
供給熱量の焼結操業に与える影響

Effect of Heat Supply on the Iron Ore Sintering Operation

菅原 実(Minoru Sugawara) 小坂橋 寿光(Toshimitsu Koitabashi) 浜田 尚男
(Takao Hamada) 岡部 侠児(Kyoji Okabe) 才野 光男(Mitsuo Saino) 佐野 幸男
(Yukio Sato)

要旨：

粉鉄鉱石の焼結過程で、装入物は石灰石と共にコークスの燃焼熱により部分的に熔融し、成品の強度に影響を与える。したがって、焼結層に熱を供給する方法は、焼結操業、生産性や品質に大きな影響をもっている。数式シミュレーションと焼結試験で、熱の供給方法の異なる次の4つのケースの操業について検討を加え、次の結果を得た。(1)吸引空気の酸素富化操業：成品強度や歩留はほとんど変わらず、生産性は酸素富化1%あたり3～4%増加する。(2)コークスの操別装入操業：コークスを層別に装入すると、コークスは8～15%節約できる。(3)吸引空気の予熱操業：吸引空気を予熱するか燃焼排ガスを吸引させる操業で、コークスは7～9%節約できる。(4)高層厚操業：層厚を増してコークス配合比を低下すれば、生産性を同一にして、焼結鉱の品質は改善できる。

Synopsis：

In the sintering process of fine iron ore, a part of the ore charge melts with the limestone additives by the heat of coke combustion, affecting product strength. Because of this, the procedure of heat supply in the sintering bed has a great influence on the operation, productivity, and property of sinter. By applying the results of mathematical simulations and pot sintering test for the practical operation, the authors have investigated the operational behavior occurred at the following four cases under different heat supplying methods. 1) Oxygen enrichment in the incoming air; an oxygen enrichment of 1% results in 3 to 4% increase of production under the constant condition of strength and yields. 2) Two-layer sintering; an 8 to 15% coke consumption can be saved, if an operation with lower mixing rate of coke at lower layer is applied. 3) Preheating of incoming air; by applying the method of preheating incoming air or of premixing of hot waste gas into incoming air, 7 to 9% of coke consumption can be saved. 4) Bed height increasing; an improvement of physical properties of sinter can be expected with increasing of bed height.

本文は次のページから閲覧できます。

供給熱量の焼結操業に与える影響

Effect of Heat Supply on the Iron Ore Sintering Operation

菅 原 実*

Minoru Sugawara

小板橋 寿 光**

Toshimitsu Koitabashi

浜 田 尚 夫***

Takao Hamada

岡 部 俠 児****

Kyoji Okabe

才 野 光 男*****

Mitsuo Saino

佐 藤 幸 男*****

Yukio Sato

Synopsis :

In the sintering process of fine iron ore, a part of the ore charge melts with the limestone additives by the heat of coke combustion, affecting product strength. Because of this, the procedure of heat supply in the sintering bed has a great influence on the operation, productivity, and property of sinter. By applying the results of mathematical simulations and pot sintering test for the practical operation, the authors have investigated the operational behavior occurred at the following four cases under different heat supplying methods.

- 1) Oxygen enrichment in the incoming air; an oxygen enrichment of 1% results in 3 to 4% increase of production under the constant condition of strength and yields.
- 2) Two-layer sintering; an 8 to 15% coke consumption can be saved, if an operation with lower mixing rate of coke at lower layer is applied.
- 3) Preheating of incoming air; by applying the method of preheating incoming air or of premixing of hot waste gas into incoming air, 7 to 9% of coke consumption can be saved.
- 4) Bed height increasing; an improvement of physical properties of sinter can be expected with increasing of bed height.

1. 結 言

粉鉄鉱石を高炉原料として適切な大きさと品質にする方法の一つとして、焼結法がある。鉄鉱石の焼結過程は配合原料中のコークスの燃焼熱により鉄鉱石や石灰石の一部を熔融し、粉鉄鉱石粒子を結合することである。したがって、鉄鉱石への

供給熱量は焼結過程に影響をあたえ、次のような現象が現われる。

- (1) 粒子の結合強度が変化し、成品強度、歩留が変化する。
- (2) 一定の結合強度に到達する時間が変化し、生産性が変化する。
- (3) 熱効率が変化し、コークス原単位が変化する。

* 千葉製鉄所管理部製鉄管理課

*** 技術研究所製鉄研究室主任研究員

***** 千葉製鉄所管理部製鉄管理課係長

** 技術研究所製鉄研究室

**** 技術研究所製鉄研究室室長・工博

***** 千葉製鉄所製鉄部原料処理課

DL焼結機は、粉鉄鉱石層の上部から空気を吸引しコークスを燃焼させる固定層である。したがって、発生熱量の一部が累積され、下層ほど供給熱量が多くなる。そのため、上層部と下層部では粒子の結合強度や一定の結合強度に到達する時間に差がある。そこで、熱の供給量や供給形態の異なる、

- (1) 吸引空気の酸素富化、
- (2) コークスの層別装入、
- (3) 吸引空気の予熱、
- (4) 層厚の増加

の4種の操業方法について数式シミュレーションによる計算、実機試験、焼結鍋試験で検討を加え若干の知見を得たので報告する。

2. 数式によるシミュレーションモデルの検討

2.1 数式によるシミュレーションモデル

焼結過程を表わす数式によるシミュレーションの基礎式は、焼結層内の微小部分についての熱収支と物質収支よりなる。シミュレーションモデルについてはすでに多くの報告がある¹⁻⁶⁾。

これらの数式の定数の妥当性を検討するには、試験鍋による実測値との対比が必要で試験鍋の挙動を表わす数式モデルをたててシミュレーションを行なった。数式を導くにあたって、次の仮定をおいた。

- (1) 伝熱は対流伝熱のみとする。
- (2) 炉壁からの熱損失は無視し、すべての現象の半径方向の分布はないものとする。
- (3) 粒子内の温度分布はないものとする。
- (4) ガスと粒子の物性定数は焼結過程中一定とする。

焼結原料の乾燥現象は昇温期の低温域のみに現われるので省略した。乾燥終了後のガスと鉱石などの含熱量の変化、ガス-固体間の伝熱量、鉱石などの熔融、凝固熱、石灰石の分解、コークスの燃焼などを考慮すると以下の式が成り立つ。なお、数式の詳細な解説は文献⁷⁾に記載されている。

