

© 1983 ISIJ

樋型炉でのソーダ灰による溶銑連続精錬と溶銑, スラグの混合特性 論文

山本 里見\*・石川 英毅\*・藤掛 陽蔵\*

吉井 正孝\*<sup>2</sup>・坂口 庄一\*<sup>3</sup>・梶岡 博幸\*<sup>4</sup>

Refining of Hot Metal with Soda Ash in Trough-type Continuous Refining Furnace and Fluid Flow Characteristics of Hot Metal and Slag in the Furnace

Satomi YAMAMOTO, Hidetake ISHIKAWA, Yozo FUJIKAKE,

Masataka YOSHII, Shoichi SAKAGUCHI, and Hiroyuki KAJIJOA

Synopsis:

The multi-stage steelmaking process with soda ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) was proposed. Dephosphorization and desulphurization of hot metal, the most important unit processes in the process, were studied. Experiments on the continuous refining of hot metal with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  were carried out using the trough-type continuous refining furnace. The furnace was divided in two chambers and the first (upper stream) chamber was provided for desiliconization with oxygen and iron ore and the second one was for dephosphorization and desulphurization with  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . In the second chamber the hot metal and slag flowed in counter currents.

The furnace was able to process the hot metal at a rate of 45 t/h and the refined hot metal was transported to the steelmaking shop. The operation for 120 hours in campaigns proved the stability in reaction temperature and low wear rate of the refractory in the refining section. By analysing the tracer concentration in the exit stream with the mixed model, Peclet numbers for the hot metal and the slag flows were estimated as 6.7 and 2.0 respectively.

1. 緒 言

日本における新製鋼法開発の流れのひとつとして、多段製鋼法をあげることができる。この多段製鋼法は精錬工程を脱けい、脱りん、脱硫および脱炭の素反応工程に分け、おのおのが最適条件下で行われるように系全体を組み立て、溶製コストの低減、省エネルギーをはかろうとする製鋼プロセスである。

この多段製鋼法は、原料事情の悪化、鋼材規格の高級化などに対処できるだけでなく、ごく少量のスラグ下で行う脱炭精錬の利点、すなわち鉄歩留りの向上、副材料の節減などを容易に手にすることができると考えられる。

多段製鋼法の基本に溶銑の脱りん、脱硫精錬がある。精錬用副材料として、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  系<sup>1)~4)</sup>、 $\text{CaO}$  系<sup>5)</sup> 副材料を用いた研究が報告されているが、筆者らはソーダ灰

( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) を用いた溶銑の連続精錬について研究しており<sup>6)</sup>、本報はその一部を報告するものである。

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  を用いた溶銑の精錬の特色として、同時脱りん脱硫が可能でありしかもその分配比が大きいことのほかに、スラグが流動性に富むので溶銑との分離が容易となり、さらにそのスラグから  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を回収できることなどをあげることができる。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を用いた精錬の特色を組み合わせると、新しい製鋼システム<sup>2)3)</sup> (Fig. 1)が考えられる。溶銑 [P], [S] を製品規格まであらかじめ低減し、ごく少量のスラグ下で同溶銑の脱炭精錬のみを行う。一方、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  スラグから  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を回収できるので  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  の再利用が可能になり、ダストを含めて副材料の循環使用を前提とする製鋼システムともなる。さらに、スラグなどの系外への廃棄物の大幅な低減およびスラグ中有価成分 (P.V など) の回収も可能になるのも特長といえる。

\* 新日本製鉄(株)第三技術研究所 (R & D Laboratories-III, Nippon Steel Corp., 1-1-1, Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

\*<sup>4</sup> 新日本製鉄(株)第三技術研究所 工博 (R & D Laboratories-III, Nippon Steel Corp.)

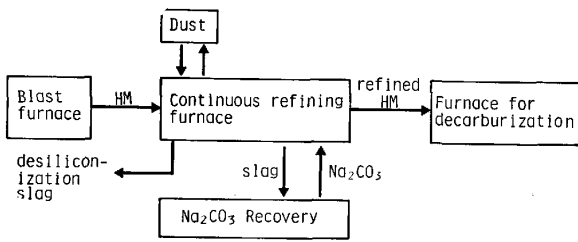


Fig. 1. Schematic diagram of the process.

