

技術論文

縦型湿式ボールミル導入による焼結原料造粒改善技術の開発

Improving Granulation of Sinter Materials by Using Wet Vertical Ball Mill

山口 泰英*	原 応 樹	梅 本 紘 成
Yasuhide YAMAGUCHI	Masaki HARA	Hironari UMEMOTO
森 田 雄 介	寺 司 周 平	松 村 勝
Yusuke MORITA	Shuhei TERAJI	Masaru MATSUMURA

抄 録

高炉の高出鉄・低還元材比操業追求にあたり、主要装入物である焼結鉱のスラグ成分低減が望まれる。一方、焼結原料である粉鉱石の成分は今後も悪化が予測される。対策として、選鉱処理した鉄精鉱、いわゆる微粉鉱石の多量使用技術確立が重要であるが、造粒強化による焼結生産率の低下を回避することが課題である。焼結プロセスにおける微粉鉱石の多量使用を目的とした造粒強化策として、焼結原料の一部を粉碎した微粒子バインダーを微粉鉱石に添加する技術を検討した。和歌山製鉄所 No.5 焼結機の P 型分割造粒ラインへ湿式ボールミルを導入し、鉄鉱石粉碎と微粒子の水中懸濁を同時進行させたスラリーの形態で添加した。これにより微粉鉱石間へ微粒子バインダーが充填され、強固な造粒物が得られる。本技術により、微粉鉱石 13.3% 使用下において、焼結生産率が 2.4% 向上した。

Abstract

In order to increase productivity and decrease Reducing Agent Rate (RAR) of blast furnace, it is important to decrease slag volume of burdens. Therefore, using high amount of iron ore concentrates as sinter materials is desired because of its lower slag contents. However, when using concentrates, it causes decreasing of the permeability of the sintering bed and sinter productivity. In this report, the new technique, adding micro-particles on concentrates as a binder, was investigated. A vertical wet ball mill was installed on separate granulation line of Wakayama No.5 sinter plant, and 0.5 mass% of Australian goethite ore was ground to -10 micron. Then ground ore slurry was added into intensive mixer on concentrates and other sinter materials. After mixing, they were granulated by a pan-pelletizer and charged into sinter machine with other materials granulated at main granulation line. It was confirmed that granulation was improved by adding micro-particles. By the technique, sinter productivity increased by 2.4% when using 13.3 mass% of concentrates.

1. 緒 言

高炉に装入される原料の品質は、その操業パフォーマンスに多大な影響を及ぼす。日本製鉄(株)の高炉においては、装入物の約 75% (その他はペレットおよび塊鉱石が各々約 10~15%) を焼結鉱が占めており、高炉の高効率、低還元材比での操業を更に追求していくためには、焼結鉱の高品質化、一例としてスラグ成分の低減が重要な要素の 1 つである。

しかしながら、焼結鉱の原料である粉鉱石は天然資源であり、将来的な品位悪化、すなわち含有鉄分の低下とスラグ成分の上昇は避けられない。資源品位悪化が進行してい

く中で焼結鉱のスラグ成分低減を指向するには、選鉱処理によって人工的に鉄分を高めた精鉱 (concentrate) の多量使用が求められる。

選鉱処理は、含鉄鉱物粒子 (濃縮対象) と脈石粒子 (除去対象) を、各々の単体分離が可能となるサイズまで粉碎し、比重、磁力等の諸特性を利用して選別する処理である (図 1)。鉄鉱床の単体分離特性や事業経済性も考慮しつつ、どの程度まで鉄分を高めるか (粉碎と選別を重ねるか) によって粒度に差異は生じるものの、得られる精鉱は必然的に微粉化する。このため鉄精鉱は慣例的に“微粉鉱石”と称され (本報告でも以下、微粉鉱石と称する)、後述する造粒への悪影響から焼結原料としての利用は限定的で、主にベ

* プロセス研究所 製鉄研究部 主幹研究員 千葉県富津市新富 20-1 〒 293-8511

レット用の原料（ペレットフィード）として扱われてきた。

焼結プロセスにおいて、原料は焼結機内に充填され焼成される前に、造粒と呼ばれる事前処理が施され疑似粒子が形成される。微粉鉱石の多量使用は、疑似粒子において核となるべき粒子（主として+1mm）の減少と付着粉となるべき粒子（主として-0.25mm）の増加を同時に招く。よって造粒処理能力が一定であれば造粒は悪化（未付着粉率増加や疑似粒子平均径縮小）し、焼結機内に形成される原料層の通気性を障害し生産性を低下させる。

上記課題に対し、焼結プロセスにおける微粉鉱石活用を狙いとした種々の技術が提案され、HPS (Hybrid Pelletized Sinter)¹⁾、MEBIOS (Mosaic Embedding Iron Ore Sintering)²⁾、SPExII^{3,4)}等の技術が実機化を果たしている。

MEBIOS法は、平均径2～3mmの疑似粒子で構成される通常の原料層に、粗大かつ緻密に造粒処理された直径5～15mmのグリーンボール（以下、GBと称する）を配置することで、GB周囲に高空隙率の領域を形成し、通気性改善を図る技術である²⁾。日本製鉄は、和歌山製鉄所のNo.5焼結機に、高速攪拌ミキサーとパンペレタイザーで構成されるE-Pラインを有するP型分割造粒法を導入した（詳細は後述）⁵⁾。同ラインで全原料の約20%を処理可能で、その過半の10%以上に微粉鉱石を配合しつつMEBIOS法にて提唱される粗大・緻密GBの製造を図っている。

SPExIIは、粉鉱石中に一定量含まれている微粒子の挙動に着目した基礎検討から発展させた技術である。造粒工程では粉鉱石をはじめとする焼結原料に水を添加し、ドラムミキサー等で転動造粒することで、鉱石粒子間に働く毛管

力を駆動力として粒子同士を接近、凝集、緻密化させ疑似粒子を形成する。この際、水中に完全に浸漬、懸濁してスラリー化するサイズ、具体的には10μm以下程度の鉄鉱石微粒子は、造粒過程で水と共に移動して粒子間に効率的に移動、配置され、造粒を終えて焼結機内で焼成される段階となり水分が蒸発した際には乾燥固化し固体架橋として働くことで、大きなバインダー効果を発揮することが報告された^{6,7)}（図2）。

