

底吹き転炉の冶金反応特性に及ぼす 酸素供給速度と羽口圧力の影響

阿部 正道*・岸本 康夫*²・竹内 秀次*・別所 永康*・鈴木 一*²

Effect of Oxygen Flow Rate and Pressure on Metallurgical Characteristics in Bottom Blowing Converter
Masamichi ABE, Yasuo KISHIMOTO, Syuji TAKEUCHI, Nagayasu BESSHO and Hajime SUZUKI

Synopsis : In order to improve the refining characteristics in the bottom blowing converter (Q-BOP) at Chiba works, the oxygen flow rate at the final stage of the blowing was decreased by reducing the diameter of the bottom tuyere.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) By lowering the oxygen flow rate at the final stage of the blowing, the improvement in the decarburization efficiency is achieved. Consequently, (T.Fe) in slag is lowered.
- (2) The effect of the dilution of the partial pressure of CO, Pco, on the metallurgical characteristics is small in Q-BOP. Therefore, for the improvement in the metallurgical characteristics the reduction of the oxygen flow rate is better than the mixed gas blowing.
- (3) The increase in the pressure of the oxygen gas improves the decarburization efficiency at the same gas flow rate.
- (4) On the basis of the mass transfer model considering the turbulent theory, the mass transfer rate in the reaction zone is assumed to be increased with the increase in the gas pressure. The improvement in the decarburization efficiency by the increase in the gas pressure in Q-BOP is well described by this increase in the mass transfer rate in the reaction zone.

Key words : steelmaking ; bottom blowing converter ; mass transfer ; water model experiment ; stirring force ; gas injection.

1. 緒言

溶鉄予備処理体制の確立により転炉における脱りん負荷が大幅に軽減されたため、転炉に要求される主な機能は脱炭のみとなりつつある。こうした状況下で、極低炭素鋼溶製時のRHでの精錬負荷を軽減するため、転炉で[mass% C]=0.03~0.04の低炭素濃度域まで脱炭する必要性が強くなっている。一方、溶鋼の高清浄化および転炉精錬、取鍋精錬における合金鉄コストの削減などを実現するためには、脱炭反応に使用されない酸素による鉄酸化を抑制する必要がある。したがって、転炉では酸素の脱炭利用効率を極力高いまま低炭素濃度域まで脱炭できる技術を確認することが望まれている。

本研究では、底吹き羽口の径を小さくし底吹きガス圧力を高圧化させることにより、脱炭吹錬末期の酸素流量を低下させ優先脱炭を行う方法を230ton底吹き転炉(Q-BOP)で試みた。さらに、酸素流量を低下させることなく吹き込みガス圧力のみを上昇した実験も行った。この実験結果と可溶性ガスを用いた水モデル実験を用いて、本研究で新たに見出した冶金反応特性に及ぼす底吹き酸素ガス圧力の効果

について、底吹き酸素の羽口直上での反応に注目した考察を行った。

2. 転炉吹錬末期の冶金反応特性に関する従来研究

1977年の川崎製鉄千葉製鉄所へのQ-BOPの導入¹⁾を契機に、転炉の冶金反応特性に及ぼす底吹き攪拌の効果が注目され、各社において上底吹き転炉の開発が行われた²⁾。以来、その精錬機能の最適化のために、上底吹き条件による冶金反応特性の変化について種々の研究が行われてきた³⁻⁶⁾。

転炉における上底吹きガス攪拌の操作要因の冶金反応特性に与える影響を統一的に表す指標として、中西ら⁷⁾はISCOを先駆的に提唱した。その後甲斐ら⁸⁾はBOCを提案した。加藤ら⁹⁾は上吹きと底吹きガスのそれぞれの攪拌力の効果を定量的に表す指標としてI値を実験結果から導出した。さらに岸本ら¹⁰⁾は上底吹き転炉においてCO分圧(以下Pcoと称する)と攪拌力が冶金反応特性に与える影響を示す因子としてCROIを理論的に導出した。これらは、優先脱炭への酸素供給速度、底吹きガス量、不活性ガス量、上底吹き比等の影

平成7年11月30日受付 平成8年5月13日受理 (Received on Nov. 30, 1995; Accepted on May 13, 1996)

* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260)

