

商用設備の石炭原単位は730～750 kg/トンと推定され、日産6,000トン規模では、商用設備が2基必要であり、高炉法と比較して、設備コストで35%、製造コストで19%の削減が可能とされた。溶融還元炉1基あたりの生産能力を大幅に拡大させることを目的とし、商用設備諸形式のエンジニアリングが実施された。そのひとつとしてのDuplex-DIOSは、鉬石の予備還元率を向上させることを目的にロータリーハース炉などの既存の固体還元技術を予備還元段階として溶融還元炉と組み合わせた形式であり、海外へ技術移転を含めた実用化の検討がなされた。

一方、日本経済は、バブル崩壊後13年がたち、グローバル競争の激化やデフレの進行、財政緊縮にともなう厳しい不況をリストラで乗り越えてきた。その結果、上述の世界ではダイナミックなプロセスが萌芽したのに対して、日本の鉄鋼業では高付加価値の製品をさらに目指す「高付加価値主義」が第一義としてダスト処理および鉄源供給において静かに進行したと言える。

ロータリーハース法は、固体炭素の存在下で、約1,300℃という高温で操業されるため、比較的低温度で高い蒸気圧を持つ金属を含む製鉄ダストやスラッジ、とくに、高濃度のZn、Pb、Cd等を含む電気炉ダストおよびミルスケールからの有価金属回収に適している。新日本製鐵(株)広畑製鉄所ではロータリーハースプロセスによって転炉ダストを年間21万トン処理しており、ロータリーハースの生産性100 kg-DRI/m²hにおいて、金属化率91.9%、脱Zn率94.0%を達成している。君津製鉄所では、所内発生ダストを月間処理能力1.5万トンのINMETCOプロセスで処理し、還元ペレットを高炉で、微粒還元鉄を焼結プロセスにリサイクルしている。この還元ペレット(金属化率70～85%)は高炉用として50 kgf/cm²以上の強度に調整されており、高炉の燃料比の低減に寄与している。

これらのロータリーハース法の新展開による粒鉄製造プロセスが、ITmk3 (Ironmaking Technology mark three) とHi-QIP (High Quality Iron Pebble) である。従来の還元鉄は固体状態での鉄鉬石を還元するため、脈石を多量に含み、これがスクラップに対して不利な点であった。炭材内装塊成鉬を1,350～1,500℃の高温で急速に加熱・還元すると、反応の最終段階で鉄とスラグが溶融して脈石を分離できる。ITmk3は1,350℃で加熱還元するため還元は固体の状態で行い、反応がほぼ終了した時点で1,400～1,450℃に昇温して金属とスラグを溶融分離する。したがって、溶融スラグ中のFeO含有量は1%以下と低い。ITmk3で鉄鉬石から製造した粒鉄の代表的組成はTFe 96～97%、C 2.5～3.5%、S 0.05%と報告されている。一方、Hi-QIPは、1500℃の高温で加熱・還元するために、還元の途中段階で酸化鉄の溶

融が起こる。溶融スラグ中のFeOが内装炭材および炉床炭材と反応して金属を生じ、スラグと分離する。炉床炭材は中間段階で生成する高FeOスラグから炉床を保護するとともに炭素を供給する役割を果たす。これらのプロセスで得られる粒鉄はスラグを含まず、炭素を含んでおり、ハンドリング性に優れると共に製鋼コストを大幅に低減できると期待されている。

ITmk3プロセスは、2001年11月に米国ミネソタ州政府および北米鉬山会社クリーブランド・クリフス社、電炉メーカースチールダイナミック社などが出資するメサビナゲット社との間で(株)神戸製鋼所が、商品化に関する覚書を締結し、2002年4月から年産25千トンの実証プラントの建設を終え、2003年5月から試験生産を開始した。パイロット規模でのHi-QIPプロセスの開発は、NEDOの民間基盤技術支援制度からの委託研究としてJFEスチール(株)が、2000年度から開始した。

以上のように、世界の新製鉄プロセスの位置付けは、これまでの高炉法との二者択一論に対して、世紀を跨いで、渾然一体化してきており、その結果、新製鉄法および高炉法の両者がグローバルに変容しつつある。そのなかで、日本の製鉄プロセス像は、高炉法を主体としたハードパワーと原料供給に融和する型でのソフトパワーに二極化すると同時に、その両者を重視するスマートパワーに重心が移行してきている。

1.12 CO₂削減技術への新たな展開

1.12.1 移動現象定量化と新高炉操業法評価

プロセスを解明することはプロセス内で生じる物理的、化学的变化を定量的に理解するとともに、プロセスの性能評価および制御を可能にすることである。この目的を達成するにはプロセス内で生じる現象のメカニズムに基づく変化の速度式を得ること、および、プロセスを記述する状態方程式の導出と数値シミュレーションを実行することが必要である。また、モデルを利用してより高効率で低環境負荷の新プロセスあるいは新操業法などを検討するためには仮想操業に関するシミュレーションを実行することになるため、要素現象を記述する速度式は予想されるプロセス内状況に対処できる形式にする必要がある。

