

原料品質に対応した低還元材比操業に向けた装入物分布

Low Reducing Agent Rate Operation of Blast Furnace by Controlling Burden Distribution Adapted for Burden Quality

佐藤 健 SATO Takeshi JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部 主任研究員(課長)
武田 幹治 TAKEDA Kanji JFE スチール スチール研究所 製鉄研究部長・Ph.D.

要旨

装入物性状制約下においては通気性改善のための周辺流確保が必要となるが、加えて低還元材比操業を指向する際には、還元効率の確保も考慮した分布制御が要求される。JFE スチールでは制御性に優れた 3 パラレルバンカーベルレス装入装置の導入を推進している。同装置を活用した分布制御により還元効率と周辺流確保の両立を図り、従来よりスペックの低い装入物品質においても低還元材比操業を実施している。この際の分布設計のコンセプトおよび操業実績について述べる。

Abstract:

Promotion of peripheral gas flow for improvement of gas permeability is necessary under conditions of limited burden quality. Furthermore, burden distribution control satisfying good reducibility is necessary to achieve low reducing agent rate operation. 3-parallel bunker bell-less top has been installed at JFE Steel. By use of that device, the burden distribution control paid attention to both gas permeability and reducibility are practiced and lower reducing agent rate operations with lower burden qualities than conventional conditions are realized. Concepts of the desirable gas distribution and results of operations are described in this paper.

1. はじめに

高炉の低還元材比操業の達成は、地球環境問題に対応する重要な課題である。また、旺盛な鉄鋼需要に応えるためには高出銑比安定操業が要求される。低還元材比・高出銑比操業を両立させるには還元性や通気性の改善が必要であり、高品質の装入物の使用はこれらに有利である。一方、装入物品質はその原料の性状や製造設備の能力などにより制限を受け、高品質の条件が満足できない場合がある。低強度のコークスや高 RDI 焼結といった通気性に劣る装入物条件で低還元材比および高出銑比操業を達成するためには、分布制御の最適化が重要なポイントとなる。JFE スチールでは 3 パラレルバンカータイプのベルレス装置を活用した分布制御により、装入物品質を補完しながら還元材比の低減や高出銑比操業を実施している。本稿ではこの際の分布制御設計のコンセプトおよび実績について述べる。

2. 3 パラレルバンカーベルレス導入状況

表 1 に JFE スチールにおける 3 パラレルバンカータイプのベルレス装置導入状況を示す。東日本製鉄所(千葉地区)第 6 高炉は 2 パラレルバンカータイプのベルレス装置から、他はベル MA タイプからの変更である。バンカーのレイアウト例を図 1 に示す。3 パラレルバンカーは装入スケジュールの点で多バッチ装入に有利である。C, C, O, O の 4 バッチ装入¹⁾を行うことにより、以下の効果を発現してい

表 1 3 パラレルバンカー導入状況

Table 1 Installation of 3-parallel bunker bell-less top

Blast furnace	Inner volume (m ³)	Year of installation of 3PB
Kurashiki No. 3	4 359	1990
Chiba No. 6	5 153	1998
Kurashiki No. 4	5 005	2002
Kurashiki No. 2	4 100	2003
Fukuyama No. 5	5 500	2005
Fukuyama No. 4	5 000	2006

3PB: 3-Parallel bunker

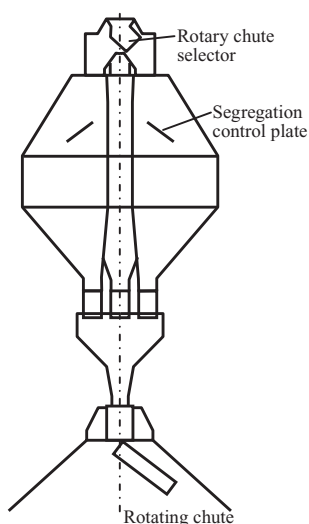


図1 3平行バンカーベルレス装入装置概略
Fig. 1 Outline of 3-parallel bunker bell-less top

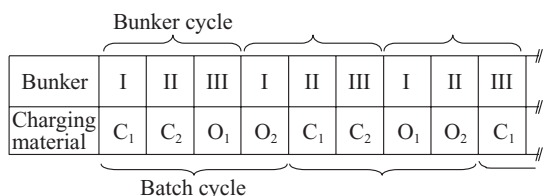


図2 3平行バンカーにおける装入サイクル
Fig. 2 Charging cycle of 3-parallel bunker bell-less top

る。

- (1) バッチごとに周辺または中間～中心と半径方向における装入位置を分けることによる分布制御性向上
- (2) 4バッチ装入と3つの炉頂バンカーの組み合わせによる円周方向偏差抑止(図2に示すようにバンカーと装入物の対応がシフト。さらにダンプ開始のシュート旋回角のシフトも併せて実施²⁾)