このシステムを構成する要素技術である溶銑の精錬技術、脱炭技術およびスラグからの  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  回収技術について、筆者らは半工業的規模で実験を行いその技術的可能性を確認した<sup>6)~8)</sup>。

多段製鋼法の利点を楽しむには、同システムによる生産量を大きくすることが有利であるから、溶銑も大量に精錬されるのが適切と考えられる。この点から、本研究では一定組成の製品を量産するのに適していると考えられる連続方式による、精錬試験を行うことにした。

このような連続方式は、製鋼技術に関しては連続製鋼法として多くの研究が進められてきた<sup>9)~14)</sup>。技術的に操業可能と報告されている方法での炉形状は、鍋型、樋型のふたつに大きく分けられる。

本研究では次に示す理由から樋型炉形式を採用した。

i)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  スラグは [C] により還元されて揮発するので、過度の攪拌を避けなければならない。攪拌を強くせずに反応界面積を大きくできる向流精錬方式を採用する。ii) 溶銑の精錬では [Si] をあらかじめ低減する脱けい工程の併設が必要となるが、連続的に脱けい精錬を行う槽を併設するのが容易である。iii)  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  スラグは流動性に富み、炉外への排出が容易である。

本報告は、樋型炉での  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  による溶銑の連続精錬試験結果の概要を報告するものである。本報では試験設備操業状況および樋型炉での流れの特性についての調査結果を述べ、統報で操業結果について検討する。

## 2. 試験設備および試験方法

### 2.1 試験設備

樋型連続精錬炉（以後、連続炉とする。）は 45 t/h の標準速度で溶銑を精錬できる。この精錬速度は、実操業規模での脱炭工程試験<sup>7)</sup>に必要最少量の溶銑 (40 t) を 1 h 以内で供給することを目的として設定した。連続炉は炉体、給銑系、出銑系、送酸系、副材料系、スラグ処理系および排ガス処理系で構成されている。おのおのの設備について説明する。

#### 2.1.1 炉体

鉄板溶接構造の鉄皮に塩基性耐火物たとえば  $\text{MgO}$  系

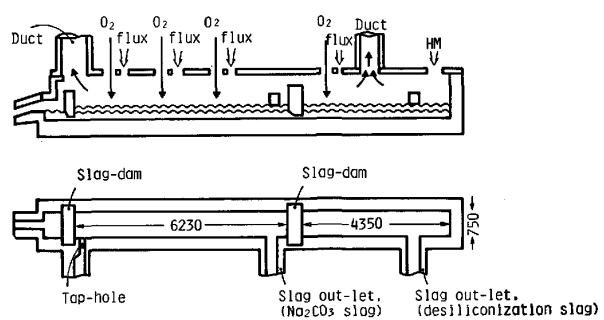


Fig. 2. Diagrammatic sketch of the furnace (mm).

耐火物で内張りして炉体とした。炉体は  $\text{CaO}$  系スラグのもとで脱けいする脱けい槽と  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  スラグのもとで脱りん、脱硫する脱りん槽とからなり、両槽は溶銑浴底部上 10 cm まで浸漬されている耐火物製の堰で分離されて隣接している。築炉後は浴長 10.6 m、浴幅 0.75 m の浴面となる。両槽にスラグ排出孔を各 1 ヶ炉壁部に設けた。脱りん槽では向流精錬のため上部に排出孔を設けたが、脱けい槽のそれはレイアウトの制約から位置が決定された。

炉体天井に耐火物製の蓋を用い、送酸用ランス、副材料および精錬温度制御のための屑鉄装入孔が設けてある。炉体および付帯設備の概略を示すと Fig. 2 のようになる。

