

新しい製鉄方法 ITmk3について

橋本 澄人

皆さん、こんにちは。科学デモンストレータの橋本です。最近私の勤める製鉄会社で、従来とは異なる新しい製鉄方法、「ITmk3(アイティーマークスリー)」を開発しました。この方法は、従来数時間かかっていた鉄作りがほんの10分で済み、CO₂の排出量も低減できるとい、すごいものです。今回はこの新しい製鉄技術を紹介させていただきます。

1. 鉄の主原料:鉄鉱石

私達の身の回りにある鉄製品は主に鉄鉱石を原料にして作られています。ITmk3もこの鉄鉱石を使って鉄を作ります。鉄鉱石の主成分は酸化鉄で、多く使われるものは赤鉄鉱(Fe₂O₃)や磁鉄(Fe₃O₄)などです。通常使われる鉄鉱石には鉄分が50~65%含まれており、これ以外にシリカ(SiO₂:2~6%やアルミナ(Al₂O₃:1~3%)などの不純物が含まれています。鉄の含有率の高い高品位鉱石は粒度調整のために破碎されますが、この過程で塊鉄石のほかに粉鉄石が発生します。また、鉄の含有率が低い低品位鉱石は、粉碎して不純物を取り除く選鉱が必要になるため、更に細かい微粉鉄石になります。鉄鉱石というと、ごろごろした固まりのイメージがあるかもしれませんが、実際にはそういった塊鉄石の比率は少なく、5mm以下の粉状の鉄石(粉鉄石)がほとんどになっています。

2. 従来の製鉄法

それでは、具体的にどうやって鉄鉱石から鉄を作っているのでしょうか。新しい製鉄法:ITmk3についてお話しする前に、まず従来の製鉄法の代表的なものを簡単にご紹介します。

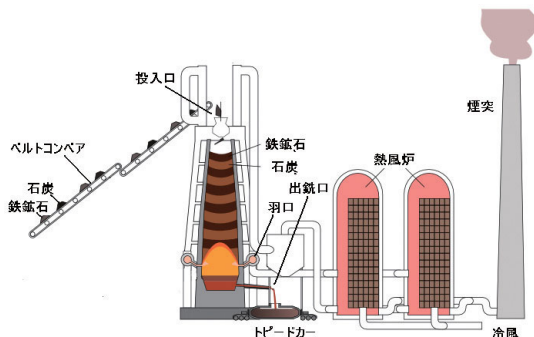


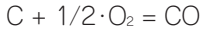
図1 高炉システム

2.1 高炉法

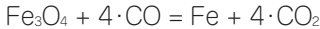
高炉法は現在主流となっている製鉄法で、日本の主な製

鉄所はこの方法で鉄を作っています。高炉は図1に示すような縦型の炉で、炉の頂部に原料の投入口が設けられています。原料の鉄鉱石(焼結鉄)と還元剤および燃料となる石炭(コークス)はベルトコンベアを使って投入口まで運ばれ、鉄鉱石と石炭が層状になる様に交互に炉内に投入されます。高炉の下部側面には空気を吹き込む羽口が設けられています。この羽口から1200~1300℃に加熱された熱風を吹き込むと、まず石炭の炭素(C)が燃焼して一酸化炭素(CO)が発生します。この一酸化炭素は鉄鉱石の酸化鉄(Fe₂O₃)と反応して純鉄(Fe)と二酸化炭素(CO₂)を発生させます。これらを化学式に表すと以下のようになります。

○石炭の燃焼



○鉄の還元



還元された鉄は、以上の反応で同時に発生した熱によって溶かされ、原料の隙間を伝って高炉の炉底に溜まります。この溜まった鉄を銑鉄と呼びます。またシリカやアルミナ等の不純物も溶融したスラグとなり、銑鉄の上に別れて溜まります。

銑鉄が一定量溜まると、底部に設けられた出銑口しゅうせんこうを開いて取り出し、トピードカーと呼ばれる保温容器に移して転炉工場まで運びます。スラグも出銑口から銑鉄と分離しながら排出されます。炉頂部から投入した原料が銑鉄になるまで約8時間かかります。転炉工場に運ばれた銑鉄は、転炉(脱炭)、溶鋼処理(成分調整)、連続鑄造(塊成化)、圧延(形状調整)などの工程を経て鉄板や型鋼の製品になりますが、これらの詳細は紙面の都合で割愛させて頂きます。

さて、高炉の操業では、羽口から吹き込んだ熱風が上方に向かって均等に流れ、また生成した銑鉄やスラグがスムーズに流れ落ちるように、投入した原料層に均一に隙間をもたせる必要があります。このため、直径2～3ミリの粉銑石に粉コークス、粉石灰石を混ぜて焼き固め、直径15～30ミリに破砕調整した焼結銑が主に使用されています。また微粉銑石を使用する場合は、16～20mm径の玉状に丸めて約1300℃で焼成してペレットにする必要があります。一方石炭についても、粘結炭という特殊な石炭(原料炭)を蒸し焼きにして高強度化したコークスの使用が必要になっています。

