# 多彩な技術開発で「鉄」を極める(2)
# 進化し続ける高炉

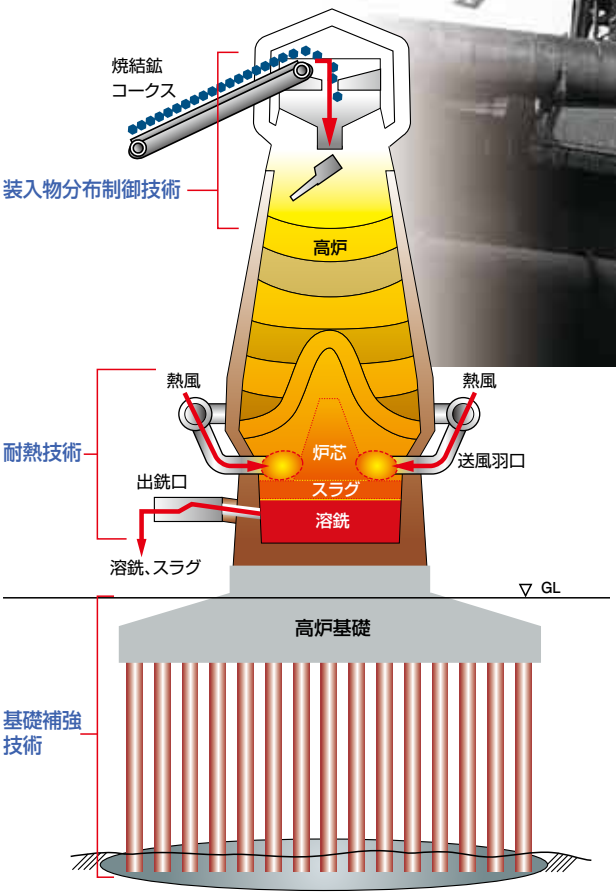
鉄づくりの原点となる製銑工程は、天然資源の鉄鉱石(酸化鉄)とコークス(炭素)を高温下で化学反応させて酸素を取り除き銑鉄を取り出すプロセス。その反応容器「高炉」は、炉断面の単位面積当たりの生産性とエネルギー効率を追求した結果、円筒の徳利型となり、形状や基本構造は近代製鉄法の誕生後今日まで変わらない。一方、大型化、長寿命化、高生産性、安定操業、コストダウンなど高炉に求められる機能は進化している。シリーズ2回目は、大型高炉の先進技術開発にさまざまな面から挑戦する若手研究者の姿を紹介する。

## ダイナミックな反応プロセス

製鉄所のシンボルである高炉は、高さが設備全体で100m以上、重量は操業時最大で約2万トンに及ぶ。高炉では、最上部(炉頂)から鉄鉱石を焼き固めた焼結鉱と、石炭を蒸し焼きにしたコークスを、交互に層をつくるように装入し、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を補完する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)が発生し、激しい上昇気流となって炉内を吹き昇り、鉄鉱石を昇温させながら酸素を奪い取っていく。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され、炭素5%弱を含む溶けた鉄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。

このように高炉の中では、約8時間をかけて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1**)。

図1　高炉の断面



プロセス研究開発センター
製銑研究開発部
（取材当時。2011年4月からは
君津製鉄所製銑部　マネジャー）
**門脇 正具**（かどわき・まさとも）
（機械知能工学専攻、2006年入社）

設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部
**尾形 知輝**（おがた・ともき）
（化学工学専攻、2007年入社）

## 原理追求と設備技術で装入物分布を制御する

高炉操業の主な制御因子は、原燃料（鉄鉱石とコークス）の入れ方（装入物分布）、原燃料性状のつくり込み、羽口からのガスの送風条件の3つ。コスト削減を目的にコークスの使用量を低減させるためには、高炉内を上昇する還元ガスの通気性を向上させる必要があり、装入物分布が重要だ。

