

戦略的創造研究推進事業(ALCA)  
技術領域(プロジェクト名)「革新的省・創エネルギー  
システム・デバイス」

課題名「熱源の温度変化に対応した  
トリラテラルサイクル蒸気機関の開発」

## 終了報告書

研究開発期間 平成24年10月～平成31年3月

研究開発代表者: 鹿園直毅  
(国立大学法人東京大学  
生産技術研究所、教授)

## ○報告書要約（和文）

研究開発代表研究者：東京大学 教授 鹿園 直毅

研究開発課題名：熱源の温度変化に対応したトリラテラルサイクル蒸気機関の開発

### 1.研究開発の目的

トリラテラル(Trilateral)サイクルとは、温度・エントロピー線図で略三角形を構成する熱サイクルである。本サイクルは、作動流体を液相の状態加熱し、液相単相あるいは低い乾き度の二相状態で膨張機に導入し、気液二相膨張させることで実現される。高温熱源からの熱吸収を液単相との熱交換で行うため、排熱や地熱等の温度変化する熱源の場合に、最もエクセルギー損失の小さい理想的なサイクルを実現することができる。工場等からの排気熱や温排水、そして再生可能エネルギーとして大きな期待がかかる地熱等からの動力回収に欠かせない技術である。トリラテラルサイクルの膨張過程は気液二相での膨張であるため、この湿り条件での二相膨張過程において断熱効率の高い膨張機を開発する必要がある。本プロジェクトでは、低振動と高効率の両立が期待できるクロスバランス機構を採用したレシプロ膨張機を開発し、起動停止、熱源の流量変動、熱源温度変動等に対応した運転制御方法を確立し、膨張機としての実用性を実証する。また、ポンプ機能も内蔵した膨張機・ポンプ一体型システムを開発し、本機構が機能することを実証する。さらに、サイクルシミュレータを開発し、動作点ごとに必要となる熱交換器伝熱面積やバッファータンク容量等のサイクル仕様を決定する。並行して、起動停止や負荷変動時の動特性実験を行い、サイクルを安定に運転するためのセンシングパラメータを選定する。

### 2.研究開発の概要

#### (1)内容:

本開発では、膨張機の中でも高い膨張比を実現出来ることに加え、効率と信頼性で有利なレシプロ膨張機を採用した。さらに、レシプロ式の課題である振動と騒音を原理的に非常に抑制できる新規なクロスバランス機構を採用した。クロスバランス機構は、揺動運動するピストンの左右に逆回転する回転軸が配置されており、力およびトルクがピストン軸に対して対象に相殺されるため、ピストン側圧や振動が非常に小さくなることが期待される。本開発では、クロスバランス機構を採用したレシプロ膨張機の第4次試作機まで作製し、HFC134aを作動流体とする実サイクルにおける気液二相膨張特性について評価した。

熱抵抗が大きくなる気相伝熱の促進のために、平滑面に対して熱伝達率で2.5倍以上、 $jf$ 因子で平滑面の90%以上という目標を掲げ、伝熱面形状最適化を行える数値シミュレーションコードを開発した。特に伝熱の劣化が激しい低レイノルズ数( $Re=500$ )において、随伴解析を用いた最適化シミュレーションコードのプログラミングを行い、斜交波状伝熱面の最適化を実施した。

#### (2)成果:

第4次試作クロスバランス膨張機において、吸入圧力損失を低減すれば図示断熱効率の目標値を実現できることが分かった。実際にそのような条件で運転した場合には、ステージゲート目標値を満足する図示断熱効率を得られた。膨張機・ポンプ一体構造についても、熱サイクルとして実際に出力が取り出せることを確認できた。

熱交換器に関しては、単位伝熱面あたりの圧力損失と伝熱量の差をコスト関数として伝熱面形状を最適化した結果、伝熱促進2.6倍、 $jf$ 因子で91%を実現する伝熱面形状が得られた。

#### (3)今後の展開:

クロスバランス機構は、設計を若干変更すれば圧縮機としても機能する。小型で高性能、低振動であることから、冷蔵庫、空調機をはじめ、各種冷却用途への適用が期待できる。また、低振動、低騒音のガス圧縮機も有望な用途の一つである。低振動化できれば、防音防振設備のコストを削減できるので、システムとしてのメリットが出せると期待される。

## ○Report summary (English)

Principal investigator: Naoki Shikazono, Professor, The University of Tokyo

R & D title: Development of Trilateral Steam Cycle for Waste Heat Recovery

### 1. Purpose of R & D

Trilateral cycle is a thermal cycle that forms a substantially triangular shape in the temperature entropy diagram. This cycle is realized by heating the working fluid in the liquid phase, introducing directly the single liquid phase or gas-liquid two-phase into the expander, and causing gas-liquid two-phase expansion. Since heat is transferred from the high temperature heat source to the liquid single phase working fluid, an ideal cycle with minimum exergy loss can be realized for heat sources whose temperature changes during heat exchange. This technology is considered to be indispensable for recovering work from exhaust heat from factories, warm wastewater and geothermal heat, which has great expectations for energy savings. Since the expansion process of trilateral cycle is gas-liquid two-phase, it is necessary to develop an expander with high adiabatic efficiency in the two-phase expansion process under wet condition. In this project, a reciprocating expander with cross-balance mechanism which is expected to achieve both low vibration and high efficiency is developed. And an operation control method which can respond to start-stop, flow rate and temperature fluctuations are investigated. In addition, an expander-pump integrated system is developed. Furthermore, a cycle simulator is developed to clarify the cycle specification such as size of the heat exchanger and buffer tank capacity, etc. In parallel, a dynamic simulation is carried out to reproduce the load changes including starting up and shutting down, and to investigate the sensing parameters for stable cycle operation.

### 2. Outline of R & D

#### (1) Contents:

In the present study, a reciprocating expander which is efficient and reliable with high expansion ratio is adopted. A novel cross-balancing mechanism is chosen to overcome the vibration and noise which are the major issues of the reciprocating machine. The cross-balance mechanism has rotating shafts that rotates in opposite directions, which can cancel force and torque and makes piston side force and vibration extremely small. Four expander prototypes are developed and evaluated to investigate the feasibility of gas-liquid two-phase expansion in a cycle using HFC134a as the working fluid.

In order to promote gas-phase heat transfer of the heat exchanger, the target values, i.e. heat transfer coefficient enhancement of 2.5 times and the  $j/f$  factor of 90% compared with the smooth surface are set. An optimization simulation code using adjoint analysis is developed. Optimization was carried out for oblique wave heat transfer surface at low Reynolds number at  $Re=500$ , where heat transfer deterioration is severe.

#### (2) Achievements:

From the investigations using the fourth prototype of the cross-balancing reciprocating expander, it was found that the adiabatic efficiency target can be reached if the suction pressure loss is reduced. Under such condition, the indicated adiabatic efficiency satisfying the stage gate target value was obtained. Furthermore, it was confirmed that the output could be taken out as a heat cycle even when the expander and pump were integrated.

Regarding the heat exchanger, the shape of the heat transfer surface was optimized by the adjoint method with the difference between the pressure loss and the heat transfer rate as a cost function. Finally, heat transfer enhancement of 2.6 times and a  $j/f$  factor of 91% were achieved.

#### (3) Future developments:

The cross-balance mechanism functions as a compressor as well if the design is slightly changed. Due to its small size, high performance and low vibration, it can be expected to be applied to various cooling applications such as refrigerators and air conditioners. A gas compressor will also be one of the promising applications.