

論 文

UDC 669.162.267.34 : 669.162.263.2

高炉解体調査と炉内状況*

(高炉解体調査-1)

神原健二郎**・萩原 友郎**・重見 彰利*** *

近藤 真一*****・金山 有治*****・若林 敬一*****

平本 信義*****

Dissection of Blast Furnaces and Their Inside State

(Report on the Dissection of Blast Furnaces-1)

Kenjiro KANBARA, Tomoro HAGIWARA, Akitoshi SHIGEMI

Shin-ichi KONDO, Yuji KANAYAMA, Kei-ichi WAKABAYASHI, and

Nobuyoshi HIRAMOTO

Synopsis:

For the purpose of investigating the inside of operating blast furnace, Higashida No. 5 B.F. (inner volume 646 m³) was dissected and examined, after quenched with water under normal operating condition in 1968. This was the first trial in Japan of dissecting a commercial blast furnace.

Next, Hirohata No. 1 B. F. (inner volume 1 407 m³), which had been operated with considerably high productivity, was dissected in 1970.

Thirdly, Kukioka No. 4 B. F. (inner volume 1 279 m³) was also dissected in 1971, so as to clarify the features of low coke ratio furnace.

In this paper, the procedure of dissection, the general views on the inside of these furnaces, the characteristics of each furnace, and the relationships between the inside state and operating conditions are described.

1. 緒 言

高炉の操業に際し複雑な現象に当面することがしばしばあるが、これらに正しく対処しうる操業技術を確立するためには、炉内状況の正確な把握がなければならない。ところが炉内状況を把握することはなかなか困難であり、多くの場合推定に頼らざるを得ないのが実情である。このため、実際に稼動している高炉をそのまま急冷して炉内状況を調査することが、その認識を深める最も直截的な方法と考えられた。

まず東田5高炉(646m³)を昭和43年に¹⁾²⁾、ついで広畑1高炉(1407m³)を昭和45年に、さらに洞岡4高炉(1279m³)を昭和46年に、操業状態のまま注水急冷して炉内状況を調査した。その結果はV. M. MURAV'EVらの調査結果³⁾とかなり異なっており、操業条件に対応した炉内状況、あるいは、操業中の現象に対応した炉内状況を知ることができた。また、今回の高炉解体調査以前には予想されなかつたような事実をはじめ、数々の貴重な知見が得られ、その後の高炉操業や設計に積極的に反映されている。しかし一方、吹止め後の溶融物滴下お

* 昭和48年11月, 49年11月, 50年4月, 10月本会講演大会にて発表

昭和50年10月13日受付 (Received Oct. 13, 1975)

** 新日本製鉄(株)広畑製鉄所 工博 (Hirohata Works, Nippon Steel Corp.)

*** 新日本製鉄(株)広畑製鉄所 (Hirohata Works, Nippon Steel Corp.)

**** 新日本製鉄(株)八幡製鉄所 工博 (Yawata Works, Nippon Steel Corp.)

***** 新日本製鉄(株)基礎研究所 工博 (Fundamental Research Laboratories, Nippon Steel Corp.)

***** 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp.)

***** 新日本製鉄(株)技術開発部 (Technical Development Dept., Nippon Steel Corp.)

よび反応の進行、冷却過程での再酸化などにより、炉内反応面特に滴下帯での反応に関する正確な解析の困難さが痛感された。

本報はこれらの一連の解体調査の総括として、吹止めおよび解体調査の方法、炉内状況の概要および操業と炉内状況との関係につき述べ、塊状帯、融着帯および炉内コークスに関しては第2報以下で詳細に報告することとする。なお、これらの一連の報告において炉内各部を下記の名称で呼ぶこととする。

塊状帯 (Lumpy zone) : 鉍石類が塊状のまま降下している部分

融着帯 (Softening-melting zone) : 鉍石類が軟化、融着、溶落ちの過程を示す部分。なおこれらの状態にある鉍石層を融着層 (Softening-melting layer) と呼ぶ。

滴下帯 (Dropping zone) : コークスのみから成る充填層を溶融したメタル、スラグが流下する部分。

2. 新日鉄における高炉解体調査の沿革

東田5高炉解体調査の目的は、とにかく、実際に稼動している高炉を操業状態のまま注水冷却し、炉内がどうなっているかを知ることであつた。この解体調査により、装入物は明確な層状を保つて下降し、シャフト下部で層状のまま融着し岩盤となつていることが見出され、また装入物は全体として溶銑中に浮いていることも確認された。その他炉内における鉍石、コークスの性状変化、溶銑やスラグの成分変化など、従来の炉壁からの試料採取では局所的にしか知り得なかつた事柄を、はじめて全体的な分布として把握することができた。

東田5高炉は 646m³ の小型高炉で鑄物銑を吹製しており、さらに吹止め前の状況があまり良くなかつた。これに対して、中型ではあるが高圧操業で製鋼銑を吹製している高炉の炉内状況を知る意味で、広畑1高炉を解体調査することとなつた。さきの東田5高炉での経験をふまえて、遺跡発掘と同様な綿密な調査が行なわれ、その採取試料の調査検討には全社の製銑関係研究者の総力が結集された。この結果、装入物の軟化、融着、滴下に至る炉内状況をつぶさに知ることができた。特に注目すべきことは整然とした融着層の存在である。すなわち炉上部から生成した融着層が羽口直上部まで逆V型に分布していた。この高炉は吹止めまで炉況が順調で高出銑 (1炉代平均出銑比 1.94 t/m³·day) を行なつており、この融着層分布がガス流れ、すなわち出銑比と密接な関係があることが推定された。

上述のように広畑1高炉は高出銑比で安定操業を行な

つていたが、コークス比は比較的高かつた。一方洞岡4高炉では、当時低コークス比、重油多量吹込みを志向した操業が行なわれており、コークス比 400 kg/t を下廻る実績をあげていた。このような低コークス比操業の炉内状況を確認することを目的として、同高炉を解体調査することとなつた。この調査により広畑1高炉とは異なつた融着層分布を確認し、操業条件、操業中の現象に対応して融着層分布が異なり、このことが高炉操業や設計に対して重要な意味を持つと判断されるに至つた。なおこの調査に際し、吹止め時の炉底出銑はもちろん最終出銑も行なわず、完全な操業状態のまま注水冷却したため、羽口先および炉床の状況に関しさらに詳細に知ることができた。

3. 吹止め直前の操業

広畑1高炉は、当時の広畑製鉄所における溶銑不足の事情を反映して、高出銑比操業を要請されており、吹止め前年9月には月間平均 2.3 t/m³·day を記録していた。この高炉は新たに建設された4高炉のリプレース対象となつていたため、炉令わずか4年3カ月で吹止められることとなつた。4高炉が火入れ後順調な立上りを示したため、1高炉は吹止め当月 (昭和45年7月) には若干減風せざるを得ず、フル操業よりは低目の出銑ペース (吹止め月平均出銑比 1.85 t/m³·day) であつた。

一方、洞岡4高炉は昭和36年9月火入れ以来すでに9年8カ月を経て炉としては老令であつたが、昭和46年2月以降大幅な酸素富化による重油多量吹込み操業により、470~480 kg/t-p の低燃料比操業を持続していた。吹止め当月 (昭和46年5月) の平均コークス比 394 kg/t-p、重油比 83 kg/t-p の好成績であつた。

