

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2005-42709

(P2005-42709A)

(43) 公開日 平成17年2月17日(2005.2.17)

(51) Int.C1.⁷

FO4D 19/04

FO4D 29/04

F 1

FO4D 19/04

FO4D 19/04

FO4D 29/04

テーマコード(参考)

3H022

3H031

M

審査請求 未請求 請求項の数 25 O L (全 41 頁)

(21) 出願番号 特願2004-173085 (P2004-173085)
 (22) 出願日 平成16年6月10日 (2004.6.10)
 (31) 優先権主張番号 特願2003-195407 (P2003-195407)
 (32) 優先日 平成15年7月10日 (2003.7.10)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 000000239
 株式会社荏原製作所
 東京都大田区羽田旭町11番1号
 (74) 代理人 100091498
 弁理士 渡邊 勇
 (74) 代理人 100092406
 弁理士 堀田 信太郎
 (74) 代理人 100093942
 弁理士 小杉 良二
 (74) 代理人 100109896
 弁理士 森 友宏
 (72) 発明者 関口 信一
 東京都大田区羽田旭町11番1号 株式会社荏原製作所内

最終頁に続く

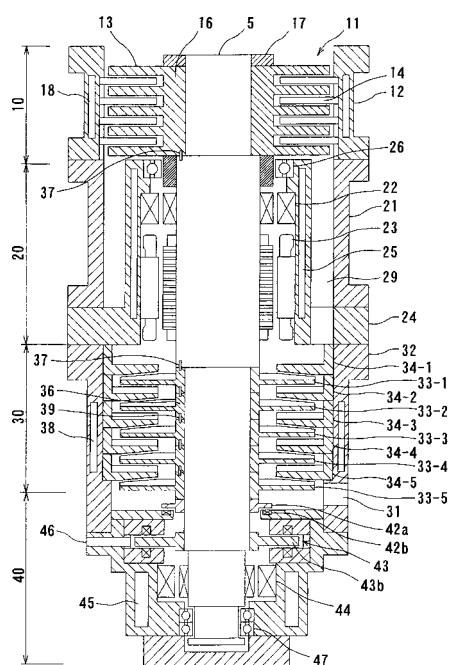
(54) 【発明の名称】 真空ポンプ

(57) 【要約】

【課題】 大気圧から高真空までの圧力領域で真空排気でき、高速回転を行うことによって小型化が図れると共にポンプ性能を向上させ、かつ完全オイルフリーの真空が得られる真空ポンプを提供する。

【解決手段】 気体を排気する真空ポンプにおいて、軸受22により回転自在に支承された主軸5と、主軸5を取り付けられた第1の回転翼13と第1のケーシング12の内部に固定された第1の固定翼14と吸気口11とを有する第1の排気部10と、主軸5を取り付けられた第2の回転翼33と第2のケーシング32の内部に固定された第2の固定翼34と排気口31とを有する第2の排気部30と、を備え、吸気口11を主軸5の端部近傍に配置し、主軸5の軸方向に沿って、第1の排気部10、軸受22、第2の排気部30をこの順に配置した。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】**【請求項 1】**

気体を排気する真空ポンプにおいて、
第1の軸受により回転自在に支承された主軸と、
前記主軸を回転駆動するモータと、
前記主軸に取り付けられた第1の回転翼と第1のケーシングの内部に固定された第1の固定翼と吸気口とを有する第1の排気部と、
前記主軸に取り付けられた第2の回転翼と第2のケーシングの内部に固定された第2の固定翼と排気口とを有する第2の排気部と、を備え、
前記吸気口を前記主軸の端部近傍に配置し、前記主軸の軸方向に沿って、前記第1の排気部、前記第1の軸受、前記第2の排気部をこの順に配置したことを特徴とする真空ポンプ。10

【請求項 2】

前記第2の排気部の下流側に、前記主軸を径方向に支承する第2の軸受と、前記主軸を軸方向に支承する第3の軸受とを設けたことを特徴とする請求項1に記載の真空ポンプ。

【請求項 3】

前記モータを前記第1の軸受近傍に配置したことを特徴とする請求項1又は2に記載の真空ポンプ。20

【請求項 4】

前記主軸及び／又は前記主軸に取り付けられた部品の軸方向の変位を検出する変位センサを備え、20

前記第3の軸受は、前記変位センサの検出値に基づいて前記主軸の軸方向の位置を所定の目標位置に保持し、

前記変位センサを、前記第2の排気部の近傍に設けたことを特徴とする請求項2に記載の真空ポンプ。

【請求項 5】

前記第1乃至第3の軸受は非接触型軸受であることを特徴とする請求項2に記載の真空ポンプ。30

【請求項 6】

前記第1乃至第3の軸受及び／又は前記モータにバージガスを供給するためのバージガス供給機構を設けたことを特徴とする請求項2記載の真空ポンプ。30

【請求項 7】

前記第1乃至第3の軸受及び／又は前記モータと前記吸気口から導入された気体との接触を防止するための保護部材を更に備えたことを特徴とする請求項2に記載の真空ポンプ。40

【請求項 8】

前記第1の排気部と前記第2の排気部との間に、前記第1の排気部の下流側から軸方向に沿って延びる流路を設けたことを特徴とする請求項1乃至7のいずれか1項に記載の真空ポンプ。

【請求項 9】

前記主軸及び／又は前記主軸に取り付けられた部品の軸方向の変位を検出する複数の変位センサを、前記第1の排気部、及び／又は前記第2の排気部、及び／又は前記主軸の端部の近傍に設け、前記第3の軸受は、前記複数の変位センサのうちの少なくとも一つの変位センサの検出値に基づいて前記主軸の軸方向の位置を所定の目標位置に保持することを特徴とする請求項2に記載の真空ポンプ。

【請求項 10】

前記複数の変位センサのうち、少なくとも2つの変位センサの検出値に基づいて前記主軸及び／又は前記主軸に取り付けられた部品の温度を検出することを特徴とする請求項9に記載の真空ポンプ。

【請求項 11】

10

20

30

40

50

気体を排気する真空ポンプにおいて、
軸受により回転自在に支承された主軸と、
前記主軸を回転駆動するモータと、
前記主軸に取り付けられた回転翼と、
前記回転翼に軸方向に隣接して配置されたリング状部材とを備え、
前記回転翼及び前記リング状部材を含むユニットの線膨張係数と、前記主軸の線膨張係数とが略同一となるように構成したことを特徴とする真空ポンプ。

【請求項 1 2】

気体を排気する真空ポンプにおいて、
軸受により回転自在に支承された主軸と、
前記主軸を回転駆動するモータと、
前記主軸に取り付けられる回転翼と、
前記回転翼に軸方向に隣接して配置されたリング状部材とを備え、
前記回転翼は前記主軸に嵌合する円筒部を有し、該円筒部の外周面に前記リング状部材が嵌合され、前記円筒部の外周面及び前記リング状部材の内周面に軸方向に延びる切欠きをそれぞれ形成し、互いに向き合う前記切欠きによって形成される穴には位置決め用部材が挿入されていることを特徴とする真空ポンプ。

【請求項 1 3】

気体を排気する真空ポンプにおいて、
軸受により回転自在に支承された主軸と、
前記主軸を回転駆動するモータと、
前記主軸に取り付けられる回転翼とを備え、
前記回転翼は、前記主軸に嵌合する円筒部と該円筒部の外周面に固定された翼部とを有し、
前記円筒部の軸方向寸法を前記翼部の軸方向寸法より長くしたことを特徴とする真空ポンプ。

【請求項 1 4】

前記翼部は、回転方向に対して後ろ向きに延びる渦巻状羽根と、前記渦巻状羽根が固定される円板状の基部とを備え、
前記円筒部の外周面の位置において、前記基部の上面から前記円筒部の上端までの寸法及び前記基部の下面から前記円筒部の下端までの寸法は、それぞれ前記基部の厚さに対して0.5倍以上であることを特徴とする請求項13に記載の真空ポンプ。

【請求項 1 5】

前記翼部は、前記円筒部の外周面に固定された円板状の基部と、前記基部の外周面に固定された複数の放射状翼とを備え、
前記円筒部の外周面の位置において、前記基部の上面から前記円筒部の上端までの寸法及び前記基部の下面から前記円筒部の下端までの寸法は、それぞれ前記基部の厚さに対して0.5倍以上であることを特徴とする請求項13に記載の真空ポンプ。

【請求項 1 6】

前記翼部は、回転方向に対して後ろ向きに延びる渦巻状羽根と、前記渦巻状羽根が固定される円板状の基部とを備え、
前記渦巻状羽根の軸方向の寸法は、径方向外側に向かって連続的に小さくなっていることを特徴とする請求項13に記載の真空ポンプ。

【請求項 1 7】

前記基部の軸方向の寸法は、径方向外側に向かって連続的に小さくなっていることを特徴とする請求項16に記載の真空ポンプ。

【請求項 1 8】

前記翼部は、回転方向に対して後ろ向きに延びている渦巻状羽根と、前記渦巻状羽根が固定される円板状の基部とを備え、
前記渦巻状羽根と前記基部とが接続される部位には隅肉部が形成されていることを特徴

10

20

30

40

50

とする請求項 1 3 に記載の真空ポンプ。

【請求項 1 9】

前記隅肉部の断面は、前記渦巻状羽根の先端部の回転方向に対して後ろ側にて大きく形成されていることを特徴とする請求項 1 8 に記載の真空ポンプ。

【請求項 2 0】

気体を排気する真空ポンプにおいて、

軸受により回転自在に支承された主軸と、前記主軸を回転駆動するモータと、前記主軸に取り付けられる第 1 の回転翼及び第 2 の回転翼とを備え、

前記第 1 の回転翼は、前記主軸に嵌合する円筒部と該円筒部の外周面に固定された翼部とを有し、該円筒部の軸方向寸法は前記翼部の軸方向寸法よりも長く、前記翼部は回転方向に対して後ろ向きに延びる羽根を有し、10

前記第 2 の回転翼は、前記主軸に嵌合する円筒部と、該円筒部の外周面に固定された円板部とを有し、該円筒部の軸方向寸法は前記円板部の軸方向寸法より長く、

前記第 1 の回転翼を吸気側に配置すると共に、前記第 2 の回転翼を排気側に配置し、前記第 2 の回転翼は前記第 1 の回転翼以上の直径を有することを特徴とする真空ポンプ。

【請求項 2 1】

気体を排気する真空ポンプにおいて、

複数の渦巻状羽根をそれぞれ有する多段の遠心ドラッグ翼と、

複数の渦巻状ガイドをそれぞれ有する多段の固定翼とを備え、

上流側に配置される前記遠心ドラッグ翼の前記渦巻状羽根の高さは、下流側に配置される前記遠心ドラッグ翼の前記渦巻状羽根の高さと同一か、又はそれよりも高く、20

上流側に配置される前記固定翼の前記渦巻状ガイドの高さは、下流側に配置される前記固定翼の前記渦巻状ガイドの高さと同一か、又はそれよりも高いことを特徴とする真空ポンプ。

【請求項 2 2】

前記遠心ドラッグ翼の前記渦巻状羽根と前記遠心ドラッグ翼に同心上に配置された仮想円の接線とのなす角度は、上流側に配置される前記渦巻状羽根の前記角度が下流側に配置される前記渦巻状羽根の前記角度と同一か、又はそれよりも大きくなるように設定されていることを特徴とする請求項 2 1 に記載の真空ポンプ。

【請求項 2 3】

前記渦巻状羽根の高さは、径方向外側に向かって徐々に低くなるように構成されていることを特徴とする請求項 2 1 に記載の真空ポンプ。

【請求項 2 4】

前記渦巻状羽根の入口高さと出口高さとの比は、上流側に配置される渦巻状羽根の前記比が下流側に配置される渦巻状羽根の前記比と同一か、又はそれよりも小さくなるように設定されていることを特徴とする請求項 2 3 に記載の真空ポンプ。

【請求項 2 5】

請求項 1 乃至 2 4 のいずれか 1 項に記載の真空ポンプと、

基板を処理するプロセスチャンバとを備え、

前記真空ポンプと前記プロセスチャンバとを直接又は間接に接続したことを特徴とする半導体製造装置。40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は真空ポンプに関し、より詳しくは、大気圧以下から高真空までの圧力領域において有効に排気動作を行うことができる真空ポンプに関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

図 2 9 に従来の真空ポンプを用いた半導体製造装置の模式図を示す。

図 2 9 に示すように、半導体製造装置 1 0 1 は、複数のプロセスチャンバ 1 0 2 と、搬

50

送室 103 と、カセット室 104 とを有している。処理されるウエハ（基板）はカセット室 104 にセットされ、搬送室 103 を経由してプロセスチャンバ 102 に搬送され、そこで所定のプロセス（PVD、CVD、エッティング等）が行われる。なお、1 台の半導体製造装置 101 で複数のプロセスを行うため、またウエハの処理枚数を増やすために、プロセスチャンバ 102 は複数設置するのが一般的である。

【0003】

プロセスチャンバ 102 では、処理前にはプロセスチャンバ 102 内に高真空状態を形成し、処理中にはプロセスチャンバ 102 からプロセスガスを連続排気する必要がある。このため、プロセスチャンバ 102 を真空排気する真空ポンプとしてターボ分子ポンプ 105 が広く用いられている。ターボ分子ポンプ 105 は、 10^{-1} Pa オーダー以下の中・高真空領域にて運転可能であるが、大気圧下では単独で運転することができない。このため、ターボ分子ポンプ 105 の排気口側には、配管 107 を介して粗引き用のバックポンプ 106 が接続されている。このバックポンプ 106 は、大気圧から 10^{-1} Pa オーダーまで排気可能に構成されている。

【0004】

上記構成の半導体製造装置では、1 つのプロセスチャンバ 102 内のガスを排気するポンプとして、ターボ分子ポンプ 105 及びバックポンプ 106 の 2 種類の真空ポンプが必要であった。このため、設置スペースの拡大、構成部品の増加、コスト高などの問題が生じていた。また、近年では半導体プロセスに使用されるガスの量は増加する傾向にあり、真空ポンプの大型化はもとより、配管 107 の大口径化を招いており、上記問題が顕著となりつつある。

【0005】

ここで、バックポンプ 106 としては、ルーツポンプ、スクリューポンプ、油回転ポンプ等の容積移送型ポンプが主に用いられている。この種のポンプは、比較的低速で回転するロータにより排気室（ケーシング）内の排気流路の容積を順次減じていって気体を移送するように構成されている。このため、ガスの移送量を増加させるにはロータの容積及び質量を大きくする必要があり、バックポンプの大型化が避けられない。

【0006】

上記問題の対策として、ロータを高速回転させることにより、バックポンプを大型化することなくガスの移送量を増加させる方法がある。しかしながら、ルーツポンプ、スクリューポンプは、ロータが固定される主軸を 2 本有し、その 2 本の主軸の回転位相を拘束する機構（タイミングギヤ等）が必要なため高速回転に適さない。また、油回転ポンプにおいては、ロータが回転軸に対して非対称の形状を有しているため、この油回転ポンプも高速回転には適さない。したがって、バックポンプを高速回転させることでバックポンプを小型化しつつガスの移送量を増加させることは極めて困難である。

【0007】

また、上記バックポンプでは、いずれも軸受、又はシール部に潤滑油などの油が用いられているため、完全にオイルフリーの真空を形成することができない。このことは、半導体製造装置において、製品の質及び歩留まり率を低下させる原因となる。

【0008】

そこで、1 台で大気圧から高真空まで効率よく真空排気ができる真空ポンプとして、特許文献 1 に記載の真空ポンプがある。この特許文献 1 に記載の真空ポンプは、複数の羽根車を有する遠心圧縮ポンプ段と円周流圧縮ポンプ段を備えている。しかしながら、上記羽根車はすべて主軸の先端部に取り付けられるため、ロータは、その先端部に大きな質量分布を有する片持ちロータとなる。このためロータの振動特性が悪く高速回転が困難となり、ポンプを小型化できないという問題があった。また、軸受部に潤滑用の油等が用いられているため、完全にオイルフリーの真空を形成することができなかった。

【0009】

また、特許文献 2 に記載の真空ポンプは、磁気軸受を使用してロータの高速回転化を図ったものである。しかしながら、吸気口近傍に磁気軸受が配置されているため、この磁気

10

20

30

40

50

軸受が排気抵抗となって真空ポンプの排気性能を阻害するという問題があった。特に吸気口側の圧力が分子流領域では、排気コンダクタンスが著しく小さくなる、すなわち排気抵抗が大きくなるため、実効排気速度が小さくなるという問題が顕著であった。また、冷却液はポンプの排気流路と連通する空間に導入されるため、冷却液による真空環境の汚染が問題であった。

【0010】

一方、半導体製造装置のプロセスチャンバを真空排気するために、遠心ドラッグポンプ要素を備えたターボ真空ポンプが用いられる場合がある。この種のターボ真空ポンプについて図面を参照して説明する。図30は従来のターボ真空ポンプを示す断面図である。図31(a)は図30に示す遠心ドラッグ翼を示す平面図であり、図31(b)は図30に示す遠心ドラッグ翼の断面図である。図32(a)は図30に示す固定翼を示す平面図であり、図32(b)は図30に示す固定翼の断面図である。

10

【0011】

図30に示すように、ターボ真空ポンプは、複数段の遠心ドラッグ翼133と、各段の遠心ドラッグ翼133に対向して配置される複数の固定翼134と、吸気口111及び排気口131を有するケーシング108とを備えている。遠心ドラッグ翼133は主軸105に固定され、この主軸105を介してモータ123によって回転駆動される。主軸105は、上ラジアル磁気軸受122、下ラジアル磁気軸受144、及びアキシャル磁気軸受143によって非接触で支持されている。上ラジアル磁気軸受122の上方、及び下ラジアル磁気軸受144の下方には、上タッチダウン軸受126及び下タッチダウン軸受147がそれぞれ配置されている。

20

【0012】

図31(a)及び図31(b)に示すように、各遠心ドラッグ翼133は、回転方向に対して後ろ向きに延びる複数の渦巻状羽根135と、これらの渦巻状羽根135が固定される円板状の基部109を有している。一方、図32(a)及び図32(b)に示すように、固定翼134は、遠心ドラッグ翼133の回転方向に対して後ろ向きに延びる複数の渦巻状ガイド166と、これらの渦巻状ガイド166が固定される環状の平面部167とを有している。なお、図31(a)及び図32(a)に示す矢印Gは気体の流れを表している。

30

【0013】

遠心ドラッグ翼133を矢印Qの方向に回転させると、気体は吸気口111からケーシング108内に流入し、遠心力の作用によって気体は径方向外側に移送されつつ圧縮される。径方向外側に移送された気体は、渦巻状ガイド166、平面部167、及び基部109の裏面とによって画成される空間へ流れ込み、気体の粘性によるドラッグ作用により気体が径方向内側に移送されつつ圧縮される。このような気体の移送が各段にて順次行われ、これにより気体が所望の圧力にまで圧縮されて排気口131から排出される。

40

【0014】

しかしながら、従来のターボ真空ポンプでは、排気性能を上げるために単に翼段数を増やしていたため、排気効率を高めることができなかった。このため、排気速度が小さくなり、また圧縮比を大きくすることができないという問題が生じ、結果として、ターボ真空ポンプ全体の大型化と製造コストの上昇を招いていた。

