

JAERI-Tech

2000-021



JP0050342



光学素子評価用試験装置の設計・製作

2000年3月

清水雄一・依田 修・貴家恒男*・寺岡有殿・横谷明徳・柳原美広*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2000

編集兼発行 日本原子力研究所

光学素子評価用試験装置の設計・製作

日本原子力研究所関西研究所光量子科学研究中心

清水 雄一・依田 修・貴家 恒男*・寺岡 有殿⁺

横谷 明徳⁺・柳原 美広**

(2000年2月1日受理)

現在、関西研究所光量子科学研究中心において、主として軟X線領域の光を発振する高強度X線レーザーの研究開発が精力的に行われている。このレーザーの開発のためには、共振器ミラー用などに高性能な多層膜ミラーの光学素子が必要不可欠であり、この多層膜は軟X線に対する高い反射率と共に、高強度パルスX線照射に対する耐熱性などそれ自体の高い耐久性も要求される。このための多層膜の反射率や耐熱性（表面損傷・粗さ）などの特性値の評価は、開発中のX線レーザーの目標発振波長と波長がほぼ等しく、しかも高輝度なX線を用いることによってのみ可能であり、大型放射光施設の SPring-8 からの軟X線を利用して軟X線レーザー用多層膜の特性評価を行うことが不可欠である。本報告は、この耐熱性などの評価のための真空チャンバーを設計・製作し、SPring-8 の原研専用軟X線ビームライン BL-23SU に設置・調整するとともに、標記試験装置の全体像について検討した結果などを述べたものである。

関西研究所：〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台8-1

* 放射光利用研究部

* 放射線照射利用振興協会

** 東北大学

Design and Manufacture of a Testing Device for the Evaluation of Optical Elements

Yuichi SHIMIZU, Osamu YODA, Tsuneo SASUGA *, Yuden TERAOKA +,
Akinori YOKOYA + and Mihiro YANAGIHARA **

Advanced Photon Research Center
Kansai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto

(Received February 1, 2000)

An active development of X-ray laser which mainly emits lights of soft X-ray regions is being carried on in our research center. In order to achieve the development, it is essential to use optical elements such as high-performance multilayer films as mirrors for a resonator. This film is necessary to possess a high heat-resisting property to irradiation by high-intensity pulsed X-ray together with a high reflectivity of soft X-rays. The evaluation of the film characteristics such as reflectivity, surface roughness and surface damage will be possible only by employing X-rays in the specific wavelength region from synchrotron radiation (SR). For this purpose, it is convenient to use soft X-rays from the SPring-8 SR facility. By reflecting the results of the estimation in the preparation conditions of the films it becomes possible to prepare optical elements practically available for use in the soft X-ray regions. This report describes the design and the manufacture of above mentioned evaluating device as well as setting and adjustment of the device which has been installed in the BL-23SU of JAERI beamlines at SPring-8.

Keywords: X-ray Laser, Soft X-rays, Optical Elements, Multilayer Films, Reflectivity, Heat-resisting Property, SPring-8 Synchrotron Radiation, Evaluating Device, Design and Manufacture, Setting and Adjustment

+ Department of Synchrotron Radiation

* Radiation Application Development Association

** Tohoku University

目 次

はじめに	1
1. 光学素子評価試験装置の設計・製作	4
1.1 本体真空チャンバーの設計・製作	4
1.2 試料導入・交換室の設計	6
1.3 照射用試料ホルダーの設計	8
1.4 本体チャンバー真空保護用前置チャンバーの設計	8
1.5 ZYG0 干渉計の検討	9
1.6 軟X線ガン・検出器の検討	10
1.7 サーモビューアの検討	10
1.8 Q-マス分析計の検討	10
2. 本体真空チャンバーの搬入・据え付け・調整	11
おわりに	13
参考文献	14
付録 1: 軟X線用多層膜光学素子	38
付録 2: 放射光関連の用語	42
付録 3: 軟X線利用化学研究	45

Contents

Introduction	1
1. Design and Manufacture of a Testing Device for the Evaluation of Optical Elements	4
1.1 Design and Manufacture of a Vacuum Chamber	4
1.2 Design of a Room for the Introduction and Exchange of Samples ..	6
1.3 Design of a Sample Holder for the Irradiation	8
1.4 Design of a Prepositioning Chamber for the Protection of Ultra-high Vacuum of a Vacuum Chamber	8
1.5 Examination of a ZYGO Typed Interferometer	9
1.6 Examination of Soft X-ray Gun and Detector	10
1.7 Examination of a Thermoviewer	10
1.8 Examination of a Q-mass Analyzer	10
2. Delivery, Setting and Adjustment of a Vacuum Chamber	11
Concluding Remarks	13
References	14
Appendix 1: Multilayer Film for Soft X-ray optics	38
Appendix 2: Scientific or Technical Terms Related to the SR	42
Appendix 3: Study on the Chemical Reaction Using Soft X-ray	45

は じ め に

可視光より波長の短い光の利用が今後の科学、技術の発展に重要な役割を果たすと考えられており、平成7年3月には科学技術庁原子力局の懇談会として「光量子の高度利用に関する懇談会」が開催され、X線、 γ 線などの光量子は重要な原子力分野である放射線利用分野において様々なブレイクスルーをもたらす可能性があり、その高度利用に関する研究開発を総合的に推進する必要があることを提言している。¹⁾

この報告を基に、関西研究所光量子科学研究センターでは高強度Tキューブレーザーの開発およびこれを用いたX線レーザーの開発とその短波長化などの研究課題を推進することになった。このためには、X線光源としてのX線レーザーの開発とともに、発生したX線を自由に操ることができる光学素子・光学系の開発が不可欠となる。しかし、波長が200 nm以下の真空紫外領域の光は酸素によって吸収されるので、光路を真空中に排気しなければならない。また、この領域の光に対しては透明な物質がないので、レンズなどを用いて透過光学系を作るのが困難である。このため、全て反射を利用した光学系を使う必要があるなど、紫外・可視領域の光に比べると実験技術的にも大きな制約を受ける。特に、波長が30 nmから1 nm、すなわち光子エネルギーにして74 eVから1.24 keVの軟X線領域の光は物質に対する屈折率がほとんど1になるので、物質の反射率が極端に低くなり、結晶の回折を利用した光学系が使いにくく、直入射光学系では反射率がほとんど得られない。このため、表面すれすれの角度($\theta < 3^\circ$)で光を入射させて反射率を確保する斜入射光学系が使われてきた。この斜入射光学系では、大面積のミラーが必要なうえ、結像系の収差も大きくなるなどの難点がある。²⁾

この軟X線領域の光に対して、人工多層膜による光学素子が注目を浴びている。軟X線用多層膜ミラーは1960年代に鉄-マグネシウム(Fe/Mg)³⁾の組み合いで安定なものが作られて以来、精力的に研究が行われてきた。これらの多層膜は、図1に示すように、軟X線領域で適当な光学定数(屈折率)を持つ2つの物質(重元素と軽元素)を厚さ数 nm程度の超薄膜にしてそれを交互に積層(数十から数百層)した多層周期構造として、弱い反射を生ずる界面をたくさん設け、

軟X線に対して強め合いの干渉によって反射率を上げる反射増加膜である。この多層膜素子によって、X線レーザーの開発研究のみならず、従来は不可能であった直入射光学系によるX線顕微鏡、X線望遠鏡、X線レーザーの開発研究、あるいはシンクロトロン放射光、プラズマ計測、X線リソグラフィーなどの研究での進展が大いに期待されている。¹⁾

光量子基盤技術研究グループでは、上記懇談会での「極短波長光学素子の評価・開発はX線レーザーの開発とその応用の重要基盤である」との提言を受けて、平成9年度よりX線レーザー用多層膜素子の評価・開発の推進を図ってきた。軟X線用多層膜に要求される基本的な特性は、干渉の高次光のカットオフの良い分光特性、ピーク波長の入射角依存性、偏光特性および耐熱性などである。当グループにおける多層膜光学素子の開発に関しては、平成9年度にイオンスパッタリング法による「多層膜生成基本装置」を整備し、すでに13 nmの波長で60%以上の直入射反射率の実績を有するMo/Siの組み合わせをモデルとして、種々の条件で成膜した多層膜の反射率に及ぼす基板の表面粗さなどの解析から多層膜の界面制御などの成膜条件を通してより高性能化を図るための研究を進めている。

一方、多層膜光学素子の評価に関しては、特に、極めて強い光の負荷を受ける極短パルス・高ピーク強度のX線レーザー（平成11年度発振予定；発振波長：10 nm；利得発生時間：10 ps；輝度：約 10^{17} 光子数/パルス mm² (mrad) 2 0.1% バンド幅）用ミラーには高い反射率とともに、耐熱性などの多層膜自体の高い耐久性が要求される。このための多層膜の反射率やX線レーザー照射による多層膜の表面損傷・粗さのような耐熱・耐X線性などの特性値の評価は、現在稼働中の使用波長（軟X線）領域の放射光X線を用いることによってのみ可能である。特に、大型放射光施設のSPring-8におけるアンジュレーター光源からの軟X線領域の光は現在発振中のX線光源としては最も輝度が高い（X線レーザー発振で予想されるピーク輝度の約 $1/10^{10}$ の光子数）。したがって、SPring-8を利用して軟X線レーザー用多層膜の耐熱・耐X線性などの特性値の評価を行うことは非常に有益である。

多層膜の耐熱性の評価は、これまで実験の容易さからアニールテストを基に行われてきた。⁴⁾しかし、アニールテストの結果だけでは単なる熱的効果は議論できても、そのデータからX線照射下での多層膜の総合的な安定性を評価

するには問題があるので、X線レーザー用の多層膜の耐熱性の評価にはX線レーザーの輝度に匹敵するような高い輝度のX線光源を用いた照射実験がなされるべきである。このような観点から、最近現状で最も高輝度な放射光X線を使った実験がようやく行われるようになってきた。^{5)~7)}しかし、放射光源を使った実験はマシンタイムの制約などから実施例は非常に少ない。これらの実験では、パワー密度が数 W/mm²のウィグラー光を照射して行われたが、基板を冷却しない場合には基板の温度が 500°C以上になって多層膜は大きなダメージを受けるが、水で冷却した時には表面温度の上昇は 100°C以下であり多層膜のダメージは小さいことが示された。一方、柳原らは⁸⁾ 高エネ研フォトンファクトリー(PF) のBL-28 のマルチポールウィグラー光をもちいて 2.3W/mm²のパワー密度で超研磨した CVD-SiC 基板上にマグнетロンスパッタで成膜した Mo/BN, Mo/B₄C, W/BN, W/B₄C の 4 種類の多層膜に 10 分間照射した。その結果、基板表面での温度上昇は最高 13°Cであり、Mo/BN が最も安定しておりピーク反射率の減少は約 20%であった。しかし、W/BN では反射率の減少は約 65%であり、また B₄C は 2 種類とも破壊された。

このように、これまで行われた放射光X線を用いた多層膜の照射実験はほとんどウィグラー光、すなわち硬X線領域の光、を用いており、軟X線レーザー用の多層膜ミラーの耐熱性や反射率などの評価は、同じ波長領域で高輝度な、しかも軟X線の光源を用いて行うべきである。さらに、軟X線は物質との相互作用が非常に大きいことが知られており、⁹⁾この点からも軟X線レーザー用多層膜の照射実験は実在の軟X線を用いて行うことが必要である。

本報告書は、軟X線用多層膜光学素子の耐熱性や反射率などの特性値を評価するための試験装置の一部である真空チャンバーを設計・製作し、大型放射光施設の SPring-8 の原研専用軟X線ビームライン BL-23SU に設置・調整するとともに、本装置の全体像について検討した結果などを述べたものである。

1. 光学素子評価試験装置の設計・製作

軟X線レーザー用多層膜光学素子の放射光X線照射による耐熱性などの特性値を評価するために標記試験装置の一部である真空チャンバーを設計・製作するとともに、本装置の全体像について検討した。従来の多くの照射実験では、照射後素子を取り外してから反射率などの特性値を測定していたので、照射中の素子の軟X線に対する反射を確認することができなかった。また、この照射方法では、照射による素子の損傷・劣化過程を調べることができない。多層膜素子の一層の高性能化を図るためにには、照射中の素子の軟X線に対する反射の確認とともに、照射中の素子の損傷・劣化過程を同時に調べ、素子の軟X線照射に対する全体的な挙動を明らかにして、その結果を素子の製作条件に反映させることができ不可欠である。したがって、多層膜素子の軟X線照射による種々の特性値を総合的に評価するためには照射中での「その場測定」が必要である。このため、標記試験装置には照射中の反射率などのその場測定のための計測装置も組み込むことを検討した。この光学素子評価試験装置は、真空チャンバー本体、照射用試料ホルダー、試料導入・交換室、本体チャンバー真空保護用前置チャンバー、ZYGO干渉計、軟X線ガン・検出器、サーモビューアーおよびQ-マス分析計などから構成されている。このうち、真空チャンバー本体を設計・製作し、他の装置については予備的な設計あるいは検討を行った。

1.1 本体真空チャンバーの設計・製作

本装置は超高真空中で用いられるので、真空チャンバー本体は超高真空 (1×10^{-9} Torr 以下) に排気・保持できるとともに、試料導入・交換室、照射用試料ホルダーおよび各種の計測装置類を取り付けるためのフランジあるいはポートを設置する必要がある。なお、チャンバー本体と試料導入・交換室はゲートバルブを介して一体となっており、その他の装置も制御系を除いて有機的に一体として構成されるものとする。これらの点を考慮して、真空チャンバー本体の主な仕様を以下のように決定した。

- 1) チャンバー本体の大きさは $500\text{ mm}\phi \times 300\text{ mmH}$ とする。
- 2) チャンバーのビームの入射、出射フランジの面間距離は 700 mm とする。

- 3) チャンバーは特に指定のない限り SUS304 を使用する。
- 4) チャンバーの外壁に、全体が 200°C 以上で均一にベーキングできるよう、シースヒーターを取り付けて配線する。
- 5) チャンバーの内側は、高温でベーキングを行っても超高真空を汚染しない材料を用い、加工後は十分洗浄して油脂などが残らないようにする。
- 6) 超高真空用ポンプとして排気速度が 2001/sec 以上のスパッタイオノンポンプ（日本真空技術製 PST-200CX II 相当品）を取り付ける。なお、コントローラは日本真空技術製 GST-03L 相当品とする。なお、予備排気用の真空ポンプにはビームラインに専属の可搬型ターボポンプを使用するので、これは仕様範囲外とする。
- 7) 真空計はヌードイオンゲージ（アネルバ製 NIG-2F 相当品）とする。なお、コントローラはアネルバ製 MIG-921 相当品とする。
- 8) 架台は、チャンバーの自重を支えるとともに、種々の計測装置が追加されるのでこれを支えるのに十分な強度を持ったものとし、振動を伝播しにくい構造にする。また、架台は評価試験装置の軸（ビームラインとの接続ポートの軸）と光軸を床面から 1400 mm H に合わせることができるようする。さらに、架台は手動で光軸水平面内 ±10 mm、垂直軸方向 ±20 mm の調整ができるものとする。

また、チャンバー本体に以下のポートあるいはフランジを取り付ける。なお、仕様範囲外の装置取り付け用などの空いたフランジにはメクラフランジを取り付ける。フランジ長はチャンバー外面から 10 cm、フランジのパイプ径は標準とする。

取り付けるポートは、

- (1) ビーム入射用ポート (ICF70)
- (2) ビーム出射用ポート (ICF70)
- (3) 真空計用ポート (ICF70)
- (4) 低圧力モニター用ポート (ICF70)
- (5) 電流導入端子用ポート 2ヶ (ICF70)
- (6) 軟X線ガン取り付け用フランジ (ICF70)
- (7) サービスポート (ICF70)

