

蓄積リング内で発生した放射光を、各種実験装置まで導く部分をビームラインと呼びます。例えて言うなら、発電所と家庭のACコンセントとの間を結ぶ送電システムのようなものです。送電システムが電線だけでできているのではないように、ビームラインも単なるパイプではありません。蓄積リングの超高真空を保護し、実験に最も合った放射光ビームを作り、安全に効率良く実験装置まで放射光を導くことがビームラインに課せられた要求です。

家電製品は発電のメカニズムや送電のシステムを知らなくても、電源プラグをコンセントに差し込みさえすれば使用することができます。しかし、トランスやブレーカーの存在、アースの取り方や配線の許容電流値などについての知識を持っていたほうが、安全で効率の良い電気の使い方ができるでしょう。同様なことが、放射光を利用する実験にも当てはまります。中には、光源やビームラインのことをあまり知らなくてもできるものもあ

ります。しかし、より高度な実験をより安全に行うためには、光源やビームラインに関する知識が必要不可欠となります。光源については本セミナー前半で報告されていますので、ここではビームラインについて見ていくことにしましょう。

図1は高エネルギー物理学研究所・放射光実験施設（Photon Factory、PF）のビームラインと実験ステーションの配置図です。楕円の形をしているものが蓄積リングで、楕円の接線方向に放射状に伸びているのがビームラインです。この図からわかるように蓄積リングはひとつしかありませんが、それを取り囲むように数多くのビームラインがあり、同時に利用することができます。また多くの場合、ビームラインは同時にいくつかの実験を独立に行うために、光源点から下流側で数本に分岐されています。

ビームラインは、比較的波長の長い光を利用する真空紫外用ビームラインと、それに比べて波長の短い光を利用するX線用ビームラインとに大別

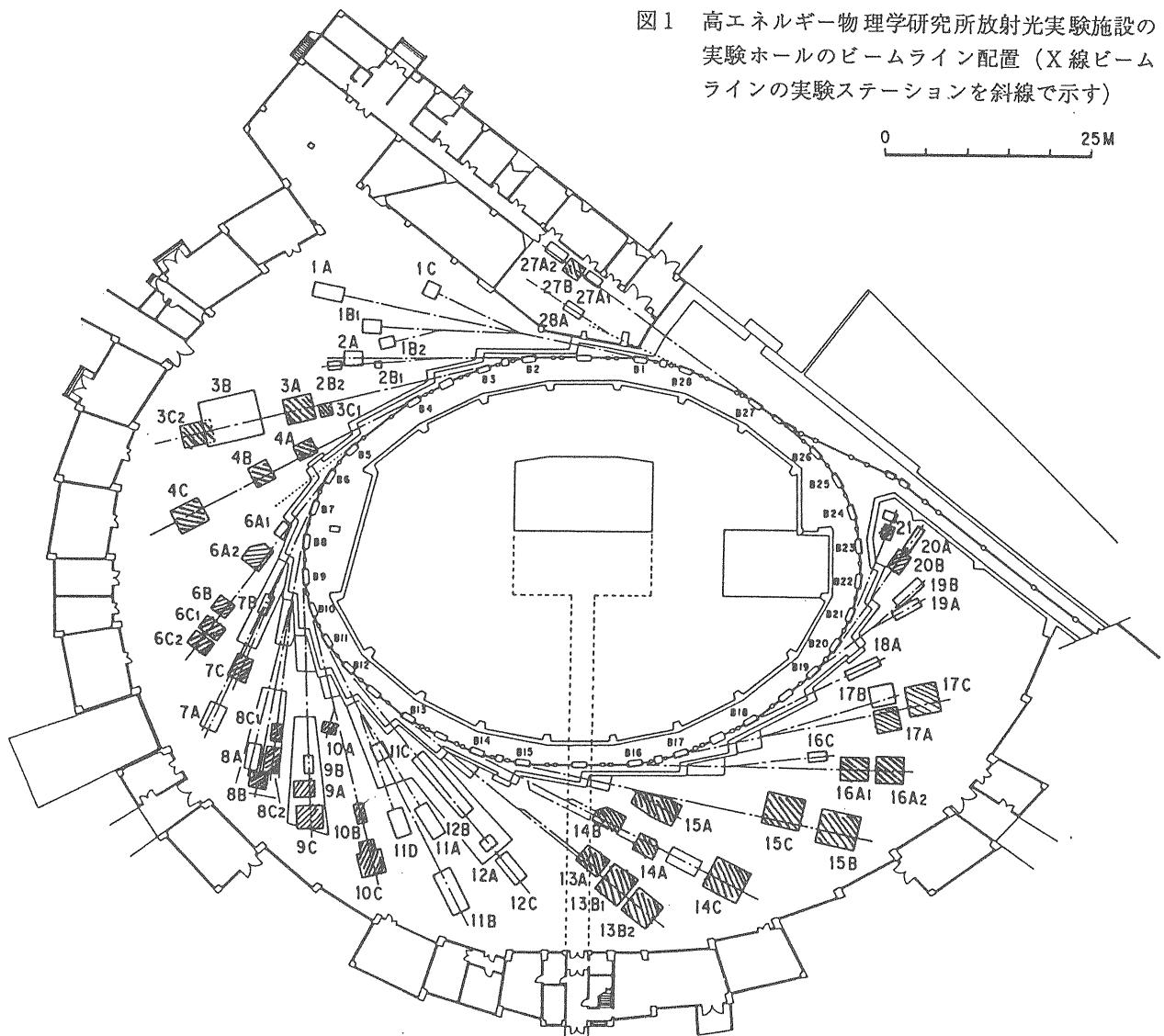


図1 高エネルギー物理学研究所放射光実験施設の
実験ホールのビームライン配置（X線ビーム
ラインの実験ステーションを斜線で示す）

されます。これら2種類のビームラインの境界はそれほどはっきりしたものではなく、真空の取り扱い方法か分光の技術で分類することができます。真空仕様による分類とは、ビームライン中にX線を透過することができるような明らかな真空仕切り、たとえばベリリウム薄板の窓、があるかないかということによって分けることをさします。真空仕切りのあるほうがX線用です。分光技術による分類とは、連続的なスペクトルを持つ放射光から実験に必要な単色光を取り出すのに、結晶を用いるか回折格子を用いるかということによって分けることをさします。この場合は結晶を用いるほうがX線用です。これらの詳細については後述するとして、さしあたって本講「X線用ビームライン」では、特に断らないかぎり真空仕様による分類を採用することにします。図1中に、X線用ビームラインの実験ステーションを斜線で明示しました。本講では、これらのビームラインを例として、ビームラインの構成に関するさまざまな事項について解説したいと思います。

1. X線用ビームラインの構成

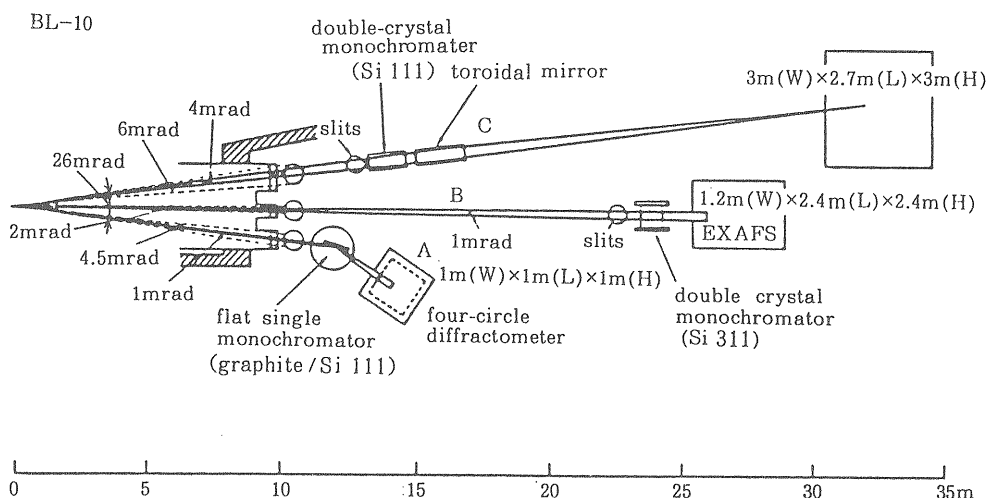
放射光利用実験が大学の研究室などでの実験と比べて際だって異なっているのは、その空間的なスケールにおいてでしょう。蓄積リングの大きさや実験フロアの広さは言うまでもありませんが、光源点から実際に利用実験が行われる場所までの

距離も数十mに達しています。その間に存在するビームラインには、各種真空装置や光学素子、放射線遮蔽用の障壁などがあり、お互いに関連を持ちながら全体としてひとつのシステムを形成しています。

ビームラインは通常光源点より下流で数本に分岐されています。光源点に近く蓄積リングと直結している部分から分岐するまでの間を基幹部、分岐したあとを分岐部と呼んでいます。基幹部は、超高真空のリングと分岐部を接続するので、リングの超高真空の保護と分岐部への放射光取り出しというインターフェース的な役割を担っています。この部分には分岐部からの真空悪化に対処するための役割を持つさまざまなコンポーネントやインターロックシステムがあります。また基幹部自身、蓄積リングと直結しているため、超高真空 (10^{-10} Torr 台) に維持されている必要があります。X線用ビームラインでも真空紫外用ビームラインでも、基幹部はほぼ似たような構造を持っています。

X線用ビームラインでは、多くの場合ビームは基幹部と分岐部の上に置かれたベリリウム窓を通過した後、分岐部へ導かれます。ベリリウム窓は、X線を通しますが気体分子を通しません。したがって、X線用ビームラインの分岐部と蓄積リングとは真空的に切り離されていることになります。分岐部には光源から発生した生の放射光ビームを実験の側から要求されるビームに加工するためのさまざまな光学素子、スリット・モノクロメータ

図2 X線用ビームラインBL10の概念的な平面図



ー（分光器）・ミラー（全反射鏡）などがあります。また、X線用ビームラインの下流端にはハッチと呼ばれる鉄または鉛製の箱ないしは小屋が放射線防御の目的で設置され、すべての実験装置はそのハッチ内に置かれます。

例として、PFのX線用ビームラインBL10の概念的な平面図を図2に示しました。BL10は偏向電磁石BM10から得られる放射光を取り込むように設計されています。発光点から約9 m離れた位置に放射線シールド用の厚さ1 mのコンクリートの壁があり、この壁より上流側が大体ビームラインの基幹部に当たります。その下流からビームラインは3本に分岐され、各分岐部において直列に配置された2枚のベリリウム窓により蓄積リングの真空と隔てられます。分岐部A・B・Cはそれぞれ以下のような構成をしています。Aラインは発光点から12 m付近にモノクロメーターを配し、水平面内でビームの進行方向を変化させ4軸回折計へとビームを導きます。Bラインは24 m付近に2結晶モノクロメーターを、その直前にスリットを置き、EXAFS測定と呼ばれる実験を行うための実験ハッチへビームを供給します。Cラインは15 m付近に上流から直列にスリット、2結晶モノクロメーター、トロイダルミラーを配置し、32 m付近にある実験ハッチへビームを導くようになっていきます。