* 2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

響を示しており、値が小さいほど優先脱炭に有利になる。これらの指標に従い、最適な上底吹き条件の選択が各社で進められている^{11~13)}。

普通鋼では、低炭素濃度域における P_{CO} の影響が少ない¹⁴⁾ことから、酸素供給速度(以下 Q_{O_2} と称する)の低下、もしくは攪拌動力密度(以下 $\dot{\epsilon}$ と称する)の向上により、吹錬末期の優先脱炭を促進させることが重要となる。

Q-BOPでは、底吹き酸素流量を低下させると $\dot{\epsilon}$ が低下するが⁵⁾、 Q_{O_2} 低下の効果が大きくISCO値は減少する¹⁵⁾。

しかし、単に Q_{O_2} を低下させると羽口の圧力が低下するため、漏鋼防止の観点から Q_{O_2} には下限値が存在する。そこで、羽口本数の減少により羽口圧力を上昇させて吹錬末期に酸素流量低下を行う試み¹⁵⁾、あるいは吹錬末期に酸素に窒素を混合させる希釈吹錬によって Q_{O_2} を低下させる試み¹⁶⁾が行われ、冶金反応特性が向上することが確認されている。ただし、羽口本数の減少は羽口の溶損が生じた場合に作業が困難となる問題が、また希釈吹錬は窒素濃度が上昇するために鋼種が限定されるという問題がある。

一方、上に示した従来のISCO等の指標は、炉内のマクロ的な操業要因と冶金反応特性を説明することができが、吹き込みガスの圧力が反応速度へ及ぼす影響について考慮した研究はない。また、従来の底吹きガスの効果は吹き込んだガスがそのまま浮上するとして整理されているが、酸素ガスは火点もしくは浮上中に鉄と反応して一旦酸化鉄になるといわれており¹⁷⁾、こうした不活性ガスと同様の取り扱いが行えるかどうかは明らかではない。

そこで、本研究では羽口径を小さくして吹き込み酸素の圧力および流量を変化させる実機実験、および羽口直上の反応に着目した水モデル実験を行った。

3. 実験方法

3・1 水モデル実験

吹き込まれた酸素は火点で鉄を酸化させるのに消費され、その後、火点で生成された酸化鉄が還元($FeO + C \rightarrow Fe + CO$)されることによりCOガスが発生するものと推定される¹⁷⁾。そのため、酸素吹き込みの場合はArや N_2 吹き込みの場合とは状況が異なる。後に述べる実機Q-BOPにおいて観察された羽口圧力の効果を考察するために、可溶性ガスの吹き込み圧力変化が浴流動へ与える影響を調査するため水中への水蒸気吹き込みモデル実験を行った。

すなわち吹き込まれた水蒸気は吹き込み後水中で液化するためガスは浮上せず溶解する。溶解過程は酸素と当然異なるが、羽口直上に限って着目すれば溶解するガスの液流動への影響をシミュレーションできると仮定した。

実験装置の概略をFig.1に示す。容器は内径0.3mの透明アクリル樹脂製の円筒容器を用いた。この容器の底部中央に底吹き羽口を設置し、底吹き羽口径は2, 4, 6mmの3種類

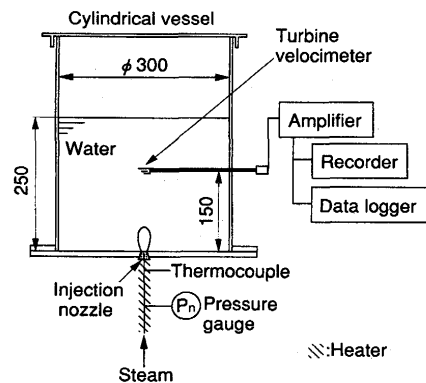


Fig. 1. Experimental apparatus of steam injection in water model.

Table 1. Conventional and experimental conditions of bottom tuyeres and oxygen blowing in 230ton Q-BOP.

