

eco ターボ冷凍機 ETI 新シリーズへの展開

Deployment to New Series of “eco Turbo chiller ETI series”



上田 憲治*1
Kenji Ueda

長谷川 泰士*2
Yasushi Hasegawa

和島 一喜*3
Kazuki Wajima

仁田 雅晴*2
Masaharu Nitta

鎌田 泰廣*4
Yasuhiro Kamada

横山 明正*2
Akimasa Yokoyama

省エネと利便性を追求したインバータ標準搭載ターボ冷凍機“eco ターボ ETI シリーズ”の発売により、熱源機器のインバータ化は飛躍的に伸張した。特に冷却水温度や負荷率が広く変化する熱源システムでは、省エネに大きく貢献している。さらに、環境負荷低減を実現するため、本シリーズの拡大を実施中である。ここでは、高性能化・高機能化それぞれの特徴と省エネ・有用性とともに、新冷媒適用を含めた環境負荷低減技術について示し、今後の更なるシリーズ拡張の可能性について紹介する。

1. はじめに

近年省エネルギーや CO₂ 排出量削減への社会的関心が高まり、高性能ターボ冷凍機は工場熱源システムなど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われるようになってきている。ターボ冷凍機は高性能なヒートポンプ機器であるが、大容量であるがゆえにエネルギー消費量が多く、CO₂ 排出量削減の観点から、高性能化を目指した技術開発、製品開発は非常に重要とされてきた。また一方で、多くの熱源システムに対して幅広く導入されるようになると、設置が容易で使いやすい製品であることが顧客ニーズとして重要となってきた。

本論文では、最近の熱源機器の動向・ニーズを背景として説明し、2008年5月に発売を開始した新型のインバータ標準搭載ターボ冷凍機“eco ターボ ETI シリーズ”^①のニーズに合わせた新シリーズへの展開と特徴を紹介する。

2. 更なる高性能化

ETI シリーズは、高性能大型ターボ冷凍機で実績のある高性能化を実現する技術要素をすべて採用し、さらに各要素を精査することで小型化と高性能化を両立させたターボ冷凍機である。この ETI シリーズのシリーズ拡大を図るとともに、更なる高性能化を同時に達成しており、その高性能化技術を以下に示す。

2.1 シリーズ拡大に伴う高性能化

2008年に発売した ETI-20系、40系は、吸収冷凍機の入替需要容量範囲に対応している。しかし、その後も一般空調用途は需要として伸長しており、その主容量帯である 700USRt (1USRt = 3.516kW) までカバーし、同時に ETI-20系、40系の 250USRt ~ 350USRt の容量範囲における性能改善のために、圧縮機単機で 300USRt とする ETI-30系、60系のシリーズ拡張を 2011年に行った。シリーズ拡張に合わせ、下記の高性能化技術を適用し、機器全体の高性能化を図った。

- ・ 圧縮機羽根車の形状改良による高性能化
- ・ 2段吸込ベーン形状の改良による性能向上と制御性向上

*1 冷熱事業本部大型冷凍機部課長 工博

*2 冷熱事業本部大型冷凍機部

*3 冷熱事業本部大型冷凍機部主席技師

*4 冷熱事業本部大型冷凍機部主席チーム統括

- ・ 軸受損失の更なる低減
- ・ 増速歯車の小型軽量化と損失低減
- ・ 圧縮機吸込, 吐出流れの最適化による吸込, 吐出損失の更なる低減

以上を適用した ETI-30 系, 60 系の代表仕様を**表1**に示す. 定格 COP (Coefficient of Performance, 成績係数) はインバータの入力電力と油ポンプ, 制御電源を含んだ消費電力規準で最高 COP は 6.2 まで向上し, これまでの ETI シリーズ最高 COP と比較して約 3% の性能向上を達成している. また, 羽根車と 2 段吸込ベーン形状の改良により, 最大能力付近での性能改善が顕著であり, 従来シリーズでは定格 COP 5.7 に対し, 拡張シリーズでは定格 COP は 6.0 を超え, 約 5% 以上の性能向上を達成した. 本拡張シリーズも従来の ETI-20 系, 40 系と同様にインバータを冷凍機本体上に標準装備していることで自立盤が不要となり, 従来機である AART シリーズの同容量機と比較しても設置面積を約 45% 削減しており, 設置導入性の面でも優れている.

