

© 1982 ISIJ

論文

焼結層内における水分凝縮現象とその層通気性 におよぼす影響

和島 正巳*・細谷 陽三*・柴田 充蔵*
相馬 英明*・田代 清*

Condensing Phenomenon of Moisture in Sintering Bed and Its Effect on Bed Permeability

Masami WAJIMA, Yozo HOSOTANI, Juzo SHIBATA,
Hideaki SOMA, and Kiyoshi TASHIRO

Synopsis :

Condensing phenomenon of moisture in sintering bed and its effect on sintering process were quantitatively studied through a mathematical model and experiments with sintering pot. The results obtained are as follows :

(1) Remarkable reduction of bed permeability after ignition is mainly due to formation of moisture condensation zone in bed. Resistance to gas permeation in moisture condensation zone is higher than that in initial raw mixture zone.

(2) The amount of condensed moisture is determined by the difference between wet-bulb temperature of gas passing through the bed and temperature of raw mixture. The less the difference is, the less the amount of condensed moisture is.

(3) As the amount of condensed moisture reaches a critical level at which sticking force of fine grains in quasi-particles starts to decrease, quasi-particles begin to agglomerate. Thus voidage of bed decreases and resistance to gas permeation increases sharply.

(4) It is proposed that effective means for suppressing moisture condensation after ignition are increase of raw mixture temperature, reduction of humidity in gas passing through bed, addition of moisture-absorber to bed and granulation of raw mixture at lower moisture content, etc.

1. 緒 言

焼結反応を効率よく進行させ、かつ良好な品質の焼結鉱を製造するには、焼結層内に適量の空気を流すことが必要である。しかし多くの場合、必要な通過空気量の確保は、焼結層の通気抵抗が大きいため必ずしも容易ではないのが現状である。近年、省エネルギー対策として、高層厚化による歩留り向上、燃料原単位低減が指向されつつあり、焼結層の通気性改善がますます重要な課題になつてきている。

従来この層通気性を向上させる方策としては、原料の事前処理を強化して、ストランド上の原料層の通気抵抗を低減させようとする試みが多い。しかし一般に焼結過程における層の通気抵抗は、点火する以前の原料層の通気抵抗にくらべ著しく増大する。それにもかかわらず、その原因についての本格的な検討は、これまであまりな

されてきたとはいえず、若干の報告があるにすぎない¹⁾。

そこで著者らは、焼結過程において、通気抵抗が点火後急速に増大する要因を調査し、さらに、その結果に基づいて焼結層の通気性改善技術を検討した。

2. 実験方法および実験内容

2.1 実験装置および実験条件

実験に使用した焼結鍋試験装置の概要を Fig. 1 に示す。試験鍋は、著者らの考案による壁側漏風を防止したサンドシール型試験鍋¹⁴⁾ (255 mmφ × 400 mm) である。

実験条件を Table 1 に示す。基準条件に対して、一部、初期原料温度上昇実験では、配合原料をあらかじめ均一に予熱し、点火前の配合原料温度が 30°C になるようにした。低水分造粒実験では、ペントナイトを 1% 添加して初期含水率を 4.0% にした。実験に使用した配合

昭和 52 年 4 月本会講演大会にて発表 昭和 56 年 8 月 17 日受付 (Received Aug. 17, 1981)

* 新日本製鉄(株)室蘭製鉄所 (Muroran Works, Nippon Steel Corp., 12 Nakamachi Muroran 050)

原料の粒度構成を Table 2 に示す。実験は特に断わりのない限り基準原料で行ったが、焼結初期の通過風量増加の影響をみるため、粗粒化した原料についても一部実験した。焼結鉱の成分は、いずれも SiO_2 : 5.6%, Al_2O_3 : 2.0%, CaO/SiO_2 : 1.3 である。

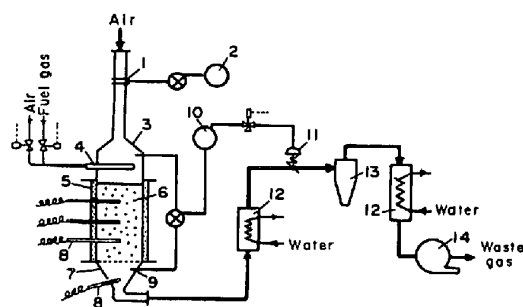
2.2 実機における対応確認試験

鍋試験装置による実験結果と実操業との対応を見るため、実機で層表面通過風量および層内水分分布を測定した。層表面通過風量は、焼結層表面に超音波風速計をのせてストランドとともに移動させ、排鉱部に至る通過風量の経時変化を測定した。また層内水分分布の測定は、焼結機を停止して（ブローも停止）、焼結層表面から掘り起こして試料を採取し、含水率を測定した。

2.3 実験内容

2.3.1 焼結過程の層表面通過風量分布測定

まず、鍋試験装置による実験および実機における焼結



- | | |
|------------------|-------------------------|
| 1. Flow elements | 8. Thermocouple |
| 2. Flow meter | 9. Pressure elements |
| 3. Ignition hood | 10. Pressure controller |
| 4. Burner | 11. Control valve |
| 5. Sintering pot | 12. Cooler |
| 6. Raw mixture | 13. Cyclone |
| 7. Wind box | 14. Blower |

Fig. 1. Apparatus for sintering experiments.

Table 1. Experimental Conditions.

