

焼結鉱の品質管理計測システムの開発

技術報告

川口 清彦*・稲田 清崇*・佐藤 駿*²・湯本 修介*³

Development of Quality Control System for Sintered Ore

Kiyohiko KAWAGUCHI, Kiyotaka INADA, Shun SATO and Shusuke YUMOTO

Synopsis :

The quality measurement system has been developed in order to control RDI (Reduction Degradation Index) of sintered ore. It consists of the measurement systems of free carbon contents from an exhaust gas analysis, FeO contents in raw materials, particle size distribution of coke breeze and FeO contents in sintered ore.

After sufficient results were obtained about each measurement system, these systems were adopted in sintering plant as a total system. As a results, the quality indices of RDI of sintered ore can be controlled fairly stable by making use of this system.

1. 緒 言

高炉の主要な装入物である焼結鉱の品質は高炉の安定操業と諸元改善にとって重要な管理項目である。特に高炉シャフト部通気性の確保には焼結鉱の耐還元粉化性指標 (RDI) の向上とその安定化が要求される。

焼結鉱製造面ではこの高炉装入物としての品質要求を満たしつつ焼結鉱生産量の確保と製造諸原単位の低減をはかる必要があるが、焼結鉱の品質だけを見てもそれに影響を及ぼす要因は多岐にわたって複雑に交絡しており、最適な要因の組み合わせを見出すことは極めて困難である。これら影響要因は原料鉱石特性と焼結操業条件の2つに大きく分離されるが、前者は原料政策と需給事情を強く反映し焼結機の日常のコントロール要素としては採用しにくい。従って焼結機の操業は通常操業条件の組み合わせの適正化をはかることで品質の確保と安定化に対処せざるを得ないが、それでもなお操業の適正化はむずかしく操業管理用計測器の充実と品質を加味した操業モデルの開発が待望されている。著者らはこれらの実情にかんがみて焼結鉱の RDI と極めて強い相関を有する FeO 量の計測を主体とした品質管理システムを検討してきた。

成品 FeO は原料 FeO と焼成時の燃料である有効「炭素(C)」量 (燃料として寄与できる炭材の固定炭素分) に主に依存し、著者らはこれらの定量的かつ連続的な計測管理が重要であることに着目し、オンラインでの原料

及び焼結鉱成品 FeO 計 (以下マグメータと称す.)、主排ガス分析による有効「C」推定システム及び粉コークス粒度分布測定装置を開発した。さらにこれら計測器及び計測システムを総合的に結合した焼結鉱品質管理計測システムを構築し現場での適用テストを実施した結果、その有用性が確認できたので以下に報告する。

2. 計測法の開発

2.1 全原料中有効炭素推定法

2.1.1 背景

全原料中有効「C」量は焼成過程を左右し成品 RDI に関係する。従来その主たる有効「C」源となる粉コークス、また二次的に使用する高炉ダストの量的管理は定量切出秤量装置 (CFW) で行われているが有効「C」量としての管理は間欠的であり短期的な変動への対応は困難であった。そこで著者らは主排ガス分析による連続的な全原料中有効「C」推定法を開発した。

2.1.2 推定法

主排ガス中の CO, CO₂, N₂ をガスクロマトグラフィ、流量を差圧式流量計、全原料重量をコンベアスケールで連続測定し、燃焼反応から有効「C」を演算する方法で、Fig. 1 に推定法及びその推定精度を示す。なお石灰石の炭酸塩分解から発生する CO₂ は燃焼に寄与しないので計算式の中で補正している。本方式による推定精度は感度解析の結果、推定値の ±3.22% であった。

昭和 58 年 11 月 16 日受付 (Received Nov. 16, 1983)

* 住友金属工業(株)制御技術センター (Instrumentation and Control Technical Center, Sumitomo Metal Industries, Ltd., 1-3 Nishinagahondori Amagasaki 660)

*² 住友金属工業(株)中央技術研究所 (Central 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.)

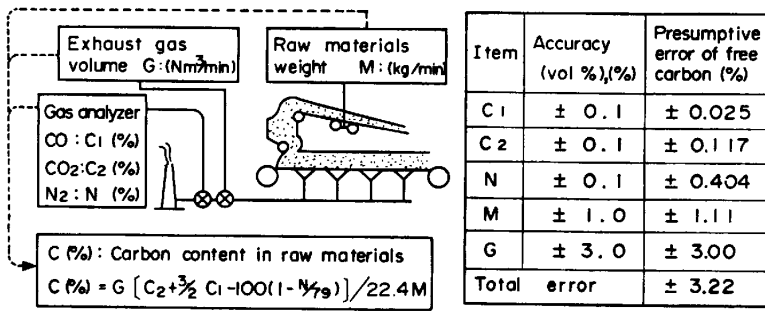


Fig. 1. Schematic diagram of presumption of free carbon in raw materials and results of presumptive error by sensitivity analysis.

