

解 説

UDC 669.184.244.22

底吹き転炉製鋼法の最近の進歩*

中西 恭 二**・三本木 貢 治**

Recent Development of Q-BOP/OBM Steelmaking

Kyoji NAKANISHI and Koji SANBONGI

1. 緒 言

最近、ヒートサイズが 100 t を超える大型の純酸素底吹き転炉が世界の各所で稼動を始め、底吹きならではの特徴ある炉内反応が報告されるようになってきた^{1)~9)}。LD 転炉に主役の座を奪われて、すでに久しい底吹き転炉が、今日急に復活をみたのは、ひとえに純酸素ガスの吹き込み技術が向上したことによる。

著者は、まず底吹き転炉の歴史の変遷について述べ、つづいて、今日の純酸素底吹き転炉製鋼法について、公表された最新のデータをもとに解説する。

2. 底吹き転炉の変遷

転炉の炉底から空気を吹き込むベッセマー法(酸性底吹き転炉)は 1856 年に特許がとられ、1860 年に工業化された。これは脱炭炉としては優れていたが、脱磷、脱硫に劣っていた。そこで 1879 年トーマス法(塩基性底吹き転炉)の出現をみる。塩基性ライニングと造滓剤としての石灰の使用により脱磷吹錬が容易となつたため高磷銑を対象とするヨーロッパでは、トーマス法が発展した。この際、副産物としてのスラグがトーマス燐肥として利用されることも利点であつた。

空気の代わりに純酸素を吹き込む方が、冶金反応上好ましいことは、底吹き転炉の開発当初からの常識であつた。これはベッセマー法から約 1 世紀にわたる技術の積み上げによつて、近年やつと実現したのであるが、その口火となつたのは、何といても 1950 年代初期に実現した安価な純酸素製造技術の確立であり、その直後から純酸素を製鋼工程に使うため、幾多の努力が払われた。最初の試みはベッセマー法でなされたが、酸素の富化率は 40% が限度で、これ以上では羽口および炉底耐火物が著しく損傷することが明らかとなつた。結局 1950~1960 年代には底吹き転炉に純酸素は使用できないという考えが支配的であつた。

一方、上吹き転炉 LD が発明されたのは 1946 年であり、底吹き転炉への純酸素吹き込みの失敗から当然の結果として、純酸素吹き込み技術は LD とともに進展することになる。1952 年オーストリーの Voest に 35 t の LD 転炉が建設されたのをきつかけに、1960 年にははや粗鋼生産量にして 1500 万 t/y にまで急成長した。LD 法は優れた生産性と、鋼材の良品質(とくに低 N 鋼の溶製が可能)により低磷銑に対して、その威力をいかに発揮したが、高磷銑の吹錬には不向きのため、トーマス法も依然として存続の余地が残された。この間高磷銑を対象に LD-AC 法、カルド法などの新技術も登場したけれども、いずれも決定打とはならなかつた。

このような状況下において、カナダの液体酸素メーカーである Canadian Liquid Air は純酸素の需要増大のため、純酸素吹き込みに耐え得る新羽口の開発に着手し、1965 年、2 重管羽口を発明しヨーロッパのトーマス炉への売込みに成功する。すなわち 1968 年 3 月、Eisenwerk Gesellschaft Maximilians-Hütte MBH (Sulzbach Rosenberg) において 25 t トーマス転炉は、上述の 2 重管羽口をとりつけた 30 t 炉に改造され、OBM (Qxygen Bottom Maxhütte) と呼ばれる。この 30 t OBM は、鋼中 N 濃度が従来の 100 ppm から 20 ppm へと低下し、また炉底寿命が 100 回から 200 回以上に伸びるなど、期待どおりの成果をあげた。2 重管羽口の内管通路は、純酸素が流れるが、アニュラス部(内、外管の間隙通路)はプロパンなどの炭化水素ガスが流れ、これが C と H₂ に分解する際の吸熱を利用して、羽口先端の高温部を集中的に冷却する。こうして羽口寿命は純酸素を使用しても飛躍的に伸びる。

その後 Maxhütte では 5 t OBM を用いて、本法が低磷銑の吹錬にも適することを確認する。この OBM プロセスに注目していた米国最大の鉄鋼会社、US スチールは、遂に 1971 年、OBM プロセスの特許を買い、みずからも South Chicago に 30 t の実験炉をつくり、大

* 昭和 53 年 8 月 10 日受付 (Received Aug. 10, 1978) (依頼解説)

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

型化にも十分耐えられることを確信する。こうして1972年 LD の建設予定を覆して、Gary 工場に 200 t の純酸素底吹転炉 3 基を設置し、Q-BOP (Q-Basic Oxygen Process) と呼ぶ。つづいて 1974 年同 Fairfield 工場の 230 t 平炉 12 基も、2 基の 180 t Q-BOP にリプレースされ、Q-BOP 法が確立する。

一方、ベルギーの CRM (Centre de Recherches Metallurgiques) と、フランスの 3 製鉄会社 (Creusot-Loire, Wedel-Sidelor および Sprunk) は、OBM とは独立に、羽口冷却剤に液体燃料を用いた LWS 法を OBM とほぼ同時期に開発した。これは、その後、Creusot-Loire 社とスウェーデンの Uddeholm 社によりステンレス鋼の精錬炉、CLU 法にも発展する。

OBM と Q-BOP は同一のプロセスを意味し、ヨーロッパでは前者の名で呼ばれ、他の世界では Q-BOP と呼ばれており、Q は quick, quiet, quality などの Q を意味する。さて、OBM/Q-BOP はその後も順調に伸び、1973 年ヨーロッパにおける 10 社のトーマス炉が OBM に切換えられた。1976 年には Thy-Marcinelle (ベルギー) で 150 t Q-BOP が 3 基稼動、日本川鉄でも 1977 年 2 月以来、230 t Q-BOP が 2 基順調に稼動している。この他 Republic Steel (South Chicago) でも、1977 年 3 月より 200 t 炉が 2 基稼動し、U. S. Steel (Fairfield) でも No. 3 Q-BOP が操業を始めた。

現在鉄鋼業界は深刻な不況下にあり設備投資の意欲はそがれているが、大型 Q-BOP 炉の建設が、Italsider (Cornigliano), USINOR (Longwy), ATH (Ruhrort) で進められている。このように、1977 年度の OBM/Q-BOP 設備は、粗鋼生産能力で 3500 万 t/y に達しておりこの 10 年の歳月でめざましい発展をとげたのである。

3. Q-BOP 設備の特徴

Fig. 1 に一例⁹⁾として Q-BOP の炉体プロフィールとれんが積みの概略を示す。図にみるように炉底分離式である。炉底れんがは Fig. 2 の例⁹⁾のごとく築造される。この場合羽口は 6 本となつている。Fig. 3¹⁰⁾は底吹き 2

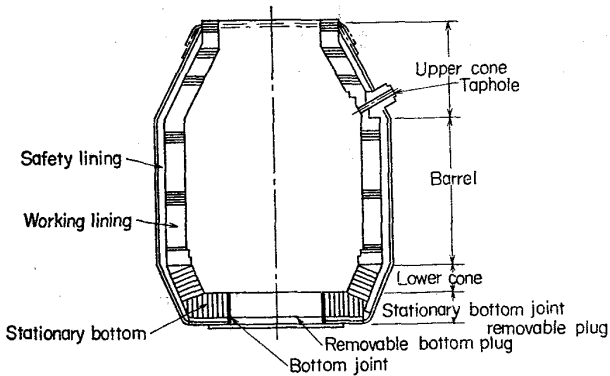


Fig. 1. Profile of a Q-BOP furnace⁹⁾.

