

高背圧・大流量ターボ分子ポンプの開発

Development of Turbo Molecular Pump (TMP) for High Back Pressure and High Throughput

東尾 篤史 平井 悦郎
安井 豊明 岡村 知明



広い圧力領域で作動可能かつ連続排気が可能な真空ポンプであるターボ分子ポンプ (TMP) において、省エネルギー化のために、大流量域及び高背圧域での更なる排気性能向上を実現することが望まれている。本報では、新型 TMP, FT-800W における高背圧機能の特徴を示す。あわせて高背圧等により発生する反応生成物の付着を防止するために開発した内部昇温システム及び大流量排気時に発生するロータクリーブ破壊対策のために開発したロータ特殊表面処理について概説する。また、TMP 高背圧化のために使用した性能予測技術として、三次元 DSMC 法解析について紹介する。

1. ま え が き

半導体機器の高集積化及び Si ウェハの大径化が進むにつれ、中真空領域にて、従来より大流量の排気が可能な真空ポンプへのニーズが高まっている。図 1 に、各種真空ポンプの作動領域比較を示す⁽¹⁾。ターボ分子ポンプ (以下 TMP と称す) は、広い圧力領域での連続排気が可能であること、及び磁気軸受を適用した TMP については油の逆流のないクリーンな真空が得られることから、電子顕微鏡・スパッタリング装置等の超高真空分野及び半導体製造装置用の中真空分野等に広く適用されている真空ポンプの一種である⁽²⁾。

TMP の動翼を図 2 に示す。動翼は軸と一体となり、5 軸制御型磁気軸受により浮上状態にて回転する。磁気軸受では、ロータ位置をセンサにより検出し、位置補正のために軸受電磁石電流に PID 制御を実施することが必要である。従来は本

制御をアナログ回路で行っていた。しかし近年、DSP (デジタルシグナルプロセッサ) の高速化、廉価化が進み、この演算処理をデジタルコントローラで対応することが可能となった。本方式では、(1) 一台のコントローラにて異なる機種種の運転が可能 (カップリングフリー機能) になり、さらに (2) TMP 運転条件の遠隔操作が可能となった⁽²⁾。デジタルコントロール機能を含むパワーサプライは他社に先駆け平成 11 年から市場投入を開始している。

TMP の排気要素としては、動翼・静翼の組合せからなる軸流部と、ねじ溝部の組合せからなる構造が一般的である。本組合せ型 TMP は複合型 TMP と称し、軸流部だけの TMP に比べ、中真空領域での排気性能に優れている。この動翼の周方向速度は一般に 300m/s 以上と、アルゴン・窒素などのガスの音速とほぼ同等の速度である。このため、遠心力によって生じる応力の低減、及びロータ破壊時の衝撃力低減のた

排気機構による分類	圧力 (Pa)		極・超高真空	高真空	中真空	低真空		
	真空ポンプ		10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}	10^2	10^4
気体輸送式	容積輸送式	油回転ポンプ						
		ルーツポンプ						
		多段ルーツポンプ						
		ピストンポンプ						
		スクリーポンプ						
		クローポンプ						
		スクロールポンプ						
気体輸送式	運動量輸送式	スチームエゼクターポンプ						
		油拡散ポンプ						
		ターボ分子ポンプ						
		モレキュラードラグポンプ						
気体ため込み式		Getterポンプ						
		スパッタイオンポンプ						
		クライオポンプ						
		ソーブションポンプ						

