

© 1982 ISIJ

底吹き転炉吹錬における脱燐挙動と溶銑脱燐法の開発 技術報告

野崎 努*・中西 恭二*²・森下 仁*³山田 純夫*³・数土 文夫*³

Characteristics of Dephosphorization in a Bottom Blown Converter and Its Application to the Preliminary Treatment of Hot Metal

Tsutomu NOZAKI, Kyoji NAKANISHI, Hitoshi MORISHITA,
Sumio YAMADA, and Fumio SUDO

Synopsis :

Dephosphorization during blowing in a 5 ton bottom blown converter has been studied. The effects of lime size and injection pattern on dephosphorization have also been investigated in a 230 ton Q-BOP. The phosphorus partition suitable for the bottom blown converter has been obtained by the regression analysis of experimental data.

Injection of lime and premelt powder mixtures into the 5 t test Q-BOP has revealed that dephosphorization proceeds largely in the early stage of blowing. This characteristic has been utilized to develop a new and effective dephosphorization pretreatment of hot metal in Q-BOP. This new technique has enabled us to dephosphorize hot metal from ca. 0.14% to 0.010%P with a consumption of 20 kg CaO/tpig and 3 kg CaF₂/t-pig within 2 to 4 minutes of oxygen blowing. The ultra-low phosphorus and sulfur steels have been successfully produced by the newly developed technique.

1. 緒 言

鋼の精錬においては、副原料原単位に強く依存する脱燐の問題解決が重要である。底吹き転炉は、上吹き転炉のようにハードあるいはソフト・ブローのようなランス高さの変更による吹錬の自由度を取りにくく、常に上吹き法のハード・ブロー的な吹錬になるため、脱燐は上吹き法に比べ困難であろうと推測された。

そこで、5 t 多目的試験転炉を用いて、種々の合成フラックスを内管を流れる酸素気流で搬送し、脱燐への影響を調査した。

また、この研究から炭素濃度が十分高いにもかかわらず脱燐が進む現象を見出したので、これに注目し溶銑予備処理の可能性を検討した。現在、一貫製鉄所において溶銑予備処理技術が注目されるのは、製鋼スラグの再利用に伴う高炉溶銑中の燐濃度の上昇、造滓剤使用量が増加することによる吹錬の不安定化、および低燐、極低燐鋼需要の漸増に基づいている。

この問題を解決すべく Na₂CO₃ を利用する溶銑の予

備処理法がここ数年注目されて来た^{1)~4)}。しかし、Na₂CO₃ 法は耐火物溶損が激しく、加えて単価が高いため回収が必須であるなどいくつかの問題点がある。

一方、生石灰を用いて溶銑脱燐を行う試みは従来からあつたが⁵⁾、反応時間が長く、反応効率も悪い点で実用化が困難と思われていた。このような欠点は反応容器やメタルとスラグの接触を良好にするための攪拌力が不足していることに起因している。そこで、攪拌力にまさる底吹き転炉を用いる CaO 系フラックスによる溶銑脱燐法を確立した経緯について報告する。

なお、CaO 系フラックス吹き込みによる脱燐の反応機構については別報⁶⁾で詳述する。

2. 5 t 試験転炉吹錬時の燐の挙動

2.1 実験方法

炉底羽口を2~6本有する5 t 試験転炉に溶銑を約5 t 装入し、スクラップや冷銑を用いずに、全溶銑による吹錬を行つた。吹錬時の酸素はすべて炉底の2重管羽口の内管から送り、その量は約23 Nm³/minであつた。

昭和55年10月本会講演大会にて発表 昭和56年9月11日受付 (Received Sep. 11, 1981)

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

*² 川崎製鉄(株)技術研究所 工博 (Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp.)*³ 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

羽口外管にはプロパンガスを冷却剤として流した。

5t 試験転炉は炉底羽口を通して CaO 微粉を酸素あるいは窒素ガスにより搬送できる設備を有している。

吹錬中の溶鋼，溶滓成分の推移は炉頂部に設置したサンプリング孔から採取したメタルとスラグの分析を行って求め，投入式温度計による測温も実施した。

2.2 5t 試験転炉の燐の挙動

5t 試験転炉の2本羽口の成分挙動は 230t 底吹き転炉の挙動⁷⁾と異なつたため，試験転炉と実炉との対応を良くする必要から，炉底羽口を6本とした。6本羽口の全送酸素量は約 50 Nm³/t-pig であり，しかも所要吹錬時間も 13 min となり，実炉と同様になつた。

