

論 文

UDC 622.341.1-185 : 622.341.1-188 : 669.162.263.24 : 669.162.282

高炉高温域におけるペレットの挙動に関する基礎的研究*

成田 貴一**・前川 昌大***・北村 雅司***・金山 宏志***

Fundamental Study on the Behavior of Pellets at Higher Temperature in Blast Furnace

Kiichi NARITA, Masahiro MAEKAWA, Masaji KITAMURA, and Hiroshi KANAYAMA

Synopsis:

In order to clarify the behavior of pellets and sinters in the reduction and melting process in the blast furnace, some phenomena, such as the retardation of reduction at higher temperature, the exudation of FeO-containing slag and the meltdown, were investigated. The results obtained are as follows:

- 1) Some kinds of burdens show strong retardation of reduction at higher temperature (1200°~1250°C).
- 2) When a reduced sample is held at 1300°~1400°C during several minutes, the exudation of FeO-containing slag to its surface takes place.
- 3) In the meltdown test, the meltdown behavior is different among various kinds of burdens according to the factors such as gangue volume and composition of burdens and the reducing conditions.

1. 緒 言

従来、ペレットおよび焼結鉱の品質管理を目的とした JIS 還元性、ふくれ指数および荷重還元性などを調べる諸試験が行われて来たが、それらは高炉の比較的低い温度領域で起こる諸現象を対象にした実験が多く、高炉の朝顔部付近の高温領域における装入物の挙動についての検討は実験の困難性もあつて十分にはなされていなかった。

しかしながら、最近の高炉解体調査^{1)~6)}などの結果から高炉装入物の評価の面で高温領域における挙動の解明の重要性が認識されるようになり、軟化・融着・溶け落ち性などに関する研究^{7)~13)}も実施されつつある。

著者らは高炉装入物の高温性状に関する一連の研究の中で、まず高温還元挙動、(FeO)を含む溶融スラグの滲出現象、さらにつづいて起こる溶け落ち挙動に焦点を絞り実験室的な検討を行なつた。上述の高温性状は高炉操業成績ならびに炉況に影響をおよぼす重要な因子であり、これらの現象を正確に把握することにより、高炉装入物の品質改善および使用技術の改善の上で有効な知見

が得られるものと考えられる。

2. 供試試料および実験方法

2.1 供試試料

本研究で使用した試料は、(1)工場ペレット2種類、(2)試験用バッチキルン・ペレット(酸性)、(3)工場焼結鉱を主体とし、その他に(4)塩基度および脈石量の異なる実験室ペレット、(5)塩基度の異なる試験鍋焼結鉱の合計16種類である。各試料の化学成分組成を Table 1 に示す。

2.2 実験方法

本研究で実施したすべての実験条件は Fig. 1 に示したとおりであり、まず JIS 還元試験装置により試料を wustite の段階まで予備還元した。wustite 段階試料の化学分析結果によれば、3価の Fe が少量(7~10%)残存していたが、実験目的からほとんど支障はないものと考えられる。この予備還元処理は、高炉シャフト部の熱保存帯で CO-CO₂ 混合ガスと wustite が平衡状態にあり、装入物が比較的順調に還元された状態を想定したものである。したがって、ここではシャフト上部で起こる

* 昭和 48 年 4 月、10 月本会講演大会にて発表 昭和 53 年 3 月 31 日受付 (Received Mar. 31, 1978)

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

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

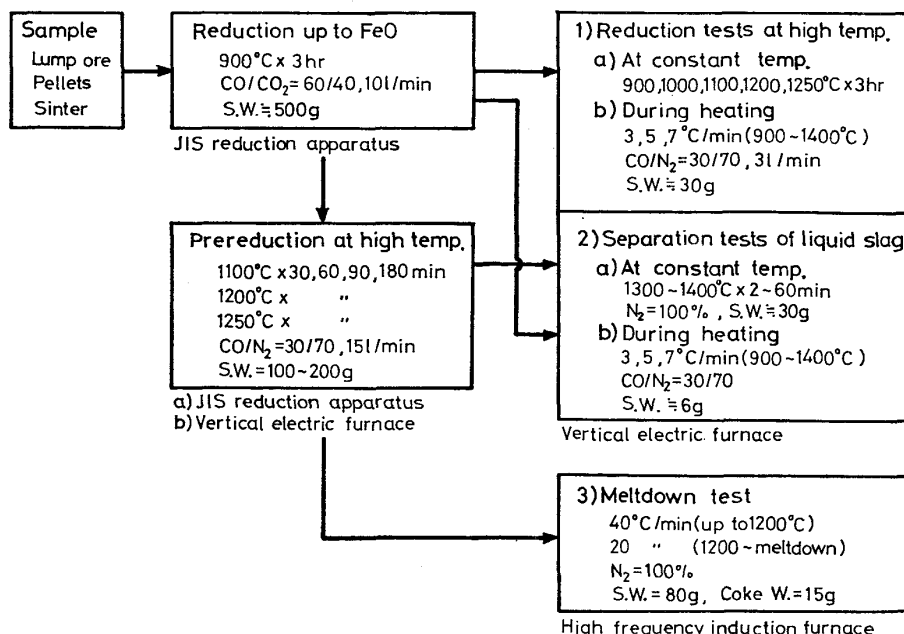


Fig. 1. Systematic diagram of experimental conditions (S. W. : sample weight, W. : weight).

Table 1. Chemical composition of samples used (B : basicity, Slag con. : slag content).

