

蒸留プロセスのイノベーション

中岩 勝*

旧化学技術研究所/旧物質工学工業技術研究所/産業技術総合研究所

要旨

本稿は、蒸留プロセスの省エネルギー化とCO₂削減を目的に開発された内部熱交換型蒸留塔 (HIDiC) の研究・商用化経緯を、理論的な省エネ化コンセプトから整理、紹介したものである。蒸留は産業界最大級のエネルギー多消費プロセスであり、第一次オイルショックの頃から省エネ化が世界的な課題となっていた。HIDiCは濃縮部と回収部間で多点熱移動を行い、従来技術に比較して省エネ性能を大幅に向上させたものであり、工業技術院、NEDOのプロジェクトでの研究開発を経て商用レベルの技術を実証、確立した。その後2016年に商用化された。プラント全体最適化との組み合わせで更なる省エネも期待されている。

1. はじめに

旧工業技術院化学技術研究所/旧物質工学工業技術研究所/国立研究開発法人産業技術総合研究所は、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。振り返ってみるとナショプロとしての構想、実施から技術移転を経て企業による実用化展開まで、基礎研究から実用化までの道のりは決して平坦ではなかった。さらに、もちろん当初から意図したものではないが、のちに述べるプロセスイノベーション実現のためのアプローチであるプロセス強化 (Process Intensification, PI) の典型例の一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とアプローチ方法について、PIと関連付けながら紹介する。特に、ここでは我々の提案した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、工技院/産総研のPIの一手法として提示することを試みる。

2. 世界における蒸留プロセスのエネルギー消費とCO₂排出の現状と課題⁽¹⁻⁷⁾

まず研究開発の背景について触れる。本稿でとりあげる「蒸留」は、石油精製や化学産業をはじめとする多くのプロセス産業、製造業において不可欠な分離技術である。その原理は混合物 (溶液) の沸点差による、溶液とそこから発生する蒸気との濃度差を利用して成分を分離するという単純なものであるが、分離を連続的に行うためには、加熱と冷却¹⁾の両方で膨大な熱エネルギーを必要とする。適用可能なプロセスは極めて多岐にわたる。こ

*現在 科学技術振興機構 研究主幹

のため、蒸留は近年の産業界全般における最大級のエネルギー消費源の一つであり、同時に大量の温室効果ガス（主にCO₂）排出の原因ともなっている。

国際的な調査によれば、世界全体の一次エネルギー消費のうち、およそ10～15%が蒸留プロセスに起因していると推定されている。さらに、化学・石油精製業界に限定すると、プロセス全体のエネルギー使用量の40～50%が蒸留に費やされているという報告もある。これらのプロセスで消費されるエネルギーの大部分は依然として化石燃料に依存しており、その結果として蒸留由来のCO₂排出量は、年間1.2ギガトン（Gt）にも上る。これは、世界全体のCO₂排出量の約3～4%に相当する規模であり、脱炭素社会を目指すうえで無視できない数値である。

特に石油精製においては、原油の多成分性から多段階の蒸留が必要とされ、それぞれの塔で熱を加えるために多くのボイラー（加熱器）およびコンデンサー（冷却器）が使われる。またこれにより大量の排熱が発生する。一方、化学産業では、高純度な分離が求められるため、さらに多くのエネルギーが投入される傾向にある。石油精製、化学等の多くのプラントではコスト面でのスケールメリットを追求するため装置が巨大化し、減価償却を終えた初期投資の大きな古い設備が平均60年といわれる長期間使用されている。熱交換器や塔内の設計が最適化されていない場合が多く、結果的に無駄なエネルギー消費が常態化している。

このような背景のもと、蒸留プロセスのエネルギー効率向上とCO₂排出削減は、今やグローバルな産業界における喫緊の課題となっている。そのためにはいくつかの技術的および制度的なアプローチが求められている。

まず、現在稼働中の既存プラントにおける省エネルギー化が重要である。具体的には、熱統合（heat integration）によって排熱の再利用を促進することや、高効率な熱交換器への更新を行うことが効果的である。また、圧力や温度条件の最適化によって、エネルギー投入量を削減できる可能性もある。近年では、プロセスシミュレーションソフトウェアを用いた全体最適化設計によるエネルギー削減事例も報告されている。

次に代替技術の導入も検討されている。有望なものとしては、膜分離、抽出蒸留、吸着分離、超臨界流体抽出などが挙げられる。これらの技術は、蒸留と比較して低エネルギーで高選択性の分離が可能であるものの、適用できる成分や混合物に対する制限や、大規模化、長期安定運転などに課題を残しているため、蒸留を代替するような商業的普及には至っていない。近年においては再生可能エネルギーの活用がある。例えば、ソーラーサーマルや地熱エネルギーを利用した間接加熱方式への転換、あるいは電力由来のヒートポンプ

技術を用いた低温蒸留が試みられている。しかし、これらの技術は設備コストや適用条件の制約が多く、現段階では限定的な利用にとどまっている。最近技術ニーズが急速に高まっているCO₂分離回収・利用、再エネからの水素/アンモニア製造、プラスチック回収やサーキュラーエコノミー技術などでも大規模、低コストで社会実装されるためには蒸留は不可欠であり、今後も主要な分離技術であり続けると思われる。しかしながら社会自体の持続可能性を支える技術としては、エネルギー効率向上とCO₂排出削減を両立させる技術的ブレイクスルーの導入が喫緊の課題となっているのである。

3. 蒸留プロセス省エネ化の戦略

ここでは我々の蒸留プロセスの省エネ化の戦略を考えるために、蒸留技術の基本原理を振り返ってみる。蒸留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一つである。その原理は加熱による溶液の蒸発と冷却による凝縮で、前節で述べたように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。紀元前3500年頃には花卉や葉から香料を集めるために原始的な形式の蒸留装置が使われていた形跡が残っている。また世紀初頭（約2000年前）のギリシャの錬金術の書物には当時の典型的な蒸留器が図示されている^[15]（図1）。これは蒸留される混合液をいれる本体、放出口を持つ頭部、受器、そして加熱炉から構成されている。その後アルコールや酸の製造などでも蒸留の技術は使われてきた。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・液化して集めるという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

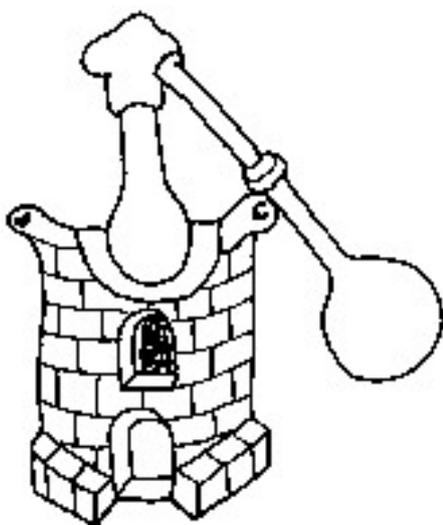
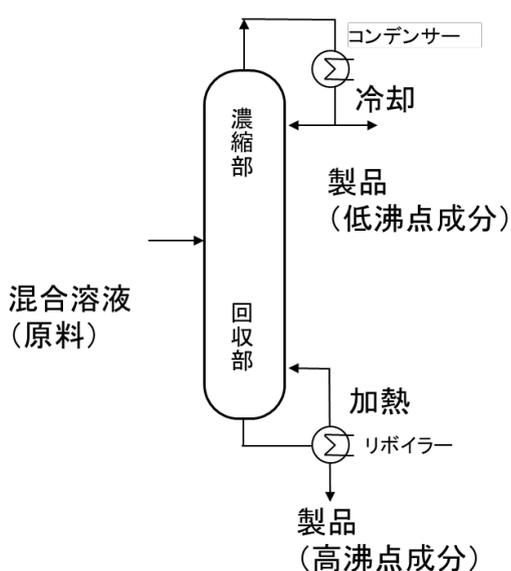


図1 古代の蒸留器

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に応用されてきた。それが18世紀から19世紀にかけて、熱がエネルギーの一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ことがわかり、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^[14,15]。

一般的な連続蒸留塔を基本原理に着目して単純化したものを図2に示す。蒸留塔では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。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

