



入門講座

鉄を知る-2

鉄を作る、リサイクルする

森田善一郎* 大阪大学 名誉教授
Zen-ichiro Morita

Manufacturing and Recycling of Iron and Steel

1 はじめに

このたび“ふえらむ”誌入門講座「鉄を知るシリーズ」の「製鉄(鉄作り)」の分野の執筆依頼があった。その主な読者対象は高校生、大学生ということで本講では鉄が作られるまでの話と、作られた鉄をリサイクルする話を、高校生にもわかるように解説し、さらに執筆に際しては難解な専門用語、数式、英文略称などは使わず、できるだけ平易な文章、表現にしてほしいとの注文がついた。約40年間、製鉄の基礎と応用について、大学と大学院で専門的立場から数式、英語等をふんだんに駆使して講義してきた筆者には、この注文はいささか厳しいが、できるだけこの線に沿って与えられた標記の課題について述べてみたい。

2 今も鉄器時代

今から20~30年ほど前には「冶金」、「金属」、「鉄」、「製鉄」などという言葉が日常何ら憚ることなく使われ、その意味も一般に漫然と理解されていたように思われるが、最近では、バイオ、情報、エレクトロニクス、コンピューターなどのいわゆる先端科学技術の台頭とそれらの華やかな展開の中で、これらの言葉はすっかり影をひそめてしまったようだ。いわゆる死語に近い状態である。中でも鉄について言えば、あまりにも身近な素材として日常多用されていること、すなわち素材としての成熟感のためか関心も持たれず、その上最近のセラミックスや各種機能材料などの新素材に比べてそのイメージも何となく暗く、今の若者の言葉で言えば“ださい”素材として見られがちだ。しかし筆者の立場から見ると、実体はそれとは全く逆で、来るべき21世紀においても鉄はやはり人類にとって最も必要

な素材であることには変わりなく、今もその重要性が一般に正しく理解されていないことに苛立ちを感じている。現在行われている鉄作り(製鉄)は決して多くの人々が連想するような「錬金術」でも「村の鍛冶屋」でもなく、そこには先端の科学と技術の融合ないしは有機的結合とそれらの応用によってもたらされた高度の技術があると私はあえて言いたい。

さて人類が金属を発見し、それを日常生活に用いるようになってから約5000年の長い歳月を経ている。近年になって金属以外にも有機、無機両分野にわたる種々の新しい材料が開発され、それらの用途も開けつつあるが、その生産量、利用度の上ではまだまだ金属のそれには及ばないのが実情である。なかでも鉄は、資源的にみても地殻を構成する金属元素の中ではアルミニウムに次いで第2位を占め、その広大な用途と製造技術の進歩、材質の向上とあいまって生産量は他金属に比べて圧倒的に多く、現在のところ鉄に代わりうるような優れた性能を有する素材は他に見出すことはできない。今日、各種工業や農業において使用されている機械器具、装置、土木産業機械、長大橋、さらに電車、自動車、船舶などの交通機関はほとんど鉄や鋼でできしており、また我々の日常生活においても鉄はあらゆるところに使われており、人類の文化は鉄鋼の生産量と使用量の増加とともに発展してきたと言っても過言ではなく、現在世界では年間約7億トン、日本では約1億トン弱の粗鋼^{*1}が生産され、また世界および日本で使用されている金属総重量の約95%が鉄鋼であるという事実はこのことを明確に物語っている。このような立場から見れば現在もなお「鉄器時代」であると言えよう。

* (社)日本鉄鋼協会元会長・名誉会員

*1 後述の製鋼プロセスで作られる鋼塊または鋼片状の、製品に加工される前の鋼。

3 鉄鋼生産量の推移

鋼の大量生産技術が出現した19世紀後半から現在に至るまで、世界主要各国の鉄鋼生産量は、その需要の増大とあいまって年々増加の一途を辿ってきた。図1¹⁾は、20世紀後半の世界主要国の粗鋼生産量の推移を示したものである。とくに我が国の第二次大戦後の生産量の増大は他の諸国に比して著しく、1973年度にはそのピークに達し、粗鋼年産量は1億2000万トンを超え、アメリカの1億3600万トン、当時のソ連の1億3000万トンとほぼ肩を並べるまでになった。第一次オイルショックの起こった1973年以降は我が国の鉄鋼生産量は他の先進諸国と同様に減少し、年産量1億トン前後を推移してきたが、昨1998年度は厳しい不況のため遂に9100万トンにまで落ちてしまった。一方、中国、韓国などでは鉄鋼生産量は年々増大しており、結果として世界の全粗鋼生産量は年間7億～8億トンのレベルに保たれている。

ところで公害、地球環境問題に加えて資源、エネルギー問題など鉄鋼産業界を取り巻く環境はより厳しい方向へ大きく変化しつつあり、とくに原料資源をほとんど海外からの輸入に依存して成長してきた我が国の鉄鋼産業は今ひとつの大きな曲がり角に来ていると考えられる。すなわち今