- (8) ビューポート 2ヶ (ICF114)
- (9) 干渉計取り付け用フランジ (ICF114)
- (10) X線検出器取り付け用フランジ (ICF114)
- (11) サービスポート (ICF114)
- (12) スッパー取り付け用フランジ (ICF152)
- (13) サーモビューアー取り付け用フランジ (ICF152)
- (14) イオンポンプ接続用フランジ (ICF203)
- (15) 試料導入・交換室取り合い用フランジ (ICF203)
- (16) Q-マス取り付け用フランジ (ICF203)
- (17) 照射用試料ホルダー取り付け用フランジ (ICF253)

図2および3に、この真空チャンバーに設置する主なポートあるいはフランジの概略の配置図を示す。軟X線放射光はチャンバー内の光軸上に設けられた照射用試料ホルダー中の多層膜試料に45°で入射する。反射光は45°の位置のストッパーフランジ上のストッパー(鉛製)によって遮蔽される。ストッパーフランジから25°の位置に軟X線ガン取り付け用フランジ、45°の位置に干渉計取り付け用フランジ、さらに65°の位置にX線検出器取り付け用フランジをそれぞれ配置する。

これらの詳細設計に基づいて、実際に製作した真空チャンバー本体(真空光学製)の図面を図4~7、実物を写真1~3にそれぞれ示す。なお、図8に、ポートあるいはフランジの全体的な配置を示す。

1.2 試料導入・交換室の設計

本装置には、真空チャンバー本体への試料導入時および照射終了後の試料交換時ならびに全ての実験終了後に真空チャンバー本体の超高真空を破壊することなく試料導入・交換・取り出しの一連の作業ができるサンプルマニピュレーターなどを設置するとともに、3cm角の複数(6ヶ程度)の試料をセットして高真空に排気・保持できるサンプルステージを取り付けることが必要である。なお、本装置自体も高真空に排気・保持できる必要がある。これらの点を考慮して、次のように、この装置の概念設計を行った。

- 1) 交換室の大きさは150mmφ×200mmHとする。

- 2) 交換室は特に指定のない限り SUS304 を使用する。
- 3) 交換室の外壁に、全体が 200°C 以上で均一にベーキングできるよう、シースヒーターを取り付けて配線する。
- 4) 交換室の内側は、高温でベーキングを行っても高真空を汚染しない材料を用い、加工後は十分洗浄して油脂などが残らないようにする。
- 5) 交換室と真空チャンバー本体とはゲートバルブで仕切る。
- 6) 交換室は BL-23 専属の可搬型ターボポンプによって独立に排気できることが必要である。
- 7) 交換室に 3 cm 角の複数（6 ケ程度）の試料を取り付けて回転できるサンプルステージを設置するとともに、試料導入用ポートを設ける。このポートにはオールメタルバルブを取り付ける。バルブの開閉は、高真空を破らずに試料を導入・交換できるエアロック機構にする。この機構は試料移動用の直線導入機構にも用いる。
- 8) 交換室には広域真空計を取り付ける。
- 9) 交換室に Z(上下)、X および Y 方向に動く 2 軸(θ 、 ϕ)回転導入機付きマニピュレーターを取り付ける。X、Y は放射光の進行方向と平行および垂直方向である。Z 方向の移動、 θ 回転、 ϕ 回転はそれぞれモーター駆動とする。マニピュレーターの先端には試料交換機構付きサンプルホルダーを取り付ける。2 軸(θ 、 ϕ)回転導入機は角度の読みとりができることが必要である。また、このマニピュレーターにはチルト機構を付ける。
- 10) 交換室に排気ポートを設け、高真空対応のリークバルブを取り付ける。

したがって、交換室に以下のポートあるいはフランジを取り付ける。フランジ長はチャンバー外面から 10 cm、フランジのパイプ径は標準とする。

取り付けるポートまたはフランジは、

- (1) チャンバー本体との接続フランジ (ICF203)
- (2) マニピュレーター取り付け用フランジ (ICF114)
- (3) 試料導入用ポート (ICF203)
- (4) 真空計用ポート (ICF70)
- (5) 排気ポート (ICF114)
- (6) ビューポート (ICF114)

- (7) エアロック機構との接続フランジ (ICF70)
- (8) 作業用ポート (ICF114)
- (9) サービスポート (ICF70)

図9に、チャンバー本体に接続した試料導入・交換室の概略を示す。

1.3 照射用試料ホルダーの設計

本装置は真空チャンバー本体内の放射光の光軸周りに設置し、ホルダー上の試料の照射位置は光軸と一致する必要がある。このホルダーには複数（6ヶ程度）の試料を取り付けることができ、その裏面には照射による試料の温度上昇防止のための冷却水の流路を設ける。また、この冷却水の温度を熱電対などを用いて測定する。

高真空中の試料導入・交換室のサンプルステージ上の試料（6ヶ程度）は試料導入・交換室に設置されたサンプルマニピュレーターによって真空チャンバー内の照射用ホルダー中の所定の位置に1ヶづつ全てが移動され、このホルダーを上下移動および回転させることによってそれぞれの試料を45°で放射光照射する。照射終了後の試料は、真空チャンバー本体の超高真空中を破ることなく、サンプルマニピュレーターによって試料導入・交換室のサンプルステージ上の所定の位置に全て移動後試料導入用ポートに取り付けたバルブを開けて室外に取り出され、その後のoff-line実験(SEM, TEM, AFM観察など)に供される。

1.4 本体チャンバー真空保護用前置チャンバーの設計

試料の放射光照射によって試料からのガス放出が起こり、真空チャンバー本体のみならずビームラインの真空度 (1×10^{-9} Torr以下)を悪化させる恐れとともに、安定的に超高真空中を保持されている上流の基幹部の真空度 (2×10^{-10} Torr以下)にも悪影響を及ぼす可能性がある。この結果、インターロックシステムが作動してビームライン最上流側の高速ゲートバルブが遮断され、実験ができないくなるばかりか、ビームラインが使用できなくなる可能性がある。そこで、この23ビームラインの真空度への悪影響を最小限にするために、真空チャンバー本体の上流側ビームラインにもう一つの真空チャンバーを設置し、このチャンバーにはターボポンプとイオンポンプの排気系を設け、二つのチャンバー間は真空パイプで接続し、新たに設置する真空チャンバーには差動排気システムの

機能を持たせる。この前置チャンバーは真空計で真空度を常時観測し、安定的に超高真空を保持できるようにする。これにより、試料の照射によって発生したガスによる本体チャンバーの真空度の悪化を速やかに解消し、本試験装置を常時、安定的に超高真空に保持することができる。また、この前置チャンバーには、必要に応じて、アッテネーター、アパーチャーなどの白色放射光の高エネルギーパワーを調節するための装置を設置する。さらに、ビーム位置モニター、ビームモニターなどを設置して光軸、ビーム位置およびビームのパワー密度の測定を行うとともに、上流側にはビームシャッターを配置して放射光ビームの本試験装置への導入/遮断を行う。なお、前置チャンバー内に液体窒素冷却のクライオポンプを設置して、試料の照射により生成した気体などを凝縮・排気させて本試験装置をより安定的に超高真空に保持することも考えられる。

図 10 に、本体真空チャンバーに接続したこの真空保護用前置チャンバーの概略を示す。

1.5 ZYGO 干渉計の検討

本装置は放射光照射中の試料表面の粗さなどの形状変化をその場観察するために使用する。

表面形状を測定するには、一般に光学式または接触式の表面評価装置が用いられるが、本例では非接触の測定が必要なことから光学式を選択した。ここでは、光学式のなかでよく知られている ZYGO 社のヘテロダイン干渉型表面粗さ計（形状測定装置）について測定方法を述べる。その構成を図 11 に示す。¹⁰⁾二周波ゼーマンレーザーからの直交する P 波と S 波の直線偏光を偏光ビームスプリッターで分け、一方を参照波とし他方を被測定物に反射させた後に合成する。45 度方位の偏光板を通して干渉させ、P 波と S 波の周波数の差によるビートから位相情報を得る。図 12 に、石英上にクロムと白金をコートしたミラー表面の粗さの測定例を示す。¹⁰⁾なお、図 11 ではレーザーとしてゼーマンレーザーを用いているが、ZYGO 社の型式 GPI-XP/XPHR では光源として波長 632.8 nm の He-Ne レーザーからの円偏光を採用している。また、このタイプでは測定口径は 4 インチ (102 mm) である。

1.6 軟X線ガン・検出器の検討

本装置は放射光照射中の試料の反射強度をその場測定するために使用する。相当品としては McPherson 社製 642 型軟X線光源が考えられる。この装置は B-K (183 eV, 6.7 nm), C-K (277 eV, 4.5 nm), O-K (523 eV, 2.4 nm), Mg-K (1254 eV, 1.0 nm) の四つのラインバンドを有し、水の窓領域のX線を放射する。発光スポットは 1 mm 径である。また、本装置は全長 260 mm、重量 1.1 kg とコンパクトで、本体真空チャンバーには ICF70 フランジを介して取り付ける。

検出器としては、Manson 社製 04 型比例計数管が相当品として考えられる。

1.7 サーモピューアーの検討

本装置は放射光照射中の試料表面の温度を非接触でその場測定し、その温度分布の画像を定量的に表示・記録するために使用する。相当品としては三菱電機製三菱サーマルイメージヤ IR-M300 が考えられる。

1.8 Q一マス分析計の検討

本装置は放射光の照射によって試料表面から脱離する気体状の物質の質量をその場で測定し、軟X線照射による試料の損傷・劣化過程を明らかにするために使用する。相当品としては質量範囲が 300 amu までのハイデン社製の残留ガス分析計などが考えられる。この装置は ICF フランジを介して本体真空チャンバーに取り付ける。

2. 本体真空チャンバーの搬入・据え付け・調整

放射光を用いた光学素子評価研究は SPring-8 の BL-23 を使用して耐熱性などの多層膜の耐久性の評価を行う方向で検討が進み、BL-23 の原研側担当メンバー（横谷、寺岡ほか）および光量子基盤技術研究グループと施工業者（川崎重工）との打ち合わせなどを経て、BL-23 に光学素子評価用試験装置を設置する方向で確認が行われた。最終的に、その設置場所について、光学ハッチ内に設置することで決着したのは平成 9 年 5 月末であった。また、評価試験装置の納入範囲についても、この前後に BL-23 の原研側担当メンバーおよび光量子基盤技術研究グループと施工業者との間で討議が繰り交わされた結果、イオンポンプを含む十数個のポートを備えた真空チャンバーに決定した。なお、BL-23 は SPring-8 では数少ない軟 X 線のビームラインであり、フロントエンド（施工：アネルバ）、インターロック（施工：東芝）、回折格子（施工：トヤマ）および光学ハッチ（施工：小松）などを除き、ビームライン本体の主な施工は川崎重工が担当した。

真空チャンバー本体は真空光学株で製作され、平成 9 年 8 月初旬に架台ごと SPring-8 に搬入され、外観、員数などの検査を経て、10 月初旬に BL-23 の光学ハッチ内の所定位置の床面にアンカーボルトにより設置・固定された。

図 13 に BL-23 全体の模式図、¹¹⁾図 14 に BL-23 の光学ハッチの模式図、図 15 には光学ハッチの拡大された模式図をそれぞれ示す。光学ハッチでは、制動放射 γ 線の遮蔽が必要であり、このため BL-23 の光学ハッチは天井および側面が 10 mm 厚の鉛、またハッチ後部は 20 mm 厚の鉛で補強された壁でそれぞれできており、さらにハッチのビームライン後方には 10~30 cm 厚の鉛製 γ 線ストッパーが設置されている。また、写真 4 に BL-23 の光学ハッチ（完成後のハッチの扉付近を中心に撮影）、写真 5 に光学ハッチ内の所定の位置に設置された真空チャンバー本体（ハッチの後部から前方側を撮影）をそれぞれ示す。なお、放射光実験中は実験者のハッチ内への入退を始め、シャッター開閉などは全てインターロックシステムによって管理されている。

その後、BL-23 の光学ハッチ内には当初設置予定の他の機器類の搬入・据え付けが進み、光学素子評価用の真空チャンバーも真空パイプやベローズなどにより他の機器類と接続された（写真 6）。それとともに、ハッチ内部での電源（写

真 7) や給水設備（写真 8）などのユーティリティー関連の作業も進捗した。なお、光学素子評価用真空チャンバーのビームライン前方側（将来、本体チャンバー保護用前置チャンバーを設置予定の位置）は現状では真空パイプ接続とした（写真 6）。

この真空チャンバーの真空立ち上げは BL-23 専属の可搬型ターボポンプとチャンバー本体へ組み込まれたイオンポンプによって行われた。まず、チャンバーのサービスポート（ICF70）を使用してターボポンプによる粗引きを行い、つづいてイオンポンプによって高真空への排気が行われた。なお、サービスポートへのターボポンプの接続には次のアネルバ製真空機器が使用された。

- ・超高真空 L 型ポリイミドバルブ
- ・粗引きバルブ
- ・変換ニップル 2ヶ (NW40-Φ70ICF)
- ・クランプ 2ヶ (NW40)
- ・センターリング 2ヶ
- ・フレキシブルチューブ 1.5 m (NW40)
- ・変換フランジ (ICF152-ICF70)

さらに、他の機器類の粗引き、各機器のベーキング用ヒーターへの通電によるベーキング（200°C以上）およびイオンポンプによる真空排気を通して光学ハッチ内のビームラインは超高真空 (1×10^{-9} Torr 以下) へ到達された（写真 9）。

写真 10、11、12 および 13 に、BL-23 の光学ハッチ内に設置・調整後の光学素子評価用試験装置の現状を示す。

おわりに

本報告書では、軟X線レーザー用多層膜ミラーの耐熱性などの特性値の評価は同じ波長領域で高輝度の放射光X線を用いて行うことが必要であること、またこのために大型放射光施設の SPring-8 の軟X線ビームラインに光学素子評価用試験装置の一部である真空チャンバーを設計・製作し、設置した結果などを述べた。しかしながら、現状では試料導入室を始め本試験装置のその場測定のための計測機器を含めたほとんど全ての機器は設計あるいは検討の段階に留まっている。

平成7年10月の関西研究所設立、そしてその光量子科学研究における当光量子基盤技術研究グループは主な研究課題として極短波長光学素子の評価・開発を取り上げ、研究計画の立案と推進を図ってきた。しかし、光量子科学研究における当初の予算スケジュールは大幅に遅れており、当研究グループについても同様である。特に、この光学素子の評価に関しては、その評価用試験装置を放射光施設の超高真空の軟X線ビームラインに組み込むため、その製作には必然的に多額の予算措置を必要とするなどから、研究の遂行は従来にもましてより困難な状況になってきている。一方、民間企業においても、最近小型の軟X線放射光施設を利用して、軟X線リソグラフィー用の縮小露光光学系に使用する光学素子の評価などのプロジェクトが立ち上がりつつある。このような現況では、光量子科学研究における極短波長光学素子の評価に関する研究計画は大幅な見直しが必要と考えられる。このような状況を踏まえ、この光学素子評価用試験装置について、これまでの製作過程および検討結果を振り返るとともに、研究計画見直しとともに研究計画変更のための議論のたたき台として、本報告書を作成することは極めて有意義であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 光量子の高度利用に関する懇談会編, “光量子科学の誕生と未来像”, 科学技術庁原子力局監修, 1996, 科学技術広報財団.
- 2) 山本正樹, 応用物理, 62, 676 (1993); 山下広順, 国枝秀世, 田原 譲, 放射光, 9, 91 (1996).
- 3) J. Dinklage and R. Frerichs, *J. Appl. Phys.*, 34, 2633 (1963).
- 4) 柳原美広, 原研委託調査報告書「極短波長レーザー用光学素子の耐熱・耐X線性評価に関する調査」1997.
- 5) E. Ziegler, Y. Lepetre, S. Joksch, V. Saile, S. Mourikis, P. J. Viccaro, G. Rolland, and F. Laugier, *Rev. Sci. Instrum.*, 60, 1999 (1989).
- 6) J. B. Kortright, S. Joksch, and E. Ziegler, *J. Appl. Phys.*, 69, 168 (1991).
- 7) E. Ziegler, G. Marot, A. K. Freund, S. Joksch, H. Kawata, L. E. Berman, and M. Iarocci, *Rev. Sci. Instrum.*, 63, 496 (1992).
- 8) M. Yanagihara, K. Mayama, Y. Goto, I. Kusunoki, S. Asaoka, and H. Maezawa, *Nucl. Instrum. Methods*, A334, 638 (1993).
- 9) 市村禎二郎, 井口洋夫, 簡野嘉彦編, “シンクロトロン放射光—化学への基礎的応用”, 1992, 学会出版センター.
- 10) 大柳宏之編, “シンクロトロン放射光の基礎”, 1996, 丸善, p. 408.
- 11) 高輝度光科学研究センター編, “*SPring-8 ビームラインハンドブック*”, 1997, p. 24.

