

稼働大型高炉の融着帯直接計測技術の開発と根部層構造

芦村 敏克*・森下 紀夫*²・井上 義弘*²・樋口 宗之*²・馬場 昌喜*³・金森 健*³・和栗 眞次郎*⁴

The Development of the Direct Measurement Technology of the Cohesive Zone and the Structure of the Root of the Cohesive Zone during the Operation of the Large Blast Furnace

Toshikatsu ASHIMURA, Norio MORISHITA, Yoshihiro INOUE, Muneyuki HIGUCHI, Masaki BABA, Ken KANAMORI and Shinjiro WAKURI

Synopsis : A belly probe was newly developed at Oita No. 2 blast furnace. It has the function of observing directly the furnace conditions and measuring the solid temperature by an image fiberscope, identifying and measuring layer structure by a microwave during operation, gas temperature and gas composition measurement and taking burden material samples during scheduled shutdown.

The conditions of the lower part of the furnace during operation were observed successfully. Some knowledge relating to the cohesive zone and its surrounding neighborhood were obtained through our measurements.

The results are summarized as follows :

- 1) The burden materials were observed layer by layer and were found to occasionally be inclined. The maximum inclination angle was estimated to be about 20 degrees.
- 2) The coke between the cohesive zone and the deadman was observed, as an image, to be floating. The gas volume flowing in this region was estimated to be about at least one third of the bosh gas volume and the gas volume distribution at the lower part of the furnace was estimated to be relatively large.

Key words : iron making ; measurement ; blast furnace ; belly probe ; fiberscope ; microwave ; cohesive zone.

1. 緒言

高炉内下部の反応は固体、液体、気体の錯綜する複雑な反応であるが、その解明は操業管理上極めて重要と考えられてきた。高炉の炉内現象については1968～1971年に行なわれた広畑第1高炉他の3基の高炉解体調査¹⁾や、それ以降の各高炉の解体調査²⁾により、従来の炉内のマクロ的理解から、三次元的な理解へと広げることができた。そして、高炉の大型化に伴い、炉内装入物分布制御及びガス流れ分布の把握やガス流分布調整に力点が置かれるようになった。同時に、炉内を推定する二次元数学モデル³⁾を研究開発する一方で、高炉シャフト上中部の充填層内の半径方向ガス温度並びにガス成分分布を計測する検出端⁴⁾や、炉内の装入物の情報を検出する検出端の一つとして層厚計⁵⁾などが開発された。更に、解体調査からの知見として焼結鉱やペレットなどの高温性状、コークスの高温における反応についても基礎研究が進められた。しかし、こうして得られた知見を総合しても、装入物の降下異常などの日常操業で遭遇する重要な異常現象を始め、前述したように高炉の制御性を向上させるにあたって、理解できない点が多くあった。それは従来の研究が、ガスを主体とした炉内情報（ガス温度、

ガス成分)をもとに解明を進めてきたことが原因であって、操業中の高炉における固体や液体の情報がほとんど捉えられていないことが炉内現象の理解に限界を与えていたものと考えられる。そこで、本研究では、高炉を的確に制御するためには稼働中の高炉内の固体情報解明が必要と考え、大分製鉄所第2高炉(1次)に、融着帯根部などの炉下部現象解明のための炉腹ゾンデを開発設置し⁶⁾⁷⁾、従来のガス情報だけでなく、光ファイバースコープを用いた炉内状況の直接観察⁸⁾、固体温度計測等の光計測技術を並びにマイクロ波計測技術を開発適用し、操業中の融着帯及びその周辺部の固体の物性・挙動解明開発を世界で最初に行ってきた。

本報告では炉腹ゾンデの特徴とこのゾンデを用いた計測で得られた融着帯の直接観察結果の例として炉下部での層構造、融着帯内面の状況とガス流れ、そしてゾンデ挿入時の推力変化と層の識別について述べる。

2. 検出端の開発

2・1 大分第2高炉の設備仕様

大分第2高炉の主な設備仕様をTable 1に、主なゾンデの設置状況をFig. 1に示す。

平成5年11月24日受付 平成6年3月4日受理 (Received on Nov. 24, 1993; Accepted on Mar. 4, 1994)

* 新日本製鉄(株)エンジニアリング事業本部 (Engineering Division Group, Nippon Steel Corp., 2-6-3 Otemachi Chiyoda-ku, Tokyo 100)

* 2 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (Oita Works, Nippon Steel Corp.)