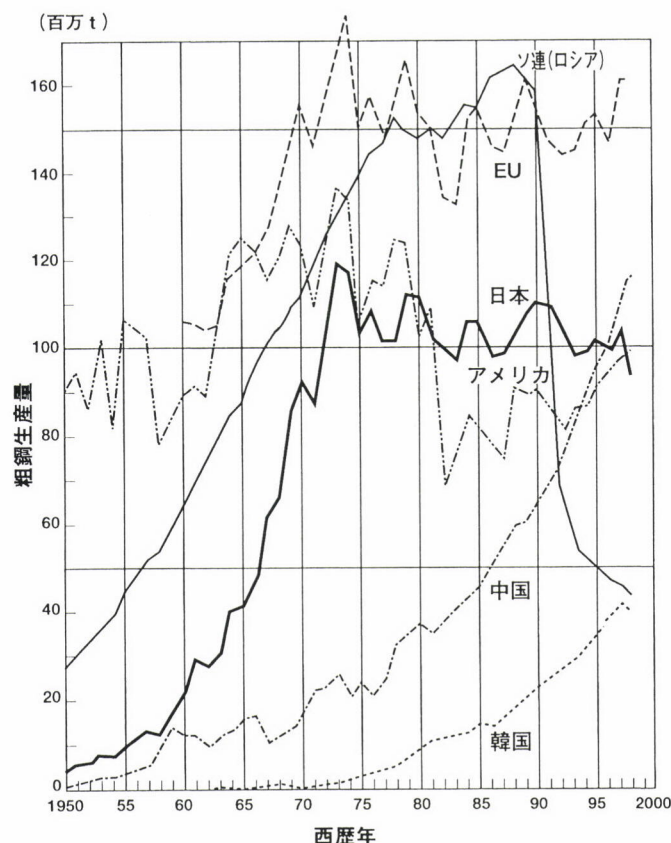


図1 主要製鉄国の粗鋼生産量の推移(1950～1998)

後の鉄鋼生産は、従来のような量的に大きな成長は望めず、鋼の質的な向上をはかることによって付加価値の高い素材を供給する方向に進展することが必要で、これを機に我が国の鉄鋼製造技術の、より一層時流に則した発展が望まれる。

次に鉄鋼製造プロセス(鉄を作る方法)の技術的内容を述べるが、その前に若干その歴史的背景に触れておこう。

4 製鉄の歴史

製鉄技術の発祥は歴史的にはきわめて古く、有史以前にさかのぼる。考古学者によると、石器時代に次いで青銅器時代、鉄器時代と続くのが通説になっているようだが、製鉄史家や鉄冶金学者の中には、青銅器時代と平行して、あるいはそれ以前に鉄が作られていたのではないかという説もある。どちらの説が正しいか断定はできないが、いずれにしても紀元前2000～3000年頃には鉄が人類によって使用されていたことは事実のようだ。この時代の製鉄技術というのは、鉄鉱石を火床で製錬して粘餅あるいは半溶融の状態で錬鉄あるいは錬鋼を作るというきわめて原始的なものであったが、その後近世に至るまで特筆すべきような技術的進歩はなく、実際にその技術が近代化し急速な進展を遂げたのは18世紀になってからである。すなわち18世紀初頭、正確には1709年イギリスのAbraham Darby父子がCoalbrookdaleの製鉄所で木炭のかわりにコークスを使って高炉(溶鉱炉)を操業することに始めて成功し、銑鉄の大量生産技術の先鞭をつけた。当時銑鉄は主として鋳物用に使われていたが、1740年Benjamin Huntsmanがコークスを燃料とするるつば溶解法を発明し、初めて溶融状の鋼が小規模ながら製造されるようになった。その後1784年にHenry Cortが石炭を使って銑鉄を錬鉄に精製する技術、いわゆるパドル法(Puddling Process)を開発し、さらに18世紀末に至ってJames Wattによって蒸気機関が発明され、それまで動力源として用いられていた水力が蒸気機関にとってかわり、19世紀に入ってから鉄道の発達とあいまって製鉄工業はイギリスを中心に急速に発達した。ところで当時の可鍛鉄あるいは鋼の製造は、前述のるつば製鋼法かパドル法によってなされていたが、これらの方法は鋼の大量生産には適しておらず、そのため大量生産が可能な鋼の溶融精錬技術の確立が要望されていた。このような情勢のもとで、1856年、イギリス人Henry Bessemerが転炉を用いて鋼を大量生産する方法を発明した。これは空気吹込みだけで大量の溶銑を溶鋼に変える技術の確立であり、その原理ならびに技術は現在に至るまで普遍的、発展的に引きつがれてきている。この転炉製鋼法の発明からしばら

くして、1866年イギリス人C. W. Siemens兄弟およびフランス人Pierre Martinが反射炉を使って鋼を製造する平炉製鋼法を発明し、実用に成功した。当時はちょうど産業革命期にあり、この転炉ならびに平炉製鋼法によって鉄鋼の生産量は飛躍的に増大した。その後イギリス人Gilchrist Thomasによって塩基性製鋼法が創始され、転炉および平炉での脱りん、脱硫操作が可能となり、また今世紀初頭にフランス人P. Heroultらによって電気エネルギーを利用して鋼を作る電気炉製鋼法が開発され、主として特殊鋼溶製などの分野に独自の地位を占めるに至った。このようにして近代製鉄法の基礎が確立され、それをもとにして鉄鋼製造技術は急速な発展を遂げ、今日に至ったのである。ことに第二次世界大戦後の進歩はまことに目覚ましく、1952年にオーストリアで開発された純酸素上吹き転炉製鋼法(LD法)など数々の新しい技術が開発され、その後の連続铸造技術の確立とあいまって鉄鋼製造技術の全分野に大きな変革をもたらしつつある。図2は以上述べた主要近代製鉄技術を時系列にまとめて示したものである。

