
焼結層内ヒートパターン連続測定装置の開発とその操業への適用

Development of Continuous Measuring Method of Heat Pattern in Sintering Bed and Its Application to Actual Operation

安本 俊治(Shunji Yasumoto) 田中 周(Syu Tanaka)

要旨：

焼結過程における熱焼溶融帯の特性は、焼結鉱の品質、生産性へ大きく影響を及ぼす。燃焼溶融帯の特性を、温度の経時変化（ヒートパターン）として、実機で連続的に 25 回測定できる装置を開発した。本装置は、シース熱電対とその保護金具およびテレメートリー装置とから構成されている。本装置で得られたデータに近似関数式を適用して指数化を行なった。現在まで得られた結果を要約すると下記の通りである。(1) SI と 900℃レベルでの保熱指数 Q900 との間に良好な正相関々係が認められた。(2) 製品中 FeO は、1100℃レベルでの冷却指数 CT1100 あるいは層内最高温度 TM との間に正相関々係が認められた。

Synopsis：

In order to control productivity and the quality of sinter, the characteristics of the combustion zone in the sintering bed are important. Therefore, a continuous measuring apparatus of the heat pattern was developed. Through the use of this apparatus, about 25 cycles of the heat pattern can be measured. This apparatus consists of three parts, i.e., a metal-sheathed thermocouple, its protector and telemetry equipment. For the heat pattern obtained by this apparatus, two indexes, the Q value and CT value, are defined. The Q value is estimated by an integration temperature curve above 900℃, and the CT value is estimated by cooling rate from peak to 1100℃. Results so far obtained through the use of the apparatus are summarized as follows. (1) There is a correlation between the Q value and shatter strength. (2) There are simple correlations between FeO content in sinter and two other values of CT and peak temperature in sintering bed.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

焼結層内ヒートパターン連続測定装置の開発とその操業への適用

Development of Continuous Measuring Method of Heat Pattern in Sintering Bed and Its Application to Actual Operation

安 本 俊 治*
Shunji Yasumoto

田 中 周*
Syu Tanaka

Synopsis:

In order to control productivity and the quality of sinter, the characteristics of the combustion zone in the sintering bed are important.

Therefore, a continuous measuring apparatus of the heat pattern was developed. Through the use of this apparatus, about 25 cycles of the heat pattern can be measured. This apparatus consists of three parts, i.e., a metal-sheathed thermocouple, its protector and telemetry equipment. For the heat pattern obtained by this apparatus, two indexes, the Q value and CT value, are defined. The Q value is estimated by an integration temperature curve above 900°C, and the CT value is estimated by cooling rate from peak to 1100°C.

Results so far obtained through the use of the apparatus are summarized as follows.

- (1) There is a correlation between the Q value and shatter strength.
- (2) There are simple correlations between FeO content in sinter and two other values of CT and peak temperature in the sintering bed.

1. 緒 言

焼結鉱の品質は、焼結過程における燃焼溶融帯の特性により大きく影響される。燃焼溶融帯の特性を把握する方法の一つに、従来から焼結層内における温度変化（以下ヒートパターンと称する）の測定が行なわれている。

ヒートパターンと焼結鉱品質および焼成因子との関係については、試験鍋により数多くの調査がなされており、その結果から多くの知見が得られている^{1,2)}。しかし、これらの知見を実機操業に適用していく場合には、実機におけるヒートパターンの測定が重要であり、必要不可欠な条件でもあ

る。

このような背景のもとに、実機におけるヒートパターン測定装置の開発を行なった。

本報告では、水島工場第4焼結機（バレット幅5m、有効機長82m）に設置した測定装置の概要とそれによって得られたヒートパターンについてのデータ処理方法ならびに焼結操業に適用した結果について報告する。

2. ヒートパターン測定装置

2.1 概 要

ヒートパターン測定装置の開発については、焼

* 水島製鉄所製鉄部製鉄技術室
〔昭和56年7月16日原稿受付〕

結機パレットのサイドウォールから熱電対を挿入する予備実験により、熱電対の挿入長さすなわちパレット幅方向における測温位置による測定パターンへの影響について調査した。

この調査結果より、熱電対保護方法として、グレートバーと一体物の突起物を有する構造の金具を考案し、この保護金具への熱電対の固定方法について、試験鍋を用いた予備実験を行なって基本的な条件を調査した。

