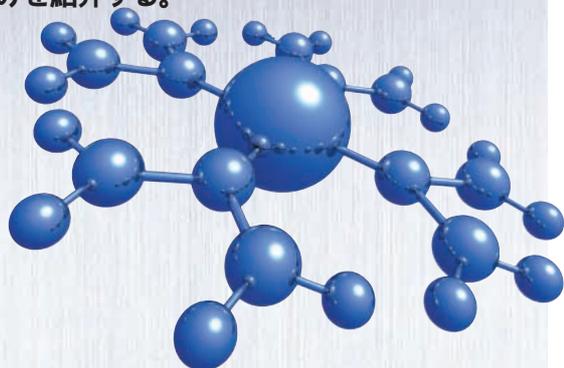


# 鉄鉱石から鉄を生み出す(中)

「製鉄プロセス」は、「鉄鉱石」から「銑鉄」を生み出す工程だ。鉄鉱石とコークスを高温下で化学反応させ、鉄鉱石の酸素をいかに効率よく取り除き（還元）“鉄”を取り出すかがポイントだ。前号から3回にわたり、製鉄業の原点である、鉄鉱石を鉄に生まれ変わらせる「高炉」のダイナミックな世界を紹介している。前号の「高炉のメカニズム」に続き、今号では、「操業のポイント」にスポットをあて、新日鉄の技術の強みを紹介する。



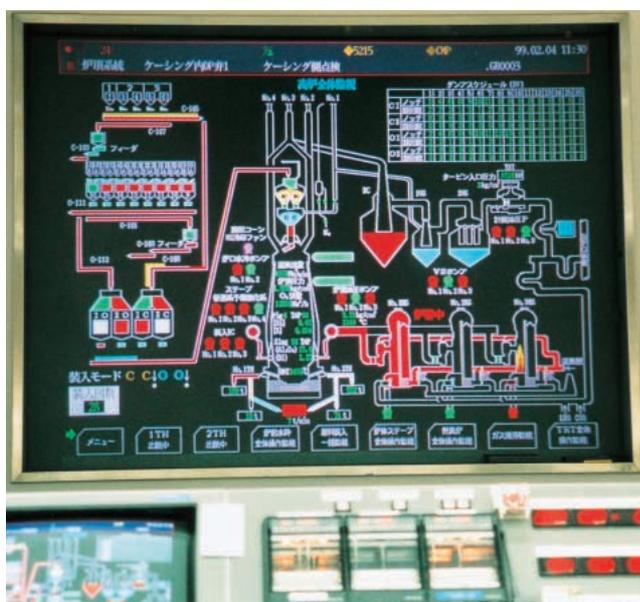
## 人間の“消化機能”に似た高炉の反応プロセス

高炉では、鉄鉱石の酸素を1,500 という高温で効率良く取り除き銑鉄を生み出す。そこでは、数多くの化学反応のドラマが進行している。そして高炉は“大食漢”でもある。1日の原燃料装入量は、世界最大の容積を誇る新日鉄君津製鉄所第4高炉（5,555m<sup>3</sup>）や大分製鉄所第2高炉（5,245m<sup>3</sup>）では、鉄鉱石は10tダンブカーで1,900台分、コークス500台分に相当する量におよぶ。そして、それらの装入物から1日1万2千tの銑鉄が生み出されている。

高炉という一つの反応容器の中で、上から固形物を飲み込み、消化して液体とガスに変える機能は“人間の消化機能”に似ている。人間でも風邪や消化不良に対する予防・治療を迅速に施すことが大切のように、高炉操業にも同様の対策が求められる。高炉の炉体周りには熱やガス圧力の状況を計測するセンサーが1千点以上設置されており、「ガスが均等に上昇しているか」

君津第二高炉の操業管理用画面

写真1

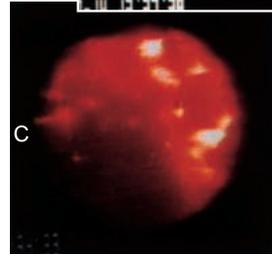
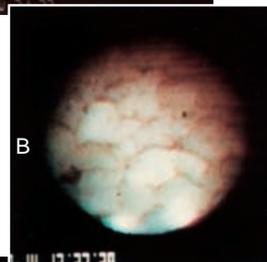
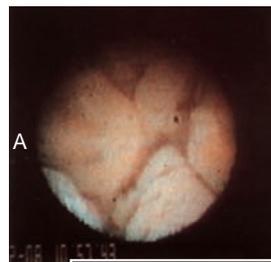
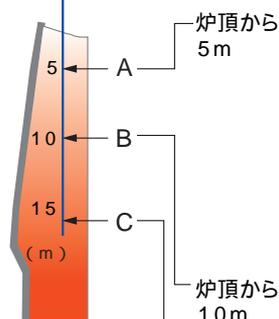


