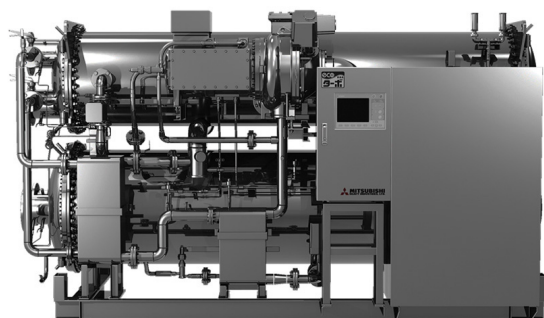


国内初 磁気軸受搭載高効率ターボ冷凍機 “ETI-MB シリーズ”

High Efficiency Centrifugal Chiller with Magnetic Bearings First-release in Japan
“ETI-MB series”



上田 憲治^{*1}
Kenji Ueda

長谷川 泰士^{*2}
Yasushi Hasegawa

八幡 直樹^{*3}
Naoki Yawata

横山 明正^{*3}
Akimasa Yokoyama

向井 洋介^{*4}
Yosuke Mukai

高効率化・高機能化が進み、製品としては成熟領域にあるターボ冷凍機において、新しい技術を採用し、従来製品と比較してさらに優れた新製品が必要となっている。これまで、高性能化やインバータの標準搭載による期間成績効率の向上、運転状況判断・サポート技術を盛り込んだ高機能化等に取り組んできたが、本報では、お客様のメンテナンス負荷低減を目的としたターボ冷凍機への磁気軸受適用技術に関する説明を行う。ターボ圧縮機への磁気軸受適用時の課題に対し、適切に対処することにより従来機対比で効率及びメンテナンス性を向上が図られ、国内初の商用機化を達成した。

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、高効率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。ターボ冷凍機は大容量のヒートポンプ機器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、製品開発が非常に重要である。そこで、通年運転条件で大幅なエネルギー消費量低減が見込めるインバータを標準装備するとともに、冷凍機にインバータを一体配置することで設置性にも配慮した製品が開発され、導入が進んでいる。また一方で、ターボ冷凍機を故障なく運転し、高性能を維持するためには、適切なメンテナンスが必要となるが、お客様からはメンテナンスに対する負担を低減する要望も強くなってきた。

本報では、最近の熱源機器の動向・ニーズを説明し、2013 年に開発を完了した新型の磁気軸受搭載高効率ターボ冷凍機“eco ターボ ETI-MB シリーズ”について紹介する。

2. ターボ冷凍機市場と製品コンセプト

ターボ冷凍機のここ数年の高性能化の考え方は、定格条件における性能ではなく、年間運転の大半を占める部分負荷条件や低冷却水温度条件における性能を考慮した期間効率へと変化している。当社でも、年間のエネルギー消費量を効果的に削減できるインバータによる可変速制御を用いたシリーズを 2003 年から製品化しており現在の AART-I シリーズに至っている。

*1 冷熱事業本部冷熱システム事業部大型冷凍機技術部 課長 工博

*2 冷熱事業本部冷熱システム事業部大型冷凍機技術部 技術士(機械部門)

*3 冷熱事業本部冷熱システム事業部大型冷凍機技術部

*4 技術統括本部高砂研究所

新型のターボ冷凍機においてもインバータを用いた可変速制御を標準で装備する必要があるとともに、CO₂ 排出量低減を目的とした吸収冷凍機の代替熱源としての入替需要の高まりもあり、一般建物への搬入性向上のため設置面積のコンパクト化、搬入重量の低減を要望されるようになった。また、大型産業用工場用途の減少、一般空調用途の増加に伴い、ターボ冷凍機の平均容量は2000年代半ばには700USRt 前後であったものが、2012年には約550USRt まで低下している。

これらの需要動向に対応するため、小容量域(～500USRt)において、インバータを一体型で標準装備した高性能でコンパクトかつ軽量をコンセプトとした ETI シリーズを2008年に発売開始するとともに、空調用途における需要の大半をカバーするため、シリーズ拡張も継続して行っている⁽¹⁾⁽²⁾。また、高性能化だけではなく、高効率運転指標導入による運転監視容易化や熱源総合制御装置適用によるシステム効率向上のように、より簡単に、高効率な運転を可能とする高機能化も進んでいる⁽³⁾。

