

基礎講座3 ビームライン

JASRI ビームライン・技術部門 後藤俊治

1. はじめに

偏向電磁石やウィグラーから放射される白色光や、アンジュレータから放射される準単色光をそのままのスペクトルとパワー分布にて実験に使用するケースは稀であり、少なくともスリットやコリメータなどにより空間的・角度的なビームの制限をして利用することになる。最も簡単なビームラインは単なるビームパイプである。実際のビームラインは、これから発展し、蓄積リングの超高真空を維持するための真空的な配慮、ビームシャッターやガンマ線ストッパ、遮蔽などの放射線防護的な配慮をして機能が加えられていったものである。さらに、放射光に対して、フォトンエネルギーおよびそのエネルギー幅、空間および角度的なビーム広がりなどの選択、加工をして、ユーザの必要とする光を実験ステーションに導くために、結晶や回折格子による分光光学系やミラーによる集光光学系などを付加してビームラインができあがっている。

本講義では、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、光学系・輸送チャンネルなどから構成されるビームラインの全体像について概説する。

2. SPring-8におけるビームラインの全体的な配置、ビームライン機器構成など

2.1 全体配置

図1にビームラインの構成例としてBL01B1の全体を、蓄積リング、収納部、実験ホールとの位置関係も合わせて示した。図示した範囲は、蓄積リング、実験ホール全周のうち約1/20分に相当する。目的によって規模、構成は異なるものの、このようなビームラインが実験ホール一周にわたって整備されている。

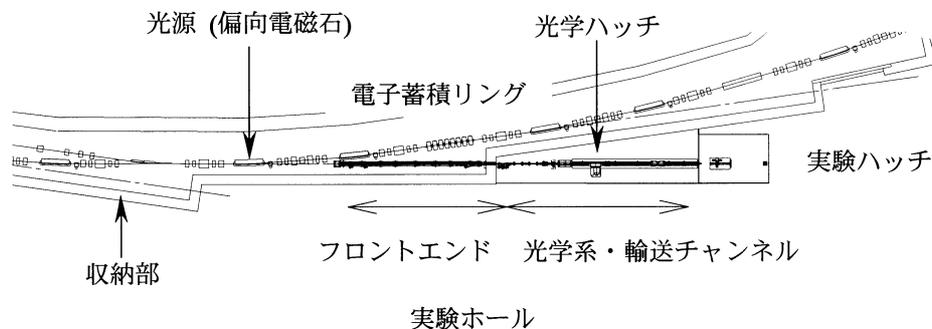


図1. ビームライン全体配置の例 (偏向電磁石ビームライン BL01B1)

電子蓄積リングはコンクリートでできた収納部内に設置されている。収納部は蓄積リングにおいて発生する放射線（高エネルギーの制動放射ガンマ線、中性子、放射光）が実験ホール側に漏れることを防ぐためにある。蓄積リングの偏向電磁石や挿入光源から放射される放射光は、収納部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。

SPring-8 における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。収納部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光学系・輸送チャンネルである。ビームラインの末端にあるものが実験ステーションである。通常、光学系・輸送チャンネルは光学ハッチ内に、実験ステーションは実験ハッチ内に設置される。

SPring-8 のビームラインの長さは、光学系によって決められるばかりではなく、収納部、実験ホール、外壁など建物の構造と隣接ビームラインとの取り合いによって制限される。光源点から収納部出口までが 25～35 m 程度となっており、光学系・輸送チャンネルで通常 10～20 m 程度である。実験ホールの終端までビームラインを延長したとして最長約 100 m となる。一方、屋外に出て医学利用実験棟に延びる中尺ビームラインで 200～250 m 程度、長尺ビームラインで 1 km と特殊なものもある。

2.2 フロントエンド

フロントエンドの機器構成例を図 2 に示す。フロントエンドの果たす役割は概して以下のようになる。

(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防ぎ（ライフタイムをのばし）、また、その際制動放射される高エネルギー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、それに直接つながるフロントエンドでは高い真空度が要求される。また、放射光を実験ステーションに導くまでに空気による吸収、散乱により放射光強度が失われることを避け、ビームライン途中で不要な散乱線が発生することを避けるためにも高い真空が必要になる。

フロントエンドには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。真空ポンプとしてはイオンポンプが主として用いられており、典型的な圧力 10^{-8} ～ 10^{-7} Pa で維持されている。機器は全て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管理されている。

