

## 6. エネルギーの有効利用

### (6. 21 蒸気設備における空気排除の重要性 —蒸気加熱装置における空気混入の障害と空気抜きの効果)

田中 大貴

(株)ティエルブイ

#### 1. はじめに

蒸気は、均一かつ素早く加熱ができるなどの利点があるため、産業界で多く使用されている。しかし、蒸気を適切に使用するには注意すべき点も多く、適切な条件で使用しないと蒸気が本来もつ数々の利点が失われる場合がある。

蒸気使用装置における空気の滞留は不十分な加熱を引き起こし、適切な加熱ができなくなるおそれがある。またそれだけでなく、ドレン滞留を引き起こし設備破損など思いもよらぬ大事故へとつながる可能性がある。本稿では、蒸気使用時における、空気が引き起こす懸念点について述べ、その後原理にまでさかのぼり、読者が実践できる知識や、改善後の事例も交えながら考えていきたい。

#### 2. 空気滞留による蒸気システムへの影響

##### 2. 1 加熱効率の低下

熱交換器で、熱源である蒸気が入る空間は、蒸気が入る前には空気が存在している。ここに蒸気を送り込んで加熱するためには、空気を上手く排除して蒸気に置き換えなければ、蒸気室内は空気と蒸気の混合気体で満たされることになる。

この混合気体が原因で加熱不良が起こるのだが、理由は大きく3つある。それぞれの理由について加熱不良を起こす原理とともに考察していく。

##### 理由1：蒸気の正味圧力の減少

「熱交換器蒸気室部分の圧力計が所定の圧力を指しているにもかかわらず、いつまでたっても必要な温度に到達しない」という現象に見舞われたことはないだろうか。これは分圧の法則が影響している。

分圧の法則とは、『数種類の気体が混合してい

るときの全体としての圧力は、それぞれの気体が同じ容器に単独で存在しているときの圧力(分圧)の和に等しい』というものである。

蒸気と空気の混合気体で満たされた熱交換器蒸気室の圧力を計測すると、その圧力は蒸気の圧力ではなく混合気体の圧力である。すなわち、圧力計が示す圧力=蒸気の圧力とはならない。ここで、先ほどの「分圧の法則」に当てはめて考えてみると、

$$[\text{空気の分圧}] + [\text{蒸気分圧}] = [\text{混合気体の圧力(全圧)}]$$

となり、上式によると、この時の実際の蒸気の圧力は、混合気体の圧力よりも低くなる。

混合気体中の各成分が単独で容器を満たしたと仮定する時に示す圧力を分圧と呼ぶが(実際には、このような分離は不可能だが)混合気体の示す圧力(全圧)は、各分圧の和になる。

すなわち、 $0.8\text{MPaA(分圧)} + 0.2\text{MPa(分圧)} = 1.0\text{MPa(全圧)}$

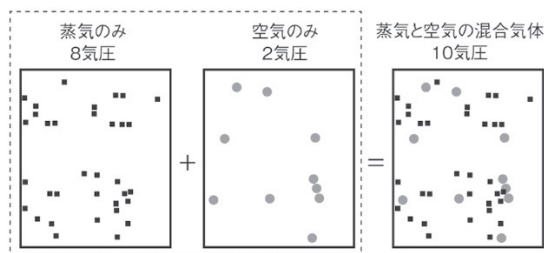


図57.1 分圧の法則

したがって、この1.0MPaAの混合気体の温度は、0.8MPaAの蒸気の飽和温度以上にならず、当然ながら1.0MPaA蒸気の飽和温度よりも低い。つまり、本来よりも温度が低い加熱媒体で加熱し

ているのと同義になり、十分な加熱ができなくなる。

#### 理由2：伝熱面積の低下

空気と蒸気の混合気体が熱交換器蒸気室に入ると、**図57.2**のように伝熱面が100%蒸気と接していない部分が出てくる。

空気は非凝縮性の気体のため、蒸気のように凝縮水として排出されることはなく、蒸気室内部に残り続ける。その結果、伝熱面の一部は空気が触れている状態であり、加熱能力が劣ることとなる。これでは熱交換器のスペックを最大限活かせず、伝熱面積が小さく加熱能力の小さい熱交換器を使用しているのと同義になる。

