

共同研究会報告講演

熱経済技術部会報告

均熱炉のタイルレキュペレータについて*

——日本鉄鋼業における使用実績およびその考察——

大 塚 武 彦**

Investigation into the Tile-Recuperator tube Referring to its Construction, Operation and Durability Some Proposals to their Improvement

Takehiko OTSUKA

1. 結 言

均熱炉では加熱すべき鋼塊は炉内で静止しているので、炉内全体を一樣な高温、約 1300°C にしなければならない。したがって炉から出る廃ガスはやはり高温であり、およそ 1200°C である。上部 2 方焚きの均熱炉では、この高温の廃ガスをそのまますぐにタイルレキュペレータに通して燃焼用空気の前熱用に使用する。一方このタイルレキュペレータが破損したとき、修理に約 1 カ月近くかかり、その間炉は休止して分塊工程に支障を与えるほか、修理前の数カ月は空気予熱温度が著しく低下するため燃焼は不調となり、鋼塊の加熱状況が不良となる。それゆえにタイルレキュペレータはできるだけ長期間良好な状態で稼働しなければならない。

今日、日本の鉄鋼業ではタイルレキュペレータをもつ上部 2 方焚きの均熱炉は総数 220 ホールにおよび、その加熱能力は年間約 2000 万 t である。この大容量の設備が有効に活用されているか否かは日本鉄鋼業にとって大きな問題であるが、現状はタイルレキュペレータの耐用年数が不安定で平均耐用年数も短く、したがってこの型の均熱炉が有効に稼働しているとはいえない。

熱経済部会ではこの問題を昭和 39 年 6 月の第 28 回部会以来今日まで共通問題として取りあげ、各社から多くの貴重な資料が提出された。ここにこれらの資料に基づいて日本鉄鋼業でのタイルレキュペレータの現状とその問題点およびその改善対策につき述べる。

2. 調査の対象となつた均熱炉

本調査の対象となつた均熱炉は 220 ホールであるが、これらをそのタイルレキュペレータを基準にして分類すると 7 種の型になる。分類の基準は次のとおりである。

- (1) 炉体廃ガスポートの形状と配置
- (2) レキュペレータ室の構造
- (3) 廃ガス出口煙道の構造
- (4) レキュペレータ室の空気案内仕切り板の配置

図 1-1, 1-2 および 1-3 は 7 つの型の中から 3 例を取りあげたものである、このようにレキュペレータ室関係の構造の異なる 7 つの型があることがわかったが、そのおのおのの構造のもつ意味や特長の比較検討は今後の課題として残されている。本報告では上記各項目についてまずその特長の内容を明らかにし、これに対して考察を加えた。

2.1 炉体廃ガスポートの形状と配置

ガスを狭い通路から広い空間に流すときには偏流が生じる。たとえば図 1-1 の Cf 社の均熱炉でガスが炉室から廃ガスポートを通つてレキュペレータ室に入る状況がちょうどこれに相当する。Cf 社の型の廃ガスポートをもつレキュペレータ室ではダストが廃ガスポートの前面に吹きとばされて堆積する実例が発表されている。Cf 社の型の均熱炉以外は一般にポートの数は多くとつてあるが、その配置には次の 3 種がある。

- (1) 煙突に近いほう、すなわちドラフトの大きいほうにポートの面積を大きくしたもの
- (2) (1) と反対にしてあるもの
- (3) レキュペレータ室中央でポートの面積を小にしたもの

上記の(1)と(2)に関しては(2)の方式のほうが妥当性がある。すなわちドラフトの大きいほうをポートの面積を小さくしたほうがレキュペレータ・チューブへのガス流れは均一になると考えられる。これについては実状を更に調査の要がある。(3)の例は図 1-2 の De 社の均熱炉であるが、これは炉底中央から燃焼ガスを吹き出している、本来なら炉体の 4 辺の壁に廃ガスポートを作らないと炉内のガス流れは均一にならない。しかし実際は廃ガスポートは 2 辺の壁に限られるのでこれを補うために両端のポートの面積を大きくしてある。しかし

* 昭和 42 年 4 月本会講演大会において講演
昭和 42 年 8 月 17 日受付

** 鉄鋼短期大学 工博

レキュペレータ室ではレキュペレータ・チューブは均等に配分されている。これはやはりレキュペレータ室中央より両端のほうがガス通過面積が大きくなるようにレキュペレータ・チューブを配分すべきである。

