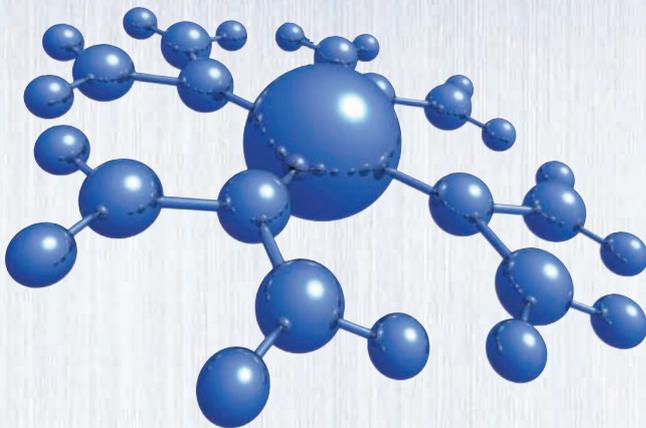


鋼を生み出す

その2 進化する精錬技術

「製鋼プロセス」では、高炉で生まれた鉄鉄から、もろさの原因となる炭素や不純物を取り除き(精錬)粘りのある強靱な「鋼」が作られる。前号から4回シリーズで、粘りのある強靱な「鋼」への挑戦を紹介している。今号では、製鋼法の主流 - 転炉法による「精錬技術の進化」にスポットをあて、そのポイントとなる技術を紹介する。



不純物に挑む

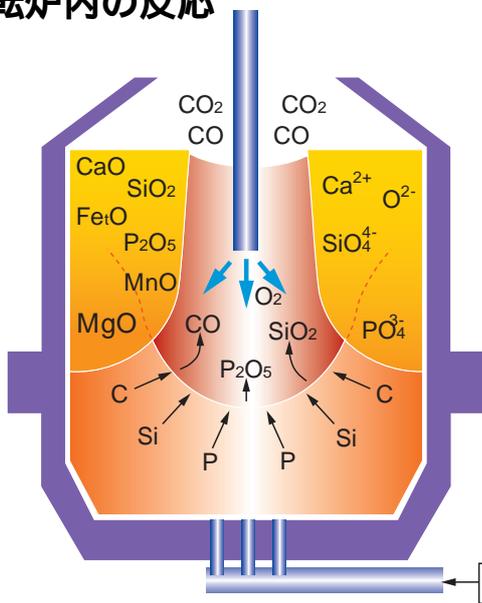
現在の製鋼プロセスは、まず溶銑予備処理工程で、もろさの原因となる硫黄を取り除く。この処理には、溶銑が入った取鍋に酸化カルシウムを主体とする脱硫剤を加えて、耐火物でできた羽根で攪拌し、硫黄を取り除くKR (Kanbara Reactor) 法という手法と、窒素ガスをキャリアーガス (粉体吹き込み用のガス) として、取鍋に酸化カルシウムなどの脱硫剤を吹き込み、溶銑中の硫黄を固定して取り除く方法などがある。次に転炉の中では、脱炭の前に上から酸素を吹き付け、珪素と燐を酸化させ取り除く予備処理が行われる。また、これらの溶銑予備処理は、トーピードカー (溶銑を運ぶ車) 内で行うこともある。

炭素を取る一次精錬においても、不純物はスラグに取り込まれ取り除かれる。前回で述べた通り、スラグは酸化カルシウムの濃度が高いほど燐酸を安定化させることができ、燐を除去しやすい。また、反応速度を上げるためには、スラグの融点を下げて液体化する必要がある。スラグの成分である酸化物は、多成分系(多元系)にすることによって融点が下がる。そこで、主として酸化カルシウム、酸化シリコン、酸化鉄の3成分系として融点を下げ、低い温度でスラグを液体にしている。

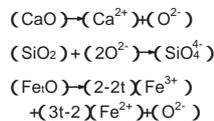
ただし、燐酸を安定化させる酸化カルシウムの濃度を下げないためには、あまり酸化シリコン成分を増やすことはできない。燐を除去するうえで邪魔となる酸化シリコンは「必要悪」だ。燐酸を安定化させると同

