

神戸製鉄所における転炉を中心とした 精錬プロセスの改善

川崎 正蔵*・平橋 英行*・青木 松秀*
羽鹿 公則*・船岡 洋一*

Improvement of the Refining Process around Combined Blowing Converter in Kobe Works

Syozo KAWASAKI, Hideyuki HIRAHASHI, Matsuhide AOKI,
Kiminori HAJIKA and Yohichi HUNAOKA

Synopsis:

A new steelmaking process composed of hot metal pretreatment, combined blowing converter and ladle refining has been developed at Kobe Works. This process has been successfully applied to mass production of high-grade steel since November 1983. Hot metal pretreatment is performed in the H furnace, which was an originally developed process using modified converter and has the ability of sequential desiliconization, dephosphorization and desulphurization within 15 minutes. In combined blowing converter, high speed and highly-accurate blowing is realized by the automatic blowing control system with sensors to detect slag condition. Ladle refining has the functions of arc heating, degassing and powder injection.

The high application ratio of hot metal pretreatment and ladle refining led to establish a highly productive, accurate and efficient refining process. In this process consistently scheduled production from blast furnace to continuous caster is assured with its highly accurate controllability of each refining station.

This paper described the improvements of combined blowing converter operation in this refining process. These improvements consist of the following items,

- (1) Decrease of flux consumption
- (2) Reduction of manganese ore and chromium ore
- (3) Refining control by the automatic blowing control system
- (4) Slag cut technique at tapping
- (5) Production of super-clean steel

and realized combined blowing converter operation with high productivity, high quality and low cost.

Key words: hot metal pretreatment; combined blowing converter; ladle refining; manganese ore; chromium ore; process control; slag formation detection; material flow control; slag cut; super-clean steel.

1. 緒 言

近年の鋼材に対する品質要求の高度化に応えるため、取鍋精錬の適用比率の増大、連铸化の拡大などが1970年代から進行し、その結果、転炉での出鋼温度が上昇し脱りん能が低下してきた。また低りん低硫鋼の需要も拡大しており、転炉の精錬負荷はますます増大する傾向にあった。このような背景のもとで、溶銑予備処理技術の開発とその適用拡大を中心とする精錬プロセスの改善が1980年代初頭より進められた結果、低りん低硫鋼の安定生産と転炉精錬負荷の軽減さらにはその機能拡大が可能となってきている。

神戸製鉄所では、1980年より溶銑予備処理技術の開発に着手し、1983年11月には転炉を改造して独自に開発した溶銑予備処理専用炉（以下、H炉: Hot metal pretreatment furnaceと略す。）を稼働開始した。そして高炉铸床脱けい-H炉-転炉-取鍋精錬（以下、LR: Ladle Refiningと略す。）工程による、全量溶銑予備処理・全量溶鋼処理体制を基本とした新しい精錬プロセスを確立し、精錬コストの低減・品質の改善・転炉生産性の向上に大きな効果をあげてきている¹⁾²⁾。当所の精錬プロセスの概要をFig. 1に示す。

本報では、当所で開発した精錬プロセスの特徴とその導入による転炉精錬機能の拡大、転炉吹錬制御技術およ

平成2年3月16日受付 (Received Mar. 16, 1990)

* (株)神戸製鋼所神戸製鉄所 (Kobe Works, Kobe Steel, Ltd., 2 Nadahamahigashimachi Nada-ku Kobe 657)

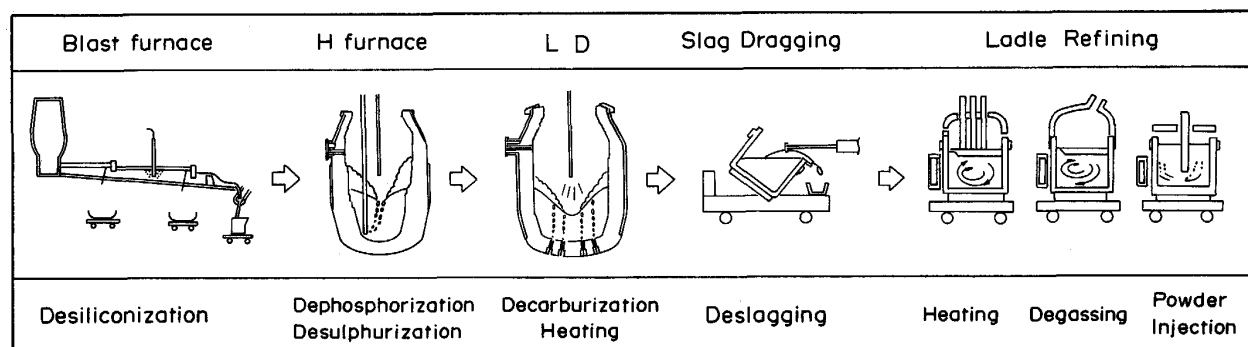


Fig. 1. Outline of the newly developed steelmaking process.

