

精錬工程におけるフラックス反応効率向上技術

Improvement of the Reaction Efficiency of the Flux in the Refining Process

植木 俊行*
Toshiyuki UEKI

熊倉 政宣
Masanori KUMAKURA

宮田 政樹
Masaki MIYATA

小川 雄司
Yuji OGAWA

抄 録

鉄鋼先進国である日本の製鋼分野においては、国際競争力の確保及び、製品のハイエンド化ニーズにこたえるためのプロセス技術の開発を行ってきた。近年、更なる鋼材の高級化に伴い精錬負荷が増大するなか、高級鋼の安定かつ大量生産を実施するため、精錬の高効率化技術の開発を進めている。また、精錬反応効率の向上及びスラグリサイクルの拡大により、コスト低減及びスラグ生成量の削減を図ってきた。更に、土壤環境基準のふっ素制約導入に対応するために、ふっ素無し精錬技術の開発を実施している。これまでの精錬工程におけるフラックス反応効率の向上によるスラグの生成量削減取り組みの概要とその成果、そして今後の課題について述べた。

Abstract

We have promoted the development of steelmaking process technologies in order to secure global competitiveness and to satisfy the high-end needs of the product. In recent year, the lode of refining process has increased with upgrading of the steel materials. So, we have developed technologies of high efficiency steelmaking process. And we have reduced the cost and the amount of the slag by the improvement of the reaction efficiency of the flux and the increase in recycling of the slag. Furthermore, we are developing the refining technology which does not use fluoride in order to adapt for environmental quality standards for soil pollution. In this paper, we describe the improvement of the reaction efficiency of the flux in the refining process, reduction of the amount of the slag and the future subject.

1. 緒 言

1980年代、抜本的な国際競争力の向上の必要性、鋼材の高級化、品質の一層の厳格化が進むなか、これに対応するため精錬工程の効率化が進められてきた。大きな発展としては、溶銑予備処理技術の進展りであり、精錬機能分割が進んだ時期であった。しかし、近年においては、更なる製品のハイエンド化や原料自由度向上による溶銑中の不純物元素の増加等によって精錬負荷が更に増大しており、高級鋼を高効率かつ安定的、そして安価に製造する技術開発が求められている。これに対して、精錬工程におけるフラックス反応効率の向上、スラグリサイクルの拡大を図りコスト削減に努めるとともに、スラグ生成量（精錬工程で発生するスラグ量から所内におけるスラグリサイクル量を差し引いた量）の削減を推進してきた。更に、土壤環境基準のふっ素制約導入に対応するため、ふっ素無し精錬技術等の対応が迫られてきた。新日鉄住金(株)においてはこれらの

課題に対し、溶銑予備処理を含む一次精錬工程の見直しと技術開発を絶えず実施してきた。本稿ではこれまでの取り組み概要とその成果について述べる。

2. フラックス反応効率向上技術

2.1 フラックス反応効率向上とスラグ生成量削減の視点

鋼材の高級化への対応かつ、高い生産能力を維持しながら低コスト化かつスラグ生成量の削減を行うためには、①少ない副原料で精錬が可能な反応効率の高いプロセスの開発によるスラグ量そのものの削減、②スラグをリサイクルしやすいプロセスの開発、③土壤環境基準に対応すべくふっ素を使用しない精錬プロセスの開発、④主原料自由度の向上を実現しながら熱的裕度を高位に維持できるプロセスの開発が必要である。

上記の観点から、新日鉄住金において、1980年代までに確立した溶銑予備処理法の見直しと改善を行った。主な改善は以下である。

* 製鋼技術部 製鋼技術室 主幹 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

- ① 精錬の基本工程である脱珪，脱硫，脱磷，脱炭の4工程の分離による反応効率の向上とスラグリサイクルの拡大
- ② 転炉型溶銑脱磷処理への集約と，更なる精錬反応効率の向上