40

【0015】

【特許文献1】特公平3-7039号公報

【特許文献2】特公平7-86357号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0016】

本発明は上述の点に鑑みてなされたもので、大気圧以下から高真空までの圧力領域で真空排気でき、高速回転を行うことによって小型化が図れると共にポンプ性能を向上させ、かつ完全オイルフリーの真空が得られる真空ポンプを提供することを目的とする。

50

【課題を解決するための手段】

【0017】

上記課題を解決するため、本発明の一態様は、気体を排気する真空ポンプにおいて、第1の軸受により回転自在に支承された主軸と、前記主軸を回転駆動するモータと、前記主軸に取り付けられた第1の回転翼と第1のケーシングの内部に固定された第1の固定翼と吸気口とを有する第1の排気部と、前記主軸に取り付けられた第2の回転翼と第2のケーシングの内部に固定された第2の固定翼と排気口とを有する第2の排気部と、を備え、前記吸気口を前記主軸の端部近傍に配置し、前記主軸の軸方向に沿って、前記第1の排気部、前記第1の軸受、前記第2の排気部をこの順に配置したことを特徴とする。この場合において、前記第2の排気部の下流側に、前記主軸を径方向に支承する第2の軸受と、前記主軸を軸方向に支承する第3の軸受とを設けることが好ましい。10

【0018】

上記のように、吸入側から、順に、第1の排気部、第1の軸受、第2の排気部を直列に配置したので、ポンプロータ（第1の回転翼、第2の回転翼、及び主軸）全体の軸方向の質量分布を均一化することができる。これにより、ポンプロータが第1の軸受によって極端に片持ち支持された状態である、いわゆるオーバーハング状態を解消でき、高速回転に適したポンプロータを構成できる。すなわち、ポンプロータの振動特性が良好となるため、ポンプロータを高速回転させることができるとなる。特に上記第1の軸受として磁気軸受を用いた場合、次のような利点が得られる。すなわち、磁気軸受の支持剛性は、ボールベアリング等の転がり軸受と比較して著しく低いため、磁気軸受は、高速回転時にポンプロータの質量のアンバランスや、ポンプロータの振動特性（ポンプロータの固有振動数）の影響を受けやすく、安定回転が困難な場合が多い。本発明によれば、ポンプロータの振動特性が良好となるため、上記問題を解消することができる。20

【0019】

また、第1の排気部の吸気口と第1の回転翼との間に気体の流れを阻害するものが無く、排気性能の高い真空ポンプが得られる。特に本発明に係る真空ポンプは分子流領域において好適に使用できる。すなわち、吸気口側の圧力が低い分子流領域では、障害物によるコンダクタンスの低下（排気抵抗の増加）が著しいが、本発明に係る真空ポンプは、第1の排気部の上流側に気体の流れを妨げる障害物を持たないため、良好な排気性能を得ることができる。30

【0020】

本発明の好ましい一態様は、前記モータを前記第1の軸受近傍に配置したことを特徴とする。

例えば、第1の排気部と第2の排気部との間に配置された第1の軸受近傍にモータを設けた場合、モータがほぼポンプロータの軸方向中心に位置することになり、ポンプロータの振動特性及び回転特性を低下させることなくモータの直径を大きくできる。したがって、モータの出力を増大させることができる。また、モータの直径を増大させることによりモータの磁極面の面積を確保できるので、モータの長さを短くできる。その結果、主軸全長を短くすることができ、ポンプロータの曲げ固有振動数が高くなり、高速回転に好適なポンプロータが得られる。また、モータは回転トルクを発生する際、径方向に不平衡力を生じさせるため、モータがポンプロータの加振源となる可能性があるが、本発明では、モータの近傍に第1の軸受が配置されているため、ポンプロータの振動を効果的に抑制することができる。40

【0021】

また、第2の排気部の下流側に配置された第2の軸受近傍にモータを設けた場合、モータを気体の流路から離間させることができる。一般に、生成物を含むプロセスガスを排気する場合、真空ポンプ内の流路に生成物が析出することを防止するために流路を高温にする必要がある。本発明によれば、モータを流路から離間させることができるために、モータを高効率で冷却することができ、小型かつ高出力のモータを真空ポンプに搭載することができる。また、腐食性プロセスガスを排気する場合には、腐食環境からモータを容易に保50

護することができる。

【0022】

本発明の好ましい一態様は、前記主軸及び／又は前記主軸に取り付けられた部品の軸方向の変位を検出する変位センサを備え、前記第3の軸受は、前記変位センサの検出値に基づいて前記主軸の軸方向の位置を所定の目標位置に保持し、前記変位センサを、前記第2の排気部の近傍に設けたことを特徴とする。

【0023】

真空ポンプ運転時においては主軸及び該主軸に取り付けられた回転翼（第1の回転翼、第2の回転翼）などの部材の温度が上昇するため、主軸は軸方向に伸びることになる。本発明では、第2の排気部の近傍に変位センサを設け、この変位センサの検出値に基づいて主軸の軸方向の位置を一定に保つことにより、主軸及び回転翼の伸びの起点を変位センサの測定点とすることができます。これにより、第2の排気部での第2の回転翼と第2の固定翼との軸方向のギャップ変化を小さくでき、結果的に真空ポンプの排気性能の向上と運転の安定化が図れる。特に、第2の排気部は比較的高い圧力領域で気体を排気するため、上記ギャップの極小化によって排気性能を著しく向上させることができる。

【0024】

本発明の好ましい一態様は、前記第1乃至第3の軸受は非接触型軸受であることを特徴とする。

これにより、ポンプロータを高速で回転させることができが可能となり、ポンプ性能を向上させることができとなる。

【0025】

本発明の好ましい一態様は、前記第1乃至第3の軸受及び／又は前記モータにバージガスを供給するバージガス供給機構を設けたことを特徴とする。

本発明の好ましい一態様は、前記第1乃至第3の軸受及び／又は前記モータと前記吸気口から導入された気体との接触を防止するための保護部材を更に備えたことを特徴とする。

【0026】

本発明によれば、腐食性プロセスガスを排気する場合に軸受やモータなどが腐食してしまうことを防止できる。また、プロセスガス中に含まれる各種生成物の析出によるポンプロータの回転阻害を防止できる。さらに、バージガスにより、モータや軸受を冷却することが可能となる。詳述すると、バージガスによりモータや軸受が直接冷却されるだけでなく、モータや軸受の周囲に存在する気体の圧力を局所的に高く維持できる。したがって、モータ及び軸受のロータ側からステータ側への熱伝達率が向上し、モータ及び軸受の冷却効果を高めることができる。

【0027】

また、本発明の好ましい一態様は、前記第1の排気部と前記第2の排気部との間に、前記第1の排気部の下流側から軸方向に沿って延びる流路を設けたことを特徴とする。

流路としては、軸方向に延びる管状流路でもよく、同心上に配列された2つの円管の間に形成された円筒状流路でもよい。これにより、第1の排気部と第2の排気部との間の流路のコンダクタンスを大きく（排気抵抗を小さく）できるので、真空ポンプの排気性能を更に向上させることができる。

【0028】

本発明の好ましい一態様は、前記主軸及び／又は前記主軸に取り付けられた部品の軸方向の変位を検出する複数の変位センサを、前記第1の排気部、及び／又は前記第2の排気部、及び／又は前記主軸の端部の近傍に設け、前記第3の軸受は、前記複数の変位センサのうちの少なくとも一つの変位センサの検出値に基づいて前記主軸の軸方向の位置を所定の目標位置に保持することを特徴とする。

この場合において、前記複数の変位センサのうち、少なくとも2つの変位センサの検出値に基づいて前記主軸及び／又は前記主軸に取り付けられた部品の温度を検出することが好ましい。

10

20

30

40

50

【0029】

本発明の他の態様は、気体を排氣する真空ポンプにおいて、軸受により回転自在に支承された主軸と、前記主軸を回転駆動するモータと、前記主軸に取り付けられた回転翼と、前記回転翼に軸方向に隣接して配置されたリング状部材とを備え、前記回転翼及び前記リング状部材を含むユニットの線膨張係数と、前記主軸の線膨張係数とが略同一となるように構成したことを特徴とする。

【0030】

本発明の他の態様は、気体を排氣する真空ポンプにおいて、軸受により回転自在に支承された主軸と、前記主軸を回転駆動するモータと、前記主軸に取り付けられる回転翼と、前記回転翼に軸方向に隣接して配置されたリング状部材とを備え、前記回転翼は前記主軸に嵌合する円筒部を有し、該円筒部の外周面に前記リング状部材が嵌合され、前記円筒部の外周面及び前記リング状部材の内周面に軸方向に延びる切欠きをそれぞれ形成し、互いに向き合う前記切欠きによって形成される穴には位置決め用部材が挿入されていることを特徴とする。

【0031】

本発明の他の態様は、気体を排氣する真空ポンプにおいて、軸受により回転自在に支承された主軸と、前記主軸を回転駆動するモータと、前記主軸に取り付けられる回転翼とを備え、前記回転翼は、前記主軸に嵌合する円筒部と該円筒部の外周面に固定された翼部とを有し、前記円筒部の軸方向寸法を前記翼部の軸方向寸法より長くしたことを特徴とする。

【0032】

本発明の好ましい一態様は、前記翼部は、回転方向に対して後ろ向きに延びる渦巻状羽根と、前記渦巻状羽根が固定される円板状の基部とを備え、前記円筒部の外周面の位置において、前記基部の上面から前記円筒部の上端までの寸法及び前記基部の下面から前記円筒部の下端までの寸法は、それぞれ前記基部の厚さに対して0.5倍以上であることを特徴とする。

本発明の好ましい一態様は、前記翼部は、前記円筒部の外周面に固定された円板状の基部と、前記基部の外周面に固定された複数の放射状翼とを備え、前記円筒部の外周面の位置において、前記基部の上面から前記円筒部の上端までの寸法及び前記基部の下面から前記円筒部の下端までの寸法は、それぞれ前記基部の厚さに対して0.5倍以上であることを特徴とする。

本発明の好ましい一態様は、前記翼部は、回転方向に対して後ろ向きに延びる渦巻状羽根と、前記渦巻状羽根が固定される円板状の基部とを備え、前記渦巻状羽根の軸方向の寸法は、径方向外側に向かって連続的に小さくなっていることを特徴とする。

本発明の好ましい一態様は、前記基部の軸方向の寸法は、径方向外側に向かって連続的に小さくなっていることを特徴とする。

【0033】

本発明の好ましい一態様は、前記翼部は、回転方向に対して後ろ向きに延びている渦巻状羽根と、前記渦巻状羽根が固定される円板状の基部とを備え、前記渦巻状羽根と前記基部とが接続される部位には隅肉部が形成されていることを特徴とする。

この場合において、前記隅肉部の断面は、前記渦巻状羽根の先端部の回転方向に対して後ろ側にて大きく形成されていることが好ましい。

【0034】

本発明の他の態様は、気体を排氣する真空ポンプにおいて、軸受により回転自在に支承された主軸と、前記主軸を回転駆動するモータと、前記主軸に取り付けられる第1の回転翼及び第2の回転翼とを備え、前記第1の回転翼は、前記主軸に嵌合する円筒部と該円筒部の外周面に固定された翼部とを有し、該円筒部の軸方向寸法は前記翼部の軸方向寸法よりも長く、前記翼部は回転方向に対して後ろ向きに延びる羽根を有し、前記第2の回転翼は、前記主軸に嵌合する円筒部と、該円筒部の外周面に固定された円板部とを有し、該円筒部の軸方向寸法は前記円板部の軸方向寸法より長く、前記第1の回転翼を吸気側に配置

10

20

30

40

50

すると共に、前記第2の回転翼を排気側に配置し、前記第2の回転翼は前記第1の回転翼以上の直径を有することを特徴とする。

【0035】

本発明の他の態様は、気体を排気する真空ポンプにおいて、複数の渦巻状羽根をそれぞれ有する多段の遠心ドラッグ翼と、複数の渦巻状ガイドをそれぞれ有する多段の固定翼とを備え、上流側に配置される前記遠心ドラッグ翼の前記渦巻状羽根の高さは、下流側に配置される前記遠心ドラッグ翼の前記渦巻状羽根の高さと同一か、又はそれよりも高く、上流側に配置される前記固定翼の前記渦巻状ガイドの高さは、下流側に配置される前記固定翼の前記渦巻状ガイドの高さと同一か、又はそれよりも高いことを特徴とする。

【0036】

本発明の好ましい態様は、前記遠心ドラッグ翼の前記渦巻状羽根と前記遠心ドラッグ翼に同心上に配置された仮想円の接線とのなす角度は、上流側に配置される前記渦巻状羽根の前記角度が下流側に配置される前記渦巻状羽根の前記角度と同一か、又はそれよりも大きくなるように設定されていることを特徴とする。

【0037】

本発明の好ましい態様は、前記渦巻状羽根の高さは、径方向外側に向かって徐々に低くなるように構成されていることを特徴とすることを特徴とする。

本発明の好ましい態様は、前記渦巻状羽根の入口高さと出口高さとの比は、上流側に配置される渦巻状羽根の前記比が下流側に配置される渦巻状羽根の前記比と同一か、又はそれよりも小さくなるように設定されていることを特徴とする。

【0038】

本発明の他の態様は、上記真空ポンプと、基板を処理するプロセスチャンバとを備え、前記真空ポンプと前記プロセスチャンバとを直接又は間接に接続したことを特徴とする半導体製造装置である。

【発明の効果】

【0039】

本発明によれば、大気圧から高真空までの圧力領域において排気することができ、コンパクトで排気性能の高い真空ポンプを提供できる。また、腐食性を有する気体を排気する場合においても、長期間に亘って安定した運転を行うことができ、信頼性及び耐久性の高い真空ポンプを提供できる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0040】

以下、本発明の実施形態について図面を用いて説明する。図1は本発明の第1の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。図2(a)は図1に示す遠心ドラッグ翼の平面図であり、図2(b)は図2(a)に示す遠心ドラッグ翼の断面図であり、図2(c)は図2(a)に示すII-II線断面図である。

【0041】

図1に示すように、真空ポンプは、第1の排気部としてのターボ分子ポンプ要素10と、第1の軸受としての上ラジアル磁気軸受22が収容される上ハウジングユニット20と、第2の排気部としての遠心ドラッグポンプ要素30と、第2の軸受としての下ラジアル磁気軸受44及び第3の軸受としてのアキシャル磁気軸受43が収容される下ハウジングユニット40とを備えている。また、真空ポンプは、上ラジアル磁気軸受22、下ラジアル磁気軸受44、及びアキシャル磁気軸受43によって回転自在に支承される主軸5を備えている。主軸5は真空ポンプ全体に亘って延び、主軸5の一方の端部は吸気口11の近傍に位置している。そして、主軸5の吸入側の軸端から軸方向に沿って、順に、ターボ分子ポンプ要素10、上ハウジングユニット20、遠心ドラッグポンプ要素30、下ハウジングユニット40が直列に配置されている。

【0042】

一般に、大気圧から高真空まで排気できる真空ポンプは、幾つかのポンプ要素を組み合わせて構成される。これは、1つのポンプ要素により大気圧から高真空まで効率良く排気

10

20

30

40

50

することが極めて困難なためである。本実施形態の真空ポンプは、異なる圧力領域で作動可能な2つのポンプ要素が組み合わされた構成を有している。すなわち、第1の排気部に高真空領域にて効率良く排気できるターボ分子ポンプ要素10が用いられ、第2の排気部に低真空領域にて排気性能が良好な遠心ドラッグポンプ要素30が用いられている。

【0043】

ターボ分子ポンプ要素(ターボ分子ポンプ部)10は、吸気口11を有する上ケーシング(第1のケーシング)12と、この上ケーシング12の内部に配置された複数段のタービン翼(第1の回転翼)13とを備えている。タービン翼13は吸気口11の近傍に配置され、主軸5の外周部に固定されている。また、上ケーシング12の内周部には複数の固定翼(第1の固定翼)14が固定されており、これらの固定翼14はそれぞれタービン翼13の各段間に配置されている。なお、タービン翼13と固定翼14は、円周方向に沿って複数のフィンが配置された軸流翼であり、タービン翼13と固定翼14のフィンは互いに概ね逆方向に傾斜している。

【0044】

遠心ドラッグポンプ要素(遠心ドラッグポンプ部)30は、排気口31を有する下ケーシング(第2のケーシング)32と、この下ケーシング32の内部に配置された複数の遠心ドラッグ翼(第2の回転翼)33-1~5と、下ケーシング32の内周部に固定された複数の固定翼(第2の固定翼)34-1~5とを備えている。遠心ドラッグ翼33-1~5は、主軸5の外周部に固定され、固定翼34-1~5と各遠心ドラッグ翼33-1~5とは交互に配置されている。図2(a)及び図2(b)に示すように、遠心ドラッグ翼33-1~5(以下、適宜遠心ドラッグ翼33という)は、回転方向に対して後ろ向きに延びる渦巻状羽根35と、渦巻状羽根35が固定される円板状の基部9とを有している。なお、渦巻状羽根35と基部9とから翼部が構成される。渦巻状羽根35が形成された遠心ドラッグ翼33の各表面は、固定翼34-1~5(以下、適宜固定翼34という)の表面と数十~数百μmの間隔を形成して対向している。そして、この遠心ドラッグ翼33と固定翼34との相互作用、すなわち気体に対する遠心作用と気体の粘性によるドラッグ作用とにより気体の排気が行われる。

【0045】

また、主軸に取り付けられる遠心ドラッグ翼33は、回転により生じる内部応力を低減させて応力集中を回避する観点、及び排気性能の向上の観点より、以下の形状を有している。

(1) 遠心ドラッグ翼33の内周部には、主軸5に嵌合する小径の円筒部(ボス)36が設けられている。この円筒部36の軸方向の寸法L1は翼部(渦巻状羽根35及び基部9)の軸方向の寸法L2より大きい(図2(b)参照)。

(2) 渦巻状羽根35は円筒部36の外周面に一体的に接続されている。また、円筒部36と渦巻状羽根35の接続部には隅肉部35aが形成されている(図2(a)及び図2(b)参照)。また、円筒部36の外周面の位置において、基部9の下面から円筒部36の下端までの寸法L5及び基部9の上面から円筒部36の上端までの寸法L6は、少なくとも基部9の厚さ(軸方向寸法)L4の0.5倍以上に設定されている。

(3) 渦巻状羽根35の軸方向寸法は、径方向外側に向かって連続的に小さくなっている。また、渦巻状羽根35が固定される円板状の基部9の軸方向寸法は、径方向外側に向かって連続的に小さくなっている。したがって、翼部の径方向外側の寸法L3は、内側の寸法L2よりも小さくなっている(図2(b)参照)。

(4) 渦巻状羽根35の厚さtは、径方向外側に向かって連続的に小さくなるように形成されている(図2(a)参照)。また、厚さtは、可能な限り薄くすることが望ましく、渦巻状羽根35の先端部では0.5~2mmにするとよい。

(5) 渦巻状羽根35の先端部には曲面部35bが形成されている(図2(a)参照)。また、渦巻状羽根35の先端部は、基部9の周縁部から少し径方向内側に位置している。これにより曲面部35bが渦巻状羽根35の先端の全体に形成される。

(6) 渦巻状羽根35と基部9とが接続される部位には、円弧状の断面形状を有する隅肉

10

20

30

40

50

部 35c が形成されている(図2(c)参照)。なお、図2(a)の破線は、隅肉部35cと基部9との境界線を示している。隅肉部35cの円弧の大きさは一様である必要はなく、場所によってその大きさを変えてよい。例えば、図2(a)に示すように、渦巻状羽根35の先端部の回転方向に対して後ろ側にて、隅肉部35cの円弧(断面)を大きくするとよい。

