

理想的な蒸気システムの設計方法と注意点～病院における蒸気システムを例に～

Methods and concerns for designing the ideal steam system: A hospital steam system as an example

報告者 (株)ティエルブイ CESセンター 橋爪裕宜
HIROKI HASHIZUME CES Center, TLV CO., LTD.

キーワード：蒸気の質、乾き度、ストール現象、ウォーターハンマー、ドレン回収

Key Word : steam quality, steam dryness, stall phenomenon, water hammer, condensate recovery

1. はじめに

蒸気は我々の生活に欠かすことのできない熱媒体である。火力発電所の発電用動力源ならびに製造業・ビル・病院などの加熱工程などで用いられる加熱用熱源として広く、かつ大量に使用されており、我々の生活を支えている。

蒸気を使用されるメリットは3つあり、第一に、他の加熱方法に比べて安定で均一な加熱ができるという点である。第二は、蒸気による加熱は凝縮を伴うので伝熱効率が非常に高く、被加熱物を素早く昇温できるという点である。第三は、蒸気は保有熱量が大きく、凝縮ドレンもまだ十分な熱量を持つため回収・再利用に適しているという点である。

しかし一方で、その使い方によって蒸気システムの安全性や生産物の品質、設備の生産性、エネルギーコストが大きく左右される。

本稿では、蒸気の良い特性を活かすために蒸気システムが抱える問題・課題とその原因、対策と改善事例について、ポイントを押さえながら紹介していく。

2. 蒸気システムの問題・課題

蒸気システムの問題・課題と改善ポイントを説明するために、病院を例として説明する。蒸気を使用する病院の蒸気システムの例を、図-1に記載した。

地下階や屋上に設置したボイラーで軟水を加熱し、蒸気を発生させている。

蒸気は配管を通り、院内の各種設備に送気される。蒸気の利用設備は空調設備、吸収式冷凍機、温水槽、温水用熱交換器、オートクレーブ、加湿器、熱風乾燥機など多岐にわたる。発生したドレンは排水されるか、再びボイラーに回収し、再利用される。

これら蒸気の発生から回収までに使用されるすべての機器・配管を含めて、蒸気システムと呼んでいる。

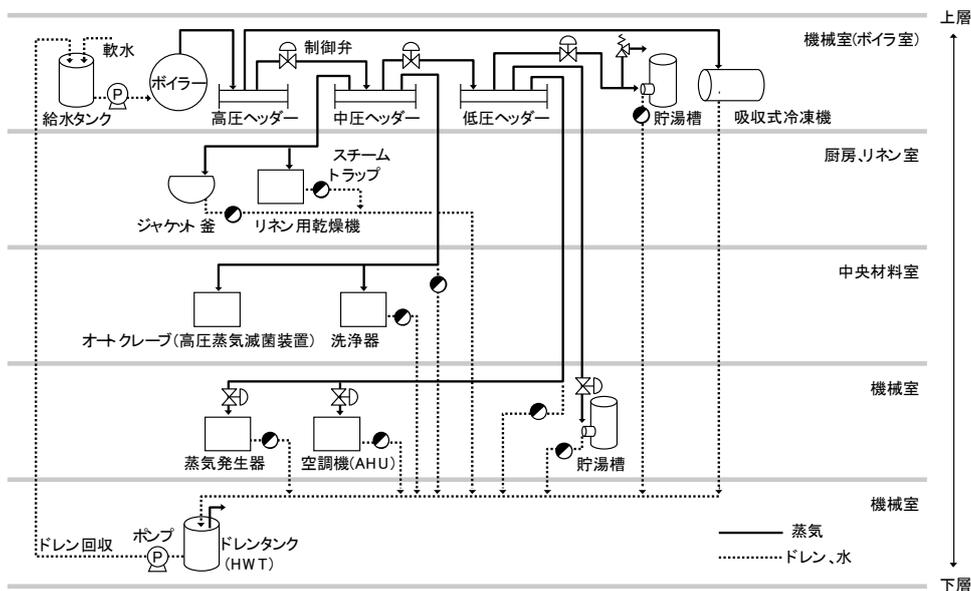


図-1 病院の蒸気システムフロー例

2-1 配管中の「蒸気の質」の問題

「蒸気の質」はあまり知られていないが、大きく分けて不純物と乾き度の2つの問題がある。

2-1-1 不純物

1つ目は、蒸気中の不純物である。蒸気そのものは水を蒸発させたもので、清浄な気体だと思われている方もいるかもしれないが、実際にはボイラー給水に添加される清缶剤や配管内のさび・スケール(配管内に析出した無機塩類)、工事直後のごみなどが含まれる。

