

蒸留プロセスのイノベーション

— 理想状態からの「デチューニング」によるプロセス強化 —

中岩 勝*、大森 隆夫

本稿では、プロセス強化を実現する1つの方法論として、理想状態からの「デチューニング」という概念による省エネルギー化技術開発のアプローチ法を示し、内部熱交換型蒸留塔 (HIDiC) を含む蒸留プロセスの開発を例として議論した。まず、典型的なエネルギー多消費プロセスである連続蒸留の特徴及びその理想状態である可逆蒸留操作の概念について説明した。次に、可逆蒸留を出発点として「デチューニング」により様々な省エネルギー型蒸留プロセスを導出することができることを示した。その1つであるHIDiCの特徴を他のプロセスと比較して議論し、NEDOプロジェクト等によるHIDiC技術開発の経緯と産総研の役割を論じた。

キーワード: プロセス強化、蒸留プロセス、省エネルギー、デチューニング

Innovation in distillation processes

– Process intensification for energy savings through concept of “detuning” from ideal state –

Masaru Nakaiwa* and Takao Ohmori

A methodology of process intensification was discussed through the concept of “detuning” from the ideal state, especially for the energy-saving continuous distillation processes, which are typical energy consumer in the chemical and petrochemical industries. First, the reversible distillation was shown as the thermodynamically ideal state. Then, it was indicated that several energy efficient modifications of distillation processes can be obtained by “detuning” or simplifying the reversible system. Among these modifications, an internally heat-integrated distillation column (HIDiC) was one of the most promising options. The development of the HIDiC in the national projects was reviewed and the reduction of energy consumption by the HIDiC was estimated to be 60 % of the conventional column from the results of the projects.

Keywords: Process intensification, distillation process, energy-saving, detuning

1 はじめに

化学プロセスやそれを構成する反応装置・分離装置などを研究対象とする化学工学の分野において、「プロセス強化」が新しいパラダイムとして議論されている。プロセス強化は、プロセス・インテンシフィケーション (Process Intensification, PI) の訳語である。ただし、PIの定義は現状ではそれほど明確ではない。平田が述べているように^[1]、PIを実現した結果としてプロセスの性能が飛躍的に向上する、というのが研究者の間で認められている数少ない共通認識である。オーダーを超えた、すなわち少なくとも10倍以上の飛躍的な向上が目標であり、それをクオラム・リープ (Quantum Leap) と呼んでいる。従来の技術の延長では、プロセスや装置の改善・改良にとどまり性能の向上はせいぜい数10%程度しか達成できない。クオラム・リープの実現には、

作動原理から装置のサイズや形状までも考慮した、根本的な発想の転換が必要となる。

PIの歴史を振り返ると、この用語自体は新しいものではないことがわかる。黒田と松本によれば^[2]、すでに30年以上前に英国でプラントやプロセスの安全設計・小型化にPIという言葉が使われている。ただし、英国を含めた欧州から米国へ、そしてわが国においてPIへの関心が高まったのはStankiewicz and Moulijnの記事^[3]が発端である。その後、彼らのPIについての考え方も少しずつ変わっているが^{[4][5]}、PIのキーワードとなっているのはプロセスや装置のコンパクト化・マイクロ化・工程数削減などの「小型化」・「単純化」、性能向上や省エネルギー化などの「高効率化」、反応と分離あるいは蒸留と伝熱といった複数の操作を1つの装置で行う「統合化」・「複合化」、廃棄物の削減

産業技術総合研究所 環境化学技術研究部門 〒305-8565 つくば市東 1-1-1 中央第5
Research Institute for Innovation in Sustainable Chemistry, AIST Tsukuba Central 5, Higashi 1-1-1, Tsukuba 305-8565, Japan*E-mail: nakaiwa-m@aist.go.jp

Received original manuscript October 24, 2008, Revisions received January 13, 2009, Accepted January 13, 2009

などの「安全性向上」などである。このように説明すると、PIは産総研が提唱しているミニマルマニファクチャリング (MM)^[6]と共通点が多いことがわかる。真に必要な原料や装置のみで必要な時に必要なだけ部材や製品を製造するMMの概念は、化学プロセスを対象としているPIよりも上位の概念と言うこともできる。MMでは、「省エネ・省資源」、「高効率・低コスト」、「高機能・新機能」という、時には相反するような要求を同時に満たすことを目標としているが、それはPIでもまったく同じである。

著者らは、蒸留プロセスの省エネルギー化を目的として、蒸留操作と伝熱操作を「統合化」した内部熱交換型蒸留塔 (Heat Integrated Distillation Column, HIDiC) プロセスの開発を行ってきた。基礎研究から実用化までの道のりは決して平坦ではなく、振り返ってみると本格研究の展開そのものであったとの自負がある。さらに、もちろん当初から意図したものではないが、PIの成功例の1つと位置付けることもできる。以下では、HIDiCプロセスの実用化までの過程や考え方やアプローチ方法について、PIと関連付けながら記述する。特に、ここでは熱力学的理想状態からの「デチューニング」による新規プロセスの設計・開発を、PIの一手法として提示することを試みる。

