

難題こそ真のニーズ！

リフトトレイからチェンジトレイへの技術展開

関西化学機械製作株式会社

代表取締役社長 野田 秀夫

取締役技術部長 山路 寛司

1. はじめに

当社は化学工学の各種の単位操作に関する装置機器メーカーであり、それらを統合してプラントとして組み上げるエンジニアリング企業です。中でも熟技術を伴う分離・精製の蒸留技術、濃縮あるいは回収の蒸発技術は得意分野であり、その中心となる棚段塔の開発の過程が当社の歴史と重なっております。産業界のニーズにお応えしながら開発してきた気液接触装置の進化の一例をご紹介します。

ところで、当社の歴史はリフトトレイの開発がターニングポイントとなったと言って過言ではありません。1975年には化学工学協会（現 化学工学会）より技術賞を受賞しています。特許の期限が切れた今も当社の主力製品であり続けておまして、処理量に大きな変動を伴う蒸留条件でも棚段の圧力損失が蒸気流自身により自律的に制御されるので安定した操作ができ、融通のきく汚れにも強い自社開発のオリジナルトレイとして幅広く活躍しています。最近では外部から自由にトレイの開孔状態や段数を切り替えられ、圧力損失をさらに劇的に加減できるチェンジトレイ（2001年分離技術会技術賞受賞）を開発し、実際の有機合成プラントなどで活用していただいております。リフトトレイからチェンジトレイまでの技術展開は当社のトレイ技術の進化の歴史と言えると思います。

2. リフトトレイ

2-1 リフトトレイの開発

ダウンカマーのないトレイ（Dual flow tray）にはシンプルな多孔板であるシーブトレイがありますが、開孔面積を蒸留操作中に変更できませんので、蒸気流量が大きくなり過ぎると大きな圧力損失となり、液が落ちて来ないフラッディング状態になってしまいます。このフラッディング点までの運転可能な蒸気流速（F-factor = $\sqrt{\rho} v$ ）範囲が広い方が運転が安定して処理量の増減に対しても融通性が利いて有利ですが、当時、このような要求を満足するトレイはありませんでした。以下の逸話のように窮地に陥った経験から蒸気流速の操作範囲が広がるように開孔面積を自然に調節できる Fluidics のようなリフトトレイを考案・開発できたのです。ターボグリッドトレイはダウンカマーの無い、非常に単純な構造のトレイで、処理量は大きいですが、操作範囲が狭いためにあまり普及していません。当社は20年以上前に、このトレイの塔をお納めしたのですが、急に運転条件が少量運転に変更になったのです。そこで「最小限の改造で、効率よく蒸留できるように何とかならないか。」と言うまさに難題の緊急事態だったのですが、これがリフトトレイの開発のきっかけとなりました。何とか開孔面積を小さくしなければなりませんので、苦肉の策としてターボグリッドの上に穴を塞ぐようにもう一枚のトレイを重ねることにしたのです。これがよいアイデアとなったのは上に載せた板を固定せずに可動板としたことでした。可動板が蒸気流量に応じて浮動することにより開孔面積が自動的に調整される結果となり、広い範囲で圧力損失があまり変化せず、安定運転が可能なトレイが生まれたのでした。商品化するにあたり、長方形孔のターボグリッドではなく、丸い孔の多孔板で開発を進め、孔の配列は四角配列にしました。

2-2 リフトトレイの構造

図1および写真1のように、リフトトレイは固定多孔板と上下運動できる可動多孔板を上下に重ねて1セットにしたトレイで、可動板は回転したり横移動しないように

ピンで支持されています。可動板が固定板に接触している状態が開口率最小で、浮いてピンに当たっている状態が開口率最大で、蒸気流量に応じて浮揚して蒸気の孔通過による圧力損失を自律的に調節してくれるトレイです。

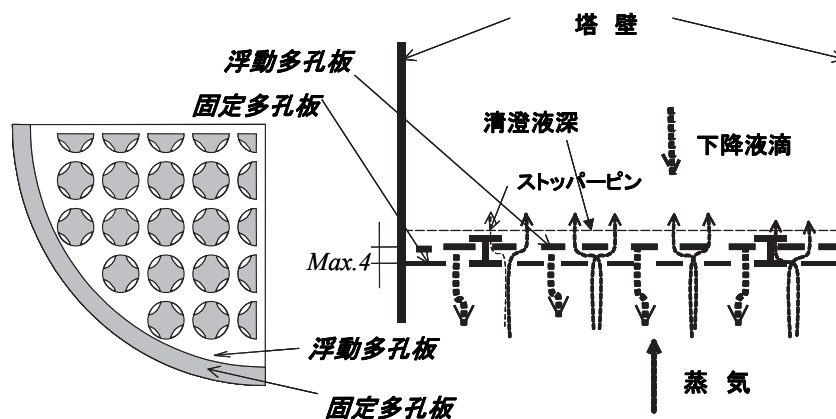


図1 リフトトレイの模式的構造と 1/4 円のリフトトレイ



写真1 Φ900 のリフトトレイ

蒸気は下方からトレイの孔を通過して上昇します。液は上方からこのトレイ上に落下して平均滞留時間の間、トレイ上に溜まり、泡沫層（Froth）を形成して潜り抜ける蒸気と向流接触します。泡沫層内では蒸気相から高沸点成分が凝縮し、その潜熱をもって液相から低沸点成分が蒸発する物質交換をします。上段へ移動するにつれて蒸気は低沸点成分が濃縮され、下降するにつれて液は高沸点成分が濃縮されていきます。このトレイの特長は固定板と可動板で孔の位置をずらしてあり、蒸気流量に応じて可動板が上下し、開孔面積を自然に自動調節するので、1段当たりの圧力損失を

