

© 1984 ISIJ

2重シース多対構造熱電対センサと耐火物 侵食診断技術の開発

技術報告

堀内 健文*・川手 剛雄*²・小西 正躬*³・永井 信幸*⁴

Development of Double Sheathed Multiple Thermocouples and Analyzing Method of Lining Erosion of Refractory Wall

Takefumi HORIUCHI, Yoshio KAWATE, Masami KONISHI and Nobuyuki NAGAI

Synopsis:

The lining erosion measuring system for blast furnace has been developed. This system consists of double sheathed multiple thermocouple (FMT Sensor : Fine Multi Thermo-Sensor) and computer software for the estimation of lining erosion of refractory wall (Trigger-Response method).

The sensor can simultaneously measure the temperature variations at a number of positions across the thickness of the lining. The Trigger-Response method can calculate the remaining thickness of lining by analyzing the time-delay occurring in the propagation of temperature variations in the lining. By analyzing the signals out of FMT-Sensors by the Trigger-Response method, the extent of erosion of the refractory lining is estimated within an error tolerance of less than 5%.

These techniques have been successfully systematized to on-line lining erosion monitoring system for blast furnace. Also, this paper describes the newly developed Ansatz Measuring Sensor of which principle is based on the application of FMT-Sensors. It is considered that signals out of FMT-Sensor may carry the useful data as operation guidance for blast furnace.

1. 緒 言

製鉄プロセスでは、高炉に代表されるように、耐火物で内張りされた数多くの高温反応炉がある。これらの耐火物は、苛酷な条件下で連続使用されるため、その侵食診断技術の開発は大きな課題である。従来、耐火物侵食量の計測解析は、炉体外表面付近に設置した熱電対、熱流計、赤外線カメラなどによつて熱的計測をおこない、耐火物の物性値、境界条件を仮定して伝熱工学的に計算していた¹⁾²⁾。しかし、計測センサの信頼性、耐久性に問題があるとともに、耐火物の物性値が経時的に変化すること、境界条件の設定が困難であることから解体時における実測値との対応が十分でないのが現状であつた。

筆者らは、これらの問題を解決するために、耐火壁内の温度分布変動を検知する耐火物侵食量計測センサ (FMT センサ) と、その出力の耐火物厚さ方向における伝播遅れから侵食量を解析するトリガーレスポンス法を開発した。さらに、このセンサを応用した高炉炉壁付着物厚さ計測センサ (FMD センサ) を開発し、耐火壁の侵食とともに付着物厚さの推移をも把握することを可

能にした。

これらの技術は、高炉耐火物の侵食量オンライン計測解析技術として神戸製鋼所の実炉において実用化をはかつてきた。本稿では、センサおよび解析手法の概要と耐火物侵食診断オンラインシステムの適用結果について述べる。

2. 耐火物侵食量計測センサ (2重シース多対構造熱電対センサ)

高炉の耐火物厚さを計測する上で、高炉が大型の熱的装置であることに注目し、温度を計測することが最も直接的かつ多種の情報を得られると考え、温度計測センサの開発を検討した。その結果、シース熱電対の一体化構造の特性と、取り扱いの容易さを発展拡張させ、耐火物内の温度分布を単一センサで測定しうる2重シース多対構造熱電対センサ (以下 FMT センサと称す) を開発した。さらに、FMT センサを応用して、測温点を炉内に突出させて炉壁付着物をも測定しうるセンサ (以下 FMD センサと称す) を開発した。以下にその構造、仕様と温度応答性、耐久性の要点について述べる。

昭和 55 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 58 年 11 月 14 日受付 (Received Nov. 14, 1983)

* (株)神戸製鋼所浅田研究所 (Asada Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

*² (株)神戸製鋼所浅田研究所 理博 (Asada Research Laboratory, Kobe Steel, Ltd.)

*³ (株)神戸製鋼所電子技術センター 工博 (Electronics Technology Center, Kobe Steel, Ltd.)

