

# 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

佐藤 健\*・野内 泰平\*・武田 幹治\*・鎌野 秀行\*<sup>2</sup>

Development of Burden Distribution Control with an Advanced Bell-less Top at Chiba No. 6 Blast Furnace

Takeshi SATO, Taihei NOUCHI, Kanji TAKEDA and Hideyuki KAMANO

**Synopsis :** A new bell-less top was installed at Chiba No. 6 blast furnace in 1998 for the advanced burden distribution control. Main features of this bell-less top are a rotating chute with stabilizer and reverse/conventional tilting function. These were developed by series investigations by use of reduced scale model experiments. Furthermore, an accurate simulator for burden distribution control was developed. An Operational trial of reverse tilting charging was implemented based on simulation by using the simulator. The controllability of burden profile and gas distribution has been confirmed during the test operation.

**Key words :** blast furnace; burden distribution control; rotating chute; reverse tilting; burden profile.

## 1. 緒言

ベルレス装入装置はベル+MA式に比べきめ細かな分布制御が可能であり、ベルレスを活用した分布制御技術の開発が行われている<sup>1-6)</sup>。川崎製鉄では千葉第6高炉(1次)における初の大型高炉へのベルレス装入装置導入<sup>7)</sup>を皮切りに、水島第3高炉(3次)ではベルレス+3パラレルバンカーを導入<sup>8)</sup>し、長寿命達成<sup>9)</sup>や細粒原料の多量使用<sup>10)</sup>等の成績を挙げてきた。

近年、高炉操業においては従来にも増して高微粉炭比によるコークス消費量の低減、並びに劣質原料の使用量増大等による原燃料コストダウンが求められている。高O/Cや事前処理鉄の低配合比の操業条件では、半径方向の鉄石層厚の変動が融着帯の局部的肥大化を招く可能性が高く、従来にも増して高精度かつ外乱に強い安定性の高い装入物分布制御が要求される。

著者らはさらなる装入物分布制御技術のレベルアップに向けて、高微粉炭比、高出鉄比、小塊原料多量使用等の限界操業に対応した装入物分布制御を検討し、目標とする装入物堆積形状および装入装置に具備すべき機能を提案した<sup>11)</sup>。これらの機能は縮小模型を用いた検討を経て、千葉第6高炉2次改修(1998年6月火入れ)で実機化された。本報告では新機能の考え方、模型実験結果、実機充填調査結果および新機能を活用した装入物分布制御テストについて報告する。

## 2. 新装入装置開発

### 2.1 新装入装置のコンセプト

高炉操業において、1チャージあたりの装入量の増加や装入物の粒子径の低下は堆積時の安息角を低下させる因子であることが知られている<sup>11,12)</sup>。従って、高O/Cや細粒原料使用時は鉄石の中心部への流れ込みが助長されやすく堆積が不安定になりやすい。そのような状況下でも高精度かつ高い再現性を実現する装入物分布制御のイメージをFig. 1に示す。具備すべき機能を以下に列挙する。

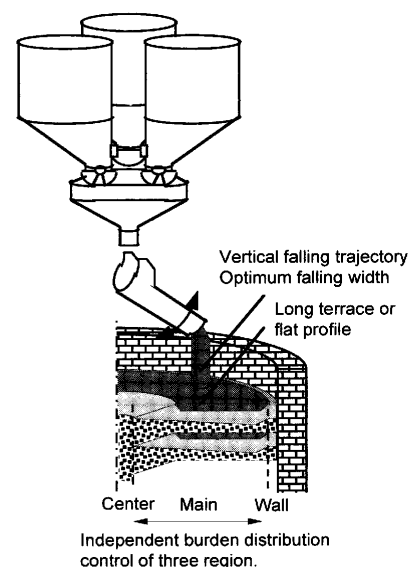


Fig. 1. Concept of new charging system.

