

© 1982 ISIJ

論文

実物大模型実験に基づく高炉の装入物および ガス分布の改善

西尾浩明*・有山達郎*・脇元一政*²・山口 篤*³

Improvement of Burden and Gas Distribution in Blast Furnace Based on Full Scale Model Experiments

Hiroaki NISHIO, Tatsuro ARIYAMA, Kazumasa WAKIMOTO, and Atsushi YAMAGUCHI

Synopsis:

Although many efforts have been made to control the burden distribution, there was not yet adequate information to obtain the best control. Therefore, Nippon Kokan K. K. built a full scale 36° segment model equipped with two bells, movable armors, a burden discharge facility and a cold blast supply facility. A number of experiments were made to obtain the burden and gas distribution.

The results of these experiments have been utilized to improve the burden and gas distribution in Fukuyama No. 4 BF; the change from two-batch charging to one-batch charging leading to a more uniform burden distribution resulted in the decrease in fuel rate by 10 kg/THM.

1. 緒 言

高炉の装入物分布は、燃料比、操業の安定性を支配する重要な因子と考えられ、その制御のために、従来より多くの努力が重ねられてきた。

装入物分布制御を的確に行うためには、装入物分布と各種制御手段との関係の把握が不可欠であるが、模型実験は有力な手段である。縮尺模型による装入物分布形成実験は実炉で起こる現象を定性的に調べるには有用であるが、これから実炉の装入物分布を精度よく推定するのは困難である。このため、縮尺模型実験とともに、実物大模型実験が数多く実施されている^{1)~9)}。大ベル角度、炉口径等設計諸元の決定に利用されたり²⁾、炉中心部における混合層形成の指摘^{3)~5)}のように、装入物分布に関する新しい解釈が生み出されたり、また、各種の装入条件下で装入物分布形成が行われ、装入物分布制御の考え方を構成するのに役立つてきた。

しかし、従来の実物大模型実験は、ガス流の装入物分布に及ぼす影響¹⁾、装入物降下速度分布の効果¹⁰⁾等の重要因子を考慮していないので、実炉の状態を十分反映しているとは言い難い。

日本鋼管では、装入物分布と各種制御手段との関係を正確に把握して、装入物分布制御を改善し、高炉操業の

安定と成績向上に寄与させるために、実物大模型による装入物分布実験を実施したが、模型製作に先立つて、実炉の装入物分布を精度よく再現するために、模型の具備すべき条件について十分検討した。

2. 実物大模型の具備すべき条件

2.1 大ベル上の装入物堆積状態

大ベルホッパー内の装入物は均一降下せず、大ベル開に伴つて、固定壁近傍の粒子が優先的に降下し、大ベルに接する粒子は排出が遅れる¹⁰⁾。この現象は、1チャージの鉱石を構成する2バッチのうち1番目のバッチ1-Oと2番目のバッチ2-Oを構成する鉱石の種類が異なる場合チャージ装入[†]をすると、炉口における1-Oと2-Oを構成する鉱石の半径方向分布、鉱石層の傾斜角に影響する。また、大ベル上での装入物の堆積状態も影響する。

大ベル上の堆積状態を再現するにはもう1つベルが必要となる。すなわち、実物大模型は2ベルを備える必要がある。

2.2 大ベルの開速度とストローク

装入物の落下軌跡は大ベルの降下に伴つて変化し、開度が増すにつれて飛距離が伸びる¹⁰⁾。落下軌跡は装入物

† 1チャージを構成する鉱石またはコークスをまとめて一度に装入する方法

昭和54年10月本会講演大会にて発表 昭和56年9月24日受付 (Received Sept. 24, 1981)

* 日本鋼管(株)技術研究所 (Technical Research Center, Nippon Kokan K. K., 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

*² 日本鋼管(株)福山製鉄所 (Fukuyama Works, Nippon Kakan K. K.)

*³ 日本鋼管(株)京浜製鉄所 (Keihin Works, Nippon Kokan K. K.)

分布を左右する基本的要因である。これを再現するために、大ベル開速度とストロークを実炉に合わせる必要がある。

2.3 ガス流の効果

従来の実物大装入物分布模型実験はガス流の装入物分布に及ぼす影響を無視して実施されてきた。しかし、粒子層への通風実験によれば、炉頂の装入物の堆積の傾斜角は、炉口ガスの平均の ρu^2 の値の増加に伴って、ほぼ直線的に減少する¹¹⁾。また、通風によつて炉中心部への鉱石の到達が抑えられる現象も起こりうる¹¹⁾。

したがつて、実炉と同様のガス流分布を層頂部に形成する必要があり、このためには少なくとも炉口径の 1/2 以上のシャフト高さとしなければならない¹¹⁾。

2.4 装入物の降下速度分布の効果

福山 5 BF の実測によれば、Fig. 1 に示すように、装入物の表面の傾斜角は装入物の降下に伴つて低下する。この現象の主因は、Fig. 2 のように説明できる。2つの水平面で囲まれた厚さ l_1 の層は、シャフト部の下方へ向かう拡がりのために、装入物の降下に伴つて l_2 まで

薄くなるとする。これに対応して、層を対角に結んで得られる傾斜角 β_1 は β_2 まで減少する。この角度の減少分を計算すると Fig. 1 に近い結果が得られる。すなわち、シャフト部では、水平面に着目すると均一降下しているが、傾斜面に着目すると、中心部で遅く周辺部で速い降下速度分布を生ずる¹⁰⁾。

日本で多数実施された高炉解体¹²⁾から高炉に共通の現象として、鉱石層とコークス層の層状構造は溶け落ちまで明確に保たれ、その層の傾斜角は降下に伴つて低下することが知られている。この現象は前記の降下速度分布の考え方により説明しうる¹⁰⁾。そこで、以下の検討はこのような典型的な降下速度分布の場合を対象とする。

