

DEVELOPMENT OF A HIGH TEMPERATURE HEAT PUMP USING REUSABLE HEAT AS THE HEAT SOURCE

○Takeru Kimura*, Hideki Fuchikami*, Kousaku Nishida*, Mizuo Kudo*, Akito Machida*, Kiyoshi Saito**,
Yutaka Ohta**, Masafumi Katsuta**

* Mayekawa MFG. CO. LTD, Tatsuzawa 2000, Moriya, Ibaraki, 302-0118, Japan

** Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan

ABSTRACT

In industrial applications, large quantities of steam are used and then released into the environment as low temperature waste heat. To realize a low carbon society, it is important to develop a high performance and a high temperature waste heat recovery heat pump system utilizing this abundant resource. This study aims to develop a heat pump system that is able to deliver heat at the maximum temperature of 200 °C with coefficient of performance (COP) above 3.5. Simulation results indicated that the heat pump system can be realized and a test apparatus was developed.

Keywords: High temperature heat pump, Waste heat, Transcritical cycle, Turbo compressor, Oil free

INTRODUCTION

Reduction of greenhouse gas emissions is intensely pursued to realize a low carbon society. However, it is difficult to implement large reductions of greenhouse gas emissions while maintaining social and economic activities.

In recent years, high temperature heat pump systems for hot water supply and vapor generation have gained a lot of attention. High temperature heat pump systems have higher energy-efficiency when compared to boilers and electric heaters that are conventionally used in industrial heating processes. Moreover, high temperature heat pump systems can utilize waste heat from industries by lifting the temperature of a waste heat medium high enough. This medium can then be reused in heating processes in factories. High temperature heat pump systems, therefore, can largely contribute to effective use of energy and reduction of greenhouse gas emissions.

These heat pump systems have many advantages, but are still not that popular technology because of long payback time.

The maximum supply temperature of present system is about 165 °C, and the COP of the system is 2.5[1].

This study aims at elevating both the maximum supply temperature and COP of the high temperature heat pump

system in order to cover wider range of applications and accelerate their use in the industry.

Therefore the initial aim of this research is to develop a high temperature heat pump system which is able to raise the temperature of a heating medium from 80 °C to 160 °C with a COP of more than 3.5. The final goal is raising the temperature of the heating medium from 80 °C to 180 °C with the same COP of more than 3.5. In order to achieve this objective, suitable working refrigerants were considered and heat pump cycle simulations were carried out. In addition a prototype heat pump system with compressors and heat exchangers for high temperature and pressure application were fabricated to establish essential technology of the system.

This paper reports on the technology development and fabrication of a 300 kW heating capacity prototype system.

TARGET SYSTEM

A summary of the targeted high temperature heat pump system is given below.

The heat source of the target system is hot water at approximately 80 °C which is exhausted from factories as a waste heat. The waste heat is extracted by the evaporator as the heat source to evaporate the refrigerant

which is then compressed and heated to about 200 °C in the compressor. A transcritical cycle is adopted for this system because discharged gas from the compressor is at super critical condition. A transcritical system can be more easily adopted to operate in large temperature difference between heat source and heat sink.

The flow diagram of the system is shown in Fig.1. The system mainly consists of heat exchangers, a compressor, expansion valve and connecting pipes.

The heat exchangers are an evaporator, a gas cooler and an internal heat exchanger. The heating medium flowing through the gas cooler is thermal oil (Thermoil 34AH) with flash point temperature of more than 250 °C which is classified as nonhazardous material by the fire service act.

Butane (R600) was chosen as working fluid after comparison of theoretical cycle calculations of several working fluids, GWP and availability in the market.

In the previous study of this project, Oil free turbo compressors and heat exchangers designed at 6 MPa and 200 °C were tested. Heat transfer rates and pressure drops were measured and compared with calculated results for the heat exchangers [2,3].

