

鉄鉱石焼結ケーキの破碎過程における 焼結鉱成品粒径と発生粉率

川口 尊三*・栗山 和益*²

The Relation between Fine Ratio and Particle Size of Sinter Product in Sinter Cake Sizing Process

Takazo KAWAGUCHI and Kazuyoshi KURIYAMA

Synopsis :

The breakage process of sinter cake was investigated to find the most efficient sizing method that minimizes the -5 mm fraction in crushed cakes. Sinter cakes with various initial sizes were crushed with a jaw-crusher, shatter and tumble testers to compare the -5 mm fines generation processes. The results showed that the dominant factor that decides the amount of -5 mm fines is the final size of the crushed +5 mm products. Under a specific crushing mode, the -5 mm fines mass is decided by the mean particle size of the residual +5 mm products, independent of the cake strength. The second dominant factor is the crushing mode and the jaw-crusher yields the least -5 mm fines mass among the three crushing modes. Thus the most efficient process is to crush sinter cake with jaw-crushers to a size which is small enough as a feed for blast furnaces. The reason why a jaw-crusher yields the least -5 mm fines mass was considered to be due to a volume breakage included in this mode where the applied energy is used for the size reduction, while the other breakage mode, surface breakage is not preferable to crush sinter cakes because the size reduction takes place by surface grinding that leads to a high -5 mm fines mass.

Key words : sintering process; particle size; crushing; surface breakage; volume breakage; crushing mode; yield.

1. 緒 言

鉄鉱石焼結鉱製造プロセスは脆性度の高い焼結ケーキを破碎整粒することによって成品を得ており、成品歩留の低いプロセスである。このため、その要因調査と改善対策が数多く実施されているが、これらは焼成不完全部の低減、焼結ケーキ強度の向上、搬送過程の粉化低減および成品の回収装置(篩)の改善に関するものが多く、焼結ケーキの破碎に関するものが少ない。これは焼結ケーキからの粉発生現象に関し本質的解析がまだ十分でなく、さらにその具体的改善策が難しいためと思われる。

従来、破碎および粉化に対する強度解析は高炉に装入される成品焼結鉱を対象としていたが、最近ではその母体である焼結ケーキも対象とされるようになり、焼結ケーキの空隙構造解析も含めその破碎現象を基本的な面から把握しようとする研究^{1)~4)}が行われている。これ

らの研究が進めば従来から蓄積された成品強度に関する知見⁵⁾⁶⁾と組合せて、ケーキから最終成品までの全破碎現象が明らかとなり、高成品歩留を得るための焼結ケーキ空隙構造およびその成品処理方法の指針が得られるものと期待される。

本報では焼結ケーキから最終目標粒径の焼結鉱に至るまでの全体的な破碎現象に関し成品粒径と発生粉率との関係について検討するとともに、実用上最も重要な点である「焼結ケーキを高炉が要求する粒径までいかに粉発生の少ない状態で破碎するか」について考察を行った。

2. 焼結ケーキ破碎基礎実験

2.1 実験方法

2.1.1 破碎供試料

粉発生現象に対する支配的要因を抽出するため、ケーキ空隙構造および形状、寸法を変化させた試料を製造し

平成3年10月31日受付 平成4年4月10日受理 (Received on Oct. 31, 1991; Accepted on Apr. 10, 1992)

* 住友金属工業(株)鉄鋼技術研究所 工博 (Iron & Steel Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16-1 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314)

*2 住友金属工業(株)未来技術研究所 (Advanced Technologies Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

破碎実験を実施した。さらに破碎方法の変更および破碎条件選定のための予備実験も実施した。

ケーキ空隙構造の異なる試料は焼結原料のコークス配合量を2.5%~3.7%に変更し、広く普及している標準焼結鍋(直径300mm)を用い実機操業実績に近い原料層厚500mmの一定条件で焼成を行い製造した。形状変更は鍋形状を円柱から直方体に変更することによって、また寸法変更は円柱形では300mm直径で層厚を100mm~700mmに、直方体では層厚300mmで横幅を100mm~400mmに変更することによって操作し、鍋側壁部からの放熱も考慮して実機操業実績値よりやや高い3.4%のコークス量でケーキを製造した。これら形状および寸法の変更条件をFig.1にまとめる。

また破碎条件に関する予備実験および破碎方法を変更する実験ではコークス量3.4%、直径300mmの円柱鍋を用い、前者は原料層厚500mm、後者は原料層厚700mmの一定条件で焼成ケーキを製造しこれを用いた。

鍋焼成においては、焼成風速差に起因する層内温度差の焼結ケーキへの影響を極力小さくするため、鍋空筒風速が常に一定(標準状態で17.0m/min)となるよう制御した。原料は実機ラインで配合されコークス添加直前で採取された原料の混合粉(T. Fe=51.1%, SiO₂=4.8%, Al₂O₃=1.7%, CaO=9.6%, フリーカーボン=0.4%)を用いた。

鍋焼成し排出された焼成物には一部焼成不完全部分(未焼結部分)が混在するので、焼結ケーキ破碎における粉発生を調査する外乱となる。そこで予備実験結果(後述)を基に焼成不完全部分を除去するため、鍋焼成物を落下強度試験機(JIS-M8711-1987)で1回落下後、5mm篩で分級し篩上産物を焼結ケーキの供試料とした。

