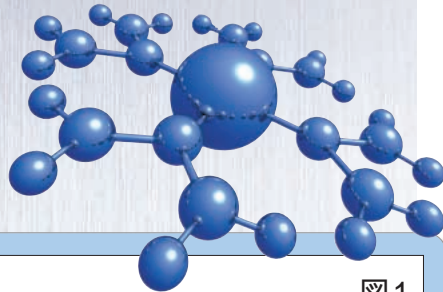


# 鋼を生み出す

## その1 製鋼法の主流 転炉法

日常生活の中で私たちが利用している鉄鋼製品のほとんどは「鋼(はがね)」から作られている。現代は「鋼の時代」だ。高炉ではコークスで鉄鉱石を還元するため、そこで生まれる銑鉄には炭素分が多く含まれている(約4.5%)。この銑鉄は粘りがなくもろい。このもろさの原因となる炭素、燐(リン)、硫黄(サルファ) および珪素などの不純物をできるだけ取り除いて粘りのある強靱な鉄にする。それが「鋼」だ。今回から4回シリーズで強靱な鋼を生み出す科学の世界を紹介する。



### 「鋼」をつくる

固体の状態に鉄に炭素が飽和する炭素濃度の最高は約2%で、状態図上ではそれ以下のものを「鋼」と言い、それ以上のものを「銑鉄」と呼ぶ。通常、加工に耐える延びがあり、鉄鋼製品として使用できるものを鋼と呼ぶが、その炭素含有量は1.2%以下が一般的だ。一方、炭素を2%以上含む銑鉄はたたくと割れてしまうため、融点の低さを利用して鋳型に流し込み製品化する(図1)。

さらに詳しく説明すると、鉄も他の物質と同様に、高温になると溶けて液体になるが、固体鉄が液体に変化する最も温度の低いところが「共晶点温度(注釈)」だ。炭素を2%以上含む鉄は、この共晶点温度以上に温度を上げると溶け始めてしまう。固体としての鉄は、炭素を約2%まで溶け込ませることができ、それ以下のものが状態図上の「鋼」となる(図2)。

炭素濃度2%以上の融点の低い鉄は、鋳型などで形を整える銑鉄だ。その場合、全てが液体となる温度が最も低いのは炭素4.2~4.3%の場合であり、そこが鉄-炭素2成分系(2元系)の共晶点温度となる。

### 「鋼」づくりの進化

炭素2%以下の鋼は、紀元前3000~5000年頃のメソポタミアや、エジプトの古墳から出土した「隕鉄」にも見られる。隕鉄とは宇宙から落ちてきた隕石のうち、ニッケル、鉄成分を70%以上含むものだ。当時はその隕鉄を使って装飾品などが作られていた。

その後、紀元前1500~2000年頃の古代オリエント地方(現在のトルコ地方)で、木炭を炭素源として鉄鉱石を還元する製鉄方法が登場した。しかし、当初は燃焼温度をそれほど上げられなかったため(おおむね共晶点温度以下)、炭素が溶け込みやすい液体の鉄が得られず、還元後は必然的に最初から2%以下の炭素を含んだ固体の鋼となっていた。固体とは言ってもスポンジのような海綿鉄だ。

