

	なかのまさのり
氏名	中野正則
授与学位	博士(環境科学)
学位授与年月日	平成16年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科(博士課程)環境科学専攻
学位論文題目	シンターケーキ構造に基づく焼結制御技術の改善
指導教官	東北大学教授 一田 守政
論文審査委員	主査 東北大学教授 一田 守政 東北大学教授 長坂 徹也 東北大学助教授 葛西 栄輝(多元物質科学研究所)

論文内容要旨

本研究は、X線CT装置を使ったシンターケーキ構造の解析技術を適用して、鉄鉱石焼結工程における主要な技術課題である生産性と歩留の向上技術を検討したものである。

第1章では、まず、鉄鉱石焼結工程は製鉄工程におけるエネルギー消費や大気汚染物質放出の観点から主要な工程であり、その生産性と歩留の改善が重要な技術課題であることを指摘した。次に、それらに関する従来研究の整理を通じて、生産性・歩留改善におけるシンターケーキ構造の解明とその制御技術の重要性を明確にした。

第2章では、本研究で採用したシンターケーキ構造解析の手法を述べ、代表的なシンターケーキ構造を示した。すなわち、まず、2次元断層像から開気孔を線分として抽出してその幅と密度をそれぞれブランチ幅(Wb)とブランチ密度(Db)として定量化する2次元シンターケーキ構造解析手法を説明し、それによって得られている代表的なシンターケーキ構造に関する知見を示した。さらに、本研究では新たにシンターケーキの3次元構造解析を試み、球換算直径が2mm以下の気孔は閉気孔

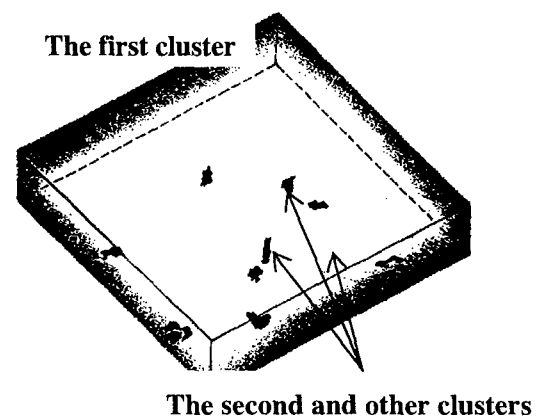


Fig.1: The top eleven pore clusters in a sintercake.

であること、開気孔は一つしかなく、シンターケーキ全体に貫通している可能性が高いこと [Fig.1]、開気孔の形状は球と板状の中間的な形状であるとの知見を得た。最後に、シンターケーキ構造を表す種々の指標（気孔率、CTL等の固体密度指数、ブランチ指数、3次元形状指数）とシンターケーキの通気性および歩留との関係を考察した。その結果、3次元解析が設備上測定試料の大きさに制約がある現状では、2次元解析から得られるブランチ指数による表現が最も好ましいとの結論を得た。

第3章では、まず、鉄鉱石焼結過程を液相焼結という観点からその基本機構を整理し、鉄鉱石焼結過程はCa-ferrite系融液の毛管力による粒子の再配列とそれに続く融液による粒子の分断現象であること、従って、支配因子として、原料の粒子径、原料充填層の密度、融液生成量や融液の粘度、充填層の固体分布の均一性が重要なことを指摘した。次に、ダイナミックX線CT装置を用いた焼結過程の経時変化観察によって、標準的な条件での気孔形成過程が次の2段階の過程を経ることを明らかとした。すなわち、粉コークスの燃焼消滅に起因するものと推察される5~8mmの気孔が焼結前半で形成される（第1段階）。この第1段階で生成する気孔は、最終的なシンターケーキ中にはその形が残らず、焼結後半に第1段階と異なった場所を起点としてCa-ferrite系融液の生成・流動に起因するものと推察される10mm以上の気孔が形成される（第2段階）。

