

論 文

UDC 669.181.4 : 622.341.1 : 622.341.1-188 : 669.094

シャフト炉装入原料の還元性状について*

金子 伝太郎**・木村 吉雄**

小野田 守**・藤田 勇雄***

Reduction Properties of Raw Materials for Direct Reduction
Shaft FurnaceDentaro KANEKO, Yoshio KIMURA,
Mamoru ONODA, and Isao FUJITA

Synopsis:

Reduction tests were performed on eight kinds of pellets produced at the actual pellet plants and four types of lump ores under the condition of the direct reduction shaft furnace, at the temperature range of 700–960°C, with reducing gas composition of H₂ 55%, CO 36%, CO₂ 5%, and CH₄ 4%. Reduction properties of these materials were investigated mainly on three important characteristics, that is, reducibility, generation of fine particles during reduction, and softening behaviour of sample beds.

The following results were obtained.

1) The reducibility of the pellets are fairly well related to the amount of slag or lime addition: the higher iron content of materials, the higher degree of reduction are obtained.

Decrease of the reducibility with the increase of slag volume or lime addition is dependent on the formation of liquid phase during pellet firing process, where the certain amount of iron oxide is included.

2) In a reduction test under load, pellets with the high iron content show the higher shrinkage and the indication of clustering is observed in the reduced samples.

3) The difference of the reduction properties of burden for shaft furnace from those of ordinary blast furnace is also discussed.

1. 緒 言

シャフト炉による還元鉄製造法では炉内を上昇する還元ガスと下降する原料のあいだで熱伝導、還元反応が進行するため、還元ガスの利用率が高く、エネルギー消費量が少ないことが特徴である。

古くはコークスを充填したガス再生炉を付備したヴェルグ法などが知られているが、最近では高い生産能力を有する設備として天然ガスを水蒸気、炭酸ガスなどで改質することによつて製造される CO+H₂ ガスを還元剤とするプロセスであるミドレックス法やアームコ法、プロフェル法などがとくに注目されている。

シャフト炉法においても使用する原料性状がプロセスの安定性や生産性に少なからず影響をおよぼし、良好な原料を選択し供給することが重要である。筆者らは実際

に天然ガスを改質し還元鉄の製造を行なつているシャフト炉法の還元条件に準拠した実験方法を用いて各種のペレットおよび鉱石について還元実験を行ない、それらの還元性状を調査するとともに、従来の高炉使用原料と直接製鉄用原料の相違点などを検討したので報告する。

2. シャフト炉装入原料として要求される性状

直接製鉄で製造される還元鉄の大部分が電気炉製鋼向であるからその原料としては鉄品位の高いもの、燐、硫黄など不純物含有量の少ないものが選択使用されているのは当然のことといえる。しかし資源的にみてこれに適合した高品位鉄鉱石は減少しつつあり、今後は磁選処理や浮選処理を駆使して目的に適つた精鉱を製造し、ペレット化し還元鉄製造工程に供する割合がますます増加してくるであろう。

* 昭和 52 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 52 年 2 月 14 日受付 (Received Feb. 14, 1977)

** (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel Ltd., 1-chome Wakihama-cho Fukiai-ku Kobe 651)

*** (株)神戸製鋼所中央研究所 理博 (Central Research Laboratory, Kobe Steel Ltd.)

シャフト炉法による還元鉄製造のために使用される原料の還元実験に関しては、原子力製鉄還元鉄グループが行なつた実験¹⁾のほか、2, 3 発表²⁾³⁾されているが、これらの結果をまとめてみると、装入物の化学組成を別にして次の特性が重視される。

- (1) 被還元性が良好であること
- (2) 還元途中において粉化が少ないこと
- (3) 炉内においてクラスター(cluster)が生成しないこと

(1)は装入物がシャフト炉内を降下し一定の還元率に達するまでに要する時間に関わるものでプロセスの生産性を左右する。(2)の粉化が著しいと炉内圧損上昇やダストロスの増加につながり好ましくない。(3)はシャフト炉内羽口付近高温部において装入物相互が固着しあいいわゆる棚吊り現象を起すもので、著しい場合には物質の円滑な降下がはばまれ大きなトラブルの原因になる。シャフト炉の生産性を高めるためには羽口吹込還元ガス温度を上昇させることが有効であるが、このクラスタリング現象を避けるため多くのシャフト炉法の羽口還元ガス温度は 800°C 付近に制約されている。

3. 試料および実験方法

3.1 試料

実験試料としては商業規模のペレット工場で製造されたペレット8種と代表的な鉱石4種を選んだ。これらの物理化学的性状を Table 1 に示した。また若干の確認実験を行なう目的で筆者らの試験工場で製造されたペレット6種を加えたがそれらの性状については Table 2 に示している。

最近ではDRフィードと称し鉄品位の高い直接製鉄用ペレットも市販されているが、今回実験に使用したものはその種のペレットのほか通常の高炉に使用されているものまで幅広く含まれており、またペレットの製造プロセスも Table 1 に記されているようにシャフト方式、グレートキルン方式、ストレートグレート方式の3方式からなっている。

鉱石のうちイスコール鉱およびピコ・デ・イタピリト鉱(以下ピコ鉱と略記する)はとくに鉄品位が高く高品位緻密塊鉱石といわれるものであるのに対して、ニューマン鉱は結晶水を若干含有する低品位鉱である。

Table 1. Chemical and physical properties of raw materials.