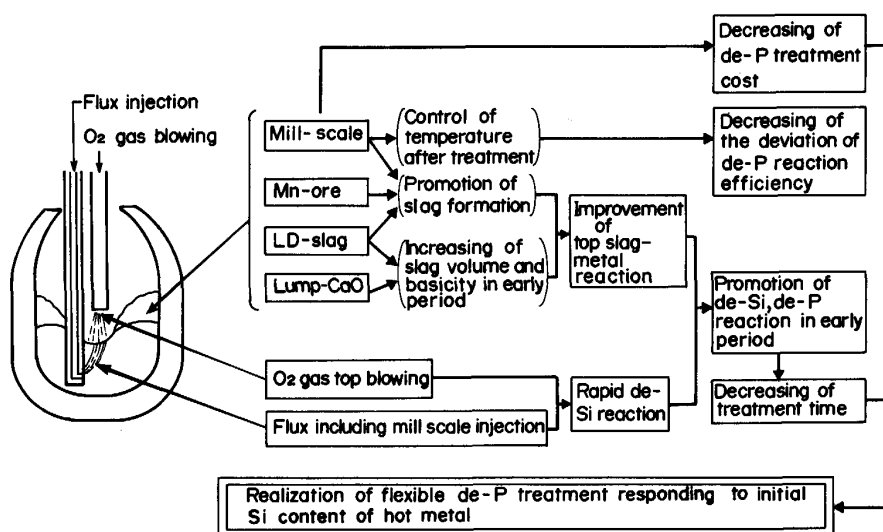


Fig. 2. Outline of 'Top slag dephosphorization treatment' in H furnace.

び高純度鋼の溶製技術について報告する。

2. 精錬プロセスの特徴

2.1 高炉鑄床脱けい処理

高炉鑄床においては脱けい処理が、次工程での脱りん・脱硫処理の反応効率を高める目的で、酸化鉄を主成分とするフラックスを丸型樋内の溶銑にインジェクションすることにより実施される。生成した脱けいスラグは、スキンマーによって分離・排滓されるようになっている。

2.2 H 炉における脱りん・脱硫連続処理

脱けい処理された溶銑は、H 炉に装入され、石灰系フラックス-酸素上吹き法で脱りん処理をおこなった後、排滓することなく引き続いてソーダ系フラックスインジェクションにより脱硫処理を実施している。

H 炉では、トップスラグ-メタル間の反応を促進させた「トップスラグ脱りん処理」を開発しており、高シリコン溶銑 ($Si \approx 0.45\%$) であっても、短時間 (10 min 以内) で連続脱けい・脱りん処理を実施することが可能となっている³⁾。

さらに H 炉では、

- (1) 副原料投入量の計算指示
- (2) 処理後温度コントロール
- (3) 最適処理パターン指示

の3種類の機能によって構成される処理制御が実施されており、処理後 \underline{P} や \underline{S} の的中精度の高い安定した溶銑予備処理がおこなわれている⁴⁾。H 炉における「トップスラグ脱りん処理」の内容を Fig. 2 に、また、H 炉処理中の成分経時変化例を Fig. 3 に示す。

このように H 炉では、高シリコン溶銑 ($Si \approx 0.45\%$) を短時間で連続脱けい・脱りん・脱硫処理する技術確立している。そしてその高い生産性の結果、H 炉処理比率は 95% に達しており、快削鋼を除いた全鋼種に対して溶銑予備処理をおこなっている。

2.3 転炉における脱炭・昇温処理

転炉における精錬機能は、全量溶銑予備処理体制が確立した後は脱りん反応から解放され、脱炭とそれに伴う昇温のみを目的とした吹錬が実施できている。その結果、転炉精錬が高速・高精度・高効率化するとともに、新たな精錬機能も付加できるようになっている。この内容につ

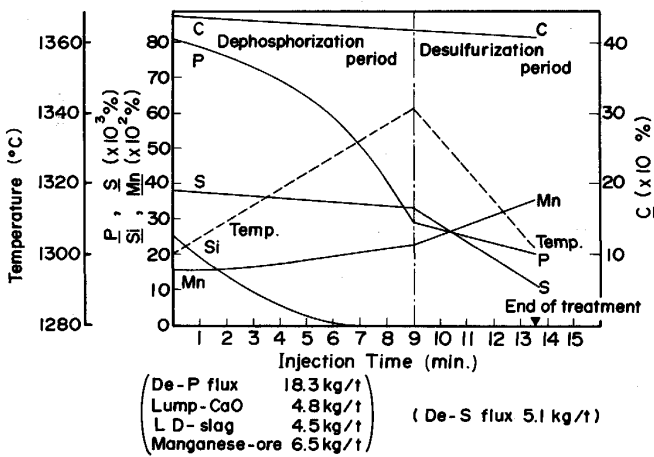


Fig. 3. Changes in hot metal compositions and temperature during hot metal pretreatment.

