

焼結鉍組織と還元性状の関係

佐藤 勝彦*・鈴木 悟*²・沢村 靖昌*³・斧 勝也*⁴

Relation between Sinter Microstructures and Sinter Properties during Reduction

Katsuhiko SATŌ, Satoru SUZUKI, Yasumasa SAWAMURA, and Katsuya ONO

Synopsis :

Evaluation of sinter properties during reduction has been studied by a new method on quantification of sinter microstructure (mineral components and porosity).

(1) Reduction degradation index is expressed by number of 100~300 μm grain size of hematite.

(2) Reduction index is described by quantity of Ca-ferrite and porosity consisted of pore size less than 150 μm .

(3) Pressure drop during softening test under load is indicated by quantity of slag and total porosity. The pressure drop increases with increasing slag quantity and decreasing the total porosity.

(4) Temperature at beginning of melt-down is estimated by quantity of Ca-ferrite and total porosity.

The above results are not only statistical, but also substantial because these are supported by investigation during reduction. So these are applied to indices of sinter evaluation.

1. 結 言

焼結鉍の品質はその構成鉍物と気孔構造、すなわち組織で一義的に決まるものといえる。ところが従来、これら両者の関係を定量的に検討した研究は少ない¹⁾²⁾。焼結鉍の構成鉍物そのものについての研究は数多く報告されていることを見ると^{3)~7)}、このような研究が少なかつたのは組織の定量化手段を欠いていたためと考えられる。

もし焼結鉍の組織が迅速かつ定量的に把握できれば、望ましい品質の焼結鉍イメージも明確になり、焼結鉍製造に際して原料の選択や焼結操業条件の決定に寄与するところが大きい。

このため最近、焼結鉍の組織定量へも画像処理技術の応用が試みられている^{8)~14)}。しかし現在のところいまだ手法の開発や実機焼結鉍の測定に着手した段階で優良焼結鉍のイメージを描くに到っていないように考えられる。

本報ではこのような現状を踏まえ、最近進歩の著しい画像処理装置を用いて焼結鉍構成鉍物の自動分析を行

い、またいくつかの気孔構造の測定結果とあわせて、焼結鉍組織とその還元時の性状の関係について検討した。その結果、良好な還元性状を有するために焼結鉍の具備すべき組織条件について、2, 3の知見を得たので報告する。

2. 組織定量法

2.1 鉍物組成測定法の概要

焼結鉍の構成鉍物はヘマタイト、マグネタイト、カルシウムフェライトおよびスラグに大別される。これらの鉍物は光学的性質が異なっており、顕微鏡下での反射輝度レベルで識別できる。本報での測定方法は顕微鏡による1視野の反射光を50万個の画像素子(1.47 $\mu \times 1.47 \mu$)で検出し、それぞれの輝度レベルを電気信号に変換して計算機で解析するもので、顕微鏡視野は自動焦点、自動走査装置により迅速に設定できる。1視野の測定時間は約0.5sである。

2.2 自動鉍物組成分析装置のシステム構成

Fig. 1に示すように自動分析装置は入力系、画像処理

昭和56年4月本会講演大会にて発表 昭和57年3月18日受付 (Received Mar. 18, 1982)

* 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., 1-1-1 Edamitsu Yawatahigashi-ku Kitakyushu 805)

*² 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (現:新日本製鉄(株)本社) (Process Technology R & D Laboratories, Now Head Office, Nippon Steel Corp.)

*³ 新日本製鉄(株)生産技術研究所 (現:浜田重工(株)) (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp., Now Hamada Heavy Industries Ltd.)

*⁴ 新日本製鉄(株)生産技術研究所 工博 (Process Technology R & D Laboratories, Nippon Steel Corp.)

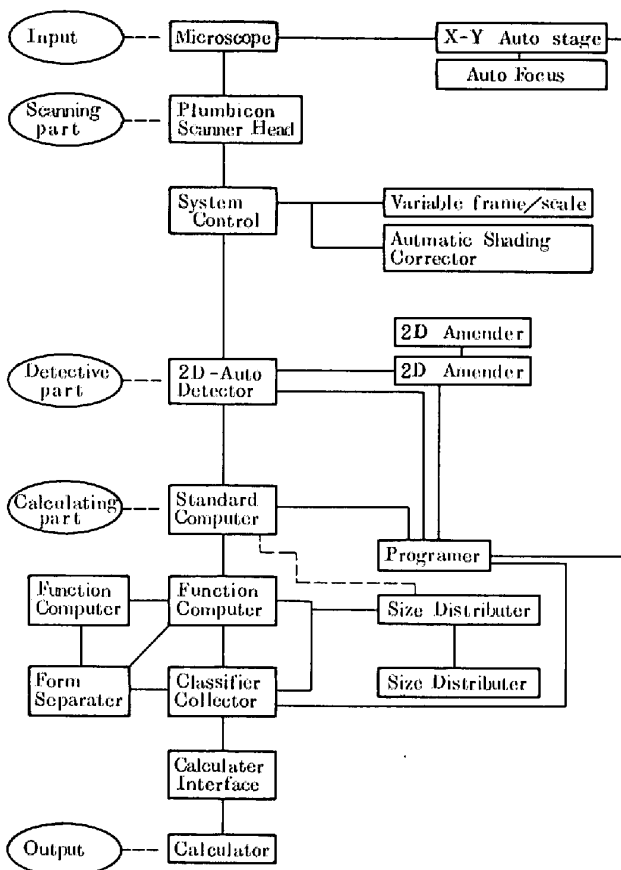


Fig. 1. System of the image analyser.

