

内部熱交換式省エネ蒸留塔 HIDiC

1. 概要

化学産業の重要な分離技術である蒸留塔は溶液の各成分の揮発度の差で低沸点成分と高沸点成分に分離するために塔内で気液を接触させる必要があり、塔底液を蒸気にして塔底へ戻すためにリボイラで加熱、塔頂蒸気を液にして塔頂へ戻すためにコンデンサで冷却するので、エネルギーを多量に消費する分離技術です。このリボイラでの加熱負荷を大幅に節減する技術として原料供給段より上部の濃縮部を切り離して加圧することによって沸点を回収部の沸点より高めて濃縮部と回収部の間で内部熱交換する、いわゆるヒートポンプ技術を応用した省エネ型蒸留塔の開発を NEDO プロジェクトに参画して推進してきました。この回収部と濃縮部の間に圧縮機を挿入する標準型内部熱交換式蒸留塔 (Heat Integrated Distillation Column 略して HIDiC) を図 1 に示します。このようなシステムは歴史的には 1997 年に Mah らが提案したのですが、なかなか注目されず、やっと上記の NEDO プロジェクトにおいて、その利点を実用化できる段階にまで技術開発が進んだところです。

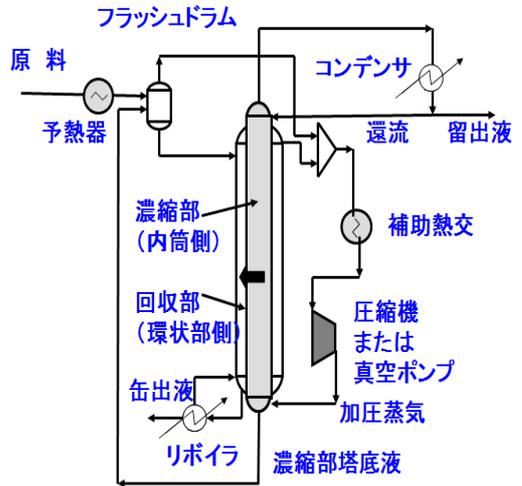


図 1 二重管式標準型 HIDiC

2. 塔構造と内部熱交換のメカニズム

弊社が開発してきた棚段式 HIDiC 塔の基本構造は図 2 に示すような二重管型であり、内塔が加圧される濃縮部、内塔と外塔の間の環状部が通常、常圧の回収部となっています。低沸点成分が濃縮されている濃縮部は加圧すれば、常圧で高沸点成分が濃縮されている回収部より沸点を高くできるので、加圧された濃縮部を回収部と熱交換できるように接触させればシステム内部で熱移動が起きます。この時、濃縮部側で蒸気の部分凝縮が起き、放出される潜熱が回収部側に伝播して回収部の還流液の部分蒸発に使われます。したがって濃縮部側はコンデンサで還流液をつくる冷却負荷が節減され、回収部側では蒸気をつくるリボイラの加熱負荷が節減されて大きな省エネ効果が得られます。このような内部熱交換特性は次式のように各実段 1 段当たりの内部熱交換量 (伝熱速度) を濃縮部・回収部温度差と 1 段当りの有効伝熱面積で割った総括伝熱係数 U を定義して

理解されます： $Q_i = U A_i (T_{r_i} - T_{s_i})$

図 2 の棚段式 HIDiC 実験装置は濃縮部、回収部とも弊社オリジナルのリフトトレイをそれぞれ 4 段装備しており、理想系溶液代表としてベンゼン・トルエン(B/T) 2 成分系、非理想溶液系代表としてエタノール・水(E/W) 2 成分系で蒸留・伝熱実験をしました。また回収部塔頂にもコンデンサを設け、そこに真空ポンプを付設することにより、回収部を 1 atm 以下の減圧にして、濃縮部を常圧にする減圧操作型 HIDiC の運転も可能にしました。

3. 内部熱交換特性

内部熱交換特性をデータベース化する主要制御パラメータは濃縮部と回収部の圧力比 P_{air}/P_{ais} すなわち圧縮比です。沸点は圧力とともに上昇するので、HIDiC 実験塔全体で平均した (代表) 温度差は当然ながら加圧操

