

## 平爐蓄熱室の研究

(日本鐵鋼協會第五回講演大會講演)

萩原巖

## HEAT EXCHANGE IN REGENERATOR.

By Iwao Hagiwara.

**ABSTRACT** The rate of heat exchange in a regenerative-chamber filled with four different checker works was investigated under actual conditions. It was found that the highest rate of heat exchange per unit volume of checker works was in spherical shaped bricks while the lowest rate of that was in a solid chimney type. However there was no appreciable difference between these two above mentioned in respect to the rate of heat exchange per unit heating surface.

In another word under present conditions the total heat exchange mainly depends on its heating surface although it is slightly affected by the velocity of gas.

Having been thus obtained the coefficient of heat transfer, the most suitable heating surface for an unit calorific mass of gas was calculated out in order to give a basic data for the design of regenerators.

As to the theory of regenerators, the author has also calculated graphically the temperature distribution in respect to the time and space, whereby the conductivity of brick was taken in consideration.

## I. 緒言

平爐に於ける蓄熱室の役割の甚だ重要なるに係はらず此の方面の實驗は甚だ少ないのである。例へば今迄に多くの人々によつて種々の煉瓦積の様式が考案されて來たが此等の煉瓦積の優劣を數量的に比較實驗したものは全然無い。これは主として實際の蓄熱室について實驗する方法が多くの困難を伴ふがためと思ふ。

それで筆者は高度の精確は得られないが現場に於て比較的簡單にこれを比較する方法を考へこれによつて4種類の各々異なつた煉瓦積についてその優劣を實際使用状態の下に於て數量的に比較して見たのである。

尙ほ蓄熱室の理論に於てはその時間的溫度變化に對する微分方程式が未だ完全に解かれて居ないので附録としてその圖式解法を示した。

## II. 比較の方法

蓄熱室は如何なる數量によつて比較すべきかと言ふにこれは其の蓄熱室へ出入する瓦斯の平均溫度差が  $1^{\circ}\text{C}$  のときに單位時間に交換する熱量即ち熱交換率とも稱すべき數量をもつてすべきでこれは大體次の様な形で表はされる<sup>(1)</sup>。

$$M = \frac{S}{2.5 \left( \frac{\tau}{\delta c \gamma} + \frac{\delta}{4\lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \dots \dots \dots (1)$$

(1) A. Schack. Der Industrielle Wärmeübergang S. 276

此處に  $M$ ・熱交換率  $\text{Kcal}/h^{\circ}\text{C}$ .  $S$ ・加熱面積  $m^2$ .  $\tau$ ・交換期間 (加熱期+冷却期)  $h$ .  
 $c, \gamma, \lambda$ ・煉瓦の比熱、比重、熱傳導率.  $\delta$ ・煉瓦の「厚さ當量」 $m$ .  $= \frac{2 \times \text{全煉瓦容積}}{\text{全加熱面積}}$ .  $\alpha_1, \alpha_2$ ・  
 加熱瓦斯及び被加熱瓦斯の傳熱率、 $\text{Kcal}/m^2h^{\circ}\text{C}$

此の熱交換率  $M$  を求むるには若しも蓄熱室が副射損失の無い理想的の場合は<sup>(1)</sup>

$$M = \frac{W_1}{\left(\frac{W_1}{W_2} - 1\right)} \log_e \frac{(F_2 - A_1)}{(F_1 - A_1) - (F_1 - F_2) \frac{W_1}{W_2}} \dots \dots \dots (2)$$

此處に  $F_1, F_2$ ・加熱瓦斯の平均流入温度と流出温度 $^{\circ}\text{C}$ .  $A_1, A_2$ ・被加熱瓦斯の平均流入温度と流出温度 $^{\circ}\text{C}$ .  $W_1, W_2$ ・加熱瓦斯と被加熱瓦斯の熱容量 (單位時間の通過重量と比熱の相乗積)  $\text{Kcal}/h$   
 なる式より求め得られるが實際の蓄熱室は少なからず熱損失を持つて居る。即ち熱損失がある場合には加熱期間中に蓄熱室が實際に瓦斯より與へられた熱量は  $h$  を此の期間中の熱損失とすれば  $W_1(F_1 - F_2) - \frac{1}{2}\tau - h$  でありまた  $h'$  を冷却期間の熱損失とすればこの期間に瓦斯が得た熱量は  $W_2(A_2 - A_1) - \frac{1}{2}\tau + h'$  である。しかるに蓄熱室が平衡に達して居れば  $h + h' = W_1(F_1 - F_2) - W_2(A_2 - A_1)$  であるから一般に  $h = h'$  として各期間に受授する熱量  $Q$  は

$$Q = \frac{1}{4}\tau \left\{ W_1(F_1 - F_2) + W_2(A_2 - A_1) \right\} \dots \dots \dots (3)$$

