

© 1990 ISIJ

## 論 文

予備処理溶銑を用いた酸素上底吹き転炉の  
吹錬条件と冶金反応特性加藤 嘉英\*・高橋 幸雄\*・桜谷 敏和\*  
藤井 徹也\*<sup>2</sup>・大宮 茂\*<sup>3</sup>Optimization of the Blowing Sequence in a Top and Bottom Blowing  
Converter Containing Pretreated Hot MetalYoshiei KATO, Yukio TAKAHASHI, Toshikazu SAKURAYA,  
Tetsuya FUJII and Shigeru OMIYA

## Synopsis :

Experimental and theoretical studies have been carried out to clarify metallurgical reactions in combined blowing converters affected by the oxygen flow rates from the top and the bottom of the furnace.

The 5t combined blowing converter showed the decrease in oxygen content in the bath with the increase in the oxygen flow rate from the bottom, while the 5t bottom blowing converter showed the decrease in oxygen content with the decrease in the oxygen flow rate. These experimental results are interpreted in terms of an index,  $I$ , related to the inverse of the oxygen efficiency used for decarburization, which has been introduced by considering the different reaction sites brought by the top blown and the bottom blown gases. Oxygen content in steel melt and (T. Fe) in slag decrease with the decrease in the  $I$  value from LD to Q-BOP, which indicates that the  $I$  is suitable for characterizing metallurgical reactions.

The metallurgical reactions at blow end can be controlled by changing the oxygen flow rates of top and bottom blowings, based on the aimed  $I$  value.

**Key words :** steelmaking ; combined blowing converter ; blowing sequence.

## 1. 緒 言

近年,国内では溶銑予備処理プロセスが急速に普及し,溶銑の全量を処理可能な製鉄所<sup>1)~3)</sup>も出現した.その結果,転炉における脱りん負荷が大幅に軽減し,予備処理溶銑のスラグミニマム吹錬が可能となった.転炉精錬に残された冶金反応上の主な課題は,吹錬末期における優先脱炭の促進とマンガン歩留りの向上であろう.これらの課題を解決するために,上底吹き転炉では吹錬の経過とともに上吹き送酸速度を段階的に低下させる方法<sup>4)5)</sup>,吹錬末期に底吹き攪拌ガス流量を増す方法<sup>6)</sup>がとられてきた.また,純酸素底吹き転炉(Q-BOP)においては,吹錬末期の底吹き酸素流量を低下させて,優先脱炭を促進させる方法も試みられている<sup>7)</sup>.これらの方法は送酸速度の低下<sup>4)5)7)</sup>,もしくは鋼浴攪拌力の強化<sup>6)</sup>によって冶金反応特性の向上を図ったものであるが,両方法を組み合わせた吹錬を行えば,より優れた反

応特性が得られると考えられる.しかし,吹錬中に上吹きと底吹きの送酸速度をともに変化させて,冶金反応特性におよぼす影響を解析した例はほとんどない.

一方,転炉での冶金反応特性を表す指標として,中西ら<sup>8)</sup>はISCO,甲斐ら<sup>9)</sup>はBOCを提出している.しかし,いずれの指標も上吹きと底吹きの反応速度の差を考慮しておらず,またそれらを用いた上,底吹きの送酸パターンに関する検討もなされていない.吹錬末期の冶金反応特性と送酸条件の関係についての定量的で精度の良い把握と,それにもとづく最適送酸パターンの構築が望まれている.

そこで,予備処理溶銑の転炉吹錬パターンの最適化を目的として5t試験転炉による吹錬実験を行い,酸素の上吹きと底吹きの反応速度の寄与を分離した新たな指標を見出した.続いて,その指標にもとづいて送酸速度を変化させることによって,上底吹き転炉の冶金反応の予測と吹錬設計が可能なることを示した.

平成元年4月本会講演大会にて発表 平成元年6月30日受付 (Received June 30, 1989)

\* 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasakidori Mizushima Kurashiki 712)

\*<sup>2</sup> 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)

## 2. 実験方法

実験に用いた 5 t 試験転炉の上吹きランスは 4 孔のラバール型で、絞り部径が 0.0095 mφ、ノズルの鉛直方向に対する傾き角が 15° である。ランス高さは 0.4 m で一定とした。底吹き羽口は同心 2 重管で、内管内径が 0.0036~0.01 mφ、本数が 2~4 本である。ただし、各実験に対して羽口径を等しくした。

脱珪および脱りん処理後の溶銑組成を Table 1 に示す。溶銑重量は 4.8~5.2 t である。吹錬開始と同時に塊状 CaO を 15 kg/t、CaF<sub>2</sub> を 1 kg/t 投入した。吹止め時の温度は 1620~1680°C、スラグボリウムは 32~46 kg/t、CaO/SiO<sub>2</sub> は 2.4~3.8 である。吹止めから底吹き羽口が浸漬していない状態である倒炉完了までの時間を約 10 s として、吹止めと倒炉間の成分や温度の変化を極力抑えた。倒炉後ただちに、测温と固体電解質を用いた鋼中酸素の活量測定を行い、引き続きメタルとスラグをサンプリングした。さらに、サブランスで吹錬中のメタル测温とサンプリングを行った。

上、底吹きを送酸条件を Fig. 1 に示す。全送酸速度が一定の  $(Q_T + Q_B)/W = 3.6$  (Nm<sup>3</sup>/min/t) の条件、全量底吹き法の  $Q_T/W = 0$  の条件、および底吹き酸素流量が一定で上吹き酸素流量を変化させた  $Q_B/W = 0.08$  (Nm<sup>3</sup>/min/t) の条件と、3 とおりを基準にした。上吹き酸素流量は 1.2~3.52 (Nm<sup>3</sup>/min/t)、底吹き酸素流量は 0.08~1.2 (Nm<sup>3</sup>/min/t) の範囲である。底吹き酸素流量を大幅に変化させたが、吹抜けや羽口への漏鋼がな

Table 1. Chemical compositions of hot metal.

