

全容量域に低 GWP 冷媒を展開した ターボ冷凍機“ETI-Z, GART-ZE/ZEI”

"ETI-Z, GART-ZE/ZEI" Centrifugal Chillers
using Low-GWP Refrigerants for Full Capacity Range



梅野 良枝*¹
Yoshie Togano

宮本 潤*¹
Jun Miyamoto

神吉 由恵*¹
Yoshie Kanki

清水 和美*¹
Kazumi Shimizu

三浦 貴晶*²
Takaaki Miura

長谷川 泰士*³
Yasushi Hasegawa

冷媒の世界動向として、2016年10月のモントリオール議定書“キガリ改正”で定められた、HFCの生産及び消費量の段階的削減義務は重要である。先進国は2036年に基準年(2011年-2013年)の85%削減となっている。今後、HFC削減のために規制が強化される可能性もあり、早急な低GWP(Global Warming Potential=地球温暖化係数)冷媒への転換が必要となっている。そのためライフサイクルを考えると、HFC冷媒を使用したターボ冷凍機を新たに導入することは難しくなっていく。そのような中、三菱重工サーマルシステムズ(株)(以下、当社)は2015年9月にGWPが1のHFO-1233zd(E)を採用したETI-Zシリーズを、2017年4月にはGWPが1より小さいHFO-1234ze(E)を採用したGART-ZE/ZEIシリーズの販売を開始した。これにより、冷凍能力が150USRtから5000USRtと全てのラインアップで低GWP冷媒対応のターボ冷凍機を提供できるようになった。

1. はじめに

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(ハイドロフルオロカーボン)”の生産及び消費量の段階的削減義務等を定める本議定書の改正(キガリ改正)”が採択され、脱HFCの流れが明確に示された。冷凍空調分野においては、これまで欧州におけるF-gas規制、国内におけるフロン排出抑制法など地球温暖化を抑制する対策が進められてきたが、より一層の取り組みが必要である。

ターボ冷凍機は地域冷暖房、ビル・工場空調、及び化学・食品工場のプロセス冷却などに適用される冷熱源機で、遠心式圧縮機を用いて冷凍能力150USRt(米国冷凍トン)から5000USRtまでの冷水を製造する装置である。ターボ冷凍機が地球温暖化に影響を与える要因として、運転時の電力消費による間接的なCO₂の排出、及び冷媒漏えい時に大気に放出されることによる直接的な温室効果ガスの排出が挙げられる。当社は、運転時の電力消費削減のため圧縮機や熱交換器の高効率化や熱源システムとして最適制御を常に追求、メンテナンスを充実させ定期的な漏えい点検など冷媒の大気放出を最小限とする維持管理をし、CO₂排出量の削減に取り組んできた。一方、HFC冷媒の温室効果が高く、微量な漏れであっても影響は小さくないことが懸念されてきた。

今回、地球温暖化の原因であるHFC冷媒を取り除いていくというニーズに応えるため、国内メーカーとして初めて、ターボ冷凍機シリーズの全容量領域を低GWP冷媒でラインアップした。これらシリーズは全型式でフロン排出抑制法の規制対象外となる。本稿では、低GWP冷媒を採用したターボ冷凍機シリーズの特徴と仕様について紹介する。

*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 グループ長

*3 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 技術士(機械部門)

2. 低 GWP 冷媒の選定

ターボ冷凍機に適用する低 GWP 冷媒の選定にあたり、次の項目を検討した。

① 環境性

オゾン層を破壊する物質でないこと、GWP150 以下であること。

② 物性

HFC-134a と比べて、同等の冷凍サイクル効率を有し、機器設計圧力が著しく高くならないこと。エネルギー消費量、CO₂ 排出量及び作動圧範囲は冷媒熱物性で決まる。作動圧が高いと冷凍機構成部材は強度を確保するために肉厚になりコストが増加する。

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も、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、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、安定供給や価格から、他の空調機器や発泡剤等で使われることが重要である。

④ 安全性

高压ガス保安法に従い不燃と同等の取扱いが可能であってかつ低毒性であること。

ターボ冷凍機用の低 GWP 冷媒は、表1に示す冷媒が検討されてきた。HFO-1234yf, HFO-1234ze(E)は、HFC-134a と比較的近い物性を持ち、高压ガス保安法の特定不活性ガスに分類される。一方、HFO-1233zd(E)は HFC-134a とは物性は異なり、HFC-245fa に近く空調用途では冷媒圧力は0.2MPa(G)より低いため、高压ガス保安法の適用を受けない。何れもGWPが1以下と低いため、フロン排出抑制法のフロン類に該当しない。①から④の検討項目の精査とリスクアセスメント等の検討を踏まえ、小容量クラスには HFO-1233zd(E)、大容量クラスには HFO-1234ze(E)を採用した。

