

第4章 実験装置

4.1 はじめに

本章では、本研究で使用した分子線散乱実験装置述べる。4.2節で実験装置について述べた後、4.3節でその計測、制御系の詳細を示す。

4.2 分子線散乱実験装置

4.2.1 装置の概略

本研究で用いた分子線散乱装置は、線源室、変調室、散乱室、後段変調室、検出室、試料導入室の6室から構成され、それぞれが個別に排気されている。散乱室と検出室は 2×10^{-10} Torr以下の超高真空状態に保たれており、長時間清浄な試料表面を保持し、高いS/N比で信号を検出することが可能となっている。また、本装置では、検出器の位置はビームラインに対して固定されており、分子線の入射角と散乱角の和は 90° になっている。分子線の入射角、入射方位の変更は試料を試料表面に並行、垂直な2軸で回転させることにより実現している。

後段変調室は試料表面で散乱された分子の飛行時間分布を効率よく計測するために研究の途中で増設された部屋である。第6章で述べる実験は主に増設前に行ったものであり、第7章の実験は増設後に行ったものである。

図4.2.1に装置の写真を、図4.2.2に装置の概略図を示す。図4.2.3にはノズル、アパーチャ等の本装置の分解能を決定する各部品の距離関係を示す。また、本実験装置の特性表を表4.2.1に示す。入射分子線の広がり 0.9° で、試料表面に垂直に入射する場合の試料表面上でのスポットの直径は3.0 mmである。0次の回折ピーク ($\theta_i = \theta_f = 45^\circ$) の広がり、後段変調室増設前で0.0404 rad ($\approx 2.3^\circ$)、増設後では0.0174 rad ($\approx 1.0^\circ$) である。

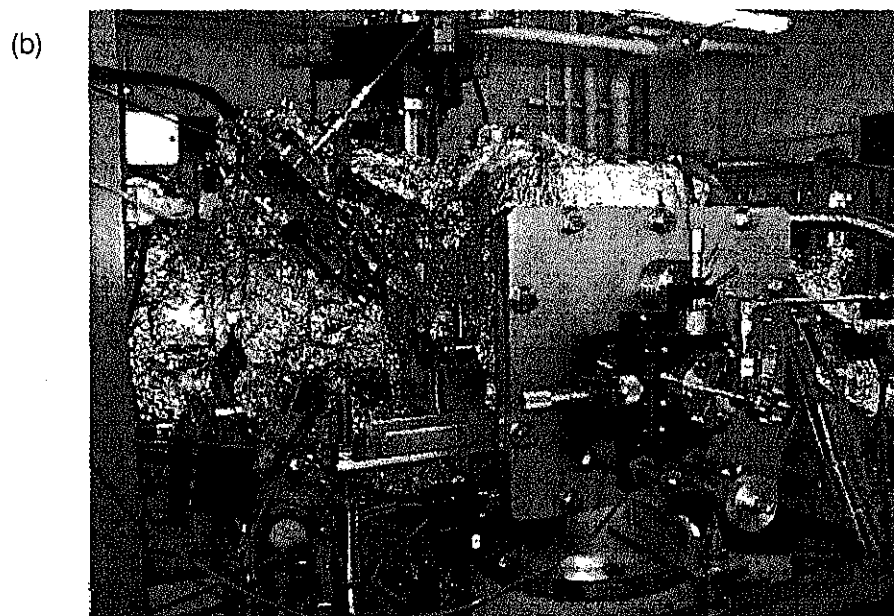
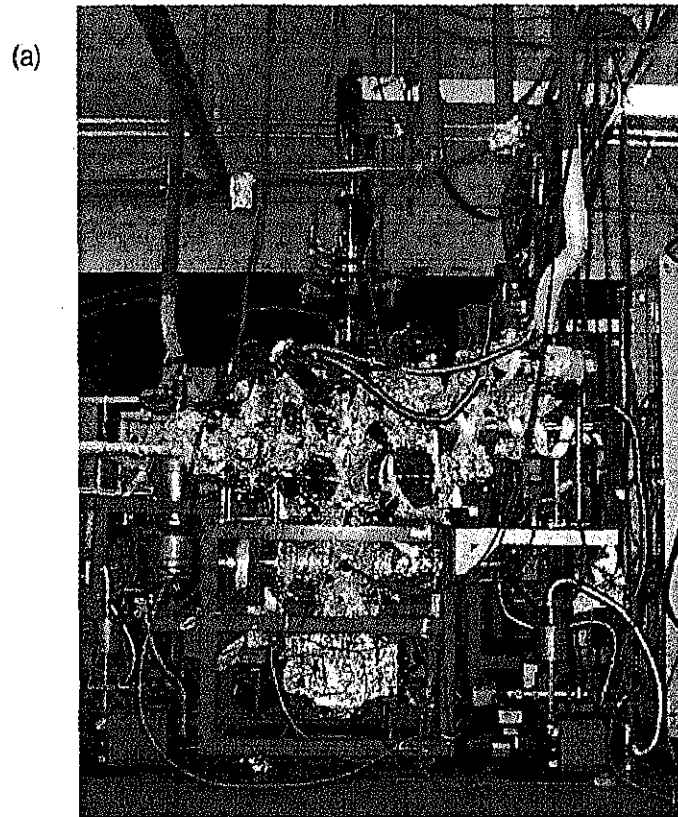


