

解説

## UVSOR の機器校正用ビームライン

桜井 誠, 森田 繁, 米津宏昭, 藤田順治

核融合科学研究所

福井一俊, 酒井楠雄, 中村永研, 渡辺 誠

分子科学研究所極端紫外光実験施設

山下 広順

大阪大学理学部

石黒 英治

大阪市立大学工学部

### A Beam Line for Radiometric Calibration at UVSOR

**M.Sakurai, S.Morita, H.Yonezu and J.Fujita**

National Institute for Fusion Science

**K.Fukui, K.Sakai, E.Nakamura and M.Watanabe**

UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

**K.Yamashita**

Department of Physics, Osaka University

**E.Ishiguro**

Department of Applied Physics, Osaka City University

A beam line for radiometric calibration has been constructed at BL 5 B of UVSOR facility. The beam line was designed for the calibration of optical components, detectors, and spectrometers for plasma diagnostic devices in the VUV and soft X-ray spectral regions. It consists of a plane grating monochromator and a calibration chamber. The calibration chamber is equipped with a differential pumping system and a reflectometer.

Spectral distribution, higher order contribution, and resolution of the monochromator were measured by experiments on photoemission and photo-ionization of rare gases and various solids. Some applications for the characterization of multilayer reflectors and channel electron multipliers are demonstrated.

## 1. はじめに

高温プラズマを扱う核融合研究では、プラズマからの放射を定量的に測定することが、不純物の挙動を把握し、放射によるプラズマのエネルギー損失を制御する上で重要となっており、このためには放射測定機器の較正が不可欠である。核融合科学研究所では、その前身である名古屋大学プラズマ研究所が分子科学研究所極端紫外光実験施設(UVSOR)のBL5 Bに建設した、SRを標準光源としたラジオメトリー専用のビームラインを、引き続き管理・運営しており、光学素子や検出器の性能評価を始めとしたプラズマ放射計測機器の較正法の確立に関する研究を進めている。このビームラインはFig. 1に示すように、ビームポート(輻射導入ポートおよび真空遮断部)、一次分光器および較正用真空槽より構成される。本設備の特徴は、プラズマからの放射計測において重要で、しかも較正技術の開発が立ち遅れていた軟X線・真空紫外領域である2-120nmをカバーし、この領域における計測機器の絶対較正を可能にするという点である。現在は、機器較正用設備としての基本的構成要素の製作、設置、および調整をほぼ完了した段階にあり、一応のまとめとして、ここでは、一次分光器の性能評価の結果と昭和62年度に製作した較正用真空槽の概略、今後の課題、および光学素子・検出器に対する応用例について述べることにする。

## 2. 装置と実験方法

### 2.1 一次分光器

Fig. 1にUVSOR BL5 Bの概略図を示す。一次分光器は平面回折格子分光器(Plane Grating

Monochromator : PGM)であり、3種類の回折格子と7種類の結像鏡を使い分けることによって、2-100nmの波長領域でほぼ一定の分解能を維持するように設計されている。Table 1に回折格子と結像鏡の組み合わせと、それに対応する波長領域を示す。発光点より放射される光のうち水平10mrad, 垂直3 mrad は前置鏡 $M_0$ および $M_1$ により平行光にされ、回折格子 $G_{1-3}$ に入射する。負の一次回折光を結像鏡 $M_{2.0-2.6}$ により $S_2$ に収束させ、波長選択する。 $S_2$ より発散した光は、トロイダル鏡 $M_3$ により較正チェンバー内のQ点に集光される。一次分光器の分解能やQ点でのスポットサイズの波長依存性等については、文献1)を参照されたい。

光軸調整では、まず製作された各反射鏡の曲率をフーコー法により測定し、測定値に合わせて光学系の設置位置を計算し直した。これに基づいて、反射鏡( $M_1, M_2$ )の位置と角度をノギス、スケール等で機械的に設定した。この際の設定誤差は、位置が $\pm 1$  mm, 角度が $\pm 1$ 度程度である。次に、He-NeレーザーとSR(可視光)を用いて反射鏡や回折格子による反射光が光軸と一致するようにそれぞれの取付位置と角度を調整した。ただし、光軸は回折格子の回転中心を基準に採り、そこから設計値に従った距離と角度に設定した。また、 $M_0, M_1$ に対しては回折格子に入射するSR光が平行光になるように曲率を調整した。刻線調整にはHe-Neレーザーを用いた。前置鏡 $M_1$ の曲率(反射光の平行度)と角度のずれ、結像鏡 $M_2$ から反射された光線の光軸とのずれ、および回折格子の刻線方向の光軸とのずれは、全て $\pm 0.01$ 度以内に収められている。回折格子と、結像鏡 $M_2$ は、真

