

技術報告

UDC 621.785.1.01.536.24

連続鋼片加熱炉における伝熱実験結果と 総括熱吸収率について*

松 永 省 吾**

On the Total Heat Exchange Factor of the Slab Reheating Furnace Basing on the Slab Reheating Experiment

Syogo MATSUNAGA

Synopsis:

A study has been made of the total heat exchange factor in the steel slab reheating furnace based on the experimental data and the radiation heat transfer theory.

The total heat exchange factor ϕ_{CG} can be estimated as follows:

$\phi_{CG}=0.64$ for heavy oil firing, and $\phi_{CG}=0.3$ for gas firing when the furnace gas temperature is determined by the readings of the thermocouple inserted into the furnace combustion chamber through the furnace wall.

By a heat transfer simulation using the value of ϕ_{CG} , an examination was made on HAYS's experimental formula for the furnace retention time of slabs.

(Received May 15, 1972)

1. 結 言

熱経済技術部会で、鉄鋼各社は加熱炉内における鋼片の伝熱式モデルを発表され、また、これを用いて最適加熱操業標準を確立し、燃料原単位の低減に寄与してきた経験をも発表されてきた。この技術は鉄鋼各社が独自に開発し、それぞれ電子計算機を有効に利用して得られた成果である。

しかしながら、炉内の熱放射伝熱機構は複雑であつて、それゆえに、たとえば炉内燃焼ガスの代表温度の定義についても、必ずしも鉄鋼各社が同一のものを採用してきたとはいえない状態にあつた。したがつて、炉内伝熱に重要な総括熱吸収率についても、各社ごとに異なる値を経験的に使用している場合もあつた。

このような状態にあつたから、熱経済技術部会では、加熱炉小委員会を設け、統一見解を得るように研究を行ない、さらに同一測温方式により、各社ごとに炉内伝熱実験をあわせて実施し、その成果は特別報告書¹⁾により報告された。

本報告は、前記特別報告書に発表された測温結果を用い、総括熱吸収率 ϕ_{CG} の特性を伝熱解析によつて求める方法を検討するとともに、工業的に使用するための炉

内温度検出位置の差が総括熱吸収率に及ぼす影響、さらに、炉内伝熱の実際例における問題点をも検討する。

2. 連続加熱炉における伝熱モデルの考え方

連続加熱炉内における、燃焼ガスから鋼片への熱放射伝達においては、たとえば、燃焼ガスの温度分布、黒色分布、さらに炉壁の温度分布などの未知の要因が多く、これらの現象は複雑であり解明することは困難である。したがつて、これらの要因をすべてふくめた伝熱数式モデルを作ることは非常に困難なことはいうまでもない。

しかし、工業的には、これらの困難を認めた上で、なんらかの仮定を設け、この伝熱現象を単純化した伝熱数式モデルを作成し、実際値と比較しつつ、有効なる経験的知見を得て、工業の発展に寄与することが望ましい。燃焼室内の熱放射伝熱現象の解明については、ボイラの場合に多くの実験と解析がなされているが、いまだ理論的に不明な分野が多く、経験式が広く用いられている現状である。

したがつて、本報告においては、つぎのような仮定を

* 昭和46年10月本会講演大会にて発表
昭和47年5月15日受付

** 住友金属工業(株)中央技術研究所

設ける²⁾。

(1) 加熱炉の長手方向の熱放射伝熱を無視する。

(2) 加熱炉内の炉長方向に垂直なる断面内においては、燃焼ガスの温度は一定である。

この仮定の下において、総括熱吸収率を定義し、これを実際例に適用して、その効果をたしかめることにしたい。上記の仮定は、炉内熱放射伝熱現象に対して、きわめて大胆な単純化を行なつたことになる。上記の(2)なる仮定でも、さらに燃焼ガスの温度の検出位置も工業的には統一しておく必要があることはいうまでもない。

