

JAERI-Tech

2004-017



JP0450350



SPring-8原研アンジュレータービームラインBL11XUの  
全反射ミラー装置の立ち上げ調整と特性評価

2004年3月

桐山 幸治・高橋 正光・塩飽 秀啓

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。

入手の問い合わせは、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、お申し越してください。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, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

SPring-8 原研アンジュレータービームライン BL11XU の  
全反射ミラー装置の立ち上げ調整と特性評価

日本原子力研究所関西研究所放射光科学研究センター  
桐山 幸治\*・高橋 正光・塩飽 秀啓

(2004年1月22日受理)

SPring-8/BL11XU では放射光の集光と結晶による高調波を除去するために 70cm 長の全反射ミラーを導入した。SiO<sub>2</sub>を基盤とするこのミラーは、広いエネルギー領域で使用できるよう、上下 2 箇所にて Pt と Rh のコーティングを施し、おおよそ 6KeV から 35KeV 程度まで利用できる。BL11XU 実験ハッチ 3 においてミラーの特性評価を行った結果、ミラーを利用した X 線は、集光前の入射光に対して、約 3 倍の強度、3 分の 1 の半値幅となり、高調波の除去も良好であった。

ミラーを利用した放射光利用実験を円滑に進めるために、ミラーを正確かつ短時間に調整することが必要である。しかし、これまでに立ち上げ手順や操作手順が系統的にまとめられていないために、必ずしも効率の作業ができるとはいえなかった。そこで、BL11XU では、作業手順を整理し、系統的なマニュアルを作成した。マニュアル化されたことによって、ミラーの使用経験・調整経験の少ない実験者であってもミラーを容易に使用・調整することが可能になった。

---

関西研究所：〒679-5148 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1

\* 業務協力員：スプリングエイトサービス株式会社

Setup of the X-ray Mirror System on BL11XU at SPring-8

Koji KIRIYAMA\*, Masamitsu TAKAHASHI and Hideaki SHIWAKU

Synchrotron Radiation Research Center  
Kansai Research Establishment  
Japan Atomic Energy Research Institute  
Mikazuki-cho, Sayou-gun, Hyogo-ken

(Received January 22, 2004)

X-ray mirror system has been installed on a JAERI beam-line, BL11XU, at SPring-8. This system has improved the quality of the reflected X-ray from the monochromator by focusing and removing of higher-order reflections. Here we presented the results of the experiment for obtaining the performance of this X-ray mirror system. Reflectivity of this mirror and FWHM of the focused X-ray beams are 3 times as strong as and 1/3 as narrow as unfocused X-rays, respectively. Removal of higher-order reflections was also checked. These results showed that the mirror system in the BL11XU beam-line provides high quality of X-ray beams for the experimental use. We completed a fully systematic instruction manual for an operation of the X-ray mirror system on BL11XU, which guides us quick and easy alignment of the optics in the beam-line. The instruction manual prevents trivial mistakes in operation of the X-ray mirror system on BL11XU and assists every mirror-user on BL11XU in their works.

Keywords : X-ray Mirror, BL11XU, SPring-8

---

\* On Leave From SPring-8 Service Co.,Ltd.

## 目次

1. はじめに	1
2. BL11XU 全反射ミラー装置の概要	2
3. ミラー調整方法	10
3. 1 分光器の調整	10
3. 2 原点出し	13
3. 3 ミラー反射率の角度依存性	16
3. 4 ミラーの集光条件の確認	17
3. 5 ビームプロファイルの測定 (ミラー位置依存性)	19
3. 6 ビームプロファイルの測定 (ベント量依存性)	20
3. 7 1回反射のビーム測定	22
3. 8 調整アドバイス	23
4. ミラー調整結果	25
5. 考察	36
6. 結論	37
謝辞	37
参考文献	37
付録1：ミラー調整時パラメータ値・測定値表	38
付録2：ビームライン・ワークステーションによるミラー調整方法概要	39

Contents

1. Introduction	-----	1
2. Specifications of the Mirror System on BL11XU/SPRING-8	-----	2
3. Operation of the Mirror System	-----	10
3. 1 For Tuning of the Monochromator	-----	10
3. 2 For Positioning of the Mirror	-----	13
3. 3 For Measurement of Reflectivity	-----	16
3. 4 For Measurement of Degree of Focusing X-ray	-----	17
3. 5 For Measurement of Beam Profile		
	Depending on Mirror-position	- 19
3. 6 For Measurement of Beam Profile Depending on Mirror-bend		- 20
3. 7 For Measurement of Single Reflection X-rays	-----	22
3. 8 Advice	-----	23
4. Results	-----	25
5. Discussion	-----	36
6. Conclusion	-----	37
Acknowledgements	-----	37
References	-----	37
Appendix1: Table for Writing-Down the Parameters of the Mirror	-----	38
Appendix2: Operation of the Mirror System Controlling from Beam-line WS		39

## 1. はじめに

第三世代の放射光施設は、これまでの放射光施設より蓄積リングとアンジュレーターの性能が飛躍的に向上したことによって、入射光の平行度が格段に良くなってきている。しかし、SPring-8のアンジュレーター光といえども、BL11XUの実験ハッチ3では発光点から観測点までの距離が約65mもあるため、観測点までのビーム横方向の広がりを無視することはできない。実験に使うビームサイズは1mm以下であるのに対して、実際には3mm程度まで広がってしまう。そのような状況において、集光と高調波成分の除去が可能であるX線反射ミラーが実験に対して果たす役割は大きい。ミラーでX線を集光すれば、入射光密度を高め、データの統計精度をあげることができる。これより、短時間で質の良い回折データを得ることができることが期待される。また、ミラーの全反射臨界角のエネルギー依存性を利用して、二結晶配置分光器から出射される二倍波・三倍波などの高調波成分を取り除くことができる。

BL11XUでは70cm長の全反射ミラーを導入した。このX線反射ミラーは、表面を高い面精度をもつ平面形状に研削し、かつ高い反射率を得るために高精度に研磨されていなければならない。ミラー本体を調整する調整機構への設置も慎重を要する。そのため、導入にあたりミラーおよびシステム全体の特性評価を行う必要がある。また、ミラー調整のプロセスを再現よく正確に、かつスムーズに行うことが実験を行う上でも極めて重要である。

そこで、今回、BL11XU用としてミラー調整法をマニュアル化した上で、その調整法に従いミラーの特性評価を詳細に行った。そして、集光・高調波除去の効果および複数の実験条件下におけるミラーの有効性を確認した。

## 2. BL11XU 全反射ミラー装置の概要

BL11XU に導入された 2 組のミラー装置は分光器下流に設置されている(図 1)。第一ミラーおよび第二ミラーはそれぞれ反射面を横方向に向けて設置されている(横振り)。アンジュレーター光源から第一ミラーまでの距離が 43960mm、第一ミラー・第二ミラー間距離が 1050mm、第二ミラーから観測点までの距離が 20620mm である。これらミラー装置は、ミラー本体とミラー調整機構から構成されている。ミラー本体はミラー調整機構のチャンバー内部に両端部をクランプすることにより取り付けられている。ミラー本体は、二結晶分光器により分光された単色 X 線が入射する条件下で使用するため、熱負荷を考慮する必要はなく冷却されない(室温 25℃付近で使用する)。ミラーチャンバーはターボ分子ポンプにより真空排気される。

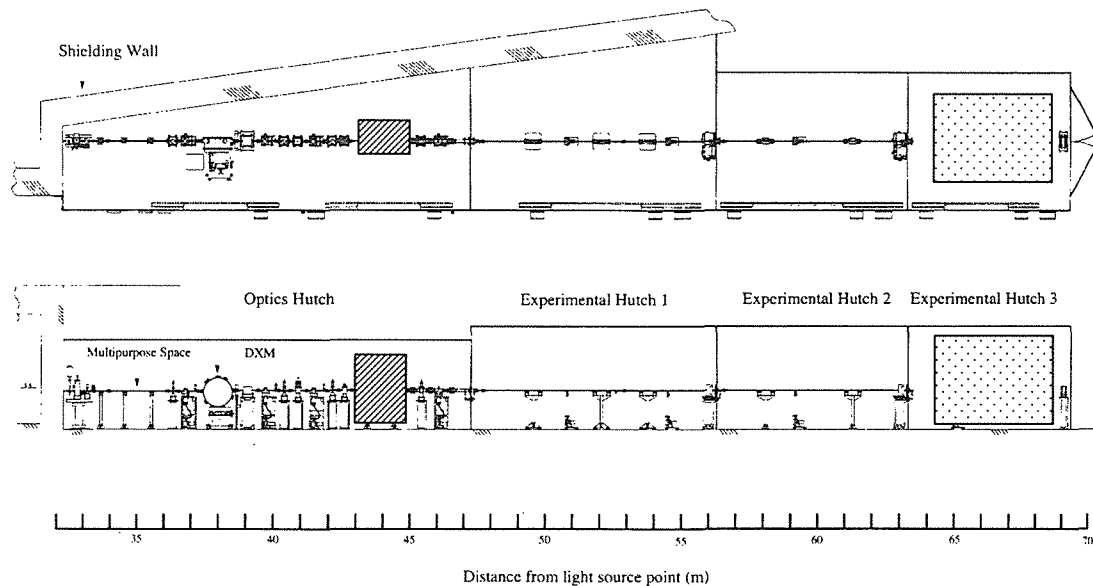


図 1 BL11XU 全体図。▨ ミラー、▤ X 線回折装置。

ミラー本体は、長さ 700mm、幅 70mm、高さ 50mm の  $\text{SiO}_2$  を基盤として用い(図 2)、研削・表面研磨され、表面には反射材のコートが施されている(図 3)。両端のクランプ部分に  $100\text{N}\cdot\text{m}$  以下の曲げモーメント( $\text{SiO}_2$  ヤング率  $73\text{GPa}$  の場合)をかけることにより、長軸方向に沿って曲率半径 2km 程度の円筒面状に弾性的に湾曲させることができる。この曲げモーメントの負荷により、母材が破壊される原因となるようなひび、割れ等が生じないように製作されている。また、ターボ分子ポンプによって排気される真空中で、脱ガスによるガス放出速度が  $10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$  以下に抑えられている。仕様詳細を表 1 に示す。



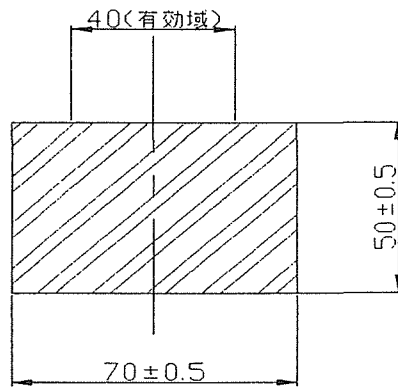


図2 ミラー断面形状図(単位: mm)

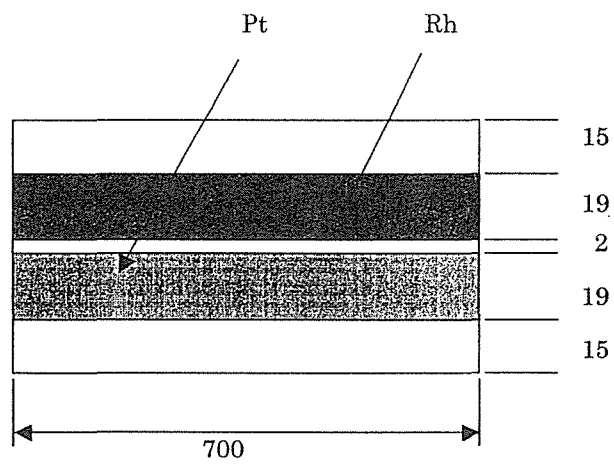


図3 ミラー表面図(単位: mm)

表1 BL11XU ミラー 仕様[1]

サイズ	700mm(L)×70mm(W)×50mm(H) 寸法公差 $1 \pm 0.5$ mm
形状	平面ミラー(ミラー断面形状図参照)。長手曲げ(長手曲率:2,000-30,000m可変)。最大曲げモーメント:100N・m( $\text{SiO}_2$ ヤング率 73GPa として)
反射面有効領域	600mm(L)×40mm(W)(ミラー断面形状図参照)。ただし、有効領域の中心は Pt/19mm、Rh/19mm のコート中心の 2カ所。
反射コート材	Pt 及び Rh(ミラー表面図参照)。長手方向に沿い側面より $\text{SiO}_2/15\text{mm}$ 、Pt/19mm、 $\text{SiO}_2/2\text{mm}$ 、Rh/19mm、 $\text{SiO}_2/15\text{mm}$ に塗り分ける。
反射コート材 不純物存在比	1%以下
反射コート材 バルク密度	80%以上
反射コート厚さ	50nm 以上
反射コート材傾斜角	基盤反射面に対して $\pm 0.002^\circ$ 以下
反射面表面粗さ	0.4nm 以下
反射面スロープエラー	0.5" 以下(l 方向)、1" 以下(w 方向)(有効領域中、有効領域中心から 70%のコート領域において)1" 以下(l 方向)、2" 以下(w 方向)(有効領域中、有効領域中心から 70%以上のコート領域において)
両側面直角度	0.02mm 以下(基準は有効領域)
両側面平面度	0.02mm 以下(鏡面仕上げ)
基盤	$\text{SiO}_2$