装置 (QTM 720) および出力系で構成されている。

入力系は光学顕微鏡, 自動走査ステージ, 自動焦点調整装置からなる。

画像処理装置は走査系, 検出系, 処理系に分けられ, それぞれ光学信号の電気信号への変換, アナログ信号のデジタル信号への変換, および計算機による処理の各機能をもっている。したがって走査系では光信号と電気信号の広範囲にわたる線形性と光信号の均一性の維持が要求される。検出系では輝度レベルによる鉱物識別の際の境界誤差が問題となる。これに対しては両輝度レベルの中間点を境界とすることで解決している。また差異の大きい輝度レベル境界に現れるハロー誤差は2次元画像修正装置によりとり除いている。処理系では画素の輝度レ

ベルデータに基づいて画像の形態を定める。鉱物組成の面積率のみでなく, 周長, 径, 個数などが測定でき, さらに画像の修正として膨張, 侵食, 消去, 付加, 合体などの機能をもっている。出力系は計算機 (YHP) で記録, 演算, 統計処理データの取捨選択ができる。

2.3 鉱物組成の測定方法

試料として 15~20 mm の焼結鉱を4個採取し, 樹脂埋め込み研磨によつて測定面を作る。これを反射光下, 160倍でそれぞれ100視野, 計400視野の測定を行う。画像解析装置はまず均一輝度レベルで画面の均一性を調整し, 次に焼結鉱試料によつてヘマタイト, マグネタイト, カルシウムフェライト, スラグおよび気孔の5段階の輝度を設定する。この輝度が安定しているか否かを1試料につき5視野を選んでチェックし, あらかじめ設定したプログラムで自動分析する。Photo. 1 に焼結鉱の組織検出像を示す。

2.4 気孔率の測定方法

画像処理でも気孔が測定できるが, 焼結鉱の場合形状が複雑で自動分析では気孔の認識が難しい。そこで15~20 mm の焼結鉱5個を試料として次のような方法で気孔率を測定した。

①水銀法 1 Torr まで減圧して水銀中に浸漬させ, 大気圧に戻したとき水銀が浸入しなかつた部分を焼結鉱体積と見なして算出する気孔率 (ϵ_0) で, 約7 μ 以下の開気孔+閉気孔が測定できる。

②熔融パラフィン法 80°C での熔融パラフィンに浸漬させて①と同様に算出する気孔率 (ϵ_1) で, 約500 μ 以下の開気孔+閉気孔が測定できる。

③プラスチック法 プラスチックで焼結鉱を被覆して①と同様に算出する気孔率 (ϵ_2) で大気孔まで測定できる。

3. 還元性状測定法

3.1 低温還元粉化試験

15~20 mm の焼結鉱 500 g をとり, 550°C で30 min 還元する。これを常温で小型回転強度試験機 (130

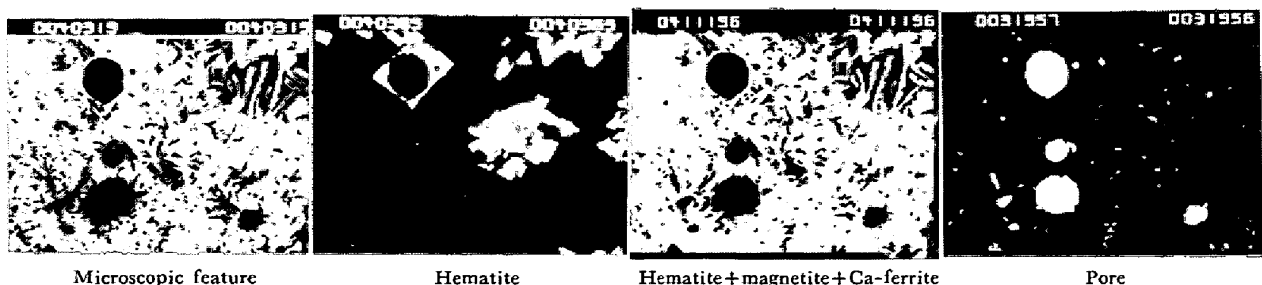


Photo. 1. Characteristics of detected image of mineral components.

mmφ×200 mm) にかき 900 回転させたのちの 3 mm 以下の粉率 (RDI) をもって指数値とする。還元ガス、還元装置は還元試験に準ずる。

3.2 還元試験

JIS-M8713 に準ずる。20±1 mm の焼結鉄 500 g を 900°C で 180 min 還元したときの酸素除去率 (RI) とする。

3.3 荷重軟化試験¹⁵⁾

10±1 mm の焼結鉄を約 500 g とし、荷重下で 1400°C までの昇温還元試験を行い、試料層の収縮率 (Sh) とガス圧損 (ΔP) を指数値とする。昇温速度は 200~800°C で 10°C/min, 800~1200°C で 2°C/min, 1200~1400°C/min で 5°C/min とする。荷重は 1 kg/cm² で 800~1400°C の温度域で加える。なお試料をつばは 70 mmφ で試料層高も 70 mm とする。還元ガスは 30%CO-70%N₂ のものを 20 Nl/min の流量で供する。

