

プレート型装入装置における焼結ベッドの空隙率と 焼結生産性に及ぼす磁場の影響

大山 伸幸*・井川 勝利*・主代 晃一*²・井田 傑*³・藤井 紀文*³

Effects of the Magnetic Field Exerted on the Plate Type Feeder on the Void Fraction
in the Sintering Bed and Sinter Productivity

Nobuyuki OYAMA, Katsutoshi IGAWA, Kouichi NUSHIRO, Masaru IDA and Norifumi FUJII

Synopsis : To improve the sintering productivity and yield, the effects of the magnetic force produced by magnets equipped under the plate feeder on the structure of the sintering bed and sintering performance were investigated by the laboratory charging experiments and sintering tests.

Introducing the magnetic force on the sinter mixture during charging, void fraction in the sintering bed was increased with the reduction of falling velocity caused by the increase of the friction of particles against the plate. Moreover return fine and mill scale, which improved the melt fluidity, were segregated toward the upper layer by changing those trajectory. As these results, the sintering productivity and the sinter yield were increased.

From the above findings, a new type feeder was developed and applied to Mizushima No. 3 sinter plant, confirming the principle of the method.

Key words: agglomeration; sintering; productivity; yield; charging apparatus; void fraction; velocity; magnetic force; segregation; melt fluidity.

1. 緒言

空気下方吸引式焼結法では、原料装入時における焼結ベッドの空隙率、成分偏析等の充填特性が、焼結ベッド内の通気性と焼成後の焼結ケーキの強度を通して焼結鉄の生産性に大きな影響を与える¹⁾。そのため、これまでに焼結原料の充填特性の解明や装入装置の開発について幾つかの報告がなされている²⁻⁵⁾。

焼結原料の充填特性に関して、充填層の空隙率に及ぼす原料の落下エネルギーの影響が大きい²⁾ことや粒度偏析を悪化させる雪崩現象の抑制に給鉄速度の低下が有効³⁾であること等が報告されている。このため、焼結原料を分散して装入することで原料堆積時の落下衝撃力を低減し、かつ、落下点に沿って連続的に篩い目を変化させて粒度偏析を強化して、焼結ベッドの空隙率を増加させる機能を有した装入装置が開発されている。代表的な装入装置の開発例としては、焼結ベッド上での原料の落下方向に複数の条材を配した整粒分散式装入装置(Intensified Shifting Feeder)⁴⁾や湾曲型の偏析スリットワイヤー(Segregated Slit Wire)⁵⁾が報告されている。

このように、焼結原料の充填特性の解明やその改善方法については数多くの報告があるが、著者らは、5 mm 以下

の篩い下焼結粉(返鉄)やミルスケールなど磁性を示す原料が焼結原料中に多量に存在することに着目し、磁場を用いた落下粒子の運動制御の可能性について検討した。今回、プレート型装入装置によって形成される充填特性に及ぼす磁場の影響を実験室実験で検討し、その原理を実機装入装置に適用した磁気ブレーキ式装入装置(Magnetic Braking Feeder, MBF)を開発したので報告する。

2. 実験方法

2.1 実験室実験方法

2.1.1 装入実験方法

Fig. 1に実験装置の概略、Table 1に装入条件を示す。本装置は、幅1 mあたりの給鉄速度、シュート上での転動距離、原料がシュートに落下する点での原料の初速、シュートの傾斜角度およびパレット上での原料層厚は水島第三焼結工場の条件に合わせ、原料の装入幅だけを実機の1/10に縮小したものである。

実験には、ミルスケールと返鉄を含まない当社の標準的な主原料(Mixture A)にミルスケール(7 mass%)、返鉄(20 mass%)、コークス(4.5 mass%)を加え、原料中のSiO₂を5.0%、塩基度を1.8となるように石灰石と珪石の配合率を調整した原料を用いた。このように配合した原料に水分

平成12年1月5日受付 平成12年2月10日受理 (Received on Jan. 5, 2000; Accepted on Feb. 10, 2000)

* 川崎製鉄(株)技術研究所(Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasakidori Mizushima Kurashiki 712-8511)

*² フィリピン シンター コーポレーション(Philippine Sinter Corp.)

*³ 川崎製鉄(株)水島製鉄所(Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp.)

Table 1. Charging conditions in the laboratory experiments.

