

遠心転動造粒機による粉コークス造粒技術と 焼結操業におよぼす影響

細谷 陽三*・今野 乃光*・柴田 充蔵*²・佐藤 正*³・鈴木 治久*³

Technology for Granulating Coke Breeze by Centrifugal Rolling Type Pelletizer and
Effect of Granulated Coke Breeze on Sintering Operation

Yohzoh HOSOTANI, Norimitsu KONNO, Juzo SHIBATA, Tadasi SATO and Haruhisa SUZUKI

Synopsis : The technology for granulating coke breeze by centrifugal rolling type pelletizer, which is operated at a Froude number (Fr) 10^2 times more than an ordinary drum mixer, and the effect of granulated coke breeze on sintering operation, granulation of raw mix and quality of sinter were quantitatively studied by use of sinter pot and NAGOYA No.2 sinter plant.

The following results were obtained :

(1) In the granulation test of coke breeze, the centrifugal rolling type pelletizer can not only granulate fine coke breeze but also penetrate ultra fine coke particles into a coarser coke, while preventing the granulated particles from becoming excessively coarse.

(2) In the pot test and the sinter plant test, it was clarified that granulated coke breeze becomes the nucleus in quasi-particles of raw mix and then promotes the granulation of other raw materials in the sintering process of iron ores.

In addition, this new technology was confirmed to be able to decrease the NO_x emission by reducing the fine portion in coke breeze. The addition of quick lime reduces the NO_x emissions further. It was also clarified that the reducibility of sinter was improved.

Key words : agglomeration ; granulation ; iron ore sinter ; coke breeze ; sintering process.

1. 緒言

焼結プロセスの熱源である粉コークスについて、焼結性に及ぼす粒度分布の重要性はこれまで数多くの指摘がある。粉コークスの燃焼は、生産率や成品歩留、焼結鉱品質のみならず窒素酸化物 (NO_x) 生成量にも影響する重要な要因である。

焼結用粉コークスの最適粒度分布は、微粉も粗粒も少ない「0.25～3 mm」と多く報告されている¹⁾。実操業においてはコークス破碎整粒プラントの閉回路化、過粉碎抑制などのハード対策が実施されてきた。しかし、破碎方法の改善のみでは、0.25mm以下を少なくすれば3 mm以上が多くなり、3 mm以上を少なくすれば0.25mm以下が多くなる欠点があった。

通常、焼結ラインで使用されているドラムミキサーやディスクペレタイザーによる転動式の造粒では、微粉が核粒子に雪ダルマ状に付着して造粒物の粒度分布幅が広くなり、粗粒化する問題がある。フルード数を高めて遠心力を増し、

造粒機の円筒等との摩擦により整粒化する方法²⁾³⁾が報告されており、粗粒化を防止する方法として有効と考える。

この考えに基づき、まず数学モデル解析で粉コークス粒度の意義を検討し、そして次にフルード数がドラムミキサーやディスクペレタイザーの 10^2 倍以上レベルの遠心転動造粒機の粉コークス造粒への適用を試み、鍋試験ならびに実機試験で検討した。

2. 従来の研究

コークス粒度の評価については、これまで多くの研究報告がある。Yu.S.Karabasov⁴⁾は1～2 mmのコークス粒度が最も燃焼速度が速く、A.G.Mikhalevich⁵⁾は1.6～2.5mmが最も焼結速度が速く、層内最高温度が高くなるとしている。C.S.Loo⁶⁾は、1～2 mmのコークスが焼結ベッドの通気性を最も良くし、0.25mm以下の粉コークスは排ガスのCO₂/(CO+CO₂)[η_{co}]を低下させ、生産率も低下させると報告している。擬似粒子の解析で、C.S.Teo⁷⁾は0.25mm以下の

平成6年7月15日受付 平成6年10月14日受理 (Received on July 15, 1994; Accepted on Oct. 14, 1994)

* 新日本製鉄(株)プロセス技術研究所 (Process Technology Research Laboratories, Nippon Steel Corp., 20-1 Shintomi Futtsu 293)

* 2 新日本製鉄(株)名古屋技術研究部 (Nagoya R&D Lab., Nippon Steel Corp.)

* 3 新日本製鉄(株)名古屋製鉄所 (Nagoya Works, Nippon Steel Corp.)