図 1 各種真空ポンプの比較⁽¹⁾ TMPは、他の真空ポンプと比べ、作動圧力範囲が広い。

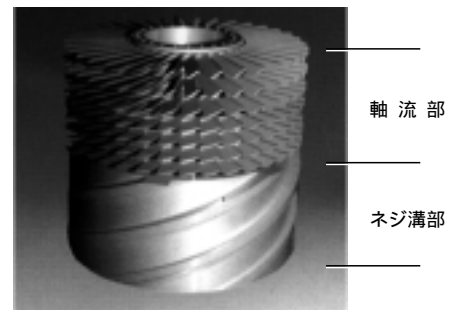


図 2 ターボ分子ポンプ構造 磁気軸受式ターボ分子ポンプの構造を示す。

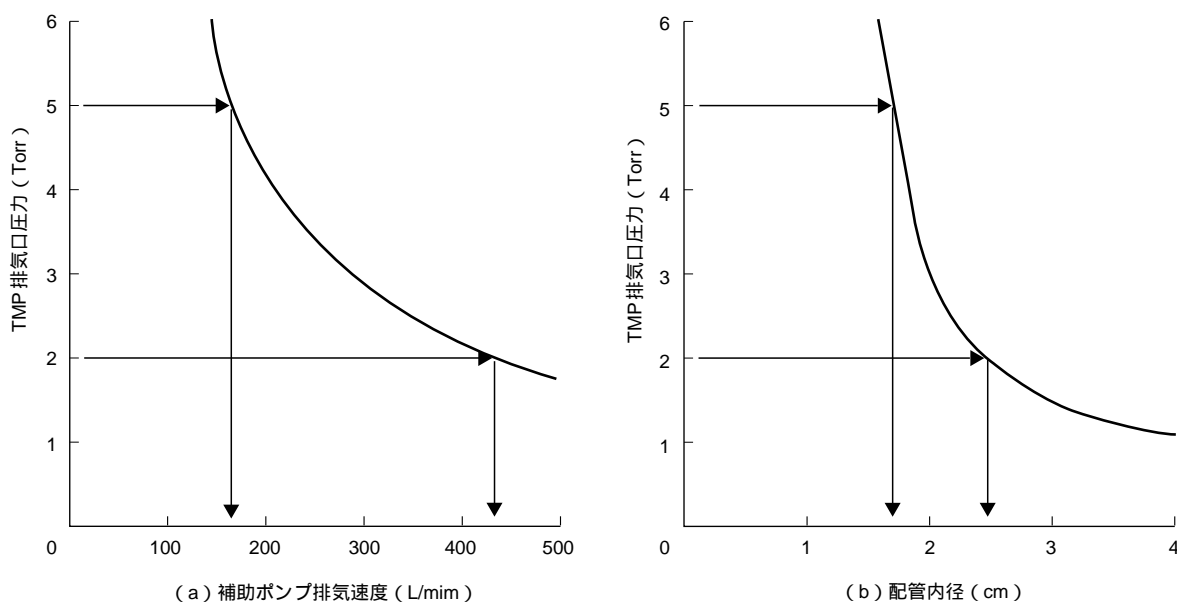


図3 高背圧TMPによる排気系のコンパクト化
TMP排気口圧力を高くした場合、補助ポンプ及び排気系配管系がコンパクト化可能である。

めに、軽量のAl合金材料をロータ材料として使用する。一方近年シリコンウェハーの大径化が進み、300mmサイズが主流となっている。これに伴うプロセスガス流量増大に伴い、TMP大流量排気時の性能向上が要求されている。あわせて、排気系全体の省エネルギー化のために、TMP補助ポンプ(ドライポンプ)の小型化が要求されており、このためにTMPの高背圧化が必要となっている。

本報では、当社新型TMP、FT-800Wの特徴である高背圧機能による省エネルギー効果について示すと共に、TMP大流量・高背圧化のために必要な内部昇温システム・特殊表面処理についても概説する。

2. 排気性能の特徴

TMPは単独では大気圧までの排気は困難であり、一般に排気側に低真空域から大気圧まで排気する補助ポンプを使用する。従来は、真空排気系に対して構成する機器ごとのコストダウンが要求されていたが、近年、排気系システム全体としてのコストダウン・省エネルギー化が要求されるようになってきている。半導体製造装置のように補助ポンプとして高価かつエネルギー消費量の多いドライポンプを使用するシステムにおいては、従来に比べ小さな補助ポンプを使用しても排気性能が維持できるTMPが要求される。すなわち、TMPにおいては、補助ポンプ小型化に伴い排気側圧力(背圧)が増大しても排気性能が維持されることが要求されている。

