

# 熱を有効利用する蒸気配管の設計

蒸気は熱を奪われると凝縮し、液体のドレンに変化する特性から配管設計者にとって考慮すべき点が多い。また、熱を有効利用するにはドレン回収が必須であり、ドレン回収配管は気体と液体の二相流体となることが多い。そこで、蒸気、ドレン配管を設計する上での考え方、注意点と、スチームトラップ、バルブの選定について、専門家が解説する。  
(編集部)

株式会社ティエルブイ CES センター 山下 展義

## 1. はじめに

蒸気は均一加熱、素早い加熱、再利用可能で安全という観点から産業分野では最も多く使用される熱媒である。しかし、蒸気は熱を奪われると凝縮し、液体のドレンに相変化するという特性から、配管設計者にとって考慮すべき点の多い流体である。また、熱を有効利用するにはドレン回収が必須であるが、ドレン回収配管は気体と液体の二相流体となることが多く、口径選定方法が特殊である。

本稿では、配管設計者に対し、蒸気、ドレン配管を設計する上での考え方や注意点、また、熱損失を抑えたスチームトラップ、バルブの選定について述べる。

## 2. 蒸気システムにおける配管設計

蒸気システムにおける配管設計には蒸気配管、水配管、ドレン回収配管がある。例えば、蒸気主管から熱交換器は蒸気配管設計、熱交換器出口からスチームトラップ一次側までは水配管設計、スチームトラップ二次側から給水タンクなどの回収先はドレン回収配管となる。配管設計にはそれぞれ基準となる数値があるが、特にドレン回収配管は、ドレンと蒸気の間相流になるため、特に注意が必要である。

### 2-1. 蒸気配管設計

配管設計はラインの目的、機能を果たすため、その管路の終点まで圧力をキープし、流体を問題なく、最適なコストで輸送するために行う。そのためには配管の流速と圧力損失とを考慮し、適正な配管口径を決めなければならない。

#### 2-1-1. 管内流速の計算

蒸気の管内流速は次の式で算出することが出来る。

$$V = \frac{2.78 WV''}{a} = \frac{3.53 WV''}{d^2}$$

$V$ : 蒸気流速(m/s)       $W$ : 平均流量(kg/h)

$V''$ : 比容積(m<sup>3</sup>/kg)       $a$ : 管内面積(cm<sup>2</sup>)

$d$ : 管内径(cm)

この式より、流速は流体の体積流量と配管の断面積とにより決まるといえる。蒸気の比体積は高圧なほど小さいため、同流量でも流速は小さくなる。流速が大きいと、蒸気に含まれる水滴が配管やバルブを侵食するエロージョンや管内壁との摩擦による圧力損失が発生する。流速を抑えるには口径を上げれば良いが、保温、配管などの材料費、工事費、放熱量が増加するため、適切な口径選定が必要である。流速の基準として、弊社では低圧蒸気(0.2～0.5MPaG)では15～20(m/s)、高圧蒸気(0.5～1.5MPaG)では20～30(m/s)という数値を置いている。ただし、設計段階では実使用状況と機器のスペックに乖離があるため、設計条件はユーザーと詳細検討が必要である。

#### 2-1-2. 圧力損失の計算

圧力損失とは流体と配管内壁との摩擦によりエネルギーが消費され、圧力が低下する現象である。仮に1MPaG、1000kg/hの蒸気を100m先に供給した場合、80A配管で約7.3kPa、50A配管で約55.4kPaの圧力損失が発生する。圧力損失により所定の圧力が得られないと機器が本来の性能を出せないという問題が発生する。

圧力損失は次の式で算出することが出来る。

$$dp = \frac{fLpVs^2}{2dV''}$$

$dp$ : 圧力損失(kPa)       $f$ : 摩擦係数       $Lp$ : 配管長さ(m)

$d$ :管内径(mm)  $V_s$ :流速(m/s)  $V''$ :比容積(m<sup>3</sup>/kg)

