業的に合理的測定法を試み顯微鏡的に觀察したる所を加へて考察するに、(1) 大多數の調合物は 15~30% 程度の粉末の 50~70% を含有せるものなること、(a) 内でも試験試料の八割は 20~30 μ 大のものを 60~70% 方含有するものなること、(b) 一割五分が 15~20 μ 大のものを 50% 方含有してあること。(2) 最大徑のものは石灰石粒子で長さ 200 μ に達するものがあり、100 μ 以上に及ぶものは甚だ多いこと。(3) 石灰石に非ざるものでも 100 μ を超ゆるものが混在すること尠からざること。

附記 原料調合物については焼成中に起る化合進行の模様を知るを以て當初の目的としたのでありますが焼成爐の性能に不充分な所があつた爲め爐溫の均齊を得難く今日迄發表するに至らなかつたのでかゝる古い試料を使用したことは意味のない様な氣もするが一參考迄に報告することゝしました。該法は微粉測定諸法中最も合理的なものに屬し而も裝置は至簡操作亦至便で研究室に於て必要缺くべからざるものであると同時に工場に於て日々の作業のコントロールにも甚だ重寶なものであると思はれます。裝置は京都市左京區丸太町川端東入喜多村商店は既に十數個作つた經驗がありますから御利用下されば御便宜かと存じます。

(昭和八年二月廿二日 京都帝國大學工學部工業化學教室)

輻射係數及周圍の溫度がセメント回轉窯のセルの 熱損失に及ぼす影響に就て

吉 井 豊 藤 丸

Influences of Radiation Coefficient and Atmosphere Affecting
to the Heat Loss of a Rotary Kiln Shell.

by Toyofujimaru Yoshii

Abstract.

Heat loss of the rotary kiln shell is much connected with the atmosphere and radiation coefficients of the shell and the surrounding bodies. If we want to diminish the heat loss, it is a way to increase thickness of the lining brick, with a view to lower the shell temperatures, first of all. But heat is accumulated accordingly, and the lining brick can not stand for the high temperature of the inside, and worn away one after the other.

Therefore it is a previous question whether the degree of refractoriness of the lining brick is enough or not.

Then author intended to diminish the heat loss as few as possible, by enclosing around the kiln shell and decreasing the radiation coefficients of the shell and the surroundings also.

As its consequence, though kiln shell temperatures somewhat rise resistively, heat loss can be saved by some 15% than before.

緒 言

曩に著者はセメント回轉窯のセルの熱損失に就て研究し次の如き式を與へたることあり。

$$Q = Q_r + Q_c = (A) \frac{c_1 \rho_2}{E} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + 0.28(A) \cdot \Delta t^{1.23} \dots \dots \dots (1)$$

但 Q_r = 輻射熱損, Q_c = 對流による熱損, 其他の符號は(2)式附記と同じ。

上式に於て右邊第一項 $e_1 e_2 / E$ 即輻射係數及セルの溫度 T_1 と外圍 (同轉窯室内窯の周圍をさす) の溫度 T_2 從而第二項 Δt の變化は熱損失量 (Q) に對して如何なる影響を及ぼすかに就て更に吟味せんとするものなり。

* 詳細本誌 No 461 (昭和 6 年 5 月) 及 Rock Products, Vol XXXV, No. 4 参照

I. 實測上のセル溫度と外氣との關係

外氣の溫度の昇降はセルの溫度に如何なる影響を及ぼすかを知らんが爲當地 (埼玉縣秩父町) に於て最氣溫の變化の烈しき 2 月中に於て窯の條件を可及的一定ならしめ (窯の條件は絶對的に一樣に保つことは不可能なれども石炭の焚方, ドラフト, 原料の送入等を一定に保てり) 約 10 日間にわたり毎時間實測しそれぞれ其平均値をもとめて計算すれば第 1 表の如し。