* 3 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (現: 日本鉄鋼連盟) (Oita Works, Nippon Steel Corp., now The Japan Iron & Steel Federation)

* 4 新日本製鉄(株)大分製鉄所 (現: 産業振興(株)) (Oita Works, Nippon Steel Corp., now The Sangyo Shinko Co., Ltd.)

Table 1. Specifications of Oita No.2 blast furnace.

Blown in	OCT, 5, 1976
Inner volume	5070m ³
Furnace height	36.465m
Throat diameter	10.5m
Belly diameter	16.0m
Hearth diameter	14.8m
Tap holes	5
Tuyeres	40
Charging system	2 bells and valve seal
Movable armour	NSC type

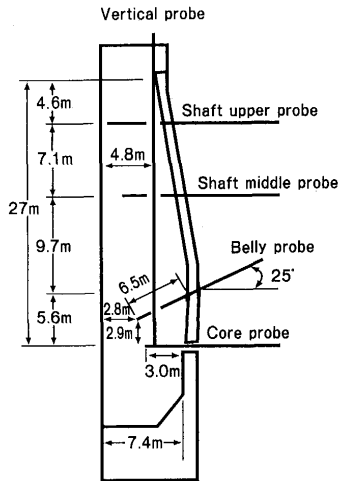


Fig. 1. Location of probes in Oita No.2 blast furnace.

2・2 炉腹ゾンデ

炉腹ゾンデの主な設備仕様と機能をTable 2に示す。設置位置は羽口上5.6mの炉腹部で、外径114.3mmのプローブを、25度の角度で炉内に6.5m挿入する。計測機能は、原料サンプリング、ガス温度及びガス成分計測、光計測（イメージファイバーによる炉内観察、ファイバー型放射温度計による固体温度計測）及び、マイクロ波計測（マイクロ波による鉱石層コークス層などの層識別）の4種である。光計測、マイクロ波計測では水冷プローブを用い、原料サンプリング⁹⁾¹⁰⁾、ガス温度及びガス成分計測では非水冷プローブを使用している。また、冷却能力については、高温高压条件を

Table 2. Specifications of Belly probe.

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

考慮して溶損の防止を第一義に設計した。

光計測の主な仕様をTable 3に示す。光計測用のファイバーはFig. 2に示すようにイメージファイバー、照明用ファイバー、温度測定ファイバーから構成されており、その外径は約20mmである。イメージファイバーの画素数は分解能を考慮して、約30000画素としている。光計測においてはプローブをいったん最深部まで挿入し、プローブの引き抜きにあわせて、先端キャップを外し、以下プローブの引き抜き過程で、炉芯～融着帯根部～炉壁部の観察を行なう。

マイクロ波計測の主な仕様をTable 4に示す。プローブ先端両側に送信用アンテナと受信用アンテナを備え、炉外の

Table 3. Specifications of optical measurement.

Probe	Water-cooled pipe of 114mm in diameter and 13.5m length
Optical fiber	Composed of two types of fiber Image fiber for observing inner state of the blast furnace Optical fiber for measuring the solid temperature
Observing method	Image fiber connects with camera so that the image of inner state is televised
Solid temperature	Optical fiber connects with a radiation pyrometer
Observing items	Observing inner state and measuring the solid temperature

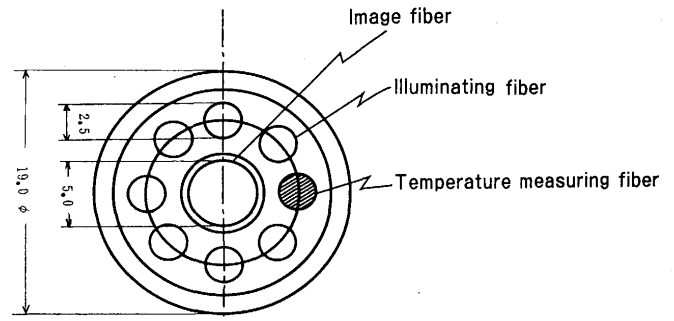


Fig. 2. Cross section of optical fiber.

Table 4. Specifications of micro wave measurement.