2.2 レキュペレータ室の形状

まずレキュペレータ室の平面的形状は Cf 社と E 社を

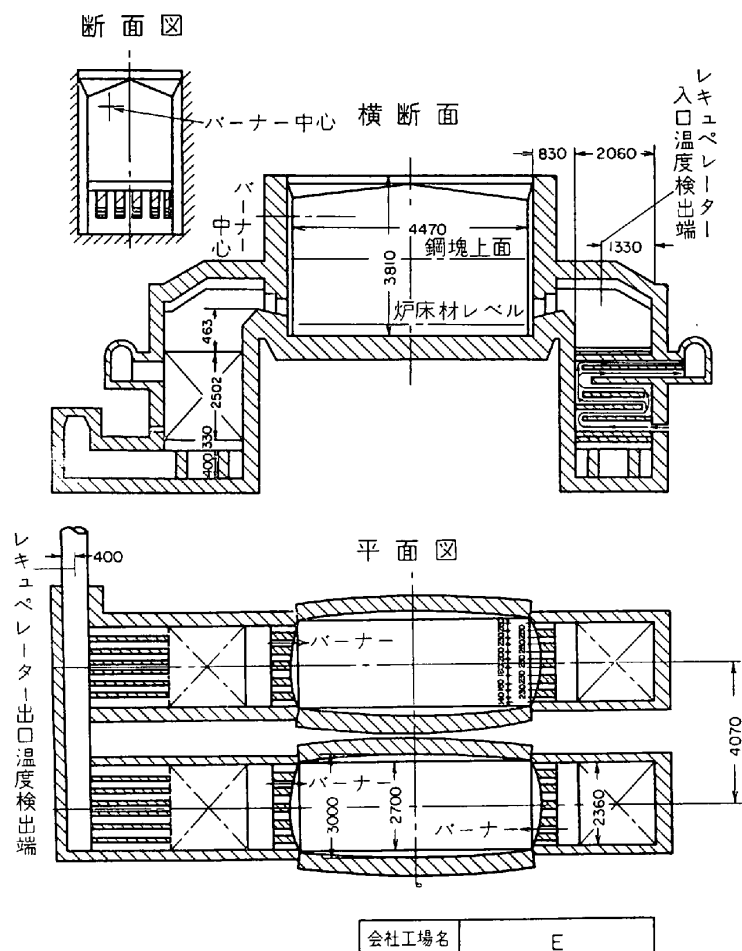


図 1-3 均熱炉レキュペレータ

除いては幅より長さが大きく、炉の長軸にそつて細長い。長さは 2060 mm のものが最も多いが、F 社のものは 3000 mm 近くもある。図 2-1、2-2 および 2-3 は 3 つの型のレキュペレータ室につき流体モデル実験をしたもので、レキュペレータ室上部の形状とその中のガス流れの状態を示している。図 2-2 と図 2-3 との型では、ガスの主流が直接レキュペレータ・チューブに流れその主流の上に渦があるが、図 2-1 の型ではガス主流は天井にそつて進み、向かい側の壁で Uターンし、この主流の下側で渦になる。ポートからの廃ガス主流はときに許容限度以上に (1200°C 以上に) 高温となることがあるが、これに対しては図 2-1 の構造であれば高温のガスがレキュペレータ・チューブに直接流れこむことはない。特に図 2-1 のものはポートからレキュペレータ・チューブの上面まで約 1000 mm あり、高温ガスからの保護が十分にされている。ポートとレキュペレータ室上部の高さがほとんど同じでポートのガス流がそのままレキュペレータ・チューブに流れこむ構造のもの (図 1-1 の Cf 社) は好ましい構造とはいえない。

次にレキュペレータ・チューブごとのガス流の流速分布につき考察してみよう。図 2-1 の F 社のものはレキュペレータ室の長さが 3000 mm 近くもあるが、レキュペレータ室上部の流線から考えるとチューブごとのガス流速はポートに近いほうよりむしろポートから遠いほうのチューブのほうが速いと判断される。これに反して図 2-2 および 2-3 のものはポートに近いほうのチューブがより速い流れをもっていると判断される。このことはこれらの各型のレキュペレータ室のダスト堆積状況とも一致している。

図 2-2 は De 社のものであるが図の右側に示した炉ではレキュペレータ室の下部煙道を炉体側によせている。このような煙道配置はこの De 社だけで他社は全部炉体の反対側に煙道をよせ

