

論文

焼結鉱製造プロセス総合シミュレーション
モデルの開発と適用川口 尊三*・佐藤 駿^{*2}・高田 耕三^{*3}Development and Application of an Integrated Simulation Model for Iron
Ore Sintering

Takazo KAWAGUCHI, Shun SATO and Kozo TAKATA

Synopsis :

An integrated simulation model for sintering of iron ore was developed to evaluate the effect of various controlling factors on sinter quality and was applied to commercial sintering process. The model consists of 6 submodels, which are permeability, heat pattern, melting, pore, mineral and quality models. By using the informations on ore qualities, characteristics of sintering machine and operating conditions as input data, the model can predict sinter quality, energy consumption, productivity and other operation performance in sintering process. The predicted values were in good agreement with the observed ones obtained by both pot tests and actual tests in commercial plants. The model was introduced into sinter plants in Kashima Steel Works as operation guidance system. The fluctuation of sinter qualities was decreased by about 20% through the application of the model. The total energy cost on sintering operation was decreased by 5.5%. The economical feasibility studies were performed prior to the construction of a new sintering plant under the condition of the planned production capacity and sinter qualities. In accordance with the specification of productivity and sinter qualities required from blast furnace, new sinter feeds of iron ores were evaluated to obtain optimum operating conditions by the model.

Key words : sinter ; *RDI* ; *RI* ; model ; guidance system ; simulation.

1. 緒 言

高炉主原料である焼結鉱製造にあつて、原料鉱石性状、操業条件、設備特性は焼結鉱の品質、生産性、諸原単位に大きな影響を及ぼす。しかしこれら諸要因は複雑に関連しているので、焼結性への影響を系統的に把握するには多くの経験と時間を必要とする。著者らは焼結過程に関する定量化モデルの開発^{1)~6)}に努めてきたが、今回各モデルを統合し総合的に焼結過程を予測できるモデルを開発し、さらにそのシステム化をはかった。本モデルは原料、操業、設備の各要因が結合されているので、品質、諸原単位、製造コストの予測ばかりでなく、原料銘柄評価、配合適正評価、適正操業及び適正設備設計条件の検討を、統合的かつ迅速に行うのに有効な手段となりうるものと思われる。本報ではこの考えに基づいたモデルの開発とその適用例について報告する。

2. 還元性状に関する品質モデルの開発

Fig. 1 に焼結鉱製造プロセスと総合モデルの構成との関連を示す。総合モデルは六つの部分モデルを統合することで構成され、鍋試験等から得られた結果を解析して組み立てられた自己完結型のシミュレーションモデルである。また機能として前述したほかに操業解析用に中間要因（例えば、原料通気性、層内温度、溶融率、焼結鉱組成や気孔率）も出力できる。

部分モデルとして造粒通気¹⁾、燃焼伝熱²⁾、溶融³⁾、鉱物⁴⁾、気孔⁵⁾及び焼結鉱品質の基本である常温強度⁶⁾については既に報告したので省略するが、還元粉化性 (*RDI*)、被還元性 (*JIS-RI*) については今回新たにモデルを開発した。Fig. 2 に品質モデルの概略フローを示す。還元粉化、被還元性モデルは品質モデルの一部を構成し、溶融、鉱物、気孔モデルから導かれた溶融部

昭和 59 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 62 年 3 月 6 日受付 (Received Mar. 6, 1987)

* 住友金属工業(株)総合技術研究所 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 16 Oaza-Sunayama Hasaki-cho Kashima-gun Ibaraki pref. 314-02)

^{*2} 住友金属工業(株)総合技術研究所 工博 (Technical Research Laboratories, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

^{*3} 住友金属工業(株)鹿島製鉄所 (Kashima Steel Works, Sumitomo Metal Industries, Ltd.)

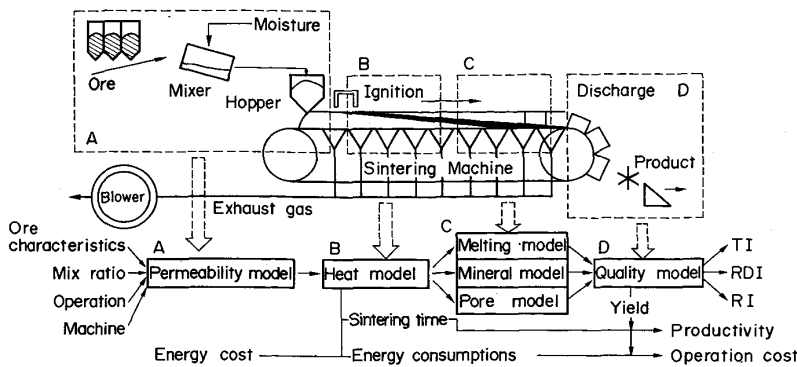


Fig. 1. Integrated simulation model for iron ore sintering.

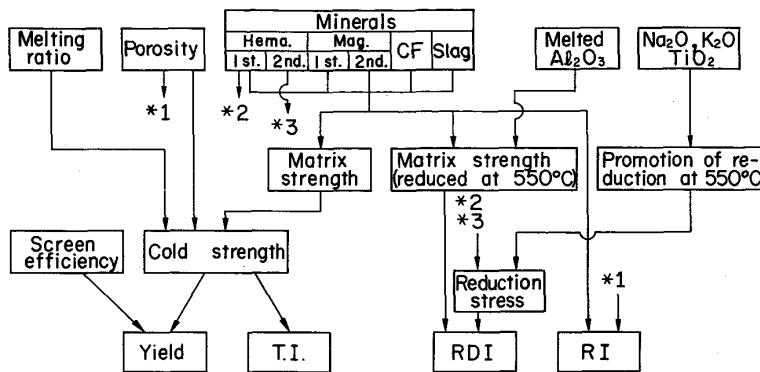


Fig. 2. Flow diagram of the quality model.

