被覆水冷壁の有効ふく射伝熱面積⁽¹⁾石谷清幹⁽²⁾ 赤川浩爾⁽³⁾

Evaluation of Equivalent Radiant Heating Surface of Block-Covered Water-Walls.

by Seikan ISIGAI and Koji AKAGAWA

The heat absorption of block-covered water-walls is less than that of the ideal cases when the surface temperatures are equal to the inside water temperatures, because of the resistance to heat conduction between the water-wall surface and the inside boiler water. We investigated on the heat resistance by measuring the electric resistance of suitably constructed models and then corrected the results by the actual temperature distribution data, and thus determined a method of calculation. The coefficient showing the proportion of actual heat flow to the ideal case can easily be found by using the diagram presented in the paper. For usual bare-faced cast-iron blocks, the coefficient falls between 0.92 and 0.98, and we recommend 0.95 for approximate calculations.

1. 緒言

ボイラ燃焼室の周壁に設けたふく射伝熱面すなわち水壁の吸収熱量を正確に計算することはボイラ設計上きわめて重要である。この吸収熱量には火炎の状態と水壁の状態が共に影響を及ぼす。火炎の影響についてはさきに論じた⁽⁴⁾ことがあるが、ここでは論じない。

被覆水壁は第1図のような構造であつて、水管の表面に鑄鉄ブロックを接着し水管表面を燃焼室内からの

第1図 被覆水冷壁

か烈な熱ふく射と灰の融着とに対して防護したものである。第1図に示したとき鑄鉄ブロック表面に耐火物をはりつけて、さらに鑄鉄面をも防護したものもある。このような被覆水壁の伝熱に影響する因子のうち水壁の状態に関するものとしては、(1) 水壁内部の伝熱抵抗のために表面温度が保有水温よりも高くなること、(2) 表面のふく射能が完全黒体と相違すること、(3) 表面に灰が附着すること、等をあげることができる。(2)と(3)については前出注⁽⁴⁾の論文に簡単に述べた。本論文は(1)の因子すなわち水壁内部の伝熱抵抗の影響を計算するのに必要な係数の求め方を論じたものである。この係数については Mullikin⁽⁵⁾が2種の被覆水冷壁に対して与えており、また Mull-

ikin の他にもこの値を与えているものもあるが、特定の寸法の被覆水冷壁に対するものであつて、一般的にこれを論じたものはない。またその数値を決定した方法も正確な値を与えるに適した方法とは認め難く、与えられている数値にも疑問がある。それゆゑこの値について理論的に考察し、電気槽実験を行い、かついままでの研究結果を参照してこの値の計算法を決定し、また近似計算図表を作製した。

2. 基本式

まず第1図のような鑄鉄のみよりなるブロックを有するものについて考察し、後にこの結果を用いて耐火物を有するものについて述べることにする。第1図は鑄鉄ブロック被覆水冷壁の管軸に直角な断面を示している。管の一ピッチの間を取り出して考えると、その

第2図 鑄鉄

熱流は第2図に示すものと全く同じである。したがつて第2図のものについて考察を進めることにする。ただし、斜線は熱的に絶縁されていることを示している。被覆水冷壁を通して水管中の水あるいは蒸気に伝えられる熱量を決定するためにはブロック表面におけるふく射熱吸収、ブロック内熱伝導およびブロック内面から接着剤と水管壁を経て内部の水への熱貫流を考えねばならない。第2図において水管中の水の温度は一定であるからブロック内面DEF部の温度 T_i は一定と考えてさしつかえない。ABはふく射を受ける面で等温ではないがある平均温度 $T_0^{\circ}\text{K}$ の等温面として理論を立てて模型実験を行