(7) 渦巻状羽根35と円接線とのなす角度は、径方向外側へ向かうに従って小さくなるように設定されている(図2(a)参照)。特に渦巻状羽根35の径方向内側の位置では $20^\circ < in < 50^\circ$ 、径方向外側の位置では $5^\circ < out < 30^\circ$ となることが好ましい。なお、円接線とは、遠心ドラッグ翼33と同心上に配置された円の接線をいう。

(8) 渦巻状羽根35がなす曲線は、渦巻曲線(極座標にて $r = a$ で表されるアルキメデス渦巻線、 $r = a$ で表される対数渦巻線など)やインボリュート曲線、又はこれら曲線の変形例にて構成されている(図2(a)参照)。

【0046】

上記項目(1)、(2)、(3)、(4)、(5)、及び(6)により、遠心ドラッグ翼(回転翼)33における応力低減及び応力集中を回避することができる。また、上記項目(3)、(6)、(7)、及び(8)により、排気性能の向上が図れる。なお、本実施形態では、渦巻状羽根35は遠心ドラッグ翼(回転翼)33及び固定翼34に設けられているが、遠心ドラッグ翼を平らな表面とし、この表面と対向する固定翼の表面に渦巻状羽根を形成してもよい。

【0047】

図3は本発明の第1の実施形態に係る真空ポンプの他の構成例を示す断面図である。図3に示す真空ポンプでは、第1の排気部30A及び第2の排気部30Bともに遠心ドラッグポンプ要素から構成されている。第1の排気部30Aは、渦巻状羽根35をそれぞれ有する遠心ドラッグ翼(第1の回転翼)33A-1~4と、渦巻状ガイド66をそれぞれ有する固定翼34A-1~4とを備えている。遠心ドラッグ翼33A-1~4の内周部には、主軸5に嵌合する円筒部16が形成されている。第2の排気部30Bは、渦巻状羽根を持たない遠心ドラッグ翼(第2の回転翼)33B-1~5と、固定円板34aの両面に形成された渦巻状ガイド66をそれぞれ有する固定翼34B-1~5とを備えている。遠心ドラッグ翼33B-1~5は、主軸5に嵌合する円筒部36と、この円筒部36の外周面に一体的に形成される円板部33aとを備えている。また、遠心ドラッグ翼33B-1~5の直径D2は、遠心ドラッグ翼33A-1~4の直径D1以上の大きさを有している(D1 D2)。

【0048】

ところで、図3に示す真空ポンプは、多段の回転翼及び固定翼を備えた遠心ドラッグポンプ要素の最適な構成を備えている。すなわち、遠心ドラッグポンプ要素では、前述したように、気体に対する遠心作用と気体の粘性によるドラッグ作用とにより排気が行われる。溝(渦巻状羽根の間に形成された凹部)を回転翼に設けた場合は遠心作用を効果的に利用できるため、固定翼に溝を設けた場合に比して排気性能が向上する。特に、 10^1 Paオーダー以下の低真空領域では、気体の粘性によるドラッグ作用があまり有効でないため、回転翼に渦巻状羽根、すなわち溝を設けることが重要である。一方、 10^2 Paオーダー以上の高真空領域では、気体の粘性によるドラッグ作用が支配的となるので、溝を固定翼に設けても排気性能は低下しない。

【0049】

また、図3において、円板状の遠心ドラッグ翼33B-1~5は渦巻状羽根を持たないため、渦巻状羽根を有する遠心ドラッグ翼33A-1~4に比して内部に生じる遠心応力が低くなる。よって、遠心ドラッグ翼33B-1~5は、遠心ドラッグ翼33A-1~4より直径を大きくした場合でも遠心ドラッグ翼33A-1~4と同一の回転速度で回転させることができる。したがって、第2の排気部30Bでは第1の排気部30Aに比して排気流路を長くすることができる。また、第2の排気部30Bでは、固定翼34B-1~5に対する遠心ドラッグ翼33B-1~5の相対速度が速くなる領域が増すため、排気性能

10

20

30

40

50

を向上させることができる。

【0050】

上記事由から、吸気側に位置する第1の排気部30Aでは渦巻状羽根を有する遠心ドラッグ翼33A-1~4が用いられ、10¹Pa以下から10²Paまでの圧力範囲で気体の圧縮が効果的に行なわれる。さらに、排気側に位置する第2の排気部30Bでは、直径を大きくした円板形の遠心ドラッグ翼33B-1~5が用いられ、10²Pa以上の圧力範囲で気体の圧縮が行なわれる。このような構成により、排気効率の高い真空ポンプを実現できる。

【0051】

ここで、図1において、タービン翼13及び遠心ドラッグ翼33から構成される2つのポンプ要素を1本の主軸5に取り付けると、ポンプローラ（タービン翼13、遠心ドラッグ翼33、主軸5からなる回転部）の軸長が長くなり、高速回転が困難となる。このため、本実施形態の真空ポンプでは、主軸5の振動特性を改善し高速回転に適したポンプローラを構成するため、タービン翼13と遠心ドラッグ翼33の間に上ラジアル磁気軸受22とモータ23が配置され、最終段の遠心ドラッグ翼33-5の軸端側（下流側）にアキシャル磁気軸受43と下ラジアル磁気軸受44が設けられている。また、主軸5は、上ラジアル磁気軸受22及びモータ23が配置された部分で最も軸径が大きくなる構造を有している。

【0052】

上記構成により、ポンプローラの軸方向における重心位置は主軸5の軸径が最も大きいモータ23付近の部位となり、重心の両側に上下ラジアル磁気軸受22, 44が配置された振動特性の良好な両持ちポンプローラが構成される。また、主軸5は重心位置にて最も軸径が大きく、軸端に向かって軸径が細くなる構成としたので、主軸5の曲げに対する剛性分布が適正となり、ポンプローラの曲げ固有振動数を高くでき、ポンプローラを高速回転させることが可能となる。

【0053】

さらに、オーバーハングしているタービン翼13を支承する上ラジアル磁気軸受22は、主軸5の最も径の大きい部分に設置されているので、電磁石の磁極面の面積を大きくでき、軸受剛性を強くすると同時に大きな減衰力を発生させることができる。したがって、オーバーハング部（タービン翼13）に起因してポンプローラに生じる加振力を、上ラジアル磁気軸受22にて有効に抑制することができる。また、モータ23は、上ラジアル磁気軸受22と同様に、主軸5の軸径の最も大きい部位に設置されているので、主軸5に固定されるモータ回転子（モータロータ）の磁極面の面積を大きくでき、モータ23の出力を落とさずにモータ23の軸方向の長さを短くできる。その結果、主軸5全体の軸長が短くなり、ポンプローラの曲げ固有振動数をより高く設定できる。

【0054】

ここで、磁気軸受の構成及び作用について簡単に説明する。図4はラジアル磁気軸受の構成を示す概略図である。回転体としてのロータ110は、回軸111と、この回軸軸111の外周部に取り付けられた磁性体112とから構成されている。磁性体112の外周側には、所定のギャップを介して電磁石113と位置センサ114が設置される。コアの突出部113aにはコイル113bが取り付けられ、隣り合う2個の突出部113a及びコイル113bを1対として1つの電磁石113が構成される。そして、図4に示すように、周方向に約90°間隔で4つの電磁石113が配置される。位置センサ114はロータ110の断面中心からX方向及びY方向に各々設置される。そして、位置センサ114によりロータ110の径方向の位置を検出し、検出した位置と目標位置との偏差に基づき制御回路115にて制御信号を生成し、上記制御信号に応じた電流をパワー・アンプ116より電磁石113のコイル113bに供給する。これにより、向かい合う電磁石113で生成される電磁力をプッシュ・プル動作にて制御し、ロータ110に電磁力を作用させる。この電磁力によって、ロータ110は所定の位置にて非接触で回転自在に支持される。

【0055】

10

20

30

40

50

上述した例ではラジアル磁気軸受の構成を示したが、アキシャル磁気軸受の構成は次のようになる。すなわち、ロータ側にディスクが設けられ、ステータ側に該ディスクを挟み込むように2つの電磁石が設けられ、さらに、ディスクの軸方向の変位を検出するアキシャル変位センサが設けられる。アキシャル磁気軸受の動作についてはラジアル磁気軸受とほぼ同様である。上述した磁気軸受によれば、回転損失が極小化できるのでロータの高速回転が実現され、さらに、油等の潤滑剤が不要となるのでオイルフリー及びメンテナンスフリーが実現できる。したがって、磁気軸受は真空ポンプにとって好適な軸受である。

【0056】

なお、図1において、何らかの事情により上下ラジアル磁気軸受22, 44及びアキシャル磁気軸受43のいずれかが正常に動作できなくなった場合、ポンプロータは上タッチダウン軸受26と下タッチダウン軸受47にて支持され、固定翼14, 34等のステータ側要素とポンプロータとの接触が防止される。ここで、上タッチダウン軸受26は上ラジアル磁気軸受22の直上に配置され、下タッチダウン軸受47は主軸5の下端に配置されており、軸受スパン（上タッチダウン軸受26と下タッチダウン軸受47との距離）を長くしている。これにより、タッチダウン時のポンプロータの傾き角度を小さくできるので、回転するタービン翼13及び遠心ドラッグ翼33が固定翼14, 34と接触してしまうことが防止できる。したがって、タービン翼13と固定翼14とのギャップ、及び遠心ドラッグ翼33と固定翼34とのギャップを狭く設定することが可能となる。

【0057】

主軸5と共に高速回転するタービン翼13と遠心ドラッグ翼33は、いずれも主軸5の外周部に固定される構造とし、主軸5に固定されるタービン翼13と遠心ドラッグ翼33の内周部には、いずれも小径の円筒部（ボス）16, 36がそれぞれ設けられている。これにより、高速回転時にタービン翼13と遠心ドラッグ翼33自身の質量によってその内周部に生じる遠心応力は小径の円筒部16, 36にて有効に減じられ、高速回転に適したタービン翼13及び遠心ドラッグ翼33を構成することができる。

【0058】

タービン翼13及び遠心ドラッグ翼33の円筒部16, 36と主軸5との軸方向における接触面には、ピン（位置決め用部材）37がそれぞれ設けられている。これは、タービン翼13及び遠心ドラッグ翼33を主軸5に着脱する際、ポンプロータの径方向のバランスが崩れてしまうことを防止するためである。すなわち、ピン37によりタービン翼13、遠心ドラッグ翼33、及び主軸5の回転方向の相対位置を互いに固定することにより、ポンプロータのバランスの変化を防止することができる。

【0059】

また、遠心ドラッグポンプ要素30では、遠心ドラッグ翼33-1~5を主軸5に装着する際、遠心ドラッグ翼33-1~5と固定翼34-1~5とが交互に順に積み重ねられる。したがって、各遠心ドラッグ翼33-1~5の間にピン（位置決め用部材）39を設けて位相決めを行い、ポンプの分解及び組立時にポンプロータのバランスが崩れてしまうことを防止している。これにより、遠心ドラッグ翼33-1~5の回転方向の相対位置が常に一定となり、ポンプロータのバランスの崩れを防止できる。

【0060】

更に、ポンプロータのアンバランス量を極力少なくするために、ピン37, 39は主軸5を中心に対称もしくは円周等配に2カ所以上設けるのが望ましい。なお、上述した構成によれば、各遠心ドラッグ翼33-1~5の間に挿入される固定翼34-1~5は、それぞれ複数に分割することなく一体のままで組み立てることが可能となる。固定翼を複数に分割した場合、固定翼の分割面から気体が漏れるという問題が生じるが、本実施形態では、このような問題が生じないため、排気効率の高い真空ポンプが実現できる。

【0061】

次に、本実施形態の真空ポンプのバランス修正作業について説明する。
本実施形態のポンプロータは高速で回転されるため、ポンプロータのバランス修正作業が必須である。上記バランス修正作業は、まず、タービン翼13及び遠心ドラッグ翼33

10

20

30

40

50

- 1 ~ 5 等、主軸 5 に固定されるすべての部材を主軸 5 に組付けた状態にて、バランス等を用いて行う。次に、一旦ポンプロータを分解し、各遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 5 と固定翼 34-1 ~ 5 を交互に主軸 5 に挿入し、真空ポンプ全体の組立を行う。このとき、前述した通り、遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 5 はピン 39 により位相決めされているのでバランスの再現性が確保される。最後に、必要であれば真空ポンプの組立が完了した状態にてポンプロータを高速回転させ、この状態にてさらに精度の高いバランス修正を行う。

【0062】

ポンプを組立てた状態でのバランス修正作業は、主軸 5 の軸端に設けたバランスリング 17 とアキシャルディスク 43b の外周部を切削することにより行う。これは、タービン翼 13 や遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 5 の切削が困難なためである。例えば、タービン翼 13 は通常高強度アルミニウム合金で製作されるが、プロセスガス等に対して耐食性を付与するため、タービン翼 13 の表面に耐食処理 (Niめっき等の各種コーティング処理) が施される。このため、タービン翼 13 を切削するとコーティング膜も同時に除去してしまうために耐食性を損ねてしまう。また、各遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 5 は固定翼 34-1 ~ 5 と交互に組付けられているため、真空ポンプが組立てられた状態で切削を行うことが困難であるとともに、遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 5 をセラミックスで製作した場合は切削自体が困難である。

【0063】

上記理由により、バランス修正のための切削箇所は、バランスリング 17 とアキシャルディスク 43b の外周部であることが好ましい。バランスリング 17 は、耐食性を有する材料で製作することにより切削が可能となる。アキシャルディスク 43b は、強磁性体材料 (電磁軟鉄やパーマロイ等) により製作されるため耐食性は劣るが、アキシャルディスク 43b は排気される気体に晒されないこと、後述するバージガス導入によりアキシャルディスク 43b はプロセスガスなどの気体から保護される位置にあること、などの理由からアキシャルディスク 43b の切削は可能である。なお、アキシャルディスク 43b の切削作業は、その外周側に設けられたのぞき穴 46 にドリル等を挿入して行う。

【0064】

次に、本実施形態のポンプの運転動作について図 1 を参照して説明する。

タービン翼 13 の最上段近傍には、ほぼタービン翼 13 の外径と同一の口径を有する吸気口 11 が設けられており、この吸気口 11 から排気すべき気体が吸入される。そして、ターボ分子ポンプ要素 (第 1 の排気部) 10 は、タービン翼 13 をその外周部の周速度が 400 m/s 程度 (例えば、タービン翼 13 の直径 100 mm の場合では 7.5 万毎分回転 (min⁻¹) 程度) となるように高速回転させて、高真圧領域 (分子流領域) で効果的に気体を圧縮する。具体的には、吸気口圧力 $10^{-7} \sim 10^0$ Pa オーダーから 10^1 Pa オーダーまで気体を圧縮する。

【0065】

ターボ分子ポンプ要素 (第 1 の排気部) 10 にて圧縮された気体は、上ハウジング 24 の外周面と円筒ケーシング 21 の内周面との間に形成された流路 29 を通過して遠心ドラッグポンプ要素 (第 2 の排気部) 30 に導入される。流路 29 は、タービン翼 13 の最終段の外周部に隣接した位置に設けられ、軸方向に沿って下流側に延びている。ターボ分子ポンプ要素 10 では、主にタービン翼 13 の外周部にて気体が圧縮及び排気されるので、気体の流れを乱すことなく気体をタービン翼 13 の外周部から流路 29 を介して遠心ドラッグポンプ要素 30 へ導入でき、コンダクタンスを大きく (排気抵抗を小さく) することができる。

【0066】

遠心ドラッグポンプ要素 30 へ導入された気体は、複数の遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 5 と固定翼 34 との相互作用により大気圧付近 (10^5 Pa オーダー) まで圧縮される。遠心ドラッグ翼 33 は、タービン翼 13 と同様、主軸 5 の外周面に固定され高速回転する。まず、遠心ドラッグポンプ要素 30 へ導入された気体は、遠心ドラッグ翼 33-1 の内周側から外周側へ移送されながら圧縮される。外周側へ移送された気体は、固定翼 34-2

10

20

30

40

50

に沿って内周側に戻されて、再度次の段の遠心ドラッグ翼 33-2 にて圧縮される。このように、複数段の遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 5 を設けて気体を各遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 5 の内周側 外周側 内周側と移送させて圧縮することにより、極めて高い圧縮比が得られる。

【0067】

また、本実施形態のポンプでは、モータ 23 により主軸 5 が回転駆動され、主軸 5 の外周部に固定されたタービン翼 13 と遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 5 が回転することにより気体が順次圧縮されるため、気体の圧縮熱及び攪拌熱が発生する。この発熱量は圧縮比が大きいほど多いため、高真空領域にて動作するターボ分子ポンプ要素 10 及び遠心ドラッグポンプ要素 30 の温度上昇が著しい。また、回転駆動力を発生するモータ 23 においても損失による熱が発生する。さらに、上ラジアル磁気軸受 22、アキシャル磁気軸受 43、下ラジアル磁気軸受 44（以下、適宜磁気軸受 22, 43, 44 という）では、渦電流損失によるロータ側の昇温や、ポンプロータのアンバランスが増大したときにコイルへの電流が増大することによるステータ側の昇温が考えられる。

【0068】

さらに、磁気軸受 22, 43, 44 で主軸 5 を支承しない時には、上タッチダウン軸受 26 及び下タッチダウン軸受 47（以下、適宜タッチダウン軸受 26, 47 という）でポンプロータを支承することになるが、ポンプロータが高速回転するときにタッチダウン軸受 26, 47 でポンプロータを支承すると、タッチダウン軸受 26, 47 の内輪とポンプロータ又は内外輪と転動体との摩擦により発熱が生じる。そして、タッチダウン軸受 26, 47 が過度に高温となると、タッチダウン軸受 26, 47 内部の隙間の減少等によりタッチダウン軸受 26, 47 が劣化し、損傷を引き起こす可能性がある。したがって、昇温した上記各部を冷却し、過度な温度上昇を防止するため、ターボ分子ポンプ要素 10 の外周部（上ケーシング 12）及び遠心ドラッグポンプ要素 30 の外周部（下ケーシング 32）には、それぞれ冷却ジャケット 18, 38 が設けられている。同様に、上タッチダウン軸受 26、上ラジアル磁気軸受 22、及びモータ 23 の外周側（上ハウジング 24）に冷却ジャケット 25 が設けられ、アキシャル磁気軸受 43、下ラジアル磁気軸受 44、及び下タッチダウン軸受 47 の外周側に冷却ジャケット 45 が設けられている。

【0069】

なお、磁気軸受 22, 43, 44 及びモータ 23 を冷却する理由として、次の事由が挙げられる。すなわち、モータ 23 や磁気軸受 22, 43, 44 のステータ側には銅線からなるコイルが設けられるが、該コイルを腐食性プロセスガスから保護すると共に、コイルの絶縁性の強化及び伝熱性を高めるために、一般に、コイルの周囲には樹脂材が充填される。このコイル及び樹脂材の耐熱性が低いため、コイル及び樹脂材を冷却して、その温度を適正に保つ必要がある。