Brand	Process*	Chemical composition (wt%)				Compression strength (kg/p)	Tumbler index** (%)	Porosity (%)	
		TFe	FeO	SiO ₂	CaO				
Pellet	Hamersley	G	63.25	0.29	4.08	0.53	309	4.2	20.5
	Savage river	S	67.86	0.79	1.41	0.18	159	7.7	24.9
	Chowgle	G	65.90	0.10	2.58	0.58	227	8.9	29.0
	Robe river	G	62.76	0.29	5.69	0.78	274	7.1	29.3
	L K A B	S	68.27	0.40	1.16	0.15	272	—	17.0
	Whyalla	GK	64.82	0.14	3.59	0.55	220	4.3	28.1
	Kakogawa	GK	61.22	0.27	4.02	4.82	276	3.4	25.1
	C V R D	G	67.60	0.57	1.56	0.35	399	5.7	26.7
Ore	Iscor	—	68.35	0.43	1.05	0.05	—	3.7	5.4
	Hemersley HG	—	66.18	0.29	2.64	0.05	—	8.6	9.2
	Newman	—	61.64	0.36	4.32	0.05	—	9.6	15.3
	Pico	—	69.67	0.79	0.18	0.06	—	9.9	4.4

* G : Straight grate, GK : Grate kiln, S : Shaft

** —3.3mm

Table 2. Chemical and physical properties of sample pellets produced at test plant. (Fired at 1280°C, 25 min)

Sample No.	Chemical composition (wt%)				Compression strength (kg/p)	Porosity (%)
	TFe	FeO	SiO ₂	CaO		
A	68.35	0.29	0.79	0.09	281	21.2
B	66.74	0.29	2.17	0.12	276	22.3
C	65.62	0.22	3.40	0.10	284	23.6
E	63.81	0.22	5.66	0.12	213	25.7
J	66.74	0.15	1.25	0.90	377	21.3
K	66.60	0.22	1.16	1.11	336	20.2

試験工場製造ペレットは焼成ペレットの鉄品位やCaO含有量に変化をもたせるように MBR 鉱 (Mineracoes Brasileiras Reunidas 鉱) およびニューマン鉱、石灰石を粉砕し種々の割合で配合、造粒しポットグレート炉で予熱したのち、バッチキルンで焼成された。Table 2 において、A, B, C, E のペレットは石灰石を添加することなく鉄品位を変更したものであり、J, K のペレットは CaO 含有量を変更したものである。バッチキルン焼成条件は 1280°C, 25 min としたが、高品位 A ペレットおよび石灰添加 K ペレットについては焼成温度がペレ

トの被還元性におよぼす影響をみるため焼成温度 1 240 °C, 1 320°C のペレットも製造した。

3.2 実験方法

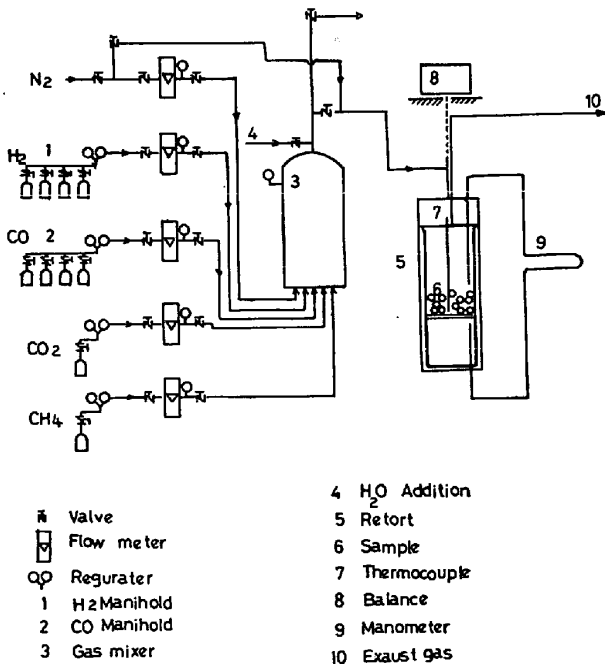
準備された鉱石および実機製造ペレットについてシャフト炉内の還元特性すなわち、被還元性、炉内粉化性状軟化収縮性状を注目した3種の還元実験を行なった。還元ガスの組成としては現存のシャフト炉法で多くの操業実績を有するミドレックス法の還元ガス組成に近い値として次のものとした。

H₂ 55%, CO 36%, CO₂ 5%, CH₄ 4%

試料は乾燥したのちふるい分け、9.5~19 mm の粒度範囲のものを実験に供した。またシャフト炉法では装入された原料は比較的短時間で昇温され還元がほぼ一定温度で進行することを考慮して等温還元実験とした。

(1) 固定層レトルト法実験

この実験は主として装入物の被還元性を調べるためのもので 500 g の試料を天秤に吊されたレトルトに入れ、電気炉内で還元し還元途中における重量変化から還元の進行をみるとともに、還元終了後取出した還元鉄の性状を調べた。装置の構成を Fig. 1 に示すがレトルトは内径 75 mm で下部に熱交換媒体としてアルミナボールを入れ、その上にスリットを敷き試料を装入する。還元ガス流量は 20 NI/min とし、温度は主として 760°C としたが還元温度が還元鉄の品質などにおよぼす影響を調べるため一部の試料については 700, 860, 960°C の場合についても実験を行なった。



- Valve
- Flow meter
- Regulator
- 1 H₂ Manifold
- 2 CO Manifold
- 3 Gas mixer

- 4 H₂O Addition
- 5 Retort
- 6 Sample
- 7 Thermocouple
- 8 Balance
- 9 Manometer
- 10 Exhaust gas

Fig. 1. Static bed reducing test apparatus and reducing gas supplying flow.

