

## 解 説

## 放射光ビームライン

後藤 俊治\*

## Synchrotron Radiation Beamline

Shunji GOTO\*

## Abstract

Key technologies in synchrotron radiation beamline are described with examples of x-ray beamlines of 8-GeV electron storage ring SPring-8. Typical components at a front-end and a transport channel are shown for understanding of their functions to tailor the SR x-rays for various applications. A total reflection mirror and a crystal monochromator are shown as major optics in the x-ray beamline as well as components such as beam shutter, slit, and windows.

## 1. はじめに

放射光ビームラインは、電子蓄積リングにおいて偏向電磁石や挿入光源を光源とするシンクロトロン放射光に対して、フォトンエネルギー（光の波長）およびそのエネルギー幅の選択、空間的・角度的な切り出しなどをして、ユーザの必要とする放射光成分を実験装置まで導くためのものである。

放射光のうち必要な成分のみを取り出して利用するという事は、使わない成分についてはビームラインの途中で捨ててしまわなければならないということでもある。光源の条件によるが放射光の全パワーは数百 W ~ 数十 kW におよび、そのほとんどを熱としてビームラインの途中で受け止める必要がある。ビームライン技術の進展は、放射光のもたらす甚大な熱負荷との戦いとともにある。また、非常にエネルギーの高い X 線、ガンマ線も伴うため放射線安全・遮蔽にも注意を払う必要がある。ビームラインは光を取り出す機能と光を止める機能が共存する装置群である。

ビームラインの構成や規模は、電子ビームエネルギー、主として利用する放射光のエネルギー帯、施設の規模によって違いが生じるが、ミラーや分光器などを用いて放射光を加工して実験に利用するという点で、ビームライン機器は、施設の規模のいかんによらず共通の考え方、技術に基づくものが少なくない。本解説では、SPring-8 において大半を占める X 線ビームラインを中心として、フロントエンド、輸送チャンネルといった大きなくくりでのビームラインの構成と機能に

ついて説明し、それらの中に用いられる主要な機器について説明する。また、X 線ビームラインにおいて使用される主要な光学機器である全反射ミラーおよび結晶分光器を例にとり、これらにより放射光がどのように加工されていくかについて概説する。

## 2. 光源について

ビームラインについて説明する前に、放射光の性質について簡単におさらいしておきたい。放射光の発生原理や特徴に関しては有名な Schwinger の論文<sup>1)</sup> 以降多くの論文や解説があるが、詳細は Kim のテキスト<sup>2)</sup>、本学会誌に掲載された田中らの解説<sup>3)</sup>などを参考にさせていただきたい。また、田中らの計算コード<sup>4)</sup>を用いて放射スペクトル、パワー分布などを具体的に計算することができる。

2.1 波長(フォトンエネルギー)帯および指向性  
偏向電磁石からの放射光は、臨界波長を

$$\lambda_c = \frac{4\pi}{3} \frac{R}{\gamma^3} \quad (1)$$

とする連続光（白色光）である。 $\gamma$  は電子の相対エネルギー、 $R$  は偏向の曲率半径である。一方、アンジュレータの場合  $n$  次光の波長は、 $\lambda_u$  を磁場の周期長、 $K$  を偏向定数、 $\theta$  を観測角（光軸中心からの傾き角）として、

$$\lambda_n = \frac{\lambda_u}{2n\gamma^2} (1 + K^2/2 + \gamma^2\theta^2) \quad (2)$$

で表される。これらの式から特に波長 0.1 nm 以下

\* 財団法人高輝度光科学研究センター JASRI/SPring-8 (E-mail: sgoto@spring8.or.jp)

( $\sim 10$  keV 以上) の X 線を中心に利用する場合、電子ビームのエネルギーを高くする必要があることがわかる。波長 0.01 nm 程度 (100 keV 程度) の X 線を得るために、超伝導ウイグラーなどが用いられることもある。ウイグラーは高い磁場により軌道の曲率半径を小さくし、より臨界波長を短くする光源である。

周期数  $N$  のアンジュレータの場合、スペクトルの幅は概ね、

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{1}{nN} \quad (3)$$

で表される準単色光である。 $N = 100$  ならば 1% 程度のバンド幅の準単色光が得られる。多くの放射光利用実験ではこれら白色光や準単色光のエネルギー分解能では不十分であり、後述の分光器を用いてさらに単色化した上で用いる。

放射光の角度広がり、

$$\text{偏向電磁石の場合 (縦方向)} : \sigma_r \approx \frac{0.6}{\gamma} \sqrt{\frac{\lambda}{\lambda_c}} \quad (4)$$

$$\text{アンジュレータの場合} : \sigma_r \approx \sqrt{\frac{\lambda}{2N\lambda_u}} \sim \frac{1}{\gamma\sqrt{N}} \quad (5)$$

である。これらから直ちに電子ビームのエネルギーが高いほど指向性が強くなることが理解できる。SPring-8 の偏向電磁石で縦方向  $100 \mu\text{rad}$ 、標準的な X 線用アンジュレータで  $10 \mu\text{rad}$  以下の角度発散に抑えられることがわかる。輝度の高い放射光を得るためには、電子ビームのエミッタンスを小さくする必要があり、このためには偏向電磁石の数を多くし、また収束用電磁石を数多く設置する必要がある。さらに、挿入光源を設置する直線部を増やす必要があるために、必然的にリングは大型化する。X 線利用を中心とした大型の第三代リングとして SPring-8 (8 GeV, 周長 1436 m) や、これに先行して建設されたフランスグルノーブルの ESRF (6 GeV, 844 m)、米国アルゴンヌの APS (7 GeV, 1104 m) があげられる。また、近年 SSRF (上海), NSLS II (米国 BNL) など 3 GeV クラスの中型リングが世界中で稼働中、または建設中であり、低エミッタンスリングでの X 線利用は益々広がりを見せている。このような光源と、それに続くビームラインの光学系により必要な放射光成分が取り出され各種の放射光利用実験がおこなわれるわけであり、X 線回折・散乱、分光、イメージングなど利用目的に応じて適切な光源と光学系の選択がなされている。

## 2.2 放射パワー

蓄積リングの放射光取り出し口付近や、それに続くフロントエンドは光源からの距離が近く、高いパワー密度と全パワーに対処しなければならないため、熱負荷機器の設計と配置には最も注意を払う必要がある。高い熱負荷を受ける光学素子に関して考える際にも、放射パワーの特性を理解した上で、冷却などの対応を考える必要がある。

電子のエネルギー  $E$  (GeV)、蓄積電流  $I$  (A)、偏向電磁石の磁場  $B$  (T)、偏向曲率半径  $R$  (m) としたとき、偏向電磁石ビームラインにおいて、水平方向 1 mrad 当たりの放射光を取り出したときの全パワーは実用的な単位で、

$$P_{\text{tot}} [\text{kW/mrad}] = 1.27 \times 10^{-3} E^2 [\text{GeV}] B^2 [\text{T}] R [\text{m}] I [\text{A}] \quad (6)$$

