

精錬技術の進展と今後の展望

Advances in the Refining Technology and the Future Prospects

熊 倉 政 宣*
Masanori KUMAKURA

抄 錄

精錬工程の課題として国際的コスト競争力の確保、鉄鋼需要増大時の対応、ハイエンド鋼材の安定生産に加え、製鋼スラグのふっ素規制対策や炭酸ガス発生削減、集塵強化等の環境調和課題等の諸課題に取り組みプロセス技術開発を推進してきた。精錬工程のこの約20年間の進展について、これまでの取り組みの概要、各精錬工程におけるプロセス技術開発状況や操業改善状況を概説し、今後の展望について述べた。

Abstract

We have promoted the development of steelmaking process technologies continuously. We have faced some severe conditions such as the global competitions, increasing demands of the steel products, stable production of the high grade steels, and the several environmental issues, for example, regulation change of the fluorine in the soils, reducing the carbon-dioxide emission, exhaust of the smoke, etc. In this paper, we will give an outline of our developments of the process technologies, operational improvements through these 20 years, and the future prospects.

1. はじめに

前回の新日鉄技報（1994年）^①に精錬技術の進歩と展望が掲載されて18年が経過し、この間鉄鋼業を取り巻く環境は激変した。世界経済の浮沈、発展途上諸国の台頭と国際競争激化、原料単価上昇、為替レートの急変、炭酸ガス排出抑制、ふっ素規制等の変化への対応及び、ハイエンド鋼種の安定製造、更に製鉄所と共生する地域からの環境課題への要望対応を行うべく、絶えず製鋼技術を研鑽してきた。本稿ではこの内精錬技術の変遷について述べる。

2. 精錬技術の変遷

2.1 精錬工程における課題への対応

近年における精錬工程の課題と開発の方向としては以下のようである。①溶銑予備処理プロセスの見直しを行い、溶銑脱硫工程の分離、溶銑脱磷・脱炭工程の分離（溶銑予備脱磷処理の実施）による反応効率向上、副原料系コストの削減、スラグ排出量の削減。②鉄鋼需要増大への対応として生産能力向上、主原料自由度向上を実現しながら熱的裕度を向上させ上記溶銑予備処理を高位に維持すること。③2001年からの土壤環境基準のふっ素制約導入に対応し各精錬工程においてふっ素を使用しない精錬プロセス

技術を開発。④ハイエンド鋼種の安定供給として近年の高強度化、高加工性、高靭性化などの要求に応えること。⑤高生産構造を維持しながら炭酸ガス排出抑制に寄与する省エネルギー、建屋からの発塵防止等の環境対策。

これらの課題に取り組んだ結果、精錬の基本工程である脱珪、脱硫、脱磷、脱炭の4工程を分離し、脱磷工程については熱的裕度に優れふっ素レスに対応した転炉型溶銑脱磷プロセスに収斂した。2次精錬については各品種の要請に応じた脱ガス能力の確保や、不純物及び非金属介在物（介在物）低減プロセス開発を実施してきた。これらの技術を活かしつつ環境対策も実施し多量生産への対応力を実現した。以下に、これらの視点で各技術の変遷について述べる。

表1に近年の精錬技術の変遷について示す。

2.2 精錬機能分担の進歩

2.2.1 概要

新日本製鐵においては、トピードカー、溶銑鍋、転炉を精錬容器として利用し、脱炭処理の前に溶銑段階で脱珪、脱硫、脱磷を行なう溶銑予備処理による分割精錬プロセスを1980年代までに確立した^②。その後、脱硫工程分離、溶銑脱磷・脱炭工程分離、反応容器としての転炉を用いたふっ

* 製鋼技術部 製鋼技術グループ グループリーダー 東京都千代田区丸の内2-6-1 〒100-8071

表1 精錬工程の課題と取り組み状況
Themes of refining processes and the solutions

A.D.	Special mentions on the subjects					Special mentions on the processes			
	Raw materials	Heat recovery	Production	Energy saving	Environment	De[S]	De[P]	De[C]	Secondly refining
1990	<ul style="list-style-type: none"> Start up of Scrap Melting Process (Hirohata) OG boiler (Kimitsu) 					<ul style="list-style-type: none"> Start up of LD-ORP (Nagoya) Renewal of the control system (DDC) Start up of REDA (Yawata) 			
	<ul style="list-style-type: none"> Iron Reserve Barrel (IRB, Yawata) 					<ul style="list-style-type: none"> Start up of MURC process (Muroran) Mass production of IF steel High speed decarburization AC process in converter (Hirohata) 			
2000	<ul style="list-style-type: none"> OG boiler (Oita) Regulation of Fluorine in the soil 					<ul style="list-style-type: none"> Desulfurization by injection in the ladle (Oita) Desulfurization by KR in the ladle (Kimitsu, Yawata) Separation of desulfurization process 			
	<ul style="list-style-type: none"> Decrease of HMR Scrap Melting in torpedo ladle Shredder machine (Nagoya, Oita) Dust recycle by RHF,DSP (Kimitsu,Hirohata,Hikari) EAF for stainless steel (Yawata) 					<ul style="list-style-type: none"> Reinforcement of converter dust collector Increase of converter working rate Increase of converter heat size Converter without Fluorine Shortening of converter cycle time Decrease of the heat conductivity of torpedo ladle refractory Increase of the torpedo ladle turn over Increase of LDG recovery Reinforcement of dust collector at the ceiling 			
2010	<ul style="list-style-type: none"> New dephosphorization furnace (Kimitsu) New decarburization furnace (Nagoya) New desulfurization furnace (Nagoya) 					<ul style="list-style-type: none"> Increase of converter type dephosphorization (Without Fluorine) Additional LF (Muroran) High speed operation of MURC process High speed blowing in converter (nozzle improvement) New dephosphorization furnace (Kimitsu) New decarburization furnace (Nagoya) Additional RH (Nagoya,Kimitsu) Increase of RH treatment Promotion of slag recycle (Oita,Kimitsu) All the hot metal dephosphorization 			

