

(解説)

低品位鉄鉱石活用のための選鉱プラント及びペレットプラントの動向

Beneficiation Plants and Pelletizing Plants for Utilization of Low Grade Iron Ore



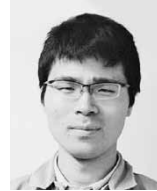
野村 勉^{*1}
Tsutomu NOMURA



山本範人^{*2}
Norihito YAMAMOTO



藤井武志^{*2}
Takeshi FUJII



滝口裕太^{*3}
Yuta TAKIGUCHI

Recently, the grade of iron ore deposits has deteriorated and further development of low grade deposits is desired. Presently the most effective and experienced route to utilize such deposits is the provision of beneficiation plants for upgrading iron ore and pelletizing plants for agglomerating. Kobe Steel has much experience in designing, constructing and operating beneficiation plants and pelletizing plants and has its own pelletizing process (KOBELCO pelletizing system). This paper describes general information on beneficiation and pelletizing plants, including future expectations for them, and introduces the latest activities in connection with KOBELCO pelletizing system, with a view to the future.

まえがき = 近年、中国やインドのような新興国を中心に鉄鋼生産が大幅に拡大し、それに伴い鉄鉱石の需要も大きく増加している。しかし、既存の鉱山では長年の採掘の結果、世界的に鉱床の品位が低下し簡単な整粒のみで鉄品位の高い鉄鉱石を製造することが難しくなっている。現在の製鉄設備の主流は高炉であるが、低品位な鉄鉱石をそのまま装入すると生産性やエネルギー原単位が大幅に悪化する。これは直接還元炉においても同じであり、原料段階での品位向上が強く求められる。現時点で最も普及している対策は、物理的分離方法を用いた選鉱プロセスで鉄鉱石の品位を上げる方法であり、既存鉱山に選鉱プロセスを導入し品位を上げる改良が広がっている。また、最初から選鉱プラントを組み込むことでこれまで対象にならなかった低品位鉄鉱山の開発も拡大している。

選鉱プロセスでは鉄鉱石を細かく粉砕し不純物を分離するため、必然的に製品鉄鉱石はこれまでより細くなる。高品位鉄鉱石の整粒で発生する粉鉄は焼結プラントでも塊成化できるが、選鉱プロセスを経たさらに細かい精鉄の多くは焼結プラントでは使用できず、ペレットプラントで塊成化を行う必要がある。このため、今後はペレットプラント建設が拡大して行く予想されている。

当社のKOBELCO pelletizing systemはさまざまな利点を有し、また研究開発や自社設備での操業経験に基づく多くの改善が織り込まれており、世界各国に多数のプラントが建設・納入されてきた。本稿では、その具体的内容もあわせて解説する。

1. 鉄鉱石需給の概要

1.1 鉄鉱石の種類

鉄鉱石はいくつかの視点から分類できる。最も重視さ

れるのは鉄成分の含有量であり、全鉄として60~63%以上を高品位、それ以下を低品位と称することが多い。またサイズや処理方法によって下記のような呼称をつけられている。

- ・塊鉄 (lump) ; 直径約10~40mm。そのまま高炉や直接還元炉に装入される。
- ・粉鉄 (fine) ; 直径約0.15~10mm。焼結プラントで塊成化し高炉に装入される。
- ・ペレットフィード ; 直径約0.15mm以下。ペレットプラントで塊成化し高炉や直接還元炉に装入される。
- ・精鉄 (concentrate) ; 鉄鉱石の品位を上げるために選鉱処理した鉄鉱石
- ・焼結鉄 (sintered ore) ; 焼結プラントで塊成化された鉄鉱石
- ・ペレット (pellet) ; ペレットプラントで塊成化された鉄鉱石

