

## 論 文

UDC 669.187.26 : 621.365.3 : 669.788

炭素鋼の直流エレクトロスラグ再溶解における  
酸素の移動について\*(故)小 島 康\*\* · 加 藤 誠\*\*\*  
野 村 正 一\*\*\*\* · 井 上 道 雄\*\*

## On the Oxygen Transfer during Direct Current Electroslag Remelting of Carbon Steel

Yasushi KOJIMA, Makoto KATO,  
Shoichi NOMURA, and Michio INOUYE

## Synopsis:

In order to study the mechanism of oxygen transfer during electro-slag remelting, carbon steel (S48C) was remelted in  $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  slag using a small scale ESR unit of direct current under the open atmosphere. It was confirmed that those ingots remelted with an electrode of negative polarity give higher oxygen content than those with positive. Those differences of oxygen behavior would be resulted from the differences of the current density and of the interfacial area between the metal and slag. The oxygen content in those ingots remelted in large scale ESR furnace could be estimated from the present results on the oxygen transfer through the molten metal/slag interface, on the assumption that the mass transfer coefficient of oxygen depends on the current density of the interface.

## 1. 緒 言

従来、エレクトロスラグ再溶解 (ESR) 法における酸素の挙動については、個々の操業条件のもとで解析した例は多いが、異なる電極径、つまり実操業規模のものと小型実験炉のそれらの間の、一貫した解析は、ほとんどなされていない。わずかに PLÖCKINGER の論文<sup>1)</sup>に、その一端をみる事ができるが、なお、定性的な域を脱していない。

一般に、ESR法におけるスラグの作用を、物質移動の立場から考えるとき、鋼の精製作用とともに、スラグ成分の溶鋼への移行、すなわち汚染作用を無視することはできない。とくに電流密度の大きな小型 ESR 炉においては、精製よりも汚染、たとえば酸素濃度は、しばしば再溶解前よりも高くなる事が認められている。

本研究は、以上の点にかんがみ、規模の異なる ESR 炉における酸素の挙動をあきらかにするため、炭素鋼を消耗電極とし、大気下で実験用直流 ESR 炉で再溶解した結果をまとめたものである。

## 2. 実 験 方 法

本研究に用いた ESR 炉は、鉄鋼基礎共同研究会特殊精錬部会において、共同研究用として名古屋大学工学部に設置されたもので、次のような規模のものである。

電源：直流定電圧電源

0~50V 任意設定可

最大 2700A

鑄型：110 mmφ 水冷銅鑄型

電極：40, 50 mmφ×1400 mm

これに水冷定盤、電極昇降装置、および測定記録装置が備えられている。

本実験では炭素鋼 S48C の丸棒 (40 および 50 mmφ×1400 mm) を電極材とし、これを  $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  (15 および 30%) 系スラグ中で再溶解し、溶解時の電圧および電流を記録した。なお、点弧板 (~100 mmφ×10 mm) には消耗電極の友材を用い、コールドスタートにより溶解を開始した。

溶製鋼塊の中心部から軸方向に ~10 mm 厚板を切出

\* 昭和 50 年 10 月本会講演大会討論会にて発表 昭和 52 年 2 月 28 日受付 (Received Feb. 28, 1977)

\*\* 名古屋大学工学部 工博 (Faculty of Engineering, Nagoya University)

\*\*\* 名古屋工業技術試験所 工博 (Government Industrial Research Institute, Nagoya, 1-1 Hirate-cho Kita-ku Nagoya 462)

\*\*\*\* 名古屋大学工学部 (現在：日本鋼管(株)) (Faculty of Engineering, Nagoya University)

Table 1. Experimental conditions and the power consumption for the electroslag remelting of steel in  $\text{CaF}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  slag.

No.	Steel	Electrode dia. (mm)	Mold dia. (mm)	Slag		Polarity	Working voltage (V)	Average working current (A)	Inter-electrode resistance (ohm)	Average melting rate (g/min)	Power consumption (KWh/kg)
				$\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	Weight (g)						
89	Pure iron	10	22	20	40	DCRP	28	240	0.117	78	1.47
90	Pure iron	10	22	20	40	DCSP	26	400	0.065	78	2.17
83	S55C	10	22	20	40	DCRP	28	250	0.112	84	1.39
73	S55C	10	22	20	40	DCSP	27	250	0.108	78	1.47
88	SK3	10	22	20	40	DCRP	28	170	0.165	102	0.75
91	SK3	10	22	20	40	DCSP	27	250	0.108	84	1.36
3	S48C	40	110	30	1000	DCRP	20	1100	0.082	185	1.96
4	S48C	50	110	30	1300	DCRP	20	1550	0.013	301	1.65
5	S48C	50	110	15	1200	DCRP	18	2150	0.0084	286	2.09
1	S48C	40	110	30	1000	DCSP	19	1400	0.014	175	2.86
2	S48C	50	110	30	1200	DCSP	20	1950	0.010	251	2.37
6	S48C	50	110	15	1200	DCSP	18	2400	0.0075	288	2.41
10	S48C	40	110	30	1200	DCSP	20	1800	0.011	248	2.43