#### 理由3：熱の伝わりやすさの低下

空気加熱は蒸気加熱に比べて熱を伝える効率が著しく低下する。熱を伝える効率は「熱伝達率」と「熱伝導率」の2つに分類できる。その内の熱媒体から熱交換器伝熱面への熱の伝わりやすさを熱伝達率で表すことができ、値が大きいほど熱交換器での加熱効率が高くなる。空気は蒸気に比べて熱伝導率が極めて小さい。そのため、空気が熱交換器に混入した状態では加熱効率が低下する。

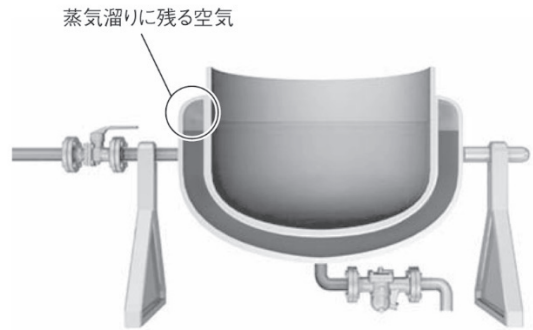
## 2. 2 加熱ムラ

前述のとおり、空気が装置に入ると伝熱面に蒸気ではなく空気が触れる面が生じる。空気は蒸気よりも熱を伝えにくく、加熱ムラの原因となる。

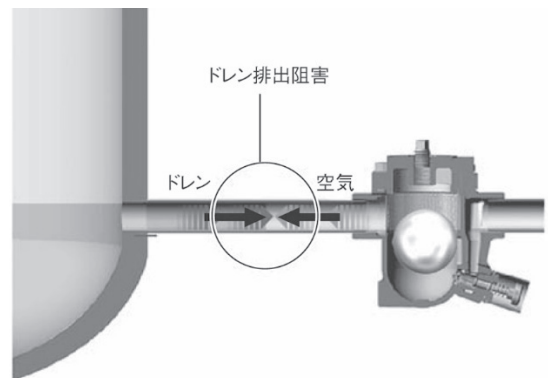
## 2. 3 エアバイディングによるドレン流下阻害

エアバイディングとは空気障害とも呼ばれ、空気などの非凝縮性ガスの影響により、排出すべきドレンを排出できなくなる状態のことを言う。作動原理として流体の比重差を利用するメカニカルタイプでは、液体であるドレンは排出するが、気体は止めてしまうので、スチームトラップにドレンより先にトラップ内へ空気が流れ込むと閉弁する。この時、トラップに空気抜き機構が設けられていないと、空気はトラップ内に残り続ける。この空気がドレンとうまく置換されない場合ドレンはトラップ内に流入できなくなる。

結果として、装置に溜まり続けたドレンの影響で、装置内で蒸気による加熱ができず加熱不良を



**図57.2** 熱交換器内に滞留した空気の伝熱面積減少イメージ



**図57.3** エアバイディングによるドレン排出阻害

引き起こす。

## 2. 4 配管の腐食

滞留した空気がドレンに触れると溶存酸素量が増加する。淡水中の腐食は、pHの極端に低い場合を除き、腐食速度は溶存酸素量に比例する。多くの金属表面で溶存酸素濃度に不均一があると、通気差電池のため低酸素の接面が陽極となって局部的に腐食が生じる。

## 3. 空気滞留の原因と対策

蒸気使用装置において、適切な加熱を行う際に空気を排除する必要性はおわかりいただけたいと思う。本章では具体的な空気排除の方法について紹介する。

### 3. 1 空気の重さ

空気を排除するためには、まず空気の溜まる場所を特定する必要がある。空気溜まりは蒸気と空

キ  
リ  
ト  
リ  
線

気の比重差によって予測できる。空気の平均分子量を29とすると、標準状態では1モルでは29gである。蒸気(水)の分子量は18なので、1モルでは18gであり、空気と蒸気を比べると蒸気の方が軽いと言える。したがって、蒸気使用装置の下部から空気を排除すると十分であるように考えてよさそうに思える。しかし、実は空気と蒸気の比重は条件によって変化する。つまり、装置内の条件次第で、蒸気が空気より軽くなることも、重くなることもあり得る。