1.2 鉄鉱石生産の概況

中国における鉄鋼生産増に伴う鉄鉱石需要増に応じて中国国内での鉄鉱石生産も飛躍的に伸びてきたが、それでも需要を賄いきれず、輸入鉄鉱石も大幅な増加を示している。しかし近年では、鉄山の品位低下による国内生産量の頭打ちが始まっているとも推測されている¹⁾。また、これまでインドは有数の高品位鉄鉱石輸出国であったが、国内需要を優先して2007年より鉄鉱石輸出に課税しており、将来的には高品位鉄鉱石の輸出は困難になると言われている²⁾。これら需要増の予測とは逆に、これまでの鉄鋼生産の結果、スクラップの発生量が拡大し、スクラップを鉄源とする鉄鋼生産が増加することによって鉄鉱石を原料とする鉄鋼生産が減少するとの予想もなされている。しかし、両者のバランスと今後の世界的な

^{*1} エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 技術部 ^{*2} エンジニアリング事業部門 新鉄源本部 プロジェクト部 ^{*3} 鉄鋼事業部門 加古川製鉄所 製鉄部

経済成長に伴う鉄鋼需要増を考慮すると、鉄鉱石の需要は比較的堅調に推移すると予想されている³⁾。

1.3 鉄鉱石供給体制の概況

鉄鉱石供給元は2000年以降戦略的な再編を行い、ブラジルのVale、イギリスとオーストラリアの2元本社制を持つRio Tinto、およびBHP Billitonの3社で世界の鉄鉱石貿易量の約65%を占めている。その他にオーストラリアのFortescue Metals Group LtdやイギリスのAnglo Americanのような準大手に加えて多数の中小規模の会社が鉄鉱石の生産を行っているが、前述した3社の価格戦略や開発計画が世界の市場に強い影響を与える構図は当面変わらない。

2. 選鉱プラントの概要

2.1 整粒

鉱床から採掘された原石 (Run of Mine=ROM) は、ショベルもしくはホイールローダで大型トラックに積み込まれ破碎工程に送られる。一次破碎は通常gyratory crusherで行われ、さらにcone crusherもしくはjaw crusherによる後段の二次破碎を経て塊鉱と粉鉱に分けられる。高品位鉱山の場合はこの段階の鉱石を製品として出荷する。

2.2 選鉱プロセス

鉄品位をさらに向上させたい場合や低品位鉱山においては、二次破碎の代わりに選鉱プロセスを組み込む。選鉱プロセスは、図1に示すように粉碎・分離・脱水の主要工程で構成されている。

2.2.1 粉碎

粉碎工程は、下流の工程において物理的方法で鉄鉱石と不純物を分離できるよう、事前に鉱石を細かく砕く工程である。一段目の粉碎にはAG mill (autogenous mill)

もしくはSAG mill (semi-autogenous mill) を使い、さらに細かく粉碎する二段目にball millを使うケースが多い。AG millは大きめの鉱石を、SAG millは大きめの鉱石と鉄製ボールを鉱石の粉碎に利用する機器である。これらを投入した円筒型のシェル(径が大きく胴長が短い)に粉碎すべき鉱石を供給し、シェルを回転させることで内容物を高く持ち上げ、落下の際の衝撃で鉱石を粉碎する。ball millは鉄製ボールのみで鉱石を粉碎する機器でAG millやSAG millに比べて径が小さく胴長が長い。

2.2.2 分離

粉碎された原料は分離工程で有用鉱石と不純物に分けられる。物理性状の違いを利用して分離する機器(比重分離機、磁力分離機、浮遊分離機)と、サイズによって分離する機器(screen, screw classifierなど)の組み合わせで構成されている。

1) 比重分離

鉄鉱石の真比重は約 5 t/m^3 で、主な不純物であるシリカやアルミナの比重(約 2.7 t/m^3)と明らかな違いがある。この比重差を利用して鉄鉱石と不純物を分離する手法が比重分離である。比重差による水中での落下速度の差を利用するjigや遠心力を活用するspiral separatorやcyclone separatorなどがある。分離工程機器の中では最も安価であり、この方法のみで選鉱を行っている例や、浮遊分離や磁力分離の前処理として組み込んでいる例も多い。比較的粗い鉱石(直径約 $0.1\sim 1.5\text{ mm}$)に用いられる。

