

討 6 焼結原料の評価と配合の最適化

住友金属工業(株)

中央技術研究所

○佐藤 駿 川口尊三

和歌山製鉄所

喜多村健治

鹿島製鉄所

高田耕三

1. 緒言

我国の焼結原料鉄鉱石はそのほとんどを海外に依存しており多種鉱石銘柄の適正な配合構成とそれに見合った操業条件の選択は製造される焼結鉱の生産性と品質性状に大きく影響し高炉の円滑な操業にとって不可欠の技術管理要素である。焼結原料配合構成の適正設計は従来からの経験的な試行錯誤による知見をふまえて最近では科学的な裏付けと定量評価が進みつつある。

ここでは、上記の観点から焼結プロセスにおける鉱石特性の評価と鉱石配合の最適化について検討するとともに2、3の適用例を報告し、討論の資料としたい。

2. 鉱石特性と配合評価方法

2.1 鉱石特性

(1) 化学的特性

代表的な焼結用粉鉄鉱石銘柄とその特性をFig.1に示した。鉱石中の酸化鉄の存在形態はその化学成分T, Fe, FeO, C. W. (Combined Water)からおよその構成推定が可能である。この図ではリモナイトの酸化鉄形態をゲーサイト(FeOOH)と仮定し、Fe%表示で3種の酸化鉄構成を整理した。現状での焼結原料構成では圧倒的にヘマタイト系鉱石の配合比率が高いが、マグネタイト系鉱石は配合原料全体の溶解性や製造される焼結鉱の酸化鉄バランスに少なからぬ影響を及ぼすことが知られており、焼結の燃料添加量のコントロールに関与する。

もう1つの重要な化学的特性として、Al₂O₃、SiO₂成分に代表される鉱石脈石性状が挙げられる。一般にAl₂O₃/SiO₂量比は脈石が粘土鉱物系か石英系かを暗示し、焼結作業における石灰石必要量や焼結鉱品質への影響が大きい。特に近年ではカルシウムフェライトの形態や構造に関して融液組成に及ぼす鉱石微粉部の脈石成分の影響が注目されている。

(2) 物理的特性

焼結鉱石の化学的特性は高炉スラグ成分制約条件の重要性と分析技術の普及で古くから管理されてきたが、鉱石の物理的特性は原料配合設計にあたって2次的に考慮されることが多く焼結操業条件の適正化で調節されてきた。しかし、鉱石の物理的特性の1つとして粒度構成は原料層の通気性を支配する重要な要因であるのみならず、造粒過程、溶解現象および鉱物生成条件等焼結プロセスの全域にわたって付着粉、核粒子別の区分設定をはじめとして、最近では物理的特性の重要性も見直されつつある。

鉱石の密度情報は粒子気孔率や粒子表面粗度を与え、付着粉の核粒子への造粒能や吸水能に関与する。

(3) その他の特性

気孔率の高い鉱石は造粒時に水分の一部を吸収するために添加された水分の全てが造粒作用に寄与できるだけでなく、銘柄種固有の吸水能に応じて適切な添加水分量を調節する必要が生ずる。また給合水を含む鉱石は焼結の昇温加熱過程で脱水し、その結果弛緩した粒子構造は溶解性の向上に寄与するとともに同粒子周囲の焼結鉱組織の気孔量の増加をもたらす。この種の鉱石は燃料粉コークスの使い方で焼結鉱品質への影響が変化し、また省エネルギーの観点からは熱分解吸熱反応のため燃料消費