2.2 高性能 ES シリーズ

更なる高性能なターボ冷凍機として ETI-40 系をベースに二重冷凍サイクルを採用した ETI-40ES を発売した⁽²⁾. ETI-40ES に採用している二重冷凍サイクルは従来 1000USRt 以上の大容量機で採用されてきた. **図1**に示すように 2 つの直列接続された冷凍サイクルが圧縮機の圧縮比を分担することにより, 圧縮に要する動力を軽減し, 高性能化を達成するとともに, 冷水ポンプの搬送動力削減にも効果のある大温度差対応とすることで定格 COP 7.0 を達成した⁽²⁾.

ETI-40ES の主な仕様を**表2**に, 部分負荷特性を**図2**に示す. 高压側, 低压側の 2 つの圧縮機を個別にインバータによりきめ細かく最適制御することで部分負荷運転時に最高 COP 29.1 と約 22% の向上を達成し, それに基づき IPLV (Integrated Part Load Value, 期間成績係数) も 11.7 と約 15% の向上を達成した. その結果, 経済性及び CO₂ 排出量削減効果について当社の従来機 ART と比較した結果, 年間の CO₂ 排出量と電気料金共に約 68% の削減が見込まれる.

標準の負荷制御範囲は 100% ~ 10% であるが, オプション対応で運用上の利便性が向上する 0% 負荷運転にも対応している. ETI シリーズと同じく幅広い容量制御が可能である. また, インバータは ETI-40 系と同様に冷凍機本体上に標準装備しており, コンパクトな設計となっている.

表1 ETIシリーズの代表仕様値

型式	ETI-20	ETI-40	ETI-30A	ETI-60A
冷凍能力	200USRt	400USRt	300USRt	600USRt
	703kW	1407kW	1055kW	2110kW
冷水温度	入口温度 12℃ / 出口温度 7℃			
冷却水温度	入口温度 32℃ / 出口温度 37℃			
消費電力	116.3kW	232.6kW	172.9kW	340.2kW
COP	6.0	6.0	6.1	6.2
冷媒	HFC-134a			

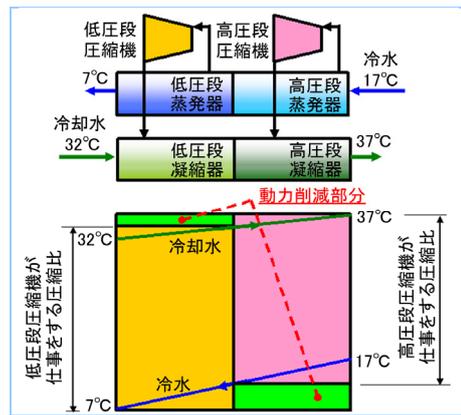


図1 二重冷凍サイクルの原理

表2 ETI-40ES代表仕様値

冷凍能力	400USRt	
	1407kW	
冷水温度	入口温度 17℃ / 出口温度 7℃	入口温度 12℃ / 出口温度 7℃
冷却水温度	入口温度 32℃ / 出口温度 37℃	
消費電力	202kW	213kW
COP	7.0	6.6
IPLV (ARI)	11.7	

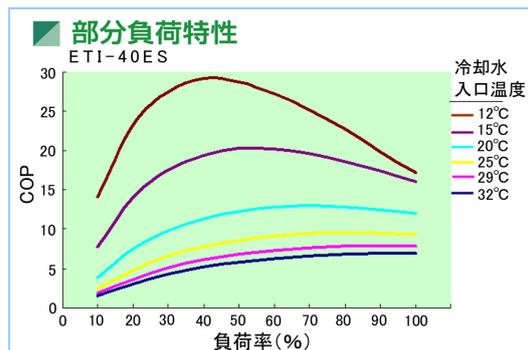


図2 ETI-40ES 部分負荷特性

3. 更なる高機能化

ターボ冷凍機の技術開発動向としては、ユーザに常に高性能な状態で利用していただくため、高性能化とともに高機能化の開発にも注力している。具体的には、①ターボ冷凍機の現在のCOPと本来あるべき計画COPの表示、②最適運転可能な負荷帯の表示、③負荷変動や温度変化に対して高性能を維持しながら追従する機能である。

