

論 文

焼結数式モデルによる焼結操業改善の考察

児子 精祐*・木村 充蔵*・一宮 正俊*
安本 俊治*・中島 一磨*・笠原 工*

Improvement for Sintering Plant Operation by Means of a Mathematical Model

Seisuke NIGO, Kōjō KIMURA, Masatoshi ICHIMIYA,
Syunzi YASUMOTO, Kazuma NAKASHIMA, and Takumi KASAHARA

Synopsis :

A mathematical model for sintering process at Mizushima Works was developed using a super capacity computer (M-200), and some operation cases were simulated to obtain useful operation guidance by this model.

One of characteristics of the model is a calculation method for heat capacity and diameter of particles of raw mixture for sinter. The present conception that particles of ore, lime, and coke are considered to be homogenized is the same one as in treating the heat transfer behavior of perfectly mixed gas. Analyses of optimum conditions of temperature pattern in ignition furnace, volume distribution of suction air along strand and coke contents distribution in direction of sintering bed height by the simulation model gave results as follows ;

(1) For saving combustion gas consumption for ignition furnace, it is effective to keep the peak temperature high and the peak time short.

(2) To reduce coke consumption, it is especially important to control the size distribution of coke within a narrow rang.

(3) To maintain the same heat hysteresis along the height of sintering bed, the difference of coke contents between upper layer and lower layer must not exceed 0.5%.

(4) By the control of air volume distribution along strand and of coke contents distribution in direction of sintering bed height, fluctuations of heat index (Q_{100}) and cooling rate index (CT_{1100}) in direction of sintering bed height can be eliminated, and precise quality control can be promoted in near future.

1. 緒 言

焼結過程の数値解析は十数年前から行われているが、焼結層内の温度変化が非常に速い部分があるために解が発散しやすいなどの問題があり実用化のために種々の努力が続けられている。

近年、超大型計算機を使つて大規模な計算が容易にできるようになったので、伝熱計算の差分法のメッシュを十分小さくすることにより、安定した収束解が得られるようになった。そこで焼結層内の同一メッシュ内に存在するコークス、石灰石、鉱石からなる混合原料をおおのの配合比で加重平均して求めた仮想の均質単一粒子と見なすことにより固体の伝熱計算上の取り扱いが単純化できることに着目し、ヒートウェーブおよび保熱指数、冷却指数の層内分布を求めるシミュレーションモデルを開発した。このモデルを使つて点火条件、コークス配合

量の偏析、吸引風量分布などが焼結過程におよぼす影響について考察を行つた。

2. 数式モデルの概要

2.1 基礎式

焼結過程の数式モデルは、すでに多くの報告^{1)~3)}がなされているように、焼結層の微小高さに対する物質、熱収支式が基本であり、主要な基礎式は次のように表現できる。

: ガス側

$$\text{物質収支式 } \epsilon \cdot \partial \rho_g / \partial \theta = -\partial G / \partial z + RM_g \dots (1)$$

$$\text{熱収支式 } \epsilon^* \cdot \partial (\rho_g^* \cdot c_g^* \cdot t_g) / \partial \theta$$

$$= -\partial (G \cdot c_g \cdot t_g) / \partial z$$

$$-h_p \cdot a \cdot (t_g - t_s) + RH_g \dots (2)$$

: 固体側

$$\text{物質収支式 } \partial \rho_B / \partial \theta = RM_s \dots (3)$$

昭和 57 年 4 月 5 日受付 (Received Apr. 5, 1982)

* 川崎製鉄(株)水島製鉄所 (Mizushima Works, Kawasaki Steel Corp., 1 Mizushimakawasakidori Kurashiki 712)

熱収支式 $\partial(\rho_B \cdot c_S \cdot t_S) / \partial \theta$
 $= h_p \cdot a \cdot (t_g - t_s) + RH_S \dots \dots (4)$

本モデルにおいても、これらの基礎式を連立して解き、層内の固体、ガス温度などを求める。その際

(1) コークスの燃焼、石灰石の分解は、塚本ら⁴⁾の方法に従い速度論的に扱う。

(2) コークス、石灰石、鉍石の各粒子数、平均粒子径から次式で求められる粒子径をもつ仮想単一粒子を考え、伝熱計算上は固体をこの単一粒子で代表させる。

$$d_p = 6(1-\epsilon) / \pi (n_1 \cdot d_1^2 + n_2 \cdot d_2^2 + n_3 \cdot d_3^2) \dots \dots (5)$$

(3) 層内の空間率はコークス粒子径の変化を考慮した次式で評価する。

$$\epsilon = \epsilon_0 + 4/3\pi \cdot n_1 (r_{i0}^3 - r_i^3) \dots \dots (6)$$

(4) 層内の固体の比熱はコークス、石灰石、生成CaO、鉍石の各々の比熱をおのこのの配合比で加重平均して求め、コークスの燃焼、石灰石の分解反応および固体温度の変化を考慮した式にした。(Appendix 2)

などの特徴をもたせた。

2.2 モデルの構成

各種のシミュレーションができるように、入力項目に現状では未だ十分には制御されていない項目も含めた。

主要な入力項目をつぎに示す。

(1) コークス、石灰石、鉍石の配合比、平均粒子径特にコークスの配合比と平均粒子径は層厚方向で変えて入力することを可能にした。

(2) 点火炉条件(点火炉内の吸引ガスの温度パターンで入力)

(3) 吸引空気条件(吸引空気の風量分布、温度および湿分の分布で入力)

(4) 混合原料の水分・嵩密度

(5) 層厚、パレットスピード

標準的な計算結果例として水島4焼結の実操業データと吸引風速測定装置により実測した風量分布データを用いてシミュレーションを行った結果を Fig. 1~3 に、用

Table 1. Calculation data.