3.4 溶融滴下試験¹⁶⁾

10±1 mm の焼結鉄 260 g を JIS の還元試験装置を用いて還元率 95% 以上に予備還元する。このために還元ガスとして 40%CO-60%N₂ のものを 15 l/min で供する。還元条件は 1000°C, 180 min である。予備還元した試料 200 g を 48 mmφ のつばにつめて 1200°C~1550°C まで昇温還元する。昇温は 1200°C までは N₂ 雰囲気中で、1200°C 以上は CO ガス (2 Nl/min) 中で、5°C/min で行う。1400°C を超えると試料の一部が溶融してつばから滴下する。この滴下を開始する温度 (T_d) を指数値とする。滴下試料は 5~50°C 間隔で採取し、冷却後スラグとメタルに分離し、必要ならば分析する。

4. 試料

試料としてある時期の当社の焼結工場の焼結鉄 9 種を選んだ。これらの化学組成を Table 1 に示す。これらは塩基度が 1.57~1.99, 脈石量で 303~381 kg/t-Fe で

Table 1. Chemical composition of samples.

Sample	T.Fe	FeO	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	gangue* M. P.	CaO/ SiO ₂	S. V. ** (kg/t-Fe)
Sinter A	58.03	7.25	9.05	5.76	1.90	0.86	1770	1.57	303
〃 B	57.18	7.04	9.60	5.52	1.74	1.53	1810	1.74	322
〃 C	56.97	7.83	9.15	5.66	1.95	1.26	1790	1.62	316
〃 D	56.62	9.05	10.05	5.72	1.99	1.82	1800	1.76	346
〃 E	57.32	10.13	9.65	5.84	1.82	1.58	1760	1.65	303
〃 F	56.62	7.90	9.75	5.60	1.90	1.53	1820	1.74	333
〃 G	57.32	6.61	9.40	5.60	1.90	1.30	1810	1.68	318
〃 H	56.08	6.69	11.16	5.62	1.87	1.72	1870	1.99	363
〃 I	55.49	6.18	11.44	6.09	1.93	1.66	1860	1.88	381

* Estimation from CaO-SiO₂-Al₂O₃-MgO phase diagram
** $\{(CaO+SiO_2+Al_2O_3+MgO)/T \cdot Fe\} \times 100$

あり、また原料、製造条件を異にしているから、実用焼結鉄としては、いろいろな性状のものを選んだことになる。

5. 実験結果

5.1 焼結鉄の鉱物組成

試料とした 9 種の焼結鉄の鉱物組成測定結果を Table 2 に示す。これには同時に 3 種の気孔率の測定結果も示した。これと Table 1 に示した化学組成との関係を見ると Fig. 2 のようになる。FeO 量とマグネタイト量、CaO+SiO₂+Al₂O₃+MgO 量と Slag 量などこれまで化学組成から推定可能と考えられていたもの間にはかならずしも明確な関係が認められない。塩基度とカルシウムフェライト量の間には本報の範囲で直線的な関係が認められる。スラグ量は塩基度 1.7 前後までの範囲では増加し、これ以上では急減している。D. JEULIN¹⁷⁾ は塩基度の異なる焼結鉄を実験室的に製造し、塩基度の上昇とともにカルシウムフェライト量が増加することを塩基度 1.5 から 2.0 にかけてスラグ量が減少することを報告している。松野¹⁷⁾ は Fe₂O₃-CaO-SiO₂ 系での鉱物生成状況を試薬を用いて、大気雰囲気下で調査し、次のことを報告している。すなわち 1280°C 以上の温度域

Table 2. Mineral composition and porosity of samples.

Sample	hematite*	magnetite*	Ca-ferrite*	slag*	pore	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2
Sinter A	35.8	24.0	26.2	14.0	21.2	14.4	26.0	31.6
〃 B	22.1	20.5	40.3	17.1	23.1	14.4	16.7	33.0
〃 C	24.6	26.0	31.7	17.7	22.1	12.2	15.0	32.3
〃 D	26.1	26.8	34.4	12.9	23.5	15.7	20.9	30.7
〃 E	23.2	23.6	36.3	17.0	18.0	14.1	17.2	41.0
〃 F	21.4	29.2	33.6	15.8	24.0	17.6	21.5	34.8
〃 G	27.4	20.1	32.9	19.6	25.0	15.1	19.5	44.7
〃 H	13.7	22.3	49.3	14.7	19.5	11.5	15.0	31.6
〃 I	30.4	13.3	42.4	14.0	20.8	13.0	12.8	28.3