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)
3.0~3.8	<0.01	0.4~0.6	0.04~0.06	0.02~0.04

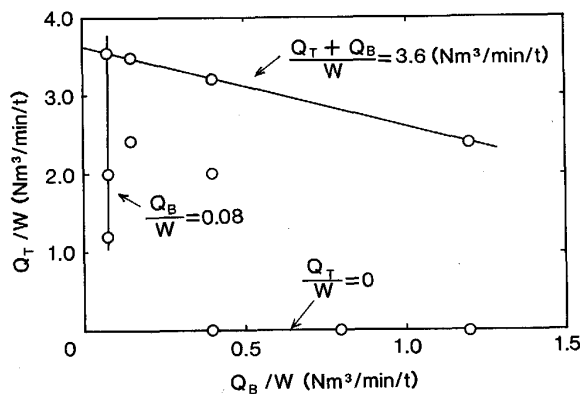


Fig. 1. Experimental conditions of top- and bottom-blowing rates in 5 t test converter.

いように<sup>10)</sup>、ガス流量に応じて底吹き羽口径を選択した。また、 $(Q_T/W, Q_B/W) = (2.0, 0.4)$  以外の送酸条件では、吹錬前、中期の吹錬時間を短縮するために炭素濃度が約 1% になるまで上吹き酸素流量を増加して、 $(Q_T + Q_B)/W = 3.6$  (Nm<sup>3</sup>/min/t) とした。 $(Q_T/W, Q_B/W) = (2.0, 0.4)$  の条件では、[%C] = 0.4~0.6 の範囲で  $(Q_T/W, Q_B/W)$  を (3.4, 0.2) から (2.0, 0.4) へステップ状に変化させた。なお、上、底吹き的气体種は純酸素とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 脱炭酸素効率におよぼす送酸条件の影響

Fig. 2 に、上底吹き法で  $(Q_T + Q_B)/W = 3.6$  (Nm<sup>3</sup>/min/t) 一定とし、上底吹き比率を変えた場合の吹錬末期の脱炭酸素効率、 $\eta_c$  (%), と [%C] の関係を示す。ばらつきがあるものの、底吹き比率を増すにつれて同一炭素濃度における脱炭酸素効率は大きくなることわかる。従来の知見と同様に、同一送酸速度では底吹きを増やして鋼浴の攪拌を促進した方が、優先脱炭は進行するといえる。また、図中の各直線は原点と各プロットの回帰線であり、 $\eta_c = 100\%$  との交点は脱炭酸素効率が 100% から低下する臨界炭素濃度 [%C\*] である。底吹き比の増加につれて [%C\*] は低下することがわかる。さらに、本実験範囲の [%C\*] = 0.3~0.4 は、210 t LD<sup>11)</sup> 転炉の [%C\*] = 0.5~0.9、通常操業時の 230 t Q-BOP<sup>11)</sup> の [%C\*] = 0.3 の間にあるが、上吹き法の冶金反応特性を底吹き法のそれに近づけるべく開発された上底吹き法においては当然の結果である。

底吹き法で  $Q_B/W$  を変えた場合の  $\eta_c$  と [%C] の関係を Fig. 3 に示す。 $Q_B$  を減らすにつれて同一 [%C] での  $\eta_c$  は大きくなり、[%C\*] も小さくなることわ

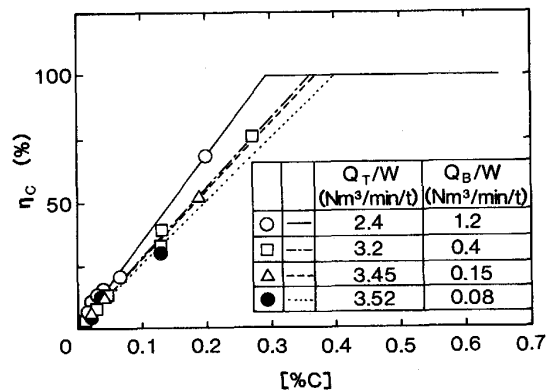


Fig. 2. Relation between oxygen utilization efficiency for decarburization and carbon content in steel melt for top- and bottom-blowing.

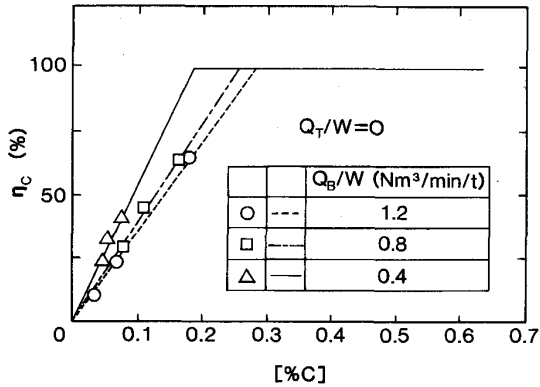


Fig. 3. Relation between oxygen utilization efficiency for decarburization and carbon content in steel melt for bottom-blowing.

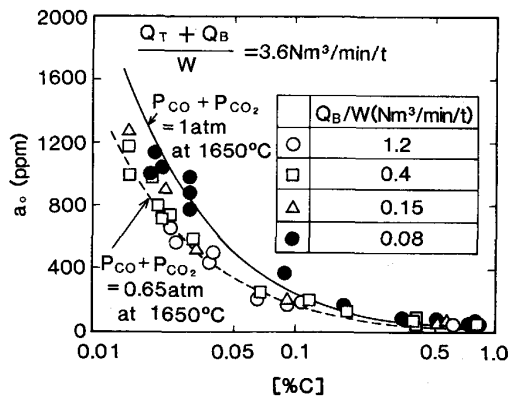


Fig. 4. Relation between activity of oxygen at turn-down and carbon content in steel melt for  $(Q_T + Q_B)/W = 3.6 \text{ Nm}^3/\text{min/t}$ .

