

鉄鋼原料 (2) 鉄鉱石を 使いこなす技術

地球上で豊富な資源量(確認埋蔵量 3,700 億トン)を誇る鉄。しかし現在、中国の経済成長などを背景に世界の鉄鉱石需要が急増する中で、鉄分の純度が低く、シリカなどの不純物が比較的多い地層での採掘も増やさざるを得なくなっており、今後、採掘場所や品質の多様化・劣化が進むものと予測されている。本シリーズ第2回目は、そうした多様な鉄鉱石を使いこなすための原料改質技術を中心に、製鉄プロセスの改良・革新に挑戦する姿を紹介する。

鉄鉱石から鉄を取り出す高炉法

鉄鉱石は、酸素のある地上で酸化鉄 (Fe_2O_3 、 Fe_3O_4) として存在する。その鉄鉱石を高温で溶解し、酸素を効率よく除去して鉄分を取り出す(還元)設備が「高炉」だ(写真1、2、図1)。14世紀ごろドイツで発明されたと言われるこの化学反応容器は、16世紀にイギリスに渡り、森林資源の枯渇を背景に、1709年には木炭ではなく石炭を焼き固めたコークス(本シリーズ3回目で紹介)を燃料として使用するシャフト炉(※1)に進化し、その後、今日まで鉄製造技術の主流を占めている。高炉は現在、高さ約100m、炉底がテニスコートほどもある巨大な容器となり、例えば、容積 $5,500\text{m}^3$ を超える世界最大級の新日鉄大分製鉄所や君津製鉄所の高炉では、一日に約1万2,000トンの銑鉄が生み出されている。

初めに、高炉の中で鉄鉱石が鉄に生まれ変わるメカニズムを説明しよう。高炉の上部(炉頂)から鉄鉱石とコークスを層ができるように交互に装入し、その層状態を崩さないように炉内を下降させながら、炉下部にある送風羽口から熱風を吹き込む。

この熱風がコークスと反応して一酸化炭素の高温の還

高炉全景

写真 1



製鉄所のシンボル「高炉」。写真は新日鉄・大分製鉄所第二高炉。

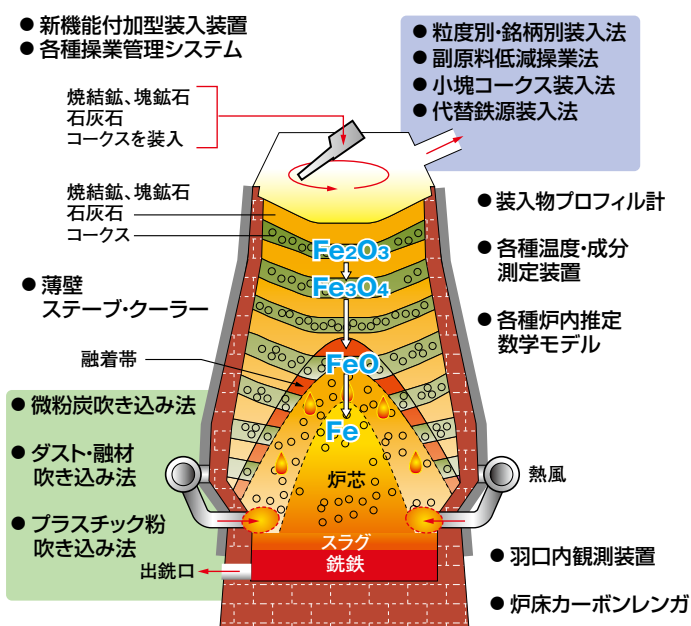
炉床から見上げた高炉内部

写真 2



高炉の開発技術一覧

図 1



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。青色部分は装入物装入法、緑色部分は還元材、ダスト吹き込み法の代表的な技術を示す。

