

Table 1. Estimated physical properties, effective diffusion coefficient, Schmidt's No. and liquidus concentration of Fe-C melt.

| Temp. °C | liquidus. c. C <sub>L</sub><br>wt. % | Viscosity<br>μ, cp. | Density<br>ρ, g/cm <sup>3</sup> | Effective diffusion<br>coeff.<br>D'' × 10 <sup>5</sup> , cm <sup>2</sup> /sec | Schmidt's No.<br>Sc, μ/ρD |
|----------|--------------------------------------|---------------------|---------------------------------|---|---------------------------|
| 1534     | 0.00                                 | 7.13                | 7.23                            | 5.28  | 186                       |
| 1493     | 0.51                                 | 5.83                | 7.08                            | 8.74  | 94.1                      |
| 1450     | 1.21                                 | 6.70                | 7.02                            | 9.54  | 100.0                     |
| 1400     | 1.83                                 | 7.62                | 7.03                            | 9.62  | 123                       |
| 1350     | 2.46                                 | 9.17                | 7.05                            | 8.71  | 149                       |
| 1300     | 2.94                                 | 10.1                | 7.07                            | 8.28  | 173                       |
| 1250     | 3.42                                 | 11.4                | 7.09                            | 7.68  | 210                       |
| 1200     | 3.86                                 | 12.1                | 7.11                            | 7.21  | 236                       |

Table 2. Estimated effective velocity of liquid Fe-C alloy and corresponding Reynold's No. in our experimental apparatus.

| Temp, °C              | 1300 | 1350 | 1400 | 1450 |
|-----------------------|------|------|------|------|
| Re × 10 <sup>-3</sup> | 4.56 | 4.91 | 5.83 | 6.99 |
| Ue, cm/sec            | 20.0 | 19.6 | 19.4 | 20.5 |

て

$$D'' = (KT/8r\mu)(1 + \partial \ln \gamma_C / \partial \ln N_C) \dots (7)$$

を計算 ( $\gamma_C$  の温度係数は小さいので 1400°C でとつた) すると Fig. 5 に示した実線をうる。さきに (5) 式から計算した実効値  $D'$  はこの実線と定性的に対応している。

Fig. 5 における一致には理論上の厳密さはまつたくないが鋼円柱の溶解を考える場合の有効値として、本報では実線上の数値を採用して議論を進めることにする。

以上、検討した結果およびそれらから計算できる Sc 数 ( $\mu/\rho D$ ) をまとめて Table 1 に示す。これらの数値はなお検討の余地があるが、Fig. 5 からみるに、これらの数値を使つて計算したとき、R. G. OLSSON et al. の実測した溶解速度に対する最終的な誤差は、実験誤差を含めて ±20% 程度になる。

なお、R. G. OLSSON et al. は 1280~1500°C で  $D = 9 \times 10^{-5}$  cm<sup>2</sup>/sec と仮定しているが、根拠にとぼしく、彼らの実験結果 (Fig. 5) から D が温度 (すなわち C<sub>L</sub>) とともに変動することがうかがわれる。

#### 6. 本装置における有効相対速度 Ue の試算

本装置における溶鉄の速度 Ue を乱流と仮定する。

(4) 式に Table 1 の数値および Fig. 4 の実験結果をいれて未知の相当 Re 数および有効な相対速度 Ue を計算すると Table 2 のようである。

H. KNÜPPEL et al.<sup>12)</sup> は彼らの装置で実測した鋼浴表面の速度を 20 cm/sec、鋼浴のもり上り高さから推定した速度を 29~32 cm/sec と報告しているが、本報の結果もこれと比較して大きな差異はない。上述のような方法によつても、溶鉄の運動速度を概略ながら推定することが可能と思われる。

#### 文 献

- 1) R. D. PEHLKE, P. D. GOODWELL and R. W. DUNLAP: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min.,