Fig. 1 が以上の調査結果に基づいて製作したヒートパターン測定装置の全体構成図を示した図である。

ヒートパターンの測定は、Fig. 1 に示す装置を組み込んだ専用パレットを焼結機の任意のパレットと入れ替えることにより開始され、以後連続的にヒートパターンの測定が行なわれる。

2.2 温度検出部

測温用熱電対は、グレートバーの上に厚さ50mm、高さ300mmの突起物を載せた形状の保護金具に組み込まれ、パレット幅方向約1/3の位置に据付けられる。直径4.8mmのシースとした熱電対先端は、保護金具表面から35mmの位置で、原料層中に15mm突出している。この取付長さは、熱電対の損傷を極力少なくし、かつ保護金具の存在による測定温度への影響を生じないように実験的に決定した寸法である。

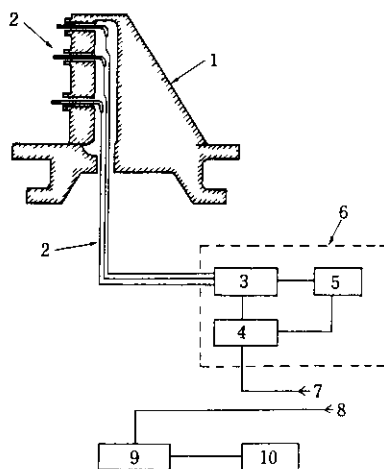
熱電対の測温信号は、PR素線（ $\phi 0.5 \times 2000l$ ）をガラスウールのチューブで絶縁被覆したリード線でパレットの外まで導かれる。保護金具下からパレット外までのリード線は、パレットリブ間に固定した磁製管の中を通し、ダストによる損傷を防止している。

以上説明したヒートパターン測定装置は、平均25パターン（約1.5日間）の連続測定が可能である。

2.3 測温信号の伝送装置

熱電対からの測温信号は、パレットの外に設置されたテレメトリ装置により、無線送信される。

保護金具の上段、中段、下段の層内温度とグレートバー下150mmの排ガス温度の計4点の信号



- 1—Protector
- 2—Metal-sheathed thermo-couple (PR : 13)
- 3—Multiplexer
- 4—Transmitter
- 5—Battery
- 6—Cooling box
- 7—Transmission antenna
- 8—Reception antenna
- 9—Receiver
- 10—Recorder

Fig. 1 Schematic diagram of continuous measuring equipment of heat pattern in the sintering bed

は、マルチプレクサーにて1サイクル約23秒で切換えて、無線送信器に送られる。無線送信器は冷接点補償を施した後、0~16mVの熱起電力信号をAM/FM変調し、約100MHzで送信する。マルチプレクサーおよび無線送信器の作動電源は水銀電池を用いている。さらに、マルチプレクサー・無線送信器および水銀電池は、機械的な破損と熱的な焼損を防止するため、パレットに固定した水冷函に収納している。

無線送信された信号は、焼結機側に張られた同軸ケーブルを受信用アンテナとして、計器室内に設置された受信器に導かれる。受信器では、FM/AM変調により、0~1Vの直流のアナログ信号に変換される。Fig. 2は、層内温度3点と排ガス温度1点の計4点の熱電対からの信号を記録計に採取した一例である。

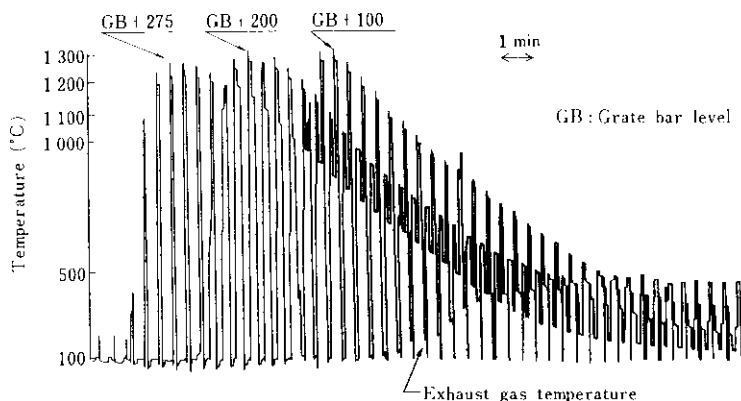


Fig. 2 An example of heat pattern obtained by continuous measuring equipment at Mizushima No. 4DL sintering machine

