

## 技術論文

## 返鉱バイパス添加焼結法による生産性向上 (RF-MEBIOS法の開発)

Improvement of Sinter Productivity by Adding Return Fine on Raw Materials after Granulation Stage  
(Development of RF-MEBIOS)

松村 勝\* 山口 泰英 上城 親司  
Masaru MATSUMURA Yasuhide YAMAGUCHI Chikashi KAMIJO

## 抄 録

焼結増産を目的とした焼結層の通気性向上において、乾燥粒子である返鉱を造粒後原料へ添加し焼結機へ供給するプロセスであるRF-MEBIOS (Return Fine - Mosaic Embedding Iron Ore Sintering) が有効である。高生産性要因として、造粒物径上昇と焼結層充填密度低減が挙げられる。前者は装入時水分が一定でも造粒時水分が高められるから、後者は乾燥粒子と湿潤粒子間の摩擦力が高められるからである。焼結鍋試験より、バイパス返鉱比率および粒径の上昇と共に、焼結速度および生産性への効果が大きい。さらに、焼結速度向上は造粒物径上昇が41%、充填密度低減が55%の寄与率と評価された。

## Abstract

In order to increase the permeability of the sintering bed for sinter ore productivity, RF-MEBIOS (Return Fine - Mosaic Embedding Iron Ore Sintering) process, in which return fine as dry particle is added on granulated raw materials and then they are charged into sintering machine, is proposed. This productivity increase is caused by increasing the pseudo-particle size at granulation and by decreasing the bulk density of sinter packed bed after charging. The former is achieved by a higher moisture content in the raw materials at granulation. The latter is achieved by higher friction in the sintering bed composed of dry and wet particles compound, which has a role of decreasing bulk density. Based on sintering pot test, with increasing bypass return fine ratio and size, sintering speed and sinter productivity increased. In addition, the effect of pseudo-particle size and bulk density on flame front speed were evaluated as 55% and 41%, respectively.

## 1. 緒 言

焼結生産性は、焼結原料層通気性と強い相関がある。それは、焼結反応の進行が焼結原料層を流通するガス流速に比例し、ガス流速は通気性に支配されることによる。さらに、高い通気性は、Ergun 式に記述されるように、造粒後の擬似粒子径を高めることで、また焼結原料層の空隙率を高めることで確保される。

実際に、擬似粒子径を高めるミニペレット法<sup>1,2)</sup>では、高通気性が達成されている。そして擬似粒子径を高めるには、分割造粒法<sup>3)</sup>が有効である。分割造粒法とは、焼結原料を2系列以上で造粒する方法であり、これまで多くの実機焼結機で採用されてきたが<sup>4,6)</sup>、原理的には2層構造ペレットの基礎研究<sup>7)</sup>の技術思想に基づく。実用化に際しては、造粒機の基本的な設計条件 (傾斜角や回転速度等)<sup>8)</sup>も併せて

検討された。

他方、焼結原料層通気性を高めるもう一つの因子である高空隙率は、主として給鉱装置開発により達成された。しかしながら、装入時の高空隙率確保に加え、焼結時に高空隙率を維持する必要がある。その対策として生石灰増配合による擬似粒子強度向上<sup>9)</sup>の他、焼結原料層中の水の挙動からみた空隙率維持方法として、焼結過程における水の凝集量<sup>10)</sup>を下げるために、焼結原料を造粒後に、擬似粒子径を維持しつつ減水する方法が有力である<sup>11)</sup>。これは、造粒時にバインダーとして機能する水は、焼結時には通気阻害因子となることによる。

これら擬似粒子径および空隙率に着目した焼結原料層通気性を高める技術として、近年、MEBIOS (Mosaic Embedding Iron Ore Sintering) 法が提案された<sup>10-15)</sup>。図1<sup>12,15)</sup>に、MEBIOS法の焼結原料層のイメージを示す。MEBIOS法は、

\* プロセス研究所 製鉄研究部 上席主幹研究員 博士(環境科学) 千葉県富津市新富 20-1 〒293-8511

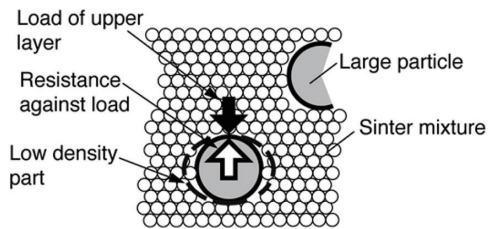


図1 MEBIOS法における高密度粒子と粉体層<sup>12, 15)</sup>  
Denser parts and loser ones in the same packed bed of MEBIOS<sup>12, 15)</sup>

低充填密度の焼結原料層中に高密度な領域を配置することによって、高充填密度を維持しながら通気性を高めることができる。具体的には、直径5～15mmの高密度グリーンボールを焼結原料層内へ配置し、壁効果によってグリーンボール周囲に低充填密度領域（空隙）を形成し、その結果、焼結原料層全体の通気性が高くなる。ここで、粗大で高密度グリーンボールは焼結過程でその形状を維持できるので、焼結原料層の支柱効果として機能し、高空隙率を維持できる<sup>16, 17)</sup>。

近年、低額の設備投資でMEBIOS法を応用する技術開発が検討された。その結果、小粒径でも乾燥状態であれば、粗大で高密度グリーンボールと同じ効果が得られることが判明した。それは、乾燥粒子と造粒後の湿潤擬似粒子間の摩擦力を活用する点に着目した技術である。すなわち、焼結原料の焼結機への装入において、乾燥粒子と湿潤原料間に働く摩擦力が、それらを密に充填することを抑制でき、その結果、高空隙率を確保できる。加えて、原料水分を造粒段階と装入段階とで独立に設計することが可能となる。具体的には、造粒段階で高水分とすることで造粒を促進させて、しかる後に乾燥粒子添加により装入時には低水分の焼結原料層を形成することが可能となる。実機適用方法としては、返鉱を乾燥粒子として活用し、造粒後の原料へ添加する。この技術を“RF-MEBIOS (Return Fine - Mosaic Embedding Iron Ore Sintering) 法”と称する。返鉱は、焼結機から排出された後に直ちに焼結原料として使用されるので、乾燥機を設けなくとも乾燥粒子として使用できる。

本報では、焼結原料層の充填密度および造粒後の擬似粒子径の視点で、RF-MEBIOS法の通気性向上を焼結鍋試験による検討、並びに実機焼結機における生産性向上につい

て述べる。なお、RF-MEBIOS法は、焼結生産性改善技術ばかりでなく、焼結原料微粉化対応技術としても活用できる<sup>3)</sup>。

## 2. 焼結鍋試験

### 2.1 実験方法

RF-MEBIOS法の焼結生産性に及ぼす影響を焼結鍋試験で調査した。試験方法の概略を図2に示す。焼結原料は、85.0mass%の複数銘柄の鉄鉱石等の新原料と、15.0mass%の返鉱とした。具体的な配合については後述する。返鉱については、造粒後原料に添加する量を $x\%$ 、造粒に供する量を $15-x\%$ に配分した。前者および後者をそれぞれバイパス返鉱および造粒返鉱と称した。