い、その結果を実物に対する Bailey の実験値により補正する方法を取る。

被覆水壁表面にはすすや灰が附着していないものとして、

Q_a = 管一ピッチのブロックの単位長さ当りの貫流熱量 kcal/mh

Q_0 = ブロック内部の熱抵抗がない場合(すなわち表面温度が内部の水温に等しい場合)に得らるべき Q_a の値

とする時

$$F_c = Q_a / Q_0 \dots\dots\dots (1)$$

を求めることが本論文の問題である。この F_c は Mullikin が conductivity factor と名づけたものと一致することは明らかである。

いま

T_g = 被覆水壁に熱をふく射する高温熱源温度 °K

T_0 = 被覆水壁表面温度 °K

T_w = 水管中の水温 °K

C' = 火災の状態によつて定まる一つの係数 kcal/m²h(°K/100)⁴

a, b, r = 第2図に示す長さ m

とすればブロック表面に対して次式が成立つ。

$$Q_a = a \cdot C' [(T_g/100)^4 - (T_0/100)^4] \dots\dots\dots (2)$$

Q_a をこのように Stefan-Boltzman 法則の形で表わすことはボイラ燃焼計算法として普通の方法であつて著者の一人の熱計算法⁽⁶⁾もこの方法によつている。(ただし注(6)の論文で定義した有効ふく射係数とこの C' とは同じものではない。 C' の値そのものは本論文では問題としていないので(2)の表現を用いてもさしつかえない。有効ふく射係数の記号として C' が慣用されているので区別するために C' とした。)したがつてまた

$$Q_a = F_c \cdot a \cdot C' [(T_g/100)^4 - (T_w/100)^4] \dots\dots\dots (3)$$

Q_a はまた等温面 AB および DEF 間を伝導により流れるから、ある係数 Z を用いて

$$Q_a = Z \lambda (T_0 - T_i) \dots\dots\dots (4)$$

とも書き表わし得るはずである。ただし λ はブロック材料の熱伝導度 kcal/mh°C である。 Z は無次元量であるからブロックの形状のみに関係し絶対的な大きさには関係がない。ゆえに Z を形状係数と名づけることとする。次にブロック内面から水への貫流熱量もまた Q_a であるから、

h = ブロック内面から水への熱貫流率 kcal/m²h°C とすれば

$$Q_a = \pi r h (T_i - T_w) \dots\dots\dots (5)$$

この(2)~(5)式が基礎関係式となる。これらの式の左辺はいずれも Q_a であるから実質的には式の数3

個あることになる。式中 $a, r, \lambda, C', T_g, T_w$ は与えられる量であるから、 h と Z の値を別に定めておけば未知量は F_c, T_i, T_0 の3個となり、上式により F_c を求めることができる。ゆえに h と Z について考察をすすめる。

3. ブロック内面から水への熱貫流率 h

Bailey⁽⁷⁾ は7種のブロック被覆水壁の温度分布を実際に測定している。その結果によればブロック内面温度はボイラ水温度に比してかなり高温でブロックと管壁の接着部の熱抵抗がかなり大きいことを示している。またこの実験によれば接着部における温度降下と水管内面の熱伝達抵抗による温度降下はほぼ比例しているから、これを一括して取り扱うことができる。またこれら7種のブロックの形状はすべて相違するが鑄鉄ブロックと水管との接合部の状況は同様と考えられるから、著者等は Bailey の実験値から上に述べた(5)式の関係により h の値を計算し Q_a に対して図示した。結果は第3図の通りかなりきれいに曲線上に乗る。またこの h を算出する基礎となつた ($T_i - T_w$)

第3図 ブロック内面とボイラ水間の温度差と熱貫流率 (Bailey の実験により著者から計算したもの)

をあわせて第3図に示した。ただし実験におけるボイラ水温度は 225°C である。これによれば熱負荷が大なるほど熱貫流係数が小になつていく。また同時にブロック内面温度 T_i も上昇する。このことは熱負荷が大になるとこれを打消すようにこの部分の熱抵抗が増加することを示している。もちろんブロックと水管の接合方法やボイラ水温度が変われば h もかなり広範囲に変るであろうし、また h の変動範囲が第3図ではかなり広すぎるともみられるが他に比較すべきデータがな