Item	Value
Raw mixture weight	kg 40
Mixing time {	
Primary	min 2
Secondary	min 5
Ignition time	min 1.5
Bed height	mm 400
Suction pressure	mm H ₂ O 1500
Initial moisture content	wt % 6.0 (4.0)
Coke in mixture	wt % 3.8
Initial raw mixture temperature	°C 10 (30)

過程の層表面通過風量の分布を測定し、両者の対応を確認した。

2.3.2 焼結層内の圧力損失測定

次いで、焼結過程における層通気抵抗支配要因を明らかにするため、層内の圧力分布を測定した。測定は試験鍋側壁より高さ方向に 50 mm 間隔で、熱電対（外径 8 mm × 内径 6 mm 磁製保護管、素線 Pt-13%Rh）と圧力検出端（ステンレス管、外径 6 mm × 内径 4 mm）を鍋中心までそう入し、温度と圧力の同時測定を行った。なお使用した熱電対は、あらかじめその応答速度を測定しておき、測温データを補正した。

2.3.3 層内水分分布の測定

前項の層内圧力損失の測定結果より、下層に形成される水分凝縮ゾーンの通気阻害がかなり著しいと推察されたので、水分凝縮挙動を調査するため、層内の水分分布を測定した。鍋試験での測定は、試験鍋の側壁に設けた 25 mm φ の原料サンプリング孔より、ブローを停止後パイプを打ち込んで原料を採取し、含水率を測定した。なお層内水分分布の測定は実機でも行った。

3. 実験結果

3.1 焼結層表面通過風量分布

鍋試験（1500 mmH₂O 定差圧制御）と実操業における層表面通過風量の測定結果を Fig. 2 に示す。通過風量は点火開始と同時に急激に低下し、その後わずかず減少するが、焼結後半では逆に増加する傾向がみられた。特に、焼結開始 1~2 min での風量低下が著しく、点火

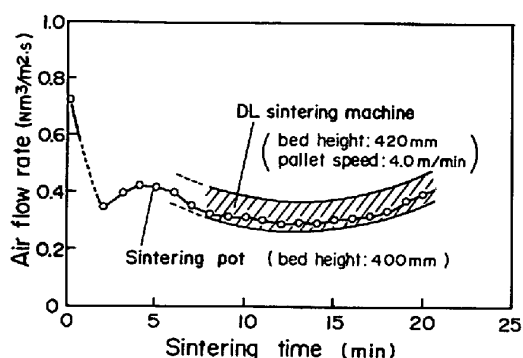


Fig. 2. Patterns of air flow during sintering at the sintering pot and the DL sintering machine (Grate area: 460 m²).

Table 2. Size distribution of raw mixture (wt%).

Raw mixture	Size (mm)							Mean size (mm)
	10-5	5-2	2-1	1-0.5	0.5-0.25	0.25-0.125	-0.125	
Basic mixture	13.4	27.6	13.4	9.6	9.0	7.2	19.8	2.30
Coarser mixture	17.9	34.8	15.2	11.0	7.6	5.0	8.5	2.92

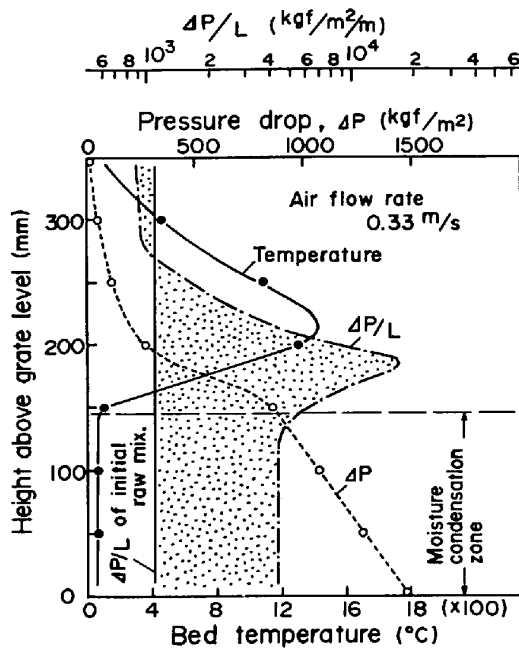


Fig. 3. Pressure drop in sintering bed at 8 min after ignition.

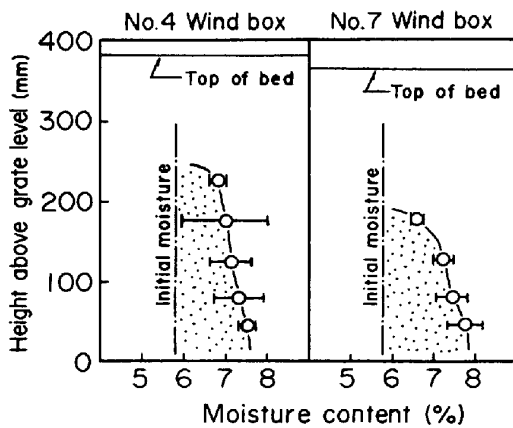


Fig. 4. Moisture condensation in sintering bed on the DL sintering machine (Grate area : 118 m², Total wind boxes : 19)

前のその約 1/2 程度に低下する。

3.2 焼結層内の圧力損失

Fig. 3 は鍋試験において、焼結開始後 8 min 時点の焼結層内の温度分布および圧力損失を測定した結果である。単位高さ当たりの圧損 ($\Delta P/L$) が最も大きいのは、ヒートウェーブ前進側の約 1000°C 付近の部分であった。この部分は、樋口ら²¹⁾によれば、コークスの燃焼が最も急速に行われている部分にほぼ対応していることから、コークス燃焼ゾーンとみなせる。しかし、下層の比較的低温領域 (水分凝縮ゾーン) の $\Delta P/L$ も初期原料にくらべて大きく、このゾーン幅が相対的に大きい焼結過程前半では、水分凝縮ゾーンの通気抵抗が層全体の通気抵抗を左右しているといえる。他方、水分凝縮ゾ

