

溶銑予備処理を用いた効率的な量産製鋼 プロセスの確立

© 1990 ISIJ
 技術報告
 //

北村信也*・水上義正*²・金子敏行*³・山本利樹*⁴
 迫村良一*⁵・相田英二*⁶・小野山修平*⁷

Establishment of Steel Making Process with High Productivity and High Efficiency by Use of Hot Metal Pretreatment

Shin-ya KITAMURA, *Yoshimasa* MIZUKAMI, *Toshiyuki* KANEKO, *Toshiki* YAMAMOTO,
Ryouichi SAKOMURA, *Eiji* AIDA and *Shuhei* ONOYAMA

Synopsis :

In Nippon Steel Corporation, various types of hot metal pretreatment processes were developed to fit in the condition of each works. In Kimitsu and Yawata Works, simultaneous dephosphorization and desulfurization treatment by lime base flux injection with torpedo car has been put into practical use. In Oita Works, this treatment was modified to make high productivity by high rate injection with snorkel immersed ladle. In Nagoya Works, by use of top-and-bottom blowing converter, highly productive simultaneous dephosphorization and desiliconization treatment was developed.

By the use of coupled reaction model, based on equilibrium relation at interface and mass transfer equations of each element, the characteristics of these processes were analysed. It was clarified that about the dependence of the efficiency of CaO and oxygen for dephosphorization on the ratio of CaO to oxygen content in flux, the tendency of calculation based on small scale experiment was in good agreement with that of industrial values. The differences among each treatment type were caused only by the difference of hot metal composition.

In addition, some new blowing methods of converter by the use of dephosphorized hot metal were introduced.

Key words : hot metal pretreatment; top-and-bottom blowing converter; dephosphorization; mass transfer equation; high productivity; high efficiency.

1. 緒 言

近年、溶銑の全量を処理することが可能なプロセスにまで発展した溶銑予備処理技術は、転炉精錬において、生石灰原単位やフェロマンガ合金原単位の低減、脱炭時間の短縮、スラグ改質による溶鋼の高清浄化などを可能とし、現在では、生産性、操業性、品質の確保といった観点から、精錬における基幹プロセスとなっている。

この溶銑予備処理技術としては、まず、フラックスインジェクションによる溶銑脱 S 技術が開発され¹⁾、次い

で、転炉でのスラグミニマム精錬を目的とした、溶銑脱 Si 技術が実用化された²⁾。これと前後して、材質特性の厳格化から、低 P 鋼に対する要求が高まり、溶銑を予備脱 P するプロセスの開発が進められた。現在、工業的に実用化されているのは、溶銑の輸送容器であった、溶銑鍋やトーピードカーを反応容器として使い、粉状の生石灰と酸化鉄を溶銑中にインジェクションする方法である³⁾⁴⁾。これは、CaF₂ や CaCl₂ といった造滓剤により、高い (CaO)/(SiO₂) (以後、塩基度と称する) のスラグを有効に反応に利用させるため、低い酸化力でも脱 P

平成 2 年 3 月 9 日受付 (Received Mar. 9, 1990)

* 新日本製鉄(株)八幡技術研究部 (Yawata R & D Lab., Nippon Steel Corp., 1-1 Tobihata Tobata-ku Kitakyushu 804)

*² 新日本製鉄(株)名古屋技術研究部 工博 (Nagoya R & D Lab., Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)大分技術研究室 (Oita R & D Lab., Nippon Steel Corp.)

*⁴ 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp.)

*⁵ 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

*⁶ 新日本製鉄(株)君津製鉄所 (Kimitsu Works, Nippon Steel Corp.)

*⁷ 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)

が進行するという特徴を有しており、C、Fe、Mnの酸化を抑制し、かつ、処理中に脱S反応も進行するという(同時脱P脱S)画期的なプロセスであった。この方法は、高純度鋼の製造を可能としたばかりでなく、製鋼コストの低減をも可能としたが、高炉から出鉄された溶銑の、全量を処理するためには、溶銑温度の低下が大きな問題であり、酸素ガスの使用による改善が進められている。

新日本製鉄においては、各製鉄所ごとに最適な溶銑予備処理方式を採用している。つまり、君津製鉄所と八幡製鉄所においてはトービードカーにより、大分製鉄所においては、ターンテーブル上での溶銑鍋により、それぞれ、同時脱P脱S処理をおこなっており、名古屋製鉄所においては、転炉を利用して、同時脱Si脱P処理をおこなっている。ここでは、これらの各方式の設備、操業、ならびに競合反応モデルによる解析結果から見た特徴を述べ、さらに、予備処理溶銑を用いた効率的な転炉吹錬技術についても概説する。

2. 各種溶銑予備処理方式の概要と特徴

2.1 トービードカー方式

反応容器としてトービードカー(以下、TPCと略す)を用いた溶銑予備処理プロセスは、君津製鉄所と八幡製鉄所において実用化されている。

君津製鉄所における溶銑予備処理プロセスは、1982年に、世界最初の溶銑脱P設備として実用化され⁴⁾、その後、溶銑温度の低下を抑制するための酸素ガスのインジェクションや、フェロマンガ合金使用量の削減を目的としたマンガニ石の利用、といった改善を重ねて

