

熱経済技術部会報告

金属レキュペレーターの現況について*

(日本鉄鋼業における使用実績およびその考察)

桑 畑 一 彦**・吉 成 大 治***

The Metallic Recuperators for Iron and Steel Works in Japan

Kazuhiko KUWAHATA and Daiji YOSHINARI

1. ま え が き

鉄鋼業における近年の設備大型化の傾向は、加熱炉についても同様であり、300 t/hr をこえる多帯式の連続加熱炉や、装入量 250 t をこえる均熱炉が出現している。

これらの大型加熱炉では炉床負荷の増大のため、排ガス温度がきわめて高く設計されている。

一方耐熱鋼に関する技術の進歩は、このような高温の排ガスで操業する加熱炉に対して金属レキュペレーターの効果的な適用を可能にし、従来比較的タイルレキュペレーターの多く用いられた均熱炉においても金属レキュペレーターの使用が一般となつてきた。

しかしながら炉が大型化するほど、レキュペレーターの損傷がただちに工場の大きな減産に結びつくことからレキュペレーターの選定、操業条件、および保全体制については従来以上の慎重な検討が必要である。

本報は第 41 回熱経済技術部会に各社より提出された調査資料をもとに、レキュペレーターの設置状況、性能と経済性、保全上の問題点などの現状をとりまとめたものである。

2. 調 査 の 対 象

本調査は国内 13 社 21 工場の圧延加熱炉に設置された金属レキュペレーター 146 基を対象に行なつた。

これら金属レキュペレーターの性能は設置されている加熱炉に大きく影響されることから、本報では加熱炉の型式を用途別に分類し次に示す 4 種類にまとめた。

- (1) 均熱炉 (4 ホールを 1 単位とする)
- (2) 厚板, 熱延加熱炉
- (3) 型钢, 線材加熱炉
- (4) その他の加熱炉 (回転炉床加熱炉, スケルプ加熱炉, バッチ炉など)

また金属レキュペレーターの型式は表 1 に示したように、多管式, ハーゼン式, 輻射式の 3 種類に分類した。

図 1~6 にこれらレキュペレーターの代表的な設置例を示した。

3. 金属レキュペレーターの設置状況

3.1 炉型式別レキュペレーター設置状況

炉型式別にレキュペレーターの設置状況を表 2 に示し

た。均熱炉では輻射式レキュペレーターが 50% を占めているのに対して、これ以外の炉では多管式レキュペレーターが約 70% を示している。

なお均熱炉の特例として、表 2 にはタイルレキュペレーターとの組み合わせ式をあげた。

3.2 金属レキュペレーターの年代の変遷

表 3 に金属レキュペレーターの年代の変遷を示した。金属レキュペレーターでもつとも苛酷な使用条件にある均熱炉では、現在までに 3 段階の変遷が認められる。すなわち昭和 37 年までに設置されたものは、タイルレキュペレーターとの組み合わせ式がほとんどで、それ以降昭和 40 年までは、多管式およびハーゼン式レキュペレーターが多く設置され、昭和 41 年から現在までは輻射式レキュペレーターが圧倒的に多い。

このことは均熱炉における金属レキュペレーターでは、特に問題が多く常に改良、改善が試みられてきたことを示していると思われる。

均熱炉以外の炉では先に述べたように、多管式レキュペレーターが大部分を占め、年代の変遷は特に認められないが最近建造されるものに輻射式レキュペレーターが多くあり、均熱炉を含めて金属レキュペレーターの型式は輻射式に移りつつある傾向が認められる。

4. 金属レキュペレーターの性能と経済性

4.1 レキュペレーター型式と空気予熱温度

レキュペレーターの性能で重要なことは、いかにしてより高温の予熱空気を得るかということである。

炉型式別にレキュペレーター型式と空気予熱温度の関係を示すと表 4 のようになる。

いずれの炉型式においても輻射式レキュペレーターがもつとも高温の予熱空気を得ており、次いで多管式, ハーゼン式の順になつている。

均熱炉の特例としてタイルレキュペレーターとの組み合わせ式をあげたが、このタイプは 450~500°C と安定した高温の予熱空気を得ており、厳密には金属レキュペレーターとはいいがたいが均熱炉のレキュペレーターと

* 昭和 44 年 11 月 4 日受付

** 熱経済技術部会長

*** 熱経済技術部会 委員

表 1 レキュペレーターの種類と形状

| 種類 | 形状 |
|---|----|
| 多管式 <ul style="list-style-type: none"> フィン無 フィン付 | |
| ハーゼン式 | |
| 輻射式 <ul style="list-style-type: none"> シングル型 ツイン型 | |

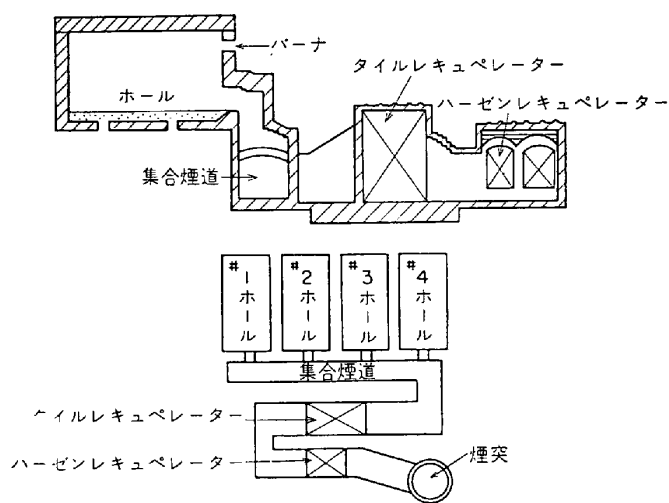


図 1 均熱炉組み合わせ式レキュペレーター設置例

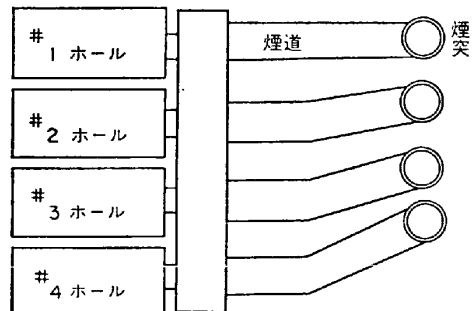
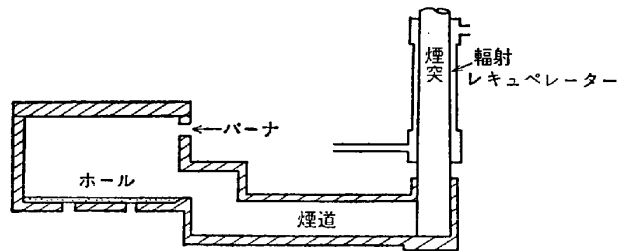