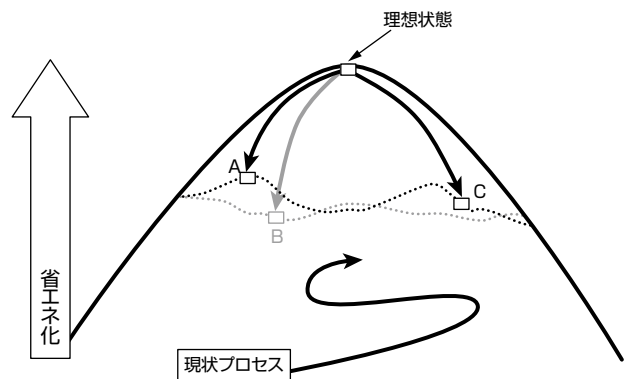
2 省エネルギー化へのアプローチ - 熱力学的理想状態と「デチューニング」

PIとしての蒸留プロセスのイノベーション・省エネルギー化を論じるために、まず「省エネルギー」の概念を確認しておきたい。「省エネ化によってエネルギー消費が20%削減された」というような記述をしばしば目にする。特にあいまいではなく、日常的な表現としては問題ないが、熱力学的には検討の余地がある。なぜなら熱力学の第一法則によれば、エネルギーは保存されるものであり、消費できるものではないからである。「小型車に買い換えたら燃費が20%良くなった」ときに削減されたものは、同じ距離を走行した場合に消費されたガソリンや軽油という燃料であり、エネルギーそのものではない。自動車では、燃料という物質の保持する化学エネルギーがエンジン (ガソリン車の場合は Otto サイクルという熱機関) により燃焼という化学反応を通じて一旦は熱となり、その一部が仕事に変換され走行に使われている。電気自動車やハイブリッド車を除いて、燃費の良いエンジンとは基本的にはこの変換効率の高いものを指している。変換効率の上限は、熱力学的な理論効率として温度等の条件により規定される。逆に言えば、現状のガソリンエンジンにおける燃料から動力への変換効率には理論的限界値が存在する。エンジンの高効率化は燃費向上のための重要なアプローチであるが、熱力学

的限界値を超える高効率化は原理的に不可能である。もう1つ例を挙げると、圧縮機を用いる冷蔵庫の動作原理は逆カルノーサイクルと呼ばれる熱機関であり、その理論効率すなわち同じ電力でどれだけの熱量を庫内から庫外に放熱できるかは、庫内冷却温度と庫外放熱温度により決まる理論的限界がある。同一の使用条件で動作する逆カルノーサイクル以上の省電力を達成することはできないのである。

以上の例を考察すると、次のように考えることができる。すなわち、省エネルギー化とは、同一の機能を発現させるために、外部から供給しなければならないエネルギーを極力少なくすることである。その際に、どこまで削減できるかはそれぞれの機能により理論的な限界がある。見方を変えたと、省エネルギー化とはいかに理論的限界に近い条件で機能を発現させていくかということになる。ここでは、理想状態のプロセスから実現可能なプロセスへの変更を「デチューニング」(detuning) と呼ぶことにする。一般的には、デチューニングはF1などのレーシングカーで培ったエンジン技術を市販車に移植する際に、コスト・耐久性・扱いやすさなどを向上させるためにエンジン性能等を下げの場合などに用いられる用語である。省エネルギーの分野ではよくターゲティング (targeting) という言葉が使われるが、これは現状プロセスから省エネ目標を定めて、より高効率なプロセスを目指すとのニュアンスを持つ語である。本稿では、これとは逆に、あらかじめこれ以上省エネ化できない理想状態 (非現実的なイニシャルコストや装置構造が必要) を明らかにし、そこから省エネ性を多少犠牲にすることで実現可能なプロセスを具現化する、との技術開発の戦略を提示する。その点を強調するためにあえて「デチューニング」という耳慣れない言葉を使うことにする。

注意しなければならないのは、理想状態から実現可能な状態への「デチューニング」は、必ずしも一次元的ではないということである。図1は一般論として、あるプロセス



A,B,C:理想状態からのデチューニングで得られた新プロセス

図1 理想状態からのデチューニング

の省エネ化を進める際のアプローチを模式化したものである。ここでプロセスの改善・改良などによる通常の省エネ化は、山のすそ野から少しずつ山を登っていくことに相当する。これに対して「デチューニング」では、まず山の頂上を確認しておき、そこから省エネ性を勘案しつつコスト等も考慮しながら山を下りていくイメージとなる。このとき下山する経路は1つではなく、経路により降り立つ地点も変わってくる。このような省エネ化アプローチには、主として2つの特長がある。1つは、理論的限界から下りてくるため、技術開発として考えた場合に原理的に不可能な目標設定にはなり得ないことである。もう1つは、ある「デチューニング」による現実化が様々な要因で困難となったときには、山頂に戻って別の下山経路を検討することが比較的容易なことである。問題点としては、「デチューニング」の結果が現状のプロセスから大きくかけ離れたものになってしまう可能性が挙げられるが、逆に言う「不連続で急激な動的变化を伴う変革」であるPIを実現しようということにもなる。

3 「デチューニング」による蒸留プロセス省エネ化の戦略

まず前節の議論を踏まえて、蒸留プロセスの省エネルギー化の歴史を振り返ってみる。蒸留プロセスは紀元前に香料を精製するために使用されるなど、最も古くから使われている化学プロセスの1つである。その原理は加熱による溶液の蒸発と冷却による凝縮で、溶液成分の沸点差に基づいて液体を分離するというものである。操作としては、容器に仕込んだ原料液を一定時間加熱し、発生する蒸気を冷却・液化して集める、いわゆる単蒸留が行われていた。その後アルコールや酸の製造など、またイタリアのルネッサンス期には錬金術(オカルトではない自然の理を利用する技)の重要な技術として、蒸留操作は蒸留酒を始めとして様々な応用されてきた。それが18世紀から19世紀にかけて、

熱がエネルギーの1つの形態であることや蒸発潜熱の概念が明らかにされ、蒸気の持つ熱で液体を加熱可能となり、様々な試みを経て19世紀末に原油からの自動車用燃料精製のニーズにより現在の連続蒸留プロセスの基礎が確立された^{[7][8]}。この単蒸留から連続蒸留への展開は、蒸留操作については「単純化」しつつ、プロセスの性能としては高性能・連続・大量処理などの「高効率化」を実現したものであり、PIの実現であると言えることができる。蒸発潜熱という当時の最新の科学的発見が、プロセスの大きな変革をもたらしたのである。