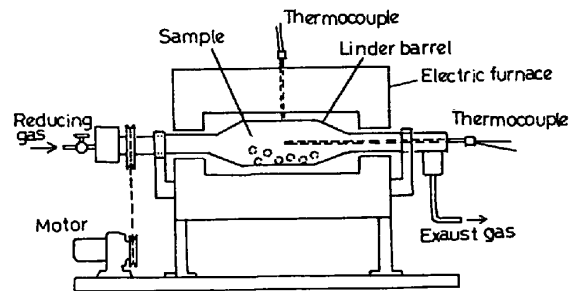
ガス源としてはガスポンプを使用し、流量計にて各ガス流量を調整したのち、アルミナボールを充填したガスミキサーで混合して還元ガスを試験装置に導入する。この還元ガス供給回路は次のリンダー還元試験および荷重還元試験装置と共通である。

(2) 還元粉化実験

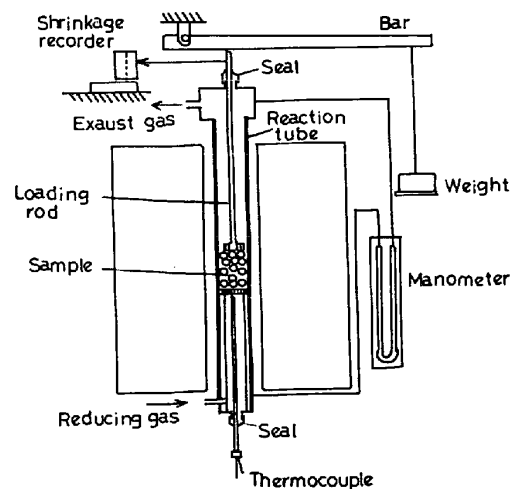
加熱した電気炉内を回転するバレル内にペレットまたは鉱石を装入して還元し、還元後取出した試料をふるい分け還元途中における粉化度を調査する方法をとった。装置の構成を Fig. 2 (a) に示す。これはいわゆるリンダー還元試験装置でバレルの内径は 135 mm, 長さ 200 mm で内部リフターは取付けられていない。1回の試料重量は 500 g とし、還元ガスを 15 NI/min で流通せしめ 760°C で 5 h 還元した。バレルの回転数は 10 rpm である。

(3) 軟化収縮試験

Fig. 2 (b) に示す荷重還元試験装置を用いた。内径 75 mm の反応管に試料を 1 000 g 装入し、シャフト炉還元帯下部における装入物にかかる荷重を考慮した荷重 2



(a) Linder reduction test apparatus



(b) Reduction under load test apparatus

Fig. 2. Linder reduction test apparatus and reduction under load test apparatus.

Table 3. Results of the reduction tests. (Reducing temperature 760°C)

Brand	Chemical composition of sponge after static bed reduction test (wt%)				Static bed reduction test		Linder reduction test		Reduction under load test			
	TFe	FeO	MFe	C	Degree of reduction (%)	Strength after reduction (kg/p)	Degree of reduction (%)	Fine* (%)	Degree of reduction (%)	Final shrinkage (%)	Cluster formation	
Pellet	Hamersley	80.74	30.20	55.29	0.03	79.6	128	98.0	11.6	82.4	6.6	observed
	Savage river	91.22	9.60	80.40	0.12	87.8	80	97.4	24.5	89.6	8.5	
	Chowgle	88.80	6.35	82.40	0.28	85.6	46	96.9	18.7	91.4	9.4	
	Robe river	79.49	31.37	54.75	0.01	73.8	189	90.5	2.9	79.9	6.6	observed
	L K A B	90.48	16.79	73.95	0.06	86.4	182	96.6	5.4	84.3	11.7	
	Whyalla	85.47	14.85	73.35	0.20	83.8	76	95.6	9.7	87.9	6.7	
	Kakogawa	78.97	9.82	68.14	0.51	82.4	50	91.0	34.3	88.9	5.4	observed
	CVRD	91.78	6.49	83.96	0.40	89.8	100	97.5	4.2	93.5	4.2	
Ore	Iskor	88.43	27.54	61.99	0.03	63.1	—	94.3	16.1	73.0	16.1	
	Hamersley HG	90.85	23.28	68.94	0.07	81.5	—	97.9	36.8	74.8	12.0	
	Newman	93.05	9.87	81.80	0.09	79.1	—	96.4	34.9	82.5	13.2	
	Pico	89.19	28.75	59.49	0.05	70.2	—	79.5	4.5	78.1	10.2	

* -3.3mm

kg/cm² を試料層にかけ、760°C で 2h 還元し還元途中における試料層の収縮度合をレコーダーで連続的に記録するとともに、還元後における試料粒子相互のクラスタリングの状況などを観察した。還元ガスの流量は 30 NI/min である。

4. 実験結果とその検討

還元温度を 760°C 一定とした場合の上記 3 種の還元実験結果を Table 3 にまとめて示した。クラスタの生成についてはこの温度では試料全体が完全に固着してしまう現象は認められなかったが、荷重還元試験後取り出した試料の外観観察によりその徴候があつたものを表中にマークしている。

4.1 固定層レトルト還元実験結果

760°C における固定層レトルト還元実験における還元時間と還元率の関係を Fig. 3 に示した。図においてペレットの還元曲線を実線で、鉱石のそれを破線で示しているがペレットと鉱石を比較すると一般的にみて後者の被還元性は劣っており、とりわけ緻密塊鉱石であるイスコール鉱、ピコ鉱などの還元の進行が遅い。