装置内で標準状態と異なる条件には、以下3点がある。

- ・熱交換器の蒸気室内は蒸気と空気の混合気体で満たされている。
- ・蒸気と空気の比率で分圧(蒸気/空気それぞれの実圧力)は変わる。
- ・比重量は温度、圧力によって大きく異なる。

このように、蒸気使用装置内では標準状態とはかけ離れた状態が生じているため、標準状態での空気、蒸気の比重差からそのまま空気溜まり位置の予想をすることはできない。

蒸気使用装置における空気溜まり位置の特定は簡単でないため、空気抜き機構を複数箇所に設置することが推奨される。では、空気溜まりの位置はどのように変化するのだろうか。ジャケット釜を例に用いて解説する。

二重釜のような蒸気加熱装置で空気が滞留すると、大まかには内部で空気部と蒸気部に分かれる。蒸気部は100%蒸気で構成されているが、空気部は100%空気で構成されているわけではなく、蒸気と空気の混合気体である。この空気部の密度が種々条件によって変化する。結果として、蒸気部と空気部の位置の上下関係が入れ替わる(図57.4)。この前提を抑えたくて、種々条件と比重関係を解説していく。

空気部と蒸気部の比重関係が条件によってどのように変わるのだろうか。

図57.5は圧力が1.0MPaにおける、空気部と蒸気部との関係を示したグラフである。空気部は100%空気で構成されているわけではなく、蒸気と空気の混合気体である。蒸気部は100%蒸気で構成されている。

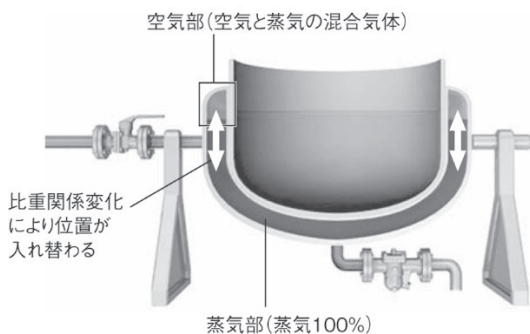


図57.4 二重釜中の蒸気部と空気部イメージ図

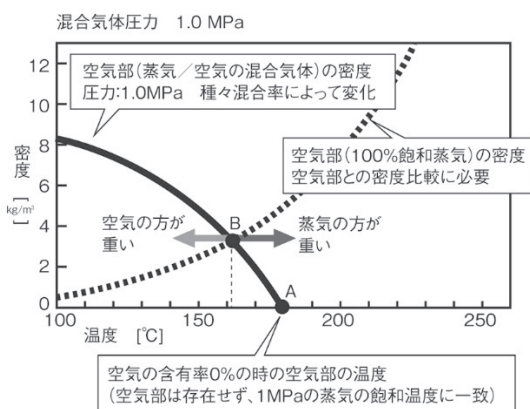


図57.5 1.0MPaでの種々混合率における空気/蒸気の密度比較

図57.5～図57.7において、縦軸は密度、横軸はジャケット内の温度、実線は決まった圧力下における①空気部(空気蒸気の混合気体)の密度を表し、混合率の変化によって密度が変化することが示されている。破線は、②蒸気部の密度曲線を表し、空気部の密度との上下関係を知る際に使用する。

内部圧力が1.0MPaで安定している時を考える。図57.5で、実線とX軸との交点Aは、空気がジャケット容積に対して0%の割合で含まれる空気部の温度を表している(この時実際空気部は存在しないが、ジャケットに対する空気含有率0%の空気部があるという考え)。空気が徐々にジャケット内に混入してくると空気密度が増加し、点Aから左上方向へと実線をなぞっていくように空気部密度が変化する。

