

討 4

シャフト炉による還元鉄製造技術に関する研究

(株)神戸製鋼所 中央研究所 工博 成田貴一 ○金子伝太郎 木村吉雄

竹中芳通 小野田 守

神戸製鉄所 田中英年 プラント本部 稲田 裕

1. 緒 言

直接製鉄法は過去多くの技術的変遷を経て近年ようやく商業規模の大型プラントが設置されるようになった。直接製鉄法の種類は多岐にわたっており、その適応性も使用する燃料、鉄鉱石原料および立地条件などで異なっている。

シャフト炉による還元鉄製造法では炉内を上昇する還元ガスと下降する原料のあいだで熱伝達、還元反応が進行するため、還元ガスの利用率が高く、エネルギー消費量の少ないプロセスとして注目される。筆者らはシャフト炉法について使用原料、炉内反応機構、成品品質などの面から一連の研究を行ってきたのでそれらの結果についてまとめて報告する。

2. 使用原料についての問題

シャフト炉法においては酸化鉄の還元が固体状態で完了し、成品が主として電気炉製鋼向であることから原料に要求される性状はいくつかの点で従来の高炉法のそれと異なっている。実工場における使用原料選択の規準はこれまでは主として化学組成によっており、電気炉における電力消費量をおさえるため鉄品位の高いもの、燐、硫黄など不純物の少ないものが使用されている。

筆者らはさらに炉内性状として、被還元性、還元粉化特性、クラスタリング特性などを重視してそれらに関する試験を行なった。

試験方法を表1にまとめて示す。試験に用いたガス組成は実機シャフト炉の羽口ガス組成を参考にCO 36%、H₂ 55%、CO₂ 5%、CH₄ 4%とした。

表1 還元性状および実験方法

還元性状	実験方法	実験条件
被還元性	固定層 レット法	試料 500 g、2-4 h 還元温度 860℃
還元粉化性	リンダー 回転還元法	試料 500 g、回転数 10r/m 還元温度 760℃、5 h
軟化収縮	荷重還元法	試料 500 g、荷重 2 kg/cm ² 還元温度 910℃、3 h
クラスタ強度	タンブラー法	タンブラ 10r/m、5 min

2.1 被還元性

図1(a)は試験工場で製造された鉄品位が異なるペレットを上記還元ガス組成で860℃にて還元した場合の還元曲線である。還元時間90 min程度までの還元進行期間においては焼成ペレット中の気孔率の高いペレットの還元速度が早い傾向にあるが、最終到達還元率は原料中の鉄品位の高いものほど高い。

図1(b)はペレット中に含有されるCaOの影響をみたもので、この場合還元進行期における還元速度の差異は明瞭でないが最終到達還元率はCaOを添加したペレットで若干低下している。

原料中の鉄品位が高いほど還元反応が最後まで均一に進行し高還元率が得られるが、脈石分の多いもの、CaOを添加したペレットではスラグ中に含有される酸化鉄の還元が達成されにくいいため最終到達還元率が若干低下するものと考えられる。

2.2 還元粉化特性

図2はリンダー還元試験後粉化指数(-6 mesh)を各種原料についてみたもので鉱石とペレットを比較すると、粉率は一般に鉱石が大である、これは鉱石の初期形状が不規則なこと、劈開面を有することなどによると考えられる。いっぽうペレットのなか

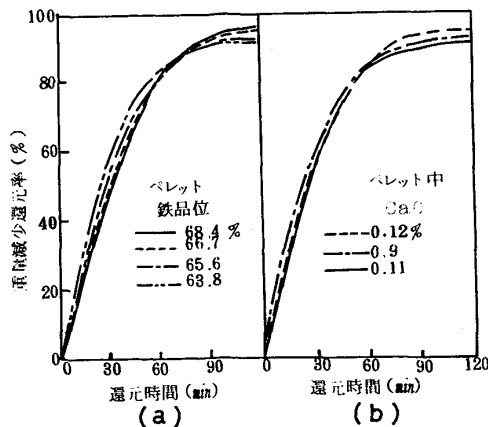


図1 還元時間と還元率の関係

では還元前の強度が弱いもの、あるいは自溶性ペレットの一部にかなりの粉化がみられた。

2.3 クラスタリング特性

シャフト炉の生産性を高めるのに有効な方法は羽口吹込還元ガス温度を上昇させることであるが、クラスタの生成がこれを制約している。筆者らはこのクラスタリングの要因を還元温度、荷重、原料の性状の3つにあるとし、荷重還元によるクラスタ生成実験とタンブラによるその強度測定を組合わせて種々の検討を行なった。

