

© 1982 ISIJ

論 文

セメントによる鉄鉱石コールドペレットの
軟化溶融性状

呉 平 男*・館 充**

Softening and Melting Behavior of Cold Bond Pellets of Iron
Ores with the Use of Portland Cement as Binder

Hirao GO and Mitsuru TATE

Synopsis :

The softening and melting behavior of cold bond pellets of iron ores with the use of portland cement as binder was investigated.

- (1) The reducibility of cold bond pellets is generally better than that of fired pellets.
- (2) The cold bond pellets have a stronger tendency to shrinkage than fired pellets, due to sintering.
- (3) Melt-down behavior of cold bond pellets is characterized by the melting down of slag prior to that of metal. Melt-down slag of cold bond pellets contains much FeO.
- (4) For the improvement of melt-down behavior of cold bond pellets, it is effective to decrease cement ratio within the limit that the required crushing strength is ensured, to make basicity higher, to use dolomite as a flux, and to include solid carbon as a reducing agent.

1. 緒 言

著者らはさきに、コールドペレットの製造に関する調査を行い良好な冷間・熱間性状を示すコールドペレットを製造する条件をほぼ把握した¹⁾。さらに試験高炉である種のコールドペレットの100%使用試験を試み、その結果コールドペレットの軟化溶融性状には改善の余地があることを指摘した²⁾。

一方コールドペレットの熱間挙動については以下のよう
に知見がえられているが、軟化溶融性状の十分な解明
はなされていない。著者の一人は³⁾、コールドペレット
は変形しやすく、また還元されたコールドペレットの熱
間強度は焼成ペレットのそれよりも小さいと報告してい
る。佐藤ら⁴⁾はセメントボンドコールドペレットについ
て、その還元によるふくれと、脈石鉱物やウスタイトの
軟化とが荷重軟化性状の悪化をもたらすと報告してい
る。斧ら⁵⁾は、コールドペレットの溶融滴下性状には脈
石融点および予備還元率が影響すると報告している。江
崎ら⁶⁾は名古屋1高炉の解体調査結果に関する報告で、
コールドペレットが塊状帯で良好な挙動を示すことを述
べているが、軟化溶融性状にはふれていない。

本研究は、セメントボンドコールドペレットの軟化溶
融試験を行い、その性状を支配する要因を調査すること
によつて性状改善の方向について検討したものである。

2. 実 験

2.1 試料

コールドペレットはその製造上の制約から、次の特徴
を持つ。

①還元ふくれは焼成工程による改善がなされないので
使用鉱石種に影響される。

②塊成工程で脱硫されない。

③バインダを使用するので脈石量が増大する。

このような観点から使用鉱石には硫黄含有量の少ない
鉱石を選んだ。使用した鉱石種は、高品位ヘマタイト
鉱 (MBR)、ふくれ性状を改善するためにリモナイト鉱
(Robe River) および造粒性の良い低品位ヘマタイト鉱
(Mt. Newman) の三種で、これらの配合比をふくれ性
状が悪くならない範囲で変えた。これらの原料鉱石の分
析値を Table 1 に示す。

バインダには入手が容易な普通ポルトランドセメント
を使用し、セメント比は 6, 8, 10% と変化させた。

昭和 56 年 11 月 6 日受付 (Received Nov. 6, 1981)

* 東京大学生産技術研究所 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, 1-8 Yayoi-cho Chiba 280)

** 東京大学生産技術研究所 (現: 住友金属工業(株)) 工博 (Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Now Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

Table 1. Chemical composition of used ore.

Ore	T. Fe	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	S
MBR	67.7	0.99	0.03	0.94	0.04	0.004
Mt. Newman	63.8	4.38	0.05	1.83	0.06	0.007
Robe River	58.8	5.30	0.10	1.40	0.09	0.010

Table 2. Pelletizing conditions and properties of cold bond pellets.

Sample	Ore blend	Cement ratio(%)	Fluxes and additions	Swelling* degree(%)	Porosity (%)
A	a	10	Lime stone	26.0	24.6
B	b	10	Lime stone	7.2	—
C	b	8	Dolomite	—	25.9
D	b	8	Lime stone	11.9	25.9
E	b	6	Lime stone	23.2	27.4
F	b	8	Lime stone Coke 5%	—	24.6
G	b	8	—	—	—
H	b	8	Lime stone	—	—

*; Reduced at 925°C for 90 min.
a; (MBR)/(Mt. Newman)/(Robe River)=6/1/3
b; (MBR)/(Mt. Newman)/(Robe River)=4/2/4

Table 3. Chemical composition of samples.