*⁴ (株)神戸製鋼所電子技術センター (Electronics Technology Center, Kobe Steel, Ltd., 53-3 Aza-Maruyama Gomo Nada-ku Kobe 657)

2.1 FMT センサと FMD センサの構造と仕様

FMT センサは、Fig. 1 に示したように、複数本のシース熱電対が長手方向に配置されるように平行に配列させ、これらの熱電対と同一の素材で作られたダミー体を各感温部の先端に接続した上で、絶縁耐火物で相互に非接触に保ちつつ外套シース管に収納したものである。

FMD センサは、Fig. 2 に示したように、FMT センサの各測温部の位置に円盤状金属フィン

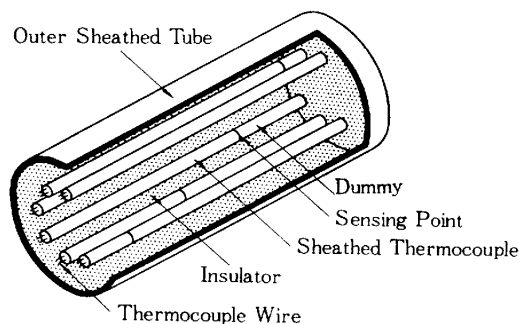


Fig. 1. Schema of the FMT sensor.

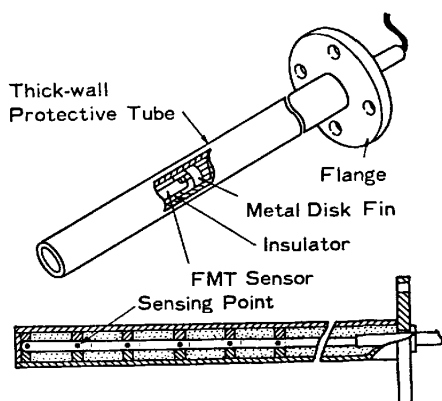


Fig. 2. Schema of the FMD sensor.

Table 1. Summary of the FMT (FMD) sensor specification.

Sensor	Items	Specification
FMT sensor	Component	(1) Thermoelement..... Sheathed Type K Thermocouple outer diameter of sheath 1.6 mm (2) Dummy element..... Same as above (3) Insulator..... Sintered Magnesia
	Shape	(1) Outer diameter..... 8.0~12.0 mm (2) Length..... 0.3~20 m (3) Number of temperature sensing points..... 2~8 (4) Sheath material..... 316 Stainless steel and Inconel (5) Accuracy of setting the sensing points..... less than ±1% of total length
	Performance	(1) Limits of error in measurement of temperature..... Conform to JISC 1 602-1 974 class 0.75 (2) Maximum use temperature..... 1 200°C
FMD sensor	Thermosensor	FMT sensor..... Same as above
	Protective tube	(1) Outer diameter..... 40~60 mm (2) Length..... 500~1 000 mm (3) Material..... heat resisting steel (ex. HK-40 etc.)
	Metal disk fin	(1) Material..... Same as above

ンサの各測温部の位置に円盤状金属フィンを設け、フィン相互間に絶縁耐火物を充填させて耐熱高強度材の厚肉金属保護管に内装したものである。円盤状フィンを設けることによつて、FMT センサの温度応答性を維持し、絶縁耐火物によつて、センサ長手方向の熱伝導を小さくして温度分布の測定精度を高める構造とした。

Table 1 に FMT センサと FMD センサの仕様を示した。

2.2 FMT センサと FMD センサの温度応答性

FMT センサは耐火物内の温度分布とその変動を計測する。したがつて、センサの重要な特性として温度応答性がある。この温度応答性を評価するために、FMT センサを各種外径の非接地型シース熱電対とともに、室温からオイルバス (油温 180°C) に挿入したときの応答時間 (時定数) を測定した。時定数は、供試材を油浴に挿入し油温の 63.2% の指示に到達する時間で定義した。

外径 8 mm FMT センサの測定結果は、外径 6.4 mm のシース熱電対と同程度の $\tau_{63.2} = 14$ s を得た。このことから FMT センサは、同一外径のシース熱電対と同程度の温度応答性を有し、耐火物内の温度変動を高精度に測定しうることを確認した。

一方、FMD センサは、円盤状金属フィンを介して測温することから、温度応答の遅れが大きくなることが予想される。そこで、設計、製作に先だち有限要素法による温度応答のシミュレーションを実施した。鉄皮、耐火物、付着物層からなる高炉壁に FMD センサを設置して、炉内温度 T_0 を時間 $t=0$ より、

$$T_0 = 1000 + 300 \cdot \sin(2\pi t),$$

$$t \leq 0 \text{ で } T_0 = 1000 (T_0: ^\circ\text{C}, t: \text{h}) \dots\dots (1)$$

で変化させたときに各測温点の温度変化を求め、炉内に突出した測温点の応答遅れが 5 min 以下になることを確認した³⁾。この結果を検証するために、オイルバス (180°C) での温度応答を測定し、応答時間 $\tau_{63.2} = 340$ s を得た。