次装入直前の装入物の傾斜角は、次の装入物の層厚分布に影響するが、上述のように、装入直後の傾斜角より低くなる。この効果を再現するためには装入物降下機能を実物大模型にもたせる必要がある。

3. 実物大模型設備

以上の検討に基づいて、冷間の実物大装入物分布模型に次のような特徴を持たせた。

- (1) 開速度とストロークの調整可能なベルを2基装備する。
- (2) 炉口径相等分のシャフト高さをとる。
- (3) 装入物降下設備を装備する。

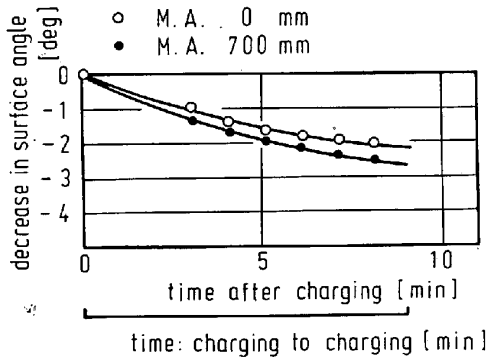


Fig. 1. Decrease in surface angle with burden descent.

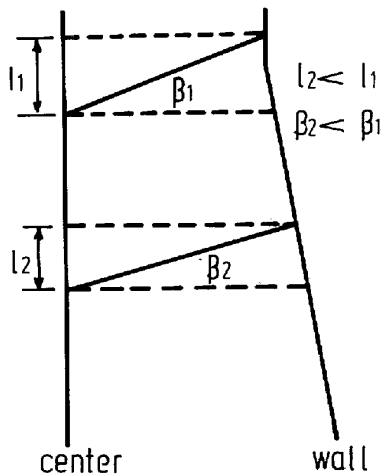


Fig. 2. Main reason for decrease in surface angle with burden descent.

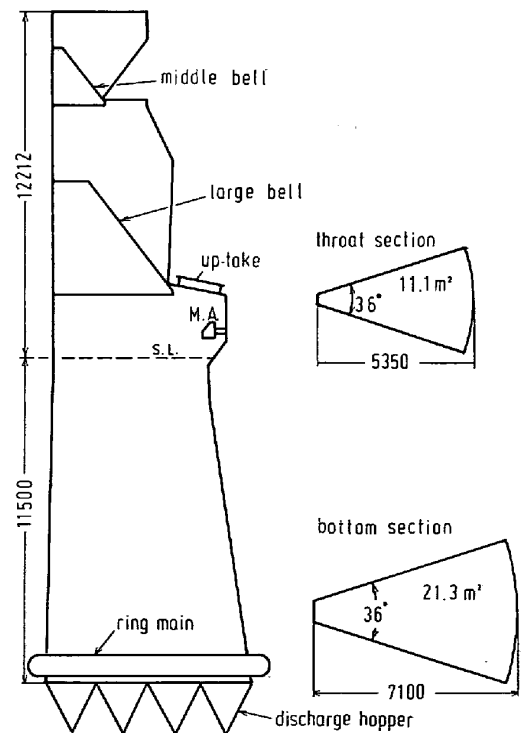


Fig. 3. Full scale 36° segment model of Fukuyama No. 5 BF.

Table 1. Capacity of charging equipment.

Stock volume of middle bell hopper	max. 10 t
Stock volume of large bell hopper	max. 20 t
Stroke of middle bell	700 mm
Stroke of large bell	700 mm
Descending time of middle bell	6.5 s
Descending time of large bell	12.0 s
Movable armor stroke	adjustable in the range of 200 mm to 1000 mm

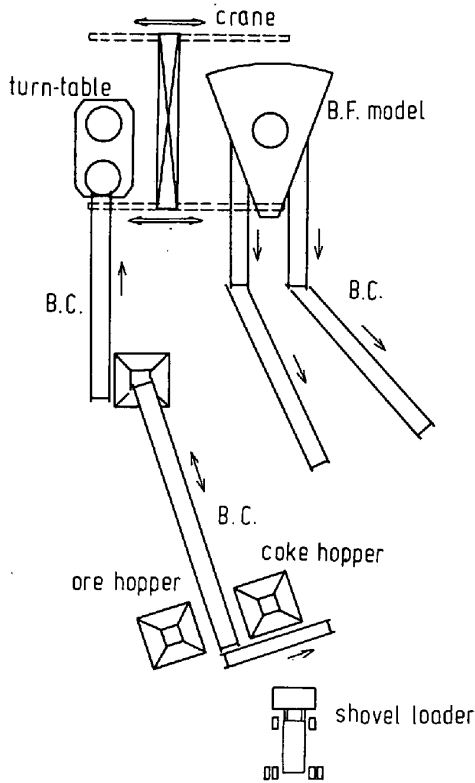


Fig. 4. Arrangement of equipments.

(4) 送風設備を装備する。

3.1 本体と装入物ハンドリング設備

Fig. 3 に示すように、本体は福山 5 BF の実物大 36° の分割模型である。製作に先立つて装置形状に基づく装入物降下阻害の問題を小規模実験で検討し下記の対策をとつた。すなわち、扇形を構成する分割壁と炉壁のぶつかる角は半径 100 mm の弧とし、中心部には炉口で 400 mm の幅を与え、また、この中心部の壁と分割壁には約 1° のすそ拡がりの傾斜を持たせた。

炉口部にストーンボックス型ムーブルアーマー（以後 MA と略記する。）2 基が設置されている。装入設備の能力を Table 1 に示す。送風口は、全周にわたつてほぼ等間隔に 16 本設けた。装入物降下設備は 10 個の等断面積のホッパーと 2 重弁からなつている。Fig. 4 に設備の配置を示す。

3.2 測定装置

Fig. 5 に本体に設置した測定装置を示す。6 点熱線風速計（装入物表面の法線方向のガス流速を求める。）、209 個所の静圧測定孔（装入物断面の静圧分布を求める。）、104 個所の装入物分布観察ガラススリット、77 個所の装入物サンプリング孔から構成されている。

