

論文

鉄鉱石焼結鉱の気孔形成過程とそのモデル化

佐藤 駿*・川口尊三*・一伊達稔*²・吉永眞弓*³

Pore Forming Process on Iron Ore Sinter and Its Model

Shun SATO, Takazo KAWAGUCHI, Minoru ICHIDATE and Mayumi YOSHINAGA

Synopsis:

On the controlling factors for sinter qualities, sinter porosity plays an important role together with the mineral composition. The present work was carried out to study on sinter pore and its forming mechanism by pot tests and to develop the sinter porosity evaluation model.

Pores in sinter were formed as the pores in raw mix bed were changed and redistributed by the forming sinter melt. predicted porosity in sinter was described by the melting ratio of raw materials and the fluid index of sinter melt. Sinter porosity was measured on the small open pores below 0.5 mm in diameter and the all closed pores by JIS method.

The calculated porosities by the model were in good agreement with the observed ones.

Key words: agglomeration; sinter; iron ore; porosity; modelling.

1. 緒 言

高炉の主要装入物として焼結鉱の品質は高炉操業の安定と諸元改善に重要な影響を及ぼしている。焼結鉱の気孔は強度面では構造欠陥部分として関与するため気孔率の増加は強度低下を招くが、被還元性の点では還元ガスとの接触面積を増して還元率の向上に寄与する。

従来焼結鉱品質に関する知見や解析は主として化学成分や焼結鉱組織面から論じられることが多いが、通常製造される焼結鉱の組成範囲は狭くこれだけで品質の変化を十分に説明できない。

しかしながら最近になって焼結鉱品質の物理的側面の重要性もしだいに明らかになり^{1)~5)}、焼結鉱気孔構造の解析結果も増えつつある。

本研究ではこのように焼結鉱の品質と関係の深い気孔の形成過程について検討するとともに、その実験と解析結果から焼結鉱品質評価モデルの一環として焼結鉱気孔率を定量的に予測するモデルを開発し実測結果との対応性を検討した。

2. 実験方法

2.1 供試料及び実験装置

Table 1 には実験に用いた鉄鉱石原料の性状を示した。原料は焼結用粉鉱として通常よく使用されるもので焼結鍋試験の原料配合はこれら主原料をそれぞれ 66%、返鉱 16.5%、石灰石 13% 及び粉コークス 4.5% 一定構成の単味配合とした。Fig. 1 には実験に用いた焼結鍋試験装置を示す。本装置は製鉄部会法⁶⁾に準拠し上記配合原料はバッチ式ドラムミキサーで 3 min 混合後さらに適量の水分 (4~7 wt%) を加えて 3 min 造粒した。事前処理された原料は鍋に均一に装入されプロパンガスで表面点火した後、風箱に接続された排風機により焼結

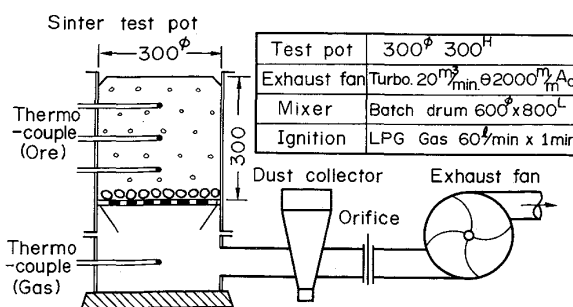


Fig. 1. Outline of sinter test procedure and apparatus.

昭和 57 年 9 月本会講演大会にて発表 昭和 61 年 6 月 2 日受付 (Received June 2, 1986)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

*² 住友金属工業(株)総合技術研究所 工博 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*³ 住友金属工業(株)総合技術研究所 理博 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

Table 1. Chemical composition and other characteristics of iron ore materials.

Materials (Unit)	T.Fe wt %	CaO wt %	SiO ₂ wt %	Al ₂ O ₃ wt %	MgO wt %	FeO wt %	CW wt %	Apparent density g/cm ³	True density g/cm ³	Charac- teristic particle size (Median) mm	Porosity vol %	Porosity after dehydration vol %
Ore A	64.7	0.1	1.57	1.53	0.08	2.95	3.30	4.03	4.61	0.51	12.6	25.7
Ore B	62.0	0.1	4.30	2.85	0.40	0.10	1.20	4.07	4.60	1.01	11.5	16.8
Ore C	64.7	0.1	4.50	0.60	0.45	0.10	0.70	4.51	5.02	0.84	10.0	13.8
Ore D	61.3	0.1	6.30	2.75	0.50	0.10	1.45	4.21	4.73	1.60	11.0	14.6
Ore E	64.9	1.00	3.60	0.40	0.50	21.9	0.10	4.27	4.98	0.30	14.3	16.8
Ore F	64.5	1.64	4.67	0.89	1.07	25.6	0.10	4.71	4.72	1.42	0.2	2.2
Ore G	57.3	0.1	6.25	3.35	0.70	0.10	8.08	3.45	4.06	2.40	15.0	32.0
B+E (1:1)	63.5	0.6	3.95	1.63	0.45	11.0	0.65	4.17	4.78	0.45	12.9	16.4
B+C (1:1)	63.9	0.1	4.40	1.73	0.43	0.10	0.95	4.28	4.80	0.90	10.8	15.3
B+A (1:1)	63.4	0.1	2.94	2.19	0.24	1.53	2.25	4.05	4.60	0.70	12.1	21.3
Lime stone	0.1	56.0	1.10	0.15	1.15	0.1	0	2.62	2.93	0.94	10.6	—
Coke	2.4	0.8	6.30	3.30	0.35	1.3	0	1.00	1.95	0.94	48.7	—
Return fine	53.3	11.0	7.20	1.95	2.45	8.3	0	3.93	4.53	0.53	13.2	—

