

(78) R-H環流脱ガス法の解析のための基礎式

(R-H環流脱ガス法の理論的解析—I)

富士製鉄, 広畑製鉄所

渡辺秀夫・浅野鋼一・○佐伯 毅

Basic Equation for the Analysis of R-H Circulating Flow Degassing Process

(Theoretical analysis of R-H circulating flow degassing process—I)

Hideo WATANABE, Kōichi ASANO
and Tsuyoshi SAEKI

List of symbols

- \underline{C} carbon dissolved in liquid metal
 C solute concentration
 $[C]$ carbon concentration
 d diameter of nozzle
 D_G diffusion coefficient in gas
 D_L diffusion coefficient in liquid
 D_{bs} average bubble diameter
 g acceleration due to gravity
 H the distance from the gas injection nozzle of up-leg to the free surface of liquid metal
 k over-all mass transfer coefficient
 k_G mass transfer coefficient of gas side at the interface
 k_L mass transfer coefficient of liquid side at the interface
 K equilibrium constant
 m_0 moles of a initial bubble
 n total number of sections
 N number of nozzles
 \underline{O} oxygen dissolved in liquid metal
 $[O]$ oxygen concentration
 P_{CO} pressure of CO gas, in a bubble
 Q_j CO gas generated during the section
 r bubble radius
 Re_n gas Reynolds number at the nozzle
 S surface area of a bubble
 t surface life
 u floating velocity of a bubble
 u_G relative velocity between a bubble and liquid steel
 u_L velocity of liquid metal in the up-leg
 $Y = H/n$
 Z_j passing time of a bubble at the j th section
 δ bubble size
 σ surface tension
 ρ density
 $\Delta\rho$ difference in density of liquid and gas.
 the subscript i is for liquid-bubble interface, and superscript $*$ is for concentration at the equilibrium with pressure of CO in a bubble and j is the ordinal section number.

1. 緒 言

R-H 環流式脱ガス法については多くの報告¹⁾²⁾があ

るが、それらは装置の定性的な説明や操業成績の発表に留まるといつて良く、脱ガス現象の解析にはいまだ着手されていない。

本装置は上昇管にアルゴン等のガスを吹込む点に特徴があり、これが起動力となつて溶鋼は、取鍋→上昇管→真空槽→下降管→取鍋、のような経路にて循環を行う。上昇管に吹込まれた気泡→溶鋼から \underline{C} , \underline{O} が拡散して CO を発生する現象も起こる。この発生の程度は当然のことながら \underline{C} , \underline{O} の濃度に依存し、また気泡の粒径や溶鋼の流れの状態、速度等の影響も受ける。真空槽内の圧力は数十ないし数 torr であるので、気泡の受ける圧力はほとんど溶鋼静圧のみであるから、浮上の末期、すなわち自由表面近辺にて急激に増大する。このような現象を解明するため簡単なモデルを設定し、解析を試みた。

2. R-H 環流脱ガス装置の概要

Fig. 1 に本装置の概略図を示す。本体は脱ガス槽とその下部の 2 本の浸漬管よりなる。この浸漬管は取鍋内の溶鋼中へ浸漬される、脱ガス槽内を減圧にすると取鍋から溶鋼が脱ガス槽内へ侵入する。一方の浸漬管に Ar 等のガスを吹込むと管内の嵩比重が小さくなり、全体として上方へ移動を始める。したがつて他方の浸漬管には逆に下向きの流れを生ずる。前者を上昇管、後者を下降管と呼ぶ。上昇管に吹込まれた Ar ガスを核として溶鋼から CO の発生が生じ、吹込 Ar 量の数倍ないし数十倍に達することが予想される。これによつて環流はさらに促進されるが CO 発生は単に Ar ガスを核として発生するのみでなく、次の 3 種が考えられる。

