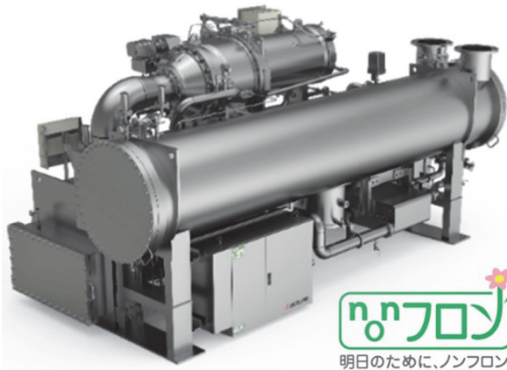


# カーボンニュートラルに貢献する低 GWP ターボ冷凍機 新シリーズ“JHT-Y”

“JHT-Y” A New Centrifugal Chiller Series Contributing to Carbon Neutrality  
with Low-GWP Refrigerants



下川 真琴\*1  
Makoto Shimokawa

中野 茉莉央\*1  
Mario Nakano

竹下 和則\*1  
Kazunori Takeshita

神吉 由恵\*2  
Yoshie Kanki

榎野 良枝\*2  
Yoshie Togano

松倉 紀行\*3  
Noriyuki Matsukura

オゾン層保護を目的としたモントリオール議定書において、地球温暖化抑制のために HFC 冷媒を段階的に削減するという“キガリ改正”が 2016 年 10 月に採択された。日本ではフロン排出抑制法が施行され、ターボ冷凍機は 2025 年度(2025 年4月1日)から、地球温暖化係数(GWP)が大きい HFC 冷媒を使用した製品が規制される。三菱重工サーマルシステムズ株式会社(以下、当社)では GWP が1未満である冷媒 HFO-1234yf を使用したターボ冷凍機“JHT-Y”を新たに開発し、従来機の HFC-134a 機と同等以上の性能・コンパクト性・冷凍能力範囲を達成した。本報では、JHT-Y 開発に当たり採用した技術及び従来機との比較について紹介する。

## 1. はじめに

ターボ冷凍機は地域熱供給、大規模建物、半導体産業や製薬、食品向け工場空調などに適用され、冷凍能力で約 150~5400USRt(米国冷凍トン)の冷水を生み出す装置である。従来、ターボ冷凍機で使用されてきた HFC(ハイドロフルオロカーボン)の HFC-134a は、GWP が 1430<sup>(1)</sup> であり、2016 年 10 月開催のモントリオール議定書第 28 回締約国会合(MOP28)にて HFC の生産及び消費量の段階的削減義務が定められた。

日本ではフロン排出抑制法の 2019 年1月改正でターボ冷凍機が指定製品化され、ターボ冷凍機は 2025 年度(2025 年4月1日)から GWP が出荷台数による加重平均で 100 を上回らないよう HFC 冷媒が出荷規制される。海外では、シンガポールが 2022 年 10 月から HFC 冷媒を使用したターボ冷凍機の出荷規制を開始しており、今後さらに低 GWP 冷媒への転換が進んでいく。

当社では HFO(ハイドロフルオロオレフィン)を使用したターボ冷凍機として、2015 年9月に GWP が1である HFO-1233zd(E)を採用した ETI-Z シリーズ、2017 年4月には GWP が1未満である HFO-1234ze(E)を採用した GART-ZE シリーズを発売し、国内メーカーとして初めてターボ冷凍機シリーズの全冷凍能力範囲を低 GWP 冷媒でラインナップした。また、現在までに培った低 GWP 冷媒に関する技術を活用し、2022 年6月には GWP が1未満である HFO-1234yf を採用した JHT-Y シリーズの販売を開始した。

\*1 三菱重工サーマルシステムズ(株) 大型冷凍機技術部

\*2 三菱重工サーマルシステムズ(株) 大型冷凍機技術部 主席チーム統括

\*3 三菱重工サーマルシステムズ(株) 大型冷凍機技術部 課長 技術士(機械部門)