バイパス返鉱以外の原料をドラムミキサー（直径600mm、長さ800mm）で4分間混合後、所定の水分を添加しさらに4分間造粒した。次にバイパス返鉱を造粒後原料に添加して15秒間混合したものを配合原料として供した。バイパス返鉱添加後の水分（装入時水分）は全ケースで7.0%一定となるよう添加水分量を調整した。従って、バイパス返鉱比率が上昇すると造粒における水分（造粒後水分）が上昇する。本報では、バイパス返鉱添加前の水分（mass%）を“造粒後水分”と称し、バイパス返鉱添加後の水分（mass%）を“装入時水分”と称する。前者は造粒に影響するパラメータ、後者は焼成に影響するパラメータである。焼結鍋への装入については、10～15mm焼結鉱2.0kgを床敷として焼結鍋（300mm径×500mm）にセットした後、焼結原料を床敷上680mmの位置から落下装入した。

図3に、バイパス返鉱比率の造粒後水分および装入時水分への影響を示す。曲線が設定値、シンボルマークが実測値であるが、両者は合致しており、設定通りに実験が遂行できたことを示す。擬似粒子径は、造粒後および装入時の両段階で計測した。計測方法は、試料を105℃2時間乾燥処理し、ロータップ振盪機を用いてタップなしで15秒間篩分けする方法とした。

表1に、配合条件を示す。日本で使用されている主要鉄鉱石5種類を用いた。粉コークス配合比率は4.5%とした。試験ケースについては、Series1およびSeries2を設定したが、それぞれの目的はバイパス返鉱比率およびバイパス返

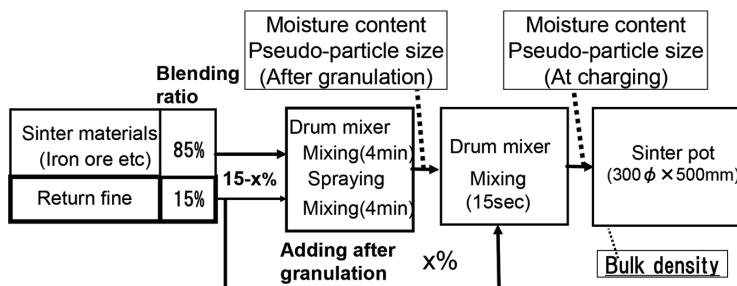


図2 鍋試験フロー  
Experimental flow of pot test (300 mm φ)

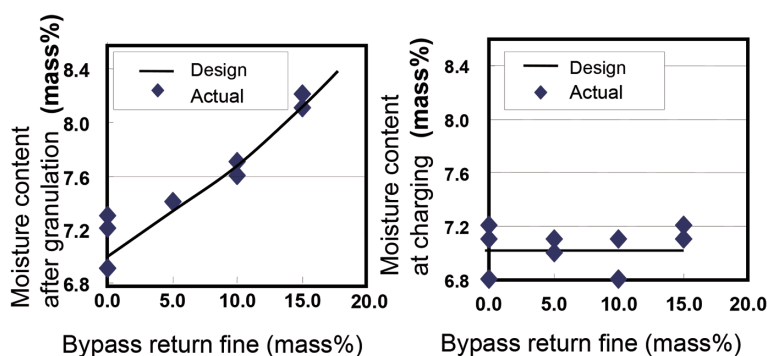


図3 造粒後および装入時水分  
Moisture content in sinter raw materials after granulation and at charging

表1 焼結原料配合条件  
Blending conditions of sinter mixture

Route	Raw materials	Series 1				Series 2	
Ordinary route	Iron ore R	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	Iron ore Y	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1	19.1
	Iron ore H	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2	13.2
	Iron ore C	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5
	Iron ore W	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3	21.3
	Serpentine	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1	2.1
	Lime stone	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3
	Return fine	15	10	5	0	-	-
	Return fine (+1 mm)	-	-	-	-	-	7.7
	Return fine (-1 mm)	-	-	-	-	7.3	-
	Sub total	100	95	90	85	92.3	92.7
	Coke breeze (-5 mm)	[4.5]	[4.5]	[4.5]	[4.5]	[4.5]	[4.5]
Added after granulation stage	Return fine	0	5	10	15	-	-
	Return fine (+1 mm)	-	-	-	-	7.7	-
	Return fine (-1 mm)	-	-	-	-	-	7.3
	Sub total	0	5	10	15	7.7	7.3
Total		100	100	100	100	100	100
	Coke breeze (-5 mm)	[4.5]	[4.5]	[4.5]	[4.5]	[4.5]	[4.5]

鉱粒度の影響調査である。なお、Series2ではバイパス返鉱粒度を +1mm および -1mm としたが、全原料に対するバイパス比率はそれぞれ 7.7% および 7.3% であった。これは、図4に示す返鉱粒度分布 (-1mm 比率 49%) に基づいて設定した。

点火は風箱内圧力 5.2kPa で吸引しながら LPG を燃料とするバーナーで1分間燃焼させた。点火後は風箱内圧力 10.3kPa 一定で行った。風箱内圧力は、風箱から送風機間のダクトに設置したダンパー開度で調整した。風箱内中央部に設置した熱電対で排ガス温度を計測し、排ガス温度ピークから3分後に焼結を終了した。なお焼結時間は点火開始時刻から排ガス温度ピーク時刻までの時間と定義した。

焼結鍋から排出した焼結ケーキは、重量計測後に落差 2.0 m で4回落下させ 5mm で篩分けし +5mm 重量を計測した。粉化により -5mm となる床敷はないものと仮定し、+5mm 重量から床敷重量 (2kg) を差し引いた値を成品焼結鉱重量とした。成品焼結鉱重量を焼結ケーキ重量から床敷 2kg を

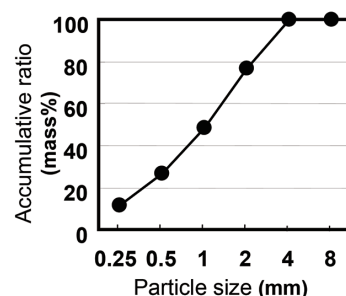


図4 返鉱粒度  
Size distribution of return fine

差し引いた値で割った値を成品歩留とした。焼結生産率は、成品焼結鉱重量を焼結時間および焼結鍋底面積で割って算出した。

燃焼前線降下速度 (FFS) は、焼結鍋へ配合原料を装入した段階の層厚を、点火開始から燃焼帯が焼結原料層の最下部へ到達した時刻までに要した時間で割って算出した。燃焼帯の最下部到達時刻は排ガス温度の立ち上がり時刻とした。

## 2.2 結果

図5、図6および図7に焼結生産率、FFS、および成品歩留の結果を示す。バイパス返鋇比率の上昇と共に、焼結生産率およびFFSが上昇した。但し、バイパス返鋇比率5%と10%を比較するとFFSが同等であった。その原因は不明であるが、バイパス返鋇の粒度分布は一定であり、かつバイパス返鋇比率の上昇と共に造粒後原料水分も単調に増加するので、バイパス返鋇比率5~10%において特異な現象が生じると考えづらい。よって、バイパス返鋇比率0%から15%への上昇と共に、FFSは単調に上昇するものと解釈する。