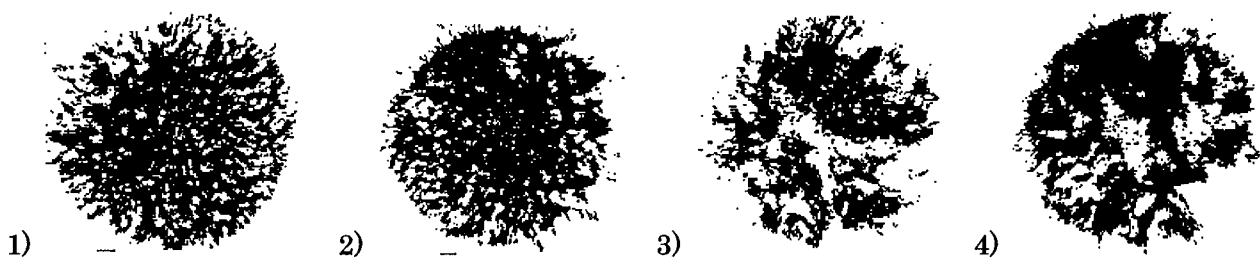


Fig.2: Two stages of pore formation during sintering. 1) Initial state (Raw mixture layer) , 2) The first stage of pore formation, 3) The second stage of pore formation, 4) Terminal state (Sintercake)

第4章から第6章では、焼結の重要な制御因子について、その生産性と歩留に及ぼす影響をシンターケーキ構造の観点から解析した。

第4章では、粉コークス配合量の影響に関して、それを3~7%に変えた焼結実験で得られたシンターケーキ構造の解析、および融液流れを考慮したシンターケーキ構造形成のシミュレーションにより検討した。その結果、粉コークス配合量5%までは、シンターケーキ中のブランチ密度の低下とブランチ幅の増加により、生産性・歩留が向上すること、5%を超えると、逆にブランチ密度の増加とブランチ幅の減少が起こり [Fig.3]、歩留は逆に低下すること、この歩留低下の現象は生成した融液が下部へ流下してその部分の通気を阻害する機構によることを示した。

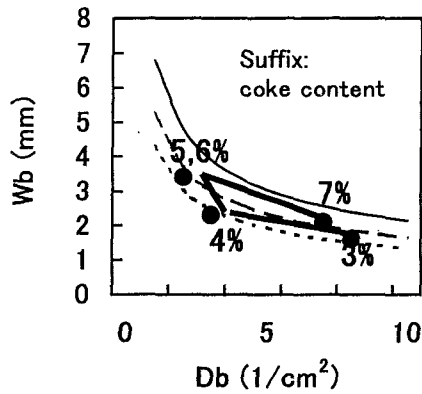


Table 1: Change in sintercake with limestone size.

Size of Limestone (mm)	Open Porosity (%)	Branch index	
		Density (1/cm²)	Width (mm)
0-0.25	59.3	8.65	2.14
2.0-3.0	56.7	6.55	2.42

Fig.3: Structural change of sintercake with coke content.

第 5 章では、石灰石粒度を変更した焼結実験を行い、その粗粒化による生産性および RDI の改善効果をシンターケーキ気孔構造の変化から考察した。その結果、石灰石の滓化可能な範囲内での粗粒化は、融液生成の局所化による自由融液量の増加作用によって焼結の進行（ブランチ密度の低下とブランチ幅の増加）を促進させること [Table 1]、石灰石粗粒化にともなう生産性の改善は、主に原料湿潤帯における通気抵抗の低減によること、石灰石粗粒化による RDI の改善は、歩留と RDI の相関が強いことおよび焼結鉱の気孔の球状化が進行していることより、焼結鉱の回転強度の改善によることを示した。さらに、偏析強化型装入装置が導入された現状の焼結ベッド実態を踏まえて、製鉄所で使用している石灰石の粒度の見直しを行い、従来基準の“3mm 以下”から“5mm 以下”に変更した。その結果、歩留の低下を引き起こすことなく、生産性の向上と RDI の改善を達成した。

