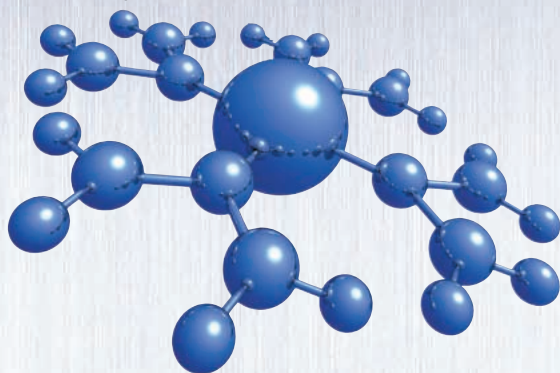


鉄鉱石から鉄を生み出す(上)

製鉄プロセスにおいて、最も川上に位置する「製鉄プロセス」は、天然資源である「鉄鉱石」から「銑鉄(注)」を生み出す工程だ。地球上で酸素と結び付き酸化鉄として存在する鉄鉱石とコークスを高温下で化学反応させ、鉄鉱石の酸素を取り除き(還元)「鉄」を取り出す(図1)。

今号から3回にわたり、製鉄業の原点とも言える、鉄鉱石を鉄にする「高炉」のダイナミックな世界にスポットを当てて、そのメカニズムと操業のポイント、新日鉄の新たな技術への挑戦を紹介する。



300年間 銑鉄製造の主流を占め続ける “高炉”

製鉄所のシンボル「高炉(溶鉱炉)」。その高さは50m以上にも及ぶ(写真1)。高炉は、“鉄鉱石に含まれる酸素分を効率よく除去(還元)する装置”で、一挙に“溶解”まで行う反応プロセスだ。形状は、炉断面単位面積当たりの生産性とエネルギー効率を追求した結果、円筒の徳利型になった。

近代高炉の原型は、14世紀から15世紀にかけてドイツ・ライン河の支流で誕生した。当初は熱源および還元材として木炭を使い、水車の動力でふいごの送風量を増やし炉の温度を上げた。さらに炉を高くして熱効率を高めることにより、十分に炭素を吸収した融点の低い銑鉄を造ることができた。