※ 1 シャフト炉：原料や燃料などの装入物を炉頂から入れ、銑鉄、スラグなどを炉下部から排出する堅型炉。

元ガスとなり激しい上昇気流となって炉内を上昇していくためには、ガスの通り道を保つよう粉が少なく強度の高い鉄鉱石やコークスが必要とされる。下降してくる鉄鉱石は、高炉の上部では、高温ガス（還元ガス）が鉄鉱石の酸素を奪い取り（間接還元）、下部では、コークスに含まれる炭素と接触してさらに還元される（直接還元）。溶けた鉄分は層内を滴下しながら、1,500℃の高温で炭素約5%を含む「銑鉄」となり炉底（湯溜まり部）に溜まる。これが鉄鋼製品の源となる銑鉄だ。溶けた銑鉄は炉底の側部に設けられた出銑口からスラグ（※2）（後述）とともに取り出される。約8時間をかけて鉄鉱石が炉頂から炉底に降りる過程で、固体、気体、液体が共存するダイナミックな化学反応をもたらし高炉は、現在も原料装入や温度制御などの周辺技術が開発され、最新鋭の反応容器として進化している（図1）。

鉄鋼材料の品質と生産性を左右する原料品質

高炉で還元して取り出される銑鉄の品質と生産性を高めるには、その源となる原料（鉄鉱石）の品質管理が重要だ。前号でも解説したように、現在は中国やインドなどを中心に鉄鋼需要が急増する中で、採掘場所や品質の多様化・劣化が進み、鉄の純度が低くシリカ（ SiO_2 ）やアルミナ（ Al_2O_3 ）などの不純物（脈石）が多い低品質原料の使用を増やさざるを得ない状況になっている。シリカやアルミナなどの不純物が多いと、高炉に装入された鉄鉱石の還元が難しくなり、銑鉄の生産性が低下し、品質を維持するのが難しくなる。

鉱山で採掘された鉄鉱石に粒子として混ざっているシ

リカやアルミナは、鉄と結び付いた化合物にはならないが、高炉内で還元されるときに、粘土のようなベタベタな固体となり（融点が高い）、熔融を促進する炉頂へのガスの通気を阻害し、温度上昇を妨げて還元効率を低下させる。また、液体になりにくいため出銑口の詰まりの原因にもなる。そこで従来から、副原料を使用して不純物を取り除く方法がとられている。

また、装入時の鉄鉱石の粒度が不ぞろいで通気性が悪いと、熱が炉内を伝わりにくく還元効率を低下させるため、炉内で積層しても潰れにくい強度を持ち、粒の気孔率が高く還元ガスと反応する表面積が大きいといった材質・形状への改質も必要だ。新日鉄では、こうした鉄鉱石の品質低下と材質のパラツキが顕在化する以前から、鉄鋼原料の安定利用を維持・継続するために多様な鉄鉱石を使いこなす「原料の事前処理」の技術開発に取り組んできた。

鉄鉱石の不純物を無害化する副原料「石灰石」

不純物の多い鉄鉱石を使いこなす方法としては、従来から、石灰石（写真3）を使用して、シリカやアルミナなどの不純物を無害化する方法が用いられている。一見、鉄とは関係のない原料を使い多くの副産物を生み出すことを不思議に感じるかもしれないが、石灰石は高炉というプロセスの中で高品質な銑鉄を得る上で不可欠な副原料だ。

石灰石は化合物「スラグ」としてアルミナやシリカの融点を下げ、粘土のような状態をサラサラで流動性の高い液体にしやすくする。高炉の操業では最終的に、炉底

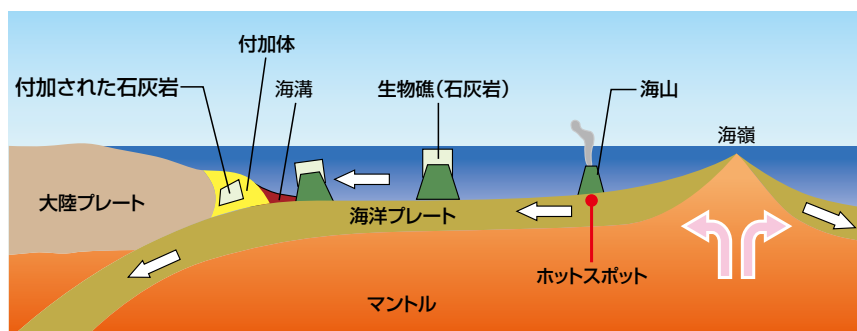
石灰石

写真3 石灰石の生成過程

図2



炭酸カルシウム（ CaCO_3 ）を主成分とする鉱物。高炉内で鉄鉱石に含まれる不純物と結合し、「スラグ」として無害化する。高品質な銑鉄を得る上で不可欠な副原料だ。