原燃料を炉頂から装入するベルレス装入装置（※1）では、高炉半径方向での鉄鉱石とコークスの配置を最適化することにより、通気性が上り還元効率が向上する。製銑研究開発部の門脇正具は、こうした原理原則をベースに高炉内の層厚分布と粒径分布など装入物分布の研究に取り組む。

「中でも難しいのは、炉容積、原燃料の条件やその装入装置が異なる中で、全高炉に適用できる装入物分布の普遍解を導き出すことです。2009年3月から3分の1サイズの実験装置でさまざまな装入パターンでの分布量・粒度の計測を繰り返し、さらに分布状態をシミュレーションして最適な装入方法を明らかにしました」（**図2**）。この地道な試験の測定は地質学の発掘調査のようだったと振り返る。

2011年の1月にこの成果を名古屋第3高炉に適用してコークス比を低減し、その後の八幡第4高炉では日本記録を樹立した。

「今後ますます原燃料の多様化が進むと考えられます。今回明らかにした装入物分布をベースに、大型高炉のコークス比低減をさらに追求するとともに、多様な原燃料に対応した装入物分布の最適化に挑戦していきます」（門脇）。

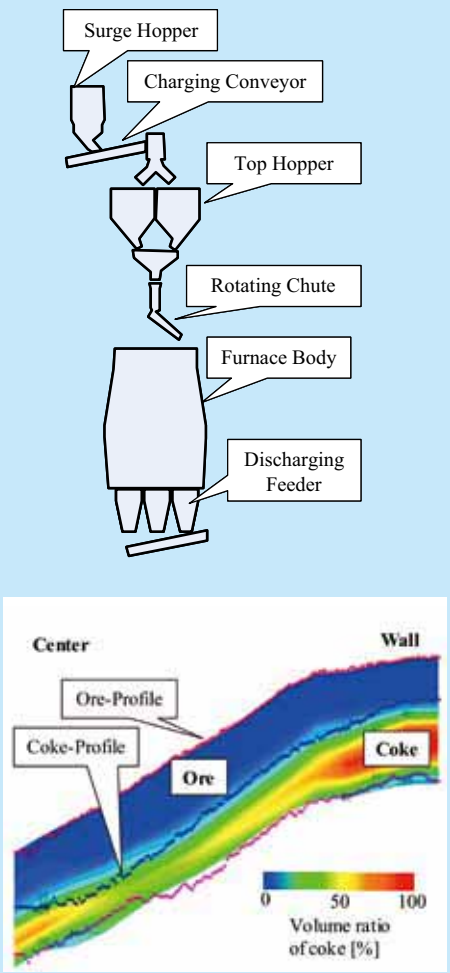
一方、こうした研究成果を実機化するためには、さまざまな専門分野の技術を結集し最適化する必要があり、開発部門と設備設計との連携が不可欠だ。高炉改修の全体計画・設計・実行を担当する設備・保全技術センターの尾形知輝は、現在進行中の君津第2高炉の改修で、門脇と連携して炉頂装入設備の設計・開発を行った。

「高炉は一度稼働すると約20年間稼働し続け、簡単には止めることができません。当社には高炉が8基あり、当社全体で約2・5年に1度訪れる高炉改修が、大きな設備改善、最新技術導入の最大の好機となります」

君津第2高炉改修では、1・4倍もの炉容積拡大（3273㎥から4500㎥に拡大）に伴う装入能力の向上が課題だった。

「既存設備の機能改善も含めた最新技術について門脇と議論して、最適な設備仕様を決めました。また20年を超える高炉寿命を見据えて、将来の原料多様化にも対応できる装入能力の向上を図りました。今後も劣質原燃料活用などの研究動向を先取りして、求められる最新設備を提供していきます」（尾形）。