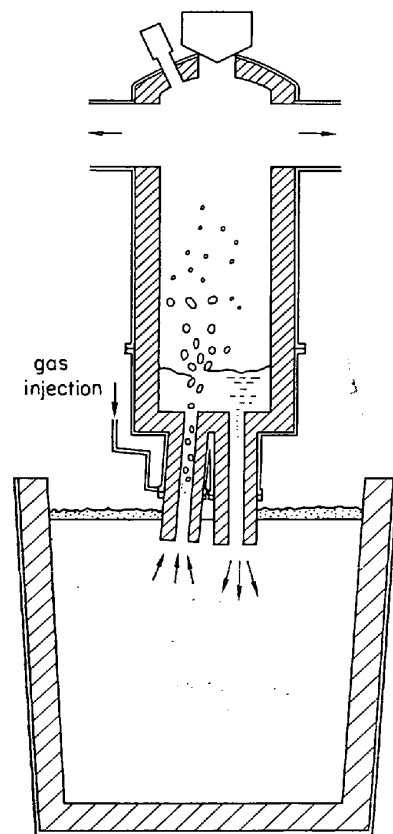


Fig. 1. Principle of R-H circulating flow vacuum degassing process.

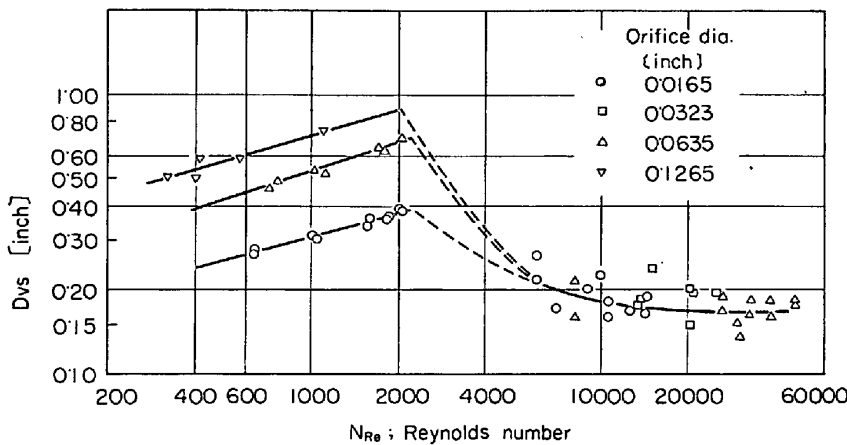


Fig. 2. Bubble dia. Dvs vs. Reynolds number³⁾.

Table 1. Some examples of bubble size obtained from Fig. 2 and equation (1) where N; number of nozzles, d; nozzle dia., Ar; amount of gas injected.

N[-]	d [cm]	Ar 100NI/min		Ar 200 NI/min	
		Ren [-]	δ [cm]	Ren [-]	δ [cm]
10	0.1	3,600	0.813	10,650	0.683
10	0.05	7,200	0.687	21,300	0.679
50	0.1	720	0.582	2,130	0.836
50	0.05	1,400	0.735	4,260	0.710

- (1) 上昇管に吹込まれたガス (アルゴン等) を核として CO を発生する場合.
- (2) 上昇管, 下降管および真空槽壁のレンガを核として CO を発生する場合.
- (3) 真空槽に露出した溶鋼表面から CO を発生する場合

溶鋼の環流を促進するのは主として (1) であるが, 脱ガスの観点からすればいずれも重要なものである. いずれが脱ガス反応の主体であるにせよ, 溶鋼は下降管に入るまでには C , O は脱ガスにより低下している. 従来, 真空処理された鋼は一度の循環で, ある一定脱ガス度にまで達するものと考えられていた. すなわち処理に要する時間の長短は取鋼内での混合状況に依存するものであると考えられていた¹⁾²⁾. しかし, 下降管の C , O 濃度は上昇管入口での濃度や, 処理時間と共に変わるものであると考える方がより一般的である.

3. 脱ガス機構モデル

脱ガス槽内での反応はかなり複雑であるので, これを総合的に論ずることはきわめて困難である. そこで解析の手始めとして, 溶鋼中に吹込まれた一つの気泡の挙動を以下に述べるモデルにしたがつて電子計算機により解析した.