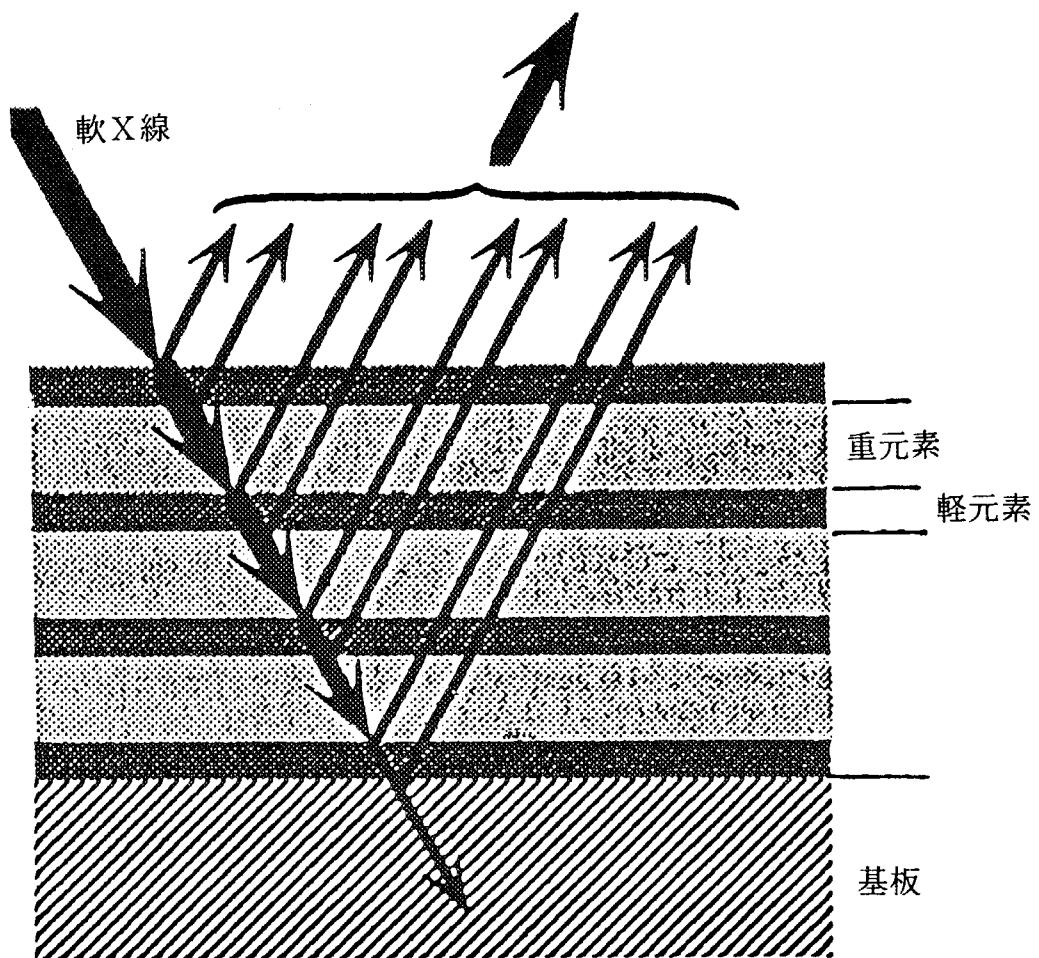


図 1 軟X線用多層膜光学素子の原理

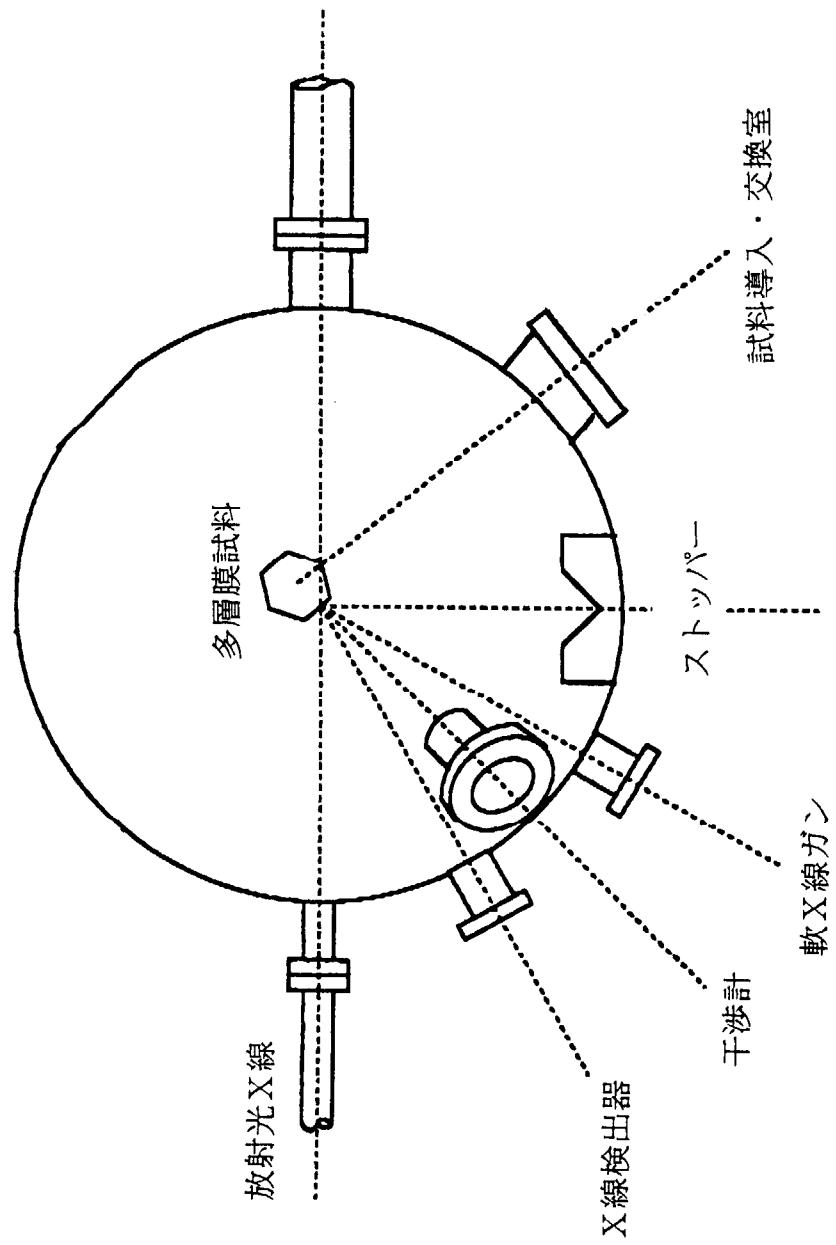


図2 真空チャンバーの概念図

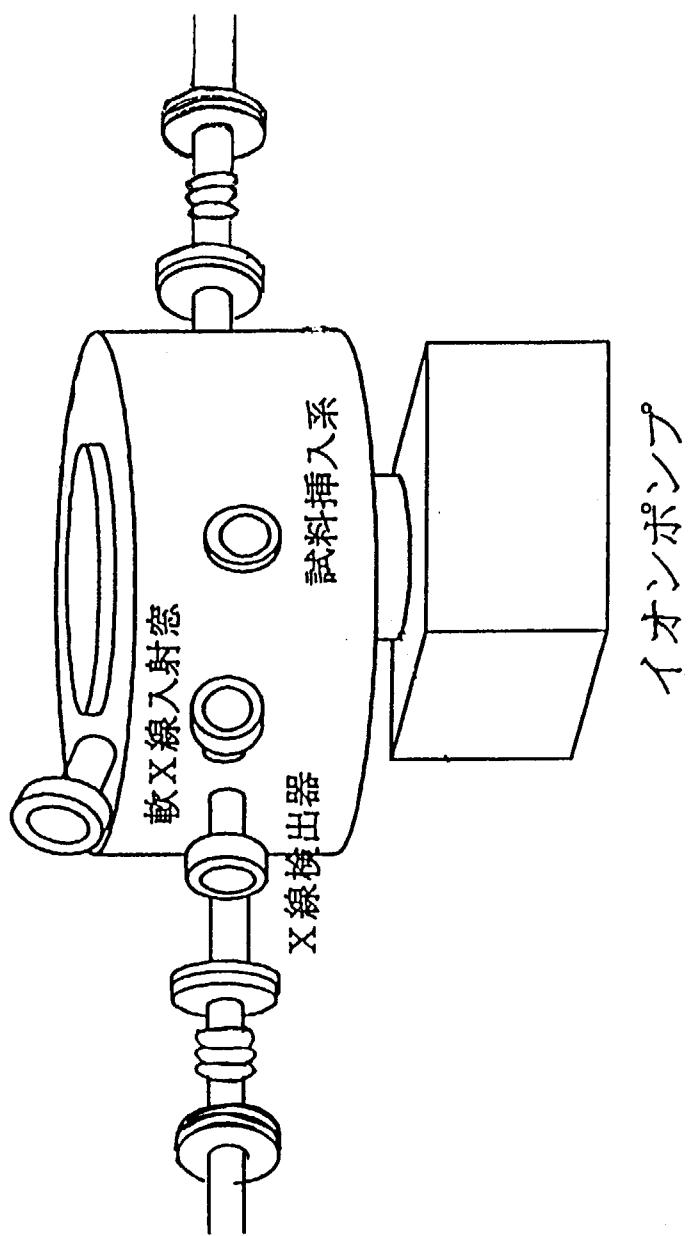


図3 真空チャンバーの概念図

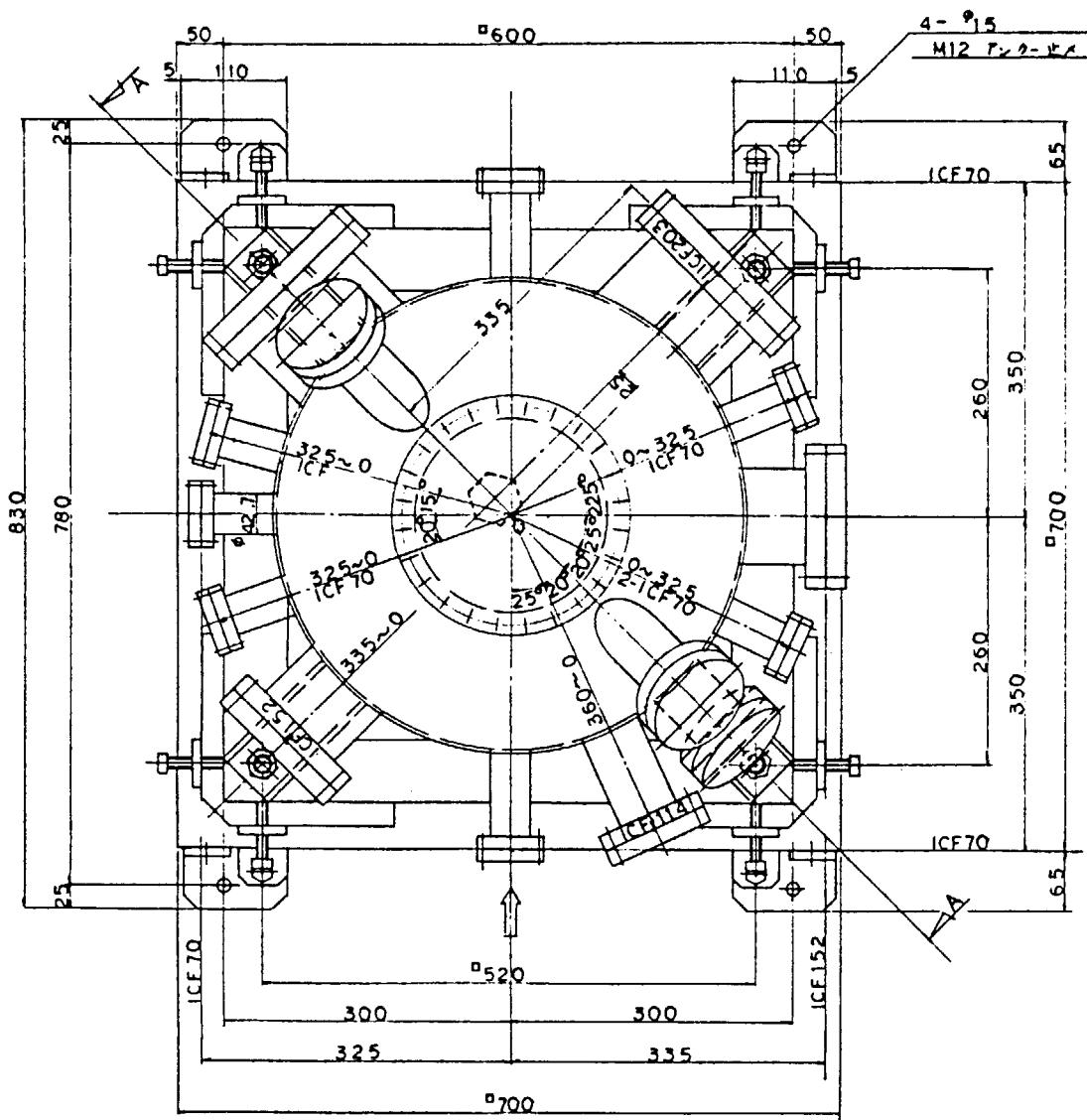


図4 真空チャンバー(上面)