(II) 放射光の導入/遮断

収納部内から実験ホール側への放射光の導入/遮断はメインビームシャッタによっておこなわれる。通常メインビームシャッタ (MBS) と称しているのは、上流部のアブソーバと収納部出口手前にあるビームシャッタという二つのコンポーネントの組である。これらは通常の使用においては連動して制御されている。

ビームシャッタにおいては、放射光およびガンマ線を遮断するための長さ 400 mm のタングステンブロックがエアシリンダにより上下し、放射光を通し、もしくは、遮断している。ビームシャッタ自身は、放射光の熱負荷に対して冷却の機能をもっておらず、放射線を遮断するためのものである。ビームシャッタが閉じているときに放射光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、水冷されたグリッドコップ (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、標準アンジュレータビームラインではトータル 10 kW 強、パワー密度 1 kW/mm² 強にもおよぶ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加工

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。このため、マスク、XY スリット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ている。これらのコンポーネントに関する熱の対処の仕方も原理的にアブソーバと同様である。

2.3 光学系・輸送チャンネル

光学系・輸送チャンネルの機器構成例を図 3 に示す。ここでは遮蔽ハッチについても広い意味で光学系・輸送チャンネルに含むものとし、それぞれの機器の果たす機能について簡単に説明する。

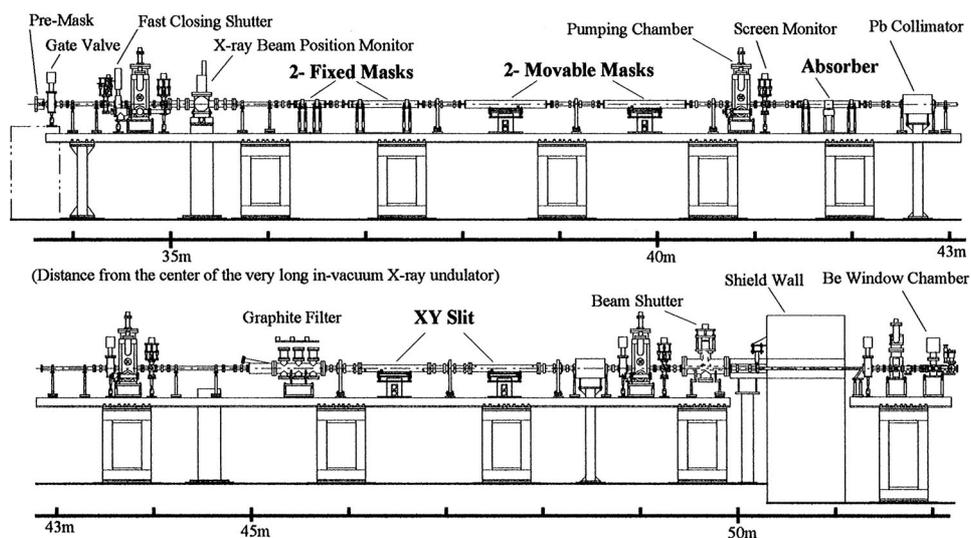


図 2. フロントエンドの機器構成例 (BL19LXU)

(I) 遮蔽ハッチ

高エネルギーの X 線を含む放射光ビームラインにおいては、その途中で放射光が光学素子、スリットなど何らかのものに当たった際に生じる散乱線を遮蔽するためのものが必要である。遮蔽ハッチはこの目的でビームラインを囲むように設置されている。

遮蔽ハッチは、基本的に厚さ 5 mm 程度で 2 枚の鋼板の間に所定の厚さの鉛板をはさみ込んだサンドイッチ構造のパネルによって構成されている。鉛の厚さは、光源の種類、出力、散乱体の種類、幾何学的な配置などに基づいて遮蔽計算によって決められている。光学ハッチでは 10~50 mm 程度、実験ハッチでは 3~10 mm 程度である。以下で述べるエンドストップや局所遮蔽といった遮蔽体を併用することにより効果的な放射線遮蔽がなされている。

(II) 光学系・輸送チャンネルにおける真空

以下のような理由により、光学系・輸送チャンネルにおいても高い真空が必要となる。

(a) 不要な吸収・散乱を避けるため

放射光を実験ステーションに導くまでに空気による吸収、散乱により放射光強度そのものが失われることを避けるためであり、また、ビームライン途中で不要な散乱線が漏洩することを避けるためである。