Sample	T. Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	CaO/SiO ₂	Gangue* amount
A	56.1	—	4.80	1.72	6.97	0.38	1.43	247
B	53.8	—	5.32	1.68	7.88	0.48	1.48	286
C	53.3	—	4.98	1.51	6.88	1.10	1.38	271
D	53.0	—	5.00	1.63	7.25	0.50	1.45	271
E	53.0	—	4.75	1.53	7.09	0.64	1.49	264
F	50.7	—	5.12	1.70	7.05	0.59	1.38	285
G	55.9	—	4.98	1.79	5.31	0.32	1.07	221
H	49.7	—	5.05	1.86	10.4	0.90	2.06	366
Fired pellet	59.5	—	4.09	1.41	5.64	1.47	1.38	212
Sinter	55.9	7.17	6.58	1.91	9.61	1.77	1.40	356

*; 1000(SiO₂+Al₂O₃+CaO+MgO)/T. Fe

添加物としては、脈石成分の調節用として石灰石とドロマイトを、内装炭剤としてコークスを使用した。

実験に供したコールドペレットの製造条件、ふくれ率と気孔率を Table 2 に、化学分析値を Table 3 に示す。ふくれは還元温度 925°C、還元時間 90 min で還元したものを測定したが、それ以外の還元条件は JIS 法⁷⁾と同じである。この理由は、コールドペレットが還元条件によつてふくれ性状が大きく異なるため、なるべく大きなふくれを呈する条件を選定したためである。比較鉱石としては焼成塩基性ペレットと焼結鉱を使用した。試料粒度はコールドペレットと焼成ペレットは 0.952~1.27 cm、焼結鉱は 0.40~0.57 cm である。焼結鉱粒度は、試験高炉²⁾で使用したものである。

2.2 コールドペレットの造粒および養生

鉱石および添加物はボールミルでプレーン指数約 3000 cm²/g に粉砕する。セメントは市販のものをそのまま使用した。これら原料を所定の混合比で混合し、リボン型ミキサで 8% の水を加え約 20 min 混練する。造粒は皿型ペレタイザ (60 cmφ) を用い、微量の水を加

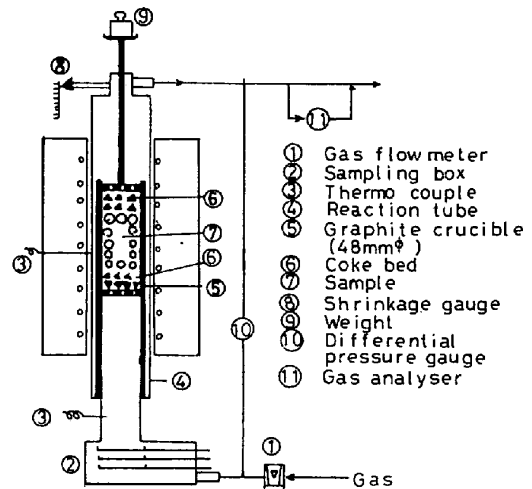


Fig. 1. Experimental apparatus.

えながら 4 kg の試料を 30 min で造粒した。造粒後は密閉状態で 40°C に保ち、2 週間以上養生したものを実験に供した。

2.3 軟化溶融試験装置

Fig. 1 に実験装置を示す。るつぼ内径は 4.8 cm で底には 0.8 cm の穴が 10 個あけてある。試料充填量は 205 g で試料の上部と下部にはコークス (1.1 cmφ) を約 3 cm の高さに敷いた。試料層高は約 7 cm であつた。試料にかかる荷重は 0.2 kg/cm² で、還元ガス組成は CO 30%, N₂ 70% のものを 6.14 Nl/min 流した。

実験手順は次のようにした。室温から 800°C までは窒素気流中で 8°C/min の昇温速度で加熱し、そこで 10 min 保持する。それから還元ガスを流して実験開始とした。その後は 4°C/min の速度で 1500°C まで加熱し、それ以後は電気炉の能力の制限で 1500°C 一定とした。

還元率は出口ガスの CO と CO₂ の分析値より算出した。溶融物の滴下は下部に挿入した熱電対にて検出し、下端に設置した 4 個の採取箱で適時採取した。

3. 結果と考察

3.1 還元性状

Fig. 2 に還元率と収縮率の温度による変化を示す。コールドペレットの被還元性は塩基度の低い G ペレットを除けば焼成ペレットのそれよりよく、特に炭剤を内装した F ペレットのそれは良好である。低塩基度の G ペレットは 1150°C 以上で還元停滞を起こしている。成田ら⁸⁾は焼成ペレットの還元停滞が金属鉄シエルの形成ならびに低融点スラグの生成により起こると報告している。G ペレット (低塩基度) の脈石成分は CaO-SiO₂-

