

杉山 健*・木村吉雄*・土屋 脩*²・西田礼次郎*³

Swelling Behavior of the Iron Ore Pellets with Lime Stone during Reduction

Takeshi SUGIYAMA, Yoshio KIMURA, Osamu TSUCHIYA and Reiziro NISHIDA

Synopsis:

The swelling of the Brazilian ore pellets during reduction is examined. In the sample pellets CaO/SiO₂ ratio and the amounts of CaO+SiO₂ are controlled from 0 to 1.5, 0.3 to 12 wt% respectively.

(1) The swelling ratio becomes less than 10 vol% at the reduction degree of 30% by using the pellets in which CaO/SiO₂ is more than unity and CaO+SiO₂ is more than 8 wt%.

(2) The volume of slag phase in pellets decreases during reduction. The hematite phase swells, due to the producing conditions.

(3) The higher the reduction temperature rises, the more the metallic iron swells in the beginning and afterwards the more rapidly it shrinks.

1. 緒 言

鉄鉱石ペレットの還元膨張（以後“ふくれ”）は、ヘマタイトからマグネタイトへの結晶変態に起因¹⁾し、ふくれに伴う強度低下が高炉内での微粉発生原因になつて悪影響をおよぼす²⁾。我が国でこの現象に注目されたのは、1964年日本に輸入されたマルコナ・ペレットの異常ふくれ³⁾が明らかになつてからである。以後の研究で、脈石成分量（以後、脈石量）の増加⁴⁾、塩基性化⁵⁾、高温焼成⁶⁾がふくれの低下に有効であり、さらに、異常ふくれは繊維状金属鉄の生成に起因⁷⁾し、ナトリウム⁸⁾、硫黄⁹⁾の存在によつて助長されることが明らかになつてきた。

このように、ふくれ現象はかなり解明されて、工業生産されているペレットのふくれは20%以下に留められ¹⁰⁾、異常ふくれを示すペレットはなくなつている。一方、著者ら¹¹⁾は化学組成と焼成温度によつて決まる焼成ペレットの結合組織によつて、ふくれ挙動が特色付けられることを示した。しかし、これまでの研究は還元時間を一定にし、一定組成の鉄鉱石にCaO成分を添加してCaO/SiO₂比を変化させているため、ふくれに対する還元率と脈石量の影響が交絡した条件で評価していた。したがつて、ペレット構成鉱物のそれぞれがふくれにどのように影響しているか明瞭になつていない。

Table 1. Chemical composition of Brazilian ore.

	Chemical composition (%)						CaO+SiO ₂ (wt%) in indurated pellets
	T. Fe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	
No. 1	69.50	0.02	0.13	0.59	0.05	0.02	For 0.3 wt%
No. 2	67.44	0.22	0.96	1.03	0.05	—	For 4.1 wt%
No. 3	67.84	0.29	2.60	0.35	0.03	0.02	For 7.8, 11.7 wt%

本報告は(CaO+SiO₂)量を0.3~11.7%内の4段階で一定にして、塩基度(CaO/SiO₂)と焼成温度を変えて試料ペレットを製造した。この代表的結合組織を有する石灰添加ペレットのふくれ挙動を調べることによつて、各種スラグ相、Fe_{1-y}O相、金属鉄相のふくれに対する影響を明瞭にした。

2. 実験方法

2.1 試料ペレットの作成方法

ペレット原料として、Table 1の化学組成のブラジル産鏡鉄鉱石、石灰石、試薬珪砂を使用した。ブラジル産鏡鉄鉱石は鉄品位が高いため脈石量の調整が容易であり、比較的大きなふくれを示す銘柄であるため¹⁰⁾、構成鉱物のふくれに対する影響が明確にしやすいために使用した。

焼成ペレットの塩基度と脈石量(CaO+SiO₂)が所定の値になるように配合して造粒原料にする。小型のタイヤ型ペレタイザー（直径46cmφ）で転動造粒し、直径約16mmφの生ペレットを製造する。大気乾燥（約2

昭和49年11月本会講演大会にて発表 昭和60年8月29日受付 (Received Aug. 29, 1985)

* (株)神戸製鋼所材料研究所 (Materials Research Laboratories, Kobe Steel, Ltd., 1-3-18 Wakinohama-cho Chuo-ku Kobe 651)

*² (株)神戸製鋼所エンジニアリング事業部 工博 (Engineering Division, Kobe Steel, Ltd.)

*³ (株)神戸製鋼所技術情報企画部 (Technical Information & Planning Department, Kobe Steel, Ltd.)

Table 2. Kind of bonding structure of pellets.

Bonding type	Production condition		Bonding structure
	Temp. (°C)	CaO/SiO ₂	
A	1 200	0	Primary hematite bond
B	1 300	0	Secondary hematite bond
C	1 250	0.5	Low basicity slag bond
D	1 300	1.0	Middle basicity slag bond
E	1 200	1.5	Calcium ferrite bond
F	1 300	1.5	High basicity slag bond

Table 3. Analysis of the slag in the pellet.