ン幅がしだいに減少し、高温ゾーン幅が拡大する焼結過程後半では、高温ゾーンの通気低下要因の比重が増してくると推論されるが、初期の焼結進行を推定するためには水分凝縮挙動の解明が必要と考えられた。

3.3 焼結層内における水分凝縮

Fig. 4 に実操業における焼結層内の水分凝縮量測定結果を示す。他の研究者らが指摘するように^{8)~13)}、下層部に水分凝縮ゾーンが存在することが確認された。その水分量は、初期水分 5.8% に対して 7~8% と 1~2% の凝縮量で、下層ほどその量はやや増加している傾向がみられた。また水分凝縮ゾーンは、焼結初期のかなり早い時期に形成されることが推察された。

4. 焼結層内の水分挙動の解析

4.1 焼結層内の水分変化

一般に、焼結原料層中では、約 400 mm 程度のわずかな距離の間にコークスの燃焼反応や原料の溶融、再凝固現象が生起しており、温度は常温から 1400°C 程度まで分布している。層内を通過するガスもこの固体側の温度に影響されて、層内各位置において大きな温度変化を示すので、水分の凝縮もこのガス温度の変化の中で考慮されなければならない。

たとえば、コークスの反応ゾーンを通過した後のガスは、高温度になって下方に移動するが、まだ反応を起していない層に熱を与えて加熱し、さらに下方の湿った原料層を通過する際には、その層を温めると同時に、存在している水分を蒸発させるからガス中に多量の水蒸気を含むことになる。しかし、この水蒸気も、さらに下方へとガスが流れ温度低下していく際に、もはやガス中に存在できなくなり、再度固体側へと水分を凝縮させる結果となる。このような通過ガスを介しての層上部から下部への水分移動が、点火開始後の経過時間の中で非定常的に起こっている。

ここに述べたような相互に関係する諸現象を明らかにするために、従来の報告¹⁶⁾では含まれていない水分凝縮過程について、今回新たに理論および実験の検討に基づき、以下のようなモデル化を行い、解析を進めた。

4.2 層内水分挙動の数式モデル

4.2.1 基礎式

焼結原料層内の層厚方向に、断面内では均一な微小部分を考え、この部分におけるガス側エンタルピ収支をとると、(1)式が得られる。

$$\begin{aligned}
 & -G \frac{\partial(C_g T_g)}{\partial Z} - \frac{6(1-\epsilon)}{d_p} h_p (T_g - T_s) \\
 & = \epsilon \rho_g \frac{\partial(C_g T_g)}{\partial \theta} \dots \dots \dots (1)
 \end{aligned}$$

ここで、(1)式左辺のガス層内通過に基づく移動項、粒子流体間の熱交換項に対して、右辺の原料層空隙部分に基づくガス側の蓄積項は、一般に非常に小さいので無視することができる。したがって、(1)式右辺をゼロとして整理すると、

$$G(C_p + C_H H_g) \frac{\partial T_g}{\partial Z} + \frac{6(1-\epsilon)}{d_p} h_p (T_g - T_s) + R_w^* C_H T_g = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

となる。一方、固体原料側に関するエンタルピ収支より、(3)式が導き出される。

$$(1-\epsilon) \rho_s (C_s + C_w W_s) \frac{\partial T_s}{\partial \theta} - \frac{6(1-\epsilon)}{d_p} h_p (T_g - T_s) + R_w^* (\lambda_s - C_w T_s) = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、ガス側および固体側に関する水分マスバランスにより、(4)、(5)式が導かれる。

$$G \frac{\partial H_g}{\partial Z} = R_w^* \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$-(1-\epsilon) \rho_s \frac{\partial W_s}{\partial \theta} = R_w^* \quad \dots\dots\dots (5)$$

さて、 R_w^* は含水率変化速度式で、水分凝縮過程および乾燥過程に対して、おのおの次の形で表される。

(1) 水分凝縮過程

水分の凝縮は、原料層を高温のガスが通過して行く過程でだいに温度低下し、ガス中の湿度が飽和湿度に達した段階で始まり、その湿度変化は飽和湿度線図に従う。ここで飽和湿度曲線は、次式で表される。

$$H_{g,s} = 0.005 \exp(0.057 T_g) \quad \dots\dots\dots (6)$$

水分凝縮過程は(6)式で表される湿度と温度の関係を維持しながら、ガス温度の低下に対応して湿度も変化するから、水分の変化速度は次式となる。

$$R_w^* = G \frac{\partial H_g}{\partial Z} = G \frac{\partial H_{g,s}}{\partial T_g} \frac{\partial T_g}{\partial Z} = G \frac{\partial H_{g,s}}{\partial T_g} \frac{\partial T_g}{\partial Z} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここで、凝縮したフリーの水分が、いかなる挙動を示すかが問題となる。固体粒子周囲のガス境界膜における水蒸気拡散速度、 R'_w は次式で表せる。

$$R'_w = \frac{6(1-\epsilon)}{d_p} \frac{h_p}{C_p + C_H H_g} (H_s - H_g) \quad \dots\dots\dots (7')$$

これから、ガス温度変化に対する水分拡散の相対速度をとると、(7)式の $\partial H_{g,s} / \partial T_g$ とほぼ同等ないしそれ以上のオーダーにあることから、凝縮水分の大半は固体側へ与えられるとみなせる。したがって、(7)式を固体側への水分凝縮速度式としてよいと考えられる。

(2) 水分乾燥過程

乾燥過程については、鞭ら¹⁶⁾の考えに基本的に従い、

恒率乾燥過程と減率乾燥過程を考慮する。恒率期間では水分の蒸発速度が速いために、ガスからの伝熱はすべて水分の乾燥に用いられるので、固体側の温度変化はないものとしてよいから、(3)式第1項をゼロとすれば、次式が得られる。

$$R_w^* = \frac{6(1-\epsilon)}{d_p} h_p \frac{T_g - T_s}{\lambda_s - C_w T_s} \quad \dots\dots\dots (8)$$

