

高炉でのコークス多量混合装入技術の実機化

Application of High-Ratio Coke Mixed Charging Technique to the Blast Furnace

渡壁 史朗 WATAKABE Shiro JFE スチール スチール研究所 企画部 主任部員(副部長)・工博
村尾 明紀 MURAO Akinori JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員(副課長)
後藤 滋明 GOTO Shigeaki JFE スチール 東日本製鉄所 製鉄部 製鉄技術室長(副部長)

要旨

大型高炉でのコークス多量混合装入技術を、世界で初めて JFE スチール東日本製鉄所(千葉地区)第 6 高炉で実用化した。本技術は、炉頂バンカー同時排出技術と、混合層の分離挙動を考慮した装入物分布モデルを用いた高精度な装入物分布制御によって可能となった。また、FCG(バンカーの排出ゲート)ダイナミック制御技術による混合層の混合状況を改善した。第 6 高炉では、2002 年 4 月より世界最低レベルの低処理鉄比操業下での高出鉄比、低還元材比操業を安定して継続中である。

Abstract:

Technique for high-ratio coke-mixed-charging was developed and applied at No. 6 blast furnace in JFE Steel's East Japan Works (Chiba District) as the first case of application to a large blast furnace. Simultaneous discharging of ore and coke from the top bunkers, and the precise control of burden distribution technique with the mathematical model considering the segregation behavior of mixed layer have made it possible. Also, FCG(Flow Control Gate)-Dynamic charging method improved ratio of uniformly mixed coke. Since April 2002, high productivity and low RAR operation with the world's lowest level of sinter ratio has been conducted using high-ratio coke-mixed-charging technique.

1. はじめに

地球温暖化や原料価格の高騰などの状況下において、今後の高炉操業では、低還元材比・低コークス比操業のさらなる推進と、低品位原料の使用比率増加による原料選択自由度を拡大することが重要な技術課題である。

これらの課題を達成する技術の一つとして、焼結や鉄鉱石原料中にコークスを混合させて高炉に装入するコークス混合装入が知られている^{1,2)}。軟化融着帯の通気性、還元性を向上させる技術であるが、実炉での混合量は 5 wt% 程度にとどまっている。これは、原料とコークスとの粒径差によって塊状帯の通気性が悪化することや、混合層が分離するために半径方向の O/C 制御が困難となって目標とした装入物分布が得られないこと、また分離した混合コークスが堆積面中心部に流れ込み、ガス化反応によって劣化して炉芯に蓄積し、炉下部の通気性、通液性を悪化させることなどの問題が生じるためである。コークス混合量が増加すると、通常の塊コークスを混合しなければならないため、コークスと原料との粒径比が大きくなって、混合層の分離が非常に顕著となる。

とくに、均一な装入方法を創出して、東日本製鉄所(千葉地区)第 6 高炉において、鉄石原料中へのコークス多量混合装入法を確立し、超低処理鉄比条件下での高出鉄比操業を達成した。

JFE スチールでは、コークス混合層の特質を調査するとともに、均一な装入方法を創出して、東日本製鉄所(千葉地区)第 6 高炉において、鉄石原料中へのコークス多量混合装入法を確立し、超低処理鉄比条件下での高出鉄比操業を達成した。

2. コークス混合装入の評価

2.1 コークス混合層の高温性状

2.1.1 荷重軟化実験

コークス混合が鉄石の高温性状に及ぼす影響を荷重軟化実験により調べた。るつぼ本体と上/下部の目皿がカーボン製である。炉上部の重錘移動式の荷重発生装置からカーボン製の棒を通じて、るつぼ内の試料に荷重をかける構造となっている。加熱温度、導入ガス組成、負荷荷重はプログラムにより自動制御した。

粒径 15~25 mm のコークス層間に、原料とコークスの混合層を均熱帯(高さ約 100 mm)に入るように、内径 100 mm のカーボンるつぼに試料を充填した。鉄石量は