次に我が国の製鉄の歴史についても少し触れておこう。我が国には古くから「たたら」と呼ばれる伝統的な独特の製鉄技術があり、それにより鉄や鋼が作られてきた。その起源は現在でも未だ謎に包まれているが、その技術の発祥は6世紀前後であるとされている。このたたら製鉄法とは、粘土で築いた舟型炉に砂鉄と木炭を入れて、ふいごで風を

- ・人類が初めて鉄を使用 : BC 2000~3000
- ・人類が初めて鉄を作る : BC 1500 頃

◆◆◆ 近代製鉄技術 ◆◆◆

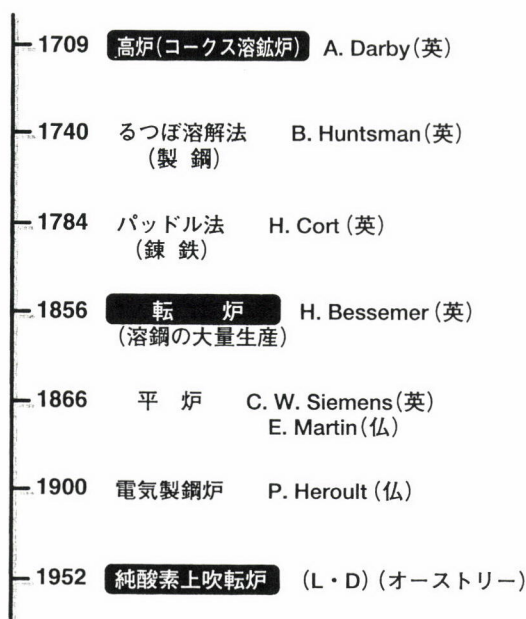


図2 製鉄の歴史

送り木炭を燃焼させて砂鉄を溶融還元し、きわめて純度の高い和鉄と和鋼を作る技術で、古代から19世紀末頃まで我が国の鉄需要の大部分を供給してきた。とくに和鋼の中でも最高品質の「玉鋼」^{たまはがね}は、世界的に有名な日本刀の製作に不可欠の素材であった。しかし20世紀に入り、廉価な外国産鋼材の輸入が活発になると同時に、我が国でも前述の洋式技術を導入した近代製鉄法が開始され、それが軌道に乗るに及んでたたら製鉄は急に衰退の道を辿り、1920年代後半には「たたら」の火は完全に消えてしまった。その後1969年、この伝統技術を後世に伝え、現代の科学技術の視点から「たたら製鉄」を見直すという意図のもとに、日本鉄鋼協会支援のもとに復元操業が行われ、また1977年以降は、日本美術刀剣保存協会により、島根県横田町に建設された「日刀保たたら」で現在も冬期に操業が続けられ、日本刀の刀匠に玉鋼が供給されている。

5 製鉄の技術

一般に鉱石を原料として粗金属を取り出し、さらに不純物を除いて実用金属に精製するプロセス(工程)を製錬あるいは製精錬と呼び、このようにして作られた金属をさらに鑄造、圧延その他の処理をして半製品あるいは最終製品を作り出すプロセスを加工と呼んでいる。図3は以上のプロセスを図示したものである。これを鉄鋼について言えば、鉄鉱石、コークス、石灰石を原料として銑鉄を作り、さらに不純物を除去して鋼にする製錬プロセスと、溶鋼を連続鑄造して固め板や棒状の鋼片に圧延加工するプロセスを経て各種鋼材や鉄鋼製品が作られる。

さて現在の鉄鋼製錬は製銑と製鋼の二つのプロセスに大別することができる。

5.1 製銑

製銑とは鉄鉱石を還元して銑鉄を作るプロセスをさし、その方法としては、コークス、微粉炭などを熱源および還元剤として使用する高炉(溶鉱炉)によるものと、電熱を熱

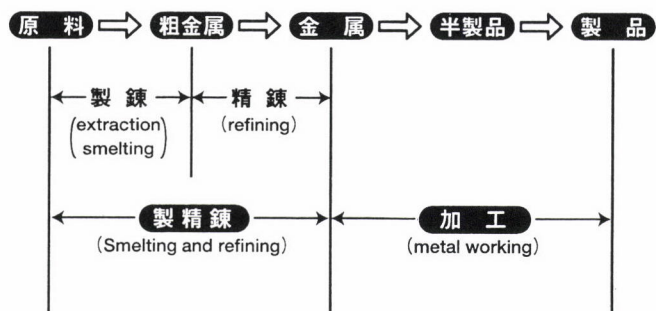


図3 金属製造プロセス

源とし粉コークスや粉炭を還元剤として使用する電気炉によるものなどがあるが、現在では主としてコークスと少量の微粉炭を燃料、還元剤として用いる高炉製鉄法が世界的に広く実施されている。

高炉は外部を銅板製の鉄皮で覆い、内部を耐火物で内張りした堅型円筒状の構造物で、後で述べるように原料は高炉炉頂から装入され、下降過程で還元生成された溶鉄と副生物である溶融スラグは下部炉床から排出される。