転炉内の反応

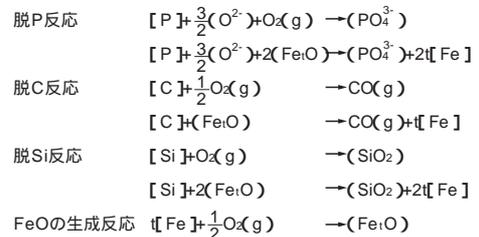
図1



スラグ内反応



スラグ/メタル界面、メタル/ガス界面反応



大きな圧力で酸素を吹き込み、攪拌。酸素は鉄鉄中の炭素、珪素、燐、マンガンなどと反応し、高熱が発生する。酸化物はスラグとして安定化される。酸化反応によって炭素が少なくなり、燐や珪素はスラグに取り込まれ、低炭素で不純物の少ない「鋼」が生まれる。

時に、融点を低くして液体にし反応を早く進ませるといった、相反する条件を両立させることにスラグ生成の難しさがある。かつては、融点を下げやすい螢石（フッ素を含む弗化カルシウム）なども使われたが、環境負荷低減のために新たな挑戦が行われてきた。

高純度化と炉命延長に 欠かせないスラグ

このように、鋼中の不純物を取り除くためにスラグは不可欠だ。1,650 にも及ぶ転炉内では、ノズルから吹き付けられる酸素がジェット噴射で内部深くまで達している。噴射の圧力に押され、周りは溶鋼とスラグが持ち上がった状態になる。スラグ中では、発生する一酸化炭素が泡となり、スラグは膨らし粉を入れたように膨張する（フォーミング）。また粒鉄がスラグ中に飛散する。溶鋼の体積に比べ転炉の容量を大きくしてあるのはそのためだ。そして酸化されやすい珪素、燐、炭素の順番で鉄から不純物を取り除かれ、生成した酸化物はスラグ内に取り込まれる。また、このフォーミングが十分できると、スラグが膨張するので、後述する「MURC法」での中間排滓で捨てやすい側面もある。（図1）

さらに、転炉を傾けスラグを上部炉壁に接触させる動作には、転炉を守る役割がある。炉壁には高熱への耐久性（耐熱衝撃性）を高めるため、酸化物だけでなく黒鉛（グラファイト）も含まれている。その成分が酸化され黒鉛がなくなってしまうと、目地が弱くなり炉壁がもろくなる。それを防ぐためには空気と遮断したい。溶鋼に浸かっている部分は空気と遮断されているため問題はないが、空気と接する上部は、徐々に黒鉛がなくなりもろくなっていく。そこで、溶鋼に浸かっていない炉壁上部にスラグを意図的にコーティングして、空気による炉壁の酸化を防ぐ。スラグは、耐火物でできた炉壁との濡れ性が良く（はじかれない）炉壁面に付着しやすい。

転炉操業のイノベーション

転炉の操業法は日々進歩している。新日鉄が世界に誇る「MURC（Multi-Refining Converter）法」はその集大成の一つだ。転炉での予備処理後、燐濃度が高くなったスラグを1度捨てて（中間排滓）、脱珪・脱燐済みの溶銑を残し、新たなスラグを足し、わずかに残った燐の除去と脱炭を行う。そして溶鋼だけをノズルから出し、最後に残った燐濃度が低いスラグを上工程の脱燐に再び使う。つまり、2回スラグを使って（スラグを入れ替えるダブルスラグ法と同じ）1回しか捨てないことで、鋼の純度を高めると同時に、スラグの排出量を抑え、製鉄所内の資源有効利用を実現した操業法だ（図2）。

