

日本産業機械工業会 会長賞
「蒸留塔付き蒸発濃縮装置」
 株式会社ササクラ
 日本リファイン株式会社

1. 装置の詳細説明

多量にエネルギーを消費する蒸留操作においては、以下に記載のとおり従来から省エネルギー化が検討されていた。しかし、それぞれに課題があり、省エネルギー化を達成できていない。

従来の技術_その1:

塔底部の液をリボイラで加熱蒸発させ、蒸留塔で蒸発蒸気中の高沸点溶剤を分離し、塔頂より高沸点溶剤を分留した蒸気を取り出し、コンデンサで冷却水などにより凝縮させ、処理水と濃縮液に分離する装置が一般的に知られている。

しかし、このような装置ではコンデンサで蒸気の潜熱を冷却水等に廃棄するため、熱エネルギーの有効利用が図れない。

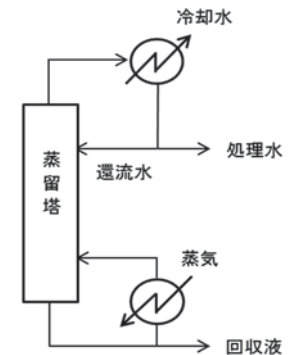


図1.従来技術_その1

従来の技術_その2:

蒸留装置の省エネルギー化を図る方法として、高圧蒸気を駆動蒸気として塔頂部の蒸気の一部をエゼクターで吸引してリボイラに送り、リボイラの加熱源とする方法もある。

しかしながらこの方法も相当量の高圧駆動蒸気を必要とし、この駆動蒸気の熱量に相当する塔頂蒸気が余分になって、その潜熱がコンデンサに廃棄されることになり、十分な省エネルギー化が図れないという問題がある。また、2 効用にする場合も同様に最終段塔頂の蒸気潜熱がコンデンサに廃棄される。

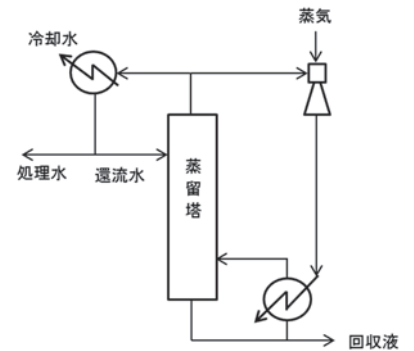


図2.従来技術_その2

従来の技術_その3:

塔頂部からの蒸気の潜熱を全量利用する方法として、MVR (Mechanical Vapor Recompression) 方式が考えられるが、なかなか実用機として広がらなかった。MVR 方式では、塔頂の低い温度の蒸気を塔底の最も高い濃縮液を加熱できる温度 (濃縮液温度+伝熱温度差) まで圧縮する必要がある。従来の場合、この圧縮温度が大きいいため蒸気圧縮機が高速タービン方式となり、実用

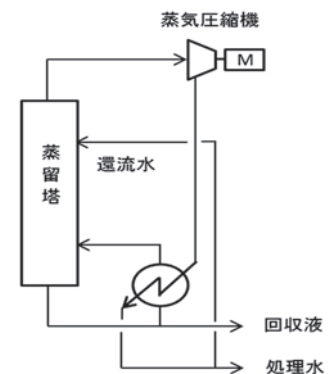


図3.従来技術_その3

化の妨げとなっていた。タービン式になると構造が複雑でスペシャリストによるメンテナンスが必要になるためである。また、圧縮比が高く、蒸気圧縮機の動力も大きくなる。

本装置は、リボイラとして高い伝熱性能を有する“水平管式蒸発器”と“蒸気圧縮機”との組み合わせを特徴とする MVR 蒸留濃縮装置であり、従来技術の問題点・課題を解決した。

(1) 当社の MVR 蒸留濃縮装置概要と作動原理

水平管式蒸発器は、後述する海水淡水化技術で古くから培ってきた技術であり、水平管式蒸発器とヒートポンプ（当社では蒸気圧縮機をヒートポンプと称する。）を組み合わせた装置が、当社の VVCC 型濃縮装置であり、VVCC 型濃縮装置に蒸留塔を組み合わせた装置が今回の装置である。本装置の概略フローを図.4 に示し、作動原理を以下に記述する。