された。

2.2 基礎物性測定方法

Table 1 に示された原料特性に関し鉄石粒子の気孔率は JIS M8717 による真密度測定値と 5~2 mm 整粒粒子の水中置換体積測定により求めた見掛け密度測定値とから計算された。また鉄石中結合水の加熱脱水に基づく高温粒子気孔率は 450°C、2 h 加熱後の鉄石粒子について同様の手法で計測された。詳細は前報⁷⁾に記載した。鉄石粒子径は乾燥後標準篩で篩分けを行いメディアン径で表示した。鍋試験において焼結反応の進行に伴う層高方向の収縮はメジャーを用いて測定し試験鍋装置の諸元(内径 300 mmφ 高さ 300 mm)と装入重量から嵩密度を計算した。焼結完了後の焼結ケーキ及び破碎後の 15~20 mm 整粒焼結鉄成品の気孔率計測は JIS M8717 真密度測定法と JIS M8716 の水銀置換による見掛け密度測定法を基準法としたが、気孔の大きさ、分布等の評価や試料寸法の制約から、他に水置換法、樹脂埋込切断面の画像処理法及びパラフィン被覆を施した水置換法など種々の方法とも比較検討を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 焼結過程の層構造変化

焼結鉄気孔の形成過程は焼結パレットへ擬似粒化された原料が充填層を形成する状態が出发点となる。この原料充填構造中には鉄石粒子内部の気孔、造粒時核粒子に付着した粉粒子間の気孔および擬似粒子相互間の空隙が含まれ、後述するように多量の空間体積が存在する。

Fig. 2 には点火開始時点基準に焼結時の層収縮(焼しまり)の経過を示した。この収縮経過によると前報⁷⁾で示した溶融率からみて溶融性の良好な銘柄 A とそうで

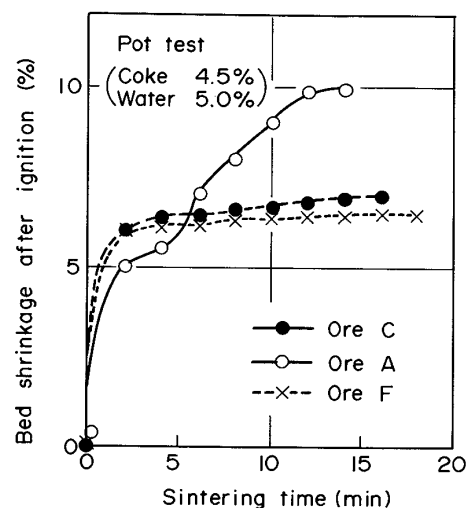


Fig. 2. Changes of bad shrinkage during sintering.

ない銘柄 C, F とは明らかに収縮挙動に差が認められる。いずれの鉄石銘柄も焼結過程のごく初期の数分間以内に急激に 6% 前後の収縮を生ずるが、溶融性の劣る鉄石がその後焼結完了までゆるやかな増加をたどるのに対して、溶融性良好な鉄石ではさらに第 2 段の大きな収縮が生じ最終的に層収縮率は 10% にも達する。焼結反応初期の急激な収縮は恐らく上層部の疎な充填構造と擬似粒子の部分的崩壊に起因するものと考えられる。これに対して第 2 の収縮変化は溶融の影響と考えられる。

Table 2 には実焼結機の配合原料を Fig. 1 に示す装置を用いて層厚 500 mm、焼成風速 0.15 m/s で焼結を行った時の焼結ケーキ層高別の物質収支結果を示した。原料の層別装入量は各層の境界面にアルミナチップをマーカーとして少量散布しながら装入順に計量し、焼結完了後ケーキはマーカーを目印に層別切断してそれぞれ

Table 2. Structure change in sinter cake before and after sintering.

Layer \ Item	Linear shrinkage (%)		Bulk density (kg/m ³)			Mass transfer (kg) (Obs. - Calc.)	Calculated voidage (%)
	Vertical	Radial	Feed mix	Sinter cake			
				Observed	Calculated		
Upper	12.6	2.2	2 007	1 880	2 118	⊖2.34	46.3
Middle	9.8	1.6	2 039	2 046	2 061	⊖0.16	41.6
Bottom	9.1	1.0	2 059	2 309	2 039	⊕2.84	34.0
Total	9.8	1.7	2 041	1 985	2 066	⊕0.34	40.5

Sintering conditions: $H=500$ mm $v=0.15$ m/s

の重量を計測した。焼結後ケーキの計算嵩密度は焼成後のケーキ寸法と配合原料中の気化物質の放出による重量減少から予測した。実測重量による嵩密度は予測計算結果と大きく異なり、Table 2 に示すように焼結融体の流動を介した層間の物質の移動が無視できない。この物質の移動の影響は嵩密度で最大 10% 以上の変化に相当し、焼結ケーキの層高方向の空隙率に大きな差を作り出している。