海面上にまで達した海山の頂部にサンゴ、石灰藻などの生物が複合して生物礁（主成分は石灰岩）を形成する。太古代以降の大陸移動で海洋プレートが日本列島の海溝に潜り込む際に、海山上の生物礁（石灰岩）が大陸プレートに付加された。四国など日本列島の端の地盤では、石灰岩の塊となって表層に顔を出した。

（参考資料：石灰石鉱業協会ホームページ）

※2 スラグ：鉄鉱石に含まれるシリカやアルミナなどの不純物が石灰石と混ざり合って溶けたもの。

部に溶融した銑鉄が溜まり、比重の小さい液状化したスラグがその上層部に浮いた状態になるため、出銑の際に銑鉄と不純物を容易に分離・排出できる。新日鉄では、石灰石の添加量について不純物の融点を下げる最適値を導き出している。高炉1回の操作で約300kg排出されるスラグはセメント材料として再利用されており、セメントの生産工程の効率化による省エネルギーにも貢献している。

従来から、日本の鉄鋼業が使用する石灰石は国内で採掘されてきた。太平洋上の海洋プレートにあった生物礁(石灰岩)が大陸移動の際に、大陸プレートに付加され、日本列島の端の地盤でその表層に顔を出した(図2)。日本最大の石灰石の鉱山は四国にある。副原料として使用するとき石灰石自体に不純物があると使いにくい、広い海洋で堆積したため不純物の少ない日本の石灰石は、豊富な埋蔵量と純度の高さから海外にも輸出されている。これは日本鉄鋼業の強みでもある。

銑鉄生産の安定化に寄与する「焼結技術」

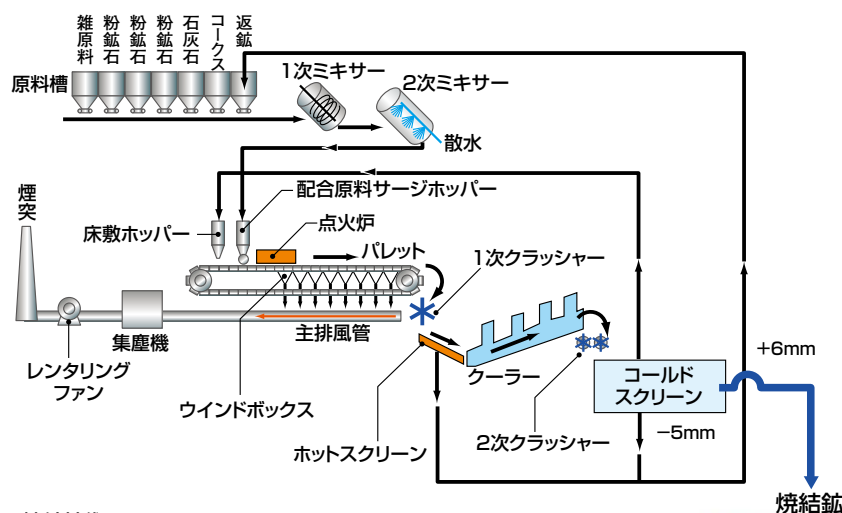
一方、鉄鋼業界では鉄鉱石の改質技術開発に積極的に取り組んできた。鉄鉱石の形状には「塊鉱石」と「粉鉱石」があり、昔は塊鉱石が多く使用されていたが、1950年代を境に日本では5mm以下の粉鉱石の使用率が高まった

(現在、塊鉱石の使用量は約10～15%)。天然の塊鉱は還元性のバラツキや不純物の偏在などが円滑な操業の妨げになるため、産地や性質が異なる粉鉱石の配合を調整して均一化し、銑鉄品質の安定化を目指した。

しかし、粉鉱石をそのまま高炉に装入すると目詰まりを起こし還元ガスの流れを阻害する。そこで粉鉱石と石灰石(粉状)を混ぜて、一定の大きさに焼き固めて塊成物にする「焼結技術」を導入した(図3)。高炉での還元時に不純物を無害化する石灰石は、焼結時に粒同士を結合させるためのフラックス(溶剤)の役割も果たしている。事前に副原料を混入させるため天然の塊鉱石と比べて鉄分の純度が下がり、その品質に見合った設備を導入するための投資や労力も必要だが、品質の均一化や不純物の無害化などの効果により、高炉操業時の鉄の還元効率・生産性が向上する。

