

# 蒸留塔へのヒートポンプ導入実績

松尾 洋志 (まつお ひろし) 木村化工機株式会社 エンジニアリング事業部技術部 部長

要約 蒸留工程への産業用ヒートポンプの導入事例を説明する。本件は、日本で初めての事例であり、世界的にも殆ど前例が無い、極めて先進的な事例である。また、蒸留塔にヒートポンプを導入した場合と、MVRを導入した場合の違いについても説明する。蒸留工程は、典型的なエネルギー多消費工程であり、こうした省エネ手法の普及が望まれる。

## 1. はじめに

名糖産業株式会社 八王子工場殿では、既設のメタノール蒸留塔の老朽化により、設備の更新が必要であった。また、このメタノール蒸留塔は、工場全体のボイラ蒸気消費量の約 50%を占める程であり、省エネルギー化が必須であった。そこで、高温水HPを用いた省エネルギー型の蒸留装置を計画するとともに、三菱 UFJ リース株式会社殿と協力し、環境省が所管する ASSET 事業の補助金制度を活用して、初期投資コストを大幅に軽減させる提案を行い、2017年3月より省エネルギー型メタノール蒸留装置の操業を開始している。

本稿では、メタノール蒸留塔に高温水 HP を適用させるポイントを説明するとともに、既設蒸留装置とのランニングコスト比較を紹介する。また、更に省エネルギー性を大幅に向上させることが出来る MVR 型ハイブリッド蒸留システムの導入実績についても紹介する。

## 2. 製造プロセスについて

八王子工場殿では、添加物用途のデキストランを生産している。本工場の発酵設備で製造したデキストラン水溶液にメタノールを混合することでデキストランが沈殿析出する。沈殿させたデキストランはろ過、精製され、乾燥機で粉体製品として製造される。このとき、沈殿デキストランの上清廃液には水分やデキストラン由来の不純物とともにメタノールが多く含まれており、メタノール蒸留塔にて、その廃液からメタノールを回収し再利用する。本製造プロセスにおいて、



図1 HP型メタノール蒸留設備(右側奥が新設)

ボイラ蒸気を消費するのは、①発酵槽の滅菌蒸気、②メタノール蒸留塔の加熱蒸気、③乾燥機の加熱蒸気があるが、メタノール蒸留塔での加熱蒸気消費量が支配的となっている。その他の加熱蒸気の消費源としては、発酵設備の滅菌時に1バッチ当たり数時間程度のピークがある他、デキストラン製品を乾燥機で粉体状にするときの熱源が挙げられる。

## 3. HP型メタノール蒸留装置フロー

### 3-1 蒸留プロセスの説明

蒸留塔への供給液であるメタノール廃液は、約 50wt%のメタノール、数%のデキストラン由来の糖成分を含有しており、残りの成分は水となる。このメタノール廃液が蒸留塔にて蒸留精製されることにより、

低沸成分であるメタノールが蒸留塔の塔頂より留出し、99.6wt%以上のメタノール製品を得る。また、高沸成分である水と溶解固形分である糖成分は蒸留塔の塔底より缶出液として回収する。この糖液を含む缶出液に含有するメタノール濃度を 0.1wt%以下とすることで本蒸留塔でのメタノール回収率を高く維持し、新液としてのメタノール購入費用を抑えることが出来る。