Fig. 1 には C, Si, Mn, P, Fe の酸化に寄与した酸素量を全酸素量に対する割合で示す。図から，P の酸化に使われた酸素の割合は Fe の酸化が急激に起こる時期に一致している。底吹き転炉の炉内における脱燐反応は上吹き転炉のそれに比較して遅れ気味に進行することがわかる。

2.3 燐分配

5t 試験転炉および 230t 実炉での脱燐に関して得られた結果を上吹き転炉に関して比較的良く成り立つことが知られている HEALY⁸⁾あるいは BALAJIVA⁹⁾の燐分配式を用いて計算したが，実験値と一致しなかつた。

不一致の原因は両者の式では，スラグ中の T, Fe や T, FeO の寄与が大きいにもかかわらず，底吹き転炉では FeO の生成が上吹き転炉に比較して少ないことによつていと思われた。

吹錬経過の推移は Fig. 1 に見たように，脱燐が顕著な場合，Mn の酸化も大きく，脱 Mn と脱 P は密接な関係にあることが示唆された。このため，Mn の効果を考慮していない HEALY や BALAJIVA の式と底吹き転炉の結果が一致しなかつたと理由づけられる。

そこで，底吹き転炉における脱燐式として(1)式を仮

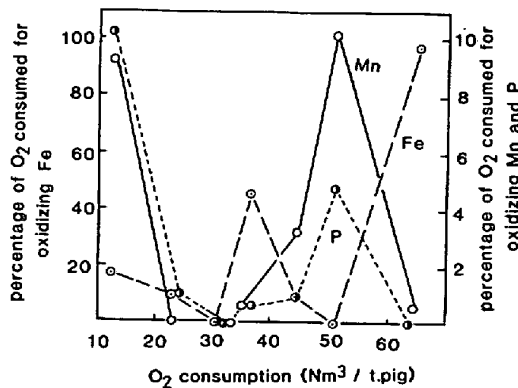


Fig. 1. Distribution of the oxygen consumption to various elements.

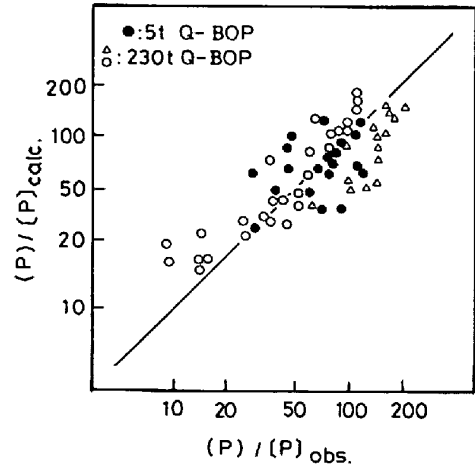


Fig. 2. Relation between estimated and observed phosphorus partitions in a Q-BOP.

定する。

$$aFeO + bMnO + cCaO + dP = P_dO_{a+b} + (CaO)_c + bMn + aFe \dots\dots\dots (1)$$

すなわち，脱燐には FeO, CaO のほかに Mn と MnO と考慮する必要があると判断し，5t および 230t の実験データから回帰によつて，これらの燐分配への寄与を求めた。Fig. 2 にはこれらの結果のほかに，230t 実炉で燐を付加した溶銹 (P ≈ 0.3%) の脱燐実験の結果も△印で示す。

HEALY の式に類似させた回帰式は(2)式で示される。

$$\log \frac{(P)}{[P]} = \frac{10773}{T} + 0.655 \log(\%T.Fe) + 3.273 \log(\%CaO) + 1.133 \log(\%MnO) - 0.822 \log[\%Mn] - 11.362 \dots\dots\dots (2)$$

ここで，Tは絶対温度であり，() はスラグ中，[] はメタル中の各成分の重量 % である。

(2)式は独立変数のみを指定したが，その符号が(1)式の反応式と対応している。

2.4 燐分配式から見た CaO 系フラックス組成

(2)式を用いて，通常操業の平均的な [%Mn] と (%MnO) を与え，CaO/SiO₂ 比を一定にした場合の FeO による燐分配 ((P)/[P]) の変化が計算できる。このようにして計算すると，FeO 濃度が 10~20% 近傍で燐分配が最も進むことが予想される。また，CaO/SiO₂ 別による燐分配から，塩基度が 3 から 4 に変化すれば，燐分配が 20% 強良くなる。CaO 量の確保が必要であることがわかる。