いては次章で詳細に述べる。

2.4 LRにおける成分・温度調整処理

LRにおいては、電磁誘導攪拌のもとで、アーク昇熱・真空脱ガス・粉体インジェクションの取鍋精錬が実施できるようになっており、ほぼ全溶鋼に対して必要に応じた処理が施されている。この結果、転炉では成分・温度の最終的な微調整を実施する必要がなくなり、吹止温度を一定にして吹錬を安定化させるとともに、転炉吹止め時に成分分析値を確認せずに直ちに鋼開始するQT (Quick Tapping) 法の適用比率を大幅に増大できている。

3. 転炉精錬機能の拡大

3.1 転炉精錬機能の変化

当所では、中高炭素鋼を主体とした条用特殊鋼を溶製しているため、転炉の平均吹止めCレベルは0.25%と高い。そのため従前の精錬プロセスでは、転炉での吹止めPやCの的中精度をあげるために二回吹錬が必要な場合もあった。また転炉に吹錬精度向上を目的として上下吹き技術を導入しても、脱りん負荷のためにその効果は少なくなっていた。

ところが、全量溶銑処理・全量溶鋼処理体制が確立すると、転炉の脱りん負荷が除去された。その結果、最大0.1Nm³/min・tまでの不活性ガス底吹きを行うLD-OTB法による、上下吹き技術の導入が実現した。

そして、精錬負荷の軽減による吹錬パターンの単純化および上下吹きの導入による炉内反応の均一化の効果により、吹錬制御精度が向上した。

さらには、上下吹き技術および自動吹錬による滓化制御技術により、効率良くマンガン鉱石およびクロム鉱石

Table 1. Optimum allocation of refining functions in steelmaking process.

	H-furnace	L D	Ladle refining			
			Heating	Slag refining	Powder injection	Vacuum degassing
De Si	● ← ●					
De P	● ← ●					
De S	● ← ●			○ → ○	○ → ○	
De C		● → ●				○ → ○
Heating		● → ○				
Temperature adjustment		● → ●				
Chemical composition adjustment		● → ○	○ → ○	○ → ○	○ → ○	○ → ○
Purification		● → ○	○ → ●			

●: Main ○: Sub

の溶融還元をおこなわせるという、新たな精錬機能が転炉に付加されるようになってきている。

このH炉-転炉-LR間における精錬機能分担の変化状況をTable 1に示す。

以上のように、全量溶銑処理・全量溶鋼処理体制を確立することにより、中高炭素鋼の溶製を主体とする転炉の操業が、高速・高精度・高効率化し、その結果、精錬コストの低減・生産性の向上・品質の向上に大きな効果を得ている。

3.2 転炉操業の改善

3.2.1 副原料原単位の低減

溶銑予備処理プロセス導入後の副原料原単位の低減状況をTable 2に示す。H炉・転炉トータルでも生石灰・軽焼ドロマイト原単位の大幅減少が可能となっている。転炉においては、炉体耐火物保護等の観点より50kg/t程度のスラグ量を確保するようにしている。

3.2.2 マンガン鉱石・クロム鉱石の溶融還元

溶銑予備処理の導入により、吹止めスラグ中の(T・Fe)の低減と転炉スラグ量の減少を図っていくことが可能となり、マンガン鉱石およびクロム鉱石の溶融還元にも有利な環境が整った。そこで、このようなスラグ条件の改善に加えて、上下吹き技術の導入、ハードブロー吹錬の採用および自動吹錬による滓化制御技術の導入をおこなうことにより、(T・Fe)をさらにいっそう低減させるようにした。

その結果、マンガン鉱石に関しては、溶銑中のCにより容易に還元され、(T・Fe)を減少させることによりマンガン分配比が低減し、還元率を高め得ることが確認された⁵⁾。

Table 2. Decrease of the flux consumption by the application of the newly developed process.

		The newly developed process					The conventional process						
		C	Si	Mn	P	S	Temp.	C	Si	Mn	P	S	Temp.
Chemical composition and temperature of hot metal		4.05%	tr.	0.20%	0.020%	0.015%	1300°C	4.40%	0.30%	0.20%	0.080%	0.020%	1310°C
Chemical composition and temperature at turn down		0.25%	tr.	0.18%	0.017%	0.015%	1660	0.25%	tr.	0.07%	0.017%	0.015%	1660
Flux consumption of LD	Burnt lime						35 kg/t						
	Burnt dolomite						12 kg/t						
	Mill scale						22 kg/t						
	Iron ore						10 kg/t						
Flux consumption of hot metal pretreatment	De-P flux						—						
	Lump-CaO						—						
	Manganese-ore						—						
	De-S flux						6 kg/t						

Table 3. Improvement in Mn yield and Cr yield in the case of Mn-ore and Cr-ore reduction.