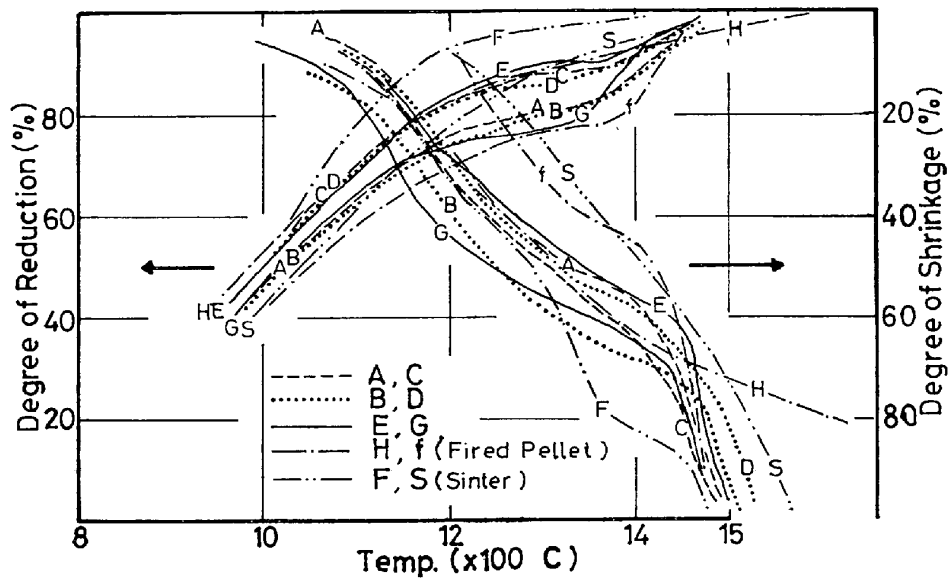


Fig. 2. Behavior of reduction and shrinkage rate.

$\text{Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}$ 状態図⁹⁾からみて 1200°C 以下の融点を持つスラグを生成する可能性がある。また 1330°C で実験を中断した試料 (Photo. 1 参照) によれば、スラグによる気孔の閉塞が観察されるので、Gペレット (低塩基度) の還元停滞の一因として低融点スラグの生成が考えられる。塩基度を上昇させると、脈石の融点が高くなるので塩基度は高い方が望ましいが、D (中塩基度) および H (高塩基度) ペレットの還元速度がほぼ同じであることから、還元速度の向上のためには塩基度は 1.4 あればよいと思われる。

後述するよりに、炭剤を内装していないペレットでは、還元後期に試料充填層上部でペレット内部に未還元 FeO が残留するのに対し、Fペレット (含炭) では 1000°C 以上の温度で内装炭剤による直接還元が進行しており固相状態でほぼ還元が終了する。このことから内装炭剤は弱還元性雰囲気さらされる充填層上部で特に有効であることがわかる。

B, D および Eペレットは同一鉄鉱石配合比でセメント比を変化させて製造したものであり、それぞれセメント比に応じて脈石量に変化している。また Aペレットは高品位鉄を多量に配合しているため脈石量は少ない。これらのペレットを比較すると Eペレット (低セメント比) の還元速度が最も速く、次に Dペレット (中セメント比)、そして A, Bペレット (高セメント比) がほぼ同じで最も遅い。このことから被還元性はペレットの脈石量の減少によつてではなく、セメント比を低下させることにより向上したとみられるがこの原因は不明である。このように、セメント比の低減は被還元性の向上に有効

であるが、冷間強度の低下もともなうので、それは高炉装入物として必要な冷間強度が得られる範囲でなければならない。

脈石中の MgO 濃度を変化させた C (含 MgO)、Dペレットを比較すると還元速度はほぼ同じであるので、この範囲の MgO 濃度の変化では被還元性には影響をあたえないと思われる。

3.2 収縮性状

コールドペレットは焼成ペレットや焼結鉄と比較すると、低温から収縮を開始し収縮率も大きい。Photo. 1 は温度が $1330\sim 1400^\circ\text{C}$ に到達した時点で実験を中止して炉冷した試料層の断面写真の代表例である。Fペレット (含炭) 以外の試料は試料上層の未還元 FeO が残留している部分で変形が大きい。Fペレット (含炭) は試料上層では変形が小さいが、試料下層ではスラグとメタルが一部分離しておりメタルは 1% 前後吸炭していた。また平均粒径が小さくなつていたがこれは内装炭剤の消耗により生じた気孔がつぶれたためと思われる。