Al_2O_3 成分、鉱物組成、気孔率に基づいて RDI 値および RI 値を算出する。

2.1 還元粉化、被還元性に関する要因の検討

前報^{3)~6)}で焼結鍋試験装置により製造した焼結鉱(サンプルAと名付ける)を用い、 RDI 試験(製鉄部会法準拠)および RI 試験(JIS:M8713)を行った。また RDI 試験前後の試料鉱物組成変化ならびに重量変化を調査した。さらに RDI に関しては Al_2O_3 、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 成分の影響が大きいので、サンプルAとは別にこれら成分の特級化学試薬(Al_2O_3 、 Na_2CO_3 、 K_2CO_3 、 TiO_2)を実機配合原料に添加調整して鍋装置により焼結鉱を製造し、これら成分の RDI に及ぼす影響調査も行った。

焼結鉱試料中の各鉱物相ならびに還元前の未溶融ヘマタイト鉱石残留率の定量は、粉末X線回折法ならびに切断試料面トレースにより実施した。また気孔率をJIS法により測定した。これらの方法の詳細は前報^{3)~6)}に記載した。そしてヘマタイト(以後 Hem. と略す)鉱石残留率の90%(ヘマタイト鉱石の Hem. 量)を1次 Hem. 量と仮定した。これより、2次 Hem. 量はX線回折法で得られた全 Hem. 量から1次 Hem. 量を控除して求めた。さらに試料の FeO 化学分析値から Fe^{++} を計算し、この値から粉末X線回折法で定量されたマグネタイト $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ (以後 Mag. と略す)中の Fe^{++} 量を

控除して Mag. 以外の Fe^{++} 鉱物量(FeO 重量換算して以後 $\text{FeO}(W)$ と記す)を求めた。この $\text{FeO}(W)$ はスラグ類およびカルシウムフェライト(以後 CF と略す)中の Fe^{++} やピスタイトと対応するものと思われる。

サンプルAにおける RDI 試験前後の鉱物組成変化を Fig. 3 に示す。 RDI 試験条件下では Hem. が還元されて減少し Mag. と $\text{FeO}(W)$ が増加する。他の鉱物量には変化が小さい。

一方、 Na_2O 、 K_2O 、 TiO_2 、 Al_2O_3 各成分を変更した試料において、還元前の鉱物組成は Hem. 量で差がなく、CF 量で高 Al_2O_3 、低 TiO_2 成分配合の試料ほど高くなっていた。また、これら試料における各成分と RDI および還元前後の重量減率との関係を Fig. 4 に示す。焼結鉱のアルカリ(Na_2O 、 K_2O)成分の増加に伴い RDI および重量減率は増加するが、逆に TiO_2 成分の増加では RDI および重量減率は減少した。焼結鉱の Al_2O_3 成分増加の場合には RDI は増加するが重量減率への影響は少ない。

また Al_2O_3 成分変更試料において RDI 試験前後の CF 量を粒度別に調査した。結果を Fig. 5 に示す。CF 量は細粒側に多く存在し、 Al_2O_3 成分が高くなるほどこの傾向が強くなっている。このことは Al_2O_3 成分は RDI に関し CF と関連があるものと考えられる。

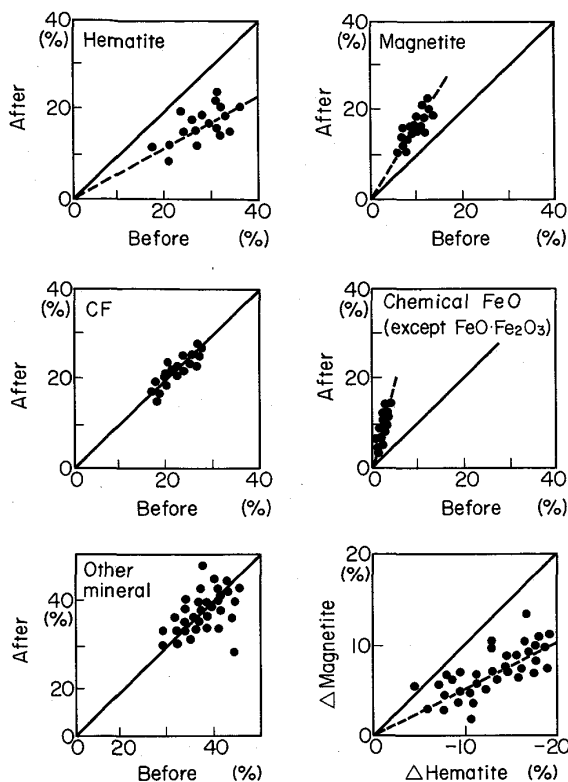


Fig. 3. Relation between minerals in sinter before and after RDI test.