	Conventional operation	This work
Ratio of cross-sectional area of tuyeres	1.0	0.62
Number of tuyeres, N	18	18
Oxygen flow rate at final stage of blowing, Q_{O_2}	2.0 ~ 2.1 $Nm^3 \cdot min^{-1} \cdot t^{-1}$	1.3 ~ 2.0 $Nm^3 \cdot min^{-1} \cdot t^{-1}$
Oxygen pressure*, P_n	0.42 ~ 0.44 MPa	0.44 ~ 0.67 MPa

*Pressure of upper stream of tuyere

に変化させた。

深さ0.25mの水浴(体積0.018m³)にキャリアガスなして水蒸気を吹き込み、底吹き羽口直上の容器底面より0.15mの位置で、プロペラ流速計により鉛直方向の浴の流速を測定し同一水蒸気流量における圧力の影響を調べた。なお、測定データの収録にはデータロガーを用い、サンプリング間隔5msで30秒間(n=6000)の流速を記録した。

3・2 230ton Q-BOP実機実験

Table 1に小径高压羽口を用いた実験条件と従来羽口での操業条件の概略を示す。実機Q-BOPの底吹き羽口は2重管構造となっており、外管、内管から構成されている。酸素は内管より吹き込まれ、内管と外管の間から羽口保護用のプロパンガスが吹き込まれる。ここで酸素吹き込み圧力、 P_n と Q_{O_2} はリニアな関係にある。

羽口本数および配列は変更せずに、羽口全体を小径化して酸素吹き込み部断面積を62%とすることにより溶鋼侵入の生じない流量下限値を低下させて²⁴⁾流量可変幅を拡大させた。これは従来の羽口で18本から11本に変更させた場合の圧力変化にほぼ等しい。

実験時の酸素流量は吹錬初期~サブランス投入([mass% C]=0.15~0.30)まで $2.3Nm^3 \cdot min^{-1} \cdot t^{-1}$ とし、それ以降 $1.3 \sim 2.0Nm^3 \cdot min^{-1} \cdot t^{-1}$ の範囲に低下させた。

4. 実験結果

4.1 水モデル実験

Fig.2に示すように水浴中に吹き込まれた水蒸気は羽口直上では気体のまま保持されるが、その後は液化して気泡の状態では浮上せず、測定位置に水蒸気は達しなかった。また浴のマクロな流動パターンは不溶性ガス吹き込みの場合と同様であった。

容器底面より0.15mの羽口直上位置における、乱流強度すなわち流速変動成分の自乗平均の平方根値²⁵⁾、 u'_{rms} 、に及ぼす水蒸気吹き込み圧力、 P_n 、の影響をFig.3に示す。圧力の上昇による吹き込みガスのエネルギー増大にともない乱流エネルギー消散が増加するため u'_{rms} は増加する。 u'_{rms} は瞬間流速の測定値、 u_i 、と瞬間流速の時間平均値、 u 、から流速変動成分、 u' 、を求め、(1)式で算出した。

$$u'_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n u'^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (u_i - u)^2}{n}} \dots\dots\dots (1)$$

4.2 230ton Q-BOP実機実験

4.2.1 吹錬末期における酸素供給速度の影響

今回特に考察の対象とした低炭素濃度域($[mass\%C] \leq 0.3$)の脱炭酸素効率、 $[mass\%C]$ に大きく影響される。

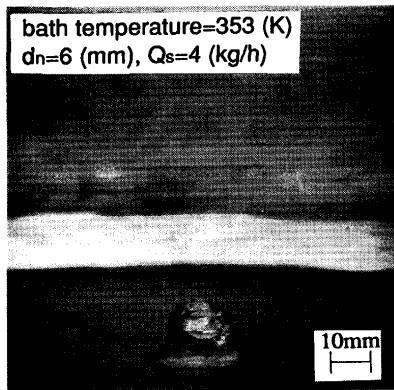


Fig. 2. Steam injection to water bath.

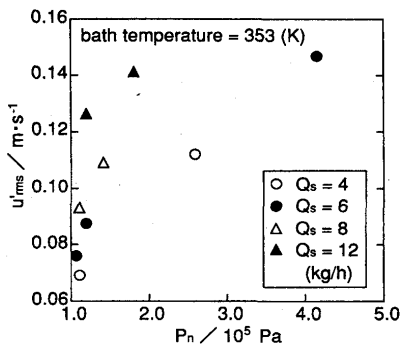


Fig. 3. Relation between steam pressure, P_n , and root-mean-square turbulence-velocity component, u'_{rms} .