さらに、実炉においても高炉シャフト部に FMD センサと外径 8 mm のシース熱電対を平行に設置し、両者の温度応答遅れを 5 min 周期の採取データから求めた結果、両者は同位相であることを確認した。したがつて、実用上十分な温度応答性を有していると考えられる。

2.3 FMT センサと FMD センサの耐久性

FMT センサは、タイプKの熱電対を使用していることから、最高使用温度は 1 200°C であり、1 000°C 以上で長時間使用すると熱起電力は劣化する。しかし、後述する耐火物厚さの解析手法では温度信号の変動だけを用い

ることから、FMT センサの熱起電力の劣化は直接問題とはならない。むしろ、断線などによる出力の消失が重要な問題となる。筆者らは、加古川製鉄所第1高炉の流銑ピット側壁に FMT センサを設置し、耐火物の侵食とともに FMT センサが溶損してゆく状況で出力を観察した結果、FMT センサは、測温点の熱接点が溶損しても、出力が現れることを確認した⁴⁾。これは、FMT センサを構成しているシース熱電対の素線間距離が 0.4 mm と極めて接近していることから、シース熱電対が溶損しても順次、熱接点を形成しうるものと考えられる。

FMD センサでは、炉内に測温点を突出させることから、炉内の高温下で炉内装入物(コークス/鉍石)の降下に耐える強度が要求される。このために、厚肉保護管には高温強度に優れた材料の選定が重要で、筆者らは、HK 40 の遠心鑄造管を採用した。FMD センサの耐久性を調査するために、神戸製鉄所第2高炉シャフト中部でセンサ先端を築炉時の稼働面れんが先端に揃えて設置し、1981年4月より1982年5月まで13カ月間のセンサ耐久性試験を実施した。この間、FMD センサは平均 800°C の高温にさらされるとともに、れんがの侵食に従ってセンサが炉内に突出したが、その外観に異常は認められず、また、測温点の検定試験でも JIS 0.75 級の起電力値内で劣化は認められなかった⁵⁾。

さらに、この FMT および FMD センサの設置は築炉時のみならず、休風日でも設置および取替えが容易であり、操業サイドのニーズに応じたセンサ施工ができる。

3. トリガーレスポンス法

高炉炉体の耐火物侵食量推定方法としては、従来から、耐火物の深さ方向に埋設された複数個の測温センサの測温値を利用した1次元法が用いられている。ところが、複数個といつても、鉄皮近傍に限られ、これらの測温値を用いた内壁の推定は、大幅な外挿となるため、わずかの測温誤差により内壁推定位置が大きく移動し、精度が低下する。

また、この方法では、内壁表面温度を仮定する必要があるが、炉体部内壁ではガス吹き抜けや付着物などにより内壁温度が時々刻々変化するため、推定結果には誤差がさげられない。さらに、計算に用いる耐火物物性値が経時変化したり、脆化層が発生すると、推定結果の精度低下が起きていた。

これに対し、トリガーレスポンス法によれば、以上に述べた従来法の問題点を解決することができる。

3.1 トリガーレスポンス法の原理

炉内熱状況を表す信号(トリガー信号)が変化すると、耐火物内の熱伝導により、耐火物内の深さに応じた一定のおくれ時間を持つて耐火物温度がトリガー信号に相似の形で時々刻々変化する。この変化の様子は、非定常熱伝導方程式で記述されるが、トリガーレスポンス法では、このいわばサーマルウェーブ(熱波)の伝播時間が耐火物深さに応じて変化する性質を利用する。

(1) 耐火物内の熱波伝播についての考察

トリガー信号は、炉内の熱的変動を表すものであるから、周期関数と仮定する。耐火物温度変動を $\Delta\theta$ とし、耐火物の熱伝導率を λ 、密度を ρ 、比熱を C とし、炉体部熱伝導をつぎに示す1次元熱伝導方程式でとり扱う。

$$\frac{\partial \Delta\theta}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 \Delta\theta}{\partial X^2} \left(a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C} \right) \dots\dots\dots (2)$$

すなわち、半無限体の熱伝導を考え、境界条件としては、内壁表面温度が周期的に $A \cdot \cos \omega t$ で変化するものとする。この場合、よく知られているように(2)式の解は、

$$\Delta\theta = A \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot X\right) \cdot \cos\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot X\right) \dots\dots\dots (3)$$