平成12年5月11日受付 平成12年7月13日受理 (Received on May 11, 2000; Accepted on July 13, 2000)

\* 川崎製鉄(株)技術研究所 (Technical Research Laboratories, Kawasaki Steel Corp., 1 Kawasaki-cho Chuo-ku Chiba 260-0835)

\* 2 川崎製鉄(株)千葉製鉄所 (Chiba Works, Kawasaki Steel Corp.)

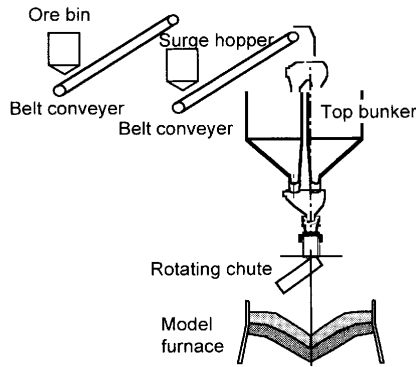


Fig. 2. Experimental apparatus.

- 1) 3つ以上の炉頂バンカーを活用した多バッチ装入。
- 2) 粒度偏析状態の制御機能を有するオフセンター型炉頂バンカーによる排出粒度の時系列変化制御。
- 3) 原料の落下幅および落下軌跡を適性化するため、旋回シュート先端部にスタビライザーを設置。
- 4) 原料の装入を炉壁側（以下順傾動）と炉中心側（以下逆傾動）のいずれからでも可能とすることによる、堆積プロフィール形成の自由度の拡大。
- 5) 斜面の崩れに対する安定性に優れたロングテラス、低傾斜角堆積プロフィールの形成。

以上の考えを実現するために必要な装置および機能を縮小模型実験により検討した。

### 2.2 実験装置

装置概要をFig. 2に示す。通常、高炉の装入物は粒度分布を有しており、ホッパー類に貯蔵される際の堆積斜面の分級作用および排出時のファネルフローによって、搬送過程で粒度の偏析を生じる。模型においても実炉の原料輸送過程を再現するために、原料槽、サージホッパー、炉頂バンカーを設け、各貯蔵槽はベルトコンベアで連結されている。縮尺は1/18であり装入速度、シュート回転速度は実機条件（回転速度10rpm）とフルード数が一致するように決定した<sup>14,15)</sup>。試料は破碎したコークスおよび焼結鉱を使用し、実炉の粒度分布に対して模型と同じ縮尺比で調整した。

### 2.3 逆傾動装入方法

安定性に優れた低堆積角のプロフィールを形成するには、従来の装入に比べて、炉中心から中間部への装入量の増大が必要である。装入物分布シミュレーター<sup>16)</sup>を用いて計算した低堆積角プロフィールの例を1旋回毎の堆積形状とともにFig. 3に示す。シュート1旋回あたりに装入される量は各旋回でほぼ一定であり、炉中心側への装入ほど1旋回の装入で形成される層が厚くなる。従来のように旋回シュートを炉壁側から炉中心側に傾動させる方法（以下順傾動）でFig. 3に示すような低堆積角プロフィールを指向した場合、原料性状の変化に起因した全装入時間の変化、すなわち最終旋回における装入量の過不足が、堆積形状に大きな

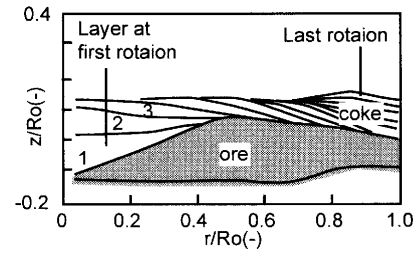


Fig. 3. Surface profiles of coke layer dumped by one rotation with low angle charging pattern (calculation).

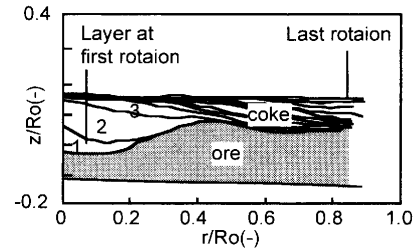


Fig. 4. Surface profiles of coke layer dumped by one rotation with low angle charging pattern (model experiment).