ミラー調整機構は、ミラー1個ごとに1台設置されている(図4)。ミラーのX線反射方向が水平方向に右および左になっている(横振り)。調整機構は、ミラー光軸調整機構部、ミラーホルダー及び湾曲機構部、架台及び調整機構部、真空関連機器部、駆動制御装置部から構成されている。

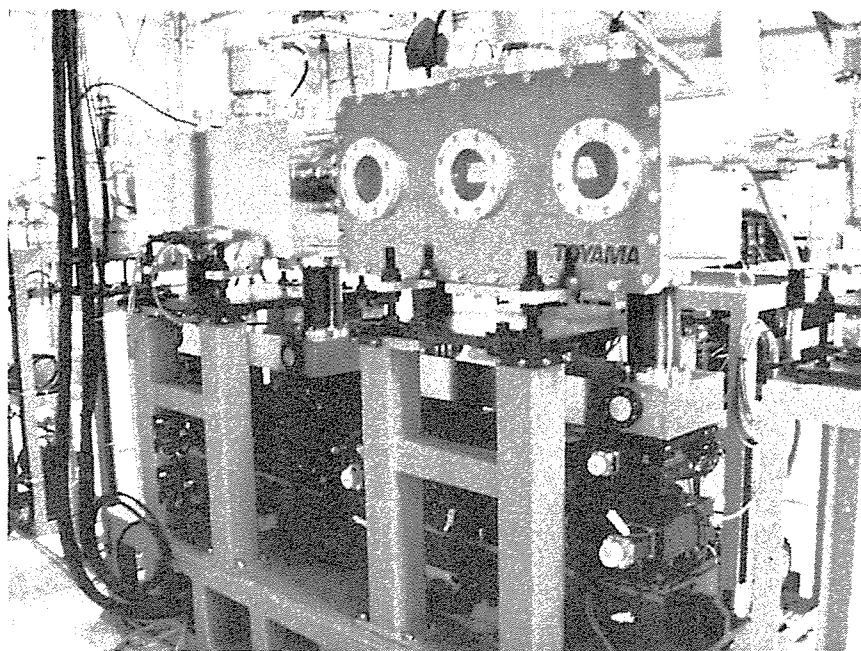


図 4 BL11XU 光学ハッチ内に設置されているミラー装置一式。写真右側上流方向。写真中央が上流ミラー調整機構、写真左が下流ミラー調整機構。チャンバー内にミラー本体が取り付けられる。チャンバーの下に調整機構部がある。

ミラー光軸調整機構部は、図 5 に示す座標系の自由度を持つ。水平位置(x)、上下位置(z)、水平面内回転角( $\theta_z$ )及び鉛直面内回転角( $\theta_x$ )の計 4 軸である。上下及び水平駆動はそれぞれ、パルスモータの回転をボールネジにより、平行移動に変えて駆動する 2 個の並進ステージにより行う。ミラー駆動部の座標系を表 2 に示す。

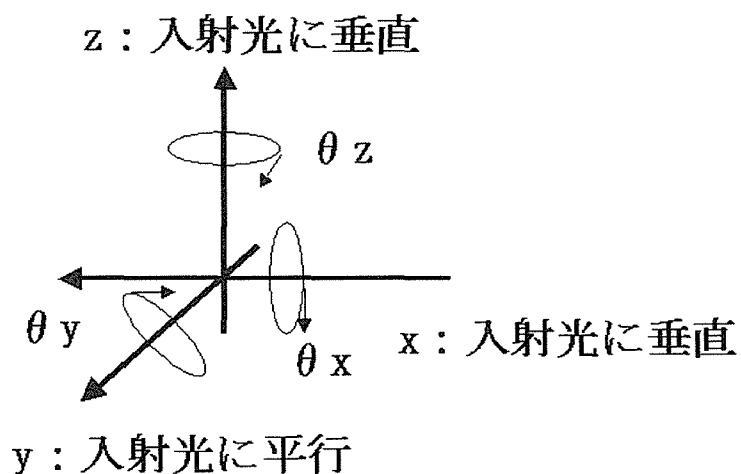


図 5 ミラー調整装置座標系

表2 ミラー駆動部の座標系

駆動部名称	単位	正移動方向
x	mm	ホール側
z	mm	鉛直上方向
tz	mrاد	真下から見て時計回転
tx	mrاد	ホール側から見て反時計回転
bend1	pulse	ミラーを凹に曲げる方向
bend2	pulse	ミラーを凹に曲げる方向

上下並進軸・水平並進軸の基準位置に対するストローク、分解能、再現性および位置決め精度は  $0.5\mu\text{m}$  である。オプションとして、 $0.1\text{mm}$  表示のポテンショメーターが取り付けられている。鉛直面内回転軸の制御は、上下並進ステージ 2 軸を用いて行う。基準位置に対する分解能は  $0.00005^\circ$ 、再現性および位置決め精度は  $0.0005^\circ$  である。水平面内回転軸の制御は、水平並進ステージ 2 軸を用いて行う。全ストロークでの駆動を確保するため、ミラー支持支柱に回転による負荷を吸収するベアリング、支持支柱間距離変化を吸収するステージが設けられている。ミラーのねじれを補正する機構は取り付けずに、ミラーホルダー等の設計や組立調整に留意することにより、ミラーの両端でのミラー反射面のねじれは  $\pm 0.005^\circ$  以下である。

ミラーホルダーおよびミラー湾曲機構部湾曲機構部は遠隔操作によりミラー面を凸及び凹の両方向に、曲率半径  $2\sim 30\text{ km}$  の円筒面状および楕円面状に曲げることができる。湾曲面形成後は安定に固定され、駆動機構に対してその動作限界を電氣的信号で取り出すことができる。湾曲機構は、ミラー母材の両端付近 2 箇所をクランプし(図 6)、独立にミラーの両端に回転モーメントをかける方式である。最大負荷モーメント、分解能、再現性は表 3 に示すとおりである。

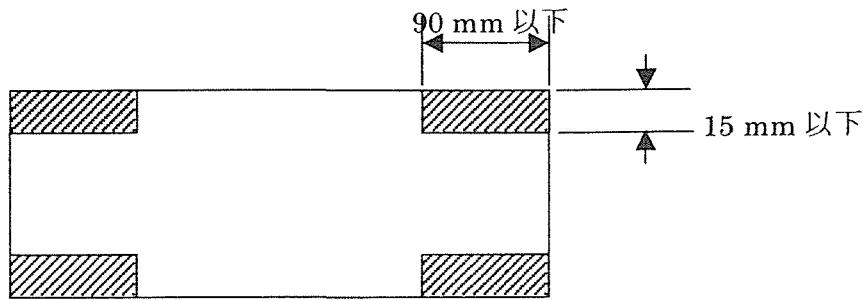


図6 ミラークランプ部位（斜線部）。図はミラー表面方向から見ている。

上下流の各回転モーメントは回転モーメント読取装置で計測できる。ミラーホルダーは、ミラー反射面側が組立調整時に基準面となるように設計されており、ミラー本体をクランプし、所定の回転モーメントをかけた際に、ミラー本体に割れ欠けが生じないように留意されている。床等の振動により、ミラー本体に共振等が生じないようにミラー本体の支持を剛性の高いものを使用している。

架台部の材質は鋼材を用い、4本脚による装置本体の支持を行う。手動操作による調節機構（水平及び上下位置）も備えている。調整範囲を表3に示す。

駆動部制御装置は、コンピュータによりパルスモータコントローラを介してパルスモータドライバを作動させる。

本装置では、ベーキングは行わない。ミラーの出し入れ用として、真空槽の側面に取り外し可能な大型フランジが設置されている。大型フランジの開閉状態を電気的信号により取り出すことができる。

X線ビームパスは、ICF152 フランジによって、ビームラインの他の機器と接続される。X線ビームパス下流側のポートは、ダイレクト光と反射光のいずれも取り出せる配置構造になっている。真空槽の側面部にはビューイングポート（窓の材質は鉛3mm当量入りの鉛ガラス）がある。真空排気は真空チェンバーに直付けされたターボ分子ポンプにより行い、オイルフリーな環境を確保している。ビームパスに接続されるフランジにブランクフランジを取り付けて、排気速度300L/sec相当のターボ分子ポンプにより排気をした場合に、12時間以内に $1 \times 10^{-4}$ Pa以下の真空度に到達できる。

据付精度は水平、鉛直、光軸方向とも $\pm 0.5$ mm以内、水準0.06mm/m以内（反転を含む）である。

表3 水平方向右および左はね型湾曲機構付ミラー調整装置 仕様[2]

チェンバー	到達真空度: $10^{-5}$ Pa 台
上下流チェンバー取合い	上流: ICF152 固定 下流: ICF152 固定
上下流フランジ面間距離	950mm $\pm$ 3mm
上下流フランジ長さ	上流: 1430mm 下流: 1430mm
ビューポート	鉛 3mm 等量入り $\times$ 4 個 ミラー上流観測用 JIS2 インチ程度 $\times$ 1 個 ミラー側面観測用 JIS4 インチ程度 $\times$ 3 個
排気ポート	70cm 長ミラー上部 ICF152 $\times$ 1 個
ケージポート	上部 ICF070 $\times$ 4 個
ミラー調整機構	パルスモータ駆動
ミラーサイズ	700mm(l) $\times$ 70mm(w) $\times$ 50mm(t)
ミラー中心高さ	1430mm
ミラー中心位置	上流支持部中心より下流 300mm
ミラー上下流支持部 中心間距離	600 mm $\pm$ 0.1mm
ホルダ取り付け時の ミラー表面のねじれ	$\pm 0.005^\circ$ 以下
上下駆動軸	2 軸並進駆動(ボールネジ使用) ストローク: $\pm 20$ mm 以上 分解能: $0.25 \mu\text{m}$ /パルス以下 再現性、位置決め精度: $2.5 \mu\text{m}$ 以下 ピッチング: $\pm 0.001^\circ$ 以下 ヨーイング: $\pm 0.001^\circ$ 以下

表3 水平方向右および左はね型湾曲機構付ミラー調整装置 仕様(続き)

## ミラー調整機構

水平光軸直交駆動軸	2軸並進駆動(ボールネジ使用) ストローク:±20mm以上(左はね:-40mm~+5mm以上) 分解能:0.25μm/パルス以下 再現性、位置決め精度:2.5μm以下 ピッチング:±0.001°以下(±3mm以内) ±0.005°以下(±3mm以外) ヨーイング:±0.001°以下(±3mm以内) ±0.005°以下(±3mm以外) 光軸退避機構付き
鉛直面内駆動軸	上下並進ステージ2軸により行う ストローク:±1.7°以上 分解能:0.00005°/パルス以下 再現性、位置決め精度:0.0005°以下
水平面内駆動軸	水平並進ステージ2軸により行う ストローク:±1.7°以上 分解能:0.00005°/パルス以下 再現性、位置決め精度:0.0005°以下
ベント軸	上流下流各1軸独立パルスモータ駆動 最大負荷モーメント:±50N・m以上 分解能:0.001N・m以下
架台調整機構	手動ネジ送り駆動
上下駆動軸	移動範囲:±20mm以上(3mm/ピッチ以下)
水平光軸方向駆動軸	移動範囲:±15mm以上(2mm/ピッチ以下)
水平光軸直交駆動軸	移動範囲:±20mm以上(2mm/ピッチ以下)
オフセット値	10.5mm(5mradにおいて)

### 3. ミラー調整方法

本調整方法は、ミラーを Certified Scientific Software 社製 X 線回折用ソフトウェア SPEC によって制御することを前提としている。また、BL11XU 実験ハッチ 3 において 10KeV を使用すること、図 7 に示すスリット等が設置され、その制御をすることも含まれる。上記外の条件で使用する場合は、調整方法の左列の手順および、「付録 2：ビームライン・ワークステーションによるミラー調整方法概要」を参考の上、ビームライン制御用のワークステーションよりミラーを制御し、ミラーの調整を行う。

