
高生産性を目的とした底吹き転炉の吹錬・操業技術の開発

Improved Productivity Using Bottom Blown Converters

太田 豊彦(Toyohiko Ohta) 三枝 誠(Makoto Saigusa) 永井 潤(Jun Nagai) 数
土 文夫(Fumio Sudo) 中西 恭二(Kyoji Nakanishi) 野崎 努(Tsutomu Nozaki)
内村 良治(Ryoji Uchimura)

要旨：

鋼浴攪拌の優位性に着目して、底吹き転炉を当社千葉製鉄所に設置した。高生産性を目標とする場合、吹錬技術の開発と、転炉寿命延長への耐火物技術の開発が必要である。炉内反応機構の把握が吹錬操業技術に直結するので、脱炭、脱磷の冶金反応の解析を行った。底吹き転炉の吹錬制御に、世界で初めてセンサーランスを設備し、吹錬軌道をダイナミックに修正し、98.8%と極めて高いC、温度の同時適中率を達成させた。終点制御の確率から迅速出鋼の技術へと発展させ、製鋼時代の短縮を実現したのみならず、耐火物技術と相まって、底吹き転炉の最大の欠点と言われた炉底羽口寿命を、2063回と大幅に更新した。このような技術の開発により、鋼の高生産法が確立できた。

Synopsis：

A higher productivity of converter derives from an advanced development in techniques concerning the blowing operation and the refractories suitable for long life performance of the furnace. Therefore, the metal-lurgical mechanisms of decarburization and dephosphorization in the bottom blown converter were quantitatively analyzed in relation with the mixing energy of the bath. A sensor lance, installed along the center axis of the furnace at its upright position, which was the first application to the bottom blown converters in the world, gives sufficient informations fit for the dynamic control of the blowing process. Through concentrated efforts, a high end-point hitting ratio of 98.8% was successfully achieved in July 1979, in terms of both carbon content and bath temperature at the same time. The precise and stable end-point contrlo has completed the QDT(Quick and Direct Tapping without end-point sampling) technique, which, together with refractory improvement, has enabled Chiba Works to attain the world record of bottom refractory life amounting to 2063 heats in April 1980.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

高生産性を目的とした底吹き転炉の 吹錬・操業技術の開発

Improved Productivity Using Bottom Blown Converters

太田 豊彦*
Toyohiko Ohta

三枝 誠**
Makoto Saigusa

永井 潤***
Jun Nagai

数土 文夫****
Fumio Sudo

中西 恭二*****
Kyoji Nakanishi

野崎 努*****
Tsutomu Nozaki

内村 良治*****
Ryoji Uchimura

Synopsis:

A higher productivity of converter derives from an advanced development in techniques concerning the blowing operation and the refractories suitable for long life performance of the furnace. Therefore, the metallurgical mechanisms of decarburization and dephosphorization in the bottom blown converter were quantitatively analyzed in relation with the mixing energy of the bath. A sensor lance, installed along the center axis of the furnace at its upright position, which was the first application to the bottom blown converters in the world, gives sufficient informations fit for the dynamic control of the blowing process.

Through concentrated efforts, a high end-point hitting ratio of 98.8% was successfully achieved in July 1979, in terms of both carbon content and bath temperature at the same time. The precise and stable end-point control has completed the QDT (Quick and Direct Tapping without end-point sampling) technique, which, together with refractory improvement, has enabled Chiba Works to attain the world record of bottom refractory life amounting to 2 063 heats in April 1980.

1. 緒 言

現在、製鋼炉としては、LD 転炉で代表される純酸素上吹き転炉が主流である。たとえば、日本における近年の粗鋼生産量のうち 80% 強が上吹き転炉法によっており、コスト的にも、能率的にも、最も進んだ製鋼炉との評価を受けてきた。

一方、底吹き転炉法は、溶鋼の強撹拌による炉内反応の促進の点で、上吹き法を凌駕するであろうという推察はあった。しかし、炉底寿命が短い点

で、上吹き転炉の優位性を打破することはできなかった。ところが 1965 年、炭化水素系ガスをさや状にして酸素ガスを包む、いわゆる二重管羽口の発明により、底吹き転炉が再びその活躍の場に登場した¹⁾。

当社においても、1977 年 1 月に底吹き転炉が千葉製鉄所で稼動を開始し、安定した操業により、Fig. 1 に示すように、高生産を上げるに至っている。

大量生産を指向する場合には、吹錬制御技術の開発と、転炉耐火物寿命の延長技術の開発が必要

* 技術研究所長
*** 千葉製鉄所製鋼部製鋼技術室主査(副部長待遇)
**** 技術研究所製鋼研究室主任研究員・工博
***** 技術研究所耐火物研究室主任研究員
(昭和 55 年 4 月 25 日原稿受付)

** 千葉製鉄所製鋼部部長
**** 千葉製鉄所製鋼部第 3 製鋼課課長
***** 技術研究所製鋼研究室主任研究員・理博

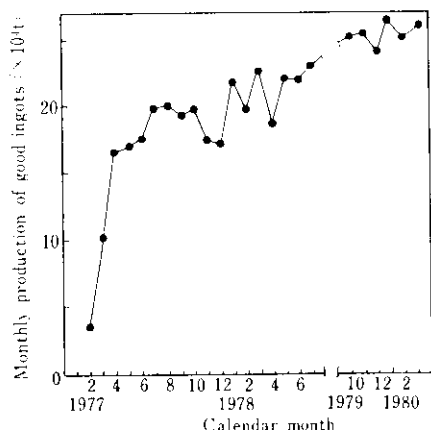


Fig. 1 Production growth of good ingots by bottom blown converter

となる。転炉吹錬では炉内反応が一定でなく、吹錬途中の炉内反応の状況把握が重要である。上吹き法と大きく異なり、底吹き転炉では、羽口冷却用の炭化水素の分解を考慮した吹錬制御の必要がある。また、任意時刻の吹錬の状態を適確に知り、それを吹錬制御に適用するためには、炉内反応の理論的な解明が不可欠である。さらに、炉底から大量酸素を吹込むため、炉底耐火物の損耗が大きく、炉底寿命を延長する技術を開発して初めて、底吹き転炉による大量生産技術の確立が可能となる。