直方体供試料にあつては試料間及び試料内の焼結ケーキ空隙構造を出来るだけ均一にするため、鍋側壁部に断熱ボードを用いるとともに、焼成温度の低い上層表面から100mm部分(Fig.1の破線より上部)を削除した。

2.1.2 破碎方法および条件

焼結ケーキの破碎には落下強度試験機、回転強度試験

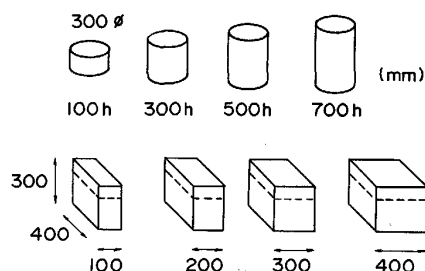


Fig. 1. Size and shape of examined sinter cakes. (The tops of the triangular cakes denoted by the dotted lines were removed before breakage tests.)

機(JIS-M8712-1987)、シングルトルグ型ジョークラッシャー(横幅450mm、入口歯幅300mm、高さ530mm)を用いた。落下強度試験機および回転強度試験機においては、その積算落下回数(4, 8, 16, 32, 64回)や積算回転数(10, 20, 50, 150回)を変更して焼結鉄成品粒子の粒径、粒子表面形状、気孔率および粉率を測定した。ジョークラッシャーは口で物を噛むように固定顎と往復顎との間に塊状の破碎物を挟んで強大な圧力で押し砕く破碎機⁷⁾であるが、破碎条件として出口歯幅(35, 45, 50, 55mm)を変更し1パスで試料を破碎し、成品粒径および粉率を測定した。

そして3種類の破碎機による破碎方法の違い、すなわち落下衝撃(落下強度試験機)、回転摩擦(回転強度試験機)、層圧縮圧力破碎(ジョークラッシャー)の違いに対する破碎焼結ケーキの成品粒度分布と粉発生量の関係について比較した。

なお、ジョークラッシャーにおける破碎は破碎物が破碎部から直に除外される自由粉碎⁷⁾であるのに対して、落下強度試験機および回転強度試験機による破碎においては破碎物が系内に留まる閉塞破碎⁷⁾なので、破碎処理過程で発生する粉の存在およびその供試料量の違いによる破碎結果への影響が考えられる。そこで予備実験結果に基づき、本実験では破碎供試料量を一定に定めず+5mmの試料全量を一度に破碎処理するとともに、所定落下回数または回転数毎に試料を取り出し、篩分級処理を行い粒度分布を測定した後、-5mm粉試料を除去した+5mm試料だけを再度強度試験機にもどして累積的に落下または回転衝撃を加え評価した。

粒度測定は5, 10, 25, 50, 75, 100mmの打抜き鋼鉄角孔篩を用い、平均粒径は体積基準により算出した。また、ここでは成品は5mm以上の試料とし、粉は5mm以下の試料と定義した。

2.1.3 焼結鉄成品粒子の表面形状と気孔率の測定

13~15mmの成品焼結鉄を樹脂に埋め込み、切断面を粒子実体部と気孔空隙部とに識別し画像定量処理装置によりマクロ気孔率、および粒子断面外周長(L1)mmを求めた。さらに粒子を凸体[†]とみなした場合の粒子断面積(S)mm²および粒子断面外周長(L2)mmを測定し、粒子表面凹凸度= L1/L2 および凸体の円形度^{†2)}= $\sqrt{4\pi S}/L2$ を求めた。(後掲Fig.7参照)この場合のマクロ気孔率は径が1.5mm以上のものである。また別途、19~21mm焼結鉄粒子(Fig.2に示される斜線部)

[†] 物体内部に2つの点を任意にとった時、2点を結ぶ線分が常にこの物体内部にある物体を凸体という。

^{†2)} 断面積径から求めた円周長と実周長の比で、円形の時1となり円形から遠ざかると値が小となる。

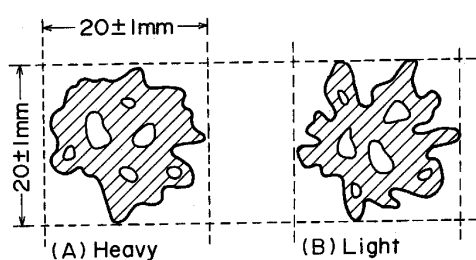


Fig. 2. The schematic descriptions of irregularities on surface of sinter product. (The light particle (B) has more ups and downs on the surface than the heavy one (A) on 19-21 mm particle.)