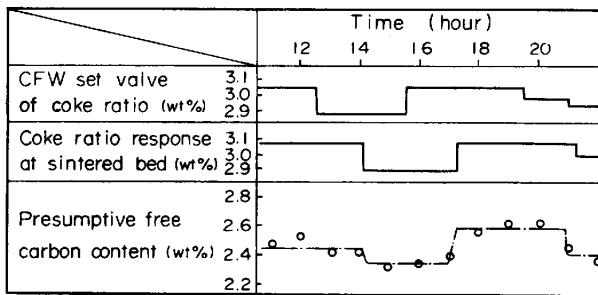


Fig. 2. Demonstration results of free carbon content presumption system.

Table 1. Repeatabilities (24h) of gaschromatography.

Composition	Measuring ranges (vol %)	Standard gas content (vol %)	Results of error (vol %)
CO	0 ~ 3	0.9941	0.00
CO2	0 ~ 15	7.964	0.04
N2	0 ~ 100	73.8119	0.04

2.1.3 測定結果

Fig. 2 に本システムによる有効「C」推定値の検証結果を示す。粉コークス設定値をステップ的に変更し有効「C」推定値の追従性を調査したもので、両者は良い対応を示し本システムの有効性が確認された。

ガスクロマトグラフィは標準ガスでの自動校正、総和補正による大気圧変動誤差の低減及びクロマト処理のデジタル化などにより Table 1 の精度で管理できており、実用上十分な精度であることが確認された。

本システムの課題は Fig. 1 の感度解析結果より、主排ガス流量計及び全原料供給量の計測精度の向上にある。前者は気体用超音波流量計の²⁾採用 (精度 ±1%)、後者は定期検定の強化により改善可能である。超音波流量計を採用した場合の有効「C」推定精度は ±1.5% となる。

2.2 粉コークス粒度分布測定装置

2.2.1 背景

粉コークスの粒度分布は配合切出量以外にも燃焼速

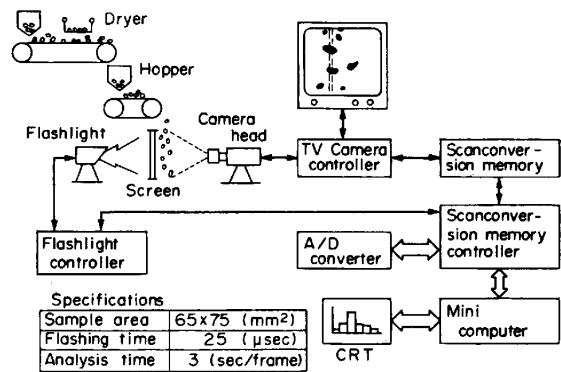


Fig. 3. Schematic diagram of measuring system for particle size distribution of coke breeze.

度、最高到達温度、高温保持時間など焼結の燃焼特性を支配する。例えば粗粒分が多くなると熱容量が大きくなり高温燃焼すると共に還元ポテンシャルが大きくなる。さらに熱間通気性も改善され冷却速度があがり再酸化が進行しにくくなつて高 FeO 化する結果 RDI が改善する³⁾。また焼結性の観点から細粒、粗粒分が多すぎても歩留りが悪化し粉コークス粒度分布に適正値が存在する⁴⁾などの報告がある。著者らもより適切な粒度分布をもつ粉コークスを安定供給するために、ロードミルの破碎制御に適用可能なオンライン粒度分布測定装置を開発した。

2.2.2 測定法

従来1回/シフトのサンプリングにて篩分けで粒度分布測定を行っていたが、間欠的なため測定結果の代表性及び制御信号に使用できない欠点があつた。そこでFig. 3 に示すように光学的手法で粒度分布を連続測定する方法を検討した。

搬送コンベアより分岐した粉コークスを乾燥させた後コンベア上に展開し自然落下させる。落下中の粒子をその背後からフラッシュライトで瞬間発光させ、対向させたテレビカメラで粒子の投影静止像を撮る。この濃淡画像をデジタル化し粒子像の暗部の面積を画像解析により測定する。さらに光学倍率から実寸法の球近似直径及