2) 磁力分離

磁力分離は鉄鉱石と不純物の磁性の違いを利用して分離する手法であり、マグネタイト鉱石の選鉱に広く用いられている。永久磁石を組み込んだドラムを原料スラリー中で回転させると、磁性のあるマグネタイト鉱石はドラムに付着して水中から分離され、磁性のない不純物は水中に留まるので両者が分離できる。磁性の弱いヘマタイト鉱石の分離には電磁石でより強力な磁力を発生させる機器が利用される。近年は、この機器を活用して尾鉱からヘマタイト鉱石を回収することも既に商業化されている。直径 $0.05\sim 1\text{ mm}$ 程度の比較的細かい鉱石に用いられる。

3) 浮遊分離

鉱石表面の親水性の違いを利用して分離する手法が浮遊分離である。直径 $0.01\sim 0.1\text{ mm}$ 程度の細かい原料に用いられ、品位向上の最終段階、あるいは硫黄やリンのような不純物を除去するために適用される例が多い。鉱石成分と主な不純物成分は同程度の親水性を持っているが、どちらかに選択的に吸着される薬品(捕集剤)を投入することによって薬品を吸着した成分の表面が疎水性になる。ここに下方から気泡を加えると気泡を吸着し浮上する。この現象を利用して分離する。

2.2.3 脱水

前述した分離工程は通常、取り扱いの容易性や発塵(じん)防止の観点から湿式で行われ、分離された精鉱はスラリー状になっているため脱水が必要となる。脱水は濃縮したスラリーを濾(ろ)布で濾(こ)すことで行

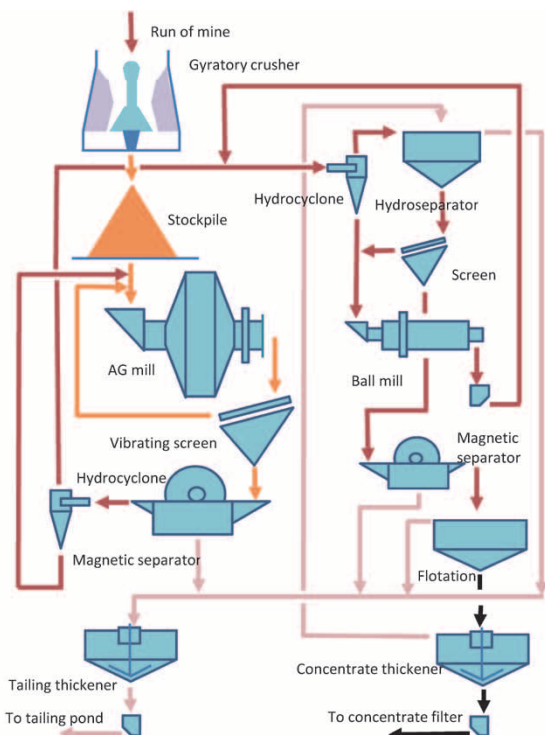


図1 選鉱プラントのプロセスフロー (一例)
Fig.1 Example of process flow of beneficiation plant

われ、濾すための力として真空を活用するvacuum filterが広く用いられている。しかし、この方式では脱水後のケーキ水分を9%以下にすることは困難で、また鉱石が細かい場合や設備が高地にある場合には残留水分はさらに高くなる。近年では、空気圧もしくは水圧で加圧するpressure filterを適用し、水分を8%程度まで低減させる例が徐々に増えている。

2.3 輸送

通常、鉱山から出荷港までの輸送は貨車で行われる。一方、粒度が細かい鉱石はスラリーのままパイプラインで輸送することも可能である。この方法を適用している代表例はブラジルのSamarcoであり、全長396kmのパイプライン2本で年間2,400万トンの鉄鉱石を輸送している。このうち1本は1977年の稼働であるが現在でも使用されている。長距離輸送のために必要な圧力を加える昇圧ポンプが必要であるが、貨車輸送に比べて運転コストは安価である。このため、選鉱プラント側で十分な水が確保できる場合にはスラリー輸送は有効な方法である。

