

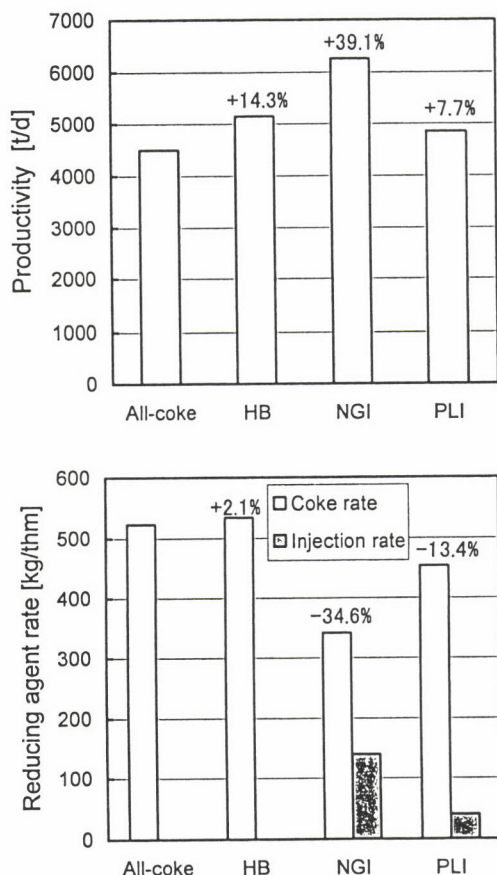


図1.12 操業における生産性と還元剤比の予測
加湿 (HB, 80g-H₂O/Nm³)、天然ガス吹き込み (NGI, 140kg/thm)、
プラスチック吹き込み (PLI, 40kg/thm)

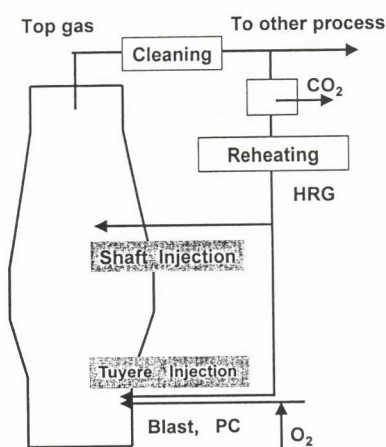


図1.13 加熱還元ガス吹き込み法による炉頂ガスの循環

込んだ場合の生産性、還元材比の改善効果を示している。このシミュレーションはレースウェイ温度、および、ボッシュガス流量一定の条件で行われているが、還元材の吹き込み量が異なるので、相互に直接比較することはできない。しかし、水蒸気吹き込みは生産性を改善するが、還元材比を悪化させている。天然ガスとプラスチックの吹き込みは生産性、還元

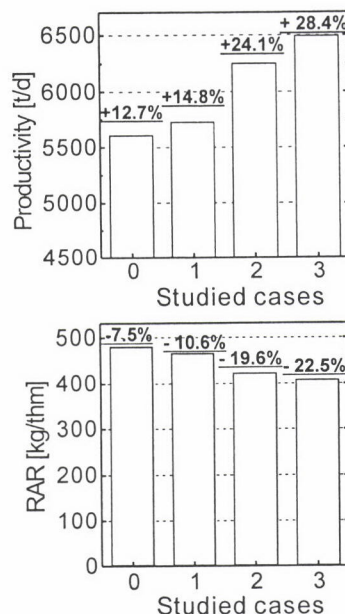


図1.14 加熱還元ガス法による炉頂ガス循環操業における生産性と還元剤比の変化
(ケース0：20SB-MT100-HM50、1：SI20、2：TI50、3：SI20-TI50)