### 3-2 HP型メタノール蒸留装置の説明

既設のメタノール蒸留塔は、大気圧操作であったが、HP による熱回収を検討する場合には、蒸留塔の操作温度を調整する必要がある。大気圧操作では、蒸留塔の塔頂温度は 65℃、塔底温度は 100℃となり、高温水型 HP であっても、高温側温水温度は 90℃が最大となるため、リボイラーの熱源として使用することが出来ない。そこで、HP 型メタノール蒸留塔は、真空操作として蒸留塔の塔底温度を 83℃とした。一方、塔頂からのメタノール蒸気の凝縮温度は、44℃となるため、HP の冷熱源温度としては熱回収するために十分な温度を有している設計とした。蒸留操作は、単純な蒸発とは異なり、濃度コントロールを必要とする。本件の蒸留システムでは、塔頂から留出するメタノールの純度を維持するとともに、塔底缶出液中のメタノール濃度を低く抑える必要がある。高温水 HP は、温水出口温度を独自制御するユニットであり、蒸留塔の濃度コントロール用として、HP だけでは対応できない可能性があるため、製品メタノール濃度調整用として加熱用スチームを投入するバランスとなるよう設計した。その際、リボイラーで必要となる全加熱量の 75%を HP で常に一定に加熱し、残りの 25%を加熱用スチームとしてメタノール濃度を調整する設計とした。

また、高温水 HP は、熱回収効率を最大限引き出すために、運転負荷を 100%で維持し、かつ連続運転中には発停しない運転方法とした。このとき、高温水 HP の熱回収効率は、COP=3.21 として設計した。

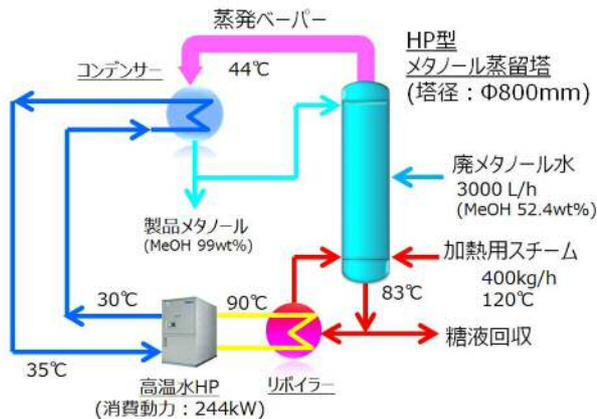


図2 HP型メタノール蒸留装置フロー図

## 4. ランニングコストの比較

表1に、2013～2015年度の顧客工場全体でのエネルギー消費量について示す。また、表2には、蒸留塔稼働時間から推定した既設蒸留塔のエネルギー消費量を計算し、表に示した。この際、ラック上配管などの放熱を考慮し、ボイラ効率を 70%と推定して計算した。その結果、工場全体でのガス使用量の約 50～60%を占めており、この工場でのメタノール蒸留塔のエネルギー消費量が支配的であることが分かる。そこで、試運転結果をもとに HP 型メタノール蒸留装置の年間のエネルギー消費量を推定した。その結果、高温水 HP の電気使用量は増加するが、ガス使用量が大幅に低減可能となり、ランニングコストは年間で 30,000k¥～38,000k¥削減可能であることが分かった。

表1 工場全体でのエネルギー消費量(実測値)

項目	2013年度	2014年度	2015年度
電気使用量[kWh/年]	4,707,636	4,955,110	5,204,046
ガス使用量[m <sup>3</sup> /年]	1,218,139	1,431,831	1,356,884
蒸留塔稼働時間[h/年]	4,368	5,171	4,186

表2 既設蒸留装置のエネルギー消費量(ボイラ効率70%推定)

項目	2013年度	2014年度	2015年度
電気使用量[kWh/年]	43,680	51,710	41,860
ガス使用量[m <sup>3</sup> /年]	769,202	910,609	737,152

表3 HP型蒸留装置のエネルギー消費量(ボイラ効率70%推定)

項目	2013年度	2014年度	2015年度
電気使用量[kWh/年]	1,092,000	1,292,750	1,046,500
ガス使用量[m <sup>3</sup> /年]	177,850	210,545	170,440

表4 HP型蒸留装置導入後のメリット計算(推定値)

項目	2013年度	2014年度	2015年度
電気使用量[kWh/年]	+1,048,320	+1,241,040	+1,004,640
ガス使用量[m <sup>3</sup> /年]	-591,352	-700,064	-566,712
ランニングコスト[k円/年]	32,255	38,185	30,911