Transmitter and Receiver	1) Transmitter ① Transmittance +20dBm ② Frequency 9,400MHz 2) Receiver ① Frequency 9,400MHz ② Sensitivity -90dBm ③ IF frequency 50MHz ④ Total dynamic range 60dBm ⑤ Received sensitivity of Reflection wave -40dBm
Wave guide	1) Size 22.9mm×10.2mm×1m 2) Material SUS 304 (Au coated) 3) Resisting pressure 7kg/cm ²
Data logging Apparatus	1) Wave memorizer ① Number of channel 4 ② Capacity 32KW 2) Micro computer

マイクロ波送信器で発生したマイクロ波は、導波管を通り送信アンテナから炉内に放射される。コークス層、鉱石層中を透過したマイクロ波は、受信アンテナから導波管を通り、炉外のマイクロ波受信器に送られる。この受信器で、マイクロ波強度に応じてアナログ信号に変換された透過波信号は計測終了後マイクロコンピュータにて解析される。

オフラインテストでは、焼結鉱、コークスを各々積み上げた層にプローブを挿入し、鉱石層、コークス層でのマイクロ波の透過性、層識別について確認した。マイクロ波の透過波強度の平均値、及び分散をTable 5に示す。Table 5およびFig. 3の計測例より、コークス層、及び鉱石層での透過波強度の平均値は、透磁率、空隙率などの物性値が両者で異なるため、透過波強度から容易にコークス層、鉱石層が識別できた。また、Fig. 4に示すように粒度低下により、透過波強度は低下する。

Table. 5 Strength of transmitted micro wave through coke layer and ore layer.

	Grain size (mm)	Strength of transmitted micro wave (dBm)	
		Mean value	Variance
Coke	20~30	-59	4.5
Ore	5~20	-93	0

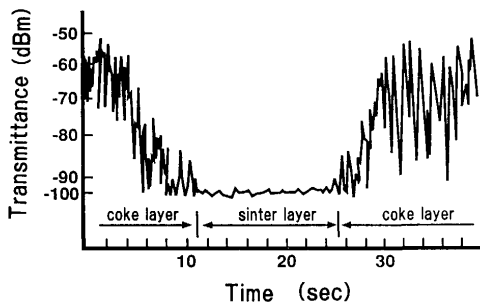


Fig. 3. Example of transmission signal for coke layer and sinter layer.

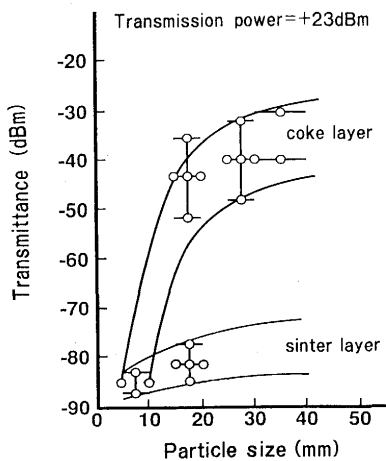


Fig. 4. Penetrating characteristic of micro wave for coke and sintered ore.

原料サンプリングは高炉休風、約4~5時間後に炉内の融着物、コークス、鉱石などを採取し、化学性状および物理性状解析に供する。

3. 融着層の直接観察結果

3.1 融着層の観察状況について

高炉解体調査から、炉腹部では炉壁より炉中心に向かって塊状帯、融着帯、炉芯部が存在すると考えられ、操業中の光ファイバー炉内観察プローブ（光計測）の後退によって生じるプローブ先端の空間部にコークス粒子や鉱石粒子が降下するのは異なり、空間が残存したまま「トンネル」を形成する領域が観察された。以下、これをトンネルと称する。原料サンプリングプローブを用いた休風後約4~5時間後の試料観察結果によると、炉中心側に近い領域において、Fig. 6に示すような融着物が得られた。また、融着物の存在する領域では、Fig. 5に見られるようにプローブ挿入時の推力は極端に高く計測され、塊状帯では鉱石層からコークス層の境で推力は上昇し、その逆では低下した。この原料サンプリング実施後、光計測の炉内観察用プローブに替えて、炉内観察をした結果、上述した融着物が採取された同じ位置において、Fig. 7に見られるようにトンネルが認められた。塊状帯は鉱石、コークス各粒子が独立している状態を、融着帯は鉱石の各粒子が固着融着し、一体化の状態と考えて、上述のトンネルが観察される領域を融着帯と判断した。