いし、かつこの値がかなり変つて表面温度にかなり差ができてふく射熱交換に対する低温側温度のことであるから結果の精度に対する影響は小さいので第3図をこのまま使用することとする。ボイラメーカまたは使用者側から正確なデータの要望でもあれば追加研究したい。

4. 電気そう実験による Z の値

定常状態における電流の基礎微分方程式と熱流の基礎微分方程式は全く同様のラプラスの微分方程式であるから、いま第2図において AB と DEF を V_1 , V_2 の等電位面とする時に流れる電流 I は k を材料の電気伝導度とすれば

$$I = Zk(V_1 - V_2) \dots\dots\dots (6)$$

となり、電流と熱流、電圧と温度の相似性から(4)式の Z と全く同一でなければならない。ゆえに電氣的に Z を求めれば熱流に対する Z として利用し得る。 V_1 , V_2 面間の抵抗を R とすれば(6)式より

$$Z = R/k \dots\dots\dots (7)$$

したがつて電気そうによつて AB , DEF 間の抵抗を測定することにより容易に Z の値を求め得る。この原理により電気そう実験によつて熱流の問題を解く実験的研究はすでにかなり多数発表⁽⁸⁾されているので著者等の実験については簡単に述べる。

a) 実験装置 実験装置の概略を第4図に示す。 B は $47 \times 32 \times 7$ cm のガラス製水そう、 P_1 , P_2 はジュラルミン製の極板、 G は検流計、 S は3インチセレン整流器、 R_1 は検流計の感度調節用抵抗、 R_2 は同じ

第4図 実験装置模型図

目的の $0 \sim 5 K\Omega$ の可変抵抗、 R_3 はセットになつたホキートストンブリッジに実験の便宜のために挿入した 0.1Ω 単位の変抵抗器である。水そうには水道水を使用し $100V$ A.C. を用いて極板間の抵抗を4けたまで測定した。

b) 実験結果 $a=47$, $b=32 \sim 10$ cm に対し $r=8$, 10 , 12.5 , 15 cm および $a=26$, $b=32 \sim 12$ cm に対し $r=10$, 12.5 cm の6種の実験により $r/b=1.0 \sim 4.0$, $a/2r=1.04 \sim 2.94$ に対する実験結果を第5図に示す。これを整理して求めた Z の値を第6図に示す。ただし第6図において縦軸に漸近する細い曲線とこれに接続

第5図 形状係数 Z の実験値

第6図 形状係数 Z の値

する太い曲線が電気そう実験による計測値であつて、縦軸に交わる直線部は次に述べる。

c) 熱流試験による補正 電気そう実験では二つの極板が接近しても電圧は一定であるので電流は著しく大となり、接触すれば電流は極端に大きくなる。しかるに実際の水壁では AB と DEF が接近すれば温度差が減少し、かつ AB 面上の温度が不均一となり $r/b=1$ の場合にも熱流は無限大にはならない。このように電流と熱流で差が生ずるのは電気そう実験では極板に電気抵抗がきわめて小さいジュラルミンを使用するからである。この補正は実物ブロックに対する熱流実験によらねばならない。ゆえに Bailey の7種のブロックに対する実験値から逆算すると、Bailey の実験における T_g は $(1230 \pm 273)^\circ K$ となる。 T_0 もわかっているから(8)式より F_g が求まる。そして铸铁ブロックに対する実験値から F_g を求め、これと Z との関係を図示すると第6図中に記入した点 P が得られる。Bailey の実験したブロックでは $a/2r=1.81$ であるがこれに対する曲線はこの点を通るはずであり、各 $a/2r$ に対する曲線の傾向は同様なべきはずであ

る。それゆえ P 点を通り電気そう実験による曲線に切線を引き、これで実際の熱流に対して補正されたものと考えたこととした。第6図において $b/r=1.0 \sim 1.5$ の範囲において補正曲線が平行直線となることの理論的根拠は薄弱であるが、熱流実験のデータがただ一つ公表されているのみである現状においてはやむを得ないものと思う。