図4.2.1 分子線散乱実験装置の外観

(a)散乱室側からの写真，(b)線源室側からの写真を示す。

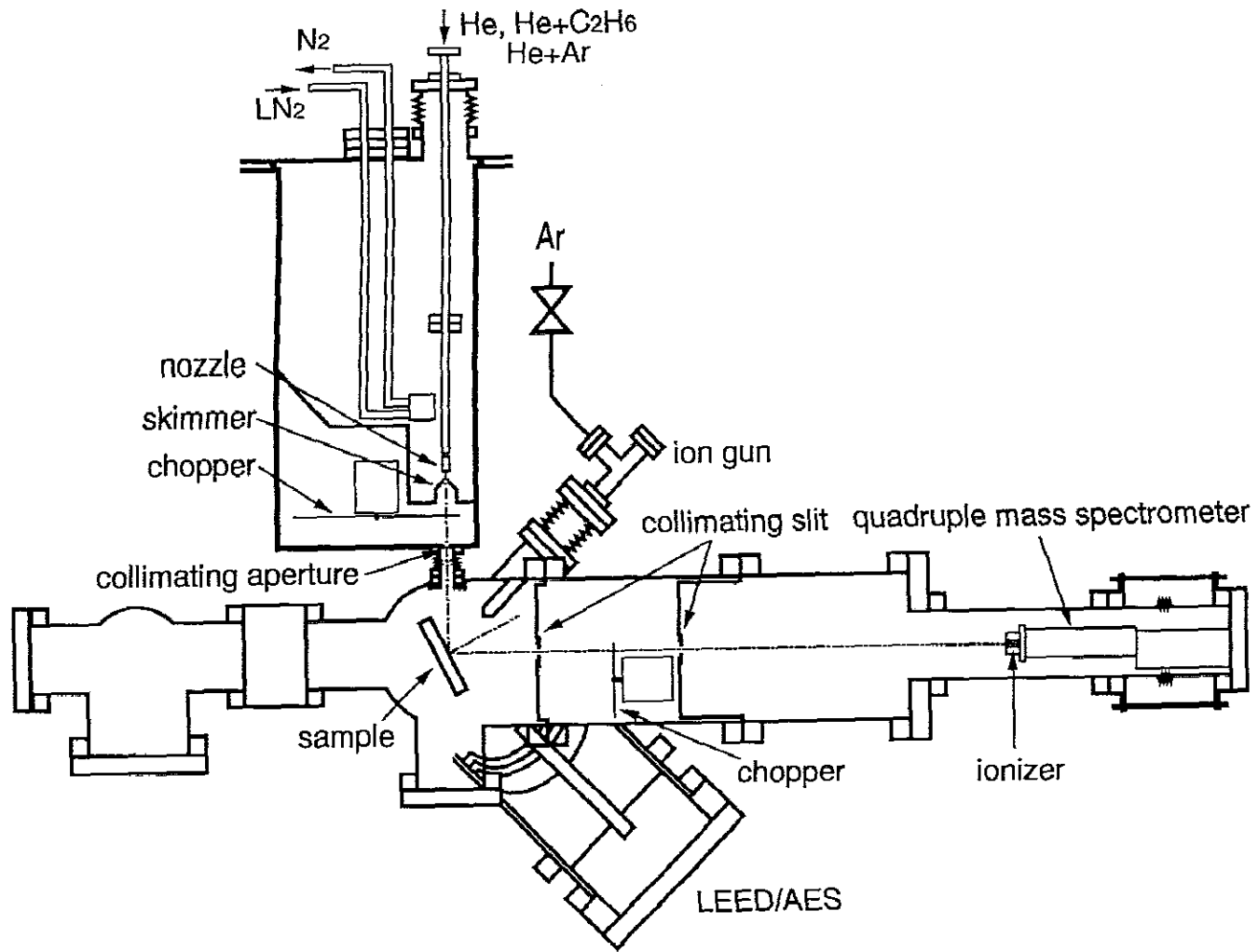


表4.2.1 装置の特性表

装置の特性	
ノズル径	5~50 μ m
背圧	1~100atm
分子線流量	2.7×10^{19} atom/sr/s
ノズル温度	100K~900K
エネルギー分散 $\Delta E/E$	5.4% (at He 30meV)
ノズルから	
サンプルまでの開き角	$2\theta=0.9^\circ$
サンプルでのビーム径	$\phi 3.0$ mm
サンプルから	
検出器までの開き角	$2\theta=0.5^\circ$
可干渉長	70 \AA (at $\theta_i=45^\circ$)
サンプル温度	150K~1200K
回転精度	$\pm 0.1^\circ$
散乱室のベース圧力	1×10^{-10} Torr以下
検出室のベース圧力	9×10^{-11} Torr以下

図4.2.2 分子線散乱実験装置の概略図

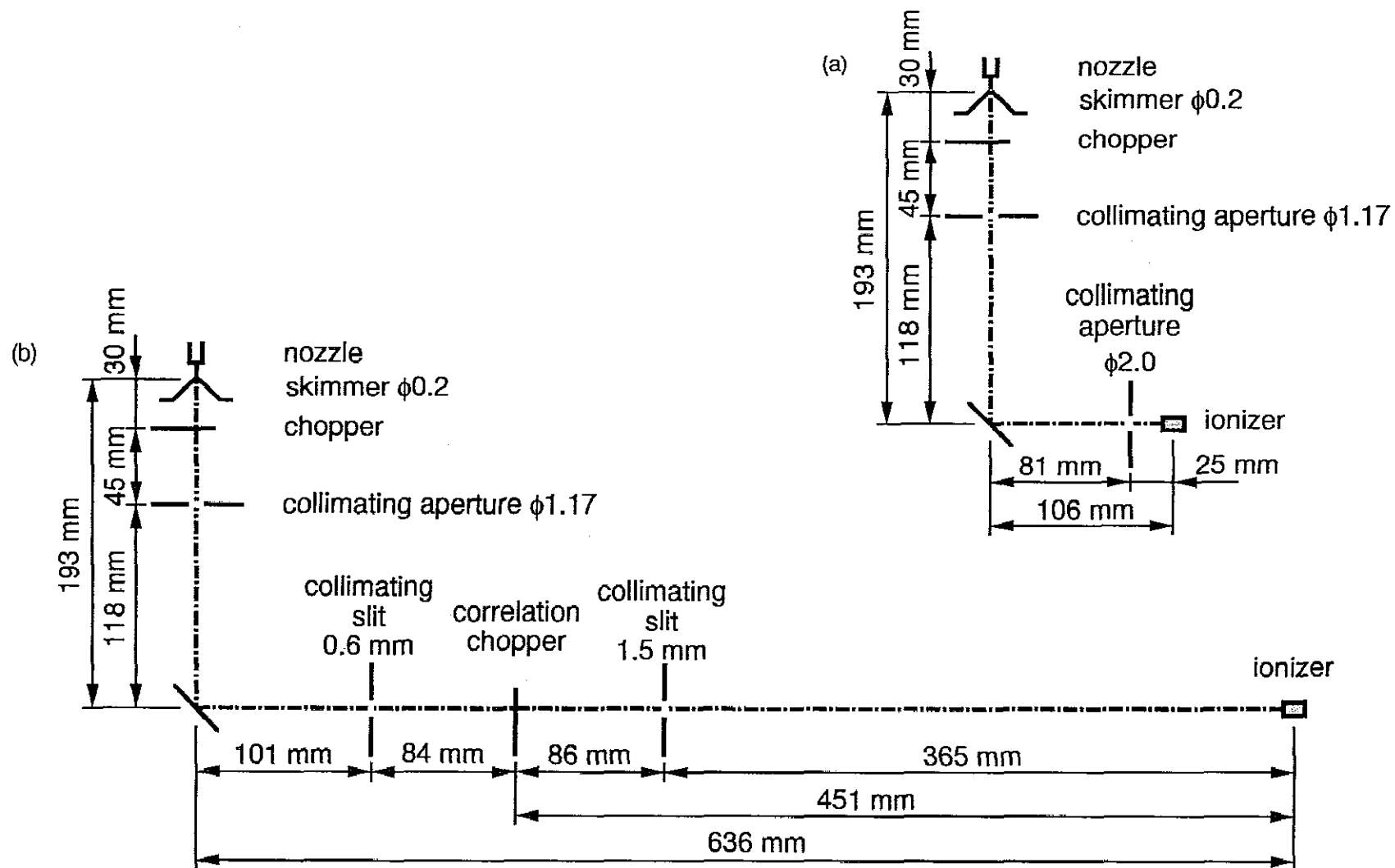


図4.2.3 装置内のアパチャ等の配置図

(a)後段変調室増設前, (b)後段変調室増設後をそれぞれ示す.

4.2.2 線源室

線源室には超音速分子線を作成するためのノズルとスキマーが設置されている。線源室では、排気速度2000 l/sの油拡散ポンプ (Edwards High Vacuum International, Diffstak250/2000P) と1180 l/sのロータリーポンプ (Alcatel CIT, T2063A) (前段変調室と共用) を用いて排気を行っており、到達真空度は 10^{-8} Torrの高真空である。また、単色性が良く強度の強い分子線を得るためには、ノズル孔径やガス背圧に合わせてノズルとスキマーの位置を最適化するため、ノズルは3軸の直線モーションフィードスルーを通して装置に取り付けられている。

(1) ノズル

図4.2.4にノズル外観写真と図4.2.5にノズル先端部とスキマーの拡大図を示す。作成する分子線のエネルギーを制御するため、100 Kから900 Kまでの加熱冷却が可能となっている。ノズルの孔としては、電子顕微鏡の白金アパーチャー (2mmOD×0.53mmT, アパーチャー径50mm, Electron Microscopy Sciences, Inc) を用いた。ノズル内部は数十気圧になることもあるため、アパーチャー取付部分はナイフエッジとなっており、これをアパーチャーの外周部分に食い込ませることによって、孔以外の部分からのガスの漏出を防いでいる。白金アパーチャーは、先端のナイフエッジの上に乗せ、上からアパーチャーディスク押さえフクロナットにて締め込む。これにより白金をエッジに食い込ませることで真空シールを行っている。このような構造であるので、孔径の異なるアパーチャーを取り付けたノズル先端部を複数用意し、実験目的に合わせて交換する