蒸気中に含まれる不純物は、配管や機器を閉塞させたり、また写真-1のように制御弁などの摺動部に堆積して動きを阻害したり、シート部のエロージョンを発生させたりすることがある。

このような配管や機器、制御弁などの内部で不純物によって引き起こされる事象が原因となり、加熱を阻害する、蒸気圧力を変動させるなど、蒸気システムの様々なトラブルに繋がる。

また直接加熱設備(オートクレーブなど蒸気と被加熱物が直接接する加熱方式)においては、蒸気中の不純物がそのまま被加熱物の表面に付着するため品質や衛生上の問題が起こる。

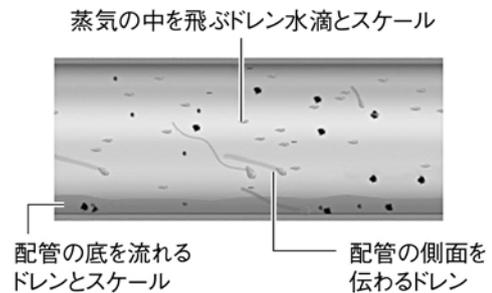


図-2 蒸気中の不純物のイメージ図

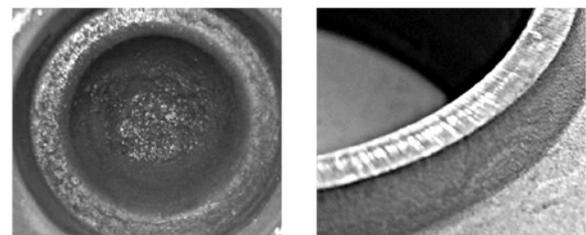


写真-1 不純物による制御弁トラブル

2-1-2 乾き度

2つ目は、乾き度である。蒸気は水が蒸発した気体であり、理想的には蒸気配管中が完全に気体で100%満たされていることが望ましい。この状態を乾き度100%と呼ぶ。しかし実際には、蒸気中には一部の既に凝縮してしまった蒸気が微細な霧状の液体として含まれており、しかも蒸気が目的地に到達するまでに配管からの放熱でこの霧状の液体であるドレンの量は増加していく。霧状のドレン水滴は次第に配管底部に溜まり、液層として蒸気配管内の下部を流れていくことになる。このように配管内の気体の割合が下がることから、乾き度が低下した状態という。

乾き度の低下により間接加熱用途(ジャケット釜など熱交換器を使用し、蒸気と被加熱物が直接接しない加熱方式)においては、加熱効率の低下を引き起こす。

冒頭に述べたが、蒸気加熱は凝縮伝熱を利用することに最大のメリットがある。蒸気の乾き度が低下すると、蒸気中のドレンによって熱交換器の伝熱面での伝熱が阻害され、加熱効率を低下させる。

また直接加熱用途においては、水滴が被加熱物の表面に付着することによる品質・衛生上の問題が挙げられる。

さらにドレン水滴が蒸気配管中を流れると、ドレンアタックによって配管内壁を削り、穴をあける。また制御弁などのシート部のエロージョンを発生させる。

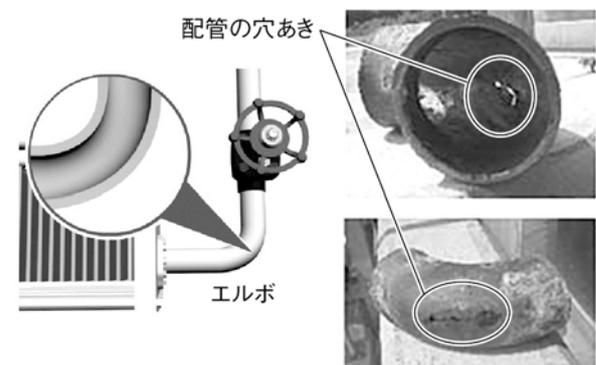


図-3 ドレンによる配管減肉

また、図-4のように蒸気配管内のドレンの塊が配管のエルボや末端に衝突すると、非常に大きな衝撃を与えるウォーターハンマーが発生することがあり、設備の破損や人身事故につながるリスクとなる。

2-2 蒸気システムにおける課題

病院では、建物の構造上、蒸気配管が縦方向に施工される箇所が多いこと、また比較的低压の蒸気を使用されることが特徴である。このような施設において潜在的な課題となっているテーマを2つ紹介する。

