

【整番】 FE-21-TM-001	【標題】 液封状態のサーマルレリーフ量の算定
分類：流れ(圧力レリーフ)／種別：技術メモ	作成年月：H19.2／改訂：Ver0.2 (H19.6)

全面見直し(H19.6.2)：特にフローチャート改訂

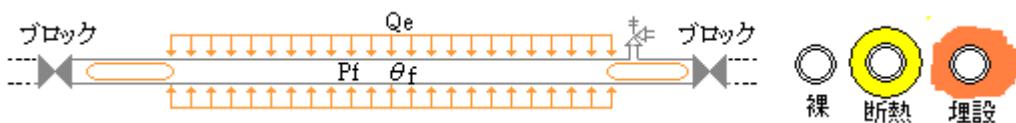
全 10 枚

1. はじめに

配管コード ASME B31.3 は、配管設計上考慮すべき負荷条件の一つとして、**流体の膨張効果**を挙げ

配管部品内の静止流体を加熱し流体の膨張効果によって圧力が増加する恐れのある
配管は増加する圧力を耐えるか、その圧力を逃がす設計としなければならない

として二者択一を要求している。液体配管の場合、管路がある区間で隔離されて液封状態にあると液体膨張によって著しく内圧が上昇するので、前者の強度検討を割愛し後者を選んでサーマルレリーフ弁を設置しているのが通例になっている。その場合、サーマルレリーフ量を如何に設定するかが課題になる。本 TS では、関連する情報を整理してサーマルレリーフ量の算定方法について所見を記す。



2. 入熱量 Q_e の算定

液封管路の圧力上昇は、火災、太陽輻射熱、内外温度差などによって外部から入熱があった時に起きる。この外部からの入熱量(液の吸熱量)は、以下のようである。

(1) 火災入熱の場合：次の式が使用できる。

$$\text{KHK 自主基準式}^{(1)} : \text{断熱無しの場合} : Q_e = 61000FA^{0.82}$$

$$\text{断熱有りの場合} : Q_e = 2.61(650-t)\lambda A^{0.82}/h$$

$$\text{API RP520 式}^{(2)} : \text{断熱無しの場合} : Q_e = 37000FA^{0.82}$$

ここで

$$Q_e = \text{流体への入熱量(Kcal/hr)}$$

F=環境係数(火災に対し)

t=噴き出し時の流体温度(°C)

埋設管 : 0.3

λ =断熱材の熱伝導率(Kcal/mhr°C)

水噴霧/散水装置付き : 0.6

A=外表面積(m²)

その他 : 1.0

h=断熱厚さ(m)

API RP520 は危険側になる恐れがある。KHK 自主基準の方を選ぶ。

(2) 太陽輻射熱：管内外の温度差がなく太陽輻射熱のみを考慮する場合、次の式がある。

$$\text{JLPA 式}^{(3)} : Q_e = 860FA$$

$$\text{API RP521 式}^{(4)} : Q_e = f A a Q_{SR} \quad (\text{保温外面での吸熱量})$$

$$\text{ここで } Q_e = \text{液体への入熱量(Kcal/hr)}$$

$$A = \text{外表面積(m}^2\text{)}$$

F=環境係数

a = 緯度による補正($\sim \cos \theta$)

埋設管 : 0.3

θ =緯度(日本 30~40 度)

断熱有り : 0.8

Q_{SR} =太陽入熱=868 Kcal/m²hr

断熱無し : 1.0

f=陽あたり係数(管で 1/2、平面で 1)

断熱無し配管の場合、両者を比べると

JLPA 式 : $Q_e = 860A$, API RP520 式 : $Q_e = (1/2)Ax\cos 30^\circ \times 868 = 376A$

JLPA の式の方が 2.3 倍ほど大きい。危険物や LPG などではマージンの大きい JLPA 式を選ぶ。

(3) 內外溫度差 + 太陽輻射熱：

管内液温～外気温に差があり、かつ太陽輻射熱に曝される場合については、基準類に該当する式はない。そこで、参考としてチャート 1a と 1b に入熱量 Q_e の算定方法(案)を示す。

チャート1aは、断熱ありの場合で、次のような手順を踏んで計算する。

まず、初期液温の状態で熱の出入りをチェックし、熱輻射も含めて放熱状態になっていれば、時間経過しても圧力上昇の見込みがないので終了する。逆に吸熱状態($Q_A > 0$)になっていれば、やがて液温が上昇して圧力 P_f が設計圧力 P_d (レリーフ弁設定圧)に達する。この場合も初期液温状態の時と同様に、温度上昇後($\theta_p^* \rightarrow \theta_p$)の熱の出入りをチェックを放熱状態であれば液圧が設計圧力を超えることはないのでそのまま終了。吸熱状態であればレリーフ弁が作動するので、必要レリーフ量を求めるためにその時点の入熱量 Q_e を計算して終了する。

チャート1bは、断熱なしの場合で、上記とほぼ同様の手順になるが、断熱がないので断面の熱の出入りの計算が簡単になっている。

(4) 内外温度差のみ：このときはチャート 1a、1b で、太陽入熱 $Q_{SR}=0$ として計算する。

3. サーマルレリーフ量 W の算定

JLPA 基準⁽³⁾は次の式を与えていた。

$$W = Q \beta / C \quad \text{--- (a)}$$

ここで、W=サーマルレリーフ量 (kg/hr)、Q=外部からの液への入熱量 (Kcal/hr)