かる。これは、230 t Q-BOP で底吹き流量を変化させた西川らの結果<sup>7)</sup>と同様の傾向である。底吹き法では、吹錬末期に送酸速度を低下させることが優先脱炭の促進に有効であることがわかる。鋼浴の攪拌力が十分ある底吹き法の場合は、送酸速度の低下によっても浴の混合状態はさほど変わらないので、吹錬末期の低酸素流量化はFeOの生成抑制、すなわち優先脱炭に結びつくためと思われる。

### 3.2 倒炉時の鋼中酸素の活量およびスラグ中酸化鉄濃度におよぼす送酸条件の影響

Fig. 4 に、上底吹き法で  $(Q_T + Q_B)/W$  を  $3.6 \text{ Nm}^3/\text{min/t}$  と一定にし、上底吹き比率を変えた場合の倒炉時の鋼中酸素の活量、 $a_o$  (ppm)、と [%C] の関係を示す。図中、実線と破線はそれぞれ  $P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} = 1, 0.65 \text{ atm}$  の [%C]-[%O] の平衡曲線である。  $Q_B/W \geq 0.15 \text{ Nm}^3/\text{min/t}$  のプロットが  $P_{\text{CO}} + P_{\text{CO}_2} = 1 \text{ atm}$  の平衡曲線より下方となるのは、岸本ら<sup>12)</sup>が指摘してい

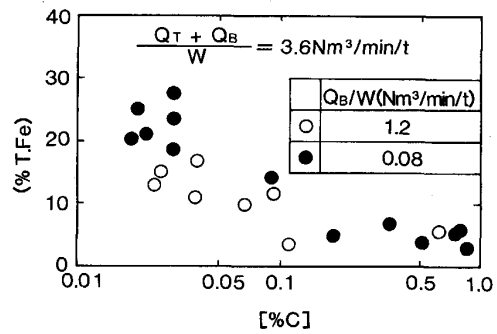


Fig. 5. Relation between (%T. Fe) and [%C] for  $(Q_T + Q_B)/W = 3.6 \text{ Nm}^3/\text{min/t}$ .

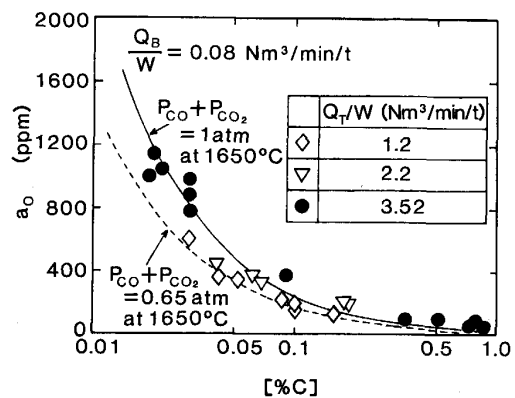


Fig. 6. Relation between activity of oxygen at turn-down and carbon content in steel melt for  $Q_B/W = 0.08 \text{ Nm}^3/\text{min/t}$ .

るようにメタルからスラグへの脱酸効果によるものと思われる。 [%C] の低下に伴い  $a_o$  は大きくなるが、底吹き比の増加につれて  $a_o$  の値が小さくなる。

上底吹き法で  $(Q_T + Q_B)/W$  を  $3.6 \text{ Nm}^3/\text{min/t}$  と一定にし、  $Q_B/W$  を 1.2 と  $0.08 \text{ Nm}^3/\text{min/t}$  に変えた場合の (%T. Fe) と [%C] の関係を、Fig. 5 に示す。従来からいわれているように、強攪拌の条件 ( $Q_B/W = 1.2 \text{ Nm}^3/\text{min/t}$ ) の方が (%T. Fe) は低い。

Fig. 6 に、  $Q_B/W$  が  $0.08 \text{ Nm}^3/\text{min/t}$  の弱攪拌条件にして、上吹き流量を変えた場合の  $a_o$  と [%C] の関係を示す。上吹き酸素流量の低下とともに  $a_o$  が小さくなるのがわかる。

Fig. 7 に底吹き法で  $Q_B/W$  を変えた場合の  $a_o$  と [%C] の関係を示す。わずかではあるが、底吹き酸素流量の低下は  $a_o$  の減少をもたらす。

Fig. 4, 6, 7 の結果を、上、底吹きを送酸速度をそれぞれ縦、横軸として概念的に整理すると Fig. 8 のようになる。  $a_o$  の値は矢印の方向に低下する。なお、図には後述の方法で [%C] を 0.05 として計算した等  $a_o$  線

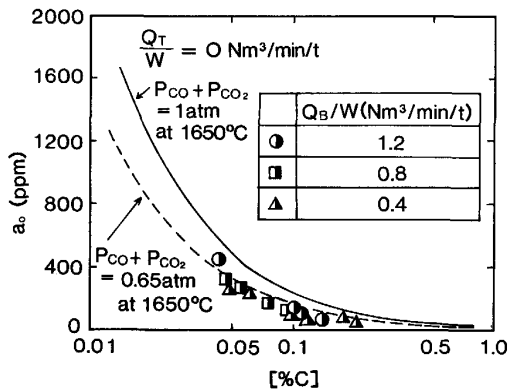


Fig. 7. Relation between activity of oxygen at turndown and carbon content in steel melt for bottom blowing.