In addition thermodynamic properties such as pressure-volume-temperature property and critical points of candidate HFO refrigerants for high temperature heat pumps were also measured [4,5].

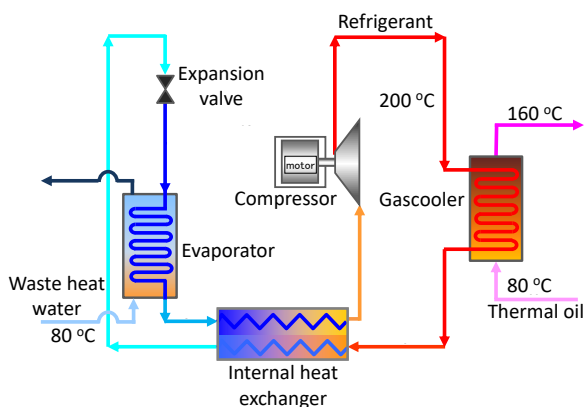


Fig.1 Schematic diagram of the heat pump system

SYSTEM SIMULATION

A system simulation tool was developed to the design the heat pump cycle, optimize configuration of the test apparatus, and to evaluate control method for unsteady state. A general purpose energy system simulation software EnergyFlow+M[6] was used to calculate the

heat pump cycle performance.

To confirm the performance of the high temperature heat pump system, simulation was carried out at both the rated design and off-design conditions. During simulation, heating capacity was varied by changing the compressor speed.

The COP was calculated from equation (1).

$$\text{COP} = \frac{h_{\text{gas,out}} - h_{\text{gas,in}}}{h_{\text{comp,out}} - h_{\text{comp,in}}} \quad (1)$$

Fig.2 shows the p-h diagram of the heat pump cycle in relation to compressor speed while Fig.3 shows COP in relation to heating capacity. Fig.3 also shows that the final goal of heating the medium from 80 °C to 180 °C with a system COP of more than 3.5 can be achieved.

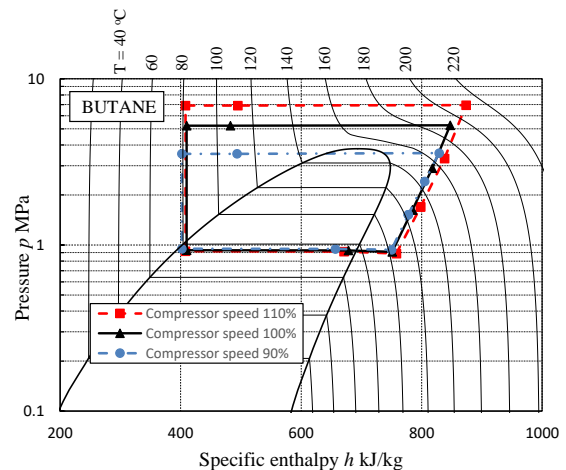


Fig. 2 Simulation result (ph diagram)

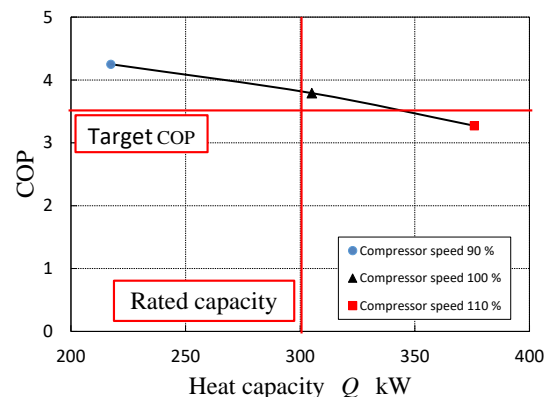


Fig. 3 Simulation result (COP)

DEVELOPMENT OF TEST APPARATUS

A test apparatus was fabricated based on simulation results. The prototype was designed to heat thermal oil from 100 °C to 180 °C. This design temperature was

decided by considering the first and the final objective goal. In comparison to the first objective of heating from 80 °C to 160 °C, the higher design temperatures will enable analysis of thermal resistances of the components and materials as well as heat losses from the components and its effect on COP. This will be beneficial in preparation for the final target of heating from 80 °C to 180 °C.

