

【整番】 FE-09-TC-001	【標題】 ヘアピン形ガスクーラーのコールドスポットトラブル
分類：流れ(剥離/渦)／種別：トラブル事例	作成年月：H19.3／改訂：Ver0.0 (H19.4) 作成者：N.Miyamoto

全5枚

1. あらまし

廃酸処理設備のガスクーラーのチューブ部分にコールドスポットができて硫酸露点腐食が発生した。調査検討の結果、入口部分にある直角曲がり直後に剥離渦ができ、チューブへの流れが停顿ないし逆流してガス温度が低下することがわかった。以下、そのトラブルの技術的背景を記す。

2. 状況

(1) 問題のガスクーラーはヘアピンタイプと呼ばれるもので自然放熱によってチューブを通過する流体を冷却するもので、熱交としては至ってシンプルである。そのフローと形状は下図のようである。

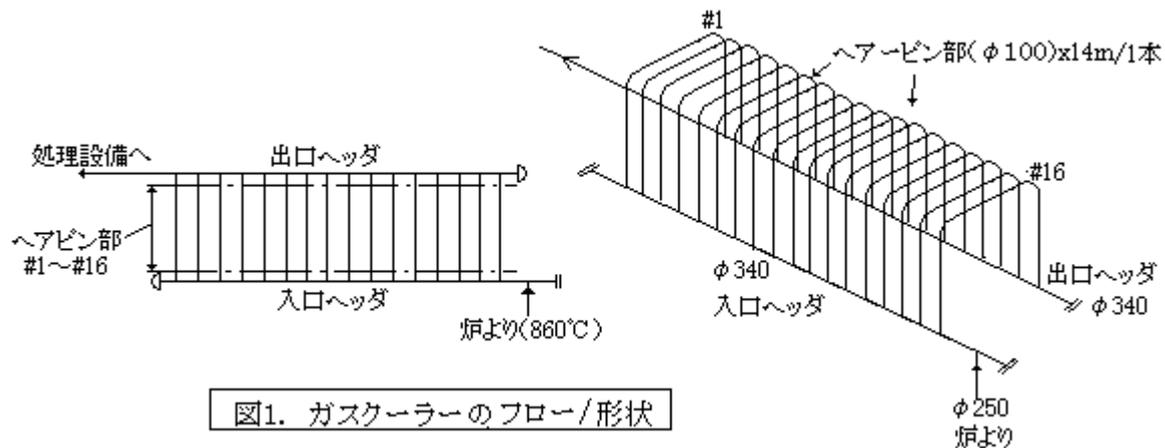


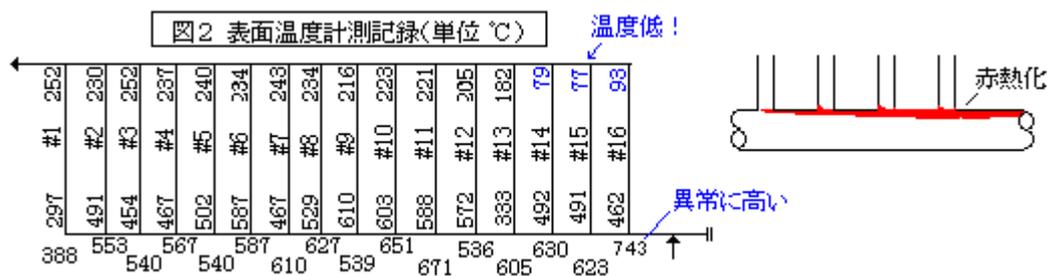
図1. ガスクーラーのフロー/形状

即ち、流れは入口～出口ヘッダー間で分配流になってヘアピン部を通過する。放熱(冷却)は、主にこのヘアピン部で行われる。放熱は自然対流と輻射によっているが、全体に断熱されていないので表面温度～外気温度の差が著しく輻射による放熱が過半を占めている。

(2) 次の事象が発生し観察されている。

- ・ 入口側ヘアピン部(#16)で硫酸露点腐食によってピンホール発生
- ・ ガス中のダスト付着によりヘアピン部で閉塞傾向(#16では一部クリーニング)
- ・ #14～#16ヘアピン部出口の温度低下(コールドスポット)
- ・ 入口ヘッダ上部(#14～#16ヘアピン入口側)の赤熱化(下図参照)

運転時の表面温度の計測結果は次のようである。#14～#16出口側で著しい温度低下(コールドスポット)が見られる。コールドスポットができると硫酸ガスが凝縮して腐食を起こすので、#14～#16は危険な状態になっている。



