

溶鋼の脱炭速度に及ぼす圧力，硫黄，酸素濃度の影響

務川 進*・水上 義正*²

Effects of Pressure, Sulfur and Oxygen on the Rate of Decarburization from Liquid Steel

Susumu MUKAWA and Yoshimasa MIZUKAMI

Synopsis : The study was made on the rate of decarburization of molten steel in the low carbon content range ($[\%C] \leq 0.1$ mass%) under reduced pressure to reveal the effects of sulfur content of molten steel, pressure and CO bubble formation in the metal bath. The chemical reaction rate constant at gas-metal interface was estimated. The value obtained was far greater than that of previously reported value by Harashima *et al.* using CO_2 -CO-Ar gas. The reaction model analysis was made on the assumption that agitation by the formation of CO bubbles increased the interfacial area of bath surface.

Three-step, *i.e.* mass transfer in metal and gas phases and chemical reaction at gas-metal interface were taken into consideration in the model.

Key words : decarburization; secondary steelmaking; low carbon steel.

1. 緒言

薄板の良加工性鋼板向けに，真空脱炭を利用した極低炭素鋼の量産技術が確立されている¹⁾。また，炭素およびそれ以外の成分濃度精度向上，清浄化，省エネルギーといった観点からも，より高度な脱炭プロセスの開発が求められている。そのためには，溶鋼の脱ガス反応機構を明らかにし，有効な対策に結びつけることが重要である。

従来，脱炭反応速度に及ぼす酸素，硫黄の影響については酸化性ガスとして CO_2 ，あるいは H_2O ガスを用い，高炭素領域を対象とした研究が多くなされている²⁻¹¹⁾。一方，低炭素濃度域での研究^{2,16)}，あるいは，溶鋼中の酸素による脱炭反応の研究¹²⁻¹⁴⁾，酸素ガスによる脱炭反応に関する研究¹⁵⁾は少なく，反応機構が必ずしも明確となっていないように思われる。ここでは，溶鋼中の酸素，あるいは酸素ガスによる，低炭素濃度下での溶鋼の脱炭速度に及ぼす酸素，硫黄の影響，さらに圧力の影響について検討を行ったので報告する。

2. 実験方法

ここでは二通りの実験を行った。一つはガス側の物質移動の影響を極力排除する目的から1.33 kPa下で行った酸素と硫黄濃度の影響を調査するための実験であり，もう一つは圧力と酸素供給速度の影響を調査する目的で13.3~66.7 kPaの圧力下で酸素ガス吹付けを行った実験である。

2.1 実験 I (1.33 kPa下での脱炭実験)

実験には既報¹⁷⁾の高周波真空溶解炉を用いて行った。用いたるつぼはマグネシア製であり，内径0.23 m，深さ0.43 mである。電解鉄80 kgを0.1 mass%相当量の黒鉛とともに溶解し，真空ポンプによりタンク内を133 Pa以下に排気しつつ，脱酸を30 min間行なった。ついでタンク内にアルゴンガスを4.00 kPa導入した後，所定量の炭素，硫黄を添加した。炭素濃度は0.1 mass%とし，硫黄濃度は0.0005から0.0800 mass%とした。さらに，酸素濃度を高めるために Fe_2O_3 試薬を添加した。その後，炉内を1.33 kPaに排気した。このとき，CO気泡が発生するが，目視観察にて気泡の生成が停止した後に溶鋼試料を所定の時間ごとに採取し，溶鋼組成の経時変化を調査した。脱炭処理中はバイパス弁を介して回転式真空ポンプで排気しつつ，炉内の圧力を1.33 kPaに保持した。溶鋼の温度は1873 Kに保った。

2.2 実験 II (減圧下，酸素吹付けによる脱炭実験)

用いた装置，および溶解，事前脱酸の方法は2.1と同様である。溶鋼の温度は1873 Kとした。炭素，および硫黄濃度がそれぞれ0.1 mass%，0.01 mass%となるよう黒鉛，硫黄を添加した。ついでタンク内に目標の圧力までアルゴンガスを導入した。ただし2.1の実験と異なり， Fe_2O_3 試薬の添加は行わなかった。さらに，内径0.002 mのアルミナ製チューブより溶鋼表面上約0.01 mの高さから所定流量の酸素ガスを所定の時間吹付けた。溶鋼組成変化の調査，タンク内の圧力調整は2.1同様の方法で行い，脱炭処理中のタンク内圧力は13.3，26.7，40.0，66.7 kPaの4水準とした。ま

平成13年7月25日受付 平成14年1月20日受理 (Received on July 25, 2001; Accepted on Jan. 20, 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 (社)日本鉄鋼協会(The Iron and Steel Institute of Japan)

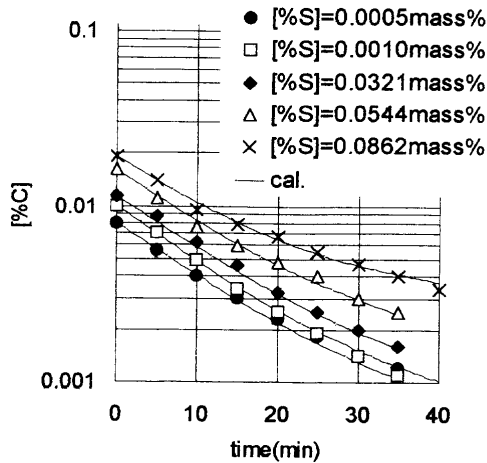


Fig. 1. Change of carbon content with time.