一定に維持でき、蒸気流量（F-factor）の操作範囲（Flooding Point までの領域）が他のトレイと比べて広くなることにあります。塔径が大きい場合は可動板を分割することによりバブリングに偏りができないようにしています。

液負荷と孔形状について

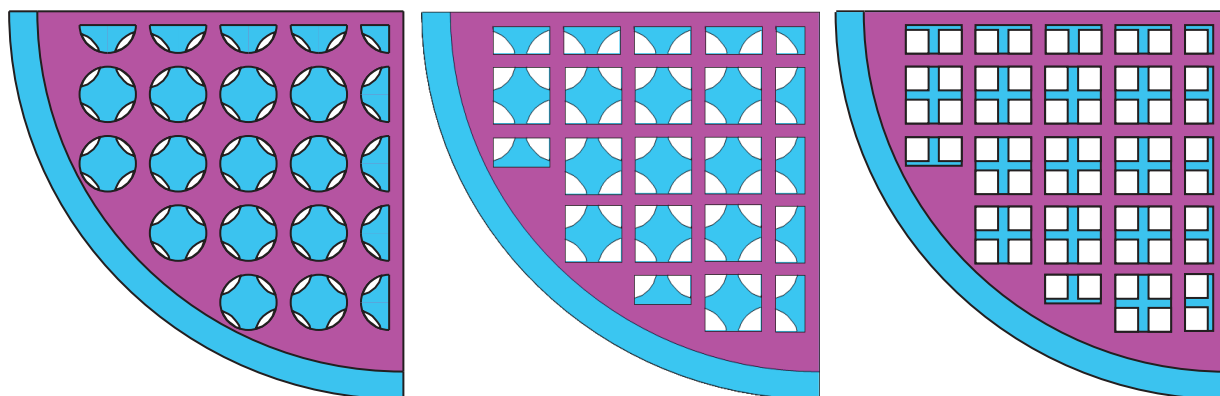


図2 リフトトレイの孔の標準的組合せ
(ア) 丸-丸型 (イ) 角-丸型 (ウ) 角-角型

孔の標準形状は図2左の円形丸孔であり、液量の少ない範囲で使用します。孔径については各種の組合せを実験で確認し、液量の範囲、液比重などの物性でパターンを選択しています。液量が増加する場合には、最小開口比を調節して安定運転ができるように、例えば、図2中央に示したように丸孔と角穴を組み合わせたパターンにしたりしますが、もっと液が大量になれば右に示した角孔と角孔の組合せで対応することもあります。これはダウンカマー付のトレイのダウンカマー面積を調節することと同じ意味であり、液量が非常に多くなると数本のダウンカマーを持たせるのと同じ考えです。液はトレイからできるだけ均一に落下するように孔の分布を変えておきまして、これらの対応により、液量が数十より数千 $L/m^2/min$ の広範囲の運転を可能にしています。

2-3 圧力損失

一般に1段のトレイ通過による全圧力損失は次式のように第1項の孔通過圧損、第2項の泡沫層通過圧損と第3項の孔での表面張力による圧損（非常に小さい）の和で

表されます。(α, β : 開孔比が大きくなると小さくなる係数)

$$\Delta P_T = \alpha \Delta P_d + \beta (\rho_L g h_{CL}) + \gamma (4\sigma / d) \quad (1)$$

泡沫層通過による圧損は泡沫層とバランスする清澄液深 h_{CL} による液の重さ $\rho_L g h_{CL}$ に比例します。リフトトレイは可動多孔板の孔が固定多孔板の孔と一部重なって共通部分を有するように配列されており、蒸気流量が大きくなると、可動板が浮き、実質的な孔の面積（開孔面積）が大きくなることにより、α, β が小さくなり、全圧力損失が増加しないように自律的に圧力損失を制御してくれます。液量が少ない条件では F ファクターが $2.5 \text{ (m/s) (kg/m}^3)^{1/2}$ 程度までフラッディングしません。1 例として塔径 200mm のリフトトレイ（5 段）の開孔比および動作流体を変えて測定した圧力損失を気体流速（F-factor）に対してプロットしたデータを図 3 に示します。使用したトレイの開孔比（可動板の浮揚最大高さの時、Max., 浮いていない時、Min.）を表 1 に示します。単一有機液体の気液間の界面張力は小さいので、フラッディング点の F-factor は小さくなる傾向が見られます。界面張力が大きくなる水との溶液の場合、フラッディング点の F-factor は高い側へ移動して、かなり広い F-factor の範囲で圧力損失が一定になりますが $2.5 \sim 3 \text{ (m/s) (kg/m}^3)^{1/2}$ 以上になると急に上昇しており、フラッディング点となっています。