である。故に若しも副射損失が無かつたとしたならば蓄熱室に  $Q$  なる熱量を與へるためには  $W_1$  より少ない  $W_1' = Q / (F_1 - F_2) - \frac{1}{2}\tau$  にて足りまた同様に  $Q$  なる熱量をもつて  $W_2$  より多い  $W_2' = Q / (A_2 - A_1) - \frac{1}{2}\tau$  を同じ温度に迄加熱出来るわけであるから (2) 式の  $W_1, W_2$  の代りに此の  $W_1', W_2'$  を用ふれば近似的ではあるが熱損失のある實際の蓄熱室より  $M$  を求めることが出来るのである。即ち

$$M = \frac{W_1 + W_2(A_2 - A_1) / (F_1 - F_2)}{(A_2 - A_1) / (F_1 - F_2) - 1} \frac{1}{2} \log_e \frac{F_2 - A_1}{F_1 - A_2} \dots \dots \dots (4)$$

より蓄熱室が好く平衡に達した時にその上下出入口に於ける温度と瓦斯量と瓦斯の性質が測定出来れば熱交換率を求めることが出来るのである。尙ほ斯くして求めた  $M$  は蓄熱室全體としての熱交換率であるが更に比較を普遍的にするには單位體積の熱交換をもつてすればよくまた單位面積に對するものが必要ならば  $M/S$  の値を求めれば宜しい。また更に煉瓦の性質が知れるときは  $M$  の値より傳熱率の逆數の和  $1/\alpha_1 + 1/\alpha_2$  を求めることが出来る。更に近似を許すならば  $\alpha_1 = \alpha_2$  として加熱瓦斯と被加熱瓦斯の同じ様な性質の場合の平均傳熱率を求めることが出来る。

實驗はその測定の方法と使用した蓄熱室の種類により AB の 2 つに分けて記述する。

(1) 同上 S 241

## III. 實 驗 A

(1) 實驗せる煉瓦積の種類 比較しやうとする煉瓦積は第1圖第2圖及び第3圖に示した様な格子積、柱狀積、球狀積(A)の3種類でこれによつて蓄熱室内の基本的な積み方の即ち直線的に瓦斯を通ずるものと直角に流れを屈曲させるものと更に圓弧をもつて屈曲させるものの比較が得られるわけである。

尙ほ球狀煉瓦積なるものは日本製鋼所の原理學士の御考案になるもので専ら塵埃の推積する面積と重なり合ふために失ふ面積を少なくしやうとする目的のものである。

(2) 測定方法と使用せる蓄熱室 實驗に於て最も困難を感じるのは温度の測定である。即ち蓄熱室の上部の様に高温度のものに於ては四壁からの幅射のために普通の熱電對では眞實の温度を測定出來ないのであつてこの爲には吸引型温度計(サクシオンタイプ、パイロメーター)を用ひなければならぬのであるがこれは甚だ複雑な装置であり且つまた外部に瓦斯を高速度で誘出するものであるから長時間の使用は熱損失を大にし瓦斯量の測定値にも變化を與へる恐れがある。兎に角吾々現場の者に於て出來得れば之れを用ひずに簡単に普通の熱電對をもつて測定する工夫が望ましいのである。それで普通の熱電對と吸引型の温度測定値に如何なる差異があるかと言ふに第5圖の如き結果が Shack<sup>(1)</sup>氏の實驗より與へられて居る。之れに依れば空氣蓄熱室に於ては空氣の測定値は甚だ差異があるが廢棄瓦斯の温度は差が非常に少ない。更に瓦斯蓄熱室に於ては冷却期間も加熱期間も共に殆んど差が無いと見て宜からう。これは空氣は副射に對して透明であるが排棄瓦斯及び發生爐瓦斯は共に副射體であるためと思ふ。

即ちこれによつて瓦斯蓄熱室を實驗に使用するときには普通の熱電對を以つて簡単に眞實に近い温度を測定することが出來るわけである。

第 1 表

それで此の實驗 A に於ては鹽基性 10 吨爐の瓦斯蓄熱室を使用した。高温度に於ては白金線が瓦斯に犯されて讀みが變化する恐れがあるので測定の前後に於て補正した。

また瓦斯量の測定は特殊のピトーチューブを用ひこの壓力を 25 倍に擴大して讀んだ、此のピトーチューブは特に測定用の風洞を作つて補

瓦斯	密度 $\gamma$ kg/m <sup>3</sup>	比熱 C
空氣	1.2930	0.2336 + 0.0000207T
CO <sub>2</sub>	1.9650	0.19 + 0.00011 T
CO	1.2505	0.2405 + 0.0000214T
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.2509	不明なれば計算に入れず
H <sub>2</sub>	0.0895	3.370 + 0.0003 T
CH <sub>4</sub>	0.7150	0.38 + 0.00022 T
N <sub>2</sub>	1.2544	0.2405 + 0.0000187T
O <sub>2</sub>	1.4291	0.2104 + 0.0000187T
H <sub>2</sub> O	0.8040	0.42 + 0.000185 T

正したものである。比熱と比重は其の都度の分析値より第1表を用ひて計算した。

表中 T は絶對温度ではない、今  $t_1$  と  $t_2$  の平均比熱を求めるには  $T = t_1 + t_2$  と置けばよろしい。

測定箇所は第6圖に示す如く温度は A B の2箇所で流量は B に於て測定した。特に B を擇んだ理由は流量の測定にはその前後に相當長い直線通路を必要とするからである。

