や良いようである。養生に関しては養生水の pH, 浸漬日数, 湿度の影響はいずれも小さいが, CO₂ の有無は材令が進むと支配的影響を与え, CO₂ の存在で硬度の増進は小さくなる。しかし苛酷な条件下でも炭酸化の進行速度は特に著しいとは認められなかった。

交互作用も CO₂ の関係するものの影響が大であると考えられ, CO₂ の存在においてはアルカリ刺激剤は多い方が良く, 砂の細かさは粗が良いがその影響が小さくなり, 養生水は石灰水が純水よりやや良く, 湿度は初期には高い方が良いが長期には影響が小さくなる傾向にあり, スラッグの塩基度の効果は小となり, 砂比は特に富配合が望ましく, 水セメント比は特に低い方が好ましいという結果を認めた。

文 献

- 1) 田中太郎, 水滓委員会報告, O-3, p. 12, April (1956)
- 2) 石川馨, 交絡法, 日本化学会関東支部主催実験計画法テキスト再 2, Dec. 1955; 近藤連一, 石膏と石灰, No. 25, 3-11 (1956)
- 3) 河嶋千尋・奥田進, 窯協, 58, 255 (1950); 河嶋千尋・村田順弘, 窯協, 63, 133 (1955)

本研究に当り激励を与えられた森谷教授ならびに適切な助言を頂いた赤尾洋二氏, さらに研究費を援助された建設省ならびに試料の提供その他に便宜を与えられた八幡製鉄 KK および秩父セメント KK の両社に厚く感謝の意を表する。

(10/31/57受付)

粘土質耐火煉瓦焼成の“あぶり”時期における 温度拡散率及び熱伝達係数について

粘土質耐火煉瓦の焼成計画に関する研究 (第 1 報)

寺 田 清・若 松 盈・若 林 一 利

(京都工芸繊維大学, 中村窯業 KK)

On the Thermal Diffusivity and the Coefficient of Convective Heat Transfer in Lower Temperature Range (Smoking Period) During the Burning of Fireclay Brick.

(Studies on the Firing Schedule for burning Fireclay Bricks, Part 1)

By K. TERADA, M. WAKAMATSU and K. WAKABAYASHI

(Kyoto Techn. Univ., Nakamura Yogyo Co. Ltd.)

In preparing the firing schedule of refractory bricks, it is essential to have a correct knowledge on the thermal diffusivity of the brick at every stage of the firing. Therefore, the thermal diffusivity of “roseki” (pyrophyllite) brick of the commercial green composition containing 20% of the grog and of the commercial size was measured up to 800 °C under the commercial rate of firing, and the following results were obtained: (1) the value of the thermal diffusivity, α (m²/hr), immediately after the start of firing is about 0.0022, and this value is practically identical with that of the fired product, (2) its value, however, decreases suddenly with temperature rise, and in the temperature range of 300°~600°C, α reaches a minimum value. This minimum value is about 0.0006 and corresponds to 1/3~1/4 of the value of the fired product, (3) above 600°C, α shows a marked rising tendency with temperature rise, (4) in this whole temperature range, the coefficient of heat transfer by convection from hot combustion gas to the brick under firing is nearly equal to that of the case when the brick which has been fired, is reheated by the same combustion gas (in the same temperature range), and this value is about 4~12 kcal/m²·hr·°C.

1. 緒 言

一般に付着水や結晶水の脱水, および原料中に随伴する有機物の乾溜ならびに焼失等の物理的・化学的諸変化を伴う¹⁾粘土質耐火煉瓦を焼成する場合, これらの諸現象が最も顕著に起ると考えられる“あぶり”時期¹⁾の焼成方法は成品の品質に極めて大きい影響を与

える。この点に関しては“あぶり”時期に煙道ガスの一部を加熱室に再循環させて燃焼ガスの温度を調節すれば, 同一素地から出発しても品質に顕著な差異を有する成品が得られることに関する著者らの既往の報告²⁾および著者らの研究を基礎とした工業化に関する報告³⁾からも明らかにされている外, この方面の仕事