び体積を下記の(1)~(3)式を用いて計算し各粒径区ごとの体積から粒度分布を測定する。

$$S_R = K \cdot N_R \dots\dots\dots (1)$$

$$D_M = 2\sqrt{S_R/\pi} \dots\dots\dots (2)$$

$$V_M = 4\pi/3 \cdot (S_R/\pi)^{3/2} \dots\dots\dots (3)$$

ここで S_R は実寸法粒子投影面積, N_R はカメラでの粒子面積, D_M は球近似直径, V_M は球近似体積, K は光学倍率をあらわす。

2.2.3 測定結果

数種のボールベアリングを用いて本装置の性能を検証した結果測定誤差 1.1% (σ) と実用上問題のないことを確認した⁵⁾。次に粉コークスを用いて測定した結果を Fig. 4 に示す。細粒部での誤差が大きくなっているが、これは光学倍率の大きいレンズ系を採用したため被写体深度が浅くなり、粒子の落下位置の違いで焦点ボケが生じテレビカメラで検出されにくくなることによる。実験的に再現性を確認したので下記の(4)式での補正法を確立した。

$$R_C(i) = \frac{C_{ri} \cdot R_M(i)}{\sum_i C_{ri} \cdot R_M(i)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで C_{ri} は補正係数, $R_M(i)$ は補正前粒度分布, $R_C(i)$ は補正後粒度分布をあらわす。また補正係数はあらかじめ手篩値と本装置での測定値を合致させるようにして決める。粉コークスの場合の補正係数と補正効果の一例を Fig. 4 に示す。補正後と篩測定とほぼ良好な対応を示している。

さらに通常操作における粒度管理指標値 (-1 mm の重量) での長期対応を調査した結果, Fig. 5 に示すように $\pm 3.4\%$ (σ) と良好な精度で測定できることも確認した。

2.2.4 ロッドミルへの適用

本装置を用いてロッドミルへの供給量を変えた場合の

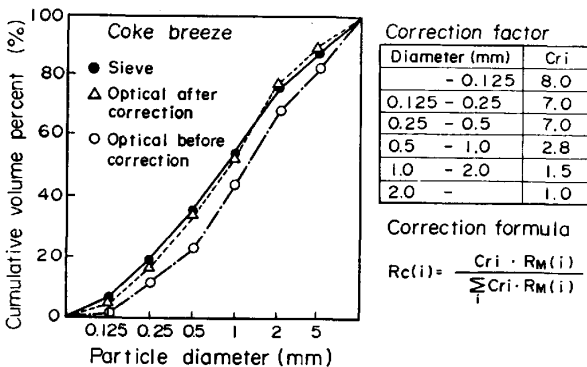


Fig. 4. Effects of correction for miss count of fine particles and correction factor of coke breeze.

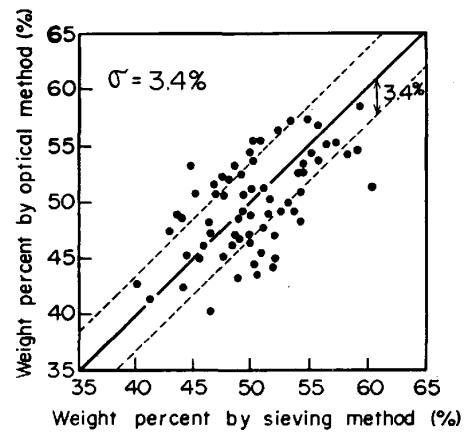


Fig. 5. Relationship between optical method and sieving method for weight percent of coke breeze particle size under 1 mm (%).

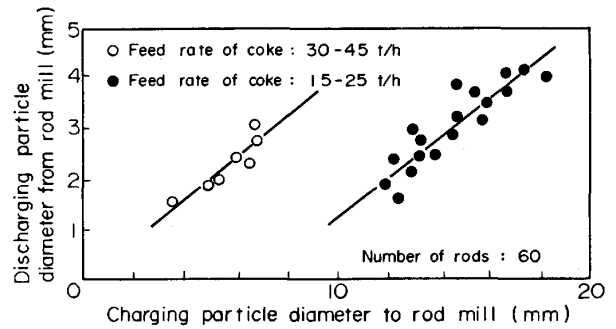


Fig. 6. Crushed characteristics of rod mill.