3.2 JIS 法で測定される気孔

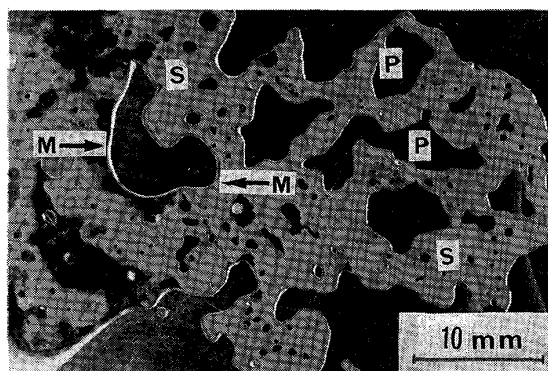
焼結鉱の見掛け密度及び気孔率の計算は水銀中に焼結鉱粒子を浸漬しその置換体積を計量することで求められる。この場合の水銀の表面張力と固液界面の接触角及び水銀中試料表面での圧力を用いて焼結鉱試料の開気孔へ水銀が侵入し得る限界気孔径を試算できる。

$$P \cdot \pi r^2 = -2\pi r \cdot \sigma \cdot \cos \theta$$

ここで、 P : 水銀中試料表面の圧力 (深さ 5 cm) 6 800 dyn/cm², σ : 水銀の表面張力 478 dyn/cm, θ : 接触角 108° を代入すれば、気孔半径 $r=0.022$ (cm) が求められる。水銀の侵入し得る最小気孔径は 440 μ m と計算される。Photo. 1 には透明容器の底面にあらかじめ切断した焼結鉱の平面を接着しておき、これに水銀を満した時の焼結鉱と水銀の接触状況を容器底部からの写真で示した。水銀と焼結鉱の接触界面では水銀の大きな表面張力のために曲面となつた部分が白色の環となつて焼結鉱の外周を覆っている。この白線の幅を拡大計測した結果 300~500 μ m 程度の値が得られ、上記の試算結果を実験的に裏付けることができた。従つて JIS 法で計測される焼結鉱の気孔率は、すべての閉気孔部分と約 500 μ m 径以下の開気孔部分の合計の体積率を意味する。

3.3 焼結鉱粒径と気孔

Table 3 には鉱石 B 単味配合鍋試験で製造された焼結鉱の粒度区分別の全気孔率と JIS 気孔率測定結果を示す。全気孔率、すなわち、焼結鉱粒子外部表面の曲率の大きな凹部も気孔の一部として計測するために、粒子の仮想外接曲面に沿つてできるだけ凹凸が少ないように、軟化させたパラフィンを粒子表面に埋込みコーティング



M: Mercury S: Sinter P: Pore

Photo. 1. Circumstances of interface between mercury and sinter.

Table 3. Total porosity and JIS porosity of different sized sinter*.

Sinter size (mm)	Total porosity (%)	JIS porosity (%)
20~18	53.0	27.0
16~15	51.7	26.3
13~10	54.5	24.7
5~4	51.4	25.6
Mean value	52.7	25.9

* Pot sinter with ore B (Coke: 4.5% Water: 4.5%)

(n=5)

処理を施した試料を水中に浸漬させその浮力からパラフィン重量と体積を補正して、焼結鉱の全気孔率を測定した。この結果によれば全気孔率はいずれも 50% 強となり、嵩密度から求められた焼結ケーキの全気孔率と同程度の値となつた。このことは焼結鉱粒子の外部表面には本来破碎前焼結ケーキの空隙が大部分保存されていることを物語っている。これに対して通常の JIS 気孔率測定結果は全気孔率の 1/2 程度の値を示し JIS 気孔率は焼結鉱の気孔の全量をとらえているわけではないが、冷間強度や還元率と強い関係があることは周知の事実であり、それと関連する欠陥の一部を評価する指標と位置づけられる。

Fig. 3 には焼結鉱粒子径とその中に含有される個数基準の平均気孔径との関係を示す。測定は粒径の異なる

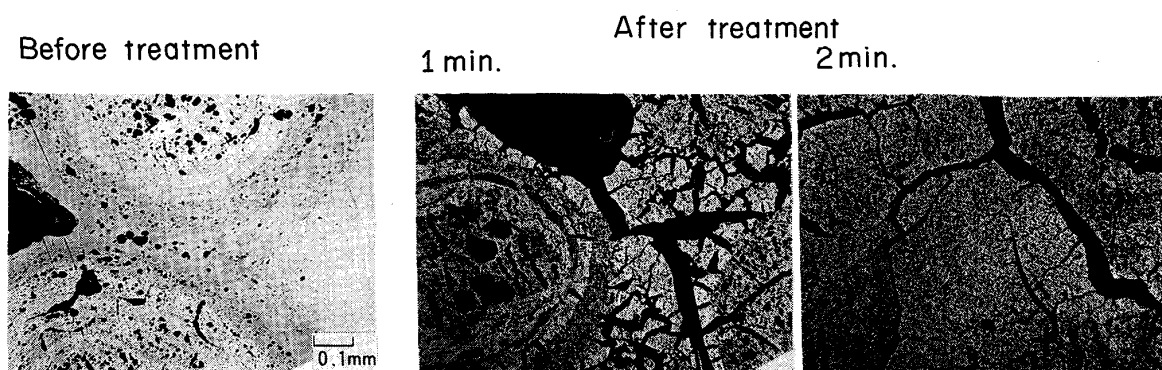


Photo. 2. Structure change of ore G before and after heat treatment.