高炉法では、上記のような原料事前処理のため、焼結炉やペレット焼成設備、コークス炉など、多くの付帯設備が必要になり、大型化・大量生産により経済性を確保してきた経緯があります。高さ100メートル以上、内容積4千立方メートル以上、日産1万トンクラスが最近の日本の主流になっています。

また、高炉は一旦火を入れると数年の単位で止めることができない(中が冷え固まってしまい、再度稼動ができなくなる)ため、操業の弾力性が低いと言われています。

2.2 ガスベース直接還元法「ミドレックス法」

高炉のように石炭の燃焼ガスで銑石を還元する間接還元に対して、還元ガスを用いた比較的低い温度で、半溶融あるいは固体のまま銑石を還元する方法を直接還元と言います。直接還元により鉄を製造する方法はいくつかありますが、ここでは天然ガスを用いたミドレックス(MIDREX)法というガスベース直接還元法を紹介します。ミドレックス法の設備は縦型のシャフト炉と、還元ガスを製造するリフォーマーの二大主用機器から構成されます(図2)。原料には塊銑石や微粉銑石から製造したペレットが使用されます。原料銑石はシャフト炉の頂部から挿入され、炉体の中間から吹き込まれる還元ガスと接触して還元反応

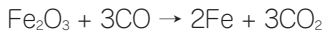
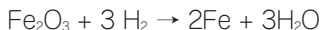


写真1 高炉(加古川製鉄所)



を進めながら炉体の下方に向かって徐々に下降していきます。この反応を式に表すと以下のようになります。

○鉄鉱石の還元(シャフト炉)



○還元ガスの製造(リフォーマー)

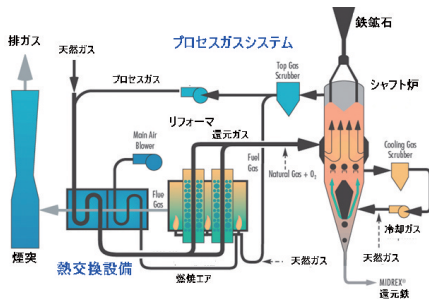
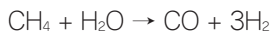


図2 ミドレックスプロセス

還元ガスは炉頂から排出されたあと、天然ガスを一部加えながらリフォーマーに再循環され、燃料消費量を低く抑える仕組みになっています。そして反応が終了したところで、炉の下部に設けられた冷却帯を経て炉外に排出されます。反応所要時間は約6時間となっています。

シャフト炉から排出された製品は、還元鉄(Direct reduction Iron: DRI) と呼ばれます。元の鉱石から酸素が除去されて気孔が多数発生することから海面鉄:スポンジアイアン(Sponge iron)と呼ばれることもあります。還元鉄はその後電気炉に送られ、溶解・不純物除去・成分調整を行なった後、連続鋳造・圧延を経て鉄鋼製品となります。



写真2 ミドレックス DR プラント

ミドレックス法はクリーンな天然ガスを使用し、CO₂の排出を抑えた環境に優しいプロセスですが、その性質上、工場の立地が産油地に制限されてしまうため、日本ではあまり馴染みのない製鉄法になっています。

2.3 スクラップ電気炉製鋼法

これまでは鉄鉱石を原料にした鉄の製造方法を紹介しましたが、これとは別に、鉄鉱石を使わずに鉄を作る方法があります。それはスクラップを原料にした電気炉製鋼です。鉄はリサイクルの優等生と言われており、屑となった鉄はスクラップとして回収され、電気炉にて溶解されて再利用されています。世界の鉄生産量の三分之一が鉄スクラップから作られているそうです。

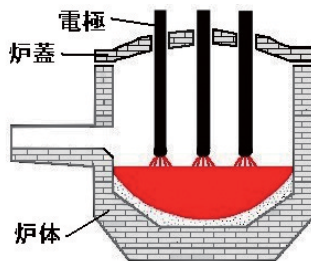


図3 交流アーク式電気炉

電気炉はその名の通り、電気熱を利用して鋼を製造する炉で、アーク式と誘導加熱式がありますが製鋼には炉容量が大きく生産能率の高いアーク式電気炉が一般的に使用されています。電気炉の形は蓋のついた鍋の形で、蓋には穴が開いていて、黒鉛でできた電極がこの穴を通して炉内に差し込まれるようになっています。アーク式には交流式と直流式があり、交流式では電極が3本、直流式では電極が1本使用されます。この電極に電流を