表1 冷媒比較

	従来冷媒			新冷媒(低 GWP 冷媒)		
	HFC-245fa	HFC-134a	HFC-32	HFO-1234yf	HFO-1234ze(E)	HFO-1233zd(E)
地球温暖化係数(GWP) ^{※1}	858	1300	677	<1	<1	1
オゾン層破壊係数(ODP)	0	0	0	0	0	0
分類 (高压ガス保安法 冷凍保安規則)	— ^{※2}	不活性ガス	不活性ガス ^{※3}	不活性ガス ^{※3}	不活性ガス ^{※3}	— ^{※2}
大気寿命	7.7 年	13.4 年	5.2 年	10.5 日	16.4 日	26 日
長期曝露毒性(許容値)[ppm]	300	1000	1000	500	800	800
沸点(大気圧)[°C]	15.1	-26.1	-51.7	-29.4	-19.0	18.3
飽和圧力(6°C)[kPa(G)] ^{※4}	-32.1	260.7	879.8	23.9	167.3	-39.1
飽和圧力(38°C)[kPa(G)] ^{※4}	133.1	861.9	2258	866.4	624.3	100.8
飽和ガス比体積(6°C)[m ³ /kg] ^{※4}	0.241	0.056	0.037	0.047	0.069	0.277
飽和ガス比体積(38°C)[m ³ /kg] ^{※4}	0.075	0.021	0.014	0.018	0.026	0.091
理論 COP ^{※5}	6.86	6.58	6.38	6.31	6.56	6.93
流通量	中	多	多	少	少	少
総合評価 ^{※6}	△	△	○	○	◎	◎

※1 気候変動に関する政府間パネル(IPCC)第5次評価報告書

※2 R-245fa, R-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 特定不活性ガス;規定された換気能力を有した機械換気(冷凍機と換気設備とのインターロック機構)、冷媒漏えい検知警報設備の設置が必要。

※4 冷媒熱物性データベース RefProp Ver9.1

※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

※6 ◎:GWP が低くかつ理論 COP が高い。

○:GWP は低いが理論 COP は HFO-1234ze(E)や HFO-1233zd(E)まではとどかない。

△:GWP が高い。

3. シリーズラインアップ

低 GWP 冷媒を採用したターボ冷凍機シリーズは、小容量クラスの ETI-Z シリーズと大容量クラスの GART-ZE/ZEI シリーズであって、冷凍能力は 150USRt から 5000USRt までである。各シリーズの容量範囲を図1に示す。図1には HFC-134a 冷媒を採用した従来シリーズの容量範囲も合わせて示す。

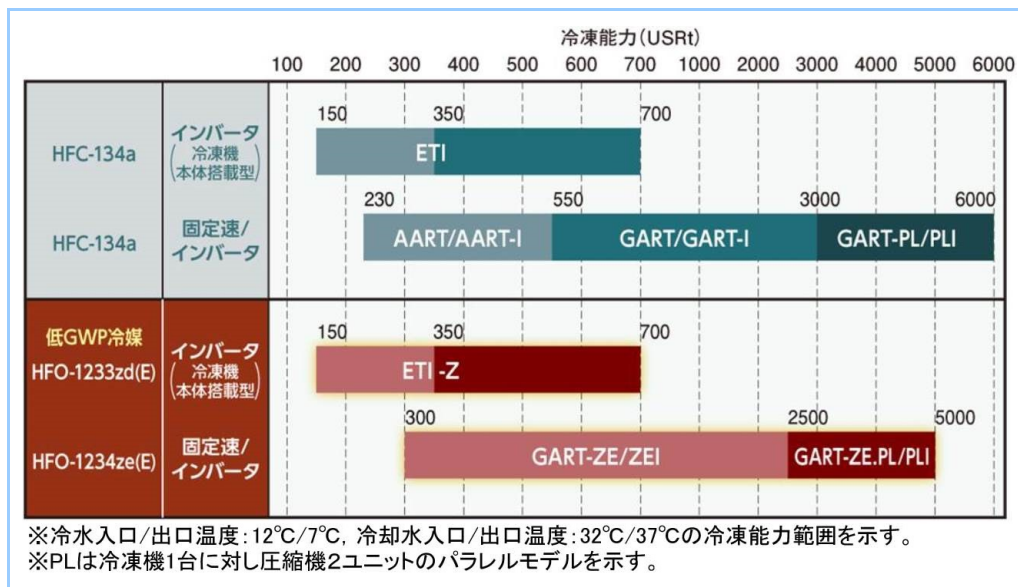


図1 当社ターボ冷凍機シリーズの容量範囲

(1) ETI-Z シリーズ

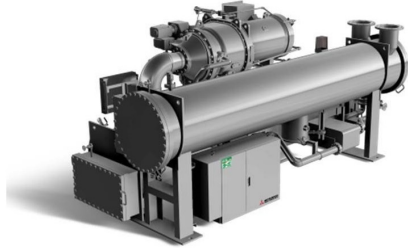
ETI-Z シリーズは GWP が1の HFO-1233zd(E) を採用し、圧縮機1台搭載のシングルモデルで 150USRt から 350USRt, 圧縮機2台搭載の平行モデルで最大 700USRt まで対応する。400V 級のインバータを標準搭載している。外観を図2に示す。



