

論 文

高炉内降下プローブによる炉内温度
分布の測定小林 勲*・稲葉 晋一*²・堀 隆一*³
後藤 哲也*³・清水 正賢*Measurement of Temperature Distribution by Descending Probe in Blast
FurnaceIsao KOBAYASHI, Shin-ichi INABA, Ryuichi HORI,
Tetsuya GOTO and Masakata SHIMIZU

Synopsis :

By the use of a descending probe set on the burden surface and equipped with thermo-couples at a given interval, temperature distribution in vertical and radial direction in a blast furnace can be measured as it goes down with burden material.

To estimate the location of the probe in the furnace, an experiment was carried out by a small-sized cylindrical model, and it was found that the middle point of the probe descended in accordance with a stream line of the burden material at the same radial. From this result, a method was presented to estimate the location of the probe in the furnace.

The isotherms were obtained by analyzing the temperature distributions measured at Kakogawa No. 1 blast furnace. The 1200°C isotherm was in a good agreement with the outer profile of melting zone observed after the dissection of the furnace. At Kobe No. 2 blast furnace, the change of isotherms was investigated with the change of coke rate and 1200°C isotherm in the peripheral part was kept at a constant level by the burden distribution control to maintain the stable operation.

Key words : ironmaking ; blast furnace ; instrumentation ; thermo-couple ; descending probe ; model experiment ; temperature distribution ; isotherm ; dissection ; softening and cohesive zone.

1. 緒 言

高炉解体調査により炉内状況、特に軟化融着帯の存在が明らかにされ¹⁾、高炉操業上観察される各種の現象がこの軟化融着帯を介して解釈されるようになった²⁾。近年では燃料比の低減^{3,4)}や微粉炭の多量吹込み⁵⁾など高炉の機能の限界を目指した操業が試みられており、このためには軟化融着帯形状をはじめとする炉内状況を正確に把握して炉内の諸現象を確実に制御することが重要になってきた。このため、高炉稼働時の炉内状況を測定するセンサーの開発^{6~8)}や、数学モデルの開発^{9,11)}が進められている。

加古川製鉄所や神戸製鉄所の各高炉では、高炉内温度分布の直接計測手段として、熱電対を固定したパイプを

炉頂堆積表面に設置して装入物とともに降下させるプローブ（以下垂直・水平ゾンデと呼ぶ）が用いられている¹²⁾。この垂直・水平ゾンデは炉内の高さ方向と半径方向の温度分布を同時に測定することができ、特に半径方向の位置関係が正しく把握できるという特徴を有している。この測温結果を解析して温度分布を求める際には、ゾンデの炉内位置を正確に算出することが重要である。

本報では、模型実験によりゾンデの降下挙動を調査するとともに、その炉内位置の算出方法を求めた。この方法を、加古川 No. 1 高炉の吹止め操業時に行つたゾンデ測定結果に適用して等温線分布を求め、解体調査による断面観察結果と比較した。さらに、神戸 No. 2 高炉のコークス比低下操業時にゾンデ測定を行つて等温線分布を求め、その結果にもとづいて装入物分布制御を行つた。

昭和 56 年 11 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 3 月 20 日受付 (Received Mar. 20, 1987)

* (株)神戸製鋼所 材料研究所 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel Ltd., 1-3-18 Wakino-hama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*2 (株)神戸製鋼所 材料研究所 工博 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel Ltd.)

*3 (株)神戸製鋼所 加古川製鉄所 (Kakogawa Works, Kobe Steel Ltd.)

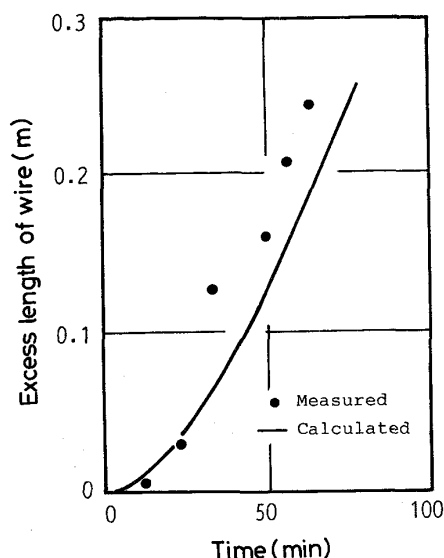


Fig. 4. Excess length of wire sent by burden descent.

