

© 1989 ISIJ

 論文  
 論 文

# 充填層内の通気性及び伝熱特性からみた 新塊成鉱プロセスの評価

坂本 登\*・野田英俊\*<sup>2</sup>・熊坂 晃\*<sup>3</sup>・谷中秀臣\*<sup>3</sup>

## Experimental Evaluation of New Iron Ore Agglomeration Process Based on Permeability and Heat Transfer Characteristics in the Bed

Noboru SAKAMOTO, Hidetoshi NODA, Akira KUMASAKA and Hideomi YANAKA

### Synopsis :

A new iron ore agglomeration process was experimentally evaluated in comparison with the sinter process on the basis of permeability and heat transfer characteristics in the bed. Desirable operating conditions for the new process were also investigated. The main results obtained are as follows :

(1) The productivity of the new process increased linearly in proportion to the gas volume passing through bed, while the maximum productivity of the sinter process was estimated at 1.6 t/m<sup>2</sup> h due to the limit of the permeability in the bed by the capacity of the suction blower.

(2) According to the sintering test results for the two processes using a pot made of a transparent silica glass tube, the new process's melting zone temperature seemed to be higher than that of the sinter process, owing to be the efficient combustion of fine coke coated on the green ball.

(3) An evaluation of gas flow characteristics in the bed by a mathematical model, the productive yield for the new process seemed to be superior to that of the sinter process, in that it controlled excessive gas flow near the side plate.

(4) It was proved by both mathematical and experimental evaluations that the size of the green balls should be mainly controlled between 5 and 10 mm in order to achieve sufficient heat conduction within the pellet.

Key words : pellet ; sinter ; new agglomerates ; mathematical model ; pot grate ; simulation ; heat transfer ; gas flow analysis.

## 1. 緒 言

著者らは従来の塊成鉱プロセスと比較し、プロセス面、成品品質面のいずれも優れた新塊成鉱プロセスの可能性を明らかにした<sup>1)</sup>。この結果をもとに焼結鉱プロセスとの比較をポットグレート炉により行つたところ、特定の条件下では新塊成鉱プロセスは(1)一定風量を得るのに吸引負圧は約1/2である。(2)層内ヒートパターンに関し、その冷却速度が速い。(3)排ガス組成より粉コークスの燃焼性が優れている。などが認められた<sup>2)</sup>。これらの特徴は原料を5~10 mm 主体のグリーンボールに造粒していること、粉コークスをグリーンボール表面に被覆しているため燃焼効率の向上が図られていることなどに起因するものと考えられた<sup>3)</sup>。また新塊成鉱プロセスでは焼結鉱プロセスに比較し生産性、歩留りが優れ

る<sup>2)</sup>。これは造粒により成品のペレットブロックが破碎されても1個のペレットは、その粒度により成品として評価されるためである。さらに還元性(RI)、還元粉化性(RDI)が優れている理由は、主として原料品位、焼成時のヒートパターンにより高炉原料として望ましい鉱物相の生成を促進したためと考えられた<sup>4)5)</sup>。

本研究はこのような新塊成鉱プロセスの特徴を主として充填層内のガス流れ及びペレット内部への伝熱の面から実験的、理論的検討を加えるとともにプロセスの適正化条件の探索を行うものである。

## 2. 実験方法及び結果

### 2.1 新塊成鉱プロセス及び焼結鉱プロセスの比較

新塊成鉱プロセスでは通気性向上により層内通過風量が増加してゆくと擬似粒子に比較し粒径の大きいグリー

昭和62年4月・10月本会講演大会にて発表 昭和63年4月4日受付 (Received Apr. 4, 1988)

\* NKK 鉄鋼研究所 工博 (Steel Research Center, NKK Corporation, 1-1 Minamiwatarida-cho Kawasaki-ku Kawasaki 210)

\*<sup>2</sup> NKK 鉄鋼研究所 (現: NKK 福山製鉄所) (Steel Research Center, Now Fukuyama Works, NKK Corporation)

\*<sup>3</sup> NKK 鉄鋼研究所 (Steel Research Center, NKK Corporation)

Table 1. Chemical composition of raw materials (%).

	T. Fe	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	lg-loss
Pellet feed	67.80	0.09	0.81	0.04	0.63	0.04	0.65
Bedding fine	60.20	5.06	5.55	1.85	1.71	1.70	2.69

Table 2. Mixing conditions of raw materials (%).

	New agglomerates	Sinter
Pellet feed	52.3	—
Bedding fine	34.8	84.5
Lime stone	6.6	13.9
Burnt lime	2.7	1.6
Serpentine	3.6	—
Return fine	—	14.0
Coke addition	3.5	

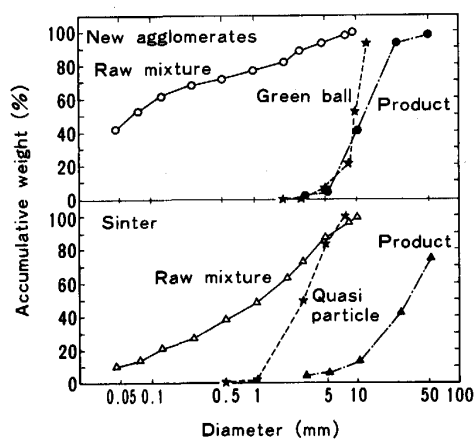


Fig. 1. Size distribution of raw materials, typical granulated materials and products.