ガスの熱収支

$$\begin{aligned} & -G_g C_g \frac{\partial T}{\partial z} - h_I a_I v_I (T - t_I) \\ & - h_L a_L v_L (T - t_L) \\ & - h_c a_c v_c (T - t_c) = \varepsilon \rho_g C_g \frac{\partial T}{\partial \theta} \end{aligned} \quad (1)$$

鉱石の熱収支

$$\begin{aligned} & \rho_I C_I v_I (1 - \varepsilon) \frac{\partial t_I}{\partial \theta} = h_I a_I v_I (T - t_I) \\ & - R_m \Delta H_m + R_s \Delta H_s \end{aligned} \quad (2)$$

コークスの熱収支

$$\begin{aligned} & \rho_c C_c v_c (1 - \varepsilon) \frac{\partial t_c}{\partial \theta} = h_c a_c v_c (T - t_c) \\ & - R_c \Delta H_c \end{aligned} \quad (3)$$

石灰石の熱収支

$$\begin{aligned} & \rho_L C_L v_L (1 - \varepsilon) \frac{\partial t_L}{\partial \theta} = h_L a_L v_L (T - t_L) \\ & - R_L \Delta H_L \end{aligned} \quad (4)$$

コークスの物質収支

$$4\pi r_c^2 \frac{\partial r_c}{\partial \theta} = - \left(\frac{M_c}{\rho_c n_c} \right) R_c \quad (5)$$

ガス中酸素の物質収支

$$\left(\frac{G_g C_o}{\rho_g} \right) \frac{\partial f}{\partial z} - R_c = \varepsilon C_o \frac{\partial f}{\partial \theta} \quad (6)$$

充填層単位体積あたりのコークスの燃焼速度

$$R_c = 4\pi r_c^2 n_c k_c C_o \delta (1 - f) \quad (7)$$

石灰石の分解反応速度

$$R_L = \left(\frac{\gamma_L h_L a_L v_L}{\Delta H_L} \right) (T - t_L) \quad (8)$$

コークス粒子の総括反応速度定数

$$k_s = \frac{1}{\left(\frac{1}{k_c} + \frac{1}{k_d} \right)} \quad (9)$$

化学反応速度定数 k_c は Hottel⁸⁾ の結果から

$$k_c = \left(\frac{6.42 \times 10^{11}}{\sqrt{t_c + 273}} \right) \exp \left(\frac{-44,000}{R(t_c + 273)} \right) \quad (10)$$

ガス境膜内物質移動係数 k_d は白井⁹⁾の結果から

$$Sh \cdot \varepsilon = 2.0 + 0.75 R_c^{\frac{1}{2}} S_c^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

また、充填層のガス-固体間の対流伝熱係数 h は白井⁹⁾の結果から

$$Nu \cdot \varepsilon = 2.0 + 0.75 R_c^{\frac{1}{2}} P_r^{\frac{1}{3}} \quad (12)$$

とした。

基礎式は独立変数 Z と θ についての偏微分方程式である。アナログ計算機で解くために Z について差分化し、 θ についての常微分方程式に変換す

る。差分は前進差分としたので第 N 層目の温度変化は第 $(N-1)$ 層目の温度変化から計算する。したがって、点火炉の温度変化を与えて第 1 層目、第 2 層目……と上層から下層まで順次計算する。計算に使用した標準のデータを Table 1 に示す。

焼結層の上面から 60mm の位置での温度、ガス組成、コークス径変化などの計算例を Fig. 1 に示す。点火炉温度は試験鍋の木炭層の下で実測した値を用いた。石灰石は 900°C で熱分解すると仮定し、この分解熱の影響でコークス温度、ガス温度曲線に変曲点がある。

Table 1 Standard data for calculation

Coke content	3%,	Coke size	1.2mm
Ore content	82%,	Ore size	2.5mm
Lime stone content	15%,	Lime stone size	1.5mm
Air flow rate	2730 kg/m ² h, Const. (2.5Nm ³ /min)		

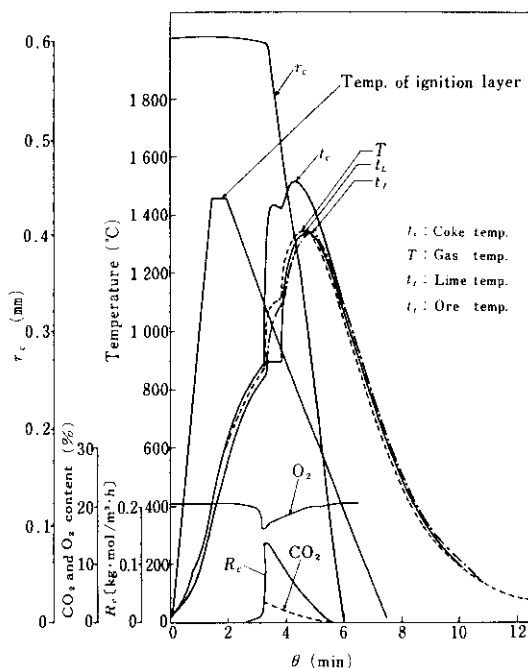


Fig. 1 An example of calculated results at $Z=60\text{mm}$

2.2 焼結鉱の成品歩留と生産率の推定

前述のような焼結過程の数式シミュレーションを用いて得た計算結果は焼結層の温度変化と焼結時間を示す。そこで、これらの値と焼結鉱の成品歩留や生産率との関係は実験で求めた。成品歩留はガス温度曲線の最高温度、あるいは 1 000°C 以上保持時間との間に相関があり、特に 1 000°C 以上保持時間との間には Fig. 2 に示すような相関がある。1 000°C 以上保持時間が長くなると成品歩留は増加するが、ある値以上になると増加しなくなる。

試験鍋の層厚 H 、断面積 A 、焼結鉱の嵩密度 ρ_b のとき焼結鉱の重量は $\rho_b AH$ であるから、焼結時間 S_t 、成品歩留 α となると、焼結鉱の生産率 $P[\text{t/m}^2\text{h}]$ は次のようになる。

$$P = \frac{\rho_b AH \alpha}{AS_t} = \frac{H \rho_b \alpha}{S_t} \dots (13)$$

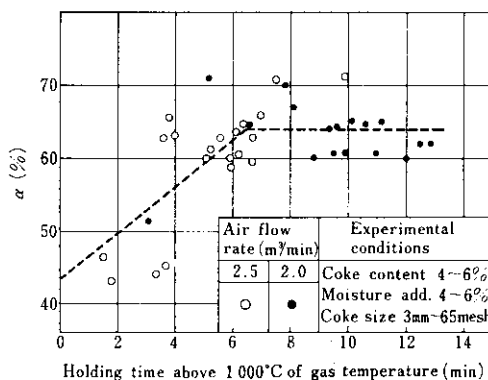


Fig. 2 Relation between yield α and holding time above 1000°C of gas temp.

