

解説

受賞技術-24

炭化水素系気体燃料を活用した鉄鉱石焼結プロセスの開発

Development of Iron Ore Sintering Process with Usage of Hydrocarbon Gas Fuel

JFEスチール(株) 山本哲也
 スチール研究所 主任研究員
 Tetsuya Yamamoto

JFEスチール(株) 大山伸幸
 技術企画部 主任部員
 Nobuyuki Oyama

JFEスチール(株) 岩見友司
 スチール研究所 主任研究員
 Yuji Iwami

JFEスチール(株) 佐藤道貴
 スチール研究所 主席研究員
 Michitaka Sato

1 緒言

京都議定書に続き、2015年にパリ協定が締結され、京都議定書には批准していなかった米国や中国の批准が発表されるなど、世界的に地球温暖化防止、およびCO₂排出量削減の取り組みが広がっている。そのような中で、日本においても更なるCO₂排出量の削減が求められている。我が国の電力を除く製造業からのCO₂排出量のうち、鉄鋼業からの排出量は50%以上を占めており、鉄鋼業の果たす役割は大きい。さらに鉄鋼業からの排出量においては、焼結-高炉工程における排出量はその60%以上を占めている。現在の製鉄プロセスでは、粉鉱石をコークスの燃焼熱を利用して塊成化し、製造した焼結鉱を高炉においてコークスにより高温で還元・溶解することで溶銑を製造している。焼結-高炉工程で発生するCO₂は大半がこのコークス由来のものであり、これらの工程でのCO₂排出量の削減には、コークス使用量の削減が重要となっている。

Fig.1に焼結工程の具体的なプロセスフローの一例を示す。まず粉鉱石と石灰石、粉コークスを混合し、パレット台車に装入する。点火炉で原料表面の粉コークスに点火すると、原料表面から吸引された空気の流れにより酸素が供給されて、粉コークスの燃焼は下方に進行する。この燃焼熱により粉鉱石と石灰石間で生成した融液が鉄鉱石の粒子同士を結合させることで、上層から下層まで順次塊成化が行われる。その間、パレット台車は排出側に進行し、排出部で塊成化した焼結鉱を排出する。これを破碎して篩いにかけて、粒径が5mm以上のものは成品として高炉へ、5mm以下のものは返鉱として再度焼結工程に戻される。

本工程で製造される焼結鉱は、高炉の主要原料であり、その品質が高炉操業に大きな影響を及ぼすことが広く知られている。焼結鉱の強度の向上により、破碎過程での返鉱発生率が低下し、焼結工程において返鉱を再度焼結するための粉コークスを削減できる。一方、焼結鉱の被還元性の向上により、高炉での還元に必要な塊コークスを削減できる¹⁾。つまり、焼結鉱の強度と被還元性の改善が、製鉄所からのCO₂排出量の大半を占める焼結-高炉工程でのコークス使用量削減に繋がり、製鉄業におけるCO₂排出量低減の総合的な対策となる。

しかしながら焼結鉱は、一般に緻密なほど強度が高く、多孔質なほど被還元性に優れているため、その両立は難しい。そこで今回、従来技術では困難であった焼結鉱の強度と被還元性を両立しつつ改善することを目的とし、炭化水素系気体燃料を用いた焼結技術を開発し、世界で初めてその実用化に成功した²⁾。本報では、ラボでの基礎研究による本技術の考

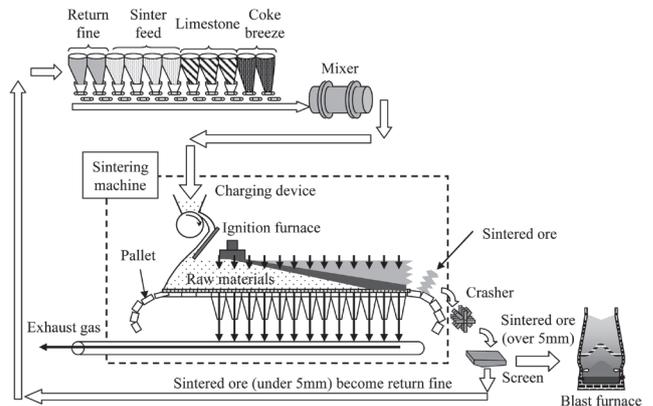


Fig.1 Outline of sintering process.