4. 装入物分布に及ぼすガス流の影響の確認

装入物分布に及ぼすガス流の影響は炉ロガスの平均の ρu^2 によつて支配される¹¹⁾。炉ロガススピード 0.85m/s、炉頂圧 2.4 kg/cm²、炉頂ガス温度 125°C の標準的な条件で ρu^2 の値を計算すると 2.2 kg/ms² を得る。ペレット 30%、焼結鉱 50%、塊鉱 20% の配合、

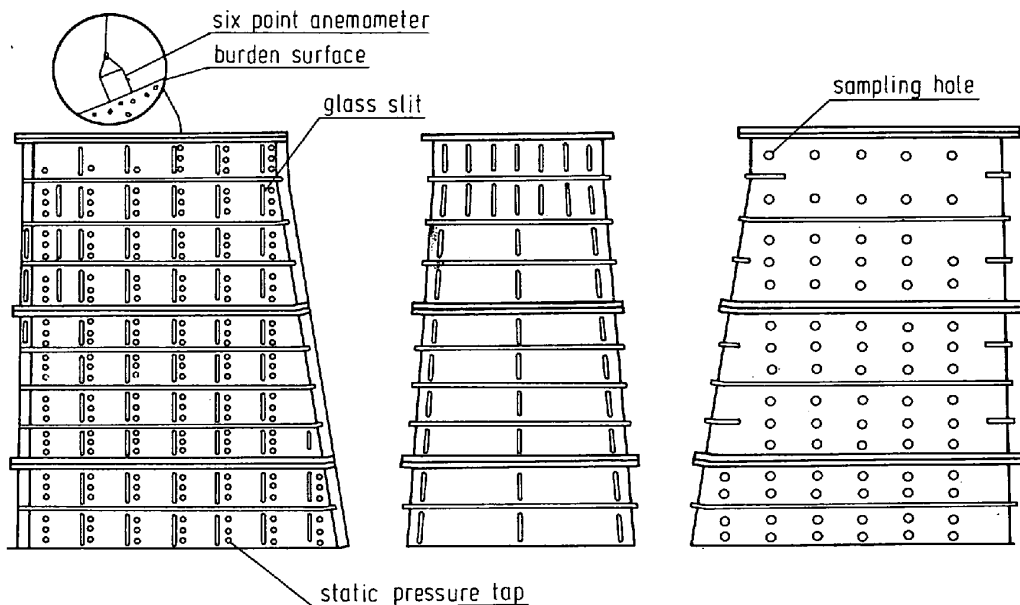


Fig. 5. Measuring means and device.

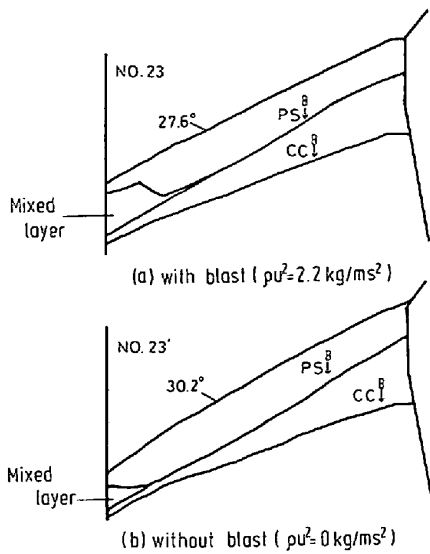


Fig. 6. Burden distribution obtained with and without blast.

ore/coke 3.8, コークベース 35 t, チャージ装入の条件で, ρu^2 2.2 kg/ms² の送風をした場合と, 送風しない場合の装入物分布を Fig. 6 に示す. 鉱石の傾斜角は, 送風時の 27.6° に対して無風時には 30.2° となり明らかに差を生じた. また, 炉中心部の混合層は送風によって明らかに拡大した.

このように, ガス流は装入物分布支配因子として無視できないことがわかる.

5. 実物大模型と実炉の装入物分布比較

5.1 装入物の表面形状

Fig. 7 は模型と実炉で多点同時測定重錘式プローブにより測定した装入物表面形状の比較を示す. ここで, 実炉のデータは装入物降下の影響を受けているので, 模型の場合は, 測定に先立つて検尺位置 (炉壁より 250 mm) において実炉と模型の装入物表面レベルが一致するように, 装入物を前述の方法で降下させた. 上図は鉱石に対して炉壁より 700 mm の位置に MA を設定した場合, 下図はコークスに対して炉壁より 600 mm の位置に MA を設定した場合である. 模型と実炉の装入物表面形状はよく一致している.

5.2 装入物の降下距離分布

Fig. 2 を使って, 装入物降下に伴う傾斜角の低下は, 装入物は同一レベルでは均一降下するというモデルで説明できると述べた. この考え方に従って, 福山 5 BF と模型の実測の表面形状に基づいて, 半径方向各位置で降下距離を計算し, 実測の降下距離分布と, それぞれ, 比較したのが Fig. 8 である. 実測手段は, 模型の場合はスリットからの観察, 実炉の場合は重錘式の表面形状測

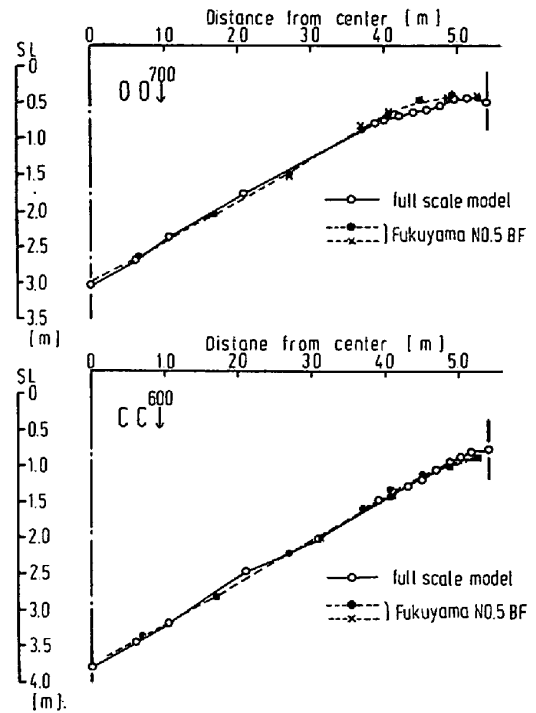


Fig. 7. Burden surface profiles measured in model and blast furnace.