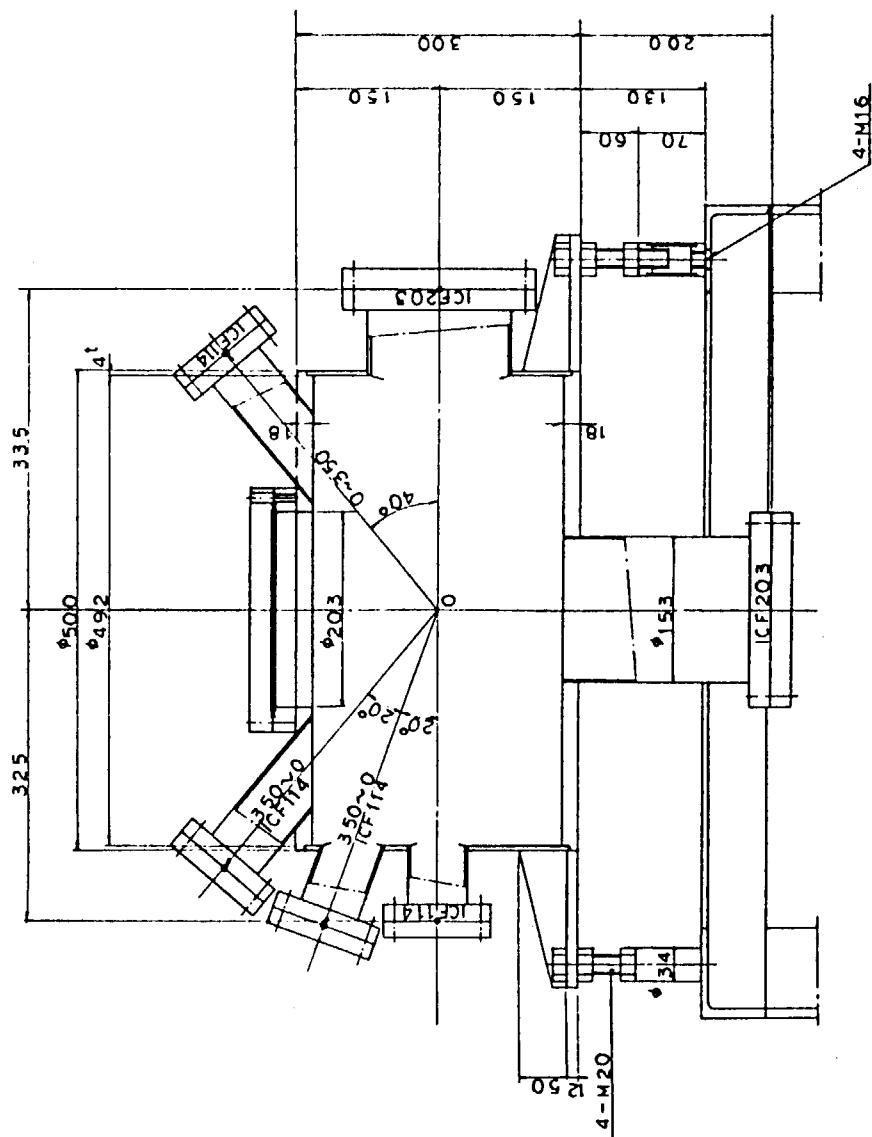


図5 真空チャンバー(側面)

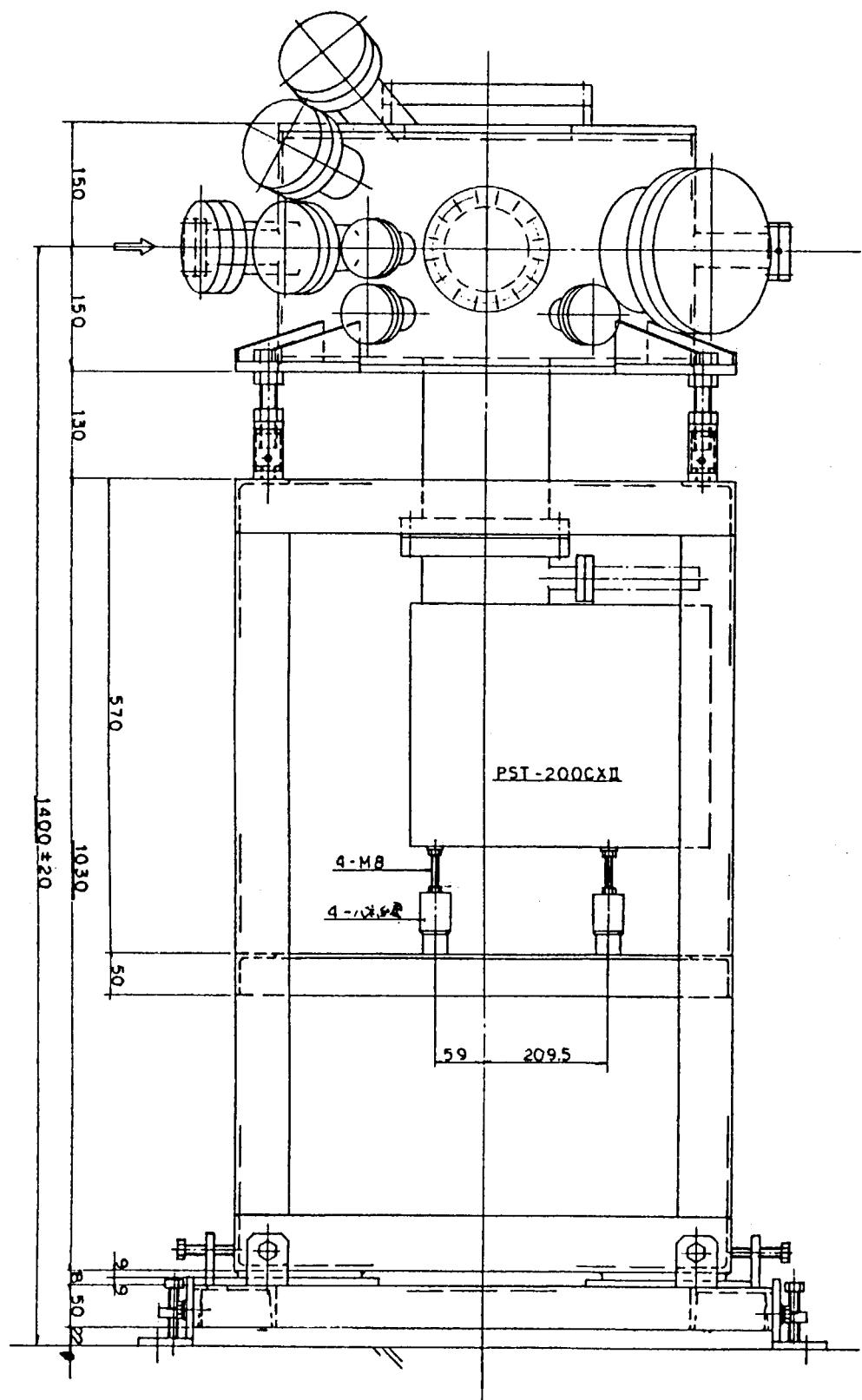


図 6 架台上の真空チャンバーとイオンポンプ (前面)

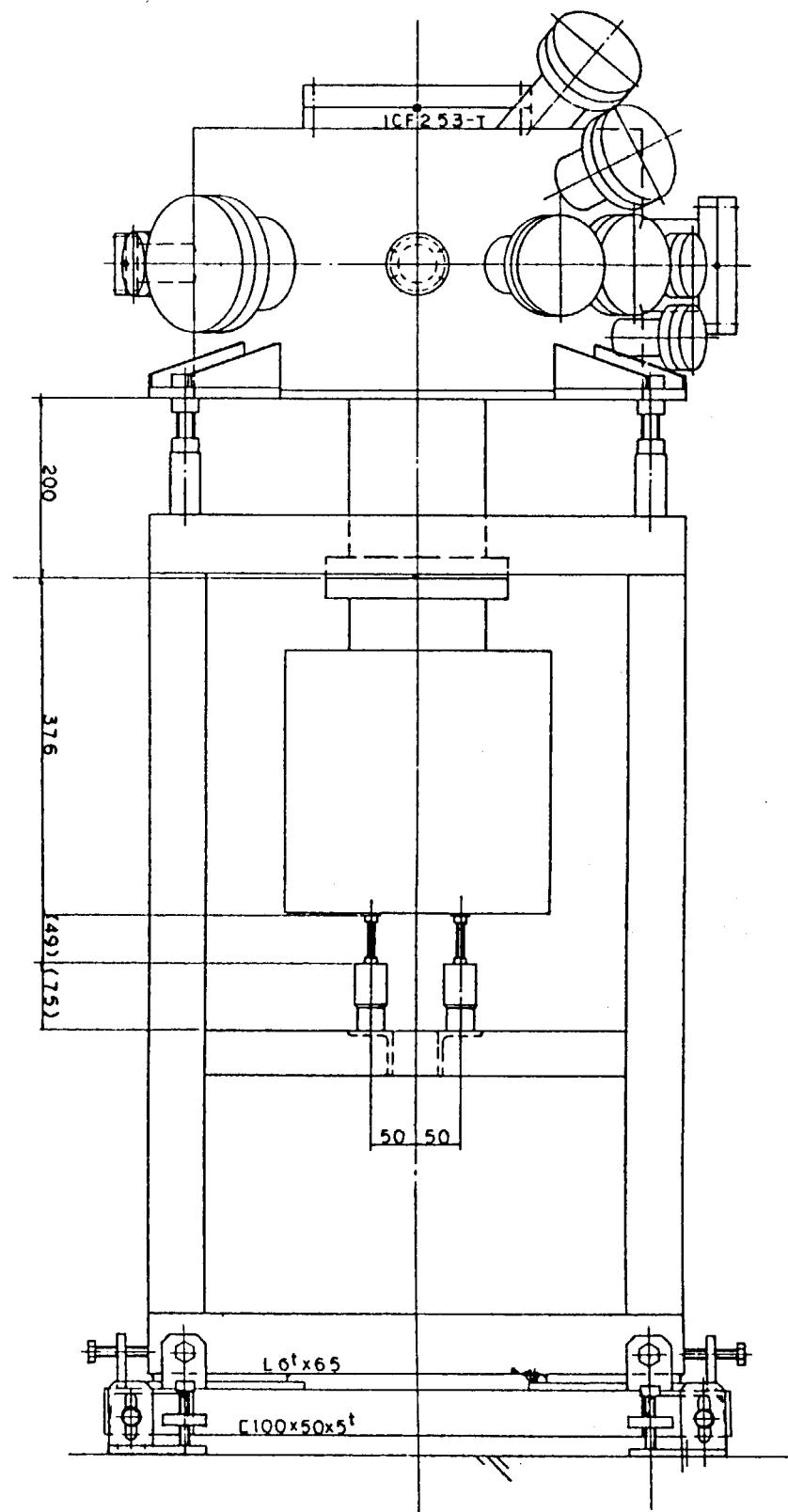


図 7 架台上の真空チャンバーとイオンポンプ (後面)