	LD	LD-OTB	
		Without slag control	With slag control by the automatic blowing control system
Mn yield	70%	75%	90%
Cr yield	65%	75%	77%

C = 0.25% Temperature = 1660°C (at turndown)

また、クロム鉱石に関しても、マンガン鉱石の場合と同様、溶銑中のCにより還元され、還元率が(T・Fe)の減少とともに向上することを認めた。ただし、クロム鉱石中のクロム分は、スピネル構造の強固な酸化物であるクロマイトとして存在しており、スラグ相に溶解して還元反応が進行し得る状態となるまでに時間を必要とする。そのため、クロム鉱石の還元率を高めるためには、吹止めスラグを残留させた状態で次チャージの吹錬を実施することにより、スラグ中に未溶解で残留しているクロマイトを完全に溶解・還元させるための反応時間を確保してやるのが、重要であることを認めた⁶⁾⁷⁾。

マンガン鉱石・クロム鉱石添加時のマンガン・クロム歩留りを Table 3 に示す。

3.2.3 転炉吹錬制御技術

転炉吹錬においては、従前より、スタティックコントロールおよびダイナミックコントロールによる吹錬制御が実施され、吹止成分・温度的中精度の向上に効果をもたらしてきた。

また、全量溶銑予備処理・全量溶鋼処理体制による吹錬パターンの単純化、上下吹きによる転炉内反応の均一性増加、ならびに転炉吹錬の自動化の効果により、吹錬制御精度が向上し、その結果、再吹錬率が40%から0.2%にまで低減した。

転炉自動吹錬設備は、1989年7月に導入し、送酸速度・酸素ランス高さ・サブランス測定・炉内圧・副原料投入

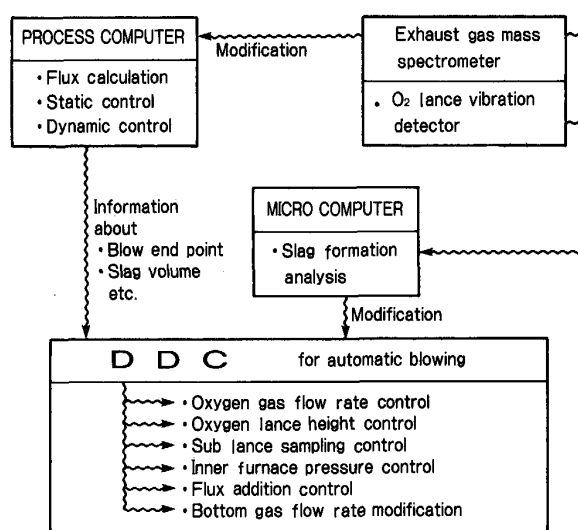


Fig. 4. Outline of the automatic blowing control system.

の自動制御を実施している。自動吹錬設備の構成を Fig. 4 に示す。

本自動吹錬設備では、排ガス情報および酸素ランス振動情報から、スラグ酸化度・スラグフォーミングレベルを検出することにより滓化状態を判定している。酸素ランス振動検出装置の概要を Fig. 5 に示す。

送酸速度・酸素ランス高さ等の吹錬パターンは、この滓化検知情報ならびにスタティックコントロール・ダイナミックコントロールの計算結果に基づいて、吹錬中に修正制御をおこない、従前の吹錬者による判断のばらつきの影響を排除したパターン吹錬を可能にしている。

そこで自動吹錬設備を活用して、滓化状態を検出し、(T・Fe)が低位安定化するようにスラグコントロールをおこなうことにより、マンガン歩留りを向上して吹止めMnレベルを上昇させることを試みた。

自動吹錬により、吹止め(T・Fe)が低減するように滓化制御を実施した場合の(T・Fe)の分布状況の変化

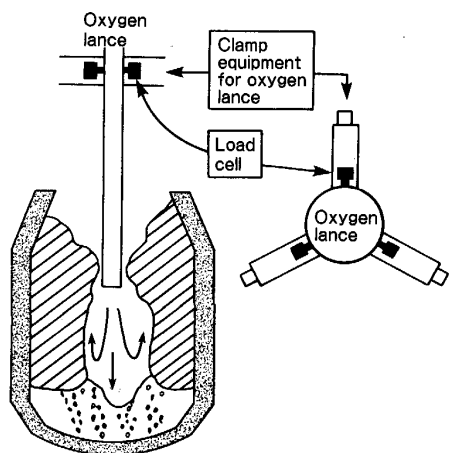


Fig. 5. Outline of the oxygen lance vibration detection system.