Coke ratio	: 2.74% (contents in mixture with return fine)
Lime ratio	: 8.5% (ditto)
Water contents	: 6.3%
Diameter of ore, lime, coke particle	: 2.3, 1.2, 1.7 mm
Density of ore, lime, coke particle	: 4.5, 1.1, 2.5 g/cm ³
Initial diameter of solid particle	: 1.82 mm
Initial void ratio in bed	: 0.449 (-)
Critical water contents (W _c)	: 0.019 kg/kg
Equilibrium water contents (W _e)	: 0.00 kg/kg
Sintering bed height	: 480 mm
Pallet speed	: 2.4 m/min
Bulk density of bed	: 1.93 g/cm ³
Suction air rate	: 20,600 Nm ³ /min
Suction air temp. and moisture	: 20°C, 12 g/Nm ³
Ignition condition, peak temperature	: 1270°C
peak time	: 1.5 min

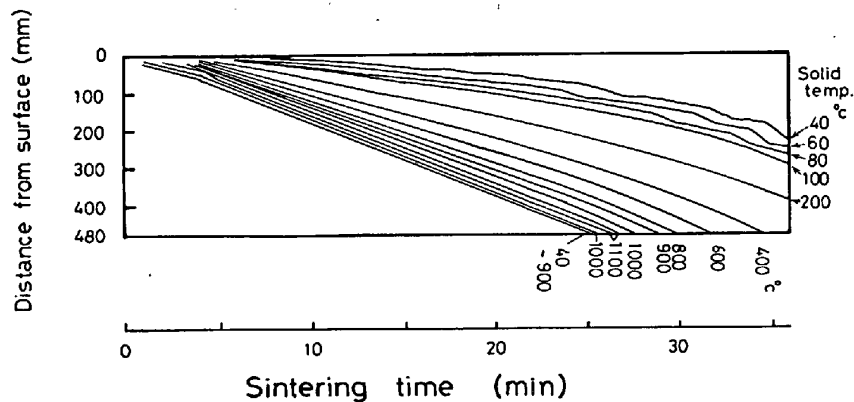


Fig. 1. Isothermal diagram in sintering bed (Base case).

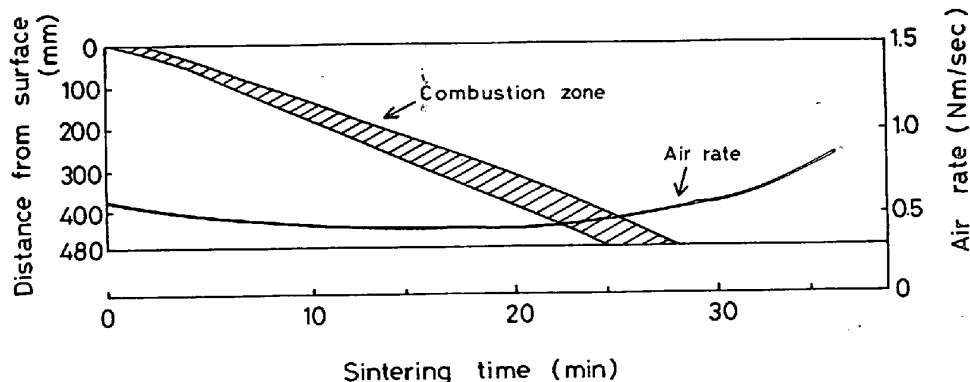


Fig. 2. Combustion zone in sintering bed (Base case).

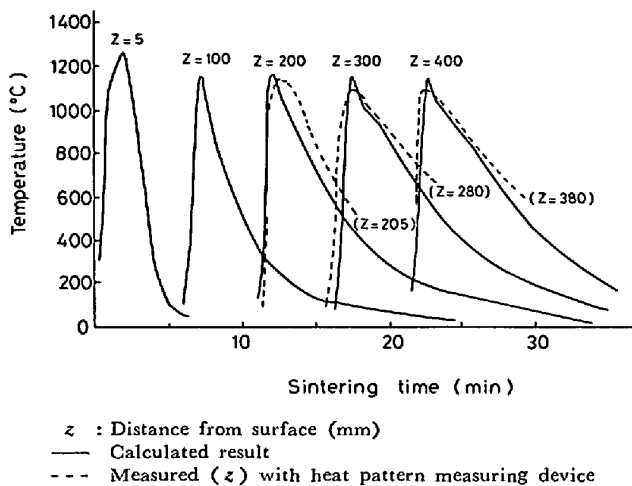


Fig. 3. Heat pattern in sintering bed (Base case).