900 g 一定とし、混合率に応じて混合コークス量を変化させた。

用いた原料は、焼結鉱の比率を 100, 75, 65 wt% に変化させ、残りは塊の鉄鉱石とした。焼結鉱と塊鉄鉱石は 10~15 mm に、また混合するコークスは 10~15 mm, あるいは 30~40 mm に整粒したものをを用いた。焼結鉱と塊鉄鉱石の混合物とコークスとを、るつぼ中にほぼ均一に分布するようにピンセットなどを用いてるつぼ内に 1 粒子ずつ装入した。

2.1.2 荷重軟化実験結果

荷重軟化実験におけるコークス混合率と焼結鉱比が最大圧力損失値に与える影響を図 1 に示す。コークス混合率によって最大の圧力損失は大きく低下し、いずれの焼結鉱比でも、混合率 12.5 wt% までは最大圧力損失が減少したが、15 wt% ではそれとほぼ同じか若干増加する結果となった。

図 2 に 1473 K における還元率の変化を示す。データのばらつきが比較的大きいが、混合率 10 wt% レベルまでは混合率とともに還元率が向上している。

次に、焼結鉱比 75 wt% における、混合率と混合コーク

ス粒径が最大圧損に及ぼす影響を図 3 に、また同じく 1473 K での還元率との関係に及ぼす影響を図 4 に示す。混合するコークス粒径が大きくなると通気性の向上効果が若干低下するが、混合率とともに顕著に改善することは小粒径時と同様の傾向であり、また還元性に関しては粒径比の影響はほとんどないことが分かった。

荷重軟化実験を中断して取り出した試料の断面観察結果から、軟化した原料と混合コークスとの境界部に空隙が観察された。これは還元してメタル化した焼結鉱とコークスが接触して局所的な浸炭が起こり、境界部のメタルが溶融して空隙が発生した³⁾ ためと推定される。すなわち、原料にコークスを混合することによって、高温でもこの空隙にガスが流れることで通気性が確保されたと考えられる。塊鉄鉱石のように還元性の低い原料の還元についても、コークスを混合することによって、未還元 FeO の生成を抑制し、塊鉄鉱石の還元が促進されるため、焼結鉱比が低い条件でも還元性が向上したと推定される。

以上の実験結果から、均一混合では塊コークス混合にお

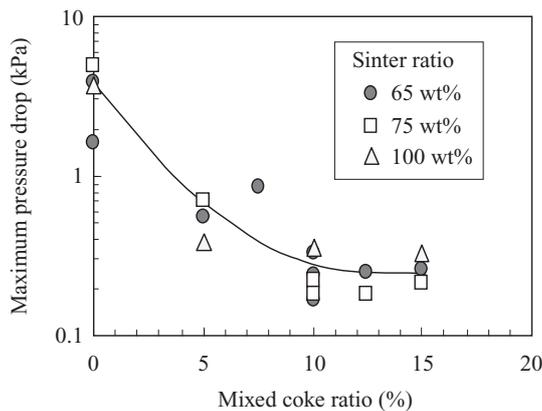


図 1 コークス混合率と焼結鉱比が最大圧力損失値に与える影響

Fig.1 Effects of mixed coke ratio and sinter ratio on high temperature gas permeability of burden material

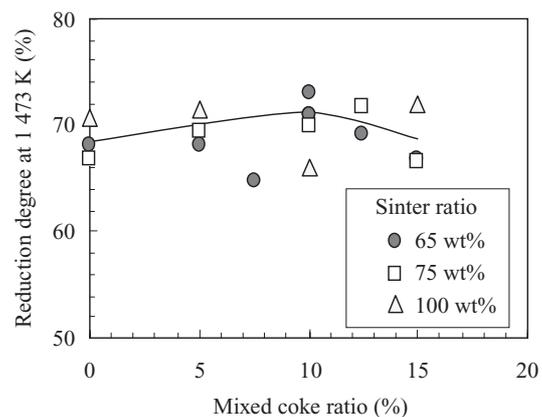


図 2 コークス混合率と焼結鉱比が 1473 K での還元率に与える影響

Fig.2 Effects of mixed coke ratio and sinter ratio on high temperature gas permeability of burden material