バイパス返鋇は細粒(粒径-1mm)よりも粗粒(粒径+1mm)

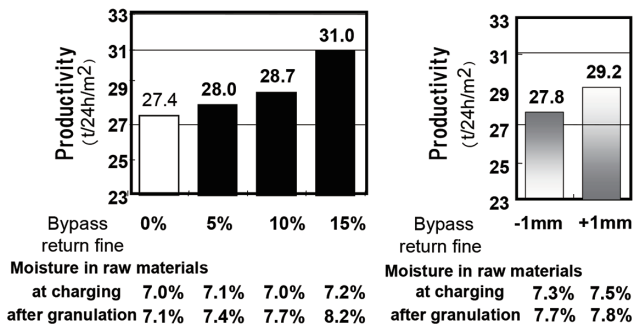


図5 返鋇造粒バイパス添加による生産率向上  
Improvement of productivity by return fine addition after granulation stage

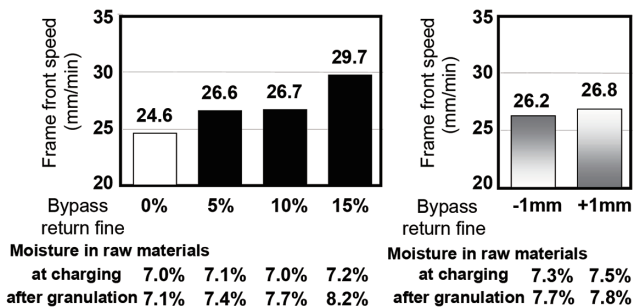


図6 返鋇造粒バイパス添加が燃焼前線降下速度に及ぼす効果

Effect of return fine addition after granulation stage on frame front speed

mm)の方が焼結生産率およびFFSが高かった。バイパス返鋇比率15%(対全原料)において、成品歩留が低かったが、これはFFSが高いことによるものと考えられる。

図8に充填密度と装入時原料の擬似粒度(-0.25mm)比率の結果を示す。図8中にバイパス返鋇比率を添字で示しているが、まずバイパス返鋇比率0%と15%を比較すると、明らかにバイパス返鋇比率15%において充填密度が低く装入時原料の擬似粒度(-0.25mm)比率が低い。次にバイパス返鋇比率5%および10%における充填密度および装入時原料の擬似粒度(-0.25mm)比率は、バイパス返鋇比率0%と15%の結果の間に位置している。ここでバイパス返鋇比率5%と10%との差は確認できなかったが、バイパス返鋇比率5~10%において特異な現象が生じると考えづらい。従って、バイパス返鋇比率の上昇と共に充填密度と擬似粒度(-0.25mm)比率が低下したものと解釈する。バイパス返鋇として細粒(-1mm)を使用した場合に比較して粗粒(+1mm)返鋇を使用した場合において、平均値では充填密度および擬似粒度(-0.25mm)比率が低くなったが、ケース内のデータ偏差を考慮するとその有意性は認められなかった。

以上を総括すると、装入時の原料水分が一定条件では、乾燥した返鋇を造粒後原料に添加するプロセスは、従来の全原料一括して造粒する従来プロセスと比較して、造粒後水分を高めることが可能となり、その結果、造粒促進により装入時においても擬似粒度(-0.25mm)比率が低くなっ

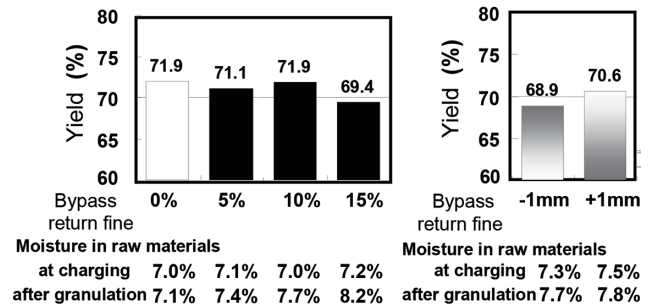


図7 返鋇造粒バイパス添加が成品歩留に及ぼす影響  
Influence of return fine addition after granulation stage on yield

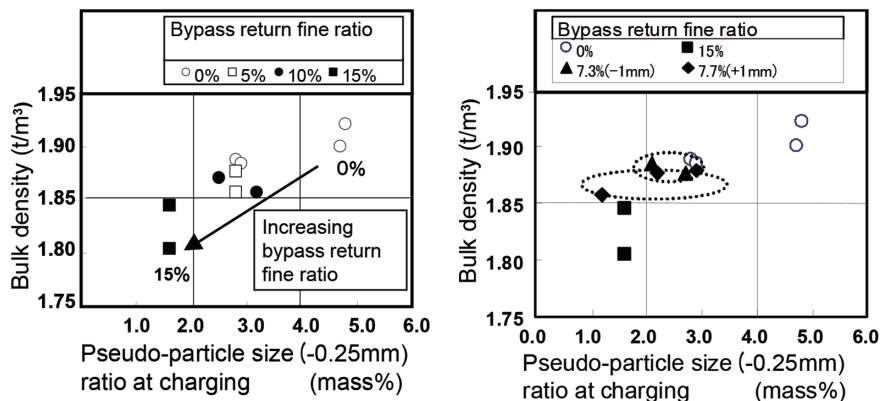


図8 返鋇の造粒バイパス添加が充填密度および装入時擬似粒度に及ぼす効果  
Effect of return fine added after granulation stage on bulk density and pseudo-particle size at charging

た。さらに充填密度が低下したが、その要因が擬似粒度 (-0.25mm) 比率によるものかそれとも湿潤粒子と乾燥粒子間の摩擦係数上昇によるものかについては今後の検討課題である。

### 2.3 考察

#### 2.3.1 返鉱バイパス添加による焼成速度要因解析

一般的に、燃焼前線は凝結材中のカーボンが燃焼している領域の最下層にあたり、その降下速度は上層から下層への伝熱に律速する。その伝熱は、焼結プロセスにおいては、下方へ流れるガスと固体間の強制対流伝熱と固体粒子間の伝導伝熱に大別される。前者は焼結原料層の通気性と含有水分に依存する。焼結原料層通気性は、Ergun 式に示されるように粒子径と空隙率で決定される。

図 6 および図 8 より、FFS が高かった実験ケースでは装入時原料の擬似粒度 (-0.25mm) 比率が低く、装入密度も低かった。

本実験では、原料配合条件が一定であったので原料の平均見掛密度は等しい。よって、装入密度は空隙率 ( $\epsilon$ ) と同義となる。なお、空隙率 ( $\epsilon$ ) は装入密度を平均見掛密度で割った値を 1 から引いて算出される。既報<sup>18)</sup> では、擬似粒度 (-0.25mm) 比率と FFS 間で強い相関が確認されている。よって、通気性を反映する粒子径として擬似粒度 (-0.25mm) 比率を採用するので、FFS は式 (1) で記載する。

$$FFS(\text{mm}/\text{min}) = a \cdot (1 - b \cdot (d_{-0.25}(\%)/100) \cdot (1 - c \cdot (w_{\text{charging}}(\%)/100)) \times (\epsilon^3 / (1 - \epsilon))^{0.6} + h \quad (1)$$