この高炉法は16世紀イギリスに渡り、1709年、森林資源の枯渇から木炭の代替原料としてコークスを使った現在のシャフト炉での銑鉄生産が

高炉法の工程

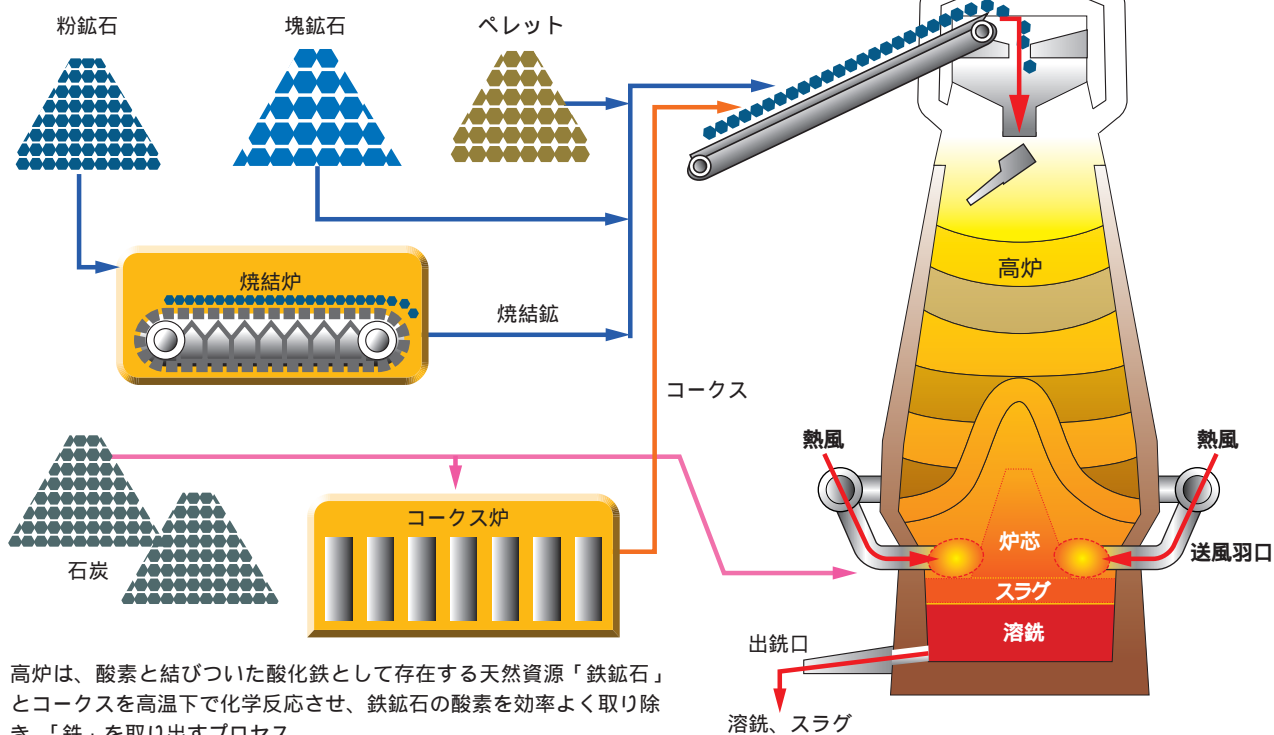


図1



注：炭素分を4~5%含んだ鉄。この銑鉄の炭素や不純物を、次工程の製鋼プロセスで徹底的に減らすことで、粘りのある強靱な「鋼(はがね)」を造る。

はじまった。その後、蒸気式送風機や熱風炉などが開発され、生産量や還元材消費の点で優位に立った高炉は、現在までの約300年間にわたり銑鉄製造技術の主流を占め続けている。例えば、日本の「たたら製鉄」の溶解法や、天然ガスや原子力による還元ガスで鉄を製造する「直接製鉄」、スクラップを主原料とする「電気炉」など、他にもさまざまなプロセスが実用化されてきたが、高炉は依然として優位性を保持している。

日本では、1857年に近代製鉄業の夜明けとなった釜石の大橋高炉が登場して、官営八幡製鉄所で高炉操業が本格化し、以後100年にわたって日本鉄鋼業の歩みを支えてきた。

世界で800基以上稼働する 唯一の化学プラント“高炉”

現在、高炉基数は日本で約30基、世界では800基以上あると言われ、鉄鉱石からの銑鉄製造量のうち、95%以上が高炉法によるものだ。世界には多種多様な化学プラントが存在するが、同じタイ

プの化学反応容器が、世界で800基以上稼働している例は高炉以外にない。

また、高炉は数で他を凌駕するだけでなく、“寿命”においても各種化学プラントをはるかに越える。高温にさらされる過酷な環境下で、その耐久性は15年以上と言われるが、高炉は十数年ごとに炉内のレンガを貼り替えるだけで再び使用できる“エンドレス”な反応容器だ。ちなみに燃料の事前処理を行うコークス炉は、30年以上の長寿命を誇る。

鉄鉱石とコークスが交互に絶え間なく装入される高炉は、文字通り24時間連続操業の設備だ。改修が難しいことから、長寿命化が追求され、高度な操業・改修技術が確立されてきた。高炉法がはじまって300年経た現在も、高炉は圧倒的な主流で“300年の歴史に耐える反応容器”だ。そして、銑鉄製造における“高炉優位”は、将来的にも変わることがないと考えられている。

シンプルな設備で ダイナミックな反応

では、高炉でどのように鉄鉱石が鉄に生まれ変わるのか、そのメカニズムを説明しよう。まず、高炉の最上部（炉頂）から鉄鉱石とコークスを交互に層を作るように装入し、その層状態をなるべく崩さないように炉内を下降させる。炉下部にある送風羽口からは熱風とコークスの補完還元材である微粉炭などを吹き込む。この熱風で微粉炭やコークスが燃焼し、一酸化炭素や水素などの高温ガス（還元ガス）が発生する。そしてその還元ガスが激しい上昇気流となって炉内を吹き昇り、炉内を下降する鉄鉱石を昇温させながら酸素を奪い取っていく（間接還元）。溶けた鉄分はコークス層内を滴下しながらコークスの炭素と接触してさらに還元（直接還元）され、炭素5%弱を含む溶銑となり炉底の湯溜まり部に溜まる。これが鉄鋼製品の源“銑鉄”だ。この銑鉄は炉底横に設けられた出銑口から取り出され、次の製鋼プロセスへと運ばれる。出銑と同時に、シリカやアルミナなどの鉄鉱石中の不純物が溶解・分離されたスラグも排出され、これらの副産物はセメント材料などとして再利用される。

高炉の中では、約8時間をかけて炉頂から炉床

写真1



製鉄所のシンボル「高炉」。写真は、2003年5月8日に火入れした君津製鉄所第4高炉。

に鉄鉱石が下りる過程で、固体、気体、液体が共存するダイナミックな反応プロセスが進行している(図2-1)。しかし、高炉は複雑な反応容器ではない。基本的には、円筒の鉄容器の内面に水冷パイプ内蔵の耐火物が貼ってあるだけの“シンプルな構造”であるため、化学プラントのような複雑な反応容器よりも、設備としての信頼性が高い(写真2)。