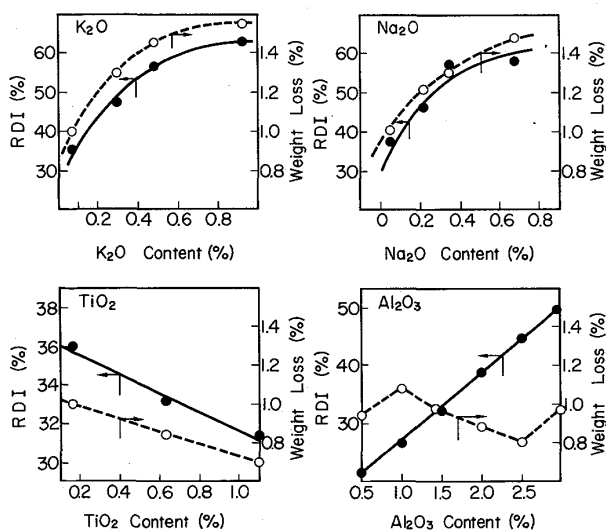


Fig. 4. Influences of some constituents on RDI and reduction weight loss.

還元粉化は Hem. が Mag. に低温還元する際に、膨張して大きな応力を発生させることが主原因と言われている^{7)~9)}。この時、Hem. では1次 Hem. よりも焼結過程で新たに形成される2次 Hem. の方が還元粉化に強く影響すると報告されている^{8)~10)}。しかし最近では応力発

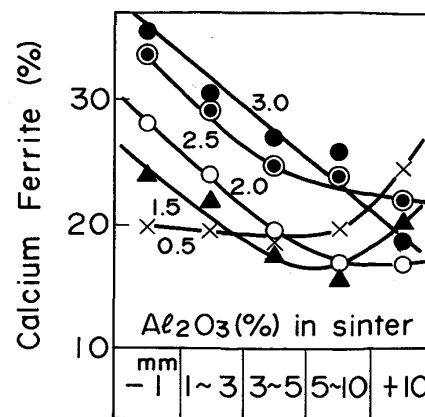


Fig. 5. Amount of calcium ferrite in particle size after RDI test.

生源の2次 Hem. ばかりでなく応力場内に存在する2次 Hem. 周辺の組織の強度も RDI 値と関連しているとの指摘も多い^{11)~15)}。

RDI への Na_2O , K_2O , TiO_2 成分の影響は、RDI 値と重量減率が対応しており還元前 Hem. 量に差がないことから、単位 Hem. 量当たりの還元反応を促進または抑制することに関連しているものと思われる。一方 RDI への Al_2O_3 成分の影響は、還元前の Hem. 量や重量減率に差がないことから単純に Hem. の還元だけで説明できない。この Al_2O_3 成分の影響機構については種々の説明¹¹⁾¹³⁾¹⁵⁾¹⁶⁾ があり定かではないが、Fig. 5 の Al_2O_3 成分が高くなるに伴い CF 量が細粒側に多く存在する結果も含めて考えれば、松野¹¹⁾ や志垣¹⁵⁾ の基礎検討結果のごとく、CF の還元後強度が他の鉱物の強度よりも弱くまた Al_2O_3 成分に応じて変化する考えを用いれば説明しやすい。

2.2 還元粉化モデルの構成

本モデルでは井上¹²⁾ が提唱するように RDI への要因を還元膨張力と還元後の強度とに分離し、(6)式で記述した。還元膨張力は Hem. の還元量だけに関係するものと仮定したが、1次 Hem. と2次 Hem. で膨張力に重みをつけ(4)式で記述した。次に Hem. の還元量は還元前の Hem. の存在量と還元促進度に要因を分離した。ここで還元促進度については、Fig. 4 の結果で Na_2O , K_2O 成分がアルカリモル濃度当たりの影響度がほぼ等しいので、これらをアルカリ成分としてまとめて TiO_2 成分の影響とともに(1)式で示した。なお還元促進度はサンプル A を基準として、サンプル A の平均成分時に $R_a=1$ となるよう(1)式を定めた。

次に RDI 試験前後の鉱物量変化であるが、Fig. 3 の結果から(2)式が求められる。ここで Hem. 中の1次

Table 1. Brittle index(B_i) used in RDI model and reduction index(X_i) used in RI model.

Mineral kinds	Brittle index	Reduction index
Hematite	0.0	49.6
Magnetite	0.20	12.1
Calcium ferrite	$0.53 \cdot [Al_2O_3]$	39.2
Grassy slag	0.51	0.0
FeO(except Fe_3O_4)	-0.38	—

[Al_2O_3]: Al_2O_3 (%) in melted part on melting model

Hem. と 2 次 Hem. の存在比は還元前後で一定であると仮定すれば(2)式を整理して(3)式が導かれる。この(3)式をモデル式に用いた。

還元後の強度は(5)式のごとく鉍物別に粉化係数を決め、鉍物量で加重平均して求めた。ここで CF の粉化係数(B_{cf})だけは Table 1 に示すごとく、反応に関与した熔融部の Al_2O_3 (%) に比例するものとした。

還元促進度 R_a

$$R_a = -100\alpha^2 + 16\alpha - 0.3\beta + 0.93 \quad (\alpha \leq 0.08) \quad \dots\dots\dots (1)$$

還元後鉍物量 (鉍物量変化)

実験結果 (Fig. 3) の関係式:

$$\left. \begin{aligned} (H_1^* + H_2^*) &= 0.575(H_1 + H_2) \\ \Delta M &= -0.5\Delta H, \quad \Delta M = M^* - M \\ \Delta H &= (H_1^* + H_2^*) - (H_1 + H_2) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$$CF^* = CF, \quad S^* = S$$