1.1 基幹部

基幹部には、手動バルブ、光アブソーバー、遮

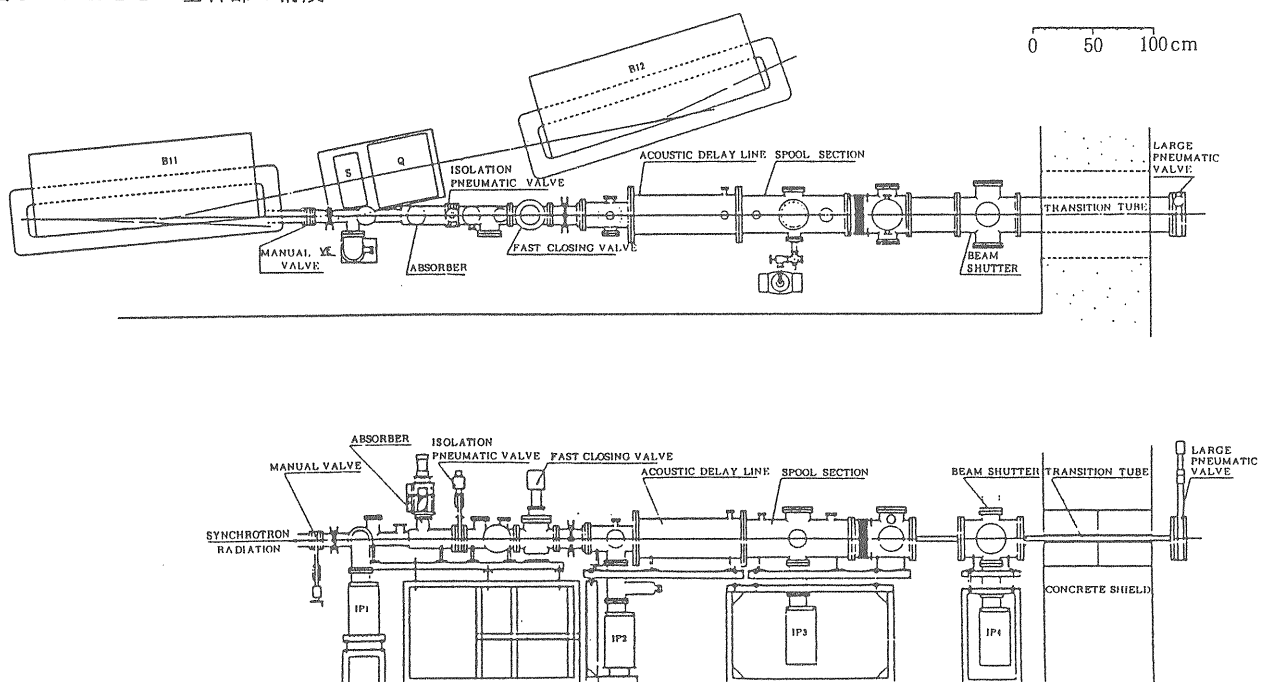
断バルブ、速断バルブ、マスクスリット、衝撃波遅延管、ビームシャッター、大バルブなどが設けられています。例として図3にBL11の基幹部の詳細図を示します。基幹部の機器配置は、放射光ビームの特性と用途、分岐部の構成に応じて細部に渡って一律ではありませんが、おおよそ図3のような並び方をしています。

手動バルブは、リングの真空との遮断のために用いられます。基幹部の真空保守の時やリングの保守を行うような、バルブ両側の真空度に大きな違いが生じるような場合にこのバルブは閉められます。

光アブソーバーは、放射光ビームの下流への出射を遮断するために用いられます。何か適当な物体で直接放射光ビームを遮ると、遮られたビームが持っているエネルギーのほとんどが遮断物のところで熱に変化します。遮断物が安全に放射光ビームを遮断し続けるためには、遮断物は冷却されている必要があります。光アブソーバー本体は、水冷された厚さ20 mm程度の無酸素銅製の板でできています。

マスクスリットは、放射光の出射されるサイズを限定するために設置されています。PFの1つの偏向電磁石から発生する放射光は、鉛直方向に約0.3 mrad、水平方向に約220 mradに広がっています。通常の偏向電磁石を光源とするビームラインでは、鉛直方向にはビームのもつすべての角度発散を、水平方向には約30 mradの角度発散を受け入れるように設計されていま

図3 BL11の基幹部の構成



す。

速断バルブは、分岐部での急速な真空悪化がリングに到達するのを防ぐために用いられます。このバルブは15 msec程度の高速で閉じる機構を有していますので、下流側での真空の悪化が判明次第、真空路を瞬間的に閉鎖することが可能です。しかし、それ単体では真空路を完全に遮断することができませんので、真空路を確実に遮断するために遮断バルブが設けられています。

衝撃波遅延管は、急速な真空悪化の際の衝撃波の伝わる速度を遅らせるためのものです。速断バルブが閉じるまでの間の時間稼ぎをするために設置されています。

ビームシャッターは、硬X線やγ線の遮断を目的としています。光アブソーバーでは遮蔽できないような高いエネルギーの光を遮蔽するため、ビームシャッター本体は長さ40 cmの銅とステンレスから成るブロックでできています。

大バルブは、基幹部と分岐部との真空の遮断を担っています。

また、これらのコンポーネントを制御するため、真空計や流量計のような各種センサー類が組み込まれ、それらの情報は基幹部インターロック制御系に取り込まれます。なお、光アブソーバー、ビームシャッター、遮断バルブ、大バルブを総称してメインビームシャッター (MBS) と呼びます。電子・陽電子ビームのリングへの入射時や放射光ビームを下流側へ出射しないときには、MBSは光路上に挿入された状態になります (このような状態を、MBSが閉まっている、と言います)。

1.2 ベリリウム窓

放射光用の窓材には、相互に矛盾する2つの特性が要求されます。ひとつは、高いX線の透過能を確保するため、窓の厚さをできるかぎり薄くすること。もうひとつは、機械的強度と熱伝導を増すため、厚くしなければならないことです。この2つの要求に対して、透過強度分布や力学的特性、熱的特性などの観点から検討を行い、最適な窓の素材や膜厚を決めなければなりません。X線を透過する真空仕切り材として最も優れた素材はベリリウムでしょう。ベリリウムは原子番号4のアルカリ土類で、放射光用の窓材として要求される機械的・熱的特性やX線の透過能などの条件において他の物質よりも優れています。

PFの偏向電磁石からの放射光に種々の厚さのベリリウム板を挿入した際の透過光スペクトルを

図4に示します。また長方形の開口を持った窓の片側から1気圧がかかった場合の、光源からの距離・ベリリウムの膜厚に対する窓の幅の熱的機械的限界曲線を図5に示しました。図6に実際に用いられている2重構造のベリリウム窓の例を示しました。通常のX線用ビームラインでは基幹部直後のベリリウム窓の下流側が、大気圧のヘリウムで満たされていることを想定して、厚さ0.2 mmのベリリウム板を2枚1組にして用いています。ベリリウム板材は700°C以上に加熱されると、再結晶化を始め強度が低下します。それを避ける

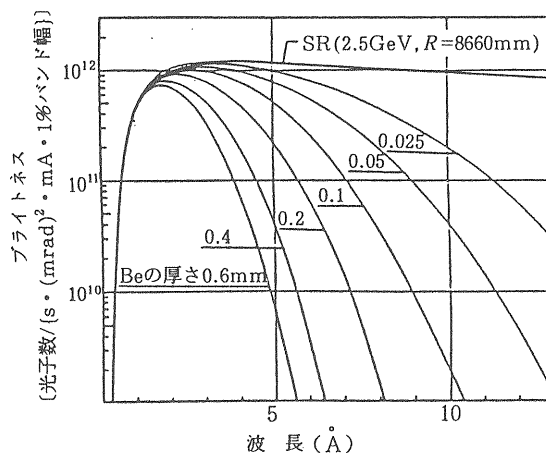


図4 種々の厚さのベリリウム板を透過する偏向電磁石からの放射光のスペクトル

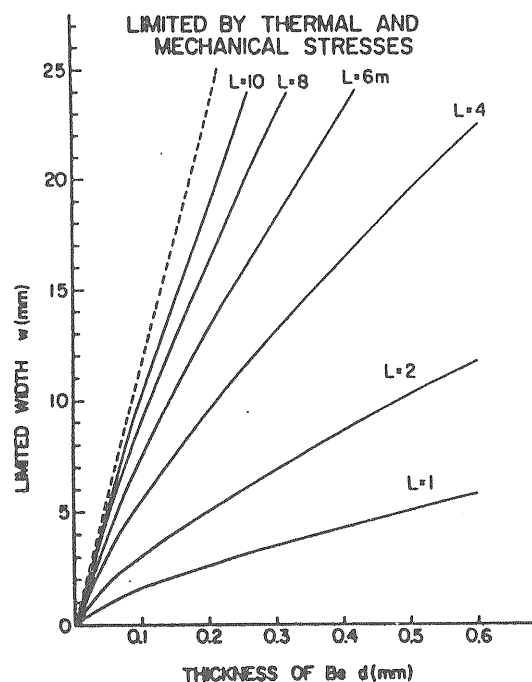


図5 偏向電磁石光源からの距離に対する長方形ベリリウム窓の使用限界

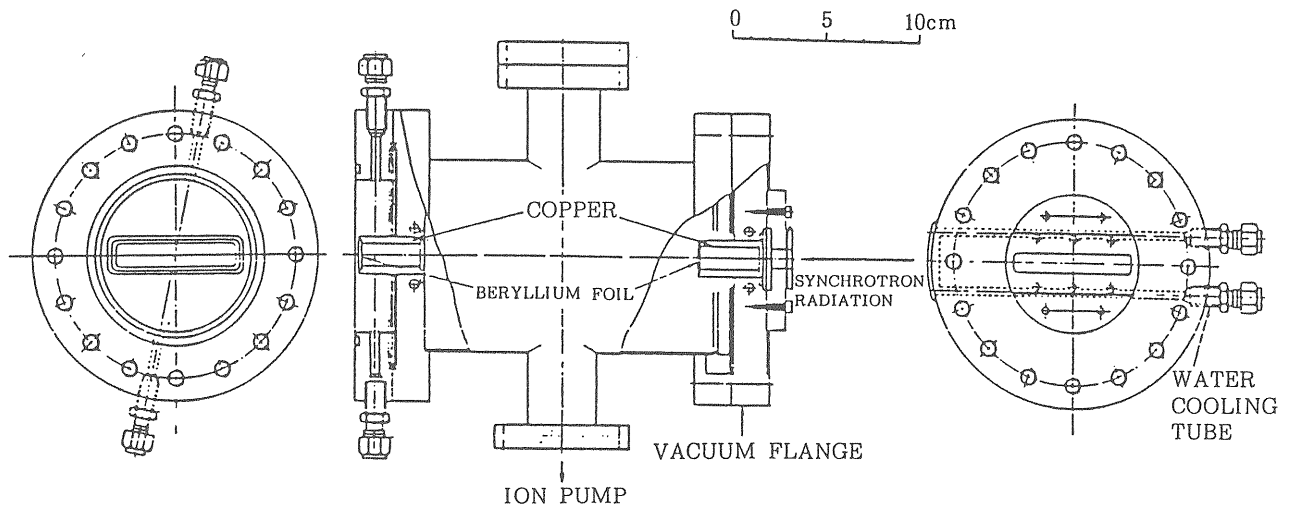


図6 二重構成のベリリウム窓の組立図

ため、温度調節が容易な電子ビーム加熱によって銅枠にろう付けされています。この銅枠を希ガス雰囲気中でステンレス製フランジに熔接し、焼き戻しと漏れ試験を行った後、使用に供されています。ベリリウム窓部の上流側と中間真空部は、超高真空に維持され、基幹部の終端に取付けられません。

放射光がベリリウム窓を通過するとき失われた放射光のエネルギーはベリリウム上で熱に変わりますので、いくらベリリウムが高いX線の透過能を持っていると言っても、冷却してやる必要があります。図6に見られるように、基幹部と分岐部の間にあるベリリウム窓には水冷機構が欠かせません。挿入光源からの大強度放射光に対しては、図6のような冷却方式では冷却能力が不足しており、上流側にカーボンフィルターを設置して前もってビームの中の熱的な成分を吸収してやる必要があります。

ベリリウム窓の下流側は通常ロータリーポンプやターボ分子ポンプで排気されています。超高真空ではない分岐部配管内にはポンプの油分や酸素分子が残留し、これらがX線によって電離され、ベリリウム板やろう付け部を酸化腐食させて真空漏れを発生させることが推測されます。したがって、窓の下流側をも高真空化することが、窓の寿命を延ばすうえでは望まれます。