また、リニアアンジュレータの場合、周期磁場の周期数を  $N$ 、最大磁場  $B_0$  (T)、アンジュレータの長さ  $L$  (m) とすると全パワーは

$$P_{\text{tot}} [\text{kW}] = 0.633 E^2 [\text{GeV}] B_0^2 [\text{T}] L [\text{m}] I [\text{A}] \quad (7)$$

となる<sup>2)</sup>。SPring-8 の偏向電磁石ビームライン ( $E=8$  GeV,  $I=0.1$  A,  $B=0.68$  T,  $R=39.3$  m) では  $P_{\text{tot}}=0.15$  kW/mrad、標準アンジュレータビームライン ( $B_0=0.87$  T,  $L=4.5$  m) では  $P_{\text{tot}}=14$  kW の熱負荷に対して考慮しなければならない。

パワー分布に関しては、偏向電磁石および水平方向に蛇行するリニアアンジュレータの場合、縦方向には  $\psi \approx 1/\gamma$  程度であり、アンジュレータの横方向の分布は  $\phi \approx K/\gamma$  である<sup>2)</sup>。だいたい  $K \leq 2$  で使用されるので、概ね  $1/\gamma$  程度の角度範囲内にパワーが集中するとして熱負荷機器は設計、配置されることになる。偏向電磁石ビームラインの場合には、水平方向には一様の分布となり、水冷マスクや水冷スリットにより、必要な角度幅の分のみ取り出すことになる。

## 3. 放射光ビームラインの構成

### 3.1 全体的な配置、規模など

図 1 にビームラインの構成例を示す。蓄積リング、



図 1 ビームライン全体配置の例

遮蔽トンネル，実験ホールとの位置関係も合わせて示している．蓄積リングはコンクリートでできた遮蔽トンネル内に設置されている．蓄積リングに設置された偏向電磁石や挿入光源からの放射光は，トンネルに開けられた取り出し口から実験ホールに取り出される．

放射光ビームラインは機能と場所の観点から大きく二つに区分できる．トンネル内にあるものがフロントエンドであり，実験ホールにあるものが輸送チャンネルである．ユーザはビームラインの末端にある実験ステーションの装置を使って放射光利用実験をおこなう．エネルギーの高い X 線を取り扱うビームラインでは，輸送チャンネル機器は光学ハッチや実験ハッチといった遮蔽ハッチ内に収納される<sup>5)</sup>．軟 X 線のビームラインはミラーなどにより軟 X 線から低エネルギー側の放射光成分のみになった段階では回折格子分光器なども含めハッチの外に並べられるケースが多い．ただし，空気による吸収を避けるためにほとんど真空ダクトや真空チェンバ内でビームが取り扱われる．

ビームラインの全長は，利用目的，光学系の設計などによって決定されるのみならず，トンネル，実験ホールなど建物の構造や隣接ビームラインとの領域の取り合いによって制約を受ける．SPring-8 の場合，フロントエンド部を含み光源点からトンネル出口までで 25 ～ 35 m 程度となっている．実験ホールの終端まで輸送チャンネルを延伸した場合約 80 m となる．面積の広いビームや空間的コヒーレンスの高いビームを利用するために長いビームラインを必要とすることがあり，SPring-8 では医学利用実験棟に伸びる 200 m 程度の中尺ビームライン<sup>6,7)</sup> や 1 km の長尺ビームライン<sup>8)</sup> が整備されている．これに対して，小型リングではビームラインの全長が 10 m 以下のコンパクトな場合もある．

ビームラインは，インターロックシステム<sup>9)</sup> および制御システム<sup>10)</sup> により放射線安全を確保し，機器の状態を監視・保護するとともに，安全な操作範囲内で機器を操作し，ユーザの希望するビームを取り出すことが可能になっている．これらは個々のビームラインで

独立に動いているのではなく，加速器全系，放射線安全管理全系ともリンクされ重要な情報がやり取りされている<sup>11)</sup>．

### 3.2 フロントエンド

SPring-8 の X 線ビームラインのフロントエンドの一例を図 2 に示す．施設の規模，光源出力の違いはあるものの，フロントエンドの機能に関する基本的な考え方はどの放射光施設でも同様である．フロントエンドの果たす役割は概して以下ようになる．

#### (i) 蓄積リングとの接点

蓄積リングは，電子ビームが残留ガスと衝突することにより蓄積電流が減少することを抑え，また，その際制動放射される高エネルギーのガンマ線の発生を極力抑えるために超高真空に保たれている．蓄積リングの超高真空を維持するため，フロントエンドにおいても超高真空が要求され，超高真空対応のコンポーネント，排気系が用いられている．主としてイオンポンプにより排気されている．典型的な圧力は  $10^{-8} \sim 10^{-7}$  Pa である．ベーキングによって脱ガスがおこなわれているとともに，放射光の照射部分は光脱ガスも十分におこなわれ，放射光導入時に急激に圧力が上昇することがないように注意深く真空に関して管理されている．また，X 線の吸収をさけること，放射光が照射される機器表面での汚染やダメージを避ける点でも真空は重要である．

通常の X 線ビームラインの場合，フロントエンドと輸送チャンネルの間にベリリウム窓が取り付けられ，上流の超高真空と下流の高真空領域を仕切っている<sup>12)</sup>．ベリリウム窓は，厚さ 250  $\mu\text{m}$  程度で，白色放射光による熱負荷に耐えるため水冷されている．中間真空チェンバをはさんで二重に配置されており，真空破断事故に対する信頼性を高めている．光源の低エミッタンス化に伴い，高分解能のイメージングなど空間的コヒーレンスを重視するような利用実験では，X 線透過窓材の品質が問われることが増えてきており，不純物やボイドなどが少なく，表面を鏡面研磨したベリリウム窓が必要になってきている<sup>13)</sup>．また，熱的特性に優れた

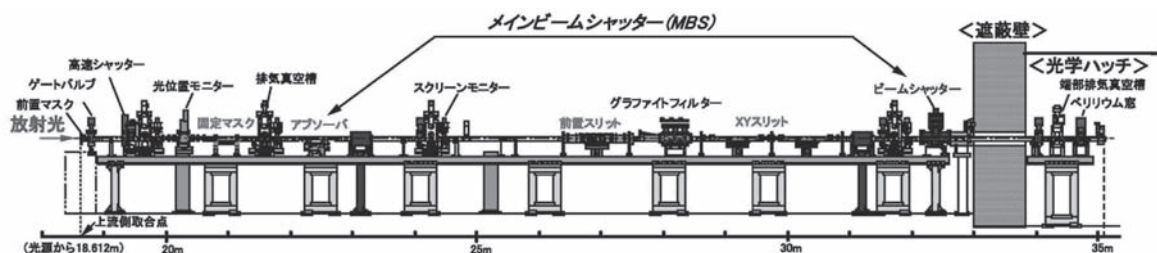


図 2 SPring-8 の標準的なアンジュレータビームライン用フロントエンド



CVD ダイアモンドの窓がフロントエンドと下流側との仕切りに使われるケースも見られるようになった<sup>14)</sup>。

### (ii) 放射光の導入と遮断

収納部内から実験ホール側への放射光の導入および遮断はメインビームシャッタによっておこなわれる。メインビームシャッタは、上流部のアブソーバとトンネル出口直前に置かれたビームシャッタという二つのコンポーネントの組であり、これらは連動して制御されている。

