

# 論文内容要旨（和文）

平成 31 年度入学 大学院博士後期課程

物質科学工学専攻

氏 名 秋元 良祐



論 文 題 目 A Study on Process Design and Evaluation of an Integrated Lorenz Cycle

Power Generation Systems

(複合ローレンツサイクルのプロセス設計と評価に関する基礎的研究)

本論文は、日本におけるエネルギー供給システムの変革のために、低温熱利用技術である有機ランキンサイクル(ORC)やカーリーナサイクル、ローレンツサイクルをプロセスシステム工学の観点からシステムの開発を行い、その性能の解析や評価を示したものである。なお、本論文は全六章から構成されており、以下に各章毎の内容を記載した。

## 第一章：緒論

近年日本では火力発電、原子力発電に代わる新たな電源として、再生可能エネルギーを主力電源化する動きがある。再生可能エネルギーによる発電容量は 2011 年に 31 TW であったのに対し、2019 年には 121 TW まで増加している。しかしながら、再生可能エネルギーの中でも地熱や産業排熱などの再生可能熱エネルギーは、ほとんど使われていない。このような熱は、温度が 373 K 以下、流量が 100 l/min 以下の低品位の熱エネルギーとして日本各地存在している。これらの熱を用いて発電可能なシステムの一つとして ORC がある。しかしながら、低品位熱を用いた発電では、温冷熱源の温度差を十分に確保できず発電性能が低いという問題を抱えている。本章では ORC に関する研究動向について調査し、プロセス設計による ORC の発電性能向上についてまとめるとともに問題提起を行い、研究目的を明らかにした。

## 第二章：マイクロ ORC の設計とその発電性能解析

従来の ORC に関する研究は、熱源温度や作動流体の種類などの操作条件に対して、最適な ORC の設計が行われてきた。しかしながら、その設計法は ORC の汎用性を低下させるものである。ORC の汎用性を高めるためには、設計条件を固定した ORC を用い、様々な条件下で検討を行うことで、ORC の適用範囲を求める必要がある。そこで、本章では、20 kW 以下の小型 ORC システムをマイクロ ORC と呼称し、モデルベースで開発を行った。また、その発電性能を熱源温度、熱源流量および作動流体の種類によって評価し、各作動流体を用いた ORC の適用範囲を明らかにした。また、得られた結果から AI を利用することによって、作動流体毎のより詳細な発電性能の解析を行った。

### 第三章：温度グライドを考慮した小型カーリーナサイクルの設計と複合カーリーナサイクルの設計

ORCは非共沸混合物を作動流体とすることで、性能が向上することが知られている。なぜなら、非共沸混合物は温度変化を伴いながら相変化することにより、熱源間の温度差小さく保つことが可能となるためである。その結果、熱交換時の不可逆損失を低減することができる。この温度変化を伴う相変化は温度グライドと呼ばれるが、これに着目しながらサイクルの設計を行った例は数少ない。

また、低温熱利用発電システムの性能向上の一つとして、熱源を昇温させることが考えられる。それを可能とする技術の一つとしてヒートポンプ技術がある。中でも吸収式ヒートポンプは、外熱を駆動力とすることができるため、低温熱利用発電システムへ適用できる可能性がある。そこで、本章では、非共沸混合物であるアンモニア/水を作動流体としたカーリーナサイクルの設計を温度グライドに着目しながら行うとともに、吸収式ヒートポンプをカーリーナサイクルに統合した複合発電システムの設計を行い、その発電性能およびコスト評価を行った。

### 第四章：非共沸混合物を用いたマイクロORCの設計

ORCで用いられる非共沸混合物はアンモニア/水に限らず様々な流体が提案されているが、これもまた温度グライドに着目しつつサイクルの設計を行った研究はほとんどない。さらに、作動流体の種類による温度グライドへの影響は明らかとなっていない。また、従来の研究では、熱源は潤沢に存在しているものが多く、低流量の熱源を対象としたものはほとんどない。しかしながら、再生可能な熱エネルギーは、十分な流量を確保できない場合が想定できる。このように、熱源の流量が少ない(100 l/min未満)場合、伝熱時に大きく温度が変化する顕熱性の熱源となる。このようなケースでは、高温熱源の出口温度が低温熱源の出口温度を下回り、システムの稼働が困難となるが、温度グライドを用いることで発電可能となる可能性がある。そこで、本章では気液平衡関係が異なるbutane/pentane, butane/ethanol, butane/1-propanolの3種の作動流体を選定し、これらを用いてマイクロORCの設計を行い、熱源流量をパラメータとしたケーススタディを行った。