点Aから、空気部と蒸気部との蒸気部の密度曲

線(破線)の交点Bに達するまでの間、蒸気部密度は空気部密度よりも大きいため空気部は蒸気部の上に位置する。点Bでは、空気部と蒸気部の密度が等しくなった場合を表している。この時温度は約162℃であり、空気部と蒸気部の密度が等しいため、空気部の滞留位置を密度関係から予測することは不可能である。点Bからさらに左上に実線をなぞっていくと、密度の大小関係は逆転する。空気部が蒸気部の密度よりも大きくなり、ジャケット内で空気部は蒸気部よりも下に位置する。

ジャケットに混入している空気の割合については温度から逆算できる。例えば、点Bでの温度162℃で、この温度での飽和蒸気の圧力は0.55MPaとなる。よって、分圧の法則より、ジャケット内の全圧1MPaに対して、空気圧力(分圧)は0.45MPaとなる。従って、点Bでは、ジャケットの45%を占める空気が混入していると計算できる。

蒸気使用装置においては、低圧蒸気が使われる。仮に0.1MPaの蒸気が使われているとすると、図57.6に示すジャケット内温度106℃(点B')を境に、低温だと空気部密度が蒸気部密度よりも大きくなり、装置の下部から排除することが推奨される。反対に高温だと空気部密度が蒸気部密度よりも小さくなり、装置の上部から排除することが推奨されるとわかる。

蒸気輸送管においては、蒸気輸送管について考える。高圧蒸気が使われる。仮に2.0MPaの蒸気が使われているとすると、図57.7に示すジャケット内温度188℃(点B'')を境に、低温だと空気部密度が蒸気部密度よりも大きくなり、装置の下部から排除することが推奨される。反対に高温だと空気部密度が蒸気部密度よりも小さくなり、装置の上部から排除することが推奨されるとわかる。

### 3. 2 スチームトラップを経由した空気排除

蒸気が空気より軽い場合、空気はスチームトラップが設置されている最下点へ流入してくる。この時、スチームトラップ自体に空気を排除するための機構として、自動エアブロー機能が必要になる。

装置立ち上げ時、蒸気通気前の配管内は常温で

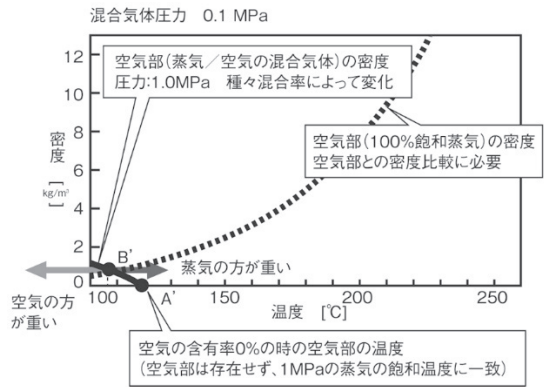


図57.6 0.1MPaでの種々混合率における空気/蒸気の密度比較

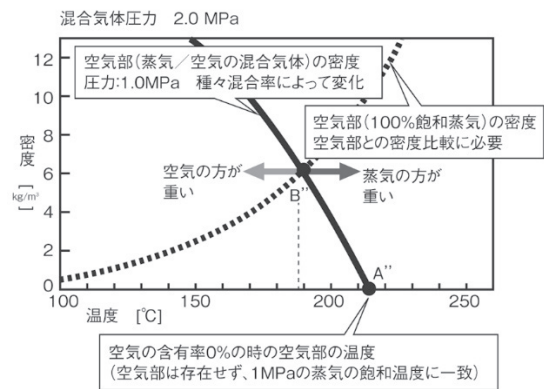


図57.7 2.0MPaでの種々混合率における空気/蒸気の密度比較

あることから、装置立ち上げ初期の自動エアブロー機構には常温空気—蒸気の温度差を利用した原理が多い。通気初期の空気が流入する際の常温雰囲気下で強制開弁して空気を抜いてしまい(図57.8, 図57.9), 蒸気温度になると弁に干渉しなくなり、トラップは通常作動をする。空気抜きの強制開弁機構には主にバイメタルが使用されている。

