

# 省エネのためのスチームエンジニアリング 〈蒸気の基礎と正しい使い方〉

(株)ティエルプイ

米倉麻衣子

Steam Engineering for Energy Savings  
～ Steam Basics and Efficient Use ～

by Maiko Yonekura

蒸気は産業界の熱エネルギーとして最も高いシェアを占めている。産業界の省エネ促進のためには蒸気の省エネと、そのための蒸気システムの最適化が不可欠であり、その実現のためには蒸気の特性を知り、正しい使い方に改善しなければならない。

本稿では、産業界で主として熱源に用いられる飽和蒸気について取り上げ、飽和蒸気表に顕れる性質をはじめとした各特性と、併せて正しい使い方の原則について紹介する。さらには実際の蒸気システムにおいて、ボイラーでの蒸気発生、装置への蒸気輸送、装置での蒸気使用、スチームトラップからのドレン排出、そしてドレン・排熱の回収といった各パートにおける、省エネ性・生産性・生産品質・安全性の向上につながる具体的な改善手法について解説する。

## 1. はじめに

蒸気は、今日の産業界において最も多く使われている熱エネルギーである。経済産業省発行の環境統計集「わが国のエネルギーフロー」からの集計によると、発電用の動力も含めた全エネルギーのうち83%を蒸気が占めており、加熱用の熱源に限っても62%で蒸気を使用されている。

蒸気が産業界で多用されている理由としては、クリーンで安全、そして使い易い、正に理想のエネルギーであるため、具体的には次のような利点がある。

- 蒸気は安定した温度で均一な加熱ができ、生産物の品質向上に役立つ。
  - 蒸気は加熱速度が速く、高い生産性が得られる。
  - 蒸気を使用したあとのドレンを回収・再利用することで、低コスト化・省エネに貢献できる。
- このような蒸気の利点を活かすためには、蒸気

の特性を理解し、正しく蒸気を使用することが必要であるが、実際の蒸気プラントでは誤った使い方がされていることも多く、結果として品質・生産性向上、省エネ、プラントの安定操業の潜在的な阻害要因となっていることもしばしば見られる。

本稿では、飽和蒸気の特性と正しい使い方とを知り、工場・プラントでの生産品質、生産性の向上、省エネルギーならびにプラントの安定操業を実現するスチームエンジニアリングについて紹介する。

## 2. 蒸気の種類

蒸気の種類は、圧力帯と温度帯によって図1のように大別される。

このうち、産業界で加熱源として主に利用されているのが飽和蒸気で、圧力ごとの水の沸点と同じ温度を持つ。冒頭で挙げた蒸気の利点も、この飽和蒸気を想定したものである。

一方、過熱蒸気とは、飽和蒸気よりも高い温度を持つ蒸気の領域であり、主にタービン等の動力として使用される。また、真空蒸気は大気圧以下の圧力で存在する蒸気のことを指す。

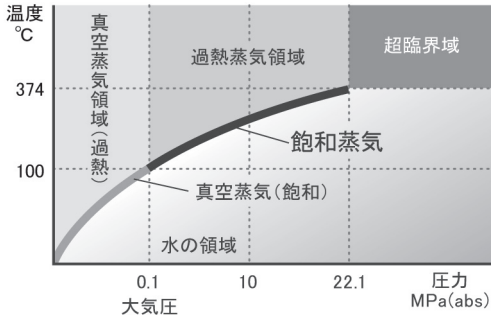


図1 蒸気の種類

ここでは、一般的な工場で加熱源として使用される飽和蒸気について取り上げる。

### 3. 蒸気システムフロー

次に実際の蒸気システムを確認する。図2で示すフローのように、最初にボイラーで水を蒸発することによって蒸気が作られる。そして輸送配管を通り、減圧弁・制御弁で適正な圧力に調整された後、装置に供給される。