微粉コークスは擬似粒子付着粉に入り込むが³, 0.25~1 mmは擬似粒子表面に付着し, 1 mm以上は単独に存在しやすいと指摘している。粉コークス造粒の実用化技術は, ディスクペレタイザーによる方法⁸⁾などがある。

3. 層内温度分布におけるコークス粒度の意義

3.1 層内温度分布の数学モデル解析

実際の焼結ベッドでは, 破碎工程で発生する各種粒径のコークスが混合して使用されている。ここでは最も基本的構成としての単一コークス粒度から成り, かつ吸引風量が一定という理想系を設定し, 次の数学モデル解析⁹⁾¹⁰⁾を行う。

3.1.1 水分凝縮および乾燥領域

ガスおよび固体側のエンタルピー収支:

$$G\{C_g + C_h \cdot W_g\} \cdot (\delta T_g / \delta X) + S_e \cdot h_c (T_g - T_s) - R_w^* \cdot C_h \cdot T_g = 0 \quad (1)$$

$$(1 - \epsilon) \rho_s (C_s + C_w \cdot W_s) \cdot (\delta T_s / \delta \tau) = S_e \cdot h_c (T_g - T_s) + R_w^* (\lambda_w - C_w \cdot T_s) \quad (2)$$

ガスおよび固体側の水分に関する物質収支:

$$-G \cdot (\delta W_g / \delta X) = R_w^* \quad (3)$$

$$(1 - \epsilon) \rho_s \cdot W_s \cdot (\delta W_s / \delta \tau) = R_w^* \quad (4)$$

水分の恒率および減率乾燥過程に関する速度式:

$$R_w^* = S_e \cdot h_c (T_g - T_s) / \lambda_w \quad (5)$$

$$R_w^* = S_e \cdot h_c (T_g - T_s) / \lambda_w \times (W_s - W_e) / (W_c - W_e) \quad (6)$$

水分の凝縮過程に関する速度式:

$$R_w^* = G \cdot (\delta W_g / \delta T_g) \cdot (\delta T_g / \delta X) \quad (7)$$

3.1.2 昇温過程, 反応および溶融・凝固過程

ガスおよび固体側のエンタルピー収支:

$$-\delta(G \cdot C_g \cdot T_g) / \delta X = S_e \cdot h_c (T_g - T_s) \quad (8)$$

$$(1 - \epsilon) \rho_s \cdot \delta(C_s T_s + H) / \delta \tau = S_e \cdot h_c (T_g - T_s) + \Delta H_c \cdot R_c^* - \Delta H_e \cdot R_e^* \quad (9)$$

ガス側連続の式:

$$-\delta G / \delta X + M_c \cdot R_c^* / \rho_c + M_e \cdot R_e^* / \rho_e = \epsilon \cdot (\delta \rho_g / \delta \tau) \quad (10)$$

ガス中の酸素, 炭酸ガスに関する収支:

$$-\delta(G \cdot C_{O_2} / \rho_g) / \delta X - R_c^* / \rho_c = \epsilon \cdot (\delta C_{O_2} / \delta \tau) \quad (11)$$

$$-\delta(G \cdot C_{CO_2} / \rho_g) / \delta X + R_c^* + R_e^* = \epsilon \cdot (\delta C_{CO_2} / \delta \tau) \quad (12)$$

コークス・石灰石粒子に関する物質収支:

$$\rho_c \cdot 4\pi \cdot r_c^2 \cdot (\delta r_c / \delta \tau) = -M_c \cdot R_c^* \quad (13)$$

$$\rho_e \cdot 4\pi \cdot r_e^2 \cdot (\delta r_e / \delta \tau) = -M_e \cdot R_e^* \quad (14)$$

コークス・石灰石各粒子当りの反応速度:

$$r_c^* = 4\pi \cdot r_c^2 \cdot k_c \cdot C_{O_2} \quad (15)$$

$$r_e^* = 4\pi \cdot r_e^2 \cdot k_e \cdot (C_{CO_2}^* - C_{CO_2}) \quad (16)$$

鉄鉱石の溶融・凝固過程:

$$-\delta H / \delta \tau = H_{m0} \cdot (\delta T_s / \delta \tau) / (T_{m1} - T_{m2}) \quad (17)$$

