

論文内容要旨（和文）

氏 名 鈴木 泰彦



論 文 題 目 内部熱交換型バッチ蒸留塔の実用化開発

有機溶媒は洗浄液や反応溶媒として用いられているが、環境負荷などの問題から使用量削減の取り組みが行われている。その一つに、使用済みの有機溶媒を分離精製して再利用する再生有機溶媒がある。混合物の分離精製には蒸留プロセスが多く用いられており、中でもバッチ蒸留は原料によらず同一の塔でこれを達成可能である。しかしながらバッチ蒸留は目的とする成分を塔頂から順番に抜き出すことから連続蒸留に比してエネルギー効率が悪い。蒸留は気液の接触によって分離を行うプロセスであるため、加熱による液の蒸発と、蒸気を冷却して液へと凝縮する操作が必要であり、エネルギー多消費型のプロセスとなっている。そのため蒸留プロセスの省エネルギー化開発が行われているが、それらは主に連続蒸留を対象としており、バッチ蒸留の省エネルギー化の試みはほとんどなされていない。

そこで本論文ではバッチ蒸留の省エネルギー化を図るため、省エネルギー蒸留プロセスとして内部熱交換技術に着目し、これをバッチ蒸留に適用したバッチ式内部熱交換型蒸留プロセス（バッチHIDiC）の実用化開発を目的とする。

本学位論文は、下記の5章で構成されている。

第1章では、蒸留プロセスの概要について述べた。連続蒸留に比べてバッチ蒸留プロセスが有機溶媒の再生に必要な不可欠な分離精製プロセスであることを述べ、溶媒再生プロセスの一例として2-Propanol-Water系分離の実例を概説した。さらに、蒸留プロセスの問題点がエネルギー効率にあることを提示し、省エネルギー蒸留プロセスおよびその技術のバッチ蒸留への適用について研究および開発動向を述べた。これらを踏まえ、省エネルギー蒸留プロセスであるバッチHIDiCの実用化開発を行うこととし、本論文の目的を示した。

第2章では、バッチHIDiCを用いて理想系および非理想系混合物を分離精製した場合の省エネルギー性の評価を行った。ここでは、原料を充填するベッセルを低圧部の塔底および塔頂に備えたバッチHIDiCのシミュレーションモデルを作成し、理想系としてBenzene-Toluene、非理想系として2-Propanol-Waterを分離対象系として定常、非定常状態における計算を行った。その結果、全還流操作した場合の挙動（定常状態）は、バッチHIDiCではヒートポンプ効果により高温となった高圧部と低圧部間で熱交換が行われることが確認された。さらに熱交換によって塔内の流量分布が変動し、低圧部の塔頂に向けて流量が増加し、高圧部の塔頂に向けて気液の流量が減少していることが分かった。また、抜き出し運転の結果（非定常状態）、バッチHIDiCは定常状態と同様に高圧部と低圧部間の熱交換が行われ、従来塔に比して抜き出し液流量が多く、プロセス時間が短くなることが分かった。これよりバッチHIDiCにおいて省エネルギー効果が得られることが明らかとなった。

第3章では、バッチHIDiCの伝熱特性を把握するために、小型実証試験機を用いて高圧部を加圧して圧縮比を変更した場合の全還流運転を行いプロセスの特性を評価した。小型実証試験機にて全還流運転を行った結果、圧縮比を上げる事で高圧部と低圧部間に温度差が発生し、塔内の流量分布が変動して低圧部では塔頂の液流量が塔底の液流量よりも大きく、高圧部では塔頂の液流量が塔底の液流量よりも小さくなることが確認された。また、圧縮比を変更して流量と温度、各段の液レベルの測定結果から伝熱面積および総括熱伝達係数を計算したところ、圧縮比1.2のときに蒸発側の総括熱伝達係数が $616 \text{ W/m}^2\text{K}$ となることを明らかにした。また、総括熱伝達係数は圧縮比によって変動していることから、塔内の流動状態が圧縮比によって変化していることが明らかとなった。

氏 名 鈴木 泰彦

第4章では、小型実証試験機の抜き出し運転結果およびシミュレーションモデルの計算結果を比較し、抜き出し運転におけるバッチHIDICのプロセス特性の検証を行った。小型実証試験機にてn-Hexane—n-Heptane 2成分系分離の全還流運転を行った結果、塔内の組成は低圧部、高圧部ともに塔頂に向かってn-Hexane組成が増加していたことが確認された。このときヒートポンプ効果によって高温となった高圧部と低圧部の各段で熱交換が行われていることが確認されたことから、試験機の全還流運転において内部熱交換が行われながら分離がなされていることが分かった。また、原料にEthanol—Water 2成分混合液を用いて小型実証試験機にて抜き出し運転を行った結果、プロセスの進行に伴って高圧部と低圧部の塔頂および塔底の流量が変化すること、および抜き出し液中のエタノール組成がプロセスの進行に伴い減少していることが確認された。これより、抜き出し運転においても内部熱交換が行われながら分離が行われていることが明らかとなった。