β = 噴き出し時の液の平均膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)、 C = 噴き出し時の液の比熱(Kcal/kg $^{\circ}\text{C}$)

一方、理屈の上で得られるサーマルレリーフ量 W は次のようにある(解説参照)。

$$W = Q \{(1-n) \beta_L + n \beta_a - R \alpha\} / C \quad \dots \dots \dots \quad (b)$$

ここで β_L =噴き出し時の液の平均膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)、 β_a =噴き出し時の溶存空気の平均膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)

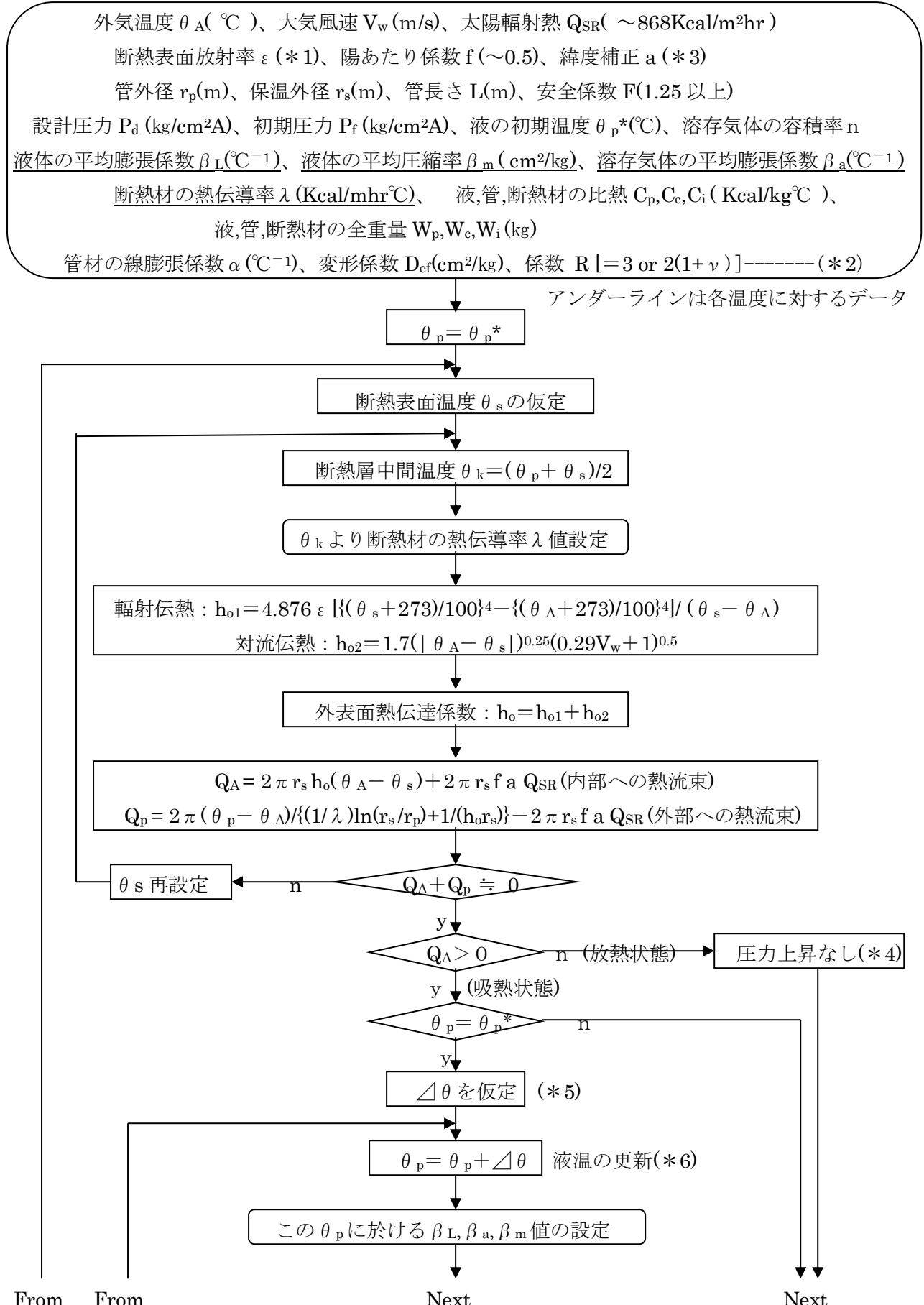
α = その液温での管材の線膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)、R = 係数、n = 溶存气体の容積率、

W, Q, C=上記に同じ

ここで、 n は極く小さくまた $R\alpha \ll \beta_L$ であるから、これらを無視すれば $W = Q_e \beta_L / C$ となって、JLPA の式に一致する。なお、 β 及び C は噴き出し時即ち上昇後の液温(≤外気温)による値である。

チャート 1a： 太陽輻射熱+内外温度差による入熱算定(断熱有り/内部流れ停頓の場合)

