マグネットメータによる高炉内部状態の観測†

原 田 耕 介*・小 島 佑 介**・藤 井 義 博**・竹 内 信 次 郎***

Measurements of Blast Furnace Inner-States by Magnetometer

Kosuke HARADA*, Yusuke KOJIMA**, Yoshihiro FUJII** and Shinjiro TAKEUCHI***

We present in this paper a new and direct method of measuring the inner-states of the blast furnace. The key point of this method is that a number of magnetometers installed in the furnace detect the layers of the ores and coke through a disturbance of the magnetic field distribution. By processing the outputs from these multi-magnetometers, we can have various important clues for the control of the blast furnace, such as the falling speed and the thickness of the layers, etc. We develop the magnetometer suitable for the application, which is made of a small Mo permalloy film.

1. 緒 言

高炉は、Fig. 1 に示すごとく、原料の鉄鉱石（焼結鉱）と燃料でかつ還元材料のコークスを交互に層状に炉頂部から装入する。この積層された鉱石は、炉下部の羽口から吹込んだ熱風とコークスの反応により生じる還元ガスによって加熱還元されつつ降下していき、鉄鉄となって滴下し、炉底部に溶鉄として貯えられる。

この高炉を操業するうえで、内部状態と装入物の挙動を把握することが非常に重要である。しかし、高炉は厚い耐火物と鉄皮で包まれた密閉構造であり、還元は高温で行われるため、その状態と挙動を正確に観測することができなかった。わずかに、高炉炉頂部の装入物表面の分布形状を ITV で観察する方法、あるいは測距離計で観測する方法があり、また高炉炉頂部のガス流の分布や温度分布を計測して装入物の挙動を推定する方法が開発されている。しかし、いずれの方法

Fig. 1 Illustration of the blast furnace

も装入物の包括的な挙動を間接的に測定する手段であり、塊状帯および融着帯での装入物自身の挙動を直接に計測する手段ではなかった¹⁾。

本論文では、炉内の内部状態と装入物の挙動を直接計測する新しい方法を提案する。この方法のキーポイントは、鉱石層とコークス層が励磁用静磁界中を降下するとき、鉱石とコークスの透磁率の違いによって交替的に磁界が変化する物象を、炉壁に装着したマグネットメータで計測することにより、装入物の挙動を直接観測することが可能な点にある。

2. 本 論

高炉の頂部から装入された鉱石とコークスは上昇してくる還元性ガスと反応しつつ降下する。鉱石の温度は、高炉シャフト上部を通過する間は、炉壁近傍では 200°C 未満であり、Fig. 2 で示すようにこの温度域では、なお強磁性を保持している。

すなわち、高炉の中段より上方の塊状帯と呼ばれるゾーンにおいては、鉱石とコークスの透磁率の差異は顕著であり、この差を利用して鉱石とコークスの識別と挙動の検出をすることが可能である。

† 8th IMEKO Cogress で発表 (昭 54・5)

* 九州大学工学部 福岡市東区箱崎 6-10-1

** 新日本製鉄(株)堺製鉄所 堺市築港八幡町 1-1

*** 三島光産(株) 北九州市八幡東区枝光町

* Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka

** Nippon Steel Corp., Sakai

*** Mishima-Kosan Co., Ltd., Kita-kyushu

(Received November 2, 1979)

(Revised January 7, 1980)

Fig. 2 The relation between the remnant magnetism and the temperature (Ore's weight 1310 g)

Fig. 3 The geometry of the magnetometer and an ore particle

ここで、以下の検討の基本となる、マグネットメータと計測対象の焼結鉱の座標系を Fig. 3 に示す。

指向性をもつ磁気検出器の検出軸を高炉の装入物の降下方向 (z 軸) と平行させ、かつ一様な磁界 H_0 を z 軸と直交する方向に配置し、このとき検出する磁界偏移を考察する。粒子半径 a 、透磁率 μ の焼結鉱が $y-z$ 平面上で検出器から離れた点に存在する場合、検出器の位置 (原点) における磁界 H は

$$H = \left(1 - \frac{\mu - \mu_0}{\mu + 2\mu_0} \cdot \frac{a^3}{r^3}\right) \cdot H_0 + \frac{3(\mu - \mu_0)}{\mu + 2\mu_0} \cdot \frac{a^3 y z H_0}{r^5} \cdot r \quad (1)$$

$$r = yj + zk \quad (2)$$

$$r = |r| = \sqrt{y^2 + z^2} \quad (3)$$

で与えられる。ここに

μ_0 : 真空透磁率 μ : 鉱石の透磁率

a : 鉱石の粒子半径 r : 鉱石～検出器間距離

j : y 軸方向単位ベクトル

k : z 軸方向単位ベクトル

このとき検出器の指向性によって、磁界の変化分として検出するのは一様磁界と直交する z 成分の ΔH である。

Fig. 4 The schematic measuring principle

Fig. 5 The ore layer's position

$$\Delta H = \frac{3(\mu - \mu_0)}{\mu + 2\mu_0} \cdot \frac{a^3 y z H_0}{r^5} \quad (4)$$