2-2-1 ストール現象

ストール現象とは、装置からドレンが正常に排出されない現象を指す。英語の **stall** には失速、停止という意味があり、蒸気使用装置においては、ドレンの流れが止まることを意味している。

ストール現象は病院施設では空調設備などで起こりやすいが、ヒーターの温度低下や穴あき、ウォーターハンマーの発生などが顕在化しない限り、多くの人がこの問題を見落としがちである

しかし、問題が顕在化しなくても潜在的な問題が2つ存在している可能性もある。1つ目は被加熱物の温度ムラである。ストール現象によるドレンの滞留によってヒーターの上部と下部で温度差が発生する。(図-5)

2つ目の問題は装置そのものへの悪影響である。ドレンが滞留したヒーター内に、高温蒸気が流れ込むことで蒸気の急凝縮によるウォーターハンマーが起こり、やがてはヒーターを破損させる。

また、ヒーターが高温と低温を繰り返すヒートサイクルにより熱疲労を起こして溶接部のひび割れや、ドレン滞留による腐食でコイルに穴が開くなどのトラブルもある。

このようなトラブルは装置の運転停止による生産機会の損失や、高額な修理代の発生など多大なコスト損失に繋がる。

2-2-2 低压ドレンの未回収

蒸気使用後に発生するドレンは、まだ多くの熱を保持しており、回収して再利用すべきである。しかし病院のように比較的低压の蒸気を使用する施設では、ドレンの圧力も低いいため、ボイラー給水タンクまで回収・再利用することを諦めている方も多い。ドレンをそのまま廃棄してしまうと熱・水資源の損失のほか、湯気による作業環境の悪化の問題も起きうる。また過去にドレン回収を実施した時に、ドレン回収管でのウォーターハンマーや、ドレン発生設備で加熱不良が起こるなど、ドレン回収によるトラブルを経験している例も多いのではないだろうか。そのような経験をされた方にとって、ドレン回収をして問題を起こすよりは、非省エネだが低压ドレンは排水した方が安全と考えるのも無理はない。

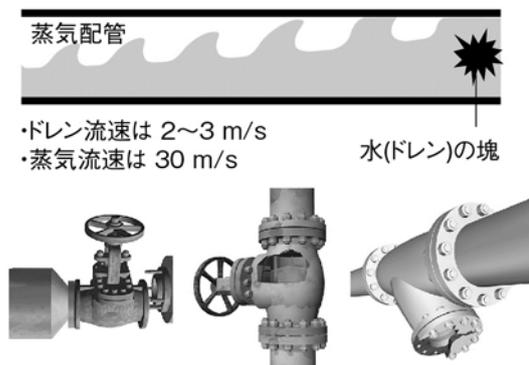


図-4 ドレンによるウォーターハンマーと破損したバルブのイメージ

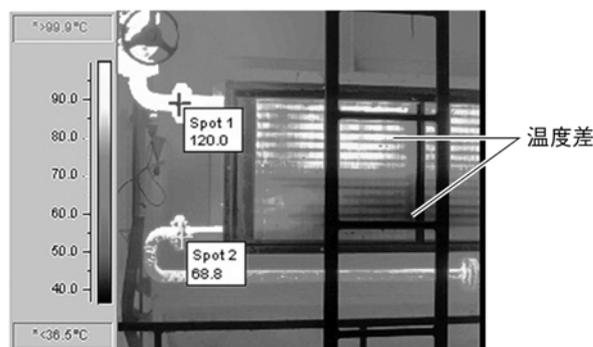


図-5 ストール現象によるドレン滞留

3. 原因

この章では前章で述べた問題・課題の原因について説明する。

3-1 配管中の「蒸気の質」の問題

「蒸気の質」を左右するのは不純物と乾き度と指摘したが、それぞれ質が悪化する原因を解説する。

3-1-1 不純物

蒸気中に不純物が含まれる原因は、主に2つあり、1つ目は新設工場・配管に初めて蒸気を通した際の金属の切子などのゴミである。蒸気供給前に、適切にフラッシングを行い、取り除く必要がある。2つ目は配管内で発生するさびやスケールである。鉄製の配管では配管内表面にさびが発生し、それが蒸気と共に流れていく。スケールはボイラー水に含まれるカルシウムやマグネシウムに起因する物質で、配管内表面に次第に析出・体積し、圧損を増加させるほか、不純物として蒸気中に流れていくことがある。