え方の確立、実機への適用、および実機適用時の焼結鉱品質の改善効果について報告する。

2 ラボ検討による技術開発

2.1 焼結鉱の鉱物組織制御の考え方

焼結鉱の鉱物組織は、主にヘマタイト、マグネタイト、カルシウムフェライト、およびスラグ組織で構成されている。強度・被還元性に及ぼす鉱物組織の影響を調査した結果、カルシウムフェライト組織が強度と被還元性の両方に優れている、一方、スラグ組織はいずれにも非常に劣ることが分かった³⁾。Fig.2に焼結過程における鉱物生成の模式図を示す。鉄鉱石中のヘマタイトは、温度の上昇に伴い一部がコークスの燃焼時に発生するCOを含むガスによる還元でマグネタイトになる。また、残るヘマタイトの一部は、石灰石中のCaOと反応して、石灰石中のCaOと反応して、少量のカルシウムフェライトを生成する。さらに温度が上昇すると、1200℃付近で低融点スラグが生成を開始し、Al₂O₃やCaOがある程度溶け込むと鉱石中の酸化鉄と反応し、カルシウムフェライトを生成する。しかし、さらに温度が上昇すると、カルシウムフェライトは1400℃付近でヘマタイトとスラグ組織に分解

する。したがって、強度と被還元性に優れた焼結鉱の製造には、焼結層内の温度を1200～1400℃に保持することで、強度と被還元性に優れたカルシウムフェライト組織を多く生成させることが有効である、と考えられる。

2.2 カルシウムフェライト組織増加のための

層内温度制御技術の開発

一般的な焼結反応における焼結層内温度の制御は、粉コークス量の増減により行われる。まず、粉コークス量を増加させることで、層内温度をカルシウムフェライトが生成しやすい1200～1400℃での長時間保持を試みた。粉コークス量増加により、1200～1400℃の温度域が拡大した一方、最高温度が1400℃を超過してしまい、スラグ組織の生成により強度や被還元性が逆に低下した。したがって、従来の粉コークス量の増減による温度制御方法では、最高温度を上昇させずに1200～1400℃の領域を増加させることは困難である。そこで、本研究開発では粉コークスと燃焼挙動の異なる炭化水素系気体燃料の活用に着目した。

実験により従来の粉コークスのみの焼結法と炭化水素系気体燃料を吹込む焼結法の層内温度分布を比較した。本実験では、炭化水素系気体燃料として、気化した液化天然ガスを使

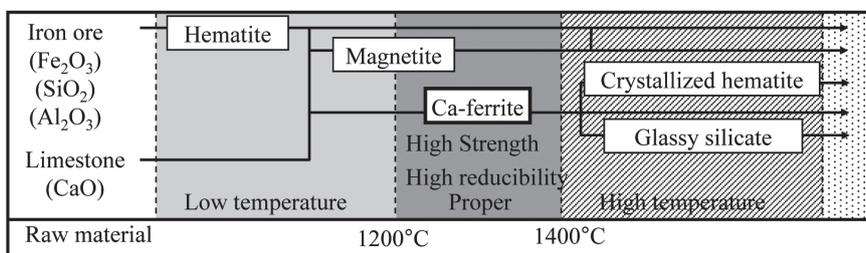


Fig.2 Schematic diagram of the changes in sintered ore texture with temperature.