図3に、性能維持可能な背圧が向上した場合の補助ポンプのコンパクト化について示す。同一流量を排気した場合、性能維持可能な背圧が高ければ、排気速度の小さな補助ポンプを使用することができ、またTMPと補助ポンプとを細い配管で接続することもできる。よって排気系全体の初期コスト低減が図れると共に、補助ポンプの容量低減による省エネルギー化を図ることが可能となる。

本章では、当社新型TMPであるFT-800Wの性能の特徴、

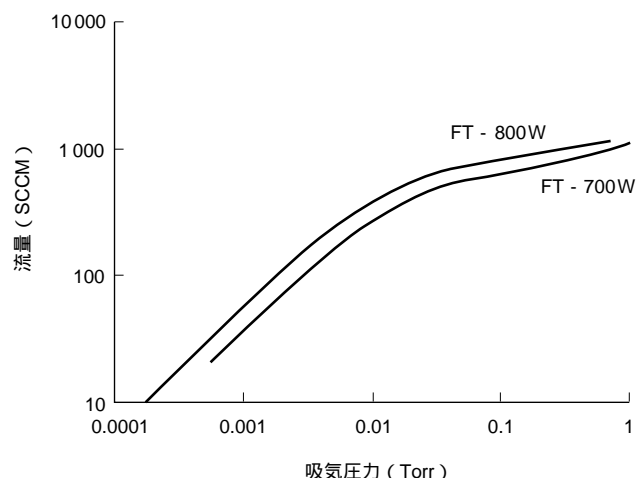


図4 FT-800W 排気性能 FT-800W軸流部排気性能をFT-700Wとあわせて示す。すべての圧力にて性能向上している。

特に高背圧性能の向上について示す。

2.1 排気性能

図4に、当社新機種であるFT-800Wの排気性能特性をほぼ同サイズの当社従来機種FT-700Wと比較して示す。本図で横軸は吸気口圧力、縦軸は標準状態(0, 1気圧)でのガス流量を表す。ガスは窒素である。本体寸法が同等にもかかわらず、FT-800Wでは、全吸気口圧力領域にて排気流量が増大している。これはロータ振動制御技術の向上に伴う、ロータ周りの小型化等による、回転数増大、及び軸流部・ねじ溝部の体積増大・形状最適化等による。

2.2 背圧性能

TMP高背圧化のためには、ねじ溝性能の改良が必要である。すなわち、軸流部から見た場合のTMPの補助排気部であるねじ溝部の排気性能の向上(圧縮比の向上)が必要である。そのためには、ねじ溝排気機構の性能予測技術の向上が必要となる。

ねじ溝部の排気性能解析には、Hodgsonらのコンダクタンス組合せ解析⁽³⁾、神吉らのBGK方程式とStokes方程式とを組み合わせた解析⁽⁴⁾⁽⁵⁾、澤田らのスリップ流解析⁽⁶⁾等多数の報告がある。これらのいずれもが円筒状のねじ溝を平面状に展開し、ロータ回転に起因するCouette流による排気と軸方向圧力差に起因するPoiseuille流による漏洩のバランスにより排気性能が決定されるという理論に基づく解析手法である。

近年、計算機の高性能化及び並列計算手法の普及により、従来計算負荷過大のため困難であったDSMC法(Direct Simulation Monte Carlo Method)⁽⁷⁾による希薄流動解析が平易に実施可能となってきている。DSMC法では、(1)遠心力の影響を考慮した解析が可能、(2)分子流域～中間流域までを同一の方程式にて解析可能、という特徴がある。ねじ溝を用いたポンプの排気性能解析へのDSMC法の適用例としては、南部らの解析事例がある⁽⁸⁾ものの、文献(3)～(6)と同様にねじ溝を平面状に展開した形状にて解析実施しており、遠心力等の影響を考慮できていない。