【0070】

遠心ドラッグポンプ要素 30 では、遠心ドラッグ翼 33 及び固定翼 34 にて発生する熱は下ケーシング 32 に設けられた冷却ジャケット 38 により冷却される。しかしながら、ポンプステータ（下ケーシング 32 や固定翼 34 など）の温度に比してポンプロータ（遠心ドラッグ翼 33 や主軸 5 など）の温度は依然として高い。このため、ポンプロータはポンプステータに比して熱膨張量が多くなり、遠心ドラッグ翼 33 と固定翼 34 との間のギャップが運転中に変化してしまう。このため、ポンプ性能が安定しないばかりか、最悪の場合遠心ドラッグ翼 33 と固定翼 34 が接触する恐れがある。このような問題の対策として、遠心ドラッグ翼 33 と固定翼 34 の接触を防止するために上記ギャップを大きく設定することが考えられるが、ポンプ性能を低下させることとなり好ましくない。

【0071】

そこで、本実施形態では次のような構成が採用されている。すなわち、最終段の遠心ドラッグ翼 33-5 のすぐ下には、センサターゲット 42a とアキシャル変位センサ 42b が設けられている。そして、アキシャル変位センサ 42b によりポンプロータの軸方向の変位量を検出し、検出された変位量に基づいてフィードバック制御等を介してアキシャル

磁気軸受 4 3 によりポンプローラの軸方向の位置を一定に保つようとする。これによって、ポンプローラが熱膨張した場合であっても、ポンプローラのアキシャル方向の基準位置をアキシャル変位センサ 4 2 b の測定点とすることができます。したがって、この測定点を起点として主軸 5 や遠心ドラッグ翼 3 3 が軸方向に伸びることになるので、遠心ドラッグ翼 3 3 の軸方向の変位量は微少に抑制され、遠心ドラッグ翼 3 3 と固定翼 3 4 間の軸方向のギャップを運転中ほぼ一定に維持できる。これにより、ポンプ性能を向上させることができると共に真空ポンプの運転を安定化することができる。さらに、上記ギャップを小さく（数 μ m ~ 数百 μ m オーダー）設定できるので、排気効率のよい真空ポンプが得られる。なお、排気効率が良くなると、遠心ドラッグポンプ要素 3 0 の 1 段あたりのポンプ性能が向上するので、遠心ドラッグ翼 3 3 の段数を少なくできる。遠心ドラッグ翼 3 3 の段数が少ないと主軸 5 の軸長はより短くすることができるため、真空ポンプの高速運転及びコンパクト化が容易となる。

10

20

30

【0072】

主軸 5 及び遠心ドラッグ翼 3 3 には、線膨張係数の小さい材料（線膨張係数 $0.5 \sim 5 \times 10^{-6}$ / K 程度の材料）を用いることが好ましい。線膨張係数の小さい材料を使用することにより、熱膨張による主軸 5 及び遠心ドラッグ翼 3 3 の伸び量を抑制することができる。上記材料として、例えば Fe - Ni 合金であるインバーやニレジスト鉄、もしくはセラミックス（SiC、SiN 等）等が挙げられる。さらに、セラミックスは耐熱性に優れ、軽量で比強度も高いので遠心ドラッグ翼 3 3 の材料としては非常に好適である。なお、遠心ドラッグ翼 3 3 をセラミックスで製作する場合には、遠心ドラッグ翼 3 3 の各段のプロフィール（翼形状）を、性能面で許容できる範囲内で同一にする。これにより、焼結による遠心ドラッグ翼 3 3 の大量生産が可能となりコストダウンを図ることが可能となる。

20

30

【0073】

なお、線膨張係数の小さい材料はポンプローラのみならずポンプステータに使用してもよい。このような構成によれば、プロセスガスに含まれる生成物の流路での析出を防止するために流路を高温にする必要がある場合、温度変化による各部材の寸法変化を極小化できる。また、更なる効果として、ターボ分子ポンプ要素 1 0 のタービン翼 1 3 と固定翼 1 4 との軸方向のギャップを極小化することが可能となり、排気性能を向上させることができる。

30

【0074】

次に、本発明の第 2 の実施形態に係る真空ポンプについて図 5 を参照して説明する。図 5 は本発明の第 2 の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。第 2 の実施形態と図 1 に示す第 1 の実施形態との相違点は、真空ポンプの第 2 の排気部の構成にある。なお、特に説明しない第 2 の実施形態の構成及び動作については上述した第 1 の実施形態と同様であるので、重複する説明を省略する。以下、本実施形態における第 2 の排気部の構成について説明する。

40

【0075】

図 5 に示すように、本実施形態における第 2 の排気部は、より高い圧縮比を得るために、遠心ドラッグポンプ要素 5 0 A と渦流ポンプ要素（渦流ポンプ部）5 0 B とを直列に配置した構造となっている。すなわち、2 段の遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 2 と、2 段の渦流翼（回転翼）5 1 - 1 ~ 2（以下、適宜、渦流翼 5 1 という）が主軸 5 に沿って直列に配置され、それぞれ主軸 5 に固定されている。遠心ドラッグポンプ要素 5 0 A では、固定翼 3 4 - 1 ~ 2 と遠心ドラッグ翼 3 3 - 1, 2 とが交互に配置され、同様に、渦流ポンプ要素 5 0 B では、渦室スペーサ 5 2 - 1 ~ 2（以下、適宜、渦室スペーサ 5 2 という）と渦流翼 5 1 - 1 ~ 2 とが交互に配置されている。

40

【0076】

図 6 (a) は図 5 に示す渦流翼の平面図であり、図 6 (b) は図 5 に示す渦流翼の正面図である。図 7 は図 5 に示す渦室スペーサの平面図である。図 8 は図 5 に示す排気流路の模式図である。図 6 (a) 及び図 6 (b) に示すように、渦流翼 5 1 の外周部には、放射

50

状に延びる複数の放射状翼 5 3 が形成されている。より詳しくは、渦流翼 5 1 は、主軸 5 に嵌合する小径の円筒部（ボス）5 1 a と、翼部（円板状の基部 5 1 b 及び放射状翼 5 3 ）とを有している。そして円筒部 5 1 a の軸方向寸法 L 1 は、翼部（基部 5 1 b 及び放射状翼 5 3 ）の軸方向長寸法 L 2 より大きい。また、円筒部 5 1 a の外周面の位置において、基部 5 1 b の下面から円筒部 5 1 a の下端までの寸法 L 5 及び基部 5 1 b の上面から円筒部 5 1 a の上端までの寸法 L 6 は、基部 5 1 b の厚さ（軸方向寸法）L 4 の 0.5 倍以上に設定されている。これにより、渦流翼 5 1 においても、回転により生じる内部応力を低減できる。なお、円筒部 5 1 a と基部 5 1 b との接続部には、隅肉部 5 1 c が形成されている。また、図 7 に示すように、渦室スペーサ（固定翼）5 2 は、周方向に延びる流路溝（渦室）5 4 を有しており、この流路溝 5 4 の一端に気体導入口 5 5 が、他端に気体導出口 5 6 が設けられている。なお、図 7 中の矢印 C は渦流翼 5 1（図 7 中には図示せず）の回転方向を表している。図 5 に示すように、放射状翼 5 3 と流路溝 5 4 との間には排気流路 5 7 が形成されている。10

【 0 0 7 7 】

渦流翼 5 1 が回転すると、気体導入口 5 5 から流入した気体は、排気流路 5 7 内で渦流を形成し、気体導出口 5 6 に向かって移送されながら圧縮され、気体導出口 5 6 から排出される。本実施形態の渦流ポンプ要素 5 0 B は 2 段の渦流翼 5 1 - 1 ~ 2 が直列に配置された多段構成のため、各段の気体導入口 5 5 と気体導出口 5 6 とが接続され（図 8 参照）、最終段の渦室スペーサ 5 2 - 2 の気体導出口 5 6 が排気口 3 1 に連通される。なお、本実施形態における渦流翼 5 1 は、渦流翼 5 1 の両面に渦流を発生させる、いわゆる両面翼の形状を有しているが、渦流翼の片面にのみ過流を発生させる片面翼を採用してもよく、更に、渦流翼の外周側及び内周側で渦を発生させる形状を有した渦流翼を採用することも可能である。20

【 0 0 7 8 】

図 8 に示すように、渦流ポンプ要素 5 0 B では排気流路 5 7 が螺旋状に形成されることとなるが、排気流路 5 7 は、渦流翼 5 1 と渦室スペーサ 5 2 との間に、軸方向の微少隙間 5 8 と径方向の微少隙間 5 9 を有するため（図 5 参照）、これらの隙間 5 8, 5 9 はできるだけ狭くして気体の逆流を防止することが好ましい。

【 0 0 7 9 】

かかる観点から、センサターゲット 4 2 a 及びアキシャル変位センサ 4 2 b は、最終段の渦流翼 5 1 - 2 のすぐ下に設けられている。これにより、ポンプロータの軸方向の基準位置はアキシャル変位センサ 4 2 b の測定点となるため、ポンプロータが熱膨張した場合にこの測定点を起点として主軸 5 と渦流翼 5 1 が軸方向に伸びることになる。したがって、各渦流翼 5 1 の軸方向の変位量をアキシャル磁気軸受 4 3 を介して微少に抑制することが可能である。この結果、渦流翼 5 1 と渦室スペーサ 5 2 間の軸方向の隙間 5 8 を運転中ほぼ一定に維持できる。よって、ポンプ性能を向上させると共に安定化できる。さらに、設計段階において隙間 5 8 を可及的に小さく（数 μ m ~ 数百 μ m オーダー）設定できるので、排気効率のよい真空ポンプが実現できる。30

【 0 0 8 0 】

主軸 5 及び渦流翼 5 1 には、線膨張係数の少ない材料（線膨張係数 $0.5 \sim 5 \times 10^{-6}$ / K 程度）を用いることが好ましい。これにより、熱膨張による主軸 5 及び渦流翼 5 1 の伸び量をより抑制することができる。上記材料として、例えば Fe - Ni 合金であるインバー やニレジスト 鋳鉄、もしくはセラミックス（SiC, SiN 等）等が挙げられる。特にセラミックスは耐熱性に優れ、軽量で比強度も高いので、渦流翼 5 1 の材料としては非常に好適である。また、径方向の微少隙間 5 9 をシールするために、渦室スペーサ 5 2 の内周面にラビリンスシール機構を設けて気体の逆流防止を行っている。このような構成により、渦流翼 5 1 の各段間のシール性能が向上し、その結果、圧縮比の大きい渦流ポンプ要素が実現できる。

【 0 0 8 1 】

なお、線膨張係数の小さい材料はポンプロータのみならず渦室スペーサなどのポンプス50

テータにも使用することができる。例えば、排気流路 57 内で生成物が析出してしまうことを防止するために排気流路 57 を高温にする必要がある場合、温度変化による渦室スペーサ 52 (排気流路 57) の寸法変化を少なくすることができる。また、更なる効果として、第 1 の排気部 (ターボ分子ポンプ要素 10) のポンプローティ側とポンプステータ側との軸方向のギャップを極小化することが可能となり、排気性能を向上させることができる。

【 0 0 8 2 】

図 9 は、本発明の第 3 の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。本実施形態では、第 1 の排気部に遠心ドラッグポンプ要素を、第 2 の排気部に渦流ポンプ要素を設けたことが、第 1 の実施形態との大きな相違点である。なお、図 1 及び図 5 と同一の部分については同一の符号を付し、その重複する説明を省略する。

【 0 0 8 3 】

本実施形態の真空ポンプは、第 1 の排気部として遠心ドラッグポンプ要素 30 を、第 2 の排気部として渦流ポンプ要素 60 を備えている。このような構成によれば、大気圧から中真空領域 (10^{-1} Pa オーダー) までの範囲で有効に動作可能な真空ポンプが実現できる。遠心ドラッグポンプ要素 30 は、遠心ドラッグ翼 33-1 ~ 4 及び固定翼 34-1 ~ 4 を備えた 4 段構成であり、遠心ドラッグ翼 33 の渦巻状羽根 35 の高さ及び固定翼 34 の渦巻状羽根 66 の高さは、上流側から下流側へ順次小さくなっている。渦流ポンプ要素 60 は、渦流翼 51-1 ~ 4 及び渦室スペーサ 52-1 ~ 4 を備えた 4 段構成であり、上流側から下流側へ渦流翼 51-1 ~ 4 及び渦室スペーサ 52-1 ~ 4 の厚さを順次薄くしている。これにより、遠心ドラッグポンプ要素 30 及び渦流ポンプ要素 60 は、上流側 (吸気側) から下流側 (排気側) へ排気流路 65, 57 の断面積を順次減じていく構成となり、効率的に気体を排気及び圧縮することができる。

【 0 0 8 4 】

また、図 9 に示すように、アキシャル磁気軸受 43 は、下側に配置される電磁石 43c を大きくして下向きの電磁力を大きくした構成としている。これは、ポンプ運転中に排気口 31 の圧力が大気圧近傍である場合に、ポンプローティには、回転翼面積 × (吸気口と排気口との間の圧力差) により算出される上向きの力 (例えば、回転翼径が 100 mm では 800 N 程度) が発生するためである。この場合、真空ポンプ運転中に電磁石 43c には多くの電流が流れるため、冷却ジャケット 45 をなるべく電磁石 43c に近接して配置することが好ましい。

【 0 0 8 5 】

なお、排気流路の断面積は、ポンプ要素の種類により様々な方法によって増減させることができる。図 10 は排気流路の断面積と各種パラメータとの関係を説明するための表である。図 11 (a) 乃至図 11 (c) は図 10 の表に記載されたタービン翼の一例を示す参考図である。図 12 (a) 及び図 12 (b) は図 10 の表に記載された遠心ドラッグ翼の一例を示す参考図である。図 13 (a) 及び図 13 (b) は図 10 の表に記載された渦流翼の一例を示す参考図である。

【 0 0 8 6 】

タービン翼 13 (図 11 (a) 乃至図 11 (c) 参照) においては、排気流路の断面積を増減させるパラメータとして羽根 13a の枚数と高さがある。そして、図 11 (b) 及び図 11 (c) に示すように、羽根 13a の高さを低くする、及び / 又は羽根 13a の枚数を増やすことにより、羽根 13a 間の寸法が小さくなつて排気流路の断面積を小さくできる。また、図 11 (a) 及び図 11 (b) に示すように、羽根 13a の高さを低くするに従い、結果的に羽根 13a の角度は減少する。

【 0 0 8 7 】

遠心ドラッグ翼 33 (図 12 (a) 及び図 12 (b) 参照) においては、排気流路の断面積を増減させるパラメータとして溝 33c (渦巻状羽根 35) の本数と深さがある。ここで、溝 33c は渦巻状羽根 35 の間に形成される凹部を意味する。そして、溝 33c (渦巻状羽根 35) の本数を多くする (溝幅を狭くする) 、及び / 又は溝 33c の深さを浅

10

20

30

40

50

くする（渦巻状羽根 3 5 の高さを低くする）ことにより排気流路の断面積を小さくできる。

【 0 0 8 8 】

渦流翼 5 1（図 1 3（a）及び図 1 3（b）参照）においては、排気流路の断面積を増減させるパラメータとして放射状翼 5 3 の枚数と高さがある。そして、放射状翼 5 3 の枚数を増やす、及び／又は放射状翼 5 3 の高さを低くすることにより、放射状翼 5 3 の間の寸法が小さくなつて排気流路の断面積を減少できる。このように、いずれの回転翼を採用する真空ポンプにおいても、それぞれの最適な運転圧力範囲内において、高真空側から低真空側へ排気流路の断面積を減じていくことにより、効率的に気体を圧縮及び排気することができる。これらの回転翼の構成は、いずれの実施形態に使用してもよい。

10

【 0 0 8 9 】

図 1 4 は本発明の第 4 の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。図 1 5 は図 1 4 の XV-XV 線断面図である。本実施形態に係る真空ポンプは、生成物を含むプロセスガスを排気する場合に好適に使用される。なお、特に説明しない本実施形態の構成及び動作は、上述した第 3 の実施形態と同様であるので、重複する説明を省略する。

【 0 0 9 0 】

図 1 4 に示す真空ポンプでは、遠心ドラッグポンプ要素（第 1 の排気部）3 0 の最終段の遠心ドラッグ翼 3 3 - 4 近傍に中間排気口 9 1 が設けられ、渦流ポンプ要素（第 2 の排気部）6 0 の第 1 段目の渦流翼 5 1 - 1 近傍に中間吸気口 9 2 が設けられている。中間排気口 9 1 と中間吸気口 9 2 とは排気管 9 3 にて接続されている。そして、第 1 の排気部 3 0 から排気された気体は排気管 9 3 を通過して渦流ポンプ要素 6 0 へ導入される。また、遠心ドラッグポンプ要素 3 0 の上ケーシング 1 2 の外周部と、排気管 9 3 の外周部と、渦流ポンプ要素 6 0 の下ケーシング 3 2 の外周部には、気体の流路を加熱するためのヒータ 9 4 , 9 5 , 9 6 が各々取り付けられている。

20

【 0 0 9 1 】

上記構成を有する本実施形態の真空ポンプでは、気体の流路が各々のヒータ 9 4 , 9 5 , 9 6 により予め十分に加熱された状態で運転を開始することができる。運転開始後は、排気される気体の圧縮熱や攪拌熱により、遠心ドラッグポンプ要素 3 0 や渦流ポンプ要素 6 0 が発熱する。このため、図示しないが、遠心ドラッグポンプ要素 3 0 及び排渦流ポンプ要素 6 0 近傍に、それぞれ温度検出手段を設けてヒータ 9 4 , 9 5 , 9 6 による加熱量を調整し、気体の流路が所定の温度を維持できるように制御する。

30

【 0 0 9 2 】

遠心ドラッグポンプ要素 3 0 や渦流ポンプ要素 6 0 での気体の圧縮作用が大きい場合は、気体の圧縮熱や攪拌熱による発熱量が多くなるので、ヒータ 9 4 , 9 6 による加熱量を調節するだけでは所定の温度を維持できなくなる。このような場合は、冷却ジャケット 1 8 , 3 8 の冷却媒体の流量や温度を調整することにより、排気流路 6 5 , 5 7 の温度を所定の温度に維持することができる。上記構成により、真空ポンプ内の排気流路 6 5 , 5 7 は運転中常に所定の温度にまで昇温されるため、気体に含まれる生成物の排気流路 6 5 , 5 7 での析出を防止できる。これにより、生成物析出によるポンプロータの回転阻害や排気流路 6 5 , 5 7 の断面積の減少によるポンプ性能の低下を防止することができ、長期間安定した性能を維持できる真空ポンプを提供できる。なお、昇温されるべき流路の温度は、半導体製造プロセスに使用されるガスの種類、ガス量、圧力等諸々の条件によるが、1 0 0 以上が好ましい。

40

【 0 0 9 3 】

主軸 5 に固定されたセンサターゲット 4 2 c 及び該センサターゲット 4 2 c の軸方向の変位を測定するアキシャル変位センサ 4 2 d は、最終段の遠心ドラッグ翼 3 3 - 4 の近傍に配置されている。また、主軸 5 に固定されたセンサターゲット 4 2 a 及び該センサターゲット 4 2 a の軸方向の変位を測定するアキシャル変位センサ 4 2 b は、最終段の渦流翼 5 1 - 4 の近傍に配置されている。さらに、主軸 5 の軸方向の変位を測定するアキシャル変位センサ 4 2 e は、主軸 5 の下流側端部の近傍に配置されている。