図 2 均熱炉輻射式レキュペレーター設置例

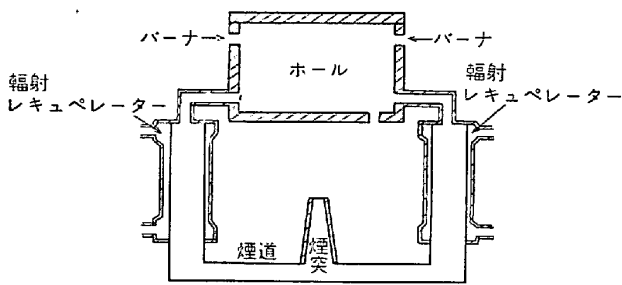


図 3. 均熱炉放射式レキュペレーター設置例

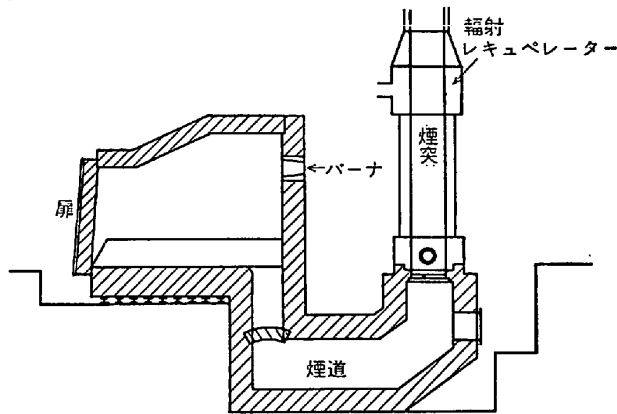


図 4. バッチ炉放射式レキュペレーター設置例

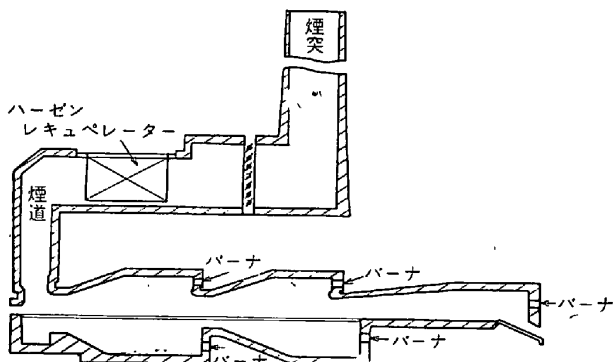


図 5. 五帯式連続加熱炉ハーゼン式レキュペレーター設置例

しては好ましい型式であるといえよう。

多管式レキュペレーターは、いずれの炉型式でもほぼ設計値を満足しており、設計の容易な型式であると考えられる。これに対してハーゼン式は多くの場合、実績値が設計値を下回り設計の困難な型式と思われる。

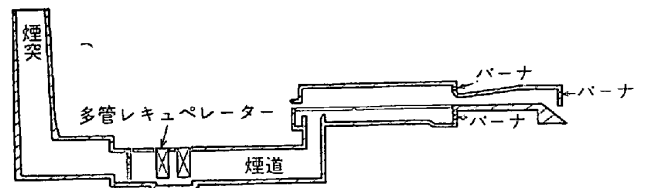


図 6 三帯式連続加熱炉多管式レキュペレーター設置例

4.2 レキュペレーター型式と伝熱面積

単位伝熱面積当たりの空気予熱量(kcal/m²・hr)はレキュペレーターの性能をあらわす重要な指標の一つである。すなわち設置面積、設置費用などに大きく影響する。

各炉型式におけるレキュペレーターの型式ごとに、単位伝熱面積当たりの空気予熱量を示すと図7のようになる。

いずれの炉型式でも放射式レキュペレーターの伝熱面積当たりの空気予熱量は、15×10³~35×10³ kcal/m²・hrであるのに対して、多管式レキュペレーターは3×10³~

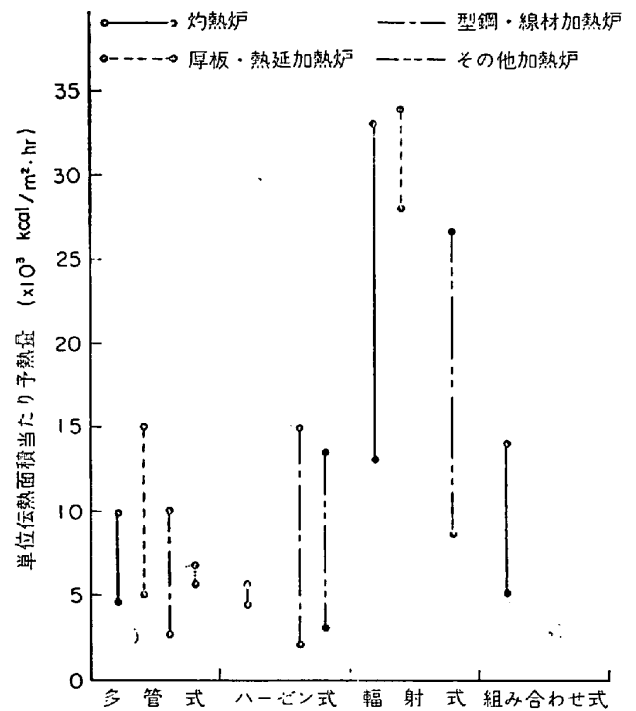


図 7 レキュペレーター型式と単位伝熱面積当たり予熱量

表 2 金属レキュペレーター設置状況

| レキュペレーター型式 | 炉数 | 多管式 | | ハーゼン式 | | 放射式 | | タイル組み合わせ | | |
|------------|---------|------|------|---------|------|------|-----|----------|------|---|
| | | フィン無 | フィン付 | ハーゼン組合せ | | シングル | ツイン | フィン付 | ハーゼン | |
| | | | | 多管 | フィン付 | | | | | |
| 均熱炉 | (バッテリー) | — | 8 | 7 | — | — | 17 | 13 | 8 | 8 |
| 厚板・熱延加熱炉 | 61 | 6 | 26 | 2 | — | — | 1 | 7 | — | — |
| 型鋼・線材加熱炉 | 42 | 15 | 10 | 4 | 1 | 1 | 2 | 1 | — | — |
| その他加熱炉 | 34 | — | 4 | 3 | — | — | 2 | — | — | — |
| | 9 | | | | | | | | | |