一般的な連続蒸留塔の概略を図2に示す。原料を供給する部分より上部を濃縮部、下部を回収部と呼んでいる。濃縮部では原料より低沸点成分の濃度が高く、回収部では高沸点成分の濃度が高い。内部ではトレイまたは段と呼ばれる棚状の構造物や様々な形状の充填物により、下部より上昇する気相混合物と上部より下降する液相混合物が接触するように工夫されている。この接触により気相混合物と液相混合物の間で蒸発潜熱が移動し相変化する。この際に、発生する気相は液相よりも低沸点成分に富み、液相は気相よりも高沸点成分に富むことになる。したがって、塔の両端に向かって低沸点成分と高沸点成分を濃縮することが可能となる。このような原理から、蒸留塔では液相を分離するにもかかわらず、溶液をいったん気相に変換するために必要な蒸発潜熱を塔底のリボイラーから供給しなければならない。また塔全体にわたって物質移動のための気液接触が可能となるように、塔頂のコンデンサーで蒸気から凝縮潜熱を奪って再び液相に戻す操作も必要となる。

連続蒸留塔プロセスでは、上記のように塔全体で気液接触を行わせるために塔頂と塔底で冷却と加熱を同時に行う。熱力学的な解析によれば、図3のように蒸留塔の濃縮部で高さ方向に沿って連続的な冷却を行い、回収部で

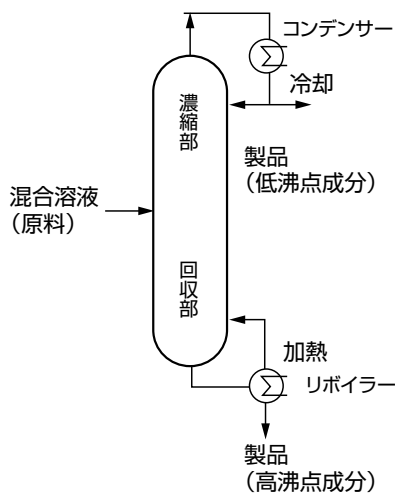


図2 通常の連続蒸留塔

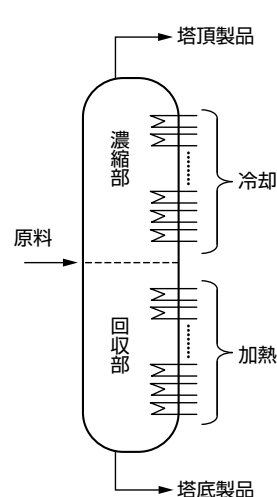


図3 可逆蒸留操作

連続的な加熱を行うと、理論的に最も効率的な蒸留操作が可能であることが示されている^{[9][10]}。この操作は可逆蒸留操作と呼ばれ、具体的には段数無限大の蒸留塔を用いて濃縮部の段ごとでは無限小の熱量による冷却を行い、回収部の段ごとでは無限小の熱量による加熱を行うことになる。これが熱力学的に理想条件での連続蒸留操作であり、蒸留塔の省エネルギー化がどのような形で進められようと、また新規な省エネルギー化手法が今後開発されるとしても、最も効率の高い操作は可逆蒸留操作である。どのような省エネルギー化技術であっても、省エネルギー化が進めば進むほど可逆蒸留操作に近づくことになる。言い換えると、蒸留プロセスの省エネルギー化とは、経済的に成立する範囲内でいかにプロセスを可逆蒸留操作からそれほど性能を落とさずに「デチューニング」するかということになる。ただし、蒸留操作の本質である「物質移動」操作に、加熱・冷却といった強制的な「熱移動」操作を持ち込むことは大きな変化を与えることになり、その影響をどのように考えるかが効果的なプロセスの達成に非常に重要となる。したがって次のステップは、この点を踏まえてどのような装置構造を採れば「デチューニング」が可能となるかについての検討であり、これはPIを実現するための1つの過程と捉えることができる。

4 「デチューニング」を実現する装置構造

「デチューニング」を行うためには、理想状態である可逆蒸留をどのように解釈するかが重要となる。図3の可逆蒸留塔は、多数(無限個)の加熱器(リボイラー)と冷却器(コンデンサー)で構成されている装置と見なすことができる。これらを高さの異なる多数(無限)の蒸留塔に分解すると、図4a)のような構成になる。ここで、本来無限個の蒸留塔で構成される図4a)をたかだか2本の蒸留塔に「デチューニング」して「単純化」すると図4b)になる。このプロセ

スは、1960年代にPetlyukらによりその特性が研究され、一般にPetlyuk塔と呼ばれている^[11]。この考え方の延長でさらに単純化が検討され、ドイツBASF社等により開発された蒸留プロセスが欧州のプラントを中心に実用化されている。わが国では協和発酵(株)や住友重機械工業(株)により商用機が開発されている^[12]。

もう1つ別の視点で可逆蒸留操作を捉えた例を次に示す。蒸留塔では、基本的な特性として上部ほど低沸点成分の濃度が高く温度が低い。ここで、先に述べた逆カルノーサイクルの原理を用いると、低温熱源から取り出した熱を高温にして供給することが可能となる。この観点からの「デチューニング」のアプローチを図5a)に示す^[13]。圧縮機はヒートポンプの役割を果たしており、蒸留塔とヒートポンプを「統合化」したプロセスである。この図では、多数の圧縮機を用いて上部から抜き出された熱を圧縮により昇温して下部に供給している。これにより、圧縮仕事の投入を除けば可逆蒸留操作に近いプロセスとなる。そこで圧縮機は1機だけ用い、濃縮部と回収部の各1箇所のみで熱交換を行うように「デチューニング」すると図5b)となる。この図のような装置は、一般に蒸気再圧縮塔(Vapor Recompression Column, VRC)と呼ばれている。VRCは、塔頂と塔底間の温度差が比較的小さい場合に有利とされ、低濃度のエタノール濃縮などで実用化されている例がある。VRCでは、塔頂と塔底という装置内で最も温度差の大きな部分の間でのみ熱の授受を行い、しかも加熱と冷却も各1箇所のみで行っている。これにより可逆蒸留操作よりも装置を「単純化」できるが、可逆蒸留操作との乖離は大きくなり省エネ性も限定的なものとなっている。