ンボール内部への伝熱面の律速から逆に歩留り、品質の悪化の可能性も予想される。この点を明らかとするため、焼結ベッド内通過風量に対する両プロセスの操業、成品品質の比較評価を行った。Table 1 に両プロセスで使用する原料の化学組成を、Table 2 に原料の配合比率を、また Fig. 1 に使用原料の粒度、平均的な造粒粒度及び成品粒度を示す。これらの結果より新塊成鉱プロセスの原料中の SiO<sub>2</sub> は 3.8%、-44 μm 原料配合率は 40% であり、原料の化学組成、粒度構成ともに焼結鉱プロセスに比較し低 SiO<sub>2</sub>、高微粉化率が特徴である。

新塊成鉱用グリーンボールの製造にあたり、まず粉コークス未添加の状態では Table 2 の配合原料に対し、混練操作を行う。混練はバッチ式ミキサー (600 mm φ × 600 mm L) により 4~5% の水分をスプレーしながら 3 min 行つた。次にこの湿潤原料を 1.3 m φ ディスクペレタイザー (回転数 11~14 rpm, 傾斜角度 44°) により、合計水分量が 8~10% となるよう加湿しながら約 15~20 min 造粒操作を行う。造粒後 10 mm の篩で篩分けた篩下グリーンボールに対し -1 mm の粉コークスをこれらの表面に被覆する。被覆は前記ミキサーにより行い、この場合の被覆時間は 3 min であり、被覆時の散水は行わない。一方焼結鉱用擬似粒子は Table 2 の配合原料に対し前記ミキサーにより行う。この場合の混練は粉コークス (-5 mm) とともに行い、混練造粒時間は 3 min、混練時に添加する水分は 6~7% である。

これら両原料を内径 300 mm φ、深さ 700 mm H のポットに 550 mm H の層厚になるよう装入する。装入に際し、

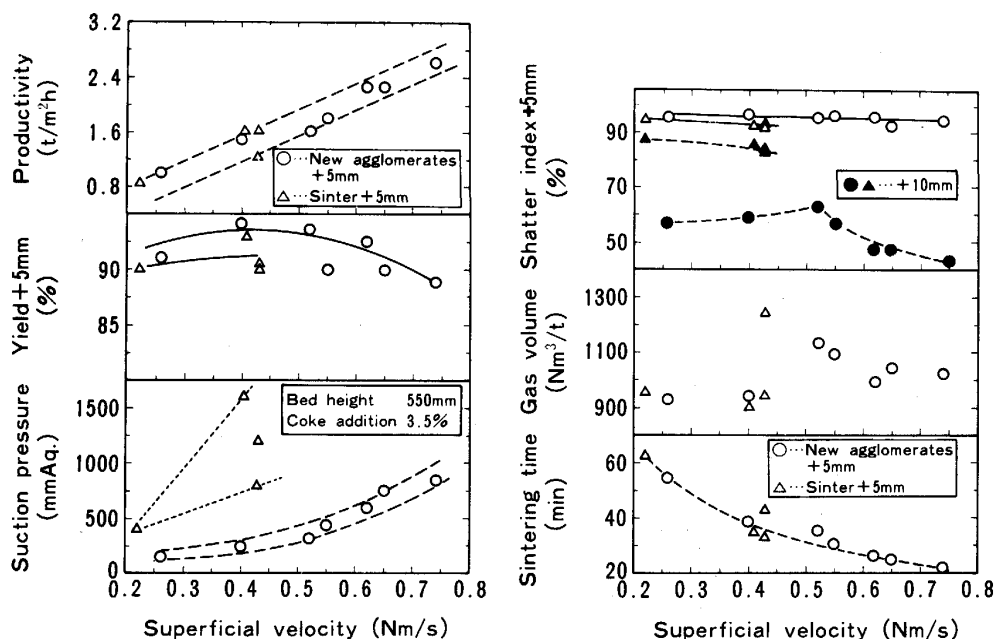


Fig. 2. Comparison of process characteristics between new agglomeration and sinter.

壁部 10 mm ゾーンに新塊成鉍プロセスではサイドレーヤーとして 1~4 mm の新塊成鉍チップを、また焼結鉍プロセスでは 3 mm の粉鉍石を充填した。ポットグレートの操業に際し、新塊成鉍プロセスでは 200~250 °C, 3 min, 200~250 mmAq で乾燥後、1 000~1 100 °C, 1 min, 350~450 mmAq の条件で点火を行う。焼結鉍プロセスでは乾燥は行わず、それ以外は新塊成鉍プロセスの点火条件と同様である。

Fig. 2 に焼結試験結果を示す。

#### (1) 負圧

同一空塔速度<sup>†</sup>を得る場合、新塊成鉍プロセスは焼結鉍プロセスに比較し 1/2~1/3 の圧力でバランスする。本実験条件ではブロー能力の限界から焼結鉍プロセスの空塔速度は 0.5 Nm/s 以上 ( $\Delta P = 1 600$  mmAq) の維持は不可能であった。

#### (2) 風量原単位

両プロセスで 900~1 100 Nm<sup>3</sup>/t とほぼ同じである。新塊成鉍プロセスでは、ガス流速上昇とともに風量原単位も上昇する。これは焼結に寄与しないサイドレーヤー部を流れるガス量が相対的に増加するためと考えられる。