(b) 光学素子の汚染、損傷を避けるため

酸素、油分などと放射光の光化学反応による光学素子表面の汚染、損傷を避けるため、これらの成分が極力少ない酸素フリー、オイルフリーな真空が望まれる。

標準的な X 線ビームラインの光学系・輸送チャンネル部の真空排気は 300 L/s 程度のターボ分子ポンプとオイルフリーの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。到達圧力は排気するコンポーネントにも依存するが $10^6 \sim 10^3$ Pa である。大気中で実験をおこなうステーションにおいてはビームライン終端に厚さ 250 μm 程度のベリリウム窓を取り付けて、大気中に放射光を取り出している。

一方、軟 X 線の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。

(III) 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。これらについてはあとで説明する。

また、スリットによりビームを空間的に制限し、不要なビームを除去するなどの加工がおこなわれる。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を受け熱的に対処し、その下流側に熱的に接触された Ta ブレードによって X 線を遮断する。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。

3. 全反射ミラー

全反射ミラーは、分光器の基本波に付随する高次光成分の除去など高エネルギー成分除去、湾曲ミラーによるビームの集光・平行化のような目的でビームラインにおいて広く用いられている。

X線領域においては、屈折率が1よりごくわずかに小さいため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。全反射がおきる臨界角（表面から測った角度）は $\theta_c = \sqrt{2\delta}$ で与えられる。ここで、 δ はミラー媒質の屈折率 n の1からのずれ（実部）である。ミラー材料（電子密度）、フォトンエネルギーなどに依存するがX線領域では臨界角は数 mrad 程度である。波長が極めて短いX線領域では反射率は表面粗さの影響を受けやすく、1 nm rms のオーダかそれ以下が要求される。

SPRING-8 の X 線ビームラインにおいては、熱的、放射線的な耐性から白色放射光を受けるミラーの材料として、シリコンを用い、一方、熱負荷のない単色 X 線用には石英を用いることが多い。ミラー表面のコーティング材料は、使用エネルギー、反射率、吸収端などを考慮して選択される。Pt, Rh などが用いられている。これらのコーティングを施すことによりシリコンや石英母材に比べて同一のフォトンエネルギーに対する臨界角を大きくすることができ、その分同じビームサイズのビームを反射するのに必要なミラーの長さを短くすることができる。ミラーに対する視射角は X 線ビームラインの場合 2~10 mrad の範囲で適宜に選ばれる。図 4 に Pt および Rh をコーティングした場合の反射率曲線の計算例を示す。

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を約 100 μ rad, 光源からミラーまでの距離を 30~40 m, 視射角を 2~10 mrad とすると 1 m 程度の長さのミラーが必要となってくる。

図 5 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。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、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 のオーダで曲げることができ、これ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。

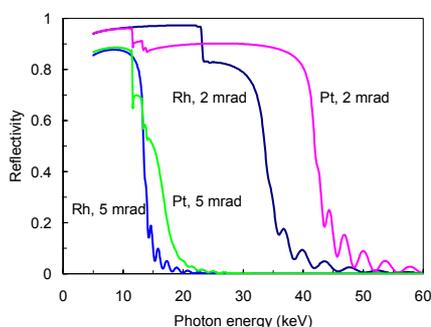


図 4. 全反射ミラーの反射曲線の計算例



図 5. 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)

4. 結晶分光器

一部の白色の放射光をそのまま用いる実験ステーションを除き、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系コンポーネントである。分光の原理は完全な単結晶による Bragg 反射である。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、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。また、通常用いられる二結晶分光器では、エネルギーを変えても分光器を出射して試料に至るまでの光軸を変えないこと、さらに、結晶の曲げによりビームを集光することなどの機能が加わる。

4.1 分光結晶

SPring-8 における分光結晶は大半がシリコン単結晶である。これは、半導体産業においてシリコンが主材料であることと大きく関連しており、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がその理由である。

また、近年完全結晶にかなり近い人工ダイヤモンドが合成されるようになっており、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ダイヤモンドが用いられている。

4.2 分光可能なエネルギー範囲

シリコン単結晶を用いてどのような波長領域の X 線が分光可能か具体例を見てみる。よく知られているように Bragg の式は以下のように与えられる。

$$2d \sin \theta_{\text{BK}} = n\lambda \quad (1)$$

ここで、 d は反射に寄与する格子面の面間隔、 θ_{BK} は屈折の効果を考慮しない運動学的回折に基づく Bragg 角、 λ は分光される X 線の基本波長、 n はその n 次光が分光されることを意味している。波長からエネルギーに換算するには、 $E_{\text{BK}} [\text{keV}] = 1.24/\lambda [\text{nm}]$ を用いればよい。