そこで当社では、遠心力等の影響を考慮した、三次元DSMC法に基づく解析コードを開発した。遠心力等の影響は、Birdらの二次元軸対象流れのDSMC法解析手法⁽⁷⁾を三次元に拡張して実施した。

当社にて試作した、ねじ条数の異なる2種類のねじ溝部の排気速度について、試験結果及び解析結果を図5に示す。ここで、排気速度とは、ねじ溝の吸入体積流量のことである。試作した2種類のねじ溝について、試験結果では新型ねじ溝の排気速度のほうが大きい。三次元DSMC法による解析でも、新型ねじ溝の排気速度計算結果のほうが大きく、また定量的にも排気速度計算結果と試験結果はよく一致している。

FT-800Wにおいては、背圧が大きくなっても排気性能が維持されるよう、上記解析による形状最適化を実施し、ねじ溝形状を改良した。図6に、FT-700WとFT-800Wにおいて、一定流量流した場合の排気口圧力と吸気口圧力の関係を示

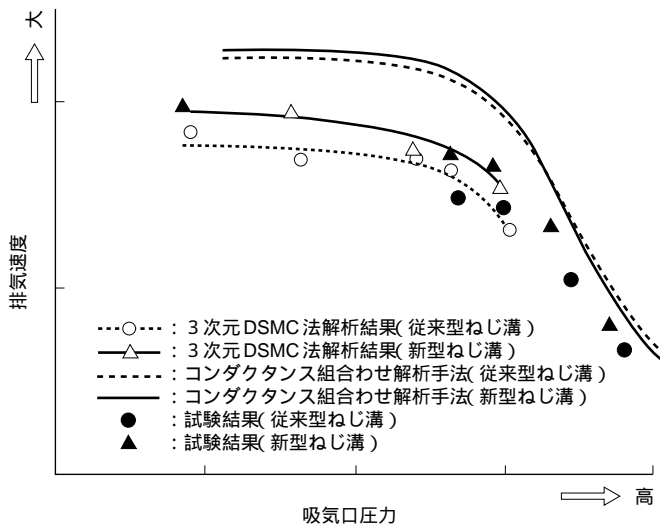


図5 ねじ溝部排気性能試験結果 試作したねじ溝ポンプの排気性能試験結果を三次元DSMC法による解析結果とあわせて示す。解析結果は試験結果とよく一致している。

す。FT-700Wでは、性能が維持される排気口圧力は約2Torrであったが、FT-800Wでは排気口圧力約5Torrまで性能維持される。すなわちFT-800Wを使用することによって、補助ポンプの小型化が図れ、排気システム全体の省エネルギー化が図れることになる。

3. 内部昇温システム

TMPをAIエッチングプロセス等の排気系に使用する場合、圧力の高いねじ溝部付近では、 $AlCl_3$ が固化し、付着物が溜まりやすい。これは $AlCl_3$ の析出温度が常温に近いためである。よって背圧が高い状態で $AlCl_3$ を排気する場合には、特に排気口付近の温度を析出温度以上に維持する必要がある。

しかし、TMP全体を析出温度以上に加熱した場合、4章に述べるように、動翼温度が上昇するため、排気可能流量・排気口圧力が減少する。またTMP全体を加熱するため、必要加熱量も大きくなる。

そこで当社では、圧力が高く加熱が必要な排気口付近のみを加熱可能とする内部昇温システムを開発した。本システムの構成を図7に示す。本システムでは、ねじ溝部周囲に放熱板を配し、TMP外部に設置したヒータにより放熱板のみを