3.1 気泡の生成時の大きさと形状

LEIBSON³⁾ らは水中に空気を吹込む実験を行ない, 生成気泡の大きさを測定した. ノズルは上向きノズルである. 結果を Fig. 2 に示す. また MAIER⁴⁾ は液滴に関する研究を気泡に拡張し, 気泡は球形であること, 液

は孔を完全に濡らすことを仮定して, 気泡がちぎれる際の付着力と浮力の約合より, 低ガス吹込量の時の気泡径を計算した結果, 次式を得ている.

$$\delta/d = 1.82(\sigma/gd^2\rho)^{1/3}, \text{ Ren} < 220 \dots\dots\dots (1)$$

これらの文献を参考にして気泡径の数例を試算すると Table 1 のようになる. これらの結果から見ると N の数と d の大きさにより ren の値を種々変えることができるが N が多くなると, ren が小さくなり, 生成する気泡は大きくなる. ノズルをあまり小さくすると, 地鉄により目詰りを生ずる心配があるので, これらの兼合が大切である.

気泡の形状は常に球形であるものと考え分裂体は行なわないものとした.

3.2 気泡の上昇速度

液体中の気泡の上昇速度の測定は多数⁵⁾ 行なわれているが, 溶鉄のような高比重の場合のデータはないので, 既存の実験式を密度補正して用いる.

$$u_G = 30.6\sqrt{r/d\rho} \text{ [cm/sec]} \dots\dots\dots (2)$$

この式は静止液に対するものであるが, 液流動がある場合には, 液の上昇速度を u_L として気泡の浮上速度 u は

$$u = u_L + u_G \dots\dots\dots (3)$$

にて表わされるとする.

3.3 物質移動係数

物質移動係数は気泡内部の攪乱や気液界面の振動, 界面積の大きさの変化等多くの因子に左右される. しかし近似的に Higbie の浸透説が成立つと仮定する. 溶鋼中の C , O はそれぞれ気泡界面に拡散して, 界面にて CO となりさらに気泡本体へ拡散する.

気液界面においては液濃度 C_i と気相中の CO 分圧 P_{CO} との間に平衡関係が成立っているものとする.

$$[C]_i \cdot [O]_i = K P_{CO} \quad K = 0.0024[(\text{wt}\%)^2/\text{atm}] \dots\dots\dots (4)$$

P_{CO} に平衡な C , O の濃度をそれぞれ $[C]^*$, $[O]^*$ とすると,

$$[C]^* \cdot [O]^* = K P_{CO} \dots\dots\dots (5)$$

となり, また

$$1/k = K/[C]k_G + 1/k_L \dots\dots\dots (6)$$

なる関係がある. $1/k_L$ が液側抵抗であり $K/[C]k_G$ がガス側抵抗である. これらの大きさを比較するため, k_G , k_L が次式で表わされるとする.

$$k_G = 2\sqrt{D_G/\pi t}, \quad k_L = 2\sqrt{D_L/\pi t} \dots\dots\dots (7)$$

$[C] = 600 \text{ ppm}$ にて考えれば

$$(K/[C]k_G)/(1/k_L) = 5.6 \times 10^{-7} \dots\dots\dots (8)$$

となり液側抵抗が主なる拡散抵抗であることがわかる. したがって

$$k = k_L \dots\dots\dots (9)$$

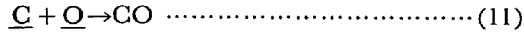
とおく. 界面の寿命は気泡直径を気液の相対速度で除した値で近似する.

$$t = 2r/u_G \dots\dots\dots (10)$$

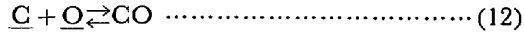
3.4 推進力

Ar ガス吹込時は瞬間的に Ar 気泡が生成するものと

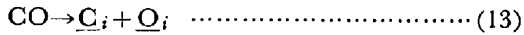
考えれば、気泡内の初期 CO 含有量は零である。気泡には時間とともに CO が発生して来るので P_{CO} はしだいに大きくなる。しかるにしだいに浮上して来ると急速に体積が大きくなり、CO 発生量よりも体積増大の影響が大きくなって P_{CO} は減少する。吹込直後では