し、軸中心で二縦割し、一方の軸中心部および側部（鋼塊表面から～10 mm内）から～10 mm角柱を切出し、さらにこれを～1 mmの薄片としてクーロマチック法による酸素および炭素の定量に供した。他方の厚板は、表面を研磨し、発光分光分析による諸元素の定量用試料とした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 溶解効率

一般に、1 kgを再溶解するに必要な電力（比電力消費量）は溶解規模の増大とともに小さくなり、また小型再溶解では逆極性（消耗電極(+)、DCRP）のほうが、大型炉では正極性（消耗電極(-)、DCSP）のほうが溶解効率はよいとされている<sup>2)</sup>。Table 1に再溶解条件と比電力消費量を示したが、DCRPのほうが比電力消費量は小さく、溶解効率はよい。これは表中に併記した見かけの極間電気抵抗からも推測されるように、DCRPでは消耗電極先端付近においてスラグ中陰イオンが放電し、高抵抗層を形成するためであろう。すなわち高抵抗層内でのジュール発熱量は大きく、消耗電極先端付近でのこうした発熱は、電極材の溶解に有効に利用されるためである。

比電力消費量はまた、溶解電流が大きいほど大きく、溶解速度が大きいほど小さくなる傾向を示している。これはDCSPの場合には、前述の高抵抗層はメタルプール近傍に形成するものと考えられ、ここでの発熱量が増しても消耗電極の溶解にはそれほど有利とはならず、むしろスラグ表面からの輻射による損失が増し、DCRPでは、電流密度が大きくなるほど電解による損失が増すた

めであろう。また溶解速度が大きければ、こうした損失は相対的に減少する。

溶解効率と関係する溶解電流は、スラグ中の $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量の高いほど小さく、スラグの電導度との関連性が顕著である。また電流は溶解速度とともに増大する傾向を示すが、これは電極送給速度を大きくするために電極間距離が短縮される結果である。DCSPではDCRPよりも溶解電流が大きく、そのためにも比電力消費量は増大する傾向がえられている。

#### 3.2 鋼塊中における酸素の濃度分布

先に報告<sup>3)</sup>したように小型炉によるESR実験の再現性はよく、再溶解条件が決まれば鋼塊中の諸元素の濃度分布も決まる。また半径方向の濃度分布はDCSPよりもDCRP溶製鋼塊のほうが大きくなる傾向がえられたが、濃度差としては大きな値ではない。そこでFig. 1

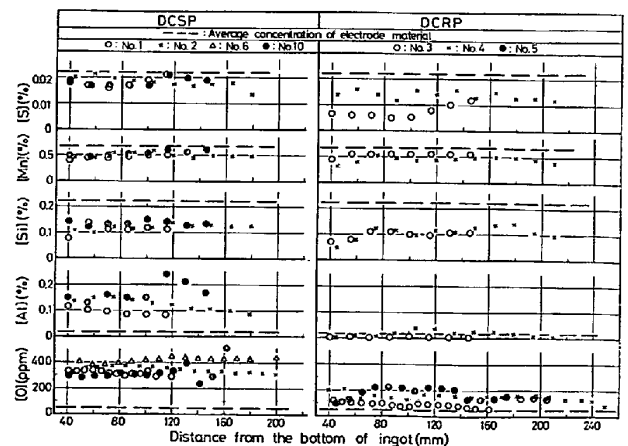


Fig. 1. The distribution of oxygen, aluminium, silicon, manganese and sulfur at the longitudinal center section of ingot.