SPring-8のビームシャッタにおいては、高エネルギーの放射光およびガンマ線を遮断するための長さ400 mm、純度95%以上のタングステンブロックがエアシリンダにより上下する(図3)。ビームシャッタが閉じているときに放射光の大半の熱を受けるのは上流に設置されているアブソーバであり、水冷されたアルミナ分散強化銅に1°程度の斜めすれすれ入射でビームを受けることにより照射面積を大きくし、熱負荷を分散させて、10 kWを超える高熱負荷に対処している。

### (iii) 高熱負荷の制御およびビームの取り出し

アンジュレータビームラインにおいては光軸からはずれた方向のビームは分光後にはほとんど利用されないばかりでなく、分光結晶などの初段の光学素子に対して不必要な熱負荷を与えることになる。

パワー分布は先に述べたように $1/r$ 程度であるが、アンジュレータ放射の中心部で分光して利用する部分は $1/(r\sqrt{N})$ 程度であり、 $N \sim 100$ のアンジュレータの場合、約1桁狭い領域だけを取り出せばよい。逆にその外側の成分は分光後には使われずに、分光光学素子上に不要な熱負荷を与えるだけである。このため、前置マスク、前置スリット<sup>15)</sup>、XYスリット<sup>16)</sup>などにより空間的にビームを制限することにより最終的に利用されない軸外の放射光成分はフロントエンド部で除去される。これらのコンポーネントに関する熱の対処

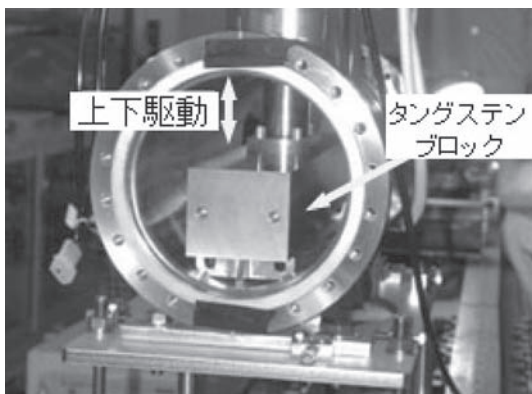


図3 SPring-8のフロントエンドに用いられているビームシャッタ

の仕方も原理的にアブソーバと同様である。

図4に斜入射配置を用いた高熱負荷対応機器の模式図を示す。受光部にはアルミナ分散強化銅を使用するとともに、冷却水の流路にはワイヤコイル技術を用いて除熱効率(熱伝達係数)を素管の場合の数倍程度に増大させている。ワイヤカット技術により斜入射加工し実効的パワー密度を低減している。概ね1 mあたりで10 kWの熱負荷を処理でき、直入射相当でパワー密度 $1 \text{ kW/mm}^2$  オーダの熱負荷を処理できるようになっている。このようにして、SPring-8の標準的なアンジュレータビームラインでは、入力段階で14 kWあった放射光のうち、分光して使うのに必要な成分を含む約300 W程度を輸送チャンネルに出力し、残りはフロントエンドにおいて処理している。有限要素法による熱解析や電子ビーム照射実験などにより高熱負荷機器材料の評価が進められており、熱サイクル寿命予測や、長寿命化、信頼性向上が図られている<sup>17,18)</sup>。

### 3.3 輸送チャンネル

X線ビームラインの輸送チャンネルの例を図5に示す。二結晶分光器、ミラーのほか、真空排気ユニット、下流シャッタ、スリット、スクリーンモニタ、ガンマ

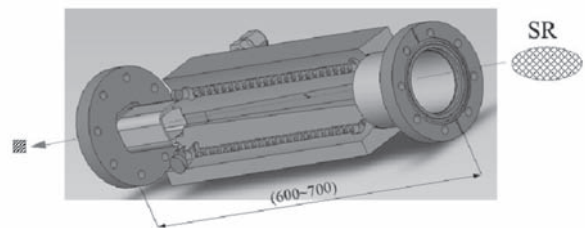


図4 斜入射を用いた高熱負荷対応機器の模式図

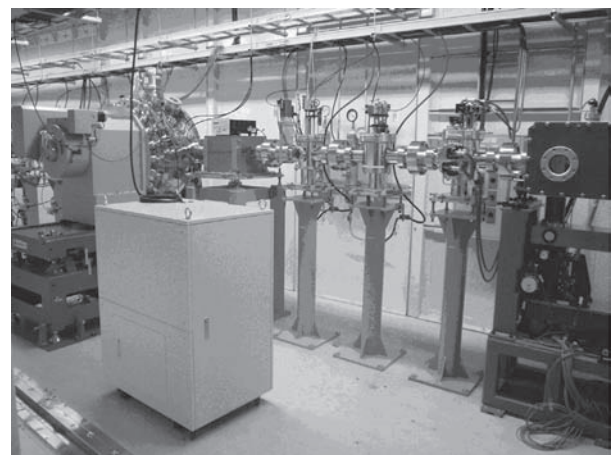


図5 輸送チャンネルの構成例(SPring-8 BL14B2)。放射光は左から右へと進む。左から二結晶分光器、ガンマストッパ、スクリーンモニタ、下流シャッタ、スリット、ミラーの順に並んでいる

ストップなどのコンポーネント<sup>19)</sup>により構成されている。輸送チャンネルの果たす機能について簡単に説明する。

#### (i) 輸送チャンネルの真空

輸送チャンネルも基本的に真空中に保たれている。ひとつには空気による吸収、散乱により放射光強度そのものが失われることを避け、また、散乱 X 線が不用意に漏洩することを避けるためである。さらに、放射光が直接照射される光学素子やシャッタ、スリットなどにおいて、酸素、ハイドロカーボンなどと放射光との光化学反応による表面の汚染、損傷を避けるためであり、これらの成分が極力少ない真空が必要になる。

SPring-8 の標準的な X 線ビームラインでは真空排気はターボ分子ポンプとスクロールポンプの組み合わせで適当な真空区間ごとに区切って排気している<sup>20)</sup>。到達圧力は  $10^{-6} \sim 10^{-3}$  Pa である。大気中での放射光実験においてはビームライン終端に厚さ 250  $\mu\text{m}$  程度のベリリウム窓を取り付けて、放射光を取り出している。先にも述べたように、利用によっては強度ムラをもたらさない高品質のベリリウム窓が求められるケースが増えており、高品質材料の探索と評価を進めている<sup>13)</sup>。図 6 は 1 km ビームラインでのベリリウムの評価結果の一例である。従来型のベリリウムでは 10  $\mu\text{m}$  程度のポイドによる輝点状のスペckルがもたらされているが、真空蒸着法で製作したものは欠陥が少なく一様な透過強度が得られ、今後の高品質窓材料として期待できる。

