

.....
論 文

高炉シャフト部における装入物の性状および粉化形態について*

城本義光**・金山有治***・奥野嘉雄***・磯山 正***

Some Properties and Degrading Patterns of Materials in a Blast Furnace Shaft

Yoshiteru JOMOTO, Yūji KANAYAMA, Yoshio OKUNO, and Masashi ISOYAMA

Synopsis:

An investigation was made on properties of materials (sinter, ore and pellet) taken from various levels and positions on the radii of the shaft in four blast furnaces of Muroran Works. Degrading properties of these materials were discussed by the comparison of the results obtained from the blast furnace with these from an experimental apparatus designed for analogy in the conditions of shaft region.

Remarkable informations were conducted as follows.

- 1) Excessive size degradation of sinter and ore was found at upper level of the shaft. At lower level, these mean size fell by 2~6 mm.
- 2) Degree of reduction of sinter, ore and pellet was found to be about equal throughout the shaft.
- 3) Degradation of sinter was characterized by the pattern of bulk degrading mechanism, in view of the facts that many cracks were formed all over the inner grain and the sinter was broken to small pieces.
- 4) Degradation of both ore and pellet was characterized by the pattern of surface degrading mechanism, in view of the facts that many cracks were formed on their surfaces and fine ore and pellet were produced.
- 5) The degree of degradation of the materials observed in the experimental apparatus coincided with that observed in the shaft region. It was assured that the result of the experimental apparatus was able to be used for evaluation of the nature of degradation.

(Received Oct. 19, 1970)

1. 緒 言

高炉操業において、原料性状、ないしは操業条件の変更などのいかににかかわらず、常に安定した炉況が保持できる技術の確立が望まれるが、このためには、炉況に大きな影響をおよぼす装入物の炉内での挙動を定量的に解明することが必要である。

従来から、炉内での挙動については、各所で、おもに炉外試験によつて研究がなされてきたが、操業に適用するうえで十分な資料となるまでにはまだ至っていない。これは試験条件が実高炉の条件と十分にマッチしておらず、得られた試験結果をそのまま操業に適用できないところにある。

炉内での装入物の状況を詳しく知るためには、直接炉内より数多くの試料を採取し、その性状を詳細に調査す

ることが重要である。

このため、筆者らは昭和40年頃から高炉シャフト部の各レベルより炉内試料を数多く採取し、炉内装入物の性状把握に努めてきた。現在までの採取数は約400本となっている。これらの試料について一連の系統的な調査を行なつて炉内シャフト部の装入物性状、特に粉化性状について種々の検討を加えた。

しかしながら、炉内からの採取調査では、量的な制限があるとともに、目的の装入物が採取位置によつては採れない場合もあるので、注目する銘柄の粉化状況を確実にとらえることのできない欠点もあつた。このため、炉

* 昭和43年9月、44年3月本会講演大会にて発表
昭和45年10月9日受付

** 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所研究所 工博

*** 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所研究所

内と相似の条件で試験できる粉化試験法を開発し、この試験結果と、炉内試料とを比較・検討することにより、その粉化状況の把握に努めた。

この結果、炉内での各装入物の粉化性状および粉化形態についてかなり明確にすることができたので報告する。この内容は粉化の原因を追求するうえで有効な知見を与えるものと考える。

2. 炉内試料採取および調査方法

2.1 試料採取

試料採取は室蘭製鉄所の全高炉（4基）について実施したが、ここでは重点的に行なつた No 1, No 4 BF での採取結果を記載する。Fig. 1 に No 1 BF (内容積, 1126m³), No 4 BF (内容積, 1701m³) の試料採取レベルを示す。採取孔は内径 76 mm φ, 長さ 800 mm の 2 重水冷管からなり、2 インチ径のサンプラー挿入が可能である。採取作業は、管外径 60.5 mm φ (肉厚, 3.8 mm), 長さ 5~9m (採取位置により異なる長さのものを使用) のサンプラーをシャフト部各レベルの採取孔に、水平に挿入し、炉壁から中心部まで 500 mm 間隔ごとに試料を採取する方法をとつた。ただし、採取は作業上の面 (サンプラー曲折の危険など) から、ほとんど高炉の休風中に行なうことを余儀なくされた。

上記の径をもつサンプラーでは、コークスの粗粒塊は

十分採取できないが、鉱石・焼結鉱・ペレットについては粒径が小さいため、ほぼ炉内と同じ粒度構成のものが採取できることを確かめている。すなわち、内径 2 m φ の円筒に数トンの各種装入物を充填し、充填した装入物の粒度分布と、円筒の側壁から各管径のサンプラーによつて採取した試料の粒度分布とが一致するか否かを検討した。この結果を Fig. 2 に示す。コークスの場合、少なくとも 5 インチ径のものが必要であるが、鉱石・焼結鉱では 2 インチ径のものでも筒内の装入物とほぼ一致する粒度のものが採取できた。このため、採取したコークスについては得られる粒度分布に信頼性がないため、今回、詳細な検討を行なわなかつた。

Table 1 に No 1, No 4 BF の試料採取日およびそのときの装入物使用割合を示す。鉱石・焼結鉱は常時使用しているので採取ごとに得られるが、ペレットは現在まで No 1 BF における 2 回の採取例にとどまっている。試料採取は昭和 44 年 4 月 14 日の操業時を除いていずれも休風時に行なつたものである。また、採取時期の高炉操業の概況は Table 2 に示すとおりである。両炉とも常圧高炉で、装入物の装入方式は No 1 BF でバケット装入、No 4 BF でスキップの装入となつている。

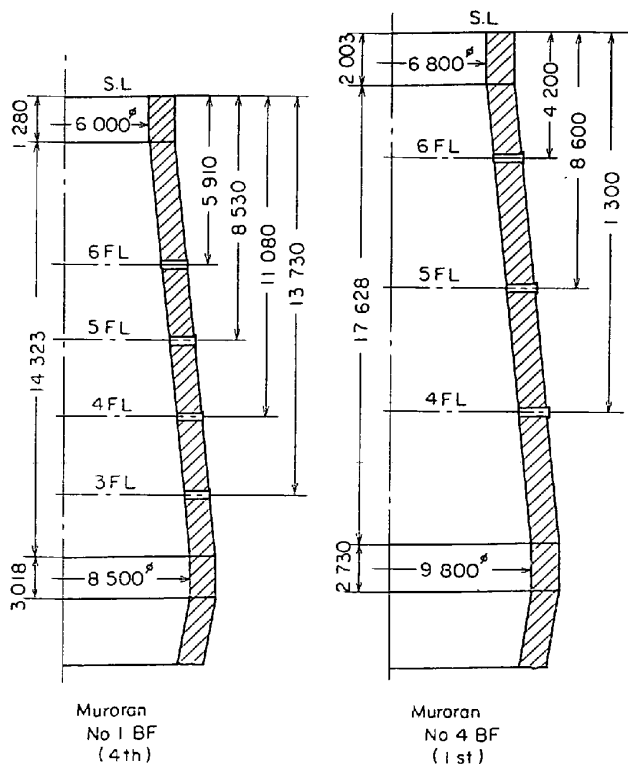


Fig. 1. Location of sampling levels of blast furnace.

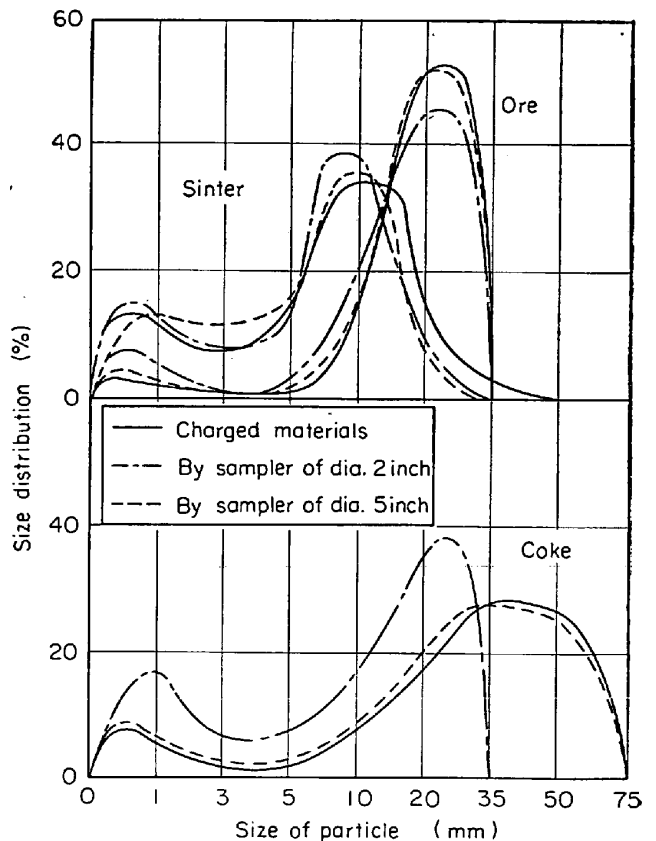


Fig. 2. Influence of diameter of sampler for size distribution of material investigated at sampling.

Table 1. Date of sampling and burdens charged into blast furnace.

Blast furnace	Date of sampling	Burdens					
		Sinter		Ore		Pellet	
		Charge ratio (%)	CaO/SiO ₂	Charge ratio (%)	Burdens	Charge ratio (%)	Burdens (Charge ratio)
No 1 BF	Sept. 10 '68	5.8	2.02	59.4	Goldsworthy, India, Thasala, Hamersley.	34.8	Kaiser (23.2)
	Nov. 7 '68	5.4	1.97	53.6	Goa M, Thasala, Hamersley.	41.0	Hamersley (11.6)
	May 30 '68	52.0	1.21	48.0	Swaziland, Brazil, Goldsworthy.		Kaiser (20.5)
No 4 BF	Jan. 6 '68	69.5	1.39	30.5	Goa M, Africa, Hamersley.		Hamersley (20.5)
	Jan. 16 '68	62.1	1.45	37.9	Goa M, Africa, Hamersley.		
	Mar. 5 '68	74.0	1.31	26.0	Goa M, Goldsworthy, Santa Fe.		
	Apr. 4 '68	71.1	1.43	28.9	Santa Fe, Goldsworthy, Goa M.		
	May 6 '68	64.1	1.41	35.9	Santa Fe, Kiriburu, Angora.		
	Nov. 19 '68	81.6	1.49	18.4	Santa Fe, Goa M.		
	Jan. 18 '69	72.1	1.11	27.9	Bandurrias, Sishen, Kiribule.		
	Feb. 17 '69	68.0	1.34	32.0	Sishen, Bailadila.		
Apr. 14 '69	62.1	1.19	37.9	Goldsworthy, Bandurrias.			

Table 2. Operating indices of blast furnace.

Indices	No 1 BF		No 4 BF	
	(Nov. '68)	(May 30, '69)	(Jan.~May '68)	(Jan.~Apr. '69)
Blast volume (Nm ³ /min)	1 852	1 410	2 375	3 446
Blast pressure (kg/cm ²)	1.130	1.010	1.615	1.754
Blast temperature (°C)	825	1 030	952	900
Coke ratio	523	487	492	513
Ore/Coke	2.95	2.90	3.13	2.92
Iron production (t/D)	1 628	2 126	2 498	2 656
Slag basicity (CaO/SiO ₂)	1.13	1.25	1.18	1.19
Si in iron (%)	0.67	0.65	0.69	0.72
Oil injection (kg/t-P)	39	34	47	36

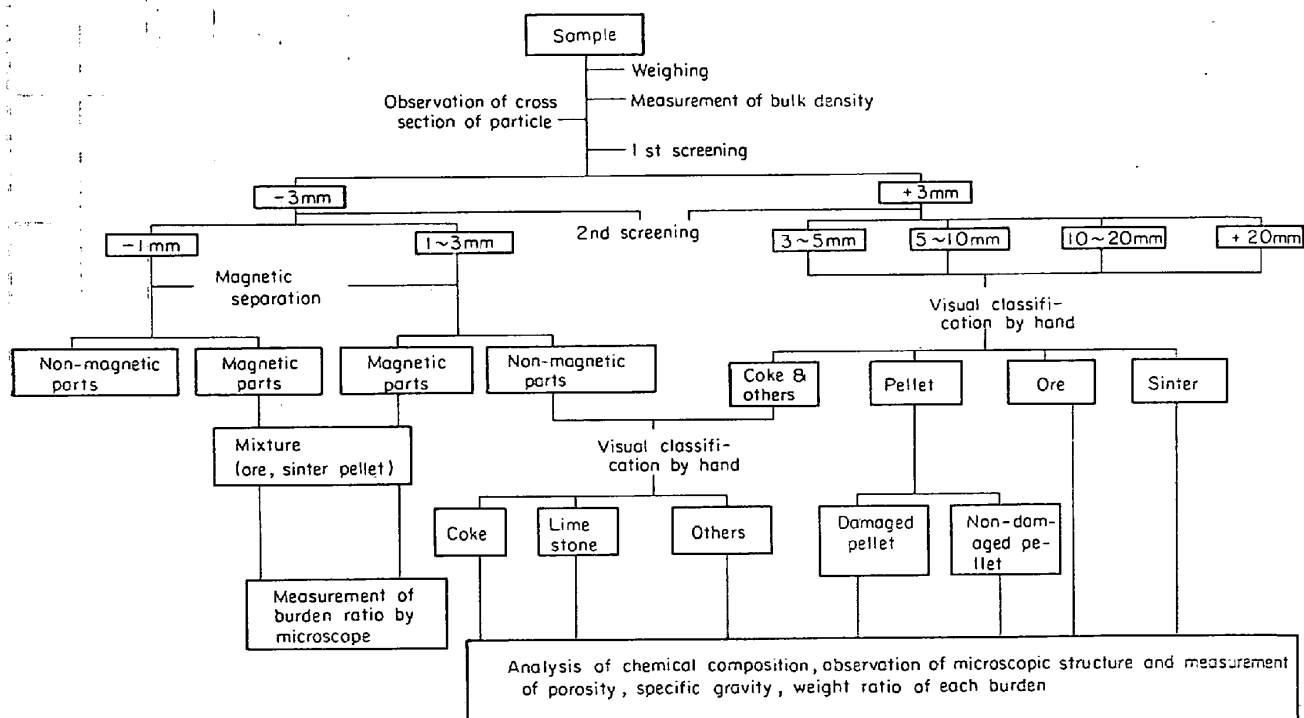


Fig. 3. Analyzing method of characters of sample.

Table 3. Results of classification of samples.