この場合、鉄鉱石に含まれる不純物(脈石分)がそのまま鋼の中に多く残るため、たいてい(鍛冶により)不純物を取り除く必要があった。温度を上げて液体化できれば、こう

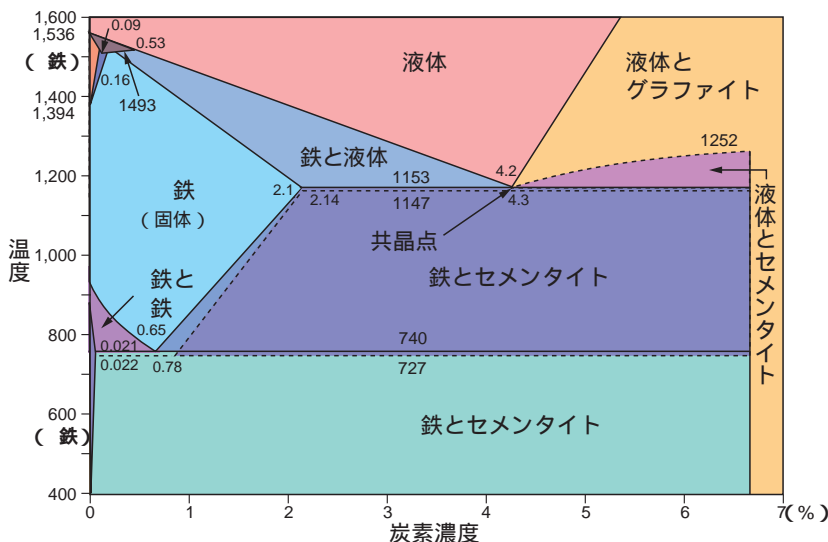
### 工業用鉄類の分類

図1

鉄	科学的純鉄	炭素% ] 0
	工業用純鉄	[ 炭素% ] = 0. ~ 0.007
	工業用鉄類	鋼 [ 炭素% ] = 0.007 ~ 1.2 銑鉄または銑鉄 [ 炭素% ] = 2.0 ~ 4.5

### 鉄と炭素の状態図

図2



鉄も他の物質と同様に、高温になると溶けて液体になる。固体鉄が液体に変化する最も温度の低いところが「共晶点温度」。炭素を2%以上含む鉄は、共晶点温度以上になると溶け始める。固体としての鉄は、炭素を約2%まで溶け込ませることができる。

注釈/共晶 温度の下降に伴って液体から2種の固体が一定の割合で同時に出てくる現象、およびその結果生じた混合物のこと。鉄の共晶点温度では、炭化鉄(セメンタイト)あるいは黒鉛(グラファイト)と鉄が同時に出てくる。

した不純物が比重差で分離除去できるため、たたく必要はない。

木炭還元の加熱方法が改良され温度が高くなると、液体と固体が混ざった鉄が還元されるようになった。それでも不純物が残るためたたき出す必要があった。日本古来の製鉄法「たたら」の源流「のだたら」は、固体または固体と液体が混ざり合った鋼であったため、たたく必要があった。製造時に日本刀をたたくのは、鋼中の組織を緻密にするとともに、不純物を取り除くためでもある。

18世紀初頭に、イギリスでコークスによる高炉法が登場し、さらなる高温化が可能になり、完全な液体状態での還元が可能になった。液体には炭素が溶け込みやすいため、炭素濃度4.5%程度の融点が高い銑鉄となる。液体の状態であれば比重差から不純物を除去しやすい。

一方で、もろさの原因となる燐や硫黄などの元素も還元され溶け込みやすくなる。その数値は固体に比べ、燐が約8倍、硫黄は約30倍にもなる。そこで「製鋼プロセス」では、炭素を除去するとともに、燐や硫黄などの不純物を取り除くことが重要な役割となる。

## 製鋼法の主流 - 転炉法

現在、製鋼法の主流を占めるのが転炉法だ。転炉法による製鋼プロセスは、脱炭精錬前に溶銑中の燐や硫黄を取る「溶銑予備処理」と、炭素を取る「一次精錬」、そしてその後、溶鋼中に残った水素や窒素などの気体を抜き、必要に応じてさらに硫黄を取り、かつ成分調整の合金添加を行う「二次精錬」で成り立つ(図3)。

製鋼プロセスの中心となる転炉(写真1)はつぼ型(洋梨型)で、この中で銑鉄が鋼に精錬される。まず少量の鉄スクラップが装入され、次に高炉から出銑された溶銑が溶銑鍋(溶銑を運搬する容器)から流し込まれ、炭酸カルシウム(生石灰)を主成分としたスラグ原料を加え転炉内での精錬が始まる。1cm<sup>2</sup>当たり約10kgの大きな圧力で酸素を吹き込み、攪拌し、その酸素が銑鉄中の炭素、珪素、燐、マンガンなどと急速に反応し、燃焼による高熱が発生する。

ここで生じた酸化物は炭酸カルシウムと結び付き、スラグとして安定化する。この酸化反応によって炭素が除去されるとともに、燐や珪素は比重が軽く上部に浮上するスラグに取り除かれ、低炭素で不純物の少ない鋼が生まれる(図4)。

鋼はこうしてつくられるが、それでもまだ微量の酸素や不純物が残る。そこでこれらの成分をさらに取り除いて成分を調整する(二次精錬)。不純物の少ない高級鋼を製造するためには不可欠な工程だ。二次精錬の方法は多様だが、真空の容器に溶鋼を吸い上げ、また