A schematic diagram of the test apparatus is shown in Fig.4. Specifications of the test apparatus are given in Table 1. The working fluid is R 600 (butane) which is flammable. Therefore, the test apparatus is explosion proof and enclosed in a casing with active ventilation. A Picture of the casing and prototype is shown in Fig.5. The size of enclosure is L4800×W2200× H2275.

The compressors are oil free centrifugal type compressors, which use active magnetic bearings. The system uses two sets of compressors. The first set is the low pressure side compressor with two stage

compression and the second set is the high pressure side compressor with single stage compression. The compressors were newly designed for operating at high temperatures and high pressure conditions. Pictures of the two compressors are shown in Fig.6 and Fig.7 respectively.

The gas cooler with a capacity of 300 kW consists of two heat exchangers with 140 plates connected in parallel. The heating medium used is thermal oil (thermoil 34AH) and exchanges heat with the refrigerant in super critical state. It is heated from 100 °C to 180 °C.

The heat source is hot water, the assumed waste heat from factories at 80 °C.

Super heat, heat capacity and discharge pressure are controlled during operation. Super heat is controlled by the expansion valve while heat capacity is controlled by varying the speed of compressors and discharge pressure is controlled by refrigerant flow using a refrigerant tank connected to the heat pump system.

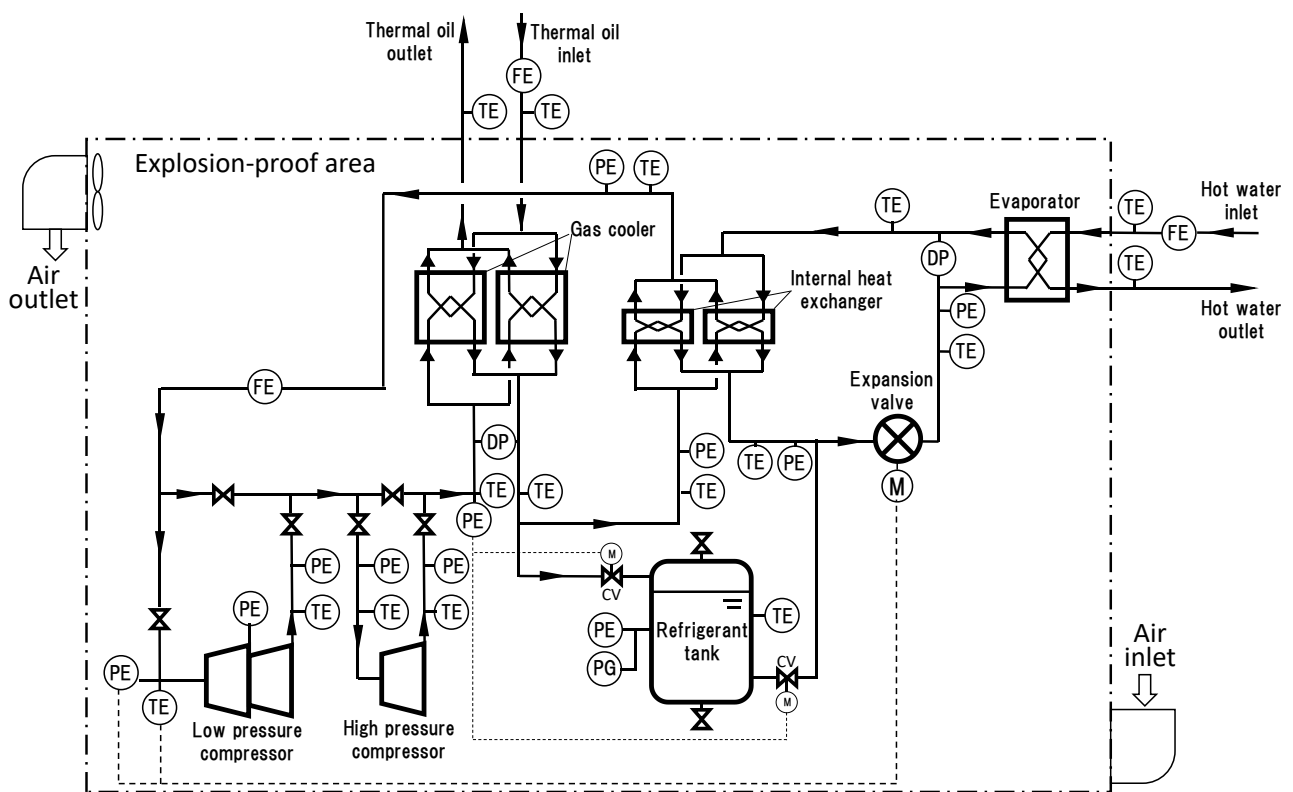


Fig.4 Schematic diagram of the test apparatus

Table 1. Specifications of test apparatus

Gas cooler	Type	Brazed plate
	Capacity	300 kW
Compressor	Type	Centrifugal
	Oil	Oil free
Refrigerant		R600
Design pressure		5.7 MPa
Rotation frequency	Low pressure compressor	45,000 rpm
	High pressure compressor	70,000 rpm
Thermal oil inlet temperature		100 °C
Thermal oil outlet temperature		180 °C
Hot water inlet temperature		80 °C



(a) Casing



(b) Inside

Fig.5 Test apparatus of high temperature heat pump



Fig.6 Low pressure compressor



Fig.7 High pressure compressor

CONCLUSIONS

This project aims to develop the high temperature heat pump system which is able to lift the heat from 80 °C to 180 °C with a COP of more than 3.5. Simulation results showed that the initial target of heating the medium from