3.2 層内温度分布特性値への影響

ここで層内温度分布の挙動特性を比較するために, コークス粒径を各種変化させて, 層内温度分布の変化に及ぼす大きな傾向を予測する観点から, 以下の各項目の挙動について調べる。

(1) 層内温度分布の温度最高点の移動速度

(2) 昇温過程での代表点 (ここでは1273K)の移動速度

(3) 冷却過程での代表点 (ここでは1273K)の移動速度

その理論計算結果をFig. 1に示す。これより, コークス粒径が細くなるほど燃焼が速くなり, 移動速度は大きくなる。一方粗粒ほど反応終了に時間がかかるようになり, 原料の溶融過程と重なり反応阻害が生ずる結果, 温度分布の後半での昇温が抑制される。そしてFig. 2から層内最高温度をも大きくするようなコークス粒径が存在することが判明す

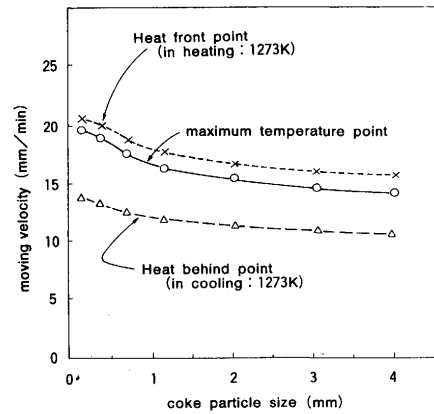


Fig. 1. Penetrating velocity of heat wave in the sintering bed.

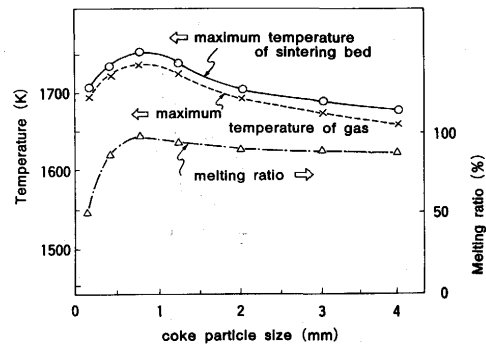


Fig. 2. Maximum temperature of heat wave in the sintering bed.

る。また、コークス粒径を細粒化することで、昇温が早くなり、熱の層厚方向への拡がり(つまりFig. 1にみられるようにHeat front pointとHeat behind pointの間の距離が拡がっている)が生ずることに起因して、最高温度の低下と原料溶融率の減少が認められる。したがって層内最高温度値と原料の溶融率の2つの観点からみると、コークス粒度には適正な値があって、それは0.5~1.5mmの範囲にあると推定される。

4. 遠心転動造粒試験結果

層内温度分布の数学モデル解析で、0.5~1.5mmの粉コークスが層内最高温度と原料の溶融率の2つの観点から最適である結果をえたので、0.5mm以下の微粉を造粒して0.5mm以上の粒度を増加させることを考え、遠心転動造粒機による粉コークス造粒を検討した。

4.1 遠心転動造粒機の採用

焼結プロセスで使用されてきた造粒機は、ドラムミキサーとディスクペレタイザーが中心であり、一部でアイリッヒミキサーが使用されている¹¹⁾。しかし、これらの造粒法では、すでに述べたように粗粒部分の制御に難点が残るのが現状である。

医薬品や食品業界で使用されている遠心転動造粒機〔マルメライザー²⁾：フルード数はドラムミキサーやディスクペレタイザーの10²倍以上で、直径1mφ(50l/バッチ)以下の大きが多い)を粉コークスの造粒試験機として採用した。遠心転動造粒機は回転する円盤と固定の側壁で構成されており、渦流運動(粒の自転と層の公転)が全外周で繰り返され、強固で粒度分布の狭い造粒物を造ることができる²⁾。

4.2 造粒試験結果

鍋試験ではFig. 3に示す600mmφの遠心転動造粒機を使用し、回転速度は周速度9.4m/s(予備試験で最適値を確認)になるように300r.p.m.とした。

処理量や造粒時間、添加水分、バインダー(生石灰)添加量等は種々変化させて最適値を把握した。造粒は間欠、連続排出の2水準とした。実機試験は、1000mmφの遠心転

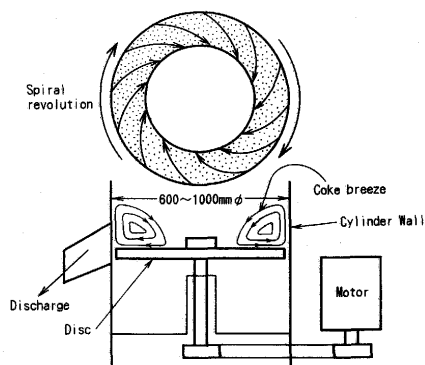


Fig. 3. Schematic diagram of centrifugal rolling type pelletizer.