なお、千葉第6高炉以降のベルレス装置の導入においては旋回シュート先端にスタビライザー^{3,4)}と呼ばれる装置を設置し、装入物の落下幅および落下軌跡の適正化による分布制御性改善を図っている。

3. 装入物品質制約下におけるガス分布制御

3.1 装入物性状と周辺流

高炉の安定操業には良好な通気性の維持が必須であるが、低強度コークスや還元粉化性の高い焼結鉱を使用する場合には、分布制御によって充填層の圧力損失を低下させる操作が必要となる。この際、炉断面において大きな領域を占める周辺部のガス流制御が重要なポイントとなる。周辺ガス流の相対的な強度を現す指標として、図3に示すようにシャフトゾンデで測定されるシャフト上部のガス利用率の、中間部と周辺部差の差を周辺ガス流指数として定義した(以下、 $\Delta\eta\text{CO}$)⁵⁾。この値が大きいほど相対的に周辺

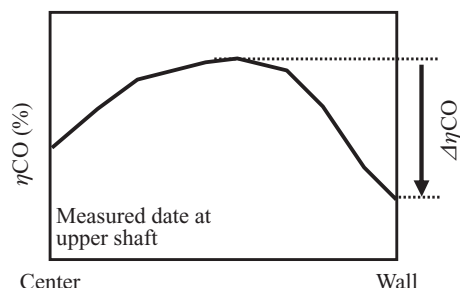


図3 周辺流指数 ($\Delta\eta\text{CO}$) の定義

Fig. 3 Definition of peripheral gas flow index ($\Delta\eta\text{CO}$)

部を流れるガス量が多いことを示す。この指標と装入物品質の関係を以下に示す。

3.2 焼結鉱 RDI と周辺流

炉内に装入された焼結鉱は500~700℃近傍で還元粉化することが知られており、その指標としてRDI(reduction degradation index)が用いられている。RDI悪化時にはシャフト部で通気性が悪化し、その対策として周辺流の強化が報告されている⁶⁾。図4にベル-MA高炉におけるRDIと $\Delta\eta\text{CO}$ の関係を示す⁷⁾。高RDI条件では $\Delta\eta\text{CO}$ の大きい(周辺ガス流の多い)ガス分布を指向している。これは、炉断面において大きな割合を占める周辺部の通気性を改善することにより、炉全体の通気性抵抗の低減を図った結果である。

3.3 コークス強度と周辺流

高炉下部において、コークスの摩耗による粉発生は通気性に大きな影響を及ぼす。JFEスチールではコークス品質の指標としてタンブラー400回転6mm指数(以下、TI)を採用しており、TI低下時の現象として炉下部圧力損失の増大、炉芯粉率の上昇が報告されている⁸⁾。コークス粉蓄積による通気抵抗増大時の対策としても、周辺流強化による圧力損失の低減が有効である。図5にベル-MA高炉におけるコークスTIと $\Delta\eta\text{CO}$ の関係を示す。高焼結RDIの