摩擦係数について算出する場合には、流体のレイノルズ数が必要となる。レイノルズ数は次式にて算出できる。

$$Re = \frac{DV_s}{V''\mu}$$

Re:レイノルズ数  $D$ :管内径(m)  $V_s$ :流速(m/s)  
 $V''$ :比容積(m<sup>3</sup>/kg)  $\mu$ :粘性係数(Pas)

レイノルズ数により摩擦係数は次の式で算出できる。

i)  $4,000 < Re < 10^5$  の場合

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$$

ii)  $10^5 < Re$  の場合

$$f = 0.0032 + \frac{0.221}{Re^{0.237}}$$

直管の場合、これらの式により圧力損失を計算できる。しかし、実際には、エルボやバルブなどが設置され、直管を用いた場合に比べ圧力損失は大きくなる。これらを単純化するために各形状に与えられた直管相当長さに置き換えて算出する。

蒸気配管を設計する場合は、まず流速が基準値以内に収まるよう仮口径を算出し、次に圧力損失の計算を行い、必要な圧力が確保されているか調整を行う。設計者はコストを抑え、かつ生産や保守において安全に操業できるよう考慮することが重要である。

## 2-2. 水配管設計

熱交換器出口からスチームトラップまでの配管は、全て凝縮したドレンとみなし、水配管として設計を行う。水配管の設計は流速を2 (m/s) とする以外は蒸気配管設計と同様の考え方である。蒸気と比べ、水の比体積は著しく小さいため、同じ質量流量でも水配管の方が口径は小さくなる場合が多い。

## 2-3. ドレン配管設計

スチームトラップ二次側から回収先までの配管は二相流のドレン回収配管として設計する。二相流となる理由は、高温・高圧のドレンがスチームトラップから排出される際、回収管内の圧力では液体として存在出来ず、一部が蒸気として再蒸発するからである。これをフラッシュ蒸気と呼ぶ。排出ドレン量とフラッシュ蒸気の割合をフラッシュ率と呼び、次の式で算出することが出来る。

$$F = \frac{h1 - h2}{r2}$$

F:フラッシュ率(%)

$h1$ :高圧側ドレン顕熱(kJ/kg)

$h2$ :低圧側ドレン顕熱(kJ/kg)

$r2$ :低圧側蒸気の潜熱(kJ/kg)

ドレン回収配管も、蒸気配管と同様に流速と圧力損失が重要である。但し、ドレン回収配管の場合は気体と液体の割合により流速の基準値が変化するため注意が必要である。ドレン回収配管の口径が小さく圧力損失が大きいとスチームトラップ二次側の圧力が上昇し、スチームトラップのドレン排出能力が低下する。結果として熱交換器内部にドレンが滞留し、機器の能力低下による生産停止リスクにつながる。

ドレン回収配管の基準流速を決めるためには、等価比容積という考え方が必要になる。等価比容積は次の式で算出することが出来る。

$$Rv = V'(1-F) + V''F$$

$Rv$ :等価比容積(m<sup>3</sup>/kg)  $V'$ :水の比容積(m<sup>3</sup>/kg)

$V''$ :回収配管圧力での蒸気比容積(m<sup>3</sup>/kg)

F:フラッシュ率

等価比容積が算出できれば、次式により基準となる流速の計算が可能となる。弊社では流速の基準を次のように定めている。

i)  $Rv < 0.01$  の場合

$$V = 2$$

ii)  $0.01 < Rv < 0.26$  の場合

$$V = 0.88 + 112Rv$$

iii)  $0.26 < Rv$  の場合

$$V = 30$$

$V$ :流速 (m/s)

基準流速が決まれば、蒸気配管と同様に配管口径を選定することが出来る。

ドレン回収配管も蒸気配管と同様に圧力損失を考慮する必要がある。圧力損失は次の式で算出することが出来る。

$$(\Delta Pf)_{tp} = \phi^2 \times (\Delta Pf) I \times L$$

$(\Delta Pf)_{tp}$ :二相流の圧力損失(MPa/L)

