

論文内容要旨（和文）

平成23年度入学 大学院博士後期課程

有機材料工学 専攻 物質化学工学 分野

氏名 山木 雄大



論文題目 プロセスインテグレーションによる蒸留システムの強化設計論に関する研究

蒸留は、物質の蒸気圧差を利用した分離操作である。蒸留プロセスは、塔底のリボイラでの蒸発潜熱の供給と塔頂のコンデンサでの蒸発潜熱の除去、そして、還流操作といった、比較的シンプルな装置と操作によって、安定的に精度の高い分離を行える点が特徴である。したがって、蒸留分離は化学産業を始めとする産業分野で数多く用いられている。しかしながら、加熱と冷却には、温度レベルの異なる熱源が必要となることからエネルギー消費量も多いといった特徴もある。ゆえに、環境負荷低減や化学産業の持続可能性を高めるためには、蒸留プロセスの高効率化や省エネルギー化が必要である。

そこで本論文は、蒸留システムの高効率化や省エネルギー化を図るために、プロセスインテグレーションによる強化設計指針を構築することを目的とする。

本学位論文は、下記の7章で構成されている。

第1章では、蒸留分離プロセスの特徴と、これまでに提案されている省エネルギー蒸留の特徴と課題について述べた。ここで、省エネルギー蒸留技術は、潜熱回収型蒸留プロセスである蒸気再圧縮型蒸留塔と内部熱交換型蒸留塔、フロー集約型蒸留プロセスである多重効用型蒸留プロセスと塔分割型蒸留塔、ハイブリッドプロセスである反応蒸留を対象とした。それらのプロセスの研究・開発動向について述べたのちに、新たに発現するプロセスの特徴を考慮した設計方法の構築の必要性から、本論文の目的を示した。

第2章では、第1章で述べた省エネルギー蒸留技術の課題解決と深化を図るためにシミュレーションによる検討を行った。具体的には、三つの課題について検討を行った。一点目は内部熱交換技術を適用したバッチ蒸留プロセスの設計とその特性の解析、二点目は塔分割型蒸留塔の操作変数が製品組成に及ぼす影響、三点目は生成物と反応物の沸点関係が異なる反応系を対象とした反応蒸留の塔内プロファイルの解析である。その結果、バッチ蒸留に内部熱交換技術を適用しセミバッチ操作することで、従来のプロセスよりも約20%の省エネルギー化が達成されることが分かった。塔分割型蒸留塔の操作レンジの解析では、従来の多塔プロセスに比して、塔分割型蒸留塔は高純度の製品組成を得られる操作範囲は狭くなるが、約15%の省エネルギー化が図れることを明らかにした。また、反応蒸留の塔内プロファイルの検討から、反応系の構成成分の沸点関係により塔内温度分布が異なることを明らかにした。

第3章では、プロセスインテグレーションによるバッチ蒸留システムの性能強化を図るために、吸着操作と蒸留操作を統合したハイブリッドプロセスについて検討を行った。本章では、イソプロピルアルコール中の水の分離を対象に、従来のバッチ蒸留で操作した際と、ハイブリッドプロセスで操作した際の操作時間ならびにエネルギー消費量をモデルベースで解析した。その結果、ハイブリッドプロセスは、従来のバッチ蒸留に比して、約47%の省エネルギー化が達成できることを明らかにした。さらに、吸着ユニットの設計を行うために、ゼオライトによるイソプロピルアルコール中の水の吸着特性についても検討を行った。その結果、LTA-KやLTA-Naゼオライトを用いることで、イソプロピルアルコール中の水を選択的に分離できることを明らかにした。

第4章では、プロセスインテグレーションによる連続蒸留プロセスの性能強化を図るために、反応操作と潜熱回収型蒸留プロセスを統合したケミカルヒートポンプ蒸留について検討を行った。ケミカルヒートポンプ蒸留に適用可能な反応系の選択指針は、擬似成分による仮想的な反応系を対象とした反応蒸留プロセスのシミュレーション結果を基に構築した。その後、擬似成分による仮想的な反応系と実在反応系として酢酸メチル合成系を対象にケミカルヒートポンプ蒸留のモデリングを行い、プロセス特性について検討した。その結果、酢酸メチル合成系のケミカルヒートポンプ蒸留は、従来の反応蒸留よりも、約10%の省エネルギー化を達成できることを明らかにした。