#### (3) 生産性

両プロセスとも風量に対しほぼ同一の生産性増加が認められる。ただし新塊成鉍プロセスは本実験範囲内では直線的な増加が認められるのに対し、焼結鉍プロセスではブロー能力に起因する風量の限界より 1.6 t/m<sup>2</sup>・h が限界であった。

#### (4) 焼結時間

両プロセスともガス流量増とともに焼結時間は同一線上で減少する。ただし (3) と同様ブロー能力により、焼結鉍プロセスの時間減少には限界がある。

#### (5) 成品歩留り

+5 mm 成品で比較すると新塊成鉍プロセスの方が焼結鉍プロセスより 3~4% 優れる。歩留りの最高値は新塊成鉍プロセスでは風量 0.4~0.5 Nm/s ( $\Delta P = 250 \sim 500$  mmAq) の範囲に認められる。風量がこれ以上では、特にポット壁部の歩留りが低下する傾向であった。

#### (6) 成品強度

+5 mm 成品でシャッター強度 (SI) を比較する場合、両プロセスでほぼ同様である。ただし、SI<sub>+10</sub> では新塊成鉍の構成単位が 5~10 mm のペレットのため焼結鉍の方が優れる。新塊成鉍の SI<sub>+10</sub> は風量とともにやや低下傾向にある。これは風量増に伴い組織形成に必要な高

温保持時間が減少したことに起因するものと考えられる。

以上両プロセスの焼結試験により、これらプロセスの適正操業範囲及びプロセスの特徴は次のように明らかとなった。

1) 新塊成鉍プロセスでは成品歩留り、シャッター強度を考慮すると層内通過風速は 0.4~0.6 Nm/s ( $\Delta P = 250 \sim 500$  mmAq) が適正領域である。ただし、生産性向上を目的とするのであれば、1 000 mmAq 程度の高負圧操業を行うことにより、生産率 2.6 t/m<sup>2</sup>・h 程度の操業の可能性も考えられる。

2) 焼結鉍プロセスでは負圧 1 000~1 600 mmAq とすることにより、生産率 1.6 t/m<sup>2</sup>・h は確保できる。なお新塊成鉍プロセスでこの生産性を達成するには空塔速度を合わせれば良く、この場合の負圧は 250 mmAq であった。

3) 生産性、焼結時間、吸引風量原単位を両プロセスで比較した結果、基本的には両プロセスとも充填原料層内への空気供給量が律速となっている。このため生産性向上を意図する場合、通気性の優れた新塊成鉍プロセスは焼結鉍プロセスに比較し空気供給量の面で優れることが推察される。

## 2.2 両プロセスの焼結過程における熱の伝播

Fig. 2 に示した両プロセスの通気性の差を焼結過程での熱の伝播とに関連づけ検討を行った。実験は焼結現象を直接観察するため、透明石英管に 2.1 と同様の事前処理をほどこした原料を充填し行った。この場合の透明石英管の内径は 150 mm であり、原料層厚は 400 mm とした。また点火はガスバーナーで行い、その時間は 1.5 min であった。吸引負圧は焼結時間を両プロセスでほぼ合わせるように調節し、その値は新塊成鉍プロセスで 300 mmAq、焼結鉍プロセスで 1 600 mmAq であった。

Photo. 1 に両プロセスの熱の伝播状況を示す。Photo. 1 より、新塊成鉍プロセスは焼結鉍プロセスに比較し、

(1) 溶融帯の幅は約 2 倍程度に広がっている。

(2) 溶融帯の温度は目視観察ではより高温である。これはグリーンボール表面に被覆された粉コークスが激しく燃焼するためである。

(3) 焼結完了帯のペレット及び水分凝縮帯のペレットは焼結による溶融、水分過飽和による崩壊は認められない。これはポットグレート炉による焼結試験結果とも一致している。

などが特徴であった。

この結果より、新塊成鉍プロセスが低負圧で操業可能な理由は造粒による層内通気性の向上の他に、溶融帯で

<sup>†</sup> 点火開始時より排ガス温度ピーク時までの風量積算値を焼結時間及びポット断面積で除した平均ガス流速

の溶融による通気性悪化、水分凝縮帯におけるグリーンボールの崩壊が抑制されている点が効果を上げているものと推察される。このように典型的な新塊成鉍を得るための操業の範囲として、本実験結果から層内空塔速度：0.4~0.6 Nm/s、燃料添加：3.5% 粉コークスをグリーンボール表面に被覆、グリーンボール粒径：5~10 mm が主体、などが得られた。また、グリーンボール強度は0.8~1.0 kg/p であり、既報<sup>1)</sup>とほぼ同じ範囲であつた。さらに成品をペレットブロックとして回収するには原料の焼結過程での溶融は抑制することが望ましい。このためには Table 1 に示すように微粉原料に高品位のペレットフィード使用などにより成品中の SiO<sub>2</sub> 含有量は4% 以下が適正と判断された。

### 3. 考 察

#### 3.1 新塊成鉍プロセスの充填層内の空間率評価

前報<sup>2)</sup>及び Fig. 2, Photo. 1 の結果より両プロセスを特徴づける通気性はベッドの充填構造に強く依存するものと予想される。ここでは新塊成鉍プロセスの充填構造の評価を行うため、その空間率の測定を行う。