仮定およびバランス:

$$H_1^*/H_1 = H_2^*/H_2,$$

$$H_1^* + H_2^* + M^* + S^* + CF^* + W^* = H_1 + H_2 + M + S + CF + W$$

予測モデル式:

$$H_1^* = (1 - 0.425 \cdot R_a) \cdot H_1$$

$$H_2^* = (1 - 0.425 \cdot R_a) \cdot H_2$$

$$CF^* = CF, \quad S^* = S$$

$$M^* = M + 0.213 \cdot R_a \cdot (H_1 + H_2)$$

$$W^* = W + 0.213 \cdot R_a \cdot (H_1 + H_2)$$

$\dots\dots\dots (3)$

還元膨張力指数 R_f

$$R_f = (H_2 - H_2^*) + (H_1 - H_1^*) \cdot K_2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

粉化係数 $\bar{B}$

$$\bar{B} = B_h \cdot (H_1^* + H_2^*) + B_m \cdot M$$

$$+ B_{cf} \cdot CF + B_s \cdot S + B_w \cdot W \quad \dots\dots\dots (5)$$

還元粉化指数 RDI

$$RDI = K_1 \cdot R_f \cdot \bar{B} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここで

H_1 : 1 次 Hem. 量 (%), H_2 : 2 次 Hem. 量 (%)

M : Mag. 量, CF : カルシウムフェライト量 (%)

S : スラグ類の量 (%), W : $FeO(W)$ の量 (%)

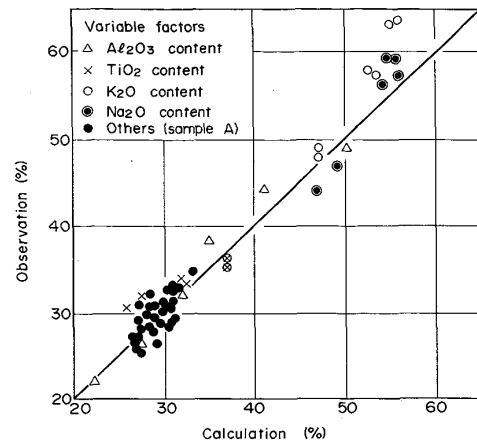


Fig. 6. Comparison of calculated values with observed ones on RDI (pot test sample).

上記鉍物量において無印は還元前鉍物量で*印は還元後鉍物量をさす。

B_h : Hem. の粉化係数, B_m : Mag. の粉化係数

B_{cf} : カルシウムフェライトの粉化係数

B_s : スラグ類の係数, B_w : $FeO(W)$ の粉化係数

α : 原料アルカリモル濃度

$$= \{[Na_2O\%]/62 + [K_2O\%]/94.2\} \times 10(\text{mol/kg})$$

β : 原料 TiO_2 (%)

これらモデル式の定数項は実験測定結果を用いて、最小自乗法で $K_1=0.123$, $K_2=0.14$, 各鉍物粉化係数を Table 1 のごとく決めた。そして、このパラメーター定数および焼結鉍物組成から求めたモデル計算値と実測 RDI 値との比較を Fig. 6 に示すが良好なる一致を認めた。

還元後の鉍物別の粉化係数は坂本らの結果¹³⁾によれば熔融組織の CF , ガラス質スラグが大きいと解釈され、また志垣らの結果¹⁵⁾($Al_2O_3=2.3\%$)によれば Hem., Mag., ガラス質スラグ, CF の順に大きくなると解釈される。さらに還元がある程度以上進行すると逆に RDI が改善する知見⁷⁾があり, $FeO(W)$ の増加は粉化係数を逆に低下せしめるものと考えられる。これらの知見は Table 1 の粉化係数と相対的に良く対応している。

また k_2 は 1 次 Hem. の還元膨張力を 2 次 Hem. の膨張力基準で示した比率であるが, 0.14 と従来の知見^{8)~10)}どおり 2 次 Hem. に比べてかなり小さい。

2.3 被還元性モデルの構成

焼結鉍の RI (JIS) を推定するモデル化については福与らの報告¹⁷⁾がある。この報告では RI の主要因として焼結鉍の鉍物組成, 鉍物別被還元性, マクロポアを挙げ, 鉍物別の RI をマクロポアを取り込んだ 1 界面反応

モデルで算出し、これを鉱物組成で加重平均する形で RI を推定している。ここでは式の簡素化の観点から、 RI が 0~100% で標示でき、かつ 100% に漸近する特性をもつ指数関数を適用し、上記支配要因を取り込んだ (7) 式で RI 値を求めることとした。

$$RI(JIS) = 100 \{ 1 - \exp(-k_3 \cdot r) \} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$r = \varepsilon \cdot \sum (X_i \cdot M_i)$$

ここで M_i : 各鉱物相の量 (%)

ε : 成品気孔率 <JIS> (%)

X_i : 鉱物別被還元指数 (Table 1)

RDI モデル同様、鍋焼成焼結鉱の鉱物組成、気孔率、 RI の実測値とモデル式を用い、最小自乗法から鉱物別の被還元指数を Table 1 のごとく、また $k_3 = 0.00213$ と決めた。さらにこのパラメーター定数と焼結鉱鉱物組成および気孔率から求めたモデル計算値と実測 RI 値との比較を Fig. 7 に示すが良好なる一致を認めた。Table 1 の被還元指数は Hem., CF, Mag., スラグ類の順に小さくとなっており、福与らの報告¹⁷⁾ と対応している。