装置で生産物の加熱に使用された蒸気は、熱を奪われたことで凝縮し、再び元の水に戻る。ここで発生した凝縮水、すなわちドレンは、スチームトラップから排出され、一般的にドレン回収・排蒸気回収され、水資源・熱資源として再利用される。

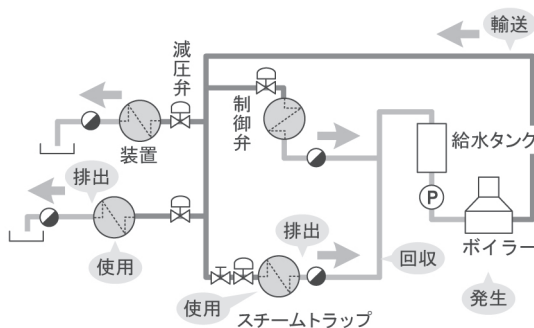


図2 蒸気システムフロー

る。

この蒸気システム全体の最適化を図るためには、蒸気の性質に沿った正しい使い方を知り、発生・輸送、使用・排出、回収のカテゴリごとの改善ポイントを実践していく必要がある。

### 4. 飽和蒸気の特徴と正しい使い方

ここでは飽和蒸気について、その特性と正しい使い方を紹介する。その前に、飽和蒸気の圧力ごとに温度・比体積・熱量等を表にまとめたものが表1の飽和蒸気表である。

表1 飽和蒸気表

圧力 MPa	温度 °C	水の比体積 m <sup>3</sup> /kg		顕熱 kJ/kg		
		v'	v''	h'	r	h''
0.05	81	0.00103	3.240	340	2 305	2 645
0.101	100	0.00104	1.673	419	2 257	2 676
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0.5	152	0.00109	0.3748	640	2 108	2 748
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1.0	180	0.00113	0.1943	763	2 014	2 777
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
2.0	212	0.00118	0.0996	909	1 889	2 798
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

注意：蒸気表は絶対圧力で表示

#### (1) 凝縮

気体である蒸気は、熱を奪われると凝縮し、液体である水に状態変化する。蒸気による加熱は、この凝縮する瞬間に放出される潜熱（後述）を、被加熱物に与えることで行われる。蒸気を持つ潜熱は、他の熱源が与えるエネルギーと比較しても非常に規模が大きく、蒸気はこの大きなエネルギーを、凝縮する一瞬の間に被加熱物に与えることで、素早い加熱を行うことができる。

蒸気を用いて加熱を行う場合、必ず熱を奪われた蒸気が凝縮して凝縮水、すなわちドレンが発生する。水の熱伝導率は、表2に示す通り、伝熱面の素材に比べ非常に低いため、ドレンが装置や配管内に滞留すると、伝熱面にドレン被膜を形成し、大きく加熱効率を低下させる。

表2 物質の熱伝導率 $\lambda$  (W/(m·K))

銅	398
炭素鋼 (0.5C)	53.5
ステンレス鋼	16
水	0.6
空気	0.025

また、ドレンの滞留は、温度ムラなどによる生産物の品質低下、ウォーターハンマー等の安全上の問題につながる恐れもあるため、発生したドレンは迅速かつ確実に排除する必要がある。

この、熱源である蒸気を漏らさずに、迅速にドレンを抜くという目的のために使用されるのがスチームトラップである。またスチームトラップには、同じく生産性を阻害する要因となる空気（後述）を排除するという役割もある。

蒸気中からドレン・エアを確実に排除することが、装置の加熱時間を短縮し生産性の向上につながるため、ドレン・エアを排除するスチームトラップの選定が重要となる。装置には、ドレンを連続的に排出でき、かつエアの排除性能にも優れた装置用フリーフロート式スチームトラップが適している。

