

極低炭素鋼の清浄度向上のための転炉・ 取鍋精錬法の開発

北川 伸和*・小山内 寿*・水藤 政人*
大宮 茂*・加藤 嘉英*²・高橋 幸雄*²

Development of Refining Process for Production of High Purity Ultra-low-carbon Steel

Nobukazu KITAGAWA, Hisashi OSANAI, Masahito SUITO,
Shigeru OHMIYA, Yoshiei KATO and Yukio TAKAHASHI

Synopsis:

In steelmaking process, the refining technology are progressed greatly by the introduction of combined blowing converter and the spread of the process of hot metal pretreatment. At Mizushima Works, the top-and-bottom blowing converter (K-BOP) were introduced in April 1980 and the hot metal pretreatment facilities had the capacity of pretreating all hot metal in November 1988. For the purpose of the development of best K-BOP only for decarburization practice, we made the experiments of reducing the bottom oxygen flow rate. As a result, it was able to reduce to $0.25 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ from $0.8 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ (conventional way) with same metallurgical characteristics, when the inert gas is used at final stage of blowing at the rate of $0.35 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ or above using pretreated hot metal. Based on this principle, we changed the K-BOP's tuyeres and obtained the prolongation of converter life and the reduction of process gas cost. Furthermore, by using the pretreated hot metal and controlling the converter slag basicity to more than 5 and the (%MgO) to around 10% and deoxidizing the ladle slag, the quality and cleanliness of ultra low carbon steel for cold-rolled sheet is able to be improved drastically.

Key words: combined blowing converter; hot metal pretreatment; efficiency of decarburization; ultra low carbon steel; deoxidization of the ladle slag.

1. 緒 言

製鋼精錬プロセスにおいて、複合転炉の導入や溶銑の予備処理プロセスの普及は大幅な技術革新を生み出し、製鋼使用溶銑全量を予備処理可能な製鉄所^{1)~4)}も出現するに至った。水島製鉄所では、1980年4月に純酸素上底吹き転炉(以下、K-BOP)を導入し、1988年11月に溶銑予備処理設備の増強工事を完了し¹⁾²⁾、これにより全量予備処理溶銑体制を確立した。その結果、転炉での脱りん負荷は大幅に軽減され、転炉精錬における機能は脱炭・昇温に限定された。転炉吹錬末期での脱炭反応効率向上のため、川崎製鉄のK-BOPでは、吹錬末期に底吹き酸素ガスに不活性ガスを混合する希釈吹錬法(以下、IOD法)が行われていた⁵⁾。全量予備処理溶銑体制下において、K-BOP炉の優れた脱炭特性を維持し

つつ、プロセスガスコストの低減・炉寿命の延長等のコストミニマム化を追求した、最適な転炉システムの構築^{6)~9)}が課題となった。そのため今回、脱炭専用炉としての最適なK-BOP炉の開発を行うことを目的として、吹錬末期に底吹きガス種を変え、さらに底吹きガス流量を低下させた新羽口による5t試験転炉および実機250t K-BOPでの実験を行った。

一方、近年自動車用鋼板をはじめとした冷延鋼板の品質向上に対する要求は、一段と厳しさを増してきている。加工性に優れた高張力鋼板や、外観や塗装性に優れた高鮮映性鋼板など、特に極低炭素鋼において品質ニーズの変化が著しくまたその生産量はますます増える傾向にある。したがって、製鋼段階において、表面欠陥の原因となる非金属系介在物の少ない高 cleanliness 鋼の安定製造プロセスの確立は、最重要課題である。水島製鉄所では全量

平成元年9月本会講演大会にて発表 平成2年3月16日受付 (Received Mar. 16, 1990)

* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasakidori Mizushima Kurashiki 712)

*² 川崎製鉄(株)鉄鋼研究所 (Iron & Steel Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)

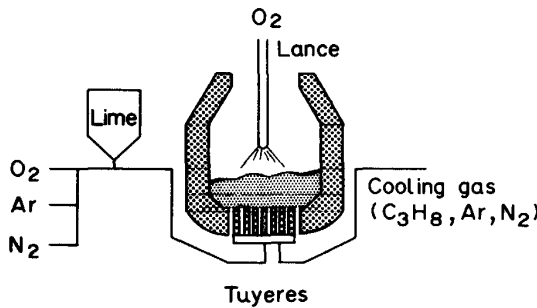
予備処理溶銑の使用を前提として、転炉吹錬方案の改善および取鍋スラゲの改質により、精錬工程での極低炭素鋼の品質改善を図った。

本報告では、K-BOP 吹錬法および極低炭素鋼の溶製法の改善を通して、全量予備処理溶銑体制に適應した製鋼プロセスの構築を検討した。

2. K-BOP 炉における底吹き条件の改善

2.1 底吹き条件の実験水準

K-BOP 炉の概要を Fig. 1 に示す。能力は 250 t であり、冷延鋼板を中心に熱延鋼板・厚板鋼板を製造している。底吹き羽口は二重管構造で、羽口数・配列は 6 本千



Specification		
Capacity x units		
250 t x 3		
Top blowing	Lance type	4 holes
	O ₂ flow rate	2.0 ~ 3.0 Nm ³ /min·t
Bottom blowing	Tuyere	Double pipe x 6
	Gas flow rate	0.7 ~ 0.8 Nm ³ /min·t
	CaO injection rate	1 ~ 3 kg/min·t
Main products		Sheet, Plate

Fig. 1. Outline of K-BOP at Mizushima Works.