上記の仮定は、内外の文献、および鉄鋼各社の研究においても広く用いられるものであつて、総括熱吸収率を適切に選定することによつて、上記の仮定の下においても、炉内伝熱計算結果は工業的に有効であることがたしかめられている。

3. 総括熱吸収率の算出式

総括熱吸収率 ϕ_{CG} は次式にて求められる。

$$Q = 4 \cdot 88 \phi_{CG} \left[\left(\frac{T_g + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_s + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_c (T_g - T_s)$$

ここに

Q : 伝熱量 (kcal/m²hr)

T_s : スラブの表面温度 (°C)

T_g : 炉内ガス温度 (°C)

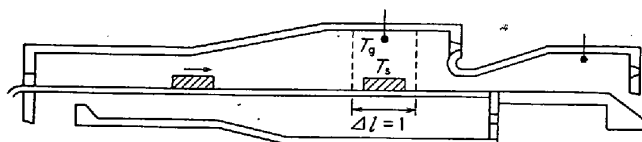
ϕ_{CG} : 総括熱吸収率

α_c : 対流熱伝達係数 (kcal/m²°C hr)

である。

一般に対流伝熱量は、熱放射伝熱量にくらべて、きわめて少なく、約 10% 程度であると考えられるので、上式の右辺の第 2 項は省略し、 α_c の効果を ϕ_{CG} にふくめて処理することにしたい。上記の計算は、炉長方向の単位長さに区分した分割区域内にあるスラブの単位表面積当たりの伝熱量を求める式である。この分割区域を Fig. 1 に示す。

炉内ガス温度としては、工業的に便利な測温位置とし



T_g : Gas temperature at 100~200mm under the furnace ceiling (°C)

T_s : Slab surface temperature (°C)

Δl : Heat transfer model section of the combustion chamber.

Fig. 1. Heat transfer model section of the 3 zone slab reheating furnace.

て、天井から 100~200 mm 下つた位置をえらび、この点の測温結果を用いる³⁾。これらの測温点の温度を曲線で結んで、これをもつて炉内ガス温度分布とする。

この炉内ガス温度 T_g の測温位置が変わると、当然、総括熱吸収率 ϕ_{CG} の値も変化することになる。

4. 五帯連続加熱炉における 総括熱吸収率の実際値

スラブの測温実験を実施した五帯連続加熱炉の炉型を Fig. 2 に示す。予熱帯におけるスラブの断面内の各点の昇温状況を Fig. 3 に示す。加熱帯、および均熱帯においては、熱電対の劣化のおそれがあつたために、総括熱吸収率は、予熱帯について検討することにした。スラブの断面内の温度分布の経過を Fig. 4 に示す。

つぎにスラブの上面から流入した熱量を Fig. 5 に示す。図中で、伝熱量の計算法はつぎのように区別した。

- (1) 伝熱量をスラブ表面層内の温度傾斜より求めた場合
- (2) 伝熱量をスラブ断面のエンタルピの変化量より求めた場合

このいずれの方法にて伝熱量を求めても、両者はかなりよく一致していると考えてよいであろう。

炉内ガス温度としてはつぎの 2 つの温度を考えた。

- (1) 炉内設定温度、すなわち、天井から 100 mm 下つた位置に設けられた熱電対の指示温度である。
- (2) スラブの上面から 100 mm の高さの点に設けられた熱電対の指示温度