Bonding type	Kind of slag	Fe ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	C/S	A : B
C	A	33.22	18.13	48.65	0.37	66.4
	B	15.28	36.40	48.32	0.75	33.6
D	A	22.69	33.66	43.71	0.77	42.0
	B	29.37	39.04	31.59	1.24	58.0
E	A	73.39	17.58	9.03	1.95	72.4
	B	16.56	45.84	37.61	1.22	27.6
F	A	1.46	68.83	29.71	2.32	16.3
	B	14.71	49.28	36.01	1.37	83.7

日) した後、所定温度に昇温した電気炉へ 30 min かけて挿入し、30 min 保持した後、再び大気中へ 30 min かけて取り出す方法により焼成した。ここで、焼成電気炉へ空気を 3 l/min 流し、1 回の試料ペレットは約 15 個である。

Table 2 に示す 6 種類の焼成温度と塩基度の条件で製造することによつて、代表的な結合組織を有する焼成ペレットを作成した¹²⁾。このペレットのスラグ相を EPMA による点分析 (Table 3) したところ、いずれの石灰添加ペレットも 2 相のスラグが存在し、C タイプペレットは低塩基度スラグ、D タイプペレットは中塩基度スラグ、E タイプペレットはカルシウム・フェライト (C・F)、F タイプペレットは高塩基度スラグの存在を確認した。

2.2 ふくれの測定方法

還元中のふくれと還元率を同時に測定する目的で、反応管下部からペレットを観察できる熱天秤形式の堅型電気炉を使用した¹³⁾。

電気炉上部の天秤から吊るした白金線バスケット (線径 0.5 mmφ) にペレット 1 個を入れ、均熱部に置く。N₂ 気流中で所定温度まで昇温し、還元ガス (CO/N₂=30/70, 4 l/min) に切り換えて 210 min 還元した後、再び N₂ 気流中で冷却する。

還元温度はペレット直上 5 mm に設置した熱電対 (PR 13) で制御した。還元率は重量減少量より算出した。

還元中の体積変化は、電気炉下部から写真撮影したペレットの投影断面積 (A) を用いて次式より求めた。

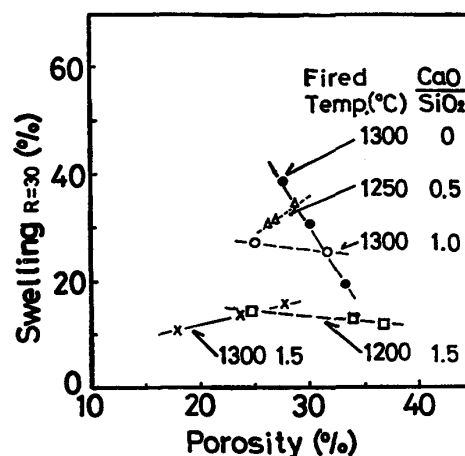
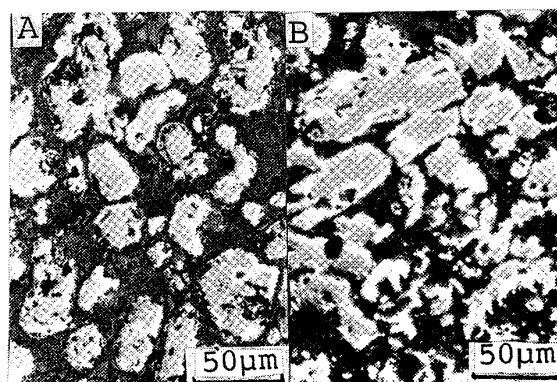


Fig. 1. Effect of the porosity on the swelling of the pellets reduced to 30% at 900°C.

Indurated temperature CaO/SiO₂

A 1 300°C 0

B 1 200°C 1.5

Photo. 1. Optical microstructures of the pellets reduced at 900°C.

$$A = a \cdot W, V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (A/\pi)^{3/2} = K \cdot A^{3/2}$$