なる反応が起るが P_{CO} が高くなると



で表わされるように可逆反応になる。この場合界面では



なる形にて反応が起こるものと考えれば、CO の解離による $[\underline{C}]_i$ と $[\underline{O}]_i$ とは等モルになる。すなわち

$$[\underline{C}]_i/12 = [\underline{O}]_i/16 \dots\dots\dots (14)$$

と表わされる。これはまた別の見方からすれば溶鋼中の \underline{C} , \underline{O} が等モル濃度の場合には CO 発生による \underline{C} , \underline{O} の減少を生じてもやはり液中での \underline{C} , \underline{O} は等モル濃度を保っているの、気液界面にて (14) 式が成立つことは十分に予想される。したがって、 $[\underline{C}]_i \times [\underline{O}]_i = [\underline{O}]_i^2 \times 12/16 = 0.0024 P_{CO}$ となり

$$[\underline{O}]_i = 566\sqrt{P_{CO}}, [\underline{O}]_i \text{ ppm}, P_{CO}; [\text{atm}] \dots\dots\dots (15)$$

と表わされる。このようにして求めた $[\underline{O}]_i$ と溶鋼本体の濃度 $[\underline{O}]$ との差が CO ガス発生 の推進力となる。

$$\text{推進力} = [\underline{O}] - [\underline{O}]_i \dots\dots\dots (16)$$

まったく同様にして推進力 $= [\underline{C}] - [\underline{C}]_i$ と表わすこともできる。

3.5 計算方法

ガス吹込位置において瞬時に半径 r の気泡が生成するものと仮定する。吹込位置から溶鋼表面までの距離を H とし、 H を n 等分し、それを Y とする。各分割点を $0, 1, \dots, j, \dots, n$ とする (0 は吹込位置, n は表面)。下から $j+1$ 番目における物質移動量は

$$Q_{j+1} = 455 \times 10^{-9} k_j S_j Z_{j+1} ([\underline{O}] - [\underline{O}]_{ij}) \dots\dots\dots (17)$$

ただし、 $k_j = 0.0579 r_j^{-1/4}$, $S_j = 4\pi r_j^2$,

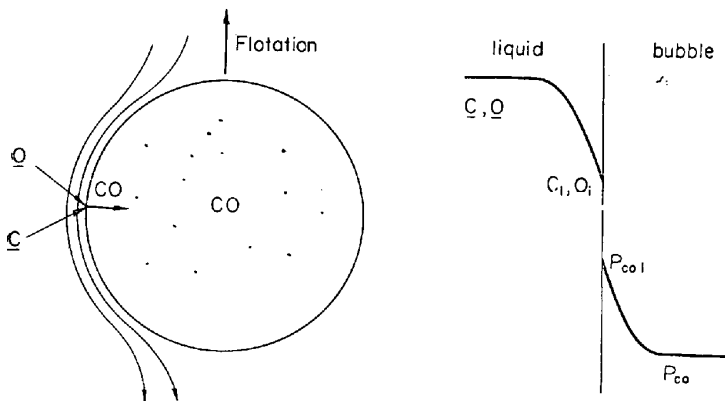


Fig. 3. A diagram of diffusion of carbon and oxygen dissolved in liquid metal to the surface of a bubble.

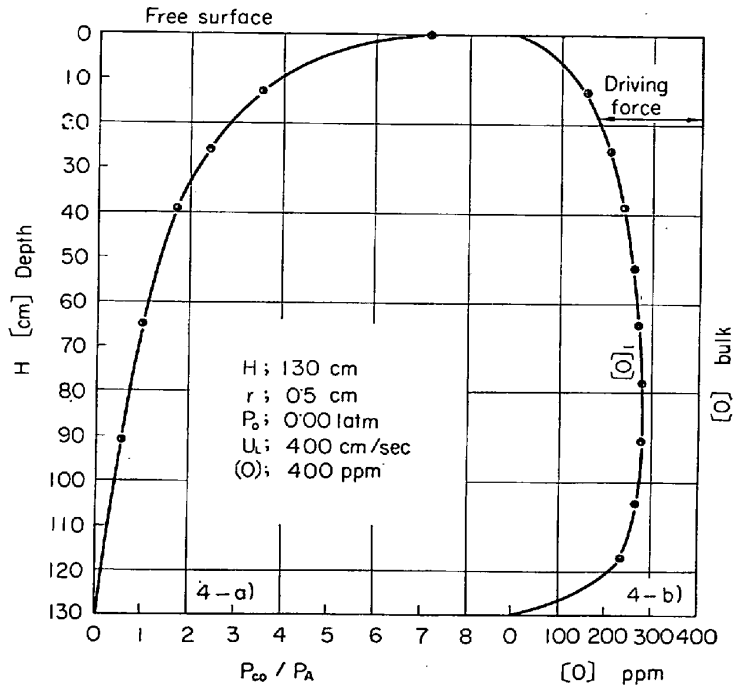


Fig. 4. Degassing phenomena with a bubble.