我が国の戦後の高炉製鉄技術は、高炉の大型化、原料処理技術の進歩、操業の迅速化、高能率化などにより驚異的進歩を遂げた。それを高炉の大型化についてみると、私が学生であった1950～53年頃には、当時の八幡製鐵(現新日本製鐵)八幡製鉄所の洞岡と富士製鐵(現新日本製鐵)広畑製鉄所にそれぞれ2基ずつあった鉄鉄日産約1000トンの高炉が当時最大のものであったが、その後20年ほどの間に高炉は急速に大型化し、1972～73年にかけて日本最初の鉄鉄日産1万トン、内容積4000m³級(世界最大)の高炉が国内主要製鉄所に誕生し、鉄鉄の生産性は著しく増大した。粗鋼生産量が漸減し、年産1億トンのペースを下まわっている現在においても、これら大型高炉を含めて30基の高炉が我が国の製鉄所において稼働している。

さて鉄は天然に金属鉄として存在することはきわめてまれで、普通は非金属との化合物として存在し、これらの中で主として鉄の酸化物がシリカ(酸化珪素 SiO₂)やアルミナ(酸化アルミニウム Al₂O₃)などのいろいろな夾雑物と混合し、いわゆる鉄鉱石として産出する。その代表的なものがヘマタイト(赤鉄鉱 Fe₂O₃)とマグネタイト(磁鉄鉱 Fe₃O₄)である。これらの鉄鉱石は、普通、焼結鉱やペレットに予備処理された後、コークス、微粉炭、石灰石などとともに高炉に装入され、それらの原料は炉の底部にある羽口と呼ばれる送風口から吹き込まれた熱風により化学反応を受ける。すなわち熱風は炉内でコークスや微粉炭と反応して一酸化炭素(CO)と窒素(N₂)の混合ガスとなり、炉頂から下降する原料と熱交換、反応しながら炉内を上昇し、炉頂から排出、回収される。鉄鉱石、焼結鉱などの鉄原料は炉内を下降しながら、炉上部の低温域では一酸化炭素による間接還元によって、炉下部の高温域では固体炭素による直接還元によってそれぞれ還元されるとともに溶融、滴下し、溶鉄となって炉底部に溜まる。また鉄原料中に含まれていた夾雑物も石灰石と反応して溶融状のスラグとなり、溶鉄と分離される。炉底部に溜まった溶鉄と溶融スラグは一定時間ごとに炉壁に設けた出鉄口と出滓口に孔をあけて取り出される。このように製鉄プロセスを化学的にみれば還元プロセスであり、この鉄鉱石の還元過程で還元剤である炭素をはじめ珪素、マンガン、りん、硫黄などの不純物

元素も還元され溶鉄中に付随して入ってくる。鉄鉄はこのように不純物として4～5%の炭素と少量の上記元素を含んでおり、そのため鉄本来の靱性、可鍛性が失われ、鑄造は容易であるが脆く、ふつう鑄物にする以外にはこのまま用いることができない。そこで普通鉄鉄をさらに精製して不純物を除き、圧延、鍛造などの加工ができる鋼にする。

5.2 製鋼

鉄鉄やスクラップ(鉄屑)を鉄原料として、それらを転炉あるいは電気炉で精錬して鋼とし、さらに連続鑄造あるいは造塊の工程によって凝固させ、鋼片または鋼塊を作るプロセスを製鋼という。このプロセスでは、鉄鉄中に含まれる不純物元素の多くは酸化除去されてスラグ中に入るか気相中に逃げる。したがって製鉄が化学的に還元プロセスであるのに対し、製鋼は酸化プロセスであるといえる。現在日本では粗鋼の約60%強が転炉、40%弱が電気炉によって作られている。

5.2.1 転炉による製鋼

1952年オーストリアのリンツ(Linz)とドナヴィッツ(Donawitz)の両製鉄所で純酸素上吹き転炉製鋼法(LD法)が開発され、この方法がそれまで用いられてきた平炉製鋼法に比して数々の利点を有することから、以来世界的に広く利用されるようになった。この方法はその後さらに主要国において改良改善が加えられて純酸素底吹き転炉が出現し、さらに最近では両者の特長を生かした上底吹き転炉が主流となっており、底吹きガスも不活性ガスを主体とした種々のガスが利用されている。

従来転炉による製鋼では、高炉で製造された溶鉄をそのまま取鍋またはトービードと呼ばれる容器で移送して転炉に装入し、鋼の精錬は転炉のみで行っていた。最近、鋼の品質の高度化とともに高純度鋼のニーズが増し、製鋼プロセスにおいてりん、硫黄、水素、窒素、酸素などの不純物元素や、硫化マンガン(MnS)、シリカ(SiO₂)、アルミナ(Al₂O₃)などの非金属介在物の含有量を下げることが必要となったが、このような高純度化は転炉精錬のみでは十分に行えず効率も悪い。そこで高純度化のための精錬機能を転炉の前後の工程へ分担させる方法が実用されるようになった。すなわち転炉に装入前の溶鉄からあらかじめ不純物を除く工程が溶鉄予備処理であり、転炉から出鋼した溶鋼を最終的に精錬、脱ガスする工程が二次精錬である。したがって現在の転炉製鋼は、溶鉄予備処理、転炉精錬、二次精錬、連続鑄造・凝固の工程から成り立っていると言える。