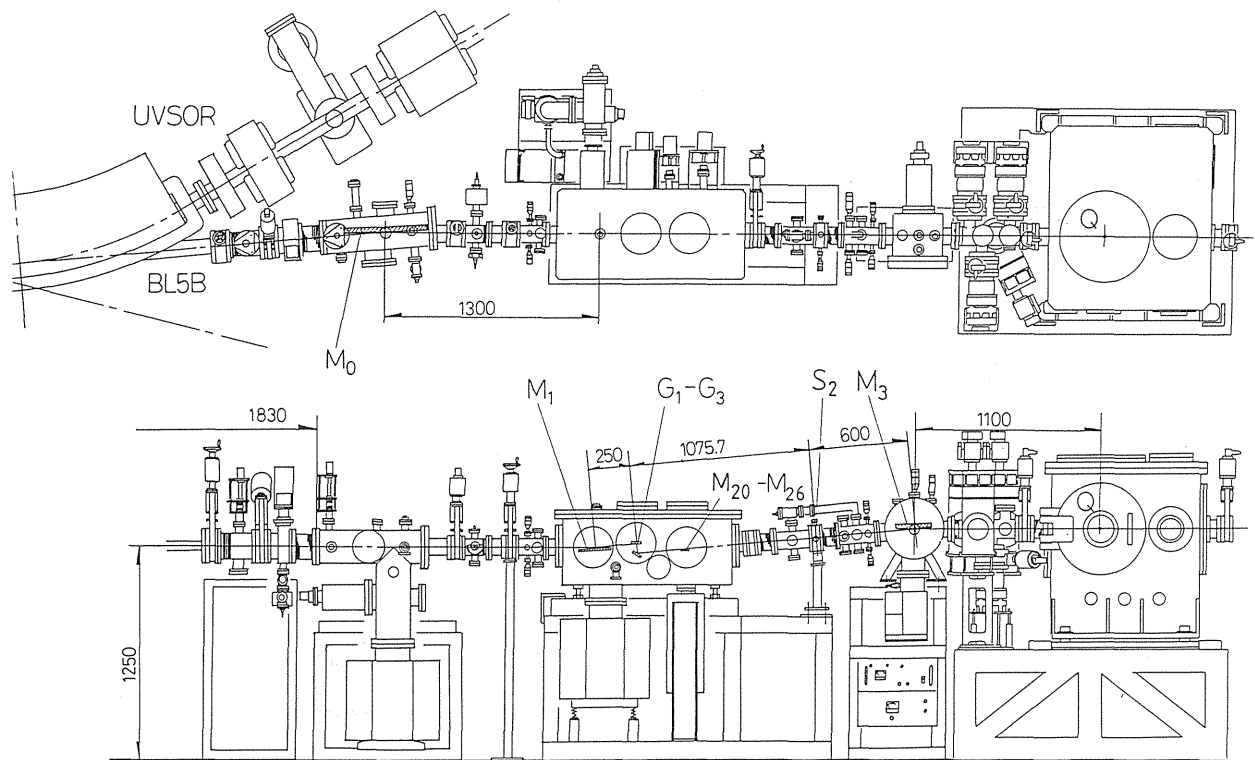


Fig. 1. Schematic view of BL5B.

Table 1 Combinations of gratings and mirrors.

Wavelength (nm)	Grating		Focusing mirror
	Grooves (/mm) (Blaze angle)	Deflection angle (°)	Number Incident angle
1.8 - 3.5	G <sub>1</sub> 1800 (0°)	86.5	M <sub>20</sub> 87.0
3.0 - 6.0		86.5	M <sub>21</sub> 87.0
6.0 - 12.0	G <sub>2</sub> 1200 2°	81.5	M <sub>22</sub> 82.0
10 - 20		72.0	M <sub>24</sub> 72.5
15 - 30	G <sub>3</sub> 800 4°	81.5	M <sub>23</sub> 82.0
27 - 54		72.0	M <sub>25</sub> 72.5
50 - 230		50.0	M <sub>26</sub> 50.5

空中で交換できるように、スライドテーブル上に乗っている。結像鏡は、球面あるいは円筒面であるため、その中心線と光軸を合わせる必要がある。回折格子、結像鏡交換の際の位置決めは、フォトセンサーで行っており、結像鏡の中心線と光軸が $\pm 0.2\text{mm}$ の精度で一致する様に調整されている。調整後のQ点におけるSR可視光(0次光)のスポットサイズは $2 \times 0.5\text{mm}^2$ であり、回折格子や結像鏡の交換によるスポット位置の変動は $\pm 0.2\text{mm}$

以内に収まっている。

真空排気系については、一次分光器が粗引きにターボ分子ポンプ、主排気にスパッタ・イオンポンプ(分光器本体に $500\text{ l/s}$ 、および後置鏡に $80\text{ l/s}$ )とチタンゲッターポンプ2台を使用している。加熱脱ガスは、スライドテーブルや回折格子回転用の駆動軸の摺動部に合成樹脂が使用されているため、分光器本体の温度を $80^\circ\text{C}$ 以下に抑えて約100時間行った。到達圧力は $1.3 \times 10^{-7}\text{ Pa}$ で