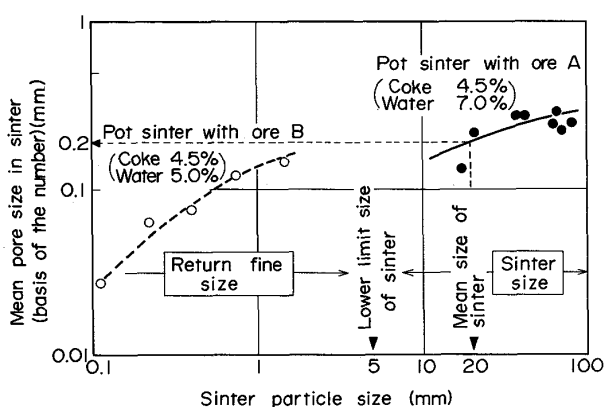


Fig. 3. Relationship between sinter particle size and the mean pore size in sinter.

整粒焼結鉱 2 種類について樹脂埋込後切断面を研磨し写真計測にて気孔のフェーレ径と個数を集計した。鉱石 B 単味配合焼結鉱では 0.1~1 mm 粒子径の小粒径範囲、鉱石 A 焼結鉱の場合は 15~100 mm 径の大径粒子を試料とした。通常製造される焼結鉱成品の粒径範囲は 5~50 mm (平均径 20 mm 前後) であるが、試料の種類と粒径分布の広い割には平均気孔径の変化は少なく成品平均粒子径での気孔平均径は約 0.2 mm 程度であった。従つて焼結鉱成品中の気孔は焼結反応過程で層内の通気経路となつていた大空隙ではなく鉱石粒内気孔やガスの発生に關与した小気孔が主体と考えられる。

このように JIS 法による気孔率は粒径に余り影響されないが、気孔径は粒子径が小さくなると減少する。粒子径の減少による気孔径の低下は破碎度の上昇に伴う欠陥部の減少に關連するものと考えられる。

3.4 鉱石銘柄特性の焼結鉱気孔率に及ぼす影響

Fig. 4 には鉱石単味配合鍋試験によつて製造された 15~20 mm 径の銘柄別焼結鉱成品気孔率を示した。この結果によれば褐鉄鉱系鉱石 G が最も高い気孔率を与え

逆に磁鉄鉱系鉱石 E, F や緻密質の赤鉄鉱系鉱石 C が低く、他の鉱石はこれらの中間に位置する。褐鉄鉱系鉱石の主要酸化鉄は X 線回折結果からゲーサイト (Goethite, α -FeOOH) であり⁸⁾、焼結反応の昇温過程でゲーサイトの結晶格子から結合水の脱水が起こるために製造される焼結鉱の気孔率が極めて高くなるものと考えられる。

Photo. 2 には鉱石 G の熱処理前後の組織の変化を示した。熱処理条件は加熱炉中で焼結ヒートパターンに準じた急速昇温で 1200°C まで加熱しこの温度で数分間保持した後徐冷した。この結果によれば加熱前の状態では鉱石 G のような 2 次沈殿鉱床由来の鉱石に特徴的なピソライト (Pisolite) 構造が散見され元来内部気孔の多い組織となつてゐる。熱処理後の組織では細いき裂が縦横に発生するとともに結合水に相当していたと考えられる部分の気孔が増加している。このような加熱後の弛緩した鉱石構造は焼結の熔融過程で融液との接触界面積を増して鉱石の見掛けの熔融速度を高めるとともに、一方では原料の気孔体積を増加させて製造される焼結鉱の気孔率を高める⁹⁾。

Fig. 5 左図では通常の鉱石 G と熱処理を施した同鉱石についてそれぞれ別々に単味配合鍋試験を同一の焼成条件下で実施し、製造された焼結鉱の気孔率を対比して示した。これら焼結鉱の気孔率はほぼ同等の値を示し、このことから焼結鉱の気孔の形成にとつて加熱脱水する水分そのものが作用するのではなく、脱水後の鉱石の気孔率が支配的要因となることを意味している。また、同右図に示されるように加熱脱水後の状態で計測された鉱石の気孔率と製造される焼結鉱の気孔率とはかなりの強い対応性が認められるが、これだけで焼結鉱気孔率と鉱石銘柄種との関係を説明することは困難である。その他の要因として同図下表に示されるように、鉱石中の脈石成分、特に Al_2O_3 量と気孔率とは良く対応しており、

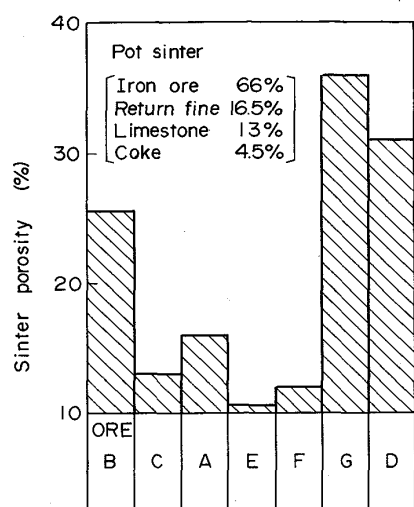


Fig. 4. Influence of iron ore brands on produced sinter porosity.