融着層の長さはプローブ挿入方向で、0.3mから1.5m程度のものが観察された。融着層は半径方向で、炉中心側で観察される例が多いが、炉壁部においてもトンネルが形成さ

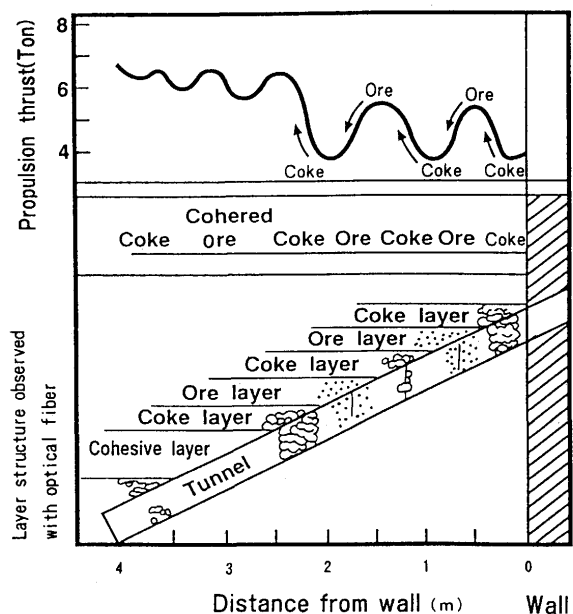


Fig. 5. Correspondence of the layer structure with the thrust of insert with belly probe.

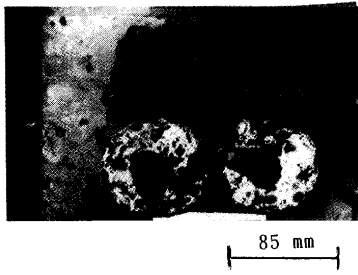


Fig. 6. Cohered material sampled with belly probe.

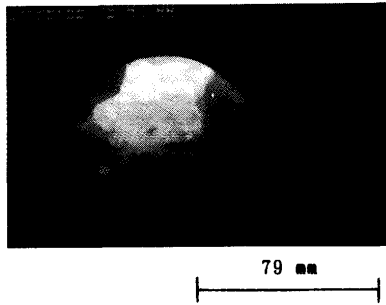


Fig. 7. Cohesive zone observed as "tunnel" with optical fiber scope.

れる例もあった。

光ファイバーを用いた計測での放射温度計による固体温度計測結果からは、このトンネルが観察される領域の固体温度は800°C~1200°Cの広範囲にある。

3・2 融着帯内面の観察状況について

融着帯内面位置が異なる特徴的な2つの観測例をFig. 8に

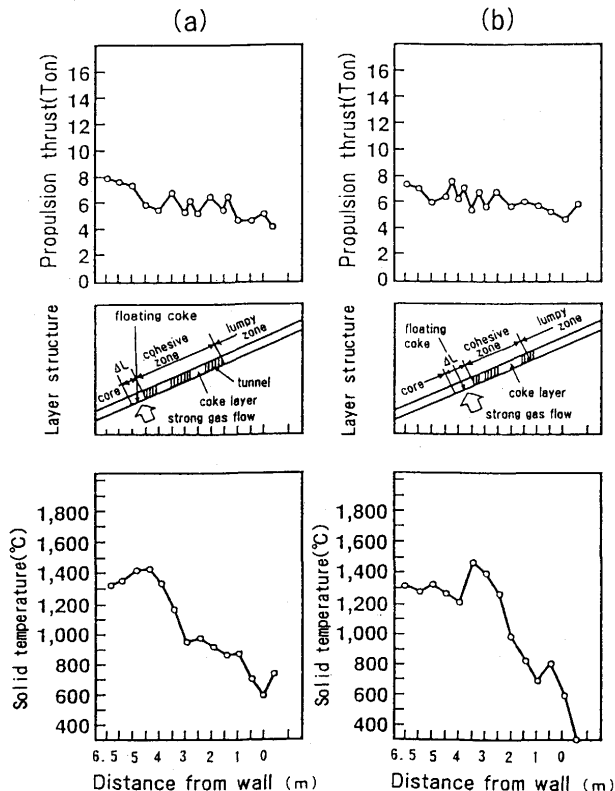


Fig. 8. Examples of different position of inner surface of cohesive zone with belly probe.