Met. & Pet. Eng, 233 (1965), p. 1420

- 2) 小坂, 義輪: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 537, 539
- 3) J. M. LOMMEL and B. CHALMERS: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 215 (1959), p. 499
- 4) 平田: 化学工学, 26 (1962) p. 709
- 5) C. BENEDICS and N. G. ERICSON: Arch. Eisenhüttenw., 7 (1930), p. 473
- 6) N. V. VATOLIN, et al.: Physics of Metals, Metallography 15 (1963), p. 53 (CCCR Eng. Tr)
- 7) たとえば R. E. GRACE and G. DERGE: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 212 (1958), p. 331
- 8) R. G. OLSSON, V. KOUMP and T. F. PERZAK: ibid 233 (1965), p. 1654
- 9) M. EISENBERG, C. TOBIAS and C. WILKE: CEP Symp. Ser, 51 (1955), p. 1
- 10) J. C. M. LI, P. CHANG: J. Chem. Phys., 23 (1955), p. 518
- 11) L. W. GURRY and L. S. DARKEN: "Phys. Chem of Metals" McGraw Hill book co. NY, (1953), p. 408
- 12) H. KNÜPPEL and F. OESTERS: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), p. 729

### (94) 高周波炉における Fe-C 溶鉄の攪拌強度

(高周波炉中の溶鉄の攪拌—II)

名古屋工業技術試験所

○小坂 岑雄・工博 義輪 晋

Intensity of Stirring of Liquid Fe-C Alloy in H.F. Furnaces.

(Stirring of liquid iron in H.F. furnace—II)

Mineo KOSAKA and Dr. Susumu MINOWA.

#### 1. 緒 言

前報<sup>1)</sup>においては、鋼円柱の Fe-C 溶鉄中への溶解が物質移動律速の過程であることから、すでに通常の流体で知られている物質移動の無次元相関を利用して、高周波溶解時に Fe-C 溶鉄側に起こる実効的な運動速度 Ue

Table 1. Experimental apparatus.

| Exp. No.                | H. F. source | frequency f, kc | Crucible (OD×ID×H cm)   | Induction coil OD×H cm (turn) | Depth of melt 2L, cm |
|-------------------------|--------------|-----------------|---|-------------------------------|----------------------|
| K 1~5<br>L 1~5<br>M 1~5 | Hg-gap-spark | 30~40           | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (6.3×5.3×10.0)<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (5.5×4.0×15.0)<br>graphite (6.3×5.3×10.0) | 9.5×20 (34)                   | 5.86<br>9.98<br>7.18 |
| N 1~4<br>O 1~4<br>P 1~5 | Vac.—bulb    | 500             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (6.3×5.3×10.0)<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (5.5×4.0×15.0)<br>graphite (6.3×5.3×10.0) | 9.0×18.0 (16)                 | 6.68<br>8.90<br>6.88 |
| Q 1~5<br>R 1~4<br>S 1~3 | SCR          | 3.2             | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (6.3×5.3×10.0)<br>graphite ( " " )<br>Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( " " )               | 12.0×23.0 (23)                | 8.04<br>7.46<br>6.10 |

を概略推定することが可能であることを示した。本報では、われわれの研究室で利用している範囲で、3種類の高周波電源をとりあげ、それぞれの場合の実験室的なるつぼ溶解時の溶鉄の未知な攪拌強度を、前報と同様の方法で調べた結果について報告する。

製鋼反応の速度論的な研究において、溶鉄の運動速度は解析上の重要な因子になるが、高周波炉ではこれが未知の場合が多いので、以下の方法で概略ながら調べておけば、その後の考察の上にも非常に有用であろうと考えられる。

2. 予備実験

高周波装置の種類により、溶鉄の攪拌強度がどの程度ことなるかを予備的に試験する目的で、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> または黒鉛製のつぼ(外径6.3×内径5.3×高10.0cm)を用いFe-C溶鉄(3.8 wt% [C])約600gを溶解し、外径1.0×長さ20cmの炭素鋼円柱(C 0.15, Si 0.02, Mn 0.44,

S 0.016, P 0.022 wt%)を浸漬した後、マイクロメーターで直径を測定して溶解速度 Vr, cm/sec の概略値を求めると Fig. 1 のようになる。