に直接従事した経験を有する人々は容易に首肯されるであろう。

以上のように“あぶり”時期の焼成方法は重要な意味を有するものであるが、この際の焼成計画は原料物質の特性値の外に、さらに被焼成物の形状、粒度組成、気孔率、成形方法特に成形圧および焼粉の混合割合等の素地煉瓦の形状の及び組織的要素の面から決定されなければならない。

元来焼成窯の設計、改造および窯の取扱は、確立された焼成計画を基礎とするもので、しかもその焼成計画は、焼成過程に被焼成物の内部で起る物理的ならびに化学的諸現象に関する充分な知識を基礎にして、これに経済的要素を織り込んで決定される。かかる理由で焼成計画は基礎的重要性を有し、耐火煉瓦の焼成計画に関しても極めて多方面の研究が要求され、事実多くのすぐれた研究が報告されている¹⁾⁴⁾⁵⁾。しかしこれらの論文においてはいずれも“あぶり”の時期の焼成方法が、成品に顕著な影響を与えることは一応留意しながらもこの点をあまり詳細には追求していない；すなわち従来の多くの研究は、温度上昇中に温度拡散率が全く変化しないような取扱の出来る品物の焼成にはそのまま適用出来ても、本報で詳しく報告するように、例えば粘土質耐火煉瓦の“あぶり”の時期に見られるような温度拡散率が相当変化する品物の焼成には直ちには適用出来難い。この点に関しては成品煉瓦中の黒芯に関する Brownell の論文¹⁾からも容易に理解されよう。

著者らは、従来より被焼成物の特性に応じた動作機構を有する窯の研究に従事し、粘土成品を焼成する場合“あぶり”時期の性能を高める一対策として、煙道

ガスの一部を再循環させる機構を具備した窯の構造を報告²⁾したが、この窯は予期通りの成績をもって、ガラス槽窯タンクブロックおよび各種の粘土質耐火煉瓦ならびに建築用粘土成品の焼成にかなり広く活用されている。しかし著者らの既往の研究では、重要な点に関してはまだ原理的な知識に留まっているところも多く、焼成窯の性能向上に関しさらに詳細な研究の必要に迫られて来たのである。著者らはかかる研究の第一段階として、粘土質耐火煉瓦の並形素地を使用し、現在工業的に採用されている標準の加熱速度の範囲内で焼成を行い、常温より約 800°C までの温度範囲で、被焼物が示す温度拡散率およびこの際の高温ガスと被焼成物との間の熱伝達係数等を実験的に求め、焼成計画を決定する上に極めて貴重な資料を得た。本報はこの研究に関する報告である。

I. 試 料

試料に用いた並形煉瓦素地は、シャモット 20%，耐火粘土 15%，残り 65% は蠟石からなるもので、約 300 kg/cm² のフリクションプレスで成形された後自然乾燥した工業用のものである。この煉瓦素地のタイラー標準篩による粒度組成は Table 1 に、またその化学組成は Table 2 に示した。

Table 1. Grain size analysis of the Green Brick for the test.

(Average) Grading	Content %
>1.50 mm	8.5
1.50~1.00 "	9.7
1.00~0.65 "	10.6
0.65~0.30 "	18.2
0.30~0.15 "	14.0
<0.15 "	39.0
Total	100.0

Table 2. Mean chemical composition and refractoriness of the Green Brick for the test.

Ig. Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	Total	S.K.
7.65	67.4	20.3	1.80	0.41	0.30	0.60	2.3	0.99	99.6	28

II. 実験装置および方法

1) 実験窯 実験窯は、つとめて工業的焼成の条件と合致するよう、並形煉瓦素地を数屯詰めることが可能な容量の耐火煉瓦焼成用倒焰式角窯の長さ方向を縮小したもので、その略図を Fig. 1 に示した。この窯の主要部分は①燃焼ガスおよび 1 次空気導入用のポート、② 2 次空気孔、③ この窯を廃熱利用形式で使用する際の廃ガス導入孔、④ 窯内で燃焼ガスの一部を再循環させるための孔、⑤ 補助煙道入口、⑥ 燃焼ガスおよび焰の流速を増すためのオリフィス、⑦ 火橋、⑧ 窯床、⑨ 床下煙道および⑩ 主煙道である。また図中に示した 1, 2, 3, …… は窯壁に石英管を埋め込まれた測定孔を示したもので、かかる測定孔が総計 60 個所準備されている。そしてこの測定孔は、両側燃焼室に設

Fig.1 Schematic representation of experimental kiln.