現在まで、還元性を高める焼結鉱の成分と形状の最適化が追求され、焼結効率を向上させる粉鉱石の選定や高炉への装入方法など、さまざまな角度から試験が行われてきた。例えば、高炉のシミュレーターで還元ガスを下から流し、上から圧力をかけて実際の操業環境を再現して、焼結鉱の品質を精査している(写真4)。また、より多くの焼結鉱を短時間で製造することが求められるが、新日鉄では多様な条件設定下で実証試験を徹底的に行い、銑鉄生産の安定化に直結する焼結鉱を効率的に作り出している。

焼結工程と焼結鉱

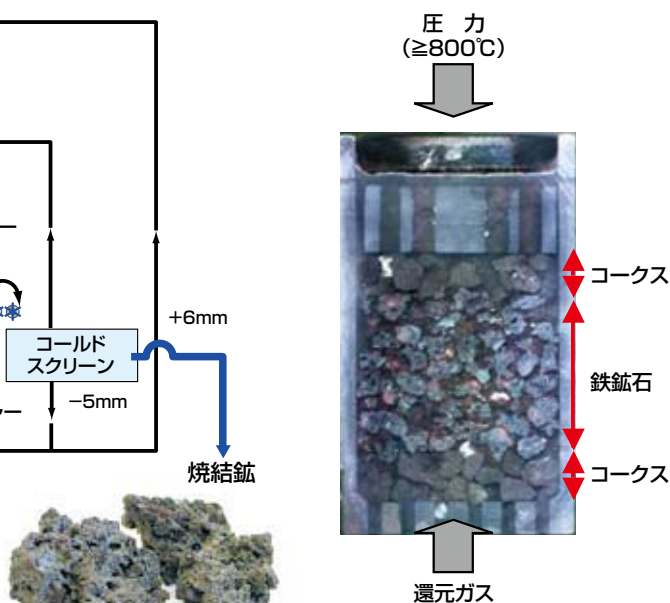


焼結技術：
産地や性質の異なる粉鉱石の配合を調整・均一化し、一定の大きさに焼き固めて塊成物にする技術。高炉で生まれる銑鉄の品質安定化と還元効率の向上に寄与する。

図 3

焼結鉱の性能試験

写真 4



高炉操業の高度化を実現した「選択造粒」

新日鉄では焼結技術の開発・導入に引き続き、1980年代後半から、低品位原料の新たな事前処理技術の開発に取り組んできた。その結果生まれた代表的技術が「**焼結工程における選択造粒**」だ(図4)。これは粉鉱石の中で3mm以下の使用が難しい微粉をふるい分けて均一な形状に造粒し、その後、3mm以上の粗い粉鉱石と混ぜて焼結機に装入することで、焼結工程の効率化と省エネルギーを実現したものの。同技術は、1993年の「大河内記念生産特賞(※3)」を受賞している。

焼結鉱は高炉での熔融の過程で軟化するが、できるだけ上部で還元しやすく、なおかつ通気性を確保するためにできるだけ塊のまま高炉の下層に降ることが望ましい。つまり熔融還元を加速させながらも、できるだけ最後まで強度を持たせて通気性を確保する隙間(熱への反応面積)を維持する必要がある。こうした相反する条件を最適値で両立させた技術が選択造粒法だ。

焼結前に選択造粒を行うと、6mm以下の粒鉱石が塊として強く結び付き強度が高まる。その一方で多くの細かい気孔があり、熱に反応する表面積が増えて還元しやすくなるように制御されている。最終的に造粒される焼結鉱の構造は、比較的大きい粒を中心として、表層にサイズが異なる

る微粒が付着した状態になっている。その際に、微粉がすべて溶けてしまうと気孔がなくなるため、ある程度の粒度を持つ粒(2mm程度)と微粒(0.15mm程度)のバランスを緻密に制御している(図5)。塊鉱石や焼結鉱とともに原料として使われているペレット(使用量約10%)(※4)は、焼結鉱と同じように粉鉱石を固めたものだが、焼結でも使いにくい超微粉を主な原料として山元で製造されることが多い。ペレットは不純物が少なく強度は高いものの焼結鉱に比べ気孔が少なく還元されにくい。新日鉄では、輸入するペレットの品質向上に山元と共同で取り組んでいる。