この場合、黒鉛るつぼでは溶鉄は炭素飽和となり、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> るつぼでは溶解の進行とともに炭素濃度が変化するから、Fig. 1 は概略の関係を示すのみであるが、あきらかに使用した高周波電源、るつぼの種類などにより Vr 値の相違がみられ、これと対応して溶鉄の攪拌強度も変化しているものと考えられる。これらの関係をさらに明確にするため、次のように実験を行なった。

3. 供試材料、実験装置

鋼円柱は直径1.0×長さ18cmの炭素鋼(C 0.28, Si 0.15, Mn 0.68, S 0.011, P 0.013 wt%)を研磨、トリクレンで脱脂してから使用した。溶鉄は電解鉄と高純度黒鉛から溶製した。測温方法その他の装置の構成は前報とほぼ同様であるが、高周波装置とるつぼの種類をかえて Table 1 に示すように実験を進めた。

4. 実験操作、測定方法

前報とほとんど同様であるからここでは省略する。

5. 結果とその考察

5.1 溶解速度 Vr の測定結果

浸漬時間 t に対して平均直径 dm を測定した結果の一例を Fig. 2 に示す。これらの直線関係を最小 2 乗法で整理すると Vr が求まるが、図にみるように t が短いので、Vr の再現誤差は ±6% 程度である。溶解の進行による炭素濃度 Cm の変動は本報の範囲で 0.2~0.4 wt% であり、黒鉛るつぼの場合は既知の飽和値にほぼ等しかった。

ここにえられた Vr 値を用いて、前報と同じく次式<sup>2)</sup>

$$Vr = k \ln [1 + (C_m - C_L) / (C_L - C_I)] \dots\dots (1)$$

(記号前報)にしたがつて整理すると Fig. 3 をうる。ただし、Fig. 1 から知られるように exp. p. の結果はばらつきが非常に大であるので、最大値と最小値の範囲をとって示す。

5.2 物質移動係数 k の計算結果

Fig. 3 から最小 2 乗法によって k 値を求めることができるが、前報の結果からも知られるように、溶鉄の有効速度は温度によりあまり大きく変動しないので、本報では主として 1400°C において測定を行ない、他では 2~3 回の測定結果から算術平均をとって表示した。

なお、各実験で 1400°C の保持電力を記録したが、こ

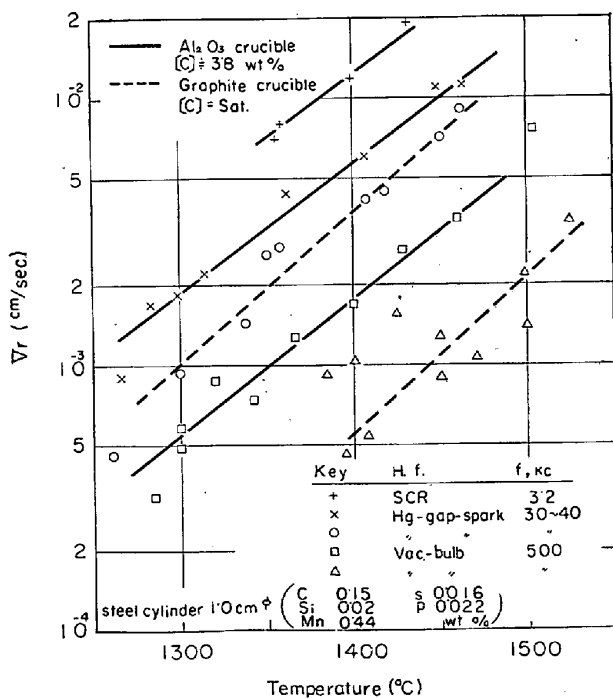


Fig. 1. Variation of rates of dissolution of steel cylinder into liquid Fe-C melt with H.F. induction apparatus. (preliminarily test)

Table 2. Mass-transfer coefficient,  $k$  cm/sec.