50

【0094】

主軸 5 、遠心ドラッグ翼 3 3 、及び渦流翼 5 1 等で構成されるポンプロータの軸方向の基準位置は、最終段の渦流翼 5 1 - 4 のすぐ下流側に設置されたアキシャル変位センサ 4 2 b によって測定される。そして、アキシャル変位センサ 4 2 b の測定値に基づいてフィードバック制御等を介してアキシャル磁気軸受 4 3 によりポンプロータの軸方向の位置を一定に保つようとする。ここで、他の 2 つのアキシャル変位センサ 4 2 d , 4 2 e は、それぞれの設置箇所でのポンプロータと固定翼 3 4 , 5 2 などから構成されるポンプステータとのギャップを測定し、これらの測定値を真空ポンプの制御動作や保護動作等に必要な情報として用いることができる。

【0095】

例えは、真空ポンプの運転時において各部の温度変化により、上記ポンプロータ及びポンプステータは、ポンプロータの浮上位置制御に使用されるアキシャル変位センサ 4 2 b の測定点を起点として、軸方向に熱膨張又は収縮する。このため、遠心ドラッグポンプ要素 3 0 及び渦流ポンプ要素 6 0 でのポンプロータとポンプステータとの間のギャップや、ポンプロータの軸方向の動きを規制する下タッチダウン軸受 4 7 と主軸 5 との軸方向ギャップが変化する。その結果、ポンプ性能が安定しないばかりか最悪の場合ポンプロータとポンプステータ及びタッチダウン軸受とが接触し、運転不能になる可能性がある。

【0096】

上記問題の対策として、ポンプロータの浮上位置制御に使用されるアキシャル変位センサ 4 2 b の他に、軸方向においてアキシャル変位センサ 4 2 b とは異なった位置にアキシャル変位センサ 4 2 d , 4 2 e を設置する。そして、アキシャル変位センサ 4 2 d , 4 2 e によって各設置位置におけるポンプロータとポンプステータの基準位置からの変位量を監視し、変位量が所定の適正值から外れた場合には、運転を停止する等の保護動作を行うことにより、運転の安全性を確保することができる。更に、ポンプステータの温度をサーミスタ、熱電対等の温度検出手段（図示せず）で検出しつつ、アキシャル変位センサ 4 2 d , 4 2 e の出力信号を温度監視装置（図示せず）により監視する。これにより、ポンプロータ及びポンプステータの軸方向寸法の変化に基づいて、ポンプロータの温度を検出することが可能となる。

【0097】

また、遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 の間にはリング状部材 6 1 が設けられており、これらのリング状部材 6 1 は遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 に隣接するように配置されている。そして、これらのリング状部材 6 1 によって各遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 の軸方向位置が固定されている。このリング状部材 6 1 は、主軸 5 と遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 との材料の違い（熱膨張係数の違い）による軸方向の伸び量の差を吸収し、かつ遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 の軸方向の位置を調整するために設置されている。すなわち、主軸 5 の材料を例えはマルテンサイト系ステンレス鋼（線膨張係数 $1.0 \times 10^{-6} / K$ ）で構成し、遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 の材料を窒化ケイ素セラミックス（Si₃N₄、線膨張係数 $3 \times 10^{-6} / K$ ）で構成した場合、主軸 5 に遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 を積み重ねて位置決めしてしまうと、運転時の温度上昇により遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 の伸び量よりも主軸 5 の伸び量が大きくなつて初期の締結（位置決め）状態が変化し、遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 の軸方向位置が変化してしまう可能性がある。

【0098】

このような問題を防止するため、主軸 5 と、該主軸 5 に取り付けられる第 1 のユニット（遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 、リング状部材 6 1 、センサターゲット 4 2 c ）との伸び量を略同一に調整するように、リング状部材 6 1 を主軸 5 とは異なる材料（例えは、オーステナイト系ステンレス鋼 $1.5 \times 10^{-6} / K$ ）で構成する。これにより、主軸 5 に取り付けられる第 1 のユニットの締結（位置決め）状態に変化がなくなる。また、第 1 のユニットでの熱応力の発生を防止することができる。さらに、渦流翼 5 1 - 1 ~ 4 の間にも同様の作用を有するリング状部材 6 2 が設置されている。第 2 のユニットは、渦流翼 5 1 - 1 ~ 4 、リング状部材 6 2 、センサターゲット 4 2 a 、及びアキシャルディスク 4 3 b か

10

20

30

40

50

ら構成され、主軸 5 と、該主軸 5 に取り付けられる第 2 のユニットとの線膨張係数は略同一である。なお、本実施形態では、回転翼の軸方向の位置を調整する構成例を示したが、主軸と回転翼との間にリング状部材を介在させ、回転翼の径方向の位置を調整することもできる。

【 0 0 9 9 】

なお、上述した遠心ドラッグ翼 3 3 の主軸 5 に対する位置決めの手法を、このリング状部材 6 1 の主軸 5 への位置決めに適用することもできる。すなわち、リング状部材 6 1 は、遠心ドラッグ翼 3 3 に比べて小径であるため、回転時にリング状部材 6 1 に生じる応力は小さい。一方、遠心ドラッグ翼 3 3 は直径が大きいため、円筒部（ボス）3 6 を設けて遠心ドラッグ翼 3 3 に生じる応力を低減させても、高速で回転する遠心ドラッグ翼 3 3 の円筒部 3 6 に生じる応力は必然的に大きくなる。そこで、図 15 に示すように、円筒部 3 6 の外周面に軸方向に沿って延びる断面半円状の切欠き（溝）3 6 a を形成し、リング状部材 6 1 の内周面に、軸方向に沿って延びる断面半円状の切欠き（溝）6 1 a を形成する。そして、2つの切欠きにより形成されるピン穴にピン（位置決め用部材）6 3 を挿入する。こうすることにより、円筒部 3 6 の内部にピン穴を形成した場合にくらべて、円筒部 3 6 に生じる応力を小さくできる。この場合において、リング状部材 6 1 に生じる応力は元々小さいため、切欠きにより応力が上昇しても支障はない。このような構成により、遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 4 の相対的な位相決めと高速回転の両立が可能となる。なお、上記構成は、遠心ドラッグ翼 3 3 に限らず、タービン翼 1 3 や渦流翼 5 1 など、他の形式の回転翼に適用してもよいことは言うまでもない。

【 0 1 0 0 】

なお、排気管 9 3 は真空ポンプの外周部に配置されるため、排気管 9 3 の着脱が容易である。したがって、排気管 9 3 の交換等により排気管 9 3 のメンテナンスを簡単に実施できる。また、排気管 9 3 を加熱するのではなく逆に冷却することにより、ガス中に含まれる生成物を積極的に排気管 9 3 で析出させ、一定期間毎に排気管 9 3 を交換しても良い。このように、排気管 9 3 を生成物のトラップ装置として機能させることもできる。この場合、ガスに含まれる生成物は排気管 9 3 内でトラップされるため、渦流ポンプ要素 6 0 での生成物の析出を防止できると共に、生成物を含むガスを排気口 3 1 から排出させないようにすることができる。

【 0 1 0 1 】

また、真空ポンプの運転中、モータ 2 3 や磁気軸受 2 2, 4 3, 4 4 から発生した熱は、冷却ジャケット 2 5, 4 5 により吸熱される。本実施形態に係る構成では、遠心ドラッグポンプ要素 3 0 と渦流ポンプ要素 6 0 の間の流路に排気管 9 3 が設けられ、モータ 2 3 や上ラジアル磁気軸受 2 2 を収容する上ハウジング 2 4 の外周部が流路の一部として使用されない。したがって、流路に熱的影響を与えることなくモータ 2 3 及び上ラジアル磁気軸受 2 2 の冷却を行うことができる。また、下ラジアル磁気軸受 4 4 及びアキシャル磁気軸受 4 3 は、流路から離れた位置、すなわち、渦流ポンプ要素 6 0 の下流側に配置されているので、下ラジアル磁気軸受 4 4 及びアキシャル磁気軸受 4 3 も流路に熱的影響を与えることなく冷却できる。このため、モータ 2 3 や磁気軸受 2 2, 4 3, 4 4 の冷却効率を向上でき、モータ 2 3 及び磁気軸受 2 2, 4 3, 4 4 の小型化及び高容量化が可能となる。また、モータ 2 3 及び磁気軸受 2 2, 4 3, 4 4 の冷却と排気管 9 3 の加熱とを個別に制御及び実施できるので、上述した各部への冷却作用及び加熱作用は互いに影響されにくくなり、熱効率を向上できる。

【 0 1 0 2 】

また、図 14 に示すように、本実施形態の真空ポンプでは、上ラジアル磁気軸受 2 2 及びモータ 2 3 が収容される上ハウジング 2 4 内に、上バージガスポート 7 3 及びバージガス流路 7 4 が設けられている。また、下ラジアル磁気軸受 4 4 及びアキシャル磁気軸受 4 3 が収容される下ハウジング 4 1 内に、下バージガスポート 8 4, 8 5 が設けられている。上バージガスポート 7 3 および下バージガスポート 8 4, 8 5 は、図示しないバージガス供給源に接続されている。

10

20

30

40

50

【0103】

バージガスは、上下ラジアル磁気軸受22, 44、アキシャル磁気軸受43、及びモータ23に、排気される気体中に含まれる生成物が析出するのを防止するために用いられる。また、バージガスを導入することによって上ハウジングユニット20及び下ハウジングユニット40内への気体の侵入が防止される。

【0104】

上バージガスポート73より導入されたバージガスは、バージガス流路74を通って上ラジアル磁気軸受22の上流側及びモータ23の下流側から上ハウジングユニット20の内部に導入される。これにより、上ラジアル磁気軸受22及びモータ23の周囲はバージガス雰囲気となり、排気される気体の侵入を防止できる。また、上ハウジングユニット20と渦流ポンプ要素(第2の排気部)60との連通部には、ラビリングシール機構75が設けられている。このラビリングシール機構75により、排気される気体の上ハウジングユニット20への侵入が確実に防止され、上ハウジングユニット20内での生成物の析出が防止できる。なお、図示しないが、上タッチダウン軸受26付近にラビリングシール機構等の非接触シール機構を設ければ、より効果的に上ハウジングユニット20への気体の侵入を防ぐことができる。

【0105】

一方、下バージガスポート84, 85より導入されるバージガスは、タッチダウン軸受47、下ラジアル磁気軸受44、及びアキシャル磁気軸受43を通って排気口31より排出される。これにより、下ラジアル磁気軸受44及びアキシャル磁気軸受43の周囲はバージガス雰囲気となり、排気される気体の下ハウジングユニット40への侵入を防止できる。さらに、図示はしないが、渦流ポンプ要素60と下ハウジングユニット40との連通部にラビリングシール機構を設け、排気される気体からアキシャル磁気軸受43及び下ラジアル磁気軸受44を保護することもできる。

【0106】

図16は本発明の第5の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。本実施形態では、主軸5を回転駆動するモータ23を遠心ドラッグポンプ要素(第2の排気部)30の下流側に配置される下ラジアル磁気軸受44の近傍に配置したこと、及びバージガス供給機構を設けたことが第1実施形態との大きな相違点である。本実施形態に係る真空ポンプについて以下に詳細に説明する。

【0107】

図16に示す真空ポンプは、ターボ分子ポンプ要素(第1の排気部)10、上ハウジングユニット70、遠心ドラッグポンプ要素(第2の排気部)30、下ハウジングユニット80を備えている。主軸5は真空ポンプ全体に亘って延び、主軸5の上端から下端にかけて、順に、ターボ分子ポンプ要素(第1の排気部)10 上ハウジングユニット70 遠心ドラッグポンプ要素(第2の排気部)30 下ハウジングユニット80が直列に配置されている。ここで、ターボ分子ポンプ要素(第1の排気部)10と遠心ドラッグポンプ要素(第2の排気部)30は第1の実施形態とほぼ同一構成のため、同一の符号を付して説明を省略する。

【0108】

上ハウジングユニット70は上ハウジング71を備えている。この上ハウジング71は円筒形状を有しており、その下端にはフランジ部が形成されている。上ハウジング71は上ケーシング12内に位置しており、上ハウジング71のフランジ部は上ケーシング12の下端部に当接されている。上ハウジング71内には上タッチダウン軸受26及び上ラジアル磁気軸受22が収容され、上ハウジング71の周壁内に設けられた冷却ジャケット76により上タッチダウン軸受26及び上ラジアル磁気軸受22の冷却が行われている。さらに、上ラジアル磁気軸受22の下方には、ラビリングシール機構75が設けられている。

【0109】

下ハウジングユニット80は下ハウジング81を備えており、この下ハウジング81内

10

20

30

40

50

に、アキシャル磁気軸受43、モータ23、下ラジアル磁気軸受44、及び下タッチダウン軸受47が配置されている。下ハウジング81の周壁内には冷却ジャケット83が設けられており、この冷却ジャケット83により、アキシャル磁気軸受43、モータ23、下ラジアル磁気軸受44、及び下タッチダウン軸受47が冷却される。下ハウジング81の上端部には、センサターゲット42a及びアキシャル変位センサ42bが設けられている。

【0110】

上記構成により、ターボ分子ポンプ要素10と遠心ドラッグポンプ要素30との軸方向距離を短くできるので、ターボ分子ポンプ要素10と遠心ドラッグポンプ要素30との間に設けられた流路29のコンダクタンスが大きくなり、真空ポンプの実効排気速度をより大きくすることが可能となる。また、排気すべき気体量が増えると、モータ23への負荷が増してモータ23のコイルに電流が多く流れるため、モータ23の冷却が特に重要となる。本実施形態では、モータ23の外周部に冷却ジャケット83が設けられているので、モータ23の冷却が容易となる。

【0111】

一方、生成物を含むガスを排気する場合、生成物の析出防止のために流路を所定温度以上に加熱することが必要となる。本実施形態では、モータ23は、流路を持たない下ハウジングユニット80内に設置されているため、流路29から離れた位置でモータ23を冷却することができる。なお、上ハウジングユニット70内にモータ23を配置した場合、モータ23のモータロータ及びモータステータは真空環境下に位置するため、モータロータとモータステータ間の熱伝達率が低くなる。このため、モータロータ側で発生した熱をモータステータ側へ伝達しづらくなる。一方、本実施形態のように、下ハウジングユニット80内にモータ23を設ければモータロータ周辺は大気圧環境となり、モータ23の排熱が容易となる。

【0112】

また、本実施形態の真空ポンプでは、上バージガスポート73が上ハウジング71に設けられ、下バージガスポート84, 85が下ハウジング81に設けられている。上ラジアル磁気軸受22が収容される上ハウジングユニット70内には、上バージガスポート73からバージガスが導入される。同様に、アキシャル磁気軸受43、下ラジアル磁気軸受44、及びモータ23が収容される下ハウジングユニット80内には、下バージガスポート84, 85からバージガスが導入されるようになっている。このバージガスは、本実施形態の真空ポンプを用いて腐食性プロセスガスを排気する場合に、耐腐食性に乏しい構成材料、例えばケイ素鋼板や銅線コイルを備える上下ラジアル磁気軸受22, 44、アキシャル磁気軸受43、及びモータ23を保護するために用いられる。したがって、バージガスを真空ポンプ内に導入することによって腐食性プロセスガスを排気する場合でも、長期間安定した真空ポンプの運転が可能となる。

【0113】

上バージガスポート73から導入されたバージガスは、上ハウジング71内に形成されたバージガス流路74を通って上ラジアル磁気軸受22の上流側及び下流側より上ハウジング71内へ導入される。これにより、上ラジアル磁気軸受22の周囲はバージガス雰囲気となり、排気される腐食性プロセスガスの上ハウジング71内への侵入を防止できる。さらに、上ハウジング71と遠心ドラッグポンプ要素30と連通部にはラビリンスシール機構75が設けられており、プロセスガスの上ハウジング71内への侵入が防止されるようになっている。これにより、上ラジアル磁気軸受22や上タッチダウン軸受26の構成部品の腐食が防止でき、また、析出した生成物が上記構成部品上に堆積してしまうことが防止できる。なお、図示しないが、上タッチダウン軸受26付近にラビリンスシール機構等の非接触シール機構を設ければ、より効果的にプロセスガスの上ハウジング71への侵入を防ぐことができる。

【0114】

一方、下バージガスポート84, 85より導入されるバージガスは、下ラジアル磁気軸受44の外周部に設けられた冷却ジャケット83を介してモータ23の冷却に利用される。

10

20

30

40

50

受44、モータ23、及びアキシャル磁気軸受43を通って排気口31より排出される。これにより、下ラジアル磁気軸受44及びアキシャル磁気軸受43の周囲はバージガス雰囲気となり、腐食性プロセスガスなどの気体の下ハウジング81内への侵入を防止できる。さらに、遠心ドラッグポンプ要素30と下ハウジング81との連通部にはラビリンスシール機構86が設けられており、下ハウジング81内への気体の侵入が効果的に防止される。

【0115】

前述したバージガス供給機構は、モータ23が上ラジアル磁気軸受22の近傍に配置された第1の実施形態の真空ポンプ等、その他の実施形態の真空ポンプに設けてもよいことは勿論である。次に、バージガス供給機構を第1実施形態の真空ポンプに適用した例を図17に示す。

【0116】

図17は本発明の第6の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。図17に示すように、上バージガスポート73より導入されたバージガスは、上ハウジング24内に形成されたバージガス流路74を通って上ラジアル磁気軸受22の上流側とモータ23の下流側より上ハウジング24の内部へ導入される。これにより、上ラジアル磁気軸受22及びモータ23の周囲はバージガス雰囲気となり、排気される腐食性プロセスガスの上ハウジング24への侵入を防止できる。さらに、上ハウジング24と遠心ドラッグポンプ要素30との連通部にラビリンスシール機構75を設けて、排気ガスから上ハウジング71内を保護できるようにしているので、上ラジアル磁気軸受22やモータ23などの構成部品の腐食が防止され、析出物の上記構成部品への堆積が防止される。

【0117】

また、上ハウジング24は第2の排気部である遠心ドラッグポンプ要素30の上流側に設けられているため、上ハウジング24内は真空となる。この場合、上ラジアル磁気軸受22及びモータ23のロータ側とステータ側との間の熱伝達量は極めて少なく、上ラジアル磁気軸受22及びモータ23のロータ側は高温になってしまう。本実施形態では、バージガスを上ハウジング24内に導入することにより、上ラジアル磁気軸受22及びモータ23のロータ側とステータ側との間に存在する気体の圧力を高くすることができる。これにより、上ラジアル磁気軸受22及びモータ23のロータ側とステータ側との間の熱伝達量は増し、冷却ジャケット25にて上ラジアル磁気軸受22及びモータ23のロータ側とステータ側の両方を有効に冷却できる。

【0118】

図18は本発明の第7の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。本実施形態に係る真空ポンプは、腐食性プロセスガスを排気する場合に好適に使用される。図18に示すように、本実施形態における真空ポンプでは、上ラジアル磁気軸受22のステータ22aの内周面及びモータ23のモータステータ23aの内周面は保護部材27によって覆われてあり、上ラジアル磁気軸受22のロータ22bの外周面及びモータ23のモータロータ23bの外周面にも保護部材28が被覆されている。同様に、下ラジアル磁気軸受44のステータ44a及びロータ44bの両方に保護部材48, 49がそれぞれ設けられている。

