

シュート式装入における焼結機内原料充填特性とその焼結反応への影響

稲角忠弘*・藤本政美*²・笠間俊次*²・佐藤勝彦*

Characteristic of Raw Mix Packed Structure on Sinter Strand with Chute Type Feeder and Its Effect on the Sintering Reaction

Tadahiro INAZUMI, Masami FUJIMOTO, Shunji KASAMA and Katsuhiko SATO

Synopsis :

Details of raw mix packed structure with current chute feeder and their effect on sintering reaction were analyzed. The chute feeding method cannot avoid the problem of avalanches, which makes it difficult to enlarge and control the degree of grain size segregation in the bed height by making simultaneously the sandwich-like structure of fine and coarse particles. The larger the raw mix feed, the larger the avalanches and the disturbance of sintering reaction. Enlargement of continuous material grain size segregation in the bed height without sandwich structure is effective in improving both yield and productivity by homogenizing sintering in the sinter bed.

Key words : sintering; chute feeder; size segregation; permeability; product yield.

1. 緒 言

焼結体の構造は、その原料の充填構造特に粒度偏析に強く左右される。従来、空気下方吸引式焼結法の特徴である焼結ベッド表層の加熱不足部へ熱源カーボンを濃集させる目的で表層へ細粒を集積させる研究が盛んに行われた^{1)~4)}が、表層以外の焼結ベッド全層にわたる粒度偏析状態についての研究は少ない。本研究では、装入シミュレーションと X 線断層撮影装置 (CT: Computed Tomography) による新解析技術^{5)~6)}を用い、シュート装入法で形成される充填層の全層にわたる構造解析を行い、併せてその構造の焼結反応への影響を検討したので報告する。

2. シュート式装入のシミュレーション実験

2.1 実験方法

高さ方向は実機寸大、幅は 300 mm の装入シミュレーター (Fig. 1) で、原料供給速度 (t/h/m) および装入装置の設備諸仕様を実験要因として装入実験を行った (Fig. 2)。原料は新日本製鉄の標準的な配合原料 (Table 1) を使用し、混合造粒後装入実験に供試した。装入後

の充填構造はサイドウォールを高さ方向に 100 mm 単位で分割し、ベッド高さ方向の断面構造の観察および写真撮影をした後、各層ごとに粒度構成、装入密度を測定し

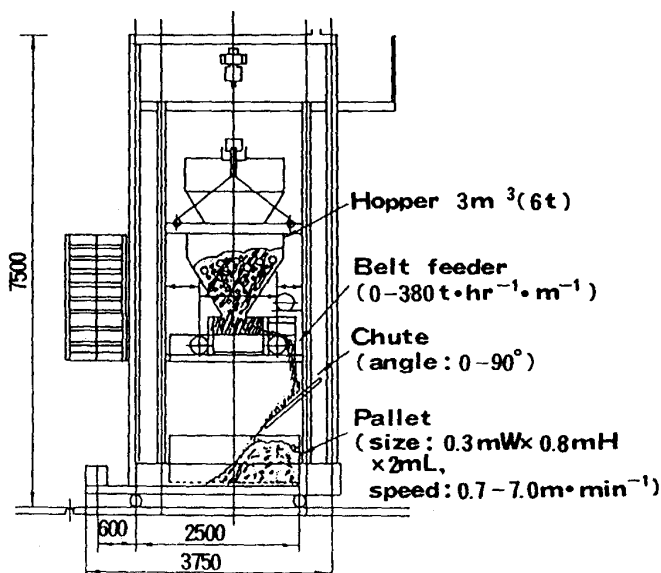


Fig. 1. Schematic of laboratory-scale feeding system.

昭和 62 年 4 月本会講演大会にて発表 平成 2 年 4 月 19 日受付 (Received Apr. 19, 1990)

* 新日本製鉄(株)製鉄研究センター 工博 (Steelmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yahatahigashi-ku Kitakyushu 805)

*² 新日本製鉄(株)製鉄研究センター (Steelmaking Technology Lab., Nippon Steel Corp.)

Table 1. Raw mix used feeding test.

Australia			India	S. Africa	Brazil		Lime-stone	Serpen-tine	Return fines	Total	Coke breeze
Ore A	Ore B	Ore C	Ore D	Ore E	Ore F	Ore G					
5.46%	16.39	16.39	2.72	3.42	16.55	7.35	10.84	0.76	20.11	100	3.5
>5 mm	~3	~2	~1	~0.5	~0.25	~0.125	~0.115	~0.062	<0.062		M. S
19.60%	17.92	6.98	13.16	9.17	6.26	4.44	1.30	2.98	18.19		2.67 mm