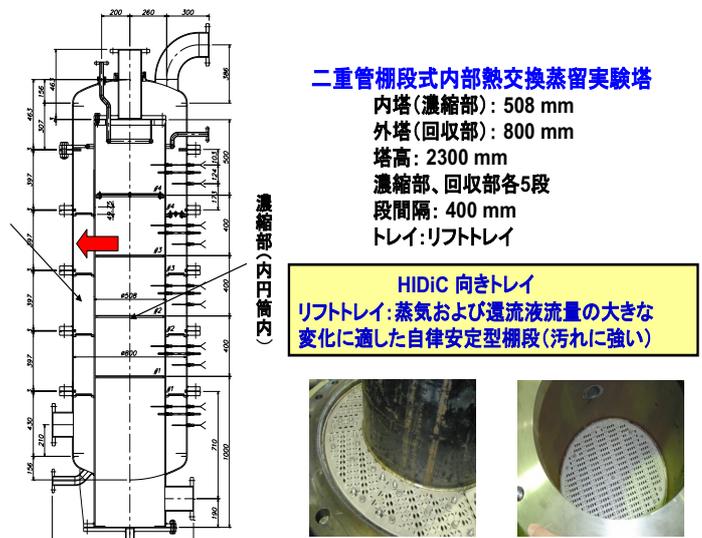


図 2 二重管型棚段式 HIDiC 蒸留塔の実験装置

作、減圧操作ともに圧縮比に正比例して増加します。

内部熱交換は凝縮と蒸発の相変化を伴う伝熱なので、図3に示す総括伝熱係数は B/T, E/W 両2成分系とも十分に大きな値を示していますが、圧縮比が増加すると若干低下します。圧縮比が大きくなると内部熱交換量が増加して濃縮部側の凝縮液膜が厚くなり、液膜の伝熱抵抗が増加することに基因します。やはり物性のせいでは有機系より水を含む系の方が大きな伝熱係数になります。省エネルギー効果を評価するために蒸留に必要な総エネルギー量に占める内部熱交換熱量を内部熱交換率（一種の省エネ率）として定義して図示しますと図4になります。圧縮比が2より低いと特に減圧操作の場合、内部熱交換率が目標である省エネ率 30% より低くなっていますが、濃縮部と回収部の温度が逆転する熱的ピンチの可能性があるので、もっと圧縮比を上げるべきです。この実験装置は濃縮部、回収部ともにリフトトレイ4段であり、段数を多くすれば伝熱面積が増えて省エネ目標値を容易に達成できます。

4. 標準型 HIDiC の適用例

発酵モロミ液のバイオエタノールの水分除去を目的とする NEDO プロジェクトの成果として設計・製作したもろみ塔と濃縮塔の2塔を配慮した減圧系の標準型 HIDiC ベンチプラントを図5に示します。発酵もろみに含まれる不揮発性の副生成物や残渣などのファウリングの問題から粘着固体ができる反応を抑制するために圧縮機の代わりにドライ真空ポンプを搭載して回収部の沸点を下げる汚れ対策をとっています。プロジェクトのベンチプラントのため原料処理量は少量です。試運転結果の成功例を図6に示します。リボイラの代わりに生水蒸気を吹き込むようにしていますが、結果はドライ真空ポンプの消費電力だけで HIDiC 塔は運転できており、生水蒸気量 = 0 になり、非常に大きな省エネ効果が得られました。NEDO プロジェクトで設定していた 1 L の無水エタノール換算での消費エネルギーの目標値： 4 MJ/L-EtOH を十分に下回る非常によい成功例となっています。

5. 結び

HIDiC の技術開発が漸く実用化のレベルまで到達できました。多様な蒸留プロセスの省エネルギーに貢献して行きたいと考えています。省エネルギー技術開発への貢献に関連して平成 23 年度兵庫県科学賞を受賞しました。

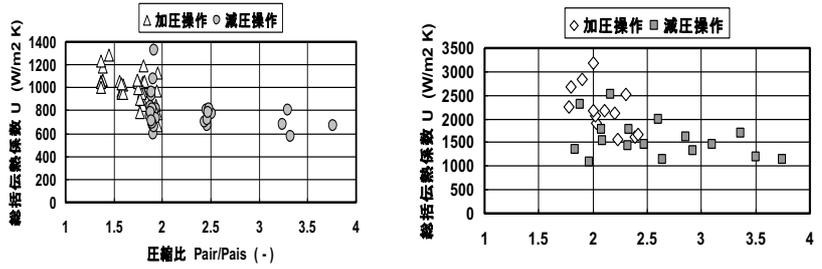


図3 総括伝熱係数と圧縮比の関係 (左: B/T 系、右: E/W 系)

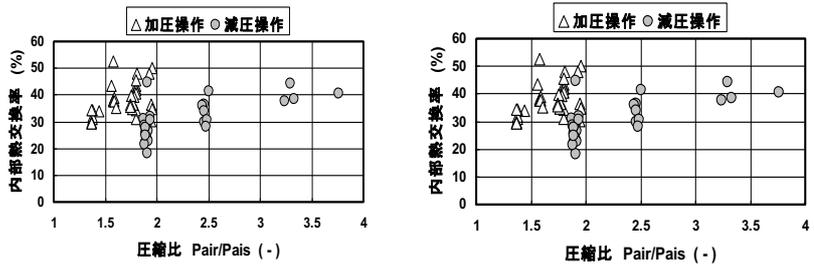


図4 内部熱交換率と圧縮比の関係 (左: B/T 系、右: E/W 系)

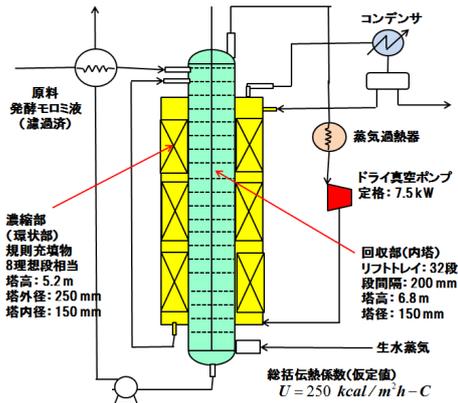


図5 真空ポンプを搭載した標準型 HIDiC エタノール濃縮装置 (ベンチプラント)

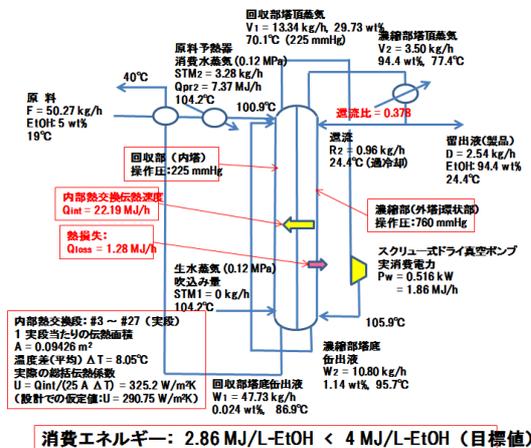


図6 目標を達成した最適な試運転結果