
トピードカーにおける溶銑の脱燐処理

Hot Metal Dephosphorization Treatment in Torpedo Car at Chiba Works

鍋島 祐樹(Yuki Nabeshima) 田岡 啓造(Keizo Taoka) 山田 純夫(Sumio Yamada)
田村 望(Nozomu Tamura) 清水 益人(Masuto Shimizu)

要旨：

千葉製鉄所では、トピードカーを用いて、ポストミックス方式のフラックス配合方法の採用、トピード内残留スラグ除去機能の付与さらに気体酸素の大量使用を特徴とした溶銑脱燐処理を実施している。フラックスのポストミックス化により消石灰原単位が削減でき、気体酸素の大量使用により溶銑の熱的余裕度を大幅に改善することができた。気体酸素の反応挙動についての検討では、脱燐反応における気体酸素と固体酸素の反応挙動は同等であることがわかった。その結果、月間25万tを安定して脱燐処理することが可能となり、全量溶銑予備処理体制下での安定操業およびトータルコストミニマムを実現することができた。

Synopsis：

Hot metal is dephosphorized in the torpedo car at Chiba Works. The main features of the process are (1) post-mixed flux injection, (2) improved torpedo-cleaning process and (3) use of large amount of oxygen gas. Post-mixed flux injection has reduced lime consumption, while the use of a large quantity of oxygen gas controls the temperature drop during dephosphorization. An investigation has disclosed that the dephosphorization behaviour of the oxygen gas is nearly equivalent to that of iron oxide. With the establishment of this pretreatment system, the amount of hot metal dephosphorized now exceeds 250 000t/month, covering virtually all hot metal produced at Chiba Works.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

Hot Metal Dephosphorization Treatment in Torpedo Car
at Chiba Works鍋島 祐樹
Yuki Nabeshima
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室田岡 啓造
Keizo Taoka
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室 主査(課長
補)山田 純夫
Sumio Yamada
千葉製鉄所 製鋼部製
鋼技術室 主査(課長
補)田村 望
Nozomu Tamura
千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(掛長)清水 益人
Masuto Shimizu
千葉製鉄所 エネルギー
一部エネルギー技術室
主査(課長補)

1 緒 言

千葉製鉄所では、精錬コストの低減および高純度鋼の安定生産を実現するための手段として、トビードカーにおける溶銑の脱磷処理を実施している。

溶銑予備処理技術の開発は、1982年4月、第1製鋼工場における工程実験設備の建設に始まった。第1製鋼工場では、高炭素鋼およびステンレス鋼の溶製において脱磷溶銑を適用し、その有用性を確認した¹⁾。そして、1984年10月には第1製鋼工場での結果を踏まえて、第3製鋼工場に量産鋼種を対象にした大量処理が可能な溶銑予備処理設備(PTC)を建設した²⁾。その後、幾多の操業改善の結果、溶銑予備処理は製鋼精錬のなかで確固たる位置を占めるに至り、全量溶銑予備処理体制が確立された³⁾。

本報告では、全量溶銑予備処理体制下での安定操業およびトータルコストミニマムの実現を目的とした脱磷処理設備・操業の考え方および気体酸素の採用に先立って実施したトビードカー内における気体酸素の反応挙動解析結果^{4,5)}についてまとめた。

要旨

千葉製鉄所では、トビードカーを用いて、ポストミックス方式のフラックス配合方法の採用、トビード内残留スラグ除去機能の付与さらに気体酸素の大量使用を特徴とした溶銑脱磷処理を実施している。フラックスのポストミックス化により生石灰原単位が削減でき、気体酸素の大量使用により溶銑の熱的余裕度を大幅に改善することができた。気体酸素の反応挙動についての検討では、脱磷反応における気体酸素と固体酸素の反応挙動は同等であることがわかった。その結果、月間25万tを安定して脱磷処理することが可能となり、全量溶銑予備処理体制下での安定操業およびトータルコストミニマムを実現することができた。

Synopsis:

Hot metal is dephosphorized in the torpedo car at Chiba Works. The main features of the process are (1) post-mixed flux injection, (2) improved torpedo-cleaning process and (3) use of large amount of oxygen gas. Post-mixed flux injection has reduced lime consumption, while the use of a large quantity of oxygen gas controls the temperature drop during dephosphorization. An investigation has disclosed that the dephosphorization behaviour of the oxygen gas is nearly equivalent to that of iron oxide. With the establishment of this pretreatment system, the amount of hot metal dephosphorized now exceeds 250 000 t/month, covering virtually all hot metal produced at Chiba Works.

