

溶鋼の脱水素速度に及ぼす圧力，ガス吹き付けの影響

務川 進*・水上 義正*²

Effects of Pressure and Inert Gas Top Blowing on the Rate of Molten Steel Hydrogen Desorption

Susumu MUKAWA and Yoshimasa MIZUKAMI

Synopsis : The rate of hydrogen desorption from liquid steel bath was measured to investigate the effect of pressure. Experiments of hydrogen desorption from molten steel were conducted using 30kg and 100kg scale induction furnace. Hydrogen desorption reaction was basically controlled by gas phase mass transfer over 1.4 kPa in this experimental condition. The effect of argon gas top blowing on to the free surface of molten steel bath on the gas phase mass transfer coefficient was evaluated. Following dimensionless equation was obtained, assuming 0.33 power of Sc.

$$\text{Sh}(H/d_n) = 0.002\text{Re}^{0.88}\text{Sc}^{0.33}(H/d_c)^{1.39}$$

where H is the distance between free surface of melt bath and nozzle, d_n is inner diameter of nozzle, d_c is inner diameter of crucible, $\text{Sh} = k_G d_n / D_{\text{Ar-X}}$, $\text{Re} = u_g d_n / \nu_g$, $\text{Sc} = \nu_g / D_{\text{Ar-X}}$, k_G is mass transfer coefficient of gas phase, $D_{\text{Ar-X}}$ is diffusion coefficient of diffusing gas, u_g is gas velocity, ν_g is kinetic viscosity of gas.

Key words: steelmaking; secondary steelmaking; ladle metallurgy; hydrogen.

1. 緒言

溶鋼中の水素は、凝固中心部の気泡残留が問題となり、鋼材中に留まれば靱性を低下させ、水素脆性や遅れ破壊を引き起こす有害元素である¹⁾。現在では真空脱ガスを利用した脱水素技術が確立されている。しかし、近年、とくに脱硫処理など、二次精錬における多重処理に伴う温度低下の問題、溶鋼組成の高精度制御、あるいは省エネルギーといった観点から、いっそうの処理技術の高度化が求められており、脱水素反応の律速機構を明らかにして有効な対策に結び付ける必要がある。

従来の研究として、萬谷ら²⁾はキャリアガス流量の高い条件で、脱水素速度は溶鉄側の物質移動速度によって支配されるとした。また、段ら³⁾は大気圧下における不活性ガス吹き付け時の脱水素速度は溶鉄側、ガス側物質移動の混合律速であることを示し、さらに脱水素速度に及ぼす吹き付け条件の影響について検討した。一方、長ら⁴⁾は溶鋼への水素吸収速度は溶鉄側の水素の拡散律速であり、酸素濃度の影響は少ないことを示した。本研究では、減圧下における脱水素実験を行い、圧力の影響を検討し、さらに不活性ガス吹き付けの効果についての検討を行った。

2. 実験方法

2.1 水素分析方法

本研究では、既報⁵⁾に述べた方法により、溶鋼中の水素

濃度を定量した。アルゴンガスと水素ガスの混合ガスを吹き付けて水素濃度を制御した溶鋼の水素分析を行った。水素分圧から計算される平衡水素濃度値⁶⁾と分析値の関係をFig. 1に示すが、とくに高濃度側で、従来の石英管吸い上げ法に比べ、本法では、精度よく水素濃度の定量が可能である。

2.2 減圧下における脱水素実験

実験装置は既報⁷⁾と同一の装置を用いた。すなわち、内容積約4.5 m³の真空タンク内に高周波溶解炉が設置されている。また、真空排気系には排気流量を調整してタンク内圧力を一定に保持するための流量調整バルブが設けられている。内径0.23 mのマグネシア製のつぼを用い、電解鉄

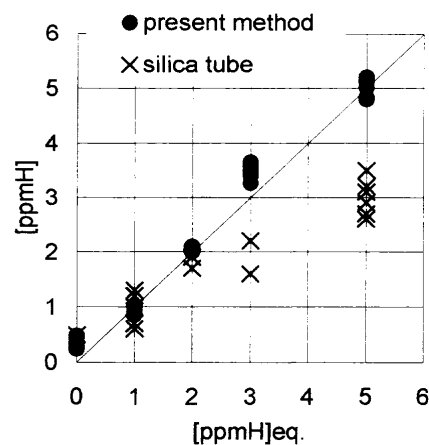


Fig. 1. Relationship between equilibrium hydrogen content and analysed one.