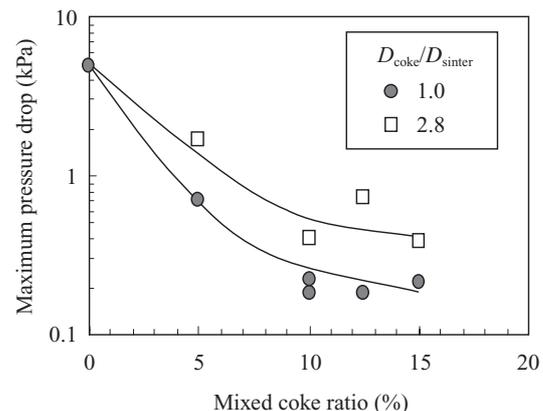


図 3 コークス混合率と混合コークス粒径が最大圧損に及ぼす影響 (焼結鉱比 75 wt%)

Fig.3 Change in the maximum pressure drop with large-diameter mixed coke with a sinter ratio of 75 wt%

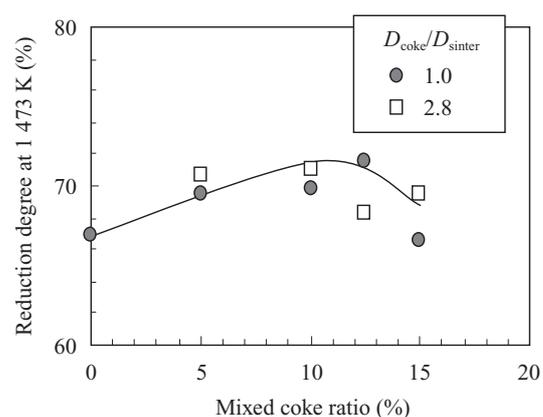


図 4 コークス混合率と混合コークス粒径が 1473 K 還元率に及ぼす影響 (焼結鉱比 75 wt%)

Fig.4 Change in the reduction rate at 1473 K with large-diameter mixed coke with a sinter ratio of 75 wt%

いても混合率 10 wt% までは原料層の高温性状が改善することが分かった。

2.2 コークス多量混合装入の高炉操業への影響

2.2.1 融着帯の通気性への影響

コークス多量混合装入を実機で実施した場合には、原料層間に装入されるコークス層（コークススリット）の厚みが減少し、特に融着帯におけるガスの通気抵抗が悪化することが懸念される。

一方で、2.1 節で述べたようにコークス混合によって軟化融着層の通気性が著しく向上することが荷重軟化実験から判明した。これから、混合装入においては通気抵抗が低下した融着層を通過するガス量が増加し、コークススリットを通過するガス量が減少して融着帯全体の通気抵抗が低下することが期待される。そこで、これらの効果を考慮した融着帯での通気性の評価を試みた。

融着層とコークス層それぞれのガス量分配が、両層の半径方向の圧力損失が同じとなるように決定されると仮定した。融着層の通気抵抗は杉山らの (1) 式⁴⁾ 式を、コークス層の通気抵抗は Ergun 式⁵⁾ (2) 式を用いて計算した。

$$\frac{\Delta P}{L} = \left[\frac{1}{Cm} \right]^2 \left[\frac{1}{\Phi D_p (1-S_r)} \right] \left[\frac{\rho_g u^2}{g D_p} \right] \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{u\mu}{g D_p^2} \frac{(1-\epsilon)^2}{\epsilon^3} + 1.75 \frac{\rho_g u^2}{g D_p} \frac{1-\epsilon}{\epsilon^3} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 ΔP は圧力差、 L は距離、 C は流出係数、 m は開口比、 Φ は混合層中の粒子の形状係数、 D_p は粒子の平均粒径、 S_r は混合充填層の収縮率、 ρ_g はガスの密度、 u はガスの空塔速度、 g は重力加速度、 M はコークス混合率で、 ϵ は充填層の空隙率である。 D_p と Φ は荷重軟化実験の中断試験試料の断面観察から求めた。