Feed rate	36.7kg/m · s
Effective chute length	1.05m
Chute angle	50°
Initial velocity at the position of sinter mixture falling on the chute	1.48m/s
Bed height	0.5m
Width of pallet	0.4m

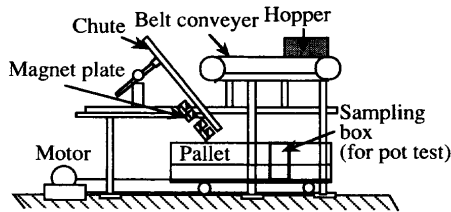


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus for plate type feeder.

6.5%を添加し、ドラムミキサーで混合造粒後、装入実験に供試した。

シュート表面での磁束密度は、シュートの背面に設置した磁石プレートとシュートの間隔を24mmから39mmの範囲で変化させ、0Tでの実験は磁石プレートを取り除いて行った。実験水準は、シュート下端の磁束密度を0T, 0.07T, 0.09T, 0.12Tの4水準とした。

焼結原料の落下速度は、シュート下端に設置したレーザー式ドップラー流速計で測定した。装入後、所定の治具(100mm^W×100mm^L)により、パレット内の原料を層高方向に100mm間隔で採取し、各サンプルは秤量後、化学分析とX線回折法による測定に供した。ここで、ベッドの嵩密度は、高さ方向で採取した原料の重量から算出し、これより、(1)式に従ってベッドの空隙率を求めた。

$$P = 100 \times (1 - BD / \rho_a) \dots \dots \dots (1)$$

P: 空隙率[vol%], BD: 嵩密度[kg/m³], ρ_a: 見掛け密度[kg/m³] (=3300)

また、原料中の返鉱含有率は、粉末X線回折内部標準法によりカルシウムフェライトの含有率を定量化⁶⁾し、その値から(2)式により逆算して求めた。

$$RF = CF / 0.308 \dots \dots \dots (2)$$

RF: 返鉱含有率[mass%], CF: カルシウムフェライト含有率[mass%]

装入後の焼結特性の評価については、堆積原料をFig.1中に示すサンプリングボックス(400mm^W×400mm^L×500mm^H)の所でパレットから採取して、吸引圧力一定(11.8kPa)で焼成し、焼結鉱の生産率、歩留を測定した。ここで、歩留は、焼結ケーキを上層部100mmの部分とその他の部分に分けて測定を行い、焼結ケーキを2mの高さ

Table 2. Blending conditions for the sintering experiments with hot stage X-ray CT scanner. (mass%)

Raw mixture	1	2	3
Mixture A	80	60	52
Return fine	20	40	40
Mill scale	-	-	8

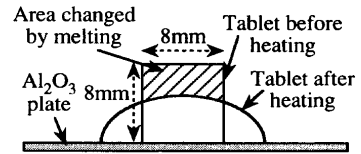


Fig. 2. Experimental method for measurement of melting ratio.

から15回落下させた時の5mm以上の重量割合で評価した。

2.1.2 X線CT装置による焼結過程のその場観察

強磁性を示すミルスケールと返鉱の配合比が融液の流動性と気孔構造の変化に及ぼす影響を検討する目的で、焼結過程を熱間で観察できるX線CT装置⁷⁾を用いて焼結実験を実施した。

Table 2に原料配合を示す。実験は、前記のMixture Aを返鉱で20mass%振り替えた原料(Raw mixture 1), Mixture Aを返鉱で40mass%振り替えた原料(Raw mixture 2), およびMixture Aをさらにミルスケールで8mass%振り替えた原料(Raw mixture 3)を用い、いずれも配合原料中のコークス量は4.5mass%一定とし、SiO₂を5.0%、塩基度を1.8となるように石灰石と珪石の配合率を調整した。その他の焼結条件およびX線CT装置による撮影条件や画像解析の手法は既報⁷⁾に従い、プランチ幅と融液流動指数を測定してプランチ幅の成長速度を求めた。

