

東日本製鉄所（京浜地区）第 2 高炉における装入物分布制御技術

Burden Distribution Control Technique at Keihin No.2 Blast Furnace

柏原 佑介 KASHIHARA Yusuke JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員（課長）・博士（工学）
岩井 祐樹 IWAI Yuki 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）
堀越 裕之 HORIKOSHI Hiroyuki JFE スチール 製鉄技術部 主任部員（副課長）

要旨

JFE スチール東日本製鉄所（京浜地区）第 2 高炉では、高炉の低コークス比操業を達成するためのさまざまな操業改善が行われ、近年では、鉱石とコークスの混合装入技術が、通気性の改善を実現する有効な手段の一つとして検討されてきた。本論文ではセンタフィード型ベルレス炉頂装入装置を有する高炉における小塊コークスの新しい装入技術を検討した。縮尺模型実験により炉頂バンカーからの小塊コークスの排出挙動が変化することを確認し、高炉装入後の炉頂における混合小塊コークスの径方向分布改善を確認した。この新しい装入技術を京浜第 2 高炉に適用し、通気性の改善を確認した。

Abstract:

In No.2 blast furnace at East Japan Works (Keihin), various operational improvements have been carried out in order to achieve the low coke rate operation of the blast furnace. In recent years, the mixed charging technique of ore and coke has been investigated as one of the effective measures to improve the permeability. In this paper, a new charging technique of small coke in a blast furnace with a center feed type bell-less top was investigated. By the scale model experiment, the change in the discharge behavior of the small coke from the top bunker was confirmed, and the improvement of the radial distribution of the mixed small coke at the furnace top after charging in the blast furnace was confirmed. This new charging technique of small coke was applied to the Keihin No.2 blast furnace, and the improvement of permeability was confirmed.

1. はじめに

近年、CO₂ 排出削減に関する取り組みが重要視されている。鉄鋼業、特に製鉄部門はその役割が非常に大きいことから、今後さらに還元材比およびコークス比低減のニーズが増加すると考えられる。京浜地区でもコークス比低減等の操業改善には従来から取り組んでおり、装入物分布シミュレーションの構築および実操業への活用¹⁾、各種ゾンデを用いた装入物の高炉内挙動調査による装入物の品質設計への適用^{2,3)}、高出鉄比操業に対応した適正な操業設計技術⁴⁾、都市ガス吹込み技術を活用した大型高炉における高出鉄比操業⁵⁾ など、さまざまな操業改善を行ってきた。

最近では、還元性の改善と通気性の確保を達成する手段の一つとして、鉱石層内へのコークスの混合装入が行われている。JFE スチールでは 3 パラレルバンカー式のベルレス装入装置を備えた高炉で、3 つのうち 2 つの炉頂バンカーを同時に使用し、鉱石とコークスを炉内へ同時に排出させることにより、バンカー内で混合コークスの偏析を発生させな

い混合装入技術を開発している⁶⁾。東日本製鉄所（京浜地区）第 2 高炉（以下、京浜第 2 高炉）は、同じベルレス式の装入装置でも、上下に 2 つのホッパーを連結した垂直 2 段バンカー式のベルレス装入装置を備えている。垂直 2 段バンカー式のベルレス装入装置については、これまで炉頂バンカー内での混合コークスの偏析を抑制する装入方法は開発されていなかった。

そこで、垂直 2 段バンカー式のベルレス装入装置を備えた京浜第 2 高炉で、鉱石コークス混合層内のコークス混合率分布を制御する装入方法を縮尺模型実験により検討し、新しい装入方法を開発した。本論文では、新装入方法の開発および京浜第 2 高炉での新装入方法を適用した操業試験結果について報告する。