80 °C to 180 °C with a system COP of more than 3.5 can be realized.

Performance evaluation of the prototype high temperature heat pump system will be carried out. Compressors and heat exchangers will then be optimized using the experimental results. In addition, application of other nonflammable refrigerants will be considered since R 600 used as the working fluid in this study is flammable.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was partially supported by the Thermal Management Materials and Technology Research Association (TherMAT) program, New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

NOMENCLATURE

COP : Coefficient of performance

Subscripts

comp : Compressor

gas : Gas cooler

In : Inlet

Out : Outlet

REFERENCES

- [1] C. Arpagaus, European Heat Pump Summit Nuremberg, 2017.
- [2] Nishida, K. et al., Proc. 2016 JASRAE annual conference, A314(in Japanese)
- [3] Nishida, K. et al., Proc. The 21st National Symposium on Power and Energy Systems, A314(in Japanese), 2016
- [4] Kimura, T. et al. Int J Thermophys, 38(2017): 122.
- [5] Kimura, T. et al. J. Chem. Eng. Data, 62(2017), 4, 1422-1426
- [6] Ohno, K. et al. Proc. The Japanese Joint Conference on Air conditioning and refrigeration, 46(2012), 119-122

未利用エネルギーを熱源とした高温ヒートポンプの開発 Development of a high temperature heat pump using reusable heat as the heat source

○木村 健, 渕上 英紀, 西田 耕作, 工藤 瑞生, 町田 明登
(株) 前川製作所
齋藤 潔, 太田 有, 勝田 正文 早稲田大学

○Takeru Kimura*, Hideki Fuchikami*, Kousaku Nishida*, Mizuo Kudo*, Akito Machida*, Kiyoshi Saito**, Yutaka Ohta**, Masafumi Katsuta**

* Mayekawa MFG. CO. LTD, Tatsuzawa2000, Moriya, Ibaraki, 302-0118, Japan

** Faculty of Science and Engineering, Waseda University, Shinjuku-ku, Tokyo, 169-8555, Japan

In industrial applications, large quantities of steam are used and then released into the environment as low temperature waste heat. To realize a low carbon society, it is important to develop a high performance and a high temperature waste heat recovery heat pump system utilizing this abundant resource. This study aims to develop a heat pump system that is able to deliver heat at the maximum temperature of 200 °C with coefficient of performance (COP) above 3.5. Simulation results indicated that the heat pump system can be realized and a test apparatus was developed.