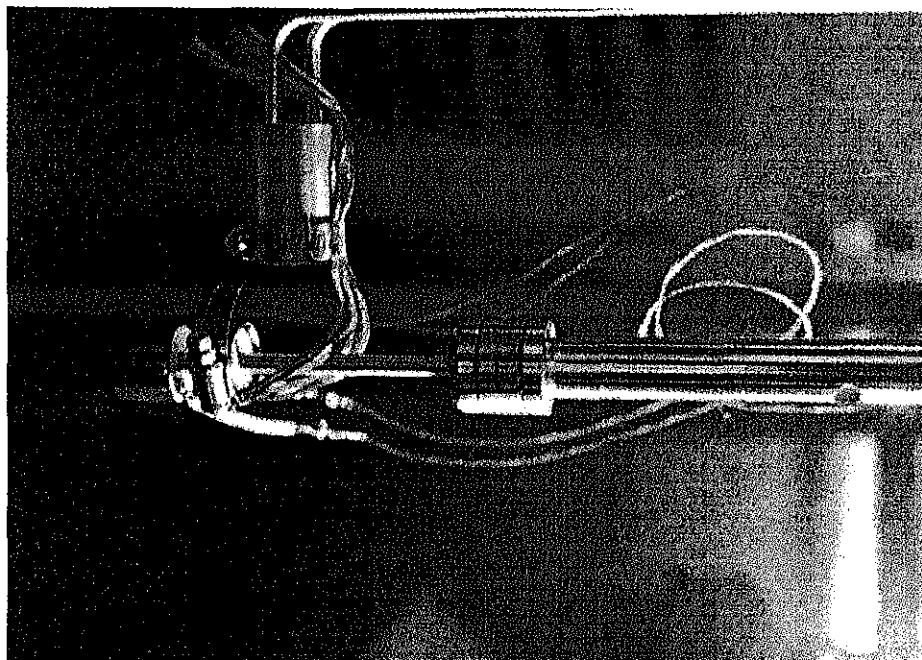


図4.2.4 ノズル外観写真

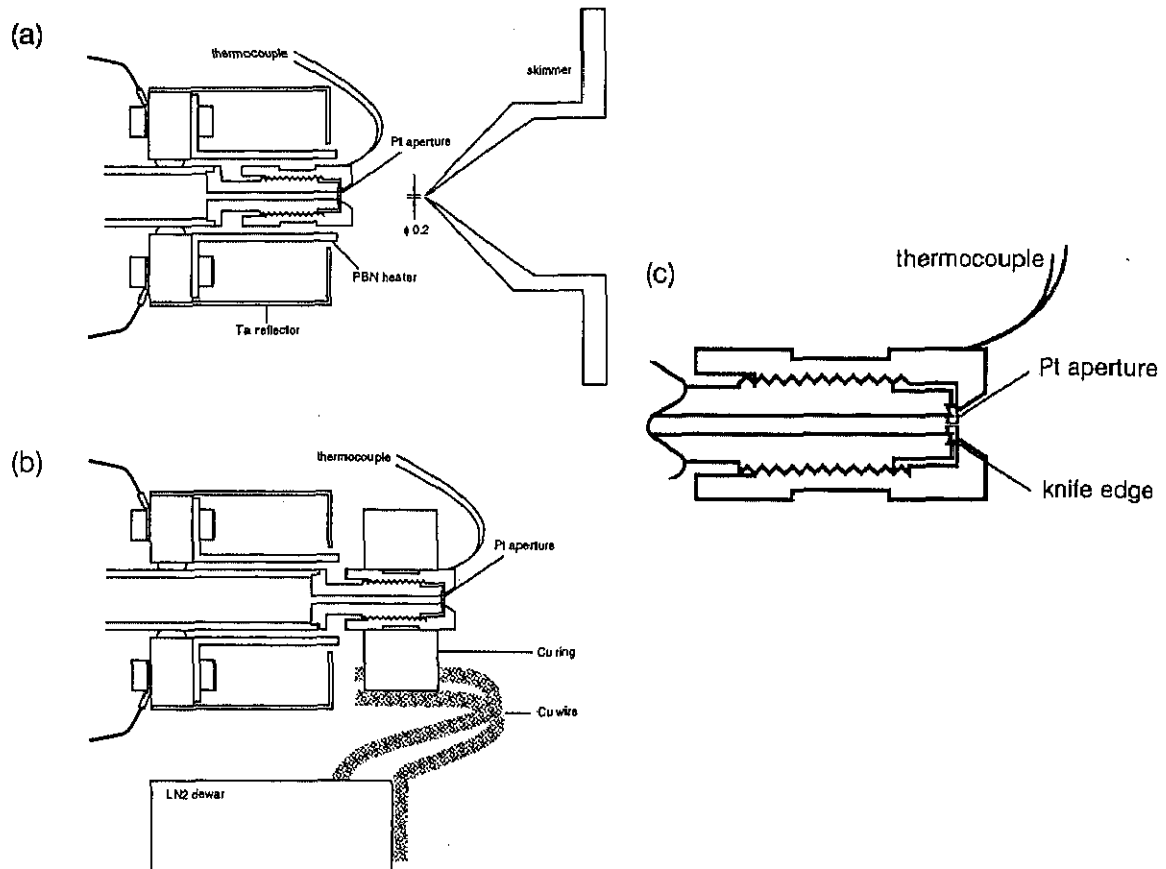


図4.2.5 ノズル及びスキマーの拡大図

(a)加熱時, (b)冷却時, (c)先端部の拡大図をそれぞれ表す.

ことによってノズル孔径の変更を行っている。ノズルの材質は、加熱ノズルの場合は高温でも丈夫なSUS310Sを用い、それ以外はSUS304を用いた。またノズルの加熱には、ノズル先端部にPBNヒーター（日本セラテック社製、特注品）を用いその熱が外へ漏れないようにTaの熱シールドカバーが付けてある。冷却には、サンプル冷却と同様に液体窒素のデュワーとノズル先端とを銅メッシュで熱接触させることを行っている。ノズル先端にはクロメル-アルメル熱電対が点溶接されており、温度調節器（富士電機株式会社、PYZ4）を用いることによってその温度を±2K以内で制御することが可能である。

(2) スキマー

スキマーはノズルから噴出するガスの流れの内、中心部分の方向の揃った部分のみを取り出すためのステンレス製（SUS304）の部品で、変調室との間の壁に取り付けられている。スキマーの写真と詳細図を図4.2.6、図4.2.7に示す。スキマーは高さ25mmの中空円錐であり、この円錐の内角及び外角はそれぞれ35°と45°であり、その先端にはφ0.2mmの孔が開いている。

スキマーは超音速の気体の流れの中にあるので先端に衝撃波ができる。この衝撃波がスキマーの先端から離れると超音速ビームの利点が失われるため、これを避けるためにスキマーの円錐状の頂点が小さい方が望ましい。一方、コンダクタンスを大きく保つため、スキマーの内側の角度は大きくしている。



図4.2.6 スキマー外観図

写真は線源室側から見た写真。左奥に見えるのがスキマー。

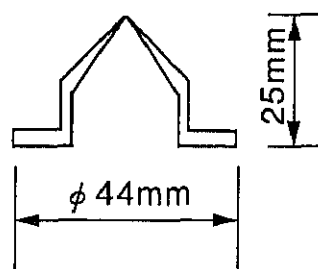


図4.2.7 スキマー詳細図

4.2.3 前段変調室

変調室は、スキマーを通して来た分子線を変調するためのチョッパーとそれを駆動するモーターで構成されている。チョッパーとそのモーターは、1枚のフランジ取り付けられておりメンテナンスが容易なようになっている。また、変調室も独自に排気速度600 l/sの油拡散ポンプ（Edwards High Vacuum International, Diffstak CR 160/700P）と1180 l/minのロータリーポンプ（Alcatel CIT, T2063A）（線源室と共用）とで行われており、さらに出口には無酸素銅のφ1.17mmのアパーチャーが取り付けられており余分なガスの散乱室への排出の削減とビームのコリメートを行っている。