5 より理想状態を目指したHIDIc

前節で紹介したPetlyuk塔とVRCは、それぞれ独立した省エネ蒸留のアイデアであり、図1のBやCに相当する。

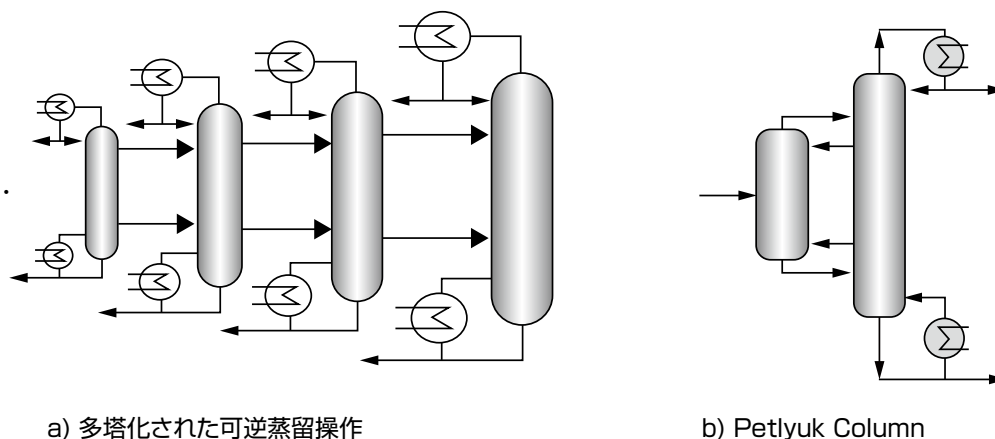


図4 多塔による可逆蒸留操作へのアプローチ

装置の基本構造はまったく異なるが、理想状態からの「デチューニング」の考え方に立てば共通した方法論に基づくものとして整理できるのである。それでは他に「デチューニング」は考えられないだろうか。VRCの「デチューニング」のポイントは、濃縮部の1箇所と回収部の1箇所を熱を移動させることであった。熱移動を行わせる箇所を1箇所ではなく複数にすれば、より理想状態に近づけることができる。しかし、それには複数個の圧縮機が必要となり現実的ではない。そこで、多数の箇所での熱移動を可能とする現実的な装置構造を検討するために、もう一度通常の連続蒸留塔(図2参照)の特性を考えてみる。通常の連続蒸留塔は、高さ方向の濃度変化により上に向かって塔内温度が連続的に低下する。この特性は可逆蒸留操作でも同じであり、濃縮部の冷却温度は回収部の加熱温度より必ず低い。したがって、濃縮部から取り出した熱をそのまま回収部の加熱に用いることはできない。図5ではこの問題を解決するために、圧縮機(ヒートポンプ)による昇温を利用している。

それでは多数箇所での熱移動をシンプルに達成するにはどうすればよいであろうか。図5a)では、濃縮部の多数の冷却点の全てが回収部の多数の加熱点の全てよりも温度が低くなっている。もし濃縮部の温度が回収部より高ければ、冷却点からの熱はそのまま加熱点に供給することができる。濃縮部の温度を高くすることは可能であろうか。蒸留分離は気液の平衡関係を利用しており、圧力を上げれば同じ組成で平衡温度を高くすることができる。したがって、濃縮部の圧力を回収部よりも高くすればよいことになる。そのためには濃縮部と回収部を分割し、濃縮部の圧力を全体で熱移動が可能となる温度まで上げればよい。こうすることで、濃縮部で取り出された熱は直接回収部に供給することが可能となる。濃縮部全体の圧力を上げるには回収部からの蒸気を圧縮すればよい。それに必要な圧縮機は1機で十分である。