H と ρ_b は一定であり S_t は計算で求まるから、計算の 1 000°C 以上保持時間 α を Fig. 2 より求めると生産率は計算できる。

3. 吸引空気の酸素富化

吸引空気に酸素を富化すると単位コークスあたりの供給酸素量が増え、コークスの燃焼速度は増

加する。したがって、次の効果が考えられる。

- (1) 強度、歩留が増加する。
- (2) 生産率が増加する。
- (3) コークス使用量が低下する。

Voice, Wild¹⁰⁾は酸素100%までの鍋試験を行ない、吸引空気に酸素富化をするとフレイムフロントスピードが増大し高温域が増加すると報告している。その他、Mazanek^{11,12)}、石光¹³⁾、Sidorov¹⁴⁾による試験報告がある。

めそのまま両者は比較できないが、傾向は一致している。酸素富化により成品歩留はほとんど変わらないが、焼結時間が短縮するので生産率は増加している。

3.2 鍋試験の結果

コークス配合比を一定にし吸引空気に酸素を5%まで富化した焼結鍋試験を行なった。その結果を Fig. 6 に示す。酸素富化率を増すと、

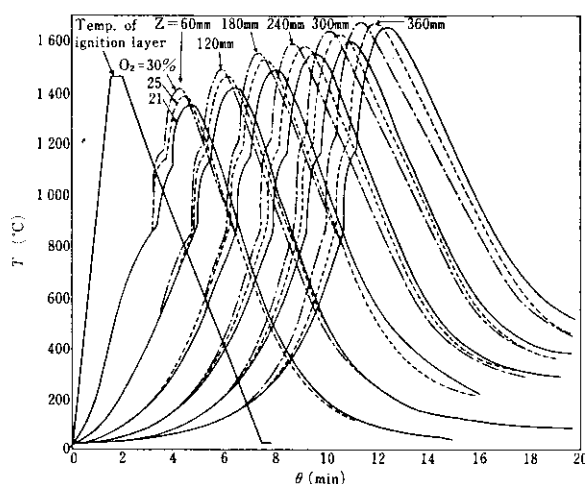


Fig. 3 Effect of oxygen enrichment on the gas temperature curve

3.1 シミュレーションモデルによる計算

酸素濃度 C_0 は(7)式のコークス燃焼速度式中に含まれ、コークスの燃焼速度 R_c とガス温度変化に影響をおよぼす。焼結層内各位置でのガス温度曲線を Fig. 3 に示す。上層では酸素富化によってガス温度の上昇は大きい、下層ほどその差が小さくなる。したがって、実操業に適用する場合、上層が焼結進行中に酸素富化を行なえば効果的と思われる。

フレイムフロントスピードの文献値^{10),14)} との比較を Fig. 4 に示す。いずれの場合も酸素富化によりフレイムフロントスピードは早くなっている。焼結特性におよぼす酸素富化の影響についての実験結果と計算結果を Fig. 5 に示す。原料と空気流量の実験条件と計算条件が異なっているた

Sign	Fuel	Content	Literature
×	Charcoal	3.5%	Voice and Wild ¹⁰⁾
●	Coke	4.0	"
⊗	"	4.0	Sidorov ¹¹⁾
○	"	3.5	This work-observed
⊙	"	3.0	" -calculated

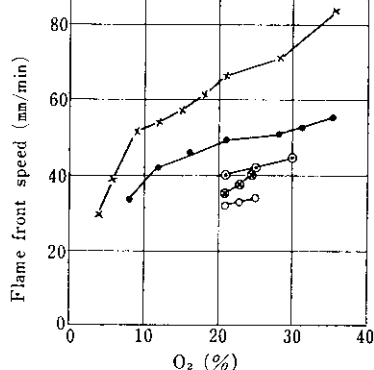


Fig. 4 Comparison of flame front speed at various oxygen content

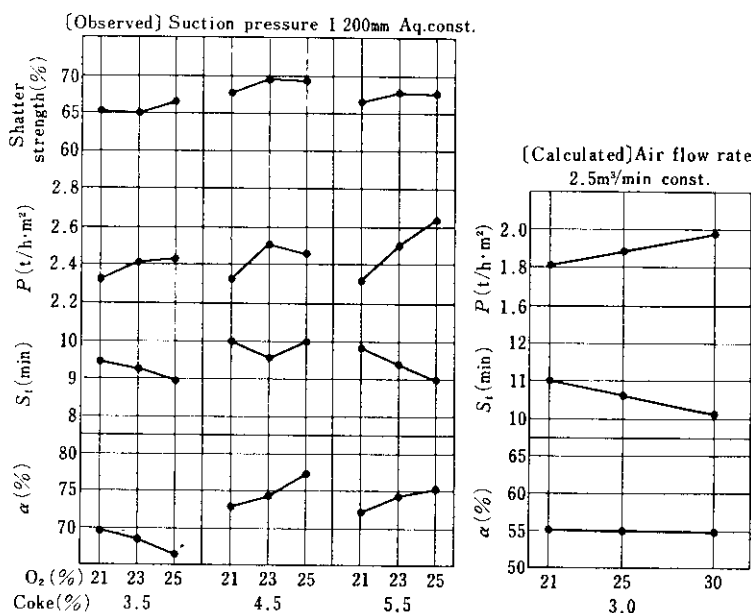


Fig. 5 Comparison of observed and calculated results of indices of sintering process by oxygen enrichment

