

DUC 669.181.4

論 文

酸化鉄の還元過程におけるクラスター生成現象に関する研究*

金子伝太郎**・木村 吉雄**・小野田 守**

Clustering Phenomena during Iron Oxide Reduction in Shaft Furnace

Dentaro KANEKO, Yoshio KIMURA, and Mamoru ONODA

Synopsis:

In the direct reduction shaft furnace it is favorable to raise reducing gas temperature blown from tuyeres to improve not only the productivity but also characteristics of the sponge iron for reoxidation. However, if the operating temperature is too high, the material become sticky and form so called clusters. Thus authors investigated clustering behavior of iron oxide during its reduction by a laboratory test.

Pellet with iron content of 64–68% and lime (CaO) content of 0.09–1.11% were produced by an indurating furnace of bench scale. Five hundred grams of fired pellets were charged into the reduction tube with inside diameter of 75 mm and were reduced with reducing gas (H_2 : 55%, CO: 36%, CO_2 : 5%, CH_4 : 4%) under load at a temperature range of 700–960°C. The expansion or shrinkage ratio of the sample bed was continuously recorded using a strain gage. The strength of clusters formed during reduction was measured in a rotating steel drum with diameter of 120 mm and length of 700 mm. It was found that the shrinkage ratio of the pellet bed was clearly related to the cluster, and the higher the shrinkage ratio, the stronger the cluster.

The formation of the cluster during reduction depended on three factors, i.e. the temperature, load on the burden bed and properties of materials. The relationship of these factors as well as clustering mechanism of reduced materials were discussed based on the experiments.

1. 緒 言

還元鉄製造法のなかでシャフト炉法は炉内を上昇する還元ガスと、降下する原料の対向流原理にもとづいた効率の高いプロセスとして注目される。

シャフト炉法の生産性を高める有効な方法は羽口吹込み還元ガスの高圧または高温化をはかることである。高圧還元については将来における核熱利用なども考慮してすでに研究¹⁾がすすめられている。

いつぼう、シャフト炉の羽口吹込み還元ガス温度を上昇させることは生産性の向上のみならず、成品の再酸化防止に対しても有利であるが還元帯下部高温域において装入物相互が固着する現象、いわゆるクラスター (cluster) の生成がそれをさまたげている。この現象が起これると還元ガス流れに偏りをもたらしばかりでなく、棚吊りの原因となり著しい場合には操業が不能になる。同一操業条件であつても原料によつてクラスター生成 (クラスタリング) を起こしやすいものとそうでないものとがありこの現象が鉱石の性状にも少なからず依存している

と考えられていた。

流動層還元の分野では高温還元時における流動粒子相互のシタリング現象に関してこれまでいくつかの研究^{2)~4)}をみるが、充填層としてのシャフト炉におけるクラスタリング現象に関してはその操業経験などから断片的に言われていることをのぞいて報告はみあたらない。

筆者らはすでにシャフト炉装入原料の還元性状に関する研究を行ないその結果を報告⁵⁾したが、引続き装入物性状や還元条件などクラスタリングにおよぼす諸要因の影響、その生成機構を明らかにしておくことは意義が大きいと考え一連の研究を行なつた。

2. 実験方法

2.1 実験装置

a) 定温度荷重還元装置

シャフト炉内における原料の降下是一種のプラグフローであり、炉壁や排鉱部をのぞいては原料相互の攪拌や混合はほとんど起こっていないとみなし、装入物に対する動的要因を無視すると、クラスタリングの要因として

* 昭和 52 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 52 年 8 月 8 日受付 (Received Aug. 8, 1977)

** (株)神戸製鋼所中央研究所 (Central Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Fukiai-ku Kobe 651)

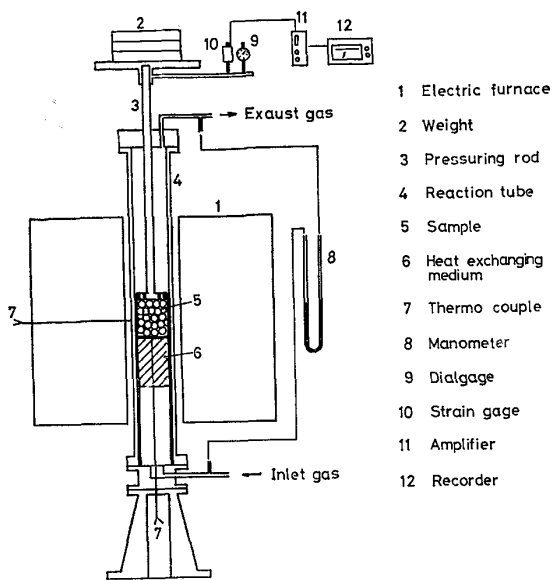


Fig. 1. Schematic drawing of reduction under-load test apparatus.

は温度、荷重および原料性状の3点があげられる。それ故、クラスタリングにおよぼすそれら要因の影響を検討するための方法として荷重還元法を採用した。実験装置の概要を Fig. 1 に示した。

内径 75 mm のステンレス製反応管内にさらに肉厚 2 mm の薄肉円筒 (長さ 150 mm) を挿入し、内部に原料を 500 g 充填し上部より荷重を加え N_2 ガス雰囲気中で所定温度に昇温したのち、還元ガスに切替え還元を開始する。還元過程における原料層の膨脹、収縮の度合は荷重棒上部にセットされたストレインゲージで測定され自動的に記録されるとともに、ダイヤルゲージでその値をチェックするようになっている。還元ガス量は $20\text{NL}/\text{min}$ とし、そ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羽口吹込みガス組成に近い値として次に示すものとしたが、

$\text{CO} : 36\%, \text{H}_2 : 55\%, \text{CO}_2 : 5\%, \text{CH}_4 : 4\%$

一部の試験ではクラスタリングにおよぼす還元ガス組成の影響をみる目的で H_2/CO 比や CH_4 添加量などを変更している。また直接還元用シャフト炉では装入された原料は比較的短時間で昇温され、酸化鉄の還元は一定温度に近い状態で行なわれることを考慮して等温還元実験とした。

