

千葉 1 高炉の解体調査結果

Report on the Dissection of Chiba No. 1 Blast Furnace

橋 爪 繁 幸*
Shigeyuki Hashizume高 橋 洋 光**
Hiromitsu Takahashi奥 村 和 男***
Kazuo Okumura富 田 貞 雄****
Sadao Tomita小 板 橋 寿 光*****
Toshimitsu Koitabashi小 西 行 雄*****
Yukio Konishi近 藤 幹 夫*****
Mikio Kondo森 岡 恭 昭*****
Yasuaki Morioka

Synopsis:

Chiba No. 1 B.F., with the inner volume of 966 m³, of Kawasaki Steel Corp. was blown down on 15th Feb., 1977 and dissected after quenching with water, aiming at: (1) Correct understanding of the phenomena in the blast furnace through the observation of the state of the burden descent, the softening-melting layers and the race-way; (2) Reevaluation of the quality control of the burden materials through the investigation of the change of properties of ore and coke in the blast furnace; (3) Obtaining information useful for furnace operation, particularly through the investigation of the formation and the melt-down process of softening-melting layers, developing the technique for controlling the shape of softening-melting layers.

In this paper, state of charged materials, burden descent, temperature distribution, and change of coke and ore properties in the blast furnace, especially separation of metal and slag, sulfur distribution, and change of permeability and porosity at softening-melting layers, are described.

1. 緒 言

稼動中の高炉を操業状態のまま急冷し炉内を観察する。いわゆる解体調査は、昭和43年八幡製鉄(株)東田5高炉で行われてからすでに10年以上を経過しているが、当社でも、今回千葉製鉄所第1高炉において解体調査の機会を得ることができた。すでに鉄鋼各社での解体調査結果が報告されて

おり多くの結果が判明しているが、千葉1高炉の解体調査においては、まず第1に高炉炉内状況および装入物の状態の目視観察を行い高炉内での現象を把握すること、第2に一般の鉱石類、コークスの性状とその変化をより詳細に求め、高炉装入原料の評価および見直しを行うこと、第3に最近話題の多い高炉融着帯に関してその生成および溶解機構を解明し、融着帯形状制御技術へのアプローチを行うこと、などをおもな目的とした。

* 千葉製鉄所製鉄部製鉄技術室主査(課長待遇)
... 千葉製鉄所製鉄部製鉄課掛長
..... 技術研究所製鉄研究室
..... 技術研究所製鉄研究室主任研究員・主博
〔昭和54年3月12日原稿受付〕

** 千葉製鉄所製鉄部製鉄課課長
**** 千葉製鉄所製鉄部製鉄技術室
***** 技術研究所製鉄研究室主任研究員

ここでは、炉内装入物分布状況、温度分布、レースウェイなど羽口付近の状況、鉱石、コークスの性状変化および融着帯での鉄滓分離状況、スラグ、メタル成分とSの変化、気孔率と通気抵抗の変化、についての調査結果を報告する。

2. 調査方法

2.1 吹卸し方法

千葉1高炉(3次)は炉容積 966m^3 であり、操業期間は昭和44年8月6日から52年2月15日までの7年6箇月であった。累計出鉄量436万t、平均出鉄比 $1.64\text{t/m}^3\cdot\text{d}$ であり後半は鋳物鉄吹製用の操業を行った。

吹卸し前2日間の操業状況は、送風量 $1420\text{Nm}^3/\text{min}$ 、 O_2 $1000\text{Nm}^3/\text{h}$ で通気性は安定し、装入物降下は順調であった。装入原料構成は、焼結鉱79.1%、ペレット5.2%、整粒鉱15.7%、 ore/coke 2.8であった。溶鉄温度は $1500^\circ\sim 1510^\circ\text{C}$ 、鉄鉄成分は、 $[\text{Si}]$ $0.9\sim 1.1\%$ 、 $[\text{S}]$ $0.03\sim 0.04\%$ であった。

吹卸しおよび注水冷却に際しては、可能なかぎり操業中の生きた炉内状況を保存することにつとめた。したがって吹卸しは従来の炉内コークス置換、炉底臨時出鉄を行わず、通常操業のまま最終出鉄のあと急速休風した。注水冷却は工業用環水で行い、注水所要時間182h、総注水量28866tであった。

2.2 解体調査方法および内容

採掘単位として炉頂から羽口より1.5m下までを垂直距離1.5mずつ12単位に分割し、採掘作業は上からそれぞれの単位の全作業が終了したのち次の単位へ移ることを原則とした。塊状帯は西半分を掘下げ南北方向の測量、サンプリングをし、そのあと東側を掘下げ東側の測量、サンプリングをした。融着帯は、融着層の外側を掘下げたのち、測量、サンプリングをしつつ融着層を一層ずつはがしていった。羽口部は羽口前コークスのメッシュサンプリングをしつつレースウェイ形状を測定した。炉底はスラグ面から炉底定板までコアボーリングによりサンプリングをした。

おもな調査テーマは、①事前特殊操業による炉

内情報の検討、②注水冷却の影響の検討、③装入物(コークス、鉱石)の挙動の検討、④融着帯の生成、溶解挙動の検討、⑤微量成分の挙動の検討などである。

これらのテーマに基づき、吹卸し前および吹卸し時における高炉熱および低炉熱操業試験、垂直ゾンデ、炉口温度分布測定、デッドマンサンブラー、シャフト下部コアサンブラー実験、送風羽口形状変更、調査用装入物(FMC コークス、テンピルペレット、黒鉛トレーサー、還元崩壊試験用シスター)の装入実験などを行った。採掘時には、一般サンプル(コークス、鉱石)、コアサンプル、樹脂固定サンプル、融着層サンプル、羽口前メッシュサンプル、炉底ボーリングサンプルの採取、調査用装入物の回収、装入物分布形状、融着帯、レースウェイ、炉底の測量および調査などを行った。

3. 装入物の分布状況、温度分布ほか

3.1 装入物の分布状況

Fig. 1, Fig. 2に装入物の分布状況を示す²⁾。炉

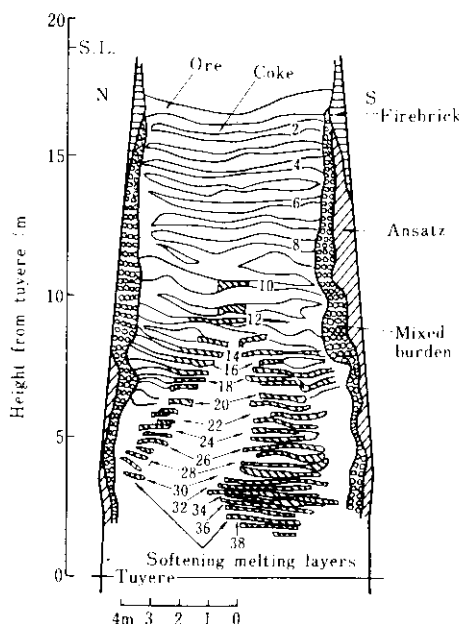


Fig. 1 State of burdens (N-S section, Chiba No. 1 B.F.)

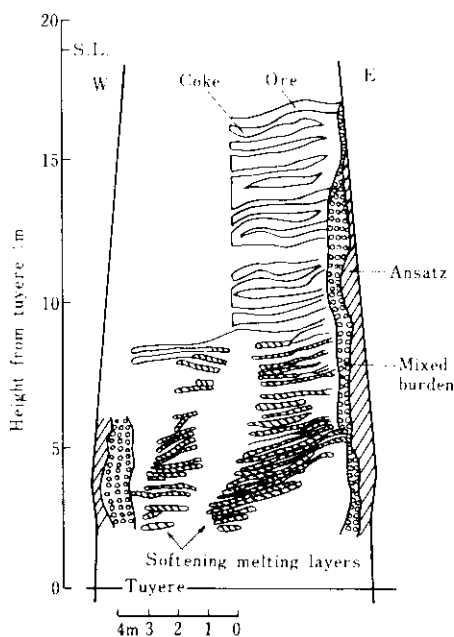


Fig. 2 State of burdens (W-E section, Chiba No. 1 B.F.)

壁部に混合層が見られたが、炉頂部からボッシュ部まで鉱石層とコークス層の境界は明確に保たれていた。融着帯はほぼ逆V字型であり、その中心は下部になるにつれて西北側へずれていた。融着

帯の内側のコークス層は西北よりに広がり、東南の融着帯下部にはコークスの停滞層があった。Fig. 1の図中の数字は上部装入面から順位づけしたore層の番号を示す。特に融着帯に関しては、北側方向のore層の18層目、すなわちO-18層について詳細な調査を行った。

Fig. 3は回収されたテンピルペレットのカプセルの存在箇所を示したものである。炉内水平面を4分割し、たとえば東側1/4円内に存在するものを東(E)として図中に示した。このカプセルは、各コークスチャージごとに装入されているので、コークス層の降下状況を示している。ペリー部まで層の上下関係が装入回数の順に保たれ、コークス層間の上下の混合はないと考えられる。東側の層の傾斜は、炉頂を除いて $10 \sim 16^\circ$ の範囲にあり降下速度の半径方向分布が一樣であった。南側は東側と傾向が似ており、北側は炉下部で傾斜が平坦化しペリー部までの平均的な降下速度は炉壁側が大きい。西側はシャフト上部ですでに中心から炉壁に向かう傾斜をとり炉壁部の降下速度が非常に大きい。円周方向、半径方向に降下速度の差がついた理由は、東南から東にかけて融着帯下方にコークスの停滞層が存在したこと、さらに東側の、No. 1, No. 16の羽口が盲であり、この部分での風

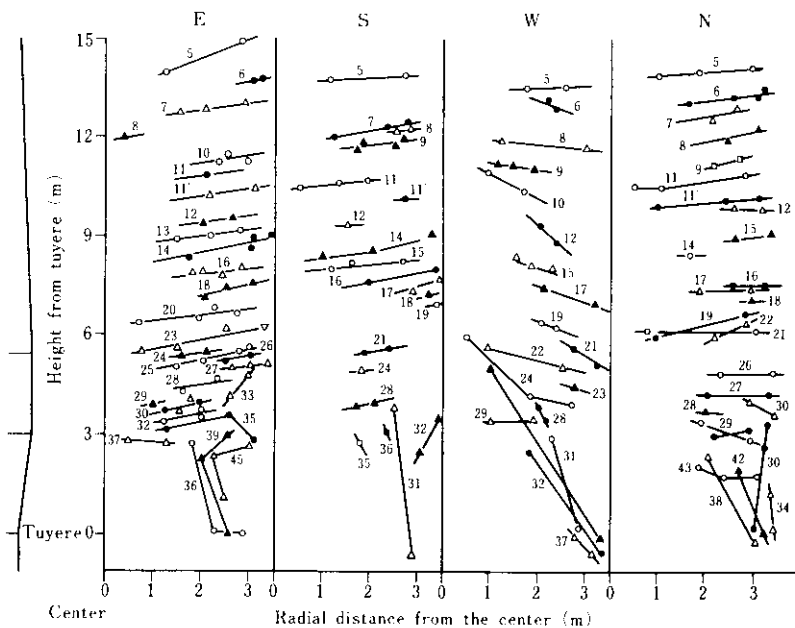


Fig. 3 Distribution of "Tempil pellet" case

量が少なかったことが原因であると考えられる。ボッシュ部では層の上下関係がくずれて固体混合が激しい。ボッシュ下端レベルにおいて、同一装入回数のカプセルを結んだ線はいずれもレースウェイに向かう傾斜を持ち、レースウェイがあたかもホッパーの出口に相当するような降下状況である。その線の内側はカプセルは存在せず、コークス層の更新の遅いデッドマン域と考えられる。