材比のいずれにも改善効果があり、吹き込み量の違いを考慮すると、ほぼ、同程度の効果があることがわかる。

図1.13に炉頂ガスのリサイクル操業の概念図を示した。この場合、レースウェイ温度を維持するため酸素の富化が必要となる。また窒素の減少により、シャフト吹き込みが必要になる。図1.14には基準操業 (ケース0) を20%CCB装入＋溶融温度100℃低下＋溶銑温度50℃低下とし、ケース1ではシャフトからの炉頂ガスの吹き込み量を羽口風量の20%に、ケース2では羽口からの炉頂ガスリサイクル量を羽口風量の50%に、ケース3ではその両者とし、レースウェイ温度とボッシュガス流量一定の条件のもとにシミュレーションを行った結果をしめしている。この計算では実炉操業に比べ生産量は28.4%増加し、還元材比は22.5%低下した。CO₂の排出量は21.2%減少した。計算条件であるレースウェイ温度やボッシュガス量などの制限を取り払い、上述の操業パラメータを合理的に組み合わせた操業を実施すればさらに効率を改善することができると考えられる。

1.12.2 エネルギー半減技術

日本の鉄鋼生産には、国内総消費量の7%強を占める膨大な量のエネルギーが使われている。したがって、安全安心で快適な社会生活を維持するのに必要な鉄鋼を生産し続けるには、CO₂抑制を始めとする環境保全がまず達成されなければならない。一方、資源需給の逼迫、価格の高騰、劣質化を背景に還元材比のさらなる削減が求められている。

(1) 低還元材比操業に向けたこれまでの努力

我が国におけるこれまでの還元材比低減への歩みを俯瞰してみると以下のようなものである。

1950年代：原料の整粒強化、自溶性塊成鉱の使用

1960年代：オイル吹き込み、高圧化、送風温度の高温化と酸素富化送風、装入物分布制御、そして高炉の大型化、など現在の技術の多くはこの年代に始まった。

1970年代：1960年代に始まった技術革新が頂点に達した。

1980年代：1982年、日本鋼管福山3BF (3220 m³)、396 kg/t (内タール42 kg/t) を達成した。オールコークス操業では、1981年、新日鐵室蘭2BF (2290 m³)、448 kg/t がチャンピオンデータとなっている。

1990年代～現在：コークス炉加齢負担の軽減とコスト低減への要請から高微粉炭吹き込み (PCI) 操業技術の開発が行われた。また、劣質資源の原料化への要請と共に、低還元材比化に向けて主に原燃料の改良に努力が注がれてきた。例えば、高PCI操業にともなうスラグ比の低下、鉱石の被還元性向上、コークスの高反応性化と大塊化、などである。低還元材比の観点からは、1994年、新日鐵大分2高炉 (5250 m³) の還元材比455 kg/t (内PC98 kg/t) が注目される。なお、国外ではPOSCO 浦項3BF (3795 m³) の493 kg/t (内PC222 kg/t) がある。

還元材比低化技術をRistモデルにそって検討すると以下になる。

① シャフト効率の向上

シャフト部塊状帯において装入鉱石の被還元性を向上させ、ガス利用率を改善する。我が国の現行高炉において800～1,000℃の炉内ガス組成はウスタイト→金属鉄還元にはほぼ平衡して推移している。シャフト効率も概ね95%に達し、この点での改善代は数%と見積もられる。被還元性向上に対する次のターゲットは570℃以下のマグネタイト→金属鉄還元と1,000℃以上のウスタイト→金属鉄の被還元性向上にあるとされる。鉱石の被還元性向上には還元に寄与する気孔の増加と組織設計が重要である。一般的には10ミクロン以下の気孔の増加と針状CF+斑状ヘマタイト組織が被還元性向上に寄与すると考えられている。高結晶水鉱石を多配合した焼結鉱においても低SiO₂、低Al₂O₃、低MgOによって強度を維持したまま被還元性の向上に成功したと報告されている。今後は酸化鉄還元に触媒として働く添加元素の探索や還元の詳細機構の解明が課題になるものと思われる。

② W点 (熱保存帯温度) の低温化

前述したように現行高炉の操業条件の中で800～1,000℃

のウスタイト→金属鉄還元がほぼ平衡に達しているとなれば、ガス利用率向上のネックとなっているウスタイトのガス還元平衡制約W点を高CO₂側へ移動させることが次の目標となる。すなわち、コークスの反応性を高めてガス化開始温度、熱保存帯温度を引き下げる技術の開発である。これには小塊コークスの混合装入技術の確立や高反応性コークスの開発、さらには炭材内装塊成鉱の開発が必要とされる。強度を損なうことなくコークスの反応性を高めるため、高Ca炭を配合したコークスを製造し実高炉で試験した。熱保存帯温度の低下が見られ、高Ca炭配合率1%あたり還元材比にして1 kg/t程度の低下が確認された。小塊コークスの使用の場合は熱保存帯温度の低下効果を目的とするよりガスの還元力向上効果の方が顕著である。特に、高PCI操業下で厚くなった鉱石層上部のガス還元力を回復させる効果が大きいとされ、ガス化反応と還元反応のカップリング現象によるものと思われる。

