

前号 (Vol.15 No.8 P.504) からの続き

3.3 撹拌混合

3.3.1 ガス攪拌時の攪拌エネルギー密度

精錬において攪拌という操作に着目されたのは上吹き転炉 が、底吹き転炉の冶金効果を反映させて上底吹き転炉へと発 展した 1980 年代である⁷⁷⁾。吹き込まれたガスが鋼浴に対し てなす仕事は、①鋼浴上昇中の静圧変化に伴う膨張の仕事、 ②吹き込み時にガスが持つ運動エネルギーによる仕事、③羽 口近傍でのガスの温度上昇に伴う膨張の仕事、④音速域の ガスが羽口近傍で圧力減少することによる仕事である⁷⁸⁾(図 79)。ノズル出口での静圧を P_1 (Pa)、精錬炉の雰囲気圧力を P_a (Pa)、溶鉄温度を T_L (K)、吹き込み位置の浴深を h_0 (m)、 とすると、①の仕事 w_1 (W・s) は (3.3.1) 式で表される。こ こで、R は気体定数 (= 8.3145J/(mol・K))、 ρ_L は溶鉄密 度 (kg/m³)、g は重力加速度 (= 9.807m/s²)、Vg はガス体 積 (m³)、n は吹き込まれたガスのモル数である。



図79 底吹きガスによる撹拌エネルギー密度(文献 78)による)

②の仕事はノズル出口でのガスの圧力、温度、体積、流 速、及び、ガス密度をPn (Pa)、Tn (K)、Vn (m³)、un (m/s)、 ρgn とすると (3.3.2) 式で表される。

$$w_{2} = \frac{1}{2} \rho_{g_{n}} u_{n}^{2} V_{n} = \frac{nRT_{n}}{P_{n}} \left(\frac{1}{2} \rho_{g_{n}} u_{n}^{2} \right) \dots (3.3.2)$$

③と④の仕事は、ガスがノズル出口で T_n の温度で P_n から P1まで圧力減少し体積が V_n から V_1 に膨張し、次いで P_1 の 圧力で T_n から T_L まで温度上昇すると仮定すると、③は理想 気体の膨張として取り扱えば(3.3.3)式に、④は(3.3.4)式に なる。

$$w_3 = nR (T_L - T_n)$$
 (3.3.3)

これらをモル流量 n (mol/s) で書き換えれば仕事率 w (W) が計算できるが、一般に②、③、④はノズル出口部での局所 的に供給されるエネルギーで、溶鉄全体の攪拌・混合には有 効に作用しないとされ、係数 (η)を掛けられることが多い。 特に、運動エネルギーは、その 94%がノズル近傍で消費さ れるとされている。その結果、ガス吹き込みによる仕事率は (3.3.5) 式で表される。

$$\dot{w} = \dot{n}RT_{L}\ln\frac{P_{1}}{P_{a}} + \eta \{\dot{n}R(T_{L}-T_{N}) + \frac{\dot{n}RT_{n}}{P_{n}}(\frac{1}{2}\rho_{g_{n}}u_{n}^{2}) + \dot{n}RT_{n}\ln\frac{P_{n}}{P_{1}}\}$$

また、③に比べて②と④は1/8程度の値になるため、これを無視し、モル流量でなく体積流量 Q_g (Nm³/min)を用い、溶鉄の質量 W (t) で割ると実用上使いやすい攪拌動力 ϵ_B (W/t) が (3.3.6) 式で得られる。ここで、 ρ_L は7×10³kg/m³ とした。

$$\dot{\varepsilon}_{B} = \frac{6.18 Q_{g} T_{L}}{W} \{ \ln (1 + \frac{h_{0}}{1.46 \times 10^{-5} P_{a}}) + \eta (1 - \frac{T_{n}}{T_{L}}) \}$$
.....(3.3.6)