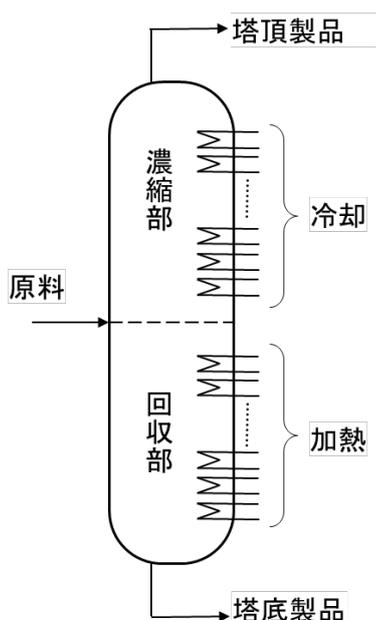
の間で蒸発潜熱が移動し相変化、すなわち蒸発と凝縮を生じる。この際に、発生する気相は液相よりも低沸点成分に富み、液相は気相よりも高沸点成分に富むことになる。従って、塔の両端に向かって低沸点成分と高沸点成分を濃縮することが可能となる。このような原理から、蒸留塔では液相を分離するにもかかわらず、溶液をいったん気相に変換しそのために必要な蒸発潜熱を塔底のボイラー（リボイラーと呼ばれる）から供給しなければならない。また塔全体にわたって物質移動のための気液接触が可能となるように、塔頂のコンデンサーで蒸気から凝縮潜熱を奪って再び液相に戻す操作も必要となる。



4. 可逆的蒸留操作

連続的に蒸留分離を行うプロセスでは、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。ブダペスト工科大学（当時）のFonyo教授らによる熱力学的な解析により、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、回収部で連続的な加熱を行うと、理論的に最も効率的な（加熱量および冷却量の少ない）蒸留操作が可能であることが明らかにされている^[16,17]（写真1）。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

図2 通常の連続蒸留塔



3 可逆的蒸留操作



写真1 Z. Fonyo教授（左端） スイス連邦工科大（ETHチューリッヒ）のRippin教授（右から二人目）訪問時。この時Fonyo教授はETHに滞在していた。右端は筆者）

蒸留塔を用いて濃縮部の段ごとでは無限小の熱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、上記の原理に基づく限り、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「現実化」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、熱移動の物質移動への影響をどのように考えるかは効果的なプロセスの開発に非常に重要となる。この点を踏まえてどのような装置構造を取れば実用化が可能となるかについての検討が一つの進むべき方向と捉えることができると筆者らは考えていた。このアプローチが第6節の「デチューニング(detuning)」の考え方になる。

5. プロセス強化

筆者らが省エネプロセス開発の方法論を議論していた2000年前後に、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た。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^[8]、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、それをクオンタム・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。クオンタム・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をも考慮した、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^[9]、以前から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^[10]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^[11,12]、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一つの装置で行う「統合化」・「複合化」、廃棄物の削減などの「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ュファクチャリング（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。

2025年現在、プロセス強化（PI）は単なる省エネ手法ではなく、反応器・分離・制御・装置設計の全体を再考する化学工学のフロンティアとなっている。膜反応器（メンブレンリアクター）やマイクロリアクター、デジタルAI設計、自律制御、モジュール化装置の実装など、産業スケールへの実用化の萌芽が多数あり、今後さらに成長が期待される分野として注目されている。

6. 熱力学的理想状態と「デチューニング（detuning）」

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」の概念を再確認しておきたい。「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オットー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。EV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。もう一つ例を挙げると、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。

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、外部から供給されるエネルギーを、より少なく使って同一の機能を発現させることで

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。見方を変えると、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エンジン性能等を下げる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ッティング(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言葉である。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下げ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、必ずしも一次的ではないということである。図4は一般論として、あるプロセス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。

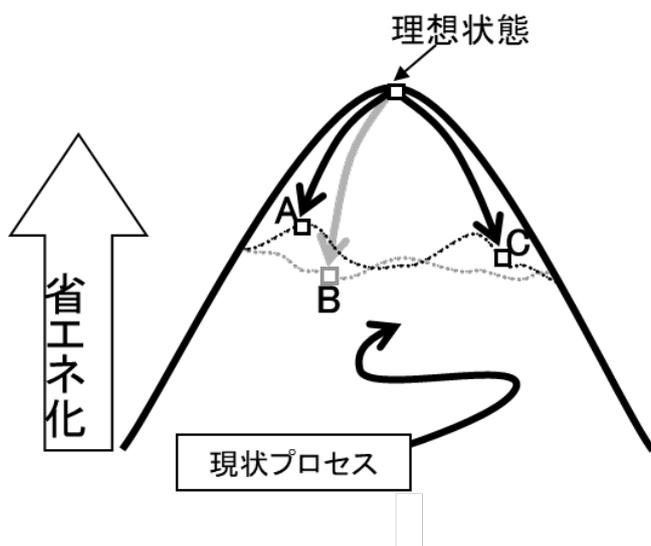


図4 理想状態からのデチューニング

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降りていくイメージとなる。このとき下山する経路は一つではなく、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、主として二つの特長がある。一つは、理論的限界から降りてくるため、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。もう一つは、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、逆に言うと「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。

7. 「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の可逆的蒸留塔は、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5 a)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5 a)を極端に単純化し、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5 b)になる。この装置形式は、1960年代にPetyluk らによりその特性が研究され、一般にPetyluk塔と呼ばれている^[18]。

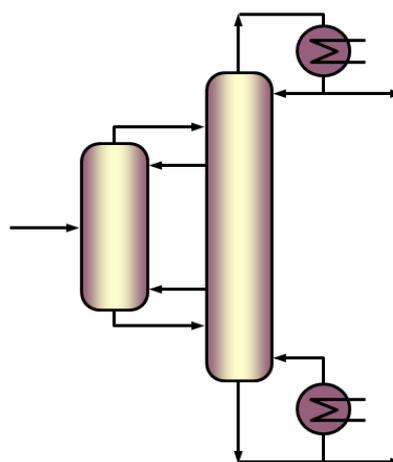
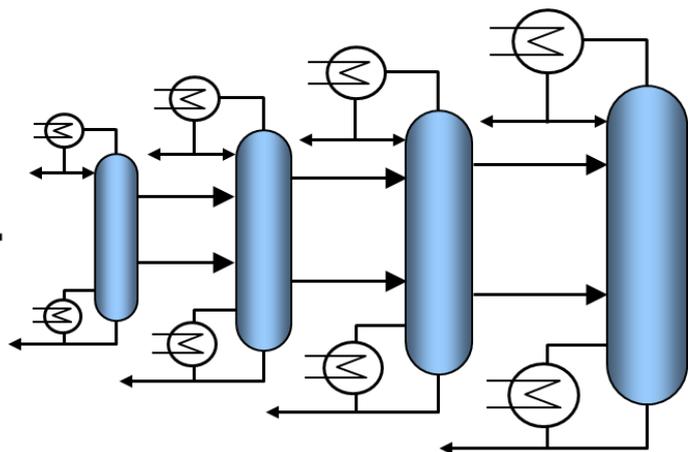


図5 a)多塔化された可逆的蒸留操作

図5b) Petyluk 塔

この考え方の延長でさらに2本の塔を一体化する単純化が検討され（2塔を一体化するというより、ひとつの塔を2塔に分割してそれぞれに役割を持たせるという見方で塔分割型（Dividing Wall Column, DWCと呼ばれる）、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（写真2）。

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^[19]。

もう一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

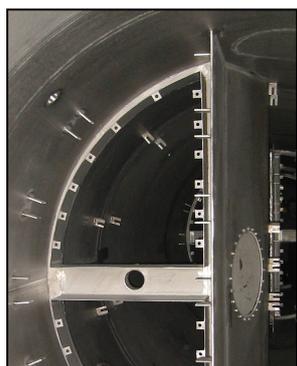


写真2 DWC外観と内部

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6 a)に示す^[20]。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機だけ使い、濃縮部と回収部の各一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6b)となる。この図のような装置は、一般に機械式蒸気圧縮塔 (Mechanical Vapor Compression, MVR) または蒸気再圧縮塔 (Vapor Recompression Column, VRC) と呼ばれてDWCより先に低濃度のエタノール濃縮などで実用化されている。MVR, 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る。VRCでは、塔頂と塔底という装置内で最も温度レベルの低い部分と高い部分の間でのみ熱の授受を行い、しかも加熱と冷却も各一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。