ペレットのなかでは原料鉄品位の高い CVRD、サベージリバーペレットなどは被還元性がすぐれており、脈石量の多いハマスレーやローブリバーペレットなどは被還元性が劣っている。自溶性ペレットである加古川ペレットは高炉装入物を対象とした JIS 還元率がきわめて高いものである。しかし今回の実験結果によると還元開始直後から中期へかけての還元速度は CVRD ペレットなどと同様に早い、還元時間 70 min 前後から還元の進行が停滞する現象がみられる。

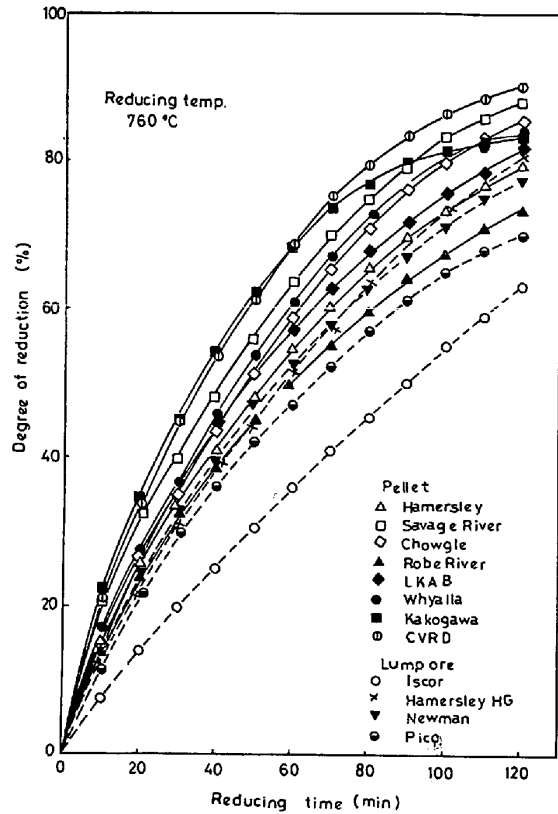


Fig. 3. Static bed reduction test results.

Table 3 に示されるペレットの還元後圧潰強度はローブリバー、LKAB ペレットなどの値が高く、ハマスレーペレットなどがこれについているが還元前の強度との相関はとくにみとめられない。

4.2 リンダー還元実験結果

次に還元途中における原料の粉化について Table 3 に示されたリンダー還元実験後の -3mm 発生量についてみると、装入物の形状から察せられるごとく一般に鉱

石の還元後粉率がペレットのそれに比較して多いといえるが、ペレットのなかでもサベージリバー、チョーグル自溶性加古川などのペレットはかなり高い粉率を示している。

還元途中における粉発生の原因として、鉱石の熱割れ現象をのぞけば、バレルの回転作用に伴う動摩擦によるものと OFFROY⁴⁾ らが指摘したようにヘマタイトからマグネタイトに還元される過程での結晶構造の変化による場合とが考えられる。焼成ペレットの常温強度がやや低いサベージリバー、チョーグルペレットなどは前者に、加古川ペレットでは後者にその原因がより依存しているものと考えられる。また加古川ペレットの還元粉率が高い点に関しては THANING⁵⁾ らが報告しているように自溶性ペレットを低温で還元した場合の還元初期段階の強度がきわめて弱いことがあるということにもその原因が求められる。

4.3 荷重還元試験結果

Fig. 4 は荷重還元試験における還元時間と試料層の収縮の状況を見たものである。鉱石の場合にはその形状からいつて加圧状態の還元途中においてその端部がくずれするため収縮割合は大きく、その要因はペレットの場合とは分離して考慮すべきであろう。

還元開始直後 20 min 程度の間にはペレットでは試料層が若干膨張するがこの現象は鉱石ではみられない。ペレットでは高品位 CVRD, LKAB ペレットなどにおいてこの初期膨張が大でかつ最終収縮率も 10% 程度まで達するがワイヤラ、ハマスレーペレットなどの収縮率は比較的低いほか、自溶性加古川ペレットの収縮割合はきわめて低い値にとどまっている。

また試験後取出し試料のなかでクラスター生成の徴候があつたものとして CVRD, LKAB サベージリバーペレットなどがあげられ、これらはいずれも鉄品位の高いペレットである。

4.4 還元温度の影響

次に CVRD, チョーグルペレットおよびピコ鉱について還元温度をさらに 700, 860, 960°C に変更したレトルト還元実験を実施し還元温度がこれら原料の被還元性や還元鉄の品質におよぼす影響を調査した。

CVRD ペレットおよびピコ鉱を各温度で還元したあとの試料表面近くの組織を走査型電子顕微鏡で観察した組織を Photo. 1 に示す。

まず CVRD ペレットについてみると、比較的低温である 760°C 還元の場合には生成した金属鉄はまだ個々の初期粒子形状を保っており、その表面には多くの微小気孔 (micro pore) を有している。このことは得られ

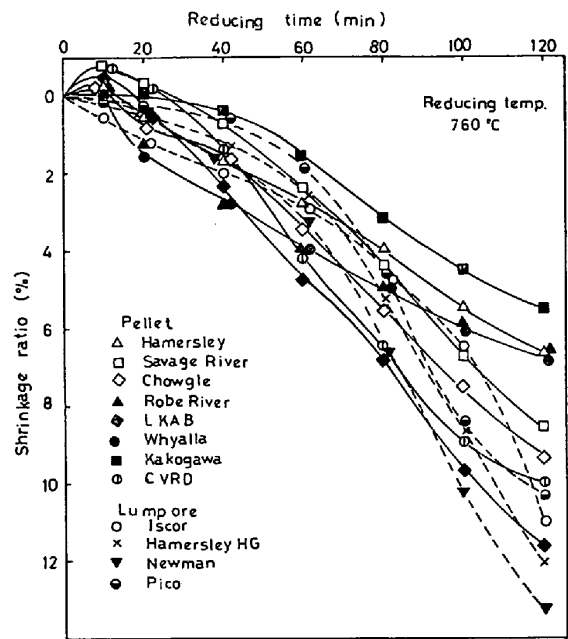


Fig. 4. Progress of the shrinkage of material bed during reduction.