ミラー調整時には、第一ミラー、第二ミラー、スリット、検出器 (PIN フォトダイオード検出器) を用いる (図 7)。後述にある「スリット」は、図 7(c) のスリットを指す。二枚のミラーの中心間距離は 1050mm で第二ミラーの中心から測定点までの距離は、20620mm である。

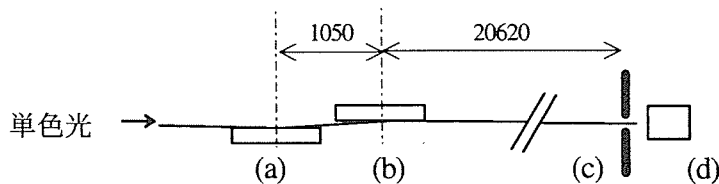


図 7 ミラー調整時の配置(上面図)。

(a)第一ミラー、(b)第二ミラー、(c)スリット、(d)検出器

マクロの詳細に関しては 3. 8 項など別途参照のこと。手順にある [ ] は測定によって決定される数値を示す。

#### 3. 1 分光器の調整

##### [調整準備]

第一・第二ミラーともに退避させ、ダイレクト光を調整に用いる。カレントアンプが飽和する場合は、アルミなどの吸収板を入れる、ゲインを調整するなどの処置を施す。

##### 操作

- 1) 検出器の選択
- 2) ミラー位置をチェック。値を記入する。
- 3) 第一ミラーが入っている場合は抜く。  
( $X_{M1}$ =数 mm であれば入っている)
- 4) スリットを広げておく。

##### 入力コマンド

```
plotselect MON
getmirror
movemirror 2 x [ $X_{1-position}+5$ ]
islit 19 19
```



## [分光器の調整]

## 操作

## 入力コマンド

- |                            |                             |
|----------------------------|-----------------------------|
| 1) 10keVにあわす。              | moveE0 10                   |
| 2) IDギャップ調整 (~14.7mm)にあわす。 | movegap 14.73               |
| 3) $\Delta\theta 2$ スキャン   | ddth2scan -2000 2000 40 0.1 |

(別法) こちら↓でも良い

- |  |                               |
|--|-------------------------------|
| 3´-1) 現在の $\Delta\theta 2$ 位置を確認する。                                    | getdth2                       |
| 3´-2) $\Delta\theta 2$ を調整する。(50~200pls<br>程度の範囲で動かす)                  | rmovedth2 200 (or -200)       |
| 4) ピーク位置にもっていく。  | movedth2 CEN                  |
| 5) IDギャップスキャンをしてピーク ( $GAP_{peak}$ )<br>を調べる。範囲はIDギャップ値の $\pm 0.3mm$ 。 | gapscan 14.4 15 40 0.1        |
| 6) 上で得られたピークにIDギャップをあわ<br>す。   | movegap [ $GAP_{peak}$ ]      |
| 7) バックラッシュを取る。   | rmovedth2 -500; rmovedth2 500 |

## [スリットの調整]

- |  |                           |
|--|---------------------------|
| 1) スリットのサイズをかえる。   | islit 1 10                |
| 2) スリットの位置を確認し、3) 項<br>でのスリットスキャン範囲を決める。                       | wm isz                    |
| 3) isz スリットスキャンでピーク [ $isz_{peak}$ ]を<br>得る。2) 項で決めた数値を[]に入れる。 | dscan isz [-5] [5] 40 0.1 |
| 4) [ $isz_{peak}$ ]に移動させる。                                     | mv isz [ $isz_{peak}$ ]   |
| 5) スリットのサイズをかえる。   | islit 10 1                |
| 6) スリットの位置を確認し、7) 項<br>でのスリットスキャン範囲を決める。                       | wm isx                    |
| 7) isx スリットスキャンでピーク [ $isx_{peak}$ ]を<br>得る。6) 項で決めた数値を[]に入れる。 | dscan isx [-5] [5] 40 0.1 |
| 8) [ $isx_{peak}$ ]に移動させる。                                     | mv isx [ $isx_{peak}$ ]   |
| 9) スリットを開けておく。   | islit 19 19               |

\* : 分光器の調整・スリットの調整は過程を入れ替えて幾度か行うこともある。

## [エネルギー較正]

BL11XU 実験ハッチ 3 において 10KeV を使用する場合のエネルギー較正に関する手順である。Ta(タンタル)の L3 吸収端が $\sim 9.87\text{KeV}$  であることを利用してエネルギー較正用の金属フォイルは Ta を用いる。その他のエネルギーを用いて実験を行う場合は、適した金属フォイルを別途選択すること。アルミフォイルはいれない。

操作入力コマンド

- |   |  |
|---|--|
| 1) Ta (タンタル) フォイルをセットする。  |  |
| 2) モノクロの角度を確認する。  | getA                                   |
| 3) 分光器の角度スキャンする。  | monoAscan 11.5 11.6 40 0.1             |
| 4) 結果グラフより吸収[ $\ominus$ ]端を読み取る。  |  |
| 5) その吸収端値に角度をあわす。   | moveA [ $\ominus$ ]                    |
| 6) Ta の吸収端をセットする。   | setE0 9.881                            |
| 7) 10KeV に戻る。   | moveE0 10                              |
| 8) Ta フォイルを取り除く。  |  |
| 9) IDギャップスキャンをしてピーク ( $\text{GAP}_{\text{peak}}$ ) を調べる。範囲は IDギャップ値の $\pm 0.3\text{mm}$ 。 | gapscan 14.4 15 40 0.1                 |
| 10) 上で得られたピークに IDギャップをあわす。  | movegap [ $\text{GAP}_{\text{peak}}$ ] |

### 3. 2 原点出し

第一ミラー、第二ミラーの原点を確認する。第二ミラーはベントしていても構わない。

#### [第一ミラーの調整]

##### 操作

- 1) 第一ミラーの tz を [0] にしておく。
- 2) 第一ミラーの x を強度を半分になる位置にあわす。[X] の値を 0.5~1mm ずつ程度小さくしていく。強度はメーターを見て判断する。
- 3) 強度半分になったところの  $[X_{M1}]$  を記入する。
- 4) 強度半分になったところから 1mm 逃がす。
- 5) tz ミラースキャンを行う。(1 回目)<sup>\*1, \*3</sup>  
(グラフの表示範囲が適当でない場合は、-7~0 の値を変更する。その他のスキャンを行う項目でも同様。適当であるとカーブが切れたり、山を書いたりしない。)
- 6) スキャン後、中心位置を記入する。  $[TZ_{M1-1}]$
- 7) tz ミラースキャンを行う。(2 回目)<sup>\*1, \*3</sup>
- 8) スキャン後、中心位置を記入する。  $[TZ_{M1-2}]$
- 9) 中心位置  $[TZ_1]$  を算出する。  

$$[TZ_1] = ([TZ_{M1-1}] + [TZ_{M1-2}]) / 2$$
- 1 0)  $[TZ_1]$  に第一ミラーを移動させる。
- 1 1) x ミラースキャンを行う。<sup>\*2</sup>
  - 1 2) その時のセンター値  $[X_{1-center}]$  を記入する。
  - 1 3) 第二ミラー調整のために第一ミラーを回避させる。

##### 入力コマンド

```
movemirror 1 tz 0
movemirror 1 x [X]
movemirror 1 x [XM1+1]
dmirrorscan 1 tz -7 0 20 0.1
dmirrorscan 1 tz 0 7 20 0.1
movemirror 1 tz [TZ1]
amirrorscan 1 x [XM1-2] [XM1+2]
40 0.1
movemirror 1 x [X1-center+5]
```

**[第二ミラーの調整]**操作

- 1) 第二ミラーの tz を [0] にしておく。
- 2) 第一ミラーの x を強度を半分になる位置にあわす。[X] の値を 0.5~1mm ずつ程度小さくしていく。強度はメーターを見て判断する。第二ミラーの位置は、オフセットのため第一ミラーとの値とは異なる。
- 3) 強度半分になったところの  $[X_{M2}]$  を記入する。
- 4) 強度半分になったところから 1mm 逃がす。
- 5) tz ミラースキャンを行う。(1回目)<sup>\*1, 2</sup>
- 6) スキャン後、中心位置を記入する。  $[TZ_{M2-1}]$
- 7) tz ミラースキャンを行う。(2回目)<sup>\*1, \*3</sup>
- 8) スキャン後、中心位置を記入する。  $[TZ_{M2-2}]$
- 9) 中心位置  $[TZ_2]$  を算出する。  

$$[TZ_2] = ([TZ_{M2-1}] + [TZ_{M2-2}]) / 2$$
- 1 0)  $[TZ_2]$  に第二ミラーを移動させる。
- 1 1) x ミラースキャンを行う。<sup>\*2</sup>
- 1 2) その時のセンター値  $[X_{2-center}]$  を記入する。
- 1 3) 第二ミラーを退避させる。

入力コマンド

```
movemirror 2 tz 0

movemirror 2 x [X]

movemirror 2 x [XM2-1]
dmirrorscan 2 tz -7 0 20 0.1

dmirrorscan 2 tz 0 7 20 0.1

movemirror 2 tz [TZ2]
amirrorscan 2 x [XM2-2] [XM2+2]
40 0.1

movemirror 2 x [X2-center-5]
```

**[第一ミラー・第二ミラーの挿入]**操作

- 1) 第一ミラーを入れる。
- 2) 第一ミラーを 5mrad<sup>\*3</sup> 傾ける。
- 3) 第二ミラーを入れる。オフセットの値 10.5mm を考慮する。
- 4) 第二ミラーを 5mrad<sup>\*3</sup> 傾ける。

入力コマンド

```
movemirror 1 x [X1-center]
movemirror 1 tz [TZ1-5]
movemirror 2 x [X2-center-10.5]

movemirror 2 tz [TZ2-5]
```

## [光の確認]

## 操作

## 入力コマンド

- 1) リナグラフを 30～60 秒露出、光を確認する。
- 2) 2 で問題が無ければ原点出し終了。  
問題がある場合は「3. 8 調整アドバイス」を参照の上、再調整する。
- 3) ミラー位置のチェック。値を記入しておく。      getmirror
- 4) 引き続き実験にうつる場合はミラーをベントさせておく。
- 5) [分光器の調整] 4) ～ 7)、[スリットの調整] を再度行う。(必要と思われない時は行わなくてもよい。)

\*1 : ミラースキャン時にグラフが切れている場合は、[X]の値を調整する。

\*2 : スキャン範囲は「wm」コマンドなどで確認すること。

\*3 : 照射角が 5mrad でない場合は、照射角の値、オフセットの値を変えること。オフセット値は「3. 4 ミラー集光条件の確認」を参照のこと。

### 3. 3 ミラー反射率の角度依存性

ミラー反射率の角度依存性は、Pt、Rh において 10keV、13 keV、20 keV で行う。Pt の x 位置は 11.5mm、Rh の x 位置は -11.5mm である。ダイレクト光を用いて調整するときにはあらかじめリナグラフなどで光が抜けていることを確認しておくこと。

#### 操作

- 1) 第一ミラーを現状の位置 [X] から退避させる。
- 2) 希望エネルギー [E] にエネルギーを変更する。
- 4) 希望エネルギーに適した I D ギャップ値 [GAP] に I D ギャップをあわせる。
- 4) I D ギャップスキャンをしてピーク値 [GAP<sub>peak</sub>] を探す。
- 5) I D ギャップピークに I D ギャップをあわす。
- 6) 第一ミラーを元の位置に戻す。
- 7) Pt (Rh) でミラースキャンを行う。
- 8) コーティング膜を切り替える。
- 9) Rh (Pt) でミラースキャンを行う。
- 10) 1) ~ 9) をエネルギーを変えて行う。7) ~ 9) の Pt か Rh はどちらから先におこなっても良い。

#### 入力コマンド

```
movemirror 1 x [X+5]
moveE0 [E]
movegap [GAP]
gapscan [GAP-0.3] [GAP+0.3]
40 0.1
movegap [GAPpeak]
movemirror 1 x [X]
do macros/ mirro.mac*
movemirror 1 x -11.5 (or 11.5);
movemirror 2 x -11.5 (or 11.5)
do macros/ mirro.mac*
```