いた主要データを Table 1 に示す。

Fig. 1 は層内の等温線を示している。900°C 以上のゾーンを赤熱帯と定義し、Fig. 2 にその赤熱帯と計算条件として用いた吸引風量分布を示す。Fig. 3 に計算で求めたヒートパターンと実測したヒートパターンを示す。ヒートパターンの測定は、特殊グレートバーに組み込まれた複数の熱電対からなるヒートパターン測定装置⁹⁾を用いて行い、計算結果が実測値とほぼ一致していることを確認した。

3. シミュレーション結果と考察

(1) 点火炉条件がヒートパターンにおよぼす影響

点火炉で使用する燃料ガス量の下限值を把握するために Table 1 の操業条件を基準として、点火条件のみを変化させてシミュレーションを行った結果を Fig. 4 に示す。図中の○印はシミュレーションで求めたヒートウェーブが Fig. 5 に示すように下層まで到達した場合であり、着火成功と判定した。一方、×印はヒートウェーブが Fig. 6 に示すように焼結層内で消滅してしまつた場合であり、着火不成功と判定した。点火炉内吸引ガス温度のピーク時間が 0.7 min の場合 (Fig. 4 の Case B) のヒートウェーブは Fig. 5 に示す 1.2 min の場合 (Fig. 4 の Base Case) とほとんど同じであるが、さらに 0.2 min 短縮して 0.5 min とした場合には Fig. 6 (Fig. 4 の Case A) に示すように、ヒートウェーブは急に消滅してしまい、従来、経験的に言われているごとく、点火炉の投入熱量には非常にシャープな境界を有する操業可能領域が存在することがわかつた。点火の成否はピーク温度とピーク時間の組合せで決まり、投入熱量を低下させるためにはピーク温度を下げるよりかピーク時間を短くする集中着火方式が有効であることを確認した。

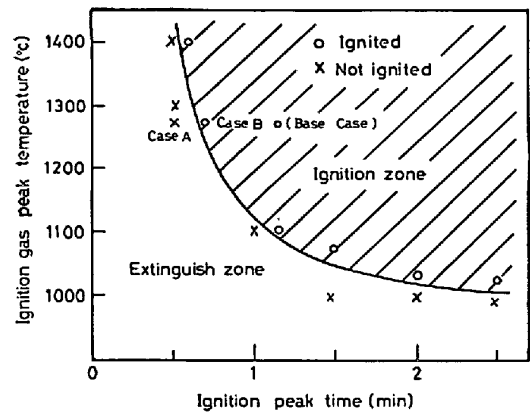


Fig. 4. Influence of ignition peak time and gas peak temperature on ignition of sintering bed.

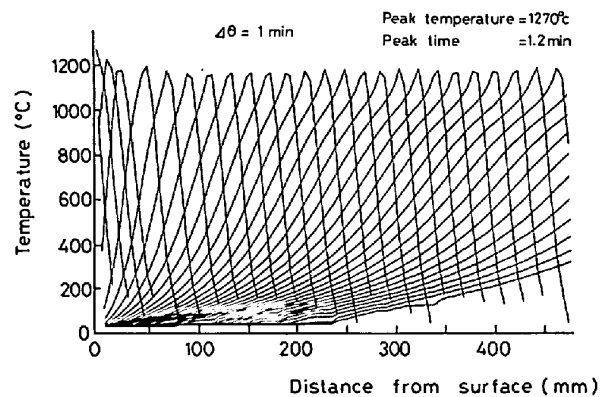


Fig. 5. An example of normal heat wave in sintering bed (Base case).

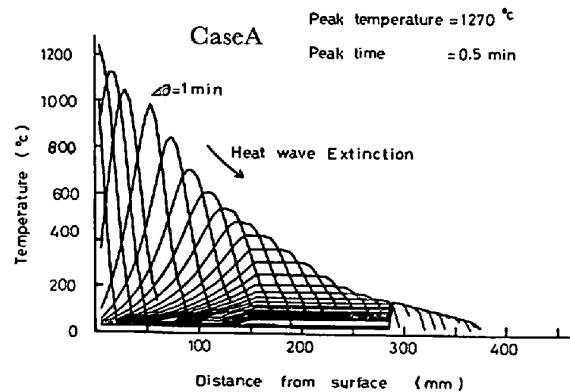


Fig. 6. An example of heat wave extinction due to shortage of peak time in ignition furnace.

(2) コークス配合比がヒートパターンにおよぼす影響

近年、低温型焼結鉄の製造を指向して、コークス配合比を下げる努力が続けられている。コークス配合比の下限值を把握するために Table 1 の操業条件を基準として、コークス配合比とコークス平均粒径を変えたシミュレーションを行った。Fig. 7 にコークス配合比を 4.1% から 2.0% の範囲で変化させた場合のヒートパターンの変化を示す。コークス配合比が 2.1% (対混合原

