

© 1984 ISIJ

焼結過程における溶融現象のモデル化

論文

佐藤 駿*・川口 尊三*・一伊達 稔*³・吉永 真弓*³

Melting Model of Iron Ore Sintering

Shun SATO, Takazō KAWAGUCHI, Minoru ICHIDATE, and Mayumi YOSHINAGA

Synopsis:

A fundamental study was carried out on melting process and its primary controlling factors in the iron ore sintering. Melting properties of sinter feed were evaluated by the volume ratio of the melted portion to the substantial solid of sinter, "melting ratio". From sinter pot test, the correlation between the melting ratio and the sinter operational conditions was studied. The melting process in sintering depended on the holding time in high-temperature zone, ore particle size, its chemical composition, and porosity after dehydration. On the basis of the obtained information, a model simulation of sinter melting process was developed and was discussed by comparing the observed values and the calculated ones by the model. The calculated values were in good agreement with the observed values. This melting model for sintering process can be applied to the estimation of sinter feed and analysis of sinter quality.

1. 緒 言

焼結過程における溶融は鉄鉱石中酸化鉄および脈石成分と媒溶材として添加された石灰石の CaO 成分とが内装固体燃料粉コークスの燃焼発熱により約 1150°C 以上の温度域で起こる。焼結原料の溶融反応に関して従来鉱物化学的観点から数多くの報告^{1)~5)}が提出されており、特にこの系の低融点鉱物であるカルシウムフェライト (Calcium Ferrite) とスラグに関する知見は重要である。

しかしながら焼結過程は極めて短時間内での急激な温度変化を特徴とする非平衡状態で起こり、かつ焼結原料の幅広い粒度分布構成と多くの化学成分の偏在によつて生ずる局所的な不均一さのために、焼結溶融過程の定量的な取り扱いが容易でない。

本稿では焼結溶融過程の物理的な面も考慮しつつ基礎的な実験を行い、いくつかの有用な知見を得た。さらにこの結果に基づいて単純化された溶融モデル⁶⁾を開発した。本モデルによる計算結果と実測値とは良い一致を示し、その有効性が確認されたので報告する。

2. 実験方法

2.1 溶融率の定義と測定方法

基礎実験の開始に先立つて焼結鉱の溶融量の評価方法

を定める必要がある。焼結配合原料はそのすべてが溶融して焼結鉱を構成するのではなく一部の原料鉱石は未溶融状態で残留する。そこで焼結鉱中の気孔空隙部を除いた実体部分の体積中に占める溶融部分の体積比率をもつて「溶融率」と定めた。この溶融部分には低融点鉱物であるカルシウムフェライトやスラグの他にもそれらの中に介在する 2 次生成ヘマタイト (Hematite) Fe_2O_3 やマグネタイト (Magnetite) Fe_3O_4 も溶融の過程で生成するので、ともに含まれるものとし、返鉱についてはそれ自身が焼結鉱と同様の組成を有し再焼結時にはほぼ 100% 溶融することを予備試験で確認しており、溶融部として取り扱った。これら溶融部と未溶融残存鉱石との識別は低倍率マクロ組織写真の未溶融部をハンドトレースでコントラストをつけ、画像処理装置を用いて容易に判別できた。溶融率測定に用いた試料は 70 m/m 径の焼結ケーキ樹脂埋込試料と破碎後の焼結鉱粒子 (15~20 mm 径) の埋込研磨試料の 2 種類を用いた。前者は試験鍋の焼成進行方向に直角な水平 6 断面に切断され、後者は代表粒子 8 個を 1 実験としていずれも全断面視野内のマクロ組織を樹脂空隙部と未溶融残存鉱石部に区別し画像処理装置 (Quantimet 720) を用いてそれぞれの部分の面積を定量した。

Fig. 1 には試料埋込樹脂切断面とそのマクロ組織写真のハンドトレース原画を模式的に示すが、高さ h 、底

昭和 56 年 11 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 3 月 10 日受付 (Received Mar. 10, 1983)

* 住友金属工業(株)中央技術研究所波崎研究センター (Hasaki Research Center, Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasakimachi Kashima-gun Ibaraki pref. 314-04)

*2 住友金属工業(株)中央技術研究所波崎研究センター 工博 (Hasaki Research Center, Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

*3 住友金属工業(株)中央技術研究所波崎研究センター 理博 (Hasaki Research Center, Central Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

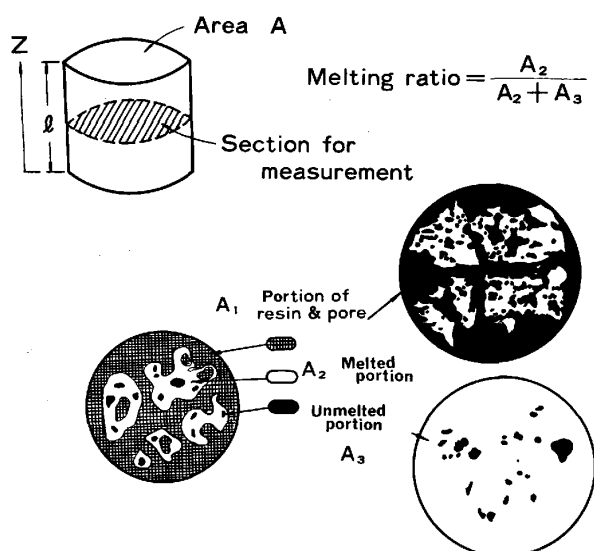


Fig. 1. Schematic diagram for measurement of melting ratio.