重管羽口構造を示す概念図である。

実際の羽口数は Fig. 2 の 6 本よりはかなり多く、川鉄千葉の Q-BOP を例にとれば、18 本と 22 本の 2 種類を使い分けている。Thy-Marcinelle の 150 t 炉でも 12 本と 18 本の 2 種類を使用している⁷⁾。羽口配列の中で最も一般的な形体は、炉底面と直角に配向 (Fig. 2) しかつ炉傾動軸に対して対称となるよう分布させたものである。しかしよりよい攪拌を得るため、意図的に傾斜さ

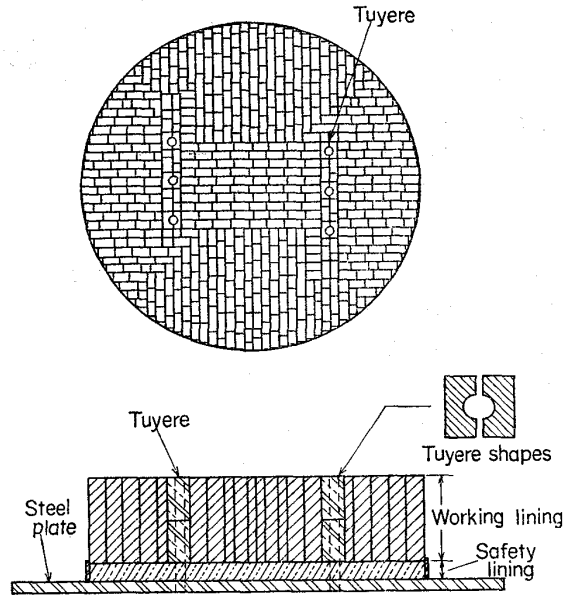


Fig. 2. Use of preformed shapes for bottom construction⁹⁾.

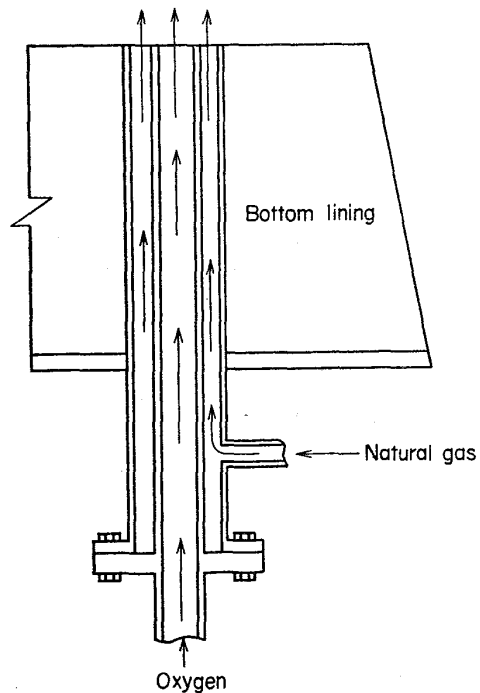


Fig. 3. Oxygen tuyere jacketed with hydrocarbon¹⁰⁾.

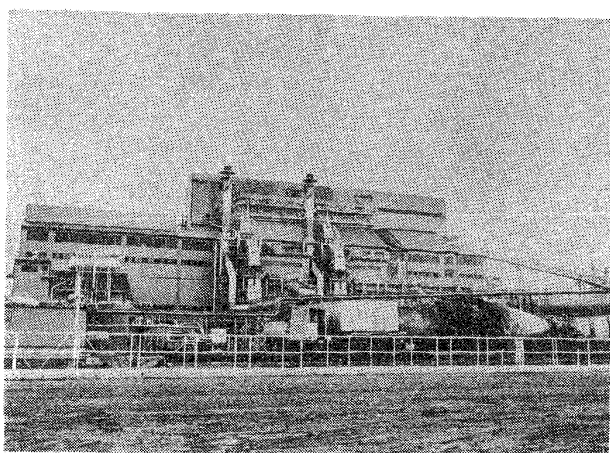


Photo. 1. Overall view of No. 3 Steelmaking Shop at Chiba where two Q-BOP furnaces of 230 t are equipped.

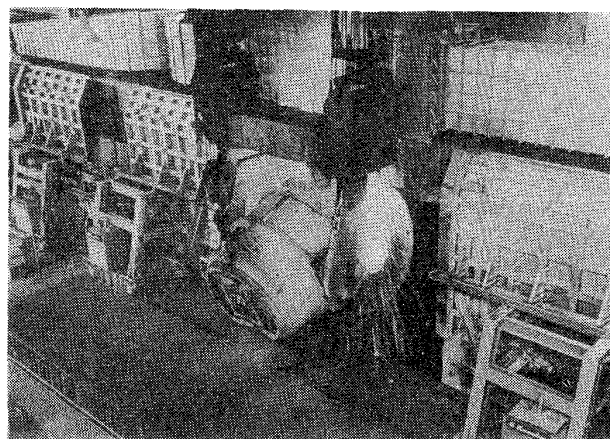


Photo. 2. Hot metal is being charged into one of Kawasaki's new 230 t Q-BOP furnaces.

せた羽口配向や、非対称分布をとることもある。後述するが、Thy-Marcinelle の 12 本羽口は傾斜羽口の例である。

羽口冷却用の炭化水素ガスとしては、天然ガス、ブタン、プロパンなどのいずれかが、各工場の立地条件に応じて選択されている。これらのガスは、ガス顕熱のみで冷却するアルゴンガスなどと異なり、高温領域で C と H_2 に分解して吸熱効果大であるので、羽口寿命は著しく向上する。アルゴン・ガスは $298^\circ K$ から $1800^\circ K$ に定圧変化して、約 $14kcal/mol$ の吸熱に過ぎないが、プロパンのそれは分解熱も含めて $79kcal/mol$ と約 6 倍大きな吸熱量となる。

脱燐、脱硫反応をより効率よく行なうために、羽口内管からは、焼石灰、螢石および石灰石などの造滓剤粉末を酸素ガスとともに吹き込むことができる。一方、精錬ガスとしては、アルゴン、窒素などもあり、精錬目的に応じた多様性を備えている。

Q-BOP では BOP のように酸素上吹ランスがないので、建屋高さを低くできる。この点は、平炉工場を Q-BOP にリプレースする場合に新たな建屋を必要としないので有利となる。米国では、いまだに多くの平炉工場が低能率の操業をつづけているが、これらが将来 Q-BOP に改造されるものとすれば、粗鋼生産能力にして $3700万 t/y$ に匹敵する Q-BOP の潜在需要があることになる。ところで川鉄千葉では吹錬の自動化のためセンサーランスを設けており、LD 工場と同等の建屋高さとなつている。

その他 Q-BOP 工場特有の設備としては、炉底分離式のために炉底交換機などの付帯設備、および吹き込み造滓剤の粉碎設備などがあげられる。

Photo. 1 に 230 t Q-BOP 炉 2 基を設置した千葉製鉄所第 3 製鋼工場の外観を、また Photo. 2 に同工場における溶銑装入中の炉前を示す。Photo. 1 において、炉

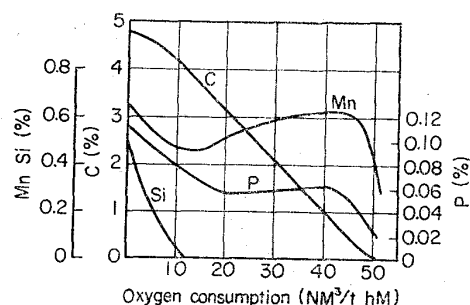


Fig. 4. Change of bath composition in the course of blowing³⁾.