けられたものをαおよびβの組に分けた外は、加熱室と床下煙道を通して上より下部に向かってそれぞれ A, B, C, …… F 行と名付け、各行に属する孔は 1, 2, 3, …… の

番号で区別した。

2) 実験方法 Fig.2 に示すように並形煉瓦素地を、それぞれの間隔が約 8 cm となるよう 4 列窯詰めし、それぞれの列は火橋の高さにはほぼ等しくなるようにした。そして窯内で高温ガスが上部から下部に向う通路は 5 個で、それぞれの通路の断面積はいずれも一律に $15 \times 20 (\text{cm}^2)$ となっている。

また熱電対を挿入した時に得られる“窯内温度”お

Fig.2 Mode of laying the sample and the location of the temperature measurement holes.

よび吸引形温度計で得られるガス温度は、Fig.1 の C₃ の測定孔で実測し、この点の温度を基準にして Table 3 に示すような温度上昇率で実験を行った。

Table 3. Rate of temperature rise.

Experiment	Firing time till 800°C	Mean rate of temperature rise
1	15 hr.	53 °C/hr
2	30 "	27 "
3	50 "	16 "
4	70 "	11.5 "
5	100 "	8 "

燃料は都市ガスを使用し、加熱期間中は温度測定孔 α_1 および β_1 のガス温度が大体等しくなるよう両側のバーナーを調節した。

また被焼成物自体の温度を測定するため、Fig.2 に示したように問題とする煉瓦素地にドリルで深さ約 8 cm、直径約 2 mm の穴を、表面と中心との間に 5 個設け、この穴にそれぞれあらかじめ較正された直径 0.5 mm の白金-白金ロジウム熱電対を埋め込み、線の周囲には煉瓦素地の微粉を充填した。なおこの際炉壁と被焼成物との間に出来る僅かな空隙で、熱電対が高温ガスと接触して測定値に誤差を生じる危険を防ぐため、Fig. 2 から認められるように、直径 5 mm の磁製保護管を煉瓦素地中に 5 mm だけ挿入した。Fig.2 の h は窯及びガスの温度ならびに炉圧等を測定するための直径約 10 mm の石英管で作った孔で、ガス採取孔を兼ねている。

そして焼成全期間を通じて燃焼ガスの組成は煙道に

Fig. 3 Temperature-time curves.

において CO_2 が 3~5% となるよう 燃料対空気の割合を調節した。

III. 実験結果

Fig. 3 は Table 3 に示した温度上昇率で焼成した場合の温度と焼成時間との関係を示したものである。図において曲線 g は試料近辺を流れる高温ガスの温度、 h は“窯内温度”、 p_1 および p_2 は試料自体の温度で p_1 は表面より 14 mm 深さの、また p_2 は表面より 56 mm (煉瓦の中心部) の温度である。なお図中の番号は Table 3 の実験番号に対応する。この Fig. 3 を基にして次の事項が導かれる。

1) 熱伝達係数, $h(\text{kcal/m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C})$ (註 1) 今ある瞬間 τ_1 およびこれより $\Delta\tau$ 後の時刻 τ_2 における試料内部の温度分布が既知の時には、時刻 τ_1 から τ_2 に至る間に試料が吸収した熱量 ΔQ が求められ、この際試料近傍のガス温度 T_g がわかっておれば、ガスと試料との間の熱伝達係数 h は、伝熱面積を実測することにより容易に求められる。かかる方法で求めた h の値を Fig. 4 に示した。

Fig. 4 Relation between the coefficients of convective heat transfer and the mean temperatures of the brick under firing.