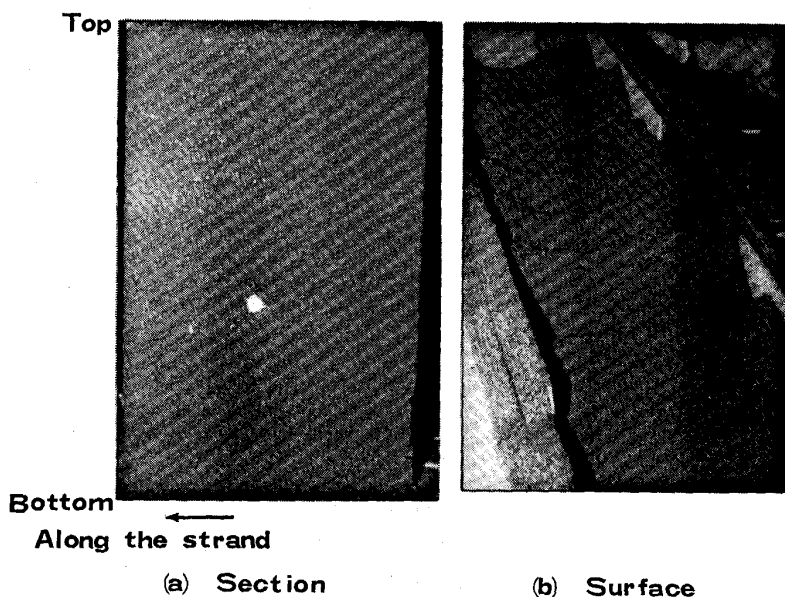


Photo. 1. Vertical section and surface of bed raw mix by chute.

Factor	Level	
	①	②
$F(t \cdot h^{-1} \cdot m^{-1})$	50.0	200.0
$\ell_1 (m)$	0.5	1.8
$\ell_2 (m)$	0.5	1.5
$\ell_3 (m)$	0.1	0.4
$\theta (-)$	45.0	60.0

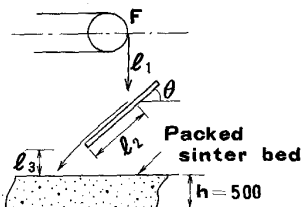


Fig. 2. Experimental conditions of feeding test.

Table 2. Sinter pot test conditions.

Bed height (mm)	Pressure drop (kPa)	Ignition time (s)	Ignition temperature ($^{\circ}C$)
600	12.7	60	1050

た。一方、一部の装入実験では、原料を装入状態のままパラフィンで固定後 CT による充填構造解析を行った。

さらに本シミュレーターで原料を装入したままの状態での焼結試験を実施した。焼結条件を Table 2 に示す。

2.2 実験結果

2.2.1 シュート式原料装入の特徴

シュート式装置による原料装入時には、充填層の傾斜面上でなだれ現象とパーコレーション現象（粉体が流動

する際の粗粒が篩網効果を持つために生じる粒度偏析）とが重なって起こるのが特徴的である。装入完了後の層内粒度構成をサイドウォール面で観察すると、一般にベッド高さ方向に上が細かく下に粗い粒度偏析が形成されるが、なお詳細にみると斜め方向に走る粗粒と細粒とのサンドイッチ構造のような粒度偏析も観察される (Photo. 1)。サンドイッチ構造を CT で解析すると壁側のみならず内部でも形成しており壁側だけの現象でないことが確認された。この試料で 40 mm 角ブロック単位の褐鉄鉱以外の緻密な赤鉄鉱磁鉄鉱系の鉱石の含有率を測定するとベッド高さ方向でなだれに応じたばらつきが現れる (Fig. 3)。ベッド内の粒度偏析構造は従来考えられていた以上に複雑なものと言える。

充填後の層内構造を層平均値として解析した結果、粒度偏析度（最上、最下層 100 mm の平均粒度の差）、装入密度は原料供給速度の影響を最も大きく受けることが判明した。原料供給速度が大きいほど粒度偏析は小さく、装入密度は高くなる (Fig. 4)。原料供給速度に比べて設備条件は、実用設備範囲内の差ではそれほど大きい影響を与えるものはない。粒度偏析度、装入密度の変化は、パーコレーション作用の他に上記のなだれ現象の影響が

含まれていると考えるべきである。

2.2.2 なだれ現象

(1) なだれによる粒度偏析メカニズム

原料装入時の粒子の運動の観察からは、粗粒細粒のサンドイッチ構造はなだれ現象とパーコレイション現象との複合作用により形成されるものと考えられた。Fig. 5 は原料装入時の粒子の運動状態を模式的に示したものである。なだれはほぼ規則的な周期をもって発生する。なだれ直後の緩傾斜面上に新しい堆積層の山が成層的に積み重なることで充填層が形成されるが、堆積中の山の傾斜面上でのパーコレイションにより、山の両裾に粗粒が集まり、山の中心部の頂上に向かうほど細粒になる粒度