通すと、鍋の中の鉄スクラップと電極との間にアーク(気体中での放電の一種)が発生し、このアーク熱を使って鉄スクラップが溶かされます。この溶解操作と、酸素吹き、石灰などを添加して行なうスラグ調整による精錬過程を経て、鋼が出来るまでに1~2時間かかります。また、ひとつの炉で造れる量はおおよそ50~120トンで、超大型の200トンクラスの炉となっています。電気炉は高炉に比べて設備費が安く済むため、中後進国が最初に鉄の生産を始めるのに向いていると言われており、中東や東南アジアで盛んに行なわれています。

電気炉製鋼法はCO₂の排出が殆どないので、環境に優しいメリットがある一方、電気をたくさん使用するので、電気コストがかかる特徴があります。日本では、電気代の安い夜間に操業してコストを下げるような工夫をしているそうです。

鉄スクラップには色々なものが付着・混入してくるため、これらがスクラップと一緒に溶解されて不純物が増加する問題があります。例えば、配線など使用される銅が原料に多量に混ざると、割れを生じやすい鉄ができてしまいます。品質を安定させるには不純物含有量を一定以下に制御する必要がありますが、溶解した鉄から一旦混入した不純物を取り除くことは非常に困難であるため、良質の鉄を加えて希釈して調整するなどの方法が取られています。このような希釈材として、製鉄所で発生する成分の明らかなスクラップ、銑鉄(溶銑を冷やし固めた物)や還元鉄(DRI)などが使われています。

3. 新しい製鉄法:ITmk3

鉄鋼生産量が世界的に着実に増加する近年、高炉で使用される塊鉱石や粉鉱石などの高品位鉱石、還元剤として使用されるコークス等の原料を安定して入手することが困難になってきています。また、焼結炉やペレット焼成設備、コークス炉など、省エネや環境面で負荷の高い事前処理が必要であることも制約となりつつあります。このような中で、低品位の微粉鉱石や、原料炭よりも豊富に存在する一般炭が利用可能で、且つ環境に優しい新たな製鉄法ニーズが高まりつつあります。こうして開発されたのが、新製鉄法:ITmk3です。このITmk3という名前は、現在製鉄の主流とされる高炉法を第一世代(Mark 1)、ミドレックス法に代表される直接還元法を第二世代(Mark 2)として、これらとは全く異なる第三世代の製鉄法という意味で命名されました。因みにITは製鉄技術:Iron Making Technologyを略しています。

3.1 ITmk3のプロセス

ITmk3のプロセスフローを図4に示します。ITmk3の原料には微粉鉱石を、また還元剤として石炭(一般炭)を使用します。石炭は、粉砕機を使って事前に微粉鉱石と同様の微粉にして使用します。微粉鉱石と石炭はまず混合機に送られ、若干の水を加えて混合された後にペレタイザー(造粒機)に送られます。ペレタイザーは、入口から出口にかけて少し傾いた円筒形の筒で、これが回っている中に原料を投入してやると、原料の粒が雪だるまの原理で少しずつ成長して直径約20mmのポー

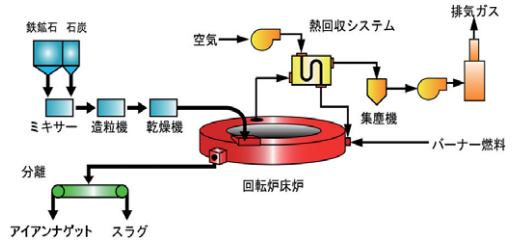


図4 ITmk3のプロセスフロー

ルに成型されます。このボールを炭材内装ペレットと呼びます。できたペレットを乾燥機で乾燥させた後、回転炉床炉(Rotary Hearth furnace: RHF)と呼ばれるドーナツ型の炉に搬送します。そして、このペレットを炉に投入し、炉が一周する間に1300℃から1450℃まで加熱してやると、約10分という非常に短い時間内に鉄鉱石中の酸化鉄が石炭の炭素によって還元・溶融が進み、金属鉄とスラグが分離されます。炉内の状況を写真3に示します。この反応は次の過程で進行します。

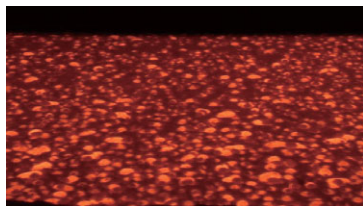
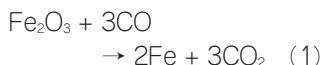
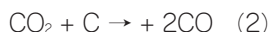


写真3 炉内の状況

○鉄鉱石の還元



○石炭のガス化



○炭素の鉄中への浸炭 (3)

○鉄の溶融



○鉄とスラグの分離 (5)