Mark	Sample	Chemical component (%)						CaO/SiO ₂	Slag con.(%)		
		T-Fe	FeO	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO				
A	Self-fluxed pellets	60.20	0.30	4.50	5.50	2.10	0.40	1.23	12.10		
B	"	63.50	-	2.83	3.42	1.35	0.13	1.21	7.60		
C	Acidic pellets	63.18	0.79	4.20	0.82	2.41	1.19	0.20	7.48		
D	Sinter	55.15	8.60	6.45	10.09	2.40	0.59	1.56	18.94		
E1	Pellets	B=1.0, Slag con.=8%	63.15	0.86	3.25	2.84	1.56	<0.01	0.87	7.56	
E2		" 1.0 "	11%	63.11	0.72	4.61	4.51	1.51	"	0.97	10.63
E3		" 1.0 "	14%	59.08	0.86	5.95	6.17	1.46	"	1.03	13.60
F1		" 0.4 "	11%	61.06	0.65	6.34	2.77	1.51	"	0.44	10.65
F2		" 0.8 "	11%	61.11	0.50	4.98	4.14	1.53	"	0.83	10.65
F3		" 1.2 "	11%	61.11	0.57	4.18	4.96	1.52	"	1.19	10.66
G1	Sinter	B=0	64.36	2.156	6.14	0.11	2.76	<0.1	0.02	9.01	
G2		" 0.5	62.40	1.746	6.22	2.81	2.65	"	0.45	11.68	
G3		" 0.9	60.17	1.214	5.68	5.13	2.72	0.60	0.90	13.53	
G4		" 1.1	58.28	9.27	6.14	6.81	2.62	0.06	1.11	15.57	
G5		" 1.5	56.21	6.54	6.38	9.73	2.82	<0.1	1.53	18.93	
G6		" 1.8	55.63	6.25	6.28	11.29	2.71	"	1.80	20.28	

装入物の熱割れ, swelling および還元粉化などの問題は取扱つておらず, これらの諸性質に関して支障のない試料であることを仮定した。

2.2.1 高温還元試験方法

高温還元試験は定温還元 (900°~1250°C) および昇温還元 (900° から 1400°C まで 3, 5 および 7°C/min) の 2 種類の試験方法で行なつた。いずれも wustite 段階試料 (約 30g) をカンタル線製のバスケットに装入後, 堅型電気炉内に設置した磁製反応管 (内径 42 mmφ) 内に吊るし, 所定の温度あるいは所定の昇温速度下で CO-N₂ 混合ガス (CO : 30%, N₂ : 70%) を 2 Nl/min 流して還元による試料の重量減少量を天秤にて測定する

ことにより還元率の経時変化を求めた。

2.2.2 スラグ滲出現象の調査方法

wustite 段階の試料を用いて, つぎの 2 種類の方法で調査した。(1) wustite 段階試料を所定の条件で予備還元し, これを 1300°~1400°C の温度範囲で N₂ 雰囲気中に所定の時間保持したのち急冷し, 予備還元条件, 保持時間および保持温度の影響を調査した。(2) 前述の高温昇温還元後試料を急冷し, 昇温速度の影響を調査した。

スラグ滲出現象の調査は急冷試料の外観および断面の観察, 光学顕微鏡組織の観察ならびに XMA (X線マイクロアナライザー) による分析などにより行なつた。

2.2.3 溶け落ち性状試験方法

本試験においても wustite 段階試料を予備還元して溶け落ち性状試験用試料としたが, 試験目的によつてつぎのような 2 種類の予備還元方法を採用した。(1) 高炉内で比較的順調に還元を受けた場合 (予備還元温度 : 1100°C) と還元停滞現象を起こした場合 (予備還元温度 : 1200°C) の溶け落ち性状を比較するために, 各種試料を JIS 還元炉を用いて, 1100° および 1200°C にて CO-N₂ 混合ガス (CO : 30%, N₂ : 70%) を 15 Nl/min 流して 90 min 間還元した。(2) さらに, 予備還元条件の影響を詳細に調査するため, 工場ペレット A を 1000° 1100° および 1200°C においてそれぞれ 30, 60, 120 および 180 min 間還元して溶け落ち性状試験用の予備還元試料とした。

溶け落ち性状試験は高周波炉を用いて行なつた。予備

還元試料 (80 g) とコークス (15 g) の混合物を入れた黒鉛製ルツボを上部天秤に吊るして、 N_2 雰囲気中で一定の昇温速度 (1200°C まで 40°C/min, 1200°C 以上 20°C/min) で加熱しながら黒鉛ルツボ全体の重量減少量を測定するとともに、黒鉛ルツボ下部のロストルからの滴下物重量を下部天秤によつて測定した。

3. 実験結果

3.1 高温還元挙動

3.1.1 定温還元挙動

まずペレット A, B, C および焼結鉱 D の 4 試料について行なつた定温還元試験 (900°C~1250°C) の結果を還元曲線の形で示すと Fig. 2 (a) のとおりである。ただし還元率は wustite 段階試料を 0% として計算している。

ペレット A の還元挙動をみると、1100°C までは温度の上昇とともに還元速度は増大するが、1200°C では逆に還元速度は小さくなり、1250°C では顕著な還元停滞現象があらわれている^{9)~11)}。いづれ、ペレット A と同じような塩基度で脈石量の少ないペレット B の還元曲線によれば、ペレット A と異なり、1200°C~1250°C においても顕著な還元停滞現象は認められない。つぎに、脈石量は少ないが、塩基度の低い酸性ペレット C の場合、1200°C ですでに還元速度は大幅に低下し、還元停滞現象は顕著である。このようにペレットの種類によつて高温還元挙動が異なるが、これは後述するように、還元停滞現象は特に試料内の気孔を閉塞させるスラグ融液の発生状況と関連があるため、スラグ融液の発生温度および発生量にそれぞれ関係する脈石組成および脈石量の影響が大きいと考えられる。また自溶性焼結鉱 D の還元挙動もペレットと同じような傾向を示し、1200°C~1250°C で還元速度の低下が認められた。しかしながらペレット