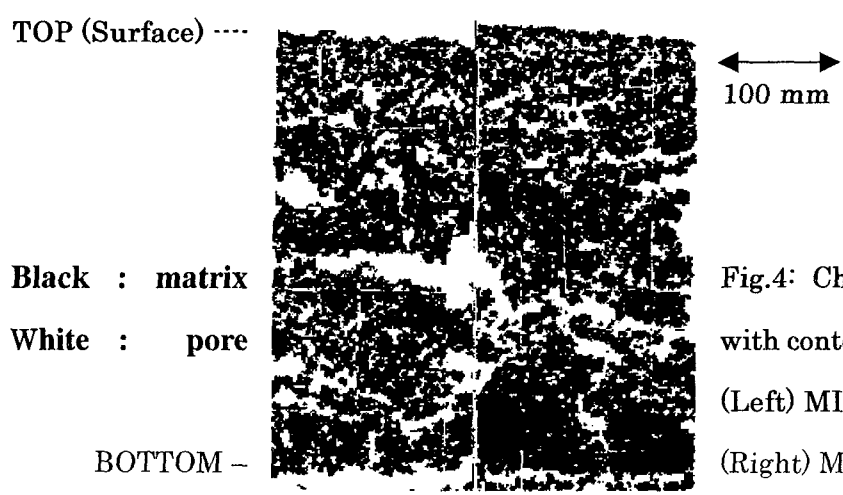


Fig.4: Change of sintercake cross-sections with content of metallic iron resource (MIR). (Left) MIR = 0% (Right) MIR = 20%

第 6 章では、金属鉄を含有する原料を粉コークスに置換して使用する際の影響を実機の焼結機

(100m²) を使用して調査した。その結果、焼結における金属鉄源の使用は生産性・歩留を低下させること、生産性の低下はベッド下層部におけるシンターケーキの緻密化（ブランチ幅は概ね一定でブランチ密度が低下）に起因することを示した [Fig.4]。さらに、実機では、下層部の通気改善対策として既設の通気プレートの改善を行い、生産一定の条件下で吸引負圧の低減と歩留の向上を達成した。

第7章では、焼結過程の生産性やコストに影響する種々の因子に関する検討例をシンターケーキ構造の変化の観点から整理し、それら制御因子を分類した。その結果に基づき、生産性および歩留ともに満足させる理想的なシンターケーキ構造を提示し、その実現に際する重要な点を指摘した。すなわち、シンターケーキ構造の制御因子は、①気孔径制御因子、②気孔率制御因子、③均一性制御因子の3つに分類できること、気孔率をある程度確保しつつ気孔の合体を進めた気孔径の大きいシンターケーキ構造を目標にすること、その実現には、②気孔率制御因子と③均一性制御因子の制御、すなわちシンターケーキ収縮の抑制と均一化が重要であることを述べた。

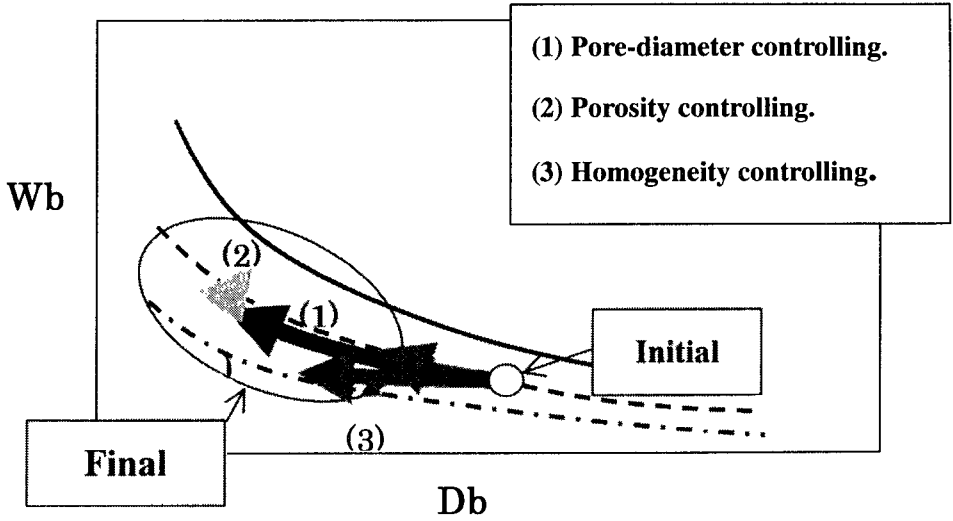


Fig.5: Classification of operational factors on a base of their function controlling sintercake structure.