2 溶銑予備処理設備の概要

千葉製鉄所における溶銑予備処理プロセスの概要をFig. 1に示す。高炉铸床において脱珪処理を実施した溶銑はトビードカーによって第1および第3製鋼工場のそれぞれの溶銑予備処理センターに搬送され、それぞれの製鋼工場のプロセスに適した成分に処理される。

脱磷処理設備の概要およびスペックをFig. 2およびTable 1に示す。設備設計に当たっては、全量処理化に伴う溶銑の熱的余裕度の低下への対応と脱磷処理におけるフラックス原単位削減およびトビード内スラグ汚染の防止を目的として、以下の改善を図った。

- (1) 溶銑予備処理への気体酸素の大量使用
- (2) 溶銑成分に合わせたフラックス組成変更機能の付与
- (3) トビード内残留スラグ除去機能の強化

気体酸素は最大50 Nm³/minまで吹入することが可能であり、大量の気体酸素使用への対応として水冷上吹きランスおよび水冷フードを採用している。脱磷フラックスの吹込みについては、処理前溶銑成分の変化に対応してフラックスの配合比を変化できるように2個のディスペンサーを備えたポストミックス型とし、2種フラック

* 平成2年4月24日原稿受付

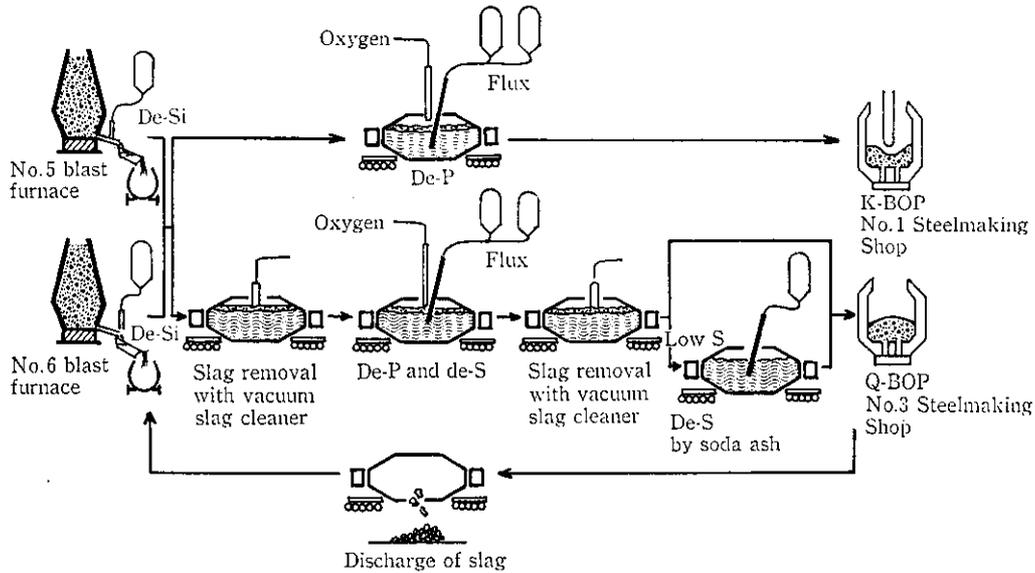


Fig. 1 Hot metal pretreatment process at Chiba Works

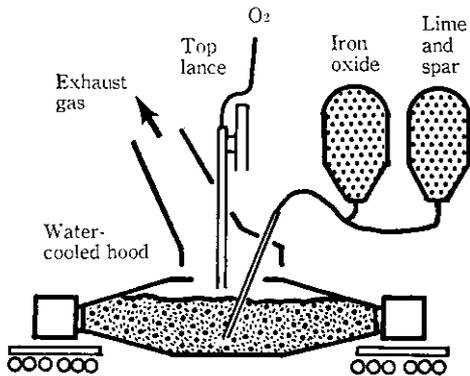


Fig. 2 Schematic view of hot metal pretreatment equipment

Table 1 Specifications of main equipment

Item	Specification
Oxygen blowing Maximum flow rate Lance	50 Nm ³ /min Water cooled
Flux injection Dispenser Mixing type Injection rate control	2 dispensers Post-mixing Injection cross section control
Waste gas treatment Flow rate Hood type	15 × 10 ⁴ Nm ³ /h Upper drawing Water cooled (cooled area 97 m ²)
Gas cooling Dust catcher	Boiler + plate cooler Bag filter