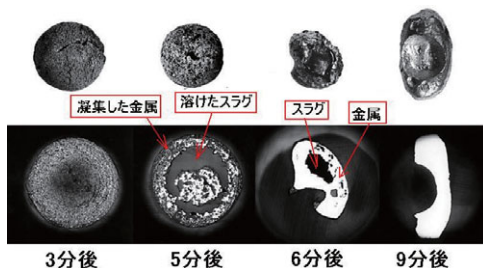


写真4 ペレットの変化

(1)と(2)の反応が繰返され、鉄鉱石はFeになり、石炭のCが消費されます。(3)の鉄中への浸炭が進むことによって(4)、(5)の反応が促進されることがITmk3のプロセスの特徴です。時間毎のペレットの変化を写真4に示します。加熱後3分経過では還元途中の固体状態にあり、中心部は未だ十分還元されていません。5分経過で表面に金属殻が形成され内部に溶けたスラグが現れます。その1分後には金属鉄とスラグが分離し始め、9分後に金属鉄とスラグが完全に分離します。こうしてできた金属鉄をアイアンナゲット(Iron Nugget)と呼びます。生成したアイアンナゲットとスラグは回転炉床炉最終部の冷却ゾーンを経て炉外に排出され、磁気式選別機によって分離・回収されます。

アイアンナゲットは高密度で、また性状が安定しているため、輸送が容易に行なえます。また、適度に炭素を含有することで優れた溶解性を有しており、電気炉製鋼の有効な主原料、またはスクラップ溶解時の希釈用鉄源として使用が期待されています。

3.2 ITmk3の特徴

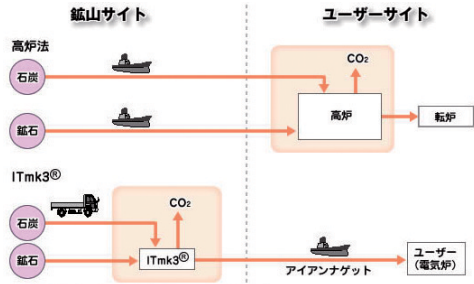
ITmk3の特徴は以下の通りです。

- (1) 微粉鉄石を高温処理すること無く使用できる。
- (2) コークスに比べ比較的豊富に存在する一般炭が使用できる。
- (3) プロセスの所要時間が約10分と短く、プラントの起動・停止が容易に行なえる。従って生産の弾力性が高い。



写真5 アイアンナゲット

- (4) 原料の事前高温処理が不要なため、エネルギー効率に優れており、またCO₂の排出が少ない。
- (5) 図5に示すように、ITmk3のプラントを鉱山サイトに建設し、製品ナゲットをユーザーまで輸送すれば、原料中の酸素・スラグ分等の不要成分を除去することで、減容・重量低減され、輸送等のエネルギー消費量とCO₂発生量が低減できる。



上側が従来の高炉法、下側がITmk3®を示しています。鉱山サイト（山元）でITmk3®によりアイアンナゲットを製造しユーザーサイト（消費先）に輸送することにより、鉄鉱石・石炭を輸送するよりも輸送重量が大幅に減少します。ITmk3®により、冷鉄源製造におけるCO₂排出量削減だけでなく、輸送時におけるCO₂排出量削減も可能となります。

図5 鉱山サイトでの製造イメージ

3.3 ITmk3の現在と今後

ITmk3の最初の商業プラント（年産50万トン）は米国ミネソタ州のメサビ鉱山エリア内に建設され、2010年1月からアイアンナゲットの生産を開始しています。新しい技術ですので、日々操業の中で新たな発見があり、これらを通して更に技術を発展させる日々が続いています（私も昨年1月から設備改善の担当として参加しています）。また、今後、米国・ロシア・インド・ベトナムなどの鉱山エリアへのITmk3プラントの導入など、地球に優しい次世代製鉄法として展開されていくことが期待されています。

4. 最後に

鉄は私たちの生活に切っても切れない、大変身近な素材ですが、鉄がどうやって作られているかな



写真6 ミネソタ州の商業第一号プラント



写真7 回転炉床炉

など、鉄に興味をもたれている方は意外と少ないのではと思います。今回は主題の新製鉄法：ITmk3に加えて、従来の代表的な製鉄法について紹介させていただきました。本書を読んで、皆さんが少しでも鉄に興味をもって頂ければ幸いです。

参考出展：Wikipedia、日本鉄鋼連盟HP、新日本製鉄HP、JFE HP等



著者略歴：はしもと すみと

所属：株式会社神戸製鋼所 新鉄源本部

コメント：休日を利用してエキストラ実験ショーなどの活動をしています。科学を通じて多くの人とお話できるのが、仕事のストレス解消になっています。