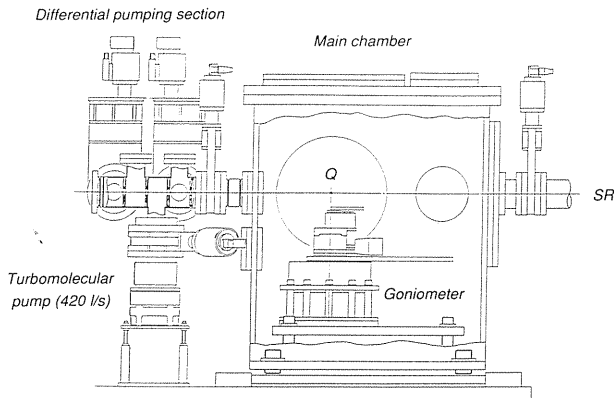


Fig. 2. Cross sectional view of a calibration chamber.

あるが、SR（ビーム電流=100mA）を導入すると  $5 \times 10^{-7}$  Paまで上昇する。

## 2.2 較正用真空槽

Fig. 2 に較正用真空槽の概略図（断面）を示す。較正用真空槽は主チェンバーと差動排気系より成る。主チェンバーは  $840 \times 940 \times 930 \text{ mm}^3$  の内容積をもち、ターボ分子ポンプ（1500 l/s）およびチタンゲッターポンプ（ $10^{-7}$  Pa台の超高真空領域で使用）で排気される。差動排気系（4段）の各段は  $12 \times 8 \text{ mm}^2$  前後のオリフィス（スリット）で仕切られ、それぞれをターボ分子ポンプ（420 l/s）で排気する。ターボ分子ポンプからスリットチェンバーまでのコンダクタンスをなるべく大きく取り（距離を短くし）、排気速度を稼ぐようにした。スリットチェンバーでの排気速度は100 l/s程度であり、差動排気1段で約1桁の差圧が得られることになる。主チェンバーは、一次分光器のQ点に正対した位置に内径410mmφのリングフランジが設けてあり、また上蓋もリングフランジとした。超高真空領域での実験にも適用できるように、これらのフランジはヘリコフレックスなどの金属ガスケットも使える仕様とした。差動排気系と主チェンバーは、それぞれ独立に3方向の位置調整が可能である。到達圧力については、差動排気系が150°Cで8時間の加熱脱ガス処理の後  $5 \times 10^{-8}$  Pa、主チェンバーが120°Cで24時間の加熱脱ガス処理の後  $5 \times 10^{-7}$  Paである。

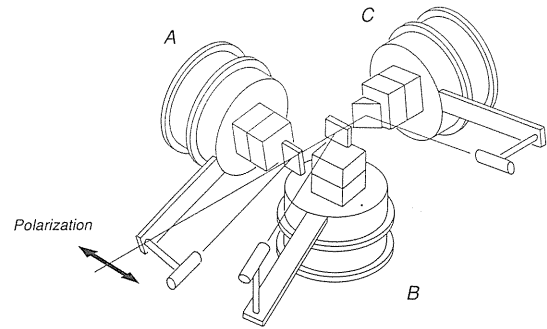


Fig. 3. Mounting positions of a goniometer.

主チェンバー内にはゴニオメーターが設置されている。主チェンバーとは独立に、ゴニオメーター自身も3方向の位置調整が可能である。このゴニオメーターは、光学素子の反射率測定などに用いられ、試料と検出器の回転、試料のX-Y移動、試料とフィルターの交換の計6自由度を持ち、真空用パルスモーター（三洋電機）で駆動される。回転とX-Y移動の分解能（設計値）は、それぞれ  $1 \times 10^{-5}$  rad および  $5 \mu\text{m}$  である。反射率などの光学的特性とSRの偏光の関係を調べられるように、ゴニオメーターの設置方向は回転軸が垂直、水平（SRに垂直）、およびSRに平行の3通りが可能にしてある。（Fig. 3）。即ち、SRが完全な直線偏光と仮定すれば、図のAの位置では反射率のs成分の測定、Bの位置ではp成分の測定が行える。また、Cの位置では、入射角45度の条件でBragg条件を満たすような多層膜と入射SRの波長に対して、多層膜と検出器を同期回転させて測定することにより、SRの偏光度を評価することができる。

主チェンバーの後方には、電離箱（double ion chamber, 吸収光路長1m）と電離箱用の気体導入系が設置されている。主チェンバーと電離箱の間にもスリット（ $10 \times 5 \text{ mm}^2$ ）が設けられている。気体導入系は将来、流量測定にも使えるように配慮した真空容器と、ターボ分子ポンプ（50 l/s）、隔膜真空計（バラトロン, 1 Torr head, MKS）、電離真空計、および可変リークバルブなどより成る。電離箱動作時は希ガスを電離箱内に