- (1) 焼結時間が短縮し、生産率は酸素富化1%あたり約3%増加した。
- (2) 成品歩留は増大した。
- (3) 成品強度と還元強度とには変化はなかった。

他の例として、Mazanek, Wyderko^{11,12)}は吸引空気に5%まで酸素を富化した鍋試験を行ない、酸素富化1%あたり約4%生産率が増加し、成品強度も増大したと報告している。石光ら¹³⁾は吸引空気に5%酸素を富化し通常の場合と比較している。それによると、成品強度、歩留は変化せず焼結時間はコークス配合比が多い時に短縮したとしている。

以上のことから、酸素富化1%あたり焼結鉄の生産量は3~4%増加すると考えられる。

3.3 実操業への適用

上述のごとく、吸引空気に酸素を富化すると生産率が増加することがわかった。実操業へ適用するにあたり、各 W. Box ごとのガス分析、温度測定、排ガス量の測定を行ないガスバランスからコークスの燃焼速度、石灰石の分解速度を計算した。計算中、漏風、水性ガス化反応は考慮しな

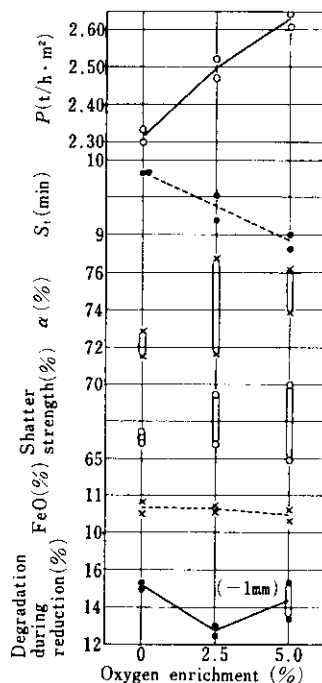


Fig. 6 Variations in the indices of the sintering process for oxygen enrichment into the sucked air

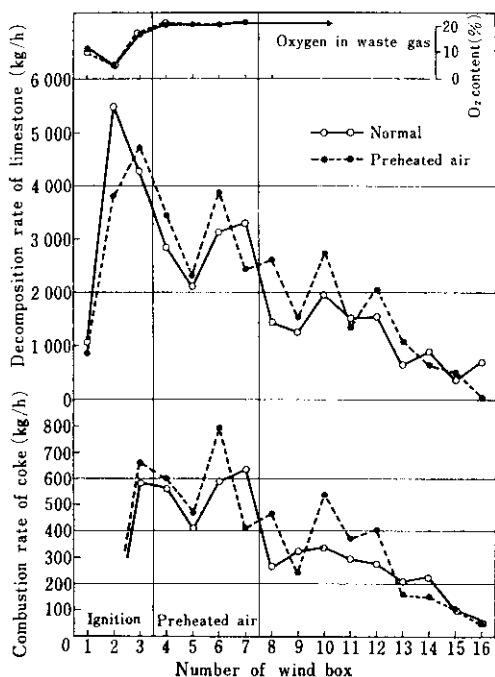


Fig. 7 Decomposition rate of limestone and combustion rate of coke

った。Fig. 7 に通常操業時と吸引空気の予熱操業時の計算結果を示す。コークスの燃焼速度と石灰石の分解速度はともに No. 8 W. Box 以降で小さくなり、吸引空気の予熱操業でもこの傾向は変わらない。したがって、吸引空気の酸素富化は No. 8 W. Box 以降で行なえば、コークスの燃焼量が増して効果的と考える。次に、酸素富化操業の経済性を高炉での焼結鉄配合量の増加によるコークス比の低下、焼結鉄増産による焼結設備の償却費の低下、それに富化酸素費用とで評価した。計算条件は次のとおりである。

焼結鉄生産量：7,500t/day

高炉所要鉄鉱石：1,600kg/t

焼結吸引空気量：15,000Nm³/min

コークス比の低下：-1kg/t/+1% 焼結比

酸素富化位置：No. 8~12 W. Box 部分

酸素富化吸引空気量：5,000Nm³/min

Fig. 8 に焼結鉄増産率をパラメータにした計算結果を示す。酸素、コークスの価格に応じて酸素富化操業の経済性は異なる。たとえば、酸素1%あたりの焼結鉄増産率が3%でコークスの価格

が13,000円/tの時、酸素の価格は3.8円/Nm³以下であれば経済的に成立する。

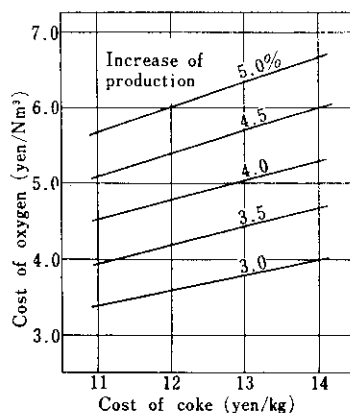


Fig. 8 Relationship between cost of oxygen and cost of coke for an increase of sinter production per 1% oxygen enrichment

4. コークスの層別装入

焼結層内の温度はこれまで数回測定している。それによると上層と下層とでは差があり、下層ほど温度が高く高温域が広い。層内の温度が不均一になると、焼結鉄の品質、組織、化学成分が不均一になる。したがって、層内の温度を均一にするように上層と下層のコークスの配合比を変える操業方法が提案され、2~3の研究報告もある。

4.1 シミュレーションモデルによる計算

計算方法としては上層、下層のコークス配合量を定めて温度分布を求める方法があるが、ここでは焼結層240mmのガス温度が180mmのそれと等しくなるコークス配合量を求める方法をとった。コークス配合量3.0、3.5、4.0%と変えた場合のガス温度—時間曲線から、焼結層180mmの温度をもとにコークス配合量を2.5から4.5%まで変化させ、焼結層240mmのガス温度を求めてFig. 9に示した。これから、コークス配合量3.0、3.5、4.0%について焼結層240mmのガス温度が180mmのガス温度と等しくなるコークス配合量を求めた。Table 2にその結果とコークスの節約量を示す。

焼結層別にコークス配合量と最高ガス温度との関係を Fig. 10 に示す。これから、焼結層全体を一定温度に保つために必要なコークス分配量が求められる。1 400°C, 1 500°C に保持するのに必要なコークス量を Fig. 11 に示す。1 400°C 保持