平成13年9月13日受付 平成14年1月22日受理 (Received on Sep. 13, 2001; Accepted on Jan. 22, 2002)

* 新日本製鐵 (株) 名古屋技術研究部 (Nagoya R & D Lab., Nippon Steel Corp., 5-3 Tokaimachi Tokai 476-8686)

*² 新日本製鐵 (株) 名古屋技術研究部 (現: 日本鉄鋼協会) (Nagoya R & D Lab., Nippon Steel Corp., now Iron and Steel Institute of Japan)

Table 1. Target composition of steel melt. (mass%)

Experiment	C	Si	Mn	Al
2.2	0.10	0.25	1.0	0.0
2.3 dehydrogenation	0.10	0.25	1.0	0.0
2.3 denitrogenation	0.10	0.25	0.5	0.0

Table 2. Conditions of argon gas top blowing experiments.

Experiment	W_m (kg)	d_c (m)	$d_n \times 10^3$ (m)	P_t (kPa)	Re	Sc	H (m)
20kg dehydrogenation	20	0.15	4.6	1013	3554~5924	0.18	0.02~0.25
80kg dehydrogenation	80	0.23	4.6	40	2630~3950	0.18	0.1~0.4
	80	0.23	4	80	3554~7109	0.18	0.07~0.2
80kg denitrogenation	80	0.23	4	6.7	1777	0.71	0.1, 0.2
	80	0.23	4.6	13	2370~4898	0.71	0.05~0.3
	80	0.23	4	40	3555~8294	0.71	0.1

80kgを溶解した。さらに脱酸のため、133 Pa以下の真空中で0.1 mass%相当量の黒鉛を添加して30 min間脱酸を行った。その後、アルゴンガスをタンク内に導入して圧力を 6.7×10^4 Paとした。さらに、溶鋼中の水素濃度を調整するため、 TiH_2 試薬を添加した。その後、タンク内を排気して所定の圧力に設定し、脱水素実験を行った。溶鋼中の水素濃度の経時変化は所定の時間間隔にて溶鋼試料を採取し、分析に供した。実験時の溶鋼温度は1873Kとした。溶鋼の目標組成をTable 1に示す。溶鋼の成分は黒鉛、珪素、マンガンを追加して調整した。

2.3 不活性ガス吹付けによる脱水素および脱窒素実験

実験条件をTable 2に示す。溶鋼量20kgの実験では内径0.15 m、深さ0.3 mのマグネシア製のつぼを用いて溶解した溶鋼にアルミナランスを用いて不活性ガス吹付けによる脱ガス実験を行った。脱ガス成分として、本実験の本来の目的である水素のみならず、ガス相中の拡散係数の影響を明らかにするために窒素を用いた実験も行った。所定のアルミナランスから所定流量の不活性ガスの吹付けを行い、脱水素、または脱窒素処理を行った。水素または窒素濃度の経時変化は所定間隔にて溶鋼試料を採取し、分析して調査した。

溶鋼量80kgの実験で用いた装置は2.2と同一のものである。つぼは内径0.23 m、深さ0.4 mのマグネシア製を用いた。両実験とも吹付けガスにはアルゴンガスをを用いた。溶鋼温度は1873Kとした。タンク内の圧力は、目標の圧力にアルゴンガスを導入して調整した。

3. 実験結果

3.1 減圧下における脱水素挙動

Fig. 2に減圧下における脱水素実験の結果を示す。なお実線は後述の計算結果を示す。時間に対して縦軸の水素濃度の対数値は直線的ではなく、溶鋼側の物質移動律速では説明しにくく、界面での化学反応、あるいはガス側の物質移動速度の混合律速であることを示唆する。

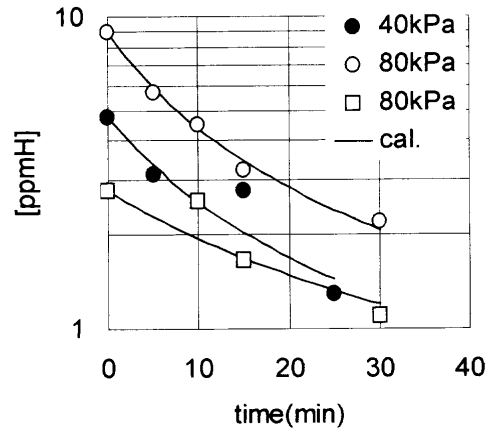


Fig. 2. Change in hydrogen content with time. (80 kg scale experiments without top blow)