で与えられる⁶⁾。(3)式からわかるように、 $\Delta\theta$ の振幅変化は

$$\Delta\theta_m = A \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot X\right) \dots\dots\dots (4)$$

となり、内壁からの距離 X が増加するにつれて振幅が減少する。また、変動が最大となる時刻を見ると、(3)式から、

$$t_{\max}(X) = \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{\omega}{2a}} \cdot X \dots\dots\dots (5)$$

である。したがって、熱波の伝播時間は(5)式の t_{\max} であり、耐火物の温度伝導度の $-\frac{1}{2}$ 乗と内壁からの距離に比例する。ところで、実際には、物性値 a が、温度すなわち距離の関数であることから、伝播時間は距離の1次式ではなく、より高次の式で表されることになる。

さらに、壁厚方向とこれに垂直な方向の熱伝導があるため、熱波伝播時間と距離の関係式として筆者らは実データにより(5)式を補正して用いた。

(2) 耐火物物性値変化の影響

実炉では、耐火物の脆化、目地開きなどのため、耐火物物性値は一定ではない。前項の解析的取り扱い、温度伝導度 a が一定でない場合は困難であるため、以下では数値シミュレーションにより物性値の影響を検討し

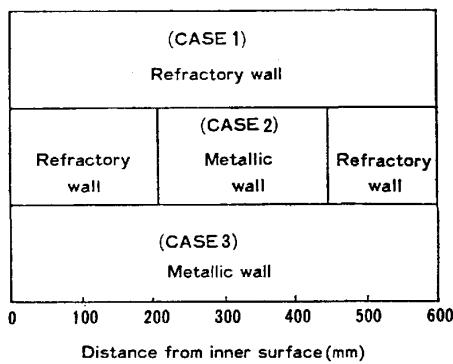
た. 計算例では, Fig. 3-(a) に示す 3 ケースを検討している. すなわち, ケース 1 は物性値が通常の耐火物に近い場合, ケース 2 は耐火物の間にメタル状のものが介在する場合, ケース 3 は物性値がメタルに近い場合である.

計算結果は, 熱波のピークを連ねたおくれ時間-位置曲線の形で Fig. 3-(b) に示した. この曲線の勾配は, 耐火物物性値に逆比例し, 内壁からの距離 (位置) の 2 乗に比例する. さらに, 内部で物性値が急激に変化しているケース 2 では, その変化位置で変曲点 (Fig. 3-(b) 図中の①, ②) が生ずる. これは, 両者の熱伝導率の違いに起因して ($\lambda_{\text{Metallic}} > \lambda_{\text{refractory}}$), メタル層では熱波の伝播時間が短くなるために変曲点が生ずるものである. しかし, いずれのケースでも, 内壁位置ではおくれ時間は 0 である. すなわち, 测温データの解析によりこの曲線が得られれば, おくれ時間 0 の位置から内壁を推定できると考えられる.

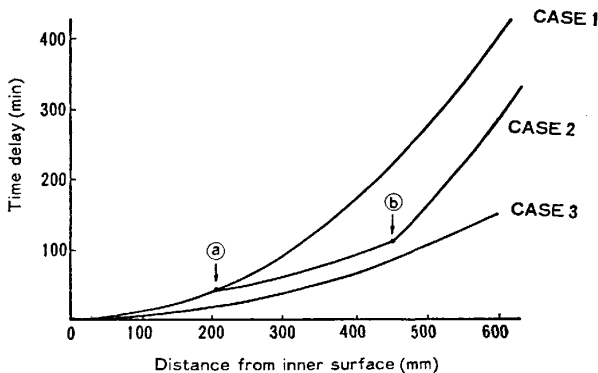
3.2 耐火物侵食量推定法

(1) トリガーレスポンス法による推定原理

耐火物の深さ方向 (内壁からの距離 $X_i, i=1 \sim n$) に FMT センサが設置されており, 深さ方向の複数点で耐火物温度 ($\theta_i, i=1 \sim n$) が計測されていると仮定する.



(a) Composition of refractory wall in case study



(b) Computed results of heat transfer

Fig. 3. Effect of heat conductivity of refractory material on heat transfer.