3. 原因とそのメカニズム

(1) “#14～#16の表面温度が#1～#12のその半分以下となっていること”から、この部分の熱の供給が相対的に低下していると思われる。この場合、熱の供給は流体速度に依るので、#14～16ではガス流速が相対的に低下し、場合によっては閉塞が起きていることが予想される。事実、#16では運転当初、閉塞がおきて、垂直管部分をクリーニングしている(水平管部分は施工できず放置)。この閉塞現象は流速低下によって固体(ダスト)が失速し堆積して起きたものと思われる。従って、

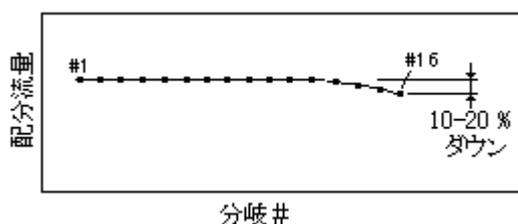
何故、#14～#16においてガス流量がダウンしたかを明らかにすることが原因究明そのものになる。

(2) #14～#16へアピンの流量ダウンの原因/メカニズムを究明するため、次の検討を行った。

- ① 各ヘアピンの流量配分の推算
- ② クーラー入口の直角曲がりの流れ解析
- ③ クーラー入口側セクションの流速/静圧分布の推定
- ④ クーラー入口側セクションの温度分布の推定

以下、その検討結果を示す。

(3) ①について。見方によっては、閉塞はスローで徐々に進行したとも考えられる。形状的にヘアピンクーラー内は分配流れになっているので、管路流れプログラムで流量配分の様子を検討したところ、下図のような結果になった。#13から流量がわずかにダウンし始め、#16で10～20%程度まで下がる。この現象は、#14～#16の温度低下とマッチしている。ただ、これ単独でダストが停留し始めたとするには、やや無理がある。温度低下についても然り。



(4) ②について。炉からの入口管とヘッダーは直交して、90°鋭角ベンドになっているので、曲がり直後に渦が発生する。この流況を把握するため流れ解析を行って下記のような結果を得た。

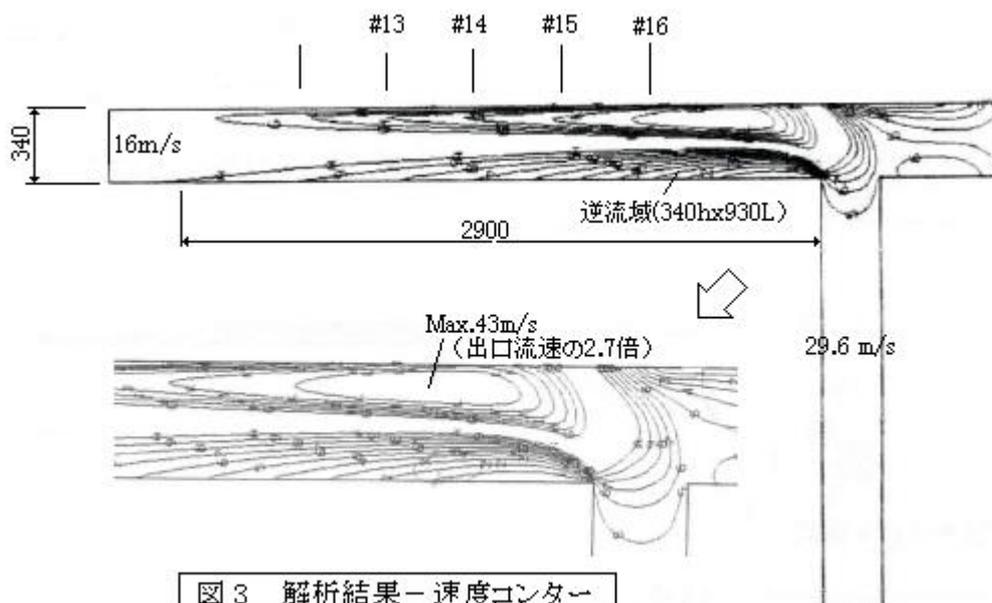


図3 解析結果－速度コンター

剥離渦ゾーンに 340x930mm の逆流域がみられ、その上部に、平均 16m/s に対し **Max.43m/s の偏流域**が見られる。実際の平均流速は **13.3m/s** なのでこの Max 流速は 36m/s 程度にダウンするがモデルが矩形であるため実際の円管では 2~4 割高めになると予想される。従って実際の Max.流速は **45~50m/s** 程度ではなかったかと思われる。

