大型磁気浮上ターボ分子ポンプの 取付方向自在性の実現*

白石 成之**・山田 仁**・外山 勝久**
川田 則幸**・森井 茂樹**

(受付1989年11月29日, 掲載決定1990年2月3日)

Realization of Mounting Big Size Turbomolecular Pump of Active Magnetic Bearing in Any Orientation

Shigeyuki SHIRAISHI**, Jin YAMADA**, Katsuhisa TOYAMA**,
Noriyuki KAWADA** and Shigeki MORII**

** (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 4-6-22, Kan-on-shinmachi, Nishi-ku, Hiroshima)

(Received November 29, 1989, Accepted February 3, 1990)

1. はじめに

従来, 取付方向自在性を実現するために, 制御磁気軸受を採用したターボ分子ポンプ (以下 TMP) が市販されていたが, 排気速度1,500 l/s クラスの大型機では取付方向自在のものはなかった。当社では, 広域対応 FT-W シリーズ機 (FT-300W, FT-500W, FT-1500W) の全機種において取付方向自在性を実現したので報告する。

2. FT-W シリーズ機の概要

Fig. 1 に FT-W シリーズ機の外観, Fig. 2 に構造を示す。回転体はラジアル磁気軸受及びスラスト磁気軸受により完全に浮上しており, 完全オイルフリー・メンテナンスフリーの TMP となっている。Table 1 に仕様一覧を示す。FT-W シリーズ機の特徴は広い圧力範囲での使用を可能としている点で, 最大500 Pa の使用に耐える一方, 到達圧力は 10^{-7} Pa を得ることができる。全機種とも5軸制御磁気軸受を採用し, 取付姿勢は大型の FT-1500W でも自由である。

Fig. 1 Mitsubishi turbomolecular pump for wide vacuum range, FT-W series.

Fig. 2 Cross-section of TMP FT-W series.

* 平成元年10月25日 第30回真空に関する連合講演会において講演 (25Aa-7)

** 三菱重工業株式会社 (広島市西区観音新町4-6-22)

Table 1 Standard specification of TMP FT-W series

Pump Model			FT-300W	FT-500W	FT-1500W
Pump	Inlet Flange		JIS 100/ICF152	JIS 150/ICF203	JIS 250/ICF305
	Foreline Flange		NW25	NW40	VF50
	Pumping Speed (l/s) *PNEUROP Standards	N ₂	300	500	1,300
		H ₂	250	400	1,100
	Compression Ratio	N ₂	>10 ⁷	>10 ⁷	>10 ⁷
		H ₂	10 ⁴	10 ⁴	10 ⁴
	Allowable Inlet Pressure (Pa)		500	500	133
	Ultimate Pressure (Pa)		10 ⁻⁷	10 ⁻⁷	10 ⁻⁷
	Rotation Speed (rpm)		36,000	27,000	24,000
	Start-up Time (min)		5	7	18
	Bearing Type		Totally Active Magnetic Bearings		
	Cooling		Water		
	Recommended Backing Pump (l/m)		200	300	700
	Weight (kg)		ca.40	ca.70	ca.130
	Mounting		Any Orientation		
Control Unit	Power Requirements	Voltage (V)	200/220	200/220	200/220
		Frequency (Hz)	50/60	50/60	50/60
		Phase	Single		
	Power Consumption (kVA)		0.9	1.2	1.2
	Weight (kg)		ca.48	ca.48	ca.48

3. 電磁石と損失

制御磁気軸受の損失は、通常の機械式軸受と比べ極めて小さいが、真空中を非接触で回転する TMP では問題となる。すなわち、周囲流体との熱伝導・熱伝達による冷却手段が存在しないため、回転体に熱の蓄積による温度上昇が生ずる。冷却手段は放射冷却であり、その冷却効果は一般に非常に小さいので、放射冷却に見合った軸受損失にまで低減する必要がある。

電磁石の損失 W は K_e , K_h を定数として次式で示される。

$$W = \frac{K_e}{\rho} B_m^2 d^2 f^2 + K_h B_m^{1.6-2} f \quad (1)$$

但し、 ρ ：比抵抗

B_m ：最大磁束密度

d ：けい素鋼板厚さ

f ：周波数

Fig. 3 Principle of generation of eddy current loss.

右辺第1項はうず電流損、第2項はヒステリシス損と呼ばれる。Fig. 3にうず電流損の発生原理を示す。電磁石により作られる磁界の中を回転体が回転すると、フレミングの法則によりうず電流が流れ、この電流により損失が発生する。

Fig. 4 Radial electromagnet set-up and their force, with TMP in horizontal position.

