

外95-2

早稲田大学大学院理工学研究科

博 士 論 文 概 要

論 文 題 目

高炉用新塊成鉍製造プロセス開発
の研究

申 請 者

野 田 英 俊

Hidetoshi Noda

1995 年 5 月

我国鉄鋼製造技術、とりわけ高炉による製鉄法は1960年代以降の国内外の活発な鉄鋼需要に支えられ、大型化や設備拡張も含めた技術革新により目覚ましい発展を遂げてきた。その中でも高炉の生産性向上のため、粉状鉄鉱石を塊成化する焼結鉱プロセスとペレットプロセスの2つの塊成化技術の飛躍的な進歩が、この一躍を担ってきたと言っても過言ではない。

しかしながら、これら両プロセスは80有余年にわたる歴史を通じ、技術的にもほぼ成熟期を迎え、その限界に近づきつつある。同時に、両プロセスは各々、長所、短所と共に次のような抜本的な問題点を有している。すなわち、焼結鉱プロセスでは、微粉原料を一定量以上使用できないこと、製造時の成品歩留が75～80%程度とペレットプロセスに比較し低いこと、成品強度維持のためには一般に、高炉にとっては不要な成品中のシリカ含有量が5%以上必要なこと、品質面ではペレットに比較し、その組織のために被還元性が劣ること、高炉の炉頂付近条件である低温還元時に粉化を呈し、通気性悪化を引き起こすことなどが挙げられる。一方、ペレットプロセスでは、微粉原料を必要とすること、トラベリンググレート炉方式では燃料に重油が必要なこと、品質面においては高温還元性、荷重軟化収縮性が焼結鉱に比較し劣ること、さらに形状が球形であるため、高炉内の装入物分布制御が難しいことなどが挙げられ、従来技術の延長線上ではその改善が難しいことが明らかとなってきた。また、世界的な資源動向としては、高品位鉄鉱石枯渇に伴う微粉化および高炉の生産効率向上のため塊成鉱の高品位、低スラグ化が我国並びにヨーロッパを中心に進みつつある。

本研究は、以上の技術的、資源的背景のもとで、従来の焼結鉱プロセスおよびペレットプロセスの技術上、資源上の限界を打破し、将来の原料事情にも柔軟に対処可能な新塊成鉱プロセスの開発を目的としている。本研究は以下の5章より成り立っている。

第1章は総論であり、我国の鉄鋼業における原料事情と将来動向、およびこれらを基に原料塊成化プロセスの開発目標について述べている。また主要な塊成鉱製造プロセスとして発展してきた焼結鉱、ペレット両プロセスの我国での変遷および各々の特徴を明らかにするとともに、高炉用塊成鉱に要求される品質と問題点を指摘している。

第2章は現在、我国の高炉原料としてその大部分を占める焼結鉱について、焼結反応と焼結鉱組織形成メカニズムに関して考察している。ここでは、まず焼結反応過程を理論的に明確化するために、化学試薬を用いて焼結原料主成分であるCaO、Fe₂O₃、SiO₂の3成分系、2成分系における生成鉱物相を明らかにしている。その結果、焼結反応は主としてCaO-Fe₂O₃系を中心としたカルシウムフェライト生成反応に支配され、この後SiO₂との同化反応が起こり、融液生成、組織形成が進行していくことを検証している。焼結原料中に含まれるAl₂O₃、MgOなどの化学成分は、各々カルシウムフェライト相やマグネタイト相を安定化する働きがある

ものの、前述の基本反応に影響を及ぼすものではないことを鉱物学的見地から結論づけている。これら基礎研究の結果を踏まえ、各種原料鉄鉱石とCaOとの反応性を定量的に評価し、反応前後の体積収縮率が原料中のゲーサイト(FeOOH)、SiO₂、FeO量で一義的に決まることを導出している。

第3章は新塊成鉱製造プロセスに関する基礎的検討に関するもので、その内容は、理論的考察に基づいた基礎技術の構築と工業化技術の開発に大別される。

前者では、まず新プロセスの必然性に至る背景およびプロセス開発目標を明確化している。すなわち、高炉用原料として被還元性、耐低温還元粉化性、荷重下での軟化熔融特性に優れ、かつ高炉内での原料分布特性を現状の焼結鉱と大きく変化させないような、たとえば、成品粒径を10mm以下としたミニペレット同志を固着させた形状を提案している。同時に、反応速度論の見地から新塊成鉱の具備すべき最適鉱物組織としては、2次ヘマタイト生成を抑制した微細型ヘマタイト、微細型カルシウムフェライトを主体とした拡散型組織が必要なことを指摘している。製造プロセスとして品質面、粒度面から原料の選択自由度を向上し、成品品質改善を具現化するため、焼結原料とペレット原料の混合原料を対象原料とし、成品中のシリカ含有量を5%以下と設定した。このため、粉鉄石事前処理としては擬似粒子製造に適したディスクペレタイザーが最も望ましく、焼成は現行の焼結プラントからの転用が容易なトラベリンググレート方式を採用することとした。さらに、造粒したミニペレットへの燃料としての炭材添加は、ペレット内部への酸素の拡散過程が燃焼反応速度を律するため、ペレット表面へ被覆することが必要であることなどを数学モデルによって明らかとしている。これらの成果を基に、新塊成鉱プロセスの基本概念を従来の塊成鉱プロセスと比較、検証しながら提案している。