影響を与える。それに対し、炉中心側から炉壁側に向かって旋回シュートを傾動させる装入法（以下逆傾動）ではトータル排出時間の変動にかかわらず確実に装入初期、すなわち炉中心部の装入量を確保できる方法であり、低堆積角プロフィールを指向した際の再現性に優れる。Fig. 4に縮小模型で実際に逆傾動で低堆積角型分布を指向して装入した際の旋回毎の堆積形状を示す。シミュレーション通りの分布が実際に再現できており、逆傾動機能は低堆積角形状形成に有効であることを確認した。

一方、高炉の安定操作のためには中心ガス流を確保する必要があり、炉中心部に細粒原料が堆積するのは望ましくない。旋回シュートの傾動方向にかかわらずに中心部へ粗粒が装入されるようにするためには、シュートの傾動方向に応じて装入中の原料粒度の経時変化を制御する技術が必要となる。水島第3高炉で採用された偏析制御板を持つオフセンター型炉頂バンカー<sup>8)</sup>は細粒が初期に、粗粒が後期に排出される特性を有しており、順傾動モードにおいて中心流確保に有利である。今回は同タイプのバンカーをベースにバンカー内の粒度偏析状態を変更できる装置を開発した。模型装置においてバンカーから排出される試料を経時的にサンプリングした結果をFig. 5に示す。これらはサージホッパーからの排出までは同一の条件とし、炉頂バンカー内への堆積条件のみ変更したものである。容器からの粉粒体の排出はファネルフローとなることが知られており、排出口上部に堆積している粒子が初期に排出される。炉頂バンカーへの装入物の投入位置を制御することにより、バンカー内の堆積形状の変更を介してバンカー排出口と細粒、粗粒の偏析箇所との位置関係を変化させ、排出時

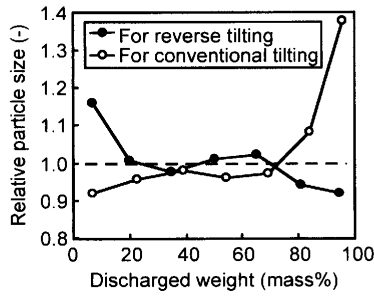


Fig. 5. Changes in particle size discharged from the top bunker.

の粒度経時変化を細粒→粗粒パターンあるいは粗粒→細粒パターンへと切り替えることが可能になった。

### 2.4 スタビライザーの開発

今回の改修では炉口径が0.9m拡大されたが、装入物を炉壁部まで到達させることは新装入装置に課せられた必須条件である。旋回シュートの長さを延ばすことにより装入物をより遠くへ落下させることができるが、装入物がシュートから飛び出す際の水平速度成分が増大して、落下軌跡が水平に近づく。装入物分布に対する外乱の一つに炉壁の局部磨耗やスリップ等による装入レベルの変動が挙げられるが、旋回シュートからの落下軌跡が水平に近いほど装入レベルが変化した際に装入物が落下する半径方向の位置が大きく変化し、結果としてガス分布の変動を引き起こす。以上のことから落下軌跡については、炉壁への到達と同時に軌跡を極力水平にしないことを目標とした。

一方、原料の装入速度一定の場合、装入物のシュートからの落下幅が狭くなると堆積面での単位面積あたりの落下エネルギーが増大して堆積状態が不安定になる<sup>11)</sup>。従って、今回の2次改修の装入装置は1次の装置と同程度の落下幅を確保することを目標とした。

以上の要求を満たすため、旋回シュート先端部へ装入物整流装置（以下、スタビライザー）の設置を検討した。スタビライザーは装入物落下流を下方に調整する前面板（シュート本体に30度の角度で設置）と、前面板衝突後の装入物の落下幅を調整する側板（前面板に垂直に設置）から構成される。模型実験によりスタビライザーの効果を確認した。

