

669.162.262.4:669.162.263:620.186 高炉シャフト部における装入物の性状変化について*

中 沢 孝 夫**・佐々木 稔**

The Change of Properties of the Charge Materials in a Blast Furnace Shaft

Takao NAKAZAWA and Minoru SASAKI

Synopsis:

The burden material samples taken from the three levels of the Tobata No 1 BF shaft were classified in sinter, hematite ore (Swaziland), magnetite ores (Chilli and Dungun) and so on. The size distribution, degree of reduction and microstructure of them were also examined. Large increases of small particles (-5 mm) of the iron ores were observed in the sample from the level of 3 m bellow the stock line and the mixing ratio of the ores from the level of 8m bellow was close to the proportion of the used ores in operation. The bursting of iron ore is considered to be related with the both reduction and turbulent mixing in the shaft. It was found that the silicate glass matrix of sinter became rich in CaO and poor in Al_2O_3 during reduction and the calcium ferrite transformed into the spinel of $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ system. The effect of the composition change of sinter on the softening is discussed.

(Received July 20, 1968)

1. 緒 言

最近の製鉄原料の処理は鉱石の整粒と塊成化を中心に発展しているが、高炉の大型化と操業速度の向上はさらに原料の品質に対する要求を高度なものにしている。しかるに、わが国では広く海外の鉄資源に依存している関係から、一定した銘柄鉱石を継続して装入することは不可能であり、多種のものをいろいろな割合で使用せざるを得ない状態にある。こうしたことから、炉内での実際の状態に近いと考えられる条件下での炉前試験法の開発が急がれ、各方面でいろいろ検討されつつある。この炉前試験法の開発と並んで、高炉内から直接内容物を採取し、装入原料の炉内性状を調べる方法も重要であり、わが国においてもその試みが最近行なわれはじめている¹⁾。しかし、装入原料種を極力少なくして操業し採取物の化学組成変化から問題の解明を計る。ソ連で行なわれるような試験操業の方法^{2,3)}は、わが国においては実際のでないと思われる。わが国においてはやはり、多種銘柄を装入しなければならないという特殊性に立脚した炉内容物の調査方法の確立が必要と考えられる。

本研究は、戸畑第1高炉シャフト部で採取した内容物が外観的にも、また組織的にもそれぞれの特徴をまだかなり残していることに着目し、その採取試料を、使用した装入物の種類と銘柄ごとに、また採取時に混入した耐火物、変質耐火物あるいは炉内下部からの種々の吹き上げ物ごとに分類したうえで、その粒度変化、化学組成ならびに鉱物組成変化などを追求したものである。その結果、シャフト部における装入原料の変化過程について、

重要ないくつかの知見が得られたので報告する。

2. 実験試料および方法

2.1 実験試料

昭和41年7月に戸畑第1高炉(炉容 1603 m^3 , 炉床径 8.7 m) が吹却されたが、その吹却前の休風時を利用して炉内各所から内容物を採取した。

本実験試料はシャフト部の7, 5, 3床(ストックライン下 $3.8, 6.8, 11.7\text{ m}$) から採取したものであるが、当時第1高炉は吹却し準備の軽操業が実施されていたため、実際の操業レベルはストックライン下 3.9 m であり、これはちょうど7床位置に相当していた。そのため、5, 3床試料は操業レベルのそれぞれ $2.8, 8.9\text{ m}$ 下部の内容物に相当するものである。

炉内容物の採取は、他の研究で報告⁴⁾されているのと同様に、炉壁に近い内容物を掻き出し、密閉容器中で放冷する方法によった。採取した内容物はそれぞれ10数kgあつたが、そのうち本試料とした分は、あらかじめ粗粒コークスを取り除いたもの($5\sim 8\text{ kg}$)から縮分した約1kgである。

なお、当時の第1高炉の操業状況は、送風温度 600°C 送風量 $2350\text{ m}^3/\text{min}$, コークス比約 620 kg , 出鉄量 1900 t/day , 炉頂温度約 300°C であり安定した炉況が持続されていた。当高炉で使用していた原料の平均装入割合を Table 1 に示した。

* 昭和42年10月本会講演大会にて発表

昭和43年7月20日受付

** 八幡製鉄(株)東京研究所

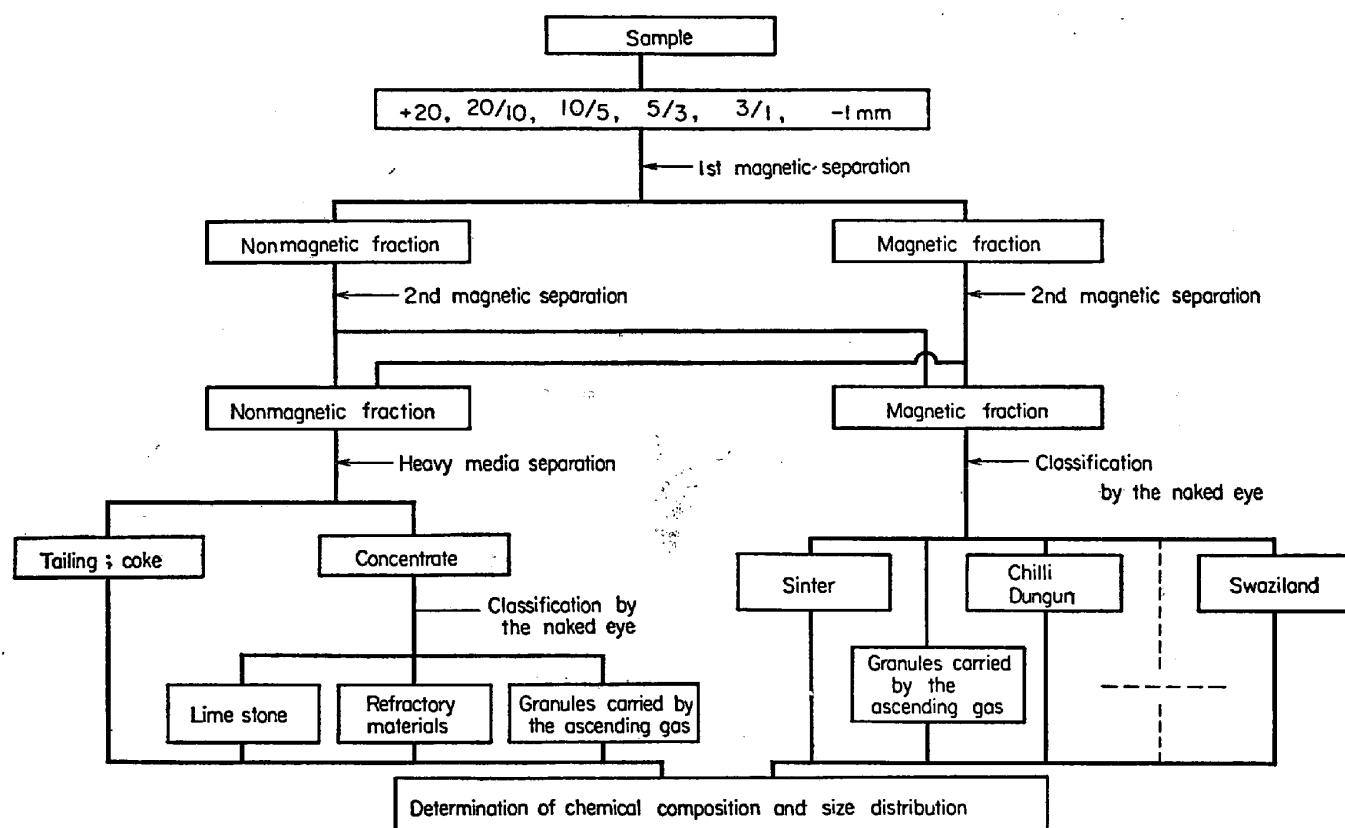


Fig. 1. Classification of the sample taken from the shaft.