高炉の移動現象論的研究はほぼ半世紀の歴史があるが、従来は、実プロセスの解析に主眼があったが、最近10年間におけるモデル化やシミュレーション技術および要素現象の解明における進歩は仮想操業のシミュレーションを可能にした。

(1) 多流体理論に基づく高炉の数学的モデル

高炉を解析対象と考えると、プロセスを記述する状態方程式は運動量、エネルギー、質量の収支式から成りたっている。連続体を仮定し多流体モデルに従うと、一般形で表し (1) 式のように書くことができる。

$$\partial(\epsilon_i \rho_i \psi) / \partial t + \text{div}(\epsilon_i \rho_i u_i \psi - \epsilon_i \Gamma_\psi \text{grad} \psi) = S_\psi$$

..... (1)

ここで、下付き i は考慮した6つの相 (ガス、充填粒子、溶鉄、スラグ、炭材粉体、鉄鉱石粉体) をあらわす。従属変数 ψ は解くべき変数であり、各相の流速、エンタルピー (温度)、質量分率を表す。 t は独立変数時間である。 ϵ は空隙率、 ρ は密度、 u は流速である。 S は湧き出し項であり、相間における運動量、熱および物質の移動量、それらの生成量を含んでいる。数値シミュレーションにおいては、高炉は複雑な形状をしているので、BFC法 (Body Fitted Coordinate) が適用されている。

開発されたモデルには高炉内現象として、鉄鉱石の還元、コークスの燃焼やガス化のような気固反応のほか、ホットメタルや溶融スラグを介した固液、液液、気液反応、さらには固体間、気体間反応など多数の化学反応の速度が考慮されているが、これらに加えるに、固液相変態、気固液粉体4相間の伝熱、運動量移動、粒子の粉化、粉体の蓄積などが組み込まれている。また、ガスの吹き抜け、溶融スラグのフラッディングなどはプロセスの限界を記述するために必要となる重要な現象である。

(2) 高炉の超高効率・低環境負荷操業シミュレーション

高炉の超高生産、低還元材比、低環境負荷操業を実現するには図1.10に示すように、低温化と高速還元化が重要であり、また、CO₂放出削減のためには、水素系の還元材使用や炉頂ガスの循環使用などが有望な方法として考えられる。これらの可能性が数学的モデルによるシミュレーションにより

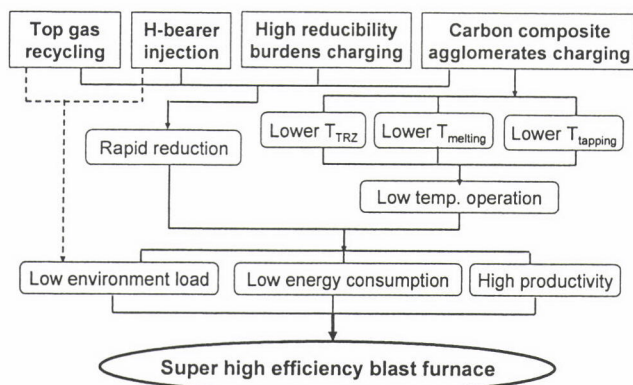


図1.10 高炉の超高効率操業

定量的に検討されている。還元の高速化のためには、焼結鉱の被還元性の改善、および、炭材内装ブリケット (CCB) の使用が有効であり、また、低温化のためには、CCBの装入による熱保存帯温度の低下は有効であるが、還元鉄の浸炭促進やスラグの低温溶融が不可欠である。低温溶融のメカニズムおよび速度はまだ十分には解明されていないが、数学的モデルを使用すると、低温化による高効率化の程度を予測することができる。水素系還元材の使用については、環境負荷低減の観点も考慮して、プラスチックの吹き込みが有望である。また、炉頂ガスのリサイクル使用は排出ガス削減のため有効であり、同時に高生産性を可能にできれば、将来展望が開ける方法であり期待されている。以下にこれら仮想操業についてのモデルによるシミュレーション結果を示す。

図1.11は焼結鉱100%装入操業を基準操業 (1) として、CCBを20%装入した場合 (2)、その上に還元鉄の溶融温度を100℃低下させた場合 (3)、さらにスラグ層表面における溶鉄温度を50℃低下させた場合 (4) のシミュレーションにより得られた生産性と還元材比の変化を示している。約10%の生産性の向上と7.5%の還元材比の低下が期待できる。