Table I. Relation between temperatures of shell and out of doors

Temperatures out of doors			Shell Temperatures			Shell Temperatures (t' °C)	$\Delta t = t - t'$ (°C)
°C	absolute temperature (T °C)		by Thermometer	factor	by Elongation	by formula (2)	
-5	+273 = 265°		108.5	+0.68	= 159.6	158.2	-1.4
-4	" = 269		"	"	= "	159.5	-0.1
-3	" = 270		109	"	= 160.3	160.8	+0.5
-2	" = 271		110.5	"	= 162.5	162.1	-0.4
-1.5	" = 271.5		110.7	"	= 162.8	162.8	0
0	" = 273		111.4	"	= 163.8	164.7	+0.9
1	" = 274		113.5	"	= 166.9	166.1	-0.8
2	" = 275		114.3	"	= 168.1	167.5	-0.6
3	" = 276		114.5	"	= 168.4	168.8	+0.4
4	" = 277		115.4	"	= 169.7	170.1	+0.4
5.5	" = 278.5		117.—	"	= 172.1	172.2	+0.1
7	" = 280		118.3	"	= 174.0	174.2	+0.2
							$\Sigma \Delta t = -0.8$

(附記) 1. 外氣溫零度以下のものは實驗式をもとむる際に $\log T$ をもとむる必要上計算に便せんが爲各 273°C を加算して絶對溫度に換算せり。

2. 上表の Δt は實測上のセル溫度 (t) と實驗式 (2) より得たる直 (t') との誤差を示すものにして兩者の値は略一致するを見る。

上の實測値を基礎として T と t との關係をあらはす實驗式を求むれば $t = aT^b$ なる式型に該當することを知り平均法によつてこの式の a 及 b を求むれば次式 (2) を得

$$t = 0.00072 T^{2.2} \dots \dots \dots (2)$$

II. 理論上より見たるセル溫度と外圍との關係

然るに操業上焼手は常に窯内溫度を一定ならしめんとつとむるが故に同一條件の下に於ては窯の内壁溫度は一定なりと見て可なり。依て理論上次の關係が成立すべし。

例 外圍溫度 5°C より 15°C に上昇せる場合のセル溫の變化

外圍 5°C に於てセル溫 140°C, $Q = 10652$ B.T.U./hr/ft run にして斷熱煉瓦 II を用ひたる場合に外圍の溫度 10°C (18°F) の上昇に對してセルの溫度は $x^\circ\text{F}$ 昇りたりとす。

$$\text{而して } \Delta t = Q \times \Sigma \frac{L}{KA} = 10652 \times 0.08385 = 893.2^\circ\text{F} \text{ なり。}$$

然るにセルより外へ逃る熱と窯内壁より煉壁を通して外面につたはる熱量は相等しきを以て次の關係あり。

$$Q = \frac{\Delta t_1 - x}{\sum \frac{L}{KA}} = (A) \times \frac{e_1 \cdot e_2}{E} \times \left[\left(\frac{T_1 + x}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2 + 18}{100} \right)^4 \right] + (t_1 + x)^{1.25} \times A \times 0.28 \dots\dots\dots (3)$$

附記 Δt_1 は窯内壁溫度とセル外面溫度との差 (F°)

$\sum \frac{L}{KA}$ は窯の壁の傳熱抵抗率にして K は熱傳導係數。

A は表面積 (sq. ft.), L は兩面間の厚さなり (ft)。

e_1, e_2 はそれぞれセル及對物の輻射係數。

E は完全黑色體の輻射係數なり。

T_1 はセルの絶對溫度 (F°)

T_2 は外圍の絶對溫度 (F°) にてこゝでは $491.4 + 9.0 = 500.4$ (F) absol. とす。

t_1 はセルと外圍との溫度差 (F°) なり。

(3) 式にそれぞれ數をあてはむれば (4) 式を得

$$Q = \frac{893.2 - x}{0.08385} = 1.215 \times \left[\left(\frac{743.4 + x}{100} \right)^4 - \left(\frac{518.4}{100} \right)^4 \right] + (225 + x)^{1.25} \times 8.0287 \dots\dots\dots (3)$$