(1) A. Schack: S. U. E 33 (1929) S. 1196

(3) 實驗結果 溫度測定結果は第7圖、8圖及び9圖に示した如く殆んど平衡に達した時の換言すれば同じ様な溫度變化を2度繰り返へすに及んで圖上より平均溫度を求めた。

瓦斯の成分は第2表に示す如くであつた。

第 2 表

瓦 斯 分 析	排棄瓦斯			發 生 爐 瓦 斯						
	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
柱 狀 積	14.2	7.6	78.2	26	12	5.1	1	4.2	0.2	51.7
格 子 積	10.0	10.8	79.2	26.2	11.9	4.5	1.1	4.6	0.3	51.4
球 狀 積	16.7	2.5	80.8	26	12.1	5.3	2.0	5.2	0	49.4

第 3 表

實 驗 煉 瓦 積	柱狀積	格子積	球狀積 A
W <sub>1</sub> Kcal/h	846	821	546
W <sub>2</sub> Kcal/h	462	415	490
W <sub>1</sub> /W <sub>2</sub>	1.83	1.97	1.11
M Kcal/h°C	1860	2430	2260
M'/Kcal/m <sup>3</sup> h°C	160	205	357
M/S Kcal/m <sup>2</sup> h°C	10.35	12.35	12.85
α Kcal/m <sup>2</sup> h°C	23.8	29.0	30.0
靜 壓 差 m/m	3.73	4.25	8.7
熱 効 率 η	0.45	0.46	0.74

以上の數値より計算された實驗結果を第3

表に示す。表中 M' は單位體積に對する熱交換率でありまた靜壓差とあるは第5圖の AB 2 點に於ける靜壓の差を水柱で表はしたものである。また傳熱率 α は α<sub>1</sub>=α<sub>2</sub> として λ=1.16 Kcal/m<sup>2</sup>h°C γ=1850kg/m<sup>3</sup> c=0.275Kcal/kg なる値をシャモツト煉瓦に對して用ひて計算

したものである<sup>(1)</sup>。

(4) 實驗結果の考察

(a) 煉瓦積の優劣 第3表を見ると單位體積の熱交換率 M' は球狀積が最もよく次が格子積、柱狀積の順序である、しかるに單位面積に對する熱交換率 M/S は柱狀積は少しく劣るが格子積と球狀積は殆んど等しく稍々球狀積が優れて居る、即ちこれを換言すれば球狀積は格子積よりもその加熱面積が多いだけ丁度熱的に優れて居ると言ふことになるのである。

次に摩擦損失の目安として蓄熱室上下の靜壓差を比較して見ると球狀積は最も摩擦が大きく柱狀積が最も少さく格子積はその中間であつた。而して實際の爐の運轉成績は球狀積が却へつて解切時間が長く格子積と柱狀積は殆んど同じであつた。これは球狀積が摩擦が多かつたために空氣全部が蓄熱室を通ること出來ず冷たい空氣が多く爐體等より洩入して全體の溫度が下つたためと思はれる。

要するに此の實驗に於ては球狀積は熱的に優れて居るが摩擦が多いから通風の小さい爐では實際運轉の成績はよくない柱狀積は熱的には劣つて居るが、摩擦損失が非常に少ないために爐の操作が樂で却つて成績がよかつたと言ふことになるのである。

(b) 傳熱率について 傳熱率は一般に臨界速度以上に於ては通過熱容量(速度に比重と比熱を乗じたもの)に比例し臨界速度以下に於ては大體一定であるとされて居る。しかるに柱狀積の場合の臨界速度は計算上 0°C にて 1.1米/秒 であるが實際通過速度は 0.37米/秒 であるからたとへ蓄熱室上下に於て急激な斷面變化のために少しく渦流を助生させられる傾向を考へに入れても尚ほ臨界速度以内

(1) λ と c は E. Schmidt 氏 γ は H. M. Spiers の實驗よりいづれも 500°C に於ける値なり。

であると見られる。即ち 23.8 なる傳熱率は臨界速度以下の一定のものと考えて差支ないと思ふのである。

また此處に注意すべきことは柱狀積と他の 2 者の間の傳熱率の差が豫想外に少なかつたと言ふことである。即ち格子積や球狀積の様に殊更に錯雜した通路を通じて渦流を生ぜしめることによる傳熱率の増し方が現在の様な速度の下に於ては豫想外に少ないと言ふことである。

尙ほ最近筆者の實驗後に發表されたものに G. Slottman 氏のデオープンフリユーに積んだ時の實驗がある<sup>(1)</sup>(この積み方は實驗の格子積と柱狀積の中間に屬するものと見做されるもの)これは筆者とは別個の方法で直接傳熱率を測定したものでその排棄瓦斯に對する結果を示すと第 4 表の如くである。

これを見ると速度に對して却へつて傳熱率が減少して居るがこれは臨界速度以下に於て見受けられ

第 4 表 (メートル單位に換算す)

速度 m/sec a to °C	22.2	24.7	30.5	32.3
$\alpha$ Kcal/m <sup>2</sup> h°C	26	25.2	19.9	22