2) 試料内部の温度分布および表面温度 Fig. 5-1 は実験 1 および実験 3 から任意に選んだ、ある時刻における試料内部の温度分布を示したもので、各曲線上の黒点は試料中に挿入した熱電対で得られた実測温度である。そしてこの際の表面温度は被焼成物内の温度分布を用いて Schack⁹⁾の方法で決定した。Fig. 5 の曲線 A は実験 1 に対するもので、 A_1 は焼成開始から 30 分目、 A_2 は同じく 1 時間 30 分目の温度分布である。また曲線 B は実験 3 に対するもので、 B_1 および B_2 はそれぞれ焼成開始から 10 時間目と 11 時間目の温度分布である。各実験に対し、任意の時刻における同様な図は容易に画かれ、Fig. 5-2 もその 1 つでこの図は焼成開始から 9 時間目と 10 時間目の温度分布を実験 1 に対して画いたものである。

3) 温度拡散率, $\alpha(\text{m}^2/\text{hr})$ (註 2) 不定常伝熱を取扱う上に、したがってまた耐火煉瓦の焼成計画を決定する上に最も重要な関係を有する要素の 1 つである。

Fig. 5-1 Temperature distributions within the brick measured at a certain instance within the experiments No. 1 and No. 3, respectively.

Fig. 5-2 Temperature distributions within the brick measured at the comparatively high temperature range in the experiment No. 1.

温度拡散率, α は $\alpha = \lambda / (C \cdot r)$ で表わされる。ただし式中の λ は熱伝導率、 C は比熱、 r は比重である。そしてこの α は不定常伝熱の一般式と次のように結ばれる；

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \alpha \left\{ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \right\}$$

ただしこの式で、 τ は時間、 x, y, z はそれぞれ熱流方向の長さ、 θ は温度である。この式は Schmidt⁷⁾ 法等で近似的に解きうるが、この際問題とする物体内のある瞬間 τ_1 とこれより $\Delta\tau$ 後の時刻 τ_2 の温度分布がわかっていける時には、温度分布の時間的変化を用いて Schmidt 法から逆にその時刻の α を求めることが可能となる。しかも考察のところで論議されるように著者らの実験方法では、試料として使用した耐火煉瓦内部の熱流は一次元的取扱が許されるので、著者らの測定値から α を求めることは、計算はかなり面倒であるが原理は至極簡単である。Fig. 6 は実験 1 に対して α の値を決定する場合の作図の作業を示したもので、曲線 1 および 2 はそれぞれ焼成開始後 30 分および 1.5 時間目の実測値である。式

$\alpha = (1/2)(4\pi/\Delta x^2)$ の右辺を利用して左辺の α を求めるのであるが、ここでは試料煉瓦の表面と中心との距離 5.7 cm を 4 等分してその 1 間隔を $\Delta x (=1.425 \text{ cm})$ とし、表面から中心に向かって $0 \cdot \Delta x$ (表面), $1 \cdot \Delta x$, $2 \cdot \Delta x$, $3 \cdot \Delta x$ および $4 \cdot \Delta x$ (中心) とした。かかる方法で曲線 1 から 1.5 時間後の実測値の曲線 2 に最も近い値が得られるように仮設解法 (Trial and error) を試みて曲線 2' を求めこの際の α の値を、この場合の

Fig. 6 An example of graph for the procedure of determining thermal diffusivity.

温度拡散率として採用するのである。問題とする時間あるいは温度範囲内で、 α の値は不明ではあるがあまり変化しないものと考えてよい場合にはかかる方法で α を決定することが出来る。Table 4 は Fig. 6 を作図する時の計算表である。以上のようにして求めた α の値を試料煉瓦の平均温度に対する関係で示したのが Fig. 7 で図の黒点はそれを示している。また同図に併記した $\alpha = 0.0022$ の直線は成品煉瓦の温度拡散率で、これは多くの文献に報告されている平均値である。そして従来の焼成計画は焼成の全期間を通しこの値を使用している場合が多いのである。

Fig. 7 Relation between the calculated thermal diffusivity and the mean temperature of the fireclay brick during the burning.