の見掛密度と密度を測定 (JIS-M8716-1987, JIS-M8717-1987) しマイクロ気孔率を求めた。この場合のマイクロ気孔率は径が 0.5 mm 以下のものである⁸⁾。

成品焼結鉱の粒子表面形状 (凹凸) については画像処理法とは別に試料を篩目差の小さい 2 枚の角孔篩 (19 mm と 21 mm) を用い、所定篩粒径の焼結鉱だけを取り出しその質量と個数を測定し、所定粒径焼結鉱 1 個あたりの平均質量を求める方法も検討した。測定焼結鉱粒子の均斉度 (凸体とみなした時の円形度と対応) および見掛密度の差が小さくまた粒径を狭い範囲に規定すれば、粒子平均質量は粒子表面形状を反映する。すなわち、Fig. 2 に見られるように質量の小さい粒子ほど粒子表面凹凸が大きい。

なお、調査サンプル採取にともなう破碎実験結果への影響を小さくするため、調査粒度は存在個数の多い粒度範囲を選ぶとともに樹脂埋め込み試料と密度測定試料とで異ならせ、サンプル採取量を極力少なくした。

2.1.4 実験方法に関する予備実験

2.1.1 で述べたように、焼結ケーキに関する破碎の検討では事前に不完全な焼成部分を除去しておく必要がある。そこで、円柱鍋焼成物を落下強度試験機によって破碎処理を行い、未焼結部に残存するフリーカーボンおよびフリー CaO を調査した。結果を Table 1 に示すが、落下累積 1 回の破碎粉だけ検出された。従って不完全な焼成部分の除去には、鍋焼成物を落下強度試験機で 1 回だけ落下し粉を除去するのが良好と判断された。

また 2.2.2 で述べたように、落下強度及び回転強度試験機における試料量ならびに粉の存在の有無は破碎現象に少なからぬ影響を及ぼすものと思われる。そこで、まず落下強度試験機を用いて破碎焼結ケーキから 20~30 mm の焼結鉱を篩にて採取し、この焼結鉱 5kg (20~30 mm 層厚) で焼結鉱層を作成し以下の実験を行った。

焼結鉱層を鉄板上に 1 回だけ落下させた場合と、鉄板上に焼結鉱層を形成させこの上に焼結鉱層を落下させ

Table 1. Free carbon content and free CaO content in sinter fines after shatter test.

Drop times	1	2	3	4
Free C (mass%)	0.31	<0.1	<0.1	<0.1
Free CaO (mass%)	0.62	<0.1	<0.1	<0.1

Table 2. - 5 mm fines generated at shatter tests with various hearth materials.

Hearth material	Steel plate	Sinter particles of 20 to 30 mm	Sinter fines
Fines generated (mass%)	2.59	1.66	0.41
Sinter particles of 20 to 30 mm	—	1.09	—
Hearth material Total	2.59	2.75	0.41

た場合の発生粉率差を調査した。この場合、落下させた焼結鉱層と鉄板上の焼結鉱層から発生する粉を分離するため鉄板上の焼結鉱層はビニール袋に入れておいた。さらに、鉄板上に -5 mm 粉 (層厚 30 mm) を敷きつめた上に焼結鉱層を落下させた場合の発生粉率も調査した。結果を Table 2 に示すが、鉄板上に焼結鉱層を落下させた場合が落下焼結鉱から発生する粉率が最も高い。しかし焼結鉱層どおしの衝突の場合、衝突に関与する焼結鉱量が倍増し両方あわせた発生粉率でほぼ等しい値となった。粉体上に焼結鉱層を落下させた場合は極端に発生粉率が小さかった。このような鉄板上敷設の試料差による落下焼結鉱の発生粉率差は衝突衝撃力の差に起因していると思われる。

次に落下強度試験機において、供試量を変更した条件での発生粉率調査ならびに焼結ケーキにあらかじめ -5 mm 粉を 22% 混入させた条件での発生粉率調査を行った。ここで混入粉率を 22% としたが、ケーキ破碎実験における -5 mm の発生粉率はほぼ 15~30% でその中間値を採用した。結果を Fig. 3 に示すが、供試量の影響は少ないが、混入粉の影響は大きい。回転強度試験機においてもほぼ同様の結果が得られた。これは供試量の差によってたとえ焼結ケーキが鉄板もしくは焼結ケーキと衝突する確率に差が存在しても、Table 2 の結果に見られるごとく発生粉率への影響が小さいためと思われる。一方、混入粉の存在により焼結ケーキの発生粉率が低減するのは焼結ケーキと混入粉との衝突確率が大きくなり、逆に粉発生率の高い焼結ケーキと鉄板または焼結ケーキどおしの衝突確率が低下するのが主因と思われる。

従って、粉を除いた焼結ケーキ粒子の破碎現象の解析ならびに評価にあつては、反復落下強度試験および回転強度試験における試料量の影響は無視しても良いが発生粉は出来る限り除去すべきと判断される。

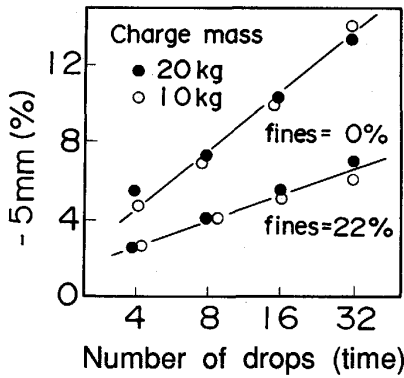


Fig. 3. Difference in generating -5 mm fines at shatter test with and without -5 mm fines in the starting materials.