2. 貯鉱槽における小塊コークスの排出方法変更による混合コークスの制御

2.1 実験条件および実験方法

実験装置の模式図を図 1 に示す。実験装置は京浜第 2 高炉の縮尺比 1/18.8 の模型であり、装入装置は、上下のバン

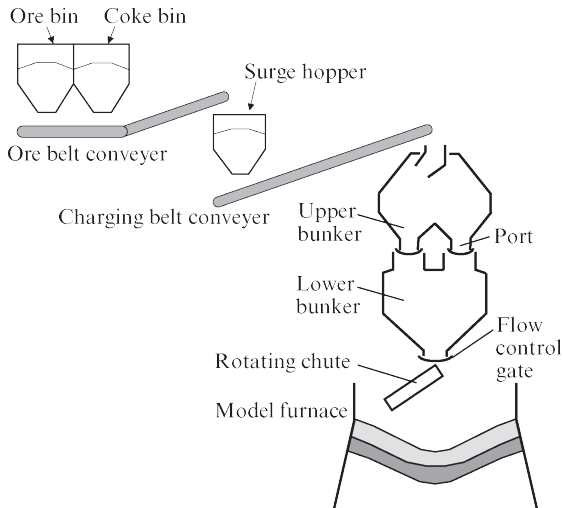


図1 実験装置の概略図

Fig. 1 Schematic illustration of experimental apparatus

カーを連結するポートを4つ有する、垂直2段バンカー式のベルレス装入装置である。実炉での原料の搬送過程を再現するため、鉱石槽、コークス槽、サージホッパー、炉頂バンカーを設置し、各槽はベルトコンベアで連結させた。そして、鉱石槽もしくはコークス槽から鉱石もしくはコークスを排出し、上部回転シュートを介して上部バンカー内に投入、ポートを通じて下部バンカーに投入した後、回転シュートを介して炉体に装入する。装入速度、シュートの回転速度については、重力と慣性力の比であるフルード数が実炉条件と実験条件が一致するように設定した¹⁾。炉体下部の周辺部には、送風用のための12本のガス吹込み口を円周方向に等間隔で有している。原料の装入中は、ガス吹込み口からAirを送風した。炉体底部からは電磁フィーダーにより原料を抜き出せるようにし、原料装入後、次の装入が開始する前に、原料表面が所定の高さ位置になるように原料の荷下がり再現した。

下部バンカーから排出された混合原料をサンプリングする実験では、下部バンカーの流量調整弁の下方にサンプリングボックス、ベルトコンベア、ローラーコンベアを設置、サンプリングボックスは連結してコンベア上に並べて配置した。そして下部バンカーからの原料排出開始と同時にベルトコンベアを稼働させ、下部バンカーから排出される原料をサンプリングボックスで連続的に採取した。採取した混合原料中の焼結鉱と小塊コークスは、焼結鉱とコークスの比重差を利用した重液分離を行い、混合率を測定した。試料は実炉で使用するコークス、焼結鉱を破碎し、実炉の粒度分布に基づき模型と同じ縮尺比で調整した。

ここでは実験条件として、鉱石ベルトコンベア上での小塊コークスの排出方法を変化させた。実験条件を図2に示す。Baseは鉱石と小塊コークスを同時に排出し、鉱石の排出量が全排出量の1/4に達したときに小塊コークスの排出