| Exp. No. | $k \times 10^3$ , cm/sec at T. °C |           |           |      | Cm, wt, % | Induction power<br>Kw at 1400°C |
|----------|-----------------------------------|-----------|-----------|------|-----------|---------------------------------|
|          | 1450                              | 1400      | 1350      | 1300 |           |                                 |
| K 1~5    | 7.89                              | 7.45      | —         | 6.24 | 2.87~3.86 | 3.9                             |
| L 1~5    | —                                 | 5.48      | 4.83      | 4.33 | 3.14~4.13 | 4.2                             |
| M 1~5    | 5.92                              | 5.32      | 4.64      | —    | 4.68~5.02 | 3.8                             |
| N 1~4    | 2.19                              | 1.73      | —         | 1.43 | 3.56~4.26 | 3.7                             |
| O 1~4    | 1.43                              | 1.37      | 1.17      | —    | 4.56~4.86 | 3.8                             |
| P 1~5    | 3.03~1.03                         | 2.88~0.99 | 2.75~0.97 | —    | 4.51~5.00 | 3.5                             |
| Q 1~5    | —                                 | 8.88      | 8.11      | 7.41 | 3.14~3.98 | 3.8                             |
| R 1~4    | —                                 | 6.78      | 6.38      | 5.39 | 4.64~4.89 | 3.7                             |
| S 1~3    | 11.4                              | 9.97      | 9.43      | —    | 3.55~4.15 | 3.7                             |

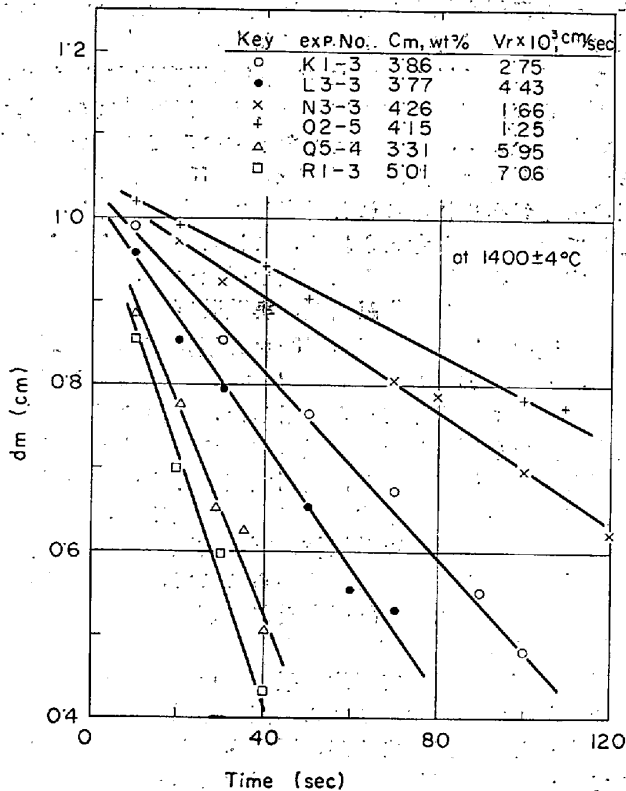


Fig. 2. Typical relation between immersed time,  $t$ , and averaged diameter,  $dm$ , at 1400°C.