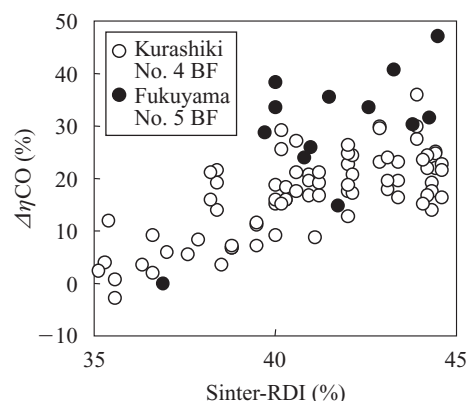


図4 焼結鉱 RDI と周辺流指数の関係

Fig. 4 Relationship between sinter-RDI and peripheral gas flow index

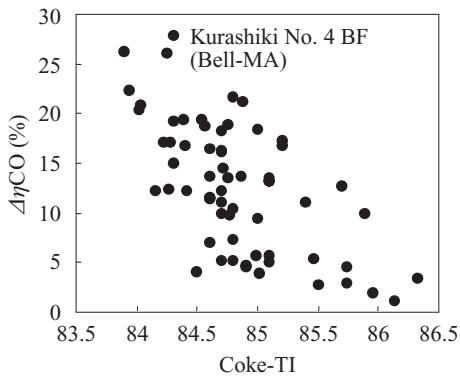


図5 コークス TI と周辺流指数の関係

Fig.5 Relationship between coke-TI and peripheral gas flow index

場合と同様、低コークス TI 条件では周辺流強化により通気性悪化を回避している。

3.4 望ましい層厚分布のコンセプト

上述のように通気性に劣る装入物使用条件では周辺流強化による通気改善が重要となる。これは、半径方向の通気性の偏差を大きくすることにより、炉全体の通気性改善を図るものである。一方、還元材比低減を指向する上では、通気性だけでなく還元性の維持も重要である。一般に半径方向のガス分布偏差が大になるほど通気抵抗は改善するが⁵⁾、還元効率は低下する。したがって、ガス分布制御による通気性と還元性の改善は両立しにくい、極力、両者の最適化を図る必要がある。高炉2次元シミュレーションモデル⁹⁾を用いて、炉頂の鉱石/コークス層厚分布が通気性および還元性に及ぼす影響を調査した¹⁰⁾。周辺ガス流強化条件を想定し周辺部の鉱石層厚を低位とした上で、中間部に局所的な鉱石層厚のピークがあるケースA、およびピークがなく鉱石層厚がフラットなケースBの2パターンを計算条件とした。還元材比は一定とし、還元性はガス利用率で評価した。計算結果を図6に示す。周辺部の鉱石層厚が

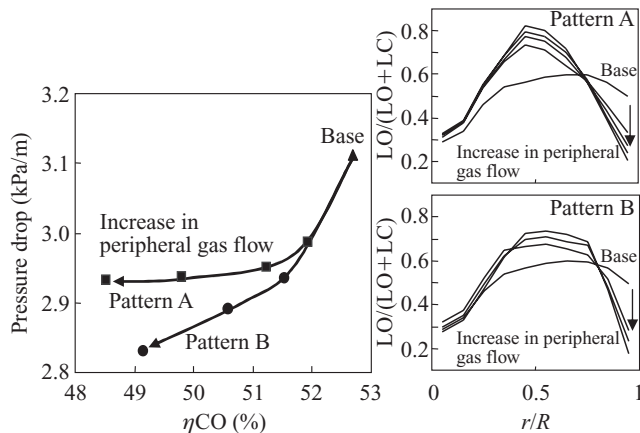


図6 周辺流増加時のガス利用率と圧力損失の関係

Fig.6 Relationship between gas utilization and pressure drop with increase in peripheral gas flow