これらの取り組みにより，フラックス反応効率の向上及びスラグ生成量の削減を行ってきた。

2.2 精錬工程の分離状況

更なる高級化のニーズによる精錬負荷増加に対応すべく溶銑予備処理プロセスの見直しを行ってきた。図1に各製鉄所の現状における精錬反応の分離状況と適用プロセスを示す。

従来，同一容器で脱磷と脱硫を実施していたのを分離，また脱磷においては転炉で行うプロセスに集約，更に，溶銑 [Si] 値が高い場合の事前脱珪を実施する4工程分離を基本とした。これらにより各反応に応じた適切な処理を行うことができ，生石灰原単位の削減等，効率の良い精錬処理が実施できる。これらを基本思想として，各製鉄所においては，各既存設備の持つ特長を活かしながら精錬反応の4つの工程分離と適用比率の向上を図ってきた。以下にその詳細について述べる。

2.3 溶銑脱硫工程の分離

従来の溶銑脱硫法は，トープードカーや取鍋にて同一容器内で脱磷・脱硫同時反応，もしくは脱磷処理に引き続き脱硫処理をするように開発された。しかし，脱硫反応には高温・低酸素活量，脱磷反応には低温・高酸素活量と互いに相反した条件が必要であるため，脱磷処理時の酸化性雰

囲気における脱硫では効率が低下していた。そのため精錬効率向上の点から，より高温かつ低酸素分圧下での精錬が可能な脱磷処理前での処理に工程分離を進めた。また，生石灰，カルシウムカーバイド，ソーダ灰を利用したフラックスインジェクション法が主流であったが，機械攪拌方式のKR法の高い反応効率が見直され，各所に導入してきた。1965年広畑製鉄所²⁾で開発されたこのKR法は鹿島，八幡(小倉地区)で古くから導入されていたが，近年では和歌山³⁾，また八幡(戸畑地区)，君津にも設置⁴⁾した。

また，フラックスインジェクション法についても高い脱硫能を持つCaO-Mg系フラックスインジェクション法の開発を実施した⁵⁾。新日鐵住金の製鋼工場においては各製鋼工場の設備基盤状況に応じてトープードカー，取鍋，転炉を用いたインジェクション法あるいはKR法の二種類の方式からいずれかを選択，実施している。

脱硫工程を分離かつ高効率プロセス化を行った結果，脱硫効率が向上し，生成スラグ量の低減が図れている。

2.4 溶銑脱磷，脱炭工程の分離

2.4.1 転炉型脱磷法の優位性

溶銑脱磷については早くから，トープードカーを反応容器として使用した溶銑予備処理法を実施してきた。溶銑中に脱磷剤を吹き込むこの方法はフリーボードが小さいため脱磷剤の横溢が生じ，攪拌力を高めることができず，反応効率が低く，処理に時間を費やす。また，転炉脱炭工程における熱的裕度を奪い，スクラップ使用量に制約を受け，生産弾力性に劣るという課題があった。また，溶銑鍋を用いた方法においてはトープードカーよりも混合性が高く，高速処理が可能であるが鉄スクラップ使用の制約，フリーボード不足といった課題は共通であった。

そのため，フリーボードが大きく，強攪拌下で気体酸素を用いることが可能な転炉を用いた脱磷処理法を開発した。転炉の持つ強攪拌と高速送酸機能を利用した高酸素ポテンシャル下における効率的な低CaO/SiO₂(以下，塩基度と表記)スラグでの脱磷と10分以内の高速脱磷精錬が実現できる。その上，スクラップの溶解能力が高く，大量のスクラップ配合が可能である。また，この転炉法においては，スクラップの配合可能と同様に，スラグの配合が容易なことから，後工程で生成したスラグを利用する向流精錬を実施し易い特徴を備えている。以上より，転炉法による溶銑脱磷処理は他のプロセスよりも優位性を有している^{6,7)}。

2.4.2 SRP法，LD-ORP法

転炉を用いた脱磷方法は，1987年には鹿島製鋼工場において，2基の転炉を用い脱磷処理と脱炭処理を分離し，更に脱炭炉のスラグを脱磷炉にリサイクルする向流精錬を行うことで，スラグを低減しつつ効率のよい脱磷が可能