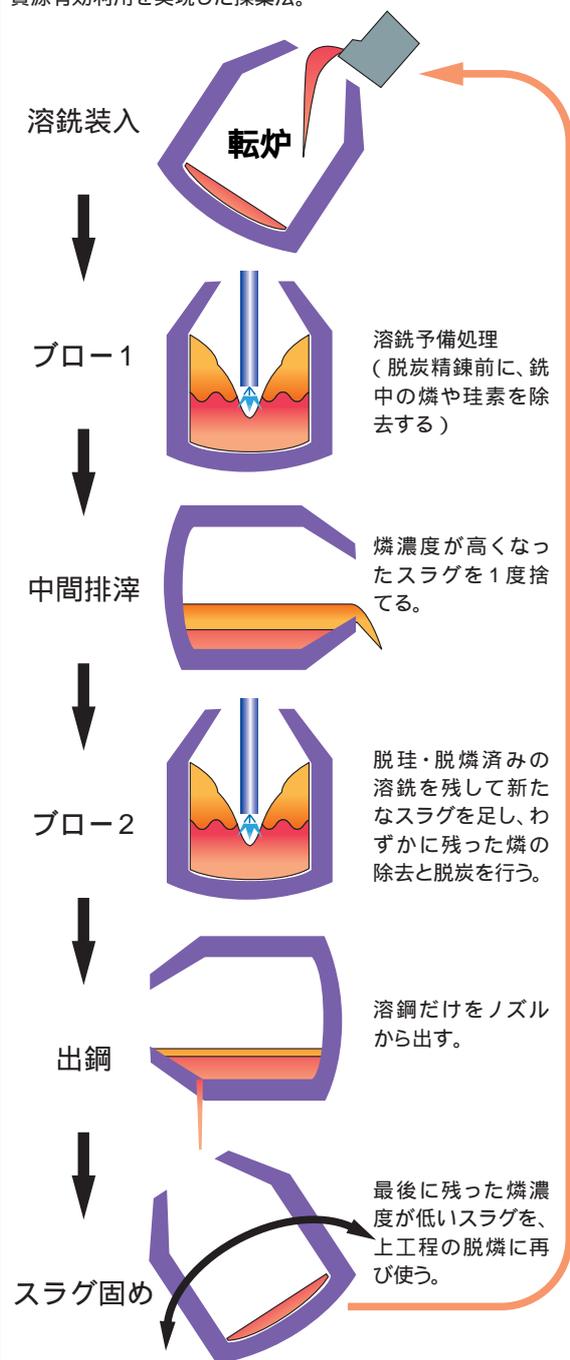
燐を徹底的に除去したい場合は、脱燐、脱珪後に、溶銑を別の取鍋に一度移し、空になった転炉を逆さまにして炉壁に残ったスラグを完全にふるい落とし、取鍋に移しておいた溶銑を再び転炉に戻して脱炭する（同一炉LD-ORP）。そして極限まで燐濃度を低減したい場合は、脱炭時への燐の持ち越しを防ぐために、脱燐した転炉とは別の転炉に溶銑を移し替えて脱炭する専用炉LD-ORP）。室蘭製鉄所では、溶銑予備処理時に底から微粉炭を吹き込み、酸化除去される炭素を補完して高炭素鋼を製造

MURC法のフロー

図2

（Multi-Refining Converter）

鋼の純度を高めると同時に、スラグの排出量を抑え、製鉄所内の資源有効利用を実現した操業法。



しているほか、脱磷を促進するため、底から粉体の酸化カルシウムを直接吹き込む操業法も考案されている。この操業法では、上部に浮いたスラグとの化学反応（パーマメント反応）と、底から吹き込まれる酸化カルシウムにより溶鋼中で起こる化学反応（トランジトリ反応）の2種類の精錬反応が起きている。

高炉を持たない広畑製鉄所では、スクラップを転炉に入れて、上から炭素を多く含んだ廃材のタイヤチップを入れると同時に、微粉炭を底吹きして炭素を補完し、炭素量が少ないスクラップから炭素4.5%を含んだ溶銑をつくっている（冷鉄源溶解法：SMP）（図3）。SMPは世界初の開発技術だ。さらに製鉄所で発生する酸化鉄の粉であるダストを回転炉床法（RHF）で9割程度還元させ、ペレット化してスクラップと一緒に装入する方法を採用し、製鉄所におけるゼロエミッションを目指した、循環型社会構築への取り組みも行われている。このように、新日鉄では新たな操業法を開発し続けてきた。