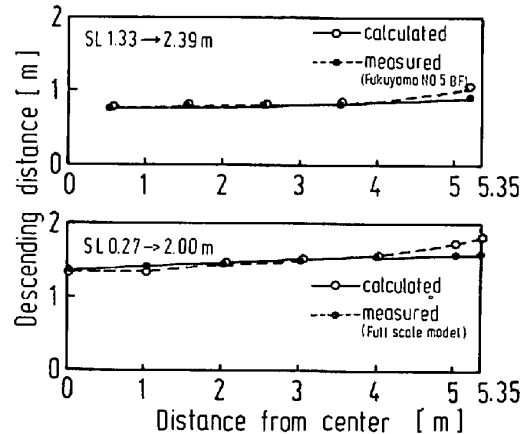


Fig. 8. Descending distance distribution measured in model and blast furnace.

定装置である. 両者とも炉壁部で実測値が計算値を上まわる傾向があるが, それ以外では, 実測値と計算値はよく一致する. したがって, この模型は実炉の装入物の降下挙動を精度よく再現しうると考えられる.

以上の検討から, この実物大模型から得られる装入物分布の信頼性はかなり高いと言える.

6. 実験方法

6.1 填充

一連の実験実施に先立つて, まずコークスをストックライン (以後 SL と略記する.) 0 m まで填充した. そして, 本体下部の 10 個の排出ホッパーの均等切り出し

によつて SL 2.0 m まで装入物を降下させた。以後、所定の実験条件のもとで実験を開始した。

6.2 実験手順

7 チャージの装入で装置内の装入物は全量入替わるので、1 水準 7 チャージ装入を原則とした。予備実験によつて、炉口ガスの ρu^2 が 4 kg/ms^2 以下ではガス流は降下に伴う装入物表面形状変化に影響しないことを確認したので、大ベルの開操作は所定の送風量のもとで実施したが、装入物降下操作は無風で行つた。装入物は上記の均等切り出しによつて指定の SL まで降下させた。

層厚分布は装入ごとにスリットから観察し記録した。7 チャージ目の装入前後で、各 1 回送風状態として炉口ガス流速分布と層内静圧分布の測定を行つた。また、装入物表面の周方向 2 箇所から重錘式測定装置を挿入し、炉壁近傍の表面形状の周方向分布を測定した。

この実験では断面の観察により層厚分布を求めたが、周辺付近の層厚分布には、MA の特性に基づく周方向の不均一性が生ずるので、上記の測定値を使つて周方向の平均値を求めて整理した。

7. 実験条件

Table 2 に全実験に共通の条件をまとめて示す。鉱石

Table 2. Experimental condition.

Mixing rate in ore ore/coke	sinter 75%, sized ore 25%
Mean coke layer thickness	3.8
ρu^2 of top gas	860 mm* 2.2 kg/ms ²

* based on nominal bulk density of 450 kg/m^3

Table 3. Charging sequence.

Purpose	No.	Charging sequence*
Two-batch charging	11	$\begin{matrix} B & B \\ CC \downarrow & OO \downarrow \\ & 2.0 \end{matrix}$
	7	$\begin{matrix} 600 & 700 & 800 & B \\ CC \downarrow & OO \downarrow & CC \downarrow & OO \downarrow \\ & & & 2.0 \end{matrix}$
One-batch charging	58	$\begin{matrix} B & B & B & B \\ C \downarrow & C \downarrow & O \downarrow & O \downarrow \\ & 2.0 & & 2.0 \end{matrix}$
	59	$\begin{matrix} B & 900 & B & 900 \\ C \downarrow & C \downarrow & O \downarrow & O \downarrow \\ & 2.0 & & 2.0 \end{matrix}$
	63	$\begin{matrix} 700 & 900 & B & 900 \\ C \downarrow & C \downarrow & O \downarrow & O \downarrow \\ & 2.0 & & 2.0 \end{matrix}$
Non waiting	14	$\begin{matrix} B & B & B & B \\ C \downarrow & C \downarrow & O \downarrow & O \downarrow \\ & & & 2.0 \end{matrix}$

* $\begin{matrix} X & B \\ CC \downarrow & OO \downarrow \\ & L \end{matrix}$ X=distance from wall to movable armor position expressed in mm
B=wall surface position
L=stock line expressed in m

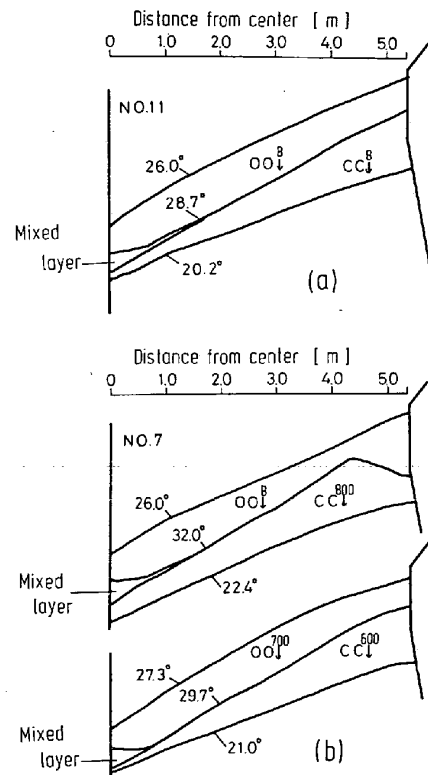


Fig. 9. Effect of movable armor adjustment on burden distribution.