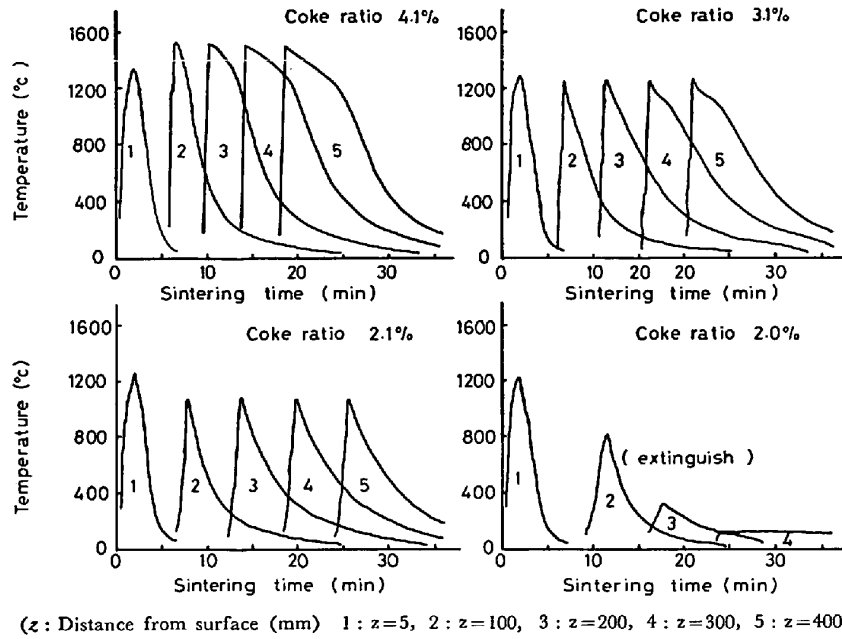


Fig. 7. Effect of coke ratio (coke contents in mixture within return fine) on heat pattern.

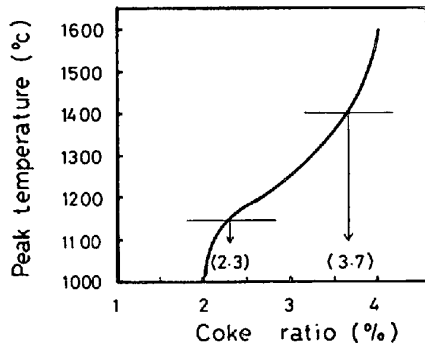


Fig. 8. Relation between coke ratio and maximum temperature of solid.

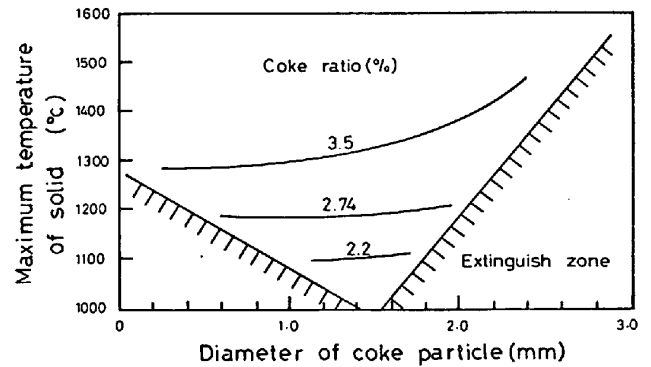


Fig. 9. Relation between diameter of coke particle and maximum temperature of solid.

料) 以下になるとヒートパターンが急に消滅し、この付近にコークス配合比の下限値があることがわかる。Fig. 8 にコークス配合比とヒートパターンのピーク温度の関係を示す。同図からコークス配合比が3.7%以上または2.3%以下ではコークス配合比のわずかな変化に対してピーク温度が大きく変化することがわかる。このため、コークスの分布制御を行う場合でもこの範囲内で分布制御をするべきであり、本条件下ではこの範囲を超えるようなコークス偏析は層内温度を不安定にするため好ましくないと考えられる。

Fig. 9 にコークス配合比をパラメータとしてコークス平均粒子径とヒートパターンのピーク温度の関係を示す。同図からコークス配合比を下げる程、コークスの適正粒度範囲は狭くなることがわかる。このことはコークス配合比とは別の面で、コークス粒子ごとの燃焼持続時間そのものがヒートパターンのピーク温度を決定する要

因になつているためと思われる。肥田ら⁸⁾は擬似粒子中のコークス賦存状態がコークス燃焼速度におよぼす影響に注目して、コークス粒子は核粒子にも、付着粒子にもなりにくい中間粒径(0.25~3 mm)の割合が多い程、コークスが短時間に燃焼を完了すると報告しており、ヒートパターン制御の重要な前提条件として、コークスの粒度管理が従来にも増して重要になつている。

4. 焼結層内の品質分布を管理するための考察

近年、焼結層内のヒートパターンを測定する装置の開発が進み、著者らはヒートパターンの指数として、保熱指数(Q₉₀₀)、冷却指数(CT₁₁₀₀)を求め、焼結鉱の品質とよい相関があることを報告⁹⁾している。数式モデルを用いれば層内の全ての部分でのヒートパターンが算出できるのでQ₉₀₀とCT₁₁₀₀の層厚方向の分布を求めることができ、これを用いて層厚方向の品質分布の推定およ

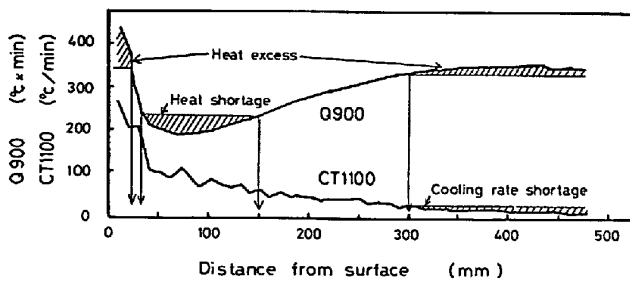


Fig. 10. Distribution of Q_{900} and CT_{1100} in sintering bed (Base case).