### 第五章：分離膜を用いた発電プロセスの開発

温度グライドは、顕熱部と潜熱部で傾きが異なるため、完全に熱源とプロファイルをマッチさせることは困難である。そこで、Organic Flash Cycle (OFC)に着目した。OFCでは、作動流体の顕熱分の熱だけがサイクルに供給され、加熱された作動流体を減圧することによって、蒸気を作り出し発電するサイクルである。熱交換は顕熱のみであるため、熱源と温度グライドをマッチさせることが容易である。しかしながら、蒸気を作り出すためには、熱交換器と減圧および気液分離を行うフラッシュタンクが必要であり、発電コストが高くなってしまう可能性がある。そこで、本研究では熱交換と気液分離が可能な技術として分離プロセスに注目した。また、中でも圧力差が駆動力となる膜分離プロセスは、発電サイクルへのアプリケーションとして適用できる可能性がある。従って本章では、OFCをベースに熱交換と気液分離が同時に可能である分離膜を用いた発電システムの開発を行った。

### 第六章：総括

本章にて、本論文の総括を行った。



# 論文内容要旨 (英文)

平成 31 年度入学 大学院博士後期課程

物質科学工学専攻

氏 名 秋元 良祐



論 文 題 目 A Study on Process Design and Evaluation of an Integrated Lorenz Cycle Power Generation Systems

This paper presents the development of small scale power generation systems for constructing the distributed energy supply system in Japan using low grade heat energy utilization technologies such as Organic Rankine Cycle (ORC), Kalina Cycle, and Lorenz Cycle from the viewpoint of process system engineering and, shows the analysis and evaluation of their performance. This paper is composed of six chapters, and the contents of each chapter are described below.

## Chapter 1: Introduction

Recently, there has been a politically movement in Japan to make renewable energy the main power source as a new alternative to thermal and nuclear power generation. The power generation capacity using renewable energies in Japan has increases from 31 TW in 2011 to 121 TW in 2019. However, renewable thermal energies such as geothermal and industrial waste heat have rarely used. Such heat energy exists throughout Japan as low grade thermal energy with temperature below 373 K and flow rate below 100 l/min. The ORC is one of the power generation systems, which can be used these heat sources. Although, power generation system using low grade heat source suffers from low power generation performance due to insufficient temperature difference between hot and cold heat source. In this chapter, the trend of research on ORC is surveyed, and the improvement of power generation performance of ORC and Kalina cycle by process design is summarized. Accordingly, the problem of power generation system using low grade heat source is raised, and the purpose of research is clarified.

## Chapter 2: Design of a micro ORC and analysis of the power generation performance

Previous research on ORCs has focused on the design of optimal ORCs for operating conditions such as heat source temperature and type of working fluid. However, these design methods are decreased versatility of the ORC. In order to increase versatility of the ORC, it is necessary to determine the scope of application of ORC by fixed design conditions and examining it under various operation conditions. In this chapter, a small scale ORC system of less than 20 kW class is called a micro ORC, and it is developed on model based approach. The power generation performance of the micro ORC system is evaluated according to the heat source temperature, the heat source flow rate, and the working fluid type, and clarified the application range of the ORC. From the results obtained, a more detailed analysis of the power generation performance of each working fluid was conducted by using AI.

## Chapter 3: Design of a small-scale Kalina Cycle using the temperature glide of the working fluid and combined Kalina Cycle

It is well known that the performance of ORC is increased by using zeotropic mixture as the working fluid. Because zeotropic mixture change phase with temperature variance, which makes it possible to maintain a small temperature difference between heat source and working fluid. As a result, the irreversible loss during heat exchange can be reduced, this phase change is called temperature glide, there are only a few examples of cycle design with focusing it. On the other hand, one of the ways to improve the performance of low temperature utilization power generation system is to increase the temperature of the heat source. The heat pump is the one of the technologies which makes that. Among them, the absorption heat pump has the potential to applied to low temperature heat utilization power generation systems because it can use external heat as a driving force. In this chapter, the design of a Kalina Cycle using zeotropic mixture of ammonia/water as the working fluid is conducted with a focus on the temperature glide. In addition, a combined power generation system integrated an absorption heat pump into Kalina Cycle is designed, and its power generation performance and cost are evaluated.