3.1 リアルタイム計画COP表示

高い性能を維持しながら運転するためには、まず現在の運転が適切であるかどうかを判断できることが重要である。定格条件であれば、仕様書などの性能と比較することで判断は可能であるが、実際の運転では負荷や冷却水温度は定格仕様条件から外れ、期待されるべき性能(COP)は定格条件のものとは異なる。机上であればシミュレーション計算手法を用い、期待されるべき性能(COP)を実測運転データに基づいた値で精度良く推定することができるが、汎用的に利用できないことが課題であった。そこで、理論特性に基づいた簡略式を用いて性能推定手法を確立した⁽³⁾。

性能推定手法は、可変速制御を適用したインバータ駆動ターボ冷凍機と、固定速で運転するターボ冷凍機の双方について確立した。これは、両者の容量制御方法が圧縮機の回転数制御を適用するか否かで異なるためである。固定速ターボ機では容量制御を行う入口ベーン制御とホットガスバイパス制御による損失特性から部分負荷性能を推定した。一方、インバータ駆動ターボ冷凍機ではターボ圧縮機の空力機械の理論特性に従った指標からすべての冷凍能力や冷水・冷却水温度条件での特性を反映し、かつ入口ベーンとホットガスバイパス弁の損失量の特定が可能となるため、より汎用的な形で性能予想できるように性能推定式を整備した。いずれの制御方法の冷凍機に対しても、実測値に対して推定値は定格動力換算で誤差3%未満となり、計測精度を考慮すると実用的精度で冷凍機の消費電力を把握することができることを確認した(図3)。

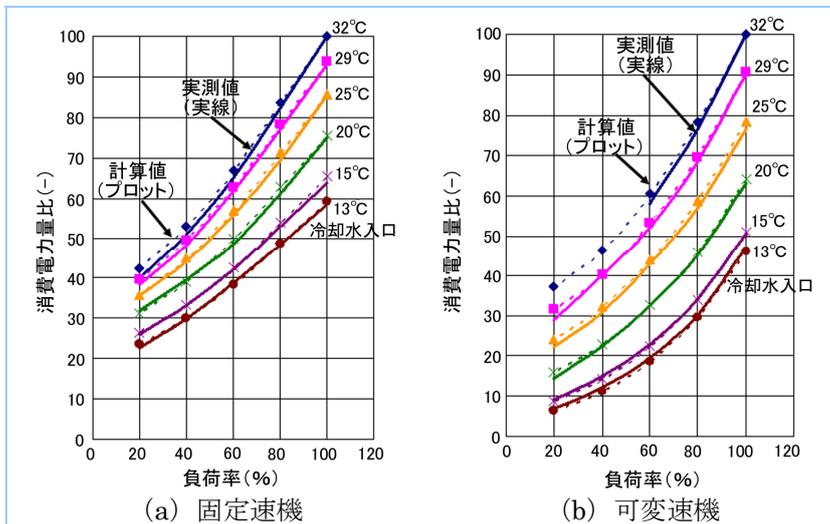


図3 部分負荷 COP の推定値と実測値の比較

本性能推定手法は、パソコンのように計算機容量が大きい冷凍機のマイコン盤にも実装が可能であり、冷凍機の操作盤の表示画面にリアルタイムで冷凍機が発揮可能な計画COPを表示し、実測値COPと比較することができる。また、これらの比較により、冷凍機の運用改善や調整の不具合などの早期発見が可能になると考えている。