(1) チョッパーディスク

チョッパーの詳細図を図4.2.8に示す。チョッパーは直径φ186mm、厚さ2mmのジュラルミン製であり、 0.72° 、 45° のスリットがそれぞれ4つある。 45° の大きいスリットは分子線緩和実験（MBRS）、S/N比向上等のために用いられる。スリットの選択は、チョッパーのビームラインへの挿入量で行う。

各周波数でのスリットのオープン時間を表4.2.2に示す。

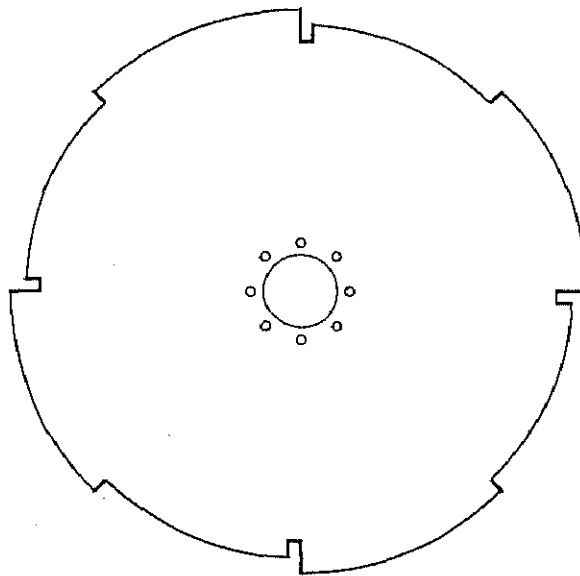


図4.2.8 チョッパーの詳細図

表4.2.2 各周波数でのスリットのオープン時間

回転周波数	周期	0.72°	45°
200Hz	1.25ms	10 μ s	0.625ms
150Hz	1.66ms	13.3 μ s	0.833ms
100Hz	2.5ms	20 μ s	1.25ms
40Hz	6.25ms	50 μ s	3.125ms

(2) モーター冷却機構, 回転検出器

チョッパーディスク回転のためのモーターは、真空対応型のヒステリシス同期モータ (TRW Globe Motors 18A1003-2, 定格回転24000rpm, 最高回転数400Hz, 最大消費電力33W, 使用温度範囲-55~85°C) である。このモーターは、周波数可変電源 (菊水電子社製 PCR-500L, 5~500Hz, 500VA) によって駆動される。モーターを真空中で回転する際には、真空中は空気の流れがないため、モーターの温度上昇によるモーター本体の破損と温度上昇による周りの部品からのガス発生を防止するためにモーターの冷却が重要になる。モーター冷却機構を図4.2.9に示す。モーターを取り囲んでいるブロックはSUS製でその周りを銀ろう溶接した1/4インチのSUS製のパイプに冷却水を流すことでモーターの冷却を行っている。また、回転検出器には、フォトランジスター (東芝製 TPS601) とフォトダイオード (東芝製 TLN101) が組み込まれておりチョッパーのスリットによってフォトダイオードの光を切ることによってフォトランジスターで回転を検出する。回転検出器は、ビームラインに対して90°の位置に取り付けられている。

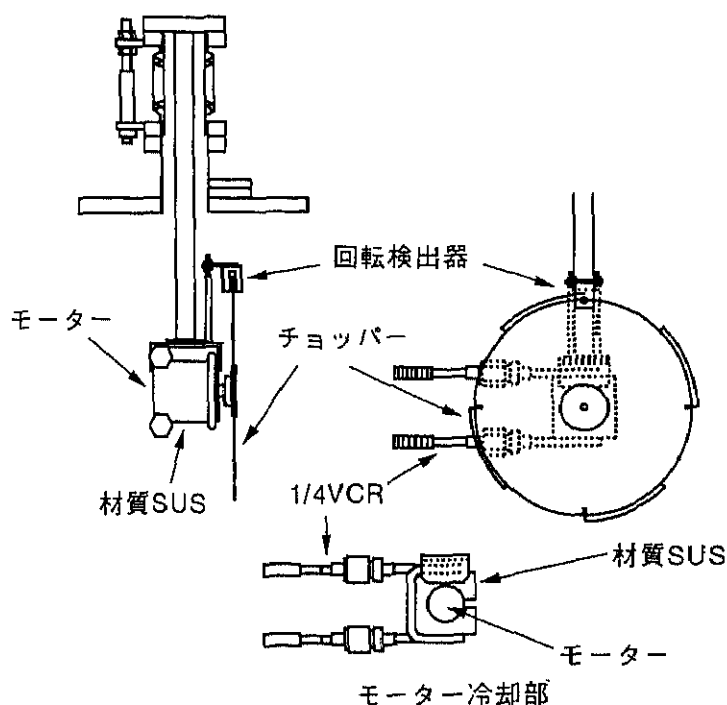


図4.2.9 モーター冷却機構

4.2.4 散乱室

散乱室には、試料を取り付けた試料ホルダーを保持するマニピュレータ、試料表面の清浄化に用いるイオンガン、試料表面の周期構造の観測と構成元素の同定とに用いる低速電子線回折/Auger電子分光装置（以下、LEED/AES装置と略す）、試料の仕事関数を測定するケルビンプローブが取り付けられている。試料表面を長時間清浄に保つ必要があるため、散乱室は排気速度450 l/sのターボ分子ポンプ（BALZERS, TPU450H）、250 l/minのロータリーポンプ（Alcatel CIT, M2015）、110 l/sのイオンポンプ（THERMIONICS NORTHWEST, TP110）、チタンサブリメーションポンプ（THERMIONICS NORTHWEST）を用いて排気を行っている。特にターボ分子ポンプは、Heなどの軽いガスを引くために圧縮比が通常よりも高いものを用いた。

(1) マニピュレータ

本装置では、分子線源と検出系が固定されているため、マニピュレータで試料を回転させることによって分子線の入射角、入射方位の変更を行う。マニピュレータの詳細図を図4.2.10に示す。マニピュレータ上の試料は試料表面に平行な軸（ θ ）と垂直な軸（ ϕ ）との2軸