荷重軟化実験より求めた、コークス混合率、混合コークスと焼結の粒径比が 1573K における混合充填層の収縮率に与える影響から、 S_r を (3) 式で与えた。また、混合層の ϵ は充填層通気性の測定結果から混合率の関数として与えた。

$$S_r = -1.88 M + 61.3 \dots\dots\dots (3)$$

融着帯内の融着層の段数は、炉腹直径を底面直径とし、根から頂点までの距離をその高さとする円錐から推定した。融着帯形状はコークスを混合しないベース条件での 2 次元高炉シミュレーションモデルの計算結果から求めた。

得られた計算結果を図 5 に示す。これからコークスの混合率の増加とともに、融着帯全体の通気性は向上すると推定された。

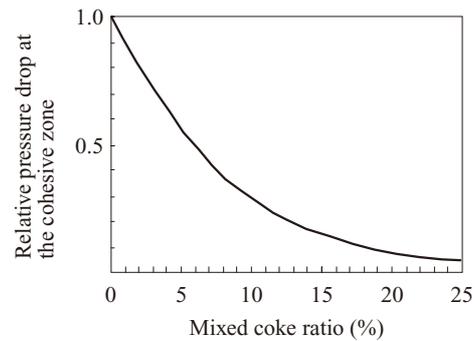


図 5 コークス混合による融着帯通気抵抗の変化 (計算結果)
Fig.5 Calculation result of change in pressure drop at the cohesive zone by coke mixing

2.2.2 コークス多量混合装入による高炉操業の変化

以上の実験で結果から、処理鋳比を変更した場合の高炉操業の変化を二次元シミュレーションモデルを用いて予測した。ベース操業諸元（出銑比 2.0 t-pig/m³·d, コークス比 387.5 kg/t-pig, PCR89.1 kg/t-pig, 送風量 7780 Nm³/min, 酸素富化率 1.4%）に対して、処理鋳比と混合装入の影響を調べた。

計算結果を図 6 に示す。処理鋳比を 72 wt% から 58 wt% まで低下させると、還元が遅れ、中間の融着帯が肥大化して圧力損失が上昇する。しかし、120 kg/t-pig のコークスを混合することで炉内の還元速度が上昇する結果となった。また、混合装入によって収縮開始温度、溶け落ち開始温度が上昇するが、融着層の通気性が改善し、また収縮率が低下することで融着帯の幅が減少して上方に移動する。これらの結果、低処理鋳比下においても、コークスを混合することで炉内圧力損失が低下する結果となった。

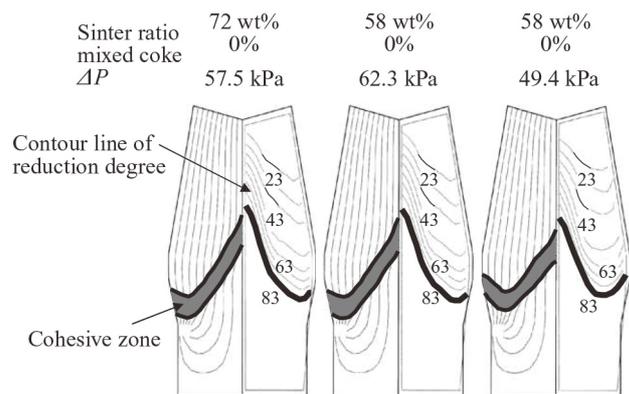


図 6 2次元高炉シミュレーションモデルによる混合装入が高炉操業に与える影響
Fig.6 2-D blast furnace simulation model calculation: Change in cohesive zone and reduction degree in the blast furnace by the sinter ratio and coke mixing

3. コークス多量混合装入技術

3.1 高炉装入模型実験

3.1.1 実験方法

コークス多量混合装入の実機化においては、混合するタイミングをできるだけ高炉に近くにし、また炉頂堆積面での混合層の分離を予測してあらかじめ設定した混合率となるように装入方法を高度に制御することがキーポイントである。そのために、装入模型実験によって垂直シュートからの排出時のコークス混合率の経時変化、高炉炉頂堆積面上での混合層の分離について調べ、これらの結果を装入物分布モデルに組み込んで、実機化における装入方法の設計を行った。