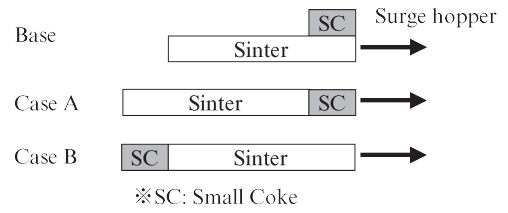


図2 鉱石ベルトコンベア上での小塊コークス排出条件

Fig. 2 Discharged condition of small coke on ore belt conveyor

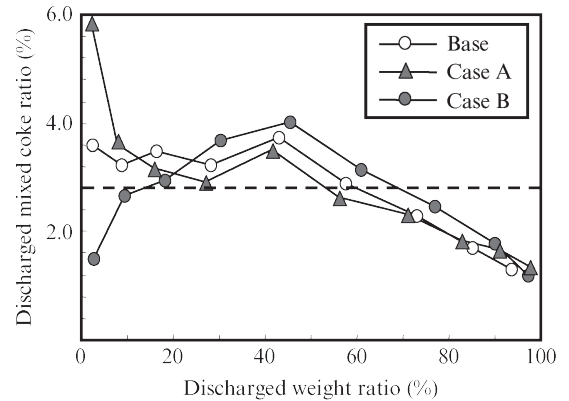


図3 排出方法による小塊コークス混合率の排出挙動の変化

Fig. 3 Change in discharged mixed small coke ratio by discharging methods

を完了した。Case Aは小塊コークスを鉱石よりも先に排出開始、完了させ、鉱石と重ねることなく小塊コークスを鉱石の前方に排出した。Case Bは鉱石を小塊コークスよりも先に排出開始、完了させ、鉱石と重ねることなく小塊コークスを鉱石の後方に排出した。

2.2 実験結果

図3に鉱石ベルトコンベア上での小塊コークスの排出方法毎の、下部バンカーから排出された原料の排出重量割合に伴うコークス混合率の変化を示す。Baseではコークス混合率は排出初期から中期にかけて平均値より高めで推移し、排出後期では排出末期にかけて徐々に低下した。Case AではBaseと比較して排出初期ではコークス混合率が高く、排出後期ではBaseと同様に排出末期にかけて徐々に低下した。Case BではBaseと比較して排出初期のコークス混合率が低く、排出中期にかけて上昇した。しかし排出後期では、BaseやCase Aと同様に排出末期にかけて徐々に低下した。

以上の結果から、貯鉱槽での小塊コークスの排出方法変更により、炉頂バンカーから排出される初期の小塊コークス混合率は制御できることがわかった。しかしこの方法では排出後期の小塊コークス混合率は制御できない。これは混合された小塊コークスの排出挙動は、炉頂バンカー内での小塊コークスの偏析により大きく支配されるためと考えられ

る。このことから、排出後期の小塊コークスの混合率を制御するには、高炉への装入直前に鉱石と小塊コークスを混合できる新しい装入方法を実現する必要があると考え、装入模型実験を用いて新しい装入方法を検討した。

3. 炉頂バンカーへの小塊コークスの装入方法変更による混合コークスの制御

3.1 実験条件および実験方法

炉頂バンカー内での小塊コークスの偏析を抑制するために提案した新装入方法の概念図を図4に示す。鉱石を炉頂バンカーに装入する前に、まず小塊コークスを単独で炉頂バンカーに装入する。次に小塊コークスと鉱石を分離した状態で下部バンカーに搬送し、下部バンカー内で小塊コークスと鉱石を分離した状態で堆積させる。その後、高炉内に鉱石と小塊コークスを混合しながら装入する。本装入方法が炉頂バンカーからの小塊コークスの排出パターンにおよぼす影響を、図1と同様の縮尺模型実験装置を用いて検討した。

実験条件を表1に示す。小塊コークスは、従来は上部バンカー内の全4ポートに事前に鉱石と混合した状態で投入していたが（Base）、全4ポートのうち1ポートだけに小塊コークスを投入する条件（Case1）と、1ポートだけに小塊

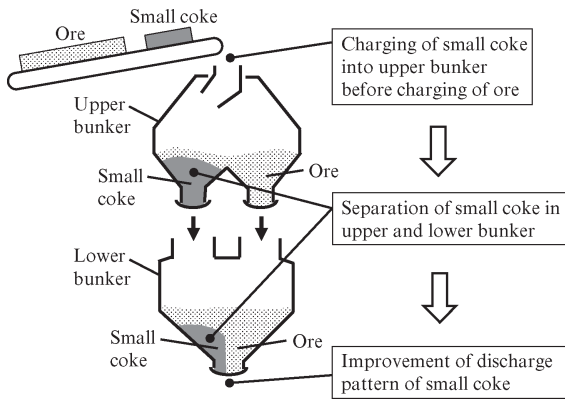


図4 新装入方法の概念図

Fig. 4 Concept of new charging method

表1 実験条件

Table 1 Experimental conditions

	Charging method of small coke into upper bunker	Number of small coke ports (-)	Discharge time lag of small coke (s)
Base	Mixing with ore before charging into upper bunker	4	0
Case1	Charging separately before charging of ore	1	0
Case2	Charging separately before charging of ore	1	0.3