軟 X 線ビームラインではベリリウム窓などでの X 線の吸収が無視できない。このため実験ステーションに至るまで超高真空を維持するか、差動排気系を介して高真空～低真空側へ放射光を導入する。

#### (ii) ビームの加工

全反射ミラーや結晶分光器を用いて、エネルギーの選択、ビームの集光など光学的な処理をおこなう。こ

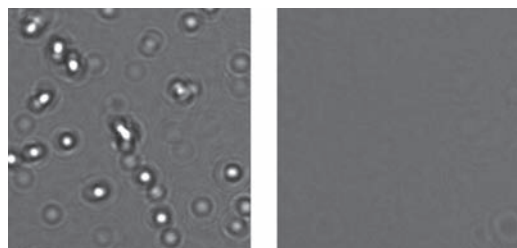


図 6 1 km ビームラインのコヒーレント X 線を用いて評価したベリリウムの透過 X 線イメージ(波長 0.1 nm, 試料～検出器間距離 1.4 m, 視野 300  $\mu\text{m}$  × 300  $\mu\text{m}$ )。 (左) 従来の粉末冶金型, (右) 真空蒸着型

れらについては 4 章において説明する。

また、スリットによりビームを空間的に制限し、必要なビームだけを取り出す。偏向電磁石ビームラインの白色用スリットでは、まず水冷された銅ブロックにより放射光の熱を受け、その下流側表面に熱接触した Ta ブレードによって X 線を止める。白色、単色いずれの場合も 100 keV 程度の高エネルギー X 線まで遮断できるように Ta は厚さ 5～10 mm のものが用いられる。マイクロビームやナノビーム利用が盛んになるに伴い高精度のスリット<sup>21)</sup>が求められるようになってきている。

#### (iii) 放射光の導入と遮断

分光器による分光後のビームを実験ハッチへ導入もしくは遮断するために光学ハッチ内の分光器下流に下流シャッタが置かれている。これにより実験ハッチに人が入り作業などをおこなっている際も分光結晶には放射光が照射され続け、熱負荷を定常に、すなわち、安定にすることができる。X 線のエネルギーにもよるが、通常では厚さ 100 mm の鉛をステンレスのケースに封入したブロックが真空チェンバのなかに取り付けられ、エアシリンダによって上下することによりビームの下流側ハッチへの導入と遮断をおこなっている。場合によってはタングステンブロックも用いられる。

蓄積リング中の残留ガスと電子との衝突により生じる制動放射は数 GeV のガンマ線となる。その一部は放射光とともにビームラインに沿ってトンネル外に出てくる。ガンマストップは、このガンマ線がそれより下流に伝わるのを阻止するためのものである。SPring-8 では通常、厚さ 300 mm の鉛ブロックが用いられる。二結晶分光器を有するビームラインにおいては、その直下流にガンマストップが設置され、光源からの直接的なビームライン光軸に対して数十 mm のオフセットをつけた位置に真空パイプを通して二結晶分光器からの出射ビームだけを下流に通す。

#### (iv) ビームのモニタ

挿入光源や光学機器の調整時などにビーム位置の確認が必要な場合がある。一例は二結晶分光器からの反射ビームを探するときである。このような目的で蛍光板をエアシリンダにより光軸上に出し入れするスクリーンモニタが用いられている。

## 4. X 線ビームラインにおける主要光学系

この章では X 線ビームラインにおける主要光学系として全反射ミラーおよび結晶分光器について説明する。なお紙面が限られているので、末尾に別の参考文献、参考書をあげておく<sup>22-25)</sup>。



## 4.1 全反射ミラー

### 4.1.1 全反射の原理と反射率

X線は非常に振動数の高い電磁波ゆえに、物質中の屈折率は1よりわずかに小さい。屈折率は $n = 1 - \delta$ と1からの偏差 $\delta$ を用いて表される。具体的な屈折率の計算は最近ではWeb上でできるようになっており、LBNLやNISTのサイトにおいて計算できる<sup>26,27)</sup>。屈折率がほとんど1程度であるので、直入射では原理的に反射率の高いミラーを得ることができないが、臨界角以下の表面すれすれの入射により媒質中において屈折波は存在しえず全反射がおきる。Snellの法則において $\delta \ll 1$ とすると全反射の臨界角として、 $\theta_c \approx \sqrt{2\delta}$ が得られる。波長や物質にもよるが、X線領域では大体ミリラジアンオーダーとなる。臨界角より小さい視射角において高い反射率が得られることから、全反射ミラーはX線光学素子としてよく用いられている<sup>28-30)</sup>。上記のWebサイト<sup>26)</sup>ではミラーの反射率も計算でき便利である。X線領域では波長が極めて短いことから反射率は表面粗さの影響を受けやすく<sup>28,29)</sup>、表面粗さは1 nm rmsのオーダーかそれ以下が要求される。

### 4.1.2 X線用ミラーの具体例

X線ビームラインにおいては、ミラー母材としては石英、シリコン、SiCなどを研磨したものが用いられている。熱的、放射線的な耐性から白色放射光を受ける場合にはシリコンやSiCミラーが用いられる。一方、熱負荷のない単色X線用には石英などを用いていることが多い。

ミラー表面のコーティング材料は、屈折率のエネルギー依存性を考慮し使用エネルギー領域に応じて選択され、Pt、Rh、Niなどが用いられている。コーティングによりSiや石英母材に比べて同一の光子エネルギーに対する臨界角を大きくすることができ、その分

必要なミラーの長さを短くすることができる。図7にPt、Rhをコーティングした場合の反射率曲線を示す。

全反射ミラーは、(i) 高エネルギー成分除去（分光器の基本波に付随する高次光成分の除去など）、(ii) 湾曲ミラー（機械的な曲げ、もしくは研磨による曲面加工）によるビームの集光、平行化、(iii) ビーム偏向（ブランチビームライン切り替え）などの目的で広く用いられている。必要となるミラーの長さは、光源や焦点からの距離、取り込み角度などによって決まる。例えば、偏向電磁石からの放射光の縦方向発散角約100  $\mu$ rad、光源からミラーまでの距離30～40 m、視射角2～10 mradとすると1 m長のミラーが必要となる。SPring-8におけるX線ビームライン用のミラーとしては、現在最大1 mのものを使用しているが、1 mを超えるミラーの製作も可能になっており、建設中の新しいアンジュレータビームライン用には1.3 mのものが導入される予定である。