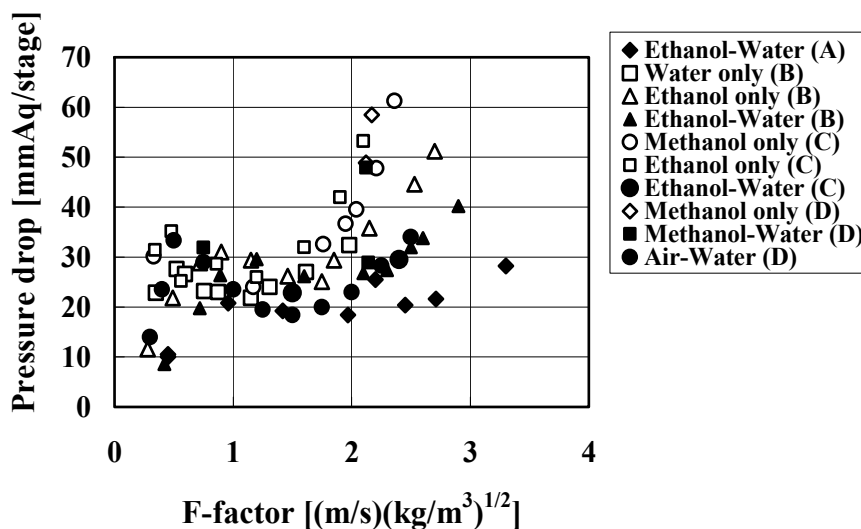


図 3 1 段当たりの圧力損失

表1 リフトトレイの開口比

トレイ 種類	Max (%)	Min (%)
A	36.4	9.1
B	29.3	7.7
C	35.5	6.2
D	35.5	6.4

孔径 16 mm & 12 mm

2-4 蒸留性能（段効率）

各段の泡沫層で接触する気液は普通、平衡状態になっていないので、蒸気中の高沸点成分が凝縮し、その潜熱で液中の低沸点成分が蒸発する（等モル相互拡散型の）物質移動が起きて、塔頂に行くにつれて低沸点成分が濃縮され、塔底に行くにつれて高沸点成分が濃縮されます。

任意の着目段（第 n 段）を去る蒸気と液が実際は平衡に至らず、次のような段効率（マーフリーの段効率）で気液接触します：

$$E_{MG} = \frac{y_n - y_{n+1}}{y^*_n - y_{n+1}} \quad (2)$$

第 n 段を去る液中の低沸成分と平衡と考えられる蒸気中の低沸成分濃度が y^*_n であり、実際の第 n 段を去る蒸気濃度 y_n はそれより低くなります。したがって仮に液と蒸気が平衡状態に到達してから第 n 段を去れば、段効率は 100% ということになります。

リフトトレイを段間隔 400mm で 5 段挿入した蒸留塔を用いて全還流で実験をしました。その 2 種のアルコールの水溶液の蒸留性能を示す段効率のデータを 図 4 に示します。F-factor の操作範囲は広く F=3 辺りまで、段効率はほぼ 60% 以上に維持できています。従来 of トレイと比較して段効率はほぼ同じですが、圧力損失が小さいので、ガス速度に変化があっても効率は大きく変化しません。リフトトレイ塔は充填層では運転が困難な条件でも現在も広く需要があり、リフトトレイ蒸留塔は 800 基

以上の納入実績があり、開発してすでに四半世紀以上経ちますが、今も蒸留に限らずガス吸収、ガス洗浄など、幅広く使っていただいています。

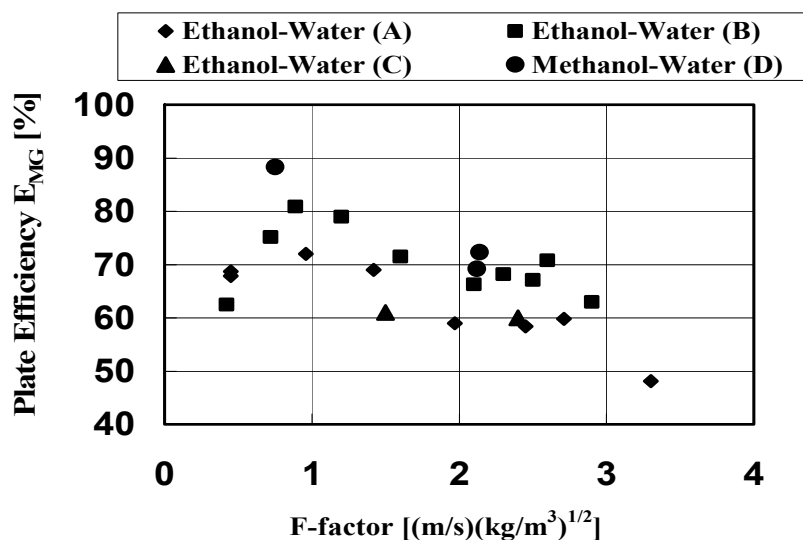


図4 リフトトレイのマーフリー段効率

汚れにも強いので、バイオエタノールの脱水プロセスの蒸留にも詰まりにくくて好評です。塔径が大きくなると、可動板を分割するため効率が確保できるように調節に苦労したときもありましたが、何とか解決でき、現在は最大φ4000のトレイでも問題なく運転できています。充填塔と比較して液切れが良く（濡れ面積が少ない）、スラリーが入っていても蒸留できる点やモノマーの蒸留で内部で重合が起きてもしっかり洗浄して再利用できる点などの特長があります。操作範囲が広いだけでなく、液ホールドアップが小さいので応答が速く、蒸気変動にも簡単に対応でき、運転しやすいと評価されています。

3. チェンジトレイ

3-1 チェンジトレイの開発

バッチ蒸留塔は蒸留の進行とともに留出液として回収する成分の種類とその濃度が連続的に変化します。そのため各成分を望む濃度で回収するために時間のかかる中

間濃度状態をカットしたいことがよくあります。またバッチ反応器に併設する蒸留塔では、その操作時間内において、単蒸留工程から還流を必要とする精留工程、さらには常圧工程から高真空工程、または、窒素等の不活性ガスによる微量軽沸成分の追出し工程など多種多様な操作を順次行います。これらの条件を満たすオールマイティな塔は今までありませんでしたが、これら一連の工程の最適運転条件を満たす蒸留塔は塔外からトレイを自在に開閉することでリフトトレイをはるかに越える圧力損失制御を可能にした奇抜なアイデアから開発されたのでした。チェンジトレイ塔は棚段式蒸留塔状態とバツフル型蒸留塔状態との間で運転中にいつでも外部から切り替えられる圧力損失可変型蒸留塔です。

蒸発釜を兼ねている反応釜は脱溶媒によって液面が低下するのですが、「ウォールウェッター」を使用すると液面レベルが変化しても蒸発速度を高い状態に維持することができて、温度コントロールも容易になり、反応も蒸留も運転をさらに安定化することができるようになりました。また、ジャケット壁が常に濡れているので、伝熱面には伝熱障害となる付着や焦げ付きなどがなくなり、使用後の洗浄も非常に楽になりました。反応終了後、少量の溶媒でジャケット面を洗浄できるため「チェンジトレイ」と「ウォールウェッター」を組み合わせたWWチェンジトレイプラス システムは生産効率をさらに高めることができます。