面積 A なる円筒状埋込試料の底面に平行な任意の位置 Z で切断し、この任意断面 $S(Z)$ の樹脂空隙部、溶融部及び未溶融部の面積率をそれぞれ $S_a(Z)$, $S_b(Z)$, $S_c(Z)$, 全試料に占める上記各部の体積を V_a , V_b , V_c とすると

$$V_a = \int_0^l A \cdot S_a(Z) dZ = A \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (S_{a(i)} \cdot \Delta Z)$$

$$= A \cdot l \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n (S_{a(i)} / n) = A \cdot l \cdot \bar{S}_a \dots \dots \dots (1)$$

ここで $S_{a(i)}$ は Z 軸区間 $0 \sim l$ の間の任意断面 i で計測された樹脂空隙部面積を表し、 \bar{S}_a は全断面の樹脂空隙部面積率 $S_a(Z)$ の算術平均値を示す。

V_a と同様に、

$$V_b = A \cdot l \cdot \bar{S}_b, V_c = A \cdot l \cdot \bar{S}_c \dots \dots \dots (2)$$

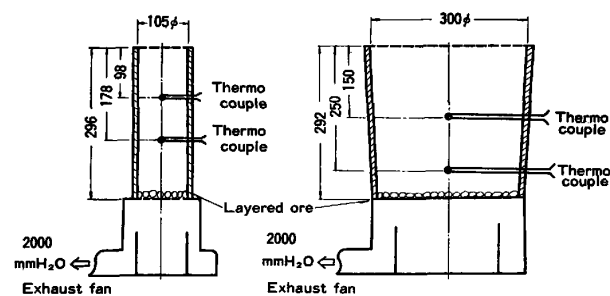
従つて各部分の体積 $V_{a \sim c}$ の精度は切断面各部分の平均面積率の測定精度に依存し、面積計測視野数が多いほど精度は向上する。(1)式及び(2)式より焼結鉱中の溶融部分の占める体積率 Q は(3)式で与えられる。

$$Q = V_b / (V_b + V_c) = \bar{S}_b / (\bar{S}_b + \bar{S}_c)$$

$$= (1 - \bar{S}_a - \bar{S}_c) / (1 - \bar{S}_a) \dots \dots \dots (3)$$

2.2 試験鍋による焼結実験方法

焼結ケーキ及び焼結鉱成品試料の作成のため Fig. 2 に示すように 105 mm ϕ 径、300 mm 層厚の小型焼結鍋と 300 mm ϕ 径、300 mm 層厚の標準焼結鍋の2種類を使用し製鉄部会法⁷⁾に準拠して焼結を行つた。小型鍋による試験はコークス配合量と吸引風量を変化させた時の層厚方向でのヒートパターンと溶融率との関係を調査するため焼結ケーキのまま樹脂埋込され、300 mm ϕ 径鍋



(Measurement for sinter cake) (Measurement for sinter product)
Fig. 2. Pot test apparatus and measuring position of temperature.

ではコークス配合量、水分添加量の他に原料鉱石銘柄を種々変更し原料の溶融性について検討するため破碎後の焼結鉱粒子を埋込試料とした。

Table 1 には上記2種類の焼結試験に用いた原料の銘柄別化学成分とその他の基礎性状を一覧表にして示した。また、Table 2 には焼結試験の原料配合構成を示した。いずれの鍋試験においても石灰石と返鉱の配合比率は、それぞれ、13%、16.5% と一定で行つた。

2.3 焼結原料基礎物性の測定方法

焼結原料鉱石の溶融性に関与すると考えられる原料の基礎性状として、粒度分布(代表粒子径)、化学成分組成、鉱石粒子気孔率等が挙げられる。粒度分布は原料を 110°C、2 時間乾燥後標準篩分法で測定し、化学組成は通常の化学分析と蛍光X線分析によつた。

原料化学組成の溶融性への影響を調査するため、63 μ m 以下に微粉碎した種々の原料鉱石銘柄に同じく微粉石灰石を 5~15% の間で配合添加したものを試料として示差熱分析を行い試料の溶融完了温度を測定⁸⁾した。熱分析は大気中昇温速度 10°C/min で 1400°C まで行つた。

鉱石粒子の気孔率は JIS M 8717 による真密度測定値と 5~2 mm 整粒粒子の水中での体積測定より求めた見掛密度測定値とから計算された。通常鉄鉱石類の見掛密度測定法は水銀を媒体として利用する JIS M 8716 で規定されているが、焼結用粉鉱石は粒径が小さく JIS 法の適用に対して安定した測定作業が困難な上、その精度も期待できないのでピクノメーターによる見掛密度測定法を検討した。5~2 mm に整粒した試料鉱石を約 20 g 採取してピクノメーター(内容積 50 ml)に装入し、水銀と水との2種の封入媒体を用いた時の見掛密度測定を行つた。まず測定は水による方法から行い、同一試料を再乾燥した後水銀を媒体とした測定を行つた。測定結果を Table 3 に示すが、両方法の見掛密度測定値の絶対値は当然媒質の物性で異なるが偏差はむしろ水を媒体とする方法が小さく、繰り返し数は十分ではないが鉱石銘

Table 1. Chemical composition and the other properties of raw materials.