このようにして所定温度にて 3 h 還元したのち再び N_2 ガス雰囲気中で常温まで冷却された試料を取り出し、その外観を観察するほかクラスターを生成したものについては試料を薄肉円筒より一定速度で抜き出し、Fig. 2 に示す回転強度試験機を用いてクラスターの固着度合を測定した。

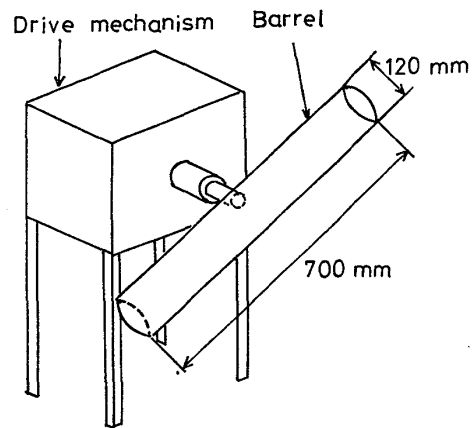


Fig. 2. Apparatus for measuring cluster strength.

b) クラスター強度測定装置

薄肉円筒より取出された試料はふるいにかけてられる。還元前試料の最大粒径を s mm とすれば、還元過程で生成したクラスターの割合 $GR(\%)$ は次のように表現される。

$$GR = \frac{W_s}{W} \times 100$$

ここに W , W_s はそれぞれ、還元後試料全重量 (g)、還元後 s mm ふるい上重量 (g) を示す。さらにクラスターは内径 120 mm、長さ 700 mm の鋼製円筒 (Fig. 2) に装入され 30 rpm にて 5 min 回転したのち再びふるいにかけてられクラスター強度が求められる。クラスター強度 (Cluster Strength) を下式のように定義する。

$$CS = \frac{W_s'}{W_s} \times 100$$

ここに W_s' は回転強度試験後 s mm ふるい上重量 (g) を示す。

c) 固定層還元装置

また、上記荷重還元実験における試料層の膨脹・収縮変化に対応した還元率の変化を調べるため、一部の試験では重量減少から還元率を求める方法としての固定層還元実験を併用した。固定層還元装置の詳細については既報⁵⁾で述べたが、試料層に荷重をかけないことを除いて実験条件は荷重還元実験におけるそれと全く同一である。

2.2 供試料

実験に用いた原料の物理化学的性状を Table 1 に示した。記号 A から E で示されるペレットは当社の試験工場で焼成ペレットの鉄品位や石灰含有量に変化をもたせるように製造されたものである。すなわち、高品位鉱として MBR 鉱を、低品位鉱としてマウント・ニューマン鉱を、添加剤として石灰石を所定の割合で配合、造粒し

Table 1. Chemical and physical properties of samples used for experiments.

	Sample name	Chemical composition (%)				Compression strength (kg/p)	Porosity (%)
		TFe	FeO	CaO	SiO ₂		
Pellet produced at test plant	A	68.35	0.10	0.09	0.79	281	21.7
	B	65.62	0.22	0.10	3.40	284	24.0
	C	63.81	0.22	0.12	5.66	213	29.1
	D	67.02	0.22	0.63	0.71	303	19.2
	E	66.60	0.22	1.11	1.16	336	20.2
Pellet	LKAB Whyalla	68.27	0.40	0.15	1.16	272	17.0
		64.82	0.14	0.55	3.59	220	28.1
Lump ore	PICO Mt. Newman Iscor	69.67	0.79	0.06	0.18	—	2.2
		65.55	0.17	0.06	2.35	—	4.7
		67.98	0.10	0.04	1.01	—	2.0

たのちポットグレートで予熱し、さらにバッチキルンで焼成した。焼成条件は 1 280°C, 25 min としたが、A ペレットおよび石灰を添加した D ペレットについては焼成温度の影響を調べる目的で 1 240°C, 1 320°C にても焼成している。なお、これら試験工場製造ペレットの粒度は 10~13 mm に整粒して実験に供した。

このほか、塊鉱石としてピコデイタビリト (Pico de Itabirito) 鉱、イスコール鉱、マウント・ニューマン鉱を、実機製造ペレットとしてワイヤラおよび LKBA ペレットが用いられた。これら塊鉱石および実機製造ペレットの粒度は 9.5~19 mm とした。

3. 実験結果

3.1 クラスタリングに関する基本的実験

Fig. 1 に示す荷重還元実験装置を用い試料層に荷重を加えて還元するとき、温度、荷重および原料種類などの条件の組合せによつてクラスターが生成する。外観は同じクラスターであつても脆弱なもの、きわめて強固なものなどさまざまであり、まずこの生成条件の基本的な検討と、その固着度合の数値化をはかった。

3.1.1 還元温度の影響

Fig. 3 はペレット層の収縮におよぼす還元温度の影響を調べたものである。この実験では原料として A ペレットを使用し、荷重は 2 kg/cm² 一定とした。

まず還元の初期において試料層はわずかに膨脹するが還元開始約 30 min 経過より収縮する方向に変わる。還元温度 860°C まではさほど著しい収縮は起こらず、3 h 還元終了後においてもその値は約 10% にとどまっている。しかし還元温度が 910°C 以上では還元開始後 30 min から 90 min にかけての収縮が急激に進行し、とくに約 900°C を境にそれ以上の還元温度で著しい収縮が認められることがわかる。

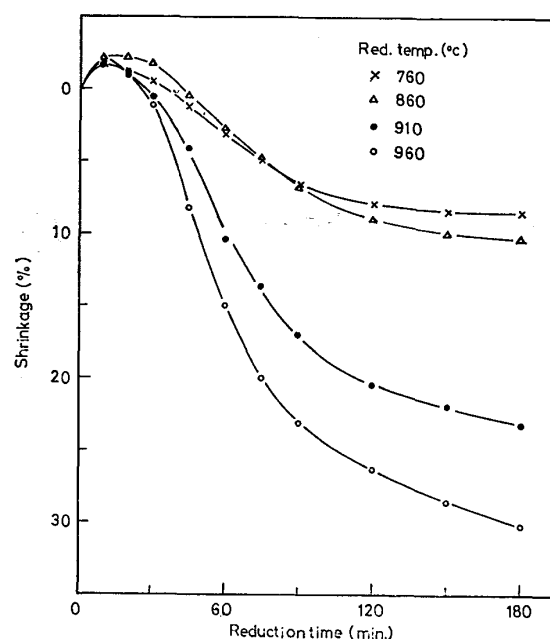


Fig. 3. Effect of reducing temperature on the shrinkage ratio of sample bed during reduction underload.

