

博 士 学 位 論 文

(論文内容の要旨及び論文審査の要旨)

第 1 7 号

令和 4 年 1 2 月

八 戸 工 業 大 学

は し が き

博士の学位を授与したので、学位規則（昭和28年文部省令第9号）
第8条の規程に基づき、その論文の内容の要旨及び論文審査の結果の
要旨をここに公表する。

目 次

論文博士

学位記番号	博 士 の 専攻分野の 名 称	氏 名	論 文 題 名	頁
第 1 0 号	博士（工学）	藤居 達郎	水－臭化リチウム系を作動媒体とした低温駆動・低温発生型吸収 冷凍機の研究 (Studies on the low-temperature driven and low-temperature generating absorption chillers using H ₂ O/LiBr solution as working fluid)	1

氏 名	藤居 達郎
博士の専攻分野の 名 称	博士（工学）
学 位 記 番 号	第 1 0 号
学位授与年月日	令和 4 年 1 2 月 2 2 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 2 項該当
学 位 論 文 題 目	水－臭化リチウム系を作動媒体とした低温駆動・低温発生型吸収冷凍機の研究 (Studies on the low-temperature driven and low-temperature generating absorption chillers using H ₂ O/LiBr solution as working fluid)
論 文 審 査 委 員	(主査) 八戸工業大学 教授 野田 英彦 (副査) 八戸工業大学 教授 大黒 正敏 (副査) 八戸工業大学 教授 小林 正樹

論文の内容の要旨

地球温暖化防止を目的とする「パリ協定」（COP21）は、世界全体での温室効果ガスの排出量を今世紀後半には実質的にゼロにすることにすべての国が取り組むとした、法的拘束力を持つ枠組みである。このような中、吸収冷凍サイクルは、比較的環境温度に近い熱エネルギーを活用するものであり、化石燃料や電力の消費を低減できる重要な技術である。

本論文は、吸収冷凍サイクルの応用機器の中で、特に環境温度に近い低温排熱から冷熱を発生することにより、社会全体における電動式冷凍機の負荷を軽減する温水駆動型の吸収冷凍機を主な対象としており、3 課題について研究開発を行っている。以下、本論文で得られた成果を 1 ～ 3 に、今後の展望を 4 に記している。

1. 中低温吸収冷凍機の開発と実用化

第一部では、水を冷媒とする吸収冷凍機において低温の冷熱を得る手段として、蒸発器内の水冷媒に少量の吸収剤を混合することにより凍結温度を低減する「希薄溶液サイクル」を採用し、実用化に向けた研究を行っている。

(1) 希薄溶液を利用した出力温度の低温化

希薄溶液サイクルを用いた技術は先行開発の例があり、第 1 章では最初にその研究成果、実用化の状況と問題点を調査検討している。この先行開発では高温および低温の 2 段階の蒸発器と吸収器を有し、高温側の蒸発器によって低温側の吸収器を冷却する構成を採用している。このため、再生器で発生して凝縮器で液化した冷媒を高温、低温の 2 つの蒸発器に供給する必要があるため、成績係数（COP）が約 1/2 となる。しかしながら、希薄溶液の吸収剤濃度と凍結温度（凝固点）の関係、蒸発器内の希薄溶液化による蒸発伝熱性能の低下傾向を明らかにした点、さらにはこれらの技術を応用した「低温吸収冷凍機」を製品化し、飲料水工場等に導入した点に意義があることを記している。

(2) 希薄溶液を考慮したサイクルシミュレーション

第2章では、上記「低温吸収冷凍機」のCOPが低い点に着目し、一般の温水焚吸収冷凍機の構成に対して希薄溶液サイクルを適用し、従来の低温吸収冷凍機に対して発生温度は高くなるが、一般の機種に匹敵するCOPが得られる吸収冷凍機を開発している。この新型吸収冷凍機は従来の低温吸収冷凍機と区別して「中低温吸収冷凍機」と称している。