(4) 式の x をもとむれば (ニュートン氏逐次代入法或はグラフの助によつて目の子算的にもとむるを得べし) 下の如し。

$x = 11.5^\circ\text{F} = 6.4^\circ\text{C}$ [此時の $Q = 10515$ B.T.U/hr/ft run]

同様に於て外圍 5°C に於てセル溫度 $155^\circ, 170^\circ, 185^\circ, 200^\circ$ (C) (以上斷熱煉瓦使用の場合) 及 $200^\circ, 250^\circ, 300^\circ, 350^\circ, 400^\circ, 450^\circ$ (C) (以上斷熱煉瓦不使用) なるものが外圍の溫度がそれぞれ 10°C 及 100°C 上昇せる場合のセル溫度及熱損失量を計算すれば第一圖及第二表の如し。

Table II.

	With Insulating Brick					No Insulating Brick						mean
Shell temp(C°) at 5°C	140	155	170	185	200	200	250	300	350	400	450	
" at 15°C	146.4	161.2	176.1	190.9	205.8	204.7	254.3	304.0	353.7	403.4	453.1	
diff' above {	in C°	6.4	6.2	6.1	5.9	5.8	4.7	4.3	4.0	3.7	3.4	3.1
	in F°	11.5	11.2	11.0	10.7	10.4	8.5	7.8	7.2	6.6	6.1	5.5
Heat loss(Q ₁) at 5°C (B.T.U/hr/ft' run)	10652	12304	14049	15835	17818	17818	25007	33453	43340	54881	68298	
" (Q ₂) at 15°C (B.T.U/hr/ft' run)	10512	12170	13919	15759	17694	17529	24745	33209	43115	54678	68111	
Q ₂ /Q ₁ × 100 (%)	98.69	98.91	99.07	99.21	99.30	98.38	98.95	99.27	99.48	99.63	99.73	99.15
Shell temp (C°) at 105°C surrounding	204.4	217.8	231.3	244.7	258.2	247.2	294.1	340.8	387.5	434.3	481.2	
shell temp' rise from at 5°C to at 105°C {	C°	64.4	62.8	61.3	59.7	58.2	47.2	44.1	40.8	37.5	34.3	31.2
	F°	115.9	113.1	110.3	107.5	104.7	84.9	79.4	73.5	67.5	61.7	56.2
Heat loss (Q ₃) at 105°C B.T.U/hr/ft' run	9270	10955	12732	14604	16569	14953	22330	30974	41060	52799	66403	
$\frac{Q_3}{Q_1} \times 100$ (in %)	87.03	89.04	90.63	91.94	92.99	83.92	89.30	92.59	94.74	96.56	97.49	91.48

上に見るが如く實驗上と理論上の結果の間に可なりの差あり一見兩者は矛盾するが如く見ゆれども然らず。

尤も窯の條件を絶對的一定に保つことは不可能にしてこれを一定なりと假定したること及後の場合に於て窯内壁の溫度を一定なりと假定したる爲兩者の間に幾分の差を生ずべき理なれども主原因は著者の測定したる窯は半屋内にあり大氣の溫度上昇する時はセルより逃げる熱が漸次屋内にこもつて戶外溫度の上昇割合以上に昇る。

然るに窯の周圍は建物置物等錯綜しこれが平均溫度をもとむること困難なるが故に前者に於ては便宜上戶外の溫度を用ひたるが爲かくの如き差を生じたるものにして室内の平均溫度を基準として計算すれば理論と實測とは略一致す。

III. 輻射係數の變化がセルの溫度及熱損失に及ぼす影響

次に前節と同様にして窯のセルの表面及外圍對物の輻射係數の値が小さくなつた場合にセルの溫度及熱損失に對していかなる影響を及ぼすかに就て考ふるにこの場合も前同様次の如き關係が成立すべし。

$$Q = \Sigma \frac{L}{KA} (T_i - T_1) = (A) \left\{ \frac{e_1 e_2}{E} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] + 0.28 (\Delta t)^{1.25} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