八幡製鉄所の戸畑No.3焼結機において、鉄鉱石の一部をローラープレスにより乾式破碎して微粒子バインダー化して他鉱石と共に造粒し、その後製鉄所内排熱を利用して乾燥処理することで強固な造粒物の製造を図るSPExIIラインが導入され、高い生産性改善効果を発揮している^{3,4)}（図3）。

本報告では、微粒子バインダー技術をMEBIOS法へ適用、すなわち和歌山No.5焼結機のP型分割造粒ラインに微粒子バインダーを添加することで、粗大・緻密GBの製造能力を更に高めることを検討した。実験室レベルでの検討として、微粒子バインダー添加による疑似粒子付着粉層の粒子構成変化が造粒に及ぼす影響に着目し、微粉鉱石と微粒子バインダーの混合系における引張付着力を調査した⁸⁾。続けて、和歌山No.5焼結機を模擬した約50kg規模の焼結鉱製造試験（鍋試験）を実施し、微粒子バインダーの必要添加量を検討した⁹⁾。それらに基づき、鉄鉱石微粒子バインダーを連続的に製造、供給するパイロットプラントとして、縦型湿式ボールミルを和歌山No.5焼結機に導入し、造粒性、焼結鉱生産性に及ぼす効果の長期評価を実行した¹⁰⁾。

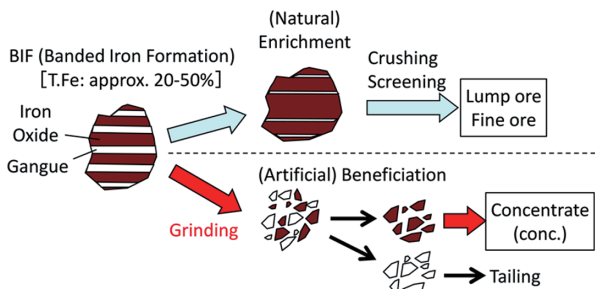


図1 選鉱処理の概念図
Schematic diagram of beneficiation process

2. 基礎検討（付着力評価）

日本製鉄では、鉄鉱石の造粒特性を評価する指標の1つ

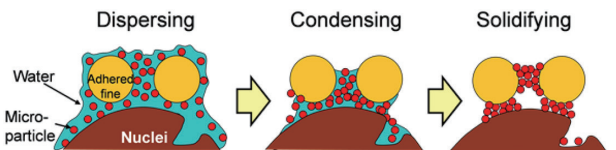


図2 微粒子バインダーが造粒物構造におよぼす影響⁷⁾
Behavior of micro-particle on granulation⁷⁾

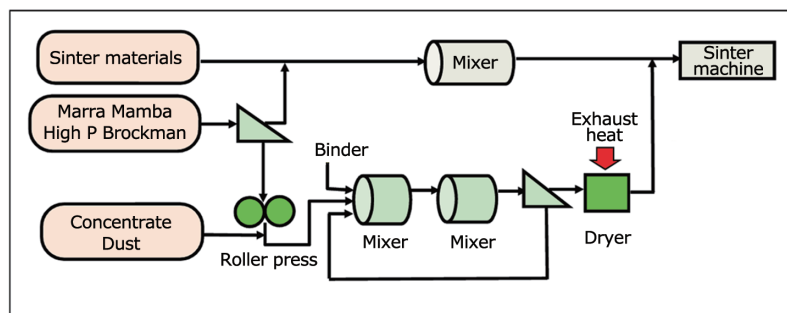


図3 SPExII プロセスフロー⁴⁾
Process flow of SPExII⁴⁾

として、垂直方向一面引張試験法による付着力（以下、付着力と称する）を測定している。岡崎ら¹¹⁾は、産地や性状の異なる複数銘柄の微粉鉱石について付着力等の評価を行い、表面形状と付着力から造粒性を評価可能であったと報告している。

筆者らは、微粒子バインダーによる造粒改善効果の評価として、微粉鉱石へ微粒子バインダーを添加した、粒子径の異なる二粒子混合系における付着力変化を調査した。

2.1 実験方法

試料として、北米産の微粉鉱石 (Ore A) および豪州産のピソライト系粉鉱石 (Ore B) を準備した (表 1)。Ore B は実験室スケールの水平対向式ジェットミルを用いて乾式破碎し、鉄鉱石微粒子バインダー Ore B' とした。レーザー回折・散乱法で測定した Ore A と Ore B' の平均径は、それぞれ約 500 μm と 4 μm であった (図 4)。粒子外観は、Ore B' は表面に若干微細な粒子が付着していたが両者共に緻密、平滑であった (図 5)。

引張試験装置の概要を示す¹²⁾。試料セルは直径約 35.7 mm (断面積 10.0 cm^2)、層高約 30 mm の円筒状で、底面から 10 mm 高さまでの下部セルと、上面 20 mm の上部セルを組み合わせた二分割構造となっており、下部セルと上部セルの境界が破断面となる。引張機構として装置上部にス

表 1 使用鉱石成分 (mass%)
Chemical compositions of sample (mass%)

	T.Fe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	P	CW
Ore A	66.14	0.34	4.78	0.09	0.07	0.017	0.09
Ore B	58.22	0.08	4.22	1.54	0.10	0.056	9.53

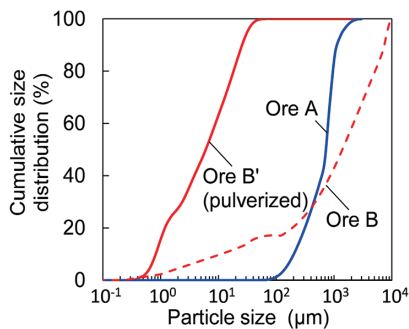


図 4 使用鉱石粒度
Size distribution of sample ores

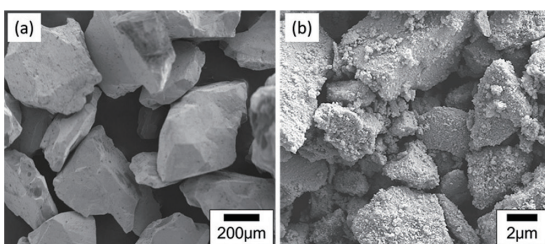


図 5 使用鉱石外観 (SEM) (a) Ore A, (b) Ore B'
SEM image of samples (a) Ore A, (b) Ore B'