#### 2.1.2 給銑系

炉体に溶銑を所定速度で供給するための設備である。傾動する架台に 45 t 容量の給銑鍋を固定し、所定の給銑速度になるように傾動角速度を制御した。

スライディングノズル方式による給銑についても試験したが、45 t/h の給銑速度ではノズル閉塞が多発したのでその使用を中止した。

#### 2.1.3 出銑系

精錬された溶銑を搬出するための設備である。脱りん槽下流側の耐火物堰でスラグと分離された溶銑を、旋回できる樋を用いて 2 ヶの運搬用溶銑鍋 (45 t) に注ぎ分けた。

#### 2.1.4 送酸系

溶銑の酸化を主に酸素で行うため、脱けい槽に 1 本、脱りん槽に 3 本の上吹きランスを設置した。ランスは個々に昇降、送酸量を制御でき、最大  $150 \text{ Nm}^3/\text{h}$  の送酸が可能である。

#### 2.1.5 副材料系

副材料として生石灰、鉄鉱石および  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  がある。生石灰、鉄鉱石を脱けい槽、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を脱りん槽に装入する設備である。炉上の各副材料ホッパーから連続的に切り出された副材料は、各ランスの火点部に装入され

る。供給速度は炉上ホッパーの重量変化から算定した。

脱りん槽の精錬温度制御のためピレットクローブ (80 ~ 120  $\phi$   $\times$  300 ~ 500 mm 長) を投入した。炉上にベルトコンベアを設け、人力でそれに乗せて炉内に投入した。

#### 2.1.6 スラグ処理系

炉体のスラグ排出孔，スラグ樋から流出するスラグを搬出する設備である。

脱けいスラグはスラグパンに受けて搬出した。脱りんスラグは，同スラグから  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を回収する工程での原料であるので，同工程に適した形状にしなければならない。同工程ではスラグを破碎して水に溶解するが，脱りんスラグは塊状に凝固させると破碎しにくくなる。スラグの凝固と破碎とを兼ねて行うために，回転水冷円板上にスラグを薄く流して凝固させ，破碎ロールにより 10 ~ 50 mm 径の小片に破碎した。冷却後直ちに袋に入れて保存し， $\text{Na}_2\text{CO}_3$  回収工程実験の原料とした。

#### 2.1.7 排ガス処理系

連続炉両槽から異なつた温度，含塵量の排ガスが出る。両者を別々に捕集したのち，水冷ダクト内で合流させてバグフィルターまで導き，除塵して大気放散した。

### 2.2 試験法

連続操業 (最大 120 h) で試験したのち炉内溶銑を排出し，耐火物溶損状況などを測定し再び築炉，操業する試験形態をとつた。溶銑およびスラグが常に炉内に収容されて操業が継続されているが，給銑を 1 ヶの鍋で行っているため，精錬作業 1 h ののちに給銑鍋に溶銑を補給するための 5 ~ 15 min 間の操業中断があつた。

定常的な操業法は次のようになる。所定条件で送酸および副材料の供給を始めたのち給銑を開始する。給銑開始後 3 ~ 5 min で炉尻からの出銑およびスラグ排出孔からのスラグ流出がおこり，定常操業に入る。約 1 h の操業ののち給銑を終了すると，送酸および副材料の供給を中止し，給銑が可能になると再度前記の操業をくり返した。

給銑開始 30 min で採取した試料が一定条件での操業の代表組成を示していることを確かめたのち，その時刻に給銑鍋，脱けい槽堰近傍，出銑流からの溶銑試料，両スラグ排出樋からスラグ試料を採取した。

鉄鉄の [C] は化学分析，その他成分は蛍光 X 線法により定量した。脱けいスラグは蛍光 X 線法，脱りんスラグはガラスビートにしたのち蛍光 X 線法により定量した。