<断熱配管対象：外気温一定>



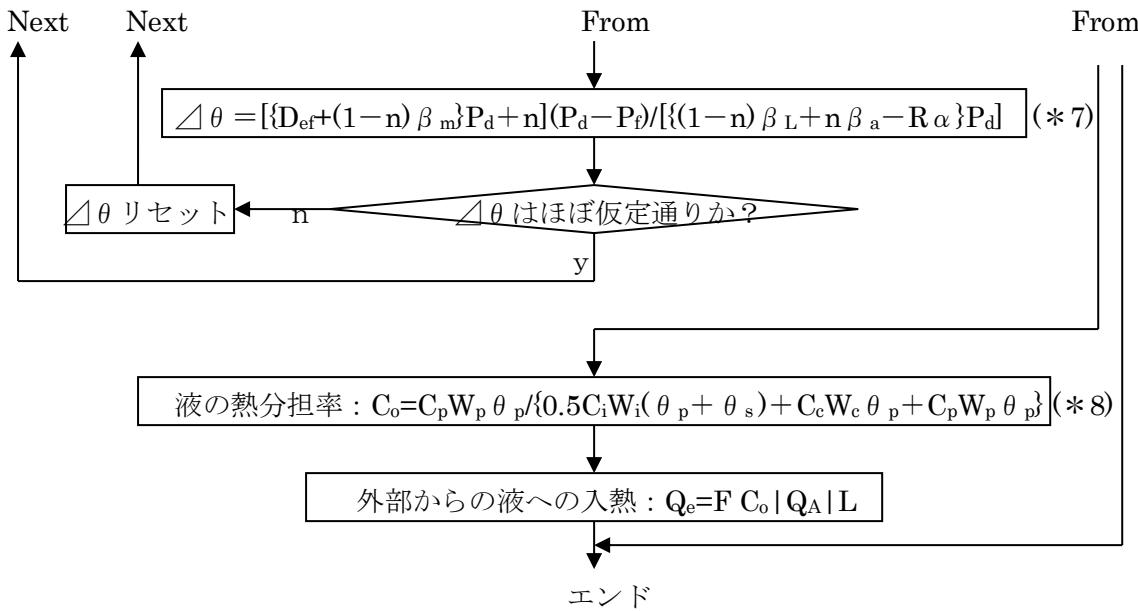
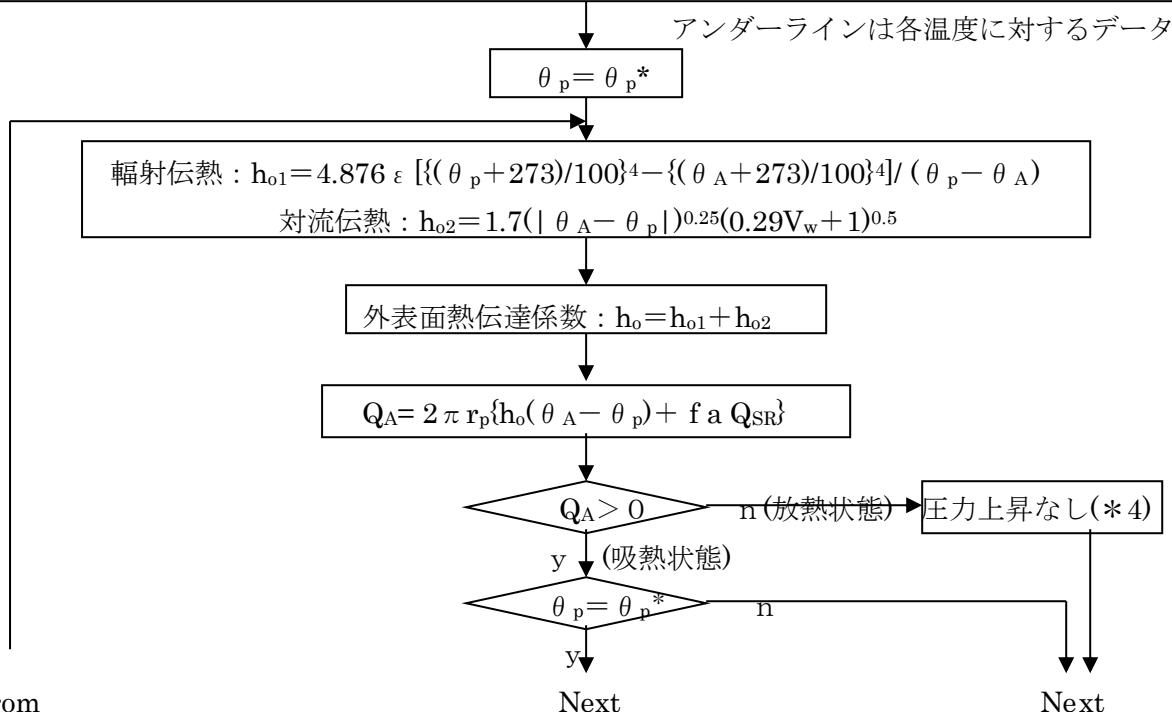
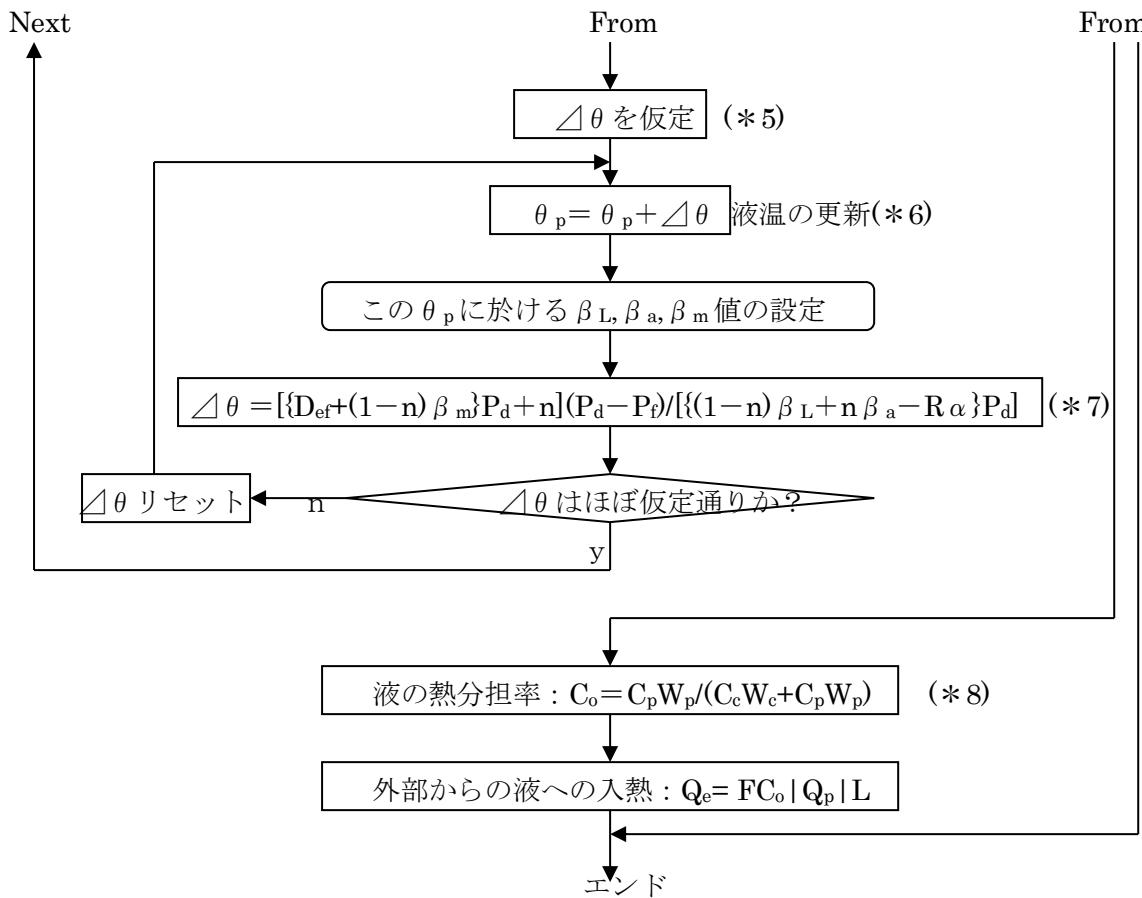