3. 塊成化プラントの概要

製品鉄鉱石のうち粉鉱とペレットフィードは、そのままでは粒度が細か過ぎるため高炉や直接還元炉に装入できない。これらを装入物として塊成化する工程が焼結プラントとペレットプラントであり、前者は粉鉱を、後者はペレットフィードを主原料とする。

3.1 焼結プラントの概要

焼結プラントのフローを図2に示す。粉鉱、石灰石、コークブリーズ（必要に応じて生石灰やドロマイト）を混合した後、格子構造を有する移動式台車に均一に供給する。点火炉でコークブリーズに着火し、その燃焼熱で混合物を塊成化させる。焼成後は円形もしくは直線形の

クーラで冷却されて製品となる。クーラ排気の顕熱は排熱ボイラで回収される例が多い。

製品の焼結鉱は、その形状が不均一で輸送中に粉を発生するため、プラントは通常製鉄所内に設置される。年産500~600万トンの設備が多く、年産800~850万トンの大型設備も稼働している。製鉄所内で発生する比較的粗いダスト類も原料としてリサイクルできるが、コークブリーズを多く使用することから排ガス中に硫黄酸化物が多く含まれ、排ガス脱硫設備を具備するプラントが増えてきている。

3.2 ペレットプラントの概要

図3にペレットプラントのフロー（KOBELCO pelletizing system）を示す⁴⁾。細かく粉碎した原料とバインダを混合した後、直径12mm程度のボール（green ball）に造粒し、これを焼成（乾燥・予熱・焼成・冷却）して製品とする。

製品ペレットは球形で強度が高いため輸送中の粉の発生が少ない。プラントは鉱山近傍か鉱石出荷港近傍に設置されることが多いが、当社の加古川製鉄所のように製鉄所内にペレットプラントを持っている例もある。造粒はballing discもしくはballing drumで行われ、焼成は当社が採用しているgrate-kiln-cooler systemもしくは、焼結炉に似たstraight grate system⁵⁾で行われる。

年産600万トンのプラントは2000年までは2ラインしか存在していなかったが、その後設備の大型化が急速に進み、現時点で9ラインが年産600万トンを超える能力を持っている。さらに、ここ数年で3ラインが加わる見込みで、最大能力のラインは年産830万トン（建設中）と焼結設備と同程度の生産能力を持つようになってきている。一方、小型設備（年産60~120万トン）もインドや中国の鉱山近傍で数多く建設され稼働している。

