

討 6

高炉耐火物の侵食量診断法

株式会社 神戸製鋼所 浅田研究所 〇理博 川手剛雄 機械研究所 園井英一
 開発企画部 横江寛治 神戸製鉄所 高野 成
 加古川製鉄所 下村興治

1. 緒 言

高炉の大形化、高圧化によって高炉耐火物は荷酷な条件で使用されるようになり、炉体寿命の延長をはかる技術の開発が重要な課題となった。もし、高炉耐火物の侵食量を継続的に計測解析することができるならば、その結果を炉体管理、安定操業、炉構造の問題の解明に活用し、炉体寿命向上の有力な技術として生かすことができる。このことから、高炉耐火物の侵食量を計測解析する技術の開発がおこなわれ、種々の方法が報告されてきた。しかし、信頼性が高く、かつオンライン的に計測解析する技術はいまだ完成されたとはいえない。

当社では、耐火物侵食量計測センサを開発し、炉体部（シャフト部、炉腹部、朝顔部）については耐火物厚さ方向の温度信号の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、また炉底部については有限要素法の技術を応用して2次元の侵食プロフィールを解析するプロフィール係数法を開発して高炉耐火物の侵食量のオンライン計測解析技術として実炉への適用を進めてきた。以下にその概要を報告する。

2. 高炉炉体部（シャフト部、炉腹部、朝顔部）の耐火物侵食量の計測解析

従来、炉体部耐火壁の侵食状況は炉体外表面近傍に設置した熱電対や熱流計で熱的計測をおこない、耐火物の物性値（熱伝導率など）、境界条件（耐火壁の内表面温度）を仮定して伝熱工学的に解析されてきた。しかし、物性値が経時的に変化することおよび炉体部では内壁表面温度が変動することから信頼性の高い侵食量の推定は困難であった。当社では、これらの問題点を解決するために、耐火物厚さ方向における温度変動の伝播遅れから残存耐火物の厚さを検知する耐火物侵食量計測センサとその解析法（トリガーレスポンス法）を開発し、高炉炉体部へ適用して良好な結果を得た。

2.1 耐火物侵食量計測センサ

耐火物侵食量計測センサは、耐火物厚さ方向の温度分布の変化を単一センサで測定しうるように考案したものである。

図1に耐火物侵食量計測センサの概念図を示す。

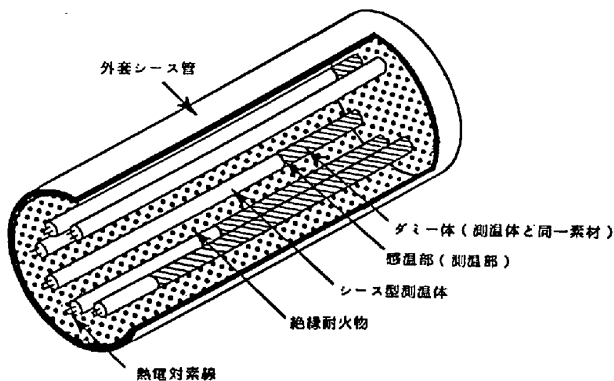


図1 耐火物侵食量計測センサ概念図

表1 耐火物侵食量計測センサの仕様

項 目	仕 様	
構成部材	(1) 測 温 体	シース型熱電対
	(2) 外套シース管	SUS
	(3) 絶 縁 物	MgO
センサ形状	(1) センサ外径	6.4 ~ 20mm ϕ
	(2) センサ全長	0.5 ~ 40 m
	(3) 測 温 体 数	2 ~ 12本
	(4) 測温部設定精度	センサ全長の $\pm 1.0\%$ 以下
性能	(1) 測 温 精 度	JIS C-1602-1974 0.75級に適合
	(2) 最小曲げ半径	20R
	(3) 軸方向平均熱伝導率	$\lambda = 1.4 \text{ Kcal/mh}^\circ\text{C}$ 測温体数 6本 at 1000°C

当センサは、複数本のシース型熱電対の感温部が長手方向に配置されるように配列し、絶縁耐火物で相互に非接触に保ちつつ外套シース管内に収納したものである。センサの断面はいずれの位置においても幾何学的に均一な状態をダミー体の構成によって維持されており、各測温点での熱的条件が均一となっている。表1に耐火物侵食量計測センサの仕様を示す。当センサは、測温点間の長手方向の相対的位置関係を正確に設定できること、センサの平均熱伝導率が耐火レンガと同程度であること、二重シース構造で耐雰囲気性が高いことなどの特長をもっている。