Fig. 6に従来の装置と新装置の旋回シュートからの装入物落下軌跡を比較して示す。炉口径拡大前後の装入物落下挙動を比較するため、半径方向の装入物到達位置を炉口径で規格化した無次元半径で評価した。旋回シュート本体の0.2m延長と最大傾動角度を従来より3°大きくすることにより装入物落下開始位置を従来より炉壁側に変更し、さらにスタビライザー前面板によって落下軌跡を下方に調整することにより、従来の落下軌跡をほぼ平行移動する形より炉壁側への装入が可能となった。Fig. 6には比較としてスタビライザーを設置せずに旋回シュート長を1m延長し

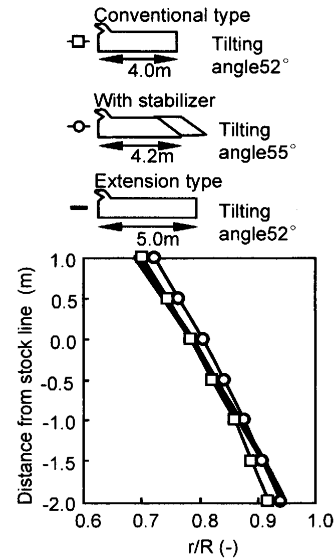


Fig. 6. Main falling trajectory of burden with conventional and new rotating chute.

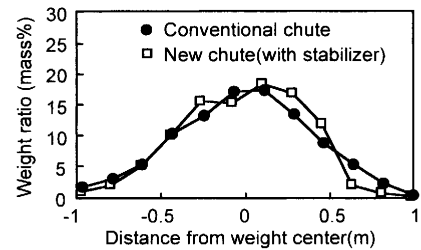


Fig. 7. Radial distribution of burden flow falling from rotating chute.

た際の計算結果を併記した。従来装置と同じ傾動角で常用のストックレベルである1~1.5mにおいてさらに炉壁側に装入物を到達させることができるが、落下軌跡が水平に近付いている。

Fig. 7に旋回シュートから落下する際の半径方向の装入物重量分布を示す。スタビライザー側板への装入物の衝突により落下幅の減少が抑制され、従来装置と同等の落下幅が実現できた。

### 2.5 シミュレーター開発

設備変更に伴い、既存の装入物分布予測モデル<sup>16,17)</sup>をベースに新装入装置に対応した装入物分布シミュレーターを開発した。スタビライザーの設置に対応して落下軌跡の計算方法を変更した。その概要をFig. 8に示す。従来、装入物の落下流を1本の主流で代表させていたが、新モデルでは3つの主流を考え、各々のスタビライザーへの衝突/非衝突を判定したうえで軌跡を計算し、最終的に1本の主流に合成した。各主流間の相互作用を最下流の半径方向速度成分に乗じたパラメータとして考慮し、模型実験結果と合致するようにパラメータ調整した(Fig. 9)。炉頂バンカーから排出される粒度経時変化はFig. 5に示した実験結果を基にモデル化した。バンカーからの排出挙動、落下軌跡およ

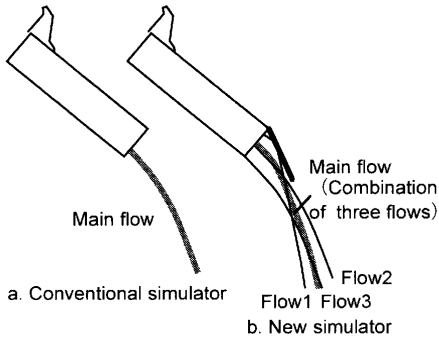


Fig. 8. Treatment of burden flow at simulator.