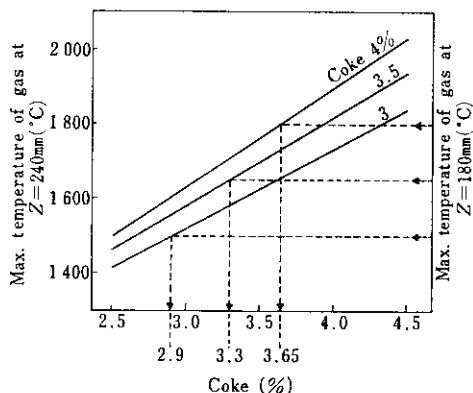


Fig. 9 Reduced coke content in the case that max. temp. of gas at $Z=180\text{mm}$ equals to one at $Z=240\text{mm}$

Table 2 Coke saving by two-layer sintering

Coke content (%)		Coke saving (%)
Upper layer	Lower layer	
3.0	2.9	3.3
3.5	3.3	5.7
4.0	3.65	8.8

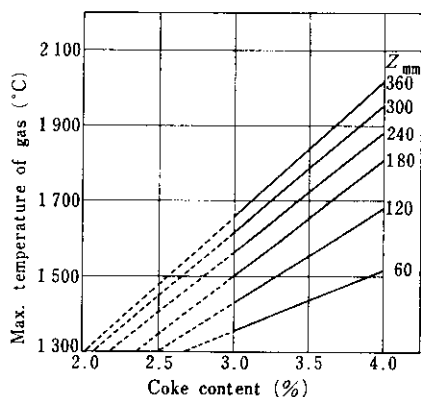


Fig. 10 Relation between max. temperature of gas and cake content in the various sinter layer

の場合、最上層は最下層よりもコークス配合量を約 1% 多くする必要がある。

焼結時間、成品歩留、生産率、コークス原単位についての計算結果を Fig. 12 に示す。各コークス量ともコークス層別装入により焼結時間の延長、歩留の低下から生産率は低くなるが、コーク

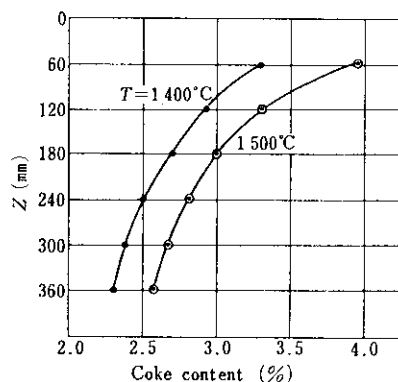


Fig. 11 Coke content required to keep 1 400°C and 1 500°C of max. gas temperature throughout sinter layer

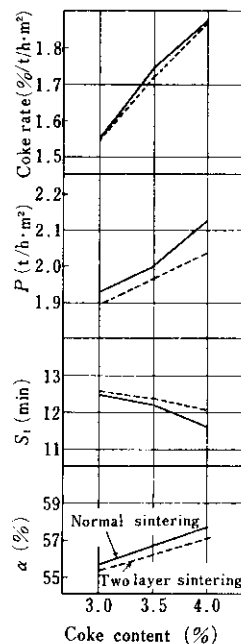


Fig. 12 Comparison of two layer sintering and normal sintering by calculations

ス原単位はわずかに低下する。

4.2 鍋試験の結果

Fig. 13 に上層と下層のコークス配合比を変えて成品強度を測定した鍋試験結果を示す。実線は上層のコークス配合比4%で下層のコークス配合比を4%から3%まで低下した時の平均コークス配合比と成品強度との関係である。点線は上層のコークス配合比が4.5%で下層のコークス配合比を3.5%から2.5%まで低下した時の平均コークス配合比と成品強度との関係である。成品強度を通常操作(2重丸で示す)と同一に保てば、平均コークス配合比を4%から3.68%へ低下でき約8%のコークスが節約できる。太田ら¹⁵⁾は鍋試験の結果、上層と下層のコークス配合比を変えれば通常の場合にくらべ成品強度は増大し、生産量は2%増加、コークス原単位は10%低下したと報告している。山根ら¹⁶⁾や Wendeborn¹⁷⁾の試験報告では、いずれの場合もコークス原単位は約15%低下するとしている。その他、Korsikov ら¹⁸⁾は組織や性状の不均一さが減少すると報告している。

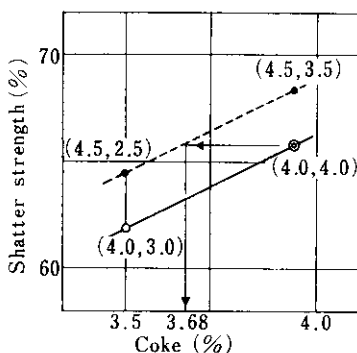


Fig. 13 Variations of shatter strength for changes of coke rate in the lower layer

5. 吸引空気の予熱

焼結層の表面は常に大気に接し、低温空気が吸引される。したがって、上層は高温域が狭いことや急冷によるサーマルショックで、成品強度は下層にくらべ小さい。この現象を改善するため吸引空気を予熱したり燃焼排ガスを吸引させる方法が考えられ、多数の試験例が報告されており¹⁹⁻²¹⁾す

でに実施している工場も多い。

5.1 シミュレーションモデルによる計算

焼結層の上面から 500°C の予熱空気を約10分間吸引させた時の焼結性への影響を計算する。予熱空気を吸引させると普通焼結にくらべてガス温度が高くなり、上層ほど高温域が広がる。成品歩留、焼結時間、生産率についての計算結果を Fig. 14 に示す。予熱空気を吸引させると成品歩留が高く、焼結時間が短縮するため生産率は高くなる。本計算は空気流量一定で行なっているが、実際の焼結は排風圧一定で行なわれるので、焼結中の空気流量は焼結層の通気抵抗の変化によって変わる。そこで、計算で求めた温度分布から排風圧一定での空気流量の変化を計算する。空気流量一定で焼結中の温度と圧力損失の時間的変化を実測したデータから、計算によって求めた排風圧一定の下での空気流量の変化を Fig. 15 に示す。予熱空気吸引のほうが空気流量は少ないので、排風圧一定の焼結では焼結時間が長くなる。平均空気流量から焼結時間を求めると予熱空気焼結法のほうがわずかに長くなるが、生産率は普通焼結法より大きい。