3-2 チェンジトレイの原理と構造

チェンジトレイはリフトトレイ型2種類とシーブトレイ型の合計3種類あり、**図5**に示しますように簡単な構造です。

図5左はシーブトレイまたはリフトトレイの中央部をカットしたもので、カットされた中央トレイを外部より上下して開閉できるタイプです。**図5**右はリフトトレイと同じように固定多孔板とその上に載せる多孔板からなっていますが、上側の多孔板を外部から上下できるタイプで開口比（圧力損失）を微調節することもできます。

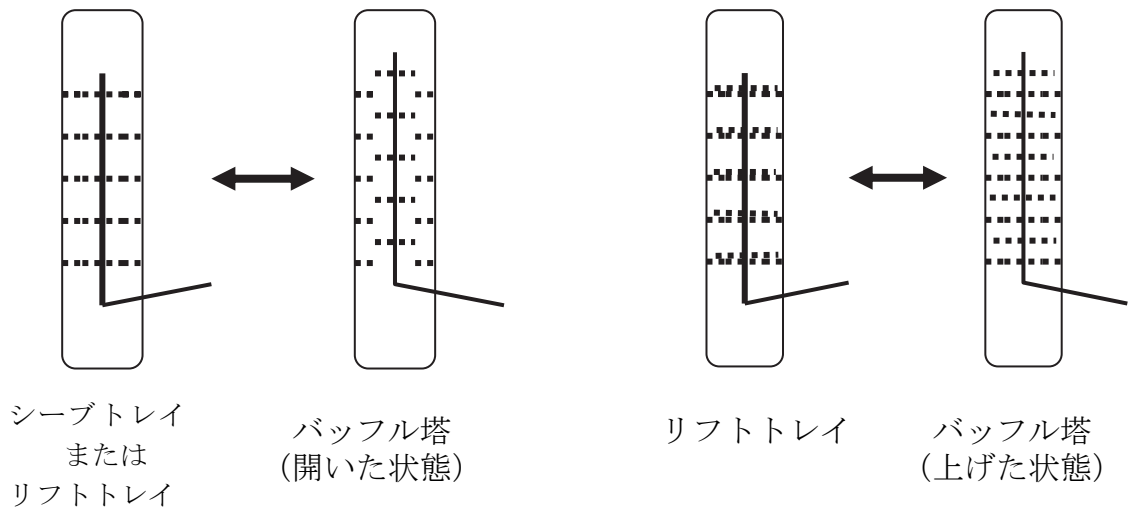


図5 チェンジトレイの概念図

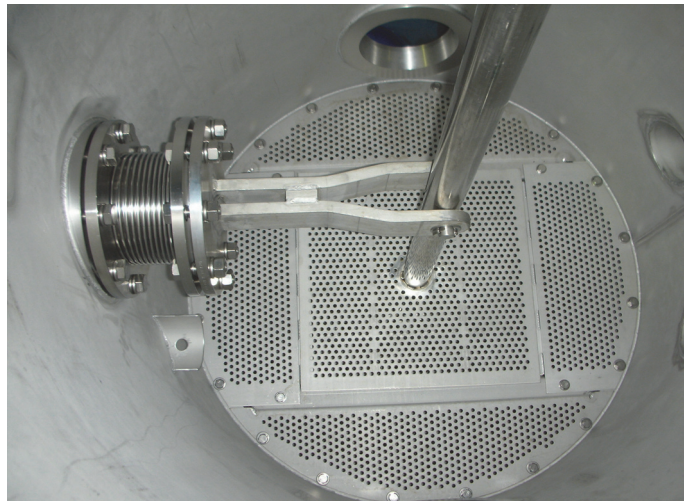


写真2 チェンジトレイ (シートトレイ型)



写真3 チェンジトレイ (リフトトレイ型)

シーブトレイ型の実際例を**写真 2**に示します。展示用のため小型ですが、中央部が上下するリフトトレイ型を**写真 3**に示します。

エステル化反応やエステル交換反応では反応を進行させるためには副生成物である水分やアルコールのような軽沸成分を除去する必要があり、かつ反応初期と後期では蒸発量が大きく異なりますので運転操作範囲の広いリフトトレイ塔が活躍しています。しかし、チェンジトレイの開発のきっかけとなったのは、①リフトトレイよりももっと広い操作範囲を持ち、かつ構造が単純な塔がほしい、②初期は常圧単蒸留、次に 10 段以上の分離効果を持つ精留（溶媒蒸留）で徐々に減圧運転をする、③そして 2～3 段の精留効果を持たせながら圧力損失を極力抑えた高真空での高沸点物の蒸留ができないか？、④飛沫同伴を抑え、限りなく 0 に近い圧損での高真空単蒸留で重合性のあるモノマーの精製を行えないか？等々の実際的なニーズからでした。当時は塔の段数を運転中に変更することなどとても不可能であり、塔の中で重合や分解などの危険性がある状態であっても最後まで運転するか、または追い出し用の太い配管を別に設けるしか方法はありませんでした。ここに開発したチェンジトレイは塔外部よりトレイの状態の設定が自由にできる画期的な仕掛けになっています。仕掛けは簡単ですが、上記の悩みを一気に解決し、大きな効果を発揮しています。まさに難題は真のニーズでした。蒸留塔が必要な時には棚段として作動し、棚の中間状態も塔の外部から調節できるなど、圧損を外部から変えられるようにしています。蒸発操作で最終的な追出しの時にはトレイの一部（中央部）を持ち上げて、大きな通路を確保し、飛沫同伴防止を兼ねたバツフル塔として運転することもできます。チェンジトレイを必要な段数毎に別々に動かすことで、必要な段数だけを選択して有効に利用することも可能です。