入側と出側での粉コークス粒度分布を計測し、ロッドミルの破碎特性を調査した結果の一例を Fig. 6 に示す。これから入側の粒度分布を測定しロッドミルへの供給量を調整することにより出側の粒度分布を制御できることがわかる。また同時に出側でも測定し、破碎特性の修正にフィードバックできる。

2.3 連続式マグメータ

2.3.1 背景

焼結鉄の品質の中で RDI の重要性は前述したとおりである。従来 RDI の測定はバッチサンプリング後還元処理を行い粉化強度を実測する方法を採用している。そのためこれの自動測定装置例⁶⁾はあるが、連続測定は極めて困難であつた。また給鉄から RDI 値を得るまで 4 h 程度の遅れがあり迅速なアクションには不満足であつた。

そこで RDI と成品 FeO とに相関関係のあることに着目し、成品のマグネタイト (Fe_3O_4) を透磁率の変化として連続測定できるマグメータを開発、間接的ではあるが成品 RDI の評価を迅速にできるようにした。

マグネタイト計としては、成品を整粒後バッチ的に測定する自動 FeO 計⁷⁾、ホット返鉄をサンプリングし連

続測定する Permagnag[®]、焼結機パレット上での連続 FeO 計⁹⁾などの報告はあるが、保守性、コンパクトさ、成品を加工せずに測定できるか否かなどで物足りない点があつた。

著者らはかかる問題点を解決し、精度良くかつ連続的に FeO を測定する原料用及び成品用マグメータを開発した¹⁰⁾。両マグメータにより焼結過程における FeO 変化量 ($\Delta\text{FeO} = \text{成品 FeO} - \text{原料 FeO}$) も連続測定が可能となつた。

2.3.2 測定法

検出コイルに低周波電流を印加しコイル近傍にある被測定物の透磁率を検出コイルの自己インダクタンス変化として検出する方法で Fig. 7 に測定原理を示す。また検出コイルのインダクタンスは下記の(5)(6)式により得る。

$$L = \mu_e \cdot L_0 = \mu_e (9.87 K \cdot d^2 \cdot N^2 / l \times 10^{-7}) \dots\dots (5)$$

$$\mu_e \propto f(\text{FeO}, X) \dots\dots (6)$$

ここで L は自己インダクタンス (H), L_0 は空筒の自己インダクタンス (H), μ_e は有効透磁率 (H/m), K は長岡係数, d は検出コイル直径 (m), N はコイル巻数 (T), l は検出コイル長さ (m), X は充填率をあらわす。

自己インダクタンスは焼結鉱中のマグネタイト (Fe_3O_4) 含有率の他に被測定物の充填率に支配されその安定化が重要となる。原料マグメータでは Fig. 8(a) に示すように配合原料サージホッパに非磁性の保護管を差し

渡し、その内部に検出コイルを挿入する。これにより水分調整された原料の検出コイルへの附着が防止でき、安定して測定可能である。一方成品マグメータは Fig. 8 (b) に示すように床敷ラインのシュート部に垂直パイパス管を設けそのなかに検出コイルを取り付け、充填率を一定にする検出系統とした。床敷ラインの焼結鉱は 5 ~ 10 mm に整粒されているので測定のために特別の処理を必要とせずに簡素でかつ連続測定ができる装置である。

なお両マグメータの仕様を Fig. 8 に示すが、コイル巻数と励磁周波数だけ変えている。これは自己インダクタンスはコイル巻数の二乗に比例、渦電流損は励磁周波数の二乗に比例する関係より原料マグメータではコイル巻数を大きくして感度向上を図ると共に励磁周波数を小さくし渦電流損の低減を図り、精度向上を行つた。

2.3.3 測定結果

原料用、成品用各マグメータ出力値と化学分析 FeO 値の対応を Fig. 9 に示すが両者共 FeO 値として $\pm 0.4\%$ 以内の精度で測定でき、実用上問題ないことがわかつた。充填率の影響については、原料用の場合、原料の粒度構成、添加水分での造粒条件に余り大きな変化のないことから大きな要因とならない。また成品用の場合も Fig. 16 に示すように粒度に着目しマグメータ出力値に影響が小さい範囲を限定、さらに安定した物流条件を Fig. 8(b) に示す構造を配慮することにより充填率の影響を小さくしている。