Table 1. Mixing proportion of charged materials.

Material	Mean mixing proportion (%)
Sinter	41.0
Swaziland	12.1
Chilli and Dungun	13.7
Goa	2.2
Manganese ore	1.1
Lime stone	2.7
Coke	27.1
Total	100

2.2 実験方法

2.2.1 炉内容物の分類方法

採取した内容物は Fig. 1 に示す方法によつて分類した。それを以下に説明する。

まず、試料を 20, 10, 5, 3, 1 mm に篩分け、その粒度分布を求める。粒度を揃えた試料は、つぎの肉眼による銘柄分類を容易にするため、フェライト磁石で 2 回ずつ磁選分離を行なつた。非磁着物には若干のコークス粒子が残っているので、重液分離（テトラブромエタン + 四塩化炭素混合液、比重約 2.2）によりコークスを浮上させて分離した。このようにして各粒度ごとに磁着物およびコークス粒子を完全に除いた非磁着物試料については、装入物の種類と銘柄ごとに肉眼で分類することを計つた。この肉眼分離法は、かなりの数の粒塊について

組織と外観的特徴との関係を把握し、それに習熟する必要があるが、経験を積みば 1 mm 程度の細粒まで精度よく銘柄別に分類することも可能となるものである。

2.2.2 粒塊の分類基本型

装入原料銘柄ごとの組織と外観的特徴の観察、ならびに熱割れ試験、還元粉化試験を行なつて、あらかじめ装入物の外観的变化を把握しておき、それをもとに採取試料の状態を検討したところ、つぎの 11 種に分類することができた。

a) 焼結鉱

特徴的な外観から容易に分類できる。炉前の試験結果では、900°C における還元粉化は、-5 mm 指数で 4.1 % 程度であつたが、試験後亀裂の発生した粒塊がかなり認められる。

b) スワジランド鉱石

褐鉄鉱質の粒塊も少量存在していたが、総じて hematite の層状構造の見られるのが特徴的である。熱割れ試験では、ち密層状の塊鉱に割れが発生するが、粒度的にはそれほど小さくならない。還元粉化の -5 mm 指数は 2.5% にすぎないが、層理面に対し垂直方向に無数の亀裂が入り、壊れやすい状態であつた。

c) チリーおよびズングン鉱石

赤鉄鉱質の鉱石であるが、いずれも magnetite を随伴

している。外観的にチリーとズングン鉱石を判別する特徴が少ないうえに、組織的にも1次の magnetite と hematite との共存関係が酷似しているので、個々の銘柄性を正確に区別することは困難である。それゆえ、本実験ではこの両者を合わせて分類した。

熱割れは両者とも同じような塊、すなわち、goethite の厚い層が間隙を埋めているような粒塊に起こるが、いずれも粒度の低下は顕著でなかつた。還元粉化の-5 mm 指数はチリーで1%以下、ズングンで約1%程度であつた。

d) ゴア鉱石

ラテライト化した黄褐色の塊や縞状の厚い goethite 層のあるもの、粗粒礫状を呈するものなど、いろいろな塊

が存在するが、容易に分類される(使用量は少なかつた)。

e) インド鉄万俺鉱石

激しく熱割れを起こしてしまい、ほとんど原形をとどめない。その結果、破片のいずれもが尖鋭な角を有する。事実、炉内容物中では小片ばかりであつたし、炉前の試験結果にみられる特徴的な破片となつていた。

f) 石灰石

g) コークス

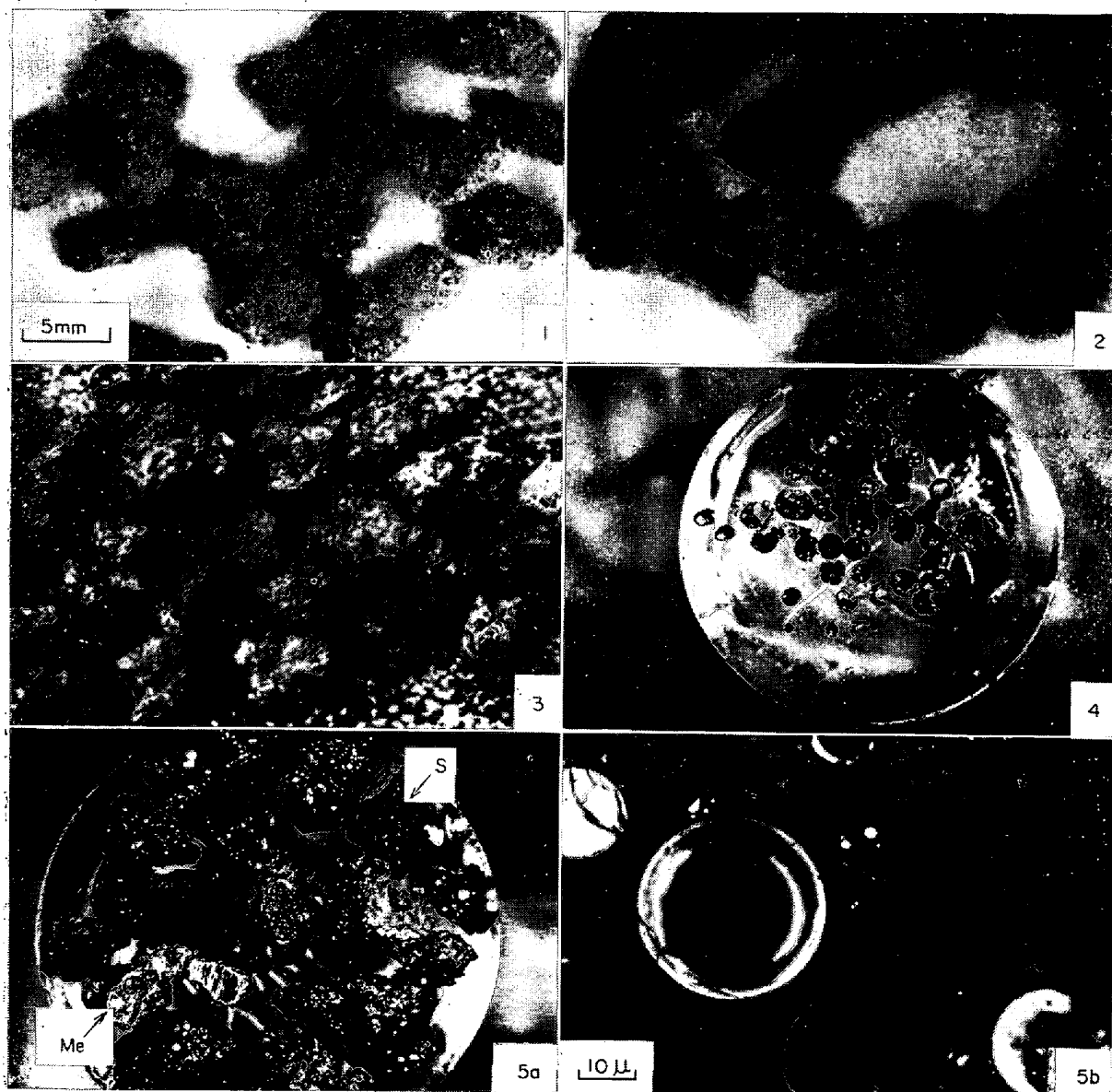
h) 耐火物およびその変質物

i) Spinel 粒塊

j) 金属鉄粒子

k) スラグ質粒塊

このうち h) の外観は Photo. 1-1, -2 に示したが、淡



1) Firebrick of chamotte, 2) Scaffold, 3) Spinel of $\text{FeO} \cdot (\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_3$, 4) Metallic iron, 5a) Slag, 5b) Microstructure of the slag granule, (3~5; Granules carried by the ascending gas)
S) Slag granules, Me) Metallic granule

Photo. 1. Granules mixed in the burden materials.