今日に至っている⁵⁾。プロセスフローをFig. 1に示すが、鑄床脱Siと生石灰系フラックスによるTPC脱P脱S処理とを基本とし、低S鋼の場合には、生石灰による脱S処理を、脱Pに先行させて行っている。また、脱Pスラグは鑄床脱Si工程へリターンされ、脱Si処理後に、脱Siスラグとともに排滓されるという特徴があり、鉄、マンガン歩留りの向上や脱Si時の塩基度調整用生石灰費用の削減を可能としている。

一方、八幡製鉄所においては、1983年に低P鋼を対象とした溶銑予備処理設備を設置し⁶⁾、これと、既存のTPC脱S設備とを利用して、1988年に一般鋼を対象とした溶銑脱P設備へと増強している⁷⁾。プロセスフローをFig. 2に示すが、君津製鉄所のプロセスとの主要な相違点は、ランス寿命の延長と、2次燃焼によるいっそうの熱補償を目的として、酸素ガスを水冷ランスから上吹きしている点と、受銑量の増加、及び、受銑後の溶銑温度の確保といった理由により、脱Pスラグを脱Si工程へリターンしていない点、及び、出銑[Si]のばらつきに対処するため、TPCでの調整脱Si処理が可能である点の三つである。

いずれのプロセスにおいても、脱P処理はフラックス中のCaOと酸化剤中の酸素との重量比(以下、CaO/Oと称す)を高くした操業をおこない、低い酸素ポテンシャルと高い塩基度により、同時脱Sや高いマンガン歩留りを可能としている。Fig. 3は、酸化鉄中の酸素重量と重量換算した酸素ガス量の合計に対する酸素ガス量の割合(酸素ガス比と称する)と、脱P処理中の温度降下量との関係を示したものであるが、従来の酸化鉄のみを酸化剤として用いていた場合に比較して、

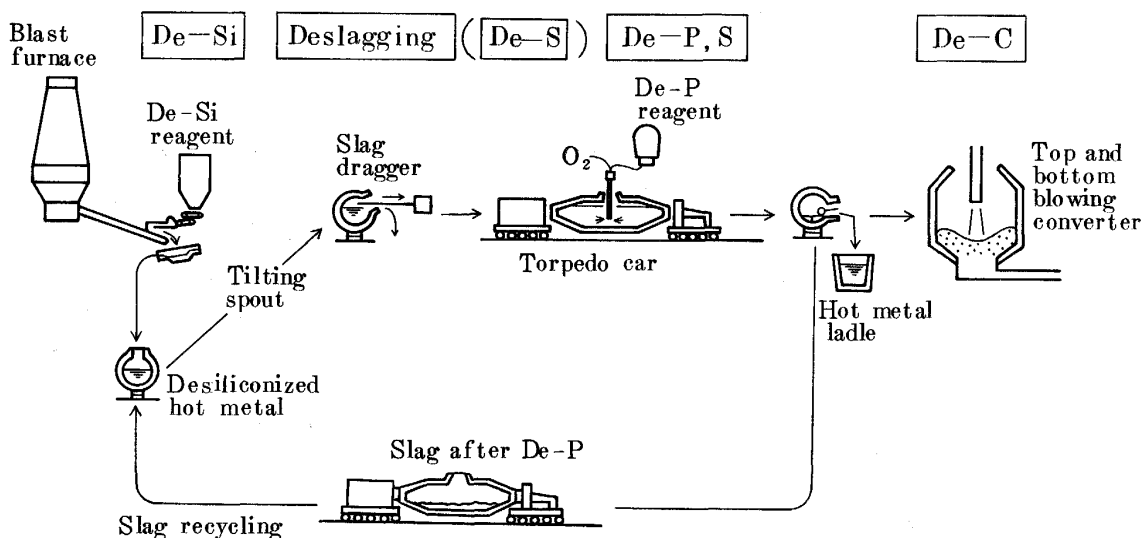


Fig. 1. Process flow of hot metal pretreatment at Kimitsu Works.

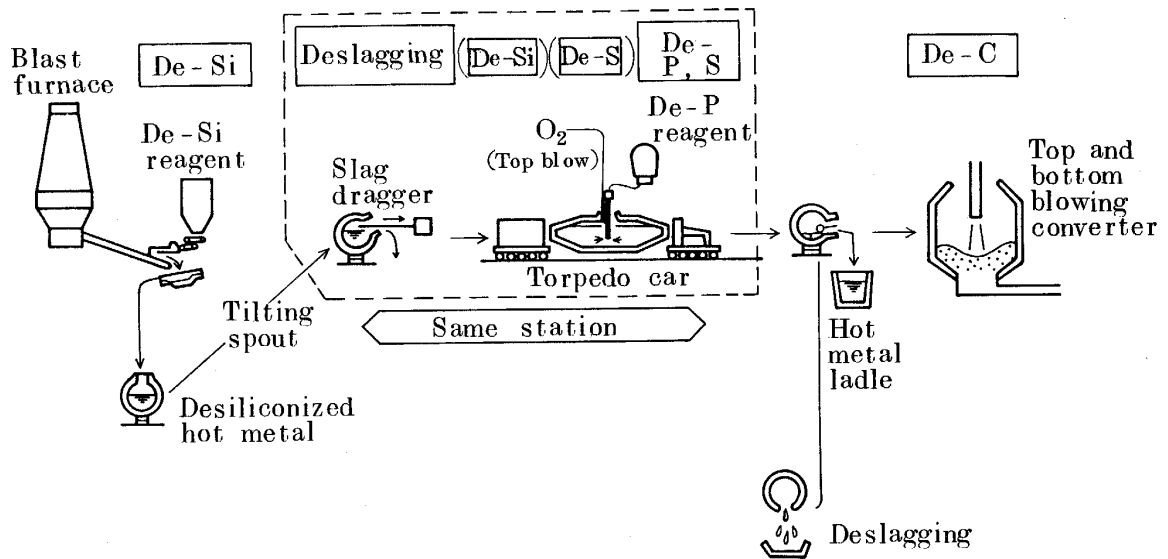


Fig. 2. Process flow of hot metal pretreatment at Yawata Works.

