溶 融 還 元 法 の 開 発 状 況*

塩 原 勝 明**

Current Status of Research & Development on Smelting Reduction

Katsuaki SHIOHARA

1. 緒 言

第二次大戦後、日本の鉄鋼業は目覚ましい発展を遂げ1973年には年間粗鋼生産量で1.2億トンを越えた。

鉄鋼業の上工程である製鉄部門においても、高炉を初めとして焼結機、コークス炉も大型化、高能率化されたが、この時期の製鉄技術の主課題は炉容の拡大と、高出鉄比、低燃料比の追及であった。

しかし、その後1973年、1979年の2度に亘るオイルショックを契機とした鉄鋼需要の低迷と、重油価格の高騰により鉄鋼業の操業形態は急変を余儀無くされた。各製鉄所は既存の設備を集約化した中で、低生産操業を強いられ、エネルギーも従来の石油系依存から石炭系にオイルレス化を図り、トータルコストミニマムを追求した低出鉄比操業に移行するに至った。

このような経済情勢、エネルギー情勢のもとでの製鉄技術への課題は製鉄所全体のエネルギーバランスを保ちつつ、できるだけ安価な高品質の溶鉄を製鋼部門へ供給する事であった。このため、省エネルギー技術、省力化技術、劣質原料使用技術等が積極的に取り込まれた。

また、従来の高炉プロセスを抜本的に改革しようとする機運が高まったのもこの時期である。高炉プロセスは高品質の塊成鉱（焼結鉱、ペレット）・コークスで安定操業を保証し、熱経済的にも極めて高効率のプロセスであるが、

(1) 高品質のコークスと塊成鉱を必要とするため使用する原燃料の種類に制約がある。良質原燃料の供給量には問題はないが、粘結炭と非粘結炭の値差と微粉鉱石の割安さを充分には享受できない。

(2) 生産量の変動に対する弾力性が小さい。

(3) 設備費が高く経営の負担が大きい。

などの欠点を持っている。とくに従来の室炉式コークス炉は、原料炭種の制約、生産量変動への対応の悪さ、設備費の大きさ、レンガ供給能力の不足、改修期間が長い、また操業技術、整備技術、設備診断技術が進んだ結果炉寿命35年以上が期待できるものの、日本ミルコークス炉のほとんどが2000～2010年に改修時期を迎えることは間違いない。もしそこで改修を行えばその後また30年以上に亘って同じコークス炉問題を抱えて行く事になる。

そこで注目された技術が“新溶融還元製鉄法”である。

高炉プロセスの欠点を克服して高炉を代替する、あるいは高炉を補完して共存する新しい製鉄法を開発しようとする努力が始まった。

日本鉄鋼業が目指した“新溶融還元製鉄法”は一般炭と粉鉱石を直接使用できて、高炉・転炉などの設備、操業技術を生かした大型化への期待が持てるプロセスである。その特徴は高炉プロセスと同等の系外エネルギー供給を可能とするシステム構成であり、これを支える重要な要素技術が上底吹転炉吹錬を応用した高二次燃焼技術であった。

(株)日本鉄鋼連盟は、鉄鋼一貫製鉄会社8社の参加のもとに石炭直接利用製鉄技術（新溶融還元製鉄法—DIOS）の研究開発を1988年から開始した。全体のスケジュールは1994年までの7年間を予定しており、現在は要素研究を終了した段階にある。

本報告では過去3年間の要素研究成果と今後のパイロットプラント計画の概要を紹介するとともに、現在欧米で進められている他の溶融還元法についても触れて見る。

2. 新 製 鉄 法

2.1 直接還元法

新製鉄法（高炉によらない製鉄法）のひとつに直接還元法がある。このうち、現在実機操業が行われているものは天然ガスを熱源・還元剤とする Midrex 法、HYL

* 平成3年11月21日本会第87回例会において発表

** (株)日本鉄鋼連盟

平成3年11月21日受理

法, Purofer 法, FIOR 法などがあり, 石炭を使うプロセスに SL/RN 法, Krupp 法, ダスト処理還元鉄法がある。このプロセスは鉄鉱石を固体状態のまま 800~1000℃ で, 還元率90%以上に還元した後, 電気炉で溶解するもので, 還元炉と電気炉の組み合わせプロセスである。現在の実機の生産規模は年産30~60万トン程度であり, ミニミルが主体である。また天然ガスを使用するので地域によってはコスト高となり, 普及・拡大は一進一退である。石炭ベースのものはごく一部の地域で行われているに過ぎない。