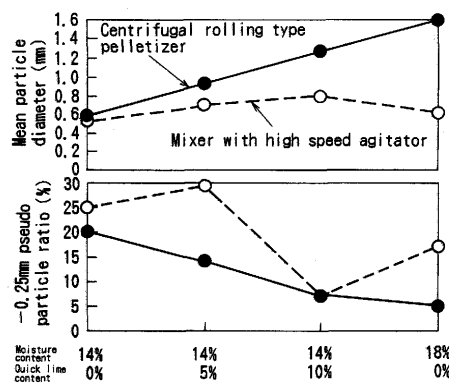


Fig. 4. Granulation test results for comparison of a centrifugal rolling type pelletizer with a mixer with high speed agitator.

動造粒機を使用し、連続排出式で造粒した。造粒物の粒度分布評価は、水分を1%まで乾燥した後、振動篩で5分間篩い分けて測定する方法で調べた。

Fig. 4に微粉コークス(0.5mm以下)を使用した造粒試験結果をアイリッヒミキサーと比較して示す。遠心転動造粒機の方が、造粒物の微粉部分が減少し、微粉同士の造粒物が大きくなる傾向を得た。生石灰添加は造粒性をさらに向上させた。

5. 実験結果および考察

5.1 焼結鍋試験方法と試験結果

5.1.1 焼結鍋試験装置

通常の焼結鍋試験装置(内径300mm, 高さ365mm, 負圧10.8kPa, サンドシール法¹²⁾)を使用した。原料の装入量は約35kgで、床敷鉄の厚さは20mmとした。配合原料(平均粒度約2.2mm)の造粒はコンクリートミキサー(内径580mmφ, 30r.p.m.×3min.)で行い(造粒後水分約6.3%), 粉コークス(C: 84mass%, N: 1.2mass%)の造粒は第4章で説明した遠心転動造粒機で行った。排ガス中のCO₂, CO, O₂および窒素酸化物の変化は赤外線分析計等で測定した。なお、ここでの窒素酸化物はNOである。

成品歩留は2mの高さから5回落下させたのち5mm以上を成品量として、全焼成量から床敷量を引き算した値で割り算し求めた。Tumble indexは、試料(50~25mmが11.5kg, 25~10mmが11.5kg)を24r.p.m.で200回転させたのち、10mm以上の割合を計算し求めた。RDIは製鉄部会法で測定した。

5.1.2 焼結鍋試験結果

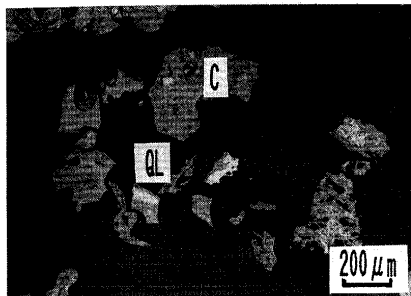
(1) 微粉コークス(1mm以下)造粒

粉コークスの粒度割合は1mm以下が100%の場合と、3~1mmが40%, 1mm以下が60%の割合の2種類の試験を行い、1mm以下のみを造粒した。粉コークス配合比は3.7mass%とした。遠心転動造粒機(600mmφ)の造粒条件は、バッチ式で回転数300r.p.m., 造粒時間120sとし、水分添加

と、水分と生石灰を同時に添加する2種類の造粒を行った(配合原料中の生石灰配合は一定)。

Fig. 5に微粉コークス造粒の顕微鏡観察結果を示す。造粒物は完全乾燥後も生石灰を中心に付着していた。

Fig. 6に微粉コークス(1mm以下)100%使用時の焼結過程における燃焼挙動の一例、Fig. 7に微粉コークス造粒物を粉コークス全体の60%使用した時の鍋試験結果を示す。微粉コークス造粒物を使用した場合、焼結過程前半のコークス燃焼速度が増加するのが特徴であった。鍋試験では、焼結時間の短縮、鍋歩留の向上、RDIの改善、NO原単位の



C: Coke breeze QL: Quick lime

Fig. 5. Micrograph of coke breeze granulated by centrifugal rolling type pelletizer.