素を使用しない脱磷プロセスの開発、各工程における反応効率の向上、スラグリサイクル利用、溶銑 Si が高い場合の調整脱珪、転炉における脱磷処理を実施する場合の転炉能力向上等の課題に取り組んできた。

2.2.2 溶銑脱硫工程分離

溶銑脱硫は、従来の溶銑予備処理法では同一容器内で脱磷・脱硫同時反応もしくは脱磷処理に引き続き脱硫処理するように開発された。しかし、脱硫は還元反応であり、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。精錬効率向上の点から、酸化精錬である溶銑脱磷とは再び工程を分離した。脱硫法としては、高い脱硫能を持つ CaO-Mg 系フランクスのインジェクション法の開発³⁾に加え、精錬効率の高い機械攪拌方式のKR法を見直しして八幡製鐵所(以後製鐵所を略す)、君津に装備した⁴⁾。現在、新日本製鐵の製鋼工場では、箇所の設備基盤状況に応じ二種類の溶銑脱硫方式から何れかを選択し実機化している。

脱硫工程を分離した結果、溶銑払い出し後直ちに高温条件にて溶銑鍋における脱硫を実施することが可能となり脱硫効率が向上した。また、分離回収された脱硫スラグの焼結工程リサイクルが可能となり、一部の箇所で実行開始した。

2.2.3 溶銑脱磷・脱炭工程分離

従来のトピードカーや溶銑鍋を反応容器として使用した溶銑予備処理法は、低磷低硫鋼種の安定製造を可能にした反面、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ていた²⁾。そのため、反応容器としてフリーボードが大きく強攪拌下で気体酸素を用いた高速脱

磷精錬が可能であるとともに、スクラップ溶解能力も高い、転炉を用いた脱磷処理法が箇所既設設備のローカリティに応じて開発され、各所に導入された。

名古屋製鋼工場では、稼働率の低かった旧一製鋼工場の転炉を使った、転炉方式予備処理:LD-ORP (LD-Optimized Refining Process) 方式を 1989 年にいち早く導入した^{5,6)}。この方式は、溶銑脱磷処理用転炉に溶銑を装入して、トピードカーやない大きなフリーボードを利用し、主に気体酸素を使って脱珪・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、溶銑移し替えを伴うが、CaO 削減や歩留向上、転炉の安定高速処理を狙って全量適用を指向している。

この LD-ORP 方式は、名古屋での実施に加えて、君津、八幡でも極低磷鋼の精錬用に活用されている(図 1⁷⁾)。最

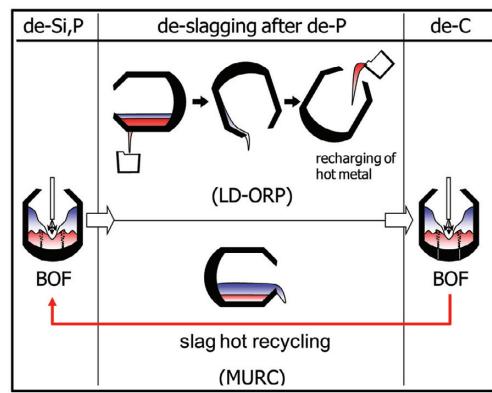


図1 転炉型溶銑脱磷処理プロセス⁷⁾
Converter type hot metal dephosphorization processes

近、名古屋では、さら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、溶銑の移し替え増を伴うものの、効率の良い脱硫、脱磷、脱炭の向流精錬処理が可能となり、生石灰使用量削減、スラグ発生量低減に寄与している。

またもう一つの方法として、新日本製鐵は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⁸⁻¹⁰⁾。本プロセスは、転炉の持つ強攪拌と高速送酸機能を利用して高酸素ボテンシャル下で効率的な低 CaO / SiO₂ (以下、塩基度と表記) にて脱磷を行うとともに、脱炭スラグは炉内に残したまま次チャージの脱磷精錬を行うため、最小限の熱ロスで向流精錬が可能となり、スラグ量も大幅に低減可能である(図 1⁷⁾)。しかし、同一転炉で脱磷処理と脱炭処理を連続して行うため処理時間が延長し、量産工場に適用するには MURC 処理時間の短縮が必須であったが、現状では1サイクルを35~37分程度で実施するレベルまで実力が向上した。またこの方式は、一般鋼(極低磷鋼を除く)精錬には CaO 削減、スラグ削減、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、八幡などで広く適用されている。

2000 年代に入り、土壤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磷プロセスの開発を推進した。トピードカーや溶銑鍋等の従来の反応容器においては、容器容量の制約から低スラグ量、高塩基度ふっ素に頼る溶銑脱磷処理が必要であり、ふっ素を使用しない場合脱磷効率が著しく低下した。このため容積の大きな転炉において高スラグ量、低塩基度においてスラグを溶解した条件でふっ素を使用せず脱磷を行うことを特長とする転炉型溶銑脱磷処理を拡大してきた。