には、鋼塊中心部、軸方向における酸素および関連元素の濃度分布と電源極性の関係を示した。

酸素濃度[O]はいずれの極性の溶解においても電極材より高く、スラグよりの汚染が顕著である。とくにDCSPにおいて[O]が高いのは、スラグ中の酸素アニオンまたは酸素アニオングループの放電面であるメタルプール界面積が大きく、スラグとの接触時間も長いためである。スラグ重量や fill ratio に関しては、実験条件における差が小さいので依存性はあきらかでないが、 $Al_2O_3$  含量が高いスラグほど[O]は低くなる傾向が認められ、KAY の報告<sup>4)</sup>と一致する。彼は、スラグ中の  $Al_2O_3$  の増加により FeO の活量が低下するためであるとしているが、[Al] と [O] は対応した濃度分布を示し、かつ鋼塊中には  $Al_2O_3$  系介在物が存在しており、FeO の影響だけでは説明しきれない。むしろ  $Al_2O_3$  の増加により溶解電流は小さくなり、反応界面における電流密度減少の効果が大きいと思われる。すなわち溶解速度が大きくなると[O]も高くなる傾向を示すのも、溶解速度を大きくすることにより溶解電流が増大するためであり、酸素の移動に関して反応界面における電流密度が重大な意味をもつことになる。

なおその他の元素について略述すると、アルミニウムおよび硫黄が電源極性に対して顕著な依存性を示している。すなわち、アルミニウムは DCSP では顕著にピックアップされるが、DCRP ではほとんど変化していない。硫黄は減少するが、DCRP のほうが脱硫は顕著である。シリコンとマンガンは類似の濃度分布を示すが、いずれも電極材濃度よりは低く、酸化損失する。ニッケル、クロム、銅および炭素の変化は少なかった。

### 3.3 吸収効率：メタルプール界面での物質移動

前述のように、酸素の移行に対しては電流密度が重要な因子の一つであることが推定されるが、どのような速度式を導入するかを決定するために、酸素の吸収効率を考えてみる。ここで、酸素の吸収効率  $\eta$  を次のように定義する。

$$\eta = (A + B) / C$$

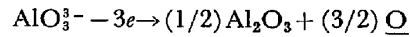
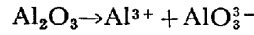
ここで、 $A$ ：鋼塊へ移行した酸素量 (g/min)  
 $= \{(\text{鋼塊中の酸素濃度}) - (\text{電極材中の酸素濃度})\} \times (\text{溶解速度}) / 100$

$B$ ：Si と反応した酸素量 (g/min)  
 $= \{(\text{電極棒中の Si 濃度}) - (\text{鋼塊中の Si 濃度})\} \times (\text{溶解速度}) / 100$

$C$ ：反応界面に到達した酸素量 (g/min)

スラグの電気化学的性質があきらかでないために、 $C$  の正確な算定はできない。ここでは、陰イオンはスラグ

中の陰イオンの数に比例して界面に到達するものと仮定する。いま、本実験に用いた  $CaF_2-Al_2O_3$  系スラグでは  $Al_2O_3$  は次のように解離している\* と考えて、 $C$  の値を算出すると次のようになる。溶解電流を  $I$  とすると、



$$C = 16 \times 60 \times 3N_{Al_2O_3} \times I / 2 \times 96500 \times (2 + N_{Al_2O_3})$$

で求められ、スラグの  $Al_2O_3$  含有量には大きく依存せず、 $\eta$  の値はたかだか 0.15~0.20 の範囲にある。すなわち、電流密度が比較的高く、陽極界面での電位降下が認められるような本実験条件下では、スラグからメタル界面への酸素の供給は十分であり、溶鉄側に反応の律速過程があるとして、酸素の移行を考えることができる。

ESRにおけるスラグ中酸素の移行界面としては、a) 電極先端/スラグ、b) 溶滴/スラグ、c) メタルプール/スラグ、の各界面が考えられる。しかし溶滴がスラグ中を通過する時間は短い(0.02~0.1 sec)<sup>5)</sup>ので、b) 界面での反応は無視できる。したがって、a) および c) 界面が主な酸素の移行界面と考えられる。さらに電源極性に関しては、DCSP では、c) 界面で酸素がピックアップされるが、a) 界面では電極材中の酸素濃度が低いので事実上除去されない。また DCRP では、a) 界面で酸素はピックアップされ、c) 界面で除去される。このようなそれぞれの界面での酸素の移行について、以下で考察する。

### 3.4 DCSP 再溶解における酸素の移行

#### 3.4.1 メタルプール/スラグ界面での酸素の物質移動係数

前述のように酸素の吸収効率は 1 よりかなり小さいので、DCSP ではスラグからメタルへの酸素の移動速度がメタルプールの境膜中の拡散によつて律速されるものと考えられる。この場合、速度式は次のように与えられる。

$$\frac{dC}{dt} = \frac{F}{V} \cdot k_s \cdot (C^* - C) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 $C$ ：酸素濃度、 $F$ ：界面積、 $V$ ：体積、 $C^*$ ：界面飽和酸素濃度、 $k_s$ ：酸素の物質移動係数