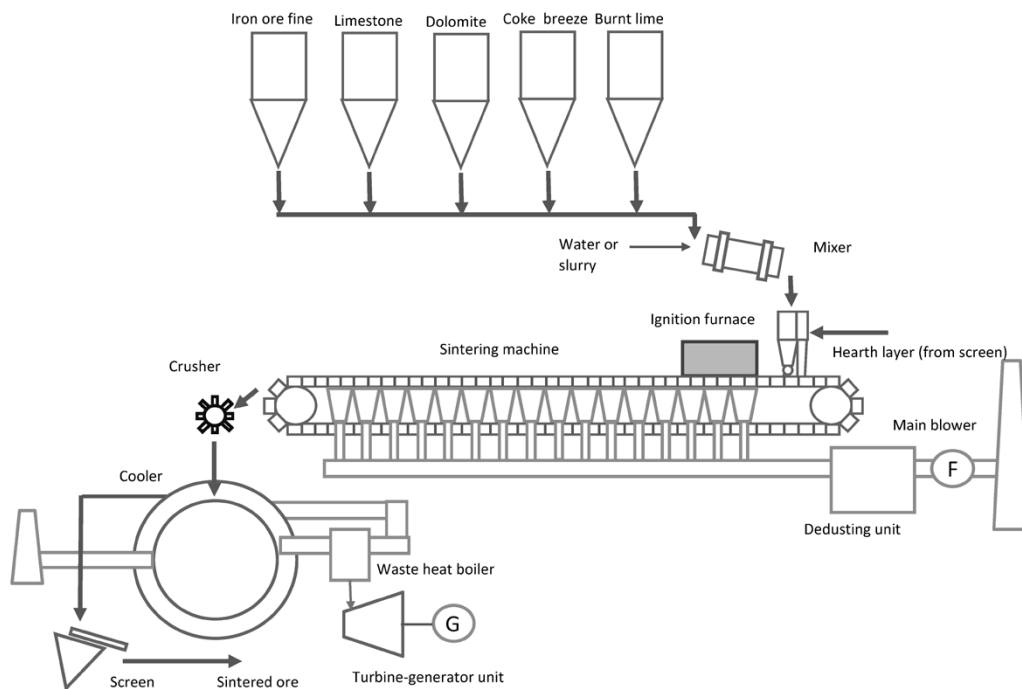


図2 焼結設備の一般的なフロー
Fig. 2 Typical flow of sintering plant

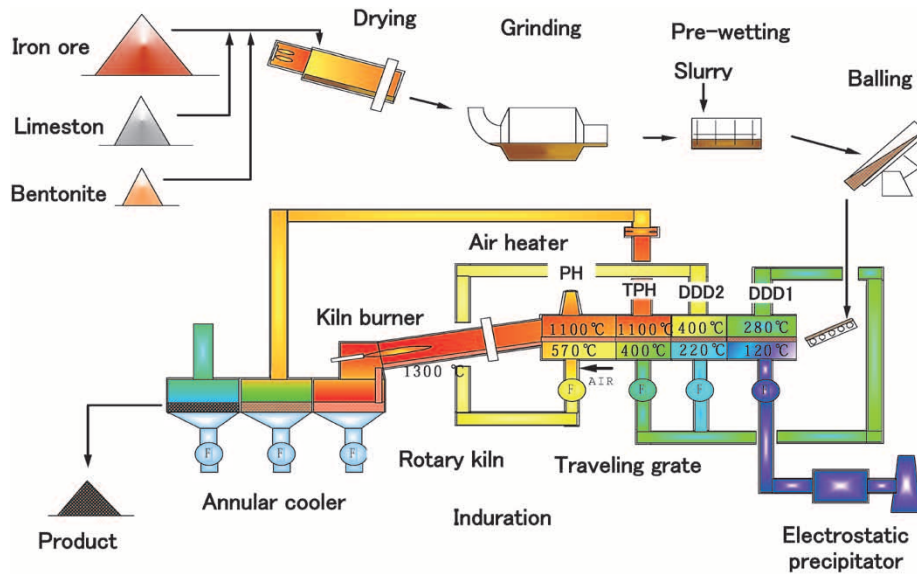


図3 当社ペレットプラントの一般的なフロー
Fig. 3 Typical flow of KOBELCO pelletizing system

4. 当社のペレットプラントの最新技術開発

当社のペレットプラントの具体的な内容や特徴については、R&D神戸製鋼技報 (Vol.60, No.1) にて紹介済みであるが、それ以降に開発した技術について紹介する。

4.1 無触媒脱硝法

近年、新興諸国においても環境への負荷をできるだけ小さくすることが求められており、その中で窒素酸化物 (NOx) を低減させる新しい方法を開発した。これは無触媒脱硝方法 (SNCR法) の1つであり、900~1,200°Cの比較的高温の領域にアンモニアを吹き込み、比較的長時間炉内で窒素酸化物と反応させる手法である。噴霧方法を工夫することにより、図4に示すような高効率でかつ未反応のアンモニアを大きく低減できる特徴を有している。この方法をtraveling grateの予熱 (PH) ゾーンに適用することにより、大きな追加設備投資なしに窒素酸化物の発生量を低減することが可能となる。その代表的なフローを図5に示す。

4.2 キルン用石炭の炭種拡大

KOBELCO pelletizing systemでは焼成にキルンを用いており、高価な重油やガスの代わりに安価な石炭を主燃料として使用できる。しかし、安価な石炭は灰分量が多く、石炭灰がキルン内に付着・堆積してキルン内の通風を阻害することがある。このようなトラブルを防ぐ対策はいくつか考案されている。なかでも、キルンバーナのフレーム長さを短く維持し、石炭の粉碎後粒度をより細かくすることが特に有効であることを見出し、実際の操業においても確認した。図6⁶⁾にキルンバーナと石炭灰の堆積の概念を示す⁶⁾。フレームがキルン内壁まで伸びていた場合、石炭灰は熔融状態でキルン内壁に到達して付着・堆積するが、フレームが短い場合はキルン内壁に到達する前に温度が下がり、固相状態として存在するため付着が抑えられる。図7には石炭粒度とキルン入口部の石炭灰付着との操業テスト結果⁶⁾を示す。石炭を細かく粉碎することで付着指数 (相対的な堆積量) を抑えることができる。