表1に、名糖産業殿よりご提供いただいた工場全体での各年度のエネルギー消費量の実績データを示す。

表2には既設蒸留装置について、その稼働時間より、ボイラ効率を70%と仮定した場合のエネルギー消費量を算出した。

表3には、HP型蒸留装置を導入したと仮定した場合のHPを含むエネルギー消費量を算出した。

以上の算出結果より、既設の蒸留装置をHP型蒸留

装置に更新したと仮定した場合の各年度のエネルギー消費量がどの程度削減できるかを試算した結果を表 4 に示す。

既設蒸留装置の運転実績と HP 型蒸留装置の原油換算エネルギー使用量の設計条件での比較を行ったところ、約 45%のランニングコストを低減可能となることが分かる。

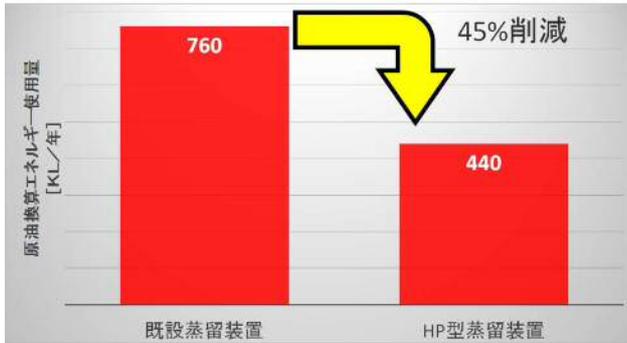


図 3 既設運転実績と HP 型蒸留設計条件との比較

## 5. HP 型メタノール蒸留装置試運転結果

2017 年 2 月に実施した HP 型メタノール蒸留装置の試運転結果について以下に紹介する。

### 5-1 スタートアップについて

スタートアップにて、冷水と温水の温度調整が不十分な場合、冷水側の温度が低下し HP は温度異常低にて停止した。そのため、スタートアップ時には、供給液を蒸留塔内に張り込んだのちに、全還流運転にて加熱用スチームを投入し、冷水側が 20~30℃程度、温水側が 40~50℃程度に上昇するまで待つ必要があった。

### 5-2 蒸留分離性能について

蒸留分離性能に関する運転データを表 5 に示す。仕様値は、既設蒸留装置での運転条件を示しており、HP 型メタノール蒸留装置の運転結果は既設をはるかに上回る分離性能を発揮した。

表 5 メタノール分離性能に関する運転データ

項目	既設仕様値	運転データ
供給液流量	3000L/h	3000L/h
供給液メタノール濃度	52.38wt%	43.98wt%
塔頂留出液メタノール濃度	99.6wt%	99.97wt%
塔底缶出液メタノール濃度	0.1wt%	0.02wt%
HP の COP	—	3.78

## 5-3 HP について

HP は、90℃の高温水を供給可能とする神戸製鋼所製 HEM-HR90T2(図 4 参照)を採用した。運転中の HP の負荷は常に 100%ロードを維持しており、蒸留塔の濃度調整は、加熱用スチームで制御した。高温水の流量、HP 入口出口温度より算出した加熱量と、HP の消費電力量実測値から、HP 単体での COP は計画値である 3.21 を大幅に上回り、3.78 まで到達していた。これは、リボイラーの伝熱面積に運転調整用の裕度を見た結果、高温水温度が設計値の 90℃ではなく、86~87℃で推移したことに起因している。



図 4 ヒートポンプ外観 (HEM-HR90T2)

## 5-4 HP 型蒸留装置の操作性について

メタノール廃液には、数%の糖が溶解しているため、回収部を泡鍾型段塔とし、濃縮部は規則充填物を選定した。蒸留分離操作の裕度を考慮して、規則充填物の HETP はある程度の余裕を持った設計とした。その結果、HP 型蒸留装置の操作性は、既存の一般的な蒸留塔と何ら変わることなく運転可能であった。