いま、 $t=0$  における酸素濃度を  $C_0$ 、 $t=t$  における酸素濃度を  $C_t$  として(1)式を積分すれば、次式がえられる。

\* 解離反応式としては種々考えられるが、このような解離反応を考えることにより、Fig.1 で DCSP の場合に [Al] も [O] も共に増加することが説明される。すなわち DCSP では、メタルプール表面(+)でこのような放電反応が進むために界面への酸素の供給は十分でありまたこの反応で界面付近に蓄積された  $Al_2O_3$  が介在物として鋼塊中に捕捉されると考えれば実験結果は理解される。しかし溶鋼滴表面(-)で放電する陽イオンと、放電により析出した金属が滴とともにメタルプールへ移行してからのスラグへのリターン分の見積りが困難なので、現実の解離反応がどのようなものであるかについてはここでは議論しない。

Table 2. Mass transfer coefficient of oxygen in DCSP with data used.

No.	Steel	Area of metal pool $F_D$ ( $\text{cm}^2$ )	Current density at metal pool ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ) $_D$	Average melting rate (g/min)	$[O]_{\text{ingot}}$ (%)	$[O]_{\text{elec.}}$ (%)	Oxygen removed (%)	$k_s$ (cm/sec)
90	Pure iron	3.80	105	78	0.0713	0.0091	0.0622	0.0152
73	S55C	3.80	65.8	78	0.0369	0.0036	0.0333	0.0075
91	SK3	3.80	65.8	84	0.0361	0.0044	0.0317	0.0076
1	S48C	95.0	14.7	175	0.0315	0.0042	0.0273	0.00054
10	S48C	95.0	18.9	248	0.0312	0.0042	0.0270	0.00076
2	S48C	95.0	20.5	251	0.0336	0.0042	0.0294	0.00084
6	S48C	95.0	25.3	288	0.0375	0.0042	0.0333	0.0011

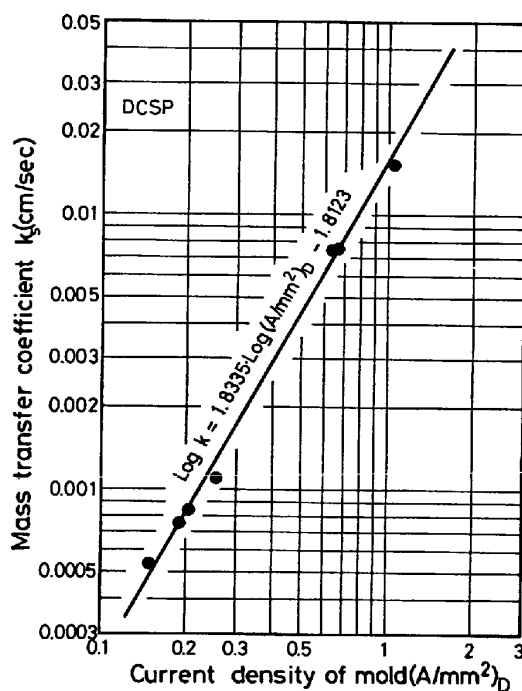


Fig. 2. Relationship between the mass transfer coefficient of oxygen and the current density of metal pool (mold) in DCSP ESR.

$$\ln \frac{C^* - C_0}{C^* - C_t} = \frac{F}{V} \cdot k_s \cdot t \quad \dots \dots \dots (2)$$

溶解速度を  $w$  とすれば、体積  $V$  は  $w t / \rho$  ( $\rho$ : 密度) で与えられるから、(2)式はさらに(3)式のように変形することができる。

$$\log \frac{C^* - C_0}{C^* - C_t} = \frac{\rho \cdot F \cdot k_s}{2.3 w} \quad \dots \dots \dots (3)$$

上式を用い、 $C^* = 0.22\%$ 、 $C_0 = 0$  として酸素の物質移動係数を算出した結果を Table 2 に示す。 $k_s$  とメタルプールの電流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ) $_{\text{pool}}$  [= (平均溶解電流) / ( $\pi D^2/4$ )、すなわち平均鋳型電流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ) $_D$  で近似、 $D$ : 鋳型内径) の関係を Fig. 2 に示すが、よい直線性がえられており、結果を最小二乗法で整理すること