## 2. HFO-1234yf の選定

低 GWP 冷媒の採用にあたり、次の基準を選定条件とした。従来の HFC 冷媒と低 GWP である HFO 冷媒の比較を表1に示す。

表1 冷媒比較

	従来冷媒(HFC)	新冷媒(HFO)		
	HFC-134a	HFO-1233zd(E)	HFO-1234ze(E)	HFO-1234yf
地球温暖化係数(GWP) <sup>※1</sup>	1430	1	<1	<1
オゾン層破壊係数(ODP)	0	0	0	0
分類 (高压ガス保安法 冷凍保安規則)	不活性ガス	- <sup>※2</sup>	特定不活性ガス	特定不活性ガス
分類 (ASHRAE Standard 34)	A1 <sup>※3</sup>	A1 <sup>※3</sup>	A2L <sup>※3</sup>	A2L <sup>※3</sup>
フロン排出抑制法	適用	適用外	適用外	適用外
長期曝露毒性(許容値)[ppm]	1000	800	800	500
沸点(大気圧)[°C]	-26.1	18.3	-19.0	-29.4
飽和圧力(6°C)[kPa(G)] <sup>※4</sup>	260.7	-39.3	167.3	283.9
飽和圧力(38°C)[kPa(G)] <sup>※4</sup>	861.8	100.7	624.3	866.4
蒸発潜熱(6°C)[kJ/kg] <sup>※4</sup>	194.0	200.7	180.3	159.3
飽和ガス比体積(6°C)[m <sup>3</sup> /kg] <sup>※4</sup>	0.056	0.278	0.069	0.047
飽和ガス比体積(38°C)[m <sup>3</sup> /kg] <sup>※4</sup>	0.021	0.091	0.026	0.018
理論 COP <sup>※5</sup>	6.58	6.93	6.56	6.31
用途(ターボ冷凍機以外)	冷媒 (カーエアコン)	発泡剤	噴射剤	冷媒 (カーエアコン)

※1 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第4次評価報告書(HFC)、第5次評価報告書(HFO)<sup>(1),(2)</sup>

※2 HFO-1233zd(E)は冷凍機の使用条件では高压ガス保安法の適用を受けない

※3 A1:不燃性・低毒性, A2L:微燃性・低毒性, B1:不燃性・高毒性

※4 冷媒熱物性データベース Refprop Ver.10.0 より算出

※5 2段圧縮2段膨張サブクーラサイクル。蒸発温度6°C, 凝縮温度 38°C, 断熱効率90%での冷凍サイクル効率

### 2.1 環境性

オゾン層破壊係数(ODP:Ozone Depletion Potential)が0.001以下, GWPが150以下, 低毒性(ANSI/ASHRAE Standard 34でA分類)であること。

→HFO-1234yfはODPが0, GWPが1未満, 毒性はA分類(低毒性)であり環境性の全ての条件を満足している。また, フロン排出抑制法対象外である。

### 2.2 物性

#### (1) 冷凍サイクル効率(COP:Coefficient Of Performance)

従来の冷媒と比較して, 同等の冷凍サイクル効率を有すること。

冷凍サイクル効率が悪いとエネルギー消費量が増え, CO<sub>2</sub>排出量が増える。

→HFO-1234yfの冷凍サイクル効率(理論COP)はHFC-134aの約96%である。従来機と同等の性能とするため, 後述する高効率圧縮機他を本機に採用することで性能向上を図っている。

#### (2) 体積流量(機器サイズ)

従来の冷媒と比較して, 機器設計圧力が著しく高くならず, 同じ機器サイズで出力できる冷凍能力が著しく小さくならないこと。

機器設計圧力が著しく高くなると強度確保のため肉厚が増加し, 出力できる冷凍能力が小さくなると機器サイズが大きくなる。そのため, 材料の使用量や製造時のCO<sub>2</sub>排出量も増える。また, 圧縮機や熱交換器のサイズは, 一般的に冷媒ガスの体積流量(m<sup>3</sup>/s)で決まる。同じ冷凍能力でも, 蒸発潜熱が小さいほど質量流量(kg/s)が増え, 体積流量(m<sup>3</sup>/s)が増える。質量流量(kg/s)が同じでも飽和ガス比体積(m<sup>3</sup>/kg)が大きいと体積流量(m<sup>3</sup>/s)が増える。