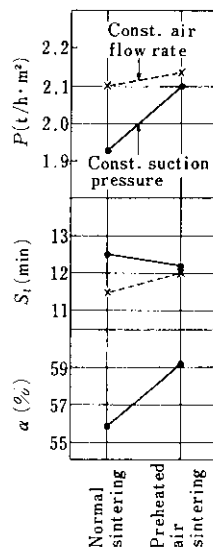


Fig. 14 Comparison of preheated air sintering and normal sintering by calculations

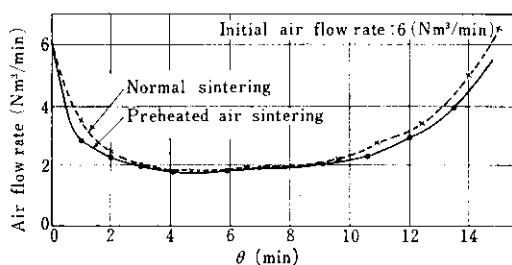


Fig. 15 Change of relative air flow rate in sinter layer under constant suction pressure

5.2 鍋試験の結果

Fig. 16 にコークス炉ガスの燃焼ガスを3.5分間 500°C で吸引させて焼結した鍋試験の結果を示す。通常の焼結操作と比較して

- (1) 生産性、焼結時間はコークスを約10%低下すると同一になった。
- (2) 成品強度は増大した。
- (3) 還元崩壊指数は低下した。

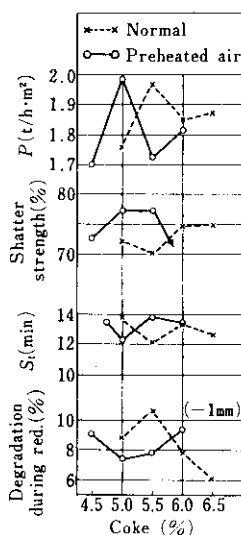


Fig. 16 Effect of preheated air on sintering operation

5.3 実操業試験

吸引空気を予熱する実操業試験は鍋試験の他に現在まで数回実施し、焼結鉱の品質の改善に効果があることがわかった。吸引空気の予熱は、混合ガスの燃焼により約 1 100°C に加熱された熱交

換炉に約 200Nm³/min の冷空気を通して行なった。予熱空気の温度は約 500°C で、吸引位置は No. 4~7 W. Box 部分である。以下に試験結果について記す。

(i) コークス配合比一定のもとでの試験

コークス配合比を一定にして試験を行ない、

Table 3 に示す結果を得た。通常操業時と比較して

- (1) 生産量はほとんど変化しなかった。
- (2) 成品強度は 5 % 増大した。
- (3) 還元崩壊指数は約 3 % 低下した。

Table 3 Effect of preheated air on sintering operation

	A	B
Coke content (%)	4.0	4.0
Production rate (t/h)	189.6	189.0
Shatter strength Upper layer ave. (%)	63.0 75.0	73.9 80.0
Degradation during reduction (-1mm) (%)	6.7	3.8
FeO content (%)	8.6	10.9
Waste gas pressure (-mmAq)	1190	1190

A : Normal operation B : Preheated air

(ii) コークス配合比低下試験

鍋試験の結果から、コークスは約10%低下でることがわかった。実機での効果を知るため、予熱空気温度 500°C でコークス配合比を下げる試験を行なった。試験結果を Fig. 17 に示す。

コークス配合比を低下しても

- (1) 成品強度、還元崩壊指数はほとんど変化しなかった。
- (2) 成品中 FeO は低下した。
- (3) 生産量への影響は実験途中で設備上の理由からパレットスピードを低下したため明らかでなかった。以上の結果から、成品強度

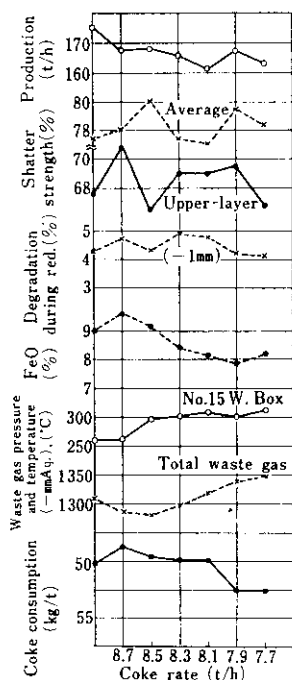


Fig. 17 Relationship between coke rate and indices of the sintering process with preheated air operation

を同一とすればコークスは約7～9%節約できる。

(iii) 予熱空気と燃焼排ガスの吸引試験

コークス配合比をさらに低下するために吸引ガスの熱量を増加することが考えられ、予熱空気の他に熱交換器から発生する燃焼排ガスをも約500°Cで吸引させて試験を行なった。燃焼排ガスはNo. 4, 5 W. Box 部分に、予熱空気はNo. 6, 7 W. Box 部分に吸引させた。コークス配合比は5.8%一定である。Fig. 18, 19に試験結果を示す。Fig. 18から燃焼排ガスを吸引させても生産量は変化せず、上層の強度は予熱空気単独の場合よりもさらに増大することがわかった。Fig. 19には各W. Boxのガス分析値、温度測定値を示す。燃焼排ガスを吸引させてもNo. 4, 5 W. BoxとNo. 6, 7 W. Boxとの間には明らかな差は見られなかった。燃焼排ガスを吹込みコークス配合比を低下する試験を引き続き実施中である。