偏析が生じる。これが両サイドの粗粒層に細粒層が挟まれる形のサンドイッチ構造が形成される主因と考えられる。そして、山がしだいに積み上がり山の傾斜角度がある値以上に達した時なだれが発生する。なだれ発生では山の途中に滑り面ができ、裾野の粗粒層の上に山の上半部のサンドイッチ構造がかぶさるようにずれ落ちる。これにより最底層にまで細粒層が到達し、同時に新しいサンドイッチ構造のベースが形成される。以上、いずれにしろ、原料の装入中の傾斜面上では常時多少のパーコレイションは起きており、全体的には高さ方向に上に細かく下に粗い粒度偏析が形成される⁴⁾。同時になだれにより層高方向の粒度偏析形成が崩され、乱され、このことがシュート装入での層高方向の粒度偏析の拡大を制約する一因となっていると考えられる。2段装入、スリットバーも最終的にはシュートを介して装入されるので、本質的にこの特徴をまぬがれない。

(2) なだれ発生の原因

次になだれの原因としては次の二つのことが考えられる。第1原因は、まずシュート上を滑動する原料層厚はビデオ写真による判定では 40 mm 以内であり、焼結ベッド上のストランド方向への原料の落下幅も 100 mm 以内に集中して落下する特徴があるので、原料が積み上がりやすく安息角を超える急傾斜が形成されやすいことによる。第2の原因は原料の粘着性にある。たとえ原料が集中落下したとしても着地後の原料の流動性が良

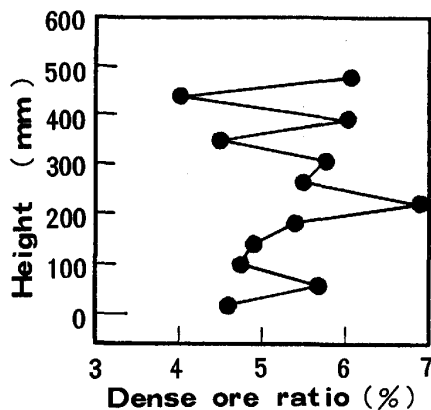


Fig. 3. Dense ore ratio in raw mix bed with CT.

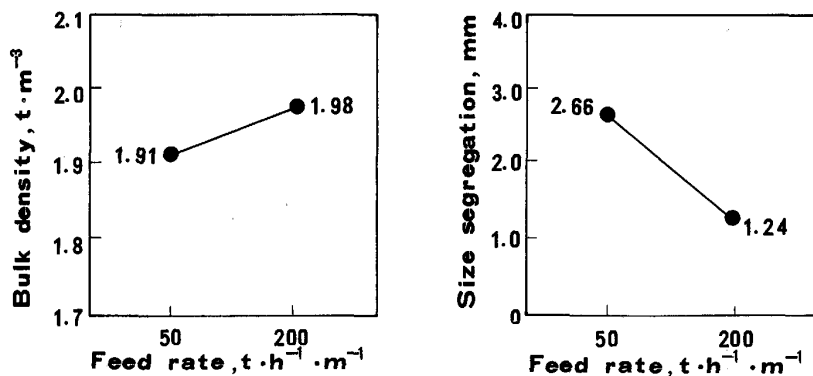


Fig. 4. Relationship among bulk density, size segregation and feed rate (Chute feeder).

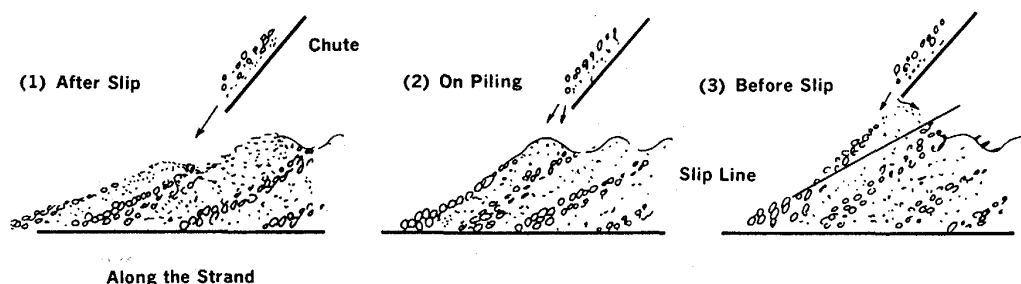


Fig. 5. Schematic of slip phenomenon and size segregation formation.

ければ原料が拡散して積み上がらないのでなだれを起こすことはない。これらの二つが重なってなだれが発生していると考えられる。

(3) 原料装入条件となだれ発生状態

なだれはほぼ周期的に発生するが、なだれの結果、その痕跡として原料充填層の表面に波形が残る (Photo. 1)。波のピッチはおおよそ原料供給速度に比例して大きくなり、なだれの起こり方がより厚い幅でより多量のもので崩れる傾向を示す。なだれの解明は雪、土砂などでは土質力学的な解析が進められており、地表面からある深さのところにかかる重力由来のせん断力が粘着力を上回り、力のバランスを崩した時に発生するとされている。新日本製鉄焼結原料の落下充填時の安息角は約 35° なので、焼結層厚 500 mm と仮定した場合には、約 900 mm 以上に分散落下させ積みつけるならば安息角以下の傾斜になりなだれは起こらないことになる。一方、なだれが発生する条件では高野⁷⁾によれば傾斜面の角度を小さくして積み上げるほどなだれのピッチは大きくなる。傾斜面の角度は原料の単位時間あたりの積み上がり高さ と着地後の流動拡散距離との比で決定されるが、DL 式焼結機では原料供給速度によらず原料の積み上がり速度は変わらず、一方原料の落下幅および落下慣性力は原料供給速度にほぼ比例するので、総合すると原料供給速度の高いほど積み上がりの傾斜面角度が小さくなだれは大きくなる。以上総合すると安息角 35° 以下になる程度に大幅に分散落下させればなだれが解消できるが、安息角を超す急斜面を形成する条件では中途半端に落下幅を広げて原料を分散落下させるとかえってなだれが大きくなることになる。