Materials	T.Fe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	CW	Apparent density*	Real density	Weight changing ratio	Volume changing ratio	Representative particle size (Median)	Porosity	Porosity after dehydration
(Unit)	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	Wt%	g/cm ³	g/cm ³	—	—	mm	Vol%	Vol%
ORE A	64.7	0.1	1.57	1.53	0.08	2.95	3.30	4.03	4.61	0.97	0.85	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	0.99	0.94	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	0.99	0.96	0.84	10.1	13.8
ORE D	61.3	0.1	6.30	2.75	0.50	0.10	1.45	4.21	4.73	0.99	0.96	1.60	11.0	14.6
ORE E	64.9	1.00	3.60	0.40	0.50	21.9	0.1	4.27	4.98	0.99	0.98	0.30	14.3	16.8
ORE F	64.5	1.64	4.67	0.89	1.07	25.6	0.1	4.71	4.72	0.99	0.98	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	0.92	0.80	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	0.99	0.96	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	0.99	0.95	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	0.98	0.89	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	0.56	0.46	0.94	10.6	
Coke	2.4	0.8	6.30	3.30	0.35	1.3	0	1.00	1.95	0.13	0.10	0.94	48.7	
Return fine	53.3	11.0	7.20	1.95	2.45	8.3	0	3.93	4.53	1.00	1.00	0.53	13.2	

* by "water-picnometer" method

Table 2. Pot test conditions for sinter cake and sinter product.

<Sinter cake>				
Case	1	2	3	
Coke (Wt%)	4.5	5.5	5.5	
Lime stone (Wt%)	13.0	13.0	13.0	
Ore B (Wt%)	66.0	65.2	65.2	
Return fine (Wt%)	16.5	16.3	16.3	
Water content (Wt%)	5.0	5.0	5.0	
Fan valve opening (%)	10	10	7	
Bed height (mm)	300	300	300	
<Sinter product> (Wt%)				
Ore	Lime stone	Return fine	Coke	Water content Run
A	13.0	16.5	4.0, 4.5, 5.0	4.5, 5.0, 5.5 9
B	13.0	16.5	4.0, 4.5, 5.0	4.5, 5.0, 5.5 9
C	13.0	16.5	4.0, 4.5, 5.0	6.5, 7.0, 7.5 12
D~G	13.0	16.5	4.5	4.5, 4.5, 6.0 8
Mix	13.0	16.5	4.5	" 6

Table 3. Measurements of apparent density of dehydrated iron ores.

Sample*	"Water-picnometer" method	Mercury-picnometer method
Ore B-1	4.335 g/cm ³	3.466 g/cm ³
-2	4.337	3.458
-3	4.361	3.526
-4	4.380	3.526
-5	4.365	3.449
Ore B	$\bar{x}=4.356$ ($\sigma=0.017$)	3.485 ($\sigma=0.034$)
G	3.533	2.989
C	4.820	4.246
F	4.742	4.236

*. Sieved to 2~5 mm in size and heated at 450°C for 2 h

柄の識別に適用できることが確められた。また両者の間には対応関係もあるので互いの換算も可能である。本研究では作業性を考慮して水を媒体とする見掛密度測定法を採用することとした。さらに、加熱過程を経た鉱石の気孔率は結合水の脱水のため常温時よりも高くなり引き続き溶融反応に影響を及ぼすことが考えられたので⁹⁾、450°C、2h 加熱後の鉱石粒子についても同様の手法で気孔率を測定した。加熱条件の設定は脱水後のシタリ

ングをできるだけ起こさずに結合水の放出が行われるよう低温域を選定した。常温での気孔率に対して、これを高温粒子気孔率と名づけた。

3. 実験結果および考察

3.1 焼結ケーキの溶融率と焼成条件との関係

Fig. 3 には 105 mm^φ 径小型鍋による焼結ケーキのヒートパターンと層厚方向の溶融率の推移を示した。層内温度変化は下層に近いほど、粉コークス配合率の高い

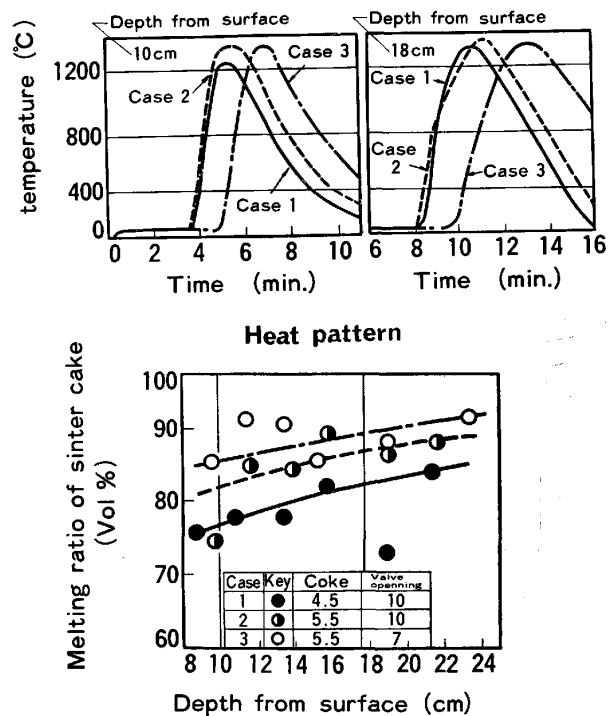


Fig. 3. Distribution of the melting ratio in the bed.

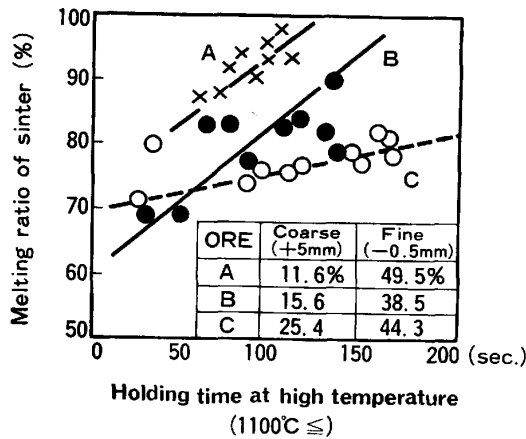


Fig. 4. Relationship between the melting ratio of sinter and the holding time at high temperature.