$$S_W = (V - V_0)/V_0 = (W/W_0)^{3/2} - 1$$

ここで、 W : ペレット断面写真の重量、 V : 断面積 A の球体積、 S_W : ふくれ、 a, K : 比例定数、添字 0: 還元開始時

2.3 ふくれの補正法

本測定法と水銀置換法¹⁴⁾で求めたふくれに、大きな差のなる場合があつた。

この原因は、本測定法が①大クラックもふくれに含み、②一方向測定に起因する体積算定誤差を含み、③写真輪郭が不鮮明になるためと考える。

下部からに加えて横から同時に写真撮影をした結果、著しい場合には、10 数%のふくれ差を示し、上記②に原因する誤差の入ることが認められた。

そこで、水銀置換法で求めた還元後のふくれを真の値とみなして、本測定法で得られた値を補正した。すなわち、還元後に水銀置換法で測定したペレット体積の球相

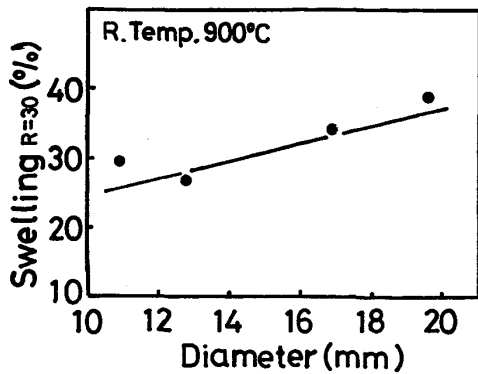
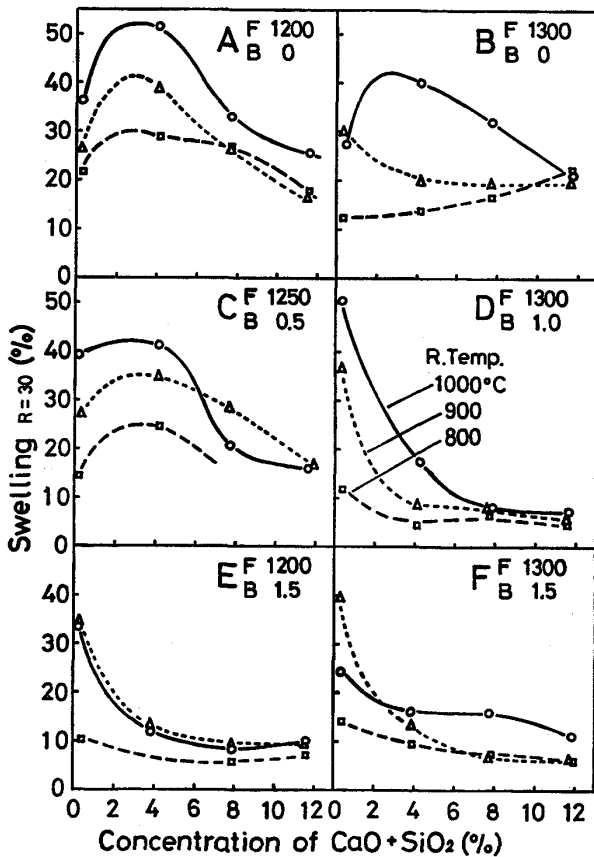


Fig. 2. Effect of the diameter on the swelling of the pellets (CaO/SiO₂=0) reduced to 30% at 900°C.



F: Induration temperature (°C), B: CaO/SiO₂

Fig. 3. Effects of the concentration of CaO+SiO₂ (%) in each kinds of pellets on the swelling at 30% of reduction degree.

当半径と本測定法による球相当半径との比は、還元中も一定と仮定して、次式より補正ふくれを求めた。

$$S_C = (S_W + 1) \cdot (S_{MF} + 1) / (S_{WF} + 1) - 1$$

ここで、S: ふくれ (%), 添字 W: 写真撮影法, C: 補正写真撮影法, M: 水銀置換法, F: 還元後

この補正ふくれは還元を中断して水銀置換法で求めた値と良い一致が見られたので、以後、本測定法と水銀置換法を併用した。

3. 実験結果と考察

通常のふくれ挙動は還元率約 30% で最大値を示した後に収縮し、異常ふくれはこれ以上の還元率で大きなふくれを示す¹⁵⁾。ここでは、通常ふくれ挙動に着目し、最大に近いふくれを示す還元率 30% でのふくれを主体に検討した。

3.1 気孔率の影響

脈石量 7.8 wt% のペレット原料へ焼成時に焼失するデキストリン粉末を添加して、気孔率が大きく変化したペレットを製造した。

900°C 還元時のふくれ (還元率 30% 時) と焼成ペレットの気孔率との関係を Fig. 1 に示す。Bタイプペレットは気孔率 1% の上昇につき、ふくれは 3.4% 低下するが、塩基度が 0.5, 1.0, 1.5 と上昇すると気孔率依存性は小さく、これらには一定の傾向はない。

Bタイプペレットのこの挙動は、Photo. 1 のごとく焼成ペレットのヘマタイト結合部が還元により分断されていることから、鉱石粒子が動きやすくなり、各鉱石粒子の体積増加が気孔に吸収されたためと考える。一方、スラグ結合しているCからFタイプペレットの気孔率によるふくれの変化は、還元速度、Fe_{1-y}O 生成量などの差によると推定されるが、本研究では明瞭になっていない。