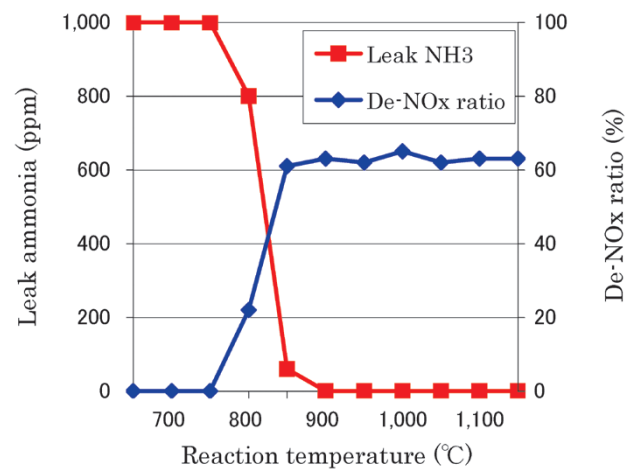


図4 SNCR法の効果例
Fig. 4 Typical example of effects by SNCR system

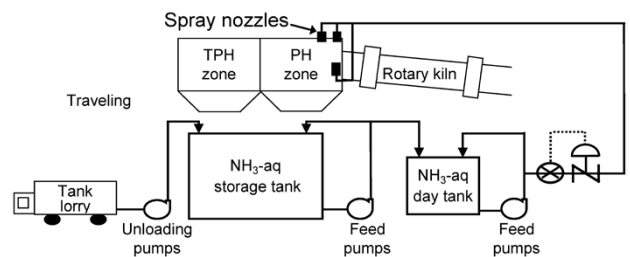


図5 SNCR法のペレットプラントへの適用
Fig. 5 Typical application of SNCR system on pelletizing plant

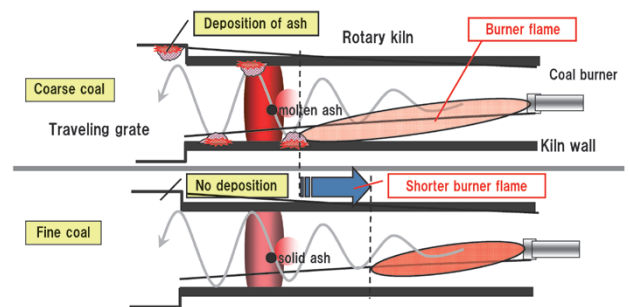


図6 キルンバーナーと石炭アッシュ堆積の概念図
Fig. 6 General image on relation between kin burner and coal ash deposition