Photo. 1(A)は還元温度 860°C, 最終収縮率が 10.2%の試料の実物写真で、反応管より取出された還元鉄は部分的に付着しているものの指で容易に分離しう程度のもので、いわゆるクラスターが形成されたというほどではない。いつぼう Photo. 1(B)は還元温度 960°C, 最終収縮率が 31.2%の試料でこの場合には試料層は完全なクラスターとなつている。

3.1.2 荷重の影響

次にクラスタリングにおよぼす荷重の影響を調査した結果を Fig. 4 に示した。異なる荷重による試料層の収縮度合の差を明確にする目的で還元温度は前項の実験でもつとも試料層の収縮が著しかった 960°C とした。

Fig. 4 によると温度と同様に荷重の影響も大なること

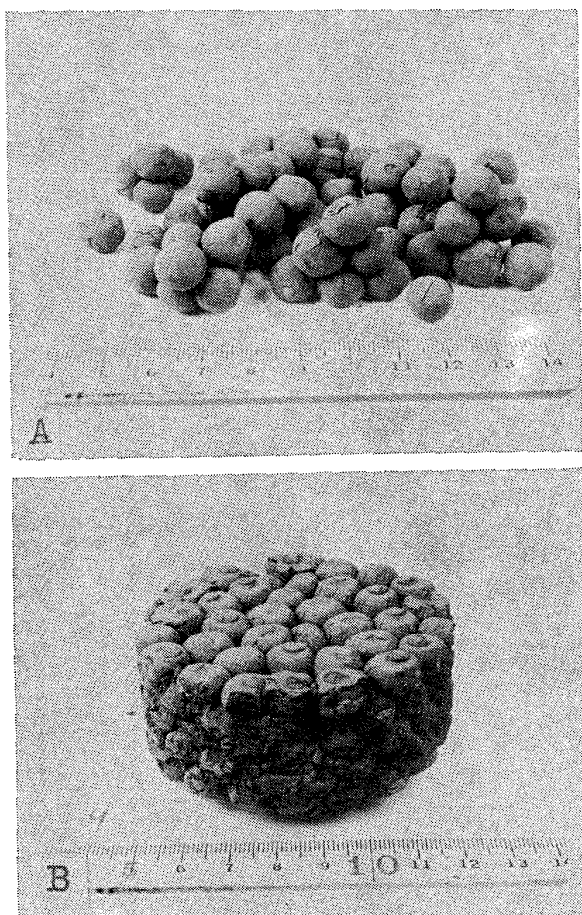


Photo. 1. Samples taken out after reduction underload test.
 (A) Reduction temperature : 860°C
 (B) Reduction temperature : 960°C

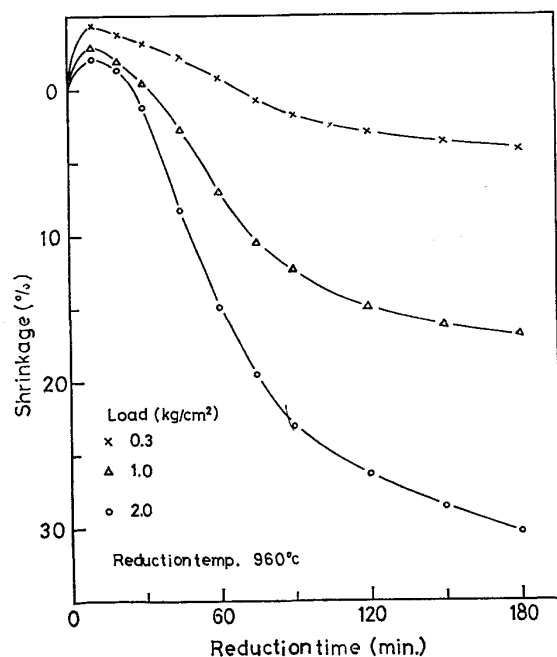


Fig. 4. Effect of load on the shrinkage ratio of sample bed during reduction underload.

がわかる。荷重が低い場合には還元初期における試料層の膨脹は大きい、例えば荷重を 0.3 kg/cm^2 としたとき最終収縮率は 3% にとどまり、いわゆるクラスターの生成はみられない。荷重を 1 kg/cm^2 , 2 kg/cm^2 と高めるに従って収縮率はそれぞれ 17%, 30% に増加する。

実際のシャフト炉内で装入物が受ける荷重はストックラインから原料までの深さのほか、上昇するガス流速や炉形状とも関連し、いちがいにはいえないが、以後の実験では装入物のかさ比重 2 kg/l を考慮したストックラインより 10m 下の原料にかかる静荷重 2 kg/cm^2 を採用した。ガス流の影響を考慮するとこの値は実際の荷重に比べやや高目ではあるが、クラスタリング現象に対する還元条件や原料性状の差異を明確にするため荷重についてはやや苛酷な条件をとった。

3.1.3 クラスター固着度合の数値化

原料性状や還元条件とクラスター生成状況との関連を検討するにさきだち、クラスターの固着度合を定量的に表わす必要があつた。当初 2 個のペレットを上下に接触させ荷重をかけて還元し、相互に固着した場合の引張強度を測定する方法も試みたがシャフト炉内におけるクラスタリングの過程が粒子集合体としての挙動に少なからず影響されることを考慮して充填層としての荷重還元法と、回転強度試験機によつて固着度合を調べる方法をとった。

Fig. 5 は上記の還元温度および荷重の影響に関する実験のほか以下に述べる種々の実験結果をふくめ、荷重還元最終収縮率とクラスター強度の関係をみたものである。

最終収縮率が約 15% までは還元後取出し試料に固着物が存在してもそれらは簡単に分離しうるものでクラス

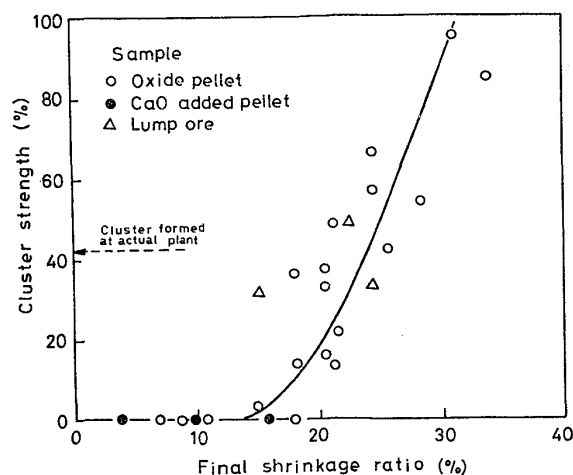


Fig. 5. Relation between final shrinkage ratio of reduction underload test and cluster strength.