両高炉の解体調査時の炉内状況に最も密接な関係があると思われる、吹止め前3日間の操業実績および装入原料を Table 1, 2 に示す。

操業条件での両高炉の差異の目立つた点を列挙すれば炉頂圧、酸素添加量、水分 (季節の影響)、ore/coke、重油吹込量である。広畑1高炉は 900 g/cm² の高圧操業にもかかわらず P/V (送風圧力/送風量) が高目であり、これはこの炉の一代を通じての傾向であつた。洞岡4高炉は酸素添加を事情の許す限り強化したが、それでも羽口先理論燃焼温度は 2000°C に達しなかつた。銑鉄成分を見ると、前者の場合 Si は 0.8% 台であるのに比し後者は 0.5% 台であり、低燃料比操業の特色を示しているといえよう。装入原料面では、前者の塊成鉍比が約65% に対し、後者は約80% であつた。なお、後者の場合は70% の高焼結鉍比で造滓剤の石灰石、橄欖岩を添加

Table 1. Operating results of Hirohata No. 1 and Kukioka No. 4 blast furnaces during 3 days just before blow-down. (Hirohata No. 1 BF, blown down on July 23, 1970)

Data	Production (t/day)	Blast condition			ore / coke	Fuel		Metal			Slag		Top gas CO ₂ CO (%)					
		Volume (m ³ /min)	P/V	Temp. (°C)		Humid. (g/m ³)	O ₂ (%)	Top press. (g/cm ²)	C.R.	O.R.	F.R.	Si (10 ⁻² %)		S (10 ⁻³ %)	Mn (10 ⁻² %)	Vol. (kg/t-p)	CaO / SiO ₂	
July 20	2 593	1.84	2 300	0.96	981	30.9	0.96	900	511	36	547	65	34	66	261	1.14	19.0	23.7
21	2 580	1.83	2 300	0.93	954	32.0	0.96	900	504	37	541	85	37	61	287	1.15	19.1	23.6
22	3 289	2.34	2 300	0.90	941	32.0	0.96	900	471	31	502	80	38	62	265	1.12	19.2	23.4

Charge sequence CC↓ CO↓ OO↓

(Kukioka No. 4 BF, blown down on May 25, 1971)

Data	Production (t/day)	Blast condition			ore / coke	Fuel		Metal			Slag		Top gas CO ₂ CO (%)					
		Volume (m ³ /min)	P/V	Temp. (°C)		Humid. (g/m ³)	O ₂ (%)	Top press. (g/cm ²)	C.R.	O.R.	F.R.	Si (10 ⁻² %)		S (10 ⁻³ %)	Mn (10 ⁻² %)	Vol. (kg/t-p)	CaO / SiO ₂	
May 22	2 257	1.76	2 046	0.62	980	13.5	1.97	61	386	78	464	57	37	69	166	1.19	18.8	23.3
23	2 262	1.77	2 024	0.62	980	14.5	1.98	60	388	77	465	56	37	71	166	1.19	18.7	23.1
24	2 268	1.77	2 039	0.61	980	16.5	1.99	58	387	78	465	52	39	60	267	1.22	19.0	22.7

Charge sequence CC↓ CO↓ OO↓

していないので、原料面では前者より良好な条件であつたといえる。

4. 吹止め、冷却および解体調査方法

4.1 吹止めおよび冷却

東田5高炉、広畑1高炉、洞岡4高炉の各高炉とも通常の装入物を最後まで装入して吹き止めた。ガス抜き後炉頂数カ所より散水し炉内を急冷した。注水状況を Fig. 1 に示す。広畑1高炉の場合は炉底出鉄を行なつたが、洞岡4高炉では炉底に溶銑を多量に残存させたまま冷却したので、冷却所要時間は長く合計注水量も多い。注水開始後 10 時間足らずで、出銑口あるいは羽口から約 70~80°C の湯が排出されはじめ、30~40 時間で排水温度は 40°C 前後に低下した。

4.2 かき出し作業

各作業床ごとに幅 80 cm、高さ 1.2 m の穴を 2 カ所あけ、一方の穴には直径 1 m の鋼管製シュートを取付け、内容物を下方へ落し貨車に積込んだ。他の穴は作業者の出入口、採取試料の搬出口とした。かき出しは Fig. 2 に示すように、炉の直径を十文字に残し約 1~1.5 m 掘り下げ、2 方向の断面形状を観察測定した。次にこの十文字の部分をかき出し平らにした後、その表面に鉄板あるいはかますを敷き、周囲の煉瓦および付着物をくずして炉外に排出した。このように内容物のかき出しと煉瓦解体とを交互に繰り返して解体を進めた。

4.3 試料採取方法

4.3.1 通常試料の採取法

あらかじめレベルを定め(東田5高炉12レベル、広畑1高炉15レベル、洞岡4高炉18レベル)、各レベルごとに直径方向9等分し、各個所から鉍石、コークスをそれぞれ 100 kg ずつ採取した。採取要領は前述のように層の断面を出し、その側面を削り取るようにして行ない、その層の上下方向が均一に採取されるようにした。

4.3.2 コアサンプルの採取法

炉内各部における装入物の充填状態、通気性などを調べるために、直径 30 cm もしくは 40 cm、長さ 1.2 m~2.6 m のパイプを打ち込み、コアサンプルを採取した。(広畑1高炉 23 本、洞岡4高炉 33 本)パイプを打ち込んだ後周辺の装入物をかき出し、パイプの底に鉄板を溶接し、樹脂もしくはパラフィンを注入して試料を固めた。

Table 2. Burdens of Hirohata No. 1 and Kukioka No. 4 Blast furnaces during 3 days just before blow-down.

(Hirohata No. 1 BF)

	kg/charge	T.Fe(%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	Mn(%)
Sinter	18 900	54.32	5.75	1.80	11.56	0.95	0.60
Hamersley pellet	5 700	63.16	5.34	3.11	0.46	0.08	0.04
Hamersley lump ore	5 100	65.00	3.00	1.70	0.24	0.06	0.09
Blended lump ore	7 800	61.80	5.20	1.45	0.85	0.55	0.26
(sub-total)	37 500						
India Mn ore	400	20.50	7.00	4.48	1.30	0.16	33.04
Olivine	660	6.09	37.92	0.88	0.66	36.96	—
Lime stone	1 080	0.77	0.36	0.18	54.29	0.12	—
Coke	12 500	0.62	6.10	3.20	0.34	0.26	—

Sinter ratio : 50.4%

Pellet ratio : 15.2%

(Kukioka No. 4 BF)

	kg/charge	T.Fe(%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO(%)	MgO(%)	Mn(%)
Sinter (Kukioka DL)	13 000	56.68	5.91	2.20	10.86	0.20	0.33
Sinter (Tobata DL)	6 500	56.31	5.82	1.97	9.59	1.26	0.40
Kowa pellet	3 300	62.19	4.82	0.86	3.65	0.29	0.07
Swazealand lump ore	3 600	64.30	4.00	1.46	0.16	0.06	0.34
Hamersley lump ore	1 000	65.50	2.40	0.08	0.14	0.08	0.06
South Africa mixed lump ore	1 000	67.20	1.88	1.09	0.06	0.03	0.05
(Sub-total)	28 400						
Mill scale	300	73.89	9.46	1.03	1.20	0.13	0.56
Africa Mn ore	150	21.02	6.04	6.13	1.18	0.25	31.80
Coke	7 200	0.65	5.00	2.83	0.51	0.18	—