2.1.3 電気炉による熔融実験方法

熔融性に及ぼす返鉱配合比の影響を考察する目的で電気炉を用いた熔融実験を実施した。

Table 2に示すRaw mixture 1とRaw mixture 2の2種類の原料を250μm以下に粉碎後、約1.5gを60MPaで加圧成型して8mmφ×8mmHのタブレットとし、電気炉内に挿入した。タブレットは、大気中にて10K/minの昇温速度で1693Kまで昇温し、炉外からビデオによりタブレットの変形状況を連続的に観察した。得られたビデオ画像から画像解析装置によりその断面積を測定し、Fig. 2に斜線で示す熔融により変形した面積を昇温前のタブレットの断面積で除した値を熔融率と定義した。

2.2 実機操業試験方法

プレート型装入装置における磁場印加の効果を検証する目的で、川崎製鉄(株)水島製鉄所第三焼結工場において磁気ブレーキ式装入装置の操業試験を行った。

本装置の設置に伴い、シュート背面に馬蹄形の磁石プレートを配し、シュートの材質をSS400から非磁性の

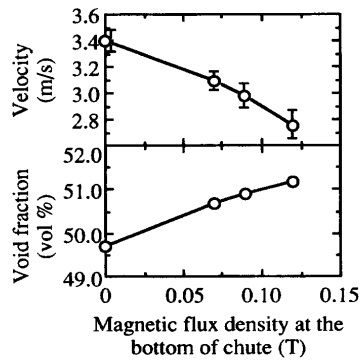


Fig. 3. Effect of magnetic field on the velocity of raw mixture falling at the bottom of chute and void fraction in the sintering bed.

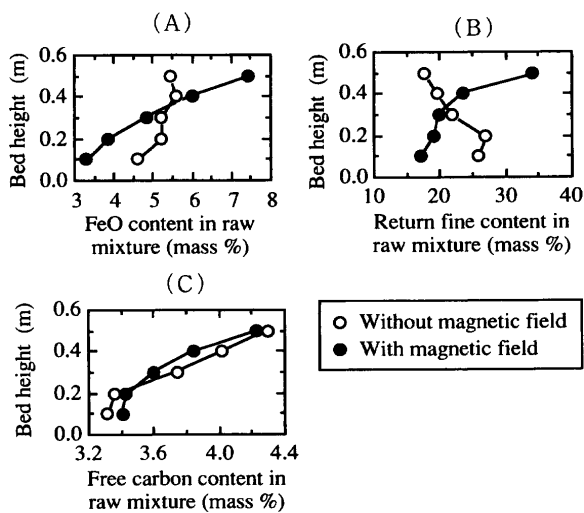


Fig. 4. Effect of magnetic field on the segregation of the raw mixture in the sintering bed.

SUS304に変更した。磁場印加の無い試験は、磁石プレートを幅方向に両側から引き抜いて実施した。操業試験は、ミルスケールやコークスなどの原料配合条件と原料層厚を一定とし、BTP (Burn Through Point)が一定となるようにパレットスピードを調整しつつ、約2日間実施し、その際、シュート下端での原料の落下速度、空隙率、生産率および歩留を測定した。

3. 実験結果

3.1 装入実験結果

Fig. 3にシュート下端での原料の落下速度と原料ベッドの空隙率に及ぼす磁場の影響を示す。シュート下端表面での磁束密度を0Tから0.12Tに増加させると、原料の落下速度は、3.40 m/sから2.75 m/sに低下し、ベッドの空隙率は1.5 vol%増加した。

Fig. 4にシュート下端の磁束密度が0Tと0.12Tにおける高さ方向の原料中のFeO含有率(Fig. 4(A)), 返鉱含有率(Fig. 4(B)), 遊離炭素含有率(Fig. 4(C))の偏析を示す。装入中の焼

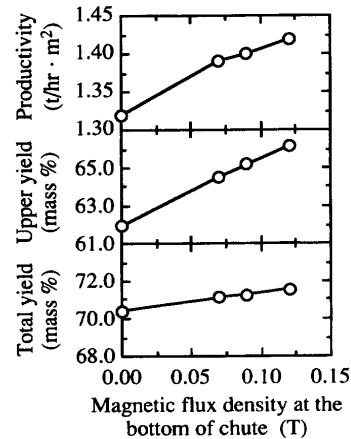


Fig. 5. Effect of magnetic field on the sinter yield and productivity.