以下、底吹き転炉の安定操業と高生産性を目標においた技術の開発経過について述べる。

2. 高生産性を目的とした吹錬制御技術の開発

吹錬制御が不確実で、吹止時の成分・温度が適中しないときには再吹錬となり、製鋼時間の延長、酸素原単位の上昇などで、生産性が阻害される。したがって、生産性の向上を計るためには、精度の良い吹錬制御法の確立が重要である。

2.1 吹錬自動制御法の開発

静的制御により、予定送酸素量、副原料投入量を計算で求めることはどの転炉でも行われているが、静的制御だけでは、安定した成分・温度適中は困難である。それゆえ、吹錬途中での炉内情報を基にした動的制御が必要である。炉内情報を知るためには、鋼浴のCと温度を測定するセンサ-

が不可欠であるが、底吹き転炉への設置例がなく、鋼浴揺動・攪拌挙動も全く不明なので、コールドモデルによる解析を行った。この実験により鋼浴の固有振動現象を見出し、ランス設置位置を決定した。

Photo. 1に、当社の底吹き転炉の炉頂上部に設けたセンサーランス設備を示す。センサーランスは転炉が心に設置され、プローブの全自動脱着・回収機構を有する。

このセンサー装置によるデータ採取と、炉内反応のモデル化の研究から、底吹き転炉稼動後1年にして、SMART (System for Measuring and Attaining the Refining Target) と名付けた吹錬制御システムを開発した。SMART法の系統図をFig. 2に示す。吹錬は静的制御システムで開始し、吹錬後半にはセンサーランスを炉内に挿入して、これによる情報を基に、その後の脱炭および昇熱計算を行う。6秒ごとにその時点の炭素と温度をCRT表示する。

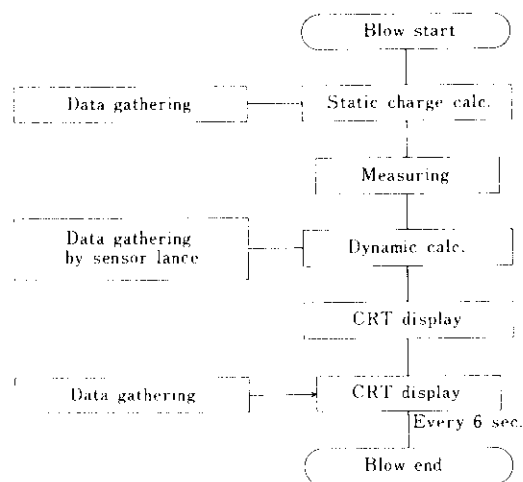


Fig. 2 Explanatory block diagram of SMART

底吹き転炉における、低炭素域での脱炭速度に影響する操業因子について考察を繰り返し、(1)、(2)式を導出した²⁾。

$$\frac{dC}{dO_2} = \left\{ \frac{A \cdot W_{Sa}}{C^2} \cdot \frac{\beta}{\alpha} + B W_{Ma} \right\}^{-1} \dots (1)$$

$$\frac{\beta}{\alpha} = \sum a_i x_i$$

$$O_2^r = (1 - K_{HC}) O_2^1 + \eta K_C W_C \dots (2)$$

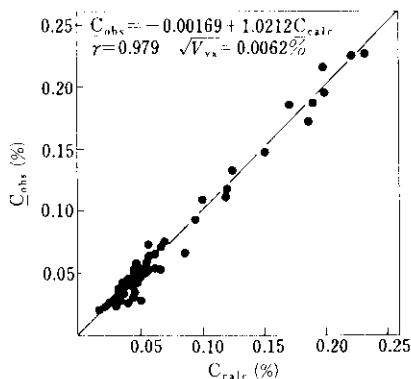
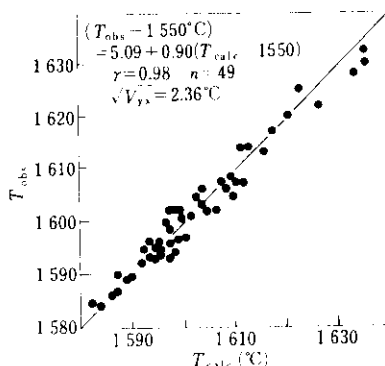


Photo.1 Sensor lance equipment over the furnace

- C : 鋼浴炭素濃度
 O_2^f : 実効酸素量
 A, B, a_i, K, K_C : 定数
 W_{Sa} : スラグ重量
 β/α : パラメータ
 W_{Ma} : 溶鋼重量
 x_i : 操業因子
 γ_{HC} : 炭化水素ガス比
 O_2^i : 吹込酸素量
 η : 冷材中の酸素の分解率
 W_C : 冷材量

(1)式の右辺かっこ内第1項は、スラグに吸収される酸素量を含む項である。当初は、脱炭に無効な酸素量を定量的に把握するために排ガス分析を行い、排ガス中の CO/CO_2 の比と鋼中の C との関係が、各ヒート間で良い再現性を示すことを見出した。この知見から、スラグに吸収される酸素量を精度よく把握すれば良いことがわかったので、 C 、計算塩基度、蛍石使用量などの操業因子と脱炭速度を結びつけるSMART法での脱炭基本式を、(1)式のように決定した。(2)式は酸素底吹き転がりに特有なもので、羽口冷却用の炭化水素ガス中の炭素を考慮している。

Fig. 3と4に、 C と温度 T の、SMARTによる予想値と実測値との対応を示す。 C に関してはその標準偏差は0.0062%、温度は2.4℃と、極めて

Fig.3 Observed turn down carbon, C_{obs} , compared with the calculated carbon, C_{calc} , by SMARTFig.4 Observed turn down temperature, T_{obs} , compared with the calculated temperature, T_{calc} , by SMART

高い精度で制御できている。

Fig. 5 に、鋼浴 C と脱炭酸素効率の関係を示す。底吹き転炉は、全 C 範囲で、上吹き転炉より脱炭効率が高いことがわかる。スラグ生成が安定していることにより、脱炭効率の変動が小さい。

