が 140 Nl/min の場合であり, 環流速度 Q_l は 30 t/min となる. Fig. 3

4 は不活性ガス吹き込み速度が, それぞれ, 60 および 30 Nl/min の場合であり, このときの環流速度は 24, および 20 t/min となる.

混相流の上昇に伴う圧力減少と, 物質移動による H_2 および CO ガスの気泡内への流入によつて, 気泡径は単調に増大していくことがこれらの図からわかるが, 不活性ガス吹き込み速度 Q_g^0 以外の他の条件をほぼ同様にとつた場合 (C_{lH}^0 の値は異なるが値が小さい) の Fig. 2 と Fig. 4 で, 気泡の成長速度を比較すると, 不活性ガス吹き込み速度が小さい場合の Fig. 4 のほうが, 気泡の成長速度が大きいことがわかる. これは, 不活性ガス吹き込み速度が小さい場合には環流速度が小となり, その結果, 上昇管内での気泡と溶鋼との接触時間 (気泡の滞留時間) が大きくなり, 気泡内への物質移動量が

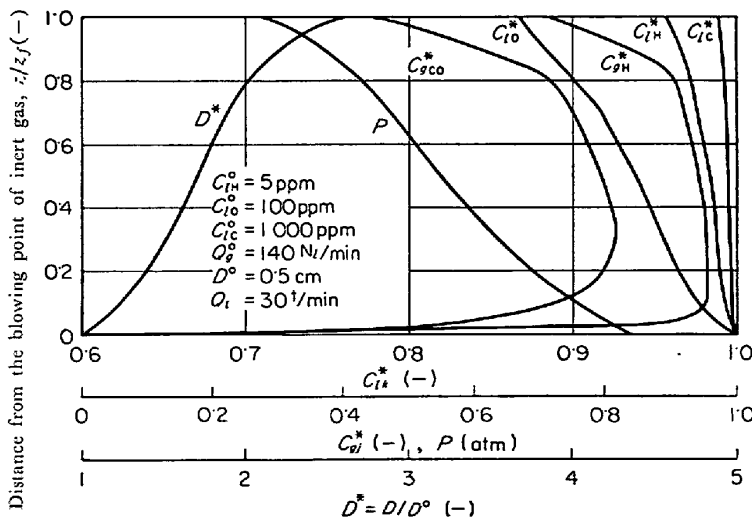


Fig. 2. Calculated results on the longitudinal distributions of process variables in upper leg, where $Q_g^0 = 140 \text{ Nl}/\text{min}$.

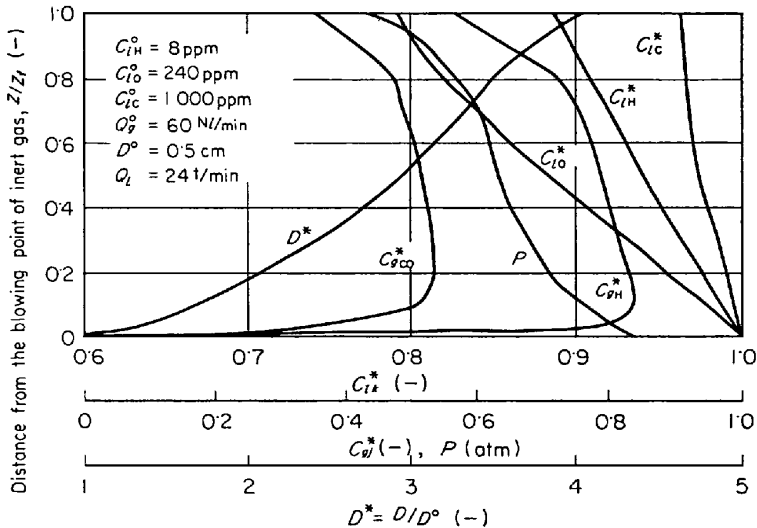


Fig. 3. Calculated results on the longitudinal distributions of process variables in upper leg, where $Q_g^0 = 60$ NL/min.