また転炉の脱炭酸素効率は、 $[mass\%C]$ 以外にスラグ量、スラグ塩基度、鋼浴深さ、投入鉄鉱石原単位等の種々の要因にも大きく影響される。したがって、これらの作業条件を一定の条件で層別すると共に、(2)式に示すexpモデル¹⁸⁾で脱炭酸素効率を評価した。expモデルの概念図をFig.4に示す。

$$-\frac{dC}{dW_{O_2}} = \alpha \left\{ 1 - \exp\left(\frac{C_0 - C}{C_p - C_0}\right) \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここでexpモデルは転炉の吹錬終点制御に使用されるもので、 C_p は $C=C_0$ で脱炭曲線と接する直線と $-dC/dW_{O_2} = \alpha$ の交点における炭素濃度であり、Fig.4からもわかるようにこの値が低下すると脱炭酸素効率が低下し始める $[mass\%C]$ が低下する。また $\alpha = 0.107 mass\% \cdot (Nm^3 \cdot t^{-1})^{-1}$ 、 $C_0 = 0.01 mass\%$ と仮定した。

サブランスおよび吹き止め時のメタルサンプルの鋼中 $[mass\%C]$ 分析値、 $[mass\%C]_{S/L}$ 、 $[mass\%C]_{BLE}$ 、およびサブランス投入時からの酸素ガス原単位、 W_{O_2} 、よりexpモデルにおける C_p を求め、脱炭酸素効率の比較を行った。

C_p に及ぼす吹錬末期酸素流量の影響をFig.5に示す。吹錬末期酸素流量を低下させるに従って、 C_p が低下する。これは吹錬末期に、より低い炭素濃度まで脱炭酸素効率が低下しないことを示している。 C_p のばらつきの原因は鋼浴温度および炉代の影響が考えられるが詳細は不明である。

Fig.6に吹き止め時における $[mass\%C]_{BLE}$ とスラグ中 $(mass\%T.Fe)$ の関係を示す。 $Q_{O_2} = 1.3 Nm^3 \cdot min^{-1} \cdot t^{-1}$ と $Q_{O_2} = 2.1 Nm^3 \cdot min^{-1} \cdot t^{-1}$ を比較すると、吹錬末期の酸素流

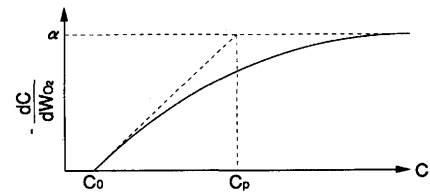


Fig. 4. Exponential-model for decarburization in the low carbon region in Q-BOP.

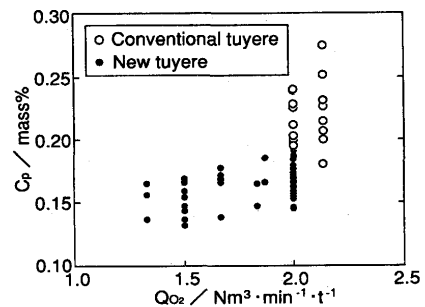


Fig. 5. Change of C_p in exp-model by reducing oxygen flow rate.

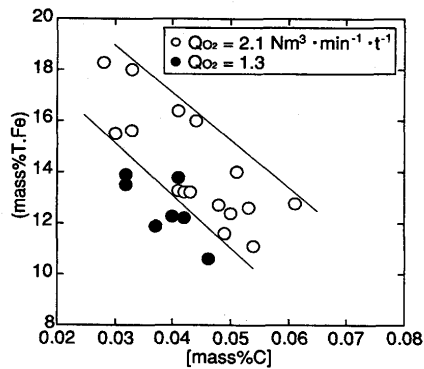


Fig. 6. Effect of oxygen gas flow rate on (mass%T.Fe) at blow end.

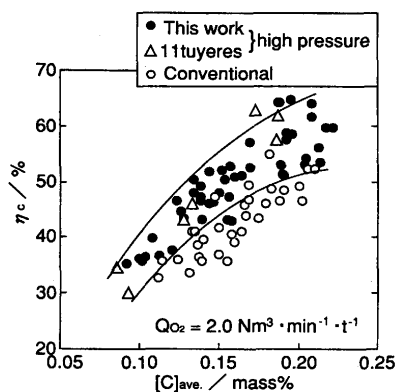


Fig. 7. Effect of oxygen gas pressure on oxygen utilization efficiency for decarburization.