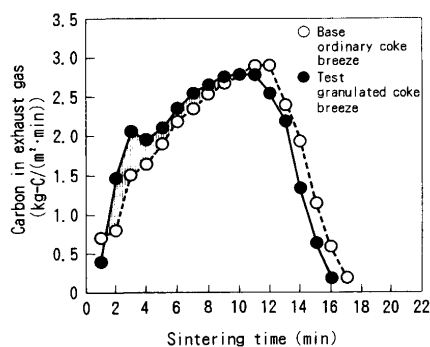


Fig. 6. Changes in carbon amount of exhaust gas in sintering pot test.

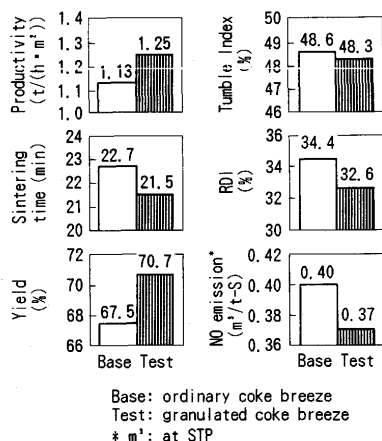


Fig. 7. Comparison of sintering pot test between ordinary and granulated coke breeze (Coke breeze size: under 1mm before granulation).

低減などが確認された。生石灰添加増でNO原単位がより低減される傾向も確認した。

(2) 粉コークス (5mm以下) 造粒

実機試験を想定して燃料配合比は、粉コークス造粒物を2.8mass%、無煙炭を1.2mass%とした。遠心転動造粒機(1000mmφ)の造粒条件は回転数200r.p.m.、造粒時間約10sとし、5mm以下の粉コークスを連続排出式で造粒した。粉コークス造粒物は微粉部分(-1mm)が減少し、粗大部分(+5mm)はほとんど増加しなかった。

鍋試験結果では、①生産率6%向上②成品歩留1.9%向上③ η_{co} 1.6%向上④NO原単位10%低減等の改善効果がみられた。

5・2 実機試験方法と試験結果

5・2・1 実機試験方法

実機焼結機(196m²)の粉コークス破碎プラントの最終コンベヤーに1000mmφの遠心転動造粒機を接続して設置した。そのパイロットプラントのフローをFig. 8に示す。粉コークスの一部を抜き出し、5mm以上を除いた後、5mm以下を連続排出式で造粒した(5t/h, 200r.p.m.、造粒時間約10s)。造粒物は粉コークス輸送コンベヤーに戻し、通常のコークスに混ぜ、燃料(「粉コークス+無煙炭」)中30%程度の配合比率で使用した。設備制約から無煙炭との混合造粒は実施しなかった。造粒粉コークスを燃料中約70%使用する試験では、造粒物をヤードに数週間備蓄したのち、粉コークス受入れホッパーから再搬入した。

5・2・2 実機試験結果

燃料中造粒比率約30%の前提で、「水分+生石灰」添加造粒試験を実施した。造粒後の粉コークスは0.5mm以下が約15mass%低下(35%が20%へ)し、5mm以上は造粒前と変わらなかった。3回実施した工場実験の結果は①NO_x(O₂15%)6~20ppm減②成品歩留1.5%増③ η_{co} 1%増の効果であった。擬似粒子も、Table 1に示すように焼結ベッドの上層から下層までの全層で、焼結原料擬似粒化度を表すGI指数¹³⁾が15~30%向上する結果をえた。

この結果については、粉コークスの配合比は数mass%であるが、かさ比重が鉄鉱石の1/5程度であるので体積比率に換算すると十数vol%になるため、粉コークス造粒の焼結原料擬似粒化への影響は大きいと推定した。

燃料中造粒比率約70%の試験では、備蓄した造粒品を通

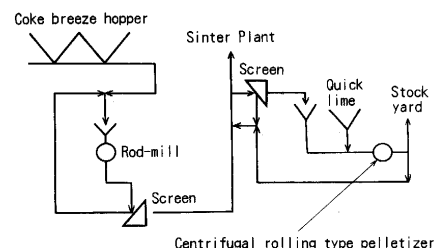


Fig. 8. Experimental apparatus at Nagoya No.2 Sinter Plant.

