



特集記事・3

鉄の環境との共生

新製鉄プロセスの展開

Development of New Ironmaking Process

田中英年
Hidetoshi Tanaka

(株) 神戸製鋼所 新鉄源プロジェクト本部
専門部長

1 はじめに

製鉄業のエネルギー起源のCO₂排出量は日本全体の16%を占め、その内60%以上が製鉄工程から排出されている¹⁾。すなわち、日本のCO₂排出量の約10%以上が製鉄工程から排出されていることから、製鉄分野に対するCO₂削減圧力が日増しに強まりつつある。

中国における鉄鋼需要増大に伴い、2002年以降、鉄鋼主原料である鉄鉱石や原料炭価格が高騰している。昨年末の金融危機を境に若干落ち着きを取り戻しつつあるものの、原料供給の寡占化が進んでおり今後とも上昇が続けると考えられ、これら資源問題への対策を進めて行く必要がある。

そこで、環境・資源枯渇の観点から、市場の根底にあるファンダメンタルズがどうあるかを考え、鉄鋼業のパラダイムシフトを実現するための新製鉄法の果すべき役割と今後の展望について考えてみた。

2 新製鉄法

現在の製鉄法は高炉—転炉法が主流であるが、コークスや焼結鉱といった使用原料の事前処理が必要であり、日本の湾岸一貫製鉄所では大型化によりスケールメリットを求めてきた。そのために、資源に対する柔軟性や生産弾力性を失いつつある。その優位性は今後しばらく揺るぎないと思われてきたが、中国での急激な鉄鋼増産により、資源を持たない日本が作り上げた湾岸一貫製鉄所のビジネスモデルの転換期に差し掛かりつつある。その中にあって、原料制約、CO₂削減、設備老朽化、生産弾力性そして資源ナショナリズム等のキーワードを解決できる可能性を秘めた新製鉄プロセスへのニーズが増大している。

2.1 直接製鉄法

一般に高炉—転炉法のように、一度加炭された銑鉄を転炉で脱炭して鋼を作る間接製鉄法に対して、直接製鉄法とは鉄鉱石を比較的低温で還元して、加炭せずに直接固体の還元鉄(DRI)を製造するプロセスを意味する。Fig.1に示されたように1方向で最終目的の鋼塊が製造される²⁾。このように、酸素含有量の減少が直線的に行われることが直接製鉄の名が付いた由縁である。

この直接製鉄法のメリットは理論的なエネルギー消費量が当然間接製鉄法より少なくなる点である³⁾。ところが、高炉法の大型一貫製鉄所では全プロセスを包含するシステムとしての合理化が一段と進んでおり、エネルギー効率が良いと言われている。それはあくまで、排ガスエネルギーを完全に利用できる大規模一貫製鉄所の場合であって、年産50万トン程度のスタンドアロン型小型製鉄所では、直接製鉄法の方が高炉法よりエネルギー使用量を低くできると考えられる。も

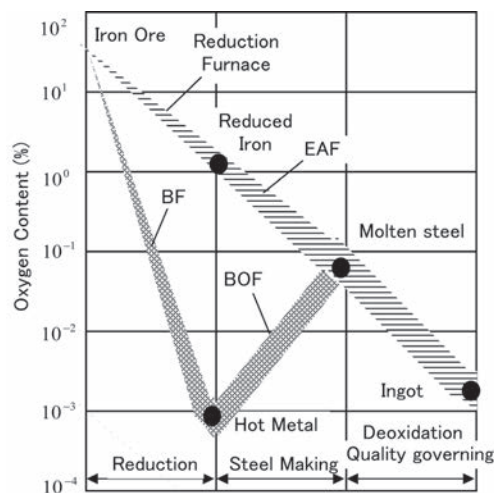


Fig.1 Difference between Direct Reduction and In-Direct Reduction Processes

もちろん燃料としてのコークスからの開放も大きなメリットである。今後CO₂削減や小規模鉱山の活用といった命題に対しては、直接製鉄法は理にかなった製鉄法として追求されていくだろう。