は焼結鉱 75%、塊鉱 25% である。Table 3 に示すように、チャージ装入とバッチ装入^{†2}の特性を明らかにするとともに、コークス装入後 SL を指定して鉱石装入に待ちをかける方法の効果を検討することを目的とする。

8. 実験結果

8.1 チャージ装入時の MA 操作

8.1.1 装入物分布

Fig. 9 の (a) はチャージ装入の MA を使用しない場合の装入物分布を示すが、コークス層、鉱石層、混合層に分けて示した。ここでコークス層下面は鉱石層を SL 2.0 m まで降下させることによつてできた面である。図中に表示したように、装入直後半径方向平均で 26.0° の鉱石の傾斜角は、装入物降下によつて 20.2° まで低下した。このため、炉壁部でコークス層はかなり厚く、炉中心部ではかなり薄くなつた。

鉱石層厚分布はコークスと鉱石の傾斜角の差によつてきまるが、コークスの傾斜角の方が大きいので、炉壁部で鉱石層はもつとも薄く、炉中心部に向かつてなだらかに増加している。炉中心部では混合層形成のため再び減少している。

Fig. 9 の (b) は、2 チャージを 1 組として、1 チャ

^{†2} 1 チャージを構成するバッチごとに装入する方法

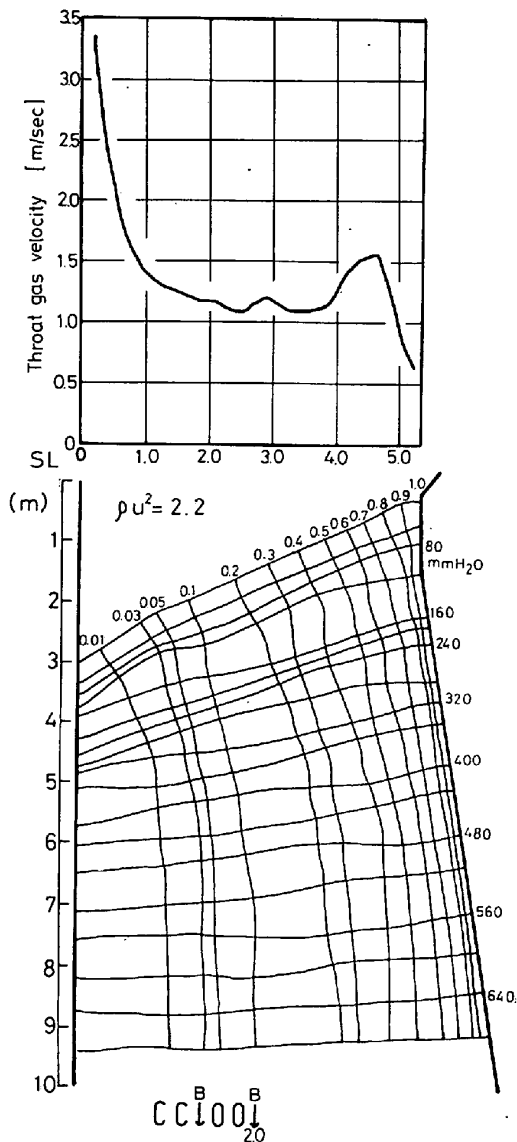


Fig. 10. Gas velocity above burden and gas flow pattern in burden without movable armor adjustment.

ージ目のコークスに 600 mm, 鉱石に 700 mm, 2 チャージ目のコークスに 800 mm の MA 操作をした場合である。

600 mm の MA 操作では装入物は MA にわずかに衝突しないのでほとんど効果がないが, わずか 200 mm さらに突出させた CC⁸⁰⁰ の分布は著しく MA 操作の影響を受けている。このため, 2 チャージ目の鉱石層は炉壁に接するところで厚く, 炉壁より内側へ 1.3 m 付近でもつとも薄く, それより内側では炉中心へ向かつてなだらかに増加している。

このような MA 操作による特異な分布は, 鉱石に対する MA 操作 (Fig. 9(b), では OO⁷⁰⁰) を組みあわせることによつて緩和される。図からわかるように鉱石への MA 操作では, 隣りあつた MA の間隙から小粒

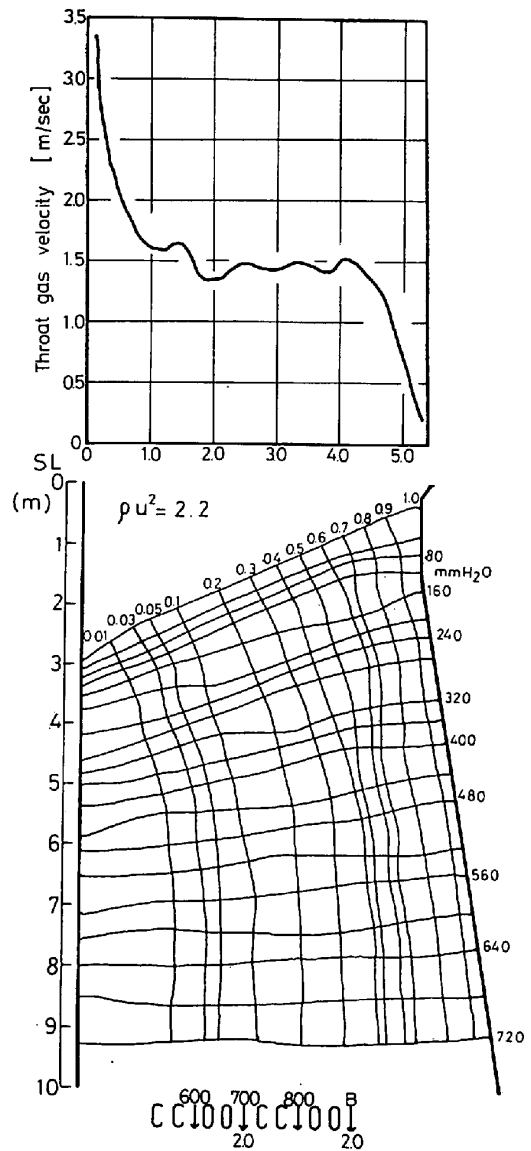


Fig. 11. Gas velocity above burden and gas flow pattern in burden with movable armor adjustment.