開発の第一段階として、従来は系統的な検討がされていなかった希薄溶液サイクルのシミュレーション方法について、一般の吸収冷凍機と動作が異なる2分割型蒸発器を中心にモデル化した。本シミュレーションにより、90℃の熱源温水、28℃の冷却水条件において1～3℃程度の冷熱が得られる見通しを得ている。

(3) 製品試作機による中低温発生機の動作検証

以上の検討結果から、第3章では実際の温水焚一重効用吸収冷凍機を基本とした製品試作機を製作し、所定の冷凍能力、0.71～0.73のCOPが得られることを確認している。このCOPは一般的な一重効用吸収冷凍機の0.75に対して十分匹敵する値である。さらに、シミュレーションの精度検証を行い、冷凍能力および温水からの入熱量において±5%、COPにおいて±0.005の精度を確認し、本技術を様々なケースに適用していく際に有効なツールを開発している。

2. ダブルリフトサイクルを用いた低温駆動吸収冷凍機の研究

第二部では、吸収冷凍機の駆動熱源温度を低減する技術として、ダブルリフトサイクルの研究に取り組んでいる。本サイクルは従来から低温排熱の利用に適していることが指摘され、先行する研究例も見られたが、本研究ではより低温の熱源を活用するために、熱源温水入口温度を60℃に設定し、冷凍能力約9kWの原理試作機が製作されている。原理試作機の製作に先立ち、サイクルシミュレータを従来の手法に倣って作成している。

(4) 原理試作機による60℃温水駆動、7℃冷水出力の実証

第4章では、原理試作機による実験の結果、熱源温水温度60℃、冷却水温度30℃の条件において7℃の冷水が得られることを実証している。さらに、この実験結果の信頼性は1) 外部との熱収支が成立すること、2) 能力およびCOPの低下要因として内部熱損失のメカニズムを明らかにすること、の2点によって確認されている。

(5) 温水温度特性とシミュレーションの検証

第5章では、原理試作機によるダブルリフトサイクルの実証結果を踏まえて、その実用化の際に重要な温水温度特性を実験とシミュレーションによって検討している。シミュレーションについては応用検討への活用を想定して実験結果との比較により精度が検証されている。その結果、温水温度変化に対するサイクルの基本的な挙動を明らかにするとともに、作成したシミュレータは冷凍能力について±3%、COPについて±0.01の誤差であり、十分な精度を有することを確認している。

3. 一重効用ダブルリフト吸収冷凍機の開発と実用化

ダブルリフトサイクルの実用化に際して、これまでに研究した基本技術をもとに市場性と経済性を検討した結果、第三部では従来の一重効用サイクルにダブルリフトサイクルを組み合わせることにより、熱源温度範囲の拡大と、温度条件に応じた COP を確保できる「一重効用ダブルリフト吸収冷凍機」を開発し、実用化に至っている。

(6) 一重効用ダブルリフト吸収冷凍機の第一次試作機の開発

第 6 章では、一重効用ダブルリフトサイクルの動作を検証するため、サイクルシミュレーションによる蒸発器と吸収器の上下 2 分割構造の効果、温水および冷却水の通水方法の検討結果をもとに第一次試作機が製作された。本試作機による実験により、88.7℃の温水から 53℃までの温度差約 35℃の熱回収条件で 7℃の冷水が発生することを実証している。

(7) 製品試作機による動作検証と製品化

第 7 章では原理試作機による実験結果をもとに、実用化を前提とした製品試作機を製作し、実験により動作を検証している。その結果、熱源温水入口温度 97℃において出口温度は 57℃以下であり、40℃以上の温度差で動作すること、本体熱損失を考慮した断熱施工時の予測 COP が 0.71 となることが確認されている。さらに、容量制御時の動作を想定して温水流量をパラメーターとした実験と解析を行い、両者がほぼ一致することを確認している。

(8) 一重効用ダブルリフト吸収冷凍機の社会導入

第 8 章では以上の研究結果に基づき、一重効用ダブルリフト吸収冷凍機の製品第一号機をコージェネレーション設備を持つ欧州の事務所ビルに導入している。実機設置後の試運転では冷水出口温度がほぼ設定値の 6℃に制御されており、容量制御を含めて妥当な動作である。