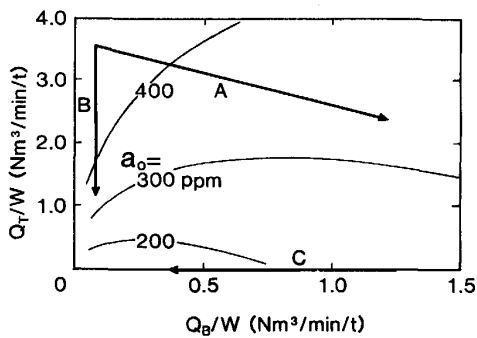


Fig. 8. Sketch of decreasing direction of measured  $a_o$  and contours of calculated  $a_o$  by eq. (10).

を併記した。  $a_o$  を低下させるためには、矢印 B, C のように総酸素流量を減らすこと、および矢印 A で示すように底吹き比率を増やすことが重要である。また、矢印 A ( $(Q_T + Q_B)/W = 3.6 \text{ Nm}^3/\text{min}/\text{t}$ ) と矢印 B ( $Q_B/W = 0.08 \text{ Nm}^3/\text{min}/\text{t}$ ) の先端での  $a_o$  は、それぞれ Fig. 4, 6 からわかるようにほぼ等しい。矢印 C ( $Q_T/W = 0$ ) の先端の  $a_o$  は、Fig. 7 を Fig. 4, 6 と比べればわかるように矢印 A, B の先端のそれより小さい。次章ではこれらの関係を定量的に検討する。

#### 4. 考察：転炉吹錬パターン設計

##### 4.1 冶金反応特性を表す指標、I の導出

中西ら<sup>8)</sup>は、酸化精錬炉の炉内反応を特徴づける指標として次式で定義される ISCO を提出した。

$$ISCO = \left( \frac{2(Q_T + Q_B)}{2(Q_T + Q_B) + Q_d} \right) \left( \frac{Q_T + Q_B}{W/\tau} \right) \dots (1)$$

$$\tau = 800 \epsilon^{-0.4} N^{1/3} \dots (2)$$

ここに、(1)式の右辺第1項は CO 分圧、第2項は酸素流量と溶鋼循環流量の比に相当する量である。第1項

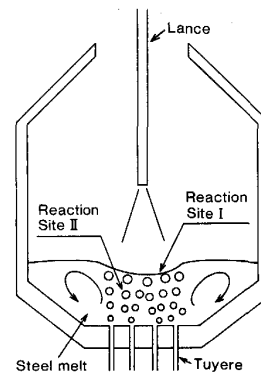


Fig. 9. Schematic representation of reaction sites in top- and bottom-blowing converter.

は熱力学的、第2項は速度論的観点から表現されており、両項とも値が小さいほど優先脱炭の条件となる。

一方、甲斐ら<sup>9)</sup>は FeO の生成速度を決める反応界面への酸素の供給速度と、鋼浴中から反応界面への炭素の供給速度との比に相当する量で定義される BOC を提案した。

$$BOC \equiv \frac{Q_T + Q_B}{(W/\tau)[\%C]} \dots (3)$$

$$\tau \equiv \left( \frac{H}{12.5} \right)^{2/3} \left( \frac{\rho}{1} \right)^{1/3} (204) \epsilon^{-0.5} \dots (4)^{13}$$

BOC も ISCO と同様、値が小さいほど優先脱炭が進行する。ISCO に比べて BOC では CO 分圧の項が考慮されていないので、Ar や N<sub>2</sub> などの希釈ガスを大量に使用しない普通鋼吹錬時の指標である。

しかし、これら ISCO および BOC の両指標ともに (1), (3)式からわかるように、上吹きと底吹きの寄与の違いを分離して定義されていない。上底吹き法では、Fig. 9 に示すように上吹き酸素ジェットによる火点の反応サイト I と、底吹きガス気泡と溶鋼の共存域である反応サイト II がある。それぞれの部位での脱炭酸素効率率は、たとえ鋼浴の攪拌が同じであっても反応界面積と酸素供給速度の比が異なるので、必ずしも等しいとは限らない。そこで、従来に比べてより良く冶金反応特性と関連づけることができるように、上吹きと底吹きの寄与の違いを考慮した新たな指標、I、を導出する。

脱炭酸素効率が 100% 以下となる吹錬末期では、脱炭反応速度は鋼浴中の炭素の物質移動に律速されるので<sup>17)</sup>次式が成り立つ。

$$\frac{d[\%C]}{dt} = (K_T + K_B)[\%C] \dots (5)$$

脱炭酸素効率、 $\eta_c$  (%) は(5)式を用いると以下のようになる。

$$\eta_c = \left( \frac{112}{12} \right) \frac{W(-d[\%C]/dt)}{Q_T + Q_B} \times 100$$

$$= \left( \frac{112}{12} \right) \frac{W(K_T + K_B)[\%C]}{Q_T + Q_B} \times 100 \dots\dots (6)$$

容量係数  $K_i (i=T, B)$  は酸素供給速度と攪拌強度に依存するとして、次の関数形で表す。

$$K_i = \alpha_i (Q_i/W)^{m_i} \dot{\epsilon}^{n_i} \dots\dots (7)$$

ただし、 $\dot{\epsilon}$  は中西ら<sup>14)</sup> が示した次式を用いた。

$$\dot{\epsilon} = 28.5 \frac{(2Q_B)T}{W} \log(1+H/1.48)$$

$$+ \frac{1}{2} \frac{Q_B}{60} \frac{32}{22.4} \frac{v^2}{W} + 0.0453 Q_T \frac{du^2}{Wh} \cos \theta \dots\dots (8)$$

ここに右辺第1, 2項は底吹き, 第3項は上吹きによる攪拌エネルギーである。右辺第1項の底吹きガス流量は  $O_2$  の全量が2倍の体積の  $CO$  になるとして,  $2Q_B$  を使用した。