前述したように，底吹き転炉の大きな特徴の一つに，フラックスを炉底羽口を通して，溶融鉄浴中へ吹き込む

ことができることがある。

炉底から CaO のみを吹き込んだ場合は、底吹き転炉の FeO 生成が遅いため、吹錬中期の滓化は促進されない。そこで、主に酸素ガスと同時に吹き込むフラックスの脱磷への影響について調べる。吹き込み割合は約 4 kg flux/Nm³O₂ の切り出しであり、脱炭最盛期と脱炭終了時の 2 回分割の吹き込みパターンとした。用いたフラックスは滓化を促進するため、一度溶融したスラグを混合することが良いであろうと考え、電気炉還元期スラグや転炉スラグを微粉にして、生石灰と混合し、CaO 主体のフラックスを作製した。このとき、前述の磷分配式から得られた知見を基にして、フラックス組成は約 80%CaO に約 20% の転炉あるいは電気炉からリサイクルしたスラグを混合した。

電気炉および転炉のリサイクル・スラグを含有したフラックスを炉底羽口から吹き込んだ場合の [%C] に伴う [%P] の変化を Fig. 3 に示す。図中に引用した 2 本羽口 5 t 試験転炉の [P] 推移よりも、本実験結果は下方に位置している。従来の底吹き転炉よりも脱磷が良いばかりでなく、80 t 上吹き転炉の実績よりも高炭素域で脱磷が顕著に進んでいることがわかる。すなわち、底吹き転炉は上吹き転炉のような過酸化状態にならないため、脱磷には不利な製鋼法と予想されたが、本実験で用いた滓化性の良いスラグを混入した CaO 系フラックスを炉底羽口から吹き込むことによつて、高炭素域でも上吹き転炉を凌駕する脱磷能を有することがわかる。

3. 230 t 底吹き転炉における脱磷の改善

3.1 フラックス吹き込みパターン

吹錬中のどの時期にフラックスを吹き込むかは、スラグの滓化に影響される脱磷にとつて重要である。そこで、Fig. 4 に示すような 2 種類の吹き込みパターンを考えた。一つは吹錬開始とともに全量の CaO フラック

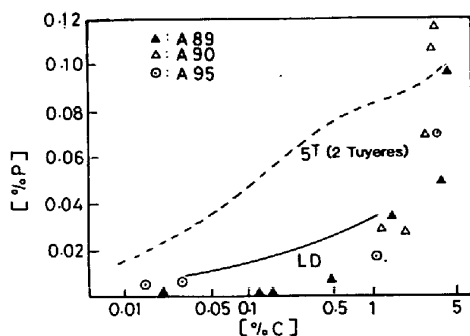


Fig. 3. Effect of recycling slags on the dephosphorization in a 5ton Q-BOP.

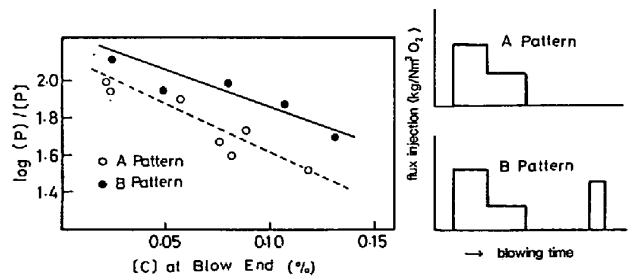


Fig. 4. Effect of the flux injection pattern on the phosphorus partition.

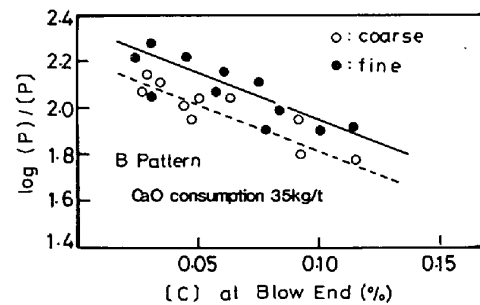


Fig. 5. Effect of the lime powder size on the phosphorus partition.