また、約 30%負荷における運転結果では、60℃程度の温水を冷房用途に活用できる可能性が示された。この結果は本研究におけるダブルリフトサイクルの原理試作機による実験結果が実際の導入先においてほぼ再現されたものであり、本研究の大きな成果の一つであることが記されている。

4. 吸収冷凍サイクルの今後の展望

結論では、今後の展望として新型熱交換器の開発による出力温度の低温化、一重効用ダブルリフトの基本としたダブルリフトサイクルの実用化、一重効用ダブルリフト吸収冷凍機へ希薄溶液サイクルの適用等が期待され、筆者としても引き続き取り組むとしている。

ABSTRACT

The Paris agreement (COP21), a legally binding framework that aims to prevent global warming, describes all countries' work to make greenhouse gas emissions essentially zero in the second half of this century. In such a situation, absorption refrigerating cycles are essential to reducing fossil fuel and electricity consumption since they use thermal energy nearby the surrounding temperature.

This thesis focuses mainly on hot-water-driven absorption chillers among various applications of the absorption cycle. These chillers can reduce the cooling load of electrical vapour-compression cooling cycles and direct fuel-fired absorption machines by producing cold heat from reused low-temperature waste heat. The author discussed three research and development themes in this thesis. In the following, the author described significant findings in Part 1 ~ 3 and mentioned the future outlook of the absorption cycles in Part 4.

1. Development and implementation of an absorption chiller with 1 to 3°C output

In part one, the author studied an absorption chiller with a "dilute solution cycle," which reduced the freezing temperature of water refrigerant in the evaporator by mixing a small amount of absorbent. Thus, the absorption chiller can generate a lower output temperature of 1 to 3°C.

(1) Output temperature reduction by using a dilute solution

In chapter one, the author reviewed previous research and developments concerning the "dilute solution cycle." The relation between the dilute solution's concentration, freezing point, and heat transfer degradation in the evaporator was already quantified. However, these developments adopted a "two-stage cycle," which reduced the chiller's COP (coefficient of performance) by almost half. This disadvantage of the dilute solution cycle was problematic.

(2) Cycle simulation considering dilute solution in the evaporator

To overcome the above COP decrease, the author developed a new absorption chiller that applied a dilute solution cycle for a normal absorption cooling cycle without the "two-stage cycle."

In chapter two, the author modeled and simulated the dilute solution cycle as the first step of development. As a result, the author predicted that the dilute solution cycle could deliver 1 to 3 °C chilled water from 90 °C heat source hot water and 28 °C cooling water.

(3) Experimental verification of the cycle behavior by production prototype

The author manufactured a production prototype in chapter three based on the above discussion. This prototype had almost the same structure as present hot-water-driven single-effect absorption chillers. This prototype performed desired cooling capacity and COP of 0.71~0.73, which is enough comparable value to a general single-effect machine whose COP was 0.75.

2. Study of a low-temperature-driven absorption chiller using vapour-exchange double-lift cycle

In part two, the author studied the double-lift cycle as a critical method to reduce absorption chillers' driving heat source temperature. Formerly this cycle was pointed out to be suitable for utilizing low-temperature waste heat, so this study manufactured a proof-of-concept prototype of this cycle.

(4) Experimental proof of 7 °C chilled water output driven by 60 °C hot water with a prototype

In chapter four, the author demonstrated that 7 °C chilled water was obtained from 60 °C hot water and 30 °C cooling water from the experimental result of a double-lift cycle prototype. The reliability of this result was confirmed by the heat balance of the whole system. Cooling output and COP decreased from their rated value, and the cause of this degradation was explained clearly by internal heat loss.

(5) Hot water temperature characteristics and validation of the cycle simulation

In chapter five, the author studied the hot water characteristics of the prototype by the measured data and cycle simulation. The accuracy of the simulation was estimated by comparing it with the experiment for further application study. As a result, the author revealed the basic characteristics and showed the simulator had enough accuracy, i.e., $\pm 5\%$ for the cooling capacity and ± 0.01 for the COP.