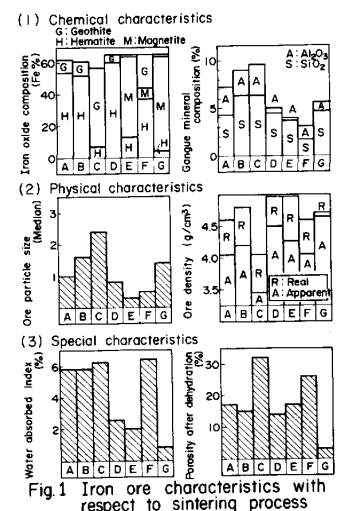


Fig.1 Iron ore characteristics with respect to sintering process

量を増加させる。

このように、焼結反応全体からみて、鉱石特性は化学的のみならず物理的な特性も重要な要因であり、且つ焼結操業条件によってもその影響度は変化するため、原料特性と操業条件とを総合的に検討してはじめて適正な原料配合設計が可能になるものと考えられる。さらに、この段階ではもはや定性的な要因集合体としての銘柄種を評価するのではなく、個々の要因に分解された特性を用いれば定量的な原料配合法則を組み立てることができる。

2.2 原料配合評価法

前述した構想に基づく原料配合評価法の一例を Fig.2 に示した。この「焼結総合シミュレーションモデル」は6つの段階に分解されたサブモデルを再結合することで構成され、焼結鍋試験等から得られる操業および品質に関する情報と原料成品の基礎的性状に関する知見を定量的に解析評価して組み立てられた自己完結型のモデルである。モデルの入力項は、原料特性要因、操業条件因子および設備特性要因の3つで構成される。Fig.3には原料特性要因の内容をモデルの基本フローとの関連で示したが、出力は生産性をはじめ焼結鉱品質指標、操業諸原単位が定量的に予測計算可能であり、操業解析用にモデルの中間要因も知ることができる。ここでは、本モデルを用いて原料特性と鉱石配合の焼結操業への影響を検討した。

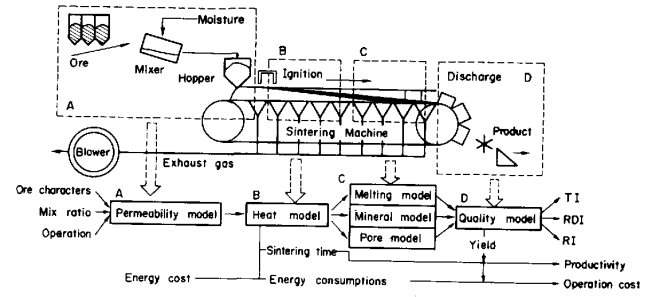


Fig.2 Integrated sinter simulation model

モデルの入力項は、原料特性要因、操業条件因子および設備特性要因の3つで構成される。Fig.3には原料特性要因の内容をモデルの基本フローとの関連で示したが、出力は生産性をはじめ焼結鉱品質指標、操業諸原単位が定量的に予測計算可能であり、操業解析用にモデルの中間要因も知ることができる。ここでは、本モデルを用いて原料特性と鉱石配合の焼結操業への影響を検討した。