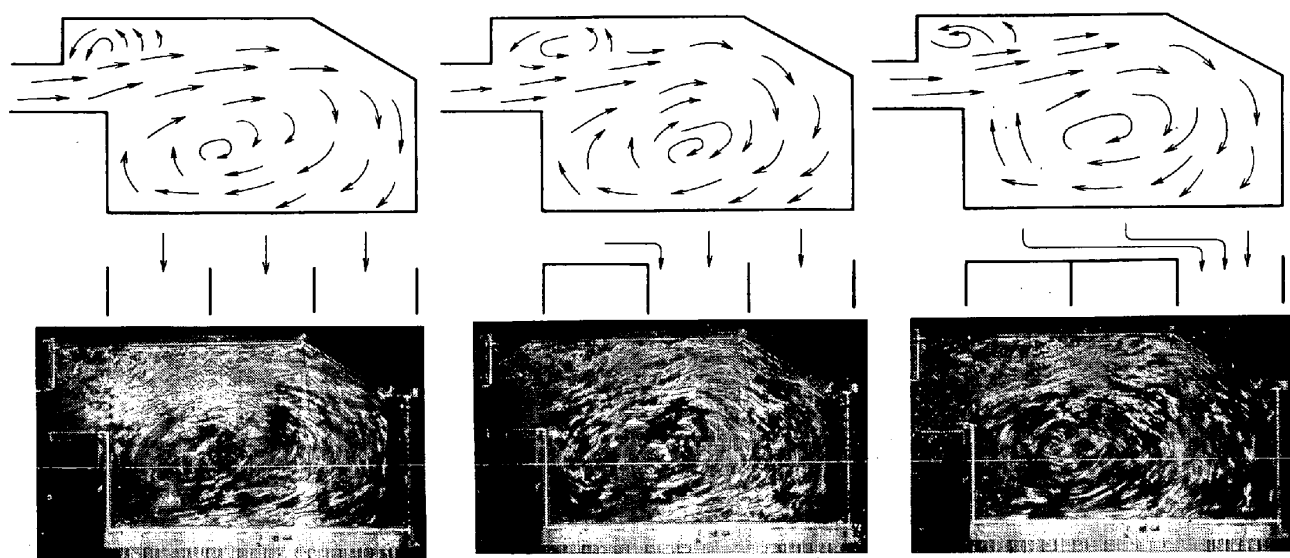


図 2-1 流体模型実験によるレキュペレータ室上部の廃ガス流れ

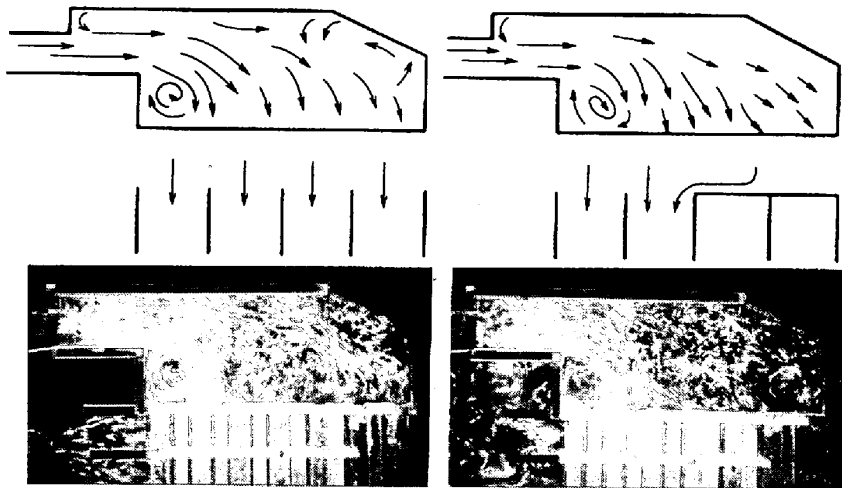


図 2-2 流体模型実験によるレキュペレータ室上部の廃ガス流れ

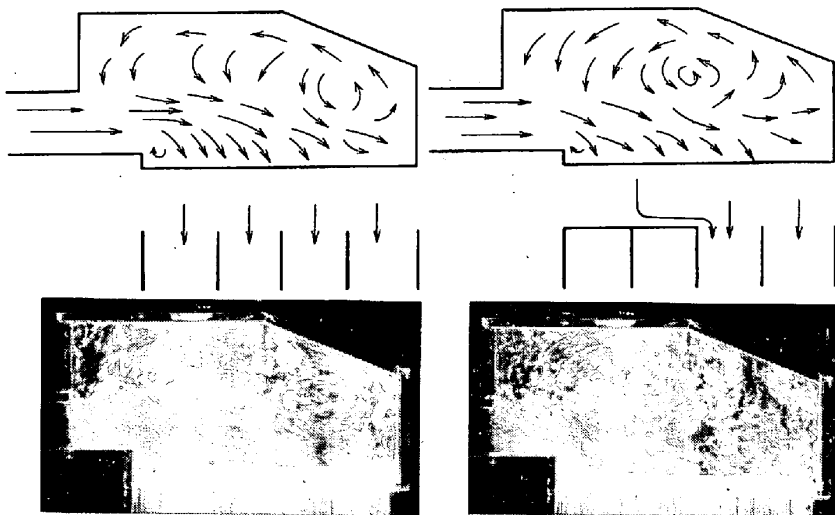


図 2-3 流体模型実験によるレキュペレータ室上部の廃ガス流れ

ている。De 社のような煙道配置では炉体に近いほうのチューブのガス流が速いことが左側に示した炉のレキュペレータ室上部の流線と比較すればよくわかる。

なお流体モデル実験の Reynolds 数は廃ガスポート出口の速度をとつたが、その値は

図 2-1	F 社：ポート出口ガス速度(1200°C)		
		3.8m/sec,	Reynolds 数 3500
図 2-2	De 社：	7.0m/sec,	7200
図 2-3	Bb 社：	5.9m/sec,	5400

となつている。

2.3 廃ガス出口煙道の構造

レキュペレータ・チューブを通つた廃ガスはチューブの下にある高さ約 300 mm のライダータイルを経て煙道に流れていく。しかし図 1 の各炉の平面図からわかるように煙道がレキュペレータ室の下部にある関係上、レキュペレータ室の幅全体から廃ガスをひくことのできるのは煙突から最も離れた炉だけであり、煙突に近いほうの炉では一般に炉体に遠いほうの煙道からガスをひいてい

ていることは前節にのべたとおりである。図 1-3 の E 社の煙道はレキュペレータ室の外側を通つているので、レキュペレータ室下部の煙道の構造に関しては、煙突に対する関係位置に関係なく各炉同一となつている。

このようにレキュペレータ室に対する廃ガス煙道の関係位置は異なつており、そのために悪い影響があつたという報告が 1 つあるが、全体の炉についてはまだ確認されていない。

図 2 の流体モデル実験で見られたように煙道の関係位置の変化にかかわらず炉体に（あるいは廃ガスポートに）近いほうの側のチューブでガス流速が大きいと判断される。したがつてチューブごとのガス流速の分布は、煙道の構造よりむしろレキュペレータ室上部の形に支配されているように考えられる。レキュペレータ・チューブのガス流速分布は次に述べる理由によつて重要であるから、実験によつて確認しておく必要があると考えられる。

すなわち各チューブごとのガス流速の不同は各チューブの温度の不同、したがつて各チューブの膨張の不同の原因となる。ところが各チューブは下部が固定されているので上部で高さが不同となり、各チューブを連結している水平タイルのためにチューブに外力が作用する結果となる。チューブはその内外面の温度差によつてその外面にすでに張力が発生しているから、その上に外力がかかると亀裂発生の原因となる。

2.4 レキュペレータ室の空気案内仕切り板の構造

図 3 に示すようにレキュペレータ室の空気案内板の構造は各社の炉ごとに異なつているといえる。たとえば図 3 の(1)、(2)および(3)は同一の炉型のものであるが仕切り板の構造は異なつている。すなわち(2)の仕切り板は(1)にくらべて、下から 2 枚目と 3 枚目が短いために空気の流れが短絡して流れが淀んでいる部分が大きくなつている。仕切り板はできるだけ長くして強制流路をレキュペレータ室の端にまで作るべきである。(3)のものは下から 3 枚目と 4 枚目の仕切り板の長さが短く、レキュペレータ室の右側に大きな淀みの部分ができてい

る。一方、図 3 の(4)、(5)および(6)はアムコ上部 2 方焚きの均熱炉のものであるが、これらも構造が少しずつちがつている。すなわちこれらは(1)、(2)および(3)にくらべて仕切り板が長く強制流路が多いが、下から 3 段と 4 段の流れが 2 段に分かれるところで 3 者それぞれ異なつている。(4)では下から 3 段目の仕切り板は右端のすき間をしぼつてあるので 3 段目にも 4 段目と同じ位

の流れがあるが、(5)ではこのすき間が大きくなっているため流れは4段に多く行き3段の流れは流れている。(6)では4段目も含めてそれより上の仕切り間隔を大きくしているため流れは全部4段に行き3段は逆流している。本試験は常温試験であり、実際の流れを忠実に表わしてはいないが、各種のレキュペレータの空気流れの特徴はつかめたと思う。

3. レキュペレータ・チューブの寿命に関する調査

レキュペレータ・チューブの寿命とこの寿命に関係があると思われる要因について熱経済技術部会で調査した結果は次のとおりである。

3.1 タイル・チューブの耐用年数

昭和40年3月現在の調査の結果によるとタイル・チューブの耐用年数は全数平均で38カ月の寿命であるが、7カ月から94カ月と大きくばらついている。各社工場ごとに平均耐用年数をとってみても22.4カ月から59.9カ月の間にばらついている。1工場内の寿命のばらつきは大体±1.5年位である。このような大幅の変動は明らかに工場の作業計画に大きな支障を与えるか、または修理前の数カ月間、炉の不調による一たとえばチューブの亀裂による空気の大量漏洩、あるいは空気予熱温度の低下による燃焼不良—鋼塊の加熱不良のため分塊鋼片の品質低下を起こしていることが懸念される。