分岐部の真空パイプの最下流端でX線を大気中に取り出すのにも、ベリリウム窓が用いられます。この場合、通常0.1~0.3mm厚のベリリウム板1枚が使用されます。その直後には、数十 μ m厚のアルミニウムまたはポリイミド系の薄膜を置き、酸素や水分による酸化腐食を防ぐため、そ

の間をヘリウムで置換しています。

1.3 分岐部

分岐部には、ブランチビームシャッター (BBS)、真空バルブ、マスクスリット、スリット、モノクロメーター、ミラー、補助下流ビームシャッター (DSS)、ビーム位置モニター、蛍光板モニター、ハッチ、 γ ストッパーなどが設けられています。これらのうち、どのX線用ビームラインにもかならず設置されているのはBBSとハッチ、 γ ストッパーの3種類だけで、残りの構成要素やその配置は必要に応じて変化します。

BBSは、通常分岐部の最上流に設置され、分岐されたビームを独立に出射・遮断するために用いられます。X線用ビームラインのBBSは、駆動の信頼性を高めるために独立した2個の等価なユニットで構成されています。放射光ビームを遮断する本体は、水冷された銅ブロックにおよそ鉛20cm等量程度の鉛もしくはタングステンのブロックを付加したものでできています。ちょうど基幹部の光アブソーバーとビームシャッターを足したものに对应します。

真空バルブは、そのバルブ位置より上下流の真空の遮断のために用いられます。分岐部を構成している各要素の保守などの時に、その構成要素の上下流の真空バルブを閉めることにより、他の部分の真空を保ちます。その名の通り、分岐部全体を真空に保っているビームラインでは必要ですが、ヘリウム置換しているようなビームラインには存在しません。

マスクスリットは、放射光の出射されるサイズを限定するために設置されます。分岐部における

放射光サイズの限定というのは、基幹部におけるものと多少異なり、マスクスリットよりも下流側の真空パイプ壁面など、予期せぬところへ放射光ビームが当たるのを防ぐことを指します。

スリットは、放射光の出射されるサイズを可変に限定するために使用します。特にモノクロメーターの上流にあるスリットは、最終的に得られる単色X線のエネルギー分解能を決める重要な役割を担っています。

モノクロメーターは、連続したスペクトルを持った放射光ビームを単色化するために用いられます。X線領域での分光素子には、シリコン単結晶が多用されています。X線用モノクロメーターは、デザイン上大きく2種類に分類することができます。ひとつは分光結晶をひとつだけ使用する1結晶モノクロメーターで、もうひとつは分光結晶を2つ使用する2結晶モノクロメーターです。どちらのデザインを採用するかで、ビームライン全体のデザインが大きく左右されます。また、結晶を湾曲させて集光することを考える場合、モノクロメーターを設置する位置がかなり限定されてしまいます。

ミラーは、発散する放射光を集光したり平行化したりするために導入されます。また、高エネルギーのX線をカットするというローパスフィルターとしても用いられます。X線領域で使用するミラーは、母材の上に白金などの金属を蒸着したものを uses。ミラーの母材としては、研削・研磨技術の確立している熔融石英や焼結炭化硅素、シリコンを使用しています。放射光を集光したり平行化したりする場合、ミラー表面は凹面になっている必要があります。平面ミラーならビームラインのどこに設置しても構いませんが、凹面ミラーを使用する場合は設置位置に制限があります。

DSSは、モノクロメーターで単色化された放射光ビームを遮断するために用いられます。モノクロメーターとハッチの間に設置され、5 cm程度の無酸素銅のブロックでできています。

ビーム位置モニターは、ビーム位置変動を検出するために設置されます。これについては本セミナーの「光モニター」のところでも詳しい報告がありますので、そちらを参照してください。

蛍光板モニターは、ビームの位置や形を目視するために用いられます。X線を照射すると可視光領域の蛍光を発するような塗料を塗った板と、その板を目視できるような覗き窓からできています。ここで取り上げた蛍光板モニターとは、ビーム位

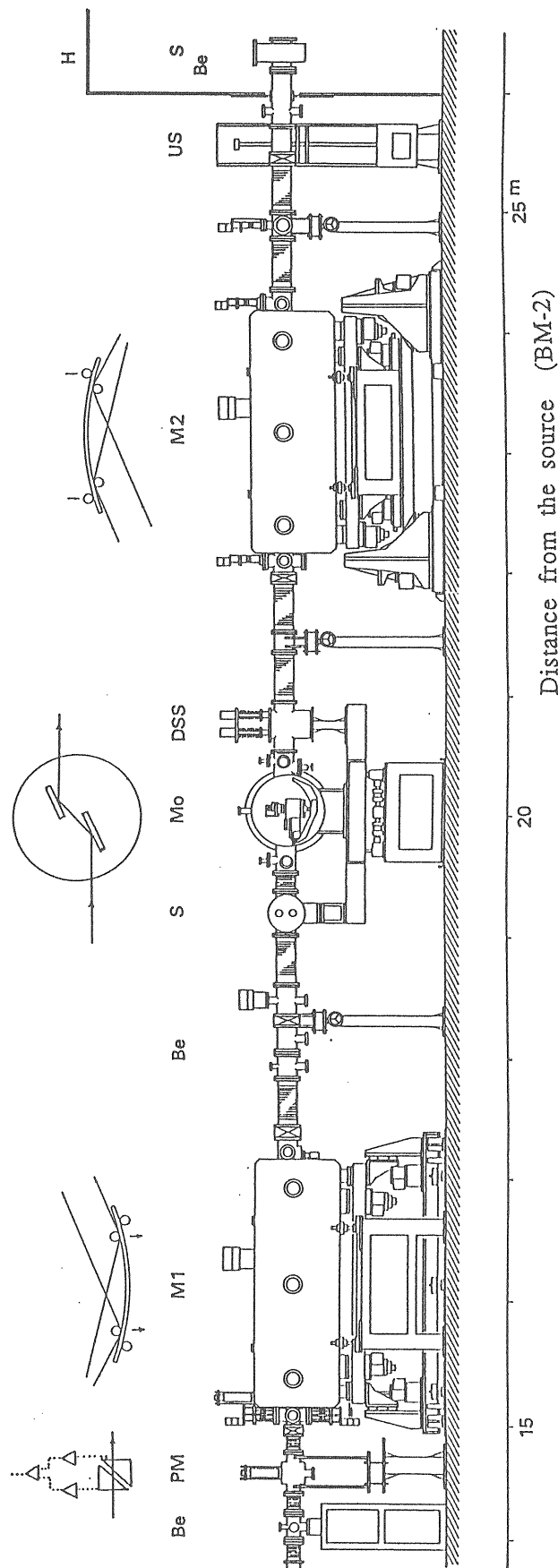


図7 X線用ビームラインBL3Aの側面図

置モニターとして使用されるようなX線ビームの端を一部切り欠くものとは異なり、ビーム全体の形が確認できるようにX線ビーム全体を蛍光板で遮断してしまう物を指します。モノクロメーターやミラーの前後に設置され、光学素子によって期待通りに放射光ビームが加工されているかどうかを確認・診断するために使用されます。

ハッチは、実験装置を格納し、実験者を放射線被曝から防ぐために設けられています。通常は分岐部の下流端に位置し、ビームラインと実験者との接点になります。ハッチの中への実験者の出入りは後述するインターロックシステムにより管理されています。X線ビームがハッチ内に導入されている状態では、ハッチ内に実験者が入ることができないようにしてありますので、実験の各種調整は遠隔操作できるようにしておいたほうが良いでしょう。

γ ストッパーは、実験に使用されなかった硬X線や γ 線を遮断するために用いられます。本体は10~30cm厚の鉛の固まりでできており、光源から放射される白色ビームの伝搬方向に置かれる必要があります。 γ ストッパーの設置場所は、ミラーやモノクロメーターで放射光ビームの方向が白色ビームの方向と変えられた後か、もしくはハッチの下流です。最終的に得られるビームの位置が白色ビームがやって来るであろう位置と大差ない場合には、その両方ともに設置されます。

例として図7にX線用ビームラインBL3Aの側面図を示しました。この図よりも上流側にBBSがあり、その後ろ、この図の一番上流側にベリリウム窓があります。発光点から15m付近にビーム位置モニターがあり、16mに前置ミラー、

18mにベリリウム窓、19mにスリット、20mにモノクロメーター、21mにDSS、23mに後置ミラー、26mにベリリウム窓、そして26m以降にハッチが設置されています。

2. X線用ビームラインの光学系

偏向電磁石や挿入光源で発生した放射光ビームの性質は良く知られていますが、そのままでは通常実験に使えません。実験の種類が異なるごとに、ビームの性質に対して異なった要求があります。実験に用いるX線ビームを特徴づける量は、ビームのエネルギー及びエネルギー分解能、強度、断面積、角度発散などです。放射光を利用した実験を企画する際には、各種の光学素子を組み合わせることで光源からの生の放射光ビームを実験の側から要求されるビームに変換するための光学系を組み上げるのが不可欠です。

図8に各種実験に用いられる試料の大きさあるいは必要とされるビーム断面積を半定量的に示しました。例えば蛍光X線分析においては1 μ m径のビームが十分な強度をもって実現できれば、試料中の各種元素の分布図をビーム径とほぼ同等の空間分解能で描くことができます。一方、医学診断用の画像を得るためには最終的には20cm角以上のビームが必要となります。図9には各種の実験において必要とされるエネルギー分解能を示しました。リソグラフィのような実験ではなるべく強度の高いビームが必要で、エネルギー分解能は許される範囲で悪くても構いません。一方、物質内における格子振動とX線との間でのエネルギー

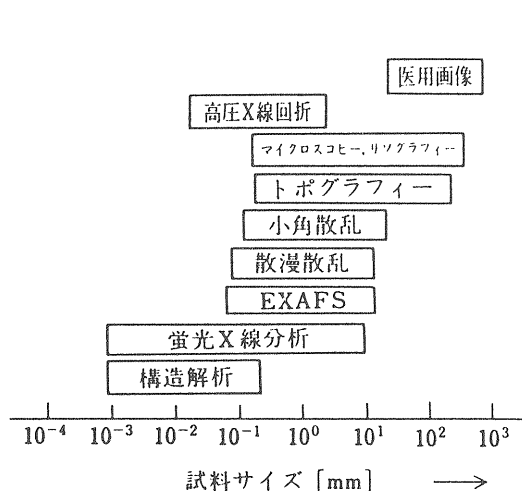


図8 各種実験で用いられる試料あるいはX線ビームの大きさ

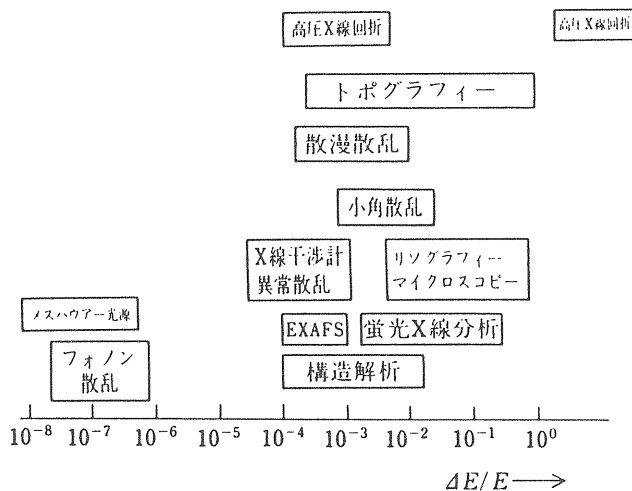


図9 各種実験で要求されるエネルギー分解能

ギーのやり取りを検出しようと思うと、1~10 meV程度 of エネルギー分解能が必要となります。

実際のビームライン光学系の設計に当たっては、上に述べたような実験から来る要求と光学素子の性能や空間的な制限を考慮して、デザインの最適化あるいは現実的な妥協が行われています。