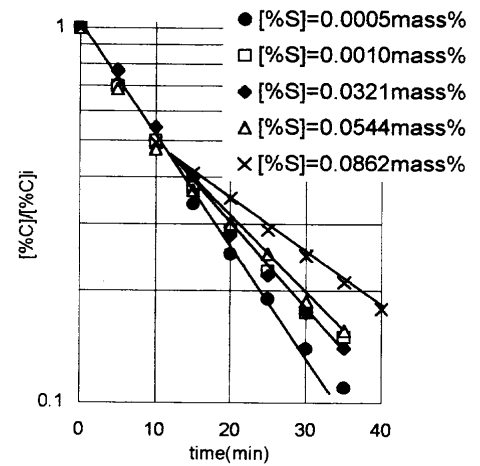


Fig. 2. Change of normalized carbon content with time.

た酸素ガスの吹付け流量は10, 20 Nl/minを基本とし、吹付け時間は吹付け酸素総量が200 Nlとなるようにした。すなわち、10 Nl/minの際には初期20 min間、20 Nl/minの際には初期10 min間とした。一部の実験では5 Nl/minでも実験を行ったが、この場合は吹付け時間を初期20 min間とした。したがって総酸素量は100 Nlである。

3. 実験結果

3.1 脱炭速度に及ぼす硫黄濃度の影響

Fig. 1に、硫黄濃度の異なる条件で1.33 kPaの圧力下で脱炭処理を行ったときの炭素濃度の経時変化を示す。Fig. 2には初期炭素濃度で規格化した濃度の経時変化を示す。初期の脱炭速度は硫黄濃度にほとんど依存しない。一方、炭素濃度の低下とともに硫黄濃度の脱炭速度に及ぼす影響が現れる。Fig. 2でより明瞭なように、硫黄濃度が高い場合には、途中で傾きが小さくなっており、脱炭速度の変化度合いは高硫黄濃度ほど顕著である。Fig. 3には、Fig. 2に示した後半の直線の傾きから求めた見かけの脱炭速度定数と溶鋼中硫黄濃度の関係を示す。Fig. 4には本実験における炭素、酸素濃度の推移を示した。理想的な物質バランスからすれば、酸素濃度の減少量は炭素濃度減少量の16/12の関係を満たすはずであるが、このような関係は満たされていない。これはるつぼ材からの酸素吸収の影響と考えられる。

3.2 酸素ガス吹付けによる脱炭実験結果

Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8に脱炭処理時の炭素濃度、酸素濃度および $P_{CO,e}$ の経時変化を示す。Fig. 8に示す66.7 kPaの場合を除き、同一圧力下では酸素供給速度が大きいほど脱炭速度は大きい。炭素濃度の経時変化から図中、破線で示す区間における傾きより、最大の脱炭速度 k_{1max} を求めた。またその時点での溶鋼静圧が炭素、酸素濃度と平衡するCO分圧 $P_{CO,e}$ とタンク内圧力 P_i の差に等しくなる溶鋼深さ H を(1)式により求めた。 H と k_{1max} の関係をFig. 9に示

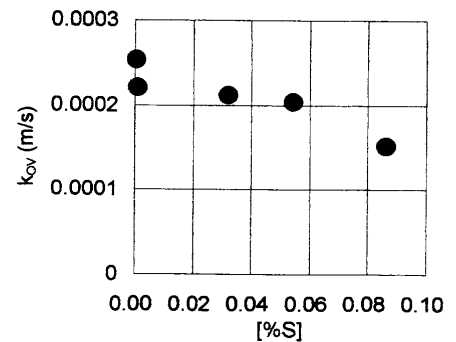


Fig. 3. Relationship between apparent rate constant and sulfur content (2nd stage).

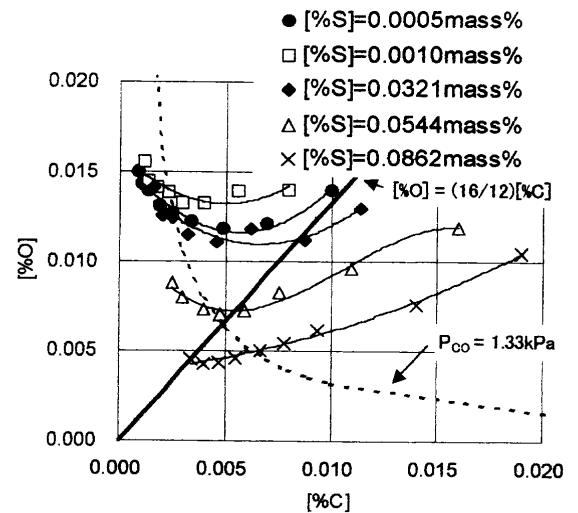


Fig. 4. Relation between oxygen and carbon contents during treatment.