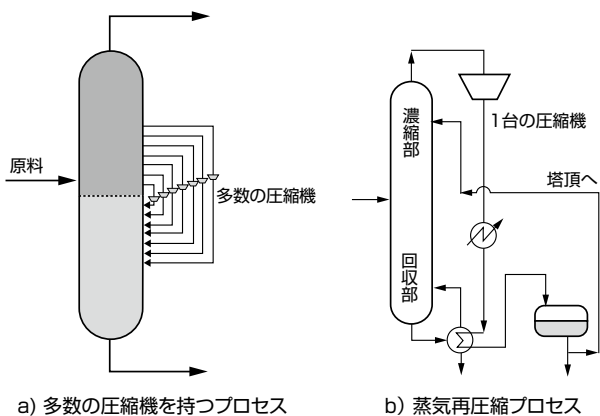


図5 多数の圧縮機による可逆蒸留操作へのアプローチ

濃縮部の温度が回収部よりも高くなれば、熱移動には様々な方法が考えられる。最もシンプルなもの、濃縮部と回収部を直接接触させる方法であろう。このように、圧縮操作を加えることにより可逆蒸留操作をほとんどそのまま具現化し、省エネ化を中心とした「高効率化」を目指したものがHIDiC(図6参照)なのである^[4]。著者らは、これもまた一種の「デチューニング」であると考えており、図1のAに相当する。また、HIDiCは蒸留と伝熱さらにヒートポンプの三者を「統合化」したプロセスと捉えることもできる。HIDiCでは、塔頂と塔底の温度差が小さく蒸留分離の困難な溶液系ほど省エネ化が図れる。比較的沸点差の小さなプロピレン/プロパン混合系では、通常の蒸留塔と比較して1/10程度のエネルギーで分離できるとの結果が得られている。表1には、HIDiCとVRC及びPetlyuk塔の特徴を簡潔にまとめて示した。表中の「イニシャルコスト」は、蒸留塔本体の製作費である。蒸留塔の建設一式で考えると、このほかに配管や計測等のコストが必要であり、本体価格差ほどの差にはならない。また、「適用性」は工業的に適用可能な溶液系の分離仕様の範囲の広さを表している。HIDiCは、塔の高さ方向の温度勾配がおおむね均一になるような系に特に向いている。石油化学工業の主力製品であるベンゼン/トルエン/キシレンの混合溶液や、粗シクロペンタン精製を含む多くの蒸留分離はこの条件にあてはまる。またPetlyuk塔は低濃度の不純物除去には向いており、VRCは沸点差の小さな溶液の分離に適用性がある。通常の蒸留塔は、これらより適用性は広く一般論としてイニシャルコストも有利な場合が多い。HIDiCは可逆蒸留操作の概念をより忠実に具現化しており、Petlyuk塔と比較すると省エネ性能・適用範囲とも上回り、またVRCの問題点である必要な圧縮による昇温幅の点で大き

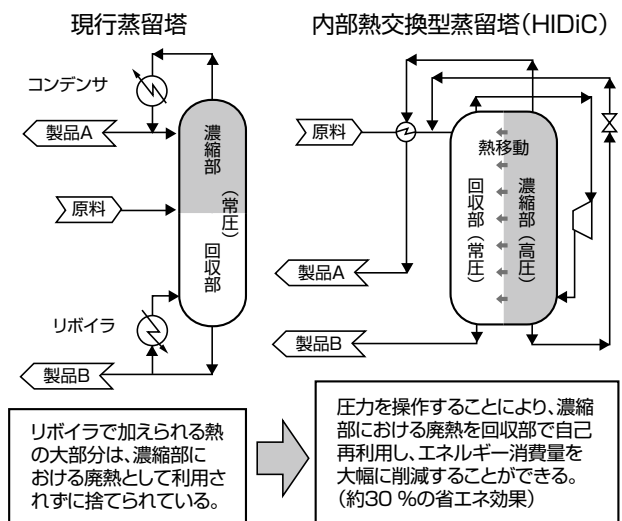


図6 内部熱交換型蒸留塔 (HIDiC)

く改善されているため省エネ性能で有利となっている。分離仕様の条件にもよるが、Petlyuk 塔や VRC に対して 20% 以上の省エネ化が期待できる。

HIDiC の基本的な概念は、1970 年代に米国ノースウェスタン大学の Richard Mah 教授により空気分離等の深冷蒸留分離を対象として発表された^[15]。Mah 教授はこのシステムを SRV (Secondary Reflux and Vaporization) 蒸留と呼んでいる (図 7 参照)。ただし、この論文の中では理論的な可能性のみが示されただけである。論文の中では空気分離のような低温で沸点差の小さな系で省エネになることを示しているが、実現性についてはほとんど考慮されていなかった。Mah 教授自身、もともと実現可能性は低いと考えていたようである。実際、このアイデアについての特許は出願されておらず、したがって HIDiC 技術については初めから基本特許と呼べるものが存在していない。Mah 教授はもともと蒸留分離の専門家ではなく、グラフ理論の応用によるプロセスフローの最適化などの研究を行っていた。そして 1970 年代中ごろの第 1 次オイルショック後に、化学プラントの中で最もエネルギー多消費である蒸留プロセスに着目し、本格的に省エネルギーに関する研究を開始したと推察される。当時、蒸留塔は断熱材などで塔本体を包み、塔頂や塔底以外の部分での熱の出入りを極力小さくすることが工学的な常識であり (現在も基本的には変わっていない)、積極的に塔本体で熱を出入りさせるという操作はまったく常識外であった。1980 年代始めに Mah 教授の下で SRV 研究を行った清水和幸九州工業大学教授によれば、SRV を発表した当時の米国化学工学会 (AIChE) の反応は非常に冷たいものであり、「論文のための研究」と見なされほとんど無視されたそうである。その後、1980 年代前半に主として米国で研究論文及び特許によりいくつかの提案がなされたが、いずれもアイデアや概念の提示にとどまり、実用化を視野に入れた研究はまったく行われなかった。

