

## 木村化工機の MVR を用いた蒸留システムの紹介

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

中西 俊成 (なかにし としなり) 木村化工機株式会社 エンジニアリング事業部技術部 主事

### 要約

MVR の省エネルギー性は非常に高く、成績係数を COP=40 までの設計が可能である。木村化工機の MVR 型蒸発装置の納入実績は、化学、石油、繊維、食品、医薬、医療機器等の分野において 36 年間で約 45 基にのぼる。MVR 型蒸発装置の省エネルギー性が優れている理由は、従来型では廃熱として棄てられている蒸発潜熱を 100% 再利用可能としている点にある。蒸発能力が約 16 ton/h の MVR 型蒸発装置の適用事例を従来型 4 重効用と比較すると、ランニングコストの削減額は年間で 1 億円以上になる。MVR は条件が合えば蒸留プロセスにも適用可能で、蒸留プロセスはその性質上エネルギー多消費型であるため、MVR が適用されたときの省エネルギー効果は大きい。その一例として、処理量が 22 ton/h の溶剤回収工程で MVR を適用した蒸留システムが、既設の従来型 4 重効用に対し、年間約 2 億円以上のランニングコストの削減を実現した実績を紹介する。

### 1. はじめに

MVR は Mechanical Vapor Recompression の略称で、自己蒸気機械圧縮型を意味し、蒸発装置の省エネルギー化技術として多く採用される。MVR の省エネルギー性は非常に高く、例えばヒートポンプ関連で取り扱われる成績係数 (COP) で表すと、COP=40 までの設計が可能である。

本稿では、MVR に関する当社の実績を紹介するとともに、MVR についての簡単な説明をした上で、エネルギー多消費型の装置である蒸留プロセスに MVR を適用した例をランニングコスト比較も含め紹介する。

### 2. 当社の MVR 型蒸発装置の歴史

木村化工機が MVR 型蒸発装置を最初に納入したのは 1980 年で、その 1 号機は食品分野向けであった。

蒸気圧縮機には、その当時主流であったルーツブロワを採用した。2 号機もルーツブロワを採用したが、1982 年に納入した 3 号機では、さらに効率の良い斜流のターボブロワを採用した。

それ以降では、ターボブロワを採用した MVR 型蒸発装置を多く納入しており、化学、石油、繊維、食品、医薬等の分野で納入実績を伸ばした。処理液として、グルコース、フラクトース、マルトース、CSL、酸浴液、ラクタム、グルタミン酸、苛性ソーダ、溶剤、ミルク等が挙げられる。

MVR 型蒸発装置に初めてファンを採用したのは 2006 年で、その後ファンの高性能化と低

価格化により、近年はファンを採用する頻度が多くなる傾向にある。

1980 年から現在までの 36 年間で、合計約 45 基の MVR を納入しており、蒸発能力は医薬品向けの 1.85 ton/h から食品向け等の 30 ton/h で、その中でも 10 ton/h 以上のものが多い。最近では蒸留プロセスに MVR を導入した MVR 型ハイブリッド蒸留システムも数基納入している。MVR を適用して省エネルギー化を実現させた蒸留システムの事例については、次項で詳しく述べる。その他、蒸留塔や溶剤吸着塔の塔頂から上昇するベーパーから、蒸気圧縮機を使用して、蒸発潜熱を間接的に熱回収して他のプロセスの加熱源として利用するものもあり、数基の納入実績がある。

処理液	実績	蒸発能力
	基	ton/h
糖液	15	4~30
CSL	4	6~28.5
飲料	1	4.5
医薬品	1	1.85
ミルク	3	12~30
溶剤	11	3~30
ラクタム	3	8~13
苛性ソーダ*	1	10
その他	6	4.5~30
合計	45	1.85~30

