

討 3 炉腹ゾンデ, 炉芯ゾンデ開発による高炉下部炉内状況の解明

新日本製鐵(株)大分製鐵所 和栗眞次郎, 森下紀夫

○芦村敏克, 井上義弘, 平田達朗

中央研究本部第三技術研究所 工博 杉山 喬

1. 緒 言

高炉内下部の反応は固体, 液体, 気体の錯綜する多重反応であるが, その解明は操業管理上きわめて重要と考えられてきた。ところが, 実炉における高炉下部は超高温高圧のため計測することが非常に困難で, 従来は高炉解体調査あるいは実験室規模のモデル等からの推察の域を出なかった。

高炉を適確に制御するためには, 稼動中の実態解明が必要と考え, 大分製鐵所では, 実炉を対象にして炉下部現象を解明するため炉腹ゾンデを開発し, 第2高炉において操業中の融着帯の直接測定を開始した¹⁻³⁾。同時に, 光ファイバーを用いた直接観察, 固体温度測定等, 従来のガス情報だけでなく, 固体の物性, 挙動に着目した測定技術の開発を行ってきた。融着帯よりさらに下方の, いわゆる炉芯部, レースウェー先端部の固体変化については, 操業中の状態は殆んど知見がなく, 第2高炉に, 稼動中の炉芯部の解明を目的として, 炉芯ゾンデを設置した⁶⁻⁷⁾。これら新しい検出端から得られた知見及び検出端情報による高炉2次元トータルモデルの検証, 改良についても以下にあわせて報告する。

2. 炉腹ゾンデ, 炉芯ゾンデ設備の開発

今回, 炉下部情報を把握するために開発した炉腹ゾンデ, 炉芯ゾンデの概要を以下に示す。

2.1 ゾンデ配置

Fig.1は大分第2高炉における各種ゾンデの設置状況を示す。当高炉では, 炉頂ゾンデ, シャフト上部ゾンデ, シャフト中部ゾンデと順次設置してきており, 更に炉腹ゾンデ, 炉芯ゾンデを新たに開発設置した。この2つのゾンデは円周方向で同一角度に位置させ, 炉腹部と羽口部の同時計測を実施することで, 高さ方向の対応をより良く把握できるように配置した。

Table.2 Specification of Core probe⁶⁾

Drive	Air Moter. Maximum thrust 10 t
Range of measurement	Maximum inserting is 3 m from tuyere
Probe	Water - cooled
Faculty of measurement	1. Optical measurement: image fiber optical and radation pyrometer 2. Measurement of gas composition

Table 1 Specification of Belly probe¹⁾

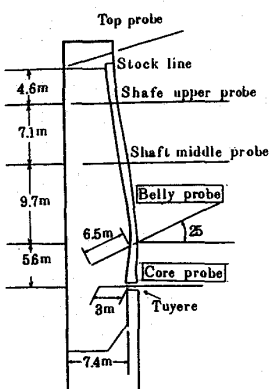


Fig.1 Location of probes at Oita 2 BF

Location	21.4m under stockline 5.6m above the tuyere axis
Range of measurement	Inclinary movement at angle 25° Maximum inserting is 6.5m inside of furnace
Faculty of measurement	1. Burden sampling 2. Measurement of gas temp and gas composition 3. Optical measurment; state of inner furnace and material temperature 4. Micro wave measurement
Drive	Hydraulic Maximum thrust 30 ton

Table 3 Specification of optical measurement²⁾

1) Probe; Water-cooled pipe of 114 mm in diameter and 13.5m in length.
2) Optical fiber; Composed of two types of fiber. Image fiber for observing inner state of the blast furnace and optical fiber for measuring the material temperature.
3) Observing method; Image fiber connects with camera so that the image of inner state is televised.
4) Material temperature; Optical fiber connects with a radiation pyrometer.
5) Observing items; Observing internal condition and measuring the material temperature.

2.2 開発経緯

Fig. 2は各種ゾンデの測定時の炉内温度，炉内圧力を示す。炉腹ゾンデについてはガス温度1600℃，ガス圧力4 kg/cm²の条件に耐える様に設計し、炉芯ゾンデについては、これまでのゾンデ開発技術を結集して、ガス温度2500℃，ガス圧力5 kg/cm²に耐える様に設計を行い、炉下部の条件に対応させた。両ゾンデ共設置以降順調に稼動している。

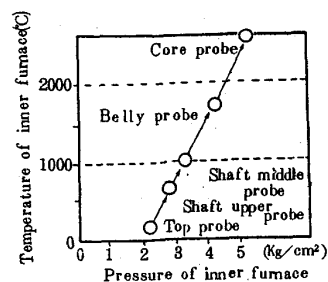


Fig. 2 Temperature and pressure in blast furnace⁵⁾

2.3 炉腹ゾンデ，炉芯ゾンデの設備仕様

2.3.1 炉腹ゾンデ (Table. 1)