2.2 熔融還元法

熔融還元法とは鉄石を熔融状態で還元・製鉄する方法で, 基礎研究の結果によると 1100~1300℃ における固体状態のガス還元速度に比べて, 熔融状態での還元速度は固体カーボン, ガスによる場合で約10倍, 溶鉄中カーボンによる場合で100倍も早い。このことは反応容器を小さくできる事を意味するため古くから研究開発が進められてきた。

ここでは欧米における比較的新しい熔融還元法について, その開発経過, 要素技術の特徴を概説する。

(1) COREX 法…旧 KR 法

1988年8月に世界最初の実機規模プラント(年産30万トン)が南アのイスコール社, プレトリア工場で操業に入った。

Fig. 1 Schematic diagram of COREX process¹⁾

このプロセスは, コルフ・エンジニアリング社(独)が開発し, その後フェースト・アルビネ社(オーストリア)に引き継がれ, ケール(独)で実証試験を行った後プレトリア工場で実機化された。このプロセスフローを Fig. 1 に示す。

シャフト型予備還元炉と炭材流動層型溶解ガス化炉から構成されたプロセスである。操業開始当初はこの両者を結ぶガスダクト系の詰まりトラブルが頻発し苦勞したが, 1989年11月以降は順調に稼働中である。

本プロセスの場合, 予備還元にシャフト炉を使うため鉄石は塊鉄石かペレットを使わざるを得ないが, コークスは不要となる。また予備還元炉へは 800~900℃ の高還元性溶解炉ガスが導入され, 鉄石はここで還元率90%以上まで還元されてから溶解ガス化炉へ投入される。従って, 予備還元を十分進めるためには高還元ガスの供給は必須であり, そのため石炭原単位が高く(現在の実績値: 1050 Kg/T), 系外へ出る余剰エネルギーも多い。

また本プロセスの場合, 予備還元炉にて固体状態でそのほとんどを完了させることから本来の熔融還元プロセスとは言えず, 先に述べた直接還元法の電気炉を溶解ガス化炉に変えて, 直接還元炉と直結させたプロセスとして見るべきであろう。

(2) HISMELT 法

クレックナー社(独)と CRA 社(オーストラリア)が1981年から共同開発で進めてきたプロセスで, 鉄浴熔融還元炉と循環流動層予備還元炉から構成されている。

Fig. 2 に鉄浴熔融還元炉の概念図を示す。

—開発経過—

・'82~84: 60トン転炉(独, マックスシュッテ)にて

Fig. 2 Conceptual Hismelt reduction vessel²⁾

予備実験。

- ・'84～'90：10トン鉄浴炉（独，マックスヒュッテ）にてパイロット試験。
- ・'89：Hismelt Corporation Pty Ltd 設立。
CRA と Midrex のジョイントベンチャーに Davy McKee がエンジニアリング参加。
- ・'91：パイロットプラント計画を発表。（'91年末着工，'93年初完成，'93年～操業試験，年産10万トン規模，建設費1億ドル，建設地クイナナ（オーストラリア，パースの南）

—特 徴—

- ・微粉石炭は窒素ガスと共に鉄浴下部から吹き込まれる。このガスでメタル，スラグを強撹拌する。
 - ・微粉鉄鉱石は循環流動層に投入され，ここで30%程度に予備還元されてから窒素ガスで溶融還元炉へ投入される。
 - ・鉄浴上部から 1200°C の熱風を吹き込む。この燃焼ジェットと強撹拌により乱れたスラグ，メタル滴が接触することで効率的な還元反応と熱移動が起こる。この結果，二次燃焼率55%以上，着熱効率85%以上が達成され石炭原単位は 630 Kg/T まで低減できる。
- 本プロセスは後述の DIOS プロセスと似たコンセプトを持っており興味深い。石炭原単位 630 Kg/T が達成できれば高炉法に充分太刀打ちできるプロセスとなりうる。

（3）直接製鋼法…AISI プロジェクト

1988年，米国鉄鋼協会（AISI）は 15 T 炉を中心とする直接製鋼法開発計画を DOE に提出，認可され，1989年からプロジェクトをスタートさせた。

Fig. 3 に全系プロセスと鉄浴溶融還元炉の概念図を示す。

Fig. 3 Schematic diagram of AISI process³⁾

—開発経過—

- ・'88：直接製鋼法開発計画提出，認可される。開発費 3100万 \$，後に予備還元炉用として1500万 \$ 追加，政府補助77%，15 T 炉を USX ビッツバーグ工場に建設し4年間の研究を行う。
 - ・'90：15 T 炉（5 T/H）パイロット試験を開始。
 - ・'91/6：水平炉（10 T/H）の試験予定。
- 特 徴—
- ・鉄鉱石として予備還元鉄（メキシコの HYL プロセスで30%程度まで還元したペレット）を使用。
 - ・石炭は鉄浴上部から投入する。
 - ・当初，縦型の鉄浴炉を使用してきたが 10 T/H 炉では水平炉を採用した。
 - ・鉄浴炉内では還元と同時に0.1%程度までの脱炭を行う。

