

# 爐壁の温度傳導度を實測する一方法

(昭和 26 年 4 月本會講演大會にて講演)

中 村 元 和\*

## AN APPROXIMATE MEASUREMENT OF THE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF FURNACE REFRACTORIES

*Motokazu Nakamura*

### Synopsis:

It is difficult to measure the heat transfer coefficient of the refractory materials. Many measuring methods have been described and some of them are as follows:—

1. Periodically repeated heat sources are used.
2. Thermal conductivity, specific gravity and specific heat capacity are separately measured.

But we felt difficulties in applying these methods to actual furnaces, so the author introduced the method calculating the heat transfer coefficient approximately by a single heating cycle.

If one face of a plate which expands infinitely in both sides is heated the heat will transfer to the other face. In this case if one heats the plane not continuously but with a definite interval and then stops heating, so the temperature wave will transfer to the other as impulse wave. The temperature of the other face is written approximately such as,

$$\theta_s = A_1 \varepsilon^{-\alpha_1 t} - A_2 \varepsilon^{-\alpha_2 t}$$

By measuring the temperature change concerning time, it is possible to calculate the mean value of heat transfer coefficient of the refractory materials.

### I. 緒 言

熱傳導に關する計算に當り、最も困る事の一つは温度傳導度 ( $k = K/c\rho$ ) をいくらに採つて良いかと言う點である。但し  $K$  は熱傳導率、 $\rho$  は比重、 $c$  は比熱である。文献を探せば、 $K, c, \rho$  が各別々に出ているから、大體の見當をつける事が出来る。然し其の値にかなり大い幅があり、どちら邊を使用したら良いか當惑する事が多い。先づ第一に同一物質に就て  $K, c, \rho$  を同時に實測した例が少く、止むを得ず似た材質の値をよせ集めて使用するため、 $k$  が廣い範圍にわたり散布してはつきり定らない。第二に此の三つは温度の函數だから、當然温度を考えなければならぬ。然るに爐壁の平均温度をいくらに採つて良いか不明な事が多く、又温度を推定出来た時でも、其の温度に適合した  $K, c, \rho$  の値が文献から見出されぬ事が多い。此の際採るべき方法としては、温度傳導度に種々の値を與えて爐壁の温度分布を計算し、實際に最も近いものを探るのも一方法である。

温度傳導度の測定法を、手近の文献により調べると次の二種が良く知られている。

(1) 熱源温度を周期的に變化して、熱的定常状態になつた時測定する方法。

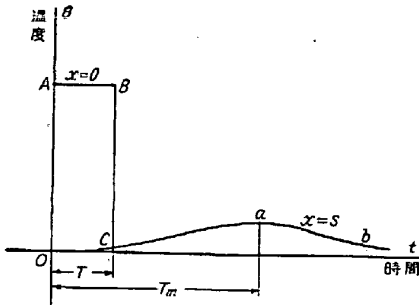
(2)  $K, c, \rho$  を別々に測定する方法。

何れも實驗室内では實行容易だが、現場で應用するには困難が多い。熱源温度を周期的に變化する事、即ち周期的に操業する事は可能な場合もあるが、一般に現場の作業と合致しない。これがため現場では此の方法で測定出来ぬと言つても過言でない。次に  $K, c, \rho$  を別々に測定する事は、既に完成した爐壁では實行不可能である。又爐壁を築造する前なら實行出来るが、多種の材質の爐材を組み合せたものがどの位になるか推定が困難になる。かくて發表されている方法は何れも現場で實行困難と思われる。そこで概算でよいから、容易に測定出来る方法はないかと考えた結果、次の如くして其の目的を達する事が出来た。以下測定方法及びエルー式電氣爐による實測結果を概略説明する。

### II. 理論的説明

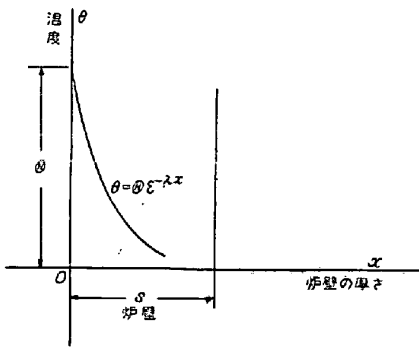
\* 山梨大學工學部

無限に擴がりをもつ平面壁の一面を熱すれば、温度は次の如く他の面に傳播してゆく。此の加熱を繼續に行わずに、間歇的に行う時即ち或る時間だけ加熱して其の後は中止すると、温度は衝撃波となつて他の面に傳わる。従つて加熱面から離れた或る断面では、加熱時刻に對して時間的遅れを以て最高値に達する。第1圖に示す如く、爐壁の内側即ち  $x=0$  の面で  $T$  時間加熱する時、