ター強度としては0にとどまっております、そのようなクラスターであれば実際のシャフト炉内で問題となることはないであろう。収縮率が15%以上では最終収縮率とクラスター強度のあいだに明瞭な相関が認められる。図中点線で示した強度は参考のため実際シャフト炉で発生したクラスターの強度を測定した値の一例である。

以上のことからペレットでは荷重還元実験における最終収縮率によつてクラスターの固着度合を判断しようといえる。ただし、塊鉱石の場合には3.2.2項で後述する理由でこの関係は必ずしも成立しない。

3.2 還元ガス組成の影響

Fig. 6は試料層の収縮におよぼす還元ガスの H_2/CO 比の影響をみたものである。還元ガス組成は2.1項で示した基準ガス組成の H_2 と CO 濃度の和を91%に保ち H_2/CO 比を0/100~100/0に変更した。

H_2/CO 比が大なるほど試料層の初期膨脹が大きく、またそれに続く収縮の進行も早い、最終的に到達する収縮率にはそれほど差異がなく、還元途中にみられる収縮率の差はむしろ H_2 、 CO 還元における還元速度の差に対応したものであると判断される。

Fig. 7に荷重還元収縮率におよぼす還元ガス中 CH_4 添加量の影響を示した。 CH_4 4%添加の基準ガス組成に比べて10~20%の添加により収縮率は低下している。還元終了後試料中の炭素含有量を分析したところ、 CH_4 添加量が4, 10, 15, 20%で炭素量がそれぞれ0.27, 0.77, 0.93, 2.17%となっており、 CH_4 の添加により

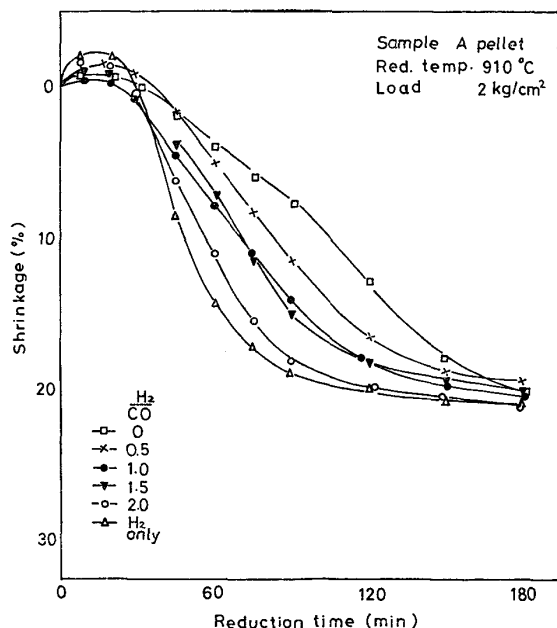


Fig. 6. Effect of H_2/CO of reducing gas on the shrinkage ratio of sample bed during reduction underload test.

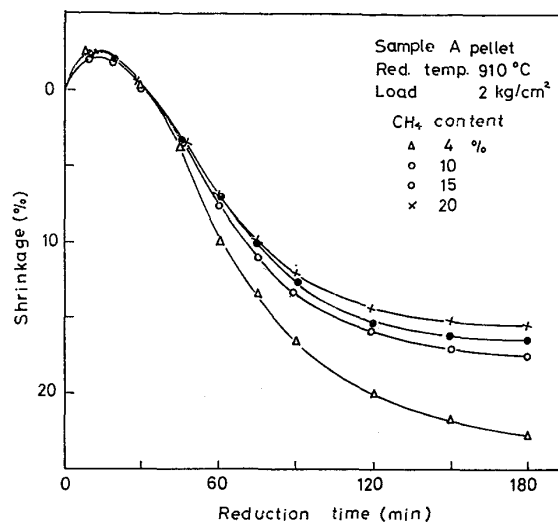


Fig. 7. Effect of CH_4 content of reducing gas on the shrinkage ratio of sample bed during reduction underload.

炭素析出や浸炭が進みクラスタリングの進行が若干さまたげられたものと判断される。

3.3 各種原料の軟化収縮性状

以上のことからクラスタリングに関する基本的事項が把握されたので次に原料性状との関連、すなわち、各種ペレットおよび塊鉱石の荷重還元実験における軟化収縮性状やクラスタリング特性を調査した。以下の実験では還元温度は現存のシャフト炉法還元温度としてはやや高い値としての $910^\circ C$ とした。

3.3.1 各種ペレットの軟化収縮性状

Fig. 8(a)は鉄品位を68.4, 65.6, 63.8%の3水準に変化させたペレット、石灰を添加し塩基度を約1に保ち、スラグ量を変化させたペレット、および2種の実機製造ペレットの荷重還元収縮曲線であるが、これより鉄品位の高いペレットほど収縮率が高くクラスターが生成しやすい傾向にあり、ペレット原料中へ少量の石灰石を添加することは収縮率の増加を制御するのにきわめて効果的であるといえる。例えば鉄品位が65.6%のCペレットと石灰石を添加して焼成した鉄品位66.6%のEペレットと比較してもEペレットの収縮率はきわめて少ない。

PANTKEがPurofer法について紹介した論文⁶⁾でその操業経験から装入物の脈石量が増すとクラスタリング開始温度が上昇することを述べており、またSANDOVAL⁷⁾らはペレットへの CaO や MgO の添加がクラスタリング防止に効果的であるとしており、これらの指摘は本実験結果と一致している。

