

## 製鉄プロセス原料の高度利用に関する研究

### 学位論文内容の要旨

日本の鉄鋼業の発展は、原料事前処理技術とプロセス制御技術の高度化による生産性の着実な向上に支えられて来た。しかし近年、優良資源の枯渇と劣質化、CO<sub>2</sub>低減を含む環境規制、スクラップリサイクルなどへの対応が緊急課題と成っている。その際、都市近郊製鉄所の多い日本では、産業廃棄物、一般廃棄物処理をも含めた都市共生型製鉄所の構築が重要である。

本研究では、これらの問題に対処するべく、焼結、コークスにおける対環境型の劣質原料利用技術、製鉄ダストのリサイクル技術、また高炉では、原料変動を幅広く吸収できる炉況制御技術、そして、次世代課題の一つであるスクラップのリサイクル処理技術について研究した。本論文の要旨は以下の通りである。

第1章は緒論であり、焼結、コークス、高炉の各プロセスにおける原料利用技術の背景と今後の課題および、課題解決への具体的手法について述べた。

第2章では、焼結層の通気性とコークス燃焼性改善による焼結工程の省エネルギー技術の開発について述べた。

焼結層内の通気抵抗は、コークス燃焼帯と下層部の水分凝縮帯で大きくなるとされているが、これまで定式化されていなかった。本研究では、鉄鉱石の熔融凝固過程、水分移動過程などを考慮した精細な数学モデルに開発し、水分凝縮帯の通気抵抗を定量的に求めた。そして、水分凝縮帯の通気抵抗を軽減するため、排ガスを利用し、点火前に原料表層を約 300℃に予熱することで、燃料原単位の約10%低減を実現できた。一方、上記数学モデルから、粉コークスの造粒が焼結層の通気抵抗低減に有効であることがわかり、高エネルギーのマルメライザー造粒機を用いて添加前の粉コークスを造粒、整粒化することで、コークス燃焼性が改善され、合わせてNOxの低減が可能であることを知った。

焼結操業については、操業予測、品質予測のための要素数学モデルを作成した。その計算から、的確な操業情報を得るための検出端の開発と適切な使用法を研究し、最終的に焼結操業予測と制御のための総合システムとして完成させた。これは、焼結プロセスの制御性を高め、また、省エネルギー型焼結技術として有効であった。

第3章では、劣質炭である非・微粘結炭を利用した、ノーバインダー型熱間成型法の開発について述べた。

コークス化性の劣る非・微粘結炭を成形するには、高価なバインダーが必要であるが、本研究では、石炭の加熱に伴う軟化熔融現象を利用した成型法について研究した。すなわち、流動層を用い、粘結炭は 400℃以下で、非・微粘結炭は 600℃前後で個別に予熱し、両者を混炭後、成型温度を粘結炭の軟化熔融開始温度近傍の約 400~420℃に保つことで成形可能である。また、粘結炭の予熱温度と成型温度を、軟化熔融開始温度直下にした場合、非粘結炭を40~50%と高配合してもコークス化

が可能であった。これらの知見に基づき、バインダーを使用すること無く、非・微粘結炭を多量に使用した高炉用コークスの製造方法を開発することができた。

第4章は製鉄所内で発生するダストを利用した、炭材内装方式による還元ペレット製造技術の基礎的研究について述べた。

シャフト炉法、回転炉法などの製法を問わず、還元ペレット製造上の大きな問題の一つは、700～1100℃域における還元粉化挙動である。その機構については、①炭材からのガス発生応力、②還元に伴う酸化鉄粒子の格子変態、③金属鉄生成時のスウェリング、などが原因とされているが、詳細については不明な点が多かった。本研究では、炭材内装型ペレットの加熱・焼成過程を研究し、700℃における粉化は $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ に伴う膨張が、800～900℃における粉化は、 $\text{FeO}$ の $\text{CO}$ 還元の際に生成する繊維状金属鉄によるスウェリングが、それぞれ主因であることを明らかにした。また1000℃以上の高温では、 $\text{CO}$ 還元ばかりでなく $\text{H}_2$ 還元によってもスウェリングが生ずることを始めて明らかし、スウェリング機構が異なることを示した。

原料となる製鉄ダストについては、各種ダストの粒度分布、化学組成、および、ペレット製造時の事前処理の際に重要な破碎特性について調査した。そして、ダストや炭材の配合条件とグリーンペレット強度の関係、炭材種類の格付けなど、還元ペレット製造のための基礎データを得た。さらに、ダストペレットの焼成過程における微量元素、特に $\text{Zn}$ の還元と気化逸散挙動について知ることができた。

第5章では、製鉄原料の高度利用を計るため、主要反応器である高炉について、装入設備、炉内診断設備および新操業法の開発について述べた。

装入原料の劣質化、多様化に対応するには、装入物の炉内分布を的確に制御することが必要である。この際、高圧、高温の向流型反応器である高炉の内部を可視化できればより正確な診断が可能となる。本研究では、炉内検知のための検出端として垂直ゾンデについて研究し、従来技術では不可能であった炉内の固体と気体の温度・組成、形状変化などの情報を得ることができた。その結果、炉壁周辺部ではガス流が十分発達せず、熱流比の増大による昇温停滞や還元粉化を誘発すること、700℃以下の低温熱保存帯が、特にオールコークス操業時に顕著となること、また、その対策として焼結鉱の粒度別装入が周辺部ガス流の増加と熱流比の低減に有効であることを知った。

