スラグ-溶鉄間の酸素の移行速度*

森 克巳** 日和佐章一*** 川 合 保 治**

Rate of Transfer of Oxygen from Slag to Liquid Iron

Katsumi Mori**, Shoichi Hiwasa*** and Yasuji Kawai**

The dissolution rate of oxygen into liquid iron at 1873 K was investigated by melting the iron under the FeO-CaO-SiO₂ slags in the resistance or induction furnace and determining the oxygen content of iron samples taken at an appropriate time interval. The results are as follows:

(1) The oxygen content in the metal increased nearly exponentially with time. The reaction rate was increased by induction stirring and was deemed to be controlled by the mass transport steps.

(2) Using the two-film theory, overall mass-transfer coefficients were calculated to be $1.3\sim4.3\times10^{-3}$ kg/m²s for runs in the resistance furnace and $4.4\sim7.6\times10^{-3}$ kg/m²s in the induction furnace. The value of mass-transfer coefficient in the metal layer, k_m , was calculated to be 1.96×10^{-4} m/s from runs with liquid iron oxide slag and values of k_s in the slag layer were $0.2\sim3.1\times10^{-5}$ m/s.

(3) From these values of k_m and k_s it was found that the resistances to the mass transport both in the metal and slag layers were the same order and the reaction was controlled by both steps.

(Received June 7, 1980) J. Japan Inst. Metals, Vol. 44, No. 11 (1980), pp. 1282~1287

I. 結 言

製鋼過程における鉄中の不純物元素の除去反応の多くはスラグによる酸化反応であるので、各々の反応では注目する元素、たとえば、P, Mn, Cr など、の移行と同時にスラグ-溶鉄間での酸素の移行が生じ、目的反応の進行に影響することが考えられる。したがって、製鋼過程での諸元素の動的挙動を明らかにするためには、同時に進行する酸素の挙動についても明らかにする必要がある。

しかしながら、スラグ-溶鉄間の酸素の移行速度自体に関する研究はほとんどみられず、溶鉄の拡散脱酸⁽¹⁾や溶鉄への復磷反応⁽²⁾に関連して若干の検討がなされている程度である。

一方、実際の製鋼過程では諸元素の移動が同時に進行する複雑な過程であるので、その解析も複雑であるが、スラグ-溶鉄間の酸素の移行反応のみに注目した実験の場合には反応に関与する物質の数が少なく、解析も比較的簡単となることが予想され、スラグ-溶鉄間の物質移動の動力学的機構の解明にとって有効なデータが得られることが期待される。

そこで、本研究では製鋼スラグの基本系である Fe₂O-

CaO-SiO₂-MgO 系の合成スラグから溶鉄への酸素の移行速度について測定したので、その結果を報告する。

II. 実 験 方 法

1. 実験装置

加熱には抵抗炉および高周波誘導炉 (15 kW, 300 kHz) を用いた。実験の大部分は抵抗炉で行われた。その装置の概

Fig.1 Experimental apparatus.

** 九州大学工学部 (Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

*** 九州大学大学院、現在：川崎製鉄株式会社水島製鉄所 (Graduate School, Kyushu University, Fukuoka. Present address: Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., Kurashiki)

* 1977 年 6 月日本金属学会九州支部講演会に発表

略を Fig.1 に示す。反応管は内径 60 mm のアルミナ管で、その両端には試料採取口、ガス導入管、熱電対挿入管などをもつ水冷キャップを取付けた。溶解するつばとしては内径 30 mm、高さ 100 mm の電融マグネシアるつばを使用した。測温は炉下部よりるつば底部に挿入した Pt-Rh (30:6) 熱電対によった。

高周波誘導炉の場合も基本的には同じであるが、反応管として内径 80 mm の石英管を用いるとともに、るつば上部に黒鉛リングをのせてスラグの温度低下を防いだ。浴の温度はあらかじめスラグ投入前に上部より溶鉄に浸漬した熱電対で確認し、実験中はるつば底部に挿入した別の熱電対で測定した。

2. 試 料

鉄試料は電解鉄に約 0.1% の炭素を加え、真空溶解炉で溶製したものであるが、実験中、浴からの CO 気泡の発生は見られなかった。スラグ試料としては試薬の CaO, SiO₂ およびシュウ酸第一鉄を熱分解して作成した FeO を所定量配合し、鉄るつば、Ar 気流中であらかじめ溶融合成し、急冷したものを使用した。用いたスラグの組成を Table 1 に示す。