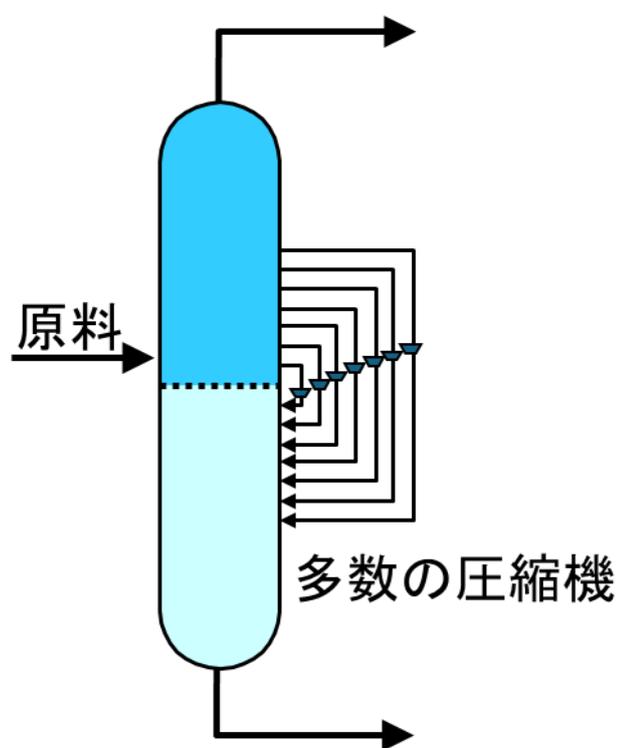


図6a)多数の圧縮機を持つプロセス

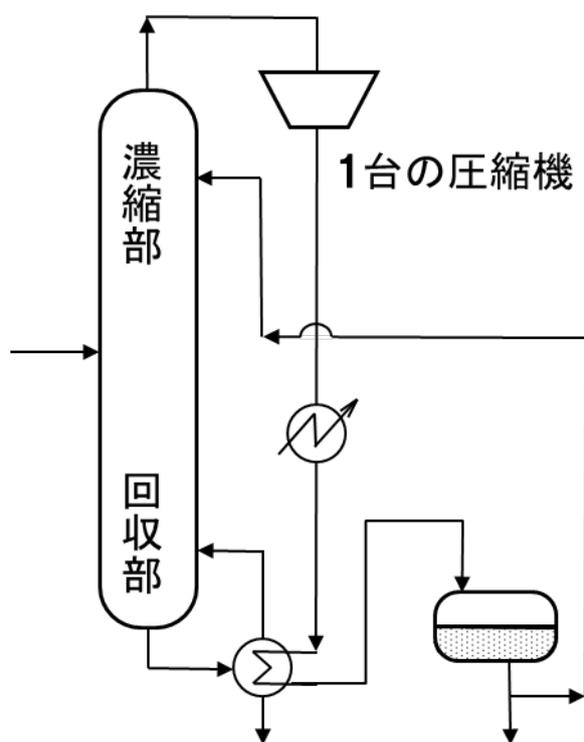


図6b蒸気再圧縮プロセス

8. 理想状態を目指した内部熱交換型蒸留塔 (HIDiC)

前節で紹介したPetyluk塔と, MVR, 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。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、濃縮部の一箇所と回収部の一箇所でのみ熱を移動させることであった。熱移動を行わ

せる箇所を一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）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。この特性は可逆的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。従って、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6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のである。

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6a)では、濃縮部の多数の冷却点の全てが回収部の多数の加热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热点に供給することができる。それでは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（この場合は溶液の沸点）を高くすることができる。従って、濃縮部の圧力を回収部

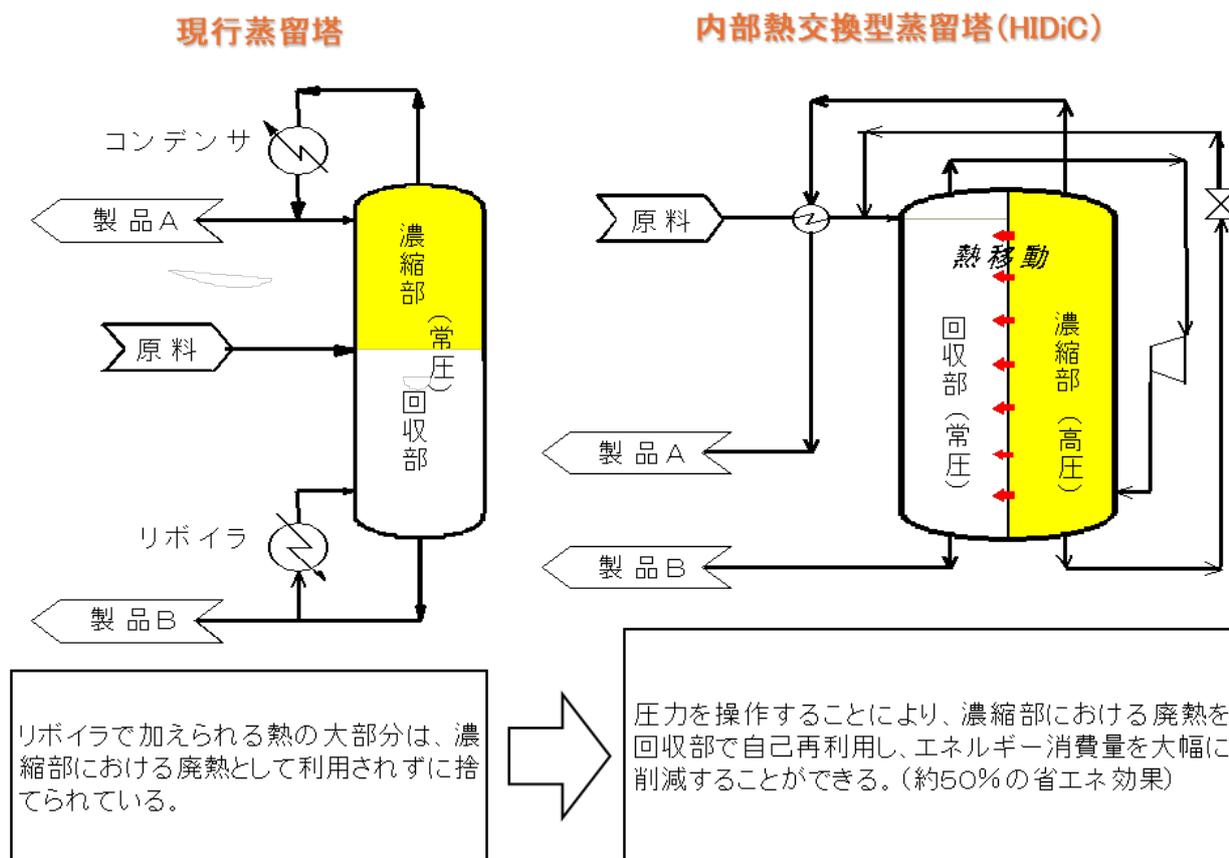


図7 内部熱交換型蒸留塔 (HIDiC)

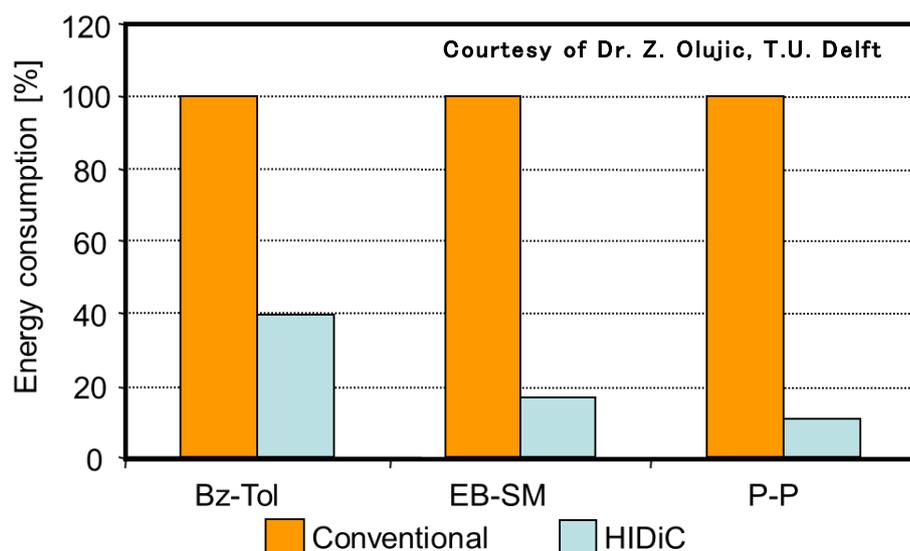
よりも高くすればよいことになる。そのためには濃縮部と回収部を分割し、濃縮部の圧力を全体で熱移動が可能となる温度まで上げればよい。

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台で十分である。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は、濃縮部と回収部を直接接触させる方法である。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」を目指したものが内部熱交換型蒸留塔 (Heat Integrated Distillation Column, HIDiC) の概念(図7)である^[21]。著者らは、これも可逆的蒸留に対する一種の「デチューニング」であると考えている。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)。