スの混合制御は、可変弁による弁開度制御とディスペンサーによる差圧制御の併用により、50~500 kg/min という広範囲において安定した吹込みが可能である。またトビード内残留スラグ除去について

は、トビードクリーニングセンター (TCC) において口直し (受銑口周辺のクリーニング) と排滓を2つのステーションに分割することによって処理能力を確保できるようにしている⁶⁾。

3 溶銑予備処理操業

3.1 操業の概要

当所の第1および第3製鋼工場では、溶銑鋼種に合わせた特色のあるプロセスを採用している。そのため、溶銑予備処理に要求される目標成分も異なったものとなっている。

すなわち、第1製鋼工場の K-BOP においては、転炉内での還元処理を採用したキャッチカーボン法による高炭素鋼の溶製¹⁾ および Cr 鉱石溶融還元法によるステンレス鋼の溶製²⁾ を実施しており、これに適した低磷溶銑 (P=0.010~0.015%) が必要となる。第3製鋼工場の Q-BOP では、一般冷延用鋼板の溶製を行っており、予備処理と転炉との総合コストを最小とする観点から P=0.035~0.040% の溶銑が必要とされる³⁾。

千葉製鉄所における脱磷処理量の推移を Fig. 3 に示す。1984年 第3製鋼工場における予備処理センター稼働以降、脱磷処理量は順調に増加し、1987年6月においては月間23万tに達した。しか

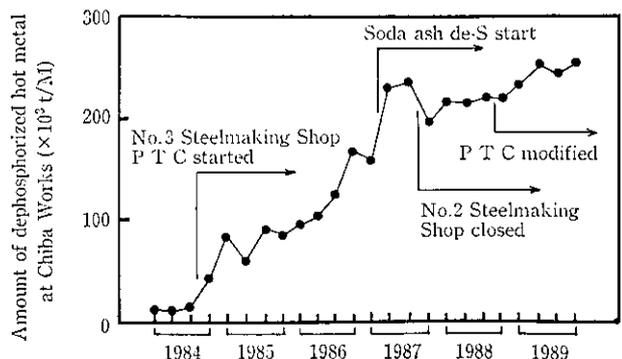


Fig. 3 Change in amount of dephosphorized hot metal at Chiba Works

し、同年10月に実施された水島製鉄所への生産集約により処理量は一時的に月間19万tにまで低下した。この処理量の低下は、高炉操業の低出銑比化に伴う処理前Siの上昇とトビード回転率の低下に伴う溶銑の温度低下によるものであった。

しかし、1988年9月に実施された設備増強によって処理量は再び増加し、最近では月間25万tを安定して脱磷処理している。

3.2 ポストミックスの効果

当所で使用している脱磷フラックス組成の代表例をTable 2に示す。CaO系のフラックスであり、固体酸素源には所内の焼結工場等で発生したダストあるいはミルスケールを使用している。そのため、コストも安価であり、かつ鉄源の回収というメリットをも享受している。

脱磷時のスラグ組成は、脱磷能の確保と復硫防止および排滓時のスラグ流動性を考慮して決定しており、処理前Si濃度にあわせて生石灰使用量をコントロールしている。当社が採用しているソーダ灰脱硫プロセス⁶⁾では、脱磷処理中の脱硫に対する負荷が小さく、P分配の低下しない範囲での低塩基度操業が可能である。通常、CaO/SiO₂=2~3を目標に生石灰使用量をコントロールしている。

しかしながら、フラックス配合方式がディスペンサー内で前もって混合しておくプレミックス方式では、溶銑Siの変動に対してフラックスの配合をダイナミックに追従させることが困難で、生石灰量の不適合を招く場合があった。

そこで、固体酸素(ダスト+ミルスケール)とCaO系(CaO+CaF₂)の2種類のフラックスを別々のディスペンサーより任意の配合で吹き込むことのできるポストミックス方式を採用した。ポストミックス方式によると、溶銑Si、処理後目標P濃度により任意の組成のフラックスを選択することができる。これにより、生石灰原単位で1.5kg/tの削減が可能であった。