3.2 建設および補修の時期との関連

建設および修理の時期を昭和26~30年、31~35年および36~40年の3期に分けて調査した結果、後期になるほど寿命が短くなっていることがわかった。また正常期間に対する漏洩期間の割合も次のようになくなっていることがわかった。

昭和26~30年：12.6%

昭和31~35年：36.3%

昭和36~40年：50.4%

すなわち異状操業の期間を長くしてもなお使用期間は短くなっている。

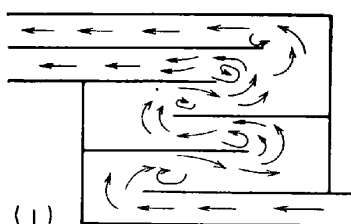
なお第1期の昭和26~30年の間はチューブは全部輸入品であり、第2期からはホットトップに発熱剤の使用が始まって、そのアルカリダストがレキュペレータ室に飛散してチューブ内面に付着し、母材より膨張率の大きい異質材を作り亀裂がおきた。しかしこの事柄は後に述べるように寿命を短くする直接の原因にはなっていない。

3.3 使用する燃料の種類と耐用年数の関連

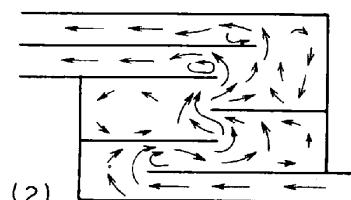
各社の炉について燃料別に燃焼に関する特性値を調べてみると

(1) ガス焚きのほうがレキュペレータの入口および出口ともに廃ガス温度が高い。

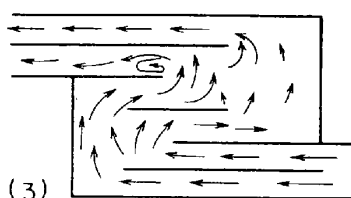
(2) チューブ伝熱面積当たりの廃ガス量および熱負荷もガス焚きのほうが大きい。



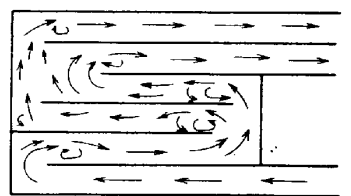
(1)



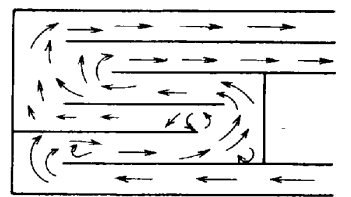
(2)



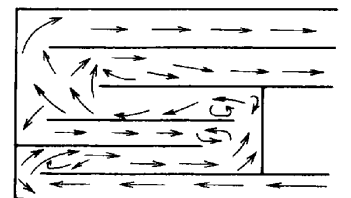
(3)



(4)



(5)



(6)



(1) アムコボトムファイア (4) アムコ上部2方焚
(2) アムコボトムファイア (5) アムコ上部2方焚
(3) ロフタス上部2方向焚 (6) アムコ上部2方焚

図3 空気仕切り板の構造の相違と空気流の変化

一方燃料別に層別したタイル・レキュペレータの平均耐用年数と正常期間の関係は表 1 に示すとおりである。この表に見られるように正常期間はアムコ重油焚きを除き大体同じと見てよい。またこのアムコ重油焚きについてもこの型の炉をもっている 2 社のうち、1 社の最近の実績は大幅に上昇し、40 カ月を経ても平常に運転されている。ゆえに現段階では燃料と耐用年数の関連はないものと見てよい。

表 1 炉形式および燃料別の平均耐用年数

炉形式	アムコ		ロフタス	ボトムファイヤ
燃 料	混合ガス	重 油	重 油	混合ガス
耐用期間 (月)	46・2	26・8	37・5	50
正常期間 (月)	31・5	15・4	32・9	—
漏洩期間 (月)	11・5	8・6	7・2	—

3.4 ホットトップ発熱剤との関連

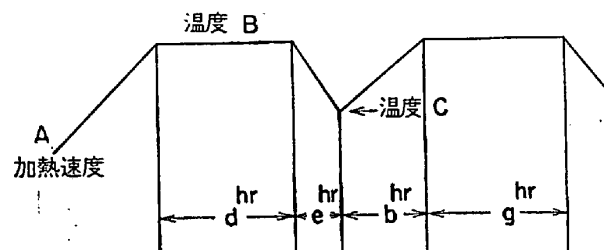
ホットトップの発熱剤がレキュペレータ・チューブの損傷に関係があると思われるのでこれを調査した。すなわち均熱炉装入鋼塊中のホットトップ比率と耐用年数の関係を調査したが、予想と逆の関係になった。すなわちホットトップよりも強い影響をもつ因子がほかにあると考えられる。

3.5 冷塊率と耐用年数との関連

冷塊装入による廃ガス温度の低下によつてレキュペレータ・チューブがスポーリングによるクラックを起こすことが考えられるのでこれを調べたが、明らかな関係は出なかった。

一方シャモット質のレキュペレータ・チューブについてスポーリングテストを行なった結果は表 2 のとおりでチューブを 1200°C に加熱したものを 800°C, 600°C, 400°C, 200°C の各温度に冷却することをくりかえした結果を示している (テストマーク No. 2-9, 2-10, 2-11, 2-12)。これによるとシャモット質チューブはスポーリ

表 2 レキュペレータチューブスポーリングテスト結果



テストマーク	加熱速度 A	B (°C)	時 間 d	時 間 e	C (°C)	時 間 b	時 間 g	クラック発生までの 加熱サイクル
*No. 1—3	30°C/hr	816	30'	3'	430	12'	30'	35(クラックせず)
No. 2—4	100°C/hr	700	2hr	1hr30'	40	40'	2hr	2
No. 2—5	"	600	2"	"	40	40'	"	5
No. 1—11	"	500	2"	"	40	40'	"	35(クラックせず)
No. 2—9	50°C/hr	1・200	30'	1'50"	800	50'	30'	5
No. 2—10	"	1・200	30'	4'10"	600	50'	"	4
No. 2—11	"	1・200	30'	7'45"	400	50'	"	3
No. 2—12	"	1・200	30'	17'	200	50'	"	2
No. 2—7	100°C/hr	816	30'	8'	300	20'	"	35(クラックせず)
No. 2—8	"	816	30'	14'	200	30'	"	35(")
No. 2—3	"	816	30'	30'	100	50'	"	2
No. 1—12	"	816	2hr	1hr30'	40	40'	2hr	2