Works	Separation of the 4 refining processes			
	De[Si]	De[S]	De[P]	De[C]
Muroran	Torpedo	Torpedo	Converter	Converter
	(De[S] in LF)		MURC	LD-ORP
Kashima	Ladle	Converter	Converter	Converter
	KR	SRP		
Kimitsu	Torpedo	Ladle	Converter	Converter
	KR	Partially Torpedo	MURC	Partially LD-ORP
Nagoya	Converter	Converter	Converter	Converter
		Desulfurization Furnace	LD-ORP	
Wakayama	Ladle	Converter	Converter	Converter
	KR	SRP		
Yawata (Kokura)	Ladle	Converter	Converter	Converter
	KR	SRP		
Yawata (Tobata)	Torpedo	Ladle	Converter	Converter
	Injection	KR	Partially Torpedo	MURC
Oita	Torpedo	Ladle	Converter	Converter
	Injection	Partially Ladle	MURC	

図1 新日鐵住金における精錬反応の分離状況
Separation of refining processes in Nippon Steel & Sumitomo Metal Corporation

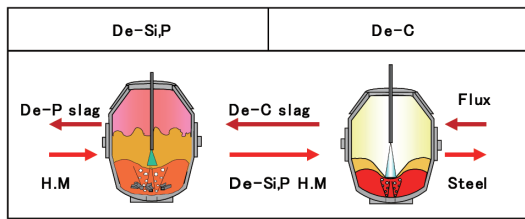
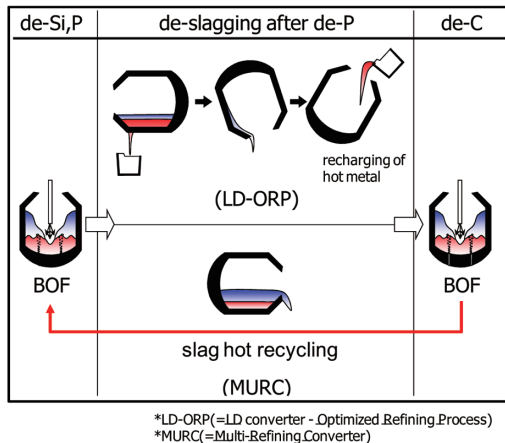


図2 転炉型溶銑脱磷処理プロセス (SRP)
Converter type hot metal dephosphorization processes (SRP)



*LD-ORP(=LD converter - Optimized Refining Process)
*MURC(=Multi-Refining Converter)

図3 転炉型溶銑脱磷処理プロセス¹⁰⁾
Converter type hot metal dephosphorization processes
(LD-ORP, MURC)

SRP法 (Simple Refining Process) を開発した (図2)^{8,9)}。

また名古屋製鋼工場では、稼働率の低かった旧第一製鋼工場の転炉を使ったLD-ORP法 (LD-Optimized Refining Process) (図3¹⁰⁾) を1989年に導入した^{11,12)}。この方法は溶銑脱磷処理用転炉に溶銑を装入して、脱珪・脱磷精錬を行った後、同じ炉内で底吹き脱硫を行い、スラグカットし、その後、別の脱炭用転炉に移し替えて再度脱炭精錬をするという方式である。

SRP法、LD-ORP法とも溶銑移し替いを伴うが、生石灰削減や歩留向上、転炉の安定高速処理が可能なることを狙って全量適用を指向している。

1990年代後半になると国際競争力の激化、鉄鋼需要の拡大のもと、溶銑脱磷処理プロセスとして圧倒的有利であるこの転炉型の脱磷処理を急速に拡大させてきた。和歌山においては1999年に、転炉型の脱磷専用炉を備えた製鋼工場を建設⁹⁾し、プロセスの高効率化と生石灰使用量の削減によりスラグ生成量低減が図られている。更にこの技術は小倉にも展開され、2010年に転炉型専用脱磷炉を設置している。

また、LD-ORP方式は、名古屋での実施に加えて、君津でも極低磷鋼の精錬用に活用している。

最近、名古屋では、更なる脱磷効率化を狙い、脱硫工程を分離するため、脱磷処理の前に事前に別の転炉にて脱硫を行う精錬方式 (ORP-II) も実機化している。この方法によれば、溶銑の移し替えが増えるものの、効率の良い向流