上底吹き転炉において、 $\dot{\epsilon}$  におよぼす上吹きの攪拌エネルギー ((8)式の右辺第3項) および底吹きガスの運動エネルギー ((8)式の右辺第2項) の寄与は通常小さいので<sup>14)</sup>, (8)式の  $\dot{\epsilon}$  と  $Q_B/W$  は比例関係にあると見なすことができる。それゆえ、(7)式で  $i=B$  の時には、( $Q_B/W$ )の項を考慮せずに  $\epsilon$  の項のみとする。すなわち、上吹き、底吹きの脱炭反応の容量係数はそれぞれ以下のようになる。

$$K_T = \alpha_T (Q_T/W)^{m_T} \dot{\epsilon}^{n_T} \dots\dots (7')$$

$$K_B = \alpha_B' \dot{\epsilon}^{n_B} \dots\dots (7)''$$

(7)', (7)''式を(6)式に代入して整理すると、(6)'式のようになる。

$$\eta_c = \left( \frac{11200 \alpha_T}{12} \right) \times \frac{W \{ (Q_T/W)^{m_T} \dot{\epsilon}^{n_T} + \alpha \dot{\epsilon}^{n_B} \} [\%C]}{Q_T + Q_B} \dots\dots (6)'$$

そこで、冶金反応特性を表すパラメーター、 $I$  を(6)'式で示される  $\eta_c$  の逆数に比例する量として定義する。

$$I = \frac{Q_T + Q_B}{W \{ (Q_T/W)^{m_T} \dot{\epsilon}^{n_T} + \alpha \dot{\epsilon}^{n_B} \} [\%C]} \dots\dots (9)$$

(9)式で定義される  $I$  は  $ISCO$  や  $BOC$  と同じく、値が小さいほど脱炭が優先的に進行する。

(9)式中の定数  $m_T, n_T, \alpha, n_B$  は以下のように定めた。まず、 $a_o$  と  $I$  の間に

$$a_o = b_0 + b_1 I + b_2 I^2 \dots\dots (10)$$

の関係があると仮定する。適当な  $m_T, n_T, \alpha, n_B$  を定めて、(10)式の  $b_0 \sim b_2$  の係数および  $a_o$  の測定値と計算値の残差平方和を最小自乗法によって求める。計算には Fig. 1 の送酸条件のうち、後述の送酸パターンの変更

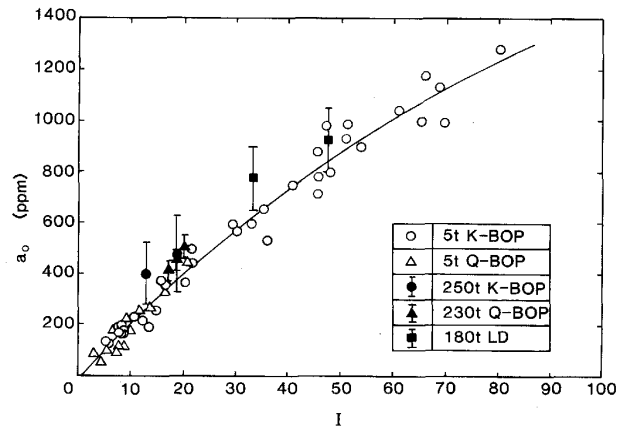


Fig. 10. Relation between activity of oxygen at turndown in steel melt and index,  $I$ .

実験で使用する ( $Q_T/W, Q_B/W$ )=(2.0,0.4) を除いた条件のデータを用いた。データ数は計 53 個である。次に、 $m_T, n_T, \alpha, n_B$  等の設定値を変化させて、 $a_o$  の測定値と計算値の残差平方和が最小となるように、繰り返し計算を行った。具体的には、 $m_T, n_T, \alpha, n_B$  に対して、それぞれ 10 個の設定値で  $10^4$  回の計算を繰り返し、大略の値を定めた。その後さらに、値の精度向上のために、当初の計算で定めた各値の近傍で同様の繰返し計算を行った。得られた係数を以下に示す。

$$m_T = 0.54 \quad n_T = 0.22 \quad \alpha = 0.26 \quad n_B = 0.56 \dots\dots (11)$$

$$b_0 = -12.0 \quad b_1 = 21.6 \quad b_2 = -0.0758 \dots\dots (12)$$

$a_o$  の実測値と、(11)式の係数を(9)式に代入して計算した  $I$  の関係を Fig. 10 に示す。○および△のプロットが最小自乗法の対象とした 5 t 試験転炉のデータで、実線は(11), (12)式の係数を用いた(10)式の計算結果である。 $a_o$  と  $I$  の間には正相関があることがわかる。図中には、商業炉の 250 tK-BOP<sup>15)</sup>, 230 tQ-BOP<sup>7)</sup> および 180 t LD<sup>16)</sup> のデータも示した。これら商業炉の鋼中酸素濃度は図中の回帰曲線に比べて約 100 ppm 程度高い値を示しているものの、平均値は 5 t 試験転炉のプロットの偏差の範囲内におさまっている。商業炉のデータは化学分析による全酸素濃度である。商業炉のデータが 5 t 試験転炉のそれに比べて若干高い値となる理由は全酸素濃度と  $a_o$  の違い、スラグ組成やスラグ量の違いなどによると考えられるが、詳細は不明であり、さらに検討が必要である。