表 3 金属レキュペレーターの年代的変遷

| 年 度 (昭和) | 15 | 17 | 21 | 29 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 | 43 |
|--------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 均 熱 炉 | | | | | | ▲ | | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | ○ | ● | ◆ | ◆ | ◆ |
| 厚板 熱延 加熱炉 | | | | | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 型鋼 線材 加熱炉 | ⊙ | ○ | ○ | ○ | ○ | | ○ | | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ● | ○ | ○ |
| その他加熱炉 | | | ○ | ○ | ○ | ● | ● | ● | | ◇ | | | ○ | ● | | ◇ | ◇ |

○ フィン無 } 多管式 ⊙ ハーゼン ◇ シングル } 輻射式 ▲ タイル+フィン付 } 組み合わせ式
 ○- フィン付 } ツイン }
 ○-● ハーゼン+フィン付
 ● ハーゼン+多管

表 4 レキュペレーター型式と空気予熱温度

| レキュペレーター型式 | 炉型式 | 均熱炉 (°C) | 厚板熱延加熱炉 (°C) | 型鋼線材加熱炉 (°C) | その他加熱炉 (°C) |
|------------|-----|----------|--------------|--------------|-------------|
| 多管式 | 設計 | 450~600 | 300~500 | 200~450 | 550~600 |
| | 実績 | 400~500 | 300~450 | 200~350 | 300~500 |
| ハーゼン式 | 設計 | 550 | 400 | 300~400 | 300~350 |
| | 実績 | 300~500 | 370 | 200~300 | 300 |
| 輻射式 | 設計 | 450~600 | 400~450 | 400~600 | 400 |
| | 実績 | 400~500 | 350~400 | 350~500 | 400 |
| 組み合わせ式 | 設計 | 500~550 | — | 400~450 | — |
| | 実績 | 450~500 | — | 350 | — |

15×10⁸ kcal/m²·hr, ハーゼン式では 2×10⁸~7×10⁸ kcal/m²·hr となつている。これらからレキュペレーターの設置場所などに制約を受ける場合には、輻射式レキュペレーターが有利であると考えられる。

4.3 レキュペレーター型式と総括伝熱係数

レキュペレーターの性能をあらわす理論的尺度の一つとして総括伝熱係数がある。

図 8 に炉型式別の各レキュペレーターの総括伝熱係数を示した。

レキュペレーターの型式別に総括伝熱係数をみると、いずれの炉型式でも、輻射式が他のものより大きく設計値と実績値がほぼ一致し良好な型式であることを示している。

型鋼、線材加熱炉における多管式レキュペレーターで総括伝熱係数を 80 kcal/m²·hr·°C に設計したものがみ

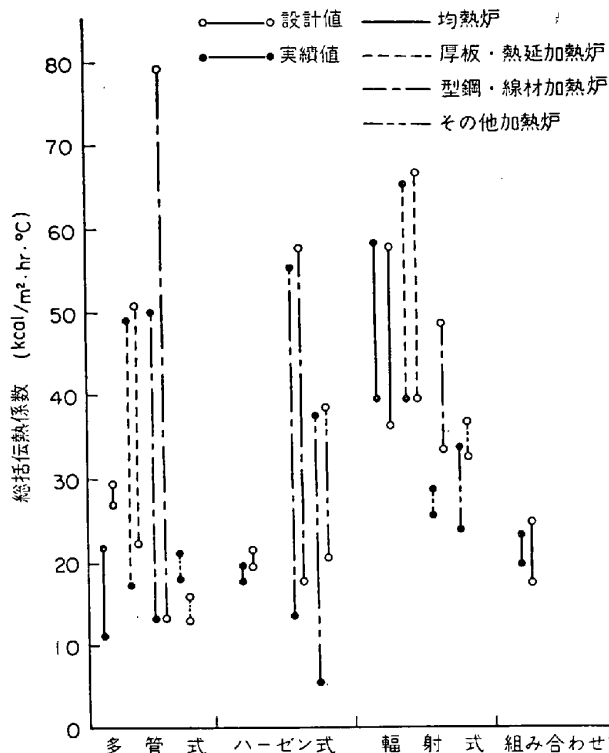


図 8 レキュペレーター型式と総括伝熱係数

られるが、実績では 50 kcal/m²·hr·°C となつており操業条件などの影響も考えられるが、多管式レキュペレーターでは実績値の約 50 kcal/m²·hr·°C が実用上とりうる総括伝熱係数の最高値ではないかと考えられる。

4.4 空気予熱温度と総括伝熱係数

一般に空気予熱温度と総括伝熱係数および伝熱面積は

次の関係がある。

$$Q = K \cdot \Delta t m \cdot F$$

ここで Q : 伝熱量
 K : 総括伝熱係数
 $\Delta t m$: 平均温度差(予熱空気温度)
 F : 伝熱面積

したがって空気予熱温度は総括伝熱係数のみで決定することはできない。

今レキュペレーターの性能判定の一方法として図7および図9から空気予熱温度を総括伝熱係数と伝熱面積よりみると次のようになる。

単位伝熱面積当たりの伝熱量および総括伝熱係数が、他のものより大きい輻射式レキュペレーターの空気予熱温度は、多管式およびハーゼン式レキュペレーターより若干低い温度を示している。

これはそれぞれのレキュペレーターの伝熱面積の相異によるもので、たとえば多管式の場合空気側の伝熱面積が130~230m²に対して、輻射式では40~50m²となっており、これらからみて同一の空気予熱温度を得るに、輻射式では多管式の1/3~1/4程度の伝熱面積で可能と考えられこのような面でも輻射式レキュペレーターは有利である。

また同一型式のレキュペレーターでは、総括伝熱係数と空気予熱温度はほぼ比例関係にあることが、図9よりあきらかである。

4.5 熱回収率とレキュペレーター型式の関係

レキュペレーターの性能をあらわすものに、熱回収効率があるが、この数値は計算に使用する計測値の関係から、ときには100%をこえる場合があり、レキュペレーターの性能を比較するのには適当ではないと考えられる。

