

$$U \cong \frac{(1-x)^2}{9} \cdot \left(\frac{C_0}{C_0 - C_1} \right)^2 \cdot \frac{a^3}{Dt^2}$$

これは $D = 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$, $t = 0.3 \text{ sec}$, $x = 0.5$, $C_1 = 0$ を代入すると

$$U \cong 300a^3 [\text{cm}/\text{sec}]$$

少し大き目に見積もつてオーダーとして $U \cong (10a)^3$ と考えてよいだろう。

もちろんこの速度は不明ですが、液滴の初期落下速度で近似すれば $U = 830 \text{ cm}/\text{sec}$ になり、 a (半径) が 1 cm のオーダーで 50% 脱水素できることになる。

以上の議論は決して定量的に正確なものではないが対流拡散、すなわち滴内の流動によつて、脱ガス現象を説明し得る余地は残つているといえる。むしろ流滴脱ガス法において滴内部の運動が全くないと考えるのは不自然ではないだろうか。

滴内での気泡の発生は十分考えられるが、以上のようなアプローチでも実際の脱ガス速度の説明が不可能ではない点を指摘した。

講演：環流脱ガス法における脱水素

富士広畑 工博 浅野鋼一・佐伯 毅

【コメント】 東大工 吉沢昭宣・工博 佐野信雄

1. 基礎式導出 ((1)~(13)) において、表面張力による気泡内圧力の項を無視しておられるが、 $\sigma = 1200 \text{ dyne/cm}$ とすれば、 $r_0 = 0.5 \text{ cm}$ として $2\sigma/r = 4.74 \times 10^{-3} \text{ atm}$ に達し P_0 と同程度以上の大きさになる。したがって P_0 を無視しないのなら、この項も無視できないのではないだろうか。

2. 式(15)において「計算を簡単にするために」計算結果を単に α 倍するということが行なわれている。またこれから「真空槽内部で除去される水素量と上昇管においてアルゴンガスを核として除去される水素量とはほぼ等量である」との結論が導かれているが、これは問題があるように思われる。というのは単に定数倍しただけであるから、たとえば k_j を定数倍してみた場合の結果と同じ程度の意味しかないはずで、(1)~(3)のような粗い仮定から出た結果をそのまま実際と比較して、不一致の分は真空槽内部での脱ガスと結論するのは早計と思う。また当然のことながら α はあらゆる実験変数の複雑な関数となるはずで、図8に示されたようなチェックから真空槽内部における脱水素機構の性格を論ずるのは行き過ぎかと思う。ただし真空槽内での脱水素が $[H]^{1.77}$ に比例するという実験結果がこの計算とは独立に存在するのであれば結構である。

【回答】

1. 気泡に加わる圧力は真空槽内部の圧力 P_0 、溶鋼静圧 P_{Fe} 、表面張力 $2\sigma/r$ の和として表わされるが、上昇管の位置によつて圧力が異なってくるから気泡の大きさもまた異なってくる。したがって、上昇管内における気泡の位置と圧力の関係を示すと次のようになる。

H (cm)	r (cm)	P_0 (atm)	P_{Fe} (atm)	$2\sigma/r$ (atm)	$P_0 + P_{Fe} + 2\sigma/r$ (atm)
130	0.5	0.001	0.85	0.0048	0.856
100	0.54	0.001	0.69	0.0045	0.696
50	0.68	0.001	0.34	0.0035	0.345
10	1.15	0.001	0.07	0.0021	0.073
1	3.26	0.001	0.01	0.0007	0.012

(145 cm = 1 atm) ($\sigma = 1200 \text{ dyne/cm}$)

この表から気泡に加わる圧力は実質上 $P_0 + P_{Fe}$ としても、 $2\sigma/r$ が小さいので $P_0 + P_{Fe} + 2\sigma/r$ とほとんど同じになる。

P_0 の値は、この表では 0.001 atm としているが実際操業においては操業時の諸条件によつて $0.1 \sim 0.001 \text{ atm}$ で操業することがあるので無視できない。

2. ご指摘のように α は実験変数の複雑な関数になるので本報告に述べたような簡単な取り扱いでは非常に多くの問題があることは十分考えられる。しかしながら単一気泡モデルから計算した値と実測値とを比較して α というパラメーターを導入したわけで、もし α の値が $1 \sim 10$ 程度でなく極端に大きい、また極端に小さい場合にはこのような計算を行なつてもあまり意味がなくなることになる。しかしながら α の値として $1 \sim 10$ 程度の値が得られているので環流脱ガス法の脱ガス現象を論ずる上での1つの目安として単一気泡モデルによる計算結果を用いようと考えると、真空槽内の脱ガス量と上昇管内の脱ガス量を分離するための実験方法もある程度見出すことができたのである。