実験は同一条件で2回行つたが、よい再現性を示した。

3.2 糸の送り長さ

1回目の実験においては装入物がシャフトを降下するにつれて単位時間当たりの降下量が減少するため糸になるみを生ずるはずであるが、糸のたるみ量はほとんどみられなかった。これはパイプに接続した綿糸が炉壁と接触し、空隙率の大きい炉壁部では装入物と糸との摩擦が減少したため、本来装入物によつて送り込まれるべき長さの糸が送られなかったものと考えられる。2回目の実験では綿糸が炉壁の影響を受けないようパイプの炉壁側より約 0.01 m 炉内側に綿糸を接続すると共に炉口で糸に張力がかからないよう注意して糸を送つた。

Fig. 4 は2回目の実験で得られた糸のたるみ量と炉口水平面からパイプと綿糸の接続点までの距離の関係を示したものである。図中の計算値については後述する。

4. 考 察

4.1 ステンレスパイプの降下状況の計算

稲葉、西尾¹³⁾はシャフト内を降下する粒子の移動を定式化している。本実験に使用した模型高炉に、この式を当てはめると点 (l_1, r_1) の粒子が点 (l, r) まで移動した時の水平、垂直距離は次式で示される。

$$l = \left\{ \left(\frac{D_0}{2 \tan \alpha} + l_1 \right)^3 + \frac{3V_t}{\pi \tan^2 \alpha} \right\}^{1/3} - \frac{D_0}{2 \tan \alpha} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$r = r_1 \left(l + \frac{D_0}{2 \tan \alpha} \right) / \left(l_1 + \frac{D_0}{2 \tan \alpha} \right) \quad \dots\dots (2)$$

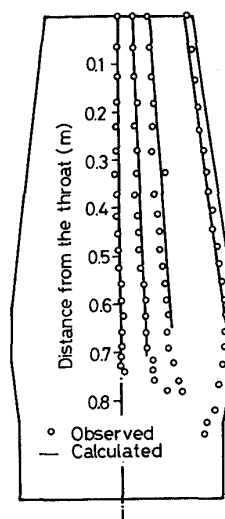


Fig. 5. Comparison of stream line between experimental results and calculated ones.

ここで、 D_0 : 炉口径

α : 傾壁が垂直線となす角度(90° -シャフトアングル)

l : 炉口水平面から装入粒子までの距離

r : 炉の中心から装入粒子までの半径方向距離

V_t : (l_1, r_1) より (l, r) まで移動する間の装入物体積 (1), (2) 式より計算で求めた装入粒子の流線と清水ら¹⁴⁾が模型高炉でトレーサーを用いて実測した流線を比較して Fig. 5 に示すが、シャフト部では計算により求めた流線と実測値は良く一致している。そこでパイプの炉内位置とパイプ設置時の堆積表面粒子の炉内移動位置(タイムライン)を Fig. 6 に比較した。Fig. 2 に示したように、パイプの中心の軌跡はパイプ装填時のパイプ中心における装入粒子の粒子の流線と一致していることから、まずパイプの炉頂設置位置の中心の位置 (l_1) とパイプ測定時の中心の位置 (l) から (1) 式により V_t を求める。次に堆積表面の各粒子が V_t 量だけ装入された後の炉内到達位置を (1), (2) 式から算出する。このようにして求めた各パイプの位置における傾斜角は実験結果とよく一致している。以上の結果から、垂直・水平ゾンデの炉内位置は装入時の堆積表面形状とゾンデ装入後の装入体積から求めることができることがわかる。

4.2 糸のたるみ量の計算と実測値の比較

糸のたるみ量は次のように求められる。炉口における糸の送り込み位置の降下速度を v (m/min) とすると時間 t (min) 間に r_1 より炉中心側に装入される砂の体積は (3) 式で表される。

$$V_t = \pi r_1^2 \cdot v \cdot t \quad \dots\dots\dots (3)$$

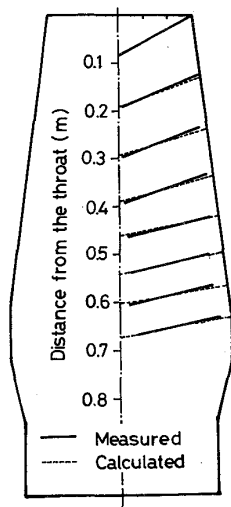


Fig. 6. Comparison of observed pipe location with calculated one.