図3は種々の原料を2 kg/cm²の荷重下において910°Cで3 h還元したあとの固着物のタンブラ試験より原料鉄品位とクラスタ強度の関係を示している。酸性ペレットおよび鉱石では鉄品位が高いほどクラスタの固着度合が大で、とくに鉄品位が67%以上でその傾向が著しい。

いっぽう石灰石を添加したペレットでは鉄品位が67%程度であってもクラスタ強度は0に留まっている。このことから少量の石灰石の添加がシャフト炉内におけるクラスタ生成を制御するのに有効であることがわかる。

3. 炉内反応機構についての検討

シャフト炉内においては酸化鉄のH₂ またはCOによる還元反応のほか滲炭反応や水性ガス反応などをともなった複雑な物質および熱移動が起っている。還元鉄製造シャフト炉の設計や操業にあたって、これらの反応や熱移動機構を把握しておくことが重要であるが、従来の熱天秤や固定層による還元実験では外部より人為的に与えられた同一温度条件で、前項のごとく原料間の被還元性の相違などを比較する上では便利であるが、シャフト炉内での熱移動をも考慮したダイナミックな挙動を把握するには不十分である。そこで筆者らは内径250 mm、長さ3 mの断熱式向流型移動層モデルを使用して鉄鉱石ペレットの還元実験を行ない還元温度、ガス組成などがシャフト炉の生産性や成品品質におよぼす影響を調査した。

3.1 向流型移動層モデルプラントの構成

向流型移動層モデルプラントは還元鉄を連続的に日産約1.5 T製造するように設計されたもので図4にその概要を示す。設備構成は大別してシャフト炉と還元ガスを製造するガスリフォーマからなっている。ガスリフォーマにはNi系触媒を充填した耐熱鋳鋼製リフォーマチューブが2本挿入されており、原料ガスとしてのプロパンガスがH₂O、CO₂ または炉頂ガスと統合して供給され約850°CでCO+H₂ガスが製造される。還元ガスはいったん冷却され過剰水分を除去したのちガスヒータにて所定温度に加熱されシャフト炉羽口から吹込まれ、降下する鉄鉱石ペレットを還元する。シャフト炉外部はカオウール断熱材で保温されており、炉内5個所に温度、ガス組成の検出端と装入物のサンプリング孔が設けられている。還元された還元鉄はシャフト炉下部冷却帯にて間接冷却されたのちテーブルフィーダで切出され成品となる。

使用原料としては豪州産の2種類のペレットを用いた。

3.2 ガス比と還元率・ガス利用率の関係

還元ガス組成を一定に保ち(H₂:55%、CO:37%、CO₂:5%)、還元ガス量、生産量、還元温度

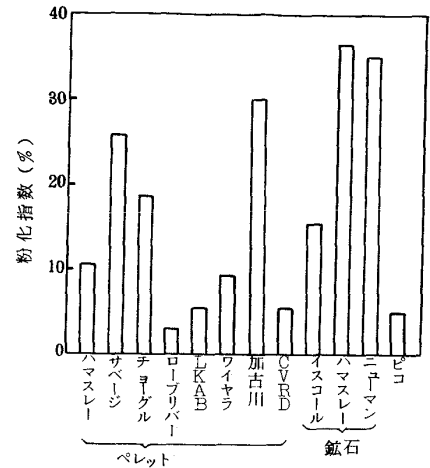


図2 リンダー還元試験結果

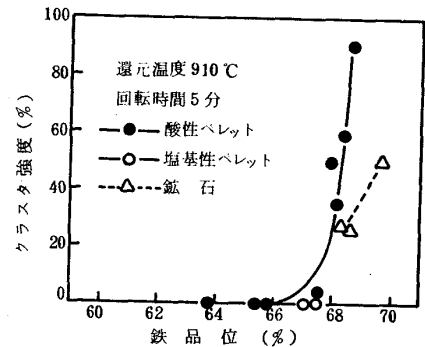


図3 原料中鉄品位とクラスタ強度の関係

などを変更して操業した結果をガス比-還元率の関係で整理して図5に示す。限られたガス量で高いガス利用率を維持して装入物の還元をすみやかに完了させることはエネルギー効率からいって重要であるが、一定還元率以下ではガス比と還元率は対応関係にあり、一定還元率に達した後はガス比をあまり上げすぎても意味がないことがわかる。