黄褐色のシャモットの破片あるいは偏平な灰白色の粒塊で、その化学組成 (Table 2 参照) から考えても採取時に混入した耐火物ないし変質耐火物であることは明らかである。i) は Photo. 1-3 にみられるように焼結鉱に

よく似た外観を呈するが、主として $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 系の spinel 粒子からなり、炉腹部に多く存在するものである。Photo. 1-4, 5 は、シャフト部で見つけられた粒状の金属鉄および珪酸塩質のスラグである。その形状および組織の特徴と、スケール、転炉滓などの雑原料が使用されていなかったことを考え合わせると、高炉下部の溶融帯付近で生成したものであることが明らかである。したがって、i)~k) の粒塊は、高炉下部から吹き上げられてシャフト部に混入したものと考えられる。

Table 2. Result of classification of the sample.

Species	Weight	Level		
		7th floor	5th floor	3rd floor
Swaziland	79.1	41.1	95.4	
Chilli and Dungun	307.7	56.9	97.4	
Sinter	298.8	454.0	609.5	
Goa	25.4	—	—	
Manganese ore	—	1.1	7.2	
Lime stone	—	—	0.7	
Coke	1.4	31.0	26.1	
Firebrick of chamotte and its altered material	20.4	13.7	75.6	
Granule of the spinel $\text{FeO} \cdot (\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_3$	26.4	55.3	32.4	
Granules of the metallic iron and slag	3.7	2.6	4.2	
Total	762.9	656.0	948.5	

3. 実験結果および考察

3.1 銘柄別の分類結果

前節で述べた粒塊の分類基本型にしたがつて、内容物を各銘柄ごとに分類した結果を Table 2 に示す。装入原料に対応しない炉壁の耐火物あるいは下部からの吹き上げ物に由来するものが 10 数%存在していることがわかる。この結果から、普通行なわれるような、炉内容物を磁選し化学分析する方法では、大きな誤りを生む可能

Table 3. Chemical composition of the classified lump materials.

Species	Sampling level	Chemical component (%)										
		T.Fe	M.Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	S	C
Sinter	(Charge)	56.42	—	8.89	6.31	2.86	9.44	0.88	—	—	0.016	—
	7th floor	53.06	—	9.22	7.28	1.95	11.23	0.40	—	—	0.035	0.05
	5th floor	57.85	<0.01	10.09	6.32	2.30	6.41	0.46	—	—	0.023	0.04
	3rd floor	61.88	0.89	38.76	7.43	3.56	9.81	0.53	0.60	0.11	0.044	0.55
	〃	60.65	0.82	34.17	6.05	2.45	7.16	0.42	0.12	0.07	—	—
	〃	54.64	0.42	28.91	6.48	2.80	9.31	0.11	0.30	0.10	0.030	0.07
	〃	55.68	0.51	44.56	7.35	2.73	9.59	0.41	0.10	0.08	—	—
Swaziland	(Charge)	65.05	—	0.09	3.54	2.52	0.07	trace	0.066	0.001	0.022	—
	7th floor	68.28	—	9.65	2.52	1.49	0.08	0.07	—	—	0.003	0.04
	5th floor	68.36	<0.01	20.21	2.20	1.38	0.29	0.24	—	—	0.018	1.53
	3rd floor	70.41	<0.02	45.12	2.20	1.66	0.16	0.20	0.39	0.06	0.015	0.05
Chilli and Dungun	* ** (Charge)	64.35	—	9.64	4.82	1.03	0.64	0.61	0.089	0.005	0.088	—
		62.08	—	5.41	3.28	2.52	0.19	0.25	0.075	0.030	0.060	—
	7th floor	67.91	—	10.41	1.70	0.42	0.13	0.31	—	—	0.024	0.04
		68.72	—	5.56	2.21	2.32	0.27	0.30	—	—	0.005	0.05
	5th floor	69.53	<0.01	13.00	1.12	1.37	0.33	0.45	—	—	0.005	0.16
		67.02	<0.01	12.58	2.18	2.07	0.28	0.28	—	—	0.003	0.41
	3rd floor	67.30	0.42	42.51	1.90	0.72	0.37	0.18	0.12	0.05	0.047	1.00
		67.44	0.38	41.41	2.52	2.22	0.18	0.25	—	—	0.038	0.16
Lime stone	5th floor	2.74	—	—	9.70	1.62	32.79	0.12	—	—	0.025	—
Firebrick of chamotte	〃	4.33	—	—	56.02	29.03	1.66	0.18	0.90	0.25	0.018	1.53
Altered material of firebrick	3rd floor	7.76	<0.02	1.25	25.34	23.11	0.54	0.11	19.32	1.33	0.035	2.11
Granule of the spinel	〃	45.52	0.64	53.14	14.28	11.73	0.24	0.60	0.25	0.07	0.008	0.16

* Chilli ** Dungun

性が指摘されよう。

装入原料ごとに分類した代表的粒塊の化学組成ならびに装入原料の平均化学組成が Table 3 である。これを見ると、分類した粒塊の脈石成分はそれぞれ装入原料の平均組成に非常によく一致しており、本実験における炉内容物分類の正確なことが示されている。

さてシャフト部において主原料に付加される成分を見ると、Cとアルカリは3床試料でわずかな増加を示すにすぎないことから、deposit carbon による還元が少なかつたこと、アルカリの付着レベルはさらに下方にあることがわかる。Sはシャフト上段でいつたん減少するが下段では逆に増える傾向にある。したがって、シャフト上段では原料中に含まれる硫化物は分解するが、下段になると雰囲気ガスからあらたにS分の吸収のあることがわかる。

3.2 装入主原料の炉内性状

採取した炉内試料のうち装入量の多かつた焼結鉱、チリー、ズンゲンおよびスワジランド鉱石の被還元性、内容物中の混在割合および粒度変化を銘柄ごとに比較検討した。

3.2.1 被還元性の比較

焼結鉱および鉄鉱石では、たとえ銘柄が同じであつて

も塊のひとつひとつが化学組成を異にしている。そのため、炉内容物から分類した各種粒塊の真の酸素除去率を求めることは不可能である。こうした場合、粒塊のFeを基準として酸素除去率を推定するいくつかの方法が提案されているが、ここではつぎのような式*を考案して、T・Fe, FeII, M・Fe から“還元率”を求めることにした。

$$RR = \frac{M \cdot Fe + 1/3 Fe^{II}}{T \cdot Fe} \times 100$$

一方、顕微鏡観察によれば、7床採取試料では装入原料と組織的な違いが認められなかつたので、還元がほとんど進行していないことがわかつた。したがって、それ以下のレベルでの還元の進行度は、7床試料をもとに推定することができるであろう。