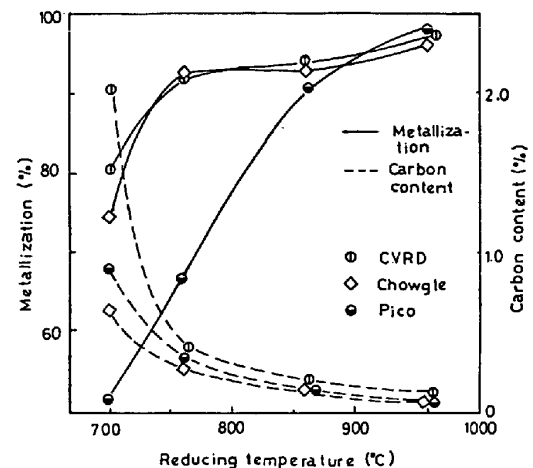


Fig. 5. Effect of the reducing temperature on metallization and carbon content of sponge.

た還元鉄の再酸化などに対する活性度が高いことを示すものである。860°C 還元ではこの微小気孔は消失し、かつ粒子相互の境界は不明瞭になる。さらに 960°C 還元では金属鉄表面がきわめて平滑なものとなり、一部まる味を帯びた海綿状組織の発達が見られるほか、全体的には粒子間距離が拡大し、いわゆる大気孔 (macro pore) の発達が目立っている。

ピコ鉱の場合 760°C, 860°C 還元ではまだ金属鉄表面に気孔がかなり存在するがそれはペレットの場合と比較するとやや大きなものである。960°C 還元では金属鉄がまる味を帯び海綿状に発達するがその割合はペレットより著しい。

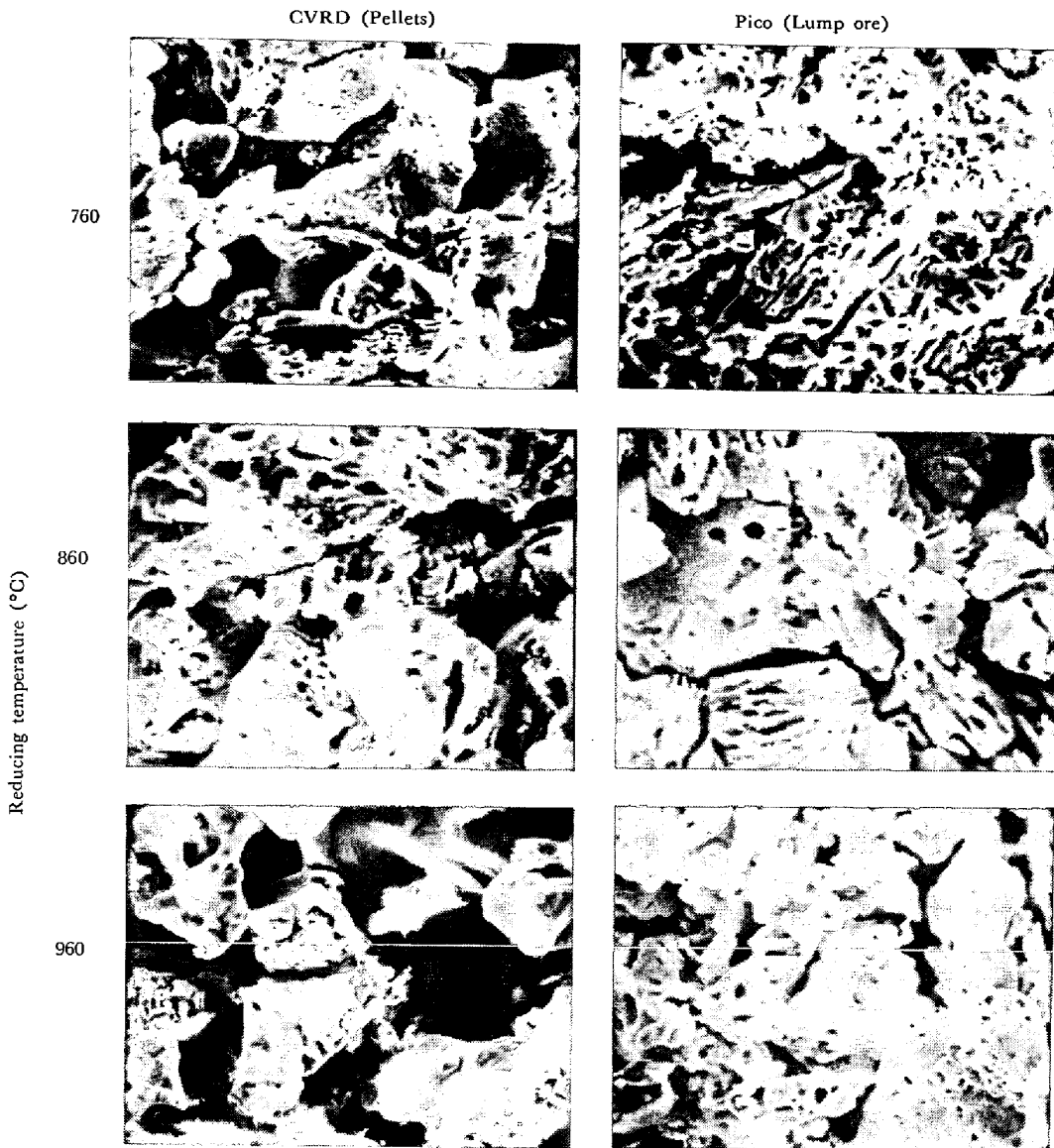


Photo. 1. Microstructures of the reduced materials observed by SEM ($\times 810$).