【0119】

一般に、アキシャル磁気軸受では、ロータが回転しても電磁石の磁気回路において磁界変化が発生しない。このため、磁気回路内の渦電流損失を低減させる工夫を行う必要がなく、積層されたケイ素鋼板をコア（鉄心）として用いる必要がない。したがって、アキシャル磁気軸受のロータ側のコアは1つの材料から一体的に構成できるので、耐食性を有する材料（電磁ステンレス鋼、パーマロイ等）の使用や、コアの表面に耐食処理（Niめっき、PTFEコーティング等）を施すことが容易である。すなわち、本実施形態では、アキシャル磁気軸受43は、1つの材料から一体的に構成されたアキシャルディスク43bを備え、そのアキシャルディスク43bの表面には耐食膜99が施されている。また、アキシャル磁気軸受43のステータ側の電磁石43aでは、コイルの表面のみに保護部材9

8 が設けられ、排気される気体と該コイルとの接触が防止されている。電磁石 4 3 a のコアは、耐腐食性を有する材料（電磁ステンレス鋼、パーマロイ等）で構成されている。また、軸方向のポンプロータの変位を検出するアキシャル変位センサ 4 2 b の表面にも保護部材 9 7 が設けられている。

【0120】

なお、コアとして積層されたケイ素鋼板を用いない構成は、コアに改良を加えることによりラジアル磁気軸受に適用することも可能である。例えば、ロータ側のコアを1つの材料から一体的に構成する場合において、コアの外周部にスリット状の円周溝を軸方向に多数設けることにより渦電流損失を低減できる。このように、ロータの回転速度や渦電流損失等で決まる磁気軸受の周波数特性を考慮して上記構成をラジアル磁気軸受に採用することが好ましい。

【0121】

ここで、上述した保護部材 2 7 , 2 8 , 4 8 , 4 9 , 9 7 , 9 8 は、モータ 2 3 や磁気軸受 2 2 , 4 3 , 4 4 にて発生する磁界に影響を与えない非磁性材であって、かつプロセスガスに対して耐食性を有する材料で構成されることが好ましい。例えば、上記材料は、オーステナイト系ステンレス鋼や P T F E (ポリテトラフルオロエチレン)、セラミックス等であることが好ましい。また保護部材の一部、もしくは全部を耐食膜としてもよい。

【0122】

上記構成により、モータ 2 3 、上下ラジアル磁気軸受 2 2 , 4 4 、及びアキシャル磁気軸受 4 3 の構成部品であるケイ素鋼板や銅線コイル、及びコイル絶縁体等の耐食性に乏しい部品が、腐食性ガスと接することを防止できる。したがって、モータ 2 3 や磁気軸受 2 2 , 4 3 , 4 4 の腐食による劣化を防止でき、長期間安定した運転を行うことができる真空ポンプを提供できる。

【0123】

図 1 9 は本発明の第 8 の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。なお、特に説明しない本実施形態の構成は第 1 の実施形態と同様であり、その重複する説明を省略する。

図 1 9 に示すように、真空ポンプは、5 段の遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 5 及び 5 段の固定翼 3 4 - 1 ~ 5 を有する遠心ドラッグポンプ要素（排気部）3 0 と、遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 5 が固定される主軸 5 と、主軸 5 を介して遠心ドラッグポンプ要素 3 0 を駆動するモータ 2 3 を有する駆動部 6 8 とを備えている。遠心ドラッグポンプ要素 3 0 は、吸気口 1 1 及び排気口 3 1 を有するケーシング 1 0 8 を備えており、遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 5 及び固定翼 3 4 - 1 ~ 5 はケーシング 1 0 8 内に収容されている。

【0124】

主軸 5 は、上ラジアル磁気軸受 2 2 、下ラジアル磁気軸受 4 4 、及びアキシャル磁気軸受 4 3 によって回転自在に支持されている。主軸 5 の下端に対向してアキシャル変位センサ 4 2 e が配置されており、このアキシャル変位センサ 4 2 e によって主軸 5 の軸方向の変位が検出されるようになっている。モータ 2 3 は上ラジアル磁気軸受 2 2 及び下ラジアル磁気軸受 4 4 の間に配置され、下ラジアル磁気軸受 4 4 の下方にアキシャル磁気軸受 4 3 が配置されている。上タッチダウン軸受 2 6 は上ラジアル磁気軸受 2 2 の直上に配置され、下タッチダウン軸受 4 7 は、下ラジアル磁気軸受 4 4 とアキシャル磁気軸受 4 3 との間に配置されている。なお、上ラジアル磁気軸受 2 2 、下ラジアル磁気軸受 4 4 、アキシャル磁気軸受 4 3 、上タッチダウン軸受 2 6 、下タッチダウン軸受 4 7 、及びアキシャル変位センサ 4 2 e は、いずれもハウジング 6 9 内に収容されている。

【0125】

図 2 0 は図 1 9 の遠心ドラッグポンプ要素を示す拡大断面図である。図 2 0 に示すように、各段の遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 5 と固定翼 3 4 - 1 ~ 5 とは微小な隙間を介して主軸 5 に沿って交互に配置されている。各遠心ドラッグ翼 3 3 - 1 ~ 5 は、複数の渦巻状羽根 3 5 と、これらの渦巻状羽根 3 5 が固定される円板状の基部 9 とを有している。固定翼 3 4 - 2 ~ 5 は、図 3 2 (a) 及び図 3 2 (b) に示す固定翼と同様の基本的構成を有し

10

20

30

40

50

ている。すなわち、各固定翼 34-2~5 は、遠心ドラッグ翼 33-1~5 の回転方向に對して後ろ向きに延びる複数の渦巻状ガイド 66 と、これの渦巻状ガイド 66 が固定される環状の平面部 67 とを有している。

【0126】

遠心ドラッグ翼 33-1~5 を回転させると、気体は吸気口 11 からケーシング 108 内に流入し、遠心力の作用によって渦巻状羽根 35 の間の流路を径方向外側に移送されつつ圧縮される。径方向外側に移送された気体は、渦巻状ガイド 66、平面部 67、及び基部 9 の裏面とによって画成される空間へ流れ込み、気体の粘性によるドラッグ作用により気体が径方向内側に移送されつつ圧縮される。このような気体の移送及び圧縮が各段にて順次行われ、これにより気体が所望の圧力にまで圧縮されて排気口 31 (図 19 参照) から排出される。

【0127】

遠心ドラッグポンプ要素 30 の気体流路は、以下の条件を満たすように形成されている。

(1) n 段目の遠心ドラッグ翼 33-n の渦巻状羽根 35 の高さ (流路深さ) Hn は、次段の遠心ドラッグ翼 33-(n+1) の渦巻状羽根 35 の高さ H(n+1) と同一か、もしくはそれよりも大きい。すなわち、図 20 において、渦巻状羽根 35 の高さ H1~H5 の間には、H1 H2 H3 H4 H5 の関係が成り立つ。

(2) n 段目の固定翼 34-n の渦巻状ガイド 66 の高さ (流路深さ) hn は、次段の固定翼 34-(n+1) の渦巻状ガイド 66 の高さ h(n+1) と同一か、もしくはそれよりも大きい。すなわち、図 20 において、渦巻状ガイド 66 の高さ h2~h5 の間には、h2 h3 h4 h5 の関係が成り立つ。

(3) 各遠心ドラッグ翼 33-1~5 の外周側に形成される外側折り返し流路 87 の径方向寸法 D は、一段目の遠心ドラッグ翼 33-1 の渦巻状羽根 35 の高さ H1 と同一か、もしくはそれよりも大きい (D H1)。

(4) n 段目の固定翼 34-n の内周側に形成される内側折り返し流路 88 の径方向寸法 dn は、その固定翼 34-n の渦巻状ガイド 66 の高さ hn と同一か、もしくはそれよりも大きい (d2 h2, d3 h3, d4 h4, d5 h5)。

【0128】

上述のように構成することで、次のような効果が得られる。

条件 (1) によれば、吸気口 11 に最も近い 1 段目の遠心ドラッグ翼 33-1 が、最も大きな気体流路の断面積を有することとなるので、排気速度を大きくすることができる。

条件 (1) 及び (2) によれば、気体を効率よく圧縮できる。すなわち、渦巻状羽根 35 の高さ (流路深さ) および渦巻状ガイド 66 の高さ (流路深さ) が必要以上に高いと、気体の粘性によるドラッグ作用を有効に利用できない。一方、渦巻状羽根 35 の高さおよび渦巻状ガイド 66 の高さが必要以上に低いと、気体流路の圧力損失が大きくなり、流路抵抗が大きくなるので好ましくない。

条件 (3) により、遠心ドラッグ翼 33-1~5 の外周部から流出した気体が次段の固定翼 34-2~5 に流入する外側折り返し流路 87 での圧力損失を小さくできる。

条件 (4) によれば、固定翼 34-2~5 の内周部から流出した気体が次段の遠心ドラッグ翼 33-2~5 に流入する内側折り返し流路 88 での圧力損失を小さくできるとともに、遠心ドラッグ翼 33-2~5 内および固定翼 34-2~5 内の流路長さを長くできる。

【0129】

また、上記構成によれば、排気効率を高く保ちつつ、遠心ドラッグポンプ要素 30 の軸方向の長さを短くすることができる。したがって、真空ポンプ全体の長さを短くすることができ、また、高速回転が容易となって、より排気効率を高めることができる。

【0130】

図 21 乃至図 24 は図 19 に示す遠心ドラッグ翼の平面図である。すなわち、図 21 は 1 段目の遠心ドラッグ翼を示し、図 22 は 2 段目の遠心ドラッグ翼を示し、図 23 は 3 段

10

20

30

40

50

目の遠心ドラッグ翼を示し、図24は4段目の遠心ドラッグ翼を示す。なお、図21乃至図24において点線で示す仮想円VCは、遠心ドラッグ翼に対向する固定翼の内周部を表している。

【0131】

図21乃至図24に示すように、遠心ドラッグ翼33-nは、回転方向Qに対して後ろ向きに延びる複数の渦巻状羽根35と、これらの渦巻状羽根35が固定される円板状の基部9とを備えている。遠心ドラッグ翼33-nの内周部には、主軸5に嵌合する小径の円筒部(ボス)36が設けられている。渦巻状羽根35と円接線とのなす角度θは、初段から最終段に向かうに従って順次小さくなっている。ただし、初段から最終段までの遠心ドラッグ翼33-1~5において、渦巻状羽根35と円接線とのなす角度θを等しくするようにしてよい。このように構成することによって、排気効率を高めることが可能となる。ここで、円接線とは遠心ドラッグ翼33-nと同心上に配置された仮想円VCの接線をいう。

【0132】

一般に、遠心ドラッグ翼は、気体に作用する遠心力と気体の粘性によるドラッグ作用により気体を排気する。しかしながら、遠心ドラッグ翼の作動圧力が10¹Paオーダー以下の中高真空領域では、気体の粘性によるドラッグ作用があまり有効に行われない。したがって、上記角度θを大きく設定して遠心ドラッグ翼内の流路断面積を大きくするとともに流路長さを短くする。これにより、遠心ドラッグ翼内での流路抵抗を小さくでき、流入した気体に対して効果的に遠心力を作用させることができる。

【0133】

一方、遠心ドラッグ翼の作動圧力が10²Paオーダー以上の低真空領域では、気体の粘性によるドラッグ作用が有効に行われる。したがって、流路入口での角度(入口角度)θ_{in}と流路出口での角度(出口角度)θ_{out}を小さくしてできる限り流路を長くすることにより、ドラッグ作用を有效地に機能させることができる。この場合、遠心ドラッグ翼内の流路断面積が減少し、流路が長くなるが、流路を通過する気体の圧力が高いため流路抵抗はあまり大きくならない。

【0134】

なお、図21乃至図24に示すように、各遠心ドラッグ翼33-1~5の渦巻状羽根35の枚数は6枚としているが、回転による内部応力や遠心ドラッグ翼33-1~5内の流路断面積を考慮して最適な枚数を選択することが好ましい。また、各段毎に渦巻状羽根35の枚数を変えてよい。

【0135】

各遠心ドラッグ翼33-1~5の基部9の厚さTは、遠心ドラッグポンプ要素30の軽量化および小型化の観点から出来る限り薄い方が好ましい。しかしながら、基部9は渦巻状羽根35を支える必要があるため、基部9の厚さTは次の点を考慮して決定される。

- ・渦巻状羽根35と円接線とのなす角度θ(角度θが大きいほど基部9の厚さTを小さくする)
- ・渦巻状羽根35の高さ(渦巻状羽根35の高さが低いほど基部9の厚さTを小さくする)
- ・渦巻状羽根35の枚数(渦巻状羽根35の枚数が少ないほど基部9の厚さTを小さくする)

通常は、図19に示すように、T₁ T₂ T₃ T₄ T₅とすることが好ましい。

【0136】

図21乃至図24に示す遠心ドラッグ翼は、いずれも回転により生じる内部応力を低減させて応力集中を回避する観点、及び排気性能を向上させる観点より、以下の形状を有している。この点について図23、図25(a)、及び図25(b)を参照して説明する。図25(a)は図23に示す遠心ドラッグ翼の部分断面図であり、図25(b)は図23のXXV-XXV線断面図である。

【0137】

10

20

20

30

40

50

(i) 遠心ドラッグ翼 33-n の内周部には、主軸 5 と嵌合する小径の円筒部(ボス)36 が設けられている。この円筒部 36 の軸方向の寸法 L1 は翼部(渦巻状羽根 35 及び基部 9)の軸方向寸法 L2 より大きく設定されている。

(ii) 渦巻状羽根 35 は円筒部 36 の外周面に一体的に接続されている。また、円筒部 36 と渦巻状羽根 35 の接続部には隅肉部 35a が形成されている。また、円筒部 36 の外周面の位置において、基部 9 の下面から円筒部 36 の下端までの寸法 L5 及び基部 9 の上面から円筒部 36 の上端までの寸法 L6 は、それぞれ少なくとも基部 9 の厚さ(軸方向寸法)T の 0.5 倍以上に設定されている。

(iii) 渦巻状羽根 35 の厚さ t は、径方向外側に向かって連続的に小さくなるように形成されている。また、厚さ t は可能な限り薄くすることが望ましく、渦巻状羽根 35 の先端部では 0.5 ~ 2 mm にすると良い。10

(iv) 渦巻状羽根 35 の先端部には曲面部 35b が形成されている。また渦巻状羽根 35 の先端部は、基部 9 の周縁部から少し径方向内側に位置している。これにより曲面部 35b が渦巻状羽根 35 の先端の全体に形成される。

(v) 渦巻状羽根 35 と基部 9 とが接続される部位には、円弧状の断面形状を有する隅肉部 35c が形成されている。なお、隅肉部 35c の円弧の大きさは渦巻状羽根 35 の長さ方向において一様である必要はなく、場所によってその大きさを変えて良い。

(vi) 渦巻状羽根 35 と円接線とのなす角度 は、径方向外側へ向かうに従って小さくなるように設定されている($in > out$)。

(vii) 渦巻状羽根 35 がなす曲線は、渦巻曲線(極座標にて $r = a$ で表されるアルキメデス渦巻線、 $r = a$ で表される対数渦巻線など)やインボリュート曲線、又はこれら曲線の変形例にて構成されている。20

上記項目 (i), (ii), (iii), (iv), (v) により、遠心ドラッグ翼 33-n における応力低減及び応力集中を回避することができる。また、(iii), (v), (vi), (vii) により、排気性能を向上させることができる。

【0138】

次に、本発明の第 9 の実施形態に係る真空ポンプについて図 26 及び図 27 を参照して説明する。図 26 は本発明の第 9 の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図であり、図 27 は図 26 に示すドラッグポンプ要素を示す拡大断面図である。なお、特に説明しない本実施形態の構成は、上述した第 8 の実施形態と同様であるので、その重複する説明を省略する。30

【0139】

本実施形態と上述した第 8 の実施形態との相違点は、2 ~ 5 段目の遠心ドラッグ翼 33-2 ~ 5 の形状と、これらの遠心ドラッグ翼 33-2 ~ 5 に対向する固定翼 34-2 ~ 5 の形状にある。すなわち、図 26 及び図 27 に示すように、2 ~ 5 段目の遠心ドラッグ翼 33-2 ~ 5 の渦巻状羽根 35 の高さは、それぞれ径方向外側に向かって徐々に低くなっている。また、遠心ドラッグ翼 33-2 ~ 5 に対向する固定翼 34-2 ~ 5 の平面部 67 の裏面(下面)には、傾斜する渦巻状羽根 35 の形状に対応するように傾斜部が設けられている。

【0140】

径方向内側位置における渦巻状羽根 35 の高さ(入口高さ)を H_{in} 、径方向外側位置における渦巻状羽根 35 の高さ(出口高さ)を H_{out} としたとき、各段での渦巻状羽根 35 の高さを低くする割合は、次のように設定される。40

$$H_{2in} / H_{2out} \quad H_{3in} / H_{3out} \quad H_{4in} / H_{4out} \quad H_{5in} / H_{5out}$$

このように、上流側の遠心ドラッグ翼 33-n の渦巻状羽根 35 の高さの減少率は、下流側の遠心ドラッグ翼 33-(n+1) の渦巻状羽根 35 のそれと同一か、若しくは小さくなるようになっている。

【0141】

一般に、排気口に近い遠心ドラッグ翼での作動圧力は高いため、ドラッグ作用が有効に行われる。したがって、渦巻状羽根 35 の高さを径方向外側に向かって徐々に低くするこ50

とにより、遠心ドラッグ翼33-1～5の基部9と固定翼34-1～5との隙間が小さくなり、これによりドラッグ作用がより有効に行われる。なお、渦巻状羽根35の高さを低くする割合は、渦巻状羽根35の間に形成される流路断面積が内径側から外径側に向かって減少しないようにすることが好ましい。すなわち、図28に示すように、渦巻状羽根35の間に形成される流路断面積S1, S2, S3は、S1 S2 S3の関係にあることが好ましい。また、遠心ドラッグ翼の高さを低くすると、遠心力による応力を減少させることができるために、高速回転できる遠心ドラッグ翼を構成することができる。

【0142】

一方、吸気口に近い遠心ドラッグ翼は、吸気口から流入した気体に遠心力を作用させる必要があるため、および遠心ドラッグ翼内の流路抵抗を小さくする必要があるために、渦巻状羽根の高さを低くすることは好ましくない。したがって、各段の遠心ドラッグ翼33-1～5の作動圧力に応じて、渦巻状羽根35の高さを適宜設定することで、排気効率の高い真空ポンプを構築することができる。

【0143】

上記の通り、本発明の真空ポンプについて実施形態を示して説明したが、本発明は上述の実施形態にのみ限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において種々変更を加え得ることは勿論である。

【図面の簡単な説明】

【0144】

【図1】本発明の第1の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。

【図2】図2(a)は図1に示す遠心ドラッグ翼の平面図であり、図2(b)は図2(a)に示す遠心ドラッグ翼の断面図であり、図2(c)は図2(a)に示すII-II線断面図である。