4. リフトトレイ、チェンジトレイの応用展開

4-1 リフトトレイ塔とウォールウェッター蒸発装置との組み合わせ

リフトトレイ塔とウォールウェッター蒸発釜を組み合わせ、商品名 WW 蒸留プラスとしてお納めしてきましたが、VOC 規制問題に関連した溶剤回収リサイクルのためにユニット化した簡易なバッチ蒸留システムとして特許が成立しました。

蒸発釜にウォールウェッター翼を用いれば液量が減少しても大きな蒸発速度を維持できますので蒸留塔と組み合わせた図 6 のバッチ蒸留ユニット (WW 蒸留プラス) は常に安定した蒸留精製操作ができます。廃混合溶剤は粘着性や焦げ付き易い樹脂等を含むことも多く、ウォールウェッター翼が蒸発釜のジャケット面を常に溶液で塗らせるので、ファウリングが抑制される大きなメリットもあります。蒸気が供給される蒸留塔は充填式も棚段式も可能で、塔頂で互いに溶解しにくい 2 液相に分かれる場合はデカンターを付設することができます。

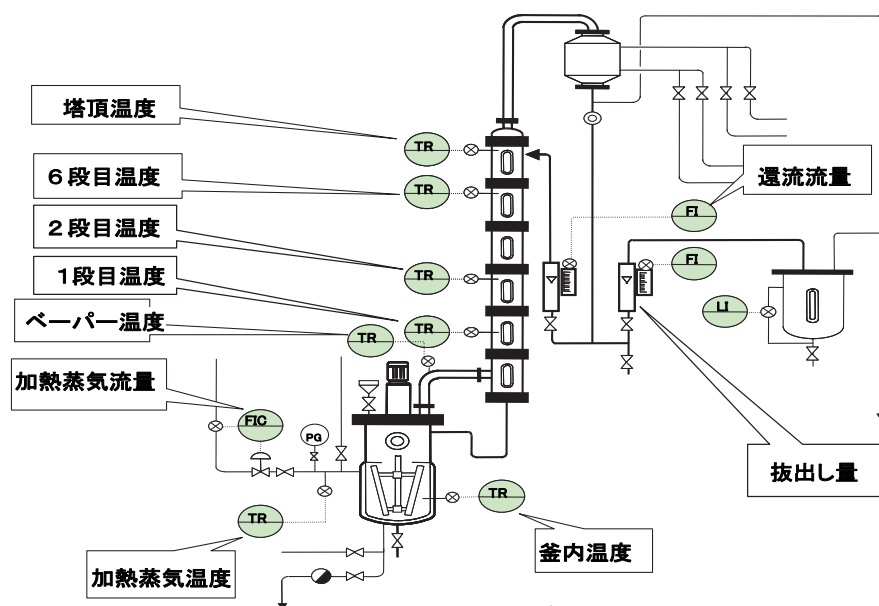


図 6 ユニット化した溶剤回収システム

図 6 のユニットでテストした実験例についてお話します。この装置はウォールウェッターWW 蒸発釜 (伝熱面積 0.68 m^2) とリフトトレイ 5 段の精留塔で構成されています。実験の原液として微量のトルエンを含む混合溶剤 (トルエン $0.1 \text{ wt}\%$ 、それより低沸点の A 溶剤 : $97.8 \text{ wt}\%$ 、高沸点の B 溶剤 : $2.1 \text{ wt}\%$) を最初、蒸発釜に仕込んで全還流操作をし、次に原液を連続的に供給しながら留出液を同じ流量で抜き出し、

還流比 = 1 で準定常操作をしました。原液は低沸点成分が圧倒的に多いので塔頂側のみで抽出をし、塔各段の温度の時間変化より塔内の高沸点成分の蓄積状態を観察する一方、塔頂、塔底で成分分析をしました。

図 7 に全還流操作とこれに続く準定常操作の運転記録（還流・留出液・原液の流量）を、図 8 には各段の温度変化を示しています。220 min までにはボイラー以外で温度上昇がなく、高沸点成分の蓄積はほとんどないことがわかります。図 9 に準定常操作後期（198 min）における塔頂組成のガスクロチャートを示していますが、順調に塔頂に主成分である A 溶剤が高純度で回収できています。