まず溶鉄予備処理では溶鉄の脱珪、脱りん、脱硫を行う。

脱珪は高炉鑄床あるいは移送容器において、溶銑中にミルスケール*2、焼結鉱などの酸化鉄を投入して行う。脱りんは通常、石灰、酸化鉄、蛍石などを混合した脱りん剤をガスとともに溶銑中に吹き込み、溶銑中のりんを酸化物としてスラグに移行させた後、スラグを排出することによって行う。さらに脱硫剤と処理条件の選定によって脱りんとともに脱硫を行うこともできる。このようにして予備処理された溶銑を転炉に装入して脱炭する。次に転炉について簡単に説明しておこう。

転炉は上部に開口部をもつ精錬炉で、傾動するようになっており、その能力は1回に精錬できる粗鋼の重量で表われ、日本では150～300トンが多い。転炉の主な機能は、純酸素ガスにより溶銑を脱炭することである。純酸素上吹き転炉ではランスから高速の純酸素ジェットを溶銑に吹きつけ、溶銑中の炭素と直接反応させ一酸化炭素として脱炭する。この操作を吹錬と呼んでいる。この転炉の場合、たとえば200トンの溶銑であれば15～20分程度で脱炭することができ、この高生産性が、それまで多用されていた平炉にとって代わる原因となった。転炉操業の要点は、(1)吹錬終了時点の溶鋼の炭素濃度と温度を、一度の吹錬で目標値に合致させる的中率をいかに高くするか、(2)脱炭酸素効率、歩留り、生産能率をいかに高めるか、(3)炉体耐火物の溶損、副原料、純酸素ガスの消費や熱損失をいかに少なくするかなどである。吹錬終了後炉体を傾け、出鋼口から溶鋼を取鍋中に注入する。この際、合金鉄や脱酸剤、脱硫剤を取鍋中の溶鋼に加える。この溶鋼は普通さらに二次精錬の工程によって最終的に精製される。

二次精錬は当初高級鋼の製造に際し、転炉から出鋼した溶鋼を鑄造するまでの間に、水素などのガス成分を除去する目的で導入された。これは真空脱ガスと呼ばれ、減圧した容器の中に溶鋼を注入することによって溶鋼中のガス成分を除去する方法である。その後不純物元素や非金属介在物の低減が一層必要となり、二次精錬には脱ガスの他最終精錬機能や成分調整機能が付加され、二次精錬は高純度鋼製造のための標準工程となっている。二次精錬の代表的な設備としてRH(Ruhrstahl-Hausen)真空脱ガス装置、LF(Ladle Furnace 取鍋精錬炉)などがある。二次精錬の中でも特に重要な機能は、最終の脱硫、酸素、窒素、水素などの脱ガス、介在物の除去および極低炭素鋼における最終脱炭である。

5.2.2 電気炉による製鋼

日本では現在約40%弱の粗鋼が電気炉によって作られて

いることは既に述べた。電気炉製鋼法(電炉法)の特徴は、加熱熱源が電気エネルギーであるため、原料としてスクラップ、冷銑などの冷鉄源を100%使用できることである。このため、スクラップなどの鉄資源の回収、リサイクルにこの方法は重要な役割を果たしている。特にスクラップと電力の豊富な地域では、高炉一転炉による一貫製鉄法に比べ消費エネルギーが格段に少なく、かつ設備投資もはるかに少ない電炉法による製鋼比率が高くなる。電気炉は加熱方式によってアーク炉と誘導炉に分かれるが、鉄鋼製造プロセスとしては、炉容量が大きく生産能率が高いアーク炉が主に使われている。

アーク炉では、脱炭、脱りん、脱水素を目的とする酸化精錬と脱硫、脱酸を目的とする還元精錬の両方が可能である。このため、アーク炉は、ステンレス鋼に代表される高級鋼の精錬にもよく利用されている。しかしステンレス鋼の精錬に適したAOD(Argon Oxygen Decarburization)法やVOD(Vacuum Oxygen Decarburization)法などの二次精錬法の実用化にともなって、最近ではアーク炉の役割は高能率溶解という機能に限定されるようになり、普通鋼でも高能率溶解と脱炭をアーク炉で行い、仕上げを二次精錬炉で行うプロセスが主流となっている。ところでステンレス鋼は基本成分として多量のクロムを含有する。クロムは強力な酸化物形成元素であるため、ステンレス鋼においては、クロムの酸化損失を防止しながら低炭素域まで脱炭することは通常の精錬では困難である。クロム共存下で脱炭を優先的に進行させるには、精錬雰囲気中の一酸化炭素分圧を下げるのが有効である。これをアルゴンで希釈して行うのがAOD炉であり、減圧により行うのがVODである。

