

氏 名	川 口 尊 三
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学位授与年月日	平成 3 年 11 月 13 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 51 年 3 月 京都大学大学院工学研究科資源工学専攻 修士課程修了
学 位 論 文 題 目	鉄鉱石焼結鉄製造プロセスの総合シミュレーション モデルによる品質制御技術に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 大森 康男 東北大学教授 萬谷 志郎 東北大学教授 八木順一郎

論 文 内 容 要 旨

高炉操業の円滑化のためには、高炉操業の改善とともに、その主要な装入物である焼結鉄品質の果たす役割がきわめて重要である。このような認識の基に良好な焼結鉄品質を確保すべく、戦後わが国においては広く海外から多くの良質な焼結原料を輸入するとともに、自溶性焼結鉄製造に関する研究および開発が精力的に行なわれ成果を上げてきた。しかし、地球温暖化問題に発する省エネルギーの推進や良質焼結原料の枯渇対応といった将来の課題を考えるならば、焼結鉄品質を制御する技術はますます重要なものとなってくる。

本論文は焼結鉄品質を制御し改善するため、下記の 1)、2)、などの研究成果をまとめたものである。

- 1) まず基礎的な実験結果を解析することによって得られた知見を基に、焼結鉄製造要因と成品品質要因との相互関係を整理した。次にこれら要因関係を再構成することで形成される焼結鉄製造に関するシミュレーションモデルを開発した。そしてこれをシステム化し実際の製造現場における品質設計に活用してその有効性を検討した。
- 2) また、現在実行されている焼結鉄製造手段要素だけでは良質焼結原料の枯渇に対応するのが困難であるとの判断から、既存の点火焼成中の焼結ベッドの上にもう一段点火焼成ベッドを形成せしめる 2 段点火焼結法、および焼結配合原料を 2 分割し独立して造粒後、混合して焼結する分割造粒法など革新的な製造方法についても検討した。

以下に本論文の内容を要約する。

第1章 緒 論

従来の鉄鉱石焼結鉱品質に関する研究および将来増加が予想される難焼結性原料による焼結鉱品質への影響を概説し、本研究の目的と内容を述べた。

第2章 本研究に関する既往研究のまとめ

鉄鉱石焼結鉱の品質制御に関する既往研究および鉄鉱石焼結鉱製造プロセスのシミュレーションモデルに関する既往研究を整理し、それら既往研究の問題点を論述した。

第3章 鉄鉱石焼結鉱製造プロセスの総合シミュレーションモデル

既に著者を含む共同研究者が開発した数学的モデル、すなわち鉄鉱石焼結鉱に関する原料・操業・設備条件を基に焼結冷間強度を推定するモデルに加え、新たに成品焼結鉱の還元粉化、被還元性を予測する数学的モデルを開発して、原料鉄石銘柄特性を考慮した焼結鉱製造プロセスの全体にわたるシミュレーションモデルを完成させた。この総合シミュレーションモデル（以下総合モデルと略す）は、Fig. 1に示すごとく焼結工程諸現象の各段階A→Dに沿って、造粒通気、燃焼伝熱、溶融同化、鉱物形成、気孔形成および品質の6つの部分モデルの結合によって構成される。そして本総合モデルの計算推定値は実際の商用生産実機における実績値と良好な一致が認められ、実用性の高いものであることを明示した。