### 2.3 操業状況

#### 2.3.1 脱けい槽

給銑鍋の傾動角速度制御で供給された溶銑は，1 本の

ランスからの酸素および鉄鉱石装入で酸化される。平均給銑速度は目標値の  $\pm 5\%$  以内にある。

脱けい条件は鍋ごとの [Si] 分析値をもとに決定した。送酸条件は一定とし，6 mm $\phi$  3 孔ノズル，ランス高さ 200 mm，送酸速度 150 Nm<sup>3</sup>/h の条件を選んだ。生石灰原単位はスラグ塩基度が 0.8 になるように，鉄鉱石原単位は操業経験から  $50 \cdot [\text{Si}]_{\text{HM}}$  (kg/t.HM) とした。しかし，生石灰供給系の故障多発から目標量の装入ができず，スラグの平均塩基度 ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2$ ) は 0.33 と低かつた。スラグは泡立っていたがスラグ排出孔から流出するため操業の支障にはならなかつた。

供給される溶銑の温度は平均 1263°C と低く，しかも鉄鉱石を使用するので浴温制御は行わなかつた。

#### 2.3.2 脱りん槽

脱けいされた溶銑は，脱りん槽上流側の堰でスラグと分離されて脱りん槽に入る。

送酸量は給銑鍋内容銑 [Si] および前ヒートでの脱けい後溶銑 [Si] を参考にして決定し，270 ~ 360 Nm<sup>3</sup>/h の範囲で変更した。ランス高さ 200 mm，ノズルの 6 mm $\phi$  3 孔は一定とした。送酸量を減少させる場合には下流側ランスから順次低減した。これは最上流ランス近傍にスクラップを投入するので，同部での浴攪拌強度を確保するためである。

ブリケット状  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  は 3 本のランスの火点部近傍に連続的に装入される。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  原単位を実験目的に応じて 13 ~ 25 kg/t.HM に変更した。炉内のスラグは鏡面のような輝きをみせ，スラグ排出孔からの流出状況は良好であつた。

脱りん槽では溶銑温度を制御した。脱りん槽平均溶銑温度と炉尻での溶銑温度との差が 10 ~ 20°C と小さいことを確かめ，炉尻での溶銑温度を指標とした。精錬基礎実験結果<sup>15)</sup> および後工程での温度低下量などから目標温度を 1300 ~ 1350°C としたが，同範囲以下の例が約半数あつた。本操業での温度制御は目標温度域からはずれないようにするのが特色であり，この点から連続測温が不可欠となる。溶銑温度が上昇しはじめるとスクラップを装入し，下降しはじめると装入を中止する方法で制御した。制御結果の 1 例を示すと Fig. 3 のようになる。

脱りん槽スラグライン部の耐火物溶損速度はほとんどの場所で 0.5 mm/h 以下であつた。

### 3. 種型連続精錬炉での混合特性

種型炉での混合特性について，中川ら<sup>16)</sup>は水モデル実験装置で測定した。混合状況は押し出し流れと完全混合との合成モデルで近似でき，押し出し流れの割合  $P$  (0.4

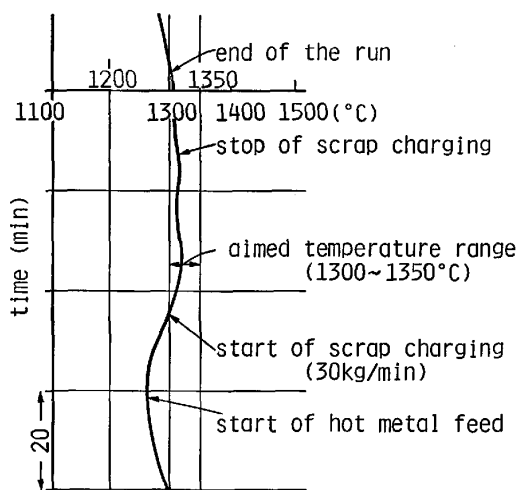


Fig. 3. An example of change of bath temperature in the temperature controlled run.

Table 1. Operational conditions of investigated runs.