シンプルだからこそ “技術の衣替え”が容易

高炉本体は円筒構造であるため、直径を増やすことで炉内容積の拡大を柔軟に行うことができる。高炉300年の歴史は「容積拡大」の歴史であり、その過程で機能向上を図るさまざまな新しい付帯装置が開発され、最新鋭の反応容器として常に生まれ変わっている。

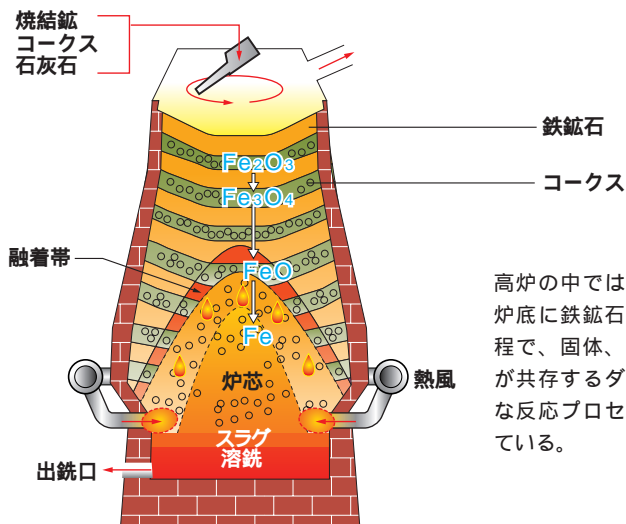
例えば、原料装入装置。現在のように炉径が10mまで大きくなると、装入する位置によって炉内成分に偏りが出てしまうため、円周方向に原料を均一に入れることが重要になる。そこで、装入物の堆積位置を自由に換えられる旋回シュートや、狙った位置へ狙った厚さに原料を装入するための分布制御方法などを開発し、炉径が拡大しても原料を均一に装入することを可能にしている(図3)。

また、容積拡大によって出鉄量も増えたため、出鉄口を従来の2カ所から3～4カ所に増やす方法がとられている。4つの出鉄口を配置する場合も、炉体を支持する4本の柱や、鋳床クレーン、溶銑を転炉に運ぶレールなど前後工程のレイアウトも考慮し、鋳床作業が効率的にできるよう配置に工夫がなされている。

さらに、高炉の長寿命化技術も進歩を遂げた。そのポイントは、送風羽口から吹き込まれた熱風とコークスの燃焼で生じる高温ガスにさらされる炉下部側面の鉄皮と、高温の溶銑が流れる炉底レンガの強化にある。現在では、前者は炉体冷却設備(ステーブ・クーラー)が進歩し、鉄皮の熱負荷を軽減することでほぼ解決され、炉底レンガについては、緻密なカーボン質で耐食性に優れた材料を使用するとともに、炉床壁や炉底の下に流す冷却水の量をレンガの侵食状況に応じてブロック毎に調節するなどの対策を実施している。