図8は偏向電磁石ビームライン用の1 m長ミラーおよび保持機構を示したものである。真空外の並進ステージと直線導入機を用いて、真空チェンバ内部のミラーの角度と位置を決める。このミラーは白色の放射光を受けるため、側面に水冷された銅ブロックをインジウムシートを介して熱接触させ挟み込む格好で間接冷却がなされている。また、同様の並進ステージと直線導入機により光軸方向に沿ってミラーを曲げる機構を有し、曲率半径1～10 kmのオーダーで曲げることができる。この機構によってビームを縦方向に集光したり平行にしたりすることができる。ビームラインの途中にこのようなミラー集光系を入れた場合、光源～ミラー間距離数十メートル、ミラー～焦点までの距離数メートルになることが多く、また、球面収差を伴い、ミラー形状誤差（研磨加工時に生じるスロープ誤差）が

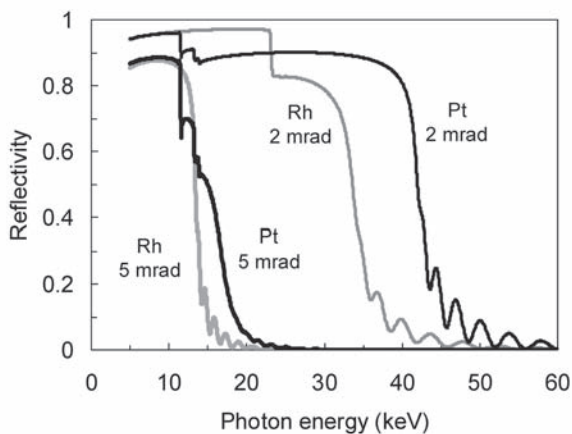


図7 全反射ミラーの反射曲線の計算例（PtおよびRhコーティングの場合）

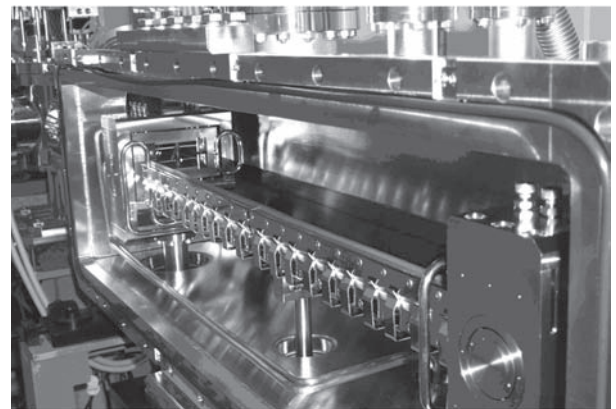


図8 偏向電磁石ビームライン白色用ミラーおよび保持機構（1 m長用、水冷およびベント機構付）

1  $\mu\text{rad}$  程度となることからビームサイズは数十  $\mu\text{m}$  程度にとどまってしまう<sup>22,29,30)</sup>.

#### 4.1.3 マイクロビーム、ナノビームの形成と利用

マイクロビームやナノビームといったより微小なビームを得るために、精密研磨によって楕円形状に加工したミラーを用いる方法がある。図9に楕円ミラーによる集光の様子を示す。楕円ミラーによる極限的な集光では、球面収差の影響を無くすとともに、精密加工により形状誤差をナノメートルレベルまで抑える必要がある。有限の長さのミラーに非常に斜めにX線が入射するため、いわば細いスリットをビームが通過する効果と同等となり、Fraunhofer回折が生じることになる。幅  $w = L \sin \theta$  ( $L$ はミラーの長さ) のスリットに波長  $\lambda$  のX線が入射するとする。光軸から角度  $\phi$  だけ傾いた方向にて観測したときのFraunhofer回折の強度分布(角度分布)の半値幅は、

$$\Delta\phi_{\text{FWHM}} \approx 0.8858 \lambda/w \quad (8)$$

となる。光源～ミラー間の距離を  $p$ 、ミラー～焦点間の距離を  $q$  とすると、結局、最小ビームサイズは主として光源サイズ  $\Sigma_s$  を  $q/p$  倍に縮小したものと回折によるばけの競合によって決まり、近似的に、

$$F_{\text{total}} \approx \left[ (\Sigma_s q/p)^2 + (0.8858 q \lambda/w)^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

で見積もることができる。

近年X線用ミラーの加工技術は大きな進展を遂げている。大阪大学とSPring-8では、Elastic Emission Machining (EEM) と呼ばれるミラーの表面の精密加工技術を用い、また、光学式もしくは放射光X線を用いたミラー形状評価と、精密加工へのフィードバックを繰り返すことにより、2009年にSPring-8の1 km ビームラインにおいて20 keVのX線にて7 nmの回折限界集光を達成した<sup>31)</sup>。集光の主な条件は  $\theta = 7 \text{ mrad}$ ,  $\lambda = 0.062 \text{ nm}$  ( $E = 20 \text{ keV}$ ),  $L = 80 \text{ mm}$ ,  $q = 75 \text{ mm}$  で、(9)式の第一項を十分に小さいとすると、第二項の回折の寄与により7 nmが求められる。実際にはさらに詳しく波動光学的な取り扱いをすることによって理論

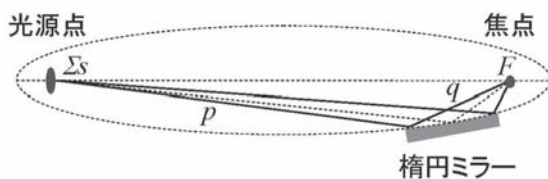


図9 楕円ミラーによるビームの集光の様子

的に得られるビームサイズが求められている。

このような先端技術により製作されたミラーをタンデムに並べ、縦横の二次元集光をすることにより、放射光ビームラインにおいてマイクロビームやナノビームを形成し、マイクロコピーや微小結晶のX線回折などに利用することが盛んになりつつある<sup>32,33)</sup>。光源サイズ  $\Sigma_s$  を小さくするために低エミッタリングが必須であり、また、光源～ミラー間距離  $p$  を大きくするために100 mクラスの比較的長いビームラインが必要になっている。

## 4.2 結晶分光器

白色の放射光をそのまま用いる場合を除き、結晶分光器はX線ビームラインにおいて必要不可欠な光学機器である。結晶分光器の主たる機能は、所定のエネルギーのX線を分光し取り出すこと、およびエネルギー幅を実験に必要なものに制御することである。

### 4.2.1 分光の原理と基本的な性質

分光の原理は完全な単結晶によるBragg反射に基づいている。入射角 = 反射角 =  $\theta$  (格子面となす角)、波長  $\lambda$ 、格子面間隔  $d$  として、ある格子面とその次の格子面からの反射X線の光路差が波長の整数倍 ( $m$  倍) となるときに強い反射が生じる。この条件からBraggの式、

$$2d \sin \theta_B = m\lambda \quad (10)$$

が得られる。 $\theta_B$ をBragg角と呼ぶ。立方晶では、格子定数  $a$ 、反射面指数 ( $hkl$ ) として面間隔は、

$$d = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (11)$$

で与えられる。

分光結晶としては良質のシリコン単結晶が用いられることが多い。これは、半導体産業における主材料であり、完全で大きな単結晶が安価に得られること、切断や研磨などの加工技術が確立していることなどによる。一部のビームラインではその熱的特性の優位さや、X線透過率の高さなどの理由により高圧高温合成された人工ダイヤモンド (Type IIa) が用いられている。シリコンおよびダイヤモンドの格子定数はそれぞれ  $a = 0.5431 \text{ nm}$  および  $a = 0.3567 \text{ nm}$  である。