設置位置は、羽口上5.6 mで外径100 Aのプローブを25°の角度で炉内に6.5 m挿入する。挿入駆動力は油圧で、30 tonの推力を有している。計測機能は、原料サンプリング，ガス温度とガス成分計測，イメージファイバーによる炉内観測，ファイバー型放射温度計による固体温度計測及びマイクロ波による層識別である。Table.3には光計測の仕様を示す。

2.3.2 炉芯ゾンデ (Table. 2)

外径100 Aの水冷プローブを用いて、羽口先端から炉内側3 mの測定を行う。挿入駆動力は工場用圧縮空気で10 tonの推力を有している。計測機能はイメージファイバーによる炉内観測，ファイバー型放射温度計による固体温度測定及びガスサンプリングである。

3. 計測によって得られた知見

3.1 炉腹ゾンデ計測結果

3.1.1 原料サンプリング

単一管構造の原料サンプリングプローブを炉内に挿入することで、PHOTO. 1に示すような大きな円柱状の融着物が数層採取でき、これらは後述するイメージファイバーで観測される空洞に相当する。融着物は細粒及び粉焼結鉱が結合したものの、メタル化が進行し、コークスにたれこんだもの、滴下直前のものに分類される。融着物の組織の一例をPHOTO. 2に示すように、還元は内外面一様に進行し、その還元率は95%前後であり、融着物近傍の鉱石類も融着物に近い還元進行を示している。又、焼結鉱のRDIが低い時は塊状帯の還元粉化が抑制され、炉内ガス流の通気性が均一に確保される。そのため融着帯根部付近では高被還元状態が得られ、円滑な融着層の形成、並びに溶け落ちが得られ、その結果、良好な荷下りとなっている。³⁾

3.1.2 光ファイバーによる融着帯観測及び测温

解体調査結果にも見られるように融着帯根部では層状状態が保存されており融着層とコークスは明確に区別できる。融着層ではプローブの挿入，引抜きによって生じる空洞が保持され (Fig. 3)、PHOTO. 3に示すようなイメージを得る。一方コークス層では、プローブ引抜きと同時に上方よりコークスが崩れ込み空洞を埋める。これはいわゆるスリットコークスと考えられる。このような層構造の識別については、光ファイバーによる観測結果とプローブ挿入時の推力変化 (Fig. 3) 及びマイクロ波の透過波強度を対比させると、良く一致しており、これらの方法を併用すれば層構造が信頼性



Photo. 1 Sample of cohesive layer

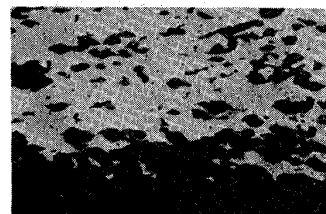


Photo. 2 Cross section of cohesive layer (×50)

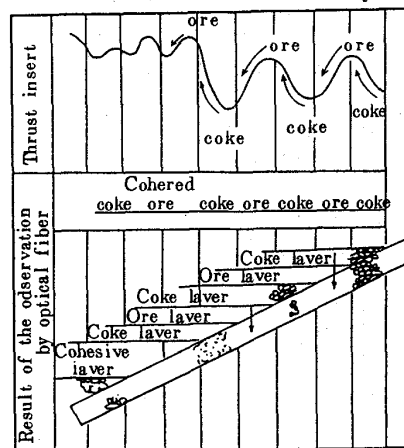


Fig. 3 Correspondence of the layer structure with the thrust of insert by belly probe⁹⁾

高く判定できることがわかった。これらの方法によると、従来は炉下部の層構造として各層が水平状態と考えられていたが、操業状態によっては観測されるコークス層や空洞の長さが大きく変化し、各層が傾斜している場合もあることが推察された。¹⁰⁾

プローブ挿入長 6.5 m 付近では、コークスの浮遊、流動状況が観察され、融着帯と炉芯間のいわゆる ΔL のゾーンと考えられ、コークスの流動状況からガス流速の推算も可能となった。⁹⁾¹¹⁾ 他方、同じ 6.5 m の付近ではほぼ静止状態に近いコークスが観察される場合もあり、炉芯ゾーンの観察状況と類似しており、稼動高炉の炉芯形状を判定することも可能となった。¹⁰⁾