5.3 連続鑄造

成分や温度を調整し、非金属介在物を除いて清浄にした溶鋼を取鍋で移送後鑄型に注入、凝固させ、半製品あるいは製品とする。かつては多数の鑄鉄鑄型に溶鋼を分注し、凝固終了後鋼塊を取り出し、これを再加熱、分塊圧延する造塊一分塊法が主流であった。1960年代になって取鍋内溶鋼を中間容器(タンディッシュ)を介して中空の水冷銅鑄型に一方から注入し、他方から凝固した鋼を連続的に引き抜き鑄片を製造する連続鑄造法が開発され、さらに改善が加えられ、現在この方法が主流となっている。その理由は(1)鑄片が分塊後の半製品と同様の形状で得られるので、再加熱と分塊工程が省略できること、(2)分塊法では切り捨てなければならない鋼塊の底部や頭部に相当する部分が連続鑄造鑄片(連鑄鑄片)では非常に少ないため歩留りが大幅

*2 圧延中の鋼片の表面に生成する酸化鉄皮膜。

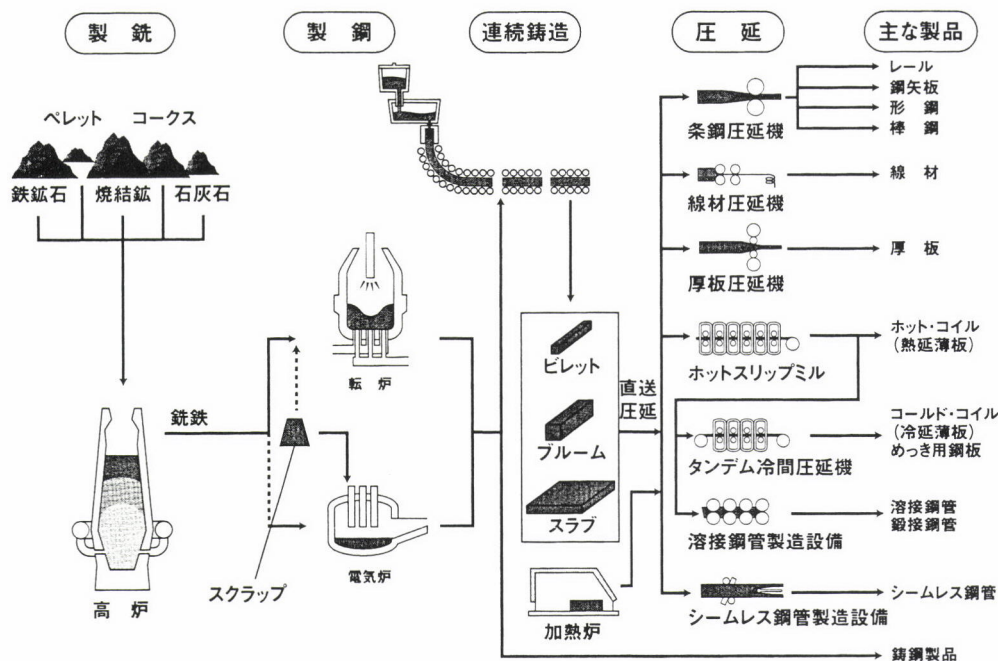


図4 鉄鋼製造プロセス

に向上すること、(3)成分偏析や非金属介在物も少ないこと、(4)技術の進歩とともに生産性や鋳片の表面性質が格段と改善され、上工程の転炉や下工程の熱間圧延と生産性が整合するため、工程間の連続化が可能になったことなどである。

以上この章では、現在の鉄鋼製造技術の概要を製鉄、製鋼、連続 casting を中心に述べた。図 4 は上述の鉄鋼製造プロセスを、原料から製品に至るまでの一貫した工程図として示したものである²⁾。

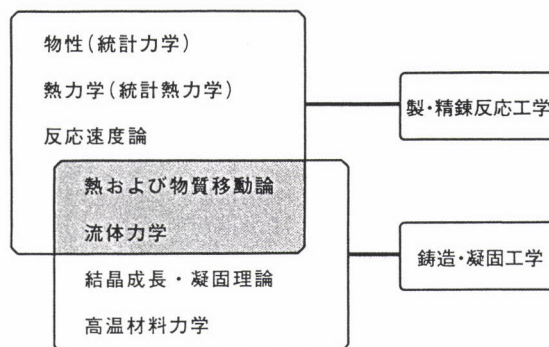


図5 製鉄技術を支える学問

6 製鉄技術を支える学問

鉄鋼の製精錬をひとことで表現すれば、鉄鉱石から鉄を取り出し、さらに鉄中の不用、有害な元素をとり除き、必要な元素を添加するということである。これは原理的には物質間の化学反応を利用することによって達成される。化学反応を取り扱う学問としては、反応の進行する方向や化学平衡状態を取り扱う熱力学と、反応の機構や速度を論じる反応速度論がある。さらにその前提として、反応に関与する物質の構造に関する情報と、それにもとづく物性値ができるだけ詳しく知られていることが必要である。

鉄鋼の製精錬工程の大きな特徴は、溶銑、溶銅や溶融スラグなどの融体を多量に取り扱うことである。このために高温での熱や物質の移動、流体の運動を取り扱う学問(熱および物質移動論、流体力学など)の支援が不可欠である。成分の偏析や割れを防いで良好な鋳片を得るには、溶銅から

の結晶の晶出、成長と、それにともなう熱の移動や濃度の変化、高温における材料の力学的挙動に関する学問(結晶成長・凝固理論、高温材料力学など)が必要である。図5³⁾は上述の事柄を図に示したものである。今後さらに製精錬の技術が発展するためには、これに関連する学問自身も進歩することが求められる。