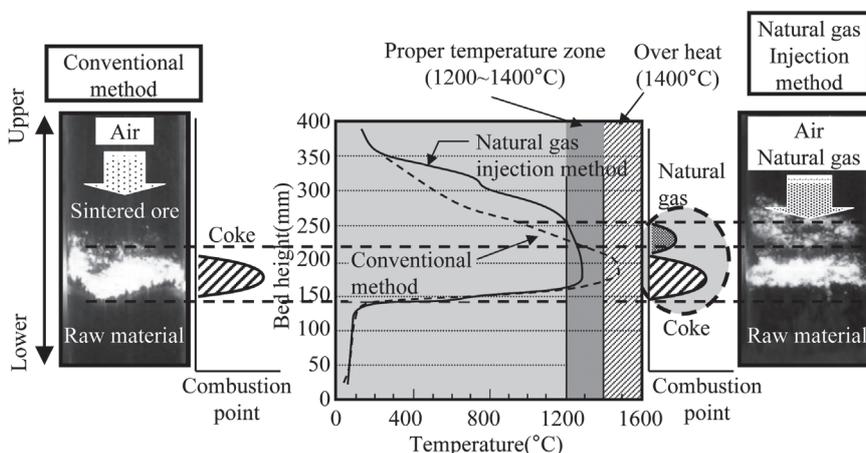


Fig.3 Effects of natural gas injection on temperature distribution.

用した（以下、LNGと記す）。Fig.3に焼結層の高さ方向での温度分布を示す。従来法では、1400℃以上の温度域が存在するのに対し、気体燃料吹込み法では、粉コークス使用量の適正化により、1200℃以上の温度域が拡大する一方、1400℃以上の温度域は存在しなくなる。また、気体燃料吹込み法では、燃焼領域が2つに分かれている様子も観察できた。これらの結果から、空気と混合されて原料表面から吹込まれた気体燃料が、粉コークスの燃焼位置よりも上方で燃焼する、すなわち粉コークスと気体燃料の燃焼位置が高さ方向で異なる燃焼状態を実現でき、焼結鉱の冷却速度を遅くすることができるため、焼結層内で1200～1400℃の温度域が拡大したと考えられる³⁾。

3 本技術の実用化に向けた安全・防災上の対策

実用化に向けて、使用する炭化水素系気体燃料の安全性、および製鉄所内での供給の観点からの評価を行った。まず、操業上の観点から対象燃料が漏洩した場合を想定し、当該燃料がCO等を含まず毒性を持たないことを、最優先の選択条件とした。火災防止の観点では、燃焼下限濃度が高いこと（簡単に引火しない）、火炎伝播速度が遅いこと（延焼しにくい）を評価の対象とした。製鉄所内での供給の観点からは、インフラが整備されており、安定的に焼結工場へ供給できる点を評価した。その結果、実用化にあたってはLNGを採用することとした。

本効果を実機焼結機において発現させるためには、LNGを所定の範囲に所定の濃度で均一に吹込むことが重要である。このためには、LNGを外部に漏洩させず、焼結機内に全量を吹込むことが必須である。これに対し、焼結機建屋は屋根こそ有しているが、壁などは無い部分も多く、吹きさらしの状態となっている場合が多い。したがって、焼結機への強風等を想定した上で、LNGが漏洩することの無い吹込み方

法を考える必要があった。

詳細な検討の結果、本技術の実用化では焼結機上にフードを設置し、その中に配置したノズルからLNGを吹込むこととした。しかしながら、フード方式ではフード構造や内部のLNGノズルの仕様、さらには万一漏洩した場合の早期検知システム、およびその対応を総合的に検討する必要があり、数値計算を活用してLNG吹込み時の吹込みガスの挙動についてシミュレーションを行った。

まず、ガス流れシミュレーションによりLNG漏洩濃度の計算を行った。ガス流れシミュレーションは、Navier-Stokesの式、および連続の式に基づき構成されている。計算条件として、焼結機に風速10m/s（焼結機での測定に基づいた最も厳しい条件）の横風が吹いた場合を想定した。計算結果の一例をFig.4に示す。シミュレーション計算の結果、フード形状の適正化、フード内の邪魔板などの設置（空気よりも軽いLNGの上方への逆流防止）、フード上端枠へのパンチングメタルの設置（防風林等に見られる建築学の知見に基づいて、フード内での渦の発生を抑制）が効果的であることを見出し、LNG漏洩を防止できるフード構造を明確化でき、実機的设计に反映した。