ペレット、鉱石いずれの場合も、 960°C 還元で粒子間隙が広まり組織全体が膨張していることが観察される。

Fig. 5は還元温度と最終金属化率の関係、および還元鉄中炭素量の関係を示したものであるが、ペレットでは 700°C から 800°C 間で金属化率の上昇が顕著で 960°C 還元では2hの還元で金属化率は95%以上に達している。塊鉱石であるピコ鉱の場合 800°C 以上の還元温度で金属化率は著しく増加し、それ以上の温度領域における被還元性はペレットと変わらないことが注目される。

一方還元鉄中に含有される炭素量は 750°C 以下の温度で急激に増加し、その値は原料種類によつて若干異なっている。還元鉄の電気炉溶解の面から成品中に1~2%の炭素を含有することが望ましいとされ、多くのプロセスで生産された還元鉄が一般にその範囲の炭素量を含

有しているが、その滲炭反応はシャフト炉還元帯よりやや下部すなわち $750\sim 800^{\circ}\text{C}$ で還元された還元鉄が冷却される過程で進行しうるものと判断される。

Fig. 6は還元温度が還元鉄の強度あるいは気孔率におよぼす影響をみたものであるが、CVRD、チョーグルペレットとも還元温度の上昇ともなつて圧潰強度は低下する。通常 1000°C 以上の還元温度で還元が進行するロータリーキルン法などで得られる還元ペレットの強度は一般に還元温度が高いほど大であるが、金属鉄のシタリングが十分進行するといえない 1000°C 以下の還元ではふくれ膨張などの現象も手伝つて、ペレットの気孔率が高まり強度が低下するものと考えられる。Fig. 6中 \times 印で示すデータはブラジル産ペレットを筆者らと類似のガス組織で還元したPIETSCH⁶⁾らの実験結果をプロットしたものであるが同様な傾向がうかがえる。

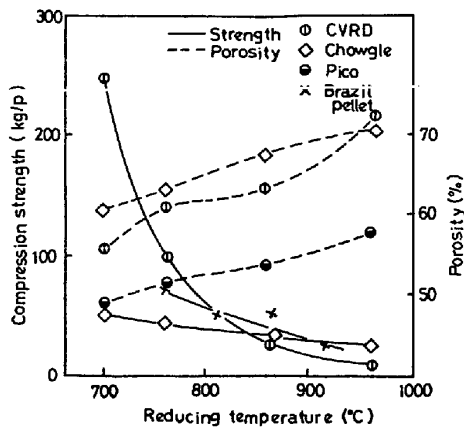


Fig. 6. Effect of reducing temperature on compression strength and porosity of sponge.

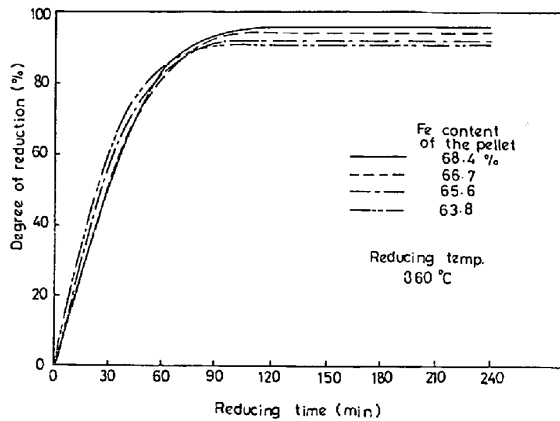


Fig. 7. Effect of iron content of the fired pellets on the progress of reduction.

4.5 試験工場製造ペレットによる確認実験

以上実機製造ペレットおよび塊鉱石についてシャフト炉法の操業条件に準拠した方法で3種の還元実験を行なったがとくに固定層レトルト法による各種原料の被還元性において、鉄品位の高い原料の被還元性が良好で、脈石分の増加や石灰の添加はこれが低下する傾向をみたがこの点を確認する目的で焼成履歴を一致させた試験工場製造ペレットを用いて確認実験を加えた。

固定層レトルト法実験条件は直接製鉄法における被還元性の評価として最終的に到達する還元率が重視されることを考慮して還元時間を4hとした。また前記の760°C還元で高還元率に達した状態で試料を長時間保持すると炭素析出現象により重量減少による還元率変化の値がやや不正確になるため、その影響がほとんどない860°Cを還元温度とした。その他ガス組成、流量などは3.1項で示した条件と同じである。

Fig. 7は石灰石無添加で鉄品位が異なるペレット、すなわちTable 2に示したA, B, C, Eペレットの還元曲線を示しているが、還元時間が90min程度までのい

わゆる還元進行期間においては焼成ペレットの気孔率の高いペレットの還元速度が早い傾向がうかがわれるが、その後還元が最終段階に到達すると、還元率は原料中の鉄品位が高いものほど高い順になつている。

一方Fig. 8はTable 2 E, J, Kのペレットを使用して被還元性におよぼす石灰添加量の影響をみたものであるが、ペレット中CaO含有量が大なるほど最終到達還元率は低下しており、これらの実験により先の実機製造ペレットの還元挙動が確認された。

さらに、被還元性におよぼすペレット焼成温度の影響を調査するためにTable 2示した高品位Aペレット、

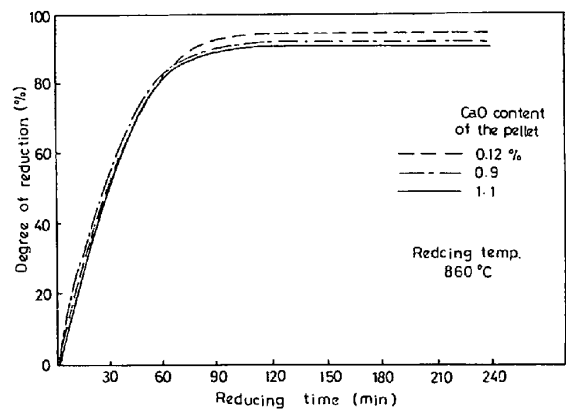


Fig. 8. Effect of CaO content of the fired pellets on the progress of reduction.