ファイバースコープで観測した高炉内部の写真

写真2

(可視径30mm)

スコープ挿入位置



A Bと高炉内で下層になるほど鉱石が次第に小さくなっている。

Cの16m地点では装入物層を抜けて高温ガスが沸騰しているような状況。

「装入物が安定して降下しているか」等を知るために必要な情報をマップにし、装入条件の変更や送風温度の調整を行っている（写真1、2）。いわば聴診器をあてて治療法を考える“医療行為”と同じだ。

予防・治療といった体調管理の基本は“食べ物の管理”つまり“原料の品質管理”にある。特に鉄鉱石やコークスの粒度が不揃いの場合や、鉄鉱石中の脈石や灰分（いわばセルローズ）、品質低下の根源となるアルミナ分（いわば悪玉コレステロール）が多いと、鉄鉱石が十分に還元されないまま炉床部に落ちるといった“消化不良”や“下痢”を起こす。

### “強くて反応性が良い原料”と“頭寒足熱”がカギ

では、こうした症状を起こしにくい原料とはどのようなものか。その品質を決めるポイントは二つある。第1は「強度に優れた、潰れにくい原料」だ。鉄鉱石とコークスには、粒が揃っていて積層

されても潰れない強度が必要だ。第2のポイントは「反応性が良い原料」であること。粒の気孔率や粒の間の空隙率が高く、還元ガスと接触反応する表面積が広いものだ（写真3）。しかし、強度が高くてパチンコ玉のように密だと還元ガスが内部を通らない。一方、塊内の隙間が多すぎると強度が落ちる。相反する条件をクリアしなければならないところに原料品質管理の難しさがある。

高炉操業の理想は、“頭寒足熱”だ。高炉では下部から上昇する高温ガスと、炉頂から降りてくる常温の装入原燃料との間で熱交換が行われる。その熱交換が効率良く進むと、下から発生した高温ガスの熱を装入物が十分吸収し、下降しながら鉄鉱石を完全に溶かす。熱交換が不十分だと高温ガスの熱が十分装入物に伝わらずに上に抜けてしまう。そして炉内下部の温度は下がり、いわゆる“炉が冷える”といった現象が起こる。この状態では効率良く銑鉄を生産することはできない。

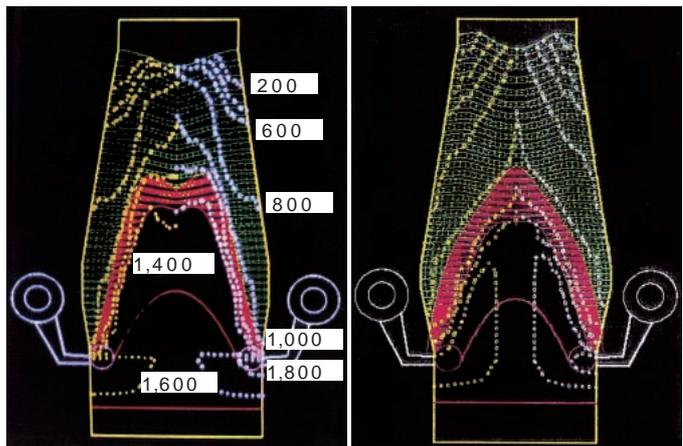
このように、高炉では効率的な熱交換が重要であり、炉上部の温度が低く、炉下部は高温になる、“頭寒足熱”型の操業が好ましい（図1）。

### 鉄鉱石と焼結鉱、石炭とコークス写真 写真3



### 頭寒足熱を表す高炉内の状況

図1



a) コークス比大で炉上部温度が高いケース

b) コークス比小で炉上部温度が低いケース

高炉では効率的な熱交換が重要。鉄鉱石を炉下部で完全に溶解するためには、炉上部の温度が低く、炉下部は高温になる、“頭寒足熱”型の操業が好ましい。

## 融着帯のコントロールは原燃料の事前処理から

高炉操業のポイントは、“消化機能”の日常管理にある。

まず装入物を飲み込む炉頂では、高炉の径が拡大する中で、特に装入物を円周方向に同心円状に均等に入れることが求められる。24時間、常に円周方向に一定の条件で均一に装入することは至難の技だ。装入物が少しでも偏って装入されるといびつな形をつくる。いびつになると高温ガスも偏りを生じ、局部に集中的に流れてしまう。そうするとその部位の装入物の溶解が加速的に進み、修正することがきわめて難しくなる。その結果、“装入物の降下が不均一となり、炉下部が冷える”といった異常現象が起る。高炉の超大型化に伴う苦勞だ。