す。同一圧力下では H が大きいほど脱炭速度は大きくなる傾向があり、同一の H では圧力が低いほど k_{1max} は大きい。

$$H = (P_{CO,e} - P_i) / (\rho_{Fe} \cdot g) \dots \dots \dots (1)$$

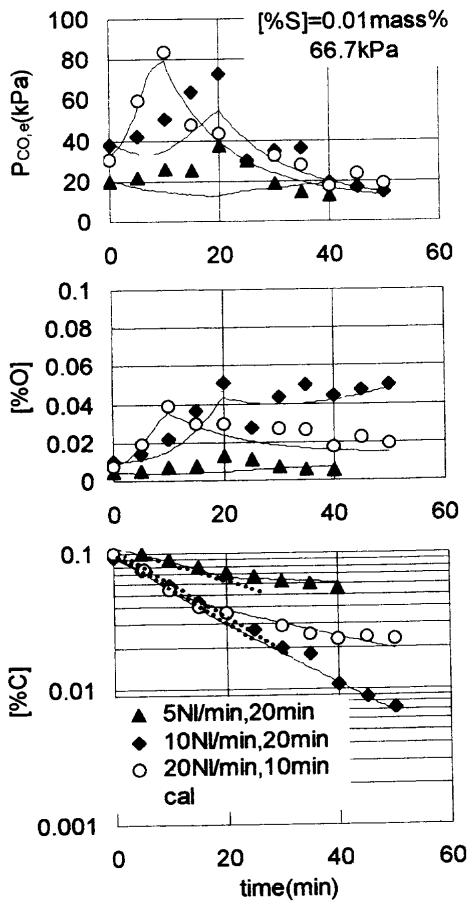


Fig. 5. Change of carbon and oxygen contents and $P_{CO,e}$ with time.

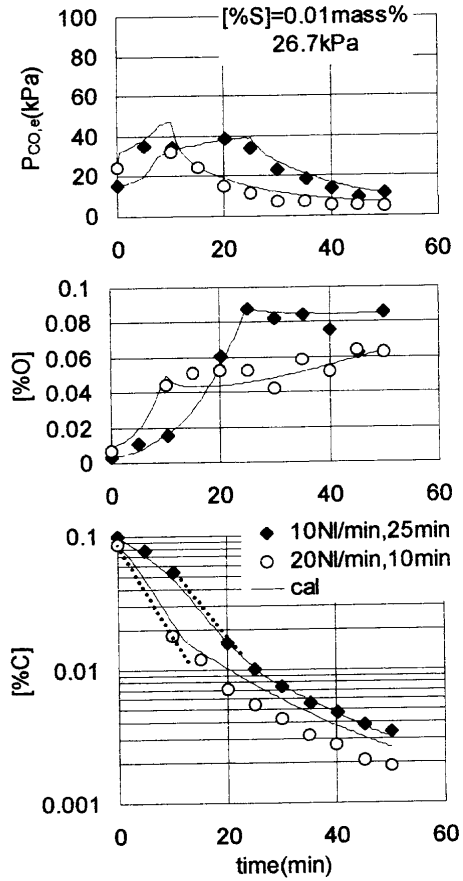


Fig. 7. Change of carbon and oxygen contents and $P_{CO,e}$ with time.

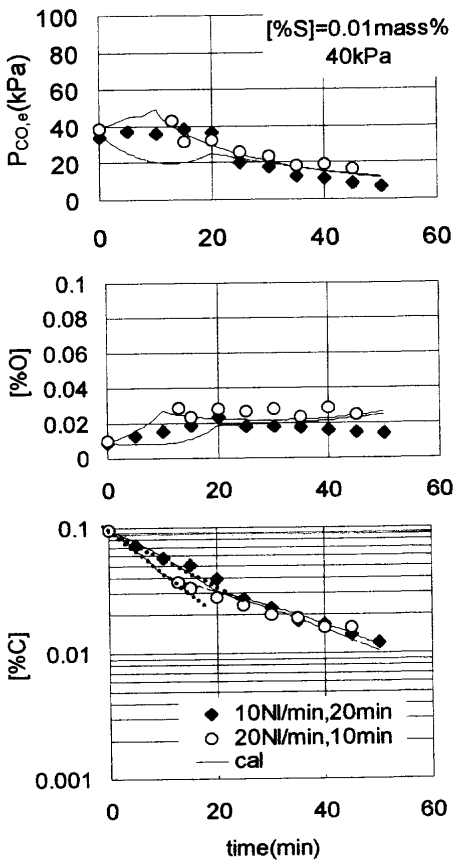


Fig. 6. Change of carbon and oxygen contents and $P_{CO,e}$ with time.