精錬処理が可能となり、生石灰使用量削減、スラグ生成量低減に寄与している¹³⁾。

2.4.3 MURC法

転炉型脱磷法のもう一つの方法として、1基の転炉で脱磷と脱炭を中間排滓を介して連続して行うMURC法 (Multi-Refining Converter) を開発した¹⁴⁻¹⁶⁾ (図3¹⁰⁾)。本プロセスは、脱磷処理を行ったのち、溶銑を炉内に残したまま脱磷スラグのみを排滓、その後、脱炭処理を実施する。脱炭スラグは炉内に残したまま次チャージの脱磷処理を行う向流精錬であるため、最小限の熱損失で向流精錬が可能となり、スラグ量も大幅に低減できるプロセスである。

このMURC法は、一般鋼 (極低磷鋼を除く) 精錬には生石灰削減、スラグ量削減、熱裕度活用などにおいて非常に効率的な製造方法であり、室蘭で開発した後、大分、君津、戸畑などで広く適用され、生成スラグ量の低減に寄与している。

向流精錬法の効果としてMURC法の例を示す。図4¹⁷⁾に大分製鉄所におけるMURC法による脱磷処理時の磷分配 (L_p) の実績値とスラグ組成から計算した推定値との関係について、脱炭スラグのホットリサイクル実施有無の比較を示す。ホットリサイクルの実施により、より計算値に近い高い分配比が得られていることがわかる。従って、ホットリサイクルを行ったスラグ中の余剰塩基度分に相当する生石灰を削減することが可能であり、ホットリサイクルによって40%の削減効果が認められている (図5¹⁷⁾)。

2.4.4 溶銑脱磷処理比率の向上

図6に溶銑脱磷法の適用比率の推移を示す。溶銑脱磷処理比率の向上を行うとともに、主流であったトープードカーや溶銑鋼を使った溶銑脱磷処理方法に代わって、前述したように国際競争力の激化、鉄鋼需要の拡大、スラグの生成量削減に対応すべく、転炉の長所を活かした溶銑脱磷法であるSRP法、LD-ORP法、MURC法の処理比率向上を図っている。足元2013年においては転炉型の溶銑脱磷法の適用比率は全社84%レベルまで拡大した。今後、全社100%

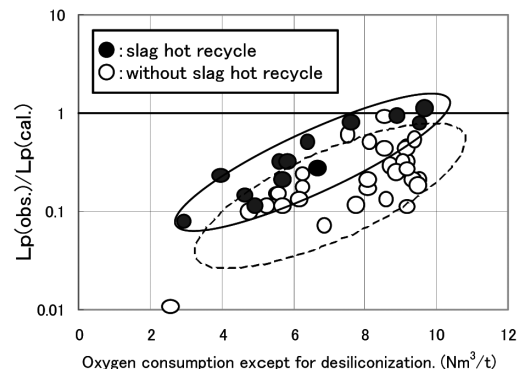


図4 MURC法におけるスラグホットリサイクルの効果¹⁷⁾
Effect of slag hot recycle by MURC process (Oita Works)

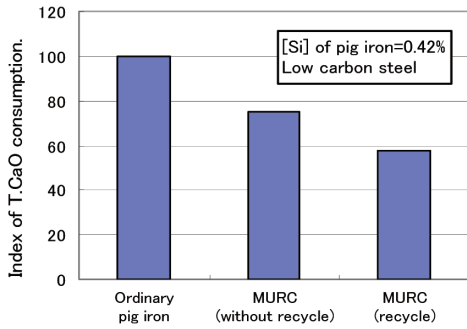


図5 MURC 法における CaO 消費量の比較¹⁷⁾
Comparison of CaO consumption (Oita Works)