3. DIOS プロセスの開発状況

3.1 プロセス構成

粗粉状の鉄鉱石と石炭を，特別な処理工程を経ずに直接使用して溶融鉄を得ようとする DIOS プロセスの狙いは次のように要約される。

- （1）低設備費。
- （2）生産の高弾力性。
- （3）粗粉状鉄鉱石（焼結フィード）の直接使用。
- （4）一般炭（V.M. 35%程度クラスまで）の直接使用。
- （5）低エネルギー消費と製鉄所エネルギーバランスへの適正な対応。（現在の高炉法のエネルギー消費量を凌駕するプロセスで，かつ製鉄所下工程へのエネルギー供給量が 1～2 Gcal/T を実現可能）

Fig. 4 に DIOS プロセスの基本構成を示す。

鉄鉱石，一般炭を直接使用し最終的に溶鉄を製造する

Fig. 4 Schematic diagram of DIOS process⁴⁾

鉄浴溶融還元炉と、溶融還元炉からの排ガス顕熱と還元ポテンシャルを利用して鉄鉱石の予熱と予備還元を行う流動層予備還元炉、溶融還元炉からの排ガス中に微粉炭を吹き込み、ガスの温度を下げると同時に還元ポテンシャルを高める石炭添加ガス改質炉の3つのサブプロセスから成っている。

3.2 開発組織

Fig. 5 に現在の開発組織を示す。(株)日本鉄鋼連盟に溶融還元研究開発委員会を置き、製鉄会社8社の参加のもとに通産省の“石炭利用技術振興費補助金”を受け、(財)石炭利用総合センターと共同で研究開発を推進している。

3.3 開発スケジュール

Fig. 6 に開発スケジュールを示す。1988年から1994年の7年間の開発で、最初の3年間に要素研究に当てた。現在、要素研究を終了し、この結果をベースにパイロットプラント設計・建設を進めている。

3.4 要素研究成果の概要

要素別技術課題の研究は、共同研究参加会社が既に保有する試験設備に加え新たに千葉に循環流動層、神戸に石炭ガス改質用リアクターを設置し、5実施部署（堺・

福山・鹿島・千葉・神戸）で行われた。3年間の成果を要約すると次のようになる。

(1) 鉄浴溶融還元炉技術

- ・基本操業条件の確立とそのスケールアップ性の確認（堺の大型炉にて生産速度 37 T/H までの試験を行い、生産性に関するスケールアップの指標を得た。）
- ・高二次燃焼率と高着熱効率の同時達成技術を確立し、一般炭使用に目途を得た。（福山では高圧化の効果を、鹿島では酸素の横吹効果を、堺では大型化の影響を確認した。）
- ・連続操業の可能性を確認した。本報は転炉操業をベースとしているため、出鉄・出滓作業をどのように行ない、操業を連続化させるかが大きな課題であった。福山で高炉法と同様のマッドガン・オープナー方式による出鉄・出滓試験を加圧下の上下一貫（上：予備還元炉、下：溶融還元炉）連続操業中に実施した。連続吹酸中に炉内のスラグ、メタルレベルを制御する技術を確認し、無倒炉長時間連続操業技術の目途を得た。
- ・耐火物損耗低減及び炉体冷却技術を推進した。（酸素吹き方法の工夫、レンガ材質の改善などにより、耐火物損耗量を低減した。また堺の大型炉でガス冷却レンガ、銅パネル水冷試験を実施し、効果を確認した。
- ・その他炉内の反応挙動に関する有益な知見を得た。

これらの中から Fig. 7 に生産性のスケールアップ、Fig. 8 に二次燃焼率、着熱効率に及ぼす炭種の影響を示す。

(2) 流動層予備還元炉技術

- ・気泡流動層（福山）、循環流動層（千葉）の2種について並行的に試験検討を行い、両者とも粗粉状鉄鉱石の予備還元は可能であるという結論を得た。Fig. 9 に両者の結果を合わせて示す。
- ・流動安定化技術を確立した。両流動層ともスティッキ