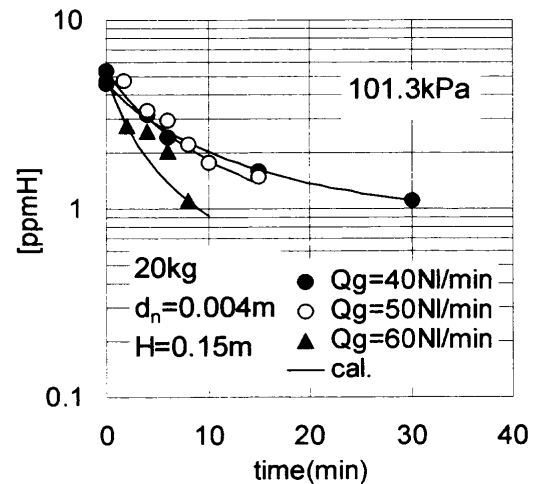


Fig. 3. Change in hydrogen content with time. (20 kg scale experiments with top blow)

3.2 ガス吹付けによる脱ガス実験

Fig. 3に、20kg規模でのアルゴンガス吹付けによる脱窒素実験結果の例を示す。この場合、ガス吹付け量の増加とともに脱窒素速度は増加している。このことから、脱窒素速度はガス側の物質移動速度の影響を受けていることが示唆される。なお、図中の実線は後述の計算結果を示す。

Fig. 4に、80kg規模での減圧下のアルゴンガス吹付けによる脱窒素実験における窒素濃度の挙動を示す。既報⁷⁾において、ガス吹付けを伴わない6.7kPaから67kPaの減圧下の脱窒素反応速度に及ぼすガス側、溶鋼側の物質移動および溶鋼-ガス界面における化学反応速度の影響を評価したが、その結果から、本実験の圧力範囲ではガス側の物質移動、界面の化学反応が主たる律速段階となることが予想される。本実験では不活性ガス吹付けを行っているため、ガス側の物質移動抵抗は減じられているものの、窒素濃度の対数値は時間に対して直線関係にはなく、界面の化学反応ないしガス側の物質移動の影響を受けていると考えられる。また、ガス流量の増加とともに脱窒素速度が増加して

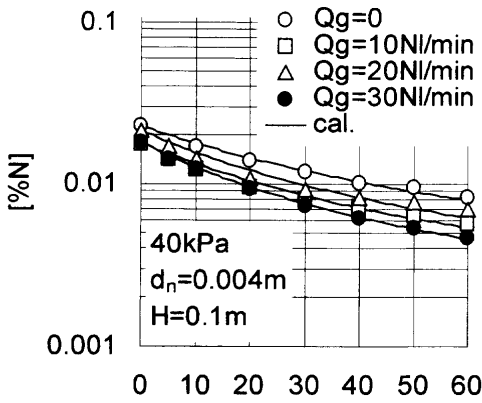


Fig. 4. Change in nitrogen content with time. (80 kg scale experiments with top blow)

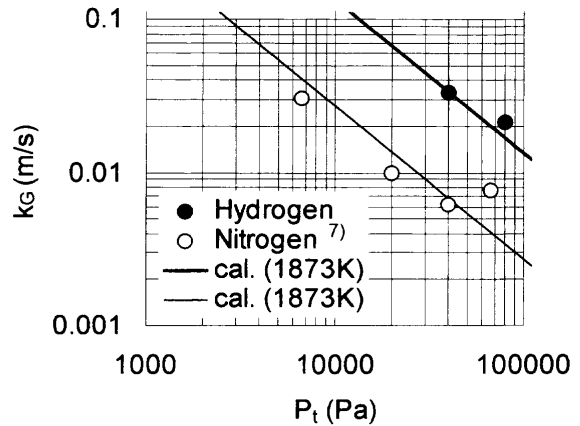


Fig. 5. Relationship between P_t and k_G . (80 kg scale experiments without top blow)