半径方向固体温度分布は、操業状態によって数種に分類できそうであり、代表例を Fig. 4 に示す。それぞれ融着帯形状と密接な関係があると推察され、Fig. 4 (a) は逆 V 型、(b) は W 字型、(c) はフラット型の融着帯形状であり、装入条件の違いと対応していることがわかった。一方、実操業においては、炉腹ゾーンの情報で特に炉壁近傍の固体温度測定はシャフト上部ゾンデや炉壁設置の各検出端が炉内変化を検出するよりはるかに

早く炉況変動を予見し得ることがわかり、昨今話題の炉下部の活性状態と不活性状態が明確に判別され得る。

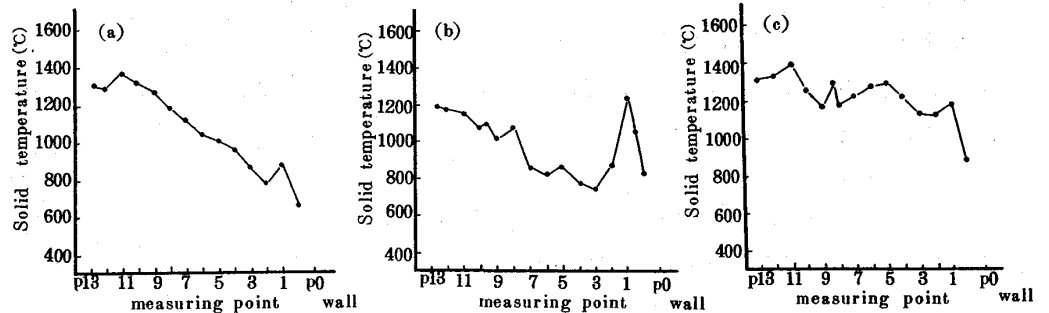


Fig. 4 Samples of solid temperature distribution measured by optical fibre

3.2 炉芯ゾンデ測定結果

炉芯ゾンデにより測定した固体温度の半径方向の分布とそれに対応した羽口コークスサンプリング結果を Fig. 5 に示す。図中の (a) は炉芯温度が低い場合で、銑滓は羽口先端から 1.0 ~ 1.3 m の部位で極大値がみられ、コークス粉 (-3 mm) は羽口先端から 1.7 ~ 2.2 m 間で極大値を示す。コークス粉が堆積している部位よりも羽口寄りの所に銑滓は多量に滴下していると推定された。一方、図中の (b) は炉芯温度が高い場合で、コークス粉 (-3 mm) の堆積部位に変化があり、極大値は炉芯側に移動しており、この場合、銑滓の滴下は均一になっている。Fig. 5(a) の場合のように炉芯温度が 1000 ~ 1100 °C まで低下すると滴下してきたスラグの流動性は悪化し、炉芯表層部にホールドされ、炉芯部の通気性を阻害し、炉下部 K 値を上昇させること等が判明した。

3.3 高炉下部状況の推定

炉腹ゾンデ、炉芯ゾンデの情報を結合させることによって炉下部状況のより正確な推定が可能となる。それぞれ著しく特徴が異なる例を対比して Fig. 6 に示す。図中 (a) の場合は炉芯温度が低く、炉腹ゾンデ測定結果からは W 字型の融着帯形状を示し、(b) の場合

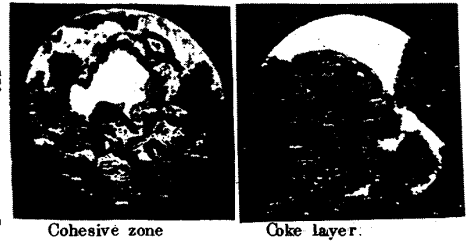


Photo. 3 Image observed by belly probe¹²⁾

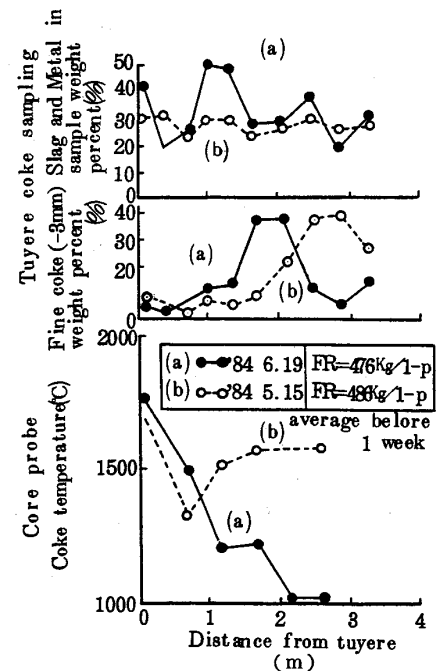


Fig. 5 Results of Core probe and Tuye re coke sampling

は炉芯温度は高く、炉腹ゾンデ情報からは逆V型融着帯形状を示すものである。(a)と(b)では送風条件は概略同一で、(a)の場合の炉芯温度低下は融着帯の垂れ下りがレースウェーの奥に近づいたためと考えられる。この結果、衝風の炉芯部への侵透が悪くなり、炉下部でのガス流の変化につながると推察される。例えば(a)の場合、羽口近傍のステーブ温度は上昇し炉腹部の炉壁周辺の温度は高く、活性状態を示す。