Table 4. Effects of fine sized ore mix on voidage and porosity in sinter product.

Items		Base	Fine mix
Void & porosity	Voidage in mix bed	57.70%	58.85%
	Voidage in sinter cake	61.27	61.19
	Porosity in sinter product (JIS)	16.4	20.7
	Porosity in sinter product (Soaking in water)	14.5	15.7

焼結過程の高温で生成する融体の性質（粘度や鉱石とのぬれ性）が焼結鉱の気孔形成に関与する可能性を示唆するものと考えられる。

次に原料鉱石粒度の焼結鉱成品気孔率への影響について検討した。Table 4 には鉱石（B+C）2種類配合鍋試験¹⁰⁾において通常の焼結用粉鉱の粒度構成をそのまま用いて配合したものと同一配合構成ながら主原料2種鉱石の5mm以上の粗粒部分を粉碎して全量5mm篩下となるよう細粒化した配合原料とを同一焼成条件で焼結した場合についてその気孔率を対比して示した。この結果によれば焼結ケーキ全体に占める空隙率は通常粒度原料と細粒原料とで大きな相違はない。これに対して、より小さな径の気孔を内包する焼結鉱成品の気孔率は明らかに細粒原料使用の焼結鉱の方が大きい。この差はさらに小さな径の気孔部分と密閉気孔を測定できる水中浸漬置換法による測定結果でも同傾向が認められ、原料鉱石の細粒化は焼結鉱気孔率の上昇に有効である。

Fig. 6 にはこの両焼結鉱の切断面について顕微鏡により気孔径区分ごとの面積率分布をポイントカウント法で測定した結果を示す。通常粒度原料による焼結鉱の気孔径は200 μm から数 mm の範囲に広く分布しているのに対し、細粒原料焼結鉱では600~800 μm にピークを

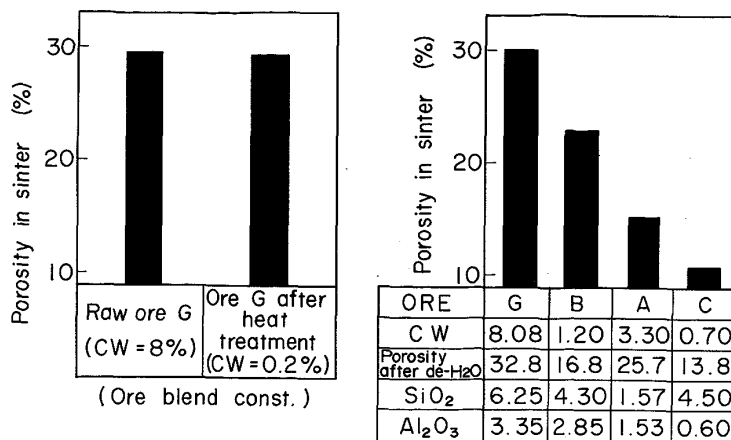


Fig. 5. Effect of iron ore characteristics on the porosity of sinter.

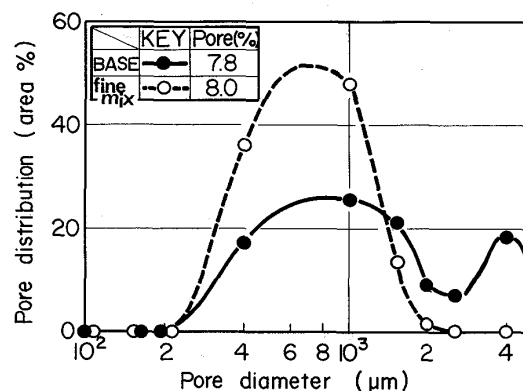


Fig. 6. Pore distributions in sinter (20-15 mm).

有する狭い分布に変化し、2mm以上の粗大な気孔は少ない。このように原料鉱石の細粒化は焼結鉱の粗大気孔を減少させる一方で、大きさのそろった小径気孔を増加させる。

3.5 焼結操作条件の焼結鉱気孔率に及ぼす影響

Fig. 7 には操作条件として単味鉱石配合鍋試験における粉コークス配合率及び原料水分添加率の焼結鉱成品気孔率への影響を示す。3種の鉱石銘柄のいずれについても粉コークス配合率の上昇により気孔率は低下している。このようなコークス配合率の影響に比較して水分の影響は明確ではない。この程度の操作条件の変更幅ではまだ鉱石銘柄特性の影響が強く現れている。粉コークス配合率の上昇は焼結層内高温保持時間を延長し熱的に原料鉱石の溶融同化を促進するため、増量した融液は原料充填層の空隙気孔を総体的に減少させる方向に作用し製造される焼結鉱の気孔率低下に寄与する。従って焼結操作条件から見れば焼結鉱気孔率のコントロールには焼

結反応での融液生成量を変化させる熱レベルの調整が重要である。

次に焼結鉱気孔率に及ぼす CaO 、 SiO_2 量の影響について検討した。実焼結機の配合に近似した原料を用いて粉コークス配合率 3.75%，原料水分 4.0% 一定の条件下¹¹⁾で、焼結鉱全 SiO_2 量を珪石の添加により 3 水準、塩基度はこれに応じて石灰石の添加量の調整で各 SiO_2 水準ごとにそれぞれ 6 水準変化させて焼結鉱気孔率への影響を調査した。この結果を Fig. 8 にまとめて示す。焼結鉱の気孔率は SiO_2 の増加、塩基度の上昇に伴って