おり、ガス側の物質移動速度の影響を受けていることが示唆される。

4. 考察

4.1 反応モデルおよび減圧下脱水素反応の律速段階

溶鋼の脱水素反応においては、長ら⁴⁾、萬谷ら²⁾、段ら³⁾の研究結果から考えて、界面での化学反応が律速段階となっている可能性は少ないと思われる。そこで、ここでは溶鋼側、ガス側両相での物質移動過程のみを考慮して考察を進める。この場合、反応速度は以下のように表される。

$$n_{H_2} = k_{mH} A ([\%H] - [\%H]^*) \rho_{Fe} / 100 M_{H_2} = k_G A (P_{H_2}^* - P_{H_2}) / RT \quad (1)$$

$$-d[\%H]/dt = n_{H_2} (100 M_{H_2}) / W_m \quad (2)$$

$$[\%H]^* = E_{H_2} P_{H_2}^{*1/2} \quad (3)$$

脱窒素反応速度については、溶鋼、ガス側両相での物質移動、およびガス-溶鋼界面における化学反応を考慮し、以下のように表される。

$$n_{N_2} = k_{mN} A ([\%N] - [\%N]^*) \rho_{Fe} / 100 M_{N_2} = k_r A ([\%N]^*{}^2 - E_{N_2}^2 P_{N_2}^*) \rho_{Fe} / 100 M_{N_2} = k_G A (P_{N_2}^* - P_{N_2}) / RT \quad (4)$$

$$-d[\%N]/dt = n_{N_2} (100 M_{N_2}) / W_m \quad (5)$$

$$k_r = 0.159 f_N^2 / (1 + 173 a_O + 52 a_S + 17 a_N^*)^2 \quad (6)^7)$$

(1)~(6)式に基づき、水素、または窒素の経時変化を数値計算によって求め、実験結果と比較した。ここで、水素または窒素の初期濃度の分析値を計算の初期値として与え、微少な時間刻みごとに脱水素、または脱窒素速度の瞬間値を算出し、これを積算することによって濃度推移を算出した。計算の時間刻みは0.5sとした。脱窒素反応の数値計算においては、(6)式中の a_O 、 a_S 、および a_N^* を0.5sごとに推算する必要がある。そこで、5~10minの時間間隔にて

得られている溶鋼成分の分析値を直線補間し、0.5sごと成分濃度を推算して a_O 、 a_S 、および f_N を求めた。また、 a_N^* (= f_N [%N]^*)は、(4)式および(6)式を同時に満足する[%N]^*を収束計算によって求めた。

ここで、溶鋼側の物質移動係数は先に脱窒素実験の結果、 $k_{mN} = 0.0009 \text{ m/s}^7)$ が求められている。そこで、この値より、浸透説に従って水素の物質移動係数を求めた。

$$k_{mH} = k_{mN} (D_H / D_N)^{1/2} \quad (7)$$

1873Kにおける溶鋼中の水素および窒素の拡散係数は、文献⁸⁾によりそれぞれ $D_H = 1.3 \times 10^{-7} \text{ (m}^2/\text{s)}$ 、 $D_N = 8.9 \times 10^{-9} \text{ (m}^2/\text{s)}$ とすると、水素の溶鋼側の物質移動係数 k_{mH} として0.0034 m/sが得られる。この値に基づき、(1)式の k_G をフィッティングパラメータとして3.1の実験結果と(1)~(3)式の計算値が最もよく合致する k_G を求めた。 k_G と圧力の関係をFig. 5に示す。また、図には k_G の値を脱窒素反応の場合について(4)~(6)式を用いて求めた結果、および(8)式にて計算した結果も同時に示した。 D_{Ar-H_2} 、 D_{Ar-N_2} はChapman-Enskogの式からの推算⁹⁾による。 δ は溶鋼表面とつぼ上端間の距離とした。ガスの温度は溶鋼表面直上であることから、溶鋼の温度と等しい1873Kを想定して行ったが、脱窒素の67kPaの条件を除けば、実験結果はこれら計算値とよく一致しており、実験から得られた k_G の値は(8)式の関係を概ね満足することがわかる。

$$k_G = D_{Ar-X} / \delta \quad (8)$$

次に、脱水素の総括反応抵抗に対する溶鋼側、およびガス側の物質移動抵抗の寄与率を推算し、Fig. 6に示す。本実験条件下では、875 Pa以下では溶鋼側の物質移動が、875 Pa以上の圧力ではガス側の物質移動が支配的となっていると推定される。