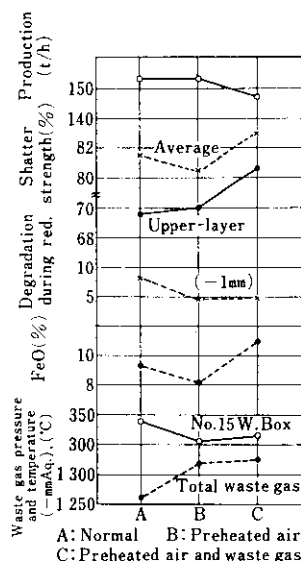


Fig. 18 Effect of preheated air and waste gas suction on sintering process

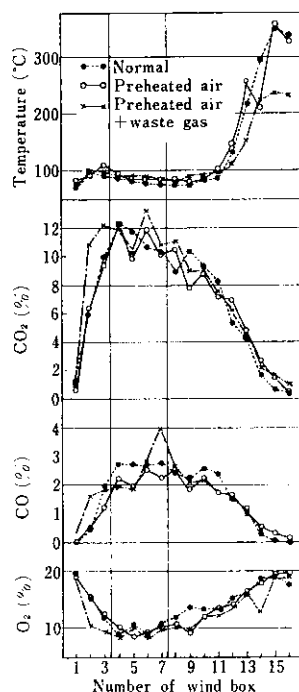


Fig. 19 Gas composition and temperature in wind box

6. 層厚の影響

前述のように焼結層の上層と下層とでは温度と高温域の広さに差があり、上層の成品強度は下層にくらべて小さい。したがって、層厚を増して性状の悪い表層部分の割合を少なくすれば、全体の性質は改善できる。このような観点から各所で層厚を増す検討が行なわれ、すでに実施している工場もある。この方法の難点は通気性が低下することであるが、原料粒度の積極的な改善や高負圧排風機の採用で解決できる。また、高層厚操作方法はDL焼結機の焼結機構から考えても、きわめて合理的な方法である。

6.1 シミュレーションモデルによる計算

空気流量は排風圧が同じ場合、層圧によって変化する。流速 U と排風圧 P_s 、層厚 H との関係は次式で表わせる。

$$\frac{P_s}{H} = \Phi \mu^{\beta} \rho_a^{1-\beta} U^{3-\beta} \dots\dots\dots (14)$$

ここでは層厚の増減による空気流量の変化を大きくとるために空気流量を層厚に逆比例させた。また、点火炉からの入熱量は一定とした。

層厚が増加するとガス温度が高くなり、温度曲線の幅が広がる。計算による成品歩留、焼結時間、生産率の変化を Fig. 20 に示す。層厚の増加により成品歩留が増し、焼結時間が長くなって生

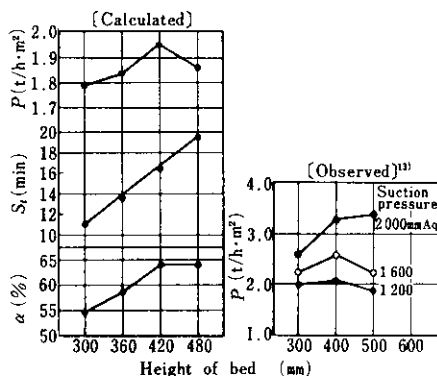


Fig. 20 Comparison of calculated and observed results in the indices of sintering process by various height of bed

産率は層厚 420mm で最高値を示す。層厚480mm で生産率が減少するのは Fig. 2 で示したように 1000℃ 以上保持時間が長くなっても成品歩留が変化しないためである。生産率が最大になる層厚が存在することが知られている²²⁾。

6.2 試験結果

Fig. 21 は第3焼結工場での試験結果である。層厚を増すと生産量は低下して成品強度は増大した。また、通気性はほとんど変化しなかった。Fig. 22, 23 は第1, 2 焼結工場での試験結果である。Fig. 22 はコークス切出量を 8.7t/h と一定にした試験結果であるが、層厚を増すと生産量は低下し強度は増大した。Fig. 21 に示した結果と同じである。Fig. 23 は層厚を増してコークス配合比を低下した試験結果であるが、この場合に

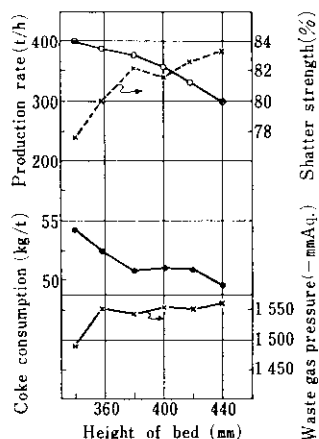


Fig. 21 Experimental results at No. 3 sinter plant

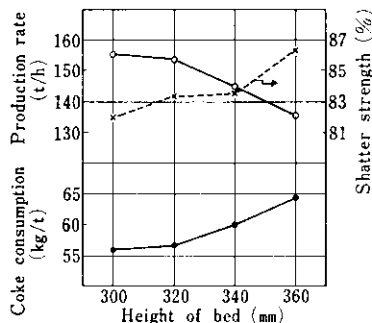


Fig. 22 Experimental results at No. 1, 2 sinter plant

は成品強度の増大割合が小さくなり、生産量はほとんど低下しなかった。Fig. 24 に新日鉄での試験結果²³⁾を示す。層厚を増してコークス配合比を低下すると、粉率は低下して生産量は層厚360mmの場合を除いてほとんど同じである。以上のことから、層厚をあげるのに応じてコークス配合比を低下すれば通気性の低下はさけられ、焼結鉱の品質は改善でき生産量も同一にできると考えられる。

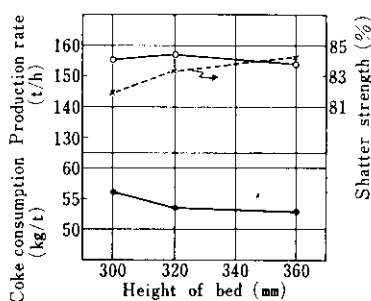


Fig. 23 Experimental results at No. 1, 2 sinter plant

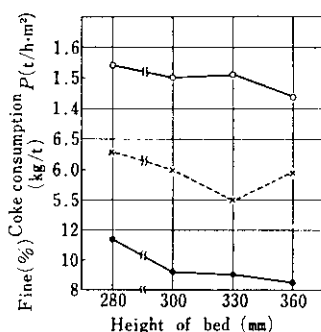


Fig. 24 Experimental results with various height of bed

7. 総括

焼結過程に影響を与える要因のうち、上述の4項目について数式シミュレーションモデルによる検討と試験結果について述べた。用いた数式モデルは物質バランスと熱バランスよりなり、これを解くことで焼結過程のコークスの燃焼と温度の関係を良く表わせ、層内の温度変化やコークス、石灰石の粒径変化などが明らかになった。したがって、操業要因の変化にともなう結果の判定に十分