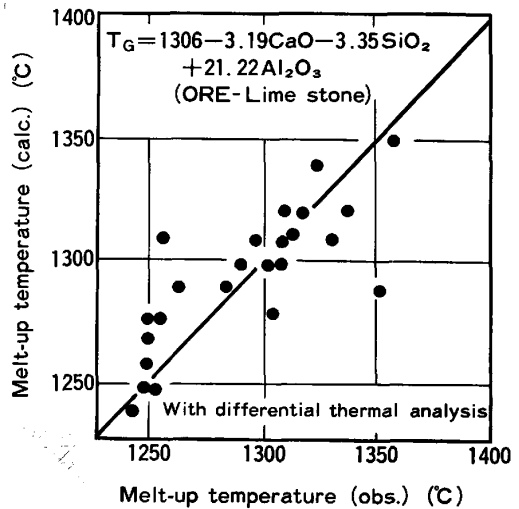
ほど、また吸引風量を絞つて焼成速度を遅くするほど最高到達温度が高い傾向を示し、1100°C以上の高温帯保持時間も延長化することが確認された。このことから高温部の到達温度と保持時間とは溶融率に密接な関係をもつことが確認されたが、モデル化にあつては溶融率に及ぼす熱的要因としてより相関度の高い高温帯保持時間で代表させることとした。

3.2 焼結鉍成品の溶融率と原料条件との関係

Fig. 4 には3種の原料鉍石銘柄について層内高温保持時間の成品溶融率に及ぼす影響を示した。これによると Fig. 3 で示した焼結ケーキの溶融率と同様に焼結鉍成品についても溶融率と高温保持時間の関係はほぼ正相関関係にあることがわかる。また層内高温保持時間が同じであつても使用した原料鉍石銘柄種によつて溶融率は異なつており、鉍石銘柄種の溶融性の差に起因するものと考えられる。Fig. 4 に添付した表には鉍石銘柄3種の粒度の粗粒と微粉の構成比率を示すが、鉍石Aは微粉型で逆にCは粗粒比率が高い。従つて鉍石粒度の効果に着目すれば Fig. 4 の高温保持時間の短い側では鉍石の微粉部分の溶融が進行する領域と考えられるので微粉構成比率の高い順に溶融率は高く、逆に高温保持時間の長い側では粗粒部分の溶融進行領域と考えると粗粒比率の小さい銘柄ほど溶融率が高くなるものと説明される。

3.3 溶融率に及ぼす原料基礎物性の影響

Fig. 5 には原料の化学成分構成の溶融性への影響を示した⁹⁾。Table 1 に示した鉍石単味銘柄の微粉に石灰石の微粉を種々の配合比で添加した試料の示差熱分析による溶融完了温度実測値に対して、配合試料の各化学成分を因子として重回帰分析を行い1次回帰式を求めた。この結果によると、回帰式による計算値と実測溶融完了温度とは良い対応を示し、CaO 及び SiO₂ 成分は溶融



(Melt-up temperature: the finishing temperature of the final endothermic reaction measured with D.T.A.)
Fig. 5. Multiple regression analysis of melt-up temperature.

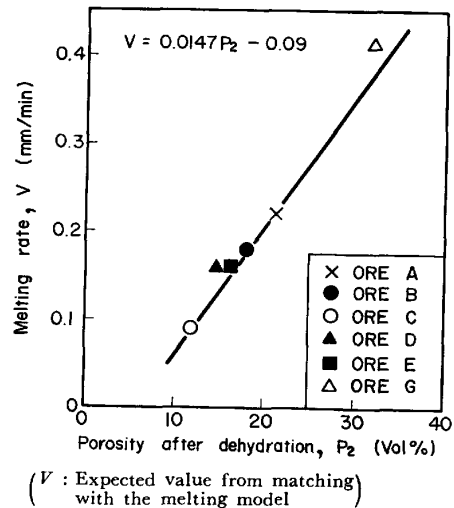


Fig. 6. Relationship between the melting rate and the porosity after dehydration.

完了温度を引き下げ Al₂O₃ 成分はこれを高める作用がある。なお、予想に反して FeO 成分の影響係数は小さく前記3成分に対し無視できる程度であつたので回帰式中からは削除した。

鉍石の溶融反応は主として媒溶材成分を含む初期融液と鉍石粒子との界面における反応によつてその進行が支配されるものと考えられるので鉍石粒子の反応界面積の大きさの影響は重要と思われる。鉄鉍石、特に褐鉄鉍にはかなりの結合水が含有することは良く知られており、この種の鉍石は溶融に先立つ加熱過程で結合水を放出し脱水後の粒子の気孔率が増すために見かけの溶融速度を高める可能性がある。Fig. 6 には鉍石加熱処理後の高温粒子気孔率の実測値とこれまでの焼結鍋試験での溶融

率測定結果を満足させるための見かけの溶融速度期待値(詳細は後述する)との対応をとつたものである。これによると高温粒子気孔率と見かけの溶融速度は正相関関係となり、結合水含有率、すなわち高温粒子気孔率の大きな鉍石銘柄ほど溶融速度大となることがモデルの整合性にとって期待される。溶融性と加熱後気孔割合が良く対応することは他の報告例¹⁰⁾もあり、高温粒子気孔率で整理することは一般性があると考えられる。