SPring-8の標準型二結晶分光器<sup>34)</sup>は使用波長帯と結晶面を考慮し  $3 \sim 27^\circ$  の範囲でBragg角が選択できるように設計されている。 $(hkl)$  が (111), (311), (511) などのシリコンの反射面を用いることにより波長  $0.01 \sim 0.28 \text{ nm}$  ( $110 \sim 4.4 \text{ keV}$ ) の範囲の分光が可能である。

分光特性をもう少し詳しく説明する。完全で大きな

単結晶における X 線の回折は、動力的回折理論を用いて説明できる<sup>24)</sup>。加工ひずみや熱ひずみのない Si 結晶の場合、回折曲線（反射率、回折幅の角度もしくはエネルギー依存性）は完全結晶に対する動力的回折理論を用いて計算したものと実際とは極めて良く一致する。

最も簡単な配置として、反射に寄与する格子面が結晶表面に平行な場合（対称 Bragg case と呼ぶ）について考える。異常分散を無視し、また、結晶が十分厚いとするとき反射率曲線は

$$\begin{cases} R = \left( W + \sqrt{W^2 - 1} \right)^2 & (W < -1) & (12a) \\ R = 1 & (-1 \leq W \leq 1) & (12b) \\ R = \left( W - \sqrt{W^2 - 1} \right)^2 & (W > 1) & (12c) \end{cases}$$

となる。ここで、 $W$  は Bragg 条件からのずれを表す無次元のパラメータであり、 $\sigma$  偏光、対称 Bragg case では、屈折による補正を微量として無視すると、

$$W = \left( \Delta\theta \cot \theta_B + \frac{\Delta E}{E} \right) \frac{2}{C}, \text{ もしくは,}$$

$$W = \left( \Delta\theta \cot \theta_B - \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right) \frac{2}{C} \quad (13)$$

と表すことができる。(12b) 式により、 $-1 \leq W \leq 1$  において反射率 1 となることがわかる。この領域をミラーの場合と同様にして全反射と呼ぶ。この回折強度曲線を図 10 に示す。これは Darwin の反射曲線として知られており、シルクハット形をしている。 $W$  は Bragg の式により結び付けられた角度およびエネルギー

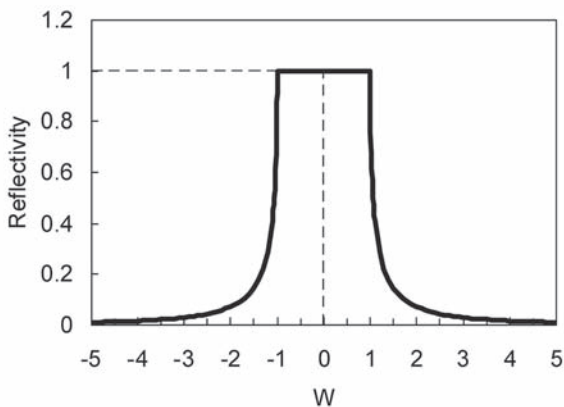


図 10 動力的回折理論による X 線回折強度曲線（吸収なし、対称 Bragg case）

ギー（波長）の関数となる。良く用いられる結晶と反射指数について (13) 式の  $W$  を計算するのに必要なパラメータ  $C$  を表 1 に示した。具体的に計算してみると、結晶と Bragg 角に依存するが、回折の生じる角度幅はマイクロラジアンオーダーになる。さきに述べたように SPring-8 において、偏向電磁石からの放射光の発散は回折の角度幅に比べて 1 桁程度大きい、アンジュレータからの放射光の発散は回折角度幅と同程度である。

#### 4.2.2 分光の様子、エネルギー分解能

図 11 に放射光の強度分布（角度、エネルギー依存性）を結晶分光器でどのようにして分光しているかを示し

表 1 完全な単結晶において X 線の回折幅を決めるパラメータ

結晶	$h,k,l$	$C$
Silicon	111	$1.30 \times 10^{-4}$
	311	$2.66 \times 10^{-5}$
	333, 511	$8.04 \times 10^{-6}$
Diamond	111	$5.73 \times 10^{-5}$
	311	$8.87 \times 10^{-6}$
	333, 511	$2.75 \times 10^{-6}$

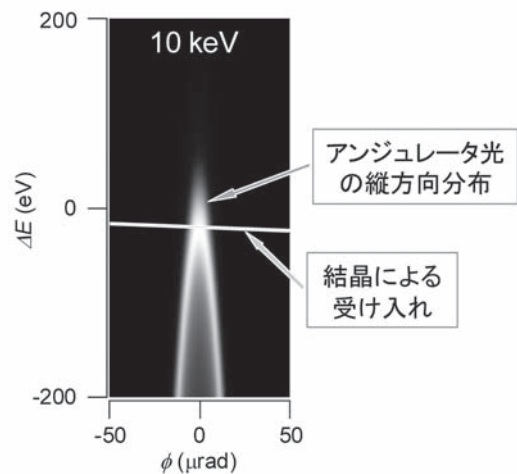
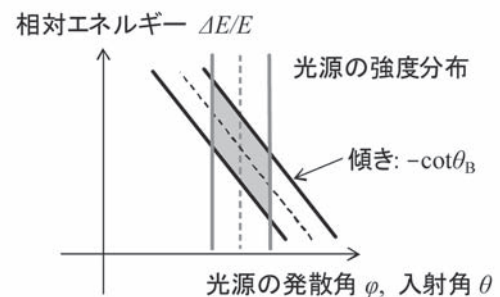


図 11 光源分布と結晶の反射領域（結晶による受け入れ）との関係



た。(13)式で $-1 \leq W \leq 1$ に相当する帯状の部分を切り出していることになる。具体的に SPring-8 の場合に、アンジュレータからの放射光を Si の (111) 面の反射により切り出す様子を計算した例を合わせて示す。光軸から角度がずれてくるとアンジュレータの強度分布が低エネルギー側にずれていくのは (2) 式による角度依存性のためである。この例では  $10^{-4}$  のエネルギー分解能となっている。

結晶分光におけるエネルギー分解能は、結晶に入射するビームの角度発散 $\Omega$ と、結晶そのものが有する回折幅 $w$ のコンボリューションによって決定される。すなわち、

$$\frac{\Delta E}{E} = \cot \theta_B \sqrt{\Omega^2 + w^2} \quad (14)$$

で与えられる。SPring-8 の偏向電磁石や標準アンジュレータを光源としたときのエネルギー分解能について (4), (5) 式による自然発散により求めてみると、概ね  $10^{-5} \sim 10^{-3}$  程度になる。