Table 1 Chemical composition of initial slags. (wt%)

Slag	Fe ₂ O	CaO	SiO ₂	MgO	$\alpha_{\text{FeO}}^{(3)}$
A	100	—	—	—	1.0
B	44.4	32.1	23.5	—	0.76
C	54.9	23.5	18.9	—	0.82
D	39.5	32.8	27.7	—	0.71
E	30.0	34.3	34.5	—	0.56
F	36.4	26.4	26.7	10.6	0.71
G	28.7	29.3	30.7	11.4	0.61
I	39.2	28.8	30.9	—	0.66
J	68.5	14.1	16.4	—	0.86
K	41.4	26.6	30.9	—	0.67
L	37.5	28.5	34.2	—	0.60
M	45.1	23.6	29.6	—	0.51
N	47.4	21.0	29.8	—	0.69
O	48.6	12.1	39.4	—	0.58
P	73.6	—	26.2	—	0.70

3. 実験 操 作

約 0.2 kg の鉄をマグネシアるつばに入れ、炉内を Ar ガスと置換したのち、少量の Ar を流しながら加熱溶解する。実験温度に達すると、初期溶鉄試料を石英管で吸引採取する。合成スラグ約 0.02 kg を入れた軟鋼製のスラグホルダーを試料採取口より挿入し、溶鉄表面近くで保持し、スラグが溶解したのを確認後、ホルダー底部を溶鉄面に接触溶解させ、スラグを流し出す。この時を反応零時間にとり、以後適当な時間毎に溶鉄試料を採取する。また、実験終了時に鉄線を用いて最終スラグ試料の採取を行う。

採取した試料はメタルについては真空溶融法により酸素分析を、スラグについては T, Fe, CaO, SiO₂ の分析を行い、100% からの残量を MgO 濃度とした。実験温度は抵

抗炉の場合には 1873 K 一定であり、誘導炉の場合には 1843~1888 K であった。

III. 実 験 結 果

抵抗炉での実験における種々のスラグから溶鉄への酸素の移行状況を Fig.2 に示す。なお、図中の実線は後述の解析で求められた計算曲線である。溶鉄中の酸素濃度はほぼ指数関数的に増大している。Fe₂O スラグのみの実験 (H-9) においては測定時間内ではほぼ一定値に達しているが、Fe₂O-CaO-SiO₂ 3 元系スラグの場合、とくに FeO の活量が小さいスラグでは平衡への到達時間が長くなる傾向がうかがわれる。

Fig.2 Effect of slag composition on the rate of transfer of oxygen (at 1873 K).

Fig.3 Effect of stirring of the metal on the rate of transfer of oxygen.

Fig. 3 は Fe_2O スラグおよび $\text{Fe}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{MgO}$ 4 元系のスラグ F について抵抗炉, 誘導炉の両炉で行った実験における酸素の移行状況を比較して示したものである。図より誘導攪拌により反応の進行が促進されることが知られる。

各実験における最終メタル, スラグの分析結果を Table 2 に示す。表には Elliott ら⁽³⁾による $\text{Fe}_2\text{O}-(\text{CaO}+\text{MgO})-\text{SiO}_2$ 擬 3 元系での FeO の等活量線図から推定されるスラグ中の FeO の活量も併示したが, 溶鉄中への酸素の移行によりスラグ中の Fe_2O 濃度が減少するにもかかわらず, スラグ中へのるつぼ材である MgO の溶解による組成変化のため最終スラグの FeO 活量はむしろ増加する場合もあった。

IV. 結果の検討および考察

1. 速度解析

本研究で対象とするスラグから溶鉄への酸素の移行は異相間の反応であって, 次の諸過程に分けることができる。

(1) スラグ - 溶鉄相界面へのスラグ中の FeO または Fe^{2+} , O^{2-} イオンの移動

(2) 相界面反応

(3) 相界面から溶鉄中への酸素の移動

ところで, Fig. 3 に示したように溶鉄が電磁攪拌される誘導炉での実験の場合, 抵抗炉での実験に比べて酸素の移行速度が速い。このことは, 一般的に言われているように, 高温反応の場合, 界面での化学反応過程は (1), (3) の物質移動過程に比べ, 十分速く進行することを示している。