このように、転炉の長所を活用した予備処理が1990年代から急速に発達してきた結果、図 2 に示すとおり、トピードカーや溶銑鍋を使った溶銑脱磷処理方法に代わって、転炉を用いたLD-ORP法、MURC法の二つが処理比率を増しており、2012年初期において転炉型脱磷比率で全社95% レベルまで拡大した。2013年には全社100% 溶銑脱

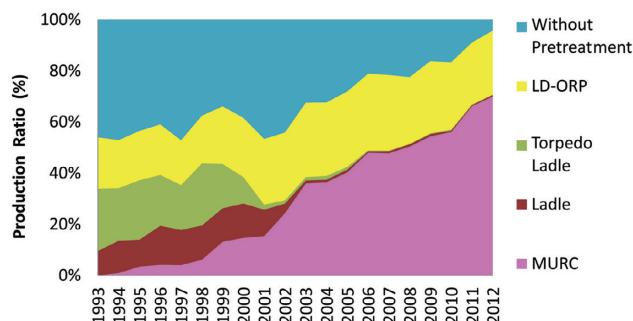


図 2 処理法別溶銑脱磷処理の適用比率
Production ratio of the types of hot metal dephosphorization

磷処理化を指向し更なる精錬効率化を目指す。

2.2.4 溶銑脱珪

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

混銑車や溶銑鍋における脱珪では容器容量制約から低スラグ量が必要であり、事前脱珪処理により珪素を極小化し、脱珪スラグを除去した後に高塩基度・高融点スラグ条件でふっ素を使用した脱磷精錬を行っていた¹¹⁾。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ふっ素レス条件での脱珪、脱磷吹鍊が可能である。このため溶銑 Si を極小化する必要はなく脱磷に必要な適正 [Si] 値が存在する。そこで、この [Si] 値を超える溶銑 Si の場合に事前脱珪を実施することにしている。しかし現在この脱珪能力は十分ではなく、今後製鋼スラグ排出量の削減や、溶銑歩留向上などを目的にこの技術を拡大してゆく方向と考えている。

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、脱炭工程を分離することにより各反応効率を高めると共に、発生するスラグを分別回収、リサイクルする事により更なるコスト削減、スラグ系外排出量削減に取り組んできた。各所の状況を図 3 に示す。各事業所においては、各既存設備の持つ特長を活かしながらこの方向を指向している。

2.2.5 スラグリサイクルの推進とスラグ系外排出量削減

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。これを低温の溶銑脱磷工程において再利用することにより脱磷工程における CaO 使用量を削減することが可能でありコスト削減に寄与する。このため脱炭スラグを分

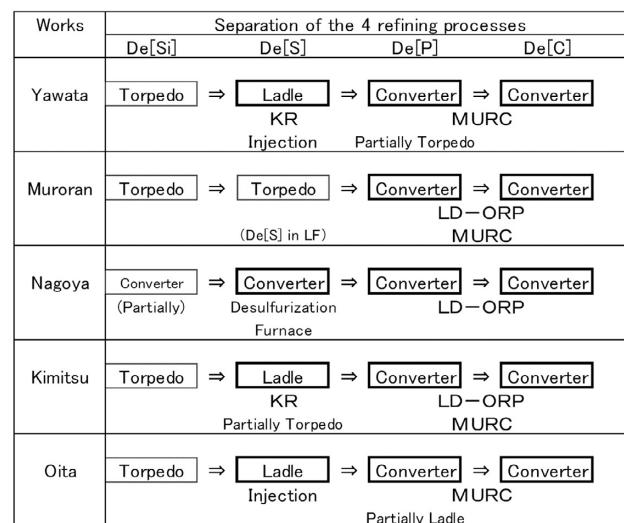


図 3 新日本製鐵における精錬反応の分離状況
Separation of refining processes in NSC

別回収し脱焼工程にリサイクル使用している。MURC法においては、脱炭スラグを炉内固化し次チャージのMURC法の脱焼工程においてそのまま使用する、スラグホットリサイクルが可能であり、各所で実行している。更に脱炭スラグが余剰となる場合には焼結工程へのリサイクルを実施する予定である。脱炭スラグリサイクルは、溶銑脱焼処理の実施による脱焼・脱炭工程分離が前提になる。このように溶銑脱焼処理比率の拡大と共に伴う脱炭スラグリサイクル、溶銑の調整脱珪によりスラグの系外排出量を削減している。

2.2.6 計算モデルを活用した精錬反応解析の推進

精錬反応プロセスは、脱硫、脱焼、脱炭に加え、Si, Mn, Feの酸化、還元反応が同時に進行する。このプロセスを解析もしくは最適化するために従来より反応計算モデルが考案されてきた。新日本製鐵においても競合反応モデル¹²⁾をベースに総合反応解析モデル（MACSIM）¹³⁾を開発し操業解析に活用してきた。一方、脱焼反応においてはスラグ中の固相と液相間の焼の分配がスラグ中酸化鉄濃度に影響される¹⁴⁾ことから、日本鉄鋼協会の研究会においてスラグ中の固相、液相、メタルの3相における物質移動を計算するマルチフェーズ計算モデルが競合反応モデルをベースに構築された^{15,16)}。現在のLD-ORPの脱焼操業においては、マルチフェーズスラグ解析の結果と同様、脱焼中期のスラグ中酸化鉄濃度向上による脱焼率向上を図っている。