3.2 ペレット径の影響

ペレット径以外の影響が少なく、ふくれの大きな脈石量 0.3% のAタイプペレットを試料に供した。

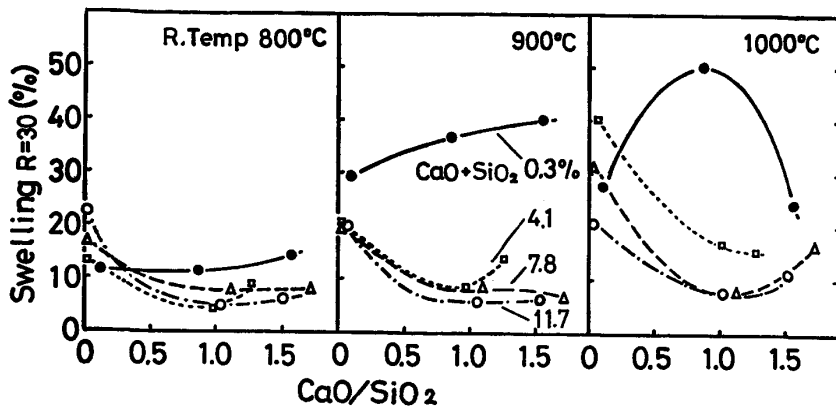
還元温度 900°C のふくれ (還元率 30% 時) は、Fig. 2 のごとく大粒径ほど大きい。

一定還元率のふくれ比較であるため、粒径が異なってもペレット内に生成する各酸化度粒子の存在比率が同じであれば、同一のふくれを示すであろう。しかし、本試験の結果では、大粒径ペレットほどマグネタイトまたは低還元率のウスタイトが多く生成していると推定できる。

3.3 脈石成分の影響

A~E の代表的な結合組織ペレットのそれぞれについて、脈石量を 0.3, 4.1, 7.8, 11.7±0.1% に変化させて、ふくれ (還元率 30% 時) を測定し Fig. 3 の結果を得た。

Aタイプペレットは 800~1000°C の各還元温度と共に脈石量 4.1% で極大ふくれを示し、さらに脈石量が



Indurated temperature 1300°C
Fig. 4. Relationship between CaO/SiO₂ in pellets and the swelling at 30% of reduction degree.

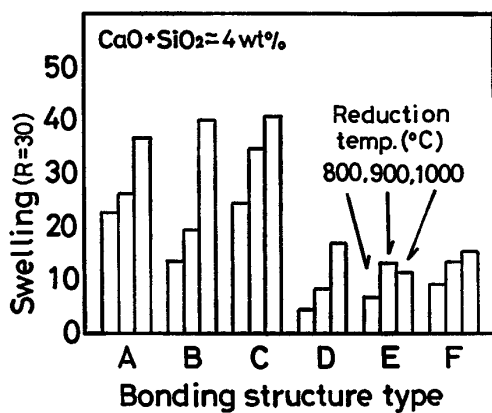


Fig. 5. Comparison of the swelling among each kinds of pellets with 4 wt% of CaO+SiO₂ reduced to 30%.

増加するとふくれは低下する。焼成温度が高いBタイプペレットは還元温度1000°CのみAタイプペレットと同様の傾向を示し、900°Cでは単調な低下、800°Cではやや上昇を示す。従来の研究の脈石量の増加がふくれを低下させるという報告⁶⁾は、脈石量1%以上のBタイプペレットに相当するものである。

CタイプペレットもAタイプペレットと同様の挙動を示す。D、E、Fタイプペレットは、いずれも脈石量の増加により、ふくれは低下する。

以上より、低塩基度ペレットでは微量の脈石量より4%程度の脈石量の方が大きくふくれることがわかった。

3.4 塩基度の影響

焼成温度1300°Cのペレットのふくれ(還元率30%)と塩基度の関係をFig. 4に示す。

脈石量4.1%以上では、類似したふくれの塩基度依存性を示し、塩基度1.0で極小のふくれを示す。この原因は塩基度1.0のペレットが極小の気孔率であり、被還元性に劣る中塩基度スラグが生成しているため、ペレットの表面近傍で還元が進行しふくれに寄与する体積

が少ないためである。

従来研究¹¹⁾¹⁵⁾の塩基度1.0以上でこれが高いほどふくれが低下するという報告との差は、従来研究はSiO₂量が一定であるため、塩基度の上昇はCaO+SiO₂量も同時に増加しているためと考える(Fig. 6参照)。

脈石量0.3%のペレットを900°Cで還元すると大きなふくれのレベルにあり、塩基度が高いほど大きくふくれる。この原因はふくれの小さなスラグ量が少ないこと、CaOの存在が還元速度を上昇させ²⁰⁾酸化鉄に微細クラックが多く発生したためと推定するが、詳細な検討は今後の課題である。塩基度1.0のペレットを1000°Cで還元した時の大きなふくれはクラックの発生による。

脈石量4.1%のペレットで、統合組織によるふくれの比較を行った(Fig. 5)。この結果、高塩基度スラグの存在がふくれの低下に大きく寄与することが明らかになる。

塩基度と脈石量のふくれに対する影響を一図に示すと、Fig. 6のごとく、CaO量の増加がふくれの低減に有効なことが明瞭になる⁶⁾。

3.5 ペレット構成鉱物のふくれ

前節までに、各種のふくれ挙動を明らかにしたが、どのペレット構成鉱物がふくれに影響しているのか明確でないため、本節ではFe(II)、金属鉄および各種結合組織のふくれに対する影響を分離して調べた。

3.5.1 Fe(II)生成の影響

試薬ヘマタイトを1300°C、空气中で30min予備焼成し、プレーン指数2800cm²/gに粉碎した酸化鉄を原料にして、直径16mmφに造粒する。これを1250°C、30min空气中で焼成し、試料にした。

CO/CO₂=60/40の還元ガスで還元率約28%まで700~1050°Cで還元し、この時のふくれを水銀置換法で測定した。測定の結果をTable 4に示す。

化学分析値より、いずれの試料もFe(III)が存在する

Table 4. Chemical composition and the reduction properties of the reduced pellets.