一方、この時間内にゾンデが深さ h (m)、半径 r (m) の位置に到達したとすると(4)式が成立する。

$$V_t = (\pi/3)(r^3 - r_1^3)/\tan \alpha \quad (4)$$

(3)(4)式より

$$r = \{3r_1^2 \cdot v \cdot t \cdot \tan \alpha + r_1^3\}^{1/3} \quad (5)$$

また、到達深さ h は

$$h = (r - r_1)/\tan \alpha \quad (6)$$

であるので、糸のたるみ量 S は

$$S = v \cdot t - h \quad (7)$$

Fig. 4 に実験で求めた糸のたるみ量 (=糸の送り長さ - パイプと糸の接続点から炉口水平面までの垂直距離) と(5)式に v と t を与えて(6)、(7)式から算出したたるみ量を比較した。Fig. 4 の計算値と実測値は降下初期には良く一致しているが、糸の送り量が増すにつれて計算値との差が大きくなっている。これは堆積表面における砂の中心方向への流れ込みによって糸が過剰に送られたり、糸と砂との滑りにより糸が砂の降下速度どうりに送られない場合が生じ、これらの誤差が時間の経過とともに蓄積されたためと考えられる。この現象は実際高炉でも起こりうると予想されるため、実高炉でゾンデの炉内位置を推定するにあたっては本実験結果に基づいて装入物の装入体積から推算することにした。

4.2 加古川 No. 1 高炉吹止め操業時の測定

加古川 No. 1 高炉 (2 次, 3 090 m³) は 1980 年 3 月 5 日に吹止めされた。吹止め操業時の操業条件を Table 1 に示す。吹止めの 12 h 前に Fig. 7 に示す後日の解体断面に相当する位置に垂直・水平ゾンデを設置して炉内の温度分布を測定した。垂直・水平ゾンデは外径 43 mm

Table 1. Operating conditions at the shuttingdown operation of Kakogawa No. 1 blast furnace.

Blast volume (Nm ³ /min)	3 800
Blast temperature (°C)	720
Blast moisture (g/Nm ³)	30
Coke rate (kg/T)	580
Oil rate (kg/T)	0
Pellet content (%)	70.5
Charging interval (min/ch)	16.0

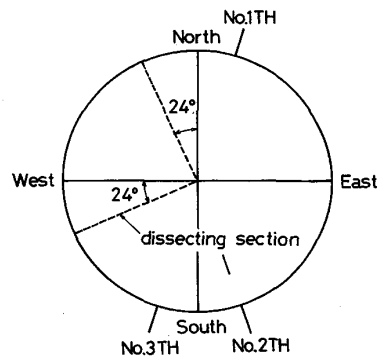


Fig. 7. Dissecting section of Kakogawa No. 1 blast furnace.

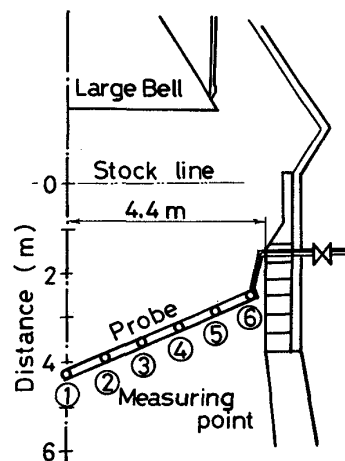


Fig. 8. Installation of descending probe at Kakogawa No. 1 blast furnace.

(32 A) の鉄パイプを用い、堆積傾斜面の長さを考慮して炉口半径より長く 4.5 m にして、シース熱電対を 6 本等間隔に設置した。Fig. 8 に炉内設置状況を示すが、シース熱電対は炉壁側で束ねて装入物の降下とともに自然に送り込まれるようにした。

送り込みシースの長さおよび装入物の装入体積から算出したゾンデの炉内位置を Fig. 9 に比較したが、約 2 m の差がみられる。シースの送り込み量による推算では装入物の平均降下速度が下方方向に向かうに連れてシャフトの広がりによって低下することを考慮したが、炉口部では装入物の降下速度に半径方向の分布が存在して周

辺部の降下速度が中心部より大きいことが確認されており¹⁵⁾、今回の場合はこの影響によりゾンデの推定炉内位置が大きく算出されたものと考えられる。従つてシーズの送り込み長さからゾンデの炉内位置を算出する場合、装入物の半径方向分布を考慮する必要がある。吹止め作業時に測定した温度の推移を Fig. 10 に示す。北側では 800°C 付近に短い熱保存帯が見られ、その後再び温度は上昇していくが、1000°C に達する前に温度計が断線したため測定されていない。周辺部 (温度計 No. 6) の温度をみると 830°C からいつたん 760°C まで低下しており、この領域でなんらかの吸熱反応が生じたことを示している。一方、西側では 800°C 付近の等温帯はみ