る現象である<sup>(2)</sup> から大體臨界速度以下と考へて差支なからう。しかるときは平均の傳熱率は 23.3 Kcal/m<sup>2</sup>h°C となつて本實驗で求めた臨界

速度以下の傳熱率 23.8 に非常に一致するのである。

#### IV. 實 験 B

(1) 實驗せる煉瓦積の種類 實驗した煉瓦積は實驗 A に於けると同じ格子積第 1 圖と實驗 A に於けるよりも更に密に積んだ球狀積 (B) 第 4 圖の 2 種である。

(2) 實驗の方法と使用せる蓄熱室 實驗 A に於て 3 種類の基本的煉瓦積の優劣を比較すると同時に少しくその傳熱現象を覗ひ知ることが出来たがこれは瓦斯蓄熱室内のもので即ち發生爐瓦斯と排棄瓦斯のものであつて出来得れば更に空氣のそれをも知りたいのである。しかしながらこれは前に述べた如く實際の蓄熱室に於ては眞實の溫度は測定出来ないのであるが空氣は副射が非常に少ないから低溫度に於ても高溫度に於ても餘り傳熱率に變化がないことが想像される。故に若しも低溫度に於て蓄熱室を運轉して測定する時は四壁の副射影響を免かれて眞實に近い空氣溫度を測定出来且つそれより實際状態に近い熱交換率や傳熱率を求めることが出来る筈である。即ちこの様な目的のために坩堝蓄熱室の一部を用ひ最高空氣平均溫度が 600°C 以上にならない様に調節して測定したのである。

更に此の實驗はまた速度の熱交換率に及ぼす影響も併せて知りたいと思ひ此の爐に於て出来得るだけの早い速度と出来得るだけの低速度の 2 様の速度で實驗したのである。

測定箇所は第 10 圖に示した A より E に至る 5 箇所であつて特に A, B, C は流量の測定のために溫度と壓力を測定した箇所である。特に此等の點を擇んだ理由は煙道に於けるよりも速度が著しく早く測定の見誤差が少ないと思つたからである。

(3) 實驗結果 溫度の測定結果は第 11 圖より 14 圖に示した如く平衡に達したものについて圖上

(1) Blastfurnace & Steel plant 3 (1930) p. 489

(2) 例へば兼重氏のコンデンサー管の傳熱實驗 機械學會誌 98 (1925) p. 237

第 5 表

實驗	格子積 (低速)	同 (高速)	球狀積 (低速)	同 (高速)
CO <sub>2</sub> %	3.0	4.4	2.2	3.1
O <sub>2</sub> %	18.4	17.26	18.8	17.9

第 6 表

實 驗	低速度		高速度	
	格子積	球狀積	格子積	球狀積 B
煉 瓦 積				
W <sub>1</sub> Kcal/h	65.4	57	90.5	86
W <sub>2</sub> Kcal/h	58.3	52.3	82.5	81
M Kcal/h°C	133	210	145	261
M' Kcal/m <sup>2</sup> h°C	109.5	183	120	230
M/S Kcal/m <sup>2</sup> h°C	6.4	6.3	7.0	7.9
α Kcalm <sup>2</sup> h°C	14.8	14.4	16.4	18.7

より平均温度を求めた。排棄瓦斯の成分は第 5 表に示す如くであつた。

以上の数値より計算された實驗結果を第 6 表に示す。

(4)實驗結果考察 第 6 表の低速度に於ける實驗結果を見るに此の場合に於ても實驗 A と同じ様なことが言ひ得る。即ち M の値は球狀積は格子積よりも 80% ばかりも多いがその單位面積の熱交換率 M/S は兩者殆んど等しい、即ち球狀積はその單位體積に含まれる加熱面積が多いただけ丁度熱交換

率が大きかつたと言ふことを此の場合に於ても言ひ得るのである。

而してこれを少くし速度を増した場合を見るに兩煉瓦積共に熱交換率及び傳熱率が低速度に於けるものより増加する。しかしその割合は同じ様な W<sub>1</sub> W<sub>2</sub> に對して球狀積の方が傳熱率に於て大きい。これは球狀積は格子積よりも密に積まれただけ渦流を生じ易いからである。また第 5 表より考へられる様に排棄瓦斯も殆んど空氣と見做し得る故此處に求められた傳熱率は空氣のそれであると考へて宜しい。

而して低速度に於ては格子積も球狀積も傳熱率が全く等しいと言ふことからこの時は臨界速度以内であると考へられる。それで此の臨界點以下の傳熱率が發生爐瓦斯及び排棄瓦斯の 23.8 に對し空氣は平均 14.6 と言ふ低い値であることが知れる。而して此の場合の格子積の通過速度(垂直自由斷面積に對する)を計算すると平均 8m/sec であるから格子積に於ては大體此の位が臨界點であらう。

### V. 蓄熱室の改良と設計に關して

(1)熱効率について (1)式に示した如く熱交換率は加熱面と傳熱率を増し煉瓦の熱的性質等を適當にすることによつて如何なる程度迄も大きくすることが出来るのであるがこれは無暗に大きくすべき性質のものではなく自ら限度があるわけである。