図2　実験装置と測定結果の一例




実験装置を用いて装入物分布を計測した結果の一例。鉄鉱石とコークスの堆積分布を調査し、その制御方法を明らかにした

※1　ベルレス装入装置：装入装置は傘状の緩衝装置の上に一度にまとめて原燃料を落とす「ベル型装入装置」と、シュート形状の装置を回しながら装入する「ベルレス装入装置」に大別される。現在は装入量や装入位置を調整できる後者が大半を占めている。

設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部 マネジャー
**中馬 俊之**（ちゅうまん・としゆき）
（機械工学専攻、1998年入社）

設備・保全技術センター
無機材料技術部
**丸山 和也**（まるやま・かずや）
（化学専攻、2007年入社）

## 多彩な耐熱技術で長寿命化・炉容積拡大

高炉の長寿命化を実現するには、炉内の耐熱性を高めることが重要である。高炉のシャフト部や炉底側壁部（羽口の上部）には1200℃以上の高温負荷に耐えて鉄皮を守る、ステーブと呼ばれる冷却装置が設置されている。1970年代以降、鋳鉄の中に水管を鋳込んだステーブ（FCDステーブ）が使われていたが、操業中の熱と、原料が下降する際の衝撃による損傷が激しく、内壁レンガが脱落して内面形状が変わり操業にも悪影響を及ぼしていた。そこで20年以上の高炉長寿命化を目指し、2003年の君津第4高炉改修から鋳鉄の6倍の熱伝導率を持つ銅ステーブを採用。銅は冷却機能が高い上、熱変態がなく損傷しにくいため長期的な安定操業が見込まれ、さらにFCDステーブの約半分の薄さにできることから、炉容積拡大にも寄与する（**写真1**）。

しかし実機化には高いハードルがあったとプラントエンジニアの中馬俊之は語る。

「銅は鉄に比べて硬度、応力が低く、また熱電導率が高いゆえに逆にステーブに接する炉内の温度低下を招くという懸念がありました。FEM（有限要素法）による温度・応力解析、実機サイズのステーブによる熱負荷試験、構造部の繰り返し強度試験、メーカー調査を行い、開発に取り組みました」

君津第4高炉で実用化した結果などからさらなる耐摩耗性改善が求められ、中馬は海外調査も含めてその対応に奔走した。

「実炉を反映したオフライン摩耗試験、10分の1モデル試験、DEM（離散要素法）解析などを行い、耐摩耗性改善と炉温が下がることを抑制する効果にも優れた手法を導き出しました」

この新たな技術は2010年の大分第1高炉で期待通りの効果が確認され、現在改修中の君津第2高炉にも採用されている。

また、溶銑が勢いよく流れ出す出銑口と接した炉底側壁部の耐熱材（カーボンブロック）も高炉寿命を大きく左右する。これまで高炉の長寿命化を達成するため、耐食性の高いカーボンブロックを開発し、実機に適用してきたが、高炉内部での状況を実際に確かめることはできず、次の高炉改修時期を待たなければ明確な効果が確認できない。そこで内部診断・評価技術や、高炉内部のシミュレーション技術を駆使して、先行した材料開発を進めている。

カーボンブロック開発に取り組む丸山和也は取り組みについて語る。

「成分設計による微細気孔化、高熱伝導率化により耐食性を向上してきました。またカーボンブロックと溶銑との界面に粘性の高い保護層を形成して耐食性を向上させる材料の開発にも成功しています」

現在、君津第2高炉で17年使用したカーボンブロックからサンプルを採取して、物性変化や稼働面の微細構造を評価することで材料開発の指針づくりに取り組む。

「損耗が大きい出銑口周囲のカーボンブロックの使用環境をシミュレーションできる数値解析モデルをつくり、高炉操業の変化に伴う温度変化や溶銑の流れの変化などを解析して新たな材料開発に結び付けていきたいと考えています」（丸山）。