3.2 冷水流量・冷却水流量検出器の標準装備

(1) 冷水・冷却水流量の検出

熱源システム全体の省エネのために、冷水(ブライン)・冷却水流量の変流量制御を行い冷

水／冷却水ポンプの消費電力を低減することが非常に有効であり広く行われるようになってきた。変流量制御を行う場合、電磁流量計を冷水・冷却水配管に設置し、電磁流量計から取り出した流量信号を指標としてインバータにより冷水／冷却水ポンプを駆動するモータの周波数制御を行う。しかし大容量熱源機であるターボ冷凍機の水配管口径は大きく、電磁流量計が非常に高価なものとなるため、変流量制御を行うことが難しく省エネの障害となっている。そこで、冷凍機に流量計測機能を代替するセンサを設置することで冷凍機から冷水・冷却水流量信号を出力し、ポンプの流量制御を安価に行うことができるようにした。また、ターボ冷凍機を最適に制御するため、冷水出口温度のPID制御を行う入口ベーンを除き、膨張弁、回転数、ホットガスバイパス弁では、冷水出入口温度、冷水流量と各部圧力、そして冷凍能力から算出される冷媒循環量に基づき制御を行っている。冷水変流量制御の場合、冷凍能力算定には冷水流量信号を用いることで、非常に精微に制御が可能となるため、高い省エネ性を実現できる。このセンサを、設備側の電磁流量計の代替としても使用することができる。さらに、変流量制御を行わない設備においても運転状態に影響がある冷水／冷却水流量を常時監視し、流量のズレやふらつきを検知して制御の調整ができるなどのロバスト性を有している。

(2) 冷水・冷却水断水検知

冷凍機は、蒸発器伝熱管内の凍結防止・凝縮器圧力の急激な上昇を防止するため、冷水・冷却水システムの双方に、断水検知装置を備える必要がある。従来は、仕様値流量での熱交換器における冷水（ブライン）／冷却水差圧を基準とし、一定割合の流量に相当する差圧値で断水検知を行っていたが、低流量への対応では微差圧を検知する装置が必要で、高価なものとなっていた。そこで、前述の流量計測機能を利用して仕様条件によらない広い範囲に対応した断水検知とし、熱源システムの制御範囲拡大を可能とした。流量計測と断水検知を同一センサで検出しているが、機器保護機能である断水検知に必要となる速い応答性と、流量計測に要求される精度を、それぞれの信号で独立して処理・演算することで両立させた。

4. 低環境負荷 新冷媒への対応

冷凍空調機器において、これまでオゾン層を破壊する恐れのある CFC 冷媒、HCFC 冷媒は HFC 冷媒へ代替されてきた。しかし、代替が進むにつれ地球温暖化係数(GWP:Global Warming Potential)の高い HFC 冷媒の地球温暖化への影響が懸念され始めた。ヨーロッパでは F ガス規制により新規カーエアコンへの HFC 冷媒の使用制限が 2011 年より開始されている。現行のターボ冷凍機で採用している HFC-134a も GWP が 1430⁽⁴⁾と高いため、ETI シリーズをベースとして低 GWP 冷媒の適用検討を行った。

4.1 代替冷媒の選定

低 GWP 冷媒については冷凍空調業界ではカーエアコンを中心に家庭用エアコンなども含めて適用の検討が進んでいる。しかし、入手性などから大容量、すなわち冷媒量充填の多いターボ冷凍機ではその適用検討が遅れているのが現状である。一方、SF₆の代替用として開発された冷媒 HFO-1234ze(E)は国内で製造されており、比較的入手が容易であるとともに、熱物性が HFC-134a に近いことから、ターボ冷凍機用の低 GWP 冷媒として有力な候補となるため、適用検討の対象冷媒とした。

4.2 材料の適合性試験結果

HFO-1234ze(E)単体との各種材料の適合性評価は既に報告されているが⁽⁵⁾、ターボ冷凍機内では、潤滑油と冷媒が混合した状態で存在する。よって、冷媒＋循環油環境下での材料の適合性(材料、冷媒、潤滑油とも劣化がないこと)の評価が必要である。材料の劣化が発生すると冷媒が大気へ漏洩し、運転に支障が出たり機器が破損する原因となりうる。前述の潤滑油適合評価において触媒として使用した鉄材、銅材、アルミニウム材については適合が確認されており、そのほかにターボ冷凍機にシール材や絶縁材として使用されている高分子材 29 部材について、