今蓄熱室の理論的効率(熱損失の無い場合の効率を名づく)と M/W<sub>1</sub> の關係を示すと第 15 圖の如くで M/W<sub>1</sub> を或る程度以上増しても熱効率が殆んど増さないと云ふ點が在るのである。

更に重要な事項は瓦斯量の比 W<sub>1</sub>/W<sub>2</sub> の値によつてその達し得る効率が制限されてしまふことである。例へば本實驗 A の格子積の場合は M/W<sub>1</sub> が 3.45 で W<sub>1</sub>/W<sub>2</sub> が 2 であるから今この儘の状態でも如何に莫大な費用を投じて蓄熱室を擴張しても効率は少しも増加しないことが知れる。

しかるに單に W<sub>1</sub>/W<sub>2</sub> を 1 に近づけたのみで η を 60% も増加出来る。更に其の上で蓄熱室を擴げるならば η は増増 1 に近づくのである。

しかして實際過剰空氣と爐體や上昇道等より洩入する空氣に注意するならば  $W_1/W_2$  を 1 に近づけるのであるから成る可くその様に運轉することが望ましい。今この實例を示すと第 3 表の球狀積 A に於ては  $W_1/W_2=1.1$  としたために實際の効率(熱損失を考へ入れたもの)が 0.74 になつて他の場合よりも著るしく宜かつたのである。而して此の場合の排棄瓦斯の分析第 2 表を見れば殆んど過剰空氣を含んで居ないのである。兎に角蓄熱室を改造しやうとする様な場合は現在その蓄熱室が如何なる状態にあるかを明かにする必要があるので無益な蓄熱室の擴張は單に熱損失を増すことのみで終つてしまはぬとも限らないのである。

(2)設計について 現在の状態に於ける熱交換率や傳熱率が求まつたのであるからこれと同じ様な速度に於ける蓄熱室の適當な加熱面積を第 15 圖を用ひて計算し得るわけである。いま單にその一例として計算方法を示せば普通の運轉状態が  $W_1/W_2=1.2$  位であると假定すれば  $M/W_1$  が 8 以上では  $\eta$  の増加が甚だ少ないからこれを適當な  $M/W_1$  の値であるとすればこれを(1)式に代入して

$$\frac{S}{W_2} = 9.6 \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + 3.84 \left( \frac{\tau}{\delta c \gamma} + \frac{\delta}{4\lambda} \right)$$

となる。此の  $S/W_2$  は被加熱瓦斯 1 Kcal/h を加熱するに最も適當な加熱面積と言ふことになる。故に若しも臨界速度以下の傳熱率を用ふるならば即ち瓦斯蓄熱室に於て  $\alpha_1 = \alpha_2 = 23.8 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$  空氣蓄熱室に於て  $\alpha_1 = 23.8 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$ 、 $\alpha_2 = 14.6 \text{ Kcal/m}^2 \text{ h}^\circ\text{C}$  とするならば實驗 A の(3)に用ひた煉瓦の數値を入れて

$$\text{空氣蓄熱室} \cdot \frac{S}{W_2} = 1.065 + 0.00755 \frac{\tau}{\delta} + 0.838 m^2 \quad \text{瓦斯蓄熱室} \cdot \frac{S}{W_2} = 0.805 + 0.00755 \frac{\tau}{\delta} + 0.838 m^2$$

となる。傳熱率はこれ以下にならないのであるから上記の數字は  $W_1/W_2=1.2$  に於ける最大限の加熱面積であると見て宜ろしからう。

## VI. 總 括

- 1 蓄熱室煉瓦積の熱的優劣を現場に於て比較實驗する簡単な方法を述べこれにより 4 種類の煉瓦積について比較實驗を行つた。
- 2 その結果實際作業状態に於ける單位體積の熱交換率は球狀積が最もよく格子積は中位で柱狀積が下位であつたが球狀積のよかつたのは主として單位體積内の加熱面積が多いためそれと共に摩擦損失は甚だ大きかつた。
- 3 現在の様な速度の下に於ては傳熱率は特に錯雜せしめた通路のものも直線的通路のものも大差がなかつた。即ち主として加熱面積の大小のみに左右されることを確めた。
- 4 しかしながら速度を増す時は錯雜せしめた通路のものの方が傳熱率が増加しやすいことを知つた。  
 $W_1$  と  $W_2$  はなるべく同じ様に運轉することが望ましいことを理論的に説明し且のその實例を本實驗より擧げて例證した。

6. その絶対値に高度の精確は期し得られないが本実験結果より得た傳熱率を用ひて1Kcal/hの瓦斯を加熱するに適當な加熱面積を求めて從來殆んど計算の基礎のなかつた蓄熱室設計の一助とした。終りに臨み本研究は日本製鋼所室蘭工場に於て行はれた、同所は之を本會に發表することを許可せられたるを茲に謹んで御禮を申し述べる。また測定製圖等に助力された大濱福市君に深く謝意を表す