平行直線的に低下傾向を示した。これはスラグ構成成分の増加による焼結反応過程の融液生成量の増加と塩基度の変化が融体の流動性を改善し充填層空隙を減少させた結果と考えられる。

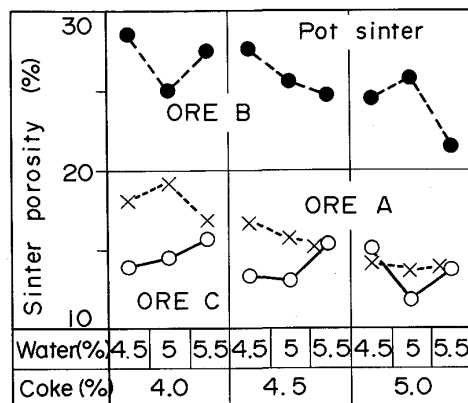
以上のごとく主に実験結果を中心として焼結鉱気孔率への影響要因とその効果について検討してきたが、原料特性の面では鉄鉱石そのものの性状と粒子径、操業条件からは焼結反応時に生成する融液量とその性質が支配的要素となつているものと考えられる。

4. 気孔形成モデル

Fig. 9 には焼結鉱気孔形成過程の概念図を示した。第 1 段階は擬似粒化された原料充填層が排風機の吸引力で冷間の層高収縮を生ずる。実焼結機の場合には排風機による吸引と層表面への点火がほぼ同時に行われるため、實際上熱間収縮と冷間収縮はまとめて評価される。原料充填層内の空間は大きく二つに分類され、一つは擬似粒子内部の気孔でこれには鉱石粒子が本来保有する気孔と核粒子の外周付着微粉層に介在する気孔が含まれる。他の一つは擬似粒子同志の間隙に介在する空隙であり、一般に前者に比較してより大きなサイズを持つと考えられる。この原料充填層は第 2 段階として層表面への点火に引き続き焼結反応が進行し、最終的に大塊ブロック状の焼結ケーキが形成される。昇温加熱過程では付着水分や鉱石中結合水の脱水と粉コークスおよび石灰石の一部が気化して加熱以前に固体または液体として占有していた空間は新たに気孔となる。さらに高温下では鉱石と媒溶材の熔融流動化が生じて粒子間空隙を埋め、全体として気孔空隙の再配置と層の緻密化が進行する。最終段階は焼結ケーキの破碎に伴って見掛け上気孔空隙の消滅が起こり、比較的小さな気孔が焼結鉱成品に残存し、これは JIS 気孔率測定法に基づいて計測される。

4.1 焼結ケーキ気孔率

Fig. 9 の模式図にて原料充填層の初期装入層高を H 、冷間収縮量 h_1 、熱間収縮量 h_2 とし、さらに擬似粒子内気孔率 ϵ_1 、擬似粒子間空隙率 ϵ_2 、焼結過程での原料中気化物質の体積率 R_v 及び充填層の平均断面積を A と



Water content of ore A: indicated value +1.5%
Fig. 7. Influence of sintering conditions on sinter porosity.

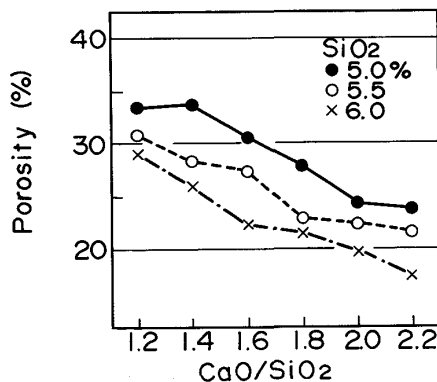


Fig. 8. Influence of basicity and SiO_2 content in sinter on porosity of sinter.

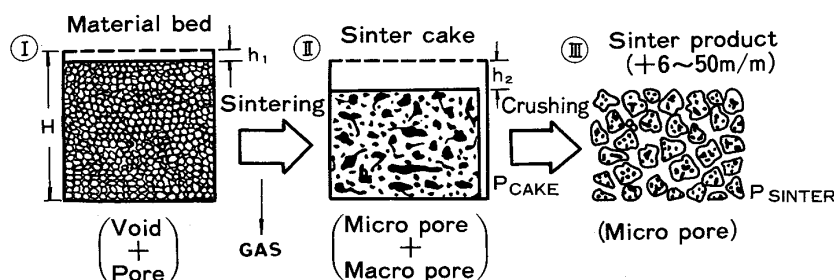


Fig. 9. General conception of sinter pore formation.