Key Word: High temperature heat pump, Waste heat, Transcritical cycle, Turbo compressor, Oil free

1. はじめに

地球温暖化という課題を解決するために、全世界で温室効果ガスの削減に対する取り組みが進められている。しかしながら、この温室効果ガス排出量の大幅削減という課題は、我々の社会経済活動を維持しつつ解決することが求められることから、その解決は容易ではない。

このような背景に対して、近年、給湯、蒸気生成等の加熱プロセスで用いられる高温ヒートポンプが注目されている。高温ヒートポンプは、従来の熱源機器として使用されるボイラや電気ヒータよりも高い効率で運転することができ、また同時に、工場等からの排熱を高温ヒートポンプによって所要の温度まで昇温し、利用することをも可能とすることができれば、エネルギーの有効利用、ひいては温室効果ガス排出量の削減に大きく貢献することになる。

しかしながら、現状の圧縮式ヒートポンプシステムは、加熱温度で 165 °C まで、その時の COP が 2.5[1]であり、現状では投資回収年数が長く、

普及の段階とはなっていない。本研究開発により、加熱温度が上昇することで適用範囲が拡大し、さらに大幅な COP 向上が実現できれば、一気に普及促進につながると考えられる。

そこで、本研究開発では第 1 段階の目標を、80 °C の被加熱媒体を 160 °C に加熱する際の COP 3.5 以上のヒートポンプ開発とし、最終的には、80 °C の被加熱媒体を 180 °C に加熱する際、COP 3.5 を達成する高温ヒートポンプの開発を目的とする。

目的達成のため、具体的には、シミュレーションによる最適なヒートポンプサイクルや冷媒の検討、高温・高圧に対応した圧縮機と熱交換器および実規模を想定したヒートポンプ試作機の開発といった、要素技術開発とエンジニアリング技術の確立を行う。

本報告では、これまでの要素技術開発と、現在、試作している加熱能力 300 kW 程度の実規模のヒートポンプ試作機に関して報告する。

2. 対象とするシステム

本研究で対象とする高温ヒートポンプの概要を述べる。対象とする高温ヒートポンプの熱源は、工場等から排出される 80 °C の温水とし、これを蒸発器で採熱し、圧縮機を用いて 200 °C 程度まで冷媒を圧縮・昇温させる。本システムでは、昇温幅が 80 °C から 200 °C と大きいため、圧縮機の吐出側が超臨界状態となる遷臨界サイクルを採用する。

対象とする高温ヒートポンプのシステムフローを Fig.1 に示す。本システムは熱交換器、圧縮機、膨張弁、および、接続配管で構成されている。熱交換器は、蒸発器、ガスクーラーの他に、液ガス熱交換器の役割を担っている。ガスクーラーにより加熱を行う熱媒体は、引火点が 250 °C 以上の消防法上非危険物である熱媒体オイル（サムオイル 34AH）を用いる。

対象とする高温ヒートポンプの作動媒体は、様々な冷媒について、熱媒体オイルを 80 °C から 160 °C に加熱する際の COP と高圧側の圧力を、熱力学的性質のみを用いて理論計算により比較し、GWP の値と冷媒の入手性から、R 600 を選定した。

これまでに、開発するヒートポンプの仕様を満たす熱交換器および圧縮機を試作すると共に、性能測定が行える試験装置を設計・製作し、試験結果から相関式の作成を行った。[2,3]また、高温ヒートポンプの作動媒体として有望であるが熱力学的性質が明らかとなっていない HFO 冷媒に関して、PVT 性質および臨界点の測定を行った。[4,5]