第 1 圖

其の温度變化は  $ABCO$  の如くなり、加熱面から  $S$  だけ離れた面即ち  $x=S$  では  $Oab$  の如き山が出来る。此の温度變化を測定して、温度傳導度を計算するのである。ただ一回の加熱により、測定出来る事が大きい利點である。又  $Oab$  の最高値  $a$  や、最高値を示す時刻  $T_m$  を測定する方法よりも正確に計算出来る。  $a$  や  $T_m$  を測定する方法は變化が緩やかな曲線となり、最適値をつかみ難いからである。第2圖に於て厚さ  $S$  なる平面壁を考え、



第 2 圖

$x=0$  の面は爐の内面を示し  $T$  時間の加熱後、冷却されるものとする。  $x=S$  の面は外面を示し常に冷却される。又簡單の爲外氣温度を  $0^{\circ}\text{C}$  と假定する。然る時は爐壁内の温度分布を表わす微分方程式として次式が成立する。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = k \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

- 但し  $\theta$  爐壁の温度
- $\theta_0$  熱源温度

$t$  時間

$x$  爐壁の厚さの方向に測つた距離

$s$  爐壁の厚さ

$\lambda$  爐壁内の温度分布を表わす常数

$$h = D/K$$

$D$  熱放散率

$K$  熱傳導率

とする。第2圖に示す様に  $T$  時間の加熱後、爐壁内の温度分布は大略指數函数となる。(註1) 此の状況で加熱を中止して、  $x=0$  及び  $x=s$  の両面から空冷する時、境界條件として次の式が成立する。

$$t=0 \quad \theta = F(x) = \theta_0 e^{-\lambda x} \dots\dots\dots (2)$$

$$x=0 \quad -\frac{\partial \theta}{\partial x} + h\theta = 0 \dots\dots\dots (3)$$

$$x=s \quad \frac{\partial \theta}{\partial x} + h\theta = 0 \dots\dots\dots (4)$$

但し内外両面の熱放散量は其の面の温度に比例するものと假定する。次に(2)、(3)及び(4)の條件を用いて(1)の解を求める。解法は川下研介氏著の熱傳導論136頁に出ているから、詳細は省略して結果のみ述べる。

$$\theta = \sum_{n=1}^{\infty} A_n X_n e^{-k\alpha_n^2 t} \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{但し } \tan \alpha_n s = \frac{2\alpha_n h}{\alpha_n^2 - h^2} \dots\dots\dots (6)$$

の根が  $\alpha_n$  である。

$$X_n = \cos \alpha_n x + \frac{h}{\alpha_n} \sin \alpha_n x \dots\dots\dots (7)$$

$$A_n = \frac{2\alpha_n^2}{(\alpha_n^2 + h^2)s + 2h} \int_0^s F(x) X_n dx \dots\dots (8)$$

これは一般の解だから(2)式の温度分布を假定して計算すれば次の如くなる。

$$A_n = \frac{2\alpha_n^2}{(\alpha_n^2 + h^2)s + 2h} \cdot \frac{\lambda + h}{\alpha_n^2 + \lambda^2} \theta_0 \cdot \left[ 1 - e^{-\lambda s} \left\{ \cos \alpha_n s + \frac{\alpha_n^2 - h\lambda}{\alpha_n(\lambda + h)} \sin \alpha_n s \right\} \right] \dots (9)$$

爐壁外面の温度を求める爲(5)式に於て  $x=s$  とおけば、

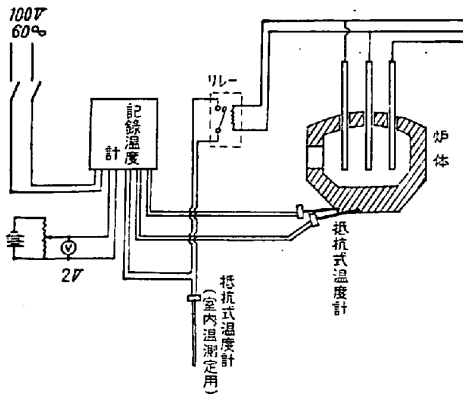
$$\theta_s = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} A_n e^{-k\alpha_n^2 t} \dots\dots\dots (10)$$