一方、運転中は蒸気室に残留していた空気が蒸気に加熱されて高温になるケースがある。高温であっても空気であることには変わりはなく、加熱不良の原因となるため排除は必要である。しかし、バイメタルは概ね90℃~100℃でしか作動しないうえ、作動・感度が鈍く、温度が上がってしまった空気の排除には適切でない。そのため、沸点調

キ  
リ  
ト  
リ  
線

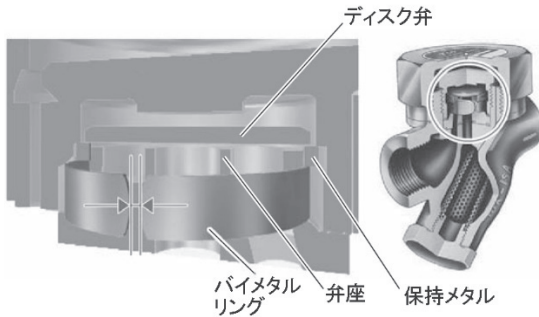


図57.8 ディスクトラップの自動エアブロー機構

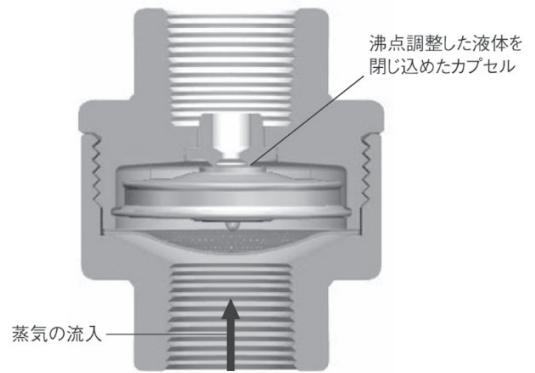


図57.10 蒸気用エアイベント

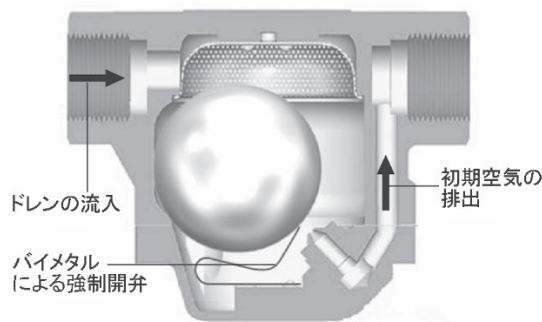


図57.9 フロートトラップの自動エアブロー機構

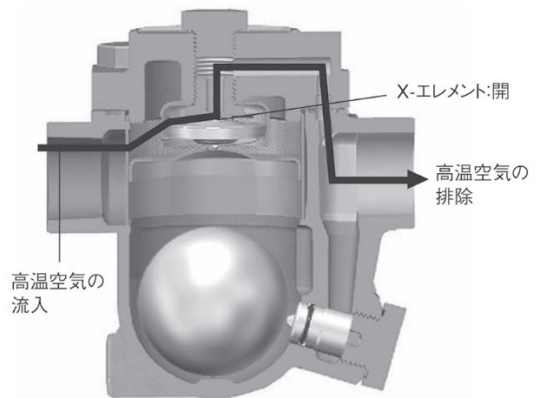


図57.11 高温空気抜きに対応したスチームトラップ

整をした液体を閉じ込めたカプセルなどを使用した、蒸気と空気の温度差を感知して作動することができる空気抜き機構が必要となる。

また、スチームトラップにおけるバイメタル製空気抜き機構は、低温かつ下部に滞留する空気を排除する目的のため、トラップの底によく設置されている。高温空気がトラップに流入した場合、トラップ上部に滞留するため、底からの排出ができなくなる。そのため、高温空気がトラップへ流入する可能性の高いパッチ運転などの装置では、トラップ上部に温度応答性の高い空気抜き機構を設けることを推奨する。

### 3. 3 熱交換器上部エアイベントから排除する

複雑な形状の蒸気室を持つ装置やサイフォン管を使用する装置などは、蒸気室内部に“空気溜まり”ができやすいので注意が必要である。高性能な空気排気機能を持つスチームトラップを使って、ドレン出口からドレンと空気を排出したとしても、空気溜まりを排除はできない。そのため、