チャート 1b： 太陽輻射熱+内外温度差による入熱算定(断熱無し/内部流れ停頓の場合)
 <裸管対象：外気温一定>

外気温度 θ_A (°C)、大気風速 V_w (m/s)、太陽輻射熱 Q_{SR} (~868Kcal/m²hr)、
 断熱表面放射率 ε (*1)、陽あたり係数 f (~0.5)、緯度補正 a (*3)、
 管外径 r_p (m)、管長さ L (m)、溶存気体の容積率 n 、安全係数 F (1.25 以上)
 設計圧力 P_d (kg/cm²G)、初期圧力 P_f (kg/cm²G)、液の初期温度 θ_p^* (°C)、
液体の平均膨張係数 β_L (°C⁻¹)、液体の平均圧縮率 β_m (cm²/kg)、溶存気体の平均膨張係数 β_a (°C⁻¹)
 液,管の全重量 W_p,W_c (kg)、液,管の比熱 C_p,C_c (Kcal/kg°C)
 管材の線膨張係数 α (°C⁻¹)、変形係数 D_{ef} (cm²/kg)、 $R=$ 係数 [3 or 2(1+ ν)] ----- (*2)





【チャートの注記】

- (*1) 【HE-02-TM-002 BS5970 による外表面熱伝達係数の算定】の添付などを参照のこと。
- (*2) 【FE-21-RP-001 管内封じ込め液の圧力上昇量の推算】参照のこと。
- (*3) ここでは緯度/方位補正は行わず $a=1$ とする(緯度補正については明確でないため)。
- (*4) 系が遮断された時点(初期状態)の液温が外気温度よりかなり高いので放熱状態になる。時間が経てば冷えていつかは吸熱に転じるが、その時は液圧は下がっているし、外気温/太陽熱で暖められても、外気温が高くならない限り遮断時点の液温に戻ることはないので、圧力上昇することは考えられない。
- (*5) $\beta_L, \beta_m, \beta_a$ (特に β_L)の値が、温度でかなり変わることがあるので、わざわざ $\Delta\theta$ を仮定して試行的に $\Delta\theta$ を求めている。温度変化が無視できるならストレートに $\Delta\theta$ を計算してよい。
- (*6) 吸熱の場合、液温は初期の液圧 P_f が設計圧(レリーフ弁作動圧) P_d になるまで上昇する。その温度上昇量 $\Delta\theta$ は ΔP との関係式から求められる。そしてその時の液温 $\theta_p (= \theta_{p*} + \Delta\theta)$ で吸熱状態なのか放熱状態なのか、元のループに帰ってチェックする。
- (*7) 【FE-21-RP-001 管内封じ込め液の圧力上昇量の推算】の(1)式を変形したもの。
- (*8) 外部からの入熱は断熱材/管材/液体を温める。この場合は液体の分が必要なので、熱容量のごく簡易的な割振りから液体の熱分担率を求める。なお管の温度は液温と同じにしている。