表1 HIDiCと通常の蒸留塔との2成分分離の消費エネルギーの比較

Bz-Tol: Benzene/Toluen EB-SM: Etherbenzene/Stilenemonomer P-P: Proplene/Propane



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 Petyluk 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は可逆的蒸留操作の概念をより忠実に具現化しており、Petyluk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く改善されているため省エネ性能でも有利となっている。分離仕様の条件にもよるが、画期的な省エネ蒸留といわれるPetyluk塔やVRCに対しても20%以上の省エネ化が期待できる。

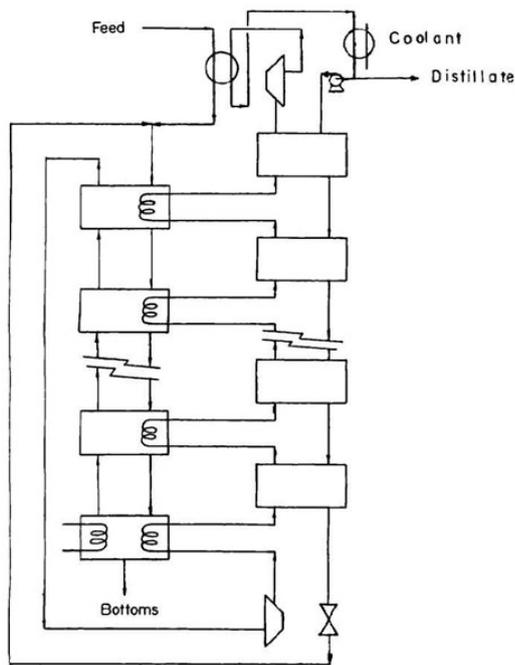


Fig. 1. Distillation with secondary reflux and vaporization



写真4. R.S.H. Mah 教授 Northwestern Univ.

図8 Mah 教授が提唱した HIDiC の概念

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

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米国化学工学会誌に論文として発表された^[22] (図8、写真4)。彼はイギリス出身でエジンバラ大学で学位取得後アメリカに移った研究者である。

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8)。ただし、この論文では理論的な可能性のみが示されただけである。論文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、従って 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省エネの主流、工学的な常識であり、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 (当時) 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（図9）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ほとんど行われなかった。

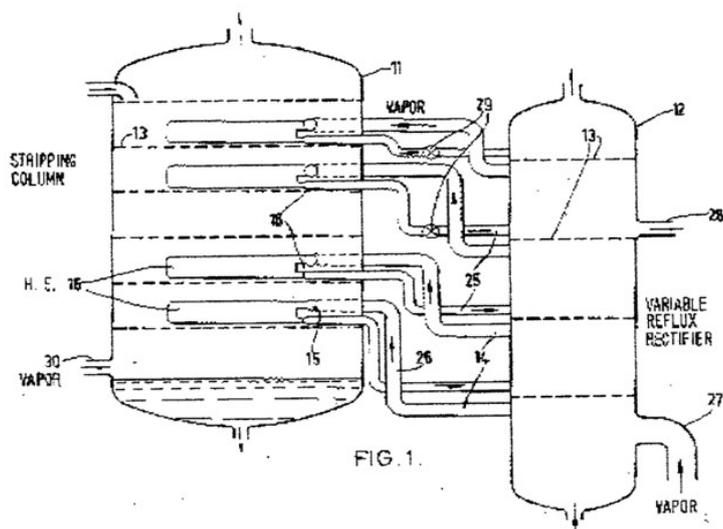


図9a 温度の異なる2塔を結合させるHIDiC (Haselden (US Patent,1977))

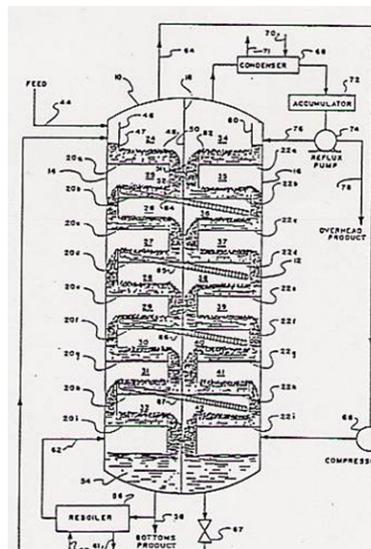


図9b 多数のヒートパイプを用いるHIDiC (Seader (US Patent,1980))

9. HIDiC実用化へのアプローチ



写真5 バンコクの国際会議で報告

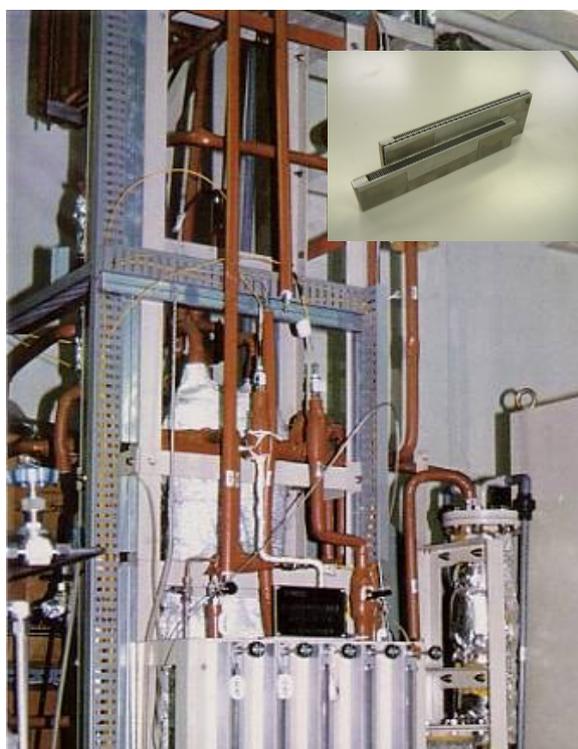


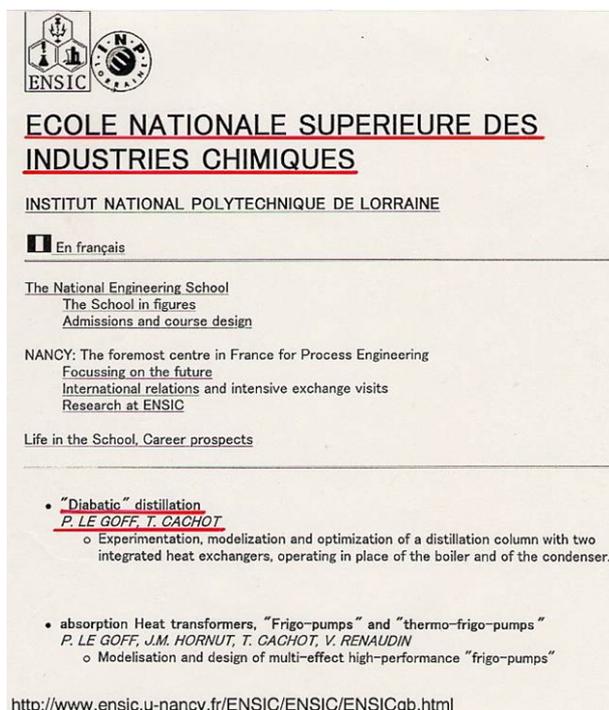
写真6 化技研に設置されたプレートフィンデバ

イス(写真右上)を用いたHIDiC試験装置

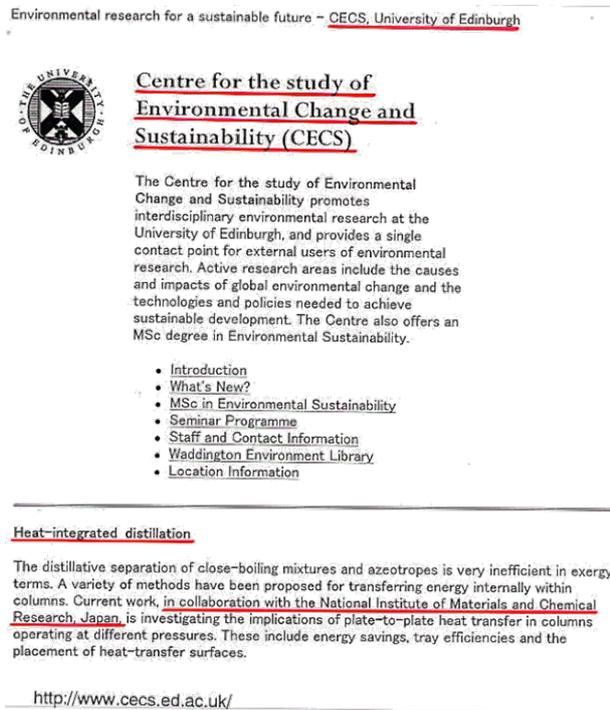
Mah教授が最初に論文を発表してから数年後に、高松武一郎京都大学教授(当時 写真5)がこのアイデアに注目し、プロセスの基本的な特性に関する研究を開始した。当時、高松教授は化学プロセスの熱力学解析やエクセルギー解析に関する研究を行っており、その過程でHIDiCの省エネルギー性の高さに着目したものである。

1980年代半ばに著者らは工業技術院化学技術研究所で、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研究した。HIDiCに関して日本のグループとして初めてバンコクで開催された国際会議で報告した。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、高压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(写真6)。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づ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。



The screenshot shows the website for ENSIC (Ecole Nationale Supérieure des Industries Chimiques). It features the ENSIC logo and text in French. The main heading is "ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES INDUSTRIES CHIMIQUES". Below it, it says "INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE". There is a section for "En français" and a list of research topics, including "Diabatic distillation" and "absorption Heat transformers". The URL at the bottom is <http://www.ensic.u-nancy.fr/ENSIC/ENSIC/ENSICgb.html>.