Table 4.

	$0 \Delta x$	$1 \Delta x$	$2 \Delta x$	$3 \Delta x$	$4 \Delta x$
$0 \Delta \tau$	46	40	36	33	31
1	47.2	41	36.5	33.5	33
2	48.4	41.8	37.2	34.7	33.5
3	49.6	42.8	38.2	35.3	34.7

4	50.8	43.9	39.0	36.4	35.3
5	52.0	44.9	40.1	37.2	36.4
6	53.2	46.0	41.0	38.2	37.2
7	54.4	47.1	42.1	39.1	38.2
8	55.6	48.3	43.1	40.2	39.2
9	56.8	49.4	44.3	41.2	40.2
10	58.0	50.6	45.1	42.3	41.1
11	59.2	51.7	46.5	43.2	42.3
12	60.4	52.9	47.5	44.4	43.2
13	61.6	53.9	48.7	45.4	44.4
14	62.8	55.2	49.7	46.6	45.4
15	64.0	56.2	50.9	47.6	46.6
16	65.2	57.4	51.9	48.7	47.6
17	66.4	58.5	53.0	49.8	48.7
18	67.6	59.7	54.2	50.8	49.8
19	68.8	60.9	55.3	52.0	50.8
20	70.0	62.0	56.4	53.1	52.0

IV. 考 察

1) 実験装置ならびに方法 該研究の目的は、粘土質耐火煉瓦を素地から焼成する場合の焼成計画決定の基礎的な要素となる温度拡散率を、あくまでも工業的焼成の条件に合致した形で求める点にあるから、取扱う試料も並形の煉瓦素地そのままであり、またその温度分布を考慮して実験窯も比較的容量の大きなものを使用した結果、窯内温度分布も極めて実際に近くその点妥当なものと考えられる。なお両焚式のガス焼成であるため温度上昇率もかなり希望する状態で得られた。焼成の全期間を通じ窯内雰囲気は CO_2 3~5% となるよう燃料と空気の割合が調節され、この点も実際の工場作業に対し満足すべきものである。かくして実験装置および実験方法は著者らの研究目的上かなり妥当なものと考えられる。

2) 熱伝達係数 以上の方法で求めた熱伝達係数は、被焼成物が脱水や結晶の分解を起し、また内部に含まれる有機物が酸化焼失あるいは乾溜炭化する場合に、被焼成物内部で起るであろう種々の発熱および吸熱と高温ガスから対流および輻射によって得られる熱量の総合結果として現われる温度上昇を、一応高温ガスからの対流伝熱によって得られた熱量と見做して求めたものである。したがってかかる意味で一度焼成された“成品”煉瓦の再加熱の際の熱伝達係数とその内容は、かなり相違するはずである。しかし著者らの方法で得た値の方が、すくなくとも粘土質耐火煉瓦焼成に対しより実的な意味を有することは確かで、なお煉瓦素地から焼成して行く場合、付着水および結晶水の脱水、結晶の崩壊ならびに有機物の分解や焼失の場合の熱量関係は、すくなくとも現状では焼成曲線を決定する時の基礎資料となる形では与えられ難いので、著者らはこの実験で得た値に重要な意味を見出すものである。

一応前述の事項を妥当と認めた場合には、熱伝達係数の精度は温度測定の精度で左右されると考えてよい。そして著者らの実験では被焼成物内の温度測定は

$\pm 2^{\circ}\text{C}$ の範囲内にあることは実験的に確認しているが、煉瓦内部の温度から表面温度を求める際の誤差を正確に見積ることは現状ではかなり困難である。一方焼成過程の表面温度の実測は一般に不可能に近く⁸⁾、また理論的に決定することも極めて困難である⁹⁾。ただかくして得た著者らの結果が煉瓦の再加熱に対する著名な文献で見られる値と大体よく一致している¹⁰⁾ので、おおむね妥当な値が得られたものと考えた。かくして粘土質耐火煉瓦焼成の“あぶり”過程における熱伝達係数は成品煉瓦の再加熱の場合と大体同一で約 $4\sim 12 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$ となる。