本研究では、X線 CT によるシンターケーキ構造解析技術を利用して、具体的なシンターケーキ制御技術の検討を行い、通気プレートの配置の改善や石灰石粒度の粗粒化を行って、約 10% の生産性と 3% の歩留の改善を達成した。また、シンターケーキ構造に基づく生産性・歩留改善の基本的な考え方は、今後とも、生産性・歩留改善技術に大きな影響を及ぼすと考えられる。

論文審査結果の要旨

本研究は、X線 CT 装置を使ったシンターケーキ構造の解析技術を適用して、鉄鉱石焼結工程における主要な技術課題である生産性と歩留の向上技術および環境対応技術を検討したものである。

第 1 章では、まず、鉄鉱石焼結工程が製鉄工程におけるエネルギー消費や大気汚染物質放出の観点から主要な工程であり、その生産性と歩留の改善が重要な技術課題であることを指摘し、次に、それらに関する従来研究の整理を通じて、生産性・歩留改善におけるシンターケーキ構造の解明とその制御技術の重要性を明確にしている。

第 2 章では、本研究で採用したシンターケーキ構造解析の手法を述べ、代表的なシンターケーキ構造を示している。特に、シンターケーキの 3 次元構造解析を試み、球換算直径が 2mm 以下の気孔は閉気孔であること、開気孔は一つしかなく、シンターケーキ全体に貫通している可能性が高いこと、開気孔の形状は球と板状の中間的な形状であるとの知見は重要である。

第 3 章では、ダイナミック X 線 CT 装置を用いた焼結過程の経時変化観察によって、標準的な条件での気孔形成過程が 2 段階の過程（第 1 段階：粉コークスの燃焼消滅に起因する 5~8mm の気孔生成。第 2 段階：Ca-ferrite 系融液の生成・流動に起因する 10mm 以上の気孔形成。）を経ることを提示している点が新しい。

第 4 章から第 6 章では、焼結の重要な制御因子について、その生産性と歩留に及ぼす影響をシンターケーキ構造の観点から解析している。

第 4 章では、粉コークス配合量の影響に関して、それを 3~7% に変えた焼結実験で得られたシンターケーキ構造の解析、および融液流れを考慮したシンターケーキ構造形成のシミュレーションにより検討している。粉コークス配合量が 5% を超えた場合に歩留が低下すること、この歩留低下の現象が生成した融液が下部へ流下してその部分の通気を阻害する機構によることを解明した点が重要である。

第 5 章では、石灰石粒度を変更した焼結実験を行い、その粗粒化による生産性および RDI の改善効果をシンターケーキ気孔構造の変化から考察し、石灰石の滓化可能な範囲内での粗粒化が、融液生成の局所化による自由融液量を増加させ、焼結を進行させることを示している。この自由融液量の概念を提出し具体的に検証している点が重要である。また、製鉄所で使用している石灰石の粒度の見直しを行い生産性向上と RDI 改善を達成した点は工業上の成果として評価できる。

第 6 章では、金属鉄を含有する原料を粉コークスに置換して使用する際の影響を実機の焼結機（100m²）を使用して調査し、焼結における金属鉄源の使用に際する効果（NO_x、SO_x 低減）と問題点（生産性・歩留の低下）を解明している。さらに、実機では、下層部の通気改善対策として既設の通気プレートの改善を行い、生産一定の条件下で吸引負圧の低減と歩留の向上を達成している。

第 7 章では、焼結過程の種々の制御因子を分類し、理想的なシンターケーキ構造を提示している。その実現には、シンターケーキ収縮の抑制と均一化が重要であることを指摘した点が重要である。

以上、本研究では、X線 CT によるシンターケーキ構造解析技術を利用して、具体的なシンターケーキ制御技術の検討を行った。具体的な成果として、通気プレートの配置の改善や石灰石粒度の粗粒化を行って約 10% の生産性と 3% の歩留の改善を達成し、金属資源使用による NO_x、SO_x 低減技術を開発している。本研究で示されているシンターケーキ構造に基づく基本的な考え方・知見は、今後の生産性・歩留・環境改善技術に大きな影響を及ぼすと考えられる。

よって、本論文は博士(環境科学)の学位論文として合格と認める。