水素系気体燃料を活用した鉄鉱石焼結プロセスの開発

岩見友司[*1)]　大山伸幸[*2)]　渡辺芳典[*3)]　佐藤道貴[*4)]　武田幹治[*5)]

1. 開発の背景

近年，中国やインドをはじめとする新興国の急激な経済成長を背景として，世界的にCO_2の排出量は増加の一途を辿っている．CO_2を含む温室効果ガスは地球温暖化の一因として，1997年に採択された京都議定書でも，我が国はCO_2をはじめとする温室効果ガスを2012年までに6％削減（対1990年比）するよう義務づけられている．ここで注目すべきは，我が国における鉄鋼業からのCO_2排出量は，国内全体の16％を占め[(1)]，そのうちの約60％が焼結−高炉工程を含む製銑工程から排出されている，ということである．これは製銑工程で多量にコークス（炭素系固体燃料）を使用するためであり，焼結−高炉工程でコークス使用量を低減し，CO_2排出量を削減することが喫緊の課題となっている．

現在の鉄鋼業では，高炉および転炉を用いた製鉄法が世界的に主流である．原料である粉状鉄鉱石は，焼結工場で塊成化され焼結鉱となり，高炉内において高温状態で還元・溶融され，溶鋼の素材である溶融銑鉄（溶銑）となる．この溶銑は転炉において炭素を除去され，連続鋳造機により厚板や自動車用鋼板の母材となる鋼片が製造されている．

本報告では，この粉状鉄鉱石を焼結工場で塊成化させる工程（焼結工程）において，粉コークスのみを用いる従来法とは異なった，粉コークスと水素系気体燃料を併用した焼結方法を開発するに至った経緯を紹介する．

2. 焼結−高炉工程におけるコークスの削減

まず，製鉄業における焼結−高炉工程の概要を解説する．焼結工程では，最初に粉状鉄鉱石と石灰石および粉コークスを混合し，焼結機台車に積みつける．焼結機では，吸引ブロワーにより下方に空気が吸引されており，点火炉で原料層表面に点火すると，あたかも煙草のように下方へ粉コークスの燃焼が進行する．この粉コークスの燃焼熱によって粉状鉄鉱石と石灰が反応し，生成した液相を介して焼結が行われる．製造された焼結鉱は，高炉での通気性確保のために整粒され，粒径が5 mm以上の焼結鉱は成品として高炉へ送られ，5 mm以下の焼結鉱は，返鉱として焼結工程に戻され，再度原料中に混合される．

高炉に送られた焼結鉱は塊コークスと共に高炉に装入され，高温状態で塊コークス由来の(C)により，還元されて鋼材の素材である溶融銑鉄（溶銑）となる．

したがって，鉄鋼業におけるCO_2排出量の低減には，焼結工程で使用される粉コークス，高炉工程で使用される塊コークスを削減することが重要である．

ここで，焼結鉱の冷間強度が向上すると，焼結鉱を整粒する過程での，5 mm以下の焼結鉱（返鉱）の発生率が低下し，焼結工程において，返鉱を再度焼結する熱に相当する粉コークスが削減でき，焼結鉱の被還元性（還元されやすさ）が向上すると，高炉での還元に必要な塊コークスの量の削減が可能となる[(2)]．したがって，焼結鉱の冷間強度と被還元性の向上が，製銑工程でのコークス使用量削減に繋がっている（**図1**）．

3. 開発の経緯

一般的に冷間強度と被還元性は，一方を改善すれば，もう

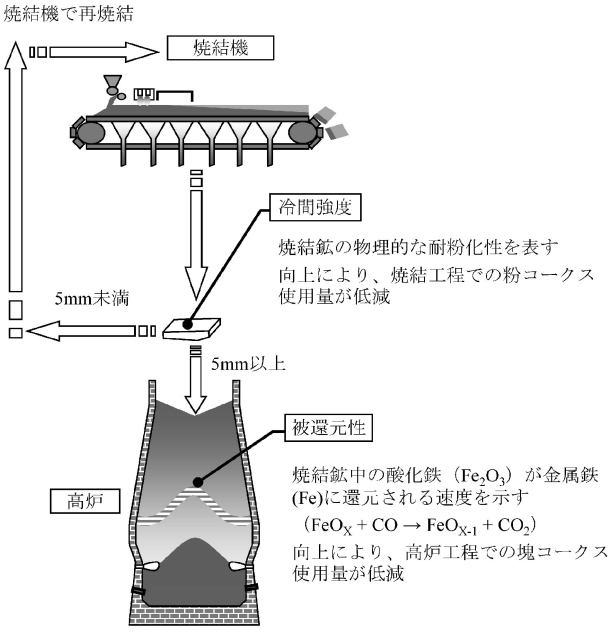

図1　焼結−高炉工程でのコークス使用量低減メカニズム．

* JFEスチール株式会社：1）スチール研究所製銑研究部研究員（〒721−8510 福山市鋼管町1番地）　2）経営企画部主任部員
3）東日本製鉄所（京浜地区）製銑部主任部員　4）スチール研究所製銑研究部長　5）スチール研究所主席研究員
Development of Hydrogen−Gas−Fuel Injection Technology in Iron Sintering Process; Yuji Iwami, Nobuyuki Oyama, Yoshinori Watanabe, Michitaka Sato, Kanji Takeda（JFE Steel Corporation）
Keywords: *sinter, gas, injection, iron ore, strength, reducibility, CO_2*
2012年3月29日受理

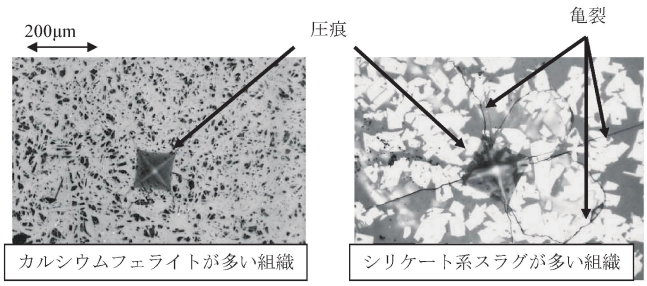

図２　破壊現象に及ぼす鉱物組織の影響.