Sampling date: May 30'69
(No 1 BF)

Sampling level	From inwall (m)	Sample weight (gr)	Size distribution (%)			Mixing ratio (%)			Mean*** size (mm)	Bulk density (gr/cm ³)	Porosity (%)	
			-1 mm	1~5 mm	+5 mm	Ore+Sinter	Coke	Others**			Sinter	Ore
6 FL	0.0	242.2	79.3	6.9	15.8	19.9(56.7)*	12.0	68.1	3.8	1.06	16.1	16.5
	1.0	147.8	13.7	9.8	76.5	23.9(0)	64.0	12.1	7.2	0.65		
	2.0	290.8	3.6	7.6	88.8	79.3(83.5)	18.5	2.2	10.5	1.05	17.1	22.7
	3.5	201.4	11.5	20.1	68.4	36.4(61.8)	59.6	4.0	11.7	0.69		
5 FL	0.0	128.9	16.3	7.4	76.3	11.1(85.7)	4.5	84.4	4.5	1.00	21.7	13.5
	1.0	332.2	7.8	18.0	74.2	97.1(97.8)	0.5	2.4	6.8	1.91	19.2	26.4
	2.0	298.8	18.8	41.1	40.8	79.8(95.7)	11.7	8.5	7.1	1.53	23.7	26.4
	3.5	236.2	10.6	22.7	66.7	45.0(99.2)	50.6	4.4	5.1	0.76		
4 FL	0.0	83.4	3.7	15.8	80.5	25.9(81.2)	61.2	12.9	4.0	0.61		27.5
	1.0	72.3	4.2	3.3	92.5	4.2(0)	93.8	3.0	—	0.45	25.9	
	2.0	503.9	14.6	21.4	64.0	77.3(24.1)	15.8	6.9	4.2	1.40	27.2	27.2
	3.5	393.7	12.6	21.9	65.4	46.1(82.0)	49.3	4.6	5.1	0.77	32.3	
3 FL	0.0	212.8	18.9	23.9	57.3	42.7(42.6)	40.7	16.6	5.2	0.88		
	0.5	455.2	7.1	35.0	57.9	81.1(6.2)	17.6	1.3	5.7	1.27	37.3	
	1.0	1035.5	15.0	46.2	38.8	96.8(94.1)	1.1	2.1	4.6	1.82	37.1	

* Sinter parts of ore+sinter over 3 mm.

** Lime stone, non-magnetic material.

*** Arithmetical mean value of ore, sinter and magnetic material.

2.2 調査方法

炉内より採取した試料はただちに鉄製容器内で空冷したのち、Fig. 3 に示す分類方法により各種性状調査を系統的に行なつた。嵩密度は試料全量を内径 100 mm φ の円筒に入れて容積を測定することにより求めた。

各装入物の区分は、3 mm 以上の試料では各粒度ごとに肉眼選別で行なつたが、鉱石の銘柄区分については判別が困難なため行なわなかつた。3 mm 以下の試料は肉眼選別ができないため、磁選 (800 ガウスのフェライト磁石により 2 回磁選を繰返す) によつて、磁着物および非磁着物に区分した。なお、磁着物の一部を縮分によつてとり出し、顕微鏡識別から個数を数えることにより、3 mm 以下の試料中の各装入物の混合割合を求めた (1 個の顕微鏡試料には数百個の微粉粒子を埋込む)。

一方、ペレットは、破損状況を知るため、外観からの判別によつて完全形状のものと、表面が亀裂・剝離しているものとに区分した。比重・気孔率測定は JIS 法にもとづいて行なつた。

3. 採取試料性状

3.1 採取状況および外観形状

試料の分類結果例として、Table 3 に No 1 BF で昭和 44 年 5 月 30 日に採取した試料の採取量、粒度分布、各装入物の混合比 (+3 mm 試料)、鉱石および焼結鉱からなる混合物 (以後、鉱石類と呼ぶ) の平均粒径、全試料の嵩密度、鉱石および焼結鉱 (試料は 5~10 mm

の粒度のもの) の気孔率についての測定結果を示す。

採取した試料では試料中の鉱石・焼結鉱・コークスの混合割合が同一シャフトレベルでも採取位置によつて異なるとともに、肉眼選別ではあるが、鉱石または焼結鉱のいずれかが試料中で多くを占めているもののがかなりみられた。ただし、ペレットを含んだ試料の場合には、細粒の鉱石または焼結鉱とペレットが同じ程度の割合で混合されているものもあつた。

次に、Photo. 1 に No 1 BF の 3 床目から昭和 44 年 5 月 30 日に採取した試料の装入物別・粒度別に区分したものの外観形状を示す。また、Photo. 2 に No 1 BF の 4 床目から昭和 43 年 9 月 10 日に採取した完全形状および破損ペレットの外観形状を示す。この場合の鉱石とペレットの使用銘柄は Table 1 に示すとおりである。

このように、数多く採取した試料の状態ならびに外観形状から、ほぼ次のことがいえる。

- 1) 炉頂・羽口間のほぼ 60% にあたるシャフト下段でも装入物は粒体の形状を保持しており、外観からでは溶融・融着現象は認められない。
- 2) シャフト中段レベルですでに鉱石類の微粒が多くみられる。コークスも細粒塊のものが発生している。
- 3) 焼結鉱・鉱石試料はかどがとれて丸味をおびた形状を示している。
- 4) 試料表面には目につくほどカーボン沈積が認められない。
- 5) ペレットの場合、シャフト上段では割れによる破

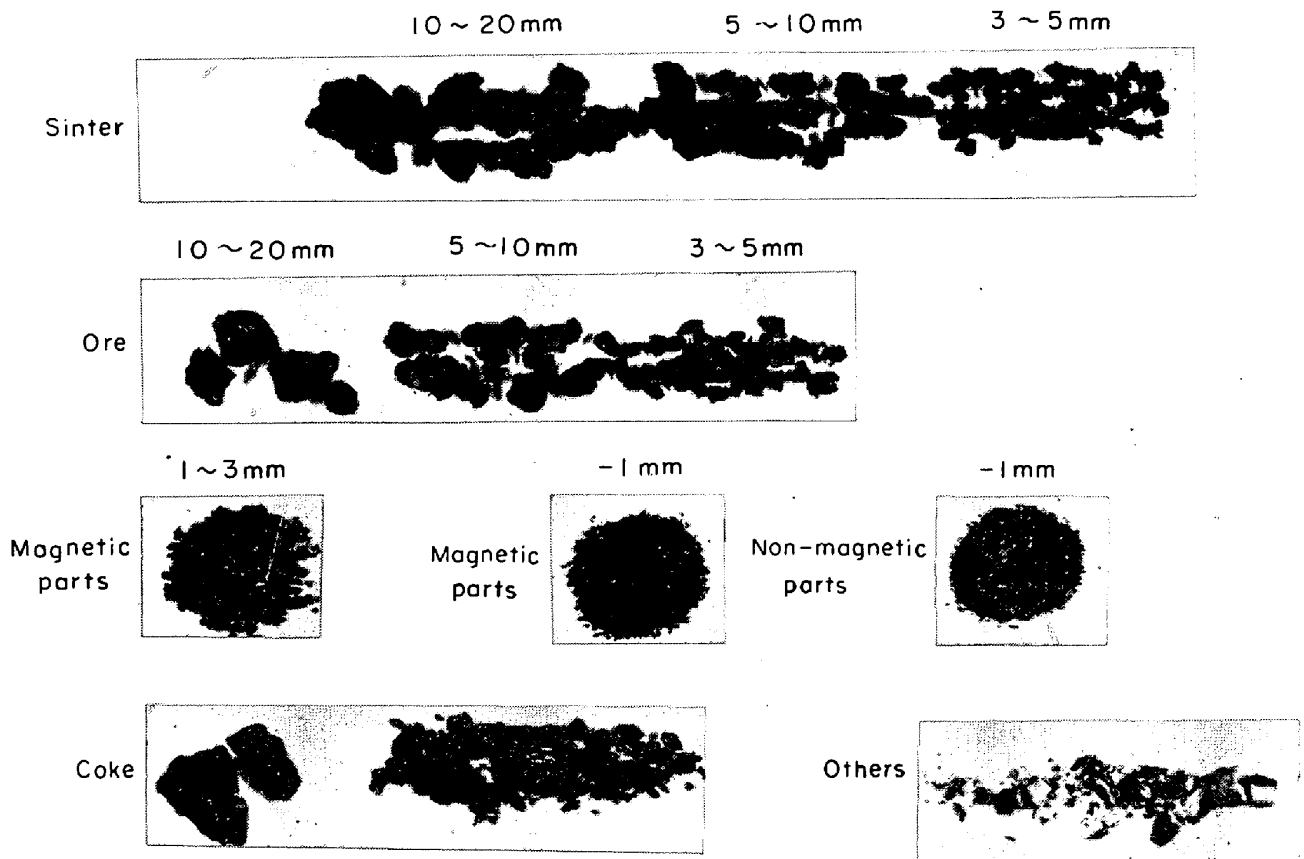


Photo. 1. Appearance of classified samples taken at 1.0m from inwall of 3 FL (No 1 BF. Sampling date : May 30 '69).

損が、下段では亀裂・剝離による破損が多くみられる。亀裂が入ることにより、若干のふくれ現象がみられるが、通気性を害するほど著しくない。

3.2 採取試料の粒径

採取試料の粒径はサンプリングごとにかかなりの変動を示すが、その変化は炉の高さ方向だけでなく、半径方向においてもみられる。Fig. 4, 5 に No 1 および No 4 B F の 鉱石類試料について求めた算術平均粒径の変化を示す。なお、このときの装入前平均粒径をTable 4 に示す。

鉱石類の平均粒径は炉頂部への装入時、14~22 mmなのに対し、6床目では6~14 mm、5床目以下では2~6 mmに減少している。4床目以下の試料数が少ないため、3床目にかけての粒径変化はあまり明らかでないが、十数回の採取データでは6床目から5床目にかけてほど激しくなかつた。したがって、炉内に装入された鉱石類の粉化はシャフト上段から中段にかけて多く起きるものと判断された。

炉半径方向での粒径分布はあまり明確な傾向を示さず、特に6床目では採取ごとに大きな変動を示した。6床目の変動は装入時に炉頂部で生ずる粒度偏析が影響し

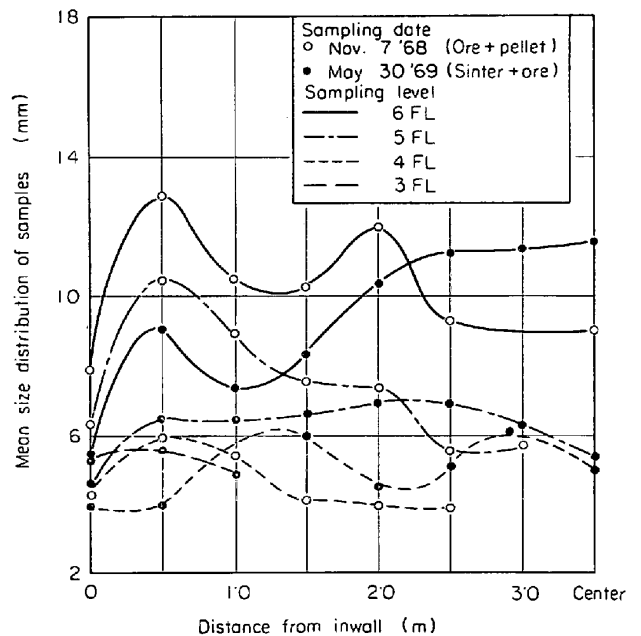


Fig. 4. Mean size distribution of samples along radius at each floor level of No 1 BF.

ているものと考えられる。炉半径方向で粉化のみによる粒径変化を知るためには、装入時の粒度偏析状況を前も

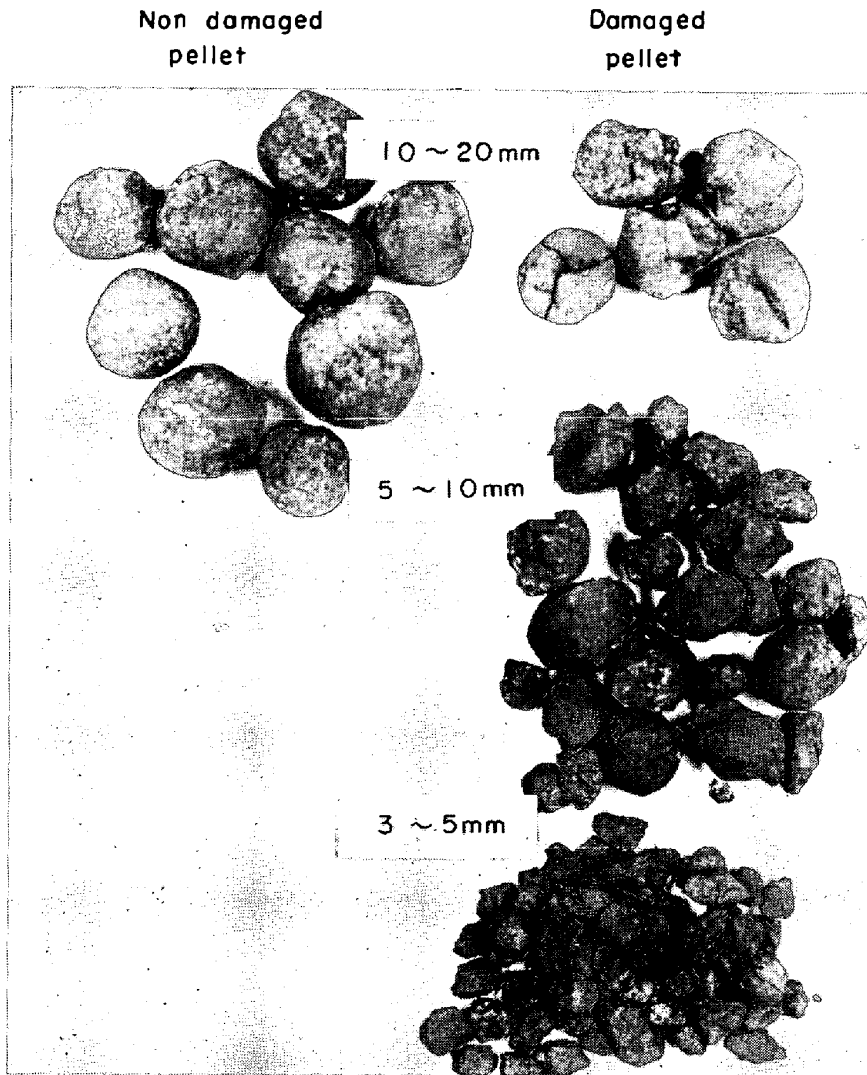


Photo. 2. Appearance of pellets taken at 2.5m from inwall of 4 FL (No 1 BF. Sampling date : Sept. 10 '68)

Table 4. Mean size of burdens charged (mm).