	Run A	Run B
Hot metal feed rate (kg/min)	710.7	728.3
Oxygen flow rate for desiliconization (Nm <sup>3</sup> /T, HM)	3.69	3.75
Consumption of iron ore for desiliconization (kg/T, HM)	32.2	31.7
Oxygen flow rate for dephosphorization (Nm <sup>3</sup> /T, HM)	7.04	7.64
Consumption of Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> for dephosphorization (kg/T, HM)	19.0	21.6
Temperature of hot metal at the outlet of furnace (°C)	1315	1310

~0.8)は流速の増大とともに大きくなることを見出している。種型炉での溶銑およびスラグの炉内成分分布、混合特性を調査した例が見られないので、その調査をおこなった。

### 3.1 炉内の溶銑、スラグ成分分布の測定

定常操業時の炉内溶銑、スラグ成分分布と、同一時刻に炉内各所で採取した試料の分析値から調査した。調査対象としたヒートの操業条件をまとめると Table 1 のようになり、給銑開始後 30 min に試料を採取した。

脱けい槽での [Si]、脱りん槽での [P]、(Na) および (P) の分布の例を示すと Fig. 4, 5 のようになる。横軸の尺度に用いた  $LW/F_m$  ( $L$ : 浴長(m),  $W$ : 浴幅(m),  $F_m$ : 給銑速度 (t/min)) は、単位重量の溶銑のスラグとの接触面積の程度を示しかつ炉内滞留時間に対応し、給銑速度の異なるヒート間の比較を行うための特性値である。この結果から、

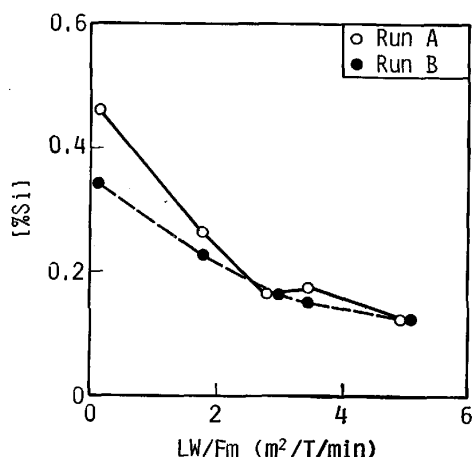


Fig. 4. Concentration profiles in the desiliconization chamber.

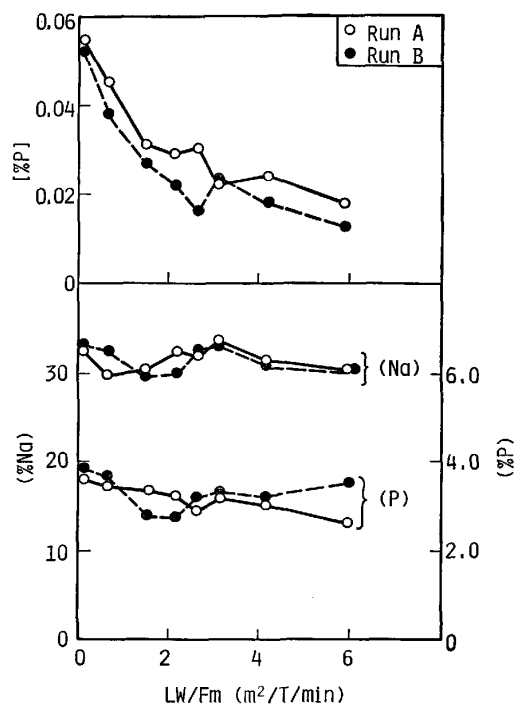


Fig. 5. Concentration profiles in the dephosphorization chamber.

- i) 各成分の分布に再現性がある。
  - ii) 脱けい、脱りん反応の大部分は浴長 1/2 程度で終了している。
  - iii) (P) 分布に向流精錬の効果がみられる。
- などの知見がえられた。

### 3.2 混合特性の測定

連続炉での溶銑およびスラグの混合特性値 ( $E_m$ ,  $E_s$ : ペクレ数  $N_{Pe}$  の逆数) の推定を試みた。流通反応装置内の逆混合の度合を示すのに  $N_{Pe}$  が用いられ、その値が大きいほどピストン流れに近くなる。

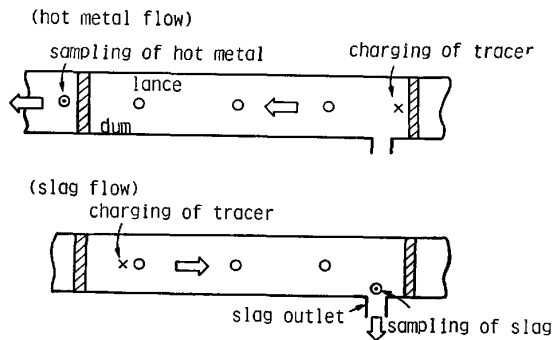


Fig. 6. Experiment for evaluation of Peclet number for metal and slag flow in the continuous refining furnace.