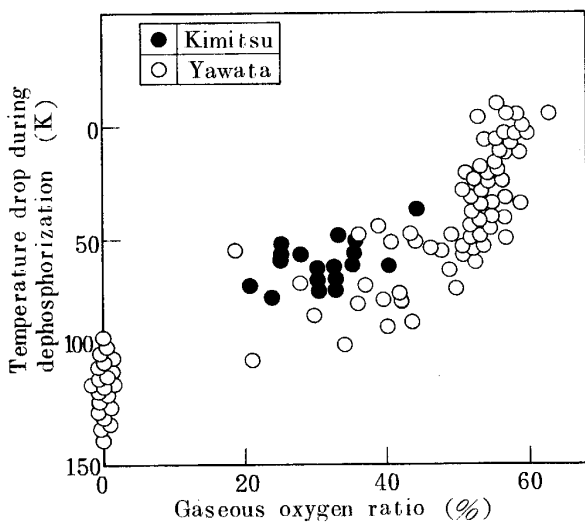


Fig. 3. Relation between gaseous oxygen ratio and temperature drop during dephosphorization treatment.

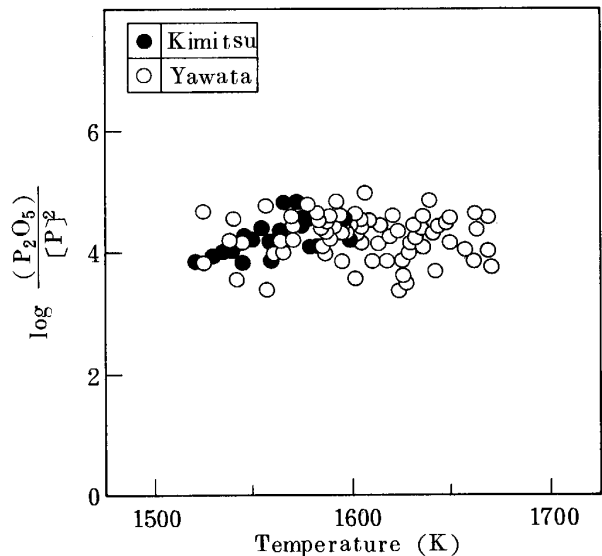


Fig. 4. Relation between phosphorous distribution ratio and temperature after dephosphorization treatment.

50%の酸素ガス比で約70 Kの温度上昇が可能となっている。Fig. 4には脱P処理後のP分配に及ぼす処理後温度の影響を示しているが、1650 K程度までは温度が高くなっても、P分配は低下していない。

2.2 溶銑鍋方式

大分製鉄所においては、トーピードカーによる脱Si工程と溶銑鍋による脱P脱S工程からなる溶銑予備処理設備を1986年に稼働させており⁸⁾、その後、設備増強を経て⁹⁾現在に至っている。プロセスフローをFig. 5に示す。脱P処理は、転炉2基に対して1基対応が可能な高速処理設備にする目的から、混合性の良い溶銑鍋

を用い、さらに、高速吹込み時にも、スラグや溶銑の鍋外流出が回避できるように、浸漬槽を使用している。処理は、测温サンプリング、脱Siスラグ排滓、脱P脱S処理、脱Pスラグ排滓の四つのステーションを持つターンテーブル上で行い、18 min サイクル(フラックス吹込み時間としては11 min)で処理溶銑を転炉に供給している。脱P処理時間は最短で9 minまで可能であり、50万t/月以上の処理を1基で行っている。