試料層の収縮の機構として

①焼結によるペレット体積の減少

②荷重によるペレットの変形

が考えられる。荷重によつてペレットが変形する際に横方向 (長径方向) の径の変化がないとすれば、焼結による体積減少率は (1) 式で表される。

$$1 - (d/d_0)^3 \dots\dots\dots (1)$$

ここで d : ペレットの実験後の長径 (cm)

d_0 : ペレットの初期粒径 (cm)

である。実験で測定された収縮率と d および d_0 から計

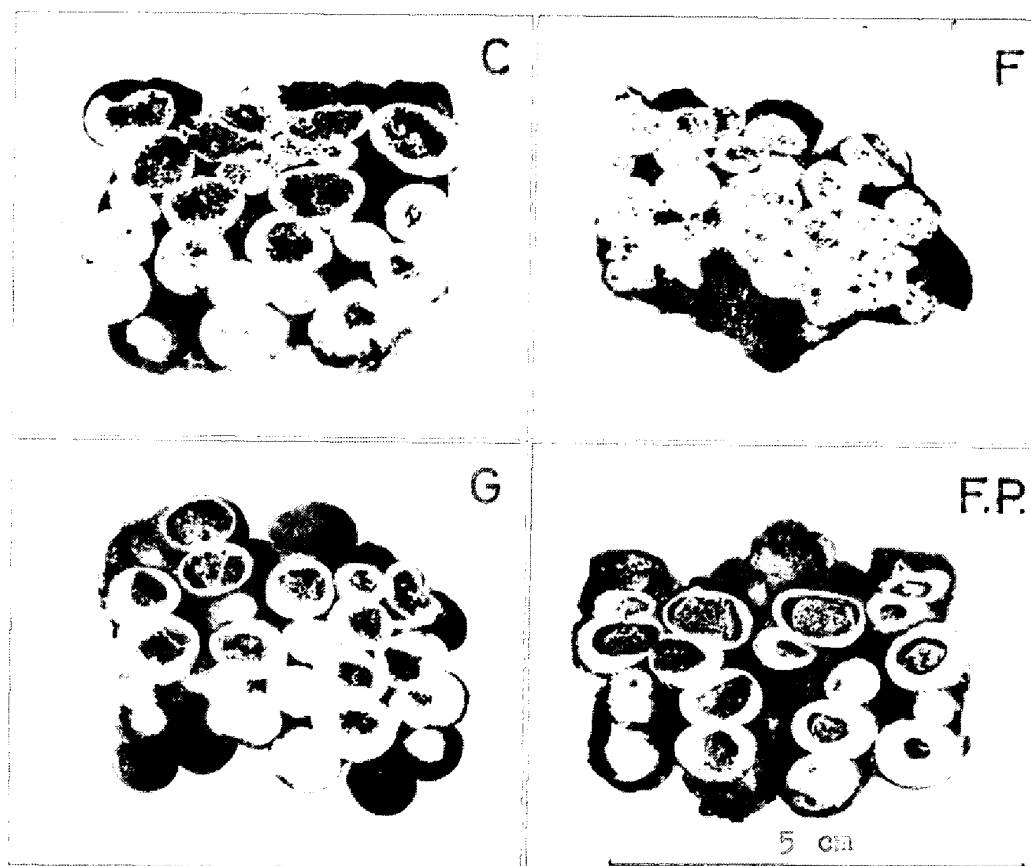


Photo. 1. Vertical cross section of sample beds.

Table 4. Behavior of shrinkage (%).