5 Pa程度導入するため、主チェンバー内の圧力は $1 \times 10^{-2}$  Pa程度になるが、差動排気の効果により分光器内の圧力上昇は $3 \times 10^{-7}$  Pa以下に抑えられる。

### 2.3 測定系と実験方法

光学素子や検出器の較正実験における測定系は次の要素より成る。即ち、1) 一次分光器、2) ゴニオメーター、3) 被較正素子・検出器とその信号処理系、4) 比較較正用標準光子検出器とその信号処理系、5) 真空系、定電圧電源、デジタル電圧計などの各計測器である。測定の際は、これらをマイクロコンピュータにより制御する。マイクロコンピュータとのインターフェースは一次分光器のコントローラ(回折格子および結像鏡の交換, tangent bar の駆動と読み取り)が48chパラレルIO、波高分析器(ヒストグラムメモリ、検出器として現在は比例計数管を使用)がCAMAC、ゴニオメーターのコントローラと他の計測器(微小電流計、定電圧電源など)がGP-IBである。測定プログラムは、ゴニオメーターを用いた反射率測定と標準光子検出器との比較較正に対応できるようにした。反射率測定では、入射角を固定して波長を掃引する $\lambda$ -scanモードと、波長を固定して入射角を掃引する $\theta$ -scanモードの測定が行え、ステップ掃引と連続掃引が可能である。波長掃引は、回折格子のホルダーに固定されたアーム(tangent bar)をプッシュロッドで駆動し回折格子を回転させることによるが、プッシュロッドの位置 $l$ と波長 $\lambda$ の関係は次式で与えられる。

$$\lambda = 2d \cos \delta \left( \cos \theta_0 \sqrt{\frac{\xi^2}{1+\xi^2}} - \sin \theta_0 \sqrt{\frac{1}{1+\xi^2}} \right) \quad (1)$$

ここで、 $\xi = (l - l_0)/L$ であり、 $l_0$ はtangent barがプッシュロッドと垂直になるときのプッシュロッドの位置、 $L$ はアームの長さ、 $\theta_0$ は0次光がスリットを通るときの回折格子の回転角、

$d$ は刻線間隔、 $\delta$ は表1に示された $1/2$ 定偏角である。 $l$ は $\lambda$ の初等関数では表されないため、プログラムでは入力された波長から、予め用意した数表値を用い内挿により $l$ を求めている。検出器の感度較正に用いる標準光子検出器は、比例計数管と電離箱を想定し、測定中に光子数の絶対値をモニターできるようにした。掃引の1ステップに測定し記録するデータは、プッシュロッドの位置、検出器の出力、およびストーレージングの電子ビームの電流値である。これらの測定機能のほかにゴニオメーターの6自由度の位置調整を行うモードと検出器出力の波高分析のモードを設けた。

分光器の性能評価のため、全波長領域に亘って強度分布を測定するとともに、フィルターや検出器の構成元素の吸収端近傍を測定し、波長較正と分解能の評価を行った。検出器としては、1) 2次電子増倍管(R596, 浜松ホトニクス, 光電面: BeCu, KCl またはNaCl), 2) フォトダイオード(陰極: Al), 3) 電離箱の3種類を用いた。2)は陰極にクッキングフォイルを用いた手製のものであり、特別の表面処理は行っていない。フィルターとしてはAl(膜厚150nm), Ti(80nm), Sn(130nm), In(180nm)の蒸着膜を用いた。また、高次光成分の寄与を調べるため、光電子のエネルギー分析器を製作し、1次光と2次光により放出された希ガスからの光電子を測定した。電子エネルギー分析器は、Fig. 4に示すように円筒鏡面型(CMA)であり、内円筒の外径60mm, 外

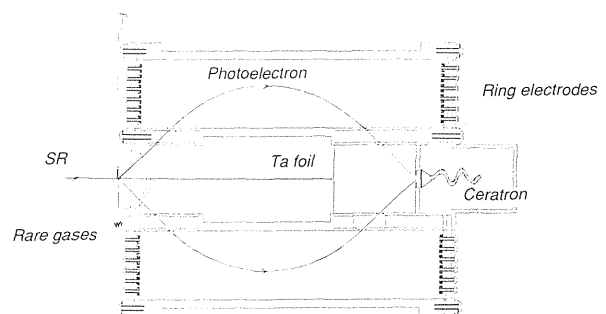


Fig. 4. Schematic diagram of a cylindrical mirror analyzer.