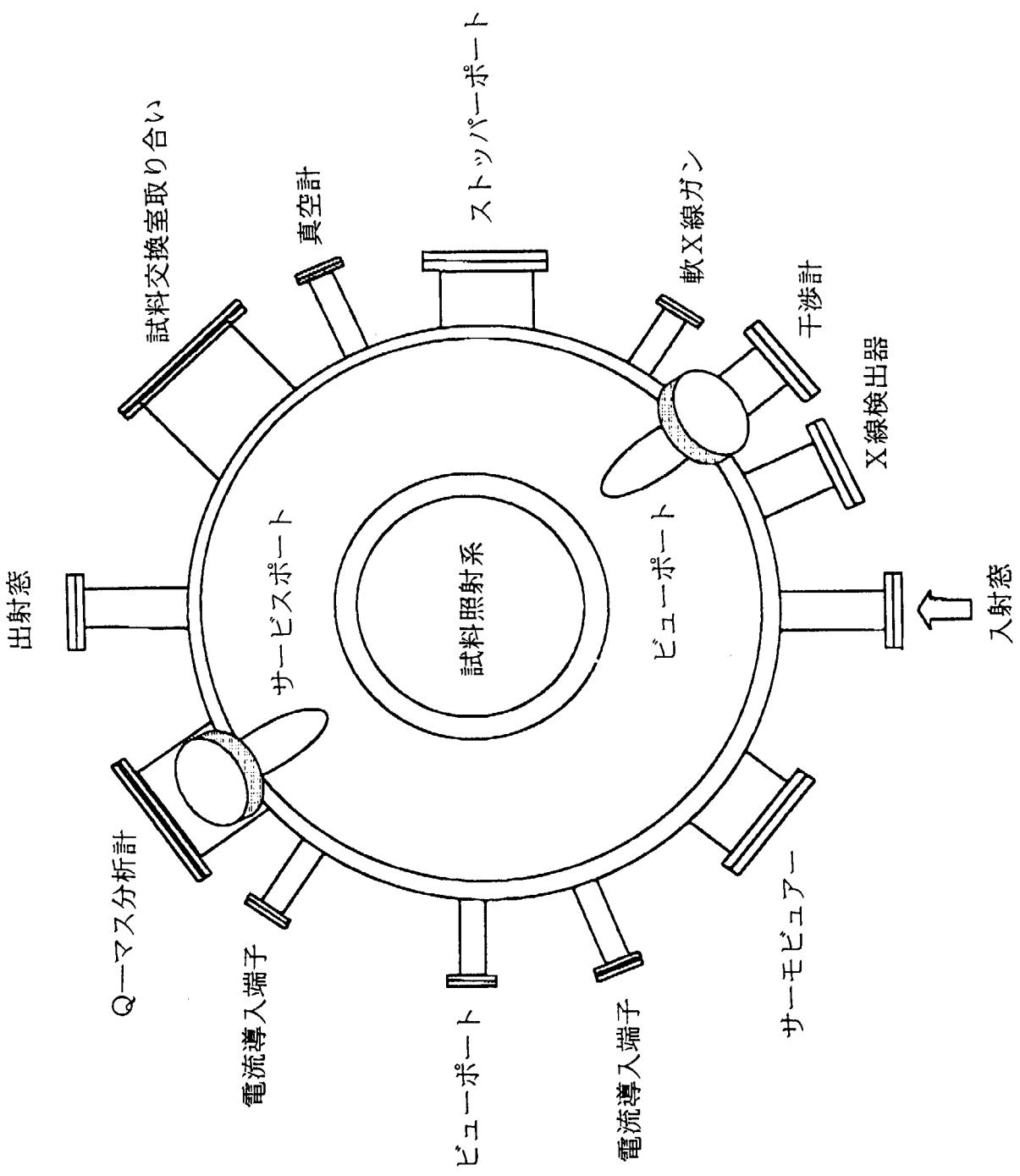


図 8 ポートあるいはフランジの全体的な配置

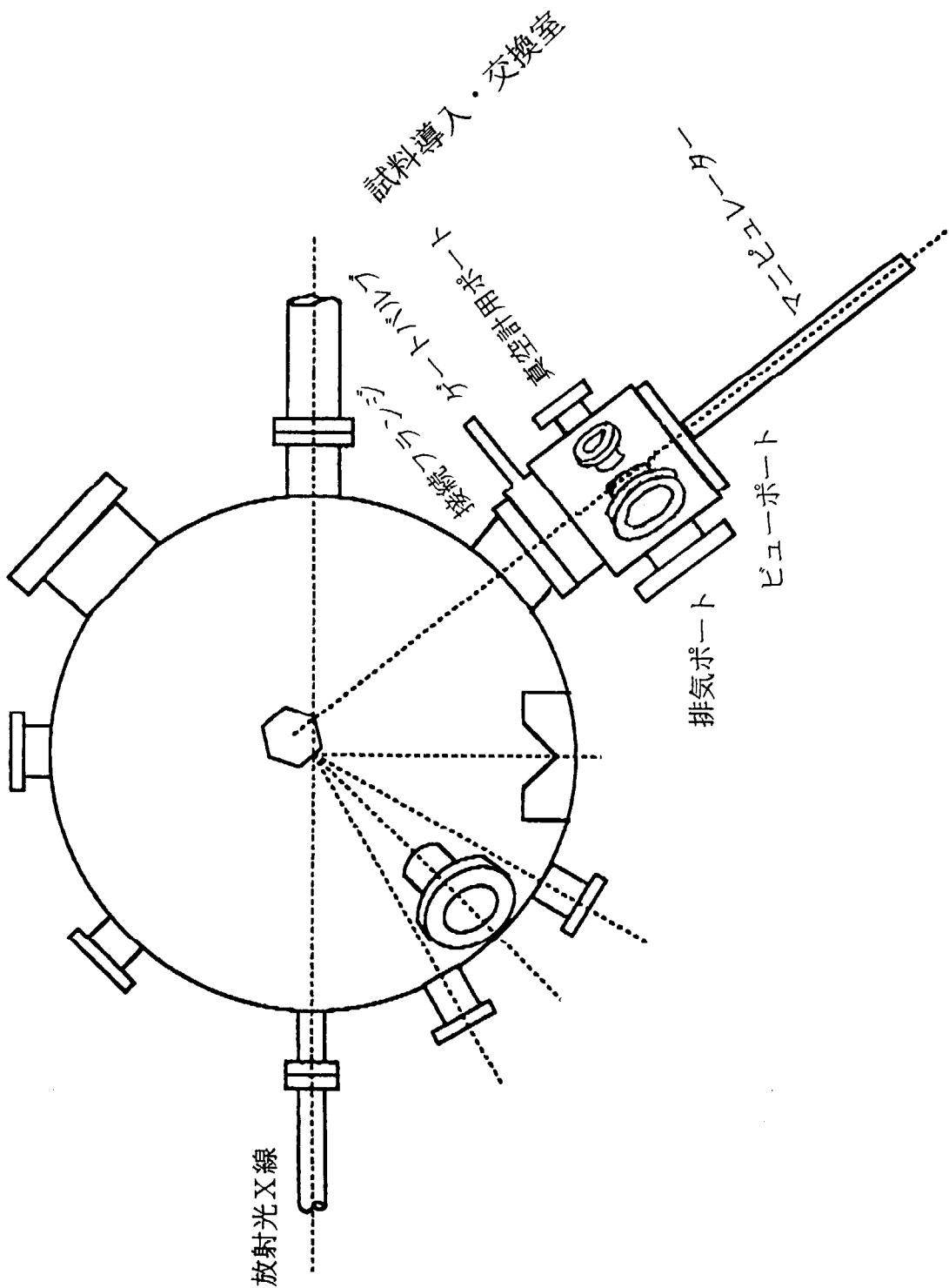


図9 試料導入・交換室の配置

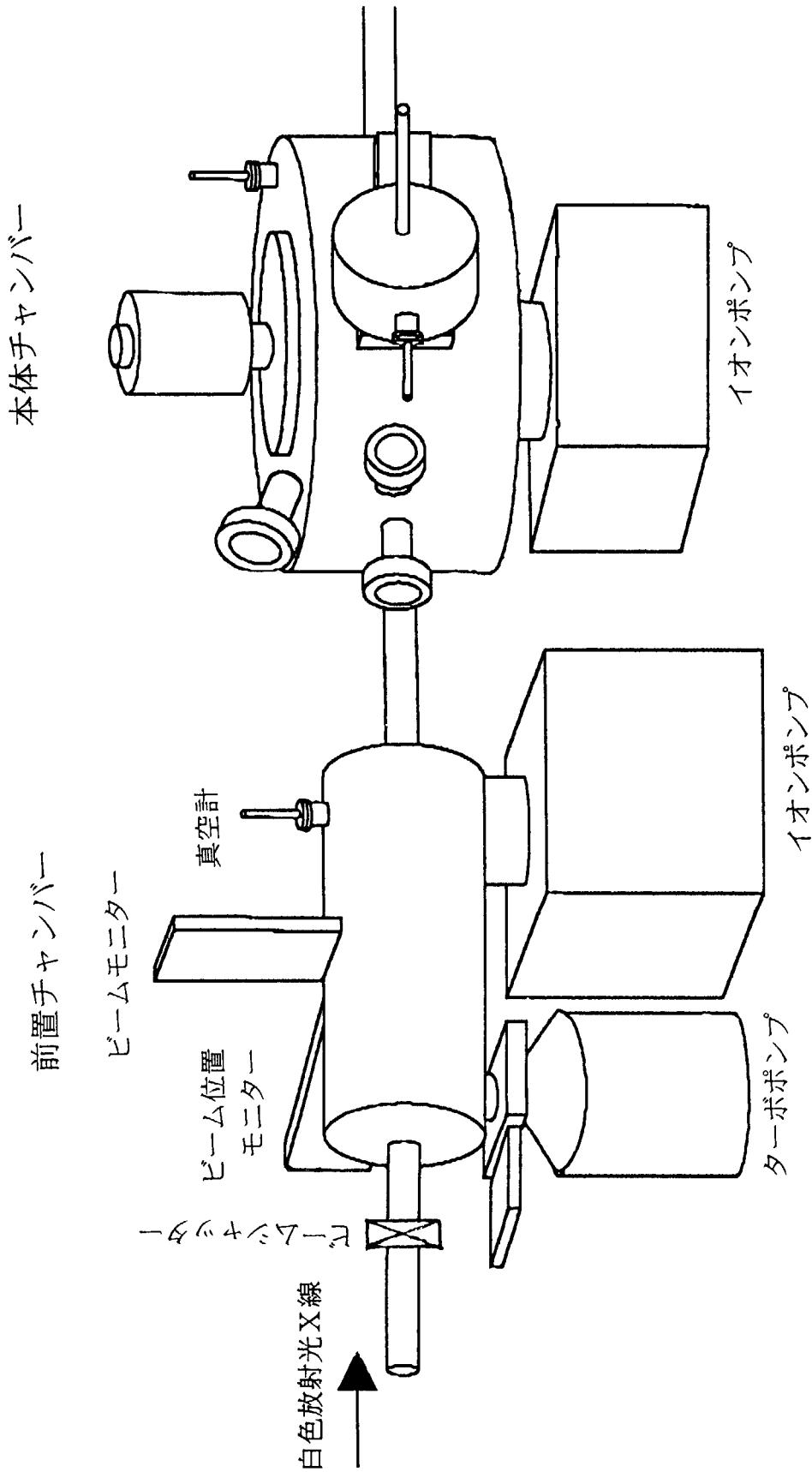
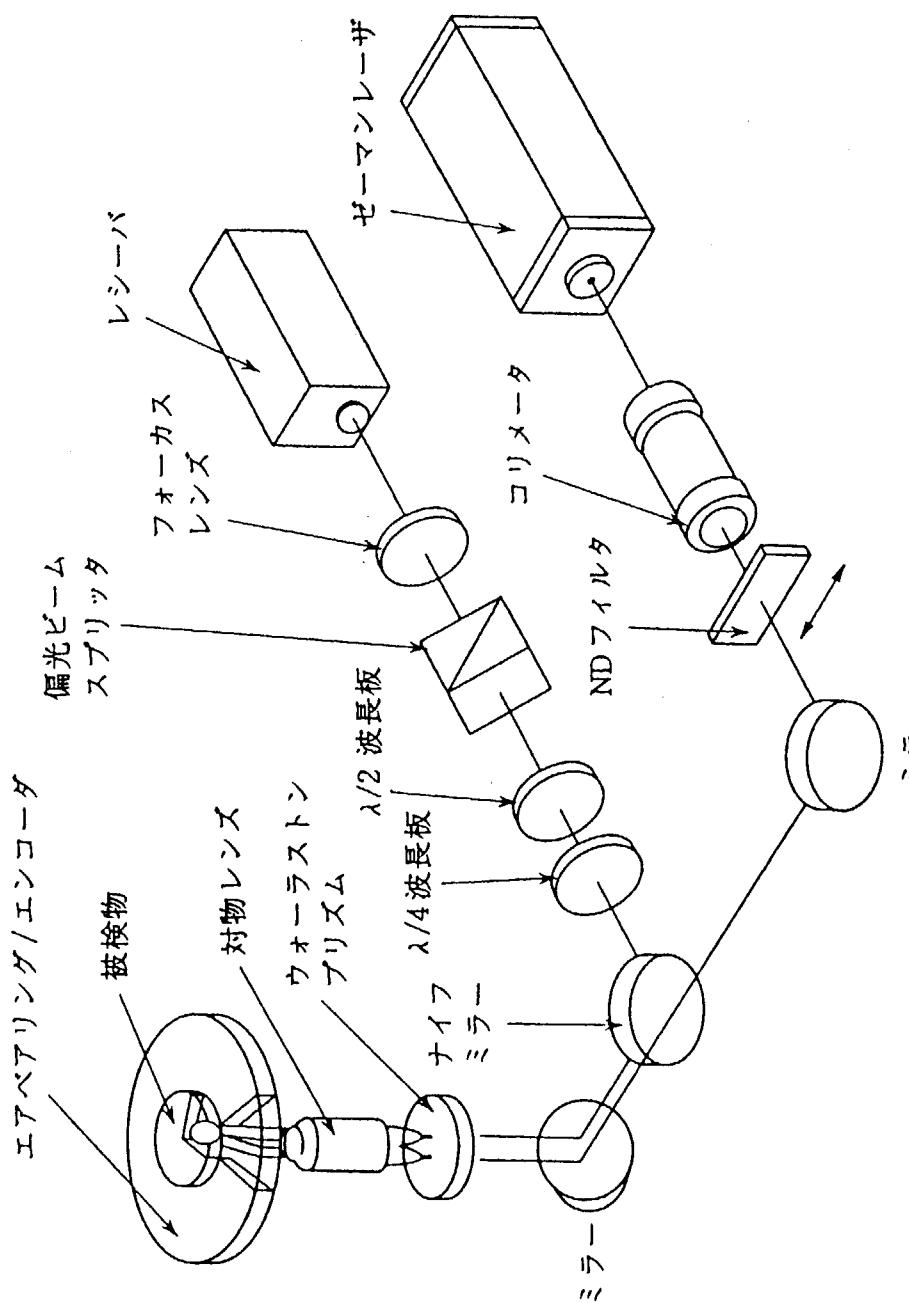


図 10 本体チャンバー真空保護用前置チャンバー



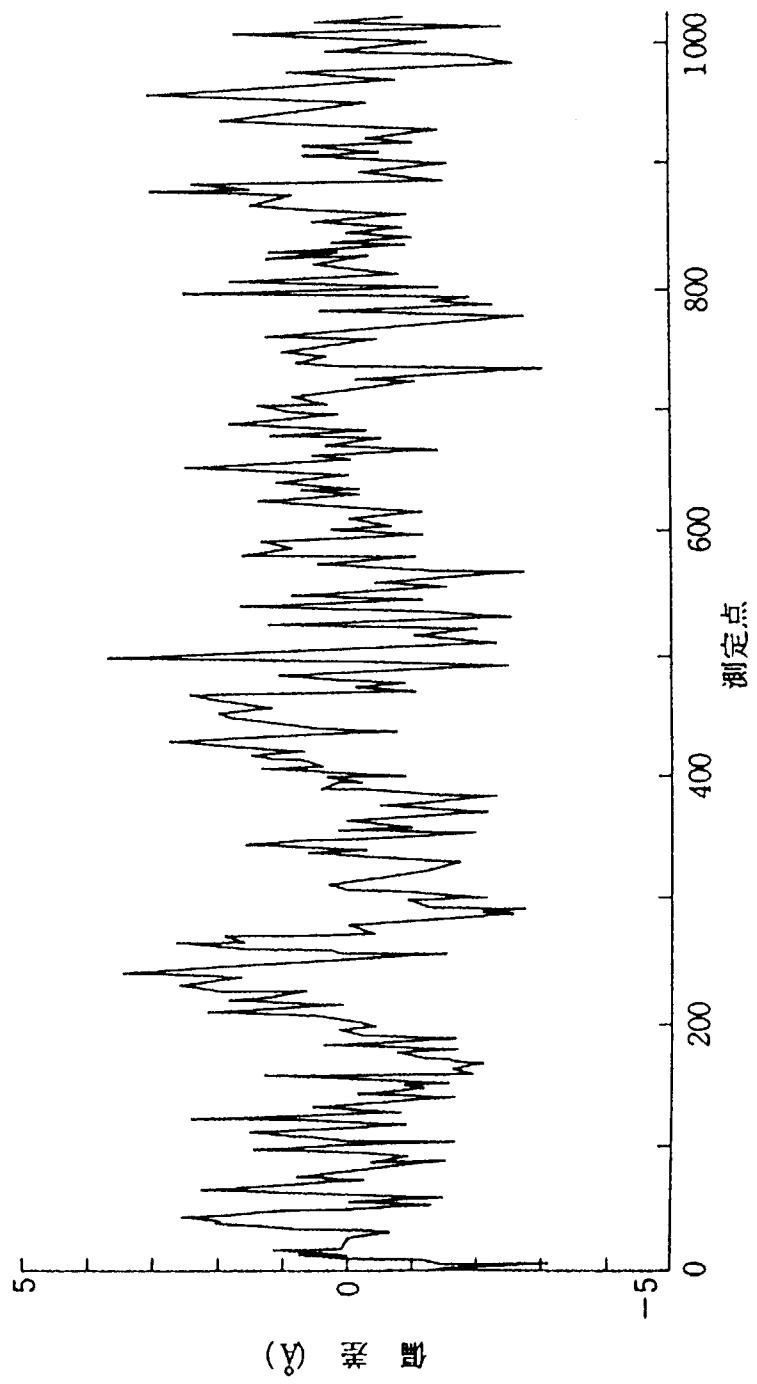


図 12 干渉計による表面形状の観測例 5)

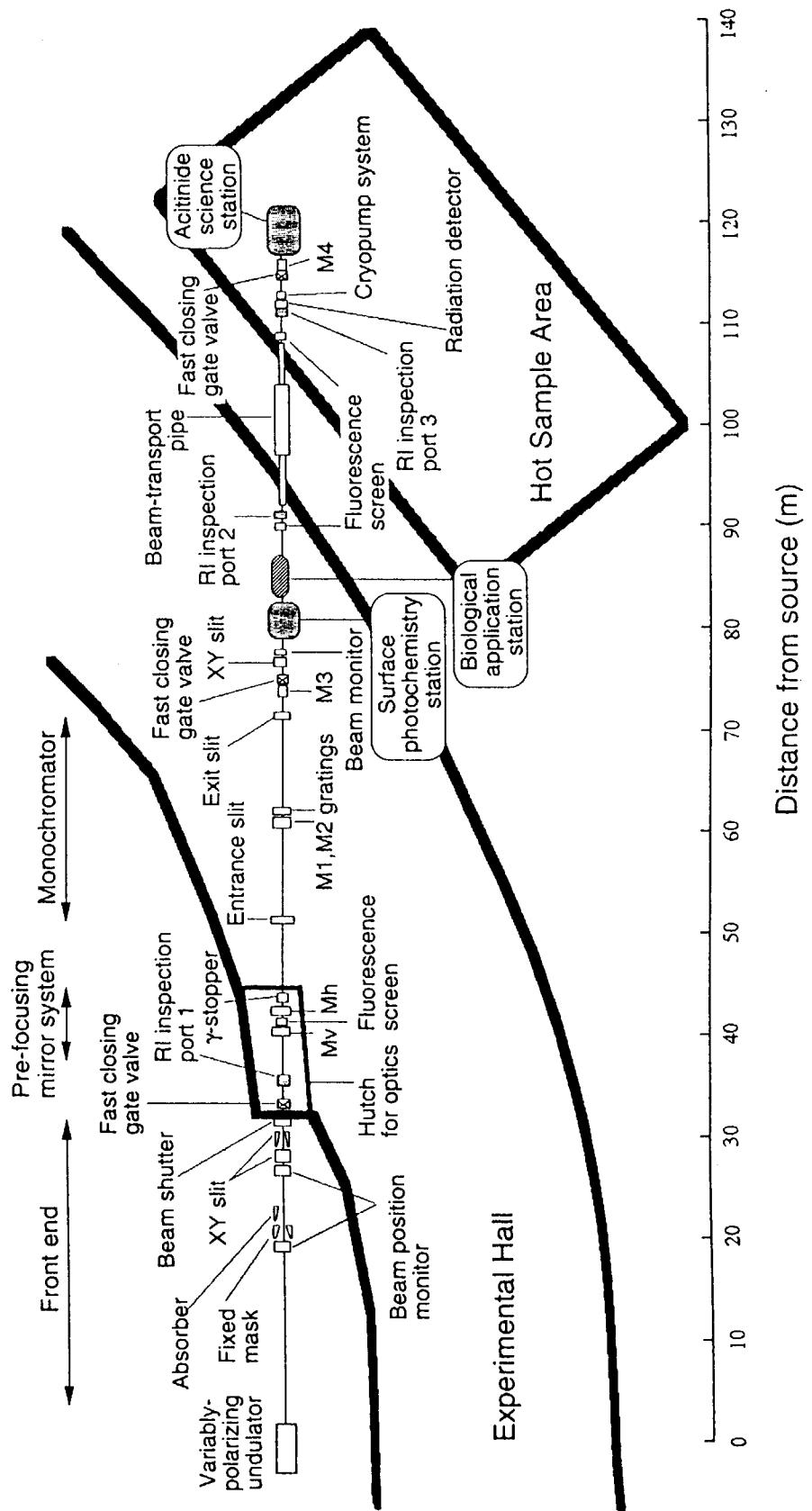


図 13 BL23 の模式図 ⑥)