Reduction Temp. (°C)	Time (min)	T. Fe	Fe (II)	Fe (III)	Reduction degree (%)	Swelling (%)
700	211	74.35	58.27	16.08	27.5	15.3
750	158	74.50	54.36	20.14	28.5	19.4
800	127	74.17	56.69	17.48	28.4	26.4
850	110	74.57	56.32	18.25	28.4	33.8
900	87	75.29	58.45	16.84	28.5	30.0
950	50	73.72	49.80	23.92	28.4	39.4
1 000	50	74.28	56.13	18.15	28.5	45.2
1 050	50	74.28	56.50	17.78	28.4	35.9
900	15	73.44	44.12	29.32	13.3	26.4

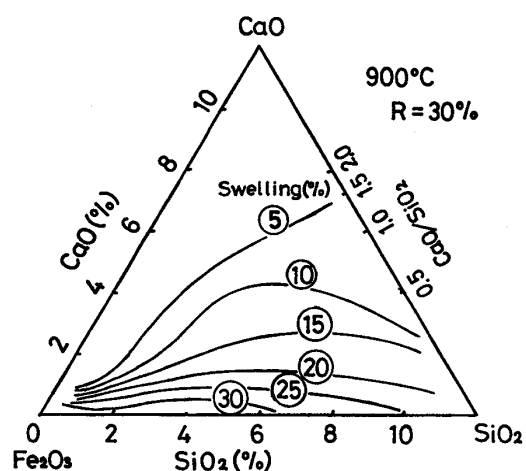


Fig. 6. Equi-swelling diagram at 900°C of reduction temperature.

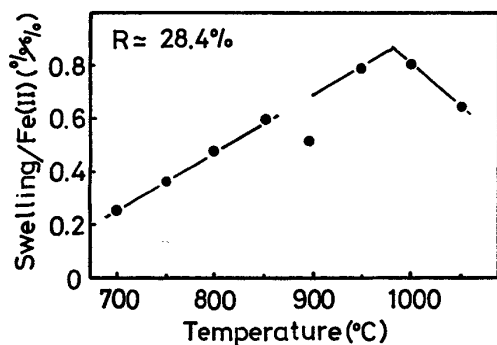


Fig. 7. Effect of reduction temperature on the swelling of acid pellets reduced to wustite.

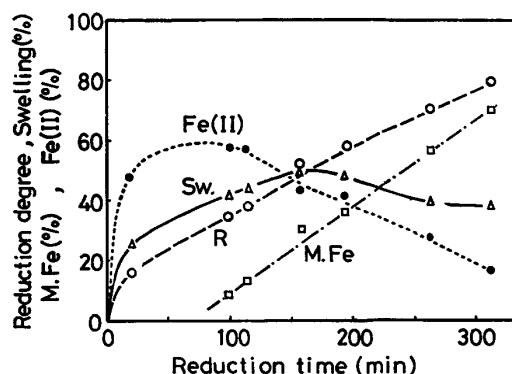


Fig. 8. Changes in the concentrations of Fe(II) and M. Fe, the swelling and the reduction degree of acid pellets.

ためマグネタイトとウスタイトが共存していることがわかる。

マグネタイトとウスタイト間の格子変態は可逆的に起こり⁴⁾、ここでの体積変化は小さいとみなされるため¹⁷⁾、ここでは、生成した Fe(II) 量当たりのふくれとして整理した。また、還元時間が還元温度によつて異なるため、焼結の効果が各試料間で異なるが、ここではこの効果も含んだ評価をする。

試験の結果は Fig. 7 のごとく還元温度が 700°C から 1000°C へ上昇すると、Fe(II)1% 当たりのふくれも上昇し、1000°C 以上では低下する。ところが、900°C の値は 700~1000°C のふくれの温度依存性より低い値を示す。H. B. EDWARDS¹⁷⁾ らによれば、マグネタイトまでの還元において、825°C で極小のふくれを示すと報告しており、その原因はクラックの発生が低下することによると述べている。本試験の結果も同様の原因と考えられる。

3.5.2 金属鉄の体積変化

前項と同一試料を 800, 900, 1000°C で CO/N₂=30/70 の還元ガスを使つて、各還元率まで還元した。還元後試料の全鉄、金属鉄、Fe(II) を化学分析し、ふくれと還元率を測定した (Table 5)。還元温度 900°C の

Table 5. Chemical composition and the reduction properties of the reduced pellets.