→HFO-1234yfはHFC-134aと飽和圧力が極めて近く(図1), 機器設計圧力は同じにできる。

また、HFO-1234yfの蒸発潜熱は約80%、飽和ガス比体積はHFC-134aの約85%であるため、HFO-1234yfの体積流量はHFC-134a対比で106%程度となり、HFC-134aと同じ機器サイズで同等の冷凍能力が出力できる。なお、従来機 GART-ZE シリーズに用いられているHFO-1234ze(E)は、蒸発潜熱が約95%、飽和ガス比体積がHFC-134aの約120%であるため、体積流量がHFC-134aの130%程度となり、同じ機器サイズで出力できる冷凍能力が小さくなる傾向があった。

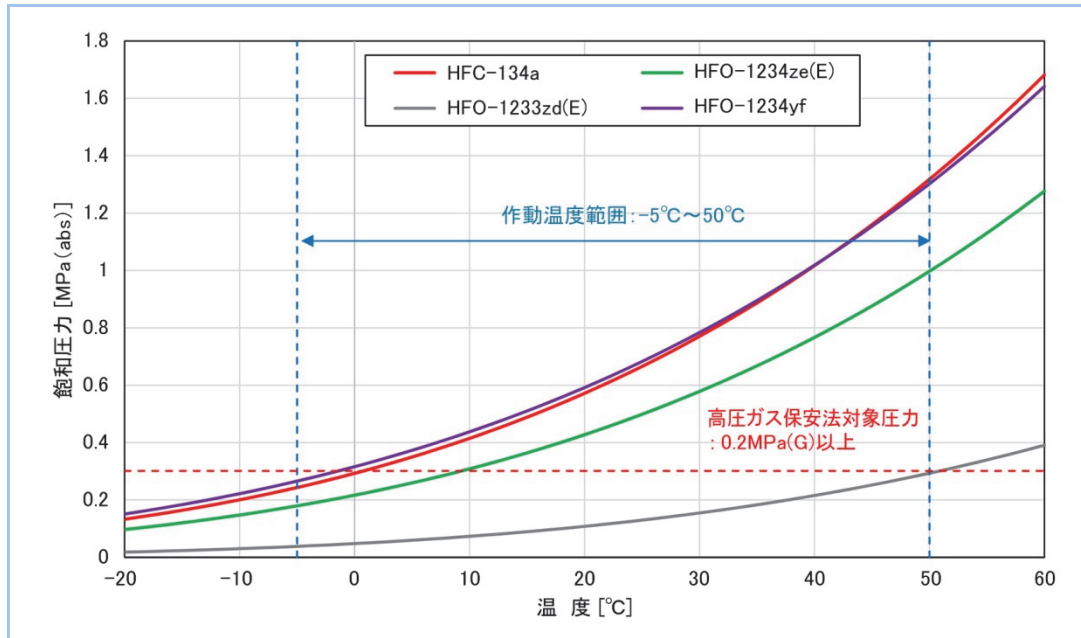


図1 各種冷媒の温度と飽和圧力の関係

### 2.3 入手性

ターボ冷凍機の冷媒以外の用途があり、生産量が見込まれていること。

ターボ冷凍機はビル用マルチエアコンと比べて冷凍能力あたりの冷媒量が小さく、また生産台数も少ないため、市場全体の冷媒使用量は他の空調機器(ビル用マルチエアコン、カーエアコンなど)と比較して少ない。そのため、安定供給や価格面を考慮すると、他の空調機器用の冷媒や発泡剤等で使われており、流通量が多いことが望ましい。

→HFO-1234yfはカーエアコン、自動販売機などを中心に採用されている。カーエアコンはフロン排出抑制法で指定製品化されており、2023年度(2023年4月1日)から規制が開始される。そのため、主流が規制対象のHFC-134aから低GWP冷媒のHFO-1234yfへと変わり、生産量も飛躍的に増えるとみられる。