また、運転負荷を下げて加熱用蒸気を停止させ、HP のみでの運転操作を試みたところ、所定の蒸留分離性能を発揮することができた。実際の操業に当たっては、メタノール廃液が廃液タンクに溜まるとメタノール蒸留塔を運転するという運転パターンであるため、年間の稼働時間は 5,000 時間程度となっている。そこで、運転負荷を下げて、HP のみで運転可能であれば、更に省エネルギー性が高まると推定される。

## 6. MVR 型ハイブリッド蒸留装置

HP 型蒸留装置よりもさらに省エネルギー性が高くなる MVR 型ハイブリッド蒸留装置を紹介する。

本装置はプラスチック製造で使用する高価な高沸点の溶剤を蒸留精製回収し、再利用するためのシステムに適用した。MVR 型ハイブリッド蒸留装置の概略フローを図 5 に示す。

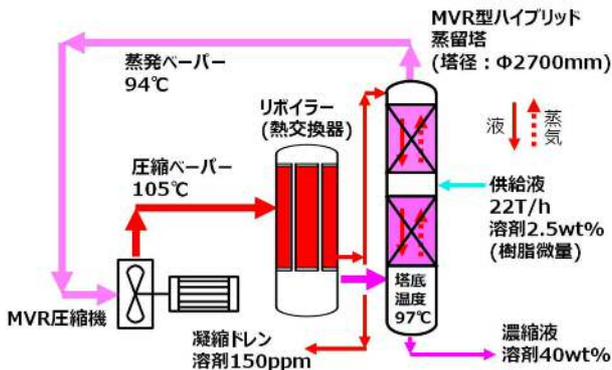


図5 MVR型ハイブリッド蒸留装置のフロー図

### 6-1 MVR型ハイブリッド蒸留装置の導入事例紹介

高沸点の溶剤回収プロセスにMVR型ハイブリッド蒸留装置を導入し、大幅なランニングコスト低減を実現した導入事例を紹介する。

使用済み廃液である処理液は、約2.5wt%の高沸溶剤と数百ppmの樹脂成分、残りは水となる組成である。

この処理液22Ton/hを、MVR型ハイブリッド蒸留装置に供給し、水を蒸留精製して蒸留塔の塔頂より回収する。この時、回収水中に含有する高沸点成分を150ppm以下として蒸留塔を設計した。また、蒸留塔の塔底よりは、高沸溶剤を40wt%まで濃縮し、さらに後段の蒸留塔で精製することで、98%以上の高価な高沸溶剤を回収するシステムを実現させている。

本装置は、真空下で操作する設計とし、塔頂からの飽和温度が94°Cとなる水蒸気ベーパーをMVR圧縮機で圧縮し、105°Cの飽和温度まで昇圧させることにより、リボイラーの熱源として再利用するMVR型ハイブリッド蒸留装置である。ここでリボイラーのプロセス側液温度は、97°Cとなるよう操作圧力と高沸溶剤濃度を設計することで、圧縮ベーパー温度105°Cを熱源としてリボイラーでの熱交換を可能としている。

ここで、MVR圧縮機の消費エネルギーは、ベーパーを飽和状態で11°C圧縮昇温するために必要となる機械エネルギー分が良いため、塔頂ベーパーが保有する潜熱エネルギーに比して非常に小さな仕事で済むことから画期的な省エネルギー性が実現可能となる。

通常の蒸留塔では、塔頂ベーパーをコンデンサーにて全量凝縮させているために、潜熱エネルギーを全量捨てているということになるが、MVR型ハイブリッド蒸留システムでは、この潜熱エネルギーを捨てずに全て自己の蒸発エネルギーとして再利用可能としている点において画期的な省エネルギー性を実現している。

本プロジェクトでMVR型ハイブリッド蒸留装置を導入する経緯としては、既設の4重効用型蒸留システムで操業されており、通常よりは省エネルギーシステムであったが、更に省エネルギー性の高いシステムの