実験に用いた装入模型は東日本製鉄所（千葉地区）第6高炉の1/17.8装入模型である。第6高炉は3パラレルバンカーを炉頂に備えたベルレス式高炉である。装入模型は、実機の原料排出挙動を再現するために、貯鋳槽、サージホッパー、ベルレス装入装置から成る装入装置を備え、また装入実験中は炉体下部のガス吹き込み口から200 Nm³/hの空気を送風した。

傾斜角30°の炉頂堆積面での混合層の分離挙動に対する装入速度、混合コークスと原料との粒径比の影響を調べた。コークスと原料との混合方法は、模型実験を行って垂直シュートからのコークス混合率の排出の経時変化が一定となる炉頂バンカー同時排出（原料、コークスをそれぞれの炉頂バンカーから排出し、旋回シュート上で混合）を採用した。旋回シュートの傾動角を30°、40°、48°、54.5°として単リングで装入した。

装入後の炉頂堆積形状はレーザー変位計を用いて測定した。また、炉頂堆積面上に円管を半径方向に差し込んで試料をサンプリングして、各半径位置でのコークス混合率の分布を求めた。採取した試料はヨウ化ナトリウム飽和水溶液を用いて原料とコークスとに比重分離し、粒度分析を行った。

3.1.2 炉頂堆積面でのコークスと鋳石の分離挙動の定量化

旋回シュートの傾動角54.5°で単リング装入を行った場合の、炉頂堆積面でのコークス混合率の半径方向分布を図7に示す。主流落下位置付近から炉中心、あるいは炉壁に向かって遠いほどコークス混合率が高くなるのが分かる。

粒度分布を持つ粒子群が斜面上を流れると、パーコレーションを起こして斜面の下方に粗粒が、斜面上方に細粒が多く存在する。三輪によって斜面上のパーコレーションが粒子の流れ込んだ距離Lの関数として(4)式のように定式化されている⁶⁾。

$$\log y = aL + b \quad \dots\dots\dots (4)$$

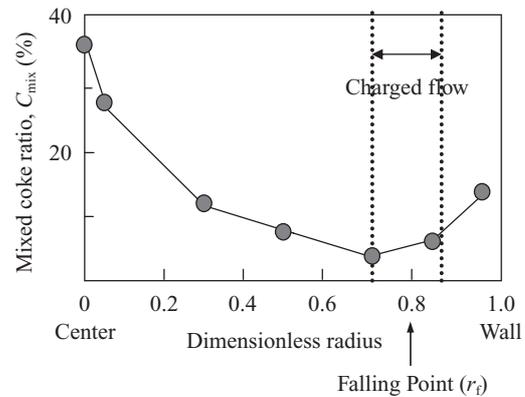


図7 シュート傾動角54.5°での炉頂堆積面上混合率分布
Fig.7 Radial distribution of the mixed coke ratio in the burden (Single-ring discharge, chute tilting angle 54.5°)

ここで、yは粗粒の割合である。密度が異なる2種類の粒子の混合物が斜面を流れ込む時にも同様の分離挙動を示すことが知られており⁷⁾、これがコークスと鋳石の混合層の分離挙動にも適用できると考えて、次式を用いて実験結果を整理した。

$$\log\left(\frac{X}{1-X}\right) = P\left(\frac{r-r_f}{R} + w\right) + C \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、Xはコークス混合率、r_fは中心と落下位置との距離、Rは炉口半径、wは無次元の落下流幅、Cは落下位置でのコークス混合率の対数値である。また、Pは混合層の分離しやすさであり、本論文ではパーコレーション定数と呼ぶ。さまざまな条件で実験を行った結果、wとCはいずれもほぼ一定の値を取り、それぞれ0.1、1.2であった。