現在は 炉頂の装入物の状況を24時間体制で監視し、精度の高い装入管理を実施すると同時に、“真ん中に鉄鉱石よりもコークスを多く入れる装入方法”をとっている。

それはなぜか。炉内で鉄鉱石が下降しながら溶ける過程で、固体と液体の中間で密度の高い半熔融状態にあるドーナツ形状の「融着帯」(写真4)ができる。それが下から上昇する高温ガスの整流板の役割を果たしている。真ん中の比較的薄い鉄鉱石の層には相対的に多くの高温ガスが流れるため、炉の中心上部から優先的に融着した層が形成され、積み上がった層の形状は逆V型になる(図2)。

高温ガスは煙突を上昇するように、逆V型の融着帯に沿って中心上部に向けて流れるようになり、一度中心軸に集まったガスはコークス層を介して、炉周辺側に均等に再分配される。強制的に中心上部にガスを寄せることによって、局部的に異常なガスの流れが起こらないように制御している。昔のコークスストーブにおいて、真ん中に高温でコークスが良く燃える領域をつくり強い燃焼力を維持する原理と同じだ。

また、融着帯は鉄鉱石が熱で軟化し始めて溶け終わるまでの層域を示すが、その厚み(帯幅)は薄い方が良い。融着帯は半熔融の密度の高い状態で存在するため、帯の幅が厚すぎるとガスの流れへの抵抗が大きくなり、ガスが炉周辺側に十分廻らず、上部の固体部分に熱が伝わりにくくなってしまふ。そこで、鉄鉱石が軟化し始める温度をできるだけ高くし、溶け落ちるまでの温度との差を小さくすることで融着帯を薄くしている。

装入物の軟化温度を高くして溶解を速やかにする

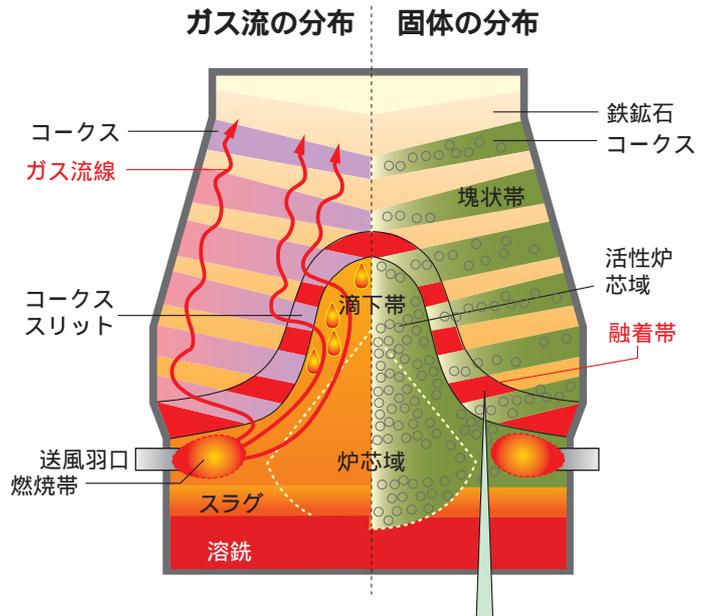
## 高炉内の仕組みと主な反応

図2

真ん中の比較的薄い鉄鉱石の層には相対的に多くの高温ガスが流れる。

炉の中心上部から優先的に融着した層が形成され、積み上がった層の形状は逆V型になる。

高温ガスは融着帯に沿って中心上部に向けて流れ、中心軸に集まったガスはコークス層を介して、炉周辺側に均等に再分配される。



## 融着帯が形成される様子

写真4

鉄鉱石が下降しながら溶ける過程で、半熔融状態にあるドーナツ形状の「融着帯」ができ、下から上昇する高温ガスの整流板の役割を果たす。



モデル実験

## 主な炉内反応

(-記号は発熱反応)  
(+記号は吸熱反応)

COによる間接還元(コークス、微粉炭からのガス)	
$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$	- 12650 kcal/kmol
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	+ 6250
$\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$	- 3330
H <sub>2</sub> による間接還元(湿分、微粉炭中の水素分)	
$3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2\text{O}$	- 2800
$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 = 3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$	+ 16100
$\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	+ 6500
カーボンソリューション反応	
$\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$	+ 41220
水素ガス化反応	
$\text{H}_2\text{O} + \text{C} = \text{H}_2 + \text{CO}$	+ 31564
炭素による直接還元(コークス、微粉炭中の炭素)	
$\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$	+ 37880
カーボンの燃焼(コークス、微粉炭中の炭素)	
$\text{C} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}$	- 26416