スロッピング、スピittingのコールドモデル実験³⁾から、実炉での溶鋼揺動の対策を確立すれば、センサーランスを用いた動的吹錬制御は、とくに底吹き転炉に適した制御方法であることがわかる。すなわち、鋼浴内の偏析は上吹き転炉でのサブランス測定における大きな問題であるが、底吹き転炉鋼浴内の深さ方向の偏析を調査した結果、攪拌力が強いので、成分・温度とも偏析はなかった。一方、プローブ測定時の凝固波形も安定している。

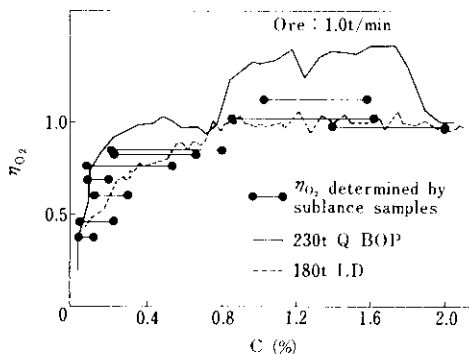


Fig. 5 Efficiency of oxygen for decarburization, η_{O_2} , under the influence of C in steel bath

現在ではこの SMART プロセスを全ヒートに適用し、安定操業をほぼ 100% 達成している。C, T の同時適中率は、Fig. 6 に示すとおり、1979 年 7 月には 98.8% という、転炉操業での世界記録を

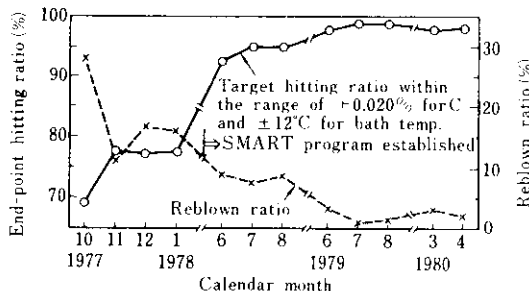


Fig. 6 Monthly variations of heat fractions for carbon and temperature hitting and for reblooming

樹立した。したがって、再吹錬率も平均 1.2% と、極めて低いレベルに減少できた。再吹錬の原因は、主として P, S 両成分の外れに起因している。このような吹錬制御技術の向上は、SMART 法を開発してはじめて可能となった。

2.2 迅速出鋼 (QDT) 法の開発

前述のように、センサーランスによる動的終点制御である SMART 法の開発に成功したので、さらに、その技術をより積極的に実操業プロセスとして結実させる目的で、迅速出鋼 (Quick and Direct Tapping) 技術を確立した⁴⁾。この QDT 法は、吹止後に温度・成分のチェックを全く行わず、直ちに溶鋼する方法である。したがって、QDT 法の実施には、精度の高い C, T 制御技術が必要であるばかりでなく、P, S, Mn についても精度良く推定する、より高度な技術を必要とする。

Fig. 7 に、QDT プロセスのフロー・チャートを示す。QDT 法は、SMART プロセスが順調に稼動することを前提として成立する。センサーランスによる溶鋼サンプルの凝固波形が良好であり、かつ SMART プロセスで C と T が共に目標範囲に適中したときに、QDT を実行し得る。QDT プロセスでの吹止成分予測の一例として、Mn は次式により決定される。

$$\text{Mn}_{\text{calc}} = 0.150 + 0.33 \text{Mn}_{\text{HM}} - \frac{0.00406}{\text{C}_{\text{calc}}} \quad \dots\dots (3)$$

ここで、 Mn_{HM} は溶銑の Mn 濃度であり、 C_{calc} は吹止推定 C である。 Mn の計算値と実測値の間には、(4) 式の関係が見出されている。

$$\text{Mn}_{\text{obs}} = -0.010 + 1.034 \text{Mn}_{\text{calc}} \quad \dots\dots (4)$$

両式により、終点 Mn は、0.013% 以下のばらつき範囲で制御されている。

上吹き転炉の無倒炉法と比較して、QDT 法の特徴は、終点でのサンプリングを全く行わないことにある。このため、吹止と出鋼の間の分析待ち時間が不要となる。ちなみに、上吹き無倒炉法では、この時間に 4 分を費やしている。

SMART 法の安定性、信頼性が高まるほど、QDT 実施率も順調に伸び、1978 年 3 月には 80%

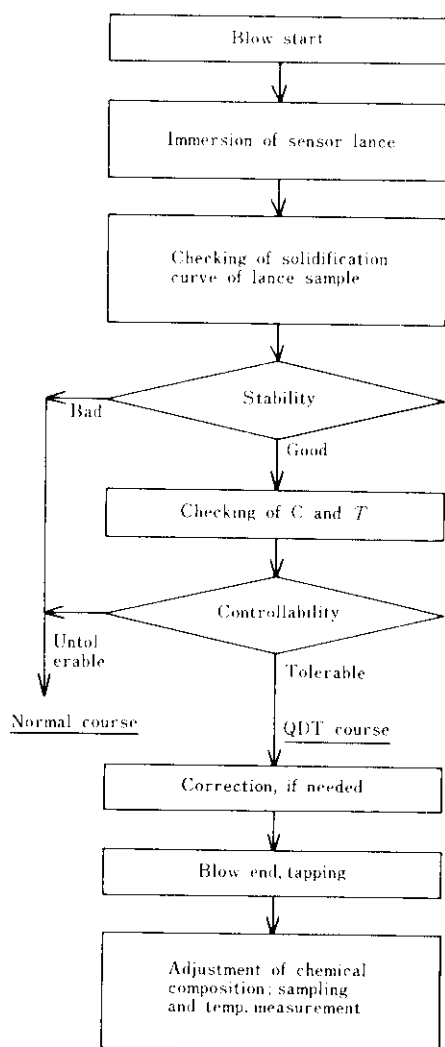


Fig. 7 Explanatory block diagram of QDT process

に達し、以降その高率を保って推移している。

QDT法の操業成果の例として、まず吹止温度を低く設定できることが期待される。実際に、出鋼待ち時間がないので、通常法より $10\sim 20^{\circ}\text{C}$ 低下できている。このように吹止から出鋼までの低下温度を少なくできることと、スラグ中の金属鉄が減少することにより 0.24% の歩留り向上がもたらされた。さらに、吹止から出鋼までに使用する N_2 、 Ar ガスが削減できる。また、通常出鋼法では鋼中 Mn が平均 0.01% 低下するが、QDT法の採用により、 Fe-Mn 合金の使用量が削減できる⁴⁾。加えて出鋼待ち時間が不要で取鍋内溶鋼温度を正確に制御できるから、鑄型内注入温度が一定し、表面お