Fig. 4 にカプセルの炉内滞留時間を示す。羽口レベルまでの平均滞留時間は 11h である。ペリー下端を境にして滞留時間分布は大きく広がりをもつようになる。Fig. 5 にデッドマンの更新速度の調査を目的とした黒鉛トレーサの分布を示す。レースウェイ下方のコークス層は更新されるが、その速度はきわめて遅い。デッドマン中心部にはトレーサは 1 個しかなく更新速度の遅速は明らかでないが、レースウェイ下端からの距離と炉内滞留時

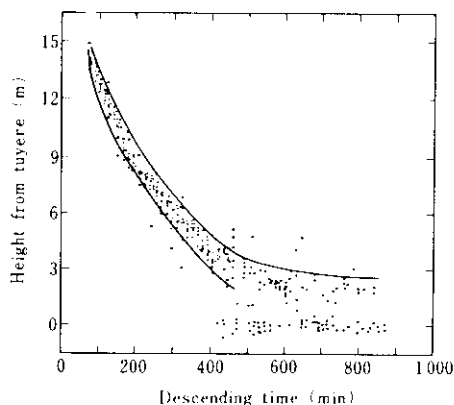


Fig. 4 Relation between position of "Tempil pellet" case and descending time

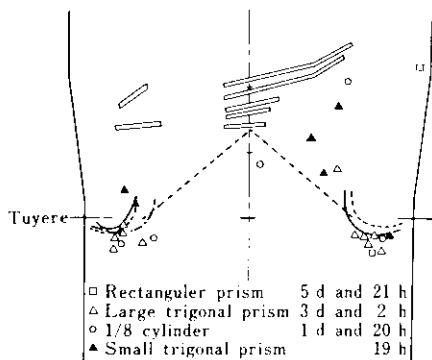


Fig. 5 Position of graphite tracer detected

間とからこの部分での更新速度を概算すると 1m の降下に対して約 7 日を要する³⁾。

3.2 温度分布

Fig. 6 にテンピルペレット法およびコークス黒鉛化度法によって求めた炉内温度分布⁴⁾を示す。融着帯分布形状と推定温度分布の等温線とがよく一致している。

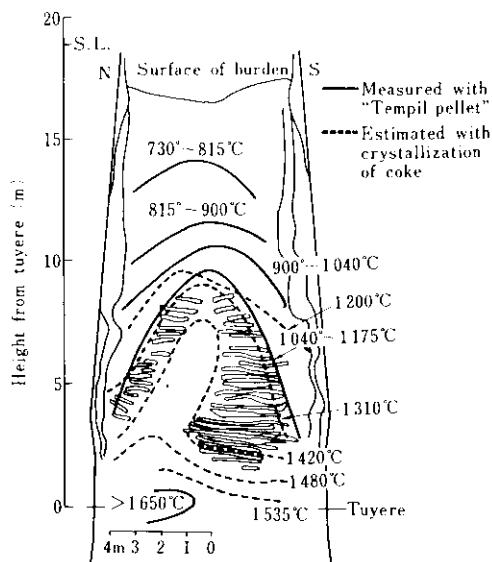


Fig. 6 Distribution of temperature (Chiba No. 1 B.F.)

3.3 コークス層中の鉱石および溶融物の分布

Fig. 7 にコークス層中に混在した鉱石および溶融物の重量比を示す。塊状帯では鉱石の重量比が 2~13% であり、半径方向での分布の傾向が一定していない。融着帯では融着層厚の大きい南側で重量比の値が高く、層厚の小さい北側および中央の滴下帯で 2~3% と低い。このように南側では、融着層間のコークス層に溶融物が多く、しかも後述するように融着層間のコークス粒径が細かいため、ガスの通路（スリット）としての通気性が阻害されている。また、南側では羽口からの送風量が少なく (Fig. 10 参照)、この結果固相への伝熱量が不足し、融着帯をより下方へ残留させたと考えられる。断面平均値 (Fig. 7 の右図) でみると、コークス粒径の低下が著しくなる羽口直上部から溶融物量が増加する。

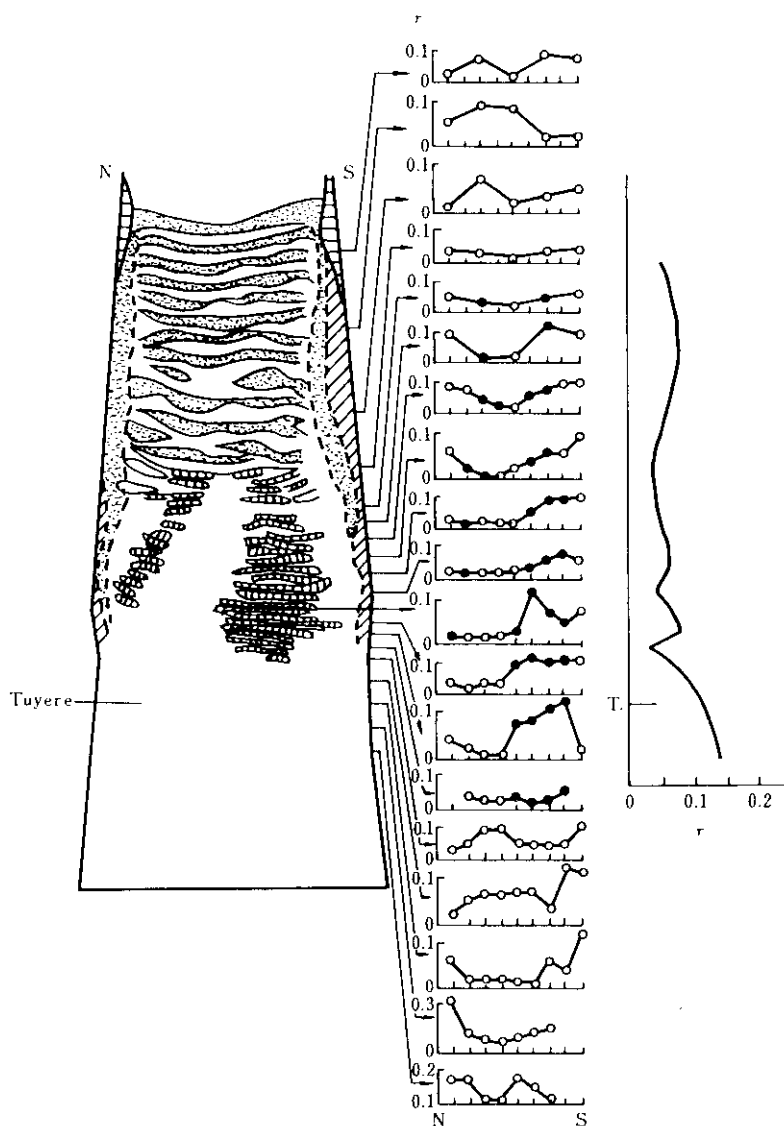


Fig. 7 Weight fraction, r , of ore or melt included in the coke layer

3・4 羽口前の状況

3・4・1 レースウェイの構造

Fig. 8にコークスのメッシュサンプリング位置を示す。Fig. 9に羽口前断面観察結果の一例を示す。レースウェイの上方においては境界を判断することは難しく、上方へ粒度が増すのみであるが前方および下部はスラグ、メタルの混じった小塊コークス、粉コークスが緻密に充填されたF層が

あり、その外側の大塊コークスから成るH層とは際立った対照をみせレースウェイの境界と判断できる。H層は羽口軸に垂直な断面でも存在する。レースウェイ間およびレースウェイ前方は平均径30mm以上の大塊から成っている。レースウェイ内はC, D, Eの順に粒径が低下しており、吹止め後の堆積順を示している。Fig. 10に各羽口でのレースウェイの形状と大きさを示す。羽口径が大きいほど風量が多いためレースウェイの奥行が大きい。

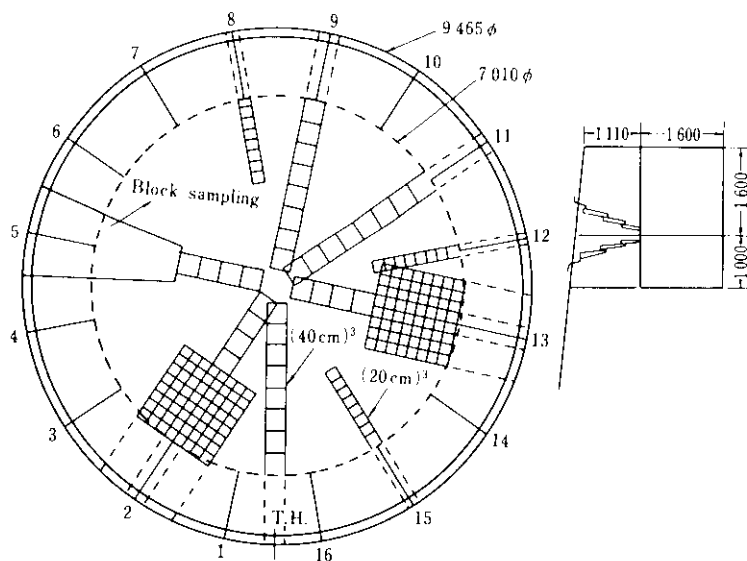


Fig. 8 Sampling positions in front of tuyere

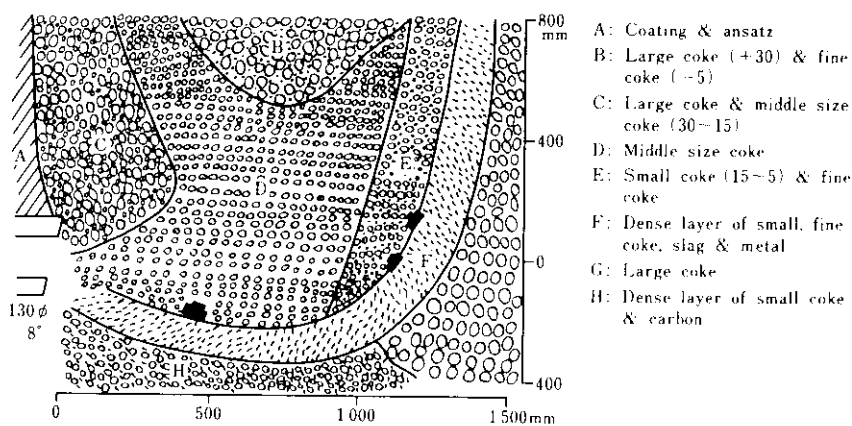


Fig. 9 Vertical section in front of No. 2 tuyere

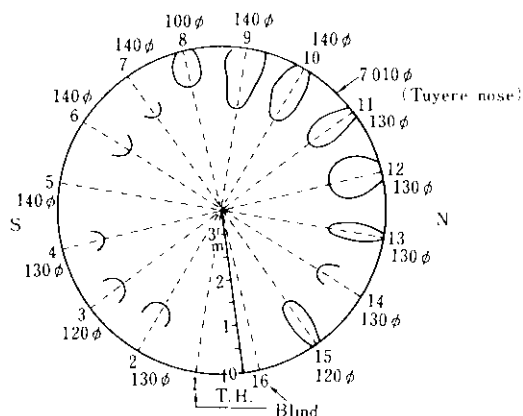


Fig. 10 Raceway at tuyere level

3・4・2 コークス粒径と静的ホールドアップ

Fig. 11 に滴下帯および炉床部での静的ホールドアップ (H_S) とコークス粒径の関係³⁾を示した。 H_S はガス流速 0 のとき、充填層内に残留した液が充填層容積に占める容積分率として表した。コークス粒径が低下するにつれ H_S は増大し、通気性と通液性は悪化する。Fig. 12, Fig. 13 にそれぞれ No. 13 羽口前のコークス粒径分布と H_S 分布を示す。コークス粒径の小さい部分は H_S の大きくなる傾向がみられる。レースウェイ部は、いわゆるウェットな状態であり、炉芯および隣接するレースウェイ間はドライな状態であった。溶融