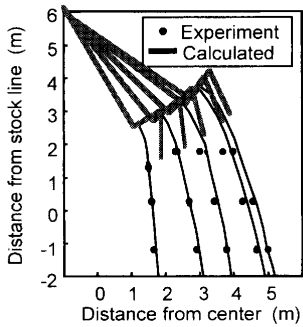


Fig. 9. Falling trajectory of burden at scale model and simulator.

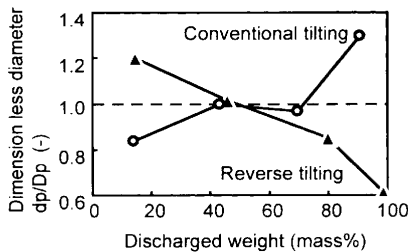


Fig. 10. Changes in particle size of ore discharged from top bunker at the filling test.

び炉内堆積状態等のシミュレーターの予測精度は填充時の実機測定で確認した。

### 3. 新機能実機テスト (填充調査)

模型実験により検討された装置は、千葉第6高炉 (2次) の改修で実機化された<sup>18)</sup>。火入れ前に填充調査を実施し、各機能を確認した。落下軌跡、堆積形状および粒径分布測定は従来と同様の方法<sup>19)</sup>で行った。

#### 3.1 粒度経時変化

順/逆傾動の選択に対応した炉頂バンカーからの原料粒度排出パターンの変更機能を確認した。炉頂固定ゾンデレベルに小型ベルトコンベアーを設置し、装入中の原料を経時的に採取した。結果をFig.10に示す。模型実験で検討した通りに、細粒→粗粒あるいは粗粒→細粒へと粒度経時変化パターンを変更できることを確認した。

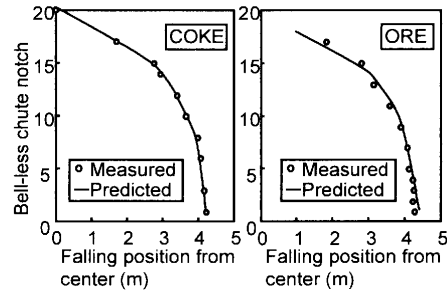


Fig. 11. Relationship between bell-less chute notch and radial falling position of burden.

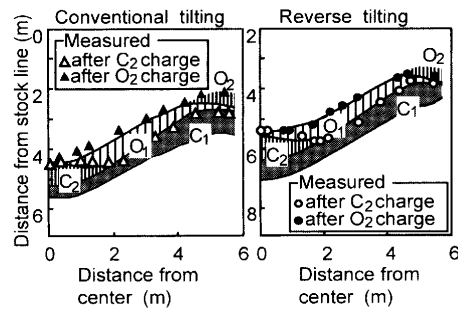


Fig. 12. Comparison of measured and predicted burden profile.

#### 3.2 装入物落下軌跡

炉頂固定ゾンデレベルに着色した鉄パイプを設置し、旋回シュート傾動ポジションと装入物落下位置の関係を調査した。鉄パイプ上の装入物の衝突痕から落下時の主流位置を決定した。主流落下位置について、実測とシミュレーターによる計算値との比較をFig.11に示す。両者は良い一致を示している。

#### 3.3 堆積形状、粒度分布

コークス、鉬石装入後の各々の堆積層表面プロファイルを測定し、シミュレーターによる計算結果と比較した。Fig.12に示すように、通常の装入モード (壁→中心)、および逆傾動装入モード (中心→壁)とも精度良く予測できた。また、コークス層の上に鉬石を装入すると、コークスの一部が削り取られて中心部へ流れ込む現象が知られている<sup>20)</sup>。この現象に関して、順傾動モードと逆傾動モードで違いが認められた。Fig.13に両モードにおけるコークス、鉬石装入後の表面プロファイルと、電気センサーにより測定した鉬石装入後のコークスと鉬石の境界を示す。順傾動モードでは典型的なコークス削り取りが発生しているのに対し、逆傾動モードではコークス削り取りはほとんど認められない。逆傾動モードでは一般的にコークス削り取りの対象となる中間~周辺部への鉬石装入時にすでに中心~中間に鉬石が堆積しているため鉬石が中心部へ流れずに落下位置近傍に留まり、コークス削り取りが発生しなかったと推察される。コークス削り取りをコントロールする技術は確立されておらず、コークス削り取りの発生しない装入方法は