Fig. 2は、分類した粒塊の銘柄別“還元率”を示したものである。炉内容物中には、いろいろな粒度の塊が存在していたが、粒度による“還元率”の差は認められなかつたので、ここでは採取レベルごとに“還元率”をプロットした。

* 原料を hematite と仮定すれば、還元過程における T・Fe, FeII, M・Fe の間にはつぎの関係が成り立つ。
原料が hematite, FeII/T・Fe=1, RR=0%
全部が FeO となつた場合, FeII/T・Fe=1, RR=33.3%
全部が金属化した場合, M・Fe/T・Fe=1, RR=100%

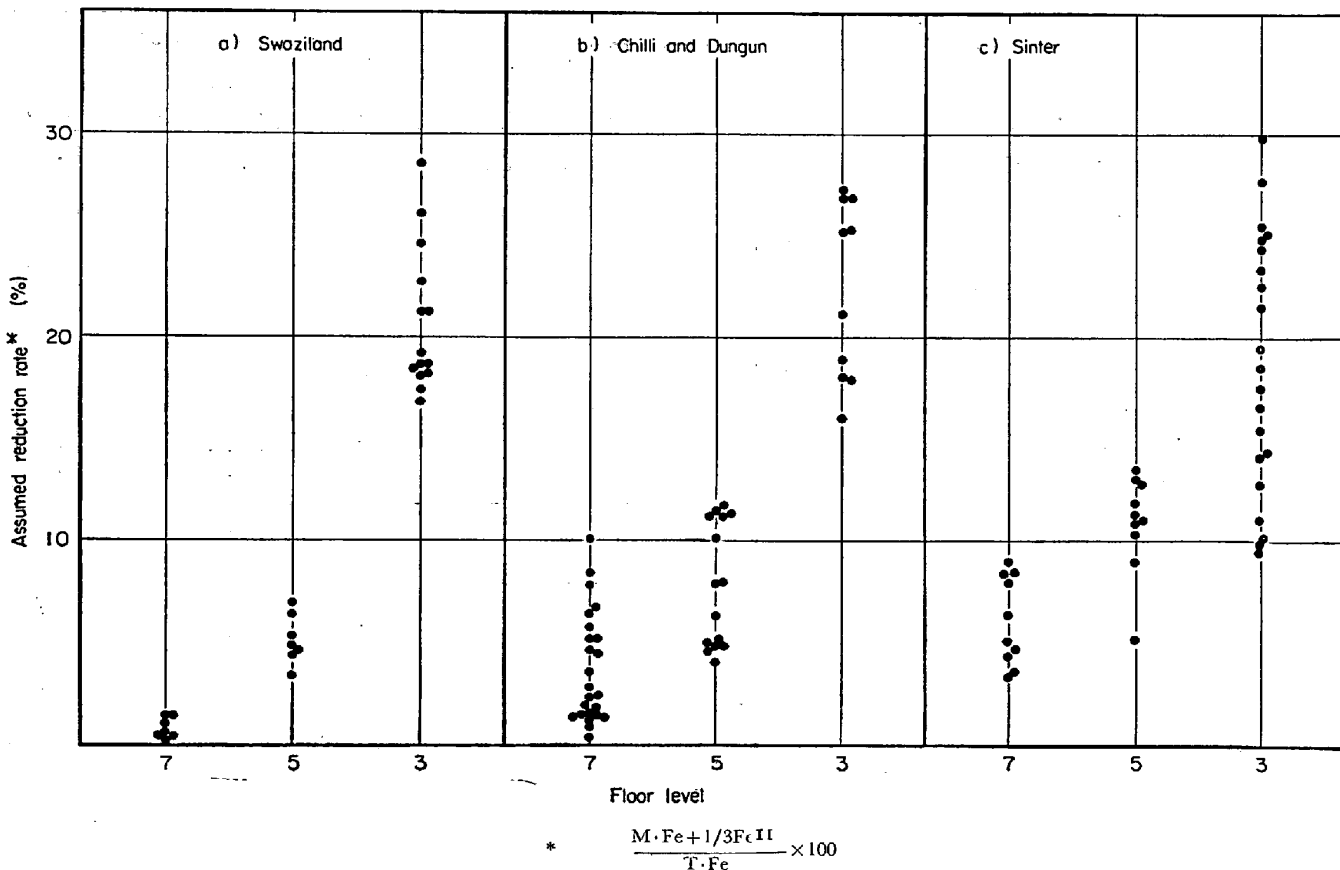
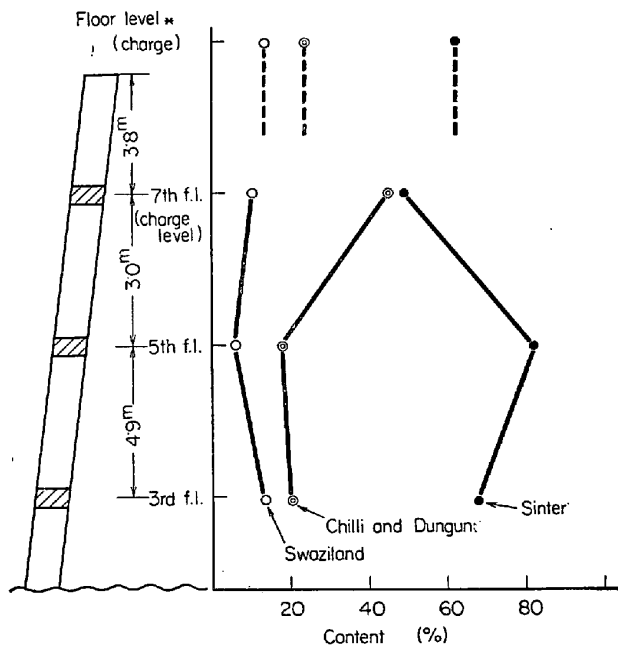


Fig. 2. Proceeding of reduction of the iron ores in the shaft.



* Mean proportion of the used iron ores

Fig. 3. Change of mixing proportion of the iron ore.

7床から5床レベルに至る間での還元進行度は、銘柄に関係なく、“還元率”にして4～5%程度の上昇が見られるにすぎない。7～5床間における還元進行が hematite から magnetite を生成する範囲にあること、その還元が急速に進行することなどが、銘柄間に被還元性の差を生じない原因と思われる。一方、5～3床間における還元反応は magnetite から wüstite に変わる領域にあるので、各銘柄の還元進行度には若干の差が現われている。とくに、焼結鉱の還元進行度の小さいこと、そのバラツキの大きいことが目立っている。前者については、焼結鉱中の酸化鉄粒子と calcium ferrite 粒子は

silicate glass によつて包まれているため、そうでないものに比べれば還元されにくい状態にあることが原因と考えられる。後者は、粒塊ごとに鉱物組成および組織の異なることによつてもたらされるものと思われる。

3.2.2 装入物の分布

Fig. 3 は、採取された炉内容物中の主原料混合比を示したものである。操業レベル位置における内容物には、平均配合率に比べて焼結鉱が少なく、チリー、ズンゲン鉱石が多く存在しており、かなりの偏析のあることがわかる。しかし、操業レベルから 2.9～8.9m 下方では、少々のバラツキはあるが装入時の平均配合率に近い値を示している。これは装入物がかなりよく混合しながらシャフト部を下降し、その過程で平均化されることを現わすものと考えられる。