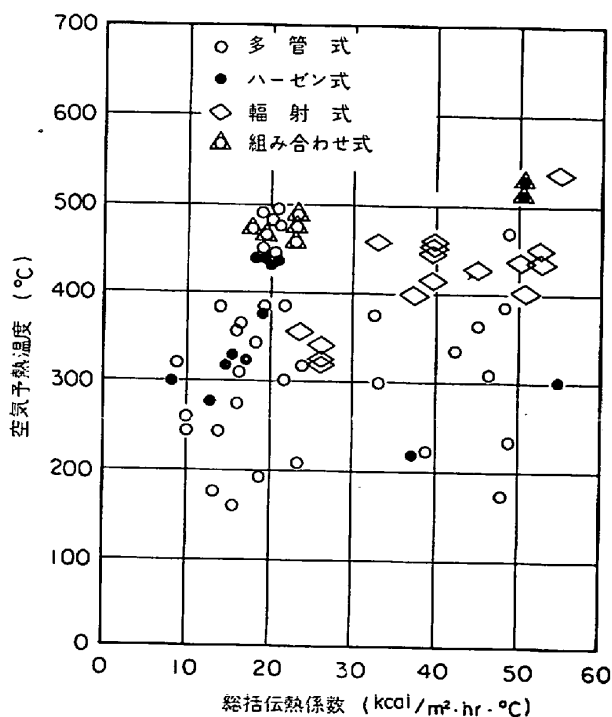


図9 総括伝熱係数と空気予熱温度

表5 レキュペレーター型式と熱回収率の関係

| 炉型式 レキュペ レーター型式 | 均熱炉 (%) | 厚 板 延 熱 加 熱 炉 (%) | 型 鋼 線 材 加 熱 炉 (%) | そ の 他 加 熱 炉 (%) |
|-----------------------|------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 多 管 式 | 30 | 25~35 | 20~34 | 25~40 |
| ハ ー ゼ ン 式 | 24~34 | 25 | 28 | 22 |
| 輻 射 式 | 22~30 | 25 | 25 | 20 |
| 組 み 合 わ せ 式 | 12~20 | — | 29 | — |

そこでここでは、プロセス全体としてのみかたから、表5に示すように熱回収率でレキュペレーターの性能を比較した。

$$\text{熱回収率} = \frac{\text{レキュペレーターで得た空気の熱量}}{\text{レキュペレーター入口の排ガス熱量}} \times 100 (\%)$$

表5より各レキュペレーターの熱回収率をみると、最も効率のよい型式は、多管式ついで、ハーゼン式、輻射式の順になつている。

輻射式レキュペレーターの熱回収率が、他のものより低い数値を示している原因は、レキュペレーター保護のため稀釈空気を吹込んでいるものもあり、いちがいにはいえないが、多くの輻射式レキュペレーターの入口排ガス温度が他のレキュペレーターより、100~150°C 高温であるためと考えられる。

4.6 レキュペレーター型式と燃料節約率の関係

レキュペレーターの熱経済的役割は、いうまでもなく燃料の節約が主体であり、空気予熱温度および排ガス温度が高温であるほど、その率は大きい。

今トリックスの式により燃料節約率を各レキュペレーターごとに算出すれば表6に示したようになる。

トリックスの燃料節約率算出式)

$$\text{燃料節約率} = \frac{\text{(燃料当たりの予熱空気の有する熱量)}}{\text{(燃料の発熱量) - [(燃料当たりの排ガスの有する熱量) + (燃料当たりの予熱空気の有する熱量)]}} \times 100 (\%)$$

いずれの炉型式でも燃料節約率は、輻射式レキュペレーターが他のものより若干ではあるが良好な値を示している。これは先にも述べたように、輻射式はレキュペレーター入口温度が、他の型式より高温であるためである。

前記燃料節約率算出式によれば、同一型式のレキュペレーターでも、気体燃料を使用する場合は燃料当たりの排ガス量が液体燃料にくらべて、大きいため燃料節約率は大きくなり有利である。

表6 レキュペレーター型式と燃料節約率

| 炉型式 レキュペ レーター型式 | 均熱炉 (%) | 厚 板 延 熱 加 熱 炉 (%) | 型 鋼 線 材 加 熱 炉 (%) | そ の 他 加 熱 炉 (%) |
|-----------------------|------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------|
| 多 管 式 | 10~20 | 12~20 | 6~15 | 10~20 |
| ハ ー ゼ ン 式 | 14~20 | 20 | 7~12 | 8~15 |
| 輻 射 式 | 14~23 | 22 | 15 | 20 |
| 組 み 合 わ せ 式 | 12~18 | — | 12~16 | — |

表 7 単位送風電力当たりの空気予熱量

| レキュペレーター型式 | 均熱炉 ($\times 10^3$ kcal/kW) | 厚板加熱炉 ($\times 10^3$ kcal/kW) | 型鋼加熱炉 ($\times 10^3$ kcal/kW) | その他加熱炉 ($\times 10^3$ kcal/kW) |
|------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 多管式 | 40.95 | 39.38 | 29.93 | 36.23 |
| ハーゼン式 | 27.40 | 34.65 | 26.78 | 25.20 |
| 輻射式 | 25.20 | 25.20 | 23.62 | 31.50 |
| 組み合わせ式 | 14.18 | — | — | — |

4.7 空気予熱温度と送風電力の関係

レキュペレーターの性能を向上させるために、総括伝熱係数を大きくすることは周知のとおりであるが、この係数を大きくするために一般に用いられる方法は、空気流速を大きくすることである。

空気流速を大きくすると、当然レキュペレーターでの空気圧力損失は増加し、大容量の送風機が必要になる。熱経済的観点から、燃料節約がいかにか高率に行なわれても運転経費および設備費が増大しては経済的に不都合である。炉型式別に各レキュペレーターの単位送風電力当たりの空気予熱量を示すと表 7 のようになる。

これによると送風電力と空気予熱量の関係は、炉型式で特徴はみられず、当然のことながらレキュペレーター型式によつて決定されることを示している。

これまでの比較で輻射式レキュペレーターは、他の型式にくらべて高性能を示していたが、単位送風電力当たりの空気予熱量は、多管式レキュペレーターの約 75% で運転経費などで不利であると考えられる。