表 1 MVR 型蒸発装置の納入実績

### 3. MVR について

MVR 型蒸発装置は、ヒータからのベーパーを圧縮機で昇圧・昇温し、自己のヒータの加熱源とする蒸発装置で、究極の省エネルギー型の蒸発装置といえる。

例えば多重効用型と比較すると、その省エネルギー効果は、40 重効用型にも匹敵する。

3.1 MVR で大幅に省エネルギー化できる理由 MVR 型蒸発装置がこのように省エネルギーとなる理由は、従来型では廃熱として棄てられている最終効用缶からのベーパーの蒸発潜熱を MVR では圧縮機で昇圧・昇温して自らのプロセスに再利用しているからである。また、自らの蒸発ベーパーを加熱源としているため、定常運転時には、加熱用の蒸気及び冷却水がほとんど不要となる。圧縮機でベーパーを圧縮するための電力が必要になるが、圧縮に必要なエネルギー（断熱圧縮動力）は、蒸発に必要な蒸発潜熱に比べて非常に小さいため、エネルギー消費量を大幅に低減できる。

#### 3.2 MVR の省エネルギー性能

蒸発能力が 16.3 ton/h である単効用の MVR 型蒸発装置の簡易フローを図 1 に示す。このフローでは、ヒータに供給液が供給され、ヒータで蒸発し発生したベーパーがファンで昇圧・昇温されてヒータの加熱源として利用されているフローを表現している。

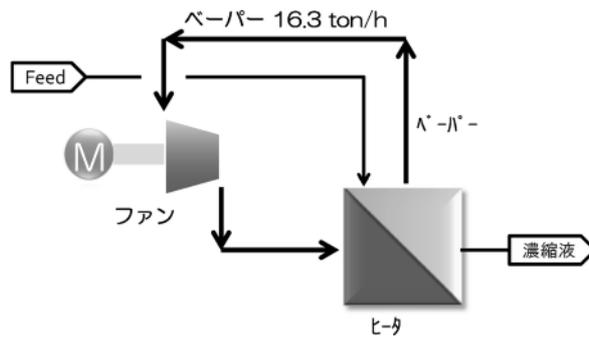


図1 MVR 型蒸発装置の簡易フロー

このときのユーティリティ使用量を従来型単効用および4重効用と比較して表2に示す。前述のとおりMVRは、安定運転時には加熱用の蒸気は不要になるが、系内圧力等を安定させるために通常少し蒸気を投入する。そのため、表2の当欄に(0.1)と記載した。電気はファンとポンプの消費電力の合計を記載し、冷却水は冷却塔の循環水で入口32℃、出口38℃として計算した。伝熱面積は、ヒータとコンデンサの伝熱面積の合計を記載した。省エネルギー性能の評価については、ヒートポンプでよく使用されている成績係数(COP)で表現し、表2に記載した。従来型単効用では、COP=0.97であるが、4重効用ではCOP=3.6に改善され、MVR型ではCOP=21と桁違いに改善されることが分かる。このようにMVRを採用した場合には省エネルギー性は極めて高くなるが、伝熱面積が大きくなりまた高価な購入品であるファンがあるため、イニシャルコストは高くなる。次項ではランニングコストメリットについて述べる。

表2 ユーティリティ使用量の比較

	MVR型	従来型 4重効用	従来型 単効用
スチーム (ton/h)	(0.1)	4.5	16.7
電気 (kW)	423	21	21
冷却水 (ton/h)	35	450	1,560
伝熱面積 (m <sup>2</sup> )	2,500	1420	1,070
成績係数 COP(-)	21	3.6	0.97

### 3.3 MVR のランニングコストメリット

仮に年間稼働時間が8,000 h/year、スチーム単価が5,000 円/ton、電気単価が13 円/kWh、冷却水単価が0.3 円/ton であるとして計算した各ユーティリティのコストを表3に示す。差額については、従来型4重効用と比較した数値を記載している。即ち、前記の単価で計算すると、MVRのランニングコストは、従来型4重効用に比べて、年間1億円以上のコストメリットがあることが判る。