また、精錬反応の到達点である平衡状態を計算する熱力学モデルについては新日本製鐵の先端技術研究所を中心にIRSID社との共同で開発がすすめられた^{17,18)}。セルモデルをベースとし、これまで蓄積された多数の熱力学データベースを駆使した汎用熱力学計算モデルが使用可能となっており、現在、現場における研究開発の基礎検討に重要な役割を果たしている。しかし、いくつかの元素系のデータベースについては、更なる精度向上に向けた開発が期待されている。

更に、各種プロセスにおける熱及び物質移動については、精度よく計算ができるようになってきた。数値計算によるシミュレーション解析は現在広く用いられ、現場の操業、開発検討に利用されている。後述の転炉吹鍊における酸素ジェット噴流解析や、転炉への溶銑装入時における発塵とその後の含塵量の定量的計算など、十分な精度で計算が可能と考えられる。

2.3 生産量の拡大とコスト削減

2.3.1 背景

2000年代に入り溶銑予備処理比率を維持しながら生産能力向上を指向し、転炉能力向上、主原料自由度の向上、熱的裕度の向上によるHMR (Hot Metal Ratio) 低減等に課題として取り組んだ。

背景として前述のように、ふっ素規制導入により溶銑脱焼処理を転炉において実施する必要性が生じた。これにより、転炉型予備処理法における熱的裕度拡大の効果を享受することが可能となった。そこでHMRを低減しスクランプを使用しながら溶銑脱焼処理を行うことが可能となる。一方、転炉における脱焼処理を導入するため、転炉の処理時間を脱焼処理に取られ、転炉能力が不足した。これらの課題を解決するためには転炉能力を抜本的に向上する必要があった。

2.3.2 転炉能力の向上

転炉能力向上には、ヒートサイズアップ、稼働率向上、サイクルタイム短縮の3つの視点がありそれぞれに取り組んだ。この方法により、新たな製鋼工場を建設することなく生産量を33百万トン/年レベルまでの生産能力向上を図ることができた(図4)。この時の溶銑脱焼処理比率は約80%であった。リーマンショック後これに近い生産レベルまで復帰しているが、溶銑脱焼処理率は95%程度まで向上させ、高位維持している(図2)。

ヒートサイズアップについては転炉炉体更新に同期した転炉容積拡大や、各クレーンの老朽更新に同期した格上げ更新を実行することによりヒートサイズアップの設備基盤を整備し、転炉能力向上による効果発揮のタイミングで各鍋の大型化によりヒートサイズアップを実行してきた。

稼働率向上については、補修材の溶射や吹き付け等の炉補修設備やスプラッシュコーティング設備の導入による炉補修時間の短縮、出鋼孔の迅速補修装置導入による孔巻き替え時間短縮、転炉炉口地金切断用の専用ランスの設置等を行ってきた。

一方、サイクルタイム短縮については、吹鍊時間の短縮のため吹鍊用ランスノズルを大径・広角化してきた。

溶銑予備処理の適用拡大に伴い、脱炭精錬を中心となつた転炉操業に関しては、近年では特に生産性を向上させるための高速処理技術が開発してきた。スロッピングセンサーや排気ガス分析設備の設置と相俟って送酸速度を向上

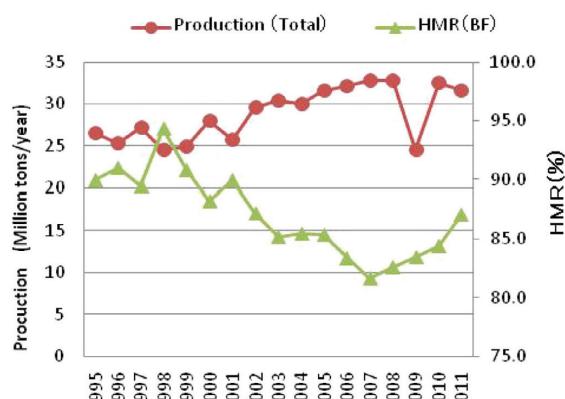


図4 新日本製鐵における生産量及びHMRの推移
Change of the production and HMR of NSC

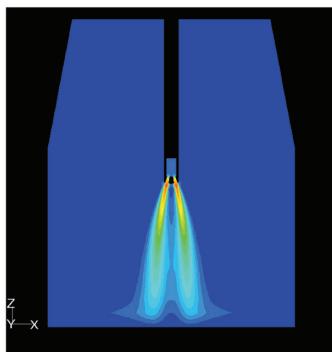


図5 上吹き噴流計算例
Example of the calculation result of top blown jet

させて処理時間を短縮してきた。このニーズに対して、ランスノズル設計や送酸速度、ランス高さなどの吹鍊パターンの重要性が増してきた。

特に、高速吹鍊時の歩留低下対策の一つとして、ダスト発生量の抑制が重要であり、超音速噴流の膨張特性を利用して噴流強度を制御したランスチップを設計・開発している^{19,20)}。この開発に当たっては、最近著しく進歩した数値計算技術を使って、噴流特性に大きく影響する多孔からの噴流の合体挙動も精度良く予測でき、ランスの最適化に貢献している（図5）。