トリガー信号の変化が, 各测温点で計測されるまでのおくれ時間を $\tau_i (i=1 \sim n)$ とすると, 前節の説明のように, 点 $(X_i, \tau_i), i=1 \sim n$ は熱波の伝播特性を表すおくれ時間-位置曲線上にあり, 内壁表面位置においておくれ時間が 0 である. 実際に計測できる点は有限個であるから, これらの点を内外挿し, 上記曲線を求めればよい.

さて, 各测温位置 (X_i) はセンサ寸法から既知であり, 上記の曲線を求めるには, トリガー信号 $T_r(t)$ と各测温点の温度 (レスポンス信号) $\theta_i(t)$ 間のおくれ時間 τ_i を知る必要がある. T_r と θ_i 間のおくれ時間は, その相互相関係数が最大となる時間として計算できる.

(2) トリガーレスポンス法の計算機処理方法

トリガーレスポンス法の計算手順を以下に示す.

① トリガー信号とレスポンス信号の相互相関係数の計算

トリガー信号とレスポンス信号は, Δt のデータサンプリング時間間隔ごとに計算機にとり込まれる. これら 2 信号の相互相関係数 $\phi(t)$ は, 計算機の中で次式により計算する.

$$\phi(j \cdot \Delta t) = \frac{1}{m-j} \sum_{i=1}^{m-j} \frac{T_r(i \cdot \Delta t) \cdot \theta(i+j \cdot \Delta t)}{\sigma_{T_r(j)} \cdot \sigma_{\theta(j)}} \dots \dots \dots (6)$$

ただし, m はデータサンプリングの総数, $\sigma_{T_r}, \sigma_{\theta}$ は T_r, θ のデータ変動の分散を表す.

② おくれ時間の計算

トリガー信号とレスポンス信号の相互相関係数 ϕ が最大値をとる時間 $t=\tau$ の計算は, 2 段階で行う. まず, (6)式で求めた $\phi(j \cdot \Delta t)$ が最大となる $j=j_0$ を計算する. このままでは離散化の誤差があるので, つぎに, その前後の ϕ 値を参考に内挿によりピーク位置を求める. この計算を各测温点について行う.

③ おくれ時間-位置曲線の計算

前項の処理により, 各测温点ごとのおくれ時間が計算できたので, 全测温点のデータ (位置, おくれ時間) に最もフィットする非線形関数を当てはめる.

④ 内壁位置の計算

内壁位置は, おくれ時間が 0 となる位置であるから, 前項で求めた非線形関数 $\tau=f(x)$ において $\tau=0$ となる X の値を計算する.

(3) 計算機処理上の制約条件についての考察

トリガーレスポンス法の実施に当たって, データサンプリング時間 Δt , サンプル数 m , 計算上の最大おくれ時間 τ_{max} の決定は, システム設計上の重要項目であ

る。トリガーレスポンス法では、温度の変動情報を利用するため、従来法の問題点は解決できる反面、これらの各種設定値が制約条件を満たさぬ場合には、その性能が劣化する。以下で、制約条件とこの条件下でトリガーレスポンス法を適用した場合の内壁推定の分解能について考察する。

トリガー信号の変動周波数を ω とすると、サンプリング定理や相関解析の理論から、つぎの条件が満たされることが望ましいとされている⁶⁾。

$$\frac{5}{m} \cdot \tau_{\max} \leq \Delta t \leq \frac{\pi}{\omega} \quad \dots\dots\dots (7)$$

すなわち、(7)式からつぎのことがわかる。

① データサンプル総数 m は、(7)式を考慮して、サンプリング時間 Δt に見合った値とする必要がある。

② トリガー信号の変動周波数 ω が小さくなると、(7)式が成立せず、侵食量推定精度は悪くなる。

つぎに、内壁推定の分解能について検討する。おくれ時間-位置曲線をつぎの2次関数で近似する。

$$\tau = b_0 + b_1 \cdot X + b_2 \cdot X^2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

(8)式の変分を取ると、次式となる。

$$\Delta \tau = (b_1 + 2b_2 \cdot X) \cdot \Delta X \quad \dots\dots\dots (9)$$

おくれ時間計算の分解能は経験的に、 Δt の1/5程度の細かさであり、これを考慮すると、内壁位置推定の分解能は(9)式より、次式で与えられる。

$$\Delta X \cong \Delta t / \{5 \cdot (b_1 + 2b_2 \cdot X)\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