よび内部性状のすぐれた鋼塊が生産できる。

吹止と同時に出鋼というこのプロセスは、炉内の高温での溶鋼滞留時間の短縮と終点温度の低下とに結びつくため、後述するように炉寿命の延長に大きく寄与する技術となった。

3. 炉寿命延長への耐火物技術の開発

高生産性を目指す製鋼法では、炉寿命の安定および延長の技術が必要である。すなわち、大量生産によるコスト低減は、鉄歩留りの向上のみならず、耐火物原単位の低減があつてはじめて成立するものであり、この点から、底吹き転炉の炉底耐火物の開発は、急ぎ解決しなければならない問題であった。

3.1 羽口耐火物の開発

底吹き転炉の寿命は、交換炉底、とくに羽口周辺の耐火物の損耗速度で決定される。現在、当社の底吹き転炉の耐火物は、炉口、炉体上部絞り部、炉腹、下部絞り部、固定炉底、交換炉底、ジョイント・シールおよび出鋼孔用に分類される。炉底の寿命は本体胴部に比べて短いので、交換可能な方式とし、胴部との溶損バランスを計っている。固定炉底と交換炉底との間隙は、不定形耐火物で充填する。炉体胴部の耐火物は、上吹き転炉と同じ材質のものを使用している。トラニオン上部および上部絞り部は、上吹き転炉と異なり、吹錬中にスラグで洗われることがなく、また熱の供給も上吹き法に比較して少ない。

交換炉底、とくに羽口周辺の耐火物は、羽口外管を流れる炭化水素ガスの分解による冷却と、羽口直上の高温溶鋼からの熱を受けて、極端な温度勾配と温度変動にともない、スポーリングを繰り返す。炉寿命延長のためには、この部分の耐火物の熱間強度と耐熱的スポーリング性が要求される。この要求を満たす耐火物の開発に際し、実炉使用に先だって、耐火物の熱的スポーリング性を評価する試験法が必要となった。

スポーリングは、温度変化によって内部に大きな熱応力が発生し、耐火物の脆性とあわせて大きな損傷をひき起こす現象である。熱応力による耐火物の破壊の機構は複雑であるが、破壊現象を解

明するには、熱応力の解析や機械的な性質など、耐火物物性の詳細な調査を行う必要がある。加えて、何らかの方法で、熱衝撃条件下における亀裂の発生と伝播の過程を、直接かつ連続的に追跡する必要がある。

以上の観点から、AE (Acoustic Emission) 法を用い、片面を急速加熱した耐火物について、亀裂の発生・伝播過程の追跡を試みた。AE とは、材料内部の組織・構造変化、すなわち、塑性変形、亀裂の成長、変態などに伴い、局所的に蓄えられていた弾性エネルギーが解放されて弾性波を発生する現象であり、耐火物への応用が可能であると考えられた⁵⁻⁷⁾。

AE 測定システムの概要を、Fig. 8 に示す。実が使用に供する実物大の試験片から放出される弾性波を、センサーで電気的信号に変換し、その出力を、アンプを経由して、計数率、計数総数、AE エネルギーの総和として記録する。

耐火物試料に熱衝撃を与えるためには、Photo. 2 に示すパネル・スポーリング装置を用いた。この

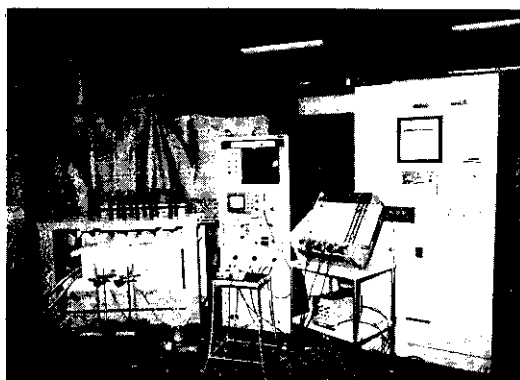


Photo. 2 Panel spalling apparatus

試験法を総称して以後パネル・AE 法試験という。

Fig. 9, Table 1 は、底吹き転が耐火物の選択に

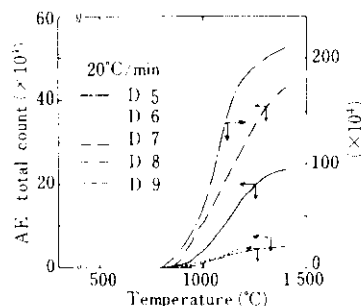


Fig. 9 Total ringdown count versus hot face temperature for five magnesia dolomite refractories

Table 1 Typical properties of refractories

		Sample				
		D-5	D-6	D-7	D-8	D-9
Porosity (%)		15.1	13.6	12.0	14.4	15.0
Specific gravity		2.95	2.96	3.08	2.96	2.96
Modulus of rupture S (kg/cm ²)	R.T.	113	123	120	153	158
	800°C	139	182	142	154	186
	1100°C	83	98	62	86	82
	1400°C	36	67	25	46	48
Modulus of elasticity E R.T. (10 ⁴ kg/cm ²)		75	83	102	97	85
Fracture energy γ_{WOF} (10 ⁴ erg/cm ²)			10.8	7.2	11.5	11.4
$\sqrt{\gamma_{WOF}/E}$ ($\propto R_{st}$) (x10 ⁻² cm ^{1/2})			3.64	2.68	3.48	3.70
Chemical composition (wt %)	MgO	91.5	90.5	90.5	87.0	87.0
	CaO	6.5	8.1	8.1	11.0	11.0
	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	1.0	1.3	1.3	2.0	2.0