スを添加する方法 (A パターン) であり、今一つは吹錬前半はもとより後期の鉄酸化期にも吹き込みを行う添加方法 (B パターン) である。

この両者の方法による吹き止め時点の磷分配と鋼浴 C の関係を Fig. 4 に示す。吹錬末期にも CaO 系フラックスを吹き込む B パターンの方が磷分配が高い。吹錬末期の鉄酸化期に入ると鋼浴中の P も酸化され、この磷酸化物固定剤として、後半に吹き込まれる CaO が有効に働くためと考えられる。

3.2 CaO 系フラックスの粒度

脱磷については B パターンの方が良かったので、さらに反応界面に大きな影響とおよぼすと考えられる CaO 系フラックスの粒度の効果を調べた。粒度を変えた 2 種類の CaO 系フラックス (平均粒径比 1:1.5) を吹き込み、吹き止め時の磷分配と鋼浴 C の関係を調べ、Fig. 5 にその結果を示す。図から明らかなように、細粒の方が磷分配が高く、CaO の比表面積増大の効果が認められた。

以上の調査から、現在は可能な限り細粒にした CaO 系フラックスを B パターンの吹き込み方法を用いて吹錬を行つている。

3.3 溶銑中の磷濃度の影響

底吹き転炉でのスラグ中への鉄の酸化は、鋼浴の攪拌力が強いことにより、上吹き転炉に比較して低値になる。両者について、スラグ中 T、Fe と磷分配を調べる

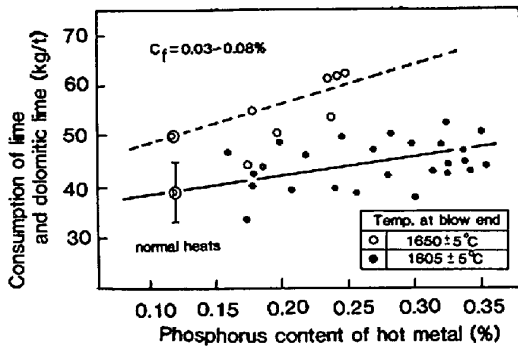


Fig. 6. CaO consumption in a 230ton Q-BOP based upon the phosphorus content in hot metals.

と、同一 T. Fe 濃度での磷分配は底吹き転炉の方が高い。

磷分配値が高いことは、比較的高い磷濃度の溶銑の処理に有利と考えられるので、Fe-P を添加して、最高磷濃度 0.35% までの溶銑を用いて吹錬を行つた。Fig. 6 には、溶銑 Si が 0.30~0.40% で、吹き止めCレベル C_f を 0.03~0.08%，吹き止め磷濃度 P_f を 0.011~0.018% に吹錬したときの溶銑初期磷濃度 P_i と CaO 系フラックスの原単位の関係を示す。溶銑磷 P_i が 0.01% 上昇しても、吹き止め温度が 1605°C では CaO 原単位をわずか 0.3 kg/t 増加すれば対処できることがわかる。

他方、上吹き転炉で溶銑磷が 0.01% 増加すれば、CaO の原単位を約 1.2 kg/t 増加させる必要がある¹⁰⁾。したがつて、底吹き転炉吹錬では溶銑磷濃度が多少上昇しても、上吹き転炉より少ない CaO 原単位で炉内脱磷が可能である。

現在、これらの結果から、上吹き転炉で生成した高 FeO 濃度のスラグを底吹き転炉に直結する高炉へ、焼結鉱の原料として積極的にリターンしている¹¹⁾。

3.4 脱磷におよぼす羽口本数の影響

現在、230 t 底吹き転炉の炉底に配置する羽口本数は 18 本と 22 本の 2 種類である。種々の実験を行つた結果、Fig. 7 に示すように、22 本羽口炉底を用いた方が、脱磷が良いという傾向が認められた。そこで、羽口径と羽口本数の脱磷へおよぼす影響を考察する。

18 本羽口の全断面積 S_{18} は 22 本羽口のそれ S_{22} よりも 1.036 倍大きい。したがつて、同一酸素流量で吹錬する場合は、気体酸素の線速度は逆に、18 本羽口よりも 22 本羽口の方が大きくなる。線速度が増すと浮上時間が短くなるため、羽口先端近傍で生成するであろう FeO や P_2O_5 はメタル浴中の C によつて還元されにくくなるため、羽口断面積の小さい方が脱磷に有利と考え