脱P剤はCaO系フラックスを用い、高いCaO/Oによる同時脱P脱Sを行っている。酸素源は、浸漬ラン

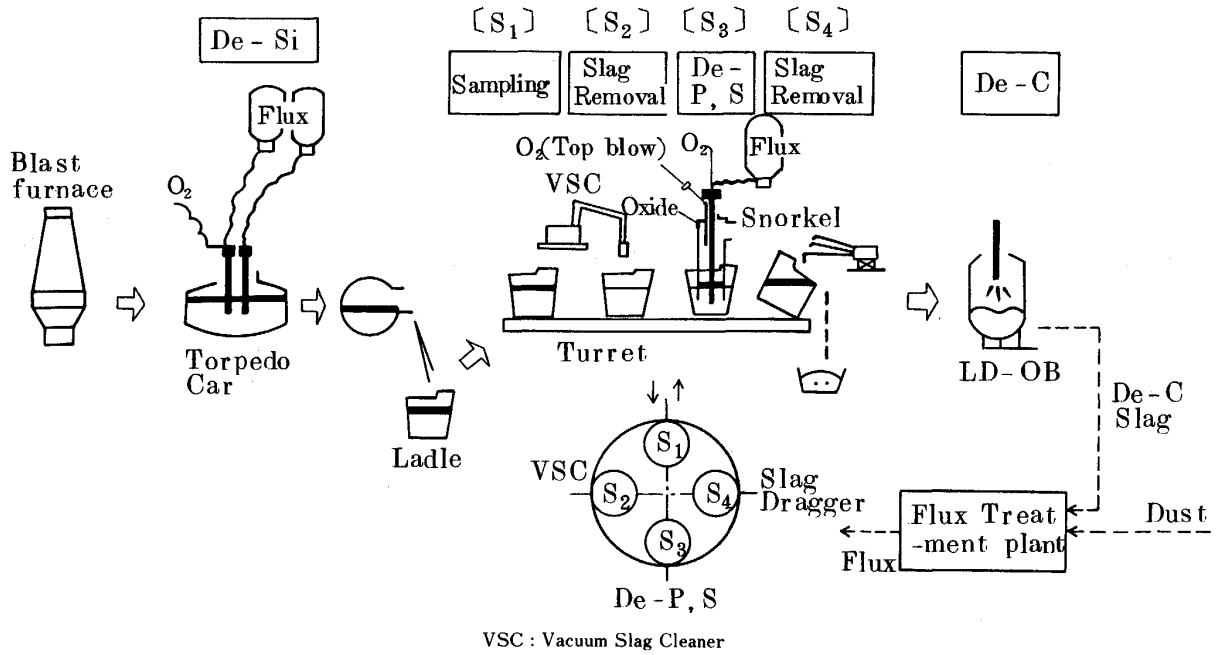


Fig. 5. Process flow of hot metal pretreatment at Oita Works.

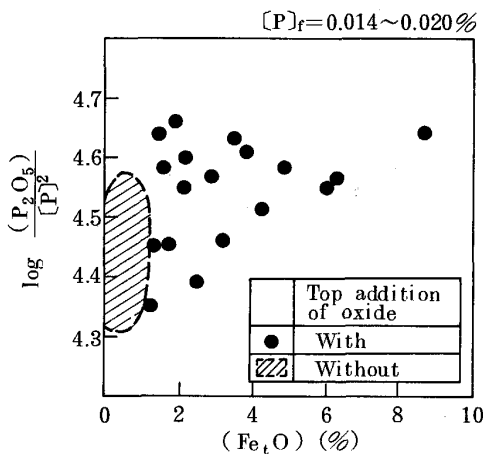


Fig. 6. Relation between phosphorous distribution ratio and Fe_2O content of slag after dephosphorization.

スからインジェクションされる酸化鉄と酸素ガス，上方から投入される酸化鉄，及び，2次燃焼を目的とした上吹き酸素であり，酸素ガス比は30~40%である。

本プロセスはフラックスと酸素ガスを高速でインジェクションするため攪拌力が大きく，そのため Fig. 6 に示すように酸素源の上方添加をおこなわない場合にはトップスラグの (Fe_2O) が低下し，十分な脱 P 率を確保することができない。これは，インジェクション粒子の浮上中の反応と，トップスラグでの反応の二つのうち，後者の寄与が無視できないことを示しており，強攪拌である本プロセスでは，酸素源の上方添加を併用することが，脱 P 反応上，重要な要因となっている¹⁰⁾。

2.3 転炉方式

名古屋製鉄所においては，LD-PB 炉¹¹⁾ (単管による粉体底吹き機能を有する上底吹き転炉) を溶銑予備処理炉に改造し，1989 年に稼動を開始した。プロセスフローを Fig. 7 に示す。本法は，転炉が本来有している設備的特徴である，大きな炉内容積を活用し，スラグのスロッピングや溶銑の飛散がない状態で，大量の酸素を高速で吹き込むことができる上に，炉底からのガスや粉体の供給設備を利用し，強攪拌条件を得ることが可能であり，約 10 min での脱 P 処理が実現されている。フラックスは炉上から投入される塊状の生石灰と螢石であり，酸素源は上吹き酸素と塊状鉄鉱石である。また，酸素供給速度を大きくした場合に，必然的に生じる脱炭反応に対しては，転炉であることを活用し，発生する熱をスクラップの溶解のための熱源として利用できる上に，CO ガスを排ガス回収設備 (OG) によって回収できる。という利点がある。

操業は CaO/O を低くし，高い酸化力により，低い塩基度で脱 P をおこなう方法であるが，予備脱 Si 処理を行わずに，脱 Si と脱 P とを同一の処理で行うという，大きな特徴を有している。Fig. 8 は，脱 P 処理前 $[Si]$ 濃度と単位溶銑重量当たりの全酸素供給速度との関係において，脱 Si のみが進行した場合と，脱 Si と脱 P が同時に進行した場合 ($\Delta [P]/\Delta [Si] \geq 0.2$) とを示した図であるが¹²⁾，同時に脱 P と脱 Si 反応がおこる $[Si]$ 濃度 ($[Si]_{CR}$) は，高い酸化力が維持できる場合に，高くなるのがわかる。これより，高速の同