2.2 トリガーレスポンス法

炉内の熱的状況を表わす信号（トリガー信号と呼ぶ。例えば炉内温度など。）が変化すると、耐火物壁の各位置では耐火物壁の内表面からの距離に比例した一定の遅れ時間ののちに、トリガー信号と相似の温度変化（レスポンス信号と呼ぶ。）が生じる。この温度変化の様子

は非定常熱伝導方程式を解くことによって知ることができる。これは固体内を伝播する音波と同様の現象であり、熱波の伝播とみることができる。トリガーレスポンス法は、炉内で発生した熱的变化（トリガー信号）が熱波として耐火物壁を伝播するとき、耐火物壁の内表面では伝播時間（トリガー信号に対するレスポンス信号の遅れ時間）が0であることを利用して耐火物壁の内表面位置－耐火物厚さ－を求めてその侵食量を解析する手法である。すなわち、耐火物壁の厚さ方向に耐火物侵食量計測センサを設置してトリガー信号と壁内の複数位置でのレスポンス信号を同時に測定し、トリガー信号とレスポンス信号の相互相関係数の解析によって各位置における遅れ時間を求め、遅れ時間が0となる位置を外挿して耐火物壁の内表面位置を得る。図2にトリガーレスポンス法の解析手順を示す。

なお、トリガーレスポンス法による侵食量推定の分解能 ΔX および精度は理論解析的にはそれぞれ $\Delta X \approx 6 \text{ mm}$ 、 $\varepsilon \approx 8 \text{ mm}$ で、