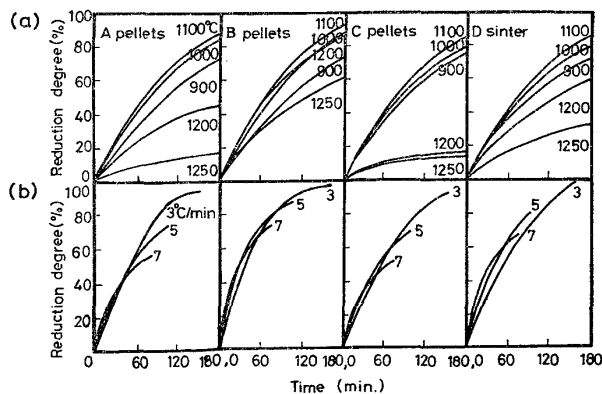


Fig. 2. Reduction curves of various pellets and sinter at high temperature (a : at constant temperature, b : during heating).

A と比較した場合、その程度は焼結鉱 D のほうが小さい。

3.1.2 昇温還元挙動

装入物が高炉内の中心側を降下するか炉壁側を降下するかによつて昇温速度が異なるため、昇温速度の還元挙動におよぼす影響を調査する必要がある。そこで前述の 4 種類の試料で昇温速度を 3, 5 および 7°C/min と変化させ、900°C~1400°C 間の還元試験を実施した。昇温還元試験の結果を Fig. 2 (b) に示す。同図と Fig. 2 (a) に示した定温還元試験の結果によれば、両者の間には密接な関係があり、たとえば定温還元試験の 1200°C や 1250°C で高還元率を示す試料は昇温還元においても還元率は高く、両者の結果は良く対応している。さらに昇温速度の影響に関しては、とくに 7°C/min のように昇温速度が速い場合にはいずれの試料も還元停滞現象が起こりやすいことが認められた。

つぎに各試料について昇温還元曲線の特徴を述べると、3 種のペレットの場合、7°C/min の急速加熱時に試料間の差が明確になつており、酸性ペレット C の場合には最終還元率は最も低くなるが、脈石量の少ないペレット B は 7°C/min でも比較的順調に還元が進行する。また焼結鉱 D は昇温速度が速い場合でも還元停滞現象があまり顕著ではない。

3.2 高温還元性におよぼす脈石量および塩基度の影響

ここでペレットの脈石量および脈石組成 (塩基度) の高温還元性状におよぼす影響を実験室ペレットを用いて調査した。供試ペレットはヤンピーサンド鉱石に脈石量および塩基度調整用として試薬の $CaCO_3$ と SiO_2 を添加し、タイヤ型ペレタイザーにて造粒後 1250°C で 30 min 間焼成して作成した。このペレットの化学組成は Table 1 に示すように (1) 塩基度一定で脈石量変化

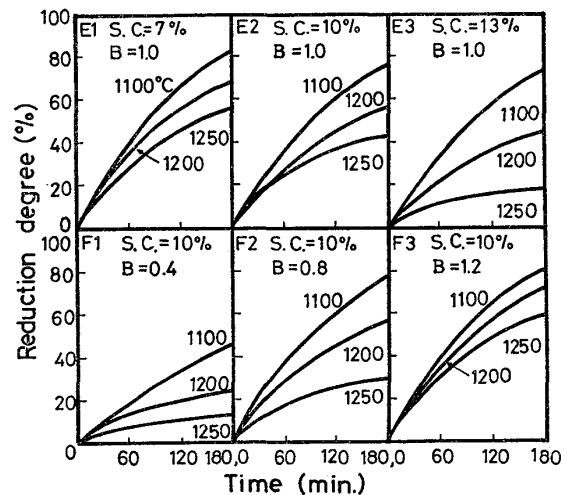


Fig. 3. Reduction curves of various pellets (S. C. : slag content, B : basicity).

および(2)脈石量一定で塩基度変化を目標としたものである。

還元温度を 1100°, 1200° および 1250°C に限定した還元試験結果を Fig. 3 に示す。塩基度一定で脈石量を変化させた場合, 1000° および 1100°C の還元速度にはそれほど顕著な差は認められないが, 1250°C では

大きな差を生じ, 脈石量の多いほど最終還元率は低い。また脈石量一定で塩基度を変化させた場合, 塩基度の上昇によつて各温度で還元速度が速くなり, とくに 1250°C では顕著な差を生じた。