また均熱炉の特例であるタイルレキュペレーターとの組み合わせ式は性能的に良好な結果を示していたが、構造的にジェットポンプを使用する関係で送風に大電力を要し、単位送風電力当たりの空気予熱量はきわめて小さく、運転経費および設備費面で不利であると考えられる。

5. 金属レキュペレーター保全上の問題点

金属レキュペレーターの窯炉における役割は熱経済的に大きい。しかしほとんどの窯炉がレキュペレーターと 1 体構造になつているため、レキュペレーターでのトラブルは直接窯炉の操業に支障をきたし、大きな損失をまねく恐れがある。

したがつてレキュペレーターの採用に当たつては、設備保全上の問題についても十分な考慮をはらう必要がある。このような意味から金属レキュペレーターの保全上の問題点について次の考察を行なつた。

5.1 排ガス温度とレキュペレーター材質

金属レキュペレーターの耐用度は排ガス温度と材質に大きく影響される。

レキュペレーターの型式別に排ガス温度と材質の関係を示すと図 10 のようになる。

多管式レキュペレーターの排ガス温度の最高値は、1050°C でこの場合の材質は高クロム系の耐熱鋳鋼製になるフィンチューブである。またハーゼン式のものでは、1100°C で 25Cr-12Ni を使用し、輻射式では同じく、1100°C で 18Cr-8~12Ni および 25Cr-20Ni のものが多い。

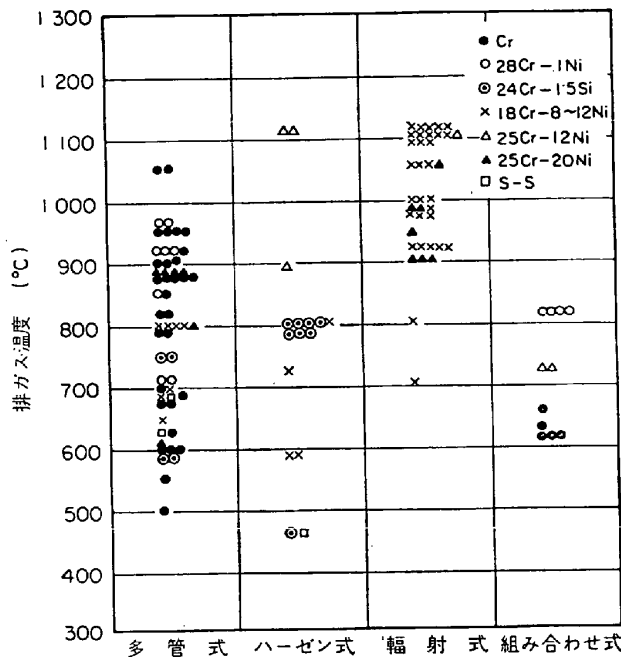


図 10 排ガス温度とレキュペレーター材質

耐熱鋼の許容温度、すなわち過度の酸化を生ぜず連続使用可能な温度の限界は、18Cr-12Ni で 1090°C、18Cr-8Ni では 900°C とされている²⁾。

これから考えると輻射式レキュペレーターは排ガス温度、1100°C に対して許容温度 900°C とされている。18Cr-8~12Ni が多く使用されていることは材質上好ましくない。

実際のレキュペレーター管壁温度は空気との熱交換を行なつているため、排ガス温度より低いものと考えられるが、突発的な事故などを予想すれば材質上の許容温度を大きくこえた排ガス温度内での操業は問題であろう。また一方多管式およびハーゼン式レキュペレーターに例がみられるように、排ガス温度が 600°C 以下であるにもかかわらず、その材質に高級耐熱鋼を使用していることは、設備費、補修費を増大させるのみで好ましいことではない。

5.2 レキュペレーター寿命と排ガス温度

金属レキュペレーターの多くは高級耐熱鋼を使用している。しかしいかに耐熱鋼といえどもこれまでの経験では、1000°C 以上の排ガス中で使用する場合その寿命は大幅に減少することが判明している。

ここでは排ガス温度がレキュペレーター寿命におよぼす影響をみるために、レキュペレーター型式別の排ガス温度と取替周期の関係を図 11 に示した。

多管式レキュペレーターの場合、排ガス温度 900~1000°C ではほとんどのものが、1 年周期で取替えている。これは図 11 には示していないが均熱炉に設置しているものがほとんどで、この原因は排ガス温度が高温であると同時に、炉床材および押湯保温剤が排ガス中のダストとして飛来しレキュペレーターに付着、侵食を促進させているものと思われる。

輻射式レキュペレーターの取替周期は、高温の排ガスにもかかわらず約 6 年とあるが、これはメーカーの仕様を示された耐用寿命であろう。実績として約 6 カ月で破

表 8 レキュペレーター型式と排ガス制限最高温度

| レキュペレーター型式 | 炉型式 | 均熱炉 (°C) | 厚板加熱炉 熱延 (°C) | 型钢加熱炉 線材 (°C) | その他加熱炉 (°C) |
|------------|-----------|-------------|---------------------|---------------------|----------------|
| 多管式 | フィン無/フィン付 | /1000 | 1000/1050 | 1050/1000 | /950 |
| ハーゼン式 | | 900 | 950 | 850 | 1000 |
| 輻射式 | シングル/ツイン | 1180/1200 | 1100/1200 | 1100/1000 | 1100/ |
| 組み合わせ式 | | 900 | — | 850/1000 | — |