第5章では、ケミカルヒートポンプ蒸留の深化を図るために、フロー集約型蒸留プロセスのコンセプトを統合した塔分割型ケミカルヒートポンプ蒸留について検討を行った。塔分割型ケミカルヒートポンプ蒸留に適用可能な反応系の選択指針は、第4章と同様にして、塔分割型反応蒸留のシミュレーション結果を基に構築した。その後、適用可能な反応系を対象に塔分割型ケミカルヒートポンプ蒸留のプロセス特性について解析したところ、従来の塔分割型反応蒸留よりも、エネルギー消費量は削減でき、さらに、反応転化率は向上できることを明らかにした。

第6章では、第3章から第5章までの検討を基に、プロセスインテグレーションによるバッチ蒸留および連続蒸留システムの強化設計指針を示した。

第7章では、本論文を総括した。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成 26 年 8 月 7 日

理 工 学 研 究 科 長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 松田 圭悟

副査 長谷川政裕

副査 高橋 幸司

副査 宍戸 昌広

副査 遠藤 明



学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

| | | | |
|----------|------------------------------------|---------|--------------------------------------|
| 論文申請者 | 有機材料工学専攻 物質化学工学分野 氏名 山木 雄大 | | |
| 論文題目 | プロセスインテグレーションによる蒸留システムの強化設計論に関する研究 | | |
| 学位論文審査結果 | 合格 | 論文審査年月日 | 平成 26 年 7 月 22 日～ 平成 26 年 8 月 7 日 |
| 論文公聴会 | 平成 26 年 8 月 7 日 | 場所 | 工学部 100 周年記念館セミナールーム |
| 最終試験結果 | 合格 | 最終試験年月日 | 平成 26 年 8 月 7 日 |

学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

蒸留分離プロセスは、シンプルな装置構造と簡便な操作性によって、高い精度の分離を安定的に行えることから、産業分野で多く用いられている。その一方で、蒸留分離は分離に必要なエネルギー消費量が多いといった特徴もある。ゆえに、環境負荷低減の観点から、蒸留プロセスの省エネルギー化を目指した性能強化が求められている。当該学位論文は、この課題解決のために可逆蒸留を目指した実プロセスを構築するための設計論についてまとめられている。

当該論文は、6 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 章ではプロセスを統合化した蒸留システムのモデル化手法についてまとめられており、その特性について議論がなされている。第 3 章では回分操作を対象とした非定常状態における統合化蒸留システムの特性について議論がなされている。第 4 章では連続操作を対象とした定常状態における様々な統合化蒸留システムの省エネルギー性能について議論がなされている。第 5 章では反応操作と分離操作を統合化した蒸留システムについてまとめられており、分離や反応性能について議論がなされている。第 6 章ではこれらが総括され、プロセスインテグレーションにより強化された蒸留分離システムの設計論が示されている。申請者は、蒸留操作と伝熱操作、反応操作を統合化した新規な連続分離システムを提案しモデルベースでの検討をおこなっており、これらのシステム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。また、蒸留操作と吸着操作を統合化した新規な回分分離システムも提案しており、これまで困難とされてきた回分操作での省エネルギー化の可能性を示している。

以上、当該論文は分離操作と様々な操作を統合化した新しい分離システムについて可逆性を対象にシステム論ならびに熱力学を基に検討し、新しい設計論を確立している。また、当該論文の内容について、8 報の原著論文が公開されており、さらに分離技術会から学術賞を受賞していることから外部からも高い評価が得られている。

これらのことから上記 5 名から構成される課程博士論文審査委員会は当該論文の工学的価値は極めて高いと認める。よって学位論文（博士）として合格と判断する。

最終試験の結果の要旨

本学の規定に従い、学位論文について口頭による最終試験を実施した。最終試験は、60 分の口頭発表および 30 分の質疑応答により実施した。学位論文の内容は研究の背景や目的、研究の成果から結論に至るまで展開と論証を明確に説明し、質疑応答ではこの論文に関連した広範囲な質疑に対して的確に回答された。その結果、学位論文（博士）として必要とされる専門知識や研究能力を十分に備えていると判断でき、最終試験を合格と判断した。