3.2.1 測定法

標準操作条件 (給銑速度 740 kg/min, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 原単位 20 kg/t-HM) のヒートで操作が安定する給銑開始後 10 min に、トレーサー物質を投入し分析試料採取を始めた。投入および分析試料採取位置を示すと Fig. 6 のようになる。トレーサーとして溶銑流には銅 10~20 kg, スラグ流にはホタル石 30 kg を用いた。すみやかに溶解するように小塊にして同一時刻に投入し、その後 5~10 min 間隔で試料を採取した。

3.2.2 解析方法と解析結果

流れ方向一次元の混合特性を検討する混合モデルとして、A) 合成モデル (完全混合部とピストン流れ部との結合)、B) 完全混合槽直列モデル、C) 拡散モデルなどがあげられる<sup>17)</sup>。本報では、溶銑流、スラグ流の混合を別々に取り扱えることおよび炉形状の影響を推定しやすいなどの利点をもつ拡散モデルをとることにした。

反応物 (溶銑, スラグ) の流れと拡散とが同時に行われる反応槽で、流れの方向のみの混合を検討する場合には流れの方向を x 軸にとると、その濃度変化の基礎式は (1) 式で与えられる。

$$\partial C_1 / \partial t = \bar{D}_e \cdot \partial^2 C_1 / \partial x^2 - \bar{u} \cdot \partial C_1 / \partial x \dots\dots\dots (1)$$

乱流拡散係数 ( $D_e$ ) および流速 ( $u$ ) は場所により異なると考えられるが、ここでは便宜的にその平均値をとる。

滞留時間分布関数 ( $E(\phi)$ : デルタ関数状の入口濃度変化に対する出口濃度変化を指し、デルタ応答ともいう。) は、過渡応答関数 ( $f(\phi)$ : ステップ状の入口濃度変化に対する出口濃度変化を指す。) に対して次のような簡単な関係にある。

$$E(\phi) = df(\phi) / d\phi \dots\dots\dots (2)$$

宮内ら<sup>18)</sup>は  $f(\phi)$  の完全な理論解を求め、それを微分することにより  $E(\phi)$  として (3) 式を得ている。同式を用いて混合特性を検討した。実測された出口濃度の時間

$$E(\phi) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\mu_n (\sin \mu_n + \mu_n \cdot \cos \mu_n)}{U^2 + 2U + \mu_n^2} \cdot \exp \left[ U - \left( \frac{U^2 + \mu_n^2}{2U} \right) \phi \right] \dots\dots\dots (3)$$

$$U = u \cdot L / 2D_e$$

$\mu_n$ :  $\cot \mu = (\mu/U - U/\mu) / 2$  の小さい方から第  $n$  番目の正根

関数  $C(t)$  を (4) 式により書き換え、カーブ・フィッティングにより  $U$  の値さらには  $E_m, E_s$  を推定する。

$$E(\phi = t/\bar{t}) = F \cdot \bar{t} / C_0 \cdot C(t) \dots\dots\dots (4)$$

$$\text{ただし } C_0 = F \int_0^{\infty} C(t) dt \dots\dots\dots (5)$$

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot F \cdot C / C_0 \cdot dt \dots\dots\dots (6)$$

炉出口での溶銑中トレーサー濃度  $E(\phi)$  を炉内滞留時間比との関係で示すと Fig. 7 のようになる。溶銑流での測定結果はヒート間で再現性がある。(6) 式から計算される滞留時間  $\bar{t}$  は 10~13 min 程度となり、炉形状と給銑量とから推定される値とほぼ一致する。Fig. 7