以上のように、高効率化・高機能化が進み、製品としては成熟領域に達しているターボ冷凍機において、他社との優位性を確保するためには新たな特徴が必要となっている。ここでは、他社との差別化を図るとともに、お客様からのメンテナンス負担低減という要望に応えるため、上記の高性能・高機能を有する磁気軸受を搭載した高効率ターボ冷凍機を開発した。

3. 磁気軸受搭載時の課題と解決策

世界市場においては、磁気軸受を搭載した電動機出力 100kW クラスの圧縮機は既に供給されており、ターボ冷凍機用としても多く採用されている。しかし、磁気軸受を採用することによる性能や信頼性の面で次の課題があるため、性能要求が高い日本市場では採用実績がなかった。

- ・ 圧縮機部での隙間やシール隙間増加による圧縮機効率低下・リーク損失増加
- ・ 主電動機の高速回転化による風損増加
- ・ 電源喪失時の圧縮機、電動機の保護
- ・ 機器イニシャルコストの増加

これらの主課題を、1980年代より磁気軸受適用圧縮機の開発実績を持つ当社が(1)～(4)に記述の通り解決し、高性能と磁気軸受搭載を両立させるとともに、国内で初めて量産商用化を実現した。

(1) 圧縮機効率低下・リーク損失増加

磁気軸受は転がり軸受と比較すると、低損失であり高速回転化には適しているものの、軸受と支持されるシャフト間の隙間は相対的に大きくなる。また、停止時等のために備えられた補助用の軸受を有しており、シャフトとこの軸受は緊急停止動作や停止時以外は非接触である必要があるため、ある一定以上の隙間をラジアル方向にもアキシアル方向にも確保する必要がある。この軸受及びシャフト間の隙間が拡大することは、圧縮機部やシール部の隙間拡大を意味し、圧縮機効率低下やシール部のリーク損失増加によるサイクル効率低下が発生する。解決手段として、①～③の対策を行った(図1)。

- ① 磁気軸受の制御コントローラを高速演算化することにより過渡運転時の磁気軸受ラジアル、アキシアル制御幅を低減し、補助軸受との隙間を最小化した。
- ② 磁気軸受によるアキシアル方向制御を適用し、運転時の圧縮機隙間を小さくすることを可能にした。
- ③ シール部の材質組合せとして、回転側を金属材、静止側を樹脂材として初期隙間を小さくするとともに、回転側部品が運転とともにシール隙間方向に変形し、運転時シール隙間を小さくする構造を採用した。

以上の対策を行うことにより、転がり軸受を適用した圧縮機と同等以上の圧縮機性能を確保するとともに、シール漏れ量は同等以下に抑えることができた。

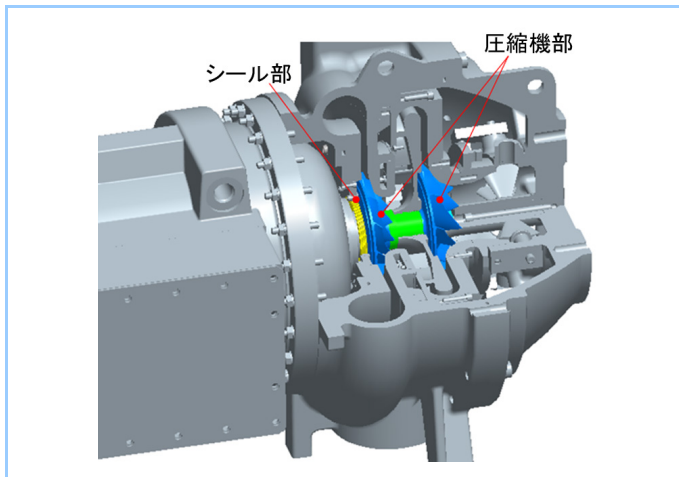


図1 圧縮機構造

(2) 主電動機の高速回転化による風損増加

磁気軸受採用とともに、磁気軸受の特性（剛性・減衰）から圧縮機部と電動機を直結としている。圧縮機と電動機を直結化することにより、主電動機回転数は商用回転数と比較すると大きく増加し、冷媒液のように密度が大きい媒体による冷却では主電動機部での風損が大きく増加してしまう。そこで、主電動機の回転子側は密度の小さい冷媒ガスを、一方、固定子側は冷却効果の大きい冷媒液を用いて冷却系統を分けることにより、電動機部での風損低下と効率的な冷却を両立させた。