しかしながら本質的には気泡による脱ガスと真空槽内部での脱ガスとは、それぞれに影響をおよぼす要因も異なるので両者はそれぞれ独立して別個に解析し、それを総合して最終的に脱ガス現象を論ずるほうがより正確な考察ができると考えられる。現在真空槽内部での脱ガス状況を解析するための実験に着手しており今後に残された問題と考える。

【質問】 鋼管技研 大久保益太

われわれは R-H 脱ガス法に関する操業経験がないので明らかでないが、図6に関連しておうかがいたい。

1. (15)式から α をパラメーターとして求められた計算値と実測値を対応して、 $\alpha = 2$ とよく一致しているとされているが、図によれば 5 min 以前については必ずしも一致しているとは考え難い。すなわち、5 min 以内では α は時間に対し次第に減少するという結果のように思われる。

われわれは低炭素鋼を D-H 処理した場合の脱炭経過について取鍋内溶鋼は常に完全混合されるという仮定のもとに計算した結果、脱ガス開始後 4 min 程度までは実測値との対応が異なるという経験を持つており、この理由として処理開始直後では完全混合という条件から大きくはずれた遷移状態にあるのではないかと考えている。

図6における 5 min 以内の状態も同様な現象ではないかと考えられるが、R-H においては処理開始後 α が次第に変化するという何か特別の理由があるのだろうか。

2. 本文では初期溶鋼水素量 5 ppm の場合について

* 鉄と鋼: 55 (1965) 3, S 333~336

計算されたとなつていますが、図では $t = 0$ で 7ppm から始まつております。これはどういうことだろうか。

初期溶鋼水素量が異なれば図 2 より脱水素経過は異なることになるが、計算曲線をそのまま $t = 0$ において 5 ppm のところへ移動させうるとすると、 α は 2 よりかなり小さい値となつてしまうのではないだろうか。

【回答】

1. 図 6 に示した実測値はエゼクターの起動開始を 0 min として時間経過と成分変化の関係を示したものである。したがつて、0 min から数分間は減圧が進行しつつある状況における成分変化である。一方計算によつて得られた線図は、0 min においてすでに 10^{-3} atm の減圧下にあるとした場合の線図である。したがつて、両者の間に相違があつたとしても当然のことと考えられる。

われわれは、この真空槽内の圧力が定常になるまでの時間を 3.5~4 min くらいとみており、この間の計算値と実測値の比較は全く意味のないものである。なおご指摘のように、この間においては環流状況も定常的ではなく、環流量も少ないと考えられるので、取鍋において完全混合という状態にはないものと思われ、図 6 の 0~4 min くらいまではこの両者の影響が出ているものと思われる。

2. 講演概要集 (55 (1969) 3, S 333) の S 335 上から 26 行目、初期溶鋼水素量 5 ppm を 7 ppm に訂正していただきたい。

【質問】 神鋼中研 工博 理博 成田貴一

本論文においては、環流脱ガス法における脱水素機構について非常に興味ある取り扱いをされており、有益な知見をあたえるものと思うが、下記の諸点についてご教示またはご意見を賜りたい。

1. 気泡上昇速度について

本論文では約 130cm の溶鋼深さを 50 等分し、 $i \rightarrow j$ に移動する Ar 気泡の成長とそれにともなう気泡の水素吸収力を計算の根拠とされているが、この場合、

(1) 静止浴に対する気泡の上昇速度 U_G の計算には $U_G = (8g r_i \Delta \rho / 3C_D \rho)^{1/2}$ を用いられている。溶鋼中に吹込まれた Ar 気泡は膨脹しながら上昇し、溶鋼表面ではその体積は約 1000 倍程度になり、それに対応して気泡内気体の密度は減少するはずである。したがつて数学的には溶鋼と気泡との密度差 $\Delta \rho$ は $\Delta \rho_j$ とすべきであると思います。