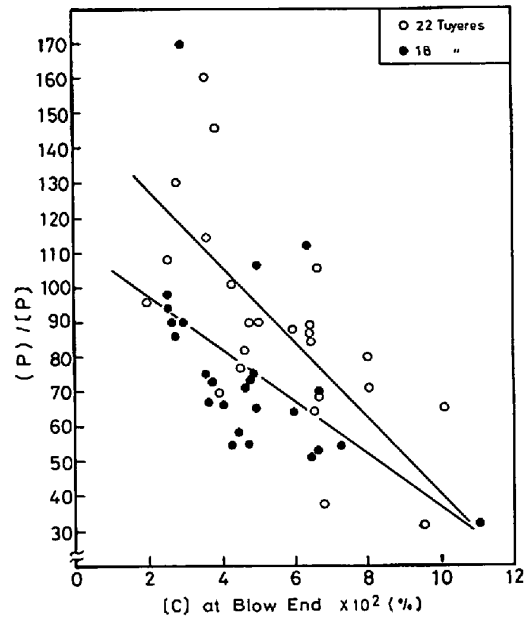


Fig. 7. Effect of the number of bottom tuyere on the phosphorus partition in a 230ton Q-BOP.

られる。

今一つは、各酸化精錬炉の指標となる C の選択酸化指数 (ISCO)¹²⁾ を用いて検討する。ISCO 値が大になるほど上吹き転炉のように鉄酸化が起りやすく、逆に小さければ炉内酸化反応は AOD に類似の挙動となる。ここで、ISCO は (3) 式で定義される。

$$ISCO = \left(\frac{2Q_{O_2}}{2Q_{O_2} + 4Q_{Pr}} \right) \left(\frac{Q_{O_2}}{W/\tau} \right) \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式中で、 Q_{O_2} は吹き込み酸素流量 (Nm³/min)、 Q_{Pr} は羽口冷却用プロパン・ガス流量 (Nm³/min)、 W は溶鋼重量 (t)、 τ は鋼浴の均一混合時間 (s) である。 τ は (4) 式で与えられる¹³⁾。

$$\tau = 800 \cdot \epsilon^{-0.4} N^{1/3} \dots\dots\dots (4)$$

N は羽口本数であり、 ϵ は攪拌エネルギー密度の供給速度 (W/t) である¹³⁾。

18 本および 22 本羽口のどちらの場合でも酸素流量 Q_{O_2} も、溶鋼量 W も等しいことから、 ϵ の値は同一となる。したがつて、18 本と 22 本羽口の ISCO の比は (4) 式から羽口本数 N の 1/3 乗の比となる。

$$\frac{ISCO(22本)}{ISCO(18本)} = \frac{22^{1/3}}{18^{1/3}} = 1.07 \dots\dots\dots (5)$$

(5) 式より、22 本の方が ISCO 値が 7% 大きくなり、脱磷に有利となる。このように、線速度および C の選択酸化指数からも、小さい羽口径で羽口本数が多いほど脱磷には有利であると推定される。

4. 底吹き転炉を用いる溶銑脱磷法の開発

高炭素域での脱磷が底吹き転炉では不利とされたが、

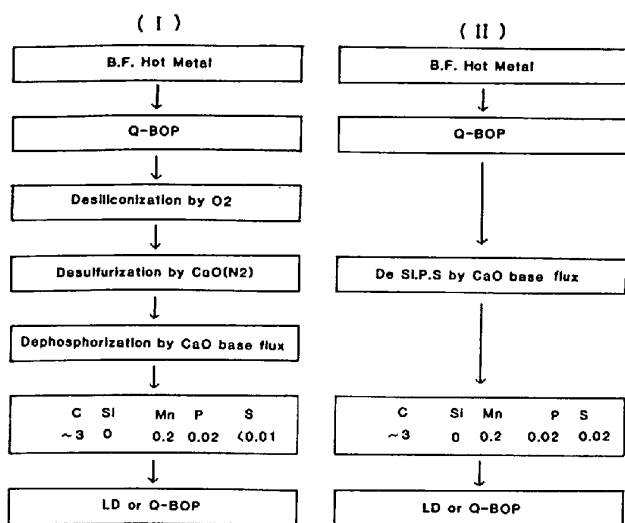


Fig. 8. Schemes of preliminary treatment of hot metals.

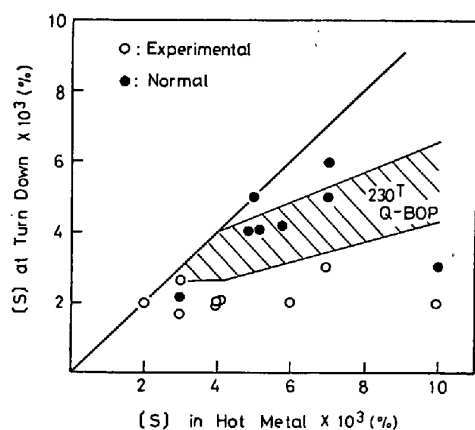


Fig. 9. [S] at turn down obtained by the (I) method in Fig. 9.

