高炉塊鉱石付着粉除去技術の開発

石井 純^{1)*}・浅沼 稔¹⁾・佐藤 健¹⁾・山本 耕司²⁾

Development of Removal Technology of Attached Iron Ore Fine

Jun ISHII, Minoru ASANUMA, Takeshi SATO and Koji YAMAMOTO

Synopsis : Improvement of gas permeability in the blast furnace is strongly needed to realize lower coke rate blast furnace operation which can reduce CO₂ exhaust dramatically. In the upper part of the blast furnace, it is known that removal of fine particles is very effective to improve gas permeability. Especially wet raw iron ore brings a lot of fine iron ore into blast furnace because the wettability of iron ore is quite higher than sinter ore, coke, and other raw materials. Then removal of attached ore fines from wet raw iron ore was tried using conventional screen. At first screening condition was changed, then it was shown that the extension of screening time was effective to remove fine ore. Next, screening of wet iron ore with additional reagent which can reduce the adhesion force by water was tested. Water absorbent polymers and surface acting agents were prepared and added to wet iron ore. Addition of these reagents was very effective to remove ore fines from wet iron ore.

Key words : raw material sizing; gas permeability; adherent powder; iron ore screening.

1. 緒言

鉄鋼業は膨大なエネルギーを消費する産業であるが、近年エネルギー消費量削減の観点から、低還元材比高炉操業が指向されている。低還元材比高炉操業においては様々な課題が示されており、これらの課題を解決すべく検討が行われてきたが¹⁻⁵⁾、最も重要な課題の一つとして通気性の低下による操業安定性の低下が挙げられる。すなわち主要な還元材であるコークスは、還元材であると同時に、炉内の空隙率を確保し通気性を向上するスパーサーとしての働きがあるため、これを削減することにより炉内通気性は大幅に低下し、吹き抜け等の操業トラブルの要因となる。そこで、低還元材比高炉操業においては炉内の通気性改善のために高炉原料の強度の向上と粒度の改善が重要である⁶⁾。高炉原料の粒度は、通常搬送路に設置される篩によって制御されているが、ヤード置き原料においては、ヤードへの原料積み付け、ヤードからの原料払い出しの際に、原料の落下衝撃が増加するため粉率が高くなり⁷⁾、篩上の微粉残存量が増加する。さらに、降雨時には水分の架橋力により微粉原料が大径の原料に付着し易くなるため、篩の効率が低下するといった問題がある。特に塊鉱石は焼結鉱と比較して吸水性が高いことが知られているが、含有するFeO濃度が高いほど濡れ性が高くなり、さらに表面の凹凸が著しく結晶性の低い鉱石は吸水性が高いこと⁸⁾が報告されており、特定の銘柄において非常に水分付着性が高く、微細な

粉が非常に付着しやすいため、特に雨天時には高炉内の通気を阻害しやすいといった問題がある。

Fig.1に湿潤状態の豪州系鉄鉱を高炉貯鉱下でサンプリングし、篩分けにより粒度を測定した結果を示す。湿潤状態の鉄鉱石は1 mm以下の微粉がほとんど測定されないが、本試料を乾燥してから粒度を測定すると、微粉が発生している。つまり、湿潤状態においては、鉄鉱石に主に1 mm以下の微粉が付着していることを示しており、高炉内に持ち込まれるため高炉通気性悪化の要因となり得る。

このため、塊鉱石の水洗技術や乾燥技術の検討が行われてきた^{9,10)}が、いずれにおいても大規模な設備投資が必要となる。本研究においては、従来の篩設備を有効に活用し、簡便な手法で塊鉱石の付着粉を除去することを目標とし、高炉原料に添加材を加えて篩効率を向上させる検討を行った。

Fig. 1. Particle Size Distribution of Raw Iron Ore.

平成26年4月1日受付 平成26年7月8日受理 (Received on Apr. 1, 2014 ; Accepted on Jul. 8, 2014)

1) JFE スチール (株) スチール研究所 (Steel Research Laboratory, JFE Steel Corporation, 1-1 Minamiwatarida Kawasaki-ku Kawasaki Kanagawa 210-0855)

2) JFE スチール (株) 京浜製鉄部 (Ironmaking division, JFE Steel Corporation)