4.2 ガス側物質移動係数に及ぼすガス吹付け条件の影響

3.2における実験値を再現しうるガス側の物質移動係数を求めた。その場合、80kg規模の脱水素実験においては

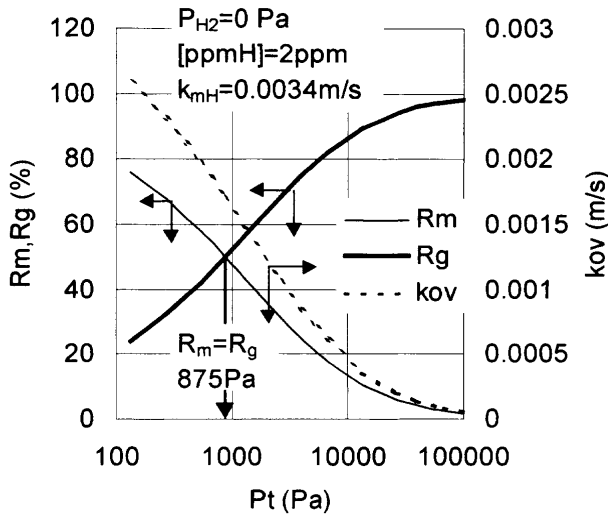


Fig. 6. Estimated relationship between pressure and mass transfer resistances and k_{ov} .

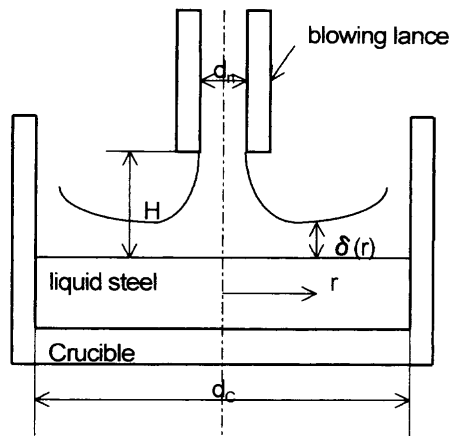


Fig. 7. Schematic model for dimensional analysis.

溶鋼側の物質移動係数を 0.0034 m/s として、ガス側の物質移動係数を求めた。また脱窒素反応におけるガス側の物質移動係数については、4・1 同様に、界面での化学反応を考慮した(4)、(5)、(6)式により実験結果を最もよく再現する k_G を求めた。すなわち、溶鋼側の物質移動係数として $k_{mN}=0.0009$ m/s を用い、化学反応速度定数として(6)式を用い、 k_G のみをフィッティングパラメータとして本実験結果を最もよく再現する k_G を求めた。

ランスから吹付けられる自由噴流の特性として、その運動量 M_m が保存されるという性質¹⁰⁾に基づき無次元相関式を導く。Fig. 7 に示すように、溶鋼表面上の噴流の衝突点から半径方向 r の位置において、形成されている濃度境界層厚みを $\delta(r)$ とすると、それを支配する物理量は M_m , μ_g , ρ_g , H , D_{Ar-X} , r であると予想される。この場合、次式が成り立つ。

$$\delta(r) = f_1(M_m, \mu_g, \rho_g, H, D_{Ar-X}, r) \dots\dots\dots (9)$$

次に、次元解析¹¹⁾より次式を得る。

$$\delta(r)/r = f_2(Re, Sc, H/r) \dots\dots\dots (10)$$

るつぼ半径方向 r の位置での局所物質移動係数は次式で表される。

$$k_{G,loc} = D_{Ar-X} / \delta(r) \dots\dots\dots (11)$$

(10), (11)式より次式を得る。

$$k_{G,loc} = C_1 Re^l Sc^m D_{Ar-X} r^{n-1} / H^n \dots\dots\dots (12)$$

(12)式をるつぼ径方向に平均化し、(13)式に示す平均の物質移動係数を得る。

$$k_G = C_2 Re^l Sc^m D_{Ar-X} d_c^{n-1} / H^n \dots\dots\dots (13)$$

最終的にシャーウッド数として(14)式を得る。

$$\begin{aligned} Sh &= k_G d_n / D_{Ar-X} \\ &= C_2 Re^l Sc^m (d_c/H)^{n-1} (d_n/H) \dots\dots\dots (14) \end{aligned}$$