溶鉄へのガス吹き込みでηはがどの程度の値になるかは明 確ではないが、上記の運動エネルギーの場合に準じて 0.06 と いう値が用いられることもある。

3.3.2 上吹きガスによる攪拌エネルギー密度

上吹きガスによる攪拌エネルギー密度は3.1.4節に示した ので省略する。

3.3.3 機械攪拌時の攪拌エネルギー密度⁷⁹⁾

攪拌羽根による鋼浴の機械攪拌もよく用いられる技術であ る。このような場合には化学工学における攪拌機の計算式を 用いることができる。今、直径 dr (m)の攪拌羽根を、回転数 n_I (1/s) で、密度 $\rho_{\rm L}$ 、粘度 $\mu_{\rm L}$ (Pa · s)の液体中で回転させ た時の攪拌動力 P_I (kg · m/s) は (3.3.7) 式で計算できる。

 $P_{I} = N_{P} \times \rho_{L} \times n_{I}^{3} \times d_{I}^{5}/g$ (3.3.7)

ここで、N_Pは動力数 (無次元) で攪拌機に固有の値をとる が、(3.3.9) 式で示すレイノルズ数 Re、浴深さ h_v (m)、浴直 径d_v (m)、攪拌羽根の幅w₁ (m)、角度 θ_1 (°) を用いて (3.3.8) 式で表される (図 80)。

$$N_{P} = \frac{A}{Re} + B \left(\frac{10^{3} + 1.2Re^{0.66}}{10^{3} + 3.2Re^{0.66}}\right)^{p} \times \left(\frac{hv}{dv}\right)^{(0.35 + w_{i}/dv)} \times (\sin \theta)^{1.2} \dots (3.3.8)$$

ここで、A、B、pは実験的に得られた (3.3.10) ~ (3.3.12) 式で記述される。

これより攪拌エネルギー密度 $\dot{\epsilon}_{M}$ (W/t) は (3.3.13) 式になる。

$$\dot{\varepsilon}_{\mathrm{M}} = \mathrm{P}_{\mathrm{I}} \times \mathrm{g/W}$$
 (3.3.13)

3.3.4 RHの環流速度と攪拌エネルギー密度

RHの場合の攪拌エネルギー密度 $\dot{\epsilon}_{RH}$ (W/t) は、下降管出 口から排出される溶鉄の運動エネルギーに基づき、環流速度 Ω (kg/s)を用いて (3.3.14) 式で計算される ⁸⁰⁾。ここで、 v_{RH} は下降管から吐出される溶鉄の線流速 (m/s)、 W_{Ladle} は真空 槽内溶鋼量を除いた取鍋内溶鋼質量 (t)、 D_{RH} は浸漬管内直 径 (m) である (図 81)⁸²⁾。

$$\dot{\varepsilon}_{\rm RH} = \Omega \mathbf{v}_{\rm RH}^2 / 2 \mathbf{W}_{\rm Ladle}$$
$$\mathbf{v}_{\rm RH} = \frac{\Omega}{\rho_{\rm L}} \times \frac{1}{\pi (\mathrm{D}_{\rm RH}/2)^2}$$
(3.3.14)

RH 処理中にトレーサーとなる合金元素を valloy (kg/s) で 連続的に添加した場合の、上昇管、下降管直下での濃度を



図80 機械撹拌での撹拌エネルギー密度

Cin、Coutとすると (3.3.15) 式が成り立つ。従って、環流速度 は合金を添加しつつ上昇管、下降管直下でのサンプリングを おこなえば測定することができる⁸¹⁾。

$$W_{Ladle} \frac{dC_{in}}{dt} = \Omega \times (C_{in} - C_{out}) + v_{alloy} \cdots \cdots \cdots (3.3.15)$$