減率期間は、鞭ら¹⁶⁾と同様に求められる。

$$R_w^* = \frac{6(1-\epsilon)}{d_p} h_p \frac{T_g - T_s}{\lambda_s - C_w T_s} \frac{W_s - w_e}{w_c - w_e} \quad \dots\dots\dots (9)$$

以上の展開による、(2)、(3)、(4)、(6)、(7)式を用いれば、水分の凝縮過程が表現され、(7)式の代わりに(8)式を適用すれば恒率乾燥過程が、(9)式を用いれば減率乾燥過程をそれぞれ表すことができる。

4.2.2 シミュレーション結果

前項の偏微分方程式で示される基礎式と、鞭ら¹⁶⁾、塚本ら¹⁷⁾によつて示されている他の諸反応に関する基礎式を、ここでは前進型差分近似法¹⁸⁾によつて、次の条件のもとに数値積分を行つた。初期条件は、原料側の装入時の状態として

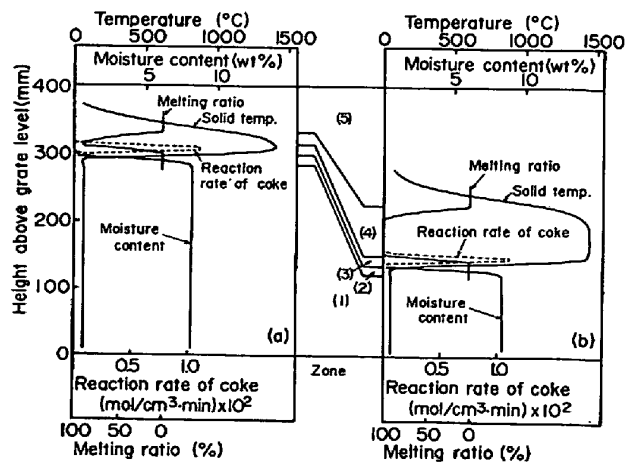
$$\theta = 0, Z \geq 0; T_g = T_{g0}, W_s = W_{s0} \quad \dots\dots\dots (10)$$

境界条件は、層最上部より流入するガス側について、

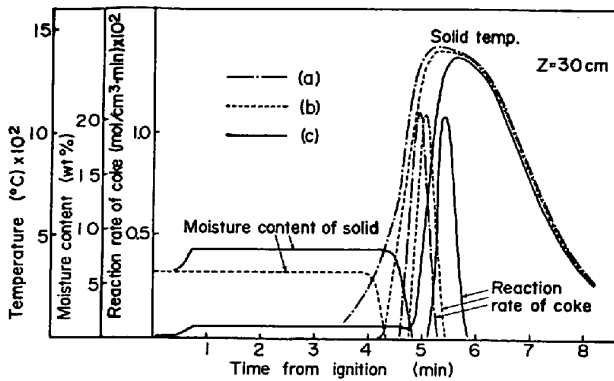
$$Z = 0, \theta > 0; T_g = T_{g0}, H_g = H_{g0} \quad \dots\dots\dots (11)$$

として、おのおの与えられる。

Fig. 5, 6 にシミュレーション結果を示す。Fig. 5 は、水分凝縮が、焼結層内で併発的に起こっている各過程と相対的にどのような関係になつているかを示したものである。これから、下層部に水分凝縮ゾーンが形成され、焼結進行とともにヒートパターンが拡大して行く過程が認識できる。Fig. 6 は、今回新たに提起した

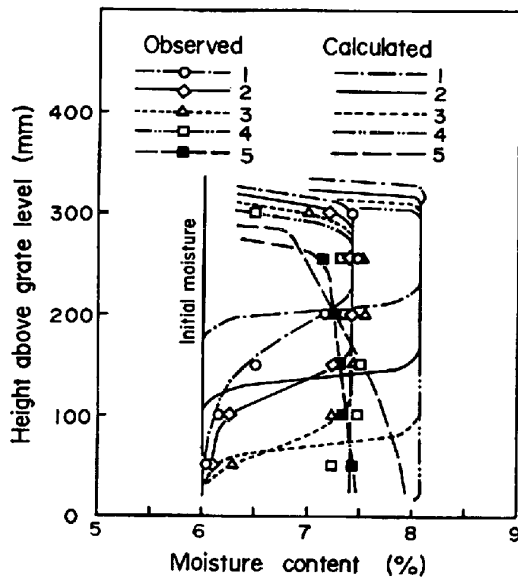


(1) Moisture condensation zone (2) Drying zone (3) Reaction zone (4) Melting zone (5) Cooling zone
Fig. 5. Relative positions of each zone at 5 min (a) and 15 min (b) after ignition (Calculated for the Case 1 in Table 3).



- (a) Drying and condensing processes are neglected.
- (b) Condensing process is neglected.
- (c) Drying and condensing processes are considered.

Fig. 6. Effects of moisture condensation process on profiles of process variables (Calculated for the Case 1 in Table 3).