Fig. 5 Typical experimental results of FFT analysis for vibration level of FT-1500W in horizontal position.

Fig. 3は、TMPが縦置に配置された場合のラジアル軸受におけるうず電流の発生状況を示しているが、TMPが横置に配置された場合は、回転体の自重を支えるための磁界が付加され、そのために損失が増大し、回転体の温度も上昇する。大型機ほど、この傾向が顕著であり従来大型のもので横置運転できるものがなかった。

なお、スラスト磁気軸受では、ラジアル磁気軸受の場合に生じていたN・S極の磁界変化が、回転体の回転に対して生じないので、損失は原理的に発生しない¹⁾。

TMPを横置に取付けた場合、ラジアル電磁石はその位相により、Fig. 4に示す2つの配置をとる。 (a)に示す配置は、電磁石の吸引力が垂直方向を向く場合であり、(b)に示す配置は45度方向を向く配置である。熱的には、(b)の方が厳しい。すなわち、吸引力の和は(a)の場合の $\sqrt{2}$ 倍であり、熱の発生も大きくなる。一方、回転安定性を考える場合、(a)が厳しい。すなわち、1個の電磁石で回転体の全重量を支える必要があるからである。従って、TMPの横置運転を確認する場合、両方の条件での連続使用に耐えるかどうかを確認する必要がある。

Fig. 6 Results of temperature variation of FT-500W in horizontal position; Running conditions are no cooling and no gas load.

Fig. 7 Relation between bearing loss and TMP mounting orientation; Loss and weight are normalized by the figures of FT-1500W after improvement.

4. 実験結果

Fig. 5にFT-1500Wの横置運転中の軸振動周波数分析結果を示す。一番大きなピークは回転数成分(400 Hz)で約 $1 \mu\text{m}^{\text{O-P}}$ という極めて小さな振動レベルで回転していることが分かる。

Fig. 6にFT-500Wの横置運転中の各部温度計測結果を示す。運転条件は、ガス負荷はないが無冷却の条件であり、これは、熱的に最も厳しい条件の1つである。静止側モータ温度に注目すると、一度定格達成時に静定した温度が、軸受損失による回転体温度上昇と共に徐々に上昇していく様子が観察できる。回転体と静止体の温度差が一定レベルに達し、放射冷却が軸受損失と釣り合った時点で温度は静定する。この条件では、約9時間の静定時間を要している。

Fig. 7に、取付姿勢と軸受損失の関係を示す。ここでは、FT-1500W横置45度支持条件の場合の数値で無次元化した。回転体重量の増大とともに損失が増大していること、並びに、縦置より横置にTMPを取付た場合の

Fig. 8 Calculated results of speed dependence of bearing loss of FT-1500W in horizontal position; Bearing loss is also normalized.

方が損失は大きいことが分かる。同じ横置でも、ラジアル電磁石の配置が、垂直支持より45度支持の場合の方が損失は大きい。なお、損失 W の測定にあたっては、次式を用いた。

$$W = I_p \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (2)$$

但し、 $\omega = 2\pi N$

I_p : 慣性モーメント

N : 回転数

FT-1500Wは、初期のプロトタイプでは横置運転時に大きな損失を有していたが、損失が低減され製品化に成功している。

Fig. 8にFT-1500Wの損失を、ヒステリシス損とわず電流損に分離した計算結果を示す。損失は、低減後の合計損失により無次元化してある。回転数に比例するヒステリシス損と、同じく2乗に比例するわず電流損が示されているが、特にわず電流損が低減されたことが分かる。

Fig. 9 FT-1500W TMP running in horizontal position

わず電流損の低減には、主として次の3つの改良がえられた。

- (1) 磁束密度を低減し、磁束の飽和領域での使用を避ける。
- (2) 磁束の流れを円滑にする。
- (3) もれ磁束を少なくする。

以上の改良の結果、FT-1500Wは横置運転が可能となった。

Fig. 9に、FT-1500Wの横置連続運転試験の状況を示す。

4. おわりに

FT-Wシリーズ機では、取付方向自在性のほか、信頼性の高いタフな軸系の設計を実施し、耐負荷変動性、耐震性、耐大気突入性、耐ノイズ性、耐食性に優れていることを確認している²⁾。

〔文 献〕

- 1) 松村文夫, 尾崎行男: 電気学会マグネティクス研究会資料 MAG-87-149
- 2) 板井計介, 山田 仁, 片山圭一, 森井茂樹, 川田則幸: 三菱重工技報 Vol. 26 No. 5 (1989) 430