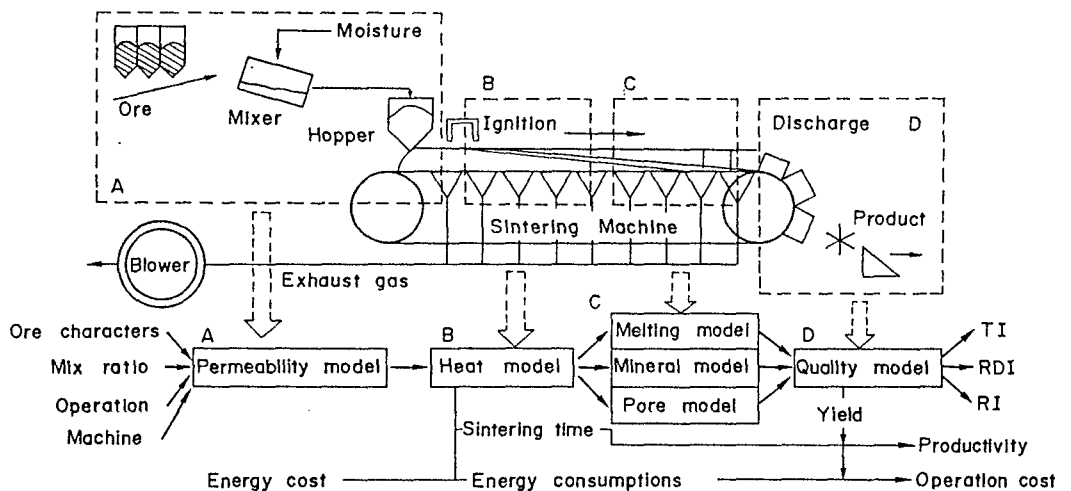


Fig. 1 Integrated simulation model for iron ore sintering.

第4章 総合シミュレーションモデルの実機適用

本総合モデルをシステム化して焼結鉱製造現場に導入し、日常の品質・操業設計に活用した。

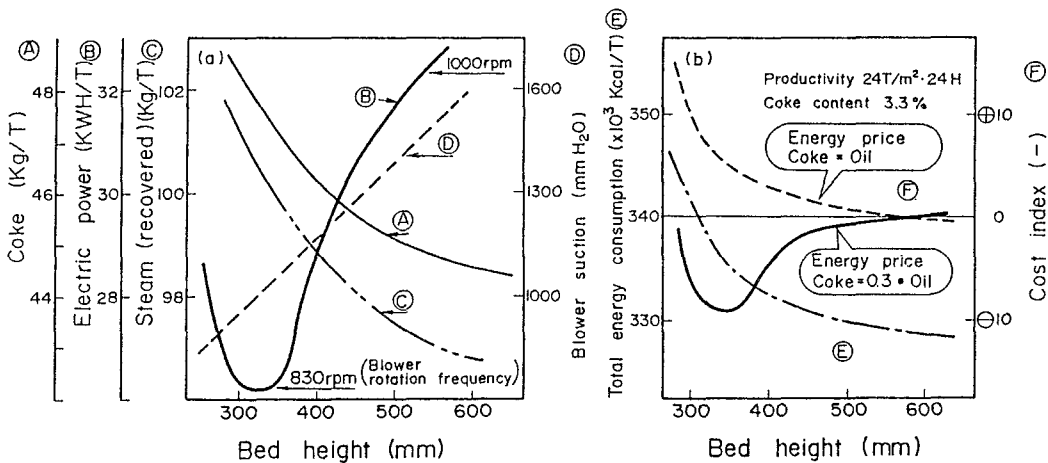


Fig. 2 Simulation results by the integrated model at Kashima No. 3 Sinter Plant in relation to energy consumption, energy cost and bed height.

製造エネルギーコストに関する操業条件適正化の検討結果を Fig. 2 に示すが、実機操業において操業条件の最適化によって製造エネルギーコストを6%低減することができ、また原料配合比率と操業条件の適正選択によって各成品品質値の標準偏差を20%低減することができた。このように本システムは品質の安定化および操業改善に多大な効果をあげ、その有効性を確認した。次に総合モデルを高被還元性焼結鉱の製造設計に活用し、高結晶水含有鉱石の多配合や原料粒径の細粒化を行なうとともに高塩基度 (CaO/SiO₂)、低コークス比操業を同時に実施することによって、高被還元性 (JIS-RI 値70%以上) を有する焼結鉱の製造を達成できた。この実機操業においては、将来増加が予想される高結晶水含有鉱石や微粉鉱石の多配合により焼結鉱の被還元性を改善しうることも確認でき、本総合モデルは原料銘柄性状を考慮した品質設計にも有効であることを実証した。さらに総合モデルと最適化探索手法とを組合せ検討することによって、新規開発鉄鉱石の焼結製造における使用評価の実施例や焼結機の新設計仕様検討の実施例も提示し、本モデルが多岐にわたる焼結製造プロセスのコスト面、エネルギー面などの最適化に有効であることを示した。