となる。此の式に於て  $t$  が相當に大きい時には、第二項までを採れば充分である。従つて

$$\theta_s = A_1 e^{-k\alpha_1^2 t} - A_2 e^{-k\alpha_2^2 t} \dots\dots\dots (11)$$

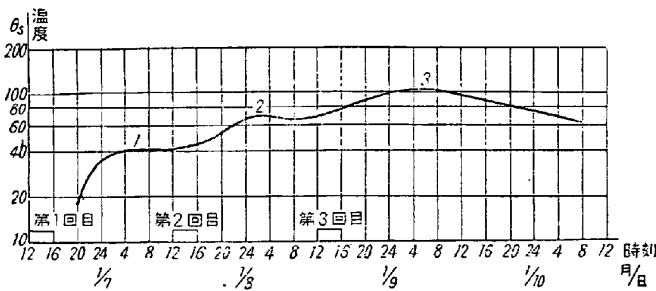
となる。此の式は二つの指數函数の差だから、實驗的に容易に係數を決定する事が出来る。(註2)

III. 測定法及び測定結果



第 3 圖

エルー式電気爐による測定法は第3圖の通りである。爐壁鐵板の空氣抜き孔を利用して、爐壁の中に約5 ㎝挿入し、アスベストで動かぬ様に固定した。測定が長時間にわたるから記録温度計を使用するのが便利である。爐壁には温度計を二個取り付け、別に室温測定用のものを一個置いた。何れも Ni 線を使用した抵抗式温度計である。第4圖は測定結果の一例である。縦軸は對數目盛に



第 4 圖

なっているから、圖示の如き直線的變化を普通目盛に書き直せば指數函数的變化となる。長い間休止している爐を使用し始めてから、第一回目、第二回目及び第三回目の操業に於ける爐壁の温度變化を示す。操業に對して約12 時間の時間的遅れをもつ三つの山があらわれている。以上の温度變化から計算した値は次の通りである。

$$k\alpha_1^2 = 0.0232$$

$$k\alpha_2^2 = 0.1913$$

これと(6)式と組み合わせると

$$\tan \alpha_1 s = \frac{2\alpha_1 h}{\alpha_1^2 - h^2}$$

$$\tan \alpha_2 s = \frac{2\alpha_2 h}{\alpha_2^2 - h^2}$$

となる。此の四つの式から  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $k$  及び  $h$  を求めればよい。方程式として根を求めるよりも、先づ  $k=0.00$

30,  $k=0.0035$ , ……………に對する  $h$  を計算して、 $h$  と  $k$  との關係を圖示して、圖上で求めるのが容易である。かくして、

$$k = 0.0036 \quad \text{m}^2/\text{h}$$

$$h = 1.90 \quad \text{l/m}$$

を得た。文献に發表されている値は、

$$\text{珪石煉瓦} \quad k = 0.001 \sim 0.003$$

$$\text{フロマイト} \quad k = 0.004 \sim 0.005$$

程度だから、似た結果と言える。

IV. 結 言

爐壁の温度傳導度は温度分布を計算する上に必要なるにもかかわらず、完成した爐に於ては測定困難な事が多い。此の解決策として、爐壁外側の温度が時間の経過と共に如何に變化するかを測定し、計算により見當をつける方法を紹介した次第である。尙此の際附隨的にわかつたのは、爐壁の外側温度が内部の温度變化に比して、相當に時間的遅れをもっている點である。從來電気爐の熱精算を行うに當り、爐の外側温度を測定し、これを用いて爐壁の熱放散量を計算するのが通例である。この方法は連續操業の時、即ち外側温度がほぼ一定の時は良いが外側温度が變化する時、即ち間歇操業に適用出来ぬと思われる。