$d_{-0.25}(\%)$ : 装入時擬似粒度 (-0.25mm) 比率

$w_{\text{charging}}(\%)$ : 装入時原料水分,  $\epsilon(-)$ : 空隙率

式 (1) において、第 1 項は固気強制対流伝熱項で、装入時擬似粒度 (-0.25mm) 比率、装入時原料水分、および空隙率に依存する。第 2 項は、固体間の伝導伝熱項で定数項とした。

装入時原料の擬似粒度 (-0.25mm) 比率、装入時原料水

分、および空隙率  $\epsilon$  が FFS へ及ぼす影響について検討した既報<sup>18,19)</sup> に基づいて、式 (1) 中のパラメータ (a, b, c, h) フィッティングを行った。その結果が式 (2) である。

$$FFS(\text{mm}/\text{min}) = 86.67(1 - 0.247(d_{-0.25}(\%)/100) \cdot (1 - 3.20(w_{\text{charging}}(\%)/100)) \times (\epsilon^3 / (1 - \epsilon))^{0.6} + 2.33 \quad (2)$$

式 (2) において、装入時擬似粒度 (-0.25mm) 比率、装入時原料水分、および空隙率  $\epsilon$  の適用上下限は以下の通りである。これらの制約は既報<sup>18,19)</sup> の実験条件に基づく。

$$0.4 < d_{-0.25}(\%) < 5.6 \quad 5.3 < w_{\text{charging}}(\%) < 8.3 \quad 0.32 < \epsilon(-) < 0.42$$

図 9 に、本実験における FFS と式 (2) より算出される計算値との対応を示す。相関係数が 0.875 と高い結果となり、本式の妥当性が示された。

図 10 に式 (2) に基づいて、空隙率  $\epsilon$  および装入時擬似粒度 (-0.25mm) 比率の FFS に及ぼす影響を独立で評価した結果を示す。両方の図中の白抜き大円は、基準点であり、バイパス配合比率 0% における装入時原料の擬似粒度 (-0.25mm) 比率、装入時原料水分および空隙率  $\epsilon$  データを式 (2) へ代入して求めた。そして図中の破線は、基準点を通りかつ他のパラメータは一定で空隙率  $\epsilon$  (左図)、装入時擬似粒度 (-0.25mm) 比率 (右図) と FFS との関係を示している。実線は本実験結果を繋いだもので

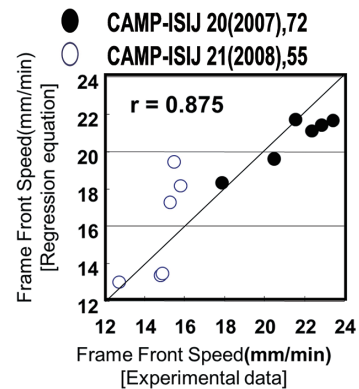


図 9 計算値と実験値との整合  
Erification of regression equation

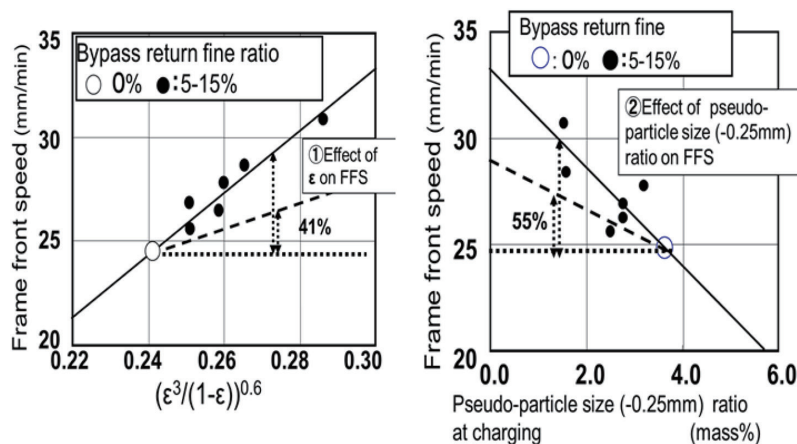


図 10 返鉱の造粒バイパス添加における空隙率および擬似粒度が燃焼前線降下速度に及ぼす効果  
Effect of void ratio and pseudo-particle size at charging on flame front speed at return fine addition after granulation stage

あり、その傾きはすべての影響因子を含んでいる。ゆえに実線の傾きに対する破線の傾きの比は、空隙率  $\epsilon$  (左図)、装入時原料の擬似粒度 ( $-0.25\text{mm}$ ) 比率 (右図) の影響度を示す。そしてこれらの影響度は41%と55%だと評価された。影響度の加算値は96%となり、この2つのパラメータでほぼ説明できた。

以上の知見より図11に造粒後原料への返鉱添加が生産率向上に有効である要因解析をまとめる。装入時原料水分が一定下では返鉱のバイパスは造粒後原料水分を高めることができる。図4に示した通り、バイパス返鉱中に微粉 ( $-0.25\text{mm}$ ) が存在するにもかかわらず、バイパス返鉱比率の上昇と共に、装入時原料の擬似粒度 ( $-0.25\text{mm}$ ) 比率は減少した。それは造粒後原料水分の上昇による造粒促進が未造粒返鉱微粉 ( $-0.25\text{mm}$ ) 比率の増加を凌駕したことによる。さらに、造粒後の湿潤原料への乾燥状態の返鉱添加により、装入密度が低下した。

装入時原料の擬似粒度 ( $-0.25\text{mm}$ ) 比率の低下および装入密度の低下によりFFSが上昇した。FFS上昇による歩留低下や装入密度低下による直接的な成品焼結鉱量低下はFFS上昇と比較して影響が軽微ゆえ、生産率は上昇した。

### 2.3.2 充填密度低下メカニズム

佐藤ら<sup>20)</sup>は、焼結原料前処理工程における水分の作用について、造粒時において水分の増加と共に擬似粒子の成長が進行するが、充填層において過剰な水分が充填層擬似粒子間の空隙を埋めてしまうため、造粒時とは逆に通気を阻害すると報告している。また、川口ら<sup>19)</sup>は、焼結原料の充填層形成に関し、高落差装入になると、通気最大水分値が低くなると報告している。これらのことから、RF-MEBIOS法により、高水分造粒と落下装入による充填層空隙の減少を抑制できるメカニズムがあるものと思われる。すなわち、乾燥粒子を造粒後に添加することで、充填層において造粒後湿潤粒子と未造粒乾燥粒子の複合層を形成する。この複合層が、落下装入時の衝撃力に対する抵抗力を増加させた