* Corresponding author : E-mail : j-ishi@jfe-steel.co.jp

DOI : <http://dx.doi.org/10.2355/tetsutohagane.100.1355>

2. 実験方法

2・1 鉱石付着粉篩いラボ試験

水分によって微粉が付着した塊鉱石の効率的な篩い分け方法を検討するため、ラボにおいて篩い分け試験を実施した。まず原料ヤードより採取した塊鉱石を乾燥機において130℃で12時間乾燥させた後、2 kgずつに小分けし、内径20 cm φ丸篩いを用いて各粒度に篩い分けた。篩い分けにはロータップを用いた。ロータップの回転数は290 rpmであり、篩分け時間は10分間とした。篩い分け後の塊鉱石を湿潤時におけるヤード塊鉱石の粒度構成となるよう配合した。篩下となり得る－9.5 mmを32.4 %、微粉とされる－4.75 mm以下を18.9 %とし、特に水分による付着性が高いと思われる－1.0 mm以下の粉が4.7 %とした。次に規定量の水分を噴霧器を用いて添加し、よく攪拌して分散させた。水分の蒸発を防ぐためポリエチレン製の袋に試料を投入し、水分を十分に浸透させるため30分静置した。添加水分量が鉱石重量と水分量の合計の3 %～9 %となるように調整し、水分量による粉の付着状況と篩性能への影響を明らかにした。この際、篩の目開きは9.5 mmとした。

また、原料水分量を7 %に固定し、篩時間を2倍に延長(30秒→60秒)、篩構成を2段構成とした(上段篩目：15 mm、下段篩目：9.5 mm)際の篩下重量の変化を測定し、篩の構成が篩性能に与える影響を確認した。

さらに、本試料に界面活性剤若しくは水分吸収材の薬剤を添加し、篩性能への影響を調査する試験を実施した。界面活性剤としては、脂肪酸ナトリウム、直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム(LAS)を主成分とする界面活性剤、また水分吸収材としては、シリカゲル、ポリアクリル酸Na系高分子吸収材を用いた。薬剤の添加量は、鉱石重量に対して脂肪酸ナトリウム：0.05～0.5 %、LAS：0.1～1 %、シリカゲル：0.1～1 %、水分吸収剤：0.02～1 %とした。薬剤を添加する際には、粉状の薬剤を散布した後混合攪拌して薬剤を分散し、さらに10分間静置して薬剤添加試料とした。次に作成した塊鉱石試料を内径20 cmの丸篩にセットし、ロータップにて30秒間篩った後、篩下に落下した試料の重量を測定した。さらに130℃で8時間以上乾燥させたのち、上記のロータップにて篩い分けを行い、粒度ごとの重量を測定した。篩上試料の乾燥・粉の分離も試みたが、微細な粉が鉱石の細孔内に入り込み、分離が困難であったため、篩下試料により微粉の除去効率を評価するものとした。

2・2 実機スケール鉱石付着粉篩い試験

実機スケールの塊鉱石篩分けにおいて、ラボ篩い分け同様の効果が得られるかを確認するために、JFE東日本製鉄所京浜地区原料ヤード内に500 t/日の処理能力を有する移動型篩装置を設置し、ヤード塊鉱石を用いた篩試験を実施した。本移動篩装置のスクリーンは2枚構成となっており、

Table 1. Initial Size Distribution of Yard Iron Ore.

Size (mm)	+25	20-25	15-20	10-15	5-10	3-5	1-3	–1
Weight (%)	6.1	11.9	17.3	21.1	13.8	5.3	10.9	13.6

上部スクリーンの目開きが20 mm、下部スクリーンの目開きは7 mmであった。またスクリーンの大きさは、下部、上部ともに幅2.0 m×長さ3.5 mであった。

塊鉱石試料としては、原料ヤードに野積みされた高結晶水鉱石を使用した。本試料をサンプリングし、乾燥後篩分けし粒度分布を測定した結果をTable 1に示す。

いわゆる粉と称される5 mm以下粒径試料の重量比率が30 %、また1 mm以下試料の重量比率が14 %であり、微粉を非常に多く含むことが示された。また、乾燥前後の重量変化から含水率を測定した結果、3.9 %であった。そこで鉱石試料が水分を大量に含んだ状態を再現するため、レインガンを用いて鉱石に水分をなるべく均一に散水し、重機を用いてよく混合した。水分添加後の試料をサンプリングし、乾燥後重量を測定した結果、含水率が9.3 %となった。本試料をベースとして、薬剤を投入した際の篩性能の変化を調査する試験を実施した。薬剤としては、ラボ篩試験で粉除去効果が得られた界面活性剤(主成分：脂肪酸ナトリウム、直鎖アルキルベンゼンスルホン酸ナトリウム(LAS))、ポリアクリル酸Na系水分吸収剤を用いた。薬剤の添加量は鉱石重量に対し、脂肪酸ナトリウム：0.16 %、LAS：0.05 %、ポリアクリル酸Na系水分吸収剤：0.02～0.05 %とした。