Sinter ratio : 68.7%

Pellet ratio : 11.6%

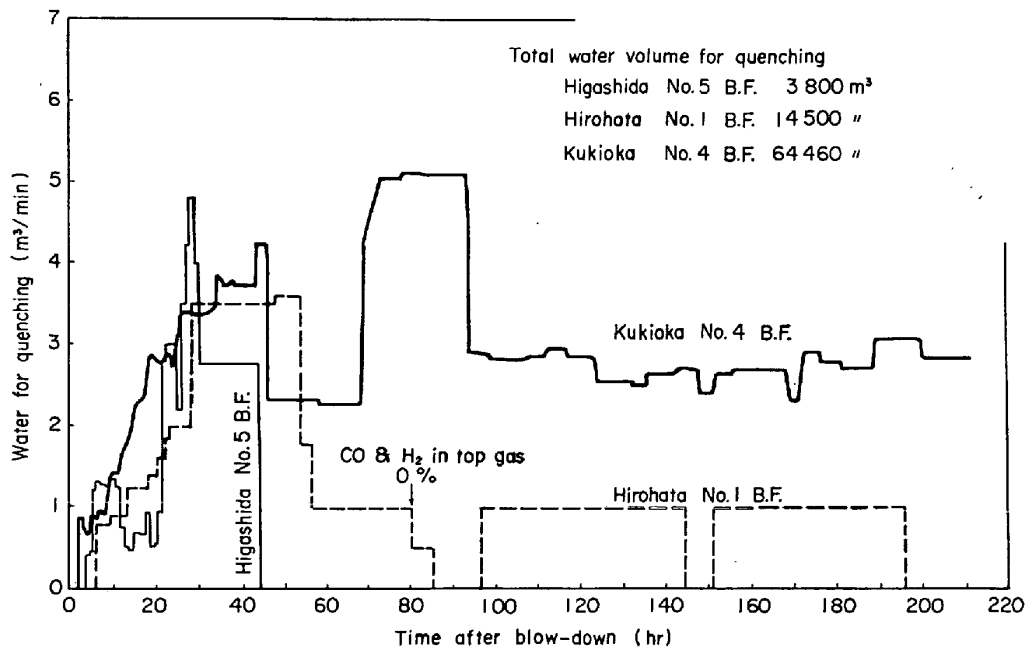


Fig. 1. Quenching condition of blast furnaces with water.

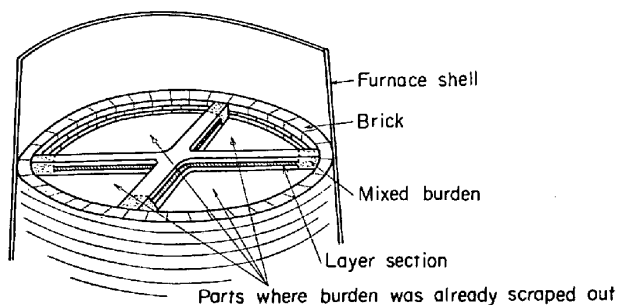


Fig. 2. Method of scraping out the burden. (Kukioka No. 4 B.F.)

4.3.3 炉床部の試料採取法

前述のコアサンプルのうち一部は炉床部より採取したが、このほかに Fig. 3 に示すような幅 1.8m 高さ 2 m の原形観察用試料を採取した。羽口前試料は Fig. 3 のように 20 cm 立方あるいは 40 cm 立方に区分して全量採取した。採取にあたってはその部分の縦断面を出し、棒鋼で作った枠に沿って側面からかき取るようにして行なった。

4.3.4 炉底ボーリング

炉底出鉄を行なわなかつた東田 5 高炉、洞岡 4 高炉においては、炉底にたまった銑滓の状態を調査するため、垂直および水平方向にボーリングを行ない、直径 70 mm 長さ 2~3m の円柱状のサンプルを採取した。(洞岡 4 高炉：垂直方向 17, 水平方向 3, 斜方向 1)

の鉱石受け金物が脱落したときの炉況変動の原因が、上述の一連の調査検討によりはじめて明確になり、その現象に応じた適切な処置をとることが可能になった。塊状帯の鉱石類のうち、焼結鉱は還元粉化に起因する粒度低下が激しく、塊鉱石もかなり粉化していた。これに反しペレットはシャフト上部で顕著な強度低下はみられるものの、ほとんど粒度変化を起こしていない。広畑 1 高炉と洞岡 4 高炉の両者を比較すると、前者では炉径方

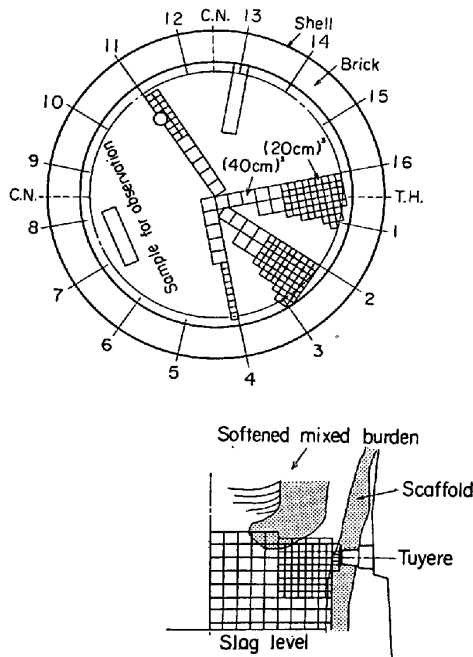


Fig. 3. Sampling in front of tuyere.

5. 炉内状況概観

5.1 装入物の降下状況

高炉内における装入物の降下状況は、炉壁の侵蝕状態や、付着物の状態によって細かい点では異なる。しかしどの高炉にも共通していえることは、鉱石が溶け落ちるまでは鉱石層とコークス層が明確に保たれており、層数を数えることもできることである。装入物が炉内を降下するにつれて、その層厚は薄くなり傾斜はフラットになってくる。Fig. 4 に 1 例として洞岡 4 高炉の装入物降下状況を示した。

洞岡 4 高炉の炉壁部には鉱石とコークスの混合層が存在しており、その厚さは炉頂部で 30~50 cm であつたものが降下につれて広がり、朝顔部では 2 m にもなつている部分があつた。この原因について縮尺 1/20 の二次元模型実験により種々検討した結果、Photo. 1(a)および(b)に示すように、炉頂の鉱石受け金物が脱落している場合にこのような混合層が形成されることがわかつた。この混合層は通気性が良かったため、炉内の融着層分布が後述のように W 字型となつたものと考えられた。炉頂

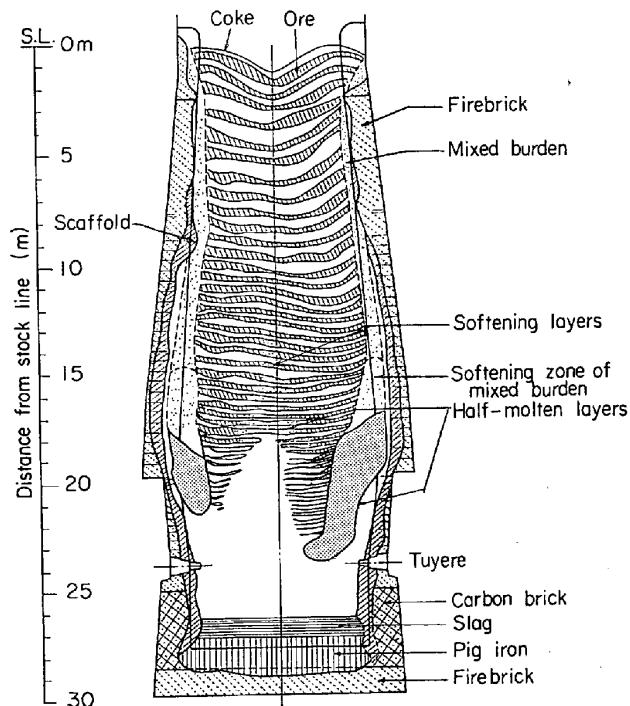


Fig. 4. State of burdens in Kukioka No. 4 B.F..