2.1 光学素子

(1) スリット

最も単純な光学素子は、ビームの一部を遮り、その形状を整えるためのスリットでしょう。図10に示すように、光源とスリットの幾何学的な配置によりスリットの下流側で得られる光の発散角が決まります。光源とスリット間の距離 L_1 (m)・光源の大きさ s (mm)・スリットの開口 a (mm) とすると、スリット下流側の光の発散角 $\Delta\tau$ (mrad) は、

$$\Delta\tau = (s+a)/L_1 \quad (1)$$

で与えられます。のちほどモノクロメーターのところで説明しますが、このような幾何学的条件から決められる光の発散角が、最終的に得られる単色X線のエネルギー分解能に大きな影響を与えます。

X線用のスリットの刃は、スリットで整形したいX線が刃本体を透過してしまわないよう、X線に対する吸収係数の大きなものを使用する必要があります。通常は、タンタルやモリブデンなどの比較的原子番号の大きく硬い金属を使用します。また刃先は迷光の発生を防ぐために、研磨仕上げする必要があります。

(2) 結晶

放射光が現われる以前より、結晶格子面での反射を利用してX線を単色化することが行われてきました。図11に結晶格子面での反射の模式図を示します。面間隔 d で積み重なっている結晶の格子面 E_0, E_1, \dots に入射角 θ で入射する白色X線 A_0C_0, A_1C_1, \dots が反射角 θ で C_0B_0, C_1B_1, \dots のように反射するとします。反

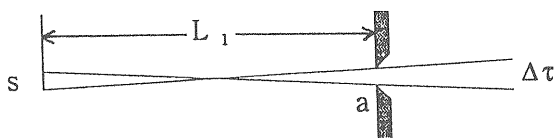


図10 光源とスリットの幾何学的配置

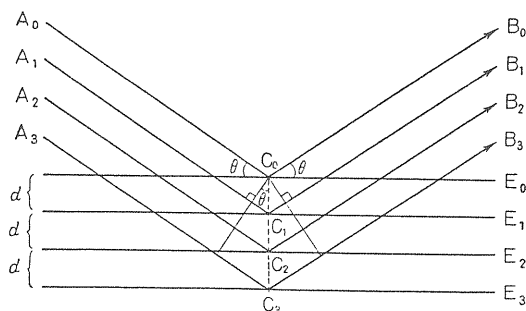


図11 結晶格子面でのX線の反射の模式図

射線 C_0B_0, C_1B_1, \dots はたがいに干渉し、隣の経路との経路差に等しい波長を持ったものだけが強め合い、それ以外の波長では弱め合います。その結果、得られる反射X線はある特定の波長 λ を持った単色X線だけになります。このとき λ は

$$\lambda = 2d \sin \theta \quad (2)$$

で与えられます。(2)式はブラッグ式と呼ばれています。(2)式から明らかのように $\lambda < 2d$ ですので、波長の長い軟X線用には面間隔 d の大きな結晶を用いる必要があります。

エネルギー分解能は、X線の波長とエネルギー E が反比例の関係にあることから(2)式を微分することにより

$$\Delta E/E = \Delta\theta \cot \theta \quad (3)$$

で与えられます。 $\Delta\theta$ は角度広がりです。ここでいう角度広がりとは、結晶の持つ本来の反射曲線の幅 $\Delta\omega$ とスリットのところで述べた幾何学的配置によるビームの角度発散 $\Delta\tau$ との影響を考慮した実効的な角度広がり

$$\Delta\theta = (\Delta\omega^2 + \Delta\tau^2)^{1/2} \quad (4)$$

を指します。

平行性の良い放射光X線を単色化するには、通常シリコンやゲルマニウムなどの完全性の高い結晶が用いられます。シリコン単結晶が多用されているのは、回折X線エネルギー領域に吸収端がないこと、入手可能な結晶素子として最も完全性が高い物が得られること、低価格であること、大きな単結晶が得られることなどの理由によります。これらの完全性の高い結晶では、動力学的回折が起こっています。発散のない単色X線が入射したときの反射曲線の例を、図12に示しました。こ

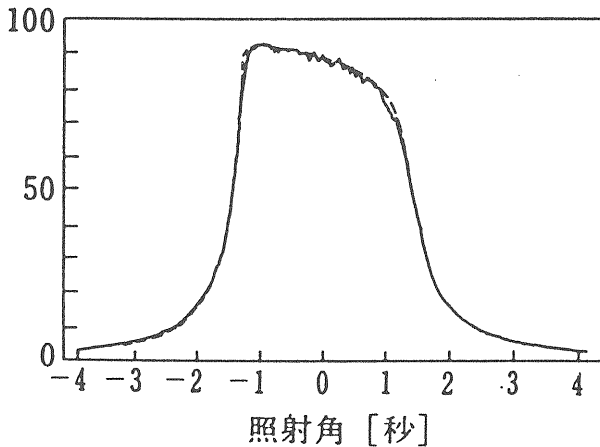


図12 完全性の高い単結晶からの反射曲線。シリコン(422)反射。波長1.54Å。

表1 波長1.54ÅのX線に対する完全結晶の反射曲線の角度幅

| 回折格子面 | $\Delta\omega$ (sec) |
|--------|----------------------|
| Si 111 | 7.4 |
| 220 | 5.4 |
| 311 | 3.2 |
| Ge 111 | 16.3 |
| 220 | 12.4 |

の図は、シリコン(422)反射に波長1.54ÅのX線が入射したときの反射曲線です。反射曲線の幅 $\Delta\omega$ は、X線の波長、結晶を構成する原子、格子定数および格子面に依存します。定性的には、結晶の奥深くまで入射光が進入する条件が満たされているほど、反射曲線の幅は狭くなります。波長1.54ÅのX線に対する各種回折格子面での反射曲線の幅を表1に示しました。これらの反射曲線の幅は、PFのビームラインでのビームの角度発散よりも約1桁ぐらい小さな値です。

(3) ミラー

X線領域においては、物質の電磁波に対する屈折率は1よりわずかに小さくなります。このことを利用すると、通常の鏡のようにX線を反射するミラーを作ることができます。

いま、ある物質のX線に対する屈折率 n を

$$n = 1 - \delta \quad (5)$$

とおくと屈折率の1からの減り δ は

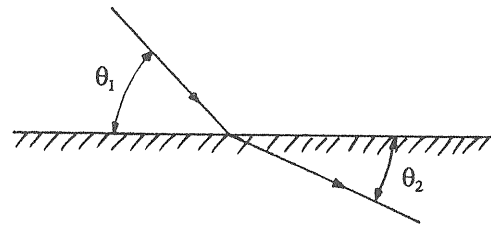


図13 物体にX線が入射する場合の幾何学的関係

$$\delta = qe^2\lambda^2/2\pi mc^2 \quad (6)$$

となります。ここで e は電子の電荷量、 m はその質量、 c は光速です。 q は物質の単位体積中の電子数で、 N をアボガドロ数、 Z を原子番号、 A を原子質量、 ρ を密度としたとき、単原子物質では

$$q = N(Z/A)\rho \quad (7)$$

で与えられます。

物体の表面にX線が入射するとき、X線の物体の外からの入射角 θ_1 と内での出射角 θ_2 を図13に示したように定義すると、一般的な光学理論から

$$n = \cos \theta_1 / \cos \theta_2 \quad (8)$$

でなければなりません。したがって n が1より小さいとき、

$$\cos \theta_1 \geq n \quad (9)$$

の場合に入射X線は全反射します。(9)式の等号が成立するときの θ_1 の値が臨界角 θ_c ですので、この式から臨界角は

$$\theta_c = (2\delta)^{1/2} = [N(Z/A)\rho e^2\lambda^2/\pi mc^2]^{1/2} \quad (10)$$

で与えられます。通常よく利用されているX線領域(4~30keV程度)に対して、臨界角は数mrad程度になります。入射角が小さいほどミラーの取り扱いが難しくなりますので、単位体積中の電子数の多い重金属などを、整形した母材の表面に蒸着したミラーを作成し、臨界角を大きくするようにしています。図14にいくつかの入射角に対する白金を蒸着したミラーの反射率のエネルギー依存性を示しました。高エネルギー側で急激に反射率が低下しますので、一種のローパスフ

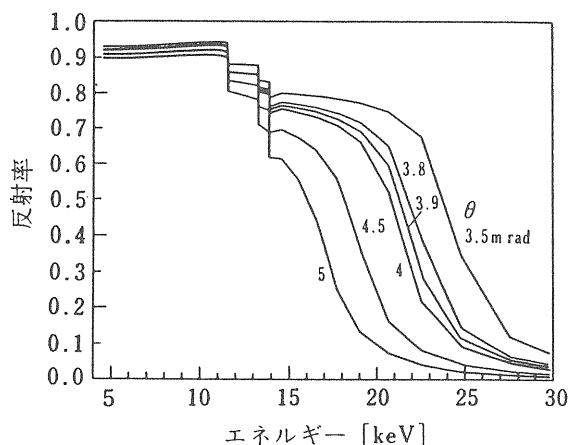


図14 白金蒸着ミラーの反射率のエネルギー依存性。 θ はX線の鏡面に対する入射角。

フィルターとして使うことができます。

X線用のミラーの母材は、入射角が非常に小さいため可視領域の光学実験用のミラーよりも高い加工精度を要求します。特に、表面の形状が正確であること、表面粗さが小さいことが重要です。これらの条件が満たされない場合には、反射率の低下や鏡面反射以外の散乱X線の増大が起こります。また、入射角が小さいためミラー本体が長いこと、放射光の照射による熱負荷の影響を受けにくいことなどが要求されます。その他、超高真空チャンバー内にセットする場合には超高真空との相性の善し悪しが問題になりますし、母材を湾曲させて曲面を作る場合には母材の曲げやすさが問題になります。

実際にX線領域で使用されているミラーの母材には、熔融石英や焼結炭化硅素、シリコンなどがあります。これらはすべて研削・研磨技術が確立されている材料です。熔融石英は伝統的に光学実験用の反射鏡として用いられており、研磨技術が高い水準で確立されています。また曲げやすく、長い曲率半径を持った曲面を作るのが容易です。しかしながら、熱変形に対する性能はあまり良くありません。焼結炭化硅素は熱変形に対する性能が優れていますが、曲げにくく、焼結体であるため超高真空中での取り扱いに多少の難点があります。シリコンは、ちょうど熔融石英と焼結炭化硅素の中間ぐらいの特性を持っています。

2.2 2結晶モノクロメーター

(1) 2結晶モノクロメーターの概要

X線の単色化は(2)式の条件を用いることにより、1枚の結晶によって実現することができます。

しかし1枚振りの結晶モノクロメーターは、使用する波長によりビームの出射方向が変化するので、波長変化を伴うような実験には不向きです。そこで、2枚の結晶を図15に示したように平行配置にした2結晶モノクロメーターが多用されています。2結晶平行配置では、図16のように第1結晶で反射されたX線は自動的に第2結晶でも反射されます。その結果、2結晶モノクロメーターのエネルギー分解能は1枚の結晶の場合と同じになります。

2結晶平行配置を実現するための簡単な方法として、チャンネルカット結晶を利用することが考えられます。チャンネルカット結晶とは、単結晶のブロックに溝を加工して2回の反射を起こさせるものです。図17にチャンネルカット結晶の例と、X線の光路を示します。結晶面の平行性は、元々1体の単結晶であることにより保証されます。エネルギーの変更は、結晶全体を回転させて入射角を変えることで実現可能です。しかしながら、通常のチャンネルカットでは入射角の変化によってビーム位置が変わってしまいます。