すれば、冷間吸引層収縮後の固体占有体積 V は次式で表される。

$$V = (H - h_1) \cdot A \cdot (1 - \varepsilon_1)(1 - R_v) \cdots \cdots (1)$$

また、焼結完了後の焼結ケーキ気孔率を P_c とし、充填層の径方向の収縮を無視できると仮定すれば、焼結ケーキ中の固体占有体積 V は焼結反応の前後で変わらずに保存され、

$$V = (H - h_1 - h_2) \cdot A \cdot (1 - P_c) \cdots \cdots (2)$$

と表現される。

(1), (2) 式より焼結ケーキ気孔率 P_c は

$$P_c = 1 - \{(H - h_1)/(H - h_1 - h_2)\} \\ (1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - R_v) \cdots \cdots (3)$$

と求められる。

(3) 式において原料初期層高の基準を装入時点でなく焼結開始時の状態に選び、熱間収縮率 $\varphi_2 = h_2/(H - h_1)$ を定義すれば、(3) 式は以下に変換される。

$$P_c = 1 - \{1/(1 - \varphi_2)\}(1 - \varepsilon_1)(1 - \varepsilon_2)(1 - R_v) \\ \cdots \cdots (4)$$

ここで熱間収縮率 φ_2 (—) は実測値であるが次式のように融体量とその性質とを要因としてモデル計算を可能とした。

$$\varphi_2 = 0.147 Q - 0.0512 \varphi_1 + 0.0715 \cdots \cdots (5)$$

ここで、融体量には前報⁷⁾で示した溶融率 Q (—) を用い、融体の性質を代表する流動性指数 φ_1 (—) は(6)式により化学成分(%)の1次関数として与えた。

$$\varphi_1 = 0.0157(\text{CaO}) + 0.016(\text{SiO}_2) - 0.181(\text{Al}_2\text{O}_3) \\ - 0.1(\text{MgO}) + 0.01(\text{FeO}) + 1.0 \cdots \cdots (6)$$

各因子の影響係数はこれまでの鍋試験の熱間収縮率実測値と一致するようパラメーター・フィッティングで求めた。焼結鉍成分(CaO)、(SiO₂)及び(FeO)は流動性指数を高める方向に、(Al₂O₃)や(MgO)成分は逆に低下させる方向の要因として作用する。各成分の中で(Al₂O₃)の流動化抑制効果は係数的に影響が大きく前出 Fig. 5 の結果とも整合する。(MgO)は高炉スラグ組成では流動性改善成分と位置づけられているが、焼結成分系では MgO 含有原料は一般に難溶融性と評価する報告¹²⁾が多い。

次に(4)式に関して、擬似粒子内気孔率 ε_1 (—)、擬似粒子間空隙率 ε_2 (—)及び加熱時気化物質の占有体積率 R_v (—)は、造粒時添加水分による擬似粒子の体積変化を無視すれば、それぞれ次式で近似できる。

$$\varepsilon_1 = (\rho_2^* - \rho_1^*)/\rho_2^* \div 1 - \{\bar{\rho}_1(\bar{\rho}_2 \cdot w + 1 - w)\} / \{\bar{\rho}_2(\bar{\rho}_1 \cdot w + 1 - w)\} \cdots \cdots (7)$$

$$\varepsilon_2 = (\rho_1^* - \rho_3^*)/\rho_1^* \div 1 - \{\rho_3(\bar{\rho}_1 \cdot w + 1 - w)/\bar{\rho}_1\} \\ \cdots \cdots (8)$$

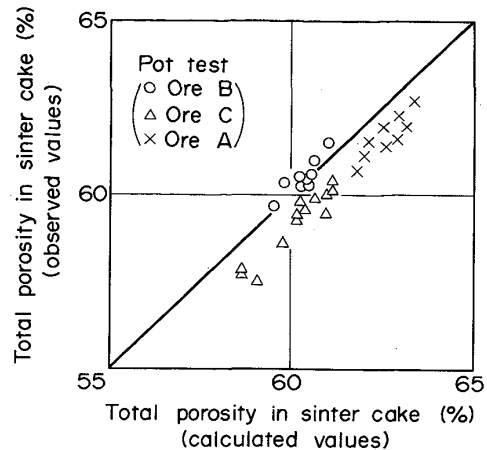


Fig. 10. Comparison between observed values of total porosity in sinter cake and calculated ones.

$$R_v = 0.85 \cdot C(1 - w) + 0.43 \cdot L(1 - w) \\ + W_0(1 - w) + w \cdots \cdots (9)$$

ここで、 ρ_1^* : 擬似粒子見掛け密度 (g/cm³), ρ_2^* : 擬似粒子真密度 (g/cm³), ρ_3^* : 充填層嵩密度 (g/cm³), $\bar{\rho}_1$: 配合原料見掛け密度 (g/cm³), $\bar{\rho}_2$: 配合原料真密度 (g/cm³), ρ_3 : 充填層嵩密度(乾量) (g/cm³), w : 原料含水分率(—), C : コークス配合率(—), L : 石灰石配合率(—), W_0 : 配合原料結合水含有率(—), ただし、アスタリスク付きの記号は湿量ベース, C , L , W_0 は体積率に換算して計算される。従つて、前報⁷⁾で示した方法で溶融率 Q が与えられれば、(5)~(9)式を用いて焼結ケーキの全気孔空隙率が(4)式により定量的に求められる。

Fig. 10 には上記のモデルを用いて計算した予測値と実測値との対応を示した。この結果によると両者はほぼ 60% 前後の値を示し、焼結ケーキの高体積の半分程度が空隙もしくは気孔で占められている。計算値に比べて実測値の方が約 1% 低目に得られているが、絶対値の大きさからみて十分な予測精度と思われる。またここでは 3 種類の鉍石鉍柄単味配合鍋試験結果を例として示したが、鉍石鉍柄別には鉍石 A が高目、鉍石 C では低目の気孔率が得られており鉍石鉍柄特性の影響がうかがえる。