3-1-2 乾き度

蒸気中の乾き度が低下する原因として、こちらも原因は2つある。1つ目は、配管からの放熱などによって蒸気配管内で発生するドレンが多くなる場合である。そして2つ目は、蒸気配管中で発生したドレンが適切に排除されていないことである。具体的には、蒸気配管のスチームトラップの選定不良や詰り不良、スチームトラップの設置箇所が不適切などで、ドレンを排出すべき箇所から排水できず、そのまま蒸気とともに配管内を流れる(図-6)。

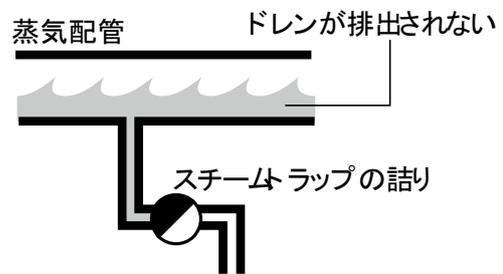


図-6 蒸気配管からのドレン排出不良

3-2 蒸気システムにおける課題

3-2-1 ストール現象

スチームトラップが正常であってもストール現象は起こってしまう。スチームトラップの作動条件は入口と出口とで正の差圧が確保されていることであるが、ストール現象はこの状態が確保できていない状態である。起こりやすい状況としては、温度制御されている被加熱物の設定温度が低く、設備の伝熱面積が必要熱量に対して過大な場合である。

ストール現象の発生メカニズムを理解するために、図-7で空調機を例に説明する。空調機を稼働し、蒸気を供給し始めると次第にエアの温度が上がる(1)。温度センサーで昇温を感知し、蒸気入口の制御弁の開度は絞られていく。一方、エアヒーター内の蒸気は熱を奪われ、次第に内圧が下がっていく。内圧が下がると、ヒーター出口のスチームトラップの前後の圧力差が減少し(2)、その結果ドレンはスチームトラップから排出されずに、コイル内に滞留する(3)。これがストール現象の発生原因である。その後、エアの温度

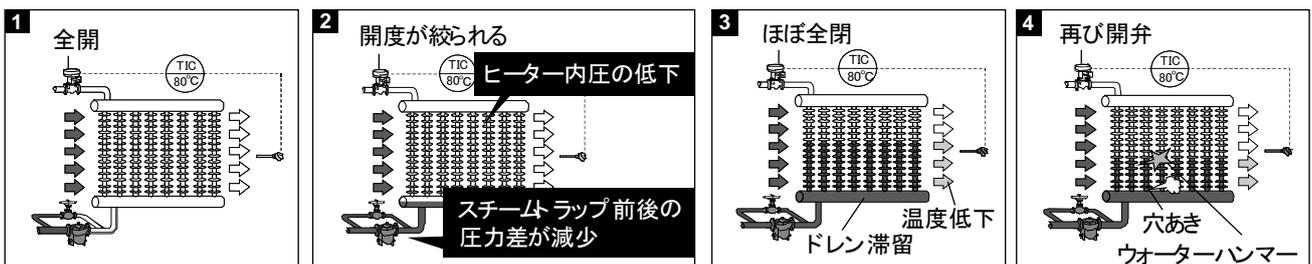


図-7 ストール発生のメカニズム

が下がり始め、温度センサーが感知すると、制御弁がそれに合わせて開度を大きくし、ヒーター内の蒸気圧力が上昇することでスチームトラップからドレンが排出され、再び設定温度に昇温する(4)。この一連のサイクルを繰り返すことでウォーターハンマーや穴あきが発生する。

3-2-2 低圧ドレンの未回収

なぜ低圧のドレンは回収できないかを説明する前に、そもそもドレン回収にはどのような方法があるかを述べる。

ドレン回収には大別して2つある。1つはオープン回収と呼ばれ、スチームトラップから排出されるドレンを直接給水タンクへ回収したり、一旦、大気圧のタンクで受けてからポンプによって給水タンクなどに回収したりする方法である(図-8)。

蒸気使用装置内で発生したドレンの温度は通常蒸気の飽和温度で100℃以上であるが、オープン回収の場合、ドレンの圧力を大気圧、即ち100℃以下に下げてから回収するという方法をとる。回収管に背圧がかからないので、他の装置への影響が少ないが、100℃以下の温度でしか回収できず、それ以上の熱量は湯気として捨てることになり、熱回収量があまり大きくならないという弱点もある。

2つ目の方法は、クローズド回収と呼ばれ、ドレンに圧力がかったまま、給水タンクを bypass せずボイラーに直接給水する方法である(図-9)。

ドレンを高温高圧のまま回収できるので回収熱量、即ち省エネ効果が大きい。またドレンが大気に触れることがないのでドレンの溶存酸素量が上がり脱気処理を軽減できる、ボイラー給水への薬剤の投入量が減るなどのメリットも挙げられる。一方で、誤った機器選定、不適切な機器の使用があると他の装置からドレンが抜けなくなる、回収管でウォーターハンマーが発生するなどのトラブルに繋がってしまう。