#### 4.2 I の検証

本節では他の冶金反応特性と  $I$  の関係を調べ、指標としての  $I$  の妥当性を検証する。

Fig. 11 に、( $\%T.Fe$ ) と  $I$  の関係を示す。5 t 試験転炉および実炉の条件は Fig. 10 の場合と同じである。

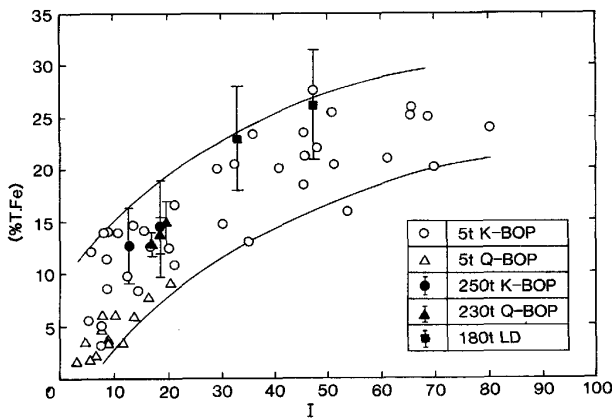


Fig. 11. Relation between (%T.Fe) and index,  $I$ .

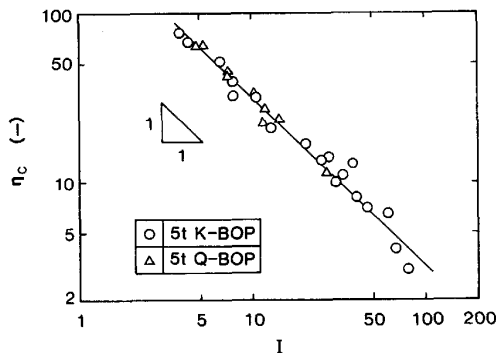


Fig. 12. Relation between oxygen utilization efficiency for decarburization and index,  $I$ .

図から (%T.Fe) は  $I$  によって決まることが明らかである。

Fig. 2, 3 に示した  $\eta_c$  と  $I$  の関係を Fig. 12 に示す。図から、 $\eta_c$  と  $I$  の間には

$$\eta_c = 320 / I \dots\dots\dots (13)$$

の関係が成り立っており、 $I$  を  $\eta_c$  の逆数に比例する量とした(9)式の妥当性が検証された。また、(13)式から、 $\eta_c=100$  での  $I$  値は 3.2 となる。 $I$  の定義式である(9)式に  $I=3.2$  を代入すれば、脱炭酸素効率が 100% から低下する臨界条件に関して、 $Q_T$ 、 $Q_B$ 、 $W$  等の設計変数と [%C] 間の関係式が得られる。これは、定められた設計変数の下での臨界炭素濃度の予測式となりうる。

Fig. 10~12 より、 $I$  の値を小さくすることは  $a_o$  を低くし、(%T.Fe) を下げ、脱炭酸素効率を上げること、言い換えれば優先脱炭を促進することであるといえる。 $I$  は優先脱炭の指標となる。

次に、5 t 試験転炉の  $a_o$  のデータを他の指標で整理しよう。Fig. 13 に、 $a_o$  と  $(BOC)'$  の関係を示す。ここで、 $(BOC)'$  は、(4)式を(3)式に代入して定数項を除いた(3)式で表される。

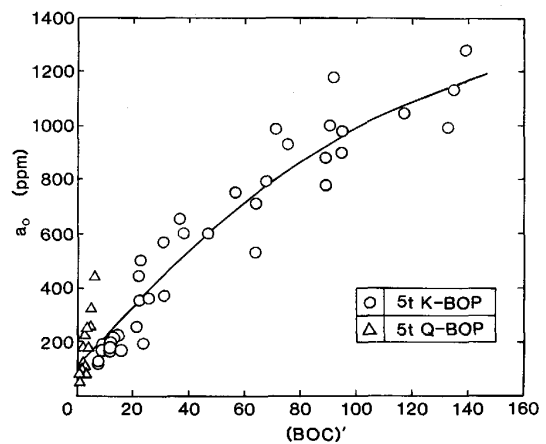


Fig. 13. Relation between activity of oxygen at turndown in steel melt and  $(BOC)'$ .

$$(BOC)' \equiv \alpha' BOC \equiv \frac{Q_T + Q_B}{W \epsilon^{0.5} [\%C]} \dots\dots\dots (3)$$

図から、 $a_o$  と  $(BOC)'$  の間にも正相関があるが、Fig. 10 の  $a_o$  と  $I$  の関係に比べて回帰曲線に対する偏差が大きい。 $(BOC)'$  で整理した場合の  $a_o$  の残差平方和は  $I$  の場合の 3.4 倍である。上吹きと底吹きの影響の違いを考慮した指標、 $I$  はより精度良く冶金反応特性を表すことができるといえる。なお、(1)式で表される  $ISCO$  についても、右辺第 1 項の  $CO$  分圧を一定として、[%C] をほぼ同一とすれば、(3)式で示される  $BOC$  との違いは  $\epsilon$  のべき乗に関する若干の差のみとなることから、 $ISCO$  の偏差も  $BOC$  と同様  $I$  値に比べて大きい。

### 4.3 等 $I$ 線図にもとづく吹錬パターンの設計

Fig. 14 に、等  $I$  線図を示す。 $I$  の計算は 5 t 試験転炉の条件で [%C] = 0.05 として行った。図中に併記した上、底吹きを送酸流量と等  $I$  線図を考慮すれば、目的の  $I$  値を得るのに必要な送酸条件を決めることができる。 $I$  値と冶金反応特性の間には相関があるので、Fig. 14 に示した等  $I$  線図は転炉の吹錬パターンの設計に有用である。また、図中で  $Q_T/W$  が大きく  $Q_B/W$  が小さい左上隅の領域では脱炭の進行が遅れ、総ガス流量が小さくしかも底吹きが確保されている下端中央部では優先脱炭されることもわかる。