3.3 スラグの滲出現象

予備還元したペレットを高温 (1300°~1400°C) で保

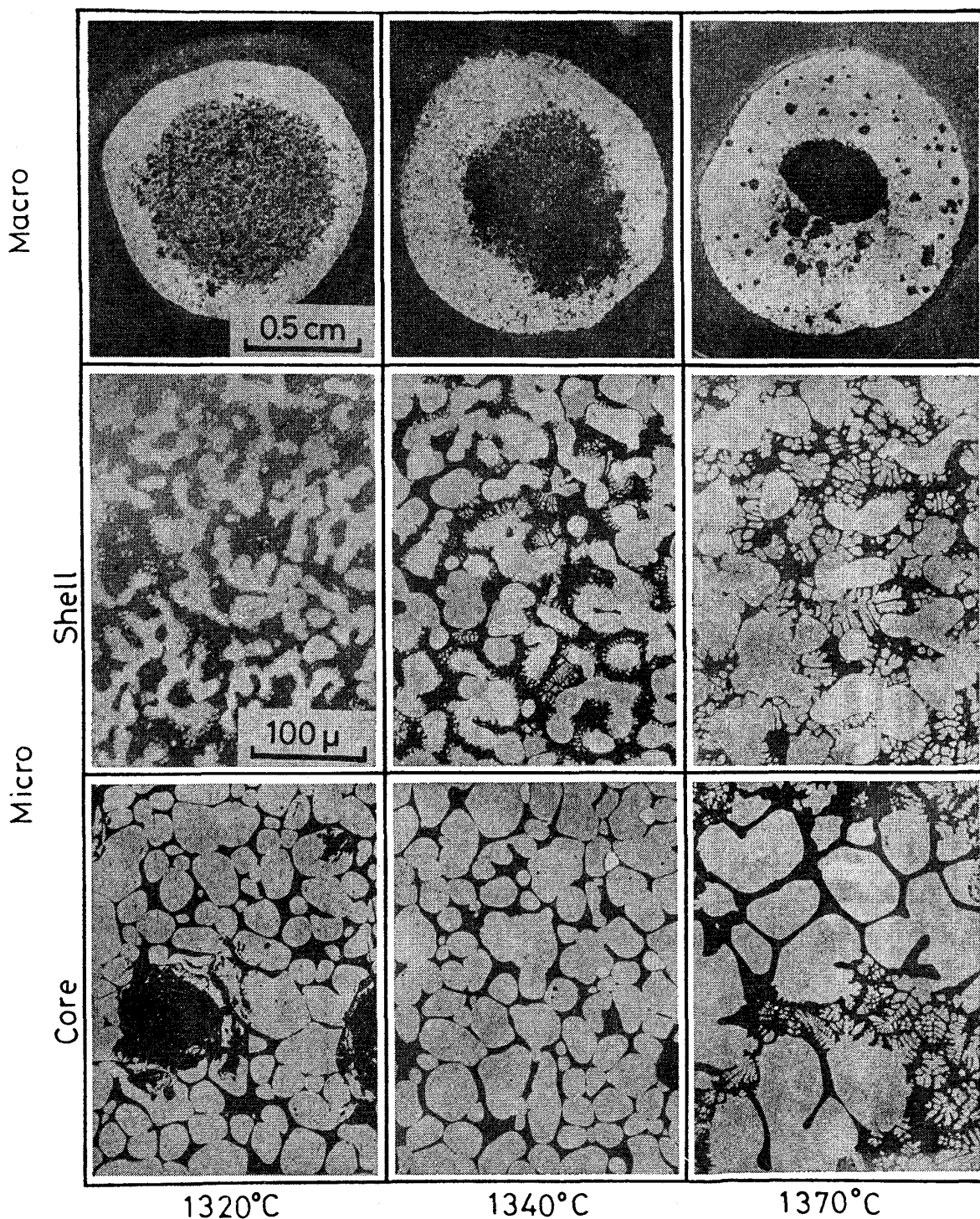


Photo. 1. Cross-sections and micro structures of pellets quenched after holding at various temperatures.

持すると、試料内部に生成した融液がペレット表面に滲出する現象が認められた。高炉内ではこのペレット表面に滲出した融液を媒体に各粒子が相互に融着し、集塊の生成原因になると考えられる。また前述した高温還元停滞現象にも関係すると推察されるので、この現象に焦点をあてて以下の方法で調査した。

3.3.1 N₂ 雰囲気中における融液の滲出挙動

まず融液滲出機構を調査するため低還元率の試料を急速に高温まで加熱して、この現象が促進されやすい条件下で実験を行なった。

900°C で 30 min 間予備還元した工場ペレット A を 1320°~1370°C 間の 10°C ごとの温度で N₂ 気流中に 60 min 間保持したのち急冷した試料の断面観察結果から保持温度の影響を調査した。Photo. 1 はそのうち 1320°, 1340° および 1370°C で保持した試料の断面写真ならびにその光学顕微鏡組織を示したものである。同写真によれば 1340°C 付近からペレット core 部に亀裂が入り始め、温度の上昇に伴って丸型の空洞が形成される現象が観察された⁹⁾。また空洞の形成に伴い試料表面に黒色の融液が滲出しているようすが認められた。この融液の化学分析結果によると (FeO) 含有量が 30~60% とひじょうに高く、光学顕微鏡組織観察によると冷却過程に晶出したと思われる dendrite 状の wustite 粒子が多数認められる。さらに Photo. 1 に示した shell 部の光学顕微鏡組織をみると、温度の上昇に伴って金属鉄粒子間のスラグ相に存在する wustite 粒子数が増加し、しかも大きく成長しているようすがわかる。

いつぼう、保持時間の影響を調べるため 1350°C にて保持時間を 2~30 min 変化させた試料についても同様の観察を行なったところ、保持時間の増加に伴って、断面観察結果および光学顕微鏡組織観察結果は保持温度を上昇した場合と似たような挙動を示すことが認められた。

以上の N₂ 雰囲気中の実験結果から、ペレット表面への融液の滲出現象は core 部の未還元 wustite が脈石成分と同化して低融点スラグを形成し、それが shell 部を通過してペレット表面に滲出したものと考えられる。したがってこの現象は保持時間の増加および温度の上昇に伴って顕著となる。

3.3.2 昇温還元におけるスラグの滲出現象

工場ペレット A および焼結鉄 D を各種昇温速度 (3, 5 および 7°C/min) で 1400°C まで昇温還元し、のち急冷した試料の外観写真を Photo. 2 に示す (還元曲線は Fig. 2 (b) 参照)。同写真によれば、昇温速度の増加に伴って黒色スラグの試料表面への滲出量が増加してい

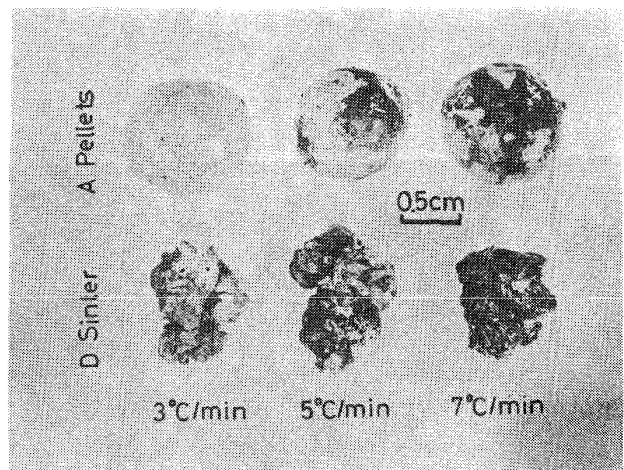


Photo. 2. Macro-pictures of pellets and sinter quenched after reduction with various heating rates.