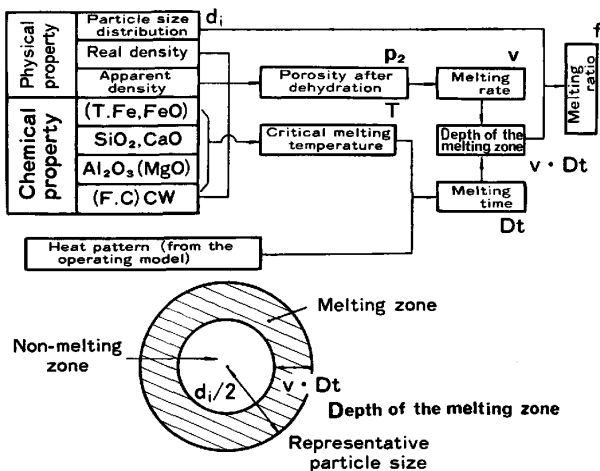
4. 溶融モデル

前章で得られた実験結果と検討に基づいて、焼結過程の溶融現象を支配する基本要因としてヒートパターン(高温保持時間)、粒度分布、化学成分及び高温粒子気孔率を選択し、原料粒子の溶融過程を体積変化の過程として把握し焼結鉍の溶融率を計算する溶融モデルの開発を試みた。本モデルの前提条件として以下の仮定をおいた。

- 1) 鉍石粒子内の熱伝導は良好であり粒子表面と内部の温度差は無視する。
- 2) 鉍石粒子は前処理段階で擬似粒化されるが本来単一粒子ではなく溶融時は乾燥粒子状態として取り扱う。粒子形状は球近似を採用する。
- 3) 鉍石粒子は配合原料化学成分から導かれる溶融限界温度以上の温度域で溶融し、粒子表面から内部へと高温粒子気孔率に依存する一定の速度で溶融が進行する。

4.1 溶融モデルの構成

Fig. 7 には溶融モデルの概念とフローを示した。モデルへの入力には図に挙げられた項目の他に実際には配合原料を取り扱うため各鉍石銘柄の体積配合比率が含まれ



$$\text{Melting ratio, } f = \sum_i \left[\left\{ 1 - \left(1 - \frac{2V \cdot Dt}{d_i} \right)^3 \right\} \omega_i \right]$$

Fig. 7. Outline and flow diagram of the sinter melting model.

る。配合原料中の揮発成分(本モデルでは溶融にとつて最も影響の強い結合水のみ採用)が加熱に伴って放出された後の原料粒子は高温粒子気孔率(p_2)で代表される反応界面の増加をもたらし見かけの溶融速度(V)を支配する。一方焼結過程のヒートパターンによつて原料粒子に供給される熱は、原料鉍石の化学成分組成で定められる溶融限界温度(T)以上に層内温度が保持されている時間だけ溶融反応のエネルギー源として寄与できる。鉍石粒子表面から内部へ向けての溶融反応の進行はこの溶融時間(Dt)内に前述した一定の溶融速度で行われ、両者の積($V \cdot Dt$)として鉍石粒子表面から内部へ径方向に沿つて進行した溶融深度が決定される。従つて原料鉍石の粒度分布構成の中で粒子半径が溶融深度より小さな鉍石粒子は100%溶融し、溶融深度より大なる粒子半径をもつ鉍石粒子はその差の分だけの未溶融部を内部に残留する。

この関係を全構成銘柄、全粒度分布について加熱溶融過程の体積変化率の修正を加味しつつ、Jander型の反応モデルに類似した形で溶融体積率を計算したものが本モデルである。

4.2 体積バランス

焼結の昇温加熱過程において鉍石中の揮発成分の存在のため、加熱後の原料粒子の密度や体積は常温時の値とは異なってくる。常温での*i*銘柄の重量を w_{1i} 、真密度を ρ_{1i} とし、加熱後の重量を w_{2i} 、真密度を ρ_{2i} とすれば、加熱前後の重量変化比 m_i は

$$m_i = w_{2i} / w_{1i} \dots\dots\dots (4)$$

であるから体積変化比 v_i は

$$v_i = (w_{2i} / \rho_{2i}) / (w_{1i} / \rho_{1i}) = m_i (\rho_{1i} / \rho_{2i}) \dots\dots\dots (5)$$

となる。鉄鉍石において揮発成分を結合水のみとし結合水含有率を x_i とすれば

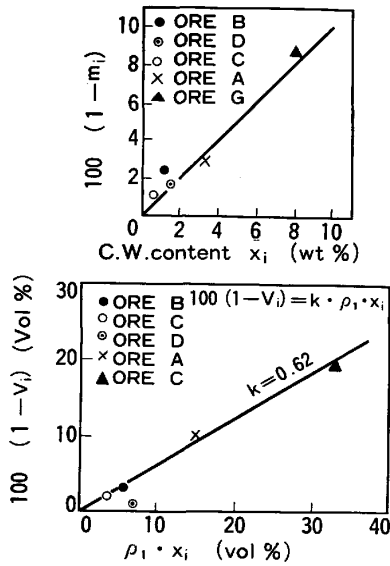
$$m_i = 1 - (x_i / 100) \dots\dots\dots (6)$$

$$v_i = 1 - k \rho_{1i} (1 - m_i) \dots\dots\dots (7)$$

ここで k は通常的自由水の占める体積に対する鉍石中結合水として占める体積の比を意味し Fig. 8 に示されるように鉍石銘柄種に関係なくほぼ $k=0.62$ の値をとる。 k の値が1とならない理由は、結合水を含むオキソ水酸化鉄($FeOOH$)構造が加熱脱水後の体積測定時にヘマタイト構造として計測されているためと説明できる。