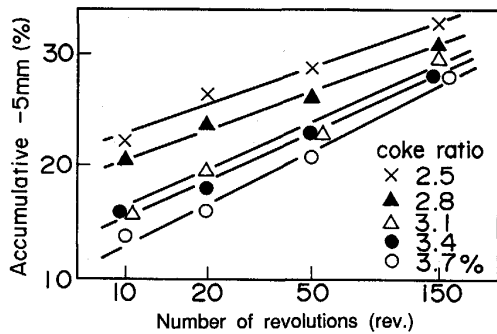


Fig. 4. Accumulative -5 mm fines mass% of cake sintered with various coke ratio of sinter during the tumble test.

2.2 実験結果

2.2.1 焼成原料のコークス配合量変更テスト

コークス量を変更して製造したケーキにおける落下強度試験機および回転強度試験機での破碎試験結果は、コークス量の多いほうが発生粉率は低くなった。回転強度試験機での破碎の途中過程を Fig. 4 に示すが、従来から指摘されているように⁹⁾¹⁰⁾、破碎初期段階における発生粉率が大きく、回転数あたりの発生粉率は累積回転数の増加とともに低下している。また、累積回転数の増加に伴って試料間の発生粉率差が小さくなっている。

コークス量を変更すると焼結ケーキの強度ならびに空隙構造は大幅に異なる⁵⁾。従って、コークス量や回転数をパラメーターにとって累積発生粉率を記述すると試料毎に異なった粉率線が得られる。しかし、Fig. 5 に示すように横軸に +5 mm 部分平均粒径をとって累積発生粉率を整理すれば全試料を狭い帯状の範囲に図示できた。図から初期形状と破碎方法が一定ならば、焼結ケーキの空隙構造によらず成品平均粒径が累積発生粉率に対し支配的な影響力をもつものと理解される。

2.2.2 焼結ケーキの粒子表面形状および気孔率変化

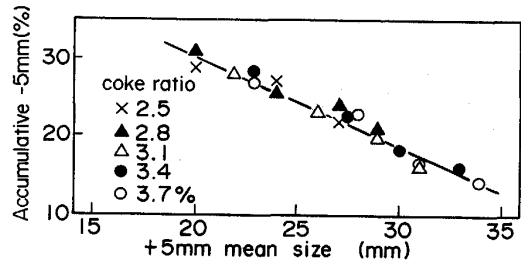


Fig. 5. Relation between mean size of +5 mm sinter product and accumulative -5 mm fines mass% of cake sintered with various coke ratio of sinter mix at the tumble test.

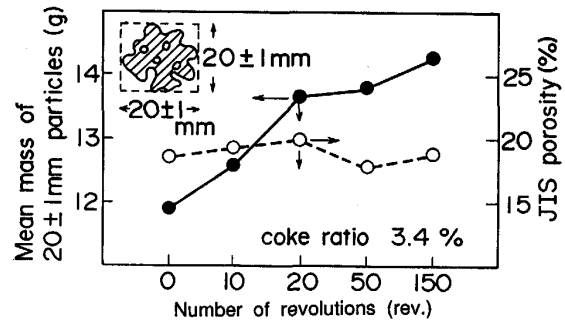


Fig. 6. Change in micro porosity and mass of 19~21 mm particles during the tumble test. (Coke ratio of sinter mix = 3.4%)

2.2.1 の回転強度試験機破碎 (コークス 3.4%) における粒径 19~21 mm 粒子の平均質量とマイクロ気孔率を測定した結果を Fig. 6 に、粒径 13~15 mm 粒子のマクロ気孔率、表面凹凸度および凸体とみなした円形度を求めた結果を Fig. 7 に示す。回転破碎中、気孔率は変化しないが表面凹凸度は低下する傾向にある。また粒子を凸体とみなした円形度はわずかであるが上昇し球形に近づく。一方粒子平均質量は増加する傾向にある。これは粒子均斉度 (凸体円形度) や粒子見掛密度 (気孔率) に差が少ないことから粒子表面凹凸度と対応していると考えられ、画像処理法により求めた結果と整合している。以上より回転試験機破碎においては、焼結鉱内部の気孔状態や粒子均斉度の変化は少ないが粒子表面の凹凸はなくなる傾向にある。

2.2.3 破碎方法変更テスト

3 つの破碎方法の比較として、Fig. 8 には破碎過程における成品平均粒径を横軸にとって発生粉率をプロットした。Fig. 9 には平均径が 21 mm 程度になるまで破碎した時の全供試料の粒度分布を、Gaudin-Schumann プロット¹¹⁾として示した。

まず Fig. 8 からジョークラッシャーによる破碎はケーキの粒度低下に際し -5 mm 粉発生が少ない破碎方法であることがわかる。さらに Fig. 9 ではジョークラッ

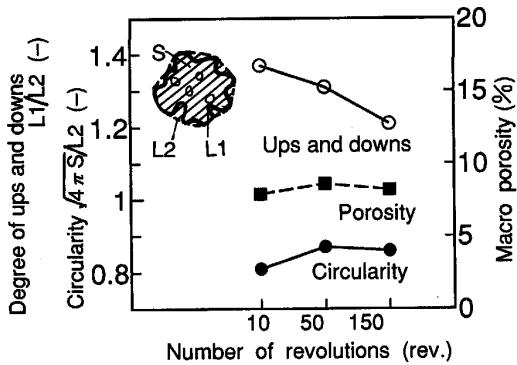
シャーによる破碎焼結ケーキの粒度分布が狭いことがわかる。従ってジョークラッシャー破碎は焼結ケーキ破碎における発生粉率ならびに高炉装入物成品の粉度分布の点から好ましい方法である。