5. F_c の正確な計算法

以上により Z と h が計算されるから (2)~(5) 式を用いて F_c を正確に算出することができる。その方法を次に述べる。(2) 式と (3) 式から

$$F_c = \{ (T_g/T_w)^4 - (T_0/T_w)^4 \} / \{ (T_g/T_w)^4 - 1 \} \quad (8)$$

いまボイラ条件により C' , T_g , T_w およびブロック形状がわかっているものとする。まずブロックの形により Z を求める。 Q_a を仮定すれば第3図より $(T_i - T_w)$, したがって T_i が求められる。ゆえに (4) 式から T_0 が定まり始めにかえつて (2) 式より再び Q_a が求まる。この Q_a が最初の仮定と一致すれば最初の仮定が正しかったことが説明されたことになり、かくして T_0 等が全部とけたことになる。ゆえに (8) 式により F_c を計算し得る。計算の便宜上 (8) 式を第7図および第8図に示した。第7図はブロック表面温度 T_0 に比例する量が横軸であり、第8図はガス温度 T_g に比例する量が横軸である。ゆえにこれらが F_c におよぼす影響を端的に表わしており、表面温度の低いほど、またガス温度の高いほど F_c の値は1に近づき、逆の場合には小さな値になることが明瞭である。

第7図 ボイラ水温度 T_w °K, 伝熱面表面温度 T_0 °K およびガス温度 T_g °K と F_c との関係

第8図 ボイラ水温度 T_w °K, 伝熱面表面温度 T_0 °K およびガス温度 T_g °K と F_c との関係

6. 耐火物を装着したブロック被覆水壁の計算法

耐火物を装着したブロック被覆水壁の場合を厳密に解くことはむづかしいが耐火物と鑄鉄の接合面が管軸に平行な平面であり、かつ温度が一樣であると考えれば容易に解くことができる。すなわち第6図により鑄鉄部分に対して無次元量 Z を求める。いま外面温度 T_0 °K, 内面温度 T_i °K の鑄鉄の平面壁がこれと同一熱量を通す時の壁の厚さを s m とすれば

$$Q_a = a/s \cdot \lambda (T_0 - T_i) \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{すなわち} \quad s = a/Z \quad \dots\dots\dots (10)$$

すなわちブロックの鑄鉄部分は厚さ s m なる平面壁と等価であるからこの上にさらに耐火物が重なつたものとして取り扱えばよい。それに耐火物の熱伝導度 λ' kcal/mh°C, 厚さ s' m として次の s'' すなわち

$$s'' = s' \times \lambda / \lambda'$$

を鑄鉄ブロックの厚さに加え、裸面被覆水冷壁に換算して取り扱えばよい。実際の数値計算を行つてみると $s'' \gg s$ だから s は無視してさしつかえないようになる。

7. 近似計算図表

以上の計算法によれば F_c の値を正確に計算し得るが試みの法が必要であつて計算の手数が大きい。したがつて簡単に F_c の値を求めるために近似計算図表を作製しよう。 F_c は上に述べたように T_g , T_w , および

C' 等がすべて影響するのであるが、このうち C' , λ , T_w の値をあらかじめ仮定して、 s と T_g の値に対して F_c を求めることにする。 F_c を求めるには上に述べたごとく (2)~(5) 式を用いるのであるが (4) 式の代りに (9) 式を用いて鑄鉄ブロックを等価な平面壁に置きかえ、また (5) 式の代りに第 3 図を用いることにする。計算を簡単にするためには Q_a の値から出発した方が便利であるのでまず Q_a の値を仮定する。上に水管内水温 T_w を仮定したので Q_a が定められれば第 3 図よりブロック内面温度 T_i がわかる。この Q_a に対応する T_i の値を T_i' と表わすことにする。また (9) 式よりブロック外面温度は

$$T_0 = \frac{s}{\alpha} \frac{1}{\lambda} Q_a + T_i' \dots\dots\dots (11)$$

$$= \frac{s}{\lambda} \cdot Q + T_i'$$

ただし $Q = Q_a/a$ kcal/m²h
 (11) 式を (2) 式に代入すれば高温側黒体温度が求まり

$$(T_g/100)^4 = \frac{Q_a}{\alpha C'} + (1/100)^4 \left(Q_a \frac{s}{\alpha} \frac{1}{\lambda} + T_i' \right) \dots\dots\dots (12)$$