このように、かつては冶金学によって支えられてきた製鉄技術も、近年その急速な進歩とともに学術的にも多様化して、現在では冶金学を含めて物理化学、物理学、電磁気学、化学工学、機械工学、エレクトロニクスなど広範な科学と基礎工学にかかわる総合的技術に転化してきている。したがって今後の製鉄技術開発には、上記のような多岐にわたる分野の研究者、技術者の融合的発想と協力が不可欠である。

7 今後の製鉄に課せられた制約と技術的課題

よく知られているように、急速に進んだ物質文明の負の産物として地球環境の悪化が顕著に進行しつつあり、地球環境の保全は、それに関連する資源のリサイクル、エネルギー消費量の削減とともに、人類共通の重要課題としてその解決へ向けての対策が急がれている。このような立場から見れば、多量の資源と膨大なエネルギーを必要とする上、主産物である鉄以外に、副生物であるスラグや地球温暖化の源である炭酸ガスを多量に発生する現在の製鉄法には、まだまだ多くの解決あるいは改善を要する課題があると言わねばならない。換言すれば、今後ますます厳しくなるであろう環境保全のための社会的制約の下で鉄鋼生産を続けるためには、有限である資源の有効利用と、リサイクルならびに製造工程の省エネルギーをはかり、さらにスラグや炭酸ガスなどの排出をできるだけ少なくするいわゆるゼロエミッション(廃棄物ゼロ)を志向した環境調和型の新たな製鉄技術の構築が必要である。

このような背景のもとに、現在我が国では、政府、大学、企業などで、鉄スクラップの完全リサイクル利用、鉄鋼スラグの発生量低減と完全資源化、石炭高度転換コークス製造技術(次世代コークス製造技術)など現在の製鉄法に直接かかわる重要な技術的課題のみならず、高炉への廃プラスチックの吹き込みや高炉操業技術を応用したゴミ処理のためのガス化溶融炉の開発など、環境保全のための種々の研究と技術開発が行われている。次に上記の課題の中で特に重要と思われる鉄スクラップのリサイクルと鉄鋼スラグの利用と資源化の現状について以下に少し述べておこう。

7.1 鉄スクラップのリサイクル

生産される鉄鋼はいろいろな用途に供されるが、同時に年々築積され、現在日本ではその量は約10億トンに達していると言われている。その中から年間約4千万トンのスクラップが発生し、そのほとんどが前述の電気炉で溶解精製され、鋼材に再生されている。このスクラップの発生量も鉄鋼築積量と同様年々増加することが予想され、したがって鉄スクラップの完全リサイクル利用は、今後ますますその重要性を増すものと思われる。

ところで、鉄スクラップには鉄鋼製造工程で発生する「自家発生スクラップ」と製品として使用後廃物として回収される「老廃スクラップ」に大別される。前者はその成分などの情報がはっきりしているので技術的にリサイクルしや

すいが、後者は成分を含めてその性状に関する情報を得難く、ことに精錬で除去が困難な不純物元素を含む場合には、リサイクルは簡単ではなく、そこには解決を要するいくつかの技術的問題がある。

老廃スクラップには鉄鋼中の合金成分やスクラップ中に混入した異物に帰因する種々の不純物元素が存在する。それらの中、精錬工程で化学的に除去できず残留する銅(Cu)、錫(Sn)、ニッケル(Ni)、クロム(Cr)、モリブデン(Mo)、亜鉛(Zn)、鉛(Pb)などの元素^{*3}のリサイクル工程での除去が技術的にきわめて困難である。これらの元素の中、特に鋼の材質に対する悪影響の大きい銅と錫を中心にそれらの除去法について研究が実施されつつあり、いくつかの成果が得られてはいるが、現時点ではまだ完全な除去法は確立されていない。

以上、この項では鉄スクラップのリサイクルの現状を簡単に述べたが、その詳細については、例えば片山ら⁴⁾および山内ら⁵⁾の最近の鉄のリサイクルに関する解説の中で述べられているので、それらを参照されたい。

7.2 鉄鋼スラグの利用と資源化

製鉄および製鋼工程で生成される鉄鋼スラグは、かつて工程別に「鋳滓」および「鋼滓」と呼ばれ、20世紀前半頃までは文字どおり派生排出物として扱われ、一部のスラグを除いては有用な資源として利用されることはほとんどなかった。しかし20世紀後半に入って、粗鋼生産量の急速な増大とともに鉄鋼スラグの発生量も増え、スラグは副生物として種々な用途に利用されるようになり、最近では発生するスラグの約96%が有効に利用されている⁶⁾。