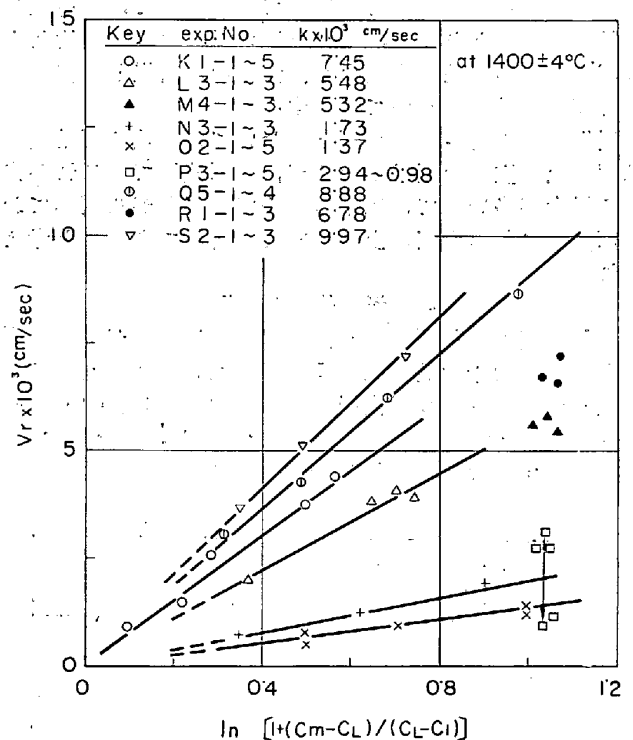


Fig. 3. Typical relation between the rates of dissolution,  $V_r$ , and driving force term in eq. (1).

これはつぼの保温程度、溶鉄量その他に支配されるのであくまで参考程度のものである。Table 2 では黒鉛をつぼでも装置ごとに  $k$  がことなり、完全には静止浴となっていないことが推察される。

5.3 物質移動係数  $k$  と温度の関係

Table 2 の結果によると、 $k$  の温度による変化がまとめられるが、1300~1450°C での全変動は  $V_r$  の測定誤差と比較して、あまり大きくない。このことについて考えるに、 $k$  値について「円柱、壁、平板に対する平行流<sup>3)</sup>」の無次元相関が成立するとして

$$J_D = (k/U)(Sc)^{2/3} = 0.664(Re)^{-0.5} \dots (2)$$

$$J_D = (k/U)(Sc)^{2/3} = 0.037(Re)^{-0.2} \dots (3)$$

(記号前報)を变形すると

$$k = U^{0.5} L^{-0.5} [(0.667)(\mu/\rho)^{0.5} (Sc)^{-2/3}] [ ] = A \dots (2)'$$

$$k = U^{0.8} L^{-0.2} [(0.037)(\mu/\rho)^{0.2} (Sc)^{-2/3}] [ ] = B \dots (3)'$$

いま  $U$  と  $L$  の温度による変動を無視できるとして、前報の Table 1 から数値を代入して定数  $A$ ,  $B$  を温度ごとに計算すると、Fig. 4 のようである。(1)式から推進力項  $\ln[1+(C_m - C_L)/(C_L - C_I)]$  を  $C_m = 4.0 \pm 0.5$ ,  $C_I = 0.3$  wt.% と仮定して計算した結果もあわせて示す。図にみるように定数  $A$ ,  $B$  の温度による変動は比較的小さいが、推進力項は温度によつて大きく変化し、かつ  $C_m$  の変化による影響がきつよく表われることがわかる。

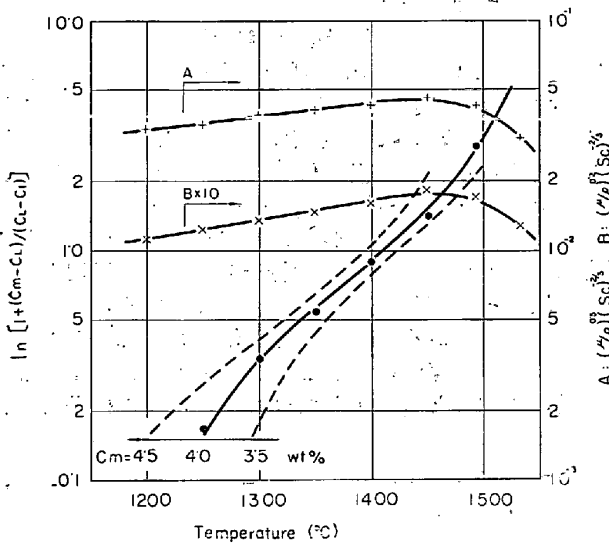


Fig. 4. Variation of physical properties term in eq. (2)', (3)' and driving force term in eq. (1) with temperature.