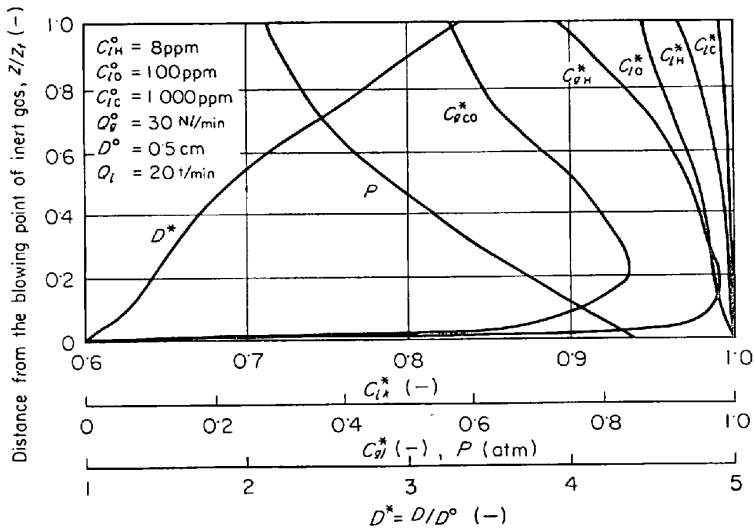


Fig. 4. Calculated results on the longitudinal distributions of process variables in upper leg, where $Q_g^0 = 30$ NL/min.

増加したことによるものと考えられる。

CO および H_2 ガスの気泡内の濃度 C_{gCO}^* および C_{gH}^* は、不活性ガスの吹き込み点から急激に増大し、ある最大値に達した後、緩慢に低下する。そして、上昇管出口近傍で急激に減少する傾向があることが推察される。

さて、溶鋼本体中から気泡内への脱ガス成分の移動は気泡内のガス濃度を増大させる効果があるが、一方、気泡の上昇に伴って起こる圧力低下のための気泡の体積膨張は、気泡内のガス濃度を減少させる効果がある。気泡内ガス濃度の曲線は、これら2つの相反する効果によって決定されると考えられる。すなわち、不活性ガスの吹き込み点の近傍では、物質移動の効果が優勢なためにガス濃度は増大するが、上昇管出口近傍では圧力低下によ

る気泡の体積膨張が優勢になるために気泡内ガス濃度は減少するものと推察される。なお、(4)、(5)式の右辺第1項と第2項がこれらの効果を示している。

Fig. 2 と Fig. 4 では、不活性ガスの吹き込み口での O と C の濃度 C_{gO}^0 、 C_{gC}^0 が同じ場合であるが、不活性ガスの吹き込み速度は 140 NL/min と 30 NL/min との差異があるのに対して環流速度は、それぞれ 30 t/min と 20 t/min との差異に留まっている。また、溶鋼内の各成分の脱ガス率(上昇管出口での C_{iO}^* 、 C_{iC}^* 、 C_{iH}^*)についても、不活性ガス吹き込み速度 Q_g^0 に大きな差異があるにもかかわらず、 Q_g^0 が脱ガス率へ及ぼす影響は比較的小さいことがわかるが、このことは次に述べるような理由によつて説明されよう。

すなわち、ガス吹き込み速度が減少すると、(6)式で示されるように溶鋼と気泡の界面積が小さくなるが、これは脱ガス率を減少させる効果となる。また、 Q_g^0 が減少すると環流速度が小となるが、そのために上昇管内での溶鋼と気泡の滞留時間が大きくなり、これは上昇管出口での脱ガス率を増大させる効果となる。これら2つの効果が相殺しあつて、ガス吹き込み速度の脱ガス率に及ぼす影響が大きく現われてこないものと推察される。

Fig. 3 と Fig. 4 では、ガス吹き込み口での C と H の濃度 C_{iC}^0 および C_{iH}^0 が同じであるが Q_g^0 と C_{iO}^0 は前者では後者のそれぞれ2倍および2.4倍にして計算しており、 C の脱ガス率が前者では後者の約4倍になっている。なお、

Fig. 2 と Fig. 4 における気泡の成長速度の比較の際述べたように、 C_{iC}^0 と C_{iO}^0 とが同じ場合に Q_g^0 が大となると成長速度は減少するはずであるが、Fig. 3 では Q_g^0 が大であるにもかかわらず気泡の成長速度が Fig. 4 よりも大となっている。このことから、 C_{iO}^0 の増加が気泡の成長速度の増加に大きく影響していることが推察される。