高炉では、Fig. 4 のごとく、装入物は z 方向に積層状態を構成し、炉中心方向 (y 方向) には磁気検出器から見れば無限長の広がりをもつと考えて良い。いま、一つの鉱石層の厚みを l とすれば、 $y-z$ 平面上の鉱石により生じる磁界偏移は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta H_{z0} &= \int_{z=l}^z \int_{y_0}^{\infty} \Delta H dy dz \\ &= \frac{\mu - \mu_0}{\mu + 2\mu_0} \cdot a^3 H_0 \cdot \left[\{y_0^2 + z^2\}^{-\frac{1}{2}} - \{y_0^2 + (y-l)^2\}^{-\frac{1}{2}} \right] \end{aligned} \quad (5)$$

この磁界偏移は Fig. 5 のごとく表わされ、 $z=0$ 、 $z=l$ の鉱石層界面近傍で最大最小をもつ。以上 $y-z$ 平面のみで考察したが、実際には鉱石層は x 方向にも広がりをもつ。しかし、 x 方向の広がり効果は上記 $y-z$ 平面の重ね合わせとして作用するので、 z 方向

Fig. 6 The principle of detecting ore and coke

に積層した鉱石層の境界において最大最小を検出する点では変化はない。

さて、高炉においては、積層した鉱石層・コークス層の一連の層が順次降下するため、前述の距離の関数としての磁界の変化が時間の関数として Fig. 6 のように観測される。最小点 A から最大点 C までの期間が鉱石層の通過を、逆に最大点 C からつぎの最小点 A までがコークス層の通過を示している。

3. 高炉用マグネットメータ：磁気マルチセンサ

前章で考察したごとく、原理的には一様な平行磁界中を鉱石層とコークス層が降下することによって生じる微小な磁界偏移を計測することによって、鉱石とコークスの識別と挙動の検出が可能である。しかし、高炉内部を観測するためには高感度で指向性に優れていることの他に、雰囲気温度の変化に耐える良好な温度特性と、伝送損失を防ぐためには、直流電源で直流信号伝送が望ましく、さらに炉体装着が容易なように小形化が必要である。

以上の目的に合致する磁気検出器として、新しく磁気マルチ形マグネットメータ^{2),3)}を開発した。本マグネットメータの回路を Fig. 7 に示す。

Fig. 7 The circuit of the magnetometer

Fig. 8 The waveform of the magnetic oscillation of the magnetometer

対をなす二つのトランジスタ T_{r1} と T_{r2} が厚さ $25\mu\text{m}$ の M_0 パーマロイ薄膜をボビン状に巻いたコアを交互に励磁するスイッチングトランジスタとして作用する磁気マルチ回路である。Fig. 7 において、電源 E が入ると $E \rightarrow R_{B3} \rightarrow T_{r1} \rightarrow R_{O1} \rightarrow E$ の経路で電流が流れる。この電流によって T_{r1} のコレクタ電流は R_{O1} を通って L_{O1} に流れ、コイル L_{B1} に誘起電圧が発生し T_{r1} は導通状態となる。一方、 T_{r2} はコイル L_{B2} に誘起する逆極性電圧のため、不導通状態となる。この状態がしばらく続いた後に、磁心の BH マイナーループの非直線性により、 $d\phi/dt$ の値が次

Fig. 9 The detecting property of the magnetometer

Fig. 10 The temperature sensitivity of the magnetometer

Fig. 11 The directivity of the magnetometer

第に小さくなり T_{r1} のベース電圧はカットオフ電圧まで下がる。これにより T_{r1} のコレクタ電流は減少し、ついには T_{r1} は不導通となりコアの磁束レベルは外部磁界 H_{ex} で規定される磁束レベルまで戻ろうとするため、逆にコイル L_{B2} に逆極性の誘起電圧が発生し T_{r2} が導通状態に入る。