還元温度を上げることによってガス比-還元率曲線は左側に移行し経済的に有利な方向に向う。これは温度上昇による反応速度の増加に依存していると考えられる。

図6はガス比とガス利用率の関係を示しており、とくに850℃以上の高温還元で高いガス利用率が得られている。ガス利用率にピークが存在するのは高ガス比側では過剰に吹込まれたガスが利用されないこと、低ガス比側では羽口吹込ガスから炉内装入物ベッドへの熱移動が不十分になり還元反応速度が低下することによる。

以上のことから成品必要還元率を95%としてガス比がもっとも低く、かつガス利用率からも有利なシャフト炉の操業条件を決定することができる。すなわち、

羽口還元ガス温度(℃)	ガス利用率(%)	ガス比(Nm ³ /t-prod)
750	31	1750
850	36	1500
950	43	1300

3.3 還元ガス中のH₂/CO比の影響

実機シャフト炉の還元ガス組成は適用するガスリフォーミング方法によってほぼ決定されるといってよく、そのH₂/CO比は1.0~3.5の範囲でプロセスによってもかなり異なっている。

図7は羽口還元ガス温度850℃、ガス比を約1500Nm³/t-prod一定として還元ガス中のH₂/CO比を変化させた場合の炉内温度分布、還元率分布、ガス組成分布などの推移をみたものである。実験室規模の固定層などを用いたH₂/CO比変更実験では通常、試料の還元温度を外熱方式で一定に維持することから反応速度の相違だけが顕われるので、H₂ガス還元によるものがCOガス還元によるものに比べて酸化鉄の還元完了時間が短い。しかし向流型移動層としてのシャフト炉を総括してみた場合には反応速度とあわせて装入物ベッドの温度分布を考慮する必要がある。図にみられるごとくH₂/CO比が高いと反応速度は早いがベッドでの吸熱反応の割合が増し、温度分布は低下するため還元完了時間はむしろ長くなる傾向を示す。

還元ガス中のH₂/CO比と還元ガス温度の関係については、H₂/CO比が高い場合には吸熱反応を補償するため還元ガス温度を高めるか、ガス量を増すなどの処置が必要である。