3. 品質管理計測システム

焼結鉱の品質安定向上の方策として前記の各計測器を駆使し一つの品質管理計測システムを開発した。

3.1 システム概要

Fig. 10 にシステム構成を示す。まず高炉側からの目標 RDI, TI があり、実測の RDI, TI との偏差により

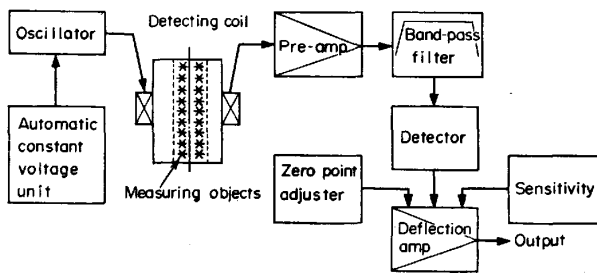


Fig. 7. Principle and block diagram of magmeter.

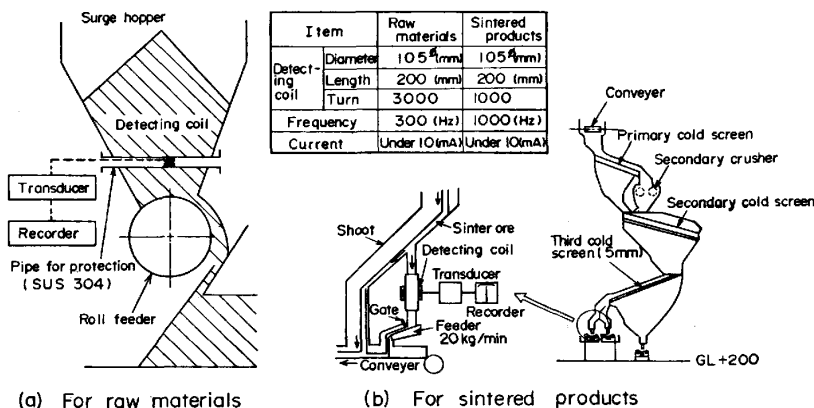


Fig. 8. Schematic diagram and specifications of magmeter for raw materials and sintered products.

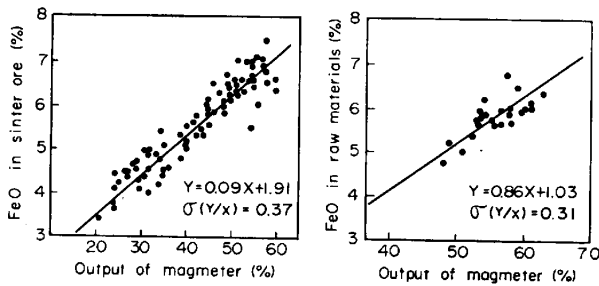


Fig. 9. Relationship between output of magmeter and chemical FeO in sinter ore and raw materials.

態の二次ヘマタイト (Fe_2O_3) 量³⁾の減少を示唆し、この結果 Fig. 11 に示すように RDI は改善される。TI については、同じく成品 FeO の増加が焼結過程の熱レベルのアップを示すことから原料の熔融が進んで強度低下の原因となる気孔率が減少するため TI 向上をもたらす。このように焼結鉄の FeO はそれ自体で品質との相関が強く有効な品質管理指標となる。しかし成品 FeO に影響を及ぼす要因にはコークス配合率の外に原料中の炭素量、原料 FeO 量、粉コークス粒度分布など少なからず関与するものがありこれらの補正が必要となる。こ