Table 1. Improvement in granulation of quasi-particles in the sintering bed by use of new method.

Sampling position	GI (%)		Improvement in GI (%)
	Ordinary method	New method	
0~ 50mm from bed top	31	54	+23
50~100mm	59	92	+33
100~150mm	76	98	+22
150~200mm	79	94	+15
200~300mm	80	99	+19
300~400mm	79	100	+21

Granulation index (GI) = $\{(A_1 - B_1) / A_1 + (A_2 - B_2) / A_2\} \times 100$
 True particles : A₁ (0.5-0.25mm), A₂ (0.25mm以下)
 Quasi-particles : B₁ (0.5-0.25mm), B₂ (0.25mm以下)
 Bed height : 500mm including hearth layer

常の粉コークス全量と置換した。Table 2 に実験結果のまとめを示す。ベースから粉コークス造粒物使用の試験に入ると、NO_x (O₂15%) がすぐに10ppm以上低下した。同時に焼結鉄FeOがやや低下した。Tumble indexとRDIに大きな変化は見られなかったが、JIS-RIは約2%向上した。成品歩留はほぼ一定であった。焼結ベッドの通気性の改善により、コークス燃焼速度が増加してNO_xが低下し、焼結層の高温保持時間も減少¹³⁾してFeOが低下すると推定した。JIS-RI向上はFeO低下の効果が大いと考えられる。

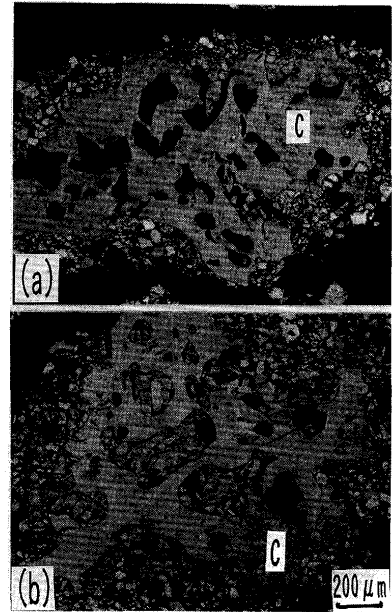
Fig. 9 にベースと粉コークス造粒時の配合原料の擬似粒子観察結果を示す。配合原料擬似粒子は、燃結機サージホッパーのドラムフィーダー出口から採取した。ベースの粉コークスには鉱石が付着し、微粉コークスの付着は認められなかった。一方、粉コークス造粒では、擬似粒子の核になっている粉コークスの内部にまで微粉コークスが付着していた。微粉コークス同士の付着物も、数は少ないが擬似粒子の核になっていた。

焼結組織は、ベースの①「マグネタイト+柱状カルシウムフェライト+スラグ」の共存組織が多い②気孔周辺のヘマタイトが少ない、の特徴に対して、粉コークス造粒は①「マグネタイト+微細カルシウムフェライト+スラグ」の共存組織(ただしスラグ量は少ない)が多い②気孔周辺にヘマタイトが目立つ、が特徴であった。JIS-RIが約2%

Table 2. Sintering performance at Nagoya No.2 Sinter Plant.

	Base	Test
Period (h)	24	10
Productivity (t/(h·m ²))	1.43	1.45
Yield (mass%)	79.3	78.6
Coke content in raw mix (mass%)	2.86	2.86
FeO in sinter (mass%)	6.29	5.76
SiO ₂ in sinter (mass%)	5.45	5.51
Tumble index (%)	71.9	71.6
RDI (%)	29.7	30.4
JIS-RI (%)	66.1	67.7
NO _x (O ₂ 15%) (ppm)	170	158

Base : ordinary coke breeze, Test : granulated coke breeze



C : Coke breeze
 (a) The nucleus of quasi-particle is a coarse coke particle (Base)
 (b) The nucleus particle is an agglomerate of coarse and fine coke breeze (Test)

Fig. 9. Microstructure of quasi-particles of raw mix.