3. ヒートパターンのデータ処理

3.1 ヒートパターンの数式化

前述の測定装置で得られたデータを計算機で処理するために、Korshikov et al.³⁾の提案した近似関数式(1)式を用いて、ヒートパターンの数式化を行なった。

$$T = T_0 + (T_M - T_0) \cdot \exp \left\{ -m_i \cdot \left| \frac{t_M}{t} - 1 \right|^{p_i} \right\} \quad (1)$$

T : 昇温あるいは冷却期間内の温度 (°C)

T_M : ピーク時の温度 (°C)

t, t_M : 点火後の経過時間と層内温度がピークとなった時間 (min)

m_i, p_i : 個々のパターンに固有な値となる係数

T_0 : 湿潤状態での原料温度 (°C)

(1)式の適用に当って、昇温過程 ($t < t_M$) と冷却過程 ($t > t_M$) とではパターンが大きく異なるため、係数は昇温、冷却の2つのパターンに区別した m_h, p_h と m_c, p_c を用いることとした。これらの係数は(1)式を変形し、対数項の1次式とした(2)式を用い、層内温度 T とその温度に対応した時間 t を与えた最小二乗法により算出した。

$$\ln \left(\ln \frac{T_M - T_0}{T - T_0} \right) = \ln m_i + p_i \cdot \ln \left| \frac{t_M}{t} - 1 \right| \quad (2)$$

Fig. 3 は実測値と計算値との比較を示した図である。Fig. 3(a) は、通常得られるパターン例で、実測値と計算値との差は昇温過程で 0.1min、冷却過程で 30°C 以内でよく一致した結果が得られる。Fig. 3(b) は昇温パターンに乱れを生じた例を示

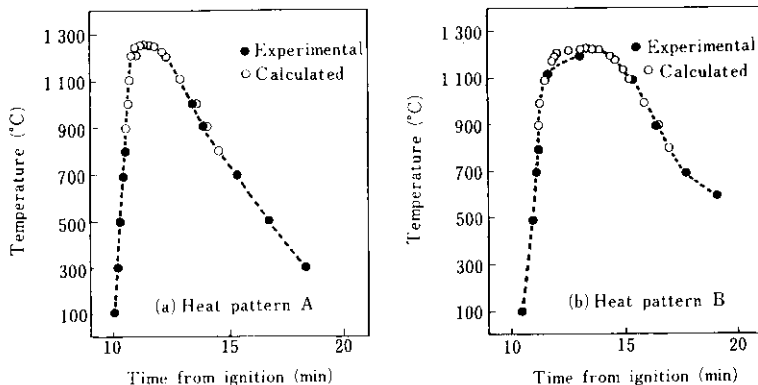


Fig. 3 Comparison of experimental and calculated heat pattern

したものである。この場合には、計算値は平滑化されたパターンとなり、高温領域での実測値と計算値との差が大きくなるが、パターンの乱れがない領域では両者はよく一致している。

以上のように、ヒートパターンの測定値は、(1)式を用いることにより、精度よく近似できる。

3-2 ヒートパターンの指数化

焼結鉱品質の評価について当所では、落下強度（以下 SI と称す）、還元粉化指数（以下 RDI と称す）および製造中 FeO の 3 項目について高頻度での定常測定を実施している。

SI は、融体の生成或いは固相拡散による粒子間の結合の度合を示す指標であり、その値は供給熱量に大きく支配され、供給熱が高温、長時間になる程向上する傾向がある。ところで、通常の操業においては、コークス配合比の平均レベルが約 3 wt% であることおよび層内最高温度の平均レベルが約 1300°C であることから、焼結過程における原料粒子の溶融量は極めて少なく、融体が生成してもその範囲は局部的なものである。したがって、SI へ影響を及ぼすヒートパターン指数としては、固相拡散による結合を主に評価すべきであると言える。固相拡散による結合は、加熱された温度と時間の 2 つの因子に支配されることが予想され、焼結過程での温度履歴を考慮したヒートパターン指数として、(3)式で表わされる保熱指数(Q)を定義した。

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} (T - T_C) \cdot dt \quad (^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}) \quad \cdots \cdots (3)$$