これらの指示温度の経過を Fig. 6 に示す。

工業的には上記のいずれの温度を用いるのが有効かという問題については伝熱解析にて得られた総括熱吸収率 ϕ_{CG} の値を参考にして検討する。

いま、スラブへの伝熱量としては

Q_E : スラブ断面内のエンタルピの変化量から求めた伝熱量

Q_G : スラブの表面層内の温度傾斜から求めたスラブへの伝熱量

の両者を用い、さらに、炉内ガス温度としては

T_{go} : 炉天井から 100 mm 下つた点における熱電対の指示温度

T'_{go} : スラブ上 100 mm の高さの点における熱電対の指示温度

の両者を使用し、これらの組み合わせによつて算出される総括熱吸収率 ϕ_{CG} の変化を求めてみると Fig. 7 のようになる。

Fig. 7 に示されている総括熱吸収率 ϕ_{CG} の中で、理

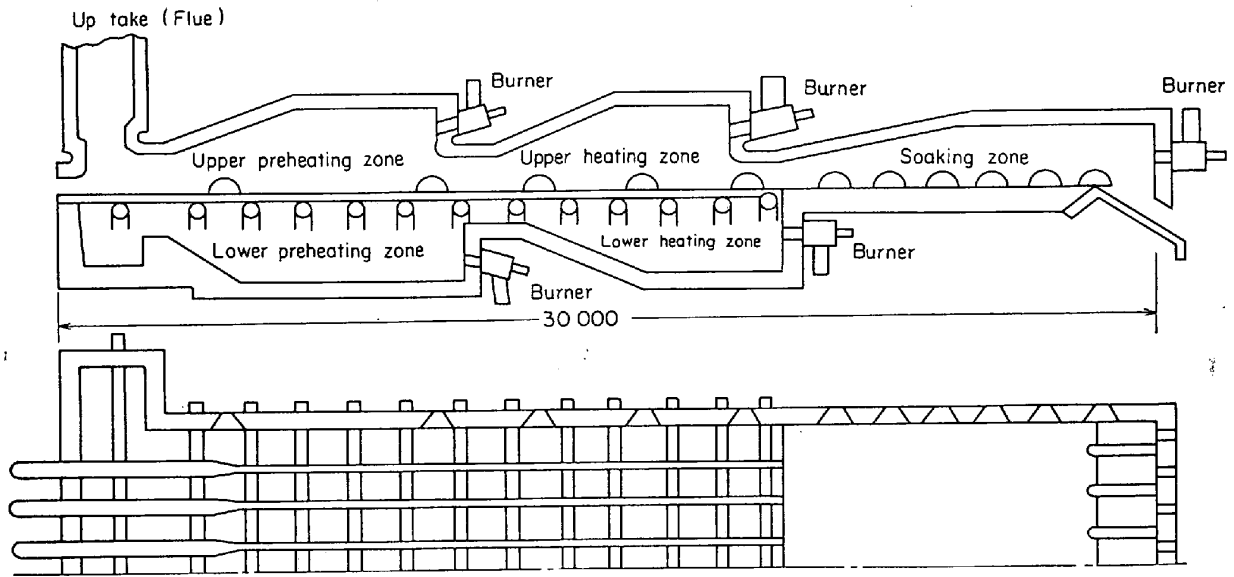


Fig. 2. Furnace lines of the continuous slab reheating furnace.

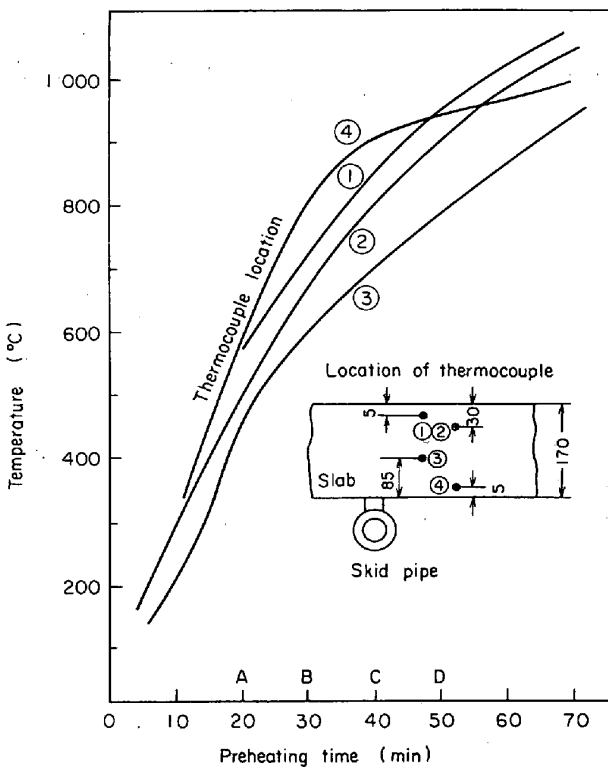


Fig. 3. Temperature rise pattern of the slab section at preheating zone of the furnace.