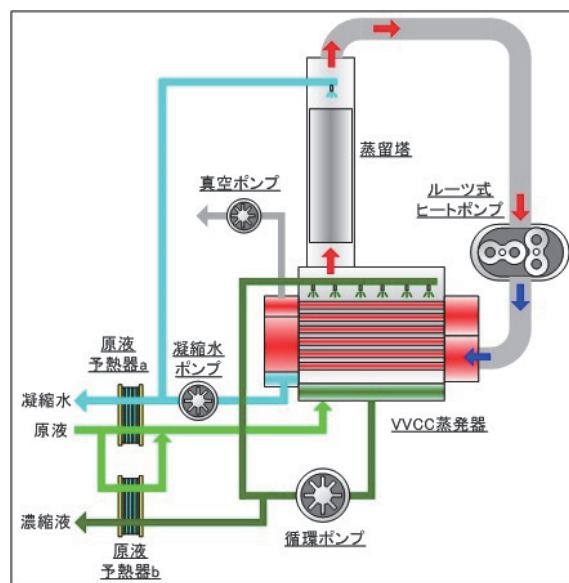


図4 蒸留塔付き濃縮装置概略フロー

<作動原理説明>

- ① 蒸発器内は、真空ポンプで常に真空が維持されており、原液は循環ポンプにより蒸発器上部から伝熱管群に均一に散布され、管外を薄膜状に流下する。
- ② 伝熱管表面にて蒸発した蒸気は蒸留塔を通過し、高沸点溶剤をほとんど含まない蒸気となってからヒートポンプに取り込まれ圧縮・昇温され、加熱源として伝熱管内部に送り込まれる。
- ③ 伝熱管内では蒸気が高流速で流れるため、凝縮液膜が薄く、非凝縮ガスや凝縮液膜による伝熱抵抗が小さくなる。管外も薄膜蒸発であることから、液深による非平衡温度差もほとんどなく、高い伝熱性能を有することになる。このため、わずかな温度差で蒸発と凝縮を繰り返すことができる。伝熱管内で凝縮した蒸気は、凝縮水となって系外へ排出される。
- ④ 原液の濃縮が進み、所定の濃度まで濃縮された液（濃縮液）は、循環ポンプにて循環ラインから分岐され系外に排出される。

起動時には熱源としての蒸気を使用するが、順調に蒸発運転が進めばヒートポンプ動力と、バックアップ用の若干量の蒸気のみで濃縮運転が可能である。

水平管式蒸発器では、加熱側も減圧で運転を行うため、压力容器適用外となる。法定点検が不要となるほか、構造的な法的制約を受けない。

(2) 当社で用いられるヒートポンプ

当社のターボ式ヒートポンプは送風機用のブロワを真空蒸気圧縮用に開発を重ねたものであり、以下の特徴を持っている。

<当社ヒートポンプの特徴>

- ・回転数が低い (3,000~4,500rpm)。
- ・大風量・高圧縮ヒートポンプのインペラー形状は3次元羽根を採用し、高効率。(効率=~75%)
- ・真空下での運転に加えて、動力、回転数が低く、ベアリング、シール部分が高寿命。
- ・騒音値が比較的低い。大風量の大型濃縮装置でも防音壁なしで、装置機側1mで85dB程度。
- ・ヒートポンプに付帯する補機、センサー類の点数が少なく、制御、構造ともにシンプルで操作、メンテナンスが容易。
- ・ターボ式ヒートポンプの1台あたりの圧縮温度は4~9℃程度であるが、これ以上の圧縮温度が必要な場合は、ヒートポンプを直列に複数台設置して圧縮温度差を確保することが可能。
- ・蒸発量が小~中規模 (~60ton/日蒸発) のものについては、1台で圧縮温度が20℃とれるルーツ式ヒートポンプを採用する場合がある。