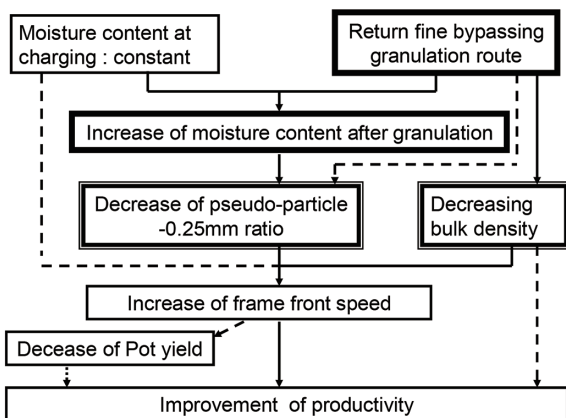


図11 返鉱の造粒バイパス添加が生産性に及ぼす効果  
Effect of RF-MEBIOS (return fine bypassing granulation route) on improvement of productivity

と考えた。そこで、一面剪断試験により原料充填層の剪断強度を調査し考察した。

一面剪断試験方法の概要を図12に示す。試料として、水分4.7%の鉄鉱石(ピソライト鉱)76.4dry-gと水分0%の返鉱20.0dry-gを用いた。試料は事前に $-0.25\text{mm}$ に粉碎した。手順として、鉄鉱石76.4dry-gに水分を加えて混合し、造粒後水分約14.0%とした後、返鉱20.0dry-gを添加して軽く混合し、複合層の装入時水分を11.1%とした。試料を、下部が固定され上部が可動である直径60mmの剪断セルに装入し、所定の垂直応力を加えながら約 $3.0\text{mm}/\text{min}$ 一定で剪断を行い、その時の剪断面方向の荷重から剪断強度を測定した。垂直応力は1試料あたり3点(49, 98, 147kPa)とし、(3)式に示すモール・クーロンの破壊規準の関係式<sup>21)</sup>から内部摩擦係数と付着力を算出した。

同様に、鉄鉱石と返鉱を、水を添加せずに混合した(装入時水分3.7%)試料および、鉄鉱石と返鉱に水分を加えて一括で混合し装入時水分11.1%とした試料に関しても、それぞれ剪断試験を行い、均一層(ベース)と複合層(RF-MEBIOS法)との比較を行った(表2)。

$$\tau = \sigma \tan \phi + C \quad (3)$$

$\tau$ : 剪断応力 (kPa),  $\sigma$ : 垂直応力 (kPa)

$\phi$ : 内部摩擦角 ( $^\circ$ ),  $\tan \phi$ : 内部摩擦係数 (-)

$C$ : 付着力 (kPa)

一面剪断試験の結果を図13に示す。横軸に垂直応力、縦軸に測定時の剪断強度を示す。(3)式より、測定点を結ぶ直線の傾きが内部摩擦係数、切片が付着力をそれぞれ表す。装入時水分3.7%と11.1%ケースの比較、すなわち同一の原料配合条件における水分差による影響を比較すると、低水分の方が内部摩擦係数は大きかった。また、装入時水分11.1%におけるベースとRF-MEBIOS法の比較、すなわち、同配合かつ等水分の試料において、従来通り全原料を一括混合して水分が均一に分布している場合と、一部の原

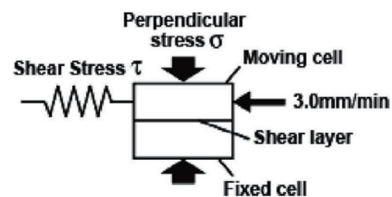


図12 一面剪断試験模式図  
Experimental procedures of shear test

表2 一面剪断試験条件  
Experimental conditions of shear test

	Base	RF-MEBIOS
Iron ore (dry-g)	76.4	76.4
Dry particle (dry-g)	20.0	20.0
Moisture after granulation (%)	3.7	11.1
Dry particle (add) (dry-g)	0.0	0.0
Moisture at charging (%)	3.7	11.1

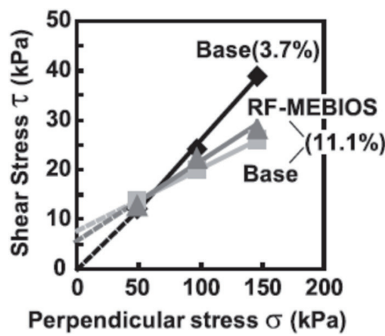


図 13 RF-MEBIOS 法による内部摩擦係数の低減  
Decrease of friction coefficient by RF-MEBIOS

表 3 RF-MEBIOS 法による表面性状変化  
Experimental results of shear test

Case (moisture content)	tan φ: Friction coefficient	C: Adhesion
Base (3.7%)	0.274	0.0
Base (11.1%)	0.124	7.8
RF-MEBIOS (11.1%)	0.159	5.8

料を後から添加して湿潤粒子と乾燥粒子の複合層である場合とを比較すると、複合層を形成する RF-MEBIOS 法の方が内部摩擦係数は高かった (表 3)。

寺下ら<sup>22)</sup>は、種々の粉粒体について定容積、定荷重一面剪断試験を行い、内部摩擦係数に及ぼす水分の影響を調査している。そして、粉粒体の内部摩擦係数は水分 0% の時に最も高く、水分の増加に伴い、pendular 域において低下し、funicular 域から capillary 域初期はほぼ一定となり、それ以降の capillary 域から slurry 域では再び低下すると報告している。ここから、RF-MEBIOS 法による内部摩擦係数の上昇は、内部摩擦係数の大きい乾燥粒子が装入時原料中に存在するためと考えられる。

また、図 13 で表現される剪断強度を、粉体層の変形に対する抵抗力とすると、ある垂直応力を境に、ベースと RF-MEBIOS 法の抵抗力が逆転することが分かる。すなわち、垂直応力がほとんどかかっている場合、ベースの方が変形抵抗力は大きく、垂直応力がある程度かかっている場合、RF-MEBIOS 法の方が変形抵抗力は大きい。

実焼結プロセスにおいては、造粒後の原料はロールフィーダーで切り出された後シュートを通してパレットへと落下装入される。また本実験において、装入時原料は落下装入され充填層が形成された。この充填層形成時において原料が受ける力としては、各擬似粒子の持つ慣性運動量が互いに衝突する力や、既に充填層を形成している領域に、上から原料流の重量や落下衝撃が伝播する力等が考えられる。これらの力に対し、原料は容器外壁によって側面を固定された状態で垂直方向からの力を受けることから、図 12 を 90° 回転させた充填状態となっており、剪断力を受けているものと考えられる。従って、RF-MEBIOS 法による充填空隙率の上昇は、図 14 に模式的に示すように、内部摩

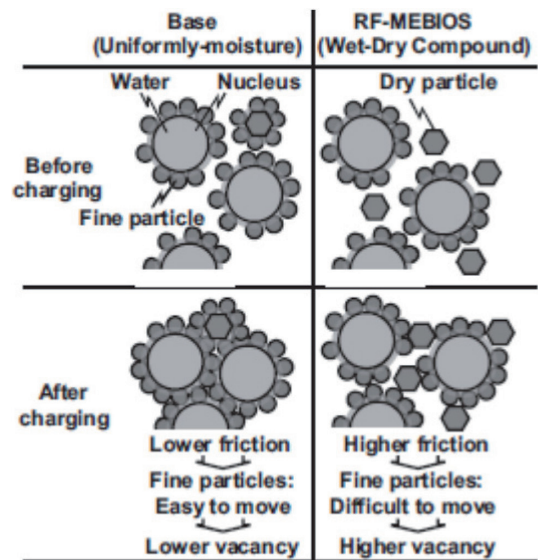


図 14 RF-MEBIOS 法による充填層空隙構造維持メカニズム  
Increasing vacancy of packed bed by RF-MEBIOS