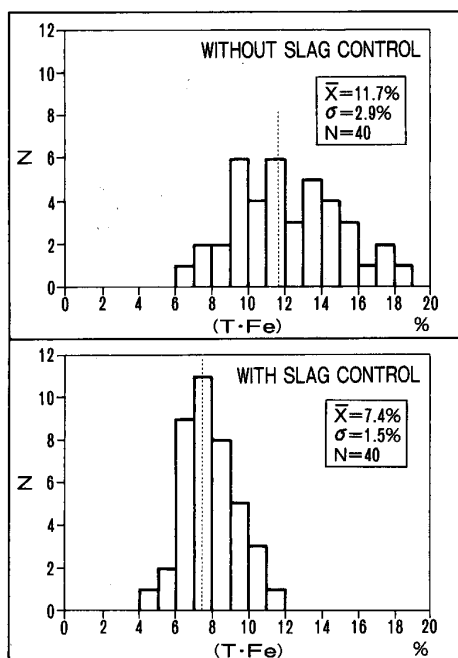


Fig. 6. Improvement in the controllability of (T·Fe) at turnaround.

を、未制御の場合のものと比較して Fig. 6 に示す。滓化制御の実施により (T·Fe) は低位安定化し、その結果、転炉におけるマンガン歩留りが向上して、吹止め Mn レベルを上昇させるという新たな転炉精錬機能の拡大を図ることが可能となっている。滓化制御によるマンガン歩留りの改善状況を Fig. 7 に示す。

3.2.4 溶銑・溶鋼物流の改善

当所では、従前は高炉・転炉間の溶銑の搬送を小型鍋(容量 45 t)でおこない、この鍋で溶銑脱硫処理を実施した後、合せ湯をして転炉に装入していた。

しかし、新しい精錬プロセスにおいては、高炉で溶銑

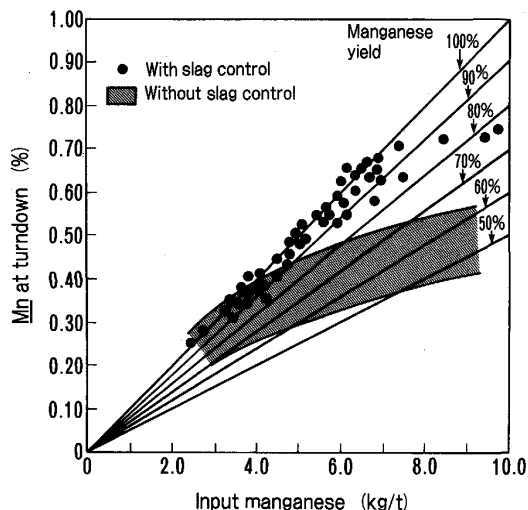


Fig. 7. Improvement in the manganese yield by the slag control with the automatic blowing control system.

を大型鍋(容量 90 t)に直接受銑して搬送した後、H 炉に装入するようにしている。また、このプロセスでは精錬機能が最適分担されているため、H 炉・転炉・LR における成分・温度的中精度が高くなっており、高炉から連続鋳までの生産管理を一本化して、予定鋼種を予定時間どおりに計画生産する体制が確立されている。その結果、高炉で溶銑鍋に受銑する段階から鋼種を決定し、溶銑量を必要量に対して ±1 t の精度で調整することが可能となっている。

また、溶銑・溶鋼物流管理システムを導入して、高炉受銑から連続鋳造までの各工程の生産スケジュールの作成およびその進捗状況の監視を行うようにしており、溶銑・溶鋼物流を円滑にし、滞留時間を短縮するのに効果を上げている。

この大型鍋の採用による放熱量低減効果により 6.7 Mcal/t (35°C)、合せ湯工程の省略効果により 2.7 Mcal/t (14°C)、溶銑搬送時間の短縮効果により 3.6 Mcal/t (19°C) の省エネルギー効果を得ている。

3.2.5 転炉スラグカット技術

転炉出鋼時のスラグカットは、溶鋼の清浄化・合金鉄歩留りの向上・取鍋耐火物の溶損防止の観点から、その必要性が年々高まってきている。

当所では、出鋼時に生石灰を炉内出鋼孔直上に投射してスラグを固め、取鍋への流出を防ぐ石灰投射法を実用化している。しかしこの方法は、中高炭素鋼においては有効であるが、低炭素鋼(吹止め C ≤ 0.14%)においては、(T·Fe) の上昇にともなってスラグの流動性が高くなるため、スラグカットが不完全になるという問題点があった。