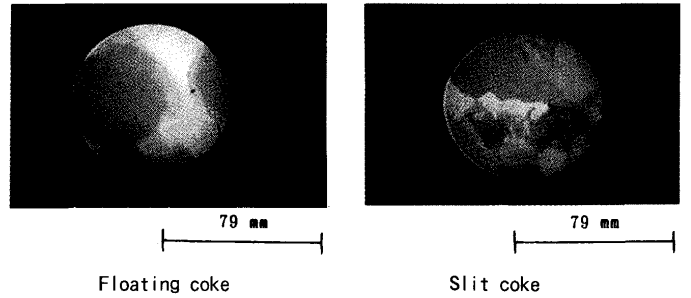


Fig. 9. Observation result of floating coke and slit coke.

示す。

測定例 (a) では挿入長4.5~5 mにおいて、測定例 (b) では3.5~4.5 mにおいて、1300~1400°C程度の高温のコークスの浮遊状況が画像的に観察された。浮遊コークスの観察状況をトンネルとトンネルの連続部で観察されるスリットコークスと対比してFig. 9に示す。画像より判断すると、観察された浮遊コークスの粒径は約40mm前後であって、小粒コークス等は認められなかった。このような画像による観察に加え、コークス浮遊領域ではプローブ挿入時の推力は極小値を示しており、炉芯と融着帯間のコークス供給ゾーンと考えられた。

炉腹ゾンデによる炉内観察において、プローブ挿入推力変化と炉内の層変化の間には別報¹¹⁾で詳細に述べているが、対応関係がみられる。

4. 考察

4・1 炉下部層構造について

光ファイバーを用いた炉内直接観察結果により、稼働中の高炉炉腹部においては、鉍石層とコークス層が周期的に観察され、炉頂より装入された鉍石及びコークスは炉腹部

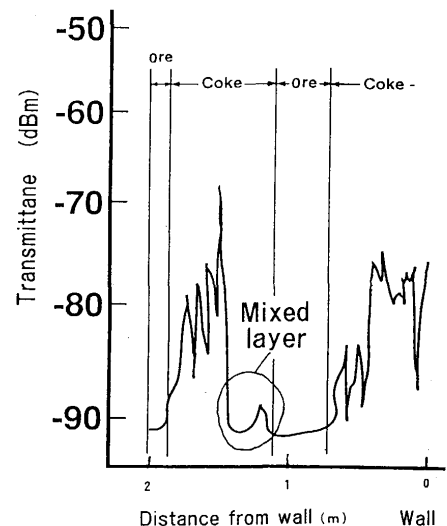


Fig. 10. Example of transmission signal in the presence of mixed layer.

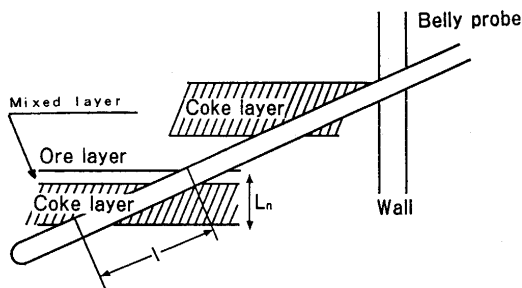


Fig. 11. Schematic conception of layer structure at lower part of furnace.

においても層状状態 (Layer by Layer) で存在していることがわかった。このことは、炉壁煉瓦の損耗等によって炉壁部に混合層を形成している例を除いて、高炉解体調査結果¹⁾とも一致している。

マイクロ波計測では、プローブ挿入方向の詳細な層変化を知ることができる。Fig.10に示すように、挿入長1m付近の短区間でコークス層と鉱石層とが連続して観察される場合はその境界部には、マイクロ波が透過しやすい領域があり、オフラインテストの結果とも併せて考察すると、各コークス層の上面に一部混合層が形成されていることがわかった。この状況を模式図で表わすとFig.11のように示される。

4・2 層の傾斜状況について

順調な生産状態で層状装入された鉱石、コークスは炉上部では半径方向に傾斜を有するが降下とともに炉下部ではほとんど水平状態になっていると考えられていたが、W型融着帯などの操業の形態によっては、コークス、鉱石の各層が炉下部で傾斜している例も観測されている。