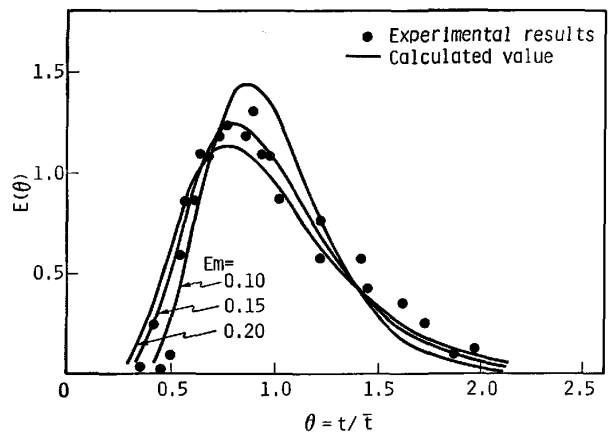


Fig. 7. Comparison of experimental results with the calculation by dispersion model in the continuous refining furnace. (Hot metal)

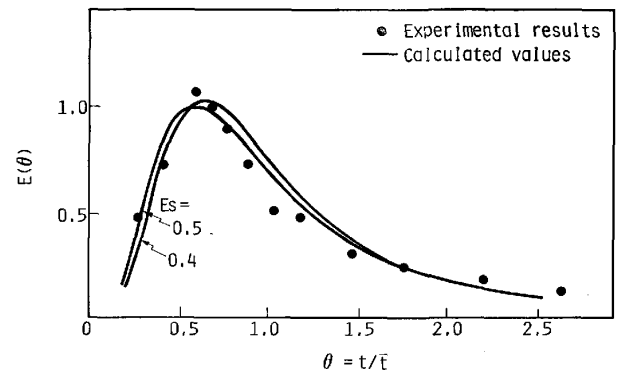


Fig. 8. Comparison of experimental results with the calculation by dispersion model in the continuous refining furnace. (Slag)

に(3)式から計算される  $E(\phi)$  の理論値を実線で示した。測定値との対比から、 $E_m(=D_{e,m}/u_m \cdot L)$  は 0.15 程度と考えられる。

スラグ流での測定結果は再現性が十分とはいえなかつたが、良好と思われる結果の例を示すと Fig. 8 のようになる。図中の実線は(3)式から計算される  $E(\phi)$  の理論値を示し、測定結果との対比からスラグ流の  $E_s(=D_{e,s}/u_s \cdot L)$  は 0.5 程度と考えられる。

以上の測定から、本試験条件での  $E_m$ ,  $E_s$  はそれぞれ 0.15, 0.5 と推定された。この値は、完全混合槽直列モデルに対応させると溶銑流については 3~4 槽、スラグ流については 2~3 槽程度のピストン流特性に対応すると考えられる。

#### 4. 結 言

$\text{Na}_2\text{CO}_3$  による溶銑事前精錬を前提とした、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を循環使用する製鋼システムを提案した。 $\text{Na}_2\text{CO}_3$  を用いて溶銑を連続精錬する試験を 45 t/h 規模で行った。向流精錬方式を採れるなどの理由から、本試験では炉形式として樋型炉を採用した。

塩基性耐火物で築造された炉は脱けい槽、脱りん槽の 2 槽に分けられ、脱りん槽では脱けいされた溶銑が向流方式で精錬された。炉体には付帯設備として、給銑系、出銑系、送酸系、副材料系、スラグ処理系および排気系の設備を備えている。