Reduction Temp. (°C)	Time (min)	T. Fe	Fe (II)	Fe (III)	M. Fe	Reduction degree (%)	Swelling (%)
900	20	73.82	47.38	25.69	0.74	16.3	25.3
900	101	76.46	57.15	9.90	9.40	33.0	41.2
900	119	78.00	57.15	7.73	13.12	39.9	44.3
900	163	82.10	42.82	7.82	31.46	52.5	51.5
900	198	82.75	41.70	7.17	33.88	58.5	46.3
900	269	86.94	25.97	5.31	56.04	69.6	38.9
900	316	91.13	17.22	4.37	69.53	79.8	38.6
800	121	79.31	44.85	13.61	20.85	50.4	22.2
800	198	89.92	19.23	3.85	66.84	80.2	17.9
1 000	74	80.98	46.36	8.93	25.69	50.3	96.7
1 000	128	88.43	24.21	3.99	60.23	80.8	130.4

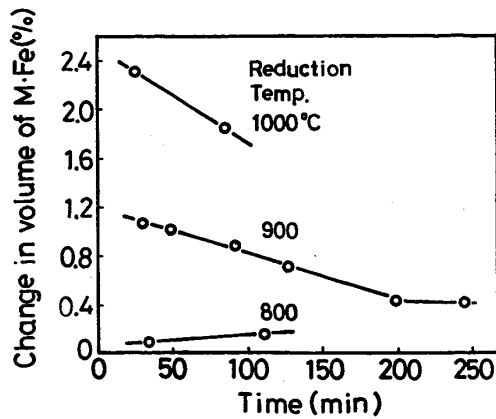


Fig. 9. Effect of the reduction time and temperature on the volume of metallic iron.

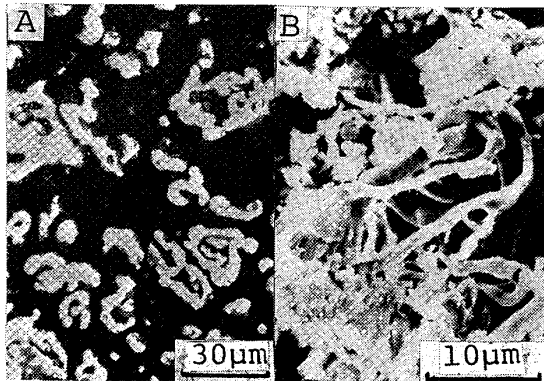


Photo. 2. Optical microstructures (A) and SEM photograph (B) of the pellets reduced at 1000°C.

測定結果 (Fig. 8) は、本試料が通常ふくれを示し、金属鉄の生成量が多くなると収縮段階に入ることを示している。

前項で得られた Fe(II) (%) 当たりのふくれを使つて、金属鉄 1% 当たりのふくれを計算した。前項の値は Fig. 8 からわかるように、最大 Fe(II) 生成時間で得られたものであるため、本検討の代表値として使用した。

計算の結果 (Fig. 9)、金属鉄生成温度が高いほど大きなふくれを示し、生成後の還元時間が長くなるほど還元温度 900, 1000°C では直線状にふくれが低下する。800°C ではわずかにふくれの上昇が認められる。

還元温度が高いほど大きなふくれを示す理由は、還元速度の上昇と酸化鉄中の Fe 原子が移動しやすくなることによつて、繊維状金属鉄が生成しやすくなつたため¹⁸⁾と還元後ペレットの顕微鏡観察 (Photo. 2) から判断する。

3.5.3 昇温還元時のふくれ

(株)神戸製鋼所加古川製鉄所で製造されたドロマイト

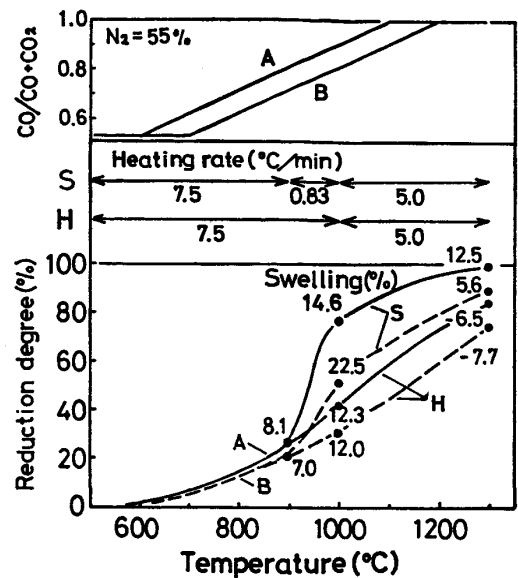


Fig. 10. Swelling behavior under the various kinds of reduction conditions.