### 3. 4 ミラーの集光条件の確認

Rh コート、5、4、3、2mrad の条件で測定を行う。集光条件を確認する前には、ミラーの上下位置を変えてコーティングの最適場所を確認する（場所によって特に変化がない場合は、中心位置(-11.5mm)にあわす。）コートの幅は 19mm、コートの中心はミラー中心より Pt が+11.5mm、Rh が-11.5mm である。それぞれの照射角におけるミラーのオフセットは以下の通りである。

$$5\text{mrad} : 2 \times 5 \times 10^{-3} \times 1050 = \underline{10.5\text{mm}}$$

$$4\text{mrad} : 2 \times 4 \times 10^{-3} \times 1050 = \underline{8.4\text{mm}}$$

$$3\text{mrad} : 2 \times 3 \times 10^{-3} \times 1050 = \underline{6.3\text{mm}}$$

$$2\text{mrad} : 2 \times 2 \times 10^{-3} \times 1050 = \underline{4.2\text{mm}}$$

集光条件の確認は、第二ミラーをベントさせて（第一ミラーはベントさせない）それぞれの条件でスリットスキャンを行う。また、第一ミラーをベントさせて（第二ミラーはベントさせない）同様に行う。また、Pt コートでも行う場合は、 $x=11.5\text{mm}$  で同様の操作を行う。

#### 操作

#### 入力コマンド

- |   |  |
|---|--|
| 1) エネルギーは 10keV にあわす。   | <code>moveE0 10</code>   |
| 2) IDギャップ調整する。（「1. 原点出し」で求められている場合は、その値にあわす。まだの場合は、「1. 原点出し」参照のこと。    | <code>movegap 14.73</code>   |
| 2) スリットを横 0.2mm、縦 19mm にあわす。  | <code>islit 0.2 19</code>  |
| 3) ミラーの位置を確認しておく。   | <code>getmirror</code>   |
| 4) 希望の照射角 A にする。  | <code>movemirror 1 tz [tz1-A]</code><br><code>movemirror 2 tz [tz2-A]</code> |
| 5) ミラーのオフセットを照射角 A にあわせて調整する。オフセットは上参考のこと。                            | <code>movemirror 2 x [X<sub>2-center</sub>-Offset]</code>                    |
| 6) 第二ミラーがベントしているなら、0 にしておく。   | <code>movemirror 2 bend1 0;</code><br><code>movemirror 2 bend2 0</code>      |
| 7) isz スリットスキャンを行う。<br>dscan の代わりに ascan でもよい。<br>ベント量によってスキャン範囲は変える。 | <code>dscan isz -2 2 40 0.1</code>   |

8) スキャン結果のピーク位置と半値幅を記録しておく。

9) 第二ミラーをベントさせる。ベント1、2 を両方動かすこと。 `movemirror 2 bend1 2000;`  
`movemirror 2 bend2 2000`

10) 7) を bend1, bend2=2000, 4000, 6000, 8000, 10000, 12000, 14000, 16000 で同様に行う。

11) ミラーのベント量を0に戻す。一度に0にせず、段階を踏んでベントさせる。 `movemirror 2 bend1 12000;`  
`movemirror 2 bend2 12000;`  
`movemirror 2 bend1 8000;`  
`movemirror 2 bend2 8000;`  
`movemirror 2 bend1 4000;`  
`movemirror 2 bend2 4000;`  
`movemirror 2 bend1 0;`  
`movemirror 2 bend2 0`

12) それぞれの照射角およびベント量でのピーク位置・半値幅の関係をグラフ化する。

\* : ベント量の変化は 16000→0 と下げて行っても良い。



## 3. 5 ビームプロファイルの測定 (ミラー位置依存性)

Rh、Pt のともに行う。第一ミラー固定、第二ミラー固定で行う。

操作入力コマンド

- |   |  |
|---|--|
| 1) isz スリットスキャンを行う。<br>スキャン範囲は場合によって異なるので、毎回範囲を確かめて決定すること。dscan の代わりに絶対位置を利用する ascan を用いても良い。   | dscan isz -2 2 40 0.1                              |
| 2) 第一ミラーの上下位置を変えながら isz スリットスキャンを行う。-11.5mm から上下に 2mm ずつ 6mm 動かす。(中心位置より 2, 4, 6, -2, -4, -6mm) | movemirror 1 z [-11.5-2];<br>dscan isz -2 2 40 0.1 |
| 3) 第一ミラーを-11.5mm に戻す。   | movemirror 1 z -11.5                               |
| 4) 第二ミラーの上下位置を変えながら isz スリットスキャンを行う。-11.5mm から上下に 2mm ずつ 6mm 動かす。(中心位置より 2, 4, 6, -2, -4, -6mm) | movemirror 2 z [-11.5-2];<br>dscan isz -2 2 40 0.1 |
| 5) 第二ミラーを-11.5mm に戻す。   | movemirror 2 z -11.5                               |
| 6) 第一・第二ミラーで適当な位置[Z1], [Z2]があれば、その位置にミラーを動かす。   | movemirror 1 z [Z1];<br>movemirror 2 z [Z2]        |

### 3. 6 ビームプロファイルの測定 (ベント量依存性)

ビームプロファイルの測定は、Rhコートで行った。ビームプロファイルは、①ミラー無し (ダイレクト)、②ミラー有り・集光無し、③ミラー有り、集光有りの三種類を測定し、ビームの形状を確認した。③の集光有りは、ミラーをベントさせている。ベント量は、集光条件の確認によって得られた最適条件のベント量である。また、③のスキャン条件は、②のスキャン条件とほぼ同じである。以下に各測定手順を示す。

#### [ミラー無し (ダイレクト)]

操作	入力コマンド
1) 第一ミラーを退避させる。退避量は使用位置[X]より+5mm 動かす。	movemirror 1 x [X+5]
2) スリットを横 1mm、縦 10mm にする。 (スリット位置の確認は「islit」)	islit 1 10
3) Z 方向にスリットスキャンを行う。	dscan isz -3 3 40 0.1
4) ピークセンターの位置[ISZ <sub>center</sub> ]をチェックする。また、ピークの大体の幅もチェックしておく。	wm isz
5) ピークセンターの位置に isz をあわせる。	mv isz [ISZ <sub>center</sub> ]
6) スリットを横 10mm、縦 1mm にする。	islit 10 1
7) 今度は X 方向にスリットスキャンを行う。	dscan isx -3 3 40 0.1
8) ピークセンターの位置[ISX <sub>center</sub> ]をチェックする。また、ピークの大体の幅もチェックしておく。	wm isx
9) ピークセンターの位置に isx をあわせる。	mv isx [ISX <sub>center</sub> ]
10) スリットを横・縦 0.2mm にする。	isilit 0.2 0.2
11) ISZ <sub>center</sub> 、ISX <sub>center</sub> 中心として両側約 3mm 程度の幅 (4)、8) で確認したピークの幅を参考にする) をもたしてスリットのメッシュスキャンを行う。	mesh isz [ISZ <sub>center</sub> -3] [ISZ <sub>center</sub> +3] 40 isx [ISX <sub>center</sub> -3] [ISX <sub>center</sub> +3] 40 0.1

#### [ミラー有り・集光無し (bend=0)]

操作	入力コマンド
1) ダイレクトのビームプロファイルを測定していた場合は第一ミラーを入れる。	movemirror 1 x [X]

- 2) [ミラー無し (ダイレクト)]でおこなった  
2) ~11) を行う。

[ミラー有り・集光有り (bend=13000) ]

操作

- 1) スリットを横 0.2mm、縦 19mm にする。  
(スリット位置の確認は「islit」)
- 2) ミラーのベント量を変える。一度に  
13000 にせず、5000→10000→13000 と  
順にベントさせる。

入力コマンド

islit 0.2 19

```
movemirror 2 bend1 5000;
movemirror 2 bend2 5000;
movemirror 2 bend1 10000;
movemirror 2 bend2 10000;
movemirror 2 bend1 13000;
movemirror 2 bend2 13000
```

- 3) [ミラー無し (ダイレクト)]でおこなった  
2) ~11) を行う。

- 4) スリットを元の横 0.2mm、縦 19mm に戻す。

islit 0.2 19

- 5) 第二ミラーのベント量を 0 に戻す。

```
movemirror 2 bend1 10000;
movemirror 2 bend2 10000;
movemirror 2 bend1 5000;
movemirror 2 bend2 5000;
movemirror 2 bend1 0;
movemirror 2 bend2 0
```

### 3. 7 1 回反射のビーム測定

入射光を第一ミラー、第二ミラーの一枚ずつで受けてそれを後ろで測定する。第二ミラーの測定時には、第一ミラーを退避させて第二ミラーを光軸上に移動させて行う。はねる方向が第一ミラーと異なるので、スリット・PIN 検出器の位置を変える必要も生じる。

#### [第一ミラーの1回反射ビーム測定]

##### 操作

- 1) スリットを調整する。
- 2) 第一ミラーを $[X_{M1}]$ に移動させる。
- 3) 第一ミラーをビームに平行に合わせる。
- 4) isz スリットスキャンを行う。  
スキャンの範囲は変わる可能性がある。
- 5) tz を $-0.03 \sim -0.18$ まで $-0.03$ ずつ変える。
- 6) 第一ミラーを元の tz に戻す。

##### 入力コマンド

```
islit 0.2 19
movemirror 1 x  $[X_{M1}]$ 
movemirror 1 tz  $[TZ_1]$ 
ascan isz -6 4 40 0.1
movemirror 1 tz  $[TZ_1-0.03]$ 
movemirror 1 tz  $[TZ_1]$ 
```

#### [第二ミラーの1回反射ビーム測定]

##### 操作

- 1) PIN 検出器をホール側に約 10mm 動かす。
- 2) 第一ミラーは退避させる。  
退避の量は任意。
- 3) 第二ミラーを $[X_{M2}]$ に移動させる。
- 4) 第二ミラーをビームに平行に合わせる。
- 5) isz スリットスキャンを行う。  
スキャンの範囲は変わる可能性がある。
- 6) tz を $0.03 \sim 0.18$ まで $0.03$ ずつ変える。
- 7) 第二ミラーを元の tz に戻す。
- 8) PIN 検出器をリング側に約 10mm 動かす。

##### 入力コマンド

```
movemirror 1 x 10
movemirror 2 x  $[X_{M2}]$ 
movemirror 2 tz  $[TZ_2]$ 
ascan isz -6 4 40 0.1
movemirror 2 tz  $[TZ_2+0.03]$ 
movemirror 2 tz  $[TZ_2]$ 
```

### 3. 8 調整アドバイス

#### PC がコマンドを受け付けない時の対処

##### 操作

- 1) WS との接続を切る。
- 2) WS との再接続をする。
- 3) ウィンドウ内の「必殺メイン」を押す。
- 4) ウィンドウ内の「そうじ」を押す。
- 5) ウィンドウ内の「メイン」を押す。

##### 入力コマンド

close\_WS  
open\_WS

#### PIN で信号が飽和する時の対処

- 1) アルミ板もしくはアルミ箔を入れる。

#### ダイレクト光が上手く出ない原因

- |                             |         |
|-----------------------------|---------|
| 可能性 1) 調整手順をどこかで間違えた。       |         |
| 可能性 2) 実験ハッチ 1 モノクロがあたっている。 | →移動させる。 |
| 可能性 3) 実験ハッチ 2 ミラーがあたっている。  | →移動させる。 |
| 可能性 4) 実験ハッチ 3 配管があたっている。   | →移動させる。 |
| 可能性 5) カレントアンプの設定がよくない。     | →設定し直す。 |
| 可能性 6) そのほか                 |         |

#### ミラー反射光が上手く出ない原因

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 可能性 1) スリットの幅があっていない。                         | →スリット幅を広げる。                        |
| 可能性 2) スリットの位置がよくない。                          | →スリットスキャンで中心位置をあ<br>わす。            |
| 可能性 3) スリット前の配管があたっている。                       | →配管の高さ・左右等を調整する。                   |
| 可能性 3) tz の回転方向が間違っている。<br>(tz は光軸に対して時計回りが+) | →ミラーパラメータを確認する。                    |
| 可能性 4) PIN 検出器の位置を変えていない。                     | →PIN 検出器をホール側に<br>10mm 動かす。        |
| (1 回反射測定 of 第二ミラーの場合)                         |                                    |
| 可能性 5) 原点出し時のパラメータが間違っている。                    | →前回パラメータと大きく異なる<br>パラメータを再計算・確認する。 |
| 可能性 6) 原点出し時のパラメータがおかしかった。                    | →前回パラメータと大きく異なる<br>パラメータを取り直してみる。  |