コークスを投入する条件に加え、上部バンカーから下部バンカーへの鉱石と小塊コークスの排出時に、小塊コークスを投入したポートだけを他の鉱石を投入したポートより遅らせて排出する条件（Case2）について検討した。

3.2 実験結果

図5に小塊コークスの上部バンカーへの装入方法および下部バンカーへの小塊コークスの遅れ排出が、下部バンカーから排出された原料の排出重量割合に伴うコークス混合率の変化におよぼす影響を示す。Case1の下部バンカーからの排出末期におけるコークス混合率は、Baseの下部バンカーからの排出末期におけるコークス混合率より高い。したがって、鉱石を装入する前に上部バンカー内に小塊コークスを装入する方法は、下部バンカーからの排出末期のコークス混合率の上昇に効果的である。Case2の下部バンカーからの排出初期におけるコークス混合率は、Case1の下部バンカーからの排出初期におけるコークス混合率より低い。したがって、小塊コークスの下部バンカーへの排出を遅れて開始する装入方法は、下部バンカーからの排出初期のコークス混合率の低下に効果的である。

上記の結果について考察するため、アクリル製の矩形模型を用いて、下部バンカー内における小塊コークスの堆積状況を観察する実験を行った。矩形模型は、上部バンカーの4ポートのうち対角線上に存在する2ポートを再現する断面とした。本実験では装置内に堆積した小塊コークスを観察しやすくするため、嵩密度がコークスに近い白色の軽石を小塊コークスの代替として使用した。図6にBase, Case1, Case2の、矩形模型の下部バンカー内に装入された鉱石および小塊コークスの堆積状況を示す。Baseでは、鉱石と小塊コークスが事前に混合された状態で両方のポートから下部バンカーに装入される。バンカー内で小塊コークスが偏析し、周辺部の斜面に沿った領域では小塊コークスが少なくなっている。Case1では、上部バンカーに最初に投入された小塊コークスの一部を、小塊コークスが投入され