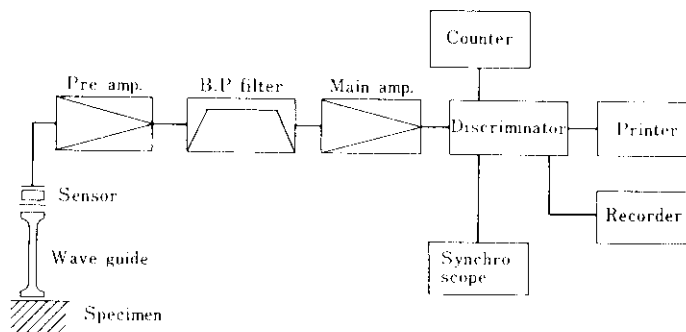


Fig. 8 An example of AE measurement system

当たり、パネル AE 法試験を行った結果であり、れんがで構成したパネルを片面から急速に加熱した場合の AE カウント数を示す。AE カウント数の多い耐火物は、多くの亀裂が発生・伝播したことを示している。また Fig. 9 によれば、同じ焼成マグドロレンがでも耐熱のスポーリング性に大きな差がある。この試験結果は、実使用時の熱的スポーリング現象と一致している。この試験により特殊なマグネシア・カーボンれんがを開発し、焼成マグドロレンがに比較して耐熱のスポーリング性を格段に向上させ、炉底耐火物として最適であろうとの確証を得た。

以上のような評価と、実炉での部分使用により酸化脱炭のないことを確認後、マグネシア・カーボンれんがを実炉に採用した。このような基礎的研究に基づく耐火物材質の検討によって、炉寿命延長への足がかりを得るに至った。

パネル AE 法試験をさらに実用化に結びつけるため、試験耐火物の周囲から拘束力を加えることにより、耐火物が構造体として築造された場合のスポーリング挙動も調査した。試験方法の開発から出発して、最適炉底耐火物を開発し、さらに築炉技術を発展させ底吹き転炉の炉寿命延長が実現した。

3-2 QDT 法の炉寿命延長への効果

QDT プロセスを開発したことにより、炉内での溶鋼滞留時間が短く、しかも SMART 法により終点吹き止温度を低下できるので、炉寿命延長への効果が期待できる。また、耐火物の溶損は炉傾動回数と関係があると思われたので、この効果を定量的に評価するため、倒炉指数 TDI (Turn Down Index) を導入した。これは、Fig. 10 に示すように、90°を単位として炉体を傾転する回数を 1 炉代について比率で示したものである。通常操業、QDT、および再吹錬ヒートの割合を r_n 、 r_{QDT} および r_{RB} として、TDI を次式で定義する。

$$TDI = r_n + \frac{1}{3} r_{QDT} + \frac{5}{3} r_{RB} \quad \cdots \cdots (5)$$

1 炉代中すべて QDT を行えば、TDI は 0.33 となる。逆に、再吹錬率が高くなるほど TDI は増加する。このように定義した TDI と、炉底損耗速度の関係を Fig. 11 に示す。TDI の増加によって、

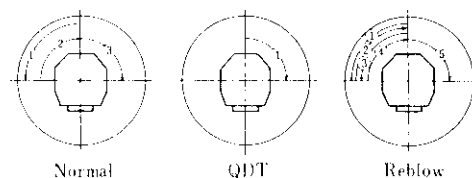


Fig. 10 Explanation for the calculation of turn down index (refer to eq. 5)

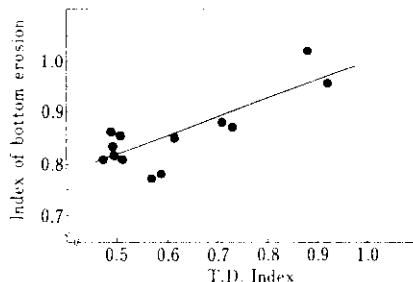


Fig. 11 Bottom refractory erosion influenced by turn down index

炉底損耗が直線的に増加する。したがって QDT 法の実施により、耐火物損耗速度を 40% も減少できる。このように、炉底耐火物の寿命延長策としては、耐火物材質はもちろんのこと、操業技術としての QDT 法の実施が重要な因子であることがわかる。

以上述べてきたように、耐火物の技術の開発と操業技術の開発が相伴って、他の底吹き転炉の追随を許さないほどの炉底寿命 2063 回を、1980 年 4 月に樹立した。

4. 炉内反応機構の解明

上吹き転炉との比較から、底吹き転炉は攪拌力が大きく、冶金反応が促進されることが予測される。しかし、鋼浴の攪拌と冶金反応を結びつける解析はなく、上吹き転炉の炉内反応の解明に比べ著しく遅れている。底吹き転炉の操業指針の決定には、冶金反応機構の究明、とくに脱炭・脱磷反応の定量的解明が重要である。

4-1 炉内冶金反応

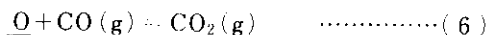
4-1-1 脱炭反応

吹錬終点時の C-O 関係は、製鋼炉を評価するうえで、極めて有用である。Fig. 12 には、5t 試験転炉および 230t 底吹き転炉で得られた、C-O 関係を示す。底吹き転炉の C に呼応する O は、CO 分圧が 0.4atm の平衡線上にあり、 $P_{CO} + P_{CO_2} = 1$ の線よりも下方に位置している。

一方、80t 上吹き転炉における値は $P_{CO} + P_{CO_2} = 1$ の線よりも上方にあり、同一 C 濃度では鋼中酸素が高くなっている。

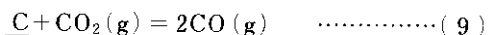
純酸素底吹き転炉では鋼浴にガスが直接導入されるので、上吹き法に比べ攪拌力が大きく、脱炭反応は、上吹き転炉よりも低炭域まで、酸素供給律速として進行することが予想される⁸⁾。