- 1, 2, 3, 4, 5 : At 30, 45, 60, 80 and 120s after ignition respectively

Fig. 7. Comparison of calculated results with observed data of moisture condensation zone. (Initial raw mixture temp. : 20°C)

水分凝縮過程の影響を明らかにするために、従来、鞭ら¹⁶⁾により報告されている解析と対比した結果である。図中の(a)は水分の乾燥、凝縮過程をいつさい無視した場合²¹⁾、(b)は乾燥過程のみを考慮した場合¹⁶⁾、(c)は水分凝縮過程までを考慮した場合であり、(a)と(b)の違いよりも、(c)の場合の方が顕著な差違が認められる。水分凝縮過程により、明らかに原料層の水分蒸発完了が遅れており、その結果として昇温開始および反応帯の形成が遅れ、かつ最高温度も低下している。これらは凝縮した水分の蒸発に、より多くの熱を必要とした結果と推定される。

このように、水分凝縮過程が、全体の焼結過程に著し

い影響をおよぼすことが明らかになったので、以下凝縮過程について、さらに詳細に検討する。

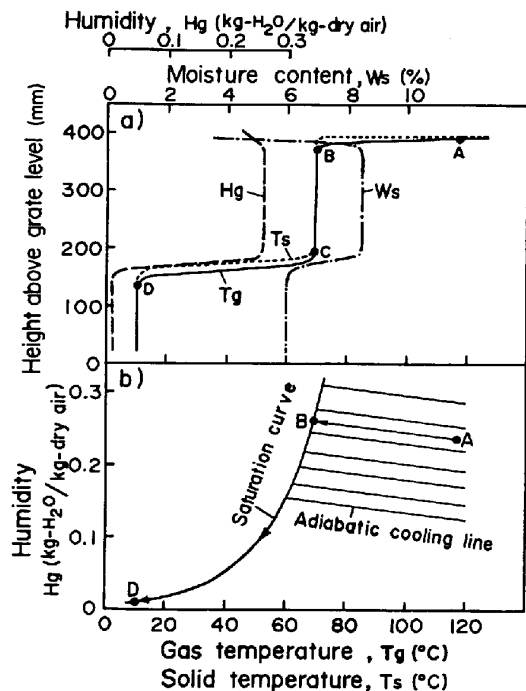
Fig. 7 は、初期原料温度 20°C、初期水分 6.0%、通過風量 0.33 Nm³/m²·s の条件における水分凝縮ゾーン形成過程を示した実測結果、計算結果である。なお、計算結果は実測に基づく層収縮量で位置補正して示してある。凝縮水分の絶対値は必ずしもよい一致を示していないが、下層への凝縮ゾーンの移動速度は、実測結果とほぼ一致している。凝縮水分値については、点火期間(90s)を過ぎると実測値と計算値がしだいに一致してくるが、点火期間中でこのような不一致が生ずるのは、特に急激な通気変化を示す点火時のシミュレーション精度をさらに向上させる必要があることを示している。

以上、計算結果と実験結果の傾向が一致するので、これまで展開した考察は近似的解析として妥当なものと考えられる。

4.3 水分凝縮挙動

以上の結果より、焼結層内での水分凝縮挙動は次のように考えられる。

Fig. 8 は、凝縮ゾーン形成過程における固体とガスの変化を示した一例である。a)において、減率乾燥ゾーンの上端に達したガスは、このゾーンを通過する過程で水分を蒸発させ、固体温度も上昇させて、みずからの



a) Sintering bed b) Humidity chart

Fig. 8. Relation between moisture content of solid (W_s), solid temperature (T_s), gas humidity (H_g) and gas temperature (T_g) in bed. A~D shows breaking point on state of gas.

温度は降下しつつ、恒率乾燥ゾーンに達する。恒率乾燥ゾーン内では、ガス温度はさらに低下するが、固体は湿球温度まで予熱されており、固体温度は変化せず、ガスからの伝熱はすべて水分蒸発に消費される。

この過程におけるガス側の変化の軌跡を湿度図表上で表せば、b) のとおりとなる。ガスはA点からB点に向かって変化する。この変化は断熱冷却線に沿う。B点の温度は、断熱飽和温度または湿球温度である。

a) で、B点に達したガスは固体と等温なので、水分飽和状態のまま層内を通過する。一方、固体含水率は、B点で蒸発が停止して以降、すでに凝縮が平衡に達している状態のまま保持される。

C点以降に、ガスの露点温度以下の低温固体が存在する場合、C点に達した飽和ガスは水分を凝縮しはじめる。同時に、固体温度は凝縮潜熱およびガスからの伝熱によつて予熱され、a) に示すように、C点～D点にかけて温度勾配が生じる。

C点以降のガス側の変化をみると、ガスはすでに飽和状態にあるから、伝熱によるガス温度低下にともなつて、b) のB点より飽和曲線に沿つて、固体の初期温度であるD点に向かって下降し、D点で平衡に達する。

次に、水分凝縮ゾーンの固体含水率がどのような要因で決定されるかを考察する。

これまでの記述から明らかなように、凝縮による固体含水率の増加は、通過するガスの露点温度以下にある固体が、露点温度まで予熱される過程で生じる。しかし、連続的にガスが供給される焼結層内では、次々に予熱が進行し、結局全層が湿球温度になるまで継続する。従つて、定常状態に達した段階では、水分凝縮は固体が湿球温度まで予熱される過程で生じるといえる。

固体はガスからの伝熱と凝縮潜熱の両者によつて予熱されるが、いずれにしても、水分凝縮量はこの予熱温度幅によつて決定されると考えられる。

湿球温度は、層内の恒率乾燥ゾーンに流入しようとするガスの温度と湿度によつて決定される。湿球温度を左右する主な要因としては、次のものが挙げられる。

(1) 焼結層に投入される水分。例えば、大気中の水分、点火・保熱時の燃焼排ガス中水分など。これらの増加はガス湿度を上昇させ、湿球温度を高める。

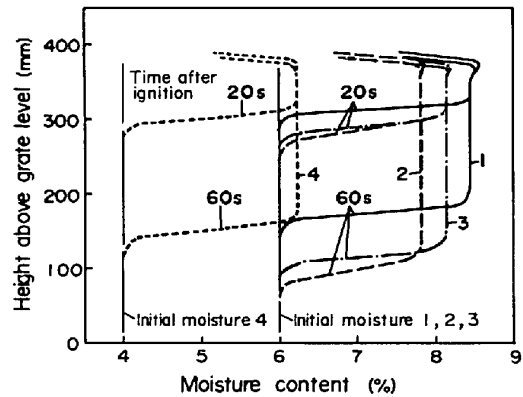
(2) 層内通過風量。通過風量の増加はガスの湿度を低下させて湿球温度を低める。

(3) 初期原料水分。その低下は蒸発する水分の絶対量を減らし、ガスの湿度を低下させて湿球温度を低める。

以上の考察から、水分凝縮を抑制する上で、ガスの湿

Table 3. Experimental conditions in each test case.