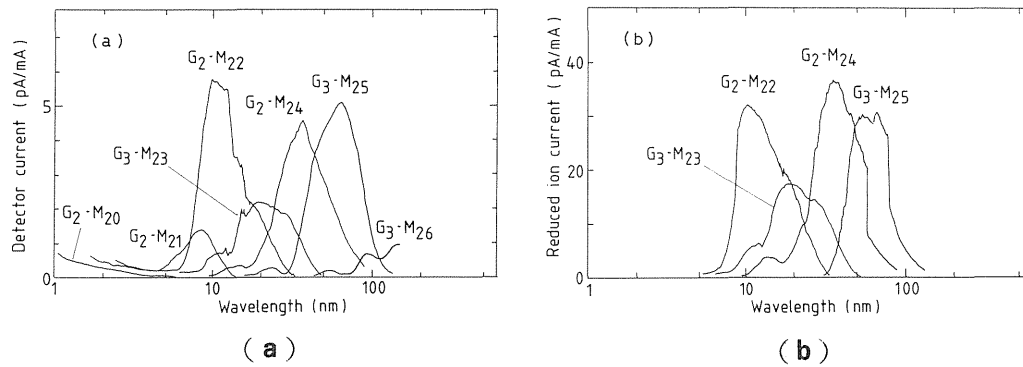


Fig. 5. Output spectra of the PGM monochromator measured by (a) a photodiode and (b) a double ionization chamber.

円筒の内径140mm, 長さ約200mmである。円筒両端部の電場補正には, リング状電極(6個)を用いて, 抵抗分割で電位配分を行っている。分析器が見込む電子の立体角を決める2段のスリットは, 内円筒とはめ合いになっており, 交換が可能である。さらに, 電子の通過エネルギーを固定して(エネルギー分解能を一定にして)測定できるように, 内円筒の電位を可変にし, 2枚の球面グリッドを設けられる構造にした。ただし, 現在は内円筒を接地して使用している。材料は, スリットがSUS 310で, 他はアルミニウムを使用した。検出器には, セラトロン(村田製作所)を用いた。分析器全体は, 厚さ0.254mmの磁気シールド材(CONETIC AA, Perfection Mica Corp.)で覆った。このCMAをゴニオメーターに設置し, その中心軸がSRの光軸に来るように調整した。ガス導入のためのパイプ(1.25mmφ×0.1t)は, なるべく出口をCMAの焦点位置の近く(約5mm)に, しかもパイプの方向を光軸と垂直に設置し, 光電子発生源の空間的広がりを少なくするよう努めた。

光学素子評価の一例として, 多層膜反射鏡(2d = 6 - 22nm)の反射率を測定した。検出器には, 2次電子増倍管と比例計数管を用いた。比例計数管は手製のものであり, 窓材にポリプロピレン膜(厚さ1μmあるいは4μm)を用いている。この測定では, 反射率の偏光依存性を明かにするために, ゴニオメーターの回転軸を垂直と水平の2通

りの設置条件で行った。従って, それぞれSRの偏光方向と試料表面は垂直と平行であり, 反射率のp成分およびs成分の測定に相当する。また, 検出器の感度較正に関しては, セラトロンについて, 電離箱と比較しながら絶対感度を見積もった。

### 3. 結果

Fig. 5はスリット幅30μmにおける, 分光されたSR光の強度と波長の関係を示す。a)はフォトダイオード, b)は電離箱で測定した結果である。設計ではG<sub>1</sub>とM<sub>20</sub>, M<sub>21</sub>の組み合わせで2 - 6nmをカバーすることになっていたが, 分解能や, 0次光の混入などの点でG<sub>1</sub>の性能が不十分であったため, G<sub>1</sub>の代わりにG<sub>2</sub>を用いている。このため, 短波長領域(< 4nm)の分光光は0次光の混入が多く, 回折格子の改善が必要である。G<sub>2</sub>に対する各スペクトルのブレイズ波長は設計値よりかなり長波長側にシフトしている。スペクトル中に見られる細かい構造は, 反射鏡や検出器の構成元素の吸収端に由来する。Fig. 5 b)において, G<sub>3</sub>-M<sub>25</sub>はArで, 他はNeを用いて測定しており, 縦軸を電離箱の2個の収イオン電極からの電流*i*<sub>1</sub>, *i*<sub>2</sub>より求められる,