び管理が可能になる。Fig. 10 に Table 1 の基準操業データから求めた Q_{900} と CT_{1100} の層厚方向の分布図を示す。同図の場合では、パレット表面から 30~150 mm の斜線部は Q_{900} が $250^{\circ}\text{C}\times\text{min}$ 以下になっており、熱不足のため強度不足になっており逆に 300 mm から下層の斜線部は Q_{900} が $350^{\circ}\text{C}\times\text{min}$ 以上になっており熱過剰で強度は十分あるが、過熔融になり部分的に通気障害をきたすとその部分の強度が極端に低下することが予想される。 CT_{1100} に関しては 300 mm から下層の斜線部では $40^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 以下になっており、FeO が再酸化して還元粉化指数 (RDI) が悪化しやすいことが予想される。さらにパレット表面から 20 mm 以内の斜線部は点火炉の影響で Q_{900} は非常に大きい、冷却も極端に速く CT_{1100} が非常に大きくなっており、強度が著しく弱くなっていることが予想される。短期間の操業実験ではあるが、焼結鉱品質とこのモデルから求めた Q_{900} , CT_{1100} の関係は Fig. 12 に示すごとく良い相関を得た。吸引風速測定装置のデータ処理の負荷上の制約から調査対象期間を 25 h とし、パレット速度とカット量のみを変更した操業実験を行い、そのデータを用いてシミュレーションを行った。Table 2 に操業実験データを Fig. 11 に SI, FeO とシミュレーションから求めた保熱指数 Q_{900} と冷却指数 CT_{1100} の層厚方向の平均値の推移を示す。焼結鉱成品のサンプリング時間の遅れを考慮して品質データは吸引風速測定時刻の 3 h 後のもの

Table 2. Test operation data (11/12/1982).

Coke ratio	: 3.05% (contents in mixture with return fine)
Lime ratio	: 8.89% (ditto)
Water contents	: 6.1%
Diameter of ore, lime, coke particle	: 2.3, 1.2, 1.4 mm
Density of ore, lime, coke particle	: 4.5, 1.1, 2.5 g/cm ³
Initial diameter of solid particle	: 1.83 mm
Initial void ratio in bed	: 0.443 (-)
Critical water contents (W_c)	: 0.019 kg/kg
Equilibrium water contents (W_e)	: 0.00 kg/kg
Sintering bed height	: 500 mm
Pallet speed	: 2.72, 2.51, 2.32, 2.15 m/min
Bulk density of bed	: 1.93 g/cm ³
Suction air rate	: Air distribution measured with suction air speed measuring device
Suction air temp. and moisture	: 25°C, 10 g/Nm ³
Ignition condition, peak temperature	: 1133°C
peak time	: 1.5 min

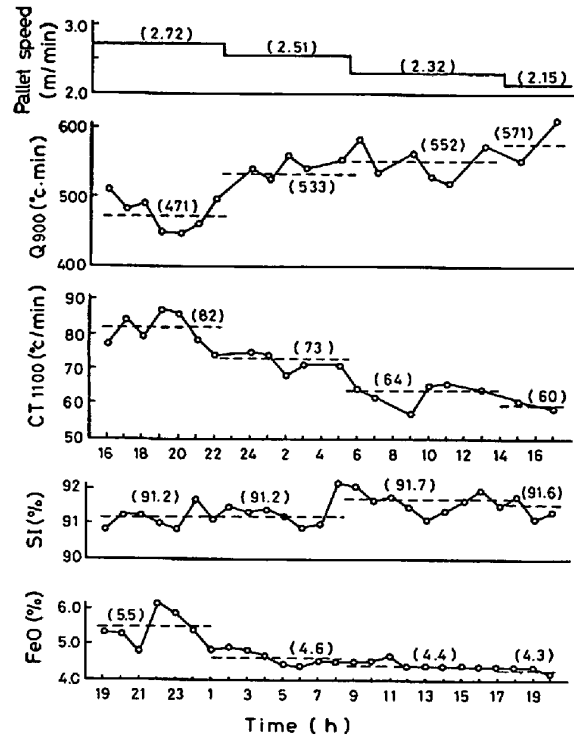


Fig. 11. Transition of Q_{900} , CT_{1100} and shatter index, FeO contents in sinter with change of pallet speed.

を用いている。同図から明らかなごとく、 Q_{900} , CT_{1100} はそれぞれパレット速度の変化とともに増減しており、SI, FeO もそれに伴って変化している。この期間における SI と Q_{900} , FeO と CT_{1100} の関係は Fig. 12 に示すごとく有意な相関が認められる。また RDI と FeO の関係は、データ数が少ないが Fig. 12 に示すごとく比例に近い関係にあり、この実験操業期間中は、操業が低温型焼結鉱の領域で行われたことを示している。

以上の検討により、Fig. 10 を用いて焼結操業の品質管理を行えば、現状より細かな操業管理が可能となる。つまり Fig. 10 の基準操業の例では、「表面から 30~150 mm の部分の保熱指数を $300^{\circ}\text{C}\times\text{min}$ 以上に増やして返鉱発生率を下げ、300 mm から下層の部分の保熱指数を少し下げて、冷却指数を $50\sim 70^{\circ}\text{C}/\text{min}$ に上げれば FeO を高めることなく RDI を下げることができる。」などの操業判断が可能となる。

つぎに Q_{900} と CT_{1100} の焼結層内の分布を平滑にするための具体的な方法として、吸引風量分布制御とコークス分布制御の効果について検討を行った。