(2) 上昇管内における気泡の上昇速度 U_j を $U_j = U_L + U_G$ であらわしておられるが、 U_G については上記 (1) にもとづく計算上の問題点がある。また吹込む Ar 量を約 200 ml/min とすれば、吹込み口に入る Ar 量は約 3.3 ml/sec であり、いま真空槽内の圧力を 10^{-3} atm、溶鋼の静圧を 0.9 atm、この気泡が断熱的に膨脹しながら上昇するとすれば、溶鋼表面では約 3000 l/sec にもなる。しかも初期気泡が比較的小さく、容易に熱的に平衡するとすれば、さらに数倍に膨脹することになる。このように考えると吹込み口付近に比べて、溶鋼表面付近における U_L の値は非常に大きくなり、逆に Z_j の値はもつと小さくなるのではないだろうか。このような考えにもとづいて計算すると、 m_j の値は非常に小さくなり、結局 (15) 式で計算される α の値はもつと大きく

なる。すなわち真空槽内における脱水素反応のほうが効果的に進行し、環流脱ガス法そのものの原理と特長がよく理解できるのではないだろうか。

(3) なお U_G の計算に際し、レイノルズ数 Re が非常に大きく、キノコ状の気泡を生ずる範囲の C_D を用いられている。単独気泡を取扱う laminar flow 領域のモデルに turbulent flow 領域の、しかもその極端な場合の C_D の値を使用されている矛盾をどのように解釈されているのだろうか。

2. 脱水素反応の推進力について

溶鋼中の H が Ar 気泡中に移動する量を計算するのに (10) 式を用いられており、その推進力として $([H] - [H]_{ij})$ を考え、計算によつて図 1 を求められている。これは単独気泡が多量の溶鋼にとりかこまれている場合には成立するが、直径約 30cm 程度の上昇管中に約 3.3 ml/sec 以上の Ar を吹込んだ場合、Ar 気泡による脱水素が効果的に生起すると仮定すれば、上昇管の上部では $[H]$ 濃度はかなり小さくなつてははずであり、したがつて (10) 式における $([H] - [H]_{ij})$ は溶鋼中の $[H]$ 濃度の低下を考慮に入れて $([H]_j - [H]_{ij})$ とすべきであると思う。そうでなければ、環流脱ガス法における Ar 気泡の脱水素力を必要以上に高く評価する恐れがあると考えられる。なお $[H]_j$ は溶鋼深さの $(50 - j)$ 分割点における溶鋼中の $[H]$ 濃度をあらわす。

3. 環流脱ガス法のモデル解析について

当社においても吸上げ脱ガス (D-H) 法と環流脱ガス法とについて一連のモデル解析をおこない、液体の輸送現象および脱ガス機構について比較検討をおこなつた。その場合、環流脱ガス法の実験には直径 30 mm、長さ約 1500 mm の環流ガラス管を用い、その中に溶鉄と同じ粘性をもつたグリセリン水溶液を入れ、上端を回転真空ポンプに接続して系内を減圧に保持し、上昇管の下部にとりつけたオリフィスより気体を上向きまたは横向きに吹込み、気泡の形、合体状況、上昇運動、液体の動きおよび輸送現象などを観察した。オリフィスには直径 0.15~1.1 mm の種々のガラス製キャピラリー管を用いまた laminar flow から turbulent flow 領域にかけての観察をおこなうため、気体を 0.1~30 ml/min の速度また最大 60 ml/min の速度で吹込んだ。その実験結果を要約するとつぎのとおりである。

(a) いずれの場合も現象論的に気泡の合体現象を無視することはできない。

(b) 気体の吹込み流量が大きくなるにしたがつて気泡の合体現象は顕著になり、気泡の合体しはじめる位置は順次上昇管の下方に移行し、上部ではいわゆるキノコの笠状を呈し、極端な場合にはオリフィスの付近ですでに合体現象が生ずる。またそれに対応して液体の上昇運動の速度も順次大きくなる。

(c) 気体の吹込み流量が一定の場合には、オリフィスの直径が大きくなるにしたがつて、上記と同様の現象が観察され、液体の輸送力も大きくなる。

(d) さらに当然のことながら、直径 1 mm 程度の単一のオリフィスから約 200 l/min もの気体を吹込むことは不可能である。

気泡の合体現象は気体の吹込み条件にいちじるしく支

配されるわけであるが、そのほか液体と気体との間の界面張力、液体の運動状態、粘性などにも大きく左右される。なかでも界面張力の影響はかなり大きいと考えられる。当社におけるモデル実験ではグリセリン水溶液を用いているのでこの点が問題となるが、溶鉄や溶鋼とグリセリン水溶液との界面張力の値を比較すると、その差は数 10 倍程度であり気体の吹込み流量による差に比べればその影響は小さく、少なくとも気泡の合体現象の観察に際しては無視できる程度であり、したがってわれわれのモデル実験における観察結果は定性的には環流脱ガス法における実際の現象とそうかけはなれていないと考えられる。