Fig. 15 に、予備処理溶銑の転炉吹錬における送酸パターンの一例を示す。スラグ量が少ないのでスロッピングを懸念する必要がなく、吹錬前、中期は底吹き酸素流量を極力少量とすることができる。一方、吹錬末期は、送酸速度の減少と攪拌力の強化によって鋼浴の局所的な過酸化状態を解消して優先脱炭を図るために、上吹き酸

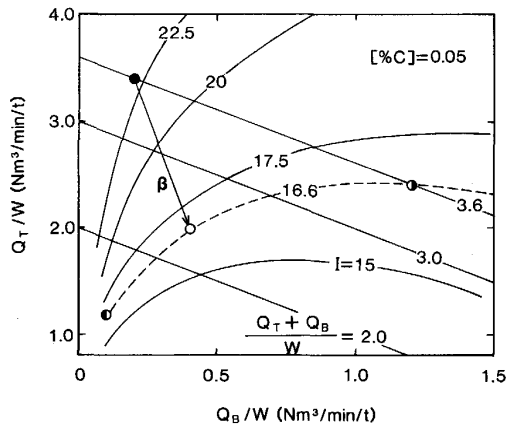


Fig. 14. Contours of  $I$  values for  $[\%C]=0.05$  and total oxygen flow rate.

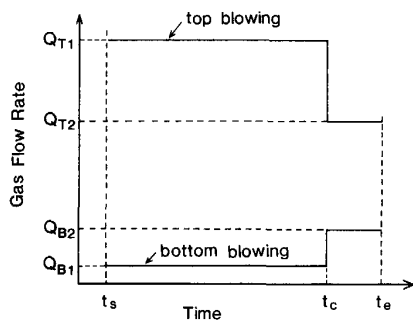


Fig. 15. An example of change in oxygen flow rates for top- and bottom-blowing to obtain smaller  $I$  value at the last stage of refining.

素流量を減らしつつ底吹き酸素流量を増加させる。

このような Fig. 15 の送酸パターンの具体例を Fig. 14 中の  $\beta$  で示す。吹錬前、中期の  $(Q_{T1}/W, Q_{B1}/W) = (3.4, 0.2)$  の条件から、吹錬末期の脱炭酸素効率が 100% 以下となる直前の  $[\%C]=0.4\sim 0.6$  の時期に、 $(Q_{T2}/W, Q_{B2}/W) = (2.0, 0.4)$  の条件に変更した。変更後の  $I$  値は 16.6 である。一方、 $(Q_T/W, Q_B/W) = (2.4, 1.2)$  および  $(1.2, 0.08)$  の送酸条件における  $I$  値も、Fig. 14 の破線からわかるようにほぼ 16.6 に等しい。これら 3 とおりの送酸条件に関して、 $a_o$  と  $[\%C]$  の関係を Fig. 16 に示す。図中の実線は、

$$I = (16.6)(0.05)/[\%C] \dots\dots\dots (14)$$

を(10)式の回帰式に代入して計算した。 $(Q_T/W, Q_B/W) = (2.4, 1.2)$  および  $(1.2, 0.8)$  の送酸条件は図中の回帰曲線を作成するためのデータの一部であるので、●および○のプロットが実線によって整理されるのは当然であるが、吹錬末期に  $(Q_T/W, Q_B/W)$  を  $(3.4, 0.2)$  から  $(2.0, 0.4)$  に切り替えた○のプロットも同様の結果となった。すなわち、吹錬末期に送酸条件を変

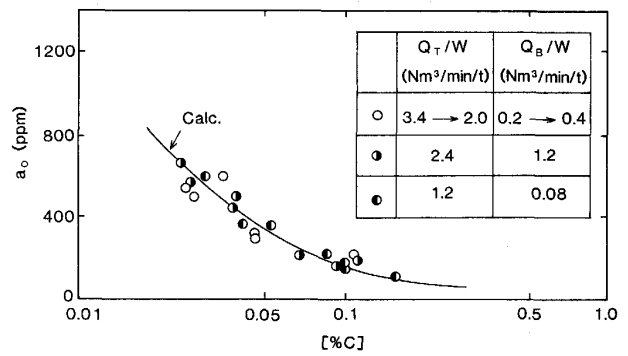


Fig. 16. Relation between activity of oxygen at turndown and carbon content in steel melt under the top- and bottom-blowing conditions of the same  $I$  value.

更した場合、吹止め時の冶金反応特性は切替え後の  $I$  値によって決まる。

このように、吹錬末期の上、底吹き酸素流量は  $I$  値を指針として設定すればよい。しかし、底吹きガス流量を可変とする操業は、吹抜けや羽口への漏鋼のない範囲<sup>10)</sup>で行わなければならない。底吹きガス流量の可変幅には制約がある。また、上吹きランスの大幅な流量変更はスピittingによるランス孔閉塞などの問題を引き起こす。優先脱炭を促進するための送酸パターンは、Fig. 14 の等  $I$  線とこれらの制約条件を同時に考慮した上で定めなければならない。

なお、今回は酸素の上底吹きで、送酸パターンの変更を脱炭酸素効率が 100% の時期に行ったが、100% 以下となる吹錬末期に切り替えた場合の冶金反応特性におよぼす送酸条件の影響については、今後解明されなければならない問題である。さらに、底吹き不活性ガス、ランス高さやランスチップ形状等の上吹き条件、スラグ量等の変更実験を通して、冶金反応特性におよぼす影響を調べ、最適な吹錬パターンを確立する必要がある。

### 5. 結 言

上吹きと底吹きの送酸条件を大幅に変えた予備処理溶銑の吹錬実験を 5 t 試験転炉を用いて行い、それにもとづいて上吹きと底吹きの反応サイトを考慮して冶金反応特性を表す指標、 $I$ 、を導出した。さらに、 $I$  を用いて転炉の送酸パターンを検討した。得られた結果を以下に示す。