安定した操業および脱りん槽溶銑温度制御が可能であることを確かめた。連続炉での精錬時炉内成分分布および脱りん槽内の溶銑流およびスラブ流の混合特性の調査から次項があきらかになった。

i) 脱りん槽では上流側ほど [P], (P) が高く、向流精錬特有の炉内成分分布が確かめられた。

ii) 溶銑流、スラグ流にトレーサーを添加し、おのおのの混合特性値  $E_m$ ,  $E_s$  を測定しそれぞれ 0.15, 0.5 が得られた。

#### 記 号

$C_i$ : 反応物質 $i$ の濃度	(mol/cm <sup>3</sup> )
$t$ : 時間	(s)
$\bar{D}_0$ : 平均乱流改散係数	(cm <sup>2</sup> /s)
$x$ : 流れ方向距離	(cm)
$\bar{u}$ : 平均流速	(cm/s)
$\phi$ : 径過時間比 ( $t/\bar{t}$ )	(-)
$\bar{t}$ : 平均滞留時間	(s)
$L$ : 炉長	(m)

$F$ : 溶銑またはスラグ流量 (cm<sup>3</sup>/s)  
 $C_0$ : トレーサー投入量 (mol)

#### 文 献

- 1) 森谷尚玄, 藤井正信: 鉄と鋼, 63 (1977), S 622
- 2) 山本里見, 梶岡博幸: 鉄と鋼, 65 (1979), S 210
- 3) 丸川雄浄, 城田良康, 姉崎正治, 平原弘章: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 323
- 4) 山田健三, 宮下芳雄, 栗山伸二, 中島龍一, 半明正之, 田口喜代美: 鉄と鋼, 66 (1980), A 141
- 5) たとえば 井上博文, 重野芳人, 徳田昌則, 大谷正康: 鉄と鋼, 63 (1977), S 575  
 福沢 章, 中川龍一, 吉松史朗, 佐藤 彰, 三井達郎, 尾崎 太: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 2109  
 成田貴一, 牧野武久, 松本 洋, 彦坂明秀: 鉄と鋼, 66 ((1980), S 728  
 梅沢一誠, 二杉憲造, 有馬良士: 鉄と鋼, 66 (1980), S 729  
 中村 泰, 原島和海, 福田義盛: 鉄と鋼, 67 (1981), p. 2138
- 6) 山本里見, 藤掛陽蔵, 坂口庄一, 藤浦正己, 梶岡博幸, 吉井正孝, 福岡弘美: 鉄と鋼, 65 (1979), S 212  
 山本里見, 藤掛陽蔵, 松尾輝夫, 梶岡博幸, 吉井正孝, 坂口庄一: 鉄と鋼, 65 (1979), S 732
- 7) 小久保一郎, 尾形昌彦, 小菅俊洋, 中嶋睦生, 桑原正年, 山本里見, 山口武和: 鉄と鋼, 65 (1979) S 213
- 8) 松尾輝夫, 横大路照男, 吉田 誠, 山本誠二, 山本里見, 福田昭一: 鉄と鋼, 69 (1983), p. 937
- 9) たとえば, D. R. G. DAVIES, M. J. RHYDDERGH, and L. J. SHAW: JISI, 205 (1967), p. 180
- 10) たとえば, A. BERTHET, J. ROUANET, P. VAYSSIERE, and B. TRENTINI: JISI, 207 (1969), p. 790
- 11) たとえば, H. K. WORNER, F. H. BAKER, J. H. LASSAM, and R. SIDONS: J. Met., 21 (1969), p. 50
- 12) E. M. RUDZKI, H. L. GILLS, B. K. PEASE, and G. E. WIELAND: J. Met., 21 (1969), p. 57
- 13) M. A. GLINKOV: Proceedings of the Meeting "Alternative routes to Steel", Iron Steel Inst London (1971), p. 88
- 14) たとえば, 中川龍一, 吉松史朗, 上田卓弥, 三井達郎, 福沢 章, 佐藤 彰, 尾崎 太: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 414
- 15) 山本里見, 藤掛陽蔵, 坂口庄一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1896
- 16) 中川龍一, 上田卓弥, 渡辺幸雄, 斎藤 博: 鉄と鋼, 56 (1970), S 65
- 17) J. SZECKELY and N. J. THEMELIS: Rate Phenomena in Process Metallurgy (1971), p. 515 [Wiley-Interscience, A Division of John Wiley and Sons Inc.]
- 18) 矢木 栄, 宮内照勝: 化学工学, 17 (1953), p. 382