Sample	Observed shrinkage	Volumetric decrease of pellet	Shrinkage by* deformation
C	62	28	34
D	56	25	31
F	82	47	35
G	60	29	31
Fired pellet	50	20	30

*:(Observed shrinkage)-(Volumetric decrease of pellet)

算した体積減少率の差を変形による収縮率とみなすと、Table 4 のようになる。これによればコールドペレットの収縮挙動の時徴は、焼成ペレットのそれと比べて、焼結による体積収縮率が大きいことにある。コールドペレットは、セメント水和物の分解により気孔率が増大し、さらにそれが焼結により減少するので体積収縮率が大きくなるものと思われる。

充填層の通気性には、空隙率と粒子径が影響をおよぼす¹⁰⁾が、空隙率の変化が与える影響の方が大きい。ここで充填構造が変化しないとすれば体積の減少は空隙率に変化を与えないので、コールドペレットの収縮は大きいと比較的通気性が維持されることになる。実際に、液相

が多量に発生しない温度領域ではコールドペレット層の圧損の上昇と焼成ペレットのそれはほぼ同じであつた。

一方、単球を用い大きな荷重で測定した実験⁹⁾ではコールドペレットは変形しやすいという結果がえられているので、これらの収縮挙動には試料荷重の大きさ(本実験では 0.2 kg/cm^2 と小さい)によつては異なる結果がえられる可能性があるが、高炉のような移動層では荷重が緩和されるため、コールドペレットの変形が特に大きいという報告はなされていない²⁾⁶⁾。

3.3 溶融滴下性状

本実験では $1330 \sim 1430^\circ\text{C}$ の範囲で急激に出口ガスの CO 濃度が上昇し、還元速度が速くなる現象が見られた。Photo. 1 はこの時点の試料層の状態を示すもので、上層のペレットの外部には微量のスラグが溶出しており、その表面の一部には薄膜状の金属鉄がみられる。すなわちこの現象は FeO を含有したスラグがこの時点で溶出し始めて溶融還元が進行したことを示すものであり、薄膜状金属鉄はこの結果生成したものと考えられる。Fペレットは試料下層で多量のスラグが分離しているが、試料上層では残留 FeO もほとんどない。

スラグ溶出温度とその時点での還元率の関係を Fig.

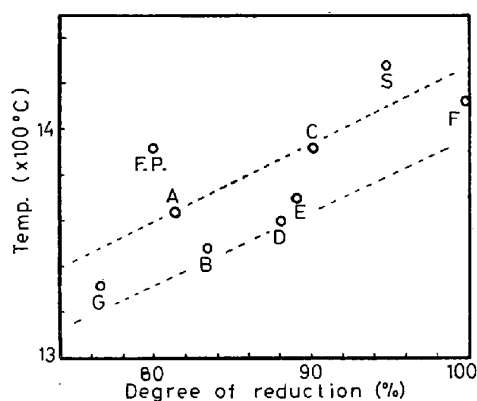


Fig. 3. Relation between temperature of starting of slag melt and degree of reduction.

Table 5. FeO content of initial slag and degree of reduction at slag melting (%).

Sample	B	C	D	F	G	F.P.
FeO	12.2	7.33	9.90	1.18	22.8	3.59
Deg. of reg.	83.5	90.2	88.1	99.6	76.8	79.9

3 に示す。還元率が高くなるほどスラグ溶出温度は高くなる傾向がある。低還元率では、低温でスラグが溶出するのは、金属鉄層が薄くやぶれやすいことならびにスラグ量の増大や融点の低下によるものと思われる。なお一般にコールドペレットは焼成ペレットと比べて低温でスラグが溶出する傾向があるが、これはスラグ量が多いことならびに体積収縮率が大きいのでスラグがペレット内部から絞り出される傾向があるためと思われる。

Table 5 に初期滴下スラグ中の FeO 濃度とスラグ溶出時の還元率を示した。溶出スラグ中の FeO は床敷きコークスやグラファイトとつぼと反応するので、滴下スラグ中の FeO 濃度と同じではないと思われるが、スラグ溶出時の還元率が高いほど FeO 濃度は低くなっており、よい相関を示している。また焼成ペレットの FeO 濃度が低いのは、脈石量が少なく、生成スラグ量が少ないので、床敷きコークス中に長時間滞留し、そのため反応がより進んだのではないと思われる。C(含 MgO) および D ペレットを比較すると C ペレットはスラグ溶出時の還元率が高く、滴下スラグ中の FeO 濃度も低い。これらのペレットは Fig. 2 に示したように被還元性に差がなく、また脈石量・塩基度もほぼ同じである。SiO₂-CaO-Al₂O₃ 系スラグ融点への MgO 添加の影響はほとんどないので¹¹⁾、MgO の添加は FeO の融点の上昇¹²⁾ に効果があつたのではないと思われる。

このようにコールドペレットはスラグ溶出温度が低く、滴下スラグ中の FeO 濃度が高くなる傾向があるの

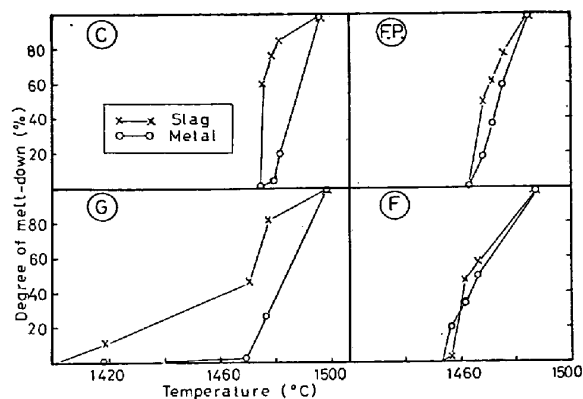


Fig. 4. Melt-down behavior of pellets.