### 2.4 安全性

低毒性で、不活性(機械室の使用で火災の恐れのない)であること。安全性が確保できない場合は法的な規制が設けられ、必要な措置をとること。

→HFO-1234yfの毒性は、ASHRAE Standard 34でA分類(低毒性)である。燃焼性は2L(微燃性)で、高圧ガス保安法では特定不活性ガスに分類されている。日本では2016年の高圧ガス保安法冷凍保安規則の改正により、世界に先駆けてA2L(微燃性・低毒性)冷媒のHFC-32、HFO-1234ze(E)、HFO-1234yfが安全に使用できる法整備が行われた。そのため、“冷凍保安規則関係例示基準”、“KHKS0302-5(2020)冷凍空調装置の施設基準(特定不活性ガスの施設編)”に規定の以下条件を満足することで、HFC-134a等の従来冷媒と同等に安全に利用できる。

- ・ 冷凍機を設置する場所は冷媒ガス漏えい時に滞留しない構造とする。屋内などの冷媒ガスが滞留する恐れのある場所に設置する場合は規定された換気能力を有した常時機械

換気を備え、かつ冷凍機と換気設備の連動機構を有すること(換気設備停止時に冷凍機が起動しない機構)。

- ・ 冷凍機から漏えいしたガスが滞留する恐れがある場所に漏えい検知の検出部を設置した検知警報装置を備える。警報設備は定期点検を行い、警報動作の確認を行う。

以上のように、HFO-1234yf は全ての選定条件を満足しており、また HFC-134a に近い特徴を多く有するため採用した。

### 3. 適用技術

HFO-1234yf は、体積流量は HFC-134a と同等だが、理論 COP は HFC-134a の 96% であるため、従来機と同等の性能とするためにはより高効率となる機械設計を行う必要がある。従来機同等のコンパクト設計を維持しつつ高性能とするため、以下の開発設計を行った。

#### 3.1 圧縮機の小型化, 高性能化

##### ① 大風量・小型空力設計

JHT-Y シリーズでは、ETI-Z シリーズで実績のある大風量翼技術を採用した。ETI-Z シリーズの翼形状をベースとし、コンピュータ上で流体に関する方程式を解いて流れを可視化する CFD (Computational Fluid Dynamics) 解析を用いて羽根車翼の前縁、後縁形状や翼角分布、入口ガイドベーンなどの形状を最適化した。その結果、HFC-134a を使用した従来機に対し、同一羽根車径で断熱効率は維持したまま風量を約 20% 増加でき、圧縮機を小型化することができた。また、圧縮機小型化に伴い軸受、シール、ギア等も最適化し、損失の低減と信頼性の向上を図った。

##### ② 圧縮機の最適選定

圧縮機は、設計点風量付近の効率が最もよく、設計点以外では効率が低下する特性がある。従来機シリーズは、550~2700USRt の冷凍能力範囲(冷凍機1台に圧縮機が1台搭載されるシングル機の場合)を5型式の圧縮機でカバーしており、型式が切り替わる冷凍能力帯は効率が最も良い設計点風量付近から離れた選定となる。そのため、JHT-Y シリーズは圧縮機を5種類から 11 種類に拡充し、全冷凍能力帯で高性能機種を選定することが可能となった。

#### 3.2 熱交換器の高性能化, コンパクト化

蒸発器、凝縮器はシェルアンドチューブ型を採用し、サブクーラ、中間冷却器はプレート熱交換器を採用した。熱交換器のサイズは従来機シリーズと同様のコンパクト設計とした。また、従来機シリーズの型式選定では、仕様条件から選定された圧縮機から一意に熱交換器が決まるため、仕様条件よりオーバースペックとなる熱交換器で選定されることがあった。JHT-Y シリーズでは、拡充した圧縮機に合わせて熱交換器もラインナップを拡充し、全冷凍能力帯で最適な熱交換器を選定できるようにした。その結果、JHT-Y シリーズの型式数は従来機シリーズの9型式の倍となる 17 型式とし、よりお客様の仕様条件に合わせた冷凍機を提供できるようになった。

#### 3.3 操作盤の小型化, 高性能化

マイコン操作盤には CPU (Central Processing Unit: 中央演算処理装置) を高速化し、緻密な制御ができる最新基板を採用し、以下の機能により操作性・視認性を向上させた。図2に操作盤表示画面のイメージを示す。