CaO 系の脱磷フラックスを炉底から吹き込んだ結果は、Fig. 3 に見たように、上吹き転炉を上回る脱磷能を示すことがわかった。さらに溶銑中C濃度が2~4%での脱磷も顕著に進むことが見出された。以上のことから、Fig. 8 に示すような底吹き転炉を利用するCaO系フラックスによる溶銑予備処理法を検討した。

5t 試験転炉では N₂ ガスで CaO を搬送できるので、脱硫も考慮すると (I) 法が実験できる。230t の実炉を用いて溶銑予備処理を行う場合には Fig. 8-(II) のプロセスが適当と考えた。

4.1 5t 試験転炉による予備実験

Fig. 3 の結果から、[C]=3% での [P] を求めると 0.01~0.06% となり、脱磷率として 57~92% が得られている。

このように脱磷に関しては、かなり良い結果を得る可能性が出て来たが、Na₂CO₃ を用いる溶銑予備処理法に

比較して、CaO 系フラックスに関しては脱硫についての問題が残る。

そこで、前述の Fig. 8-(I) 法による脱硫実験を行い¹⁴⁾、Fig. 9 にその結果を示す。5t 試験転炉での通常操業に比較して N₂ ガスによる CaO 吹き込みは脱硫が安定して良い。加えて、230t 底吹き転炉の実績値よりも低値となつている。したがって、底吹き転炉の酸素吹錬前に N₂ による CaO 系フラックスの吹き込みが可能であれば、低硫鋼を望む場合、(I) 法は極めて有効な方法であることがわかった。

5. 230t 底吹き転炉による溶銑脱磷法の確立

5.1 溶銑予備処理法の開発

従来から生石灰を用いる脱磷は、生石灰を滓化し、高い酸素ポテンシャルを与えるため酸化鉄の共存を利用している。酸化鉄はミルスケールや気体酸素による鉄浴の酸化により供給されるが、これらによる滓化には限度があり、さらに滓化を進めるには、多量の融点降下剤の使用あるいはスラグを低塩基度にせざるを得ないという欠点があつた。しかし、この欠点は、底吹き転炉の利点、すなわち粉体吹き込み機能と強攪拌により解決できると考えた。

底吹き転炉を利用する CaO 系フラックスによる溶銑予備処理プロセスの概略を Fig. 10 に示す。本処理法はソーダ灰脱磷法のフラックス原単位と同程度の 23 kg/t-pig の CaO-CaF₂ で済み、脱磷率は 90% 以上、脱硫率も約 50% が得られる。また、本処理法では、スラグ中の T. Fe が 4% 程度と低値である。

このプロセスで低磷鋼を溶製する場合に、従来の2回吹錬法よりまさる点は(1)予備脱磷吹錬における生石灰原単位が約 20 kg/t と少なく、(2)脱磷処理は 2~4

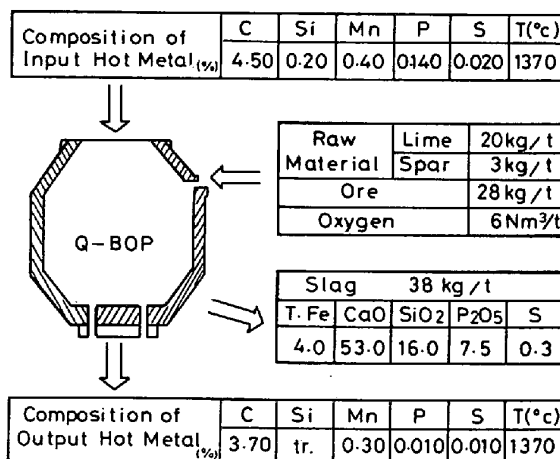


Fig. 10. Outline of the preliminary treatment of hot metals by use of Q-BOP.