$\phi^2$ :補正係数(10~40)

$(\Delta Pf)I$ :管内を液相のみと仮定した損失(MPa)

$L$ :配管長さ(m)

ドレン回収配管の圧力損失については後述する技術計算ツールなどを利用すれば計算できるが、最適な流速であれば許容範囲内となることが多い。本稿では流量の関係から詳細については省略する。

### 3. 蒸気配管の熱損失の低減

配管の適切な口径が決まれば、次に検討すべき点は運転中のウォーターハンマーの防止と蒸気ロスの低減である。ウォーターハンマーの原因は配管または装置内に滞留する不必要なドレンであり、対策としてはこのドレンを速やかに除去するよう設計することである。ドレンが滞留しないよう輸送配管の30～50mごと、またはバルブ前後の配管底部にスチームトラップを設置する。蒸気配管の蒸気ロスは主に放熱、スチームトラップ・バルブからの蒸気漏れが挙げられる。放熱ロスを低減させるためには可能な限り配管口径を小さくし、配管長が短くなる取り回しを検討する必要がある。また、適切に保温を施工することも必須である。スチームトラップからの蒸気ロスを低減するためには、長寿命かつ蒸気漏れの少ないスチームトラップを選定することが重要である。

#### 3-1. 蒸気配管に最適なスチームトラップ

蒸気配管は適切な保温がなされている場合、100Aの配管50m、外気温10℃にて1MPaGの蒸気を使用したときには、1時間当たり約8kg程度しかドレンは発生しない。よって蒸気配管に設置するスチームトラップには、極少ドレン時にも高いシール性を維持させる必要がある。そのため、弊社では蒸気輸送配管には球形フロートを直接弁にしたボールフロート式（フリーフロート<sup>®</sup>）を推奨している。蒸気配管用ボールフロート式トラップはフロートを3点で支持することで着座位置を安定させ、高いシール性を維持させている（図-1参照）。

スチームトラップは正常作動をしていても一部蒸気ロスが発生する。これを弊社では作動蒸気ロスと呼び、型式ごとに試験を行うことで定量化を図っている。ボールフロート式トラップはディスク式トラップ等に比べ作動蒸気ロスが少なく、経年による蒸気ロス量の増加も緩やかであることが分かっている（図-2、3参照）。