径の鉱石が MA 下へ流れこみやすいので明確なピークが形成されず効き方が小さいので, 微調整に使うことができる。

8.1.2 ガス流分布

Fig. 10 は, Fig. 9(a) に対応する炉口ガス流速分布と, 層内の等圧線, 流線を示す。流線は, まず, 炉口ガス流速分布の実測値から装入物表面で流線位置を求め, ここを起点として, 流線が実測の静圧に基づく層内等圧線と直交するように方向を探索し求めた。流線の密度は, その場所のガス流量に比例するが, 図からわかるように, 炉壁近傍にガスの集中がみられる。これは Fig. 9(a) の鉱石層厚分布とよく対応する。この分布は炉壁への熱負荷が大きいのので好ましくない。

Fig. 11 は Fig. 9(b) に対応する炉口ガス流速分布

と、層内の等圧線、流線を示す。ガス流の集中は、炉壁から1.0~1.5mのところのみられるが、Fig. 9(a)ほど極端なものではなく、炉壁部へのガス流過多は是正されている。

Fig. 11 からわかるように、炉口ガス流速分布と装入物表面から離れたところのガス流分布とは十分対応しない。これは、装入物表面の傾斜の影響によりガス流が装入物表面近くで中心側へ偏寄するためである。装入物表面近傍を除いた領域のガス流分布を評価するために、炉中心部の装入物表面から1mの深さにある等圧線を上限として、それ以下の領域について、等面積で分割した3領域、中心部、中間部、周辺部の各境界に相当する流線の値から各部を流れるガスの割合を求めた。結果をFig. 12 に示す。MA を使用しない No. 11 の周辺流は50%を越えるが、No. 7のMA操作により40%まで減少している。

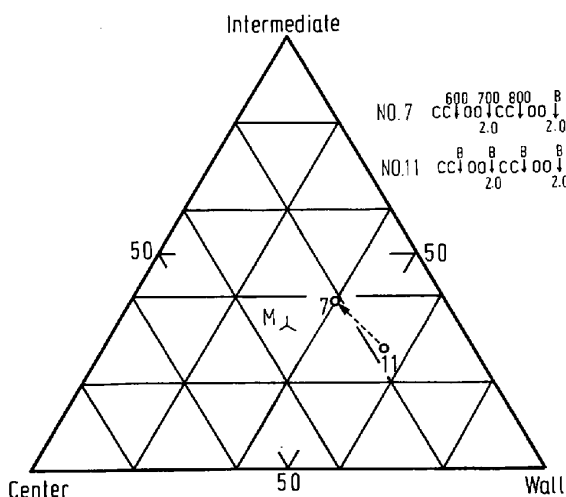


Fig. 12. Effect of movable armor adjustment on gas distribution.

8.2 チャージ装入とバッチ装入の比較

Fig. 13 は MA を使用せずにバッチ装入したときの装入物分布である。これを Fig. 9(a) のチャージ装入と比較すると、鉬石の傾斜角が増加し、コークスの傾斜

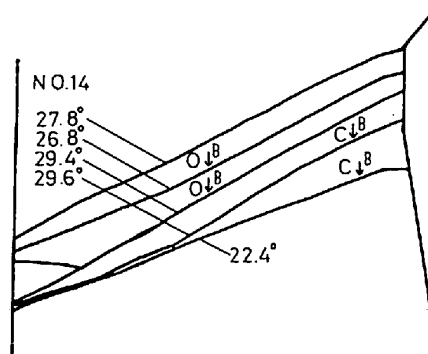


Fig. 13. Burden distribution in one-batch charging.

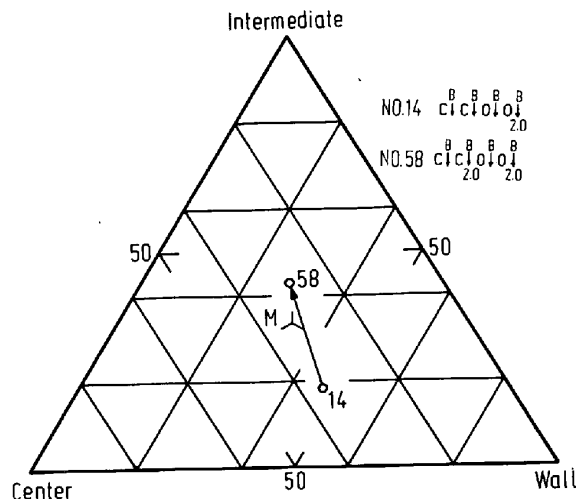


Fig. 14. Effect of waiting action after coke charging on gas distribution.