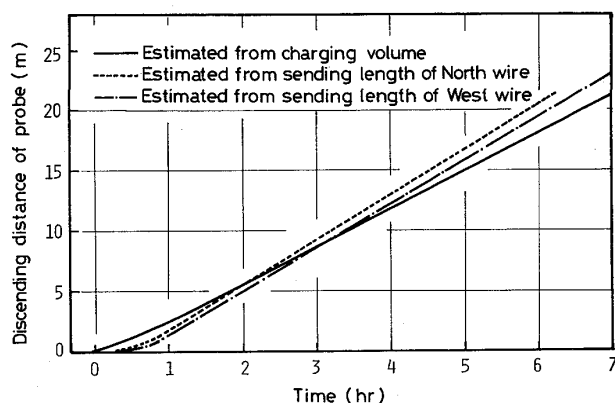


Fig. 9. Estimated location of descending probe by charging volume and sending wire.

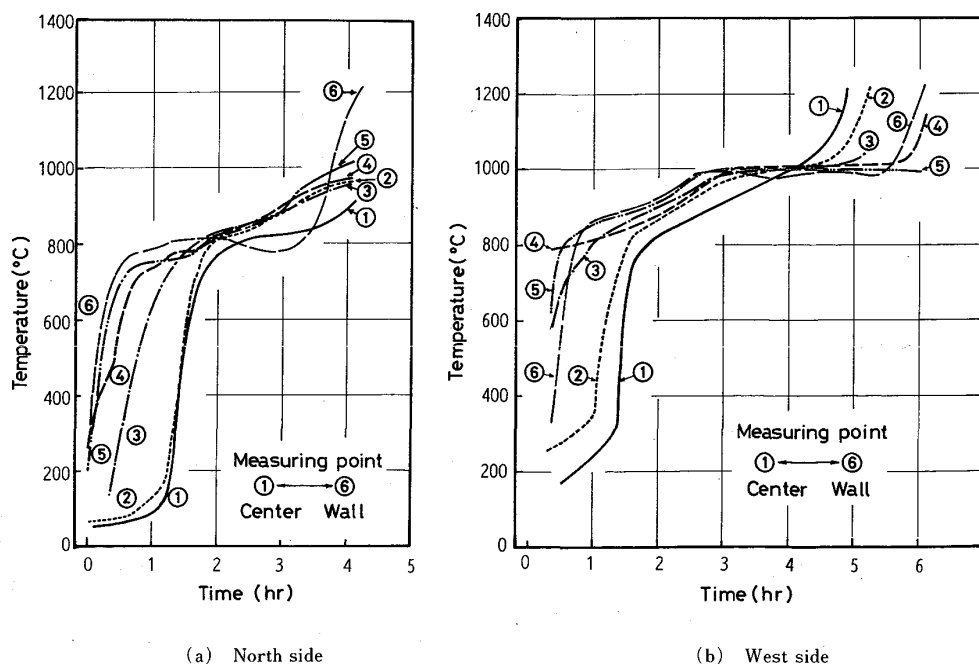


Fig. 10. Temperature measurement by descending probe at the shutting down operation of Kakogawa No. 1 blast furnace.

られず、中心部 (温度計 No. 1) 以外は 1000°C の熱保存帯が存在する。これらの測定データを以下の手順に従つて時間と炉内位置の関係に変換して炉内の等温線分布を求めた。

(1) ゾンデ設置時の装入物堆積表面形状を測定する。

(2) ゾンデ装頭以後の各装入ごとの時間と装入量を求める。

(3) 炉頂部の堆積プロフィールの各点の座標 (l_i, r_i) と装入量 V_i を (1), (2) 式に代入して、 V_i 量装入した後の炉内プロフィール (l, r) を求める。これが V_i 量装入後のタイムラインとなる。