一般的にオープン回収とクローズド回収の使い分けはドレンの圧力で判断する。概ね0.3MPaG以下の蒸気圧力であればオープン回収、それ以上であれば熱回収のメリットからクローズド回収で計画するのが望ましい。

ドレンが低圧の場合、回収を諦めるケースが多い。低圧ドレンならば圧力帯から判断するとオープン回収が考えられるが、使用蒸気圧力が0.1MPaG以下になると、ドレンそのものの圧力では回収が困難になるからである。ドレン回収管の距離や曲りによる圧損や、配管の立ち上がりによる背圧を下回ってしまうからである。このようなケースでも安全で効果的なドレン回収が可能であり、その方法は後で説明する。

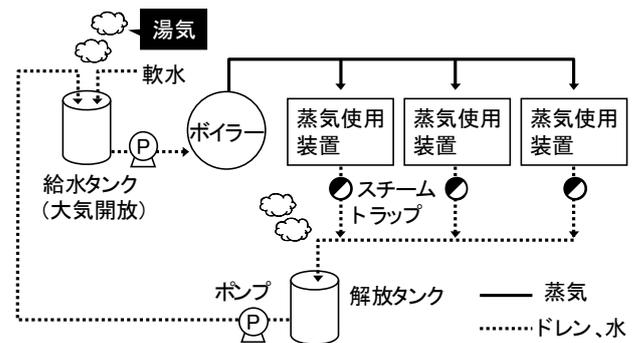


図-8 オープン回収

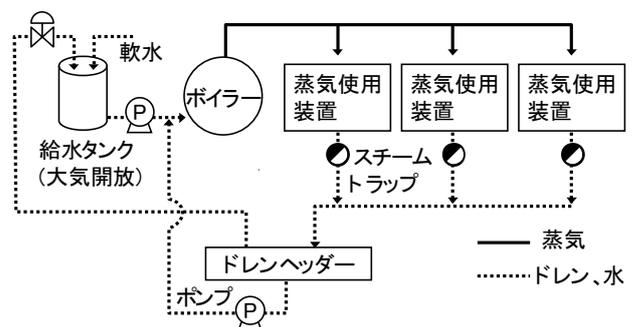


図-9 クローズド回収

4. 対策

4-1 「蒸気の質」の改善

この章では、これまで述べてきた問題・課題を改善するための対策について、それぞれの原因ごとに説明する。

4-1 「蒸気の質」の改善

「蒸気の質」を改善するために、不純物と乾き度への対策について紹介する。

4-1-1 不純物

不純物による影響を少なくするため、適切なボイラー水処理や蒸気配管のステンレス化以外にも、機器選定においても対策ができる。

1つは蒸気用のストレーナーやフィルターである。どちらも異物除去を目的とした機器だが、制御弁などの機器の保護を目的としたものがストレーナーであり、流体の清浄性を高めるための機器がフィルターである（図-10）。

フィルターには不純物を取り除くために金属製の網や金属粒を焼結したものをを用い、濾過粒度が $0.5\mu\text{m}$ と非常に細かい不純物まで取り除けるものもある。また洗浄して繰り返し使えるものもある。

新設の工場・設備においては金属片やごみが、配管などが老朽化した工場ではさびやスケールが混入しやすいのでフィルターは必要不可欠である。

さらにセパレーターと呼ばれる機器もある。蒸気中からドレンを取り除くのが目的で、後述の乾き度向上のために使用される。セパレーターは内部で蒸気と蒸気中に含まれるドレンや不純物を分離する。分離効率を高めるために蒸気を旋回させ、遠心力で強制分離させる方式が有効である（図-11）。

4-1-2 乾き度

蒸気の乾き度が低下すると、前述のような加熱効率の低下につながる。また乾き度低下を放置しているとドレンアタックやウォーターハンマーの原因となる。

これらを防ぐには蒸気配管中のドレンを適切に排除する必要があり、解決策は上述のセパレーターおよびスチームトラップである。

スチームトラップはドレンを排水し、蒸気は逃がさない特殊な自動弁である。

蒸気使用装置だけでなく、蒸気配管にも適切に設置することで、配管内で発生するドレンを排除することができる。しかしスチームトラップは蒸気中に浮遊して蒸気と共に流れているドレンは排除することができないので、配管のエロージョンの心配がある箇所では手前にセパレーターを設置する必要がある。これらの対策をとることで乾き度低下を防ぎ、リスクを軽減させることができる。