T, T_C : (1)式で求まる温度および基準とする固定の温度 (°C)

t_1, t_2 : $T = T_C$ となる時の昇温および冷却の時間 (min)

つぎに RDI は、焼結過程で生じる再酸化へマタイトの量に影響を受けることから、マグネタイト量を示す製品中 FeO との間に負の相関関係がある。さらに、FeO は破還元性(例えば JIS 還元率)との間にも負の相関関係があることが知られている。これらのことから、RDI および破還元性を管理する上で、製品中 FeO を制御することが重要であると言える。

ところで、製品中 FeO は、昇温過程での還元反応によって生成するマグネタイト量と冷却過程

での酸化反応によって消失するマグネタイト量の両過程での反応量によって決定されと考えられる。この考えから、還元および酸化の両反応の生成量を同時に評価するヒートパターン指数として(4)式で表わされる冷却指数(CT)を定義した。

$$CT = -\frac{T_M - T_C}{t_M - t_2} \quad (^{\circ}\text{C}/\text{min}) \quad \cdots \cdots (4)$$

すなわち、最高温度(T_M)を還元反応量として、又冷却に要する時間($t_2 - t_M$)を再酸化反応量として、それぞれ評価した指数である。

水島工場第4焼結機において得られたヒートパターンから上記の指数値を算出し、SI および製品中 FeO との関係を調べた。

3-3 保熱指数と落下強度との関係

SI と対応する保熱指数の基準温度レベルを詳細に調べる目的で、800~1200°C までの範囲内で 100°C 単位に変化させた保熱指数を算出した。SI の測定値は、ヒートパターン測定部分がサンプリングされるように時間対応を採り、かつ SI、ヒートパターン指数は 4 時間の平均値を用いた。

Table 1 に、基準温度を変化させた保熱指数と SI との単相関係数を示す。調査期間は昭和 54 年 3 月~10 月の 8 ヶ月間である。

保熱指数と SI との単相関係数が最も大きくなるのは、基準温度が 900°C の場合であった。Fig. 4 はこの基準温度での保熱指数と SI との散布図である。

Table 1 Simple correlation coefficients between Q values and shatter strength (n=47)

	Mean value	Standard deviation	Correlation coefficient
	°C·min	°C·min	
Q_{800}	2092.5	931.6	0.629
Q_{900}	1498.7	746.7	0.665
Q_{1000}	959.9	525.3	0.640
Q_{1100}	539.5	373.3	0.517
Q_{1200}	202.9	168.3	0.542
SI	91.42(%)	1.31(%)	

3-4 冷却指数と製品中 FeO との関係

RDI については、その測定頻度が 8 時間に 1 回

と少ないため、データとして充分な数が得られないことから、RDI とは負相関の関係にある製品中 FeO と冷却指数との関係を調べた。製品中 FeO は原料条件によってレベルが大きく異なるため、同一原料配合期間内での解析を行なった。データの採り方は SI について調べた方法と同一である。

Table 2 は、基準温度を変化させた時の冷却指数と製品中 FeO との単相関係数を示す。FeO との単相関係数が最大を示す基準温度は 1100°C であった。Fig. 5 は、この基準温度での冷却指数と製品中 FeO との散布図を 2 種類の原料条件について示したものである。原料条件により製品中 FeO レベルの変化がみられるが、傾向は類似している。

Table 2 Simple correlation coefficients between CT values and FeO content (%) in sinter (n=9)

	Mean value	Standard deviation	Correlation coefficient
	°C/min	°C/min	
CT ₈₀₀	106.6	23.8	0.394
CT ₉₀₀	100.8	20.8	0.618
CT ₁₀₀₀	91.7	20.0	0.740
CT ₁₁₀₀	79.2	16.7	0.831
CT ₁₂₀₀	55.2	16.8	0.733
FeO	4.67(%)	0.34(%)	

3.5 ヒートパターン指数と操業因子との関係

ヒートパターンの制御方法を検討するに当たり、SI および製品中 FeO との相関がみられた前記 2 つのヒートパターン指数と操業因子との関係を調べた。調査データは、前述のデータにその後得られたものを加えて解析を行なった。

Table 3 は、ヒートパターン指数と操業因子と

Table 3 Simple correlation coefficients between heat pattern indexes and operating conditions in the sintering machine (n=63)