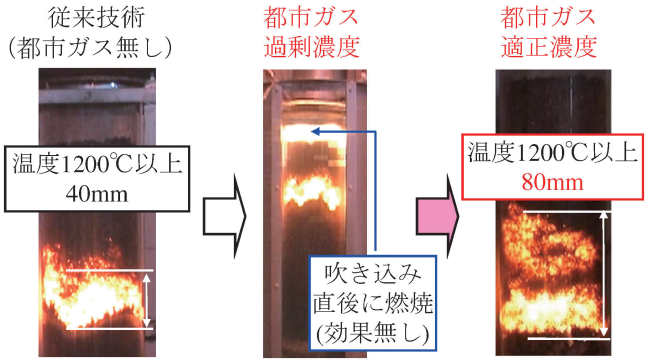

図３　都市ガスの適正濃度の検討.

一方が悪化する背反関係にあり，両者を同時に改善できる技術の開発が望まれていた．著者らも2000年から鉱物組織形成に着目した基礎研究に取り組み，冷間強度・被還元性に優れた鉱物組織の特定とその生成条件の解明に注力していた．本研究では，焼結鉱の鉱物組織における冷間強度と被還元性を左右する因子を調査するため，鉱物組織の物性に関する基礎的な研究を実施し，ダイナミックSEMによるミクロな視点での組織形成の直接観察や，単一鉱物組織の機械的な強度の測定，被還元性の測定を行った．この結果，カルシウムフェライト組織が，引張強度において最も優れており，被還元性も良好であること，一方，シリケート系スラグ組織は，いずれも非常に劣っていることを確認した．**図２**は各成分を多く含む組織に圧痕を穿った際の組織写真であるが，シリケート系スラグが多い組織では，大きく亀裂が伝播し，冷間強度が低い様子を示している．

次に著者らは，焼結反応においてカルシウムフェライト組織を多く残留させる条件を調査するため，鉄鉱石と石灰石の混合物を用い，電気炉において焼成実験を繰り返した．この実験において，カルシウムフェライト組織は1250℃～1350℃の温度域で最も安定して存在し，1450℃以上ではカルシウムフェライト組織が顕著に減少することを確認した．このため，焼結層内の目標温度を上記最適温度の±50℃の1200℃～1400℃とし，この温度での滞留時間を長くすることにより，焼結鉱中のカルシウムフェライト組織を増加させ，冷間強度と被還元性の改善を図ることとした．

本研究内でも，焼結機内の現象をシミュレートするラボ焼結試験装置を用いて，粉コークスの配合量の増減，粒度の変更などによる実験を行ったが，いずれも到達温度を上下させるだけの結果となり，目的温度域での滞留時間の延長には至らず，研究は一時ここで頓挫した．

4.　気体燃料吹込みの着想

2005年，焼結層内を1200℃～1400℃に長時間保持する手段が見つからない状況が長く続く中，著者らの雑談から一縷の光明を見出すこととなる．

「焼結は粉コークスを使わないといけないのだろうか.」

著者らは粉コークスと燃焼挙動の異なる熱源の使用の検討を開始した．それには，木炭や籾殻，ゴマ油や菜種油，重油，灯油といった液体燃料，都市ガスやプロパンガスなどの気体燃料等，何でも取り上げ，実際にラボ焼結試験を実施し，その熱履歴と強度・被還元性の調査を繰り返した．

その結果，点火後の焼結層に気体燃料を吹込むことで，焼結層内の1200℃～1400℃の温度領域が拡大する現象を確認した．この現象について，ヒートパターンのシミュレーションモデルやサーモグラフィなどを用いて理論の解明を行い，気体燃料が粉コークスの燃焼位置よりも上部で燃焼しているということが判明した．

ラボにおいて気体燃料吹込みによるヒートパターン改善効果を確認した後，実機化に向けての具体的な吹込み条件の検討を開始した．毒性の有無，供給能力などから気体燃料の中から都市ガスを選定し，吸引する風量に対する適正な濃度，吹込む位置，吹込み設備の構造などを調査した．適正濃度の検討では，過剰な濃度の場合，焼結層に都市ガスが吸引される前に燃焼してしまうことなどの失敗も実際に実験を通して確認し，安全且つ効果のある濃度を決定した(**図３**).

本技術は2009年１月に，弊社・東日本製鉄所(京浜地区)第１焼結工場において，世界で初めて実用化に成功した．2012年１月現在までに，弊社では５機が稼働し，順調に稼働を継続している．2012年内に弊社・全焼結機への導入を完了する予定である．

5.　お　わ　り　に

製鉄業における焼結–高炉工程で，焼結鉱の冷間強度・被還元性を向上させることによって，CO_2排出量の低減を図るべく，2000年より新技術開発の検討を開始した．基礎実験からスタートし，様々な試行錯誤を経て2006年に「水素系気体燃料吹込み技術」を着想した．その後の実用化に向けての検討は非常に速やかに行われ，わずか３年で実用化に成功した．

現在，新興国の台頭により，鉄鋼の需要が拡大しており，今後も本技術による更なるCO_2排出量の低減効果が見込まれる．

文　　献

（１）半明正之：ふぇらむ，**12**(2007), 456–462.
（２）梶川脩二，山本亮二，中島龍一，岸本純幸，福島　勤：鉄と鋼，**68**(1982), 2361–2368.