一方、落下強度試験結果と回転強度試験結果を比較すると Fig. 8 では両方の粉率線が重なり、また Fig. 9 で

は破碎ケーキ粒度分布の一致が認められることから、この2つが類似の破碎方法であると思われる。この理由は回転強度試験機ではドラム内に2枚のリフターが設置されており、1回転毎に2回の落下衝撃が加えられ、落下衝撃力は異なるものの落下強度試験機と同様の破碎モードとなっているためと思われる。

2.2.4 ケーキの形状および寸法変更テスト

円柱または直方体形状ケーキの落下強度試験機破碎における発生粉率と成品平均粒径の関係を Fig. 10 に示す。円柱ケーキは焼結層厚を変更しているためケーキ空隙構造は寸法の上昇すなわち高層厚のケーキほど強度的には強い空隙構造を持っている¹²⁾。一方、直方体ケーキでは焼結幅を変更しておりまた強度の弱い上層部を削除しているため比較的ケーキ空隙構造に差が少ない試料と思われる。ケーキ寸法が異なれば破碎方法変更結果と同様に成品粒径と発生粉率の関係が異なる。ここで用いた各ケーキは構造的に同等ではないが、2.2.1 に示されるようにケーキ空隙構造の影響が小さいことを考慮すれば、ケーキ寸法そのものが成品粒径-発生粉率の関係を变化させる要因であると理解される。落下回数をパラ



L1: Peripheral length L2: Envelope length
S: Area enclosed with envelope

Fig. 7. Change in macro porosity, degree of ups and downs on surface and degree of circularity of enveloped particle for 13~15 mm particles during the tumble test. (Coke ratio of sinter mix = 3.4%)

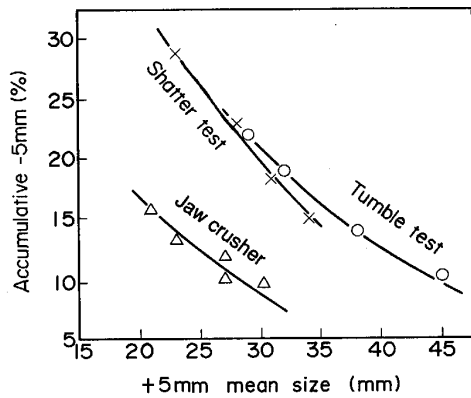


Fig. 8. Effect of crushing mode on the relation between accumulative -5 mm fines% of sinter cake and mean size of sinter product.

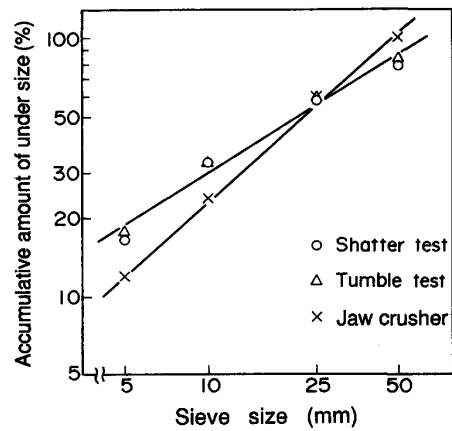


Fig. 9. Size distribution of sinter cakes crushed up to 21 mm for mean particle size with shatter tester, tumble tester and jaw crusher. (Gaudin-Schumann plot¹¹⁾.)

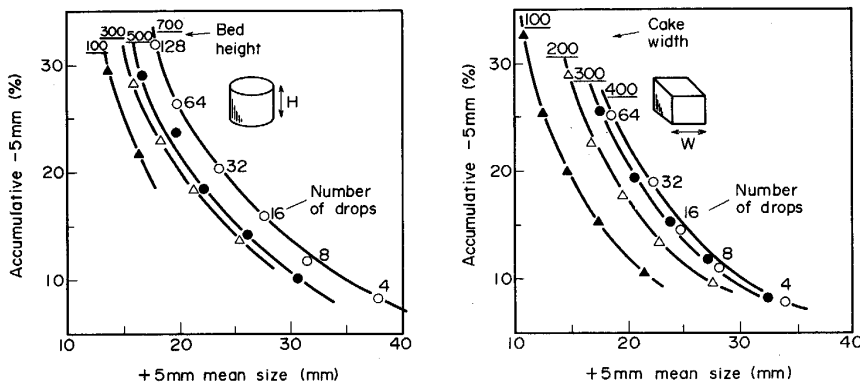


Fig. 10. Relation between mean size of +5 mm sinter product and accumulative -5 mm fines mass% of siter cake under varying initial size of siter cake.