そこで, (1), (3) の両相内での移動過程によって反応が律速されるとして, 境界理論に基づいて各相での移動速度を表わす式 (1), (2) となる。

$$dn_{\text{FeO}}/dt = A k_s (C_{\text{FeO}} - C_{\text{FeO}}^i) \quad (\text{mol/s}) \quad (1)$$

$$dn_{\text{O}}/dt = A k_m (C_{\text{O}}^i - C_{\text{O}}) \quad (\text{mol/s}) \quad (2)$$

ここで, A は界面積 (m^2), k_s , k_m はスラグ, 溶鉄中での物質移動係数 (m/s), C は濃度 (mol/m^3) であり, 添字 i は界面濃度を意味する。スラグ - 溶鉄間の酸素の分配平衡反

Table 2 Chemical composition of final metal and slag. (wt%)

Slag	Run No.	Reaction time (s)	[%O] _{final}	Final slag (%)				$a_{\text{FeO}}^{(3)}$
				Fe_2O	CaO	SiO_2	MgO	
A	H-1	1167	0.210	97.5	—	—	2.5	0.96
	H-9	1155	0.179	90.7	—	—	9.3	0.86
	I-4	1048	0.168	94.5	—	—	5.5	0.93
B	H-3	1168	0.140	37.3	28.5	23.0	11.2	0.74
C	H-7	1161	0.140	48.0	21.3	18.7	12.0	0.81
	H-8	1162	0.138	48.8	21.1	18.1	12.0	0.81
D	H-5	1177	0.114	31.5	27.7	26.8	14.5	0.70
E	H-14	1167	0.120	25.1	30.9	30.8	13.2	0.58
F	H-17	1163	0.097	32.2	25.0	28.0	14.9	0.66
	I-2	1147	0.116	31.8	26.1	27.3	14.8	0.67
G	H-19	1154	0.065	24.6	28.5	30.3	16.7	0.57
	H-25	1753	0.087	24.2	27.9	27.8	20.1	0.59
I	H-12	1164	0.117	35.0	25.5	28.4	11.1	0.67
J	H-13	1173	0.161	61.2	13.1	17.4	8.2	0.85
K	I-3	1192	0.169	31.9	24.9	29.2	13.9	0.71
L	H-2	1173	0.127	31.6	25.9	29.2	13.3	0.71
M	H-20	1160	0.128	—	—	—	—	—
N	H-4	1173	0.121	39.4	18.6	25.5	16.5	0.73
	H-6	1168	0.113	41.1	17.3	25.0	16.5	0.73
O	H-10	1158	0.127	36.4	5.7	28.2	29.7	0.69
	H-11	1138	0.130	38.1	5.7	26.6	29.6	0.71
P	H-15	1165	0.160	56.2	—	22.5	21.4	0.84

I-series: Induction furnace (I-2, 1876 K, I-3, 1888 K, I-4, 1843 K)

H-series: Resistance furnace (1873 K)

応はスラグがイオン性液体であるので、本来電気化学的に表わされるべきであるが、総括的な反応としての式(3)に基づき、界面でのその平衡分配値を式(4)で与える。

$$L_o = (\% \text{Fe}_2\text{O})^i / [\% \text{O}]^i \quad (4)$$

さらに、界面で酸素や Fe^{2+} イオンの蓄積がない定常的狀態では次式の関係が成立つ。

$$\dot{n}_{\text{FeO}} = \dot{n}_\text{O} \quad (5)$$

式(1)~(5)の関係を用いて、酸素の移行速度式を溶鉄中の酸素濃度の変化式として表わすと式(6)を得る。

$$\frac{d[\% \text{O}]}{dt} = \frac{A}{W_m} K \{ (\% \text{Fe}_2\text{O}) - L_o [\% \text{O}] \} \quad (6)$$

$$1/K = L_o / k_m \rho_m + M_{\text{FeO}} / M_{\text{O}} k_s \rho_s \quad (7)$$

ここで、 K は酸素移行の総括物質移動係数 ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$) であり、 W_m は溶鉄重量、 ρ_m 、 ρ_s は溶鉄、スラグの密度、 M は分子量である。本研究では反応中のスラグ試料採取を行っていないので、任意の時間、 t 、における (Fe_2O) 濃度は次の物質収支式に基づいて、溶鉄中の酸素濃度変化より求めた。

$$\begin{aligned} & \frac{W_s \{ (\% \text{Fe}_2\text{O})_{i0} - (\% \text{Fe}_2\text{O})_t \}}{M_{\text{FeO}}} \\ &= \frac{W_{m,t} \{ [\% \text{O}]_t - [\% \text{O}]_{i0} \}}{M_{\text{O}}} \end{aligned} \quad (8)$$