鉄鉱石の改質技術は常に高炉技術の進歩とセットで考える必要がある。新日鉄では、製鉄の主流である高炉法での最適生産を前提に、今後も多様化する鉄鉱石の品質に対応する技術開発に取り組んでいく。次回は、鉄鉱石の還元に不可欠な「石炭(コークス)」の歴史や資源としての埋蔵量、使用技術を紹介するとともに、鉄鋼原料の将来を展望する。

監修 新日本製鉄(株)

原料第二部審議役(資源調査)

兼 原料第一部審議役(石炭資源調査)

長野 研一(ながの・けんいち)

プロフィール

1950年生まれ、大分県出身。

1976年入社。主に原料資源調査に従事。

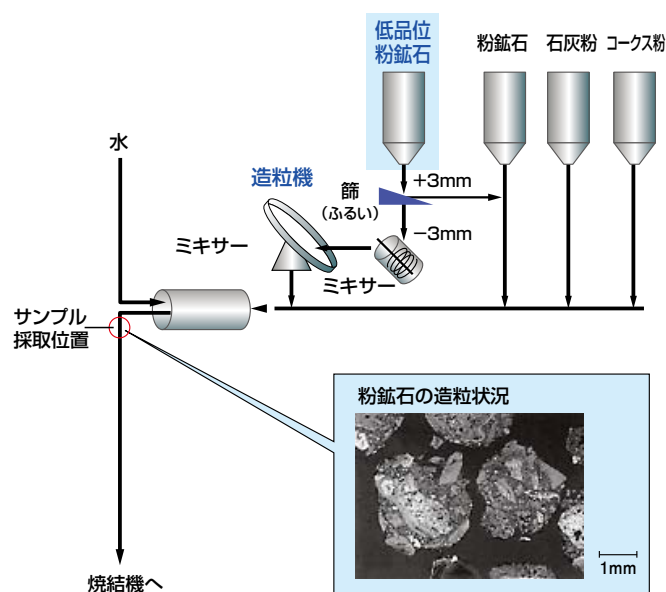
2000年原料第二部部長。

2006年より現職。



選択造粒のプロセスと造粒状況

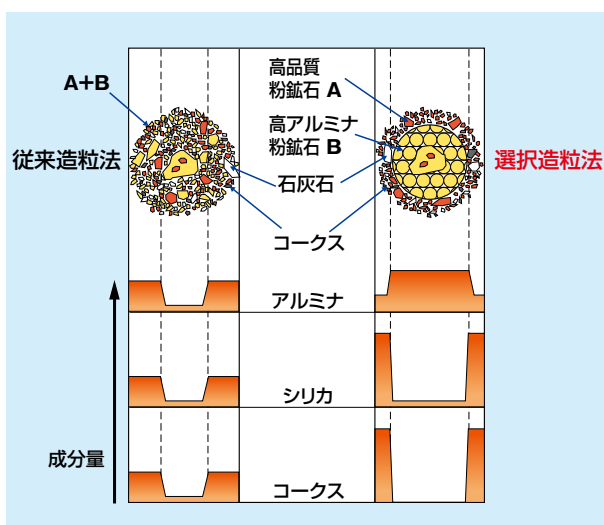
図4



まず、粉鉱石の中で3mm以下の微粉を篩で選り分けて造粒し、その後、粗いものと混ぜて焼結機に装入する。これで形状を均一化し、効率良く焼結することができる。

従来の造粒法と選択造粒法の造粒物の比較

図5



選択造粒法(右)は、比較的大きい粒を中心に粒度の異なる粉鉱石のバランスを制御して強度と通気性を両立している。また焼結反応を阻害するアルミナなどを中心部に閉じ込めている。

※3 大河内賞：生産工学、生産技術の研究開発や高度な生産方式の実用化などで優れた業績をあげた個人、事業体を毎年表彰するもの(主催：(財)大河内記念会)。

※4 ペレット：粉砕した微粉鉱石を副原料とともに球状に造粒し、重油や石炭で加熱し成形したもの。