メーターに表示すれば Fig. 11 のようになって、寸法が大きなケーキのほうが発生粉率が小さくなる。しかし成品の平均粒径が高炉側で要求する所定値 (例えば 20 mm) になるまでケーキを破碎しなければならぬという制約をおけば、Fig. 10 に示されるように低層厚あるいは幅の狭い、つまり寸法の小さいケーキの方が低粉率で目標粒径まで破碎できる結果となっている。

2.3 焼結鉄成品粒径と発生粉率に関する考察

焼結ケーキ粒子の破碎には体積破壊と表面破壊の2つの現象^{13)~15)}に分けて考えられる。体積破壊は粒子全体が複数個の粒径に分かれる現象で、Fig. 10 に見られるように数回の落下処理により数百 mm の初期ケーキが数十 mm の粒子に破碎されていることから確認される。一方、表面破壊は粒子中心部はそのまま外表面部が分かれる現象で、2・2・2 の結果に見られるように焼結鉄粒子表面の凹凸がなくなる傾向から、粒子表面凸部が

割れ -5 mm 粉が発生する表面破壊が起きていることも理解される。このように実際の焼結ケーキ破碎にあつては、これら2つの破壊現象が混在して同時進行するが、焼結ケーキの表面破壊は体積破壊に比べ成品粒径の低下度合いに対しその発生粉率は多いものと考えられる。

焼結鉄成品の平均粒径を D として、Fig. 10 の実験結果を横軸に $1/D$ を選び整理しなおすと、Fig. 12 となり各条件 (ケーキ寸法、形状) ごとに直線関係が得られる。この結果は $1/D$ の増分に対応する発生粉率が一定であることを示すが、成品全粒子を平均粒径の球粒子と仮定すれば $1/D$ は粒子見掛比表面積 (粒子を凸体とみなした状態) に対応する。すなわち破碎発生粉率は破碎前後の成品粒子の見掛比表面積の差に比例した結果となっている。発生粉率と $1/D$ の関係を示す直線の傾きを K とすれば、この傾き K は単位見掛比表面積増分当たりの発生粉率と対応しており、焼結ケーキ破碎において表面破壊が優勢の時には K は大きな値をとり、体積破壊が優勢の時には K は小さな値をとる。従つて、傾き K は表面破壊と体積破壊の寄与率を示すものと思われる。

このように考えると、衝撃力に対するケーキ全体構造が弱いと思われる板状の偏平なケーキあるいは棒状のケーキのほうが立方体のものより体積破壊しやすく、傾き K は小さい。また破碎方法においてもジョークラッシャー破碎の方が体積破壊しやすく、Fig. 8, Fig. 10 に見られる結果になったものと思われる。

さらに Fig. 12 では初期ケーキ寸法により $1/D$ と発生粉率の関係が異なり、2・2・4 で述べたように寸法が小さい程同一成品粒径における発生粉率が低い。これは初期寸法が破碎目標粒径に近い程、破碎にともなう成品粒度の低下、すなわち粒子見掛比表面積増加の度合いは小さいので累積される発生粉率も小さくなるためと考える。

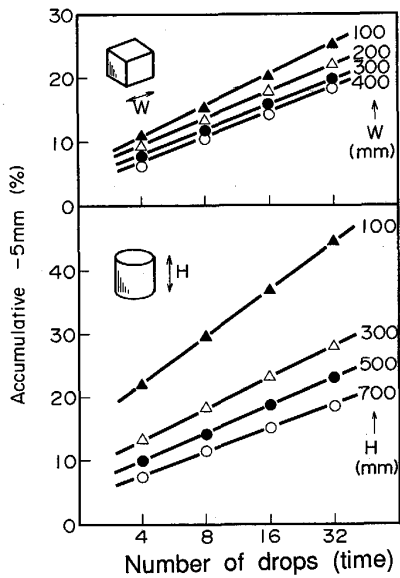


Fig. 11. Accumulative - 5mm fines mass% of sinter cake at the shatter test.

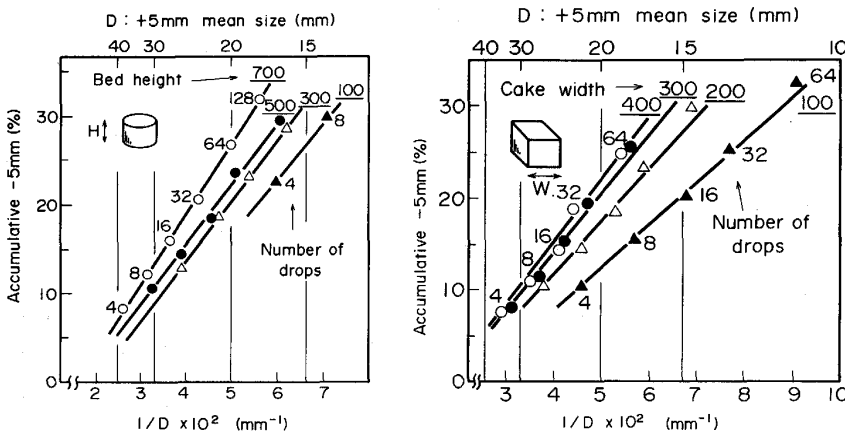


Fig. 12. Relation between reciprocal mean size $1/D$ of +5mm sinter product and accumulative - 5mm fines mass% of sinter cake under varying initial size of sinter cake.