により次の関係式が求められた。

$$\log k_s (\text{cm/sec}) = 1.8335 \log (\text{A}/\text{mm}^2)_D - 1.8123 \quad \dots \dots \dots (4)$$

ただしこの場合、以下の諸条件が満たされているものと仮定している。

- 1) Si は界面で酸化される。
- 2) C は酸化されない。
- 3) メタルプール界面では酸素は飽和し、0.22%である。
- 3) 界面で  $\text{SiO}_2$  や  $\text{Al}_2\text{O}_3$  が生じても界面積は変化しない。
- 5) 溶滴の落下によつて界面は乱されない。

#### 3.4.2 操業規模の拡大と酸素濃度

前項で  $k_s$  と鋳型電流密度の関係式がえられたので、操業規模の拡大により酸素の移動がどのように変化するかを推定することができる。

一般に鋳型径の増大ともなつてメタルプール界面の電流密度が減少することはすでにあきらかにしたところである<sup>6)</sup>。すなわち、消耗電極における電極電流密度 ( $\text{A}/\text{mm}^2$ ) $_d$  と電極径  $d$  (mm) の関係は、近似的に次式で表わすことができる。

$$\log (\text{A}/\text{mm}^2)_d = -1.0110 \log d (\text{mm}) + 1.5880 \quad \dots \dots \dots (5)$$

一方、実操業における電極径は鋳型径  $D$  に関係し、集録データの整理から、次の関係式がえられた。

$$\log d (\text{mm}) = 1.3123 \log D (\text{mm}) - 0.9370 \dots (6)$$

すなわち、上の2式からメタルプールの電流密度と鋳型径の関係式(7)が導出され、操業規模を拡大した場合のスラグによる酸素汚染を検討することができる。

$$\begin{aligned} \log (\text{A}/\text{mm}^2)_{\text{pool}} &\approx \log (\text{A}/\text{mm}^2)_d \\ &= -0.7021 \log D (\text{mm}) + 0.6613 \dots (7) \end{aligned}$$

実操業におけるメタルプールの上昇速度(凝固速度)  $v$  は、通常  $50 \sim 200 \mu/\text{sec}$  である<sup>5)</sup>から、(7)式と(4)式から求めた  $k_s$  を用いて、次の関係から近似的に汚染酸

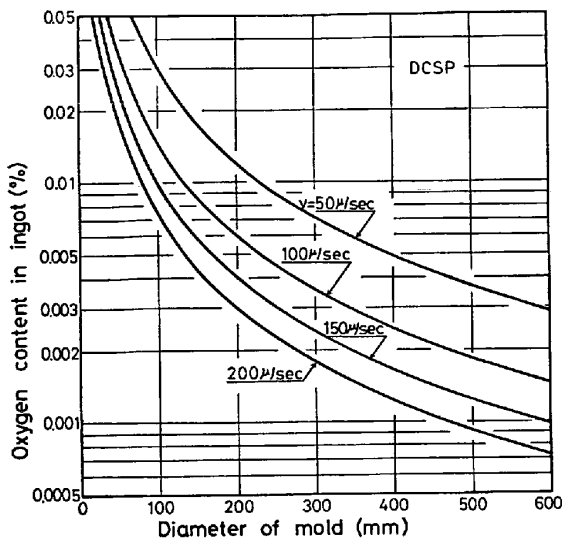


Fig. 3. Estimated values of oxygen content in DCSP ESR ingot from the current density of metal pool, under various raising speed of metal pool.

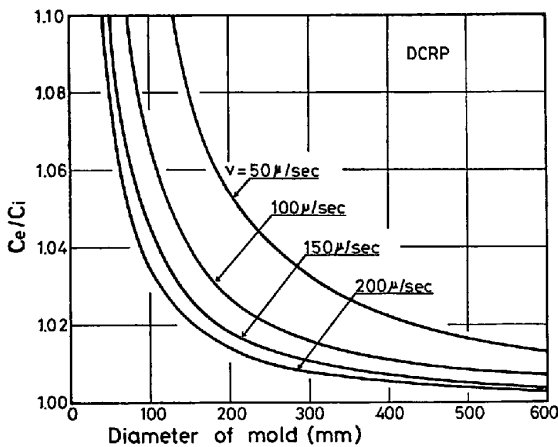


Fig. 4. Relationship between the mold diameter and the ratio of oxygen content in metal pool and that in the molten surface of consumable electrode under various raising speed of metal pool.