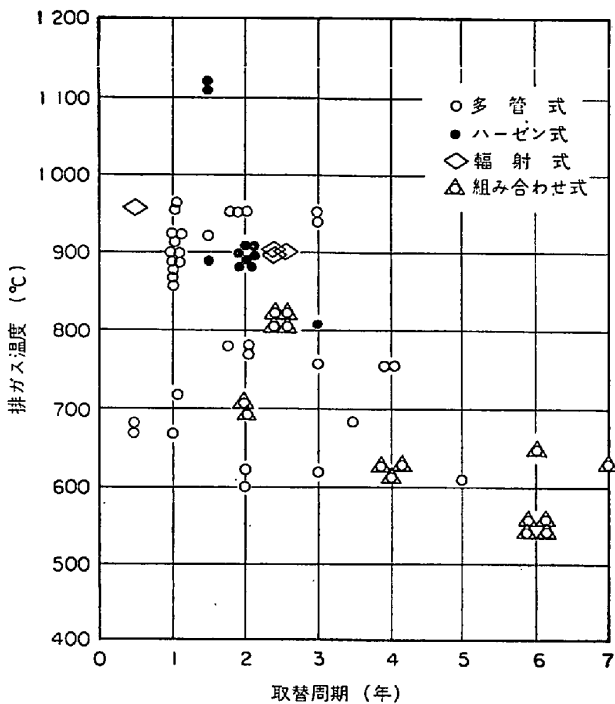


図 11 排ガス温度とレキュペレーター取替周期

損したものが1基あることから考えて実際の命数はこれよりかなり短いと思われる。

5.3 レキュペレーター型式と排ガス制限温度

金属レキュペレーターの多くは、その効率をたかめるため煙道の上流に設置されている場合が多い。

したがってレキュペレーターの入口排ガス温度は、通常レキュペレーター材質の許容温度をこえることが多く排ガス温度制限装置を用いて許容温度域まで低下させている。

排ガス制限温度はレキュペレーターの型式およびその材質によつて異なり、炉型式別に各レキュペレーターの排ガス制限温度を示すと表8のようになる。

表8よりみれば、排ガス制限温度は炉型式別には特に顕著な傾向はみられず、レキュペレーターの型式によつて定まっている。

多管式、およびハーゼン式レキュペレーターの排ガス制限温度は、それぞれ1050°C、1000°Cであり前項で述べた材質との関係から、この数値は材質上の許容温度の限界に近いものであり、安全率をほとんど含まない制限値である。

一方輻射式レキュペレーターでは排ガス制限温度を、1200°Cとしており実際のレキュペレーター管壁温度は

これより相当に低いことが予想されるが、材質上の許容温度をこえた制限値は操業上問題である。

5.4 レキュペレーター型式と保護装置

炉型式別に各レキュペレーターに採用されている保護装置を表9に示した。

レキュペレーターの保護装置は以下に述べるように各種の方式がありそれぞれ一長一短がある。

5.4.1 排ガス温度を低下させる方法

(1) 冷風を煙道に吹込む方法

レキュペレーターより上流の煙道へ、冷風を吹込みレキュペレーター入口排ガス温度を所定の温度まで低下させるもので、冷風量のコントロールはレキュペレーター入口の排ガス温度を検出して行なうようになっている。

しかしこの方法の欠点は、排ガス量が大幅に増加するためにドラフトの悪化をまねく恐れがある。

(2) 噴霧水を用いる方法

この方法は前述の冷風吹込みの欠点である、ドラフトの悪化を防止するもので、煙道の上流側へ水を噴霧させ水の蒸発潜熱を利用して排ガス温度を所定の値まで冷却しようとする方法である。

5.4.2 熱風をブリードさせる方法

レキュペレーターの過熱防止に必要な最低空気量を確保すべく、熱風ヘッダーに放散弁を取り付け炉本体の空気使用量には関係なく、レキュペレーターに必要な量の空気を通過させ、管壁温度の上昇を防止するようにしたので、レキュペレーターの保護としては消極的な方法である。

5.4.3 冷風吹込み・熱風ブリード併用方式

これは前述の2つの方法を併用したもので、レキュペレーターの保護装置としては最も好ましいものであるが設備費が増大する。

表9より各炉型式別にレキュペレーター保護装置をみれば、均熱炉61基中保護装置をもたないものが12基あり、これはすべて輻射式レキュペレーターである。

また保護方式をみれば、冷風吹込みの稀釈空気方式が23基で38%を占め、以下熱風ブリード、稀釈空気+熱風ブリードの順になっている。

厚板、熱延加熱炉でも保護装置をもたないものが5基で約12%であり保護方式としては稀釈空気方式が26%を占めている。

型钢、線材およびその他の加熱炉では、小型炉が多いためか、ほとんどのものが保護装置をもたず、保護装置をもつたものでは簡単な熱風ブリード方式が多い。

5.5 レキュペレーターの点検および清掃頻度

表10に炉型式別のレキュペレーター点検および清掃状況の一覧を示した。炉型式別の特徴はほとんどみられ

表 9 炉型式とレキュペレーター保護装置

| 炉型式 | 均熱炉 | 厚板加熱炉 | 型钢加熱炉 | その他加熱炉 |
|-----------------|------|-------|-------|--------|
| 保護装置 | | | | |
| 稀釈空気 | 23 基 | 11 基 | 4 基 | — 基 |
| 稀釈空気+熱風ブリード | 7 | 10 | 2 | — |
| 熱風ブリード | 17 | 9 | 8 | 1 |
| 熱風ブリード+スチームスプレー | — | 6 | — | 2 |
| 稀釈空気+スチームスプレー | 2 | 1 | — | 1 |
| 保護装置なし | 12 | 5 | 20 | 5 |

表 10 レキュペレーター点検および清掃頻度

| レキュペレーター型式 | 均熱炉 | 厚板加熱炉 | 型钢加熱炉 | その他加熱炉 |
|------------|--|---------------------------------------|---|-----------------------|
| 多管式 | 清掃: 1~3回/年 点検: {適時 取替時} | 清掃: {1~2回/年 炉修時 点検: {適時 炉修時} | 清掃: {1~4回/年 炉修時 点検: {1~2回/年 適時, 炉修時} | 清掃: 1回/年 点検: 炉修時 |
| ハーゼン式 | 清掃: 1回/2年 点検: } | 清掃: {1回/2年 炉修時 点検: 炉休止時} | 清掃: 2回/年 点検: 炉修時 | 清掃: 1~2回/年 点検: 炉修時 |
| 輻射式 | 清掃: 特に行なつていない 点検: {適時 炉修時} | 清掃: 1回/年 点検: 炉修時 | 清掃: 炉修時 点検: } | 清掃: 適時 点検: } |
| 組み合わせ式 | 清掃: {3~6回/年 炉修時 点検: {1回/2年 炉修時} | | | |