前述の図7を(5)式で変換した結果、図8のようにそれぞれの領域で直線関係を示したことから、炉頂堆積面上での混合層の分離挙動を(5)式で定式化できることが分かった。パーコレーション定数Pは、装入速度が大きくなるほど、粒径比が小さくなるほど小さくなった。

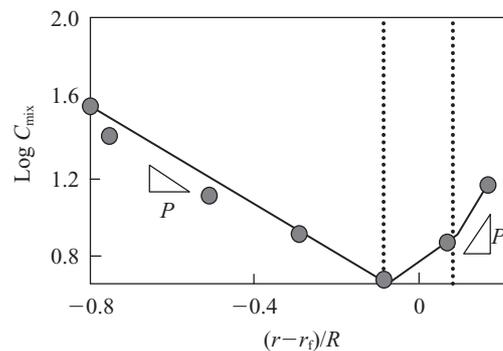


図8 図7の(5)式による変換結果
Fig.8 Arranged result using Eq. (5) of Fig. 7

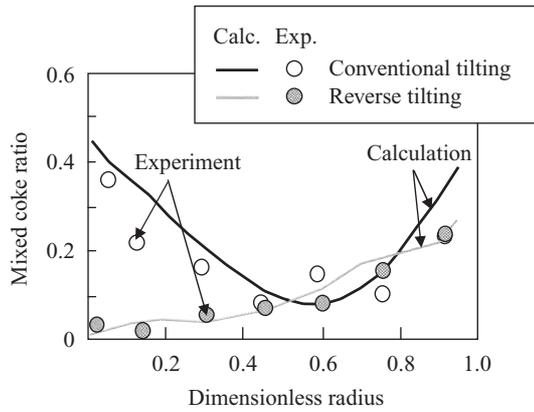


図9 堆積面上混合率分布の実験結果と装入物分布モデル計算結果との比較
Fig.9 Comparison of the calculated and experimental results for conventional tilting and reverse tilting

3.2 多量混合装入の実機化

3.2.1 混合装入に対応した装入物分布モデル

混合層の分離挙動を考慮した装入物分布数学モデルを構築した。前述の実験結果から得られたパーコレーション定数を粒径比および装入速度の関数として与え、以下の手順で従来の装入物分布モデルに組み込んだ。

- (1) 旋回ごとのコークス混合率の計算
- (2) 主流落下軌跡の計算
- (3) 旋回ごとの混合コークスの半径方向分布の計算
- (4) 堆積面形状の計算
- (5) 半径方向の堆積面コークス混合率分布の導出

得られたモデルの精度を検証するため、順傾動および逆傾動パターンで装入した場合の模型実験結果と計算結果とを比較した結果、図9のように実験結果と計算結果とはよく一致しており、本モデルによって混合層を考慮した装入物分布の予測、制御が可能であることが分かった。

3.2.2 均一なコークス混合率となる

多量混合装入方法

前項の装入物分布モデルを用いて、均一なコークス混合率となる多量混合装入方法を検討した。コークスと鉱石とをそれぞれ2バッチに分割し、鉱石1バッチ目に塊コークスを、2バッチ目に小塊コークスを混合した。塊コークスは炉頂バンカー同時排出とし、小塊コークスは貯鉱槽同時排出で鉱石に混合した。コークス混合量は両バッチそれぞれ3.75 wt%とし、合計で7.5 wt%とした。

装入物分布モデルによって半径方向に均一な混合率分布となるような装入パターンを設定し、装入実験を行ってその効果を確認した。装入実験後に低粘性の樹脂を堆積表面から流して浸透させ、固化後に切断して堆積断面の様子を観察した。通常の装入方法と、本実験での装入パターンで混合装入を行った場合の結果を図10に示す。コークステラス上の2バッチ目の鉱石中には小塊コークスはいずれも