## その他

- ベント 5000 におおよそ 6 分半かかる。

- ミラー調整用マクロ

```
位置を得る  getmirror [1|2] [x|z|tx|tz|bend1|bend2]
絶対移動   movemirror [1|2] [x|z|tx|tz|bend1|bend2] destination
相対移動   rmovemirror [1|2] [x|z|tx|tz|bend1|bend2] relative_position
絶対スキャン amirrorscan [1|2] [x|z|tx|tz|bend1|bend2] · start finish
                                                    interval-time
相対スキャン dmirrorscan[1|2] [x|z|tx|tz|bend1|bend2] · start finish
                                                    interval-time
```

```
スリット位置の確認      islit
isz もしくは isx の絶対位置  wm isz (isx)
```

- マクロ(mirror.mac)

```
def mirrorscan '
  if ($# != 4) {
    print "Usage: mirrorscan start finish intervals time"
    exit
  }
  {_s1 = $1; _f1 = $2; _n1 = int($3); _ctime = $4}
  if (_n1 <= 0) {
    print "Intervals <=0"
    exit
  }
  HEADING = sprintf("mirrorscan %g %g %d %g", $1, $2, $3, $4)
  _d1 = (_f1 - _s1) / _n1++
  _cols = 1
  X_L = sprintf("angle (arad)"); Y_L = cnt_name(DET); _sx = _s1; _fx = _f1
  _styp= 1|(1<<8)
  FPRNT = sprintf(" angle")
  VPRNT = FPRNT; VPRNT = FPRNT
  scan_head
  def _scan_on \
  (
    local an
    for(; NPTS < _n1; NPTS++){
      an = _s1 + NPTS * _d1
      movemirror 1 tz -1*an-0.52345 1
      movemirror 1 x 1.2792 1
      movemirror 2 tz -1*an+0.219 1
      movemirror 2 x 7.3307-1050*2*an/1000 1
      FPRNT= sprintf("%g ",an)
      VPRNT = FPRNT; VPRNT = FPRNT
      scan_loop
      scan_data(NPTS, an)
      scan_plot
    }
  )
  scan_tail
  \
  _scan_on

mirrorscan 0.4 6.8 32 1
undef mirrorscan
```

## 4. ミラー調整結果

## 4. 1 原点出し

調整手順に従い、原点出しを行った。両者のビームが半割りになる位置は、 $TZ_{M1-1} = -4.7537\text{mrad}$ 、 $TZ_{M1-2} = 3.4967\text{mrad}$ であった。その平均  $TZ1 = -0.6285\text{mrad}$  を回転角  $\theta z$  の原点とみなした。この回転角で、次に  $x$  方向のスキャンを行い、ビームが半分に分かれる位置として  $X1_{\text{center}} = -12.942$  が得られた。これをミラーの水平位置の原点と決めた。同様の調整を下流側の第二ミラーについてもおこない、回転角の中心  $TZ2 = 0.0118\text{mrad}$  を決定した。続いて、第二ミラーの水平位置原点  $X2_{\text{center}} = 18,138$  が求められた。照射角は  $5\text{mrad}$  である。

第一ミラーと第二ミラーの間隔は設計値により、 $1050\text{mm}$  である。したがって、ミラーの照射角  $\theta$  に対して、第一ミラーの水平位置  $X1_{\text{center}}$ 、回転角  $\theta z1$ 、第二ミラーの水平位置  $X2_{\text{center}}$ 、回転角  $TZ2$  は、以下のように設定すればよい。

$$\begin{aligned} X1_{\text{center}} &= -12,942 \text{ mm} \\ TZ1 &= -\theta - 0.6285 \text{ mrad} \\ X2_{\text{center}} &= 18,138 - 1.05 \times 2\theta \text{ mm} \\ TZ2 &= -5 + 0.0118 \text{ mrad} \end{aligned}$$

以上の方法による原点出しが妥当であるかどうかの確認をおこなった。照射角が  $5\text{mrad}$  の場合、上の式に基づいて、 $x1_{\text{center}} = -12,942$ 、 $\theta z1 = -5.6285$ 、 $x2_{\text{center}} = 7.638$ 、 $\theta z2 = -4.98885$  に設定し、第一ミラー、第二ミラーの  $x$  移動にともなう反射強度の変化を測定した (図 8)。

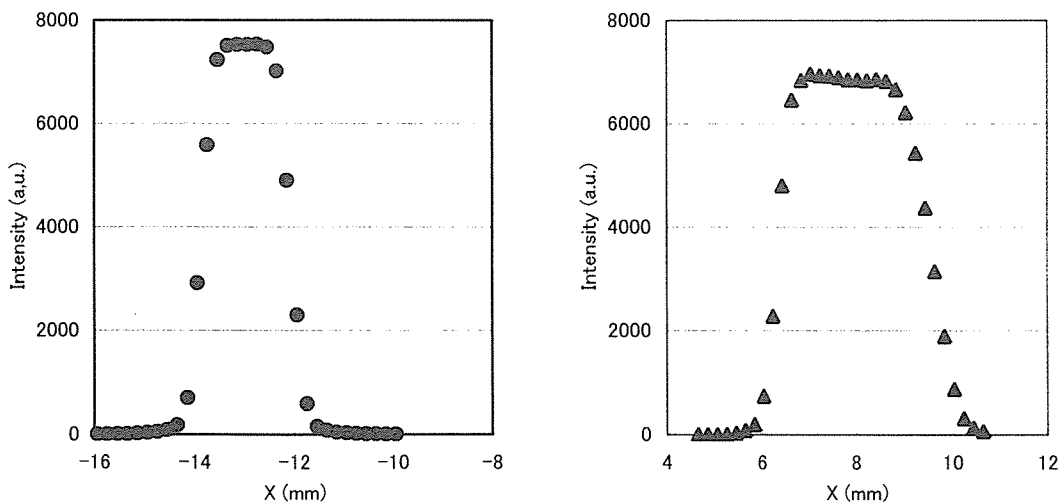


図 8 第一ミラー(左)、第二ミラー(右)の  $x$  移動にともなう反射強度の変化。

いずれの場合も、中心値は設定値と一致したので、 $x$  移動の原点は正しく決められていることがわかった。しかし、半値幅は第一ミラーと第二ミラーとで異なる値を示した。ミラー長 70cm と照射角 5mrad を考えれば、第二ミラーの半値幅 3.25mm は合理的な値であるが、第一ミラーの場合の半値幅 1.82mm は小さすぎる値である。

#### 4. 2 反射率の角度依存性

ミラーの臨界角を確認する目的で、第一・第二ミラーの回転角と水平位置とを同期的に移動させながら、第一・第二ミラーの反射強度の角度依存性を測定した。10keV、13keV、20keV の 3 種類の X 線エネルギーと、Pt (図 9)、Rh (図 10) の 2 種類の反射コート材について調べた。反射コート材はミラーの  $z$  移動によって切り替えることができる。Pt は  $z=11.5\text{mm}$ 、Rh は  $z=-11.5\text{mm}$  である。フロントエンドスリットの幅は 1mm とした。

2mrad以下の照射角で強度が減少することがわかった。これは、ミラーからビームがはみ出すことによる。13keV以上のエネルギーでは、Ptの吸収により、臨界角が不明瞭になることがわかった。10keVの場合、Rhミラーを照射角5mradで使えば、Si原子の電子密度分布が完全な球対称でないために生じる二倍高調波20keVの反射率は0.5%以下である。これより、高調波除去の目的は十分に達成できることがわかった。

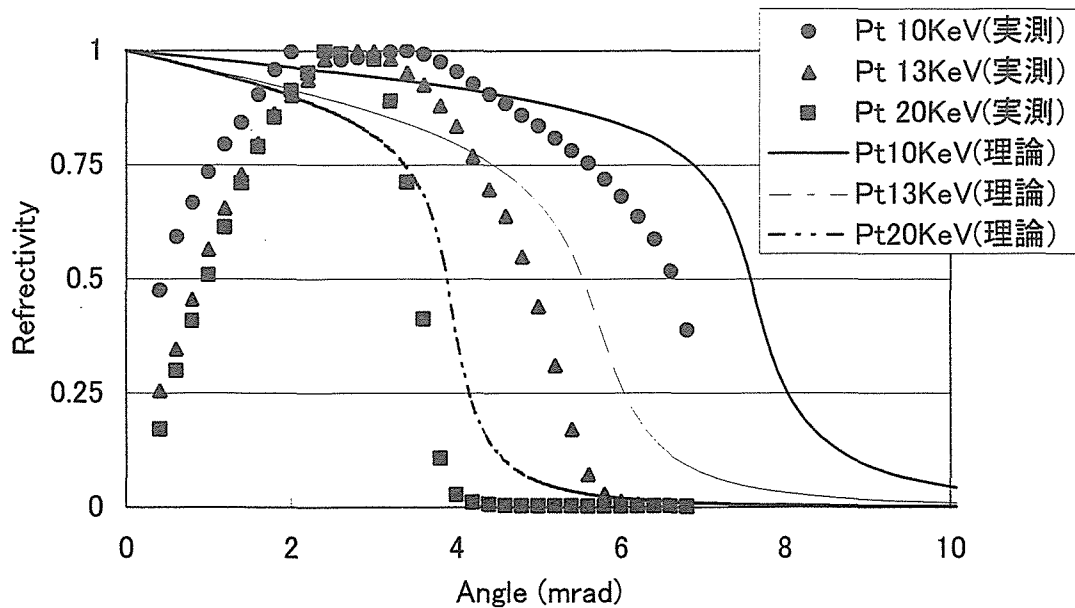


図 9 Pt コート材でのミラー反射率の角度依存性



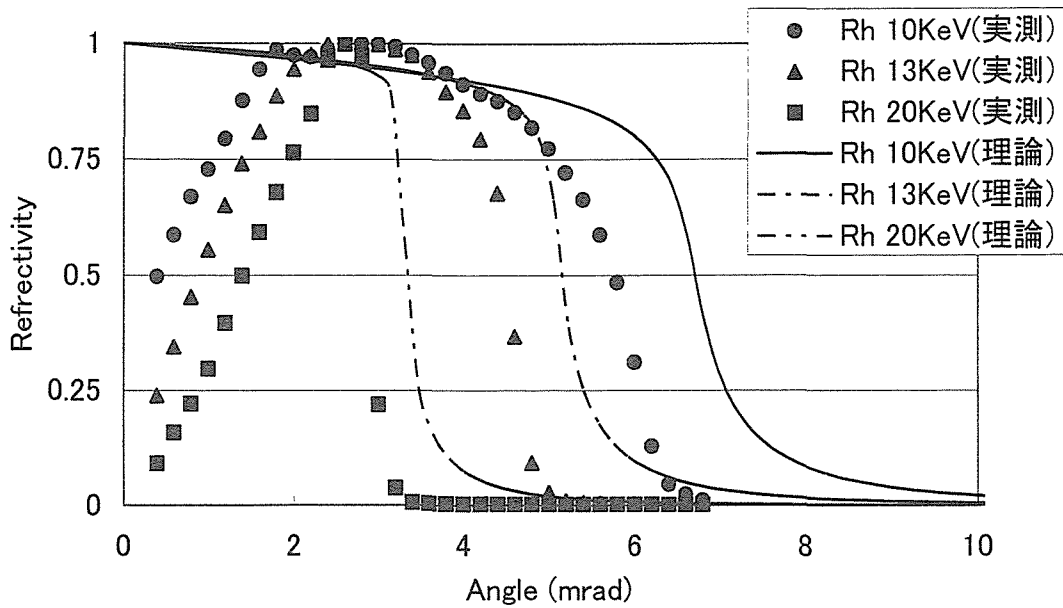


図 10 Rh コート材でのミラー反射率の角度依存性。

次に、反射材の充填率を見積もった。反射率の測定結果から、臨界角の波長依存性をプロットしたものが図 11 である。臨界角  $\alpha_c$  は、X 線の波長  $\lambda$ 、コーティング材の固有の電子密度  $\rho$ 、充填率  $\varepsilon$  の関数として、以下の式で表される。

$$\alpha_c = \sqrt{(\gamma_e \varepsilon \rho / \pi) \cdot \lambda}$$

$\gamma_e$  は古典電子半径である。この式より、図 11 の直線の傾きから、Pt および Rh の充填率が計算できる。傾きは Pt、Rh のそれぞれについて 4.95、4.59 である。Pt の電子密度  $5.18/\text{\AA}^2$  および Rh の電子密度  $3.28/\text{\AA}^2$  を考慮すると、Pt と Rh の充填率はそれぞれ 54.8%、73.6% と求められた。Pt の充填率が低いために、Rh に比べてもあまり臨界角が大きくなっていない。したがって、反射コート材としてはいずれのエネルギーにおいても Rh を選択するほうがよい。