(12) 式によつて Q が与えられた場合の高温側黒体温度 T_g が s に対して定まる。また (12) 式を (3) 式に代入することによつて

$$F_c = Q/C' \left[\frac{Q}{C'} + (1/100)^4 \left(\frac{s}{\lambda} Q + T_i' \right)^4 - (T_w/100)^4 \right] \dots\dots\dots (13)$$

したがつて (13) 式によつて Q が与えられた場合 F_c の値が s に対して求められる。(12) 式と (13) 式の関係を図に示せば第 9 図のごとくなり、この図を用いて T_g をパラメータとする F_c と s の図を作製することができる。

第 9 図 t_g, F_c と s の関係図 (概略図)

$C' = 4.0$ kcal/m²h(°K/100)⁴, $\lambda = 50$ kcal/mh°C,
 $T_w = (200 + 273)^\circ\text{K} = 473^\circ\text{K}$ と仮定し, $Q = 50\,000 \sim 300\,000$ kcal/m²h, $s = 0.01 \sim 2$ m に対して計算を行い

第 10 図 F_c の近似計算図表

横軸に (10) 式による等価厚さ s をとりガス温度をパラメータとして F_c を第 10 図に示した。この計算に使用した数値のうち λ が実際の値と相違することは厚さを補正することにより容易に考慮に入れることができる。また上に仮定した C' と T_w の値は実際に最も多く遭遇する代表的な値であるから、本図は多くの場合そのまま計算図表として役立つであろう。 C' と T_w の値が仮定した値とかなり相違する場合も近似計算図表としては十分利用し得るものと考ええる。なお図において等価厚さが 0 のとき F_c が 1 とならないのはブロックと水管接合面の熱抵抗が計算に入れてあるためであつて妥当な結果である。図の使用法は次の通りである。ブロックの形状が与えられた場合第 6 図より Z の値を求め、(10) 式により等価厚さ s を求める。次に第 10 図により s と炉内温度 T_g をパラメータとする曲線より F_c の値を求める。

8. 数値計算例および考察

(1) ある日本の有力ボイラメーカーが使用している裸面被覆水冷壁用ブロックの寸法は次の通りである。
 $a = 0.147$, $b = 0.053$, $r = 0.0403$ m. 第 6 図によれば、 $Z = 4.40$ となるから $s = 0.147/4.40 = 0.0334$ m となり第 10 図によれば $t_g = T_g - 273 = 1\,000 \sim 1\,300^\circ\text{C}$ に対して $F_c = 0.98 \sim 0.92$ となる。

Mullikin は裸面ブロックに対して $F_c = 0.7$ を与えている⁽⁹⁾。もちろん第 10 図のボイラ水温度 200°C を仮定してあるが第 7, 8 図によればこれが多少変わつてもふく射伝熱面の性質上 F_c がさほど変るとは思われないのであつて Mullikin の値は過小であることは明らかである。これは Mullikin が F_c の算出には不適当な方法によつているためである。すなわち Mullikin は実際のボイラのたき成績から F_c を算出したのであるがこの方法では多数の因子の影響を完全になくして純粹に F_c を求めることは無理と思われる。

(2) 耐火物を装着した場合は鑄鉄部分の等価平面壁の厚さ s に対して耐火物を鑄鉄に換算した厚さ s'' が著しく大きくなる。厚さ 30 mm, $\lambda' = 3.35$ kcal/mh°C