2・2・3 装入実験試料の焼結性

装入シミュレーターで原料供給速度を 50 t/h/m と 200 t/h/m と変え粒度偏析度と装入密度を変化させた試料の焼結試験結果を Fig. 6 に示す。低供給速度試料では、焼結時間が短く、歩留りがより高い。また排ガス中の CO 濃度も低下した。全体に通気、燃焼が安定し、

焼結体のむら焼けが減少し、焼成がより均一に進んだことを示している。原料供給速度の差の焼結反応に及ぼす影響は大きい。

3. 原料充填構造の焼結性への影響解析

上記鍋焼結結果は原料装入時に形成した原料充填構造の種々の構造的特徴が総合的に現れたものであり、次にそれぞれの構造的特徴の焼結性への影響を分離して解析した。

3・1 粒度偏析とコークス偏析効果

3・1・1 実験目的

ベッド高さ方向の粒度偏析の効果を確認する。同時にコークス偏析を伴う粒度偏析とコークスを一定にした粒度偏析単独の効果を比較し、コークス偏析と粒度偏析の単独効果を分離して解析する。

3・1・2 実験方法

粒度偏析をつけた原料充填層を人工的につくるために混合造粒後の原料を事前にふるい分けた。ふるい分けには、平均粒径が連続的に異なる試料を得る目的で、独自に開発したふるいを用いた。このふるいは、多数のバーを原料流れに沿って平行に並べ、かつ上流から下流にむけて隣接のバー同士を互いに下流に向かうほど段差が大きくなるように設置したことで構成される一種の確率ふるいである (Fig. 7)。分級後の原料を 5 等分して焼結鍋に 5 層に積みつけることで粒度偏析をつけた原料充填構造を形成させた。粒度偏析のみを付ける場合は原料配合時にコークスを添加せずに鉬石類のみにて最初に造粒し分級後粒度ごとに 3.5% 一定のコークスを添加し混合するようにした。歩留りは改善点を明確にするために上下層に分けて測定した。

3・1・3 焼結実験結果

歩留り (+5 mm% 成品比率) は両実験ともに無偏析よりも偏析をつけたほうが高い (Fig. 8)。粒度とコークスの同時偏析の場合は従来報告されているとおりの改善結果が得られたが、本実験ではコークス偏析が無く粒度

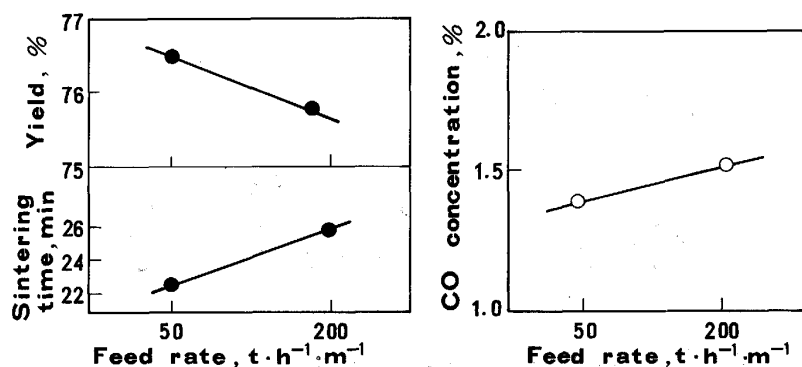


Fig. 6. Change of sinterability of packed raw mix with increasing feed rate.

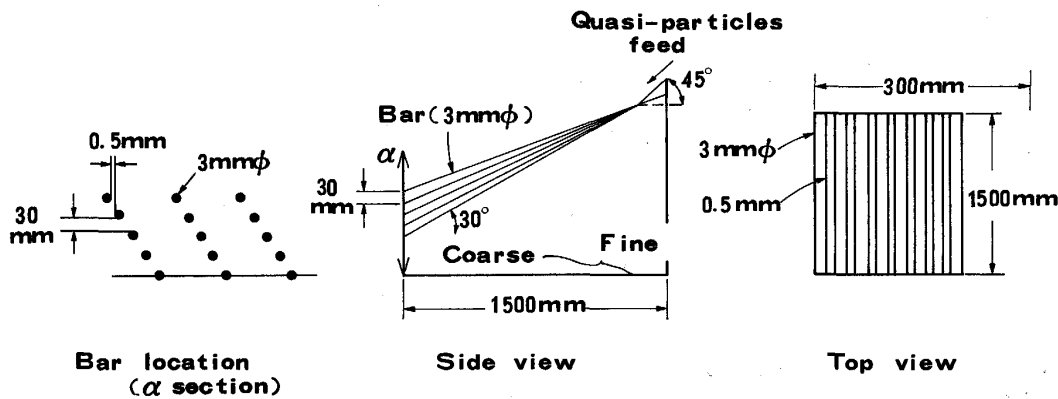


Fig. 7. New devised screen for classification of quasi-particles.