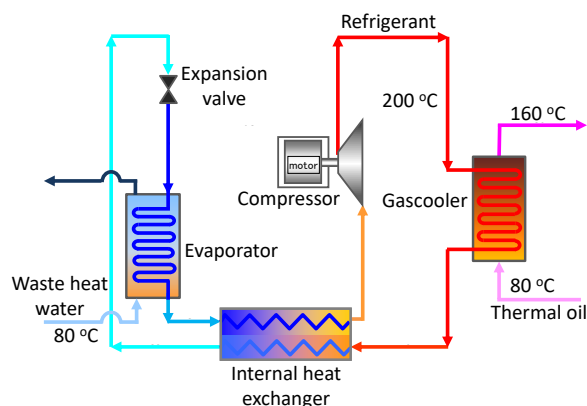


Fig.1 Schematic diagram of the heat pump system

3. シミュレーションによるシステムの評価

対象とするシステムのサイクル選定、機器構成の最適化、非定常な制御方法の検討を行うため、解析シミュレータの開発を行った。解析シミュレータの開発に当たって、汎用エネルギーシステムシミュレーターEnergyFlow+M[6]を用いて、システム全体のヒートポンプサイクルの計算を可能とした。開発中の高温ヒートポンプの性能を確認するため、定格点及びその周辺の運転範囲でシステムシミュレーションを行った。シミュレーションでは、定格回転数を 100% として、圧縮機回転数を変化させ、加熱能力を変化させた。

性能評価指標として用いた COP を式(1)に示す。

$$COP = \frac{h_{\text{gas,out}} - h_{\text{gas,in}}}{h_{\text{comp,out}} - h_{\text{comp,in}}} \quad (1)$$

Fig.2 および Fig.3 に、加熱量に対する COP およびオイル取り出し温度を示す。Fig.3 より、定格能力において、COP 3.5 以上となることが確認できた。

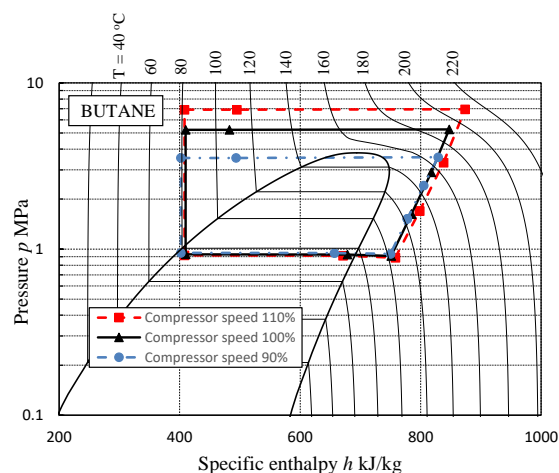


Fig. 2 Simulation result (ph diagram)

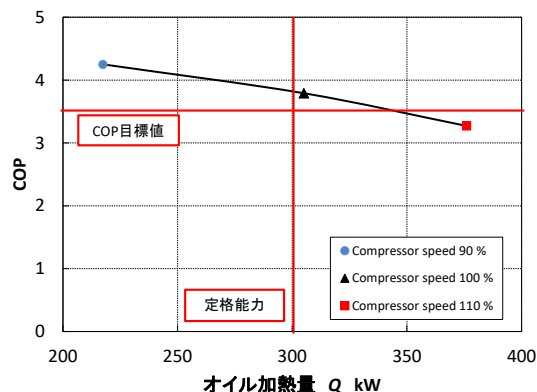


Fig. 3 Simulation result (COP)

4. 試作機の製作

シミュレーション結果をもとに、実規模のヒートポンプ試験機の製作を行った。

試験機は被加熱媒体オイルを 100℃ から 180℃ に加熱する仕様とした。この仕様値は、中間目標である 80℃ から 160℃ への加熱および、最終目標の条件である 80℃ から 180℃ への加熱を念頭に置き、中間目標より温度条件を厳しくした値として採用した。