役立つことがわかった。

しかし、熔融、凝固過程の検討が不十分なこと、歩留、強度の評価方法に問題があることや焼結層内の通気性の変化が数式化できていないことなどから、コークス配合比と焼結時間、成品強度、歩留の関係が試験結果と対応しない部分があり、まだ改良の余地を残している。今後、さらに数式モデルの改良につとめ、焼結過程の解析に活用する考えである。以下に各項目についてまとめる。

- (1) 吸引空気に酸素を富化すると成品強度、歩留はほとんど変化せず、焼結時間が短縮して生産率は酸素富化1%あたり約3~4%増加する。
- (2) コークスを層別に装入すると製品強度を同一とすればコークスは8~15%節約できる。
- (3) 吸引空気を予熱するか燃焼排ガスを吸引させると上層の強度は増し、コークスは約7~9%節約できる。
- (4) 層厚を増してコークス配合比を低下すれば、生産性を同一にして焼結鉱の品質は改善できる。

最後に、本報告をまとめるにあたり種々の実験結果についてご教示いただいた製鉄部の関係各位に深謝の意を表する。

使用記号

- A: 断面積 (m²)
- a_c, a_I, a_L : コークス, 鉱石, 石灰石の充填層単位体積あたりの表面積 (m²/m³bed)
- C_g, C_c, C_I, C_L : ガス, コークス, 鉱石, 石灰石の比熱 (kcal/kg°C)
- C_o : 焼結層に入るガスの酸素濃度 (kg·mol/m³)
- D_p : 粒子径 (m)
- D_v : ガスの拡散定数 (m²/h)
- f : 酸素の転化率 (—)
- G_g : ガスの質量速度 (kg/m²h)
- H : 焼結層厚 (m)
- h, h_c, h_I, h_L : ガスと原料, コークス, 鉱石, 石灰石との間の伝熱係数 (kcal/m²h°C)
- $\Delta H_c, \Delta H_L, \Delta H_m, \Delta H_s$: コークスの燃焼熱, 石灰石分解熱, 鉱石の熔融熱, 凝固熱 (kcal/kg·mol)
- k : ガスの熱伝導率 (kcal/m·h°C)

k_s : コークス燃焼反応の総括速度定数 (m/h)	S_t : 焼結時間 (min)
k_c : コークスの燃焼反応速度定数 (m/h)	T, t_c, t_I, t_L : ガス, コークス, 鉍石, 石灰石の温度 ($^{\circ}\text{C}$)
k_d : ガス境界膜内物質移動係数 (m/h)	U : ガス流速 (m/h)
M_c : 炭素のグラム分子量 (kg/kg·mol)	v_c, v_I, v_L : 原料中のコークス, 鉍石, 石灰石の体積割合 (—)
n_c : 原料層単位体積中のコークス数 (コ/m ³)	Z : 焼結層上面からの距離 (m)
N_U : ヌッセルト数 (hD_p/k) (—)	α : 成品歩留 (%)
P : 焼結鉍の生産率 (t/hm ²)	γ_L : ガスから粒子への伝熱量の中, 石灰石の分解反応に使われる割合 (—)
P_S : 排風圧 (mmH ₂ O)	δ : コークス燃焼速度の補正係数 (—)
P_r : プラントル数 ($\mu C_p/k$) (—)	ε : 原料層の空間率 (—)
R : 気体定数 (kcal/kg·mol ^o K)	μ : ガスの粘度 (kg/m·h)
R_c, R_L, R_m, R_S : コークスの燃焼反応速度, 石灰石の分解反応速度, 鉍石の熔融速度, 鉍石の凝固速度 (kg·mol/m ³ h)	$\rho_g, \rho_c, \rho_I, \rho_L$: ガス, コークス, 鉍石, 石灰石の密度 (kg/m ³)
r_c : コークス粒子の半径 (m)	ρ_b : 焼結鉍の嵩密度 (kg/m ³)
R_e : レイノルズ数 ($D_p G_g/\mu$) (—)	Φ : 通気抵抗指数 (—)
S_c : シュミット数 ($\mu/\rho_g D_v$) (—)	
S_h : シャーウッド数 ($k_d D_p/D_v$) (—)	

参 考 文 献

- 1) 深川, 他: 鉄と鋼, 50 (1964) 3, 338
- 2) 樋口, 鞭: 鉄と鋼, 53 (1967) 11, 1171
- 3) 鞭, 樋口: 鉄と鋼, 54 (1968) 3, S 19
- 4) 鞭, 樋口: 鉄と鋼, 56 (1970) 3, 371
- 5) 塚本, 他: 鉄と鋼, 56 (1970) 6, 661
- 6) 小笠原, 他: 鉄と鋼, 57 (1971) 4, S 27
- 7) 浜田, 小坂橋, 岡部: 鉄と鋼, 58 (1972) 12, 1567
- 8) A. L. Parker, H. C. Hottel: Indust. Eng. Chem., 28 (1936), 1334
- 9) 化学工学協会編: 化学工学便覧, (1958), 147, 394 [丸善]
- 10) E. W. Voice, R. Wild: Iron Coal Trad. Rev., (1957) 10, 841
- 11) E. Mazanek, M. Wyderko: Stahl u. Eisen, 89 (1969) 16, 863
- 12) E. Mazanek, M. Wyderko: Stahl u. Eisen, 85 (1965) 14, 25
- 13) 石光, 他: 鉄と鋼, 49 (1963) 3, 342
- 14) N. E. Sidorov: Stal' (1960) 10, 715
- 15) 太田, 大木, 望月: 鉄と鋼, 56 (1970) 11, S 358
- 16) 山根, 灰谷: 鉄と鋼, 52 (1966) 9, 1336
- 17) H. Wendeborn, M. O. Peuker, 他: Stahl u. Eisen, 71 (1951) 23, 1212
- 18) G. V. Korsikov, 他: Stal', (1971) 1, 3
- 19) H. Rausch, K. Meyer: Stahl u. Eisen, 78 (1958) 9, 600
- 20) I. V. Paspopov, 他: Stal' (1963) 8, 589
- 21) B. A. Bashkov, 他: Stal' (1966) 2, 90
- 22) I. Shimizu, 他: Proceedings ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ, 11 (1971), 83
- 23) 新日本製鉄㈱名古屋製鉄所: 第37回製鉄部会資料, 37鉄~17~2