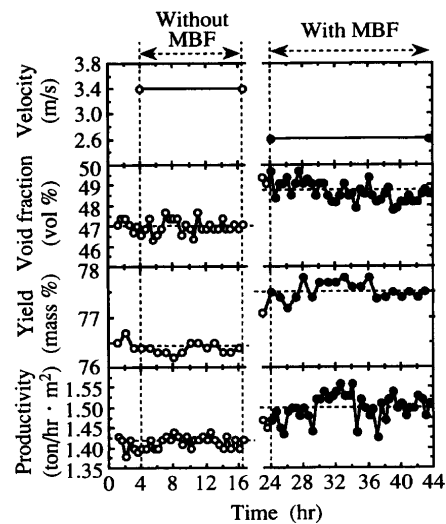


Fig. 6. Effect of magnetic field on the sintering operation at Mizushima No. 3 sinter plant.

結原料に磁場を作用させることにより、上層部100 mmの部分でのFeO含有率と返鉱含有率が増加した。これは、原料の配合条件を考慮すると、返鉱とともにミルスケールも上層部に濃縮したことに起因するものと考えられた。遊離炭素の含有率には磁場の有無による明確な差異は認められなかった。

Fig. 5に焼結鉱の生産率、上層部100 mmの部分の歩留、全体の歩留に及ぼす磁場の影響を示す。シュート表面の磁束密度の増加に伴い、生産率が向上し、上層部の歩留が顕著に改善したことで、全体の歩留も増加した。

3.2 実機操業試験結果

実験室実験に基づき、水島第三焼結工場において実機操業試験を行った。Fig. 6に操業試験結果の一例を示す。装入中の焼結原料に磁場を作用させることで、落下速度の低下に伴い、ベッドの空隙率は1.7 vol%増加し、生産率は6%、歩留は1.1 mass%向上した。また、パレット上での原料を採取して分析した結果、上層部への返鉱とミルスケール

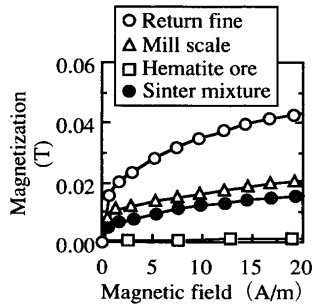


Fig. 7. Magnetic characteristics of raw materials.

ルが偏析しており、実機においても本法の効果が検証された。

4. 考察

4.1 焼結ベッドの成分偏析と空隙率に及ぼす磁場の影響

落下中の焼結原料に磁場を作用させることで返鉱，ミルスケールが上層部に偏析し，原料の落下速度が低下する現象が観察された。

そこで，振動試料型磁力計を用いて，返鉱，ミルスケール，赤鉄鉱系鉱石，装入実験に用いた焼結原料の磁化特性を測定した。Fig. 7に反磁場を補正した後の測定結果を示す。返鉱，ミルスケール，焼結原料，鉄鉱石の順で磁化され易く，特に，返鉱は鉄鉱石と比較すると著しく強い磁性を示した。粉末X線回折法による定性分析の結果から，これは，返鉱には強磁性体であるマグネタイトとカルシウムフェライトが，ミルスケールには金属鉄とマグネタイトが含有されているためと考えられる。

八嶋⁸⁾によると，粒子に働く磁力は(3)，(4)式で表わされる。ここで，磁化率は，装入実験で採用した磁束密度を含むように18.8 A/mにおける値(0.017 T)を採用した。

$$F_M = m \chi H \left| \frac{dH}{dx} \right| \dots \dots \dots (3)$$

$$H = A \cdot \exp(-bx) \dots \dots \dots (4)$$

F_M ：磁力[N]， m ：質量[kg]， χ ：磁化率[—]， H ：磁場表面から距離 x 離れた位置の磁束密度[T]， A ：磁場表面の磁束密度[T]， b ：定数[—]， x ：粒子と磁場の距離[m]

(4)式中の A ， b は，実験に用いた磁石プレートの表面からの距離と磁束密度の測定値から求めた。

Fig. 8に(3)，(4)式を用いて，質量1.0kgの返鉱，ミルスケール，鉄鉱石に作用する磁束密度と磁力の関係を検討した結果を示す。今回，重力場での各粒子の落下速度の制御を目的としているため，重力の値も図中に併記した。これより，粒子に作用する磁束密度の増加に伴い，磁力は増加し，返鉱単体では外部磁場が約0.08 Tの時，ミルスケール単体では外部磁場が0.12 Tの時に重力とほぼ同等の磁力が作用すると算出された。また，外部磁場が0.1 Tの時，返

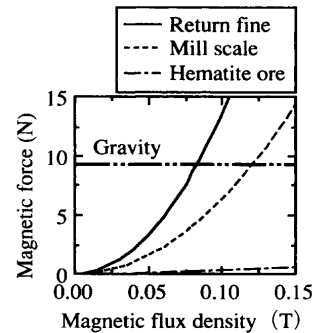


Fig. 8. Change of calculated magnetic force for each raw material due to magnetic flux density.