Fig. 8(b)は固定層還元実験で還元過程における還元

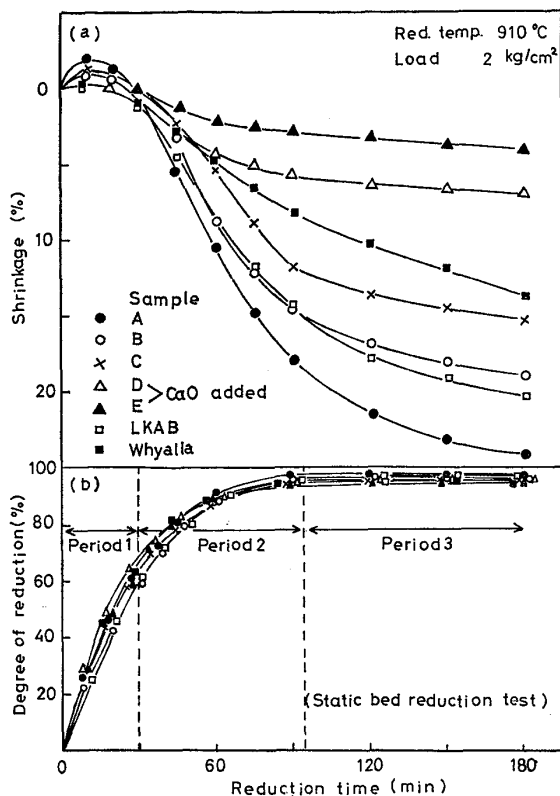


Fig. 8. Shrinkage behavior of sample bed of different kinds of pellets and reduction obtained by static bed reduction test.

率の変化を調べたものである。還元時間約 100 min で還元率はほぼ最終値に達するがこの最終到達還元率は別報⁵⁾で報告した結果と同様鉄品位の高いペレットが高く、脈石量の多いペレット、石灰石を添加したペレットではその値がわずかながら低下している傾向がみられる。

3.3.2 ペレット焼成温度の影響

Fig. 9 は A ペレット、石灰石を添加した D ペレットについてペレット焼成温度が荷重還元収縮率におよぼす影響をみたものである。いずれの場合も焼成温度が低いと収縮率が高く、とくに A ペレットではその差異が明確である。D ペレットでは 1240°C の場合に収縮率が高いが 1280°C, 1320°C では 10% 以下にとどまっている。

3.3.3 塊鉱石の軟化収縮性状

Fig. 10 は塊鉱石としてのピコ・デタバリティ鉱、イスコール鉱、マウント・ニューマン鉱の収縮曲線である。塊鉱石ではペレットにみられた初期の試料層の膨脹は全くみられずクラスター強度は次のようになっている。

ピコ・デタバリティ鉱 47.8%, イスコール鉱 34.2%
マウント・ニューマン鉱 30.7% すなわち、塊鉱石では Fig. 5 に示した収縮率とクラスター強度の関係が適用されないことがわかる。

塊鉱石では加圧状態の還元過程においてその粒子の一部が崩壊し、試料層の再充填が行なわれることにより収縮の過程は粒子の形状や還元時の強度などとも関連し、ペレットの場合と本質的に異なつた解釈をすべきであろう。

4. 考 察

4.1 還元の進行と試料層の軟化収縮の関連

Fig. 8 (a), (b) に示される各種ペレットの還元時間と収縮率および還元率の関係において、還元率は還元開

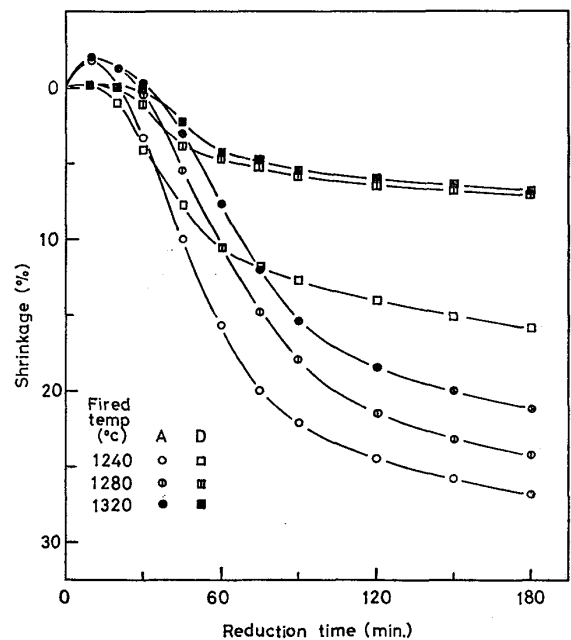


Fig. 9. Effect of pellet firing temperature on the shrinkage ratio of sample bed during reduction underload.

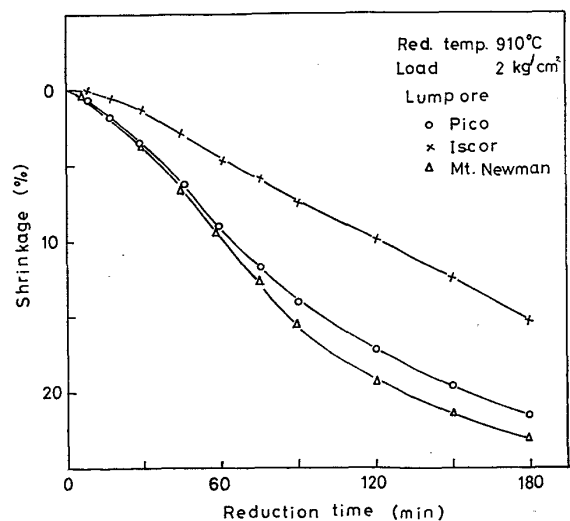


Fig. 10. Shrinkage behavior of sample bed of different kinds of lump ores during reduction underload.

