

## 高真空排気システムの開発と応用に関する研究

## 学位論文内容の要旨

本論文は2編に分けられている。第1編は電子顕微鏡の真空排気システムに関する研究であり、第2編は高性能ターボ分子ポンプの開発と核融合装置への応用に関する研究であるが、第1編と第2編とは密接な関係がある。即ち、第1編の電子顕微鏡(以下TEMと称す)排気用真空ポンプとして当初油拡散ポンプを主に使用したが、TEMの高性能化と共に油を使用しないオービトロンポンプの開発を行い、よりクリーンな超高真空を作成する試みを実施した。第2編では、溜め込み式ポンプであるオービトロンポンプの性能上の欠点をカバーしたターボ分子ポンプを開発し、種々の実験を行い、更に核融合装置へ応用した結果について述べた。さらに真空ポンプに対する種々のニーズと変遷を両編で説明した。現在、ターボ分子ポンプはTEMにも使用されている。

第1編の第1章は緒論であり、TEMの出現と発展の歴史、TEMが学問的、社会的に及ぼす重要性について述べた。次に、一連のTEMの性能を向上させるためには、単にTEM本体の改良(レンズ統、照射系などの改良)のみでは不十分で、真空技術的に大幅な検討を加えないとTEMの性能向上に結びつけることは困難であることを明らかにした。第2章では、加速電圧100KVのTEMを使用して、3つの実験研究を行った。その第1は、TEMの真空に関する現状分析を行い、問題点を明らかにした。その結果、TEM各鏡筒の圧力はほぼ等価( $10^{-4} \sim 10^{-5}$  Torr)であり、主にカメラ室内に挿入される撮影用フィルムからの放出ガス(大部分水分)が大きく真空を阻害していることが分かった。第2に、TEMそのものを偏光せずに排気系のみを改良して真空の水準を向上させた。液体窒素トラップの位置変更、カスケード式の排気採用などで、ほぼ等価であった各鏡筒圧力を電子銃室、試料室で $10^{-6}$  Torr 台と約2桁圧力を低くすることができた。更にTEMの振動を除去するために、リザーバタンクの設置、高背圧の油エゼクタポンプの試作を行い、約4時間ロータリポンプの停止を可能にした。第3に、油拡散ポンプを改良してより高性能なポンプにした。寸法的に限られた条件のもとで、従来のポンプと比較して排気速度で約1.4倍、背圧で約3.8倍大きく、作動開始時間を0.6倍に短縮できた。なおこのポンプ

は、現在でも一般の TEM に使用されている。TEM の最も重要な部分である試料室、電子銃室を超高真空でクリーンな状態にするために油拡散ポンプに代わるオービトロンポンプ（ゲッタイオンポンプ）を試作した。このポンプの各種性能、残留ガス分析などを行った結果、十分に超高真空 TEM 用ポンプとして使用できることが確認された。また、試料室を設計製作し、製造加工の段階から十分に注意を払い、洗浄や前処理を行い、TEM の組立てはクリーンルーム内で実施した。その結果、オービトロンポンプによる排気により試料室を $10^{-9}$ Torr 台の超高真空に向上することができた。

第 3 章では、TEM 内部に使用されている主な金属、非金属材料の放出ガス量を種々の処理条件のもとで測定した。この実験研究の結果、できるだけ放出ガスを少なくするための処理方法を見出すことができた。また、当時存在しなかった国産の超高真空用油（ライオン S）を開発し、最も一般的なシリコン油（DC-705）と種々性能を比較した結果、十分に超高真空用拡散ポンプ油（蒸気圧 $10^{-10}$ Torr 台）として使用できることが確認された。なおこの油は現在広く使用されている。

第 4 章では、TEM の試料汚染に関する研究について述べた。TEM はもともと「きれいな試料を観察すること」が最終目的であるから試料汚染に関する研究は極めて大切である実験は汚染に関係するバックグラウンドの少ないガラスの系により、小型の電子銃を試作し、種々の材料について汚染の評価を行った。その結果、蒸気圧の低い材料ほど汚染量は小さいが、シリコン系のグリース、油などは予想外に汚染が大きいことが分かり、使用する上で十分な注意が必要であることを示した。

第 5 章では、これまでの一連の TEM に関する研究をまとめ、これらの研究成果がどのように TEM の性能向上に真空光学的に結びつけられたかを総括した。TEM の真空を大幅に向上させることにより、電子銃室では、フィラメントの寿命が極めて長くなり、加速電圧の安定性がよくなった。また、微少放電の発生が起こらなくなり高輝度のビームが得られるようになった。試料室では試料面の汚染が減少し、超高真空中での蒸着、蒸着膜の観察が可能となり、現在の高性能 TEM 真空技術の基礎を築くことができた。

第 2 編の第 1 章は緒論であり、ターボ分子ポンプ（以下 TMP と称す）の真空ポンプにおける位置づけを行い、このポンプの開発の歴史と現状について述べた。また現在、高真空、超高真空用ポンプとして最も数多く使用されていることを示した。

第 2 章では、TMP の排気原理とこのポンプに共通する性能上の特徴と問題点について述べた。次に本研究で開発した順序にしたがい、軸受を油（又はグリース）で潤滑した TMP、ねじ溝ポ