The screenshot shows the website for the Centre for the study of Environmental Change and Sustainability (CECS) at the University of Edinburgh. It features the CECS logo and text in English. The main heading is "Centre for the study of Environmental Change and Sustainability (CECS)". Below it, it says "The Centre for the study of Environmental Change and Sustainability promotes interdisciplinary environmental research at the University of Edinburgh, and provides a single contact point for external users of environmental research." There is a list of research areas and a section for "Heat-integrated distillation". The URL at the bottom is <http://www.cecs.ed.ac.uk/>.

図10 フランス化学工業大学とエジンバラ大学のWebサイト(当時)

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（通称エコエネプロジェクト）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、「化学プラントでの排熱改質・回収システムの研究開発」として工業技術院及び新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）委託事業が木村化工機（株）、丸善石油化学（株）、そして関西化学機械製作（株）の3社により進められた（図11）。

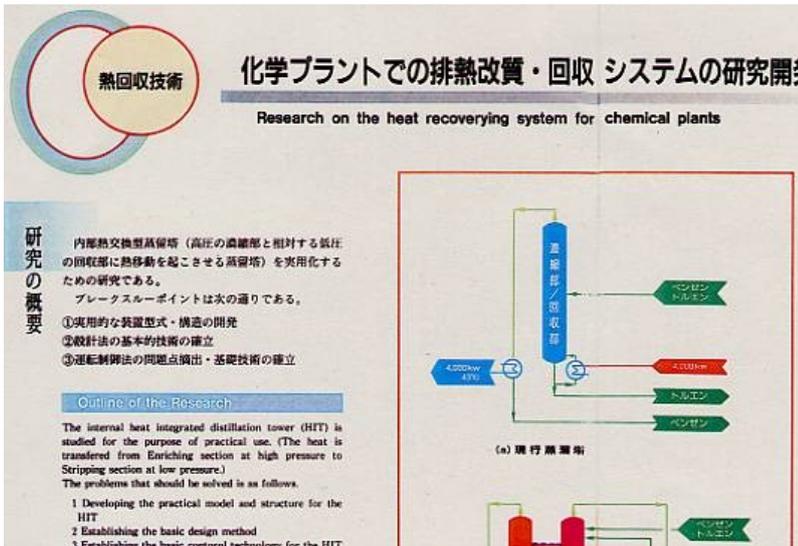


図11.HIDiCを説明するプロジェクトのパンフレット

検討の結果、できるだけシンプルな構造にするという方針により同心円の基本構造が開発され（図12）、産総研で実験による研究が実施された（写真7）。

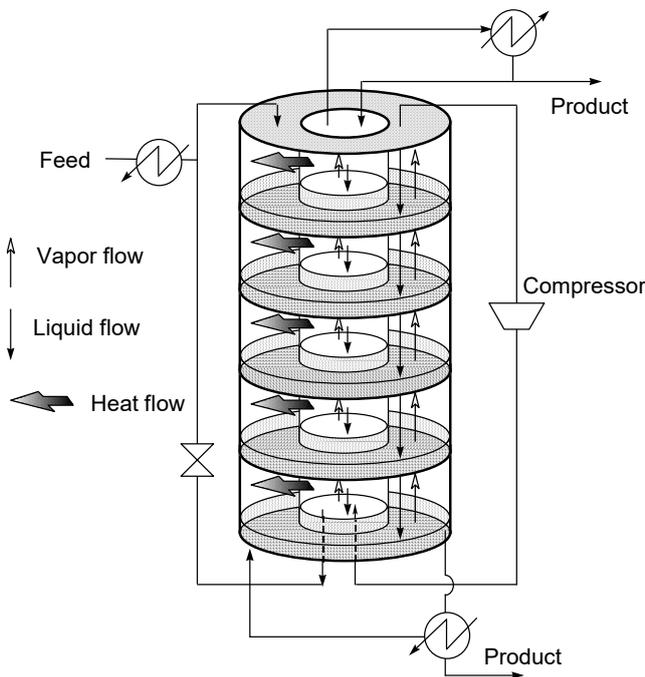


図12.同心円型HIDiCの概念図 写真7.産総研に設置された2重管型HIDiC試験装置

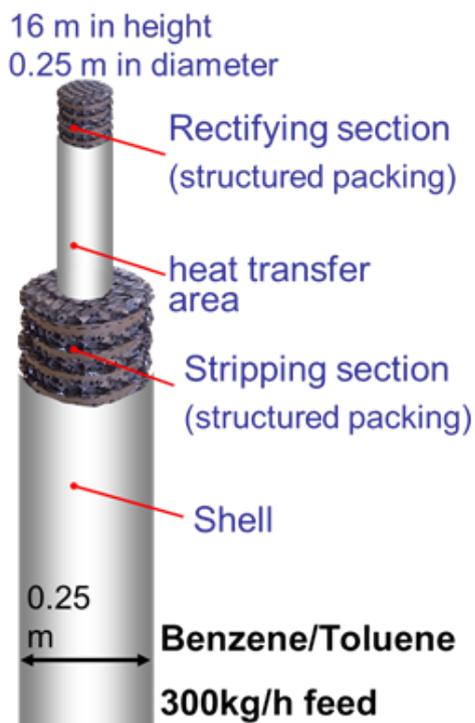


図 13. HIDiC-1の内部構造



写真 8. 実プラントに設置されたHIDiC-1

図 1 2，写真 7 の装置では内管を通常の蒸留塔の上部（温度の低い部分）、外管を下部（温度の高い部分）とするが、それぞれの圧力操作によりその温度差を逆転させて内管から外管に熱を移動させる。これに蒸気は下から上へ、液は上から下へ移動する流れの流動特性と気液接触状態などによる影響を明らかにするのが試験の主な目的である。実際の装置では気液接触を促進するために規則的な金属の充填物を用いる。この試験研究結果などを検討し、1999年12月には、丸善石油化学（株）千葉工場内に塔径約300mmで高さ約25mのプロトタイプ実験塔（HIDiC-1と呼んでいた）が建設され（図 1 3、写真 8）、ベンゼン／トルエン系で300kg/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。特徴としては蒸留塔の上下両端で高さ方向の蒸気の線速度が遅く、中間部で速くなるという速度変化を緩和するために、高さ方向に内側の塔の内径を3段階に変化させたことがある（写真 9）。これにより過大な蒸気速度による分離効率の低下を防ぐことができた。



写真9 輪切りにしたHIDiC-1の内部構造 左から上部、中部、下部

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、産総研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]（図14）。参加した民間企業は、先の3社に加えて、空気分離をターゲットとした日本酸素（株）（現三菱ケミカルHD傘下）と（株）神戸製鋼所の2社の計5社である。プロジェクトでは、蒸留塔内部で気液接触を行わせる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HIDiC-1をスケールアップした二重管構造の基本設計について検討を行った。これとは別に日本酸素（株）、（株）神戸製鋼所が先に紹介したプレートフィン構造を用いた深冷空気分離をターゲットとする装置開発を進めた。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（HIDiC-2）の建設を決定した。この試験装置は、図15に示すように7本の二重管を束ねた形状になっており、先に述べた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、種々の装置上の工夫に基づいて製作が行われた。