HFO-1234ze(E)+POE(ポリオールエステル)環境下でのオートクレーブ試験にて評価した。29部材の内、27部材については潤滑油の酸価上昇、色の濁り及び部材の質量低下は見られず、適合性を確認した。しかし、表3に示すとおり CR, ノンアスベストシートの2部材については、0.2mgKOH/g 以上の酸価上昇があり、濁りも多く劣化傾向にあり適合性が低いが、同じシール材であるHNBRは酸価上昇や濁りもなく、HNBR への材料変更は可能であることを確認した。

4.3 ドロップイン試験結果^{注(1)}

HFC-134a 用のターボ冷凍機であるETI-40系にHFO-1234ze(E)を封入して、運転・評価を実施した。図4に検証を行ったターボ冷凍機の外観を示す。HFO-1234ze(E)はHFC-134aに比べ比重が20%以上小さいため、圧縮機の流入冷媒ガス体積流量を同じとすると冷凍能力はHFC-134a対比71%となる。今回の試験においては冷媒としての特性をHFC-134aと比較して評価するため、圧縮機への流入冷媒ガス体積流量をHFC-134aの350USRt, 400USRt, 500USRt時に合わせた条件で運転を行うとともに、実運用での性能評価をする際に重要となる、部分負荷条件での計測も実施した。図5に定格性能の計測結果比較を、図6に部分負荷条件での試験結果比較を示す。

表3 R1234ze(E)と潤滑油混合条件における適合性試験結果

供試体	Oリング	ガスケット	Oリング
材質	CR (クロロプレンゴム)	ノンアスベストシート	HNBR (水素化ニトリルゴム)
色 (ASTM)	(L3.0) (×) 	(L5.0) (×) 	(L0.5) (○) 
質量変化率	107.5% (○)	106.5% (○)	104.1% (○)
全酸化 (mgKOH/g)	0.98 (×)	1.36 (×)	0.00 (○)



図4 R1234ze(E)ドロップイン検証機

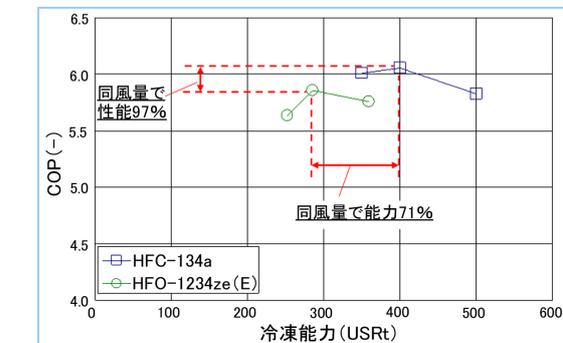


図5 定格性能計測結果

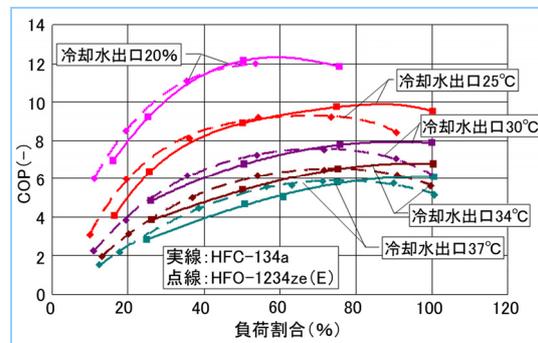


図6 部分負荷性能計測結果

定格能力におけるHFO-1234ze(E)のCOPは、HFC-134aの94%~97%であり、低負荷ほど性能が低下する傾向がある。これは、HFC-134aと比較するとHFO-1234ze(E)の冷媒ガスの粘性係数が高く、Re数の低下により圧縮機での摩擦損失が増加する影響と、冷凍能力に対する機械損失と電動機損失の相対的な割合が増加したためと考える。この点は、圧縮機の体格を合わせた専用設計(羽根車の大径化、翼形状の最適化など)によりHFC-134aと同等の性能が得られると考えている。一方、部分負荷でのCOPは、HFO-1234ze(E)の圧縮機吸込ガスの密度、潜熱の違いからHFC-134aと比較して負荷割合の小さい方へシフトするため、40%以下の低負荷でHFO-1234ze(E)のCOPはHFC-134aを上回る結果となった。