環流速度に対して様々な式が提案されている。例えば (3.3.16) 式は、気泡の浮力によるエネルギーと浸漬管内での 摩擦によるエネルギー損失のバランスから理論的に数式の形 式を決め、水モデル結果に基づき係数を決定したものであ る^{81,82)}。ここで、qupは昇管へのガス吹き込み速度 (Nm³/s)、 P_N はガス吹き込み位置の静圧 (Pa)、Pv は真空度 (Pa) であ る。

$$\Omega = 11.4 \times (10^3/60) \times (q_{up} \times 60 \times 10^3)^{1/3} \times D_{RH}^{4/3}$$

図 82 に上記式での計算値と実機 RH での測定値との対比 を示すが良い一致が見られる。

この他にも、浸漬管の上昇管直径 D_{up} (m)、下降管直径 D_{down} (m)、ガス吹き込み位置の浴深 h₀ (m) などを考慮した (3.3.17) 式など ^{83,84)} が提出されている。

$$\begin{split} \Omega &= 3.8 \times (1/60) \times (q_{up} \times 60 \times 10^3)^{0.31} \times (D_{up} \times 100)^{0.3} \\ &\times (D_{down} \times 100)^{1.1} \times (h_0 \times 100)^{0.5} \dots (3.3.17) \end{split}$$

3.3.5 均一混合時間

均一混合時間 t_m (s) は、液中にトレーサーを添加し、その 濃度変化を測定することで求められる (図 83)⁸⁸⁾。完全混合



図 81 RH における攪拌エネルギー密度(文献 82) による)

後のトレーサー濃度を1としたとき、測定される濃度の変動 が±i以内になるのに要する時間 tm'(s) は (3.3.18) 式で与え られる。

ここでt。は浴内を液体が1回循環するのに要する時間であ る。例えば濃度が±5%以内になるのに要する時間を均一混合 時間とすると、3t_c、つまり浴内を液体が3回循環するのに要 する時間に相当する値となる⁸⁵⁾。

液体の循環流量を \dot{V}_L (m³/s) とすると $t_c = V_L/\dot{V}_L$ になる。 ガス体積流量 q_g (m³/s)、浴深 h_V (m)、気泡上昇域 (気泡塔) 面積を A_P (m²) とすると、(3.3.19)の実験式が得られている。

 $\dot{V}_L = 1.17 \; (q_g \times g \times h_V \times A^2_P)^{0.339} \dots (3.3.19)$

3.3.6 均一混合時間と攪拌エネルギー密度の関係

底吹き攪拌の場合、図84のように攪拌エネルギー密度が 小さい時には均一混合時間tmは *ε*Bの-1/2乗に比例するが、



図82 環流速度の計算値と実測値の比較(文献⁸¹⁾による)



図83 均一混合時間の測定例

大きくなると ϵ_B の-1/3乗に比例して短くなる⁸⁰。これは、 粘性支配域から、慣性支配域、または、乱流粘性支配域へと 移行するためである。粘性支配域では、 $t_m \ge \epsilon_B$ の関係は装 置スケールの効果はあらわれないが、慣性支配域、または、 乱流粘性支配域では、 t_m は単に ϵ_B だけの関数ではなく装置 スケールの関数にもなる。

 $t_m \& \epsilon_B の関係は様々な実験式が示されているが、(3.3.20) 式のように浴深さ<math>h_v$ (m) と浴直径 d_v (m) との関数で示すことができる (図 85)⁸⁵⁾。

$$t_m = 100 \, \{ \frac{(dv^2/hv)^2}{\dot{\epsilon}_B} \}^{0.337} \, \text{-------} \, (3.3.20)$$

また、ガス流量 q_g (m³/s) を用いた (3.3.21) 式⁸⁷⁾、液体の 動粘度 ν_L (m²/s) を考慮した (3.3.22) 式⁸⁸⁾ が提示されてい る。

 $t_m = 1200 \times q_g^{-0.47} \times (2r_V)^{1.97} \times h_V^{-1.0} \times \nu_L^{0.47} \dots (3.3.22)$



図84 攪拌エネルギー密度と均一混合時間の関係(文献⁸⁶⁾による)