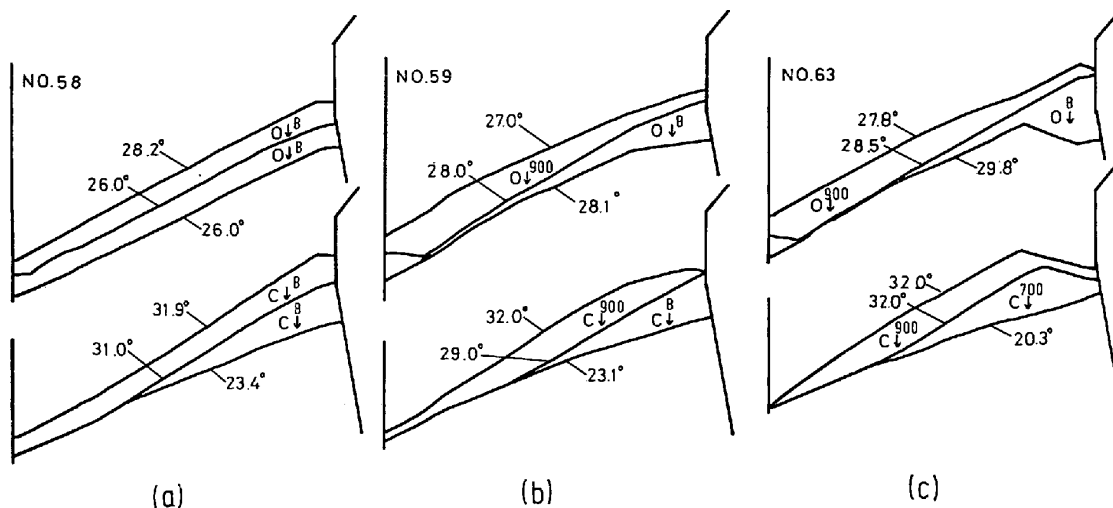


Fig. 15. Effect of movable armor adjustment on burden distribution.

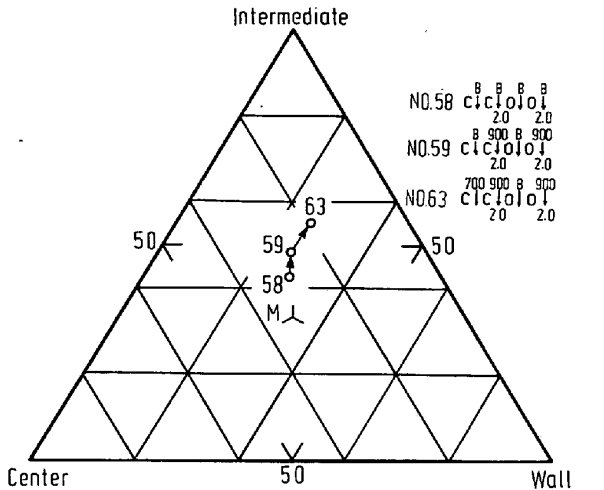


Fig. 16. Effect of movable adjustment on gas distribution.

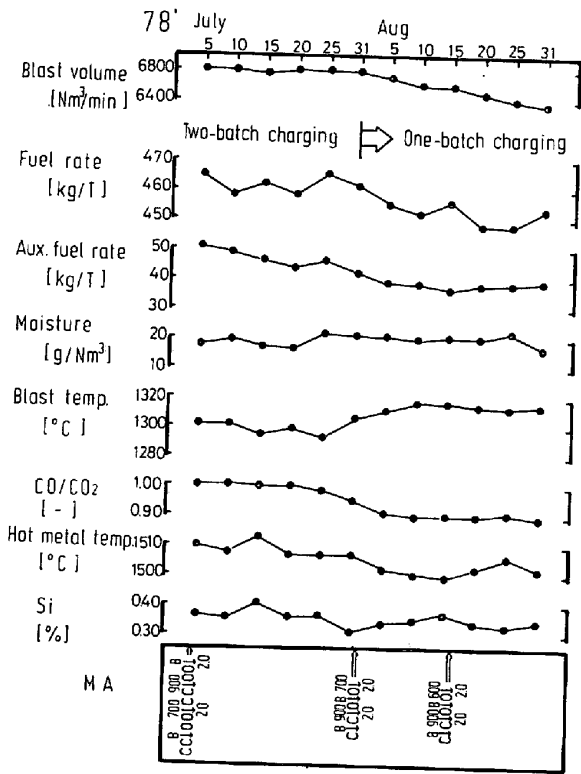


Fig. 17. Change from two-batch charging to one-batch charging in Fukuyama No. 4 BF.

角に近づいて、鉱石層厚分布は均一化されている。これは、バッチ装入のように1回に装入する鉱石量が少ないと既装入の装入物からなる下層の傾斜の影響を受けるためと思われる。

このガス流分布は、Fig. 14 の No. 14 で示されるが、Fig. 12 の No. 7 に比べ、前述の中心部、中間部、周辺部に均等配分される点Mに近い。

8.3 鉱石装入に待ちをかける効果

Table 3 の No. 58 はバッチ装入で 2-C に SL2.0m

を指定し、鉱石装入に待ちをかけた場合である。この場合の装入物分布は、Fig. 15(a) に示されるが、鉱石層厚分布はきわめて均一である。これは、コークスの降下によつてその傾斜角が低下し、鉱石の傾斜角に近づいたためである。

このため、Fig. 14 に示されるように、ガス流分布は、No. 14 よりもさらに均等配分点に近い。

8.4 バッチ装入時の MA 操作

No. 58 は鉱石層厚分布の均一性がすぐれているので、これを基本にして MA 操作を加えてみる。Fig. 15 (b) の No. 59 は、2-C と 2-O に 900mm の MA 操作をした場合である。この場合、チャージ装入とは異なつてコークスのピークは形成されない。したがつて、チャージ装入のように、鉱石層厚の薄いところはできず、均一な鉱石層厚分布を保持したまま、周辺部の鉱石層厚を調整することが可能となる。

No. 63 は 1-C に 700mm の MA を併用した場合である。2-C の 900mm の MA 操作の効き方は、No. 59 とは対照的にきわめて鋭敏なものとなる。このようにバッチ装入の場合、下層の影響を受けやすい。

Fig. 16 は、以上3ケースに対応するガス流分布を示す。周辺流の減少と中間流の増加傾向がみられるが、Fig. 15 の結果と対応している。

9. 実炉におけるチャージ装入からバッチ装入への切り替え

福山 4 BF では、装入物分布模型実験結果をふまえ、昭和 53 年 7 月 31 日にチャージ装入から、コークスにも SL 2.0m の指定をするバッチ装入へ、装入方式の切り替えを行つた。そのねらいは、半径方向により均一な鉱石層厚分布を形成させることにより、ガス利用率の向上をはかることであつた。