ただし、ここに述べた考察は上昇管だけについてであつて、R-H 環流脱ガス装置全体から考えれば、ガス吹き込み速度が脱ガス速度に及ぼす影響については、さらに異なる結果になることが考えられる。

環流速度と不活性ガス吹き込み速度との関係を Fig. 5 に示す。環流速度は溶鋼中の C 、 O の濃度に依存するために、実測値と計算結果とを直接比較することはできな

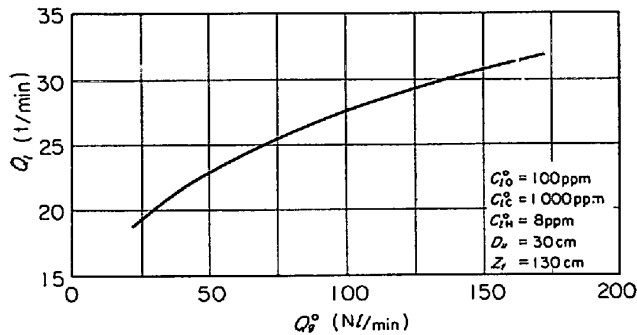
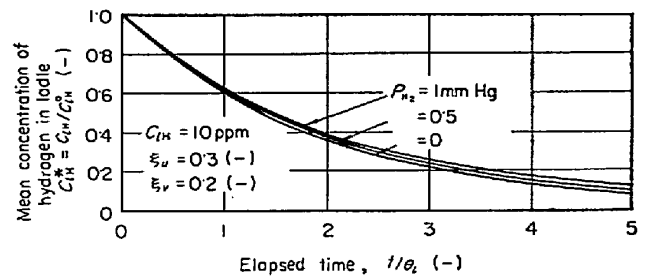


Fig. 5. Relation between circulation-flow rate of molten steel Q_l and blowing rate of inert gas Q_g^0 .

いが、従来、他の研究者によつて報告されている環流速度の実測値²²⁾²³⁾や計算値²⁴⁾と比べて、Fig. 5 に示した計算値はほぼ妥当なものと推察される。

すなわち、宮川ら²²⁾、渡辺ら²³⁾は、RI を使用して環流速度 Q_l を測定し、 Q_l と不活性ガスの吹き込み速度 Q_g^0 との間に明確な関係があることを認めており、宮川ら²²⁾は $D_u = 20$ cm で $Q_g^0 = 100 \sim 300$ NI/min の範囲で $Q_l = 10 \sim 22$ t/min、渡辺ら²³⁾は $Q_g^0 = 50 \sim 130$ NI/min のとき $Q_l = 14 \sim 21$ t/min を報告している。最近、渡辺ら²⁴⁾は実測値を利用して環流速度を理論的に求め、実測値をほぼ満足できる計算結果を得ている。この渡辺らの理論では、溶鋼の上昇速度を上昇管全長にわたつて一定と仮定し、運動方程式中の速度項および重力項を無視することにより、流体の摩擦項が上昇管内の気泡のホールド・アップに比例するという式を採用し、実測値に基づいて比例係数を求めて環流速度を得ている。その計算結果は、 $D_u = 27$ cm で $Q_g^0 = 50 \sim 300$ NI/min のとき $Q_l = 10 \sim 25$ t/min、 $D_u = 32$ cm で $Q_g^0 = 50 \sim 300$ NI/min のとき $Q_l = 10 \sim 35$ t/min となつている。さらに、渡辺ら²³⁾は、上昇管での脱ガスについて単一気泡に基づいて理論解析を行ない、環流速度の解析²⁴⁾を加味して、R-H 脱ガス装置全体による脱ガス速度と操作条件の関係を求めている。本研究では、Fig. 5 に示したように、 $D_u = 30$ cm で $Q_g^0 = 25 \sim 170$ NI/min のとき $Q_l = 18.5 \sim 32$ t/min となつている。

最後に、脱ガス現象に及ぼす真空槽内圧力の影響について考察する。本研究で示した計算方法では、真空槽内の圧力 P_r の変化が数 mmHg 程度の場合には、 Q_l や脱ガス率に及ぼす P_r の影響を定量的に検討することは計算の精度の上から無理である。ただし、上昇管と真空槽での脱ガス過程を単純なモデルで表現し、これに取鍋での流動状態を考慮して、R-H 脱ガス装置全体としての脱ガス速度を推算した結果²⁶⁾、 P_r が 1 mmHg 以下で



Parameters: $\xi_u \equiv \alpha k_u Q_g \theta_u / D Q_l$, $\xi_v \equiv k_v a_v \theta_v$ (-)

Fig. 6. Effect of pressure in vacuum chamber on the degassing rate of hydrogen in molten steel.