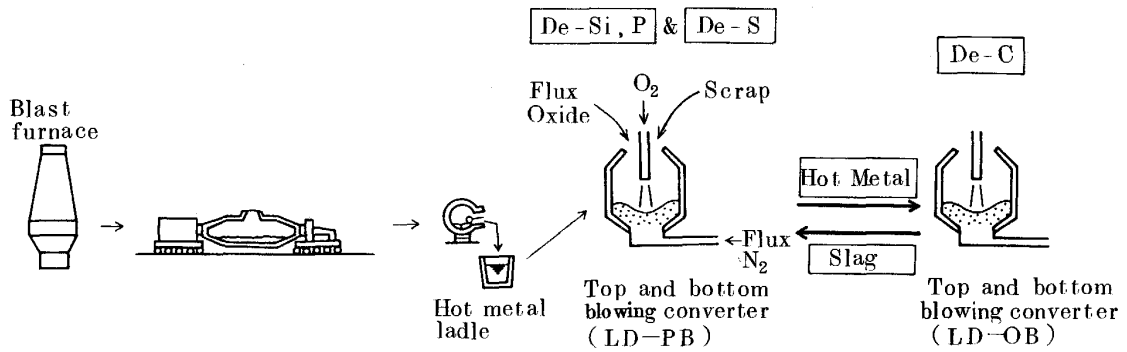


Fig. 7. Process flow of hot metal pretreatment at Nagoya Works.

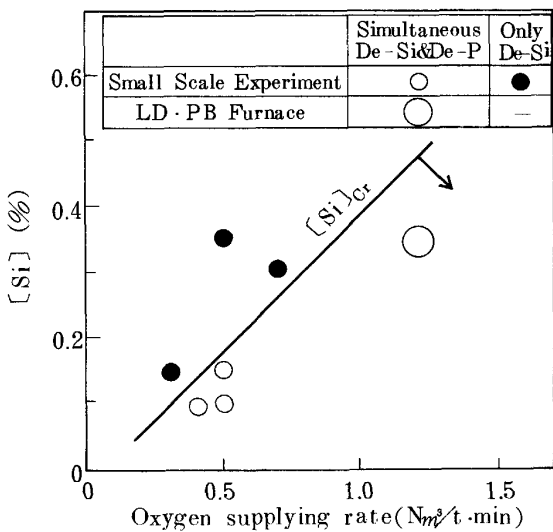


Fig. 8. Condition that desiliconization and dephosphorization reactions were able to occur simultaneously.

時脱 Si 脱 P 処理は酸素供給速度が大きくできる転炉方式でのみ可能な方法であると考えられる。

3. 反応効率に及ぼす操業条件の影響

3.1 反応効率, 反応速度から見た各プロセスの特徴

本節では、各製鉄所におけるプロセスの代表的な操業結果を、同一のパラメーターで整理し、それぞれの特徴を明らかにするとともに、その結果に対する理論的考察を試みた。なお、以降では製鉄所名をもって各プロセスを表すこととする。パラメーターとしては、脱 P の効率を表す指標として (1) 式, (2) 式で定義した。脱 P 酸素効率 ($\eta_{O_2}^P$) と脱 P 生石灰効率 (η_{CaO}^P) を、脱 P 反応速度を表す指標として (3) 式で定義した見掛けの脱 P 速度 (K_P') を、また、重要な副反応である脱 S 反応を表す指標として (4) 式で定義した同時脱 S 率 (R_S) を用いた。

$$\eta_{O_2}^P = \Delta [\%P] \times 9.02 / (W_{CaO}) \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta_{CaO}^P = \Delta [\%P] \times 27.1 / (W_{CaO}) \dots\dots\dots (2)$$

$$K_P' = \{ \ln ([\%P]_i / [\%P]_f) \} / t \dots\dots\dots (3)$$

$$R_S = \Delta [\%S] / [\%S]_i \times 100 \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $\eta_{O_2}^P$, η_{CaO}^P と $3 CaO \cdot P_2O_5$ が脱 P 生成物であると仮定した場合の効率 (%) であり、 W_{O_2} は全酸素使用原単位 (酸素ガスと酸化鉄中の酸素の合計: Nm^3/t)、 W_{CaO} は全使用生石灰原単位 (kg/t) を示し、 $\Delta [\%M]$ は処理前後の M 成分の濃度差である。また、 t は処理時間 (min)、添え字の i は処理前、 f は処理後を表す。

Fig. 9 に $\eta_{O_2}^P$, η_{CaO}^P と、フラックス中の生石灰と酸素との重量比 (CaO/O) との関係、Fig. 10 に R_S と CaO/O との関係を整理した結果を示す。また、Fig. 11 に K_P' と全酸素供給速度 (V_{O_2}) との関係を示す。ここで、図中の曲線は、後述する計算結果を表している。これより、各プロセスについて、次の特徴が認められる。まず、 CaO/O , V_{O_2} とともに類似している八幡と君津とを比較すると、 R_S は同程度であるが、 $\eta_{O_2}^P$, η_{CaO}^P は君津の方が高く、脱 P スラッグを脱 Si 工程へリターンしているために処理前の $[P]$ が高い影響が認められる。これに対して、 CaO/O は類似しているが、 V_{O_2} が大きい大分は、八幡に比べて $\eta_{O_2}^P$, η_{CaO}^P , R_S はいずれも同じレベルを保持し、 K_P' が非常に大きいという特徴がある。一方、予備脱 Si を行わない溶銑を、転炉で用いている名古屋は、 CaO/O が小さく V_{O_2} が大きいという特徴があり、酸素や生石灰が脱 Si 反応にも使用されるため、見かけ上、 $\eta_{O_2}^P$, η_{CaO}^P が低く、また、 K_P' も大分と同等レベルである。