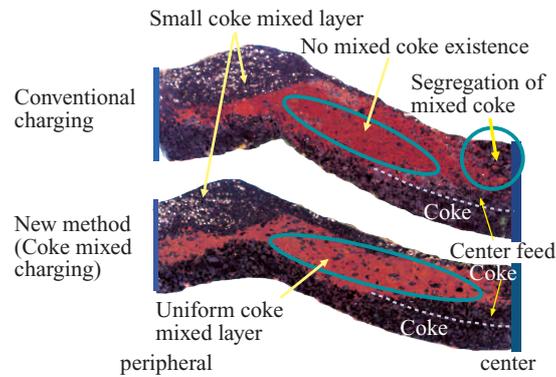


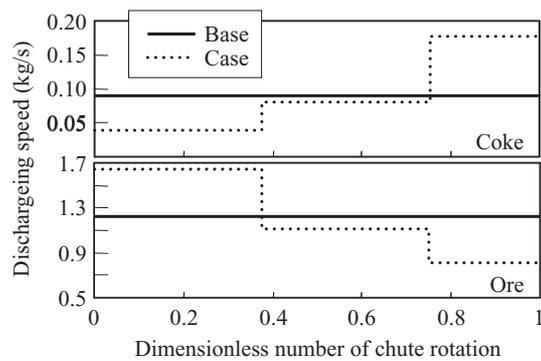
図10 従来法と本法による層内混合状況の比較
Fig.10 Comparison of mixed coke distribution of high ratio coke mixed charging by the conventional method and the developed method (Cross-section of burden model experiments)

均一に分布している一方、1バッチ目に混合した塊コークスは従来パターンでは分離して中心に流れ込んでいるが、新パターンでは鉱石中に均一に存在していることが分かる。

3.2.3 FCG ダイナミック制御による混合性改善

炉頂堆積面での混合層の分離の影響を最小にするため、炉頂バンカーからの原料、コークスそれぞれの排出量を随時的に変化させることを試みた。具体的には、逆傾動においてコークス排出は徐々に増加、原料は徐々に減少するようにバンカーの排出ゲート (FCG) の開度を独立に制御した。

実験は前述の装入模型装置を用いた。FCG 開度パターンの組み合わせは、図11のようにコークス FCG のみを段階的に開くパターン (Case 1)、原料 FCG のみを段階的に閉じるパターン (Case 2)、コークス FCG を開いていくと同時に原料 FCG を閉じていくパターン (Case 3) を比較した。実験後に堆積面の断面観察を行って、画像解析により鉱石層内に歩留まっている混合コークス量を求め、均一に混合



	FCG pattern		Mixed coke ratio (%)
	Coke	Ore	
Base	Base	Base	66.7
Case 1	Case	Base	73.9
Case 2	Base	Case	76.4
Case 3	Case	Case	76.8

図11 FCG ダイナミック制御条件
Fig.11 Pattern of FCG-Dynamic charging

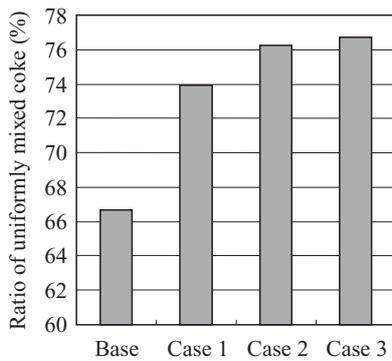


図12 FCG ダイナミック制御による混合度の変化
Fig.12 Change in uniformly mixed coke ratio by FCG-Dynamic charging

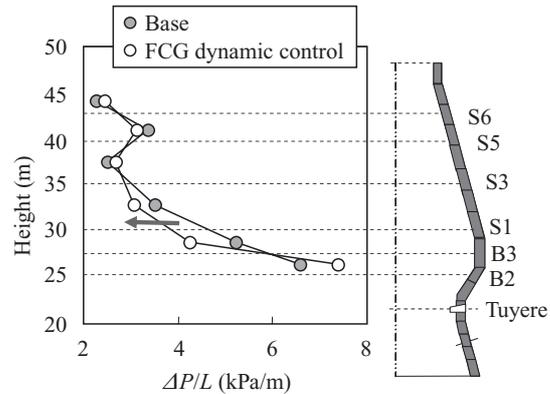


図13 FCG ダイナミック制御による高炉通気抵抗の変化
Fig.13 Pressure drop distribution obtained by shaft pressure gauge before and after FCG dynamic control