Period	No 1 BF		No 4 BF			
	1968 Nov. 7	1969 May 30	1968 May 6	Jan. 17	1969 Feb. 16	Apr. 14
Sinter	22.1 (5.4)	20.1 (48)	23.7 (26)	23.7 (28)	21.3 (32)	19.6 (38)
Ore	17.2 (54.6)	18.5 (52)	18.7 (74)	20.3 (72)	18.0 (68)	11.1 (62)
Pellet	10.8 (41.0)	—	—	—	—	—
All materials	14.9	19.1	19.5	21.2	19.0	14.4

() Charge ratio of burdens

つて測定しておく必要がある。この偏析状況は、操業時に測定できるまでにまだ至っていないが、No 4 BF の火入れ時に測定した結果を Fig. 5 に示す。炉壁側では細粒が、炉中心側では粗粒が多くなる偏析を生じており、この傾向は炉外での分布試験によっても確認している。したがって、変動はかなりあるが、粗粒が多い中心部で

は粒径の低下が大きいことから他の位置より粉化が多く起きるものと判断された。

なお、Fig. 4, 5 に示す値はいずれも休風時に採取した試料についてなので、操業時の場合とどの程度の差があるかを確かめてみた。Fig. 6 に測定結果を示す。

この測定値は No 4 BF で装入条件を変えずに操業時

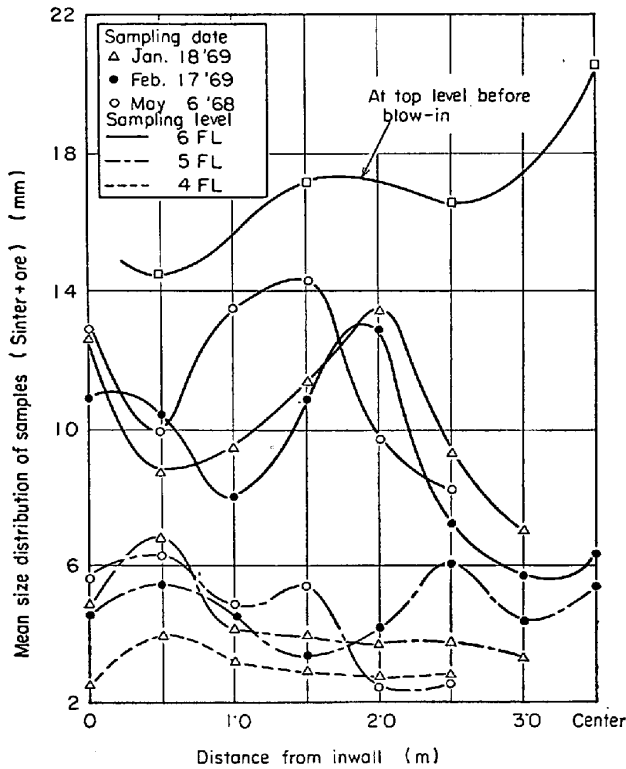


Fig. 5. Mean size distribution of samples along radius at each floor level of No 4 BF.

および休風時に採取した試料を調べたものである。いずれも炉半径方向でほぼ同じ平均粒径の変化を示すが、操業時の方が休風時より 3~4 mm 低くなっている。したがって、操業時を休風時と同一性状の試料がとれるとはいいがたいが、平均粒径が同じパターンを示したことから休風時でもかなり精度の高い試料がとれるものと考えた。

一方、ペレットは Photo. 2 に示す破損現象が多くみられたので、各床での破損割合（ただし、3 mm以上の粒度のもの）を調べた。この結果を Fig. 7 に示す。ペ

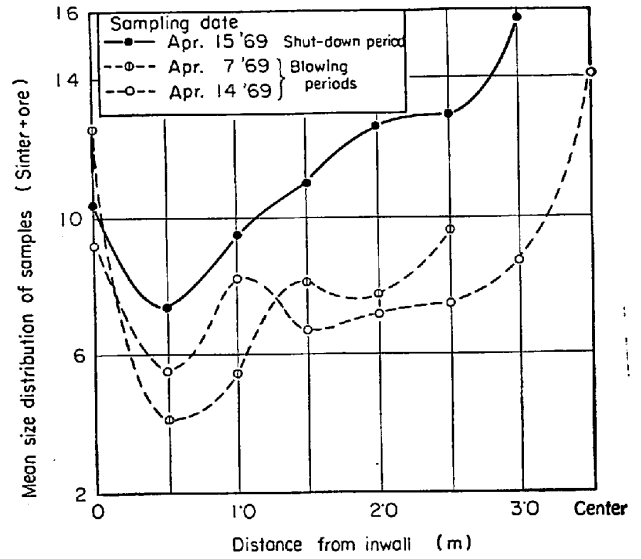


Fig. 6. Comparison of size distribution between shut-down period and blowing periods (at 6FL of No 1 BF).

レットの破損は 6 床目から 5 床目にかけて多く起きるが、5 床目から 4 床目にかけてはそれほど激しくない。炉半径方向についても破損割合を調べたが、炉中心、および炉壁側で多く出る傾向を示した。したがって、ペレットの破損も他の鉱石類の粉化と同様のレベルで多く起きると判断された。

なお、ペレットの破損割合とともに圧壊強度を測定し、炉内降下に伴うペレットの脆弱化程度を調べた。この結果を Table 5 に示す。試験に供したペレットは昭和 43 年 11 月 7 日に採取した完全形状のものである。

採取ペレットは装入前のペレットにくらべ 5 床目ですでに半分以下の強度に低下していた。5 床目から 4 床目ではあまり低下していないのでシャフト中段までである程度脆弱化が進んでしまうものと考えられる。この傾向は破損割合の変化とよく類似している。

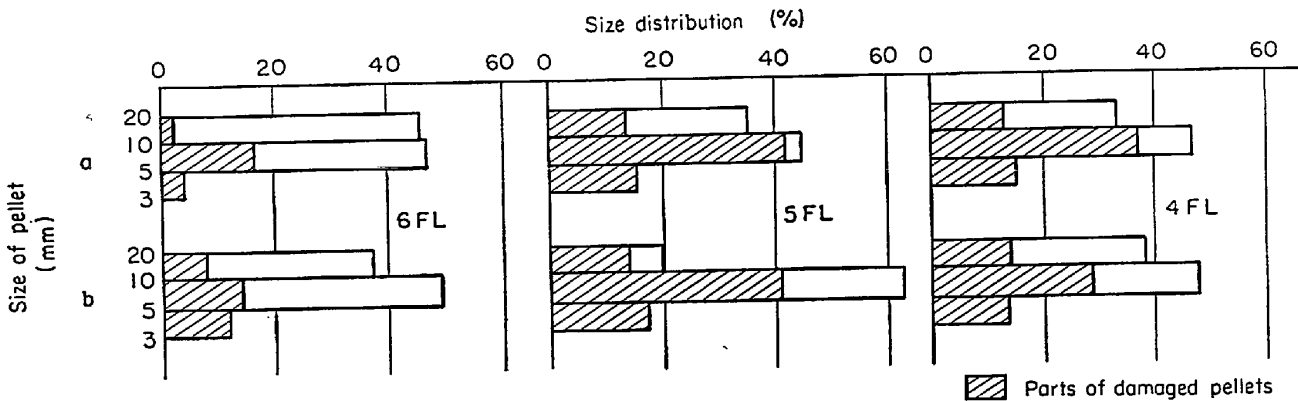


Fig. 7. Size distribution of pellets and ratio of damaged pellets at each floor level. (Sampling date, a; Sept. 10 '68. b; Nov. 7 '68).

Table 5. Crushing strength of charged and sampled pellet.

Sampling date: Nov. 7 '68

Pellet	Species	Sampling level	Crushing strength at normal temperature (kg/piece)			
			Mean value	Maximum value	Minimum value	Pieces for test
Charged pellet	Hamersley (arrival at 1968. 9)		240	520	20	100
	Kaiser (" 1968. 8)		173	320	20	100
Sampled pellet		6 F L	146.5	500	20	49
		5 F L	78.3	280	35	20
		4 F L	59.6	205	21	37

Table 6. Chemical composition of the classified lump materials.

Sampling date: May 30, '69
(No. 1 BF)

Sampling level	From inwall (m)	Species	Sample size (mm)	Chemical component (%)								
				T. Fe	M. Fe	FeO	T. C	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
(Charged materials)		Sinter	—	59.48	—	13.20	—	0.005	5.56	1.81	6.75	6.68
		Swaziland	—	64.71	—	0.18	—	0.003	3.80	1.14	0.14	0.08
		Goldsworthy	—	65.83	—	0.04	—	0.005	3.15	0.90	0.03	0.05
		Bandlurias	—	61.06	—	11.14	—	0.110	5.90	1.18	1.68	2.15
		Brazil	—	67.86	—	0.31	—	0.006	0.80	0.70	0.03	0.05
6 F L	0.0	Sinter	3~50	45.75	22.13	19.58	2.57	0.177	6.80	2.05	7.05	0.55
	0.5	Ore	5~10	67.72	0.11	10.42	0.09	0.012	1.95	0.88	0.58	0.05
		Sinter	5~10	60.94	0.16	15.45	0.06	0.006	5.02	1.58	5.45	0.62
	1.0	Ore	5~10	63.53	0.11	1.08	0.18	0.006	2.13	0.90	0.06	0.07
	2.0	Ore	3~50	64.71	0.05	0.99	0.17	0.012	0.65	0.53	0.07	0.05
		Sinter	3~50	60.80	0.21	8.35	0.06	0.020	5.20	1.06	5.20	0.92
	3.5	Ore	3~50	58.78	0.37	31.97	0.09	0.135	5.50	2.32	5.95	0.90
	Sinter	3~50	62.27	2.55	44.55	0.10	0.013	5.20	1.46	6.75	0.67	
5 F L	0.5	Ore	3~50	56.48	0.48	27.03	0.16	0.041	1.10	2.50	2.74	0.10
		Sinter	5~10	62.48	3.83	25.15	0.28	0.008	4.70	1.50	5.80	0.61
	1.0	Ore	3~50	41.75	0.27	1.80	0.33	0.067	1.50	2.12	5.70	0.58
		Sinter	5~10	59.20	0.16	14.01	0.09	0.009	5.30	1.83	6.65	0.10
	2.0	Sinter	5~10	60.32	0.69	22.72	0.11	0.006	5.20	1.62	6.50	0.64
	3.5	Sinter	5~10	62.69	7.50	54.96	0.16	0.013	5.93	1.74	7.50	0.78
4 F L	0.5	Ore	3~50	71.21	0.59	59.27	0.11	0.154	1.70	0.44	0.40	0.42
	1.5	Ore	5~10	56.06	0.43	32.69	0.16	0.053	5.70	0.62	1.28	0.72
	2.0	Ore	5~10	57.38	0.37	34.94	0.29	0.110	2.66	1.34	2.50	0.18
		Sinter	5~10	62.06	0.37	44.28	0.11	0.007	5.25	1.42	5.80	0.86
	3.5	Ore	5~10	59.06	14.26	36.46	0.20	0.009	4.90	1.22	0.12	0.11
		Sinter	5~10	68.34	23.14	42.12	0.19	0.025	5.20	1.56	6.00	0.64
3 F L	0.0	Ore	3~50	70.09	59.73	7.90	11.92	0.077	1.35	0.74	0.76	0.18
		Sinter	3~50	35.95	27.13	8.44	21.86	0.231	4.10	1.44	4.40	1.05
	0.5	Ore	5~10	76.16	33.67	30.72	1.80	0.029	2.60	1.50	0.80	0.15
		Sinter	5~10	65.83	14.79	48.32	0.64	0.016	5.75	1.62	6.70	0.62
	1.0	Ore	5~10	64.50	1.97	53.44	0.09	0.021	6.85	1.46	3.60	0.60
		Sinter	5~10	61.99	0.32	56.58	0.07	0.016	6.20	1.82	6.70	0.96

3.3 採取試料の還元率

炉内装入物の還元率変化は還元にもなつて生ずる粉化現象を検討するうえで重要である。

昭和44年5月30日にNo1BFから採取した焼結鉱と鉱石の化学組成(供試料は5~10mmの粒度のもの

を、採取量が少ない場合、3~50mmの粒度のものを、Table6に、昭和43年11月7日にNo1BFから採取した完全形状および破損ペレットの化学組成をTable7に示す。Table6,7に示す各装入物の使用割合は、焼結鉱52.0%、スワジランド鉱19.9%、ゴールドワージ

Table 7. Chemical composition of classified pellets.