量低下によって、同一 $[\text{mass}\%C]_{\text{BLE}}$ における $(\text{mass}\%T.\text{Fe})$ が低減されていることがわかる。

4.2.2 酸素吹き込み圧力の影響

Fig.5に示されるように、従来羽口と今回実験用の小径羽口において、同一酸素流量 $(2.0\text{Nm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1})$ で吹錬した場合にも C_p の明確な差が認められる。すなわち圧力の上昇により同一酸素ガス流量でも C_p が低下する。

Fig.7に $[\text{mass}\%C]_{\text{S/L}}$ と $[\text{mass}\%C]_{\text{BLE}}$ の平均炭素濃度、 $[\text{mass}\%C]_{\text{ave.}}$ とサブランス投入時から吹き止めまでの脱炭酸素効率、 η_c 、の関係を示す。明らかに実験用小径羽口を用いた方が η_c の向上が認められる。以前に従来羽口の本数を11本として実験を行った結果も同図に示すが、小径羽口と同等の結果が得られている。11本羽口での酸素吹き込み圧力は今回の小径羽口の圧力とほぼ等しいので、羽口径によらず羽口圧力が高い場合に η_c が向上しているといえる。

この結果から酸素流量が同一でも吹き込み圧力が上昇することにより冶金反応特性が向上することが明らかである。

5. 考察

5.1 酸素流量低下とCO分圧低下の効果

希釈吹錬実験結果¹⁶⁾と本実験結果における、(3)式に示す

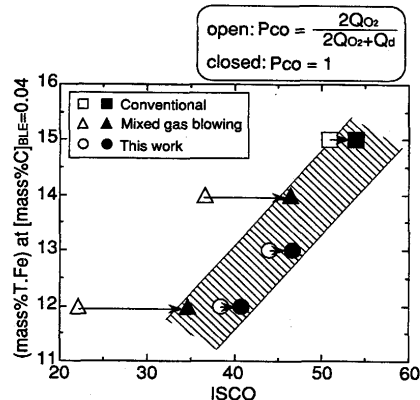


Fig. 8. Relation between ISCO value and (mass%T.Fe) at blow end.

ISCO値と吹き止め時 $([\text{mass}\%C]_{\text{BLE}} = 0.04)$ の $(\text{mass}\%T.\text{Fe})$ との関係をFig.8に示す。

$$\text{ISCO} = \frac{2Q_{O_2}}{2Q_{O_2} + Q_d} \cdot \frac{Q_{O_2}}{W/\tau} \dots\dots\dots (3)$$

また既に普通鋼の場合は極低炭素領域以外では転炉の冶金反応特性に与える P_{CO} の影響は少ないことが知られている¹⁴⁾ので、 P_{CO} の項 $(=2Q_{O_2}/(2Q_{O_2} + Q_d))$ を1として計算したISCO値で整理した結果も併せてFig.8に示す。

従来のISCO値を用いた場合希釈吹錬の結果と本実験結果は同一の線上では整理できないが、 $P_{CO}=1$ とすると希釈吹錬の結果と本実験結果が統一的に整理できる。したがって、今回の実験範囲内では既報告¹⁴⁾と同様に冶金反応特性に及ぼす P_{CO} の影響は少ないといえる。

この結果から、底吹き転炉では希釈吹錬よりも酸素ガスを希釈することなく酸素流量を低下させる方法がガスコストの上昇も招かないので有益な方法といえる。

5.2 ガス吹き込み圧力の影響

4.2.2に示したように、同一酸素流量では酸素吹き込み圧力が高くなると脱炭酸素効率が上昇した。吹き込んだガスジェットの運動エネルギーの約6%のみが $\dot{\epsilon}$ に影響を与えると考えた場合^{19,20)}、小径羽口を使用すると従来羽口の使用時に比べて $\dot{\epsilon}$ は1.02倍になる。

一方、低炭素濃度域の脱炭反応速度定数、 K 、は $\dot{\epsilon}$ に対して $K \propto \dot{\epsilon}^{0.33} \sim \dot{\epsilon}^{0.4}$ の関係が報告されている^{10,21)}。したがって、 $\dot{\epsilon}$ の増加により K が増加するとしてもたかだか1.01倍である。実機実験では羽口圧力の上昇により脱炭酸素効率は11~13%向上しており、この現象は鋼浴のマクロな $\dot{\epsilon}$ の増加では説明できないといえる。

服部ら¹³⁾は上底吹き転炉において、炉底中心部分の羽口を他に比べて大径化することにより炉底中心部のガス量を増大させ、上吹きによる火点領域を攪拌強化して、同一底吹きガス流量で冶金反応特性が向上できることを報告している。