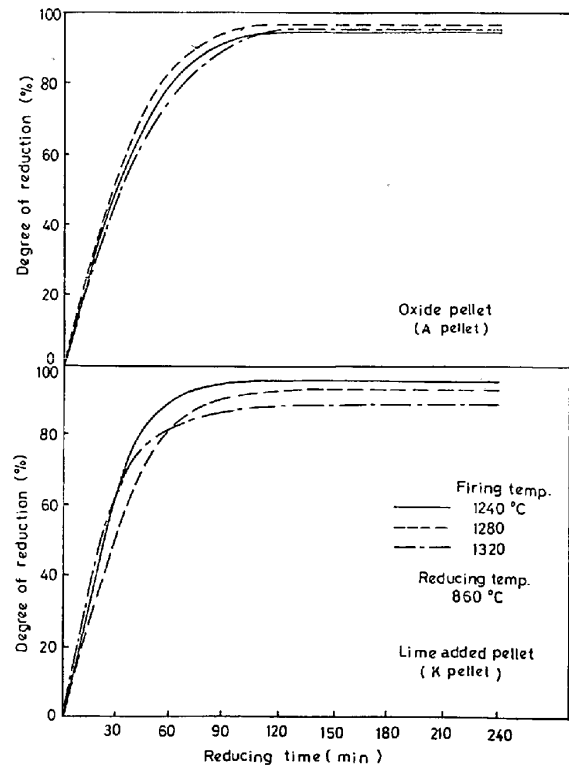


Fig. 9. Effect of the firing temperature of pellets on the progress of reduction.

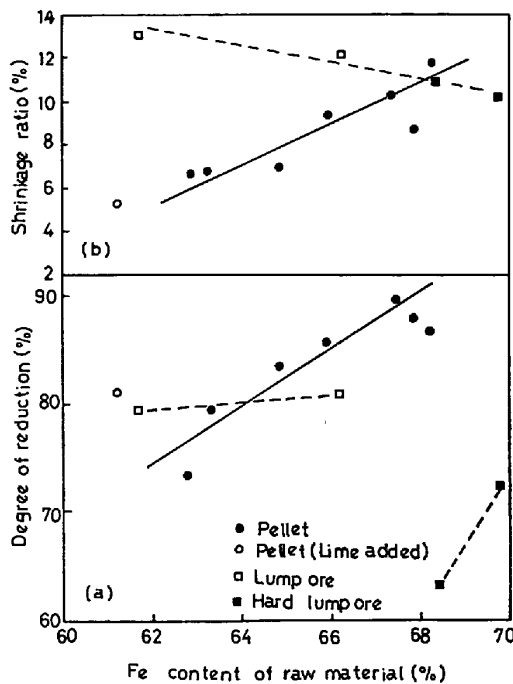


Fig. 10. Relation between iron content of raw materials and degree of reduction or shrinkage ratio of the material beds.

石灰添加Kペレットについてバッチキルン焼成温度を変更したものの還元率曲線を Fig. 9 に示した。

焼成温度 1 240, 1 280, 1 320°C のペレットを比較すると高品位Aペレットでは最終到達還元率にほとんど差異がみられないのに対して石灰添加ペレットでは焼成温度による差異が明瞭で焼成温度が低いペレットほど還元率が高い。

5. 考 察

5.1 鉄品位, 石灰含有量と被還元性の関係

Fig. 10(a) は実機製造ペレットおよび塊鉱石の固定層レトルト還元実験における原料中鉄品位と最終還元率の関係を示したもので、ペレットと鉱石では若干挙動が異なるが、いずれの場合にも鉄品位が高いほど還元率が高い。また高炉装入物としての被還元性が良好な自溶性ペレットが本実験では高還元率領域で還元停滞を起こしたことを先に述べたが、これらの事実は原料中の脈石成分やその量が被還元性に少なからず影響していることを示すと考えてよい。

4.5 項における試験工場製造ペレットの還元実験によっても上記の関係は確認されたが、まず石灰添加ペレットに関し焼成ペレット中の成分構成を Fig. 11 に示した $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ 三元系状態図で検討してみると通常のペレットの焼成温度 (1 250~1 350°C) 以下の温度

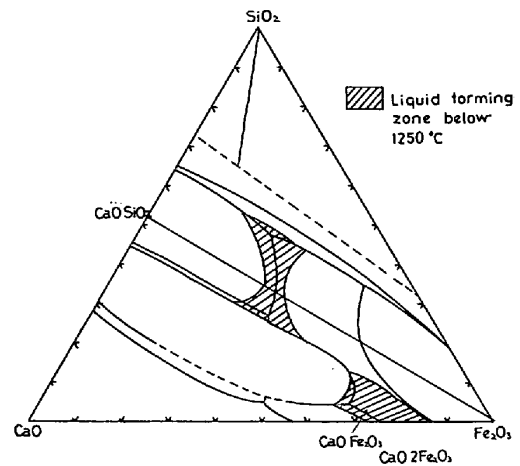


Fig. 11. System $\text{CaO-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ composite. (by F. OSBORN and M. MUAN)