擦係数の上昇によって落下衝撃や上部からの荷重等の力に対する抵抗力が上昇し、空隙構造が維持されたためと考えられる。充填層形成時に原料がどの位の力をどの方向に受けているか等の解析については今後の課題である。

### 3. 実機焼結機への展開

#### 3.1 鹿島 No.3 焼結機への適用

##### 3.1.1 返鉱搬送ルート

図 15 に実機焼結機における搬送ルートを示す。返鉱の搬送ルートは分離ダンパーにより 2 つの経路へ分離した。一方は既設の返鉱槽への、もう一方は新設のパイパス返鉱槽への経路である。

そして、既設の返鉱槽から切り出される返鉱は他の焼結原料と共に混合、水添加、造粒処理される。一方、パイパス返鉱槽から切り出された返鉱は造粒後原料へ添加される。図 15 中の破線で囲んだ部分が分離ダンパーとベルトコンベアーの位置関係を示しているが、分離ダンパー位置の調整により、パイパス返鉱比率が変更できる仕組みである。ここで、分離ダンパーはベルトコンベアーから排出される返鉱を上層と下層とに分け、上層側がパイパス返鉱、下層側が造粒返鉱となる。ベルトコンベアーから排出される返鉱は上層が粗粒となる特性があるので、比較的粗粒の返鉱がパイパス返鉱となる。

前章で述べた通り、パイパス返鉱は粗粒の方が、FFS や焼結生産率向上により効果があるため、本法が採用された。図 16 に各パイパス返鉱比率におけるパイパス返鉱および全返鉱の擬似粒度 (-0.25 mm) 比率を示す。パイパス返鉱の擬似粒度 (-0.25 mm) 比率は、全返鉱の値と比較して低いことが確認された。なおパイパス返鉱比率の上昇と共に、パイパス返鉱の擬似粒度 (-0.25 mm) 比率は、全返鉱の値に近づく。

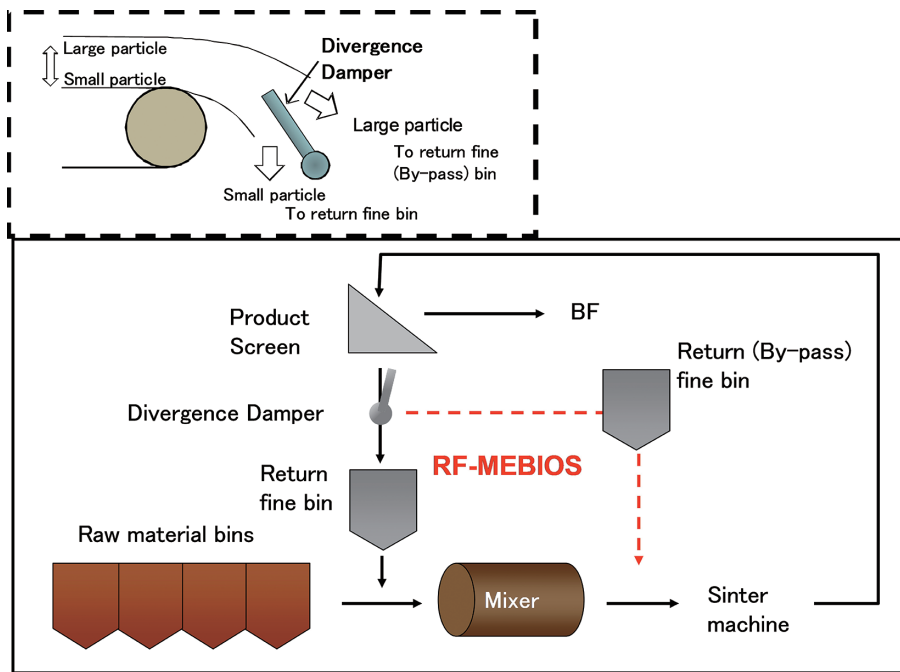


図 15 実機焼結機における返鋇搬送ルート  
Layout of return fine transporting route at commercial sinter plant

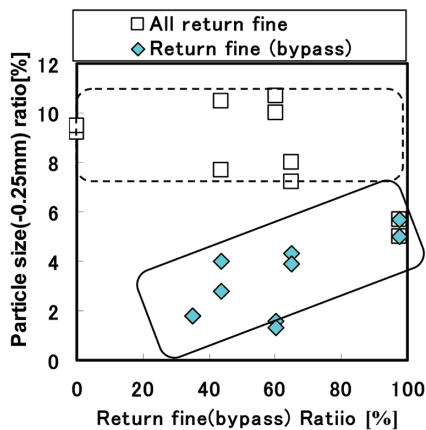


図 16 バイパス返鋇比率が擬似粒度に及ぼす効果  
Influence of bypass return fine ratio on particle size

実機において、バイパス返鋇比率(対全原料)を20%、14%、8%の3水準にて装入時原料水分を一定(6.4~6.5%)条件にて効果を確認した。なお、図15に示すように、造粒後の原料水分はバイパス返鋇比率(対全原料)と対応して、7.9%、7.5%および7.1%となる。

### 3.1.2 実機試験結果

図17に実機試験結果を示す。バイパス返鋇比率が高い(20%:対全原料)場合、FFSが高く620t/h以上の高生産率が達成された。生産率向上は、前章で示した鍋試験と同様に擬似粒子径の上昇効果であると考えられる。

図18に、造粒後水分と造粒後原料の擬似粒度との関係を示す。なお、擬似粒度は式(3)で定義されるGI(-0.25mm)で評価した。GI(-0.25mm)は、粒径0.25mm以下の微粉の造粒率を意味する。A(-0.25mm)およびB(-0.25mm)は、

Moisture condition in each condition			
Bypass return fine ratio (mass%)	20	14	8
Moisture content after granulation (mass%)	7.9	7.5	7.1
Moisture content at charging (mass%)	6.4	6.5	6.5

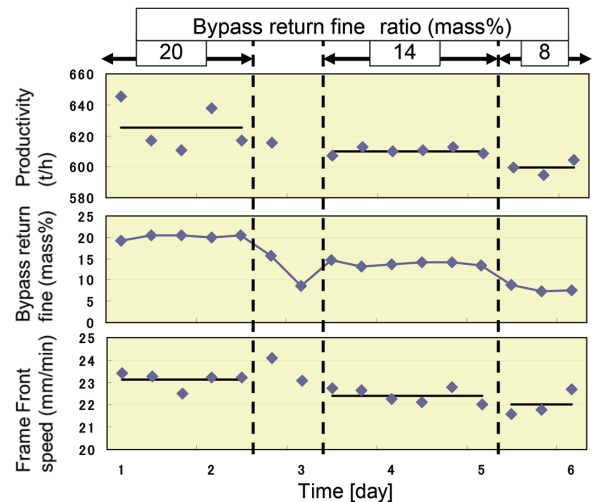


図 17 バイパス返鋇比率変更時の操業変化  
Operational performances at varying bypass return fine ratio

