

地球温暖化防止に貢献する低GWP冷媒適用ターボ冷凍機 “ETI-Z シリーズ”

"ETI-Z series" Centrifugal Chiller Applied Low-GWP Refrigerant
to Contribute to the Global Warming Prevention



上田 憲治*1
Kenji Ueda

白方 芳典*2
Yoshinori Shirakata

長谷川 泰士*3
Yasushi Hasegawa

松倉 紀行*4
Noriyuki Matsukura

三吉 直也*5
Naoya Miyoshi

古賀 淳*6
Jun koga

近年、当社はターボ冷凍機の高性能化を進め、省エネ性能を高めることにより、地球温暖化防止に貢献してきた。さらに、地球温暖化係数が二酸化炭素と同じである HFO-1233zd(E)を使ったターボ冷凍機を開発し、2015年9月より ETI-Z シリーズとして発売し、冷媒放出による直接的な地球温暖化防止を図っている。

HFO-1233zd(E)は、従来使用されていた冷媒 HFC-134a と比較すると冷媒ガス体積が約5倍と大きく異なるが、新開発のターボ冷凍機は従来の HFC-134a を用いる従来機と同様にコンパクトな製品に仕上げた。また、定格性能を3%向上させ、高い省エネ性能を実現した。

1. はじめに

冷凍空調機器の一つであるターボ冷凍機はこれまでオゾン層破壊係数(ODP:Ozone Depletion Potential)が大きなCFC冷媒から、ODP が小さい又はゼロの HCFC 冷媒, HFC 冷媒へと転換され、各々の冷媒で高性能化が図られてきた(図1)⁽¹⁾。しかし、一方で HFC 冷媒は地球温暖化係数(GWP:Global Warming Potential)が高く、HFC 冷媒への代替が進むにつれ、近年、地球温暖化への影響が懸念され始めた。特に欧州におけるFガス規制や、日本国内におけるフロン排出抑制法等の施行開始により、先進国市場において低 GWP 冷媒への転換が望まれている。

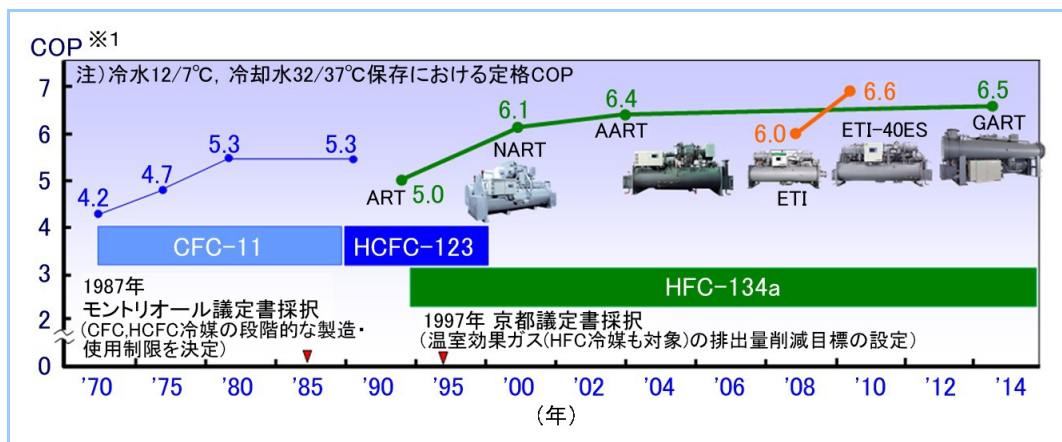


図1 ターボ冷凍機適用冷媒と性能の変遷

※1 COP:成績係数(Coefficient Of Performance), 発生冷熱量を消費動力で除した数値で、この数値が大きい程性能が良い。

- *1 機械設備ドメイン冷熱事業部大型冷凍機技術部 次長 工博
- *2 機械設備ドメイン冷熱事業部大型冷凍機技術部 課長
- *3 機械設備ドメイン冷熱事業部大型冷凍機技術部 技術士(機械部門)
- *4 三菱重工空調系統(上海)有限公司経営管理部 技術士(機械部門)
- *5 機械設備ドメイン冷熱事業部 大型冷凍機技術部
- *6 技術統括本部総合研究所流体研究部 主席研究員