プリングとワイヤーが取り付けられており、ワイヤーを巻き上げて引張荷重を印加していき、破断時の荷重値が表示される (図 6)。付着力は下記手順で測定した。

- (1) 同重量に縮分した試料を複数個準備した。
- (2) 試料の 1 つに所定の水分を添加し混合した。
- (3) 水分調整後の試料をセルに装入し、層高 30 mm まで圧密し充填層を形成した。
- (4) 試料充填後のセルを引張試験機に設置して、下部セルをストッパーで固定した。
- (5) 垂直方向引張荷重を徐々に印加し、上下セルが分断した際の引張荷重値を断面積で除し、付着力とした。
- (6) 水分を変更して上記測定を繰り返し、水分と付着力の関係を整理した。この際、初期水分を 3 mass% とし、後述する付着力の最大値が明確となるまで水分を 1 mass% 刻みで上下させ繰り返した。

上記測定を、Ore A および Ore B' 単体、更に Ore A に Ore B' を 5, 10, 20, 30 mass% 添加混合した条件で実施し、付着力に及ぼす微粒子バインダー添加の影響を整理した。

2.2 結果および考察

各試料の水分と付着力の関係から、付着力は水分添加と共に上昇していき、ある水分値で最大値を示し、その後下に転じた (図 7)。粉体粒子間に働く相互作用力のうち、水分上昇に伴って増加するのは液架橋力であると推定され、本試験でも水分上昇に伴い液架橋数が増加していき

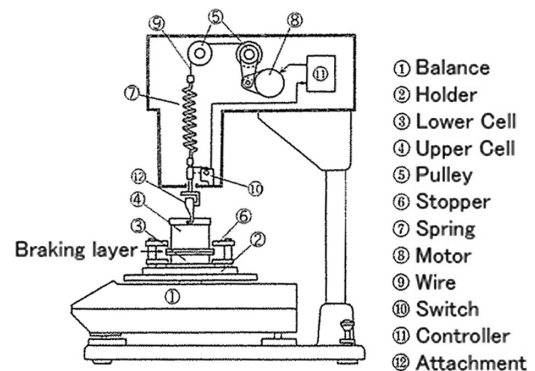


図 6 引張試験装置模式図¹²⁾
Schematic diagram of cohesive strength tester¹²⁾

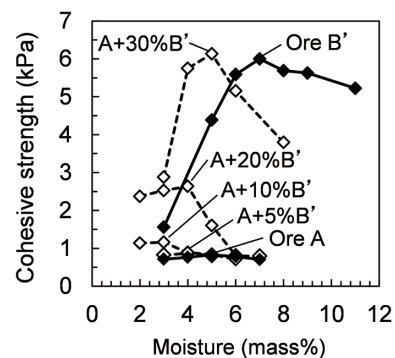


図 7 微粉鉱石付着力に及ぼす水分の影響
Cohesive strength of sample ores

(Pendular 域), ある水分で (理想的には全ての粒子間に液架橋が生成して) ピーク値を示し (Funicular 域), 以降は液架橋が合体して架橋力が消滅していく (Capillary 域) と共に, 過剰水分が潤滑効果をもたらして付着力が低下に転じたものと推察される。

Ore A と比較して Ore B' は, 最大付着力値が上昇した。これは, 単一球粒子の充填層に働く力を表す関係式として広く知られる Rumpf の式¹³⁾ から, 細粒化による粒子接点数および比表面積の増加によって粉体粒子間の液架橋力の合計が (1 接点あたりの架橋力は小さくなるが, 総接点数増加の影響が上回るため) 増加したものと推察される。

Ore A に Ore B' を添加した混合系においては, 2 つの変化が見られた。1 点目は, 最大付着力が Ore B' 添加に伴い上昇した。2 点目は, 最大付着力を示す水分値が Ore A, Ore B' 単体よりも低水分側へシフトする傾向が見られ, 本試験においては, Ore B' を 10% 混合した際に最も低下し, 水分 3% で最大付着力を示した。

上記の如く試料毎に最大付着力を示す水分値は異なっていたが, 造粒において水分値はある程度制御可能な因子であることから, 各々の最大付着力のみに着目, 抽出して, Ore A と Ore B' の混合比率に対する最大付着力および空隙率を整理すると, Ore B' の添加に伴い空隙率は低下し, 最大付着力は二次関数的に上昇した (図 8)。

空隙率の低下は, Ore A 粒子間への Ore B' 粒子の充填が進行したことによると推察され, Ore B' 30% 添加まで低下した。Ore B' 単体の空隙率は高かったが, これは Roller¹⁴⁾ により実験的に示されている様に, 粒径低下に伴って重力に対する表面力 (付着力) の影響が大きくなり充填性が悪化したためと判断される。

最大付着力の上昇が線形でなく二次関数的だったのは, Ore B' 添加量が小さい範囲では破壊の起点となる Ore A 粒子間の接触点が残留しており, それが Ore B' に置き換わり Ore A 同士の接点が減少することで, 大きく付着力が上昇したためと推測される。

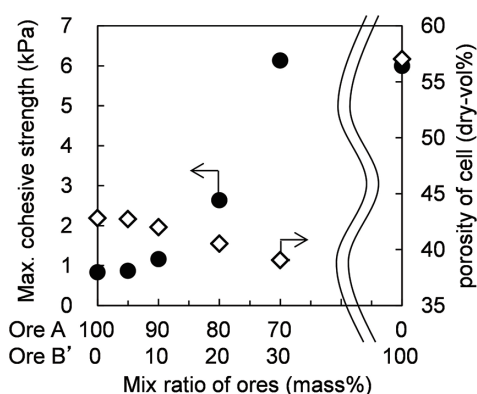


図 8 付着力および充填層空隙率に及ぼす微粒子バインダー添加の影響
Changing of maximum cohesive strength by adding micro-particles