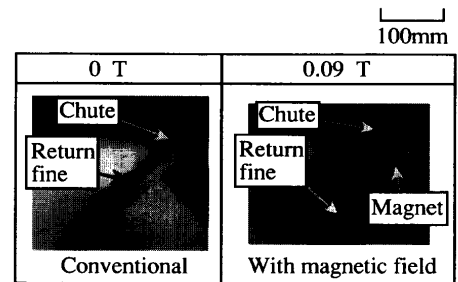


Fig. 9. Comparison of the trajectory of return fine falling down along the chute.

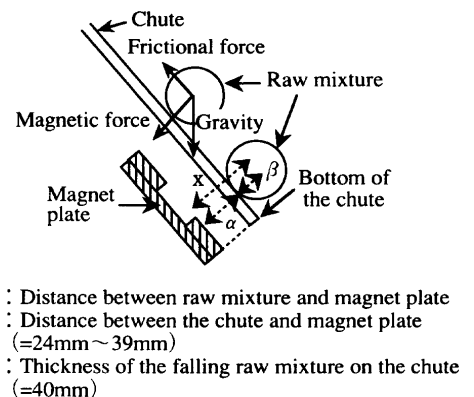


Fig. 10. Schematic diagram of the force exerted on solid particle.

鉱単体には鉄鉱石の約43倍，ミルスケール単体には鉄鉱石の20倍の磁力が作用するものと推算された。

Fig. 9に示すように，塩化ビニル製のシュート上を流した返鉱に磁場を作用させることで落下流が大きく変化することが観察された。落下中の焼結原料に磁場を作用させると上層部における返鉱とミルスケールが偏析するのは，前述のように返鉱とミルスケールが鉄鉱石と比較して非常に磁化され易いため，シュート上を移動中にこれらの粒子が磁場側に引き寄せられるためと考えられる。

Fig.10のように粒子に作用する力として重力，磁力とそれらによる摩擦力を想定し，(5)式を基にシュート下端での原料の落下速度を算出した。

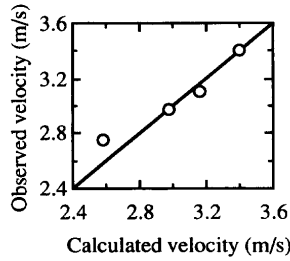


Fig. 11. Comparison of observed velocity of raw mixture falling at the bottom of chute with calculated one.

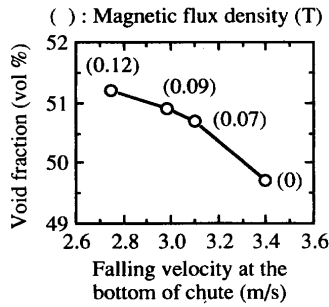


Fig. 12: Relationship between void fraction in the bed and velocity of raw mixture falling at the bottom of chute.

$$(1/2)mV_0^2 + mgh - \mu(F_g \cdot \cos \theta \times L + \sum F_M \times L_M) = (1/2)mV^2 \quad (5)$$

m : 質量[kg], V_0 : 原料の初期速度[m/s] (=1.48), V : 原料のシュート下端での速度[m/s], μ : 摩擦係数[-] (=0.45), g : 重力加速度[-], F_g : 重力[N], F_M : 磁力[N], L_M : 磁石の長さ[m] (=0.535), L : シュート上の原料の転動距離[m] (=1.05)

摩擦係数は、今回、磁束密度が0Tの時の、初期速度とシュート下端での速度から算出した0.45を採用した。これは従来の壁摩擦係数の報告例⁹⁾の範囲内(0.428~0.472)であった。原料に作用する磁力の算出では、磁化率はFig. 7の焼結原料の測定結果を用い、原料と磁石プレート表面との距離(x)は、磁石プレートとシュート表面との距離(α)に稲角らが報告しているシュート上を転動する原料層厚($\beta=40\text{mm}$)³⁾を加えた値を用いた。