(1) 吸引風量分布制御

吸引風量分布が Q_{900} と CT_{1100} の層内分布におよぼす影響を把握するために、Table 1 の基準操業で風量分布のみを変えたシミュレーションを行った結果を Fig. 13 にまとめて示す。

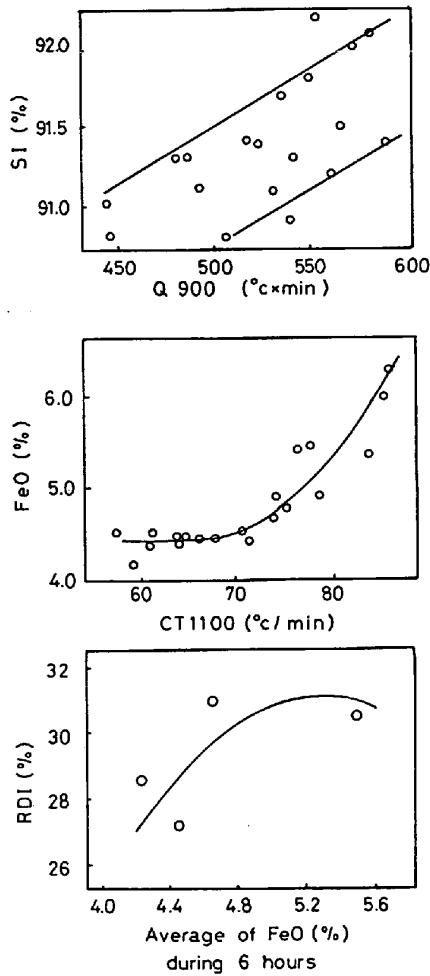


Fig. 12. Relation between calculated Q_{900} , CT_{1100} and actual results of shatter index (SI), FeO contents in sinter, and relation between FeO and RDI.

Case 1 は給鉱部と排鉱部の風量が過大で、乾燥終了点 (DEP) 近くの風量が過少な風量分布の実測例であり、 Q_{900} の変動が大きく、下層の CT_{1100} も小さく、品質のばらつきが大きくて好ましくない例である。

Case 2 は風量分布を一定にした例であり、Case 1 と比較すれば、風量分布が Q_{900} の分布におよぼす影響が大きいことがわかり、焼結操業の解析には正確な風量分布の測定が必要なことを示している。

最近、点火炉直後のウィンドボックスのダンパーを全閉にして操業改善を行つている報告が多い¹⁰⁾。Case3 は点火炉直後の風量を大幅に少なくし、排鉱部近くの風量をわずかに低下させる一方、DEP 近くの風量を大幅に増加させた仮想例のシミュレーション結果である。 Q_{900} と CT_{1100} はパレット表面のごく一部分を除いて、ほぼ一定となり、望ましいケースである。この風量分布制御を実現するためには焼結機のウィンドボックスごとのシール性を抜本的に改善する必要があると考えられる。

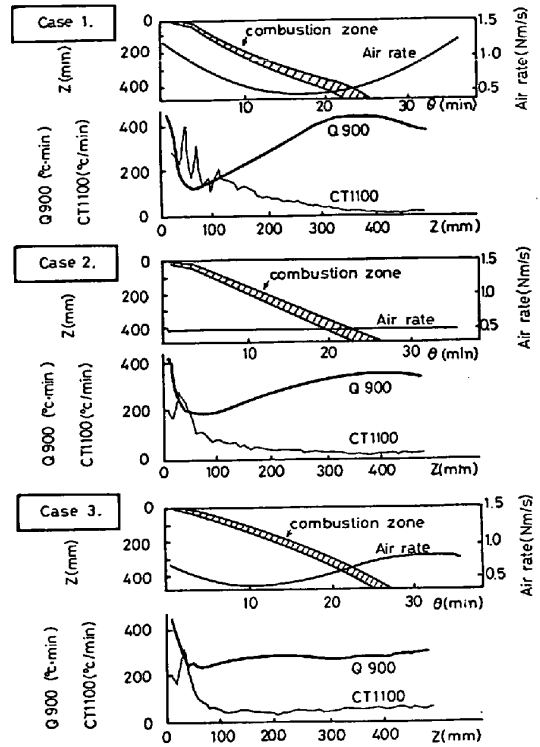


Fig. 13. Effect of air distribution on Q_{900} , CT_{1100} and combustion zone (z : Distance from surface).

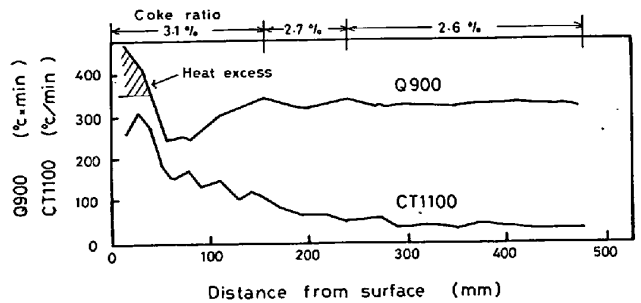


Fig. 14. A suitable coke distribution effected on Q_{900} and CT_{1100} in sintering bed estimated by simulation.