図1.12にはオールコークス操業を基準にして、水素含有補助還元材として、水蒸気、天然ガス、プラスチックを吹き

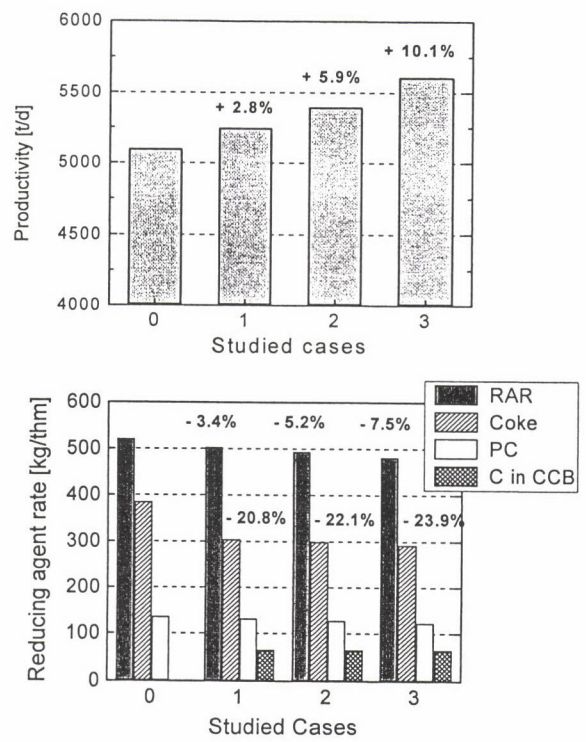


図1.11 低温操業における生産性と還元剤比の予測
(0: 基準操業、1: 基準操業+20% CCB 装入、2: ケース (1) +溶融温度100℃低下、3: ケース (2) +溶鉄温度50℃低下)

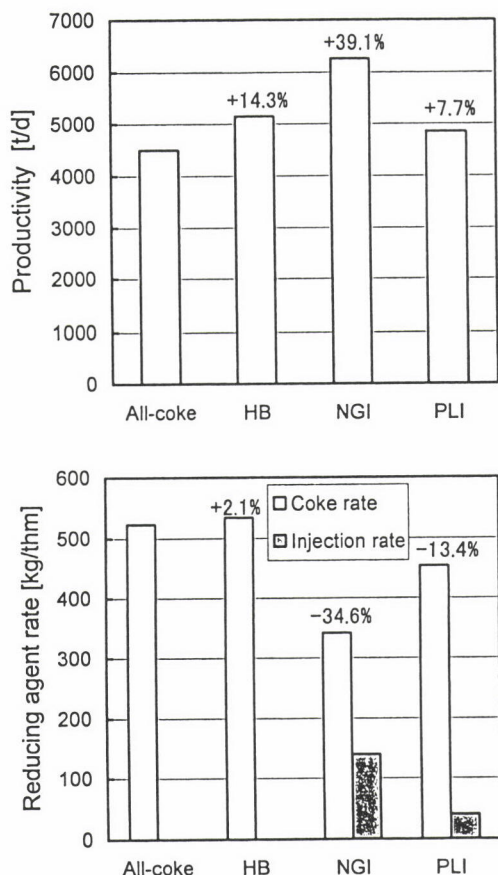


図1.12 操業における生産性と還元剤比の予測
加湿 (HB, 80g-H₂O/Nm³)、天然ガス吹き込み (NGI, 140kg/thm)、
プラスチック吹き込み (PLI, 40kg/thm)

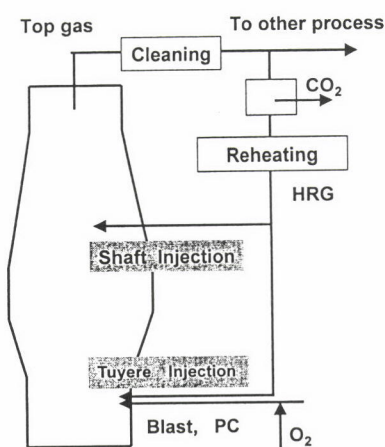


図1.13 加熱還元ガス吹き込み法による炉頂ガスの循環

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

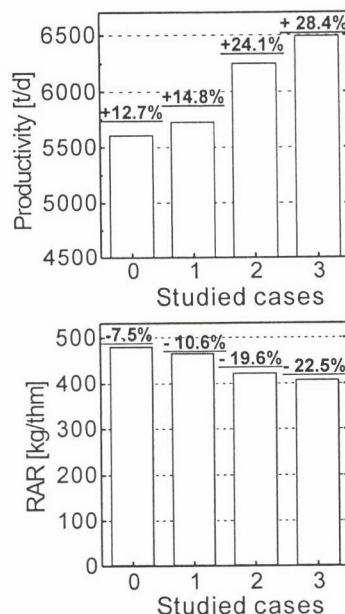


図1.14 加熱還元ガス法による炉頂ガス循環操業における生産性と還元剤比の変化
(ケース0：20SB-MT100-HM50、1：SI20、2：TI50、3：SI20-TI50)

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。