第5章 鉄鉱石焼結製造プロセスの生産性向上技術の開発

焼結製造プロセスにおいて従来法では、高生産焼結時には焼成時間の短縮にともなう高温保持時間、すなわち焼結化反応時間の短縮による焼結冷間強度低下の対策が重要課題となっていた。この課題の解決方法としては、焼結化反応時間は従来法と同一であるが焼結化反応を多段に併発させることができれば良い。この概念を具現するものとして、Fig. 3 に示す焼結原料を敷設した後、原料層表面に点火し下方吸引する従来の焼結焼成層の上にもう1段原料を敷設し原料層表面に点火し、2つの燃焼面を形成せしめ下方吸引し焼結する2段点火焼結法を提案した。本方法の特徴は2つの燃焼面を形成せしめることで2倍の生産性を有することにあるが、技術課題としては下段部を上段部焼成で発生する H₂O と CO₂ を含む低 O₂ 排ガスで焼結し得るか否かにある。この2段点火焼結

法の実験を行った結果、焼成ガス中への H_2O 含有による下段部焼成への影響はほとんど認められず、一方 O_2 ガス濃度の低下による下段部焼成への影響は焼成不完全としてあらわれた。実験だけでなく総合モデルによる検討も含め考察すれば 2 段点火焼結法が可能となる条件として、焼結原料中の燃料カーボン量が 2.6% (粉コークス換算 2.9% 相当) 以下であることまたは 3% 以上の酸素富化が必要であることを明確にした。この知見を基に小型の DL 型焼結試験装置を用いた 2 段点火焼結試験操作を実施し、低コークス比・高層厚・高圧力条件下で日産単位 m^2 当たり焼結鉱 57ton の高生産率を達成できた。焼結鉱品質面から冷間強度は弱くまたその操業可能範囲も狭いという今後の検討課題はあるが、将来的なコークス配合量低減の必要性に基づく生石灰の多配合や高度な原料予備処理技術が確立されれば、2 段点火焼結法は十分に実現可能な技術であると考察した。

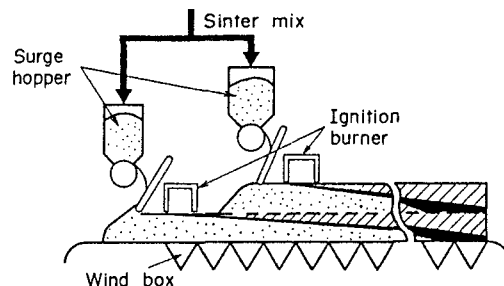


Fig. 3 Schematic image of the double ignition sintering.

第 6 章 CaO 成分分割造粒法に関する基礎的研究

焼結鉱品質改善の手段として Fig. 4 に示す焼結原料を 2 種類に分別し、それぞれ独立に造粒後、混合して焼結する「分割造粒法」を提案し、特に CaO 成分を分割因子と定める方法について基礎実験による検討を行った。その結果、高 CaO 成分擬似粒子と低 CaO 成分擬似粒子を独立に作成し混合焼成した焼結体の耐還元粉化性は、均一に造粒・混合された焼結体と比べて、優れていることを確認した。この改善要因は意識的に原料化学成分を偏在させることによって形成される鉱物組織を制御し、すなわち 2 次ヘマタイト量および 2 次ヘマタイトとカルシウムフェライトの共存組織を抑制できたことに起因するものと考察した。

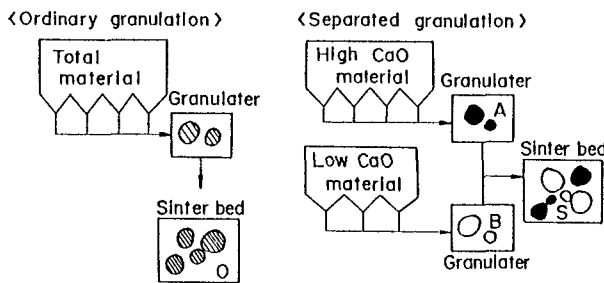


Fig. 4 Material flow for separated granulation method.