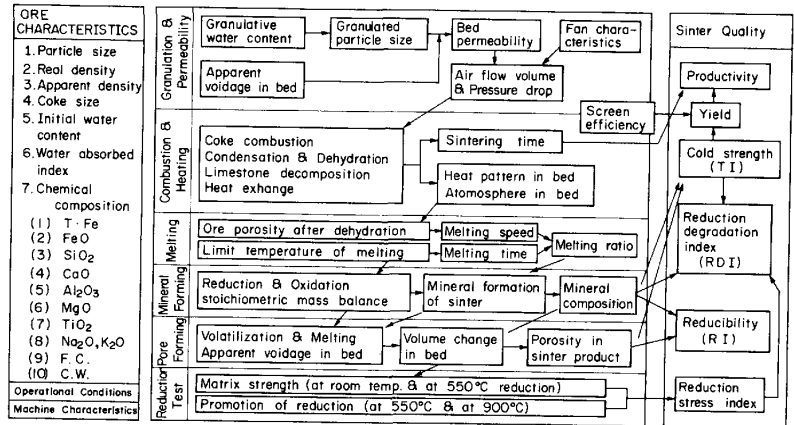


Fig.3 Ore characteristics and flow diagram of sinter quality model

3. 鉱石銘柄種の焼結操業への影響

3.1 単味銘柄配合

単味銘柄配合焼結試験は鉱石特性を評価する方法の1つとして古くから実施されてきた。Fig.4,5には、それぞれ、A~G鉱石単味銘柄配合条件におけるモデル予測結果と焼結鍋試験による焼結特性実測値を対比して示した。ここで原料鉱石特性を顕示させるため石灰石配合量は一定とした。計算結果と実測値とでは、焼結操業条件（燃料配合比、層厚、排風吸引力）が異なっているため厳密な比較は無理としても、生産速度と燃料配合量を組合せて調節することにより焼結鉱品質水準を維持することは可能と考えられる。また、いずれの条件下でもD~F鉱石は高強度が得られやすいこと、D,E,G鉱石は耐遠

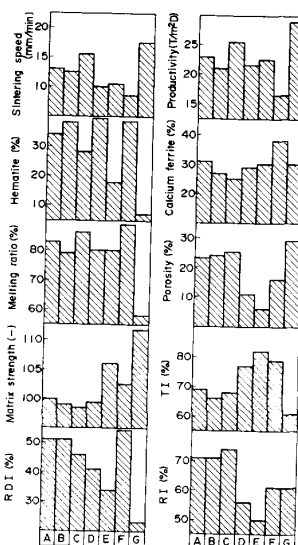


Fig.4 Model prediction for sintering
Blend: SF ore 62.8%, Return fine 22%, Limestone 12%, Coke 3.2%
Condition: Bed height 500mm, Suction 1000mm H₂O

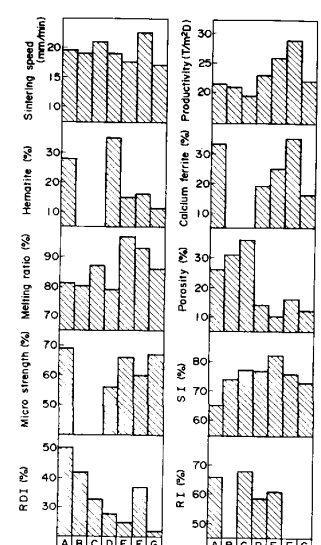


Fig.5 Results of sinter pot test
Blend: SF Ore 66%, Return fine 16.5%, Limestone 13%, Coke 4.5%
Condition: Bed height 300mm, Suction 1200mm H₂O

元粉化特性に優れていることなどが推察できる。冷間強度の向上は主として気孔率の低さに起因するものであり、良好な R D I 性状は焼結鉍鉍物相の構成に深い関係を有する。

このように石灰配合一定条件下での単味鉍柄配合評価は鉍石特性を顕示させ得る反面、その焼結特性への影響は過大に評価される危険があるため、実際的な原料配合構成と焼結 操業条件下での再検討が必要である。

3.2 実用配合における評価

Table.1 には実用原料配合ベースを前提にして特定 S F 鉍石鉍柄をそれぞれ約10%置きかえた場合を想定し、この時の操業エネルギーミニマムとなる適正操業条件をモデルシミュレーションした結果を示す。ベース配合として、当社年間平均原料配合構成を選び、制約条件として、生産率 $24 \text{ T/m}^2 \text{ D}$ 一定、焼結鉍品質水準維持 ($\text{TI} \geq 66\%$ 、 $\text{RDI} \leq 40\%$ 、 $\text{RI} \geq 60\%$)、焼結鉍 $\text{CaO/SiO}_2 = 1.8$ 、 $\text{SiO}_2 = 5.3\%$ 一定とした。予測計算の結果、E、G 鉍石のエネルギー消費量(排熱回収補正含む)が最も低く、逆にC 鉍石が高い。