Sampling date: Nov. 7 '68
(No. 1 BF)

Sampling level	From inwall (m)	Species	Chemical component (%)								
			T. Fe	M. Fe	FeO	T. C	S	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
(Charged pellets)		Kaiser Hamersley	64.71	—	0.63	—	—	3.47	0.57	0.31	2.44
			63.37	—	0.22	—	—	5.10	2.87	0.52	0.10
6 F L	0.5	Damaged	62.97	1.02	3.95	0.06	0.007	5.90	3.10	0.50	0.12
	1.0	Non-damaged	62.97	0.62	3.23	0.05	0.008	5.50	3.08	0.44	0.10
		Damaged	63.67	0.82	6.29	0.07	0.007	5.40	3.00	0.42	0.10
	2.0	//	66.46	0.17	20.48	0.05	0.027	3.15	0.62	0.31	0.46
	2.5	Non-damaged	67.58	0.15	35.57	0.04	0.022	3.20	0.44	0.34	2.50
		Damaged	66.74	0.16	31.08	0.07	0.015	3.30	0.48	0.34	2.64
5 F L	0.5	Non-damaged	64.23	0.71	29.10	0.06	0.010				
		Damaged	68.98	0.21	36.28	0.03	0.010	2.85	1.48	0.27	0.53
	1.0	Non-damaged	64.79	0.19	26.76	0.05	0.015	5.40	3.24	0.73	0.50
		Damaged	65.35	0.18	23.89	0.04	0.020	4.20	2.90	0.34	0.91
	2.0	//	69.81	0.17	30.18	0.05	0.013	1.50	0.64	0.18	0.58
	3.0	//	64.79	0.21	40.42	0.04	0.020				
4 F L	0.5	Damaged	67.58	0.45	37.00	0.06	0.010	3.75	0.82	0.34	2.36
	1.0	Non-damaged	68.56	0.12	34.85	0.04	0.008	2.85	0.72	0.23	1.29
		Damaged	66.18	0.23	46.88	0.05	0.012	5.55	3.40	0.84	0.11
	2.0	Non-damaged	66.88	0.53	31.97	0.04	0.007	3.50	0.57	0.39	2.50
		Damaged	66.46	0.54	42.93	0.06	0.008	4.05	2.17	0.36	1.22
	3.0	Non-damaged	64.09	0.57	22.09	0.04	0.013	5.50	3.24	0.63	0.10
	Damaged	64.51	0.24	24.97	0.11	0.012	5.00	2.98	0.81	0.25	

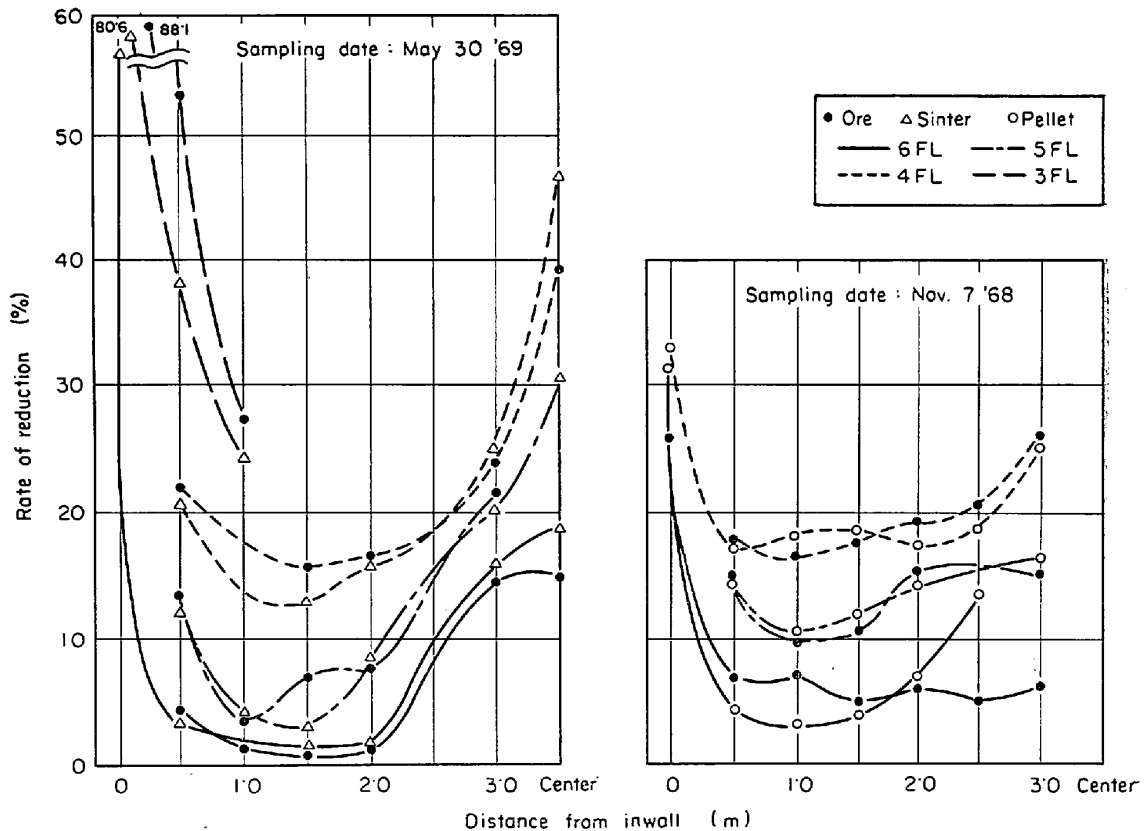


Fig. 8. Rate of reduction of samples along radius at each level of No 1 BF.

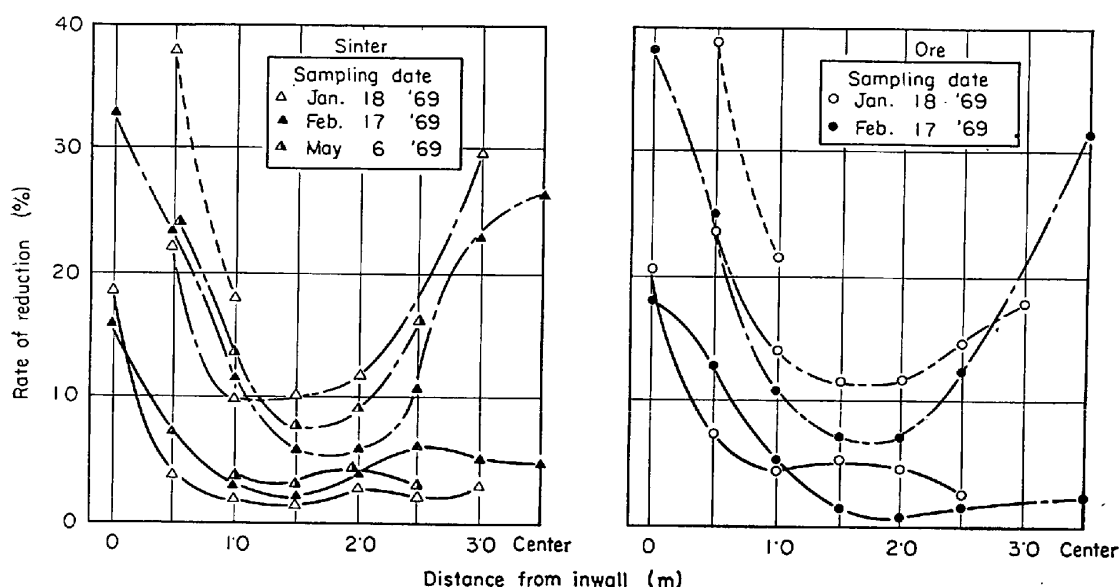


Fig. 9. Rate of reduction of samples along radius at each level of No 4 BF.

一鉱 14.7%, バンドリアス鉱 9.7%, ブラジル鉱 4.6% である。ペレットの使用割合はカイザー、ハマスレーそれぞれ 50% である。

還元率 (R , %) の算出は、装入物に含まれる酸素量が銘柄によつて異なるので、ここでは試料中に含まれる鉄量と酸素量の比率で表わす次式によつて行なつた。

$$R = 100 \times \{ (O/Fe)_c - (O/Fe)_s \} / (O/Fe)_c$$

ただし、 O は試料中の酸素含有量 (%), Fe は鉄含有量 (%), C , S は装入前試料および炉内試料を示す記号である。

Fig. 8, 9 に No 1 および No 4 BF で採取した各試料の炉高さおよび半径方向における還元率変化を示す。ペレットの還元率は完全形状のもの、破損したものを合わせた平均値で示す。完全形状のものと破損したものの間には、Table 7 に示す化学組成から明らかなように還元率にあまり差がみられなかつた。

各試料の還元率は No 1, No 4 BF とも炉壁側および炉中心側で高く、中間部で低くなる値を示しているが、この傾向はシャフト下部に移るほど顕著となる。炉壁側および炉中心側で高い還元率を示すことは、この付近を高温で、CO 濃度の高い炉内ガスが多く流れていることと密接な関係があると思われる。ガスの挙動については No 4 BF のシャフト部で水平ゾンデを用いてガス濃度・温度分布を測定することによつて確かめている。²⁾

鉱石・焼結鉱・ペレットについて還元率の差を比較してみるとかならずしも焼結鉱とペレットがよく還元されているとはいえない。このことはソ連の実炉測定でも同様の結果を得たことが報告されている³⁾⁴⁾。

なお、Fig. 8, 9 に示す値は休風時に採取した試料に

ついてであるが、操業時に採取した試料の還元率と比べてみると若干操業時のほうが高い値を示した。

各採取レベルの還元率は試料の粒径によつても異なると予想されたため、各装入物の粒度ごとの還元率を調べてみた。その結果を Fig. 10 に示す。供試料として、3 mm 以上のものは肉眼で選別したものを、3 mm 以下のものは焼結鉱と鉱石に区分できないので、これらの混合物の磁着物試料を使用した。

この図から明らかなように、小粒径のものほど高い還元率を示すが、この傾向は 5 床目より 6 床目のほうが、また炉壁側のほうが顕著にみられた。シャフト部の上段で高い還元率を示す微粒のなかには、還元を受けた粗粒の表面層から粉化して生じた微粒も含まれていると考えられる。参考までに 5・6 床目で採取した試料の磁着物に含まれる金属鉄粒子 (粒子の組織中に金属鉄部分の占める割合が 50% 以上になるもの) の割合を調べてみた。その結果を Fig. 11 に示す。また、この試料中にはすべて金属鉄からなる粒子も存在していた。Photo. 3 にその一例を示す。

4. 採取試料の粉化形態

4.1 粒度分布変化と粉化形態

シャフト部で示す装入物の粉化は炉内の通気性に大きな影響を与え、棚吊りなどのトラブルをひき起こす原因ともなるので重要である。

装入物の粉化は、採取試料の粒径変化からも概略知ることができたが、更に詳しく知るためには各装入物の粉化形態、すなわち各粒子がどのようなパターンで破壊されて微粒化するか、あるいは微粉量の発生がどの程度な

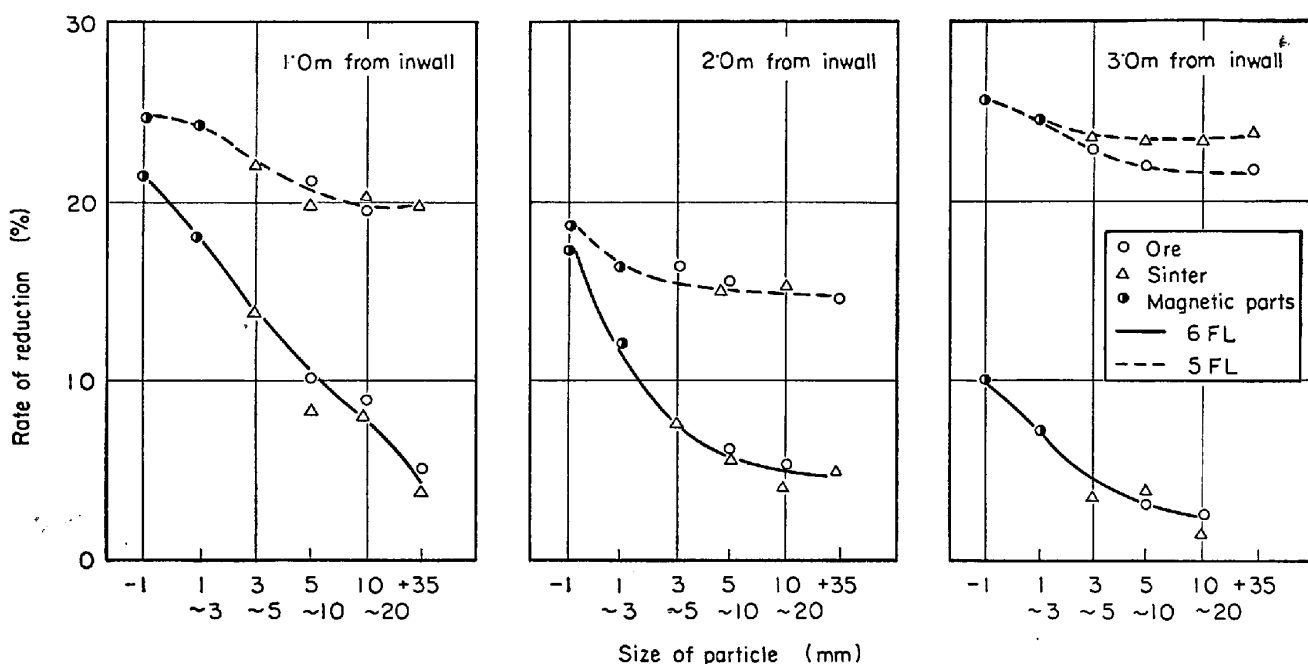


Fig. 10. Relation between size of particle and rate of reduction at each level of No 4 BF (Sampling date : Apr. 4 '68).

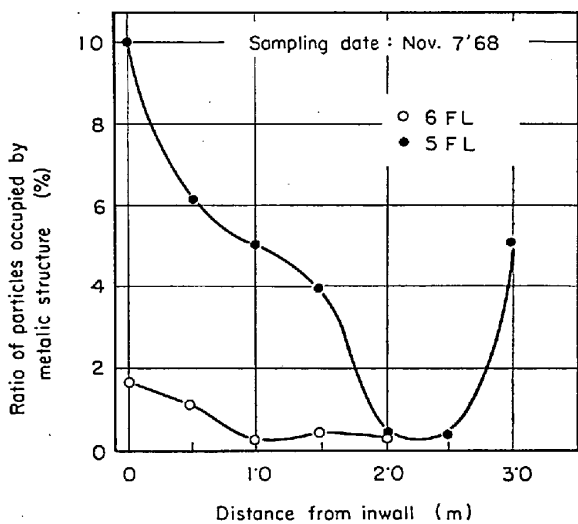


Fig. 11. Ratio of particles occupied by metallic structure over 50% in magnetic parts (-1 mm).

のかを調べる必要がある。粉化形態がわかれば、顕微鏡組織などによつて検討される粉化機構と炉内で示す粉化性状との関係を一層明確なものにすることができる。

このため、各装入物が炉内を降下するさいに示す粒度分布の変化を調べ、粉化形態の把握に努めた。

各装入物の粒度分布変化は、鉱石・焼結鉱などが互に混合した状態でしか採取できないので正確に知ることがむずかしい。しかし、Table 3 に示すように、試料のなかには肉眼選別ではあるが、+ 3 mm試料中に焼結鉱、鉱石もしくはペレットのいずれかの装入物が 80% 以上



×100 (7/8)

Photo. 3. Particles of metal in magnetic parts (-1 mm) (Sample taken from 5 FL of No 1 BF).