さて、ターボ冷凍機は工場熱源システム等の産業用のみならず、ビル空調などの一般空調用においても広く使用されており、それら市場のニーズ、用途適用の変化からターボ冷凍機に要求される仕様も徐々に変化してきた。通年運転条件でエネルギー消費量の低減が見込めるインバータの標準装備化が定着し、既設機とのリプレース需要の割合も高いため、設置性に優れたコンパクトな点も重要視されている。

本報では、これらの冷媒の転換と市場のニーズに応えるため、2015年9月より発売を開始した低 GWP 冷媒 HFO-1233zd(E)適用ターボ冷凍機“ETI-Z シリーズ”について紹介を行う。

2. ターボ冷凍機用の低 GWP 冷媒

単に冷媒としての特性に加え、冷凍空調用熱源機で最大容量となるターボ冷凍機用の冷媒として採用する際の判断基準となるのが以下の3項目である。

① 冷凍サイクル効率等の基本特性

冷凍サイクルの効率が良く、使用圧力範囲が適切であることが必要となる。冷凍サイクルの効率は、冷凍機の効率に大きく影響するものであり、省エネや運転時の間接 CO₂ 排出量削減のためには優れている必要がある。また、使用圧力範囲が過剰に高い場合には、冷凍機構成部材の強度を確保するために部材肉厚が厚くなり、過剰に低いものは冷媒ガス部の構成要素サイズが大きくなり、いずれもコストが高くなるため、適切な圧力範囲であることが重要となる。

② 入手性

ターボ冷凍機1台に充填される冷媒充填量が多いが、ターボ冷凍機で使用される総冷媒量は他の空調機器(エアコン、カーエアコン等)と比較すると少ない。そのため、安定供給や量産効果による冷媒の低コスト化を考えると、他の空調用機器用の冷媒や発泡剤等の冷媒以外の用途を含めた生産量が確保されることが重要となる。

③ 安全性

毒性が無く、不燃(機械室の使用で火災の恐れのないこと)で扱いやすいことが必要となる。

ターボ冷凍機用の低 GWP 冷媒としては、表1に示すHFO系冷媒が候補として検討されてきた。現行冷媒である HFC-134a と比較的近い冷媒特性を持つものとしては、HFO-1234yf や HFO-1234ze(E)が検討され、ターボ冷凍機用の冷媒としては技術的な適用検討は既に実施されているものの、両者ともに微燃性を有しており安全性に課題があるとともに、前者は入手性にも問題があるため、国内法規の制約も重なり実採用には至っていない。そこで、現行冷媒 HFC-134a と冷媒物性は大きく異なるものの、冷凍サイクル効率等の基本特性に優れ、入手性・安全性にも問題がない HFO-1233zd(E)冷媒を低 GWP 冷媒候補として選定した。

表1 従来冷媒と代替冷媒との比較⁽²⁾⁽³⁾

	従来冷媒			代替冷媒		
	HCFC-123	HFC-245fa	HFC-134a	HFO-1234yf	HFO-1234ze(E)	HFO-1234zd(E)
地球温暖化係数	79	858	1300	<1	<1	1
オゾン層破壊係数	0.012	0	0	0	0	0
可燃性	不燃	不燃	不燃	微燃	微燃	不燃
毒性(許容濃度) [ppm]	B1(50)	B1(300)	A1(1000)	A2L(500)	A2L(1000)	A1(800)
大気寿命	1.4年	7.6年	13.8年	10.5日	16.4日	26日
沸点(大気圧) [°C]	27.8	15.1	-26.1	-29.4	-19.0	18.3
飽和液密度(25°C) [kg/m ³]	1464	1339	1207	1092	1163	1263
飽和ガス密度(25°C) [kg/m ³]	5.87	8.55	32.35	37.93	26.3	7.19
潜熱(25°C) [kJ/kg]	171.4	190.9	177.8	145.4	166.8	190.6
理論 COP[-] ^{*2}	7.43	7.36	7.16	6.96	7.18	7.39

*2 2段圧縮2段膨張サブクーラサイクル。蒸発温度6.2°C、凝縮温度37.7°C、サブクール度4°C、断熱効率88%での冷凍サイクル COP

3. 低 GWP 冷媒採用機の高効率・コンパクト・高機能化技術

冷媒 HFO-1233zd(E)は、現行冷媒である HFC-134a と比較して、冷媒ガス密度は約 1/5 であり、冷媒の潜熱は同等レベルであるため、同一の能力を得るには 5 倍の冷媒ガス体積流量が必要となり、冷媒ガスが流れる部位である圧縮機、蒸発器・凝縮器、ガス配管等の流路断面は大きくする必要がある。そこで従来機種と同等の性能・コンパクト性を確保するには、本冷媒採用時の小型化を実現した上で、高性能化を達成することが重要となる。以下に、そのために必要な技術について述べる。