あれば、脱ガス速度に P_r はほとんど影響しないことがわかつた。H の脱ガスについての計算の一例を Fig. 6 に示す。この図から、水素分圧 P_{H_2} が 1 mmHg 以下であれば、取鍋内の溶鋼中の H の濃度はほとんど変化していないことがわかる。

このことは、真空槽での脱ガスについて考えれば、1 mmHg の水素分圧と平衡する溶鋼側の H の界面濃度は約 1 ppm であり、この値は溶鋼中の水素濃度 (Fig. 6 の計算では初期濃度 $C_{H^0}^0 = 10$ ppm) と比較して非常に小さいこと、また上昇管内での脱ガスについて考えれば、1 mmHg 程度の圧力変化が管内溶鋼の静圧に及ぼす影響は僅少であることから理解できよう。

5. 結 言

R-H 環流脱ガス装置における溶鋼の環流速度と上昇管での脱ガス速度を求めるための数学的モデルを展開した。このモデルに基づいて数値計算を行なつた結果、溶鋼の環流速度の計算値は、他の研究者によつて従来報告されている実測側や計算値と比較してほぼ妥当な結果が得られた。

上昇管における脱ガス率については、計算値と直接比較できるような実測値が発表されていないために、本モデルの妥当性を検討することはできなかつたが、本報では、上昇管内における溶鋼中の C, O, H の濃度の軸方向分布を求め、不活性ガスの吹き込み速度の影響について考察した。

さらに、真空槽内での脱ガスプロセスに対する数学的モデルを確立して、本報に示した上昇管内での脱ガスのモデルを確立して本報に示した上昇管内の脱ガスのモデルと結合させることによつて実測値との比較が可能となると考えられる。