METI/NEDO委託

事業計画

2002年度～2005(4年
間)
事業総額 14億円

プロジェクトの概要

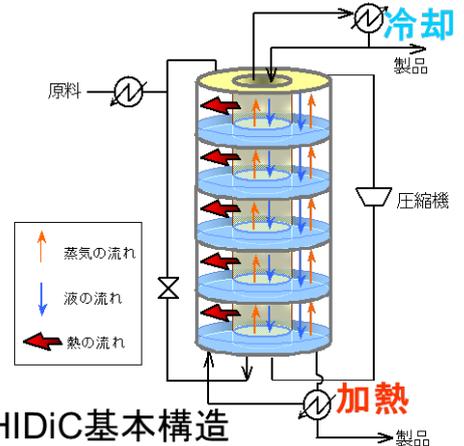


石油精製・化学工業のコンビナートのタワー群はほとんどが蒸留塔。原油換算33.2百万kℓ/年を消費するエネルギー多消費産業であり、そのうちの約40%が蒸留プロセスで消費。

内部熱交換による省エネ蒸留技術(略称HIDiC)は熱エネルギーを自己再利用することにより総合的なエネルギー効率で従来比30%以上の省エネルギー化が可能。

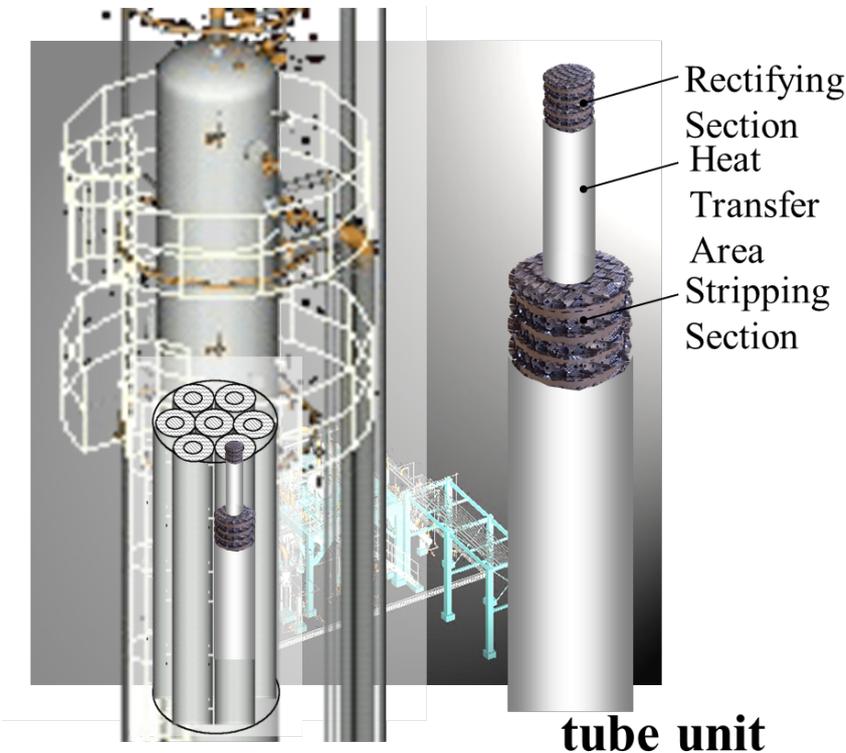
プロジェクト参加企業等

- (独)産業技術総合研究所 (プロジェクトリーダー)
- 丸善石油化学(株)
- 木村化工機(株)
- 関西化学機械製作(株)
- 大陽日酸(株)
- (株)神戸製鋼所
- (社)化学工学会(調査)
- 京都大学(再委託)
- 名古屋工業大学(再委託)



HIDiC基本構造

図14. 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の説明資料より



パイロットプラントの建設は順調に進み(写真10)、2005年度には試験運転が行われた。シクロペントンの分離を目的として商業機としても使用可能な処理量で、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以上の省エネ性能を実証する運転を安定的に行う

図15 チューブユニットを7本まとめたHIDiC-2の構造

ことができた。運転結果で得られた省エネ率は、一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30Mcal/hに対して削減リボイラー熱量は290～320Mcal/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に相当）では約10の高い値が得られている。



写真10.HIDiC-2の建設時の様子

石油化学以外のターゲットとしての空気分離については日本酸素（株）が袖ヶ浦に深冷空気分離用商用機の5分の1スケールのパイロットプラントを建設し、高い省エネ性能を実証した。内部構造には日本製のプレートフィンデバイスが採用された。先に紹介した初期のHIDiC研究で採用したプレートフィンと同形式のものである。比表面積（単位体積あたりの表面積）が大きくコンパクト化が可能で、現行の深冷空気分離でも使われている実績があり、流路が積層された構造としてスケールアップが比較的容易であることが採用された理由と考えられる。



写真11. 圧縮機を中央部に持たないHIDiC（神戸大学近藤昭彦研究室）

またメンバーの関西化学機械製作（株）はプロジェクト成果を踏まえて独自に開発を進め、蒸留塔の中央部に圧縮機を持たない独自の構造での小型のHIDiCを開発した。空気分離に少し近いプロセスであり、バイオエタノール濃縮への応用を目的として神戸大学との共同研究を実施しパイロットプラントを同大学に納入した。想定通りの省エネ性能が発揮されている（写真11）。

一方、諸外国でも地球環境問題への対応を背景に、HIDiC研究開発が検討され、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、国家プロジェクトとして実施された。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

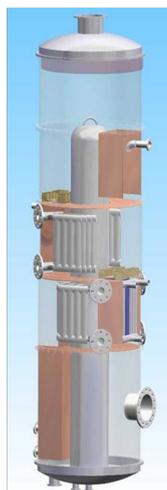
中心として複数の企業が参画した。石油化学の中でもプロピレン/プロパン分離など商用機が高さ100mのレベルになる大型でエネルギー多消費な蒸留塔をターゲットに独自の内部構造の研究開発を進めた（第1期2002-2005 第2期2007-2010）（図16、写真17）。

Advantages:

- applicable in tray and packed columns
- flexible heat transfer area
- relatively simple column design

Research Objectives:

- Heat transfer coefficient in froth regime
- influence heat panels on tray hydraulics and tray separation efficiency



Courtesy of Dr. Z. Olujic, T.U. Delft

図16.オランダのHIDiCプロジェクト
Dr.Olujic氏資料より

写真17.デルフト工科大学の試験装置とPLのOlujic氏

また、台湾では国立工業技術研究院（ITRI）がHIDiCの化学産業への適用の研究を進めていた。詳細は明らかにされなかったが、台湾では当時化学産業が最もCO2を排出する産業としてその省エネ化、CO2排出量削減が喫緊の課題と認識されていた（写真18、19）

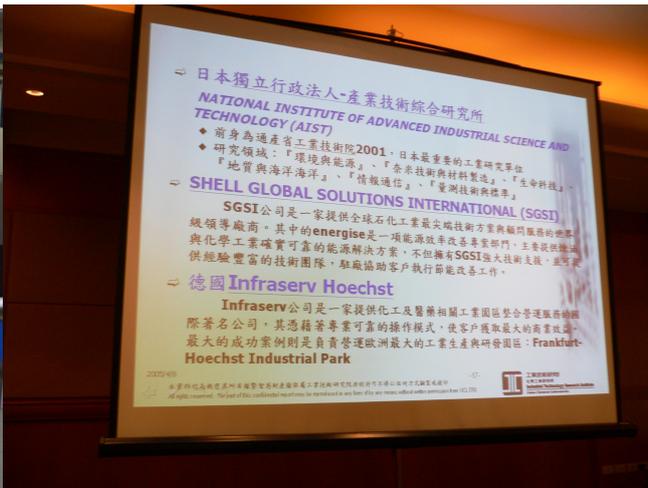


写真18 ITRI(工業技術研究院)の試験装置 写真19 CO₂削減シンポジウム

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社体制の共同研究（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。民間企業資金によるコンソであり、政府資金は投入されていない。成果は各社に持ち帰られた。何社かの企業はその後補助金によりそれぞれ研究開発を進めた。

10. 商業化へのハードル

コンソ活動と前後して、まず木村化工機(株)が商用機の営業活動を開始した。しかしながら最終的にHIDiC-2をベースに商品として納入するには至らなかった。理由はいくつかあるが、大きくはコストと構造の複雑さ、メンテナンス性にあったのではないかと筆者は考えている。これは空気分離、バイオエタノールについても同様である。省エネ性能は画期的だとしても、省エネでの大型の設備投資に対する投資回収年は一般的に短い期間を期待される。メンテナンス性も含めて、この点をユーザーに納得いただくことに高いハードルがあったものと思われる。プロジェクトのその後の経緯を含めたHIDiC研究開発の展開を図17、18に示す。