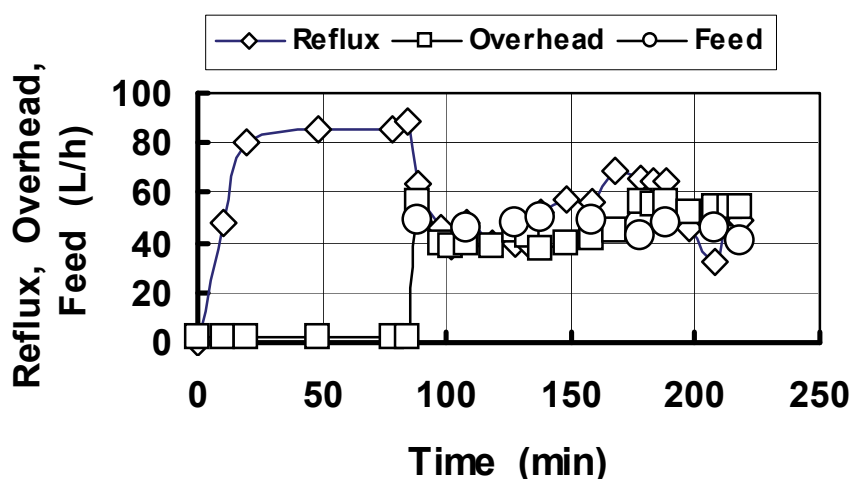


図 7 全還流操作と準定常操作の運転記録

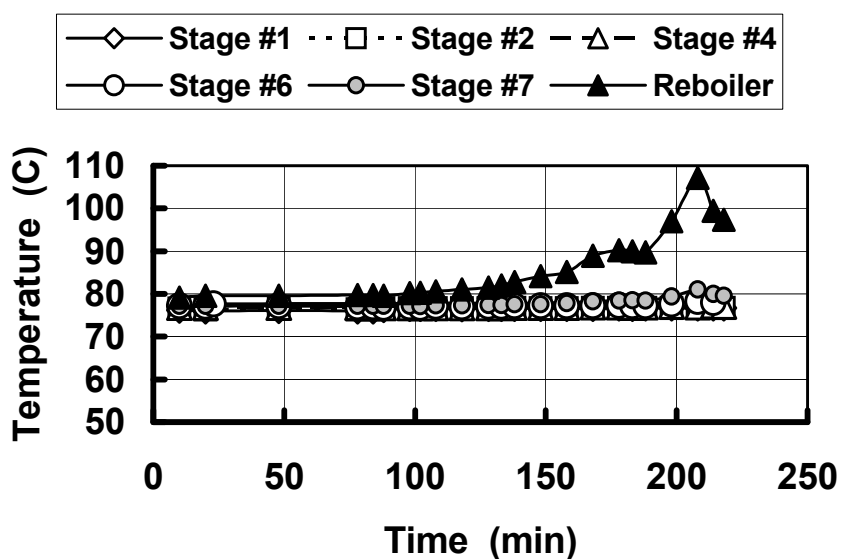


図 8 精留塔の各段の温度の時間変化

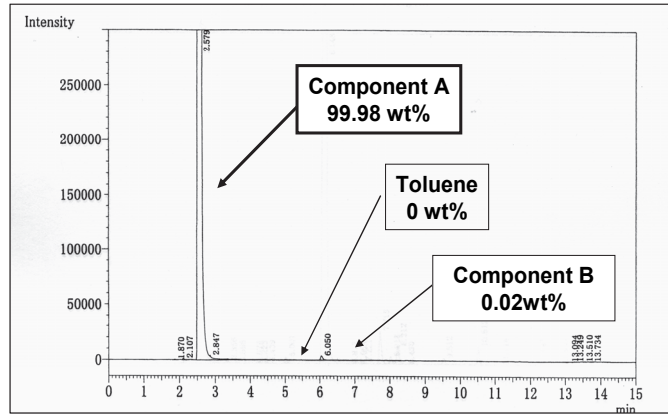


図9 準定常運転後期（運転開始後 198 min 経過）における
塔頂蒸気組成のガスクロマトグラム

4-2 リフトトレイの新たな可能性

図10のように、蒸留塔を二重管構造にして、内管内を濃縮部にし、外側の環状部を回収部にし、その間で内部熱交換させる構造を考えてみましょう。低沸成分が多くなる濃縮部を加圧して高沸成分が多く存在する回収部より沸点を上げて濃縮部と回収部の間で内部熱交換する通称棚段式 HIDiC 蒸留塔を実は当社で実用化へ向けて技術開発中です。

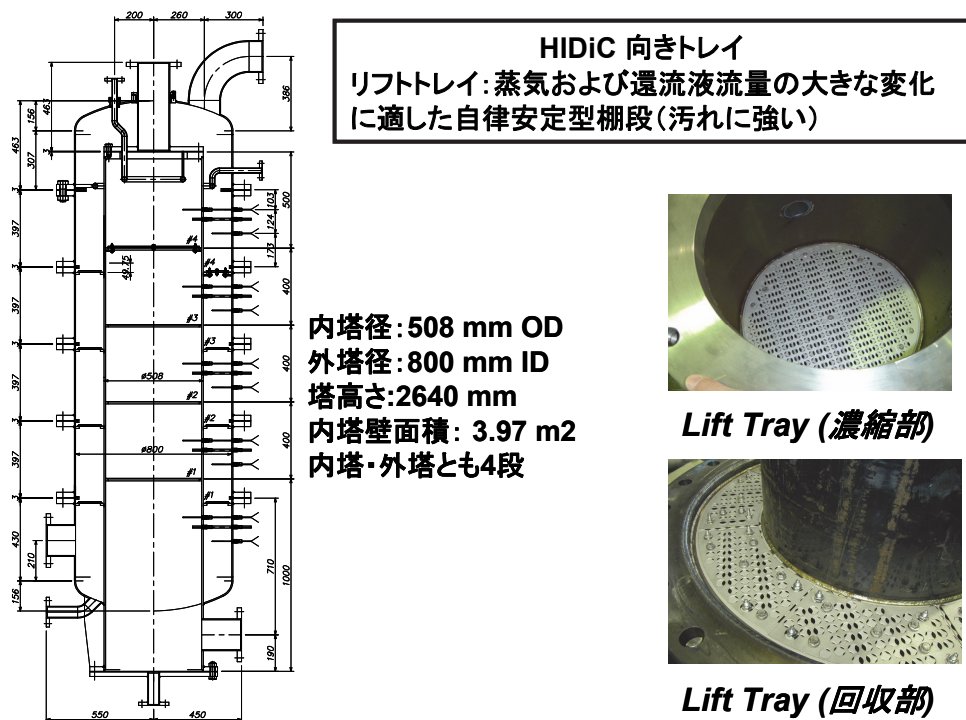


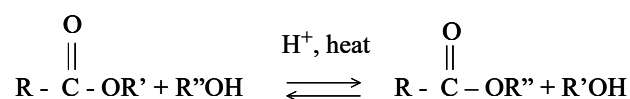
図10 リフトトレイを使用した二重管型棚段式 HIDiC 実験装置

加圧により沸点が上昇した濃縮部から常圧の回収部へ熱を与えるため、濃縮部は蒸気が凝縮して塔頂より塔底の還流液量、蒸気流量がともにかなり大きくなる一方、回収部は下降する還流液が蒸発して、塔底より塔頂の蒸気流量、還流液量がともにかなり大きくなります。このように、塔高さ方向に還流液量、蒸気流量が大きく変化する蒸留塔に有望なトレイとしてリフトトレイが応用できそうです。そのような訳で当社で二重管型棚段式 HIDiC 実験装置 (図 10) にリフトトレイと搭載して NEDO 技術開発プロジェクトを推進しています。