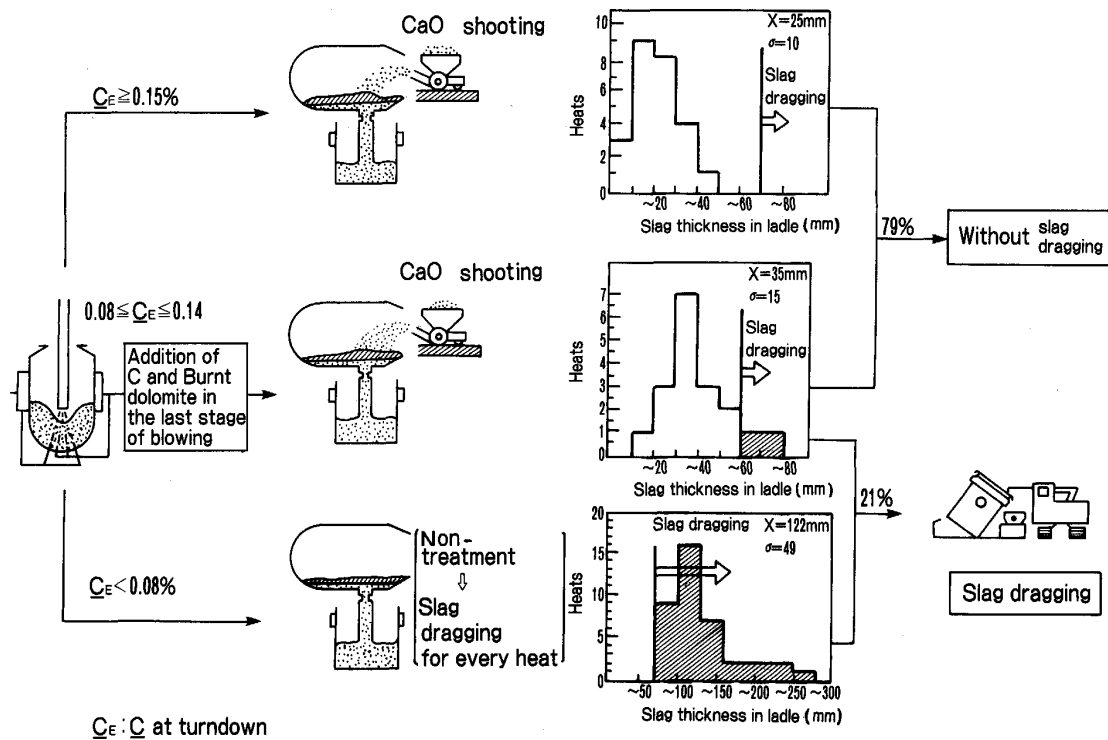


Fig. 8. Slag-off process at LD tapping.

ところが、予備処理溶銑を用いると転炉ではスラグ量が低減するので、スラグ改質が容易となる。そこで、吹錬末期に黒鉛と軽焼ドロマイトを炉中添加し、溶鋼を加炭することなく積極的にスラグ改質を実施する方法を採用した。その結果、従前は困難であった低炭素鋼についてもスラグカットが実施できるようになっている⁸⁾。当所における転炉スラグカット方法の内容を Fig. 8 に示す。

3.2.6 転炉生産性の向上

転炉では本精錬プロセスの導入により、送酸速度を低減させたソフトブロー吹錬から、送酸速度を増大させたハードブロー吹錬への変更が可能となり、その結果、吹錬時間を短縮できるようになった。

また、吹錬制御精度が向上して再吹錬率が低減したことからも、吹錬時間が短縮された。

さらに、全量溶銑予備処理・全量溶鋼処理体制の確立、ならびに転炉吹錬の中精度の向上にともない、QT 法の実施率が 90% にまで上昇し、その結果、吹止め時のサンプリング・分析待ち時間が省略され、製鋼時間が短縮できた。

転炉操作に QT 法を適用すると、吹止めから出鋼開始までの時間が短縮される結果、4.6 Mcal/t (23°C) の温度降下を抑制することができている。

以上のような、吹錬時間の短縮・再吹錬率の低減・

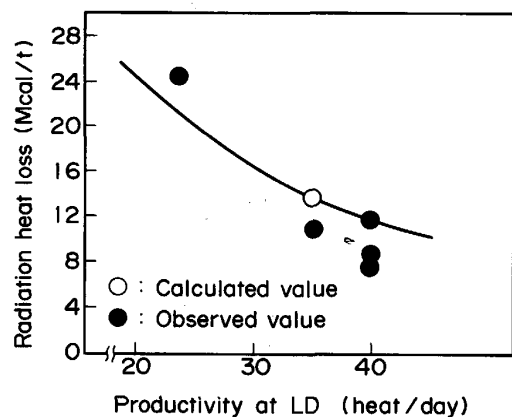


Fig. 9. Decrease of radiation heat loss with the increase of productivity at LD.