【図3】本発明の第1の実施形態に係る真空ポンプの他の構成例を示す断面図である。

【図4】ラジアル磁気軸受の一般的な構成を示す概略図である。

【図5】本発明の第2の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。

【図6】図6(a)は図5に示す渦流翼の平面図であり、図6(b)は図5に示す渦流翼の正面図である。

【図7】図5に示す渦室スペーサの平面図である。

【図8】図5に示す排気流路の模式図である。

【図9】本発明の第3の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。

【図10】排気流路の断面積と各種パラメータとの関係を説明するための表である。

【図11】図11(a)乃至図11(c)は図10の表に記載されたタービン翼の一例を示す参考図である。

【図12】図12(a)及び図12(b)は図10の表に記載された遠心ドラッグ翼の一例を示す参考図である。

【図13】図13(a)及び図13(b)は図10の表に記載された渦流翼の一例を示す参考図である。

【図14】本発明の第4の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。

【図15】図14のXV-XV線断面図である。

【図16】本発明の第5の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。

【図17】本発明の第6の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。

【図18】本発明の第7の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。

【図19】本発明の第8の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。

【図20】図19のドラッグポンプ要素を示す拡大断面図である。

【図21】図19に示す1段目の遠心ドラッグ翼を示す平面図である。

【図22】図19に示す2段目の遠心ドラッグ翼を示す平面図である。

【図23】図19に示す3段目の遠心ドラッグ翼を示す平面図である。

【図24】図19に示す4段目の遠心ドラッグ翼を示す平面図である。

【図25】図25(a)は図23に示す遠心ドラッグ翼の部分断面図であり、図25(b)は図25(a)に示す遠心ドラッグ翼の拡大断面図である。

) は図 23 の XXV - XXV線断面図である。

【図 26】本発明の第9の実施形態に係る真空ポンプを示す断面図である。

【図 27】図 26 に示す遠心ドラッグポンプ要素を示す拡大断面図である。

【図 28】図 26 に示す遠心ドラッグ翼の一部を示す斜視図である。

【図 29】従来の真空ポンプを用いた半導体製造装置を示す模式図である。

【図 30】従来のターボ真空ポンプを示す断面図である。

【図 31】図 31 (a) は図 30 に示す遠心ドラッグ翼を示す平面図であり、図 31 (b) は図 30 に示す遠心ドラッグ翼の断面図である。

【図 32】図 32 (a) は図 30 に示す固定翼を示す平面図であり、図 32 (b) は図 30 に示す固定翼の断面図である。

10

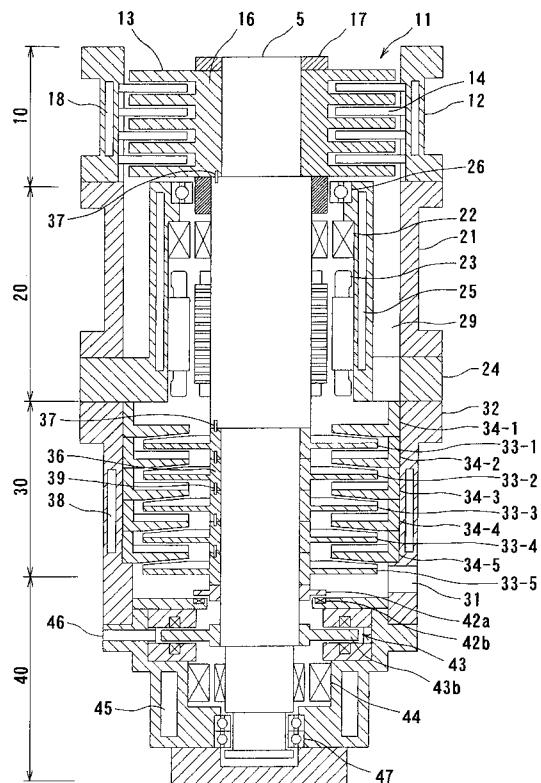
【符号の説明】

【0145】

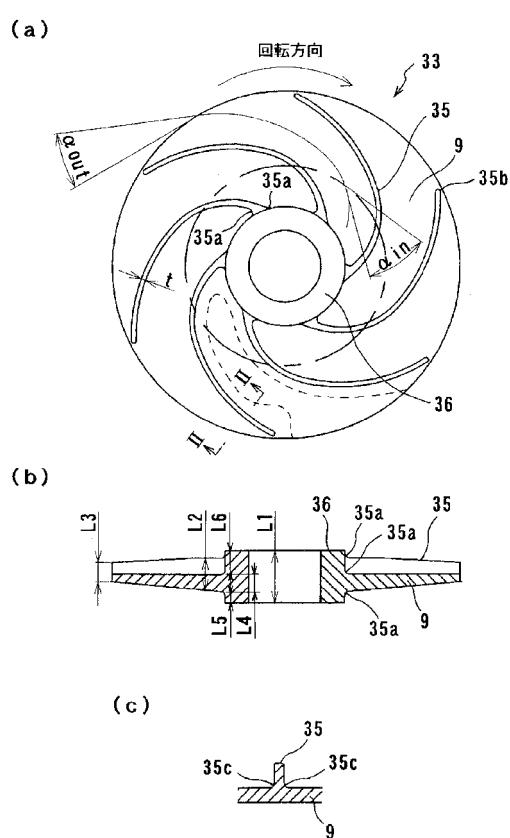
5, 105	主軸	20
9, 109	基部	
10	ター ボ 分子ポンプ要素	
11, 111	吸気口	
12	上ケーシング	
13	タービン翼	
14	固定翼	
16, 36, 51a	円筒部 (ボス)	20
17	バランスリング	
18, 25, 38, 45, 76, 83	冷却ジャケット	
20, 70	上ハウジングユニット	
21	円筒ケーシング	
22, 122	上ラジアル磁気軸受	
23, 123	モータ	
24, 71	上ハウジング	
26, 126	上タッチダウン軸受	
27, 28, 48, 49, 97, 98	保護部材	
29	流路	30
30	遠心ドラッグポンプ要素	
31, 131	排気口	
32	下ケーシング	
33 - 1 ~ 5, 133	遠心ドラッグ翼	
34 - 1 ~ 5, 134	固定翼	
35, 135	渦巻状羽根	
37, 39	ピン	
40, 80	下ハウジングユニット	
41, 81	下ハウジング	
42a	センサターゲット	40
42b	アキシャル変位センサ	
43, 143	アキシャル磁気軸受	
44, 144	下ラジアル磁気軸受	
46	のぞき穴	
47	下タッチダウン軸受	
50A	遠心ドラッグポンプ要素	
50B	渦流ポンプ要素	
51 - 1 ~ 5	渦流翼	
52 - 1 ~ 6	渦室スペーサ	
53	放射状翼	50

5 4	流路溝（渦室）	
5 5	気体導入口	
5 6	気体導出口	
5 7 , 6 5	排気流路	
5 8 , 5 9	隙間	
6 0	渦流ポンプ要素	
6 1	リング状部材	
6 3	ピン（位置決め用部材）	
6 6 , 1 6 6	渦巻状ガイド	
6 7 , 1 6 7	平面部	10
6 8	駆動部	
6 9	ハウジング	
7 3	上ページガスポート	
7 4	ページガス流路	
7 5 , 8 6	ラビリンスシール機構	
8 4 , 8 5	下ページガスポート	
8 7	外側折り返し流路	
8 8	内側折り返し流路	
9 1	中間排気口	
9 2	中間吸気口	20
9 3	排気管	
9 4 , 9 5 , 9 6	ヒータ	
9 9	耐食膜	
1 0 1	半導体製造装置	
1 0 2	プロセスチャンバ	
1 0 3	搬送室	
1 0 4	カセット室	
1 0 5	ターボ分子ポンプ	
1 0 6	バックポンプ	
1 0 7	配管	30
1 0 8	ケーシング	

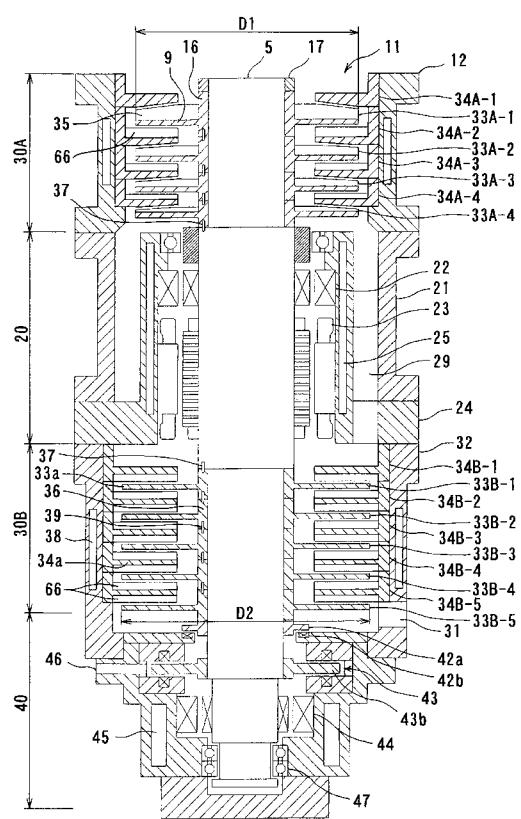
【図1】



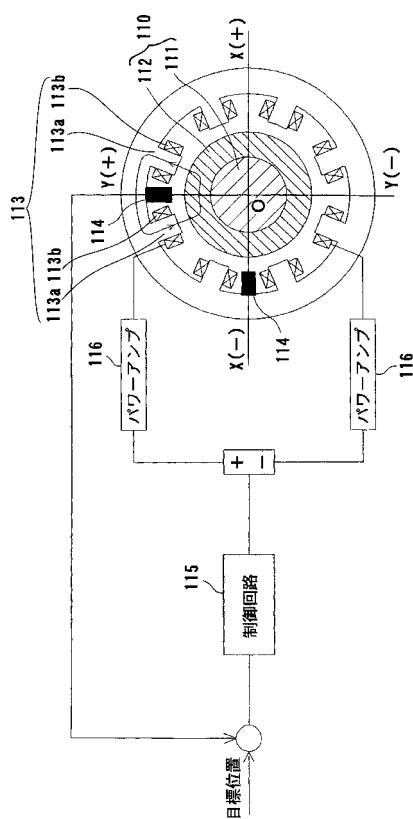
【図2】



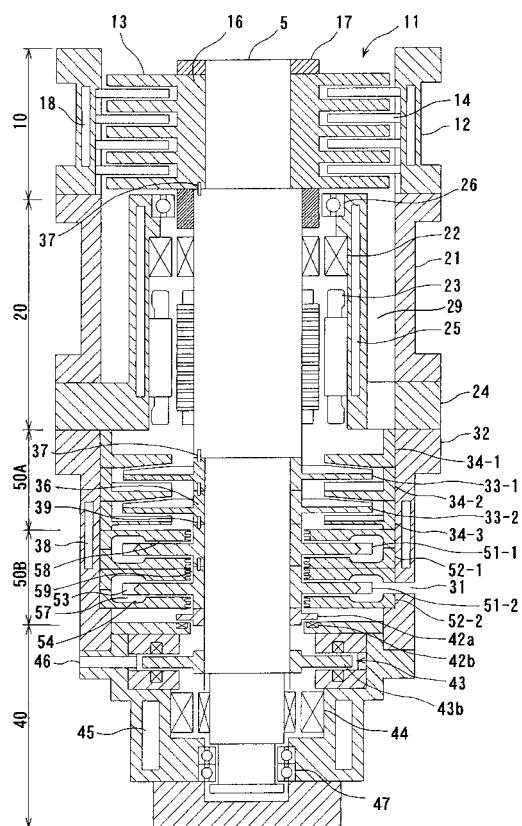
【図3】



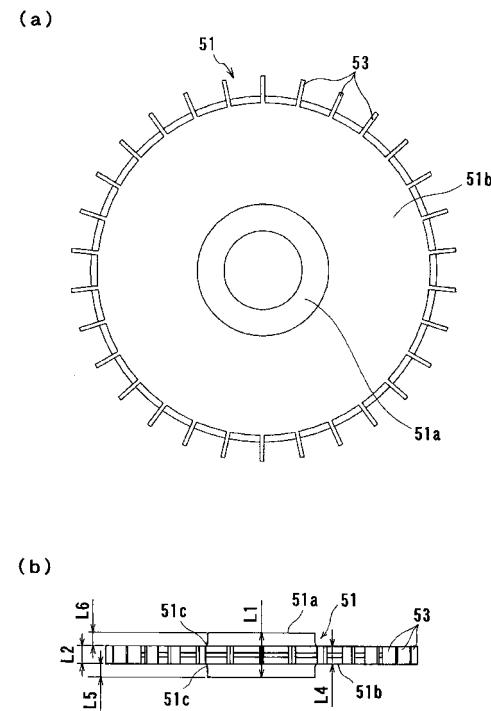
【図4】



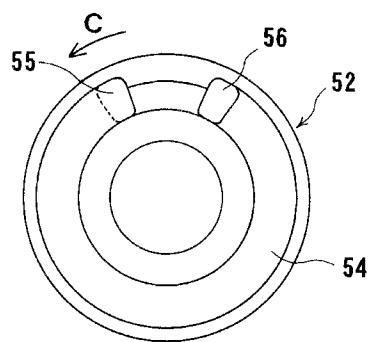
【図5】



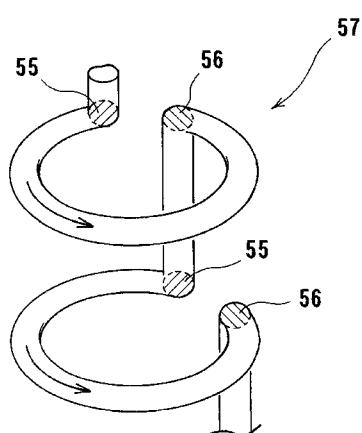
【図6】



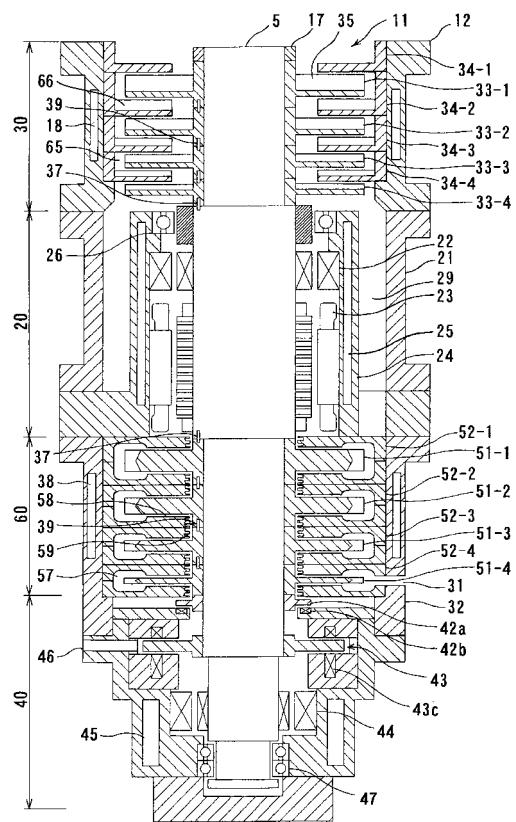
【図7】



【図8】



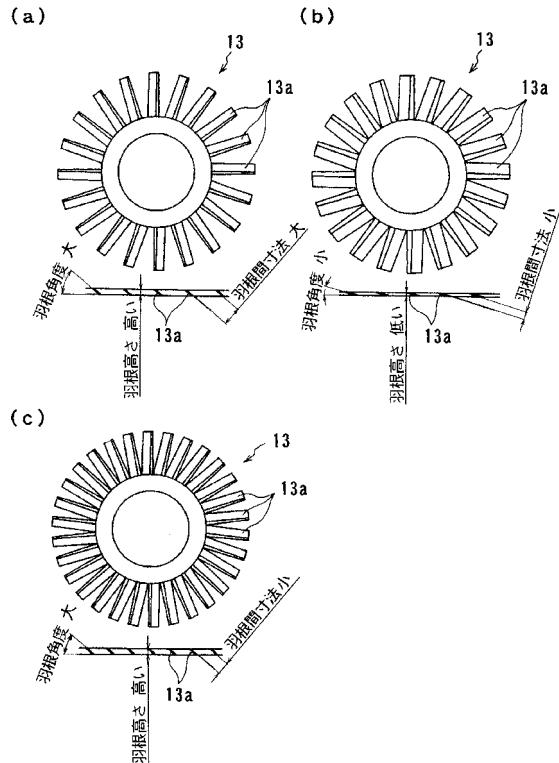
【図9】



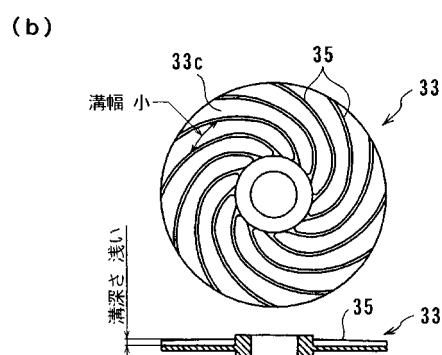
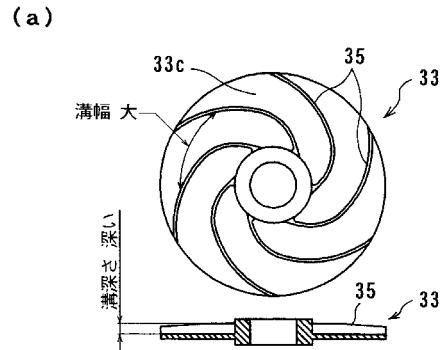
【図10】

ポンプ要素	パラメータ	排気流路の縮小手段	参考図
タービン翼	羽根枚数 (羽根間寸法)	多い (小)	図11
	羽根高さ (羽根間寸法)	低い (小)	
遠心ドラッグ翼	羽根本数 (溝幅)	多い (小)	図12
	溝深さ	浅い	
渦流翼	羽根枚数 (羽根間寸法)	多い (小)	図13
	羽根高さ	低い	

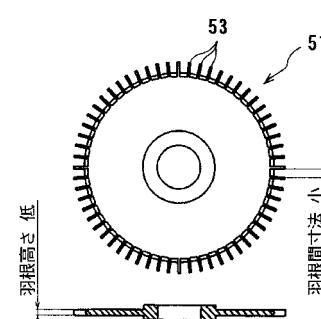
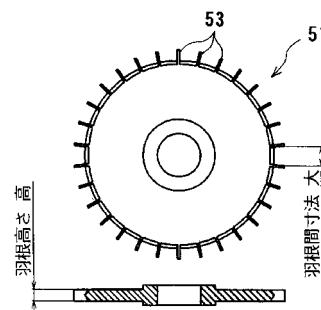
【図11】