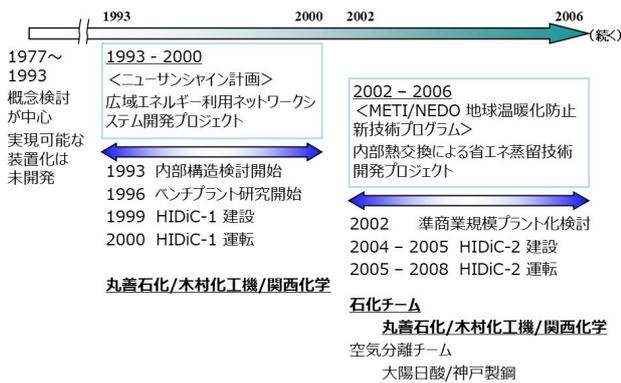


図17 HIDiC研究開発の展開1

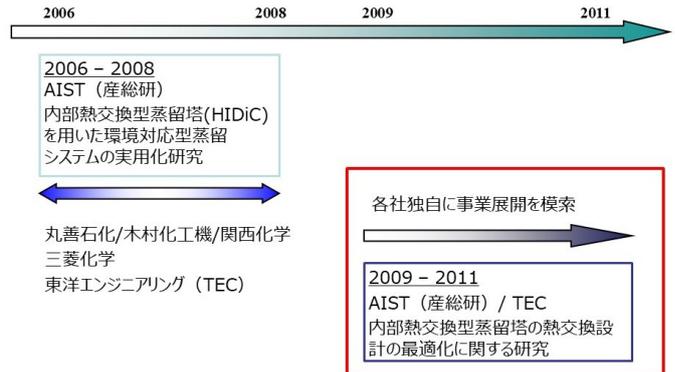


図18 HIDiC研究開発の展開2

11. さらなるデチューニングで商用化へ

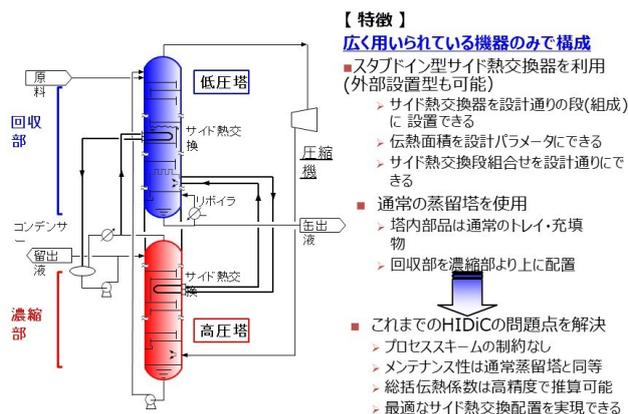
(12) United States Patent Nakaiwa et al.	(10) Patent No.: US 8,440,056 B2 (45) Date of Patent: May 14, 2013
(54) HEAT INTEGRATED DISTILLATION APPARATUS	(58) Field of Classification Search . 62/238.6; 159/24.1, 159/43.1; 202/154, 155, 158, 172, 182, 262; 203/26, 203/71, 98, DIG. 8; 261/114.1; 114.4, 114.5, 261/DIG. 72
(75) Inventors: Masaru Nakaiwa, Tsukuba (JP); Toshihiro Wakabayashi, Narashino (JP); Akihiko Tamakoshi, Narashino (JP)	See application file for complete search history.
(73) Assignees: National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tokyo (JP); Toyo Engineering Company, Tokyo (JP)	(56) References Cited
(*) Notice: Subject to any disclaimer, the term of this patent is extended or adjusted under 35 U.S.C. 154(b) by 0 days.	U.S. PATENT DOCUMENTS 3,575,007 A * 4/1971 Gunther 62/620 4,234,391 A * 11/1980 Seader 203/26 4,277,268 A * 7/1981 Spangler, Jr. 62/630 4,737,177 A * 4/1988 Erickson 62/646 (Continued)
(21) Appl. No.: 13/386,624	FOREIGN PATENT DOCUMENTS EP 1800726 A1 6/2007 JP 04-250801 A 7/1992 (Continued)
(22) PCT Filed: Sep. 24, 2010	Primary Examiner — Virginia Manoharan (74) Attorney, Agent, or Firm — Knobbe Martens Olson & Bear LLP
(86) PCT No.: PCT/JP2010/066498 § 371 (c)(1), (2), (4) Date: Jan. 23, 2012	(57) ABSTRACT
(87) PCT Pub. No.: WO2011/043199	

図19 HIDiC技術に関する新たな特許

図18に示したように、プロジェクト終了後にその成果を踏まえて、産業技術総合研究所と東洋エンジニアリング(株)(TEC)の共同研究が進められた。共同出願で国際特許を取得し(図19)、同社はSUPERHIDiCという商品名でHIDiC技術を世界で初めて商用プラントとして実用化した。

HIDiC-1,2と同じく、2014年に丸善石油化学(株)千葉工場のMEK(メチルエチルケトン)プラントに導入され、2016年から運転を

開始した。稼働実績を通じ、「50%以上のエネルギー削減」を達成し、温室効果ガス排出量を大幅に低減する効果が確認されている。塔内部に複数のサイド熱交換器を設置し、濃縮部と回収部を部分的に結合し、内部で熱を再循環させることでリボイラー、コンデンサーの熱投入、除熱を大幅削減している。設置には従来型の蒸留塔をそのまま用いることも可能で、HIDiC-2で課題となったコストとメンテナンス性の問題を解決する設計を実現している。その要因は、端的に言えばHIDiC-2をさらにデチューニングし、構造をシンプルにしたことにある。HIDiC-2では塔全体を加熱部分と冷却部分に分けて結合さ



- 【特徴】
広く用いられている機器のみで構成
 ■スタブドイン型サイド熱交換器を利用(外部設置型も可能)
 ▶ サイド熱交換器を設計通りの段(組成)に設置できる
 ▶ 伝熱面積を設計パラメータにできる
 ▶ サイド熱交換器組み合わせを設計通りにできる
 ■通常の蒸留塔を使用
 ▶ 塔内部品は通常のトレイ・充填物
 ▶ 回収部を濃縮部より上に配置
 ■これまでのHIDiCの問題点を解決
 ▶ プロセススキームの制約なし
 ▶ メンテナンス性は通常蒸留塔と同等
 ▶ 総括伝熱係数は高精度で推算可能
 ▶ 最適なサイド熱交換配置を実現できる

- 2014年11月丸善石油化学殿向けにSUPERHIDiC®導入に関する契約調印。
- プロジェクト概要
 - プラント: MEK (メチルエチルケトン)
 - EPCコントラクター: 東洋エンジニアリング及びTPS (テックプロジェクトサービス)
 - 立地: 千葉県市原市
 - 省エネ率: 約50%
 - 稼働時期: 2016年後半
- 設備導入に対する公的支援
 - 経産省補助金「エネルギー使用合理化等事業者支援補助金」を活用。

丸善石油化学(株)千葉工場にて稼働中



SUPERHIDiC

図20 SUPERHIDiCの概念図

図21 世界初の商用プラント

せていたが、SUPERHIDiCでは全体ではなく部分的に結合させて構造を簡単にしている。これにより省エネ性能は下がるが、それでも従来に比較すれば十分な省エネ性能が確保されることをシミュレーションで確認したのである(図20, 21)。

最初の適用プロジェクトである丸善石油化学(株)のMEK(メチルエチルケトン)精製蒸留塔では実測データで約57%のエネルギー削減と年間約4,700トンものCO₂排出削減を達成している。MEKは丸善石油化学が世界的にも高いシェアを持っており、同社の主力製品である。SUPERHIDiC事業はその後も進展し、東洋エンジニアリング(株)は既存プラントへの適用を容易にする間接式ヒートポンプ版の開発や、既設蒸留塔を再利用できる再設計手法を確立し、運転の柔軟性と信頼性を重視した技術改良も進めている。またHERO(Hybrid Energy system Re-Optimization)と呼ばれる同社独自のコンサルティングツールと組み合わせることで、プラント全体のユーティリティ最適化が可能となり、追加的に約40%のエネルギー削減実績も報告されている。

オランダや台湾などでのプロジェクトも結局は実用化に至らなかった。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、先に紹介した1980年に出された米国特許では、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制作上の問題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「実プロセスの構築」に結びつけた。それでも「商用化」にはさらなるデチューニングが必要だったのである。



HIDiC研究開発に関しては国内の大学、企業、また海外の大学、研究機関と多くの共同研究を実施した。先に記したプロジェクトでは3名の日本企業の技術者が博士号を取得した。海外の大学からもエジンバラ大学、ノルウェー工科大学、デルフト工科大学の博士課程の学生が数か月～1年間つくばに滞在しHIDiCに関する博士号を取得している（写真20）。いうまでもなく研究グループはもとより、工技院/産総