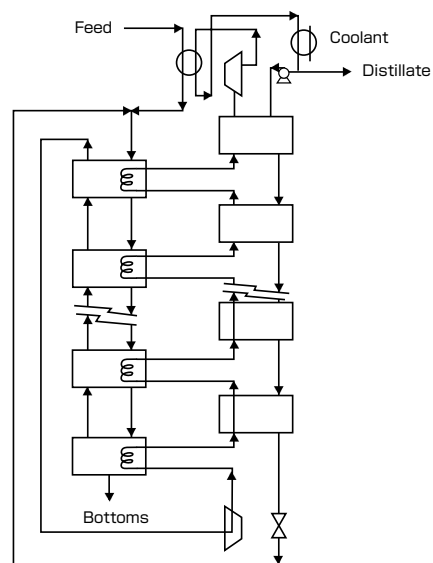
6 HIDiC 実用化への道のり

Mah 教授が最初に論文を発表してから数年後に、高松武一郎京都大学教授 (当時) がこのアイデアに注目し、プロセスの基本的な特性に関する研究を開始した。当時、

表 1 HIDiC と他の省エネ蒸留技術の比較

	省エネ性	適用性	操作範囲	イニシャルコスト
HIDiC	○	○	○	△
VRC	△	△	△	△
Petlyuk	△	×	△	○

高松教授は化学プロセスの熱力学解析やエクセルギー解析に関する研究を行っており、その過程で HIDiC の省エネルギー性の高さに着目したと思われる。1980 年代半ばより、著者らは工業技術院化学技術研究所 (物質工学工業技術研究所を経て現産総研) において、高松教授との共同研究等によりこのプロセスの特性を理論的及び実験的に解明した。著者らはまず、分離の条件と操作圧力を与えることで、塔の高さや段数及び必要な伝熱面積などを決めることができ、塔全体の設計が可能であることを理論的に示した。また、高圧側の操作圧力はできるだけ小さいほうが省エネとなるが、熱力学的には限界があり、その値は分離の条件を与えれば決まることを明らかにした。実験的には小型の装置を用いて、内部熱交換による塔底の加熱量を削減できることを実証した。ただしこの装置は圧縮機が塔本体よりも大きなものであり、圧縮効率も低く電力を含めた省エネルギー性を示すことはできなかった。工業技術院では、その時期に「スーパーヒートポンプ・エネルギー集積システム」のプロジェクトを実施しており、著者らは HIDiC 技術が広い意味でのヒートポンプ概念による産業プロセスの省エネルギー化として位置付けられるものと考えていた。1990 年代に入ると、イギリス・フランス・ハンガリー等の大学の研究グループにより実験的なアプローチを含めた研究が進められたが、実用化への見通しは得られなかった。一方、わが国では「広域エネルギー利用ネットワークシステム」プロジェクトが 1993 年から 2000 年までの期間で実施され、その中で上記の研究成果をベースに HIDiC の研究開発が、工業技術院及び新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 委託事業 (木村化工機 (株)、丸善



Mah R.S.H., et.al., AIChE Journal, Vol. 23(5), 651-658 (1977)

図 7 SRV 蒸留の概念

石油化学 (株)、関西化学機械製作 (株) の 3 社が受託により進められた。1999 年 12 月には、丸善石油化学 (株) 千葉工場内に塔径約 300 mm で高さ約 25 m のプロトタイプ実験塔が建設され、ベンゼン/トルエン系で 300 kg/h の小規模な処理量ながら、世界で初めて 100 時間以上安定した連続運転に成功した。

この成果を発展させるべく、経済産業省と NEDO により地球温暖化防止新技術プログラム/内部熱交換による省エネ蒸留技術開発プロジェクトが、著者らの 1 人をプロジェクトリーダーとして 2002 年 9 月に開始された^[16]。参加した民間企業は、石油・化学産業分野をターゲットとした木村化工機 (株)・丸善石油化学 (株)・関西化学機械製作 (株) の 3 社と、空気分離をターゲットとした日本酸素 (株) (現大陽日酸 (株)) と (株) 神戸製鋼所の 2 社である。プロジェクトでは、主に規則充填物を用いた濃縮部を胴側とし回収部をチューブ側とする図 8 a) に示すような二重管構造の基本設計について検討を行った。2003 年度末には、丸善石油化学 (株) 千葉工場に 12 成分系を対象とするパイロットプラント (図 8 b) 参照) の建設が決定された。この試験装置は、図 8 c) に示すように 7 本の二重管を束ねた形状になっており、気液の負荷に合わせて内管径を 3 段階に変化させ、各部分の塔負荷を調整するなど、PI を実現するための種々の装置上の工夫に基づいて製作が行われた。

パイロットプラントの建設は順調に進み、2005 年度には試験運転が行われた。最終的に 1000 時間の連続運転を達成し、さらに条件変動運転や外部の熱源を全く用いない運転等も行い、いずれの場合も設計時に想定した省エネ性能を実証する運転を安定的に行うことができた。運転結果で得られた省エネ率は、1 次エネルギー換算で既設蒸留

塔と比較して 62 %であった。投入電力約 30 Mcal/h に対して削減リボイラー熱量は 290 ~ 320 Mcal/h となり、投入電力量と得られた加熱量の比 (ヒートポンプの成績係数) では約 10 の高い値が得られている。NEDO プロジェクト終了後には、産総研と上記の石油・化学産業分野 3 社、及び新たに三菱化学 (株) と東洋エンジニアリング (株) の 2 社が加わった 6 者体制の共同研究 (コンソシアム) が開始され、本格的な実用化と普及体制について検討を行った。成果は各社に持ち帰られたが、まず木村化工機 (株) が 2008 年度より商用機の営業活動を開始している。一方、諸外国でも地球環境問題への対応を背景に、近年、HIDiC 研究開発が検討されており、特にオランダでは HIDiC プロセスの実用化研究が 2002 年 1 月より開始され、現在第 2 期研究開発を実施中である。このプロジェクトには、デルフト工科大学や ECN 国立研究所を中心として欧州の有力企業が参画している。

なぜわが国だけが先頭を切って実用化に目途をつけることができたのか? その解答は明確ではないが、著者らは HIDiC の持つ蒸留と熱移動を同時に達成するという特徴の実現に向けた戦術の相違にあると考えている。1980 年代の米国や 90 年代の欧州での研究では、濃縮部と回収部の熱移動をいかに大きくするか研究の主眼が置かれ、結果として物質移動すなわち蒸留性能への考慮が不足していたと考えられる。例えば、1980 年に出された米国特許では^[17]、濃縮部と回収部間の熱移動に多数のヒートパイプを用いている。これにより熱移動量は十分に確保できるであろうが、ヒートパイプによる塔内流れの阻害及び装置製作上の困難さから実現は極めて困難である。これに対してわが国では、シミュレーション技術を駆使して従来の蒸留塔