この下降時の混合は、後述する装入物の細化と密接な関連性をもっているが、内容物の採取方法からみて、炉壁近傍のようなある特定な場所でのみ起こっているのか、あるいは炉内すべての場所で起こる一般的現象かどうかは、今後、炉軸方向に深く採取された試料を調査することにより明らかにされるものと思われる。

3.2.3 原料の細化

Fig. 4 に示した銘柄間の粒度変化に前項の結果を合わせて検討すると、シャフト部における主原料の細化過程を明らかにすることが可能である。装入原料はあらかじめ炉前で 6 mm の篩によつて粉を取り除いて装入しているため、7床の採取物に -5 mm 粉の存在しないのは当然であるが、こうした装入物がシャフト部を下降しながら還元を受けると、装入物の粒度分布はかなり小さい方へ移行している。そして激しい細化を起こすのは操業レベルの 2～3 mm 下であり、それより下部では装入物の

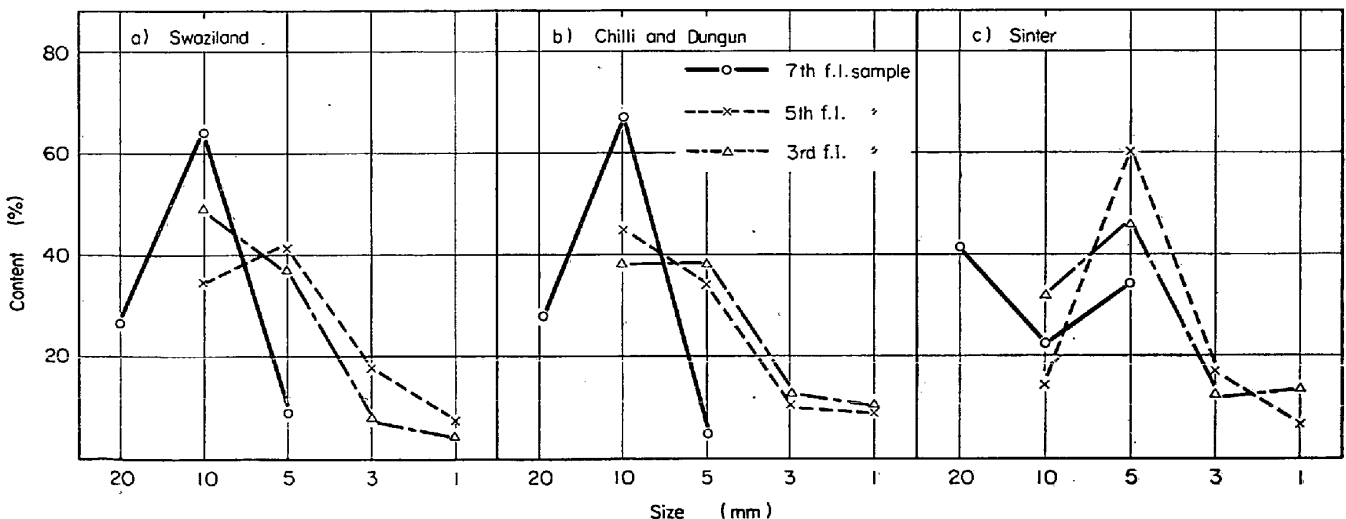


Fig. 4. Size distributions of the iron ores at each level.

粒度分布にはほとんど変化は現われない。もちろん、その過程で発生する微粉は dust 化して炉外へ排出されるであろう。

一方、これを銘柄ごとに検討すると、焼結鉱の平均粒径の低いこと、鉄鉱石とはやや変わった粒度分布を示すことが目立つが、細化の傾向は同じである。したがって、原料の細化はそれ自体の熱割れ性や還元初期段階における粉化性に基因していると考えられる。また、それぞれの粒塊の破面の状態もそのことを裏書きしていた。しかし、細化と銘柄間の関連性のないこと、いずれの原料も多量の - 5 mm 粉 (20~30%) を発生していることは、炉前の還元粉化率 (- 5 mm 指数) だけから装入原料を完全に評価できないことを示している。

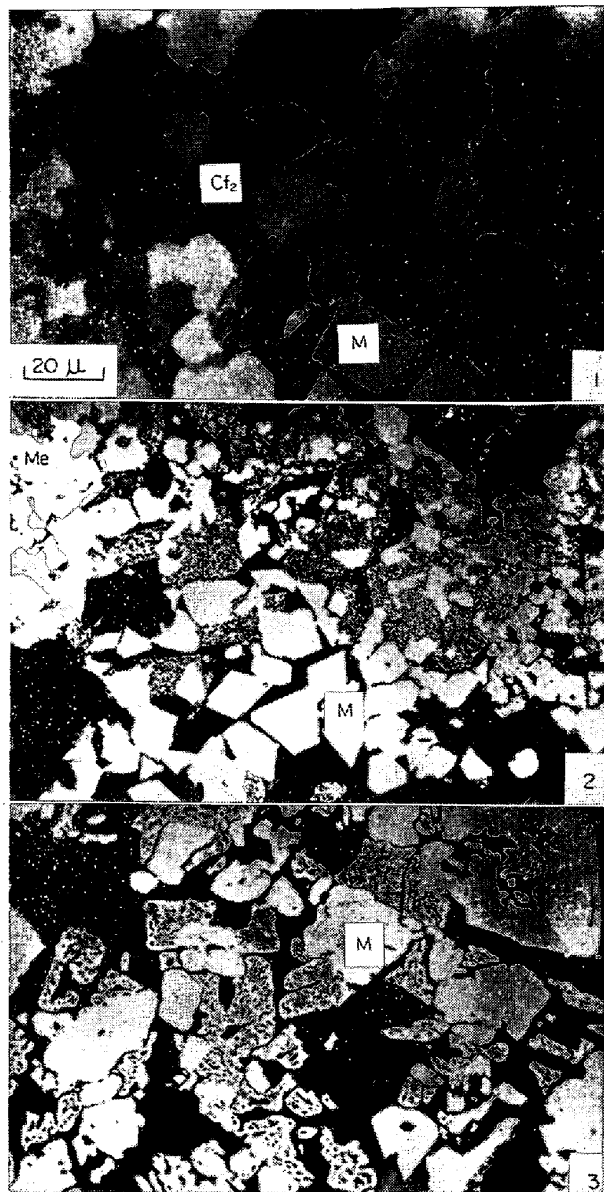
さて、原料の還元粉化は、hematite が magnetite 化する段階で発生する微細なクラックが原因となり、その成長によつて粒塊が破壊し、粉を発生する現象である³⁾。それゆえ、十分に焼成された焼結鉱や大部分の鉄鉱石では亀裂が入る程度にすぎず、- 5 mm 指数はあまり高い値を示さない。ところが、本炉内試料の調査結果では、装入物の混合と原料の細化の起こるレベルが一致していること、5 mm 以下の細粒が多いこと (炉前試験の値に比べて)、さらに下部では装入物の粒度分布がほとんど変わらないことなどがあげられる。こうした事実からは、装入原料の細化は、粒塊中の hematite が magnetite 化する段階で発生する歪みや亀裂に原料同志の摩擦や上部からの荷重が加えられるため、急速に進むものと考えざるをえない。

以上のごとく、炉前の単一銘柄の試験結果には現われない多くの問題点が明らかになったが、これは炉内容物を銘柄ごとに分類し検討したことによつてはじめて提起されたものである。

さて、本内容物の示したシャフト部上段の炉内現象は、現在の高炉操業および装入原料ではある程度さげられないことのように思われる。しかし、シャフト部における装入物の粒度低下を極力少なくおさえることは、安定した炉況を保つためにも、また、炉内の通気性すなわち高い生産性を維持するためにも重要なことである。それゆえ、炉内性状にもとづいた装入原料の品質改善ならびに装入物の正しい評価法の確立が必要とされる。そのためには、さらに多くの検証を積み重ねて、装入原料の一般的な炉内性状を解明すべきであると考えられる。

3.3 焼結鉱の鉱物組成変化

5、3 床から分類した焼結鉱の鉱物組成と組織を調べた結果、主要な鉱物相である hemicalcium ferrite および matrix slag に特異な変化の現われているのが認めら



1) Microstructure of the sinter from the 5th floor level
2) and 3) " " " 3rd " "
M) Magnetite, Cf₂) Hemicalcium ferrite, Me) Metallic iron

Photo. 2. Change of the hemicalcium ferrite particles of sinter.