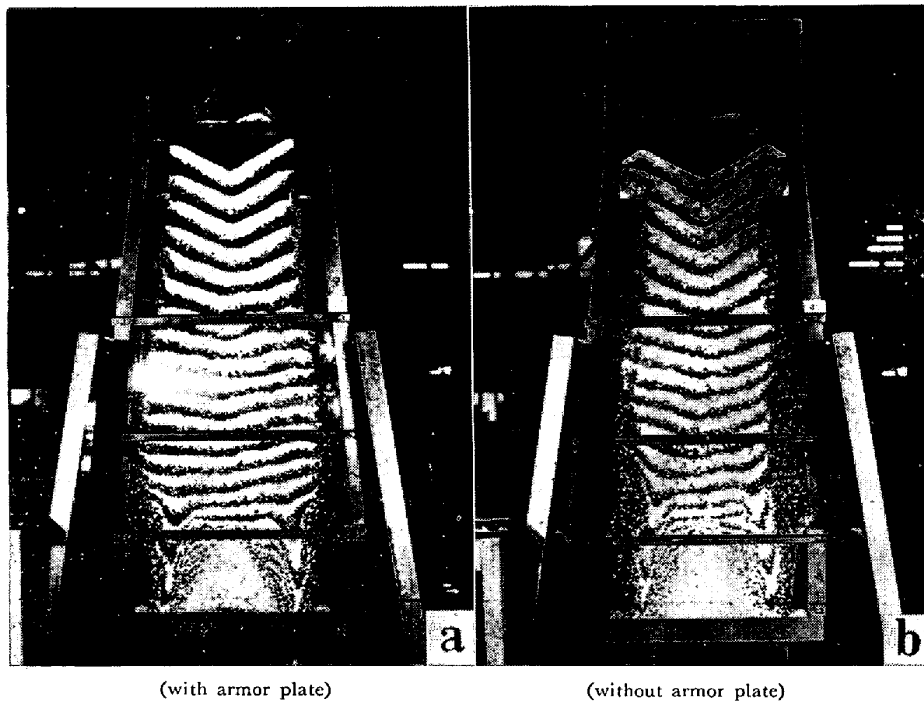


Photo. 1. Model test of burden descent.

向の粒度変化が大きく後者では比較的小さい。(第2報⁴⁾ Fig. 5 参照) これは後述の温度分布ひいてはガス流れ分布が、融着層分布形状に対応して異なっていたことによるものである。

また塊状帯における鉱石類の還元率は、注水冷却による再酸化を考慮しても全般的に低く、融着帯に近い高温部で急激に上昇している。したがって還元率分布は融着層のそれに対応した形状を呈していた。(第2報⁴⁾ Fig. 11, 12 参照)

5.2 融着層分布

装入物は炉内を降下し還元、軟化、溶融、滴下して炉床に銑鉄およびスラグとしてたまるが、この軟化開始から滴下開始までの温度域に存在する鉱石層は融着層を形成する。したがってその性状は鉱石類が相互に軽く付着しているものから、メタルスラグがおのおの凝集しながら分離はじめている半溶融状態のものまで、連続的に変化している。この融着層が炉内の温度分布に対応し整然と分布し、その分布状況や炉内における位置が高炉の操業状況により異なるという事実は、今回の一連の解体調査の最大の収穫であったといつても過言ではあるまい。Fig. 5 に東田5高炉、広畑1高炉、洞岡4高炉の融着層分布を示す。

東田5高炉解体調査において、はじめて融着層の存在を知つたのであるが、何分にもはじめての経験であり、その分布状況調査の精度は他の二者のそれにくらべれば著しく劣る。また東田5高炉は吹止めの約1週間前から

羽口破損が頻発し、炉況不安定であった。そのためか融着層分布は不規則な形状を示している。

広畑1高炉の場合には、融着層の生成は装入レベルより約4m下のシャフト上部炉中心ですでに始まり、3番目以下の融着層は中心部が溶落ちてドーナツ状の形態となつている。以下層の降下にしたがって溶け落ち部分が拡大し、また融着部分の幅も広がり朝顔部ではほぼ炉壁に到着しており、羽口直上部で全部溶落ちて消失している。融着層の厚みは上部で400~500mm、最下レベルに近いところでは70~100mmであった。このように鉱石層は降下にしたがって炉中心部より溶落ちて行くので、溶融ゾーンの形は融着層の内縁を結んだ円錐形であり、炉の縦断面で見れば切り立つた逆V型であった。

一方洞岡4高炉では、炉中心部の融着層生成は装入ライン下12.5mのシャフト下部で始まつており、広畑1高炉にくらべるとかなり低い。さらに前述のように、炉壁部に鉱石とコークスの混合層が形成されていたため、シャフト下部以下の炉周部にはつきりした層状を示さない混合層融着帯が発達し、全体としてはW型の融着帯となつていた。なお、洞岡4高炉の融着層厚さは広畑1高炉のそれにくらべて薄かつたが、これは1チャージあたりの鉱石量の差に基づくものである。

以上両高炉の解体調査結果から、高炉の融着層分布形状として、逆V型およびW型の両者が存在することが判明したが、さらにソ連のMURAV'EVらの調査結果³⁾、日本鋼管川崎4高炉の調査結果⁵⁾は融着層のV型分布を示

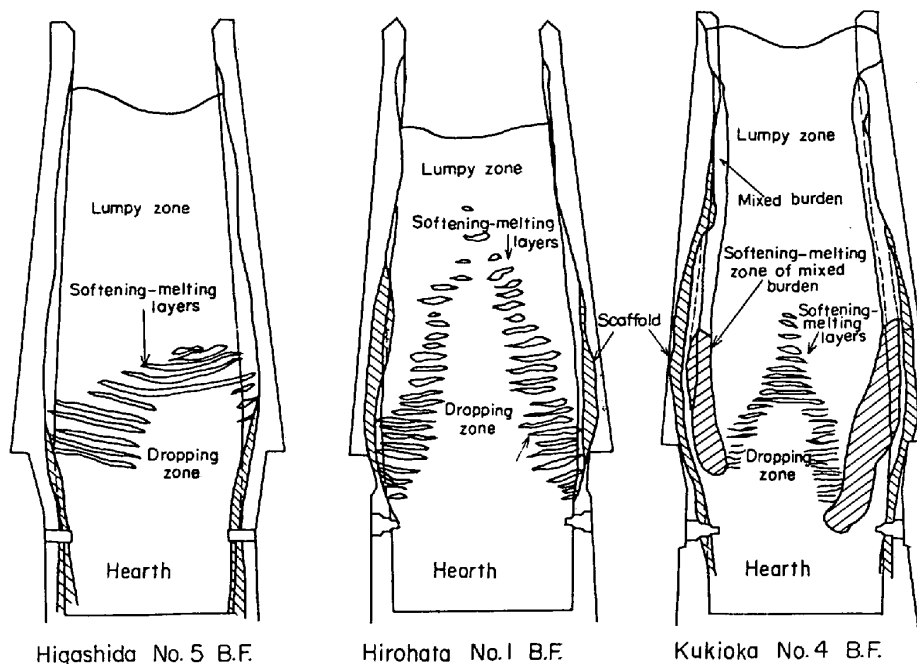


Fig. 5. Distribution of softening-melting layers in blast furnaces.