表3 ランニングコストの比較

	MVR	従来型 4重効用	従来型 単効用
スチーム (千円/年)	4,000	180,000	688,000
電気 (千円/年)	43,992	2,184	2,184
冷却水 (千円/年)	84	1,080	3,744
合計 (千円/年)	48,076	183,264	673,928
差額 (千円/年)	-135,188	0	490,664

#### 4. MVR の蒸留プロセスへの適用

MVR は、設計条件が適合すれば蒸留プロセスにも適用可能である。蒸留プロセスは、その性質上エネルギー多消費型のプロセスであるため、これに MVR を適用できれば消費エネルギーを大きく削減することができ、非常に省エネルギー効果は大きい。

まず、最初になぜ蒸留プロセスがエネルギー多消費型なのかについて説明した上で、MVR を蒸留プロセスに適用した事例を紹介する。

##### 4.1 蒸留プロセスについて

蒸留は、混合液を溶液成分の沸点温度差で分離するという最も古くから使われている単位操作のひとつである。蒸留塔 (図2) の中では上昇する蒸気と下降する液が直接接触しており、沸点温度の低い成分の濃度が蒸気中で増し、沸点温度の高い成分の濃度が液中で増す、という単位操作が塔の高さ方向で連続的に行われる。この蒸気と液を発生させるために通常は、リボイラ (塔底の液を加熱して蒸気を発生させる役割) とコンデンサ (塔頂の蒸気を冷却して液を発生させる役割) が必要になる。

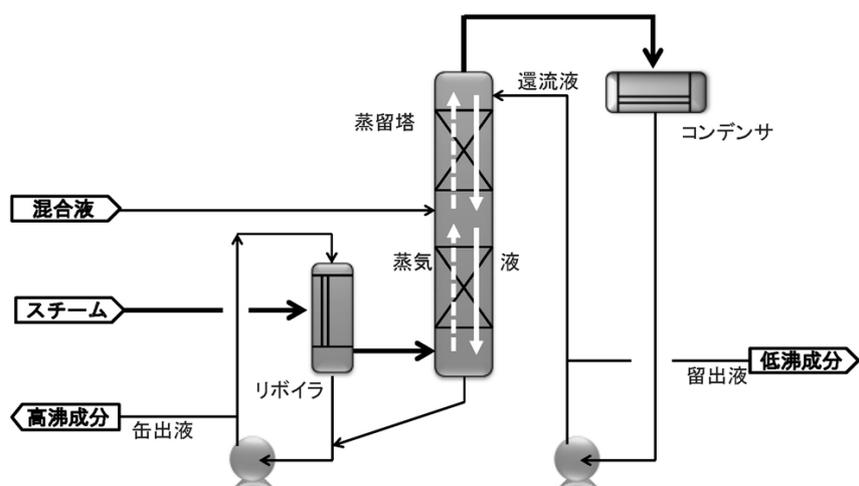


図2 蒸留プロセスのフロー

## 4.2 蒸留プロセスの消費エネルギー

蒸留プロセスでは、図 2 に示したように塔頂から出る蒸気がコンデンサで凝縮して液になり、その一部は留出液として低沸点製品が系外に出され、一部は還流液として蒸留塔の塔頂に戻される。この還流量の留出量に対する比が還流比と呼ばれ、還流比を操作することにより製品の濃度を制御することができる。還流比を大きくするに従って製品の濃度が高くなるが、塔内の蒸気流量が増加するため、リボイラに供給するスチームの量も増加する。分離に要求される還流比は分離する液の成分によっても変わる。留出液と缶出液の沸点温度差が小さいほど分離が難しくなるため、より大きな還流比が要求される。

このように蒸留操作では、分離性能を満足するために、既に製品濃度まで分離された液を蒸留塔に戻す必要がある。その分リボイラでの蒸発量は増加することから、蒸留プロセスは、消費エネルギーの大きいプロセスであると言える。