	当社のターボ式ヒートポンプ	従来のコンプレッサー
基本システム	送風機としてのブロワを真空蒸気圧縮用として開発したもの。飛沫同伴、ミストなどにも強く、シンプルでメンテナンスが容易。	高速タービンとしてのシステムとなり、複雑でスペシャリストによるメンテナンスが必要。
メンテナンス性	ドライシール、軸受部品を約5年に一度交換するのみで、あとは潤滑油、グリースの定期注入、交換のみ。	高速回転のため、インペラー、軸受等の損傷が激しく部品交換の頻度が多く、かつ高価となる。 海外製は国内在庫がない場合もある。
回転数	3,000~4,500rpm	10,000~30,000rpm 海外製は低速で5,000rpm程度のももある。
騒音	モータファンが主の音源で最大でも80~85dB	非常に大きく、コンプレッサー室として建屋内に別基礎を設けて収納する場合もあり。
軸受	オイルバス方式で軸受冷却を兼ねたシール水のみ	油冷却器用の冷却水、軸封用の蒸気、油ポンプ用の電源等のユーティリティが必要。
インペラーへのミスト付着対策	過熱蒸気によるミスト付着は、減温水スプレーによる減温方式を採用しており、ミスト付着無し(常に凝縮水で洗浄されている)。	減温水スプレーが不可のため、完全なミスト除去と付着した場合の定期的な分解洗浄が必要。

表1 当社のターボ式ヒートポンプと従来の圧縮機

2. 開発経緯

(1) 開発主旨

蒸留装置における省エネルギー化

(2) 開発目標

2重効用の販売価格、ランニングコストを想定し、蒸留塔付き蒸発濃縮装置のランニングコスト差を考慮したトータルコストが、2重効用のトータルコストを2年で逆転すること。

(3) 開発経緯

平成 26 年 04 月～	共同開発の検討開始
平成 26 年 11 月	サクラから日本リファインに水平管式蒸発器を納入
平成 26 年 12 月～	日本リファインにて水平管式蒸発器と蒸留塔、蒸気圧縮機を組み合わせてパイロット試験機を完成、確認試験開始
平成 27 年 06 月	第 1 号機受注
平成 28 年 01 月	第 1 号機納入

なお、本装置は、株式会社サクラと日本リファイン株式会社が共同で開発を行った。それぞれが担当した開発の内容は次の通りである。

- ・株式会社サクラ：蒸発器、蒸気圧縮機的设计・製作
- ・日本リファイン株式会社：蒸留塔的设计・製作

3. 独創性

一つ目の特徴としてリボイラに「水平管式蒸発器」を採用したことが挙げられる。

従来のリボイラの方式として採用されている「垂直管式」や「浸管式」では伝熱係数が低く、大きな伝熱温度差が必要になり、圧縮比の大きな蒸気圧縮機が必要になっていた。本装置におけるリボイラは上述の「水平管式」を採用しているため、

- ①伝熱係数が非常に高い
- ②ヒートフラックスを小さくできる（伝熱面積を大きくとれる）、という利点がある。

①については、前述の<作動原理説明>を参照。また、非常に薄肉の伝熱管を採用していることも伝熱係数の向上に寄与している。

②について、水平管式においては伝熱管に小さな径を採用しているため、小さな胴体に無理なく大きな伝熱面積を有することが出来るのである。

伝熱の基本式である $Q=U \times A \times \Delta T$ において、

(Q =交換熱量、 U =伝熱係数、 A =伝熱面積、 ΔT =有効温度差)

「水平管式」においては U および A が大きく出来るので、同じ交換熱量であれば従来の方式と比べて ΔT が小さくできる。従来の方式では有効温度差 $\Delta T=20^{\circ}\text{C}$ 程度だったものが、「水平管式」を採用することで $\Delta T=3.0^{\circ}\text{C}$ 程度まで下がることにより、蒸気圧縮比を小さくでき、省エネルギー化を達成した。概要を表 3. 比較表にまとめたので参照。