1) 総酸素流量が一定の上底吹き法では、底吹き比が大きいくほど  $a_o$  と  $(\%T.Fe)$  は小さく、脱炭酸素効率も向上する。底吹きガス流量が一定の上底吹き法と底吹き法では、それぞれ上吹き酸素流量、底吹き酸素流量を

少なくするほど冶金反応特性が向上する。

2) 次式で定義される指標,  $I$ , を上吹きと底吹きの影響サイトの寄与を分離しつつ導き, 5t 試験転炉の  $a_0$  のデータを用いて係数やべき数を定めた。

$$I \equiv (Q_T + Q_B) / [W \{ (Q_T/W)^{m_T} \dot{\epsilon}^{n_T} + \alpha \dot{\epsilon}^{n_B} \}] [\%C]$$

3)  $I$  の値が小さいほど優先脱炭が促進されることを確認した。

4)  $I$  は反応サイトの寄与の違いを考慮していない他の指標に比べて, 精度良く優先脱炭現象を説明できる。

5)  $I$  値の計算結果にもとづいて, 送酸速度や上底吹き流量比率などの吹錬条件の設計が可能である。

### 記号

$a_0$ : 鋼中酸素の活量 (ppm)  
 $b_0, b_1, b_2$ : (10)式の回帰式の係数  
 $BOC$ : (3)式で定義される冶金反応特性を示す指標  
 $d$ : 上吹きノズルの内径 (m)  
 $h$ : ランス高さ (m)  
 $H$ : 浴深 (m)  
 $I$ : 冶金反応特性を示す指標  
 $ISCO$ : (1)式で定義される冶金反応特性を示す指標  
 $K_i, K_T, K_B$ : ( $i=T, B$ ), 上吹き, 底吹きの脱炭速度の容量係数 ( $\text{min}^{-1}$ )  
 $m_i, n_i$ : 定数 ( $i=T, B$ )  
 $P_{CO}, P_{CO_2}$ : CO, CO<sub>2</sub> の分圧 (atm)  
 $Q_i, Q_T, Q_B$ : ( $i=T, B$ ), 上吹き, 底吹きの酸素流量 ( $\text{Nm}^3/\text{min}$ )  
 $Q_{T1}, Q_{B1}$ : 吹錬前, 中期の上, 底吹き酸素流量 ( $\text{Nm}^3/\text{min}$ )  
 $Q_{T2}, Q_{B2}$ : 吹錬末期の上, 底吹き酸素流量 ( $\text{Nm}^3/\text{min}$ )  
 $Q_d$ : 鋼浴中を浮上する CO 以外のガス流量 ( $\text{Nm}^3/\text{min}$ )  
 $t$ : 時間 (min)  
 $T$ : 溶鋼温度 (K)  
 $u, v$ : 上吹きランス, 底吹き羽口出口のガス速度 (m/s)  
 $W$ : 溶湯重量 (t)  
 $\alpha, \alpha', \alpha_i, \alpha'_i$ : 定数 ( $i=T, B$ )  
 $\dot{\epsilon}$ : 鋼浴の攪拌エネルギー (kW/t)

$\eta_C$ : 脱炭酸素効率 (%)

$\rho$ : 溶鋼密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$\tau, \tau'$ : それぞれ(2), (4)式で定義される均一混合時間 (s)

$\theta$ : 上吹きノズルの鉛直方向となす角度 (deg)

### 文献

- 住田守弘, 安藤道英, 中村皓一, 野瀬正照, 中島啓之, 高橋義則: 鉄と鋼, **69** (1983), S959
- 数士文夫, 山本武美, 水藤政人, 有吉政弘, 相沢完二, 永井亮二: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 104
- 朝穂隆一, 山田純夫, 安川 登, 鈴木孝夫, 西川 広, 富山淑朗: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 214
- 吉田克麿, 山崎 勲, 田中雅章, 青木伸秀, 渡辺吉夫: 鉄と鋼, **73** (1987), S1013
- 山瀬 治, 池田正文, 福味純一, 滝 千尋, 山田健三, 岩崎克博: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 270
- 加藤嘉英, 藤井徹也, 岸本康夫, 仲村秀夫, 垣生泰弘, 森 淳, 岡田導昌: 鉄と鋼, **70** (1984), S896
- 西川 広, 近藤 寛, 荒谷 誠, 朝穂隆一, 山田純夫: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 215
- 中西恭二, 加藤嘉英, 鈴木健一郎, 香月淳一: 鉄と鋼, **64** (1978), S169
- 甲斐 幹, 大河平和男, 平居正純, 村上昌三, 佐藤宣雄: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1946
- 加藤嘉英, 野崎 努, 中西恭二, 藤井徹也, 江見俊彦: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 380
- 中西恭二, 鈴木健一郎, 別所永康, 仲村秀夫, 馬田 一: 鉄と鋼, **64** (1978), S168
- 岸本康夫, 加藤嘉英, 桜谷敏和, 藤井徹也: 鉄と鋼, **75** (1989), p. 1300
- 甲斐 幹, 大河平和男, 樋口満雄, 平居正純: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 1946
- K. NAKANISHI, K. SAITO, T. NOZAKI, Y. KATO, K. SUZUKI and T. EMI: 65th Steelmaking Conference of AIME (1982), p. 101
- J. NAGAI, T. YAMAMOTO, H. YAMADA, H. TAKE, R. TACHIBANA, K. NAKANISHI and Y. IIDA: Kawasaki Steel Technical Report, **6** (1982) Sep., p. 12
- 岡崎有登: 私信 (1964)
- たとえば, 藤井毅彦, 荒木泰治, 丸川雄浄: 鉄と鋼, **52** (1966), p. 510