この理由は、マグネタイト系鉍石の燃料消費量が相対的に少なく、しかも C.W が小さく且つ造粒時添加水分も少なく済むことで排熱回収量も増加でき、省エネルギー型の操業に適していたことによるものである。この場合焼結鉍品質の面では R D I に余裕があるが、R I 確保が難しい。

Table.1 Model prediction for energy minimum sinter operation

ORE	A	B	C	D	E	F	G
Coke (%)	2.8	2.9	3.0	2.8	2.8	2.8	2.8
Bed height	578	617	550	659	576	490	679
Suction (mm/h)	400	344	304	680	472	600	600
TI (%)	71.2	74.6	71.4	77.0	73.8	72.5	74.0
RDI (%)	40.0	40.0	40.0	38.8	37.4	40.0	37.2
RI (%)	65.3	62.8	65.1	60.1	60.4	64.1	60.2
Energy Min (x10 ³ Kcal/T)	316.1	317.4	320.3	311.0	305.5	311.6	298.4

Limit condition:
 1. Blend: Replace annual mean blend with 9.5% SF Ore
 2. Sinter qualities: $\text{TI} \geq 66\%$, $\text{RDI} \leq 40\%$, $\text{RI} \geq 60\%$, $\text{CaO/SiO}_2 = 1.8$, $\text{SiO}_2 = 5.3\%$
 * Annual mean blend
 SF Ore 41.9%, Under screened 6.3%, Other ore 16.2%, Return fine 20.9%, Limestone 11.4%, Coke 3.3%

4. 実操業への適用例

4.1 操業ガイドモデルの活用(鹿島 No.3 DL)

原料需給制約条件下での適正原料配合設計とそれに見合った適正操業の確立のため、Fig. 6に示す操業ガイドモデルを実機へ導入した。鉍石特性は入船毎に自動更新される性状テーブルに保持され、これに操業方針から決定された生産量、焼結鉍品質および設備特性等の制約条件下で最も合理的な操業要因の組合せを事前予測するものであるが、操業条件の選択で不十分の場合は原料配合構成の調整も行う。

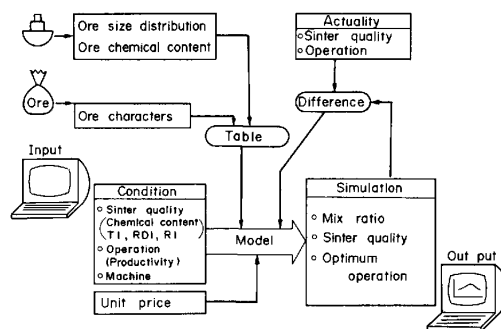


Fig. 6 The guidance system for optimum sintering operation (KASHIMA No.3 DL)

Fig. 7 には生産と品質に関するモデル予測計算値と実測結果の対比推移を示した。両者の対応は極めて良好である。同図後半の T I の低下はモデルの事前予測機能を活用した低層厚低負圧操業による合理化施策に対応しているが、現在では他の改善により回復をみている。

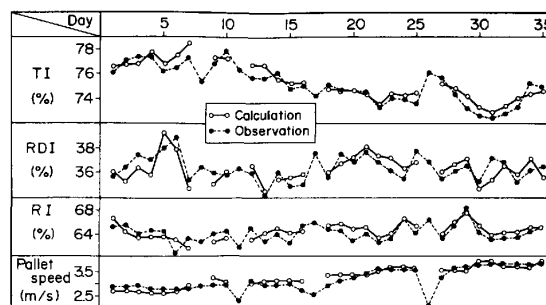


Fig. 7 Transition of model calculation and observation (KASHIMA No.3 DL)

Fig. 8 はガイドモデル導入前後の焼結鉍品質の変動量の推移を示す。システムの導入により原料配合構成に見合った適切な操業条件を事前に評価し設定することで、特にブレンドパイル切替え時の操業の円滑な移行を可能としている。