次に、本研究においてガス吹付けを行った脱水素、および脱窒素実験の結果を基に、比例定数、および指数 l, m, n を求めた。ここで、必要となるガスの物性値は以下のように扱った。温度は溶鋼温度 1873K と同一とし、ガスの粘度 μ_g は 1873K と仮定して Chapman-Enskog の式から推算した¹²⁾。また、密度は理想気体の状態方程式より求めた。圧力は雰囲気圧力とした。吹付けガス噴流によるガス側物質移動係数については、谷口らが一連の研究結果¹³⁻¹⁷⁾を報告している。その報告では、ランス先端と吹付け対象平板、あるいは液体面間の距離の影響が現れる場合と現れない場合の限界の条件を定式化¹³⁾し、それぞれの場合に吹付け条件とガス側の物質移動係数の関係を求めている。Fig. 8 に、 H/d_n と k_G の関係を示すが、本実験条件では k_G がランス先端と溶鋼面間の距離の増加とともに低下する傾向は確認できなかった。ここで、(14)式の定数、 C_2, l, m, n を重回帰分析により決定し、(15)式を得た。

$$Sh(H/d_n) = 0.003 Re^{0.80} Sc^{0.06} (H/d_c)^{1.38} \dots\dots\dots (15)$$

結果を Fig. 9 に示すが、両者の間にはよい相関関係が得られる。本結果では Sc の指数は 0.06 と非常に小さい値を示した。しかし、一般には乱流域の衝突噴流による物質移動、あるいは熱移動においては Sc 数の影響が現れる¹⁸⁾。そこで、 Sc 数の指数を 0.33¹⁹⁾と仮定し、再分析を行った結果を Fig.10 に示す。Fig. 9 に比べると多少ばらつきが大きくなる傾向はあるが、よい相関関係が得られる。この場合の無次元相関式として(16)式を得た。

$$Sh(H/d_n) = 0.002 Re^{0.88} Sc^{0.33} (H/d_c)^{1.39} \dots\dots\dots (16)$$

本研究での Sc 数の値は、Table 1 に示したように、0.18 および 0.71 である。(16)式の値に及ぼす Sc の違いは $(0.71/0.18)^{0.33} = 1.6$ 倍である。Fig.10 に $\pm 60\%$ でのばらつき

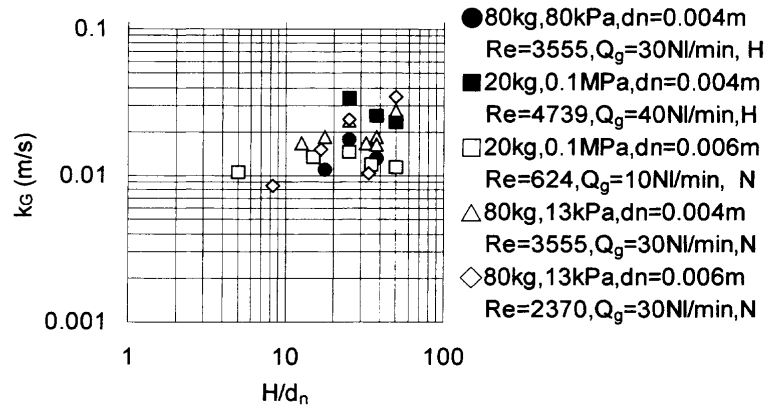


Fig. 8. Relationship between k_G and lance height.

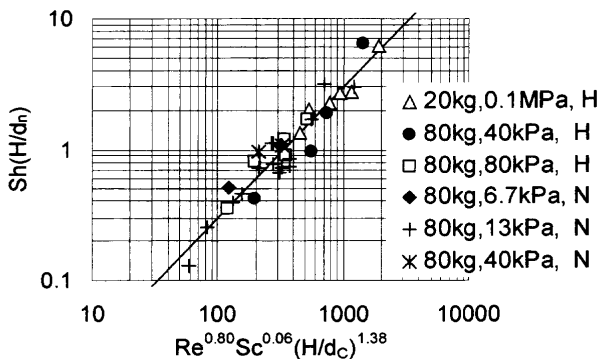


Fig. 9. Dimensionless relationship of gas phase mass transfer and the argon gas top blowing condition.

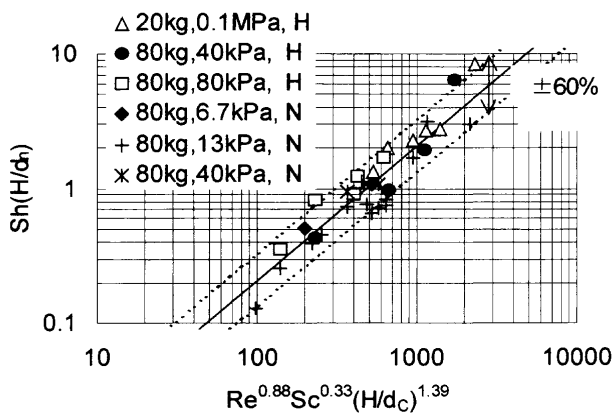


Fig. 10. Dimensionless relationship of gas phase mass transfer and the argon gas top blowing condition. (0.33 power of Sc was assumed.)