2.3.3 転炉精錬技術の発展

(1) 転炉底吹攪拌技術

転炉底吹き攪拌の方法については、吹鍊用酸素の一部を底吹きするLD-OB (LD-Oxygen Bottom Blowing)、不活性ガスを底吹きするLD-CB (LD-CO₂-Bottom Bubbling)、石灰石粉を底吹きするLD-PB (LD-Powder Bottom-Blowing)の開発を1980年代までに終え技術の特長に合わせて各工場にて活用している¹⁾。即ち、鋼浴の強攪拌を指向する八幡、名古屋、君津2製鋼、大分にLD-OB法を導入、鋼種制約から高炭素吹止を必要とし底吹きガス流量を吹鍊中に低下させる必要のある君津1製鋼、室蘭にLD-CB法を採用した。広畠においては、後述する冷鉄源溶解法の脱炭炉においてLD-CB法を採用し現在に至っている。名古屋のORP炉には脱燐に有利なLD-PB法を活用している²⁾。

LD-OB法の底吹きガス流量は現在0.15～0.20Nm³/t/min程度であるがこれ以上のガス流量増大の場合に得られるスラグ中酸化鉄成分の低減効果は限られている。一方現在、ノズルの溶損速度は低位で、一炉代ノズル交換無しでの操業が可能となっている。

(2) センシングによる吹鍊精度向上

転炉炉内における情報をセンシングする事により吹鍊精度を向上させるべく開発を行ってきた。転炉溶銑装入後のメタル面を把握するためにマイクロ波レベル計を導入し、短時間でサブランスを使用せずに湯面を測定しランス-湯

面間距離の測定頻度を向上させ吹鍊精度を向上している。

またスラグ面を検知するために音圧レベルを把握するセンサーによりその音圧低下を検知しスラグがランスジェットに隠れるタイミングを把握することを可能としている。

耐火物の溶損を検出するためレーザープロファイルメータを設置し短時間、高頻度にて測定を実施し耐火物の局所損耗を把握し補修効率を向上させている。

これらのセンシング技術により、転炉吹鍊の安定化、転炉耐火物の安定化、操業トラブルの抑制等の効果を得ている。全量溶銑脱磷処理の吹鍊安定化効果も併せ、転炉炉内におけるサブランスによる測温サンプリングを実施しダイナミック制御により吹鍊を停止した後、吹止測温サンプリングを実施せずに出鋼する、いわゆるサブランス1本/チャージ操業を可能としている²¹⁾

2.4 原料自由度の向上と熱裕度向上

2.4.1 安価スクラップ使用拡大

2000年代初頭、生産量拡大を実現するために出銑量とのバランスから製鋼においてはHMRの低減が必要となり、鉄系原料自由度の向上と熱的裕度の向上が求められた。原料自由度の向上については、安価スクラップの市場からの調達が必要であり、低級屑を調達し転炉で使用するための課題である不純物除去と嵩比重增加の対策を実施した。

不純物低減にはシュレッダー装置の導入、嵩比重向上にはプレス装置の導入を行った。シュレッダー装置で安価スクラップを処理すると、可燃物を除去する事が可能となり転炉溶銑装入時の発塵量も低減することができた。

2.4.2 熱的裕度向上とスクラップ使用拡大

熱裕度の向上のために、搬送容器であるトピードカーの回転率の向上や、トピードカー内における冷鉄源溶解等に取り組んだ。

トピードカー回転率（1日当たりの受銑回数）は、放熱ロスを抑制する上で効果が大きく、トピードカーの運行台数の削減等に鋭意取り組んだ。これにより回転率は3を超える箇所が過半となっている。トピードカー冷鉄源溶解について大分等で実機化完了し熱的裕度拡大に寄与している。本法は溶銑払い出し後の空車となったトピードカーに所内発生屑を装入し、そのまま高炉にて受銑するものでトピードカーが空車となった状態における放熱ロスを抑制する効果がある。実機操業において冷鉄源約1.5%の装入により溶銑温度約8℃相当の放熱ロス低減の効果を得ている。

トピードカー耐火物の材質を変更し、熱伝導率の低い耐火物を使用することによりトピードカーの鉄皮温度を低減し放熱ロスを低減することができた。ウェアレンガの熱伝導率を19から8W/m/Kに低減した結果溶銑温度約10℃相当の放熱ロス低減効果を得ている。

八幡においては、1998年、誘導加熱装置付き貯銑炉

(IRB: Iron Reserve Barrel) を設置し鉄スクラップを溶銑温度領域で溶解し転炉操業に熱源付与する方式を開始し約 60t/h 程度の鉄源溶解能力を得た²²⁾。

広畠においては、冷鉄源溶解法 (SMP: Scrap Melting Process)²³⁾をプロバー化し 1993 年に高炉を休止した後は、購入スクラップ及び社内鉄源を溶解するプロセスにて溶銑を製造し、これを従来通りの転炉において吹鍊する方法を構築した。以後 RHF (Rotary Hearth Furnace) との組み合わせにより RHF にて製造した DRI (Direct Reduced Iron) を冷鉄源溶解法で溶解するプロセスを構築し後述するようにダスト原料の比率を拡大しながら現在に至っている。

冷鉄源溶解法により溶製した溶銑は、溶銑鍋で脱硫処理を実施した後、通常の転炉設備において吹鍊処理を実施し RH, CAS (Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling) による 2 次精錬処理を経て製造している。この溶銑には [Si] がなく、転炉吹鍊における脱磷を効率的に実施するために微粉生石灰の吹鍊用ランスからの吹き込み法 (AC: Arbed-CNRM) を実施し転炉内脱磷効率を向上している²⁴⁾。