記 号

- A : 上昇管断面積 (cm²)
a : 上昇管内混相の単位体積当たりの気泡と

溶鋼間の界面積 (cm^2/cm^3)	文 献
a_v : 真空槽での溶鋼の単位体積当たりの 表面積 (cm^2/cm^3)	1) 加藤: 化学工学, 26 (1962) 10, p. 1068
C_{gi} : 気泡中の不活性ガスの濃度 (mol/cm^3)	2) 植田: 日本機械学会論文集, 23 (1957) 8, p. 553
C_{gj} : 気泡中での j 成分 ($j=\text{CO}, \text{H}_2$) の濃度 (mol/cm^3)	3) G. W. GOVIER, B. A. RADFORD, and J. S. DUNN: Can. J. Chem. Eng., 25(1957) 8, p. 59
C_{gj}^* : 気泡中での j 成分の無次元濃度 (-)	4) G. W. GOVIER and W. L. SHORT: Can. J. Chem. Eng., 36 (1958) 10, p. 195
C_{lk} : 溶鋼中での k 成分 ($k=\text{C}, \text{O}, \text{H}$) の濃度 (mol/cm^3)	5) 勝原: 日本機械学会論文集, 24 (1958) 12, p. 1050
C_{lk}^i : 溶鋼中での k 成分の界面濃度 (mol/cm^3)	6) L. E. GILL, G. F. HEWITT, and P. M. C. LACEY: Chem. Eng. Sci., 20 (1965) 2, p. 71
C_{lk}^* : 溶鋼中での k 成分の無次元濃度 (-)	7) A. H. STENNING and C. B. MARTIN: Trans. Amer. Soc. Mech. Eng., 90 (1968) 2, p. 106
D : 気泡の直径 (cm)	8) 佐々木: 化学工学, 28 (1964) 2, p. 117
D^* : 無次元気泡直径 (cm)	9) 藤井, 鞭: 鉄と鋼, 56 (1970) 5, p. 558
D_{lk} : 溶鋼中での k 成分の分子拡散係数 (cm^2/sec)	10) P. NILLES: J. Iron Steel Inst., 202 (1964) 7, p. 601
D_u : 上昇管の内径 (cm)	11) K. SCHWERDTFEGER: Trans. Met. Soc. AIME, 239 (1967), p. 134
f : 上昇管の管壁における摩擦係数 (-)	12) P. M. SHURYGIN and V. I. KRYUK: Russ. Met. Mining, (1963) 3, p. 53
g : 重力加速度 (cm/sec^2)	13) I. A. NOVOKHATSKII and G. S. ERSHOV: Izvestiya Acad. Nauk SSSR, Met. Ser., (1963) 2, p. 43
k_{lk} : 気泡周辺の溶鋼側での k 成分の物質移動係数 (cm/sec)	14) P. L. McCARRON and G. R. BELTON: Trans. Met. Soc. AIME, 245 (1969), p. 1161
k_u : 上昇管での溶鋼側物質移動係数 $= k_{lk}$ (cm/sec)	15) D. W. MORGAN and J. A. KITCHNER: Trans. Farad. Soc., 50 (1954), p. 51
k_v : 真空槽での溶鋼側物質移動係数 (cm/sec)	16) V. I. KOZLOV, A. F. VISHKAREV, A. G. ZILBERMAV, and V. I. YAVOISKÜ: Izvest. Vysshikh. Ucheb. Zavedenü, Chernaya Met., (1961) 11, p. 65
P : 上昇管内の混相流の圧力 (dyne/cm^2)	17) Iron Steel Inst.: Vacuum Degassing of Steel, (1965), p. 29 [Iron Steel Inst.]
P_v : 真空槽内の圧力 (dyne/cm^2)	18) N. M. EL TAYEB and N. A. PARLEE: Trans. Met. Soc. AIME, 239 (1967), p. 1345
P_{zf} : 上昇管出口での混相流の圧力 (dyne/cm^2)	19) R. HAMRIN and F. de KAZINCZY: Jernkont. Ann., 137 (1953), p. 224
ΔP_{zf} : 上昇管出口での圧損失 (dyne/cm^2)	20) 化学工学協会: 化学工学便覧, (改訂第三版), (1968), p. 105, p. 106, [丸善]
Q_g : 上昇気泡の容積流量 (cm^3/sec)	21) I. LEIBSON, E. G. HOLCOMB, A. G. COCOSO, and J. J. JACOMIC: A.I. Ch. E., J. 2 (1956), p. 296
Q_l : 溶鋼の環流速度 (cm^3/sec)	22) 宮川, 野村, 野崎, 足立, 岸田, 森井: 鉄と鋼, 53 (1967) 3, p. 302
t : 経過時間 (sec)	23) 渡辺, 渡辺, 浅野, 中山, 宮川, 野村: 鉄と鋼, 50 (1964) 11, p. 1773
u_l : 溶鋼の上昇速度 (cm/sec)	24) 渡辺, 浅野, 佐伯: 鉄と鋼, 54 (1968) 13, p. 1327
u_r : 気泡と溶鋼との相対速度 (cm/sec)	25) 渡辺, 浅野, 佐伯: 鉄と鋼, 53 (1967) 3, p. 297
z : 不活性ガス吹き込み点から上方への距離 (cm)	26) 藤井, 鞭: 鉄と鋼, 55 (1969) 3, S. 124
z_f : 不活性ガス吹き込み点から上昇管出口 までの距離 (cm)	
α : 定数 (-)	
ε : 上昇管での気泡の容積比率 (-)	
θ_l : 取鍋内での溶鋼の平均滞留時間 (sec)	
θ_u : 上昇管内での溶鋼の平均滞留時間 (sec)	
θ_v : 真空槽内での溶鋼の平均滞留時間 (sec)	
ξ_u : 上昇管の脱ガス能力を表わすパラメータ (-)	
ξ_v : 真空槽の脱ガス能力を表わすパラメータ (-)	
ρ_g : 気泡の密度 (g/cm^3)	
ρ_l : 溶鋼の密度 (g/cm^3)	

(添字) C: 炭素, CO: 一酸化炭素, g: ガス, H: 水素, l: 溶鋼, °: 初期値