また、スラグ組成が適切な範囲に保たれることから、スラグの流動性も確保され、トビードカー内にスラグが残留することも少ない。脱磷処理終了時のスラグ塩基度とトビード充填率の関係をFig. 4に示すが、トビード充填量の確保のためにもスラグ塩基度のコントロールが重要であることがわかる。Fig. 5には脱磷処理量とトビード充填率の関係を示す。脱磷処理量の増大に伴って、トビード内に残留するスラグが増加しトビード充填量が減少するが、スラグの

Table 2 Typical composition of dephosphorization agent (%)

Sinter dust	Mill scale	Lime	Spar
38	35	25	2

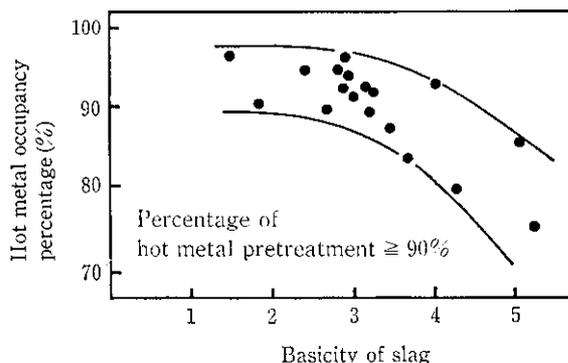


Fig. 4 Influence of slag basicity after treatment on hot metal occupancy percentage in torpedo car

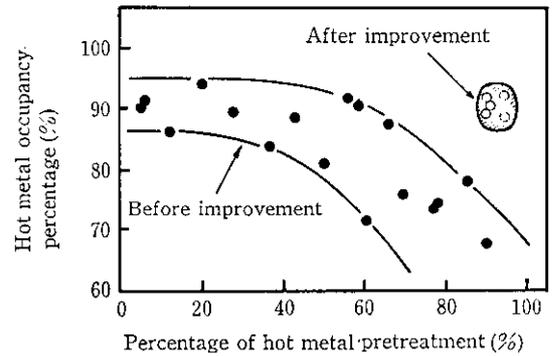


Fig. 5 Influence of hot metal pretreatment ratio on hot metal occupancy percentage in torpedo car

流動性確保とTCCにおける処理能力の強化により、全量予備処理体制下においてもトビード充填率を高位に維持することができる。また、従来、脱珪反応末期に発生することのあったスロッピングについても、脱珪期においてCaO/SiO₂>1.5を確保するスラグ組成とすることによってほぼ完全に抑制することができた。これは大量の気体酸素使用の前提となる技術であり、スロッピング起因のトラブルの増大を防ぎ、全量処理体制の維持にも重要な技術である。

3.3 気体酸素利用の効果

溶銑予備処理における熱余裕度の増大を目的として、気体酸素の利用を図っている。気体酸素比率(=気体酸素/(気体酸素+固体酸素))とフラックス吹込みによる温度降下にはFig. 6に示す関係があるので、処理後の溶銑温度は、気体酸素比率を変更することによって制御することができる。

前述したように、溶銑予備処理においてはダスト等の固体酸素の利用によって安価な鉄源を回収できるというメリットがあるため、要求される溶銑Pレベルによって最適な気体酸素の比率が存在する。すなわち、要求Pレベルの厳しい第1製鋼工場においては、処理中の温度降下が大きいので、鉄源回収メリットを多少犠牲にしても熱的余裕度を増大させるべく、脱磷期における気体酸素比率を高くする必要がある。一方、要求Pレベルの緩い第3製鋼工場においては、装入温度上昇による転炉でのメリットと固体酸素からの鉄源回収メリットのトータルメリットが最大となる気体酸素比率にて操業している。