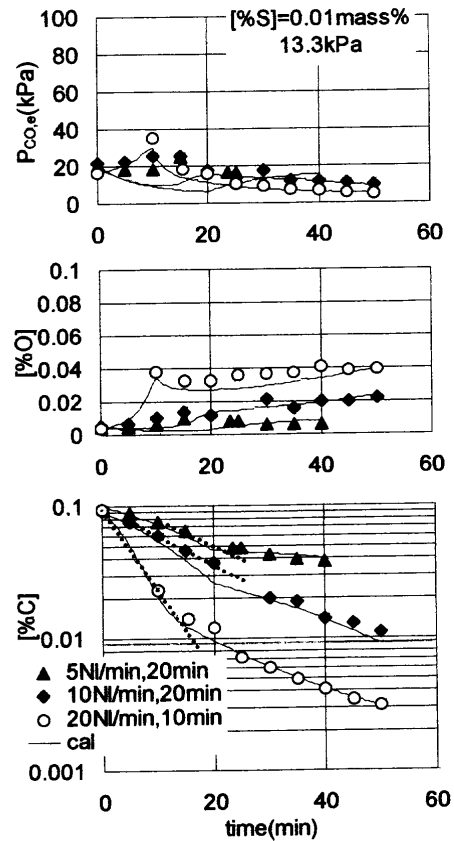


Fig. 8. Change of carbon and oxygen contents and $P_{CO,e}$ with time.

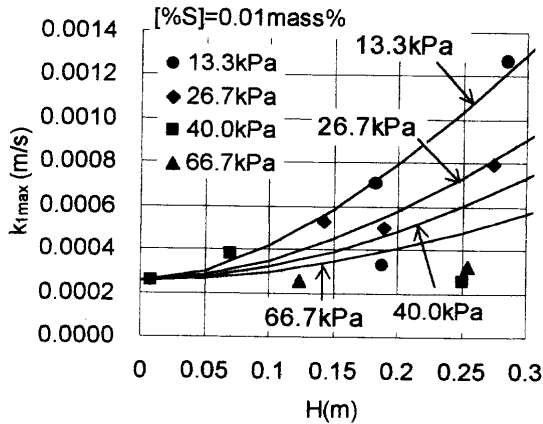


Fig. 9. Relation between K_{1max} and H .

4. 考察

4.1 反応モデル

ここでは酸素、硫黄濃度、圧力の影響を評価するために反応モデルを用いて解析を行った。モデルの概要を示す。溶鋼中の炭素の物質移動過程および界面での化学反応速度を(2)式で表す。

$$n_c = k_{mC} A([\%C] - [\%C]^*) \rho_{Fe} / (100 M_C) = k_r A([\%C]^* [\%O]^* - P_{CO}^* / E_{CO}) \rho_{Fe} / (100 M_C) \dots (2)$$

ガス側のCOの物質移動速度を次式で表す。

$$n_{CO} = k_g A P_t \ln[(P_t - P_{CO}) / (P_t - P_{CO}^*)] \dots (3)$$

また、溶鋼中の酸素の物質移動速度を次式で表す。

$$n_o = k_{mO} A([\%O] - [\%O]^*) \rho_{Fe} / (100 M_O) \dots (4)$$

界面における炭素、酸素の物質バランスより(5)、(6)式が得られる。

$$n_c = n_{CO} \dots (5)$$

$$n_o + 2\alpha J_{O_2} = n_{CO} \dots (6)$$

ただし、(6)式の左辺第2項は酸素吹付けを行った場合の界面への酸素供給速度 αJ_{O_2} を含むが、 α はそのうち有効に作用した割合を示すパラメータである。

4.2 実験 I (1.33 kPaでの実験)の結果の解析

3.1の実験で得られた結果をもとに、4.1に述べたモデルで最も良く実験結果を再現しうるモデル上のパラメータを求めた。なお、本実験では酸素ガス吹付けを行っていないため、(6)式の左辺第2項の αJ_{O_2} は零とした。 k_r に対する酸素、硫黄の影響として、本報では二座吸着を仮定した次式¹⁶⁾を用いた。

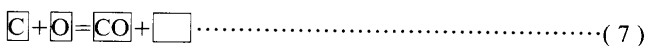


Table 1. Rate parameters.

k_{mC} (m/s)	k_{mO}/k_{mC} (-)	k_g (mol/(m ² ·s·Pa))	k_r (m/(mass%·s))	κ_o (1/mass%)	κ_s (1/mass%)
0.000588	0.66	1.18×10^{-5}	2.67	190	51

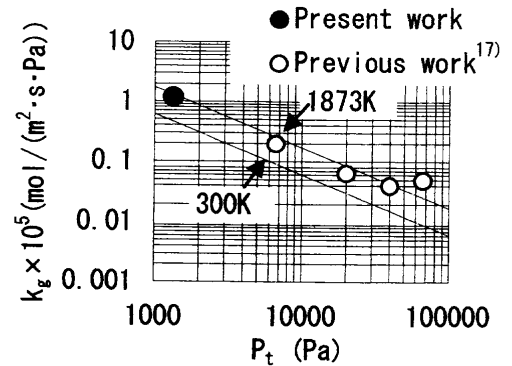


Fig. 10. Relation between k_g and P_t .