実験は内径 155 mm、高さ 400 mm の小型焼結ポットに Table 2 に示した新塊成鉍プロセスの原料を 2・1 と同様の方法で事前処理を行い充填した。ベッド内通過風量はポット上部に風量計を設置し、これにより吸引負圧に対する風速として測定した。

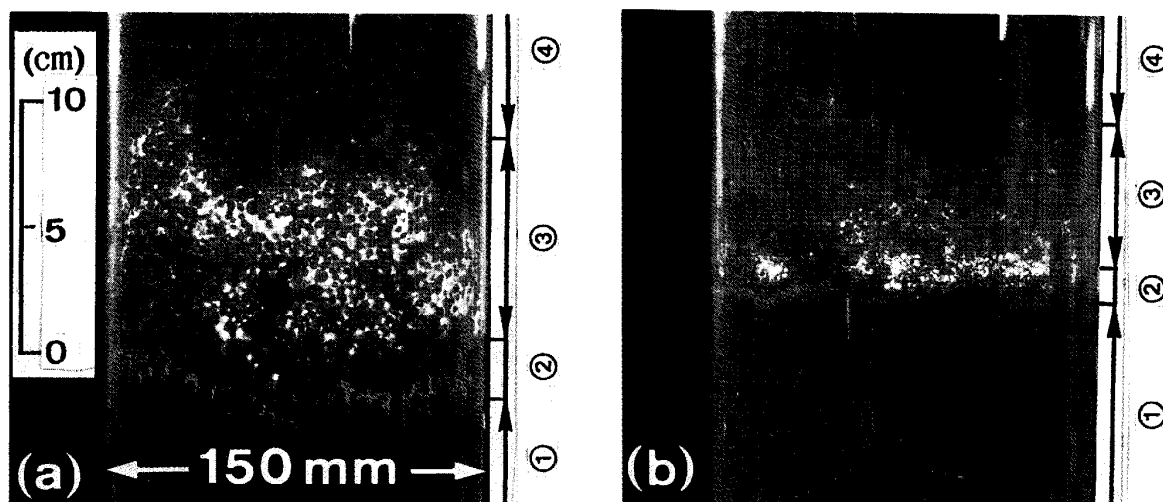
充填層内の流れ解析には、一般的に ERGUN の提出した実験式が適用される<sup>6)</sup>。ここではまず新塊成鉍プロセ

スの湿潤状態、焼結完了状態時の層空間率を ERGUN の式により評価した。実験結果及び ERGUN の式による評価結果を Fig. 3 に示す。

これより負圧 400 mmAq 以下の領域では ERGUN の式の適用の妥当性が認められた。400 mmAq 以上の負圧域で実測値が計算値より高く出る理由は、壁効果の影響で相対的に空間率の高い壁部を流れるガス量が多くなったためと判断された<sup>7)</sup>。壁効果の影響を考慮した上で ERGUN の式を適用する方法も提案されており、今後の検討課題である<sup>8)</sup>。また乾燥状態の空間率は湿潤状態のペレットをポット内で完全に乾燥した後、前記と同様の方法で評価した。

一方、ベッド内の全圧損を律すると考えられる溶融帯の空間率は、本実験装置では精度の高い評価は不可能である。そこで山岡ら<sup>9)</sup>の焼結鉍プロセスに対する空間率を参考にすると同時に、Photo. 1 の溶融帯にもかかわらずペレットの原形を留めていることを考慮し、新塊成鉍プロセスでは焼結鉍プロセスの 20~30% 増の値を設定した。

Table 3 に以上新塊成鉍プロセスの各ゾーンに対する ERGUN の式より予測した空間率を示す。これら空間率の妥当性を調べるため 2・1 と同様の方法で Photo. 1 に準じ層厚のみを 400 mm としたポットグレート炉テストを行つた。ここでは溶融帯が中層部に達したときの風速~負圧を求める。一方 Photo. 1 の各ゾーン比率、Table 3 の各空間率を用い ERGUN の式から全負圧を計算する。これらの検討の結果は、ばらつきはあるものの実験及び



(a) New agglomeration process (b) Sinter process  
 ① Wetting zone ② Drying zone ③ Sintering zone ④ Product zone

Photo. 1. Appearance of heat propagation between new agglomeration process and sinter process in silica tube reactor.

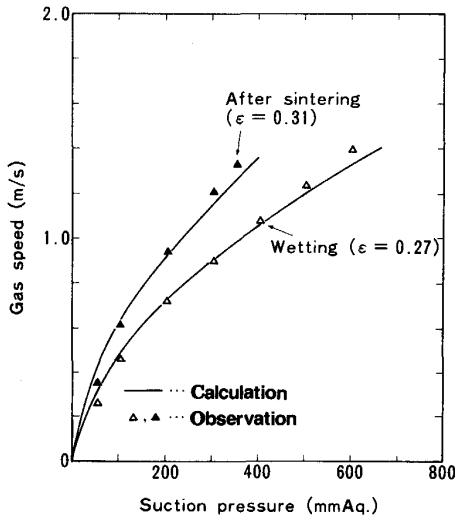


Fig. 3. Evaluation of void fraction in the bed estimated by ERGUN'S equation.

Table 3. Void fraction in sintering bed evaluated by the relation between suction pressure and gas velocity.