* hematite+magnetite+Ca-ferrite+slag=100%

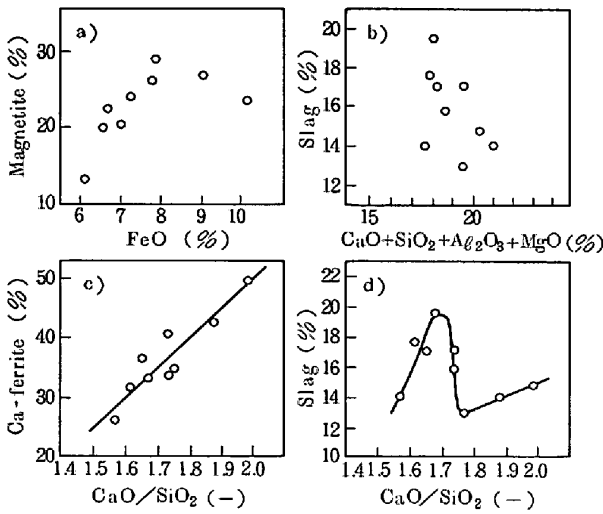


Fig. 2. Relationship between mineral composition and chemical composition.

では塩基度 1.86 を境にして、これ以上ではカルシウムフェライトが、またこれ以下ではスラグが生成するが、1200~1280°C の温度域では塩基度 1.4~2.0 ではヘマタイト、カルシウムフェライトおよびスラグの混合体になる。本報での調査結果はカルシウムフェライト量とスラグ量の動きについては JEULIN らの結果と同一であり、また実機焼結鉱であるから試薬より反応が遅く非平衡であつたとすれば、塩基度 1.86 以下でもカルシウムフェライトが、また塩基度 1.86 以上でもスラグが存在する本報の結果は松野のそれとも矛盾しない。

このように化学組成と鉱物組成の間にはかならずしも一定の関係がなく、化学組成から焼結鉱中の鉱物組成を推定するのは難しいものと考えられる。

5.2 焼結鉱の還元性状と組織

焼結鉱の還元性状試験結果を Table 3 に示す。RDI は 24~42, RI は 57~72 と実用焼結鉱の範囲では大きな差異をもつものである。この結果と化学組成の関係を Fig. 3 に示す。熔融滴下試験の T_d と塩基度以外に良

Table 3. The results of reduction property tests.

	Reduction degradation index (%)	Degree of reduction (%)	Softening property		Melt-down property	
			Pressure drop (\equiv H ₂ O)	Shrinkage (%)	Degree of pre-reduction (%)	Temp. at beginning of melt-down (°C)
Sinter A	33.5	57.9	66	47.6	98.0	1510
” B	42.0	71.9	87	50.0	96.0	1480
” C	28.7	57.4	114	52.8	98.6	1510
” D	37.9	63.1	57	47.3	97.0	1505
” E	32.1	64.4	72	45.0	95.9	1518
” F	24.3	63.3	73	49.8	101.6	1497
” G	41.1	64.7	87	50.1	95.9	1507
” H	32.7	61.4	61	45.7	96.4	1445
” I	34.5	56.9	75	49.9	97.8	1448

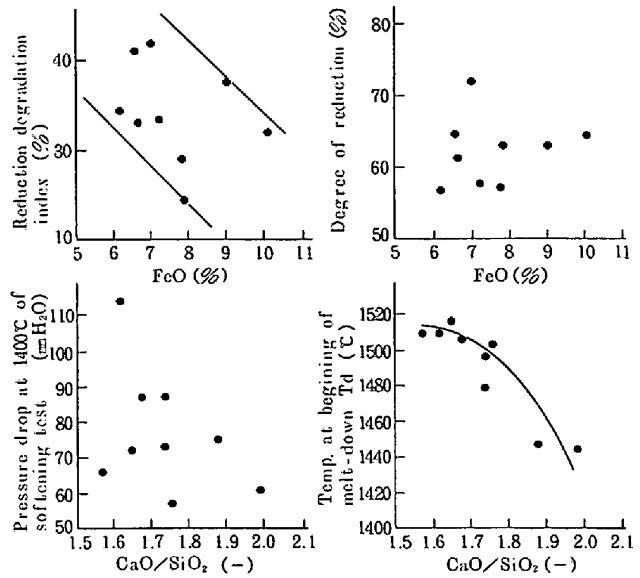


Fig. 3. Relationship between chemical composition and reduction property of samples.

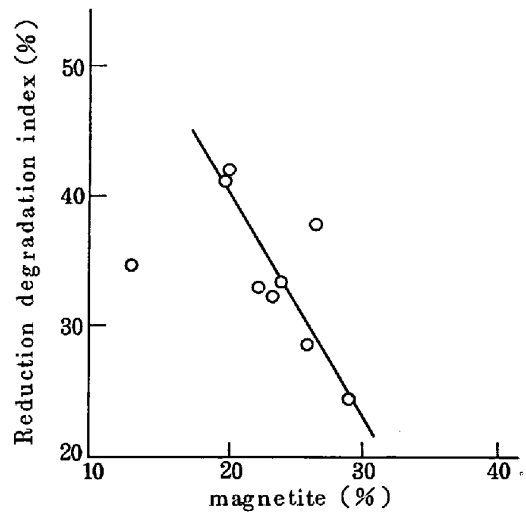


Fig. 4. Relationship between reduction degradation index and quantity of magnetite.