本試験機の仕様に関して述べる。今回製作した試験機のフローを Fig.4 に、主な仕様を Table 1 に示す。冷媒は R 600 を使用する。R 600 は可燃性冷媒であるため、本試験ユニットはケーシングで囲い、24 時間換気の防爆仕様とした。試験機の外觀および内部を Fig.5 に示す。なお、試験機のサイズは、L4800×W2200×H2275 である。圧縮機は、低段側 2 段を 1 組、高段側 1 段を 1 組とし、3 段圧縮を 2 組の圧縮機で行う。圧縮機に関しては、オイルフリーとするために、磁気軸受を採用し、

新たに開発した高温対応のターボ圧縮機を用いた。開発した圧縮機の外觀を、低段側圧縮機は Fig.6 に、高段側圧縮機は Fig.7 に示す。加熱性能に影響を及ぼす加熱器は、実規模を想定して加熱能力 300 kW とし、プレート枚数 140 枚の熱交換器を 2 台並列に接続している。被加熱媒体は、熱媒体オイル(サームオイル 34AH)を用い、加熱器で超臨界状態の冷媒と熱交換させて、熱媒体オイルを 100℃ から 180℃ に昇温させる。熱源は工場等からの排熱利用を想定し、入口温度 80℃ 温水を用いる。なお、被加熱装置、熱源装置、モータ冷却装置については非防爆仕様とした。

次に制御に関して述べる。膨張弁の開度によって、圧縮機吸入過熱度の制御を行い、圧縮機の回転数によって能力制御を行う。サイクルに冷媒タンクを接続し、冷媒を出し入れすることによって吐出圧力を制御する。