水モデルで得られた各種攪拌方法でのtmとをの関係を図 86に示すが⁸⁰⁾、RH方式よりも底吹き方式の方がをが大きく、 均一混合時間が短いことがわかる。また、上吹きの場合はを が大きいにもかかわらず均一混合時間は長い。これは上吹き ガスジェットのエネルギーのうち1/10程度しか浴の攪拌に寄 与しないためである。図87は転炉形状の水モデルによるtmと をの関係であるが⁸⁹⁾、上吹きの撹拌エネルギーを1/10として 底吹きエネルギーに加えた場合によい相関が得られている。

3.4 粉体インジェクションとエマルジョン

3.4.1 粉体インジェクション⁹⁰⁾

粉体を気体とともに浴内にインジェクションする技術は 1970年代に大きく発展した。この場合、粉体粒子が気泡を 突き抜けて浴内に侵入できる条件で操業することが重要とな る。

液体中を移動する半径 rp (m) なる球体の運動方程式は (3.4.1)、(3.4.2) 式で表される⁹⁰⁾。



図 85 (3.3.20) 式での撹拌エネルギー密度と均一混合時間の関係 (文献 ⁸⁵⁾による)



図86 各種装置における攪拌エネルギー密度と均一混合時間の関係(文献80)による)

$$\{(\frac{4}{3}\pi r_{P}{}^{3}\rho_{P}) + \alpha(\frac{4}{3}\pi r_{P}{}^{3}\rho_{L})\} \times (\frac{-dv_{P}}{dt}) = F \cdots (3.4.1)$$

$$F = \pi r_{P}{}^{2}\frac{1}{2}\rho_{L}v_{P}{}^{2}C_{D}\Phi_{1} - \frac{4}{3}\pi r_{P}{}^{3}\rho_{P}g + \frac{4}{3}\pi r_{P}{}^{3}\rho_{L}g\Phi_{2}$$

$$+ 2\pi r_{P}\sigma_{L}\Phi_{3} \cdots (3.4.2)$$

(3.4.1) 式、中括弧内の第1項は球体質量、第2項は仮想 質量であり、これに球体加速度を掛けたのが左辺である。仮 想質量とは、液体中を物体が運動するとき、ある量の液体が 物体に同伴して動き、液体質量がみかけ上増加するような影 響が現れるが、この時の同伴する液体の質量であり係数 α を 掛けてある。右辺のFは球体に働く力であり、(3.4.2) 式のよ うに、流体抵抗力(第1項)、重力(第2項)、浮力(第3項)、 界面張力による力(第4項)の和になる。ここで、 ρ Pは球体 密度(kg/m³)、vP は球体速度(m/s)、CD は流体抵抗係数、 σ_L は液体の表面張力(N/m)であり、 Φ_1 、 Φ_2 、 Φ_3 は補正係 数である。

これより、球体の液体への臨界侵入速度 v_{PC} は、(3.4.3) 式 で示される臨界ウェーバー数 Wec、(3.4.4) 式で表される浮 力と界面張力の相対比を示す無次元数 G、密度比 ρ^* (= $\rho_P/$ ρ_L)、球体と液体の接触角 θ_c を用いて (3.4.5) 式で表される。





図 87 転炉型容器での攪拌エネルギー密度と均一混合時間の関係 (文献⁸⁹⁾による)

ここで、Aは係数であり、CDを0.44とした場合には実験 値との比較から2.5とされている (図 88)⁹⁰⁾。

また、仮想質量を考慮しない場合の式は (3.4.6) 式になる (C_D = 0.5の場合)⁹¹⁾が、この式と実験結果が一致するという 報告もある (図 89)⁹²⁾。

Wec = 8
$$(1 - \exp(\frac{3}{4\rho^*}))(\cos\theta_c - 1 + \frac{8}{3}\rho^*) + 16$$

......(3.4.6)