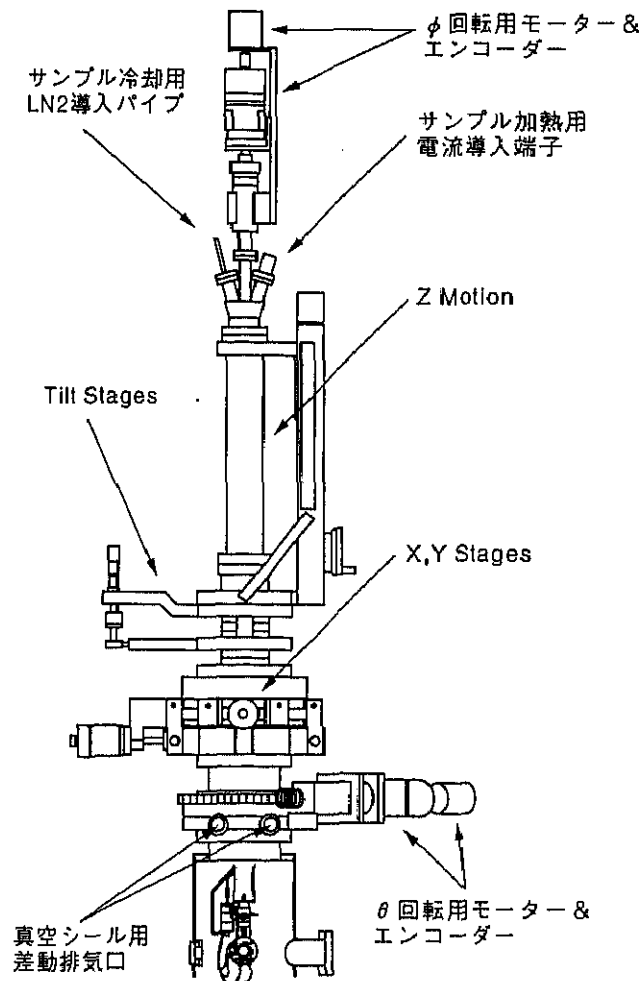


図4.2.10 マニピュレータ詳細図

で回転させることが可能で、 $\pm 0.1^\circ$ の精度で制御することが可能である。マニピュレーターは、真空中で軸回転を行うために回転部分にボールベアリングと2つのテフロンシールを用いて真空シールを行っており、この部分の独自の排気のために排気速度50 l/sのターボ分子ポンプ（三菱社製PT-50）と90 l/minのロータリーポンプ（Alcatel CIT, M2005）を用いて排気を行っている。分子線の散乱を精度良く計測するためには、試料を回転させた際に試料表面上の一点が常にビームラインと接している必要がある。このため、マニピュレータには θ 回転軸を水平移動させる2軸のステージと、 θ 回転軸の傾きを制御する2軸のチルトステージが取り付けられている。それぞれの可動範囲は、X, Y: $\pm 12.5\text{mm}$, Z: 250mm , Tilt: $0\sim 5^\circ$, 面内回転(ϕ): $\pm 90^\circ$, 軸回転(θ): $\pm 180^\circ$ であり、面内回転と軸回転については5相ステップモーター（オリエンタルモーター, UPH566HG2-B2）を用いている。

(2) サンプルホルダー

図4.2.11に試料ホルダ、ホルダドックの拡大図を示す。試料は試料ホルダ上のMoの円板状にTaの板パネを用いて密着させて固定されている。試料温度の制御のための熱のやりとりはこのMo板を通じて行われる。これは試料温度のむらを少なくするためである。Mo板は背面で銅製のホルダドックと密着させてある。ノズルの場合と同様に、このホルダドックを液体窒素を充填させた銅製の容器と複数の銅の網線で結合することによって、試料を約150 Kまで冷却する事が可能となっている。また、ドックの中央にはW（線径 $\phi 0.3$ ）フィラメントが取り付けられており、フィラメントの輻射と電子衝撃加熱とを組み合わせることにより、約1200 Kまで試料を加熱することが可能である。本装置では、加熱の効率を上げるためにフィラメントの周りをTa製の熱反射板で覆っている。また、電子衝撃加熱の効率を上げるために、このTa製の熱

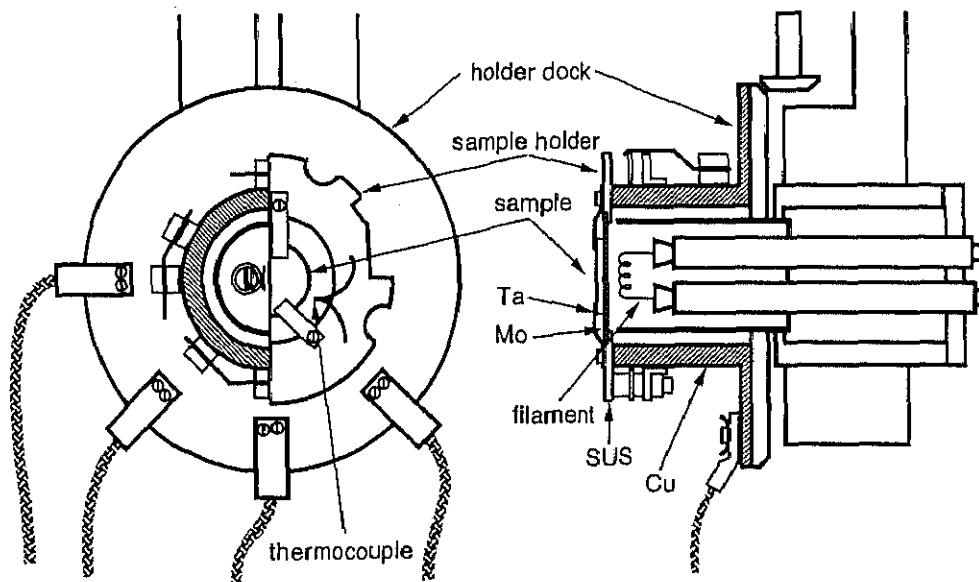


図4.2.11 サンプルホルダ及びホルダドックの拡大図

左側の正面図の左半分は試料ホルダを取り外した状態を表す。

反射板がフィラメントと同電位（マイナスの電位がかけられている）になっており、電子が効率よくMo板に当たるようになっている。Mo板に点溶接されたクロメルアルメル熱電対を用いて、試料温度を間接的に計測しており、温度調節器（EUROTHERM, 903P）で試料温度を±1 K以内で制御することが可能である。試料ホルダは電氣的に切り放されており、LEED, AES, イオンスパッタリング等の際には、試料に流れる電流を計測することが可能である。このホルダには10 mm四方程度の大きさまでの試料を取り付けることが可能である。また、試料ホルダは、トランスファーロードによって準備室から移動できるようになっている。

(3) 表面清浄化及び分析装置

本装置に用いられているLEED/AES装置は、格納機構つき3メッシュ背面低速電子線回折/オージェ電子分光装置（VG Microtech, RVL/15）である。これにより、可干渉長の短い分子線散乱では観測することが出来ない、長周期の周期性をLEEDで観測したり、AESで表面の元素同定が可能となっている。用いられている電子銃は最大で3 KeVのエネルギーの電子を出すことが可能で、試料上での電子のスポット径は約1 mmである。

試料表面清浄化に用いるイオンガン（OCI Vacuum Microengineering, IG35）は、直線導入器を用いて取り付けられており、使用しないときには試料から遠ざけることが出来る。試料に照射するイオンのエネルギーは、最高で3 KeVである。

試料の仕事関数計測のためにケルビンプローブ（ベソッケ社製、ケルビンプローブS型）が設置されている。このケルビンプローブS型は、サンプルがグランドになっても測れるタイプであり、プローブと試料表面との相対的な仕事関数計測を行う。プローブの材料は、吸着物に対して汚染されづらい金のメッシュを用いており、その直径は、2.5mmである。

4.2.5 後段変調室

後段変調室は、散乱飛行時間分布を正確に測定するために後から増設したものである。また、散乱分子の強度が弱いために効率よく測定する必要があるため、ここでは分子の変調には相互相関ディスクを用いている。図4.2.12に後段変調室概略図、図4.2.13に後段変調室チョッパー部の写真を示す。後段変調室は、散乱室と検出室の間に設置されており、分子線を変調するためのチョッパーと、それを回転させるためのモーターが設置されている。チョッパーとモーターは、メンテナンスを容易に行うために1枚のフランジ(φ203)にとりつけられている。チョッパーディスクの回転モーター、冷却機構、回転検出器は、前段変調と同じ機構のものをを用いた。回転検出器は、ビームラインに対して約180°の位置に取り付けている。チョッパーは、ビームラインに対して上下方向に±10 mm移動可能である。後段変調室と散乱室、検出室の間には、それぞれアパーチャーが取り付けられている。後段変調室では、ターボ分子ポンプ（Pfeiffer社製TMU 065, 排気速度56 l/min）とロータリーポンプ（Alcatel社製M2005, 排気速度90 l/min）を用いて排気を行い、その到達真空度は 5×10^{-9} Torr以下である。