2.2 ガスベース還元鉄製造法

天然ガスを還元剤に用いた直接製鉄法は、高炉のように大規模な設備投資が不要でありコークスも必要としないため、天然ガスを産出する発展途上国を中心にミニミル製鉄所の鉄源プラントとして建設されてきた。また近年、先進国においてもスクラップ代替として不純分が少ない清浄鉄源としての還元鉄需要が高まっており、その生産量はFig.2に示すように2008年には68.5百万トンに達している⁴⁾。

天然ガスをを用いた直接製鉄法としてはFig.3に示したようにMidrex法とHYL法に大別される⁴⁾。これらの直接製鉄法は塊鉱やペレットを原料にクリーンな天然ガスを使用し、CO₂発生を削減できるプロセスであり、将来の原子力製鉄への応用が可能なプロセスである³⁾。しかしながら現状では、その立地は産油地域に制約されているため、最近では石炭を使った還元鉄製造プロセスのシェアが増加している。

2.3 石炭ベース還元鉄製造法

石炭を用いた直接製鉄法としてはロータリーキルン法が古くから用いられているが、その規模が比較的小さいこと、キ

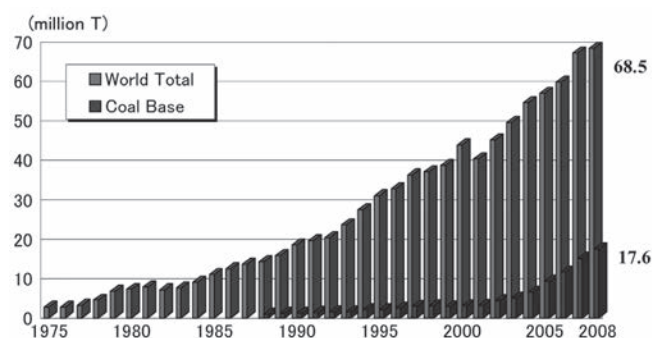


Fig.2 World DRI Production by Year

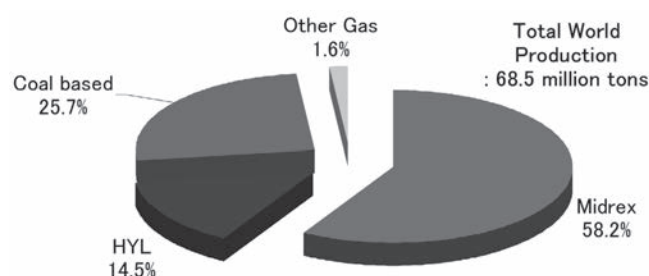


Fig.3 World DRI Production by Process (2008)

ルンリング発生による停止時間が長いこと、塊鉱石やペレットが必要ことから、立地条件が限定されている。

同じく石炭を用いた直接製鉄法は1990年代に入って、炭材内装塊成物の還元注目が集まるようになった。これはFig.4に示したように、酸化鉄と炭素の近接配置により還元反応の低温高速化を実現できることが分かってきたからである⁵⁾。そこで生来の炭材内装塊成物の脆弱な物理強度を補うため、静置式で還元可能な回転炉床炉を用いたプロセスが考案された。このプロセスは、天然ガスの利用が難しい地域での微粉塊鉱石を利用した還元鉄製造法として注目されるが、現状では製鉄所でのダスト処理プロセスとして工業的に実用化され始めている。またこの技術から派生した次世代製鉄法であるITmk3法は炭素濃度2-3%で半溶融領域を対象としており、直接製鉄法と間接製鉄法の中間に位置するが、鉄鉄同等のアイアンナゲットを一段の回転炉床炉で製造できる点で注目を集めている。

3 資源枯渇への対応

3.1 高品位鉱石の枯渇

鉄鉱石を形成する鉄鉱床のタイプには堆積鉱床、火成鉱床、風化残留鉱床の3つに大別できる。その中では堆積鉱床が世界の鉄鉱床の85%と圧倒的に多く存在する⁶⁾。現在広く利用されている堆積鉱床型の高品位鉱石の成り立ちについては、Fig.5に示したような説が広く受け入れられている⁷⁾。