(1) さて浅野氏らの取り扱いにおいては、真空槽内の雰囲気ガスの分析結果から気泡の大きさを割りだし、吹込み口の直径を推算されているが、実際の装置における吹込み口はもつと直径の大きい多数孔ではないだろうか。また約 1 mm 程度の孔であるとすれば、無数の孔たとえば porous brick nozzle などを通して吹込むことになる。このような場合、いずれにしても吹込み口付近ですでに turbulent flow になり、したがって環流脱ガス法の解析に際しては turbulent flow 領域の現象を対象としたモデルを取扱わなければならないと考えられます。

(2) つぎにわれわれのモデル実験におけるレイノルズ数 Re を計算すると、上昇管の下部では 1200~2000 上部では 1500~2100 液面近くでは数 1000 以上の値になります。一方浅野氏らのモデルにおける上昇管の気体吹込み口直下の Re 数を、放射性同位元素を用いて測定された溶鋼の上昇速度¹⁾から計算すると 687×10^5 となり、臨界値をはるかに上まわり、吹込み口をでた気泡はすぐ合体してキノコの笠状になり、気体ピストンを形成し、非常に顕著な溶鋼輸送現象を呈する。このように考えると、実測されたように溶鋼が 150 cm/sec にも達する速度¹⁾でいきおいよく真空槽内に送り込まれる現象もよく理解できる。すなわちこのような状態で短時間内にできるだけ多量の溶鋼を真空槽内に送り込み、槽内において溶鋼表面をできるだけ押しひろげ、効果的に脱ガス処理するのがとりもなおさず環流脱ガス法の原理であり、本質的な特長ではないだろうか。いいかえると単独気泡を仮定し、気泡の合体現象を無視すること自体、またそうした仮定によるモデルを取り扱うこと自体が実際とあまりにもかけはなれているのではないだろうか。

4. 脱水素効果について

最後に図 6 の環流脱ガス法における脱水素効果をみますと約 15 min 間の処理で $[H]$ 量は 5~6 ppm から 3 ppm 程度にしか減少していない。吸上げ脱ガス法の場合、われわれの実績では同濃度の溶鋼を約 15 min 間処理すると容易に 1~2 ppm、平均 1.1 ppm に低下する。すなわち通常操業に比べて脱水素効率が低いように思うが、分析試料採取法の相異によるものかどうか、お教えいただきたい。なお当社の実験では学振法に準じ、石英管採取・急冷法を採用している。

文 献

- 1) 宮川一男, 野村悦男: 鉄と鋼, 53 (1967) 3, p. 302

【回答】

(1) U_G を計算する際の $\Delta\rho$ は $\Delta\rho = \rho_L - \rho_G$ で与えられる。本報告で用いた ρ_L は約 7 g/cm^3 であり、 ρ_G としては 0.002 g/cm^3 である。したがって、 $\Delta\rho = \rho_L$ において計算してもほとんど大きな誤差を生じない。それゆえ理論的には $\Delta\rho_j$ として計算すべきであるが ρ_G の上昇管内の位置による変化は実質上無視している。

(2) 次に本報告においては、はじめに単一気泡の浮上過程における物質移動の現象を考察しているが、その計算の前提の 1 つにガス体積は溶鋼の体積に比して十分小さく、したがって気泡の体積の増大によつて溶鋼の流路が狭くなることはないとしている。しかしながら実操業においては単一気泡ではなく気泡群の現象であり計算を気泡群に拡大する場合には、気泡が溶鋼中に占める体積を無視することはできなくなる。この場合には気泡の膨脹によつて上昇管の上部になるほど溶鋼流路は狭くなり U_L は大となる。このことからご指摘のように Z_j は小さくなるものと考えてよい。

しかしながら (15) 式の G_0 が大きくなると (15) 式はガス吹込量のみならず上昇管断面積、ガス発生量などの複雑な関数形になり、これらを総合的に考察することはきわめて困難である。このような理由から第 1 次の近似として気泡群の現象を単一気泡による解析結果の算術的加算によつて表わしうものとして行なっているのだからにより精度よく考察するためには、ご指摘の点を十分考察しなければならない。