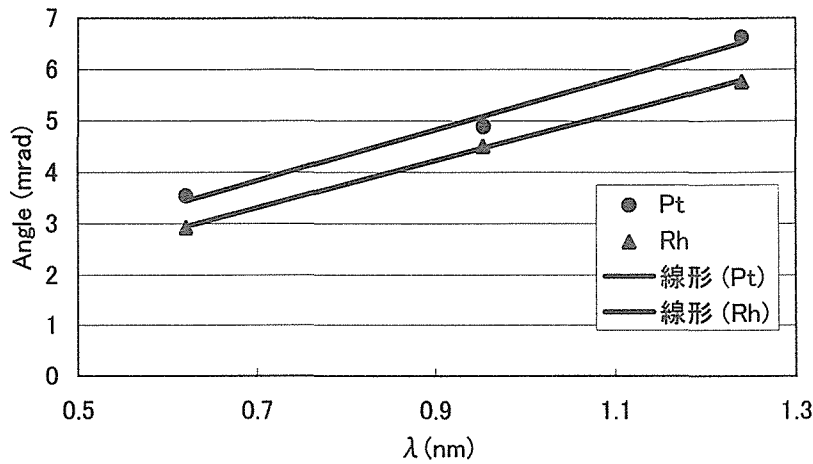


図 11 Pt、Rh の臨界角の波長依存性。

#### 4. 3 ミラーの集光条件の確認

第一ミラー・第二ミラーを曲げて、測定点におけるビームサイズとピーク強度の変化を測定した(図 12, 13)。実験ハッチ 3 の単管の出口に横幅 0.2mm のスリットを設置し、水平ステージを使ってスリットスキャンすることによってビームサイズを測定した。この測定場所は、本来の試料位置より、約 2m 上流である。X 線の波長は 10keV である。ミラーには曲げのための軸が二つ (bend1、bend2) についているが、ここでは、両者を対称に曲げることにした。

第一ミラーは、検出器前のスリットは 0.2mm (水平方向) × 19mm (垂直方向) に設定した。ミラーは Rh 反射コート材にセットしてあり、照射角は 5mrad としている。

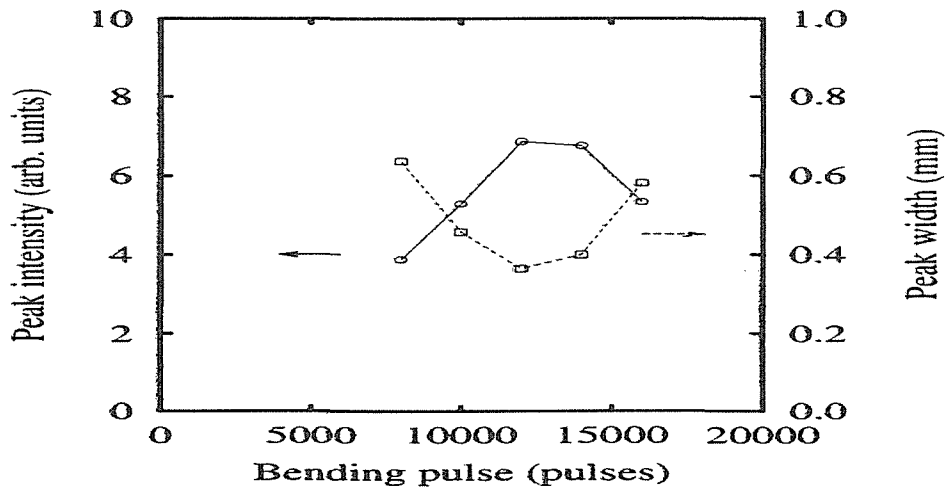


図 12 第一ミラーの集光特性。実線：ピーク強度の変化、破線：ビームサイズの変化。

第二ミラーでは、照射角を 2、3、4、5mrad と変化させて測定した。その結果、5mrad では 12000 ないし 14000 パルスで半値幅はおよそ 1/3 となり、これに対応して強度は 3 倍になった。

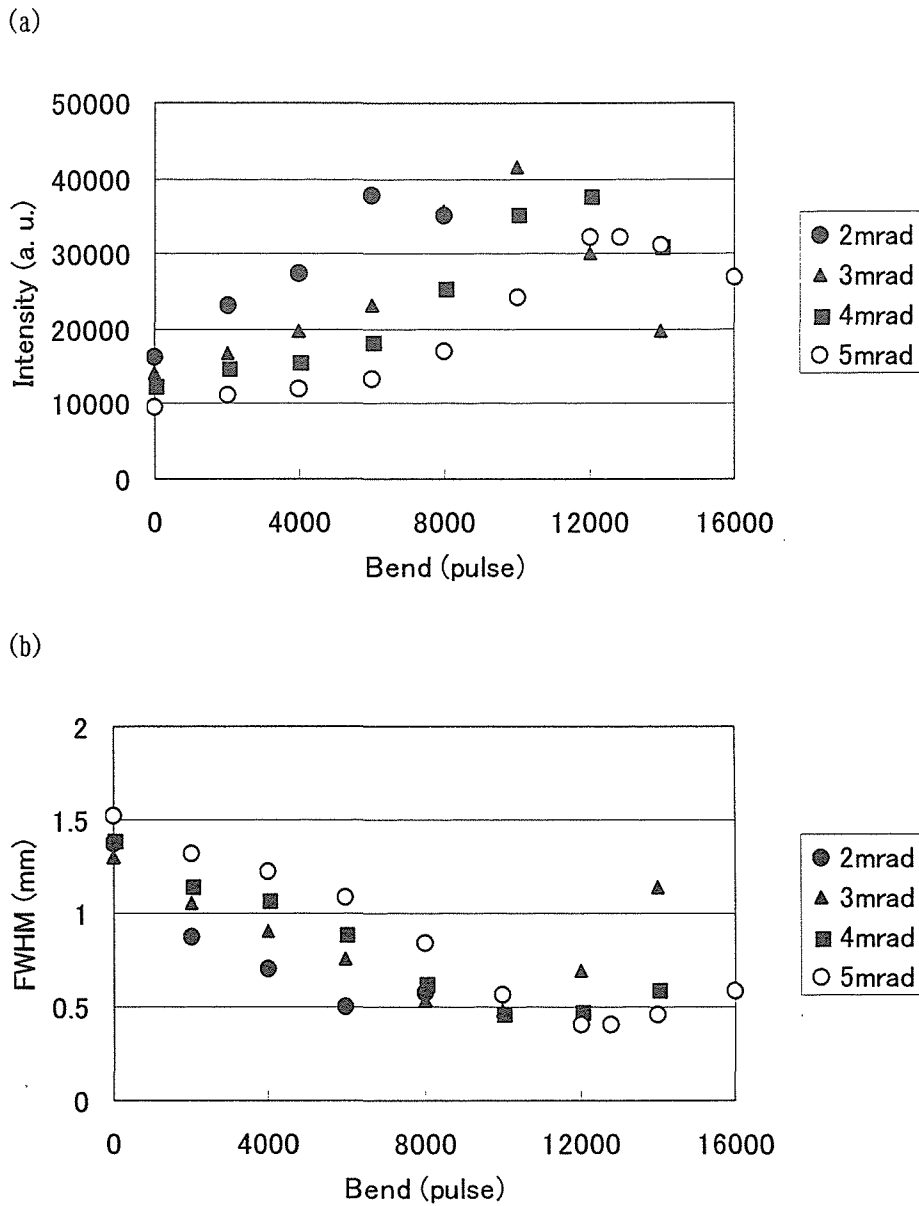


図 13 第二ミラーの集光特性。(a) ピーク強度の変化と(b) ビームサイズの変化。

集光条件におけるピーク幅は第二ミラーを曲げたときの値と同等であり、そのときのプロファイルも単一のピークからなる。したがって、第一ミラーの歪は集光した時には影響が出ていない。

この結果より、曲率半径（ベント量）とミラーの照射角の関係がわかる。ミラーの曲率半径を  $R$ 、照射角を  $\theta_0$ 、光源から第二ミラーまでの距離  $f_1$  ( $=45960\text{mm}$ )、第二ミラーから集光点までの距離  $f_2$  ( $=20620\text{mm}$ ) とした時 (図 14[3])、これらは次に式で示される。

$$R = \frac{2 \cdot f_1 \cdot f_2}{(f_1 + f_2) \cdot \theta_0} \quad (1)$$

また、ミラーのベント量をパルス量  $p$  で表すと、

$$R = \frac{\alpha}{p} \quad (2)$$

とできる。ただし  $\alpha$  は定数である。これより、

$$p = \alpha \cdot \frac{(f_1 + f_2)}{2 \cdot f_1 \cdot f_2} \cdot \theta_0 \quad (3)$$

となり、 $p$  は傾き  $(f_1 + f_2) / (2 \cdot f_1 \cdot f_2) \cdot \alpha$  をもつ直線で示することができる。よって、図 15 より傾き  $(f_1 + f_2) / (2 \cdot f_1 \cdot f_2) \cdot \alpha$  は 2166.1 であることから  $f_1$ 、 $f_2$  を代入して計算すると、 $\alpha$  は  $6.17 \times 10^7$  となる。

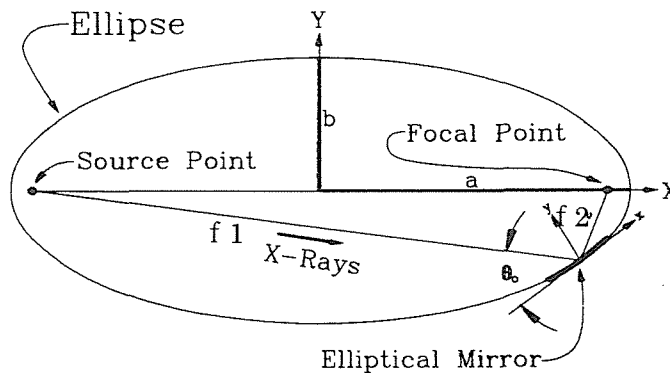


図 14 ミラー原理図[3]

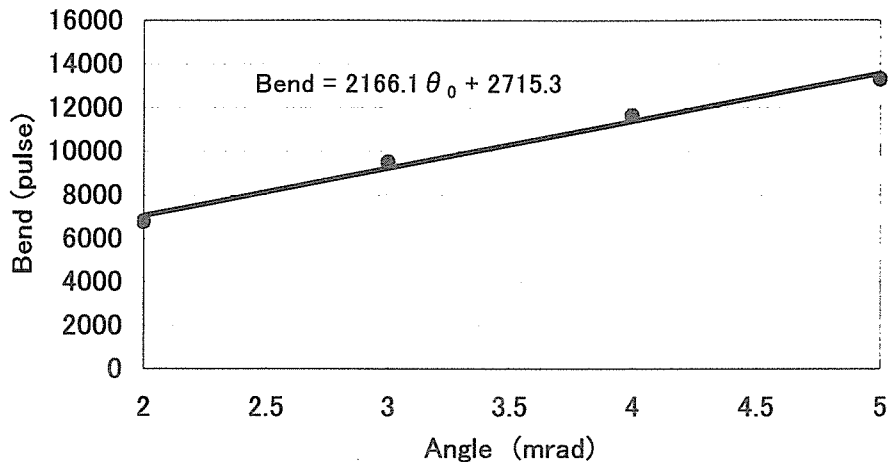


図 15 照射角とベント量の関係。図 13(a) のフィッティングラインによって得られた強度最大となるパルス値を用いている。

#### 4. 4 ビームプロファイルの測定

単管の出口においたスリットを 0.2mm 角に絞り、二次元のスキャンをすることによって、集光前後でのビーム形状を測定した。その結果を図 16 に示す。ピーク的位置については、3 つのグラフは共通であるのに対し、強度は任意のスケールで描いてあるので、ビーム強度を直接比較することはできない。平面のままのミラーを通したビームのプロファイル (図 16 (b)) では、水平方向に二つのピークがあることがわかる。ミラーを通さない場合には、図 16 (a) に示すようにピークがひとつであることから、ピークが二つ生じる原因がミラーにあることは確かである。

二つに分かれたピークは、集光させた状態ではひとつに集まり、図 16 (c) に示したように強いほうのピーク位置に 1/3 程度の幅のビームを作る。縦方向のビームサイズはほとんど変化していない。