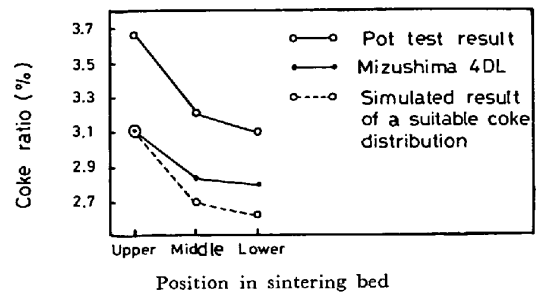


Fig. 15. Suitable coke segregations estimated by simulation, pot test and actual operation.

(2) コークス分布制御

焼結層内のヒートパターンを均一化するためにコークス配合比の層厚方向の分布を制御することが各社で進められている。Table 1 の基準操業でコークス配合比の分

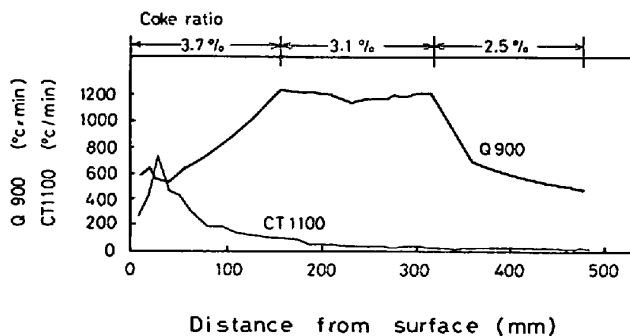


Fig. 16. Simulation in case of excessive coke segregation based on pot test.

布のみを変化させてシミュレーションを行い、 Q_{900} が最も平滑化した例を Fig. 14 に示す。このシミュレーション結果を検討するために、Fig. 15 に鍋試験装置で得られた最適なコークス偏析状況と、実操業において返鉱の発生が少なくコークス配合比が低かつた時に実測されたコークス偏析状況を Fig. 14 のシミュレーション上の最適コークス偏析状況と共に示す。同図から水島の焼結設備ではコークス分割装入は行っていないが、給鉱部のベルトフィーダによる自然な偏析でも、シミュレーション上の適正偏析に近い状況が得られており、さらに中層部で 0.1%、下層部で 0.2% 程度コークス配合比が低下できる余地があることを示唆している。また鍋試験での最適コークス偏析とシミュレーション上のそれは、コークス配合比の絶対レベルは相違するが、傾向は一致しており、特に上下層でのコークス配合比の差は約 0.5% で一致している。さらにコークス偏析量が過大の場合の例として、Table 1 の基準操業のコークス配合比の代わりに、上下層でのコークス配合比の差が 1.2% で、コークス偏析量が大きすぎたために偏析がない場合より鍋歩留が悪くなった鍋試験実施例のコークス配合比を用いてシミュレーションした結果を Fig. 16 に示す。Fig. 10 のコークス偏析のない基準操業時の分布に比較して Q_{900} 、 CT_{1100} の層内変化は大きくなっており、このために鍋歩留が悪化したと予想される。これらの結果から、焼結層内のヒートパターンを均一化するためには焼結層を上下層で最大 0.5% 程度のコークス量のわずかな偏析を安定して与えることができる給鉱装置の開発が必要であると考えられる。

5. 結 言

焼結過程でおこるコークスの燃焼、石灰石の分解、鉄鉱石の熔融、凝固、水分の蒸発および伝熱に関する数式モデルにおいて、混合原料を伝熱計算上は均質擬似単一粒子と見なすことによつて混合原料の温度、比熱および

平均粒子径の取り扱いが単純化され、安定性のよい実用的な焼結数式モデルが得られ、これらを用いたシミュレーションによつて次の点が明らかになった。

(1) 点火炉の投入熱量を下げるためには、炉内吸引ガスのピーク温度を下げるより、ピーク時間を短くする集中着火方式が効果的である。

(2) ヒートウェーブを下層まで持続させるためには、点火炉条件とは独立して、コークス配合比にもシャープな下限値（混合原料に対する割合で 2.1%）が存在し、その値はコークス粒子径によつて変化するため、コークス配合比を下限近くまで下げる場合にはコークス中間粒子径の割合を多くする必要がある。

(3) コークス配合比が 2.3~3.7%（混合原料に対する割合）の範囲を外れると、コークス配合比の変化に対するヒートパターンのピーク温度の変化が極端に大きくなるので、コークスの分布制御を行う場合でもコークス配合比はこの範囲内にすべきであり、また上下層のコークス配合比の差は最大 0.5% 程度にすべきであると思われる。

(4) 吸引風量分布制御とコークス分布制御によつて、保熱指数 Q_{900} と冷却指数 CT_{1100} の層内変化を小さくすることができる。そのためには吸引風量分布制御装置と給鉱部でのコークス分布制御装置の開発が重要であり、これによつて焼結層内の高さ方向の SI, FeO, RDI の品質管理が可能になり、層内の品質変化を減少させ、返鉱発生率を大幅に低下させることが可能になると思われる。