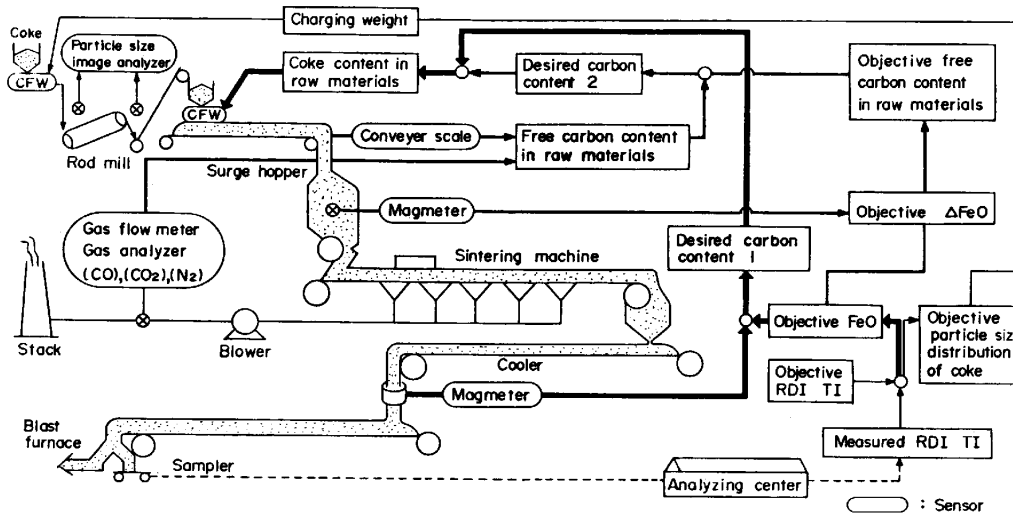


Fig. 10. Schematic diagram for quality control of sintering plant.

目標の成品 FeO を得る。さらに成品マグメータでの実測 FeO 値とを比較し必要アクション炭素量を計算して適正な粉コークス量を CFW で調整することを主ループとしている。次に原料マグメータの FeO 値と成品マグメータの FeO 値との差 (ΔFeO) を計算しこれより目標の有効「C」量を求める。これと主排ガス分析による全原料中有効「C」量とを比較し必要アクション炭素量を計算する。これを前述の粉コークス量調整に加味することにより、原料 FeO 変動に対してフィードフォワード制御で微調整できるものとなる。その結果成品 FeO の安定化が期待できる。

さらに粉コークスの適正粒度分布は目標の成品 RID 及び TI より決められ、前述したロッドミル破碎制御への目標値としている。これにより CFW を用いてロッドミルへの供給量制御を行っている。なお粒度分布の制御ループは成品 RDI 及び TI の目標から必ずしも一義的に決まらない点があるので制御ゲインを小さくし大幅な粒度変化を抑制するようにしている。

3.2 計測値と品質

成品 FeO の増加は還元粉化の主原因となる特異な形

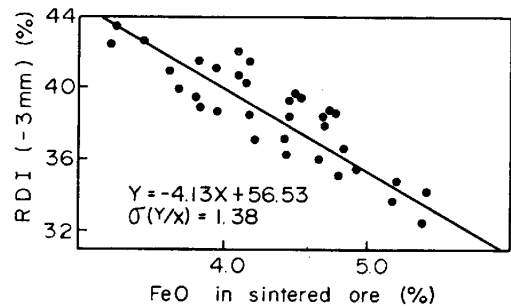


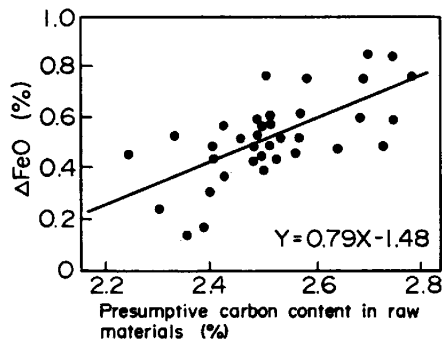
Fig. 11. Relationship between RDI and FeO in sintered ore.

のため供給される燃料源は全て焼結に有効な炭素量として把握し、その必要な量は原料 FeO を差引補正した ΔFeO 量に対応するものとして予測制御するのが有効と思われる。Fig. 12 には主排ガスの炭素化合物の分析値から計算で求めた有効「C」量と ΔFeO との関係を示す。多少のばらつきはあるものの前述した補正方式がおおむね妥当であることを示している。

また粉コークス粒度の焼結鉄品質への影響については Fig. 13 に示すように RDI に対しては一次的な関係が得られており、粉コークス粗粒化にともなつて RDI 改

善効果が得られるが、TI については適正な粒度範囲が存在するため単純な制御要素には組みにくい。従つて本システムでは粉コークス粒度は原則的に安定した粒度分布で焼結機に供給できるようロードミルにて破碎制御を行うが、粉コークス原単位の推移しだいでは補助的な品質制御手段として積極的な活用も可能である。

このような粉コークス粒度の品質への影響は、鍋試験の層内温度特性と排ガス分析の結果によると、粗粒の方が原料層内での熱の利用効率が高く、層内の高温帯領域を拡大すると共に燃焼反応で消費される酸素量が増えて



$\Delta\text{FeO} = (\text{FeO in sintered products}) - (\text{FeO in raw materials})$
 Fig. 12. Relationship between presumptive free carbon content in raw materials and ΔFeO .