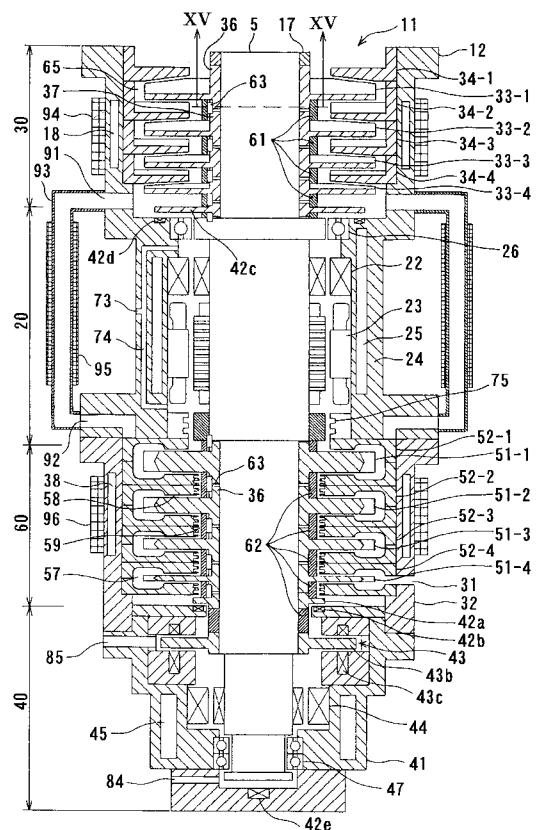
【図12】



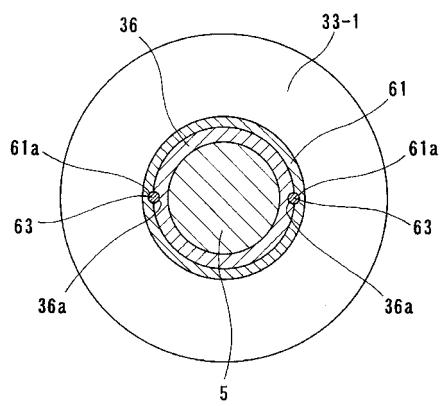
【図13】



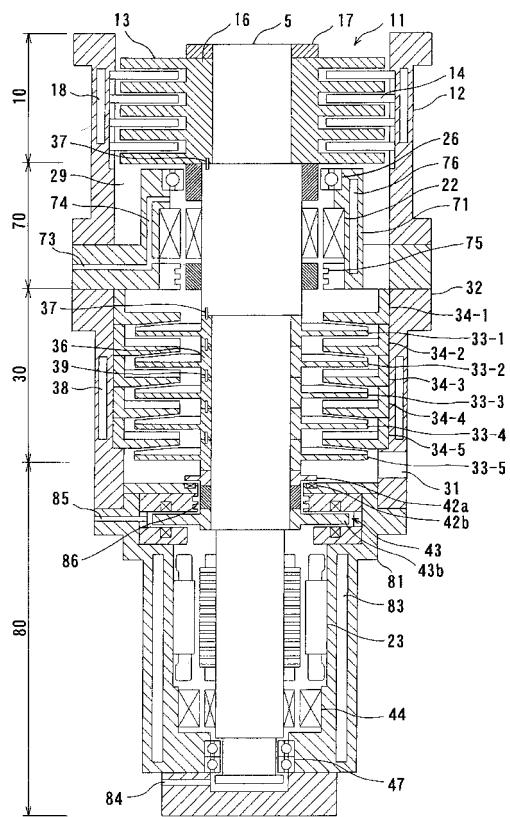
【図14】



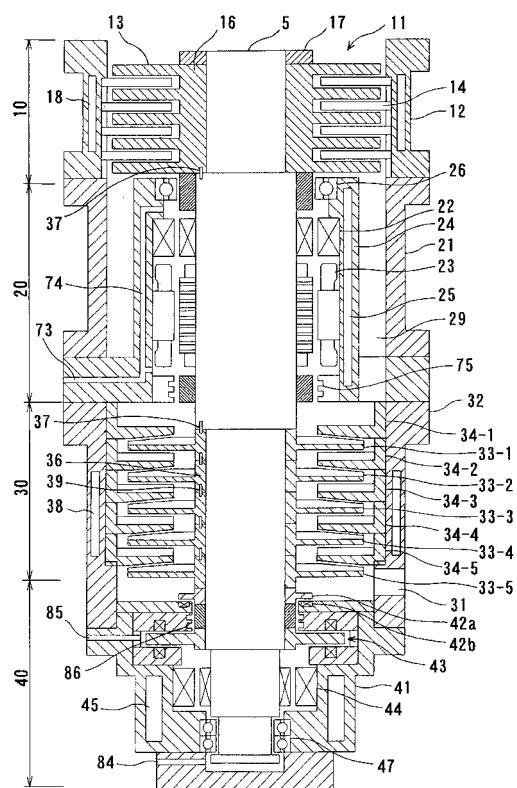
【図15】



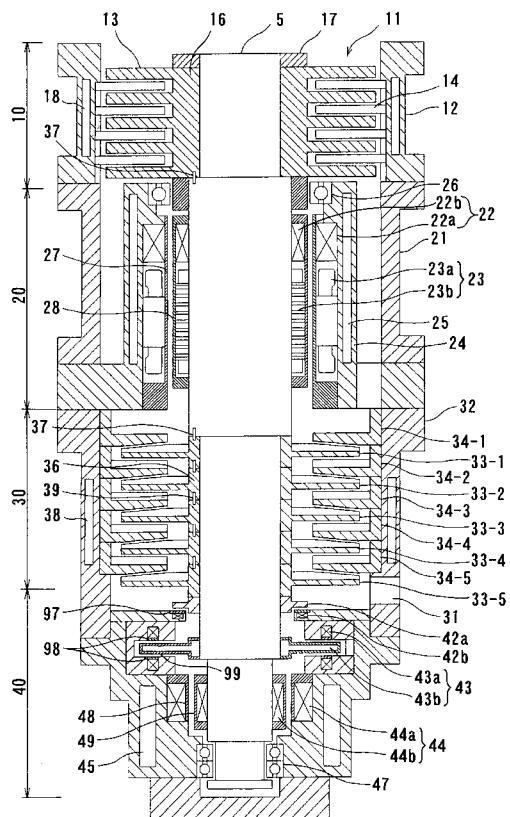
【図16】



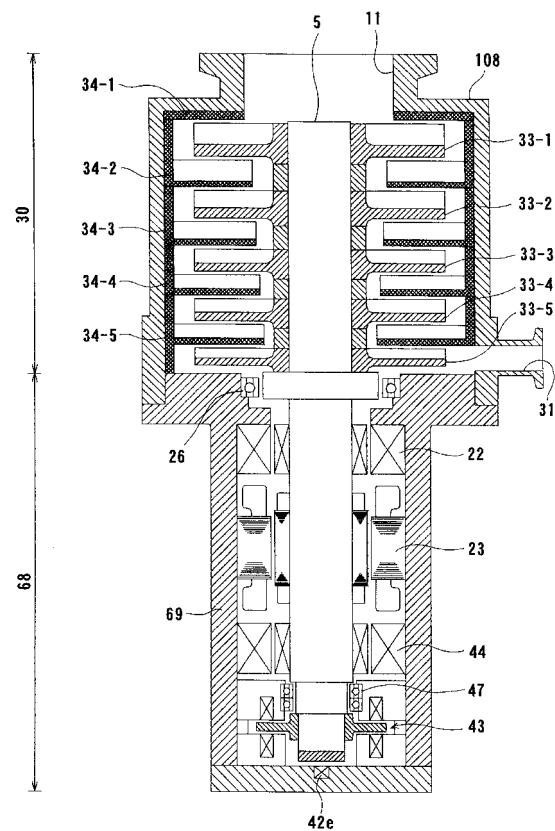
【図17】



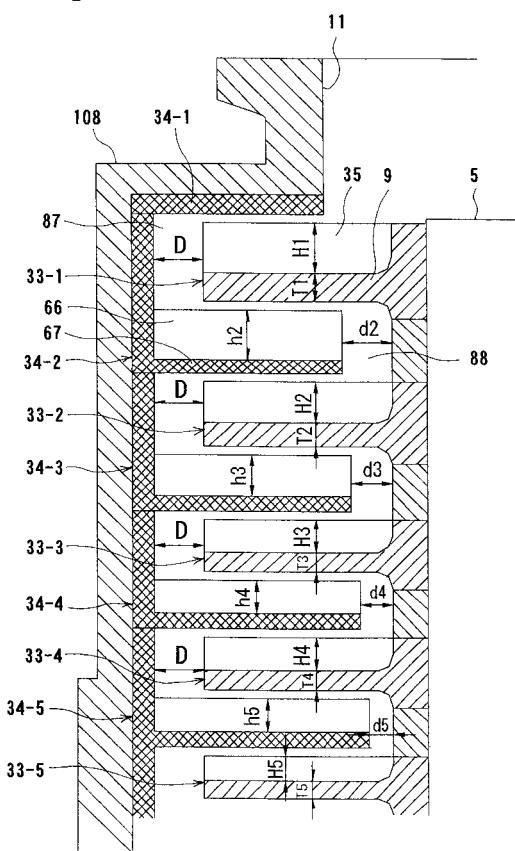
【 図 1 8 】



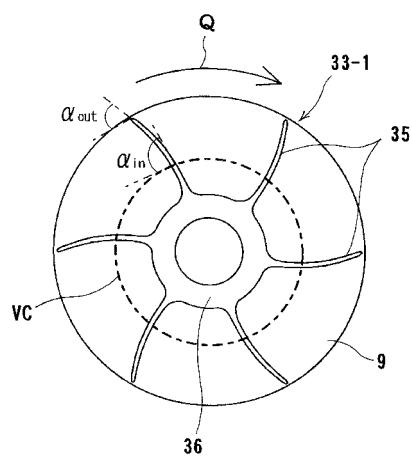
【図19】



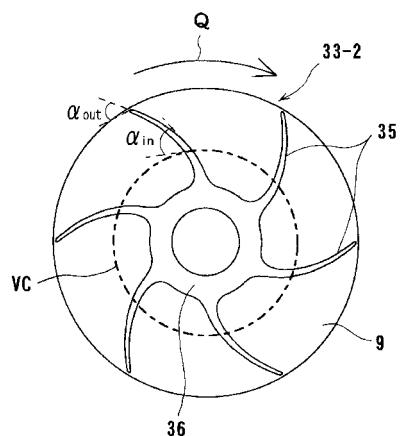
【 図 2 0 】



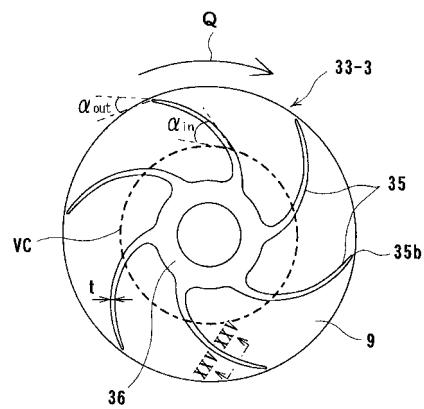
【 図 21 】



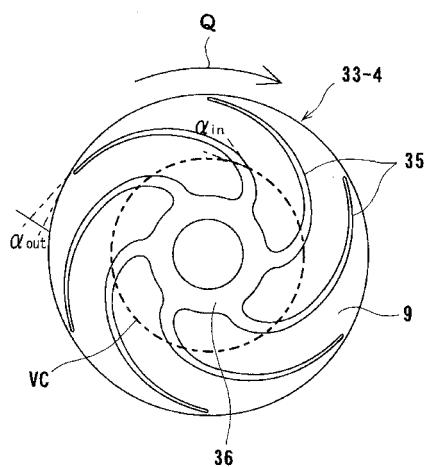
【図22】



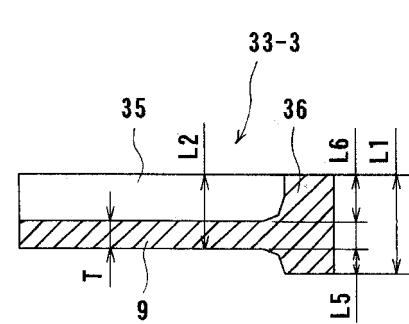
【図23】



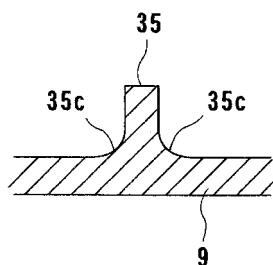
【図24】



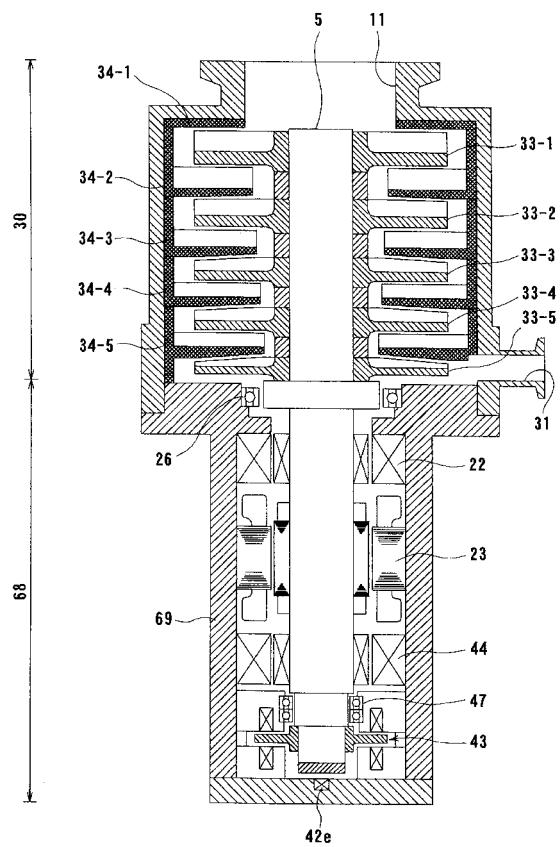
【図25】



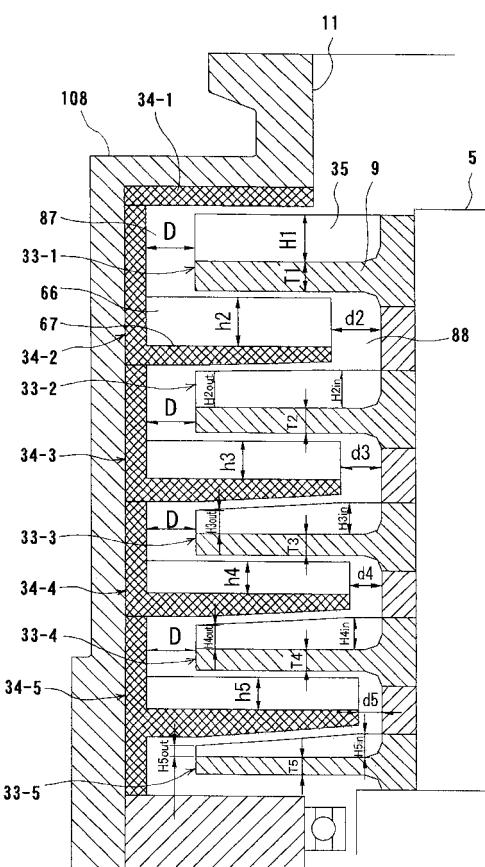
(b)



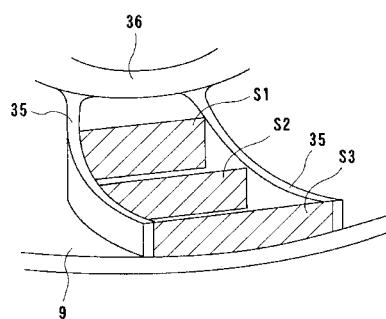
【図26】



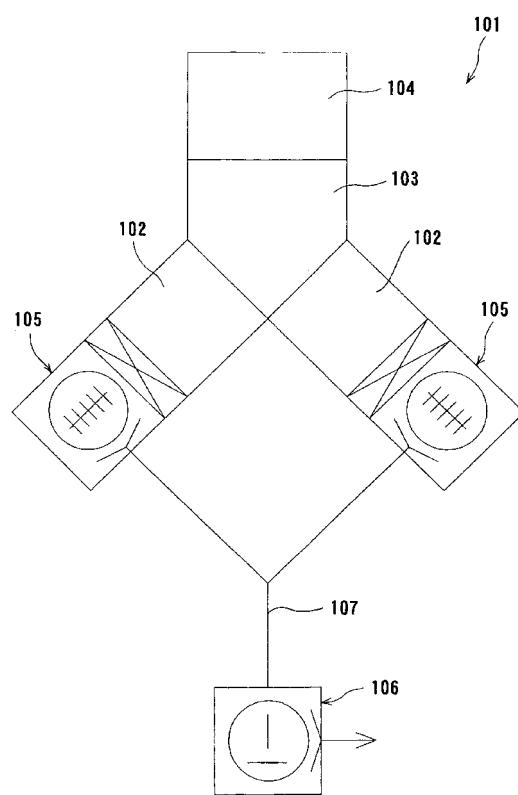
【図27】



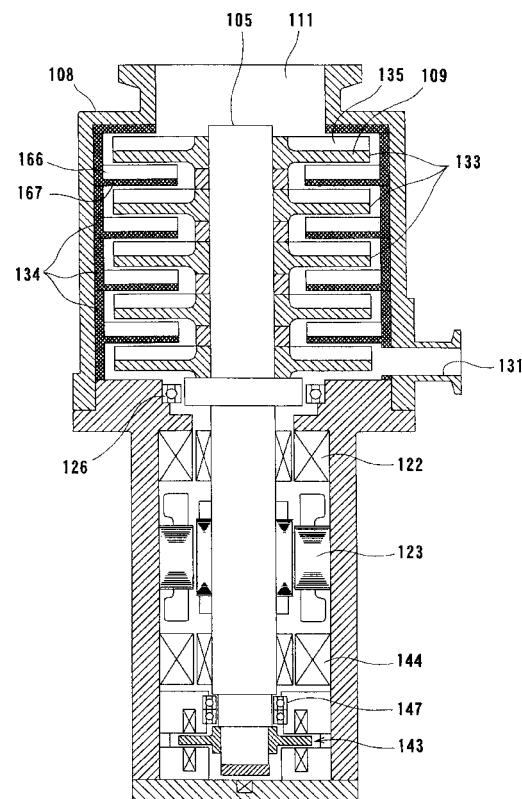
【図28】



【図29】

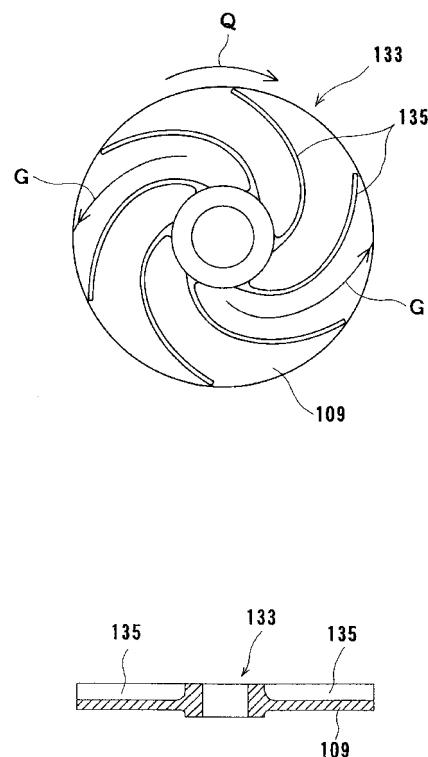


【図30】



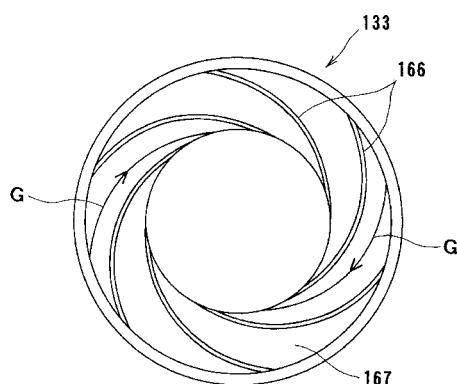
【図31】

(a)

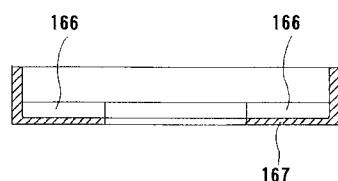


【図32】

(a)



(b)



フロントページの続き

(72)発明者 宮本 松太郎

東京都大田区羽田旭町11番1号 株式会社荏原製作所内

F ターム(参考) 3H022 AA02 BA06 CA16 CA56 DA08

3H031 DA01 DA04 DA06 EA05 EA07 EA15 FA16 FA35