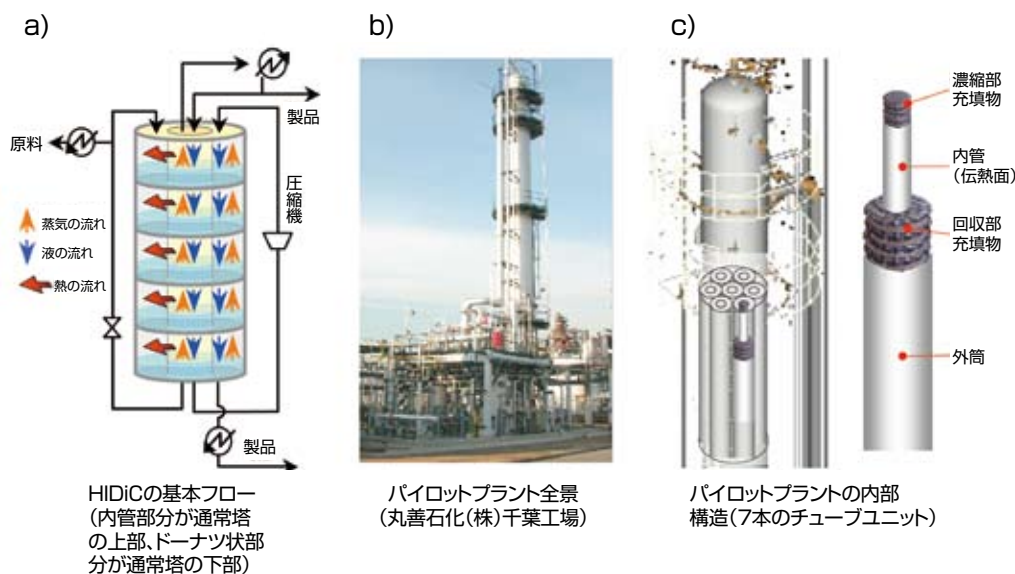


図 8 HIDiC の内部構造とパイロットプラント

と比較して蒸留性能の低下を防ぎつつ、熱移動性能に不足があれば高さ方向に塔を伸ばすことで伝熱面積を増やして補う方向で検討し、単純な二重管構造を採用して実用化に結びつけた。結局、蒸留と伝熱という2つのプロセスの「統合化」によりPIを実現したHIDiCではあるが、あくまでも蒸留塔の省エネ化が主眼であり、蒸留性能は維持しつつ伝熱を加えることによる省エネ性能向上を追及した戦術が功を奏したと考えている。

7 おわりに

本稿では、理想状態からの「デチューニング」という概念で、既存プロセスの省エネルギー化技術開発のアプローチ法を示し、著者らが進めてきた内部熱交換型蒸留塔 (HIDiC) を含む蒸留プロセスに関する具体的な検討について記述した。ここで示したケースでは、a) ターゲットとなるプロセスの熱力学的 (理論的) 理想状態を明らかにする→ b) 理想状態から実現可能な条件に「デチューニング」する→ c) 「デチューニング」後の省エネ性・コスト・装置構造の実現性等を評価する→ d) 結果が満足できなければ改めて b) に戻り別の「デチューニング」の道筋を探索する、という手順となっている。b) → c) → d) はループを形成し、これがPI実現の1つの道筋ではないかと考えられる。実際、HIDiCプロセスはこの概念により実用化までに至ったと考えている。以上、省エネ蒸留プロセスであるHIDiCプロセスの実用化までの過程について、PIと「デチューニング」の観点からアプローチ方法や考え方をまとめてみたが、シンセシオロジー発展の一助となれば幸いである。

参考文献

- [1] 平田雄志: プロセス開発の戦略-性能改善からプロセス強化へ-, *化学工学*, 69(3), 144-147 (2005).
- [2] 黒田千秋, 松本秀行: グリーンプロセス工学 (GPE) とプロセス強化 (PI), *化学工学*, 72(4), 180-183 (2008).
- [3] A. Stankiewicz and J.A. Moulijn: Process intensification: Transforming chemical engineering, *Chem. Eng. Prog.*, 96(1), 22-34 (2000).
- [4] A. Stankiewicz: Serving the triple bottom line: Process intensification role in sustainable manufacturing, *化学工学*, 69(3), 148-150 (2005).
- [5] J.A. Moulijn, A. Stankiewicz, J. Grievink and A. Gorak: Process intensification and process systems engineering: A friendly symbiosis, *Comput. Chem. Eng.*, 32(1-2), 3-11 (2008).
- [6] 五十嵐一男: 材料・製造技術の新たな取り組み, *産総研 Today*, 4(9), 4-5 (2004).
- [7] 頼実正弘: *蒸留工学*ハンドブック, 朝倉書店 (1966).
- [8] 加藤邦興: *化学機械と装置の歴史*, 産業技術センター (1978).
- [9] C.J. King: *Separation processes*, 2nd ed., McGraw Hill, New York (1980).
- [10] Z. Fonyó: Thermodynamic analysis of rectification I. Reversible model of rectification, *Intern. Chem. Eng.*, 14(1), 18-27 (1974).
- [11] F.B. Petlyuk, V.M. Platonov and I.V. Girsanov: The design of optimal rectification cascades, *Intern. Chem. Eng.*, 5(2), 309-317 (1965).
- [12] 化学工学会編: *化学工学の進歩第37集*, 楨書店 (2003).
- [13] 中岩勝: 超燃焼システム技術と自己熱利用による蒸留プロセスの省エネ技術, *日本燃焼学会誌*, 50, 235-241 (2008).
- [14] M. Nakaiwa, K. Huang, A. Endo, T. Ohmori, T. Akiya and T. Takamatsu: Internally heat-integrated distillation columns: A review, *Chem. Eng. Res. Design*, 81(1), 162-177 (2003).
- [15] R.S.H. Mah, J.J. Nicholas, Jr. and R.B. Wodnik: Distillation with secondary reflux and vaporization: A comparative evaluation, *AIChE J.*, 23(5), 651-658 (1977).
- [16] 中岩勝: 内部熱交換型蒸留塔 (HIDiC) 技術開発の今後の展開, *分離技術*, 36(4), 202-204 (2006).
- [17] D.J. Seader: Continuous distillation and method, *U.S. Patent* 4, 234, 391 (1980).