4-3 チェンジトレイ塔とウォールウェッター蒸発装置の組合せ

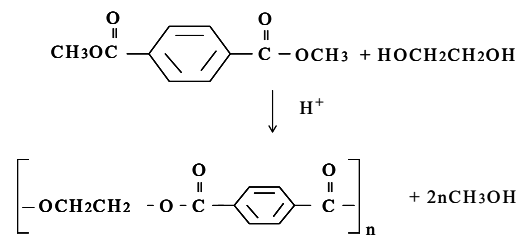
回分操作の場合に、単に蒸留だけを行うのではなく、単一の攪拌タンクで反応、脱溶媒、溶媒精製、製品精製など一連の操作を移し替えなしで順にできないかとのニーズがありました。

例えば、有機系の反応によく使われるバッチ反応装置には蒸留塔がよく併設されます。バッチ反応の進行に伴い、反応釜から蒸発させて分離除去あるいは精製すべき物質が変わったり、反応溶液中の成分が変わったり、生成物の濃度、分子量が大きくなり沸点が高くなって気液平衡関係が変わるなど、時々刻々変化する反応環境を自由に制御できる蒸留塔は出現しないだろうかとの待望論がよく出されていました。



上の式のように、エステル交換反応は高沸点脂肪酸 R-COOH とアルコール R'OH のエステルを目的のアルコール R''OH で交換すれば、アルコール R'OH が遊離してきます。このアルコールが低沸点であれば、それを蒸発除去すればこの反応は望む右方向へ進みます。

例えば、酸を触媒にしてテレフタル酸ジメチルをエチレングリコールでエステル交換反応すれば、ポリマー状エステルができメタノールが遊離してきます。このメタノールを除去して反応を進めたいが、反応の進行に伴い反応溶液中のポリマー状エステ



ルの分子量が増加するので粘度も大きくなり、気液平衡関係は高沸点側へシフトしてきます。このようにエステル交換反応あるいは縮合反応などの初期の反応環境は常圧であり、副反応生成物や反応で遊離してくる低沸点アルコールのように逆反応を起こす物質を除去し、一緒に蒸発する溶媒を分離精製して反応釜にフィードバックするなど蒸留塔も常圧で望む反応の進行を促す反応制御のために働きます。しかし中期になると除去、精製したい物質が変わったり、反応溶液の生成物濃度や分子量などが上がり沸点が高くなってきますが、生成物の熱変性が起きぬように溶液の反応温度を上げないで阻害物質や不純物を蒸発させるために反応釜も蒸留塔も減圧にしたいことが度々あります。そのための真空ポンプは通常、塔頂コンデンサーの下に繋ぐので減圧の程度によっては圧損の関係で蒸留塔の段数も減らさねばならない事態になります。後期に至っては不純物や溶媒、反応原料物質などを粘度の高い溶液より追出し、生成物の精製もしたいので、反応釜を高真空にし、蒸留塔の圧損を限りなく0に近づける必要性が出てきます。このように時々刻々反応環境が変化する制御に適応できる蒸留塔は従来存在しなかったのですが、**図 11** に示すように、トレイを塔外から自由に開閉したり、段数を変えたり、圧損を塔外より自由に制御できる新しい蒸留塔「チェンジトレイ」が考案・開発されたのでした。重合性のあるモノマーの精製を行う場合もWWチェンジトレイプラスが有効です。棚段の中間状態が必要な時も塔の外部から段数を調節でき、随時、圧損を外部から変えることができます。チェンジトレイは反応釜の反応環境適応型蒸留塔を構成します。また、蒸発操作で追出しの時にはトレイの一部を完全に持ち上げて、大きな通路を確保し、飛沫同伴防止を兼ねたバツフル塔として運転できます。

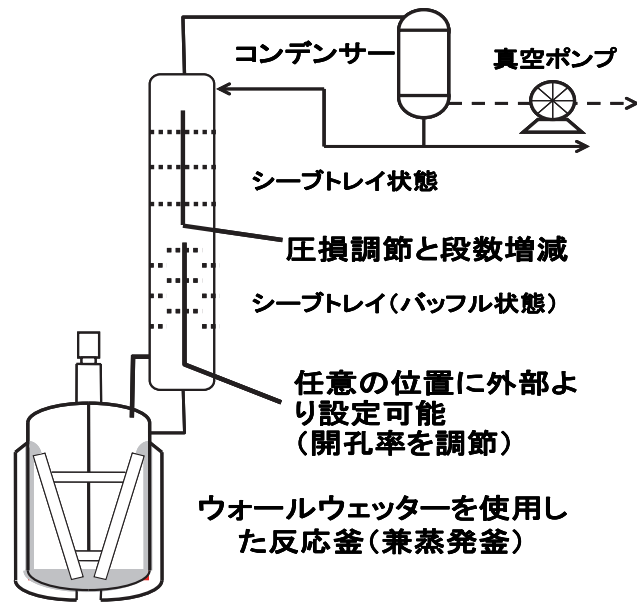


図 11 チェンジトレイ蒸留塔を併設したバッチ反応装置
(WW チェンジトレイプラス)