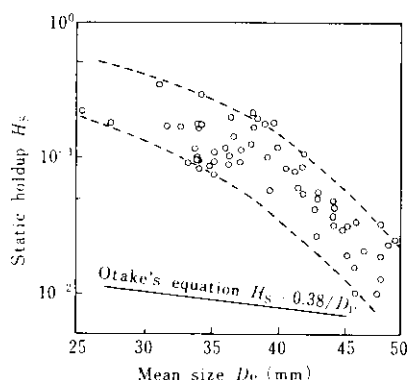


Fig. 11 Static holdup of melt H_s in the dropping zone and the hearth as a function of coke mean size D_p

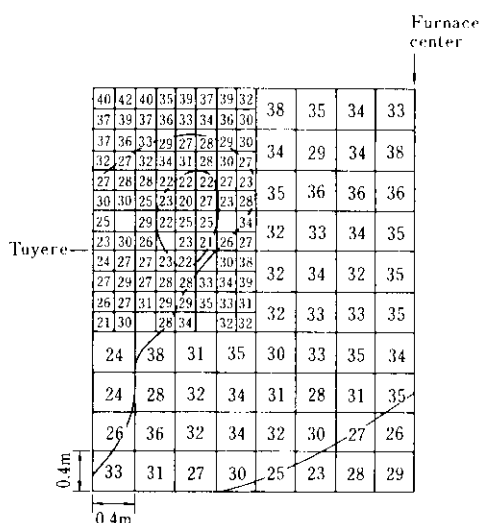


Fig. 12 Distribution of coke mean size in the vertical plane containing the axis of No. 13 tuyere

物はが芯およびレースウェイ間のほうがコーク粒径が大きいためレースウェイ内部より流れやすいと考えられる。

4. 鉱石類の性状変化

4.1 鉱石類の粒度および強度の変化

が高方向の粒度変化を Fig. 14 に示す。装入前にくらべて全体に細粒化している。シャフト上部ではが径方向に顕著な粒度差があり南側が細かい。が高 12m 付近ではが径方向の粒度差は少なくなり、が高 9m 以下では軟化し結合する粒子もあるため

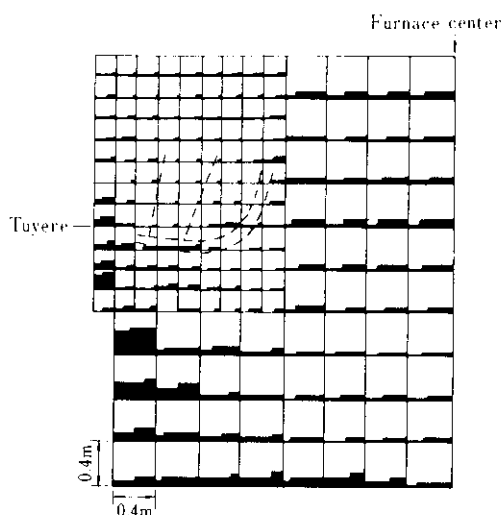


Fig. 13 Distribution of static holdup of melt in the vertical plane containing the axis of No. 13 tuyere

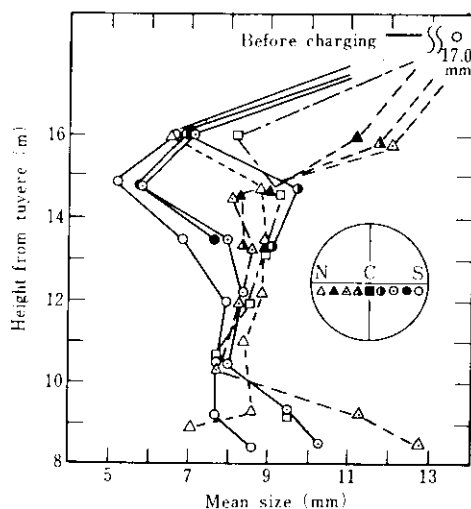


Fig. 14 Change of ore size in lumpy zone

粗粒化する傾向がある。が内において粒度低下を起こす原因としては、装入時の細粒化は別として、①操業中の還元粉化、②装入物の荷重や摩耗による粉化、③吹卸し休風および注水冷却による粉化、が考えられる。シャフト上部で粒度が細かいのは、吹卸し休風から注水冷却の間、その部分の装入物が還元粉化しやすい温度に長くさらされていたことが原因と考えられる。

RDI 測定用ドラム試験機により鉱石類の強度変化を測定した。試料は 10~15mm, 500g, 試験条件は回転時間 30 min, ロータブふるい 1min である。

この結果を Fig. 15 に示す。シャフト上部で大きな変化があるが、さらに下降する間の強度変化は少ない。ペレットの強度が最も大きく、次に焼結鉱、鉱石の順である。

還元粉化調査用の焼結鉱をバスケットに入れ、吹止前最終 8 チャージの鉱石とともに装入した。この回収サンプルの粒度分析およびドラム強度測定結果を Fig. 16, Fig. 17 に示す。Fig. 16 の粒度変化において、-5mm, -3mm と同様な傾向を示し、粉化は最上部ではなく、装入物表面から約 0.5m 下がった位置で最も激しく、さらに下部になると少なくなる。Fig. 17 のドラム強度の変化は、粒度変化と同じ傾向を示す。すなわち、粉化量の多い焼結鉱ほど強度が弱くなる。これらの傾向は Fig. 14 の場合と一致しており、上部では、還元粉

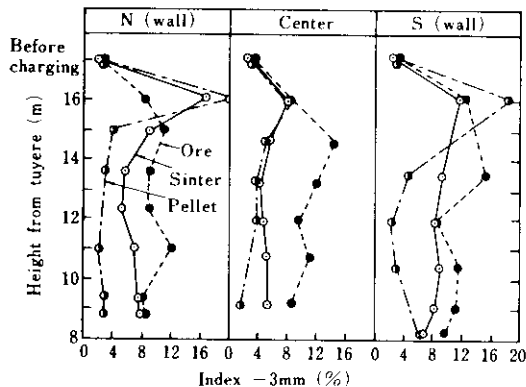


Fig. 15 Change of ore strength in lumpy zone

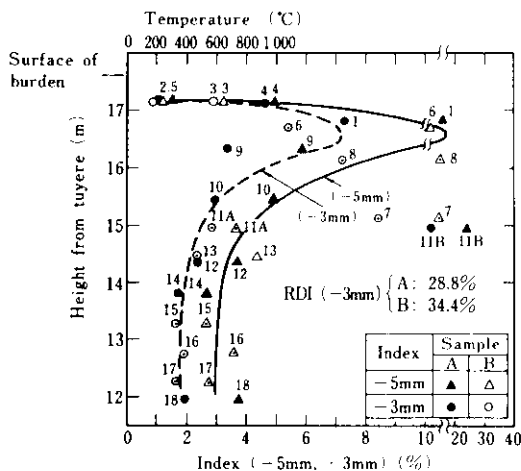


Fig. 16 Change of proportion of -5mm, -3mm sinter size (Basket-charged samples)

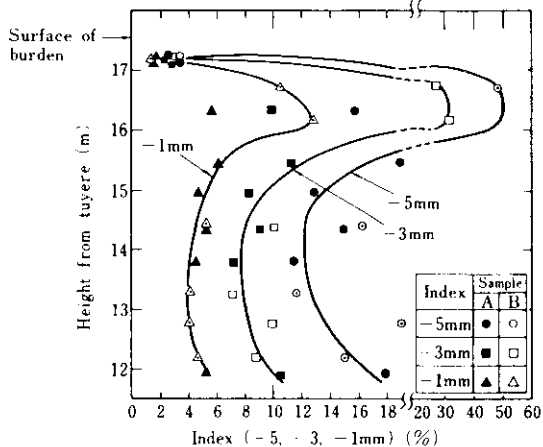


Fig. 17 Change of sinter strength (Basket-charged samples)

化の起こりやすい温度 (400~600℃) に長く保持され、下部はより高い温度に保持された結果である。すなわち下部のサンプルの粉化量は操業中の還元粉化とみなすことができ、それは、-5mm 指数で 4% 以下であるから、比較的少ないと考えられる。

4.2 化学成分の分布と変化

炉内還元率分布を Fig. 18 に、鉱種別の還元率

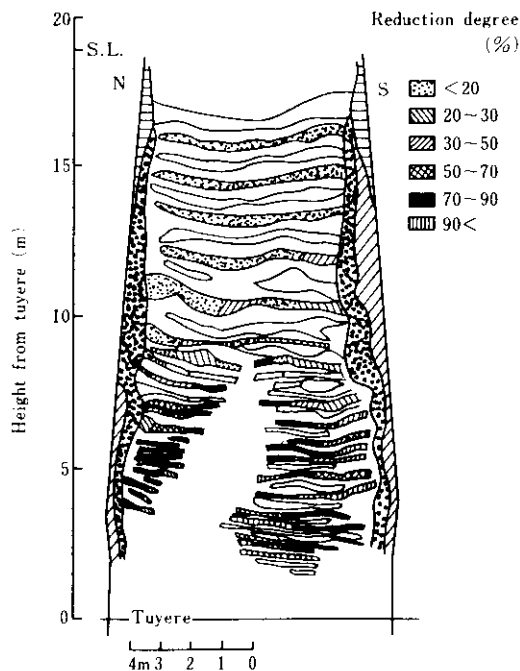


Fig. 18 Distribution of reduction degree of burdens in blast furnace (Chiba No. 1 B.F.)