$$i = i_1^2 / (i_1 - i_2) \quad (2)$$

で整理した。高次光の寄与と2次イオン化が無視

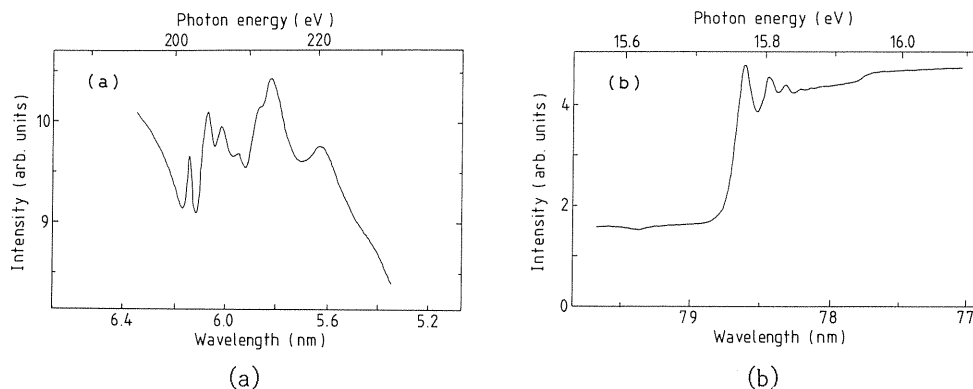


Fig. 6. Expanded spectra near the absorption edge of the elements of detectors; (a) was measured by an electron multiplier with NaCl photocathode and (b) is an absorption spectrum near Ar  $M_{2,3}$  edge measured by a ionization chamber.

できる場合には, SRの絶対強度 (photons/s) は  $I = i / e$  ( $e$ は素電荷) で表される<sup>2, 3)</sup>。即ち,  $G_3 - M_{2,3}$ の組み合わせで, 波長50nm, ビーム電流100mAにおけるフォトン数は  $2 \times 10^{10}$ /s となる。

Fig. 6 a) および 6 b) は, それぞれ電子増倍管 (光電面: NaCl) と電離箱で測定した内殻レベル近傍のスペクトルである。6 a) は, Cl- $L_{2,3}$ 吸収端に付随した励起子ピークとX線吸収端構造 (XANES) を示す<sup>4)</sup>。6 b) はArの $^2P_{1/3}$ と $^2P_{3/2}$ のあいだに現れる自動電離スペクトルである<sup>5)</sup>。6 a), 6 b) それぞれの場合について, おおよその分解能 ( $\lambda / \Delta \lambda_B$ ) は200 および800と算出される。長波長領域 (80nm) では, 分解能は設計値どおりであるが, 短波長領域 (6 nm) では設計値より幾分低下している。また, 分解能はスリット幅に対して0-100  $\mu\text{m}$  の範囲で変化しなかった。これは, PGMが入射スリットを持たないことから, 分解能が電子ビームの大きさ (0.64 $\times$ 0.46 $\text{mm}^2$ ) で制限されるためと考えられる。

Fig. 7 はCMAで測定した, Ne 2pレベルからの光電子スペクトルである。図中, 左側のピークが1次光, 右側のピークが2次光により放出された光電子に相当する。ピークの半値幅から得られ

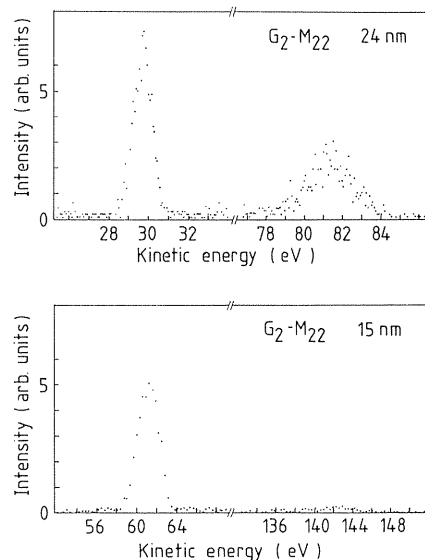


Fig. 7. Photoelectron spectra from Ne gases near Ne-2p level.

る分解能は約3%であり, これは物体の空間的広がり ( $\sim 2 \times 1 \text{mm}^2$ ) とセラトロン入口の絞り径 (3 mm  $\phi$ ) を基に計算される分解能とほぼ一致している。Fig. 7のようなスペクトルを, さらに異なる波長や他の回折格子と結像鏡の組み合わせに対して測定し, ピーク強度を光電離断面積<sup>6)</sup>で補正して1次光と2次光の強度比として表したものが, Fig. 8である。長波長になるにつれて1次光に対する2次光の比率が増加すること,  $G_3$ では $G_2$ よりも, それぞれの回折格子がカバー

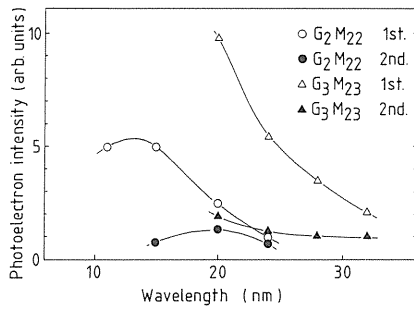


Fig. 8. Contribution of second order light in the PGM output radiation.

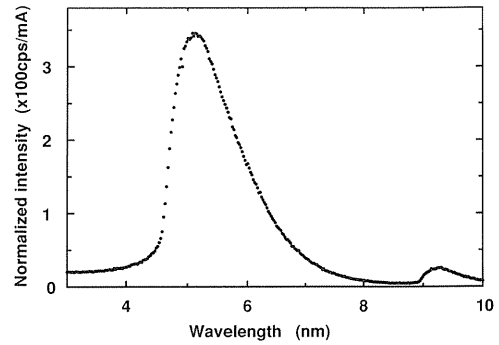


Fig. 10. Spectral distribution of incident radiation measured by a proportional counter.