で液相を示す領域が2個所存在する。焼成ペレットの顕微鏡組織の観察によると塩基度 (CaO/SiO_2) 1以下では $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ の液相が、1以上では 1 200°C 以下の温度で $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、1 200°C 以上においては $\text{CaO}\cdot 2\text{Fe}_2\text{O}_3$ などのカルシウムフェライトが出現し、それは 1 250°C を越える温度で液相となるのが一般的である。すなわち、従来の石灰添加ペレットまたは自溶性ペレットの焼成組織はヘマタイトのほか、これらの固溶体またはスラグが共存したものである。このようにスラグ中に固定された鉄酸化物はシャフト炉法などにおける還元温度範囲では還元されにくく、このためペレット中石灰含有量の増加にともなつて最終到達還元率が低下することが理由づけられる。

また石灰を含有したペレットでは焼成温度が高いほど酸化鉄がスラグ成分として固定される度合が大となるため最終到達還元率が低下することも Fig. 9 に示した実験結果が裏付けていると考えられる。

鉄品位の高いペレットでは焼成時間や焼成時における酸素濃度が十分であれば組織的にはほぼ完全なヘマタイト結合からなり、この場合還元ガスは生成した金属鉄内部を拡散することが容易で還元反応は最後まで均一に進行することが可能で高還元率の成品が得られる。脈石分の増加やスラグ相の存在はこの現象を妨げる方向に作用するであろう。

高炉シャフト部における被還元性の評価を目的とした JIS 還元試験などによる自溶性ペレットの被還元性が良好とされるのは主として原料中に石灰石を添加することによる焼成ペレット気孔率の増加に依存しており、またこの種の試験では還元率が 50~80% の段階で被還元性の優劣を対比していることが多く、実際固体炭素による

直接還元とそれによつて生成するCOガスによる間接還元との組合せからなる高炉の装入物としてはそれ以上の段階での還元率はあまり問題とされない。

5.2 試料層の軟化収縮性状について

Fig. 10(b)は原料中鉄品位と荷重還元試験における試料層最終収縮率の関係を示したものである。前述のごとく収縮率におよぼす要因はペレットと鉱石では分離して考える必要がある。すなわち鉱石では低品位鉱ほど一般にポーラスで荷重還元過程に粒子の一部が崩壊し試料層としては密充填となるので収縮率は高い。

一方ペレットでは逆に鉄品位の上昇とともに試料層の最終収縮率は高い値を示しており、かつ収縮率の高い試料ではクラスタリングの徴候がみられた。

シャフト炉内におけるクラスタリングの要因として、物質の性状、還元温度および荷重などが考えられるが、高品位ペレットではまず還元初期にふくれ現象を示す割合が大きく、その結果荷重に抗しきれず軟化収縮が進行し、ペレット相互の接触面積が増しクラスタリングが助長されるといえよう。クラスタリングのメカニズムに関しては定説がないが、今回の実験結果から推測されることは、クラスターを構成する物質同志の固着は還元生成した金属鉄相互の拡散によつて起こり、温度、荷重など他の条件が同じであれば、原料中鉄品位の高いものがクラスタリングしやすく脈石その他の添加物はこれを阻止する方向に作用する。実際のシャフト炉においても原料中脈石分が増すとクラスタリング開始温度は上昇することが報告⁷⁾されている。

6. 結 言

実機および試験工場で製造された数種のペレットおよび鉱石についてシャフト炉の還元条件に準拠した方法で還元実験を行ないその結果を検討した結果次のことが明らかにされた。

(1) ペレットと鉱石の還元性状を比較すると一般に

被還元性、還元粉化性状、軟化収縮性状ともペレットがすぐれている。

(2) 被還元性に関しては還元進行期と還元の最終段階すなわち最終到達還元率の両面を考慮する必要がある。とくに成品品質面で重視される最終到達還元率は鉄品位やCaOの含有量に影響されることが大である。原料中鉄品位が高いものほど最終到達還元率は高く脈石量の増加や石灰石の添加によりこの値は低下する。

(3) 原料中鉄品位が高いペレットほど荷重還元試験における軟化収縮割合が大であり、クラスタリングの徴候がみられた。脈石量の増加、石灰石の添加はクラスタリング現象を阻止する方向に作用するものと考えられる。

(4) 還元粉化の原因として鉱石の熱割れ現象を別にすれば焼成ペレットの強度に依存するものと還元時における結晶組織変化に依存するものがある。

ペレットに石灰石を添加することによつて同一還元温度において最終到達還元率は低下する。しかし一方においてクラスタリング開始温度が上昇すると考えられるので石灰添加ペレットがシャフト炉装入原料として必ずしも不利なわけではない。これらの点に関する定量的な検討は今後の研究課題である。

文 献

- 1) 原子力製鉄還元鉄グループ、佐々木晃、岡部俵児：鉄と鋼，61 (1975)，S3，p. 3
- 2) J. ASTIER and R. JOH: The Aus. IMM, Newcastle, (1974) Oct., p. 131
- 3) W. A. AHREND: Midrex Co. technical papers, presented at the Port Alegre Direct Reduction Conference, (1975) May
- 4) C. OFFROY: Rev. Met., (1969) July, p. 491
- 5) G. THANING: Ironmaking and Steelmaking, (1976) 2, p. 57
- 6) W. PIETSCH: SME AIME Fall Meeting & Exhibit, Denver (1976)
- 7) H. D. PANTKE: Rev. Met., (1975) November p. 811