それぞれ真粒度(-0.25mm)と擬似粒度(-0.25mm)に対応する。B(-0.25mm)は、105℃2時間乾燥処理を行った後に、ロータップ振盪機を用いてタップなしで15秒間篩分けした際の-0.25mm比率とした。この篩分けした試料を全量回収し、ロータップ振盪機を用いてタップありで5分間篩分けした際の-0.25mm比率をA(-0.25mm)とした。この方法で定義したA(-0.25mm)、B(-0.25mm)を造粒後原料および装入時原料を対象に調査し、それぞれのGI(-0.25mm)を求めた。



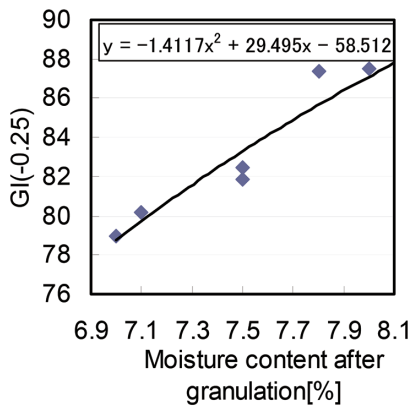


図 18 造粒後水分が GI 指数に及ぼす影響  
Increasing GI(-0.25mm) by high moisture content after granulation

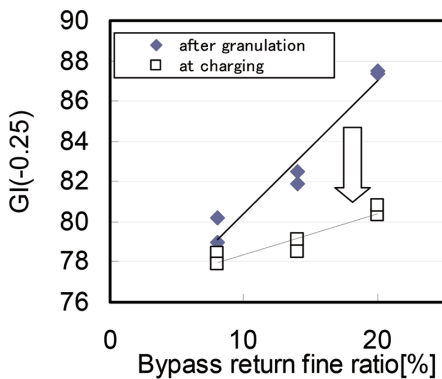


図 19 バイパス返鋇比率が GI 指数に及ぼす効果  
Effect of bypass return fine ratio on GI(-0.25mm)

$$GI(-0.25mm)(\text{mass}\%) = \left(1 - \frac{B(-0.25mm)}{A(-0.25mm)}\right) \times 100 \quad (4)$$

A(-0.25mm) : -0.25mm ratio of real particle(mass%)

B(-0.25mm) : -0.25mm ratio of pseudo-particle(mass%)

図 18 より、造粒後原料水分の上昇と共に、GI(-0.25mm) が上昇することを確認した。GI(-0.25mm) を造粒後原料水分で回帰分析すると、図 18 中に示した 2 次式で表現された。

図 19 に、バイパス返鋇比率が造粒後原料および装入時原料の GI(-0.25mm) に及ぼす影響を示す。バイパス返鋇比率の上昇と共に造粒後原料の GI(-0.25mm) は上昇したが、これは造粒後水分の上昇効果である。装入時原料における GI(-0.25mm) は、造粒後擬似粒子の GI(-0.25mm) よりも低下したが、その原因はバイパス返鋇中の -0.25mm 比率の影響である。この低下影響を受けてもなお、バイパス返鋇比率が高いケースで装入時擬似粒子における GI(-0.25mm) が高かった。この結果は、バイパス返鋇比率上昇による高水分造粒強化が、未造粒で添加されるバイパス返鋇中の微粉影響よりも大きいことを意味し、鍋試験結果と定性的傾向は合致した。

実機操業においては、バイパス返鋇比率の最適化が求められる。実機試験結果を用いて、バイパス返鋇比率と装入時擬似粒子中の -0.25mm 比率との関係を以下の手順で算

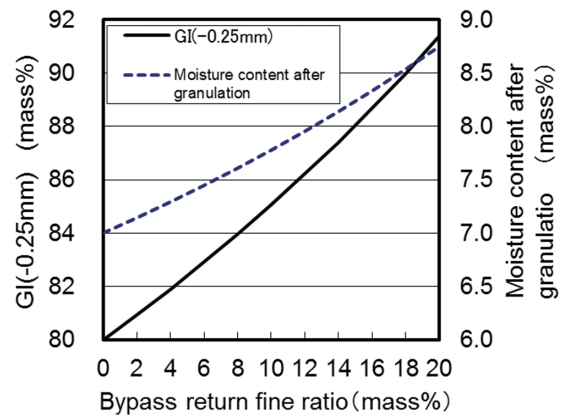


図 20 GI 指数および造粒後水分のバイパス返鋇比率との対応関係

GI(-0.25mm) and moisture content after granulation corresponding to bypass return fine ratio

出した。前提条件は以下の通りである。

- ・ 返鋇を除く焼結原料中の -0.25mm 比率 : 25%
- ・ 返鋇配合率 (対全原料) : 20%
- ・ 返鋇中の -0.25mm 比率 : 4.4%
- ・ 装入時原料水分 : 7.0%

装入時の配合原料中の -0.25mm 粒子量は、バイパス返鋇中の -0.25mm 粒子量と造粒後原料中の -0.25mm 粒子量との加算であると考えた。その理由は、バイパス返鋇は造粒処理されない状態で焼結機へ装入されることによる。従って、以下のように表現される。

$$\begin{aligned} & \text{装入時原料中の -0.25mm 比率}(\%) \times \text{装入時原料重量}(\text{t/h}) \\ & = \text{造粒後原料中の -0.25mm 比率}(\%) \\ & \times (\text{装入時原料重量}(\text{t/h}) - \text{バイパス返鋇重量}(\text{t/h})) \\ & + \text{バイパス返鋇中の -0.25mm 比率}(\%) \\ & \times \text{バイパス返鋇重量}(\text{t/h}) \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) より、装入時原料重量 (t/h) およびバイパス返鋇重量 (t/h) は操業条件として与えられる。バイパス返鋇中の -0.25mm 比率は図 13 の結果を用いる。造粒後原料中の -0.25mm 比率は、式 (3) を用いて GI(-0.25mm) と造粒前原料中の -0.25mm 比率から算出される。ここで、GI(-0.25mm) は図 18 で示した回帰式より求まる。一方、造粒前原料中の -0.25mm 比率は、上記前提条件で示した“返鋇を除く焼結原料中の -0.25mm 比率 : 25%” “返鋇中の -0.25mm 比率 : 4.4%” および造粒用返鋇比率より求まる。

バイパス返鋇比率 (対全原料) と GI(-0.25mm) および造粒後原料水分との関係を図 20 に示す。また図 17 に示した GI(-0.25mm) を用いて、図 21 にバイパス返鋇比率 (対全原料) と造粒前後の原料の擬似粒度 (-0.25mm) 比率との関係を示す。バイパス返鋇比率の上昇と共に、造粒前原料の擬似粒度 (-0.25mm) 比率が上昇するにもかかわらず、造粒後原料の擬似粒度 (-0.25mm) 比率が減少する。