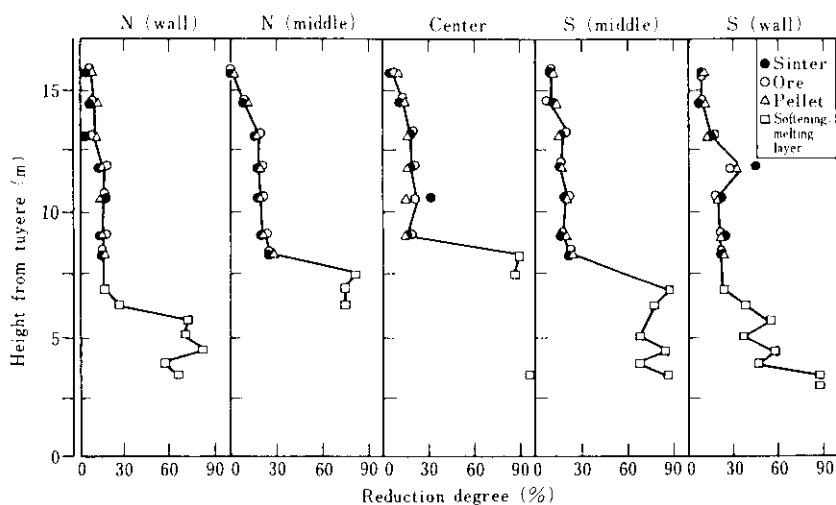


Fig. 19 Distribution of reduction degree of burdens in blast furnace

変化を Fig. 19 に示す。シャフト上部の塊状帯では、各鉱種とも還元率30%以下であり、鉱種別の還元率の差は認められず、また炉内の半径方向の変化も少ない。還元率の低い原因として注水冷却の影響が大きいと考えられる。

融着帯が存在するシャフト中、下部の領域では還元率は炉の半径方向で異なっていて、中心部が

高く、炉壁部ほど低い。上下方向では下部ほど高い。還元率の分布は温度分布 (Fig. 6 参照) や融着層分布 (Fig. 1, 2 参照) に類似した形状を示す。

次に、アルカリの分布を Fig. 20 に、アルカリ中 K_2O の分布を Fig. 21 に、S の分布を Fig. 22, Fig. 23 に、また Zn の分布を Fig. 24 にそれぞれ示す。

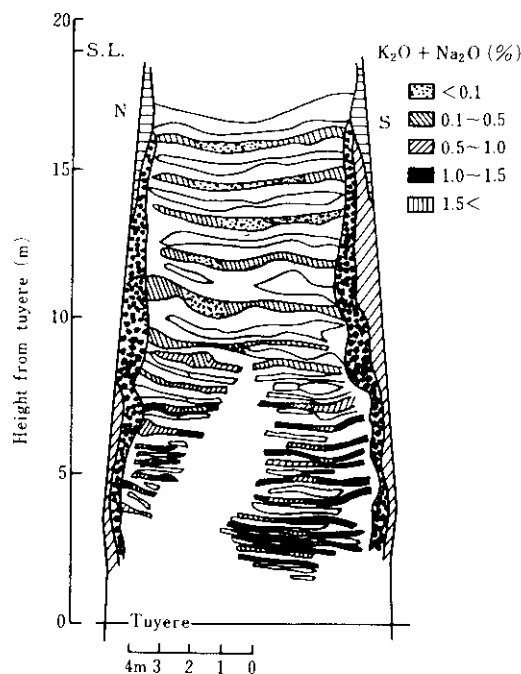


Fig. 20 Distribution of alkalis in blast furnace (Chiba No. 1 B.F.)

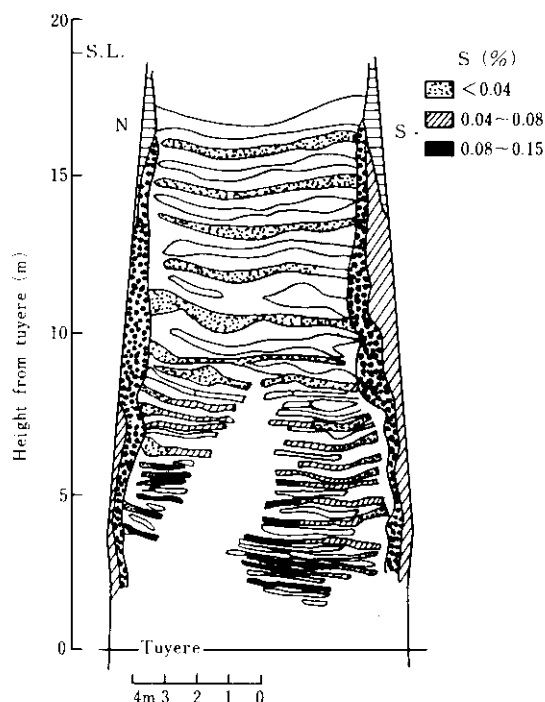


Fig. 22 Distribution of sulfur in blast furnace (Chiba No. 1 B.F.)

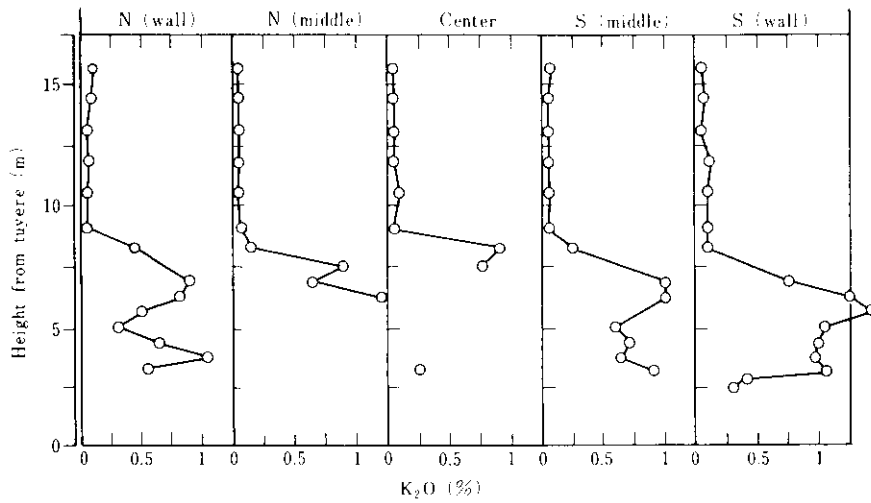
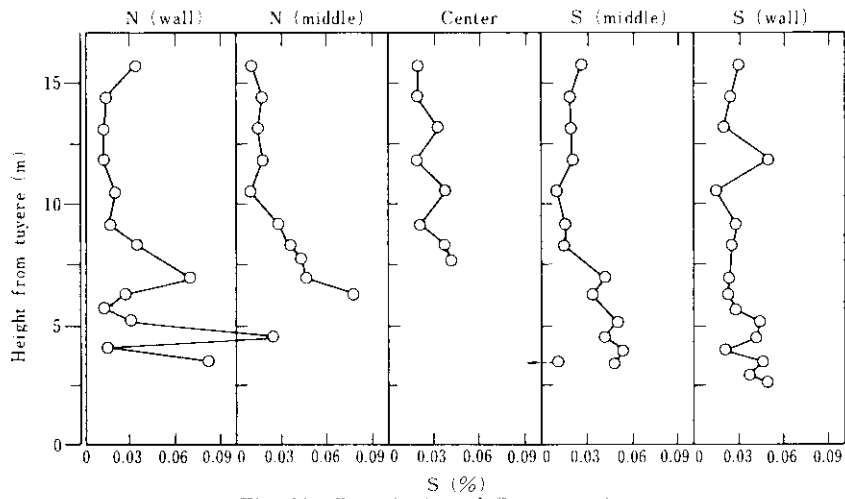
Fig. 21 Distribution of K_2O content in ore

Fig. 23 Distribution of S content in ore

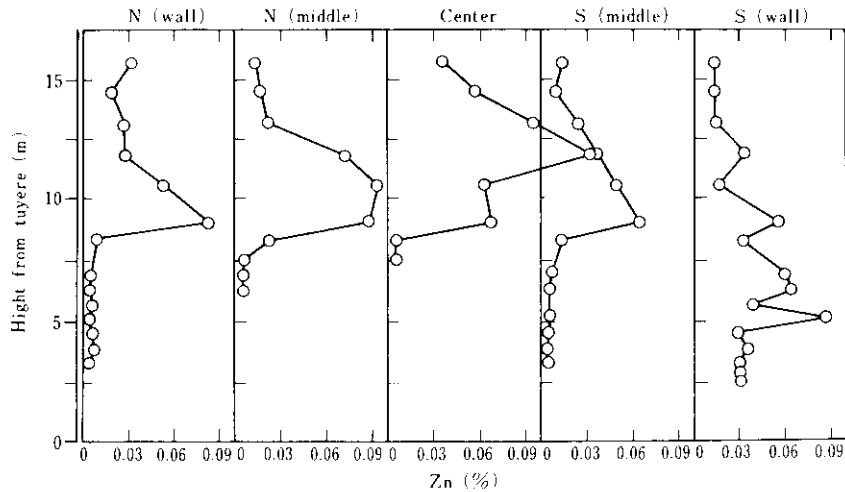


Fig. 24 Distribution of Zn content in ore

アルカリ分布はS分布や還元率分布と同じ傾向を示し、アルカリ量は塊状帯で少なく、融着帯の炉芯側と下部側に多い。アルカリ中の K_2O は Na_2O より数倍多い。Znの凝縮量はシャフト中部で最も多く、 K_2O とSの凝縮量はシャフト下部で多い。Zn, アルカリともに、炉内の高温部と低温部の間を循環していることが知られているが、両者の循環領域の違いは出口ら⁷⁾によれば、各元素が反応後安定な化合物として存在する温度域の違いであると指摘されている。鉱石装入物の亜鉛は酸化物として炉内を降下し、 $1100^{\circ}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ で還元され、Znとして揮発する。ガス化した亜鉛は炉内を上昇し 500°C 前後で鉱石層に凝縮する。

Zn, K_2O , Sの存在量と温度の関係をFig. 25に示す。 $800^{\circ}\sim 900^{\circ}\text{C}$ の範囲に亜鉛の高濃度域が存在する。一方、カリウムは $1100^{\circ}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ の範囲に高濃度域を有する。カリウムは鉱石中では主として $K_2O\cdot SiO_2$, K_2S として炉内を降下し、融着帯以下、滴下帯でガス相に放出されK, KCNの形で存在する。このガス中カリウムは $1100\sim 1400^{\circ}\text{C}$ の領域で再び吸収されて凝結層に移る。このようにカリウムの循環は温度範囲から推定して融着帯より下部の領域で起きている。

本解体調査の装入物分布の特徴として、Fig. 1, Fig. 2に示したように、炉下部で南側の融着帯が中心まで延びている点を指摘できる。Fig. 6から

南側の温度分布は北側に比べ低く、特に南側炉壁部が低い。したがってFig. 24のように南側炉中部の亜鉛の凝縮領域が下部に移り、カリウムと同じ領域に位置していることがわかる。亜鉛、カリウムの蓄積量の増加は装入物の通気性に悪影響を及ぼし、南側融着帯の通気性を悪くしていると考えられるが明らかでない。