	PS	V	C	R
Q ₉₀₀ (°C/min)	-0.607	-0.741	0.464	-0.343
CT ₁₁₀₀ (°C/min)	0.604	0.604	-	+
Pallet speed, PS (m/min)	1	0.766	-	0.389
Volume of suction, V (m ³ /min)		1	-0.387	0.358
Coke fine ratio, C (%)			1	+
Return fine ratio, R (%)				1

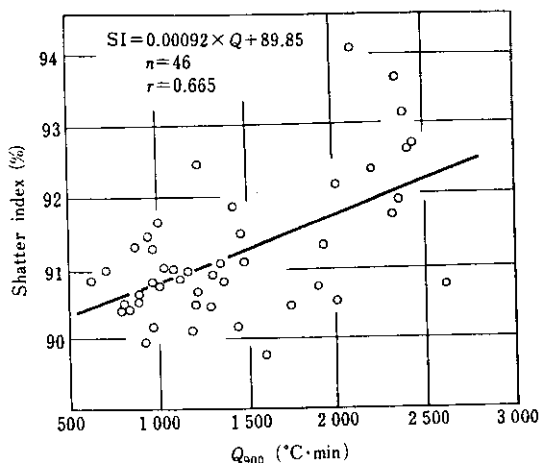


Fig. 4 Relation between shatter index and Q value at 900°C

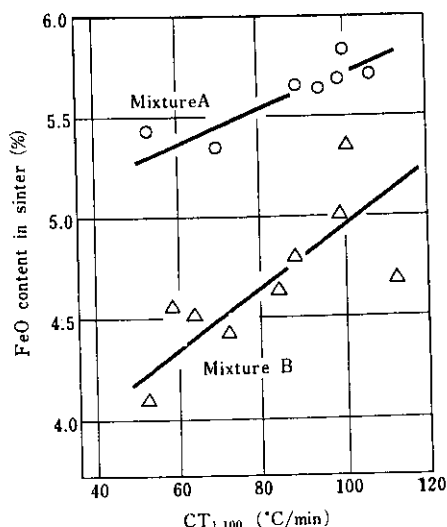


Fig. 5 Relation between FeO content in sinter and CT value at 1100°C

の単相関係数の一覧表である。ヒートパターンへ影響を及ぼす操業因子については、主排風量あるいはこれと正相関関係にあるパレット速度の効果が著しく大きく、保熱指数と負相関、冷却指数と正相関の関係がある。コークス配合比の効果については、保熱指数と正相関の関係が認められるが、冷却速度への効果は特に認められなかった。

このようなヒートパターンと操業因子との間に得られた結果は、試験鍋のテスト²⁾ 或いはシミュレーションの計算^{4,5)} によって報告されている例と同様の傾向であることが確認できた。

4. 焼結操業への適用

ヒートパターンの制御方法を詳細に検討することを目的に、同一原料配合期間内において、パレット速度を3水準、コークス配合比を4水準変更させた操業条件下でヒートパターンの測定を実施した。この時のデータの採取方法は3.3項と同一である。

Fig. 6 は、パレット速度変更による焼結鉱品質およびヒートパターンの変化を示した図である。これらの結果から、コークス配合比のレベルが変わると、品質およびヒートパターン指数のレベルに差を生ずるが、これらに及ぼすパレット速度の影響の傾向はあまり変化しないと言える。パレット速度の変更は、実際には、焼結層への吸引通過風量の変化として把握することが重要であるが、現時点で目標値設定が可能な操業因子としてパレット速度を採用している。このように、パレット速度を上げること、すなわち吸引風量を上げることにより、SIの低下と製品中 FeO の増加が生ずる。この時のヒートパターン指数の変化としてはピーク温度・冷却指数の上昇と保熱指数の低下が生じている。