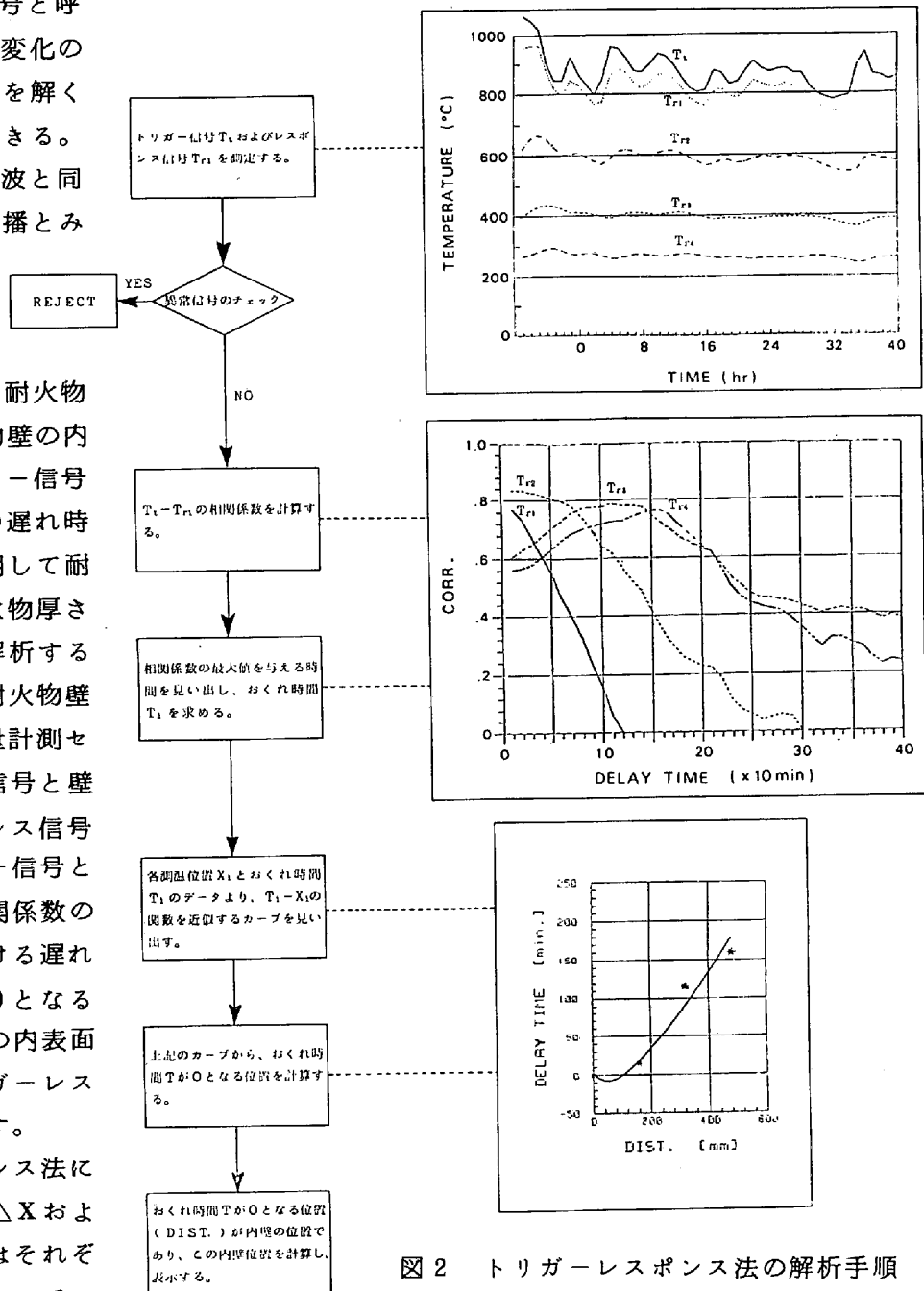


図2 トリガーレスポンス法の解析手順

実験的にも $\epsilon \approx 10mm$ を得ており、高炉耐火物の侵食量を計測解析するには実用上十分な精度であることを把握している。

2.3 実炉への適用

耐火物侵食量計測センサおよびトリガーレスポンス法による耐火物侵食量計測解析技術を当社神戸製鉄所第1高炉シャフト下部に適用し、19ヶ月間のフィールド試験を実施した。当センサを同じ高さ位置 (GL+17.000、S-W方向) で周方向に1m離して2組設置し、耐火レンガの残存厚さを計測解析した。耐火レンガ残存厚さの19ヶ月間にわたる計測解析結果を図3に示す。図3にはフィールド試験開始時(1978年8月)および終了時(1980年3月)にボーリングによって測定した残存レンガ厚さを同時に示している。トリガーレスポンス法による解析結果とボーリングによる測定結果は良好な一致を示し、本技術の実用性が確認された。以上の結果をふまえて、当社各高炉へ耐火物侵食診断システムとして順次適用を進めている。

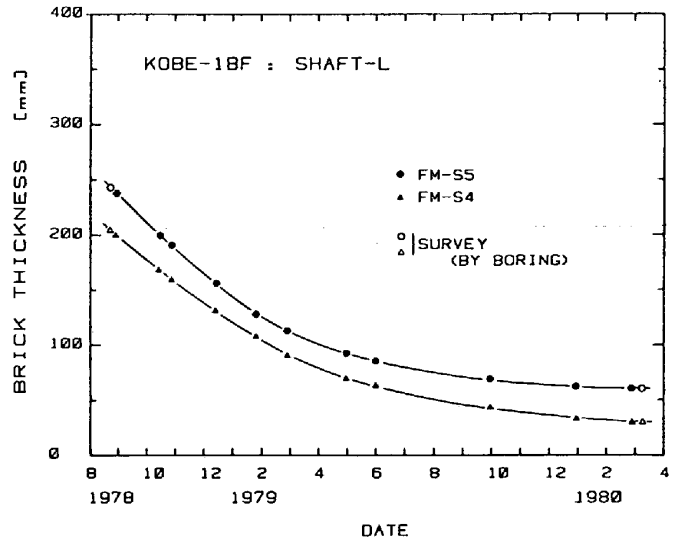


図3 残存レンガ厚さの経時変化

3. 高炉炉底部の耐火物侵食量の計測解析

高炉炉底部耐火物の侵食は炉底破損の重大事故につながることから炉底部耐火物の侵食プロフィールを推定することは極めて重要である。従来、鉄皮近傍の温度分布や熱流分布から内部の温度分布を推測し、溶銑の凝固温度 $1140^{\circ}C$ の等温線を求めて侵食プロフィールを推定する方法が用いられてきた。しかし、炉底部は炉体部と異なり、コーナ部が存在することから一次元的な伝熱解析を適用することは困難であり、解体調査との対応が十分であるとはいえない。固体内の二次的な温度分布を計算する一般的な方法として有限要素法が知られている。しかし、有限要素法では境界条件を入力データとして与えることが前提となっているために高炉炉底の侵食ラインを推定する場合には、境界の形状、温度などが未知であることから適用が困難である。また仮に、有限要素法を適用したとしても計算容量、計算時間が大きくオンライン解析には問題がある。当社ではこれらの点を解決する方法としてプロフィール係数法を開発し、炉底侵食プロフィールのオンライン解析を可能にした。

3.1 プロフィール係数法

プロフィール係数法では炉底コーナ部上方の炉芯寄りの位置に原点Pを定めて、コーナ部の侵食プロフィール(溶銑の凝固温度 $1140^{\circ}C$ で定義)を極座標 (R_i, θ_i) で表示する。但し、 θ_i は等分割とする。この侵食点 R_i ($i=1, 2, \dots, N$) が炉底耐火物壁に設置した温度計の測温値 T_j ($j=1, 2, \dots, M$) から直接計算できる関係式

$$R_i = f_i (T_1, T_2, \dots, T_M), \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