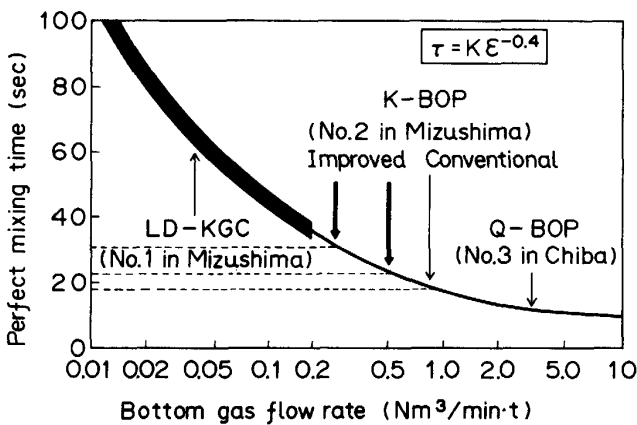


Fig. 2. Effect of bottom gas flow rate on perfect mixing time.

鳥配列である。底吹き酸素ガス流量は、従来約 0.8 Nm³/min·t で、通常溶銑の吹錬において優れた脱炭能・脱りん能を有していた。

しかしながら、予備処理溶銑使用比率が増加するにつれ、転炉の脱りん負荷は激減するため、高い脱炭反応効率を維持するのに必要な攪拌力を保証する程度まで底吹きガス流量の低減が可能になると考えられた。そこで、羽口径を小径化することにより⁶⁾、0.5, 0.25 Nm³/min·t と底吹き酸素ガス流量を減少させた。なお、予備処理後の溶銑りん濃度は 0.015~0.050 % である。

底吹きガスを少流量化することにより、鋼浴攪拌力は減少する。Fig. 2 に底吹きガス流量と均一混合時間の関係を川崎製鉄の他の転炉形式と比較して示す。均一混合時間は、従来約 18 s であったものが、底吹きガスの少流量化により、23~30 s に増加する。そのため、Fig. 3

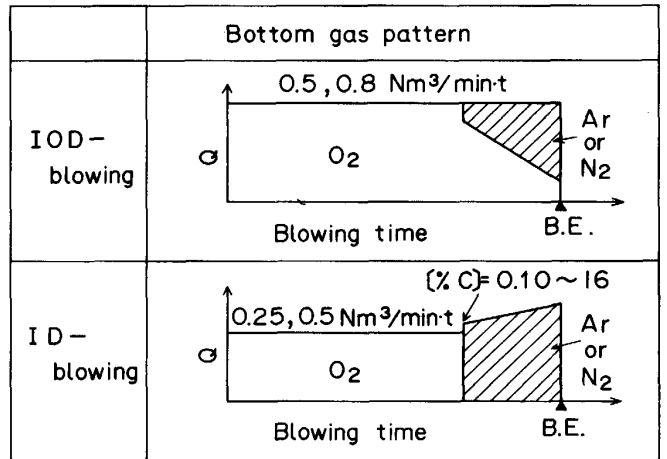


Fig. 3. Improvement of decarburization process at end point of blowing.

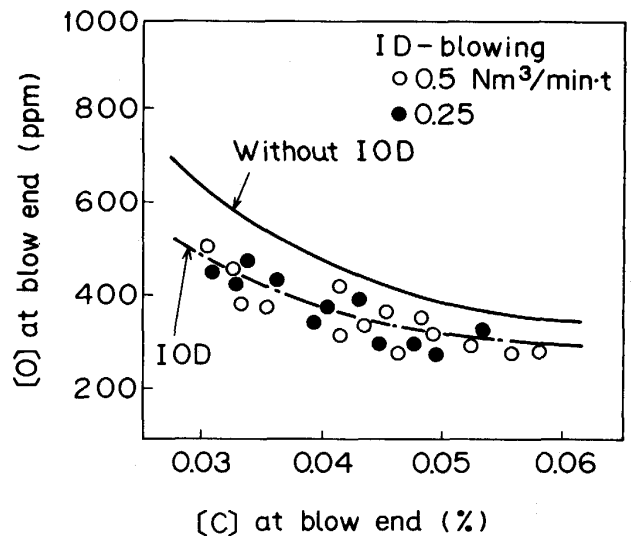


Fig. 4. Relation between [C] and [O].