$$k_r = k_{r0} f_C f_O / (1 + \kappa_o a_o^* + \kappa_s a_s^*)^2 \dots (8)$$

実験結果に合わせるべきパラメータは k_{mC} , k_{mO} , k_r , κ_o , κ_s , k_g の6個となるが、実験結果を最もよく再現する値を求めた。モデル計算は0.5秒刻みにて行い、炭素濃度の経時変化を計算により求めた。任意の時刻における酸素濃度の値は、5分間隔で得られている酸素濃度の定量値を直線補間して求めて代入した。パラメータを求める計算手順は最大傾斜法²⁰⁾によった。すなわち、パラメータの初期値を与え、実験結果と計算結果の差の二乗和が最小となるパラメータの組を繰り返し計算して求めた。得られたパラメータの値をTable 1に示す。これらの値を用いて炭素濃度の経時変化を算出し、Fig. 2の実線で示すが、実験結果をよく再現できる。溶鋼側の炭素の物質移動係数として0.000588 m/s が得られ、酸素の物質移動係数と炭素の物質移動係数の比として0.66が得られた。鈴木ら¹²⁾はアルゴンガス吹付けによる溶鉄の脱炭反応速度の律速機構につき詳細な検討を行っているが、そのなかで溶鉄中の炭素、酸素の物質移動係数を温度の影響を考慮して求めている。その結果からは、本実験温度1873Kでは $k_{mC}/k_{mO} = 0.67$ と、Table 1の値に極めて近い値が得られる。さらに、ガス側の物質移動係数について考察する。著者らは同一の実験装置を用いて行った溶鋼の脱窒素速度に及ぼす圧力の影響よりFig.10に示すガス側の物質移動係数と圧力の関係を得ている¹⁷⁾。Fig.10の実線は溶鋼自由表面からるつぼ上端までの距離を δ としたときにAr-N₂二元拡散係数 D_{Ar-N_2} から(9)式を用いて推定したアルゴンガス中の窒素ガスのガス側物質移動係数であり、ガス温度 T_g として300K, 1873Kの二つの場合について示した。一方、COとN₂ではガスの物性値の差はわずかであり¹⁸⁾、Ar-CO二元系拡散係数はほぼAr-N₂二元拡散係数と同一であり、ガス側物質移動係数はAr-N₂系の値にほぼ等しいことが予想される。Fig.10の k_g と圧力の関係を1.33

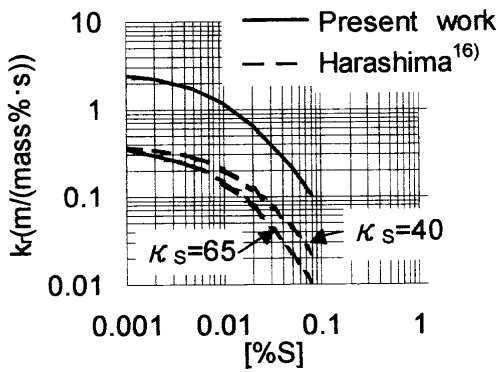


Fig. 11. Relation between sulfur content and chemical reaction rate constant.

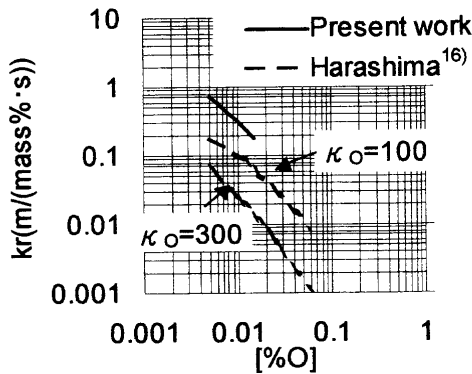


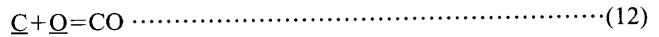
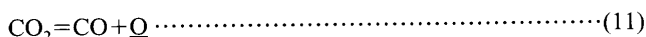
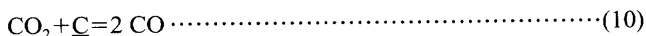
Fig. 12. Relation between oxygen content and chemical reaction rate constant.

kPaに外挿すると $1 \times 10^{-5} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s})$ となり、Table 1に示す値とよい一致を示す。

$$k_g = D_{\text{Ar-N}_2} / (RT_g \delta) \dots \dots \dots (9)$$

4.3 化学反応速度定数について

Fig.11に k_r と硫黄濃度、Fig.12に k_r と酸素濃度の関係を示す。Harashimaら¹⁶⁾はAr-CO₂-CO混合ガスの吹付けによる脱炭実験を行って反応速度定数 k_r に及ぼす酸素、硫黄濃度の影響を評価し、 k_{r0} として0.40 m/% s、 κ_O 、 κ_S の値は、それぞれ100~300、40~65の範囲と推定している。Harashimaraの k_{r0} の値は本報に比べて小さい。また、野村ら²⁾は、CO₂-COガスを用いた低炭素濃度での脱炭速度について検討した。野村らの実験結果は、[%C] \geq 0.05 mass%かつ $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{CO}} \leq 7/3$ の条件下では脱炭速度定数は $P_{\text{CO}_2}/P_{\text{CO}}$ 比に比例することを示し、界面での化学反応が律速段階であるとして(10)、(11)、(12)式の三過程の反応速度定数を求めて実験結果を再現している。その結果、本報の k_r に相当する(12)式の正反応速度定数として $5 \times 10^{-7} \text{ mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ の値を報告している。(13)式で本報で定義する $\text{m}/(\text{mass}\% \cdot \text{s})$ の単位に換算すると、0.004 $\text{m}/(\text{mass}\% \cdot \text{s})$ となる。