W_s はスラグ重量、添字 $i0$ は t 番目の試料採取時を、 t は時間 t を示す。

一方、Table 2 の最終スラグの分析結果から明らかなように、スラグ中には 10~30% の MgO が含まれている。これはるつば材である MgO の溶解によるものであるが、この MgO の溶解によりスラグの量および組成が変化する。スラグ中への MgO の溶解反応はスラグより溶鉄への酸素の移行反応とは別の反応場所、すなわち、スラグ - るつば界面で進行し、その溶解速度はスラグ中の MgO の移動で律速されることが報告されている⁽⁴⁾。したがって、 MgO の溶解は式(9)により表わされるとした。

$$\frac{d(\% \text{MgO})}{dt} = \frac{A' k'_{\text{MgO}} \rho_s}{W_s} \{ (\% \text{MgO})_s - (\% \text{MgO}) \} \quad (9)$$

ここで $(\% \text{MgO})_s$ はスラグ中の MgO の飽和溶解度である。X線透過写真によれば、溶鉄上のスラグ層とるつば間の接触面積はるつば径、スラグ重量より幾何学的に計算される値より大きい。2, 3 の実験で反応途中に採取したスラグ中の MgO の濃度変化より求めた $A' k'_{\text{MgO}} = 2.2 \times 10^{-8} (\text{m}^3/\text{s})$ なる一定値を用い MgO の溶解によるスラグ量、組成の変化を計算した。

FeO の活量係数によぼす MgO 単独の影響については明らかでないが、 MgO の溶解により $(\text{CaO} + \text{MgO})/(\text{SiO}_2)$ 比が増大し、 FeO の活量係数は増大する。したがって、Table 2 のスラグ O, P のように初期スラグの CaO/SiO_2 比が小さいスラグでは反応時の MgO の溶解量が大きいので、実験前後で L_o が変化することが予想される。しかし、

L_o とスラグ組成の関係について精度のよい関係式は得られていないので、計算では反応中の L_o は一定であると仮定した。

そこで、式(6)~(9)を用いて、 K 、 L_o をパラメーターにして溶鉄中の酸素濃度の時間変化曲線を求め、酸素濃度の実測値と計算値の差の2乗和、 $\sum_{i=0}^n \{ (\% \text{O})_{\text{obs}} - [\% \text{O}]_{\text{cal}} \}^2$ 、が最少となるものをその実験での K 、 L_o の値とした。このようにして決定された K 、 L_o^{cal} の値を Table 3 に示す。これらの K 、 L_o^{cal} より $[\% \text{O}]$ の時間変化を逆算した結果が Figs. 2, 3 の実線である。 K の値は抵抗炉の場合、 $1.3 \sim 4.3 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ で、誘導炉の場合は $4.4 \sim 7.6 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ であった。同一組成のスラグについて比較すると、誘導炉での値が2~3倍大きい。これらは後述するように、誘導炉の寄与のためであろう。

最終スラグについて、Elliottら⁽³⁾の $\text{Fe}_2\text{O} - (\text{CaO} + \text{MgO}) - \text{SiO}_2$ 擬3元系での FeO の等活量線図から推定される L_o の値を L_o^{lit} として表に示しているが、 L_o^{lit} に比べ計算値 L_o^{cal} は若干大きい傾向が見られる。なお、Timucinら⁽⁵⁾はスラグ-ガスの平衡より $\text{Fe}_2\text{O} - \text{CaO} - \text{SiO}_2$ 系の活量測

Table 3 Calculated values of mass-transfer coefficients and partition coefficient of oxygen.

Slag	Run No.	L_o^{cal}	L_o^{lit}	$K \times 10^3$ ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)	$\frac{k_s \times 10^6}{(k_m \times 10^4)}$ (m/s)
A	H - 1	464	444	2.8	(1.86)
	H - 9	512	466	2.8	(2.05)
	I - 4	572	504	6.6	(5.39)
B	H - 3	275	229	2.4	0.61
C	H - 7	347	265	1.8	0.42
	H - 8	335	227	1.3	0.24
D	H - 5	290	205	1.5	0.29
E	H - 14	213	203	4.3	1.94
F	H - 17	342	225	2.2	0.66
	I - 2	288	205	4.4	0.86
G	H - 19	377	195	1.4	0.32
	H - 25	282	183	1.7	0.37
I	H - 12	304	255	3.1	1.34
J	H - 13	392	322	1.5	0.31
K	I - 3	220	184	7.6	2.04
L	H - 2	262	219	4.0	2.32
M	H - 20	302	—	3.2	1.42
N	H - 4	326	246	2.1	0.54
	H - 6	362	257	2.0	0.55
O	H - 10	295	252	3.9	3.07
	H - 11	299	248	3.1	1.23
P	H - 15	369	327	2.3	0.72