頂ホッパーへの副原料搬入用のベルトコンベヤーが、写真右端から転炉工場へと立上がつている。また 2 本の煙突は転炉廃ガスの未燃焼回収設備 (OG) における放散塔であり、写真中央手前には、第 3 製鋼工場と同時に建設された第 6 高炉 (生産能力 $10,000t/d$) から溶銑を輸送する $350 t$ トピード・カーも見える。

4. Q-BOP 吹錬中の諸成分の挙動

以下、川鉄千葉における 230 t Q-BOP について、川名らが得たデータ^{1)~4)}を中心に、吹錬中の諸成分の挙動をみてみよう。

4.1 各成分のおおまかな動き

Fig. 4, 5 にそれぞれ吹錬中の鋼浴成分とスラグ成分の推移を示す³⁾。これらは溶銑率 100%、送酸速度 $600 \sim 700 Nm^3/min$ 、および冷却剤として鉄鉱石およびミルスケールを使用したヒートであり、吹錬中のサンプルはセンサーランスあるいは、吹錬中断後倒炉によつて取られた。図の横軸の酸素には固体酸素も含まれる。吹錬初期は Si と Mn の優先酸化が進むが、中期の脱酸効率はほぼ 100% であり、鉄鉱石、ミルスケール中の酸素も完全に分解して脱炭に寄与する。これは LD と異なる点で Q-BOP 鋼浴の強攪拌の効果といえる。Mn の酸化

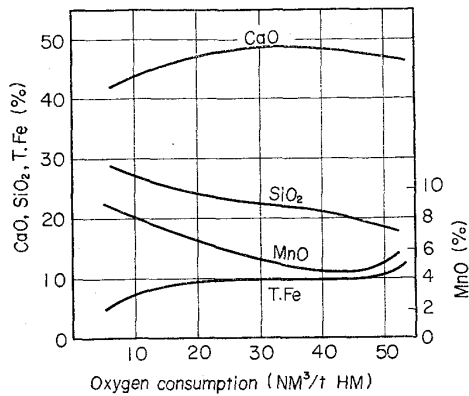


Fig. 5. Change of slag composition in the course of blowing³⁾.

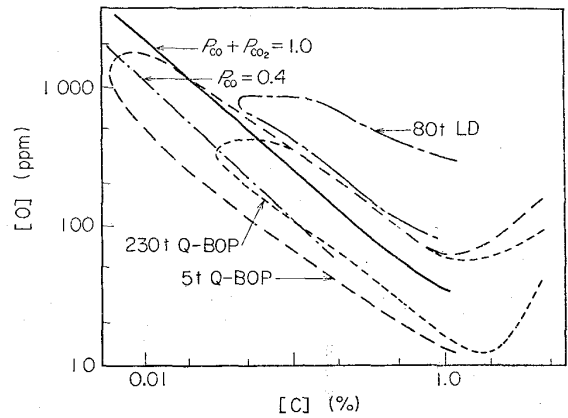


Fig. 7. [C] vs. [O] relationship in Q-BOP and LD⁵⁾.

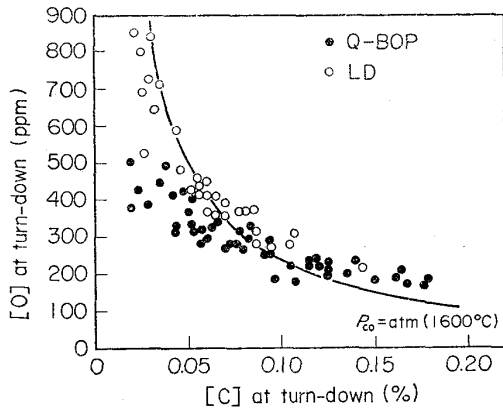


Fig. 6. [C] vs. [O] relationship at turn-down¹⁾.

は LD の場合、吹錬初期に溶銑 Mn の 70% 以上が酸化されるのに対し、底吹き転炉では 30~40% と少なく後述するように吹き止め時の高歩止りをもたらす。鋼浴の攪拌が終止一貫して保証されるため、C による (FeO) の還元が進み、スラグ中の (FeO) 濃度は LD に比較して低い。

4.2 [C]-[O] 平衡

Fig. 6 に吹き止め時の [C] と [O] の関係を、LD と対比して示す¹⁾。LD は CO 分圧が 1atm の平衡関係をほぼ満足する。Q-BOP での [C]-[O] 関係は、[C] が 0.07% 以下では、1atm より低い CO 分圧側にシフトする。これは鋼浴中の C が少なくなるにつれて、冷却ガスの分解によって生じるガスの影響が大なることを意味する。

Fig. 7 は同様の関係を、川鉄実験炉 5t Q-BOP のデータも含めて示したものである⁵⁾。これより 5t Q-BOP の場合 [C]-[O] 関係は CO 分圧が 0.4atm の平衡曲線の上にある。Q-BOP の極低炭素領域について、[O] の活量は (FeO) 飽和を仮定して求め、さらに炉内ガスはすべて冷却ガスの分解と酸化によって生成したものと仮定して平衡論的計算を進めると、脱炭限界 [C] 濃度、

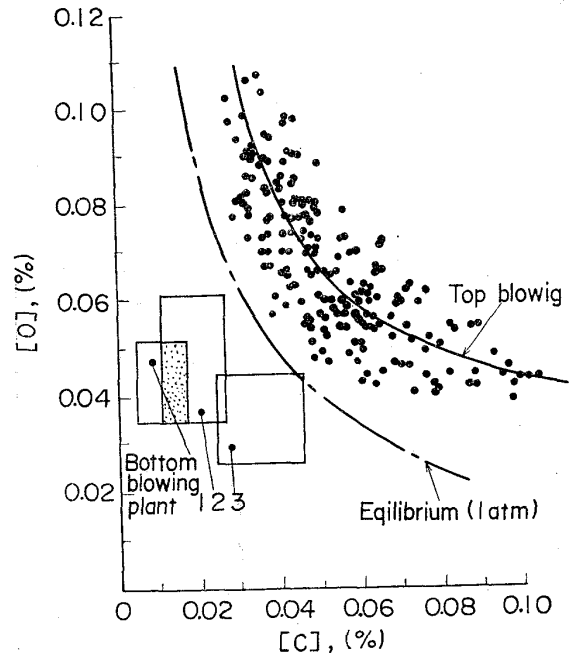


Fig. 8. [C] vs. [O] relationship in OBM with high phosphorus pig iron¹⁴⁾.