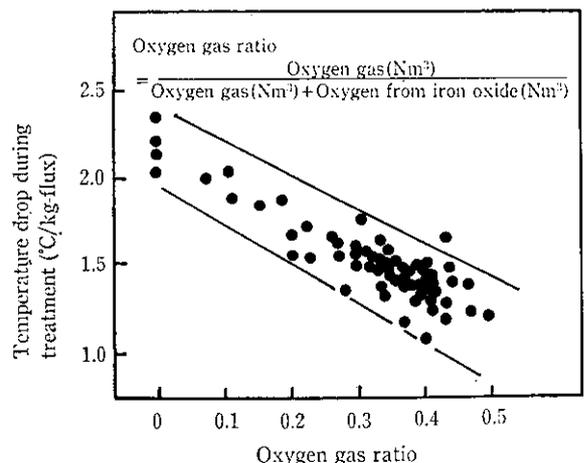


Fig. 6 Influence of oxygen gas ratio on temperature drop during treatment

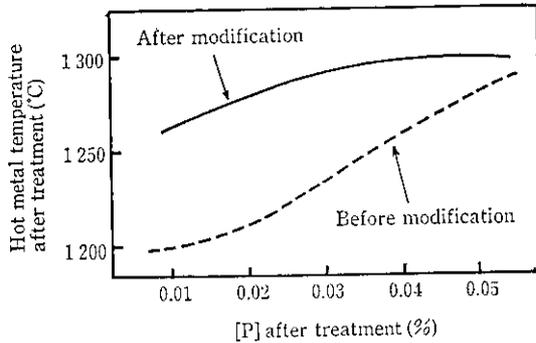


Fig. 7 Comparison of hot metal temperature after treatment between before and after modification by applying oxygen gas

処理後Pと処理後温度の関係を増強前（気体酸素なし）と比較して Fig. 7 に示す。気体酸素比率の制御により、処理後Pによらず処理後温度は1260~1300°C にコントロールすることができる。

4 溶銑予備処理における気体酸素の反応挙動^{4,5)}

4.1 実験方法

溶銑予備処理における熱補償を目的とした気体酸素の利用については、従来から数多くの報告がなされている⁹⁾。しかしながら、気体酸素と固体酸素の反応挙動を比較した例は少なく、またトビードカーにおける2次燃焼およびその着熱挙動を詳細に検討した例もない。そこで、酸素上吹き設備の建設に当たっては、その適用性を評価する目的で実験設備による事前調査を実施した。

実験は、当所第1製鋼工場の予備処理センターで実施した。調査に当たっては、溶銑予備処理の各ステージにおいて、排ガス、溶銑およびスラグの成分と温度を測定し、酸素バランスおよび熱バランスを求めた。また2次燃焼挙動に及ぼす送酸条件の影響を調査する目的で、可能な範囲で送酸速度、ランス径およびランス高さを変更させた。実験条件を Table 3 に示す。

Table 3 Experimental conditions

Heat size	200~250 t/torpedo
Top lance	
Lance type	Non cooled
Nozzle diameter	20 or 30 mm
Height	0.4~1.2 m
Oxygen flow rate	0~15 Nm ³ /min

4.2 脱炭、脱珪および脱磷反応挙動

気体酸素と固体酸素の各反応挙動については、酸素バランスから溶銑に到達した酸素（気体+固体）を（1）式より求め、（2）式により各反応の反応効率を求めることで比較検討した。

$$q_T = q_C + q_{Si} + q_{Mn} + q_P + q_{Fe} \dots\dots\dots (1)$$

$$\eta_i = q_i / q_T \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

q_i : i 成分の酸化に消費された酸素 (Nm³)

q_T : 溶銑浴に到達した有効酸素 (Nm³)

η_i : 有効酸素による i 成分の酸化反応効率

（2）式より求めた溶銑浴到達酸素の脱炭効率と気体酸素比率の関係を Fig. 8 に示す。溶銑中の Si 濃度が 0.05% 以下では、脱炭に消費される比率は気体酸素比率によらず 74% と一定である。この結果から、気体酸素比率が 40% までの範囲であれば、脱炭反応に関して、気体酸素と固体酸素の反応挙動は同等であるといえる。

同様に、溶銑浴到達酸素の脱珪反応効率を Si 濃度で整理し、気体酸素比率で比較したものを Fig. 9 に示す。脱珪反応効率は Si 濃度の影響を強く受けるが、気体酸素比率による差は認められな