4-a) The change of CO generated in a bubble during the flotation through the bath of depth H . P_{CO}/P_A is a ratio of partial pressure of CO and inert gas initially injected.

4-b) The change of effective driving force, $[\underline{O}] - [\underline{O}]_i$, during the flotation.

$$Z_{j+1} = Y/u_j = Y / (u_L + 81 \cdot 1V\sqrt{r_j}),$$

$$[\underline{O}]_{ij} = 222,000 \sqrt{3 \sum_{i=1}^j Q_i / (4\pi r_i^2)},$$

$$r_j = \sqrt[3]{366 \cdot 2 (m_0 + \sum_{i=1}^j Q_i) / (P_0 + 0.00690(n-j)Y)}$$

にて表わされる。すなわち n 等分した後、その 1 分割区間における物質移動量をその 1 段前における気泡の性状にて計算していかうとするものである。

初期条件として、ガス吹込口の深さ h , 気泡径 r , 真空槽圧 P_0 , 溶鋼中の \underline{C} , \underline{O} 濃度, 液流速 u_L を与えなければならない。

4. 計算結果の一例

分割を 50 段として計算した結果の一例を Fig. 4 に示す。これは溶鋼中 $[\underline{O}] = 400$ ppm の場合であるが、気泡は浮上の初期と末期以外は 200~300 ppm 相当分の CO を含有することがわかる。すなわち推進力は 100~200 ppm にしか達しないことがわかる。また CO は溶鋼表面近傍になって急速に発生することが知られる。

5. 結 言

R-H 真空脱ガス機構解明のため、一つの手法として、溶鋼内へ吹込まれた気泡を核として CO を発生する現象をモデル化し、計算機により解析する手続きを述べた。詳細な計算結果は次報にゆずる。

文 献

1) Technical Report of Fuji Steel, 13 (1964),

- p. 597
- 2) H. MAAS : Rev. Mét., 60 (1963), p. 421
 - 3) LEIBSON, et al. : A. I. ch. E. Journal, 2 (1956), p. 296
 - 4) C. G. MAJER : U. S. Bur. Mines Bull, (1927), p. 260
 - 5) W. SIEMENS : Chemie Ing. Tech., 26 (1954), p. 479, p. 614

(79) 単一気泡による脱ガス

(R-H環流脱ガス法の理論的解析—II)

富士製鉄, 広畑製鉄所

渡辺秀夫・浅野鋼一・○佐伯 毅

Degassing by a Bubble

(Theoretical analysis of R-H circulating flow degassing process—II)

Hideo WATANABE, Koichi ASANO

Tsuyoshi SAEKI

1. 緒 言

R-H 真空脱ガス装置の解析の手掛りとして, 溶鋼中に吹込まれた単一気泡が浮上の過程においていかなる挙動を示すかを, モデル計算によつて解析する基礎式を第1報にて提出した. この方法にしたがつて, 種々の条件下における挙動を解析したのでその結果を報告する.

2 酸素濃度の影響

以下の計算はすべて 50 段分割として行なつた.

Fig. 1は溶鋼の上向き流速を媒介変数とし, 縦横軸にそれぞれ CO ガス発生量と溶鋼中の酸素濃度を取り, それらの関係を示した. U_L が小さいときには CO 発生