始後約 100 mm で最終値に達しその後ほとんど変化がみられない。試料層の収縮と還元の進行を対比してみると、図中に示すごとくおおむね 3 期間に分けられる。すなわち期間 1 は試料層が収縮するのではなく、むしろ膨張しており、これは還元率が 60~70% までであり、WENZEL⁹⁾ や GRANSE⁸⁾ らが述べているようにペレットのふくれた現象による体積膨張は還元の開始とともに起こり、還元率 50~70% をピークとして体積収縮に移行するという挙動に一致している。期間 2 は試料層の収縮が著しく進行する期間であり、これは還元率が最終値に達するまでの期間に相当する。この収縮のすみやかな進行は上記のペレットにおける体積収縮と加圧下において酸化鉄が金属化していく過程における組織の軟化にその原因が求められる。

期間 3 は還元率が最終値に達したまま放置された状態での収縮過程であるが高品位 A ペレットをのぞいては収縮の進行は緩慢になっている。

Fig. 11 は A ペレットと石灰を添加した E ペレットについて還元率と収縮率および Fig. 5 の関係より推定し

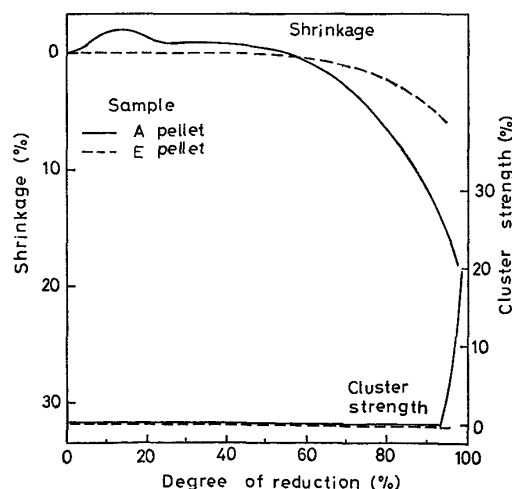


Fig. 11. Relation between degree of reduction and shrinkage ratio or cluster strength.

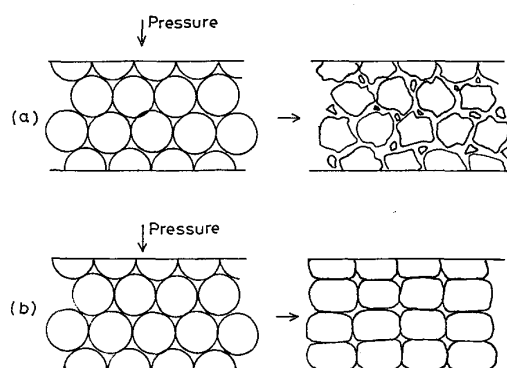


Fig. 12. Different methods of particle compaction.

たクラスター強度の関係を示したもので、還元温度 910 °C では E ペレットのクラスター強度値は最後まで 0 にとどまっている。A ペレットにおいても強度値が高まってくるのは還元の最終段階であることが知られる。

4.2 加圧下における充填層の変化

一定粒度範囲に整粒した粒状物質を充填した試料層を加圧するとき、試料層が密充填に近いものであれば加圧したことによる収縮のしかたに Fig. 12(a), (b) に示されるような 2 つのモデルが考えられている¹⁰⁾。(a) は物質が脆弱な場合で加圧することにより、粒子の一部が破壊されその破片が初期に有していた空隙を埋めることによつて層全体は収縮する。荷重還元実験においても原料として塊鉱石を用いた場合の収縮の進行はこれに相当するものと考えてよい。すなわち塊鉱石ではその粒子形状が不規則なこと、特定の劈開面を有することなどから端部が $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$ 変化時の強度低下にともなつて崩れ粒子層の再充填がなされより密充填に移行していく。

Fig. 12(b) は物質に展性がある場合で加圧することにより物質が変形し、変形部が空隙に入り込むとともに物質相互の接触面積は増加する。ORR¹⁰⁾によれば加圧力がそれほど大でない場合には、加圧力 P 、充填層の加圧前の空隙率 E_0 、加圧後の空隙率 E の間には、

$$E_0 - E = P^{1/3}$$

なる関係、すなわち空隙率の減少は荷重の 1/3 乗に比例するとしている。

Fig. 13 は還元温度を 960 °C とし A ペレットについて種々の荷重下で還元した場合の $E_0 - E$ と $P^{1/3}$ の関係をみたものであるがペレットの還元過程における軟

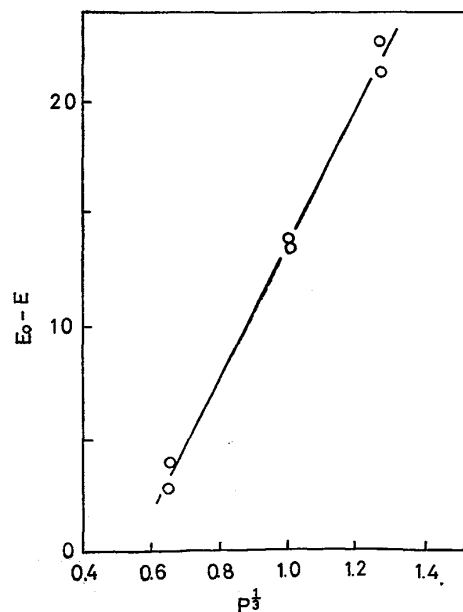


Fig. 13. Relation between $P^{1/3}$ and $E_0 - E$.

化収縮においてもこの関係が適用されることがわかる。

4.3 クラスターの生成機構

還元過程におけるクラスターの生成は前述のごとく加圧状態で初期膨脹に続いて起こる収縮および金属鉄生成にもとづく延性展性の増大によつて粒子相互の接触面積が次第に増してゆき達成されると考えられるが、この現象をマクロおよびミクロ組織から観察し検討した。

4.3.1 マクロ組織からの検討

Photo. 2 は A ペレットおよびピコ・デ・イタビリトの固着部分を示す写真であるがペレットでは固着部分はまったく均一な組織となり、とくに境界線の存在などはみ