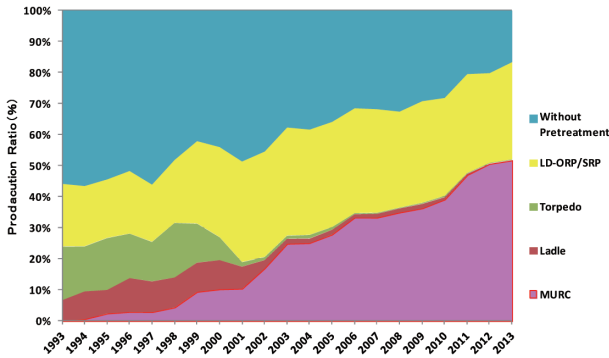


図6 処理法別 溶銑脱磷処理の適用比率
Production ratio of the types of hot metal dephosphorization

の処理化を指向し、フラックスの反応効率の向上による生成スラグ量の削減を実施していく。

2.5 溶銑脱珪

高炉溶銑中の珪素濃度の上昇は製鋼の生石灰使用量増大やそれに伴うスラグ量の増大などへの影響が大きい。

前述のように転炉型脱磷処理を採用した場合は、大きな反応容器を活用し比較的低塩基度条件で低融点スラグ組成を利用した脱珪、脱磷吹錬が可能である。このため溶銑 [Si] を極小化する必要はないが、脱磷に必要な適正 [Si] 値が存在する。そこで、この [Si] 値を超える溶銑 [Si] の場合において、事前脱珪を実施し、製鋼スラグの生成量削減に取り組んでいる。しかし、現状、この脱珪能力は十分ではなく今後、製鋼スラグの生成量の更なる削減を目的にこの技術を拡大していく計画である。

以上に述べたように、精錬反応の基本4工程である脱珪、脱硫、脱磷、脱炭工程を分離、そして脱磷工程を転炉型に集約することにより各反応効率を高め、生成するスラグ量の削減を行ってきた。

2.6 更なるフラックス反応効率の向上

工程を分離した各工程において、更なる反応効率を高める技術開発も進めている。その一例を示す。

脱磷処理においては低温処理、また短処理時間のため、生石灰の溶解が不十分となる。そこで、転炉方式の利点

を最大限に生かし、底吹きガス流量を増加させ、攪拌力を強化することで生石灰の溶解を促進させ反応効率の向上を図っている^{7,18)}。

また、上吹きランスから生石灰の粉体を吹き付けることで生石灰の滓化性を促進させる技術を開発した。これは滓化に有利な粉状生石灰の集塵損失を防ぎ、かつ、高温となる火点に生石灰を直接投入することで生石灰の滓化を向上させる方法である (図7)¹⁹⁾。

2.7 スラグリサイクルの拡大

スラグの生成量削減にはスラグのリサイクルを可能な限り実施することが必要である。前述した、精錬の各工程を分離したことで、磷酸濃度が低い脱硫スラグ、脱炭スラグを容易に分離回収することができ、焼結工程へのリサイクルが可能となった。現在では多くの箇所でもリサイクルを実行し、スラグの生成量の削減に寄与している。

また、前述したように脱炭スラグを脱磷に使用する向流精錬法の拡大を図っている。脱炭工程で発生する脱炭スラグは、比較的高塩基度であるが高温の転炉吹止条件におけるスラグであり磷酸濃度が低い。よってこのスラグを低温かつ、低塩基度操業の溶銑脱磷工程において、十分に再利用することが可能である。これにより脱磷工程における生石灰使用量を削減することが可能である。