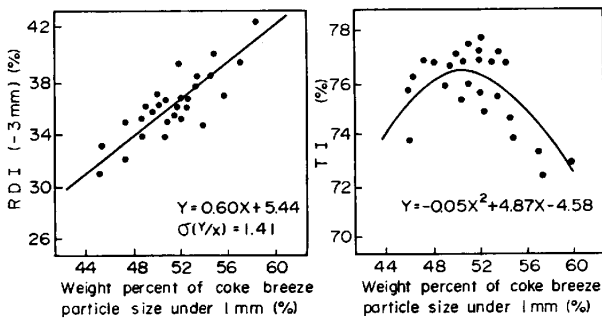
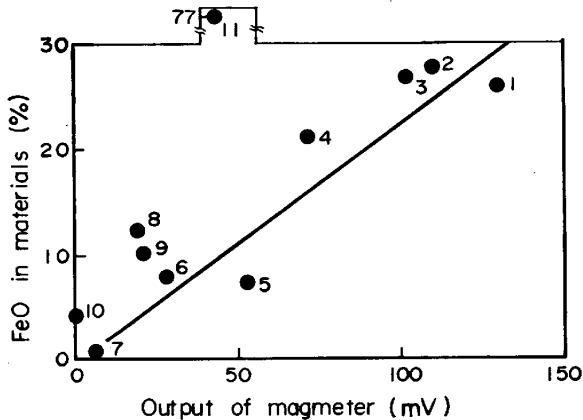


Fig. 13. Relationship between coke breeze particle size and RDI, TI.



- Dot No. Materials
- 1 Romeral
 - 2 Iron sand
 - 3 PF. peru
 - 4 Dried dust cake
 - 5 SF. carol lake
 - 6 Sinter ore
 - 7 M. B. R.
 - 8 Converter slag
 - 9 Dust pellet
 - 10 B. F. dust
 - 11 Scale

Fig. 15. Relationship between output of magmeter and FeO in materials.

還元雰囲気強化されるため焼結鉱中 FeO はより高いレベルに達するものと説明される。

3.3 実機試験結果

Fig. 14 にロードミルの破碎制御条件が一定である場合の本計測システムの試験結果の一例を示す。試験の初期では主排ガス成分より求めた有効「C」量はその目標値に対して過剰気味であつたので粉コークス配合比を再三にわたつて低下させており、この結果焼結鉱の FeO は徐々に減少を示している。試験の途中で粉コークス配合比低下アクションがオーバーシュートした結果、有効「C」量が目標値より低下したので逆に配合比率を上げて修正した。その結果成品 FeO の動きがこれと良く対応した経過を示している。このようにして試験の後半には有効「C」量の目標値と実測結果は良く一致し、成品 FeO と RDI の安定化が認められる。このように本計測システムに基づいた有効「C」量による焼結鉱 RID の制御効果は極めて良好であり実焼結機の品質制御システムとして有用である。なお、Fig. 14 には成品マグメータによる FeO 換算値と化学分析 FeO の良い対応も示されている。

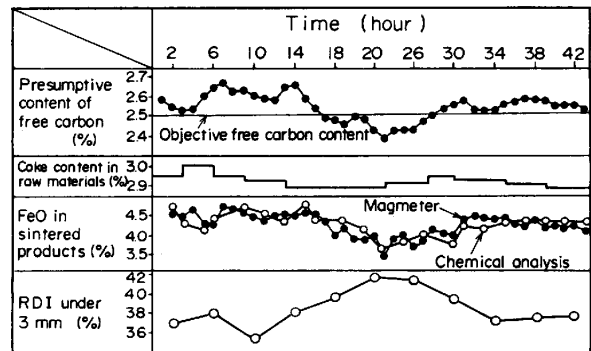


Fig. 14. Effects of sintered ore qualities control by coke feed action according to presumptive free carbon content.

4. 考 察

4.1 対象物質の特性によるマグメータの測定精度

4.1.1 原料マグメータ

Fig. 15 に焼結用原料及び焼結鉱に対するマグメータ出力特性を示す。No. 1~No. 7 については FeO% とマグメータ出力値に強い相関があり、マグメータにより FeO% を測定することは可能である。しかし No. 8~No. 11 は FeO% の値に対しマグメータの出力値は相当小さな値となる。これはマグメータは Fe_3O_4 の中の FeO として測定する原理に対し、これらの原料はウスタイト (FeO) 系であるため FeO% が高くて透磁率としては低い値を示すためである。従つて原料マグメータを用いる場合、これらの原料の配合比により出力値がドリフトするので、配合比もしくは成品マグメータを用いてこのドリフトを補正する必要がある。