4.2 焼結鉍成品気孔率

焼結ケーキの破碎整粒過程を経て製造される焼結鉍成品中に残存する気孔の特徴として、これまでの実験結果から JIS 法で実測される気孔は閉気孔のすべてと約 0.5 mm 径以下の開気孔である。ここで焼結ケーキの破碎を経て焼結鉍成品に残留し JIS 法で計測される気孔をマイクロ気孔と定義し、その主な発生源は原料鉍石擬似粒子内の初期マイクロ気孔と仮定する。これに対して、破

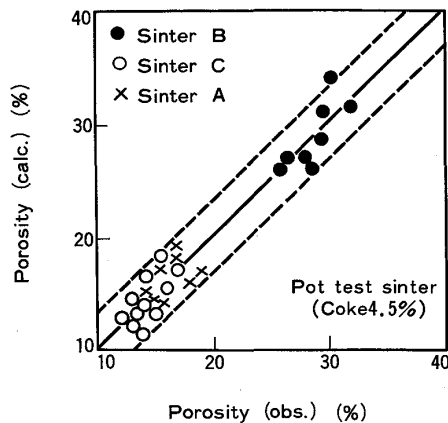


Fig. 11. Comparison between observed porosity in sinter and calculated one.

砕時に見掛け上消滅する気孔をマクロ気孔と定義し、これは擬似粒子間の初期マクロ気孔に主として由来するものの仮定する。

原料充填状態での初期ミクロ気孔率 ε_0 と初期マクロ気孔率 E_0 に関して次式が成立する。

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_1 + R_v \quad (10)$$

$$E_0 = \varepsilon_2 \quad (11)$$

次に原料充填層の鉱石の熔融に伴って初期ミクロ気孔は一部合体してマクロ気孔に移行し、でき上がる焼結ケーキ中のミクロ気孔率 ε とマクロ気孔率 E のバランスは、溶融率 Q と融液流動性指数 φ_1 に依存して次式で表す。

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \varphi_1 \cdot Q \cdot \varepsilon_0 = \varepsilon_0 (1 - \varphi_1 \cdot Q) \quad (12)$$

$$E = E_0 + \varphi_1 \cdot Q \cdot \varepsilon_0 \quad (13)$$

これより、焼結ケーキの破碎整粒によって得られる焼結鉱成品気孔率 P_s は、焼結ケーキのマクロ気孔を除く全体積中のミクロ気孔の割合で求められる。

$$P_s = \varepsilon / (1 - E) \quad (14)$$

Fig. 11 には鉱石 A, B 及び C それぞれの単味配合鍋試験によって得られた焼結鉱成品 3 種の気孔率実測値と本モデルによる計算値との対応関係を示した。この結果はほぼ $\pm 3\%$ の精度範囲内で両者は良く一致しており

性状の異なる鉱石配合が一律の関係で整理され、他の鉱石や多種銘柄の組合せ配合の場合にも適用可能と考えられる。ここで焼結操作条件が同一の場合、鉱石 B 配合焼結鉱は高い気孔率が得られる一方で、緻密質でミクロ気孔形成要因の少ない鉱石 C や溶融性が良好でミクロ気孔が減少する鉱石 A 配合焼結鉱の気孔率は低下し、合理的な説明が可能である。

5. 結 言

焼結鉱品質に大きな影響を及ぼす要因として、焼結鉱気孔率は鉱物相構成とともに重要な役割をもっている。焼結鉱の気孔形成過程に関して基礎的な実験を行い、実験結果の解析に基づいて焼結鉱気孔率を定量的に推定可能なモデルを開発した。モデルによる予測計算結果と各種焼結鉱についての気孔率実測値とは良い一致を示した。

今後は焼結鉱品質の定量推定モデルの開発を進める。

文 献

- 1) 渋谷悌二, 斎藤 汎, 谷中秀臣, 竹元克寛: 鉄と鋼, **69** (1983), S121
- 2) 前田敬之, 林 炳鑑, 小野陽一: 鉄と鋼, **70** (1984), S82
- 3) 神坂栄治, 相馬英明, 和島正巳: 鉄と鋼, **70** (1984), S816
- 4) 国分春生, 板谷 宏, 児玉琢磨, 中西恭二: 鉄と鋼, **71** (1985), S46
- 5) 佐藤勝彦, 鈴木 悟, 沢村靖昌, 斧 勝也: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 2215
- 6) 日本鉄鋼協会共同研究会製鉄部会: 鉄と鋼, **49** (1963), p. 1228
- 7) 佐藤 駿, 川口尊三, 一伊達 稔, 吉永真弓: 鉄と鋼, **70** (1984), p. 657
- 8) H. NODA, H. YANAKA, R. YAMAMOTO, H. KAWATA and Y. YAMAOKA: Trans. ISIJ, **25** (1985), p. 1103
- 9) 肥田行博, 伊藤 薫, 岡崎 潤, 佐々木 稔, 梅津善徳: 鉄と鋼, **68** (1982), p. 2166
- 10) 佐藤 駿, 一伊達稔, 加藤和正, 川口尊三: 鉄と鋼, **69** (1983), S744
- 11) 安元邦夫, 小野啓雄, 山本一博: 鉄と鋼, **67** (1981), S46
- 12) 古井健夫, 菅原欣一, 川頭正彦, 清水 亮, 仲田泰三: 製鉄研究, **272** (1971), p. 9689