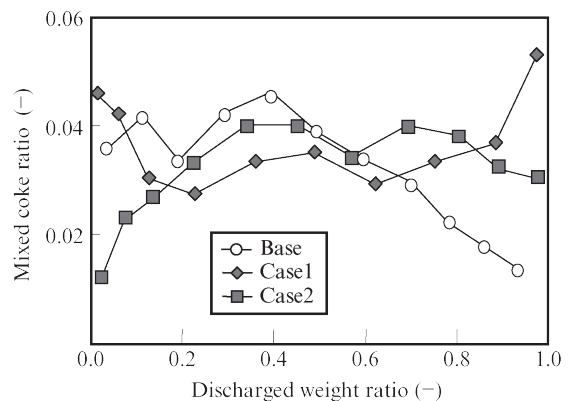


図5 炉頂バンカーから排出される混合コークスの経時変化

Fig. 5 Change in mixed coke ratio discharged from top bunker

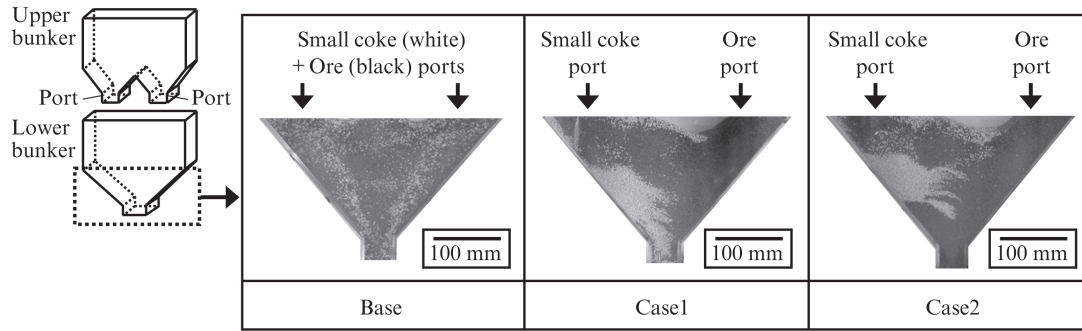


図6 下部バンカーの下方部に装入された鉱石および小塊コークスの比較

Fig. 6 Comparison of ore and small coke charged in lower part of lower bunker

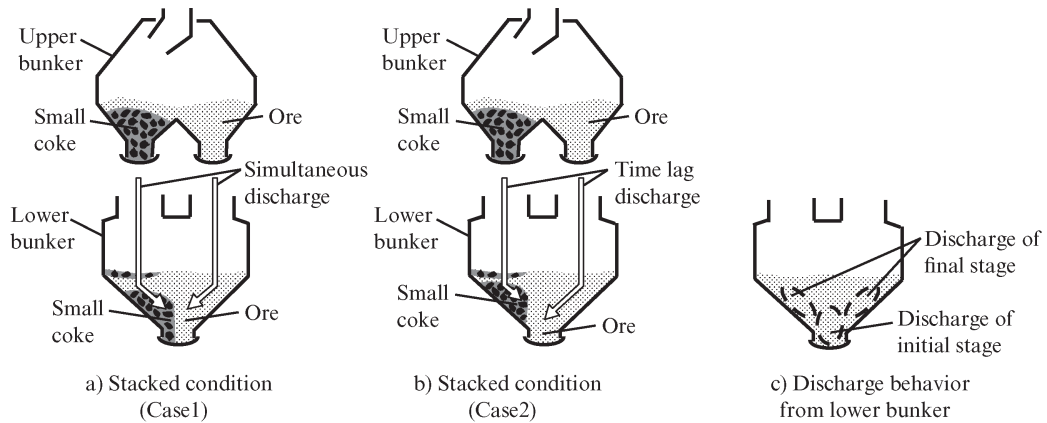


図7 炉頂バンカーに堆積した原料および下部バンカーからの原料排出挙動の概念図

Fig. 7 Schematic illustration of stacked materials in top bunker and discharge behavior of materials from lower bunker

ていないポートの鉱石と同時に下部バンカーに最初に装入するため、小塊コークスは、下部バンカー内において主に排出口の直上部から左側の斜面に沿った領域の下方部に堆積する。Case2では小塊コークスが投入されていないポートからの鉱石を初期に下部バンカーに装入するため、鉱石のみが排出口の直上部に堆積している。したがって小塊コークスは下部バンカー内で排出口の直上部には堆積せず、Case1より少し上部の、主に左側の斜面に沿った領域の下方部に堆積する。

図7にCase1, Case2の炉頂バンカー内における原料の堆積状況および下部バンカーからの原料排出挙動⁷⁾の模式図を示す。Case1では下部バンカーの周辺部の斜面に沿った領域に堆積した小塊コークスが末期に排出されたため、排出末期のコークス混合率が上昇したと考えられる。Case2では下部バンカーの排出口の直上部に堆積した鉱石が初期に排出されるため、排出末期のコークス混合率の上昇に加えて、排出初期のコークス混合率が低下したと考えられる。

以上の結果より、Case2の装入方法は、下部バンカー内における小塊コークスの堆積位置を、排出口の直上部を除いた斜面に沿った領域の下方部に变化させることにより、排出初期のコークス混合率を低下させ、併せて排出末期の