## 4.3 蒸留プロセスの省エネルギー化

前述のとおり、蒸留プロセスはエネルギーを大量に消費するため、省エネルギー化によるメリットは大きい。木村化工機は、蒸留プロセスに MVR を適用することで省エネルギー化を実現しており、このシステムを当社では、MVR 型ハイブリッド蒸留システムと呼んでいる。

MVR 型ハイブリッド蒸留システム概念図を図 3 に示す。蒸留塔の塔頂から上昇するベーパーを圧縮機で昇圧（昇温）し、塔底のリボイラの加熱源として利用している。通常はコンデンサで排熱として捨てられている蒸発潜熱を 100% 利用可能になるため、省エネルギー性の高い蒸留システムを実現している。また、自らの蒸発ベーパーを昇温・昇圧してリボイラの加熱源としているため、定常運転時には、加熱用蒸気及び冷却水がほとんど不要となる。従って、従来型の蒸留プロセスに比べ、大幅にランニングコストを低減することが可能となる。

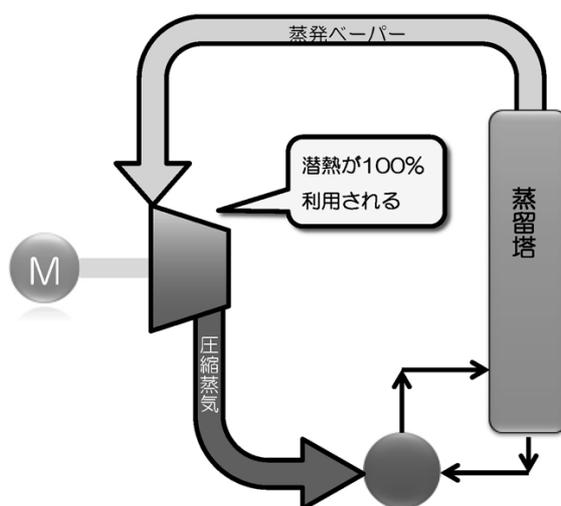


図 3 MVR 型ハイブリッド蒸留システム概念図

#### 4.4 MVR の蒸留プロセスへの適用事例

溶剤回収工程に適用した MVR 型ハイブリッド蒸留システムの概略フローを図 4 に示す。これは溶剤を 2.5 wt% 含有する水溶液から水を回収して高沸点溶剤を濃縮する蒸留システムで、塔頂から上昇するベーパーを 2 段圧縮で昇圧・昇温し、蒸留塔のリボイラの加熱源にした装置である。圧縮機は定格 400 kW のファンを 2 基使用し、蒸留塔内部には圧力損失の小さい規則充填物を採用している。

4.5 MVR 型ハイブリッド蒸留システムのランニングコストメリット 溶剤回収工程に適用した MVR 型ハイブリッド蒸留システムのランニングコストメリットを既設の従来型 4 重効用蒸留システムと比較して表 4 に示す。

なお、既設の蒸留システムが次工程の蒸留塔から上昇する塔頂ベーパーを使用する 4 重効用で構成されているため、図 4 の工程に次工程の蒸留塔に関わるユーティリティも含め、条件を合わせた内容にして比較した。ランニングコストメリット計算における年間稼働時間やユーティリティ単価については前述と同様とした。