(但し T_i は窯内壁の溫度にして他の符號は全部前節同様なり)

セルの表面に金屬光澤を有する ペイントを塗るか 或は常にきれいに磨いておくならば 實際上其關係黒色度を 0.3 位に保ちうと考へらるゝが故に其輻射係數は $e_1 = 0.3 \times 0.162 = 0.0486$ となる。

次に外圍をきれいなトタン板にて全周の $\frac{3}{4}$ を圍ひ (操業上の必要より全周を圍ふこと能はず) 殘 $\frac{1}{4}$ だけが大地に對するものと假定すれば其關係黒色度を大體 $\left[= \frac{1}{4} (0.22 \times 3 + 0.4 \times 1) = 0.265 \right]$ 迄下げうるを以て $e_2 = 0.265 \times 0.162$ となる。

$$\therefore (A) \frac{e_1 e_2}{E} = \frac{31.86 \times 0.265 \times 0.162 \times 0.3 \times 0.162}{0.162} = 0.01288 \times 31.86 = 0.4104 \text{ となる。}$$

今 (4) 式にそれぞれ數をあてはめてセル溫度が 280°F (=140°C) より (284+ ϵ)°F に上りたりと假定すれば次式を得。(但斷熱煉瓦使用)

$$Q = \frac{881.7 - x}{0.08385} = 0.4104 \times \left[\left(\frac{754.9 + x}{100} \right)^4 - \left(\frac{518.4}{100} \right)^4 \right] + (236.5 + x)^{1.25} \times 8.0287$$

これを解けば $x = 34.1^\circ\text{F}$ (比時の $Q = 10108$ B.T.U) となる。

同様にして外圍 15°C , $e_1 e_2 / E = 0.03814$ の場合に於てセルの溫度 155°C , 170° , 185° , 200° (以上斷熱煉瓦使用), 206° , 250° , 300° , 350° , 400° , (以上斷熱煉瓦なし) なるものが外圍 15°C $e_1 e_2 / E = 0.01288$ に變化したる場合のセル溫度及熱損失量を計算すれば第二圖及第三表の如し。

Table III.

	With Insulating Brick					No Insulating Brick						
Shell Temps : t_1 °C (at 15°C surrounding) ($e_1 e_2 / E = 0.03814$)	140	155	170	185	200	200	250	300	350	400	450	Mean
Heat Loss above: Q_4 (B.T.U/hr/ft run)	10512	12170	13919	15759	17694	17529	24745	33209	43115	54678	68111	
Shell Temps : t_2 °C (at 15°C Surrounding) ($e_1 e_2 / E = 0.0128$)	158.9	176.9	194.9	213.2	231.7	223.8	284.6	347.2	411.8	478.0	545.7	
Heat Loss above: Q_5 (B.T.U/hr/ft run)	10108	11701	13382	15151	17013	16089	22648	30344	39365	49939	62300	
$t_2 - t_1$ { in $^\circ\text{F}$	34.1	39.4	44.9	50.8	57.1	42.8	62.2	85.0	111.2	140.4	172.3	
{ in $^\circ\text{C}$	18.9	21.9	24.9	28.2	31.7	23.8	34.6	47.2	61.8	78.0	95.7	
$Q_5 / Q_4 \times 100$ (in %)	96.16	96.15	96.14	96.14	96.15	91.79	91.52	91.37	91.30	91.33	91.47	93.59

上表の計算によれば P_2 のセル溫度は 500°C 以上に達すべきが故にセルはやゝもすれば褐赤色を呈するに至り危険なり。又一般に焼成圈のセル溫度 300°C 以上の部分に於てはセルを磨きて常に光澤ある状態に保つこと至難なり。尙ペントも比較的剥げやすし。依而此部分には耐火度の充分なる内張煉瓦の厚きものを鋪装してセル溫度の低下をはかるに如かざるべし。