今、鋼浴中の炭素は、ガス相およびスラグ相と 1600°C で平衡していると仮定する。鋼中酸素とガス相との平衡は (6)、(9) 式で、スラグ相とは (12) 式で表される⁹⁾。



$$\log \frac{P_{CO_2}}{P_{CO} \cdot a_O} = \frac{8718}{T} - 4.762 \quad \cdots \cdots (7)$$

$$\frac{P_{CO_2}}{P_{CO} \cdot a_O} = 0.781 \quad \cdots \cdots (8)$$



$$\log \frac{P_{CO}^2}{a_C \cdot P_{CO_2}} = \frac{7558}{T} + 6.765 \quad \cdots \cdots (10)$$

$$\frac{P_{CO}^2}{a_C \cdot P_{CO_2}} = 537 \quad \cdots \cdots (11)$$



$$\log \frac{a_{FeO}}{a_O} = \frac{6150}{T} - 2.604 \quad \cdots \cdots (13)$$

$$a_O = 0.209 \quad \cdots \cdots (14)$$

ただし、(14) 式の導出に当たっては、 $a_{FeO} = 1$ のスラグと平衡するものとした。(14) 式を (8) 式に代入し、 $P_{CO_2}/P_{CO} = 0.163$ を得る。上吹き転炉では $P_{CO} + P_{CO_2} = 1$ の条件より、 a_C が 0.010 と求まる。相互作用助係数 $e_C^{(O)} = 0.34$ であるから、平衡する C 濃度、すなわち到達限界 C 濃度 $\underline{C}_{eq}$ は 0.012% となる。

全く同様にして、底吹き転炉の場合には、 P_{CO}

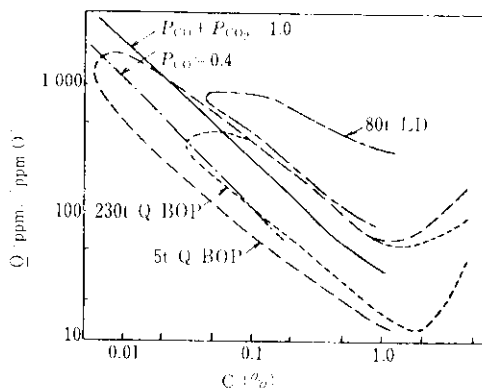


Fig. 12 C-O relation in steel bath

$+ P_{CO_2} = 0.43$ から、 $a_C = 0.0042$ となり、 $\underline{C}_{eq} = 0.005\%$ となる。

Fig. 12 より、底吹き転炉における脱炭限界 $\underline{C}_{eq}$ は、熱力学的予測値 0.005% に近く、上吹き転炉の 0.025% より著しく低い値まで脱炭が可能であることがわかる。

酸素供給律速から C の拡散律速に遷移する、いわゆる臨界 C 濃度 C^* が、上吹きと底吹き転炉では異なるであろうし、また、 C^* の違いが到達限界 C 濃度 $\underline{C}_{eq}$ に影響することが予想され、以下の考察を行った。

Fruehan¹⁰⁾ によれば、低炭域における吸窒速度式は次式で与えられる。

$$\ln \left(\frac{N_t - N_e}{N_0 - N_e} \right) = - \frac{A q \rho}{W} \cdot t \quad \cdots \cdots (15)$$

ここで、 A は界面積 (cm^2)、 q は吸窒反応速度定数 (cm/min)、 ρ は溶鋼密度 (g/cm^3)、 W は溶鋼重量 (g)、 N_0 は初期窒素濃度 (%), N_e は平衡窒素濃度 (%), N_t は時刻 t での窒素濃度 (%) である。(15) 式が成立する低 C 域では鋼中酸素が高いため、ガス-メタル界面には酸素が支配的に吸着されている。したがって、 N_2 ガスが N となって吸着できるサイトが少ないので、吸窒反応は反応律速で進む。吸窒反応の速度定数 q (cm/min) については、(16) 式の関係が見出されている¹⁰⁾。

$$q = 8C \quad (\%) \quad \cdots \cdots (16)$$

230t 底吹き転炉で、送窒素量 Q_{N_2} を $600 \text{ Nm}^3/\text{min}$ として 1 分間 N_2 リンスを行ったところ、 $\underline{N}$ が 10ppm から 94ppm へと変化し、このときの $\underline{C}$ の平均は 0.12% であった。

これらの数値を (15) 式に代入すると、界面積 A

は $7.1 \times 10^6 \text{ cm}^2$ と求まる。また CO リンスを 12 ヒート行った結果から、ガス・メタルの平均界面積 $\bar{A}$ は N_2 リンスの約 2 倍の、 $1.2 \times 10^7 \text{ cm}^2$ と導かれた。

一方、窒素の液側物質移動係数 k_N としては、30t Q-BOP における実測から、 0.03 cm/s が得られている¹⁰⁾。ところで、底吹き転炉のような強攪拌浴では、物質移動係数は元素の違いによらないと仮定できるので、 k_N は C の物質移動にも使えることになる。結局、C 供給律速下で進行する低炭域の脱炭速度は、次式で表される。

$$\frac{1}{\rho} W \frac{dC}{dt} = -A \cdot k_N \cdot C \quad \dots\dots\dots (17)$$

この式に、前述の A 、 k_N を代入すれば、(17)式は次式となる。

$$\frac{dC}{dt} = -0.66 C \quad \dots\dots\dots (18)$$

一方、送酸速度を Q_{O_2} (Nm^3/min) とすれば、最高脱炭速度は次式で与えられる。

$$\left(\frac{dC}{dt} \right)_{\max} = -\frac{Q_{O_2}}{60} \cdot \frac{24}{22.4} \cdot \frac{100}{230 \times 10^3} \quad \dots\dots\dots (19)$$

以上から、異なる律速条件の接点となる臨界 C 濃度 C^* は (18) と (19) 式を等置して、 $C^* = 0.42\%$ となる。この値は、Fig. 5 に示した実測値とほぼ一致している。 C^* より小さい範囲での脱炭酸素効率 η_0 は、次式で与えられる。

$$\eta_0 = \frac{C - C_{eq}}{C^* - C_{eq}} \quad \dots\dots\dots (20)$$

上吹き転炉の、到達最小 C 濃度 0.025% 、 $C^* = 0.75\%$ 、 $C_{eq} = 0.012\%$ を代入すると、 $\eta_0 = 0.018$ となる。この η_0 値に相当する底吹き転炉の C 濃度は、 $C^* = 0.42\%$ 、 $C_{eq} = 0.005\%$ を代入し、 $C = 0.012\%$ と求まる。この値は実測値の 0.01% に極めて近く、酸化吹錬で到達可能な C 濃度の差は臨界 C 濃度 C^* の差に基づくことで説明された。