している割合を算出した。

結果を図12に示す。FCG ダイナミック制御により、コークス混合率が約8~10%向上し、特にCase3では混合性が大きく改善した。これは、初期に装入するコークス混合率を小さく、壁側に装入するに従って大きくすることによって、炉中心部に流れ込むコークスを低下させたためと考えられる。

3.3 多量混合装入による東日本製鉄所（千葉地区）第6高炉低処理鋳比，高出鉄比操業

2002年4月3日から、東日本製鉄所（千葉地区）第6高炉においてコークス多量混合装入を開始した。コークス2バッチ，原料2バッチの4バッチ装入をベースに，O1に炉頂バンカー同時排出混合で75 kg/t-pig，O2に小塊コークスを貯鋳槽排出で45 kg/t-pig，それぞれ混合した。

多量混合装入移行直後は，原料装入時の堆積面の崩壊や，中心近傍のコークス層厚の薄層化によって通気の不安定が見られたが，装入パターンの調整を行った結果，炉況が安定し η COも上昇した。特にシャフト下部以下の通気抵抗が大幅に改善した。

多量混合装入前後の操業データを解析した結果，多量混合装入によりシャフト効率が向上し，6.2 wt%の混合率で約10 kg/t-pigの還元材比の低減効果を確認した。シャフト効率の向上，還元材比の低下は，融着帯の通気性や還元性の改善，熱保存帯温度の低下などによると考えられる。また，溶銑中Si濃度が約0.15 wt%低下したが，混合装入により溶け落ち開始温度が上昇し，融着帯レベルが降下したためと考えられる。

東日本製鉄所（千葉地区）第6高炉実操業への適用初期においては，第5高炉稼働中は操業諸元をほぼ一定としたままで原料スペックの低下，すなわち処理鋳比の低下を試みた。72 wt%の処理鋳比を2002年11月から徐々に低下させ，2003年3月には月間平均で56 wt%の処理鋳比（出鉄比2.0 t/m³·d，還元材比約500 kg/t-pig）を達成した。

さらに，図13にFCGダイナミック制御適用前後の炉高

方向の通気抵抗分布の変化を示す。混合コークス量は120 kg/t-pigで，装入中にコークスFCG開度を2倍，原料FCG開度は一定とした。これから，シャフト下部の通気抵抗が大幅に低下したことが分かる。また，シャフト効率も改善した。

以上のように，コークス多量混合装入によって高炉操業が大幅に改善され，低処理鋳比下での低還元材比，高出鉄比操業が可能となることが明らかとなった。

4. おわりに

大型高炉で世界初となるコークス多量混合装入法を実機化し，超低処理鋳比操業，高出鉄比操業を実現した。2004年6月に東日本製鉄所（千葉地区）第5高炉を吹卸後，第6高炉は極めて安定した操業を継続中である。

参考文献

- 1) Okuda, K.; Yamaguchi, K.; Ishioka, N.; Furukawa, T.; Endo, H. Tetsu-to-Hagané. 1984, vol. 70, S102.
- 2) Anan, K.; Nagane, T.; Nagata, M.; Ogata, M.; Honda, M.; Isobe, M. CAMP-ISIJ. 1999, vol. 12, p. 234.
- 3) Hotta, H.; Yanaka, H.; Yamamoto, R.; Kishimoto, S. Tetsu-to-Hagané. 1984, vol. 70, S814.
- 4) Sugiyama, T.; Yagi, J.; Omori, Y. Tetsu-to-Hagané. 1978, vol. 64, p. 1676.
- 5) Ergun, S. Chem. Eng. Progr. 1952, vol. 48, p. 89.
- 6) Miwa, S. "Huntai Kogaku Tsuron." Nikkan Kogyo Shinbunsha. Tokyo, 1981.
- 7) D.R. Michell, Trans. AIME. 1938, 130, p. 107.



渡壁 史朗



村尾 明紀



後藤 滋明