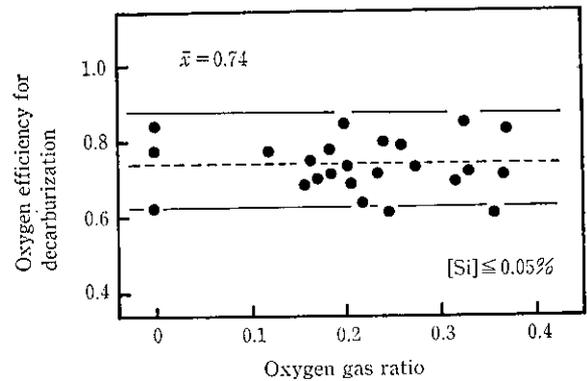


Fig. 8 Influence of oxygen gas ratio on oxygen efficiency for decarburization

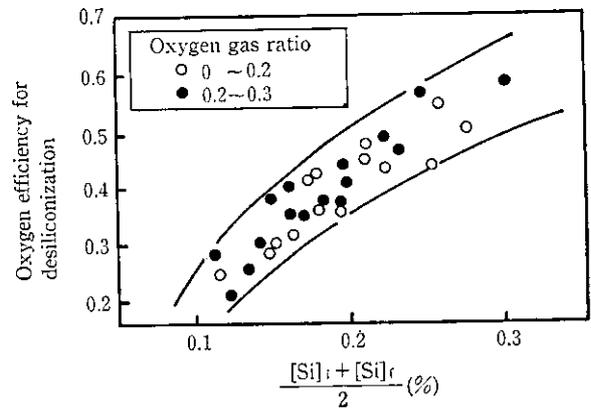


Fig. 9 Influence of silicon content and oxygen gas ratio on oxygen efficiency for desilicization

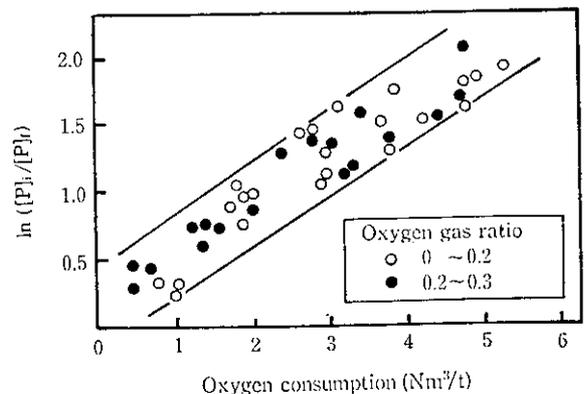


Fig. 10 Influence of oxygen gas ratio on dephosphorization behaviour

い。これより脱炭反応に関しても、気体酸素と固体酸素の反応挙動は同等であるといえる。

脱炭反応に関しても、反応挙動の比較を実施した。溶銑浴到達酸素量とその前後における溶銑中P濃度の対数との関係を Fig. 10 に示す。この図より、脱炭反応に関しても気体酸素と固体酸素の反応挙動は同等であるといえる。

4.3 2次燃焼挙動

溶銑予備処理設備においては、排ガス中のCOはトビードカーの受鉄口付近で完全燃焼するため、溶銑浴面直上での2次燃焼率を実測することが困難である。そこで、酸素バランスより溶銑浴面直上での気体酸素の2次燃焼への利用効率を推定することにした。

溶銑浴に到達しない気体酸素はすべてCOの燃焼に消費されると考えると、トビードカー内の気体酸素の2次燃焼への利用効率は、(3)式のように表せる。

$$\eta_{PC} = 1 - \eta_{MB} \dots\dots\dots (3)$$

ここに、

η_{PC} : 気体酸素の2次燃焼への利用効率

η_{MB} : 気体酸素の溶銑浴への到達率

さらに、気体酸素の溶銑浴への到達率は、トータル気体酸素および溶銑浴に到達した気体酸素それぞれの脱炭反応率から、(4)式のように導くことができる。

$$\eta_{MB} = \eta_{C(G)} / \eta_{C(B)} \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