素量を計算することができる。

$$\%O = 0.22 \cdot k_s / v \dots\dots\dots (8)$$

計算結果を Fig. 3 に示すが、スラグによる酸素の汚染は操業規模の拡大につれて減少することが期待できる。

3.5 DCRP 再溶解における酸素の移行

3.5.1 DCRP における電極先端溶融部の酸素濃度の推定

DCRP の場合には、酸素は電極棒先端の溶融部で溶鉄へ移行し、メタルプールでは逆にスラグへと移行する。このメタルからスラグへ酸素が移行する場合においても DCSP で求められた電流密度と物質移動係数との関係が適用されるものとする。電極先端溶融部の酸素濃度  $C_e$  は

メタルプール(鋼塊中)の酸素濃度  $C_i$  の関数となる。すなわち、

$$C_e - C_i = (F/v) \cdot k_s \cdot C_i \dots\dots\dots (9)$$

上式より  $C_e/C_i$  を求め、鑄型径との関係を Fig. 4 に示した。これによると鑄型径 200 mm 以上になると、メタルプールを通しての脱酸はほとんど期待できない。すなわち電極先端溶融部の酸素濃度は、ほとんど鋼塊中のそれと等しくなってしまう。

3.5.2 電極先端溶融部の物質移動係数

DCSP で計算したと同様に、物質移動係数  $k_r$  と電極電流密度の関係を求め、Fig. 5 に示した。なおここでの計算には前記の  $C_e$  を用いた。

さきに著者らが試みたモデル実験<sup>7)</sup>からもあきらかなように、電極先端溶融部での物質移動係数がメタルプールのそれよりも小さいとは考えられないので、この計算には疑問がある。すなわち電流は電極先端の溶滴形成部に集中するので、電極断面積から求めた電極電流密度と  $k_r$  の関係には問題が残る。

さきに小型炉により DCRP で再溶解したときの実験結果によれば、電極先端で生成する滴の重量と溶解速度の間には、Fig. 6 に示すような関係が認められる<sup>8)</sup>。すなわち鑄型径が決まれば溶解速度の範囲が決まり、落下

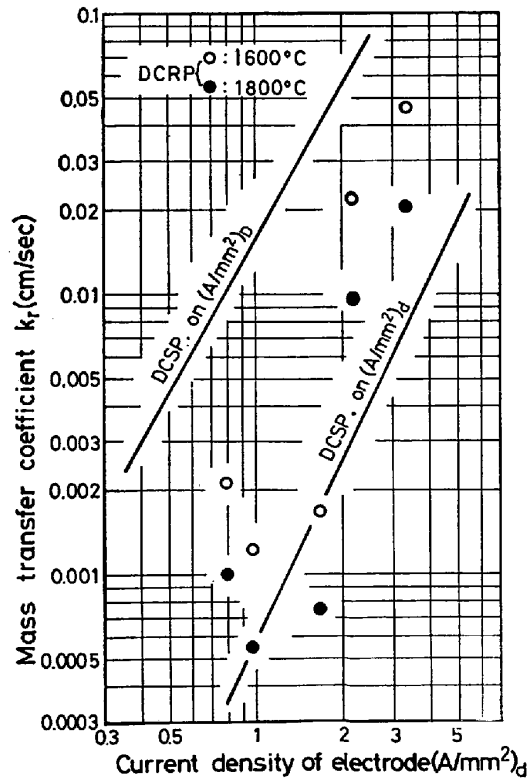


Fig. 5. Relationship between the mass transfer coefficient of oxygen and the current density of consumable electrode in DCRP ESR.

Table 3. Mass transfer coefficient of oxygen in DCRP with data used.

No. Steel	Area of electrode $F_d$ (cm <sup>2</sup> )	Current density of elec. (A/mm <sup>2</sup> ) <sub>d</sub>	Average meltig rate (g/min)	[O] <sub>ingot</sub> (%)	[O] <sub>elec.</sub> (%)	Oxygen removed (%)	$10^5 \cdot k_r$ (cm/sec)	[O] <sub>e</sub> <sup>cal.</sup> (%)	Drop weight (g)	Surface area of drop $F_{sp}$ (cm <sup>2</sup> )	Frequency of drop removal n (1/sec)	$n \cdot F_{sp}$ (cm <sup>2</sup> /sec)	$10^5 \cdot k_{sp}$ (cm/sec)
84 S55C	0.785	3.31	120	0.0284	0.0036	0.0248	770	0.0315	1.0	1.37	2.0	2.74	660
88 SK3	0.785	2.16	84	0.0194	0.0044	0.0150	350	0.0208	1.2	1.54	1.17	1.80	455
3 S48C	12.6	0.875	185	0.0081	0.0042	0.0039	30	0.0087	2.57	2.43	1.20	2.92	170
4 S48C	19.6	0.789	301	0.0138	0.0042	0.0096	55	0.0149	2.72	2.66	1.84	4.89	430
5 S48C	19.6	1.10	286	0.0111	0.0042	0.0069	100	0.0128	2.48	2.43	1.92	4.67	370