に示すように、従来の IOD 法⁵⁾を改良し、不活性ガスのみで強攪拌を行う脱炭法 (以下、ID 法) を吹錬末期の低炭域で適用することにより、冶金特性の向上を図った。

2.2 実炉での操業結果

2.2.1 底吹きガス流量の [C]-[O] 平衡におよぼす影響

Fig. 4 に予備処理溶銑の吹錬における吹止め時の [C] と [O] の関係を示す。なお、従来の底吹き酸素流量 $0.8 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ の時に、IOD 法を適用していない場合を実線で、IOD 法を適用した場合を一点鎖線で示す。これより、底吹きガス流量を $0.8 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ より 0.5 あるいは $0.25 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ まで低下させても、ID 法を適用することにより、IOD 法を適用した時と同様に鋼浴が過酸化状態になることを防止できることがわかる。

2.2.2 底吹きガス流量のスラグ酸化度におよぼす影響

Fig. 5 に予備処理溶銑の吹錬における [%C] = 0.05 でのスラグ酸化度におよぼす吹錬末期の底吹き条件、すなわち吹錬終了まで酸素のみで行った時、IOD 法を適用した時、ID 法を適用した時別に、底吹きガス流量の影響を示す。水島製鉄所第一製鋼工場の純酸素上吹き・不活性ガス底吹き転炉 (LD-KGC) のデータも合わせて示す。これより、底吹き酸素ガス流量を 0.5 あるいは $0.25 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ まで低下させても、吹錬末期の不活性ガス流量を $0.35 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ 以上とすれば、従来の底吹き酸素流量 $0.8 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ で IOD 法を適用した時と同等のスラグ酸化度に抑えることが可能であることがわかる。

2.2.3 底吹きガス流量のメタル・スラグ分配比への影

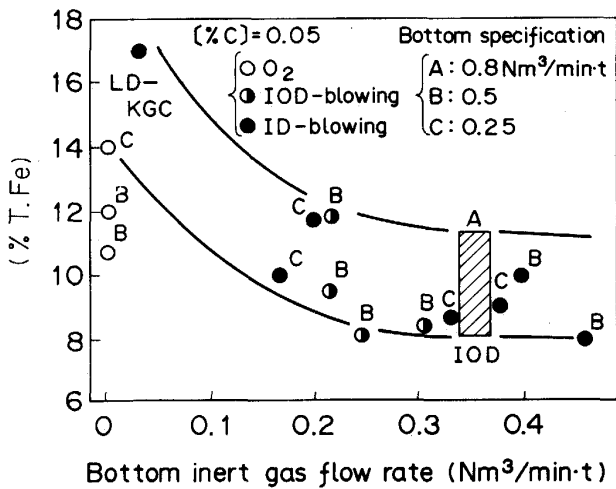


Fig. 5. Influence of bottom gas flow rate on degree of oxidation.

響

Fig. 6 に予備処理溶銑の吹錬における (T.Fe) = 15 でのりん分配比への底吹きガス流量の影響を示す。底吹き酸素ガス流量を 0.5 あるいは $0.25 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ まで低下させても、吹錬末期の不活性ガス流量を $0.35 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ 以上とすれば、従来の底吹き酸素流量 $0.8 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ で IOD 法を適用した時と同等のりん分配比が得られることがわかる。

2.2.4 底吹きガスの少流量化による経済的効果

底吹きガスを少流量化したことにより、炉体軸方向の最大振幅量は、従来の $0.8 \text{ Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ のガス流量の時に比べて、約 40 % のレベルまで減少した。炉体振幅量の減少により、れんが表面での溶鋼流速が低下するため、溶鋼流による摩耗が減少し、炉底の溶損速度は従来の $1.0 \text{ mm}/\text{ch}$ より $0.5 \text{ mm}/\text{ch}$ まで低下し、炉底寿命が飛躍的に向上した。炉底羽口保護のための冷却用プロパンガスやアルゴン・窒素ガス使用量の削減および耐火物原単位の低減により、精錬コストの削減が図られた。

2.3 少流量化 K-BOP の冶金的考察

K-BOP において、脱炭酸素効率が低下する吹錬末期に ID 法を適用することにより、底吹きガス流量を低下させても鋼浴の攪拌を効率よく行うことができることがわかった。そこで、5 t 試験転炉を用いて、底吹きガス攪拌条件を変えた実験を行い、その効果について考察を行った。

加藤ら¹²⁾ は、上吹きと底吹きの反応サイトの違いを考慮して酸素上吹き転炉の冶金反応特性を表す指標、I を導入したが、IOD 法や ID 法のように底吹きガス種や脱炭酸素効率が 100 % 以下となる時期の影響については検討されていない。そこで、酸素単独法に加えて、

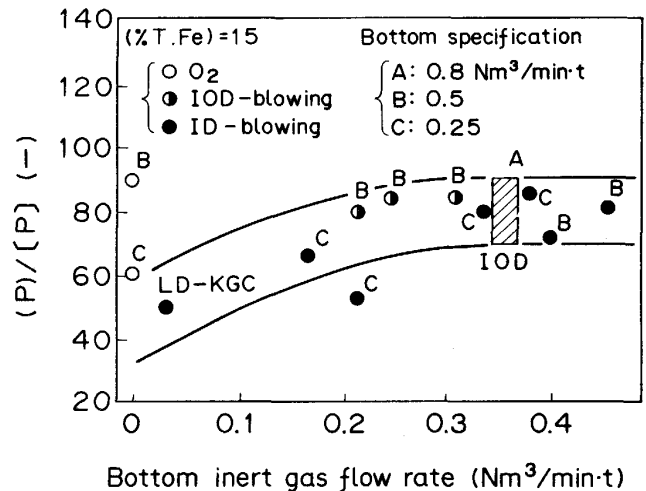


Fig. 6. Influence of bottom gas flow rate on phosphorus partition ratio.