向上した理由として、カルシウムフェライトの微細化とヘマタイト増の効果が大いと考えられる¹⁴⁾。

5.3 造粒機フルード数の比較

ドラムミキサー、ディスクペレタイザー、アイリッヒミキサー、遠心転動造粒機のフルード数¹⁵⁾((18)式より計算)をTable 3 に示す。

$$Fr = D(N/60)^2 / g \dots\dots\dots (18)$$

ここで、

Fr : フルード数(-)

D : 回転体直径 (m)

N : 回転数 (r.p.m.)

g : 重力加速度 (=9.8m·s⁻²)

遠心転動造粒機のフルード数はドラムミキサー、ディスクペレタイザーの10²倍以上あり、重力の数倍の遠心力により造粒していると評価できる。このため粗粒に微粉を付着させても、揉まれ効果により粗粒化を防止できると考える。なおアイリッヒミキサーは、攪拌羽根のフルード数は高い

Table 3. Representative Froude number used in the operation of granulating machine.

	Drum, Disc	Agitator
Drum mixer	$6 \times (10/60)^2 / 9.8 = 1.7 \times 10^{-2}$	—
Disc pelletizer	$6 \times (20/60)^2 / 9.8 = 3.4 \times 10^{-2}$	—
Mixer with high speed agitator	$3 \times (40/60)^2 / 9.8 = 13.6 \times 10^{-2}$	$1 \times (500/60)^2 / 9.8 = 7.1$
Centrifugal rolling type pelletizer	$2 \times (200/60)^2 / 9.8 = 2.3$	—

が、回転パンのフルード数はドラムミキサーやディスクペレタイザーの5倍程度である。

5・4 粉コークス造粒の焼結原料擬似粒化性に及ぼす効果

粉コークスを焼結原料の付着粉にすると擬似粒化性を悪化させるが、焼結原料の核にすると擬似粒化性は向上するといわれている¹⁶⁾。付着粉中に異質な粉コークスが混じると焼結原料の造粒性が悪化することは十分考えられる。したがって、微粉コークスを粗粒コークス内部等に付着させて(Fig. 9), 擬似粒子付着粉に巻き込まれる微粉コークスを減らすことは、Table 1 に示したように焼結原料の擬似粒化性向上に寄与することになると考えられる。

5・5 コークス燃焼速度、NO_x生成抑制に及ぼす造粒コークスの効果

粉コークス造粒によりコークス燃焼速度が増加する理由として、焼結原料の擬似粒化性改善があげられる。焼結ベッドの通気性が向上するので、コークス表面の酸素濃度増加によりコークス燃焼速度が増加したと推定する。

コークス燃焼速度が増加すると、コークス表面温度が上昇して酸素の消費が増し、高CO/O₂雰囲気コークス表面にできてNO_x生成が抑制される¹⁷⁾。3章の数学モデルによる検討でも、0.5~1.5mmのコークス粒度は層内最高温度が最も上昇した。粉コークス造粒により上記粒径が増えて、コークス表面の温度が上昇したことは十分考えられる。

Fig. 9の擬似粒子は、造粒コークスの周りに鉄鉱石が付着している。呉ら¹⁸⁾の提案する、NO_x除去効果のある擬似粒子形態(核コークスにCaO-Fe₂O₃系組成の物質が付着)に近い。酸化鉄がコークス燃焼時に触媒作用として働き、NO_x生成を抑制していることも予測されるが¹⁸⁾、本研究では明らかにできなかった。粉コークス造粒時に添加するCaO量が増加するとNO_x生成がより抑制されるのは、造粒度向上による微粉コークス低減効果と考える。

6. 結言

焼結プロセスで使用する粉コークスの微粉を減らすことを目的として、フルード数がドラムミキサーの10²倍以上レベルの遠心転動造粒機を用いて実験を行い、そして次に粉コークス造粒物の焼結操作、焼結原料擬似粒化性、焼結鉱品質などに及ぼす影響を数学モデル、鍋試験、実機試験で検討し、以下の結論をえた。

1) 数学モデルによる焼結層内最高温度と原料の溶融率の解析では、コークス粒度の適正值は0.5~1.5mmの範囲にあると推定される。

2) 遠心転動造粒機で粉コークスを造粒すれば、粗粒の表

面への微粉付着を抑制しながら、微粉同士や微粉を粗粒内部等に付着させることが可能である。

3) 粉コークス造粒物は擬似粒子の核になり、焼結原料全体の擬似粒化性を改善する。生石灰をバインダーにして造粒した粉コークスは、実機プロセスでも、ドラムミキサー内の焼結原料との転動時に崩壊しない強度を有している。