また直接加熱設備においては被加熱物の品質面や衛生面での影響、間接加熱設備においては加熱効率低下やエロージョンのリスクを低減することに繋がる。

セパレーターは制御弁の出口と加熱装置の間に設置するのが最適で、分離したドレンが下に溜まるため、

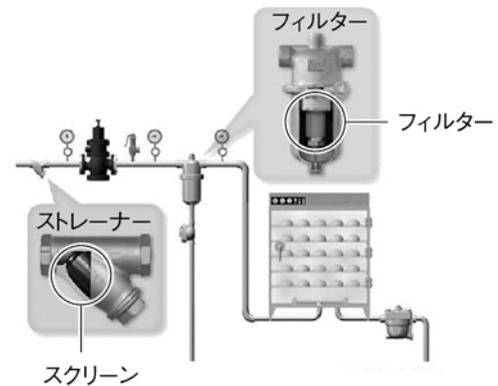


図-10 ストレーナーとフィルター

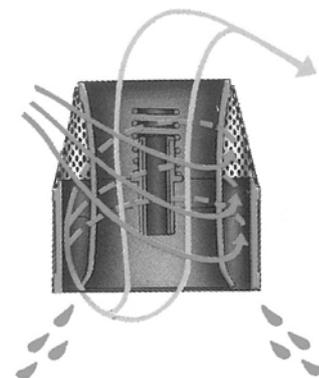


図-11 サイクロン式セパレーター

セパレーター下部にスチームトラップを設置する必要がある。なお、セパレーターとスチームトラップ、減圧弁が一体化した製品もあり、省スペース化に効果的である(図-12)。

次に、蒸気の質を考慮した蒸気配管設計について説明する。

蒸気配管中にはドレンが必ず含まれ、それを取り除かなければならないことは前述の通りである。そのためにはドレンのキャッチに適し、かつ排除しやすい位置に、最適なスチームトラップを設置する必要がある。

ドレンは蒸気に比べて比重が大きい、つまり重力方向に動きやすい流体である。また重たいがゆえに上方向には上りにくい。

蒸気配管は放熱によってドレンが発生するため、蒸気配管の30~50m間隔でスチームトラップの設置が必要である。また立ち上がり配管の下部にも必ずスチームトラップを設置する必要がある。

病院のような施設では、蒸気配管が横方向だけでなく縦方向にも施工されており、建築の都合上、配管をU字状にする必要のある箇所もある。そのような現場の際には、図-13のようにドレンの溜まりやすい箇所にスチームトラップの設置が必要である。

また太い水平配管に対して直接、細いドレン抜き配管を取り付けてしまうと、ドレンが入りきらず素通りしてしまう。このような場合は、図-14のようにドレン溜め(ポット)を設置することで解消できる。