3. Development and implementation of single-effect double-lift absorption chiller

In part three, the author developed a "single-effect double-lift (SEDL) absorption chiller," combining a double-lift cycle and a conventional single-effect cycle. This chiller is driven by hot water with wide temperature differences and has appropriate COP for given temperature conditions. These SEDL absorption chillers were installed in some cases in Europe.

(6) Development of a primary prototype of a single-effect double-lift absorption chiller

In chapter six, the author manufactured a primary prototype of a SEDL absorption chiller to study its behavior and function, based on simulation results concerning cycle configurations. This prototype delivered 7 °C chilled water and recovered heat from 88.7 °C to 53.0 °C of hot water; thus approximately 35 °C difference between inlet and outlet was demonstrated.

(7) Operation verification of a production prototype and commercialization

In chapter seven, the author manufactured a production prototype based on the experimental results of the primary prototype of SEDL, premised on practical use, and verified its operation. As a result, the production prototype was operated with a 97 °C inlet, and the outlet hot water temperature was less than 57 °C. Thus over a 40 °C temperature difference was observed. The author predicted the COP considering body heat loss as 0.71 in the case of regular insulation of actual products.

(8) Social implementation of the single-effect double-lift absorption chillers

Based on the above studies, in chapter eight, the author introduced the first product of the SEDL absorption chiller to an office building with a co-generation system. According to its test run data, the chilled water outlet temperature was almost stable at approximately 6 °C of its set value. In another condition of approximately 30% cooling load, 60 °C hot water was available as the heat source for space cooling use. This result reproduced the experimental result of the proof-of-concept prototype studied in

chapter four and was one of the most important results of this thesis.

4. Future outlook of absorption cooling cycles

In conclusion, the author is willing to study further lowering output temperature using a novel heat exchanger, commercialization of simple double-lift cycle, and applying a dilute solution cycle to the SEDL absorption chillers as the future outlook.

.

論文の審査結果の要旨

藤居氏は北海道大学大学院工学研究科衛生工学専攻修士課程を修了し、日立製作所機械研究所に入社後から現職のジョンソンコントロールズ ビルディング エフィシエンシーに至るまで、30 年近く吸収冷凍機の研究を行っており、主体的に執筆した論文 23 編（査読論文和文 12 編、英文 1 編、査読なしの論文和文 5 編、英文 5 編）を公表している。これまでの英論文を含む論文数、および口頭試問に対する回答から、十分な専門知識と語学力があることを確認した。

本論文は、吸収冷凍機研究のうち、従来廃棄されている排熱を低温度域まで利用する温水駆動型の吸収冷凍機の研究について執筆しており、序論、三部 8 章、結論から構成されている。

序論では、研究目的と経緯を説明し、関連する従来の研究と本研究の位置づけを述べている。第一部では、低温排熱の用途を空調分野から冷蔵分野に拡大する希薄溶液を利用した中低温吸収冷凍機の開発について述べている。第二部では低温排熱の利用温度帯をより低温側に拡大するダブルリフトサイクルの研究について述べている。第三部はこの技術を適用した一重効用ダブルリフト吸収冷凍機の開発、実用化に関する研究について述べている。最後に結論では本研究で得られた成果を要約するとともに、今後の課題について述べている。

本論文の研究は、利用されずに廃棄している未利用エネルギーの有効利用を可能とするものであり、省エネルギー技術の分野で価値の高い研究成果と考える。

また、最終試験では、吸収冷凍機実機内の作動液の状態や実機の導入事例に関する質問に対して、的確な回答を述べた。したがって、博士（工学）の学位を与えるに相応しい。

最終試験の結果の要旨

吸収冷凍機に関する 30 年近い研究歴と執筆論文数、口頭試問に対する回答から、関連専門知識は十分と確認した。また、英文論文 6 編のうち、筆頭著者として 5 編を執筆しており、外国語能力は十分と確認した。