[C]_e として、0.004%、CO 分圧として 0.4atm を得る。実際の [C]_e は鉄歩止りを無視した 5t 炉で 0.006% と上記理論値に近く、また 230t 炉で 0.01% であり、LD 転炉の 0.025% に比較して低い。ここで誤解のないよう付記すると、実炉ではひきつづく Ar リンスにより 0.004% の極低炭素濃度も得られている。

このように、低炭素領域における P_{co} は、使用する冷却ガスの種類によって異なるので、[C]-[O] 曲線は、各工場によって少しずつ異なるはずである。Fig. 8 はヨーロッパの OBM を有する工場についてその様子を示している¹⁴⁾。図において BOP (LD) のデータが P_{co} = 1atm より上側へ偏倚しているが、これは高磷銑吹錬のため、かなりソフトブローであつたものと推察される。

以上のように、(イ) 極低炭素鋼が脱ガス工程を省略

して容易に得られること、(ロ) 吹き止め時の [O] 濃度が低く、次工程で脱酸剤の歩止りが向上すること、などは LD との対比の上で、Q-BOP の大きな利点となっている。

4.3 脱 Mn

Fig. 9 は吹き止めにおける [Mn] と [C] の関係を、Q-BOP と LD で比較したものである¹⁾。これより明らかなように、[Mn] 濃度は LD に比較して Q-BOP の方が高く、フェロマンガンの原単位が削減できる。実際低炭リムド鋼でフェロマンガンの使用量は LD の 50~70% と少ない¹⁾。

さて、このように Q-BOP で [Mn] 濃度の高い理由として容易に考えられることは、スラグ中の (FeO) 濃度が LD よりも低いことである。通常 [Mn] はスラグの酸化力で決まるとして、(1) 式の平衡が書かれる。

$$\begin{aligned} &(\text{FeO}) + [\text{Mn}] = (\text{MnO}) + \text{Fe} \\ &\log K = \log (\text{MnO}) / ([\% \text{Mn}] (\text{FeO})_t) \\ &= 6440/T - 2.95 \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

ここに (MnO), (FeO)_t は分子分率で示し (FeO)_t = (FeO) + 1.35(Fe₂O₃) である。

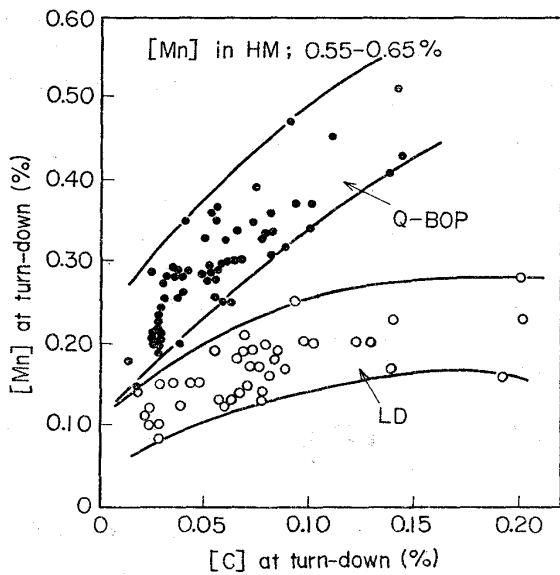


Fig. 9. [Mn] vs. [C] relationships in Q-BOP and LD¹⁾.

Table 1 は Q-BOP と LD の吹き止め時スラグ成分を比較したものである¹⁾。これらの分析値を (1) 式に代入して平衡 [Mn] 濃度を求めると、Q-BOP で 0.16%、LD で 0.12% と Fig. 9 の実測値 (0.06% [C]) より著しく小さい。つまり [Mn] 濃度はスラグの酸化力から説明できないほど高い。したがって [Mn] 濃度は鋼浴自体の酸化力によつて決められていると考えざるを得ない。前述のように、鋼浴の酸化力は [C] と P_{co} 間の平衡で決まっております、その値はスラグのそれよりかなり小さい。したがって、これと [Mn] とに平衡が成り立つのであれば、スラグとの平衡より高い [Mn] 濃度を維持できるので実状とよくあう。先に述べたように LD では P=1atm、Q-BOP では 0.4 atm と [O] 活量、a_o にして約 2.5 倍、LD の方が大きいことを考えれば、Q-BOP と LD の [Mn] 濃度の差も一応の解釈はつく。

TURKDOGAN は、Q-BOP の羽口直上部では、気相の P_{O2} が高く、enhanced vaporization (強制気化) が起りやすいので [Si] は SiO として気化し CaO 粉に捕足される。すると [Mn] は FeO-MnO と比較的活量の高い酸化物となるので、[Mn] 濃度は高く吹き止まると説明している¹³⁾。

4.4 Fe の酸化と脱 P 反応

4.4.1 低 P 銑の場合

4.2 で述べたことの裏返しであるので、多くを述べる必要はないが、Fig. 10 にみるようにスラグ中の (T.Fe) 濃度は低い¹⁾。その結果、低炭素鋼を対象に通常の吹錬

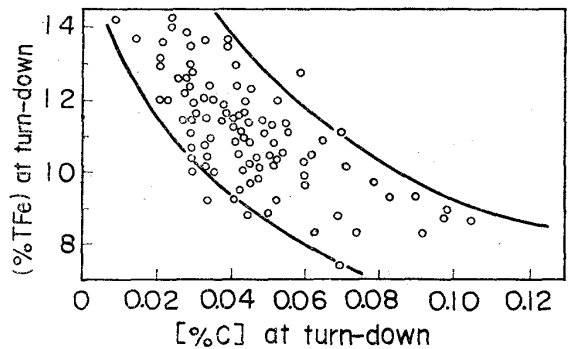


Fig. 10. [C] vs. (T.Fe) relationship at turn-down¹⁾.

Table 1. Comparison of slag composition at turn-down.

Furnace	Unit	(FeO) _t	SiO ₂	MnO	CaO	P ₂ O ₅
Q-BOP	wt%	16.3	16.1	7.7	48.7	2.75
	molar fraction	0.152	0.180	0.0724	0.583	0.0130
LD	wt%	22.5	14.1	7.8	40.8	2.27
	molar fraction	0.223	0.167	0.0784	0.520	0.0114

Si in hot metal : 0.50 to 0.55%, Lime consumption : 35 to 40 kg/t of steel, Temp. at turn-down : 1610°C, [c] at turn-down : 0.06%

Table 2. Phosphorus contents in ladle (200 t Q-BOP at Gary.)
Heats within phosphorus range

Steel carbon in ladle (%)	Steel phosphorus in ladle (%)					
	<0.010	0.010~0.014	0.015~0.019	0.020~0.024	0.025~0.029	0.030~0.034
0.10 maximum	91.0	8.2	0.8	0	0	0
0.11~0.30	47.5	31.6	13.9	4.0	2.0	1.0
0.30~0.50	3.9	19.2	73.0	3.9	0	0
Over 0.50	0	0	80.0	20.0	0	0

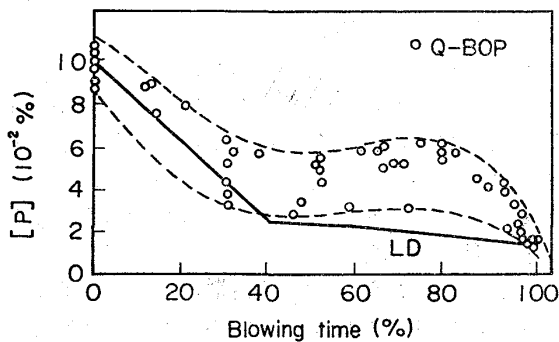


Fig. 11. Change of phosphorus content during blowing¹⁾.