第5章では、本論文を総括した。

論文内容要旨 (英文)

氏 名 鈴木 泰彦

論 文 題 目 Development of an Internally Heat-Integrated Batch Distillation Process

Batch industries, especially the solvent recovery, need the energy saving process that can easily produce the separation of mixtures. Otherwise, conventional batch distillation process is energy-intensive industry because of adding a large amount of thermal energy as a separation agent. Recently, it has been reported that the energy saving with respect to elementary technology and zero reflux and/or no reboil operation can be obtained by using a Heat-Integrated Distillation Column (HIDiC).

The scope of this study is to develop an energy saving batch distillation system applying internally heat-integrated technology.

This doctoral thesis consists of 5 chapters.

Chapter 1.

The general reviews and research trends of energy saving batch distillation process, especially internal heat-integrated technologies were described. The dehydration process of IPA-water separation via commercial scale batch distillation column was explained. The purpose of this study was indicated.

Chapter 2.

This chapter verified process characteristics of the batch HIDiC using simulations. The batch HIDiC model was developed. The ideal and non-ideal separation process were calculated using the developed models. The energy saving performance of batch HIDiC was analyzed.

Chapter 3.

This chapter discussed the heat transfer characteristics of the batch HIDiC using the experimental setup. The flow rate and temperature profiles along the column at the total reflux operation was confirmed. Heat transfer area and overall heat transfer coefficients were estimated.

Chapter 4.

This chapter evaluated separation performances of the batch HIDiC using the same experimental setup in the Chapter 3. The total reflux operation and withdrawal operation were conducted. The composition profile along the column and the composition of distillate were analyzed. Also, the separation and energy saving performances of the dehydration process was confirmed.

Chapter 5.

This chapter was summarized the results and conclusions in this thesis.

学位論文の審査及び学力確認の結果の要旨

平成30年08月08日

理工学研究科長 殿

論文博士論文審査委員会

主査 松田 圭悟

副査 木俣 光正

副査 宍戸 昌広

副査 桑名 一徳

副査 中岩 勝



学位論文の審査及び学力確認の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	氏名 鈴木 泰彦		
論文題目	内部熱交換型バッチ蒸留塔の実用化開発		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	平成30年07月26日～ 平成30年08月07日
論文公聴会	平成30年08月07日	場 所	工学部4号館中示範A教室
学力確認結果	合格	学力確認年月日	平成30年08月07日
学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)			
溶剤は、塗料の希釈、反応溶媒、基礎原料、洗浄剤に用いられる化学物質であり、産業分野において広く用いられている。しかしながら、使用済みの溶剤の殆どは焼却処理によって大気放散されることから、二酸化炭素排出量の増加に繋がっている。それゆえ、環境負荷低減の観点から、省エネルギーな溶剤リサイクルプロセスの開発が求められている。本学位論文は、この課題解決のために内部熱交換技術を用いたバッチ蒸留の実用化開発に関する方法論についてまとめられており、全5章から構成されている。 第1章では既往の研究と本論文の目的がまとめられている。第2章では内部熱交換技術を用いたバッチ蒸留プロセスが提案されており、このプロセスに関する特性について実験およびモデルから得られた知見が述べられている。第3章では理想的な2成分系混合物を対象としたバッチ蒸留についてモデルベースで検討がなされており、内部熱交換性能と省エネルギー性能の関係について述べられている。第4章では商業稼働する溶剤リサイクルを対象とするバッチ蒸留プロセスについて内部熱交換型バッチ蒸留の適用可能性について述べられている。第5章ではこれらが総括され、内部熱交換型バッチ蒸留プロセスの実用化開発に関する方法論が示されている。本論文では、分離操作と伝熱操作を統合した新規なバッチ分離プロセスを提案し、実験およびモデルから詳細なプロセス工学的検討がなされており、提案されたプロセスが従来のものより高い省エネルギーが得られることを明らかにしているだけでなく、実用化に関する市場性、導入に関する意思決定メカニズムについても考察がなされており、新しい方法論を確立している。 本研究の成果は、1報の査読付き英文学術論文に掲載済みであり、3件の国際会議および10件の国内学会で発表がなされている。さらに分離技術会から学術賞を受賞していることから、本研究に対して客観的な評価が得られている。 本学位論文は、学位論文審査基準を満たしており、上記5名から構成される論文博士論文審査委員会は本論文の工学的価値が高いことを認め、合格と判定した。本論文は、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ありません。			
学力確認の結果の要旨			
学力確認は、博士論文公聴会における質疑応答と口頭試問を通じて、博士論文に関連する内容および当該専攻分野の内容について実施した。その結果、博士（工学）として必要とされる専門知識および学力は十分にあると判断し、合格と判定した。			