第 7 章 CaO 成分分割造粒法の実用化

第 6 章の CaO 成分分割造粒法の実用化を目的として、具体的な原料鉱石種類の選定や焼成パレット内の原料装入偏折や通風焼成下での焼結鉱品質への影響、および鉱物組織や溶融同化に関する制御性について実験的に検討した。鉱石の分割分類として化学成分・粒度・造粒性に関する基準を整理し、現在実用されている原料を分割分類するならば、高 CaO 系の配合比率を 20~30% で構成し、

その原料の選定として石灰石，スケール，粘着性の高い鉍石，微粉鉍が良好であった。一方低CaO系の配合比率は70～80%で構成し配合種類としては残る返鉍，粗粒鉍石，粉コークスを主体とした原料が良好との知見を得た。そして本方法を商用生産として実用化し，耐還元粉化性およびベッド通気性の改善に有効であること，さらに通気性や還元粉化性を悪化させる原料の増配対策に有効であることを実証した。また第6章の基礎実験で示した形成鉍物組織制御に有効であることを製造焼結鉍の鉍物共存組織定量により確認した。この分割造粒法は幅広い焼結鉍製造の新技术として評価され，今後の発展が期待される。

第8章 結 論

本論文の総括である。

審査結果の要旨

我が国における高炉装入物の主要割合を占める鉄鉱石焼結鉱（以下焼結鉱と略称）の製造プロセスにおいて、将来の原料条件の悪化、すなわち粉鉱、高結晶水含有鉱石および高アルミナ鉱石などの増加に対応する技術を確認することが重要な課題となっている。

本論文は、上記の鉄鉱石資源事情に対応し、より有効かつ幅広く焼結鉱品質を制御する技術を確認するため、製造状況や品質を予測できる総合シミュレーションモデル（以下モデルと略称）を提案し、さらに生産性向上と製造エネルギー原単位の低減のための新技術を開発した成果をまとめたもので全編8章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、焼結鉱製造プロセスの要因と成品品質要因の相互関係ならびに既往のモデルを整理し、本研究によるモデルの特徴を述べている。

第3章では、原料、設備および操業条件を基に焼結鉱冷間強度、高炉内における焼結鉱の還元粉化と被還元性を予測するモデルの構成ならびにそのモデルに基づく予測値と実機での実績値とを比較検討した結果を述べている。このモデルは、造粒通気、燃焼伝熱、溶融同化、生成する鉱物相と気孔径および品質の各部分モデルの結合によって構成され、予測値は商用生産実機の実績値と良好な一致を示す実用性の高いモデルであることを立証している。

第4章では、このモデルをシステム化して製造現場に導入し、日常の品質・操業設計に活用した結果などを述べている。成果として操業条件の最適化によって製造エネルギーコストの6%低減、および成品品質の標準偏差の20%低減を達成している。さらにこのモデルは、新規開発鉄鉱石鉱山の仕様評価や新設焼結機的设计仕様検討などに有効であることを明示したことは評価される。

第5章では、製造プロセスの生産性の向上と製造エネルギー低減を目的とした新技術として、焼結層中に2つの燃焼面を形成して焼結する2段点火焼結法の成果について述べている。

第6章では、将来の焼結原料悪化に対応して、原料を2種類に分別し、それぞれ独立に造粒後、混合して焼結する分割造粒法を提案し、その基礎的検討結果について述べている。

第7章では、第6章の分割造粒法の実用化を目指した試験操業を行い、原料鉱石種類の選択や焼成パレット内の原料装入偏析方法、ならびに焼結鉱品質への影響などについて検討した結果を述べ、将来の鉄鉱石資源に対応して幅広く焼結鉱品質を制御し得る新技術であることを明らかにしている。

第8章は結論である。

以上要するに本論文は、将来の鉄鉱石資源に対応した焼結鉱の品質改善、製造エネルギー低減および生産性改善のための総合シミュレーションモデルを開発し、さらにそれらの目的を達成する新技術を提案したもので、金属工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。