4.1.2 脱磷反応

底吹き転炉吹錬では、吹錬開始後 1～2 分で脱珪が終了し、その後脱炭が急速に進行する。しかし、この間脱磷は進行せず、吹錬後期の鉄酸化期になって進む。底吹き転炉での脱磷反応は、上吹き転炉に比較して遅れ気味となる。この違いは、上吹き転炉では火点において酸素ポテンシャルが高く、酸化鉄を生成しやすく、しかもソフトプロ

ーによって脱磷しやすい吹錬方法を選択できることによる。底吹き転炉の脱炭最盛期には、羽口近傍で生成する酸化鉄が、鋼浴中を浮上する過程で C によって還元されてしまうため、脱磷には不利と考えられる。

しかしながら、底吹き転炉の大きな特徴は炉底羽口からフラックスを吹込むことができる点にある。転炉リサイクルスラグや電気が還元期スラグのように、熔融性の良いパウダーと焼石灰の混合フラックスの添加により、高炭域での脱磷が著しく改善されることが、Fig. 13 からわかる¹¹⁾。また焼石灰の粒度や焼石灰吹込みパターンが、脱磷反応に寄与することも判明している¹²⁾。

脱磷に関し得られた結果は、広く引用されている Healy¹³⁾ や Balajiva¹⁴⁾ の磷分配式を用いて計算した結果と、一致しなかった。不一致の原因の一つは、両者の式ではスラグ中の T.Fe の寄与が大きいのに、底吹き転炉では FeO 生成が少ないことが挙げられる。また、底吹き転炉の吹錬中の成分挙動から、脱磷には鋼中 Mn の影響が大きいことが予測された。これが、Mn の効果を考慮していない前述の磷分配式と実験結果とが一致しなかったもう一つの理由と思われる。

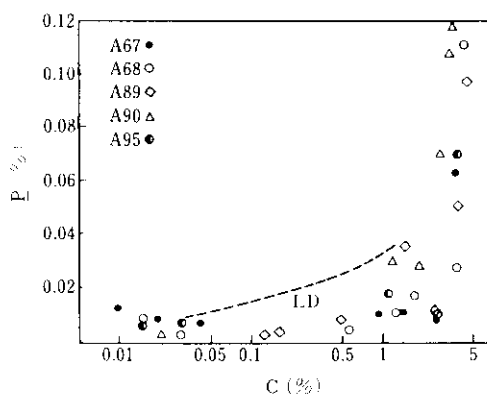
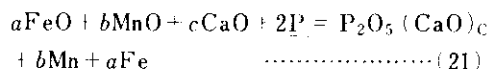


Fig. 13 Effect of recycled slag on dephosphorization

そこで、底吹き転炉の脱磷は次式にしたがって起こるものと仮定した¹¹⁾。



(21)式のように、FeO、CaO のほかに Mn と MnO を考慮し、5t および 230t 炉の実験データの同帰か

ら磷分配式を求め、Fig. 14 に示す。さらに同図には、230t 底吹き転炉における高磷銑脱磷実験の結果も示す。結局底吹き転炉における磷分配の式として次の回帰式が得られた。

$$\log \frac{(P)}{[P]} = \frac{10773}{T} + 0.655 \log (\%T \cdot Fe) \\ + 3.273 \log (\%CaO) + 1.133 \log (\%MnO) \\ - 0.822 \log (\%Mn) - 11.362 \quad \cdots \cdots (22)$$

ここで、 T は絶対温度である。独立変数を指定しただけであるが、(22) 式の係数の符号は (21) 式の反応式と一致しており、底吹き転炉の脱磷反応は、ほぼ (21) 式で表現されることがわかる。

従来、底吹き転炉の磷分配を算定する計算式がなく、脱磷挙動を推定あるいは評価できなかったが、(22) 式を求めたことにより、脱磷吹錬に利用できるようになった。

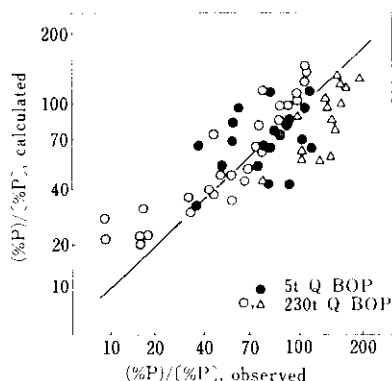


Fig. 14 Comparison of observed and calculated phosphorus equilibrium

4.2 脱炭・脱磷反応と鋼浴攪拌の関係

鋼浴の攪拌と炉内反応を結びつける一つの指針として、攪拌エネルギーの大小がある。近年、酸化精錬炉は、LD、AOD、OBM/Q BOP というように、精錬時間の短縮、反応性の増大の方向へ進んで来た。

通常これらの酸化精錬炉の特性を、送酸素量 q_{O_2} に対するヒート・サイズ W の比 q_{O_2}/W で表現してきた。しかし、同一の q_{O_2}/W であっても、鋼浴の攪拌が大幅に異なる上吹き転炉と底吹き転炉

の相違点を、 q_{O_2}/W のみで表すことは不適當である。そこで、鋼浴の均一混合時間 τ を導入した $q_{O_2}/(W/\tau)$ をプロセス・パラメータにすることにより、溶鋼循環量に対する送酸素量という概念に至る。

さらに、優先脱炭に関して、AOD の例からわかるように、炉内の CO 分圧が重要な因子であり、これを示すパラメータを、 $2q_{O_2}/(2q_{O_2} + q_{Ar})$ とする。底吹き転炉のように、Ar の替りにプロパンガスを冷却剤として用いる場合には、その分解を考慮すれば、 $2q_{O_2}/(2q_{O_2} + 4q_{Pr})$ となる。

溶鋼循環量に対する送酸素量という概念と、酸化精錬炉の優先脱炭を示す炉内 CO 分圧との両者を総合的に考慮して、製鋼炉特性を表すプロセス・パラメータの導出を試みた。

このパラメータを次式で表し、ISCO (Index for Selective Carbon Oxidation) と定義する¹⁵⁾。

$$ISCO = \left(\frac{2q_{O_2}}{2q_{O_2} + q_{Ar}} \right) \left(\frac{q_{O_2}}{W/\tau} \right) \quad \cdots \cdots (23)$$