次に鉍石に石灰石を配合し焼結反応を起こさせた時の体積変化について検討を行う。焼結反応後の重量変化比を m^* 、体積変化比を v^* 、焼結鉍の真密度を ρ^* とすれば、全反応における体積変化から

$$v^* = m^* \cdot (\rho_1 / \rho^*) \dots\dots\dots (8)$$



m_i : weight changing ratio, ρ_1 : real density at room temperature
 v_i : volume changing ratio, x_i : combined water content
 Fig. 8. Weight and volume changing ratio before and after dehydration compared with the combined water content.

ここで m^* は焼結反応過程で多少の酸化還元反応が生じ変化するが影響は小さいと考えて $m^*=m$ とする。

(8)式より焼結反応の体積変化 k^* は

$$k^* = (v^*/v) = (m/v) \cdot (\rho_1/\rho^*) \dots\dots\dots (9)$$

が得られる。この式で焼結鉱成品の真密度 ρ^* を測定すれば他はこれまでの実験結果で得られているので k^* が求められる。この結果を Fig. 9 に示すが $k^*=1.029$ となり、焼結反応前後の体積変化はほぼ無視することができる。

4.3 高温粒子気孔率と溶融速度

高温粒子気孔率 p_2 は、常温での粒子気孔率 p_1 、見掛密度 d_1 、加熱後の見掛密度 d_2 より以下のごとく計算することができる。

$$p_{2i} = 1 - (d_{2i}/\rho_{2i}) = 1 - (m_i \cdot d_{1i}/\rho_{2i}) \\ = 1 - (v_i \cdot d_{1i}/\rho_{1i}) = 1 - v_i(1 - p_{1i}) \dots\dots\dots (10)$$

高温粒子気孔率 p_2 と見かけの溶融速度 V との関係は前出 Fig. 6 の予測計算結果より(11)式で示される。

$$V = 0.0147p_2 - 0.09 \dots\dots\dots (11)$$

4.4 溶融限界温度

本モデルに用いる溶融限界温度は溶融の開始温度を意味するが前出 Fig. 5 の実験結果は溶融完了温度に関する知見であり換算が必要となる。示差熱分析結果によれば銘柄による溶融開始温度の差は小さく検出感度が弱いので便法として溶融完了温度 T_G と開始温度 T との間には一定の温度差 ΔT が存在するものと仮定し、 ΔT の決定についてはこれまでの鍋試験結果で得られた溶融率

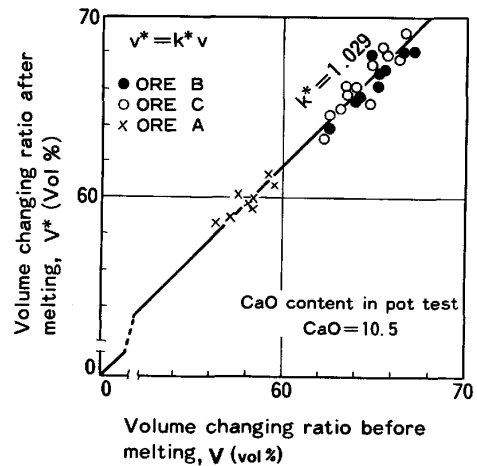


Fig. 9. Volume changing ratio of the materials after melting compared with the one before melting.

の実測値に対して、計算値が最も一致するように溶融速度 V と温度差 ΔT をパラメータとしてフィッティング処理を行つた。この結果を Fig. 10 (焼結ケーキ溶融率測定実験) および Fig. 11 (焼結鉱成品溶融率測定実験) に示した。

これらによると $\Delta T=200^\circ\text{C}$ の場合が最も良く実測データと一致しており、特に焼結ケーキの実験の場合には実験に用いられた鉱石Bの溶融速度 V の値とも良い対応を示している。これらの検討により $\Delta T=200$ を採用し溶融限界温度 T は次式で与えた。

$$T = T_G - \Delta T = 1106 - 3.19\text{CaO} \\ - 3.35\text{SiO}_2 + 21.22\text{Al}_2\text{O}_3 \dots\dots\dots (12)$$

4.5 ヒートパターン

今回の報告では直接鍋試験結果により得られたヒートパターンを前節で与えられた溶融限界温度で切つて溶融限界温度以上に保持されている時間を算出しているが、本来ヒートパターン自身も原料配合条件と操業条件とが入力として与えられる中で化学工学的的手法により予測計算されるべきものであろう。このような焼結過程の化学工学的モデルは従来から多くの報告¹¹⁾¹²⁾があり著者等も類似のモデルを開発している¹³⁾が、本報告の主旨からは外れるのでここでは触れない。

4.6 溶融率

最後に Fig. 7 のモデル概念図で示される溶融率の計算は Jander 式と類似の形¹⁴⁾で表される。

すなわち、ある粒度区分における代表粒子径を d_i 、同区分に含まれる粒子の重量比率を w_i とし、溶融深度 $V \cdot D_t$ を用いると

$$f = \sum_i \left[\left\{ 1 - \left(1 - \frac{2V \cdot D_t}{d_i} \right)^2 \right\} w_i \right] \dots\dots\dots (13)$$