占めているものがあるので、この試料をとり出し粒度分布を調べた。すなわち、3 mm以上の試料については、粒度ごとに肉眼選別を行なつて各装入物の粒度割合を求め、3 mm以下の試料については、1~3 mm および -1 mm の粒度にわけて磁選を行ない、その磁着物について 3 mm以上の試料で得た各装入物の混合比を適用し各装入物の試料重量を求めた。

3 mm以下の試料において、磁着部分を鉱石類とし、非磁着部分をコークス・石灰石などと区分するのは正確ではないが、Fig. 10 に示すように 3~5 mm の鉱石類でも数%以上の還元率を有するので、3 mm以下の鉱石類も粒子内にマグネタイト組織をもち磁着物試料として

Table 8. Containing ratio of ore and sinter in sample of each size (%).
(Sampling date: Mar. 5 '68)

Size	Species	Sampling level		
		6 FL (1.5)*	5 FL (2.0)*	4 FL (1.0)*
+3 mm	Sinter	77.2	80.2	88.0
	Ore	22.8	19.8	12.0
1~3 mm	Sinter	66.6	76.5	84.6
	Ore	33.4	23.5	15.4
-1 mm	Sinter	60.2	75.8	81.7
	Ore	28.9	20.8	16.3
	Others**	9.8	3.4	2.0

* Distance from inwall (m) ** Undecided particles

回収できるものと考えた。非磁着物試料を顕微鏡観察した結果では鉱石類に属する粒子はほとんどなかった。また、粒径のいかんにかかわらず焼結鉱・鉱石の還元率が

ほぼ同じであることから、磁選時に特定の装入物が磁着物中に片寄つて入ることはないと考え、3 mm以上の試料で得た各装入物の混合比も磁着物試料に適用できるとした。

この処理法の妥当性は磁着物試料の一部をとり出し顕微鏡による識別で焼結鉱と鉱石の個数を数え、その混合比を求めることにより確認した。その結果の例をTable 8に示す。3 mm以上の試料に対し、1~3 mmおよび-1 mmの試料では鉱石の方がやや多く出ているが、特定の装入物を80%以上含む試料ではあまり差が出ていない。したがって、簡便法として上記方法はかなりの精度で磁着物中の各装入物の混合割合を知ることができるものと判断した。

焼結鉱・鉱石・ペレットについて炉の高さ方向で求めた累積粒度分布変化をFig. 12, 13, 14に示す。この

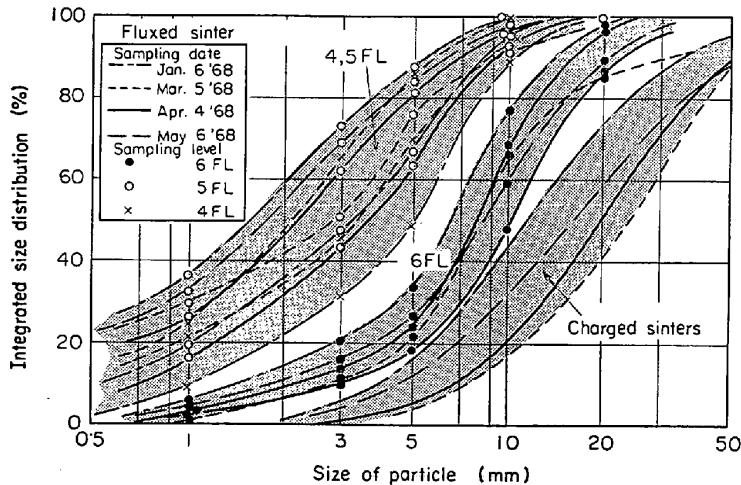


Fig. 12. Size degradation of fluxed sinters descending in shaft zone (No 4 BF).

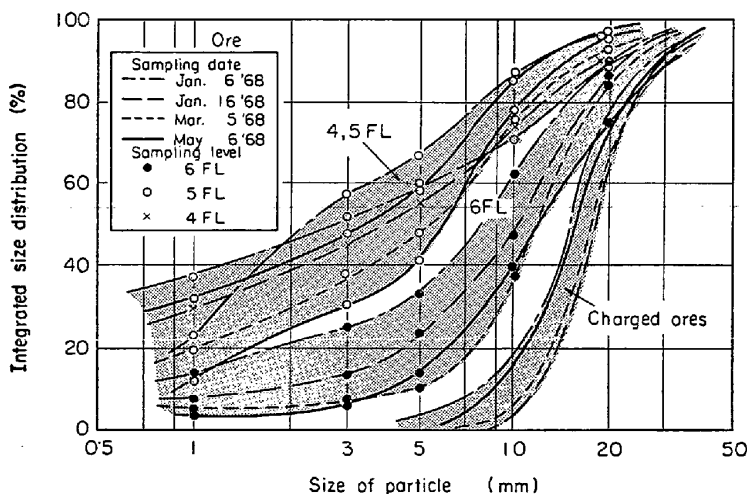


Fig. 13. Size degradation of ores descending in shaft zone (No 4 BF).

図から明らかなように、炉内降下とともに焼結鉱は粗粒部分が大幅に減少して細粒および微粒のものが多く出る粒度分布変化、すなわち累積粒度分布が小粒径側に平行移動する変化を示し、鉱石とペレットは粗粒部分を残しながら微粒が多く出る粒度分布変化、すなわち累積粒度分布の勾配が小さくなる変化を示している。

また、炉半径方向を炉壁帯・中間帯・中心帯にわけて、おのおの位置で採取した試料の粒度分布を調べてみると炉壁帯および中心帯で微粒の多い粒度分布を示した。しかし、その粒度分布のパターンは各装入物とも各半径位置で異なる反応履歴を受けているにもかかわらずFig. 12~Fig. 14の分布と同じ特徴を示している。Fig. 15に焼結鉱の例を示す。

したがって、粒度分布変化から焼結鉱は粗粒が小粒径のものに破壊されて細粒および微粒を生ずる粉化形態を、また、鉱石とペレットは粒子の表面層が削られて微粒をおもに生ずる粉化形態をとることがわかる。

Fig. 16に粉化型式について2種類のパターンを示すが、粉体工学では粒子自体に多数の亀裂が入り数個以上のブロックに破壊する粉化を体積粉化と呼び、粒子表面が削られて微粒を発生する粉化を表面粉化と呼んでいる⁵⁾。この粒度分布変化から、炉内の焼結鉱は体積粉化に、鉱石とペレットは表面粉化に近い粉化形態をとるといえる。

4.2 顕微鏡組織と粉化状況

各装入物試料について切断面を観察したので

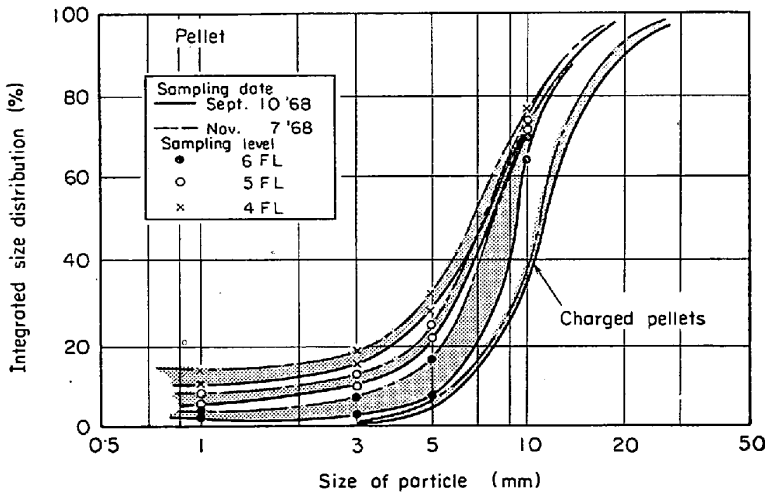


Fig. 14. Size degradation of pellets descending in shaft zone (No 1 BF).

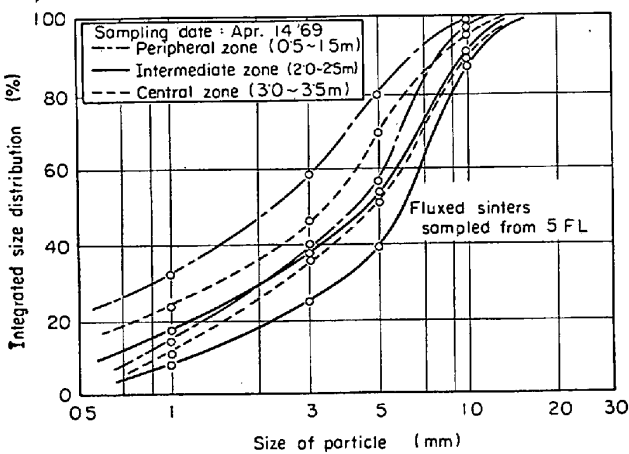


Fig. 15. Size distribution of sinters at each position from inwall (No 4 BF).

その例を Photo. 4 に示す。

5床目から採取した焼結鉱は、マクロナ亀裂面に沿って無数の微細な亀裂を生じ、数個以上の細粒に分散しやすいことを、また6床目から採取した鉱石は表面層に微細な亀裂が入りこんでいて表面から剝離して微粒を生じやすいことを示している。一方、ペレットは粒子表面から2~3mm離れた内側に環状のマクロナ亀裂を生じ、表面層がこの亀裂面に沿って剝離しやすいことを示している。したがって、顕微鏡組織からも焼結鉱は内部全体に亀裂を生じて粉化する体積粉化を、また鉱石とペレットは表面層に亀裂を生じて粉化する表面粉化を起こしやすいことが確認できる。

焼結鉱の亀裂はシャフト上段の試料に多くみられたが、概して菱形および線状のヘマタイトを含む組織および元鉱が残存している組織に発生している。これらは高炉炉頂部から採取したダストの性状調査からもすでに確

められている。Photo. 4 にその例を示すが、(a)は菱形のヘマタイト組織に、(b)は元鉱部と焼結部の中間組織にみられる亀裂である。

従来から各種の炉外試験により、焼結鉱は500°C前後の低温領域で還元を受ける際ヘマタイト組織に起因する亀裂を生じて粉化するとされているが、これは炉内のシャフト上段で粉化が多く起きている事実と一致する。シャフト中段以降では、亀裂も鋭利なものから幅の太く短いものにかわり、組織も微細なマグネタイトになるので亀裂に起因する粉化はほとんど進行しなくなると推定される。

鉱石の組織は銘柄によつて異なるので亀裂との関係を見出すことは困難である。鉱石の亀裂は大きくわけて、おもに表面層から結晶粒界に沿って発生しているものと、結晶粒界・粒内の区別なしに還元の進行にともなつて発生しているものがある。

Photo. 5 に亀裂の発生例を示すが、(c)はゲータイト

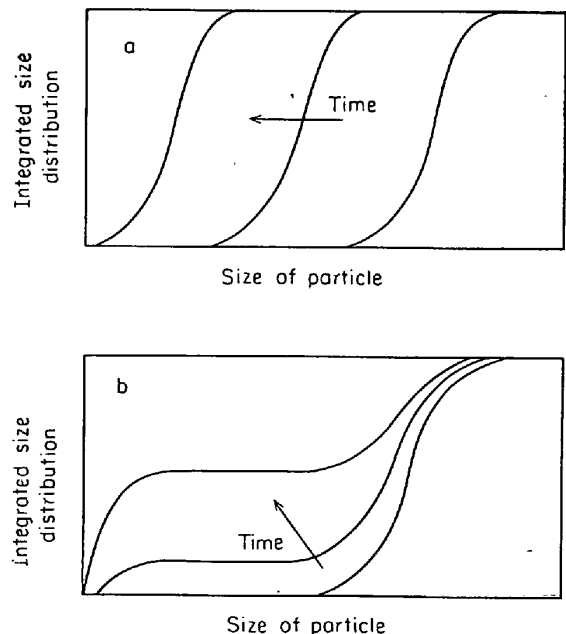
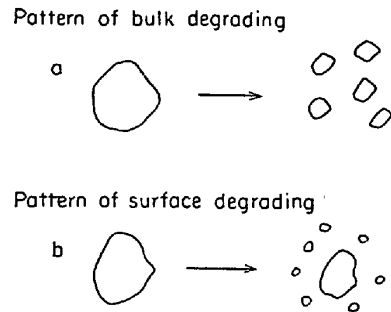


Fig. 16. Pattern of typical size degradation.

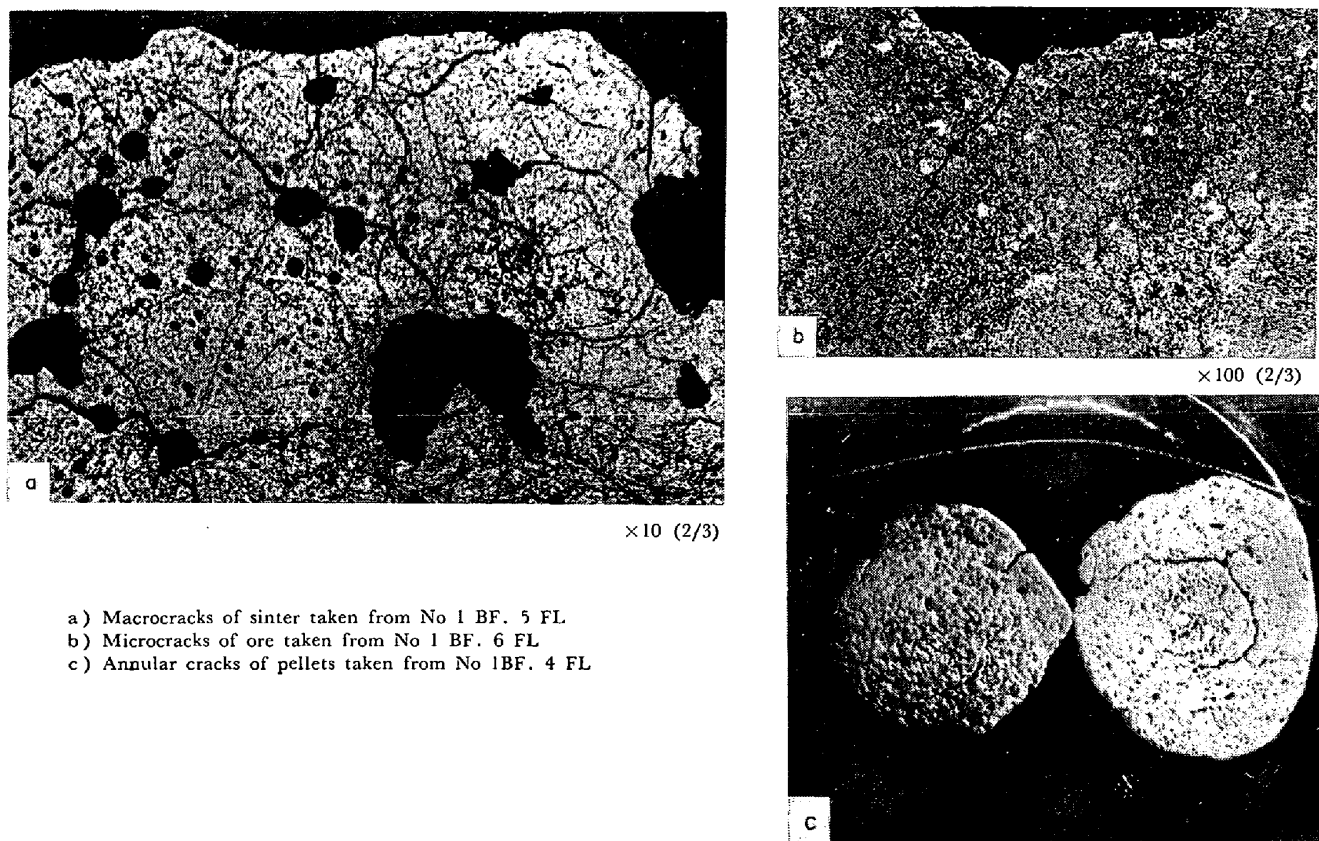


Photo. 4. Appearance of cracks extended in samples.