ー旦侵入した粒子の到達距離 xMax (m) については、初速 v_{p,0} で気泡先端から浴内へ侵入した球体のエネルギーバラン スから球体の速度を求め、粒子のレイノルズ数 Rep が1になっ た時点で静止するとした場合 (3.4.7) 式が書ける⁹³⁾。ここで、 μ_L は液体の粘度 (Pa・s) である。



図88 粉体粒子の浴内侵入条件(文献 92)による)



図 89 (3.4.6) 式による粉体粒子の浴内侵入臨界速度と実験値との比較 (文献 ⁹²⁾による)

$$\mathbf{x}_{\text{Max}} = 61.4 \,\rho^* \frac{\mathbf{r}_{\text{P}}}{C_{\text{D}}} \times \log \text{Re}_{\text{P}} \\ \text{Re}_{\text{P}} = \frac{2\mathbf{r}_{\text{P}} \,\rho_{\text{P}} \mathbf{v}_{\text{P},0}}{\mu_{\text{L}}}$$

$$(3.4.7)$$

3.4.2 底吹きガスによるスラグエマルジョンの生成

スラグを鋼浴に巻き込ませ、いわゆるスラグエマルジョン を生成させると、スラグとメタル間の反応を促進させること ができる。

底吹きガス攪拌の場合、(3.4.8) 式で定義される容量係数 K (1/s) と q_B の関係を K $\propto q_{B^n}$ で整理した時の n の値が、あ るガス流量で変化し、この流量でスラグ滴の巻き込みが開始 したと考えられている。図 90 は LF での脱硫速度を測定した 例 $^{94)}$ であるが、n の値が変化し始めるガス流量を臨界ガス流 量と呼ぶ。

$$K = -\frac{d\ln C_i}{dt} \qquad (3.4.8)$$

ここで、Ciはi成分の濃度、tは時間(s)である。

スラグ滴の巻き込みが起こる条件⁹⁵⁾は、スラグ滴の流速 v_{sp} (m/s)、スラグ滴の半径 r_{sp} (m)を用いると (3.4.9) 式で 表される。ここで、 $\sigma_{s/m}$ はスラグとメタル間の界面張力であ り、下添えのmはメタル、sはスラグを表す。

$$\frac{1}{2} (\rho_{s} \frac{4}{3} \pi r_{sp}^{3}) v_{sp}^{2} \ge 4 \pi r_{sp}^{2} \sigma_{s/m} + g (\rho_{m} - \rho_{s}) (\frac{4}{3} \pi r_{sp}^{3}) r_{sp}$$

(3.4.9)式において、左辺は粒子の運動エネルギー、右辺 第1項は界面生成に伴うエネルギーで第2項は位置エネルギー を示す。



図 90 底吹きガス流量と脱硫速度定数の関係(文献 94) による)

これを解くと、臨界流速 v_{sp,min} (m/s) が (3.4.10) 式で得られる。

$$v_{\rm sp,min} \ge \{48g \ (\ \rho_{\rm m} - \rho_{\rm s}) \ \frac{\sigma_{\rm s/m}}{\rho_{\rm S}^2} \}^{1/4}$$
(3.4.10)

図91は水モデルの結果であるが、上式で良く整理できる。

また、臨界流速は動粘度_ν (m²/s) や浴形状にも依存し、 (3.4.11) 式で整理した方が精度が良いとの報告もある (図 92)⁹⁶。

$$\frac{u_{\rm sp,min}}{\left(\sigma_{\rm s/m}\,g/\rho_{\rm s}\right)^{1/4}} = 1.2\;(\frac{\nu_{\rm s}}{\nu_{\rm m}})^{0.068}\;(\frac{\rm h_{\rm s}}{\rm d_{\rm v}})^{-0.11}\,.....\,(3.4.11)$$

ここで、 ν_m 、 ν_s はメタル、スラグの動粘度であり、h_sは スラグ厚 (m)、d_vは浴直径 (m) である。また、 $u_{sp,min}$ はスラ グ滴の巻き込みが起こる臨界ガス流量 $Q_{sp,min}$ (m³/s) から、 メタル浴深さ h_v (m) の関数である (3.4.12) 式により計算さ