MURC 法の効果について、図8¹⁶⁾に装入した生石灰原

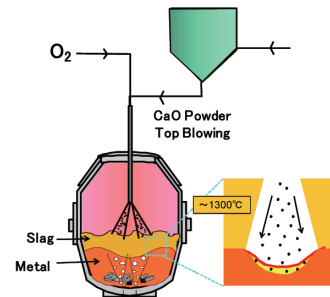


図7 CaO 粉体上吹き法の概要¹⁹⁾
Schematic of CaO powder top blowing

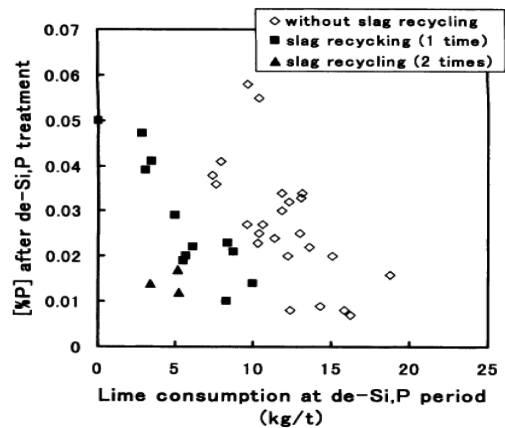


図8 生石灰原単位に及ぼすスラグリサイクル効果¹⁶⁾
Effect of slag recycling on lime consumption

単位と脱燐処理後の [P] 濃度の関係を示す。スラグリサイクルを実施した場合は実施しない場合と比較して、5～10kg/tの生石灰原単位の削減効果が認められている。

3. ふっ素無し精錬技術の進歩

2000年代に入り、土壌環境基準にふっ素規制が適用され、ふっ素を使用しない脱燐プロセスの開発を推進した。トービードカーや溶銑鋼等の反応容器においては、容器容量の制約から高塩基度となりスラグの融点を下げるためふっ素を利用していた。このためふっ素を使用しない場合、脱燐効率が著しく低下し後工程の負荷が増大する。よって、転炉法の拡大とともに、転炉法の優位性を利用した強攪拌、高酸素ポテンシャル下での低塩基度処理を実施し、蛍石を使用しない処理技術を開発している。図9¹⁷⁾にCaO/Oと脱燐石灰効率の関係を示すが、蛍石を使用しなくても、高い脱燐石灰反応効率の確保が可能となっている。

また前述した粉体上吹き法の活用により細粒CaOの表面積増加による効果と、火点への直接投入の効果により、蛍石を使用しなくても生石灰の溶解を促進させ、脱燐能の向上を図っている(図10¹⁹⁾)。

4. 製鋼スラグの生成量削減効果

以上述べてきた精錬工程の機能分担、そして転炉型溶銑

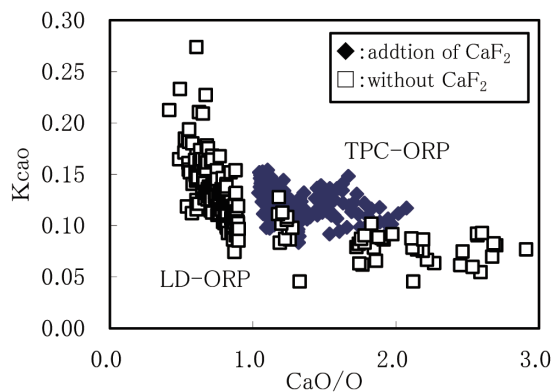


図9 CaO/Oと K_{CaO} の関係(八幡製鉄所)¹⁷⁾
Relationship between CaO/O and K_{CaO} (Yawata Works)

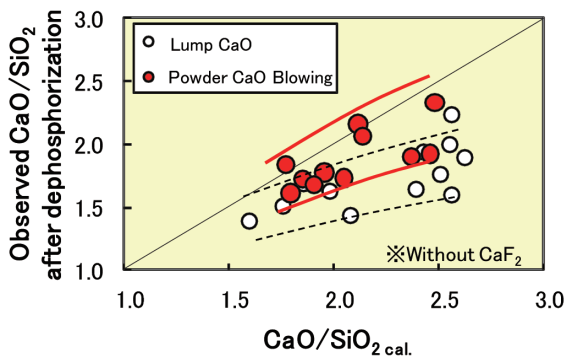


図10 計算塩基度と実塩基度の関係¹⁹⁾
Relation between CaO/SiO_2 cal. and observation of CaO/SiO_2 after dephosphorization