Fig.12には水平な層と傾斜している層における炉内観察結果の模式図ならびに、マイクロ波による層識別状況を示す。マイクロ波計測によるとコークス層または鉱石層が2~3mの範囲にわたって観察される場合がある。炉腹部での層厚から判断すると、各層が傾斜しているものと推察される。

層の傾斜度合 θ はFig.12 (b) の状態を仮定すると、(1)式で計算される。 L_n は約0.3m, 各層が水平状態と判定された測定例から算出し、(1)式より、 $1 = 2 \sim 3$ mの場合、層の傾斜は15~19度と推定された。

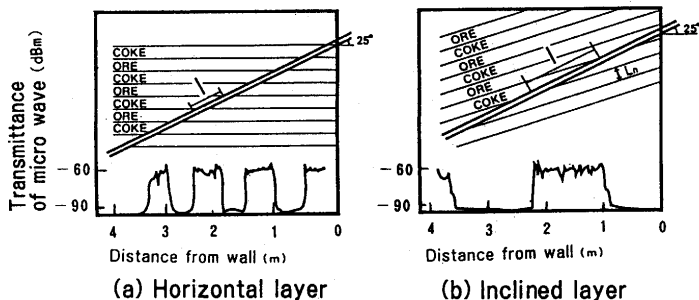


Fig. 12. Estimation of layer structure at lower part of furnace with micro wave measurement.

$$\theta = 25 - \sin^{-1} (L_n / 1) \dots\dots\dots (1)$$

4・3 融着帯内面状況とガス流れ推定について

融着帯内面~炉芯間 (以下ドーナツ状空間域とする) で、コークスは浮遊しており、その粒径は約40mm程度とサイズが整っていることから、融着帯内面での通過ガス流量推定にあたり、次の仮定をおいた。すなわち、コークスの重力による降下と上昇ガス流による浮力とのバランスが成り立っていると考え、この時のガス流速を最小流動化速度として試算した。

ここで、最小流動化速度 U_{mf} はWenとYuの式¹²⁾を用い、(2)式で表わされる。

$$U_{mf} = (D_p (\rho_p - \rho_g) g_c / 24.5 \rho_g)^{1/2} \dots\dots\dots (2)$$

一方、ガス密度 ρ_g は(3)~(5)式で計算される。

$$\rho_g = \rho_{g0} \times 273 / (273 + T_g) \times (1.013 \times 10^5 + P) / (1.013 \times 10^5) \dots (3)$$

$$M_g = (M_{N_2} (N_2)_{BOSH} + M_{H_2} (H_2)_{BOSH} + M_{CO} (CO)_{BOSH}) \dots (4)$$

$$\rho_{g0} = M_g / 22.4 / 100 \dots\dots\dots (5)$$

ここで、計測結果より、 $D_p = 0.04$ m, $P = 2.942 \times 10^5$ Pa, $\rho_p = 1020$ kg/m³, $(N_2)_{BOSH} = 60.6\%$, $(H_2)_{BOSH} = 3.5\%$, $(CO)_{BOSH} = 35.9\%$, $g_c = 9.8$ m/s² とおき、Fig. 7の結果より、 T_g をパラメータとして、(2)式より U_{mf} を計算し、結果をTable 6に示す。 U_{mf} は T_g の変化に対して4.5~5.0m/s前後と推算された。融着帯と炉芯間のドーナツ状空間域 (Fig. 8 図中 ΔL) は、0.5~1.0mの範囲にあり、仮に1.0mとすると空間域の断面積 S は21m²程度となる。したがって、ドーナツ状空間域を流れるガス流量 V を(6)式で計算すると、

$$V = S \times U_{mf} \dots\dots\dots (6)$$

ガス流量 V は100m³/s以上とかなり大きく、ボッシュガス流量に対する割合は約30%程度になることがわかった。上述したドーナツ状空間域からより炉壁側の中間部および周辺部にはボッシュガス流量の最大でも約70%が流れており、中間~周辺部の面積を考慮にいと単位面積あたりの中間~周辺部のガス流量は中心部ガス流量の約1/3となる。このように炉腹下方部 (羽口上3~5m上方) では炉径方向で変化の大きいガス流量分布をなしているものと推定された。

Table 6. Calculated gas flow rate between cohesive zone and deadman.