Case	Initial moisture content (wt %)	Initial raw mixture temperature (°C)	Air flow rate (Nm ³ /m ² ·s)	Note
1	6.0	10	0.33	Base
2	6.0	30	0.33	Raw mixture of higher temperature
3	6.0	10	0.49	Coarser raw mixture
4	4.0	10	0.33	Raw mixture of lower moisture content



1, 2, 3, 4: Case No. in Table 3
Fig. 9. Calculated results of moisture condensation at various conditions.

度を低下させて湿球温度を低めるか、初期原料温度を高めることが、有効であると推論される。

4.4 水分凝縮挙動におよぼす操業条件の影響

そこで、この推論をシミュレーションおよび実験で確認した。設定条件を Table 3 に示す。

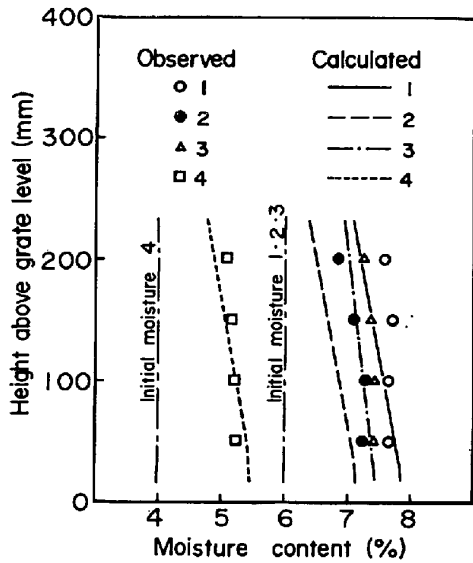
Fig. 9 は、点火開始後 20 s, 60 s における水分凝縮のシミュレーション結果である。Case 1 を基準にすると、Case 2 の初期原料温度を上昇させた場合、Case 3 の通過風量を増加させた場合に凝縮水分量が低下した。さらに、Case 4 の初期含水率を低下させても、若干凝縮水分量が低下し、水分凝縮が抑制されることが確認された。

Fig. 10 にシミュレーション結果と実験結果を対比して示す。なお、計算結果は実測に基づく層収縮量で位置補正して示してある。これから、シミュレーション結果と実験結果とは、傾向が一致しており、これまでの考察の妥当性が実験によつても確認された。

また、Fig. 11 はこの実験において、(12)式¹⁵⁾で整理した水分凝縮ゾーンの通気抵抗係数 $\log f$ を示す。

$$\Delta P/L = f \cdot U_m^{1.3} \dots \dots \dots (12)$$

水分凝縮ゾーンの通気抵抗は、凝縮量の減少にともなつて低下する傾向にあることがわかつた。なお、Case 3 の粗粒原料を用いた場合に、水分凝縮量に対して通気抵



1, 2, 3, 4 : Case No. in Table 3

Fig. 10. Comparison of calculated results with observed data of moisture condensation at 2.5 min after ignition.

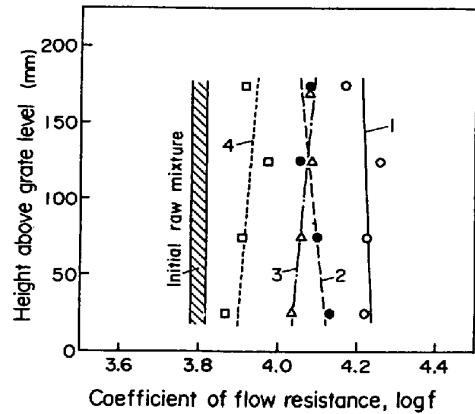
抗が比較的小さいのは、微粉粒子量が少ないため、次に述べる擬似粒子の崩壊程度が緩和された結果と考えられる。

4.5 水分凝縮にともなう原料擬似粒子の崩壊

水分凝縮による通気抵抗増大原因について、以下考察する。

Photo. 1 に水分凝縮ゾーンからサンプリングした原料の擬似粒子の状態を初期原料のそれと比較して示す。水分の凝縮により、擬似粒子の付着微粉部分の一部が流し出されて合体している。このため層内の空隙率が減少して通気抵抗が増加すると考えられる。これらの擬似粒子挙動がなぜ生じるかについて、微粉焼結原料の粉体特性を調査した。

一般に粉体の充填構造上の区分として、粒子と液体が連続構造で、空気が不連続に存在する状態 (Funicular-2 域) から、さらに水分が増加して粒子間に空気が存在



1, 2, 3, 4 : Case No. in Table 3

Fig. 11. Observed data of flow resistance in moisture condensation zone.