## 附 録

### 蓄熱室温度の時間的變化の圖式解法

蓄熱室温度の時間的變化に對する微分方程式は未だ完全に解かれて居ない。最近 Nutzelt 教授<sup>(1)</sup>及び Hausen 博士<sup>(2)</sup>の2人が殆んど同時にこの問題を取り扱つて居るがこれらはいづれも煉瓦の熱傳導率が無限によいものとして解かれたもので決して完全な解ではない。且つこの様に簡略に考へてさへその解かれた結果は恐ろしく複雑なものでその上積分の形で與へられてゐるので事實上殆んど計算の不可能なものである。それ故更に煉瓦の熱傳導の事項をも考へに入れた算式に至つては數學的に解くこと不可能であると言つて差支ない。

しかしながらこれを圖學的に求めて見ると案外簡単に求められるのでこの作圖法の大體を述べて見たいと思ふ。

即ち第 16 圖の如く煉瓦の厚さ當量の生分  $\frac{\delta}{2}$  をとつてこれを任意に細等分して  $4\delta$  としこの内部の温度分布が 0, 1, 2, 3, 4 と言ふ様であるとき  $\frac{\lambda}{\alpha}$  の距離に斯瓦の温度  $T_g$  を 5 と採ると

$4t = (c\gamma/2\lambda)(4\delta)^2$  なる微少時間  $4t$  後に變化する温度  $0', 1', 2', 3', 4'$  は次の様な作圖で求まる。

先づ 6 と 2, 1 と 3, 2 と 4 を結んだ線と夫々 1, 2, 3 の垂直線との交點が  $1', 2', 3'$  でまた  $1'$  と 5 の直線が 0 の垂直線即ち煉瓦の表面と交つた點が  $0'$  また煉瓦の中心は對稱の理由より  $4' = 3'$  として  $4'$  が求められるのである。これは  $4\delta$  を  $\delta/6$  とした場合を例としたが其の場合も同様である。以上は E. Schmidt 氏<sup>(3)</sup>が物體內の傳熱の方程式を簡単に圖式的に解くべく考へられた方法で非常にこれは便利な方法でこれを用ふるときは普通數學的には解き得ない様な種々の周圍の條件を満足するものであつた。例へば之を少しく修飾するときは鋼塊内部の傳熱現象と鑄型の關係や潜熱の温度分布に及ぼす影響等を數學的に解くことの拾數分の一の手數をもつて成し遂げ得るのである。蓄熱室の問題もこれを應用して次の如く解くことが出來たのである。今蓄熱室の全加熱面積  $S$  を任意に細等分して  $4S$  とすると  $4S$  だけ距たつた點に於ける  $4t$  後の瓦斯の温度は表面より  $4S\lambda/W_1$  (今假りに加熱期について考へて) だけ距たつた線と 5— $0'$  線との交點 7 で表はされる。故にこの  $4S$  距たつた點の瓦斯温度が求められたのであるから  $4t$  後の煉瓦の温度變化は再び前に述べたと同様の方法を繰り返すことによつて求められ結局逐次作圖を進めることによつて全體の温度變化を求めることが出来る。故に若しも

(1) W. Nutzelt. V. D. I, 71 (1927) S. 83

(2) H. Hausen Zeit. aug. Math. 9 S. 173

(3) "Trink: "Industrial Furnaces" p. 323

又は "Beiträge zur technischer Mechanik und technischen Physik" S. 176



蓄熱室へ入り来る瓦斯の温度と蓄熱室の最初の時間に於ける温度分布が與へられるときは蓄熱室内部の時間的溫度變化を求めることが出来るのである。

而して蓄熱室に入る際の瓦斯の温度は必らず與へ得るものであり（それが時間に對して一定であるとも變化するものであるとも差支ない）また蓄熱室の最初の温度分布は例へば全體が一様に常溫であるとかまたは煉瓦表面が或る知られた簡単な温度分布に豫熱されて内部は長時間の加熱により表面の温度と等しいとか兎に角非常に簡単な形で與へられ得るのである。

今一例として  $S=340m^2$ 、 $W_1=1300Kcal/h$ 、 $W_2=1000Kcal/h$ 、 $\alpha_1=\alpha_2=33Kcal/m^2h^\circ C$ 、 $\delta=0.066m$ 、 $\lambda=0.66Kcal/mh^\circ C$ 、 $e=0.24Kcal/kg$ 、 $\gamma=1700kg/m^3$  と言ふ蓄熱室が最初一様に豫熱されてゐてこれに  $F_1=1,220^\circ C$ 、 $A_1=635^\circ C$  の加熱瓦斯と被加熱瓦斯が交流する場合第1回交換が2時間、第2回が1時間、第3回が30分、第4回が15分それ以後の交換が7.5分とである場合（これは實際稼行と異なるが）蓄熱室が平衡に近づいて行く有様を示せば第17圖の如くである。

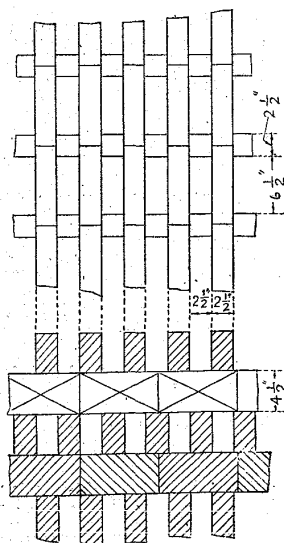
尙ほ此の際の計算は  $4S = \frac{1}{10} S$   $4x=1cm$ 、 $4t=1.88分$   $\frac{\lambda}{\alpha}=2cm$ 、 $4S\lambda/W_1=1.73cm$ 、 $4S\lambda/W_2=1.33cm$  として求めたものである。