脱炭反応のほとんどが上吹き酸素による火点で生ずる上底吹き転炉の場合は、その火点をどのように攪拌するかが重要であるが、Q-BOPの場合でも底吹き酸素によって生ずる火点近傍のみを選択的に攪拌強化できれば、同様の効果を得ることができると推測される。

井口ら²²⁾は、水モデル実験によってガス攪拌下の液体中に固体(白金板)を浸漬し固-液の物質移動速度を測定した。その結果、底吹きノズルの出口近傍では同一吹き込みガス流量において、ノズル径が小さいほど固-液間の物質移動係数が大きくなることを報告している。

今回の水蒸気吹き込み実験の結果によれば、Fig.3に示すように同一吹き込み流量において吹き込み圧力が増加するほど羽口直上の乱流強度が大きくなり、乱流エネルギー消散が大きくなっている。物質移動が乱流エネルギーの増加と共に促進されると考えれば、酸素吹き込みによって形成された火点近傍の物質移動速度が、酸素吹き込み圧力の増加によって向上すると考えてよい。

既に述べた吹き込みガスの運動エネルギーのほとんどは浴のマクロな攪拌には寄与しないという考え方¹⁹⁾は、ガスの運動エネルギーは羽口近傍で消費され、羽口出口近傍の混合を強化することを示しており、上記の考えと合致する。

Fortescue²³⁾は気-液系における液側界面近傍の物質移動が、液側での界面に平行な流れによって生じた界面近傍に存在する渦により支配されると考えて、(4)式に示す乱流強度と物質移動係数の関係を導いた。

$$k \propto u'_{rms}{}^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

今回の水モデルではFig.9に示すように u'_{rms} と P_n の関係として、

$$u'_{rms} \propto P_n^{0.46} \dots\dots\dots (5)$$

が得られた[†]。

ここで今回の解析において以下の仮定を立てる。

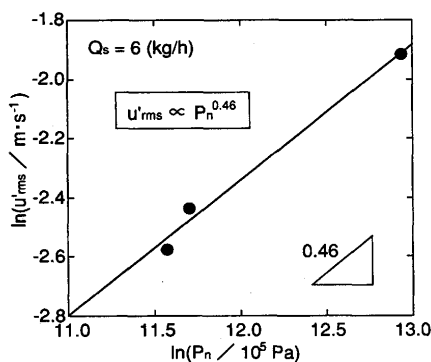


Fig. 9. Relation between $\ln(P_n)$ and $\ln(u'_{rms})$.

1) 気-液系を酸素-溶鋼系に見立てることによりFortescue²³⁾の物質移動モデル((4)式)が適用できる。

2) 水モデル実験での可溶性ガス(水蒸気)の吹き込み圧力と羽口直上での乱流強度との関係((5)式)が、溶鋼中への可溶性ガス(酸素)吹き込み時にも成り立つ。

液側のCの物質移動係数、 k_c 、についても(4)式が成り立つとすれば、

$$k_c \propto P_n^{0.23} \dots\dots\dots (6)$$

となる。したがって、小径羽口の使用により羽口圧力が増加し k_c が増加する。

今回の実験において従来羽口と小径羽口の圧力の比は1.6倍である。したがって、(6)式より従来羽口および小径羽口の物質移動係数、 k_{c1} 、 k_{c2} 、の比は、

$$k_{c2}/k_{c1} = P_{n2}^{0.23}/P_{n1}^{0.23} = (P_{n2}/P_{n1})^{0.23} = 1.11$$

となる。

ところで、Fig.7で示した脱炭酸素効率 η_c は(7)式、および脱炭速度は(8)式で表せる。

$$\eta_c = -\frac{dC}{dW'_{O_2}} \times W \times \frac{11.2}{12} \times 1000 \dots\dots\dots (7)$$

$$-\frac{dC}{dt} = K(C - C_e) = \frac{akc}{V}(C - C_e) \dots\dots\dots (8)$$

溶鋼重量、 W 、および $Q_{O_2} (= dW'_{O_2}/dt)$ は一定であり、さらに反応界面積、 a 、を一定、 $C_e \approx 0$ と仮定すると、式(7)、(8)より η_c と k_c の関係は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \eta_c &= -\beta \cdot \frac{dC}{dW'_{O_2}} = -\beta \cdot \frac{dC}{dt} \cdot \frac{dt}{dW'_{O_2}} \\ &= -\beta' \cdot \frac{dC}{dt} = \beta'' \cdot kc \cdot C \dots\dots\dots (9) \end{aligned}$$