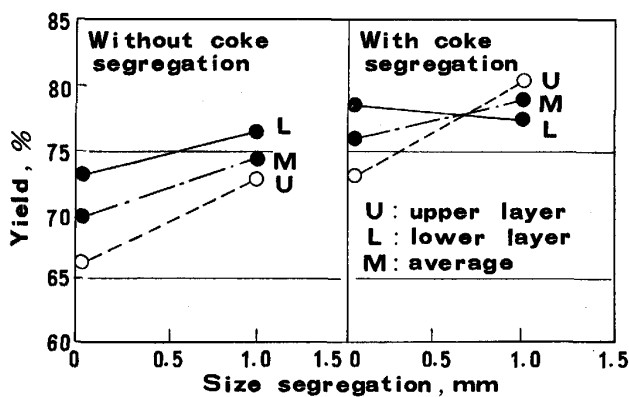


Fig. 8. Relationship between yield and size segregation with or without coke segregation.

偏析のみ付けた場合でも歩留りが改善することが判明した。粒度偏析自体にベッド高さ方向の均一焼成化をもたらす独自の効果が存在するといえる。なお、粒度偏析とコークス偏析とが同時に起こる場合の歩留りと、コークス偏析が無く粒度偏析のみ付けた場合の歩留りではレベル差があるが、これは実験条件としてのコークス配合量差によるもので、偏析効果の評価には影響ないと考えられる。

3.2 だれの焼結反応への影響

3.2.1 実験目的

なだれによる粗粒と細粒のサンドイッチ構造の焼結反応への影響を検討する。

3.2.2 実験方法

粒度偏析実験と同じ原料を用い、同じ分級方法でふるい分けた原料を、Fig. 9 に示す粒度構成になるように焼結鍋に積み付けて焼結試験をした。

3.2.3 実験結果

粗粒細粒のサンドイッチ構造では歩留りは低下する (Fig. 10)。FFS (Flame Front Speed) はレベル的な差はほとんどないが、ばらつきが大きくなり焼成が不安定になったことを示している。粗粒と細粒のサンドイッチ構造は、通気の偏りおよび燃料、鉍石の熔融率の不均一性のために全体に焼成が不均一になったためと考えられる。

3.3 装入密度の焼結反応への影響

3.3.1 実験目的

焼結体の緻密化促進のためには原料の充填密度を高くする方が良い。しかし、一方、鉄鉍石焼結反応では通気によるコークスの燃焼で反応が進行するので通気の安定確保も重要である。このような意味で重要な充填構造指標として装入密度がある。装入密度 (嵩密度) は原料鉍石の真密度に左右されるが、原料配合一定の場合には、装入密度は充填層の空隙率の指標となる。ここでは、空

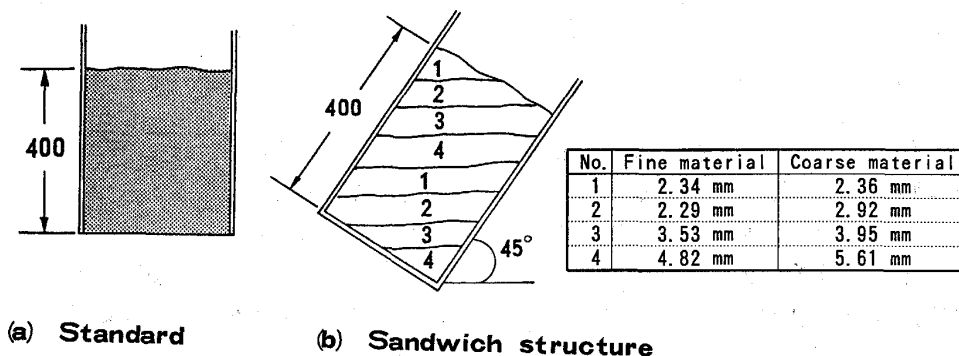


Fig. 9. Methods for feeding raw mix into a sintering pot.