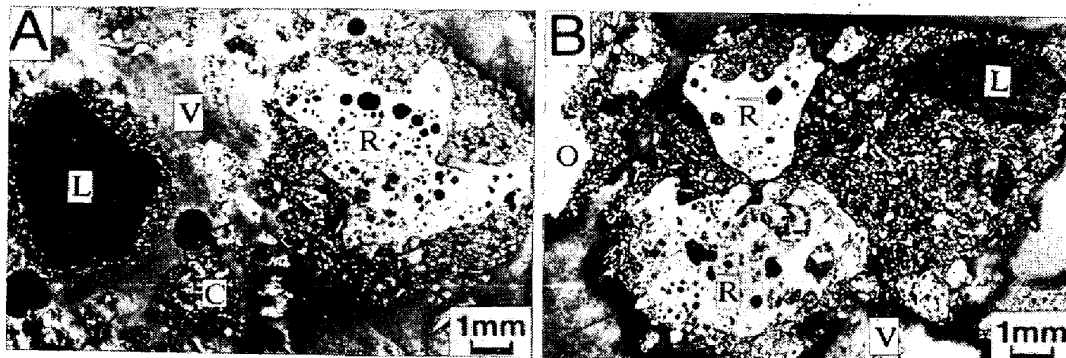
Table 4. Plastic limits and liquid limits of raw materials (<0.125 mm).

Description	Main mineral	Plastic Limit, % (vs. solid)	Liquid Limit, % (vs. solid)
C. V. Rio Doce	Specularite	8.8	13.0
Goldsworthy	Hematite	12.0	18.5
Miferma		14.2	16.0
Bailadila		16.8	21.2
Timblo	Limonitic hematite	18.8	22.0
Salgaoncar		15.2	16.7
Marcona	Magnetite	12.0	13.4
Tasu		11.4	12.1
Mill scale		17.4	18.3
Limestone		15.3	20.8
Return fine		20.3	22.1
Coke breeze		29.5	35.9
Average		16.0	19.2

しなくなる Capillary 域に移行する点を可塑限界 (P. L.) と称し、次いで水分が増加して流動しはじめる点を液化限界 (L. L.) と呼んでいる¹⁹⁾。

焼結原料は、粗粒子のまわりに微粉粒子が付着しており、粘土などと異なり表面が不活性なので、P. L. 以上の水分量になると可塑性を帯び、ベッドを通過する排ガスの圧力で変形することが予想される。さらに L. L. 以上になると、重力により流動化すると考えられる。

そこで、JIS 法により焼結原料の P. L., L. L. を測



C : Coke particle L : Limestone particle O : Ore particle R : Sinter return particle V : Void (Resin)

Photo. 1. State of quasi-particles (A : Initial raw mixture, B : Raw mixture after moisture condensation).

定した。その結果を Table 4 に示す。コークスを除いて、P. L. は 9~20% (vs. solid), L. L. は 12~22% (vs. solid) 程度であり、配合率によつても変わるが、これらを平均すると、P. L. = 16% (vs. solid), L. L. = 19% (vs. solid) になる。

水分凝縮ゾーンの含水率は 8% 前後の値になる例がみられた。ここで、粗粒子のまわりに付着している微粉部分のみに水分が含まれていると仮定すると、上記微粉量が 50% 以下の場合には、微粉部分の水分量は 18% (vs. solid) にもなる。水分の偏析などを考慮すると、さらに高水分な部分の存在も考えられ、水分凝縮ゾーンでは配合原料の流動および合体などが十分起こり得るものと推論される。

通常、よく経験されるように、焼結層が点火中に急激に収縮するのは、水分凝縮によつて配合原料の流動および合体などが起こり、層空隙率が減少するためと考えられる。このことは焼結鉱の品質にとつても重要な意味をもつ。水分凝縮を抑制すれば、層の収縮が減少し、焼結鉱の気孔率が増加して焼結鉱の被還元性、高温軟化溶解性状が改善されるからである²⁰⁾。

また、このような機構で擬似粒子が崩壊するとすれば、初期水分が少ない場合、それだけ崩壊しにくいことも明らかである。Fig. 11 に示すように、Case 4 の低水分造粒において最も通気抵抗が小さいのは、凝縮による水分増加量というより、水分の絶対量が問題であることを示しており、これまでの考察の妥当性を示唆するものと考えられる。

5. 焼結層の通気性を改善する 2, 3 の技術の提言

ここでは、水分凝縮ゾーンの通気抵抗を低減して、焼結過程前半の通気性を改善する技術を挙げる。

(1) 配合原料温度の上昇

返鉱温度の上昇、ミキサーへの蒸気吹き込み、ミキサーへの温水添加、生石灰添加など。

(2) 水分吸収剤の添加

生石灰の水和反応による過剰水分の結晶水化 (比較的反応性の低い生石灰を使用する) など。

(3) 点火前の初期通気度改善

初期通気の改善は、湿球温度を低め、水分凝縮を抑制して、焼結層の通気改善をいつそう促進させる。そのためには、バインダー添加や原料の粗粒化などが効果的である。

(4) 低水分造粒

低水分化を指向した造粒技術の適用。

(5) 点火炉・保熱炉でのコークス炉ガス、重油などの使用量低減による水蒸気発生量の減少

点火効率の向上や熱風排熱回収などにより、含水蒸気燃焼排ガス量を減らし、点火・保熱期間における層通過ガスの湿度を低下させる。

6. 結 言

焼結層の通気性向上を目的として、層内通気抵抗の変化、層内下部に形成される水分凝縮ゾーンの形成機構、通気性を改善する因子などについて検討した。

(1) 水分凝縮ゾーンの通気抵抗は、初期原料のそれより著しく大きい。凝縮ゾーンの形成速度は速く、短時間内に最下層まで達する。焼結層通気性が、点火開始後急速に低下するのは、水分凝縮ゾーンの形成が主な原因である。

(2) 水分凝縮量は、層内を通過するガスの湿球温度と配合原料温度の差で主に決まり、温度差が少なければ凝縮量は少ない。ガスの湿球温度は、焼結層内にあつては通過するガスの湿度によつて決まるので、ガスの湿度を低下させるか、原料温度を上昇させることが、水分凝縮を抑制することになる。