1台であれば大きな蒸気ロス（熱ロス）は生まれにくいですが、大規模工場で台数も多くなれば、ランニングコストに大きな差が生まれることになる。

#### 3-2. バルブからの蒸気ロス低減

バルブに関しても頻繁な開閉による摩耗や、ステムの腐

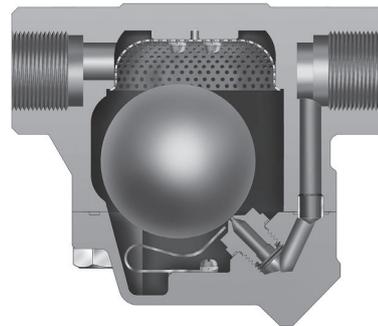


図-1 蒸気輸送配管用スチームトラップ「TLV SS1 シリーズ」

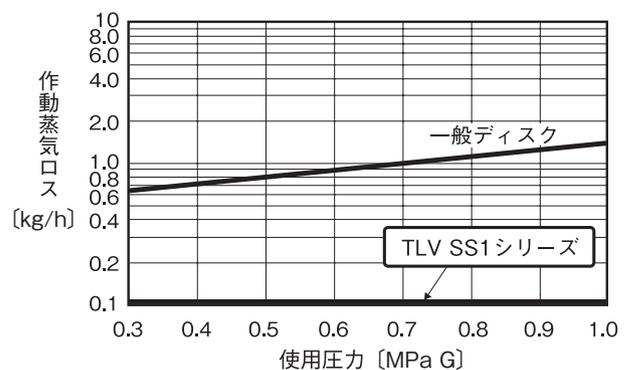


図-2 作動蒸気ロスの比較

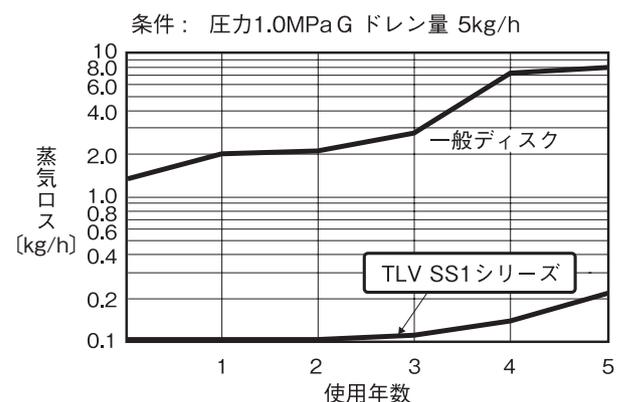


図-3 経年劣化の比較

食により外部漏れが発生することがある。外部漏れが発生すると、蒸気ロスが発生するだけでなく、作業者にとって危険である。そのため、弊社では開閉を繰り返すバルブについては伸縮可能なベローズをグラウンド部とステム部に取り付けたベローズバルブ（写真-1参照）の使用を推奨している。



写真-1 ベローズバルブ「TLV BE1」



写真-2 技術計算ツール「TLV Toolbox」

#### 4. おわりに

蒸気を有効に使用するためには適切な配管設計や機器の選定が必須であり、経験の少ない設計者にとって難易度が高い。特に口径選定に関しては煩雑な計算も多く、実務で利用する場合には感覚的に理解し難い項目も多いと思われる

る。弊社では「TLV Toolbox」(iOS, Android 対応)という技術計算モバイルアプリを無料で公開している(写真-2参照)。本稿にて述べた流速や圧力損失などを自動で計算できるため、是非、実務に活用して頂ければ幸いです。

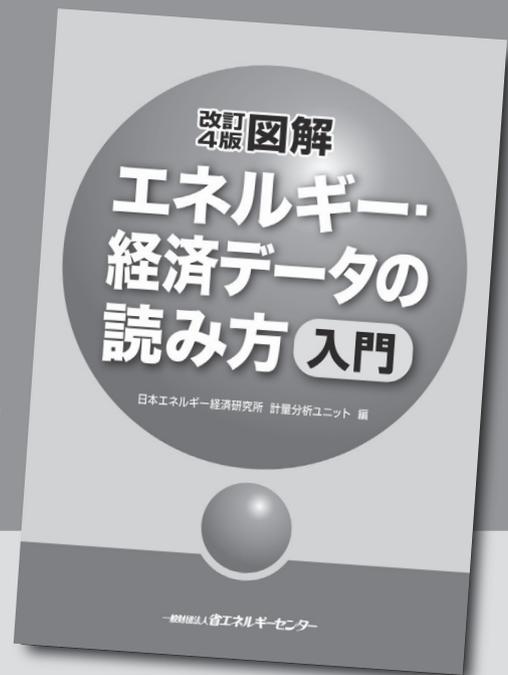
なお、本稿についてのお問い合わせは、  
【TLV 技術 110 番】 079-422-8833 まで。

改訂  
4版 図解

# エネルギー 経済データの 読み方 入門

日本エネルギー経済研究所  
計量分析ユニット 編

エネルギー・環境分野の新動向を網羅!!  
エネルギー源別需給編に新章を追加、  
豊富な図表(約290点)でビジュアルに解説、  
電力・ガス自由化時代に必携の入門書です。



A5判 400頁 定価(本体3,200円+税)

ISBN 978-4-87973-459-4

CC 一般財団法人省エネルギーセンター

〒108-0023 東京都港区芝浦2-11-5 五十嵐ビルディング  
TEL.03-5439-9775 FAX.03-5439-9779 <https://www.eccj.or.jp/book/>