* AMCO社規定

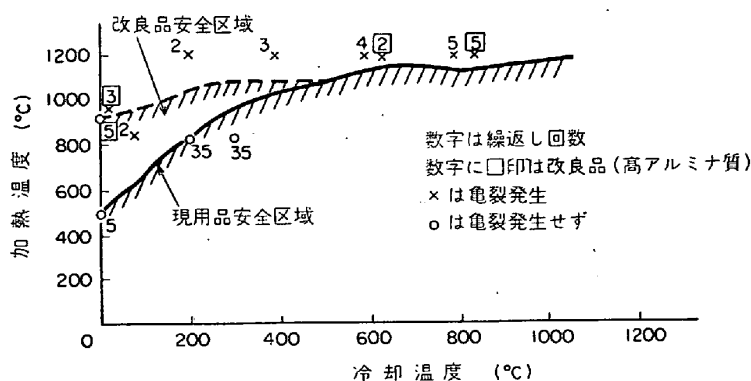


図 4 チューブのスポーリングに対する許容温度範囲

ングには弱いことがわかる。図 4 は高アルミナ質の改良品のスポーリングテスト結果も一緒に図示したものである。これを見ると改良品も加熱温度を 1100°C 以上にすると、スポーリングに対する抵抗力は在来品と同じである。またスポーリングを避けるためには加熱温度を高くすれば冷却温度も高くしなければならないことがわかる。

4. レキュペレータ・チューブの寿命に影響するその他の事項

2 ではレキュペレータ室の構造がチューブの寿命に影響を与える問題点を取りあげたが、本

章ではチューブの寿命に関連するその他の問題点を取りあげてみる。

4.1 レキュペレータ・チューブのスポーリングについて

図4からわかるようにレキュペレータ・チューブのスポーリングを防ぐには、チューブの加熱冷却のサイクルで上限温度は低く、下限温度は高くすればよい。すなわち上限は 1100°C 以下、下限は 700°C 以上でなければならない。もし上限が 1200°C になれば下限は 800°C より低くなつてはならない。各社の均熱炉の操業状況は、報告によるとレキュペレータ入口廃ガス温度はガス焚き

で 1200°C 、重油焚きで 1100°C ということになっている。しかしレキュペレータ室廃ガス温度が 1300°C をはるかに越えていることを示す写真1および2のような例も紹介されている。また下限温度については合金鋼の冷塊装入の際に炉温を 500°C 位まで低下させるのでチューブもそれに近い温度まで低下させていることも多い。図5は低合金鋼のパネ鋼の冷塊装入時の均熱炉の操業を示す。鋼塊の装入終了後約3hrは燃料を投入しないで炉壁に残留した熱のみで徐熱を行なっているため、炉温は最低 650°C まで低下している。レキュペレータ室入口はこの温度より少なくとも 100°C 低い 550°C 位には下がっている。



写真1 スタップチューブとダストの熔融



写真2 レキュペレータ室側壁レンガの熔融

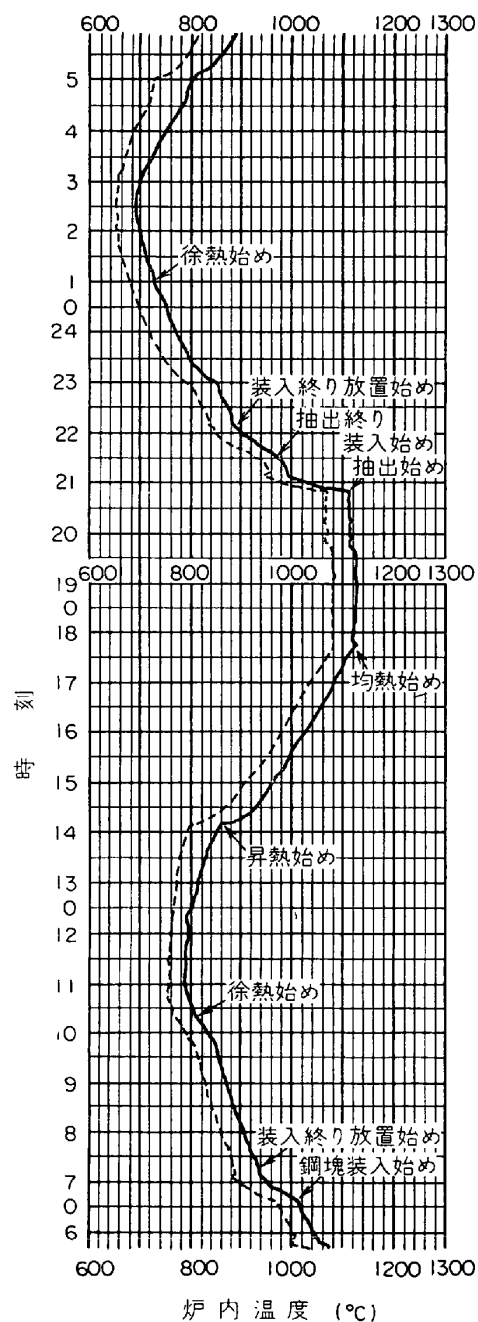


図5 パネ鋼の冷塊加熱時の均熱炉温度 (炉の両側の温度を示す)

このように現在の均熱炉の操業では、チューブがスポーリングで亀裂をおこすチャンスは実に多いといわざるをえない。なおメタリックレキュペレータをもつ均熱炉があるときは、合金鋼の冷塊はつとめてこのメタリックレキュペレータの均熱炉に装入するようにし、タイルレキュペレータの均熱炉にはなるべく熱塊装入をするようにすべきである。