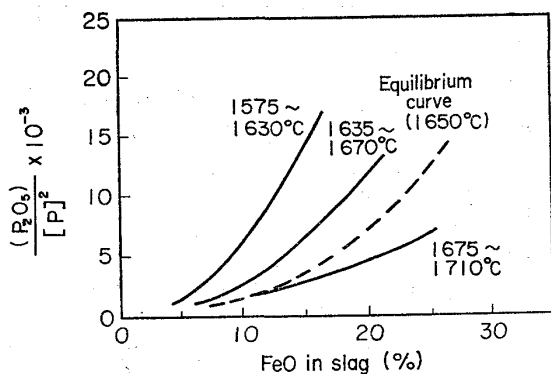


Fig. 12. Influence of the temperature on the $(P_2O_5)/[P]^2 - (FeO)$ relation⁸⁾.

をする限り、LDよりも脱磷反応がやや遅れて進行するが、鉄源歩止りがLDより高いという利点は遺憾なく発揮される。

Fig. 11に吹錬中の[P]の変化をQ-BOPとLDで対比して示す¹⁾。川鉄千葉では現在高炭素鋼の必要がないので、データを持ち合わせていないが、0.6% Cのレール材を多量に製造しているGary工場の200 t Q-BOPについて、取鍋[P]濃度の分布をみればTable 2のようである。これよりLDと比較して遜色ない成績であり、とくに低炭素鋼(<0.1% C)の場合はQ-BOPの方が優れている。

TURKDOGANはPについても enhanced vaporizationによる脱P機構を提唱している。すなわち羽口直上のガ

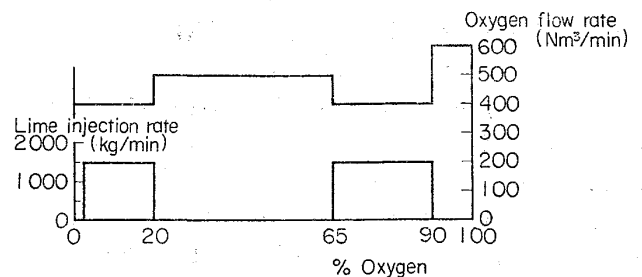


Fig. 13. Description of the reference practice⁷⁾.

ス中の高いO₂分圧により、PO(g)が生成しこれが固体石灰により迅速にCa₃P₂O₈として固定されるため、LDにはない強力な脱Pが起こるとしている。すなわち、LDでは火点でFe₂P₂O₅なる鉄磷酸塩が生成するが、これは不安定であるので、[C]により再還元されやすいのに対し、Q-BOPではCa₃P₂O₈と安定であるので再還元速度は遅く、とくに低C域での脱Pが顕著に進むと説明している。

4.4.2 高P銑の場合

OBMにおいてメタルとスラグの酸化力を比較すればメタルの方が高いといった指摘⁹⁾があるが、これは前述の[Mn]の挙動からみても、はなはだ疑問である。

高P銑をone slag法で精錬した際のP分配を調べ、Fig. 12を得ている⁸⁾。ここにCaO粉末の吹き込みは吹錬末期に集中している。図よりOBMにおける脱Pは熱力的平衡関係以上に進んでいるが、それは過渡的現象によるものと推論している⁸⁾。

このように溶銑の[P]濃度が高いほど、OBM/Q-BOPはLDよりも優位に立つ特徴を踏まえて、BROTZMANNらは低P銑の吹錬方法についても見直している⁹⁾。すなわち、鉄鉱石の低品位化、転炉スラグの再利用などの観点から、今後0.4% [P]程度の溶銑を用いた方が高炉-OBM/Q-BOP法全体でのコスト・ダウンにつながるとしている。実際へマタイト銑にPを添加し0.4% [P]として、double slag法(前回スラグを残し、中間排滓後再吹錬)で吹錬したところ、中間排滓時で0.01~0.02% [P]、4~5% (P₂O₅)となり、再吹錬でCaO原単位20kg/t-steel使用して0.006~0.007% [P]に仕上がった。

以下高P銑吹錬の今一つの実例として、Thy-Marcinelle の 150 t OBMの報告⁷⁾を引用する。先と同様に前回ヒートのスラグを炉内に残してリサイクル使用している。吹錬の基準パターンは Fig. 13 のようであり、CaO 粉末は吹錬の前期と後期のみ吹き込む、いわゆるU型を採用している。基準パターンでの CaO 原単位は、前期 35kg/t-steel、後期 51kg/t-steel と多量である。溶銑[P]は 1.7% と高い。インプットPの約 50% が前期吹錬で除かれている。

Fig. 14 は 12 本の傾斜羽口と18本の直立羽口で、脱C、脱P速度を比較したもので、送酸素速度が同一の場合、冶金反応におよぼす羽口配列の影響は小さいことを示している。スラグ組成は Fig. 15 のようであり、吹錬酸素の 75% の時点では 2 液相分離しているが、吹錬末期では CaO 飽和スラグとなり、次回ヒートに再利用される。

CaO の添加法として、全量初期添加 (A法) および前、後期 2 分割添加 (B法) を比較している。吹き止め [P] 濃度の実績値と理論値の比として脱 P 能を表示すれば、A法が 1.63 (0.016% [P])、B法が 1.21 (0.012% [P])

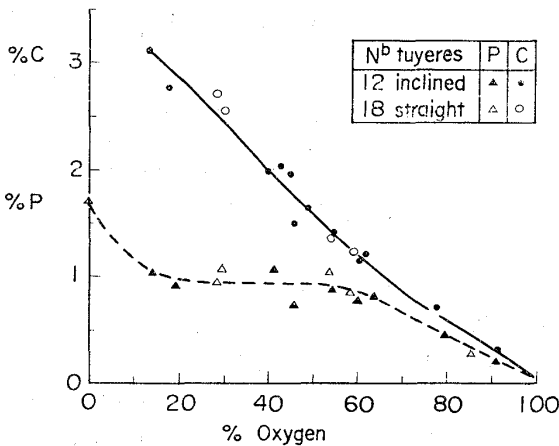


Fig. 14. Influence of tuyere pattern on P and C removal⁷⁾.

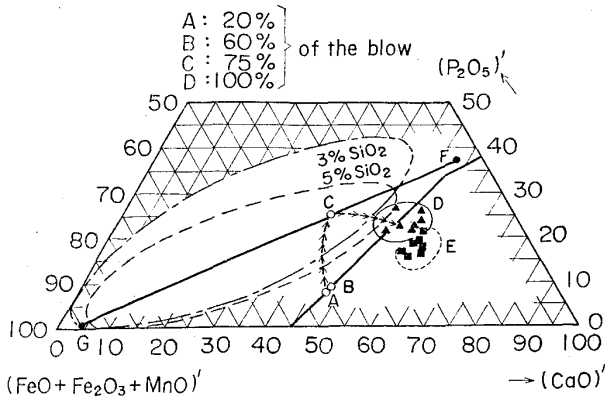


Fig. 15. Slag path during an OBM heat. (reference practice) (section at 1600°C in the ternary diagram⁷⁾.)