で、その被還元性は十分に改善しておく必要がある。

Fig. 4 に溶融物滴下状況の代表例を示す。F ペレット(含炭)以外のコールドペレットは、スラグがメタルに優先して滴下する傾向がある。これはスラグが溶出しやすいことならびに脈石量が多いことによるものと思われるが、F ペレットのように内装炭剤により完全に還元が終了するものはスラグとメタルがほぼ同時に滴下する。

なお、塩基度が 2.1 の H ペレットはこの実験の範囲では、スラグの溶出もスラグやメタルの滴下も観察されなかつた。このことから溶融性状の改善には脈石塩基度の上昇が有効であると推察される。

Fig. 5 に試料層における圧損変化の代表例を示す。圧損はスラグ溶出開始後に急上昇し、大きく変動する。この圧損の変動にともなつて出口ガスの CO 濃度も変動し、滴下が終了すると圧損は低下する。したがつて G ペレット(低塩基度)のようにスラグ溶出開始から滴下終了までの時間が長いものは圧損上昇期間が長く、G ペレットや焼成ペレットのようにスラグ溶出開始時の還元率が低いものは最大圧損が大きく、F ペレット(含炭)のように還元率が高いものは最大圧損が小さくなる傾向がある。

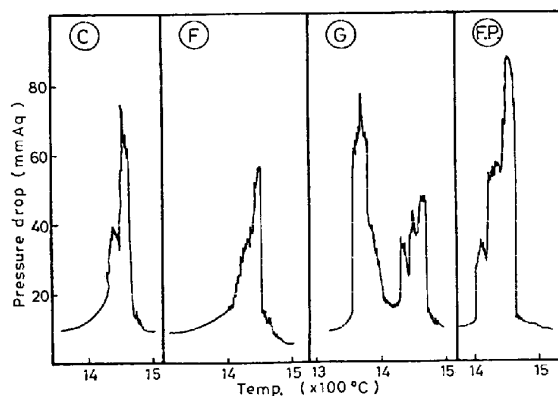


Fig. 5. Behavior of pressure drop change.

以上のことから、コールドペレットの溶融滴下性状の改善には、その被還元性の向上、MgO の添加および脈石塩基度の上昇が有効であり、特に炭剤の内装は大きな効果を持つことがわかる。

また焼結鉱と比べると焼成ペレットおよびコールドペレットはともに高温域で還元が停滞する傾向があり、スラグ溶出温度も低い。これには焼結鉱の粒子径が小さいことも影響していると思われるが、ペレットに共通した欠陥のようにも思われる。

4. 溶融滴下挙動に関する検討

軟化溶融試験により、前述の結果がえられたが、Photo. 1 に示したように試料層高方向に還元率の分布があることや、実験装置の制約で炉冷試料しかえられず、冷却中に試料が反応する可能性があることなどから、溶融滴下機構について十分な検討ができない。そこで以下の実験を行った。