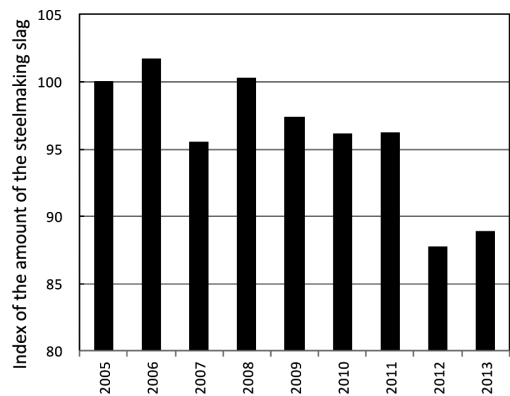


図11 製鋼スラグの生成量の変化
Change of the amount of the steelmaking slag

脱燐プロセスへの集約、また溶銑脱燐処理比率の向上により、製鋼スラグの生成量の削減を図ってきた。図11に製鋼スラグの生成量の推移を示す。2005年度をベースとして種々取り組みにより約13%の削減が図られている。

5. 今後の更なるフラックス反応効率の向上とスラグ生成量削減への取り組み

更なるフラックス反応効率の向上とスラグの生成量削減のために、溶銑予備処理比率の全社100%化を目指すとともに、事前脱珪能力の向上対策を行っていく。更に、精錬反応においては、脱硫、脱燐反応の石灰利用効率を見ると改善の余地は多く、反応効率の更なる追及を行っていくとともに、スラグリサイクルの推進を図り、更なるスラグ生成量の削減に取り組んでいく。

6. 結 言

鋼材の更なる高級化要求に伴い、精錬負荷が増大する中、精錬の基本工程である脱珪、脱硫、脱燐、脱炭の4工程の分離と予備処理比率の向上、転炉型脱燐処理への集約と、更なる精錬反応効率の向上、精錬工程分離によるスラグリサイクルの拡大を実施しスラグ生成量の削減を図ってきた。更には環境対応としてのふっ素無し技術の開発を推進してきた。今後も引き続き、更なる精錬効率化を中心に技術力、現場力の向上を図り、スラグ生成量の削減はもとより、製鋼技術の発展に努めていく。

参考文献

- 1) 北村信也 ほか：鉄と鋼. 6, 1801 (1990)
- 2) 神原健二郎 ほか：鉄と鋼. 58, 34 (1972)
- 3) 植木俊行 ほか：CAMP-ISIJ. 16, 1069 (2003)
- 4) 例えば、秦啓二 ほか：CAMP-ISIJ. 13, 867 (2000)
- 5) 鷲巣敏 ほか：CAMP-ISIJ. 15, 876 (2002)
- 6) 芳山純一郎 ほか：CO₂削減シンポジウム. 48 (2005)
- 7) 藤原清人：第203・204回西山記念技術講座. 61, (2010)

- 8) 松尾亨 ほか：鉄と鋼. 76, 1809 (1990)
9) 吉田克麿 ほか：鉄と鋼. 76, 1817 (1990)
10) 岩崎正樹 ほか：新日鉄技報. (391), 88 (2011)
11) 例えば, 加藤郁 ほか：CAMP-ISIJ. 4, 1153 (1991)
12) 務川進 ほか：鉄と鋼. 80, 25 (1994)
13) 新日本製鐵名古屋製鉄所：第 145 回製鋼部会提出資料.
2011, 私信
- 14) 林浩明 ほか：CAMP-ISIJ. 15, 139 (2002)
15) 久米康介 ほか：CAMP-ISIJ. 16, 116 (2003)
16) 小川雄司 ほか：鉄と鋼. 87, 21 (2001)
17) 宮本健一郎 ほか：CAMP-ISIJ. 17, 642 (2004)
18) 鳥井孝一 ほか：CAMP-ISIJ. 11, 142 (1998)
19) 谷垣武 ほか：CAMP-ISIJ. 24, 157 (2011)



植木俊行 Toshiyuki UEKI
製鋼技術部 製鋼技術室 主幹
東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071



宮田政樹 Masaki MIYATA
プロセス研究所 製鋼研究部
主幹研究員



熊倉政宣 Masanori KUMAKURA
製鋼技術部 製鋼技術室長



小川雄司 Yuji OGAWA
プロセス研究所 製鋼研究部
上席主幹研究員 工博