が求めれば侵食プロフィールのオンライン解析が可能となる。(1)式右辺をテーラー展開して一次の項までで R_i を近似すると

$$R_i = f_i(T_{10}, T_{20}, \dots, T_{M0}) + \sum_{j=1}^M \left(\left(\frac{\partial f_i}{\partial T_j} \right)_{T_j = T_{j0}} \cdot (T_j - T_{j0}) \right) \quad (2)$$

となる。ここで、 $T_{10}, T_{20}, \dots, T_{M0}$ は定数で、特定の時点における測温値に対応する $f_i(T_{10}, T_{20}, \dots, T_{M0})$ は測温点の値を境界条件に課して有限要素解を満足する解を求める関接法によって得られる。したがって、オフラインで $f_i(T_{10}, T_{20}, \dots, T_{M0})$ および $(\partial f_i / \partial T_j)_{T_j = T_{j0}}$ (これらをプロフィール係数と呼ぶ。) を計算しておけば、 $(T_j - T_{j0})$ の二次以上の項が無視できる範囲では (2) 式を用いて炉底部の侵食プロフィールを求めることができる。なお、侵食があらかじめ定めた距離、すなわち $(T_j - T_{j0})$ の二次以上の項が無視出来る範囲を越えてくると、定数 $T_{10}, T_{20}, \dots, T_{M0}$ を新しい測温値に変更し、オフラインでプロフィール係数を再計算し、オンライン解析で用いる係数表を更新することによって常に一定の精度で侵食プロフィールのオンライン解析が可能である。

3.2 実炉への適用

当社加古川製鉄所第1高炉の吹き下しに際して、既設の測温点を用いてプロフィール係数法による解析をおこない解体調査との対比を実施した。その結果の一例を図4に示す。プロフィール係数法による侵食プロフィール(1140°Cライン)と解体調査による鉄侵入ラインとはR8段でずれがみられる。しかし、測温点の位置がプロフィール係数法の解析に最適の配置でない既設測温点を用いていることを考慮すると2つの侵食プロフィールは比較的良好一致を得ていると考えられる。

現在、プロフィール係数法の解析に適した測温点の配置を検討し、当社加古川製鉄所第2高炉においてプロフィール係数法による炉底侵食プロフィールの推定をオンラインで実施している。図5にCRT表示の一例を示す。

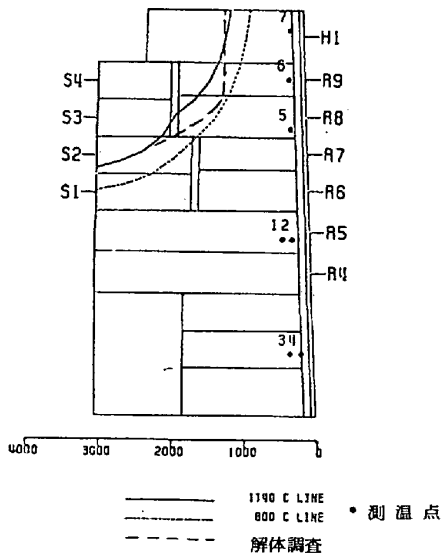


図4 炉底侵食プロフィール一例 (加古川1BF)

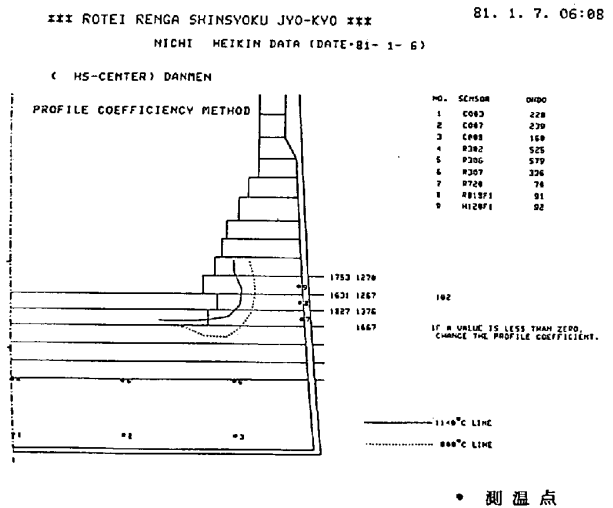


図5 炉底侵食プロフィール一例 (加古川2BF, CRT表示)

4. 結言

高炉耐火物の侵食量診断法として、耐火物侵食量計測センサを開発し、炉体部についてはトリガースポンス法、炉底部についてはプロフィール係数法によるオンライン解析手法を開発した。これらの技術を実炉に適用して実用性を確認し、現在、当社各高炉に高炉耐火物侵食診断システムとして順次実用化を進めている。