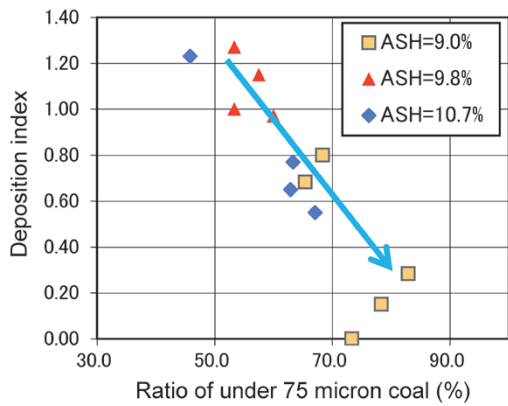


図7 石炭粒度と石炭灰堆積

Fig. 7 Relationship between coal fineness and ash deposition

5. 今後のペレットプラントの動向と当社の対応

5.1 今後の塊成化プロセスの動向

これまで述べたように、鉱山の品位低下に伴って選鉱プロセスの導入が増え、製品鉱石は粉碎工程を経るため非常に細かな精鉱となる。精鉱は細かいため焼結プラントでの使用に限界があり、ペレットプラントでの使用拡大が進むと予想される。また高炉においては、製品ペレットの鉄品位が高く、高温性状の改良も進んだ結果、ペレット多配合によるスラグ低減や還元剤低減と、それに伴うCO₂排出量低減の有効性が認められている⁷⁾。このため、今後は高炉装入原料の一部が焼結鉱からペレットに置き換えられて行くと推測される。この流れは、コークブリーズを多く消費する焼結プラントに比し、ペレット製造における環境負荷が低いことでさらに加速されると考えられる。

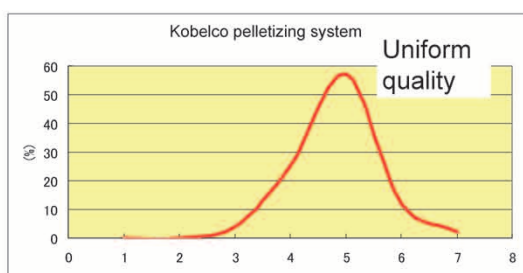
さらに注視すべき点は、直接還元炉向けのペレット消費の増加である。もともと、鉄品位が高いことと粉の発生が少ないことが好まれ、直接還元炉の原料はほとんどがペレットである。そして直接還元炉は、シェールガス

を活用した安価な鉄源製造としての需要増。およびスクラップを利用した製鋼工程において必要とされる清浄鉄源としてのDRI (Direct reduced iron) やHBI (Hot briquetted iron) の需要増から今後大きな拡大が予想されており、その原料となるペレットも同様に需要増が見込まれる。

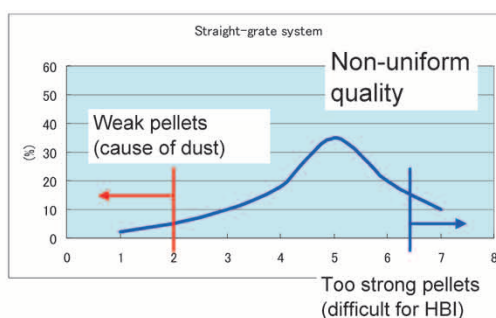
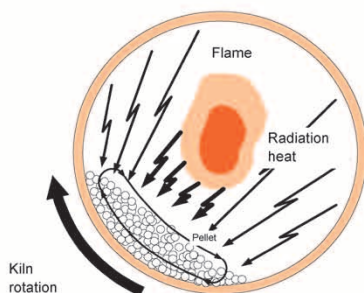
5.2 今後の大型プラントの動向

鉄鉱石の埋蔵量が豊富にある場合、投資効率の観点から大型のペレットプラントが計画され、建設や操業の容易な出荷港近傍が建設地として選定される。近年のペレット設備の一基当たりの生産能力増を踏まえると年産600万トン以上の能力が求められ、また製品ペレットの競争力確保のために、低い製造原単位と高い品質が必要とされる。とくに、船で世界各地に出荷されることから粉の発生が少ない点が強く求められる。

当社は既に2010年にバーレーンにおいて年産600万トンのペレットプラントを建設した実績を有しており、年産800万トンプラントへの対応も可能である。また、当社のKOBELCO pelletizing systemはStraight grate systemに比べて焼成ガス量が少なく、原料層厚が薄いことから、プロセスファンの消費電力が少ないという特徴を有している。さらに、最適な熱回収プロセスを具備することによって、トップレベルの低い燃料原単位を実現している。また、焼成工程にキルンを採用し、ペレットが転動しながら焼成されるため、図8に示すように⁸⁾ 高強度で強度のばらつきの小さいペレットが製造でき、長距離の輸送に伴うペレットの割れを抑える効果も生む。Straight grate systemではペレット静止層の上部から加熱されるのみで上層部と下層部の強度差が大きく、強度の弱い下層部のペレットが輸送中に割れることが多い。ペレットの平均強度を上げればこの点は改善されるが、逆に過剰に強度の高いペレットが含まれてしまう。直接還元炉でHBIを生産する場合、強度が過剰に高いペレット