コークス混合率を上昇させる装入方法となることが確認できた。

次に、従来の装入方法（Base）と新装入方法（Case2）では、下部バンカーから排出される小塊コークスの排出パターンが異なることから、小塊コークスの排出パターンの違いが高炉内のコークス混合率分布におよぼす影響を確認するため、小塊コークスの炉頂バンカーへの装入方法が炉内装入後の炉頂堆積面におけるコークス混合率分布におよぼす影響について、図1と同様の縮尺模型実験装置を用いて調査した。所定の装入パターンでコークス（C）、鉱石（O1）、鉱石（O2）を1サイクルとして合計3サイクルを炉体内に装入し、炉内堆積後の原料について、炉頂堆積表面の半径方向の、表面形状および鉱石層内のコークス混合率分布を測定した。表面形状は、C、O1、O2各装入後にレーザー変位計を用いて径方向に測定した。コークス混合率分布は、直径30mmの円管を各半径位置で堆積面の上部から鉛直方向に差し込み、管内の混合原料を吸引装置で上部から吸引して採取し、各半径位置でのコークス混合率を測定した。小塊コークスの装入方法は、O1、O2の両方のバッチで変更した。

図8に堆積した原料の表面形状の測定結果を示す。ここ

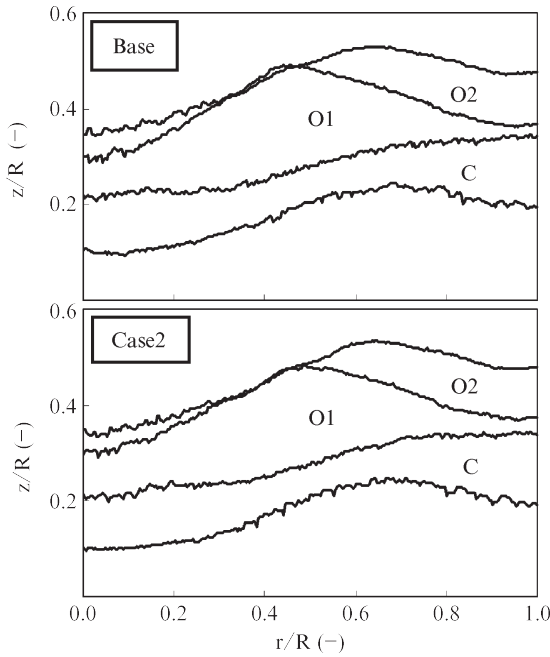


図8 装入後における表面形状の比較

Fig. 8 Comparison of surface profiles after charging

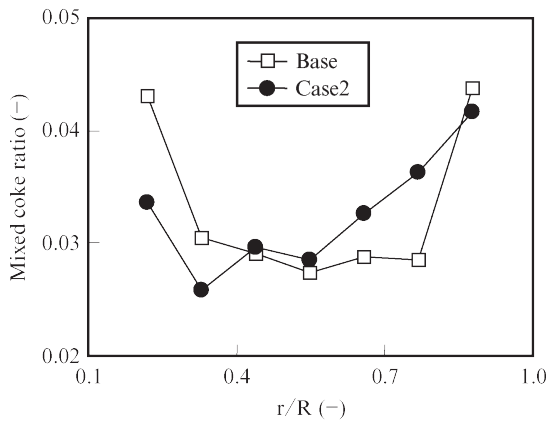


図9 小塊コークス装入方法が半径方向のコークス混合率の分布におよぼす影響

Fig. 9 Effect of charging method of small coke on radial distribution of mixed coke ratio

では従来の装入方法（Base）と新装入方法（Case2）で比較した。中心部と周辺部にはコークス（C）が相対的に多く堆積し、中間部には鉱石（O1, O2）が相対的に多く堆積しており、Base と Case2 ではおおむね同様の表面形状を示している。図9に小塊コークス装入方法が、鉱石層内における半径方向のコークス混合率分布におよぼす影響を示す。Base では炉中心側でコークス混合率が高い。Case2 ではBase と比較して炉中心側でコークス混合率が低く、 $r/R=0.5\sim 0.8$ でのコークス混合率が高い。これはBase では下部バンカーから排出される原料の初期のコークス混合率が高く、かつここでは中心側から周辺側に向けて装入する逆傾動装入⁸⁾を行ったことにより、排出初期の原料は中心側に