鉄鋼スラグは図6⁶⁾に示すように、製鉄工程で発生する高炉スラグと製鋼工程で発生する製鋼スラグに大別され

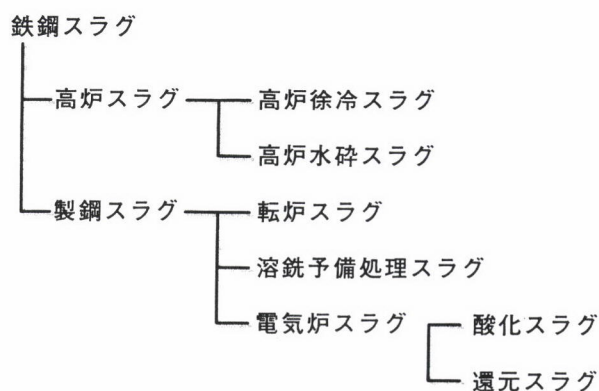


図6 鉄鋼スラグの分類

*3 トランブエレメント(tramp element)と呼ばれている。

る。高炉スラグは鉄鉱石中の脈石(夾雑物)とフラックス(媒溶剤)であるライム(石灰石)から形成されるため、ライム(CaO)、シリカ(SiO₂)、アルミナ(Al₂O₃)を主成分とし、その発生量は製造される銑鉄1トンあたり300kg程度である。また高炉スラグは処理方法によって高炉徐冷スラグと高炉水砕(急冷)スラグに区分される。一方、製鋼スラグは精錬方法により転炉スラグ、溶銑予備処理スラグと電気炉スラグに分類され、さらに電気炉スラグは精錬時の炉内雰囲気によって酸化スラグと還元スラグに区分される。またその主成分は、造滓剤、添加剤であるライム(CaO)、アルミナ(Al₂O₃)と酸化鉄(FeO、Fe₂O₃)であり、発生量は高炉スラグに比べて少なく、製造される粗鋼1トンあたり転炉スラグと溶銑予備処理スラグを含めて約150kg、電気炉スラグでは約120kg程度である。

さて現在我が国の粗鋼年産量は約1億トン(1998年度は9100万トン)であることは先にも述べたが、これに伴って発生する鉄鋼スラグ量は年間3700万トン程度であり、その中、高炉スラグの発生量は約2200万トン(全体の約60%)程度であり、転炉スラグ、溶銑予備処理スラグ、電気炉スラグを合わせた製鋼スラグの生成量は1300万トン(約40%)程度である⁶⁾。高炉スラグは徐冷スラグ、水砕スラグともに道路用材料(路盤材)、土木用材料、コンクリート骨材および混和剤、高炉セメントなどに全量が有効利用されている。一方、製鋼スラグは、塩基度が高いため遊離石灰を含むものが多く、それが化学反応して膨張崩壊を起こすので、その抑制のために蒸気エージングなどの処理を必要としたり、その他技術的、経済的に改善を要する点があり、現在のところ高炉スラグのように全量が有効利用されるには至っていない。製鋼スラグは1970年頃までは有効に利用されることなく、その約50%が埋め立てや土地造成に利用されているに過ぎなかったが、その後道路用材料(アスファルトコンクリート、骨材、路盤材)などへの利用技術が進められた結果、埋め立てなどへの使用割合は現在約10%まで減少し、有効利用される割合は大幅に増加してきている⁶⁾。最近の主な用途は、製鉄所内における鉄源としてのリサイクル利用、前述の道路用路盤材、土木用材料などである。これらの用途の中でも土木用などは付加価値が低く需要も不安定でその経済性、市場性にも問題があり、そのため有効利用率は現時点で未だ90%に及ばず、完全資源化までは至っていない。現在完全資源化へ向けての努力が続けられてきている

が、これと同時にスラグの発生量を低減させる製鋼プロセスの開発もなされている。

8 おわりに

以上、高校生、大学生、その他鉄鋼にかかわりの少ない一般の方々を対象に、平素あまり関心を持たれることが少なく時には誤解されやすい「製鉄」について正しく認識していただくため、製鉄の今日的意義と重要性、製鉄の歴史、製鉄技術の現状と未来など鉄鋼製造の入門的事項を簡単に述べた。数式や化学反応式などを用いず、できるだけ平易に述べたつもりであるが、止むを得ず専門用語を用いた記述も随所にあり、その上、誌面が限られていることもあって記述に十分意をつくせず、結果として内容もずい分はしょった表皮的なものとなってしまった。それにもかかわらず、ここで対象としている読者の方々に、本講を通して、製鉄が決して過去の技術でも不用の技術でもなく、今後もその重要性は変わらず、厳しい社会的環境の中で継続発展させねばならない技術であることをご理解いただくための一助となれば筆者として望外の喜びである。

最後に、本稿の執筆に際しては、筆者のかかわる解説⁷⁾ならびに教材⁸⁾を参照し引用させていただいたことを付記しておく。

引用文献

- 1) 鉄鋼統計要覧, (社)日本鉄鋼連盟, (1995), および日本の鉄鋼業, (社)日本鉄鋼連盟, (1999)
- 2) 鉄鋼プロセス工学入門, (財)川鉄21世紀財団, (1994) 2A, (非売品)
- 3) 鉄鋼プロセス工学入門, (財)川鉄21世紀財団, (1994) 3L, (非売品)
- 4) 片山裕之, 水上義正: まてりあ, 35 (1996), 1283.
- 5) 山内秀樹, 三輪 守, 小林日登志: ふえらむ, 4(1999), 398.
- 6) 大関彰一郎: 鉄鋼スラグの基礎と応用研究会最終報告書, (社)日本鉄鋼協会, (1997), 1.
- 7) 森田善一郎: 生産と技術, (社)生産技術振興協会, 26-6 (1974), 1.
- 8) 鉄鋼プロセス工学入門, (財)川鉄21世紀財団, (1994), (非売品)

(1999年6月7日受付)