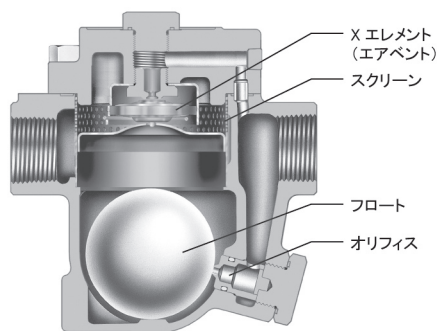


図3 装置用フリーフロート式スチームトラップ断面図の例

## (2) 圧力と温度

飽和蒸気は圧力によって温度が一義的に決まり、その温度は圧力ごとの水の沸点と等しい。そしてその温度は、比例的でこそないが、圧力の上昇に伴って上昇していくという性質がある。

そのため、蒸気使用設備では、生産物の加熱温度に応じて、供給する蒸気の圧力を決定しなければならない。そしてその圧力を安定して供給することで、蒸気の温度を一定に保ち、生産で必要な均一な温度を確保することができる。

したがって、ボイラーでの蒸気発生圧力は、装置が必要とする最も高い圧力に、輸送時の圧損分を考慮した圧力が適正値ということになる。ボイラーを必要以上に高い圧力にしないことで省エネにつながる。

ただし、蒸気の圧力を低下させると比体積が大きくなり、管内流速が上がることによって圧力損失が大きくなることに注意しなければならない。

## (3) 圧力と比体積

飽和蒸気は、圧力によって一義的に比体積も決まるとい性質もある。この蒸気の比体積は、同じ圧力下の飽和水の比体積に比べて非常に大きく、大気圧下では飽和水の約1 600倍にもなる。そして圧力を上昇させると、ほとんど比体積に変化の無い飽和水に対し、飽和蒸気の場合は比体積が著しく小さくなっていく。

蒸気配管径は通常、エロージョン・圧損の影響を抑えるため、管内流速が30m/s以内に収まる範囲で設計する。当然同じ流量の蒸気を流そうとすると、より比体積の大きい低圧の蒸気の方が、より太い配管径が必要になる。そのため、高圧で蒸気を送気することで、配管径を小さくことができ、配管施工費の低減、ならびに適切な保温をしていれば、放熱による蒸気ロスをも低減できる。

つまり、ボイラーで発生された蒸気を減圧して使用する場合は、できる限り装置の直前まで高圧で輸送し、装置の供給直前で、装置が必要とする適正圧力まで減圧すべきである。

## (4) 顕熱と潜熱

そして、同じく圧力によって一義的に決まるものが、蒸気を持つ熱量である。

蒸気を持つ熱量には、顕熱と潜熱、2種類の熱量がある。顕熱 ( $h'$ ) は温度として顕れる熱のことで、温水の場合にも、温水の状態のままでも持つことのできる熱量である。一方の潜熱 ( $r$ ) とは、温度はそのまま飽和水が飽和蒸気に状態変化する際に使用される熱量であり、温度計に現れない

潜んだ熱量である。

そしてこの潜熱は、蒸気の乾き度が100%のとき、つまり蒸気中に水滴が全く含まれていない状態の時に最大となり、この時の値が蒸気表に記されている潜熱量である。このため、乾き度の高い蒸気を使うことは、蒸気の単位質量あたりの保有熱量を増加させ、消費蒸気量を削減することにより省エネにつながる。

また、蒸気による加熱の方式としては、伝熱面を介する間接加熱と、直接蒸気を吹きかけて行う直接加熱とがある。乾き度を向上させることは、間接加熱の場合には、伝熱面に形成されるドレン被膜が薄くなり、加熱効率向上による生産性の向上につながる。また、直接加熱の場合には、製品表面に付着するドレン水滴が減少し、製品の品質向上を実現できる。

この乾き度を維持・向上させる手法としては、まずは輸送配管への適切な保温と、適切なスチームトラップの設置により、ボイラーで発生させた蒸気の乾き度を低下させないことが挙げられる。また、低下した乾き度を向上させるためには、蒸気中の水滴を強制的に分離除去するためにドレンセパレーターを使用する。図4はセパレーターとスチームトラップとが一体となったものであり、図5はこのセパレーター・トラップを内蔵した減圧弁の例である。