図 91 (3.4.10) 式によるスラグ滴巻き込み臨界流速と実験値の比較 (文献 ⁹⁵⁾ による)



図 92 (3.4.11) 式によるスラグ滴巻き込み臨界流量の整理 (文献 ⁹⁶⁾による)

れる、液体の中心軸上上昇速度 (m/s) である。

一方、実操業で臨界流速を求めることは難しいが、K∞ q^{Bⁿ} で整理した場合のnの値と単位質量当たりの底吹きガス流量の関係で整理すると図 93⁹⁵⁾のように 2×10⁻⁶ (m³/s/kg) あたりに臨界値が見られる。しかし、溶融金属とスラグでは水モデルに比べると密度差が大きいため、図 94⁹⁷⁾のように nの値に明確な変化を示すほどのエマルジョンを起こさせるには、ガス流量をかなり増加させる必要があると考えることもできる。

3.4.3 底吹きガスによるメタルエマルジョンの生成

転炉スラグには質量比で5%程度の粒鉄が含まれ、粒鉄中 の不純物濃度は極めて低いことが知られており、転炉での炉 内反応は粒鉄によってなされているとの考えもある。上吹き ガスによる粒鉄の発生は、前述のスピッティングの発生と同







図 94 k \propto qgⁿ として整理した場合の n とガス流量の関係 (文献 97 による)

様に考えることができる。一方、底吹きガスによる粒鉄の生 成は、前節のスラグエマルジョンの対比としてメタルエマル ジョンと名付けることができる。メタルエマルジョンは、気泡 が界面を通過する時に、その周囲にメタル膜を伴ってスラグ 層に侵入するために生成し、その機構は図95のように^{98,99}、 メタル、スラグの表面張力σm,σsと界面張力σs/mとの関係 で異なり、以下のように整理される。

 (3.4.13)式で示されるフィルム係数のが0以上の場合に は、気泡周囲のメタル膜が安定であり、スラグ層に侵入 した後も崩壊することなく気泡とともに浮上し、その後 に気泡から分離しメタルエマルジョンを生成する(図95 (a))。

 $\Theta = \sigma_{\rm s} - \sigma_{\rm m} - \sigma_{\rm s/m} \cdots (3.4.13)$

 (3.4.14) 式で示される浮上係数Φが0以上の場合には、 気泡周囲のメタル膜は界面で崩壊するが、メタル粒子の 一部は気泡に付着したまま浮上しメタルエマルジョンを 生成する(図95 (b))。

3) 浮上係数Φが0以下の場合には、気泡周囲のメタル膜は 界面で崩壊し、メタル粒子はすべて気泡から分離され沈 降する。この場合には、メタルエマルジョンは有効には 発生しない(図 95 (c))。

溶鉄とスラグの場合には、σm もσs/m も大きいためフィル ム係数Θが0以上になることはなく、1)のケースは起こらな い。浮上係数Φに対しては、図96のように溶鉄やスラグの組 成が影響する¹⁰⁰。

メタルエマルジョンの生成量に対しては、上下層の密度差 が大きく影響し、油と塩化亜鉛水溶液を用いた実験がおこな われている^{101,102)}。この結果に基づき、下層液体の単位時間 当たりの上層液体への混入体積 V_d (m³) は粘度 μ (Pa・s)、



図 95 メタルエマルジョンの生成機構 (文献 99) による)

密度ρ (kg/m³)、気泡直径 d_B (m)、ガス流量 q_g (m³/s) を 用いて (3.4.15) 式で表される¹⁰¹⁾。この関係に基づき気泡1 個当たりに生成する粒滴体積 V_d⁰の計算値と実験値の対応、 及び溶鉄/スラグ系で計算結果を図 97 に示す。

$$V_{d} = \frac{q_{g}}{\frac{4}{3} \pi (\frac{d_{B}}{2})^{3}} \times 1.04 \times (\frac{\mu_{m}^{2}}{\rho_{s}^{2} g}) \ (\frac{-\rho_{s}^{2} g d_{B}^{3}}{\mu_{m}^{2}})^{0.66}$$

$$\left(\frac{\mu s}{\mu m}\right)^{-0.34} \left(\frac{\rho s}{\rho m - \rho s}\right)^{1.66}$$
.....(3.4.15)