い相関関係は見られない。

そこで鉱物組成、気孔率と還元性状の関係をみるために Table 2, Table 3 のデータを用いて重回帰分析を行い、寄与率の高い要因を選びだすこととした。

まず RDI については Fig. 4 に示すようにマグネタイトとの関係が認められる。焼結鉱の低温還元粉化は焼結過程で生成する 2 次のヘマタイトが原因とされている¹⁸⁾。

本報の測定では反射輝度のみで鉱物の識別を行つたので、鉱石が未熔融で残る 1 次ヘマタイトと 2 次ヘマタイトの判別ができず RDI とヘマタイト量の関係が見られなかつたものと考えられる。ただ 2 次ヘマタイトはマグネタイトに由来するという従来の研究結果からすれば、

酸化鉄鉍物がマグネタイト段階により多く止まっているものは2次生成のヘマタイトの生成が少ないものと考えられ、小山ら¹⁹⁾のマグメータ法による“マグ FeO”とRDIの関係を示した報告とも一致する。

次にJIS法による被還元性については重回帰分析で有意となる要因は見いだされなかつたが、Fig. 5に示す非線型の関係が見られた。これから被還元性の高い焼結鉍とはカルシウムフェライト量と500 μ 以下の気孔率、 ϵ_1 の大きい構成のものと考えられる。

さらに荷重軟化性として ΔP と組織の関係をFig. 6に示す。これは高度に有意な関係で、 ΔP を減少させるにはスラグ量を減少させ、全気孔率を増加させればよいことがわかる。

最後に熔融滴下性として T_d と組織の関係をFig. 7

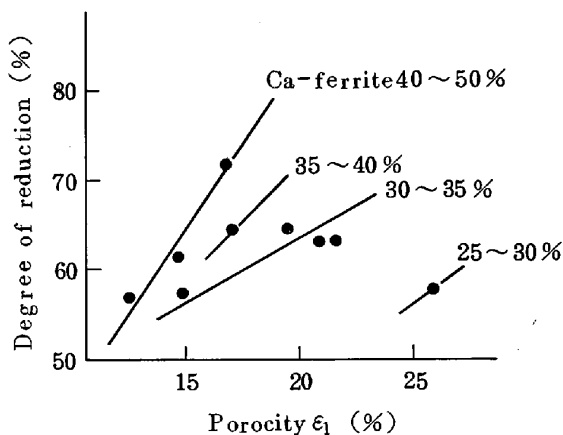


Fig. 5. Relationship between degree of reduction and quantity of calcium ferrite, porosity.

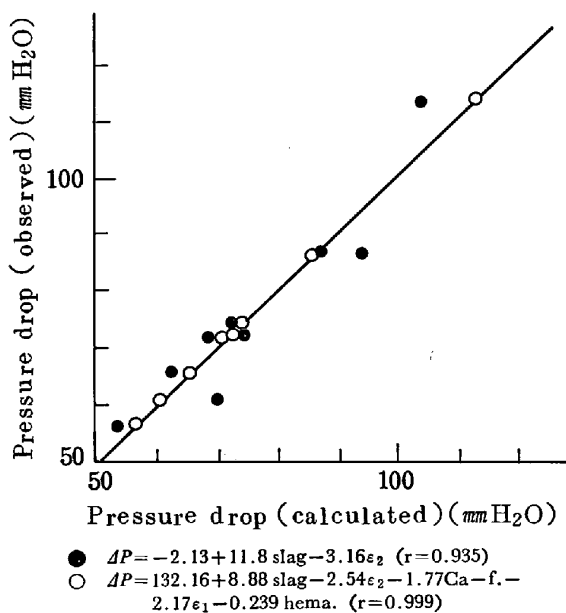


Fig. 6. Multiple correlation on pressure drop at 1400°C of the softening test under load.

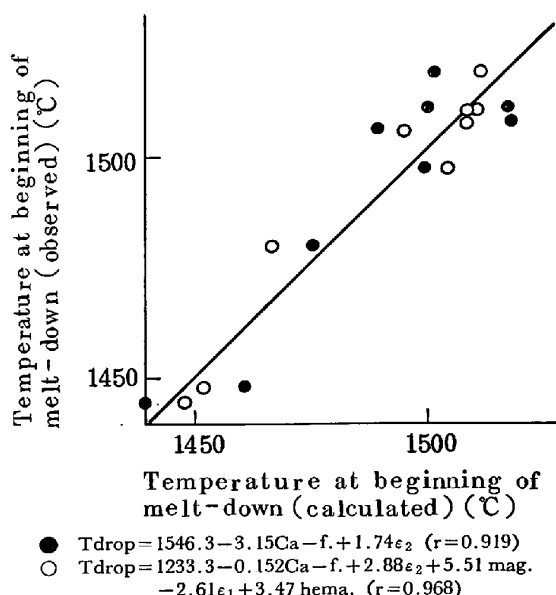


Fig. 7. Multiple correlation on temperature at beginning of melt-down.