「極低炭素鋼」を生んだ 新たな真空脱ガス技術

転炉の進化に続く技術革新は「真空脱ガス技術」の登場だ。転炉での一次精錬が完了した溶鋼を、さらに真空槽の中で脱炭、脱ガス（脱水素・窒素）脱酸する。また、アルゴンガスなどで攪拌しながら、吹き込みまたは吹き付けで脱硫剤を入れて、溶鋼中の硫黄をさらに取り除く。

この真空脱ガス法には主に2つの方法がある。1つは、

溶鋼を取鍋から真空槽の中に吸い上げ、鋼中の水素・窒素の脱ガスを行う真空処理方法（DH：1968年～1970年代後半）だ。溶鋼に含まれる水素、窒素、一酸化炭素が、真空中で圧力が下がることによって炭酸飲料の泡のように浮き出て、真空槽内の圧力とつり合う（平衡）までガス成分量が下がる。山の上などで気圧が下がると水が沸騰しやすくなるのと同じ原理だ。圧力を上げると液体の中に気体が入りやすく、下げると気体は液中から出てくる。真空槽を上下させて溶鋼を入れ替えて、処理を繰り返す。

その後、新たな真空脱ガス技術が登場した（RH：1970年代以降）。真空槽と取鍋の間で溶鋼を還流させて反応面積を増やすものだ。ガスを吹き込むことによって還流状態を作り、上部の真空槽で脱ガスされた溶鋼が取鍋に戻り、再び取鍋から真空槽に上昇することによって、溶鋼全体が徐々に脱ガスされる仕組みだ（図4）。

この真空処理は当初脱ガスが目的だったが、酸素を上部ランスから吹き付けたり、ノズルから吹き込むと溶鋼中の炭素が一酸化炭素として燃焼するため、さらに炭素を除去することができる。すなわち「極低炭素鋼」を作ることができる。過酷な成形・加工に耐える軟らかさと強さを持つ、自動車用鋼板の原点にある技術だ（図5）。現在、要求される炭素濃度は、超深絞り鋼板で20ppm以下、自動車用鋼板では10ppm以下にもなる（表1）。

また、新日鉄の独自技術「MFB（Multiple Function Burner）」では、酸素を吹き、鋼中の炭素をさらに酸化させ落とすとともに、酸素だけでなく、燃焼ガスを吹き付けることで溶鋼の温度制御が可能となり、かつ地金の

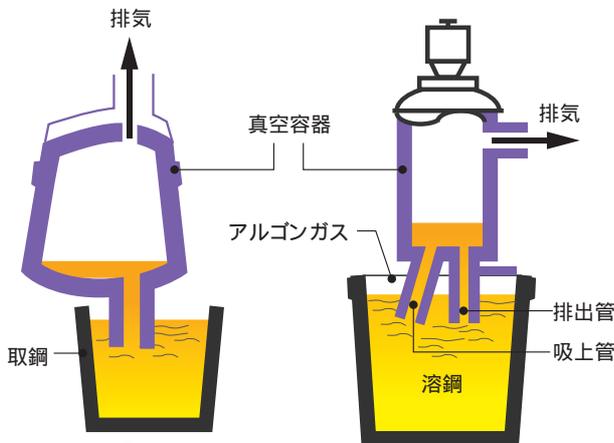
冷鉄源溶解法(SMP)を活用したタイヤ資源化 (SMP: Scrap Melting Process)

図3



真空脱ガス原理比較

図4



DH真空脱ガス法 (Dortmund Hörder vacuum degassing process)