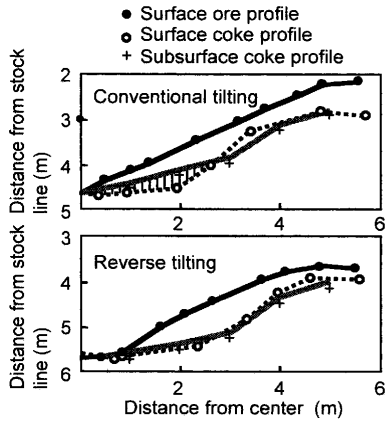


Fig. 13. Measured subsurface coke profile after ore charging.

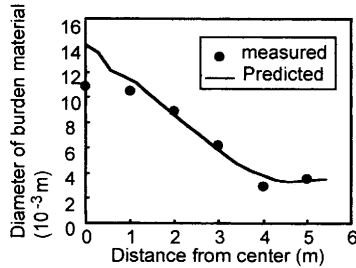


Fig. 14. Measured radial distribution of particle diameter.

分布の再現性に優れた手法であると考えられる。

鉱石装入後に炉内から採取した原料の各半径位置の粒度についても、シミュレーターの予測と良く一致した (Fig.14)。中心で計算値と実測値がずれているが、Fig.12に示すように炉内調査時は中心部の鉱石層厚が非常に小さい堆積形状となっており、炉中心での鉱石採取量が少量であったため実測値の精度が低かったと推定される。

#### 4. 新装入方法操業実験

千葉第6高炉は62日間の短期改修<sup>21)</sup>を経て、98年5月から第2次操業を開始した。火入れ立ち上げ<sup>22)</sup>は1次と同様にコークスと鉱石の2バッチ装入を実施したが、火入れ後17日目にはそれ以降の装入パターンをのベースとなる3平行バンカーを活用した4バッチ装入(C<sub>1</sub>C<sub>2</sub>O<sub>1</sub>O<sub>2</sub>)を開始した。さらに新機能を確認するために逆傾動モードにおける分布制御性の確認テストを実施した。

##### 4.1 順/逆傾動モードの切替えテスト<sup>23)</sup>

順傾動から逆傾動への円滑な移行のために、ベースとなる順傾動装入時とガス分布が変化しないような逆傾動装入モードの旋回シュート制御パターンをシミュレーターにより事前検討した。ベース条件と逆傾動装入移行時のシュート制御パターン、および各々から算出された熱流比分布 (層厚と粒径分布から計算され、ガス分布に相当) を Fig.15に示す。順/逆傾動で同じ熱流比分布とするために

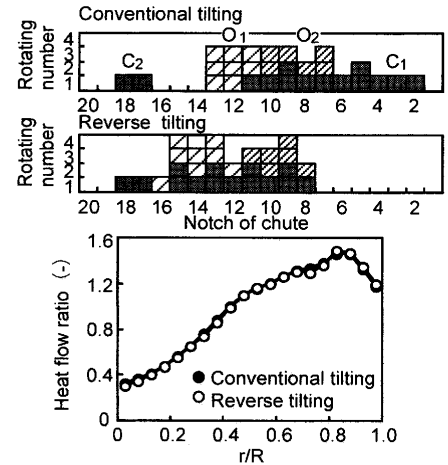


Fig. 15. Bell-less charging pattern planned by simulator for switching to reverse tilting.