【チャート 1a, 1b の記号説明】

P_d =管路の設計圧力(=レリーフ弁設定圧力)(kg/cm ² A)	θ_A = 外気温度 (°C)----通常夏場最大値
P_f =系の遮断時の初期液圧(kg/cm ² A)	θ_s = 断熱層表面温度(°C)
Q_A = 単位管長当たりの内部への熱流束(Kcal/m·hr)	θ_p = 管表面温度(≈流体温度) (°C)
Q_p = 単位管長当たりの外部への熱流束(Kcal/m·hr)	θ_k = 断熱層中間温度(°C)

Q_{SR} = 太陽輻射熱($\sim 868 \text{Kcal/m}^2\text{hr}$)	$\angle \theta$ = 液温上昇量($^{\circ}\text{C}$)
Q_e = 外部からの入熱量(吸熱量)(Kcal/hr)	n = 溶存気体の容積率(\sim)(*2)
ϵ = 断熱表面放射率 (*1)	h_o = 外表面の熱伝達係数($\text{Kcal/m}^2\text{hr}^{\circ}\text{C}$)
f = 陽あたり係数(円環の半分として $\sim 1/2$)	$h_{o1} = h_o$ の輻射伝熱分($\text{Kcal/m}^2\text{hr}^{\circ}\text{C}$)
a = 補正係数(緯度/方位による。ここでは 1.0 とする)、	$h_{o2} = h_o$ の対流伝熱分($\text{Kcal/m}^2\text{hr}^{\circ}\text{C}$)
V_w = 周辺の風速(m/s)、	λ = 断熱材の平均熱伝導率($\text{Kcal/m hr}^{\circ}\text{C}$)
α = 管材の線膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)(*2)	β_L = 液体の平均膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)(*2)
r_p = 管外半径(m)、 r_s = 断熱層外半径(m)、	β_a = 溶存気体の平均膨張係数($^{\circ}\text{C}^{-1}$)(*2)
L = 液封管路の全長(m)、	β_m = 液体の平均圧縮率(cm^2/kg)(*2)
R = 係数 [軸方向フリー 3、軸拘束 $2(1+\nu)$] (*2)	C_i, C_c, C_p = 各部の比熱($\text{Kcal/kg}^{\circ}\text{C}$)
D_{ef} = 変形係数(cm^2/kg)(*2)	W_i, W_c, W_p = 各部の全重量(kg)
C_o = 液の熱分担率	F = 安全率(1.25 以上)
サフィックス "p", "c", "i" → それぞれ流体, 管材, 断熱材の意	

4. 例 題

屋外にある設計圧力 $6 \text{k g/cm}^2\text{A}$ の裸の地上鋼製液封管路($100\text{Ax}50\text{mL}$)について、太陽輻射熱によるサーマルレリーフ量を見積もりたい。流体は清水(溶存空気 0.2 Vol.%)、系の遮断時の液温は 20°C 、圧力は $1 \text{kg/cm}^2\text{A}$ とする。外気は 35°C 、風速 5m/s とする。

下記の条件にて計算する。

$$\begin{aligned} \theta_A &= 35^{\circ}\text{C}, V_w = 5\text{m/s}, Q_{SR} = 868 \text{Kcal/m}^2\text{hr}, \epsilon = 0.6, f = 0.5, a = 1(\text{緯度 } \theta = 0 \text{ として安全側に}) \\ r_p &= 0.05715 \text{ m}, L = 50\text{m}, L = 50\text{m}, P_d = 6 \text{ kg/cm}^2, P_f = 1 \text{ kg/cm}^2, \theta_p^* = 20^{\circ}\text{C}, \\ \beta_L &: 0.2113 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} (20-25^{\circ}\text{C}), 0.234 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} (20-27.5^{\circ}\text{C}), 0.242 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} (20-30^{\circ}\text{C}) \\ \beta_a &: 3.39 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} (20-25^{\circ}\text{C}), 3.37 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} (20-27.5^{\circ}\text{C}), 3.36 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} (20-30^{\circ}\text{C}) \\ \beta_m &= 0.423 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{kg} (20-25^{\circ}\text{C}), 0.424 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{kg} (20-27.5^{\circ}\text{C}), 0.425 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{kg} (20-30^{\circ}\text{C}) \\ C_c &= 0.113 \text{ Kcal/kg}^{\circ}\text{C}, C_p = 0.999 \text{ Kcal/kg}^{\circ}\text{C}, \alpha = 11 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}, \\ D_{ef} &= 9.0418 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kg}, R = 3 (\text{軸方向拘束なし}), n = 0.002, \angle \theta_{max.} = 50^{\circ}\text{C} \\ W_p &= 1000 \times \{3.14 \times (0.05115^2) \times 50\} = 411 \text{ kg}, W_c = 7850 \times \{3.14 \times (0.05715^2 - 0.05115^2) \times 50\} = 801 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{管外面熱伝達係数} : h_o &= h_{o1} + h_{o2} = 4.876 \times 0.6 \times (2.93^4 - 3.08^4) / (20-35) + 1.7 \times (35-20)^{0.25} \times (0.29 \times 5 + 1)^{0.5} \\ &= 3.18 + 5.24 = 8.4 \text{Kcal/m}^2 \text{ hr}^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{熱流束} : Q_A &= 6.283 \times 0.05715 \times 8.4 \times (35-20) + 6.283 \times 0.05715 \times 0.5 \times 868 \\ &= 45.2 + 155.8 = 201 \text{ Kcal/mhr} > 0 \quad \text{よって放熱状態} \end{aligned}$$