上記結果から, 微粒子バインダー添加によって, 疑似粒子付着粉層の構成粒子が, 高付着力を有し造粒が進行し易い状態となり, 造粒後の疑似粒子強度も上昇することが予測される。ただし, 本試験で検証されたのは液架橋力の存在下, すなわち湿潤状態における強度上昇であって, それが乾燥後の疑似粒子強度の上昇にも寄与するかを直接判断はできない。前田ら¹⁵⁾ は鉄鉱石造粒物の湿潤強度と乾燥後強度の発現機構に関し, 湿潤強度は液架橋力が支配的であり, 乾燥後強度は粘土鉱物の直接添加, もしくは脈石鉱物中に粘土鉱物であるカオリナイトを含有する鉄鉱石の使用時において向上したと報告しており, 粘土鉱物含有量が多い鉄鉱石を破碎して微粒子バインダー化することで, 乾燥後強度上昇に対しても有効に寄与することが期待される。

2.3 基礎検討小括

微粉鉄石への微粒子バインダー添加による造粒改善効果の基礎検証として, 垂直方向一面引張試験法による付着力変化を検討し, 以下の結果を得た。

- (1) 付着力は含水分に伴い変化し, 試料毎に特定の水分値にて最大値を示した。
- (2) 粉体試料が細粒であるほど, 高い最大付着力を示した。
- (3) 微粉鉄石への微粒子バインダー添加に伴い, 混合粉体層の付着力は上昇した。

3. 焼結プロセス模擬試験 (鍋試験)

前章で, 微粉鉄石への微粒子バインダー添加により粉体層の付着力が上昇することを確認した。本章では, 和歌山 No.5 焼結機に微粒子バインダー製造設備を導入するための事前検討として, 既存のバインダーである生石灰との併用時における適切な微粒子バインダー添加量の検討を, 約 50kg 規模の焼結プロセス模擬試験である鍋試験にて行った。

3.1 実験方法

上述した様に和歌山 No.5 焼結機は P 型分割造粒法を導入しており, 2 系統の造粒ラインを有する。それを模擬した鍋試験を実施した。高速攪拌ミキサーとパンペレタイザーからなる E-P ラインで新原料約 23.5mass%, 残る新原料約 76.5mass% と返鉄と炭材をドラムミキサーからなる D-D ラインでそれぞれ造粒処理し, 両者を合流させて鍋装置へ装入し, 焼成した。

E-P ライン原料は, 北米産微粉鉄石 Ore A, 豪州産ピソライト系粉鉄石 Ore B, 高炉ダスト, 生石灰を用い, 前章と同様に Ore B の一部を粉碎して微粒子バインダー Ore B' として添加した。生石灰添加量は和歌山製鉄所での使用量を模擬した 3 水準 (Case-1, 2, 3: E-P ライン原料を 100% とした際に 3.5, 2.7, 1.8mass%) とし, Ore B' 添加量を 4 水準 (Case X-0, 1, 2, 3: 同様に E-P ライン原料を 100% と

した際に 0.0, 3.0, 5.0, 7.0mass%) に変更し、計 12 水準で比較した。D-D ライン配合は、豪州産およびブラジル産の複数銘柄の粉鉱石、副原料、返鉱、炭材を用いた。Ore B' 添加ケースでは D-D ライン配合の Ore B を一部破碎した(表 2)。

E-P ラインの造粒は、原料に水分を添加して高速攪拌ミキサーで 1min 混合調湿し、580mm 径のパンペレタイザーにて 1kg/min で連続的に投入して造粒し、排出された GB を回収した。D-D ライン造粒は、原料を一度に全量ドラムミキサーへ投入し 2min 混合後、水分を添加し 4min 造粒した。その後 E-P ライン造粒物を所定の混合比率となる様にドラムミキサーへ加え、両ラインの造粒物を 15 秒間混合し、ミキサーから排出した。その後、300mm 径、500mm 高の鍋に落下装入し、9.8kPa 圧力下で吸引を続けながら、上部から LPG ガスで 1min 点火し、焼成した。

また、造粒物の評価は、E-P ライン造粒物、D-D ライン造粒物、両ライン混合造粒物の 3 種をそれぞれ約 500g サンプルングし、105℃で 2h 以上乾燥させ水分 0%とし、ロータップ振とう機でタップせずしに 15 秒間篩分けし、各篩区分の重量比率から加重平均径を算出した。

3.2 結果および考察

E-P ライン造粒に及ぼす生石灰 (QL) および微粒子バインダー Ore B' 添加の影響は、若干ばらつきは存在したが、Ore B' 添加率上昇に伴って GB 平均径が増加し、また同じ Ore B' 添加量でも生石灰添加量が多い場合に GB 平均径が増加する傾向をそれぞれ示した(図 9)。

和歌山 No.5 焼結機の E-P ラインには、微粒子バインダーとして本検討で新たに添加した Ore B' に加えて、従来からバインダーとして添加している生石灰や、核として配合する粉鉱石(本試験においては Ore B) が元来有する微粒子

表 2 微粒子バインダー添加鍋試験配合⁹⁾ (mass%)
Blending condition of pot test⁹⁾ (mass%)

	Case 1- 0, 1, 2, 3	Case 2- 0, 1, 2, 3	Case 3- 0, 1, 2, 3
E-P line			
Ore A	12.91	12.90	12.88
Ore B	8.61	8.60	8.59
BF-dust	0.52	0.52	0.52
Quicklime	0.80	0.60	0.40
Subtotal (E-P)	22.84	22.62	22.38
Ore B'	0.0, 0.7, 1.1, 1.6		
D-D line			
Ore B	14.12	14.10	14.08
Other SFs	47.43	47.39	47.32
Fluxes	14.81	15.09	15.41
Quicklime	0.80	0.80	0.80
Return fine	20.00	20.00	20.00
Coke breeze	5.50	5.50	5.50
Subtotal (D-D)	102.66	102.88	103.11
Total	125.50	125.50	125.50

部も存在しており、前章の基礎検討とは異なりバインダー粒子が複数の原料に由来していると考えられる。本試験では上記に挙げた 3 種がバインダーとして同等の造粒改善機能を有しているものと仮定して、Ore B' 添加量+生石灰添加量+Ore B 中に含まれる -10 μ m 粒子量を、各々の密度差で補正して合算したものを総バインダー粒子量と仮定した。

上記の総バインダー粒子量を用いて図 9 を再整理すると、GB 平均径に対して 1 本の相関線に近づき、総バインダー粒子量の増加に伴って GB 平均径が二次関数的に増加した様に見てとれる(図 10)。これは、前章の付着力評価にて微粒子バインダー添加によって付着力が急上昇し始めた領域とも一致した。従って、少なくとも造粒段階における湿潤状態においては、微粒子バインダーはその種類によらず微粉鉱石粒子間を充填することで、体積基準の添加量と相関して GB 平均径の増大に寄与することが示唆される。