に示す。これも高度に有意な関係で T_d を高めるにはカルシウムフェライト量が少なく、全気孔率の高いものがよい。

このように焼結鉍の還元性状と組織との関係は化学組成との関係よりも有意な相関関係を示すことが多く、イメージがより具体的である点に特徴がある²⁰⁾。

6. 考 察

前章で焼結鉍の還元性状と組織の統計的な関係について述べたが、単なる統計的な関係にとどまる限り、将来とも有効な指標として活用できるものか、現象の一時的局所的な説明にとどまるものか明らかでない。少なくとも焼結鉍還元時の挙動が組織との関係で理解できることが望ましい。ここでは以上のような観点からいくつかの検討を行った。

6.1 低温還元粉化

低温還元粉化の原因となる2次ヘマタイトは特徴ある形態を示すことが報告されている。これを画像処理して指数化すれば直接2次ヘマタイト量が定量できるが、現状でははまだそのレベルに到達していない。ただ詳細に1次、2次のヘマタイトを観察すると、その粒度に差が認められる。未熔融で残る1次ヘマタイトは通常500 μ 以上の粒子として存在することが多い。そこで焼結鉍Gについて層高方向から4~8個の試料を採取し、粒子径別のヘマタイト量とRDIの関係を見た。その結果Fig. 8に示すように100~300 μ の粒子径のヘマタイト(粒子数)とRDIの間に明瞭な関係が認められた。ただ100 μ 以下の粒子径のヘマタイト量はRDIと一定の関

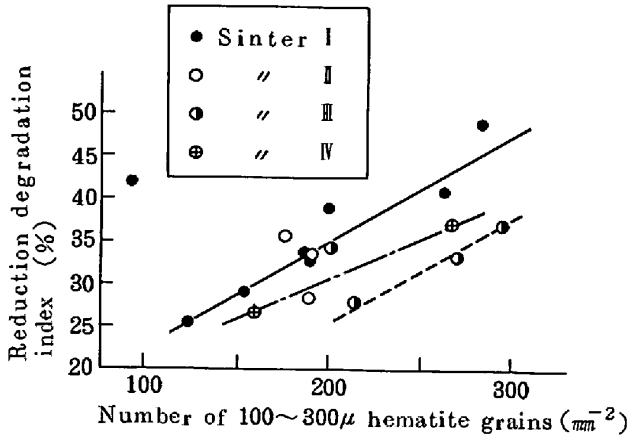


Fig. 8. Relationship between reduction degradation index and number of 100~300 μ hematite grains.

係を示さない。この両者は形態的には同じ2次ヘマタイトと観察されるので、その差が何によるのか現在のところ明らかではない。

6.2 被還元性

焼結鉱の定温還元機構を明らかにするために、今回の調査で RI に最も大きい差異のあつた焼結鉱 B と焼結鉱 I について還元過程の組織観察を行つた。Photo. 2 に還元前焼結鉱の溶解部の組織を示す。焼結鉱 B は微細な針状カルシウムフェライトと気孔が多く、焼結鉱 I ではカルシウムフェライトは長柱状で、組織全体にスラグが発達している。

次に還元時の組織観察の結果について述べる。

(1) 焼結鉱粒子はマクロ的には外殻部から内芯部へ還元が進行するが、ペレットのようにトポケミカルな還元にならないのは反応界面が広い、いわゆる Zonal な還元形態になつているからである。

(2) ミクロ的にはトポケミカル還元部分と均一還元部分が混在している。

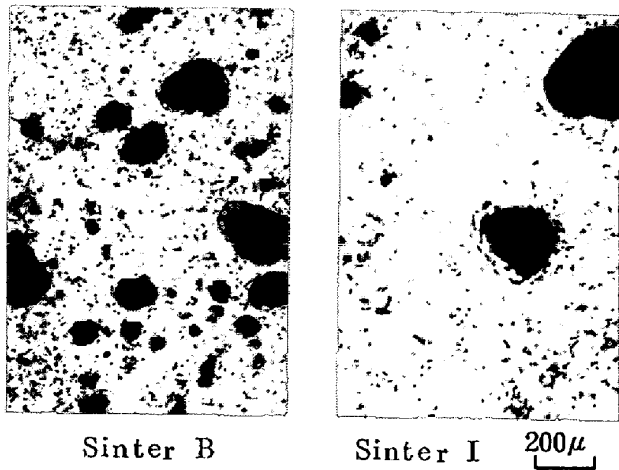


Photo. 2. Microstructures of melted part in sinters.

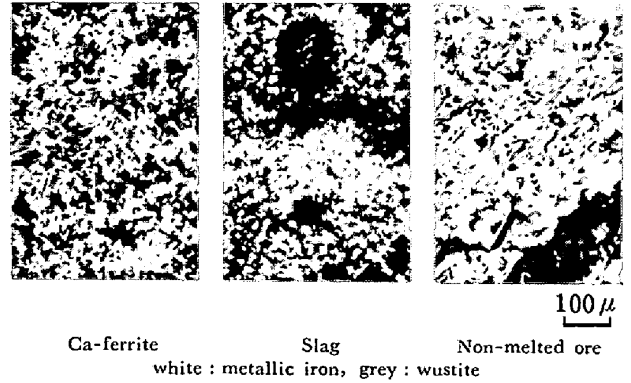


Photo. 3. Microstructures of sinter reduced at 900°C.