3. 実機における焼結ケーキの破碎

3.1 成品粒径と発生粉率

鹿島 No. 2, No. 3 焼結工場および高炉での原料搬送ラインにおいて破碎焼結ケーキを採取して発生粉率および成品粒径を調査し、基礎実験で得た知見の検証をおこなった。2つの焼結工場の操業条件(コークス比と層厚)は Table 3 に示すように異なっていたが原料条件はほぼ同一であった。Fig. 13 に発生粉率と成品粒径の関係を示すが、基礎実験と同様に発生粉率は $1/D$ に対して直線関係が認められた。また高コークス比で層厚の高い No. 3 焼結工場の発生粉率線の方が上に位置しており、基礎実験の知見と実機調査の結果は整合している。

また実機における傾き K の値を基礎実験結果と比較したのが Fig. 14 である。実機の傾き K は、落下衝撃で破碎した粉率線の傾き K とジョークラッシャー破碎した粉率線の傾き K との中間の値を有している。実機での破碎がクラッシャー(基礎実験とはタイプが異なる)と落下衝撃で行われていることを考えれば妥当な結果と思われるが、ジョークラッシャーでの破碎と比較して実機ではまだ改善の余地が残されていると考える。

3.2 焼結ケーキ内強度分布と発生粉率

和歌山 No. 1 焼結工場において同一原料操業条件でクーラー冷却法とストランド冷却法の比較試験を実施した¹⁶⁾。この時の1次クラッシャーの破碎動力と発生粉率の結果を Table 4 に示す。ストランド冷却法では破

Table 3. Coke ratio in sinter mix and sinter bed height at No. 2 and No. 3 Kashima Sinter Plants.

Sinter plant	No. 2	No. 3
Coke content(mass%)	3.13	3.33
Bed height(mm)	410	520

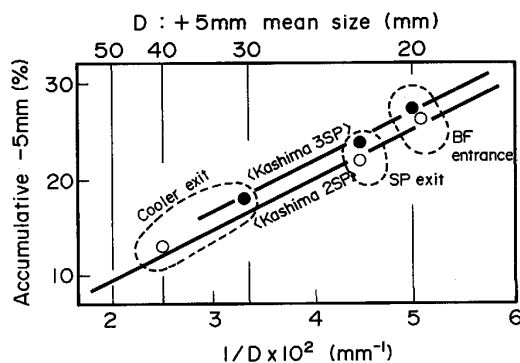


Fig. 13. Relation between reciprocal mean size $1/D$ of +5 mm sinter product and accumulative -5 mm fines mass% for sinter cakes at Sinter Plant. (SP) and Blast Furnace (BF) in Kashima steel works.

碎動力の低下と返鉱率の低下が認められる。この差の主原因として焼結ケーキ内の強度分布差が考えられる。

焼結ケーキにあってはその空隙構造および性質は均一ではない。一般に焼結化反応時間の差から焼結ケーキ強度は下層の方が上層より大きい¹²⁾。また冷却法の違いにあっては、クーラー冷却の場合初期破碎においてケーキ上層の温度は低い下層は高温状態で塑性的な性質を有している。このため鍋焼結下層ケーキの落下強度は常温では 83.6% に対し赤熱高温では 93.7% と高い値を示し、クーラー冷却の場合は常温の上層と高温の下層では強度により大きな差が存在する。このような強度分布の存在するケーキを一律に同一の衝撃を加え目標粒径まで破碎すると、低強度部分は過粉碎となり成品粒径が小さくなるとともに発生粉率も高くなるものとする。

従って、初期破碎直前のケーキ強度の分布はより均一が望ましく、ストランド冷却法はクーラー冷却法よりも優れる。またケーキ層厚は低い方が良好と思われる。

4. 考察

4.1 高層厚操業の評価

従来、歩留改善のためには層厚上昇が効果的とされて

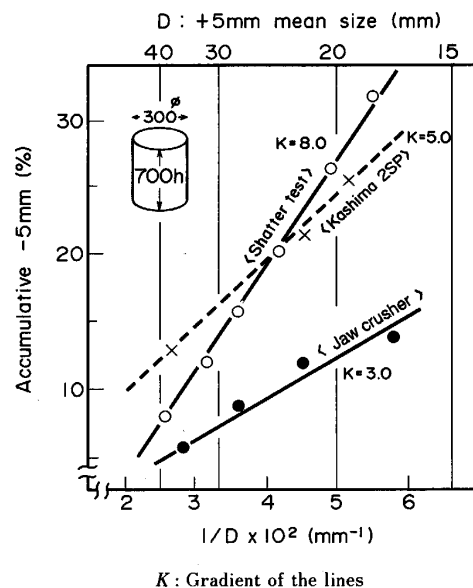


Fig. 14. Comparison of crushing efficiency among shatter tester, jaw crusher and sizing system at Kashima No. 2 Sinter Plant.

Table 4. Power of 1st crusher and return fines ratio for on-strand cooling and off-strand cooling processes at Wakayama No. 1 Sinter Plant.

Cooling process	On-strand	Off-strand
Electric current of crushing moter(A)	40	60
Return fine(mass%)	12.2	15.8

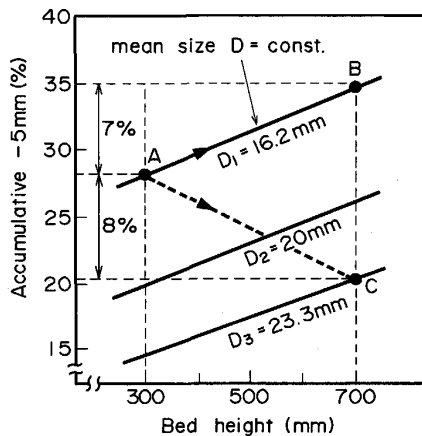


Fig. 15. Relation between accumulative - 5 mm fines mass% of sinter cake and height of sinter bed at keeping mean size of +5 mm sinter product.