#### 4.2.3 二結晶分光器

一枚の結晶では Bragg 角を変えてエネルギーを変えようとするとき反射ビームは入射ビームから  $2\theta_B$  だけ角度を変えてしまう。そこで、定位置出射型の二結晶分光器を用いることにより、Bragg 角を変えて取り出すエネルギーを変化させても常に出射ビームの位置を一定に保つことができ、ユーザにとって便利である。

二結晶分光器における定位置出射の原理は、同一の格子面間隔を有する結晶を用いて、例えばまず斜め上方向、次に反対方向に振り戻す二回の反射をさせることにより入射ビームと出射ビームを平行に保つこと、それに加えて、二つの結晶の相対的な位置関係に対して適当な並進動作を加えることにより、Bragg 角を変化させても出射ビームの位置を一定に保つことである。基本動作は回転と並進を合わせて 3 軸の操作が必要である<sup>34-36)</sup>。

実際に使用される二結晶分光器では、上で述べた主要なステージ以外にも多くの調整ステージを有している。特に Bragg 角の微調整は重要である。先に述べたように回折角度幅はマイクロラジアン程度であり、二つの結晶の平行度を  $0.1 \mu\text{rad}$  以下の分解能で合わせる機構が必要である。この他にもアオリ角、面内回転角、結晶位置の微調整などの調整機構が必要であり、角度軸でマイクロラジアン、並進軸でミクロンの分解能での調整が必要である。これらの調整軸は真空チェンバ内に設置されるため、高真空対応のモータや高精度ステージが用いられる<sup>34)</sup>。

#### 4.2.4 結晶の冷却

SPring-8 のビームラインでは結晶分光器は通常光源から 30 ~ 40 m 付近に設置される。光源の種類にもよるが、第一結晶が受ける熱負荷はパワーで最大数百 W、パワー密度で最大数百  $\text{W}/\text{mm}^2$  になる。結晶を冷却しないで用いれば最悪の場合融解、破損に至るが、そうでなくても熱膨張による結晶のひずみ、第一結晶と第二結晶の格子面間隔の不整合などをもたらす、分光器の基本的な性能を劣化（強度の低下、発散の増大、出射方向の変化）につながる。このため、結晶上に照射される全パワーおよびパワー密度に応じた冷却方法が用いられている。第二結晶についても第一結晶において Compton 散乱された X 線が第二結晶を照射するため第二結晶が受ける熱も無視できず、それなりの冷却が必要とされる。

表 2 は結晶冷却における性能指数をシリコンおよびダイヤモンドについて示したものである。基本的に熱伝導率 $\kappa$ が高いこと、熱膨張係数 $\alpha$ が小さいことが重要である。数百 W の高熱負荷に対応するためにシリコンを液体窒素温度に冷却する方法<sup>37)</sup>や常温(水冷)で熱特性に優れたダイヤモンド結晶を用いる方法がある<sup>38)</sup>。また、液体窒素や水などの冷媒への熱伝達を良くすることも重要であり、フィンやピンポスト加工されたシリコン結晶に直接冷却水を流して熱伝達を高める方法も用いられている<sup>39,40)</sup>。

#### 4.3 ビームラインにおける強度の計算例

図 12 は SPring-8 の標準的なアンジュレータにおける強度スペクトルの計算例である。(a) は基本波のエネルギーが 10 keV になるようにアンジュレータをチューンした状態において、まずはスリットでの制限なしに空間的に全フラックスを積分したスペクトルを示している。これに対して、(b) はフロントエンドスリットにより光軸上付近のみを取り出したスペクトルである。分光されない不要な成分がスリットにより取り除かれることがわかる。さらに、Si の (111) 面で 10 keV のエネルギーを分光して取り出した強度 (c) と、それに付随する 3 次光 (333 反射, 30 keV) の強度 (d) を示した。これは、表 1 で示したパラメータを用いて

表 2 結晶冷却の性能指数

結晶	Silicon	Silicon	Diamond
温度 (K)	300	80	300
$\kappa$ (W/m/K)	150	1000	2000
$\alpha$ (1/K)	$2.5 \times 10^{-6}$	$-5 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-6}$
$\kappa / \alpha \times 10^6$	60	2000	2000

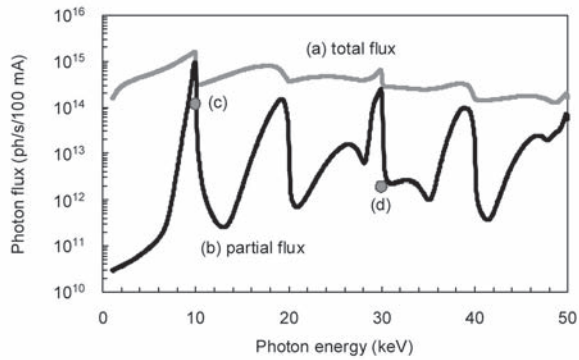


図 12 SPring-8 標準アンジュレータ光源からのスペクトルが加工されていく様子. (a) 0.1%バンド幅あたりのトータルフラックススペクトル, (b) フロントエンドスリットにて切り出した部分フラックス (30 m の位置で  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  に切り出した場合), (c) Si 111 反射による分光後の強度 (10 keV), (d) 3 次光の強度 (30 keV)

結晶の受け入れのバンド幅を計算することによって求められる. 3 次光のバンド幅の方が狭いため, 2 桁近く強度落ちているが, さらに高次光成分を低減するには 4.1 で述べたミラーを用いる必要がある.

## 5. おわりに

SPring-8 の例を中心に放射光ビームラインの全体像を上流から下流にわたり概観した. 今後ナノビームの利用, X 線自由電子レーザーの利用などが展開していくと放射光ビームラインに要求される技術は益々高度なものになってくるであろう. 現在 SPring-8 に建設中の X 線自由電子レーザーでは先行して X 線用ビームライン 1 本を建設中である<sup>41)</sup>. X 線自由電子レーザーでは, ビームラインの構成は SPring-8 のものより複雑であり, 光学機器に関してはより高精度で安定な動作を目指して設計・製作がなされている. 高い尖頭輝度によるアブレーションの問題などを考慮し, ビームの照射部分の材料には軽元素材料を選択するなどの工夫が取り込まれている. また, コヒーレンスにすぐれたビームを途中の光学系で損ねては全く意味がなく, 光学素子の扱いに対するよりいっそうの注意が必要である. 完成したビームラインにおいて実際にビームを取り出してみるとビームラインの要素技術に関しても, 新たな課題を見出すかも知れない. ここで得られる新たな知見と確立される技術は, 蓄積リングの放射光ビームラインにもフィードバックされるものと期待する.

## 参考文献

1) J. Schwinger, "On the classical radiation of accelerated electrons", *Phys. Rev.* **75**, p. 1912 (1949).