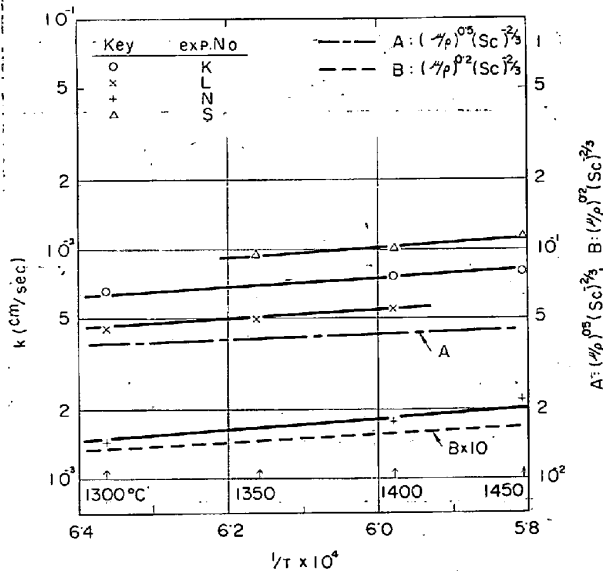


Fig. 5. Typical relation between reciprocal temperature,  $1/T$ , and mass-transfer coefficient,  $k$ .

Table 3. Comparison of estimated velocities of Fe-C melt,  $U_e$ , from experimental data by eq. (3) with  $\bar{U}$ , from electro-magnetic force by eq. (4), (5) at 1400°C.

| Note                            | Exp. No. | K     | L    | M     | N    | O    | P | Q      | R    | S    |
|---------------------------------|----------|-------|------|-------|------|------|---|--------|------|------|
| $Re \times 10^{-3}$ , eq. (3)   |          | 7.01  | 9.31 | 5.94  | 1.33 | 1.42 | — | 12.9   | 8.44 | 10.6 |
| $U_e$ , cm/sec, eq. (3)         |          | 25.9  | 20.7 | 17.8  | 4.32 | 3.44 | — | 34.9   | 24.5 | 37.6 |
| $\bar{u}$ , cm/sec, eq. (4) (5) |          | 63~58 |      | 30~28 |      |      |   | 110~98 |      |      |

ところで、本報で実験によりえられた物質移動係数  $k$  の温度関係を Arrhenius plot で示し、さらに (2)', (3)' 式の A, B 値と比較すると Fig. 5 のようであり、

ここにえられた直線関係の勾配がほぼ等しいことから、鋼円柱の溶解は物質移動律速の過程であり、(2), (3) 式から逆に溶鉄側の有効な運動速度  $U_e$  を求めることができることが知られる。

5.3 有効速度  $U_e$  の計算

前報と同様に、本報で実験的に求めた  $k$  値を (3) 式に代入し、溶鉄側の物性定数値を使用して、各装置における溶鉄の有効運動速度  $U_e$  を計算した結果を Table 3 に示す。

上述の結果について、Fe-C 溶鉄中に鋼円柱を立てたことによる磁束分布の変化、溶鉄炭素濃度による  $\rho_i$  の変化など未知の問題も多いが、溶鉄中の自然対流の影響はとくに無視できないと考えられる。すなわち、自然対流と高周波電磁力による流れの方向は正反対であり、後者が非常によわい場合は前者 (自然対流) の影響がよよく表われることになる。本報の exp. P では  $k$  の実測値のばらつきが大きい、鋼円柱の形状も他とはことなり、自然対流の影響が支配的に大きいことが推察される。したがって exp. P については Table 3 から除外した。

なお、Table 3 の  $U_e$  値を、SiC 焼結体の Fe-C 溶鉄中への溶解速度を実測した著者らの既報<sup>5)</sup>の結果の解析に採用しても、かなりよい一致をみることからして、本報のようにしてえられた溶鉄の有効速度を他種の反応速度の解析に使用しても、定性的には十分に有意であると思われる。ところで H. KNÜPPEL et al.<sup>6)</sup> は高周波溶解時の鋼浴表面における速度  $\bar{U}$  を高周波電磁力による溶鉄のもり上り高さを用いて推定できるとして、次のように計算している。

$$h = 31.6(\mu_i/\rho_i \cdot f)^{1/2} \cdot Ni/F \cdot 1/\rho \dots\dots\dots (4)$$

$$\bar{U} = 1/2(2gh)^{1/2} \dots\dots\dots (5)$$

- $h$ : もり上り高さ, cm Ni: 高周波入力, kW
- $\rho_i$ : 比抵抗,  $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  F: 鋼浴の側面積,  $\text{cm}^2$
- $\mu_i$ : 透磁率  $\rho$ : 密度,  $\text{g}/\text{cm}^3$
- $f$ : 周波数 c/s.