(4) ゾンデ中点の降下軌跡を引く。

(5) ゾンデ中点を (4) で求めた降下流線上に固定し、タイムラインに沿つてゾンデ内測温点の位置を定める。

(6) タイムラインとゾンデの半径方向測温点からなる格子点に、実測した時間～温度チャートから温度を読み取つて与える。

(7) 等温線の位置を格子点間の温度補間より求める。このようにして求めた炉内等温線と解体調査による断面観察結果を Fig. 11 に比較した。北側、西側ともシャフト上部において中心部の温度が周辺部より低く、V型の等温線を示す。Fig. 12 に炉頂部における炉壁部から中間部の装入物堆積形状の測定結果を示すが、本作業ではペレット 70.5% の多配合のために、鉍石層の傾斜角がコークス層より小さく、中心部の Ore/Coke 比が高くなつてこの様な V 型の等温線を示したものと考えられ

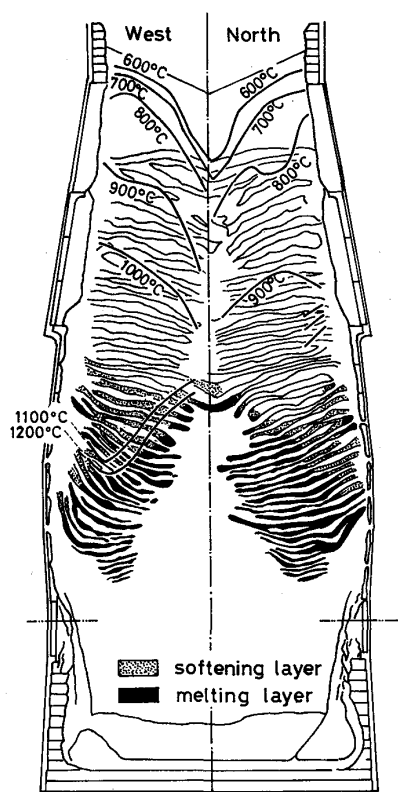


Fig. 11. Comparison of isotherm with dissected section of Kakogawa No. 1 blast furnace.

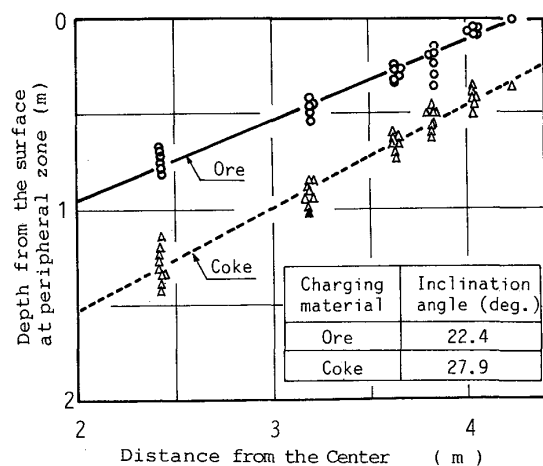


Fig. 12. Surface profile of charging materials measured at the throat of Kakogawa No. 1 blast furnace.

西側の等温線形状はシャフト上部のV形状からシャフト下部の逆V形状に反転しており、1200°Cの等温線は融着帯外部形状によく一致している。さらに、1100°Cと1200°Cの等温線は中間部から炉壁部にかけて跳ね上がっており、軟化融着帯形状がいわゆるW型であることも

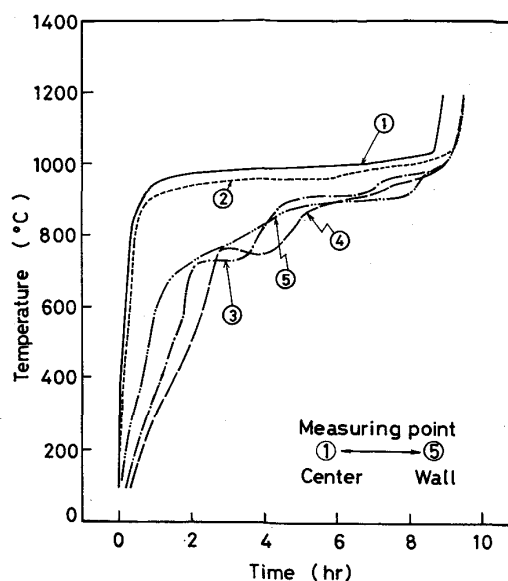


Fig. 13. Temperature measurement by descending probe at Kobe No. 2 blast furnace.