- (5) ③について。図 2 の入口ヘッダの温度分布をみると、入口直後の#16 分岐もとで異様に温度が高く、#15,14,13...と流れ下るごとに温度が低下してゆく。これは内部流速の影響によるものと思われる。そこで、#16 分岐近傍のヘッダ全断面の強制対流/輻射伝熱と流速の関係を考えてみる。この場合、

$$q = \alpha_B \cdot 2\pi r_o \cdot (t_s - t_B) \quad \text{----- (a) 表面の熱流れ}$$

$$q = 2\pi (t_A - t_B) / \{1/(\alpha_A r_i) + (1/\lambda_m) \ln(r_o/r_i) + 1/(\alpha_B r_o)\} \quad \text{----- (b) 全断面の熱流れ}$$

$$w = 132.7 \{ \eta g / (\gamma r_i) \} \cdot \{ \alpha_A r_i / (\lambda Pr^{0.4}) \}^{1.25} \quad \text{----- (c) 管内の乱流伝熱式より}$$

ここで、 q = 熱流束(Kcal/mhr)

α_A 、 α_B = 管内面、管外面の熱伝達係数(Kcal/m²hr°C)

(α_B では局部の自然対流+輻射を考慮。)

r_o 、 r_i = 管の外半径、内半径(m)、 d = 管の内径(m)

t_A 、 t_B 、 t_s = 流体温度、外気温度、外皮温度(°C)

λ 、 λ_m = 流体、管壁の熱伝導率(Kcal/mhr°C)

w = 管内流速(m/hr)、 η = 粘性係数(kg hr/m²)、 g = 重力(1.27x10⁸ m/hr)

Pr = プラントル数(= $C_{pg} \eta / \lambda$)、 γ = 比重量(kg/m³)

(a)(b)を等値して α_A を求め、これを用いて流速 w を得る。見掛け流速は $V_e = w/3600$ より得られる。

ここで t_A 、 t_B 、 $t_s = 855^\circ\text{C}$ 、 50°C 、 $600 \sim 800^\circ\text{C}$ / r_o 、 $r_i = 1778$ 、 0.1718 として計算すると

t_s	600°C	625°C	650°C	675°C	700°C	725°C	750°C	775°C	800°C
α_B	7.0	7.4	7.8	8.2	8.7	9.1	9.6	10.1	10.6
α_A	15.7	19.3	23.8	29.7	38.2	49.6	67.5	97.4	156.2
V_e	10.5	13.6	17.7	23.3	32.0	44.3	65	103	186

外皮温度は、流速が増えるごとに上昇してゆく。図 2 の計測データでは#16 分岐元で約 750°C、#13~14 分岐元で約 620°C(605~630°C)であるから、#16 分岐元で約 65m/s、#13~14 分岐元では約 13m/s ということになる。**#16 分岐元は Max.流速域(推定 45~50m/s)の近くにあり、#13~14 分岐元は Max.流速域から外れて平均流速域(10~13m/s)に近いので、計算結果は#16 で高めにできるものの、傾向的には計測結果と粗々合っているようである。**従って入口ヘッダの温度分布は流速変化に依る。

(#16 で誤差が大きくでるのは、 α_B を低く見積もったためと思える。)

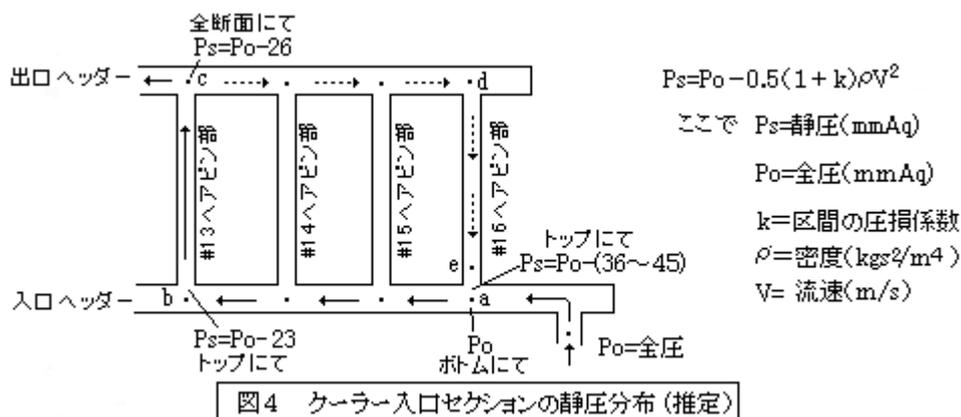
- (6) #16 分岐元では推定 45~50m/s、#15,#14 分岐元では推定 35~45m/s 程度の高い流速になるので、例えば #16 分岐元ではその静圧は、平均流速(13.3m/s)の場合よりも、

$$dp = 0.5 \rho (V_o^2 - V_m^2) = 0.5 \times (0.351/9.807) (13.3^2 - 50^2) = -42 \text{ kg/m}^2 = -42 \text{ mmAq}$$