Table 1. Experimental conditions.

Lance height	0.4 m
Top blowing gas (O ₂)	2.4~3.6 Nm ³ /min·t
Bottom blowing gas (O ₂ , Ar)	0.08~1.2 Nm ³ /min·t
C at blow end	0.02~0.10%
Temperature at blow end	1600~1680°C
Slag volume	20~40 kg/t
Basicity	2~5

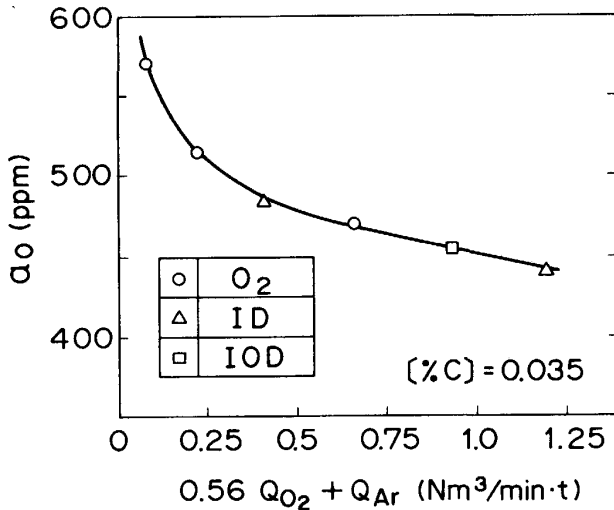


Fig. 7. Relation between oxygen activity and gas flow rate of bottom blowing.

IOD 法や ID 法の冶金反応特性までが統一的に説明可能な指標を、5 t 試験転炉での実験から見いだすことを試みた。

5 t 試験転炉での実験条件を Table 1 に示す。脱珪および脱りんを行った予備処理溶銑を用いた。吹錬前・中期は上吹き、底吹きともに純酸素を用い、吹錬末期に底吹きのみをアルゴン (ID 法) または酸素とアルゴンの混合ガス (IOD 法) に切り替えた。切替え時期は [%C] = 0.1~0.6 である。

Fig. 7 に [%C] = 0.035 での鋼中酸素の活量, a_o (ppm) と底吹き流量の関係を示す。図中の○のプロットは吹錬末期も純酸素の底吹きを行った場合である。アルゴン流量の寄与に対して酸素流量のそれを 0.56 倍とした場合に, a_o と底吹き流量の間に良好な関係が得られる。図中のデータは全酸素流量が一定であるので、冶金反応特性は鋼浴の底吹き攪拌力によって整理されるはずである。Fig. 7 の結果は吹錬末期の底吹き酸素による攪拌効果がアルゴンのその 0.56 倍であることを意味しており、ID 法の優位性が検証された。なお、脱炭酸素効率 100% の場合の酸素流量の係数は 2 であるので、本条件での底吹き脱炭酸素効率は $56/2=28\%$ と推定される。

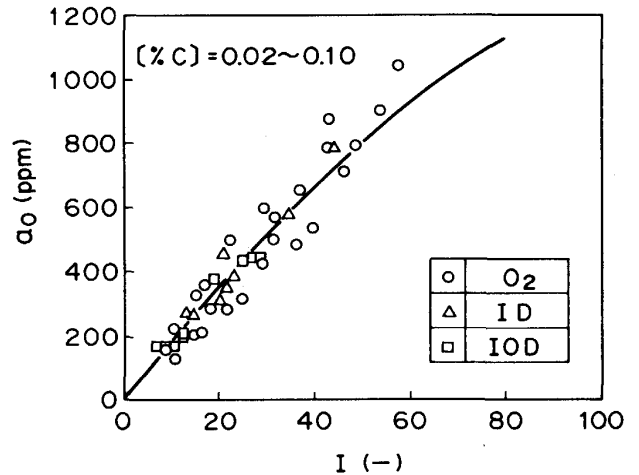


Fig. 8. Relation between oxygen activity and index, I .