(3) 電源喪失時の圧縮機・電動機の保護

冷凍機への供給電源が遮断され、磁気軸受が駆動できない状態を想定し、磁気軸受で浮上させない時にシャフトを支持する転がり軸受（補助ベアリング）を設置している。しかし、この軸受は転がり軸受であるため有限寿命であり、本軸受を使用した緊急停止（タッチダウン）の回数は限定されてしまう。そこで、冷凍機への供給電源が喪失した際に、補助ベアリングにタッチダウンすることなく停止できるよう、磁気軸受用のUPS（無停電電源装置）を標準で装備するとともに、UPSのバッテリーが正常な状態でのみ運転出来るようにすることで信頼性の高いシステムとし、実機での停電試験により信頼性が十分であることを確認した。

(4) 機器イニシャルコストの増加

磁気軸受搭載や電動機高速回転化、電源喪失時の保護等による機器イニシャルコストの増加は、圧縮機効率の低下を抑制し従来機以上の性能を確保することでランニングコストを低減するとともに、後述するメンテナンスコストの抑制により相殺できる目途を得た。

4. ETI-40MB, 50MBの詳細仕様

4.1 高性能仕様

前項で示した磁気軸受搭載時の性能面における課題への対策と、従来の高効率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採用することで、高性能磁気軸受搭載ターボ冷凍機を実現した。以下に代表的な要素を示す。

- ・ 2段圧縮1段膨張サブクールサイクルの採用
- ・ 最新の高効率翼形状の採用
- ・ 高精度機械加工羽根車の採用
- ・ 1段＋2段ベーン制御機構、インバータによる圧縮機可変速制御を含む6要素数値演算制御による負荷追従制御と冷却水温度追従制御
- ・ 熱交換器への高効率伝熱管の採用と管群の最適配置

上記の高性能化技術を適用することにより、定格 COP^{注1)}は同容量インバータ機では世界最高レベルである6.3を達成した(表1)。また、実質的な年間消費電力の基準となる IPLV^{注2)}は9.0と非常に高い性能を有している。さらに、ETI-40MB, 50MB(図2)に採用した圧縮機をパラレル仕様とすることで最大 1000USRt まで対応できるようなり、従来機と合わせて 1000USRt までを 400V 級電源のインバータを標準装備したシリーズでカバーできるようになった。

注1) Coefficient of Performance(成績係数)、この数値が大きいほど、性能が良いことを示す

注2) Integrated Part Load Value(期間成績係数)、JIS B 8621(2011)の算出基準による

表1 ETI-40MB, 50MB と従来機の比較(仕様値表)

型式	ETI-40MB (開発機)	ETI-50MB (開発機)	ETI-40 (従来機)	ETI-50 (従来機)
冷凍能力	400USRt	500USRt	400USRt	500USRt
	1407kW	1758kW	1407kW	1758kW
冷水温度	12℃ in/7℃ out			
冷水流量	241.3m³/h	297.0m³/h	241.3m³/h	297.0m³/h
冷却水温度	32℃in/37℃Out			
冷却水流量	280.9m³/h	354.2m³/h	282.6m³/h	353.6m³/h
消費電力	223 kW	297 kW	228 kW	288 kW
法定冷凍トン	171.7	228.3	168.3	213.3
L×W×H	3.9m×1.8m×2.3m		4.4m×1.9m×2.2m	
機器質量	5.5t		7.4t	
冷媒	HFC-134a			
COP	6.31	5.92	6.14	6.08
IPLV	9.0	9.2	7.9	8.6