ないが、清掃頻度にレキュペレーター型式別の傾向があらわれている。

清掃頻度はタイルレキュペレーターとの組み合わせ式が3~6回/年がもつとも多く、ついで多管式、ハーゼン式、輻射式レキュペレーターの順となつている。

レキュペレーターの点検は、いずれの型式も炉休止時または、適時となつており周期が定まつていない。

レキュペレーターの保全上、点検作業は定期的に行なうべきと考えられ、現状の保全体制はレキュペレーターの耐用命数増大に対して問題があるのではなからうか。

5.6 レキュペレーター型式別の事故例

金属レキュペレーターの設備保全上の問題点の一つである事故例を表 11 に示した。

表 11 よりみれば、炉型式別の事故例には特徴はみられないが、レキュペレーター型式ごとに類似事故がみられる。表中、レキュペレーターチューブの溶損事故がみられるが、これはあきらかに操炉上の不注意によるアフターバーニングが原因と考えられ、レキュペレーターの性能および型式には関係がない。

レキュペレーターの型式別に事故例をまとめると次に示したようになる。

5.6.1 多管式レキュペレーター

この型式のフィン付チューブを有したものは、材質に高 Cr 系の鋳鋼品を使用しているものが多く、このためにサーマルショックによると思われるクラックの発生事

故が多発している。

また形状的に複雑であるため、ダスト付着事故も多く発生している。ついでこの型式では膨張接手の破損事故が多く発生しており、これらから多管式レキュペレーターでは、材質および構造の両面を検討する必要がある。

5.6.2 ハーゼン式レキュペレーター

この型式は他のものにくらべて比較的事故例がすくなく、各炉型式を通じて高温酸化によるチューブの破損事故が多く、使用温度を検討することにより事故を防止できるものとする。

5.6.3 輻射式レキュペレーター

この型式は使用実績が短期間であるにもかかわらず多くの事故例が報告されている。

いずれの事故もレキュペレーターの機械的強度の不足が原因と思われ、鋼板の厚みを計算値より若干厚くするなど、設計面で現場での経験を取り入れた構造および使用温度の検討が必要である。

現状ではメーカーが示している5~7年の耐用年数には若干問題がある。

5.6.4 タイルレキュペレーターとの組み合わせ式

タイルレキュペレーター+多管式の組み合わせ式で、多管式と同様な事故例があげられている。これにくらべて、ハーゼン式の組み合わせ式では事故例がなく、保全上ではこの型式が問題がなく、好ましいものといえよ

表 11 レキュペレーター型式別事故例

| 炉型式 レキュペ レーター型式 | 均 熱 炉 | 厚板・熱延加熱炉 | 型钢・線材加熱炉 | その他加熱炉 |
|-----------------------|--|--|---|---|
| 多 管 式 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 高温側フィンチューブの破損 ○ ダスト付着 ○ ベローズの破損 | <ul style="list-style-type: none"> ○ フィンチューブの溶損 ○ ダストの付着 ○ カラーおよびコンベンセーターの腐食 ○ 高温側チューブの中央部が折損またはクラックの発生 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 高温-低温下部ダクトの破損 ○ チューブにクラック発生 ○ ダスト付着 ○ 高温側カラーおよびベローズの破損 | <ul style="list-style-type: none"> ○ サーマルショックによるクラックの発生 ○ 高温側フィンチューブの破損 |
| ハ ー ゼ ン 式 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 管壁の過度な酸化 | <ul style="list-style-type: none"> ○ チューブの溶損 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 高温側チューブの破損および曲がり | |
| 輻 射 式 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 内筒の圧潰、破損 ○ コンベンセーターの破損 ○ 外筒の破損 ○ フィンの破損 ○ 高温側内筒の肉減 ○ ホットボックスのスケールオフ | <ul style="list-style-type: none"> ○ 中間部レンガ脱落 ○ ダンパー動作不良 ○ 内筒の変形 ○ 外筒溶接部クラック発生 ○ フルグラウンド部クラック発生 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 上部内筒の座屈 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 内筒の破損 |
| 組 み 合 わ せ 式 | <ul style="list-style-type: none"> ○ 全チューブ溶損 ○ ダスト付着 ○ 高温側エレメント割れ ○ ベローズの破損 | | | |

表 12 金属レキュペレーターの性能と経済性の評価

| 項目 | 均 熱 炉 | | | | 厚板加熱炉 | | | 型钢加熱炉 | | | | その他加熱炉 | | | |
|-----|--------|-------|-----|--------|-------|-------|-----|-------|-------|-----|--------|--------|-------|-----|-----|
| | 多管式 | ハーゼン式 | 輻射式 | 組み合わせ式 | 多管式 | ハーゼン式 | 輻射式 | 多管式 | ハーゼン式 | 輻射式 | 組み合わせ式 | 多管式 | ハーゼン式 | 輻射式 | |
| 性能 | 空気予熱温度 | 2 | 1 | 3 | 4 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 4 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| | 単位伝熱量 | 2 | 1 | 4 | 3 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 3 | - | 1 | 2 | 3 |
| | 総括伝熱係数 | 2 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 3 | 4 | 2 | 1 | 1 | 2 | 3 |
| | 設置面積 | 2.5 | 2.5 | 4 | 1 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 4 | 1 | 2 | 1 | 3 |
| | 熱回収率 | 3 | 2 | 4 | 1 | 3 | 1.5 | 1.5 | 4 | 2 | 1 | 3 | 3 | 2 | 1 |
| 小計 | 2.3 | 1.5 | 3.8 | 2.4 | 2.0 | 1.3 | 2.7 | 3.0 | 2.0 | 2.8 | 1.75 | 2.0 | 1.6 | 2.4 | |
| 経済性 | 燃料節約率 | 3 | 3 | 4 | 1 | 1 | 2 | 3 | 2 | 1 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 |
| | 送風電力 | 4 | 3 | 2 | 1 | 3 | 2 | 1 | 4 | 2 | 1 | 3 | 3 | 1 | 2 |
| | 寿命 | 1.5 | 1.5 | 3 | 4 | 1.5 | 1.5 | 3 | 3 | 4 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| | 小計 | 2.5 | 2.5 | 3.0 | 2.0 | 1.8 | 1.8 | 2.3 | 3.0 | 2.3 | 2.0 | 2.7 | 2.0 | 1.7 | 2.7 |
| 評価 | B | D | A | C | B | C | A | A | D | B | C | B | C | A | |