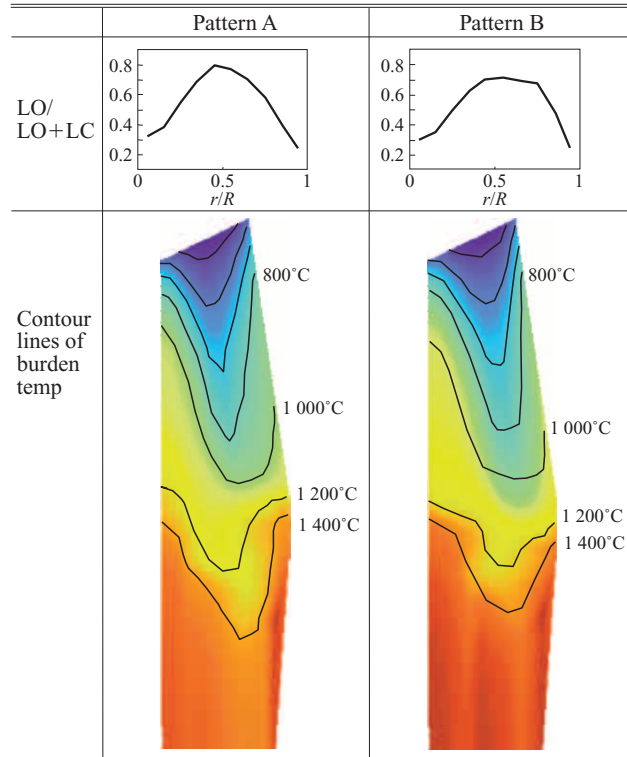


図7 層厚分布が炉内温度分布に及ぼす影響

Fig.7 Effect of distribution of layer thickness on temperature profile

高い Base に対し、A パターン、B パターンとも周辺部の鉱石層厚を低下させるにしたがって圧力損失は低下する。一方、両パターンとも通気改善にともないガス利用率も低下するが、B パターンの方が A パターンと同程度のガス利用率における圧力損失が低い。炉内の温度分布を図7に示す。A パターンは B パターンに比べ、融着層 (1200~1400℃) が径方向中間部で肥大化しており、これが通気改善を妨げる要因となっている。したがって、周辺流強化を前提とする低還元材比操業においては、ケースBのような中間部に局所的な鉱石層厚のピークがなく、かつ周辺部の低鉱石層厚比領域が小さい層厚分布が望ましく、分布設計の目標とした。

4. 操業実績

上記のケースBの層厚比分布を形成するためには、

- (1) 低鉱石層厚比条件を炉壁近傍の狭い領域に限定
- (2) 中間部において鉱石と同等のコークス堆積角の形成を満足する必要がある。周辺流を強化するためには、鉱石の装入位置を炉壁部から遠ざける必要があるが、さらに図8に示すように、コークステラスを小さくするほど炉壁近傍の狭い領域で鉱石層厚が小となる。ベル高炉で周辺流強化を図ってコークス投入位置を周辺部に集中させると、コークステラスは短くなるが、同時に中間部のコークス堆積角が大きくなる。この結果、一般に鉱石の堆積角はコー

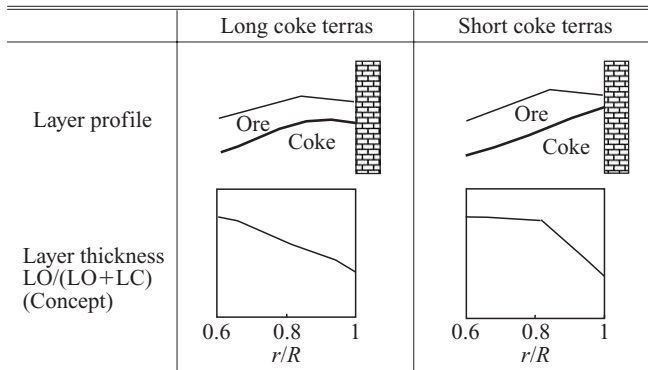


図8 周辺部層構造が層厚分布に及ぼす影響

Fig.8 Effect of layer profile on the ore layer thickness at peripheral region

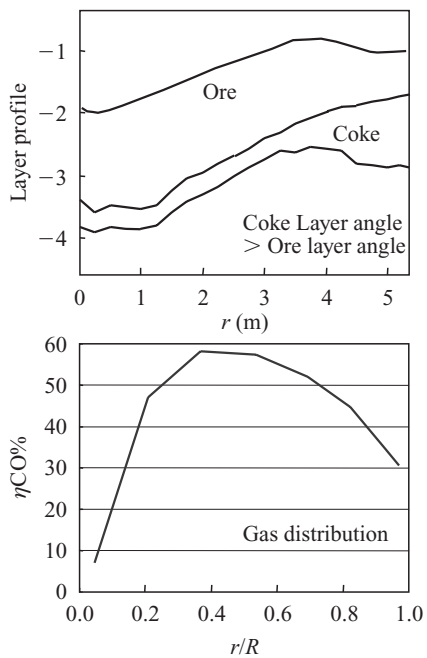


図9 ベル高炉における周辺流強化時の層構造とガス分布の例

Fig.9 Typical layer profile and gas distribution of bell-top with high peripheral gas flow