3. 総合シミュレーションモデルの調整

3.1 各部分モデルの結合

各部分モデルは Fig. 1 に示す構成で結合される。すなわち、まず原料特性 (粒度分布、成分、密度、吸水指数¹⁾)、原料配合率および原料水分等から造粒通気モデルにより原料通気性を算出する。次にこの原料通気性、充填密度、設備や送風機条件、原料層高およびコークス配合率等から燃焼伝熱モデルにより焼結層内ヒートパターン (焼結時間、高温保持時間) を算出する。次に層内高さ方向の代表点 (10 か所) において、原料特性、原料配合率および高温保持時間から溶融モデルにより溶

融率や溶融部組成を算出する。そして引き続きこれら結果と充填密度を加味して気孔モデルより焼結鉱気孔率を、鉱物モデルにより鉱物組成を算出する。最後に品質モデルにより各位置における品質 (TI , RDI , RI) および歩留りを求め、歩留加重平均にて焼結鉱の品質を算出する。さらに諸算出要因から各種原単位、生産率およびコストを算出する。

以上のフローに従って総合モデルはシミュレーション計算を実施するが、各部分モデル間で、推定精度、計算時間、論理構成に差が存在する。実用的観点からみれば、全体としてこれら部分モデルのアンバランスを調整する方向で総合化をはかるべきである。たとえば、大きな計算能力を必要とする燃焼伝熱モデルは設備フローを固定した検討では簡略化する方が有利である。このような簡略化は種々の方法¹⁸⁾ で行われている。ここでは焼成速度と高温保持時間 (高さ方向 10 点) における燃焼伝熱モデルの計算結果と一致するような原料要因 (通気性、水分%, F.C.%, CaO%), 層高, 吸引圧力, 充填層密度を変数とした近似式を作成し、この近似式を用いる方法で簡略化した。

3.2 総合モデルの計算値と実機実績値との比較

小倉製鉄所第 3 焼結工場における原料特性、操業条件の実績を総合モデルに入力し、モデルより計算された予測値と実績値との対応を調べた。本モデルのパラメーター定数は鍋試験実測値を基にしているので、実機対応にあたり実績管理項目 (焼成速度、品質、歩留り) の絶対値レベルをあわせるべくこれら項目にかかるパラメーター定数を修正した。Fig. 8 には焼成速度と RDI における比較を示すが、モデル計算値と実機実績値とは良好なる一致が認められ、本モデルが焼結性予測にとつて有効なものと評価できる。

3.3 適正操業条件を求める最適値解法

原料、配合、設備基本設計に関する評価において適正操業点の把握は重要である。ある操業条件での上記項目の評価順位は別の操業条件での評価順位と一致しないことがあり、単に操業条件一定で評価を行うことは問題である。また焼結鉱製造にあつては高炉要求に基づく品質管理基準や生産量の制限があり、まずこれを満足させる必要がある。この制限条件の中で焼結操業は適切な目標評価関数 (通常は製造コスト) を定めて実施されるが、操業諸原単位、生産率、品質に関与する要因は数多く、これらの中からその都度、最適な原料配合構成と操業条件の組合せを選択することはかなりの困難さを伴う。そこで操業条件 (コークス%, 原料水分%, 層高, 吸引圧力) を変数とした管理項目 (TI , RDI , RI , 生産率, コス

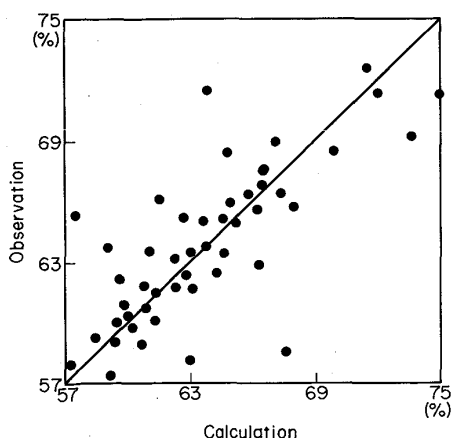


Fig. 7. Comparison of calculated values with observed ones on RI (pot test sample).

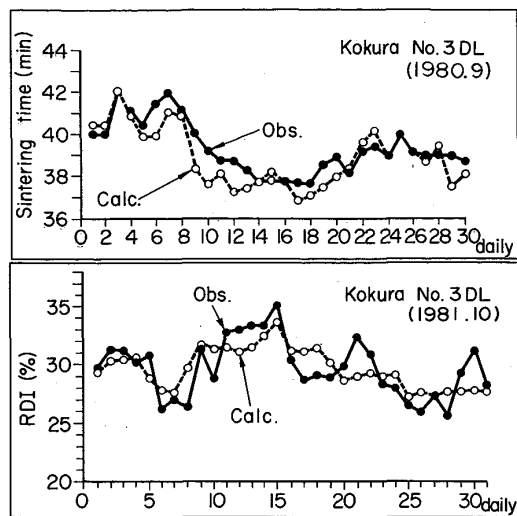


Fig. 8. Comparison of calculated values with observed ones on sintering time and RDI.