図2 ETI-Z シリーズ外観

(2) GART-ZE/ZEI シリーズ

GART-ZE/ZEI シリーズは、GWP が1未満の HFO-1234ze(E) を採用し、圧縮機1台搭載のシングルモデルで 300USRt から 2500USRt, 圧縮機2台搭載の平行モデルで最大 5000USRt まで対応する。固定速モデル (GART-ZE) を基本とし、同時に可変速モデル (GART-ZEI) をラインアップする。外観を図3に示す。



●300~5000USRt **大容量まで対応**

●HFO-1234ze (E) 冷媒採用 **地球温暖化係数 (GWP) 1未滿**

世界トップレベルの高性能

HFO-1234ze(E)に適した空力設計

固定速機

定格GOP
JIS B8621:2011
6.4
1920USRt 冷水12℃/7℃

インバータ機

部分負荷時最高GOP
24.0
冷却水入口 12℃

図3 GART-ZE/ZEI シリーズ外観

4. 適用技術

ETI-Z シリーズで採用した HFO-1233zd (E) のガス比体積は HFC-134a と比較し約5倍、GART-ZE/ZEI シリーズで採用した HFO-1234ze (E) で約 1.3 倍となるため、冷媒ガスが流れる圧縮機、蒸発器、凝縮器、ガス配管などの容積を大きくする必要がある。しかし、機器を大きくするとリプレースでは従来機器の入替とできず、広く普及させるため従来機同等以上のコンパクト化と高性能化を目論んだ以下の要素設計を行った。

(1) 圧縮機の高性能、コンパクト化

① 空力設計

冷媒ガスの比体積増加に対応するため、従来圧縮機よりも大風量の空力設計を採用した。設計風量を大きくすると断熱効率が低下する傾向があるため、羽根車翼形状や入口ガイドベーンの形状を CFD 解析を用いて最適化した。結果、従来機に対し、同一羽根車径で断熱効率の3%向上と風量の 60%増加を両立させながら、圧縮機容積の低減を達成した。

② 圧縮機と電動機の直結化 (ETI-Z シリーズのみ)

冷媒の比体積増加により、同一冷凍能力でも羽根車径が大きくなり、周速が大きくなることによって羽根車回転数が低くなることから、羽根車を電動機軸に直結する構造が選択できた。これにより、電動機は小型高速回転化、圧縮機と電動機が増速歯車を介さず直結となり圧縮機の小型化と高性能化、さらに圧縮機軸受数の削減による低損失化、信頼性向上を図った。

(2) 熱交換器の高性能、コンパクト化

熱交換器はシェルアンドチューブ型を採用している。冷媒ガスの比体積が大きく、従来機対比で凝縮器と蒸発器の圧力差が小さいため、冷媒流動による圧力損失を抑制するように設計した。特に蒸発器で局所的に冷媒ガス量が増大し伝熱管での熱交換がし難くなるドライアウトを抑制すること、伝熱管群の上部からの冷媒ガスの噴き出し流速が大きく圧縮機に冷媒ガスとともに冷媒液滴が吸込まれることを防止すること、凝縮器に冷媒ガスが流入する領域で発生する圧力損失が大きくなることに留意した。

なお、ETI-Z シリーズは蒸発器など作動圧が大気圧以下となる箇所があり、気密不良など何らかのエラーにより不凝縮ガスである空気が侵入する可能性がある。そのため、不凝縮ガスの滞留位置を特定し、抽気が必要な場合は効率的に行うことができる位置に抽気管を配置した。

(3) 操作盤の小型化, 高性能化

マイコン操作盤には CPU の高速化でさらに高精度な制御を可能とする基板を採用した。加えて、従来機よりも液晶表示部を大型化し、タッチパネル式として操作性と視認性の向上を図った(図4)。冷凍機異常停止時には対応方法を画面に表示して運転操作をサポートするとともに、メンテナンス時期などを自動的に通知する機能により、利便性を向上した。