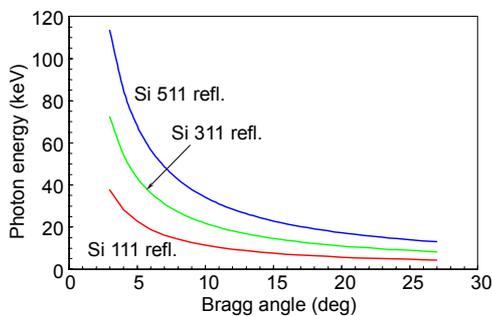


図 7. 分光可能なエネルギーと Bragg 角の関係

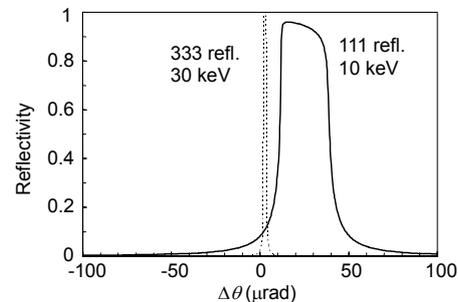


図 8. Si 結晶の回折曲線の計算例

一例として、SPring-8の標準型二結晶分光器は3~27°の範囲でBragg角が選択できるようになっている。Si 111 反射, 311 反射, 511 反射, 333 反射などが主として用いられ、これらの反射により4.4~110 keVの範囲の分光が可能である(図7)。

4.3 回折曲線と回折幅

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。加工ひずみや熱ひずみのないシリコン結晶の場合、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。図8は回折曲線の入射角依存性(イントリンシックなロッキングカーブ)の対称Bragg caseにおける計算例である。屈折を考慮しないBragg角 θ_{BK} からは屈折の影響で回折のピークを与える位置が高角度側にわずかにずれること、回折を起こす範囲が有限の幅をもつことなどが動力的回折理論の特徴である。また、吸収が少ない硬X線領域では反射率のピーク値は1に近い。

図9にはSi 111 反射, 311 反射, 511 反射の回折幅(半値全幅 FWHM)のエネルギー依存性を示した。これからわかるように0.1~100 μrad のオーダの回折幅を有している。比較のために同じグラフ中にSPring-8の偏向電磁石および標準アンジュレータ(周期長 32 mm, 周期数 140)からの放射光の角度発散(半値全幅)を示した。SPring-8において、偏向電磁石からの放射光の発散は回折幅に比べて1桁程度大きい、アンジュレータからの放射光の発散は低次の反射の回折幅と同程度である。

4.4 エネルギー分解能

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 Ω と、結晶そのものが有する回折幅 ω のコンボリューションによって(2)式のように表される。

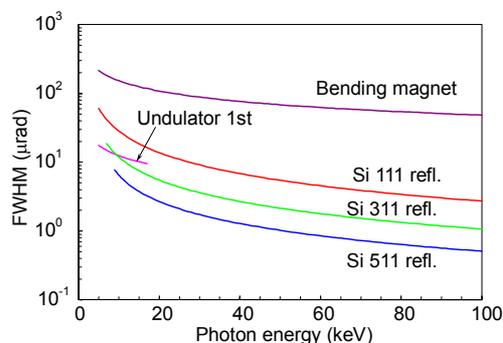


図9. 回折幅のエネルギー依存性
および光源の発散角

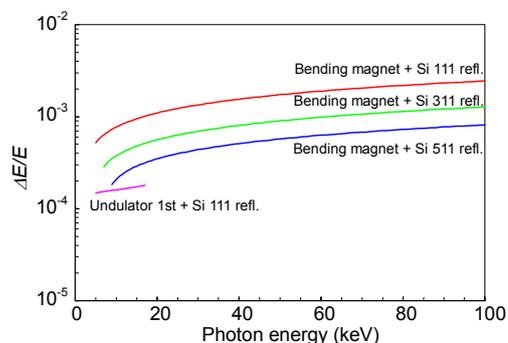


図10. 標準アンジュレータ、偏向電磁石を光源
としたときのエネルギー分解能

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

図 10 は SPring-8 の標準アンジュレータ、偏向電磁石を光源としたときのエネルギー分解能について示したものである。ここでは、光源からの発散についてはスリットなどの制限は無く、そのものの自然発散を考えている。したがって、スリットやコリメータミラーを用いて光源からの発散を制限すると分解能を向上させることができる。通常の使用条件では $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 程度である。

4.5 二結晶分光器と定位置出射

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射出ビームの位置を一定に保つことができる。これにより、ユーザにとって使い勝手が向上する。

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射出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 角を変化させても射出ビームの位置と方向を一定に保つことである。