さて、酸素上底吹き転炉の冶金反応特性を示す指標, I は次式で定義される。

$$I = (Q_T + Q_B) / [W(\%C) \cdot \{(Q_T/W)^{0.54} \epsilon^{0.22} + 0.26 \epsilon^{0.56}\}] \dots\dots\dots (1)$$

ここに, Q_T, Q_B : それぞれ上, 底吹き酸素流量 (Nm³/min), W : 溶鋼重量 (t), ϵ : 鋼浴の攪拌エネルギーの供給速度 (W/t) である。

酸素と不活性ガスの攪拌力の差を考慮するために、NAKANISHI ら¹³⁾ が示した鋼浴の攪拌エネルギーの供給速度 ϵ のガス流量として, $(0.56Q_{O_2} + Q_{Ar})$ を用いれば、

$$\epsilon = 28.5(0.56Q_B + Q_I) T/W \times \log(1 + H/1.48) \dots\dots\dots (2)$$

となる。ここに, Q_I : 底吹きの不活性ガス流量 (Nm³/min), T : 溶鋼温度 (K), H : 浴深 (m) である。

(2) 式を (1) 式に代入して、酸素上底吹き法, IOD 法および ID 法の各条件での I を計算し、酸素活量, a_o に対してプロットすると、Fig. 8 のようになる。酸素の攪拌力が不活性ガスのその 0.56 倍であるのは、厳密に言えば [%C] = 0.035 の場合であるが、[%C] = 0.02~0.10% の広い範囲において両者には良好な相関が認められる。したがって、IOD 法や ID 法においても (2) 式の ϵ を用いれば、指標 I によってガス-メタル間反応速度やスラグ-メタル間反応速度などの冶金反応特性を統一的に説明可能である。

3. 極低炭素鋼の清浄度向上のための吹錬改善

3.1 清浄度向上のための考え方と操業方案

超深絞り用冷延鋼板の溶製工程においては、鋼中介在物を極限まで除去したのち、酸素汚染を防止しながら製造することが、良好な品質を得る上での重要課題である。

極低炭素鋼の表面欠陥の発生原因の主たるものは、 Al_2O_3 系介在物に起因する表面疵である。鑄片表面より 10 mm まで 2 mm ごとにサンプリングし、アルミナエッチング法(試薬: 塩酸 1, 過酸化水素 4, 水 16)により 500 μm 以上の Al_2O_3 クラスター個数を測定し、その個数と [T.O] の関係を Fig. 9 に示す。これより、 Al_2O_3 系介在物を低減するためには、[T.O] を下げればよいことがわかる。[T.O] は、(T.Fe) と強い正の相関があるので、極低炭素鋼の清浄度向上のために、

- 吹止め時の (T.Fe) の低減
- 転炉スラグの取鍋への流出量の低減¹⁴⁾¹⁵⁾
- 取鍋スラグの改質による (T.Fe) の低減^{16)~18)}

を達成することが必要であると考えられる。これらのために、転炉精錬において以下の手段をとった¹⁰⁾。

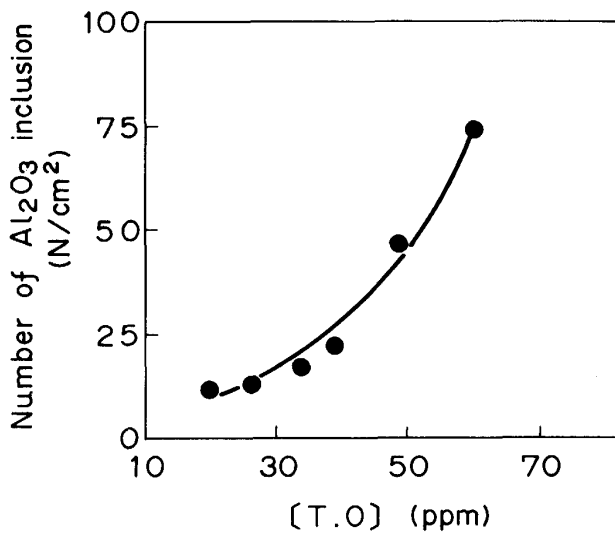


Fig. 9. Relation between [T.O] and number of Al_2O_3 inclusion.

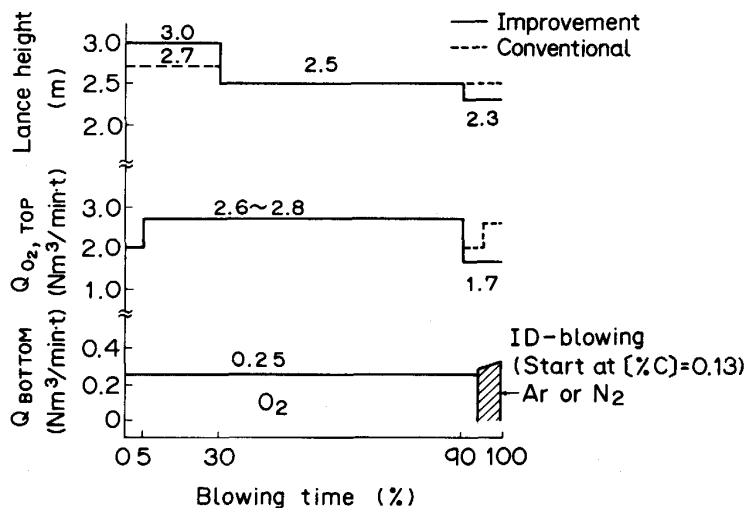


Fig. 10. Blowing pattern on ultra low carbon steel refining.