脱 P 反応を有効に進めるためには、酸素ポテンシャルを増大させることと、(P_2O_5) の活量係数を低下させることの二つの方法がある。したがって、定性的には、 CaO/O を低くして、高い酸素ポテンシャルで脱 P を行うことも (名古屋)、 CaO/O を高くして、高塩基性スラッグにより脱 P を行うことも (君津, 八幡, 大分) 可能

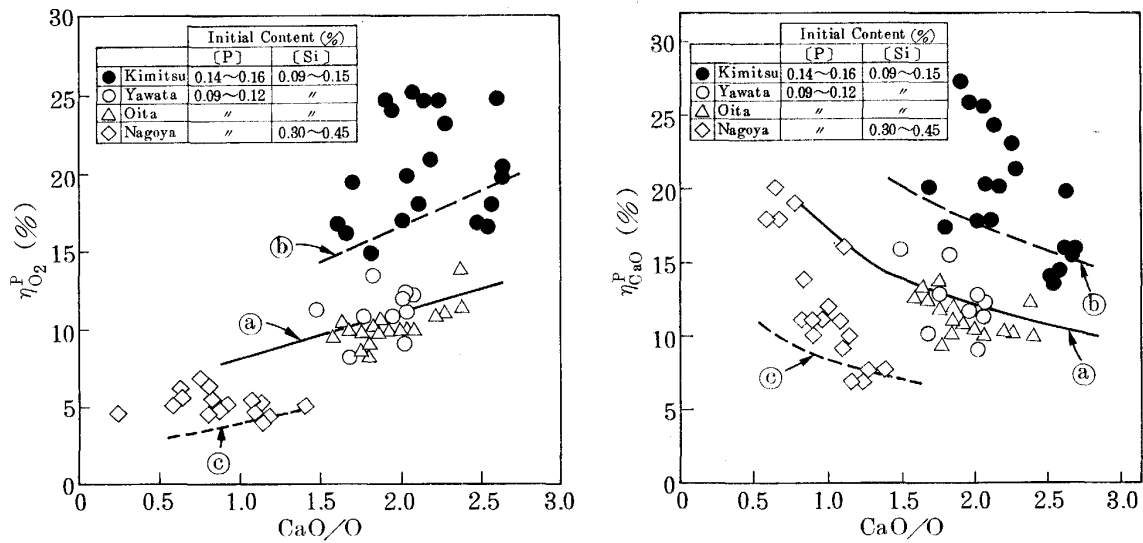


Fig. 9. Relation between CaO/O and efficiency of CaO and that of oxygen for dephosphorization.

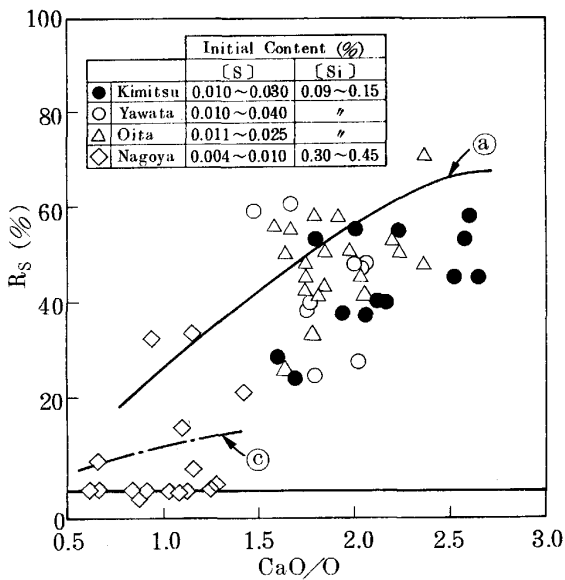


Fig. 10. Relation between CaO/O and degree of desulfurization during dephosphorization treatment.

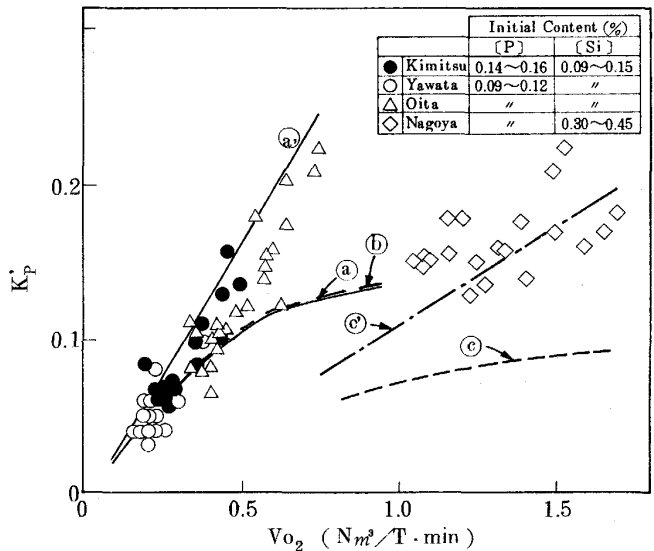


Fig. 11. Relation between oxygen feeding rate and dephosphorization rate.