一方で焼結生産率は、Ore B' を 5mass% 添加したケースまでは成品歩留が一定値を保ったままで焼成速度が上昇し生産率も上昇したが、7mass% 添加時は焼成速度が更に上昇した一方で成品歩留が低下し、3 水準の生石灰添加率のいずれの場合においても生産率が低下に転じた。ただし、生石灰添加率によって Ore B' 7mass% 添加時の生産率低下度合いが異なり、生石灰添加率が少量であるほど成品歩留および生産率が大きく低下した(図 11)。

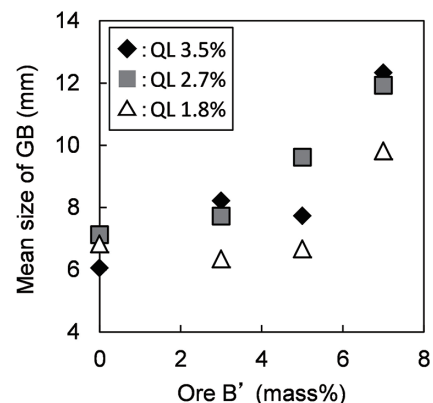


図 9 微粒子バインダー添加が E-P ライン造粒に及ぼす影響⁹⁾
Effect of micro-particle binder on granulation at E-P line⁹⁾

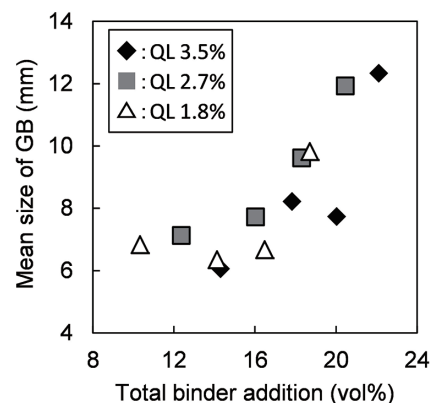


図 10 総バインダー添加量が E-P ライン造粒に及ぼす影響⁹⁾
Effect of total binder on granulation at E-P line

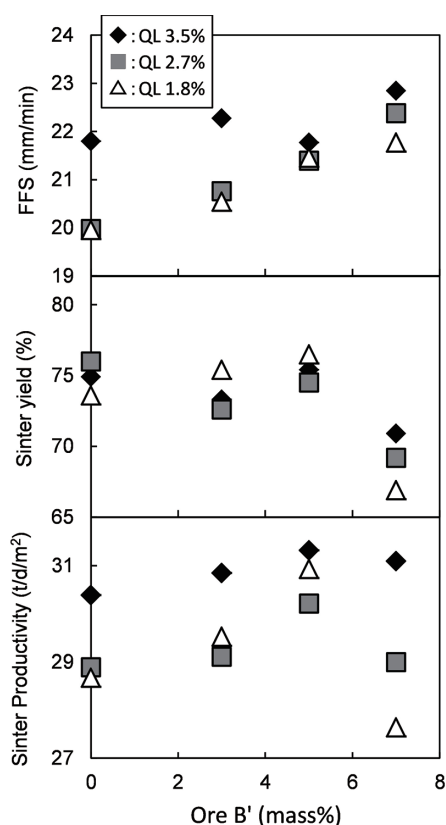


図 11 微粒子バインダー添加が焼結生産率に及ぼす影響
Effect of micro-particle binder on sinter productivity

Ore B' 7mass%添加時の GB 平均径は生石灰添加率にもよるが9.8mmから12.3mmであり、緒言で言及したMEBIOS法における粗大造粒物の上限15mmを大きく超過はしていなかった。にもかかわらず成品歩留が大きく低下した理由は、GBの焼成後強度、例えばCaO成分量およびカーボン量の不足によると推定される。川口ら¹⁶⁾は粗大粒子を配置した際の焼結挙動に関し、マラマンバ造粒球を粗大粒子として配置した場合に、その焼結化状況が成品歩留に大きく影響すること、流動性に富む低融点組成(高CaO、高FeO)でかつ高燃料カーボンを含む配合が良好と考えられることを報告している。川口らが検討したマラマンバ造粒球は-1mmの石灰石を6.2mass%配合した10~15mm球であり、配合されていたCaO成分量は約3.5mass%であったと推算される。これに対し本試験にて成品歩留の低下が特に大きかったCase 3-3のGBは、CaO成分量が約1.8mass%で平均径9.8mmのGBであったため、焼成後強度が不足していたと推察される。

以上より、従来バインダーである生石灰はCaO成分を含んでいるためGB粒径を増加させつつその焼成後強度の担保も可能だが、鉄鉱石を粉碎した微粒子バインダーを更に追加添加してより粗大なGBを製造する際は、別途GB粒径に応じた焼成後強度を確保する手段を準備するか、焼成後強度を維持可能なGB粒径になる様にバインダー添加量を制御することが望ましい。和歌山No.5焼結機のE-Pラインにおける長期試験は、本結果に基づき、Ore B'の製

造・添加量を、E-Pラインに対して7mass%未満の範囲で行うこととし、その仕様に適した破碎設備を導入し、実機評価を実施することとした。

GBの焼成後強度を確保する手段として、上述したCaO成分やカーボンの添加の他、マグネタイト鉱石も有効と予想される。松村ら¹⁷⁾は、(一社)日本鉄鋼協会“資源対応型高品質焼結鉄製造プロセス”研究会にてマグネタイト鉱石の活用を検討した学側知見¹⁸⁻²⁰⁾に基づき、分割造粒法にてマグネタイト微粉鉄石主体かつCaOおよびカーボンの近接配置を抑制したGBを用いた鋼試験にて、マグネタイト鉱石の酸化発熱反応による強度向上を促進し、焼結鉄の冷間強度と被還元性が共に改善したことを報告している。マグネタイト微粉鉄石への鉄鉱石微粒子バインダーの添加検討は今後の課題としたい。