表 3. 各種方式比較表

	従来方式-① 浸管式	従来方式-② 垂直管式 ※1	申請方式 水平管式
伝熱係数	× (悪)	○ (やや良)	◎ (非常に良)
伝熱面積と 本体寸法	◎: コンパクトにまとまっている。	△: 伝熱管径が大きく、本体寸法もしくは伝熱温度差が犠牲になる。	◎: コンパクトにまとまっている。
伝熱温度差 ΔT	× (悪) ΔT≒20℃	○ (やや良) ΔT≒6～℃	◎ (非常に良) ΔT=3～℃
省エネルギー化 (COP) ※2	×: 温度差が大きく、MVR の適用が困難。基本的に蒸気加熱方式となり、この場合 COP≒1。2重効用としても COP≒2 程度となる。	○: MVR の適用は可能で、ある程度の省エネ化は達成できる。伝熱温度差が大きい分、省エネ性はやや劣る。 COP≒14	◎: 伝熱温度差がもっとも小さいため、蒸気圧縮機の消費動力が最も小さくなり、省エネ性で有利。 COP=21
COP 計算条件			
沸点差	3.0	3.0	3.0
ΔT	20.0	6.0	3.0
必要圧縮温度	23.0	9.0	6.0
蒸気圧縮機効率	—	60%	60%

※1: 文献などからの推定値。

※2: 蒸気圧縮機の動力のみで算出。

株式会社サクラとしての MVR の取り組みは、1983 年に VVC 型海水淡水化装置の初号機を納入し、海水淡水化装置で積み重ねた技術を応用して 1987 年に濃縮用途に VVCC 型濃縮装置として販売を開始した。高い伝熱性能を持つ蒸発器と自社設計・製作のターボ式ヒートポンプ（当社では蒸気圧縮機をヒートポンプと称する）やルーツ式ヒートポンプを用い、各種プロセス溶液や排水からの水回収・有価物回収・溶液の減容化等、目的に合わせて最適なシステムを提案し、幅広い業界にご使用され、ご評価をいただいている。

2 つ目の特徴は 8 項で述べる 1 号機においてのみの適用となる項目であるが、蒸気圧縮式 (MVR) と蒸気加熱式を組み合わせた『ハイブリッド式』を採用していることである。高濃度まで溶剤を濃縮する場合は沸点の差が大きくなるが、この場合、以下の問題点が生じる。

- ・問題点_その 1: MVR 方式を適用するには圧縮比が大きくなり、蒸気圧縮機のコスト、消費動力が大きくなりすぎて現実的でない。
- ・問題点_その 2: 濃度の薄い範囲で MVR を採用し、高濃度範囲は蒸気加熱式と 2 段階に分けて蒸留することで省エネ化は達成できるが、低濃度域と高濃度域で、二つの蒸留塔が必要になり、イニシャルコストの増加となる。(図 5 参照)

ここで『ハイブリッド式』(図.6)を採用することで、沸点の低い低濃度時はヒートポンプで、沸点の高い高濃度時は蒸気加熱と運転を切り替え、高濃度回収液を最後に排出するというバッチ運転とすることで、省エネルギー性を保ちつつ、低コスト(蒸留塔1基で対応)、高濃度まで濃縮を可能としている。

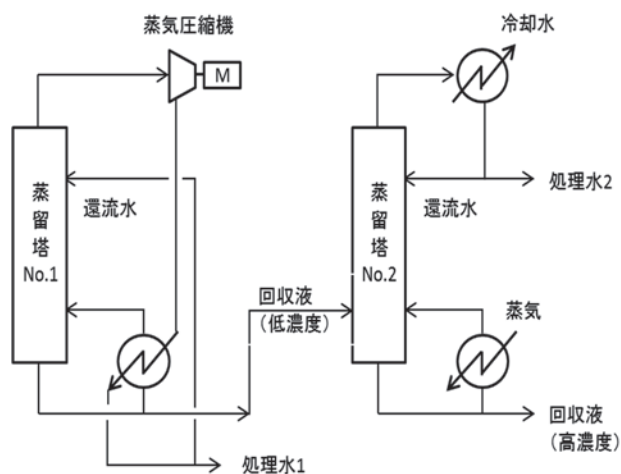


図5.従来技術(連続運転)

