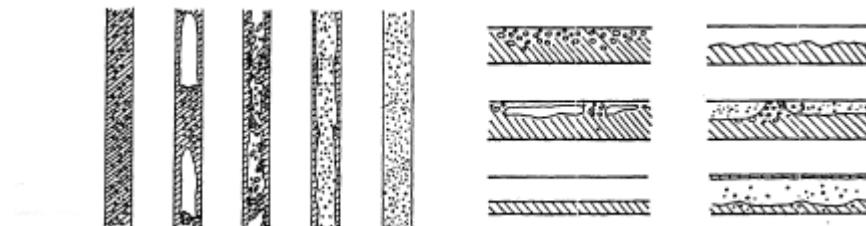


【整番】FE-29-RP-001	【標題】気液2相流の限界流速
分類：流れ(基準流速)／種別：推奨指針	作成年月：H19.1／改訂：Ver0.0 (H19.04) 作成者：N.Miyamoto

全3枚

1. 気液2相流の管路におけるエロージョンは、レインエロージョンに似ているが、フローパターンによって液滴の形状や衝突の仕方が変化するだろうから扱いが難しい。その点、API RP14E⁽¹⁾はごくシンプルな形で気液2相流の限界流速に関して経験的な上限を与えており、この規格は本来、井戸元の石油生産設備に適用されるものであるが、特に2相流全般に適用しても不具合はないようであるので以下、その運用を示す。



2. 2相流のエロージョンは下記の条件が満足されるとき一応、回避できる。但し、炭素鋼/低合金鋼をベースとする。

$$V < [V_e = C / \rho_m^{0.5}]$$

ここで V =流速(m/s)= $m/(A \rho_m)$ 、 V_e =エロージョン発生限界流速(m/s)

ρ_m =気液混合密度(kg/m³)= $m/(m_l / \rho_l + m_g / \rho_g)$

m =全質量流量(kg/s)、 m_l =液体質量流量(kg/s)、 m_g =気体質量流量(kg/s)

A =管断面積(m²)= $\pi D^2/4$ 、 D =管内径(m)、

C =経験定数=122 (連続運転に対し)

=152.5 (間欠運転に対し)

なお、固形分(砂など)が含まれるときは経験定数 C を切り下げる必要がある。

3. エロージョンの可否判定の例を以下に示す。

[ナフサ 5811 kg/h (比重 660 kg/m³) + H₂ガス 37 kg/h (比重 2.2 kg/m³)]を 50A 配管で連続的に輸送、この場合の可否判定は？

混合密度： $\rho_m = m/(m_l / \rho_l + m_g / \rho_g) = 5848/(5811/660 + 37/2.2) = 228.2 \text{ kg/m}^3$

限界流速： $V_e = C / \rho_m^{0.5} = 122/228.2^{0.5} = 8.1 \text{ m/s}$

実際流速： $V = m/(A \rho_m) = 5848/(0.785 \times 0.05^2) / 228.2 / 3600 = 3.6 \text{ m/s}$

$V < V_e$ の故に、エロージョンは回避できる。

【解説】

1. API RP14E のエロージョンの発生流速(fluid erosional velocity)は、連続運転の場合、

$$V_e = 100 / \rho_m^{0.5} \quad (C=100) \quad \text{----- (Eq. 2.8)}$$

であるが、ポンド-フィート単位なので、 $V_e = V_e^* / 0.3048$ 、 $\rho_m = (0.3048^3 / 0.4536) \rho^*$ とおいて kg·m 単位に直すと

$$V_e^* = 122 / \rho_m^{0.5} \quad (C=122)$$

になる。同様に間欠運転に対しては $C=125 \rightarrow 152.5$ になる。本 TS では kg·m 単位の方を採った。

2. 上記の式は、Seibold⁽²⁾の騒音限界式([EE-01-RP-001 気体配管の騒音の簡易推算法]を参照)、

$$V = 100 v_o^{0.5} = 100 / \rho^{0.5} \quad (v_o \text{ は比容積で、 } \rho \text{ の逆数})$$