最後に此の測定は、筆者が日立製作所清水工場に在勤中行つたもので、實驗に協力された各位に深く感謝の意を表わす次第である。

註 1

第2圖に於て、加熱時間が短い時は平面壁と考えずに半無限固體と假定しても大差ない。(1)式を解く境界條件は次の如くなる。

$$t=0 \quad \theta=0$$

$$x=0 \quad \theta=\theta$$

$$x=\infty \quad \theta=0$$

此の解は川下研介氏著の熱傳導論 87 頁から直ちに求める事が出来る。

$$\theta = \theta \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{kt}}} \epsilon^{-\beta^2} d\beta \right] \dots\dots\dots (12)$$

$t=T$  に於ける温度分布は

$$\theta_T = \theta \left[ 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{\sqrt{kT}}} \epsilon^{-\beta^2} d\beta \right]$$

となる。此の値は指數函数に近いから

$$\theta_T \doteq \theta e^{-\lambda t}$$

と表わしうる。これが(2)式である。

## 註 2

二つの指数函数の差が第1圖 *Oab* 曲線の如く表しうるとき、圖から係数を求めるには次の如くする。(11)式に於て

$$\theta_s = A_1 \varepsilon^{-\alpha_1 t} - A_2 \varepsilon^{-\alpha_2 t}$$

*t* が相當に大きい時は

$$\theta_s \doteq A_1 \varepsilon^{-\alpha_1 t}$$

となる。*t* の大きい所即ち *ab* 曲線の部分から *A*<sub>1</sub> と  $\alpha_1$  とを決定する。次にこの *A*<sub>1</sub> と  $\alpha_1$  とを使用して

$$A_1 \varepsilon^{-\alpha_1 t} - \theta_s = A_2 \varepsilon^{-\alpha_2 t}$$

を計算し、これから *A*<sub>2</sub> と  $\alpha_2$  とを決定する。

(昭和 26 年 6 月寄稿)

CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO系, CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>系溶融スラッグ構成成分の活量計算

(昭和 26 年 4 月本會講演大會にて講演)

松 下 幸 雄\*

ON THE CALCULATIONS OF THE ACTIVITIES OF MOLTEN SLAG COMPONENTS OF CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO AND CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> SERIES

Yukio Matsushita

Synopsis: The author calculated the amount of active components by making use of the data given in some literatures on SiO<sub>2</sub>, FeO (in 1600°C) in the fundamental ternary systems CaO-SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO respectively, which are the principal parts of blast furnace slag and basic open hearth furnace or electric arc furnace slag playing an important role in making pig iron or steel. It is possible to infer, from these diagrams showing iso-activity lines, the relative functions of main slag components. But alteration of diagram into intuitive one by acquiring more accurate knowledge of the diagram of ternary phases is desired.

At the same time the more reliable data on the activities of slag components are accumulated by measuring them physico-chemically or electrochemically, the more precise iso-activity diagrams will be gained. It is assured that much useful information of its application to the practical operation will be obtained, if the method of calculation applied to the basic binary or ternary systems should be applied to the splendid results recently developed.

## I. 緒 言

溶鑛爐スラッグや製鋼スラッグの構成成分の中、主要な SiO<sub>2</sub>, CaO 或は FeO, 更に Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 等の高温操業状態における活量を知ること、スラッグの實際の活動能や鹽基度を理解する上にきわめて望ましい。實驗的には溶鐵と、それに平衡した溶滓との二液相の酸素分配を求めたり、溶滓—溶鐵—混合ガスの化學平衡を測定したり、或は溶滓のイオン性を利用して電氣化學的に実施することができる。この方面は近年とみに活潑な研究が行われ本邦でも歐米においても數多の報告がある。しかし勿論系統的な総合的なものは少なく、全く新しい分野であつて、現場の要求に應える道は、はるかに遠い。今後のデータに期待する所甚だ切なるものがあるが、本報には斬新

なソ連邦及びアメリカの論文に與えられた主題の二つの系について、既知の FeO 及び SiO<sub>2</sub> 活量から残りの構成成分のそれを計算した結果を述べた。これは單なる計算にすぎないが、参考になる點も多いと思われ、將來基礎三元系について實測する場合に、その中の一成分の活量を知れば、均一な單相溶液である限り、他の残りの成分の活量が計算される便宜を與えた。

## II. 計算の方法

鹽基性スラッグの基本系 CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO 三元系については、電弧爐溶滓に對して緒言にふれた第一法によるソ連邦の報告<sup>1)</sup>がある。これは CaO+MgO+MnO の

\* 東京大學助教授 東京大學生産技術研究所第四部