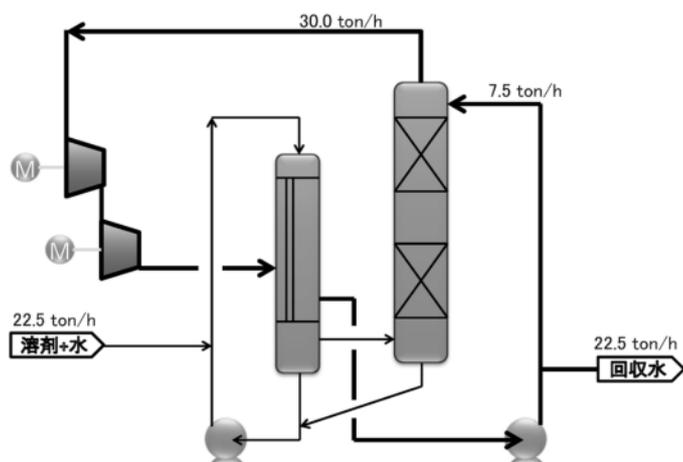


図 4 MVR 型ハイブリッド蒸留システムの概略フロー

既設の従来型 4 重効用は、既に高い省エネルギー性を有する設備として設計され、操業されていた。しかしながら、MVR 型ハイブリッド蒸留システムは、更にこの既設の従来型 4 重効用に対し、年間で約 2 億 6 千万円のランニングコストを削減する省エネルギー効果を実現した。

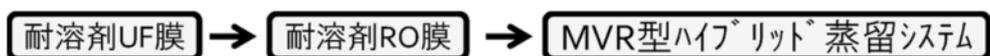
表4 MVR 型ハイブリッド蒸留システムのランニングコストメリット

	MVR	従来型 4重効用
スチーム (ton/h)	2.0	9.7
電気 (kW)	576	108.5
冷却水 (ton/h)	253	673
スチーム (千円/年)	80,000	388,000
電気 (千円/年)	59,904	11,284
冷却水 (千円/年)	607	1,615
合計 (千円/年)	140,511	400,899
差額 (千円/年)	-260,388	0

4.6 MVR 型ハイブリッド蒸留システムの技術的考察 MVR 型ハイブリッド蒸留システムは、MVR 型蒸発装置とは異なり、蒸発量だけではなく、蒸留分離性能をも同時にコントロールする必要がある。蒸留分離性能をコントロールする場合には、蒸留塔の塔頂還流比を制御する必要がある。しかしながら、この塔頂還流比が変わると、圧縮機の性能曲線上の操作ポイントが変わるため、還流比の調整幅を考慮した圧縮機の選定とリボイラの伝熱面積の裕度を検討する必要がある。つまり、圧縮機の昇圧・風量の裕度とリボイラの伝熱面積の裕度により還流比を調整するということである。

木村化工機は、蒸留技術と MVR 技術に関する両方の経験と実績を持ち合わせることで、蒸留プロセスに MVR を適用することが可能になった。そして現在、更なる省エネルギーに様々な技術で取り組んでいる。例えば膜分離技術の導入がその一例である。

その実施例として下記のようなフローを実現している。



#### 膜とMVRの総合エンジニアリング

希薄な溶剤中に樹脂成分が溶解しているプロセスにおいて、膜濃縮を検討する場合には、プロセス中から樹脂成分をまず除去する必要がある。樹脂成分を含有する白濁したプロセス液は、UF 膜によりろ過されて清澄な希薄溶剤水溶液とすることで RO 膜にて濃縮することが可能となる。また、後段の MVR 型ハイブリッド蒸留システムでは、溶解していた樹脂成分がスケーリングとしてリボイラの伝熱管内に付着し、圧縮機の消費電力が増加することでランニングコストが押し上げられる原因となっていた。ところが、この膜濃縮システムの導入により、供給液中から樹脂成分が除去された結果、スケーリングの発生は無くなった。このことにより、ランニングコストの更なる低減が可能になるとともに、定期的実施していたリボイラのジェット洗浄にかかる費用も削減できるようになった。

## 5. おわりに

産学交流会や客先打合せの席等での会話で、蒸留の MVR 化については、文献に記載されている机上の話で実現困難な技術であると思われている方が多いように見受けられる。本稿で紹介したように MVR はすでに導入されている各工場で実際に稼働している技術であり、当社ではかなりの台数の MVR 型ハイブリッド蒸留システムを導入した実績を有する。地球環境問題が深刻化する中で、省エネルギー性を追求し、技術開発に真摯に取り組むことは、社会的責務であると考えます。更に技術革新が進む省エネルギー技術に対し、木村化工機は全力で挑戦し続けていきたい。