$\eta_{C(G)}$: 気体酸素によるみかけの脱炭反応効率

$\eta_{C(B)}$: 溶銑浴に到達した気体酸素の脱炭反応効率

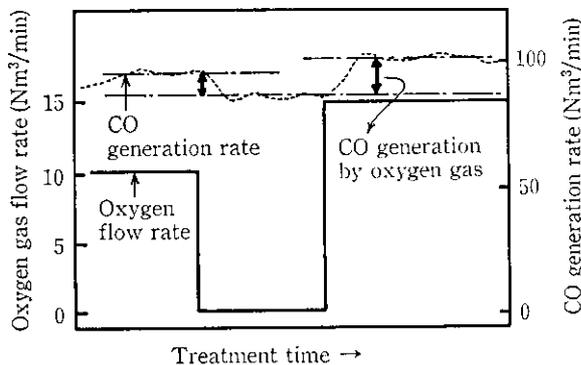


Fig. 11 Outline of measuring method of CO generation rate by oxygen gas

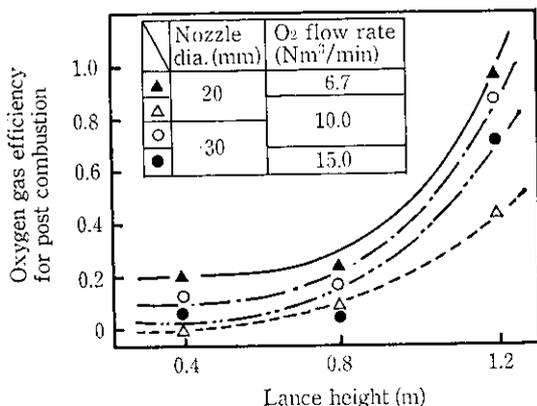


Fig. 12 Influence of blowing conditions on oxygen gas efficiency for post combustion

このうち、溶銑浴に到達した気体酸素の脱炭反応効率については前節で求めたように気体酸素と固体酸素で差がないことより、溶銑浴到達酸素の脱炭反応効率 0.74 を用いることができる。

気体酸素によるみかけの脱炭反応効率については、固体酸素供給速度一定のもとで気体酸素流量を変化させ、排ガス流量および排ガス中のCO₂濃度より求まるCO発生量の変化より脱炭反応量を測定することにより求めた。測定方法の概要を Fig. 11 に示す。測定結果より、(3)および(4)式を用いて計算された気体酸素の2次燃焼への利用効率を Fig. 12 に示す。2次燃焼への利用効率は、ランス径、酸素流量およびランス高さによって変化するが、ランス高さの影響が最も大きく、ランス高さのみを変化させるだけでも広範囲な制御が可能であることがわかった。

4.4 気体酸素使用時の熱補償機構

溶銑予備処理における気体酸素の利用目的は、処理中の温度降下防止であるので、熱補償という観点から検討を行った。

気体酸素の利用による熱補償は、次の2つの効果によるものと思われる。

- (1) 固体酸素との置換による顕熱、分解熱の減少
- (2) COガスの2次燃焼熱の着熱

これらの効果による熱補償量を定量的に把握するために、熱バランスを求めた。気体酸素を流量 10 Nm³/min およびランス高さ 0.8 m の条件で上吹きした際の熱バランス例を Fig. 13 に示す。吸熱項のうち、フラックスの顕熱と酸化物の分解吸熱が占める割合はそれぞれ 30% および 60% であり、気体酸素の2次燃焼による着熱量は吸熱項の 3% であることがわかった。