Fig. 7 は、900°C 以上の高温領域（以下赤熱帯と称す）の変化について示した図である。図から明

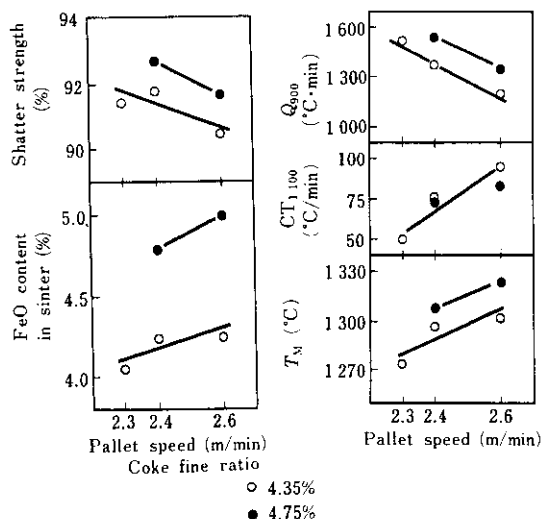
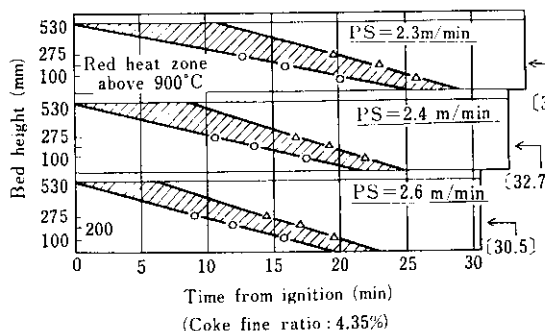


Fig. 6 Relation of qualities of sinter and heat pattern indexes vs. pallet speed



() shows the sintering time from ignition to wind box end (min)

Fig. 7 Variation of Red-heat zone above 900°C in sinter bed with pallet speed

らかなように、パレット速度の増加に伴って、熱前線移動速度 (Heat Front Speed) が速くなるとともに、900°C 以上に保持されている時間が短くなっている。このために、パレット速度の増加によるヒートパターンの変化としては、ピーク温度が若干上昇した、よりシャープな形状へと変化している。

Fig. 8 は、コークス配合比変更による焼結鉱品質およびヒートパターンの変化を示した図である。コークス配合比の増加により、SI、製品中 FeO の増大を生じ、ヒートパターン指数は、ピーク温度、保熱指数の上昇と冷却指数の低下を生じている。

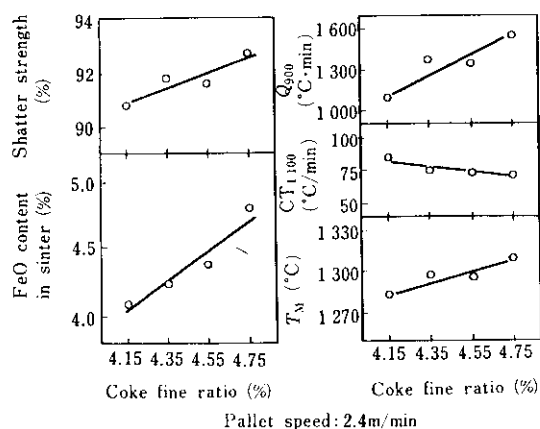


Fig. 8 Relation of qualities of sinter and heat pattern indexes vs. coke fine ratio in main ore

Fig. 9 は、コークス配合比の影響として赤熱帯の変化を示した図である。パレット速度変更時と

異なり、コークス配合比を増加させても Heat Front Speed の変化はほとんどなく、900°C 以上の保持時間が長くなっていることが判る。特にこの傾向は中層部で顕著である。このため、コークス配合比の増加によるヒートパターンの変化としては、ピーク温度が上昇し、かつフラットな形状へと変化している。

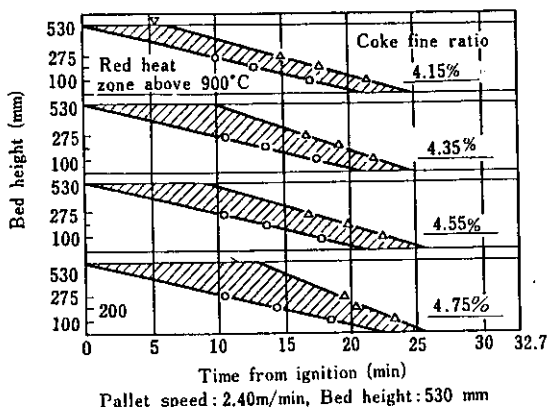


Fig. 9 Variation of Red-heat zone above 900°C in sinter bed with coke fine ratio in main ore