組織（偏光による顕微鏡観察で確認）に、(d)はトポケミカルに還元された組織に生じている亀裂である。鉱石の亀裂はよく成長しているヘマタイト組織ないしはゲータイト組織からなる鉱石に多くみられるが⁹⁾、微細なヘマタイト組織を示す鉱石にはあまりみられない。

鉱石は焼結鉱と同様にシャフト中段でほぼマグネタイト組織にかわり、微細な亀裂も鉱石内部の全体にいきわたるが、焼結鉱のように内部に生じた亀裂面に沿ってすみやかに粉化することはないようである。Photo. 6に一例を示す。粉化した微粒の焼結鉱内部では亀裂があまりないが、鉱石内部では微細な亀裂が多くみられる。このことはシャフト中段以降でも鉱石の粉化が起こりうることを示している。

一方、ペレットは Photo. 4 に示す環状のマクロな亀裂のほか、組織内に微細な亀裂がみられ、これに沿ってマグネタイトが発達している。Photo. 7の(a)にマクロな亀裂を、(b)にトポケミカルに還元された組織内の微細な亀裂を示す。マクロな亀裂面ではマグネタイトが必ずしも生成していない。微細な亀裂はマクロな亀裂面を境に還元の進んだ表面層側にみられる。したがって、ペレットの粉化はマクロな亀裂面で剝離して細粒を生ずる粉化と、表面層の微細な亀裂によつて微粒を生ずる粉化とが考えられる。

5. 高炉炉内条件と相似の粉化試験

5.1 粉化試験法

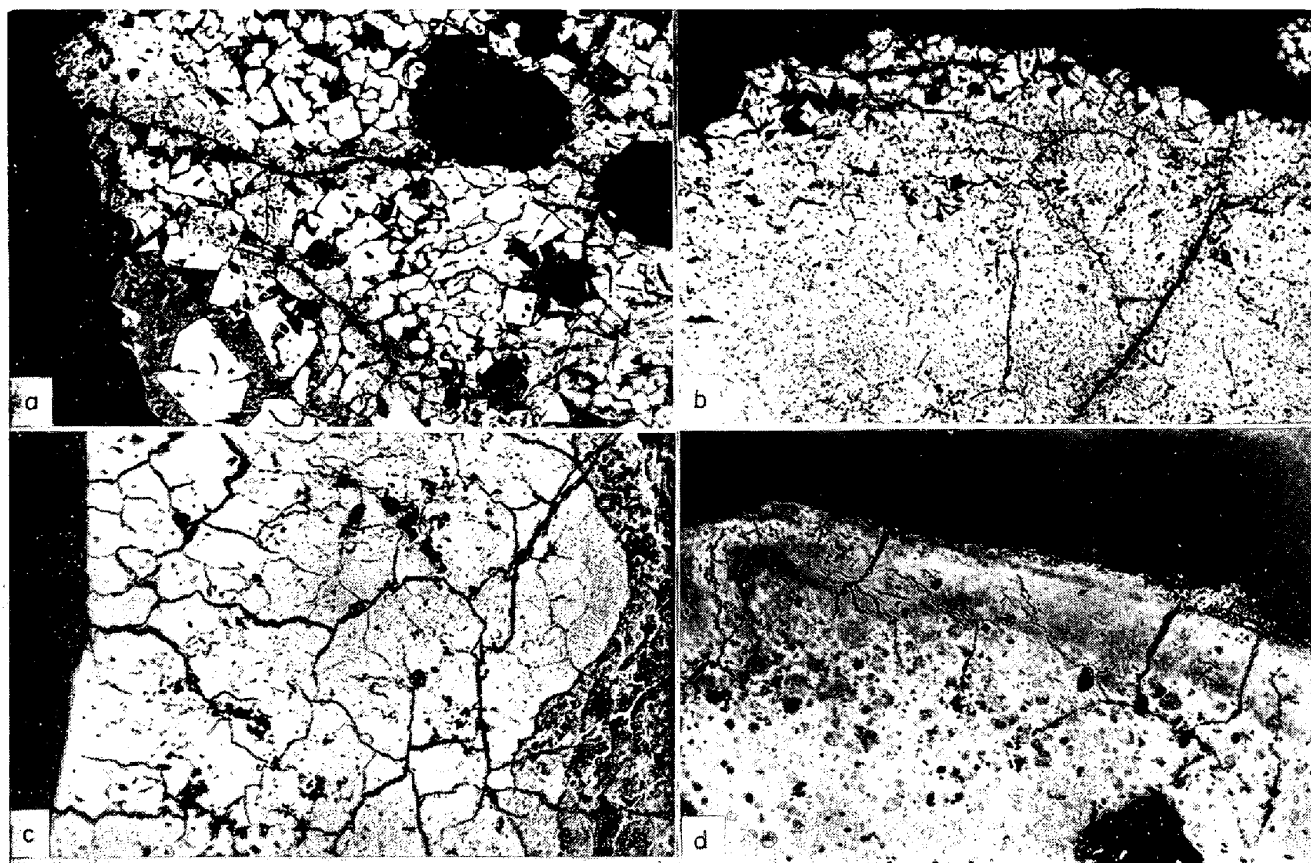
採取試料の性状調査から炉内での粉化形態をかなり知ることができたが、採取試料には数種類の装入物が混合しているため、各銘柄の粉化形態をくわしく知ることはできない。

このため、高炉シャフト部の諸条件が相似できる試験装置を開発し、各銘柄ごとに粉化試験を行なつて粉化形態を調べた。

炉内での粉化は荷重・摩擦力の影響を受けて生じているものと考えられるが、従来の試験法ではこの要因を定量的に加えたものがあまりなく炉内での装入物性状を把握するうえで大きな障害となつていた。

炉内での高さ方向の荷重力は実測することが困難であるが、装入物粒子間の摩擦係数を測定することにより次式から求めることができる⁹⁾。この式は Fig. 17 に示す炉の単位高さ方向の応力バランスから得たもので、算出条件として注目する単位層内の装入物性状が均質であることを必要とする。炉内ではこの条件を完全に満足しないが、各装入物層が 500 mm以下の厚さで幾段にも重なつて堆積しているので近似できるものとした。

$$\text{炉頂部分} : P = R \cdot (\rho - \Delta p) / 2\mu k.$$



a) Cracks at rhombohedral crystals of hematite
 b) Cracks at boundary layer between original hematite and sintered parts
 c) Cracks developed by release of combined water
 d) Cracks developed by reducing topochemically

Photo. 5. Cracks appeared in sampled sinters and ores.

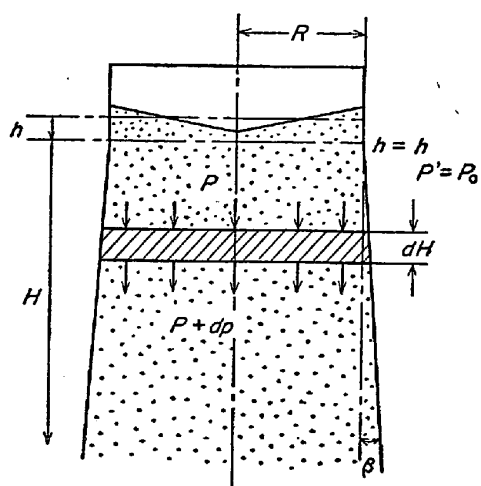


Fig. 17. The variables adopted for calculation of stock pressure on a closed section in a blast furnace.

$$\{1 - \exp(-2\mu \cdot k \cdot h/R)\}$$

シャフト部分： $P = \{(H \cdot \tan \beta + R) \cdot (\rho - \Delta p) / (2\mu k + \tan \beta)\} + \{R / (H \cdot \tan \beta + R)\}^{(2\mu k / \tan \beta)}$

Table 9. Coefficient of internal friction and external friction against brick wall.

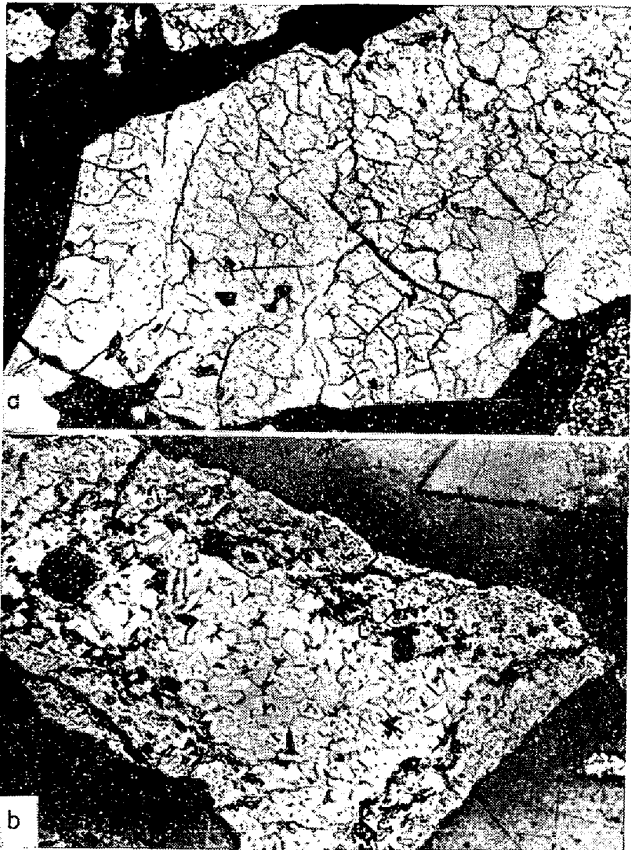
Species	Size distribution (%)			μ	μ_w
	+5 mm	5~25 mm	+25 mm		
Sinter -1	20.0	66.1	13.9	0.56	0.63
" -2	13.5	68.4	18.1	0.52	0.62
Ore -1	9.0	91.0	—	0.60	0.64
" -2	2.0	95.0	3.0	0.54	0.60
Pellet	4.8	95.2	—	0.45	0.53
Coke -1	—	11.0	88.0	0.44	0.60
" -2	—	3.0	96.0	0.46	0.61

Sinter; Fluxed sinter, Ore; Santa Fe, Pellet; Kaiser pellet

$$(P_0 - (\rho - \Delta p) \cdot R / (2 \cdot \mu \cdot k + \tan \beta))$$

P : 垂直荷重 (kg/m²), P_0 : 炉頂部下段レベルの P (kg/m²), ρ : 装入物の嵩密度 (kg/m³), Δp : 単位高さ当たりのガス圧損失 (kg/m²·m), h, H : 炉頂部, シャフト部の層深さ (m), μ : 装入物粒子間の摩擦係数 (-), β : 垂直面に対するシャフト角度, $k = 1 / (1 + 2\mu^2 + \mu \sqrt{1 + \mu^2})$, R : 炉頂半径 (m)

上式から炉内での荷重力分布を求めるため, 実炉と同



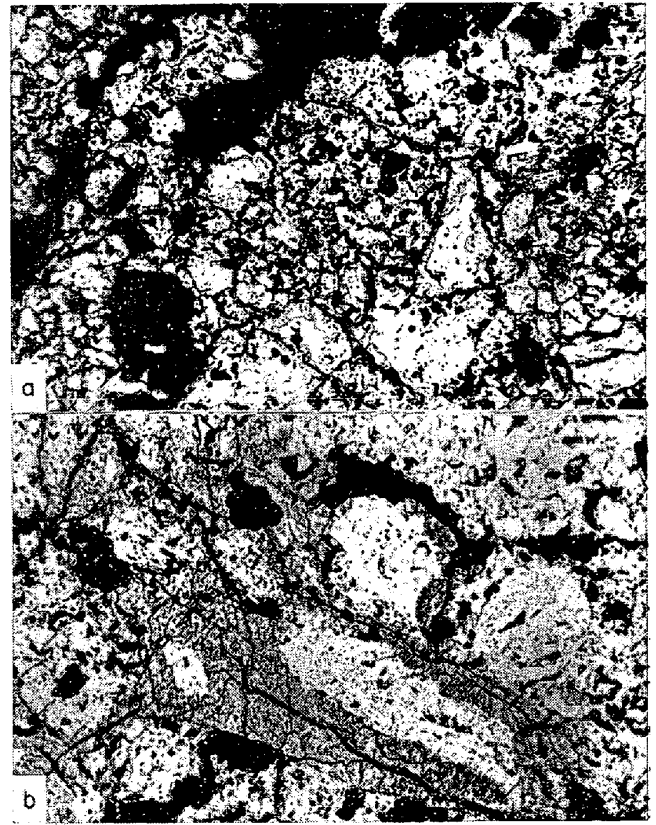
a) Structure of ore
b) Structure of sinter

×100 (4/5)

Photo. 6. Microscopic structure of degraded materials in shaft zone (Samples taken from 5 FL of No 4 BF).