$$k_r = k_f (100 M_C K_{\text{CO}}) / \rho_{\text{Fe}} \dots \dots \dots (13)$$

ここで得られた k_{r0} の値はHarashimara¹⁶⁾の値に比べて大きい、その理由として、CO₂ガスを主たる酸素源とするHarashimaraらの条件では(11)式が律速過程であるのに対し、本実験では(12)式が律速過程であり、(12)式の反応が(11)式の反応に比べ、速度が大きい²³⁾であるとの解釈は可能である。野村ら²⁾が報告した反応速度定数に比べて大きい理由は不明である。

BeltonらはCO₂による高炭素濃度溶鉄の脱炭速度における界面での化学反応速度、および化学反応速度に及ぼす酸素、硫黄の影響について、詳細な研究を行っている^{3,4,5,25)}。彼らは、CO₂の界面への吸着、ないし吸着したCO₂の分解反応が律速過程であるとの考え²⁵⁾に基づき、界面吸着酸素、硫黄の影響について検討を行っている。その結果、硫黄、酸素の吸着平衡定数について(14)⁴⁾、(15)⁵⁾式を導出した。

$$\log \kappa'_S = 3600/T + 0.57 \text{ for carbon saturation} \dots \dots \dots (14)$$

$$\log \kappa_O = 11370/T - 4.09 \dots \dots \dots (15)$$

1873Kにおける κ'_S の値を(14)式から求め、硫黄の活量係数を⁶⁾²⁶⁾とし、低炭素濃度での κ_S を求めると52となる。Table 1に示した κ_S の値は51であり、よい一致を示している。Harashimara¹⁶⁾は、 κ_S の値を40~65と推定し、また、脱窒素速度から63.4の値を得ている。前報¹⁷⁾では吸窒素・脱窒素速度より $\kappa_S=52$ の値を示した。以上のように、 κ_S の値についてはよい一致がみられる。

一方、Harashimaraらは低炭素濃度の脱炭速度より100~300の範囲とし、脱窒素速度から161の値を示している。前報¹⁷⁾では吸窒素・脱窒素速度より $\kappa_O=173$ の値を示した。Table 1に示した $\kappa_O=190$ の値はこれらの値に近い。(15)式から計算される1873Kにおける κ_O の値は96となり前記の値とは若干異なるが、その理由は不明である。

4.4 CO気泡生成の影響

4.2で求めた化学反応速度定数と k_{mC}/k_{mO} の値、およびガス側の物質移動係数を用いて3.2の実験結果をどの程度説明しうるかを検討した。本実験では溶鋼内部からのCO気泡生成を伴い、この影響を考慮するために以下の仮定を置く。Fig.13に示すように、自由表面から(1)式で定義される溶鋼深さH内の溶鋼の体積は $\pi_H(d_C/2)^2$ で表されるが、CO気泡生成速度 n_{CO} はこの体積に比例するものとする²⁴⁾。

$$n_{\text{CO}} \propto H(d_C/2)^2 \dots \dots \dots (16)$$

また、CO気泡はHの深さから生成するという仮定を置く。この仮定より攪拌エネルギー ϵ_{CO} は(17)式で表される。

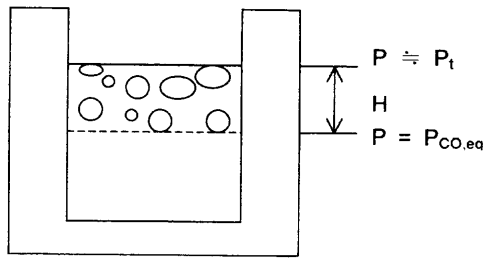


Fig. 13. Concept of reaction model with CO bubble formation.

$$\begin{aligned} \varepsilon_{CO} &= n_{CO} \int_H^0 P \, dV \\ &= n_{CO} RT \ln(1 + \rho_m g H / P_t) \dots\dots\dots(17) \end{aligned}$$