2.4.3 ダスト再利用の推進

ダストの再利用についてプロセス開発を行い処理を拡大してきた。君津、広畠、光(2003年に新日鐵住金ステンレス(株)に分社)において、RHF を用いたダスト還元処理を実機化した。君津においては RHF を 3 基設置し所内発生ダストを還元・脱亜鉛処理し製銑工程にて再利用している。さらに、広畠では、ダスト類を 4 基の RHF にて還元、脱亜鉛を行い、DRI, HBI (Hot Briquetted Iron) を製造し、前述した SMP および DSP (DRI Smelting Process) にて溶解し、溶銑を製造するダスト原料からの一貫溶銑製造プロセスを確立した。社内外ダストを細粒鉄源として利用を拡大して現在に至っている。また、光においてはステンレスダストを RHF にて還元し電気炉原料として再利用している。君津の RHF プロセスを図 6 に示す。

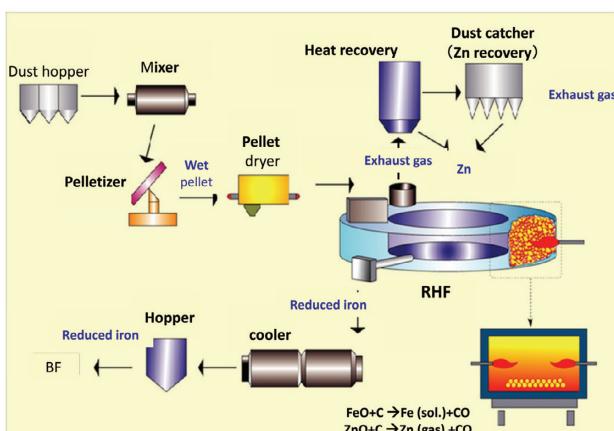


図 6 RHF プロセスフローの例(君津)
Example of RHF process flow (Kimitsu)

2.5 2 次精錬機能の向上

2.5.1 脱ガス処理プロセスの適用拡大

新日本製鐵においては、従来からの厚板向け溶銑の脱水素処理ニーズに加えて、自動車用冷間圧延鋼板の連続焼鈍化に伴い、IF (Interstitial Free) 鋼など脱炭処理を必要とする鋼材が急増した。自動車向け鋼板の幅広化や、連続鋳造(連鑄)の高速鋳造化に伴い、2 次精錬処理時間の短縮が必要となり、脱炭速度向上のための技術改善が進んだ。RHにおいては、処理時間の短縮を狙って、浸漬管口径の拡大、還流ガス量のアップ、真空排気系の強化などの要素技術開発を実施してきた。特に、処理初期の真空到達速度短縮を図って、処理前に処理槽と後の真空排気系を仕切って、後段を事前に真空排気しておく方法:予備真空技術が広く採用されている²⁵⁾。真空排気系も高性能ブースター、エジェクターの導入、また高効率メカニカルポンプを組み合わせた真空系を有した RH 設備を名古屋 3RH (2007 年)、君津 3RH (2010 年)²⁶⁾に増設した。

これらにより RH 処理時間を短縮し IF 鋼の多量生産を可能としてきた。RH 増設により、連鑄機との対応を改善し極低炭素鋼を同一 RH において連続処理する事により C コンタミネーションの軽減効果も得られる。また、脱炭処理の終了タイミングを計算で求め脱炭処理時間を短縮するべく、種々の脱炭モデルを構築し実機化してきた²⁷⁾。

また新日本製鐵の RH では、処理中の脱炭及び昇温用酸素上吹きや、真空槽の保温のための MFB (Multi Function Burner) を設置している。本法は、RH 槽内に挿入された同一のランスから燃料及び酸素の吹き込みを可能とするもので、真空処理中及び大気圧下の双方において保熱が可能であると共に、処理中の酸素吹き込みによるアルミニウム昇熱操業が可能である。保熱の効果により槽内地金の軽減効果が得られ極低炭素鋼の処理時間短縮にも寄与すると共に吹止温度の低減にも寄与している^{28, 29)}。

REDA (Revolutionary Degassing Activator) は、1 本の大径浸漬管を溶銑に浸漬し取鍋からのボトムバーリングにより攪拌することで浸漬管内においてスラグメタル反応により脱ガスを連続的に効率よく行うもので DH の装備を流用しながら DH の周期的反応プロセスに比較し効率を高めた技術である。図 7 に示すように八幡と君津の DH は、1997

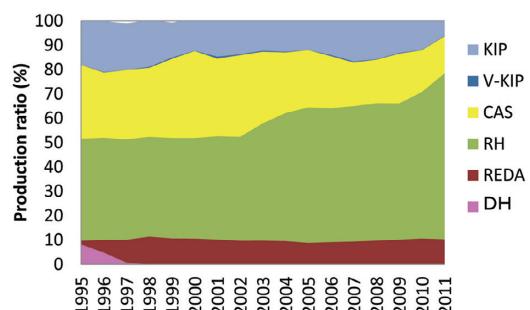


図 7 新日本製鐵における処理法別 2 次精錬処理比率の推移
Production ratio of the types of the secondly refining in NSC

年までにREDAに置き換えられ現在に至っている³⁰⁾。図7に示すように脱ガス処理プロセスの適用を拡大してきている。脱ガス所要鋼種の拡大への対応に加えて、RH処理プロセスを連続的に使用することで槽内温度の維持による耐火物コスト低減、転炉吹止温度の低減を可能としている。そのため、一般汎用鋼種へのRH軽処理適用の拡大を推進している。RH処理能力が転炉能力とバランスする大分、君津においては全量RH処理を指向し実施中である。