範囲を破線で示したが、Sc数の差異が識別できる精度にはないと考えられる。乱流領域における衝突噴流による物質移動に関する研究において、Scの指数として0.33の値が示されている¹⁹⁾。したがって、Scの指数は0.33とした(16)式の方が妥当であると思われる。

次に、(16)式の両辺を(H/d_c)で除すると次式が得られる。

$$Sh(d_c/d_n) = 0.002 Re^{0.88} Sc^{0.33} (H/d_c)^{0.39} \dots \dots \dots (17)$$

(17)式はd_cが一定のとき、Hの増加とともにわずかでは

あるが、Sh数が増大することを示す。本研究でのH/d_cは0.13から1.74の範囲で変化させており、(1.74/0.13)^{0.39}=2.8倍の変化に対応する。データのばらつきを考慮しても無視し得ない差異である。この理由として、溶鋼表面に生成するキャビティーの影響が考えられる。本実験では、Hの小さい場合にキャビティーの生成が観察されたが、この場合、キャビティー周囲に生成するリップの存在により、その外側の溶鋼表面に広がるガス流速が低下してk_Gが低下する可能性が考えられる。

谷口ら¹³⁾は、ガス吹き付けにおける物質移動速度の無次元相関式として次式示している。

$$Sh(r_s/d_n) \propto Re^{0.66} Sc^{0.5} \dots \dots \dots (18)$$

ここで、r_s=d_c/2であるから、(18)式は次式と等価である。

$$Sh(d_c/d_n) \propto Re^{0.66} Sc^{0.5} \dots \dots \dots (19)$$

(19)式のRe数の指数は0.66であるが、段ら³⁾は大気圧下のアルゴンガス吹き付けによる脱水素実験よりRe数の指数として0.76 (Re=20~500)、別所ら¹⁷⁾は大気圧下でのCO₂-CO混合ガス吹き付けによる溶鋼の脱炭実験よりReの指数として0.76の値 (Re=20~500)を得ている。谷口ら、段ら、別所らの報告は、そのRe数範囲が1000以下であることから考えて、層流領域における結果である。それに対し、本研究は、乱流領域である。乱流の衝突噴流による物質移動におけるRe数の指数は0.9¹⁹⁾という値が報告されている。(17)式のRe数の指数、0.88は、0.9に近い。本研究で、谷口ら、段ら、別所らより大きなRe数依存性を示した理由は乱流領域であるためと考えることができる。

5. 結言

溶鋼の脱水素速度に及ぼす圧力、および不活性ガス吹き付けの影響を明らかとすることを目的に実験を行った。得られた結果は以下の通りである。

(1) 減圧下における脱水素実験結果より、本実験条件下では概略 1.0 kPa 以下では溶鋼側の、それ以上の圧力ではガス側の物質移動抵抗が支配的であると推定した。