執筆者略歴

中岩 勝 (なかいわ まさる)

1980年京都大学工学部化学工学科卒業。同年工業技術院化学技術研究所入所。2001年から産業技術総合研究所環境調和技術研究部門熱利用化学システムグループ長。現在は、環境化学技術研究部門長。この間、米国カンザス州立大学での在外研究を含め、化学プロセスの省エネルギー化や非線形化学システムの実用などの研究に従事。本論文では、「デチューニング」を含めたHIDiCに関する部分を担当。

大森 隆夫 (おおもり たかお)

1984年京都大学大学院工学研究科化学工学専攻博士課程修了。日本学術振興会奨励研究員を経て、1985年工業技術院化学技術研究所入所。現在は、産業技術総合研究所環境化学技術研究部門主幹研究員 (兼) 化学システムグループ長。この間、米国ウェストバージニア大学での在外研究を含め、非線形現象、複雑系、プロセス強化等の研究に従事。本論文では、プロセス強化に関する部分と全体の構成を担当。

査読者との議論

議論1 既存装置との比較について

質問・コメント (水野 光一)

HIDiCが省エネ性や操作性に優れていること、これまでのVRCやPetlyukより優位であることは理解できます。しかし、本文中で述べられるコストなどに限界があるともいえます。例えば、既存の蒸留プロセスに比べて装置が複雑なため製作コストが高価である可能性もありますが、どのようにお考えでしょうか? 同様に、蒸留性能については本プロセスを他のプロセスと比較するとどのような差異がでるのでしょうか?

回答 (中岩 勝)

一般に蒸留塔は、分離すべき溶液の物性、どこまで製品純度を要求するか、処理量などにより装置の仕様が異なるため全てオーダーメイドであり、建設費の比較はケースバイケースになります。パイロットプラント (丸善石油化学 (株) 千葉工場、商業規模 (原料1万2千トン/年) で12成分のガソリン留分精製) の実績ですと、HIDiC: 230,000千円という金額になります。原油価格を1バレル60ドルで試算した省エネによる年間ランニングコスト削減金額は約20,000千円です。同規模の通常塔の建設費は不明ですが、技術移転先である木村化工機 (株) ではユーザーからの問い合わせに対して現時点では「従来型に比べてざっと2倍程度かかります」と回答しています。これをパイロットプラントに適用して、HIDiCと通常塔の価格差を年間ランニングコスト削減金額で除した単純投資回収年は5.75年にな

ります。パイロットプラントは温度計測等に通常塔では使用しない計測システムを導入するなど、やや特殊仕様になっており、実際の価格は多少変動するものと考えています。これらの詳細につきましては化学工学論文集 34 (4)、444 (2008) にまとめています。また、熱移動を伴わない場合の蒸留性能につきましては通常のプロセスと同程度と考えています。

議論2 理想状態とデチューニングでのエネルギー消費について

質問・コメント (水野 光一)

本研究で大幅な省エネが図られた訳ですが、エネルギー消費について理想状態と HiDiC とで差異を定量的に述べることは可能でしょうか？

回答 (中岩 勝)

これもケースバイケースですが、現時点では試算しておりません。HiDiC の理想状態は「可逆蒸留操作」ですが、断熱圧縮による気体の昇温、いわゆるヒートポンプ効果が加味されています。現時点で省エネ性はこの圧縮過程の使用エネルギーが支配的です。この過程の熱力学的理想状態は本文中にも記述しました逆カルノーサイクルです。最近の産業用圧縮式ヒートポンプのチャンピオンデータでは、実際の効率は逆カルノーサイクル効率の 50 % レベルと言われています。したがって、今後さらに使用エネルギーを少なくとも半分程度にできる可能性があると考えられます。もっと一般化して、混合物と精製物のエントロピー差で考えるとさらに 1 桁以上小さくできると思います。これらを定量化するにはエクセルギー解析などの熱力学的解析が有効です。

議論3 理想状態からのデチューニングについて

質問・コメント (立石 裕)

図 1 は概念としてわかりやすくてよいと思いますが、反面、例示されている A,B,C がそれぞれどのような意味を持つのが不明です。理想状態からのデチューニングは、必ず何らかの条件設定をして近似操作をするものと理解されるので、そうした観点から説明を図の中に入れることはできないでしょうか。

回答 (中岩 勝)

図 1 は一般的な概念を述べたもので、必ずしも本稿の Petlyuk 塔や VRC と定量的に対応したものではありません。一般論であることを明確にするために、本文中の図の説明に加筆しました。

議論4 HiDiC に関する研究のポイントの説明について

質問・コメント (立石 裕)

蒸留プロセスのイノベーションという一段高い立場から HiDiC の研究開発を俯瞰するという全体的な構成はよいと思いますが、具体例としての HiDiC に関する産総研の研究のポイントの説明にもう一工夫ほしいと思いますがいかがでしょうか。理論検討、シミュレーション、実際の具体的な技術的工夫がどのように「統合」されたのかを、もう少し突っ込んで表現できないでしょうか。

回答 (中岩 勝)

産総研の貢献等に関しまして第 6 節に加筆しました。