論値に近い場合を今後は使用することにした。また、この ϕ_{CG} の値は、経験値に一致することが望ましい。ここで経験値 ϕ_{CG} とは、スラブの測温結果と、伝熱計算による計算温度とがかなりよく一致しているときの ϕ_{CG} の値をいう。

経験によれば、重油焚き加熱炉内の伝熱においては

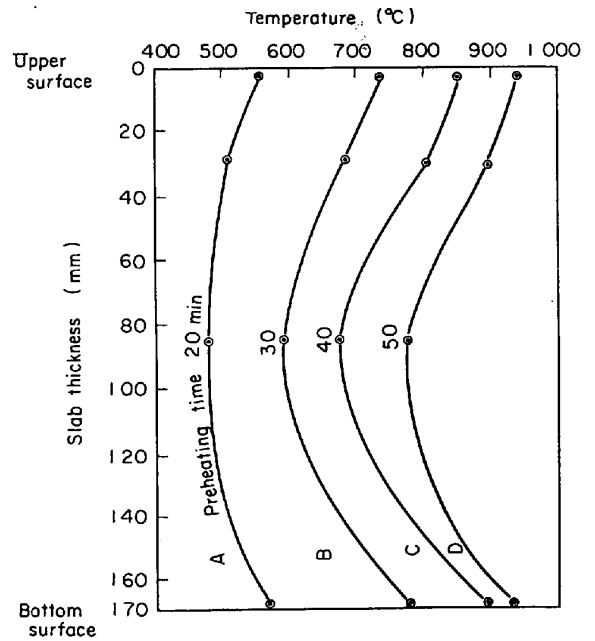


Fig. 4. Temperature distribution in the slab section at the preheating zone of the furnace.

$$\phi_{CG} = 0.64$$

であつたから、Fig. 7 により、 ϕ_{CG} を定義する測定温度としては曲線 Δ 印のものを用いることにしたい。すなわち、つぎのような定義を用いて ϕ_{CG} を算出すればよい。

T_s : スラブの表面温度

T_{g0} : 炉天井から 100 mm 下がった点の熱電対の指示温度

Q_G : スラブの表面層内の温度傾斜より求めた伝熱量
このときの ϕ_{CG} 理論値については次節にて考察する。

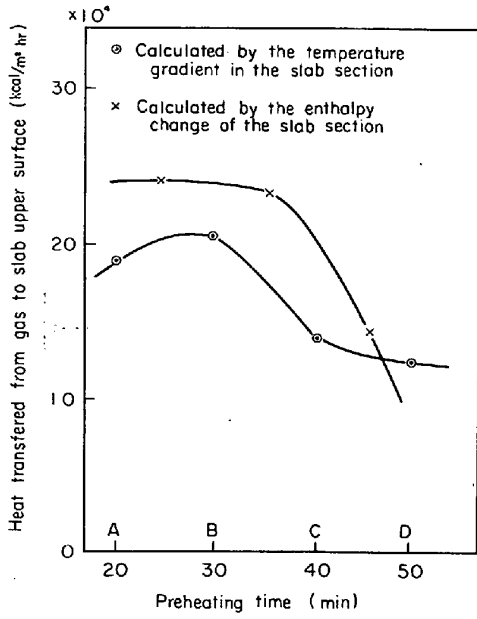


Fig. 5. Heat transferred from combustion gas to slab upper surface at the preheating zone of the furnace.