Condition of agglomerates	Agglomeration process	
	New agglomerates	Sinter
Drying	0.29	0.21
Sintering	0.16	0.12
Wetting	0.27	0.20
After sintering	0.31	0.30

計算による両負圧は近いことが認められ、その妥当性も確認された。なお、焼結鉍プロセスに対して提出した空間率のうち、湿潤帯、乾燥帯の値を ERGUN の式に代入し得られた負圧～ガス流速の関係は、焼結用擬似粒子に対する同様の実験結果とはほぼ一致することを確認した。ただし焼結完了帯の空間率は山岡ら<sup>9)</sup>の値 (ε=0.54) を用いると風速が実測値より高く評価されるため実験結果に合うようこれを設定した。

Table 3 より新塊成鉍プロセスの空間率は、いずれの領域でも焼結鉍プロセスのそれに比較し 10~40% 程度高い値が妥当と判断された。ただし今回の実験では熔融帯の空間率は直接測定することが困難であり、この領域における精度の高い評価は実験方法を含め今後の課題である。なおこのような空間率の差が Fig. 2 に示すようなガス流速負圧及び生産性の関係となつたものと判断された。

### 3.2 新塊成鉍及び焼結鉍プロセスにおけるベッド内ガス流れの検討

グレート方式で塊成鉍を製造する場合、グレート幅方向の局所的なガス流れの変動が粒子への不十分な伝熱を

ひき起こし、ひいては歩留りに影響を与えることが考えられる。ここでは両プロセスのサイドプレート近傍のガス流れ状況を実験により得られた空間率、各ゾーンの比率などを用いシミュレーションにより明らかとし歩留りとの関係を検討する。モデル作成にあたって、以下のような仮定をおいた。

(1) ベッド内は等温とし、焼結反応によりガス側の物質収支による変化はないとする。

(2) 等温を仮定するため、ガス側物性値及び微小要素内でのガス量の変化はないとする。

(3) グレートの長さ方向へのガス流れはなく、幅方向及びベッド高さ方向の 2 次元流れを考慮する。

ベッド内ガス流れ数式モデルは、流体に対する連続の式及び 2 次元に拡張した ERGUN の式を連立させた STANEK<sup>10)</sup> の提出式を用いた。すなわち定常状態を仮定すると、微小要素内での物質収支より (1) 式が得られる。

$$\text{div}(\mathbf{G}) = 0 \dots\dots\dots (1)$$

また ERGUN の式をベクトル表示すると (2) 式が得られる。

$$\text{grad } P = -(f_1 + f_2 |\mathbf{G}|) \mathbf{G} \dots\dots\dots (2)$$

いま流れ関数  $\psi$  を (3) 式で定義すれば (1) 式は自動的に満足する。

$$G_x = -\partial\psi / \partial y, \quad G_y = \partial\psi / \partial x \dots\dots\dots (3)$$

(2) 式をそれぞれ  $x, y$  で偏微分し、(3) 式を代入し圧力項 ( $P$ ) を消去すると (4) 式が得られる。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \left( f_1 + 2f_2 \left| \frac{\partial \psi}{\partial x} \right| \right) \\ & + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \left( f_1 + 2f_2 \left| \frac{\partial \psi}{\partial y} \right| \right) \\ & + \frac{\partial \psi}{\partial x} \left( \frac{\partial f_1}{\partial x} + \frac{\partial f_2}{\partial x} \left| \frac{\partial \psi}{\partial x} \right| \right) \\ & + \frac{\partial \psi}{\partial y} \left( \frac{\partial f_1}{\partial y} + \frac{\partial f_2}{\partial y} \left| \frac{\partial \psi}{\partial y} \right| \right) = 0 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

ここで、

$$f_1 = \frac{150(1-\epsilon)^2 \mu}{g_c \rho (\phi \cdot d_p)^2 \epsilon^3}, \quad f_2 = \frac{1.75(1-\epsilon)}{g_c \rho (\phi \cdot d_p) \epsilon^3}$$

$\mathbf{G}, G_x, G_y$ : ガス質量速度 [ $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ],  $P$ : ガス圧力 [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ],  $\psi$ : 流れ関数 [-],  $\epsilon$ : 層空間率 [-],  $\mu$ : ガス粘度 [ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ ],  $g_c$ : 重力換算係数 [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],  $\rho$ : ガス密度 [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],  $\phi$ : 形状係数 [-],  $d_p$ : 粒径 [ $\text{m}$ ],  $x, y$  幅方向及び層厚方向の座標

また境界条件としてグレートのサイドプレートより外部にガスが流れないこと、サイドプレート付近のグレートバーを盲とすることを考慮すると (5), (6) 式が得られる。

$$G_x = 0 \text{ (サイドプレート部)} \dots\dots\dots (5)$$

$$G_y = 0 \text{ (グレートバーの盲板)} \dots\dots\dots (6)$$

(4) 式を (5), (6) 式の条件下で解くことによってグレートの幅方向, 層厚方向のガス流れ分布が得られる. 計算は差分近似法により行つた. また収束は SOR 法(逐次加速緩和法)<sup>11)</sup>により行つた. 加速係数は 0.2~0.7 であり, 収束の確認は各 2 次元座標の  $\psi$  に対するノルム計算を行いこれより判断した. 今回の計算条件下では, 800~1000 回のくり返しにより収束は十分となることが確認された. またこのようにして  $\psi$  から求めた  $G$  について, 流線方向に積分した圧力が初期に設定した負圧に等しくなる場合に計算は完了するとした. 計算に使用した定数, 物性値<sup>12)</sup>を Table 4 に示す. このうちベッド内の空間率及び焼結過程での焼結完了, 熔融, 乾燥, 湿潤帯の相対比率は Table 3 及び Photo. 1 より求めた.