3.1 圧縮機の高効率化, コンパクト化

(1) 空力設計の改良

圧縮機の高性能化, コンパクト化を図るため、今回採用する冷媒物性に適した羽根車の翼形状を新たに設計した。従来機の羽根車と比較して、より大風量・高速回転の仕様とし、同一翼径で従来比、約 60% 風量を増加させて高効率を維持しながら小型化を狙った。羽根車の設計風量を大きくすると、断熱効率が低下する傾向となるが、羽根車翼の前縁・後縁形状や翼角分布、静止部の流路形状や入口ガイドベーンの形状を従来設計手法に加え形状最適化ロジックを介することで、従来機種以上の高効率を得た。また、羽根車は実績のある高強度アルミ材の機械加工品とすることにより、設計性能に対して高い再現性を実現した。

(2) 圧縮機, 電動機の直結化

従来機では増速歯車を介し、電動機に対して羽根車を増速させているが、本開発機では冷媒の特性を生かし同一容量で羽根車を電動機軸に直結させる構造としたため、以下のとおり性能上有利な変更が可能となる。

- ・電動機の高速化による小型化
- ・増速歯車の削除による、圧縮機ユニットの小型化と損失低減
- ・圧縮機軸受支持数の削減(従来機:8列→開発機:3列)による高性能化
- ・潤滑油量の低減

3.2 熱交換器のコンパクト化

(1) 蒸発器, 凝縮器

蒸発器, 凝縮器にはシェル&チューブ熱交換器を採用し、チューブには高性能薄肉の伝熱管を採用した。また、伝熱管本数, 伝熱管長さ, 伝熱管径, 冷水もしくは冷却水の通水方向の組合せを最適化し、伝熱面積を最小化するようにした。また、従来機と比較して絶対圧力が低下し、蒸発器での液柱の影響による熱交換性能低下を最小化する伝熱管配置とした。さらに、蒸発器・凝縮器内の冷媒ガス流速が高くなるため、蒸発器内部でのキャリーオーバー防止や、凝縮器管群部での圧力損失低減に配慮して伝熱管ピッチ・配置を決定した。蒸発器に対しては、キャリーオーバー防止のための液滴分離構造の改良も加えることにより、従来機と同様にコンパクトな熱交換器体格とした。

(2) サブクーラ

本開発機でも従来機に引き続き、高性能化に寄与するサブクーラを採用している。従来機ではブレイジング型プレート熱交換器をサブクーラとして採用していたが、熱交換器内部での冷媒側圧力損失を小さくできる凝縮器内蔵タイプの凝縮器下部液溜り組込型サブクーラを採用した。凝縮器同様、伝熱管長さ, 伝熱管本数, 伝熱管径の組合せを最適化するとともに、冷媒側圧力損失を低減しながら伝熱性能を確保できるよう、冷媒流路構造に工夫を施した。

3.3 最新マイコン基板による高機能化

本開発機では、ユーザによる操作をより容易にするとともに、高度な機能を付加するために最新のマイコン基板を採用した。最新型マイコン基板の特徴を以下に示す。

- ・液晶サイズを従来の 10.4 型から 12.1 型に拡大して視認性を向上するとともに、抵抗膜式のタッチパネルを採用し、操作方法・手順を分かりやすくした。
- ・コアCPUを高速化し、より高度で複雑な制御に対応可能とし、複数の高速通信にも対応可能とした。
- ・対応言語種別数をこれまでの 15 言語から倍の 30 言語とし、より幅広い言語地域での使用を可能とした。
- ・SDHC カード(～32GB)の使用を可能とし、より多くの運転データ履歴を保存できるようにし、メンテナンスや故障時のトラブルシューティングに活用しやすくした。

上記のマイコン基板の改良に加え、運転データ表示画面も表示項目や表示位置を見直し、視認性を向上させた。また、故障発生時には故障名だけではなく、故障要因・解決策を表示し、故障時の初期対処をサポートする機能も備えている(図2)。