Fig. 17 に装入方式切り替え前後の操業推移を示す。図からわかるように、予想どおり、ガス利用率の向上 (CO/CO₂ 比の低下) を果たすことができ、送風温度の上昇と相まつて、約 10 kg/THM の燃料比低下を達成することができた。

切り替え前後で測定した鉱石とコークスの層厚比の分布を Fig. 18 に示すが、ねらつた装入物分布が得られている。

Fig. 19 は、切り替え前後の水平ゾンデ (SL 下 4.9 m に設置) で測定した温度、ガス利用率分布を示すが、中心流を確保しながら、炉壁～中間部で均一なガス利用率分布と、ガス利用率向上を得ていることがわかる。

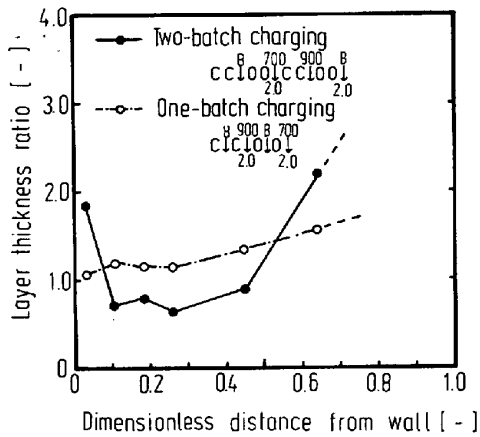


Fig. 18. Ore to coke ratios measured with surface profile measuring device in Fukuyama No. 4 BF.

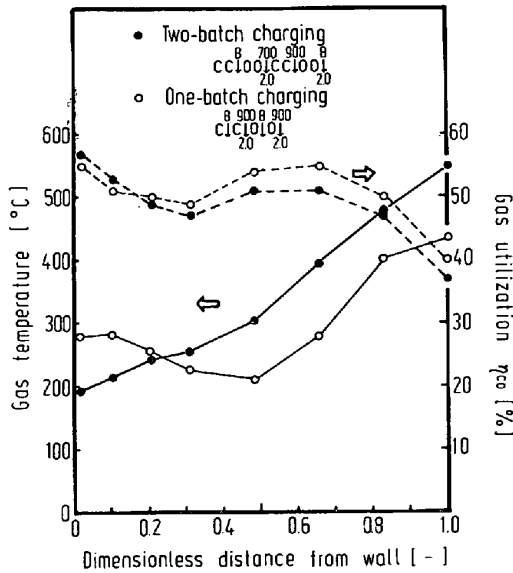


Fig. 19. Gas temperature and gas utilization measured with in-burden probe in Fukuyama No. 4 BF.

10. 結 言

高炉の装入物分布と各種制御手段との関係を正確に把握し、高炉操業の安定と成績向上に役立てるために、装入物分布を支配する基本因子を十分考慮して、実物大模型を製作し、装入物分布実験を実施するとともに、得られた知見を実炉の装入物分布制御に適用して次のような結論を得た。

1. 送風設備と装入物降下設備とを有する実物大模型により、実炉の装入物分布を精度良く再現できることがわかった。
2. 焼結鉱主体配合の装入物分布実験により得られた知見

(1) バッチ装入はチャージ装入よりもより均一な鉱石層厚分布を与える。これは、バッチ装入のように、1回の鉱石装入量が少ないと、その傾斜角が下層の傾斜角に近づく傾向を示すためである。

(2) コークス (バッチ装入の場合は 2-C) で SL を指定し、鉱石装入に待ちをかけることによつて、鉱石層厚分布の不均一性は著しく改善される。これは、装入物の降下に伴つて、表面のコークスの傾斜角が低下して、装入直後の鉱石の傾斜角に近づくためである。

(3) チャージ装入の場合、MA 操作をしないと、鉱石層は炉壁部でもつとも薄くなり、この部分へガス流が集中するが、2チャージを1組として、1チャージ目のコークスに MA を強く使用してガス流の集中部を炉壁から 1.0~1.5m 内側へ移し、2チャージ目の鉱石に MA を使用して、この傾向の微調整を計ることができる。

(4) バッチ装入の場合、1-O に待ちをかけると、MA 操作をしない状態で、きわめて均一な鉱石層厚分布が得られるが、2-C と 2-O への MA 操作を併用することによつて、均一性を保持したまま、鉱石層の周辺部の厚さを調整することができる。

3. 福山 4 BF で、半径方向により均一な鉱石層厚分布を形成することを目的として、チャージ装入から、1-O への待ちを併用したバッチ装入への切り替えを行い、低燃料比を達成することができた。

文 献

- 1) 前田一徳, 佐藤武夫, 中島龍一: 鉄と鋼, 54 (1968), S 364
- 2) G. HEYNERT, F. TOUSSAINT, J. WILLEMS, and G. QUARDE: Stahl u. Eisen, 80 (1960), p. 473
- 3) E. PEETZ and G. WINZER: Stahl u. Eisen, 81 (1961), p. 1101
- 4) 古賀 強, 綿井義雄, 矢部茂慶: 住友金属, 14 (1962), p. 1
- 5) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 39 回製鉄部会 (1971) 新日本製鉄(株) (私信)
- 6) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 39 回製鉄部会 (1971) 住友金属工業(株) (私信)
- 7) K. KOEN, G. A. FRIERMAN, and C. H. van TOOR: B. F. A. Symposium Wollongong, (1975), p. 122
- 8) 研野雄二, 久米正一, 楯岡正毅, 天野 繁, 安倍 勲: 製鉄研究 (1976) 288, p. 54
- 9) 成田貴一, 稲葉晋一, 小林 勲, 沖本憲一, 清水正賢, 矢場田武, 玉田慎一: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 358
- 10) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, 65 (1979), S 601
- 11) 西尾浩明, 有山達郎: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1878
- 12) 例えば, 伊沢啓夫, 三浦光敏, 里見弘次, 斉藤正紀, 宮本健彦, 福島 勤, 古川武: 鉄と鋼, 63 (1977), S 446