3.3 トリガーレスポンス法のフィールドテスト結果

トリガーレスポンス法の確性のため、加古川製鉄所第2高炉炉壁部にて採取したFMTセンサによるデータを解析した。Fig. 4にテスト結果を示す。左半分は計算手順をフローの形で示し、右半分は対応する実データの解析結果を示す。おくれ時間の計算誤差のため、各测温位置のデータは一様な曲線上になく、これらの点に最もフィットする2次曲線をあてはめ、その0点から内壁位置を推定した。Fig. 4の例では、侵食量は約100mmであるが、同時に実施したボーリング結果と5%以内の誤差で一致する結果を得て、本方法の有効性を確認した。

4. FMT センサとトリガーレスポンス法による耐火物侵食診断オンラインシステム

FMT センサとトリガーレスポンス法から成る炉壁耐火物侵食診断システムは、神戸製鉄所第1高炉シャフト下部に適用して、19カ月間にわたるフィールドテストの結果、本技術の実用性を確認した⁷⁾。ひきつづいて、加古川製鉄所第2高炉において、シャフト下部および炉

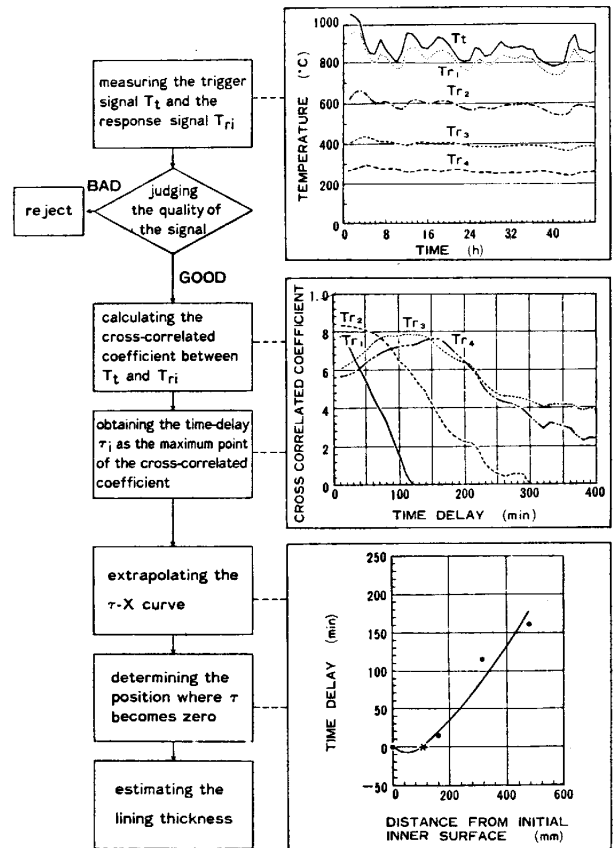


Fig. 4. Analytical procedure for estimating the lining thickness by the Trigger Response Method.

腹部に4方向2段、計8本のFMTセンサを設置してオンラインシステム化を検討し、その問題点を抽出把握して、現在、神戸製鉄所第3高炉(3次:1983年4月火入れ⁸⁾)においてオンライン耐火物侵食診断システムとして実用化している⁹⁾。

神戸第3高炉において、FMTセンサはFig. 5に示したように、炉壁から炉底各部に計58本が設置されている。

炉壁には、シャフト部から炉腹、朝顔部にかけて、4方向7段、計28本の6点式FMTセンサを設置し、4方向でトリガーレスポンス法による残存れんが厚みの管理を、プロセスコンピュータにより行っている。なお、火入れ以降、炉壁各部の耐火物侵食推移を時々刻々把握するため、6点式FMTセンサの最先端测温点は、築炉時の稼働面れんが先端にセットし、これで火入れ初期のトリガー信号を得ることとした。

プロセスコンピュータを用いてトリガーレスポンス法を適用するためには、前章でのべた基本プログラムに2つの診断機能を追加している。1つは、解析起動時に入力されるトリガー信号が、トリガーレスポンス法に適し

た波形か否かを診断する機能で、1例として、

- ① センサの劣化診断、および測温ノイズ発生の有無
- ② 波形信号の良否判定

などを行っている。他の1つは、各測温位置とおくれ時間の近似曲線から求めた侵食量が、妥当か否かを診断する機能で、入力信号の波形診断で捕捉できなかった不良信号を解析結果の妥当性チェックから判別している。

Fig. 6 に、プロセスコンピュータで解析した炉壁耐火物侵食診断結果の CRT 表示例を示した。この図は、

シャフト中部から羽口までの 1/4 縦断面を模式化したもので、シャフト中部から朝顔下段まで、鉄皮外面から炉内までの原寸 800 mm に対して、解析時のれんが稼動面を東西南北を区別して同時に表示し、侵食量の監視を行っている。