(3) 構成鉱物と還元形態の間には次の対応がある。典型的な例を Photo. 3 に示す。

- a) カルシウムフェライト相 ほぼ均一還元をする。
- b) スラグマトリックス相 トポケミカル還元となる。
スラグマトリックスが発達した部分では例えばカルシウムフェライトでも還元が遅れる。
- c) 未熔融鉱石部 トポケミカル還元となる。
- d) 大気孔部 還元が進行している部分もあるが全体の特徴ではない。

焼結鉱の被還元性は均一還元部分とトポケミカルな還元部分の割合で決まり均一還元部分の多いものほど RI は高い。均一還元する領域は構成鉱物ではカルシウムフェライトであり Fig. 5 に示した結果が説明できる。さらに両焼結鉱の差としてスラグマトリックス発達の有無が挙げられる。ε₁はこの差を表しているものと考えられる。

6.3 荷重軟化性

Fig. 6 で示したように ΔP はスラグ量と ε₂ でほとんど説明できる。スラグは還元過程で FeO と CaO の交換を行うことにより高融点化するが、もともとスラグ自身の融点は低いので軟化原因になる。ε₂ については次のように考えられる。ペレットの場合 ΔP には高温の被還元性が影響し、たとえば RI の点ではペレットの中でも良好なコールド・ペレットでも粒径を大きくすると Fig. 9 に示すように ΔP は増加する。ところが焼結鉱では粒径を変えても ΔP はほとんど変化しない。ペレ

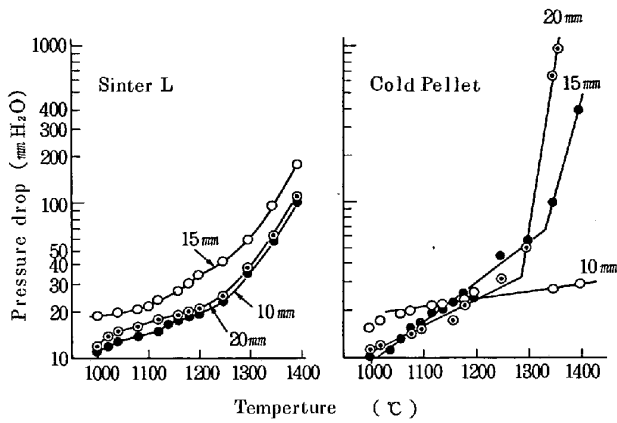


Fig. 9. Characteristics of softening under load of pellets and sinters.

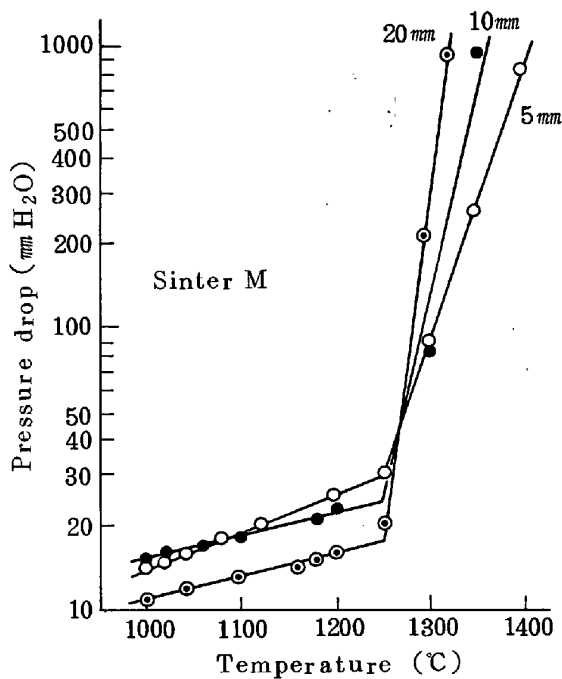


Fig. 10. Characteristics of softening under load of sinter M.

トの場合は良く知られているように粒子が全体としてトポケミカルな還元をするために中核部に FeO や低融点スラグが残り、高温になると溶融して軟化原因となる²¹⁾。焼結鉍の場合にはトポケミカル還元領域はミクロ的に粒子中に分散しており、さらに高温になつても還元の進行が持続する。この還元の進行に焼結鉍特有の大気孔が重要な役割を果たしているものと考えられる。実験室的に燃料多量添加によつて ϵ_2 の小さい、緻密な焼結鉍を製造して試験をすると、その焼結鉍の ΔP は Fig. 10 に示すようにペレットと同じ挙動を示すことから ϵ_2 の役割がわかる。

6.4 熔融滴下性状

本報で採用した試験法では Table 3 に示すように予

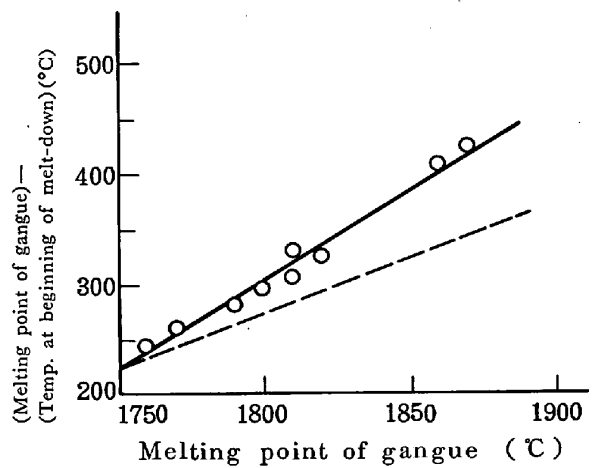


Fig. 11. Relationship between the difference (melting point of gangue-temperature at beginning of melt-down) and melting point of gangue.