導入を希望されていた。既設の4重効用型蒸留システムでも最終効用缶の塔頂ベーパーはコンデンサーで凝縮させることにより、そのエネルギーは捨てられていると言える。そこで、MVR型ハイブリッド蒸留装置の省エネルギー性について提案し、採用されるに至った。

図6に、4重効用蒸留装置とMVR型ハイブリッド蒸留装置のランニングコストを比較する。その結果、MVR型に更新した場合、年間約2.1億円のランニングコスト低減に成功していることが分かる。

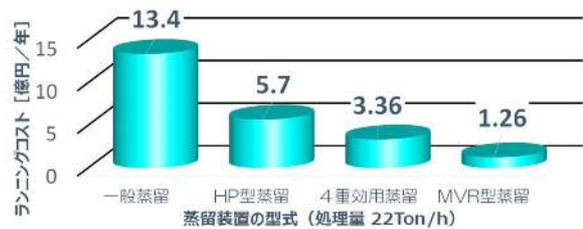


図6 各蒸発装置のランニングコスト比較

### 6-2 MVR型とHP型の比較

図6に、一般の蒸留とHP型蒸留のランニングコストを比較のために示している。

HP型蒸留は、一般の蒸留に比較して、ランニングコストを半減させていることが分かる。同様に、MVR型蒸留では、10分の1以下に低減できていることが分かる。以上の比較からも分かるように、MVR型ハイブリッド蒸留システムを適用可能である場合には、画期的な省エネルギー性を実現することが可能となる。

### 6-1 MVR型とHP型の選定について

次に、MVR型とHP型のそれぞれの特徴を解説するとともに、如何にして適切にシステムを選定するかを紹介する。

MVR型ハイブリッド蒸留システムは、自己の蒸発ベーパーを熱媒として直接利用する直接熱媒型HPシステムであると言える。そのため、圧縮機は蒸留塔の塔頂ベーパーを直接圧縮することになる。圧縮機メーカーでは、水蒸気のエンジニアリングは得意であるが、その他の流体の場合には、設計標準を外れるため、適用困難なケースがある。従って、MVR型が得意な処理液としては、水と高沸点溶剤というような組み合わせで、蒸留塔の塔頂より水蒸気ベーパーが発生する場合には、その適用が要素技術として容易となる。

蒸留塔の塔頂と塔底の温度差という観点では、MVR圧縮機の圧縮度について経済的な制限があると言える。MVR圧縮機の基数を増やせば、理論的には何度でも

圧縮可能であるが、MVR 圧縮機が高価であり、設置スペースも大きくなることから、台数が増えるごとに経済的最適点から外れることとなる。実質的には、1～3 台までが、適当であるといえる。

一方、HP 型は、蒸留塔の塔頂と塔底の温度差の許容範囲は広くなると言える。HP 型メタノール蒸留塔の実績でも、その温度差は、40℃程度であり様々な蒸留システムに適用できる可能性を秘めている。しかしながら、大型の HP であってもその交換熱量には限界があり、90℃高温水型 HP でも 1 台当たり 350～400kW の加熱量であり、小規模な蒸留塔の省エネに適用性が高いと言える。

表 6 MVR 型と HP 型の特徴 (蒸留に対する適用)

項目	MVR 型	HP 型
塔頂ベーパー	水系	全て対応
塔頂と塔底の温度差	5～7℃以下	40℃以下
処理量	大	小

## 7.おわりに

高温水 HP を蒸留塔の省エネに適用した実績は、おそらく日本で初めてではないかと推察する。今回、実際のプロセスの省エネに HP を使用した経験から、まだまだ他のプロセスにも適用できる可能性を秘めていると感じた。

今後は、本件のプロジェクトを好例として様々な蒸留塔の省エネ化に注力してゆきたい。

最後に、本プロジェクト実施に当たり、ご協力いただきました名糖産業株式会社様、三菱UFJリース株式会社様にはこの場を借りて御礼申し上げます。