薬剤を添加する際には、含水鉱石試料を重機で出来るだけ薄く引き伸ばし、表面に薬剤を薄く散布した後、再度重機を用いてよく混合して、薬剤添加試料とした。また篩い分け試験における原料処理量は1回あたり約4 t、原料処理速度は0.9～1.5 t/分であった。

3. 実験結果

3・1 鉱石付着粉篩ラボ試験

3・1・1 水分量による篩性能への影響

ラボ鉱石緩い試験において、水分添加量を変化させた際の鉱石表面の状況をFig.2に示す。水分添加量3 %までは水分が鉱石に浸み込んだが、5 %以上になると浸み込みきれない水分が表面に湧出しはじめ、9 %では表面全体が水分で覆われた。

次に篩試験の結果をFig.3に示す。篩下の重量は水分量の増加に伴い減少したが、水分量7 %を超えると逆に増加した。粒度別に見ると、篩下重量の変化はほぼ－1 mmの微粉に起因している。つまり、水分量の上昇に伴い、－1 mm以下の微粉が大粒径の粒子に付着し、落下し難いことが示

Fig. 2. Appearance Configuration of Wet Iron Ore.

Fig. 3. Removed Ore Particles Size Distribution.

された。しかしながら水分量がさらに増加すると粒子表面全体に多量の水分が湧出し洗浄効果が発揮されるため、微粉が落下し易くなり、篩下重量が増加したものと考えられる。

3・1・2 スクリーンの増強による性能向上効果の検討

篩性能の基本的な向上方法として、まずスクリーン長さの延長、スクリーン面積の拡張が考えられる。また、スクリーンの段数を複数段化することにより、粒子の篩への衝突確率を制御して分離性能を向上させる「確率ふるい」と呼ばれる手法が知られている。本手法を用いた「モーゲンセンサイザー」は高効率の篩として知られ、細粒焼結鉱回収用篩として採用された実績がある¹¹⁾。

そこで、湿潤鉄鉱石における篩性能向上効果を検討するため、篩時間の延長、篩の多重化による篩性能への影響をラボ試験により調査した。篩試験結果をFig.4に示す。

水分0%と比較し、水分7%においては1mm以下の粉の落下量が篩上原料に付着するため大幅に減少しているが、篩時間を延長することで粉落下量が増加した。また篩2段構成の場合においても粉落下量は若干増加したが、時間延長ほどの効果は得られなかった。よって、篩面積の拡大など、篩時間を延長する設備拡張が有効である可能性が示された。

3・1・3 薬剤添加による篩性能向上方法の検討

湿潤鉱石は水分によって微粉が付着した状態にあり、篩い分けが困難となっている。そこで水分による付着力を低

Fig. 4. Effect of Screening Time and Screen Combination on Screening Performance.

減させる薬剤を添加する手法について検討した。

Fig.5において、半径Rの粒子間が水で架橋されるとし、粒子と液体の接触角を δ 、液体の表面張力を γ 、液体の形状を円弧と仮定した際の半径をR1、液架橋部のもっとも低い部分の高さをR2、水平面から液接触面への角度を α とすると、液架橋による粒子間の付着力Fは式(1)で示される¹²⁾。

$$F = \pi R^2 \gamma \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \sin^2 \alpha + 2\pi R \gamma \sin \alpha \cdot \sin(\alpha + \delta) \dots \dots \dots (1)$$

上式より、表面張力の低減により、付着力が減少することが示されている。水の表面張力を減少させるためには界面活性剤が有効であることが知られており、界面活性剤を添加した篩試験を実施することとした。また、液による架橋を減少させる方法も粉の付着力低減に有効であると考えられる。そこで水分吸収材を添加し液架橋を減少させる方法についても検討を行った。これらの薬剤を添加した際のラボ篩試験結果をFig.6に示す。

原料水分7%条件において、9.5 mm篩下重量は29.1%であったが、界面活性剤を添加した場合、水分吸収材を添加した場合のいずれにおいても篩下重量が増加した。特に高分子吸収材の効果は顕著であり、添加量0.05%で篩下重量が大きく増加することが示され、わずかな量の水分吸収剤を添加することにより、篩性能が大幅に改善されていることが明らかになった。また水分吸収剤を添加して10分間の静置時間内で水分吸収が行われており、水分吸収速度が非常に速いことが推測される。

また水分吸収材は、ある添加量を超えると一定の篩下重量増加効果を示すが、界面活性剤は添加量増加に伴い、篩下重量が減少する結果となった。界面活性剤はある添加量までは水分の表面張力を劇的に減少するが、添加量が増加すると水溶液の粘度を上昇させるため、架橋力が強固となり粉除去能力が低下するものと推測される。

Fig. 5. Water-bridge Formation.