のカーボランダムを装着すると $s''=0.448\text{ m}$ となり第 10 図によれば $F_c=0.4\sim0.6$ となる。この値は耐火物の性質によりかなり大きく変り得るが、Mullikin の発表している値すなわち 0.35 を無反省に採用すると過小である場合が多いことはたしかであろう。

(3) 上の計算において Mullikin の与えている値とかなり差があり、これら両者の数値を用いて伝熱量を計算する場合に吸収熱量は(3)式により表わされているから一見して F_c の差が直ちに吸収熱量の差となつて表われて来るように思われるが、実は F_c は T_g に影響を及ぼし(すなわち F_c の大きいことは有効ふく射伝熱面積が大きいことを示し、そのために炉内ガス温度 T_g が下り、また F_c が小さい場合は有効ふく射伝熱面積が小さいため炉内ガス温度が上る) F_c と T_g は吸収熱量に対して互に打ち消し合うように働くので F_c の差が直ちに吸収熱量の差となつて表われるものではない。

いまボイラの他の条件が等しくてただ F_c の値のみが異なっている場合の吸収熱量に及ぼす F_c の影響を調べてみる。炉内ガス温度は有効ふく射伝熱面積以外に燃料による供給熱量、空気比、予熱空気温度および有効ふく射係数により定まるものであり、これらの関係はすでに著者の一人が発表した特性数 I_S を用いたふく射伝熱面の計算図表⁽¹⁰⁾ により容易に求めることができる。したがつてこの図を用いて $BH_u=10^7\text{ kcal}$

/h, $A_0F_A F_S=30\text{ m}^2$, $C=4.0\text{ kcal/m}^2\text{h}(\text{°K}/100)^4$ (イ) 予熱空気温度 100°C , 空気比 1.2, (ロ) 予熱空気温度 20°C , 空気比 1.3 の場合に対し, $F_c=1.0\sim0.5$ の範囲で炉出口ガス温度を求め、これより吸収熱量を算出し、また $F_c=1.0$ の場合に対する吸収熱量の比を第 11 図に示した。 F_c の値に対して T_g の値が変わらないものとすれば図の点線の値を取るこの線と比較することによつて F_c の影響が明らかであろう。裸面被覆水冷壁ブロックの F_c の前述の計算値より平均値 0.96 として Mullikin の 0.7 と比較して F_c の値は 35% 大きい吸収熱量では 13% 大きく表われて来て F_c ほどの大きな差ではない。

(4) なお終戦後ブロックと水管をはり合わせる接着剤が悪くなり、水管との接合部がはがれ易くなり、このためにブロックの焼損事故が増している。このような場合には h の値が著しく減少するので今までの議論は適用し得ない。ボイラメーカーや使用者から要望せられればブロックの焼損に関する研究も実施したいと考えているがどうだろうか。

9. 結 論

被覆水冷壁の有効ふく射伝熱面積を定める係数中の「伝熱面の熱伝導率に関する係数 F_c 」の値について理論的に考察し、電気そう実験を用いつつ今までの研究結果を参照してこの計算法を決定し、また近似計算図表を作製した。なお F_c の概算値として鑄鉄ブロック被覆の水冷壁に対しては低熱負荷の時に 0.98, 高熱負荷の時に 0.92, 普通 0.95 を推奨する。

注:—

- (1) 昭和 24 年 5 月 7 日関西支部第 166 回講演会において講演、原稿受付 昭和 25 年 5 月 20 日。
- (2) 正員、大阪大学工学部。
- (3) 准員、神戸大学。
- (4) 石谷、機械学会論文集、15 卷 50 号、第 2 部 (昭 24) およびその第 2 報。
- (5) Mullikin, ASME (1935) Vol. 57, RP-57-2.
- (6) 注 (4) に同じ。
- (7) E. G. Bailey, ASME (1928) Vol. 50, FSP-50-78.
- (8) 抜山、吉方、機械学会誌、33 卷。
- (9) (5) に同じ。
- (10) 石谷、機械学会誌、51 卷 357 号、225 頁 (昭 23-6)。

第 11 図 F_c の吸収熱量に及ぼす影響