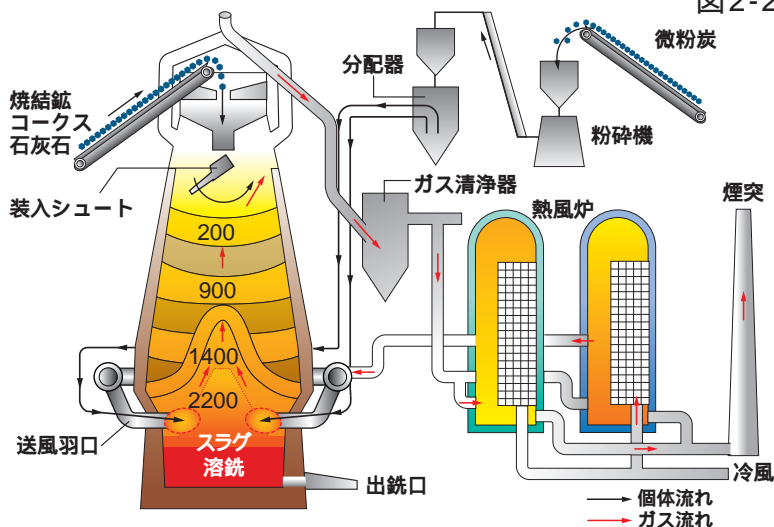
高炉内部の状況

図2-1



高炉の中では、炉頂から炉底に鉄鉱石が下りる過程で、固体、気体、液体が共存するダイナミックな反応プロセスが進行している。

図2-2



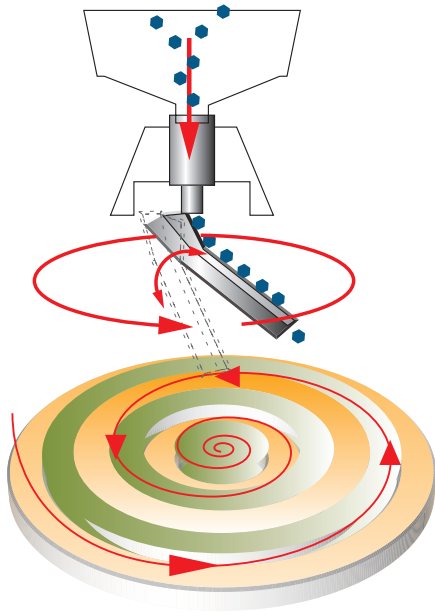
炉床から見上げた高炉内部

写真2



高炉は、円筒の鉄容器の内側に水冷パイプ内蔵の耐火物が貼ってある、シンプルな構造。

原料装入均一化技術/旋回シュートのメカニズム 図3



装入原料の堆積位置を自由に変えられる旋回シュート。原料を均一に装入することができる。

高炉の開発技術一覧

図4

新機能付加型装入装置
各種操業管理システム

粒度別・銘柄別装入法
副原料低減操業法
中心コークス装入法
小塊コークス装入法
代替鉄源装入法

焼結鉱
コークス
石灰石

鉄鉱石
コークス

薄壁
ステーブクーラー

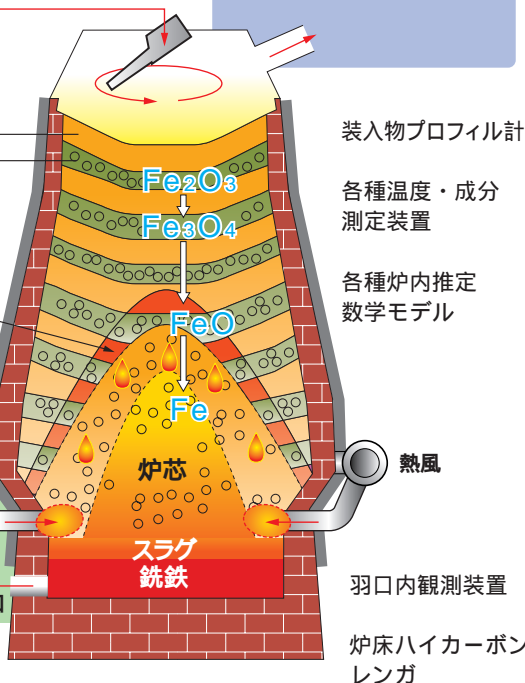
融着帯

微粉炭吹き込み法

ダスト・融材
吹き込み法

プラスチック粉
吹き込み法

出鉄口



装入物プロフィール計

各種温度・成分
測定装置

各種炉内推定
数学モデル

羽口内観測装置

炉床ハイカーボン
レンガ

高炉はシンプルな反応容器だが、生産性の向上、鉄鉱石および還元材のコスト削減ならびに炭酸ガス排出抑制などのニーズに対応するため、さまざまな機能を付加しながら、最新鋭の反応容器として進化し続けている。

基本を変えず、 付帯技術は着実に進化

一方、高炉の還元材や還元効率も大きな進化を遂げている。送風羽口から吹き込まれる還元材は、当初の重油から、微粉炭に変わっており（図2-2）また、コークス炉、高炉ではプラスチックなどの廃棄物も活用するなど、還元材利用における技術革新が進んでいる。また、炉下部の横から吹き込む熱風の圧力は、従来1～2気圧の送風圧で炉頂部にガスが上昇していたが、容積が拡大した現在では、従来の3～4倍に当たる4～5気圧で熱風と燃料を吹き込む高圧操業となり、多量に高温ガスを炉内に送り込むことで、炉内の還元効率を高めている。さらには高圧操業によって炉頂に上昇してくる高圧ガスを使いタービン発電を行う「炉頂圧発電システム（TRT）」を装備するなど、常に時代ニーズに応える最新鋭の反応容器としての機能を持ち続けている。

高炉自体は、300年間変わらないシンプルな反応容器だ。しかし生産性の向上や鉄鉱石、還元材のコスト低減、そして炭酸ガスの排出抑制などの時代ニーズに対して、基本構造を変えずにさまざまな機能を付加して、最新鋭の反応容器として着実に進化し続けている（図4）。

今回は、現在の超大型高炉において、高品質の銑鉄を生み出す“操業のポイント”を解説する。



監修 新日本製鉄㈱顧問 奥野 嘉雄（おくの よしお）

プロフィール

1938年生まれ、岐阜県出身。

1961年入社。1993年フェローを経て、2002年より顧問。

1974年：Iron and steel society of AIME

「AIME Ironmaking Conference Award」受賞

1988年：(社)日本鉄鋼協会 西山記念賞

1991年：科学技術庁長官賞「科学技術功労者表彰」

1993年：(社)日本鉄鋼協会 山岡賞

1996年：紫綬褒章

1999年：(社)日本鉄鋼協会 香村賞