$\angle \theta$ を 9°C 程度に仮定すれば、 $\theta_f = 29^{\circ}\text{C}$ なので $\beta_L = 0.242 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\beta_a = 3.36 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\beta_m = 0.425 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{kg}$ となる。そして

$$\begin{aligned} \angle \theta &= \{[D_{ef} + (1-n)\beta_m]P_d + n](P_d - P_f) / \{(1-n)\beta_L + n\beta_a - R\alpha\}P_d \\ &= \{(9.04 \times 10^{-6} + 0.998 \times 0.425 \times 10^{-4}) \times 6 + 0.002\} \times 5 \\ &\quad / \{(0.998 \times 0.242 \times 10^{-3} + 0.002 \times 3.36 \times 10^{-3} - 3 \times 11 \times 10^{-6}) \times 6\} \\ &= 8.94^{\circ}\text{C} \quad \text{----- ほぼ仮定の通り} \end{aligned}$$

故に、 $\theta_p = 20 + 9 = 29^\circ\text{C}$ 。この時の熱伝達係数は、

$$\begin{aligned} h_o &= h_{o1} + h_{o2} = 4.876 \times 0.6x(3.02^4 - 3.08^4)/(29 - 35) + 1.7x(35 - 29)^{0.25}x(0.29x5 + 1)^{0.5} \\ &= 3.3 + 4.2 = 7.5 \text{ Kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ\text{C} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{また、 } Q_A &= 2\pi r_p [h_o(\theta_A - \theta_p) + f_a Q_{SR}] = 6.283 \times 0.05715x\{7.5x(35 - 29) + 0.5x868\} \\ &= 0.359x(45 + 434) = 172 \text{ Kcal/hr} > 0 \text{ 吸熱 (太陽輻射熱は } 434/(45 + 434) = 0.9 \rightarrow 90 \% \text{)} \end{aligned}$$

液の熱分担率は $C_o = C_p W_p / (C_e W_c + C_p W_p) = 0.999x411 / (0.113x801 + 0.999x411) = 411/502 = 0.82$

従って、外部から入熱は、 $Q_e = C_o |Q_A| L = 0.82x172x50 = 7052 \text{ Kcal/h r}$

故に(b)式に拠るレリーフ量 W は

$$\begin{aligned} W &= Q \{(1-n)\beta_L + n\beta_a - R\alpha\} / C \\ &= 7052x(0.998x0.242x10^{-3} + 0.002x3.37x10^{-3} - 3x11x10^{-6}) / 0.999 = 1.52 \text{ kg/hr} \end{aligned}$$

(a)式の JLPA 式による場合、

$$W = Q \beta / C = 7052x0.242x10^{-3} / 0.999 = 1.71 \text{ kg/hr}$$

簡易的な計算によっているので裕度のある JLPA の結果を 1.5 倍して $W = 1.5 \times 1.71 = 2.6 \text{ kg/hr}$ とする。

【 解 説 】

1. 火災時の入熱量については、米国の旧 API RP 520 規定と CGS 規定の 2 様がある。これについては KHK S0303⁽¹⁾の解説 10 ; 4.2.項で詳しく分析されている。要は、

API 規定： 実験等データの最小ラインを探っている、

CGA 規定： 実験等データの最適化ラインを探っている、

API 規定は危険側ということで KHK S0303 は CGA 規定を採用していると思うが、同じ理由(?)で米国消防規格(NFPA # 30)でも日本 LP ガスプラント協会(JLPA)基準でも CGS 規格を採用している。

2. 太陽輻射熱については、JLPA 基準と旧 API RP521 Appendix A がある。情報が乏しくてよくわからないが、感じとしては API RP 521 Appendix A(添付 A 参照のこと)の方に妥当性があるようだ。しかし、残念ながら Appendix A には?部分があって現在は削除されている。JLPA 規定は、この API 規定に対して

太陽熱被射率 f : 円環上半分として~0.5 → 1.0

緯度による補正 a : 日本では $a = \cos(30 \sim 40^\circ) = 0.866 \sim 0.766 \rightarrow 1.0$

というように変更して運用しているようである(単に推定のみ)。従って 2 倍強の裕度が感じられる。ただ、API 式 $Q_e = f A a Q_{SR}$ については、その妥当性についてさらに調査する必要がある。

なお、JLPA 基準式 $[W = Q \beta / C]$ は簡潔ではあるが、次の問題がある。

(a) 太陽輻射熱しか考えていないが、実際は内外温度差(管内温度～大気温度)によって熱の出入がある。圧倒的な火災入熱の場合は無視できるが、緩やかな太陽輻射熱では無視できない。

(b) 液の膨張係数 β_L は液温によって多少変わるので、液封時点からの液温上昇を見る必要がある。
これらの不明はいずれも 2 倍強の裕度の中に入っているのかもしれない。

3. [管内外温度差+太陽輻射熱]のときの入熱量については、旧 API RP 521 Appendix A があったが、

内容的に不備があり、今では廃棄されている。チャート 1a,1b は云わば、その改訂案にあたる。ただ煩雑さを避けてできるだけ簡易化しているので、結果には少なくとも 1.25 以上のマージンを乗じるのがいいと思う。また設計的には、外気温 θ_A は夏場における最大値を用いるのがよい。