[P])であつた。また CaF₂ を 3kg/t-steel併用すると、A法が 1.33、B法が 1.16 にそれぞれ向上した。以上のごとく、造滓剤の原単位が同一でも、脱P促進のための最適添加法が存在する。

4.5 脱S反応

炉内 P_{CO} が LD よりも低いこと、攪拌が最後まで持続することなどのため、当然予期されるように Q-BOP の脱硫能力は大である。Fig. 16 は川鉄千葉のデータ⁴⁾であり、スラグ-メタル間の S 分配比をスラグ塩基度の関数として示している。これより Q-BOP の脱S能は、とくに塩基度が 2.5 以上で LD より格段に優る。Fig. 17 は低S鋼溶製時の溶銑 [S] と吹き止め [S] の関係であり、低S域でもQ-BOPに脱S能のあることが明瞭である。このように、Q-BOP では炉外脱硫剤を削減して炉内での脱硫に切り換えられるので、脱S上のコストダウンは大きい。

吹錬途中の [S] を追跡すると、0.8% [C] 付近で鋼浴 [S] は最小値となり、その後スラグの酸化度の増加につれていつたん復硫し、吹錬後期のスラグの流動性の向上とともに再び [S] は低下する、といった経路を辿る。この前期の脱S反応では明らかに固体 CaO 粉末による直接脱Sが進むようである。

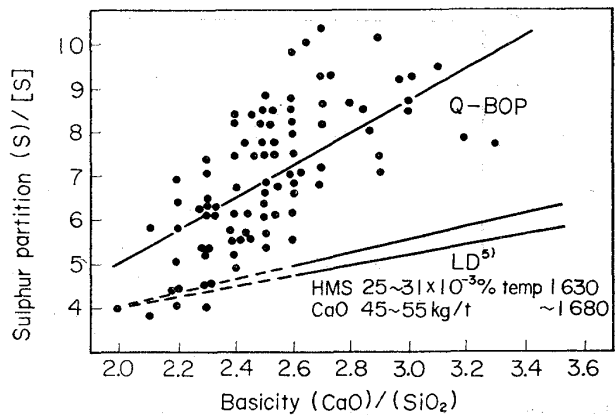


Fig. 16. Influence of basicity on sulphur partition⁴⁾.

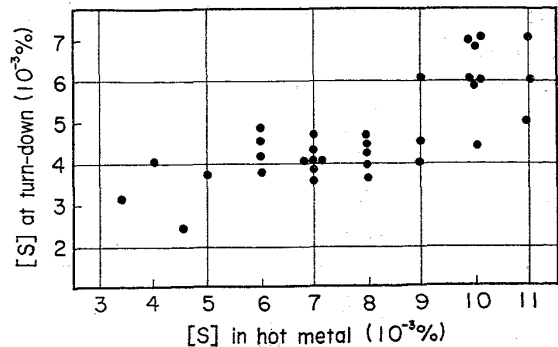


Fig. 17. Hot metal [S] vs. turn-down [S] relation⁴⁾.

前述の Thy-Marcinell における高P鉄吹錬の場合、CaO 原単位が高いためか、脱S能への塩基度の影響は認められていない⁷⁾。脱Pの項で述べた CaO 添加法の異なるA法とB法について、吹き止め時の(S)/[S]をみると、A法が6.3、B法が8.9と、前、後期分割添加のB法が約0.002%だけ低[S]となる。

4.6 ガス成分 [N] および [H]

脱炭後期でも鋼浴の攪拌が持続するので、プロセス・ガスとしての N₂ の使用を控えれば、LD よりも低 N 鋼を得ることができる。その反面、プロセス・ガスとして N₂ を使用すれば窒化鋼の溶製が、精度よくかつ安価にできる。

BROTZMANNら⁸⁾ は吹錬中の [N] の挙動を理論的に検討している。MAXHÜTTE における 60 t OBM の標準的吹錬パターンにおいて、吹錬中の [N] の活量係数 f_N、

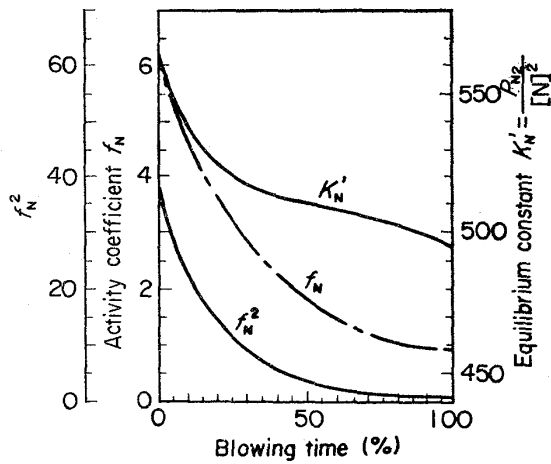


Fig. 18. Progress of the functions f_N, f²_N and K_N' during blowing⁸⁾.

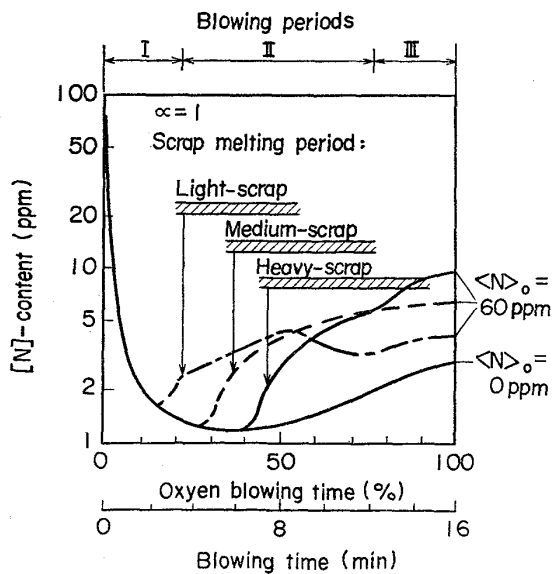


Fig. 19. Influence of the scrap melting period on the [N]-progress.⁸⁾

見かけの平衡定数 K_N' などは Fig. 18 のように変化する。これより脱 [N] 反応は吹錬初期ほど有利に進むことが明らかである。

彼らはOBM/Q-BOPの吹き止め [N] 濃度を次式で与えている。

$$1/[N] = 1/[N]_0 + \theta_G \frac{\alpha K_N f_N^2}{8P} \dots\dots\dots (2)$$

ここに、[N]₀; 初期[N]濃度(%), θ_G; パージガス量 (Nm³/t), K_N=[N]f_N/√P_{N₂} および α; 1 のとき熱力的平衡値を示すパラメータで 0<α≤1.