ペレットを高炉のガス組成と温度に近似した条件で昇温還元し、各温度のふくれを水銀置換法で測定した (Fig. 10)。

900°C から 1000°C への昇温還元条件によつて、ふくれ挙動が異なる。昇温速度の小さいパターン S では還元率が低いにもかかわらず、還元ポテンシャルの低い条件 (B) の方が、高い条件 (A) より 1000°C のふくれが大きい。この挙動は、還元ポテンシャルが低いと $Fe_{1-y}O$ が多量に生成し、金属鉄の生成が高温寄りになつて、その収縮時間が短いため大きな 1000°C のふくれになり、一方、還元ポテンシャルが高いと、金属鉄生成開始温度が低く、その量も多くなるため小さなふくれになると解釈できる。

急速昇温パターン (H) では、ガスの還元ポテンシャルの影響が小さく、1000°C のふくれも小さい。

1000°C 以上では還元速度が大きいほど、ふくれの低下量が大きく、 $Fe_{1-y}O$ および金属鉄の焼結によるふくれ低下の効果が現れている。

3.5.4 結合組織の影響

塩基度と焼成温度によつてふくれが大きく異なることを 3.3 に示したが、その原因が単にスラグ相のふくれの差のみによるものか明らかでない。そこで、焼成ペレット中のスラグ相と酸化鉄相のふくれに対する影響を分離して検討した。両相の体積割合はスラグ相の分析値 (Table 3) と各酸化物の真比重 (SiO_2 2.5, CaO 3.2, Fe_2O_3 5.2, Al_2O_3 3.4) より求めた。

脈石量 4.1% と 7.8% の各同一結合組織ペレットごとに、次式を連立させて、酸化鉄相とスラグ相の各単位

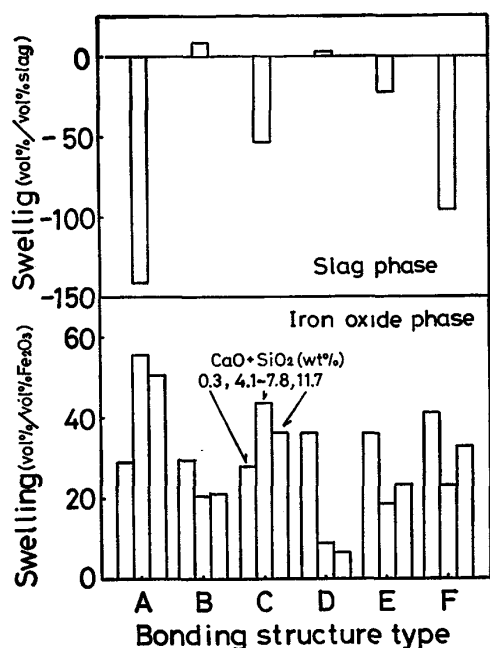


Fig. 11. Comparison of the swelling during reduction among each kinds of slag phase and iron oxide in the pellets reduced to 30%.

体積当たりのふくれを算定した。この計算は、脈石量 4.1 と 7.8% の酸化鉄とスラグ相がそれぞれ同一のふくれを示すことが前提になる。

$$V_{H \cdot n} \times \alpha_H + V_{S \cdot n} \times \alpha_S = S_n$$

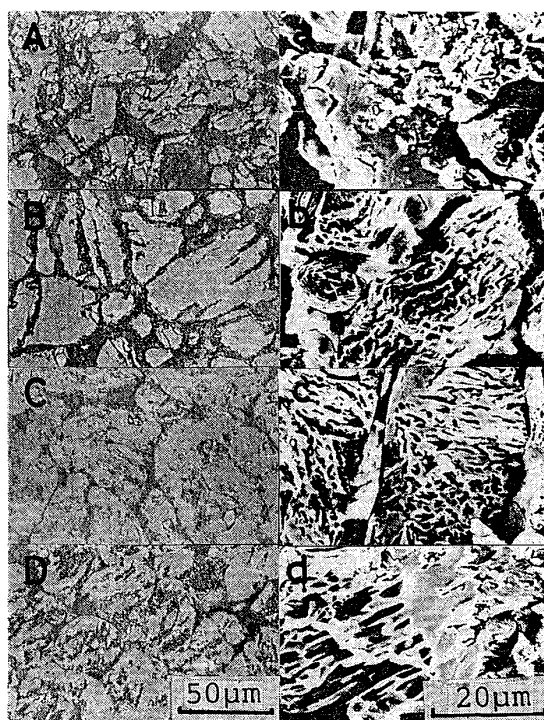
ここで、 V ：体積割合 (%)， S ：ペレットのふくれ (%)， α ：単位体積当たりのふくれ (%)，添字 H ：酸化鉄相， S ：スラグ相， n ：脈石成分量

スラグ相の単位体積当たりのふくれは、脈石量 0.3%，11.7% においても変化しないとして、この脈石量における酸化鉄相のふくれを計算した。

スラグ相のふくれは Fig. 11 のごとく、A, C, E, F タイプペレットは負の値を示し、B, D では体積変化がない。塩基度 0 (A, B タイプ) では、焼成温度 1200°C で大きな収縮を示すが、焼成温度 1300°C になると体積変化が小さくなる。