#### Chapter 4: Design of a micro ORC with zeotropic mixture using temperature glide

A variety of zeotropic mixtures have been proposed for ORC, including ammonia water. However, few studies have focused on temperature glide while designing the cycle. Moreover, effect of type of working fluid on the temperature glide is not clarified. In addition, most of the previous studies have focused on heat sources that are plentiful and few have intended the low flow rate of heat source. It can be assumed that renewable energy may not be available in sufficient flow rates. Thus, when the flow rate of the heat source is low (less than 100 l/min), it becomes sensible heat source with large temperature change during heat exchange. In this case, although the outlet temperature of the high temperature heat source is lower than that of the low temperature heat source, which makes it difficult to operate the system, the use of temperature glide has potential that can be generated electricity. In this chapter, three working fluids, butane/pentane, butane/ethanol, butane/1-propanol, which have different vapor-liquid equilibrium, are selected and used to design a micro ORC, and a case study is conducted with the heat source flow rate as a parameter.

#### Chapter 5: Design of a power generation process using separation membrane (micro Lorenz cycle)

Since the slope of the temperature glide differs between the sensible and latent heat portions, it is difficult to perfectly match the profile with the heat source. In this study focused on the Organic Flash Cycle (OFC). In the OFC, only the sensible heat of the working fluid is supplied to the cycle, in which steam is produced by depressurizing the heated fluid. It is easy to match the temperature glide to heat source, because only sensible heat supplied. However, the OFC require a heat exchanger and a flash tank for depressurization and vapor-liquid separation in order to produce steam, it has possible that can be increased the cost of power generation. This study focused on the separation process as a technology that enables heat exchange and vapor-liquid separation. Among them, the membrane separation process, in which the pressure difference is the driving force, has the potential to be applied to the power generation cycle. Therefore, in this study proposed a power generation system based on an OFC using a separation membrane that can simultaneously heat exchange and separate vapor and liquid.

#### Chapter 6: Summary

In this chapter, the summary of this chapter is indicated.



# 学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

令和04年02月01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 木俣 光正

副査 宋戸 昌広

副査 小竹 直哉

副査



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	物質化学工学専攻 氏名 秋元 良祐		
論文題目	A Study on Process Design and Evaluation of an Integrated Lorenz Cycle Power Generation Systems (複合ローレンツサイクルのプロセス設計と評価に関する基礎的研究)		
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	令和04年01月19日～ 令和04年02月01日
論文公聴会	令和04年02月01日	場 所	工学部3-2307教室
最終試験結果	合格	最終試験年月日	令和04年02月01日

## 学位論文の審査結果の要旨 (1,000 字程度)

日本では SDGs などの取り組みから再生可能エネルギー利用導入拡大が求められている。地熱大国である日本は、再生可能な熱エネルギーのポテンシャルが高く、それらを利用した地域分散型エネルギー供給システムの構築が考えられている。それらを用いて発電できる技術には、有機ランキンサイクル (ORC) がある。しかしながら、再生可能な熱エネルギーは低温、低流量であるため利用することが難しい。本学位論文は、この課題解決のために小型 ORC の開発やその発電性能の検討及び、ローレンツサイクルである温度グライド効果に着目し、それを有効的に利用した発電システムの設計とその発電性能についてまとめられており、全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、小型有機ランキンサイクルの設計を行い、その汎用性の検討や AI を用いることによる性能予測について述べている。第3章では、ローレンツサイクルの一種であるアンモニア/水を作動流体としたカーリーナサイクルを、低品位熱を対象に設計を行うとともに、ヒートポンプを用いた発電プロセスの強化を行い、その発電性能と発電コストについて述べている。第4章では、ローレンツサイクルの特徴である温度グライド効果を利用した小型 ORC の設計を行い、より低品位熱な熱を用いて発電可能であることを述べている。第5章では分離膜を発電プロセスに導入した新たなシステムの開発を行い、その発電性能について述べている。研究テーマには新規性・独自性があり、自ら研究を計画・遂行するための専門的知識を基に、研究背景・目的が正しく述べられていた。学位論文の構成は適切で、体裁も整っており、記述が論理的で、設定した研究テーマに沿った明確な結論が述べられていた。また、本研究の成果は、3報の査読付き英文学術論文に掲載済みであり、1件の国際会議発表がなされている。博士論文審査基準を満たしており、上記4名から構成される課程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。

## 最終試験の結果の要旨

本学の規定に従い、主査及び副査3名の計4名が参加した学位論文に関する40分の口頭発表を行い、その後30分の質疑応答を行った。研究目的、内容、考察について十分な説明がなされた。

最終試験は、公聴会実施後に学位論文を中心に、物性推算法、伝熱、分離技術に関する専門知識について30分間口頭試問を行った。いずれの回答も的確であり十分な説明がなされた。

以上の結果から、博士(工学)の学位を授与するのに十分な知識と能力を有していると判断し、合格と判定した。