れた。

Photo. 2-1 は、5 床における焼結鉱で magnetite, 長柱状 hemicalcium ferrite (粒子内部には反射明灰色で細脈状の 3 元系 calcium ferrite が析出している⁷⁾) および matrix slag から成る代表的な組織を示すものである。ここでは、装入原料と比べてはつきりした組織および化学組成上の変化は生じていない (Table 2 参照)。

Photo. 2-2 は 3 床の焼結鉱で、一部に金属鉄の析出の始まっている組織である。粒塊の周囲から金属化していたが、magnetite 粒子から金属化しているのが見られる。一方、これと共存している calcium ferrite 粒子を見ると、粒子の形骸は残しながらも、その粒子内では 2 種以上の微粒鉱物に変化している。さらに、Photo. 2-3 では、

Table 4. Results of X-ray diffraction analysis of sinters.

Sinter from the 5th floor level						Sinter from the 3rd floor level		
Nonmagnetic fraction			Magnetic fraction			Nonmagnetic fraction		
d (Å)	I	Ident.	d (Å)	I	Ident.	d (Å)	I	Ident.
5.12	m	Hemi	4.86	m	M	5.26	w	Hemi
3.88	m		3.69	w	H	4.86	w	M
3.68	s	H	3.00	w	Hemi	3.69	w	H
3.49	w		2.97	s	M	3.01	w	Hemi
3.18	w		2.78	w	Hemi	2.97	s	M
3.00	m	Hemi	2.70	m	H	2.89	m	Hemi
2.97	m	H, M	2.59	w	Hemi	2.80	w	
2.77	m	Hemi	2.53	v s	M	2.76	m	Hemi
2.75	w		2.20	w	Hemi	2.70	m	H
2.69	v s	H	2.10	s	M	2.61	m	Hemi
2.61	m	Hemi	2.02	w		2.53	v s	M, H
2.51	v s	H	1.83	w	H	2.48	w	
2.46	w		1.71	m	M, H	2.21	m	H, Hemi
2.43	w		1.61	s	M	2.15	s	Wu
2.35	w		1.48	s	M, H	2.10	s	M
2.25	v	Hemi	...			1.84	m	Hemi
2.20	s	H, Hemi	...			1.71	w	Hemi
2.15	w					1.69	s	M, H
						1.52	m	Wu
						1.48	s	M, H

Notation H : hematite M : magnetite Wu : Wüstite Hemi : hemicalcium ferrite

粒塊の還元はそれほど進んでないが、微粒鉱物の粒成長およびそれに伴うものの calcium ferrite 粒子の外形の崩れが顕著である。そして周囲の粗粒 magnetite の外形にもかなりの変形の跡が認められるので、シャフト下部において温度上昇による焼結を起こしたことがわかる。

Table 4 は、Photo. 2-1, 2 に示したと同様の組織をもつ粒塊を粉碎・磁選して得た磁着分および非磁着分の X 線回折分析結果である。磁着分については 5 床の一例のみを示したが、3 床試料もこれとほとんど同じで、magnetite の強い回折線のほかには、hemicalcium ferrite, hematite の弱い回折線が認められるにすぎない。非磁着分については、5 床および 3 床試料とも hemicalcium ferrite, hematite および wüstite が確認されたが、後者では wüstite の回折線が明確となる一方、hemicalcium ferrite はやや不明確になる傾向にある。なお、顕微鏡下で認められる matrix 中の珪酸塩鉱物は、X 線回折分析では同定することができなかつた。

Photo. 3-1 は、上述の変質を始めた calcium ferrite 粒子を含む組織 (Photo. 2-2) を X 線マイクロアナライザーで調べたものである。

中央部の calcium ferrite 粒子に代表されるように、いずれの変質 calcium ferrite 粒子からも Fe のほかに Ca, Al が検出される。もともと焼結鉱中の hemicalcium ferrite 粒子には、 Al_2O_3 分が calcium aluminate として固溶しているが、その Al 分は還元の初期段階

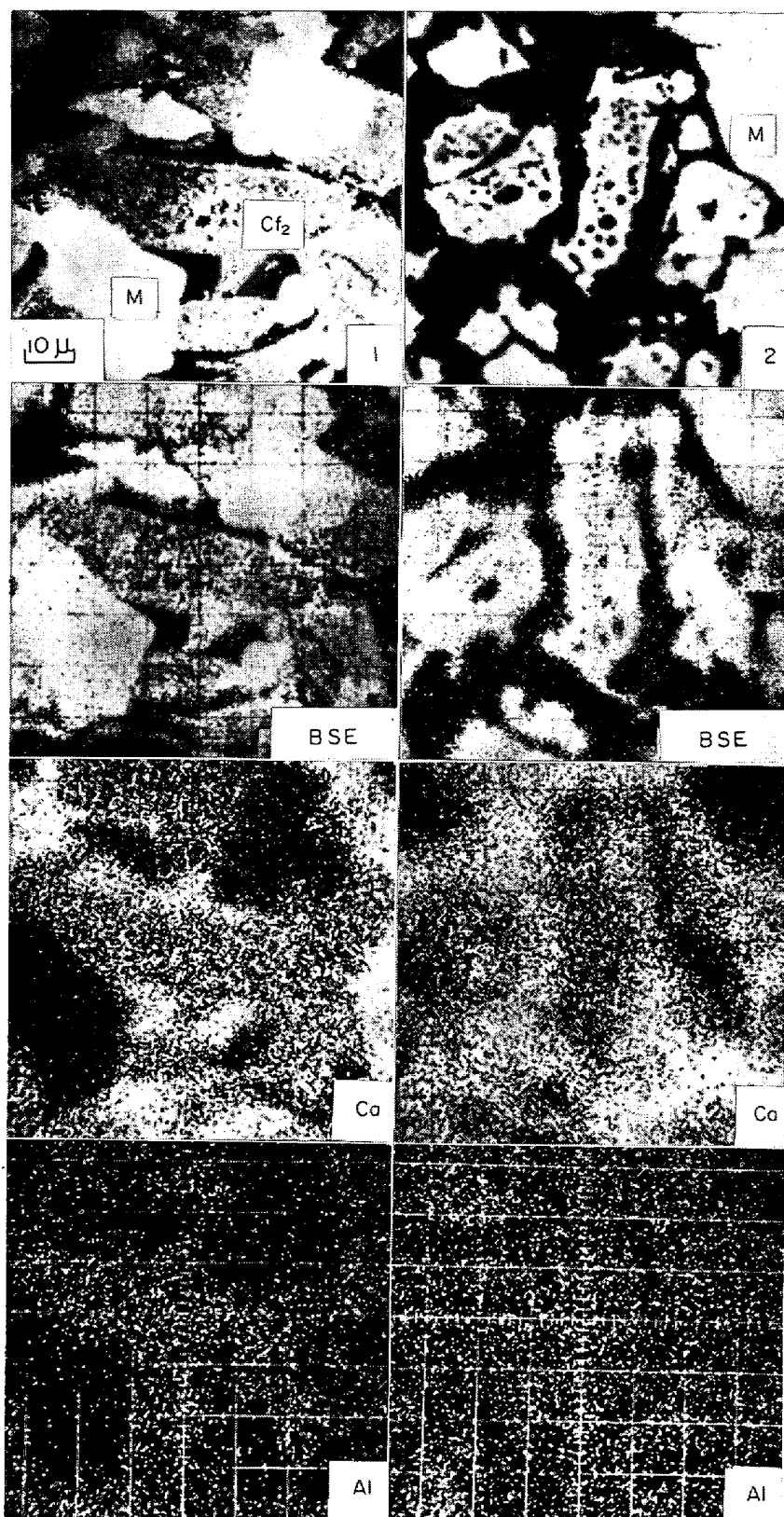
Table 5. Change of chemical composition of the slag matrix of sinter.