2枚の独立した結晶を用いることもよく行われています。第1結晶と第2結晶の間の面間隔を反射角によって変えられるようにしておくと、ビーム位置を一定にして異なる波長を取り出すことができます。このような仕組みを持った2結晶モノクロメーターを、定位置出射型と呼びます。波長を変えてもビーム位置が変化しないことは、その下流側で行っている実験にとっては非常に重要で

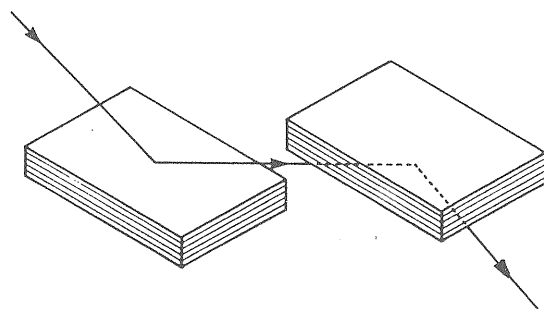


図15 2結晶平行配置

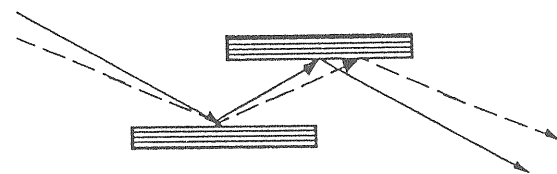


図16 平行配置での第1結晶で反射したX線と第2結晶の関係。異なる波長のX線が同時に反射条件を満足する。

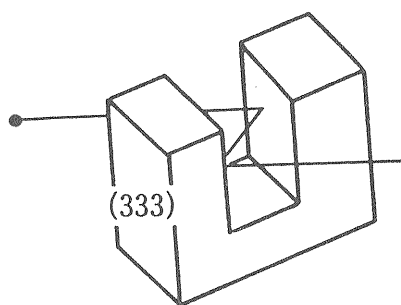


図17 チャンネルカット結晶とX線の光路

す。というのは、違う波長を利用するときに実験装置のセットアップを変える必要がないからです。

定位置出射型2結晶モノクロメーターとして、数多くの形式が提案され用いられていますが、大別すると2通りあります。ひとつは、2つの結晶がそれぞれ独立したたがいに平行な回転軸を持ち、少なくとも一方の回転軸に並進機構を備えていて、エネルギーを変えるごとにそれぞれの位置関係を調整するものです。このようなタイプを3軸式定位置出射型2結晶モノクロメーターと呼ぶことにしましょう。もうひとつは、2つの結晶が同じひとつの回転ステージの上に乗っており、エネルギーを変えるごとにこのステージ上でそれぞれの位置関係を調整するものです。PFでは位置関係の調整のためにカムを用いていますので、このようなタイプをカム式定位置出射型2結晶モノクロメーターと呼びます。

2枚の独立した結晶を用いることには、定位置出射型を実現できる以外にもいくつかの長所があります。それぞれの結晶をメカノケミカル研磨することが可能になり、チャンネルカットを用いる場合よりも空間的に一様性の高いビームが得られます。また、基本波と高調波の回折強度曲線の幅の違いにより、2つの結晶を平行配置からわずかにずらすことによって高調波を除去することができます。第2結晶をX線ビームと結晶表面法線のつくる面に直角の方向に円筒形に曲げてやることによって、水平方向に発散するビームを集光することも可能になります。

(2) 3軸式定位置出射型

2結晶モノクロメーター

3軸式定位置出射型2結晶モノクロメーターの例を図18に示します。このタイプのモノクロメーターは、PFではBL10C、11B、14A、14B、14C、28B、NE3で用いられてい

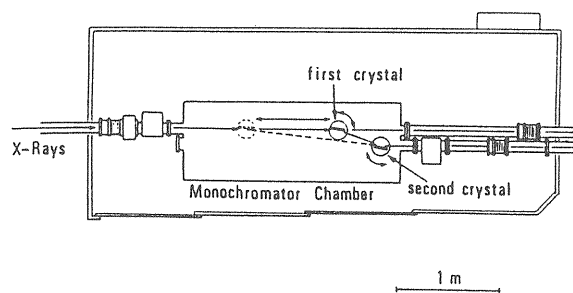


図18 3軸式定位置出射型2結晶モノクロメーターの例

ます。

第1、第2結晶はそれぞれ別々の回転ゴニオメーターに取付けられます。2つのゴニオメーターの回転軸は平行でなければなりません。また、どちらかのゴニオメーターが定位置出射を満たすように並進ステージの上に取付けられています。それぞれの回転軸および並進位置は、機械的な連動ではなく、パルスモーターを用いてソフトウェア的に連動されています。3軸式定位置出射型モノクロメーターの利点は、モノクロメーター本体の機械的な構造が比較的単純になることです。PF設立当初のビームラインにこのタイプのモノクロメーターが多いのは、そのような理由によるものと思われます。

このタイプのモノクロメーターでは、分光X線のエネルギーを変えたときにどのようにして第1、第2結晶の平行度を保つかが問題となります。2結晶平行配置モノクロメーターでは、結晶面の平行度は反射曲線の幅以下に保たなければなりません。通常のゴニオメーターや並進機構の機械精度では、数秒程度の角度精度を維持するのは困難です。したがって、平行度を保持するためのフィードバックシステムが必要となります。そのようなフィードバックシステムとしては、出力されるX線の強度が最大になるように2つの結晶の角度を調整する方法がよく行われています。最近では、オートコリメーターを用いて光学的に平行度を調整するシステムも実用化されました。

(3) カム式定位置出射型

2結晶モノクロメーター

カム式定位置出射型2結晶モノクロメーターの例を図19に示します。PFではBL2A、3A、4A、4C、6B、7C、16X、18B、27A、27B、NE1A2で用いられています。

3軸式定位置出射型モノクロメーターの平行度

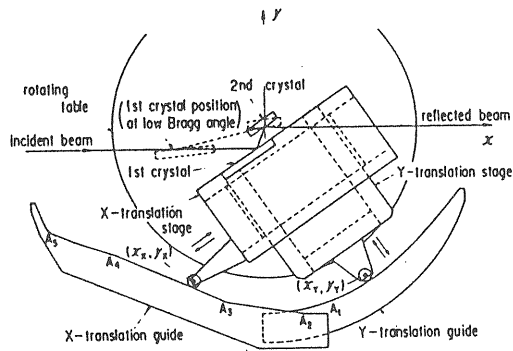


図19 カム式定位置出射型2結晶モノクロメーターの例

調整の労力を軽減する観点から設計されたのが、本モノクロメーターです。第1、第2結晶の位置をカムを用いて機械的に連動させ、主軸回転のみで定出射位置を実現するよう設計されているところからカム式と呼ばれています。

図19で示されたモノクロメーターでは、第2結晶が主軸回転中心にセットされています。第1結晶は、主軸回転ステージ上に積み重ねられた2つの並進ステージ(Xステージ、Yステージ)の上に固定されます。入射角が変化したときには図中の実線、点線で示したように第1結晶の位置を調整しなければなりません。この位置調整を図に示したように2つのガイドレールを用いて機械的に行なうようにします。すると、第1、第2結晶の回転は主軸の回転のみで行われ、かつ結晶位置の調整も主軸とガイドレールとのカムの作用によって行われるようになります。これがカム式定位置出射型2結晶モノクロメーターの原理です。個々の並進ステージの位置 (x_x, y_x) 、 (x_y, y_y) は簡単な計算から

$$x_x^2 + y_x^2 = [R_{x0} + (h/2)(1/\sin \theta)]^2 \quad (11)$$

$$x_y^2 + y_y^2 = [R_{y0} + (h/2)[(1/\cos \theta) - 1]]^2 \quad (12)$$

となります。ここで R_{x0} 、 R_{y0} は定数、 h は入射X線と出射X線とのビーム位置のずれを表しています。この式を用いてガイドレールを設計します。この方式を用いると、 $6^\circ < \theta < 70^\circ$ の範囲で極めて簡単に単色X線を取り出すことができます。

(4) 高調波の除去

結晶モノクロメーターでは一般的に基本波以外

に高調波成分も同時に反射されてきます。高調波とは、基本波の波長 λ に対して $\lambda/2$ 、 $\lambda/3$ 、……のような波長を持ったX線のことです。波長の短いX線の方が物質に対する透過能が高いので、結晶の説明のところで述べたように高調波の反射曲線の幅は基本波のものに比べて狭くなります。このことを利用すると、2結晶モノクロメーターの第1結晶と第2結晶を完全な平行配置からわずかにずらしてやることによって高調波成分を抑制することができます。

図20に2結晶モノクロメーターによる高調波除去の原理を示します。 R_{1F} 、 R_{2F} 、 R_{1H} 、 R_{2H} はそれぞれ第1結晶の基本波の反射曲線、第2結晶の基本波の反射曲線、第1結晶の2次高調波の反射曲線、第2結晶の2次高調波の反射曲線を示しています。基本波の反射曲線と、高調波の反射曲線の中心角度がずれているのは結晶によるX線の屈折の効果によります。この図では、第1結晶と第2結晶を完全平行配置から約1.5秒ずらした場合を示しています。 R_{1F} と R_{2F} の大部分が重複しているにもかかわらず、 R_{1H} と R_{2H} の重複は非常に少なくなっています。

高調波はどのような実験を行う場合にも実験データの質を落とす原因となりますので、実験を始めるに当たって必ず高調波除去を行っておくことが望まれます。

(5) サジタル集光

単色X線の集光には結晶を用いる方法とミラーを用いる方法の2通りがあります。ミラーによる集光は約20 keV以下のエネルギーのX線に対して有効ですが、それ以上のエネルギーのX線に対しては反射率の低下とミラーのサイズが大きくなり過ぎることからあまり現実的ではありません。