には“原料品質”がキーとなる。例えば、鉄鉱石内部にシリカやアルミナなどの不純物が多くあると軟化温度が低くなり、溶けるまでの時間が長くなるので融着帯は厚くなってしまふ。世界の様々な地域から調達される鉄鉱石は不純物の少ない高品質なものばかりではないため、高炉に装入する原料品質を向上させることは簡単ではない。

一般的にブラジル鉱石はシリカやアルミナが少なく鉄分が多いが、オーストラリアの鉱石はそうした不純物が多い。原料のバラツキを抑えながら使いこなす“原燃料の事前処理”は体調管理の第1のポイントだ。

## 炉芯コークス層は高炉の“肝臓” 常に状態管理が大切

一方、鉄鉱石を消化して銑鉄を生み出す「炉下部」の体調管理も重要だ。炉下部では下降過程で鉄鉱石を還元・溶解したあと、残ったコークスが送風羽口から送り込まれる熱風でガス化し、徐々に消滅する。しかし、径が13~15mある炉床部では送風羽口からの熱風の大半は1.2mほどしか届かない。そのため、送風羽口に近い所はガス化して消滅するが、炉の中央部のコークスは、コークス粒がほとんど動かずに1カ月程残る。この部位を「炉芯コークス層」と呼ぶ。

送風羽口先でガス化するコークスは炉芯コークス層の傾斜面に沿って流れ込むが、その傾斜面の角度はおよそ60度だ。60度以内のコークス層はほとんど動かずそのまま残り続け、炉芯コークス層となる。

炉芯コークス層は高炉内の熱変動を緩和するバッファとしての役割や、近くに滞留するコークス粉を滴下メタルやスラグと接触して消失させる場を与える役割を担う。人間で言えば“肝臓”だ。炉芯コークス層は以前、不活性で役に立たないと言われたが、この大きな熱保有層があるからこそ、炉床部は冷えない。炉芯コークス層が一度冷え始めると、送風羽口から熱風をいれてもなかなか炉内の温度が上昇しない。つまり“肝臓”のように、悪くなってもなかなか気づかないが、悪くなると影響が大きい、非常に重要な存在だ。

炉芯コークス層は銑鉄やスラグよりも軽いが、炉上部からの装入物層の加重で押さえつけられ、溶けた銑鉄中に炉心コークス層の下部が潜り込んでいる。炉芯コークス層はその周りのコークス層と連なって存在している。独立して動くものではないが、溶けた銑鉄の中央部に浮かぶ浮島のイメージで説明すると分かりやすい。

実はこの“浮島”の浮上位置や大きさの制御が難しい。浮島が浮き過ぎると炉芯コークス層底面中央の下にある銑鉄が冷えて凝固し、流動性(湯流れ)が悪くなる。一方、沈んで炉底に密着してしまうと、炉芯コークス層の裾野が完全な円形でないため溶けた銑鉄やスラグが炉周方向で十分に連通せず、3~4カ所ある出銑口からの銑鉄とスラグの流出量にバラツキがでる。浮島が肥大化すると、銑鉄やスラグの貯まり場が小さくなって炉芯コークス層への熱の伝わりを悪くし、炉底を冷やす一因になる。

原理的に、炉芯コークス層は炉上部(特に中央部)から軽いコークスを多く入れて装入物の荷重を減らすと浮きやすくなり、重い鉄鉱石を増すと沈みやすくなる。また、熱風量を増して融着帯の位置を持ち上げると炉下部のコークス層域が広がり、炉芯コークス層は浮きやすくなる。

しかし、コークスを多く装入して融着帯の位置を必要以上に持ち上げるのは、コークス比の上昇や銑鉄生産性の低下をもたらすので望ましくない。テニスコートほどの広さがある炉底において、炉芯コークス層の位置や大きさは、銑鉄・スラグの温度や滞留量、そして炉周方向でのバランスに強い影響を与える。炉径が大きくなれば炉周方向のバランスはとりにくくなる。最適なバランスをピンポイントで狙う大型高炉では“炉芯コークスの管理”が体調管理の第2のポイントだ。

今回は、高炉の体調管理に不可欠な“原燃料の品質管理”と“超大型高炉の操業管理”における新日鉄の技術的挑戦および今後の高炉技術の方向性を紹介する。



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