Fig.11に原料落下速度の計算値と実測値との対応を示す。計算値と実測値はほぼ良好な対応を示しており、落下中の原料に磁場を作用させることで落下速度が低下するのは、重力以外に磁力が作用することでシュート上での摩擦抵抗が増加する磁気ブレーキ効果によるものと考えられる。なお、原料の落下速度が遅い領域での計算値と実測値のずれが拡大しているのは、シュート表面での磁束密度が0.1Tを越えるような場合には装入後のシュート表面に少量の返鉱の付着が観察されており、磁力線が強磁性体内部に集中して流れる磁気遮蔽が起こっているためと考えられる。

Fig.12に原料の落下速度の実測値とベッドの空隙率の関

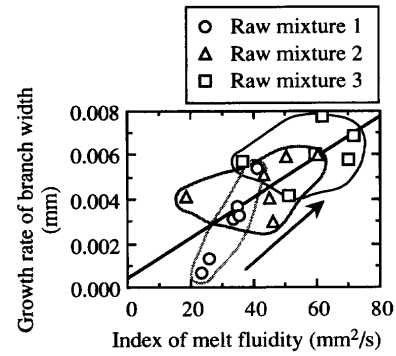


Fig. 13. Comparison of the index of melt fluidity and the growth rate of branch width among raw mixtures.

係を示すが、原料の落下速度の低下とともにベッドの空隙率は増加する。図中の傾きより、落下速度の低下が1 m/sあたり空隙率は2.3 vol%増加し、この値は藤本らのモデル実験の測定結果²⁾の範囲内であった。

以上より、落下中の焼結原料に磁場を作用させると、磁化率の高い返鉱とミルスケールは磁場側に引き寄せられ、ベッドの上層部に偏析するとともに、シュート上での摩擦力が増加する磁気ブレーキが働き、落下速度が低下し、ベッドの空隙率が増加すると考えられる。

4.2 歩留向上要因の解析

従来より、強度や歩留と高い相関がある焼結ケーキの気孔構造は、融液の流動性によって大きく左右され¹⁰⁻¹¹⁾、歩留の向上には気孔合体の促進が有効である¹²⁾と報告されている。

X線CT装置を用いて既報⁶⁾に従って求めた、焼結反応が比較的安定して進行している120秒から280秒での融液流動指数とブランチ幅の成長速度の関係をFig.13に示す。融液流動指数の増加に伴い、ブランチ幅(気孔幅)の成長速度も増加した。Raw mixture 1に比べて、返鉱の配合比を増加したRaw mixture 2とさらにミルスケールを添加したRaw mixture 3では、融液流動指数、ブランチ幅の成長速度ともに高い状態に位置しており、ミルスケールや返鉱の配合比の増加に伴い、融液の流動性が改善され、気孔の合体が促進されるものと考えられる。

ミルスケールの配合比を増加させた場合、融液の流動性が向上するのは、ミルスケール中に多量に含有されているFeO(2価鉄)が焼結過程で生成する融液の粘度を低下させる¹³⁾ためと考えられる。

返鉱配合比の焼結原料の溶解性への影響については、Fig.14の1583KにおけるRaw mixture 1(返鉱20 mass%)とRaw mixture 2(返鉱40 mass%)のタブレットの変化とFig.15の溶解率の温度変化より、1550K以下では両者の溶解率に大きな差異は認められないが、1550K以上では、両者とも溶解率は急速に増加し、特にRaw mixture 2ではその増加割合が顕著であった。返鉱の溶解性については、返鉱単体から生成する融液は高粘性であるとのダイナミック

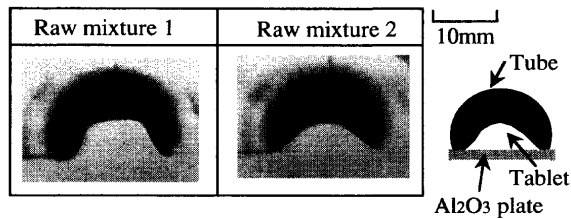


Fig. 14. Comparison of the macroscopic shape of tablet between raw mixture 1 and raw mixture 2 at 1583K.