まず酸性雨で海水中に多量に鉄イオンが溶け出す(1)。次にシアノバクテリアから発生した酸素で酸化され酸化鉄(赤鉄鉱や磁鉄鉱)が沈澱、脈石と共に層状となった初生鉱石(鉄分約30%)を形成する(2)。その後の大陸移動で世界各地に散らばった後に、隆起し鉄鉱山を形成する(3)。さらに、一部が天水や火成岩系熱水の富化作用を受け、チャート(高SiO₂の堆積岩)の溶出や鉄分の濃縮によって高品位鉱石が誕生した(4)。

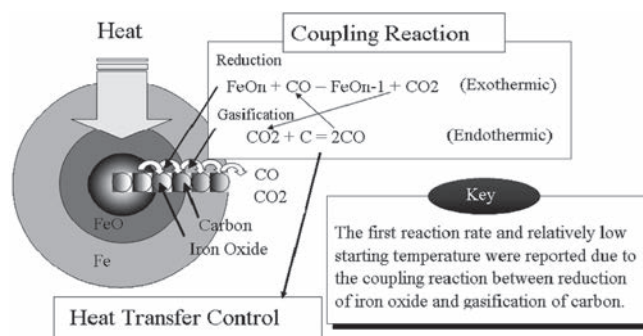


Fig.4 Reduction Mechanism of Carbon Composite Pellet

この型の鉱石は、米国ではタコナイト、ブラジルではイタピライト、アフリカではゼブラ鉱、豪州では縞状鉄鉱層 (BIF)、インドでは縞状赤鉄鉱珪岩 (BHQ) などと地域によって様々な名前で呼ばれているが、これら縞状鉄鉱層の鉱量は世界の全埋蔵量の約60%以上を占めている⁶⁾。

このように豊富に存在する縞状鉄鉱石のほんの一部に高品位鉱石が存在することから、将来的には高品位鉱石は枯渇する傾向にある。従い、今後は富化作用を受ける前の低品位の堆積鉱床へと利用鉱石を転換する時期に差し掛かっていると言える。その一例が、現在50万トンのITmk3商業プラントの建設が進められている米国ミネソタ州のメサビ鉱山に見られる。Fig.5- (4) に示したように、今から80年ほど前まではポケット状鉱体 (①: Natural Iron Ore) から高Fe品位の鉄鉱石が採取できていた。この高品位鉱石を採り尽くすと、低品位のタコナイト (②: 堆積鉱床原岩に近い鉄分30%の鉱石) を微粉碎・選鉱し、ペレットにして高炉で使えるように

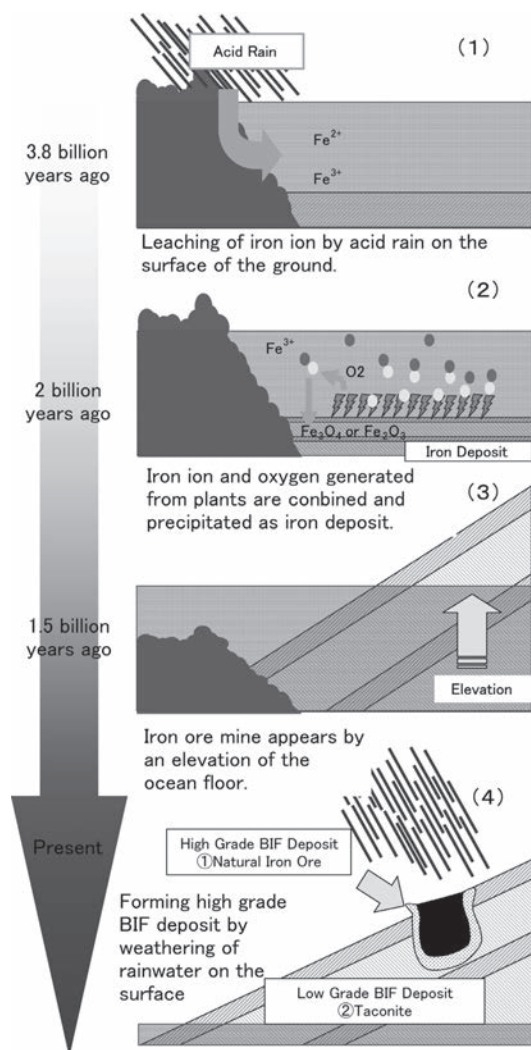


Fig.5 Iron Ore Body Generation Process

した歴史がある⁸⁾。メサビ鉱山と同様の現象がブラジルや豪州で現在進行形で起きつつあり、高品位鉱石の枯渇、低品位化と微粉化が進行しているとの報告もある^{9,10)}。