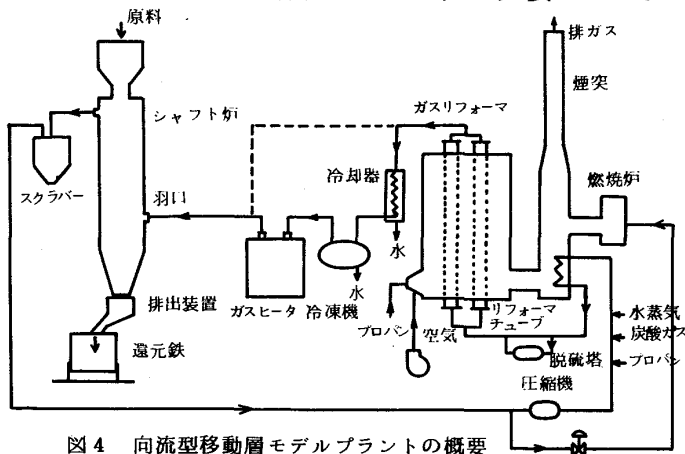


図4 向流型移動層モデルプラントの概要

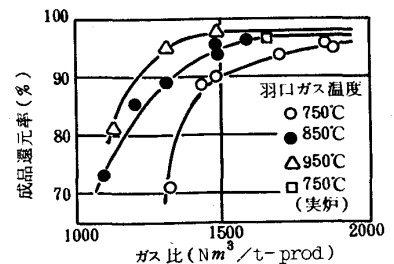


図5 ガス比と還元率の関係

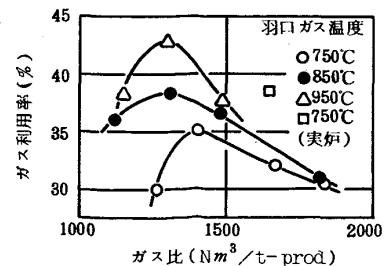


図6 ガス比とガス利用率の関係

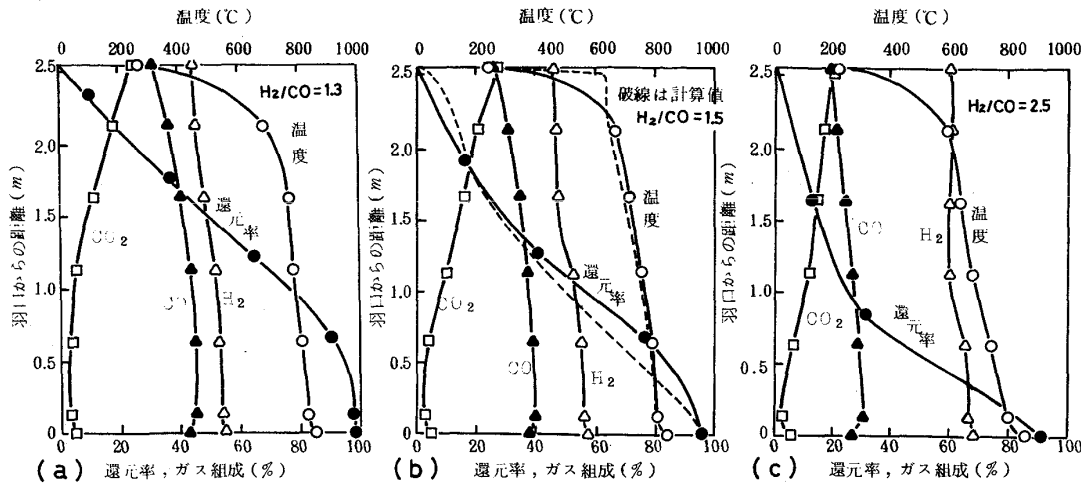


図7 H₂/CO比変化にもなうシャフト炉内挙動の推移

3.4 シャフト炉のシュミレーション解析

多界面未反応核モデルに基づいたシャフト炉還元の数学的モデルを作成し、パラメータフィッティングの手法により、本移動層のシュミレーション計算を行なった。図7(b)に還元ガス温度850°C、還元ガス中H₂/CO比1.5の操業条件についてこのモデルを用いて計算した炉内温度分布、還元率分布を破線で示すが、炉頂ガス温度がやや異なることを除いては実測値とよく一致している。このようにして得られた還元速度パラメータをそのまま内径5mの実機シャフト炉に適用し炉内還元挙動をシュミレーションした結果、大型シャフト炉操業解析などにも充分利用し得ることがわかった。

4. 還元鉄の再酸化防止処理について

シャフト炉で製造された還元鉄はヤードなどに放置すると再酸化し品質をそこなうばかりでなく、時に発火の原因になる。前項で述べた移動層で製造された還元鉄の再酸化特性を調べたところ、再酸化の進行は還元温度をはじめ保管温度や湿度に少なからず依存していることがわかった。

低温度で還元された還元鉄ほど生成した金属鉄表面に微細な空隙を多く有し低い保管温度で再酸化または発火に至るが、高温還元では金属鉄表面がsolidになり再酸化が進行しにくい。

還元鉄の再酸化防止方法として従来種々の方法が提案されているが、筆者らはその一つの対策として還元鉄をCH₄を僅量含有した高温燃焼排ガスにより短時間処理する方法を試みた。

写真1(a)は800°Cで還元された還元鉄のSEM観察組織である、この場合表面が不規則で多くの空隙がみられる。写真1(b)はこの還元鉄を1200°CでCH₄5%含有燃焼排ガスで処理したもので表面の結晶がきわめて緻密化しているとともに、処理による酸化率は1%以下であり、また再酸化に対する抵抗力があることがわかった。

5. 結言

シャフト炉による還元鉄製造に関し原料、炉内還元機構および再酸化防止処理などの問題に関して述べた。シャフト炉法はその実用化が流動層法やロータリキルン法などに比べておそかったこともあり、技術の体系化が現在ようやく進みつつあるといえる。いっぽう炉内が固体とガスだけから構成されていることから、高炉法に比べるとモデル実験やシュミレーション結果の実炉へ対応はとりやすいといえる。

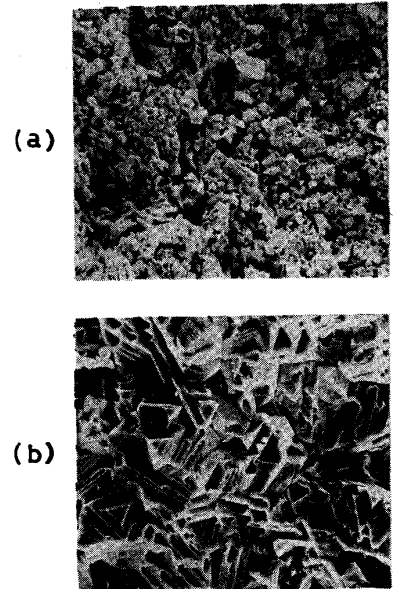


写真1 再酸化処理前後の還元鉄組織