3.3 鋼試験検討小括

和歌山No.5焼結機の造粒フローを模擬し、E-Pラインへ微粒子バインダーを添加する鋼試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) E-Pライン造粒において、微粒子バインダーの添加による造粒改善を確認した。GB平均径は、バインダー粒子の種類によらず、体積基準の添加量の総量に相関して増加する傾向を示した。
- (2) 焼結生産性はある添加量でピークを示し、E-Pラインに対し7.0mass%の微粒子バインダーOre B'を添加した際には焼結生産性が低下した。

4. 実機長期試験

本章では、和歌山No.5焼結機において、鉄鉱石微粒子バインダー製造、添加による造粒改善効果の長期評価を実行した結果を述べる。

4.1 和歌山No.5焼結機の特徴

和歌山No.5焼結機は、第4、5高炉(2700m³)から新1、2高炉(3700m³)体制への切り替えに伴う炉容積増加に対応するべく、2008年に焼結設備増強が実行された。その際、MEBIOS法にて提唱される粗大・緻密造粒物の製造を目的に、P型分割造粒法が導入された⁹⁾(図12)。

和歌山No.5焼結機のE-Pラインは、約150t/h(全原料約20%、新原料約25%)の原料を処理可能である。E-Pライン用に5つの原料槽(内1つは生石灰専用の気流輸送ホッパー)が割り当てられ、鉄石3槽(標準で粉鉄石1槽+微粉鉄石2槽)、高炉ダスト1槽、生石灰1槽という構成としている。粉鉄石と微粉鉄石の配合比率(PF/SF比)は、筆者ら²⁰⁾の過去検討から1/1以上3/1以下を目安としている。

残りの全原料約80%は、ドラムミキサー(以下、D-Dラインと称する)で処理される。和歌山No.5焼結機は1次、2次ミキサー間のコンベアを排した連結型となっている(レ

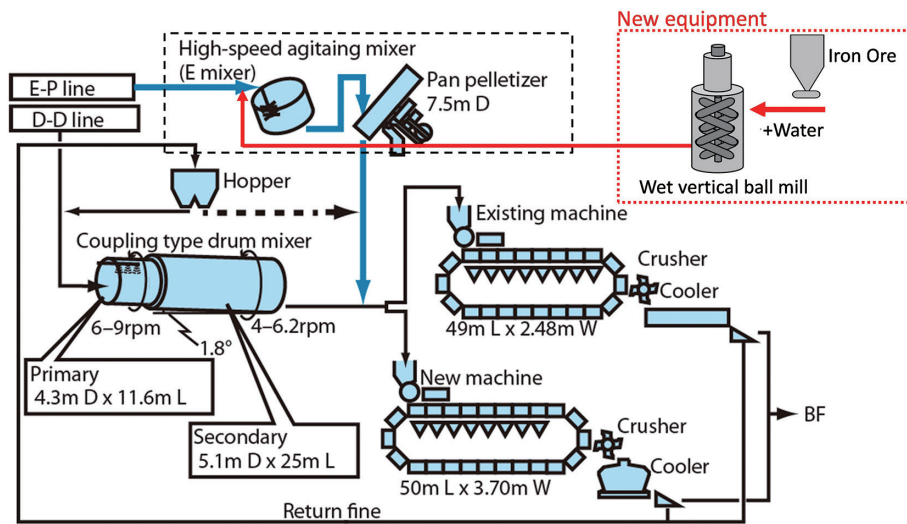


図 12 和歌山 No.5 焼結機の造粒処理フロー
Granulation process of Wakayama No.5 sinter plant

アウト制約下での 2 次ミキサー滞留時間確保目的)。

最終的に、D-D ライン造粒後原料を搬送するベルトコンベア上に E-P ライン造粒後原料が上乗せされる形で両者が合流し、数回の乗継とサージホッパー装入、ドラムフィーダー切り出しを経て軽混合されて焼結機内へと装入される。

4.2 縦型湿式ボールミルの導入

上記 E-P ラインを対象に、微粒子バインダーを連続的に製造、添加するための破碎プロセスを比較検討し、縦型湿式ボールミル (以下、ミルと称する) を採用した。乾式破碎法ではなく湿式破碎法を採用した理由は、図 2 に示した様に微粒子バインダーは造粒過程において水と共に移動して微粉鉱石間へ配置されると考えられるため、鉄鉱石の破碎 (微粒子バインダー化) と水中懸濁を同時に進行させたスラリーの形態で高速攪拌ミキサーへ添加することで、バインダーの配置が効率的になされると期待されるためである。また、乾式破碎した鉄鉱石微粒子はその比表面積の高さから水を加えても濡れ難く、かつ濡れた場所も局所的に凝集していわゆる“だま”を形成し易かったため、その回避も念頭に置き選定した。

ミルの基本構成ならびに破碎プロセスを以下に述べる (図 13)。中心部にスクリューを有した塔型の本体に、破碎メディアとして耐摩耗鋼球が所定量充填されている。破碎対象の鉄鉱石と水が各々投入され、スクリューの回転によって内容物が攪拌されることで圧縮力や剪断力が働き、鉄鉱石が破碎されていく。従って、本装置は広義ではボールミルの 1 種ではあるが、より正確には媒体攪拌ミル (Stirred mill) の 1 種と言える。

本体にて破碎された鉄鉱石スラリーは、付帯する水箒槽での重力分級およびサイクロンでの遠心分級を経て粗粒部は本体へ再循環し、細粒部が成品スラリーとして次工程

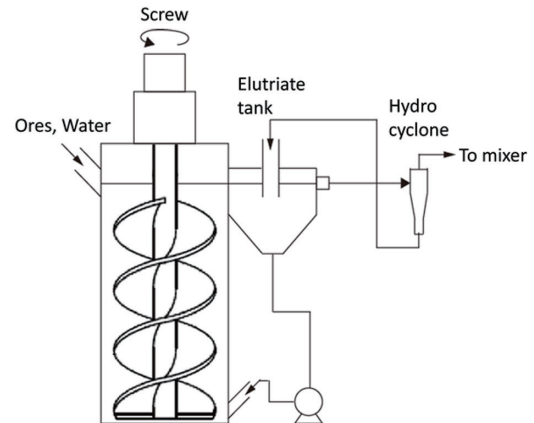


図 13 縦型湿式ボールミルシステム構成図
Schematic diagram of wet vertical ball mill

の高速攪拌ミキサーへと供給される。主な設備仕様として、スラリー粒度 $-10\mu\text{m}$ が目標値である 60 vol% 以上となることを保証する原料供給量 7.3t/h 以下、水分供給量 9.6t/h 以下、スラリー濃度 40~43 mass % である。