クスより小さいため、図9に示すように中間部に η_{CO} のピーク（鉱石層厚のピークと対応）を持つ分布となる。したがって、(1)、(2)を満足するためには、周辺部のコークステラスを極力小さくするとともに、中間部のコークス堆積角を鉱石層と同等に調整する必要がある。JFEスチールでは、スタビライザーを備えた3平行バンカーベルレス装置を活用し、 C_1 、 C_2 、 O_1 、 O_2 の4バッチ装入により、これらのコンセプトに基づいた分布制御を実施している。図10にベルレスパターンの、図11に堆積形状およびガス分布の例を示す。コークステラス調整を C_1 で、中間部のコークス堆積角調整および中心部コークス層厚調整を C_2 で行い、 O_1 （中間～中心）、 O_2 （周辺）で鉱石層厚調整を行うことにより、目標とする層厚およびガス分布を形成している。図12に同等のコークスTIおよび焼結RDI条件にお

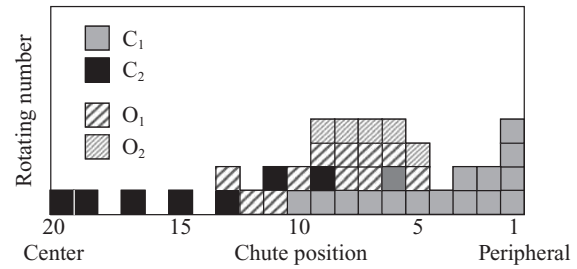


図10 3平行バンカーベルレスの装入パターン例

Fig.10 Typical charging pattern of 3 parallel bunker bell-less top

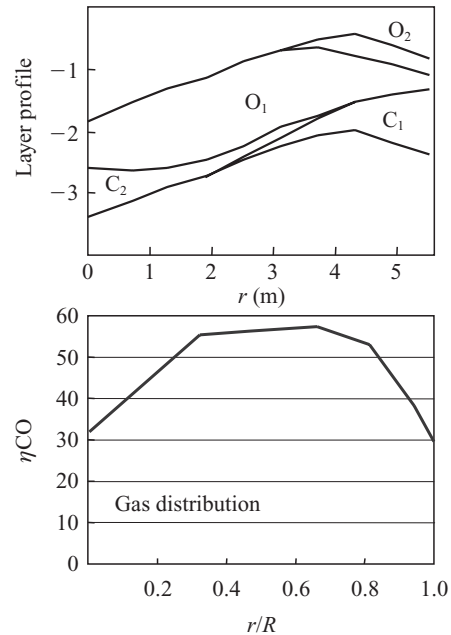


図11 3平行バンカーベルレスにおける周辺流強化時の層構造とガス分布例

Fig.11 Typical layer profile and gas distribution of bell-less top with high peripheral gas flow

	Productivity	RAR	CR	Coke-TI	Sinter-RDI
◆ Bell top	1.9	537	420	84.1	36
▲ Bell-less top	2.4	486	370	84.4	38

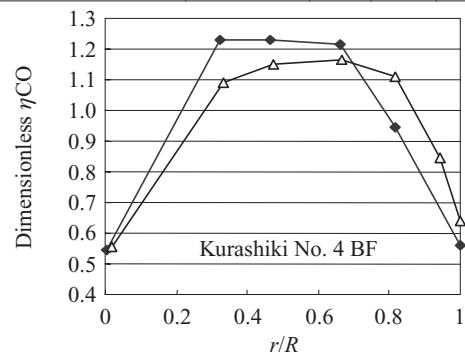


図12 同等の装入物条件におけるベルおよび3平行バンカーベルレスにおけるガス分布例

Fig.12 Gas distribution at bell top and bell-less top with the same burden qualities