る。これは昇温速度による還元率(未還元 wustite 量)の差および shell 部の金属鉄粒子の sintering 程度による影響が大きいと考えられる。すなわち昇温速度が遅いと還元率が高くなり、また shell 部の金属鉄粒子の sintering が進行してスラグが shell 部を通過して試料表面に滲出する際の抵抗となるためである。

また N₂ 雰囲気中の実験および昇温還元後試料のスラグ中 Fe 含有量を XMA により定量した結果を Table 2 に示す。同表から N₂ 雰囲気中の実験では保持時間が増加するほど、また昇温還元実験では昇温速度が速いほど shell 部のスラグ中 Fe 含有量は高く、含 (FeO) スラグが滲出しやすいことがわかる。

前述した昇温還元後のペレットでスラグ滲出状況を定性的に観察すると、高温還元性との間に密接な関係があり、高温還元性の悪い酸性ペレット C や脈石量の多いペレット A などはスラグ滲出量が多く、低脈石量ペレット B は昇温速度が 7°C/min の場合でもスラグの滲出量は比較的少ない。

以上の結果より高炉内でもスラグの滲出現象が起こることが予想され、この現象が促進されるような状況 (高温還元性の悪い装入物使用時や、急速加熱を受けるような場合など) においてはペレット間の融着や集塊形成を促進し⁷⁾¹⁴⁾ 高炉操業上好ましくないと考えられる。

Table 2. Fe content in slag phase of pellets determined by XMA analysis (%).

Experimental condition		Shell	Core
After holding in N ₂ gas	1350°C x 3 min	27.5	13.9
at constant temperature	" x 30 min	40.1	13.7
After reduction during heating	3° C/min	18.8	-
	7° C/min	46.4	-

3.4 ペレットの溶け落ち挙動

装入物は高炉上部でガス還元を受けたのち、下部にいたり溶融および滴下の過程をたどる。装入物の溶け落ち挙動はその脈石量や脈石組成によつて左右されるほかに還元履歴などによつても大きな影響を受けることが予想される。ここでは高温還元挙動と関連づけ、還元履歴と溶け落ち性状の関係を調査した。

まず溶け落ち挙動におよぼす予備還元率の影響を調査するため極端な例としてペレット A の wustite 段階試料と高還元率試料の溶け落ち挙動を比較した。その試験結果を Fig. 4 に示す。横軸に昇温中の時間経過を、縦軸に上部天秤で測定したルツボ全体の重量減少量および下部天秤による滴下物の重量増加量を昇温履歴とともに示す。wustite 段階試料の場合、低温から滴下が始まり、滴下開始から終了にいたるまでに長時間を要した。これに対し、高還元率試料の場合は対照的で高温まで滴下しないが、滴下開始後短時間で終了にいたる。

両者の溶け落ちパターンを参考にし、数種の試料を用いて予備還元温度が 1100° と 1200°C の場合の溶け落ち挙動を検討した。試験結果を予備還元率とともに Table 3 に示す。

3.4.1 予備還元温度が 1100°C の場合

これは高炉内で比較的順調に還元を受けたのち溶融お

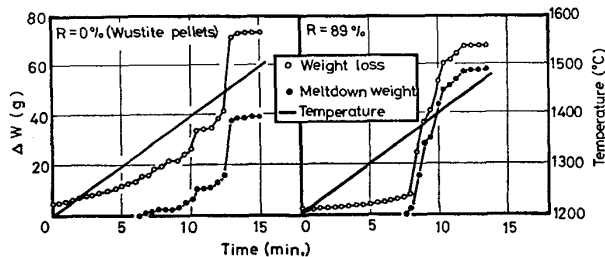


Fig. 4. Comparison of meltdown behaviors of metallized pellets and wustite pellets.

Table 3. Meltdown temperatures of various samples.

Mark	Sample	1100°C x 90 min				1200°C x 90 min			
		Reduction degree (%)	Meltdown temp. (°C)		Reduction degree (%)	Meltdown temp. (°C)			
			Start	End		Start	End		
A	Self-fluxed pellets	74.5	1300	1390	10.5	1230	1310		
B	"	61.0	1350	1390	39.4	1330	1400		
C	Acidic pellets	66.4	1390	1480	10.9	1240	1460		
D	Sinter	76.4	1340	1390	19.4	1370	1420		
G1	Sinter	CaO/SiO ₂ = 0	25.0	1210	1530	13.0	1210	1490	
G2		" = 0.5	32.7	1310	1430	30.2	1240	1440	
G3		" = 0.9	58.4	1320	1380	31.0	1350	1470	
G4		" = 1.1	64.8	1300	1350	37.1	1280	1390	
G5		" = 1.5	71.0	1350	1390	41.1	1400	1500	
G6		" = 1.8	75.4	1420	1480	39.3	1450	1520	

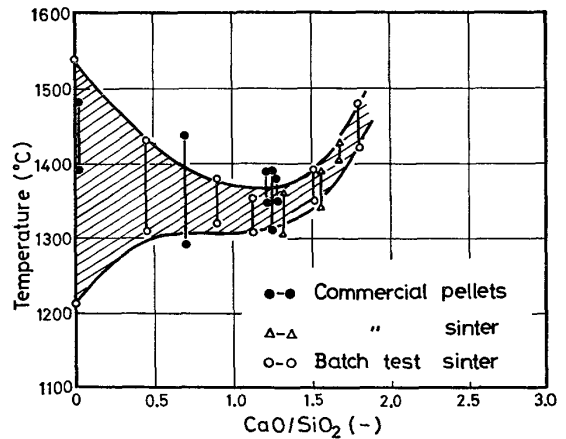


Fig. 5. Variation of meltdown temperature with burden basicity (hatched area : meltdown temperature zone).