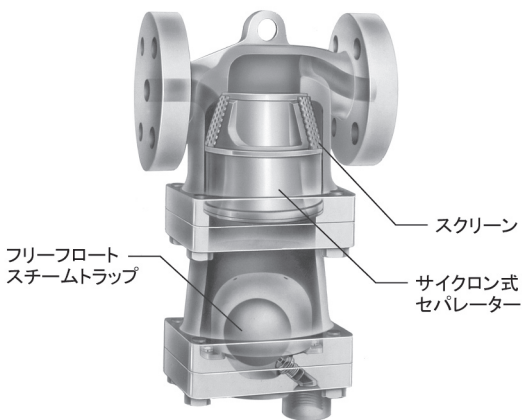


図4 サイクロンセパレーター（トラップ内蔵）内部構造

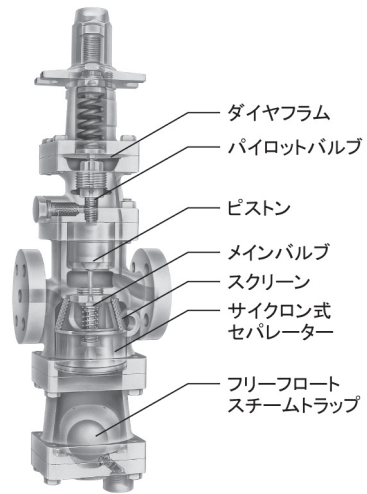


図5 セパレーター・トラップ内蔵減圧弁内部構造

また、この蒸気を持つ熱量は図6のように、圧力が上昇すると顕熱は上昇する一方で、潜熱は低下していく。そのため加熱に潜熱のみを使用する（残る顕熱はドレンとしてスチームトラップから排出される）間接加熱の場合、できるだけ低圧で蒸気を使用することで潜熱を増大させ、消費蒸気量を削減することができる。

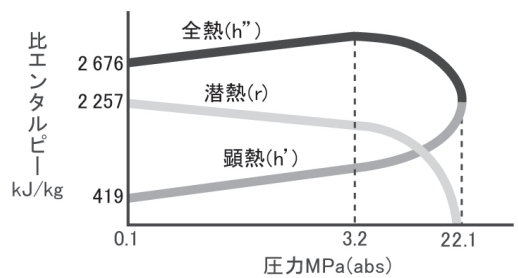


図6 蒸気の圧力と熱量の変化

ただし、飽和蒸気の圧力を低下させると温度が下がるため、生産物の加熱速度が低下する場合があります。ことに注意が必要である。

#### (5) フラッシュ現象

フラッシュ現象とは、圧力が低下した際に、高温のドレンが再蒸発する現象で、この時発生した蒸気がフラッシュ蒸気である。



たとえば、0.5MPaGの飽和温度である159℃のドレンが、出口が大気圧力のスチームトラップから排出された場合を考える。出口側は大気圧で、このときの飽和温度は100℃であるため、スチームトラップの入口側と出口側とで、それぞれ顕熱として存在できる熱量の上限に59℃分の差が生じる。この熱量の差があるために、スチームトラップから排出された高温ドレンの顕熱の一部が潜熱に変化し、それに応じたフラッシュ蒸気が生じる。

このとき、再蒸発前のドレンのうち、質量または熱量換算で何%が再蒸発したかを示すのがフラッシュ率であり、次の式で求められる。

$$\text{フラッシュ率(\%)} = \frac{\text{高圧側顕熱} - \text{低圧側顕熱}}{\text{低圧側潜熱}} \times 100$$

スチームトラップは、出口側よりも入口側の圧力が高くなければドレンを排出することができないため、ドレンを排出している限り、必ずこのようなフラッシュ現象が生じる。また、フラッシュ蒸気の比体積はドレンの比体積よりも著しく大きいため、再蒸発前のドレンに比べて全体の体積が大きく膨張する。