2.5.2 CAS-OB 装置の役割

従来の転炉出鋼後の鍋バブリングによる脱酸・成分調整処理に代わる簡易な2次精錬方法としてCAS-OB(Composition Adjustment by Sealed Argon Bubbling-Oxygen Blowing)設備が普及し、脱ガスを要しない鋼種に適用されている。近年は前述のようにRH処理比率の拡大を指向しRH軽処理比率を向上させると共にCAS-OB処理比率は低下傾向である。

2.5.3 LF 装備の増設

新日本製鐵においては2次精錬の高速処理の観点から、一般鋼はLF(Ladle Furnace)設備によらない製造方式であるが、極低酸素レベルを要求される鋼種や熱付加を避けられない棒鋼、線材、特殊鋼厚板、高炭鋼用にLF設備を有している。室蘭製鋼工場においては特殊鋼における介在物品質の高度化に対応するため、従来のLF1基体制から、更に1基を増設し全量LF処理を可能とした製造工程を完成している。

2.5.4 高純度鋼の安定生産

極低燐低硫の耐サワー鋼管、低硫高強度鋼薄板、低燐低硫厚板等のハイエンド鋼材の需要は拡大しつつあり、高純度化の量産要求に応えるべく開発を行ってきた。

極低燐鋼については、転炉型溶銑脱燐プロセスであるLD-ORP法を用いるか、トピードカーや溶銑鍋による溶銑脱燐処理を行う事により安定溶製することが可能であり、P規格上限54ppmの製品の製造が可能である。

また、極低硫鋼については溶銑脱硫プロセスを開発し、RHにおける粉体吹き込みとしてRHインジェクション法³¹⁾、溶銑鍋におけるインジェクション脱硫法(KIP:Kimitsu Injection Process)により安定生産している。KIP法は、脱硫処理に限らず脱ガスを必要としない鋼種に広く適用されてきたが、近年は前述のようにRH軽処理に置き変えつつある。

RHインジェクション法は大分において開発されRH処理中にJ型の耐火物製ランスから脱硫フラックスをRHの上昇管内に吹き込み、同ステーションにおいて脱ガス及び脱硫を実施可能としたものである。溶銑鍋インジェクション法は、溶銑鍋において耐火物製ランスから脱硫フラックスを吹き込むものであり、君津においてKIP及び真空内に

てこれを行うV-KIP³²⁾を開発し低硫鋼種の安定生産を可能としており、S規格上限7ppmの製造が可能である。これらのプロセスは、多機能2次精錬法として1990年代までに開発してきた技術である¹⁾。

[P].[S]の除去限界については、その規格上限値の推移について日本鉄鋼協会にて不純物元素の上限推移を10年毎にフォローしているが³³⁾、脱燐、脱硫の高純度化については、国内各社とも1990年代までにそのプロセス開発を実施し現在に至っている。

2.5.5 ステンレス鋼製造技術の進展

新日本製鐵においては、八幡、室蘭にて転炉を用いて溶銑にフェロクロムを溶解した上で脱炭吹鍊・脱ガス処理するステンレス鋼溶製を行っていたが、室蘭製鐵所の熱間圧延工程休止(1987年)に伴いステンレス鋼製造を八幡に一本化した。当初八幡において、仕上げ脱炭はVOD(Vacuum Oxygen Decarburization)を用いていた。REDAが開発された後はステンレス溶鋼の脱炭に脱ガス効率が高く吸窒も少ないREDAを用いている³⁴⁾。

また2010年には、八幡においてステンレス鋼の製造用に電気炉を装備した。フェロクロムとステンレス鋼屑の電気炉における溶解により得られた溶鋼に溶銑を混合しその後転炉にて脱炭吹鍊を行うもので、安価なフェロクロム原料の使用や所内発生ステンレス鋼屑の再利用促進が可能である。

2.6 自動化、省力化

1990年以降、製鋼各工程において、1970年頃の建設当初から設置していた各種制御装置については老朽更新時期を迎えた。そこで、当時技術確立されたDDC(Direct Digital Control)を採用した制御装置を更新に合わせて導入した。この際以下の点に留意した。①制御装置とプロセスコンピュータをリンクさせた処理の自動化、②操作室の統合による要員効率の向上、連絡業務の円滑化、③多能工化等人材育成の基盤整備、④操業情報のデータベース化、解析の容易化等。

この結果、各事業所において溶銑予備処理操作室の統合、転炉操作室の統合、2次精錬操作室の統合等を実現し現在に至っている。プロセスの運転要員としては転炉は1炉3名/シフト、2次精錬は1基1名/シフトがベースとなっている³⁵⁾。

2.7 省エネルギー、環境調和への取り組み

2.7.1 省エネルギーへの取り組み

エネルギーコスト削減及び炭酸ガス排出削減に寄与すべく、省エネルギーに取り組み蒸気回収、LDG(LD Gas)回収量の増加を図った。OG(Oxygen Converter Gas Recovery System)ボイラについては、OGフード老朽更新のタイミ

ングを捉えるなどしてフードのボイラ化改造を行ってきており³⁶⁾、主要工場に既に装備され80kg/t超レベルの蒸気回収を実施している。LDG回収については、転炉ガス分析時間の短縮による回収タイミングの早期化など操業努力を行い、回収増加を図っている。