脈石量 4.1, 7.8% ペレットの酸化鉄相のふくれはスラグ相の種類によつて大きく異なっている。このことから、スラグ相は酸化鉄相の還元形態にも大きな影響を及ぼす、たとえば、C タイプペレットのふくれが大きい原因はスラグ相でなく酸化鉄相であると理解される。この傾向は、脈石量 11.7% でも同様であるが、脈石量 0.3% では酸化鉄のふくれに対するスラグ相の影響は小さい。

このことより、スラグ相と酸化鉄相が十分に接触できる脈石量 4.1% 以上では、スラグ相と酸化鉄相のふく



Mark : Indurated temperature (°C)-CaO/SiO₂
A, a : 1300-0 B, b : 1250-0.5 C, c : 1300-1.0
D, d : 1200-1.5

Photo. 3. Optical microstructures (A-D) and SEM photographs (a-d) of the each kinds of pellets reduced to 28%.

れは同一種のスラグ相であれば類似しており、本計算に大きな誤差はないとみなし得る。

スラグ相のちがいによる酸化鉄相のふくれの差を、還元率 28% まで CO/N₂=60/40 で還元した各結合組織ペレット (脈石量 7.8%) の組織観察から検討した (Photo. 3)。

B タイプペレットの酸化鉄 (Fe_{1-y}O) 粒子には多数のクラックが存在し小粒子に分離している。この小粒子間空隙が比較的大きなふくれを示す原因であろう。C タイプペレットは Fe_{1-y}O 粒子のクラック数は少ないが、クラック間隙が大きく、大きなふくれの原因になる。

一方、D タイプペレットでは Fe_{1-y}O 粒子の外形は焼成時の形を留め、粒子内に空隙が生成しているため、小さなふくれを示すと理解できる。

以上の組織観察より、酸化鉄相が結合組織によつて異なるふくれを示す原因は、クラックまたは気孔の生成機構が Ca⁺⁺ イオンの固溶によつて変化するため¹⁹⁾と考える。

4. 結 言

石灰添加ペレットのふくれ挙動を還元率 30% で検討し、次の知見を得た。

(1) CaO/SiO_2 比を 1.0 以上にし, $\text{CaO}+\text{SiO}_2$ 量を 8% 以上にすると, 10% 以下のふくれにできる.

(2) 高い還元温度で生成する Fe_{1-y}O ほど大きなふくれを示すが, 1000°C 以上ではふくれが低下する.

(3) 異なる結合組織を有するペレットでは, スラグ相のふくればかりでなく, 酸化鉄相も異なるふくれを示す.

(4) $900, 1000^\circ\text{C}$ で生成した金属鉄は, 生成後の時間に比例して収縮する.

文 献

- 1) J. O. EDSTRÖM: J. Iron Steel Inst., 179 (1953), p. 289
- 2) J. STALHED and R. LINDER: Medd. Jernkont., No. 209 (1955)
- 3) 児玉惟孝, 重見彰利, 堀尾竹弘: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 327
- 4) 神原健二郎, 宮川一男, 沖川幸生, 藤田慶喜: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 586
- 5) 児玉惟孝, 重見彰利, 斧 勝也, 堀尾竹弘, 東辰男: 製鉄研究, 251 (1965), p. 5761
- 6) 石光章利, 菅原欣一: 鉄と鋼, 50 (1964), p. 1888
- 7) 渡辺正次郎, 吉永真弓: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 583
- 8) 中沢孝夫, 佐々木稔, 伊藤 薫, 近藤真一: 鉄と鋼, 58 (1972), p. 1039
- 9) 林 昭二, 井口義章, 平尾次郎: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1311
- 10) 土屋 脩, 小野田守, 藤田勇雄: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 349
- 11) 土屋 脩, 大槻 健, 杉山 健, 小野田守, 藤田勇雄: 鉄と鋼, 66 (1980), p. 1057
- 12) K. KUNII, R. NISHIDA, H. KOIZUMI, O. TSUCHIYA and T. SUGIYAMA: Symposium on Pellets and Granules, New Castle, NSW, Australia (1974), p. 1
- 13) T. SUGIYAMA, M. ONODA and I. FUJITA: Ironmaking Proc., 37 (1978), p. 300
- 14) 日本工業規格 JISM-8716
- 15) L. GRÄNSE: Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 45
- 16) L. von BOGANDY and H.-J. Engell: The Reduction of Iron Ores (Springer-Verlag), p. 170
- 17) H. B.-EDWARDS, B. L. DANIELL and R. L. SAMUEL: JISI (1965) Apr., p. 361
- 18) 小林陸弘, H. W. グーデナウ, W. G. ブルヒャート, H. C. シェーファー: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1102
- 19) 井口義章, 井上道雄: 鉄と鋼, 65 (1979), p. 34
- 20) S. K. KHALATALLA, P. L. WESTON: Trans. AIME, 239 (1967), p. 1094