due to tumbling action of pellet



due to static bed firing

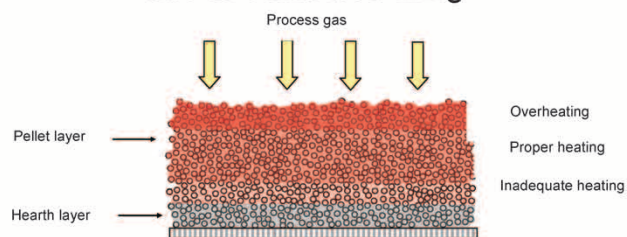


図8 製品ペレットの比較

Fig. 8 Comparison of product pellet

トが含まれているとブリケット化が難しくなる。このため、均一なペレットが製造できる当社プロセスの方がHBI製造には適している。

5.3 今後の中型プラントの動向

中型プラントは、大型プラントと比べて投資効率が低くなるため、投資効率以外の利点が得られるように製鉄設備と同じ敷地に建設されるケースが多いと考えられる。必要とされるペレットプラントの能力は年産300～400万トンで、単独で建設されるケースに比べて下記のような利点が期待される。

- ・小規模な鉄鉱石原料ソースでも活用できる。
- ・自社製鉄設備に最適な品質のペレットを設計・製造できる。
- ・副生ガスをペレットプラントの燃料に活用することにより、安価なペレットが製造できる。
- ・保全要員や管理要員の共通化が図られる。
- ・他設備で発生するダストをペレット原料として再利用できる。

当社保有のペレットプラントは高炉一貫製鉄所の敷地内に設置しており、製鉄所内に設置されるペレットプラントに対する多くの知識と経験を蓄積している。例えば、転炉ダストをペレット原料にリサイクルすることによって原料の有効利用を図っている。転炉ダストは微粉であるためにバインダとしての効果もあり、実際にバインダの使用量を低減する副次効果も得られている。また、前述した石炭活用技術により、ボイラ設備で使用する安価な石炭をペレットプラントでも活用することによって燃料費の削減を実現している。

5.4 今後の小型プラントの動向

埋蔵量がそれほど豊富ではない鉱山はインドや中国で数多く存在しているが、採算性が悪いことからこれまで

は開発対象になっていなかった。しかし、近年の鉄鉱石価格の高止まりを受け、このような鉱山の開発も進展すると予想される。

小型鉱山の場合、ペレットプラントは選鉱プラントと一緒に鉱山近傍に建設されるケースが多いと考えられる。一体化することで精鉱の貯留設備を省略でき、また、一括建設することで工事費用の抑制も期待できる。当社も年産250万トン標準小型プラントを活用し、今後の拡販を目指している。

むすび = これからの鉄鋼生産および鉄鉱石生産を俯瞰（ふかん）すると、選鉱プロセスで鉱石の品位を上げ、ペレットを製品とする開発が着実に増加して行くものと予想される。当社は独自のペレット技術を有し、世界6箇国に11基のペレットプラントの建設実績を持つ。特に製品ペレット品質の高さと石炭を主燃料に使用するノウハウを保持している点で高い評価を受けている。加えて、鉄鉱石向けの大型選鉱プラントの建設実績も有している。今後もこれらのプラントの拡販を通して鉄鉱石産業および鉄鋼業の発展に少しでも寄与できれば幸いである。

参考文献

- 1) Magnus Ericsson. JOGMEC金属資源レポート. 2010.3, p.99.
- 2) テックスレポート. 輸入鉄鉱石年鑑2012年度版. p.76.
- 3) 小澤純夫. JOGMEC金属資源レポート. 2012.5, p.47.
- 4) 山口晋一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, p.15.
- 5) 山口晋一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, p.15.
- 6) 滝口裕太ほか. COREM 3rd symposium on iron ore pelletizing. 2013, Oct.
- 7) <http://www.lkab.com>
- 8) 山口晋一ほか. R&D神戸製鋼技報. 2010, Vol.60, No.1, p.17.