図 22 に、バイパス返鋇比率が装入時原料中の擬似粒度 (-0.25mm) 比率に及ぼす影響を示す。ここで、装入時原料

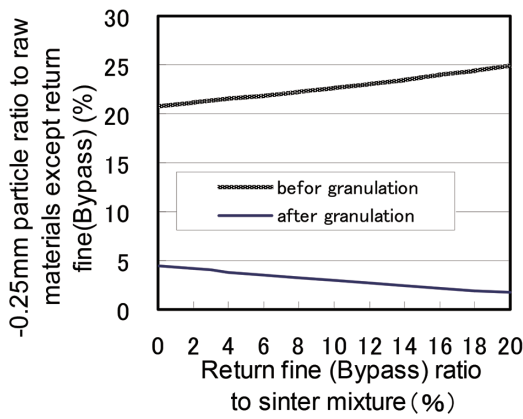


図21 バイパス返鋇比率が造粒前後の微粉比率に及ぼす影響  
Influence of bypass return fine ratio on particle size (-0.25 mm) ratio before and after granulation

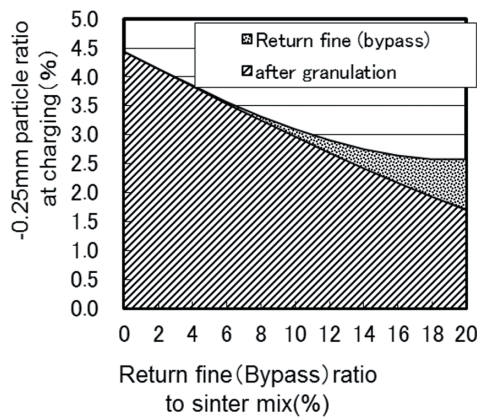


図22 装入時疑似粒度からみたバイパス返鋇比率の最適条件  
Influence of bypass return fine ratio on pseudo-particle size (-0.25mm) ratio at charging

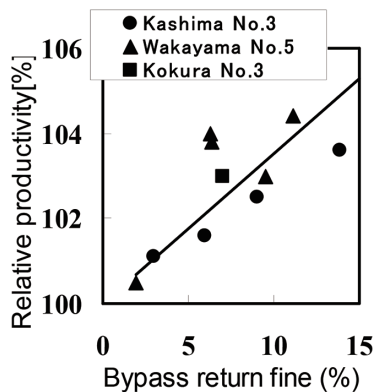


図23 各製鉄所 RF-MEBIOS 法適用による焼結増産効果  
Universal effect of RF-MEBIOS on productivity

の疑似粒度 (-0.25 mm) 比率は造粒後原料由来とパイパス返鋇由来とに区分して表現した。なお、造粒後原料由来分は、図21に示した造粒後原料の疑似粒度 (-0.25mm) 比率である。図22の結果より、鹿島 No.3 焼結機における実機試験前提とした諸条件においては、パイパス返鋇比率の最適条件は18% (対全原料) であると評価された。

### 3.2 実機焼結機における生産性向上

RF-MEBIOS 法は、図23に示す通り、統合前の旧住友金属工業(株)3機の焼結機において焼結生産性向上が確認された。なお、統合後は君津製鉄所および八幡製鉄所へも導入し、現在に至っている。

## 4. 結 言

焼結生産性向上を目的とした焼結原料層の高通気性は、RF-MEBIOS (Return Fine - Mosaic Embedding Iron Ore Sintering) 法で達成される。なお、RF-MEBIOS 法は、乾燥状態の返鋇を造粒せずに造粒後の湿潤原料へ添加する方法である。

高通気性の要因は、擬似粒度 (-0.25 mm) 比率低下および低充填密度の2点である。前者は、乾燥状態の返鋇を除いて造粒するので、装入時原料水分一定条件下では、造粒時水分を高められる効果である。

本技術は、現在、日本製鉄(株)4製鉄所の焼結機へ適用され、すべての焼結機において生産性向上が確認されている。

### 参照文献

- 1) Sawamura, J., Itou, K., Uno, N., Oomizu, M.: Tetsu-to-Hagané. S416, 61 (1975)
- 2) Nakajima, R., Komatsu, S., Shimizu, M., Inoue, H., Takagi, A.: Tetsu-to-Hagané. S765, 61 (1987)
- 3) Kawaguchi, T., Kuriyama, K., Sato, S., Takada, K.: Tetsu-to-Hagané. 1924, 73 (1987)
- 4) Kawaguchi, T., Kuriyama, K., Sato, S., Takada, K.: Tetsu-to-Hagané. 1642, 76 (1990)
- 5) Haga, T., Ohshio, A., Hida, Y., Fukuda, H., Ogata, N.: Tetsu-to-Hagané. 233, 83 (1997)
- 6) Matsumura, T., Miyagawa, K., Yamagata, Y.: ISIJ International. 485, 45(2005)
- 7) Kasai, E., Shu, I., Kobayashi, S., Omori, Y.: Tetsu-to-Hagané. 520, 70 (1984)
- 8) Suzuki, S., Sato, K., Fujimoto, M.: Tetsu-to-Hagané. 1932, 73 (1987)
- 9) Hida, Y., Itoh, K., Sasaki, M.: Tetsu-to-Hagané. S82, 66 (1980)
- 10) Wajima, M., Hosotani, Y., Shibata, J., Soma, H., Tashiro, K.: Tetsu-to-Hagané. 1719, 68 (1982)
- 11) Tashiro, K., Soma, H., Hosotani, Y., Konno, N.: Tetsu-to-Hagané. S24, 63 (1977)
- 12) Kawaguchi, T.: CAMP-ISIJ. 129, 5 (1992)
- 13) Kamijo, C., Matsumura, M., Kawaguchi, T.: CAMP-ISIJ. 120, 17 (2004)
- 14) Kawaguchi, T., Kamijo, C., Matsumura, M.: Tetsu-to-Hagané. 779, 92 (2006)
- 15) Kawaguchi, T., Usui, T.: ISIJ International. 414, 45 (2005)

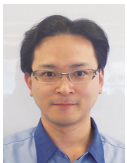
- 16) Kasai, E., Komarov, S., Nushiro, K., Nakano, M.: ISIJ International. 538, 45 (2005)
- 17) Kamijo, C., Matsumura, M., Kawaguchi, T.: ISIJ International. 544, 45 (2005)
- 18) Matsumura, M., Kawaguchi, T.: CAMP-ISIJ. 72, 20 (2007)
- 19) Kawaguchi, T., Matsumura, M.: CAMP-ISIJ. 55, 21 (2008), CD-ROM
- 20) Sato, S., Yoshinaga, M., Ichidate, M., Kawaguchi, T.: Tetsu-to-Hagané. 2174, 68 (1982)
- 21) 河上房義編：土質工学演習 基礎編. 森北出版
- 22) 寺下敬次郎, 宮南啓, 岡嶋雅資, 古林和夫：粉体工学会誌. 18 (9), 657-665 (1981)



松村 勝 Masaru MATSUMURA  
プロセス研究所 製鉄研究部  
上席主幹研究員 博士(環境科学)  
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



上城親司 Chikashi KAMIJO  
プロセス研究所 試験高炉プロジェクト推進部  
主幹 博士(工学)



山口泰英 Yasuhide YAMAGUCHI  
プロセス研究所 製鉄研究部  
主幹研究員