- ① 予備処理溶銑の使用
- ② (MgO) の増加
- ③ 転炉スラグ塩基度の増加によるスラグ固化
- ④ 吹錬末期の上吹き酸素流量低下および ID 法による強攪拌 (2. 参照)
- ⑤ 取鍋スラグ改質

転炉における溶製パターンを Fig. 10 に示す。溶銑はりん濃度が 0.050 % 以下の予備処理溶銑を使用する。(%MgO) = 10 になるように、軽焼ドロマイトおよび生ドロマイトを投入する。スラグ塩基度 ($= (\% \text{CaO}) / (\% \text{SiO}_2)$) は、生石灰投入量を制御することで全吹錬時間の 25 % 経過までに 3.5~5.0, 吹錬終点で 5.0~8.0 に調整した。[%C] = 0.035 で $a_{\text{O}} \approx 400$ ppm を目標とすれば、Fig. 8 から吹錬末期に $I \approx 20$ としなければならない。指標 I にしたがって、上吹き酸素流量は 2.6~2.8 $\text{Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ から 1.5~2.0 $\text{Nm}^3/\text{min}\cdot\text{t}$ に低下させ、底吹きパターンには ID 法を適用することによって、鉄の酸化を極力抑制し優先脱炭を図った。取鍋スラグの (T.Fe) を低下させるために、出鋼直後の取鍋スラグ上面にスラグ改質剤を添加した。

以下に、操業結果と結果に対する考察を示す。

3.2 操業結果と考察

3.2.1 (MgO) 増加のスラグ酸化度に及ぼす影響

(MgO) と (T.Fe) の関係を Fig. 11 に示す。(MgO) を 10 % 以上にすることにより、スラグの融点が上昇して滓化率が低下し、それによって (T.Fe) は 14~16 % まで低下すると考えられる。さらに、ID 法を適用することにより、12~14 % まで低下させることが可能である。

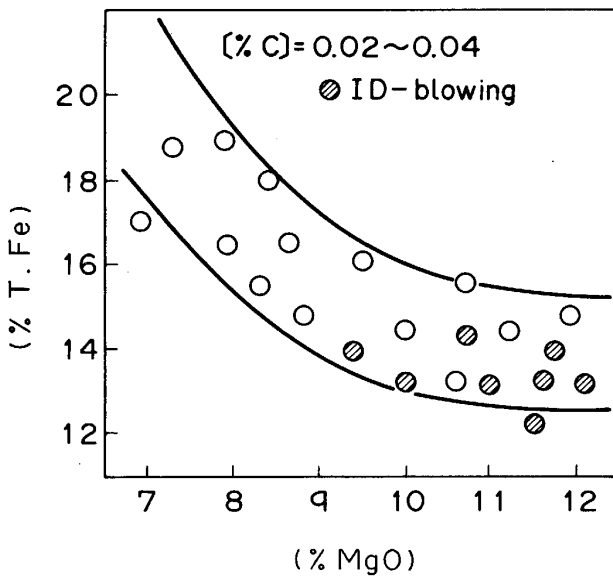


Fig. 11. (T.Fe) content versus (MgO) in converter slag.

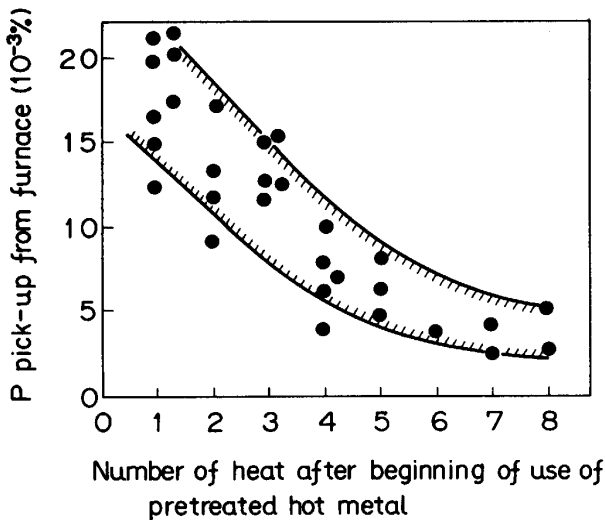


Fig. 12. Change of P pick-up from furnace according to heat number with pre-treated hot metal.

3.2.2 スラグ塩基度上昇による転炉スラグ固化の効果

予備処理溶銑を連続して吹錬すると、Fig. 12 に示すように転炉内のりん汚染が減少し、全量予備処理溶銑体制では、スラグの脱りん能を高める必要がなくなり、滓化不良域での吹錬が可能となる。このことを利用して、取鍋への転炉スラグの流出を防止することを目的として、従来塩基度 3.5~4.5 を目標としていたものを、5.0~8.0 の範囲まで上昇させた。

塩基度と取鍋への転炉スラグの流出量の関係を Fig. 13 に示す。スラグ塩基度を 5 以上で操作すると、流出

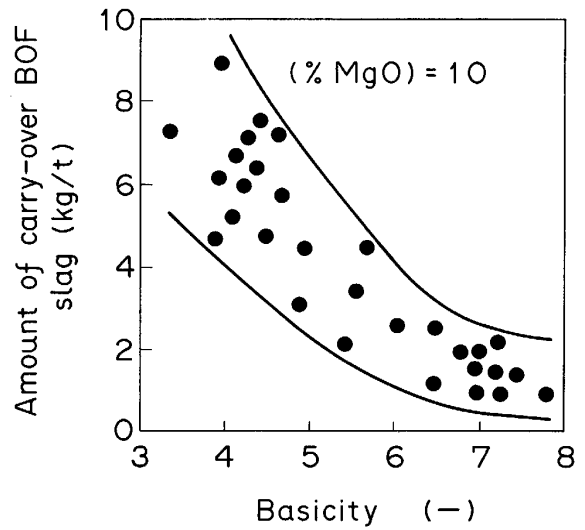


Fig. 13. Relation between basicity and amount of carry-over BOF slag.