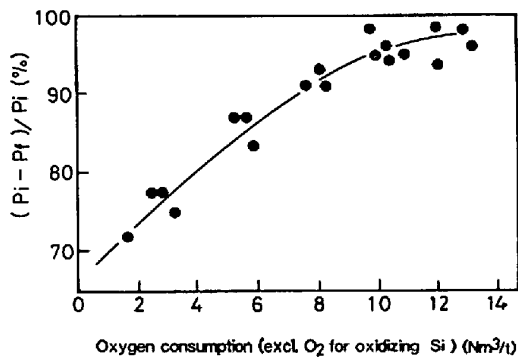


Fig. 11. Relation between the dephosphorization ratio and the oxygen consumption.

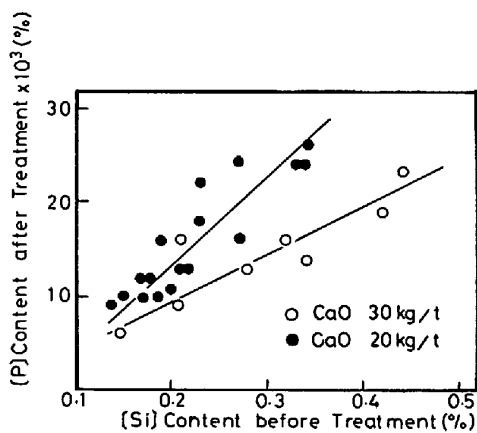


Fig. 12. Effect of Si content in hot metals before the treatment on the dephosphorization.

minのきわめて短時間の反応であり、(3)脱磷処理鉄に対しては実際上スラグ量が極少で脱炭のみを目的とする吹錬を行う、にある。

5.2 溶鉄脱磷におよぼす諸要因

本処理法における酸素消費量と脱磷の関係は Fig. 11 に示すように、酸素使用量の増加に伴い、脱磷率が向上している。脱 Si のために消費した酸素を除いて、10 Nm³/t の消費酸素量で脱磷率が約 95% となる。

鉄中 Si 濃度が高ければ、脱磷に先行して脱 Si が起こる。処理前 Si が溶鉄脱磷におよぼす影響を Fig. 12 に示す。ソーダ灰による脱磷法²⁾と全く同様に、溶鉄中 Si 濃度が低くかつ処理する溶鉄の温度も低いほど脱磷反応が促進され、到達 [P] が低値となる。

螢石の添加効果について Fig. 13 に示す。スラグ中の F の増大に伴いスラグとメタル間の磷の分配は上昇する。しかし、Fig. 14 に見られるようにスラグ中 F の増大に伴いトップ・スラグ中の T・Fe が減少している。すなわち、本処理法では上吹き転炉法と言われる滓化とは無関係に、吹き込まれる CaO 系フラックスが浮上過程で溶鉄中の磷と反応していることが示唆される。この反応機構については別報⁶⁾で考察する。

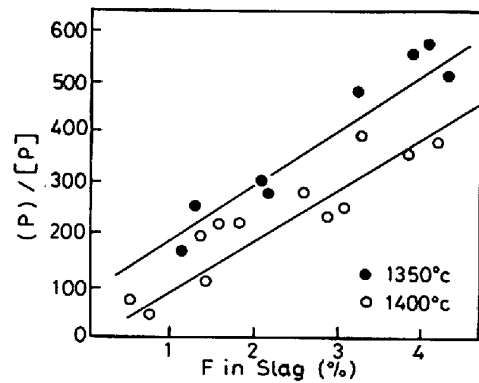


Fig. 13. Effect of F in slag on the phosphorus partition.

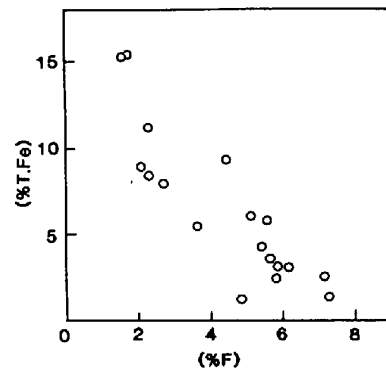


Fig. 14. Relation between T·Fe and F in top slags.