これらの対策を講ずることで乾き度の低下を防ぎ、ウォーターハンマーなどのトラブルを未然に防ぐことができる。

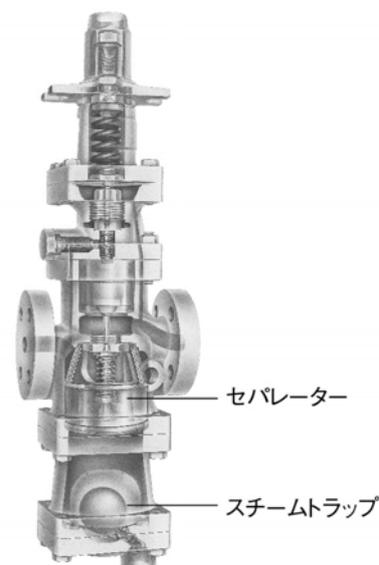


図-12 セパレーター・トラップ内蔵減圧弁

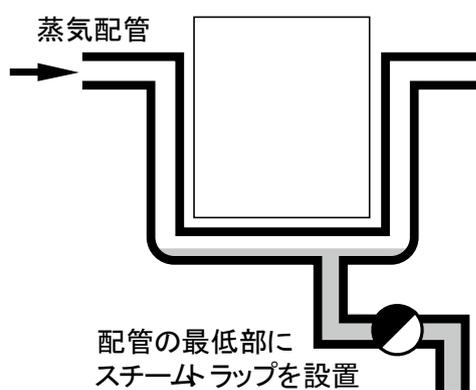


図-13 縦配管からのドレン排除

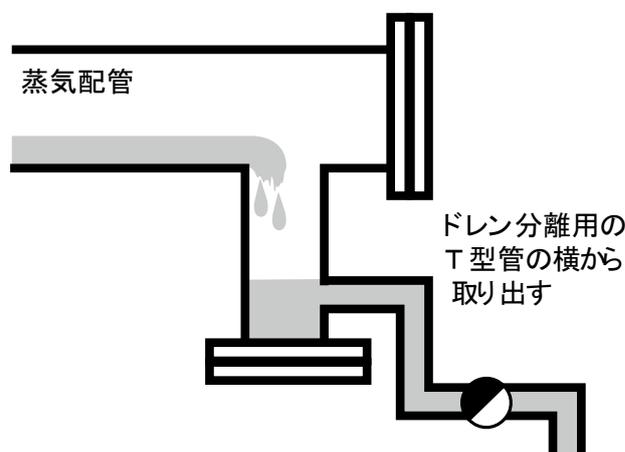


図-14 蒸気配管のドレンポット

4-2 蒸気システムの最適化

4-2-1 ストール現象

前述したストール現象により、スチームトラップの入口と出口の圧力差が取れなくなったとき、どのようにしてドレンを排水すればよいのかを説明する。

1つ目の対策として、メカニカルポンプを導入する方法である(図-15)。

これは負圧のドレンが自重でメカニカルポンプ内に流れ落ち一定量が溜まると、内部のフロートが浮き上がり、弁を切り替え、外部から供給する蒸気や空気の圧力によって強制的にドレンを排水する装置であ

る。またスチームトラップ機能付きのメカニカルポンプを設置すれば、差圧が確保されている時はスチームトラップとしての作動、差圧がない時にはポンプとしての作動が行われ、エアヒーターなどの熱交換器内部にドレンを滞留させることなく運転ができる。

メカニカルポンプの設置は蒸気使用装置毎に設置が必要となる。しかし、空調機が複数台ある現場も多く、このような場合は、真空ポンプを用いることで複数の空調機からのドレンを同時に排水することができる。スチームトラップの出口側のラインを大気圧以下に真空引きし、強制的にスチームトラップの入口部と出口部に差圧をつくることで、空調機内のドレン滞留を防ぐことができる。

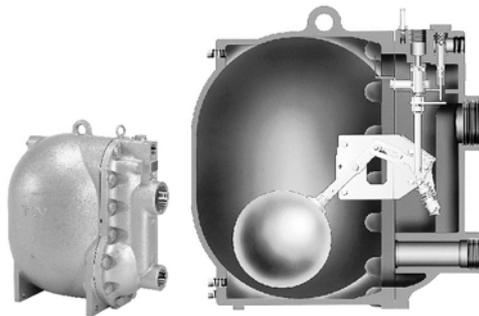


図-15 メカニカルポンプ

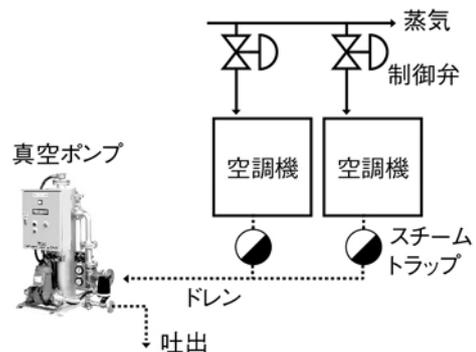


図-16 真空用ドレン回収ポンプ

4-2-2 低圧ドレンの未回収

使用する蒸気圧力が低く、スチームトラップから排除されるドレンを自圧で回収先までドレンを送れない場合は前述のメカニカルポンプを使用する。

メカニカルポンプはストール現象の対策のみならず、低圧ドレンの回収にも利用できる。高圧蒸気や空気によってドレンを圧送するため、現場に電気系統がない、電気を使用できない場所でもドレン回収をすることができる。設置面積も取らないため、ユーティリティーやスペースに制限がある場合でも使用可能である。

電動の渦巻きポンプを使用してドレン回収をするとドレンの温度によっては、ドレンがポンプ内で気化してキャビテーションと呼ばれる問題が発生する場合がある。この現象が続くと、ポンプが破損し、ドレンを圧送できなくなる。この渦巻きポンプに代わるものが、ドレン回収専用のジェットポンプである。ジェットポンプはエゼクターによってドレンを加圧してポンプに送り込むため、高温ドレンであってもキャビテーションは起きにくい。