さらに、想定されるトラブルを速やかに検知、もしくは未然に防止するため、フード内およびフード近傍にセンサーを設置した。フード内ではCH₄濃度計（LNGの90%近くはCH₄で構成）で常に監視し、局所的に濃化したLNGを速やかに検知できる。また、火災検知器でフード内を常に監視し、LNGが燃焼した場合にはインターロック機構によりLNGの供給を遮断し、窒素パージを行うことができる。また、フード外部の開口部付近にもLNGの漏洩検知器を設置し、常時モニターしている。

4 京浜第1焼結工場での本技術の適用

上述の各種検討を経て、2009年1月に、当社・東日本製鉄所（京浜地区）第1焼結工場において、世界で初めて気体燃料吹込み技術の実用化に成功した（Fig.5, Fig.6）。同設備はトラブルも無く、現在まで順調に稼働している。

Fig.7に気体燃料吹込み技術の導入前後での操業諸元と品質指標の推移を示す²⁾。実験では、生産量を一定に維持しつつ、焼結鉱品質を調査した。LNG吹込み開始後、強度が約1%向上した。さらに、固体燃料である粉コークスの配合率を0.3%低減することができた。また、焼結鉱の被還元性も次第に上昇し、最終的に4%の改善効果を確認した。

気体燃料吹込み技術導入の前後で焼結鉱をサンプリングし、粉末X線回折法により、組織の定量分析を行った結果を

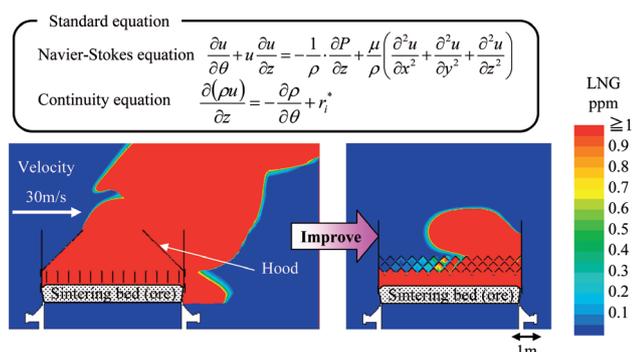


Fig.4 Calculation results of injection hood with using fluid simulation model.

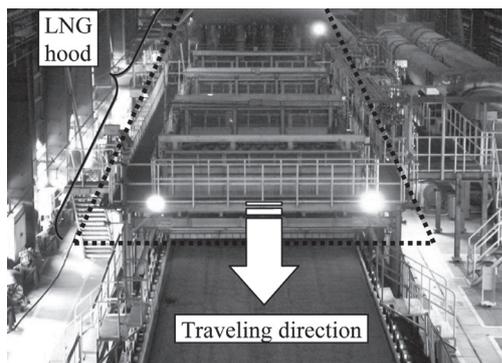


Fig.5 Picture of LNG injection hood.

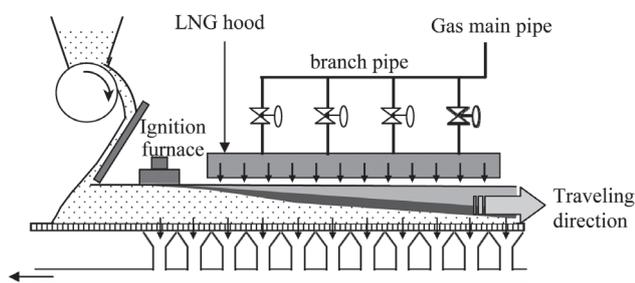


Fig.6 Schematic image of gas fuel injection equipment.