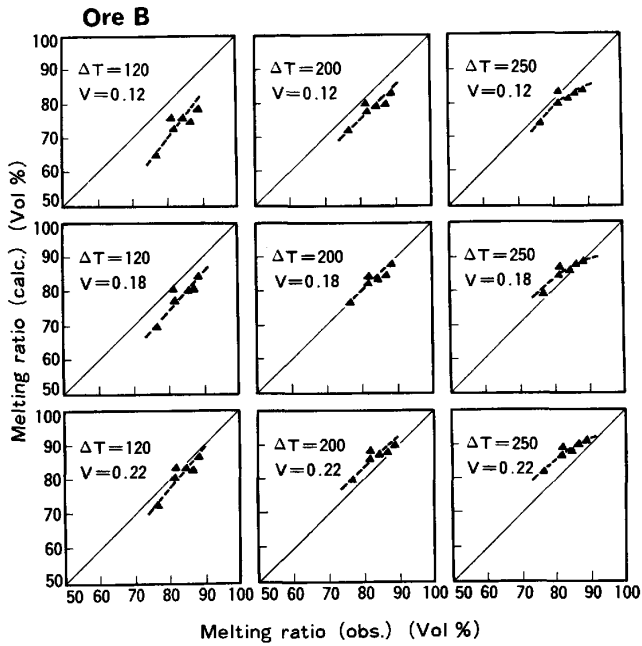


Fig. 10. Fitting results of the melting ratio of sinter cake.

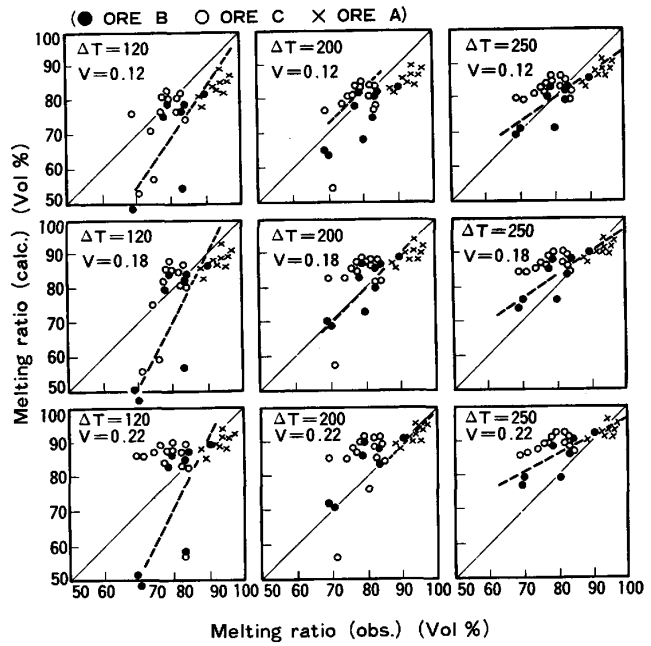


Fig. 11. Fitting results of the melting ratio of sinter product.

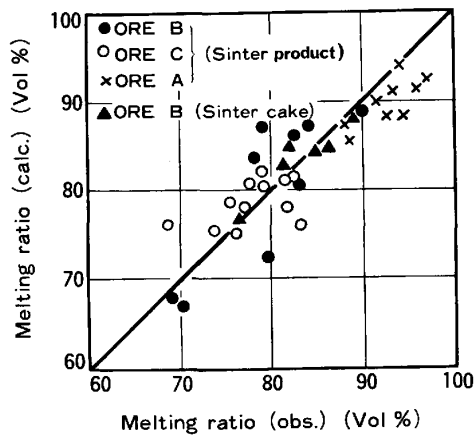


Fig. 12. Calculated melting ratio compared with the observed one.
(Operational condition variable)

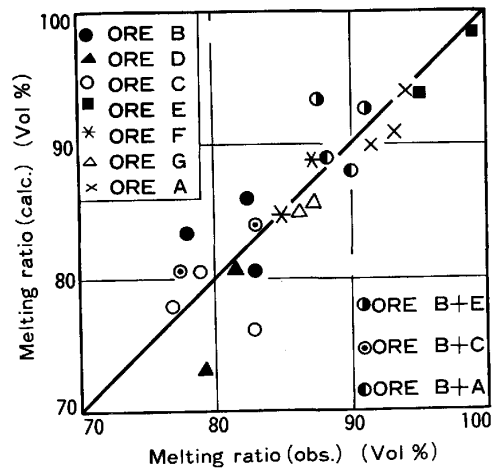


Fig. 13. Calculated melting ratio compared with the observed one.
(Ore material variable)

で与えられる。(13)式は配合原料に含まれるすべての銘柄についてそれぞれ計算が行われ、各銘柄ごとの溶融率 f を前述した体積変化比で補正するとともに累計されて最終的に配合原料の溶融率が算出される。

5. 溶融率実測値とモデル推定計算値との比較

第3章で示した鍋実験による溶融率実測値と本溶融モデルによる推定計算値との対応性を検討した。この結果を Fig. 12 及び Fig. 13 に示す。Fig. 12 は焼結鍋試験の操作条件(粉コークス配合比, 吸引空気量, 原料水分)変更によるヒートパターン変化の場合の溶融率実測

値と計算値との対応を示すが、ほぼ良好な対応性が認められた。

この中で鉱石Bの操作条件の変更は比較的広範囲の溶融率変化を示しており操作条件の変化に敏感な銘柄であることがうかがわれる。また前述したように鉱石銘柄種が同一ならば焼結ケーキの溶融率と焼結鉱成品のそれとはほぼ同レベルの値を示した。