よび滴下にいたる場合を想定したもので予備還元温度が 1200°C の場合に比較して一般に予備還元率が高い。

3種のペレットの溶け落ち試験結果を比較すると、予備還元率にあまり差を生じないため大体同じような溶け落ち挙動を示すが、塩基度の異なる6種類の焼結鉱ではかなり差を生じ、Fig. 5 からわかるように滴下開始温度は塩基度の増加により上昇している。また低塩基度領域では溶け落ちに要する時間が非常に長くなり wustite 段階試料のパターンに似ているのがわかる。これは塩基度および予備還元率が低いためである。高塩基度領域では脈石融点が高いなどの理由により滴下温度は急激に上昇している。また塩基度が 1.8 付近以上になるとメタルは滴下するが、スラグの一部は白色の粉末となりルツボ内に残留する現象が観察された。

3.4.2 予備還元温度が 1200°C の場合

この場合は還元停滞現象を起こしやすい温度で予備還元を行なつたため、高温還元性の差により溶け落ち挙動もかなり異なってくる。すなわち 1100°C では同じような溶け落ち挙動を示した3種のペレットでも高温還元性の悪い酸性ペレット C では溶け落ち開始温度が低く、滴下時間が極端に長くなつている。また脈石量の異なる両工場ペレットでは還元率の差により高脈石量ペレット A の滴下温度が 1100°C の場合より低くなつている。

いつぼう 6種類の焼結鉱では予備還元温度が 1100°C の場合とよく似た溶け落ち挙動を示すが、一般に滴下に要する時間が長くなる。

以上の結果より、予備還元温度が 1200°C の場合の特徴を整理すると次のようになる。

(1) 1100°C の場合に比較して一般的に滴下時間が長くなる。これは未還元 wustite が多く、コークスとの

Table 4. Meltdown temperatures of A pellets reduced under various conditions.

Condition of prereduction	Reduction degree (%)	Meltdown temp.(°C)	
		Start	End
1000°C x 30 min	29	12 60	13 50
60 "	32	12 80	14 20
120 "	65	13 20	13 70
180 "	79	13 60	14 20
1100°C x 30 min	10	13 50	14 40
60 "	36	13 60	14 30
120 "	78	14 00	14 30
180 "	89	13 60	14 40
1200°C x 30 min	15	13 20	14 10
60 "	25	13 20	13 80
120 "	31	13 70	14 70
180 "	28	14 20	14 80

反応で生成した CO ガスによるフォーミングなどの影響が大きいことによるものと考えられる。

(2) 1100°C の場合には塩基度の影響が大きい、1200°C では影響が小さくなる。これは 1200°C においては試料によつて還元率に差が生じやすく、未還元 wustite の影響が試料によつて異なつてくるためである。

3.4.3 溶け落ち挙動におよぼす予備還元条件の影響

予備還元条件の影響をさらに詳細に調査するため工場ペレット A を用いて数種の予備還元履歴を受けた試料の溶け落ち挙動を調査した。試験結果を Table 4 に示す。

予備還元温度が 1000°C の場合は還元時間の増加とともに還元率は上昇し、そのため溶け落ち温度は高く、溶け落ちに要する時間は短くなる傾向にある。この傾向は予備還元温度が 1100°C の場合も同様である。1250°C で還元停滞を起こした試料はいずれも還元率は低い、還元時間の短い場合は溶け落ち温度が低く、溶け落ちに要する時間は長い。いつぼう還元時間の長い場合には溶け落ち温度が高く、所要時間も長いという特徴がある。これは試料の外周に生成する金属鉄 shell の sintering 程度に関係し、還元時間が長くなると金属鉄 shell は強固なものとなる。したがつてそれが溶融しないと内部の低融点スラグが滲出しにくいため滴下温度は逆に上昇したのと考えられる。

以上のように溶け落ち挙動は予備還元率だけでなく、予備還元温度および時間によつても大きな影響を受けることが判明した。

4. 考 察

以上の試験結果に基づいて各種装入物の高温還元性

状、スラグ滲出現象および溶け落ち性状について考察し、各性状の相互関係や理想的な装入物の高温性状などを検討してみる。

4.1 高温還元性状およびスラグ滲出現象について

高温還元性状はペレットの品質によつて大幅に異なり、関係する因子として次の諸点があげられる。

- (1) ペレットの脈石組成
- (2) ペレットの脈石量とその分布状況
- (3) 還元時 shell 部の金属鉄粒子の sintering 作用
いつぼうスラグ滲出現象に関連する因子としては、
 - (1) 未還元 wustite 量
 - (2) shell 部の金属鉄粒子の sintering 程度
 - (3) 脈石組成および量

などが考えられる。その中でもとくに未還元 wustite 量(還元率)が大きな因子となることが判明したので、スラグ滲出現象は高温還元性状と密接な関係があるといえる。