Fig.8に示す。この結果から、カルシウムフェライト組織の量が17.0%から19.1%に増加し、スラグ組織が減少していることがラボ検討と同様に確認できた。したがって、Fig.7に示す焼結鉱品質の改善効果は、焼成時の温度適正化によるカルシウムフェライト組織の増加とスラグ組織の低減によるものと考えられる。

以上より、実機の操業においても炭化水素系気体燃料吹込み法の適用により、焼結鉱の強度と被還元性を同時に改善することができた。これにより、製鉄工程において粉コークス使用量と塊コークス使用量を削減することが可能となり、京浜第一焼結工場への本技術適用により最大6万t-CO₂/年のCO₂排出量を削減できた。さらに当社国内焼結機7機すべてに本技術を導入し、焼結鉱品質の改善を行うことで環境負荷の低減に寄与している。

5 結言

JFE スチールでは、焼結-高炉工程で排出されるCO₂の削減に向けた高強度・高被還元性焼結鉱の製造のため、焼結工程で使用する凝結材(粉コークス)の一部代替として、炭化水素系気体燃料を使用する技術を開発した。本技術は2009

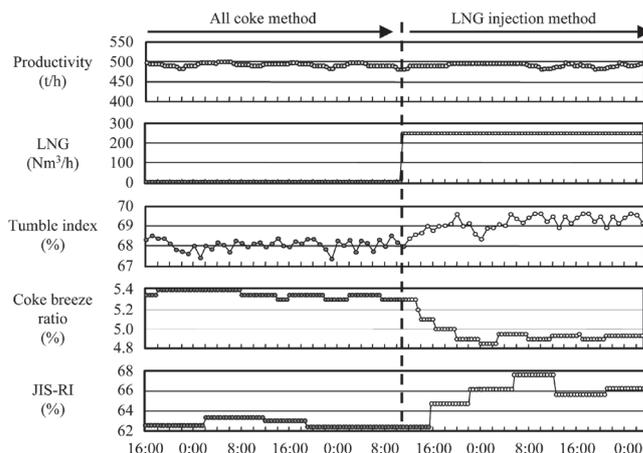


Fig.7 Changes in sintering operation.

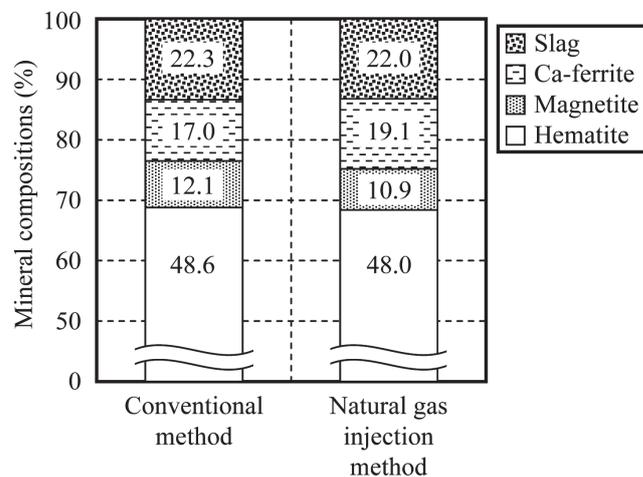


Fig.8 Changes in sintered ore texture.

年に当社・東日本製鉄所(京浜地区)第1焼結工場において、世界で初めて、その実用化に成功した。本技術の導入により焼結鉱の強度と被還元性を改善し、京浜地区の焼結-高炉工程において大幅なCO₂排出量の削減を達成した。

参考文献

- 1) 梶川脩二, 山本亮二, 中島龍一, 岸本純幸, 福島勤: 鉄と鋼, 68 (1982), 2361.
- 2) N.Oyama, Y.Iwami, T.Yamamoto, S.Machida, T.Higuchi, H.Sato, M.Sato, K.Takeda, Y.Watanabe, M.Shimizu and K.Nishioka: ISIJ Int., 51 (2011), 913.
- 3) D.A.Kissin and T.I.Litvinova: STAL', 5 (1960), 318.

(2017年3月1日受付)