結 論

セメント回轉窯のセルの熱損失はセルと外圍の溫度及各々の輻射係數に關係す。

故に熱損失を少からしむるには先セルの溫度を低下せしむるの目的の下に内張煉瓦を厚くすることも一方法なれども然る時は窯内に熱がこもり煉瓦は其高溫に耐得ずして漸次とける滅損するが故に煉瓦の耐火度が充分それに耐うるか否かと先決問題なり。

依而著者は窯の外側を圍ひて外圍の溫度を高めた場合及セルと對物相互の表面の輻射係數を可及的減じて熱損失を少からしめんとせり。其結果は所謂反抗率に従ひセルの溫度は幾分上れども結局實際的に到達しうべき最少熱損失量は前者に於ては事前の約 91.5% (外圍の平均溫度を 105°C として) 後者に於ては約 93.6% 迄に

削減しうべくもし兩者併用すれば $\frac{91.5 \times 93.6}{100} = 85.6\%$ 程度迄に喰とめうるものと考へらる。

講

演

耐火物の合成と過熱水蒸氣との關係

京都支部の講演會に於て

青 武 雄

多くの無機物質殊に珪酸鹽類に過熱水蒸氣を通じつゝ高溫度に熱する時には該物質の熔融點轉移點或はシンターする溫度を降下せしむる即單に珪酸鹽を熱する所謂乾式法に依る時には 1400°C に於て熔融する物質を今過熱水蒸氣を通じつゝ所謂水熱式に於ては 1300°C にて即熔融點を 100°C 引下る現象換言すれば SK 14 番にて始めて焼上る物質をこれに過熱水蒸氣を通じつゝ熱する時には SK 10 番にて完全に焼成し得る物ならざるやに就き理論的及實驗的結果の一部を報告せんとす勿論該現象は焼成物質の種類熱源の如何過熱水蒸氣の量焼成窯の容量熱經濟等を考に入れずして一概に論ずる事は危險を伴ふ恐れあるもそは後日の發表に譲り筆者は要するに種々の實驗結果から此の現象を推察する事の可能な事を報告すべし本論を述ぶるにあたり暫く自然界の現象に就き述べん。

各種窯業材料の熔融點或は轉移點に及す過熱水蒸氣の作用

地球内部に於ける物質の状態如何と云ふ問題は古今を通じ物理學者、化學者、或は地質學者と云はず何れも彼れ等の終生の大問題として一度は必ず此れが解決に想を潛めたものである然れ共現今吾々の考へてゐる知識は結局未だ想像の範圍を遠く脱却する事が出来ない併しながら地表面より内部に進むに従ひ漸次地熱を上昇せしむる事は既定の事實である第一表はルンに依つて示された地表からの深さと溫度並に壓の關係である。

第 一 表

表面よりの距離 (杆)	壓 (メガタイン/□ 杆)	溫度 (°C)	物質の比重
0	0	0	2.80
319	97000	320	3.37
638	215000	1110	3.95
957	353000	2190	4.54
1276	510000	3470	5.13

數百杆の深さに達せば地熱は數千度の高溫となり各種の無機物質は何れも熔融狀態と考へられる此れに反して地表面より内部に至れば岩石の比重等の爲に起る壓力の上昇は大なるものである第一表に示す壓力はメガタインなるも概略値を取れば普通の壓力に等しいのである扱 50 杆の深さになれば 14000 氣壓 300 杆になれば 97000 壓となる一般に壓力が増大すれば (水、蒼鉛等を除) 物質の熔融點或は轉移點を上昇せしめる今壓の變化に伴ふ轉移點熔融點の變化を表す數量的の關係は有名なクラウジウス・クラペーロンの公式

$$dt/dp = \frac{T(V_2 - V_1)}{Q} \quad \text{で表される。}$$