Fig. 4 にこの計算フローを示す.

サイドプレート壁部 14 cm 以内の空間率は新塊成鉍プロセスではサイドレーヤーとして 1~4 mm の成品を

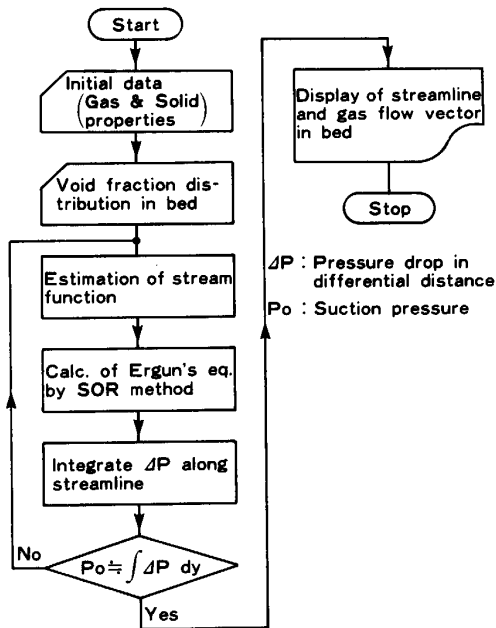
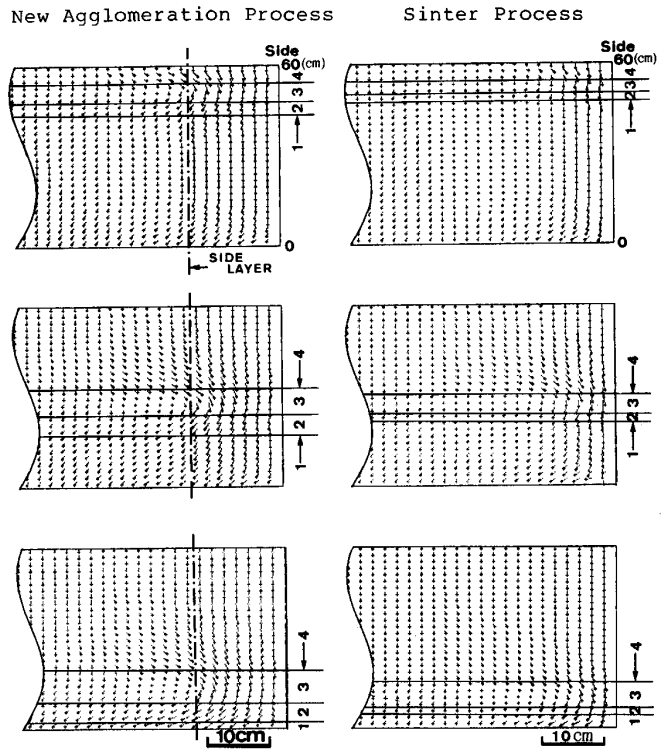


Fig. 4. Calculation flow of gas stream in packed bed.

使用し 3・1 と同様の実験方法で  $\epsilon = 0.42$  と決定した. 一方, 焼結鉍プロセスではサイドレーヤーは使用せず壁効果のみを考慮する. このため側壁部の  $\epsilon$  は各領域の空間率の 30% 増とした.

シミュレーション結果を Fig. 5 に示す. Fig. 5 は両プロセスとも充填層をガスが通過する際の壁部近傍のガス流れを表わしている. この結果より壁部ガスは焼結完了帯より熔融帯に入るとき,  $\epsilon$  が急激に低下するためサイドプレート方向に流れ込み, この領域でのガス流れは抑制される. 一方, 乾燥湿潤帯ではいつたんサイドプレート部に回つたガスは, これらの領域の  $\epsilon$  が熔融帯のそれより大きくなるため, 再度グレート中心部に向かつて流れることが明らかである. また, サイドプレート付近の偏流の傾向は, 新塊成鉍プロセスの熔融帯, 乾燥帯に



- 1. Wet zone
- 2. Drying zone
- 3. Sintering zone
- 4. Product zone

Fig. 5. Comparison of gas flow in the bed between new agglomeration process and sinter process.

Table 4. Parameters used for the simulation.

Parameter	Value	Remarks
Gas density ( $\rho$ )	1.23 kg/m <sup>3</sup>	Assuming room temperature
Gas viscosity ( $\mu$ )	1.8 × 10 <sup>-5</sup> kg/m·s	
Diameter of green ball (dp)	0.01 m	New agglomeration process
Diameter of quasi particle (dp)	0.003 m	Sinter process
Shape factor ( $\phi$ )	0.5~0.8	
Layer of bed (H)	0.6 m	
Void fraction ( $\epsilon$ )	0.12~0.35	
Suction pressure (P <sub>0</sub> )	400~450 mmAq	New agglomeration process
Suction pressure (P <sub>0</sub> )	1500~1600 mmAq	