5. 融着帯での成分変化と通気抵抗、気孔率分布

5・1 融着帯でのスラグ、メタル成分とSの変化^{5,6)}

5・1・1 融着帯でのスラグ、メタルの変化

鉄滓分離過程が観察されるO-18融着帯(Fig. 1参照)について、高さ方向に上, 中, 下の3箇所、半径方向に7箇所ダイヤモンドコアボーリングを用いて $25\text{mm}\phi\times 25\text{mmh}$ の寸法の試料を採取した。サンプリング箇所をPhoto. 1に示す。

やや炉壁側上部での試料No. 5の組織をPhoto. 2に示す。スラグはメタルと完全に分離しスラグは凝集している。上部の5-1, 5-2のスラグ成分は、Table 1に示すように比較的低融点の C_3MS_2 と C_2AS とからなり、FeOはほとんど含まれていない(スラグ組成に関しC: CaO, M: MgO, S: SiO_2 , A: Al_2O_3 の略号を用いる)。

炉芯側先端のNo. 1の組織においては、スラグとメタルが分離していて、高塩基度のスラグがネットワーク状にかなりの量で残存している。これをPhoto. 3, Photo. 4に示す。

さらに炉芯側最先端から採取した試料No. Sの組織をPhoto. 5, Photo. 6に、スラグ組成をTable 2に示す。No. 5と同様にスラグとメタルとが分離しており、組成はおもに C_3MS と C_2AS の2相からなる。Photo. 6で見られるようにAlの高いスラグ(C_2AS)の位置にK, Sが偏析している。

これらの結果、スラグ成分はおもに C_3MS_2 , C_2AS , CS(C_2S , C_3S)の3種類に分けられ、上下面において分離した状態で観察されるスラグの組成は最終スラグのメリライト(おもにオケルマナイト C_2MS_2 とゲーレンナイト C_2AS の固溶体から

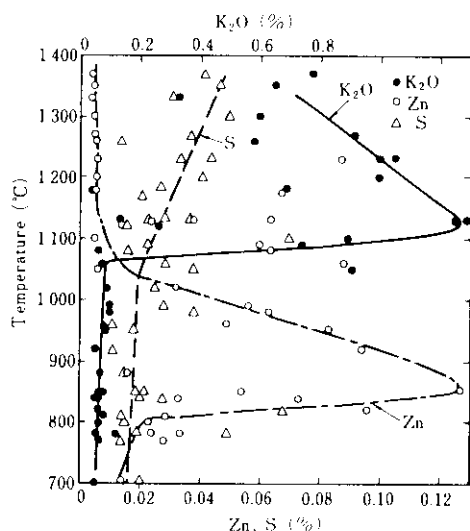


Fig. 25 Relation between K_2O , Zn, S contents and temperature in furnace

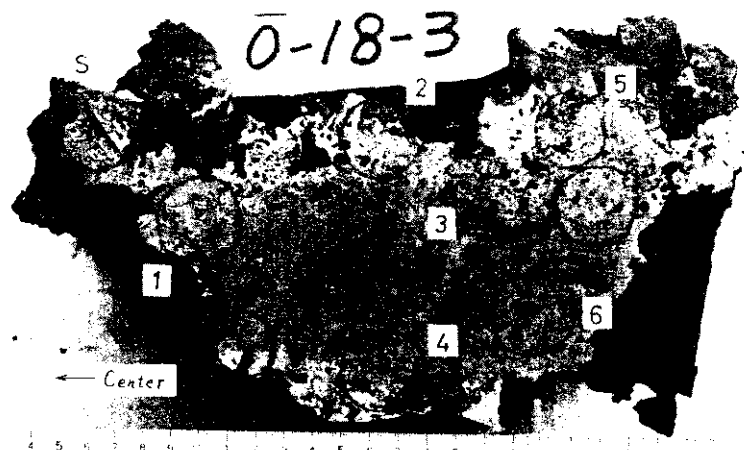


Photo. 1 Position of core sampling ($25\phi \times 25\text{mm}$) at softening melting layer (Ö-18)

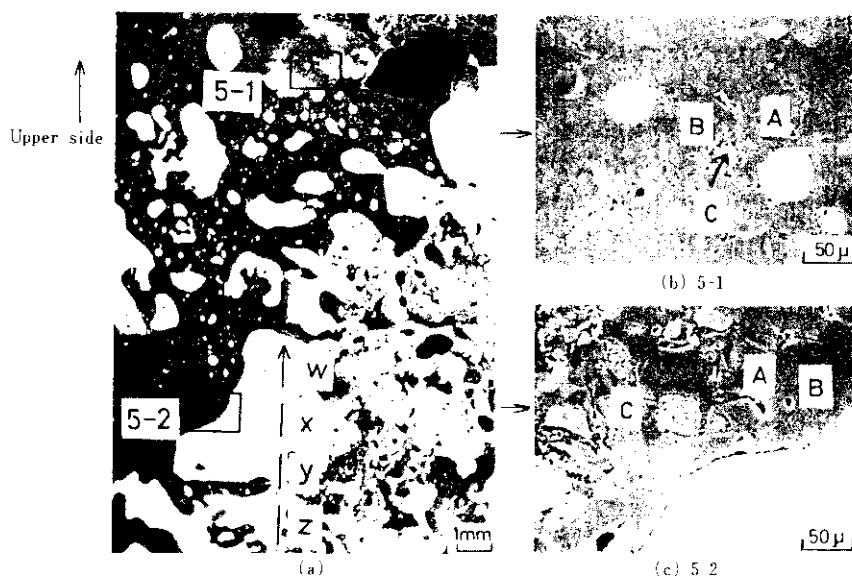


Photo. 2 Microstructures of softening-melting layer (Ö 18) at the upper side (sample No. 5)

Table 1 Slag composition at softening-melting layer (Ö 18) by E.P.M.A. (wt %)

No.		CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	S	Phase
1-1	A	62.93	24.18	1.68	1.81	0.86	0.59	5.04	0.80	0.03	C ₃ S, C ₂ S (+ K ₂ O)
	A	52.70	30.63	11.45	0.79	0.68	0.26	0.16	0.23	0.03	C ₃ MS ₂ (merwinite)
5-1	B	40.89	20.79	2.95	32.01	0.52	0.11	0.20	0.25	0.04	C ₂ AS (gehlenite)
	C	47.03	12.44	5.25	2.46	0.32	0.21	0.39	0.50	0.04	C ₃ S (+ TiO ₂ 30.57)
5-2	A	52.48	31.76	11.53	0.74	0.31	0.30	0.12	0.28	0.03	C ₃ MS ₂
	B	42.50	19.33	2.18	30.98	0.41	0.07	0.11	0.15	0.02	C ₂ AS
	C	62.55	30.52	2.30	0.75	0.27	0.35	0.67	0.34	0.11	C ₂ S

C: CaO, S: SiO₂, A: Al₂O₃, M: MgO

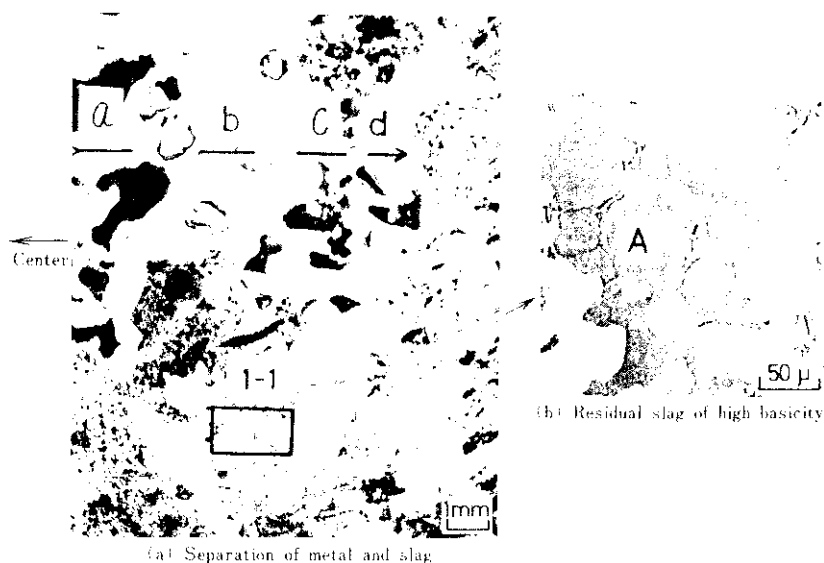


Photo. 3 Microstructures of softening melting layer (0.18) at the edge (sample No. 1)

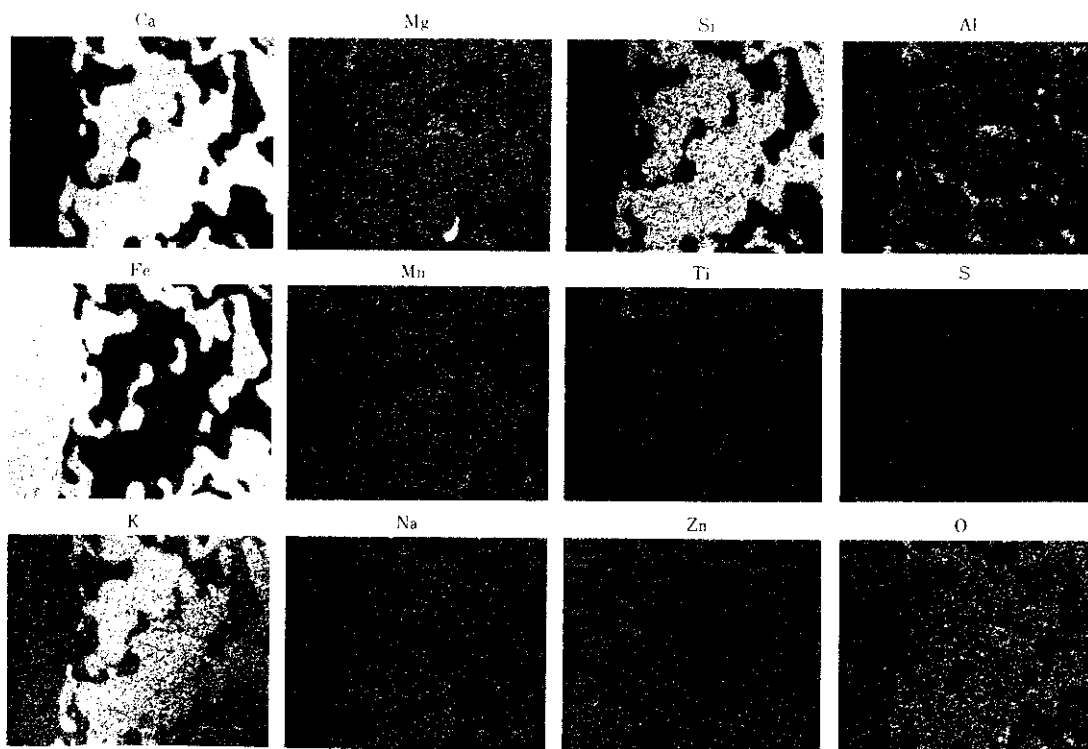


Photo. 1 Structures of residual slag in molten iron at the edge of softening-melting layer O 18 (No. 11) by E.P.M.A.