③ 炉体熱損失の低減

高炉の熱損失は内部を通過するガス量とその炉内分布によって支配される。前者は平均熱流比で代表させうる。後者は新たにシャフトゾンデで測定した中間部と炉壁部間の η_{CO} の差 $\Delta\eta_{CO}$ をもって数値化 (大きいほど強周辺流) し、周辺ガス流指数と名付けた。熱損失は950℃基準の炉下部熱収支から求めて解析した結果、熱流比が低下するほど、また周辺流が強いほど増加する傾向が認められた。熱流比が低くO/Cの大きい高PCI操業では中心流を志向した装入物分布制御が必要である。ただし、 $\Delta\eta_{CO}$ は原燃料性状に合わせて最適操業を目指した結果であり、独立に制御できるものではない。ここでも熱流比に応じて適切な原燃料の品質設計が重要となる。試算では $\Delta\eta_{CO}$ の低減や鉱石RDIやコークス強度の改善によって400 MJ/t程度熱損失を低下でき、シャフト効率の2%向上と合わせれば還元材比換算20 kg/tの軽減が可能だという。それには、望ましい逆V型融着帯を装入物分布によって任意に作り出すための高精度センシング技術、中心装入技術を核とする分布制御技術、炉芯粉率の抑制技術、などの開発がさらなる課題となる。

なお、低還元材比操業ではO/Cが必然的に高くなり、O/Cが6を超えることも予想される。このとき融着帯部の通気を確保するため高温性状の改良が重要課題になる。もしこれが出来ない場合、還元鉄やスクラップの高炉使用が真剣に検討されねばならない。

④ 炉内入熱の増加、持ち出し熱量の低減

送風温度の増加、送風湿分の低下、出鉄滓温度低下および持ち出し熱の低減、スラグ比の低下、メタロイド (主にSi) 還元の低減などが還元材比の低下には有効である。低還元材比操業では出鉄滓温度が低下すると予想されるが、その時ス

ラグ粘度の増加によりスラグレベルの上昇や出鉄滓の遅延などが生じるものと懸念される。これをキャンセルするには出鉄口近傍のコークス粒径を大きく保つことが有効であると計算されている。実炉炉床部のコークス粒径をどの様に制御するかが新しい技術課題となっている。

⑤高水素系還元材を吹き込む複合送風

直接的な省エネルギー効果はないがCO₂抑制の観点から炭素消費原単位 (CCR) を低減する場合や生産性 (増産) をはかる場合に、PC、CH₄、タール、プラスチックなど高H還元材を吹き込むことは効果的である。例えば以下の試算がある。高PCI操業 (RAR 508 kg/t、PCR 187 kg/t、CCR 430 kg/t) 下でシャフトの熱流比の上限を0.85としてCH₄を50Nm³/t吹き込む場合、炭素消費原単位は416 kg/tまで14%減少する。さらに送風温度1,350℃+送風湿分5g/Nm³ (CH₄ 75Nm³/t吹き込み) とした場合は396 kg/tまで34 kg/t減少する (送風温度1,350℃、CH₄ 60Nm³/tでは407 kg/t)。さらに1,400℃の低温出鉄が実現できれば390 kg/tまで9%の削減が可能となる。これは熱保存帯温度を800℃まで下げたときと同等の効果である。

なお、炉下部発熱量は補助還元材のコークス置換率と正の相関関係がある。低揮発分 (低H) 炭ほど炉下部発熱量が高くコークス置換率が高い (低還元材比) ことになり留意すべきである。