ここで両性状に大きな影響をおよぼす低融点スラグの発生に関連させ、還元途中の未還元 wustite および脈石中の SiO₂ と CaO が共存する場合を Fig. 6 に示した FeO-SiO₂-CaO 系状態図¹⁵⁾で検討してみる。同図で斜線部分の 1250°C における液相領域は wollastonite-olivine-fayalite にまたがる広い範囲におよんでおり、還元温度が 1250°C の場合には低融点スラグの発生は比較的容易である。低融点スラグが発生すると、気孔の閉塞を伴つて還元ガス拡散の抵抗となるばかりでなく、やはり還元ガス拡散の抵抗となる金属鉄粒子の sintering も液相存在のため促進されるという結果になる。

低融点スラグ発生のおもに脈石量とその分布状態に依存し、脈石組成が一定ならば脈石量が多いほど、

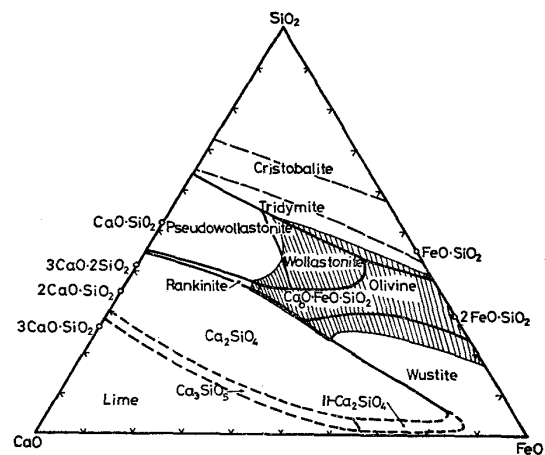


Fig. 6. Phase diagram for FeO-CaO-SiO₂ system¹⁵⁾. The hatched area is the liquid region at 1250°C.

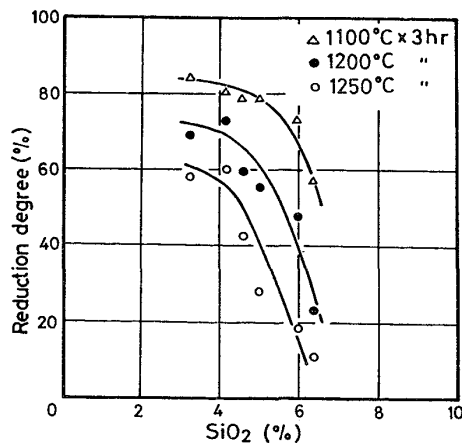


Fig. 7. Relation between final reduction degree at various temperatures and SiO_2 content of pellets.

またその分布状態が細かく均一なほど、発生頻度が高いことになる。また Fig. 3 からわかるように塩基度の影響も大きく、とりわけ塩基度の低い場合には wustite と脈石中 SiO_2 とが反応して fayalite ($2\text{FeO}\cdot\text{SiO}_2$) を生成し、これが低融点 (1205°C) であることにより低融点スラグが発生し易くなる。

本実験範囲でペレット中の SiO_2 含有量と還元率の関係を整理すると Fig. 7 のようになり、 SiO_2 量が 4~6% 付近で急激に還元率が低下する。

焼結鉱とペレットを比較すると、焼結鉱のほうが脈石量が多いにもかかわらず高温還元性は良好である。この理由として製造プロセスによるものが大きく、(1) 塩基度の差、(2) 脈石成分の分布状態の差および (3) 形状の差などが考えられる。とりわけ微粉原料を使用するペレットは組織が均一であるため低融点スラグの発生頻度は高いと考えられる。しかしながらペレットの特徴である組織の均一性を有効に利用し、脈石組成および量を調整することにより高温還元性状を改善することが可能であり、高温還元性およびスラグ滲出現象の改善のためにはペレットの脈石量の減少および脈石融点の上昇（例えば塩基度の上昇、 MgO 添加など）を目指す必要がある。

4.2 ペレットの溶け落ち性状について

ペレットの溶け落ち性状にはペレット固有の特性（脈石組成や脈石量）および予備還元条件などに加えて溶融時の状況（スラグ中 (FeO) とコークスとの反応やコークス層の通液性など）が複雑に影響を与える。それらの因子の影響を明らかにする意味で次の整理を行なった。

4.2.1 塩基度の影響

Fig. 8 に予備還元温度が 1100°C の場合について脈

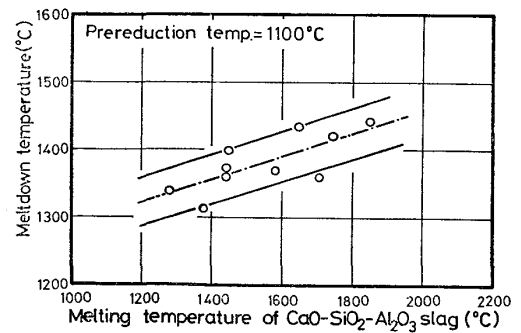


Fig. 8. Relation between meltdown temperature and melting temperature of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ slag.

石組成から求めた脈石融点 ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 3 元系状態図の液相線温度) と溶け落ち温度 (滴下量の半量が滴下した温度) との関係を示す。同図より脈石融点と溶け落ち温度には密接な関係が認められ、予備還元率が高く脈石融点におよぼす未還元 wustite の影響が比較的小さい場合には溶け落ち温度は脈石融点の関数として整理できる¹⁶⁾。脈石融点と塩基度は密接な関係があるため高炉内で順調に還元を受け、比較的高還元率に達した試料の溶け落ち挙動におよぼす塩基度の影響は大きい。いつぼう装入物が急速に加熱されたような場合には未還元 wustite の影響が大きくなり、塩基度の影響は小さくなる。しかしこの場合でも塩基度が高い試料では、溶融および半溶融状態におけるスラグ中 wustite の還元性が良好¹⁷⁾なため脈石融点降下におよぼす未還元 wustite の効果は小さくなると考えられる。