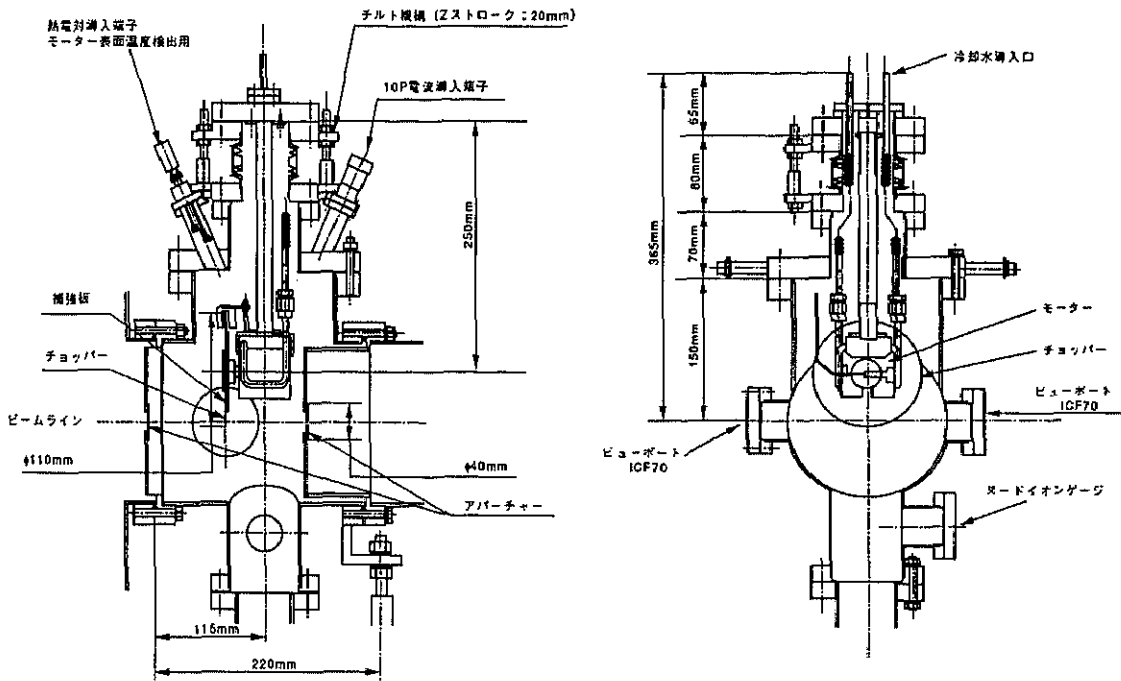


図4.2.12 後段変調室概略図

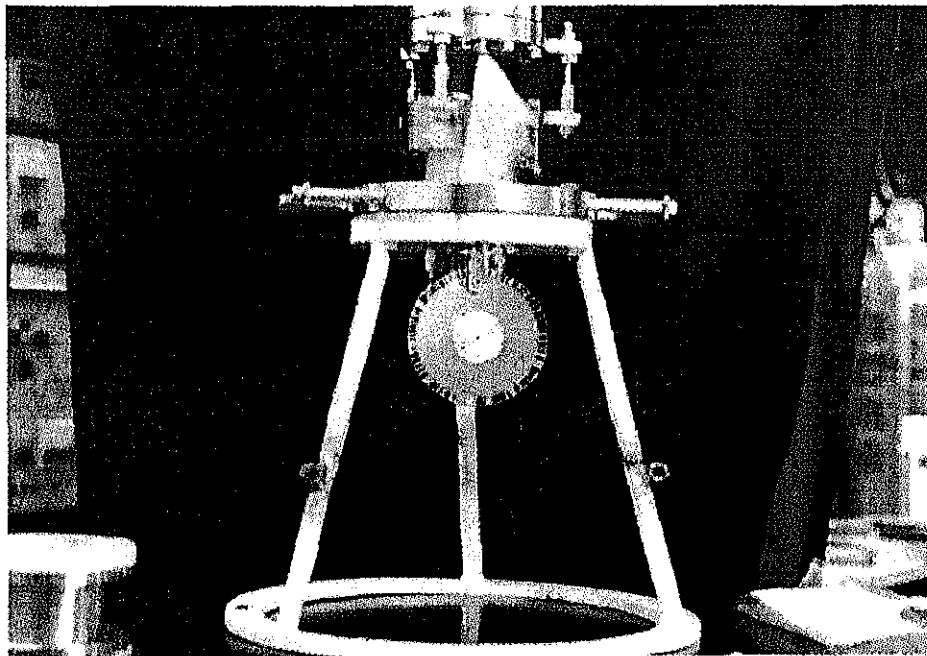


図4.2.13 後段変調室チョッパー部写真

(1) 相互相関チョッパー

本研究では、スリット総数255, 511の相互相関チョッパーを設計及び作成を行った。図4.2.14に作成した相互相関チョッパーを示す。相互相関チョッパーの形状は、直径110 mm, 肉厚0.15 mmの円盤状であり、材質はニッケル-銅-ニッケル(肉厚はすべて0.03 mm)である。変調スリットは、チョッパーの円周上にあり、トリガースリットは、変調スリットから1 mm内側にある。それぞれのスリットの大きさを表4.2.3に示す。ただし、変調スリット幅、トリガースリット幅は、それぞれチョッパーの中心から51 mm, 44.5 mmの位置での値である。

相互相関チョッパーの工作は、工作精度を良くするためにフォトエッチング((株)健正堂

表4.2.3 変調スリットとトリガースリットの大きさ

	スリット総数	単位角度[°]	幅[mm]	長さ[mm]
変調スリット	255	1.4	1.27	6
トリガースリット	255	1.4	1.10	5
変調スリット	511	0.7	0.63	6
トリガースリット	511	0.7	0.55	5

にて作成)にて行った。図4.2.15にチョッパーの工作精度を示す。チョッパー板の反りは0.3%以下であり、スリットの長さやネジ孔の位置精度は±0.02 mm, 単位スリット角度の精度は±0.022°, トリガースリットの角度精度は±0.026°である。また、チョッパー断面でのスリット位置精度は、フォトエッチングをする際のレーザー入射面に近いニッケル-銅接線部で最も良くなっている(精度面)。スリットはレーザー透過面側が入射面側に較べ大きくなり、その誤差は0.01 mmである。相互相関チョッパー変調数列は、M系列を用いたM系列は付録A.2に示す。表4.2.3は、各回転周波数における単位スリットのオープン時間である。本研究では、スリット総数255の相互相関チョッパーと、回転周波数196.1 Hzを用いた。回転周波数の回転誤差は±0.02 Hzであり、その時の時間誤差は±2 nsである。

表4.2.4 チョッパーの回転周波数とオープン時間

回転周波数[Hz]	単位スリットオープン時間[μs]	
	スリット総数	
	255	511
130.7	30	15
196.1	20	10
206.4	19	9.5
217.9	18	9