この侵食診断結果については、休風時のボーリング結果と良い一致を示していることを確認している。

5. FMD センサによる付着物厚さ計測解析システム

FMD センサによる炉壁の付着物厚さ計測解析システムは、神戸製鉄所第3高炉(2次)シャフト部におけるフィールドテストを経て、厚肉保護管材料の選定に関する知見を得て、同所第2高炉(1981年2月火入れ、現在休止中)において、付着物厚さの推移管理に実用化した。すなわち、シャフト中~下部の2段に各々周方向にわたって8組、2組の計10組を1981年4月に設置し、炉吹き止めの1983年3月までの約2年間にわたって、付着物層を含む耐火壁厚さをトリガーレスポンス法で解析して、推移管理に活用した。Fig. 7 に1例として、シャフト中部東のFMD センサにより、付着物層を含む耐火壁厚さを解析した結果の経時変化を、1981年5月から1982年7月までの約14カ月にわたって示した。図中の棒グラフは、約1カ月ごとの休風時にボーリング孔より金属スケールで測定した結果を示した。両者の対応関係は、測定位置の違い、付着物層の不安定さ、高炉装入物の炉壁近傍での滞留などの問題点を考慮する

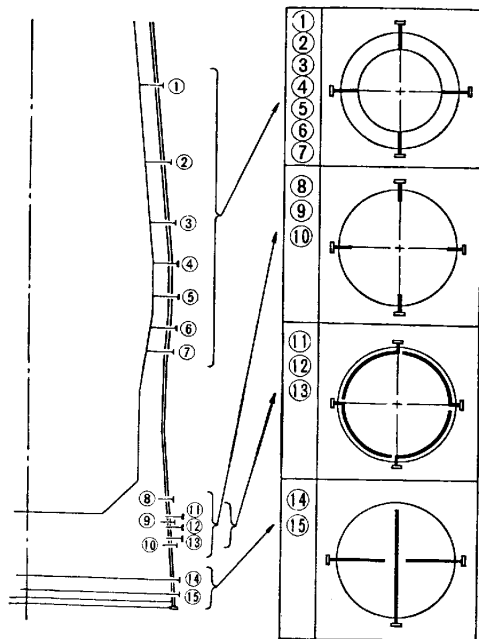


Fig. 5. Installation of the FMD sensors in the lining of Kobe No. 3 BF (3rd).

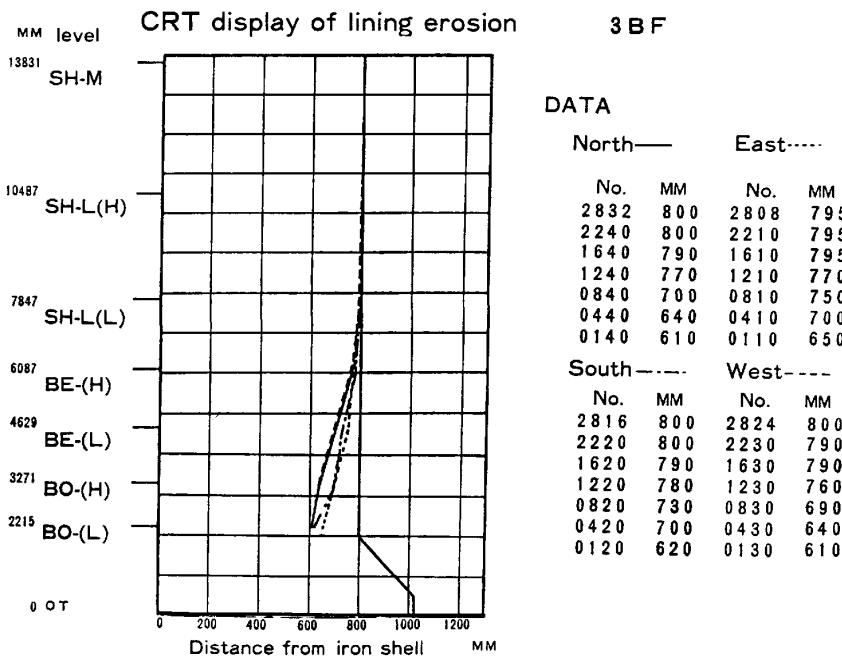


Fig. 6. Analytical result of lining erosion at the furnace-wall of Kobe No. 3 BF (3rd) by the Trigger Response Method. (CRT display)