比較し焼結鉍プロセスではこれらの幅が狭い上焼結完了帯から焼結帯への  $\epsilon$  の変化率が大きいことや大きくなる。

焼結鉍プロセスでは高負圧のため、サイドプレート部付近のガス流速が新塊成鉍プロセスのそれに比較し速くなっている。シミュレーション結果によれば新塊成鉍プロセスのサイドプレート部とこれより 60 cm 内部地点のガス流速比が 2.9 であるのに対し、焼結鉍プロセスのそれは 9.1 であった。この結果より上記偏流も考慮するとこの付近の成品歩留りは悪化する可能性を示唆している。

以上、両プロセスのベッド内でのガス流れをシミュレーションにより評価を行った。今回のシミュレーションでは、

- (1) 壁効果によるサイドプレート付近の空間率評価の精度が不明であること
- (2) 等温を仮定していること
- (3) 全圧損に対する影響が高いと想定される溶融帯の空間率に対する実験的裏付けがないこと

(4) 焼結鉍プロセスでは焼結によりベッドを構成する擬似粒子が消失する。このため空間率に影響を与える粒径  $d_p$  の評価方法に問題があることなどにより定量的な評価には問題があるが、両プロセスのガス流れの特徴は得られたものと判断する。今後は実験によつてこれら両プロセスの流速分布、偏流の差がグレート幅方向の局所的な歩留りにどの程度影響を及ぼすかの定量的な検討が必要と思われる。

### 3.3 新塊成鉍プロセスにおける伝熱面からみた適正グリーンボール粒径

ベッド内通気性向上のために原料を造粒する効果については既に Fig. 1 に示した。グリーンボールの粒径を評価する場合、ベッド内の通気性の他に新塊成鉍の組織形成の面からペレット内部への熱移動も重要な要素と考えられる。

短時間の焼成で新塊成鉍の組織形成を十分に行うためには、ペレットの中心温度と表面温度に差がなくなるような粒径条件が必要となる。ここではペレットの粒子内の熱移動が伝導伝熱のみにより、また燃焼ガスからペレット表面への熱移動は対流伝熱で行われると仮定し、FOURIER の式により伝熱解析を行った。そこでペレットを球と仮定し、初期、境界条件を考慮すると次式が得られる。

$$\frac{\partial t}{\partial \theta} = \frac{\lambda}{\rho_s C_s} \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \dots\dots\dots (7)$$

初期条件

$$\theta = 0, t = t_0 \dots\dots\dots (8)$$

境界条件

$$r = R, -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = h_p (T_g - T_s) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、 $r$ : ペレット表面からの距離 [m],  $t$ :  $r=r$  におけるペレット温度 [°C],  $\theta$ : 時間 [h],  $\lambda$ : ペレット内熱伝導率 [kcal/mh°C],  $\rho_s$ : ペレット密度 [kg/m<sup>3</sup>],  $C_s$ : ペレットの比熱 [kcal/kg°C],  $t_0$ : ペレット初期温度 [°C],  $R$ : ペレット半径 [m],  $h_p$ : 熱伝達係数 [kcal/m<sup>2</sup>h°C],  $T_g$ : ガス温度 [°C],  $T_s$ : ペレット表面温度 [°C] (7) 式のペレットの熱伝導率は非定常型高温熱伝導率測定装置 (英弘精機産業(株) HC-60 型) により行い、この結果を他の研究のデータ<sup>13)14)</sup>との比較で Fig. 6 に示す。Fig. 6 より本実験で得られた熱伝導率は、従来値に比較し小さい値であった。これは従来値が天然鉍石を対象としているのに対し、本実験値が粉鉍石を焼結させたサンプルを対象としていることによるものと考えられる。また、ペレットと燃焼ガスとの間の熱伝達係数は

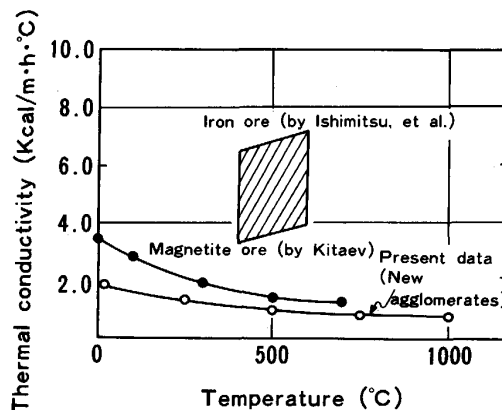


Fig. 6. Thermal conductivities of new agglomerate and iron ore.

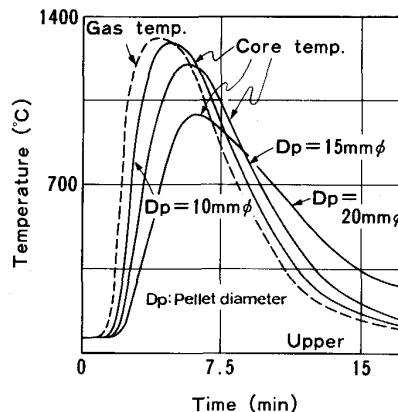


Fig. 7. Influence of pellet size on its core temperature under the typical heating pattern.