低くなり、ヘアピン部の静圧および流量は総じて低下する。下図のようなモデルで、入口ヘッダ#13ヘアピン部の流れを見ると分岐出口の c 点の静圧は($P_o - 26$)である。一方、#16ヘアピン部の始端 e 点の静圧は、入口ヘッダ a 点のトップ側の静圧($\{P_o - (36 \sim 45)\}$)とほぼ等しくなる筈であるから、

$$(c \sim e) \text{ の差圧} = (P_o - 26) - \{P_o - (36 \sim 45)\} = +10 \sim 19 \text{ mmAq}$$

となり、c 点から e 点への流れ、即ち逆流が起きる可能性がある。



おそらく、この逆流は#14、#15でも起きると思われる。逆流モードでの流量バランスがどうなるかは多少の収束計算を要するが、#13の流量の増分は限られており逆流量はごく少量であると思われる。現状#14~#16の流れがどうなっているかはわからないが、かなり閉塞に近いのではないかと？
(以上ではダスト浮遊の影響は少ないとみてガス単相流で計算している。実際は影響するかも?)

(7) ④について。クーラーの入口側セクションの流体温度分布を推定してみる。区間 a~b~c では
放出熱量 = 流入熱量 即ち

$$q = \alpha_B \cdot (2\pi r_o L) \cdot \Delta t_B = C_p Q_m \Delta t_f$$

ここで r_o = 外半径(m)、 L = 区間長さ(m)、 α_B = 管外面の熱伝達係数(Kcal/m²hr°C)

Δt_B = 外皮温度~外気温度差(°C)、 Δt_f = 流体温度降下(°C)

C_p = 流体比熱(Kcal/kg°C)、 Q_m = 質量流量(kg/hr)、

であるから、この式に依って流体温度を推定する。また区間 c~d では、対流効果を無視して通常の一次元定常熱伝導式 $t_i = t_s + (t_o - t_s) / \{ \cosh(ml) + (\alpha / \lambda_m) \sinh(ml) \}$ から流体温度を推定する。更に推定された流体温度及び(5)項の式(a)(b)(c)を用いて、#16ヘアピン部の外皮温度を推定する。経緯は割愛して計算結果を図5の(あ)(い)に示す。おおむね妥当な結果ではないかと思う。

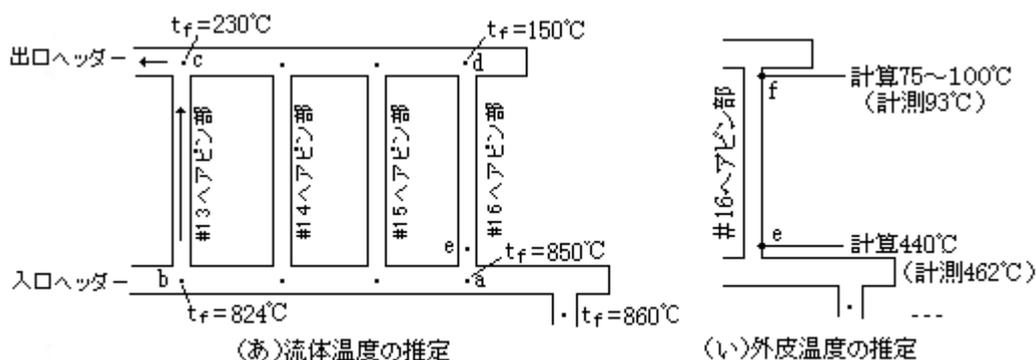


図5 クーラー入口側セクションの温度分布の推定

(8) 以上の検討から、#14~#16ヘアピン部のコールドスポットは、入口ヘッダーへの流入形状が90°鋭角ベンドになっていたため、ターン直後大きく偏流して静圧が降下し、当該のヘアピン部に出口ヘッダーからの逆流を伴う流量ダウンが起きたことに由るものと推定される。なお、本来このヘアピン管の流量配分には偏りがあって#14~#16側で流量低下する傾向があり、これが更に流量低下を増進させた気配もある。

4. 是正措置など

幸いクーラーの伝熱性能には余裕があって、#14~16の閉塞には支障がないのでこのままとした。
ただ、今後の設計としては

(A) 入口ターン部から最初の分岐までのアプローチは少なくとも6D以上にする。

付帯的に、

(B) ヘアピン部はクリーニングできるようにしておく(180°ベンダー曲げなど)。

(C) 出口ヘッダは保温して放熱による過剰な温度降下を防ぐ。

なお、入口部分の赤熱化については、熱応力を検討したが約300回程度の寿命があり設備寿命を一応満足するので、特にこれを排除する必要はないと判断した。

あとがき：ダストによる閉塞については、単に低流速だけが原因ではない気配があり、更に検討が必要なのかも知れない。以上の原因/メカニズムの検討は、多少恣意的な所も否めない。ダストによる閉塞問題も含めて、この種の問題では全体的な熱流体モデルによる流れ解析が望ましいようだ。