じ粒度の各装入物の摩擦係数 μ を摩擦角測定装置によつて測定した。その結果の一例を Table 9 に示す。上式は、普通 μ_w (壁・粒子間摩擦係数) を使用するが、炉内では $\mu_w > \mu$ となつて、装入物の降下が炉壁面ではなく炉壁側近の装入物面に沿つて起こるので μ を使用するのが正しい¹⁰⁾。また、炉内では各装入物が層状に堆積しているので Table 9 の μ を直接上式に代入して算出することができないが、円筒内に焼結鉱とコークスを層状に堆積させて荷重力分布を測定した結果では各装入物の体積比による μ の算術平均値を用いれば、層状装入された装入物層の荷重分布が求められることを確認した。これより、実炉内での層状装入物の μ を求め、上記の式を用いて室蘭 No 4 BF の炉高さ方向の荷重力分布を計算した。この結果を Fig. 18 に示す。ソ連の実測値も示すが計算値とはほぼ一致している。¹¹⁾

この荷重力分布の検討結果をもとに高炉と相似の条件で試験できる荷重還元粉化試験装置を作成した。装置の概略を Fig. 19 に示す。この装置では荷重・摩擦力・熱・還元条件をシャフト各レベルの条件と相似させて与え



a) Macro cracks formed on the surfaces
b) Cracks developed on the topochemically reduced structure

×100 (4/5)

Photo. 7. Cracks appeared in sampling pellets (samples taken from 5 FL of No1 BF)

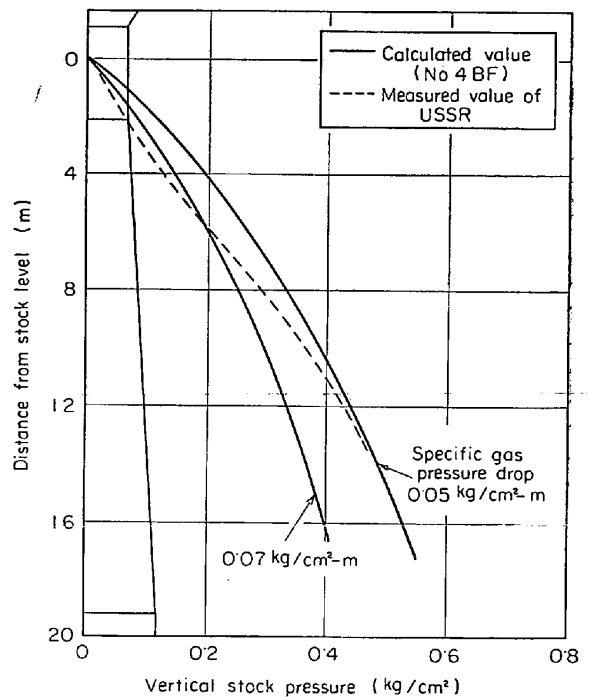
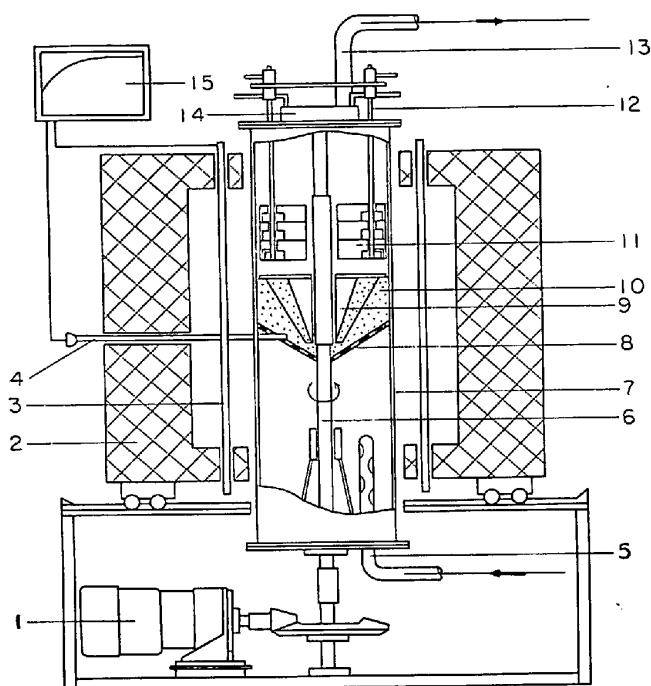


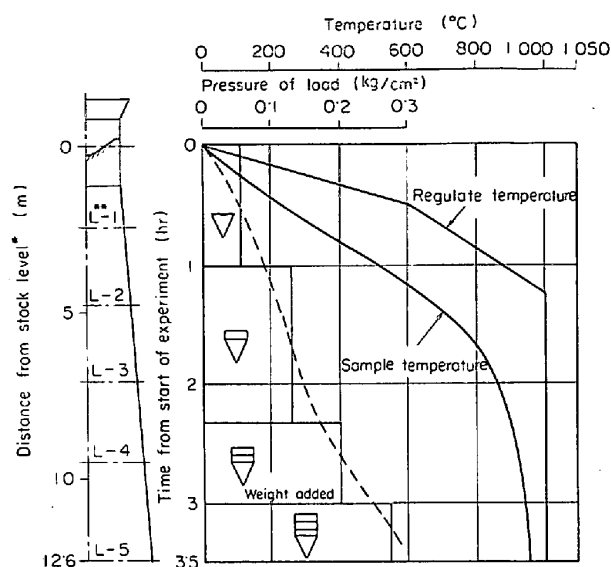
Fig. 18. The vertical stock pressure distributions along the furnace height.



- 1 Motor for rotating (3 rpm)
- 2 Heating furnace
- 3 Si-C heater
- 4 Pt-PtRh thermo couple
- 5 Inlet for reducing gas
- 6 Rotating shaft bar (0.5 rpm)
- 7 Reaction tube (dia 250mm, length 1000mm)
- 8 Screening grate (dia 3mm)
- 9 Star-type weight
- 10 Sample
- 11 Adding weight
- 12 Handling bar for adding
- 13 Outlet for reacted gas
- 14 Water jacket
- 15 Heat controller

Fig. 19. Experimental apparatus designed for analogy in the shaft conditions of blast furnace.

ることができる。すなわち、荷重力は数段に重ねた添加重錘⑩を時間の経過とともに星形重錘⑨の上面に逐次一個ずつ添加する方法によつて与え、摩擦力は星形重錘を添加重錘とともに回転させることによつて与えた。回転数は星形重錘の回転速度が装入物の炉内での降下速度とほぼ同じ値になるように 0.5 rpm に設定した。反応筒⑦の昇温は高炉内のシャフト温度測定値から得た温度分布に沿つて与えた。Fig. 20 にその試験条件を示す。還元ガスはボッシュガスに相当する一定のガス組成 (CO 40% + N₂ 60%) のものを 20 l/min の割合で流した。試験時間は装入物がシャフト下部まで降下する時間とほぼ同じ 3.5hr、試料装入量は容積基準で 3l、試料粒径は 10~20 mm (ペレットは粒度調整せず) である。なお、この試験では鉱石類およびコークス相互の影響も考慮してコークス (10~20 mm 粒径のもの) を ore/coke (重量比) で 3 となるように装入した。発生した 3 mm 以



- * Calculated with descending speed of burdens 60 mm/min
- ** Corresponding shaft level for test

* Calculated with descending speed of burdens 60mm/min.
** Corresponding shaft level for test.

Fig. 20. Schedule of heating and load added for experiment.

下の粉は多数の孔をもつプレート⑧をへて筒底部に落として回収し、粉中のコークスは重液 (C→CCl₄, Cl₄+C₂H₂Br₄, 比重 2.2) により分離した。

このように高炉と相似の条件で試験を行なうことにより、シャフト部の各相当レベル (Fig. 20 の L-1~L-5) における各銘柄の粒度分布および粉化量変化を調べた。

5.2 粉化試験結果

本試験によつて得られた値が炉内の粉化状況を再現しているか否かを試験試料と炉内試料の粒度分布変化およびその粉化程度について検討した結果、炉内試料とほぼ同じ粉化形態および粉化量を示すことが確認できた。

Fig. 21 にシャフト各相当レベルの試験条件で求めた各装入物の代表銘柄についての累積粒度分布変化を示す。焼結鉱は Fig. 12 と同じく累積粒度分布が小粒径に平行移動する粉化を示すと同時に、シャフト部の上段から中段相当レベルにかけて細粒および微粒を多く生ずるのがみられた。この粉化の特徴は自溶性焼結鉱において塩基度の高低をとわずかならずみられた。

これに対し、鉱石 (ブラジル鉱) は Fig. 13 と同じく微粒を多く生じて累積粒度分布の勾配が小さくなる粉化を示した。しかし、鉱石の場合、粒度分布変化の程度は銘柄によつてかなり異なるのがみられた。一方、ペレットは鉱石と類似した粉化を示したが、その粉化量は焼結鉱および鉱石ほど激しくなかつた。また亀裂・剝離の発生はよく観察することができた。

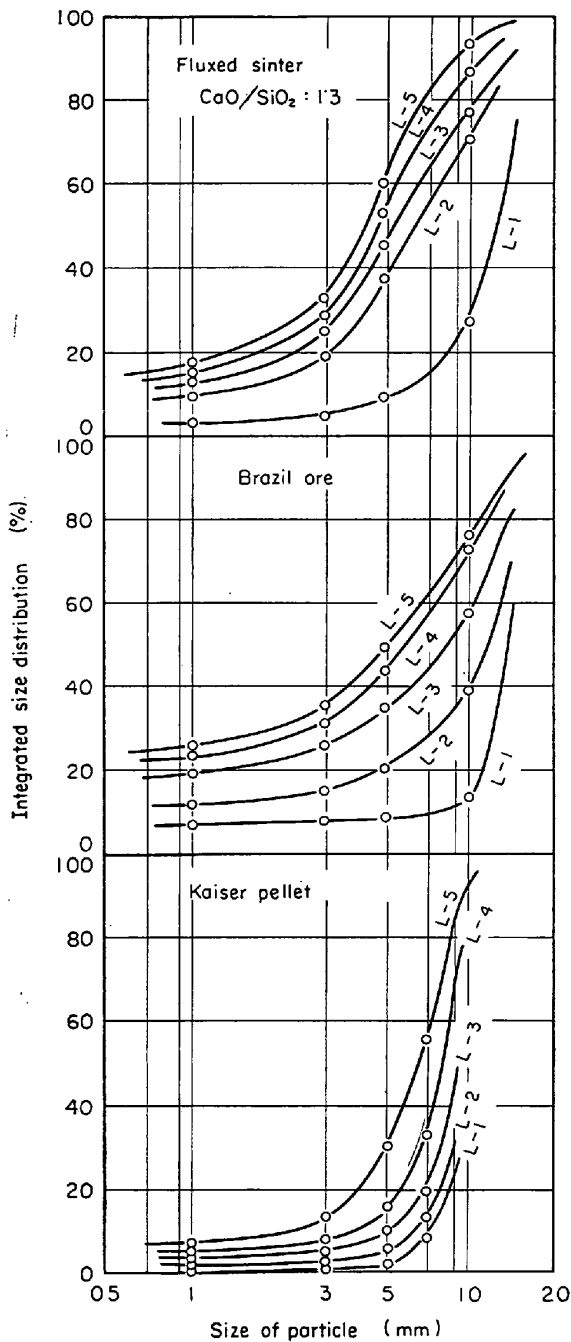


Fig. 21. Variation in size distribution of each material descending the shaft under experimental condition corresponding to each shaft level.

次に、各種銘柄の装入物十数種類について、シャフト部各レベルの粉化量変化を知るため、各レベルに相当する試験条件 (L-1~L-5) を与え粉化試験を行なった。3 mm以下の粉発生量を各相当レベルについて示すとFig. 22 のようになる。供試料の化学成分および各相当レベルでの還元率を Table 10 に示す。なお、還元率は縮分した 3 mm以上の試料の化学分析値から算出した。

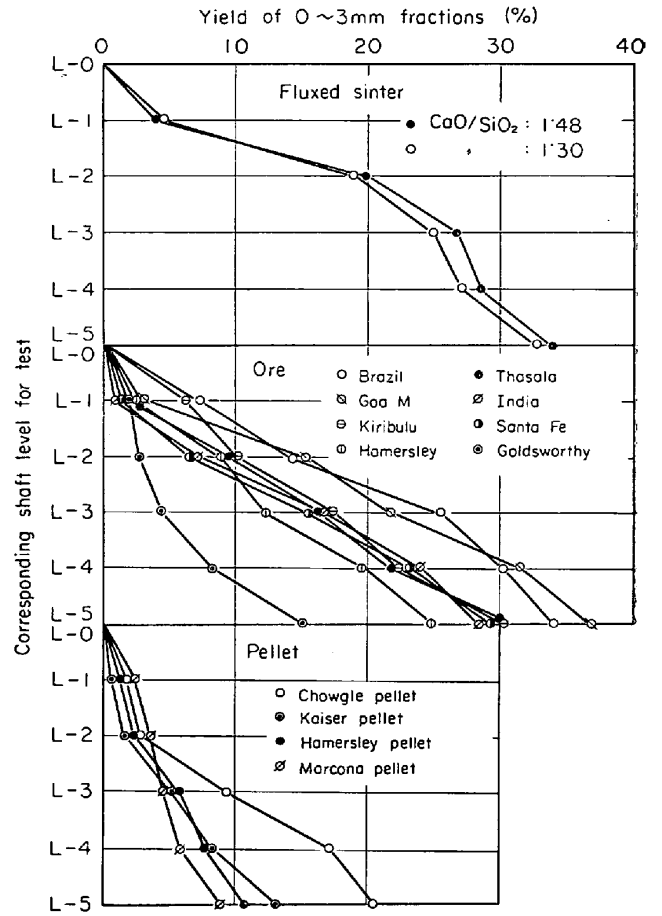


Fig. 22. Variation in amount of each material degraded to 0~3mm under experimental condition corresponding to shaft level.

焼結鉱は 2 種類の試料の例を示すが、L-1 から L-3 のレベルにかけて急速な還元を受けるとともに、微粉量が急激に増加している。L-3 レベル以後では粉化があまりみられない。L-4 と L-5 レベルの焼結鉱では亀裂が太く短いものに変わつているとともに表面層のマグネタイト組織が微細、かつ緻密なものとなつていた。Photo. 8 (a)に L-5 レベルの顕微鏡組織を示す。

これに対し、鉱石は銘柄によつてその粉化量がことなるが、L-1 から L-3 のレベルにかけてやはり微粉量の増加がみられる。しかし、焼結鉱と異なり L-4 と L-5 レベルでも微粉が多く生じている。

鉱石の粉化は各銘柄のもつ組織と密接な関係がある。緻密で微細なヘマタイト組織をもつゴールドワージー鉱では鉱石内部に亀裂がほとんどみられずきわめて低い粉化量にとどまつた。これに対し、ヘマタイトがよく成長しているブラジル鉱石では熱割れによるマクロな亀裂を生ずるため⁸⁾、他鉱石にくらべ L-1 から L-3 のレベルにかけて粉化が多くみられた。また、微細な亀裂も粒界に沿つて多数生じているので鉱石表面からの微粉化も

Table 10. Chemical composition of materials for test and rate of reduction at each test level.