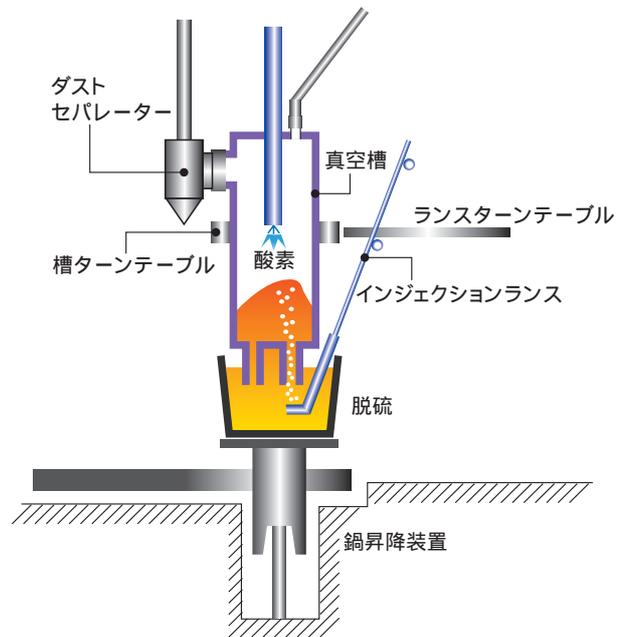
溶鋼を転炉から真空槽の中に吸い上げ、鋼中の水素・窒素の脱ガスを行う真空処理方法。

RH真空脱ガス法 (Rheinstahl Hüttenwerke und Heraeus vacuum degassing process)

真空槽と転炉の間で溶鋼を還流させて反応面積を増やす真空処理方法。

RHインジェクション

図5



槽への付着を防止することで、珪素を含んだ電磁鋼や、珪素が不要な自動車用鋼板などの作り分けが可能になる。特に、処理中の地金の融け落ちがなくなり、炭素量の変動を抑制できることが効果大である。極低炭素鋼の生産量が伸びるとともに、現在ではRHが主体になっているが、DHについては、浸漬管の断面積を広げ、かつ底吹きガス（アルゴンガス）を用いて脱ガスの生じる溶鋼表面積を増大させた、新日鉄の独自技術「REDA：Revolutionary Degassing Activator（レーダ）法」が開発されている。

こうして温度と成分が整った鋼が連続鋳造機に送られる。今回は製鋼プロセスとして重要な役割を果たす連続鋳造にスポットを当てよう。



監修 新日本製鉄㈱ フェロー 松宮 徹（まつみや とおる）

プロフィール

1949年生まれ、京都府出身。
1973年入社。2001年よりフェロー。
1980年：日本塑性加工学会 会田技術奨励賞
1985年：日本鉄鋼協会 依論文賞
1991年：日本金属学会 功績賞（金属加工部門）
1999年：（社）日本鉄鋼協会 西山記念賞
2002年：文部科学大臣賞 研究功績者表彰

高純度鋼における各元素の要求値

表1

元素	プロセス組み合わせ	含有量	製品
[C]	LD - 上底吹き転炉 → RH	[C] 20ppm	深絞り用鋼板
[P]	溶銹処理 → LD - 上底吹き転炉 → RH → [P] 70ppm	[P] 70ppm	合金鋼、高压容器
	溶銹処理 → LD - 上底吹き転炉 → PI → RH → PI → [P] 50ppm	[P] 50ppm	耐水素誘起割れ鋼
	溶銹処理 → LD - 上底吹き転炉 → 鋼の脱炭 → LF → RH → [P] 50ppm	[P] 50ppm	9%ニッケル鋼
[S]	溶銹処理 → LD - 上底吹き転炉 → RH → [S] 30ppm	[S] 30ppm	ラインパイプ
	溶銹処理 → LD - 上底吹き転炉 → PI → RH → PI → [S] 10ppm	[S] 10ppm	耐水素誘起割れ鋼
[N]	LD - 上底吹き転炉 → RH → [N] 20ppm	[N] 20ppm	連続焼鈍用鋼板
[O]	溶銹処理 → LD - 上底吹き転炉 → LF → RH → [O] 10ppm	[O] 10ppm	軸受け鋼
[H]	溶銹処理 → LD - 上底吹き転炉 → RH → [H] 1.5ppm	[H] 1.5ppm	ラインパイプ等の厳格材
介在物制御	溶銹処理 → LD - 上底吹き転炉 → LF → 清浄度、変形能	清浄度、変形能	タイヤコード

PI：パウダーインジェクション LF：レードルファーンネス