以後この動作を繰り返して磁気発振が起こり、外部磁界 H_{ex} によって規定される磁束レベルを中心にしてコアの磁束が変化することから、 R_{01} と R_{02} に流れる電流の平均値も H_{ex} によって制御される。Fig. 8 は、Fig. 7 に示した回路の発振波形である。この状態は $H_{ex}=0$ であるが、 H_{ex} が印加されれば各半サイクルの周期が H_{ex} で制御され、直流分が e_0 に重畳されることになる。

Fig. 9 に本マグネットメータの磁気検出特性を示した。ヒステリシスのない良好な直線性を有し、200 mV/G の高感度をもっている。

Fig. 10 に温度特性を示す。基準点を 20°C 、 $\Delta H_{ex}=0$ として、温度係数は $2\gamma(10^{-5}\text{G})/^{\circ}\text{C}$ であり、既存ホール素子の 1000 倍以上の安定性をもつ。

Fig. 11 に指向性を示す。コアの軸方向に高い感度を持ち、コアと直交する磁界には感じない優れた特性をもっている。

4. マグネットメータの高炉への実装

マグネットメータを高炉の炉体に装着するには、マグネットメータとともに装入物を励磁する磁界発生器をコンパクトに一体化することが、高炉のガスシール

Fig. 12 Installation of the magnetometer

Fig. 13 Schematic magnetometer system

Fig. 14 The waveforms of the magnetometers

性および検出部の冷却の容易さから強く要求される。したがって、実際に高炉に装着したマグネットメータは Fig. 12 のごとくステンレス (SUS 304) の二重水冷管の中にマグネットメータのコアを、スイッチングトランジスタ等の発信回路と分割して、永久棒磁石の磁界中心軸上の先端に配置し、この 3 者を樹脂で一体に固めた構造とした。

Fig. 13 は降下速度を求めるために炉高方向に 400 mm の距離をもって、ペアで炉壁レンガに装着したマグネットメータの実装概観図である。

Fig. 14 は Fig. 13 に示したペアのマグネットメータの出力波形である。チャンネル 1、チャンネル 2 の波形は、それぞれペアのマグネットメータの上段および下段からの出力を示す。両波形の位相差が、ペアのマグネットメータ間を装入物が降下するのに要する時間を与えるから、装着距離より容易に装入物の降下速度を導くことができる。Fig. 14 の例では、約 6.5 m/H の降下速度を示している。また、降下速度に鉱石・コークス各層の通過に要する時間（最大値～最小値、最小

Fig. 15 The waveforms of the magnetometers installed in the circumferential direction of the blast furnace

値～最大値の経過時間)を乗算することによって、各層の層厚が計算できる。Fig. 14 の例では、鉱石とコークスの層厚は、両者とも約 50 cm を示している。

さらに、マグネットメータを高炉の円周方向に配置することによって、装入物の積層状態の円周方向でのバランスを計測することができる。Fig. 15 は 180° 対向した位置に配置した二つのマグネットメータの出力波形を示す。チャンネル 3 がチャンネル 4 より、当初は先行して降下していたが、約 3 時間経過する過程で、ほぼ同じレベルを保ってバランス良く降下し始めている。

5. 結 論

以上、高炉炉内の装入物の積層状態と降下状態を直接計測する手段として、新しく開発したマグネットメータを用いる方法を報告した^{4),5)}。マグネットメータを用いることによって、炉壁近傍における装入物の降下速度および鉱石、コークス各層の層厚を計測することが可能であるとともに、円周方向に複数個配置することにより高炉内反応の円周バランスを把握することも可能となり、既存の装入物の分布制御や羽口支管風量制御を真にクローズドループ化するとともに、マグネットメータ情報に基づく新しい高炉操業技術も展開されつつある。

参 考 文 献

- 1) 神原健二郎, 他: 高炉解体調査と炉内状況, 鉄と鋼, **62**-5, 535/558 (1976)
- 2) 原田耕介, 他: 磁気マルチ形磁力計, 昭和 50 年度電気学会全国大会, No. 195 (1975)
- 3) K. Harada, et al.: The Magnetic Mixing Amplifier, IEEE Trans. on Magnetics, **MAG-8-4**, 780/785 (1972)
- 4) 原田耕介, 他: マグネットメータによる高炉内部状態の観測, 第 16 回 SICE 学術講演会予稿集, 669/670 (1977)
- 5) K. Harada, et al.: Measurements of Blast Furnace Inner-States by Magnetometer, 8th IMEKO Congress, S-25 (1975)