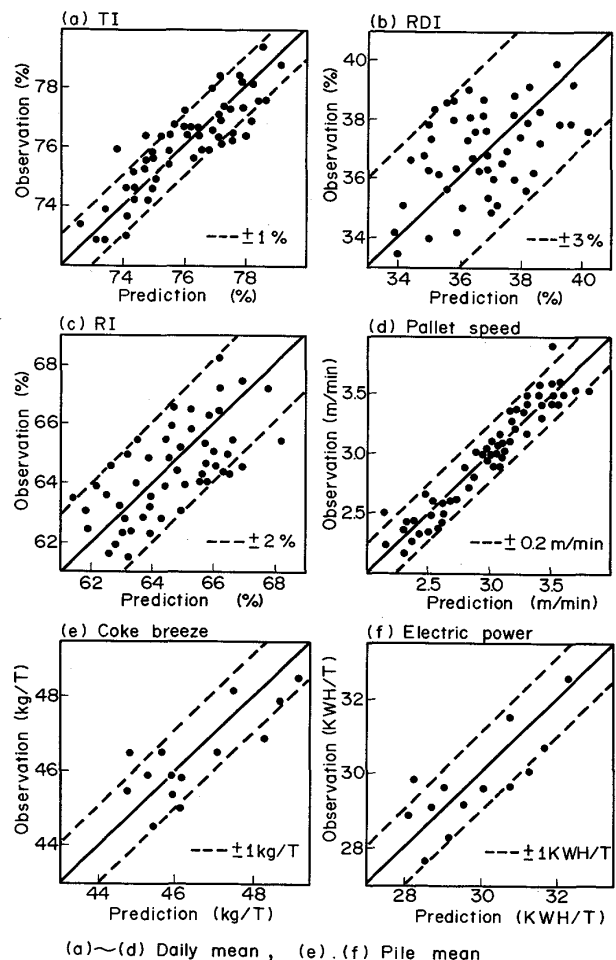
ト)に関する近似式を多数のモデルシミュレーション予測結果から求め、これに制限条件を加味し最適値解法を行う方法を採用し、最適操業条件を求めた。すなわち、モデルの入力条件群を a_m 、出力結果を b_k 、近似式を楕円関数 $b_k = \sum (K_{ij} \cdot a_i \cdot a_j) + C (K_{ij}, C: \text{定数})$ として与える。まず、順次 a_m を変更して総合モデル計算を実施し a_m に対応した b_k を求める。次に求めた多数の (a_m, b_k) 数値を用い近似式の係数 K_{ij} 、 C を決める。このようにして求めた近似関数式 b_k において管理項目 n 、評価項目 l 、制限値 $n_{\max}$ 、 $n_{\min}$ 、 $m_{\max}$ 、 $m_{\min}$ に対し、 $n_{\min} \leq b_n \leq n_{\max}$ 、 $m_{\min} \leq a_m \leq m_{\max}$ 条件で $\min(b_l)$ の非線形計画問題を山登り法¹⁹⁾で解法する。これらはすべて電算機で自動的に処理され、最適操業条件ならびに目標評価値が求められる。

3.4 総合モデルの外挿精度検定

前報⁶⁾ならびに3.2において鍋試験及び小倉焼結工場におけるモデル計算値と実績値との比較を示したが、パラメーター定数設定に用いたデータによる内挿区間での比較であった。そこで鹿島製鉄所第3焼結工場にモデル導入をはかる時点で、同工場実績値に対するパラメーター定数設定完了後の外挿予想精度検定を行った。まず昭和57年11月の8日間、主原料配合条件一定でコークス配合率(%), SiO_2 (Ni スラグ配合率), CaO/SiO_2 (石灰石配合率), 層高, 原料水分, 吸引圧力を順次変更し焼結操業実績データを集積してパラメーター定数を設定した。パラメーター定数は鍋試験や小倉の定数と若干異なっていた。次に、設定したパラメーター定数を用い、昭和58年6月15日～9月27日(ブレンドパイル切替

Table 2. Test condition (Kashima No. 3 DL).

Variation action		Variation range	
Sinter feed mix ratio	Sinter feed A	0	~ 14.0 (%)
	B	10.0	~ 24.0 (%)
	C	0	~ 15.0 (%)
	D	0	~ 15.0 (%)
Operating condition	Coke breeze	2.98	~ 3.68 (%)
	Bed height	450	~ 550 (mm)
	Suction pressure	878	~ 1306 (mmH ₂ O)
	Moisture	4.7	~ 6.3 (%)
	Hearth layer	50	~ 87 (kg/m ²)



(a)~(d) Daily mean, (e), (f) Pile mean

Fig. 9. Comparison of the predicted values from the model with the observed ones at Kashima No. 3 DL.

日, 操業休止日を除く)の60日間の長期にわたり、精度の検定を実施した。その間の原料配合及び操業条件の変動範囲をTable 2に示す。検定結果をFig. 9に示す。RDI, RIについてはやや誤差が大きい、実機の製造プロセスにおける定常的な品質変動幅から考えれば許容できるものと判断される。また定数設定データ採取日から7か月後の検定において予測値の実測値に対するドリフトは認められないことから、モデル出力値のフィード

Table 3. Conditions and results of experimental operation (Kashima No. 3 DL).