3) 試料内部の温度分布および表面温度 試料内部の温度分布は一応実測値として得られるので、その点疑問はすくないように見えるが、この場合にも温度測定法にかなり問題がある。試料中に挿入した熱電対の高温接点と、測定位置における物体との接触抵抗がどの位のものであるかを知ることは決して容易なことではない。この点に関し著者らが繰返し詳細に実験したところによれば、熱電対の挿入方法如何により著者らの測定温度には $\pm 2^{\circ}\text{C}$ の差は認められた。次に表面温度に関して考えると、内部の温度分布から表面温度を求める場合結局外挿に頼ることを意味するので、不確実になるのは止むを得ない。そして前述したようにこの精度を増すための具体的手段は、すくなくとも現状では見出し難い。ただかくして得られた表面温度を用いて求めた熱伝達係数の値がおおむね妥当な値を与えていることを考えると、この表面温度の値もかなり妥当な値と推定出来るようである。

4) 温度拡散率 Moody らの研究⁵⁾によれば、著者らの実験方法では試料内の熱流は Fig. 8 に示すような一次元的取扱が出来るので、試料内部の温度分布の時間的な変化から温度拡散率を求めることが極めて簡単となる。そして Schmidt 法で温度拡散率を求める際

Fig. 8 Schematic diagram of heat flow with in the fire clay brick during the burning.

の誤差は、温度測定値の誤差を別にすれば、Fig. 6 の例で述べれば曲線 2 と 2' との差異で決定され、曲線 2 と 2' が完全に一致した時には Schmidt 法を使用したための誤差は皆無となる。そして著者らの場合には大体 Fig. 6 で見られる程度の一致が得られたので、この際の誤差はかなりすく

ない。Fig. 7 からわかるように、粘土質耐火煉瓦をその素地から焼成してゆく場合、焼成開始直後は温度拡散率が相当大きな値をとり、この時期では煉瓦内部にはあまり大きな温度差が

生じ難いことを意味している。しかるに焼成の進行につれて温度拡散率は急激に減少し、約 $300\sim 600^{\circ}\text{C}$ の温度範囲で最小値を示し、この時期では煉瓦内部に極めて大きな温度差が生じることが予想される。そして一般にこの温度範囲では被焼成物からは付着水、結晶水等の脱水、有機物の乾溜や酸化焼失等一部の物質の脱出を伴う極めて複雑な物理的および化学的变化が起ると推定されている時期である。なお被焼成物の亀裂発生の状態が、この温度拡散率の最小値をとる温度範囲の焼成方法と大きく関係することは、美崎らの現場の資料からもある程度まで明らかになっている³⁾。

結 論

以上の実験結果ならびに考察より次の結論が導かれる。

(1) 粘土質耐火煉瓦焼成過程の“あぶり”の時期における高温ガスの温度、“窯内温度”、および焼成過程の煉瓦内部の温度分布を明らかにした。

(2) 同じく“あぶり”過程の高温ガスから煉瓦への対流伝熱係数を求め、その値が $4\sim 12 \text{ kcal/m}^2\cdot\text{hr}\cdot^{\circ}\text{C}$ で大体成品煉瓦を再加熱する場合と大差ないこと、およびこの場合の伝熱は高い近似度で一次元熱流として取扱えるという Moody らの理論が充分適応されることがわかった。