3.4 数学モデルの改良

当社では高炉2次元トータルモデルの開発をすすめてきた。現実の高炉内では種々の特性値が実験によって求められた値

とずれているケースが多く、大分第2高炉での前記検出端情報を用いて炉内現象との整合性をチェックし、モデル内で使用している種々の速度パラメータ、諸特性値の修正、標準化⁸⁾を行った。標準化後、モデル出力の融着帯位置は炉腹ゾンデの炉内観察でのトンネル位置と良く一致しており、モデルの有効性が確立された。(Fig. 7)

4. 今後の課題

炉腹ゾンデ、炉芯ゾンデの計測により、高炉下部状況、とりわけ、融着帯～炉芯の状態把握ができ、融着帯推定の精度も向上させることができた。今後

の課題としては、安定かつ効率的な操業をめざした融着帯、炉芯を造り込むための送風条件と組合わせた装入物分布調整技術の確立が必須である。現在はモデルを用いて装入物分布推定を行っており、装入物分布と融着帯あるいは炉芯との関係を定量化することが必要と考える。

5. 結 言

- 1) 炉腹ゾンデ及び炉芯ゾンデを開発し、特に光計測技術を用いて、稼動中の高炉の炉下部状況観測に初めて成功し、融着層、あるいは融着帯内面の状況に関する知見を得た。
- 2) これらのゾンデを用いて、高炉2次元トータルモデルの検証、フィッティングを行い、諸特性値の標準化を実施した結果、モデル出力結果と実測とが良く一致し、モデル推定精度を向上させることができた。
- 3) 融着帯を精度良く推定できるようになり、今後は造り込みのための送風条件と組合わせた装入物分布調整技術の確立が必要である。

6. 参考文献

1) 金森, 内田ら; 鉄と鋼 68('82) S784	7) 望月, 芦村ら; 鉄と鋼 71('85) S63
2) 和栗, 宮辺ら; ibid 69('83) S83	8) 杉山, 須賀田ら; ibid 71('85) S884
3) 和栗, 金森ら; ibid 69('83) S870	9) 和栗, 森下ら; ibid 71('85) S889
4) 望月, 芦村ら; ibid 70('84) S783	10) 和栗, 森下ら; ibid 71('85) S888
5) 樋口, 宮辺ら; ibid 70('84) S780	11) 和栗ら; ; 学振54委-1200
6) 和栗, 望月ら; ibid 71('85) S62	12) 和栗ら; ; 日豪シンポジウム

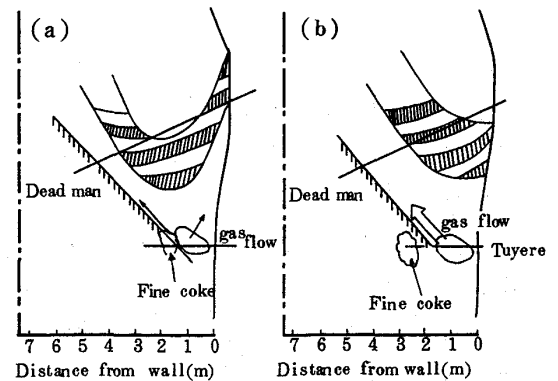


Fig. 6 Estimation of typical state inner furnace

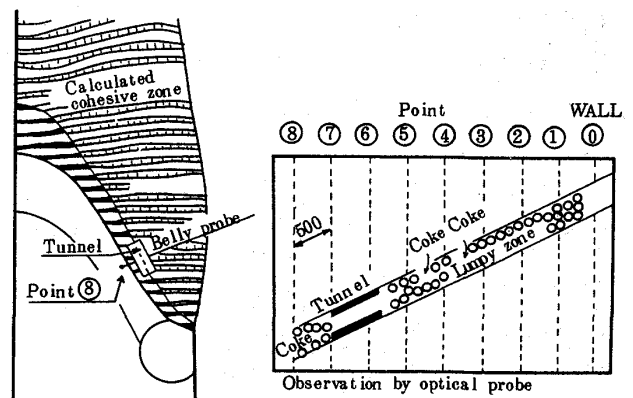


Fig. 7 Comparison of the calculated position of cohesive zone with the position observed by the belly probe.⁸⁾