溶鋼側の物質移動係数はCO気泡による攪拌の効果として(18)式^{21,22)}で表すこととする。

$$k_{mC} \propto [\varepsilon_{CO} / d_c^2]^n \dots\dots\dots(18)$$

(17), (18)式より(19)式を得る。

$$k_{mC} \propto [HRT \ln(1 + \rho_m g H / P_t) / 4]^n \dots\dots\dots(19)$$

実際にはCO気泡生成がない場合、すなわち $\varepsilon_{CO}=0$ のときには、溶鋼側の物質移動係数は高周波誘導による攪拌の影響によって0にはならない。そこで、 $n_{CO}=0$ のときの誘導攪拌で決まる装置定数としての物質移動係数を k_{mCO} とし、(19)式を変形して(20)式で表す。

$$k_{mC} = [k_{mCO}(1/n) + a y]^n \dots\dots\dots(20)$$

ここで、 y は(19)式のかっこ内の値である。酸素の物質移動係数 k_{mO} と(20)式で与えられる k_{mC} の比は一定と仮定した。すなわち、CO気泡生成による k_{mC} の増加は静止浴時に対する攪拌浴時の反応界面積増加²²⁾と考へ、酸素の物質移動係数 k_{mO} と(20)式で与えられる k_{mC} の比はTable 1に示した0.66一定値とした。また、この仮定により、ガス側の物質移動係数 k_g はCO気泡による界面攪拌の影響と圧力の影響を含め、(21)式で表される。ただし、 k_{g0} は1.33 kPaで、CO気泡生成がない場合のガス側の物質移動係数であり、Table 1に示した値である。

$$k_g = k_{g0} (k_{mC} / k_{mCO}) (1.33 \times 10^3 / P_t) \dots\dots\dots(21)$$

(20)式の a, n をパラメータとして実験結果を最もよく再現できる値を求めた結果、 $a=2.1 \times 10^{-6}$, $n=0.931$ を得た。実験結果と計算結果の対応状況はFig. 5, Fig. 6, Fig. 7, Fig. 8に示す。計算結果は圧力、酸素供給速度の異なる実験結果をよく再現できる。本実験の圧力の範囲13.3~66.7 kPaでの減圧と酸素供給速度の影響は、CO気泡の生成領域増加によるCO気泡生成速度増加に伴う攪拌の効果と捉えることができる。

なお、本実験においてもるつぼからの酸素供給があると推定される。そこで、酸素ガス停止後から実験終了後までの炭素と酸素の物質バランスからるつぼからの酸素供給量を求め、るつぼからの酸素供給量を当該時間で除し、平均のるつぼからの酸素供給速度を求めた。そして、計算においては、その値をバルクの酸素濃度変化に加えた。

5. 結言

溶鋼の脱炭反応速度に及ぼす圧力、酸素、硫黄濃度の影響を明らかとすることを目的に溶鋼量80 kgの真空高周波溶解炉を用いた実験を行い、溶鋼側、ガス側両相での物質移動、ならびに化学反応速度を考慮したモデル解析を行った。さらに、酸素ガス吹付けによる減圧下での実験結果を再現するモデルとして、CO気泡による攪拌効果を考慮したモデルで実験結果を解析し、以下の結果を得た。

(1) 1.33 kPaにおいて行った減圧下での脱炭実験結果を溶鋼側の炭素、酸素の物質移動、化学反応速度、およびガス側の物質移動を考慮して解析した。化学反応速度定数を酸素、硫黄の影響を考慮して評価し、CO₂-COガスを用いた実験から得られた従来の報告値より大きな値を得た。また、ガス側の物質移動係数は同一装置を用いた脱窒素反応の値とよく一致した。

(2) CO気泡生成を伴う場合の脱炭反応モデルとしてCO気泡生成の影響が自由表面の攪拌の効果としたモデルにより、圧力を13.3~66.7 kPaとして酸素供給速度を変化させた実験結果を統一的に説明し得た。

記号

- A : ガス-溶鋼間反応界面積 (m²)
- $[\%C]$: 溶鋼中炭素濃度 (mass%)
- $[\%O]$: 溶鋼中酸素濃度 (mass%)
- $[\%C]^*$: 溶鋼側濃度境界層のガス-溶鋼界面側の溶鋼中炭素濃度 (mass%)
- $[\%O]^*$: 溶鋼側濃度境界層のガス-溶鋼界面側の溶鋼中酸素濃度 (mass%)
- a : (18)式中のパラメータ
- n : (16)式中のパラメータ
- a_{O^*} : 溶鋼側濃度境界層のガス-溶鋼界面側の酸素活量
- a_s : 硫黄の活量
- d_c : るつぼ内径 (m)
- D_{Ar-N_2} : Ar-N₂の二元相互拡散係数 (m²/s)
- D_{Ar-CO} : Ar-COの二元相互拡散係数 (m²/s)
- E_{CO} : C+Q=CO反応の見かけの平衡定数 (Pa/[mass%]²) (= $K_{CO} \cdot f_C \cdot f_O$)
- K_{CO} : C+Q=CO反応の平衡定数 (Pa/[mass%]²)
- f_C : 溶鋼中炭素の活量係数
- f_O : 溶鋼中酸素の活量係数
- g : 重力加速度 (m/s²)
- H : 溶鋼静圧が $P_{CO,e}$ と等しくなる溶鋼深さ (m)
- J_{O_2} : 酸素ガス供給速度 (mol/s)
- k_{ov} : 見かけの脱炭速度定数 (m/s)
- k_{mCO} : CO気泡を伴わない場合の溶鋼側炭素の物質移動係数 (m/s)
- k_{mOO} : CO気泡を伴わない場合の溶鋼側酸素の物質移動係数 (m/s)
- k_g : CO気泡を伴わない場合のガス側のCOの物質移動係数 (mol/(m²·Pa·s))
- k_{g0} : CO気泡を伴わない場合の1.33 kPaにおけるガス側のCOの