注(1) ターボ冷凍機へのHFO-1234ze(E)ドロップイン試験は平成22年度のNEDOの助成事業のもと実施したものである。

4.4 LCCP(Life Cycle Climate Potential)評価

4.3での部分負荷性能計測結果を元に、ライフサイクルでの環境負荷指標であるLCCPでの比較を行った(図7)^{注(2)}。図7より、間接影響(冷媒製造、運転での電力消費によるCO₂排出)はわず

かな性能低下の影響により HFO-1234ze(E)の方が約3%大きいですが、直接影響(稼動時・廃棄時漏えいによる CO₂ 排出)を含めると、GWP が低い HFO-1234ze(E)を用いることにより CO₂ 排出量を約 30%削減できる試算結果となった。

注(2) LCCP 検討条件. ①年間運転時間:4000h/年, ②機器寿命:15年, ③運転時消費電力:IPLV の負荷係数及び冷却水温度条件を用いて算出, ④CO₂ 排出係数:0.351kg/kWh(電気事業連合会 2009 年度実績値), ⑤冷媒製造時の CO₂ 排出量:23CO₂-kg/冷媒-kg(日本冷凍空調工業会での LCCP 試算係数), ⑥稼動時の漏洩率:7%/年, ⑦廃棄時の漏洩率:2%.

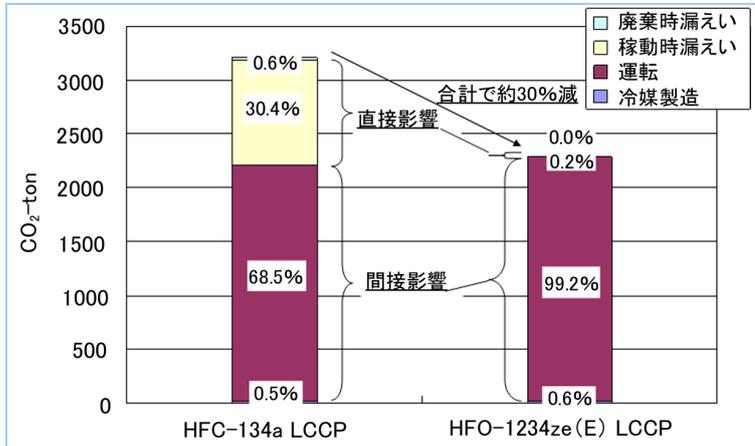


図7 HFC-134a と HFO-1234ze(E)の LCCP 比較結果

5. まとめ

ETI シリーズは市場ニーズを反映し、小容量・コンパクト化を実現した高性能ターボ冷凍機である。小容量にターゲットを絞った新しい設計思想とインバータ標準装備や既存の高性能化技術を組み合わせることで信頼性が高く、従来の産業用途や業務用途に加え、小規模の空調用途、小容量機を必要とするお客様に対して大幅な CO₂ 排出量削減や省エネルギーを実現できるシリーズである。本シリーズの展開として、市場ニーズを反映した高性能化・高機能化・環境負荷低減化を行い、いずれの点についても改善効果を確認した。さらに長期的な視点に立ち、低 GWP 冷媒での適用により、継続的な省エネの方向性を示した。

今後一層インバータターボ冷凍機は導入しやすく使いやすい機種として汎用化してくると思っている。ETIシリーズでの適用技術をもとに、市場の求める製品開発を今後も推進していく所存である。

参考文献

- (1) 上田憲治ほか, インバータ標準搭載高効率ターボ冷凍機“eco ターボ ETI シリーズ”, 三菱重工技報, Vol.46(2009)p.51~54
- (2) 横山明正ほか, 独立2系統最適制御技術を用いた可変速ターボ冷凍機, The International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2010, P.132-137
- (3) 上田憲治ほか, ターボ冷凍機部分負荷性能推定手法の開発(第1報)性能推定手法の概要と実用化, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, (2010-9), P.93-96
- (4) http://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/sroc/sroc_spmnts_fr.pdf(平成 23 年 12 月 9 日確認)
- (5) 小山繁ほか, 低 GWP 次世代冷媒候補物質 HFO-1234ze(E)の基本特性, J.HTSJ, Vol.49(2010)P.40-4