4.2 燃料燃焼用空気の空気比について

熱経済技術部会に提出された資料によると、各社均熱炉の空気比は Bb 社が 1.15, Cg 社が 1.17 にしているほかは全部 1.2 と 1.4 の間にある。被熱材料の酸化量が少ない普通の加熱炉では、空気比をガス燃焼では 1.15, 重油燃焼では 1.17 にとつて完全燃焼している。しかし均熱炉では被熱材のほとんど全表面が装入後ただちに高温燃焼ガスにさらされ、早く高温度になつて厚いスケールができる。このような状態では、被熱材の酸化による酸素の消費も無視できない。図 6 は重油焚き均熱炉で空気比 1.4 のときの廃ガス中の酸素量の変化を示す。加熱のはじめで鋼塊表面の酸化があまり起こっていないときは、廃ガス中の酸素量は 5% 以上あり、これは次の計算式による計算値 5.8% に近い。

すなわち、理論空気量: $10 \text{ Nm}^3/\text{l}$ 理論燃焼ガス量: $10.5 \text{ Nm}^3/\text{l}$ 空気比: 1.4 として廃ガス中の酸素を計算すると

$$21 \times 0.4 / (1.05 + 0.4) = 5.8\%$$

となる。

鋼塊表面の温度が高くなり、酸化が活発になるにつれ、廃ガス中の酸素量は減少し、約 2.5% になつてくる。すなわち鋼塊の表面酸化によつて 2~3% の酸素が消費される。

いま、混合ガス燃焼時の理論空気量を $1.3 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$, 理論燃焼ガス量を $2.0 \text{ Nm}^3/\text{Nm}^3$ とすると、理論燃焼に近いところでは空気比 0.1 の変動に対して廃ガス中の酸素の変動は、重油で約 1.8%, 混合ガスで約 1.2% である。ゆえに鋼塊酸化による酸素の減少を 2.5% とすれば、これと見合う空気比は重油燃焼では 0.14, 混合ガス燃焼では 0.2 となり、この分だけを普通の空気比に加算してやらねばならない。そうしないと不完全燃焼ガスがレキュペレータ・チューブに流れ、そこでアフタバーニングを起こすおそれがある。ゆえに適当な空気比として重油焚き、ガス焚きともに 1.3 以上をとらねばならない。

4.3 ホットトップ発熱剤がレキュペレータ・チューブに与える影響

発熱剤を用いたホットトップの鋼塊を均熱炉で加熱すると、発熱剤のアルカリダストが廃ガスにつれて運ばれレキュペレータ・チューブまで行き、その内面に付着してチューブ内質に渗透しネフェライト結晶を生じ、変質層を作る。この変質層は膨張率が大きくチューブ破壊の原因となるといわれている。すなわち写真 3 の (2) に示すように使用後のチューブの断面をみると写真の左端に示す上方の第 1 段チューブは内面

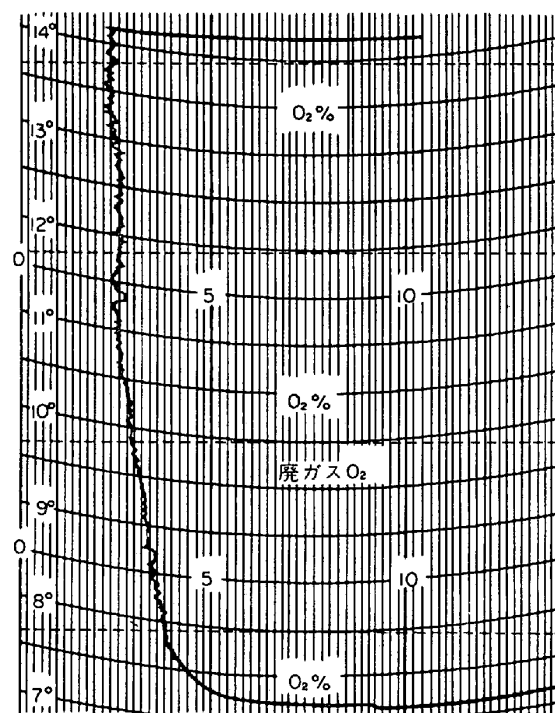
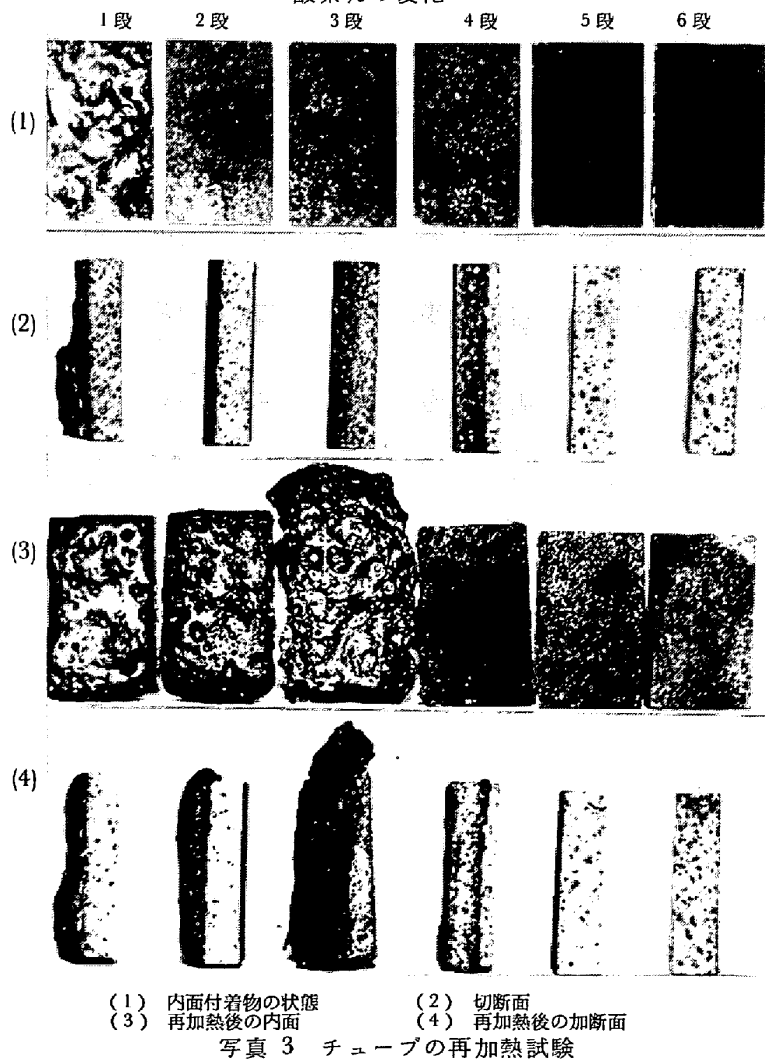