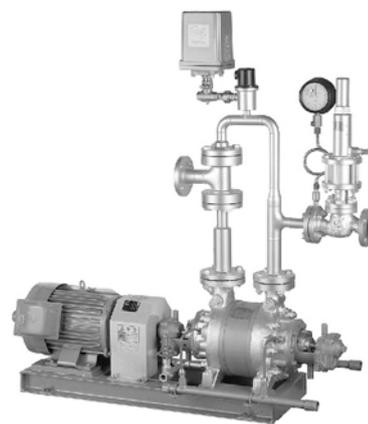


写真2 ドレン回収専用ジェットポンプ

5. 改善事例

最後に、ここまで説明した問題・課題に関して、実際の解決事例を紹介したい。

5-1 セパレーターの導入事例

ある病院では、蒸気で加湿するタイプのアハンドリングユニットが使用されていた。調湿用制御弁の内部漏れが頻発しており、過度に水蒸気が供給されてしまったときには、「手術室が真っ白になった」こともあったという。

特定箇所の制御弁が頻繁に故障する場合は、周囲の状況に問題があると考えられる。この時は、調湿用蒸気配管のスチームトラップが詰り故障を起こしており、蒸気の乾き度低下、それに伴うドレンによる制御弁のシート部のエロージョンが原因と推定された。

対策として、まずはスチームトラップを更新し、ドレン滞留を防ぎ、制御弁におけるエロージョン発生リスクを低減させた。この改善により、調湿用制御弁の内部漏れ頻度は大きく減少した。

また、手術室のような重要性が高い場所のエアハンドリングユニットにはセパレーターフィルターを制御弁手前に設置し、加湿用蒸気は乾き度が高く不純物のない状態で供給できるように改善を行った。

5-2 真空ポンプの導入事例

ある病院では、60台の空調機を使用しており、ヒーター内部の穴あきが頻発していると相談があった。

話を伺うと、レヒーター（空調機内部の温度管理用加熱コイル）でピンホールからの漏れが頻発しており、その都度ヒーターを交換されていた。1回の交換に5~6万円かかり、一部の空調機は研究設備向けに使用していたため簡単に止められないと、非常に困っておられた。

穴あきの原因は、ドレン滞留による腐食である。供給蒸気圧力は0.2MPaGだが、レヒーターの制御温度は23℃で、空調機のドレン出口が冷たい状態であった。圧力計を設置して確認すると-40kPaGとかなりの真空で、ストール現象対策が不可欠であることが判明した。

60台もの設備があったため、複数の設備を接続できる真空ポンプを導入し、スチームトラップの出口側を-80kPaGまで圧力を下げた。ドレンがレヒーターから抜け、ポンプ側に回収されたことを確認した。この結果、ピンホール発生頻度が大幅に減少し、修理頻度・コストの削減につながった。

5-3 ジェットポンプの導入事例

ある病院では、4.5 t/hのドレンが発生し、これをホットウェルタンクに集め、ボイラー給水として再利用するオープン回収システムが採用されていた。ポンプのキャビテーション対策のため、タンクの温度低下を目的として軟水を補給する制御を加えていた。しかし、4.5 t/hのドレン全てを回収すると、温度調整のため軟水補給量も増大し、大量のオーバーフローが発生してしまうため、常時約1.0 t/hのドレンをタンクに入る前に廃棄していた。

現場を確認すると、主な蒸気使用設備と使用蒸気圧は、吸収式冷凍機（0.8MPaG）、洗濯機・厨房設備（0.6MPaG）、貯湯槽・医療設備（0.2MPaG）であった。最も圧力が高い吸収式冷凍機ラインのドレンはフラッシュタンクに回収され、その後ホットウェルタンクに回収されていた。しかしそれ以外の系統のドレンは全てホットウェルタンクへオープン回収されていたため、タンクの温度が高くなりすぎている。

そこでオープン回収システムの更新を検討頂き、キャビテーションを起こさないジェットポンプを導入した。4.5 t/hのドレンを温度を下げずにボイラーに直接回収することで、廃熱を有効に回収し、3年で投資回収できる結果となった。

6. おわりに

本稿では蒸気システムの問題・課題を解決する技術を紹介するために、病院における設備を例に問題と原因、そして有効な対策について解説した。

正しく蒸気を使えば高い生産性・品質の向上、そして省エネにも繋がる。

最後に、本学会関係者の皆様の蒸気使用に関する課題解決のために、今後も最適な解決策を開発・提供していく所存であり、お問い合わせやご意見は、下記までご連絡頂ければ幸いです。

●URL : <http://www.tlv.com> の「お問い合わせ」コーナーから

●TLV 技術 110 番 : 079-422-8833 まで直通電話