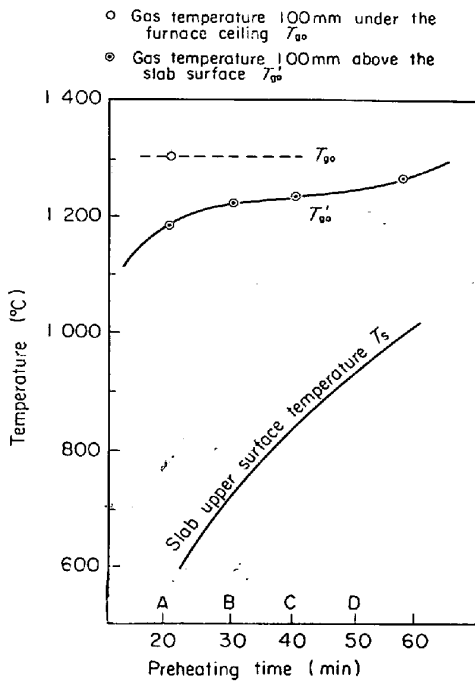
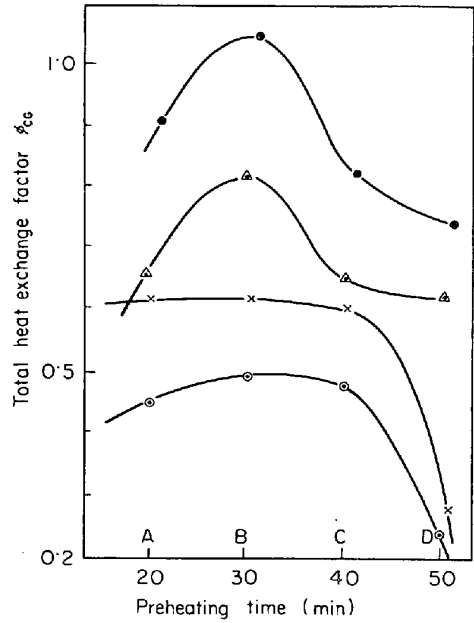


Fig. 6. Gas temperature in the preheating zone of the furnace.

5. 総括熱吸収率の理論的考察

総括熱吸収率 ϕ_{CG} の解析にあたっては、矢木、国井の方法⁴⁾を用いる。

この場合には、燃焼ガスの黒色度の選定方法が問題となる。一般には燃焼ガス中の熱放射成分ガスの分圧と



○ T_s, T_{g0}, Q_E (heat calculated by enthalpy)
 × T_s, T_{g0}, Q_E (change of slab section)
 △ T_s, T_{g0}, Q_E (heat calculated by temperature)
 ● T_s, T_{g0}, Q_E (gradient in slab section)

Fig. 7. Total heat exchange factor of the preheating upper zone of the furnace.

ガス層の厚さを用いる方法⁵⁾が用いられるが、重油焚きバーナーの場合のように輝炎のときは、この計算法は不十分であり、小さな値を与える。したがって、本報告では、バーナー燃焼炎について実測されたガスの黒色度をそのまま用いることにする⁶⁾。この場合にはガス層の厚さや、熱放射ガスの成分については考慮されないことになるが、輝炎の黒色度の選定については、このような実測値を解析に使用するのが無難であろう。輝炎の黒色度の算出式も発表されているが、これらの式は、ガス中の炭素粒子の直径か濃度をも必要とするために、あまり工業的ではない。