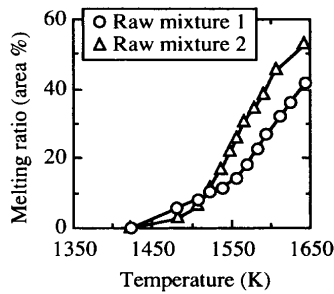


Fig. 15. Change of the melting ratio during heating.

SEMによる観察結果¹⁴⁾や返鉱と似た組成の焼結ダストと石灰石との反応では1513K以上から低粘性の融液が急激に生成するとの報告¹⁵⁾がある。今回、返鉱配合比を40 mass%まで増加させたRaw mixture 2においても石灰石は約10%存在しており、後者¹⁵⁾に近い結果となった。返鉱配合比の増加に伴い原料の溶融性が向上したのは、CaOを9%程度含有している返鉱の近くに石灰石が存在すると、部分的にCaO濃度が増加した低融点組成の融液(20 mass%CaO-80mass%Fe₂O₃: 1478K¹⁶⁾)が生成し、これが全体の溶融性に影響したことが予想されるが、今後さらなる検討が必要と考える。

5. 結言

焼結原料のプレート型装入装置について、焼結ベッドの充填特性に及ぼす磁場の影響を検討し、その原理を実機において検証し、以下の知見を得た。

(1) 落下中の焼結原料に磁場を作用させると、原料の落下速度が低下してベッドの空隙率が増加し、生産性が向上した。また、返鉱とミルスケールは、ベッドの上層部に偏析し、歩留は改善した。

(2) 返鉱、ミルスケール、鉄鉱石の順で磁化率が高く、返鉱単体には鉄鉱石の約43倍の磁力が作用するものと算出された。このため、他の原料との摩擦力が増加して原料の落下速度が低下したものと考えられる。

(3) 溶融性に優れた返鉱やミルスケールの上層部への偏析により、上層部での気孔の合体が促進され、焼結ケーキの歩留が向上したものとする。

(4) 磁気ブレーキ式装入装置を水島第三焼結工場を実機化し、実機での焼結鉱の生産性向上と歩留改善効果を確認した。

文 献

- 1) K.Fukami, H.Itaya, F.Aratani, K.Nakanishi and H.Nishimura: *Tetsu-to-Hagané*, **71** (1985), 1888.
- 2) M.Fujimoto, T.Inazumi and K.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **72** (1986), S826.
- 3) T.Inazumi, M.Fujimoto, S.Kasama and K.Sato: *Tetsu-to-Hagané*, **77** (1991), 63.
- 4) T.Inazumi, M.Fujimoto, S.Kasama, K.Sato, E.Shimozawa and A.Kaishima: *CAMP-ISIJ*, **1** (1988), 970.
- 5) T.Takai, S.Kishimoto, A.Sakai, H.Sato, O.Komatsu and H.Noda: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 916.
- 6) F.Matsuno, S.Nishikida and H.Ikesaki: *Trans. Iron Steel Inst. Jpn.*, **24** (1984), 275.
- 7) N.Oyama, K.Nushiro, K.Igawa and K.Sorimachi: *57th Ironmaking Conference Proceedings*, **57** (1998), 109.
- 8) S.Yashima: *J. Min. Metall. Inst. Jpn.*, **72** (1956), 201.
- 9) D.A.Augenstein and R.Hogg: *Powder Technol.*, **10** (1974), 43.
- 10) T.Kawaguchi, S.Kasama and T.Inazumi: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1053.
- 11) N.Oyama, K.Nushiro, K.Igawa and K.Sorimachi: *Tetsu-to-Hagané*, **83** (1997), 287.
- 12) N.Oyama, K.Nushiro, Y.Konishi, K.Igawa and K.Sorimachi: *Tetsu-to-Hagané*, **82** (1996), 719.
- 13) M.G.Frohberg and R.Weber: *Arch. Eisenhüttenwes.*, **35** (1964), 885.
- 14) J.Okazaki and Y.Hosotani: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 186.
- 15) J.Okazaki, Y.Hosotani, A.Ohshio and T.Kozono: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 175.
- 16) B.Phillips and A.Muan: *J. Am. Ceram. Soc.*, **41** (1958), 445.