4.1 実験方法

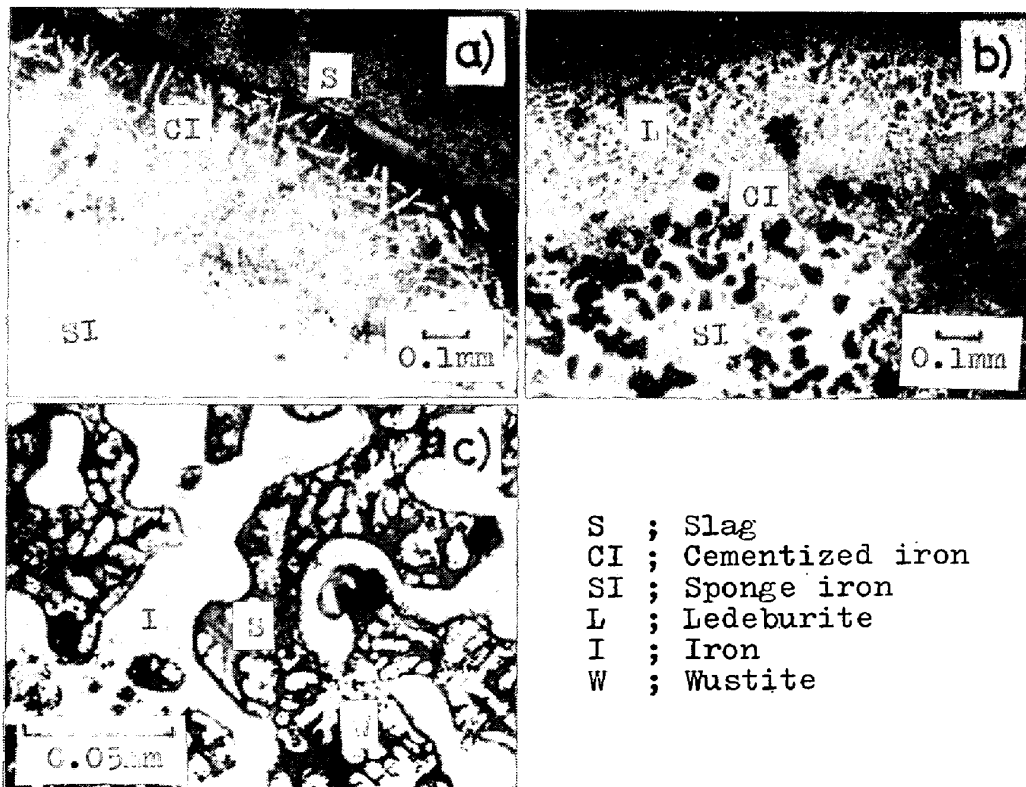
底に穴をあけたグラファイトるつぼないしアルミナるつぼに3個のペレットを重ねないように入れ、内径4cmの縦型の反応炉に吊し、加熱還元した。還元開始温度までは窒素気流中で昇温し、還元ガス流量は軟化溶融

Table 6. Conditions of reduction.

Condition	Heating rate	Atmosphere
1	800°C-1500°C, 4°C/min	CO/N ₂ =3/7
2	800°C-950°C, 4°C/min	CO/N ₂ =3/7
	keeping at 950°C for 30 min 950°C-1500°C, 4°C/min	CO/N ₂ =3/7 CO/N ₂ =3/7
3	1000°C-1050°C, 4°C/min	CO/N ₂ =3/7
	1050°C-1100°C, 4°C/min	N ₂
	1100°C-1150°C, 4°C/min	CO/N ₂ =3/7
	1150°C-1200°C, 4°C/min 1200°C-1500°C, 4°C/min	N ₂ CO/N ₂ =3/7

試験の還元ガス空塔速度と同じになるようにした。反応管上部には覗き穴を設置し、ペレットの変化を観察した。実験後は試料を吊っているワイヤを切断し、試料を反応管下部に設置した採取箱中に落下させ、そこで窒素冷却をした。るつぼ材質を2種使用したのは、固体炭素の溶融滴下挙動に与える影響を調べるためである。

還元条件をTable 6に示す。条件1は軟化溶融試験と同じであるから、その試料充填層下部の還元条件に対応する。条件2は950°Cで30min余分に還元をしてペレットの還元をより十分に進行させることを目指したものである。条件3は還元途中で還元ガスを窒素に2回切り換えて還元の進行を抑制することを目指したものであり、軟化溶融試験の試料充填層上部の還元状況に対応



a) ; F. P., Reduction condition 1, 1450°C, Graphite crucible
b) ; G, Reduction condition 1, 1370°C, Graphite crucible
c) ; G, Reduction condition 3, 1400°C, Alumina crucible

Photo. 2. Microstructure of pellets (etched).

する。

4.2 結果とその検討

グラファイトるつぼを使用した場合には次の結果が得られた。

①条件1では、C(含 MgO)、Dペレットおよび焼成ペレットは 1450°C までは溶解することがない。ペレット表面に若干のスラグのしみだしが認められ、またるつぼに接した部分のメタルのみが若干の吸炭をしている。この例として焼成ペレットの場合を Photo. 2 の a) に示す。Gペレット(低塩基度)では 1350°C で FeO を含む溶出スラグとグラファイトとの激しい反応によりスラグがバブリングし、1360°C でメタルは吸炭溶解する。これを Photo. 2 の b) に示す。Fペレット(含炭)は、1380°C でスラグとメタルの分離が徐々に始まり 1450°C で溶解する。