- ・ 液晶サイズを従来の 10.4 型から 12.1 型に拡大し、視認性を向上させた。
- ・ タッチパネルによる直感的な操作を可能とした。
- ・ 故障時や冷凍機が異常を検知した時には故障要因、対応方法を表示しユーザサポートを充実化した。
- ・ メンテナンス時期を自動的に通知する機能を追加し、利便性を向上させた。

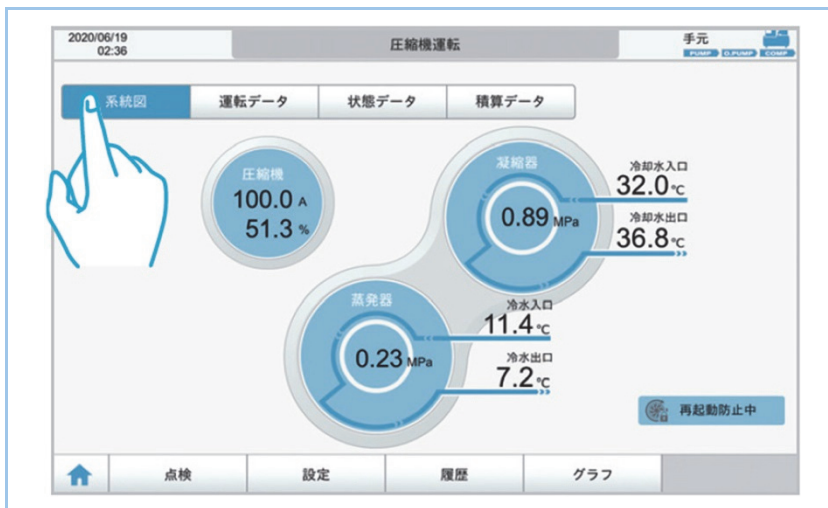


図2 操作盤表示画面

### 3.4 カスタマーポータル

当社では、カスタマーポータルサイト“三菱重工ターボ冷凍機倶楽部”にて、購入していただいた全てのお客様に各種情報を提供している。図3にカスタマーポータルのイメージを示す。お客様所有の情報をクラウド上で一元管理することで、パソコンやスマートフォン等からお客様所有の冷凍機に関する資料の検索・ダウンロード、保守計画などが閲覧でき、いつでもどこからでも冷凍機の状態を確認できるようになる。

また、有償で遠隔監視サービス“M-CONNECT”を用意しており、ご契約のお客様は追加機能として運転状況の確認、運転情報の自動レポート作成が利用できる。冷凍機が異常を検知した際には、指定された宛先へメールを通知する。