備還元率が高いために原組織の影響は小さくなる。このようなメタルへの浸炭で T_d が決まる場合には脈石融点の影響が大きく、それが 1700°C を超えるときはその上昇とともに T_d は低下する¹⁶⁾。本報の場合も T_d と脈石融点の関係は Fig. 11 に示すように従来の結果と一致している。焼結鉍の場合、脈石融点は塩基度に依存するところが大きいし、Fig. 2 に示すようにカルシウムフェライト量も塩基度に比例している。したがつて T_d へのカルシウムフェライト量の影響は疑相関であり、本当は脈石融点の影響と考えるのが妥当であろう。 ϵ_2 は構造的な要因としてメタル中への浸炭速度を低下させ、 T_d 上昇の効果をもたらしているものと考えられる。

7. 結 言

焼結鉍の鉍物組成および気孔率の定量法を開発し、焼結鉍の還元性状を構成鉍物と気孔構造とから理解し、望ましい焼結鉍の組織イメージを明確にするために検討を行った。その結果焼結鉍組織と還元性状の間には以下に示す密接な関係があることがわかつた。

- (1) RDI は $100\sim 300\mu$ の粒子径のヘマタイト量によつて表される。
- (2) RI はカルシウムフェライト量と 500μ 以下の気孔率とで決まり、両者が増せば向上する。
- (3) 荷重軟下性はスラグ量と全気孔率とに関係し、スラグ量が小さく、全気孔率が大きくなるほど圧損は下がる。
- (4) 熔融滴下性は還元がほとんど終了している段階での試験で原組織との直接的な結びつきは少ない。カルシウムフェライト量は小さく、全気孔率が大きいほど

T_a は上昇する. このときのカルシウムフェライト量は脈石融点を表している.

これらは単に統計的な関係のみでなく, 還元過程の検討に裏づけられており, 今後とも有効な指標として活用できるものと考えられる. また化学組成から焼結鉄組織を推定するには無理があり, さらに焼結鉄の還元性状も, 熔融滴下性を除いては化学組成との関係で論ずべきではないものと考えられる. したがって焼結鉄組織分析の重要性はますます大きくなる.

今後はさらに形態学 (Morphology) 的検討を進め, 常温強度を表現できるマクロ組織, 2次ヘマタイト, 構成鉄物の相互関係などを定量化することが望まれる.

文 献

- 1) P. LECOMTE and R. VIDAL: CNRM, 23 (1970), p. 3
- 2) P. LECOMTE: CRM, 28 (1971), p. 25
- 3) 佐々木稔, 榎戸恒夫: 製鉄研究, (1976) 288
- 4) 佐々木稔, 中沢孝夫: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1217
- 5) D. A. KISSIN and T. I. LITVINOVA: Stal in Eng., 5 (1960), p. 318
- 6) 小島鴻次郎, 永野恭一, 稲角忠弘, 高木勝博, 品田功一: 鉄と鋼, 55 (1969), p. 669
- 7) 楊澈基, 正路徹也, 武内寿久禰: 日本鉄業会誌, 93 (1977), p. 411
- 8) D. JEULIN, J. L. LETAILLEUR, and M. SCHNEIDER: Proc. of the 2nd International Symp. on Agglomeration (1977), p. 526
- 9) A. GRECO, D. JEULIN, and J. SERRA: J. Microsc., 116 (1978), p. 199
- 10) T. HERSANT, D. JEULIN, and P. PARNIERE: IRSID report. RE 322 (1975)
- 11) C. LE. CORRE, B. KAYSER, J. C. CELESKI, and D. JEULIN: Reprint from "Agglomeration 81" Nürnberg, 6-8. 5 (1981)
- 12) 渋谷悌二, 丹羽康夫, 谷中秀臣, 鳥井健二, 山田健夫, 上杉満昭: 鉄と鋼, 67 (1981), S98
- 13) 渋谷悌二, 斎藤 汎, 谷中秀臣, 竹元 寛, 山田健夫, 上杉満昭: 鉄と鋼, 67 (1981), S679
- 14) 須賀田正泰, 梅津善徳, 山口一良, 斎藤元治, 下沢栄一: 鉄と鋼, 67 (1981), S680
- 15) 斧 勝也, 肥田行博, 重見彰利, 児玉惟孝: 鉄と鋼, 61 (1975), p. 777
- 16) 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
- 17) 松野二三朗: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1499
- 18) 佐々木稔, 榎戸恒夫, 近藤真一, 中沢孝夫: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 1209
- 19) 小山朝良, 山本一博, 花木幸男, 矢間孝一, 広島龍夫: 鉄と鋼, 64 (1978), S480
- 20) 鈴木 悟, 佐藤勝彦, 斧 勝也, 千々和九州男, 江口清美: 鉄と鋼, 67 (1981), S96
- 21) 成田貴一, 前田昌大: 鉄と鋼, 63 (1977), p. 1443