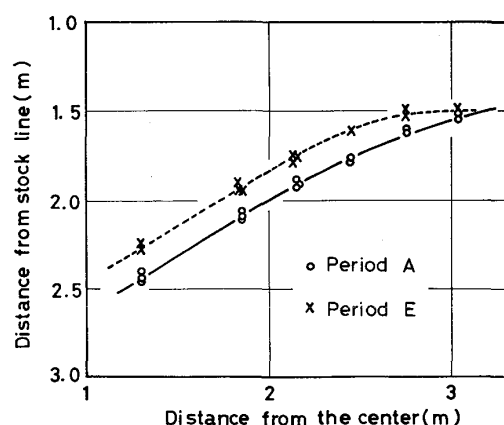


Fig. 14. Surface profile of ore layer at the throat of Kobe No. 2 blast furnace.

検知できている。

4.3 神戸 No. 2 高炉の低コークス比操業

神戸 No. 2 高炉 (3 次, 1618 m³, 1983 年 4 月 22 日吹止め) で 1982 年 2 月にオールコークスによる低コークス比操業が行われた⁴⁾。コークス比を 465 kg/t から 452 kg/t に徐々に低下させ、その変更ごとに垂直・水平ゾンデを装入して炉内温度分布を測定した。コークス比が 455 kg/t の時のゾンデ測定結果を Fig. 13 に示す。中心部の温度はゾンデ装入後直ちに 1000°C に上昇して熱保存帯を形成するが、炉の中間部 (測定点 No. 3, 4) では、800°C と 1000°C に、2 段の熱保存帯がみられる。これはコークス比の低下とともに顕著となつた現象である。更に、ゾンデ装入ごとにプロフィールメーターによ

り装入物の堆積表面形状を測定した。この測定結果を Fig. 14 に示す。この表面形状を(1), (2)式に適用して、装入ごとの炉内層構造を算出し、時間とゾンデの位置の関係から炉内における等温線を求めた。炉内層構造を Fig. 15 に、コークス比の変更にもなう等温線の変化過程を Fig. 16 に示した。Fig. 16 の Period B ($CR=458$ kg/t) の操業に計測データを入力して炉内状況と軟化融着帯形状を推定する数学モデル²⁾を適用して炉内状況を推算したところ、Fig. 17 に示すように周辺部(⑤)では Ore/Coke 比が高いために温度の上昇が遅く、還元が遅れていることが示された。そこでコークス比を低下させる過程で、鉱石層の堆積表面形状を Fig. 14 に示した Period A ($CR=465$ kg/t) の形状から

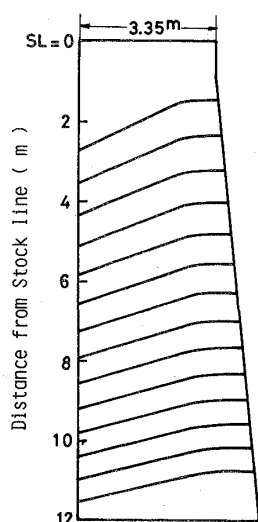


Fig. 15. Estimation of ore surface changing with burden descent at Kobe No. 2 blast furnace.

Period E ($CR=455$ kg/t) の形状に徐々に変更して周辺部の層厚を調整した。その結果、中心部の 1200°C 位置は低下したが、周辺部では一定位置に保つことができる。

5. 結 言

一定間隔で温度計を固定したパイプを高炉内の装入物と共に降下させ、炉内温度分布を測定するプローブの炉内位置の算出方法を求めるため、模型実験を行った。この実験により、プローブは装入物のタイムラインにしたがつて傾斜角が減少していくこと、およびプローブの中心点は装入物の流線に従って降下することを見いだした。これらの結果から、プローブの降下にもなう炉内位置は装入物の装入体積から算出できることを明らかにした。