(2) 還元材比の抜本的低減に向けた基礎研究

前項で述べた技術が仮に全て実施されたとして高炉の使用エネルギーは現行に比べ15%程度の低減に留まるものと見られる。エネルギー半減に向かうには現行高炉法の枠組みを超えた取り組みが必要である。このような観点から、文部科学省では本会の提案に基づき平成11年に科学技術振興調整費総合研究「エネルギー半減・環境負荷ミニマムを目指した高炉の革新的製鉄反応に関する研究 (PL：石井邦宜北大教授)」をスタートさせ平成16年3月に終了した。新プロセスは、熱保存帯温度700℃、浸炭溶融温度1,250℃ (出鉄滓温度1,350℃) を目標とし、それを実現するプロセス原理として、「反応の高速化 (GL北大石井邦宜教授)」と「低温化 (GL東工大永田和宏教授)」が新規に掲げられ、また、実プロセス構築に向け「装入物の組成組織設計 (GL九大清水正賢教授)」と「プロセスのモデル化 (GL東北大八木順一郎教授)」の2テーマを加えて計4つのサブグループ (分科会) が組織された。11大学、5企業 (後に4企業)、1国研 (後に独立行政法人) と日本鉄鋼協会の18研究機関が参加した。

革新的高炉の反応原理として、鉱石と炭素の共存による還元反応とガス化反応の相互促進作用の利用が新規提案された。これと炉頂ガス循環を組み合わせたコンパクト高炉にお

いて、30%におよぶ大幅なCO₂排出量削減が可能である。酸化鉄還元と炭素ガス化のカップリング現象により両反応は300℃以上低温で開始するのが観測された。この原理を応用した炭材内装鉱について高炉実験シミュレーターを用いて実炉操業をシミュレートしたところ熱保存帯温度は約800℃まで低下することが確認された。この場合、相互促進作用はカップリング反応、固体炭素との直接的反応、あるいは溶融還元時の高速還元と浸炭現象などとしてあらわれる。これを効率よく生起させるにはガス化反応性の高い炭材が必要で、それらを低温で実現するための基礎として炭素ガス化反応の機構がラマン分光法などにより炭素構造の観点から解明された。

低温操業の鍵を握る浸炭反応の高速化・低温化については、固体浸炭、溶融スラグを介した浸炭、ガス浸炭、の3つの方面から速度論的に研究され、実炉内ではこの順で寄与率が大きいと推定された。そして、還元鉄の浸炭開始温度はスラグの融点と密接な関係があり低融点のスラグほど浸炭開始温度は低下する。一方、スラグの融点に関する熱力学的検討からは、CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO系の2つの組成領域において低融点域が存在することが明らかにされ、これについて粘性などの動力学的物性値が理論と実験の両面から解明された。これら物性値は既往文献値と共に製鉄系の物性値集として出版される予定である。

以上のプロセス原理に関する基礎的成果に加え、鉱石接合機構の定量化と組織制御、多相複合体の強度推定、鉱石の組成・組織の最適化および新製鉄プロセスに適う高速・低エネルギー・低接合助剤で塊成鉱を製造する基本原理について、鉱石原料塊成化の基本となるSiO₂-CaO-Fe₂O₃、SiO₂-CaO-FeO-Al₂O₃-MgO系酸化物の高酸素分圧下での状態図作成、融液の浸透・拡散速度の定量化、還元と溶融に優れたスラグ成分と気孔構造の究明、多孔質体の強度予測モデルの開発、鉱石と石炭の高密度・高強度接合技術の開発など、エネルギー半減に向けた原料性状の性状最適化と革新的な新技術の開発が行われた。

さらに、製鉄炉が巨大複雑反応器であることから、炉内で生じる超多元系多相反応と個々のプロセス操作因子の関連、各種反応パラメータが操作条件に及ぼす影響について定量的評価を行うため、3次元非定常数学モデルを計算機上に構築した。この仮想製鉄システムを用いて数値実験が行われ、革新的高炉製鉄法のプロセスイメージの明確化と、さらに操業条件の提案がなされた。また、熱力学的モデルによる前記新プロセスの提案の他、多孔質体の破壊メカニズム、軟化融着現象、レースウェイ現象、炉心の更新などの解明が行われた。これらの成果の一部は鉄と鋼、87 (2001)、No.5やISIJ.Intn., 44 (2004)、No.12に特集されている。