図 6 鋼塊装入から抽出までの廃ガス中の酸素%の変化



(1) 内面付着物の状態 (2) 切断面
(3) 再加熱後の内面 (4) 再加熱後の加断面
写真 3 チューブの再加熱試験

にスラグとの反応層はあるが、それだけにとどまらずチューブ内質は変質していない。しかし2, 3および4段チューブは内質が前述の変質層となっており、特に3段チューブが著しい。これらの試料を1200°Cで2hr再加熱すると(3)および(4)のようになり、内質が変質した2, 3および4段チューブは膨張して変形している。すなわち2段チューブは表面で、3段チューブは大部分が著しく膨張して変形が大である。4段チューブは内質中央部が膨張してサンドイッチ状の変形をしている。しかしながらチューブの2, 3および4段がこの試験温度のように1200°Cになるためには、レキュペレータ入口廃ガス温度が1300°C以上になるか、あるいはアフタバーニングがチューブ内で起こるか、いずれの場合であり、いずれも操業の注意によつて避けられる事からである。ゆえにホットトップ発熱剤はチューブ損傷の直接の原因にはならない。操業を注意すればその被害はまぬがれうる。熱経済技術部会の報告中にも発熱剤の影響はないとしているものもあり、又ホットトップ発熱剤がチューブ耐用命数に直接関係のないことをアンケートの結果示している。

4.4 炉蓋開閉時の燃焼のシーケンス制御について

炉蓋を開くときの燃料と燃焼用空気を遮断するシーケンスには次の3つの型がある。

A型

炉蓋開と燃料および燃焼用空気遮断のスイッチを同時に入れる型

B型

タイマーをつけて燃焼空気の遮断を燃料の遮断より遅らせる型

C型

燃料を停止した後、燃焼空気を遮断するようにインタロックした型

炉蓋を閉めるときの燃料と燃焼用空気の通入開始のシーケンスも次の3つの型がある。

A型

炉蓋(閉)の指令で、燃焼空気(全開)、燃料(自動)用タイマー、空気(自動)用タイマーが同時に作動しはじめる。

B型

炉蓋(閉)にインタロックして燃焼空気(全開)および燃料(自動)のタイマーが同時に作動しはじめる。

C型

炉蓋(閉)にインタロックしてダンパ(全開)、さらにこれにインタロックして空気(開)、それからタイマーである時間をとつて燃料(自動)にインタロックしている。

これらのシーケンスコントロールは、炉蓋開閉の際、炉内で燃料のアフタバーニングや爆発的燃焼の起こるのを防止するためであるが、そのためには燃料と空気の通入遮断装置がシーケンスコントロールの指令どおりに正確に動作することを前提としている。インタロックのしていないA型、B型ではこの前提は必須である。しかしこの燃料と空気の遮断装置は必ずしも正確に動作していない例を図7に示す。このような場合に冷塊装入を行なつて炉温を下げたときに起こりうるアクシデントとして写真4に示すようなチューブ内のガス爆発によるチューブの崩壊がある。燃料と空気の遮断装置は日常の保守点検

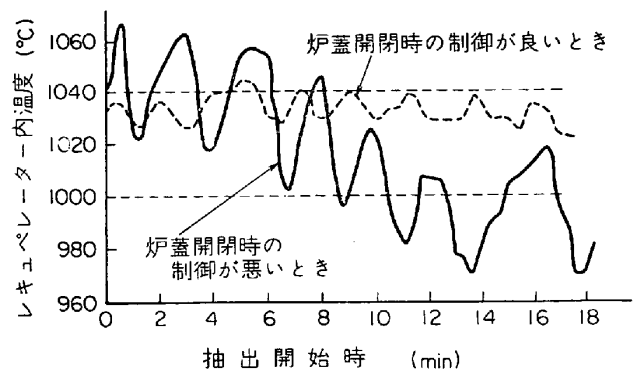


図7 炉蓋開閉と換熱器温度

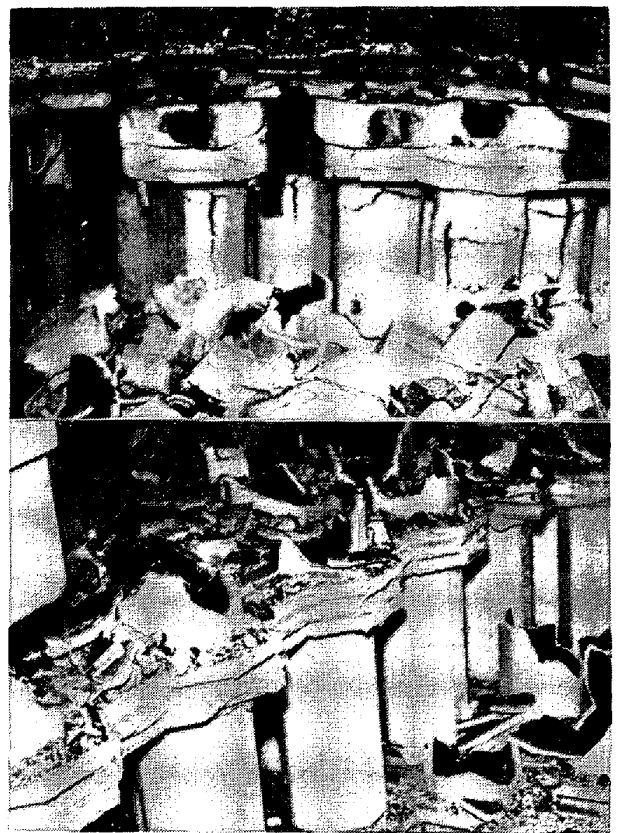


写真4 ガス爆発によるチューブの崩壊

を厳重にしてその動作を正確に行なわせることが肝要である。同時にシーケンスコントロール装置としてはインタロッキング機構をもつC型が最も望ましいものである。

4.5 レキュペレータ・チューブの長さの膨張収縮について

レキュペレータ・チューブの平均温度を700~800°Cとし、0~700°Cおよび0~800°Cの膨張率をとると、それぞれ約0.45%と0.48%となる。チューブの全長はフランジタイルも含んで2000~2200mmであるからチューブの最上段のシールプレートが側壁に対して移動する寸法は約10mmになる。実際は側壁も熱膨張するからこれより少ない寸法にはなる。シールプレートと側壁の間はサンドシールになつていて、お互に自由な関係にあるが、写真5のようにシールプレート上にダストが堆積してなかば溶融したり、または写真1や2のよう