(3) 水分凝縮ゾーンの通気抵抗が増大する原因は、擬似粒子の微粉粒子間に存在する水分が過剰になり、微粉粒子が流動・合体し、層空隙率が減少するためと考えられる。したがつて水分凝縮の抑制は、焼結層の通気性向上に有効であるばかりか、適度な気孔率を有する被還元性の良好な焼結鉱を得るためにも非常に有効である。

記 号

C_H, C_w : 水蒸気, 水の比熱	[kcal/kg·°C]
C_g, C_p : ガス比熱	[kcal/kg·°C], [kcal/kg (dry)·°C]
C_s : 配合原料比熱	[kcal/kg (dry)·°C]
d_p : 配合原料粒子径	[m]
f : 通気抵抗係数	(= $\Delta P/L/U_m^{1.3}$)
G : 通過空気質量速度	[kg (dry)/m ² ·h]
H_g, H_{g0} : 空気湿度, 初期空気湿度	[kg (H ₂ O)/kg (dry air)]
$H_{g,s}$: 飽和湿度曲線	(= $0.005 \exp(0.057 \cdot T_g)$)
H_s : 空気湿度 (T_s °C における飽和湿度)	[kg (H ₂ O)/kg (dry air)]
h_p : 粒子-流体間伝熱係数 (= $k_g \cdot Nu/d_p$)	[kcal/m ² ·h·°C]
k_g : 空気の熱伝導度	[kcal/m·h·°C]
L : ゾーン長さ	[m]
Nu : ヌッセルト数 (= $2.0 + 0.6 Re_p^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$)	[-]
ΔP : 圧力損失	[mm H ₂ O], [kgf/m ²]
Pr : プラントル数 (= $C_p \cdot \mu_g/k_g$)	[-]
Re_p : 粒子レイノルズ数 (= $d_p \cdot G/\mu_g$)	[-]
R_w^* : 水分蒸発 (凝縮) 速度	[kg/m ³ ·h]
R_w' : ガス境界内水蒸気拡散速度	[kg/m ³ ·h]
T_g, T_{g0} : ガス温度, 初期ガス温度	[°C]

T_s, T_{s_0} : 原料温度, 初期原料温度	[°C]
U_m : 空気空塔速度	[m/s]
w_c, w_e : 限界含水率, 平衡含水率	[kg(H ₂ O)/kg(dry bed)]
W_s, W_{s_0} : 原料含水率, 初期含水率	[kg(H ₂ O)/kg(dry bed)]
Z : 層高方向距離	[m]
ϵ : 層空隙率	[-]
θ : 時間	[h]
λ_s : 水蒸気のエンタルピ (= 597.5 + $C_H \cdot T_g$)	[kcal/kg]
μ_g : 空気の粘度	[kg/m·h]
ρ_g : ガス密度	[kg/m ³]
ρ_s : 原料のかさ密度	[kg(dry bed)/m ³]

文 献

- 1) E. W. VOICE, S. H. BROOKS, W. DAVIES, and B. L. ROBERTSON: JISI, 175 (1953), p. 97
- 2) D. W. MITCHELL: JISI, 198 (1961), p. 358
- 3) M. BOUGRAUT and R. ROCHAS: Rev. Mét., 65 (1968) 12, p. 835
- 4) V. P. PUZANOV and V. I. KOROTICH: Izv. VUZov, Cher. Met., (1966) 6, p. 58
- 5) V. I. KOROTICH and V. P. PUZANOV: Steel in USSR, (1967) 7, p. 550
- 6) P. N. GREKOV, S. I. RYZHKOV, L. I. KAPLUN, and V. I. KOROTICH: Izv. VUZov, Cher. Met., (1975) 10, p. 34
- 7) A. N. POKHVISNEV et al.: Izv. VUZov, Cher. Met., (1976) 5, p. 26 (Trans. in English, British Industrial & Scientific International Translation Service)
- 8) R. WILD and K. G. DIXON: Agglomeration ed. by W. A. KNEPPER (1962), p. 565 [Interscience Publishers]
- 9) V. I. KOROTICH and V. P. PUZANOV: Izv. VUZov, Cher. Met., (1965) 4, p. 53
- 10) M. KOWALEWSKI: Prace Inst. Hutn., 22 (1970) 1, p. 3 (Trans. in English, British Iron and Steel Industry Translation Service)
- 11) G. I. RUDOVSKII, A. A. KHARITONOV, and G. I. SEREBRYNIK: Metallurg, (1971) 12, p. 7
- 12) G. I. RUDOVSKII, A. A. KHARITONOV, G. I. SEREBRYNIK, and V. F. AVDEEV: Metallurg, (1973) 10, p. 11
- 13) V. G. KOTOV and V. A. SHURKHAL: Steel in USSR (1973) 10, p. 800
- 14) 田代 清, 相馬英明, 細谷陽三, 和島正巳: 学振 54委-No. 1451 (昭和 53 年 7 月)
- 15) 田代 清, 相馬英明, 和島正巳: 未発表
- 16) 鞭 巖, 樋口充蔵: 鉄と鋼, 56(1970) 3, p. 371
- 17) 塚本 孝, 嶋田駿作, 田口敏夫, 樋口充蔵: 鉄と鋼, 56 (1970) 5, p. 661
- 18) L. LAPIDUS: Digital Computation for Chemical Engineers, (1962), p. 131 [McGraw-Hill]
- 19) 久保輝一郎, 水渡英二, 中川有三, 早川宗八郎 共編: 粉体 (理論と応用) (1962), p. 501 [丸善]
- 20) 高田 司, 相馬英明, 田代 清: 鉄と鋼, 64 (1978) 11, S 540
- 21) 樋口充蔵, 鞭 巖: 鉄と鋼, 53 (1967) 11, p. 1171