T_g (°C)	ρ_g (kg/m ³)	U_{mf} (m/s)
1,300	0.815	4.47
1,400	0.768	4.60
1,500	0.721	4.76
1,600	0.688	4.87
1,700	0.650	5.01

5. 結言

炉腹ゾンデを開発し、特にイメージファイバーによる光計測技術およびマイクロ波計測技術を用いて、稼働中の大型生産高炉の炉下部状況の観測に世界ではじめて成功し、融着層、あるいは融着帯内面の状況に関する多くの知見を得たが、特徴的なものは以下のとおりである。

1) 炉腹ゾンデのプロープ挿入推力の変化とイメージファイバーによる層の識別観察には対応関係が見られる。この対応関係を調査考察し、融着帯根部及びその近傍でのコークス、鉍石の各層を挿入推力変化から識別できることを明らかにした。

炉腹～朝顔部の炉下部では、装入物は層状になっていることが観察された。且つ、操業形態によっては各層が傾斜している場合もあり、その傾斜度合は最大で20度前後と推算された。

2) 融着帯内面と炉芯との間の領域では、画像として、コークスが浮遊している状況が観察された。この領域を流れるガス流量はボッシュガス流量の約30%程度と試算された。炉腹部～朝顔部では半径方向で変化の大きなガス流量分布をなしているものと推定された。

3) コークス層、鉍石層中のマイクロ波の透過特性は高温域においても変化しないことが確認され、この特性を利用することで、高温域においてもコークスと鉍石の識別が可能であり、炉内の層別判定に活用できる。

記号

L_n : 層厚 (m)

l : 例えばコークス層として連続して確認されるプロープ挿入方向の長さ (m)

θ : 層の傾斜角 (degree)

U_{mf} : 最小流動化速度 (m/sec)

D_p : コークス粒度 (m)

ρ_p : コークスの密度 (kg/m^3)

ρ_g : ガスの密度 (kg/m^3)

g_c : 重力の加速度 (m/sec^2)

T_g : ガス温度 ($^{\circ}\text{C}$)

P : 圧力 (Pa)

M_g : 炉内の平均ガス分子量

M_{N_2} : 窒素の分子量

M_{H_2} : 水素の分子量

M_{CO} : COの分子量

$(N_2)_{BOSH}$: ボッシュガス中の窒素濃度 (%)

$(H_2)_{BOSH}$: ボッシュガス中の水素濃度 (%)

$(CO)_{BOSH}$: ボッシュガス中のCO濃度 (%)

V : 融着帯と炉芯間のドーナツ状空間域を流れるガス流量 (m^3/sec)

S : ドーナツ状空間域の断面積 (m^2)

文献

- 1) 例えば、下村泰人, 西川 潔, 有野俊介, 片山 力, 肥田行博, 磯山 正: 鉄と鋼, **62** (1976), p.87
- 2) 例えば、佐々木寛太郎, 羽田野道春, 渡部雅男, 下田輝久, 横谷勝弘, 伊藤孝夫, 横井 毅: 鉄と鋼, **62** (1976), p.120
- 3) 杉山 喬, 須賀田正泰: 製鉄研究, (1987), p.34
- 4) 江崎 幹, 和栗真次郎, 金森 健: 鉄と鋼, **55** (1969), S7
- 5) T.Yamamoto: ISIJ Int. **22** (1982), p.774
- 6) 金森 健, 森下紀夫, 内田雅敏, 西尾藤一, 土井勇次, 宮辺 裕, 藤原 稔: 鉄と鋼, **68** (1982), S784
- 7) 和栗真次郎, 金森 健, 樋口宗之, 土井勇次, 宮辺 裕: 鉄と鋼, **69** (1983), S83
- 8) 和栗真次郎: 日豪シンポジウム, (1983. Oct. 13-14)
- 9) 和栗真次郎, 金森 健, 樋口宗之, 宮辺 裕, 平田達朗: 鉄と鋼, **69** (1983), S870
- 10) M.Higuchi, Y.Miyabe, T.Hirata, S.Wakuri and K.Kanamori: ISIJ Int., **24** (1984), p.76
- 11) 馬場昌喜, 和栗真次郎, 井上義弘, 芦村敏克, 内藤誠章: 鉄と鋼, **80** (1994), p.89
- 12) C.Y.Wen and Y.H.Yu: AIChE J. **12** (1966), p.610
K.Kanamori: ISIJ Int., **24** (1984), p.76