図 96 浮上係数Φに対する溶鉄、スラグ組成の影響(文献 100) による)



図 97 気泡1個当たりに生成する粒滴体積(文献 101) による)

(次号 Vol.15 No.10 に続く)

参考文献

- 77) K.Nakanishi, T.Fujii and J.Szekely: Ironmaking and Steelmaking, 2 (1975), 193.
- 78) 森一美, 佐野正道: 鉄と鋼, 67 (1981), 672.
- 79) 永田進治:新化学工学講座 W-2, 攪拌機の所要動力,日 刊工業新聞社, (1961)

- 80) 渡辺吉夫, 赫.冀成, 浅井滋生, 鞭 巖:鉄と鋼, 69 (1983), 1160.
- 81) 桑原達郎,三村満俊,森幸治,梅沢一誠,田中武司:鉄 と鋼,73 (1987), s176.
- 82) T.Kuwabara, K.Umezawa, K.Mori and H.Watanabe : Trans. ISIJ, 28 (1988), 305.
- 83)小野清雄,柳田稔,加藤時夫,三輪守,岡本徹夫:電 気製鋼,52 (1981),149.
- 84)田中英雄, 榊原路唔, 林順一: 製鉄研究, 293 (1978), 293.
- 85) 佐野正道, 森一美:鉄と鋼, 68 (1982), 2451.
- 86) 浅井滋生,岡本徹夫,赫.冀成,鞭 巖:鉄と鋼,68 (1982),426.
- 87) D.Mazumdar and R.I.L.Guthrie : Metall. Trans. B, 17B (1986) , 725.
- 88) M.Iguchi, K.Nakamura and R.Tsujino : Metall. Trans. B, 29B (1998), 569.
- 89)甲斐幹,大河平和男,樋口満雄,平居正純:鉄と鋼,69(1983),228.
- 90) 小沢泰久, 鈴木克紀, 森一美: 鉄と鋼, 69 (1983), 753.
- 91) T.A.Engh, H.Sandberg, A.Hultvist and L.G.Norberg : Scan. J.Metall., 1 (1972) , 103.
- 92) 成田貴一,牧野武久,松本洋,小川兼広:鉄と鋼,69 (1983),392.
- 93) 中西恭二, 江島彬夫, 鈴木宰, 数土文夫: 鉄と鋼, 64 (1978), 1323.
- 94) 石田二郎,山口国男,杉浦三郎,山野清市,早川静則, 出向井登:電気製鋼,52 (1981),1.
- 95) 浅井滋生:第100,101回西山記念技術講座テキスト, 日本鉄鋼協会,(1984),67.
- 96) 井口学, 隅田豊, 岡田隆介, 森田善一郎: 鉄と鋼, 79 (1993), 569.
- 97) S.Kitamura, T.Kitamura, K.Shibata, Y.Mizukami, S.Mukawa and J.Nakagawa : ISIJ Int., 31 (1991) , 1322.
- 98) R.Minto and W.G..Davenport : Trans. IMM C, 81 (1972), 36.
- 99) I.Hahn and D.Neuschutz : Ironmaking and Steelmaking, 29 (2002), 219.
- 100) T.El Gammal, G..Hinds and U.Schoneberg : Steel Research, 4 (1991), 152.
- 101) Z.Lin and R.I.L.Guthrie : Metallurgical and Materials Trans.B, 25B (1994) , 855.
- 102) 高島真, 井口学: 鉄と鋼, 86 (2000), 217.

(2010年3月25日受付)

23