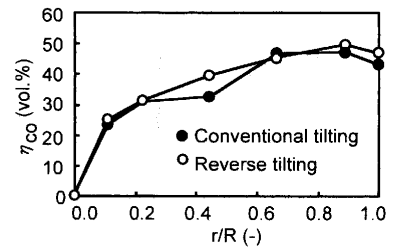


Fig. 16. Measured gas distribution before and after the switch to reverse tilting.

は、シュート制御パターンを大幅に変更する必要がある。この検討に基づき順傾動から逆傾動装入への装入モード変更を実施した。

切替え前後にシャフトガスサンプラーによって測定した炉内ガス利用率  $\eta_{CO}$  の半径方向分布を Fig.16に示す。事前検討通りテスト前後でガス分布はほとんど変化せず、逆傾動モードにおいてもシミュレーターによって操業状況を予測することの有効性が確認できた。

##### 4.2 逆傾動低堆積角装入<sup>24)</sup>

上述の結果を踏まえ、堆積形状およびガス分布の制御性の確認を目的とし、長期の逆傾動装入テストを実施した。コークスの堆積角を低くすると同時に中心部と、周辺部のガス流を確保できる装入物分布を最終目標とし、シミュレーターによる事前検討に基づき、ショートテラスプロフィールから段階的に分布変更を実施した。まずコークス堆積角の低下を実施し、安定した中心流が確保できた (Fig.17中a)。次いで、周辺流増加を目的とし、鉱石のパターン変更を実施した。1バッチ目鉱石(O<sub>1</sub>)を中間に、2バッチ目鉱石(O<sub>2</sub>)を周辺に装入していたモードから、O<sub>1</sub>を中間から周辺に広く装入し、O<sub>2</sub>を中間部に装入するモードに変更した。この結果、事前検討通り堆積プロファイルが変化し、周辺流が上昇した (Fig.17中b)。テスト期間中、順調な操業を継続し、逆傾動低堆積角装入の制御性、安定性を確認した。

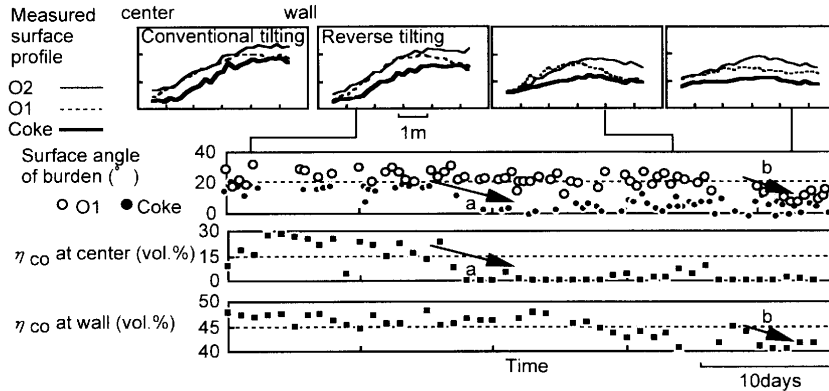


Fig. 17. Changes in burden profile and gas flow during reverse tilting charge tests.

## 5. 結言

千葉第6高炉2次改修では、高O/Cや小塊原料多量使用等の限界作業時の装入物分布制御性の向上を図って新装入装置を導入した。装置は模型実験に基づき開発され、以下の特徴を有する。

- (1) 多バッチ装入を可能にする3パラレルバンカー。
- (2) スタビライザーによる落下軌跡、落下幅の適正化。
- (3) 順/逆の旋回シュート傾動モード選択可能。これに対応した炉頂バンカーから排出時の粒度経時変化パターンの変更機能。

填充調査で装入装置の新機能の制御性および並行して開発したソフトシミュレーターの精度を確認した。立ち上げ作業の後、逆傾動テストを実施し、逆傾動モードでのガス分布および堆積形状の制御性を確認した。今後、新機能を活用して原料品質のスペックダウンや高O/Cに対応した分布制御技術を開発する予定である。