定を行っているが、彼らのデータは FeO の活量値で約 0.1 程度 Elliott らの結果より小さい。本実験のように、飽和近くまでの高濃度の MgO を含むスラグの FeO の活量の推定に CaO と MgO を等価として Timucin らの結果を用いると、 L_o の計算値と文献値の対応はかなりよくなる。

2. 物質移動係数と律速段階

前節の解析で得られるのは総括物質移動係数であり、スラグ、溶鉄相内の両移動過程のいずれに主たる抵抗があるかを推定するには k_m , k_s の値を知る必要がある。

抵抗炉を用いた実験で Fe₂O スラグの場合、若干の MgO の溶解はあるが、比較的初期の MgO の溶解量が少ない領域での解析ではスラグ中の FeO の移動過程が無視できるであろう。その場合、式(7)は式(10)となる。

$$K = k_m \rho_m / L_o \quad (10)$$

Fe₂O スラグの実験(H-1, 9)について、式(10)の関係から得られた k_m の値は平均 1.96×10^{-4} m/s となる。そこで k_m にこの値を使い、 $\rho_m = 7 \times 10^3$, $\rho_s = 3 \times 10^3$ kg/m³† として式(7)の関係より k_s の値を求めた結果を Table 3 の最後の欄に示す。 k_s の値は $0.24 \sim 3.07 \times 10^{-5}$ m/s となり、かなり大きくばらついており、 k_s とスラグ組成、粘性などとの関係は明確ではなかった。なお、本実験の場合実験誤差が k_s に集約されており、そのためにスラグ組成との関係が明確でなかったかも知れない。

$1/K$ と L_o の関係を Fig. 4 に示す。図中の直線は上記の式(10)を示すものであるが、2 元、3 元系スラグについての実測点はいずれも直線より上方にある。加熱炉、るつば径、溶鉄量が同じであるので、 $k_m \rho_m$ は Fe₂O スラグの場合と同じと考えられる。したがって式(7)によればこの直線からのずれはスラグ側境界膜内の移動抵抗の寄与を示すものと考えられる。

Fig. 4 Relation between overall mass-transfer coefficient and partition coefficient of oxygen.

† 1673 K の密度値と $d\rho_s/dT \approx 2$ kg/m³·K 用いて計算される値は $2.9 \sim 3.1 \times 10^3$ kg/m³ となるので、ここでは平均値として 3×10^3 kg/m³ を使した⁽¹⁰⁾。

k_s の値にはばらつきがあるが、溶鉄側とスラグ側での移動抵抗比、 $(L_o/k_m \rho_m)/(M_{FeO}/M_{O} k_s \rho_s)$ を求めると、この値は本実験条件下では 0.2~3.0 程度であり、両相内の移動抵抗のいずれも無視できず、本実験の場合、2 重境界膜の取扱いが妥当であることを示している。

つぎに、本実験より得られた物質移動係数値を他の元素の物質移動係数値と比較してみる。抵抗炉を用いた類似の条件下で行われた実験より求められた種々の元素の k_m についての文献値は Table 4 に示すように $0.2 \sim 1.4 \times 10^{-4}$ m/s である。復磷実験⁽²⁾や Klein らの研究⁽⁷⁾は単に溶鉄側の物質移動律速として解析されたものであるため k_m を小さく見積っているであろう。また、拡散物質が異ってもこれらえの元素の溶鉄中での拡散係数は同程度であることを考えれば、本実験値は妥当なものと考えられる。

FeO を含むスラグ中での k_s の値については報告例が少ないが、著者らの一部は以前に類似のスラグによる溶鉄の脱磷実験より $k_{P,S}$ として $0.76 \sim 1.8 \times 10^{-5}$ m/s と本実験とはほぼ一致する値を得た。しかし、スラグ-溶鉄間での分配平衡が成り立つ条件下での Fe と Mn の同位体交換反応速度を誘導炉で調べた宮下ら⁽⁸⁾は FeO-Mn-O スラグについて 1923 K で $k_{Fe,S} = 1.1 \times 10^{-4}$ m/s と本実験値に比べ約 10 倍大きな値を報告している。この違いの原因は明らかでない。