Case days			Base for 27 days (A)actual		Guidance for 25 days (B)actual		Difference energy consumption	(B)-(A) cost index
Condition	Blower suction	(mmH ₂ O)	1338	1338	1078	1078		
	Bed height	(mm)	457	457	369	369		
	Coke content	(%)	3.28	3.28	3.30	3.30		
	Productivity	(s-t/日 m ²)	23.3	23.4	23.1	23.4	(Mcal/s-t)	(-)
Energy consumption	Coke breeze	(kg/s-t)	46.2	46.5	49.0	49.7	19.6	5.9
	Electricity	(kwh/s-t)	30.0	30.2	26.4	27.0	-9.6	-9.6
	Coke gas	(Nm ³ /s-t)	1.91	1.84	2.28	2.27	1.8	1.8
	Recovery steam	(kg/s-t)	97.5	104.8	103.1	112.4	-4.1	-4.1
	Total						7.7	-6.0
Quality	TI	(%)	76.0	76.5	73.3	73.8	(A)total 336.0	109.6
	RDI	(%)	37.4	35.4	35.6	34.6	(B)total 343.7	103.6
	RI	(%)	63.0	63.1	65.4	66.7		

バック補正は不必要と判断される。なお、製造所間でパラメーター定数の差が現実に存在するが、今後さらに普遍的に整理できるようモデルのレベルアップに努力したい。

4. 総合モデルの適用

4.1 操業ガイドシステム

原料需給制約下での適正原料配合計画とそれに見合った適正操業把握のため、また操業方針から決定された生産量、焼結鉱品質及び設備、鉱石配合の制限下での適正操業把握のため、2.4 の総合モデルおよび 2.6 の最適値解法を操業ガイドシステムとして鹿島焼結工場に適用した。本システムにおいて鉱石特性は入船ごとに自動更新される性状テーブルに保持される。2.7 のテストでモデル予測がほぼ良好な精度をおさめたので、適正操業（エネルギーコスト最小）の検討を実施した。この結果、Table 3 に示す適正操業条件が出力され、これまでの操業条件よりも低層高・低負圧条件の方がコスト面から望ましいことがガイドされた²⁰⁾。そこで、それぞれ1か月間の評価試験操業²⁰⁾を行い、ガイド予測どおりの大幅な送風電力低減によるエネルギーコスト低減(5.5%)を確認した。これ以降、鹿島焼結工場ではモデルガイドンスに基づく操業を行い、第2焼結機、第3焼結機とも、層高 400 mm、鍋下負圧 800 mmH₂O 付近の低層高・低負圧操業（昭和 61 年 10 月現在）を継続している。また Fig. 10 には本システム導入前後における焼結鉱品質変動の推移を示す。システムの導入により適切な原料配合構成や操業条件を事前に評価し選択することで、成品品質の変動を約 20% 低減することができた。これらはモデルを用いた事前評価によるブレンドパイル切替時の品質変化を予測することで可能となった。以上から本システムがきわめて有効なガイドであると評価できる。

4.2 原料鉱石評価例

焼結原料の配合評価事例については一部報告²¹⁾した

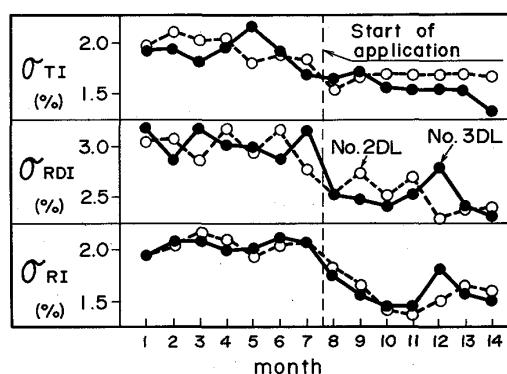


Fig. 10. Effect of application of the model on sinter quality fluctuations at Kashima DL.

Table 4. Ore characteristics of new sinter feed.

Ore	T.Fe	Al ₂ O ₃	SiO ₂	LOI	+5 mm	-0.1 mm
E	62.2%	1.5%	2.7%	5.6%	10%	16%
F	62.2	1.7	2.7	6.2	19	16
G	58.4	1.5	4.4	8.1	8	15
H	57.1	2.7	5.7	10.1	2	25

LOI: Loss of ignition

ので、ここでは新規鉱石銘柄の焼結性事前評価例について述べる。焼結原料鉄鉱石は天然資源であるため銘柄や性状は変遷する。また鉱山開発や長期購買契約に際し新規鉱石の事前評価はきわめて重要であるが、実際に焼結試験を行って評価するのに必要なサンプル量を手入れするのが困難な場合が多い。しかし本システムでは実サンプルがなくても鉱石性状の情報があれば検討が可能で、品質や生産率の条件を前提として任意の評価関数に基づいた適正操業条件で、評価結果を与えることができる。一例として Table 4 の性状をもつ 4 種類の新規鉄鉱石をおおの 16% 配合使用した場合に、あらかじめ定められた生産量と品質を確保した制約条件の中での副原料（コークス、Ni スラグ、石灰石）コストを評価関数として検討した。結果を Table 5 に示すが、鉱石評価をコストで定量的に評価できた。

Table 5. Estimation of new sinter feeds (blending ratio 16%) under the optimum operating condition.