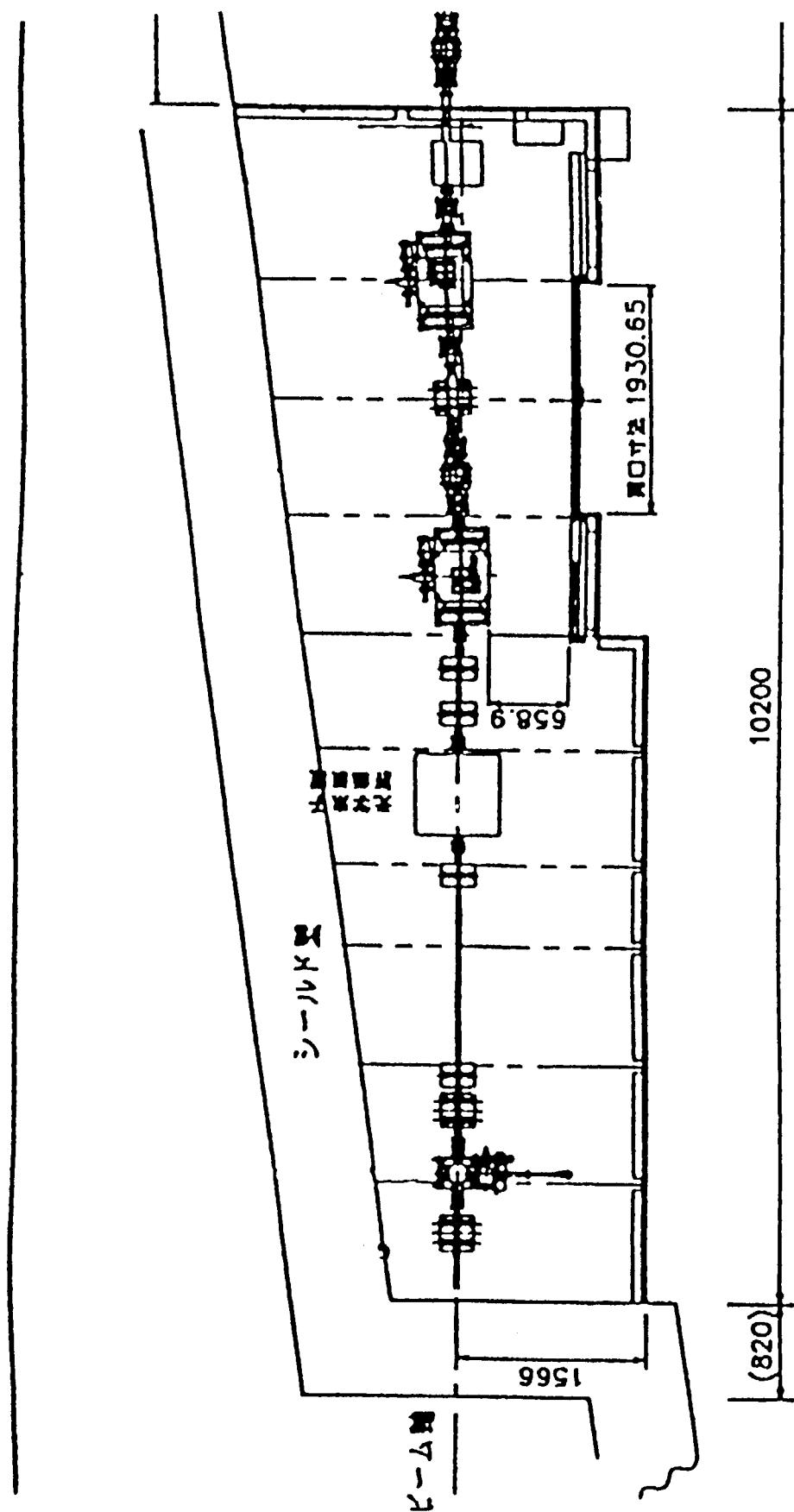


図 14 BL23 の光学ハッチの模式図

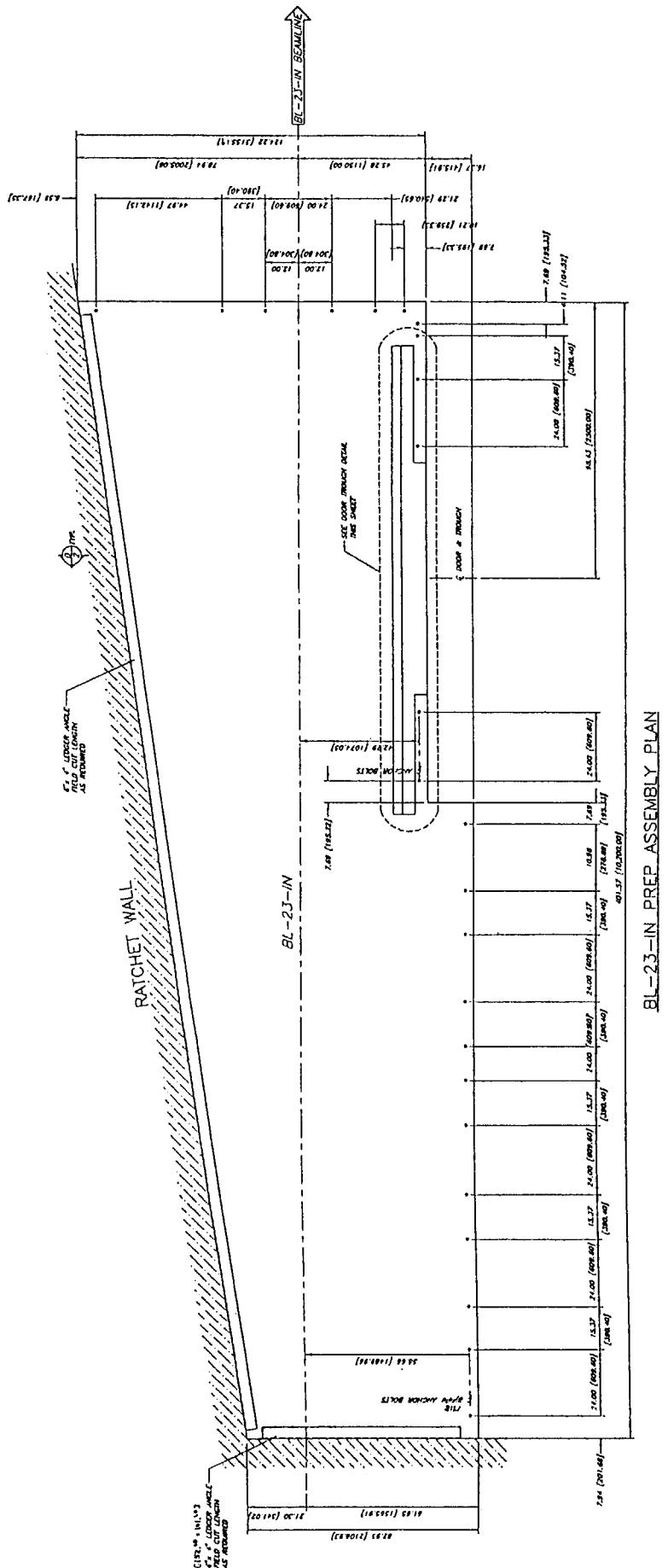


図15 BL23の光学ハッチの拡大模式図

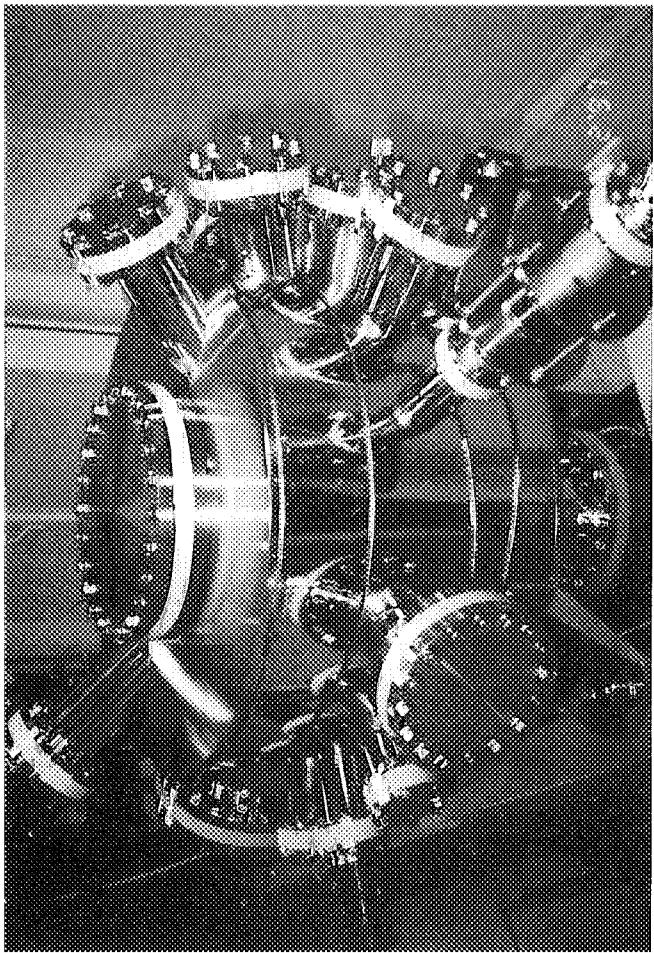


写真1 真空チャンバー（上面）

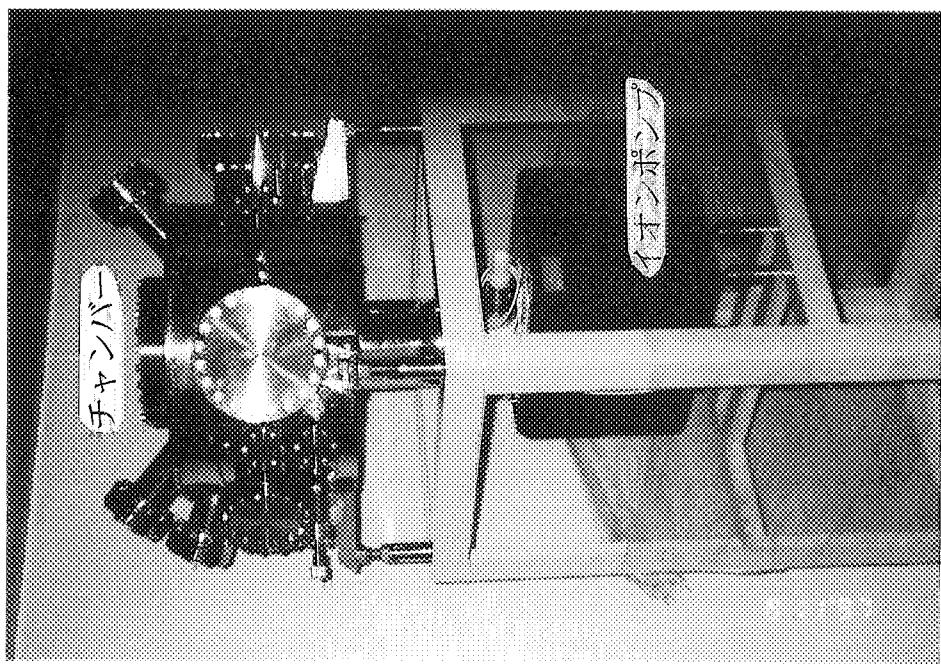
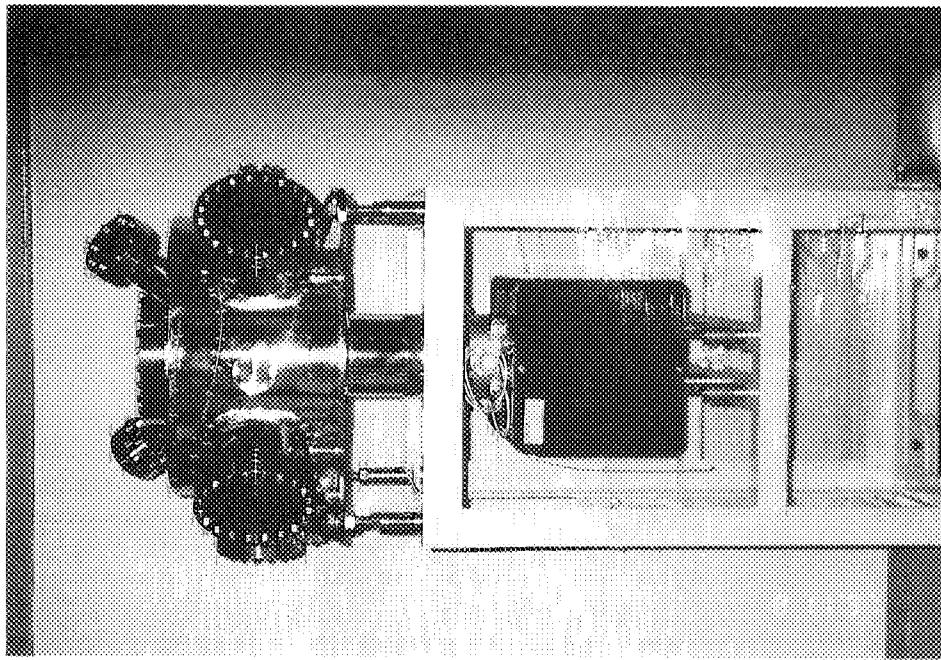


写真2 架台上の真空チャンバーとイオンポンプ(正面) 写真3 架台上の真空チャンバーとイオンポンプ(側面)