Materials	Chemical component (%)					Rate of reduction (%)				
	T. Fe	FeO	CaO	SiO ₂	MgO	L-1	L-2	L-3	L-4	L-5
Fluxed sinter-1	60.06	11.56	7.10	4.80	0.93	0.72	3.60	20.14	28.76	33.75
Fluxed sinter-2	60.60	9.04	6.97	5.41	0.67	1.48	4.48	20.78	33.34	34.81
Goldsworthy	66.32	0.09	0.09	2.55	0.02	0.67	7.33	23.33	30.00	35.33
Thasala	57.03	1.17	0.42	12.90	0.08	1.00	8.87	21.71	26.00	30.29
Kiribulu	63.95	0.45	0.08	1.12	0.03	0.67	12.00	23.33	31.33	34.67
Goa M	60.25	1.30	0.02	1.50	0.07	2.58	9.39	18.79	26.85	36.24
Santa Fe	61.57	9.25	1.21	6.50	0.76	1.00	4.17	8.33	15.97	20.83
Hamersley	67.09	0.36	0.06	1.70	0.08	2.67	7.33	17.33	22.00	28.67
India	65.06	0.09	0.03	2.15	0.03	1.42	8.91	18.51	22.10	24.66
Brazil	68.90	0.90	0.03	1.40	0.05	2.13	12.00	23.40	26.53	30.87
Hamersley pellet	63.18	0.22	0.47	5.05	0.14	2.70	11.87	19.39	26.87	32.50
Chowgle pellet	65.76	0.09	0.68	2.70	0.23	1.33	6.00	20.00	26.00	30.00
Marcona pellet	65.41	1.84	0.39	3.90	0.85	1.00	3.54	10.89	16.18	23.65
Kaiser pellet	64.34	1.37	0.72	3.02	1.87	2.68	10.07	14.09	34.89	39.12

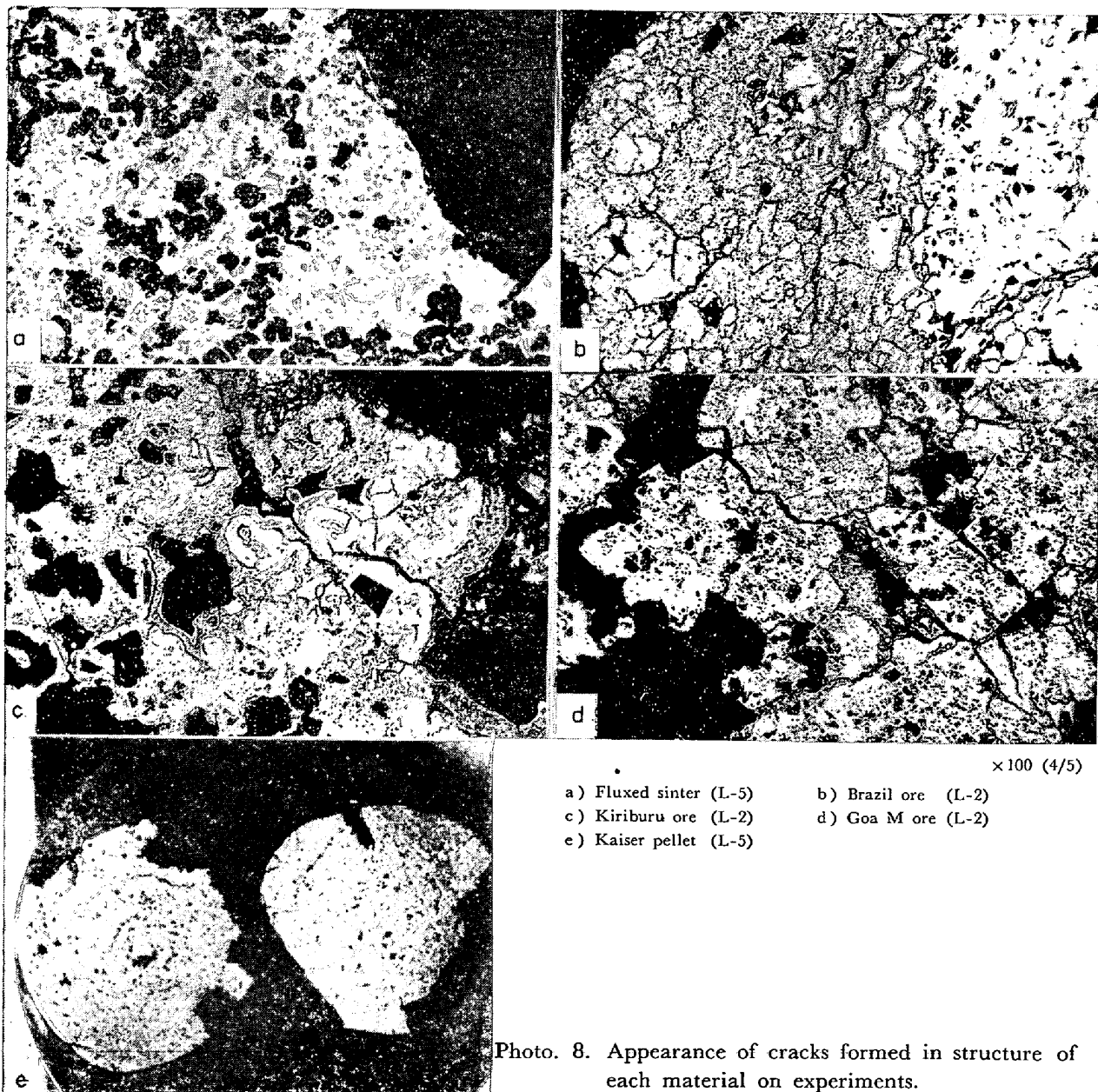


Photo. 8. Appearance of cracks formed in structure of each material on experiments.

多く起こるのが確認された。Photo. 8 (b)に L-2 レベルにおけるブラジル鉱石の顕微鏡組織を示す。一方、キリブル、ゴアMなどのゲータイト組織を多く含む鉱石では結晶水を放出してゲータイト組織にマクロな亀裂を生ずるので¹²⁾、L-1 から L-3 のレベルにかけてやはり粉化が多くみられた。Photo. 8 (c), (d)に L-2 レベルにおけるキリブル、ゴアM鉱石の顕微鏡組織を示す。その他の鉱石では還元にもなつて表面層に微細な亀裂を生じ、粉化するのが観察された。

ペレットは焼結鉱・鉱石にくらべ約 1/3 程度の粉化にとどまるとともに、微粒の発生は L-4 および L-5 レベルのシャフト下段になるほど多くなる傾向を示した。ペレット粒子内における環状の亀裂は L-2 から L-3 レベルにかけて多く発生したが、3 mm 以下の微粒の発生は環状の亀裂にそつて剝離して表面形状が劣化したあとに多くみられた。Photo. 8 (e)に L-5 レベルにおけるカイザーペレットの切断面を示す。

このように、荷重還元粉化試験装置による粉化試験によつても、炉内における焼結鉱は体積粉化に近い粉化形態を、また鉱石とペレットは表面粉化に近い粉化形態を確認することができた。

焼結鉱の使用割合が高い操業では、シャフト上段から中段にかけて焼結鉱の粉化が激しく起きることになるので、このレベルでのトラブルが当然予想される。実際に焼結鉱の使用割合が 80% 以上となつている高炉では、棚吊り・スリップの発生がシャフト上段レベルに集中していることをシャフトガス圧計によつて確かめている。

6. 結 言

高炉内における装入物の性状変化を知るため、直接シャフト部の各位置より試料を採取してその性状を調査した。

また、採取試料の粉化性状を検討するとともに、炉内と相似の条件が与えられる粉化試験装置を用いて粉化試験を行なうことにより、各種装入物の炉内で示す粉化形態の把握に努めた。結果を要約するとつぎのとおりである。

(1) 焼結鉱および鉱石はシャフト上段から中段にかけて、また炉中心側で微粒を多く生ずるのがみられた。

各装入物はシャフト下段でも粒体の形状を保持しており溶融・融着現象は認められなかつた。

(2) ペレットも同様であつたが、表面層に生ずる環状の亀裂によつて多く破損するのがみられた。また、圧壊強度もシャフト中段で半分以下に低下していた。

(3) 鉱石類 (ペレットも含む) の還元率は炉壁およ

び炉中心側で高く、中間部で低い値を示したが、鉱石・焼結鉱・ペレットの各還元率には差がほとんど認められなかつた。

(4) 焼結鉱はシャフト上段から中段にかけて内部全体に亀裂を生じて順次細粒化していく粉化が多くみられた。このため、焼結鉱は体積粉化に近い粉化形態をとると判断された。シャフト中段以後では、亀裂をあらたに生じて粉化が更に進むことはあまりない。

(5) 鉱石は銘柄によつて粉化量を異にするが、シャフト上段から中段にかけて、表面層から亀裂が入つて微粒を生ずる粉化が多くみられた。このため、鉱石は表面粉化に近い粉化形態をとると判断された。また、鉱石はシャフト中段以後でも粉化が進むことを確かめた。

(6) ペレットはシャフト部であまり多く粉化しないが、環状のマクロな亀裂にそつて剝離する粉化と微細な亀裂にそつて表面から微粒を生ずる粉化がみられた。このためペレットも表面粉化に近い粉化形態をとると判断された。

文 献

- 1) B. L. LAZAREV, B. A. BOKOVIKOV, et al.: *Stal in Eng.*, 6 (1965), p. 429~433
- 2) 学振製鉄 54 委員会: 第75回 No 1132
- 3) V. I. LOGINOV, A. I. PARFEROV, et al.: *Stal in Eng.*, 6 (1969), p. 526~530
- 4) I. Z. BUKLAN, I. D. BALON, et al.: *Stal in Eng.*, 3 (1970), p. 183~187
- 5) 松山: 化学機械技術, 14(1962), p. 72 [化学同人]
- 6) 小島, 永野, 稲角, 高木: 鉄と鋼, 55(1969) 9, p. 757~763
- 7) 菅原, 佐藤: 鉄と鋼, 55(1969) 13, p. 1107~1118
- 8) 国井, 稲葉: 鉄と鋼, 53(1967) 7, p. 732~734
- 9) 森: 新化学工学講座 IV-1(1961), p. 54~56 [日刊工業新聞社]
- 10) 青木, 森: 化学工学, 24(1960) 12, p. 926~935
- 11) N. N. BABARYKIN, A. A. AGASHIN, et al.: *Stal in Eng.*, 4 (1959), p. 249~250
- 12) 国井, 細見, 稲葉: 鉄と鋼, 52(1966) 3, p. 228~230

討 論

【質問】 住友金属 河西健一

炉内サンプリングの結果、ペレットと鉱石とに差がないと結論されているが、これは炉内分布、鉱石層の厚み、ガス通気性分布などがペレットと鉱石とで異なるためではないか、実験室の還元試験ではペレットの方が高い還元率を示すがこれとの差が出る原因はなにか。

【回答】

ペレットは鉱石にくらべ安息角が小さいため炉内に装入された場合、炉中心部に流れ込む。このためガス流れも炉中心側が押えられるのでペレットを使用した高炉で

は外部操業の傾向がでる。したがって、炉内での還元率変化も鉍石を使用する操業の場合とくらべ当然異なるものと予想される。しかし、ここで述べたペレットと鉍石は同一高炉内で隣接していたものを同時に採取した試料であるため、ほぼ同じ履歴を炉内で受けたものとみてよいので還元率に対する装入物分布、ガス通気性分布の差異による影響は考えられない。

装入前のペレットと鉍石の性状が異なるにもかかわらず還元率に差がほとんど認められないのは、これらの性状があまり影響しない炉内還元条件下にあるためと考えられる。

すなわち、シャフト部では Fig. 23 に示すように、ガス温度が 700~950°C、ガス利用率が 30~40% の範囲にあるため、その還元条件は Fe-FeO の還元平衡に近い状態にある。一方、鉍石類の炉内における還元反応は、特殊な性状を示すものを除いてほぼ 850°C を境に低温側では化学反応律速が、高温側では粒内拡散律速が支配的になることを確かめられている¹⁾。

したがって、シャフト上段の低温領域では、還元ガスが細孔内まで均一に到達し粒子の外表面と内部とがほぼ同じ速度で反応が進むので各装入物の物理的性状（粒径、気孔率など）は還元速度にあまり影響を与えない。これに対し、シャフト中段から下段にかけての高温領域では粒内拡散律速となつて粒子内部まで均一に還元ガスが到達しなくなるので、還元速度は粒子の反応界面と外表面との間の物理的性状によつて左右されることとなる。しかし、この高温領域に降下してくる装入物は低温領域ですでにある程度の還元（シャフト中段で FeO を 20~40% 含有）を受けているので、この領域での還元反応をあまり活発に行なわれぬ。シャフト部では Fe-FeO の平衡領域に近いガス組成なので、特にヴィスタイトからメタルへの還元速度は低下する²⁾。このため、この領域では粒子の表面層がいくらか還元されるにとどまつて各装入物のもつ物理的性状の還元率への影響が強くてこない。

このような理由によつて、性状の異なるペレットと鉍石においても還元率に差があまり出ないものと判断される。ただし、上記の条件と異なり、シャフト上段まで高

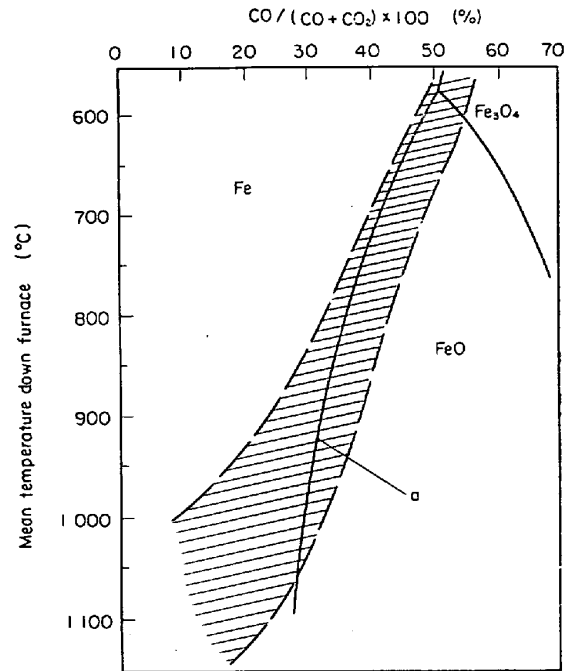


Fig. 23. Relation between temperature and degree of utilization of gases down the blast furnace stack (a: Equilibrium curve of reducing iron oxide with CO gas).

温で CO 濃度の高いガスが流れる位置の装入物についてはこの限りでない。

これに対し、たとえば JIS 法による還元試験では 900°C の温度で、CO 30% + N₂ 70% の成分からなる還元ガスを流して行なうので、メタルまで進む強い還元条件にあるとともに粒内拡散律速の範囲にある。このため、ペレットと鉍石の場合も性状の差が還元率の差となつて強く表われるものといえる。

文 献

- 1) 鞭: 鉄と鋼, 52(1966) 7, p. 1079~1089
- 2) V. I. LOGINOV, A. I. PARFENOV, et al.: Stal in Eng., 6(1969), p. 183~187