(4) 式は被加熱体と誘導コイルの直径がほぼ等しく、漏洩磁束のない場合について導かれているから、本報のように直径にかなり大きな差がある小規模溶解の場合には当然ながら電気的な結合状態<sup>7)</sup>もことなり、無効電力も増すから、(4), (5) 式をそのまま用いて計算するには無理があると考えられる。また、 $\rho_i$  は Fe-C 溶鉄での実測例がみあたらないが、ここではいちおう  $\mu_i = 1.0$ ,  $\rho_i = 136 \times 10^{-6} \Omega/\text{cm} = 136 \times 10^{-10} \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$  (純鉄) なる値<sup>8)</sup>を採用し、本実験条件下での  $\bar{U}$  を試算してみた。参考のため結果の一例を Table 3 に併記した。表にみるように、(4), (5) 式による結果は  $k$  の実測から推定される  $U_e$  よりもかなり大きくなっている。すなわち、本報のような少量の溶鉄を溶つばと誘導コイルの直径に大きな差がある装置で溶解した場合に (4), (5) 式をそのまま用いると  $\bar{U}$  に過大値を与えるおそれがあると考えられる。

文 献

- 1) 小坂, 裴輪: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, p. 1429
- 2) J. M. COMMÉD and B. CHALMERS: Trans. Met. Soc., Amer. Inst. Min., Met. & Pet. Eng., 215

- (1959), p. 499
- 3) 平田: 化学工学, 26 (1962), p. 709
- 4) 小坂, 菱輪: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 539
- 5) 菱輪, 小坂: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 1176
- 6) H. KNÜPPEL and F. OESTERS: Arch. Eisenhüttenw., 33 (1962), p. 729
- 7) 高橋: “高周波の工業への応用” 東京電気大, 東京 (1960), p. 13
- 8) R. W. POWELL: Phil. Mag., 44 (1953), p. 722

**(95) CaO(43)-SiO<sub>2</sub>(43)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(14) 溶融滓の電導性におよぼす FeO, MgO および MnO の影響**

(溶融滓精錬に関する研究—VIII)  
名古屋工業技術試験所

○加藤 誠・工博 菱輪 晋  
Effect of FeO, MgO or MnO on the Electrical Conductivity of Molten CaO(43)-SiO<sub>2</sub>(43)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(14) Slag.

(Research on the molten slag refyning—VIII)  
Makoto KATO and Dr. Susumu MINOWA.

**1. 緒 言**

鉄鋼精錬においては精錬用滓の溶融状態における性状を知ることがきわめて重要であり, 精錬反応を速度論的に考察するうえで, その溶融状態における諸物性定数が要求される. そこで筆者らは, CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 系融滓を基本系としてとりあげ, これに各種の酸化物あるいはフッ化物を添加した溶融滓の物性定数の測定を試みてきた(1~7).

本論文においては, 精錬滓中もつとも普通に存在する FeO, MgO および MnO を対象とし, CaO(43)-SiO<sub>2</sub>(43)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(14) 溶融滓の電導性におよぼすこれら各酸化物添加の効果, 白金ルツボ, 白金電極より成る電導度測定槽を用いて測定したので, その結果を報告する.

**2. 実 験**

**2.1 測定供試融滓**

測定に供した融滓は, 前報<sup>5)</sup>において粘性係数の測定実験に供したもので, 粘性測定の実験終了後, 水中に急冷し, 加熱乾燥後, デシケーター中に保存しておいたものである.

**2.2 溶融滓の電導度の測定**

電導度の測定は前報<sup>1)</sup>において詳述した装置を用いて行なった. すなわち, 白金ルツボおよびアランジット・スペーサーで固定された2本の白金線電極で構成されている電導度測定槽を用い, 万能ブリッジにより電極間液体抵抗を測定することにより溶融滓の電導度を求めた. ブリッジの電源周波数は 1kc/sec である.