- 2) K. -J. Kim, "Characteristics of synchrotron radiation", *AIP Conference Proceedings* **184**, Vol. 1, p. 565 (1989).
- 3) 田中隆次, 備前輝彦, 北村英男, "加速器におけるアンジュレータ (前編)", *加速器* **5**, p. 3 (2008), および, 田中隆次, 備前輝彦, 北村英男, "加速器におけるアンジュレータ (後編)", *加速器* **5**, p. 100 (2008).
- 4) T. Tanaka and H. Kitamura, "SPECTRA: a synchrotron radiation calculation code", *J. Synchrotron Rad.* **8**, p. 1221 (2001).  
計算コードは URL: <http://radiant.harima.riken.go.jp/spectra/> から入手できる.
- 5) K. Takeshita et al., "Construction of beamline radiation shielding hutch at the SPring-8", *Nucl. Instr. Meth.* **A467-468**, p. 829 (2001).
- 6) S. Goto, et al., "Construction and commissioning of a 215-m-long beamline at SPring-8", *Nucl. Instr. Meth.* **A467-468**, p. 682 (2001).
- 7) Y. Suzuki et al., "Construction and commissioning of a 248 m-long beamline with x-ray undulator light source", *AIP conference proceedings* **705**, p. 344 (2004).
- 8) T. Ishikawa et al., "One kilometer beamline at SPring-8", *Proc. SPIE* **4145**, p. 1 (2001).
- 9) T. Matsushita et al., "Beamline Interlock system and rfBPM interlock system in SPring-8", *Nucl. Instr. Meth.* **A467-468**, p. 816 (2001).
- 10) T. Ohata et al., "SPring-8 beamline control system", *Nucl. Instr. Meth.* **A467-468**, p. 820 (2001).
- 11) T. Ohata et al., "Secure network for beamline control", *Nucl. Instr. Meth.* **A467-468**, p. 825 (2001).
- 12) S. Sato et al., "Front ends for the Photon Factory beam lines", *Nucl. Instr. Meth.* **208**, p. 31 (1983).
- 13) S. Goto et al., "Characterization of beryllium and CVD diamond for synchrotron radiation beamline windows and x-ray beam monitor", *Proc. SPIE* **6705**, p. 67050H-1 (2007).
- 14) Y. Jaski and D. Cookson, "Design and application of CVD diamond windows for x-rays at the Advanced Photon Source", *AIP conference proceedings* **879**, p. 1053 (2007).
- 15) S. Takahashi, Y. Sakurai, and H. Kitamura, "Design of a pre-slit for SPring-8 undulator beamlines", *J. Synchrotron Rad.* **5**, p. 581 (1998).
- 16) M. Oura, Y. Sakurai, and H. Kitamura, "Front-end XY-slits assembly for the SPring-8 undulator beamlines", *J. Synchrotron Rad.* **5**, p. 606 (1998).
- 17) M. Sano et al., "Quantitative estimation of thermal contact conductance of a real front-end component at SPring-8 front-end", *J. Synchrotron Rad.* **15**, p. 1 (2008).
- 18) S. Takahashi et al., "Fatigue life prediction for high-heat-load components made of GlidCop by elastic-

- plastic analysis”, *J. Synchrotron Rad.* **15**, p.144 (2008).
- 19) S. Goto et al., “Standard transport channels of x-ray beamlines at SPring-8”, *J. Synchrotron Rad.* **5**, p. 1202 (1998).
  - 20) H. Ohashi et al., “Vacuum system of x-ray beamlines of SPring-8”, *Nucl. Instr. Meth.* **A467-468**, p. 801 (2001).
  - 21) T. Takeuchi et al., “Development of high-precision slit for x-ray beamline at SPring-8”, *Proc. SPIE* **7448**, p. 74480Y-1 (2009).
  - 22) 後藤俊治, 石川哲也, “放射光利用における X 線光学素子”, *日本結晶学会誌* **47**, p. 171 (2005).
  - 23) 浪岡武, 山下広順編, “X 線結像光学”, 培風館 (1999).
  - 24) 菊田惺志著, “X 線回折・散乱技術上”, 東京大学出版会 (1992).
  - 25) 大橋治彦, 平野馨一編, “放射光ビームライン光学技術入門”, 日本放射光学会 (2008).
  - 26) LBNL の 数 表, URL: [http://henke.lbl.gov/optical\\_constants/index.html](http://henke.lbl.gov/optical_constants/index.html).
  - 27) NIST の 数 表, URL: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/FFast/html/form.html>.
  - 28) D. H. Bilderback, “Reflectance of x-ray mirrors from 3.8 to 50 keV (3.3 to 0.25 Å)”, *Proc. SPIE* **315**, p. 90 (1981).
  - 29) J. Susini, “Design parameters for hard x-ray mirrors: the European Synchrotron Radiation Facility case”, *Opt. Eng.* **34**, p. 361 (1995).
  - 30) T. Uruga et al., “Standard x-ray mirror systems for SPring-8 beamlines”, *Nucl. Instr. Meth.* **A467-468**, p. 782 (2001).
  - 31) H. Mimura et al., “Breaking the 10 nm barrier in hard-X-ray focusing”, *Nature Phys.* **6**, p. 122 (2010).
  - 32) H. Yumoto et al., “Design optimization of highly accurate elliptical mirrors for hard-x-ray micro focusing probes at SPring-8”, *Proc. SPIE* **7448**, p. 74480Z-1 (2009).
  - 33) K. Hirata et al., “New micro-beam beamline at SPring-8, targeting at protein micro-crystallography”, *AIP conference proceedings* **1234**, p. 901 (2010).
  - 34) M. Yabashi et al., “SPring-8 standard x-ray monochromators”, *Proc. SPIE* **3773**, p. 2 (1999).
  - 35) H. Kawata and M. Ando, “A double crystal monochromator for the Photon Factory wiggler beamline”, *Nucl. Instr. Meth.* **A246**, p. 368 (1986).
  - 36) T. Matsushita, T. Ishikawa, and H. Oyanagi, “Sagittally focusing double-crystal monochromator with constant exit beam height at the Photon Factory”, *Nucl. Instr. Meth.* **A246**, p. 377 (1986).
  - 37) T. Mochizuki et al., “Cryogenic cooling monochromators for the SPring-8 undulator beamlines”, *Nucl. Instr. Meth.* **A467-468**, p. 647 (2001).
  - 38) M. Yabashi et al., “Diamond double-crystal monochromator for SPring-8 undulator beamlines”, *AIP conference proceedings* **879**, p. 922 (2007).
  - 39) T. Uruga et al., “X-ray optics research and development for SPring-8 beamlines” *Rev. Sci. Instrum.* **66**, p. 2254 (1995).
  - 40) H. Yamazaki et al., “Water-cooled first crystals for the SPring-8 x-ray undulator beamlines”, *Proc. SPIE* **3773**, p. 21 (1999).
  - 41) 矢橋牧名他, “SPring-8 における XFEL/EUV-FEL ビームライン”, *放射光* **22**, p. 56 (2009).