2.7.2 建屋からの発塵対策

製鋼工場建屋からの発塵については、生産量増大に際してHMRを低減しスクラップを使用拡大する際に対策を講じた。発塵の要因としては、転炉溶銑装入時の発塵をOGによる一次集塵、炉口フードからの局所集塵だけでは吸引しきれず建屋からの発塵に至る場合があった。そこで対策として建屋集塵の設置を検討した。この際建屋内のガス及び粉塵の流動シミュレーションを行い炉口及び建屋からの集塵風量の必要量を計算で求める手法を用いて必要な集塵機風量を選定することができた。実機立ち上げの結果、粉塵濃度の計算値と実績値は十分整合する事がわかった。この手法を用いて集塵機風量の設計を実施している^{37,38)}。

3. 今後の展望

3.1 更なるコスト低減の視点

ハイエンド鋼種の精錬コスト削減と共に、汎用鋼の精錬コスト削減に引き続き取り組む。精錬反応は、脱硫、脱磷反応の石灰利用効率を見るとまだ改善の余地が多い。スラグリサイクル等の推進に加えて、反応効率向上の視点を更に追求する。この場合、既に述べたようにこれまでに開発してきた種々の計算手法を活用していく事も重要と考える。また、操業中の反応工程の計算の根拠となるべき、反応容器内的情報を得るためのセンシング技術の有効活用についても今後の課題である。

3.2 環境調和への取り組みの視点

省エネルギー、ふつ素レス精錬、スラグ系外排出量削減に引き続き取り組む。スラグ系外排出については、前述の脱硫、脱磷コストの削減の取り組みと共に通する取り組みに加えて、製鐵所内におけるスラグリサイクルの更なる推進が課題である。

4.まとめ

18年前の報告に記載された、精錬機能分割の最適化や主原料自由度の拡大、環境調和等の課題項目については、これまでにある程度の回答を見出し実操業において対策を実現してきたと考える。今後20年を考えた場合に、更なる経営環境の変化への対応や、海外事業の拡大等の課題への取り組みをする事になると想定する。これまで培ってきた技術力を更に絶え間なく研鑽し、激動する環境に対応可能としていくことが重要である。

参照文献

- 1) 遠藤公一:新日鉄技報.(351), 3 (1994)
- 2) 北村信也 ほか:鉄と鋼. 6, 1801 (1990)
- 3) 鷺巣敏 ほか:CAMP-ISIJ. 15, 876 (2002)
- 4) 例えば 秦啓二 ほか:CAMP-ISIJ. 13, 867 (2000)
- 5) 例えば 加藤郁 ほか:CAMP-ISIJ. 4, 1153 (1991)
- 6) 務川進 ほか:鉄と鋼. 80, 25 (1994)
- 7) 岩崎正樹 ほか:新日鉄技報.(391), 88 (2011)
- 8) 林 浩明 ほか:CAMP-ISIJ. 15, 139 (2002)
- 9) 久米康介 ほか:CAMP-ISIJ. 16, 116 (2003)
- 10) 小川雄司 ほか:鉄と鋼. 87, 21 (2001)
- 11) 米澤公敏:製鋼スラグ極小化研究会最終報告書. 日本鉄鋼協会, 1999, p. 50
- 12) Ohguchi, S. et al.: Ironmaking Steelmaking. 11, 202 (1984)
- 13) 例えば 北村信也 ほか:CAMP-ISIJ. 4, 202 (1991)
- 14) 伊藤公久 ほか:鉄と鋼. 68, 342 (1982)
- 15) 北村信也 ほか:鉄と鋼. 95, 127 (2009)
- 16) 宮本健一郎 ほか:鉄と鋼. 95, 13 (2009)
- 17) 山田亘 ほか:新日鉄技報.(342), 38 (1991)
- 18) 山田亘 ほか:CAMP-ISIJ. 8, 792 (1995)
- 19) 内藤憲一郎 ほか:CAMP-ISIJ. 11, 146 (1998)
- 20) 内藤憲一郎 ほか:CAMP-ISIJ. 10, 168 (1997)
- 21) 福田佳之 ほか:CAMP-ISIJ. 7, 1121 (1994)
- 22) 高橋義則 ほか:CAMP-ISIJ. 13, 48 (2000)
- 23) 大貫一雄 ほか:CAMP-ISIJ. 6, 1028 (1993)
- 24) 永井渉 ほか:CAMP-ISIJ. 13, 89 (2000)
- 25) 國武意智 ほか:CAMP-ISIJ. 7, 216 (1994)
- 26) 東豊一郎 ほか:CAMP-ISIJ. 24, 165 (2011)
- 27) 北村信也 ほか:鉄と鋼. 80, 31 (1994)
- 28) 大貫一雄 ほか:CAMP-ISIJ. 7, 240 (1994)
- 29) 矢野正孝 ほか:新日鉄技報.(351), 15 (1994)
- 30) 沖森麻佑巳:新日鉄技報.(374), 47 (2001)
- 31) 遠藤公一 ほか:製鉄研究.(335), 20 (1989)
- 32) 桑嶋周次 ほか:鉄と鋼. 72, S250 (1986)
- 33) 雀部実:ふえらむ. 15, 562 (2010)
- 34) 宮本健一郎 ほか:CAMP-ISIJ. 12, 748 (1999)
- 35) 例えば 森健一 ほか:CAMP-ISIJ. 12, 739 (1999)
- 36) 森岡昌邦 ほか:CAMP-ISIJ. 5, 219 (1992)
- 37) 三村義人 ほか:新日鉄技報.(394), 75 (2012)
- 38) 川人健二 ほか:新日鉄技報.(391), 122 (2012)



熊倉政宣 Masanori KUMAKURA
製鋼技術部 製鋼技術グループ
グループリーダー
東京都千代田区丸の内 2-6-1 ☎ 100-8071