(2) 大気圧下、減圧下における不活性ガス吹付けによるガス側物質移動係数と吹付け条件の関係は(17)式で表された。

記号

A	: ガス-溶鋼間反応界面積 (m^2)
a_O	: 溶鋼中における酸素の Henry 基準の 1 mass% を標準状態とする活量
a_S	: 溶鋼中における硫黄の Henry 基準の 1 mass% を標準状態とする活量
a_N^*	: 溶鋼-ガス界面における窒素の Henry 基準の 1 mass% を標準状態とする活量
C_1, C_2	: (12), (13) 式の比例定数
D_H	: 溶鋼中の水素の拡散係数 (m^2/s)
D_N	: 溶鋼中の窒素の拡散係数 (m^2/s)
D_{Ar-X}	: ガス中の Ar-X 二元拡散係数 (m^2/s) (ただし, X は N_2 または H_2)
d_C	: りんぼ内径 (m)
d_n	: ノズル内径 (m)
E_{H_2}	: $1/2 H_2 = H$ 反応の見かけの平衡定数 ($mass\%/Pa^{1/2}$)
E_{N_2}	: $1/2 N_2 = N$ の反応の見かけの平衡定数 ($mass\%/Pa^{1/2}$)
f_N	: 溶鋼中の窒素の活量係数
H	: 溶鋼表面-吹付けランス間距離 (m)
[ppmH]	: 溶鋼中の水素濃度 (ppm)
[ppmH]*	: 溶鋼-ガス界面の水素濃度 (ppm)
[ppmH] _i	: 処理前の溶鋼中の水素濃度 (ppm)
k_G	: ガス側の物質移動係数 (m/s)
$k_{G,loc}$: ガス側の局所物質移動係数 (m/s)
k_{mi}	: 溶鋼側の物質移動係数 (m/s) (ただし, i は溶鋼中の元素)
k_{ov}	: 総括物質移動係数 (m/s)
k_r	: 脱窒素反応における界面化学反応速度 (m/mass% s)
l, m, n	: (9) 式の定数
M_{H_2}	: 水素の分子量 (kg/mol)
M_m	: ガス噴流の運動量 ($kg\ m/s^2$)
[%N]	: 溶鋼中の窒素濃度 (mass%)
[%N]*	: 界面における窒素濃度 (mass%)
[%N] _i	: 処理前の溶鋼中の窒素濃度 (mass%)
n_{H_2}	: 水素分子の移動速度 (mol/s)
P_f	: 雰囲気圧力 (Pa)
P_{H_2}	: ガスバルク側の水素分圧 (Pa)
$P_{H_2}^*$: ガス-溶鋼界面の水素分圧 (Pa)
P_{H_2}	: ガスバルクの窒素分圧 (Pa)
$P_{N_2}^*$: ガス-溶鋼界面の窒素分圧 (Pa)
Q_g	: ガス流量 (m^3/s)

R	: ガス定数 (J/mol K)
r_s	: りんぼ半径 (m)
Re	: レイノルズ数 ($\equiv u_g d_n / \nu_g$)
Sc	: シュミット数 ($\equiv \nu_g / D_{Ar-X}$)
Sh	: シャーウッド数 ($\equiv k_G d_n / D_{Ar-X}$)
R_m	: 溶鋼側の物質移動抵抗割合 (%)
R_g	: ガス側の物質移動抵抗割合 (%)
T	: 温度 (K)
W_m	: 溶鋼量 (kg)
ν_g	: ガスの動粘性係数 (m^2/s)
μ_g	: ガスの粘度 (Pa s)
δ	: ガス側濃度境界層厚み (m)
ρ_{Fe}	: 溶鋼密度 (kg/m^3)
ρ_g	: ガス密度 (kg/m^3)

文献

- 1) S.Takaishi, T.Komai, H.Murata, K.Hiromoto and H.Sekihara: *Tetsu-to-Hagané*, **64** (1978), 1343.
- 2) S.Ban-ya, K.Mori and Y.Tanabe: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1494.
- 3) D.Weidao, H.Fukatsu, T.Nakatsukasa, M.Hirasawa and M.Sano: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 905.
- 4) T.Choh, M.Takada and M.Inoue: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 1309.
- 5) Y.Hayakawa, H.Ono, K.Senoo and S.Mukawa: *Bunseki Kagaku*, **39** (1990), 617.
- 6) 製鋼反応の推奨平衡値改訂増補, 日本学術振興会製鋼第19委員会編, 東京, (1984).
- 7) S.Mukawa, Y.Mizukami and Y.Ueshima: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 411.
- 8) 溶鉄・溶渣の物性値便覧, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1972).
- 9) R.B.Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot: *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons Inc., New York, (1960), 508.
- 10) 生井武文, 井上雅弘: 粘性流体の力学, 理工学社, 東京, (1994), 206.
- 11) 鉄鋼製造における模型理論とスケールアップ, 日本鉄鋼協会編, 東京, (1986), 17.
- 12) R.B.Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot: *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons Inc., New York, (1960), 19.
- 13) S.Taniguchi, A.Kikuchi and S.Maeda: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 191.
- 14) S.Taniguchi, A.Kikuchi and S.Maeda: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 1071.
- 15) S.Taniguchi, A.Kikuchi, T.Tadaki and S.Maeda: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), 1830.
- 16) A.Kikuchi, M.Ayusawa, T.Tadaki and S.Maeda: *J. Jpn. Inst. Met.*, **44** (1980), 665.
- 17) N.Bessho, S.Taniguchi and A.Kikuchi: *J. Jpn. Inst. Met.*, **55** (1991), 860.
- 18) M.Halger: *Adv. Heat Transfer*, **13** (1977), 1.
- 19) J.T.Davies: *Turbulence Phenomena*, Academic Press, New York, (1972), 151.