従来羽口の $Q_{O_2} = 2.0 \text{ Nm}^3 \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{t}^{-1}$ の場合の脱炭酸素効

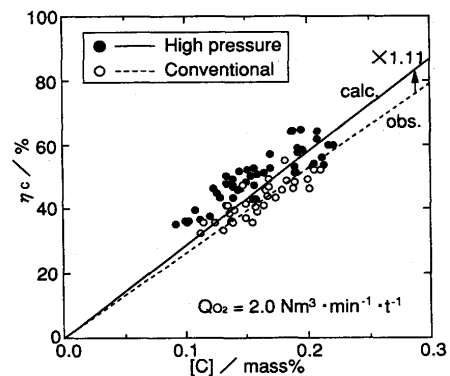


Fig. 10. Comparison of calculated η_c with observed one.

† 今回の解析では4・1の実験結果において唯一 P_n を3条件変化させた $Q_s = 6 \text{ (kg/h)}$ の場合のデータを用いた。

率の実績から(9)式より $\beta'' \cdot k_{c1}$ を求め、高圧化された場合の脱炭酸素効率を計算して実績値と共にFig.10に示した。

吹き込みガスの圧力上昇による脱炭酸素効率の向上効果の推算は、ほぼ実測データと対応している。この結果から羽口圧力上昇により脱炭特性が向上する理由は、主として火点近傍の物質移動速度の向上によるものと推定される。

ただし計算による予測値に比べて実測値は高く、反応界面積が圧力の上昇により増加している可能性も考えられるが、この点についての詳細な検討は今後の課題である。

6. 結言

実機230ton Q-BOPにおいて、吹錬末期の冶金反応特性向上を目的に、底吹き羽口の径小径化による吹錬末期の酸素供給速度を低下させる実験、および吹き込み圧力を高圧化させる実験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

(1)吹錬末期の酸素流量を低下させることにより、脱炭酸素効率の向上およびスラグ中酸化鉄濃度の低減が得られる。

(2)CO分圧を減少させる効果は底吹き転炉では小さく、酸素流量のみを低下させる本方法で希釈法と同等の冶金反応特性向上効果が得られる。

(3)同一底吹き酸素流量でも吹き込み圧力を高圧化させることにより、脱炭酸素効率の向上が得られる。

(4)水蒸気を用いたモデル実験と乱流理論に基づく物質移動モデルから、Q-BOPでの吹き込みガス圧力上昇による脱炭酸素効率の向上は、羽口直上の乱流強度の上昇による火点の物質移動速度の増加によるものと推定される。

記号

a	: 反応界面積(m ²)
C, [C]	: 溶鋼中炭素濃度(mass%)
C ₀	: 脱炭速度=0となる炭素濃度((4)式)(mass%)
C _e	: 反応帯における平衡炭素濃度(mass%)
C _p	: C=C ₀ で脱炭曲線と接する直線と-dC/dW _{O₂} =αの交点における炭素濃度((4)式)(mass%)
[C] _{S/L}	: サブランスメタルサンプル鋼中C分析値(mass%)
[C] _{BLE}	: 吹き止め時メタルサンプル鋼中C分析値(mass%)
[C] _{ave.}	: 平均炭素濃度(=[massC] _{S/L} + [mass% C] _{BLE})/2)(mass%)
k, k _c , k _{c1} , k _{c2}	: 液側の物質移動係数(m·s ⁻¹)
K	: 脱炭反応速度定数(=a·k _c /V)(s ⁻¹)
N	: 羽口(ノズル)本数(本)
P _{co}	: CO分圧(atm)
P _n , P _{n1} , P _{n2}	: 羽口圧力(Pa)
Q _d	: 希釈ガス流量(Nm ³ ·min ⁻¹ ·t ⁻¹)
Q _{O₂}	: 酸素供給速度(Nm ³ ·min ⁻¹ ·t ⁻¹)
Q _s	: 水蒸気流量(kg·h ⁻¹)
(T.Fe)	: スラグ中T.Fe濃度(mass%)
u	: 平均液流速(m·s ⁻¹)