Sinter	Composition* of the slag matrix	As oxide (%)				
		Al_2O_3	SiO_2	CaO	FeO	Sum
Charge		6~9	30~35	38~40	15~20	
From the 3rd f.l.		<1	28	54	10	(93)
"		<1	30	55	9	(95)

* Determined by X-ray microanalyser

において matrix へは移動しないことが明りようである。Photo. 3-2 は変質後さらに粒成長をしている calcium ferrite 粒子 (Photo. 2-3) で、ここでは Ca の減少が認められる。Al の分布状態はあまり明りようでないが、焼結鉱にもともとあつた (あるいは hematite から生成した) magnetite の粗粒にも Al が含有されていることは興味深い。

以上の結果、3 床から採取した焼結鉱粒塊中にみられる変質 calcium ferrite 粒子は、magnetite 化の過程にあることがわかる。したがって、calcium ferrite 粒子の還元・変質からできる形状不整な magnetite の小粒と magnetite の粗粒は、calcium ferrite 粒子に固溶していた Al_2O_3 分ならびに周囲の silicate glass に含まれていた Al_2O_3 分を取り込んで、いずれも $\text{Fe}_3\text{O}_4\text{-FeO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$



1) Hemicalcium ferrite particle in the early stage of phase transformation,
2) " " in the middle stage,
Cf₂) Hemicalcium ferrite particle, M) Magnetite particle
BSE) Back scattered electron image

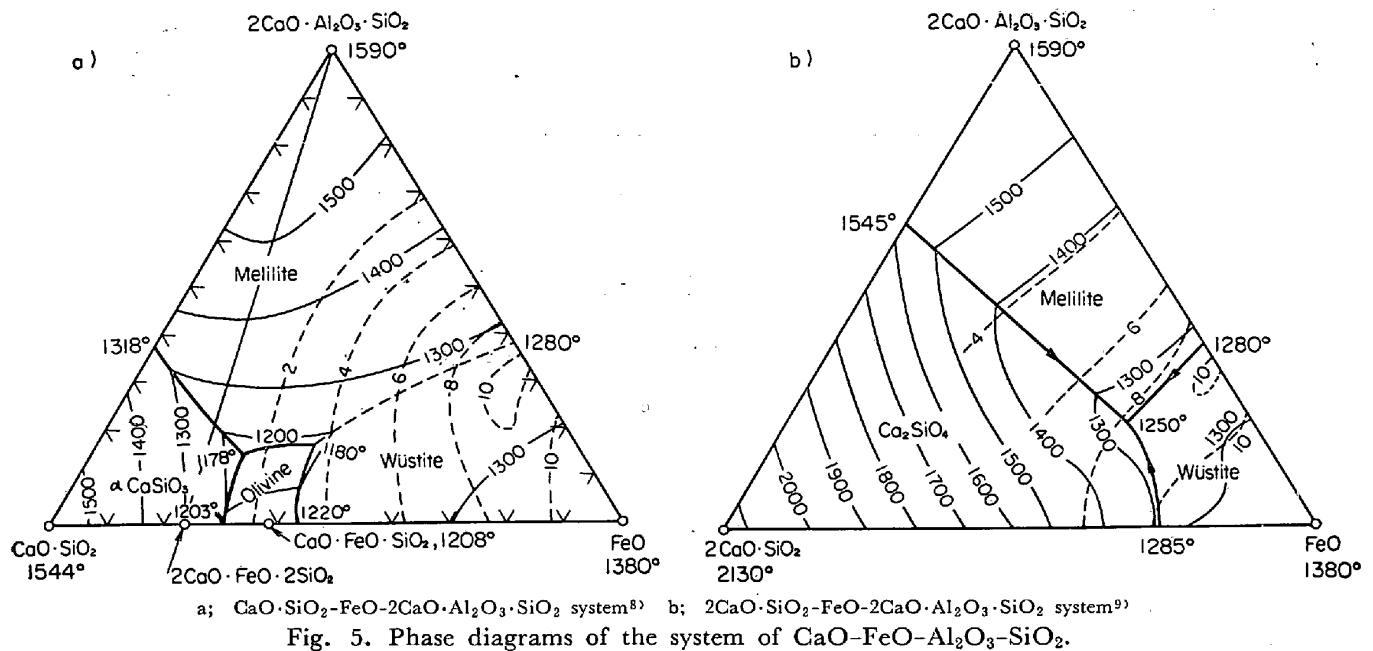
Photo. 3. Scanning images of characteristic X-ray of the hemicalcium ferrite particles of the sinter samples from the 3rd floor level.

固溶体に変わっていく。そのため、焼結鉄中の酸化鉄鉱物(calcium ferrite から変質したものも含めて)は、還元の間段階において難還元性の spinel の形成を経ることになる。

高炉内から排出されるガス灰中にも、多くの場合、変質 calcium ferrite 粒子を生成した焼結鉄粉が認められる。このことは、焼結鉄が高炉内において、前述の変化過程を一般的に経過している可能性を示唆するものである。

Table 5 は、原料焼結鉄中で hemicalcium ferrite 粒子と共存していた silicate glass(6カ所)、ならびに3床で変質の後期(Photo. 2-3)にあつて calcium ferrite 粒子と共存している silicate glass の X 線マイクロアナライザーによる分析結果を示してある。この2つの測定結果を比較すると、走査 X 線像写真で推測した CaO, Al₂O₃, FeO 分の挙動は、silicate glass の組成変化にはつきりと現われていることがわかった。

以上の焼結鉄の特異な相変化は、シャフト部における還元効率と温度条件に関係していることは明らかである。しかし、それらの条件についての検討はさておき、ここではそのような相変化を起こした焼結鉄が高炉下部においてどのような性状を示すか考察してみたい。相変化を起こさないものおよび相変化したものの silicate glass の組成(Table 5)から、両者の融点を状態図上で推定する。前者の組成は、CaO-FeO-SiO₂-Al₂O₃ 系である。そのうち Al₂O₃ 分を gehlenite に換算すると、残分の CaO/SiO₂ はほぼ 1 になる。そこで Fig. 5 a) の状態図上にあてはめると、その融点は約 1200°C であることがわかる。後者の組成は、Al₂O₃ 分が少ないから CaO-FeO-SiO₂ 系で考えてよい。しかも、CaO/SiO₂ は dicalcium silicate 領域にあることから、これを Fig. 5-b) の状態図上にプロットすると、その融点は前者よりはるかに高いことがわかる。このように新しい相変化は、焼結鉄中の唯一つの連続相である silicate glass の融点を変えることになる。それは、

Fig. 5. Phase diagrams of the system of $\text{CaO}-\text{FeO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$.