此の圖に於て實線は瓦斯温度、點線は煉瓦の表面温度で各全面積の  $1/5$  づつの箇所にてけるものを上部より順次に示したのである。

これによつて蓄熱室は案外速やかに平衡に達するものであることや最初の交換期間に於ては蓄熱室上下の温度變化の様子が反對であると言ふ様なことが知れやう。

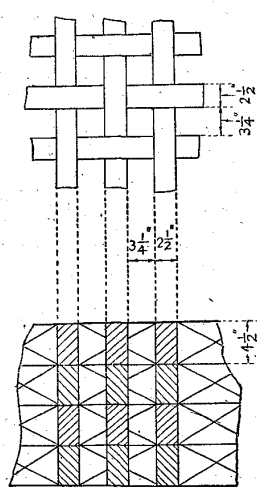
第1圖 格子積

$d = 0.0465 m$



第2圖 柱狀積

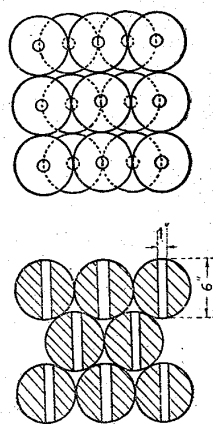
$d = 0.088 m$



第3圖 球狀積 A

A

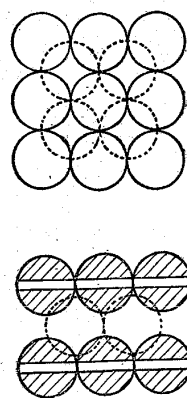
$d = 0.048 m$



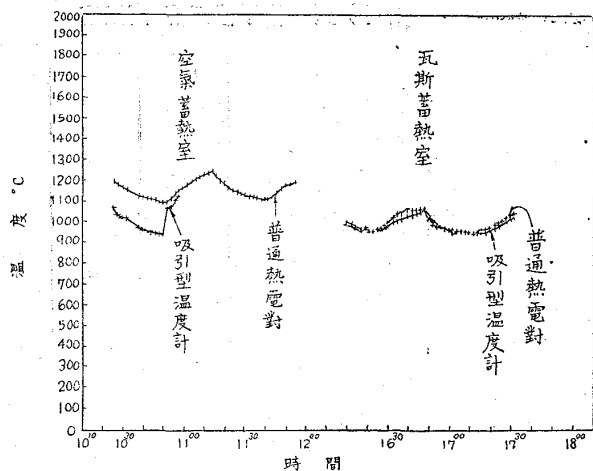
第4圖 球狀積 B

B

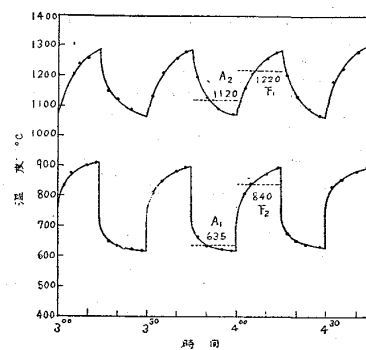
$d = 0.048 m$



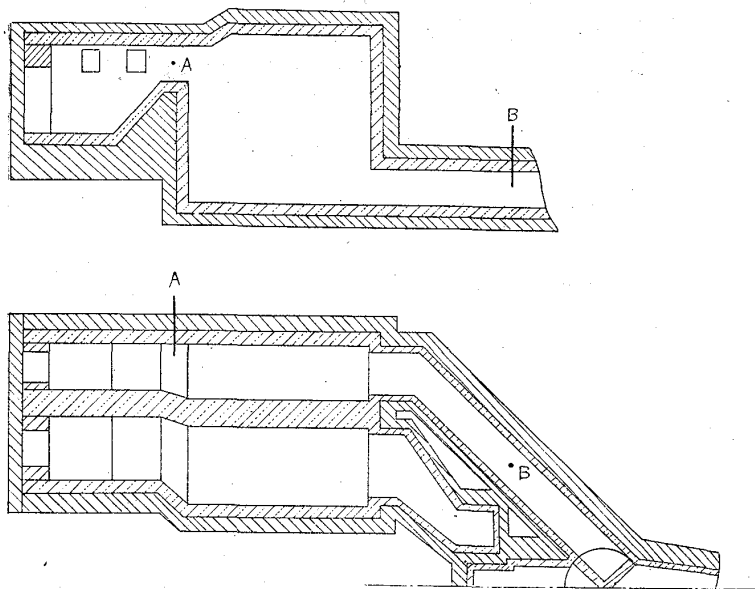
第 5 圖 普通熱電對と吸引形溫度計との測定値比較



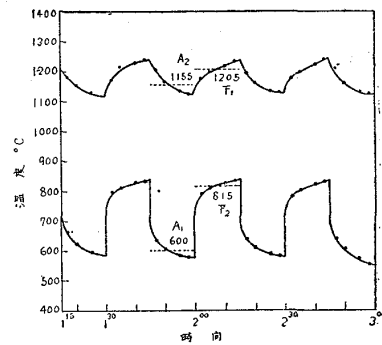