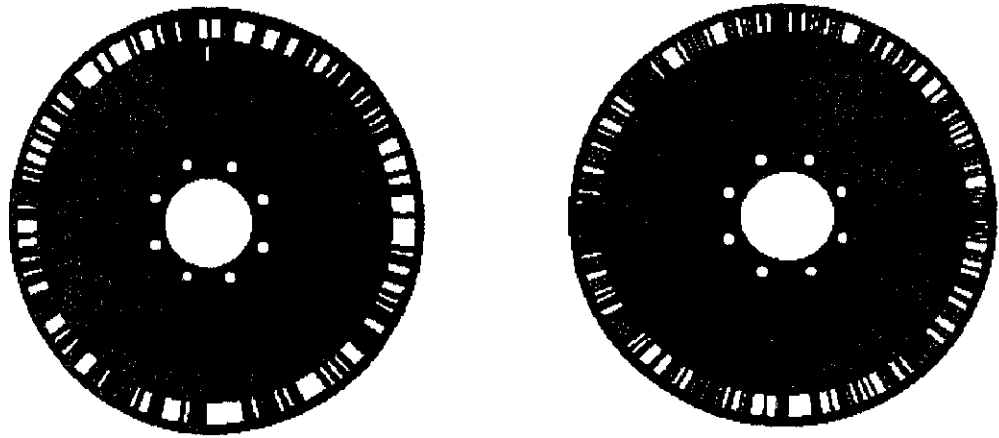


図4.2.14 作成した相互相関チョッパー

それぞれのスリット総数は255 (左) と511 (右) である。

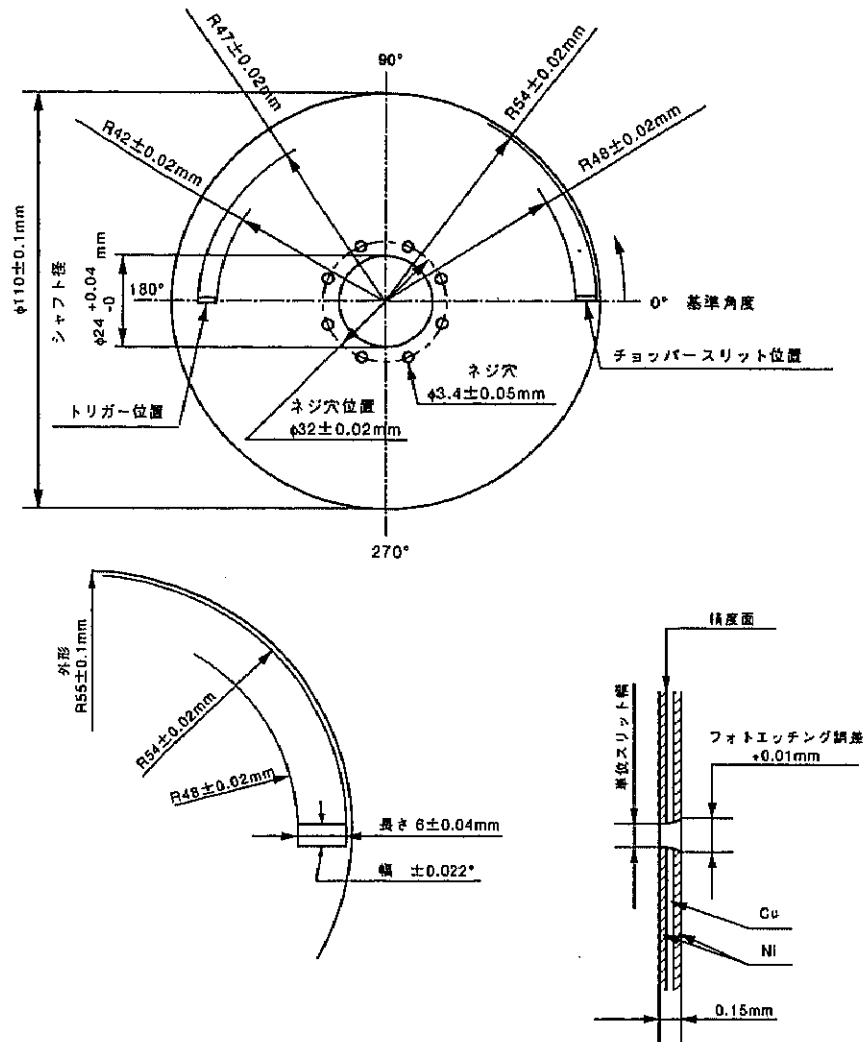


図4.2.15 相互相関チョッパーの工作精度

上図は全体, 下図はスリットの精度の詳細である。

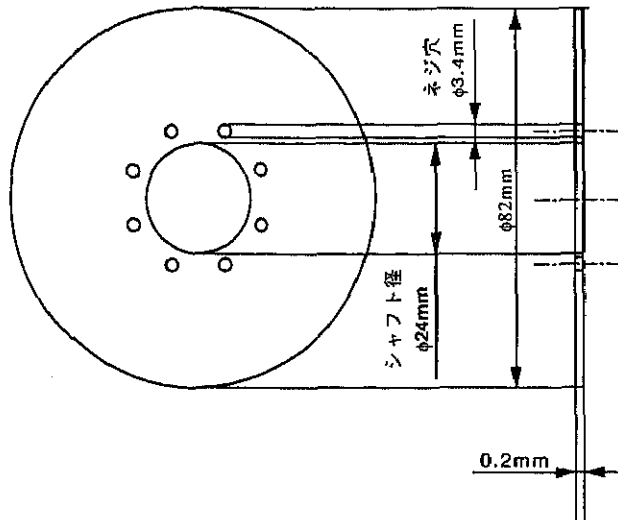


図4.2.16 補強板詳細図

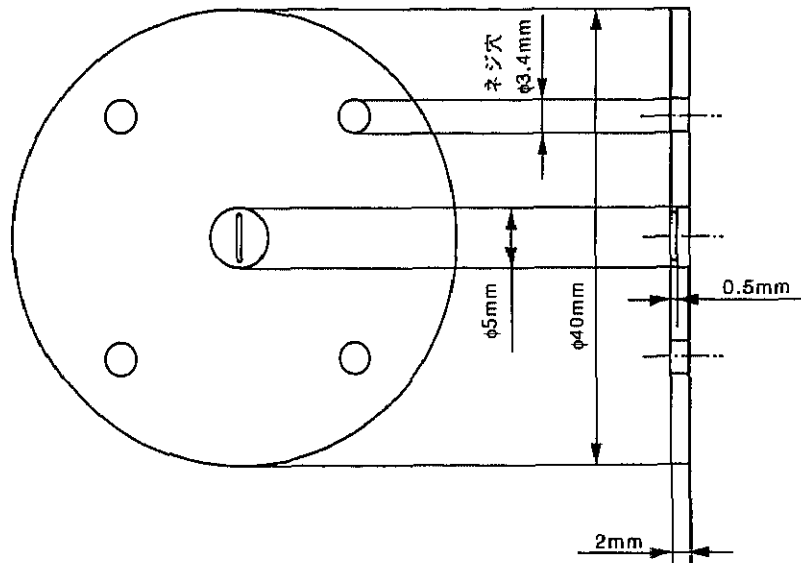


図4.2.17 アパーチャー詳細図

表4.2.5 後段変調室のアパーチャーの大きさ

	スリット総数	幅[mm]	長さ[mm]
散乱室側	255	0.6	3.17
検出室側	255	1.5	5
散乱室側	511	0.3	3.17
検出室側	511	1.5	5

(2) 補強板

高速回転によってチョッパー板の振れを防止するためにモーターとチョッパーの間に補強板の設置を行った。補強板の形状は、直径82 mm、肉厚0.2 mmの円盤状であり、材質はニッケル-銅-ニッケル(肉厚はそれぞれ0.05 mm, 0.1 mm, 0.05 mm)である。図4.2.16に補強板詳細図を示す。

(3) アパーチャー

アパーチャーは、不要なガスの散乱室、検出室への排出防止と、散乱された分子線のコリメートを行っている。図4.2.17にアパーチャー詳細図を示す。アパーチャーは、SUS304製であり、検出強度を良くするために長方形スリットを用いた。また、チョッパーにおけるビーム径を単位スリット幅以下にする必要があるため、アパーチャーの大きさを表4.2.5のように設定した。検出室から試料を見た分子線の広がり角は、スリット総数255のとき 0.34° 、511のとき 0.17° である。アパーチャーの工作は、スリット幅が狭いため、0.2 mmの電極を用いた放電加工にて行った。