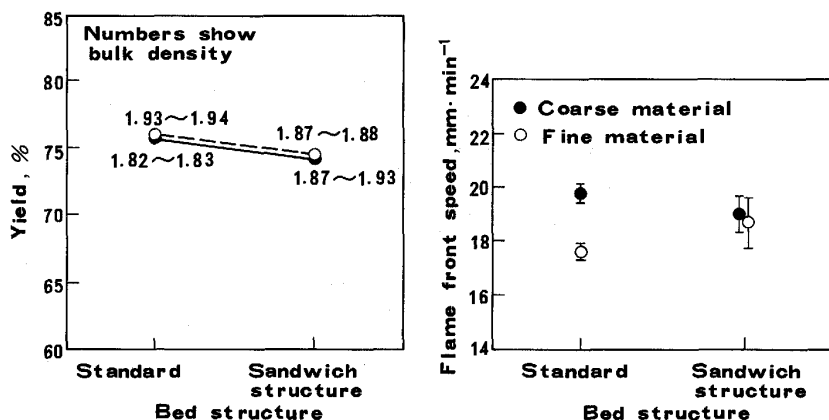


Fig. 10. Effect of sandwich structure on yield and flame front speed.

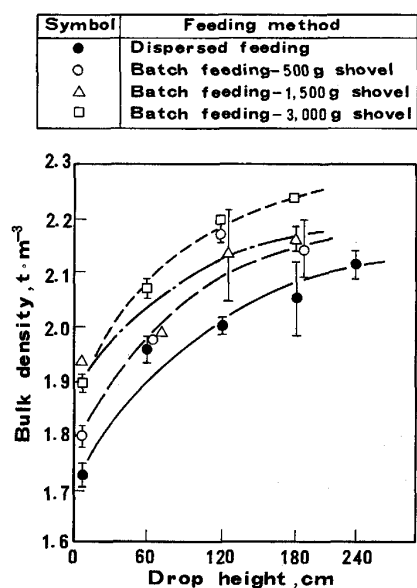


Fig. 11. Effect of feeding methods on bulk density.

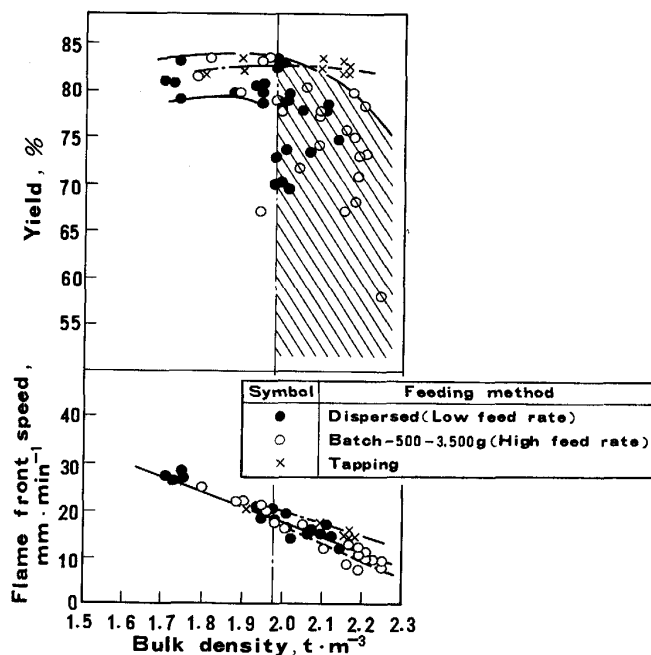


Fig. 12. Effect of bulk density on yield and flame front speed.

隙率の影響の解析をする。

3.3.2 実験方法

装入密度は焼結鍋への装入落下距離および1回の装入操作の供給量単位を変えることにより変化させた。装入落下距離は0, 60, 120, 180, 240 cmの5水準とした。供給量は原料を均一に分散落下させて装入する方法と、小型ショベルで500, 1500, 3000 gを一括して手装入する方法をとった。

3.3.3 実験結果

装入落下距離、供給量単位と装入密度との関係をFig. 11に示す。両実験手段で実機の装入密度の実績範囲をカバーする範囲で変更できた。装入密度は装入落下距離とともに増加し、供給量単位が大きくなるほど高くなる。また、焼結時間は装入密度が高くなるほど長くなり、また歩留りは装入密度が高すぎると低下する (Fig. 12)。本実験結果から鉄鉱石焼結プロセスでは、最終的

には当初の原料の充填密度を高めるよりは密度を下げて通気を確保の方が緻密な焼結体が得られ、焼結が全体として良く進み、歩留りが高くなることを示している。焼結状態を表すヒートパターンからも焼成の不均一度の差が認められた (Fig. 13)。

4. 考 察

以上、原料充填層の三つの構造的特徴はそれぞれに異なる意味で焼結反応に影響を及ぼしていることが判明した。しかし装入で形成される充填層では互いに要因としては交絡しており、粗粒と細粒のサンドイッチ構造の形成は層高方向の粒度偏析度にも影響するし、装入密度にも影響し、また粒度偏析度は装入密度と密接に関連している (Fig. 4)。したがって実機操業ではこれらの影響が