(3) 粘土質耐火煉瓦焼成の“あぶり”過程では脱水、有機物の乾溜や焼失等一部の物質が被焼成物から分離する。そしてかかる際の温度拡散率は成品煉瓦のそれとは著しく異なり、焼成開始直後は成品煉瓦のそれに大体等しい値を示すが、温度上昇と共に急激に減少し $300\sim 600^{\circ}\text{C}$ で成品煉瓦のその約 $1/3\sim 1/4$ という極めて低い値を示し、 600°C 以後でふたたび急激に増加して成品煉瓦のそれに近づく。このことより約 100°C までは煉瓦内部の温度はかなり均一となるが、 $300\sim 600^{\circ}\text{C}$ で被焼成物の内部に顕著な温度差の生じる可能性が存し、焼成計画決定に極めて重要な事項が明らかにされた。

(4) 以上の事項はいずれも、現在わが国の現場で採用されている工業的焼成速度による実験から得られたもので、直ちに現場に適用出来る。そして著者らの関係した工業的試験においても温度拡散率が最小値をとる付近の焼成速度を制御することにより、同一素地を用いた成品でも気孔率、強度、収縮率特に亀裂発生状態が著しく相異なることを見出すと共に、従来とかく亀裂の発生しやすい素地も現在では亀裂の心配が極めて減少する結果を得ている。(昭和 32 年 4 月 26 日窯協講演会で講演済)

この研究の遂行に当り現大阪窯業耐火煉瓦KK技師岡田保および現中村窯業KK技師前川弥一郎両君の強力な御援助を賜ったことを深く感謝する。

文 献

- 1) Wayne, E. Brownell, *J. Am. Ceram. Soc.*, **40** [6] 179-87 (1957)
- 2) K. Terada and M. Wakamatsu, *Memoirs Kyoto Tech. Univ.*, **6**, 81-96 (1957)
- 3) 美崎敬之・石井義二・前川弥一郎, “寺田式倒焰窯の耐火煉瓦焼成について”. 昭32.11.15, 窯協, 関西3支部協同学術講演会の講演
- 4) E. Preston and W.E.S. Turner, *J. Soc. Glass Techn.*, **25**, 310-27 (1941)
- 5) B.E. Moody, A.J. Modgwick and D.G. Monk, *J. Soc. Glass Techn.*, **55**, 260-76 (1956)
- 6) A. Schack, *Der Industrille Wärmeübergang* S. 228, 4. Auf. (1953)
- 7) *ibid.*, S.51
- 8) W. Trinks, *Industrial Furnaces*, P.23, Vol. 1 (1951); W.H. McAdams, *Heat Transmission*, P.198 (1954)
- 9) E.R.G. Eckert, *Introduction to The Transfer of Heat and Mass.*, P.86 (1950); W.H. Giedt, *Principles of Engineering Heat Transfer*, P.17 (1957)
- 10) 例えば W. Heiligenstaedt, *Wärmetechnische Rechnungen Für Industriöfen*, S.128 (1951)

(註1) 熱伝達係数, h の決定法 時刻 τ から時刻 $\tau + \Delta\tau$ に至る $\Delta\tau$ 時間内に, 被焼成煉瓦が高温ガスから吸収する熱量 ΔQ (kcal) は,

$$\Delta Q = A \cdot h \cdot (\theta_g - \theta_s) \cdot \Delta\tau \text{ (kcal)} \dots\dots\dots (1)$$

ただし式中の A は被焼成煉瓦の対流伝熱に關係する表面積 (m^2), θ_g および θ_s はそれぞれ高温ガスおよび被焼成煉瓦の表面の温度 ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\tau$ は伝熱の行われる時間 (hr), h は熱伝達係数 ($\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^{\circ}\text{C}$) である。被焼成煉瓦に吸収された熱量 ΔQ の大部分は顕熱として該煉瓦の温度上昇に寄与するが, 残りの一部分は煉瓦内部の物理的および化学的变化にともなう潜熱となる。そしてその關係は,

$$\Delta Q = H \cdot W \cdot (\theta_2 - \theta_1) \text{ (kcal)} \dots\dots\dots (2)$$

で与えられる。ただし式中の θ_1 および θ_2 はそれぞれ時刻 τ および時刻 $\tau + \Delta\tau$ における被焼成煉瓦の平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), W は被焼成煉瓦の重量 (kg), H ($\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$) は被焼成煉瓦の内部に起ると考えられる物理的および化学的变化にともなう潜熱をも含めて, 該煉瓦 1 kg を 1°C 上昇させるに必要な熱量で見掛けの比熱ともいふべき量である。