すなわち要求品位を下げればその埋蔵量は飛躍的に増加することを意味しており¹⁰⁾、鉄鉱石の資源問題は量の有無の問題ではなく鉄品位や質、及び鉱床規模の低下による利用コスト高の問題と考えられている。

3.2 選鉱による低品位鉱石の活用

この様な低品位鉱石を利用する場合のキーワードは選鉱である。これまでは採算が合わないとして見捨てられていた低品位鉱石も、鉄鉱石価格が高騰する中、選鉱コスト (10 \$/t 程度) をかけても採算が合うようになってきた⁹⁾。低品位鉱石では鉄と脈石の分離性が劣るため選鉱において微粉碎が必要であり、製品鉱石は極めて細かい粒度 ($-44\mu\text{m} > 80\%$) になる。そのため、選鉱処理後の微粉鉱石を高炉で使用するには焼成ペレット化が必須であった。しかしながら、焼成ペレット価格と鉄鉱石価格の差 (ペレットプレミアム) は僅かなため、商業化には生産規模の拡大が必須となる。それに伴い大型船の入る港やインフラの整備に多額の投資が必要であり、埋蔵量の少ない小規模鉱山の開発が遅れてきた。

3.3 微粉鉄鉱石を用いた山元での鉄源製造

高品位鉱石の枯渇問題への対応として、選鉱後の微粉鉄鉱石を使って小規模でも経済的に成り立つ新製鉄プロセスを開発することが重要である。あわせて今後枯渇が予想される高品位の原料炭を使用しないコークスレス製鉄法が望まれる。

この問題解決に最も近い位置にいるのがITmk3法によるアイアンナゲット製造である。ITmk3法はFig.6に示したシンプルなプロセスで微粉鉄鉱石と一般炭から銑鉄同等のアイアンナゲットを製造できる点で注目を集めている。米国で低品位のタコナイトを原料にした年産50万トンの商業機の建設が進んでおり (Fig.7)、2009年末頃には運転が開始される予定である。

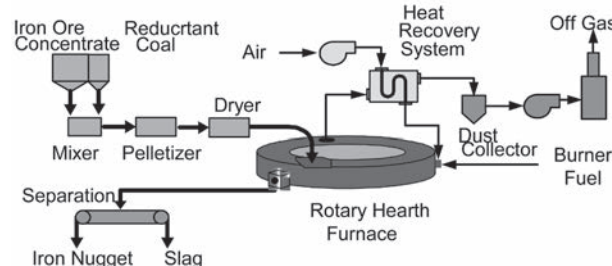


Fig.6 Process Flow of ITmk3

このように、世界に豊富に存在する低品位鉱石の活用は、ある意味では世界の資源問題克服課題の先陣的取り組みであると言う点で注目に値する。この動きを、今後山元でのカットオブ鉱石やテーリングなどのくず鉱石の利用に広げ、現在直面している資源問題の解決につなげることが期待される。

4 新製鉄法の将来展望

4.1 製鉄ダストのリサイクル処理

製鉄所で発生するダストは日本国内で年間約 480 万トンとされているが¹¹⁾、これらダストは亜鉛、鉛、鉄等の有価金属を含んでおり貴重な二次資源である。高炉—転炉ダストの平均亜鉛品位を 1% とすると、日本における高炉—転炉ダスト中に含まれる亜鉛はおおよそ 5 万トンと推定される。また電気炉ダストの平均亜鉛品位を 25% とすると電気炉ダスト中に含まれる亜鉛はおおよそ 11 万トンと推定される。これらは近年の国内亜鉛地金消費量 45-50 万トンに比しても決して無視できない量である¹²⁾。

製鉄各社では資源リサイクルによるゼロエミッション化を進めてきたが、これまで製鉄所発生ダストのリサイクルは既設設備（焼結・ペレット）での再使用が主体であった。しかし高濃度の亜鉛やアルカリを含有したダストは高炉原料としてのリサイクルが困難であり、使用不可能なダストは外部処理されており、資源環境問題の観点から重要な課題となっている。また CO₂ 対策のため一貫製鉄所でのスクラップ利用が進む中、亜鉛の蓄積も進んでおり、製鉄所の製造工程から亜鉛を抜き出す必要に迫られている¹³⁾。