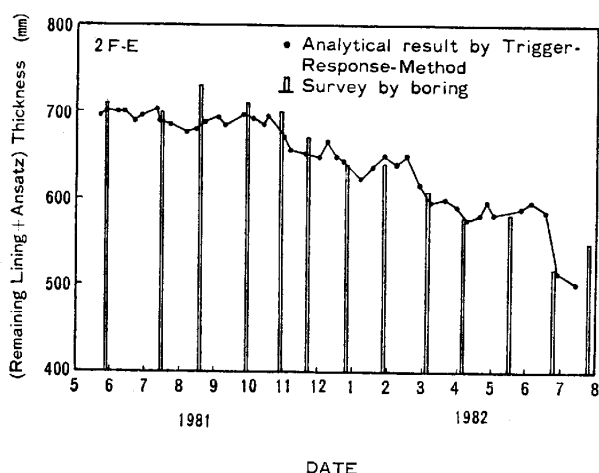


Fig. 7. Sequential changes of remaining lining (included Ansatz) thickness measured by the FMD sensor in Kobe No. 2 BF.

と良好と考えられる。

耐火物厚さを計測するための FMT センサ、炉壁付着物厚さを計測するための FMD センサの出力は、耐火物厚さ方向の温度分布を計測すると同時に、炉内稼働面側の測温点では、炉内状況を反映した温度情報が得られる。この温度情報を単に炉体管理だけではなく、操業管理に活用する多機能センサとしても用途開発を進めている。これは、単なるセンサ技術としてだけではなく、計算機処理用各種ソフト技術を組み合わせて、センサをインテリジェント化することで検討を進めている。

6. 結 言

2重シース多対構造熱電対の FMT センサおよびこれを応用した FMD センサと、これらのセンサによって得られる信号から耐火物の侵食量を解析するトリガースポンス法とについて述べ、オンライン侵食診断システムの実炉への適用例について報告した。

FMT (FMD) センサと、トリガースポンス法の特長を整理すると以下ようになる。

(1) FMT (FMD) センサの特長

- (a) 耐火物壁内の温度分布をコンパクトな単一セン

サで測定できることから、施工性が向上する。

(b) 長手方向の、どの断面でも熱的に均一な状態が維持され、温度分布の計測結果の信頼性が高い。

(c) 2重シース構造で、かつ絶縁耐火物の充填率が高く耐久性に富んでいる。

(2) トリガースポンス法の特長

(a) 解析に測温信号の変動のみを利用するため、センサの測温精度の劣化は結果に影響しない。

(b) 物性値を用いた伝熱計算によらないので、耐火物が劣化、変質しても解析結果に影響されない。

(c) 伝熱計算によらないので、耐火壁内表面温度の仮定が不要であり解析結果の信頼性が高い。

現在、センサ技術と解析技術とのバランスがとれた計測技術の開発に重点をおいて、FMT (FMD) センサの多機能化を進め、高炉、転炉などへの適用技術の開発を進めている。この詳細については次の機会でご報告したい。

最後に、FMT (FMD) センサとトリガースポンス法による高炉耐火物侵食診断システムの実炉への適用に際して御尽力いただいた、(株)神戸製鋼所神戸製鉄所、高野成氏、加古川製鉄所、下村興治氏、および関係各位に対し深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 渋谷悌二: 鉄と鋼, 67 (1981), A109
- 2) 田村節夫: 鉄と鋼, 68 (1982), p. 2108
- 3) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 81 回計測部会 (1982 年 7 月) 新日本製鉄(株) (私信)
- 4) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 75 回計測部会 (1980 年 7 月) 新日本製鉄(株) (私信)
- 5) 川下研介: 熱伝導論 (1975) [生産技術センター]
- 6) 山川新二: システムと制御, 17 (1973), p. 287
- 7) Y. KAWATE, N. NAGAI, M. KONISHI, Y. YOKOUE and T. HORIUCHI: Temperature its Measurement and Control in Science and Industry, 5 (1982), p. 1043
- 8) 西田 功, 矢場田武, 蓼原 薫, 田丸博人, 竹増 貞男, 西村康明: 神戸製鋼技報, 33 (1983) 3, p. 99
- 9) 日本鉄鋼協会共同研究会: 第 85 回計測部会 (1983 年 11 月) (株)神戸製鋼所 (私信)