QT 実施率の増大による吹止めから出鋼までの時間短縮の各効果により、製鋼時間が短縮して転炉の生産性が向上し、従前の 2/2 基操業体制から 1/2 基操業体制への合理化を達成した。1/2 基操業体制への変更にともない、転炉における待機時間が大きく減少した。その結果、待機時間中の転炉炉体からの放熱損失量が低減し、10.0 Mcal/t (50°C) の転炉における熱収支の改善効果が得られている。転炉の生産性と放熱損失量との関係を Fig. 9 に示す。

Table 4. Decrease of heat loss and increase of Fe yield with the newly developed steelmaking process.

	Merits	Demerits	Heat difference	Fe yield difference
Desiliconization on cast floor of blast furnace	◦ Increase of Fe yield 6kg/t	◦ Decrease of temperature 5.7Mcal/t	Δ5.7Mcal/t	+6kg/t
Transportation from blast furnace to H furnace	◦ Decrease of radiation heat loss by large-size ladle 6.7Mcal/t ◦ Disuse of hot metal mixing process 2.7Mcal/t ◦ Improvement in the handling of hot metal 3.6Mcal/t	—————	+13.0Mcal/t	0kg/t
H furnace	◦ Input heat from reaction 37.7Mcal/t ◦ Decrease of radiation heat loss during de-(S) treatment 3.8Mcal/t ◦ Increase of Fe yield 25kg/t (Reduction of mill scale Efficient use of sensible heat of hot metal and reaction heat)	◦ Heat loss with treatment 24.3Mcal/t ◦ Radiation heat loss 4.5Mcal/t ◦ Sensible heat of slag (CaO 11.2kg/t) 6.6Mcal/t ◦ Charging and tapping 9.5Mcal/t ◦ Exhaust gas 3.7Mcal/t	+17.2Mcal/t	+25kg/t
L D	◦ Decrease of output heat 35.7Mcal/t ◦ Radiation heat loss 10.0Mcal/t (24.5Mcal/t→14.5Mcal/t by reducing waiting time) ◦ Sensible heat of slag (CaO 35kg/t→10kg/t burnt dolomite 12kg/t→6kg/t) 22.0Mcal/t ◦ Exhaust gas 3.7Mcal/t (43.9Mcal/t→40.2Mcal/t) ◦ Application of quick tapping 4.6Mcal/t ◦ Decrease of Fe loss in slag 11kg/t	◦ Decrease of input heat 61.7Mcal/t ◦ Sensible heat of hot metal 1.7Mcal/t (218.5Mcal/t→216.8Mcal/t) ◦ Reaction heat 60.0Mcal/t (192.3Mcal/t→132.3Mcal/t) ◦ Decrease of Fe yield 17kg/t (Reduction of Fe-ore)	Δ21.4Mcal/t	Δ6kg/t
Total	◦ Heat increase 94.8Mcal/t ◦ Fe increase 42kg/t	◦ Heat decrease 91.7Mcal/t ◦ Fe decrease 17kg/t	+3.1Mcal/t	+25kg/t

4. 熱および鉄収支解析

溶銑予備処理導入前と現行の新プロセス間における、精錬プロセストータルとしての熱および鉄収支の変化状況を、S35Cを溶製した場合を例に、Table 4にまとめて示す。新プロセスの導入により、転炉においては入熱量が減少したため鉄鉱石の投入量が減少し、鉄原単位が低下した。しかしプロセス全体としては、精錬機能の最適分担および物流の最適化・効率化が行われた結果、3.1 Mcal/t (16°C)の熱効果を得るとともに、この熱効果を有効活用することにより、25 kg/tに鉄原単位向上効果をあげている。

5. 高純度鋼の溶製

本精錬プロセスを適用することにより、 $P + S \leq 50$ ppmの低りん低硫鋼を安定して製造することが可能となっている。低りん低硫鋼の溶製例をFig. 10に示す。

さらに、軸受鋼や弁ばね鋼のような超清浄鋼の溶製についても、本精錬プロセスは活用されている。これらの超清浄鋼において、チタン系介在物を低減させるために

は、従前ではチタン含有量が0.01%の高価なフェロクロム合金鉄を取鍋添加する必要があった。

ところが、本プロセスの採用により、転炉スラグ量の減少および上下吹き吹錬によるCr分配比の低減の効果が得られた結果、フェロクロム合金鉄を転炉吹錬時に炉中追加した場合のクロム歩留りを、45%から90%に改善できるようになった。このクロム歩留りの改善状況をTable 5に示す。