4) コークス微粉部分の減少で、コークス燃焼速度が増加しNO_x生成が抑制される。焼結鉱被還元性も改善される。

記号

C_{CO2}, C_{CO2*}, C_{O2}: 炭酸ガス, 平衡, 酸素濃度 (mol/m³)
 C_g, C_h: ガス比熱, 水蒸気比熱 (J/kg・K)
 C_s, C_w: 固体比熱, 水分比熱 (J/kg・K)
 G, h_c: 質量速度 (kg/m²・min), 伝熱係数 (J/m²・min・K)
 H, H_{mo}: 溶融変数, 固体融解熱 (J/kg)
 ΔH_c, ΔH_e: コークス, 石灰石反応熱 (J/mol)
 k_c, k_e: コークス, 石灰石総括反応速度定数 (m/min)
 M_c, M_e: 炭素, 石灰石分子量 (kg/mol)
 R_{c*}, R_{e*}: コークス, 石灰石反応速度 (kg/min・m³)
 r_c, r_e: コークス, 石灰石の粒子径 (m)
 S_e, T_g, T_s: 伝熱面積 (m²/m³), ガス, 層温度 (K)
 T_{m1}, T_{m2}: 溶融開始温度, 溶融終了温度 (K)
 W_c, W_e, W_g, W_s: 限界, 平衡, ガス湿度, 含水率 (kg/kg)
 X, ε: 層頂よりの距離 (m), 層空間率 (-)
 λ_w, τ: 蒸発潜熱 (J/kg), 経過時間 (min)
 ρ_c, ρ_e: コークス, 石灰石の密度 (kg/m³)
 ρ_g, ρ_s: ガス密度, 固体密度 (kg/m³)

文 献

- 1) 例えば, 第3版鉄鋼便覧II (日本鉄鋼協会編), (1979), p.115 [丸善]
- 2) 造粒ハンドブック (日本粉体工業技術協会編), (1991), p.166 [オーム社]
- 3) 工場操作シリーズ (増補造粒編), (1983), p.114 [(株)化学工業社]
- 4) Yu.S.Karabasov, E.M.Voropaev and V.S.Valavin: Izvestiya VUZ Chemaya Metallurgiya, (1976)5, p.21
- 5) A.G.Mikhalevich, V.G.Voskoboinikov, S.B.Ten and B.M.Boranbaev *et al.*: Stal', (1980), p.357
- 6) C.E.Loo: Ironmaking and Steelmaking, 18 (1991), p.33
- 7) C.S.Teo, R.A.Mikka and C.E.Loo: ISIJ International, 32 (1992), p.1047
- 8) 阿蘇辰二, 田村信一, 佐藤勝彦, 吉田 均, 吉村 尚, 奈須野孝洋: 製鉄研究, 338 (1990), p.15
- 9) 鞭 巖, 樋口充蔵: 鉄と鋼, 56 (1970), p.371
- 10) 和島正巳, 細谷陽三, 柴田充蔵, 相馬英明, 田代 清: 鉄と鋼, 68 (1982), p.1719
- 11) 高田耕三, 高良正昭, 川口尊三, 横井 毅: 鉄と鋼, 73 (1987), p.S65, p.S769
- 12) 相馬英明, 和島正巳, 細谷陽三, 田代 清: 鉄と鋼, 68 (1982), p.2200
- 13) 古井健夫, 川頭正彦, 菅原欣一, 藤原利之, 香川正浩, 沢村 惇, 宇野成紀: 製鉄研究, 288 (1976), p.9
- 14) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 70 (1984), p.504
- 15) 鈴木 悟, 佐藤勝彦, 藤本政美: 鉄と鋼, 73 (1987), p.1932
- 16) 佐藤勝彦: 浮選, 28 (1981), p.99
- 17) 肥田行博, 佐々木稔, 伊藤 薫: 鉄と鋼, 66 (1980), p.1801
- 18) 呉 勝利, 杉山 健, 森岡耕一, 葛西栄輝, 大森康男: 鉄と鋼, 80 (1994), p.276