であり、前者の場合には、塩基度が高くなくとも脱Pが進行するため η_{CaO}^P が高くなり、後者の場合には、酸素ポテンシャルが低いため $\eta_{O_2}^P$ が高く、かつ脱S反応も進行すると解釈できる。ただし、名古屋の場合は、予備脱Siをおこなわないため、CaO/Oが低いにもかかわらず η_{CaO}^P は他と同レベルであったと思われる。

3.2 競合反応モデルによる検討結果

ところで、著者らは、溶銑予備処理のような多くの反応が同時に進行するプロセスの解析には、競合反応モデルが有効であることを指摘している¹³⁾¹⁴⁾。これは反応の速度をスラグ側、メタル側とも物質移動律速として考

え、各反応についての物質移動の式を、界面平衡を仮定し、電気的中性条件のもとで解く方法である。

また、[C]の酸化反応は界面でのCO分圧の過飽和度に比例させて進行させるという取扱いをしている。

本モデルにより、Table 1に示した条件で行ったフラックス上方添加の小型実験結果¹⁴⁾を解析し、その時に得られたパラメーターを用いて、種々の実験条件において、[P]を0.020%まで低下させる場合の挙動をモデル計算し実炉での反応との対比をおこなった。ここで、スラグの酸化物成分の活量は、正則溶液モデルを基準として、また、脱S反応の平衡関係は、光学的塩基度とサルファイドキャパシティーの関係を用いて表した。さ

Table 1. Experimental condition of small scale furnace for each calculation.

Heat size		1 000 g		
Diameter of furnace		19.6 cm ²		
Temperature		1 623 K ± 10		
Experimental time		25 min		
Flux addition method		Top addition 9 times of 3 min interval		
Flux composition	CaO	88~157 g		
	CaF ₂ FeO	0~125 g 270~470 g		
Calculation case		a	b	c
Initial metal composition (%)	C	4.5	4.5	4.5
	Si	0.11	0.11	0.35
	Mn	0.25	0.25	0.25
	P	0.082	0.160	0.082
	S	0.030	0.030	0.030

らに、物質移動係数は著者らがおこなった基礎実験結果に基づいて決定した¹⁵⁾。また、計算においては、フラックス供給速度を一定とし、CaO と FeO の比を変化させた。

結果を、Fig. 9, 10, 11 の図中に示しているが、曲線 a は Table 1 の a の条件での計算結果で、曲線 b は処理前の [P] を 0.16% としたものである。また、曲線 c は、曲線 a の条件で、処理前 [Si] を 0.35% としたもので、さらに、曲線 a, c での物質移動係数を 10 倍にしたものが Fig. 11 における、曲線 a', c' である。

これより、次のことがわかる。

1) 八幡と君津は CaO/O, V_{O₂} とも類似しているが、Fig. 9 において、曲線 a は八幡の、曲線 b は君津の操業実績値と対応しており、両者の差は、処理前 [%P] の差で、ほぼ説明可能であることがわかる。また、Fig. 10 においては、君津、八幡のいずれの場合も曲線 a と対応している。

2) V_{O₂} が大きい大分の値も、Fig. 9, 10 において、曲線 a と対応している。これは、供給された酸素や石灰がいずれの反応に利用されたかという割合を表しているパラメーターである、 $\eta_{O_2}^P$, η_{CaO}^P , 及び、 R_S は、攪拌と酸素供給速度のバランスにより決定されるためと考えられ、CaO/O や、スラグ中の (FeO) の値が同レベルである八幡と大分のデータは、反応速度によらず同一の傾向を示したものである。

3) Fig. 9, 10 において、曲線 a の条件で溶銑 [Si] を上昇させた場合の計算値 (曲線 c) は、CaO/O が小さい領域にある名古屋の実績値に近いが、ばらつきの下限にあり、小型炉に基づく計算値の方が、溶銑成分の影響を、より強く受けているようである。これは、計算の前提としたフラックス供給速度が名古屋の値に比べて小さく、同時脱 Si 脱 P 挙動が計算では得られなかったためと考えられる。

4) 一方、Fig. 11 において、V_{O₂} を増加した場合の K_{p'} の実績値は、曲線 a, c よりも大きくなっている。これは、実操業においては攪拌が強いため、反応速度については、攪拌の弱い小型炉の実験結果から、そのまま推定することは難しいことを示していると考えられる。そこで、仮に、物質移動係数を 10 倍として計算すると、曲線 a', c' に示すように計算値は実機プロセスと良く対応した。ここで、実機プロセスの攪拌エネルギーをインジェクションされた酸化鉄により浴内で生成される CO ガスも考慮して計算すると、3~10 kW/t 程度となるため、著者らの式¹⁵⁾に基づきメタル側物質移動係数を計算すると 0.10~0.30 cm/s となり、小型炉の値 (0.018 cm/s) の約 10 倍となる。したがって、この結果は妥当なものと考えられる。

以上のように、競合反応モデルにより、前節で述べた八幡、君津、大分、名古屋の四つのプロセスは、処理前溶銑成分と CaO/O の差で、ほぼ、定量的に説明することが可能であることが明らかとなった。

4. 溶銑予備処理銑を利用した転炉製鋼法

4.1 フェロマンガ合金使用量の削減

溶銑予備処理の適用による大きな経済効果の一つは、転炉でのスラグ量の減少によるマンガ歩留りの向上である。例えば、大分においては¹⁶⁾¹⁷⁾、転炉内で大量のマンガ鉱石を用いる場合の問題を抽出し、吹錬初期の鉱石溶解、滓化の促進と、末期のスラグの酸素ポテンシャルの低減による再酸化の抑制が重要であることを見いだした。この知見に基づき、初期媒溶剤添加と吹錬中の浴温の確保により、鉱石の溶解、滓化を促進させる対策、及び、火点の炉底への投影面内にある羽口の径を拡大することにより攪拌を促進し、末期 (T.Fe) を低下させる対策とにより、大量にマンガ鉱石を使用した場合にも約 70% の高いマンガ歩留りを確保し安定的に 1% 以上の吹止め [Mn] を得ることが可能となっている。