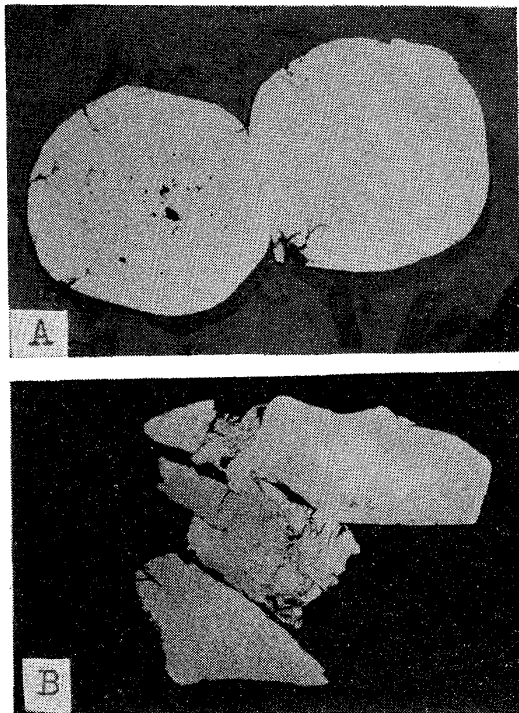


Photo. 2. Appearance of clustered portion of pellet (A) and ore (B).

られない。塊鉱石ではその粒子形状の不規則性に起因する空隙をやや有するが固着部分はやはり均一でこれによりクラスターの生成は一種の焼結現象とみなしうる。

KUCZYNSKI¹¹⁾ は固体物質の焼結機構として粘性流動焼結、蒸発凝着焼結、内部または表面拡散焼結の 3 つの形態を分類しているが、前 2 者は液相（液相に近い粘性流体を含む）または気相をともなつた焼結であり、還元ガス温度がおおむね 950°C 以下である直接還元用シャフト炉の還元温度ではこれらの現象は無視してよいと考えられるので、還元鉄のクラスタリング現象に関しては内部または表面拡散による焼結と考えてよい。

4.3.2 ミクロ組織からの検討

Photo. 3 (A) は A ペレットを 910°C、2 kg/cm² で 3 h 還元したさい生成した強固なクラスターの固着部付近を走査型電顕で観察した組織で、多数の繊維状粒子が発達しそれらがたがいにからみ合っているのが観察される。いつぼう、Photo. 3 (B) は同一還元条件においてクラスターの生成がみられなかつた石灰添加 D ペレットの表面組織で、ここでは繊維状粒子の存在はみられず、金属鉄が小さな凹凸をもつて発生している。

流動層還元を対象とした研究で大蔵²⁾ は反応器内で、820~850°C 以上の温度になると還元鉄が焼結し、流動不能になることからその焼結粒子間結合機構を走査電顕で観察した結果、結合の原因が繊維状金属鉄の発生にあることを報告している。また類似の現象は田中ら³⁾ によつても観察されている。

繊維状金属鉄生成過程についてはペレットの還元時ふくれ現象に関する研究において詳細に報告¹²⁾ されている。すなわち、とくに高品位酸化鉄の還元では生成する金属鉄粒の核の数が少なく、また還元途中における Fe の拡散が十分大きいので限られた少数の核に対して Fe

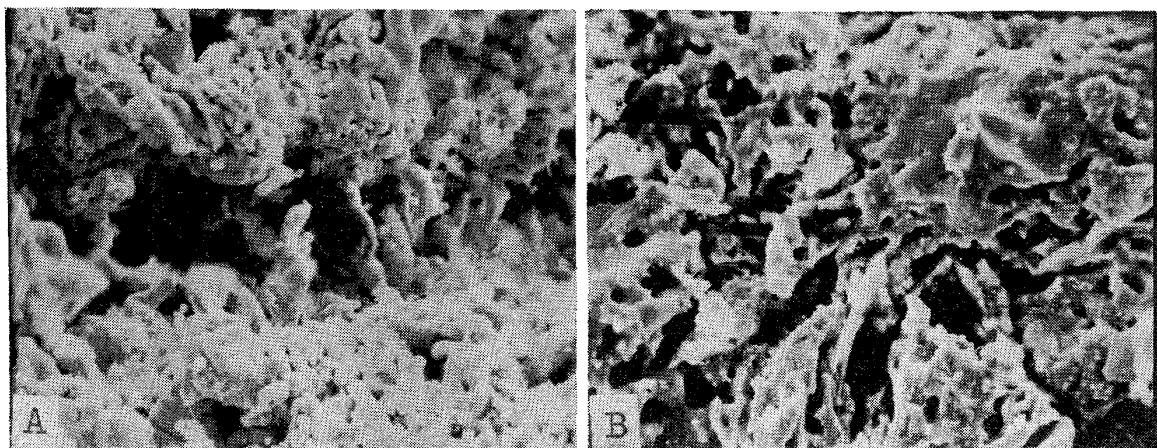


Photo. 3. Microstructure of reduced materials observed by SEM
(A) High grade A pellet. (Clustered portion)
(B) Lime added pellet. (Surface)

が集中的に拡散成長し繊維状に発達する。脈石分やCaOなどの存在はこの核の集中発達を制御するため繊維状物質の著しい成長はおさえられるとされている。

本実験においてペレットへの石灰の添加や脈石量の増加によりクラスタリングが起こりにくくなっていることから、とくに高品位ペレットでは上記の繊維状金属鉄がからみ合う現象が原料性状面からの要因としてクラスタリングを助長しているといえる。

4.4 流動層還元におけるスティッキング現象との相点異

上述の大蔵の研究²⁾をはじめとして流動層還元の分野では高温還元時における流動粒子相互のシンタリングが流動層としての粒子の運動を不良にし、短時間のうちに流動停止に至らしめるという理由から重視されその要因や防止対策がかなり研究されており、その経過などが近藤⁴⁾によつてまとめられている。

LANGSTON ら¹³⁾はこの流動層内粒子の付着性について次の式を示している。

$$\text{Stickiness} = f \frac{(F)(A)}{(M)}$$

ここで、 F は付着力、 A は付着面積、 M は運動量で、付着力は温度、還元率、鉱石性状などによつて決まる因子である。

充填層としてのシャフト炉による還元と、粒子が浮遊状態にある流動層還元では原料の粒度構成、運動状態などが異なるものの還元温度の影響や鉱石性状その他の諸要因においてかなりの類似点を有しているといえる。