峻するものであり、融着層分布と高炉操業との関連は、今後さらに追求すべき重要な研究課題であろう。

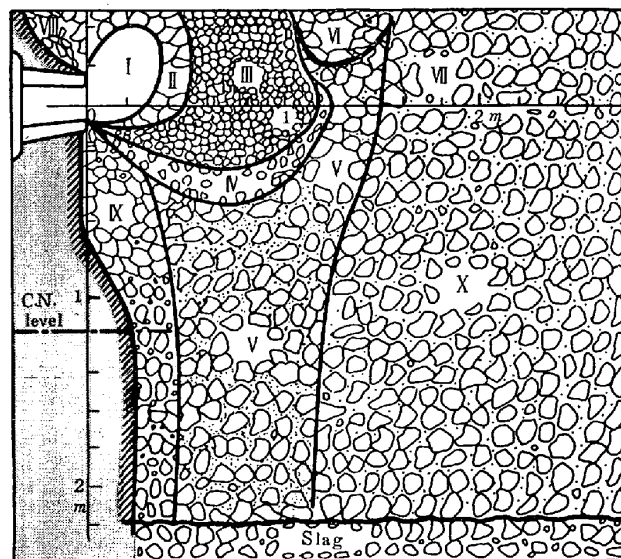
なお、融着層の生成、溶落ちについては第3報⁶⁾で詳細に報告するが、その生成温度は1100°C近辺、溶落ち温度は1400~1500°Cである。溶落ちの際のメタル中のSiはほとんどなく、Cは1%程度以下、Sは0.1%以下であった。溶落ちスラグのCaO/SiO₂は造滓剤(石灰石、橄欖岩)を除く鉍石類原料の平均値とほぼ等しい。また、FeOは融着層内部ではかなり高い値を示す部分もあるが、溶落ちに際しては数%以下となっていた。

5.3 羽口先の状況

広畑1高炉吹止めに際しては炉底出鉄を行なつたため十分な羽口先の状況調査を行なえなかつた。それゆえ洞岡4高炉の場合は、炉底出鉄のみならず最終出鉄も行わないで吹止め、羽口先状況の保存に努めた。

羽口先の炉内状況は羽口ごとにかなり差がある。Fig. 6に羽口先の垂直断面を、またFig. 7に水平断面を示した。一般的にいえば、羽口先の空洞部分の周囲に粗粒コークスが存在し、その先に円みを帯びた小粒化したコークスがある。小粒コークスの前方および下方には、レースウェイで発生したと判断される-5mmの粉コークスとスラグおよび鉄粒から成る空隙率の小さい部分が存在し、その部分から離れた中心部に行くにしたがつて粉コークスはなくなり、大塊コークスのみになる。操業中の炉芯テストの結果から判断すると、上記の小粒コークスの存在している部分まで、すなわちFig. 6のI、IIおよびIIIが操業中のレースウェイの範囲であつたと考え

られ、羽口直前の粗粒コークスは吹止めに際して上部からレースウェイ内に崩れ落ちてきたものの、小粒コークスはレースウェイ内で流動していたものと見られる。以上の結果は、GREUELら⁷⁾が羽口からEndoscopeを用



- I : Cavity
- II : Large brown roundish coke
- III : Small brown roundish coke
- IV : Dark dense layer (mixture of graphite, metal, slag and small coke)
- V : Large coke & fine coke (-5mm)
- VI : Dark angular large coke, metal and slag drops
- VII : Large brown coke
- VIII : Dark small coke, metal and slag drops
- IX : Brown middle size coke impregnated with slag
- X : Brown and dark large coke

Fig. 6. Vertical section in front of tuyere. (Kukioka No. 4B.F.)

いて観察したレースウェイ内状況とよく対応する。
 また、レースウェイ前面の粉コークス密充填部の存在は、羽田野ら⁸⁾ や著者ら⁹⁾ の行なつたコークス燃焼モデル実験でも認められ、その大小はコークス品質と関連し、炉下部のガス流れに大きな影響を与える因子として注目される。

炉の水平断面で見ると、隣接羽口のレースウェイは互につながっていないが、その間には粗粒コークスが存在している場合などがあり、一様ではない。

なお、コークスの炉内での性状変化については第4報¹⁰⁾で詳細に報告する。

5.4 湯溜り部の状況

炉底出鉄を行なわなかつた東田5高炉と洞岡4高炉では、スラグ・レベルまで内容物をかき出したのち、その下部を垂直および水平方向にボーリングして直径的 70 mm のコアサンプルを採取し、湯溜り部の状況を調査した。

炉床コークスはいずれの場合も下に凸の形状を呈していたが、東田5高炉では全面的に溶銑中に浮いていた(Fig. 8 (a))。これに反し洞岡4高炉では、北側の部分はかなり溶銑中に浮いており、南側の部分もわずかに浮いていたが、その中間の部分は炉底煉瓦と完全に接触していた(Fig. 8 (b))。炉床コークスの状態は、炉底の深さ、装入物 ore/coke や融着層の位置形状に基づく炉床部への荷重の大小などいろいろな因子に支配されるものと考えられるが、安定な出鉄率、炉底侵蝕とも関連し、今後さらに検討を要する問題である。なお、溶銑中に浸漬している炉床コークスの空隙率は 47~55% であつた。

炉床に溜つたスラグの成分は場所によりそれほど変化はないが、溶銑中の C, S, Si, Ti は炉底部付近でかなり高くなつていた。特に炉底周辺部には高融点のTiNが析出していた。

6. 温度分布

6.1 炉内温度分布調査方法

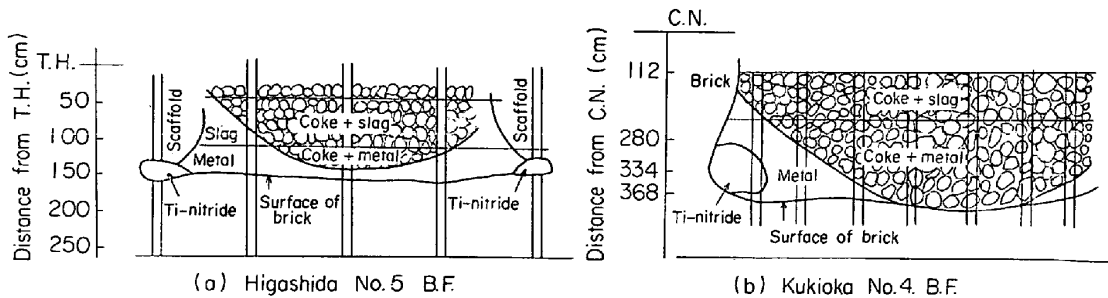
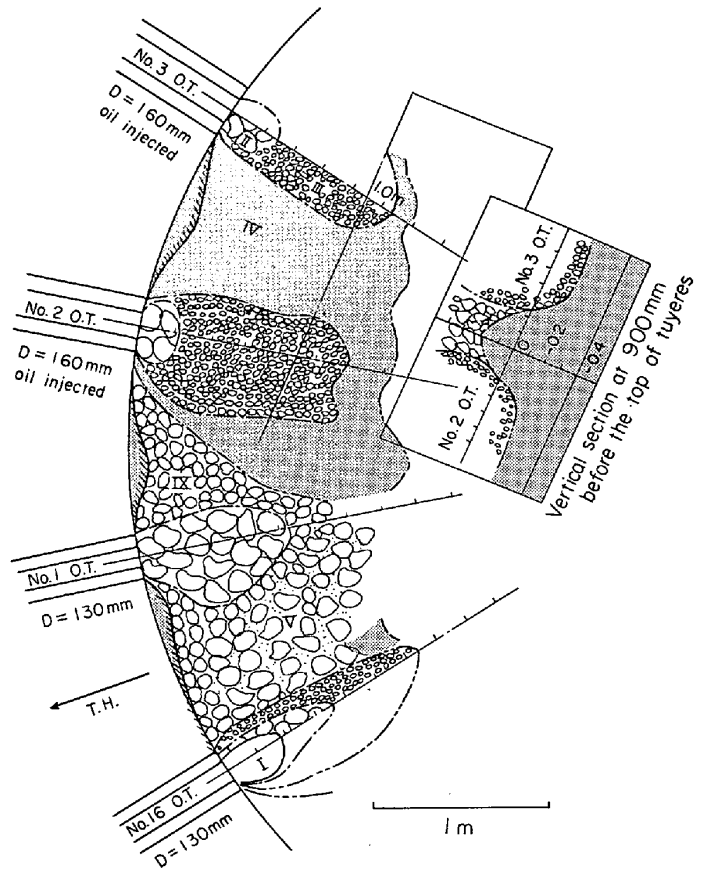


Fig. 8. Vertical section of blast furnace bottom.