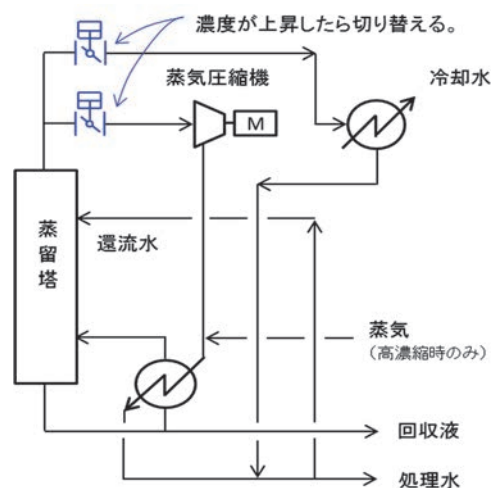


図6.ハイブリッド式(バッチ運転)

4. 特許

本装置の関連特許は次のとおりである。

公開番号：特開平 5-237302 / 名称：蒸留装置

※他、2件出願中

5. 性能

(1) 従来装置との比較

前述の表3ご参照。

(2) 運転・操作性

本装置は自動運転が可能ないように計送品、自動弁が設置されており、シーケンス制御により全自動運転となっている。消泡剤など新規に補充する薬品の投入は必要になるが、それ以外は特別な操作や調整を必要としない。

また、装置の運転中は各パラメーター(圧力、温度、流量)を監視しており、各設定値を超えた場合は、外部へ警報を出力し、装置は安全に自動停止する。

6. 経済性

本装置と従来装置の比較を表.6 に示す。

*他のヒートポンプ式との比較は、正確な情報が無いため、割愛する。

<比較条件>

a) 原液流量	14,400 kg/日	原液溶剤濃度	5.37 wt%
b) 処理水流量	13,556 kg/日	処理水溶剤濃度	<0.1 wt%
c) 濃縮液流量	844 kg/日	濃縮液溶剤濃度	約 90 wt%
d) 蒸気コスト	5.0 円/kg		
e) 電気コスト	12 円/kWh		
f) 冷却水コスト	5.0 円/m ³	g)稼動時間	330 日/年

表 6. 従来装置との比較

	従来装置 (2重効用)		申請装置 (ヒートポンプ式)	
イニシャルコスト比	100		150	
ランニングコスト比	100		31	
ランニングコスト詳細				
・蒸気	16.3 ton/日	26,895 千円/年	2.88 ton/日	4,752 千円/年
・冷却水	1,680 m ³ /日	2,772 千円/年	352 m ³ /日	580 千円/年
・電気	12 kWh/日	380 千円/年	1,008 kWh/日	3,991 千円/年
・合計	30,047 千円/年		9,323 千円/年	

(注) 申請装置ではイニシャルコストが増加するが、年間ランニングコストで約 70%削減を達成したことにより、～2.5年で回収できる。

7. 将来性

溶剤はさまざまな分野で洗浄剤や剥離剤として使用されており、近年ではリチウムイオン 2 次電池の部品製造に多量の溶剤が使用されており、今後も使用量は増加する見込みである。

ここで、本装置は以下の役割を担うことで、今後、環境負荷低減に大きく貢献することができる。

① 排水の濃縮資源化

各工場にて使用済みとなった希薄な溶剤を濃縮することで、濃縮液が有価物として回収できる。

② 排水の産廃ゼロ化

排水から溶剤成分を低濃度まで分離除去することで、環境負荷を低減。また、処理水を製造ラインに再利用することも可能で、①とあわせて排水の産廃ゼロ化が可能。

③ ヒートポンプによる省エネ

蒸気圧縮に多量のエネルギーを消費しては意味が無いが、高伝熱性能の水平管式蒸発器を採用することで実用的な MVR 型蒸留装置を実現できる。