矢木、国井の算式によつて総括熱吸収率 ϕ_{CG} を求めるとつぎのようになる(算出式の実際については付録参照)。

この場合に、燃焼ガスは上部予熱帯に一樣に充満しているものと考えている。

燃焼ガスの黒色度 ϵ_g	ϕ_{CG} の理論値	経験値 ϕ_{CG}
0.8	0.680	0.64
0.5	0.395	—

しかして、一般に、 ϵ_g の実際値はバーナーの燃焼炎についてつぎのように考えるとよい。

- 重油燃焼炎の場合 $\epsilon_g \approx 0.8$
- ガス燃焼炎の場合 $\epsilon_g \approx 0.3$

したがって、上記の ϕ_{CG} の理論値は、実際値とかなりよく一致していると考えてよい。

重油燃焼による輝炎の熱放射伝熱においては

$$\phi_{CG} = 0.64$$

にとるとよい。しかし、炉から赤色の燃焼炎が噴出しているような異常状態においては ϕ_{CG} をさらに増して

$$\phi_{CG} = 0.70$$

にとることにより、鋼片の測温結果と伝熱計算結果とがよく一致するという経験を有している。

総括熱吸収率 ϕ_{CG} の選定にあたっては、燃焼炎の輝度、色彩、燃焼室内における燃焼炎の充満度を参考にし、経験的に $\phi_{CG} = 0.64$ を修正して使用することが望ましい。

また、コークス炉ガスを加熱炉に使用する場合、またはコークス炉ガスと高炉炉頂ガスの混合ガスを加熱炉にて燃焼せしめる場合には、その燃焼炎の黒色度としてはガスの黒色度を用い

$$\phi_{CG} = 0.3$$

にとればよいことがわかっている。また、この値はコークス炉ガスで予熱される連続鑄造用タンデッシュの伝熱の解析の場合にも有効であることがたしかめられている。さらに、ロータリー・キルンにて、重油バーナーから十分に離れた部分の燃焼ガスの伝熱計算においても $\phi_{CG} = 0.3$ にとると実測温度と計算温度とはよく一致することがみとめられている。この総括熱吸収率の応用分野は広い。

6. 加熱炉内熱放射伝熱計算による HAYS の公式の拡張

加熱炉から抽出されるスラブの内外温度差を知ることには、加熱炉操業標準の作成、および圧延計画に必要なことである。しかし、スラブの測温実験には、かなりの経費と労力を必要とし、また、均熱帯付近においては熱電対の劣化という事故もありうるので、スラブの測温実験の回数はおのずから制限されることになる。このような事情にあるので数式モデルによる伝熱 simulation は有効であつて、前節にて求められた炉内総括熱吸収率 ϕ_{CG} を利用して、伝熱計算により、数多くの場合のスラブ内の温度分布の経過を知ることができる。

本節では、従来、経験式として知られているところの鋼材の在炉時間に関する HAYS の公式を、さらに拡張する。

HAYS の経験式は次式にて示される。

$$R = K \frac{d}{30000 - 632(d-1)}$$

ここに

R : 鋼材の在炉時間 (hr)

d : 鋼材の厚さ (inch)

K : HAYS の係数

である。伝熱解析結果によれば、抽出時の鋼片の内外温度差が 50°C なる場合には

$$K \approx 6000 \sim 6500$$

にとればよいことがわかっている⁹⁾。この HAYS の公式をさらに拡張すると次式を得る。

$$K = 6000 - 134\theta + 2200k_s$$

ここに

θ : 抽出時の鋼片の内外温度差 ($^{\circ}\text{C}$)

k_s : ヒート・パターン係数

$$k_s = \frac{\left[\begin{array}{l} \text{炉内ガス温度が、抽出時のスラブの所期} \\ \text{均熱温度に到達するまでの加熱時間} \end{array} \right]}{\text{鋼片の在炉時間}}$$

である。上式は重油焚き加熱炉についての鋼片の在炉時間を決定するのに有効である。

7. 実炉におけるスラブの在炉時間と HAYS の公式による在炉時間との関係

加熱炉内の伝熱モデルによつて、理論的に検討された HAYS の在炉時間の算定公式は、加熱炉内に同一厚さのスラブのみが在炉する場合に適用される。

加熱炉小委員会において、各社が行なつたスラブの測温実験では、在炉するスラブの厚さが同じであるようなときを選んで、同じ厚さの測温スラブを加熱炉に送入した。したがつて、スラブの測温結果による抽出時の内外温度差と、HAYS の公式による抽出時のスラブの内外温度差とはかなりよく一致しているという結果を得ている (Fig. 8)。