I, II ----- Same to Fig 6

Fig. 7. Horizontal section at tuyere level. (Kukioka No. 4 B.F.)

広畑1高炉、洞岡4高炉の両者に共通の方法として、テンピルペレット法とコークス黒鉛化度測定法とが採用され、さらに洞岡4高炉の場合には鉍石類の融着度による推定法も併用して、総合的な判定が行なわれた。以下各方法につき略述し、その得失および問題点にも言及する。

6.1.1 テンピルペレット法

種々の所定温度で溶融する物質の錠剤(テンピルペレット)を、Photo. 2のように10~12個黒鉛製ネジ蓋付きのカプセルに収納し、吹止め前に時間間隔をおいて炉頂より装入して、解体後炉内より回収、調査する方法で

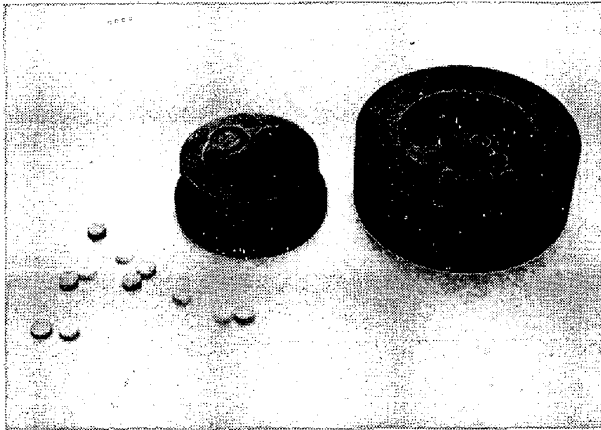


Photo. 2. Tempil pellets and graphite capsule.

ある。使用したテンピルペレットは融点 200~1600°C の範囲の約 20 種類から選んだ。この方法の最大の問題点は、カプセルを装入物と一緒に炉頂から装入するため、任意の位置の温度が必ずしも得られないことである。また、1400°C 以上の高温では雰囲気の影響による誤差が大きくなり、さらに注水冷却時にカプセル中に水が侵入した場合には、水による溶出と溶融とを誤認するおそれがある点も注意を要する。

6.1.2 コークス黒鉛化度法

コークスは加熱により黒鉛化が進行し、その度合はおもに加熱保持温度により支配されるので、炉内コークスの黒鉛化度を測定しその温度を推定する方法である。黒鉛化度測定の手段として、X線回折による(002)面間隔ピークの半価幅測定による方法と、電気伝導度測定による方法との両者が採用された。すなわち、あらかじめ装入コークスを熱処理した標準サンプルによる検量線を作成し、それと炉内コークスでの測定値とを対比して温度を求めた。洞岡4高炉の場合の検量線をFig. 9に示す。この方法によれば炉内任意の位置の温度を知ることが可能であるが、コークスは乾留に際してすでに1200°C付近まで加熱されているので、それ以下の温度推定には原理的に利用できない。また、保持時間が短いと低目に出るおそれがあり、雰囲気、溶銑滓によるアタックの影響もあるので、温度の絶対値の精度に関しては若干の問題点がある。なお電気伝導度で推定する場合には、コークス中に含まれる銑滓などの介在物による誤差も生ずる。

6.1.3 鉱石類の融着度による推定

炉内温度分布推定には前記の2方法が主体となつたがテンピルペレットでは任意の位置の温度が得られず、コークス黒鉛化度法では1200°C以上の温度にしか適用されない。そのため900~1200°Cの範囲の温度分布推定の手段として、洞岡4高炉調査に際しては、装入鉱石類を炉内と類似の荷重還元条件で昇温、還元し、各温度に

おける融着試料を得、冷却後タンブラー試験を行ない、Fig. 10の検量線を求めた。実際の炉内融着層試料を同一条件でタンブラー試験を行ないその強度値から Fig. 10により温度を推定した。この方法も荷重還元条件を炉内各部分と一致させることは困難であり、一応の目安と考えるべきものであろう。

6.2 洞岡4高炉、広畑1高炉の推定温度分布

以上の諸方法での測定値を総合して、洞岡4高炉の炉内温度分布を推定したものが Fig. 11-a である。また広畑1高炉のテンピルペレットとコークス黒鉛化度からの推定温度分布が Fig. 11-b である。両高炉とも温度プロフィールでは融着層プロフィールとよく一致している。広畑1高炉の中心部では急激に温度が上り融着状態に達

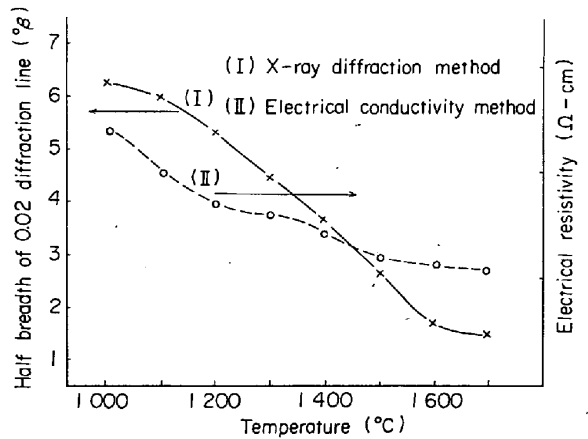


Fig. 9. Calibration curve for temperature estimation by measuring the graphitization of coke.

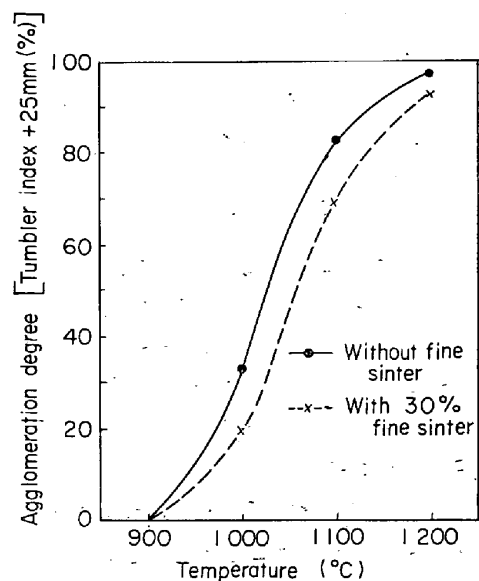


Fig. 10. Calibration curve for temperature estimation by measuring the agglomeration degree of burdens.

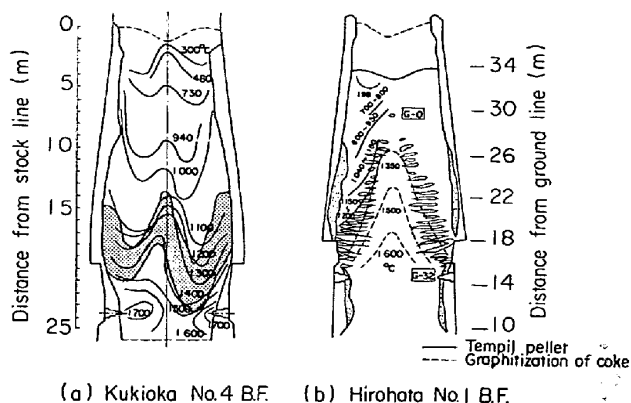


Fig. 11. Estimated temperature distributions in blast furnaces. (Based on the measurements with tempil pellets, graphitization of coke, and agglomeration degree of burdens)