図2 最新マイコン盤採用操作盤の外観と表示画面

4. 新シリーズ機の特徴

前述の技術の採用により、ETI-Z シリーズは冷媒転換により、冷媒ガス密度が約1/5と大きく変化したにも関わらず、従来機対比高性能化と従来機と同等のコンパクト性を実現した。以下に新シリーズ機の特徴をまとめる。

4.1 高性能化

従来冷媒の同容量インバータ標準駆動機では、JIS 条件(冷水入口 12℃/出口7℃, 冷却水入口 32℃/37℃)における COP は 6.1 であったのに対し、ETI-Z シリーズでは最高 COP6.3 と約3%の性能向上を達成した(表2)。

表2 開発機と従来機との仕様比較

	従来機	開発機
冷凍機型式	ETI-20	ETI-Z20
冷凍能力	200USRt (703kW)	200USRt (703kW)
冷媒	HFC-134a	HFO-1233zd(E)
冷水温度	12℃ in/7℃ out	
冷水流量	121.0m ³ /h	121.0m ³ /h
冷却水温度	32℃ in/37℃ out	
冷却水流量	140.2m ³ /h	139.6m ³ /h
消費電力	115.0kW	111.3kW
COP	6.1	6.3
L×W×H	3.7m×1.5m×1.8m	3.8m×1.6m×1.7m
設置面積	5.55	5.83
搬入質量	3.9ton	4.2ton

本開発機で採用している冷媒 HFO-1233zd(E)は運転時の高低差圧が低い特性を有する“低圧冷媒”と呼ばれるものである。冷媒圧力が比較的これに近いCFC-11やHCFC-123を冷媒として採用していた際に冷却水温度が低い運転状態の時には、電動機や潤滑油冷却のために供給する冷媒のための冷媒ポンプを用いていた。本開発シリーズ機では、冷却冷媒供給の揚程が小さくなるよう構成要素の配置に配慮するとともに、圧縮機ユニット内部を含めた冷却経路に配慮することにより、冷却冷媒供給用の冷媒ポンプがなくても冷却水温度が低い条件にも対応可能とした。また、部分負荷運転時において、補機動力となる冷媒ポンプの駆動なしで運転することも可能とした。

4.2 コンパクト化

3項で示した圧縮機、熱交換器のコンパクト化に加え、インバータユニットを冷凍機本体に組み込み一体型にするるとともに、補機や小型容器類を凝縮器下部に配置することにより、コンパクトな設計とした。従来の冷媒 HFC-134a を採用したシリーズと比較すると、冷媒ガス体積が約5倍となっているにもかかわらず、約5%の設置面積拡大にとどめた非常にコンパクトな設計になっていると言える。また、リプレースの対象となる15年以上前の当社従来機と比較すると、約35%の設置面積低減を達成した。

4.3 低圧冷媒採用によるメリット

今回採用した冷媒は50℃に相当する飽和圧力が0.2MPa(G)未満と低く、ターボ冷凍機の一般的な使用条件においては、高圧ガス保安法の対象外となる。従来冷媒であるHFC-134aと比べ、高圧ガス製造許可書・届出の提出や、冷凍保安責任者の選任、保安教育や定期自主検査の実施、法定点検等が必要なくなり、導入・メンテナンスを行う上での取扱いが容易になる。

5. まとめ

ETI-Z シリーズは、国内市場ニーズを反映し、小容量・コンパクト・高性能化を実現化した高性能ターボ冷凍機ETIシリーズの後継機であり、近年、特に課題となっている低 GWP 冷媒への転換に対するソリューションを提示する。従来機で特に好評であった、インバータ標準装備・一体型、部分負荷を含めた高性能特性、設置性に優れたコンパクト設計はそのまま踏襲し、新冷媒に対する最適設計や最新マイコン基板の採用等により、さらなる高性能・高機能化を達成することが出来た。本開発機に採用した冷媒は、1000USRt を超える容量域に対しても適用を進めていく予定であり、小容量のターボ冷凍機だけではなく、幅広い容量域で導入されていくことが予想される。

本開発機の発売により、低 GWP 冷媒への転換は進むものと考えている。今後もお客様からのニーズに応えるべく、市場の求める製品開発を推進してゆく所存である。

参考文献

- (1) 上田憲治, ターボ圧縮機の変遷, 2010 年度日本冷凍空調学会年次大会講演論文集, 2010, P.417-420
- (2) IPCC 第5次報告書(2013)
- (3) NIST REFPROP Ver.9.1