物質移動係数 (mol/(m²·Pa·s)) k_{mC} : 溶鋼側炭素の物質移動係数 (m/s) k_{mO} : 溶鋼側酸素の物質移動係数 (m/s) k_r : 見かけの化学反応速度定数 (m/(mass%·s)) k_{r0} : 純溶鉄の化学反応速度定数 (m/(mass%·s)) k_f : (13)式で定義される見かけの化学反応速度定数 (mol/(m²·s·Pa)) M_C : 炭素の原子量 (kg/mol) M_O : 酸素の原子量 (kg/mol) n_C : 溶鋼側の炭素の物質流束 (mol/s) n_O : 溶鋼側の酸素のモル流束 (mol/s) n_{CO} : ガス側のCOの物質流束 (mol/s) n_{CO}' : 溶鋼内部でのCO生成速度 (mol/s) P_i : タンク内圧力 (Pa) P_{CO} : タンク内のCO分圧 (Pa) P_{CO}^* : ガス側濃度境界層のガス-溶鋼界面側のCO分圧 (Pa) $P_{CO,e}$: 溶鋼中C、Oと平衡するCO分圧 (Pa) R : ガス定数 (J/(mol·K)) T : 溶鋼温度 (K) T_g : ガス温度 (K) α : 酸素ガスの反応寄与度 (-) δ : 溶鋼自由表面-るつぼ上端間距離 (m) ϵ_{CO} : COガスによる表面攪拌エネルギー (W) ρ_{Fe} : 溶鋼密度 (kg/m³) κ_O : 酸素の吸着平衡定数 (1/mass%) κ_S : 硫黄の吸着平衡定数 (1/mass%) κ_S' : 炭素飽和溶鉄の硫黄の吸着平衡定数 (1/mass%)

文 献

- 1) 大量生産規模における不純物元素の精錬限界, 日本鉄鋼協会高温プロセス部会精錬フォーラム, 日本学術振興会製鋼第19委員会反応プロセス研究会編, 日本鉄鋼協会, 東京, (1996).
- 2) H.Nomura and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **58** (1972), 29.

- 3) D.R.Sain and G.R.Belton: *Metall. Trans. B*, **7B** (1976), 235.
- 4) D.R.Sain and G.R.Belton: *Metall. Trans. B*, **9B** (1978), 403.
- 5) A.W.Cramb and G.R.Belton: *Metall. Trans. B*, **12B** (1981), 699.
- 6) H.G.Lee and Y.K.Rao: *Metall. Trans. B*, **13B** (1982), 403.
- 7) H.G.Lee and Y.K.Rao: *Metall. Trans. B*, **13B** (1982), 411.
- 8) F.J.Mannion and R.J.Fruehan: *Metall. Trans. B*, **20B** (1989), 853.
- 9) T.Nagasaka and R.J.Fruehan: *Metall. Trans. B*, **25B** (1994), 245.
- 10) T.Nagasaka and R.J.Fruehan: *ISIJ Int.*, **34** (1994), 241.
- 11) K.Harashima, S.Mizoguchi and H.Kajioka: *Tetsu-to-Hagané*, **74** (1988), 449.
- 12) K.Suzuki, K.Mori, T.Kitagawa and T.Shibayama: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 354.
- 13) K.Suzuki, K.Nakabayashi and K.Mori: *Tetsu-to-Hagané*, **63** (1977), 1470.
- 14) K.Amano, K.Ito and H.Sakao: *Tetsu-to-Hagané*, **62** (1976), 344.
- 15) Y.Han, T.Sawada, M.Kato and M.Sano: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 377.
- 16) K.Harashima, S.Mizuguchi, M.Matsuo and A.Kiyose: *ISIJ Int.*, **32** (1992), 111.
- 17) S.Mukawa, Y.Mizukami and Y.Ueshima: *Tetsu-to-Hagané*, **84** (1998), 411.
- 18) R.B.Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot: *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons Inc., New York, (1960), 520.
- 19) S.Mukawa and Y.Mizukami: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 272.
- 20) 鞭 巖: 冶金実用数学, 科学技術社, 金沢, (1975), 132.
- 21) S.Mukawa and Y.Mizukami: *Tetsu-to-Hagané*, **80** (1994), 207.
- 22) K.Sasai and Y.Mizukami: *ISIJ Int.*, **38** (1998), 332.
- 23) Y.Sasaki and K.Ishii: *ISIJ Int.*, **37** (1997), 1037.
- 24) T.Kuwabara, K.Umezawa, K.Mori and H.Watanabe: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **28** (1988), 305.
- 25) G.R.Belton: *Advanced Physical Chemistry for Process Metallurgy*, ed. by N.Sano *et al.*, Academic Press, New York, (1997), 183.
- 26) S.Ban-ya and J.Chipman: *Trans. TMS-AIME*, **245** (1969), 133.