しているが、両高炉を通じて全般的に眺めると、700°C付近までは比較的急に上昇しその後1100°C付近まではゆるやかに昇り、融着層近傍で再び急激に上昇している。

高炉の垂直方向の温度分布に関し、FeO から M・Fe への還元反応の発熱とカーボンソリューションロス反応の吸熱とが相殺するため、“Thermal reserve zone”といわれる均一な温度帯が存在すると従来よりされている。熱流比の小さい試験高炉の結果¹⁴⁾では、1000~1100°C の間に典型的な Reserve zone が認められる。この両高炉の場合も 700~1100°C の間の温度勾配は小さく特に広畑1高炉の炉周部および洞岡4高炉の中間部で顕著である。しかしこれらの部分では還元の進行が少なく、上記の機構による Thermal reserve zone であるかどうかは疑わしい。これらの部分は後述のように塊状帯でのガス流速が比較的低く、したがって熱流比が大きい部分であるので、ガス-固体間の温度差の小さい向流熱交換帯の特性を示していると解釈する方が妥当であろう。

7. ガス流れ分布

7.1 コアサンプルによる流速分布の推定

炉内のガス流れ分布は、前記の融着層分布、温度分布に加えて、第2報⁴⁾で詳述する還元率分布、およびガスにより運ばれる元素 (S, アルカリ, Zn) の分布から推定される。これらの推定を裏付けるため、解体の際炉内より採取したコアサンプル (4.3.2) を用いて、炉内各位置における通気抵抗係数 (垂直方向の) を求め、その結果と炉内温度分布および推定ガス組成から、炉内の垂直方向のガス流速分布を算出した。

採取したコアサンプルに空気を流し、その時に生ずる圧力損失と空塔速度の関係から、通気抵抗係数を求め

た。空塔速度 (U_0) と圧力損失 ($\Delta P/\Delta L$) とは、空塔速度が 0.5~0.6m/sec 以上であれば、通常の充填層と同様に下記の関係が成立した。

$$\Delta P/\Delta L = KU_0^{1.64} \dots\dots\dots (1)$$

K は流体の物性、装入物の粒度・形状によりきまる通気抵抗係数である。この関係から各コアサンプルについて通気抵抗係数を求めた。

(1) 式の関係が炉内任意の位置で成立するとすれば、各位置での流速は次式で示すことができる。

$$U_{T_{ji}} = \{(\Delta P/\Delta L)_{T_{ji}} \cdot (1/K_{ji})\}^{0.61} \dots\dots\dots (2)$$

K_{ji} も実際には温度により変化するが、ここでは無視できるものとした。この式で $(\Delta P/\Delta L)_{T_{ji}}$ が炉径方向で一定であるという条件が成立すれば、次式より $(\Delta P/\Delta L)_{T_{ji}}$ の値を知ることができ、(2) 式により各位置での流速 $U_{T_{ji}}$ が計算される。

$$(\Delta P/\Delta L)_{T_{ji}} = \left[\frac{(\bar{T}_j + 273)/273 \cdot \{1/(1+P_j)\} \cdot \bar{U}_{0j} \cdot Z_j}{\sum_i \{Z_{ji} \cdot (1/K_{ji})^{0.61}\}} \right]^{1.64} \dots\dots (3)$$

なお、この計算では次の条件を満足するまで繰返し計算を行なった。

- (1) \bar{T}_j (シャフト上部熱収支式よりの) = \bar{T}_j (炉内温度分布推定値よりの)
- (2) $Q_0 = \sum_i \{Z_{ji} \cdot Z_{0ji}\}$

数式記号：

- P : 静圧 [kg/m²]
- Z : 層断面積 [m²]
- ΔL : 層厚 [m]
- T : ガス温度 [°C]
- U : 空塔ガス速度 [m/sec]
- Q : 炉内ガス流量 [Nm³/sec]
- K : 通気抵抗係数

添字

- i : 炉半径方向の位置
- T : 炉内温度での値
- j : 炉高方向の位置
- 0 : 標準状態での値

以上の計算結果から得た炉内ガス流速分布を Fig. 12 に示す。シャフト下部について見ると、中心部のガス流速は 7~9m/sec と速いが、融着層近辺では 2~4m/sec と遅くなっている。シャフト上部ではガス温度が低下するため、ガス流速は全般的に低くなっており、中心部と炉周部のガス流速は中間部より速い。広畑1高炉、洞岡4高炉の両者を比較して見ると、前者の場合は中心流速が速く、後者では周辺流速が速いことが眼につく。この測定に関し、注水冷却過程での装入物の収縮、滴下帯における溶融物の不在、パイプ打込みの影響など通気抵抗係数の決定に関し問題点は多々あり、またガスのクロスフローは無視して垂直上昇流のみとした計算方法にも問

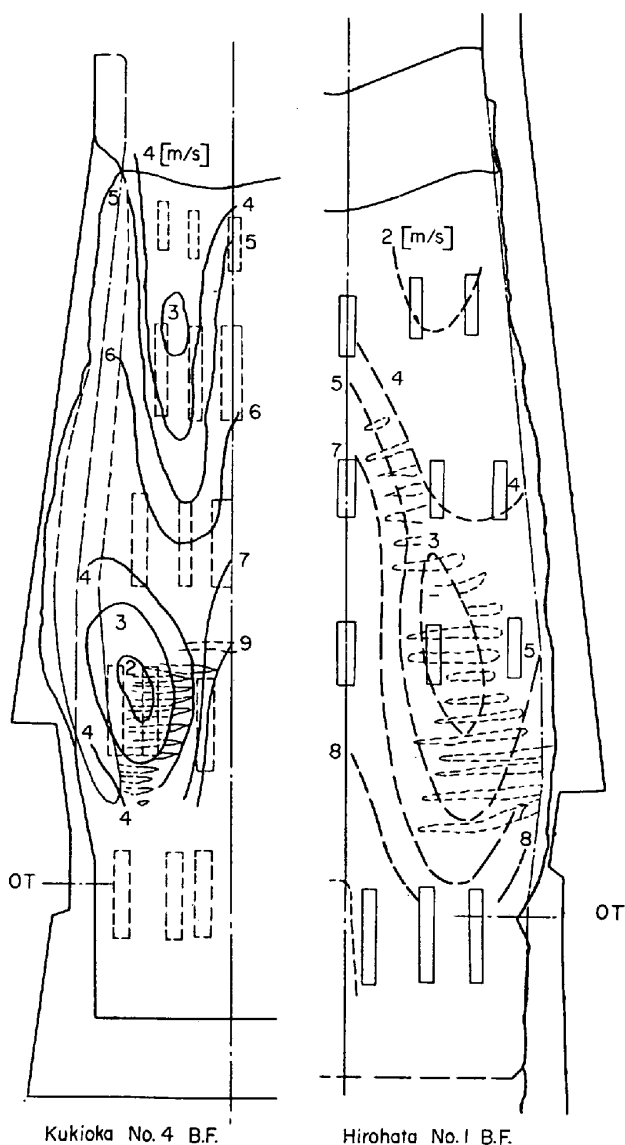


Fig. 12. Calculated gas velocity distribution in the blast furnaces.

題はあるが、相対的なガス流分布は良く表現されていると思われる。

7.2 ガス流れ分布と高炉操業

解体調査結果と対応する操業データとして、広畑、洞岡両高炉の吹止め直前の炉頂ガス温度およびCOガス利用率 η_{CO} の分布を Fig. 13 に示す。両者とも Fig. 12 の炉内ガス流速推定分布とよく対応している。広畑1高炉は全体として中心流発達型であるが、中間部で炉頂ガス温度が低く、炉周部で再び上つている。これは第2報で述べる還元率分布、気化成分分布(第2報⁴⁾ Fig. 11, 14参照)からも推定される。一方洞岡4高炉の炉頂ガス分布は相対的にフラットであるが、炉径方向の断面積比を考慮すれば、周辺流型といえる。

両高炉の炉頂ガス分布に影響する操業因子として、

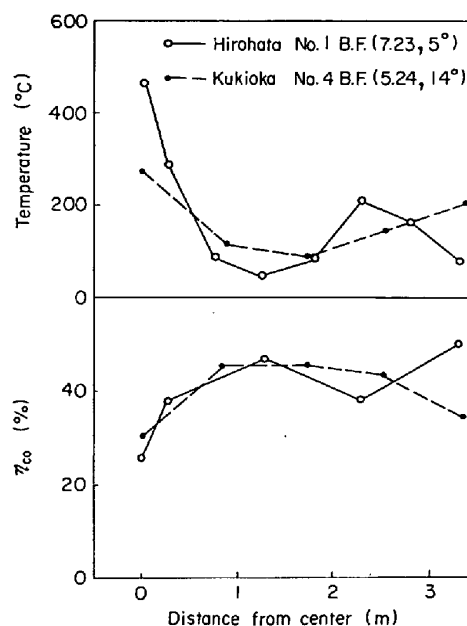


Fig. 13. Temperature and η_{CO} distribution at the top of blast furnace.