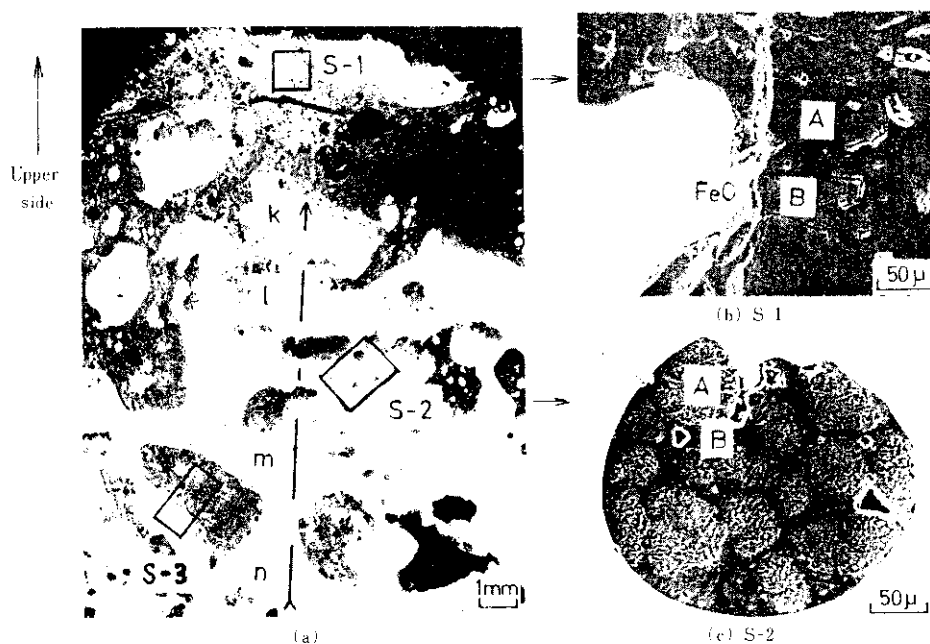


Photo. 5 Microstructures of softening melting layer (O 18) at the upper side (sample No. S)

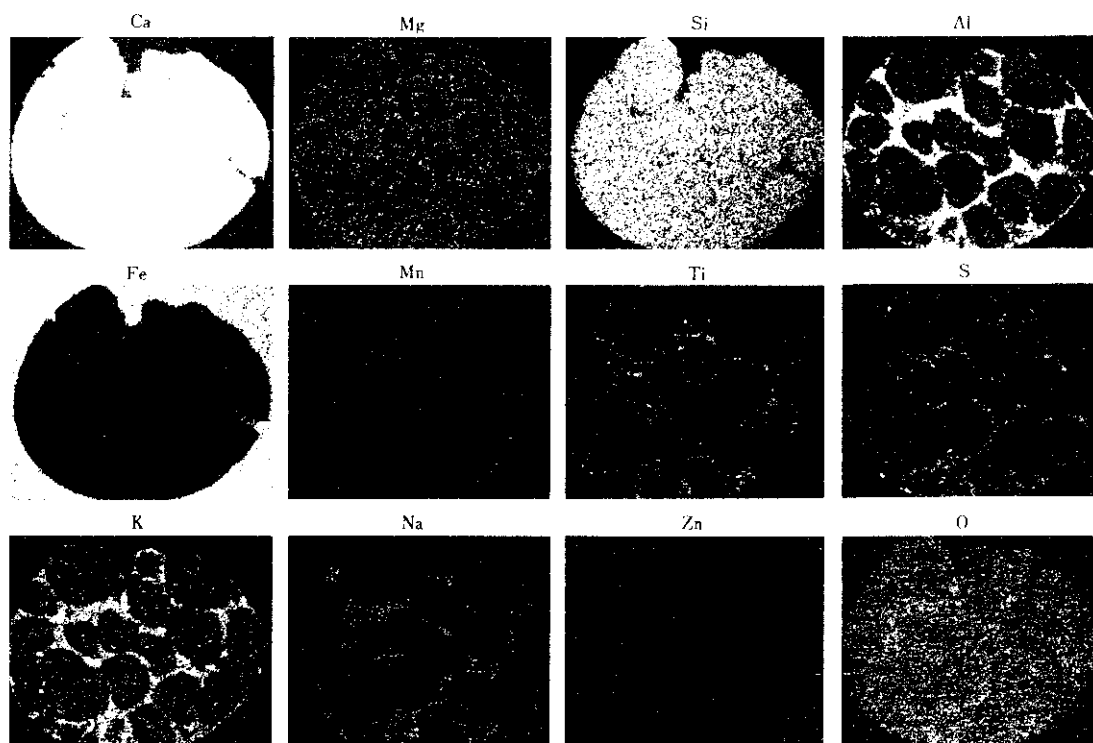


Photo. 6 Structures of slag separated from metal at the upper side of softening melting layer O 18 (No. S-2) by E.P.M.A.

Table 2 Slag composition at softening melting layer ($\bar{O}-18$) by E.P.M.A. (wt %)

No.		CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	S	Phase
S-1	A	49.13	15.32	1.75	29.26	0.32	0.14	0.08	0.20	Tr	C ₂ AS
	B	58.20	25.48	9.29	0.56	0.24	0.16	0.09	0.20	0.05	C ₃ MS
S-2	A	60.48	27.50	1.78	2.05	0.59	0.60	3.06	0.56	0.23	C ₂ S (+ K ₂ O)
	B	23.06	21.20	2.05	25.23	0.44	1.42	8.50	4.72	0.51	CAS ₂ , C ₂ AS (+ K ₂ O)

C: CaO, S: SiO₂, A: Al₂O₃, M: MgO

なる)にかなり近い成分である。最終スラグに比較してSiO₂量が少ないが、SiO₂は炉下部でコークス灰分から移行する。

Table 3, Table 4にメタル部の組成を示す。Cはわずかに浸炭していて、融着帯内部(たとえばPhoto. 2のWからZ)へ向かってC濃度は低下している。この位置($\bar{O}-18$)ではメタルへの侵硫、Siの合金化は行われていない。酸素はやや高いが分散している微細なスラグ成分の影響と思われる。これは $\bar{O}-18$ 融着層についての観察結果であるが、その他の融着帯を含めた総括結果を次に示す。 $\bar{O}-10$ は融着層として最上部の層であり、鉬石が弱く結合し、焼結鉬、ペレットがそのまま観察できる。 $\bar{O}-18$ ではこれら粒子のこん跡はなく断面は緻密な半溶融状態を呈しており、前述したように、炉芯側先端と上面、下面から溶融が進み、溶融物が滴下している。特に炉芯側先端でスラグが上下面に浸み出すように分離していると同時に、先端側の内部に残存しているスラグが観察される。鉄滓の分離は水平方向を中心にしてほぼ上下方向対称に起こっている。シャフト中間位置での $\bar{O}-28$

Table 4 Change of iron metal composition at softening-melting layer ($\bar{O}-18$) by line analysis of E.P.M.A. (wt %)

Composition	Upper side			
	k	l	m	n
Fe	95.54	95.19	95.98	96.56
C	0.48	0.44	0.39	0.33
S	0.007	0.008	0.007	0.008
Si	0.04	0.04	0.05	0.06
O	1.55	1.53	1.57	1.56

Sample No. S (refer to photo. 5)

(Photo. 7 参照)では炉壁から炉芯方向に向かって層厚が減少しており、炉芯側でスラグとメタルがほぼ完全に分離している。最下部の融着帯である $\bar{O}-36$ では層厚が薄く、鉄滓分離が進んでいて、メタル部が多くなっている。Fig. 26にスラグの塩基度の変化を示す。 $\bar{O}-18$ の炉芯側と下層の $\bar{O}-36$ で塩基度が高くなっている。次に、融着帯でのスラグ比の変化をFig. 27に示す。 $\bar{O}-18$ 先端と $\bar{O}-36$

Table 3 Change of iron metal composition at softening melting layer ($\bar{O}-18$) by line analysis of E.P.M.A. (wt %)

Composition	Edge*				Upper side**			
	a	b	c	d	w	x	y	z
Fe	98.15	98.46	97.08	98.19	94.84	95.71	96.55	96.56
C	0.10	0.05	0.04	0.03	0.33	0.21	0.15	0.12
S	0.011	0.010	0.010	0.009	0.017	0.017	0.018	0.016
Si	0.03	0.04	0.03	0.04	0.03	0.03	0.03	0.03
O	1.60	0.84	1.62	1.48	1.50	1.49	1.53	1.54

* Sample No.1 (refer to photo. 3)

** Sample No.5 (refer to photo. 2)

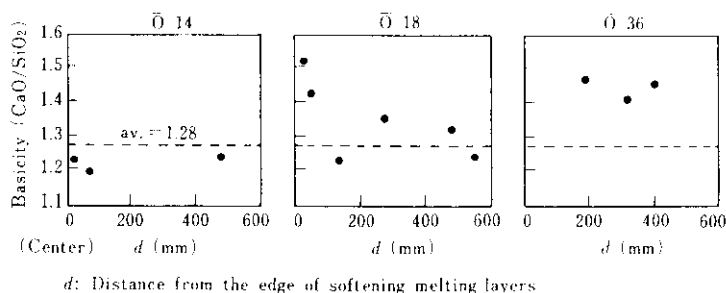


Fig. 26 Basicity of slag at softening melting layers

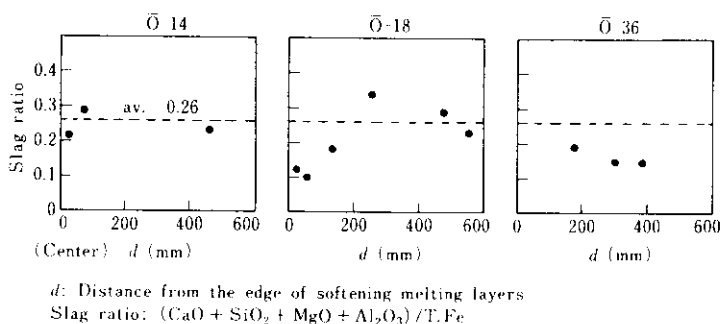


Fig. 27 Slag ratio at softening melting layers

で低融点のスラグがすでに滴下し、スラグ比が低くなっている。

装入物の焼結鉱の塩基度は約1.7である。西田ら⁷⁾の実験結果からすると塩基度1.78ではスラグとメタルが同温度で滴下し、メタルの滴下量が多いとしているが、本調査ではスラグが先に滴下した状態が観察されている。これは焼結鉱、ペレットを含んだ装入物全体の塩基度が1.25に相当し、ペレット中のスラグなど低融点部分のスラグが先に滴下したものと考えられる。

5.1.2 融着帯内でのSの分布

Fig. 28に融着帯でのスラグ、メタル中のSの分布を示す。O-14で低く、O-18で侵硫が始まっている。スラグ中SはO-18の上部、下部で高くなっている。一方、メタル中Sは低く、O-18で0.01~0.03%、下層のO-36で0.05%程度である。従来の報告に、融着帯内でのSの分布を示した例がないが、滴下直前から炉床にいたるまでの下村らの結果⁸⁾と合わせて考えて、融着層でのSの分

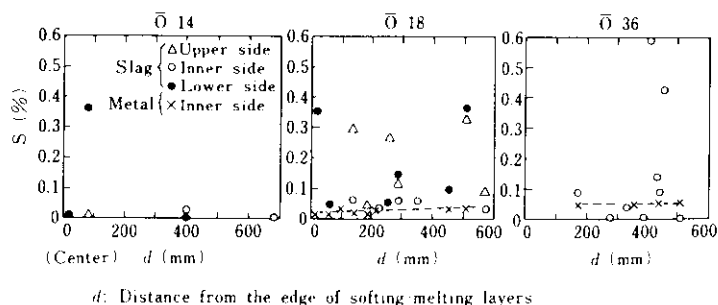


Fig. 28 Sulfur distribution of slag and metal portions at softening-melting layers (by E.P.M.A.)