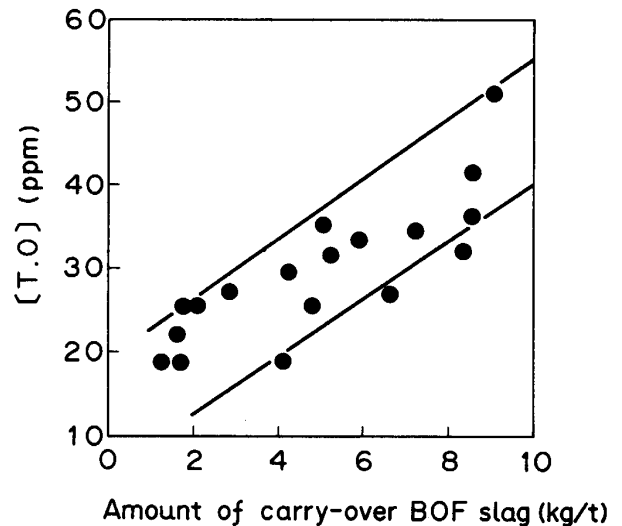


Fig. 14. Relation between amount of carry-over BOF slag and total oxygen content at end of RH degassing.

スラグ量を 3 kg/t 以下にすることが可能となり、従来の 6~10 kg/t より大幅に低下した。また、取鍋への転炉スラグの流出量と RH 脱ガス処理後の [T.O] の関係を Fig. 14 に示す。スラグ流出量を減少させることにより、[T.O] を低位に安定させることができる。

3.2.3 取鍋スラグ改質の効果

スラグ改質効果を向上させるためには、スラグ融点を下げることが必要であり、このため取鍋スラグ改質剤としては Al_2O_3 を含有したものを使用した¹¹⁾。改質剤の成分は、Al: 30~55%、 Al_2O_3 : 30~50% である。

Fig. 15 に取鍋スラグ改質剤による取鍋スラグの (T.Fe) 低減効果を示す。取鍋スラグ改質剤を 0.10

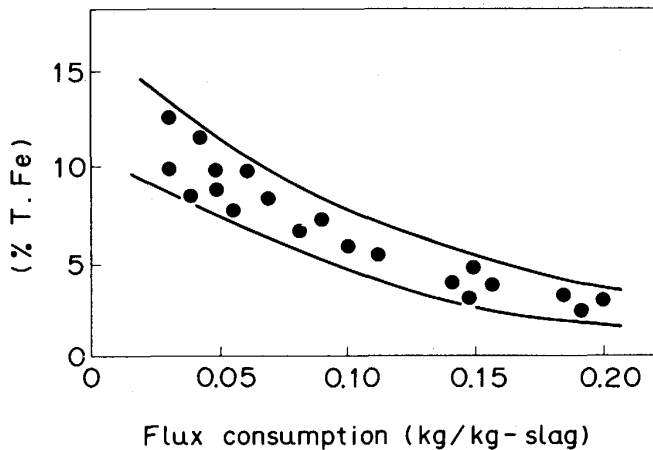


Fig. 15. (T.Fe) in ladle slag versus flux consumption.

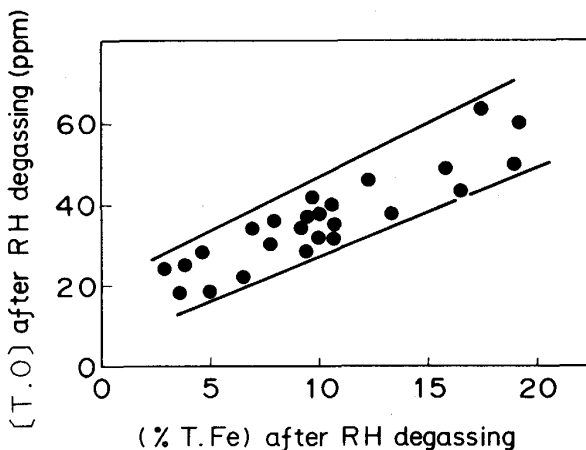


Fig. 16. (T.Fe) versus total oxygen content at end of RH degassing.

Table 2. Comparison of refining conditions and results.