さらに、円周バランス制御性のよい新型同軸垂直2段ホッパー・旋回シュート装入装置および装入物分布制御ソフトの開発を行い、低燃料比下での操業において、理想的装入物分布を実炉で実現した。

第6章では、次世代型製鉄プロセスの主要課題である、スクラップリサイクルについて述べた。

熱効率、プロセス効率の良い豎型（シャフト）炉から、高炉とキューポラを選択して数学モデルにより検討した。その結果、高炉を使用した場合、現行の低燃料比、高 $\text{PCI}$ 操業の下で、スクラップの使用比率上限は400～500kg/THMであること、出鉄比はフラッキング限界および溶解能力の限界から、現行の2倍程度の4～5であることを知った。一方、代表的キューポラの操業実績を熱および物質収支により解析したところ、ガス利用率を極端に上げた場合、出鉄比20、燃料比100Kg/THMが達成可能と結論された。これに基づき、安価な高炉用コークスを使用した、多段羽口を有する豎型新溶解炉の概念設計を行った。この新溶解炉は、ダストなどの廃棄物にも対応可能な処理特性を具備しており、次世代製鉄プロセスのニーズに適合する新プロセスとして、実証プラントを開発中である。

第7章は本論文の総括である。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 石 井 邦 宜  
副 査 教 授 工 藤 昌 行  
副 査 教 授 篠 原 邦 夫  
副 査 教 授 千 葉 忠 俊

## 学 位 論 文 題 名

### 製鉄プロセス原料の高度利用に関する研究

日本の鉄鋼業の発展は、原料事前処理技術とプロセス制御技術の高度化による生産性の向上に支えられて来た。しかし近年、優良資源の枯渇と劣質化、CO<sub>2</sub>を含む環境規制に加え、スクラップリサイクルなど、次世代製鉄への対応が緊急課題と成って来ている。

本論文では、これらの問題に対処するべく、焼結、コークス両工程での劣質原料利用技術、製鉄ダストのリサイクル技術、また高炉では、原料変動を幅広く吸収できる炉況制御技術、そして、次世代課題の一つであるスクラップのリサイクル処理技術について研究した成果を述べている。

第1章は緒論であり、焼結・コークス・高炉の各プロセスにおける原料利用技術の背景と今後の課題および、課題解決への具体的手法について述べている。

第2章では、焼結層の通気性とコークス燃焼性改善による焼結工程の省エネルギー技術の開発について述べている。焼結層内の通気抵抗に大きな比重を占める水分凝縮帯について、実験室や実機の試験および数学モデルにより定量的に推算ことに成功した。そして、水分凝縮帯の通気抵抗を軽減するため、排熱を利用した新しい予熱焼結法を開発した。すなわち、点火前に原料表層を約300℃の回収排熱で予熱し焼結することで、約10%の燃料原単位の低減を可能とした。現在、この排熱回収型の予熱焼結法は広く普及している。

第3章では、劣質炭である非・微粘結炭を多量に用いるノーバインダー型熱間成型法による高炉用コークス製造プロセスの開発について述べている。非・微粘結炭を600℃前後に予熱し、これに粘結炭を加えて400～420℃に加熱すると軟化溶融が生じて成形可能となることを見いだした。この成形炭は、非粘結炭を40～50%と高配合してもコークス化が可能であった。これらに基づき、バインダーを使用すること無く、非・微粘結炭を多量に使用した高炉用コークスの製造方法を開発することができた。

第4章は資源活用・産業廃棄物低減の観点から、製鉄所内で発生するダストを使用した炭材内装還元ペレットの開発研究について述べている。還元ペレットは700～1000℃域で容易に粉化するがその原因は良くわかっていない。本研究では、

炭材内装型ペレットの加熱・焼成過程を解析し、700℃における粉化は、 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ に伴う膨張が、900～1000℃における粉化は、 $\text{FeO}$ 還元の際に生成する繊維状金属鉄に起因するスウェリングが、それぞれ主因であることを明らかにした。特にスウェリングについては、 $\text{CO}$ 還元の場合よりもより高温で、 $\text{H}_2$ 還元によっても生ずることをはじめて明らかにした。

第5章では、製鉄原料の高度利用を計るため、主要反応器である高炉について、装入設備、炉内診断設備および操業法の新たな開発について述べている。著者は、炉内の固体や気体の温度、組成などを測定する垂直ゾンデを開発し、炉壁周辺部ではガス流が十分発達せず昇温停滞や還元粉化を誘発すること、オールコークス操業時に、700℃以下の低温熱保存帯が顕著となること、などを明らかにした。さらに、その対策として、周辺部ガス流の増加と熱流比の低減に有効な、焼結鉱の粒度別装入法を考案した。また、円周バランス制御性のよい新型装入装置を開発し、装入物分布制御の精度向上に成功した。

第6章では、次世代型製鉄プロセスの主要課題である、スクラップリサイクルについて述べている。熱効率、プロセス効率の良いシャフト炉について数学モデルを用いて検討した。高炉を使用した場合、スクラップの使用比率上限は400～500kg/THMで、出鉄比は現行の2倍程度の4～5であることを明らかにした。一方、キューボラの場合、出鉄比20、燃料比100kg/THMが達成可能と結論された。これに基づき、安価な高炉用コークスを使用した、多段羽口を有する豎型新溶解炉の実証プラントを開発した。

これを要するに、著者は、金属製錬工学的手法を駆使して、製鉄プロセス原料の高度利用と関連工程の省エネルギー化に成功したものであり、鉄鋼製造工学の進歩に寄与するところ大である。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。