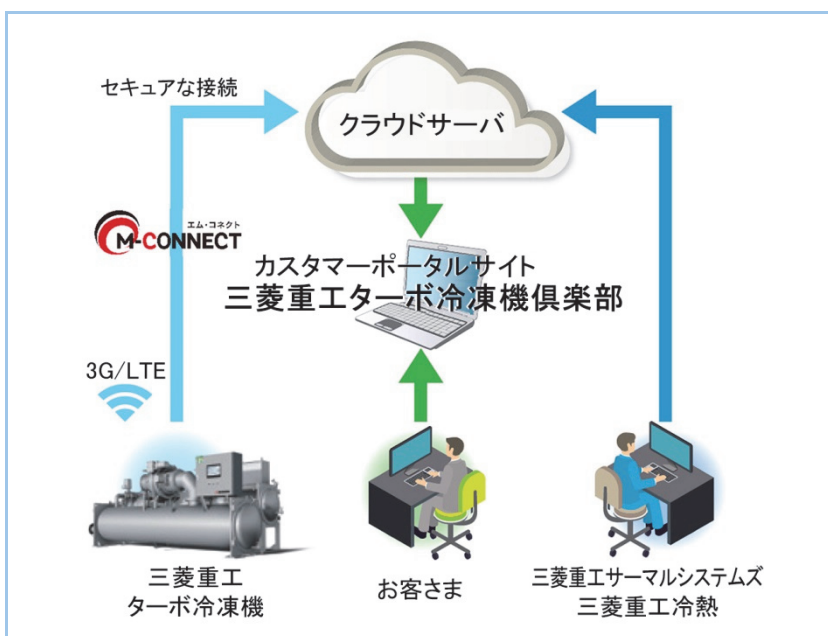


図3 カスタマーポータルサイト“三菱重工ターボ冷凍機倶楽部”イメージ

## 4. 従来機との比較

JHT-Y シリーズは、HFC-134a, HFO-1234ze (E)を使用した従来機シリーズと同等以上の性能、冷凍能力範囲を達成しており、よりコンパクトとなっている。表2に従来機との比較結果を示す。

JHT-Yシリーズは、定格 COP は 6.4(固定速機 2000USRt クラス)、インバータ機の部分負荷最高 COP は 24.9, IPLV(Integrated Part Load Value)は 8.8 であり、世界トップクラスの高性能、省

エネを発揮する。

運転可能な冷凍能力範囲は空調用途で300～5400USRtと、HFC-134aを使用した従来機シリーズと同等、HFO-1234ze (E)を使用した従来機シリーズからは最大冷凍能力が約20%拡大した。従来機同様に低温、熱回収、ヒートポンプの仕様にも対応する。

冷凍機ユニットは、HFC-134aを使用したGARTシリーズと同等のシェルアンドチューブ型熱交換器、サブクーラ、中間冷却器にプレート熱交換器を採用している。GARTシリーズは、熱交換器の最適な配置を検討し、10年前の冷凍機に対して設置面積を約30%削減、空間容積を約40%削減している。JHT-Yシリーズは、GARTシリーズのコンパクト設計を踏襲し、さらに3章に示した圧縮機の小型化により圧縮機質量を最大で約15%削減、また熱交換器の最適選定により凝縮器・蒸発器ユニット合計の質量を最大で9%削減することができた。冷凍機ユニット全体としては、高さが最大約4%、質量が最大約10%削減される。

表2 国内大型機 定格仕様と性能比較

シリーズ	GART	GART-ZE	JHT-Y
冷媒	HFC-134a	HFO-1234ze (E)	HFO-1234yf
シリーズ能力範囲	400-5400USRt	300-5000USRt	300-5400USRt
冷凍機型式	GART-270	GART-ZE250	JHT-Y245
冷凍能力	1830USRt (6435 kW)		
冷水温度	12.0℃ → 7.0℃		
冷水流量	1104 m <sup>3</sup> /h		
冷却水温度	32.0℃ → 37.0℃		
冷却水流量	1288 m <sup>3</sup> /h	1291 m <sup>3</sup> /h	1290 m <sup>3</sup> /h
消費電力	995 kW	1014 kW	1005 kW
COP	6.46	6.35	6.4
L×W×H	6.2m×3.4m×3.4m	6.2m×3.5m×3.4m	6.2m×3.5m×3.3m
設置面積	21.08 m <sup>2</sup>	21.70 m <sup>2</sup>	21.70 m <sup>2</sup>
搬入質量	33.0 ton	33.6 ton	31.4 ton
運転質量	43.4 ton	43.9 ton	40.8 ton

## 5. まとめ

GWPがCO<sub>2</sub>よりも小さい低GWP冷媒HFO-1234yfを使用したターボ冷凍機JHT-Yシリーズを開発し、販売を開始した。これにより、HFO-1233zd (E)を使用した小容量クラスのETI-Zシリーズと合わせると、150～5400USRtとなり、HFC-134a冷媒機の全冷凍能力範囲を低GWP冷媒機で置き換えることができた。またJHT-Yは、最新の設計技術を用いることで、HFC-134aを使用したGARTと同等以上の高性能化、コンパクト化、軽量化を達成し、仕様条件に合わせたより細やかな選定もできるようになった。

今後も低GWP冷媒を適用した高性能製品の開発に注力し、グローバル市場で普及させることで地球環境保全に貢献していく。

## 参考文献

- (1) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fourth Assessment Report (AR4), (2007)  
<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar4/>
- (2) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Fifth Assessment Report (AR5), (2014)  
<https://www.ipcc.ch/assessment-report/ar5/>