大容量機である GART-ZE/ZEI シリーズでは、操作部となるタッチパネル部と電装部品が収納されるボックスとを分離して配置し、より操作性を向上させている。

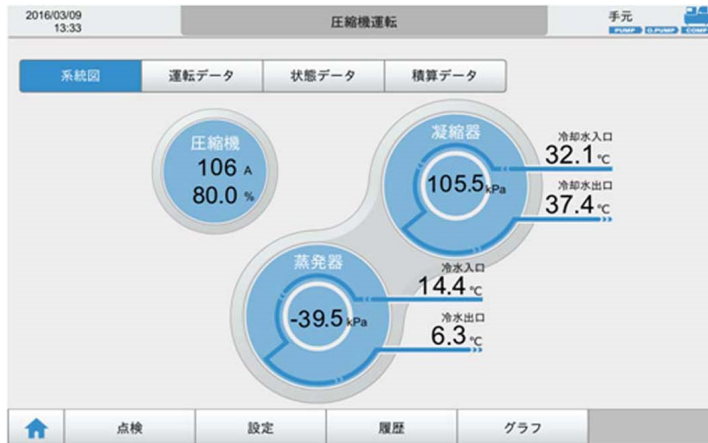


図4 操作盤表示画面(ETI-Zシリーズ)

5. 従来機との比較

HFC-134aを採用した従来機ETIシリーズと、冷媒物性が大きく異なるHFO-1233zd(E)を採用したETI-Zシリーズを比較した(表2)。

表2 定格仕様・性能比較

	ETIシリーズ	ETI-Zシリーズ
冷凍機型式	ETI-20	ETI-Z20
冷媒	HFC-134a	HFO-1233zd(E)
冷凍能力	200 USRt (703 kW)	
冷水温度	12.0°C → 7.0°C	
冷水流量	120.7 m ³ /h	
冷却水温度	32.0°C → 37.0°C	
冷却水流量	141.5 m ³ /h	139.6 m ³ /h
消費電力	115.0 kW	111.3 kW
COP	6.1	6.3
L×W×H	3.7m×1.5m×1.8m	3.8m×1.6m×1.8m
設置面積	5.55 m ²	5.80 m ²
搬入質量	3.9 ton	4.3 ton

(1) 性能

ETIシリーズ(ETI-20)のCOPが6.1であったのに対し、ETI-Zシリーズ(ETI-Z20)ではCOPが6.3と約3%、定格性能を向上させた。

(2) 設置面積

4章で示した圧縮機、熱交換器のコンパクト化に加え、補機や小型容器類を凝縮器下部に配置するコンパクトな設計としている。ETI-Zシリーズでは、ETIシリーズに対し冷媒ガス比体積は約5倍であるが、設置面積の増加は約5%に留めることができた。また、GART-ZE/ZEIシリーズでは、GARTシリーズのコンパクト性を引き継いでいる。何れのシリーズもリプレースの対象となる15年以上前の当社機と比較すると、約35%の設置面積削減を達成した。

6. 維持管理

ターボ冷凍機を安全かつ高効率に運用するためには、日々の維持管理は重要である。ETI-Z [HFO-1233zd(E)], GART-ZE/ZEI [HFO-1234ze(E)] の特徴を示す。

(1) ETI-Z

HFO-1233zd(E) は設計圧力が低く [空調用途の飽和圧力が 0.2MPa (G) 未満]、高圧ガス保安法が適用されないため、保安教育や定期自主検査の実施、法定点検、冷凍保安責任者の選任等が不要となる。このように法的義務はなくなるが、安全な運用や冷凍機の性能を維持するためには適切な維持管理をする必要がある (冷水・冷却水の水質管理、電装部品の交換など)。そのため、当社は定期点検や検査メニューを示し積極的にユーザーを支援していく。

(2) GART-ZE/ZEI

HFO-1234ze(E) は高圧ガス保安法が適用されるため、従来の HFC-134a と同等である。また、高圧ガス保安法で特定不活性ガスに分類されるため、規定された換気能力を有した機械換気 (冷凍機と換気設備とのインターロック機構)、冷媒漏えい検知警報設備の設置が必要である。

7. まとめ

GWP が CO₂ 相当の1以下と非常に小さい、HFO-1233zd(E)、HFO-1234ze(E) を用いたターボ冷凍機の開発を行った。これにより、ターボ冷凍機の全てのラインアップで低 GWP 冷媒の対応が可能となった。大規模空調用途において、個別空調方式と言われるビル用マルチエアコンでは、低 GWP の冷媒を用いた熱源機は現在示されていない。セントラル空調方式で、国内メーカーでは当該冷媒を適用したターボ冷凍機が唯一である。今後、これら新冷媒の普及に努力し、合わせてお客様の満足が得られるよう継続的な冷凍機の提供を行っていく所存である。

参考文献

- (1) 三吉直也ほか, R1233zd(E) を適用するターボ冷凍機, 日本冷凍空調工業会 環境と新冷媒 国際シンポジウム 2016