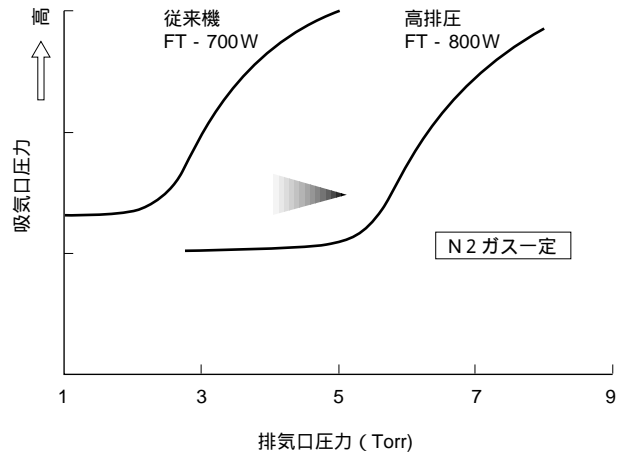


図6 FT-800W 背圧特性 FT-800Wにおいて、窒素ガスを流した場合の排気口圧力と吸気口圧力の関係を示す。FT-800Wでは排気口圧力5Torrまで性能維持可能である。

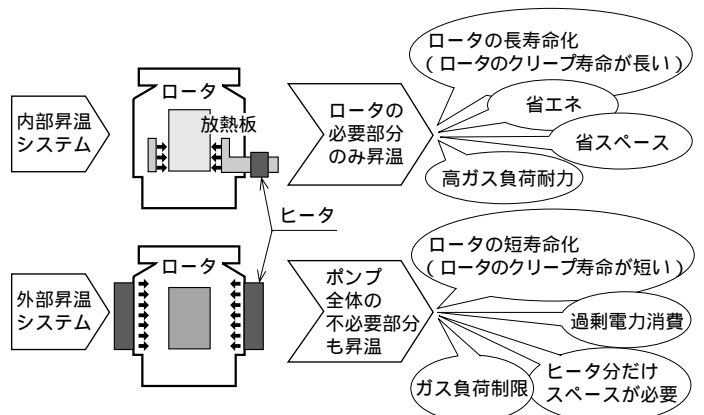
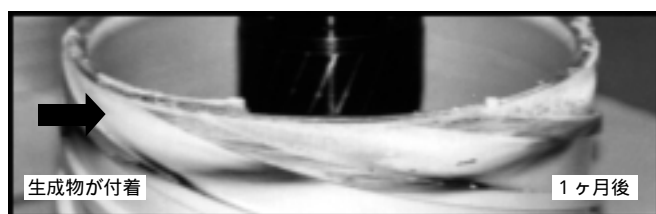
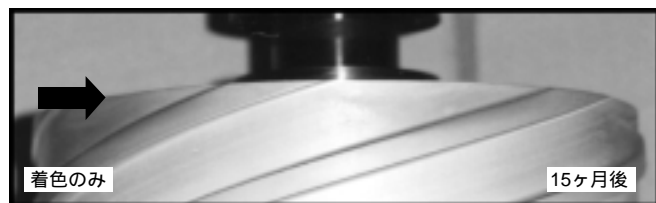


図7 内部昇温システムの概要 内部昇温システムの概要及び特徴を示す。



(a) 昇温なし



(b) 内部昇温を適用

図8 内部昇温システムの効果 内部昇温システム使用による、AIエッチングプロセス適用時の反応生成物付着量低減効果を示す。

加熱することにより、少ない消費電力で効率よくねじ溝部のみを加熱し、 $AlCl_3$ 等の反応生成物の付着を防止することが可能となる。

図8に、内部昇温システムの効果を示す。AIエッチングプロセスにおいて内部昇温未実施の場合、運転開始から1ヵ月後には反応生成物がねじ溝部に付着する。反応生成物が付着した場合、ロータのアンバランスによる異常振動等が生じ、反応生成物が腐食性の高い物質の場合には、最悪の場合ロータが破壊する。しかし内部昇温使用時には、運転開始から15ヵ月後にもほとんど反応生成物は付着していない。

4. 特殊表面処理技術

1章に述べたようにTMPでは動翼を高速回転するために、動翼材料として軽量のAl合金材料を使用する。定格回転時の遠心応力に対し、Al合金材料のクリープ破壊寿命10年以上とするためには、動翼温度を一定温度以下とする必要がある。