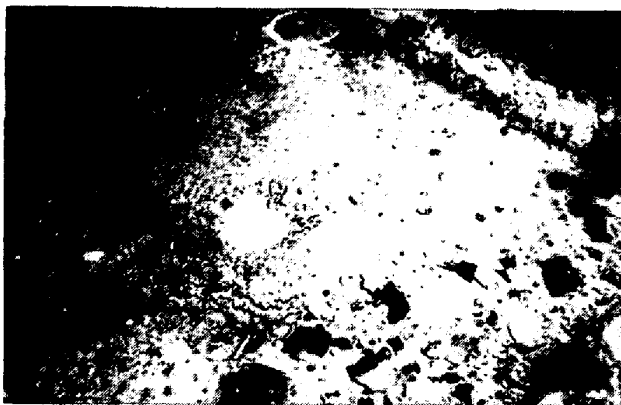


写真 5 シールプレート上のダスト

にシールプレートにレンガの溶融したものが流れ込むともはや両者の間の自由な関係は失われ、シール部が固着するためにチューブの自由な伸縮が妨げられ、チューブに大きな応力が生じて亀裂の原因となる。この点からいってもレキュペレータ室上部の温度が 1200°C 以上になることは避けねばならない。

4.6 タイル・チューブの肉厚について

レキュペレータのタイル・チューブは内面は高温、外面は低温となるため、この温度差によってチューブ肉厚内に応力が発生する。チューブの内面から外面に熱量 Q が伝達されるものとする、熱膨張の差から生じる熱応力 S は次式で与えられる。

$$S = \frac{E}{2} \cdot \frac{Q \cdot s}{C} \alpha \dots\dots\dots (1)$$

ここに

E : 弾性率 C : チューブの熱伝導率
 α : 熱膨張率 s : チューブの肉厚

日本のタイルチューブのメーカーからこれらの数値が与えられていないので、TRINKS の Industrial Furnaces (第4版) からこれらの数値をとると次のようになる。

$$E = 2,000,000 \text{ Lb/inch}^2$$

$$\alpha = 0,000,003/^{\circ}\text{F}$$

$$C = 8 \text{ Btu} \cdot \text{inch}/\text{ft}^2 \cdot \text{hr}^{\circ}\text{F}$$

$$S = 300 \text{ Lb/inch}^2 \text{ (チューブ材の引張り強さ)}$$

これらの値を (1) 式に代入すると

$$Q \cdot s = \frac{2 \times 300 \times 8}{2,000,000 \times 0.000003}$$

$$= 800 \text{ Btu} \cdot \text{inch}/\text{ft}^2 \cdot \text{hr} = 54.6 \text{ kcal} \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \dots (2)$$

(2) 式はチューブにかかる負荷 Q [$\text{Btu}/\text{ft}^2 \cdot \text{hr}$ または $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$] によつて、チューブの肉厚 s を選ぶ必要があることを意味している。しかし実際にはチューブはメーカーの既成品を使用しなければならないから s は与えられた寸法になるので、逆に負荷 Q の値が定まり、これによつてタイル・レキュペレータの設計をしなければならないことになる。

ここでは各社の均熱炉のレキュペレータ・チューブの $Q \cdot s$ の値を計算して (2) 式の値と比較してみよう。 s は国産品では 13 mm である。なお (2) 式の計算に用いた E , C および S の高温における値が絶対に正確であるとはいえないから、 $Q \cdot s$ の値も正確に限度を示す値ではなく、一応の目安になる値である。各社均熱炉の $Q \cdot s$ の値を $\text{kcal} \cdot \text{m}/\text{m}^2 \cdot \text{hr}$ の単位で表わすと次のようになる。

Ac社 : 96.3	Aa社 : 110.1	Cd社 : 86.8
Cf社 : 61.2	De ₁ 社 : 85.4	De ₂ 社 : 125.8
Cg社 : 60.2	G社 : 67.2	F社 : 70.5
E ₁ 社 : 53.7	E ₂ 社 : 56.9	Bb ₂ 社 : 107.0

これらの $Q \cdot s$ の数値とレキュペレータ・チューブの寿命の関係には明らかな傾向は認めることはできないが、ただ 100 を越すものは寿命が短い、あるいは漏洩期間の稼働が長いことが認められる。

(2) 式からチューブの肉厚 s を小さくすれば Q は大きくとりうることはわかるが、 s はチューブ製作上の都合で 13 mm より小さくできないとなれば Q の値を制限しなければならない。そのためにはガスと空気の流速はメタリック・レキュペレータのときよりはるかに小さくしなければならない。同時にレキュペレータ入口腐ガス温度も低くする必要がある。これらの数値を具体的に検討することも今後の課題である。

5. 結 言

TRINKS の Industrial Furnaces によると、タイル・レキュペレータは毎週休炉する炉で 10 年間支障なく運転した例があるという。日本での実績は平均 38 カ月である。わが国鉄鋼業で年間 2000 万 t 以上の加熱能力をもつタイル・レキュペレータ均熱炉群の耐用年数を 10 年間にすればその利益は計り知れない。筆者は稼働中のタイル・レキュペレータ均熱炉の 7 つの型のレキュペレータ室の構造を検討して問題点を取りあげその対策を述べた。また操業法についても熱経済技術部会に提出された資料から数種の事例を拾い、改善すべき点を明らかにした。しかしながら今後なお調査研究を要する問題が少なからず残っていることは本文中で述べたとおりである。これについては今後とも引き続き各社が協力して問題の解決にあたられんことを希望してやまない。

謝 辞

本論文の考察に使用した事例はほとんどを熱経済技術部会の資料から、少部分を鋼板部会分塊分科会の資料から収録した。熱経済技術部会でタイル・レキュペレータの調査資料をとりまとめられたのは住友金属工業(株)小倉製鉄所の計測管理課であるが、本報告はその資料に負うところが大きい。また流体モデル実験は同じく住友金属の中央研究所にやつていただいた。ここにあわせて感謝の意を表する次第である。