これに対して、往年に、熱経済技術部会にて発表された鉄鋼各社のスラブの測温結果は Fig. 9 のように HAYS の公式の結果とかなりの差を生じている。これは測温スラブが、異なる厚さのスラブの中に入れて送られたためであると考えられる。一般の圧延工程計画の中に試験スラブを送入すると在炉時間は Fig. 9 のようになることは、一般にみとめられている。

この Fig. 9 の場合に測温スラブは抽出時にははなはだしく過均熱になつていないという結果を得ている。この原因としては、厚さの異なるスラブの表面温度に差があり、そのために、スラブ間で熱放射熱交換が行なわれていることも考えうる。しかし、この熱交換量は決して大きな量ではないので、炉内の熱放射伝熱の複雑さを暗示しているものと考えられる。

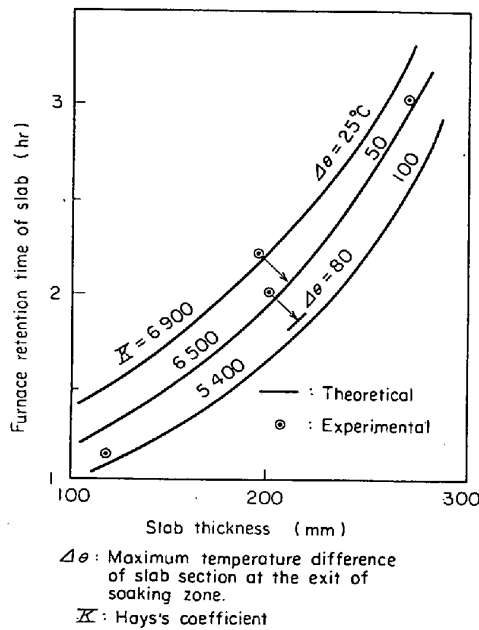


Fig. 8. Slab reheating characteristic curves of the furnace.
(The case when the slabs of same thickness are pushed into the furnace.)

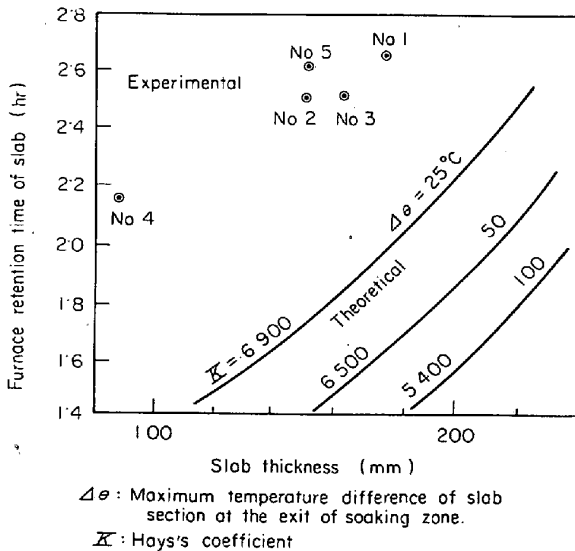


Fig. 9. Slab reheating characteristic curves of the furnace.
(The case when the slabs of different thickness are pushed into the furnace.)

8. 結 言

連続鋼片再加熱炉における、鋼片の伝熱実験と、炉内熱放射伝熱理論により、総括熱吸収率を考察した結果、つぎのような結論を得た。

(1) 炉壁内部に突出せしめた熱電対の指示温度をもつて、炉内ガス温度の代表値とするときは、総括熱吸収

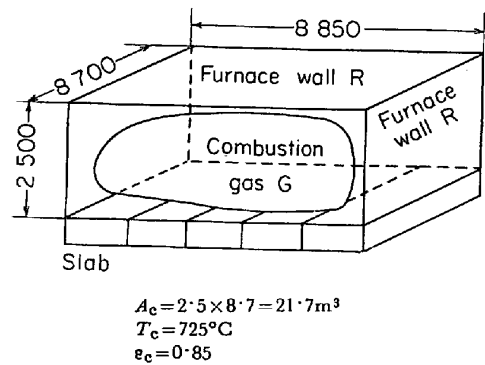


Fig. 10. Radiating heat transfer model of the upper preheating zone of the furnace.