Ore brand		E	F	G	H
Cost index		100.0	106.3	101.4	116.8
Quality	TI (%)	66.1	66.0	66.1	66.1
	RDI (%)	39.9	39.9	39.9	39.8
	RI (%)	62.8	62.7	62.6	62.4
Productivity (s-t/日 m ²)		26.0	26.0	26.0	26.0
Optimum condition	Coke (%)	2.8	3.1	2.9	3.6
	Ni slag (%)	3.3	3.2	2.9	2.6
	Moisture (%)	5.2	6.0	5.3	5.6
	Bed height (mm)	556	559	499	469

CaO/SiO₂=1.65 TI>66% RDI<40% RI>60%Productivity=26 s-t/日 m²

Cost index (Sum of coke, Ni slag and limestone consumption)

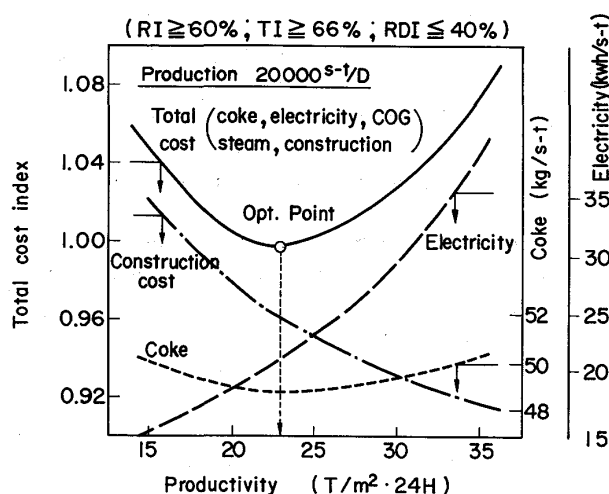


Fig. 11. Optimum productivity on construction of new DL sintering plant.

4.3 設備設計検討例

20 000 s-t/日の生産能力をもつ DL 型焼結機を新設する場合の主仕様検討の例を述べる。Fig. 11 に最も重要な仕様である生産率（またはストランド有効面積）の変化に関し、各生産率におけるトータルエネルギーコスト最小時のエネルギー諸原単位と設備建設コストを示す。この結果では生産率の低下に伴い電力は低下、コークスは変化が少なく、建設コストは上昇し、23 s-t/日 m² が総合コストの最小点となった。電力の低下は焼成風速の低下に起因する。コークスコストは排熱回収コストにより一部相殺され、コスト最小時のコークス原単位は 48 ~ 50 kg/s-t で差が少ない。

生産率の適正点が求まれば逆の順で計算して、この点を求めた時の各設備設計仕様を求めることができる。このような検討は従来多くの時間と経験を必要としたが、本システムを用いれば迅速に精度よく行うことができる。

5. 結 言

前報^{1)~6)}のモデルと今回開発した還元性状に関するモデルとを統合することによって焼結鉄品質、操業諸元単位を予測する総合シミュレーションモデルを開発し、モデル予測値と実機実績値との良好な一致を確認した。本モデルと最適値解法を結合した操業ガイドシステムを鹿島焼結工場に導入することによって、焼結鉄品質の変動が 20% 低減したまた製造エネルギーコストが 5.5% 低減した。さらに本システムを用いれば、焼結鉄製造に関連する主な影響因子を網羅した上での原料評価や適正設備検討を迅速かつ正確に求めることができる。従って、本モデルは種々の要因解析ばかりでなく、その先行予測性を活用した焼結原料、配合、設備設計、操業方針の適正検討とその戦略的運用に有効である。

文 献

- 1) 佐藤 駿, 吉永真弓, 一伊達稔, 川口尊三: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2174
- 2) 吉永真弓, 久保敏彦: 住友金属, 29 (1977) 4, p. 383
- 3) 佐藤 駿, 川口尊三, 吉永真弓, 一伊達稔: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 657
- 4) 佐藤 駿, 川口尊三, 吉永真弓, 一伊達稔: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 804
- 5) 佐藤 駿, 川口尊三, 吉永真弓, 一伊達稔: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 956
- 6) 佐藤 駿, 川口尊三, 吉永真弓, 一伊達稔: 鉄と鋼, 73 (1987), p. 964
- 7) 小菅 高, 石光章利, 菅原欣一, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, 52 (1966), p. 501
- 8) 稲角忠弘: 鉄物化学 (今井秀喜, 竹内寿久弥, 藤本良規編) (1976), p. 213 [朝倉書店]
- 9) 志垣一郎, 沢田峰男, 前川昌大, 成田貴一: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 1513
- 10) 春名淳介, 宮本国昭, 蜷川充男: 鉄と鋼, 71 (1985), S 874
- 11) 松野二三郎, 錦田俊一, 池崎寿志: 鉄と鋼, 69 (1983), S 119
- 12) 井上勝彦, 林 秀高: 鉄と鋼, 68 (1982), S 89
- 13) 坂本 登, 福与 寛, 岩田嘉人, 宮下恒雄: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 512
- 14) 春名淳介, 鈴木章平, 高崎 誠, 佐藤勝彦: 鉄と鋼, 67 (1981), S 683
- 15) 志垣一郎, 沢田峰男, 吉岡邦宏, 高橋 佐: 鉄と鋼, 71 (1985), p. 1880
- 16) 佐々木稔, 榎戸恒夫, 近藤真一, 中沢孝夫: 鉄と鋼, 59 (1973), p. 1209
- 17) 福与 寛, 野田英俊, 坂本 登, 齊藤 汎: 鉄と鋼, 72 (1986), S 85
- 18) 柴田充蔵, 和島正巳, 相馬英明, 松岡 宏: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 178
- 19) L. C. W. DIXON: 非線形最適化計算法 (松野正一訳) (1974), p. 30 [培風館]
- 20) 住友金属工業(株) (私信) 1985 年 10 月
- 21) 佐藤 駿, 川口尊三, 喜多村建二, 高田耕三: 鉄と鋼, 71 (1985), A 189