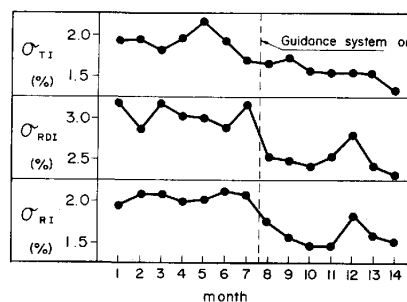


Fig. 8 Application of simulation model for KASHIMA No.3 DL

4.2 高 R I 焼結鉍製造における原料配合設計(和歌山 No.3 DL)

近年オイルレス高炉操業にとって装入物の被還元性の重要性が注

目されており、焼結鉍のT I、R D Iを維持しつつさらにR Iを高める操業が検討されている。和歌山 No.3 DLでも現状のR I = 62 レベルからR I 70 以上を目標に高被還元性焼結鉍製造操業が計画されたがR I 向上幅が大きく、通常の操業要因の組合せのみでは目標達成は困難と判断し、原料鉍石の選択と配合構成の適正設計を併せて総合的に検討することとした。Table.2には、現状配合ベースを含めて合計6 ケースの原料配合構成案についてモデルシミュレーションを行い、高R I 焼結製造のための原料配合構成を事前評価した。制約条件として、生産率 $2.9 T/m^2 D$ 、焼結鉍塩基度2、 $SiO_2 = 5.5\%$ を固定したうえ、焼結鉍品質 $T I \geq 66\%$ 、 $R D I \leq 40\%$ とした。この結果は、結合水含有量の高いC 鉍石を多配合することによって、熔融性の改善に伴うコークス配合比の低減によるマグネタイト量の減少と焼結鉍気孔率の上昇を同時に狙った配合 (Case1) が最も高いR I 値を与えることを示した。しかし、達成目標である $R I = 70$ は満足し得ず、しかも他の品質も管理限界いっぱいであるため、別に有効な対策の併用がなければ、品質管理基準を緩和せざるを得ない状況となることが推察された。

Table 3 に示す実機操業ではこの事前評価結果に基づき高C.W.含有鉍石C の多配合を主体に、細粒鉍石の配合で気孔核の増加をはかるとともに高塩基度、低スラグ化にてR I を高めやすい焼結鉍組織の改善対策を併用した。

実機操業の経緯は Fig. 9 にて詳細に示しているが、その期間は大きく2 つに区分することができる。前半 (Step 1) ではコークス配合減にもかかわらず頭初の予想と異なってR D I は良好に推移し、T I を維持しながらR I を平均69 まで上昇させることができた。この段階で高炉の操業状況も良好であったため、後半 (Step 2) にはさらにコークス配合を下げた結果FeO が減少し目標 $R I \geq 70$ を達成することができた。

しかしながら、コークスの大幅な減配は焼結鉍の結合ボンド量を熱的に十分確保することができず、強度T I は管理水準をやや下廻る結果となった。このように、モデルシミュレーションによる鉍石特性の評価と操業を加味した原料配合の適正化予測は焼結操業の合理化と戦略方針の設定に極めて有効と考えられる。

5. 結言

原料需給制約のなかで最適な配合設計を行うためには、個々の鉍石銘柄特性の十分な把握とその評価技術が必要であり、焼結生産品質管理範囲内での原料配合構成と焼結操業条件との適切な組み合わせの選択で達成される。

参考文献：

- 1) 井上, 池田: 鉄と鋼 68 ('82) 2190
- 2) 相馬, 和島, 細谷, 田代: 鉄と鋼 68 ('82) 2200
- 3) 佐藤, 吉永, 一伊達, 川口: 鉄と鋼 68 ('82) 2174
- 4) 肥田, 伊藤, 岡崎, 佐々木, 梅津: 鉄と鋼 68 ('82) 2166
- 5) 佐藤, 川口, 一伊達, 吉永: 鉄と鋼 70 ('84) 657
- 6) 九島, 内藤, 有野, 佐藤, 金森: 鉄と鋼 69 ('83) A1