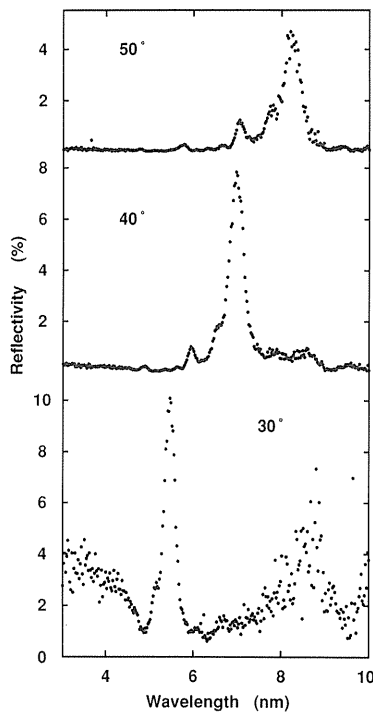


Fig. 9. Reflectivity of a Ni/C multilayer for s polarization condition.

する波長領域の短波長側における、2次光の寄与が大きいことがわかる。

Fig. 9 は、Ni / C 多層膜 (2d=10.7nm) の反射強度をλ-scan モードで測定した例である。検出器は比例計数管であり、鏡面反射方向(2θ)に置かれている。回折ピークがBragg条件に対応した位置に観測されている。Fig. 10は、入射光強度と波長の関係を比例計数管で測定したものである。比例計数管の窓材によりC-K吸収端(4.47nm)より長波長側(8.9nmまで)では高次光の影響は無視できると考えて良い。また、吸

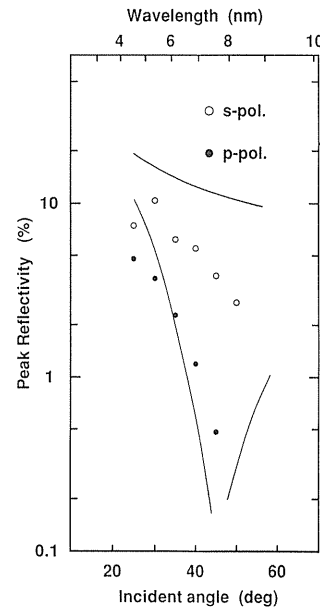


Fig. 11. Peak reflectivity of a Ni/C multilayer for both s and p polarization. Solid lines represent values including the effects from interlayer roughness.

収端前後の強度比から、散乱光の寄与も5%以下と考えられる。Fig. 11はFig. 9でみられるBragg反射条件での反射率を入射角に対して整理したものである。多層膜の反射率 $R_p$ は、光学定数を用いて定まる理想的反射率 $R_0$ を層間の界面粗さで補正した、次式で表すことができる。

$$R_p = R_0 \exp [ - ( 2 \pi m \Delta z / d )^2 ] \quad (3)$$

ここで $\Delta z$ は界面粗さでフィッティングパラメー



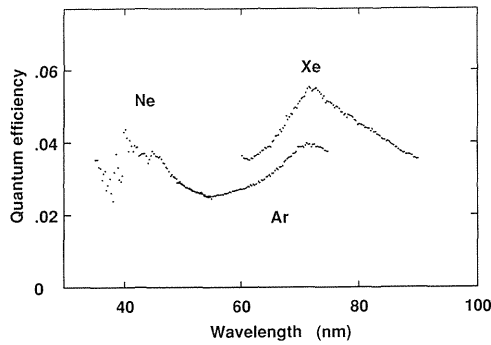


Fig.12. Quantum efficiency of Ceratron by using a rare gas ionization chamber.

タであり、 $m$ は反射の次数である。図中の実線は界面粗さを特性X線 ( $Al-K\alpha$ ) に対する反射率でフィッティングした ( $\Delta z = 0.68\text{nm}$ )、反射率のシミュレーション結果である。測定結果との不一致の理由としては、界面粗さの波長依存性等が考えられる。p 偏光測定の場合、入射角が  $45^\circ$  近傍では偏光の効果により、反射率が殆ど 0 まで減少している。このことから、Fig. 3 の C の測定モードが SR の偏光度測定に有効であるということが分かる。本実験では、一次分光器から出射される SR のビーム径や発散角を絞らずに、そのまま試料に当て、検出器の入口にも特にスリットは設けなかった。試料に入射する SR の発散角は  $\pm 5\text{ mrad}$  であり、多層膜のような分解能の低いもの場合は問題ないと思われるが、さらに高分解能の分光結晶や回折格子を評価する場合や、斜入射領域で測定する場合はビームの発散角を抑えることが必要になる。