Fig. 5 Organization of DIOS project⁵⁾

	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
(1) Pilot-scale Plant Study ○ Design & Construction ○ Operation							
(2) Basic Components Studies 1) Smelting Reduction Tech. ○ In-bath type (5t, 100t) ○ Coal Fluidized type (5~10t/d) ○ Integration 2) Fluidized Pre-reduction Tech. ○ Bubbling type ○ Circulating type 3) Gas Reforming Tech.							
(3) Total System Study							

Fig. 6 Research schedule for DIOS project⁵⁾

Fig. 7 Relation between reduction rate and slag weight⁷⁾

Fig. 8 Influence of V.M. in coal on post combustion ratio and heat transfer efficiency⁸⁾

Fig. 9 Effect of degree of gas oxidation on prereduction degree

ングや付着などのトラブルは発生しなかった。

- ・ 其他操業変動への対応性、ガス導入部構造などに多数の知見を得た。

パイロットプラントでは両者の特徴を生かし、細粒鉱は循環し、粗粒鉱は気泡流動させる複合流動層とする予定。

(3) 石炭添加ガス改質技術

- ・ 基礎試験（神戸）、大型炉への吹き込み試験（堺）を行った。神戸の結果によると、高温の酸化性ガスに吹き込まれた石炭は急速に乾留され、JIS 法の工業分析値で示される V.M. 値の1.4倍程度の揮発分が発生し、短時間でガス改質に寄与することが明らかとなった。
- ・ 必要石炭粒度、生成チャーの性状及び残留タールなどに対する多くの知見を得た。
- ・ 石炭吹き込みノズルの設計データーを得た。

以上述べたように、要素研究は多少の課題を残すものの概ね順調に推移し、所期の目的を達成して本年3月に終了した。

3.5 パイロットプラントの概要

要素研究結果を反映して、平成2年からパイロットプラントの設計に入っている。まだ未定のところもあるが現在決定している項目のみを簡単にまとめて示す。

- ・ 設置場所…NKK・京浜製鉄所
- ・ 規模…500 T/日 (21 T/H)
- ・ 試験期間…平成5年度下期～平成6年度末
- ・ 型式…鉄浴式溶融還元炉
+流動層式予備還元炉

Fig. 10 Bird eye view of DIOS pilot plant

- + 鉍石予熱炉
- + 石炭添加ガス改質炉
- ・ 全系機能…直結・加圧型 (2 Kg/cm^2), 必要に応じて結
合組み合わせ変更可能
- ・ 溶融還元炉…転炉型, 傾転可能
- ・ 予備還元炉…粗粒・細粒鉍同時処理複合型
- ・ 出銑・出滓設備…マッドガン・オープナー方式
- ・ ダスト回収設備…ホットサイクロン

Fig. 10 にパイロットプラントの鳥瞰図を示す。

4. 将来の課題と期待

過去3年間の要素研究成果を中心に DIOS プロセスの開発状況を述べてみた。現在, まだ未解決の課題も幾つか残っており, 今後の検討で煮詰めていくにしても一部の課題はパイロットプラント試験で検証することになる。

更なる今後の検討と検証が必要な課題のひとつに, 溶融還元炉の炉体構造がある。大きな熱損失を伴わず, 炉寿命を延長できる構造は何かである。

また5トン炉規模では一応確立できた上下直結技術(上: 予備還元炉, 下: 溶融還元炉)が大型炉にも適用出来るかがある。

いずれの課題も最終的にはパイロット試験での検証を待たねばならない。

一方, 対抗馬の高炉プロセスも最近では PCI 比アップに技術力を集中しており, 欧米高炉に於ける高レベル実績と日本ミルの製鉄技術力を考えると将来的には高炉の必要コークス量が現在の半分以下になる可能性があることも考慮しておかねばならない。

この高 PCI 低コークス比高炉を凌駕し得る DIOS プロセスを構築するための最大の課題は, いかに効率の良いシステムを構築するかである。

いずれにしても, 現在は要素研究を終了し, パイロットプラントの建設が始まったばかりである。日本鉄鋼連盟としては今後も引き続き所期の目的を達成すべく, 計画どうりに開発を推進するつもりである。

参 考 文 献

- 1) L. W. Kepplinger, "Latest development in the COR-EX process and industrial results" SRNC-90, p. 395
- 2) B. L. Cusac, "2nd generation direct smelting" 1991, 2nd EIC
- 3) E. Aukrust, "The AISI direct steelmaking program" 1991, The iron and steel society, p. 659
- 4)-7) T. Inatani, "The current status of JISF research on the direct iron-ore smelting process" 1991, The iron and steel society, p. 651
- 8) K. Shiohara, "Research program of the JISF's new iron ore smelting reduction process (DIOS project)" 1991, 2nd EIC, p. 316