Table.2 Model prediction of high-reducibility sinter production test at Wakayama No.3 DL

ORE	CASE	BASE	I	II	III	IV	V
A	20	-	-	-	-	-	20
B	15	-	18.7	17.9	18	-	17.7
C	40	20	20	20	20	-	-
D	12	13	-	-	-	15	15
H	10	15	15	15	-	-	-
I	5	5	5	5	5	-	-
J	10	-	-	13	13	13	-
K	10	-	-	-	-	-	-
L	5	-	-	-	-	-	-
M	-	-	3	3	3	3	-
SCALE	5	5	5	5	5	5	5
IRON SAND	5	-	5	5	5	5	5
NI SLAG	2.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
SINTER FINE	10	14	14	14	14	14	14
SILICA SAND	0.6	-	-	0.8	0.7	1.0	-
ILLUMINITE	-	0.7	-	-	-	-	-
BURNT LIME	-	-	-	-	-	-	-
Coke (%)	3.6	3.3	3.4	3.4	3.7	3.6	-
SUCTION (mm)	1100	1020	1240	1160	860	1020	-
BED HEIGHT (mm)	497	487	482	481	448	516	-
T I (%)	66.0	66.0	66.0	66.0	66.0	66.5	-
R D I (%)	34.6	40.0	36.8	37.2	36.8	39.0	-
R I (%)	64.2	68.1	65.6	66.4	66.7	66.8	-
PRODUCT (t/h)	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9	28.9	-

Operation Limit:
 (Productivity $28.9 T/m^2 D$ Const.
 Sinter $CoO/SiO_2 = 2$, $SiO_2 = 5.5\%$ Const.
 $T I \geq 66\%$, $R D I \leq 40\%$)

Table 3 Production test for high-reducibility sinter at Wakayama No.3 DL

(1) Raw material content of production

Item	Period	Base (Jul-Sep '83)	Test (Dec '83)
High C.W. Ore (%)		11.7	40.0
Fine particle Ore (%)		8.4	20.0
Quicklime (%)		0	1
C.W. content in material (%)		1.68	3.10
Material $-1 mm$ (%)		44.9	47.1
particle size mean (mm)		2.05	1.89
Sinter CoO/SiO_2		1.79	2.00
Sinter SiO_2 (%)		5.73	5.50
Sinter Al_2O_3 (%)		1.92	1.66

(2) Sinter qualities of production

Item	Period	Base (Jul-Sep '83)	Test (Dec '83)
JIS RI (%)		62.9	70.3
T I (+10 mm%)		67.1	65.6
R D I (-3 mm%)		37.4	32.7
Porosity (%)		24.5	32.0
Magnetite (%)		12.6	9.0
Calcium ferrite (%)		16.0	19.0

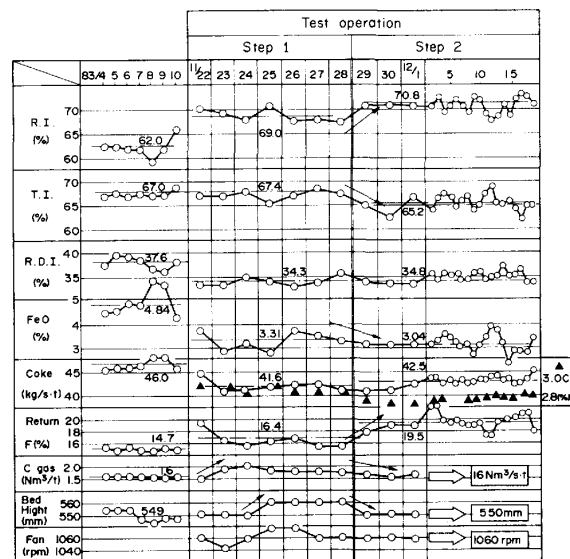


Fig 9 Changes in test operation results of producing high-reducibility sinters