2次燃焼熱の溶銑への着熱効率を評価するため、トビードカー内の伝熱が主として輻射によるものと考えたモデルにより燃焼熱の分

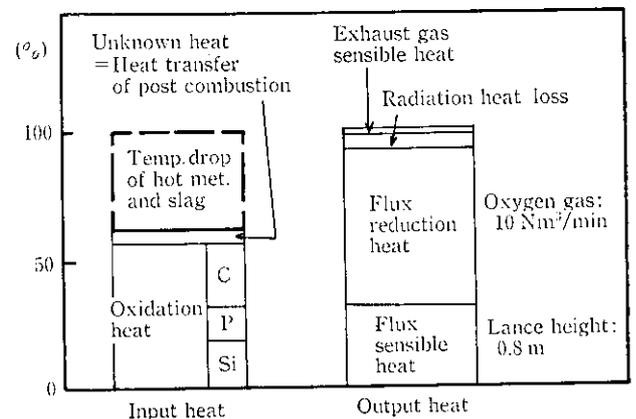


Fig. 13 Example of heat balance

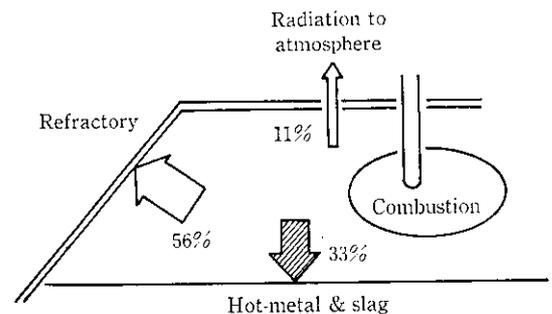


Fig. 14 Heat distribution of hot metal pretreatment in torpedo car

配を推定した。その結果を Fig. 14 に示す。トビードカー内における 2 次燃焼熱の着熱効率は 33% 程度であり、発熱量の大部分は内壁の耐火物に着熱してしまう。

一方、転炉における 2 次燃焼の着熱効率は、一般に 70~80% であり、溶銑予備処理の場合の 2 倍以上である。このように溶銑予備処理における 2 次燃焼の着熱効率が低い理由は、次の 2 点であると考えられる。

- (1) 転炉に比べて耐火物表面温度が低く、処理の初期においては耐火物表面から溶銑への輻射伝熱が望めない。
- (2) 燃焼空間の形状差により、溶銑への輻射伝熱比率が低い。

気体酸素利用の効果をまとめると、気体酸素 1Nm^3 が固体酸素との置換あるいは 2 次燃焼に消費された場合の熱補償量は、それぞれ 7380kcal/Nm^3 , 1990kcal/Nm^3 程度となる。熱補償という目的の達成に当たっては積極的な固体酸素との置換が有効であるといえる。

しかしながら、一方で固体酸素との置換は安価な鉄源からの鉄回収メリットが減少し、そのコスト変動を考慮すると熱補償手段としては 2 次燃焼の方が安価である。したがって、気体酸素利用に関しては、溶銑予備処理～転炉のトータルコストメリットを考慮したう

えで最適化を図る必要がある。

5 結 言

- (1) 千葉製鉄所におけるトビードカーを利用した溶銑の脱磷処理体制は、溶銑成分に合わせたフラックス組成の変更機能およびトビード内残留スラグ除去機能の付与とともに、気体酸素の大量使用により確立された。
 - (2) フラックスのポストミックス化により、溶銑成分に応じた生石灰量の最適制御が可能となり、生石灰原単位を低減することができた。適正スラグ組成へのコントロールと TCC の処理能力強化により、全量処理体制下におけるトビードカーのスラグ汚染を防止できた。
 - (3) トビードカーにおける気体酸素の利用については、設備建設に先立った実験によって、その反応挙動と着熱挙動を調査し、気体酸素の有効性を確認するとともに、その結果をもとに各プロセスに応じた最適利用方法を確立した。
- これらの結果、月間 25 万 t の全量予備処理体制下での安定操業が実現し、トータルコストの低減に寄与した。

参 考 文 献

- 1) たとえば、野村 寛, 馬田 一, 田岡啓造, 山田純夫, 朝徳隆一, 江本寛治: 川崎製鉄技報, 18 (1986) 1, 14
- 2) 鷺尾 勝, 山田純夫, 山田博右, 江本寛治, 浜田俊治, 森 淳: 鉄と鋼, 71 (1985) 4, S 109
- 3) 朝徳隆一, 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) 1, 214
- 4) 鍋島祐樹, 山田純夫, 田村 望, 清水益人, 加藤嘉英: 材料とプロセス, 1 (1988) 4, 1147
- 5) 田村 望, 清水益人, 鍋島祐樹, 山田純夫, 加藤嘉英: 材料とプロセス, 1 (1988) 4, 1148
- 6) 近藤 寛, 西川 廣, 鈴木孝夫, 山田純夫, 朝徳隆一: 鉄と鋼, 73 (1987) 12, S 887
- 7) 馬田 一, 田岡啓造, 石塚晴彦, 多田 睦, 越川隆雄, 江本寛治: 材料とプロセス, 1 (1988) 1, 136
- 8) 西川 廣, 近藤 寛, 岸本康夫, 田村 望, 朝徳隆一, 大西正之: 鉄と鋼, 投稿中
- 9) たとえば, 水藤政人, 大宮 茂, 日和佐章一, 北川伸和, 上田 新, 武英雄: 川崎製鉄技報, 19 (1987) 4, 222