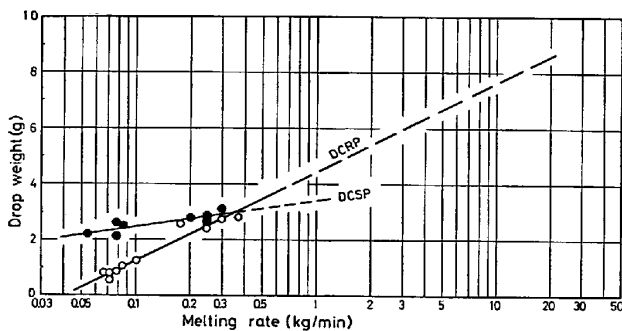


Fig. 6. Relationship between the weight of drop and the melting rate.

する滴の重量が決まる。これを球と仮定して、反応は球表面のみで起こるものとすれば、球表面積、毎秒落下滴数、毎秒出現する界面積が求められるので、この場合の物質移動係数  $k_{sp}$  が計算できる。計算結果を Table 3 に示した。  $k_{sp}$  は溶解速度に依存すると考えられるが、いまかりにこれを一定と仮定すると、DCRP再溶解における酸素濃度を推定することができる。

3.5.3 操業規模の拡大と酸素濃度

前述のごとく実操業データの集録結果から、鑄型径と溶解速度 (g/sec) の関係を次のように整理することができた。

$$\log (\text{g/sec}) = 0.6394 \log D (\text{cm}) + 0.9250 \dots (10)$$

したがって Fig. 6 の溶解速度と滴重量の関係が、図中破線で示すように外挿しうるものと仮定すれば、前項同様の計算により、操業規模の拡大による酸素濃度変化を推測することができる。Fig. 7に、 $k_{sp}$  を 0.003, 0.005 および 0.007 とした場合の鋼塊中酸素濃度を鑄型径との関係で示した。なおこれには、Fig. 8の電極電流密度と酸素濃度の実験結果から単純に推定した関係を破線で併示した。図によれば、計算による推定では実験結果からの推定ほど操業規模に対する依存性は大きくない。また鑄型径 600 mm で 200  $\mu$ /sec のとき、生成する滴の重量を 8.9 g と推定したが、かりに 12 g としても鋼塊中酸素濃度は 8.9 g の場合の 0.91 倍となり、滴重量推定の誤差は酸素濃度に大きな影響をおよぼさない。

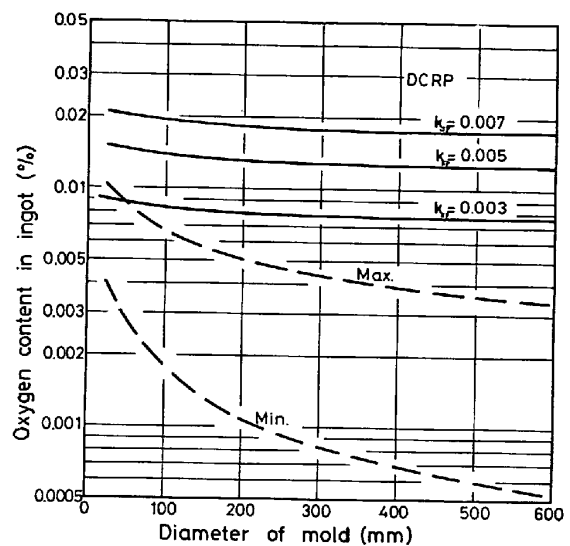


Fig. 7. Estimated values of oxygen content in DCRP ESR ingot depending on the diameter of mold.