4.3 実機試験条件

最初に微粉鉄石を配合しない状態から操業を開始した。微粉鉄石を新原料約 13.3% 配合し、Base 操業を約 3 日間続けた後、ミルの稼働を開始して破碎量と濃度を約 1 日掛けて徐々に増加させて目標値まで調整していき、Test 期間に移行した。

Base と Test で同じ原料配合 (焼結鉄成分の微調整やリサイクル品変動によって実績値は若干変動) とし、Test においては前章までで検討してきた豪州産ピソライト鉄石 Ore B の一部を破碎した。破碎後のスラリーは高速攪拌ミキサーまでポンプ輸送して投入し、造粒水分レベルを一定にするため、Base において高速攪拌ミキサーへ添加する水をスラリーと置き換えた。なお試験時の破碎量は新原料約 0.5 mass%, E-P ライン内においては約 2.1 mass% に相当する。

D-D ライン配合はいずれも通常の粉鉱石、副原料、炭材等とした(表3)。

試験中は、E-P ライン(パンペレタイザー出口)造粒物、D-D ライン(ドラムミキサー出口)造粒物、両者が合流し焼結機に装入される直前の配合原料(給鉱部)それぞれをサンプリングし、造粒状態を評価した。造粒状態評価は、疑似粒度評価として、サンプリングおよび縮分した造粒物を、乾燥機で完全乾燥(105℃ 2h 以上保持)させた後に、ロータップ振とう機でタップせず短時間(12秒間)振とうさせ、8.0, 4.0, 2.0, 1.0, 0.25mm で分級した。特に、過去検討により原料層通気性との相関が高いと報告されている²⁾、上記操作で剥離、崩壊した-0.25mm 粉の量を未附着粉率(-0.25mm%)として評価した。

4.4 結果および考察

製造したスラリーの性状を示す。濃度は、ミル稼働24h後に目標値である約40mass%に達し、以降Test期間中の平均濃度は40.8mass%であった。また、期間中に採取したスラリーのレーザー回折・散乱法での測定から、-10μm 約71%と、目標粒度まで破碎されていることが確認された(図14)。

造粒物評価結果の一例を示す。Base, Test 期間それぞれ

表3 微粒子バインダー添加実機試験配合(mass%)
Blending conditions of commercial plant test(mass%)

		Base	Test
E-P line	Concentrate	13.3	13.3
	Pisolite SF (Australia)	8.9	8.8
	Others	0.6	0.7
	Quicklime	0.8	0.8
	Micro-particles	0.0	0.5
	Subtotal	23.6	24.0
D-D line	Pisolite SF (Australia)	17.2	16.6
	Marra mamba SF (Australia)	19.5	19.4
	Hematite SF (Brazil)	17.7	17.6
	Others	11.1	11.5
	Limestone	10.5	10.7
	Quicklime	0.3	0.3
	Subtotal	76.4	76.0
Total		100.0	100.0

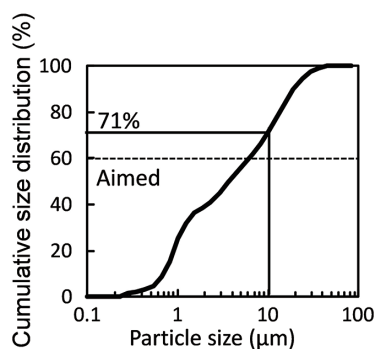


図14 縦型湿式ボールミル破碎後のスラリー粒度
Size distribution of slurry

で採取、評価したE-P ライン造粒物の中ではほぼ同水分値だった2点を比較したところ未造粒粉率が低下しており、微粒子バインダー添加による造粒改善効果が確認された(図15)。E-P ライン造粒物の研磨断面観察から、Test 期間の造粒物附着粉層内においては、微粉鉱石間の空隙率がBase に対して減少しており、それら空隙が微粒子バインダーによって充填されていることが確認された(図16)。

また、鉄鉱石微粒子バインダーのみが数百μm 以上自己凝集した様な“だま”部分は、断面観察結果から確認されなかった。湿式破碎したスラリーの形態で高速攪拌ミキサーに添加し混合攪拌することで、微粉鉱石間へのバインダー粒子の分散が十分に進行したものと推察され、湿式破碎法は微粒子バインダーを製造、供給して微粉鉱石多量使用時に造粒改善が可能な方法として有効であると判断される。

試験前の微粉鉱石無配合期間からBase 期間に掛けて通気性および生産率は低下した。Base からTest 期間への移行、すなわち微粒子バインダー添加により、焼結生産率が2.4%向上した(図17)。

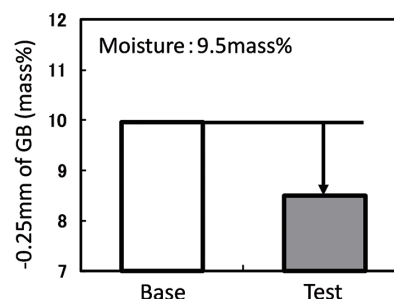


図15 微粒子バインダー添加がE-P ライン造粒に及ぼす影響¹⁰⁾
Effect of total binder on granulation at E-P line¹⁰⁾

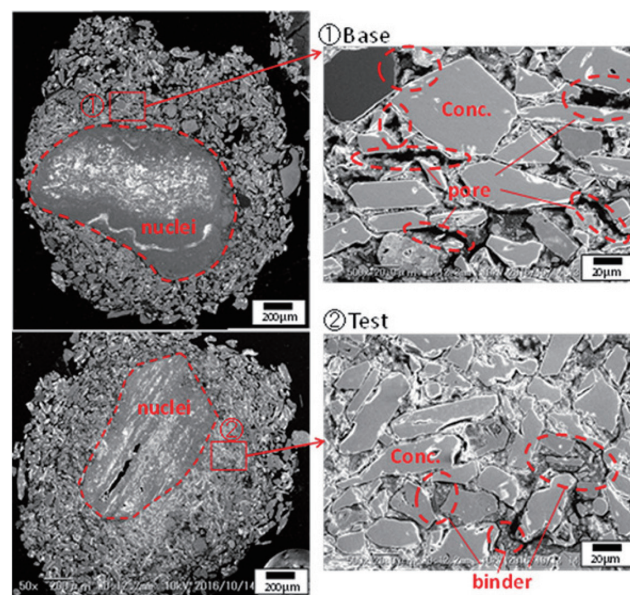


図16 微粒子バインダー添加が附着粉層内構造に及ぼす影響
Effect of micro-particle binder on adhering layer structure