誘導攪拌を伴う場合の k_m の値は用いた高周波電源の出力、周波数などの影響を受けることが知られている。そこで、誘導炉と抵抗炉との流動条件の違いによる相対的な影響を評価することを試みた。すなわち、誘導攪拌による影響は k_m にのみ作用すると考え、 k_m の値が誘導炉では抵抗炉の場合の x 倍に増大するとすれば、式(7)は式(11)となる。

$$1/K = M_{FeO}/M_{O} k_s \rho_s + L_o/x k_m \rho_m \quad (11)$$

同じスラグについて 2 つの炉での実験結果の比較より $x \approx$

Table 4 Comparison of mass-transfer coefficient of solute in liquid iron.

Investigation	Diffusing element	$k_m \times 10^4$ (m/s)	$k_s \times 10^5$ (m/s)
Rephosphorization ⁽²⁾	oxygen phosphorus	0.9~1.5 0.6~1.1	— —
Dephosphorization ⁽⁶⁾	phosphorus	—	0.76~1.8
Oxidation of solute in liquid iron ⁽⁷⁾	silicon aluminum manganese	1.3~1.4 0.6~1.1 0.2	— — —
Dissolution of graphite ⁽⁹⁾	carbon	0.48	—
Exchanging reaction of isotope ⁽⁸⁾	iron	—	11.0
Present work	oxygen iron	1.86~2.05 —	— 0.17~3.19

3 と推定された。Table 3 の誘導炉での実験 ($I=2,3,4$) の場合の k_s は $x=3$ と仮定し、式(11)より計算された値であり、これらの数値は抵抗炉の場合とほぼ一致している。

V. 結 言

抵抗加熱炉および誘導加熱炉を用いた2つの装置で溶融 $\text{Fe}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{SiO}_2(-\text{MgO})$ スラグから溶鉄への酸素の移行速度を 1873 K において測定し、次の結果を得た。

(1) 溶鉄中の酸素濃度は時間に対して指数関数的に増大し、スラグ中の FeO の活量が大いほど酸素の移行速度も大きい。

(2) 抵抗炉に比べ、誘導炉(攪拌浴)では移行速度が速く酸素の移行反応は物質移動律速である。

(3) 2重境膜説に基づいて求めた総括物質移動係数は抵抗炉の場合 $1.3\sim 4.3\times 10^{-3}\text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ であり、誘導炉の場合 $4.4\sim 7.6\times 10^{-3}\text{ kg/m}^2\cdot\text{s}$ であった。 Fe_2O スラグの結果より求めた溶鉄側境界層の物質移動係数 k_m は抵抗炉で $1.96\times 10^{-4}\text{ m/s}$ であり、誘導炉ではこの値は約3倍大きかった。

(4) これらの k_m の値を用いると、スラグ側境界層における物質移動係数 k_s の値は $0.24\sim 3.07\times 10^{-5}\text{ m/s}$ となった。

(5) 得られた k_m , k_s の値から酸素の移行反応は溶鉄、スラグ両相内の移動の混合律速と判断された。

終りに、本研究は文部省科学研究費補助金の援助で行なわれたものであり、実験の遂行に協力された岡 恵美子氏に感謝の意を表します。

文 献

- (1) 佐野信男, 塩見純雄, 松下幸雄: 鉄と鋼, **51**(1965), 170.
- (2) 森 克巳, 金子敏行, 川合保治: 鉄と鋼, **63**(1977), 400.
- (3) J.F.Elliott and F.W.Luerssen: J.Metals, **7**(1955), 1129.
- (4) 馬越幹男, 森 克巳, 川合保治: 鉄と鋼, **62**(1976), S570.
- (5) M.Timucin and A.F.Morris: Met.Trans., **1**(1970), 3193.
- (6) 川合保治, 土居定雄, 森 克巳: 鉄と鋼, **63**(1977), 391.
- (7) K. M. Klein, H. Abratis, H. Maas and M. Wahlster: Arch. Eisenhüttenw., **45**(1974), 9.
- (8) 宮下芳雄, 西川勝彦: 鉄と鋼, **54**(1968), 351.
- (9) 川合保治, 森 克巳: 九大工学集報, **40**(1968), 993.
- (10) 川合保治, 森 克巳, 白石博章, 山田 昇: 鉄と鋼, **62**(1976), 53.