う。

6. 金属レキュペレーターの選定

6.1 金属レキュペレーターの評価

レキュペレーターの性能と経済性、および保全上の問題点について、これまで各項目について考察を述べた。その結果から炉型式別に、表 12 に示したような評価を試みた。これから各レキュペレーターの検討を行なう場合、それぞれの項目に使用条件による重み係数を剰じて比較をするのが妥当であると考えられる。

表 12 よりいずれの炉型式でも、輻射式レキュペレーターは良好な結果を得ており、最近建造される金属レキュペレーターの多くが、この型式であることは妥当と思われるが、その耐用命数についてはメーカー側の示す、6

年以上という数値はいま少し今後の実績をみて修正しなければならないものと考えられる。

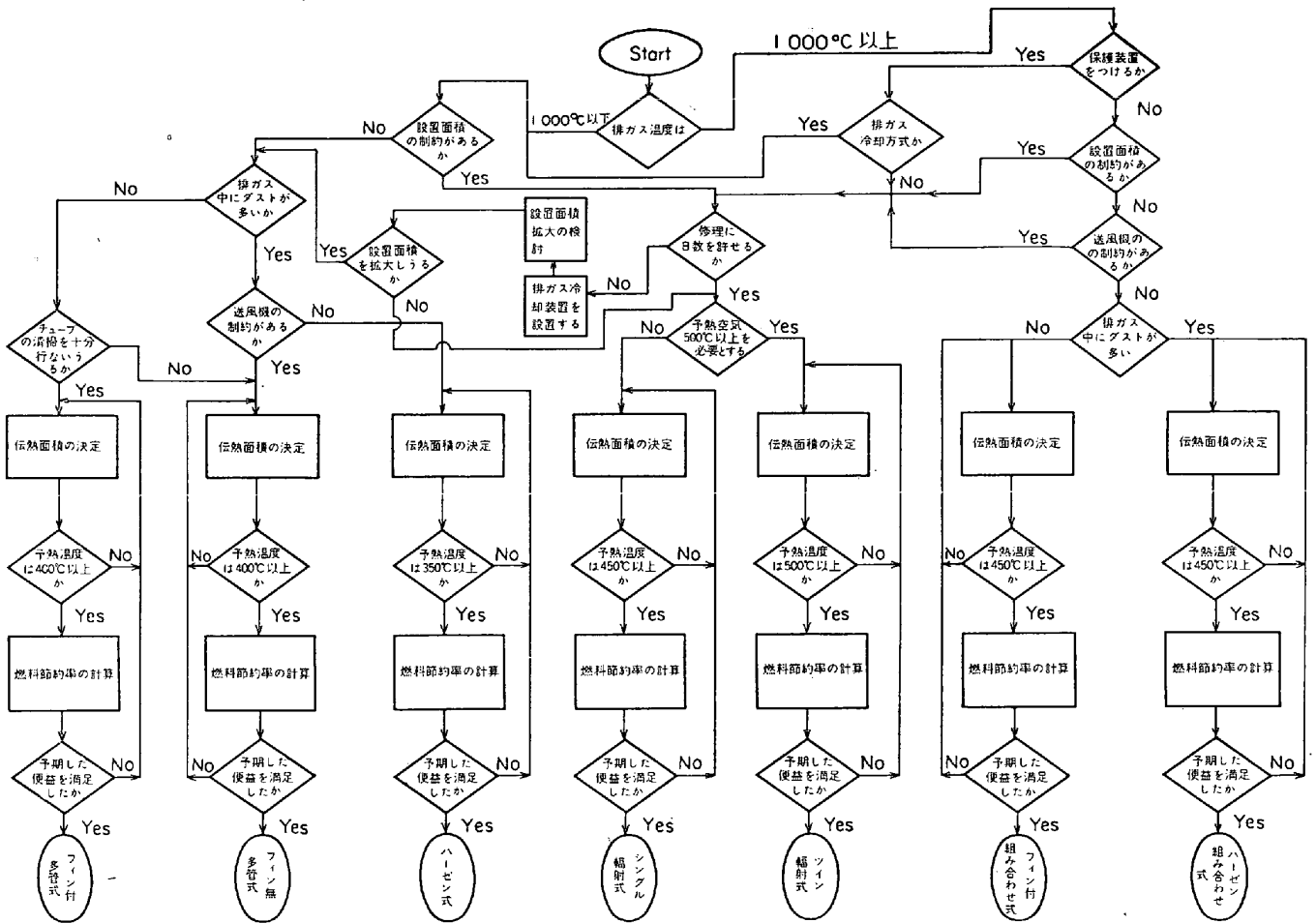
6.2 金属レキュペレーターの選定

これまで述べてきた金属レキュペレーターの諸特性より、今後レキュペレーターの設置、および改造を検討する場合の、指針を得るべく表 13 に示すごとき選定手順の試案を作成した。

表中にある予期した便益の算出については、炉型式、およびレキュペレーター型式で、種々条件が異なるため画一的に行なうことは困難であるが、考え方としては次のような式で検討を加えるべきである。

$$\text{便益} = [\text{回収した熱量の価値}] - [(\text{レキュペレーター建造費}) + (\text{償却費}) + (\text{利子}) + (\text{修理・維持費}) + (\text{動力費})]$$

表 13 各炉型式共通金属レキュペレーター選定手順 (案)



7. 結 言

各社委員より提出された「金属レキュペレーターの現況」をまとめて考察を行なった。

空気予熱による便益は、燃料の節約のみならず、炉全体の効率向上が行なわれ熱経済上非常に有益である。

しかし各社の実績から、金属レキュペレーターによる空気予熱の限界は約 550°C であり、しかもこの温度を得るために 1 100°C 以上という高い排ガス温度で使用されている例が多い。

特に最近建造されている、輻射式レキュペレーターにこの傾向が強くあらわれている。そのため現状では寿命の面で問題となるものが多く、このような高温の排ガス

中で長期間の使用に十分耐えうるレキュペレーターの材質あるいは構造については、今後さらに研究が必要である。

最後に貴重なデータを提供していただいた熱経済技術部会委員各位、ならびに取りまとめに当たってご指導いただいた鉄鋼短期大学大塚教授、また特にまとめにご援助いただいた住友金属工業(株)和歌山製鉄所古川良治、錦木勝彦、矢葺邦弘の諸氏に深く謝意を表する次第である。

文 献

- 1) W. TRINKS: Industrial Furnaces, Vol. 1, p. 221
- 2) 日本金属学会編: 金属便覧, p. 585, p. 587