4.1.2 成品マグメータ

マグメータ測定精度は被測定物の充填率に左右される。安定した流れの中では充填率はほぼ粒度に対応するので Fig. 16 に示すように成品粒度と成品 FeO% の関係を明らかにした上で活用することにより高い精度での測定が可能である。

4.2 粉コークス粒度分布測定精度の水分影響

粉コークスは通常 10~15% の水分を含み、造粒作用によつて疑似粒度化し光学的方法で真粒度を測定する場合大きな誤差要因となる。水分による影響を調査した結果を Fig. 17 に示すが、数%の含水率でもその影響が大きいことがわかり、実機においては乾燥装置を装備し、粉コークスの含水率が 1.0% 以下になるようにし精度向上を行つた。

5. 結 言

焼結鉱成品 RDI の安定操業を目的として、オンライン連続測定可能な全原料中有効カーボン推定法、粉コークス粒度分布測定装置、原料マグメータ及び成品マグメータの開発を行い、これらを組み合わせた品質管理計測システムを検討してきた。その結果次のことが明らかとなつた。

(1) 全原料中有効カーボン推定精度は $\pm 3.22\%$ である。主排ガス流量測定の改良によりさらに精度向上が期待される。

(2) 粉コークス粒度分布測定は手篩による管理指標値 (-1 mm) と $\pm 3.4\%$ の対応がある。

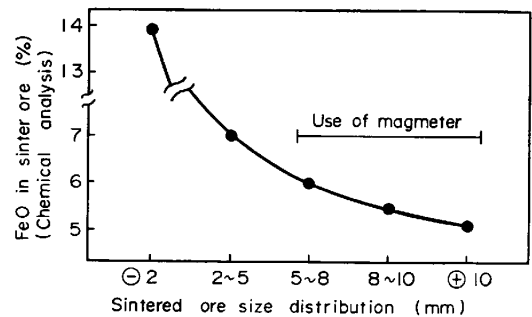


Fig. 16. Influence of FeO content according to particle size distribution of sintered ore.

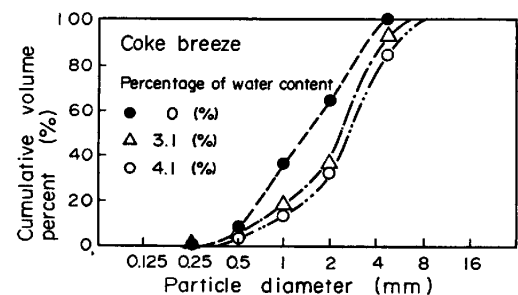


Fig. 17. Relationship between particle size distribution and percentage of water content of coke breeze.

(3) マグメータは原料用、成品用共に FeO 換算値で $\pm 0.5\%$ 以内の精度である。

(4) 実機試験の結果、本システムは成品 RDI の安定化に有効であり、一部実機適用しているがトータルシステムとしては現在計画中である。

文 献

- 1) 沢沢進一, 田鍋一樹, 渡辺雅男, 上甲忠嗣, 藤田修司, 高田耕三: 鉄と鋼, 67 (1981), S 695
- 2) 藤田修司: 計測技術, 11 (1983), p. 35
- 3) 稲角忠弘, 北山 順, 古宅英雄, 高松信彦, 安藤啓司: 鉄と鋼, 68 (1982), S 38
- 4) 児玉琢磨, 荒谷復夫, 田中智夫: 鉄と鋼, 68 (1982), S 36
- 5) T. SHIRAIWA, Y. SAKAMOTO, K. KAWAGUCHI and K. INADA: ACTA IMEKO (1979), p. 265
- 6) 佐古芳治, 齊藤 昇, 矢間孝一, 古江健一: 鉄と鋼, 63 (1977), S 517
- 7) G. MEUNIER and R. HOLPER: CNRM, 9 (1966), p. 17
- 8) A. POOS, G. MEUNIER and J. LUCKERS: Proceedings ICSTIS, Suppl. Trans. ISIJ, 11 (1971), p. 94
- 9) 宇野成紀, 鎌田満雄, 大水 満, 伊藤 敦, 泉水康幸, 児玉順一: 鉄と鋼, 69 (1983), S 722
- 10) 大橋保威, 湯本修介, 増田和生, 山本章生: 鉄と鋼, 68 (1982), S 31