RANZ の式<sup>15)</sup>より求めた。その他、塊成鉍の比熱は文献値<sup>14)16)</sup>を、密度は測定値である  $3430 \text{ kg/m}^3$  を用いた。この結果の妥当性を検証するために、所定温度に設定された電気炉内にペレットを装入し、ペレット中心部温度の推移を測定した。測定は熱電対からの熱伝導の影響を考慮し粒径を約  $35 \text{ mm}$  と大きくし、かつ熱電対素線は空気で冷却した。実験は昇温するケースと冷却するケースについて行い、この実験結果と (7)~(9) 式をもとにした計算結果を比較した。計算にあたっては (7)~(9) 式を差分方程式に変換し、SOR 陰解法<sup>17)</sup>により行った。この結果、両者は良く一致していることが認められ、(7)~(9) 式及びこれに用いた物性値の妥当性が確認された<sup>18)</sup>。Fig. 7 は典型的な新塊成鉍のベッド上層部のヒートパターンを与えたとき、各種粒度ペレットの中心温度の変化に関するシミュレーション結果を示す。これよりペレットの粒径が  $15 \text{ mm}$  を超えると中心部温度が十分に昇温しない可能性があり、この付近の組織形成が不十分になるものと考えられる。

以上、新塊成鉍の造粒粒度を検討した結果、グリーンボール粒度は造粒の歩留りも考慮すると  $5\sim 15 \text{ mm}$ 、望ましくは  $5\sim 10 \text{ mm}$  が適正と考えられる。

#### 4. 結 言

新塊成鉍プロセスを主として、ベッド内の通気性の面から焼結鉍プロセスと比較、検討を行い、その特徴を明らかとした。また、新塊成鉍の組織形成に影響を及ぼす熱移動の観点から、グリーンボール粒径に関する検討をあわせて行った。その結果は以下のとおりである。

(1) 両プロセスとも風量に対しほぼ同一の生産性増加が認められる。ただし本実験条件下では、新塊成鉍プロセスは成品品質を維持しながら直線的に増加するのに対し、焼結鉍プロセスではブロー能力からくる風量の限界により生産性は  $1.6 \text{ t/m}^2 \text{ h}$  であつた。

(2) 透明石英管による両プロセスの焼結試験を行った結果、新塊成鉍プロセスの特徴は焼結プロセスに比較し熔融帯の温度が被覆粉コークスの急激な燃焼により高くなること、熔融帯の幅が広いことなどである。また、グリーンボールは乾燥、水分の凝縮を受けても崩壊することはないことが確認された。

(3) ベッド内の実測空間率を用いてグレートサイドプレート付近のガス流れシミュレーションを行った結果、両プロセスとも焼結完了帯より熔融帯へのガス流れは抑制されサイドプレート方向に流れやすいこと、熔融帯より乾燥、湿潤帯に向かうガス流れは再度グレート中心に向かうことなどから明らかとなつた。また、焼結鉍プロセスではサイドプレート付近のガス流れが早いこと、上記偏流の程度が新塊成鉍プロセスに比べ大きいことなどからこの部分の歩留り低下が予想された。

(4) グリーンボール粒径の伝熱に及ぼす影響を調査した結果、新塊成鉍プロセスでペレット内部まで十分に熱が伝達するためには、その粒径が  $5\sim 10 \text{ mm}$  が望ましいこと、これ以上ではペレットの中心部の組織形成が十分行われないことなどが予想された。

(5) 本試験及び結果の検討により新塊成鉍プロセスの適正操業条件は、負圧  $400\sim 600 \text{ mmAq}$ 、グリーンボール粒度  $5\sim 10 \text{ mm}$ 、などが基本になるものと考えられた。

#### 文 献

- 1) 坂本 登, 野田英俊, 岩田嘉人, 斎藤 汎, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 1504
- 2) 野田英俊, 坂本 登: 鉄と鋼, 73 (1987), S 101
- 3) 坂本 登, 岩田嘉人, 福与 寛, 斎藤 汎, 里見弘次, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 72 (1986), S 94
- 4) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 504
- 5) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 512
- 6) S. ERGUN: Chem. Eng. Prog., 48 (1952), p. 89
- 7) K. RIDGWAY and K. J. TARBUCK: Brit. Chem. Eng., 12 (1967), p. 384
- 8) 三輪茂雄: 粉粒体工学 (1971), p. 337 [朝倉書店]
- 9) 山岡洋次郎, 堀田裕久, 長野誠規, 梶川脩二, 塩原勝明, 川田 仁: 鉄と鋼, 69 (1983), S 737
- 10) V. STANEK and J. SZEKELY: Canad. J. Chem. Eng., 50 (1972), p. 9
- 11) 水本久夫: 工業数学 II (1978), p. 93 [森北出版]
- 12) 化学工学便覧 (化学工学協会編) (1968), p. 40 [丸善]
- 13) 石光章利, 菅原欣一, 平戸正男: 鉄と鋼, 51 (1965), p. 614
- 14) B. KITAEV, Yu. G. YAROSHENKO and V. D. SUCHKOV: Heat Exchange in Shaft Furnace (1967), p. 218 [Pergamon Press Ltd.]
- 15) 化学工学便覧 (化学工学協会編) (1978), p. 288 [丸善]
- 16) O. KUBASHEWSKI and C. B. ALOCK: Metallurgical Thermochemistry, 5th Ed. (1979) [Pergamon Press Ltd.]
- 17) G. D. SMITH: 偏微分方程式の解法 (1979), p. 17 [サイエンス社]
- 18) 野田英俊, 坂本 登: 鉄と鋼, 73 (1987), S 100