αを1とおいて理論的に計算した [N] 濃度の変化は Fig. 19 のようで、スクラップの溶解速度が吹き止め、[N] 濃度を左右する。スクラップの全量を鉄鉱石に置き換えて、吹き止めで 8ppm [N] を実際に得ている。

Fig. 20 は GARY 工場の取鍋 [N] を Q-BOP と LD で比較したものであり、Q-BOP の方が低[N]濃度となっている。

Fig. 21 は川鉄千葉の例¹⁾ で、吹き止め時の [C] と [N] 濃度の関係を、LD と対比して示している。とくに低C域で、Q-BOP の [N] 濃度は LD より低い。

つぎに [H] であるが、Q-BOPの場合 [H] は羽口の冷却ガスから、持ち込まれるので LD より高く、Q-

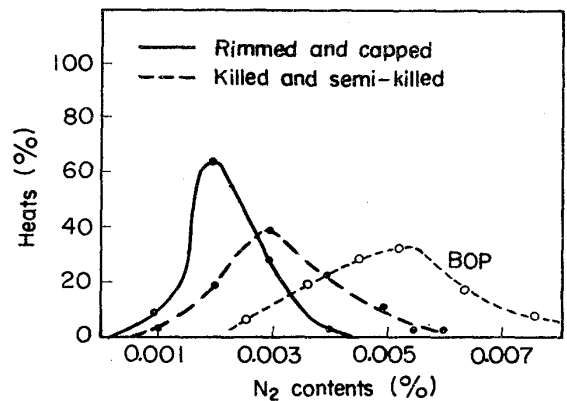


Fig. 20. [N] contents in ladle (200 t Q-BOP at Gary)²⁰⁾.

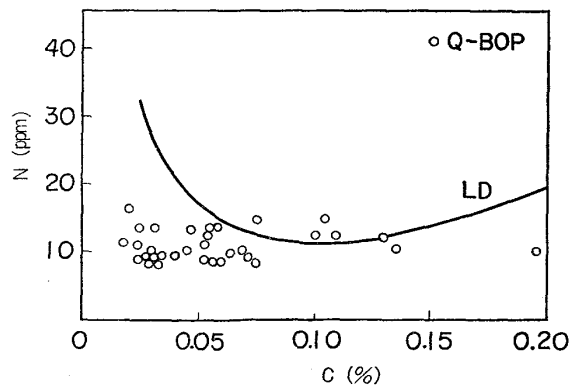


Fig. 21. [C] vs. [N] relationship at turn-down¹⁾.

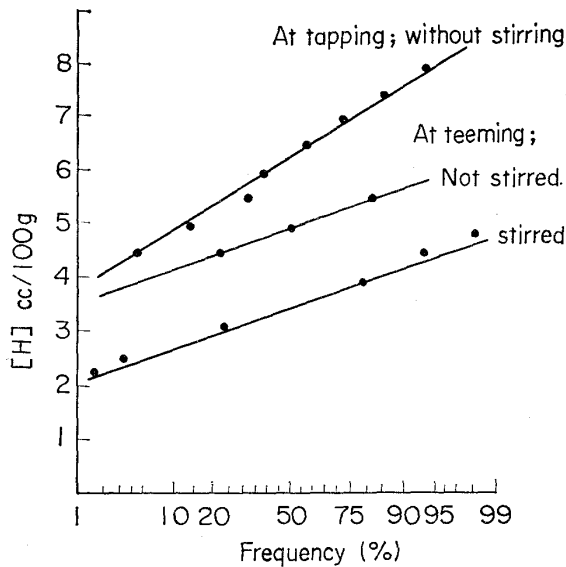


Fig. 22. [H] contents of 0.55%C killed steel in ladle after OBM steelmaking¹⁴⁾.

BOP の最大の欠点といえる。川鉄千葉の例では、LD 法が平均 2.6 ppm であるのに対して Q-BOP では 4.5 ppm と高い¹⁾。

OBM 転炉で高炭素鋼の取鍋 [H] を調査した例が、Fig. 22 であるが¹⁴⁾、これより吹き止め後 N₂ あるいは Ar ガスなどでフラッシングすることにより、[H] 濃度は低下する。FRUEHAN¹⁶⁾は、Ar 気泡中の P_{H₂} と鋼浴 [H] が平衡するとして求まる理論最大脱 [H] 量を計算し、これが South Chicago の 30 t Q-BOP の実験値とよく合うとして、Fig. 23 を示している。川鉄千葉でも 1.6 Nm³/t の Ar ガスを使用して、平均して 4.5 ppm [H] から 2.5 ppm [H] を得ているが、この実績も Fruehan と同じ考え方ではば整理できる。

5. スロッピング、スピットングなど

Thy-Marcinelle の経験によれば、スロッピングにおよぼす羽口数の影響は著しく強く、12本の傾斜羽口を使用していた頃には、炉ロスカルが操業上大きなトラブルであつたが、18本の直立羽口で同量の O₂ を吹き込むようになって以来、これは一挙に解決したと述べている⁷⁾。これは最初に羽口設計を誤つた例といえる。

一般的に羽口 1 本当りのガス流量を増していくと、平行管内の等エントロピー流れを仮定して解かれるガス流速は、やがては羽口出口で音速に達し飽和する。それ以後は羽口 1 本当りのガス流量の増加はガスの圧力増加を促し、スピットングの危険度を増すのである。したがって、羽口の設計は、この辺りの事情も考慮して十分慎重に行なわねばならない。

川鉄千葉の場合、18本および22本羽口ともにスロッピングは皆無であり、当初の羽口設計が適確であつたといえよう。この他、LD と異なり 2000°C を越す火点が

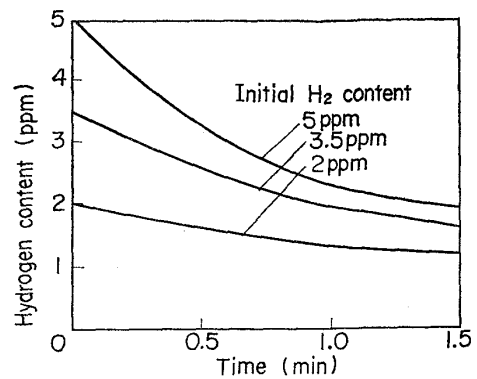


Fig. 23. Hydrogen removal at 1600°C in a 30 t Q-BOP using 54 Nm³/min argon¹⁶⁾.

炉底部にあり、そこで一旦蒸発した Fe 分も、気泡の浮上と共に鋼浴中に戻されるため、排ガス中に逸出するダスト量が少ない。すなわち、LD の 7~10 kg/t に対し 2.5~4 kg/t が千葉 Q-BOP のダスト量である⁷⁾。以上の効果が Q-BOP の高い鉄源歩止りを支える柱の一つとなつている。

川鉄千葉の Q-BOP では、羽口冷却ガスとして燃料を添加しているとはいうものの、OG ガス回収率の世界記録を塗り変えつつある (78年6月に 248×10³kcal/t 良塊) が、これもスロッピング、スピットングがないためにスカートと炉口の間隔を、LD に比較して著しくせまく保つことができたことによつている。

5. LD との本質的な違い

LD, Q-BOP を問わず酸素製鋼炉の特徴は、反応物質である酸素ガス自体が、反応装置にとって重要な攪拌エネルギーの運び手でもあることといえる。攪拌が強ければ、鋼浴中の炭素の優先酸化が保証されるし、逆に攪拌が弱ければ、酸素は鋼浴内で局在して、鉄の酸化を引起し、その結果脱 P を促進するといった経過を辿る。

上述の観点から、C の優先酸化の度合を示すパラメータ、ISCO (Index for Selective Carbon Oxydation) 値が提案されている⁸⁾。

