

博士論文審査報告書

論 文 題 目

Optimal Operation of Solar Energy Driven
Single-Double-Effect Absorption Chiller

太陽熱で駆動する一重二重効用吸収冷凍機の
最適運用に関する研究

申 請 者

ARNAS
アルナス

機械科学専攻 機械システム制御工学研究

2019年2月

地球温暖化問題は、人類が抱えている最大の環境問題である。これからの科学技術は、この解決に向けた取り組みが最大の課題の一つとなることは間違いない。全世界的にこの問題の解決を目指し、2050年までに二酸化炭素を主とした温室効果ガスを50%削減する極めて厳しい数値目標を設定し、機器の効率向上や再生可能エネルギー導入をはじめとした多様な取り組みを続けている。

冷凍空調分野では、冷凍空調機器の圧縮機や熱交換器をはじめとするデバイスの性能向上が図られるとともに、運転制御手法の改善により、機器の年間性能の向上が図られている。これに加えて動作流体である冷媒の温室効果が問題となり、地球温暖化係数(GWP)の低い冷媒の探索や開発、人工物質ではなく自然界に存在しGWPの極めて低い自然冷媒の普及が進められている。

このような中、吸収式冷凍機は、再生可能エネルギーとしての太陽熱や工業プロセスにける低温の排熱などの熱を駆動源として駆動することが可能であるとともに、動作流体として、水やアンモニアのような自然冷媒を使用して、冷凍、冷房から給湯、蒸気生成に至る熱エネルギー変換機器として幅広く活用可能であることから、改めて有望な技術として注目されている。

吸収式冷凍機を太陽熱で駆動する場合には、日射量の変動により、所要の空調負荷への対応が困難となる時間帯を有する。本研究では、このような太陽熱の不安定な特性に対して安定した冷熱を供給するために、加熱量の調整が容易なガスの燃焼によってバックアップできる一重二重効用吸収式冷凍機を対象とする。本システムが採用している一重二重効用併用サイクルは、太陽熱で駆動する場合には、90℃程度の低温の熱源でも駆動可能な一重効用サイクルとして吸収式冷凍機を駆動し、それが不足した場合には、ガスの燃焼によって高効率な二重効用サイクルのバックアップ駆動が可能となる。

このサイクルは、熱交換器を主構成要素として多くの構成要素から構成されるだけでなく、両サイクルで吸収器や蒸発器、凝縮器、溶液熱交換器を共有する。そして、両サイクル間を動作流体としての吸収溶液や冷媒が熱交換器内の駆動圧力に強い影響を受けつつ分岐や混合しながら流動する。このため、太陽熱とガスの両熱源による併用運転がなされる場合には、それぞれのサイクルが強く相互干渉するため、その最適な運用が極めて困難となる。

そこで、本研究では、太陽熱で駆動する一重二重効用吸収冷凍機を対象として、数理モデルを構築するとともに、それらを用いた数理解析と実機の性能試験により、太陽熱の変動に対しても冷凍機を安定して、しかも高効率に駆動するための最適運用方法を明らかにすることを目的とする。

本論文は、8章から構成されている。第1章では、本研究の背景から、研究目的、従来の研究に対する本研究の位置づけ、論文の構成について述べている。本研究の背景には、平均気温と湿度の高いアジアの熱帯地域の気候の特徴と、それに伴う年間空調の必要性が含まれている。この地域の日々の生産活動の向上のためには、年間を通じた冷房により快適なゾーンを作るための空調システムが必要不可欠であるが、当然の結果として、電力使用量が大幅に増加する。

一方で、赤道直下にあるアジアの熱帯地域では、年間を通して豊富に太陽エネルギーの利用が可能

となるため、これを有効活用すれば、大幅な省エネルギーを実現することが可能性となる。吸収式冷凍機は、熱で駆動可能な冷凍空調機器であるため、アジア熱帯地域での豊富な太陽熱を活用し、空調によるエネルギー使用量の大幅な増大を防ぐ有効な手立てとなることについて述べている。

第2章では、インドネシア大学に設置し、現在も運用を続けている最新の冷房能力350kW級の太陽熱駆動の一重二重効用吸収式冷凍機を主構成システムとするソーラークーリングシステムについて述べている。本システムは、一重二重効用吸収式冷凍機、ソーラーパネル、クーリングタワー、ウォーターループから構成されており、これらが冷凍機とソーラーパネル間のエネルギーのやり取りを行う温水循環ループ、冷房を供給する冷水循環ループ、クーリングタワーで放熱を行うための冷却水循環ループで接続されている。