チェンジトレイを必要な段数毎に、別々に動かすことで、分離条件に合わせて必要な段数だけを有効に利用することも可能です。特に、受託生産をされる会社にとって蒸留塔は必要ですが、受託品目毎に専用の蒸留塔を持つことは不経済です。製品やプロセスによって段数を逐次変化させる必要があり、しかも、高真空の追い出しまでする必要があります。チェンジトレイを使用すれば、種々の条件に対応できる上、兼用する蒸留塔のトレイの取替えが不要になり、設備面、時間面とも大きなメリットがあります。

4-4 バッチ蒸留

その他の使用方法として、多成分（低沸点順A, B, C, …）系を分離していくバッチ蒸留にチェンジトレイを使用すれば、操作時間を大幅に短縮できる画期的な運転方法があります。バッチ蒸留では品目（成分）と品目（成分）の間で中間カットを行う操作が行われます。例えば図 12 のように、一番低沸点のA成分を留出液として回収した後にAB成分の混合物が留出してきますが、チェンジトレイを使用するとトレイ上にホールドアップされた混合液はチムニーより瞬時に塔外に取り出せる

ので、中間カット時間を殆どなくすことに成功しました。また、カット終了後にすぐに元のトレイ状態に外部から戻すことで蒸留工程にすぐ復帰でき、次の B 成分を回収する運転が可能になります。その上、バッチ蒸留で液量減少により液面が低下する蒸留釜に「ウォールウェッター」を使用すれば液面が変化しても蒸発速度に変化がなく、運転をさらに安定化することができます。また、壁が常に濡れているので、伝熱面には焦げ付きや粘着などが無くなり、洗浄も非常に楽になります。

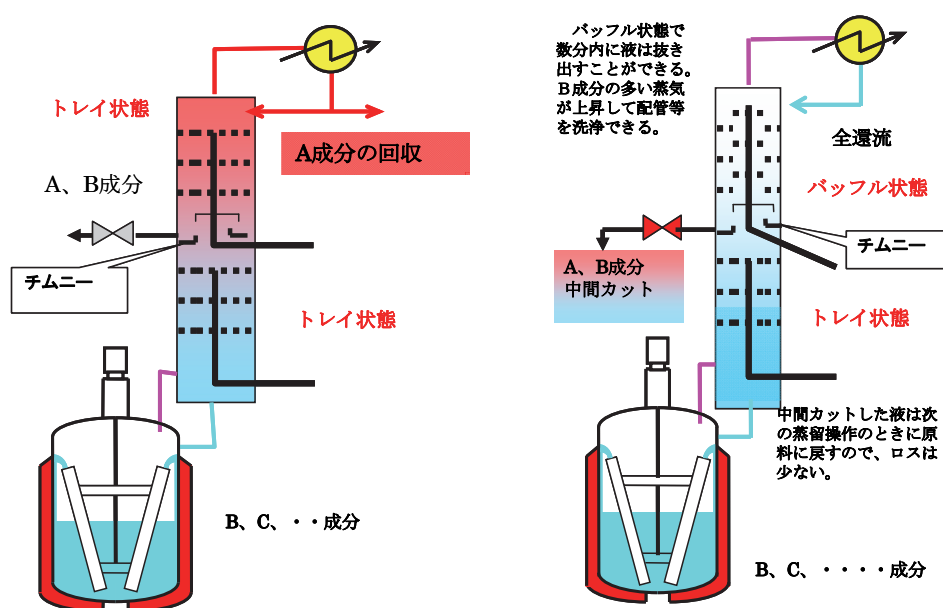


図 12 チェンジトレイによる多成分系バッチ蒸留

左：A 成分留出状態 右：AB 混合液中間カット（抜き出し状態）

5. おわりに

このように四半世紀にわたってリフトトレイに始まりチェンジトレイに技術展開できましたのもお客様から率直なご意見、ご要望をご教示いただいたお陰だと承知しております。お陰様でリフトトレイは化学工学協会（現 化学工学会）より 1975 年に技術賞を受賞し、約 800 塔ほどの実績ができました。チェンジトレイの技術は工業現場からの強いニーズから生まれたものであり、1991 年に塔径 1m、段数 25 段のチ

ェンジトレイ塔を納入して以降、着々と納入実績を挙げております。本システムは化学物質を扱う幅広い産業界に役立つ多目的型システムであり、高付加価値の有機物質や高分子モノマーの受託生産の汎用プラントとして現在、性能を発揮して大きな経済効果を挙げています。

分離技術会より 2004 年に第 13 回分離技術賞を受賞し、現在 10 基ほどがフルに活躍しています。リフトトレイ、チェンジトレイいずれも開孔率を変化できる圧力損失調節型蒸留塔を構成します。特にウォールウェッター蒸発器と組み合わせて一体化すれば、多様な蒸留プロセスや反応環境適応型の圧力損失可変式蒸留・反応プラントを構成します。

難題こそ真のニーズを実感した開発話を含めて技術開発の一端を披露させていただきましたが、これからも皆様方から頂戴するご意見やご要望に応えるべく、努力研鑽して参る所存です。

参考文献

- 1) 野田秀夫 他：分離技術, Vol.26, No.6, p.338 (1997)
- 2) 野田秀夫 他：化学工学, Vol.63, No.6, p.295 (1999)
- 3) 片岡邦夫・山路寛司：混相流、Vol.18, No.1, p.57 (2004)
- 4) 片岡邦夫：アロマティックス Vol.58 秋季号, p.9 (2006)
- 5) Noda, H. et al.: A High-efficiency Distillation System for Batch or Semi-batch Chemical Reactors, Distillation & Absorption 2006, IChemE, p.745-753, Sep. 4-6, London (2006)

特許

リフトトレイに関する特許： 日本 No.1102052

チェンジトレイに関する特許： 日本 No.3251036, No.3251040

WW 蒸留プラスに関する特許： 日本 No.4058410