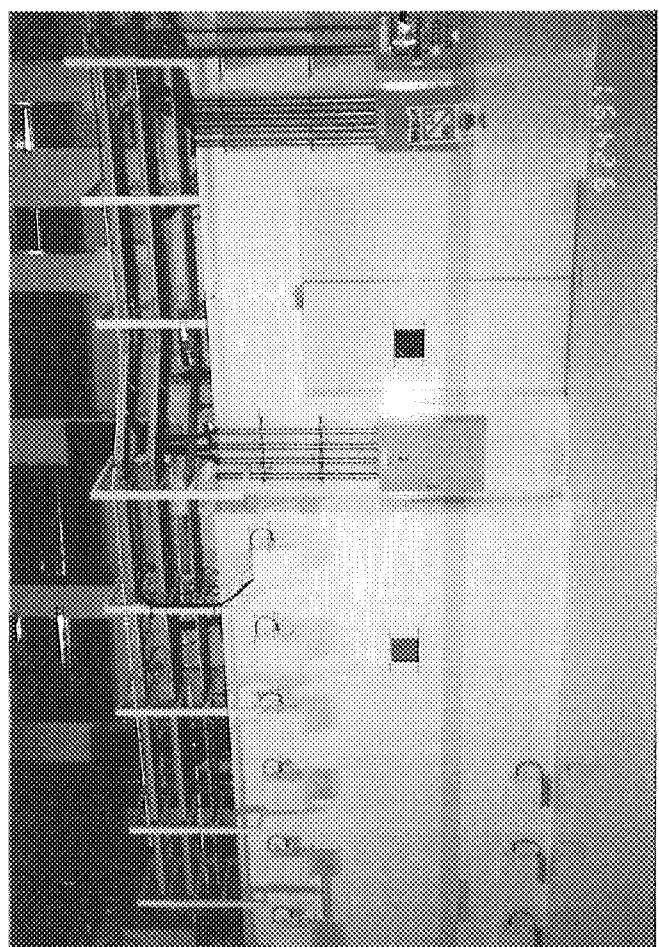


写真4 BL23 の光学ハッチ

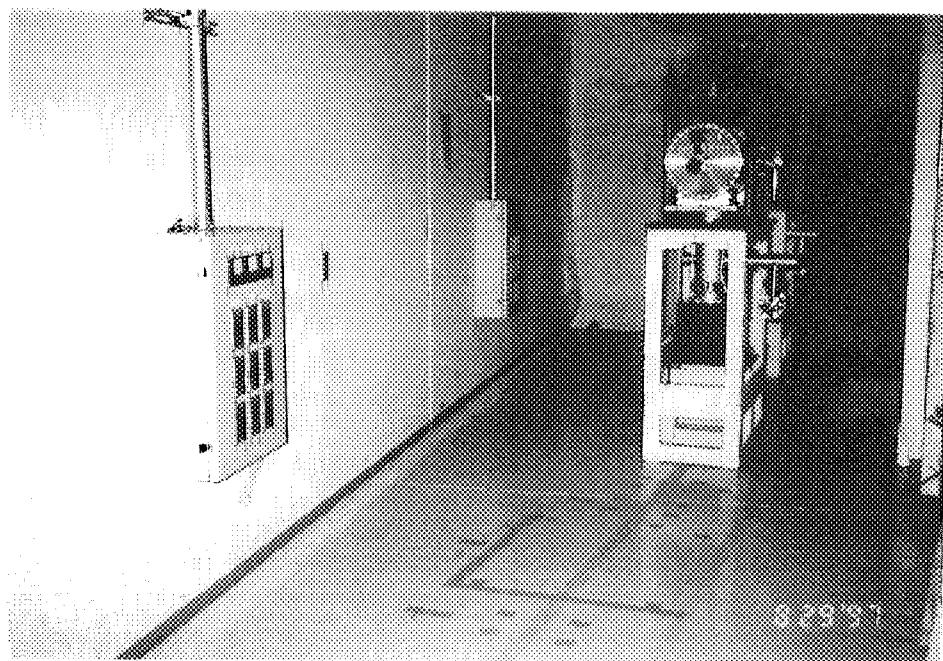


写真 5 BL23 の光学ハッチ内の真空チャンバー本体

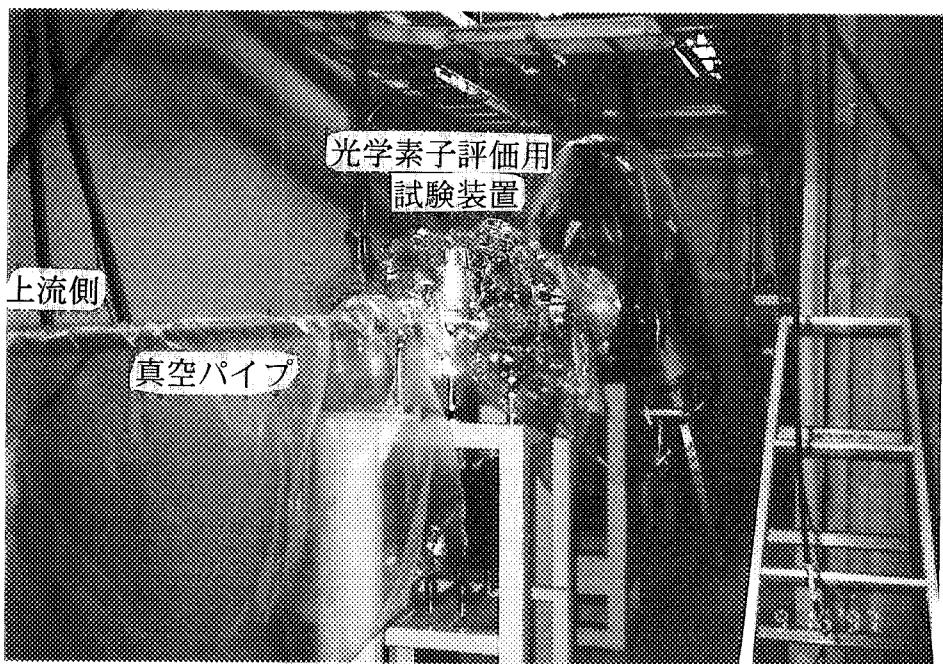


写真 6 BL23 の光学ハッチ内の真空チャンバーの設置・接続

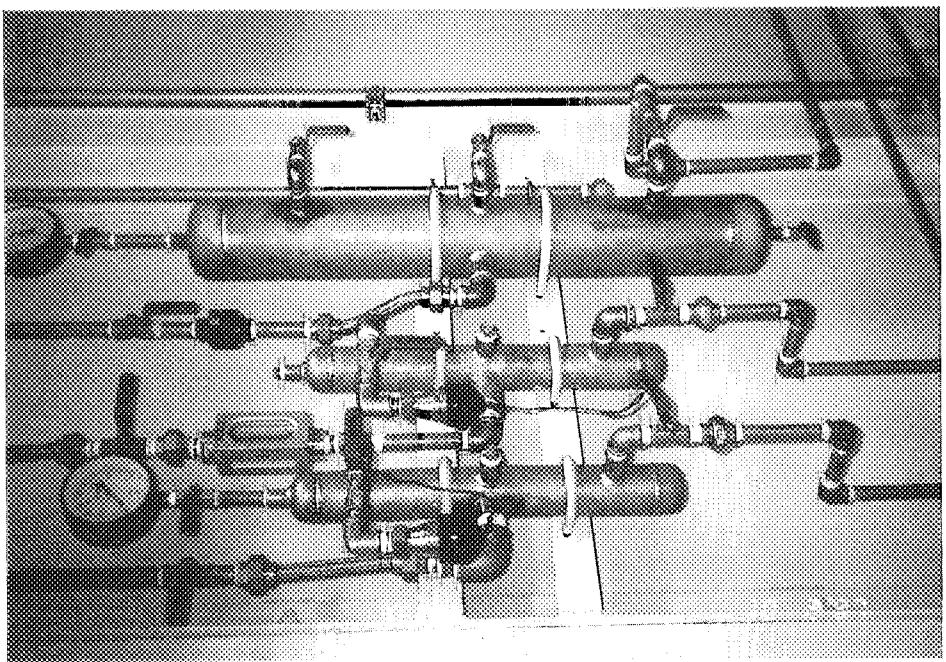


写真 8 BL23 の光学ハッチ内の給水設備

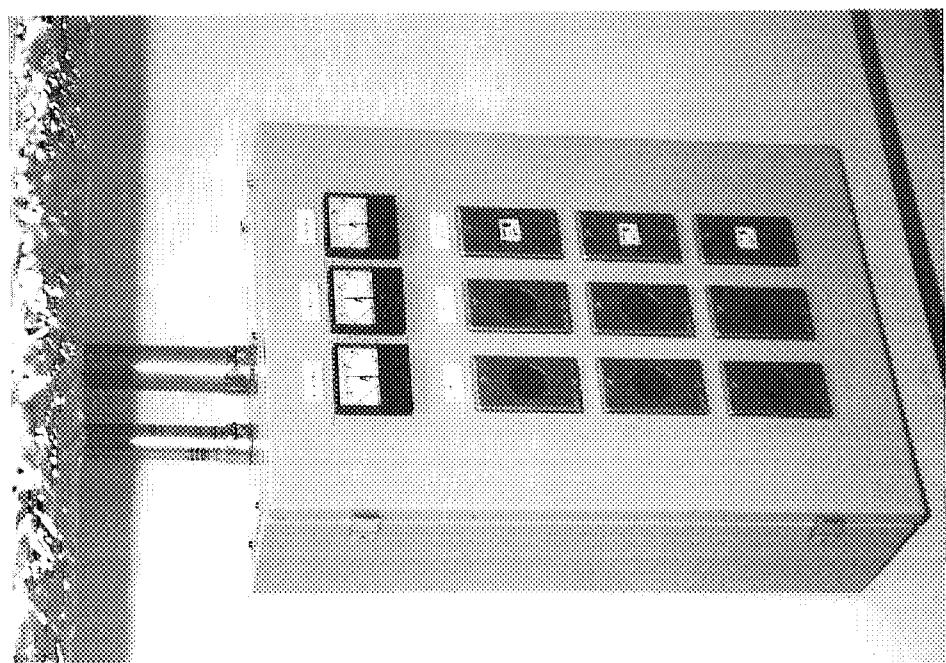


写真 7 BL23 の光学ハッチ内の電源設備

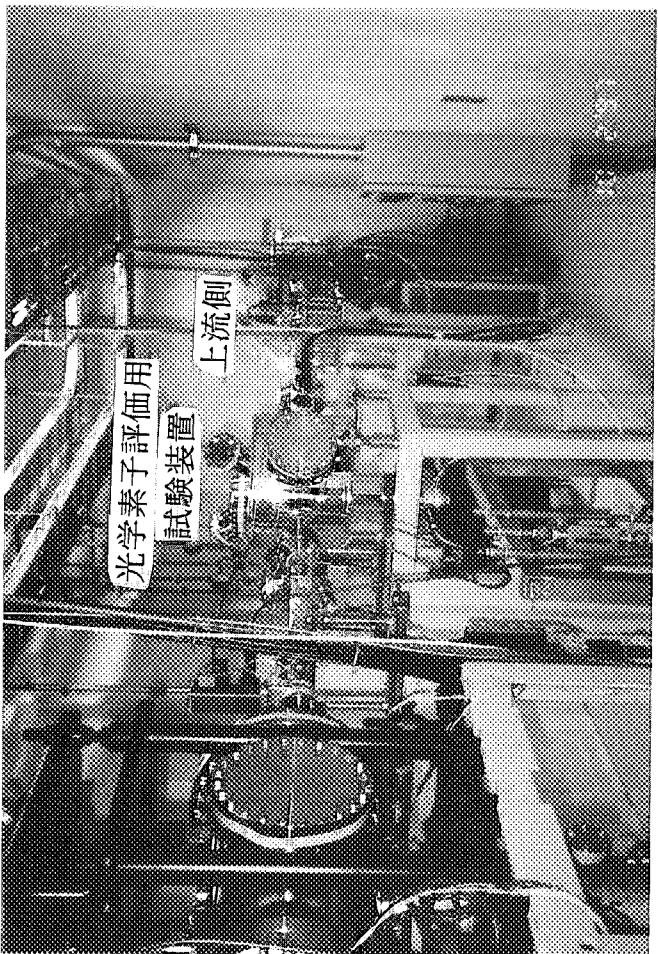


写真 9 BL23 の光学ハッチ内のビームライン

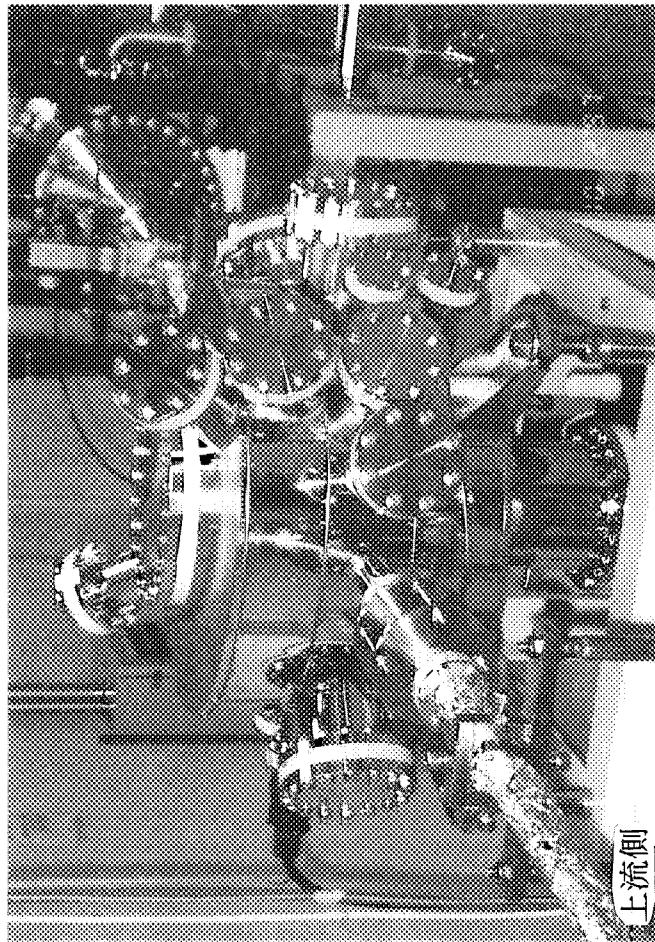


写真 11 BL23 の光学ハッチ内の光学素子評価用試験装置

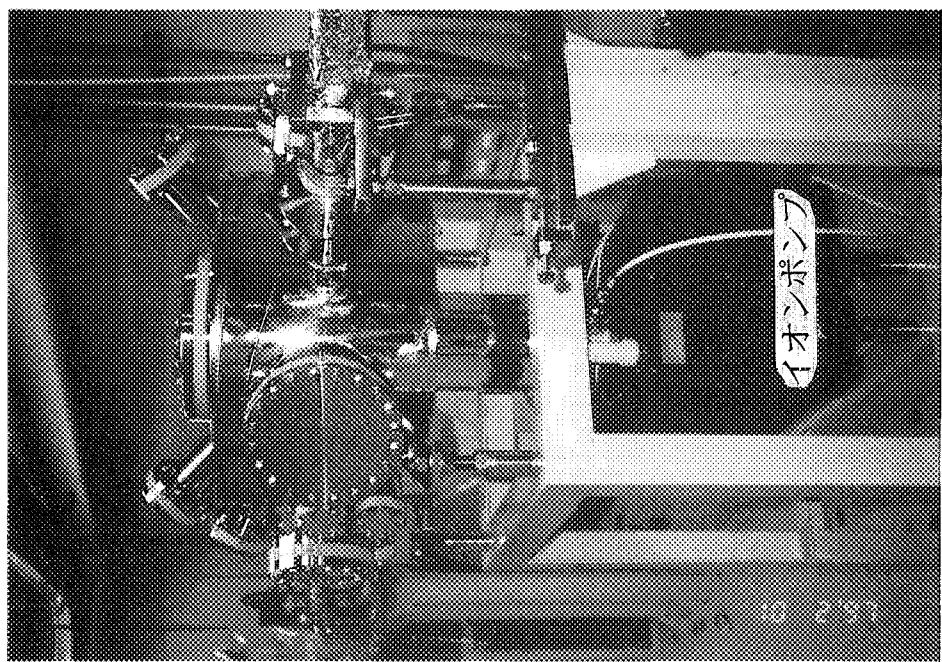


写真 10 BL23 の光学ハッチ内の光学素子評価用試験装置

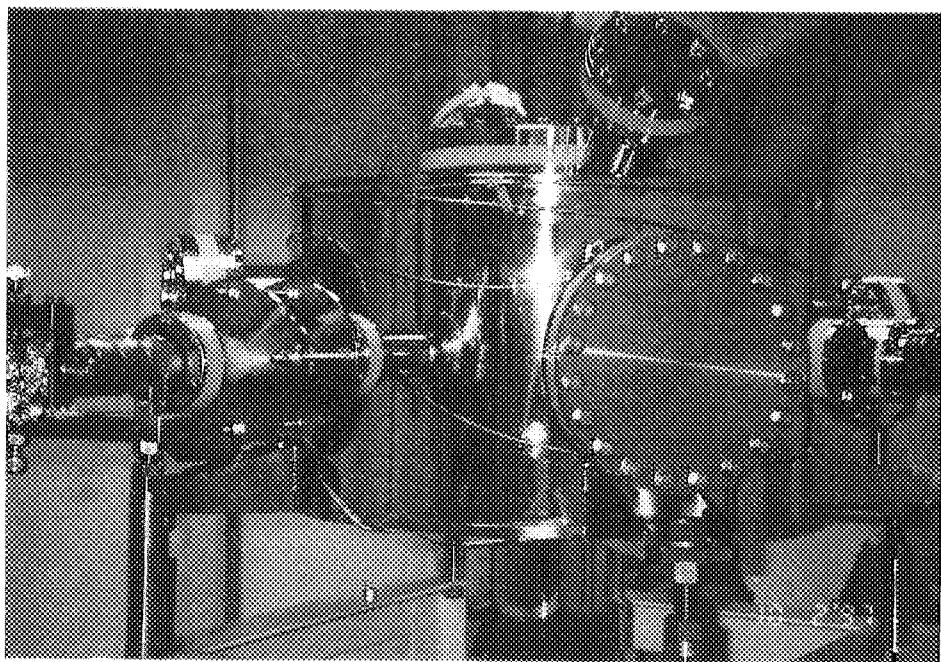


写真 12 BL23 の光学ハッチ内の光学素子評価用試験装置

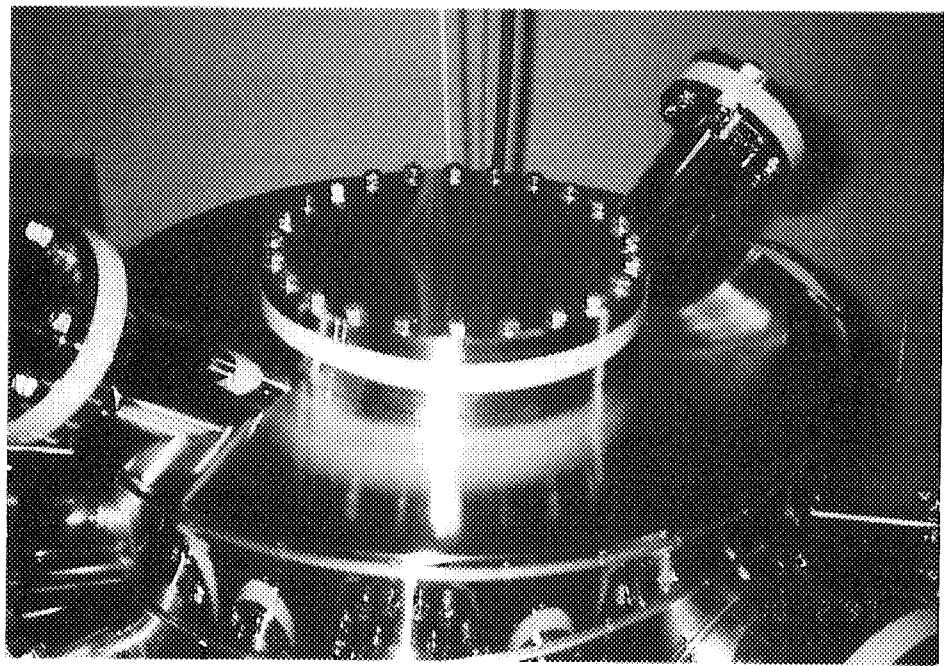


写真 13 BL23 の光学ハッチ内の光学素子評価用試験装置

付録 1 軟X線用多層膜光学素子

(1) 軟X線の一般的な呼称

数十～0.01 nm X線

30～1 nm (0.04～1.24 keV) 軟X線領域

2.33～4.36 nm (532～284 eV) 「水の窓」(OとCのK吸収端の間)

水を透過し、炭素の吸収を受ける……生体高分子

0.1～0.01 nm (10～100 keV) 硬X線……多層膜スーパーミラー

X線の energy E (keV) = $1.24/\lambda$ (nm)

特性X線 Al-K α (0.834 nm, 1.49 keV)

Cu-K α (0.154 nm, 8.05 keV)

他に Ni, Pt, Au, Ir など

(2) 多層膜ミラーの必要性

200 nm ……O₂の吸収

105 nm ……LiF の吸収端 (透過限界)

<30 nm ……斜入射光学系 (直入射光学系では反射率が得られない)

>1 nm ……結晶光学系が使いづらい

X線領域ではほぼ全ての媒質で屈折率が1となるので、光の干渉を用いたミラーが困難で、極端な斜入射 ($\theta < 3^\circ$) でしか大きな反射率が得られない。

(3) 多層膜ミラーの用途

軟X線レーザーミラー

生体用X線顕微鏡

X線望遠鏡

リソグラフィー用X線光学系

プラズマ診断用X線光学系

前・後置鏡、蛍光X線集光鏡、偏光子・移相子、パワーフィルター
 実例……球面鏡 (Mo/Si, Ni/C)
 回転放物面鏡 (Ni/C)
 回折格子 (Pt/C)

(4) 多層膜ミラーの構成

多層膜ミラーの構成について、その概要是本文の「はじめに」の項 (p. 1 および 図 1)に記載したが、多層膜によるX線の反射波の相互干渉はプラグの反射による。

$$m\lambda = 2D \sin\theta_m$$

m : 反射の次数 (1, 2 次光)

D : 周期長 ($d_A + d_B$) ……一組の重元素と軽元素の膜厚の和

θ_m : 反射面に対する入射角

重元素……Ti, V, Fe, Ni, Co, Mo, Ru, Rh, Hf, W, Ir, Pt

軽元素……Be, B₄C, C, Si, Mg

化合物、酸化物の利用

基板………フロートガラス、Si ウエハー、研磨ガラス (石英、BK-7)、SiC

0.2~0.4 nm (rms)

(5) 作成法

(5.1) 特徴

- マグнетロンスパッタリング法

蒸着速度が安定、 10^{-1} Pa (不純物混入の恐れ)

- 電子ビーム蒸着法

高融点物質 (W, C, B₄C) では蒸着速度が一定にならない→膜厚モニター
ーが必要、基板は固定

- イオンビームスパッタリング法

蒸着速度が安定 (膜厚モニター不要)、基板をスパッタ源から隔離でき、
Ar 圧も低く ($\sim 6 \times 10^3$ Pa) できる。

より高真空中で、イオンやラジカルの効果をより積極的に用いて高密度で平

滑な膜を得るため、

- ・デュアルイオンビームスパッタリング法
- ・クラスターイオンビーム法
- ・ECR スパッタリング法

他に、真空蒸着、レーザービーム蒸着

DC スパッタリング (非球面回転体の内面への成膜)

(5.2) 性能と因子

- ・基板面の粗さ (超研磨法→0.1 nm 以下 Si)
- ・物質の種類
- ・成膜法 (緻密さ、不純物混入の度合い)
- ・膜厚の均一性
- ・一様性
- ・界面の粗さ

(6) 実施例

最も周期長が短く、積層数の多いもの

W/C, W/Si D=1.5 nm, N=300

W/B₄C D=1.2 nm

他に、Be/Ni, SiO₂/Ni, W/C, W/Ni, LiO₂/Ni, Li/Ni, LiH/Ni など

特に、耐熱性について

多層膜は結晶や LB 膜よりも高い

Si-W-Si/C, W/B₄C (0.4W/mm²)

水冷 W/C, W/Si (0.25W/mm²)

Mo/BN (2.3W/mm²)

Mo/Si, Rh/Si-SiC (100°C)

Mo/Si, Ru/Si-Si (105°C)

(7) 評価

(7.1) on-line (in situ)

膜厚計測 (モニター)
水晶振動式膜厚計
自動エリプソメータ (屈折率も)
RHEED モニター
結晶性 (表面粗さ)

多層膜は通常アモルファスあるいは微小な多結晶
MBE (分子線エピタキシー)法→結晶性膜作成の試み

(7.2) off-line

X線散乱
周期構造
透過型電子顕微鏡 (TEM)
界面の観察
走査型プローブ顕微鏡 (STM)
表面粗さ
触針式あるいは光学式粗さ計
表面粗さ、膜厚の均一性
オージェ電子分光 (AES), 二次イオン質量分析 (SIMS), X線光電子分光 (XPS)
深さ方向の元素分析
不純物の分析
蛍光X線分析装置
元素分析

付録 2 放射光関連の用語

SPring-8 と放射光

SPring-8 は大型放射光施設の愛称で、Super Photon ring-8 GeV の略であって、世界最高レベルの「放射光」を発生させる施設である。電子ビーム加速エネルギーが 60 億電子ボルト (6 GeV) 以上の加速器を有する大型放射光施設と呼ばれる施設は現在世界に ESRF, APS, SPring-8 の三つがあるが、この SPring-8 は電子ビームの加速エネルギーが 8 GeV と世界最大であるとともに、専用の加速器にアンジュレーター主体の挿入光源を多数設置できるように設計された第 3 世代の放射光施設である。

「放射光」とは、ほぼ光速で直進する電子がその進行方向を磁石などによって変えられた際に発生する電磁波であって、電子の速度が速く、その進む方向の変化が大きいほど、より絞られた明るい光となり、また X 線などの短波長の光を含む。

SPring-8 では、電子銃から発生した電子ビームを、まず線型加速器により 1.2 GeV まで加速した後シンクロトロンに導入して 8 GeV まで加速する。この電子ビームを蓄積リングに導入し、8 GeV のエネルギーを維持させながら、磁石などによって放射光を発生させる。電子の進行方向を変えるために用いる磁石としては、電子をリング状の加速器に閉じこめるために必要な偏向電磁石と磁石を特定の形に組み合わせ電子の進路に挿入して用いる挿入光源（ウィグラー、アンジュレーター）がある。それぞれ特徴ある光が得られる。