図 9 に定位置出射を実現する一つの方法を示す。1 軸の回転テーブルの上に第一結晶および第二結晶が併進 2 軸とともに置かれた配置である。この例では第一結晶について直交 2 軸の並進操作をおこなうものとしている。この場合について定位置出射に必要な結晶の並進の条件を求めてみる。Bragg 角を変化させてもオフセット h を保つためには、幾何学的考察から、以下の関係を満たす必要があることがわかる。

$$y = AB = \frac{h}{2 \sin \theta_{BK}}, \quad z = OB = \frac{h}{2 \cos \theta_{BK}} \quad (3)$$

SPring-8 の標準型二結晶分光器 (図 10) では、分光器全体を現実的な大きさにするため、オフセットとしては 30 mm が選ばれ、Bragg 角の設定範囲は $3 \sim 27^\circ$ に選ばれている。

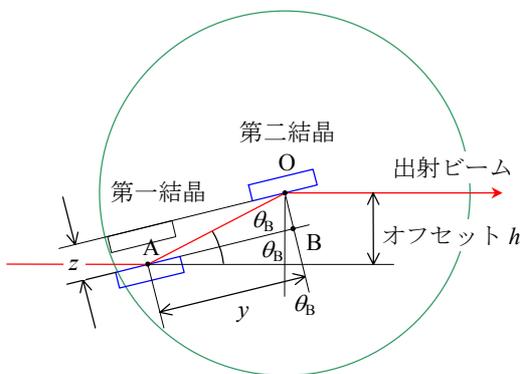


図 9. 定位置出射を可能とする結晶の角度、位置

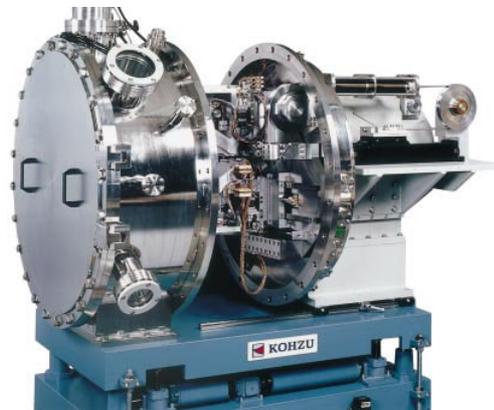


図 10. SPring-8 標準二結晶分光器の概観

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 (θ - y - z) 以外にも多くの調整ステージを有している。Bragg 角の微調整、アオリ、面内回転、結晶位置の調整などの調整機構を有している。例えば Bragg 角の微調整については回折幅より十分小さな分解能と精度が必要であり、この場合 $0.05 \mu\text{rad}$ となっている。その他の回転軸についても $1 \mu\text{rad}$ 程度かそれ以下、並進軸で $0.1 \mu\text{m}$ 程度となっている。

4.6 結晶の冷却

SPring-8 のビームラインでは結晶分光器は光源から $30\sim 40 \text{ m}$ 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最大数百 W/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ち、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）につなげる。このため、照射パワーおよび照射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ける分光後の単色 X 線のみならず、第一結晶において Compton 散乱された X 線が第二結晶に入射した結果、第二結晶が受ける熱も無視できず、それなりの冷却を必要としている。

5. 放射光強度の計算例

図 11 は偏向電磁石ビームラインにおける強度（スペクトル）の計算例で、図 3 のような構成における二結晶分光器と二回反射の高次光除去ミラーからなる光学系を仮定したものである。偏向電磁石からの放射光スペクトル (a) は全反射ミラーにより 15 keV 以上の高エネルギー成分が除去される (b)。また、Be 窓による吸収により 10 keV 以下の低エネルギー成分が幾分減少する (c)。さらに、結晶分光器により分光されることにより、最終的な単色 X 線 (d) が得られる。

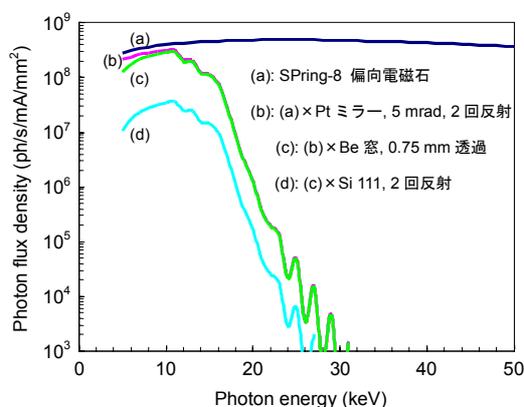


図 11. 偏向電磁石ビームラインのスペクトルの光学系による変化

以上