率は理論値と実際値とはよく一致する。

(2) 炉内ガスの黒色度としては、燃焼炎について実測された値を用いる。

(3) この場合に総括熱吸収率はつぎのような値にとるとよい。普通操業の場合の値をつぎに示す。

重油焚の場合 $\phi_{CG} = 0.64$

ガス焚の場合 $\phi_{CG} = 0.3$

なおこれらの値は、燃焼炎の状況、すなわち操業状況の変化に応じて若干修正して用いることが望ましい。

このようにして選定された総括熱吸収率は、連続加熱炉以外のプロセスにも応用できることがたしかめられている。

本報告の作成にあたり、ご指導いただいた加熱炉小委員会の委員各位、ならび、実験の計画と実行にご努力いただいた和歌山製鉄所計装課の石田氏に謝意を表します。

付 録

五帯加熱炉 (Fig. 2) の上部予熱帯をモデル化すると Fig. 10 のようになる。

符号をつぎのように定める。

F^* : 反射面が存在するときの熱放射到達率

ϕ : すべての因子を考慮した総括熱吸収率

ϵ : 黒色度

A : 表面積

添字

R : 反射面 (炉壁面)

C : 受熱面

G, g : 燃焼ガス

また

$$A_T = A_R + A_C$$

とおく。ここで矢木、国井の方法⁹⁾を用いて計算するとつぎのような値を得る。

まず $\epsilon_g = 0.8$ なるときは、

$$\overline{F}^* \begin{cases} CC=0.0064, & CG=0.994 \\ GC=0.145, & GG=0.865 \end{cases}$$

したがって

$$M=1-(1-\varepsilon_c)\overline{F}_{CC}^* \approx 1$$

$$\phi_{CG} = \frac{1}{M} \varepsilon_c \varepsilon_g [\overline{F}_{CG}^*] \approx 0.68$$

となる.

また $\varepsilon_g=0.5$ のときは

$$\overline{F}^* \begin{cases} CC=0.0575, & CG=0.94 \\ GC=0.22, & GG=0.78 \end{cases}$$

となり

$$M=0.99$$

$$\phi_{CG}=0.395$$

を得る.

文 献

- 1) 鉄鋼協会, 熱経済技術部会, 加熱炉小委員会報告:
連続加熱炉における伝熱実験と計算方法 (昭和46
年5月)
- 2) L. M. K. BOELTER, V. H. CHERRY, H. A.
JOHNSON, and R. C. MARTINELLI: Heat Transfer
Notes, 1965, p. 765~769, McGraw-Hill Book

Co.

および H. C. HOTTEL: Heat Transmission in
Steel Reheating Furnaces. ASME Trans. 58
(1936), p. 185

- 3) 1) に同じ, p. 40
- 4) 矢木, 国井: 窯炉内輻射伝熱理論とその応用, 化
学工学と化学機械, 1950, p. 11~42, 化学機械協
会年報, 第8巻
上記論文には, ミスプリントがあり, そのままで
は統一表示式を得ることはできない. したがって
一部を修正する必要がある. しかしながら本報告
における ϕ_{CG} の算出式については正しいから,
そのまま用いてある
- 5) たとえば
D. Q. KERN: Process Heat Transfer, 1950,
p. 690~715. McGraw-Hill Book Co.
- 6) たとえば
日本機械学会: ふく射伝熱に関する最近の進歩,
p. 54, 第3-6図
- 7) 鉄鋼協会: 加熱炉の設計と実際, 並に熱精算方式,
昭和29年, p. 79 (丸善)
- 8) 1) に同じ, p. 105
- 9) 4) に同じ