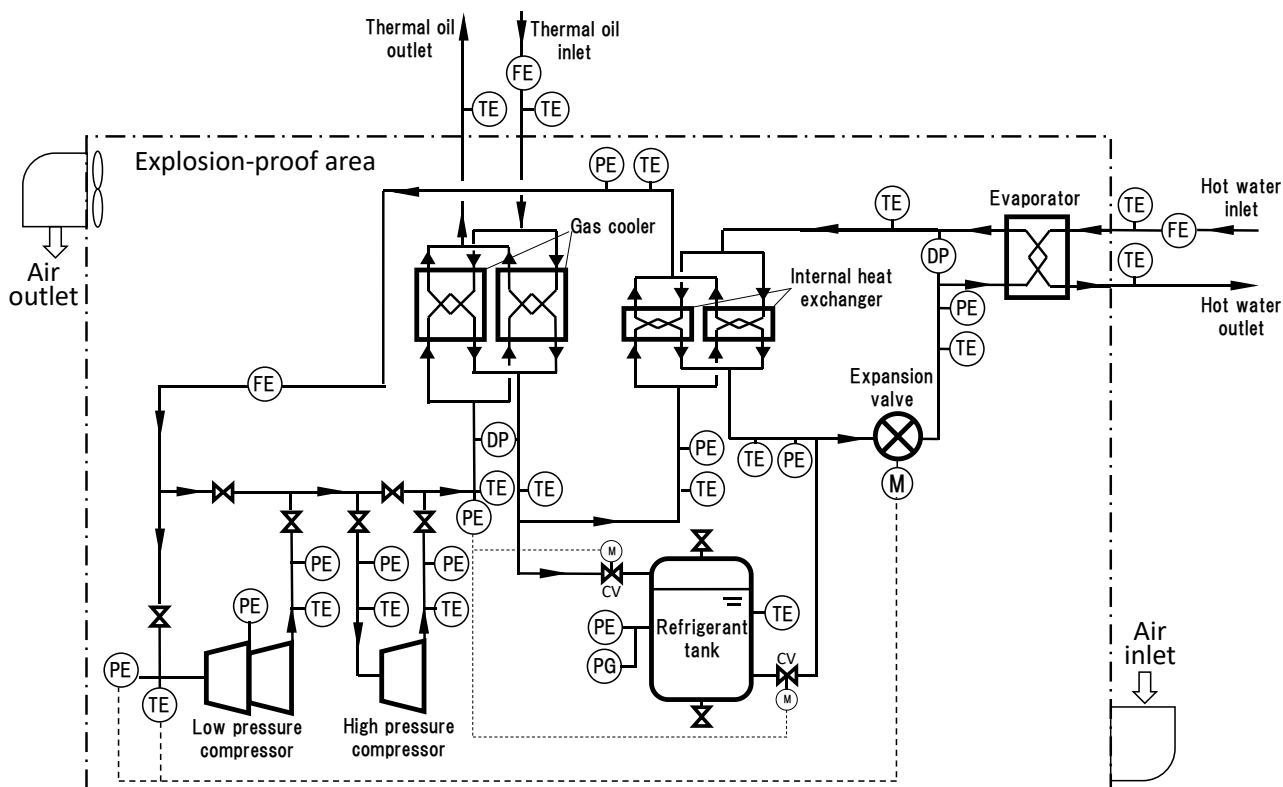


Fig.4 Schematic diagram of the test apparatus

Table 1 Specifications of test apparatus

Gas cooler	Type	Brazed plate
	Capacity	300 kW
Compressor	Type	Centrifugal
	Oil	Oil free
Refrigerant		R600
Design pressure		5.7 MPa
Rotation frequency	Low pressure compressor	45,000 rpm
	High pressure compressor	70,000 rpm
Thermal oil inlet temperature		100 °C
Thermal oil outlet temperature		180 °C
Hot water inlet temperature		80 °C



(c) Casing



(d) Inside

Fig.5 Test apparatus of high temperature heat pump



Fig.6 Low pressure compressor



Fig.7 High pressure compressor

5. まとめ

80 °C の被加熱媒体を 180 °C に加熱する際、COP 3.5 を達成する高温ヒートポンプの開発を目指している。その第 1 ステップとして、80 °C の被加熱媒体を 160 °C に昇温するシステムを対象にして、これまで開発した圧縮機、熱交換器をヒートポンプに適用した際のシステム性能のシミュレーション

による評価を行った。シミュレーション結果より、第 1 段階の目標であるオイル取出温度 160 °C、COP 3.5 が達成できることが確認できた。そして、シミュレーション結果およびこれまでの熱交換器の伝熱性能や圧縮機の流体解析結果をもとに、実規模の性能評価試験装置の製作を行った。

今後、今回開発したヒートポンプ試作機を用いて、性能評価試験を行うと共に、試験結果を用いて、圧縮機、熱交換器の要素技術を高温ヒートポンプに最適化していく予定である。また、今回作動媒体として採用した R 600 は可燃性を有しているため、今後、非可燃性冷媒を含めた新規冷媒の適用可能性検討を合わせて行っていく。

謝辞

この成果は、経済産業省と国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の委託業務の結果得られたものである。ここに記して謝意を表す。

NOMENCLATURE

COP : Coefficient of performance

Subscripts

comp : Compressor

gas : Gas cooler

In : Inlet

Out : Outlet

参考文献

- 1) C. Arpagaus, European Heat Pump Summit Nuremberg, 2017.
- 2) Nishida, K. et al., Proc. 2016 JASRAE annual conference, A314(in Japanese)
- 3) Nishida, K. et al., Proc. The 21st National Symposium on Power and Energy Systems, A314(in Japanese), 2016.
- 4) Kimura, T. et al. Int J Thermophys 38(2017): 122.
- 5) Kimura, T. et al. J. Chem. Eng. Data, 62(2017), 4, 1422-1426
- 6) Ohno, K. et al. Proc. The Japanese Joint Conference on Air conditioning and refrigeration, 46(2012), 119-122