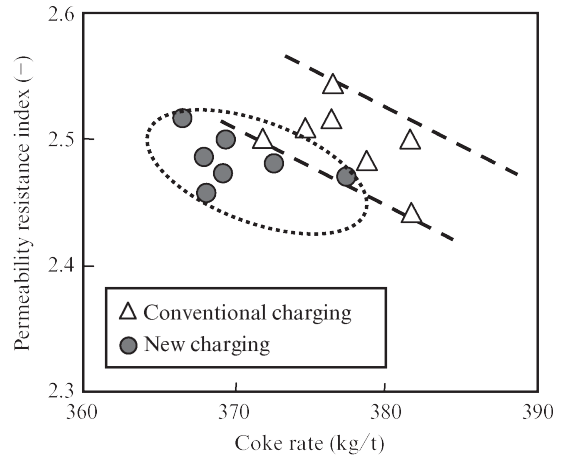


図10 小塊コークス装入方法の変更前後における通気抵抗指数の比較

Fig. 10 Comparison of permeability index before and after change in charging method of small coke

装入されたためと考えられる。一方 Case2 では下部バンカーから排出される原料の初期のコークス混合率が低く、このコークス混合率が低い原料が逆傾動装入により中心側に装入されたため、炉中心側でコークス混合率が低いと考えられる。また $r/R=0.5\sim 0.8$ 付近は最終装入位置であり、下部バンカーから排出される原料の末期のコークス混合率が高いため、コークス混合率が高いと考えられる。このことから、小塊コークスの装入方法を変更した新装入法により、堆積形状を維持したまま半径方向におけるコークス混合率分布を中心部で低下させ、中間部で上昇させるよう適正に制御できることがわかった。

4. 京浜第2高炉での小塊コークス装入方法変更試験

小塊コークスの装入方法を変更した新装入方法が実炉操業におよぼす影響を調査するため、京浜第2高炉で操業試験を行った。変更前は従来の装入方法（模型実験のBase相当条件）とし、変更後は新装入方法（模型実験のCase2相当条件）とした。京浜第2高炉では、コークス1バッチ（C）、鉱石2バッチ（O1, O2）で装入しているため、O1, O2の両方のバッチで小塊コークスの装入方法を変更した。

図10に小塊コークスの装入方法変更前後における通気抵抗指数の比較を示す。一般的にコークス比の低下により通気抵抗指数は上昇する。しかし、小塊コークスの装入方法変更後は、同じコークス比で比較すると通気抵抗指数が低位であった。図11に小塊コークスの装入方法変更前後における、高炉炉壁部に設置したシャフト圧力計から得られる圧力値の、炉頂圧力（炉頂の原料堆積表面より上部に設置された圧力計から得られた圧力値）からの上昇値の比較を示す。小塊コークスの装入方法変更後は、下段の2つの

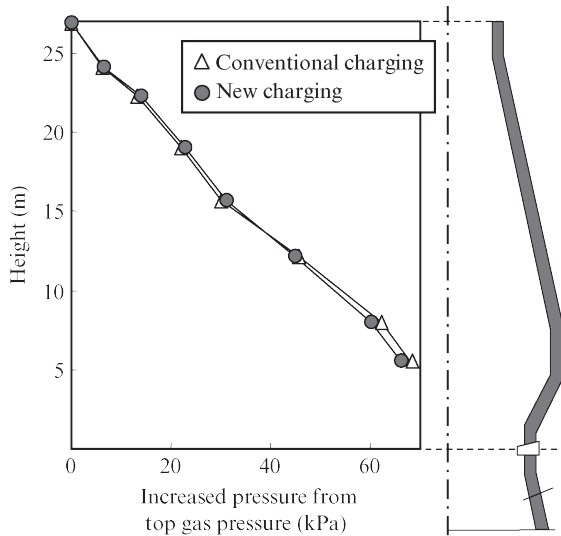


図 11 小塊コークス装入方法の変更前後におけるシャフト圧力分布の比較

Fig. 11 Comparison of pressure distribution obtained by shaft pressure gauge before and after change in charging method of small coke