u'	: 液流速変動成分(m·s ⁻¹)
u _i	: 瞬間液流速(m·s ⁻¹)
u' _{rms}	: 流速変動成分の自乗平均の平方根値(m·s ⁻¹)
V	: 液の体積(m ³)
W	: 溶鋼重量(t)
W _{O₂}	: 酸素ガス原単位((4)式)(Nm ³ ·t ⁻¹)
W' _{O₂}	: 酸素ガス量(Nm ³)
α	: 最大脱炭速度((4)式)(mass%·(Nm ³ ·t ⁻¹) ⁻¹)
β, β', β''	: (15)式の係数
ε	: 攪拌動力密度(W·t ⁻¹)
η _c	: 脱炭酸素効率(=[mass% C] _{BLE} - [mass% C] _{S/L})× W×1000×(11.2/12)/W' _{O₂} (%)
τ	: 均一混合時間(s)

文 献

- 1) 中西恭二, 三本木貢治: 鉄と鋼, **65** (1979), 138.
- 2) 半明正之: 第100・101回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会, (1986), 200.
- 3) 橋 林三, 高柴信元, 桑山道弘, 山根 明, 前田瑞夫, 小山内寿: 川崎製鉄技報, **17** (1985), 357.
- 4) 吉田克磨, 山崎 勲, 田中雅章, 青木伸秀, 渡辺吉夫: 鉄と鋼, **73** (1987), S1013.
- 5) 犬井正彦, 岡田 剛, 加藤木健, 佐藤光信, 森 明義, 興梠昌平: 鉄と鋼, **73** (1987), S1016.
- 6) 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), 270.
- 7) 中西恭二, 加藤嘉英, 鈴木健一郎, 香月淳一: 鉄と鋼, **64** (1978), S169.
- 8) 甲斐 幹, 大河平和男, 平居正純, 村上昌三, 佐藤宜男: 鉄と鋼, **68** (1982), 1946.
- 9) 加藤嘉英, 高橋幸雄, 桜谷敏和, 藤井徹也, 大宮 茂: 鉄と鋼, **76** (1990), 560.
- 10) 岸本康夫, 加藤嘉英, 桜谷敏和, 藤井徹也, 小山内寿, 大宮 茂, 武 英雄: 鉄と鋼, **76** (1990), 1924.
- 11) 北川伸和, 小山内寿, 水藤政人, 大宮 茂, 加藤嘉英, 高橋幸雄: 鉄と鋼, **76** (1990), 1932.
- 12) 高橋幸雄, 岸本康夫, 桜谷敏和: 材料とプロセス, **4** (1991), 1303.
- 13) 服部正幸, 稲葉東賢, 高本 久, 遠藤公一, 釘宮貞二, 米澤公敏: 材料とプロセス, **2** (1989), 246.
- 14) 岸本康夫, 加藤嘉英, 桜谷敏和, 藤井徹也: 鉄と鋼, **75** (1989), 1300.
- 15) 西川 廣, 近藤 寛, 岸本康夫, 田村 望, 朝穂隆一, 大西正之: 鉄と鋼, **76** (1990), 1940.
- 16) M.Hiyaji, Y.Kitano, K.Hamagami, S.Yamada and M.Kuga: 76th Steelmaking Conference, Proc. of AIME, Dallas, USA, (1993), 81.
- 17) V.I.Baptizmanskii, V.I.Trubavin and B.M.Boichenko: Steel in the USSR, (1980)10, 532.
- 18) N.Bessho, S.Takeuchi, K.Nakanishi, T.Emi, S.Yamada and F.Sudo: McMaster Sympo. Iron Steelmaking, Proc., ed. by W-K. Lu, Canada, McMaster University Press, (1981), 11-1.
- 19) 森 一美, 佐野正道: 鉄と鋼, **67** (1981), 672.
- 20) L.H.Lehrer: I & EC, Progress Design and Development, **7** (1968), 226.
- 21) 竹内秀次, 加藤嘉英, 奥田治志, 武 英雄, 山田純夫: 鉄と鋼, **70** (1984), A184.
- 22) 井口 学, 富田祐志, 中島敬治, 森田善一郎: 鉄と鋼, **78** (1992), 1786.
- 23) G.E.Fortescue and J.R.A.Pearson: Chem. Eng. Sci., **22** (1967), 1163.
- 24) 加藤嘉英, 野崎 努, 中西恭二, 藤井徹也, 江見俊彦: 鉄と鋼, **70** (1984), 380.
- 25) 城塚 正, 平田 彰, 村上昭彦: 化学技術者のための移動速度論, オーム社, (1966), 147.