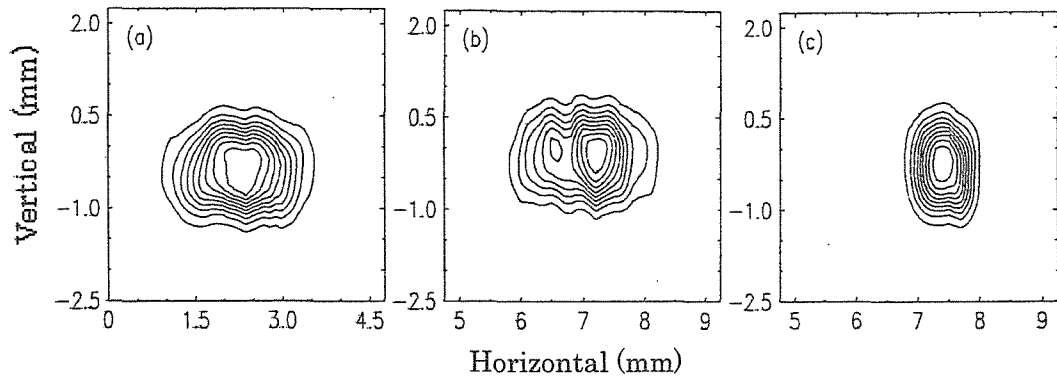


図 16 集光前後でのビームプロファイル。(a)ミラーに当てる前。(b)集光前。(c)集光後。強度は任意スケールで描いてあるので、直接の比較はできないことに注意。

第一ミラー・第二ミラーを入れ替えて、集光前条件でのビームプロファイルを測定した(図 17)。ビームは入れ替え前と変わらずに二つのピークを持っていた。ただし、ピークの強度は左右が反転した形になっている。

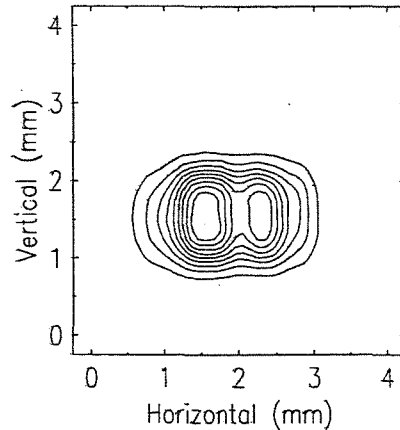


図 17 第一ミラー・第二ミラー交換後のビームプロファイル。集光前。

#### 4. 5 1回反射のビーム測定

第一ミラーおよび第二ミラーのそれぞれについて、1回反射させたときのビーム位置およびプロファイルを調整手順に従い測定した。反射コート材は、Rh ( $z=-11.5\text{mm}$ )を選んだ。第一ミラー、第二ミラーによる反射ビームのプロファイルを照射角 $\theta=0\sim 0.18\text{mrad}$ の範囲で変化させた時の結果を図 18 に示す。第二ミラーからの反射に比べ、第一ミラーからの反射ピークの幅が広がっている。さらに、第一ミラーからの反射は、複数に分裂したピークからなっているようである。

これらのピークのダイレクトビームから計った位置  $z$  を照射角  $tz$  に対してプロットし、(4)式でフィッティングすることにより、 $tz$  軸の原点  $tz_0$  が求められる。

$$x = 2L \cdot a(tz - tz_0) \tag{4}$$

ここで、L はミラー中心から測定点までの距離である。a は tz の真の回転角と公称値との比で、フィッティングのパラメータとした。フィッティングの結果、第一ミラーについて、 $a=1.00$ 、 $tz_0=0.007$ 、第二ミラーについて、 $a=0.94$ 、 $tz_0=0.024$  と求められた(図 19)。したがって、本調整手順による tz の誤差はここで求められた  $tz_0$  の値の程度ということが出来る。

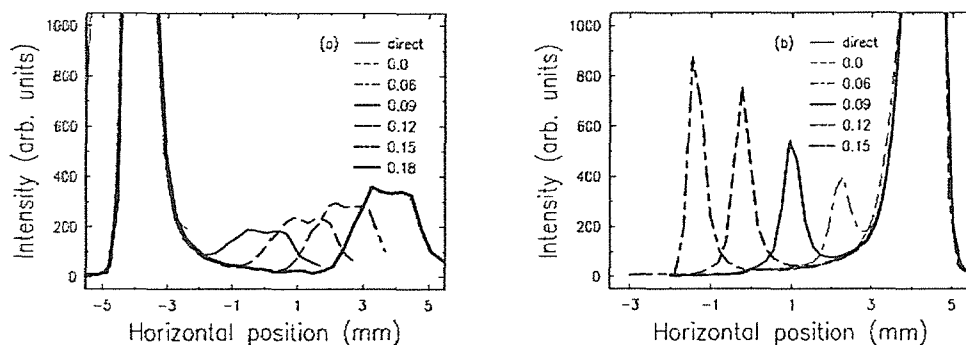


図 18 一回反射のビーム測定。(a)第一ミラー、(b)第二ミラー

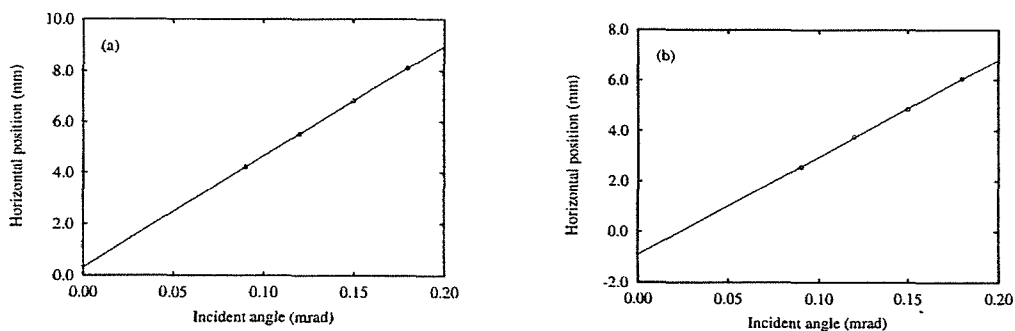


図 19 照射角に対する反射ビームの位置変化。(a)第一ミラー、(b)第二ミラー。

第一ミラー・第二ミラーを交換して一回反射時のビーム位置を測定した(図 20)。第一ミラーからの反射ピークが、第二ミラーの反射に比べて広がっていること、複数に分かれたピークをもつことがわかる。すなわち、第一ミラーの方が歪を持っている。

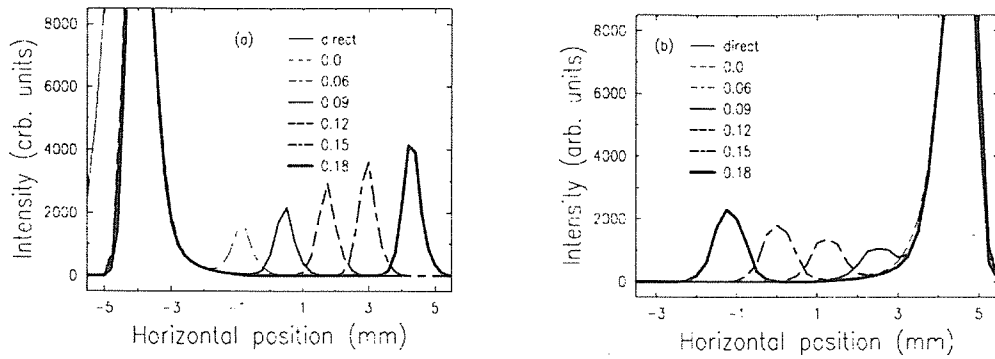


図 20 第一ミラー・第二ミラー交換後の一回反射のビーム測定。  
(a)第一ミラー、(b)第二ミラー

4. 6 ビームプロファイルのミラー位置依存性

ミラー上で X 線があたる位置によって、反射ビームのプロファイルがどのように変わるかを調整手順に従い測定した(図 21)。第二ミラーの z 方向を走査した図 21(a)のプロファイルがほぼ一定であるのに対し、第一ミラーの走査による図 21(b)では、z の位置によって、プロファイルが左右に 1mm 以上の幅をもつ。ミラーの下半分にあたる Pt コートの部分についても、Rh コート部分と同様のビームプロファイルの変化があった。

第一ミラー・第二ミラー交換後の位置依存性は、第二ミラーの z 方向を走査した図 22(a)のプロファイルがほぼ一定であるのに対し、第一ミラーの走査による図 22(b)では、z の位置によって、プロファイルが左右に 1mm 以上の幅にわたって移動していることがわかる。反射コート材が Pt の部分についても、Rh コート部分と同様のひずみが確認された(図 23、24)。