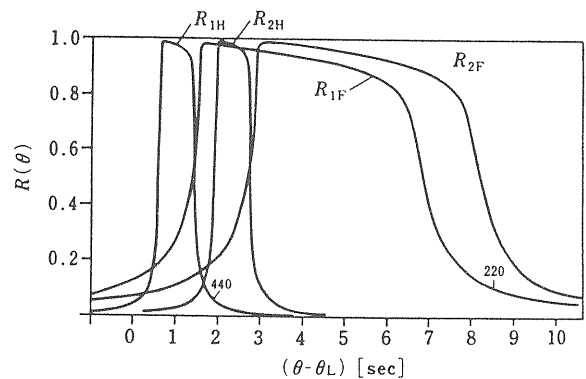


図20 2結晶モノクロメーターにおける高調波除去方法の原理

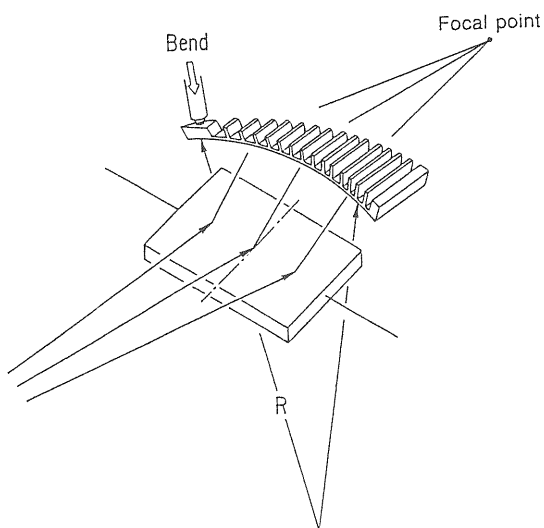


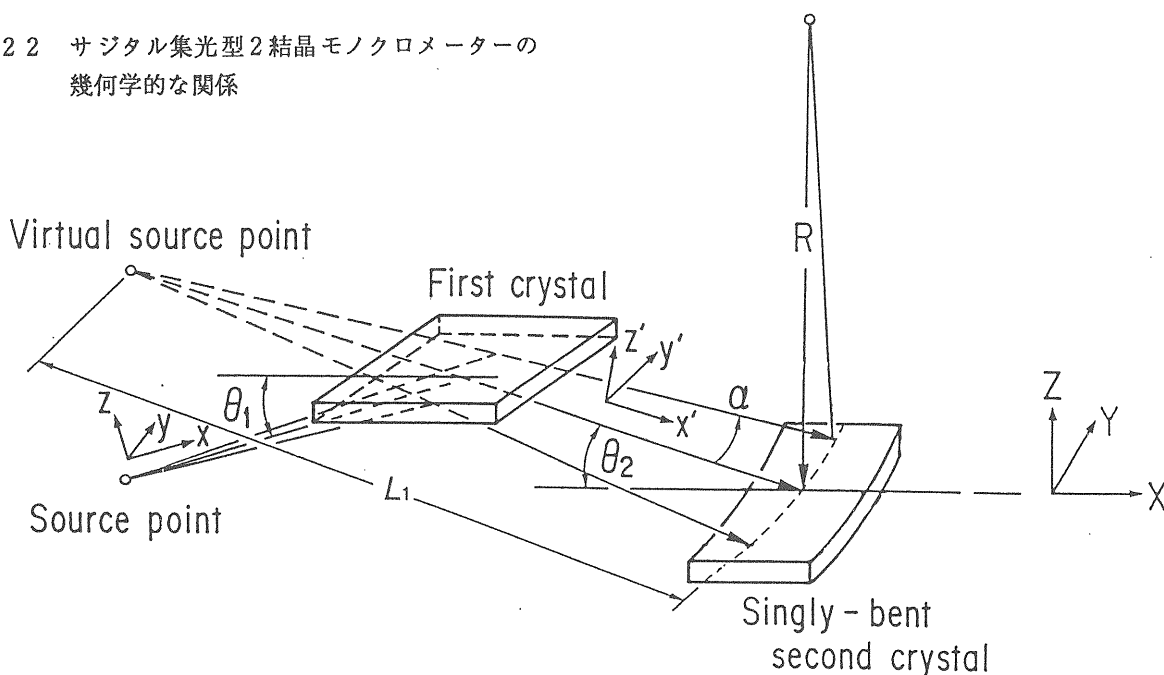
図 2 1 放射光の水平方向のサジタル集光

一方、結晶による集光は原理的に高いエネルギーのX線まで有効で、そのサイズが小さくてすむことから広く用いられています。

2結晶モノクロメーターで水平方向の角度広がりを収束させるには、図21のような集光機構が用いられます。このような方法をサジタル集光と呼びます。この方法では、2枚目の結晶をX線ビームと結晶表面法線のつくる面に直角の方向に円筒形に曲げてやることによって、水平方向の集光を実現しています。実際にサジタル集光を行う場合には、以下で述べるように分光器の配置位置に非常に大きな制限がかかります。

図22にサジタル集光型2結晶モノクロメーターの幾何学的関係を示しました。第1結晶は平板

図 2 2 サジタル集光型2結晶モノクロメーターの幾何学的な関係



結晶で、第2結晶は曲率半径Rの湾曲結晶です。水平方向の放射光の角度広がりを α とします。このような配置で、光軸上($\alpha=0$)で2つの結晶の格子面を平行にしたとします。この時、第1結晶へのX線の入射角 θ_1 は第2結晶への入射角 θ_2 に等しくなります。しかしながら、第2結晶が湾曲しているため光軸から外れて発散してくるビームに対しては θ_1 は θ_2 に等しくなるとは限りません。 α が十分小さいとして、 θ_2 の α 依存性を求めると

$$\theta_2(\alpha) - \theta_1 = [(L_1/R) / \cos \theta_1 + (1/2) (L_1/R)^2 \tan \theta_1] \alpha^2 \quad (13)$$

となります。 L_1 は仮想光源から第2結晶までの距離です。サジタル集光の条件は θ_2 が α によらず、常に θ_1 に一致するような解を求めることです。

(13)式で α^2 の係数が0となる条件は、

$$L_1/R = 0 \quad \text{or} \quad L_1/R = 2/\sin \theta_1 \quad (14)$$

となります。第1の解はRが無量大、すなわち第2結晶が平板結晶であることを意味しており、集光作用のない平行平板2結晶モノクロメーターになります。これは今興味を持っている解ではありません。第2の解が求めたいサジタル集光の条件です。PFのビームラインでは L_1 は10~30m程度ですので、Rは数10cm~数mになることがわかります。

第2の解が満たされるようにRと θ を定めるとき、焦点はどこに来るのでしょうか？ 回転面をつ

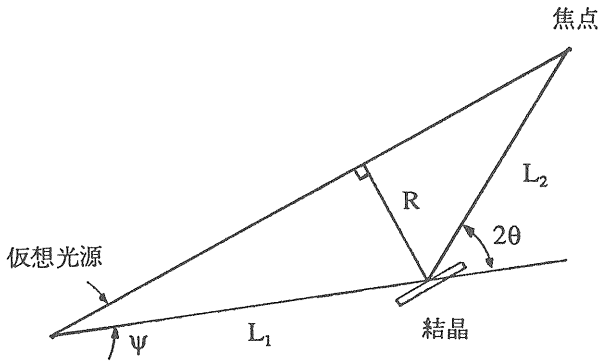


図23 サジタル集光における仮想光源と焦点、湾曲結晶の間の幾何学的関係

かって集光させるのですから、その回転中心は仮想光源と焦点を結んだ直線上にあるはずですが、図23に仮想光源と焦点、湾曲結晶の間の関係を示しました。分光結晶から焦点までの距離を L_2 、仮想光源から分光結晶と焦点を見たときの開き角を ψ とすると、図23から

$$L_1 \sin \psi = R \quad (15)$$

$$L_2 \sin (2\theta - \psi) = R \quad (16)$$

という関係式が得られます。ここで θ 、 ψ がそれほど大きくない値の場合、 L_1 と L_2 は

$$L_1 = 3L_2 \quad (17)$$

という関係になります。つまり、光源から分光器間での距離と分光器から焦点までの距離の比は3:1である必要があるということです。

円筒形に薄い結晶を曲げると、図24に示したように、弾性によりその母線方向にも結晶が湾曲します。これをAnticlastic Bendingと呼びます。

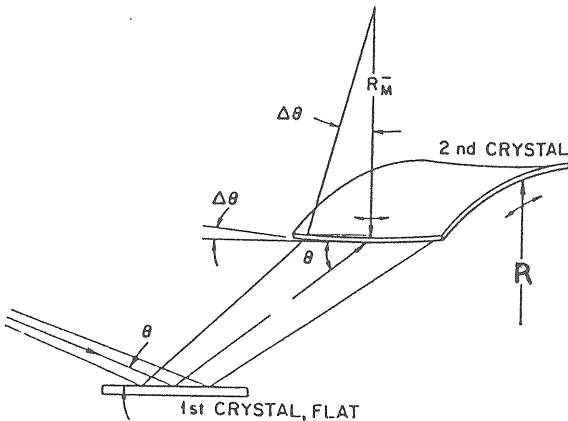


図24 サジタル集光を行うときに問題となるAnticlastic Bending

薄板結晶を曲率半径 R で円筒面に曲げたときのAnticlastic Bendingの曲率半径 R_m は

$$R_m = R/\sigma \quad (18)$$

で与えられます。ここで σ はポアソン比です。Anticlastic Bendingが起こると第2結晶の表面上で θ の値が連続的に変化し、第1結晶で反射されたX線を反射できる場所が非常に限られてきます。これを防ぐために図21に示したように、第2結晶後面にリップを付けることが提案されました。このような結晶を用いることにより、約20 keVまでの集光が比較的容易にできます。

高エネルギーX線に対しては、以下に述べる理由により図21のような結晶は使用できません。高エネルギーX線を反射するためには、(2)式から θ が小さくなることがわかります。そのとき、(14)式から R が小さくなるので、(18)式から R_m も小さくなることが導かれます。つまり、結晶表面により大きなひずみが導入されることとなります。他方、X線が高エネルギーになるほど結晶の反射の幅は小さくなります。つまり、より高エネルギーのX線ほど結晶のひずみの影響を受けます。したがって、湾曲面で反射させている結晶では湾曲によるひずみの影響により、高エネルギーX線に対して反射能やエネルギー分解能が低下してしまいます。そのようなことを避けるため、最近では図25に示したようにリップ側の結晶面を用いる方式が用いられます。この方式では、原理的にリップの有限な大きさ以下に集光することは不可能です。高エネルギーX線の正確な集光は今後の検討課題です。

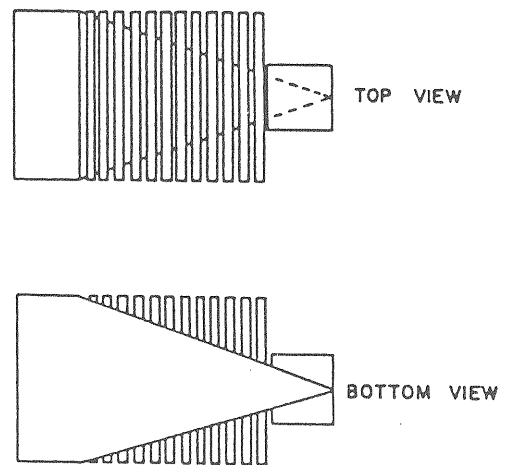


図25 高エネルギーX線をサジタル集光するための第2結晶

2. 3 1結晶モノクロメーター

(1) PFにおける

1結晶モノクロメーター

多くのX線用ビームラインでは、2. 2で述べた2結晶モノクロメーターが用いられていますが、特殊な用途のため1結晶モノクロメーターを用いているビームラインがいくつか存在します。タン白質構造解析用のビームラインである6A2、結晶構造解析用の10A、小角散乱実験用の15A、コンプトン散乱実験用のNE1A1、医学診断用のNE5Aがそれに当たります。始めの3つのビームラインでは、1次元湾曲結晶により放射光の水平方向の発散を収束させています。NE1A1では、擬似2次元湾曲結晶を用いて水平、垂直両方向の発散を収束させています。NE5Aでは、非対称反射を用いて、ビームの垂直方向の幅を拡大し大面積のビームを得ています。その他、1次元湾曲結晶を用いてエネルギー分散を実現することも可能です。それぞれ個別に見ていくことにしましょう。

(2) 1次元湾曲型

1結晶モノクロメーター

放射光の単色化と同時に、その水平方向の発散を収束させるためには、2. 2(5)で述べたサジタル集光以外にも1次元湾曲結晶を用いる方法があります。図26にその概念図を示します。サジタル集光では光源と湾曲結晶の中心および焦点の3つの点が張る面は光軸を含んだ鉛直面になりますが、図26の場合は水平面になっています。図中にあるように、2等辺三角形の結晶を切り出し、底辺を固定し、頂点を偏心カムで押し曲げる構造になっています。このような構造だと偏心カ

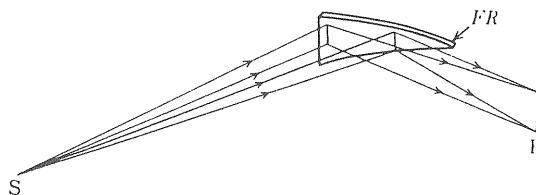


図26 1次元湾曲結晶によるX線ビームの収束

ムの調整だけで、曲率半径一定の円筒面が容易に得られます。

このタイプのモノクロメーターには、いくつかの利点があります。この集光方法では、集光してきたビームの水平方向の発散角がモノクロメーターに取り込んだビームの発散角と同じになります。サジタル集光では集光ビームの発散角は取り込んだビームの発散角の3倍になってしまいます。試料上もしくは検出器上でのビームの水平方向の発散角が問題となるような実験には、サジタル集光よりもこの集光方法の方が向いているでしょう。また、結晶を曲げる曲率半径は、光源と結晶中心および焦点の作る円の半径の2倍ですので、通常の放射光実験では数10mという非常に大きなものになります。したがって、サジタル集光の時に問題となったAnticlastic Bendingはこの場合ほとんど影響しません。