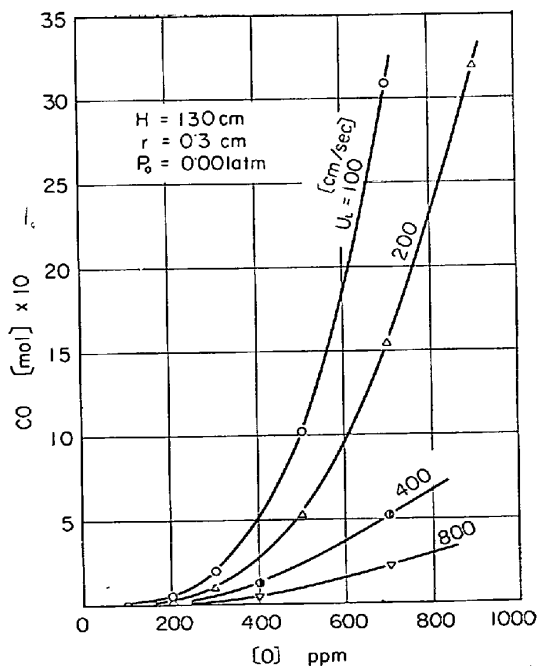


Fig. 1. Relation between oxygen content and CO gas generated.

は [O] の増加と共に急激に大きくなる. $U_L=100$ cmの時を考えてみると, [O]=700 ppm で $CO=30 \times 10^{-5}$ mol 発生しているのに対し, [O]=350 ppm では $CO=3 \times 10^{-5}$ mol しか発生していない. すなわち [O] の濃度が 1/2 になることによつて, CO発生量は 1/10 に激減してしまうのである, さらに [O]=100 ppm になると $CO=0.09 \times 10^{-5}$ mol になり, 700 ppm の場合の 1/300 にしか達しないことがわかる. これはむしろ CO がほとんど発生しない状態であると見てさしつかえない. このことから考えて, 溶鋼中の O, C を CO の形で除去する場合, 100 ppm 程度以下にすることはかなりむつかしいことがわかる.

3. 液流速の影響

U_L が大きくなると CO 発生量は急減する. これは気泡が液から浮上除去される速度が速くなり, 液中の気泡保有量が少なくなることによる. CO 発生量を多くしようとする場合には溶鋼の流速を適度に低くおさえておく方が良いと言える. 溶鋼の流速があまり小さくなると, 取鍋へ環流した時取鍋内を混合する力がなくなり, 取鍋内不均一や環流の短絡現象の原因となるので, これらを考慮した上で, 十分に小さい方がよい.

4. 吹込深さの影響

Fig. 3 に吹込深さの影響を示した. 同一直径の気泡が深さに無関係に生成するとした場合, 気泡 1 個当たりの CO 発生量は深さの増加とともに増加する. ほぼ H に比例すると考えても良い. しかし, 気泡直径が同一ということは静圧が異なる点を考えれば, けして気泡 1 個の持つモル量が等しいという意味ではないから, これを Ar 1 モル当たり CO 発生量に換算して図示すれば H がむしろ小さい方が CO 発生量が多いことがわかる. すなわち浅い位置から吹込む方が気液の接触時間は短くなるけれども, むしろ気泡が小さくなり, この効果が大きいため, 全体として, CO 発生を有効に行ないうることを

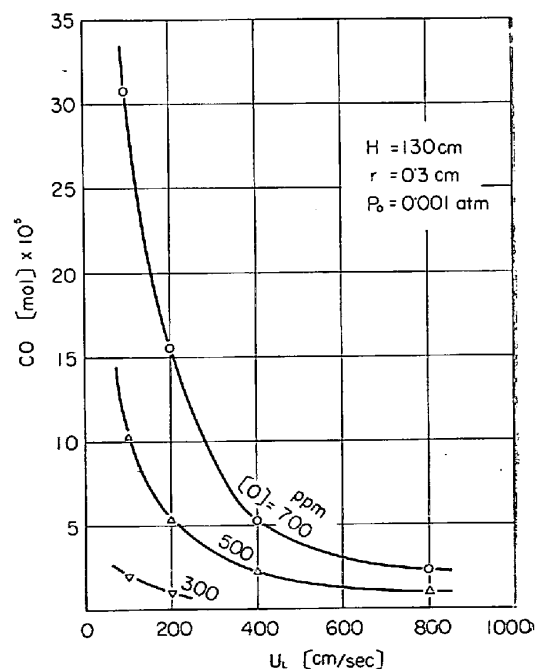


Fig. 2. Effect of flow velocity in up-log.