(1) 装入シーケンス、(2) ore/coke 比、(3) コークスペースが挙げられる。

(1) 装入シーケンス：広畑はCC↓CO↓OO、洞岡はCC↓OO↓の装入方式が採用されていた。広畑のCO↓の混合装入は中心部にコークスを流れこませ、かつ粗粒を偏析させる傾向があるため、中心流を発達させる方式であつた。

(2) ore/coke 比：広畑は約 3.0、洞岡は約 4.0 であつた。一般に ore/coke 比の上昇により鉱石層厚は大きくなるが、同時に鉱石の傾斜角がコークスより小さいため、中心部の鉱石層厚が特に増大する。これは洞岡4高炉の周辺流が助長される条件の一つであろう。

(3) コークスペース：広畑は 12.5 t、洞岡は 7.2 t で、炉容を考慮しても広畑の方が平均コークス層厚は大きかつた。一般にコークスペースを増すと、炉径方向の ore/coke 比の均一化の傾向が認められ、コークスペースの差が両高炉のガス流れ分布の問題に直接的な影響を与えたとは考え難い。

以上両高炉の操業因子について考察したが、洞岡4高炉の炉壁部の混合層の影響が、それに加えてさらに大きかつたといえよう。

8. 考 察

以上述べた一連の高炉解体調査の結果を集約して、著者らは高炉の各部分の機能につき次のように考えている。高炉の炉内は融着帯を境にして、上と下は画然とした差がある。すなわち、上部では固相と気相のみが存在

し、下部では固-液-気の3相が共存し、しかも固相はコークスのみである。融着層の状況を見ると、中心部から鉱石が溶け落ちているにもかかわらず、中心側が陥没している様子がない。このことは滴下帯コークスの充填状況は比較的ルーズであり、この部分の通気性、通液性の良好なことを示している。

模型的な表現をすれば融着層はガスの分配板で、レースウェイで発生したガスは通気性良好な滴下帯コークス層を上昇し、融着層間のコークススリットを通り抜けて塊状帯に入る。塊状帯では、装入時の ore/coke 比分布、炉内での鉱石粉化などによる横断面の通気抵抗分布に支配された流速分布をもつて上昇し、炉頂から排出される。炉全体の圧力損失を考えると、融着層を通過するところがかなり大きな割合を占めると見られる。それゆえ広畑1高炉のようなシャフト上部から羽口直上部まで融着層が広く逆V型に分布している状態では、コークススリットの総断面積は大きくなり、通気の面からは有利な形といえる。このような形では炉中心部の η_{co} は低くなり、高出鉄比は期待できるが燃料比は高目となる。これに対し、洞岡4高炉のように融着層が炉下部に分布している場合には、 η_{co} は全般的に向上し低燃料比型であるが、通気性の面ではやや不利である。ここでは融着層をガスの透過しない一種のルーバーとみなしたが、実際には内側の半溶融部から周辺の塊状部まで、0から連続的に通気性が増している。それゆえ、荷重還元軟化特性の劣る装入物の場合には、通気抵抗の高い部分の幅が相対的に広くなり、大きな圧損を与えることとなる。

熱の面から見れば、羽口前で生成された高温ガスは最下部の融着層の溶解にかなり多量の熱を与え、ついで逐次上方の融着層先端部を溶かしながらコークススリットを抜けて行く。滴下帯における温度低下は比較的少なく、融着層を通過するあたりで急激に温度が下る。これはこの付近で還元反応と併行してカーボンソリーションロス反応が盛んに進行していることを示している。滴下帯コークスの持つている顕熱量が、高炉の熱的余裕をあらわすものと考えられるので、広畑1高炉の場合は滴下帯の占める容積割合が大きく、したがって熱余裕の大きな操業であり、洞岡4高炉のような低燃料比操業では熱余裕は小さい。

反応面の検討に関しては、注水冷却時の再酸化、吹止め後の反応進行(例えばSi還元)、滴下物試料の位置に対する信頼性など、解体調査に不可避の問題点があり、断定的なことは言えない。しかし得られた情報を総括すると、鉱石類の還元は塊状帯上中部では比較的緩慢であり、融着層およびその近傍に達して急激に進行する。Si

還元は融着層までは起らず、滴下後羽口まででほぼ完結している模様で、また溶銑の脱硫も大部分羽口までで行なわれているようである。

融着層が高炉において重要な役割を担っていることは、以上の記述から明らかであり、その位置、分布形状を支配する主要な因子はもちろん装入物の ore/coke 比、炉頂分布であろうが、羽口前燃焼状況も大きな影響を有するはずである。すなわち、レースウェイの深さ、形状が下部融着層の位置や形を左右する因子であろう。最適融着層分布は操業方針により当然異なるべきであり、それに対応した炉頂と羽口からの制御技術の発展が、今後大いに期待される。

9. 結 言

実用高炉の解体調査の結果、炉内状況に関してかなり広汎な知識を得ることができた。しかしこの調査はあくまでも死体解剖であり、生体内で行なわれている反応の解明には、解体調査の限界を感じざるを得なかつた。この面の研究は別の手法で果たさるべきであろう。今回の一連の解体調査の最大の収穫は、炉内に融着層が整然と存在することであり、その位置、分布が操業状況により大幅に異なることは、操業のむずかしさを改めて認識させるものであつた。高炉がブラックボックスであつた過去に比べれば格段の進歩であると思うが、時々刻々の炉内状況を検知する方法はまだ不十分であり、またそれに即応する操業技術の確立も将来の問題であろう。その意味で著者らのこれらの一連の解体調査報告が、製鉄技術発展の一助となれば幸甚と存ずる次第である。

文 献

- 1) 新日鉄八幡技研: 学振 54 委, 1176 (1970)
- 2) K. KODAMA and S. HASHIMOTO: Proc. ICSTIS (Tokyo, Sept. 7~11, 1970), Part 1, p. 112
- 3) V. M. MURAV'EV, N. I. EFGONOVA, I. D. BALON, I. Z. BUKLAN, and N. M. MISHCHENKO: Stal in Eng., (1970), p. 591
- 4) 下村, 西川, 有野, 片山, 肥田, 磯山: 鉄と鋼, 62(1976), p. 547
- 5) 梶川, 隅田, 吉越, 福島, 鴨志田, 福山: 鉄と鋼, 59(1973), A81
- 6) 佐々木, 奥野, 斧, 鈴木, 吉沢, 中村: 鉄と鋼, 62(1976), p. 559
- 7) M. GREUEL, F. W. HILLENHÜTTER, H. KISTER, and B. KRÜGER: Stahl u. Eisen, 94 (1974), p. 533
- 8) 赤松, 羽田野, 福田, 竹内: 学振 54 委, 1332 (1974)
- 9) 近藤, 中村, 杉山, 鶉野: 鉄と鋼, 61(1975), A5
- 10) 小島, 西, 山口, 仲摩: 鉄と鋼, 62(1976), p. 570
- 11) 安藤, 福島: 鉄と鋼, 57(1971), S 661