Fig. 10 は、以上の調査結果から保熱指数と SI との関係を示した散布図である。両者の間には、3・3項に述べた結果と同様な正相関係が認められる。

Fig. 11 (a) は、冷却指数と製品中 FeO との関係を示した散布図であるが、この場合、3・4項の調査結果と異なり、両者の間に相関係がみられなかった。Fig. 11 (b) は、層内最高温度の平均値と製品中 FeO との関係を示した散布図である。この場合には、両者の間に良好な正相関係が認めら

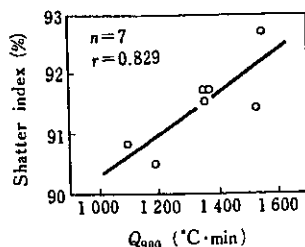


Fig. 10 Relation between shatter strength and Q value at 900°C

れた。なお、SI と層内最高温度との関係を調べたが、両者の間には相関係は認められなかった。

以上のように、製品中 FeO へのヒートパターンの影響について、前述の考えと異なり、冷却指数のみで評価することができない場合があることが判明した。すなわち、これらの結果は、冷却指数で評価できるのは冷却過程での再酸化反応量のみであって、ピーク温度は昇温過程での熱分解反応を含めた還元反応量として評価できるものであることを示唆していると考えられる。

5. 結 言

実機での焼結過程における温度変化（ヒートパターン）を正確に把握し、焼結鉱品質の管理をより定量的に行なうことを目的に、ヒートパターン測定装置の開発を、水島工場第4焼結機にて行なった。

開発を完了した測定装置の概要は以下の通りである。

(1) 測温部は、グレートバーと一体物の突起物を設けた保護金具とシース熱電対とからなる。

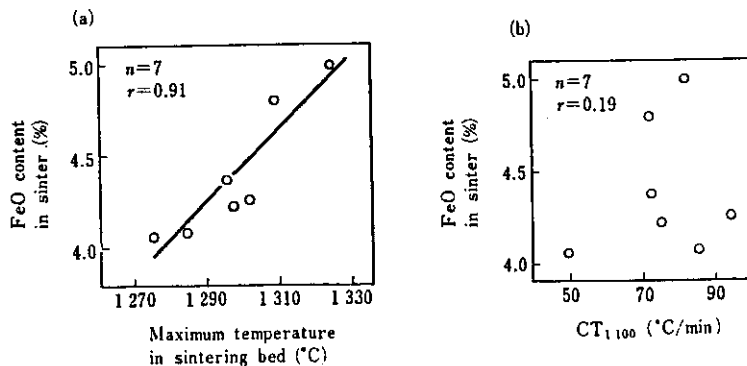


Fig. 11 Relation between FeO content in sinter and heat pattern indexes

(2) 測温信号は、テレメトリ装置を用いて移動パレットから計器室内に設置している記録計まで、無線送受信される。

(3) 本装置の耐久性は熱電対の機械的損傷によって制限されるが、平均25パターンの連続測定が可能である。

次に、本装置で得られるデータの解析を行なった結果は以下の通りである。

(1) ヒートパターンは、Korshikov et al の報告している指数関数式を用いることにより、精度良く近似できる。

(2) 保熱指数と SI との関係では、基準温度900°Cにおいて、冷却指数と製品中 FeO との関係では、基準温度 1100°C において最も高い正相関関係が認められる。

(3) 製品中 FeO へのヒートパターン指数の影響に

ついては、実験操作の結果、ピーク温度によってマグネタイトの生成量を評価できる可能性が判明した。

(4) パレット速度のヒートパターンへの影響について、Heat Front Speed およびピーク温度を含めたパターン形状への影響が生じるが、前者への影響が大である。

(5) コークス配合比のヒートパターンへの影響については、ピーク温度を含めたパターン形状への影響が大きい、Heat Front Speed への影響は殆んどない。

今後、更に長期間測定が可能な装置への改良、および信号処理からデータ解析までを自動化する設備への改善を行なうとともに、焼結鉱品質および操業因子とヒートパターンとの関係について操業実験によって定量化を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 北沢, 灰谷, 小竹: 日立造船技報, 36 (1975) 3, 169
- 2) 三本木, 西田: 鉄と鋼, 46 (1960) 12, 1527
- 3) G.V.Korshikov and V.A.Tsivilev : Izv. VUZov. Cher. Met. (1974) 10, 30
- 4) 浜田, 小坂橋, 岡部: 鉄と鋼, 58 (1972) 12, 1567
- 5) 吉永, 久保: 住友金属, 29 (1977) 4, 383