4.2 スクラップ加熱技術の適用

従来、溶銑予備処理の適用による最大の問題は、転炉装入温度の低下による、最低溶銑比の上昇にあった。この問題に対して、最近では、酸素ガスの利用により脱 P 処理中の溶銑温度の低下が最小限に抑制できるようになり、大幅な改善が成し遂げられた。これに加え、八幡においては、転炉での灯油を用いたスクラップの加熱技術を開発している¹⁸⁾。これは、LD-OB 底吹き羽口の外管から灯油を、内管から窒素で希釈した酸素を供給し、さらに、上吹きランスからも燃焼用に空気で希釈した酸素を供給するもので、短時間で 1 200 K 程度までの加熱

が可能となっている。

4.3 極低 P 鋼の溶製

極低 P 鋼溶製技術の確立に対する溶銑予備処理の寄与も重要である。最近、酸素ガスの使用により、溶銑温度を低下させることなく低い [P] の濃度域まで処理できるようになったため、溶銑予備処理により到達できる [P] レベルが大幅に低下するとともに、転炉での造滓剤の使用量の増加も可能となり、極低 P 鋼の溶製に大きな効果をあげている。例えば、君津においては、溶銑予備処理による脱 P の強化、LD-OB 転炉でのスラグ量の増加と強攪拌とによる脱 P 能の確保、及び、スラグカットの徹底により、成品 [P] が 50 ppm 以下の鋼材の大量生産が可能となっている。さらに、八幡においても、従来はソーダ系フラックスでおこなっていた、低 P のステンレス鋼の溶製に対しても、生石灰系フラックスでの対応が可能となっている。

5. 結 言

新日本製鉄において採用している、各種の溶銑予備処理方式 (トービードカーによる同時脱 P 脱 S 処理、溶銑鋼を用いた高速の同時脱 P 脱 S 処理、及び、転炉を利用した同時脱 Si 脱 P 処理) について、これらの各方式の設備、操業ならびに競合反応モデルによる解析結果から見た特徴を述べ、さらに、予備処理溶銑を用いた転炉吹錬技術についても概説した。今後、鋼に対して、さらに高純度化、高 cleanliness が要求される一方、いっそうのコストダウンをおこなっていく必要があることは明らかであり、そのためには、溶銑予備処理と転炉とによる製鋼プロセスの、さらなる効率化が必要となっていくも

のと思われる。

文 献

- 1) 堀 珊吉, 島 孝次, 水木栄夫, 橋本卓三: 製鉄研究, (1977) 291, p. 1
- 2) 伊藤幸良, 佐藤信吾, 河内雄二: 鉄と鋼, **67** (1981), p. 2675
- 3) 梅沢一誠, 松永 久, 有馬良士, 殿村重彰, 古垣一成: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1810
- 4) 佐々木清和, 中島啓之, 奥村治彦, 山田容三, 後藤裕規, 住田守弘, 辻野良二: 鉄と鋼, **69** (1983), p. 1818
- 5) M. OHJI, H. SHIMOJI, H. YAMAKAWA, K. NAKAMURA and M. KUROSAKI: 第 4 回日本中国鉄鋼学会議 (1987), p. 237 [日本鉄鋼協会]
- 6) 田中 功, 村上昌三, 佐藤宣雄, 井下 力, 矢動丸成行, 井ノ口和好, 佐々木健一: 鉄と鋼, **69** (1983), S 958
- 7) 工藤和也, 高崎義則, 迫村良一, 木村晃平, 鐘ヶ江繁光: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 107
- 8) 竹村洋三, 吉田基樹, 調 和郎, 古崎 宣, 高橋正章: 鉄と鋼, **73** (1987), S 277
- 9) 服部正幸, 稲葉東實, 調 和郎, 殿村重彰, 本多清之: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1087
- 10) 金子敏行, 松崎孝文, 石川英毅: 学振 19 委-No. 10986, 反応 693 (平成元年 2 月)
- 11) 森 正晃, 小林 功, 吉田学史, 二瓶 清, 石井光嗣: 鉄と鋼, **72** (1986), S171
- 12) 金子敏行, 松崎孝文, 片山幹史: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 108
- 13) S. OHGUCHI, D. G. C. ROBERTSON, B. DEO, P. GRIEVESON and J. H. E. JEFFES: Ironmaking Steelmaking, **11** (1984), p. 202
- 14) S. KITAMURA, N. SATO and K. OKOHIRA: Trans. Iron Steel Inst. Jpn., **28** (1988), p. 364
- 15) 北村信也, 大河平和男, 北村寿宏: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1091
- 16) 稲葉東實, 高本 久, 殿村重彰, 遠藤公一, 田淵 敏, 米沢公敏: 鉄と鋼, **73** (1987), S1012
- 17) 服部正幸, 稲葉東實, 高本 久, 遠藤公一, 釘宮貞二, 米沢公敏: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 24
- 18) 工藤和也, 高崎義則, 中嶋睦生, 平嶋直樹: 材料とプロセス, **2** (1989), p. 1085