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

ここに、Q_{O₂} は送酸素速度 (Nm³/min)、Q_d は Ar などの稀釈ガス流量 (Nm³/min) で、羽口冷却ガスがプロパンの場合、その 4 倍の値をとる、W は溶鋼量 (t)、および τ は浴の均一混合時間である。

(3) 式右辺の第 1 項は炉内 P_{CO} を与え、これが小さいほど C の優先酸化が保証される。また第 2 項は酸素流量、Q_{O₂} (Nm³/min) に対して溶鋼流量、W/τ (t/min) が対向し、これらの比が小さいほど、供給酸素は C により消費されやすく、C の優先酸化が保証される。

溶鉄の温度、成分などの装入条件が同じ場合を考えると、ISCO 値が小さいほど、C の優先酸化が保証される

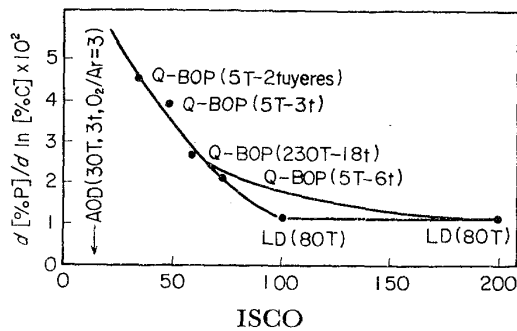


Fig. 24. Interpretation of oxidizing furnaces in terms of ISCO values⁶⁾.

一方、低炭域になつて初めて (FeO) の急増が起り、これに伴つて脱 P が急速に進むであろう。すなわち吹錬後期において、 $d[\%P]/d \log [\%C]$ なる勾配を求めれば、それが ISCO 値とよく対応するはずである。Fig. 24 は川鉄千葉の 230 t 炉、5 t 実験炉で得られたデータをもとに、本関係をプロットしたものであり、図には参考のため、AOD における ISCO 値も示されている。

これより Q-BOP の特徴を一言で表わせば、LD より強攪拌、強還元であり、その結果、ISCO 値が小さく、脱炭精錬器として優れている反面、脱 P はやや遅れて進行するといえる。ただし、先に脱 P 反応の項で述べたように、CaO 粉末吹き込みの効果は、0.4% P といった高 [P] 濃度の溶銑でとくに顕著となるが、そのような効果を考えぬ場合のことである。

6. 耐火物原単位、その他

川鉄千葉の Q-BOP が稼動するまでは、炉底耐火物の寿命が LD 法に比較して低いことが、最大の問題であつた。しかし川鉄の Q-BOP は稼動直後から着実に炉底寿命の世界記録を更新し始めた。現在、炉底寿命は、1646回をもマークし、現時点ですでに LD と遜色ないところまで到達したといえる¹⁷⁾。これは炉底耐火物の開発、施工方法の改善、炉底、羽口近辺の温度解析とそれにもとづく適正プロパン流量の管理、稼動中のメンテナンスと補修技術の向上などの総合効果として実現したもので、今や炉底耐火物原単位は(補修材を含めて) 2kg/t-steel を切っている。

このように耐火物原単位が飛躍的に向上した今一つの理由として忘れてならないのは、Q-BOP の吹錬制御性がきわめて優れていることである。すなわち、Q-BOP 炉内の均一性からセンサーランスによる中間サンプルの代表性が LD より遙かに高く、低炭素鋼の C, T 同時的中率は 90% 以上をマークしており、これが炉寿命延長に寄与する QDT 法 (Quick & Direct Tap; センサーランスの中間サンプルで吹き止めを決め、サンプルを採らずに直ちに鋼する方法) の開発へと結びついたのである⁸⁾。

川鉄千葉の Q-BOP では底吹き転炉に適した脱炭昇

温式の開発、センサーランスの開発などをベースに、上記 QDT 法も包含したシステム、SMART (System for Measuring and Attaining the Refining Target) を確立しているが⁹⁾、これは、LD と異なりランス高さ、スラグ層を通しての酸素供給など、ヒート間で変動しやすい変数がなく、再現性がきわめて高いという Q-BOP の特長を根底に成り立っている。

7. 結 言

以上述べてきたように、Q-BOP のメリットである、① 鉄源歩止りの向上、② Fe-Mn, Al など合金鉄の削減、③ 焼石灰の削減、④ 脱 S 剤の削減、⑤ O₂ 原単位の削減および ⑥ OG ガス回収率向上などの合計が、Q-BOP のデメリット、① プロパン消費、② Ar, N₂ などのプロセスガス消費などの合計を上回り、Q-BOP は LD より優位であるという評価も固まりつつある。

とくに今後の転炉スラグのリサイクリング、あるいは原料事情の悪化による溶銑 P の上昇に対処する場合、Q-BOP の経済性は益々強まるのではなからうか。

文 献

- 1) 川名昌志: 鉄鋼界, (1978), 1, pp. 56 ~ 61
- 2) 川名昌志, 岡崎有登, 永井 潤, 香月淳一, 田中貞治, 駒村宏一, 山田純夫: 鉄と鋼, 64 (1978), S. 165
- 3) 川名昌志, 岡崎有登, 永井 潤, 数土丈夫, 馬田一, 中西恭二: 鉄と鋼, 64 (1978), S. 166
- 4) 川名昌志, 岡崎有登, 永井 潤, 数土丈夫, 朝穂隆一, 鈴木健一郎: 鉄と鋼, 64 (1978), S. 167
- 5) 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), S. 168
- 6) 中西恭二, 加藤嘉英, 鈴木健一郎, 香月淳一: 鉄と鋼, 64 (1978), S. 169
- 7) J. R. CLAES and P. H. DAUBY: I & SM (1978) May, pp. 17-22
- 8) K. BROTMANN and D. PAPAMANTELLOS: I & SM (1978) May, p. 23~27
- 9) D. H. HUFFLE and L. W. FRECH: I & SM (1977) May, pp. 24-29
- 10) 江島彬夫, 三本木貢治: 日本金属学会報, 17 (1978), No.6, pp. 483~489
- 11) J. PEARCE: Iron Steel Eng., 53 (1976), March 27
- 12) 土居襄編: 転炉製鋼法, (1966), p. 109 [日刊工業新聞社]
- 13) E. T. TURKDOGAN: Trans. Inst. Min. Met., 83 (1974), C 67
- 14) J. CLAES, J. DEFAYS, and P. DAUBY: Met. Rept. CRM, No. 41 (1974), Dec., p. 13
- 15) 吉井正孝, 一戸正良: 鉄と鋼, 56 (1970), No.2, p. 178
- 16) R. J. FRUEHAN: Ironmaking and Steelmaking, (1976) No. 3, p. 33
- 17) 永井 潤, 数土丈夫, 香月淳一, 馬田 一, 石坂邦彦: 鉄と鋼, 64 (1978), S. 139
- 18) 三枝 誠, 永井 潤, 数土丈夫, 山田純夫: 鉄と鋼, 64 (1978), S.
- 19) 永井 潤, 数土丈夫, 山田純夫, 森 淳, 中西恭二, 別所永康, 土田 剛: 鉄と鋼: 64 (1978), S.
- 20) K. BROTMANN, W. T. LANKFORD Jr. and A. H. BRISSE: Ironmaking & Steelmaking, (1976), 5, p. 259