配比 $(S)/(S)$ は Fig. 28 から 10 位であり、融着層での脱硫は起きないといつてよい。

融着層の形成に及ぼす S の影響として Hills ら⁹⁾ が Fe-S-O 系状態図に基づいて検討し、炉内を上昇したガスが 900°~1100°C の範囲で Fe あるいは FeO と結合し、FeO-FeS などの融液を生成し、融着帯の生成に寄与することを指摘している⁹⁾。しかし、本調査結果からではスラグとメタルが分離したのちに侵蝕しており、特に上部融着帯での S 濃度が低く、しかも S は鉄滓分離後のスラグ中に直接侵蝕していることから (Photo. 4 の S-2 参照)、Hills らの提案する融着帯生成への侵蝕の寄与は少ないと考える。

以上の結果、融着帯での S の分布が明確にされたが、Fig. 22, Fig. 23 の炉内での S の分布が Fig. 26 の融着帯に残存しているスラグの塩基度の値とかなり密接な関係にあることと、また実際に Table 2

の No. S-2 のように塩基度の高いスラグ部分の S 濃度がかかなり高いことから推察して、高炉内 S の循環に対して融着帯内のスラグ塩基度が大きな影響をもっているものと考ええる。

5・2 融着帯での気孔率と通気抵抗¹⁰⁾

融着帯を円柱状に切出し、気孔率と通気抵抗を測定した。代表的試料として軟化から融着、さらに溶解過程までが観察される Ö-28 融着帯を用いることにした。この断面を Photo. 7 に示す。炉芯側は層厚が薄く部分的に溶け落ちていて緻密である。炉芯から離れるにしたがって空隙が多くなる。Photo. 8 は Photo. 7 の 1~4 位置から切出した試料の外観を示す。

気孔率 ϵ の分布を Fig. 29 に、通気抵抗指数 ϕ の分布を Fig. 30 に示す。上部および炉壁部ほど ϵ が高く、 ϕ は小さい。 ϵ は軟化初期状態の 38%



Photo. 7 Position of core sampling (Ö-28)

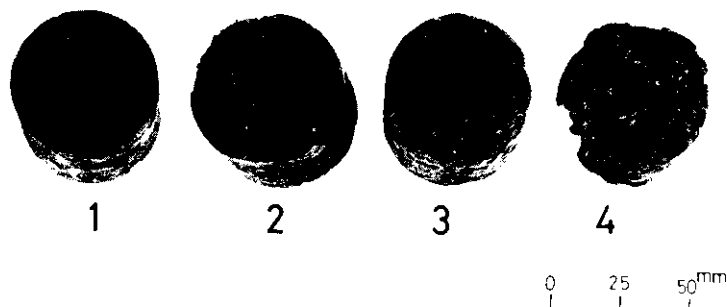


Photo. 8 Core samples

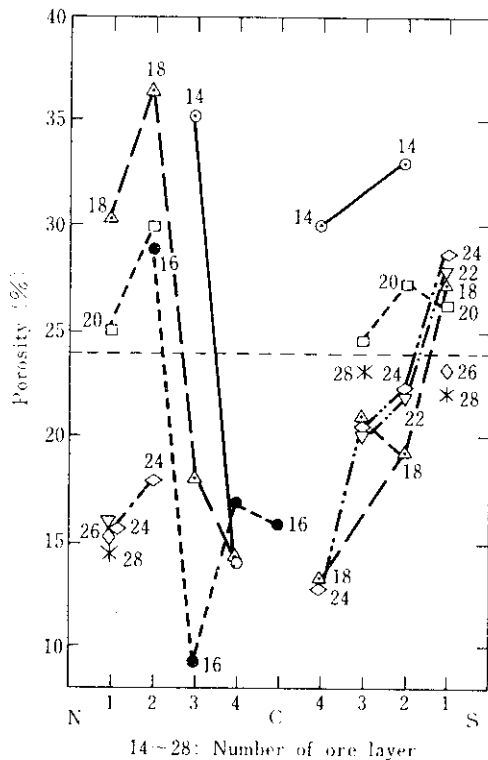


Fig. 29 Distribution of porosity in blast furnace

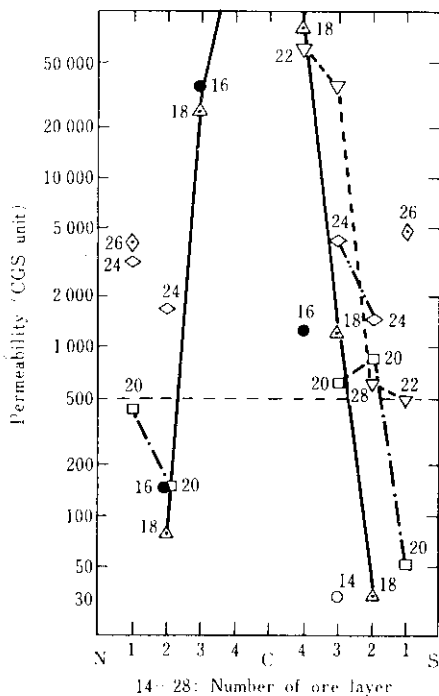


Fig. 30 Distribution of permeability in blast furnace

から、融着がかなり進むと10%以下にまで減少する。 ϕ は塊状帯の値にくらべて、数十倍から数万倍も高く、 ϵ の減少とともに非常に大きくなる。

杉山ら¹⁰⁾はポリスチレン融着層を用いてガス流れの研究をしているが、融着の程度を融着度 η で表し、この値が0.4を境にしてそれ以上ではガスは流れないとしている。この数値は、 $\epsilon=0.24$ $\phi=500$ に相当し、融着層温度にして1280℃に相当する。これらの値をFig. 29, Fig. 30に破線で示す。が中心に近い融着層はガスは流れないが、が壁寄りの融着層はガスが流れる。O-10のように若い融着層は中心でもガスが貫流している。またO 20以下ではが壁寄りの融着層でもガス流れは少ないと思われる。

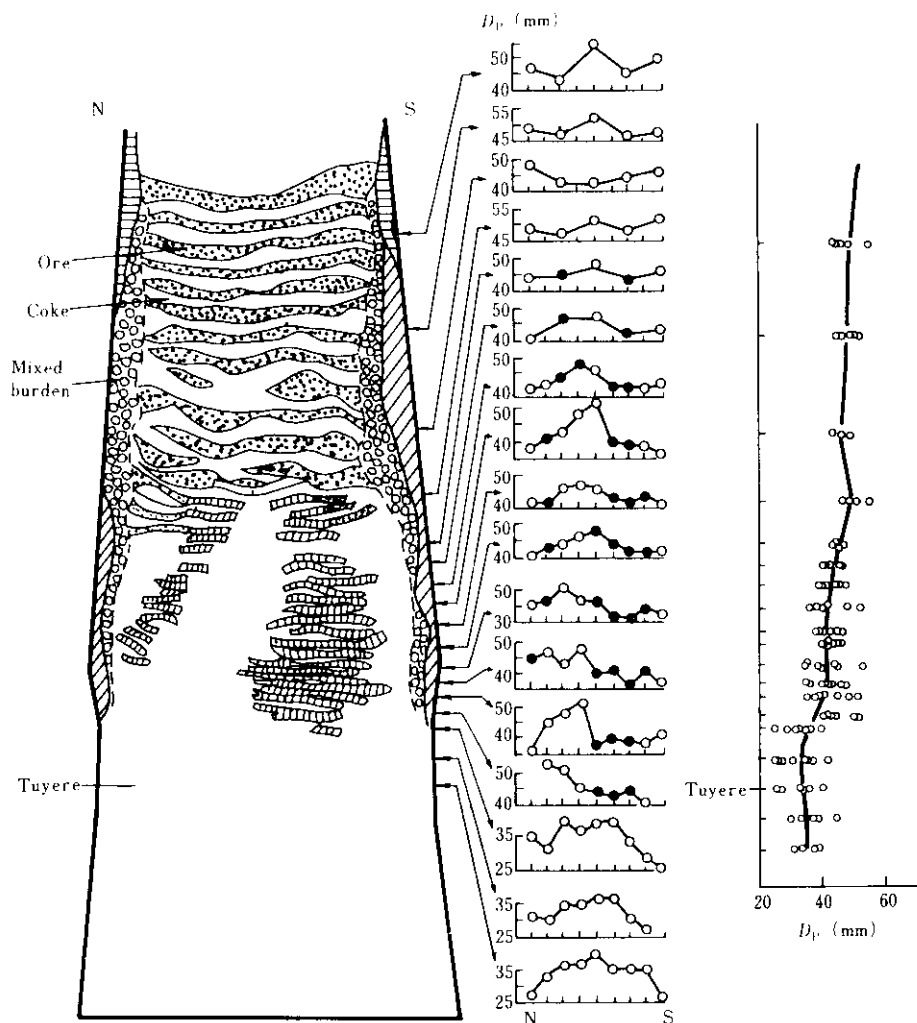
6. コークスの性状変化

6・1 コークスの粒度、強度変化

が内でのコークスの粒度変化³⁾をFig. 31に示す。が高方向でみると、が頂からシャフト中段までは変化がなく、シャフト下部よりボッシュ部にかけて徐々に粒度が減少し、羽口直上部で急激に細くなっている。が径方向でみると、塊状帯ではが芯部が大きくが頂での粒度偏析が保たれている。が下部では融着帯が成長するにつれて融着層間の粒度が小さくなるが、中心部の滴下帯では装入時の粒度をそのまま保っている。融着に際しては鉄石の還元率が上昇するとされているが、これは言い換えるとコークスのソリューションロス反応が促進されることであり、融着層間のコークスの粒度低下は、この効果によるものと考えられる。