そこで軸受鋼の溶製に、予備処理溶銑を用い、チタン含有量が0.9%のより安価なフェロクロム合金鉄を転炉へ添加する方法を適用してみた。その結果、フェロクロム合金鉄中のチタンは上下吹き転炉の強攪拌により容易に酸化除去され、凝固時にTiが反応して生成するチタン系介在物(TiC-TiN)低減の品質改善効果が得られるとともに、フェロクロム合金鉄のコスト低減も可能となった。本法による溶鋼におけるTiの低減状況をFig. 11に示す。

6. 結 言

神戸製鉄所では、1983年11月の溶銑予備処理プロセ






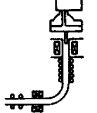
Process	Composition %					Temperature °C	Remarks
	C	Si	Mn	P	S		
BF Desilicization 	4.45	0.30	0.18	0.082	0.045	1503	
Flux O2  H furnace	4.40	0.15	0.09	0.078	0.045	1373	De-P Agent 24.2 kg/t De-S Agent 4.5 kg/t O2 7.4 Nm ³ /t
	4.05	tr.	0.09	0.008	0.006	1295	
 LD	0.09	tr.	0.25	0.005	0.004	1676	Dephosphorization at Tapping
	0.09	tr.	0.17	0.002	0.004		
Arc Heating 	0.39	0.18	1.50	0.002	0.004		Low Phosphorus Ferro-manganese
Powder Injection 	0.39	0.19	1.50	0.002	0.001	1581	Desulphurization
Continuous Casting 	0.39	0.19	1.50	0.002	0.001		

Fig. 10. Production of ultra low phosphorus and sulphur steel.

Table 5. Cr yield and Cr partition in LD.

Blowing	Hot metal pretreatment	Cr yield (%)	(Cr)/[Cr]
Top	Non pretreated	45	10~20
	Pretreated	70	10~20
Combined	Pretreated	90	3~7

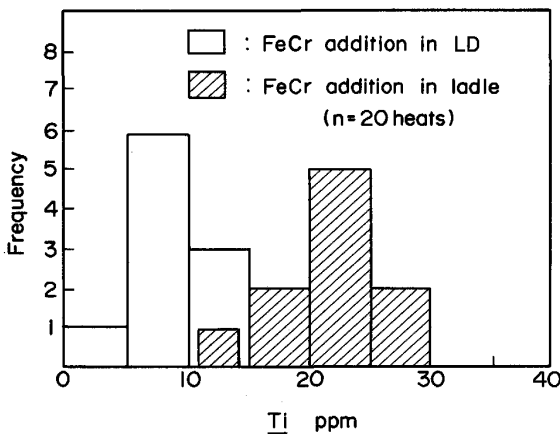


Fig. 11. Titanium content of high carbon chromium bearing steel.

スの導入以来、溶銑予備処理-転炉-溶鋼処理を組み合わせた精錬プロセスの開発を進め、精錬機能の最適分担を図ってきた。その結果、転炉操業は高速・高精度・高効率となり、高炉から連続までの生産を一貫して精度良く計

画できる体制を確立した。また、転炉精錬機能が拡大し、吹止め Mn・Cr レベルの上昇を含めた転炉の成分・温度調整能力が増大するとともに、高純度・高付加価値鋼を高品質・低コストで製造できるようになった。

さらに転炉における Mn・Cr を含む吹止成分を、製品規格値に精度良く近づけていくことにより、逆に LR 処理負荷の軽減を図れるようになってきている。

今後は、転炉の精錬機能をさらに高度化して、各プロセスの精錬分担の最適化を進めていくことにより、精錬プロセストータルとしてのいっそうの品質および生産性の向上とコストの低減を図っていきたい。

文 献

- 1) 大西稔泰, 高木 弥, 武林俊治, 矢田場武, 吉田康夫, 勝田順一郎: 神戸製鋼技報 R & D, **34** (1984), p. 73
- 2) 大西稔泰, 高木 弥, 小倉哲造, 羽鹿公則, 矢田場武, 吉田康夫: 神戸製鋼技報 R & D, **36** (1986), p. 9
- 3) 塩飽 潔, 川崎正蔵, 神森章光, 青木松秀, 羽鹿公則: 鉄と鋼, **73** (1987), p. 1567
- 4) 塩飽 潔, 川崎正蔵, 神森章光, 青木松秀, 羽鹿公則: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 991
- 5) 萬谷志郎, 日野光元: 鉄と鋼, **74** (1988), p. 1701
- 6) 山名 寿, 佐藤哲郎, 片桐 望, 尾上俊雄, 小山伸二: 鉄と鋼, **70** (1984), S 961
- 7) 山名 寿, 佐藤哲郎, 片桐 望, 尾上俊雄: 鉄と鋼, **71** (1985), S 143
- 8) 川崎正蔵, 青木松秀, 羽鹿公則, 折橋英行, 船岡洋一: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1253