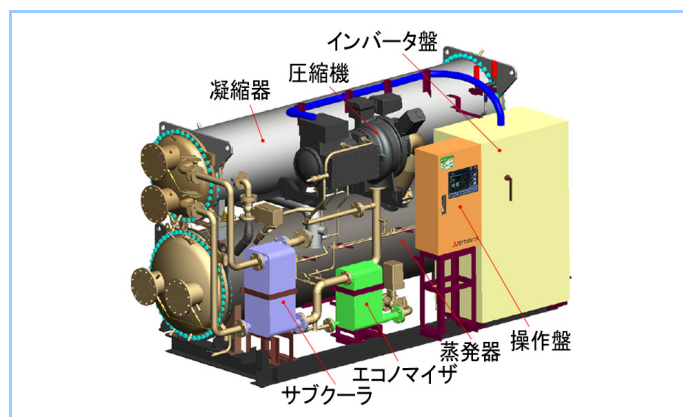


図2 ETI-40MB, 50MB 外観

4.2 コンパクト・軽量設計

磁気軸受搭載機に対しても、ETI シリーズのコンパクト・軽量設計の思想を踏襲し、設置導入性について配慮した。主な設計改良項目としては、次の通りである。

- ・ 圧縮機と電動機直結化、電動機高速回転化による圧縮機ユニット小型化
- ・ 潤滑油フリーによる、油タンク、潤滑油配管の削除
- ・ 熱交換器の最適設計による小型化
- ・ 各構成要素の最適配置(蒸発器、凝縮器の縦積構成)

以上の最適設計により、ETI-40MB, 50MB の設置面積は当社同容量現行機と比較して約 15%、機器質量も約 20%低減することができ、既設代替機としてさらに導入しやすくなった。

4.3 省メンテナンス性

磁気軸受を搭載することにより、従来機と比較して定期的な潤滑油及び潤滑系統のフィルタ交換が不要となり、日常運転における潤滑系統管理(油面や潤滑油温度)も省力化することができた。また、軸受として非接触の磁気軸受を採用し、非常用の補助ベアリングも UPS によりタッチダウンを原則回避することが可能であるため、オーバーホールによる機械的な駆動部品の交換は

不要となった。つまり、オーバーホール周期は機械的駆動部品の寿命ではなく、Oリングやガスケット等のシール部品の寿命により決定されることになり、潤滑油の影響が無くなることにより延びたシール材寿命も相まってオーバーホール周期を従来機よりも長くすることが可能となった。これにより、ライフサイクルでの標準的なメンテナンスコストを低減し(図3)、導入時に上昇するコストを相殺できる目途を得た。

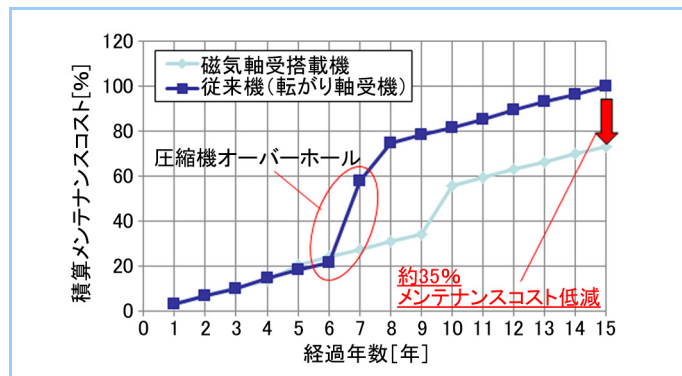


図3 従来機とのメンテナンスコスト比較

5. まとめ

ETI-MBシリーズは、従来のETIシリーズをベースとし、メンテナンス負荷低減を目的とした磁気軸受搭載機として開発した。磁気軸受搭載時の課題に適切に対処するとともに、実績のある高性能化技術を適用することにより、同容量及び磁気軸受搭載機としては世界最高レベルの性能を達成した。また、メンテナンス項目低減やメンテナンス周期の延長による、メンテナンス負荷低減も可能となった。さらに、磁気軸受の制御性向上やUPSの標準装備により、サージング^{注3)}やトリップ停止等の急激な負荷変動を伴う運転状態や停電時においても圧縮機損傷を回避できる信頼性の高いシステムを構築することができた。

今回の磁気軸受搭載ターボ冷凍機の開発を足掛かりとして、磁気軸受搭載機の対応容量を拡大していく予定であり、さらに汎用的なものとして導入が進むものとする。今後もお客様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。

注3) 圧縮機部で圧縮ガスが流れ方向に激しく振動、もしくは逆流する事象であり、圧縮機に対して急激な負荷変動が発生する

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 No.1 (2009), P.51-54
- (2) 上田憲治ほか、eco ターボ冷凍機 ETI 新シリーズへの展開，三菱重工技報 Vol.49 No.1 (2012), P.58-63
- (3) 長谷川泰士ほか、大型ターボ冷凍機の新提案-さらなる高機能化・高性能化-，三菱重工技報 Vol.48 No.2 (2011), P.36-41