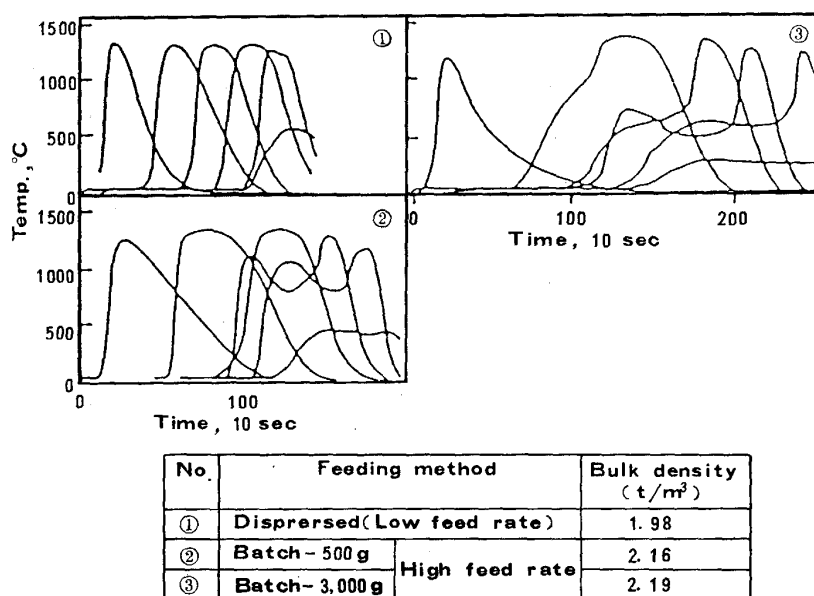


Fig. 13. Heat pattern.

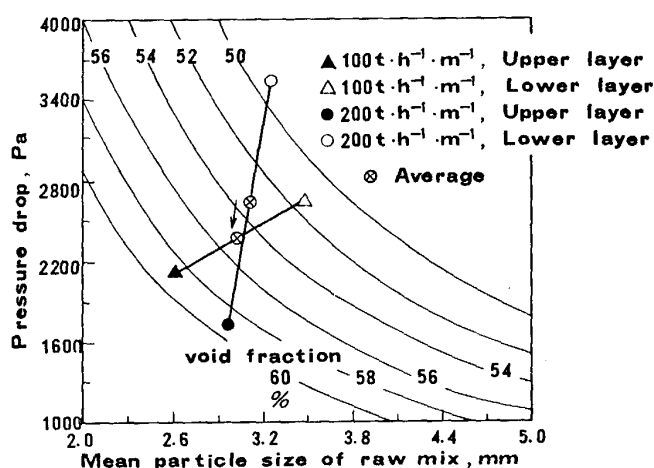


Fig. 14. Difference in pressure drop distribution in raw mix packed bed between two feeding rates (Spatial velocity 0.5 m/s, air).

分離しがたいが、いずれにしろなだれの発生を解消するとともに、焼結ベッド高さ方向の粒度偏析度を高めていくことが、総合的に均一焼成を進め、歩留り・通気をともに改善する方向にあると理解できる。

そこでここでは、ベッド高さ方向の粒度偏析の拡大が重要であることを考慮し、その焼結反応の改善理由について考察した。

はじめに原料充填層の通気性について検討した。原料充填層の圧力損失値の計算結果を Fig. 14 に示す。計算は ERGUN の式⁸⁾ によった。低供給速度の場合は高供給速度にくらべてベッド高さ方向の粒度偏析度が大きくなり、高さ方向の各層の空隙率が増し、全体に圧損値が低下している。特に下層ほど低下幅が大きい。原料通気性

が全体に改善するとともに高さ方向の圧損値分布（すなわち実機では風量分布）も同時に変化した。焼結帯の抵抗も粒度偏析により後述の理由で下層部での改善が大きく、層高方向の粒度偏析は焼結帯を含めて総合的に通気性を改善する方向にある。下層部が通気速度の鉄鉱石焼結プロセス⁹⁾ ではこの分布変化を通して通気が改善したと考えられる。

次に熱的な面でみると、粒度偏析によるヒートパターンの改善は上層と下層の2箇所で行なわれた。上層での改善は、粒度偏析による上層の下層に対する相対的な通気抵抗の増加で上層の焼結空気量を抑制し、コークスの燃焼性が改善したことによると考えられる。すなわち著者の一人が先に報告した⁹⁾ ように、鉄鉱石焼結反応ではコークス着火直後の上層部のコークス燃焼は風量を抑制することで促進されることによる。さらに細粒化による比表面積の増大による着火性の改善も考えられる。下層での改善はヒートパターンの肥大化抑制で、下層の粗粒化による原料通気抵抗の低下および過剰溶融抑制による通気改善とで冷却が促進されたことが原因と考えられる。

以上、上下層がおのおの別の理由で粒度偏析自体がヒートパターンの改善効果をもたらしたと考えられる。なお、粒度偏析に伴うコークス偏析の効果も同方向の改善であり上記効果が倍加される方向で作用していると考えられるが、コークス偏析自体の効果幅は従来考えられているほど^{1)~4)} 大きくない結果が得られ詳細は今後の課題である。