5.3 溶鉄予備処理法による極低磷鋼の製造

230 t 底吹き転炉で予備処理した溶鉄を上吹き転炉に装入し、脱炭吹錬を行った。極低磷・極低硫鋼を目標にする場合は、上吹き転炉での CaO 原単位は 50~55 kg/t とした。前ヒートのスラグの影響が大きいので、極低磷鋼吹錬前は炉壁保護のためのスラグコーティングは行わなかった。脱磷溶鉄を用いた本実験では、出鋼磷は Fig. 15 に示すように 15~35 ppm となり、従来の 2 回吹錬法やダブル・スラグ法の 30~70 ppm に比べて、極低磷鋼が容易に溶製できる。なお、本実験で生成するスラグ量は CaO バランスから 90 kg/t 程度と推定された。

このプロセスを 9%Ni 鋼や 60 kgf/mm² 級調質鋼の精錬に適用した結果、Table 1 に示すように 19~24 ppm の極低磷鋼を得た。また、このときの S 値は 24~40 ppm であつた。

底吹き転炉を利用する溶鉄予備処理法の確立により、安価でかつ容易に極低磷鋼を製造することができるようになった。

6. 結 言

5t 多目的試験転炉を用いて、底吹き転炉の脱磷にお

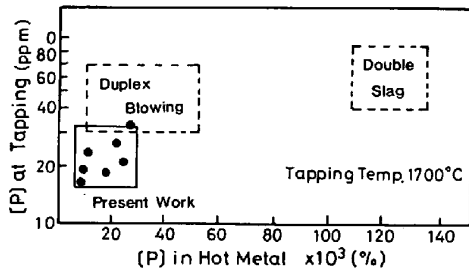


Fig. 15. Relation between phosphorus contents in hot metals and at the blow end for various methods.

Table 1. Examples of the composition of ultra low phosphorus steel obtained by the present method.

Steel Grade	Chemical Composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	V
9% Ni	0.16	0.25	0.58	0.0019	0.0024	9.06	0.01	—
SM 58 Q	0.15	0.26	1.32	0.0024	0.0040	0.50	0.05	0.039

よばずフラックス組成の影響を調べた。また、230 t 底吹き転炉における生石灰粒度や吹き込みパターンの燐分配におよぼす影響を調べ、底吹き転炉の弱点と言われた脱燐の問題を解決した。

さらに、上吹き転炉では良く成立した従来の燐分配式を用いても、底吹き転炉の脱燐挙動を十分説明できないので、底吹き転炉に適用できる燐分配式を操業データの回帰分析により求めた。

以上のように、5 t 試験転炉および 230 t 底吹き転炉の脱燐挙動を検討し、生石灰による溶銑予備処理を底吹き転炉を用いて行うプロセスとして確立した。このプロ

セスが従来の 2 回吹錬法と異なる点は、(1) 予備脱燐吹錬における生石灰原単位が約 20 kg/t と少なく、(2) 酸素吹錬時間も 2~4 min と短い、(3) 脱燐処理後の溶銑を用いれば実際上スラグ量が極少で脱炭のみを目的とする吹錬ができる、にある。

この方法では生石灰を酸素気流中で炉底羽口から吹き込み、初期燐濃度 $P_i = 0.140\%$ から、処理終了後の燐濃度 P_f を 0.010% 以下と脱燐率 90% 以上にでき、かつ脱硫率も 50% にできた。

文 献

- 1) 森谷尚玄, 藤井正信: 日新製鋼技報 (1979) 41 p. 1
- 2) 井上 亮, 水渡英昭: 鉄と鋼, 65 (1979), S 217
- 3) 平原弘章, 丸川雄浄, 姉崎正治, 城田良康: 鉄と鋼, 64 (1978), S 639
- 4) 山本里見, 梶岡博幸: 鉄と鋼, 65 (1979), S 210
- 5) 佐々木寛太郎, 大喜多義道, 池田隆果, 岡崎 卓松尾 亨, 川見 明: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1801
- 6) 拝田 治, 竹内秀次, 野崎 努, 江見俊彦, 数土 文夫: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1744
- 7) M. SAIGUSA, J. NAGAI, F. SUDO, H. BADA, and S. YAMADA: Ironmaking and Steel-making (1980) 5, p. 242
- 8) G. W. HEALY; JISI, 208 (1970), p. 664
- 9) K. BALAJIVA, P. VAJRAGUPTA; 同上, 155 (1947), p. 563
- 10) 山西逸生, 平原弘章, 戸崎泰之, 平田武行: 鉄と鋼, 64 (1978), S 569
- 11) 古茂田敬一, 江見俊彦, 篠崎義信: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 737
- 12) 中西恭二, 加藤嘉英, 鈴木健一郎, 香月淳一: 鉄と鋼, 64 (1978), S 169
- 13) 中西恭二, 加藤嘉英, 野崎 努, 江見俊彦: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1307