写真20 共同研究を実施したノルウェー工科大学のSigne教授と博士課程学生のRosjordeさん。彼は1年間つくばに滞在した。

研にとっても非常に有益な交流であった。

12. 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紹介した。ここで示した方法論では、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実現の一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を何回か回ることにより実用化までに至ったと考えている。

近年、プロセス強化の一環として「強化熱統合システム（Enhanced Heat Integration Systems）」との概念が化学プラントやプロセス産業において、プロセス内で発生する熱エネルギーを最大限に回収・再利用することで、飛躍的な省エネルギー化とCO₂排出削減を実現する技術として注目されている^[25-29]。従来の省エネ技術である熱統合（Heat Integration）は、反応器や蒸留塔、熱交換器間での熱回収ネットワークを最適化するもの

だが、強化型はこれを一歩進め、プロセス装置そのものに熱統合機能を内蔵し、設計段階から熱の再利用を前提とした構造とするのが特徴となっている。代表的なシステムがHIDiCであり、SUPERHIDiCは実用例と考えられている。このようなシステムは、蒸留だけでなく、反応・分離・乾燥などあらゆる熱利用工程に応用可能である。例えば反応器と熱交換器を一体化した「熱統合型膜リアクター」や、低温排熱を再利用するヒートポンプ統合系も含まれる。さらにAIや機械学習による熱交換ネットワークの最適設計、マイクロリアクターとの組み合わせによる局所的な熱制御の高度化も進んでいる^[30-34]。強化熱統合は、単なるエネルギー効率の改善にとどまらず、装置の小型化、モジュール化、運転の柔軟性向上にも貢献し、分散型プラントの中核技術としても期待されている。今後のカーボンニュートラル社会の実現に向けて、あらゆる産業プロセスの再設計に不可欠な技術領域となることが期待される。

本稿は産総研発行のSynthesiology, Vol.2 No.1 pp51-59 (2009)の内容を大幅に加筆修正し再構成したものである。

謝辞

今年で2005年に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終了してちょうど20年になります。化技研時代からの研究グループメンバーはもとより通商産業省/工業技術院、経済産業省、産総研、NEDO、プロジェクト参画企業、内外の大学、研究機関をはじめとした関係者に改めて謝意を表します。また今回、HIDiC研究開発に関する経緯を整理する機会を与えていただき、本稿編集を担当された神本正行氏、神澤千代志氏に感謝とお礼を申し上げます。

参考文献

1. Sholl, D. S., & Lively, R. P. (2016). Seven chemical separations to change the world. *Nature*, 532(7600), 435-437. <https://doi.org/10.1038/532435a>
2. The Chemical Engineer. (2023). Distillation distilled: Is industry adapting fast enough? *The Chemical Engineer*. <https://www.thechemicalengineer.com/features/distillation-distilled-is-industry-adapting-fast-enough/>
3. Jiménez-González, C., Poehlauer, P., Broxterman, Q. B., Yang, B. S., am Ende, D., Baird, J., ... & Manley, J. (2011). Key green engineering research areas for sustainable manufacturing: A perspective from pharmaceutical and fine

- chemicals manufacturers. *Organic Process Research & Development*, 15(4), 900-911. <https://doi.org/10.1021/op200097d>
4. Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
 5. U.S. Department of Energy, Office of Scientific and Technical Information. (2000). *Energy use and energy intensity of the U.S. chemical industry*. <https://www.osti.gov/servlets/purl/773773>
 6. Ng, D. K. S., Chew, I. M. L., Tan, R. R., & Foo, D. C. Y. (2019). Energy and CO₂ management for the chemical and related industries. *BMC Chemical Engineering*, 1(1), 1-9. <https://bmcchemeng.biomedcentral.com/articles/10.1186/s42480-019-0008-6>
 7. Wikipedia contributors. (2023). *Distillation*. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/Distillation>
 8. 平田雄志 (2005) : 「プロセス開発の戦略ー性能改善からプロセス強化へー」, 『化学工学』, 69(3), 144-147.
 9. 黒田千秋, 松本秀行 (2008) : 「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.
 10. Stankiewicz, A., & Moulijn, J. A. (2000). Process intensification: Transforming chemical engineering. *Chemical Engineering Progress*, 96(1), 22-34.
 11. Stankiewicz, A. (2005) : 「Serving the Triple Bottom Line: Process Intensification Role in Sustainable Manufacturing」, 『化学工学』, 69(3), 148-150.
 12. Moulijn, J. A., Stankiewicz, A., Grievink, J., & Gorak, A. (2008). Process intensification and process systems engineering: A friendly symbiosis. *Computers & Chemical Engineering*, 32(1-2), 3-11.
 13. 五十嵐一男 (2004) : 「材料・製造技術の新たな取り組み」, 『AIST Today』, 4(9), 4-5.
 14. 頼実正弘 (1966) : 『蒸留工学ハンドブック』, 朝倉書店.
 15. 加藤邦興 (1978) : 『化学機械と装置の歴史』, 産業技術センター.
 16. King, C. J. (1980). *Separation processes* (2nd ed.). McGraw-Hill.
 17. Fonyó, Z. (1974). Thermodynamic analysis of rectification I. Reversible model of rectification. *International Chemical Engineering*, 14(1), 18-27.

18. Petyluk, F. B., Platonov, V. M., & Girsanov, I. V. (1965). The design of optimal rectification cascades. *International Chemical Engineering*, 5(2), 309-317.
19. 化学工学会編 (2003) : 『化学工学の進歩 第37集』, 槓書店.
20. 中岩勝 (2008) : 「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.
21. Nakaiwa, M., Huang, K., Endo, A., Ohmori, T., Akiya, T., & Takamatsu, T. (2003). Internally heat-integrated distillation columns: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 81(1), 162-177.
22. Mah, R. S. H., Nicholas, J. J. Jr., & Wodnik, R. B. (1977). Distillation with secondary reflux and vaporization: A comparative evaluation. *AIChE Journal*, 23(5), 651-658.
23. 中岩勝 (2006) : 「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.
24. Seader, D. J. (1980). *Continuous distillation and method*. U.S. Patent No. 4,234,391.
25. Chen, Q., Wang, R., Zhao, W., & Li, Z. (2022). Integrated heat pump-assisted distillation: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112270. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112270>
26. Stankiewicz, A., & van Gerven, T. (2021). *Process intensification: Engineering for efficiency, sustainability and flexibility* (2nd ed.). Wiley-VCH.
27. Górak, A., & Stankiewicz, A. (Eds.). (2018). *Intensified reaction and separation systems*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110345879>
28. European Federation of Chemical Engineering. (2023). *12th European Process Intensification Conference (EPIC-12) Proceedings*. https://efce.info/WP_PI.html
29. Toyo Engineering Corporation. (2024). *SUPERHIDIC® 技術資料*. <https://www.toyo-eng.com/jp/ja/solution/superhidic/>
30. 一般社団法人 環境共創イニシアチブ (SII). (2023). 「先進的省エネルギー投資促進支援事業」導入事例 (R4Hsen-163) . https://sii.or.jp/file/senshin_system_search_04r/R4Hsen-163.pdf
31. Aspen Technology, Inc. (2023). *Heat integration using Aspen Energy Analyzer*. <https://www.aspentech.com>
32. MACBETH Project Consortium. (2024). *Membranes and catalysts beyond economic and technological hurdles (MACBETH)*. <https://www.macbeth-project.eu>

33. 化学工学会 PI分科会 (2021-2024) : 『プロセス強化に関するシンポジウム報告・講演資料』 . <https://www.scej.org/division/pi/>
34. AIChE RAPID Manufacturing Institute. (2024). *Modular chemical process intensification program overview*. <https://www.aiche.org/rapid>

著者略歴

中岩 勝 Masaru Nakaiwa

- 1980年4月 工業技術院化学技術研究所プロセス開発部第1課 研究員
- 1991年3月 工業技術院総務部ムーンライト計画推進室併任
- 2001年4月 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 グループ長
- 2008年7月 産業技術総合研究所 環境化学技術研究部門 研究部門長
- 2017年4月 産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所 所長
- 2021年4月 山形大学 産学連携教授
- 2023年4月 株式会社AIST-Solutions プロデュース事業本部 プロデューサー
- 2025年3月 同退職
- 2025年4月 科学技術振興機構 研究主幹 名古屋大学大学院情報学研究科 客員教授

本件に関する受賞歴

- 分離技術会技術賞 (2000)
- 化学工学会技術賞 (2001)
- 石油学会論文賞 (2009)
- 化学・バイオつくば賞 (2009)
- 日経地球環境技術賞 (2014)
- 化学工学会技術賞 (2018)

受理日：令和7年8月12日