4.2.6 試料導入室

本装置では、散乱室の真空状態を破ることなく試料を散乱室に導入するために、試料導入室が設けられている。ここには、試料ホルダーを2個保持できる回転導入器があり、散乱室で測定を行うもの以外にもう1個の試料を真空中で保持することが可能である。また、試料表面に蒸着などの処理を行うことも可能である。

試料導入室は、排気速度56 l/sのターボ分子ポンプ (BALZERS, TPU062H) , 250 l/minのロータリーポンプ (Alcatel CIT, M2015) を用いて排気を行っている。

4.2.4 検出室

検出室には、試料で散乱された分子線を検出するための四重極質量分析計 (日本真空株式会社, MSQ-200) が取り付けられている。この質量分析計には直径6.9 mm、長さ125 mmのロッドからなる四重極と、14段の2次電子増倍管が用いられている。この四重極質量分析計では入射分子をイオン化した後検出するため、検出効率がイオン化確率に依存する。イオン化確率は入射分子の持つ速度に反比例するため検出される分子線強度は入射する分子の密度に比例したものである。

検出器の設置は、一度イオン化領域を通過した分子が検出器内部で散乱されて再びイオン化領域へ戻らないようするのが理想的である。しかし、高い並進速度を持つ分子が入射した場合、この速度のためにイオンが四重極を正確に通過できなくなるため、正確に信号を検出できなくなる。このため、本装置では図4.2.2で示した様に検出器を設置してある。

検出信号のS/N比を良くするため検出室は超高真空状態に保つ必要があり、排気速度180 l

sのターボ分子ポンプ (BALZERS, TPU180H) , 90 l/minのロータリーポンプ (Alcatel CIT, M2005) を用いて排気を行っている。

4.3 分子線散乱実験装置の計測・制御系

本装置の計測, 制御系の構成図を図4.3.1に示す。表4.3.1に分子線散乱実験装置に使用されている主な計測・制御機器を示す。本装置では, 計測, 制御をコンピューター (Gateway 2000 P5-120) を用いて統一的行っている。コンピューターと計測, 制御系との通信は, GPIBボード (TransEra, Model 910) と14BitA/D D/A (TransEra, Model 430) によって行われており, これらは, プログラム (HT Basic) によって制御されている。

(1) 空間分布測定

空間分布測定は, 散乱された分子をQMSにて検出し, プリアンプ (EG&G ORTEC, 142A) , タイミングフィルターアンプ (EG&G ORTEC, 474) , ディスクリミネーター (EG&G ORTEC, 583) によって信号整形を行いカウンター (Laboratory Equipment Corporation, C-2000) にて計測される。

(2) 飛行時間測定

飛行時間測定も同様に, 空間分布測定と同様の信号検出, 整形を行い, マルチチャンネルスケーラー (Laboratory Equipment Corporation, DN-5000) にて計測が行われる。計測開始の信号は, 変調室に設置されているフォトランジスタの信号をタイミングフィルターアンプ (日立製作所中央研究所) , デイレー回路 (日立製作所中央研究所) にて整形及び遅延を行いマルチチャンネルスケーラーに入力される。

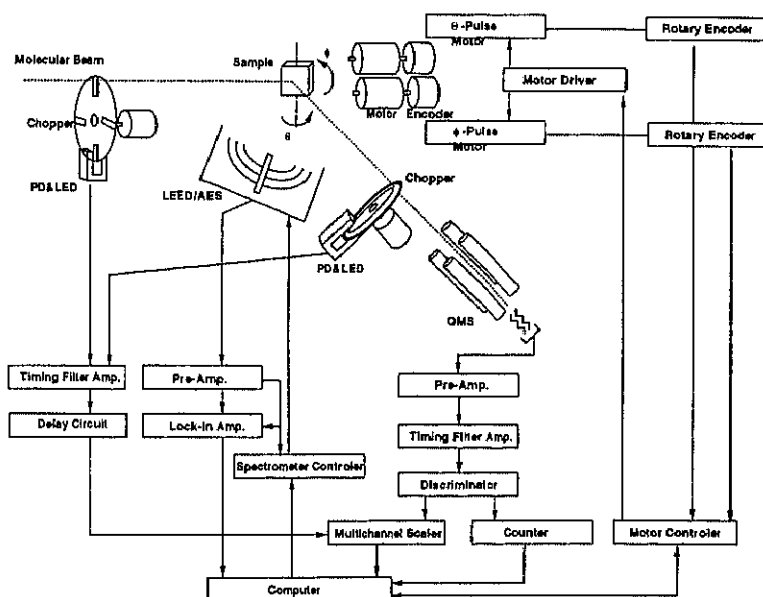


図4.3.1 計測・制御構成図

(3) AES測定

AES測定では、コンピューターからの設定値をD/Aボードを通りスペクトロメーターコントローラー (VG Microtech, Model 318) に送られる。LEED/AES装置のスクリーンメッシュに入った信号は、プリアンプ (VG Microtech, Model STO25861) で増幅し、ロックインアンプによって検波されA/Dボードを通りコンピューターに記録される。

(4) 軸回転, 面内回転

2軸の回転は、モーターコントローラー (Laboratory Equipment Corporation, DN-2000) , モータードライバー (Laboratory Equipment Corporation, SD-2020 (UPS500)) 通してマニピュレーターに取り付けられた、モーターを回転させ、ロータリーエンコーダーによって角度位置の検出を行う。

4.4 アライメント方法

分子線実験に於いてアライメントは非常に重要である。(分子線は中性であるため静電力や磁力によって曲げることが不可能である)ここでは、本装置のアライメント方法について述べる。アライメントには、レーザー (Edmund Scientific社製, レベリングレーザーJ52202 (ダイオードレーザー, 発振波長650nm) , レベリングアダプタープレートJ52204) とオートベル (トプコン社製, AT-M3) を用いた。(1) 散乱面の水平を確保するため, 散乱室のマニピュレーターが乗る面の水平を水準器にて確認を行う。確認後, マニピュレーターを取り付けそのマニピュレーターが一転で軸回転することを確認する。(2) ノズルの後ろ, またはスキマーから平行ビーム (ダイオードレーザー) を入射する。これがビームラインになる。この時, サンプルのほぼ中央にビームがくるように線源室, 変調室のアライメントを行う。(3) マニピュレーターのサンプルホルダーに鏡面研磨したSi単結晶 (実際にはよく反射するもの) を取り付けノズル側から入射したビームを等角反射させる。そのときの散乱光が検出室側のアパーチャーを通る様に調節を行う。(この時, QMSは取り外す。)

表4.3.1 分子線散乱実験装置に使用されている主な計測・制御機器

Computer	Gateway 2000, P5-120
GPIB board	Trans Era, Model 910
14bit D/A, A/D board	Trans Era, Model 430
Programming language	HT-BASIC
 MBS	
quadruple mass spectrometer	日本真空, MSQ-200
pre-amplifier	EG&G ORTEC, 142A
timing filter amplifier	EG&G ORTEC, 474
amplifier-discriminator	EG&G ORTEC, 9302
counter	Laboratory Equipment Corporation, C-2000
multi-channel scaler	Laboratory Equipment Corporation, DN-5000
 Chopper start signal	
timing filter amplifier	日立製作所中央研究所
delay circuit	日立製作所中央研究所
 AES	VG microtech, RVL/15
power supply	VG microtech, Model 8011
spectrometer control unit	VG microtech, Model 318
pre-amplifier	VG microtech, Model STO25861
Lock-in amplifier	VG microtech, Model 5101
 Kelvin	Besocke Delta Phi
control unit	Kelvin Control Model 07
probe	probe Kelvin probe S
 Motor control	
pulse motor controller	Laboratory Equipment Corporation, DN-2000
motor driver	Laboratory Equipment Corporation, SD-2010
motor	オリエンタルモーター, UPH566HG2-B2