この方法を加古川 No. 1 高炉の吹止め操業時の測定に

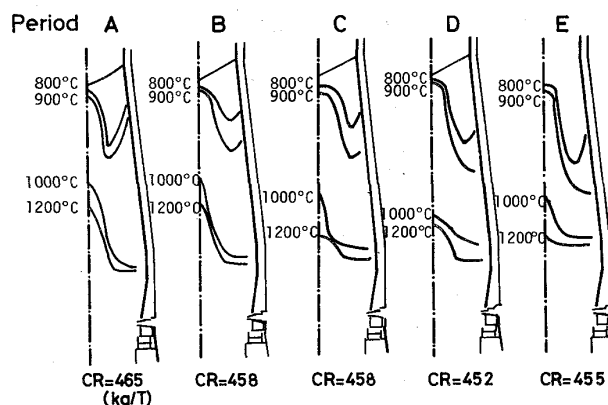
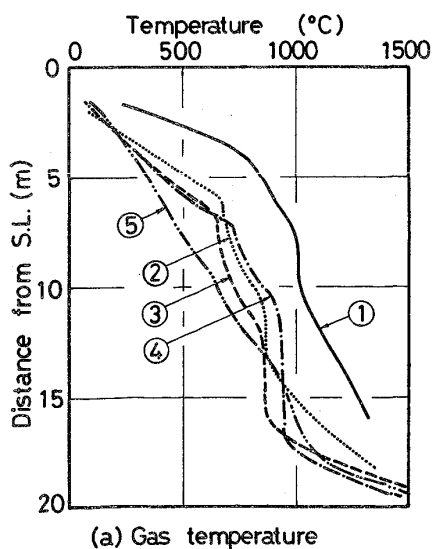
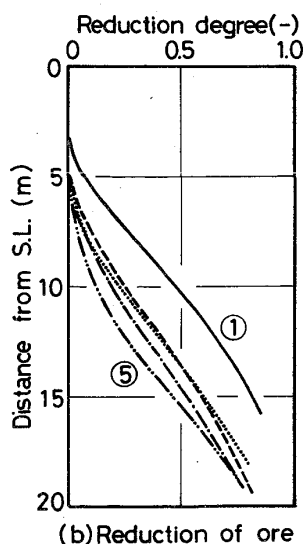


Fig. 16. Change of isotherms with coke rate at Kobe No. 2 blast furnace.



(a) Gas temperature



(b) Reduction of ore

Measuring point
① ← ⑤
Center Wall

Fig. 17. Estimated distributions of gas temperature and reduction degree of ore at the operation period B of Kobe No. 2 blast furnace.

適用して炉内温度分布を求め、解体調査による断面観察結果と比較したところ、1200°C等温線は軟化融着帯の外部形状によく一致した。さらに、神戸 No. 2 高炉の測定にもこの方法を用いて解析し、周辺部における1200°C等温線の位置を一定に保つように装入物分布制御を行うことによつて安定した操業を維持することができた。

文 献

- 1) 福島 勤, 下田輝久: 高炉内現象とその解析 (日本鉄鋼協会編) (1982), p. 35
- 2) I. KOBAYASHI, S. INABA and M. ISOBE: ISS-AIME, Iron making Proceedings, **43** (1981), p. 119
- 3) 研野雄二, 須賀田正泰, 山口一良: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 1544, 1553
- 4) 西田 功, 上原輝久, 矢場田武, 玉田慎一, 佐藤健一, 高野 成, 沖本憲市: 鉄と鋼, **68** (1982), S710
- 5) 加藤友則, 岸本純幸, 山口 篤, 木村康一, 下村昭夫, 和田 隆: 鉄と鋼, **72** (1986), S870
- 6) 片山英司, 槌谷暢男, 岡部俠児, 田口整司, 奥村和男, 田村 栄: 鉄と鋼, **66** (1980), S682
- 7) 福島 勤, 斉藤信一, 山田健夫, 小林 隆, 渋谷悌二, 古川 武, 山口 篤: 鉄と鋼, **67** (1981), S69
- 8) 高田 司, 相馬英明, 入田俊幸, 神坂栄治, 木村春男, 磯山 正, 須沢昭和: 鉄と鋼, **72** (1986), p. 203
- 9) 羽田野道春, 栗田興一: 鉄と鋼, **66** (1980), p. 1898
- 10) 桑原 守, 鞭 巖: 鉄と鋼, **68** (1982), S782
- 11) 杉山 喬, 須賀田正泰, 下村泰人, 吉田光夫: 鉄と鋼, **69** (1983), S862
- 12) 西田 功, 高見満矩, 多田彰吾, 堀 隆一, 細川益洋, 竹内正明: 鉄と鋼, **67** (1981), S72
- 13) 稲葉晉一, 西尾浩明: 高炉内現象とその解析 (高炉内反応部会中間報告) (日本鉄鋼協会編) (1979), p. 52
- 14) 清水正賢, 山口荒太, 稲葉晉一, 成田貴一: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 936
- 15) 成田貴一, 稲葉晉一, 小林 勲, 沖本憲市, 清水 正賢, 桑野恵二, 池田耕一: 鉄と鋼, **65** (1979), p. 44