シャフト圧力計の圧力が低下した。これは小塊コークスの装入方法の変更により、鉍石層内におけるコークス混合率が改善し、融着層の圧力損失が低下した効果⁹⁾と推定された。以上の結果から、上部バンカーの全4ポート中1ポートだけに小塊コークスを鉍石よりも先に投入し、下部バンカーに小塊コークスを遅らせて排出する新装入方法は、垂直2段バンカー式のベルレス装入装置を備えた高炉において、通気抵抗を低下させる効果的な装入方法になり得ることがわかった。

5. おわりに

垂直2段バンカー式のベルレス装入装置を備えた高炉の通気性改善を目的として、鉍石とコークスの混合層内におけるコークス混合率分布を制御する装入方法について縮尺模型実験により検討を行った。最後に実炉での操業試験を行い、新装入方法の効果を確認した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 鉍石を上部バンカーに装入する前に上部バンカー内の1ポートに小塊コークスを単独で装入する装入方法により、バンカー内における小塊コークスの偏析が抑制さ

れ、下部バンカーから末期に排出される原料のコークス混合率が上昇した。また上部バンカー内の小塊コークスが装入されたポートからの下部バンカーへの原料の排出を他のポートより遅れて開始する装入方法により、下部バンカーから初期に排出される原料のコークス混合率が低下した。

- (2) 上部バンカー内の小塊コークスが装入されたポートからの下部バンカーへの原料の排出を他のポートより遅れて開始する装入方法により、炉内での半径方向のコークス混合率分布が改善された。
- (3) 小塊コークスの装入方法を変更した新装入方法を適用した操業試験を京浜第2高炉で実施した。本技術の適用により通気抵抗指数が低下した。

参考文献

- 1) 服部道紀, 飯野文吾, 下村昭夫, 築地秀明, 有山達郎. 大型ベルレス高炉における装入物分布シミュレーションモデルの開発と操業への適用. 鉄と鋼. 1992, vol. 78, no. 8, p. 1345-1352.
- 2) 大河内巖, 服部道紀, 山口篤, 下村昭夫, 石井邦彦, 築地秀明. 装入物炉内挙動調査. 材料とプロセス. 1993, vol. 6, no. 1, p. 121.
- 3) 築地秀明, 服部道紀, 山口篤, 下村昭夫, 石井邦彦, 大河内巖. 高出鉄比操業面からみた装入物の性状評価. 材料とプロセス. 1993, vol. 6, no. 1, p. 122.
- 4) 中島龍一, 岸本純幸, 飯野文吾, 堀田裕久, 伊藤春男, 古屋茂樹. 大型高炉における高出鉄比操業. 鉄と鋼. 1990, vol. 76, no. 9, p. 1458-1465.
- 5) 山本耕司, 柏原佑介, 築地秀明. 東日本製鉄所（京浜地区）第2高炉における都市ガス吹込み操業. JFE 技報. 2008, no. 22, p. 55-60.
- 6) 渡壁史朗, 村尾明紀, 後藤滋明. 高炉でのコークス多量混合装入技術の実機化. JFE 技報. 2008, no. 22, p. 49-54.
- 7) 村尾明紀, 柏原佑介, 大山伸幸, 佐藤道貴, 渡壁史朗, 山本耕司, 福本泰洋. ベルレス高炉における小中塊コークス混合制御技術の開発. 鉄と鋼. 2016, vol. 102, no. 11, p. 614-622.
- 8) 佐藤健, 野内泰平, 武田幹治, 鎌野秀行. 千葉第6高炉新ベルレス装置を活用した装入物分布制御技術の開発. 鉄と鋼. 2000, vol. 86, no. 10, p. 648-653.
- 9) 堀田裕久, 谷中秀臣, 山本亮二, 岸本純幸. 鉄鉍石類とコークスの混合層の高温性状. 鉄と鋼. 1984, vol. 70, no. 12, p. S814.



柏原 佑介



岩井 祐樹



堀越 裕之