ンプと複合化した複合分子ポンプ、全く油（又はグリース）を使用しない磁気軸受型 TMP について各ポンプの構造を説明し、特徴と性能を明らかにした。すなわち、実験研究の結果から複合分子ポンプは、全翼段型の TMP と比較して約 2 桁（100 Pa）低真空側へ排気性能が拡大されることが分かった。更に TMP の最も問題となる大気突入時における対策を大型のポンプ（排気速度 1800 l/sec）により理論的に考察し、十分に大気突入に耐えることを実験的に確認した。磁気軸受型 TMP では、その振動が油潤滑型 TMP と比較して約 1 桁（片振幅 0.01  $\mu$ m）小さいことが分かった。また、磁場中で運転したとき、どのような挙動を示すかをも調べた。

第 3 章では、TMP の核融合装置への応用に関する研究について述べた。TMP を核融合装置へ装着するためには、核融合プラズマに起因する厳しい環境条件に耐えなくてはならない。この条件の中でまず磁場に対する TMP への影響を調べその対応策を検討した。また、アルミニウム合金製大型 TMP（排気速度 5,000 l/sec）を設計製作し、放射熱による TMP ロータ温度の上昇を重点的に調べ性能を明らかにした。以上の実験結果をふまえて JT-60 の計測装置に数多くの TMP を設置した。設置して以来、現在までの 6 年間何ら問題なく運転されている。更に、次期大型国際熱核融合実験炉（ITER）にそなえて排気速度 20,000 l/sec 以上の TMP を試作し、このポンプの外観、寸法及び得られた性能結果について述べた。

最後に本研究で得られた成果を総括した。

## 学位論文審査の要旨

主 査	教 授	山 科 俊 郎
副 査	教 授	阿 部 寛
副 査	教 授	早 川 和 延
副 査	教 授	高 橋 平 七 郎

近年、真空技術は多くの基礎研究分野ならびに光学分野において、益々その利用の範囲が拡大され、また高度の技術が要求されている。本論文は、電子顕微鏡（以下 TEM と称す）の性能向上を目的としての真空排気システムの開発、ならびにクリーンな超高真空作成のための軸流分子ポンプ（以下 TEM と称す）の開発についての成果をまとめたものである。本論文は 2 編に分けられている。

第1編はTEMに関するもので、第1章は緒論として、TEMの歴史的発展の経緯を述べ、現状の問題点を指摘している。第2章では、加速電圧100KVのTEMを用いて、その性能を及ぼす真空技術の影響について実験検討を行っている。その結果、TEMの性能にたいする支配的因子はカメラ室内の撮影用フィルムからのガス放出であることが分かった。これを改良するため、カスケード式排気系を採用し、電子銃室及び試料室内の圧力を $10^{-6}$ Torr台と約2桁低くすることができた。また油拡散ポンプの改良の研究を行い種々の工夫により、従来のポンプと比較して排気速度で1.4倍、背圧で3.8倍大きく、作動開始時間を0.6倍に短縮することに成功している。さらにTEMの主要部である試料室と電子銃室を超高真空にするため油拡散ポンプに代わるオービトロンポンプの開発を試み、これを利用することにより $10^{-8}$ Torr台の真空を達成し、性能を向上させることができた。

第3章では、TEM内部に使用されている主な材料からのガス放出量を測定するとともに、ガス放出を低減させるための材料処理方法を見いだしている。また廉価で高性能の拡散ポンプ油を開発し、 $10^{-10}$ Torrの超高真空を得ることができた。

第4章では、TEMにおける「よりきれいな試料による観察」を目的として、試料の汚染対策について検討した。小型電子銃による汚染評価のモデル実験の結果、蒸気圧の低い材料ほど汚染量は少ないが、シリコン系の油類は予想外に大きな汚染源となることを明らかにしている。

以上のように、TEM装置の真空度を大幅に向上させることにより、電子銃ではフィラメントの寿命が極めて長くなり、加速電圧の安定性が良くなった。また微小放電の発生が起こらなくなり高輝度のビームが得られるようになった。試料室では、試料の汚染が激減し、超高真空下での蒸着と蒸着膜の観察が可能となり、現在の高性能TEM技術の基礎を築くことに貢献している。

第2編はTEMの開発と応用に関するもので、第1章ではこのポンプの開発の歴史的経緯と、洗浄な真空環境を保持するためのポンプとして、TMPの工学的意義を述べている。

第2章では、TMPの排気原理とこのポンプに共通する性能上の問題点について述べ、次に本研究で開発した順序に従い、軸受けを油（またはグリース）で潤滑したTMP、ねじ溝ポンプと連結した複合分子ポンプ、全く油類を使用しない磁気軸受型TMPについて、各ポンプの特徴と性能を示すとともに、本研究の成果を明らかにしている。すなわち、多くの実験検討の結果から、複合分子ポンプは、全翼段型のポンプと比較して約2桁（高圧域）低真空側へ排気性能を拡大することに成功している。また、TMP使用の際に問題となる大気圧突入時における対策を大型ポンプ（ $1800\text{ l/sec}$ ）を用いて検討し、十分に耐えうることを明らかにしている。

第3章では、TMPの核融合装置への応用についての成果を述べている。TMPを核融合装置

に装着するに際しては、高温プラズマに起因する厳しい環境に耐えうることが要求されるが、本研究ではまず強磁場にたいする対策を検討し、使用の可能性を明らかにした。また、核融合装置に適合したアルミニウム合金製大型 TMP (5000  $l/sec$ ) の開発に成功している。以上の検討結果を踏まえて、日本原子力研究所の大型核融合装置 JT-60 の排気系に数多くの TMP を設置した。その結果、過去 6 年間、全く異常なく運転されている。

以上要するに、本論文は、各種の高真空排気システムの開発を行うとともに、これらを多くの大型装置に応用して装置の性能を向上させたものであって、実用上有益な新知見を得ており、真空工学ならびに装置工学の進歩に寄与するところ大である。よって著者は、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。