3・2 鉱石付着粉篩いヤード試験

製鉄所原料ヤードにおける鉱石篩分け試験の結果をFig.7に示す。

ラボ実験と同様に原料に水を散布することにより、篩下重量が大幅に減少し、特に-1 mm粉の減少が顕著であった。これは、水分により-1 mm粉が篩上原料に付着する事を示している。篩構成による影響は、篩回数を2回（篩時間2倍）とした場合、篩下に落下する-1 mm粉が増加したが、2段篩（20 mm, 7 mm）とした場合、殆ど効果が見られず、ラボ試験と同様の結果となった。実機篩設備を増強する場合、篩面積の増加は効果的であるが、篩の2重化等、多段篩の適用は効果が小さいと言える。

また、薬剤を添加した際の篩性能への影響を試験した結果をFig.8に示す。

高分子吸収剤を添加した場合においては、添加量増加に伴い篩下重量が増加した。粒度別に見ると-1 mm粉も増加しているが、1-5 mm, +5 mmも同時に増加している。+5 mmの大径粒子が落下すると篩上歩留りが減少するため、歩留りと粉率の両方を考慮して添加量を検討する必要がある。また、篩分け後の篩下は水分量が多いにも関わらず高分子吸収剤の作用で流動性が高く、ベルトコンベアに

Fig. 7. Iron Ore Screening Test at Keihin Yard (Screen Combination).

Fig. 6. Effect of Reagent Addition Ratio on Removed Ore Ratio.

よる搬送も容易であった。

界面活性剤添加試験においては、LASは篩下重量の増加が小さいが、脂肪酸ナトリウムは篩下重量が大きく特に－1 mm 粉、－5 mm 粉を除去する能力が高いことが示された。しかしながら、水分と界面活性剤を含んだ篩下は付着性が高く、搬送用ベルトコンベアに泥状に付着し取り扱いが困難であった。よって水分吸収材の適用が強く推奨される。

4. 考察

4・1 篩性能向上効果の検討

篩分けにおいては、目標粒度以下の試料を確実に分離し、また目標粒度以上の試料をなるべく分離しない事が求められる。分離性能の鋭さを求める指標として、ニュートン効率が知られている。Fig.9に示すように、ある目標粒度以上の粒度の粒子比率が X_f である試料 F kgを篩で分離し、篩上 O kg、篩下 U kgが得られる時、篩上、篩下の目標粒度以上の粒子比率をそれぞれ X_o 、 X_u とすると、目標粒度以上の篩上回収率(γ_o)、目標粒度以下の篩下回収率(γ_u)はそれぞれ式(2)、式(3)で表される。ニュートン効率(η)は篩上回収率(γ_o)、篩下回収率(γ_u)を用いて式(4)で表される¹³⁾。

$$\gamma_o = \frac{x_o \cdot O}{x_f \cdot F} \quad (2)$$

$$\gamma_u = \frac{(1-x_u) \cdot U}{(1-x_f) \cdot F} \quad (3)$$

$$\eta = \gamma_o + \gamma_u - 1 \quad (4)$$

ラボ篩分け試験の篩効率としてニュートン効率を算出したものがFig.10である。篩構成の変更、薬剤の添加により、篩上効率は大きく変動しないが、篩時間2倍(篩回数2回)、

Fig. 8. Iron Ore Screening Test at Keihin Yard (Additional Reagents).

高分子吸収剤添加の条件において篩下回収率が大幅に向上し、この結果ニュートン効率も大きく改善されることが明らかになった。篩時間の延長においては篩による水分落下により、また高分子吸収剤添加においては水分吸収により、水分による架橋力が減少し、付着粉が落下し易くなるためと推測される。多段篩については、微粉が水分によって付着する場合、微粉は大径粒子の一部となるため、スクリーンへの衝突確率の制御による篩い分けが有効に機能せず、性能が向上しなかったと考えられる。

4・2 水分吸収材有効利用率の推定

水分吸収材は水分濃度を低減することにより篩性能を向上させることが可能である。そこで水分吸収材添加時の篩性能から水分濃度を逆に推算し、水分吸収剤に取り込まれた水分量を求めて、最大吸収量に対する比率を計算した。まず、Fig.3の試験結果より、各水分濃度における篩性能を計算した。篩性能の指標としては、篩下回収率(－5 mm)を用いた。篩下回収率は、目標粒度以下の試料が篩下で回収された割合として求められる。各水分濃度の試料における篩下回収率をFig.11に示す。篩下回収率は水分量2.5 %を超えると水分の増加に従って減少することが示された。水分量2.5 %以上で鉱石表面に水分が湧出し、粉を付着す

Fig. 9. Simplified Schematic of Screening.