②条件2では、Gペレット(低塩基度)は 1400°C でペレット表面に若干のスラグがしみ出すがメタルは吸炭せず、スラグおよびメタルともに溶解しない。

③条件3の場合には、C(含 MgO)、Dペレットは 1310°C で溶出スラグるつぼとの溶解還元反応が観察され、メタルの吸炭も進行する。(C₂≒2% であつた。)焼成ペレットでは同じ現象が 1360°C で観察される。Fペレット(含炭)は 1450°C までスラグの分離や吸炭が認められず、溶解しなかつた。また残留 FeO もほとんど存在しない。

アルミなるつぼを使用した実験は、最も溶解しやすい Gペレット(低塩基度)を用いて、条件1と3で行つた。いずれの場合も多量の FeO を含むスラグが溶出したが、メタルは吸炭しない。この例を Photo. 2 の c) に示す。

以上の結果からペレットの溶解は次のように進行すると判断される。

①溶解は FeO を含むスラグから始まる。したがつて還元率が低くなるほど溶解しやすい。このスラグは固体炭素と接触すると急激に溶解還元されて金属鉄を生成する。

②溶解還元により生成した金属鉄は固体炭素との接触が良好なため、吸炭し溶解する。溶解鉄の生成により鉄中の炭素の拡散が速くなり、その結果還元鉄の溶解が促進される。すなわちペレットが高還元率の場合にはメタルの溶解が遅れるので溶落温度は高くなる。

③炭剤を内装したペレットは未還元 FeO が直接還元され高還元率がえられる。しかしこの際ガス還元により低温で還元が十分に進行するような強還元条件下では、炭剤が過剰に残留し、メタルがこれを吸炭してスラ

グとメタルの分離が促進されてそれらはほぼ同時に溶解する。しかもこの際溶解温度は低温側に移行する。したがつて内装炭剤が過剰にならない範囲内ならば、内装炭剤量が多いほど高還元率がえられ、その結果溶解滴下温度が高くなると思われる。これらのことから、内装炭剤量は還元条件に応じて変える必要があると思われる。

これらの溶解進行挙動は軟化溶解試験の結果とよく一致した。

5. 結 言

コールドペレットの軟化溶解性状について調査を行い次の結果をえた。

(1) コールドペレットは焼成ペレットと比べて、被還元性が良好である。その被還元性の向上には、冷間強度をそこなわない範囲でのセメント比の減少、塩基度の上昇および炭剤の内装が有効である。

(2) コールドペレットは収縮しやすいが、これは焼結により体積収縮する傾向が強いためである。

(3) コールドペレットは脈石量が多くまた体積収縮率が大きいので、FeO を含むスラグから先に溶解滴下し、滴下スラグ中の FeO 濃度が高くなる傾向がある。

(4) コールドペレットの溶解滴下性状の改善には、被還元性の向上、脈石塩基度の上昇、MgO の添加や適量の炭剤の内装が有効である。

文 献

- 1) 呉 平男, 桑野芳一, 鈴木吉哉, 辻 英太, 松崎幹康, 館 充: 鉄と鋼, 64 (1978), S521
- 2) 呉 平男, 桑野芳一, 鈴木吉哉, 張 東植, 松崎幹康, 中村成子, 辻 英太, 館 充: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1870
- 3) 上野英生, 館 充, 大蔵明光: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 317
- 4) 佐藤勝彦, 沢村靖昌, 神原健二郎, 古井健夫: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 1673
- 5) 斧 勝也, 山口一良, 重見彰利, 西田信直, 神原健二郎: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 505
- 6) 江崎 澁, 須沢昭和, 稲角忠弘, 高崎 誠, 野田多美夫, 野島健嗣: 鉄と鋼, 67 (1981), S51
- 7) JIS M-8715 (1969)
- 8) 成田貴一, 前川昌大: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1443
- 9) E. M. LEVIN, C. R. ROBBINS, and H. F. McMURDIE: Phase Diagrams for Ceramists, Fig. 871 [The American Ceramic Society]
- 10) R. B. BIRD, W. E. STEWART, and E. N. LIGHTFOOT: Transport Phenomena, p. 200 [Wiley International Edition]
- 11) E. M. LEVIN, C. R. ROBBINS, and H. F. McMURDIE: Phase Diagrams for Ceramists, Fig. 630, 882 [The American Ceramic Society]
- 12) 成田貴一, 前川昌大, 志垣一郎, 関 義和: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1623