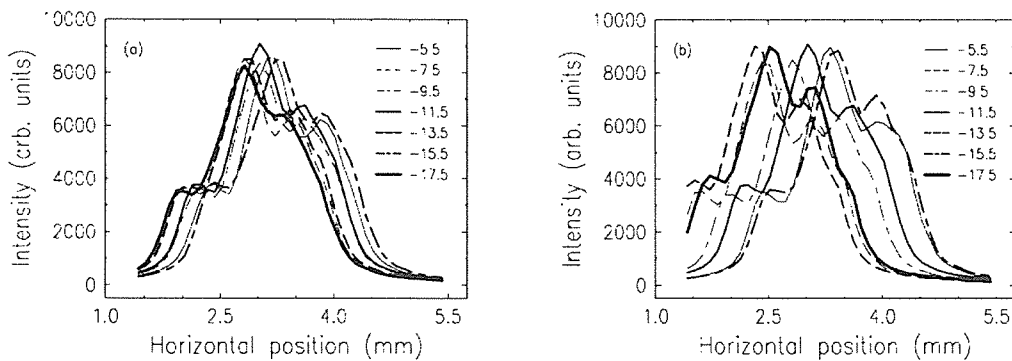


図 21 Rh 反射コート材範囲のミラーの z 方向位置とビームプロファイルの関係。(a)第一ミラー固定、(b)第二ミラー固定。



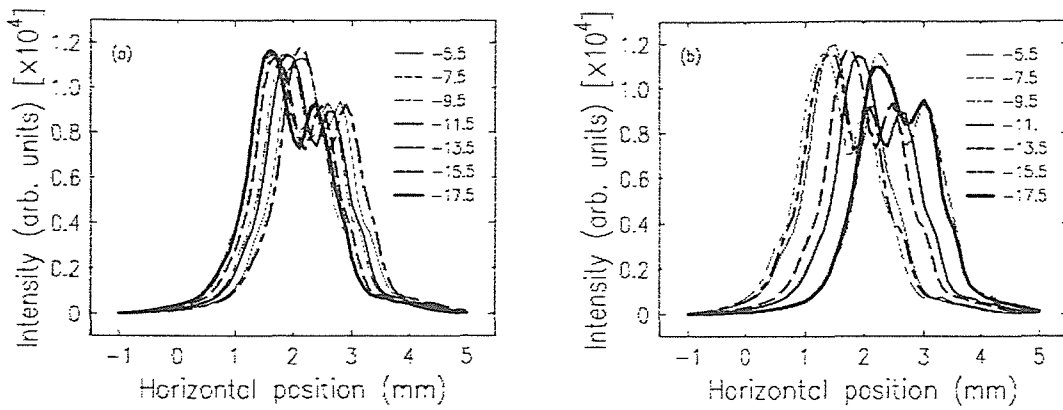


図 22 第一ミラー・第二ミラー交換後の Rh 反射コート材範囲のミラーの z 方向位置とビームプロファイルの関係。(a)第一ミラー固定、(b)第二ミラー固定。

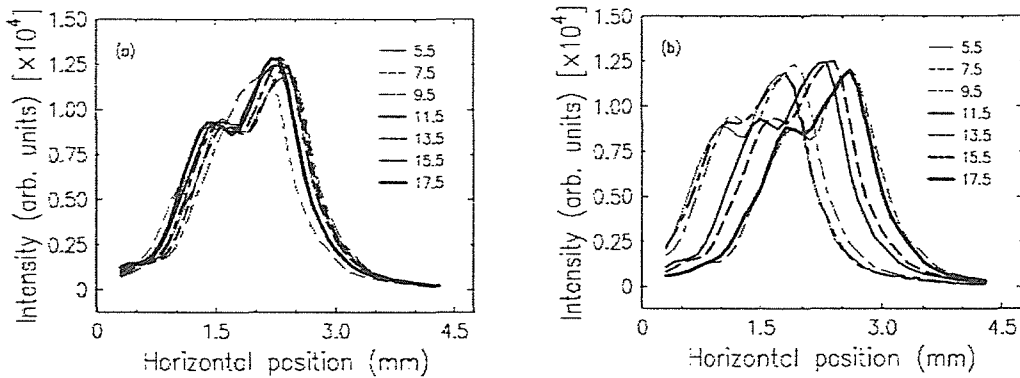


図 23 Pt 反射コート材範囲のミラーの z 方向位置とビームプロファイルの関係。(a)第一ミラー固定、(b)第二ミラー固定。

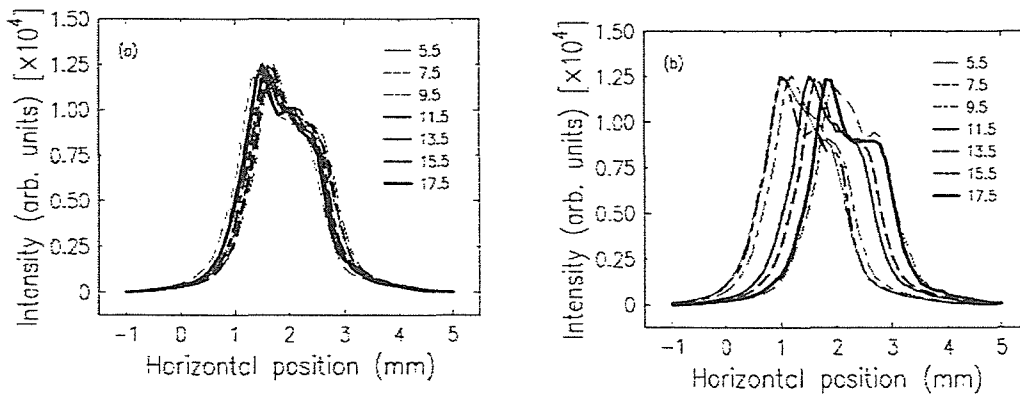


図 24 第一ミラー・第二ミラー交換後の Pt 反射コート材範囲のミラーの z 方向位置とビームプロファイルの関係。(a)第一ミラー固定、(b)第二ミラー固定。

## 5. 考察

今回の結果より、ミラーの集光と高調波除去が良好であることが確認された。しかし、問題点として集光されていないときのビームプロファイルが2つのピークを持つこと、ミラー位置によってプロファイルの位置が変化すること、オフセット値の実測値と計算値に違いがあることがわかってきた。ミラー表面に何らかの欠陥があるとすれば、ミラーの反射光のプロファイルを詳細に調べることで手がかりがつかめる可能性がある。

ミラーのビームプロファイルを考察してみると、(1) 一回反射のビーム測定の結果より得られた第一ミラーからの反射ピークの幅が広いこと、(2) 集光していない条件でミラーのビームプロファイルが二つに割れていること、(3) 第一・第二ミラーの位置交換後においても、下流に取り付け直された第一ミラーの反射ピークのほうが広い幅をもち、ミラーの交換と同時にビームプロファイルの特徴が入れ替わったこと、以上3点のことから、第一ミラーが完全な平面ではなく、歪を持っている可能性が高い。

位置変化によるビームプロファイルの測定結果は、前回と同様、第一ミラーを上下させた場合のほうがピークの移動が顕著であった。この原因が、上記のミラーのひずみ(ねじれ)が原因であるとも考えることもできる。Rh、Ptのどちらにおいても見られることや、左右のふれが1mm以上であることを考慮した歪の量は0.02-0.04mrad(5秒角)程度となる。しかし、この推測された歪の量はミラーの納入時の試験成績書[2]によるスロープエラーの値(数 $\mu\text{m}$ の範囲内)に比べて一桁大きく、このような大きなスロープエラーが実際に存在するとは考えにくい。よって、歪がプロファイルの左右移動の直接的原因ではなさそうである。そこで、詳細にピークの移動の様子をみると、ピークの形状自体はほとんど変わらず、平行移動しているようである。また、上下方向の移動に対して、ピークは一定の方向に動くのではなく、1mm前後の範囲内で、不規則に往復しているようである。この特徴は、ミラーの入れ替えにかかわらず上流側のミラーで顕著に見られる。したがって、ここに見られるピークの移動の主原因は、ミラーのひずみではなく、上流ミラー調整機構のヨーイングと考えるのが妥当である。

二枚のミラーで反射され、実験ハッチに通ってきたビームと、ダイレクトビームとの間のオフセットが、照射角5mradの場合、ミラーによるビームの平行移動距離は計算上10.5mmであるのに対し、ミラーの幾何学的な配置から計算される値と5mm程度一致しなかった。各ミラーで一回だけ反射させたビームの位置の移動量とミラーから測定点までの距離から $\theta$ の量を見積もると、 $\theta$ 軸の原点の誤差は $\sim 0.02\text{mrad}$ と見積もられた。このため、この誤差とミラーから測定点までの距離28mとを考慮すれば、0.8mm程度のビームの移動でしかない。すなわち、今回の結果からはミラーの振り角 $\theta$ の原点に誤差があることがオフセット値のずれの原因であると断定できない。今後も、オフセット値のずれの原因を調査する必要があるだろう。

## 6. 結論

ミラー評価の結果、集光によって約3倍の強度、3分の1の半値幅を持つX線がBL11XU実験ハッチ3において得られた。10keVの場合、Rhミラーを照射角で使えば、Si原子の電子密度分布が完全な球対称でないために生じる二倍高調波20keVの反射率は0.5%以下であり、高調波除去も良好であった。これより、導入されたミラーを10keVにおいて十分に性能を満たす条件で使用できるといった。ただし、実験に支障が無い範囲内で、第一ミラー本体がひずんでいることと上流側のミラー調整機構のヨーイングが下流側に比べて大きいことの問題点があることもわかった。オフセット値が計算値と異なる問題も残されている。今後、さらなるミラーの特性評価を行い、これらの問題点を検証していく必要があるだろう。

また、ミラー調整方法の確立により、実験開始時に確実に速やかにミラーを調整することが可能になった。体系的なマニュアルの作成によってミラー使用経験の少ない実験者であっても以前に比べて容易にミラー調整できるようになった。

## 謝辞

日本原子力研究所放射光科学研究センター・菖蒲敬久氏にはミラー評価に関して有意義なコメントを多数いただきました。ここにお礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] 量子物性 BL 全反射ミラー本体 完成図書
- [2] 量子物性 BL ミラー調整機構 完成図書・試験検査成績書
- [3] P. J. Eng, M. Newille, M. Rivers and S. R. Sutton (1998) Dynamically Figured Kirkpatrick Baez X-Ray Micro-Focusing Optics, in X-Ray Microfocusing: Applications and Technique, I. McNulty ed., SPIE Proc. 3449, 145.

付録 1 : ミラー調整時パラメータ値・測定値表

内容	パラメータ						
光の調整	E						
	$\theta$						
	gap						
	$\Delta \theta 2$						
ミラー調整前パラメーター	x1						
	z1						
	tx1						
	tz1						
	bend11						
	bend12						
	x2						
	z2						
	tx2						
	ty2						
	bend12						
	bend22						
	原点出し	XM1					
		TZM1-1					
TZM1-2							
TZ1							
<b>X1-center</b>							
XM2							
TZM2-1							
TZM2-2							
TZ2							
<b>X2-center</b>							
ミラー調整後パラメーター	x1						
	z1						
	tx1						
	tz1						
	bend1 1						
	bend1 2						
	x2						
	z2						
	tx2						
	ty2						
	bend1 2						
	bend2 2						

## 付録2：ビームライン・ワークステーションによるミラー調整方法概要

希望エネルギーには分光器の結晶角度、ID ギャップ、 $\Delta\theta_2$  の調整、エネルギー較正がすでに調整されているものとする。また、エネルギーはミラーが使用できる範囲であるとする。ビームライン・ワークステーションのミラー操作のウィンドウを開き、ウィンドウ内の各軸値等を入力することで調整できるが、調整にはミラー各軸のスキャンを行う必要があるため、ミラーの各軸をスキャンできる、X線検出器の出力を得ることのできる、制御ソフト等があることが望ましい。

ミラー調整方法（原点出し）

## [第一・第二ミラーの調整]

- 1) 第一ミラーの  $t_z$  を 0 にしておく。
- 2) 第一ミラーの  $x$  を動かして X 線検出器から測定できる強度を半分にする。
- 3) 強度半分になったところの  $[X_{M1}]$  を記入する。
- 2) 強度半分になったところから  $X$  を光軸から離れる方向に 1mm 逃がす。
- 3) ミラーの  $t_z$  を段階的に変化させてスキャンを行う。
- 6) スキャン後、中心位置  $[TZ_{M1-1}]$  を記入する。
- 7) ミラー  $t_z$  を段階的に変化させてスキャンを行う。5) とは反対方向に  $t_z$  をふる。
- 8) スキャン後、中心位置  $[TZ_{M1-2}]$  を記入する。
- 9) 中心位置  $[TZ_1]$  を算出する。  $[TZ_1] = ([TZ_{M1-1}] + [TZ_{M1-2}]) / 2$
- 1 0)  $[TZ_1]$  に第一ミラーを移動させる。
- 1 1) ミラー  $x$  を段階的に変化させてスキャンを行う。
- 1 2) その時の強度最大と最小となるセンター値  $[X_{1-center}]$  を記入する。
- 1 3) 第二ミラー調整のために第一ミラーを入射光が当たらない位置に退避させる。
- 1 4) 1) ~ 1 2) までの過程を第二ミラーで同様に行う。

## [第一ミラー・第二ミラーの挿入]

- 1) 第一ミラーを入れる。  $[X_{1-center}]$  の値を入力する。
- 2) 第一ミラーを  $5 \text{ mrad}^{\ast 3}$  傾ける。  $[TZ_1-5]$  の値を入力する。
- 3) 第二ミラーを入れる。  $[X_{2-center}-10.5]$  の値を入力する。
- 4) 第二ミラーを  $5 \text{ mrad}^{\ast 3}$  傾ける。  $[TZ_2-5]$  を入力する。

## [光の確認]

- 1) リナグラフを 30~60 秒露出、光を確認する。
- 2) 問題が無ければ原点出し終了。
- 3) ミラー位置のチェック。値を記入しておく。
- 4) 引き続き実験にうつる場合はミラーをベントさせておく。

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
トン	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	$\mu$
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

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	$\text{s}^{-1}$
力	ニュートン	N	$\text{m} \cdot \text{kg} / \text{s}^2$
圧力, 応力	パスカル	Pa	$\text{N} / \text{m}^2$
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
工率, 放射束	ワット	W	$\text{J} / \text{s}$
電気量, 電荷	クーロン	C	$\text{A} \cdot \text{s}$
電位, 電圧, 起電力	ボルト	V	$\text{W} / \text{A}$
静電容量	ファラド	F	$\text{C} / \text{V}$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$\text{V} / \text{A}$
コンダクタンス	ジーメンズ	S	$\text{A} / \text{V}$
磁束	ウェーバ	Wb	$\text{V} \cdot \text{s}$
磁束密度	テスラ	T	$\text{Wb} / \text{m}^2$
インダクタンス	ヘンリー	H	$\text{Wb} / \text{A}$
セルシウス温度	セルシウス度	$^{\circ}\text{C}$	
光度	ルーメン	lm	$\text{cd} \cdot \text{sr}$
照射度	ルクス	lx	$\text{lm} / \text{m}^2$
放射能	ベクレル	Bq	$\text{s}^{-1}$
吸収線量	グレイ	Gy	$\text{J} / \text{kg}$
線量等量	シーベルト	Sv	$\text{J} / \text{kg}$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バ	b
バル	bar
ガリ	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$   
 $1 \text{ b} = 100 \text{ fm} = 10^{-28} \text{ m}^2$   
 $1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$   
 $1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm} / \text{s}^2 = 10^{-2} \text{ m} / \text{s}^2$   
 $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$   
 $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} / \text{kg}$   
 $1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$   
 $1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$

(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, 1 eV および 1 u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, ヘクト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のカテゴリに分類されている。
- E C閣僚理事会指令では bar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

## 換算表

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

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

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

圧	MPa(=10bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
	1	10.1972	9.86923	$7.50062 \times 10^3$	145.038
力	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$
	$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft·lbf	eV
	1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$
	9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$
	$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$
	4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$
	1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$
	1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$
	$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1

$1 \text{ cal} = 4.18605 \text{ J} (\text{計量法})$   
 $= 4.184 \text{ J} (\text{熱化学})$   
 $= 4.1855 \text{ J} (15^{\circ}\text{C})$   
 $= 4.1868 \text{ J} (\text{国際蒸気表})$   
 仕事率 1 PS(仏馬力)  
 $= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{s}$   
 $= 735.499 \text{ W}$

放射能	Bq	Ci
	1	$2.70270 \times 10^{-11}$
	$3.7 \times 10^{10}$	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	$2.58 \times 10^{-4}$	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

SPRING 8 原研アンシユレータービームラインBL17XUの全反射ミラー装置の立ち上げ調整と特性評価