Fig. 10. Effect of Additional Reagents on Newton's Efficiency.

Fig. 11. Effect of Moisture Content on Undersize Recovery.

るためと考えられる。次に、水分7%の鉱石試料に高分子吸収材0.01%を加え篩試験を行った結果より、篩下回収率は88.4%であった。これはFig.11において水分量4.9%に相当する。つまり添加した高分子吸収材により水分が7%から4.9%に減少したものと推測される。

これより高分子吸収材重量当たりの吸水量を算出すると、207 g/g—吸収材であった。本高分子吸収材の水分吸収量のカタログスペックは400 g/g—吸収剤であり、最大吸収量と比較して吸収された水分量は小さいことが示された。よって水分吸収材の混合方法の改善などによりさらに水分濃度を低下して篩性能を向上できる可能性があると考えられる。

5. 結言

湿潤鉄鉱石を効率的にふるい分ける方法について、ラボ試験による検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 水分を含む塊鉱石は—1 mm以下の微粉を付着する性質がある。試験に使用した豪州系鉱石の場合、粉の付着量が最大となる水分量は7%であった。
- (2) 微粉を除去するために篩構成を変更する試験において、篩時間の延長により微粉除去が可能であることが示された。またメッシュの異なる2枚の篩を重ねて使用した場合は篩性能改善効果が小さかった。

(3) 水分吸収材、界面活性剤の添加により湿潤鉱石の篩性能が改善されることが示された。特に高分子吸収材は少量の添加量で篩性能が大幅に改善されることが明らかになった。

(4) 高分子吸収材 (0.01 %) による水分吸収により、塊鉱石水分量7%を4.9%まで低減できることが推測された。この際高分子吸収材あたりの水分吸収量は207 g/g吸収材と算出され、カタログスペックに対して余裕があるため混合性向上などによりさらに給水量を高められる可能性がある。

また、上記ラボ試験結果をもとに、製鉄所原料ヤードにおいて実機スケールの湿潤鉱石篩試験を実施し、以下の知見を得た。

(5) 実機スケール湿潤鉱石篩試験において、ラボ試験と同様に—1 mmの微粉が粗粒に付着し篩性能が低下することが示されたが、篩時間の延長、薬剤の添加により篩性能が改善されることが明らかになった。薬剤の添加においては、脂肪酸Na、高分子吸収材ともに効果が確認されたが、脂肪酸Na添加時の篩下は高水分で付着性が高く、ベルトコンベアに付着する問題が発生した。

文 献

- 1) M.Iizuka, S.Kishimoto, T.Shibuya and T.Fukushima: *Tetsu-to-Hagané*, **66**(1980), 1966.
- 2) J.Kurihara: *Tetsu-to-Hagané*, **67**(1981), 1574.
- 3) Y.Togino, M.Tateoka, M.Sugata, K.Yamaguchi, S.Kume, K.Yamaguchi and I.Abe: *Tetsu-to-Hagané*, **65**(1979), 1553.
- 4) Y.Ujisawa, K.Nakano, Y.Matsukura, K.Sunahara, S.Komatsu and T.Yamamoto: *Tetsu-to-Hagané*, **92**(2006), 1015.
- 5) T.Sato, M.Sato, K.Takeda and T.Ariyama: *Tetsu-to-Hagané*, **92**(2006), 1006.
- 6) K.Komada, T.Horio and Y.Hida: *Tetsu-to-Hagané*, **52**(1966), 295.
- 7) Y.Togino, T.Yamada, Y.Umezu and T.Iida: *Tetsu-to-Hagané*, **62**(1976), S422.
- 8) M.Yoshinaga and M.Ichidate: *Suiyō-Kaishi*, **18**(1977), 561.
- 9) 浜田重工業 (株) : 特開平 7-113127, (2006).
- 10) JFE スチール (株) : 特開 2013-119667, (2013).
- 11) M.Nakamura, T.Sawada, K.Nakamura, T.Minagawa, Y.Tagawa and H.Takahashi: *Tetsu-to-Hagané*, **72**(1986), S875.
- 12) 三輪茂雄: 粉粒体工学, 朝倉書店, 東京, (1972), 357.
- 13) 三輪茂雄: ふるい分け読本, 産業技術センター, 東京, (1974), 203.