TMPにおいて大流量排気を実施すると、圧力上昇に伴い、動翼と静翼間の摩擦発熱が増大するため、一般にTMP本体を水冷して使用する。

ところでAl合金材料は塩素系のガスに対し腐食されやすいため動翼表面に反射率の低いNiめっきが施されることが多い。一方動翼は真空中で回転しているため、放射伝熱による動翼から静翼への伝熱促進による動翼温度の低減を図る必要がある。

そこで当社では、Niめっき後の動翼表面に密着性に優れた特殊表面処理を実施することにより、放射率を向上し、動翼温度低減を図っている。図9に特殊表面処理による動翼温度低減効果を示す。動翼温度は排気ガス流量が増大するに従い上昇する。特殊表面処理実施により、Niめっきのみの場合に比べ、連続排気可能流量は約1.5倍に増大可能となる。

5. ま と め

新型TMPの背圧性能の向上結果、及び排気系システム全

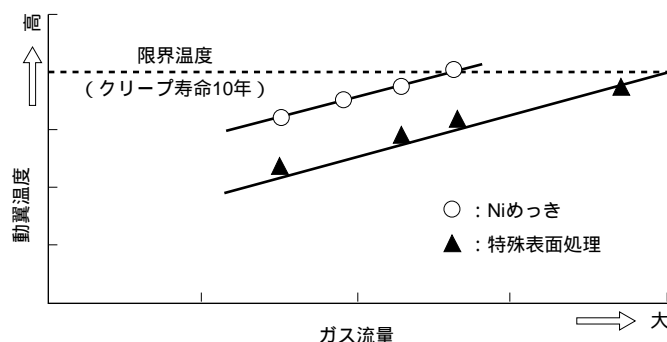


図9 特殊表面処理の効果 特殊表面処理による運転可能ガス流量の増大効果を示す。

体のコストダウン・省エネルギー化の可能性を示した。また、高背圧機能開発のために実施した、三次元DSMC法によるTMP排気性能解析への適用例について示した。あわせて高背圧等により発生する反応生成物付着防止のために開発した内部昇温システム及び大流量排気時に発生するロータクリープ破壊対策のために開発したロータ特殊表面処理について概説した。

TMPにおいては、今後も更なる大流量・高背圧化が求められるていく。特に高背圧化技術は、更に進めば、今後TMPを含むドライかつクリーンな排気系の高背圧化により、排気ガスをリサイクルすることにより省資源化を図ることが可能となる等、TMPの使用方法を拡大する技術として注目されるものである。

参 考 文 献

- (1) 日本機械学会編，原子・分子の流れ，共立出版(株)，(1996) p.149
- (2) 水津雅晴，真空ジャーナル，No.80 (2002) p.34 ~ 37
- (3) J. N. Hodgson, Designing a Molecular Pump as a Seal-To-Space, an ASME publication (1965) p.1 ~ 18
- (4) 神吉達夫ほか，移動壁を有する矩形流路内の希薄気体の流れ，化学工学論文集，No.18-6 (1992) p.911 ~ 918
- (5) 神吉達夫ほか，ねじ溝分子ポンプの排気特性，化学工学論文集，No.19-1 (1993) p.62 ~ 68
- (6) 沢田雅ほか，ねじ溝粘性真空ポンプ，日本機械学会論文集，No.85-74B (1985) p.3381 ~ 3385
- (7) G. A. Bird, Molecular Gas Dynamics, Clarendon Press, Oxford (1976)
- (8) 南部健一ほか，ターボ分子ポンプねじ溝の排気性能，日本機械学会論文集B，57巻 533号 (1991) p.172 ~ 177



東尾篤史
技術本部
広島研究所
機械プラント研究推進室



平井悦郎
技術本部
広島研究所
機械プラント研究推進室長 工博



安井豊明
技術本部
広島研究所
物質工学研究室



岡村知明
広島製作所
ターボ機械技術部
原子力設計課