1次元湾曲結晶の応用として、エネルギー分散型の実験があげられます。図27にエネルギー分散型X線吸収測定の実験配置図を示します。湾曲結晶によって平行性の良い白色放射光はエネルギーに応じて異なる角度に反射され、結晶後方に焦点を結びます。焦点位置に試料を置いてその後ろに位置敏感検出器を置けば、あるエネルギー領

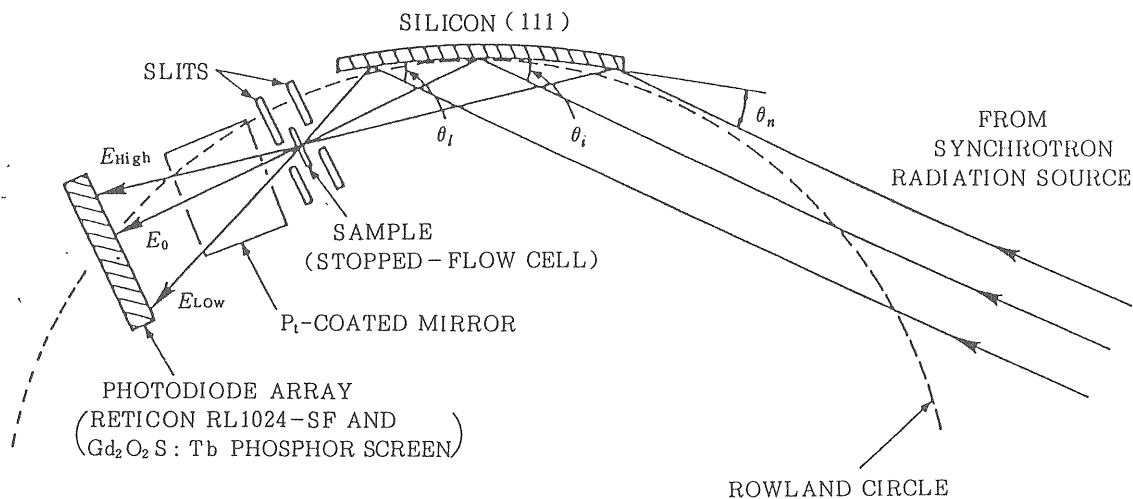


図27 エネルギー分散型X線吸収測定の実験配置図

域での試料の透過スペクトルが同時に測定できます。

(3) 2次元湾曲型

1 結晶モノクロメーター

サジタル集光や1次元湾曲型結晶による集光では、放射光の水平方向の発散を収束するだけです。より高い光子密度を要求するような実験のためには、放射光の鉛直方向の発散をも収束する必要があります。ミラーが利用できるようなエネルギー領域では鉛直方向の収束をミラーで行えばよいでしょう。しかし、高エネルギーX線では結晶を用いて鉛直方向をも収束しなければなりません。このような要求は、図28(a)に示したような2次元湾曲結晶を用いることで解決されます。

実際のビームラインで白色X線が当たる場所に結晶を設置する場合、放射光による熱負荷の問題からその結晶を冷却する必要があります。理想的には図28(a)のような一体型の冷却2次元湾曲結晶が作ればよいのですが、これは非常に難しい加工になります。そこで図28(b)に示すように冷却1次元湾曲結晶を並べることで2次元湾曲結晶を制作したのが、NE1A1で使用されている擬似2次元湾曲結晶モノクロメーターです。

(4) 非対称反射型

1 結晶モノクロメーター

結晶表面を反射面に対して斜めに切断した結晶を用いると、入射ビームの幅を拡大または縮小させることができます。図29に概念図を示します。図29のような結晶の切り出し方をファンクーヘンカット、反射の仕方を非対称反射といいます。

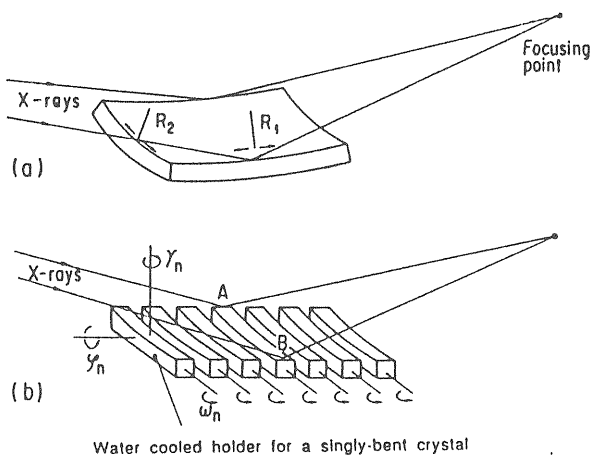


図28 (a) 2次元湾曲結晶による集光の模式図
(b) 多数の1次元湾曲結晶による2次元湾曲結晶の実現

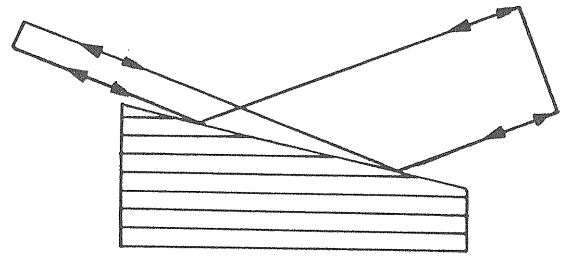


図29 ファンクーヘンカットモノクロメーター

入射ビームが図の左側からやって来たとする、得られる反射ビームは入射ビームに比べその幅が拡大され単位幅あたりのX線強度が減少します。反射面と結晶表面とのなす角を α とすると、非対称因子 b は

$$b = \sin(\theta - \alpha) / \sin(\theta + \alpha) \quad (19)$$

のように定義されます。ここで θ はX線の反射面への入射角です。ビーム幅を拡大する場合、その拡大率は $1/b$ で与えられます。

2.4 ミラーの形状

(1) ミラーの取り込み角

現在製造可能なミラーの長さは約1mです。いくつものミラーをつなぎ合わせて使うにしても、ミラーチェンバーの大きさの問題などから、2m程度がミラーの長さの現実的な最大長になるでしょう。長さ1の平面ミラーを使って入射角 θ で取り込めるミラー表面法線方向のビームの幅 h は図30から

$$h = 1 \sin \theta \quad (20)$$

で与えられます。このミラーが光源から距離 L_1 に設置されたとすると、その取り込み角 α_v は

$$\alpha_v = h/L_1 \quad (21)$$

となります。白金蒸着ミラーでは、臨界角を与える(10)式は簡略化されて

$$\theta_c [\text{mrad}] = 6.794 \lambda [\text{\AA}] \quad (22)$$

となり、例えば25keVをカットオフとする場合、入射角は3.4mradになります。このように入射角が非常に小さいため、ミラーでの取り込み角は(20)(21)式から小さいものとな

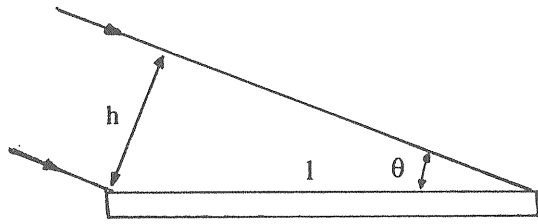


図30 平面ミラーが長手方向に取り込めるビームの幅

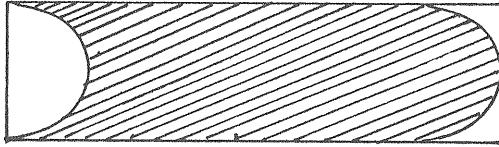


図31 幅方向に曲率を持ったミラー表面上での入射ビームの形

ることがわかります。通常の放射光ビームは水平面内の発散が大きく、垂直面内の発散は小さいため、X線用のミラーは垂直面内の発散をミラーの長さ方向で取り込むよう設置されます。つまり(21)式は垂直方向の取り込み角を表しています。水平方向の取り込み角 α_h はミラーの幅を w として(21)式と同様に

$$\alpha_h = w/L_1 \quad (23)$$

となります。

凹面に湾曲したミラーは、X線の収束に役立ちます。凹面の形状はほとんどの場合、2次曲面を利用しています。X線用ビームラインの集光に用いるミラーの典型的なものは

- ・円柱面ミラー (Cylindrical Mirror)
- ・楕円面ミラー (Elliptical Mirror)
- ・回転楕円面ミラー (Ellipsoidal Mirror)
- ・放物面ミラー (Parabolic Mirror)
- ・回転放物面ミラー (Paraboloidal Mirror)
- ・トロイダルミラー (Toroidal Mirror)

などです。これらのミラーの幾何学的な配置関係を2.4(2)以降に解説します。

幅方向に曲率を持ったミラーでは、そのミラー表面上での入射ビームの形が図31で示すようになっていきます。その結果、垂直方向の取り込み角が(23)式で与えられるものとは違ってきますので、注意が必要です。

(2) 円柱面ミラー

円柱面ミラーはビームの一方向の収束に用いられます。幾何学的配置を図32に示しました。円

柱面ミラーの曲率半径 R は

$$R = 2L_1L_2 / [(L_1 + L_2) \cos(\pi/2 - \theta)] \quad (24)$$

で表されます。

(3) 楕円面ミラー

図33に楕円面ミラーの幾何学的配置を、図34に楕円面ミラーによる集光の様子を示しました。楕円の長軸の長さを $2a$ 、短軸の長さを $2b$ とすると

$$a = (L_1 + L_2)/2 \quad (25)$$

$$b = [a^2(1 - e^2)]^{1/2} \quad (26)$$

となります。ここで e は離心率で

$$e = (L_1^2 + L_2^2 + 2L_1L_2 \cos 2\theta)^{1/2}/2a \quad (27)$$

と書けます。ミラー表面の中心位置 x_0 、 y_0 は

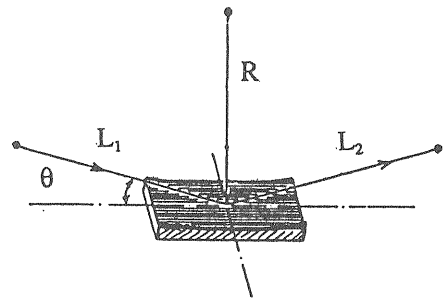


図32 円柱面ミラーの幾何学的配置

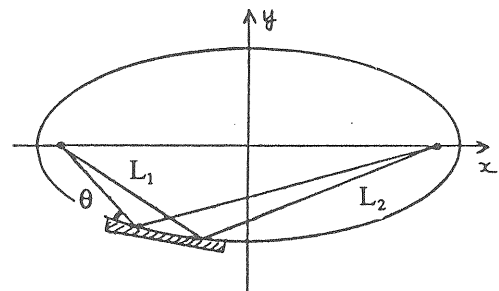


図33 楕円面ミラーの幾何学的配置

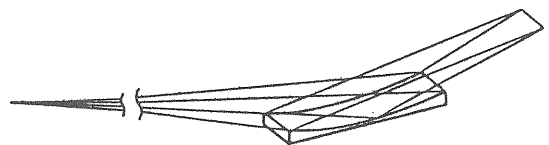


図34 楕円面ミラーによる集光

$$y_0 = -L_1 L_2 \sin 2\theta / 2ac \quad (28)$$

$$x_0 = a(b^2 - y_0^2)^{1/2} / b \quad (29)$$

となります。

(4) 回転楕円面ミラー

垂直、水平両方向に同時に集光する場合には、回転楕円面ミラーを使用します。図35に回転楕円面ミラーでの集光の様子を示しました。この時の関係式は楕円面ミラーの表現式にz軸を加え、同様に回転楕円面の式から導くことで得られます。