Item	Conventional	Improvement
CaO/SiO ₂	4.5	5.0~8.0
(%MgO) at blow end	8.0	10.0
(%T.Fe) at blow end	20	12~14
Amount of carry-over slag from converter	10 kg/t	3 kg/t
[T.O] after RH degassing	35~40 ppm	20 ppm
Number of Al ₂ O ₃ inclusion in slab	18~23/cm ²	5~10/cm ²

kg/kg-slag 以上添加することにより、取鍋スラグの (T.Fe) をほぼ 5 % 以下に制御することができる。これにより、Fig. 16 に示すように RH 脱ガス処理後の [T.O] を約 20 ppm に低減することが可能となった。

3.2.4 溶鋼清浄度の向上結果

Table 2 に吹錬改善前後の吹錬条件とスラブ品質の比較を示す。高スラグ塩基度かつ高 (MgO) 吹錬、吹錬

末期の ID 法の適用および取鍋スラグ改質を実施することにより、Al₂O₃ 系介在物個数は従来の約 30 % まで低下することができた。この極低炭素鋼の品質向上は、全量予備処理溶銑化により転炉から脱りん負荷を除去することによりなされたものと言える。

4. 結 言

水島製鉄所において 1988 年 11 月に確立した全量予備処理溶銑体制の下で、脱炭専用炉としての K-BOP 炉吹錬法ならびに極低炭素鋼の溶製法の最適化を目的として、底吹きガス流量を低下させた実機実験を行い、以下のことが判明した。

(1) 全量予備処理溶銑体制下では、K-BOP 炉の底吹き酸素ガス流量を従来の 0.8 より 0.25 Nm³/min·t まで低下させても、吹錬末期に不活性ガスのみ 0.35 Nm³/min·t 以上流すことにより、従来型 K-BOP 炉と同等の冶金特性が得られた。

(2) 吹錬末期の底吹き酸素による攪拌効果を、アルゴンガスのその 0.56 倍として、冶金反応特性を表す指標 *I* を、底吹きガス種の違いを考慮した形まで延長することにより、統一的に冶金反応を整理することが可能である。

(3) 極低炭素鋼において、予備処理溶銑を使用し、高塩基度・高 (MgO) 吹錬を実施することにより、吹止め時の (T.Fe) は約 5 % 低下し、取鍋へのスラグ流出量は従来の約 25 % のレベルまで低減できた。

(4) 取鍋スラグ改質の効果も合わせて、Al₂O₃ 系介在物個数は従来の約 30 % まで低下し、品質が著しく向上した。

文 献

- 1) 敷土文夫, 山本武美, 水藤政人, 有吉政弘, 相沢完二, 永井亮次: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 104
- 2) 敷土文夫, 山本武美, 水藤政人, 永井亮次, 山根弘郷, 秋本圭一: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 105
- 3) 朝穂隆一, 山田純夫, 安川 登, 鈴木孝夫, 西川 廣, 富山淑郎: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 214
- 4) 住田守弘, 安藤道英, 中村皓一, 野瀬正照, 中島啓之, 高崎義則: 鉄と鋼, 69 (1983), S 959
- 5) 小山内寿, 三崎規生, 武 英雄, 山根 明, 今井卓雄: 鉄と鋼, 73 (1987), S 1017
- 6) 北川伸和, 小山内寿, 水藤政人, 加藤嘉英, 高橋幸雄: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 1189
- 7) 高橋幸雄, 加藤嘉英, 桜谷敏和, 藤井徹也, 大宮 茂, 北川伸和: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 1190
- 8) 加藤嘉英, 高橋幸雄, 桜谷敏和, 藤井徹也, 大宮 茂, 小山内寿: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 247
- 9) 西川 廣, 近藤 寛, 荒谷 誠, 朝穂隆一, 山田純夫: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 21
- 10) 末次精一, 北川伸和, 大宮 茂, 敷土文夫, 小山内寿, 馬田 一: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 243
- 11) 関口 浩, 馬田 一, 奥田治志, 日和佐章一, 原 義明:

- 材料とプロセス, 2 (1989), p.1251
- 12) 加藤嘉英, 高橋幸雄, 桜谷敏和, 藤井徹也, 大宮 茂:
鉄と鋼, 76 (1990), p. 560
- 13) K. NAKANISHI, K. SAITO, T. NOZAKI, Y. KATO, K. SUZUKI
and T. EMI: 65th Steelmaking Conference of AIME
(1982), p. 101
- 14) 副島利行, 小林潤吉, 松井秀雄, 森川敏男, 大藪敏雄,
前田真一: 鉄と鋼, 73 (1987), S1007
- 15) 山村英明, 金子敏行, 三隅秀幸, 矢倉重範, 長田修次:
鉄と鋼, 73 (1987), S1008
- 16) 原 義明, 中戸 參, 日和佐章一, 馬田 一, 敷土文夫:
材料とプロセス, 2 (1989), p. 233
- 17) 逢部 綴, 藤井博務, 田中俊一, 平岡照祥, 大平俊朗,
宮崎義正: 鉄と鋼, 73 (1987), S185
- 18) 新井 学, 古野好克, 沖本一生, 福味純一, 政岡俊雄,
内藤秀男: 材料とプロセス, 2 (1989), p. 237