と全く同じになる。エロージョンと騒音は直接結びつかないので、この符合は奇妙である。しかし制限式の形として変形すると、 $\rho V^2 < C$ であり、モーメンタム(流体慣性力) ρV^2 を、ある限界値以下に押さえようとしていることが読める。流体慣性力(または乱流の強さ)があるレベルを越えて大きくなるとエロージョン/騒音共に顕著になる傾向が予想されるので、この符合は案外、妥当な所なのかもしれない。

$\rho V^2 < C$ において C 値は経験則によるものであるが、これは追加減によって過度に安全側にもなるし、きわどく危険側にもなる。API の(Eq.2.8)は、液相の割合が高くなり ρ_m が大きくなると V_e が低流速になり過度に安全側になるようである。多分に(Eq.2.8)は気相の割合が高い噴霧流などにフィットするのではないかと思われる。

3. API RP14E では、気液混合密度 ρ_m を次式で定義している。

$$\rho_m = (12409S_lP + 2.7RS_gP) / (198.7P + RT) \quad \text{----- (Eq.2.9)}$$

ここで S_l =常温の水に対する液の比重量の割合、

S_g =標準状態の空気に対する標準状態のガスの比重量の割合

P =運転圧力(psig)、 T =運転温度(°R)、 R =ガス/液比(ft³/barrel)

この式は米国単位で判り難いので kg·m 単位に直して、その内容を確認してみる。

まず、液比重 S_l は、 $S_l = \rho_l / 1000$ [但し、 ρ_l =液比重量(kg/m³)]

また、ガス比重 S_g は、 $S_g = \rho_g^* / 1.251$

ここで 状態式 $P^* / \rho_g = R_o T^*$ より $P^* / (\rho_g T^*) = P / (\rho_g T) \rightarrow \rho_g^* = (T/T^*)(P^*/P) \rho_g$

$T^* = 273K$ 、 $P^* = 10000kg/m^2$ であるから $\rho_g^* = (T/273)(10000/P) \rho_g = 36.63(T/P) \rho_g$

[但し、 ρ_g^* =標準状態のガス比重量(kg/m³)、 ρ_g =実際のガス比重量(kg/m³)]

T =運転温度(°K)、 P =運転圧力(kg/m²)]

また、ガス/液比 R は、1 barrel= 0.159m³、1 ft³=0.0283m³ であるから

$$R = (V_g / 0.0283) / (V_l / 0.159) = 5.618 (V_g / V_l)$$

[但し、 V_g =ガス容積(m³)、 V_l =液容積(m³)]

また、圧力、温度は、 $P = (P/10^4) / 0.07 = 0.0014286P$ 、 $T = 1.8T$

[但し、左辺において P =運転圧力(kg/m²)及び T =運転温度(°K)]

また、気液混合密度 ρ_m は、 $\rho_m = (0.3048^3 / 0.4536) \rho_m = \rho_m / 16$

[但し左辺において $\rho_m = \text{密度}(\text{kg}/\text{m}^3)$]

以上を(Eq.2.9)に代入して、

$$\rho_m = \{\rho_l V_l + 35.62 \rho_g V_g (T/P)\} / \{V_l + 35.62 V_g (T/P)\}$$

ここで、常温の空気を想定すると $(P/T) = \text{約 } 36$ 程度なので

$$\rho_m = (\rho_l V_l + \rho_g V_g) / (V_l + V_g) \quad (\rightarrow \text{表記は異なるが, 本文の } \rho_m \text{ 式と実質同じ})$$

となって、API の ρ_m は、均質流を仮定した通常の気液混合密度であることがわかる。おそらく API RP14E の (Eq. 2.8) は石油生産設備に適用を限られるものではなく 2 相流全般に運用できると思われる。

4. エロージョンは材質によってその程度が異なる。石油生産設備では炭素鋼鋼管/低合金鋼鋼管が

主体になっているようなので、ここでは対象の管路材質を炭素鋼/低合金鋼とした。

5. 本 TS は 2 相流の最大流速をエロージョン防止の観点から規制するものである。しかし API RP14E の規定では、slugging(スラグ流による振動)防止の観点から、最小流速もまた 3m/s に押さえている。

ただ、一率に 3m/s でカットすることには疑問もある。これについては別途議論したい。

引用文献：

- (1) API RP14E “Design and Installation of Offshore Production Platform Piping System”
- (2) James G. Seibold 「Smooth piping reduces noise—fact or fiction」

(Hydrocarbon Processing Sept.1973)