粒度偏析の強化により歩留りが改善したが、ひとつはこれらのヒートパターンの改善によるが、同時に固体の

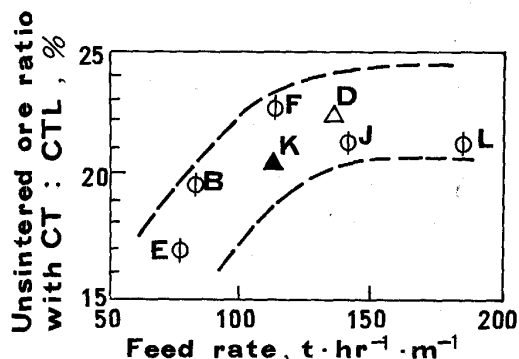


Fig. 15. Influence of feed rate on unsintered ore ratio CTL⁵⁾ of sinter-cake for NSC sintering plants.

着熱性 (比表面積), 熔融性の面からの改善が考えられる。すなわち熱不足状態にある上層部へ, 着熱性・熔融性の良好な細粒を増して熔融率を向上させ焼結を促進させる効果があったことと, 従来過剰熔融傾向にあった下層部の粗粒化による鉱石の着熱性, 熔融率の抑制で過剰熔融焼結による脆弱化およびむら焼けを抑制したことの効果が考えられる。以上, 焼結層内の通気と加熱と熔融を均一に保ちにくい鉄鉱石焼結反応プロセスの特性を考えると, 層高方向の粒度偏析は焼結反応に大きな影響を与える重要要因と理解できる。

一方, なだれは高さ方向の粒度偏析の形成を阻害するのみならず, その構造自体が焼結反応に悪影響を及ぼすことも上記試験で確認した。この構造は通気抵抗の異なる並列層をベッド内に斜めにつくったことになり焼結進行を不均等に進めるほか, さらに粒度の差は C, CaO などの成分, 熔融性の差を伴うのでヒートパターン, 熔融量の差をつくる。不均一焼成を進める反応構造そのものになっていると理解できる。なだれは抑制すべきである。

これら原料充填層構造の制御要因としては原料の供給速度の影響が実際的には大きいことが明らかになった。ちなみに新日本製鉄内の操業解析でも供給速度が高くなるほど歩留りを低下させるシンターケーキ未焼結部比率が増す傾向が見られる (Fig. 15)。原料供給速度は焼結鉱生産率, および焼結ストランド長さに比例し, 焼結生

産の効率化を進めていく上で重要な要因である。特に焼結ストランド長さはほぼ焼結面積に比例するので, 従来大型機ほど歩留りが低い原因が原料の供給速度の影響として考えられる。今後は実験室で明らかになったこれらの結果が実操業でどの程度に影響しているかの確認とともに, なだれを伴わずベッド高さ方向の粒度偏析度を格段に高められる原料装入方式の技術開発を進めていく必要があると考える。

5. 結 言

1) シュート装入方式では層高方向の粒度偏析が形成されるが, 同時に装入時に発生するなだれにより粗粒・細粒のサンドイッチ構造のような粒度偏析構造が形成される。

2) シュート装入方式では原料供給速度が粒度偏析度, 装入密度, なだれ発生規模を大きく左右する重要要因である。

3) これらの原料構造差は層内の粒度構成を通して, ベッド内の通気, 伝熱, ヒートパターン, 熔融量の分布を変化させ, 歩留り, 焼結時間に影響を及ぼす。

4) 焼結機の原料装入では, なだれの発生を抑制し, 焼結ベッド高さ方向の粒度偏析度を高め, 装入密度を低下させていく方向に改善することが効果的である。

文 献

- 1) 石川 泰, 菅原欣一, 野坂庸二, 仙崎武治, 津田勉久: 鉄と鋼, **65** (1979), S518
- 2) 佐々木三千夫, 上川清太, 須賀芳成, 福田 一: 鉄と鋼, **66** (1980), S86
- 3) 福田隆博, 姫田昌孝, 前洪栄一, 吉田 均, 佐々木望, 佐藤 守, 那須野孝洋, 阿蘇辰二, 芳賀良一: 鉄と鋼, **70** (1984), S30
- 4) 中島一磨, 西村博文, 田中 周, 坂谷 宏, 深水勝義: 鉄と鋼, **71** (1985), A185
- 5) T. INAZUMI, S. KASAMA, K. SATO, M. SASAKI and N. TANAKA: Proc. 5th International Symposium on Agglomeration, Brighton England (1989 年 9 月), p. 599
- 6) 笠間俊次, 稲角忠弘, 藤木政美, 佐藤勝彦: 材料とプロセス, **1** (1988), p. 1061
- 7) 高野秀夫: 地すべりと防止工法 (1960), p. 282 [地球出版]
- 8) S. ERGUN: Clem. Eng. Progress, **48** (1952), p. 89
- 9) 稲角忠弘, 富井良和, 北山 順, 齊藤武雄, 古宅英雄, 高松信彦, 中川浩一郎, 松村勤二: 製鉄研究 (1985) 317, p. 59