おり¹²⁾, 本結果はその知見に一見相反する。そこで Fig. 11 の結果を Fig. 15 に整理した。例えば層厚 300 mm と 700 mm のケーキを比較すると、同じ落下回数 (32回) の時の成品粒径と発生粉率は Fig. 5 の A, C に示される。この時約 8% の発生粉率差が生じ低層厚ケーキの発生粉率が高い。しかし成品粒径 (16.2 mm と 23.3 mm) にも差が生じている。

そこで成品粒径を 16.2 mm に一致させようとするれば層厚 700 mm (C点) は、層厚 300 mm (A点) に比べて破碎を強化しなければならず B 点に移行し発生粉率は逆に 7% 上昇する。このように、成品粒径一定か衝撃力一定かによってケーキ層厚に対する評価は変わる。

実機のように設備が固定されている前提では衝撃力一定の条件に近く、そのため高層厚ケーキの方が発生粉率が低下すると認識されていたと思われる。この場合成品粒径の粗粒化を伴っていたと推定される。しかし同一成品粒径を目標とした衝撃破碎力の異なる設備間で比較すると、Fig. 13 に示されるように高層厚操業の方が、発生粉率が高くなっており必ずしも有利となっていない。

4.2 発生粉率低減への指針

粉率低減のための破碎に関する改善策としては、まず成品粒径の粗粒化が第 1 であり、第 2 に破碎方法を体積破壊させやすいクラッシャー破碎に傾斜すべきである。また焼結ケーキの初期寸法や形状に関しては、初期値によらず高炉の要求する成品サイズは 20 mm 前後であるから、前述のように高層厚・幅広のケーキほど不利である。この観点から大型焼結機は歩留の面で多少不利である。従って第 3 の対策としては、体積破壊しやすい扁平で、最初から目標サイズに近い小さなケーキとなる切れ目をいれておくのが有利と考える。

第 4 にケーキ内の強度分布を均一にし、弱いケーキの過粉碎を防止する。また目標粒径になった成品は選択的に抜き出し衝撃力を受けないよう配慮すべきである。この場合、発生粉の共存は衝撃破碎力低減に効果がある。

5. 結 言

鍋ケーキを用いた基礎破碎実験と実機破碎焼結ケーキのサンプリングから、発生粉率の支配要因を調査し以下の知見を得た。

(1) 破碎方法、ケーキ寸法や形状が一定なら目標とする成品粒径によって発生粉率は支配される。これはケーキ強度に依存しない。

(2) 破碎方法としては落下や回転強度試験機による破碎よりもジョークラッシャーによる破碎の方が粉発生の少ない状態で目標粒径までケーキを破碎できる。

(3) ケーキ寸法は最初から小さく(目標粒径に近い)、かつ扁平な形状の方が発生粉の少ない状態で目標粒径まで破碎できる。

(4) 目標成品粒径まで同一衝撃履歴によって全ケーキを破碎するものとするれば、ケーキ内の強度分布が均一である方が発生粉率が低減すると考えられる。

文 献

- 1) T. Inazumi, S. Kasama, K. Sato and N. Tanaka: Proc. 5th International symp. on agglomeration, Brighton England, (1989), p. 599
- 2) 稲角忠弘, 笠間俊次, 藤本政美, 佐藤勝彦: 材料とプロセス, 3 (1990), p. 968
- 3) 八嶋三郎, 橋本 等: 材料とプロセス, 3 (1990), p. 948
- 4) 中島龍一, 谷中秀臣, 服部道紀, 小松 修, 長野誠規, 高木 昭: 鉄と鋼, 72 (1986), S802
- 5) 葛西栄輝, R. R. Lovel, W. J. Rankin, 大森康男: 鉄と鋼, 75 (1989), p. 228
- 6) 佐藤 駿, 川口尊三, 一伊達 稔, 吉永真弓: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 48
- 7) 森 芳郎: 化学工学便覧改訂 3 版 (化学工学協会編), p. 1021 [丸善]
- 8) 佐藤 駿, 川口尊三, 一伊達 稔, 吉永真弓: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 54
- 9) 城 博, 井田四郎: 製鉄研究 (1966) 254, p. 6331
- 10) 和島英明: 鉄と鋼, 73 (1987), S99
- 11) R. Schumann: Am. Inst. Min. Met. Eng. Tech., Pub. (1940), p. 1189
- 12) I. Shimizu, M. Yoshinaga, K. Monji and T. Funabashi: Proc. ICSTIS (1976), Section 1, p. 83
- 13) D. Jeulin: Ironmaking Steelmaking, 10 (1983), p. 145
- 14) 森 芳郎, 神保元二: 化学工学, 23 (1959), p. 138
- 15) A. G. Waters, A. Vince and J. D. Litster: 14th Australian Chemical Engineering Conference (1986)
- 16) 日本鉄鋼協会共同研究会製鉄部会誌 63-13- 自 (1983) (私信)