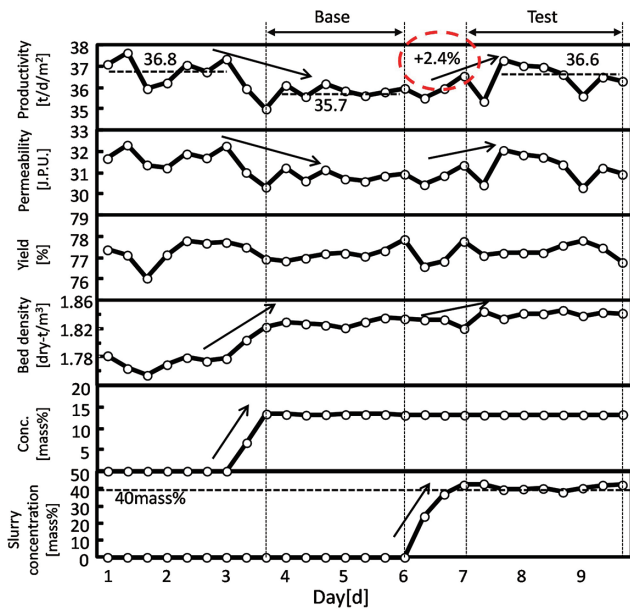


図 17 和歌山 No.5 焼結機微粒子バインダー添加長期試験結果¹⁰⁾

Effect of micro-particle binder addition on sintering operation at Wakayama No.5 sinter plant¹⁰⁾

5. 結 言

和歌山 No.5 焼結機の E-P ラインに縦型湿式ボールミルを導入し、連続的に微粒子バインダーを製造、添加することにより、以下の結果を得た。

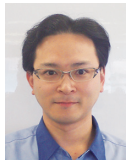
- (1) 湿式破碎したスラリーの形態で鉄鉱石微粒子バインダーを連続添加することによる造粒改善を確認した。
- (2) 鉄鉱石微粒子バインダー添加による造粒改善によって、P 型分割造粒法で微粉鉄石を多量使用する際における更なる生産率改善を確認した。

参考文献

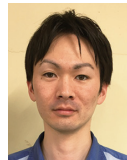
- 1) 坂本登, 岩田嘉人, 福与寛, 斉藤汎, 里見弘次, 宮下恒雄:

鉄と鋼. 72, 94 (1986)

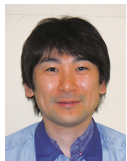
- 2) Kawaguchi, T., Usui, T.: ISIJ Int. 45, 414 (2005)
- 3) 樫村茂, 大山浩一: CAMP-ISIJ. 26, 741 (2013)
- 4) 高松信彦, 栗原喜一郎, 圃中朝夫, 斉藤源治, 加来久典: 新日鉄技報. 391, 79 (2011)
- 5) 上城親司, 山口泰英, 原応樹, 川口尊三, 松村勝, 中川洋一, 吉川政秀, 藤徹: CAMP-ISIJ. 12, 133 (2010)
- 6) 岡田務, 岡崎潤, 中野正則, 河野克之, 三浦悟: 鉄と鋼. 92, 735 (2006)
- 7) 河内慎治, 笠間俊次: 鉄と鋼. 94, 475 (2008)
- 8) 山口泰英, 松村勝, 樋口謙一, 野村誠治: CAMP-ISIJ. 30, 725 (2017)
- 9) 山口泰英, 松村勝, 樋口謙一, 野村誠治, 森田雄介: CAMP-ISIJ. 30, 726 (2017)
- 10) 原応樹, 寺司周平, 山口泰英, 松村勝, 梅本紘成: CAMP-ISIJ. 30, 727 (2017)
- 11) 岡崎潤, 肥田行博: CAMP-ISIJ. 8, 1085 (1995)
- 12) 矢野省三, 林田和弘: 島津評論. 38, 201 (1981)
- 13) Rumpf, H.: Chem. Ing. Tech. 42, 538 (1970)
- 14) Roller, P.S.: Ind. and Eng. Chem. 22, 1206 (1930)
- 15) 前田敬之, 松尾賢嶺, 大野光一郎, 国友和也: 鉄と鋼. 103, 238 (2017)
- 16) 川口尊三, 上城親司, 松村勝: 鉄と鋼. 92, 779 (2006)
- 17) 松村勝, 高山透, 原恭輔, 山口泰英, 石山理, 樋口謙一, 野村誠治, 村上太一, 林幸, 大野光一郎: 鉄と鋼. 103, 388 (2017)
- 18) 多木寛, 大野光一郎, 前田敬之, 国友和也: 鉄と鋼. 103, 335 (2017)
- 19) 藤野和也, 村上太一, 葛西栄輝: 鉄と鋼. 103, 341 (2017)
- 20) 片平圭貴, 渡邊玄, 林幸: 鉄と鋼. 103, 372 (2017)
- 21) 山口泰英, 上城親司, 松村勝, 川口尊三, 樋口謙一, 野村誠治: 鉄と鋼. 103, 254 (2017)
- 22) 原応樹, 川口尊三, 上城親司: CAMP-ISIJ. 23, 936 (2010)



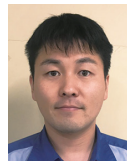
山口泰英 Yasuhide YAMAGUCHI
プロセス研究所 製鉄研究部 主幹研究員
千葉県富津市新富20-1 〒293-8511



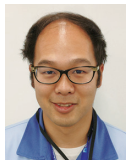
森田雄介 Yusuke MORITA
和歌山製鉄所 製鉄部 製鉄技術室



原 応樹 Masaki HARA
和歌山製鉄所 製鉄部 製鉄技術室 主幹



寺司周平 Shuhei TERAJI
和歌山製鉄所 製鉄部 製鉄技術室 主査



梅本紘成 Hironari UMEMOTO
設備・保全技術センター
プラントエンジニアリング部 主査



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)