このシステムの主要な仕様やデータの取得や計測などについて詳しく説明している。本システムから取得した運転データは、以降で構築する数理モデルの妥当性検証にも有効活用される。

第3章では、まず、フィールドテストのデータに基づいてソーラークーリングシステムの現行の運用制御手法について説明している。吸収式冷凍機では、要求される冷房負荷に応じてガス供給量が操作される制御を基本制御としている。また、冷水、冷却水、温水や吸収式冷凍機内部での動作流体としての吸収溶液流量は、単効用サイクルと二重効用サイクルの過度な干渉を避け機器を安定に駆動するために一定に保たれているため、システム全体の制御が良好になされていることが示されている。一方で従来の制御系に対して吸収溶液を適切に分配する制御を加えることによってガスの燃焼量を最小化し、効率を最大化させる運転が可能であることが示唆されている。

第4章では、シミュレーション方法について述べている。まず、数理モデルは、各構成要素において連続方程式、エネルギー方程式を基本として構成され、非定常モデルとなっている。これらの接続系としてシステム全体の数理モデルが構築されるが、システムが非常に複雑になるため、数理モデルも全体としては非常に複雑なものとなる。このため、システム全体の数値解析を実現するためには、システム全体の特性には影響をしない因子を適切に簡易化したモデルを適用することが必要となる。

そこで、特に複雑となる伝熱式については、熱抵抗の大小関係を明確にすることにより、流量の関数として精度を落とすことなくその関係式を簡略化できる手法を導入することにより、数値解析を比較的容易としている。この手法の妥当性はシステム全体としてのシミュレーション結果とフィールドテストの結果がよく一致することから確認されている。

第5章では、構築した数理モデルを用いてシミュレーションにより、システムの基本性能を分析している。ここでは、冷房負荷量、ガスの加熱量、冷却水供給温度が吸収式冷凍機の特性に与える影響が検討されるとともに、これらの変動によって太陽熱による吸収冷凍機の加熱量が逆に影響を受けることが明らかとされている。これらの結果から、システムが要求される冷房負荷に対して必要となるガスによるバックアップ加熱量が明らかにされている。

第 6 章では、第 5 章の基本性能分析結果をもとにして、このシステムの運転性能を最大化し、ガスの消費量を最小化する最適な運転手法について説明している。最適運転を実現するために、全吸収溶液流量、吸収溶液分配比を変動させる効果について検討している。

この際には、吸収冷凍機は吸収溶液の流量を低下させすぎると濃度が上昇し、溶液の結晶化をもたらすことがあるため、結晶を回避すること、法規上容器内の圧力を大気圧以下で運転することが運転上制約となるため、解析上では、これらを制約条件として考慮することが重要となることが述べられている。この制約条件も加味したシミュレーションの結果、冷房能力と太陽熱の加熱量に応じて、ガス消費量を最小化する最適な運転条件が存在することが明らかにされている。

第 7 章では、吸収溶液循環量を直接制御するためには、高価な流量計による計測が必要となり、実システムとしては、現実的ではないため、容器内の圧力から間接的に適切な溶液の分配を実現できる方法を新たに提案している。示唆された運転方法は、実現が容易であり、吸収溶液分配比の直接制御のために 2 つの流量計を必要とすることなく第 6 章で述べた最適な運転手法を採用した際とほぼ同等の性能を発揮できることが示されている。

提案された運転手法は、実際に機器が過渡的に運転されている状態でも問題なく適用することが可能なことがシミュレーションによって示され、現在の運転計画の COP（成績係数）よりも高い COP で機器の運転が可能なが示されている。

第 8 章では、本研究を総括し、結論と今後の展望について述べている。

以上要するに、本研究では、日々の平均気温と湿度が高いため、今後冷凍空調システムが急激に普及することが予想されるアジアの熱帯地域において、太陽熱を有効利用することによりこれらのシステムからの二酸化炭素排出量の削減に大きく貢献するソーラークーリングシステムの最適な運用方法が明確化されている。ここでは、単に実験的なアプローチだけでなく、非常に複雑となるシステムのモデリング方法とともに論理的な解析手法、最適化手法を明確化している。同時に具体的に実装する方策まで明確化している。

この結果は、環境工学、熱力学だけでなく、システム工学、制御工学の発展に大きく貢献するものであり、博士（工学）の学位論文として価値のあるものと認める。

2019 年 1 月

審査員

主査	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	齋藤 潔
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	勝田 正文
	早稲田大学准教授	工学博士（早稲田大学）	武藤 寛
	早稲田大学教授	博士（工学）早稲田大学	天野 嘉春