このため、注意しなければならないのが、まず出口大気開放の場合は、トラップの漏れ不良との混同である。トラップの入出口の圧力差が大きくなるほど、またドレン量が多くなるほど、フラッシュ蒸気量が増え、漏れ不良とフラッシュ蒸気との識別は困難になる。その客観的な識別方法としては、トラップの良否が判定でき、かつ蒸気漏れ量を定量化できる精密診断器を用いる方法がある。

また、トラップ出口が回収管に接続されている場合は、回収管をドレンと蒸気の二相流で設計する必要がある。回収管内には必ずドレンとフラッシュ蒸気の二相流が発生しているため、ドレンの单相流で設計すると、管内流速が上昇し、著しい圧力損失・配管減肉の原因となる。

#### (6) 分圧の法則

ある圧力の容器内に二種類以上の気体が混合して存在しているとき、この容器全体の圧力は、それぞれの気体の圧力の和になり、これを分圧の法則という。逆の見方をすれば、その容器内の圧力は、それぞれの気体に分散してかかるということ

である。

これを蒸気と空気とで考える。内圧0.1MPaGの装置内に、蒸気だけが入っている場合と、空気が容積で20%混合した場合とを比較すると、蒸気だけの場合の蒸気圧力は、当然装置の内圧と等しい0.1MPaG、飽和温度は120.2℃である。これに対して空気が混入した場合は、分圧の法則により圧力が蒸気と空気とに分散してかかるため、蒸気の圧力は0.06MPaGまで低下する。これにより、蒸気の温度は空気の混入によって（それぞれの圧力の飽和温度である）120.2℃から113.5℃にまで低下することになる。この飽和蒸気への空気の混合率と、見かけ上の圧力の飽和温度に対する実際の蒸気の温度との関係を、表3に示す。

表3 空気混合率と蒸気温度 [℃]

見かけの圧力 [MPaG] 空気混合率 (容積) [%]	0.1	0.2	0.4	0.8	備考
0	120.2	133.5	151.8	175.4	飽和温度
10	117.1	130.1	148.0	171.0	—
20	113.5	126.2	143.7	166.1	—
40	105.0	117.1	133.6	154.8	—

蒸気使用装置には、運転停止中に内圧が下がることで、ほぼ確実に空気が混入する。空気混入により蒸気の温度が低下すると、立ち上げに時間がかかり、先に示した空気の熱伝導率の低さと併せて、加熱時間が伸びる要因となる。そこで、この混入した空気をいかに迅速、かつ確実に抜くかが、生産性向上の鍵となる。

空気の排除方法は、空気の温度によって対処が異なる。立ち上げ初期の低温のエアは蒸気よりも比重が重く、装置下部に滞留するため、上述のエア排除性能の高いスチームトラップを用いて下部から抜くことになる。

しかし、蒸気に温められた温度の高い空気は、蒸気よりも比重が軽くなり、装置上部に滞留するようになる。そのため、初期に抜ききれず高温になった空気は、装置上部に図7のような蒸気用エアイベントを設置して抜く必要がある。

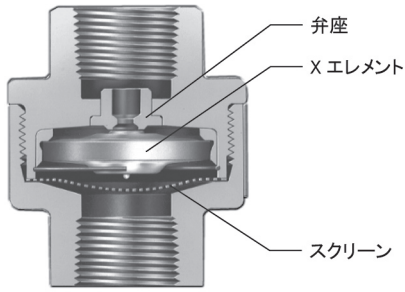


図7 蒸気用エアベント断面図

## 5. おわりに

蒸気を使用する工場では、生産物の品質、生産性、安全性の向上、省エネによるコスト低減等、抱える課題が多い。本稿で紹介した蒸気の特性と正しい使い方の改善技術は、これら蒸気使用工場の課題達成に必ず有効と確信している。