[管内外温度差]単独のケースも比較的多いのかも知れない。場合によって機器の内部にセットされたインターナルチューブが封じられて数百度のガスに曝されるといった例もありうるだろう。

なお、いずれのチャートも外気温一定で作っている。外気温上昇のケースは改造する必要がある。また、管断面の温度分布は非常に緩い変化なので定常伝熱のそれに近いと仮定している(θ_s の設定然り)。

4. 外部入熱がわかればサーマルレリーフ量の計算は容易である。JLPA 式 [(a)式] は、火災の場合であれ、太陽輻射(+内外温度差)の場合であれ、そこそこ安全側に外部入熱及びサーマルレリーフ量が計算できる。添付 B にその規定内容を示す。

一方、(b)式の方は以下のようにして導いている。

別途 TS 【FE-21-RP-001】で述べたように液体膨張時の容積バランスは、

$$\Delta V_L - \Delta V_c = \Delta V_t + \Delta V_p$$

逃がし弁が作動してレリーフ状態にあると

$$\Delta V_L - \Delta V_c - \Delta V_R = \Delta V_t + \Delta V_p$$

ここで ΔV_L =自由液膨張量、 ΔV_c =液圧縮量、 ΔV_R =レリーフ量、

ΔV_t =管の膨張容積、 ΔV_p =管の弾性変形量

【FE-21-RP-001】の(a)(b)(c)(d)式を用いて

$$\Delta P = [-\{A + (n + C + \angle V_R/V)\} + \{A + (n + C + \angle V_R/V)\}^2 - 4A(C + \angle V_R/V)]^{0.5}/(2A)$$

圧力上昇量が零になるには分子=0。この場合、分子を整理すると $4A(C + \angle V_R/V) = 0$ 、

$A \neq 0$ であるから、 $\angle V_R = -VC = V\{(1-n)\beta_L + n\beta_a - R\alpha\}\angle\theta$ 、これに比重を乗じて、

$$\text{レリーフ重量 } \Delta W_R = W_p\{(1-n)\beta_L + n\beta_a - R\alpha\}\Delta\theta \quad (\text{但し } W = \text{液重量})$$

流体膨張は通常、時間変化がゆるやかで、その変化過程でもほぼ定常バランスが保たれると思われる所以、

$$\dot{\Delta W}_R = W_p\{(1-n)\beta_L + n\beta_a - R\alpha\}\Delta\dot{\theta}$$

ここで、 $\dot{\Delta W}_R$ =レリーフ量(kg/hr)、 $\dot{\Delta\theta}$ =温度上昇量(°C/hr)

一方、単位時間当たりの外部からの入熱(Q_e)と温度上昇量($\dot{\Delta\theta}$)の関係は、 $Q_e = C_p W_p \dot{\Delta\theta}$ であるから

$$\dot{\Delta W}_R = Q_e\{(1-n)\beta_L + n\beta_a - R\alpha\}/C_p$$

ここで、 $\dot{\Delta W}_R$ =サーマルレリーフ量(kg/hr)、 Q_e =外部からの液への入熱量(Kcal/hr)

β_L =噴き出し時の液の平均膨張係数(°C⁻¹)、 β_a =噴き出し時の溶存気体の平均膨張係数(°C⁻¹)

α =その液温での管材の線膨張係数(°C⁻¹)、 C_p = 噴き出し時の液の比熱(Kcal/kg°C)、

n =溶存気体の容積率、 R =係数 [軸方向フリー3、軸拘束 2(1+ν)]

$W = \dot{\Delta W}_R$ 、 $Q = Q_e$ 、 $C = C_p$ とおけば、本文の(b)式が得られる。

引用基準類：

- (1) KHK S0303-1973 「安全弁の適用基準(ガス設備)」の 4.2-2 式 /4.2-1 式 及び 10.4.2 項
- (2) API RP 520(1976 旧版) Design and Installation of Pressure-relieving Systems in Refinery Part I Appendix A
- (3) 日本 LP ガスプラント協会基準 JLPA-No.3 [16. 配管安全弁]
- (4) API RP 521(旧版) Guide for Pressure-relieving and Depressing System - Appendix A

添付A (1/2)

APPENDIX A

RELIEVING REQUIREMENTS FOR THERMAL RELIEF

$$Q_A = h_{c,R}(T_A - T_S) \quad (A-1)$$

$$\text{? ? } \rightarrow Q_P = \left(\frac{Lh'_P + K'}{\frac{L}{K} + \frac{1}{h'_P} + \frac{1}{h_{c,R}}} \right) (T_P - T_A) - \frac{(A)(e)(Q_{SR})}{h_{c,R}} \quad (A-2)$$

Where:

$$h_{c,R} = \frac{0.172e \left[\left(\frac{T_S + 460}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_A + 460}{100} \right)^4 \right]}{T_A - T_S} + 0.3(T_A - T_S) \sqrt{\frac{V+680}{680}}$$

For curved surfaces:

$$h'_P = h_P \left(\frac{D_P}{D_S} \right)$$

$$K' = K \frac{(D_S - D_P)}{D_S \ln \left(\frac{D_S}{D_P} \right)}$$

For flat surfaces:

$$h'_P = h_P$$

$$K' = K$$

$$[(A)(e)(Q_{SR})] + Q_A + Q_P = 0 \quad (A-3)$$

$$GPM = \frac{\sum [(Q_P)(S.F.)](B)}{500CG} \quad (A-4)$$

Q_A and Q_P are signed values; proper sign for use in equation (A-3) will result from equations (A-1) and (A-2); Q_{SR} is always positive.