測定操作も前報<sup>1)2)3)4)</sup>と同様で, 白金ルツボ上端から 2~3 mm F に溶融滓がくるまで融滓を追加, 溶融し, 1350~1400°C で約 1hr 保持した後, 白金電極を挿入して電極間液体抵抗を測定した. なお温度は裸の Pt-Pt·Rh(13%) 熱電対を直接溶融滓中に浸漬して測定し, 実

験は大気中で行なった.

**3. 結果と考察**

CaO(43)-SiO<sub>2</sub>(43)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(14) 融滓に FeO, MgO および MnO の各酸化物を添加した溶融滓の電導度の温度依存性を Fig. 1~3 に示す. 図のごとく MgO を添加した場合の電導度の温度依存性は Arrhenius 型の式  $\kappa = A_e \exp(-E_a/RT)$  ..... (1)

(1)によく適合しているが, FeO および MnO 添加の場合には Arrhenius plot に折点があり, 高温域あるいは低温域のそれぞれで(1)式に適合している.

また図からわかるように, 各酸化物を添加することにより溶融滓の電導性は良好となり, 電導度はほぼ添加酸化物量の増加とともに大となっている. この様子を明白

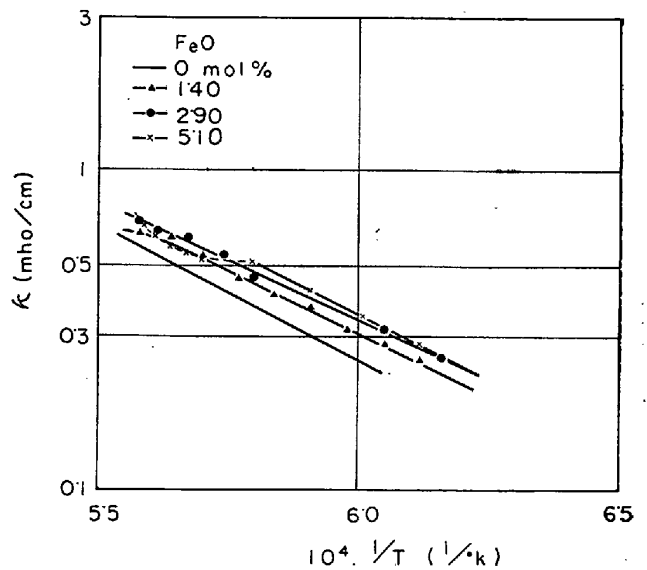


Fig. 1. Influence of FeO addition on the electrical conductivity of molten CaO(43)-SiO<sub>2</sub>(43)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(14) slag.

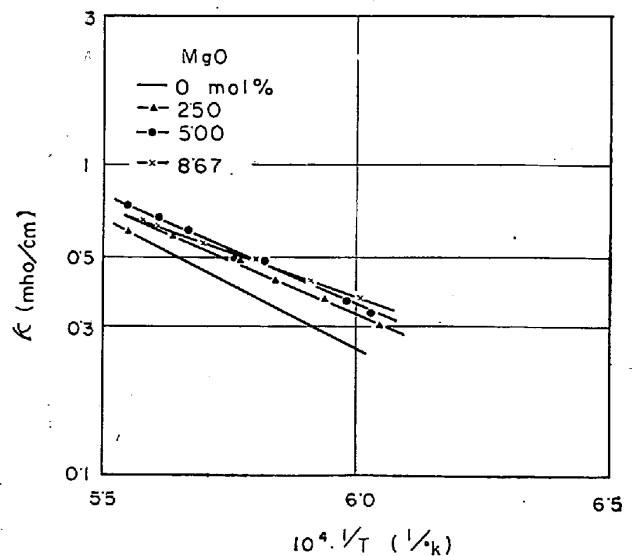


Fig. 2. Influence of MgO addition on the electrical conductivity of molten CaO(43)-SiO<sub>2</sub>(43)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(14) slag.