## 転炉

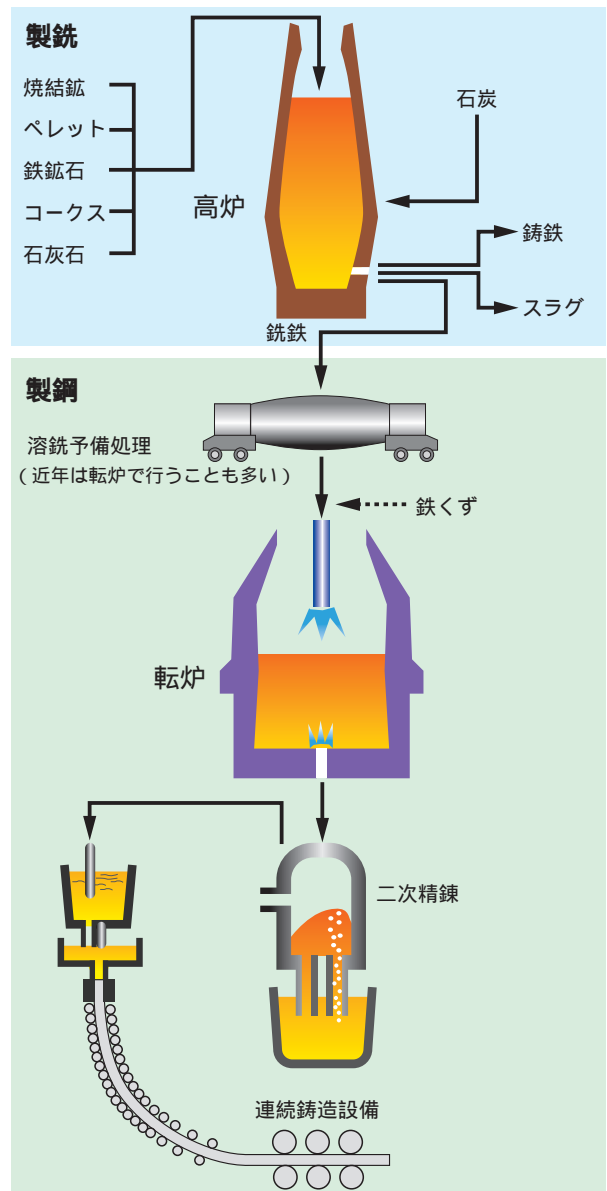
写真1



転炉では「銑鉄」が「鋼」に精錬される。まず少量の鉄スクラップを入れ、次に高炉から出銑された溶銑を、溶銑を運搬する容器の溶銑鍋から流し込み、精錬が始まる。

## 転炉法による製鋼プロセス

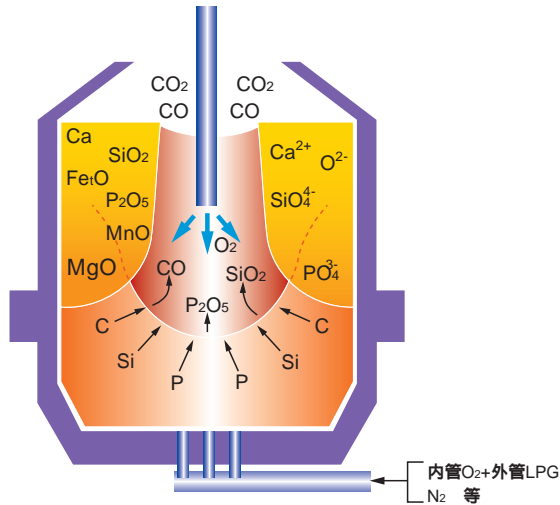
図3



転炉法は、脱炭精錬前に溶銑中の燐や硫黄を取る「溶銑予備処理」と、炭素を取る「一次精錬」、溶鋼中の水素・窒素や、必要に応じて硫黄を取り除き成分調整として合金添加を行う「二次精錬」から成る。

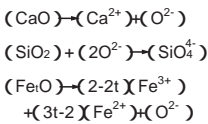
## 転炉内の反応

図4

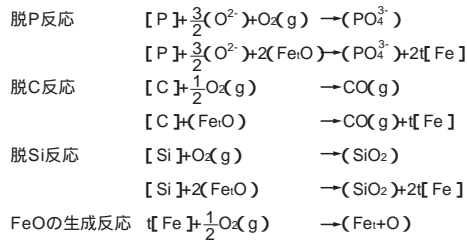


大きな圧力で酸素を吹き込み、攪拌。酸素は銑鉄中の炭素、珪素、燐、マンガンなどと反応し、高熱が発生する。酸化物はいずれも安定化される。酸化反応によって炭素が少なくなり、燐や珪素はスラグに取りこまれ、低炭素で不純物の少ない「鋼」が生まれる。