Fig.12は、セラトロン量子効率について、分光器のスリット幅が同一の条件でセラトロンと電離箱の出力を比較することにより求めたものである。電離箱の測定条件は導入ガスが Ne のとき圧力  $16\text{Pa}$ 、Ar のとき  $5\text{ Pa}$ 、Xe のとき  $5\text{ Pa}$  であり、それぞれの希ガスに対して二次電離が起こらない波長領域<sup>8)</sup> (Ne :  $35-55\text{nm}$ , Ar :  $48-75\text{nm}$ , Xe :  $60-90\text{nm}$ ) に絞って測定した。回折格子と結像鏡の組み合わせは  $G_3-M_{26}$  を用いた。セラトロンの構成元素である Ti の吸収端 (Ti-

$M_{2,3} : 38\text{nm}$ ) 周辺では、量子効率の変動が大きい。Ar と Xe に対する値が大きく異なる理由については、高次光による二次電離の寄与の違いが考えられる。恐らく Xe の値が大きく出すぎているものと思われる。フィルター等で高次光を除去して、再度測定する必要がある。今回の測定では、セラトロン (本測定での最高計数率  $< 10^6$ ) と電離箱 (検出限界  $\sim 10^7\text{ photons/s}$ ) が同一条件で測定できるように、一次分光器のスリット幅を機械的に制御できる限界 (数  $\mu\text{m}$ ) まで絞ったが、 $\ln$  フィルターを用いた吸収端近傍の透過率測定から、この条件ではスリットからの散乱光の寄与が数 10% あることが分かった。従って、入射光子束に対するダイナミックレンジが標準検出器と大きく異なる検出器を校正する場合、量子効率の測定値の信頼性を高めるためには、測定する波長領域に応じて透過率の予め較正された適当な膜厚と材質のフィルターを使用するなど、光子束の広いレンジで純粋な分光光を提供するための、今後の改善が必要である。

#### 4. おわりに

分子科学研究所極端紫外光実験施設 (UVSOR) に設置されている、核融合科学研究所所有の機器較正用ビームライン (BL 5 B) に関して、その構成と性能評価の結果について述べた。一次分光器に関する今後の課題としては、高次光の評価と除去、短波長領域用の回折格子 ( $G_1$ ) の改良、前置鏡等の汚染除去が挙げられ、有効波長領域の拡大と全波長領域における絶対強度と高次光成分や偏光度の把握のための幾つかの改良が必要である。また、様々な研究テーマに対応できるように、第 2 の較正用真空槽をビームラインの下流に設置することを計画中である。このようなビームラインの性能向上を進める傍ら、実際の放射計測機器とくに核融合装置に設置されているプラズマ放射計測機器との比較較正のための、トランスファー分光器の開発と絶対較正を行うとともに、様々な

光学素子や検出器など、放射計側機器のコンポーネントの較正に適用し、新しいプラズマ放射計側機器の開発に役立てていく予定である。

## 謝 辞

本研究を進めるに当たり、ビームラインの建設計画に多大のご配慮を頂いた、分子科学研究所の井口洋夫所長並びに木村克美教授に感謝致します。また、実験装置や測定プログラムの整備に協力頂いた分子科学研究所極端紫外光実験施設の松戸修氏、山崎潤一郎氏に感謝致します。多層膜の評価については、大阪大学理学部の大谷正之氏、廿日出勇氏、田村敬輔氏、新技術開発事業団の永田浩氏、鈴木美彦氏、関正治氏にセラトロンの感度較正については、村田製作所の山本宏氏、和田龍一郎氏に試料を提供して頂き、実験にも協力して頂きました。あわせて感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 森田 繁, 藤田順治, 福井一俊, 酒井楠雄, 渡辺 誠, 石黒英治, 山下広順, :「核融合プラズマ計測センター放射光実験設備の建設(1)」, IPPJ-DT-135 (1987).
- 2) J.A.R. Samson: J. Opt. Soc. Am. 54 (1964) 6.
- 3) E.B. Saloman and D.L. Ederer : Appl. Opt. 14 (1975) 1029.
- 4) T. Sagawa, Y. Iguchi, M. Sasanuma, T. Nasu, S. Yamaguchi, S. Fujiwara, M. Nakamura, A. Ejiri, T. Masuoka, T. Sasaki and T. Oshio: J. Phys. Soc. Japan 21 (1966) 2587.
- 5) R.E. Huffman, Y. Tanaka and J.E. Larrabee: J. Chem. Phys. 39 (1963) 902.
- 6) F. Wuilleumier and M. O. Krause : J. Electron Spectrosc. 15 (1979) 15.
- 7) E.B. Saloman: Nucl. Instr. and Meth. 172, (1980) 79.
- 8) 増岡俊夫: 学位論文 (1976).