粒塊の軟化開始を遅らせることにつながり、軟化帯での“堅い”状態を維持するのに役立つことが予想される。一方、高炉下部の炉腹部付近においては、アルカリ成分の付加わりが急激に起こるので、matrixの軟化と融体化はこの付近から起こるものと思われる。いずれにしろ、焼結鉱の“堅い”状態はアルカリ成分の付加の起こるまで新しい相変化によつて保持されることになるであろう。

さて、高炉の安定した操業と高生産性は、高炉下部の軟化・溶融帯の幅をせばめて多量の送風を可能にすることが非常に効果的な一つの条件であるならば、石灰焼結鉱はそれに合致した装入物であることになる。そればかりか、シャフト部におけるあたらしい相変化は、さらに高炉下部での焼結鉱の効果を強めていることが考えられる。

4. 結 言

戸畑第1高炉シャフト部から採取された炉内容物を装入物の種類と銘柄ごとに分類して検討し、以下のことが明らかになった。

(1) 装入物の細化は、操業レベルの2～3 m下部でもつとも激しく起こる。そのうち焼結鉱の細化割合がやや高めであった。しかし、-5 mm粉の発生量では銘柄間に差はみられなかった。細化に至る過程は、装入物の混合と、原料の還元初期にみられる粉化が併行して起こるため、還元粉化試験の-5 mm指数より非常に高い値を示す。しかし、その過程を経た装入物はさらに高炉下部へ降下しても、それ以上の細化は認められなかった。

(2) シャフト上段における各銘柄の被還元性はほとんど同じであるが、下段に行くにつれて焼結鉱の還元が遅く、他の鉄鉱石の被還元性とに差が現われる。それは焼結鉱中の酸化鉄鉱物と calcium ferrite 粒子が silicate glass によつて包まれているからである。

(3) 焼結鉱の高炉内におけるあらたな変化過程が見出された。それは calcium ferrite 粒子が magnetite 化する過程で、silicate glass との間に CaO , Al_2O_3 , FeO 分が移動して鉱物相変化を起こすものである。その結果連続相としての silicate glass は融点の高いものになり、同時にシャフト下部から炉腹部にかけての焼結鉱の軟化性状を改善することになると考えられる。

(4) 炉内容物を銘柄ごとに分類することにより、それぞれの装入物の炉内性状の把握と、相互比較が可能となる。そればかりか、炉内の平均的内容物の採取と、多くの検証を積み重ねれば、それにもとづく原料の品質改善ならびに炉前試験法の開発に寄与することが明らかにした。

終わりにのぞみ、本研究を遂行するにあたり、終始ご指導ご激励を賜わった東北大学三本木貢治教授、ならびに大森康男助教授に厚く感謝いたします。

文 献

- 1) 児玉, 彼島, 高橋: 鉄と鋼, 53(1967), p. 260
- 2) F. A. YUSHIN and N. N. BABARYKIN: Stal in English, (1964), p. 850
- 3) L. A. BYALYI and A. P. KOTOV: ibid., (1966) p. 956
- 4) 佐々木, 中沢: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 101
- 5) 石光: 鉄と鋼, 54 (1968) 3, S 275

6) 神原, 萩原, 藤田: 鉄と鋼, 54(1968)3, S 279

7) 佐々木, 中沢: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1217

8) A. MUAN and E. F. OSBORN: Phase Diagrams

for Ceramists, ed. by E. M. LEVIN, (1964) p. 288 [Am. Ceram. Soc.]

9) *ibid.*

669.184.24466.001.57:669.184.242. 純酸素上吹転炉の数学的モデル*

浅井 滋 生**・鞭

巖***

Mathematical Model of Oxygen Top Blowing Converter

Shigeo ASAI and Iwao MUCHI

Synopsis:

In order to predict the variations of the process variables caused with the progress of blowing oxygen in LD converter, mathematical model for oxygen absorption accompanied by the simultaneous reactions in connection with carbon, silicon and iron existing in the neighborhood of cavity in steel bath has been developed in this work.

By use of this model, the changes of temperatures and compositions of steel bath and waste gas, and those of evolution rate of waste gas can be estimated.

Numerical calculations based on this model under various operating conditions have been conducted with the aid of digital computer (HITAC 5020E), and from comparison of estimations with empirical results obtained by other investigators in LD converter of 150 t the authors have believed that this model may be used for prediction of behaviors of process variables.

(Received July 1, 1968)

1. 緒 言

純酸素上吹転炉の操業では、終点時での浴内炭素濃度や鋼浴温度を的確に予知することが重要になるが、そのためには、吹錬経過時間に伴う脱炭反応の推移や鋼浴温度の変化を操業条件に基づいて予知できるような数学的モデルの確立が望まれる。

筆者らは、LD転炉の操業改善に有用な基礎資料を得るために、以前に発表した炉内反応のモデル¹⁾、および凹み周辺でのガス流の挙動に関する理論²⁾の一部をそれぞれ修正し、さらに生石灰滓化率、排ガスの組成と流量と温度、および、溶鋼温度などの推算法を加味して、LD転炉の数学的モデルを展開した。

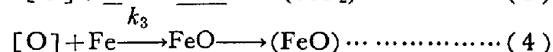
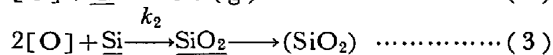
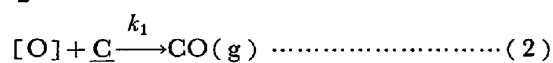
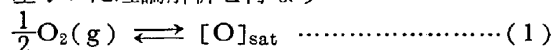
なお、この数学的モデルに基づいて、適当に設定した操業条件のもとで、電子計算機(東京大学の HITAC5020E)によつて数値計算を行ない、吹錬時間の経過に伴つて起こる種々のプロセス変数の変化を推算した結果も本報に示したが、実際操業での測定例と比較すると、プロセス変数の推移の傾向とかなりよい一致が得られているものと推察される。

2. 解 析

2.1 凹み界面での脱炭・脱ケイ素、酸化鉄生成反応

脱炭反応を主体とする炉内反応については、従来、多くの研究が発表されているが、本報では、数学的モデルに組み込んだ場合に計算が困難にならないように反応機構を以下に述べるように単純化して考えた。

すなわち、ガス側での物質移動抵抗は無視できるとし、脱炭反応は凹み界面で起こるとみなして、次の反応機構に基づいた理論解析を行なう。



(1)式はガス側の抵抗を無視した場合に書ける。(2)～(4)式の反応は、浴内から鋼浴の運動に伴つて凹み面に現われてくる炭素、ケイ素、および鉄が、それぞれ、凹みのガス・メタル接触面に吸収された酸素[O]と同時に反応することを示している。(1)～(4)式に基づいて凹み表面に現われる溶鋼の微小な素片内で、酸素、炭素、ケイ素、鉄について物質収支を行なうと、(5)～(8)式

* 昭和43年4月本会講演大会にて発表
昭和43年7月1日受付

** 名古屋大学工学部

*** 名古屋大学工学部 工博