### スラグ内反応

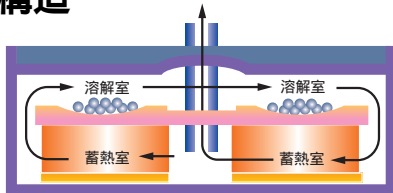


### スラグ/メタル界面、メタル/ガス界面反応



## 平炉の構造

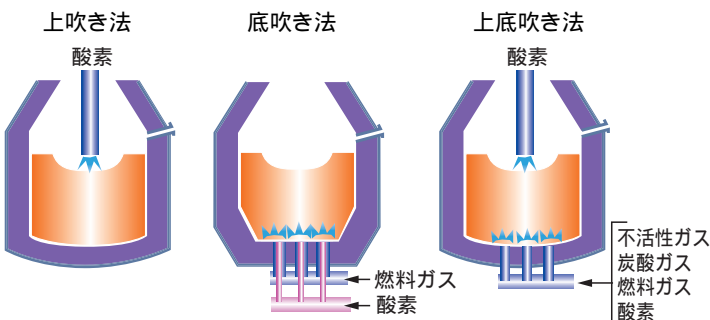
図5



1856年に登場した「平炉（蓄熱炉）」では、銑鉄とスクラップを入れて、蓄熱室で加熱した空気で燃料を燃焼させ、その熱を反射盤で炉全体に回し溶鋼を作る。

## 酸素吹き込み法の違い

図6



1949年、上から吹くだけで十分に溶銑が攪拌されることがわかり、「上吹き転炉」が実用化された。

底部を保護する技術が現れ、再び底吹き転炉が登場。攪拌力が強く反応速度は速いが、上部の温度が上がりやすかった。

現在の主流。上吹きで酸素を吹き込みながら、攪拌力の強い底吹きを補完的に行う手法。

はアルゴンガスなどの不活性ガスを吹き込んで還流させて、炭素、酸素、窒素、水素などの不要な成分をガスとして抜いてしまう「真空脱ガス技術」が広く用いられている。また、減圧下で酸素を吹き込んだり（インジェクション）上吹きランス（酸素を吹き込むパイプ）から吹き付けると一酸化炭素ガスの発生が促進されて、さらに炭素を下げるができる。

## 「外部燃料を使わない」転炉

現在の転炉の原型（酸性底吹き転炉法）は、1856年、イギリス軍の砲身用材料開発の要請を受けたH.ベッセマーによって発明された。当初は、転炉底のノズルから空気（酸素）を吹き込む「底吹き」で、銑鉄中の炭素を一酸化炭素、二酸化炭素に変換して取り除いた。

しかし、この「ベッセマー転炉」の炉壁は酸性酸化物の珪石（酸化シリコン）できており、空気をいくら吹き込んでも不純物である燐が取り除けなかった。通常、燐は燐酸として酸化させ除去するが、分離除去する燐酸がうまく溶け込むスラグが、珪石を用いた炉壁の転炉ではできなかったためだ。

一般的に、スラグ中の酸化カルシウムの濃度が高いほど燐酸が安定して燐が取りやすくなるが、ベッセマー転炉の耐火物に使われた珪石が溶けて増加すると燐を除去しにくくなる。燐濃度が高い鋼はもろくなるため、この転炉法では製鉄原料の制約があり、燐を含まない鉄鉱石を選ぶ必要があった。

1879年に登場した「トーマス転炉（塩基性底吹き転炉法）」も「底吹き」方式だが、炉壁が酸化カルシウムと酸化マグネシウムをベースとした耐火物で作られている。酸化カルシウムと酸化鉄があれば、溶銑中の燐を酸化させ、それを化学的に安定させてスラグ中に取り込むことができる。

それと並行し、1856年に登場した「平炉（蓄熱炉）」（図5）が、アメリカを中心に普及した。銑鉄（炭素約4.5%）と市場の鉄スクラップ（低炭素の鋼材）を入れて、蓄熱室で加熱した空気で燃料を燃焼させ、その熱を反射盤で炉全体に回し、加熱しながら不純物を酸化させて溶鋼をつくる方法だ。炭素濃度が高い銑鉄と、すでに炭素が除去された鋼のスクラップを混ぜて炭素濃度を薄めることができる。しかし、平炉では冷えた銑鉄やスクラップ

を使用するため加熱に時間がかかり、精錬処理には約10時間（1960年代には約3時間まで短縮された）も要した（転炉の処理時間：約30分）。そのため平炉は徐々に衰退し、1960年代を境にわが国からは姿を消した。

転炉の大きな特徴は、溶銑の炭素量が多いため、これを燃やして熱を生み出す「外部燃料を使わない自家発熱」だということだ。これに対して平炉は、炭素量が少ないスクラップを使うため、外部からの熱供給が必要になる。