本プロセスの有効性は小型試験炉を用いたプロセス評価により、その検証を行っている。ブラジル産高品位ヘマタイト系ペレット原料と焼結原料用豪州産リモナイト鉄鉱石からなる混合原料では、成品中のシリカが3.3～4.1%、被還元性などの諸性状も従来焼結鉱に比較し飛躍的に向上し、従来塊成鉱では達成し得ない塊成鉱の製造が可能であることを明らかにしている。高炉内での分布特性もペレットに比べ格段に優れることを成品の堆積角評価によって証明している。

造粒時に要求されるバインダーは、特に造粒物の乾燥後強度維持に優れている生石灰が最適であること、添加量はおよそ3～4%程度が望ましいことを各種バインダーの評価より明らかにしている。微粉鉄石として使用するペレット原料は、その鉱物相や粒度により、造粒性と密接に関係する飽和水分値が異なることを見出し、使用割合に応じた水分およびバインダー量の管理がプロセス上、重要なことを指摘している。

さらに製造プロセス条件を明らかにするために、移動現象論に基づくシミュレーションモデルを用いて最適焼成条件の検討を行っている。まず、グレート上の

ベットのガス流れは、流体に対する連続の式、および充填層内のガス流速と圧損の関係式を2次元に拡張した式を連立して解くことにより、その特性を解析できることを明らかにしている。これよりグレート壁部近傍では焼結鉱プロセス、新塊成鉱プロセスとも、グレート方式特有の現象としてこの付近に過剰のガスが流れ易いこと、このためこの付近の歩留り悪化の可能性が判明した。同時に、歩留り改善のための提言を行っている。ペレット粒径については非定常伝導伝熱による解析を試みた結果、ペレット中心部の組織形成が焼成過程で十分に行われるためには、その粒径は5～10 mmが望ましいことを見出している。

高炉の燃料消費量と密接に関係する被還元性の評価として、反応速度論的観点から、焼結鉱と新塊成鉱の比較評価を固相～気相不均一反応モデルの一種である、未反応核モデルの導入により行っている。CO-CO₂系混合ガスによる酸化鉄の段階還元試験より、新塊成鉱の被還元性が優れている理由は、組織中を還元ガスが拡散する速度に影響する有効拡散係数が、いずれの還元段階でも焼結鉱より高い値を有するためであることを見出している。特に、総括還元過程を支配するウスタイトから鉄への段階での有効拡散係数、および未反応核界面における化学反応速度定数の値が焼結鉱に比較し、ほぼ2倍であり、これは組織を構成する微細気孔および鉱物相と関係していることを明らかにしている。

これらの基礎研究の成果を基に、工業化技術を確立するための200 t/dのパイロットプラントによる新塊成鉱の連続製造試験を試み、プロセスの確正と工業プラント設計のための各種設計データの採取を行っている。この結果、新塊成鉱は生産面、成品品質面から見て焼結鉱プロセスより優れること、連続プロセスとして長期連続操業が可能なことなど実用化の可能性を明らかとしている。

第4章は新塊成鉱の工業生産とその評価について述べている。工業プラントは、有効グレート面積530 m²とし、年間生産量600万トン規模の設備を建設している。本プロセスの特徴である諸設備は、これまでの基礎研究、連続パイロットプラント操業の知見より決定している。稼働プラントの操業結果から、基礎、応用研究結果と同様、従来塊成鉱プロセスと比較して品質面、プロセス面ともに優れることを確認している。次に、新塊成鉱を大型高炉で使用したところ、燃料消費量および銑鉄生産率が従来と比較し、一段と向上することを操業を通じ明らかにしている。これは新塊成鉱の多量使用により、高炉のシャフト部における還元平衡到達度を示す指数であるシャフト効率を、極限まで向上させることが可能であることを結論づけている。さらに、次世代高炉プロセス、たとえば、高炉への微粉炭の限界吹込み、あるいは非微粘結炭使用高反応性コークス使用下での重要な原料となり得ることを理論的に見出している。これら結果より、新塊成鉱の現在の重要な高炉原料である焼結鉱に対する優位性を証明している。

第5章は総括であり、主要な成果を述べるとともに、新塊成鉱プロセスの今後の目指すべき方向について言及している。