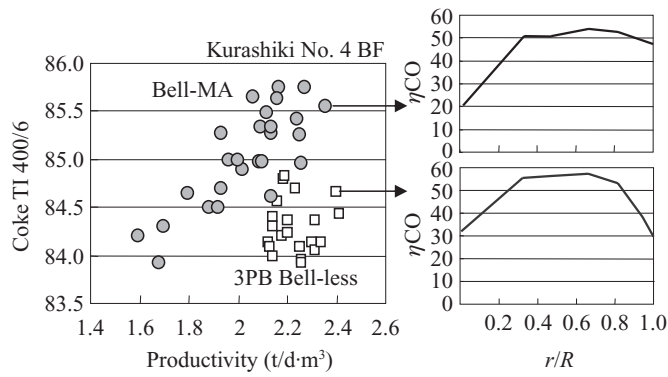


図 13 コークス TI と出鉄比の関係

Fig. 13 Relationship between productivity and coke-TI

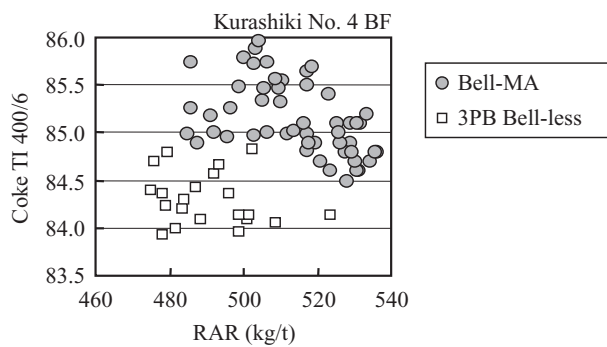


図 14 還元材比とコークス TI の関係

Fig. 14 Relationship between RAR and coke-TI

る、ベルおよびベルレス装入装置によるガス分布を示す。ともに周辺の ηCO は低位としているが、ベルレス装置においては前述のコンセプトに従って中間部の ηCO のピークがないガス分布を指向している。結果として、装入物スペックの大幅な変更なしで高出鉄比かつ低還元材比操業が実現している。図 13 に倉敷第 4 高炉のコークス TI と出鉄比の関係に代表的なガス分布を合わせて示す。ベルレス導入前においては、高出鉄比条件ではコークス強度を高めることにより通気性を改善し、周辺ガス流を抑制していた。一方、ベルレス導入以降は、低コークス強度の低い条件にも関わらず、周辺流を強化することにより高出鉄比操業が実施できている。図 14 に還元材比とコークス TI の関係を示す。ベルレス装置導入後、前述の通気性と還元性の両立を指向したガス分布により、周辺流を確保しながら低 TI 条件で低

還元材比操業を実施している。

以上は西日本製鉄所（倉敷）第 4 高炉の事例であるが、2 章に示したように JFE スチールでは 3 パラレルバンカーベルレスの導入を推進している。各高炉の装入物品質事情に応じて分布制御の最適化、並びに還元材比低減を実施している。

4. おわりに

JFE スチールでは、3 パラレルバンカーベルレス装置を活用した装入物分布制御により、低位の装入物品質条件においても低還元材比・高出鉄比操業を実施している。今後も、排出 CO_2 削減と経済性を追求した操業改善を推進する予定である。

参考文献

- 1) 沢田寿郎, 上谷年男, 谷吉修一, 宮川昌治, 菅原英世, 山崎信, 鉄と鋼. 1992, vol. 78, no. 8, p. 1337.
- 2) 谷吉修一, 益本慎一, 大神正通, 沢田寿郎. CAMP-ISIJ. 1992, vol. 5, p. 107.
- 3) 佐藤健, 野内泰平, 武田幹治, 鎌野秀行. 鉄と鋼. 2000, vol. 86, p. 648.
- 4) 渡壁史朗, 武田幹治, 西村博文, 後藤滋明, 西村望, 内田哲郎, 木口満. 鉄と鋼. 2006, vol. 92, no. 12, p. 901.
- 5) 佐藤健, 佐藤道貴, 武田幹治, 有山達郎. 鉄と鋼. 2006, vol. 92, no. 12, p. 1006.
- 6) 若井造, 牧章, 酒井敦, 脇田茂, 松原真二, 塩原雅之. CAMP-ISIJ. 1996, vol. 9, p. 182.
- 7) 佐藤健, 有山達郎, 佐藤道貴, 武田幹治, 渡壁史朗. CAMP-ISIJ. 2004, no. 17, p. 18.
- 8) 武田幹治, 井川勝利, 田口整司, 木口満, 妹尾義和, 田村栄. CAMP-ISIJ. 1990, vol. 3, p. 10.
- 9) 佐藤健, 野内泰平, 木口満. 川崎製鉄技報. 1997, vol. 29, p. 30.
- 10) 佐藤健, 佐藤道貴, 柏原佑介, 武田幹治. CAMP-ISIJ. 2006, vol. 19, p. 711.



佐藤 健



武田 幹治