## 文 献

- 1) Y.Ochifuji, Y.Matsui, M.Shimizu, S.Kitayama and S.Ishiwaki: *CAMP-ISIJ*, **9** (1996), 826.
- 2) K.Iwatsuki, H.Shioda, K.Kawaoka, T.Abe and M.Yano: *CAMP-ISIJ*, **2** (1989), 996.
- 3) I.Ishihara, H.Kumada, K.Kakiuchi, H.Ueno, S.Matsuzaki and N.Yadomaru: *CAMP-ISIJ*, **10** (1997), 882.
- 4) M.Ichida, T.Tanaka and F.Koizumi: *CAMP-ISIJ*, **12** (1999), 624.
- 5) A.Shimomura, M.Hattori, B.Iino, K.Kimura, S.Wakita and H.Tsukiji: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), T41.
- 6) K.Yamamoto, S.Kishimoto, A.Maki, H.Inoue and K.Tomioka: *CAMP-ISIJ*, **6** (1993), 107.
- 7) K.Okumura, T.Kawai, H.Marushima, H.Takahashi and J.Kurihara: *Tetsu-to-Hagané*, **66** (1980), 1956.
- 8) T.Sawada, T.Uetani, S.Taniyoshi, S.Miyagawa, H.Sugawara and S.Yamazaki: *Tetsu-to-Hagané*, **78** (1992), 1337.
- 9) S.Hirose, N.Matsuo and H.Kokubu: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 157.
- 10) K.Kobayashi, T.Matsumoto and K.Yanagisawa: *Kawasaki Steel Tech. Rep.*, **32** (1995), 9.
- 11) T.Nouchi, K.Takeda and H.Itaya: *Tetsu-to-Hagané*, **86** (2000), 293.
- 12) K.Narita, S.Inaba, I.Kobayashi, K.Okimoto, M.Shimizu, T.Yabata and S.Tamada: *Tetsu-to-Hagané*, **65** (1979), 358.
- 13) Y.Okuno, T.Irida, M.Isoyama, T.Imai, Y.Hara and A.Suzawa: *Tetsu-to-Hagané*, **69** (1983), 1578.
- 14) S.Miyagawa, K.Takeda, S.Taguchi, T.Morimoto, M.Fujita and H.Fujimori: *Kawasaki Steel Giho*, **23** (1991), 130.
- 15) Y.Konishi, S.Taguchi, T.Fukutake, K.Fukami, H.Itaya and Y.Serizawa: *Kawasaki Steel Tech. Rep.*, **18** (1988), 16.
- 16) T.Sato, T.Nouchi and M.Kiguchi: *Kawasaki Steel Tech. Rep.*, **38** (1998), 24.
- 17) T.Nouchi, T.Sato, S.Miyagawa, K.Takeda and H.Itaya: *CAMP-ISIJ*, **7** (1994), 1004.
- 18) Y.Morikawa, H.Kamano, T.Kawai, H.Marushima and T.Matsumoto: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 896.
- 19) T.Yamada, M.Sato, N.Miyazaki, H.Shimamura and S.Taguchi: *Kawasaki Steel Giho*, **6** (1974) 1, 46.
- 20) Y.Okuno, T.Isoyama, T.Irida and H.Matsuoka: *Tetsu-to-Hagané*, **68** (1982), 37.
- 21) M.Fujita, H.Kojima, H.Marushima, Y.Matsumoto and A.Yokokawa: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 898.
- 22) T.Shiozawa, M.Nomura, T.Matsumoto, S.Goto, H.Takashima, Y.Morikawa, H.Kamano and T.Kawai: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 899.
- 23) T.Sato, T.Nouchi, K.Takeda, T.Kawai, M.Nomura and N.Nishimura: *CAMP-ISIJ*, **11** (1998), 897.
- 24) T.Sato, T.Nouchi, K.Takeda, H.Kamano, S.Goto, H.Takashima and M.Nomura: *CAMP-ISIJ*, **12** (1989), 128.