シャフト炉におけるクラスタリングの要因として流動層の場合と別に考慮しなければならないのは装入物にかかる荷重の影響であり、上式に荷重(L)を乗ずれば定性的ではあるが諸要因の関係を表現しうるといえる。

4.5 石灰添加ペレットがシャフト炉生産性におよぼす効果

シャフト炉内におけるクラスタリングを避けるためにはペレットとして脈石量の多いものを使用するか、高品位鉱に少量の石灰石を添加して製造したペレットを使用することが好ましいことが本実験結果によつて判明した。しかし脈石量の多い原料を使用することは還元鉄の製鋼過程における電力消費量を著しく高めるので妥当な方法とはいえず、石灰添加ペレットの使用が有利と考えられる。

Fig. 14 はペレットと石灰を添加したDペレットについて還元温度とクラスター強度の関係を示したものであるが、いずれの場合もクラスター強度は一定還元温度までは0でそれ以上の温度において上昇する。この上昇開

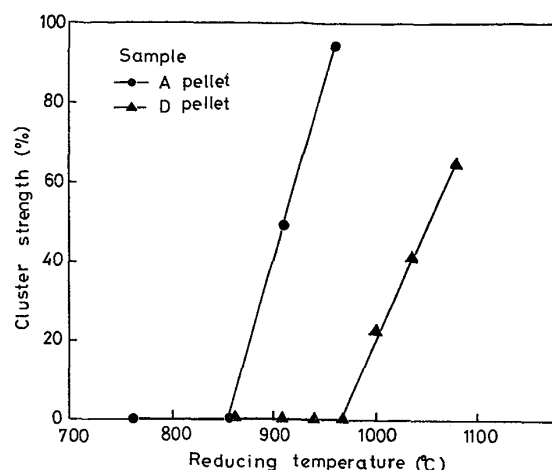


Fig. 14. Effect of reducing temperature on cluster strength of different kinds of pellets.

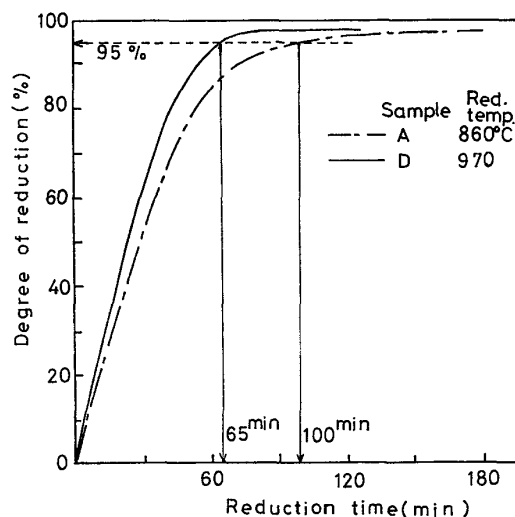


Fig. 15. Reduction curve of different kinds of pellets.

始点をクラスター生成開始温度とすると、それはAペレットでは 860°C、石灰添加 D ペレットでは 970°C で 110°C の差がみられる。

Fig. 15 はこれら2種のペレットをそれぞれのクラスター生成開始温度にて固定層ペレット還元実験を行つた結果得た還元曲線であるが、例えば成品の目標還元率を95%とした場合、Aペレットでは 860°C 還元において 100 min かかるのに対してDペレットでは 970°C 還元で 65 min ですむことがわかる。シャフト炉法の生産性が装入物の還元所要時間のみで一義的に決まるとは必ずしもいえないが、この関係からみても石灰添加ペレットの使用は羽口吹込還元ガス温度をかなり上昇させることが可能で生産性の向上に大きく寄与することが予想される。

5. 結 言

種々のペレット、塊鉱石について荷重還元法を主体として直接還元用シャフト炉におけるクラスター生成の過程やその原因について検討した結果次のことが明らかにされた。

(1) 還元温度が高いほど、また装入物にかかる荷重が大なるほどクラスターは生成しやすいが、その挙動は装入物の性状によってもかなり異なっている。

(2) ペレットでは荷重還元試験における試料層の収縮率とクラスター強度の間に対応があり、収縮率が高いほどクラスターの固着度合は大である。塊鉱石ではこの関係は必ずしもあてはまらない。

(3) 鉄品位の高いペレットでは脈石量の多いペレットに比べて荷重還元収縮率が高く、クラスタリングを起こしやすい。高品位ペレットに少量の CaO を含有させることはクラスタリングを制御しシャフト炉羽口吹込還元ガス温度の上昇を可能にする。

(4) 還元ガス中の H_2/CO 比や CH_4 添加量はクラスターの生成に無関係ではないが、還元温度、荷重、装入物の性状といった要因に比べるとこの影響は比較的小さい。

(5) シャフト炉還元におけるクラスターの成因は還元生成した固体金属鉄の拡散焼結現象の一種とみなすことができ、組織学的には還元時に生成する繊維状金属鉄相互のからみ合がこの現象を助長している。

文 献

- 1) 原 行明, 土屋 勝: 鉄と鋼, 63(1977), S 4
- 2) 大蔵明光: 鉄と鋼, 57(1971), p. S 8
- 3) 田中 稔: 日本鉱業会における講演 1976 年 5 月
- 4) 近藤真一: 鉄と鋼, 60(1974) 10, p. 1542
- 5) 金子伝太郎, 木村吉雄, 小野田守, 藤田勇雄: 鉄と鋼, 63(1977) 14, p. 3
- 6) H. D. PANTKE: Rev. Met. Nov. 1975, p. 811
- 7) J. A. SANDOVAL: U. S. Pat. 3,957,486
- 8) L. GRANSE: Proc. ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ, Vol. 11, 1971
- 9) W. WENZEL and H. W. GUDENAU: Stahl. u. Eisen, 90 (1970) 13, p. 689
- 10) C. ORR, Jr.: Particulate Technology, The Macmillan Co. N.Y
- 11) G. C. KUCZYNSKI: Trans. Am. Inst. Mining, Met. Eng. 185
- 12) 成田貴一, 前川昌大: 鉄と鋼, 59 (1973) 2 p. 136
- 13) B. G. LANGSTON and F. M. STEPHENS, Jr.: Iron Ore Reduction, Pergamon Press N.Y. 1962, p. 207