(1) 式と (2) 式から

$$h = H \cdot W \cdot (\theta_2 - \theta_1) / \{ A \cdot (\theta_g - \theta_s) \cdot \Delta\tau \} \dots\dots\dots (3)$$

(3) 式において, W および A は試料の重量および寸法から, $\theta_g, \theta_s, \theta_1$ および θ_2 は本文中で詳述したように実測から, また $\Delta\tau$ は時間測定からそれぞれ求められる。最後に H の値は, それを求めることはかなり困難

であるが, 煉瓦素地の焼成に關する A.E. MacGee (*J. Am. Ceram. Soc.*, **9** [4] 206-47 (1926)) の詳細な研究が利用出来て $H = 0.45 (\text{kcal}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ となる。かかる方法で焼成過程中的の各温度に対し, 熱伝達係数 h を求めその値を図示したものが Fig.4 である。

(註2) 温度拡散率, α の決定法 焼成過程中的のある時刻 τ における被焼成煉瓦内部の温度分布とその温度拡散率および表面温度の時間的变化が既知の場合には, 時刻 τ 以後の任意の時刻の温度分布は Schmidt 法によって容易に求めることが出来る。

熱流が一次元の場合には

$$\theta_{(n+1)\Delta\tau, m\Delta x} = (\theta_{n\Delta\tau, (m+1)\Delta x} + \theta_{n\Delta\tau, (m-1)\Delta x})/2 \text{ (}^{\circ}\text{C)} \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta\tau = (\Delta x)^2 / (2\alpha) \text{ (hr)} \dots\dots\dots (2)$$

の2個の式が計算式である。ただしこれらの式で m および n は注目する場所と時刻に対する番号, $\theta_{n\Delta\tau, m\Delta x}$ は加熱表面から $m\Delta x$ の位置の $n\Delta\tau$ 時間経過後の温度 ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\tau, \Delta x$ および α は本文中のものと同じである。この Schmidt 法は従来主として $\alpha, \Delta x, \Delta\tau$ および時刻 τ における被熱物の温度分布と表面温度の時間的経過を用いて, 時刻 τ 以後の任意の時刻の温度分布を求める計算に使用されているが, この方法を次のように使用すれば被焼成煉瓦の焼成過程中的の各時刻における温度拡散率が決定出来る; すなわち被焼成煉瓦の表面温度の時間的経過およびある時刻 τ_1 と時刻 τ_2 における温度分布, ならびに (2) 式中の Δx に相当する量等は実測等で既知ではあるが, α が不明の場合において, もし時刻 τ_1 と時刻 τ_2 との間で α が一定値をとると考えられる場合には, α の値を逐次仮定して, これらの α に対応する $\Delta\tau$ の値を (2) 式から求め, この $\Delta\tau$ および α の値を用いて時刻 τ_1 における温度分布と表面温度の時間的経過の実測値を基にして, $(\tau_2 - \tau_1) / \Delta\tau = K$ で定まる τ_1 から $K \cdot \Delta\tau$ 時間後の時刻 τ_2 の温度分布を (1) 式を用いて計算する。そしてかくして求めた温度分布の計算値がその時刻の温度分布の実測値と一致した時には, 時刻 τ_1 と時刻 τ_2 との間では α は変化せず, しかもこの場合の α の値はこの温度分布の計算に使用した値と一致することになる。

著者らは焼成過程中的の被焼成煉瓦内の温度分布と表面温度の各時刻における実測値を基にして, $K \cdot \Delta\tau = 1$ 時間となる時の温度分布を Schmidt 法で計算して, これをその時刻の温度分布の実測値と比較する方法を繰返し, 仮設解法によって α の値を決定した。Fig. 7 はかくして求めた α の値を煉瓦の平均温度に対して画いたものである。

(1/14/58 受付)