還元鉄製造プロセスとして開発されてきた炭材内装プロセスをダスト処理に適用して、還元鉄から亜鉛を分離回収、製鋼工程に鉄源をリサイクルするダスト処理技術の開発が行われている。回転炉床法ではシャフト炉やロータリーキルン法のような塊成化粒子の相互摩擦や転動がないため、比較的

強度の低い塊成鉱が使用できる。このため塊成化に際して高強度を得にくい炭材内装塊成鉱や製鉄ダストやスラッジの処理に向いている。さらに排ガスが酸化雰囲気のため、有価金属の揮発・酸化回収にも有望である。

一貫製鉄所ダスト処理の分野では、すでに Table 1 に示した FASTMET の商業機が稼動しており、一定の成果を挙げている。最近では Fig.8 の JFE 西日本製鉄所の商業機が運転を開始している。今後は亜鉛を高濃度に含有する電気炉ダストへと適用範囲を広げて行く必要がある。

4.2 製鉄工程の海外シフトと電気炉化

製鉄工程の中では鉄鉱石の還元時に最もエネルギーを消費するため、スクラップの使用が実現すればエネルギー削減に大きく寄与することが知られている。また日本では、スクラップを毎年 700 万トン程度輸出しておりこれを活用することで日本鉄鋼業の CO₂ 排出量の 4% 程度を削減できると試算されている¹⁾。一貫製鉄所でのスクラップの利用拡大の方法として、すでに一部でキューボラの導入が始まっているが、ここで忘れてはいけないのは老廃スクラップ中には Cu や Sn といった不純物が含まれていることであり、高級鋼板を製造する一貫製鉄所ではその使用量に制約がある。そこでスクラップの代わりに不純物の少ない鉄源として還元鉄やアイアンナゲットの利用が考えられる。

Fig.9 に示したように、製鉄工程で使用するエネルギーの 3/4 を占める還元エネルギーを海外にシフトし、還元鉄やアイアンナゲットをエネルギーコンテナとして活用する案がある。すなわち製鉄部門を一部海外移転して高炉のキューボラ化あるいは電炉化をはかることで CO₂ 削減、製鉄設備の老朽

Table 1 FASTMET Commercial Plants

Location	Dust-ton/year	Start up
Nippon Steel Hirohata No.1	190,000	April. 2000
Kobe Steel Kakogawa	14,000	April 2001
Nippon Steel Hirohata No.2	190,000	Feb. 2005
Nippon Steel Hirohata No.3	190,000	Dec. 2008
JFE Nishinohon	190,000	April. 2009



Fig.7 ITmk3 Commercial Plant at Hoyt Lakes, MN, USA (as of March 2009)



Fig.8 FASTMET Commercial Plant at JFE Nishinohon Works

化、生産弾力性等の問題解決をはかることができる。特に、電気炉での高級鋼製造に必須な清浄鉄源の安定供給は、日本での電炉鋼比率向上によるCO₂削減に大きく寄与できる点は重要なポイントである。

石炭を用いて鉄源を製造した場合、単なるCO₂排出の海外移転に過ぎないとする批判に対しては、次のような反論が可能であろう。

- (1) 無駄な結晶水、酸素、スラグ等を山元で除去して輸送量を半減できる結果としてCO₂削減に寄与できる。
- (2) 高炉法のように緻密性のマグネタイト (Fe₃O₄) 鉱石を一旦ヘマタイト (Fe₂O₃) に酸化してから利用する必要がなく、マグネタイトからそのまま鉄まで還元できる。従い、ヘマタイトより除去すべき酸素量が少ない分、製鉄段階で約12%のCO₂削減が期待できる。(但しマグネタイト鉱石を使用する場合に限定される。)
- (3) 石炭の代わりに、炭材としてゴミやバイオマスからのカーボンが利用できるの、さらに大きなCO₂削減の可能性を有している。