For negligible process fluid resistance (h_P very large), the right side of equation (A-2) becomes:

$$\left(\frac{1}{\frac{L}{K} + \frac{1}{h_{c,R}}} \right) (T_P - T_A) - \left[\frac{(A)(e)(Q_{SR})}{h_{c,R}} \right]$$

For the case of no insulation, $T_P = T_S$ and the right side of equation (A-2) becomes:

$$\left(\frac{1}{\frac{1}{h'_P} + \frac{1}{h_{c,R}}} \right) (T_P - T_A) - \left[\frac{(A)(e)(Q_{SR})}{h_{c,R}} \right]$$

Steps

1. Assume T_A for the surface being considered.
2. Obtain K using assumed mean temperature.
3. Calculate Q_A with equation (A-1).
4. Calculate Q_P with equation (A-2).
5. Check to see if equation (A-3) balances.
6. Adjust T_S and repeat steps No. 2 through No. 5 until it does balance.
7. Calculate Q_P using $h_{c,R}$ at the balanced T_S .

8. Repeat steps No. 1 through No. 7 for each different surface type, as needed.

9. Use equation (A-4) with the area of the system and properties of the fluid to get GPM.

NOTE: For exchangers, use $(Q_P)(S.F.)$ = design heat duty.

次ページに続く

A-1. Nomenclature

添付 A (2/2)

- ✓ A = ratio of area exposed to solar radiation to outside insulation surface. For pipe, this may be assumed to be one-half. For flat surfaces, it can be up to a value of 1 if horizontal, e.g., a tank roof.
- ✓ B = cubical coefficient of expansion for fluids, in volume per volume, per degrees fahrenheit; for typical values, see API RP 520, Part I, Appendix D.
- C = specific heat of fluid at T_p , in British thermal units per pound, per degrees fahrenheit.
- D_p = outside diameter of pipe or equipment, in feet.
- D_s = outside diameter of insulation surface, in feet.
- G = specific gravity of fluid at relieving temperature (water = 1).
- GPM = volume relieving rate, in gallons per minute.
- $h_{c,a}$ = coefficient between insulation (or pipe or equipment) and atmosphere, in British thermal units per hour per square foot, per degrees fahrenheit.
- ✓ h_p = coefficient between container and fluid, in British thermal units per hour per square foot, per degrees fahrenheit.
- K = thermal conductivity of insulation at mean temperature, in British thermal units per hour per square foot per inch, per degrees fahrenheit.

L = insulation thickness, in inches.

Q_A = heat exchange between insulation (or pipe) surface under consideration and ambient, in British thermal units per hour per square foot.

Q_P = heat exchange between material in the pipe (or equipment) and surface of the containing wall under consideration, in British thermal units per hour per square foot.

Q_{SR} = heat due to solar radiation (most locations = 320), in British thermal units per hour per square foot.

$S.F.$ = square feet of surface under consideration—outside of insulation, if insulated, or pipe or equipment, if bare.

T_A = ambient temperature, in degrees fahrenheit.

T_p = process fluid temperature, in degrees fahrenheit.

T_s = insulation (or pipe) surface temperature, in degrees fahrenheit.

V = wind velocity, in feet per minute.

a = fraction of solar direct radiation absorbed by insulation (or pipe) surface due to latitude and orientation.

ϵ = emissivity of insulation (or pipe) surface.

16 配管安全弁の計算式

添付 B

(1)配管安全弁の計算式はAPI RP-520, NFPA

A, KHK S0302にそれぞれ配管用液安全弁の計算式が規定されているが、この基準においては日本基準の共通性をもたらせるためにKHK S0302によった。

(2)吹き出すべき流体の流量の算定は装置の規模、運転の条件などにより、つぎにより各位で決定された。

$$W = \frac{Q \times \beta}{C} \quad \text{kg/hr}$$

C : 液体の膨脹時の平均比熱 K cal/kg°C

β : 液体の膨脹係数 $1/^\circ\text{C}$

Q : 液体の吸热量 K cal/hr

①太陽の放射熱を対象とした場合

$$Q_1 = 860 \times F \times A$$

②火災時でAPIの算定による場合

$$Q_2 = 37100 \times F \times A^{0.82}$$

③火災時でKHKの算定による場合

$$Q_3 = 61000 \times F \times A^{0.82}$$

F : 断熱係数

基準による断熱を施さない管 1.0

〃 断熱を施した管 0.8

〃 地下埋設配管 0.8 (?)

A : 対象とした管の表面積 (m^2)

(3)表8-1の配管安全弁の口径の基準はつぎの条件

により算出した。

(1)対象管長100m以下は Q_3 即ち火災時でKHKの算定値によった。

(2)対象管長100mをこえるものは Q_1 即ち太陽の放射熱を対象とした(ただし①の値を最小値とする)。

(3)対象流体はプロパンとし、平均体膨脹係数を0.00429 $1/^\circ\text{C}$ 平均比熱を0.577K cal/kg°Cとし、差圧を20kg/cm²として計算した。

(4)ブタン、混合ブタンにおいて、差圧が10.8kg/cm²の場合においてもブタンの体膨脹係数は0.0022であるので、この表を日安としてさしつかえない。