ボッシュから羽口レベルにかけては、が壁近傍すなわちレースウェイ内およびその直上部だけが中心部と比較し小さいことが特徴であり、羽口レベル以下でもほぼ同じ傾向である。

コークスの強度変化をFig. 32に示す。ドラム強度はが下部へ降下するにつれて低下傾向を示している。マイクロ強度はシャフト下部で急激に低下し、それ以降では増加の傾向を示している。マイクロ強度のシャフト下部での急激な低下はコークス炭素層に浸したアルカリ成分変化の傾向と対応し、アルカリ成分は亀裂発生の原因となり、

Fig. 31 Mean size of coke, D_p (mm)

吸収量が多いと表層部の剥離や粒の崩壊を促進しマトリックス強度の低下を起こすという筆者らの実験データ¹²⁾と一致する。実験室での検討によるとマイクロ強度は熱処理温度とともに増大し¹³⁾、ガス化による気孔率が増すと低下する。マイクロ強度のシャフト下部以降での増加は、炉下部でのコークス中Cの反応率の増加が比較的少ないこと、Ash量の増加およびCの黒鉛化の効果が総合された結果であると考えられる。一方、図示しないが炉径方向についてみると、ドラム強度は顕著な傾向が認められなかった。マイクロ強度は塊状帯では炉芯部が高く炉壁部になるにしたがい低下し、

融着帯でもこの傾向があり、特に南側が北側より低い。すなわち炉内温度分布と一致し、コークスの炉内でうける熱履歴を反映している。

6.2 コークスの物性と化学成分の変化¹²⁾

コークスの気孔率および化学的性質の変化を、Fig. 33に示す。気孔率はシャフト中部まではほとんど変化がなく、シャフト下部からしだいに高くなっている。

JIS反応性(JIS K 2151)はシャフト下部付近より増加が始まっている。コークス中Cの反応率もシャフト下部付近より増加の傾向を示すが、炉

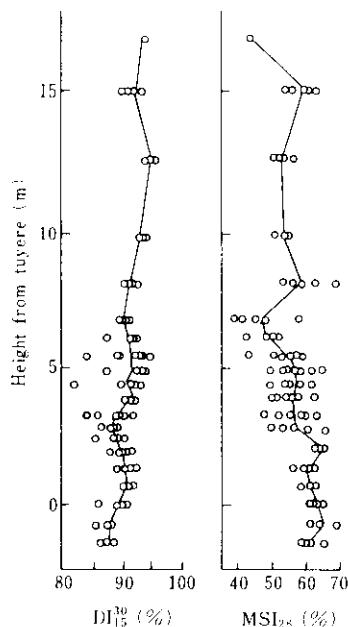


Fig. 32 Change of coke strength in blast furnace

下部へ降下してもそれほど増加せず、わずかの増加傾向を示すにすぎない。

Ash, T.S および Ash 中の化学成分の変化を Fig. 34 に示す。炉下部へ降下するにしたがって増加傾向を示すものは、Ash, Ash 中の Fe_2O_3 , CaO , MgO であり、減少傾向を示すものは、T.S, Ash 中の SiO_2 , Al_2O_3 である。アルカリ成分はシャフト下部からボッシュにかけて最も多くなりそれ以降減少している。図示しないが、炉径方向で融着帯の存在

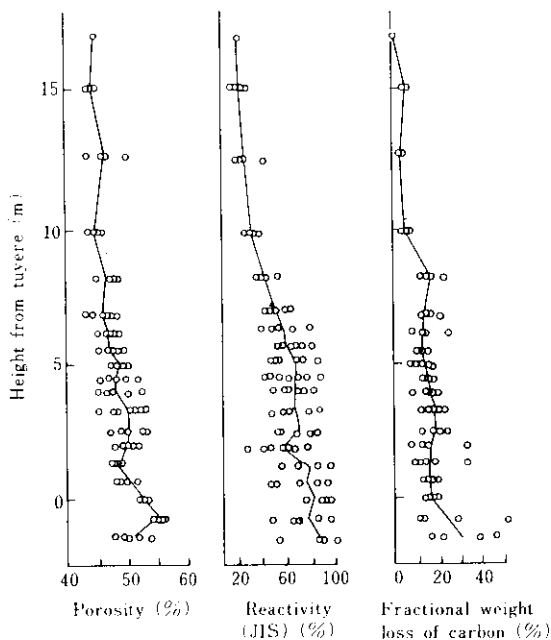


Fig. 33 Change of coke properties in blast furnace

する範囲において、炉芯部が高く炉壁に向かうにつれて減少している成分は Ash 中の Fe_2O_3 , MgO であり、この逆の傾向を示す成分は Ash, Ash 中の SiO_2 , アルカリ成分である。これらのコークス中の化学成分分布は、融着帯分布および温度分布とよく一致している。コークス中の T.S は、 1100°C 付近で一時減少し、その後 1500°C 以上で急激に減少する。これは、ペリー部からボッシュ部に向け

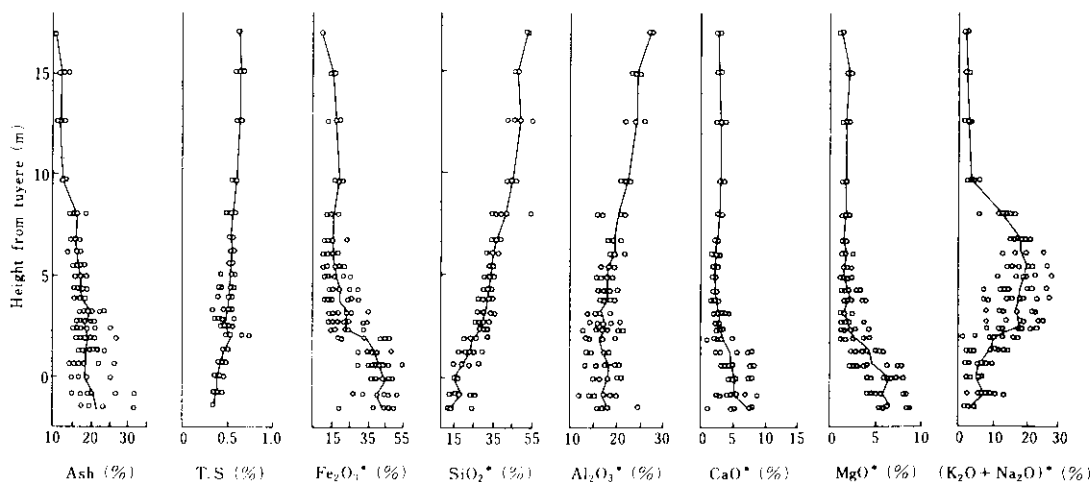


Fig. 34 Change of chemical properties of coke (* Ash components)

での融着帯のS分布 (Fig. 22 参照) と関連していると考えられる。アルカリ成分は炉内を循環しシャフト下部からベリ一部にかけて多く濃縮しており、この領域は1200℃前後である。

7. 主な調査結果

以上をまとめると主な調査結果は以下のとおりである。

- (1) 装入物および融着帯の分布および降下状況は東西南北で顕著な差があり、これは操業条件に起因するが、鉱石性状変化、コークス性状変化、温度分布、などに影響している。
- (2) レースウェイの境界はコークス粒径の差および小塊、粉コークス中にメタル、スラグの混合した緻密な層により判別された。コークス粒径の小さい部分で静的ホールドアップ量 H_s が大きく、通液性はレースウェイの下部が悪く、炉芯とレースウェイ間が良い。
- (3) 温度分布は融着帯形状と一致し、アルカリ成分分布などと対応する。
- (4) 鉱石粒度、強度は炉頂部で大きく減少するが降下過程での変化は少ない。焼結鉱の還元粉化量はたかだか4%である。鉱石の還元率は、塊状帯では30%以下であり、融着帯では30%以上で中心部で高く炉壁部で低い。
- (5) 融着帯は半径方向で組織変化が大きい。鉄滓分離状況および高塩基度スラグと低塩基度スラグの分離状況がみられる。Cは鉄滓分離後のメタルに浸炭、Sは鉄滓分離後のメタルに侵蝕する。
- (6) 融着帯の気孔率は、融着が進むと10%以下に

なり、通気抵抗指数は塊状帯の数十倍から数万倍高い。炉中心よりの融着層はガスが流れないが、炉壁側の融着層はガスが流れうる。

(7) コークス性状はシャフト中部付近までほとんど変化せず、それ以下での変化が著しい。炉下部へ降下するにつれて増加傾向を示すものは、マイクロ強度、気孔率、反応性、Ash中の Fe_2O_3 、 CaO 、 MgO などであり、減少傾向を示すものは、平均粒径、ドラム強度、T.S、Ash中の SiO_2 、 Al_2O_3 などである。

8. 結 言

千葉製鉄所第1高炉での解体調査結果の概要をまとめた。ここでは、炉内装入物の分布状況、温度分布、レースウェイの構造など炉口付近の状況、鉱石類、コークスの性状変化および融着帯に関する調査結果を紹介した。特に融着帯に関しては、融着層を大塊のまま採取し断面を一体として観察できたほか、融着層断面でのSの分布状況、融着層でのスラグ組成の変化、鉄滓分離過程などが明確にされた。さらに、融着層の炉内半径方向位置での通気抵抗指数の測定から、炉内融着帯付近でのガス流れ分布が推察された。

高炉解体調査については、多くの人達から、いわゆる“死体解剖”であるとの指摘を受けるが、今回の調査結果によって高炉操業に有益な、さらに新しい情報を得ることができたものと考ええる。今後これらの知見をもとにして、新しい技術の開発など高炉操業への実際の寄与を考えていきたい。

参 考 文 献

- 1) 田口、小坂橋、稲谷、高田、植谷、高橋、奥村、田川：鉄と鋼，63 (1977) 9，計1
- 2) 橋爪、高橋、中川、富田、佐藤、森岡、小坂橋：鉄と鋼，64 (1978) 4，S108
- 3) 近藤、小西、小坂橋、森岡、橋爪、高橋、奥村、富田：鉄と鋼，64 (1978) 11，S546
- 4) 小西、近藤、小坂橋、森岡、橋爪、高橋、奥村、富田：鉄と鋼，64 (1978) 11，S547
- 5) 森岡、小坂橋、橋爪、高橋、奥村、富田：鉄と鋼，64 (1978) 4，S109
- 6) 岡部、森岡、小坂橋：学振54委-1455，(1978)
- 7) 西田、重見、斧、山口：学振54委-1360，(1975)
- 8) 下村泰人ら：鉄と鋼，62 (1976) 5，547
- 9) A.W.Hillsら：Process Engineering of Pyrometallurgy，(1974)
- 10) 小坂橋、田口、森岡、橋爪、高橋、奥村、富田：鉄と鋼，64 (1978) 11，S548

- 11) 杉山, 八木, 大森: 鉄と鋼, 64 (1978) 12, 1676
- 12) 近藤, 小西, 岡部: 鉄と鋼, 62 (1976) 4, S28
- 13) 近藤, 小西, 岡部: 川崎製鉄技報, 16 (1974) 1, 1