一方 Fig. 13 に示すように鉱石銘柄種を変更した場合の溶融率実測値とモデル推定値との対応も極めて良好な結果が得られた。しかも単味配合の場合のみならず2種銘柄の組み合わせ配合においても良好な対応性が認め

られるので、多種銘柄配合の場合においても本モデルによる加算性が成立すると考えられ実機配合原料への本モデルの適用の可能性が確認された。

6. 溶融率の二、三の適用例

焼結過程における溶融の程度は焼結鉱の結合組織の量の多少を物語るものであるから直接焼結鉱の常温強度や成品歩留りに寄与することが想定される。Fig. 14 には今回の鍋試験で実測された落下強度と溶融率との関係を示した。落下強度は溶融率と比較的良好な正相関が得られており、溶融率は常温性状に対して大きな影響因子として関与している。

また Fig. 15 は溶融モデルを用いて代表的な SiO₂ または SiO₂-MgO 系造滓材の粒度別溶融性を検討したものである。各造滓材銘柄 (蛇紋岩, ニッケル製錬滓及び珪石) の溶融性はカルシウムフェライト融液に造滓材を一定加熱条件で浸漬させたときの溶融深度実測結果を通じて溶融率が計算されたが、これによると珪石及びニッケル製錬滓は現行の破碎粒度で 90% 以上が溶融するのに較べて蛇紋岩は粗粒のため 50% の溶融率にも満たないことがわかる。従つて蛇紋岩を 90% 以上溶融させるためには少なくとも 1mm 以下の粒度にまで粉碎する必要がある。この知見は焼結鉱の低スラグ化¹⁵⁾を志向するとき蛇紋岩等造滓材の適正粉碎度をモデルで与えることを可能とする。本溶融モデルはこの例のように主原料鉱石に限らず他の雑原料の溶融性評価にも十分適用することができる。

7. 結 言

焼結過程における原料鉄鉱石類の溶融現象を基礎実験

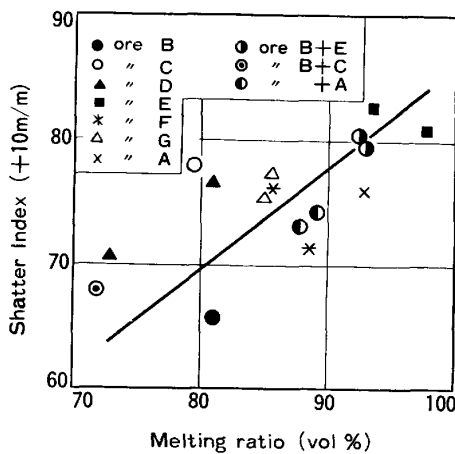


Fig. 14. Relationship between the shatter index and the melting ratio.

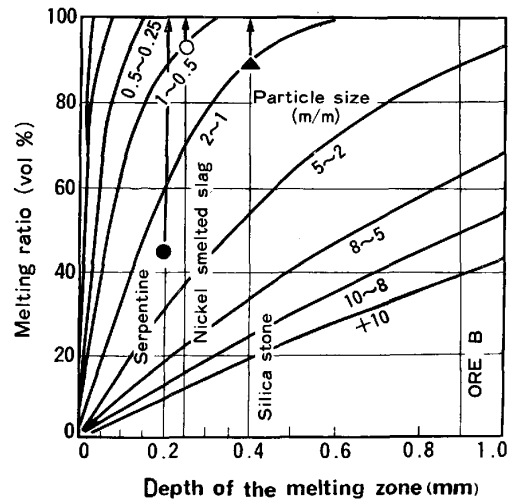


Fig. 15. Relationship between the melting ratio and the depth of the melting zone.

により解明し、簡略化された溶融モデルの開発を試みた結果、モデルによる推定計算値と実測値とは良い一致を示した。本モデルを用いて実機の配合原料の溶融性の評価と焼結鉱常温性状の解明の可能性が確認された。

今後焼結鉱品質の定量化に努めるとともに実操業への適用を検討していきたい。

文 献

- 1) 佐々木稔, 中沢孝夫: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 1217
- 2) 浅田 実, 大森康男, 三本木貞治: 鉄と鋼, 54 (1968), p. 14
- 3) E. MAZANEK and M. WYDERKO: Arch. Eisenhüttenwes., 39 (1968), p. 433
- 4) O. NYQUIST: Agglomeration Intern. Sympo. Philadelphia Pa. (1961), p. 809
- 5) S. WATANABE: Agglomeration Intern. Sympo. Philadelphia Pa. (1961), p. 865
- 6) 吉永真弓, 一伊達稔, 佐藤 駿, 川口尊三, 中村哲之: 鉄と鋼, 67 (1981), S 688
- 7) 製鉄部会: 鉄と鋼, 49 (1963), p. 1228
- 8) 松野二三期: 鉄と鋼, 64 (1978), p. 1499, 私信
- 9) 野坂庸二, 磯崎成一, 菅原欣一: 鉄と鋼, 67 (1981), S 655
- 10) 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
- 11) 鞭 巖, 樋口充蔵: 鉄と鋼, 53 (1967), p. 1171
- 12) 鞭 巖, 樋口充蔵: 鉄と鋼, 56 (1970), p. 371
- 13) 吉永真弓, 久保敏彦: 鉄と鋼, 59 (1973), S 306
- 14) R. E. CARTER: J. Chem. Phys., 34 (1961), p. 2010; 35 (1962), p. 1137
- 15) 和島正巳, 細谷陽三, 相馬英明, 田代 清: 鉄と鋼, 66 (1980), S 670