4.2.2 予備還元条件の影響

本実験結果からわかるように比較的低温で予備還元を行なった場合には予備還元率の増加に伴い溶け落ち温度は上昇する¹⁸⁾。これは溶け落ち挙動におよぼす未還元 wustite の効果が減少するためである。

いつぼう、還元停滞現象が起こるような高温で予備還元時間が短い場合、試料外部に生成する shell 部の sintering 程度も小さく、溶け落ち挙動も予備還元率の低い場合に類似している。しかし予備還元時間が長い場合には shell 部の sintering が進行し、試料内部に生成した低融点スラグが shell 部に滲出しにくい状態となる¹⁹⁾。この場合には shell 部の溶融温度を支配する脈石融点降下におよぼす wustite の影響が小さくなり、溶け落ち温度は逆に高くなるものと考えられる。

以上のように溶け落ち挙動におよぼす予備還元条件の影響は単純に予備還元率だけでは整理できず、予備還元温度や時間によっても大きく左右される。

4.2.3 溶け落ち性状の評価

この問題は高炉高温帯における装入物の溶け落ち挙動が高炉操業におよぼす影響を十分に考慮して検討する必要があるが、ここでは炉内通気性および炉熱の両面から定性的に検討する。

炉内通気性は高炉操業面からみると最も重要な因子の1つであり、圧損が少なくなる方向が望ましい。この点からすると装入物はより高温で軟化、溶融し、これに要する時間の短いことが要求される。

また炉熱の面からすると炉下部の炉熱の変動を少なくすることが必要であり、装入物の生下りなどは好ましくない。したがって装入物は還元条件などによっても溶け落ち性状があまり変化せずに高炉下部までガス還元が十分に進行するものが望ましい。

以上より装入物の溶け落ち性状としては(1)溶け落ち温度が高いこと、(2)溶け落ち開始から終了にいたる温度幅が狭いことが必要となってくる。この方向に沿ってペレットでは脈石組成および脈石量を変化させることによつて溶け落ち性状を改善できると考えられる。

5. 結 言

高炉装入物、特にペレットの高炉下部高温帯における挙動を把握するため高温還元性状、含(FeO)スラグの滲出現象および溶け落ち性状を実験室的に調査し、以下のような結果を得た。

(1) 1200°~1250°Cの高温におけるガス還元挙動は各種装入物によつて大きな差を生じ、ある試料では還元停滞現象を呈し、還元が進行しない。

(2) 還元途中の装入物を1300°~1400°Cの高温で保持すると、試料内部に生成した含(FeO)溶融スラグが試料表面に滲出する現象が認められた。

(3) 溶け落ち性状試験では各種装入物によつて溶け落ち温度および溶け落ち開始から終了にいたる温度幅が変化する。

(4) これらの高温性状を左右する因子として装入物の固有の性質(脈石組成や脈石量など)があげられ、溶け落ち性状には装入物の還元履歴も重要な因子となる。

(5) 個々の高温性状間には密接な関係があり、高炉

操業におよぼす影響を検討する場合には高炉内で連続的に進行する各現象を十分考慮することが必要である。

以上、高炉下部高温帯で炉内通気性や炉熱に大きな影響をおよぼすと予想される装入物の一連の高温性状の評価ならびに各性状間の関係を明らかにすることができた。

文 献

- 1) 神原健二郎, 萩原友郎, 重見彰利, 近藤真一, 金山有治, 若林敬一, 平本信義: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 535
- 2) 下村泰人, 西川 潔, 有野俊介, 片山 力, 肥田行博, 磯山 正: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 547
- 3) 佐々木稔, 斧 勝也, 鈴木 明, 奥野嘉雄, 吉沢謙一, 中村 隆: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 559
- 4) 佐々木寛太郎, 羽田野道春, 渡辺雅男, 下田輝久, 横谷勝弘, 伊東考夫, 横井 毅: 鉄と鋼, 62 (1976), p. 580
- 5) 梶川脩二, 隅田 昇, 吉越英之, 福島 勤, 鴨志田友男, 福山辰夫: 鉄と鋼, 59 (1973), A81
- 6) V. M. MURAV'EV, N. I. EFONOVA, I. D. BALON, I. Z. BUKLAN, and N. M. MISHENKO: *Stal in Eng.*, (1970), p. 591
- 7) 成田貴一, 前川昌大: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 318
- 8) S. KONDO, M. SUGATA and T. SUGIYAMA: *Proceedings ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ*, 11 (1971), p. 36
- 9) 江本房利, 館 充: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 1301
- 10) 和田亀吉, 児玉惟孝, 重見彰利: 鉄と鋼, 47 (1961), p. 1617
- 11) 佐々木晃, 片山英司, 荒谷復夫, 岡部俠児: 鉄と鋼, 59 (1973), A85
- 12) 李 海洙, 館 充: 鉄と鋼, 56 (1970), S36
- 13) K. D. HAVERKAMP, H. SCHULZ, and M. WAHLSTER: *Arch. Eisenhüttenw.*, 39 (1968), p. 319
- 14) A. N. POKHVISNEV, N. F. PASHIKOV, Yu. S. YUSFIN, V. V. PAN'SIN, and T. N. BAZILEVICH: *Steel in the USSR*, 2 (1972), p. 253
- 15) A. MUAN and E. F. OSBORN: *Phase equilibria among oxides in steelmaking*, (1965), p. 113 [Addison-Wesley]
- 16) 肥田行博, 斧 勝也, 重見彰利, 児玉惟孝: 鉄と鋼, 59 (1973), S33
- 17) 北村雅司, 金山宏志: 鉄と鋼, 60 (1974), S351
- 18) 須賀田正泰, 杉山 喬, 近藤真一: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1363