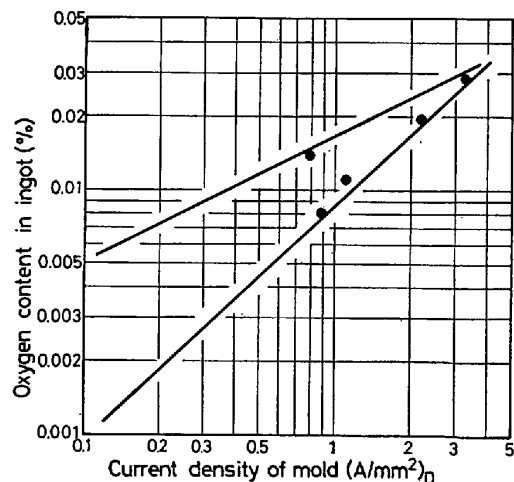


Fig. 8. Experimental relationship between the oxygen content in DCRP ESR ingot and the current density of mold.

3.6 DCSP 再溶解と DCRP 再溶解による酸素濃度の比較

DCRPの場合の酸素濃度と操業規模の関係は前項に示したように明確でないが、酸素濃度が操業規模の増大に

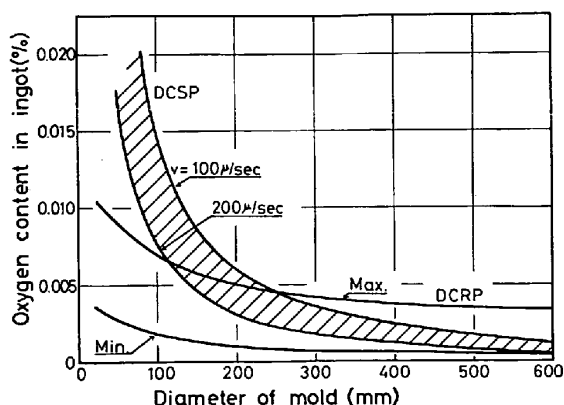


Fig. 9. Comparison of the estimated values of oxygen content in ingot in DCSP and those in DCRP.

ともなつてもつとも低くなる Fig. 7 の関係と、DCSP でのこの関係を Fig. 9 に示した。鑄型径が 100 mm 以下では、DCRP での再溶解が DCSP に比較して酸素濃度に関して有利である。また操業規模の拡大とともに、DCSP での溶解が有利となることが理解できる。このような関係は、さきに PLÖCKINGER<sup>1)</sup> によつて簡単な経験則として報告されているが、本研究結果は、さらにこれに理論的な裏付けを与えたものといふことができる。

#### 4. 結 言

E S R 法における酸素の挙動について、実験用小型直流 E S R 炉を用いて試みた実験の結果、2, 3 の有益な知見をうることができた。すなわち、DCSP で再溶解する場合は、スラグ/メタルプール界面を通しての酸素の移行が支配的であるとみなすことができ、酸素の物質移動係数とメタルプールの電流密度との間にきわめてよい直線関係が成立つことを見出した。これに対し、DCRP

すなわち電極先端での酸素の移行については、なお不明のところが残されており、十分満足できる説明はえられなかつた。しかしながら、本研究では一応電極先端部の溶滴を考えたモデルにもとづき、解析を試みた。

さらに、さきに著者らがあきらかにした、一般の操業規模範囲まで含み、鑄型径と電流密度との間にみられる関係式と、本実験結果から、スケールアップした場合の E S R 鑄塊の酸素濃度を推定した。すなわち、一般に鑄型径が大きくなるにつれ、鑄塊中に持込まれる酸素は少なくなるが、直流溶解の場合は大型化するほど DCSP のほうが有利であることが十分考えられる。

なお、本研究を行なうにあたり、前述のように鉄鋼基礎共同研究会特殊精錬部会から多大のご援助をいただいたことに、深く謝意を表すものである。また種々有益なご討論をいただいた同部会の委員の方々に、厚くお礼申し上げます。最後に、また電極材をお世話いただいた愛知製鋼(株)および大同特殊鋼(株)に感謝いたします。

#### 文 献

- 1) E. PLÖCKINGER: J.I.S.I., 211 (1973), p. 533
- 2) 例えば、井上道雄, 小島 康, 加藤 誠: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 139
- 3) 小島 康, 加藤 誠, 豊田剛治, 井上道雄: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 2001
- 4) D. A. R. KAY: 2nd Int. Symp. ESR (1969): J.I.S.I., 209 (1971), p. 962
- 5) M. M. KLYUEV and Yu. M. MIRONOV: Stal in Eng., (1967), p. 480
- 6) 井上道雄, 小島 康, 加藤 誠: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 139
- 7) 加藤 誠, 小島 康, 井上道雄, 豊田剛治: 電気化学, 43 (1975), p. 437
- 8) 小島 康, 加藤 誠, 豊田剛治, 井上道雄: 電気製鋼, 45 (1975), p. 211