(3) 単一気泡の浮上速度は気泡の大きさや液の物性値によつて、ほぼ一義的に定まるといわれている。いま上昇する気泡の受ける抵抗が浮力とつり合うとすれば次式を得る。

$$C_D \rho_L U_G^2 \pi r^2 / 2 = 4 \pi r^3 g \Delta \rho / 3$$

ここで C_D は気泡の Reynolds 数が定まれば経験的に一定値になるものである。本報告で対象としている気泡の大きさは少なくとも直径 1.0 cm 以上であり、平均数 cm になる。また、気泡の浮上速度は通常数 10 cm/sec といわれている。そこで、 $d = 1 \sim 3 \text{ cm}$, $U_G = 50 \text{ cm/sec}$, $\rho_L = 7.0 \text{ g/cm}^3$, $\mu_L = 7 \times 10^{-2} \text{ g/cm} \cdot \text{sec}$ として概算すれば、

$$\frac{d U_G \rho_L}{\mu_L} = 5000 \sim 15000$$

となり気泡は turbulent 状態であることがわかる。このときには $C_D = 2.80$ なる一定値になることが実験的に求められている。すなわち、本報告においては、はじめに単一気泡の挙動を考察の基礎においたが、その気泡の上昇は turbulent 状態であることを考慮したものであり、このときの気泡形状は決して球ではなくなるはずであるが、これを球に仮定した点がむしろ問題であるといえよう。単一気泡を取り扱っているからといって、これを laminar flow 領域のモデルであるとは断言できないと思われる。

2. 脱ガス槽の入口における水素濃度を $[H]$ 、このときの出口における水素濃度を $[H]'$ 、さらに取銅容量を W 、環流量を V とすれば次の式が成立する。

$$\frac{d[H]}{dt} = \frac{V}{W} ([H] - [H]')$$

ここで、 $W=100\text{ t}$ 、 $V=30\text{ t}$ とし、また図6から $[H]=4\text{ ppm}$ における実測値の濃度の減少勾配から $d[H]/dt$ を求めると、 0.25 ppm/min が得られる。したがってこれらの値を上式に代入すると、 $[H]'=3.2\text{ ppm}$ となる。この $[H]'$ は真空槽における脱水素量も含めた値であるから真空槽における脱ガスが起る前の水素濃度 $[H]_j$ は当然、 $[H]>[H]_j>[H]'$ なる条件を満足しておりそれゆえ、 $[H]_j$ は常に $[H]'$ よりも小さくなることはない。すなわち、 $[H]=4\text{ ppm}$ のときには $[H]-[H]_j$ が 0.8 ppm より大きくなることはない。したがって、推進力を $([H]-[H]_j)$ としたときの誤差は上昇管のガス吹込口で0、上昇管上部で 0.8 ppm であり平均して 0.4 ppm である。この値は上昇管入口における溶鋼の水素濃度の10%程度である。いいかえれば推進力の推定誤差は10%程度であつて本研究の目的からいえば十分無視してよいと考えた。

(1) ご指摘のように、実用装置においては多量のガスを吹込むので気泡の諸現象、および溶鋼流れ現象についてそれぞれ層流であるか乱流であるかを考慮しなければならないであろう。その判定法として、次の4種のReynolds数を考慮しなければならない。すなわち、

Re_n : ガス吹込口における Re 数

Re_d : 気泡に関する Re 数

Re_G : 上昇管内におけるガス流れの Re 数

Re_L : 上昇管内における溶鋼流れの Re 数

である。ここで Re_n は吹込直後における気泡大きさに

関係し、ノズル直径とガス吹込量の関数となるから、装置の様式によつて、層流と乱流との両場合がありうる。 Re_d は気泡の浮上速度に関係し、これは乱流状態である場合がほとんどである。 Re_G は溶鋼の環流速度の原動力の大小を判定する基準であり、環流が脈動流や吹抜け現象を示すことと関係が深く、単純に層流や乱流という表現では云々できない。 Re_L は溶鋼流れにおよぼす抵抗と関係があり、多くの場合乱流である。われわれは、これらの条件を常に念頭において考察したつもりであるが、局部的には大胆な仮定をしたので、実状にそわない部分があることをおことわりしておく。

(2) 気体ピストン現象がR-H装置においておもなる現象ではないかのご指摘であるが、このような現象は、実験室規模の装置においては支配的であろう。しかしながら、工業規模の装置では、相対的にガス吹込量が少なくなり、このような現象の比率は小さくなり、本報告に示した気泡による脱ガスも一つの重要な現象となる。われわれは、これに着目したものであり、ご指摘の事項は今後検討しなければならない問題であると思われる。

4. 本報告における脱水素のデータは操業初期におけるものであつたため、設備的にも操業的にもなお不十分な状態でのものである。現在ではご指摘のように1 ppm以下の水素含有量を確保することは容易である。なお、水素分析は学振法に準じ高温抽出パラジウム管分離法によつた。