第 7 圖 柱狀積溫度



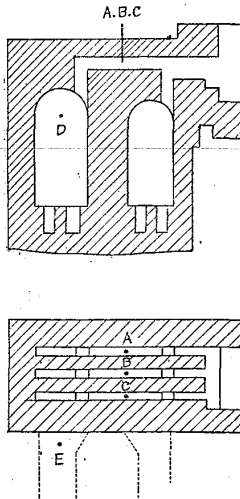
第 6 圖 實驗Aに使用せる蓄熱室と測定箇所



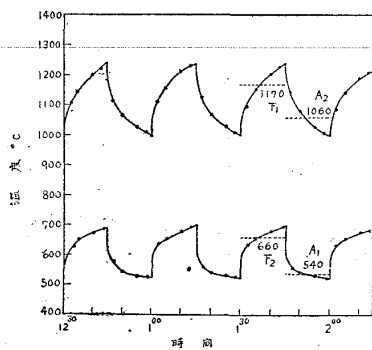
第 8 圖 格子積溫度



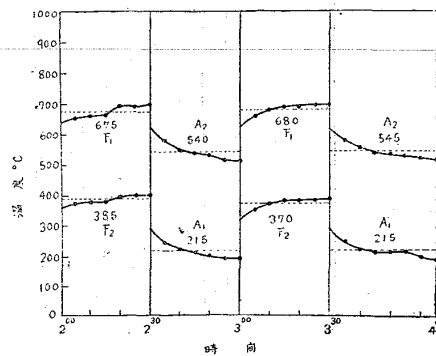
第 10 圖 實驗に使用せる蓄熱室と測定箇所



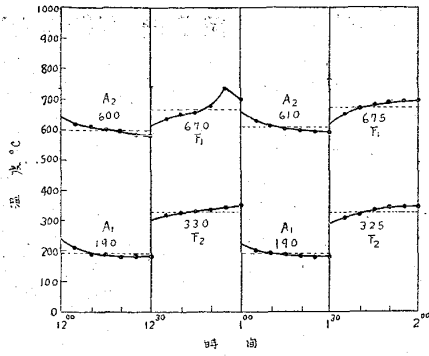
第 9 圖 球狀煉瓦(A)溫度



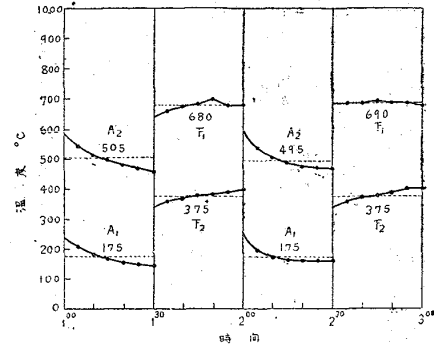
第 11 圖 格子積溫度(低速度)



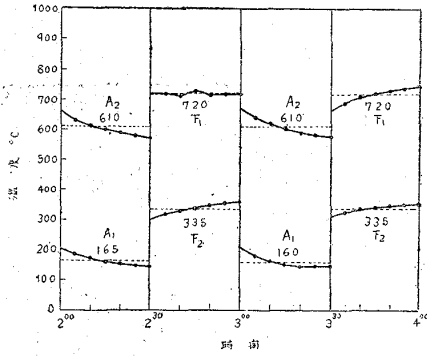
第 12 圖 球狀積(B)溫度(低速度)



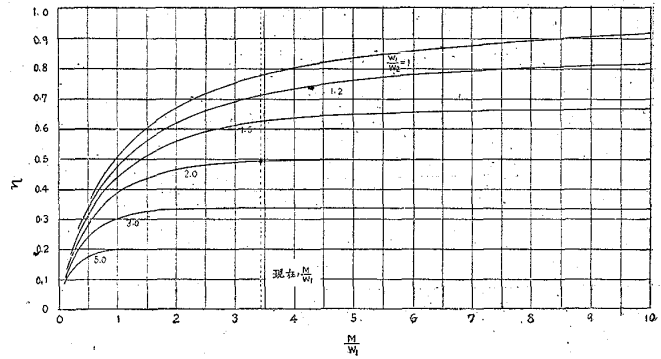
第 13 圖 格子積溫度(高速度)



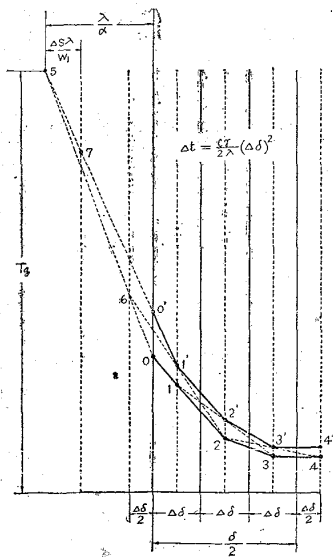
第 14 圖 球狀積溫度(高速度)



第 15 圖



第 16 圖



第 17 圖