- ・偏向電磁石：赤外線から X 線までの連続した波長の光（白色光）を発生
- ・ウィグラー：電子を大きく複数回蛇行させることにより、より明るく波長の短い白色光の発生
- ・アンジュレーター：電子を周期的に小さく蛇行させ、蛇行の度に発生する光を干渉させることにより極めて明るい特定波長の光を発生

このように、SPring-8 の放射光は①極めて明るい光（高輝度）②細く絞られ、広がりにくい光（優れた指向性）③赤外線から X 線までの広い波長領域の光（連続スペクトル）が特徴である。

ビームライン

ビームラインは、蓄積リングの磁石などから発生した放射光のうち、実験に必要なあるいは最適な光だけを選択して実験装置へ導くためのものである。通常のビームラインは長さが 50~80 m であるが、実験内容によっては 300 や 1000 m のビームラインも必要になる。ビームラインは大きく分けて、以下の三つの部分から構成される。

①基幹チャンネル

蓄積リングと直結して最初に放射光を取り出す部分。通常フロントエンドと呼ばれ、蓄積リングを収納するためのコンクリート遮蔽壁の内部に設置される。マスク、フィルター、鉛コリメーター、ビームシャッターなどが設置される。

②輸送チャンネル

遮蔽壁の外側から実験ハッチまでの部分。通常光学ハッチと呼ばれる大きな箱の中に設置される。分光器、ミラーなどが設置される。

③実験ステーション

放射光を利用して種々の実験を行う測定装置が設置されている部分。通常実験ハッチと呼ばれる大きな箱の中に設置される。

高速シャッター

真空漏れ事故時、シャッターを高速（ミリ秒以内）に下ろすことによって、大気が蓄積リング真空系に流入することを阻止する。

ビームシャッター

タンクステンブロックのシャッターを光軸上に下ろすことによって、実験ステーションへの放射光ビームを遮断する。

ゲートバルブ

輸送系の各コンポーネントにおいて、真空トラブルが発生した時にリング、フロントエンド部の真空を保護する。また、ビームラインの部分的な大気リークによる保守作業などを可能にする。

真空パイプ

ビームラインを構成する各コンポーネントを接続する。

ベローズ

ビームラインを構成する各コンポーネントを接続するために使用し、各コンポーネントの設置誤差を吸収する。また、加熱排気時の熱膨張を吸収する。

スクリーンモニター

蛍光板に放射光を照射することによって光軸位置を測定する。

ビーム位置モニター

X線ビームの端に蛍光板を挿入し、光っている部分を鉛ガラス越しにTVカメラで観察し画像処理する。ビームの形状変化を直観的に観測できる。

アパーチャ、スリット

余分な光をカットする。

付録 3 軟X線利用化学研究

放射光はエネルギーが連続であるため、その中から目的に応じたエネルギー領域の光だけを取り出して使用できるが、特にこれまで適切な光源のなかった軟X線領域(数10 eV～数 keV)での研究の進展が期待されている。

軟X線領域の光では、分子の内殻電子を励起することができ、それが引き金となって価電子帶励起の反応とは異なる新しい型の化学反応が起こると言われている。しかし、内殻励起については、これまで内殻電子エネルギー損失分光スペクトルなどによる電子構造や分子構造についての分光学的な研究が主であった。近年、内殻共鳴吸収を利用して、分子内の特定の原子を選択的に励起し、励起した原子近傍での選択的な結合切断を引き起こす「サイトを選別した化学反応」が起こることが、気相のアセトン分子で報告された[1]。すなわち、アセトンには二つのCH₃基(283 eV)とCO基(291 eV)があるが、この二種のCを区別でき、COのCのみを選択励起できる。また、最近ポリメチルメタクリレート薄膜についても同様なサイト選択的な光分解反応が見出され[2]、化学反応に軟X線を有用な光源として用いることがますます期待される。

- [1] W. Eberhardt, T. K. Sham, R. Carr, S. Krumacher, M. Strongin, S. L. Weng and D. Wesner, *Phys. Rev. Lett.*, **50**, 1038 (1983).
- [2] M. C. K. Tinome, K. Tanaka, J. Maruyama, N. Ueno, M. Imamura and N. Matsubayashi, *J. Chem. Phys.*, **100**, 5988 (1994); M. C. K. Tinome, N. Ueno, J. Maruyama, K. Kamiya, Y. Harada, T. Sekitani and K. Tanaka, *J. Electron Spectr. Relat. Phenom.*, **80**, 117 (1996).

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラード	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, L
ト	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁻¹	デシ	d
10 ⁻²	センチ	c
10 ⁻³	ミリ	m
10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換算表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
					1
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	6.89476 × 10 ⁻³	7.03070 × 10 ⁻²	6.80460 × 10 ⁻²	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
								= 4.184 J(熱化学)
3.6 × 10 ⁶	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J(15 °C)
	4.18605	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ⁵	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁶	= 4.1868 J(国際蒸気表)
1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹	仕事率 1 PS(仏馬力)
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	6.58515 × 10 ²¹	= 75 kgf·m/s
1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁶	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁹	1	8.46233 × 10 ¹⁸	= 735.499 W

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	線量当量	1
										1
3.7 × 10 ¹⁰	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹	0.01	1	1	2.58 × 10 ⁻⁴	1	1	0.01	100
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1					1

(86年12月26日現在)