蒸気使用装置のみならず、蒸気輸送配管中の空気は、放置しておくとならざる不具合を引き起こす原因となる。スチームトラップまで運ばれるとエアバインディングの原因となり、ドレンに空気が触れると配管腐食を引き起こす。空気抜きの箇所が増えればこれらの懸念点が抑えられることに加えて、定期修繕後などの立ち上げ時間短縮にもつながり、メリットが多い。

### 3. 4 蒸気輸送配管における空気排除

蒸気使用装置のみならず、蒸気輸送配管中の空気は、放置しておくとならざる不具合を引き起こす原因となる。スチームトラップまで運ばれるとエアバインディングの原因となり、ドレンに空気が触れると配管腐食を引き起こす。空気抜きの箇所が増えればこれらの懸念点が抑えられることに加えて、定期修繕後などの立ち上げ時間短縮にもつながり、メリットが多い。

蒸気の輸送は、高温高压で実施される。例えば2.0MPaの状態を考える。配管中に流入する空気は200℃近い蒸気で加熱されるため、蒸気よりも軽くなり配管上部へ移動する。配管上部かつ、滞

留しやすい箇所への蒸気用エアイベント設置を推奨する。

#### 4. 空気排除による改善事例

##### 4. 1 二重釜の改善事例

食品工場での改善事例である。蒸気を熱源としてスープの加熱を行っていたが、昇温時間が長いことが悩みだった。また、スチームトラップ横のバイパスバルブを手動操作することで空気抜きは可能だが、設置位置が地面と近く、衛生面から可能な限り触れたくないという悩みも抱えていた。そこで、空気排出能力の高いトラップへの変更、二重釜上部へのエアイベント設置という2点の改良を行った。

その結果、立ち上げ時間が15分→6分と半分以下に短縮され、一日当たりの生産性が向上した。改善前は立ち上げ時、ジャケット内に存在する空気の排除に苦勞していた。また、時間経過とともに蒸気によって空気が温められ、図57.12に示すようにジャケット釜上部に高温空気が滞留する状況だった。これに対して、空気抜き機構の改善を行ったことにより、低温空気はスチームトラップ下部(図57.13中①)から、二重釜やトラップへ流入する高温空気はそれぞれトラップ上部(図57.13中②)、二重釜上部に設けたエアイベント(図57.13中③)から適切に排出されることとなり、生産性の向上につながった。

また、エアイベントやスチームトラップの空気抜き機構は自動的に作動するため、空気抜きのためのバルブ操作も不要となり、作業工数の削減にもつながった。

##### 4. 2 ゴム製造工場での改善事例

ゴム製造では、原料ゴムに弾性と耐熱性を持たせるための加硫工程がある。この加硫工程では、加硫缶と呼ばれる加硫容器内に充満する空気をいかに蒸気通気始めの初期段階で排除できるかが、バッチ時間の短縮と品質に大きく影響する。このゴム工場では、初期エアの排除をバルブの手動開閉によって行っていたが、完全に排除できず昇温時間の長さや昇温不良に悩まされていた。そこで、図57.14のような空気排除システムを導入した。