酸化精錬炉の送酸素量、溶鋼重量、均一混合時間をこの式に代入すれば、ISCO が計算できる。

ここで、均一混合時間は、実測¹⁶⁾ のほかに、以下のように求めることができる。炉底から吹き込むガスによって与えられる攪拌エネルギー $\dot{\epsilon}$ ($W/t \cdot \text{steel}$) は、気泡の浮上過程での浮力と膨張による仕事との和から、次式で与えられる¹⁷⁾。

$$\dot{\epsilon} = \left(0.0285 \frac{QT}{W} \right) \log \left(1 + \frac{H}{148} \right) \quad \cdots \cdots (24)$$

ここに、 W は溶鋼重量 (t)、 T は絶対温度 (K)、 Q はガス流量 (NL/min)、 H は鋼浴深さ (cm) である。また、この攪拌エネルギー $\dot{\epsilon}$ は鋼浴の均一混合時間 τ と次式の関係にある¹⁸⁾。

$$\tau = 800 \cdot \dot{\epsilon}^{-0.4} \quad \cdots \cdots (25)$$

この式は、 N 本羽口のコールド・モデル実験により次式となる¹⁹⁾。

$$\tau = 800 \dot{\epsilon}^{-0.4} N^{1/3} \quad \cdots \cdots (26)$$

(26) 式を 5t および 230t 底吹き転炉に適用すれば、均一混合時間は 10~20s となり、上吹き転炉の 50~100s に比べて強攪拌であることがわかる。

ISCO を導入することにより、C が選択酸化される精錬炉の設計には ISCO をできるだけ小さくするように選び、他方、ISCO 値を大きくする操業では、Fig. 15 に示すように、鉄や磷の酸化が容

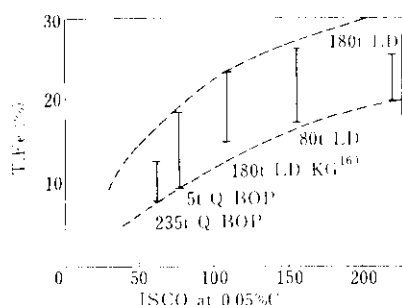


Fig.15 T.Fe as a function of ISCO

易となる。以上から、脱磷には上吹き転がりが良く、Cr歩留りの向上にはAODが適し、底吹き転がりはこれらの中間的な性格で、汎用性の高い炉といえることができる。すなわち、底吹き酸素の吹き込み量や羽口本数の選択により、希望する酸化精錬炉の役割を選べるという特徴を有する。

このような考え方が上吹き転がりの見直しの契機となり、最近の上吹き底吹き併用吹錬法開発の糸口となっている²⁰⁻²²⁾。

5. 結 言

大量生産を指向する製鋼炉の吹錬技術の基盤と

して、反応機構の究明を行った。この研究が吹錬自動制御、(SMART)法として開花し、吹錬軌道をダイナミックに修正して終点のC、T同時適中率が98.8%と、精度の高い制御技術となった。SMART法をより積極的に実操業プロセスに反映させる目的で、迅速出鋼(QDT)技術を確立した。

炉寿命延長のため、羽口耐火物の開発に着手し、同時に、アコースティック・エミッションを活用した耐火物特性判定装置を開発した。これを用いた研究が、耐熱的スポーリング性耐火物として、底吹き転がりに適したマグネシア・カーボンレンガを誕生させ、操業技術の発展と相まって、炉底寿命2063回と、上吹き転がりと比較し遜色のない水準にまで技術革新を行った。

さらに、高生産性を目標とする場合にとくに必要である、炉内反応のメカニズムを明らかにし、溶鋼の攪拌と冶金反応を連結させ、酸化精錬炉の特徴を説明した。

以上の研究および技術開発により、当社千葉製鉄所に設置した底吹き転がりは、高い生産性を誇る製鋼炉として脚光を浴び、上吹き転が吹錬法の見直しへの契機となった。

参 考 文 献

- 1) K. Brotzmann & D. Papamantellos: I & SM, (1977), May, 23
- 2) 永井, 数土, 山田, 森, 中西, 別所, 上田: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 590
- 3) 加藤, 中西, 鈴木: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 587
- 4) 三枝, 永井, 数土, 山田: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 591
- 5) 熊谷, 内村, 岸高: 川崎製鉄技報, 11 (1979) 1, 132
- 6) 熊谷, 内村, 川上: 窯業協会誌, 87 (1979) 5, 259
- 7) 熊谷, 内村, 川上: 窯業協会誌, 87 (1979) 6, 309
- 8) 中西, 鈴木, 別所, 仲村, 馬田: 鉄と鋼, 64 (1978) 4, S 168
- 9) 学振, 製鋼第19委員会編: 製鋼反応の推奨平衡値 (日刊工業新聞社)
- 10) R. J. Fruehan: Ironm. & Steelm., (1976) 1, 33
- 11) 野崎, 原田, 仲村, 中西, 数土, 山田: 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S 199
- 12) 山田, 数土, 永井, 馬田, 野崎, 中西: 鉄と鋼, 65 (1979) 4, S 198
- 13) G. W. Healy: JISI, 208 (1970), July, 664
- 14) K. Balajiva & P. Vajragupta: JISI, 155 (1947), 563
- 15) 中西, 加藤, 鈴木, 香月: 鉄と鋼, 64 (1978) 4, S 169
- 16) 斎藤, 別所, 原田, 鈴木, 野崎, 中西, 江見: 鉄と鋼, 66 (1980) 4, S 239
- 17) K. Nakanishi, T. Nozaki, Y. Kato and J. Katsuki: 7th Japan USSR Joint Symp. Physical Chem. of Steelmaking (Moscow, May 1979)
- 18) K. Nakanishi, T. Fujii and J. Szekely: Ironm. & Steelm., (1975) 3, 193

-
- 19) 中西, 加藤, 野崎, 江見: 鉄と鋼, **66** (1980) 9, 掲載予定
 - 20) 平原, 丸川, 山崎, 姉崎, 戸崎, 平田: 鉄と鋼, **65** (1979) 11, S 677
 - 21) 甲斐, 中川, 平居, 村上, 中島, 荒木: 鉄と鋼, **66** (1980) 4, S 235
 - 22) 三枝, 今井, 千野, 塚本, 朝穂, 木中: 鉄と鋼, **66** (1980) 4, S 236