4.3 海外山元での分散型製鉄

上述した製鉄工程の海外シフトを加速するには、安価鉄源の安定供給が不可欠である。そのためには、ITmk3法のような小規模でスタンドアロンでも十分エネルギー効率の良いコークスレス製鉄プロセスを世界中に普及させ、Fig.9のように低品位鉱石を利用した海外山元での小規模の分散型鉄源製造を実現し、製造コストの大きな部分を占める鉱石価格を低減して、安価な鉄源を供給する必要がある。将来的には鉄源の国際取引所の構想(鉄源のオープンマーケット化)¹⁴⁾なるものが実現され、鉄源の流動性増加による調達機会の増大、リスク管理の向上が図れることを期待したい。

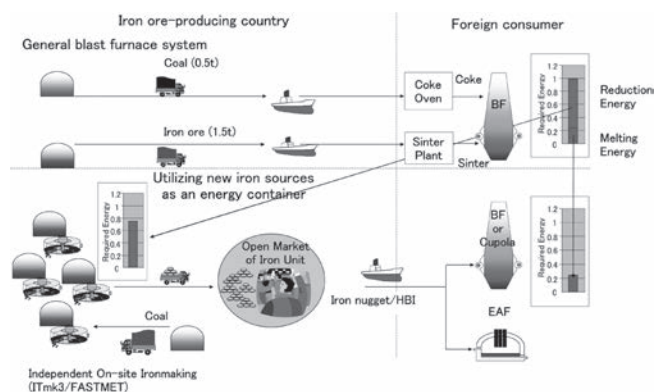


Fig.9 Expected CO₂ Reduction by producing Iron Unit in the Mine Location

5 結言

これまでの鉄鋼生産の歴史が物語るように、製鉄業は時代と共に増加する鉄鋼需要に応えられないという資源供給限界が起こるため、より鉄鋼生産の飛躍を可能にできる鉄鋼資源への移行を繰り返してきた。その意味で資源を持たない日本が作り上げた、湾岸一貫製鉄所での高品位輸入資源に頼った鉄鋼生産と言ったビジネスモデルから舵をきる時期に近づきつつある。

特に鉄鉱石の低品位化や原料炭の枯渇に対応するため、簡易な選鉱設備を導入しコークスレスで製鉄を行う必要性が増してくる中、回転炉床炉を用いた炭材内装法による新製鉄法は、微粉鉱石や一般炭を原料として利用できるの、好都合である。

この新製鉄法の将来の展望として、

- ①製鉄所ダスト処理への活用
- ②製鉄工程の海外移転と電炉化
- ③海外山元での分散型製鉄

など、一貫製鉄所の高度化について提案した。原料性状に対する制限が少なく、エネルギー消費の点においても優れているため、CO₂削減、資源枯渇の問題が重要視されるなか、同法に対する期待は今後ますます高まることが予想される。

参考文献

- 1) 半明正之：ふえらむ, 12 (2007) 7, 456.
- 2) L. V. Bogdandy：Stahl u. Eisen, 92 (1972) , 1069.
- 3) 近藤真一：第59・60回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1979) , 93.
- 4) 2008 World Direct Reduction Statistic by Midrex
- 5) Y. Kashiwaya, M. Kanbe and K. Ishii：ISIJ Int., 46 (2006) 11, 1610.
- 6) 崎元雄厚, 浜辺修二：資源地質特別号, (1992) 13, 87-98.
- 7) 長野研一：Tetsu-to-Hagane, 90 (2004) 2, 51.
- 8) Minnesota's Iron Range Trail, published by Minnesota Department of Natural Resources and Minnesota Department of Economic Development in 1969.
- 9) 長野研一：第196・197回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (2008) , 85.
- 10) 稲角忠弘, 小山政夫：第165・166回西山記念技術講座, 日本鉄鋼協会編, (1997) , 48.
- 11) 古川武：第35回白石記念講座, 日本鉄鋼協会編, (1998) , 41.
- 12) 今井力, 竹内信登：金属, 76 (2006) 11, 1161.
- 13) 小野信行, 持田順二：CAMP-ISIJ, 11 (1998) , 929.
- 14) 根上卓也：金属, 78 (2009) 5, 461.

(2009年9月3日受付)