## 進化する転炉法 「酸素吹き込み法」の変遷

鋼の精錬に不可欠な酸素は、当初大気をそのまま利用していた。しかし大気中には窒素が80%もあり、窒素が熱を奪うため溶銑の温度が下がってしまう。その後、空気液化装置が発明されて、純酸素を廉価に製造する方法が現れ、その酸素を使うことでこの課題を解決できるようになった。

しかし、底吹きで純酸素を吹き込むと、底部の耐火物の消耗が激しくなる。実は従来、窒素はその消耗を抑える役割を果たしていた。しばらくの間は、底部が消耗しないように酸素濃度を調整したトーマス転炉と平炉が併用されていた時代があった。トーマス転炉では、燐濃度の高い鉱石を還元して得られた溶銑を用いて、燐の酸化熱も使って温度を上げていた。

その後、1949年には酸素を底から吹いて攪拌しなくても、上から吹くだけで十分に溶銑が攪拌されることが分かり、「上吹き転炉」が実用化された。最初は上からノズルを深く溶銑の中に差し込んでいたが、あるときそのノズルが折れていたにもかかわらず、十分に脱炭できたことで発見された技術だ。

次に、底部を保護する純酸素の底吹き技術が現れ、

再び底吹き転炉が登場。しかし、攪拌力が強い底吹きは反応速度は速いが、上部の温度が上がりにくいなどの課題があった。そこで、上吹きで酸素を吹き込みながら、攪拌力の強い底吹きを補完的に行う方法が考案された。また、高炭素鋼などをつくる場合は、底吹きには酸素を使わず、アルゴン、窒素などの攪拌用のガスを用いて、炉底部の消耗を抑える方法なども考案された。現在はこの「上吹き転炉」が主流になり、上から吹き込まれる酸素と底部からの攪拌力によって製鋼時間は飛躍的に短縮された（図6）。

酸素ガスの底吹き羽口の耐火物は、炭素や鉄の燃焼による過酷な高温環境下に置かれるため、冷却しなければならない。純酸素底吹きではプロパンガスやメタンガスなど、熱分解時に吸熱・冷却効果があるガスを2重管ノズルの外管に流して、耐火物の温度上昇を抑えている。ノズル内管からは酸素を吹いて炭素や燐を燃やし、外側には冷却用ガスを流す2重管構造だ。

こうして転炉法は約150年の歴史を経て進化を遂げてきた（表1）。



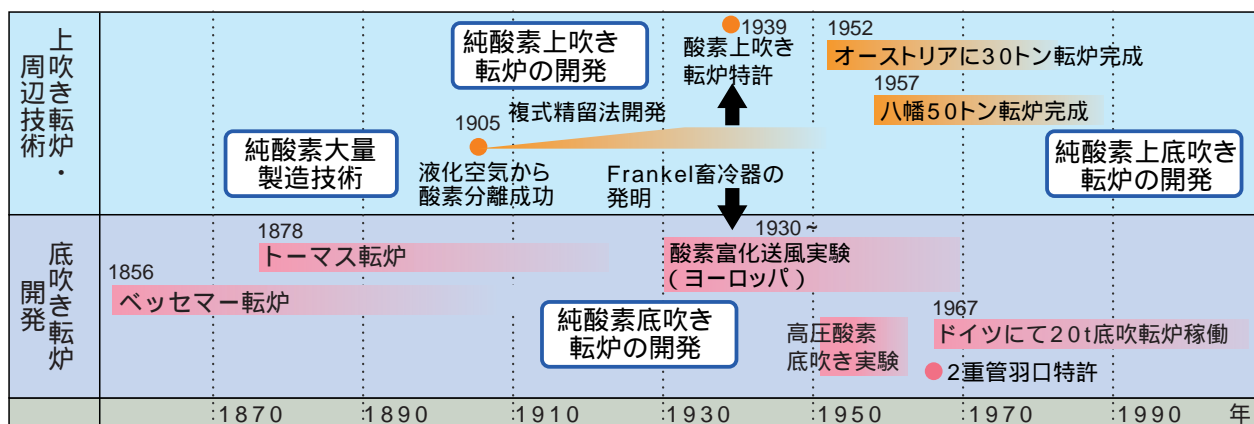
監修 新日本製鉄㈱ フェロー 松宮 徹（まつみや とおる）

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 俵論文賞  
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

### 酸素製鋼法の変遷

約150年の歴史を経て進化を遂げてきた転炉法

表1



「我国における酸素製鋼法の歴史」(日本鉄鋼協会)より抜粋