Appendix

1. ガスと固体間の熱伝達係数

$$h_p = \lambda_g / d_p \cdot \{2 + 0.6(9 \cdot R_{ep})^{0.5} \cdot Pr^{1/3}\}$$

$$a = 6(1 - \epsilon) / d_p$$

$$R_{ep} = G \cdot d_p / \mu_g$$

$$Pr = C_g \cdot \mu_g / \lambda_g$$

2. 固体の比熱

$$C_s = \sum_{i=1}^4 C_i \cdot X_i$$

$$C_1 = 0.342 + 4.25 \times 10^{-5} \times (T_s + 273) - 64.1 / T_s$$

$$C_2 = 0.250 + 2.62 \times 10^{-5} \times (T_s + 273) - 22.7 / T_s$$

$$C_3 = 0.155 + 5 \times 10^{-5} \times (T_s + 273)$$

$$-9.7 / T_s \quad (T_s < T_{m1})$$

$$C_3 = \{0.155 + 5 \times 10^{-5} \times (T_{m1} + 273)$$

$$-9.7 / T_{m1}\} T_{m1} + H_m \cdot (T_s - T_{m1}) /$$

$$(T_{m2} - T_{m1}) / t_s \quad (T_{m1} \leq T_s < T_{m2})$$

$$C_3 = \{0.155 + 5 \times 10^{-5} \times (T_{m1} + 273)$$

$$-9.7 / T_{m1}\} T_{m1} + H_m + \{0.155 + 5 \times 10^{-5}$$

$$\times (T_s + 273) - 9.7/T_s \{ (T_s - T_{m_2}) \} / t_s$$

$$(T_{m_2} \leq T_s)$$

$$C_4 = 0.211 + 9.65 \times 10^{-6} \times (T_s + 273) - 10.9/T_s$$

3. 初期空間率

$$\epsilon_0 = 1 - \rho_{B_0} \cdot \sum_{i=1}^3 X_i / \rho_i$$

4. 粒子数

$$n_i = \rho_{B_0} \cdot X_i / (\rho_i \cdot \frac{4}{3} \pi \cdot r_{i_0}^3)$$

記号

- a : 仮想粒子の表面積 [cm²/cm³(bed)]
- c_1, c_2, c_3, c_4, c_s : コークス, 石灰石, 鉱石, 生成CaO, 仮想粒子の比熱 [kcal/kg·°C]
- d_p : 仮想粒子径 [cm]
- d_1, d_2, d_3 : コークス, 石灰石, 鉱石の粒子径 [cm]
- d_{20} : 石灰石の初期粒子径 [cm]
- r_1, r_2, r_3 : コークス, 石灰石, 鉱石の粒子半径 [cm]
- r_{10}, r_{20} : コークス, 石灰石の初期粒子半径 [cm]
- G : ガスの質量速度 [kg/cm²·min]
- h_p : ガスと固体間の熱伝達係数 [kcal/cm²·min·°C]
- H_m : 鉱石の融解潜熱 [kcal/kg]
- n_1, n_2, n_3 : コークス, 石灰石, 鉱石の粒子数 [/cm³]
- Pr : プラントル数 [—]
- Re_p : レイノズル数 [—]
- RM_g : 反応によるガスの質量増加 [kg/min·cm³]
- RM_s : 反応による固体の質量増加 [kg/min·cm³]
- RH_g : ガスにより吸収される反応熱 [kcal/min·cm³]
- RH_s : 固体により吸収される反応熱 [kcal/min·cm³]
- R : ガス定数 [kcal/kmol·K]
- t_g, T_g : ガス温度 [°C, K]
- t_s, T_s : 固体温度 [°C, K]

- T_{m_1} : 鉱石の溶融開始温度
- T_{m_2} : 鉱石の溶融完了温度
- X_1, X_2, X_3, X_4 : 固体の仮想粒子中のコークス, 石灰石, 鉱石, 生成 CaO の割合 [—]
- z : 層内距離 [cm]
- ϵ : 層の空間率 [—]
- ϵ_0 : 層の初期空間率 [—]
- θ : 焼結時間 [min]
- μ_g : ガスの粘度 [kg/cm·min]
- λ_g : ガスの熱伝導率 [kcal/cm·min·°C]
- ρ_g : ガスの密度 [kg/cm³]
- C_g : ガスの比熱 [kcal/kg·°C]
- ρ_{B_0} : 焼結層の初期嵩密度 [kg/cm³]
- ρ_1, ρ_2, ρ_3 : コークス, 石灰石, 鉱石の密度 [kg/cm³]

文 献

- 1) 鞭巖, 森山 昭: 冶金反応工学 (1974) [養賢堂]
- 2) 鞭巖: 製錬化学工学演習 (1974) [養賢堂]
- 3) 鞭巖, 樋口充蔵: 鉄と鋼, 56 (1970) 3, p. 371
- 4) 塚本 孝, 嶋田駿作, 田口敏夫, 樋口充蔵: 鉄と鋼, 56 (1970) 6, p. 661
- 5) 浜田尚夫, 小坂橋寿光, 岡部俠児: 鉄と鋼, 58 (1970) 12, p. 1567
- 6) 吉永真弓, 久保敏彦: 住友金属技報, 29 (1977), 4, p. 383
- 7) R. W. YOUNG: Ironmaking and Steelmaking 6 (1977), p. 321
- 8) 肥田行博, 佐々木 稔, 榎戸恒夫, 梅津善徳, 飯田孝司, 宇野成紀: 鉄と鋼, 68 (1982) 3, p. 403
- 9) 安本俊治, 田中 周: 川崎製鉄技報, 13 (1981), 4, p. 540
- 10) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 58 回製鉄部会 (1981. 5) 住友金属工業(株) (私信)