写真1　銅ステーブ

設備・保全技術センター
土木建築技術部
**西島 諭**（にしじま・さとし）
（土木専攻、2008年入社）

## 新たな基礎補強対策で大型化を支える

高炉では大荷重を支える基礎も重要だ。君津第2高炉の改修では、炉容積拡大に伴う荷重増加（操業時最大約2万トン）に伴い、基礎に生じる応力が許容値を超えるため基礎補強対策が必要となった。通常の建築物では杭を増やして荷重を分散させる杭増打ち工法が用いられるが、施工エリアを広げる必要があるため高炉の操業休止後でないと着工できず、改修工期が約1カ月延びる。そこで高炉操業中でも影響のない基礎下の地盤改良に着目した。ジェットグラウト工法を用いて杭周囲の地盤中にセメントを噴出し、改良体を造成。数百本の杭を一体化させたロの字型の固化壁をつくる「杭と改良体の複合基礎」を構想した（**図3**）。ジェットグラウトはこれまでも土木公共事業などで使われてきたが、液状化対策などの地盤改良を目的とすることが主であり、今回のように基礎に作用する荷重を改良体に分担させる目的での適用は初の試みだった。

土木建築技術の研究開発に取り組む西島諭は実用化までの道程を説明する。「新たな挑戦でしたので、施工品質の信頼性をどのように確立するかが課題となりました。設計時に複合基礎の挙動を解明し、その後試験施工を行い品質と施工法の信頼性を確認しました」。2010年10月から約5カ月で本施工を無事完工し（**写真2**）、改良体からサンプルを抜き取り、せん断波発生装置を使って改良地盤の性状を把握。全体の強度・剛性を確率統計的に評価する手法を確立することにより、設計を上回るスペックで施工できていることを確認した。

「今後も全体重量を決める高炉設計部門との連携を強化し、同工法と免震工法など他工法を組み合わせる新たな工法の開発を行いながら、巨大な構造物を下から支える基礎の合理的な設計・施工方法を追求し、高炉改修工事のニーズに応えていきます」（西島）。

## 高炉改修に求められるもの

多岐にわたる鉄鋼製品の素材となる銑鉄をつくり出す高炉。その高炉改修では、前述の大型化（より多く）、長寿命化（より長く）、エネルギー効率の向上（より安く）をより短工期で実現し、競争力を強化していくことが求められている。設備・保全技術センターの尾形知輝は次のように抱負を語る。

「関係部門と議論を深める中で、いま高炉に必要とされていることは何なのか、そして10年20年後の高炉に求められるであろうことを探り、研究、設備、要素技術といった各専門技術を融合して、高炉改修を担っていきたいと思います」

図3　杭・改良体複合基礎の概要

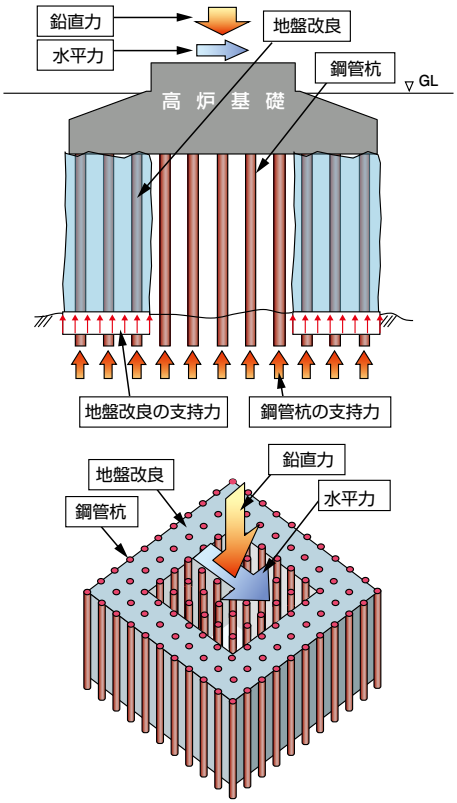



写真2　君津第2高炉の基礎本施工風景