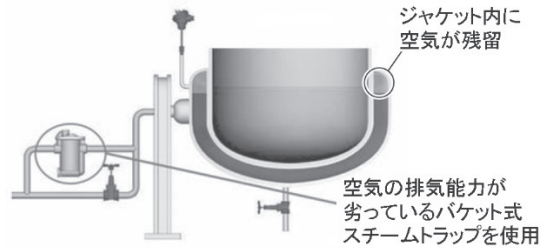


図57.12 二重釜使用時、空気残留のイメージ

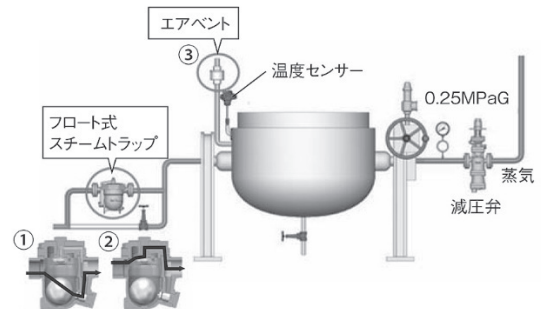


図57.13 空気抜き機構を設置した二重釜及び周辺機器

複数箇所から短時間で確実に空気を排除することで、立ち上げ時間の短縮だけでなく、釜内温度が供給蒸気温度に近づいた。また、残留空気を排除する際の圧力低下に追従して蒸気を追加供給することで、圧力の低下またそれに起因する温度変化に追従。加硫中の温度のバラつきが改善され製品不良が減少した。具体的な空気抜きの流れを以下で解説する。

図57.14を参照に読み進めていただきたい。立ち上げ時、内部は空気で満たされているため①、①'、②が開き空気を排除する。空気が十分に抜け温度が十分上昇すると、それらは閉まる。運転中に流入する空気は蒸気によって温められており、缶上部に滞留しようとするため③から適宜排除される。ここで空気が排除される際に缶内部で圧力が低下し、缶内部温度の微妙な低下が懸念されていた。そこで、④の開閉による蒸気流入、②の開閉によって缶内圧の開放により、より細かな過不足を調整し、空気滞留由来の温度低下だけでなく、缶内圧の低下、つまり缶内部温度の低下が引き起こす品質低下を防いだ。

キ  
リ  
ト  
リ  
線

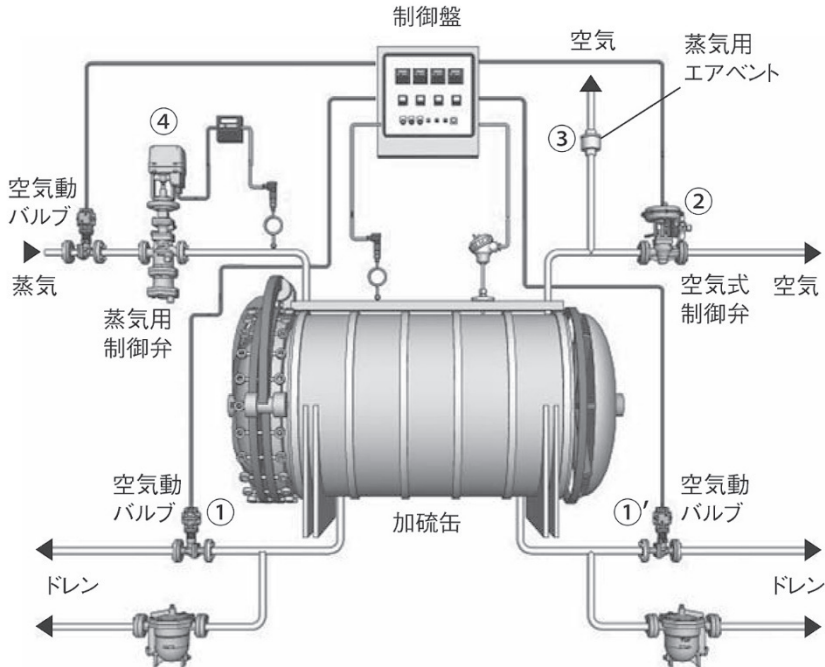


図57.14 加硫缶からの空気の自動廃除による改善事例

## 5. まとめ

蒸気は工場を稼働するうえで不可欠な熱エネルギーである。ただし、正しく使用されなければ生産効率や安定性に影響が出るだけでなく、設備の破損など、安全性にも大きな懸念点が生じる。今回は、見落とされがちな空気滞留の悪影響と排除機構について紹介した。運転開始初期の温度が低い空気は蒸気に対して空気の比重が大きいため下部から排除する、温度が高くなった空気は蒸気に

対して空気の比重が小さいため上部から排除するというセオリーを念頭に置いて、空気抜き機構を設置していただきたい。

このように、蒸気と空気の性質や起こりうる問題と原因を正しく理解することで、生産中の温度に関連するトラブルが減り、日々の仕事を滞りなく安全に進めることにつながる。

蒸気を使用する方々の業務の改善に少しでも本稿が活用いただければと考える。