(5) 放物面ミラー

放物面ミラーの幾何学的関係を図36に示しました。放物面では、焦点から出たX線は平行に、平行に入ったX線は焦点を通るようになります。いま光源から出た光を平行化することを考えたとき、放物面を表す式は

$$y^2 = 4ax \quad (30)$$

$$a = L_1 \sin^2 \theta \quad (31)$$

となります。ミラー表面の中心位置 X_0 、 Y_0 は

$$x_0 = a \cot^2 \theta \quad (32)$$

$$y_0 = -2a \cot \theta \quad (33)$$

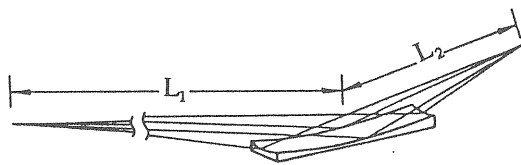


図35 回転楕円面ミラーによる集光

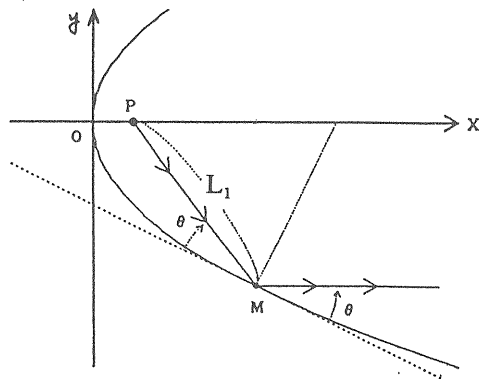


図36 放物面ミラーの幾何学的配置

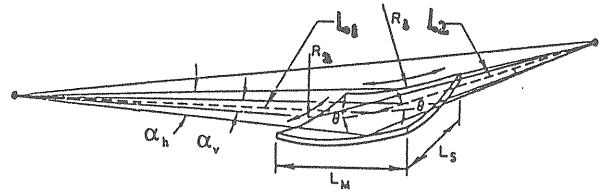


図37 トロイダルミラーの幾何学的配置

となります。

(6) 回転放物面ミラー

2方向に同時に集光または平行化する場合には回転放物面ミラーを用います。関係式は放物面ミラーの表現式にz軸を加え

$$y^2 + z^2 = 4ax \quad (34)$$

から導くことで得られます。

(7) トロイダルミラー

トロイダルミラーの幾何学的関係を図37に示しました。光軸とミラー表面法線の作る面内の曲率半径を R_1 、その面に垂直でミラー表面法線を含む面内の曲率半径 R_2 とすると

$$R_1 = 2L_1 L_2 / (L_1 + L_2) \sin \theta \quad (35)$$

$$R_2 = 2L_1 L_2 \sin \theta / (L_1 + L_2) \quad (36)$$

のように近似されます。

2.5 光学系の特性評価

実際のビームラインを設計・製作するに当たっては、今まで述べてきたような光学素子や光学要素を組み合わせて、実験の側から要求される性能をできるだけ満たせるようにしなければなりません。そのためには、各種の境界条件を考慮にいたうえで、考えられる光学系に対して特性の評価を行い、最も性能の良いものを選ぶ作業が必要になります。

光源から距離 z の位置でX線束の特性を記述しようとするとき、位置について x 、 y 、光軸となす角度 x' 、 y' および波長 λ の5つの量について記述を行う必要があります。X線光学系の性能の見積もりを行う方法として、古くから x' と λ の関係をあらわすのに DuMond の図形と呼ばれる方法が用いられてきましたし、放射光が現われてから x と x' の関係をあらわすのに位相空間光学が

利用されるようになりました。また、これら5つの量をすべて取り扱うように位置-角度-波長空間の導入もなされました。このような図形的な取り扱いには直感的で解かりやすく、光学系の特性のおおよその見積もりをするのに役立ちます。しかし、たとえばトロイダルミラーのような場合、 x 、 x' 、 y 、 y' の間に相関ができるため図形的な表現が難しくなります。

光学系の光学特性を計算でシミュレートする手法に光線追跡法 (Ray Tracing) があります。これは1本1本の光線の軌跡をコンピューターを用いて辿っていく方法です。X線用ビームラインでは、真空紫外用ビームラインに比較すると光学系の取りうる種類はそれほど多くはありません。しかしそれでも、光学系の特性を前もって正しく把握しておくためには光線追跡法を用いて特性評価を行うことが不可欠です。

3. 放射線防御

ビームラインの運用において、実験者や施設スタッフの安全、とりわけ放射線の防御に関する安全は最優先の課題です。放射線防御で配慮すべきことは、蓄積リングの運転エネルギー、放射光のスペクトル分布、実験環境とビームライン構成などによって異なります。放射光ビームの中には、強い硬X線成分に加えて、電子/陽電子ビームが残留ガスと衝突するときに発生する制動輻射も含まれています。この中には最大のエネルギーが蓄積リングの運転エネルギーに等しい γ 線までが含まれます。また、これらが吸収・散乱されて発生する2次的な放射線も考慮する必要があります。

実際のビームラインでは、放射線遮蔽壁やハッチのような静的な放射線防御装置のほかに、ビームを下流側へ出射したり遮断したりするためのシャッターや、そのシャッターの開閉を制御しハッチの開閉などを常時監視しているインターロックシステムなどの動的な放射線防御装置が設置されています。現在のPFにおけるインターロックシステムは、真空の保護という役割なども担っています。

3.1 静的放射線防御

蓄積リングの運転エネルギーが低い場合 (例えば1 GeV以下)、主に問題となるのは入射時と

電子/陽電子ビームの損失時の放射線レベルです。放射光のスペクトルが真空紫外領域にあるので、ビームラインにおいては通常は遮蔽は施されません。この領域の放射光ビームは真空チェンバーやパイプの壁で容易に吸収されてしまうからです。しかし、これらの壁が薄かったり、透過性のある窓を用いているような場合には放射線量の見積もり、測定と遮蔽の検討をする必要が生じます。また、可視光や紫外線の成分を覗き窓などを通して見る場合は、集光した放射光ビームなどでは強く放射線が射出されていることがあり注意が必要です。

蓄積リングの運転エネルギーが高い場合、とくに数 GeVクラスである場合や放射光のスペクトルが硬X線域に達する場合は特別の配慮が必要です。蓄積リングで発生する制動輻射 γ 線と高エネルギーX線成分の放射線の遮蔽のため、蓄積リングを実験エリアからコンクリートなどの遮蔽壁で隔離しなければなりません。また、放射線を実験エリアに漏洩させないようなビームラインを設計・製作する必要があります。

軌道から失われた電子/陽電子ビームがビームラインに到達し、ビームパイプなどの壁に当たって γ 線を発生する場合があります。このような場合に備えてビームラインの上流に電子ビームを偏向させるための磁石を入れ、その下流に小さなマスクを置きます。この方法は放射光ビームの垂直発散角の小さなX線用ビームラインの場合には特に有効です。また、上流のマスクなどで放射光ビームのサイズを制限するのは、下流側から見た蓄積リングの放射線の経路をも同時に制限するので有効です。

PFのビームラインのコンクリート壁貫通部は鉛ブロックで厚さ10~20 cmにシールドされていて、放射光ビームの出射・遮断は γ 線の遮蔽能の高いMBSとBBSによっています。これらのシャッターが開いているときは下流に γ 線が到達するので、ビームラインの途中または下流端には10~30 cm厚の鉛の γ ストッパーが置かれています。実験エリアは放射線安全管理区域に設定され、そこでの γ 線と中性子線の空間線量率が常にモニターされています。頻繁な線量率の測定とシールド壁周辺などの遮蔽の強化により、実際の線量率は規定値よりもさらに低く押さえられています。その結果、実験者は電子/陽電子ビームの入射と蓄積という運転モードにかかわらず、実験エリアに常時滞留することが可能です。このこ

とは実験遂行上、極めて重要なことです。

分岐部では、真空チェンバーやパイプなどの厚い壁が遮蔽体となります。しかし、放射光ビームのスペクトルがX線から硬X線にかけて分布している場合には、遮蔽を強化しなければならない場合が多いようです。特に、パイプなどの壁厚が十分でない場所、バルブなどの筐体がアルミニウム系などの材料の場所、覗き窓などのガラスやペローズには遮蔽の強化が必要となります。

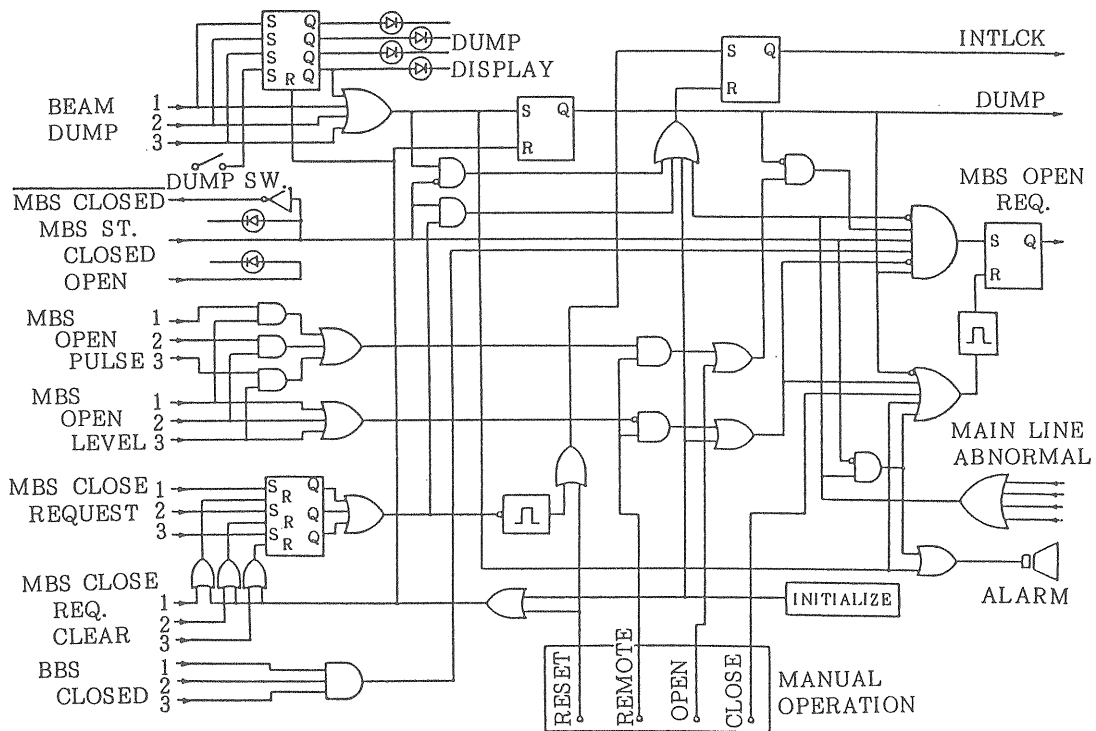
X線ビームの遮蔽では、(a) 白色ビームが直接遮蔽体に当たる場合と、(b) 散乱体で全立体角方向に散乱される場合に大別して考えることができます。ビームストッパーなどの直接放射光を受けるものは(a)の場合に相当します。このようなビームの区別を考慮して十分な遮蔽を見積る必要があります。X線用ビームラインのハッチは、ハッチ内に単色X線しか導かれなくても、実験の形態によっては強く反射されるX線ビームが出射されることがあるので、白色ビームを導くハッチと同程度の遮蔽をしておいたほうがよいでしょう。ハッチには、直接的な、または散乱と回り込みなどによるX線の漏洩を防ぐため、すきまな

どをなくし、遮蔽材の接続箇所を二重の構造にするなどの細部にわたる配慮が要求されます。

3.2 動的放射線防御

ビームラインを制御するシステムには、コンポーネントの故障・異常や誤った操作をしたときに、安全の確保と機器の保護を担うインターロック機能が組み込まれています。このインターロックには放射線防御機能だけではなく、放射光による熱負荷や放射損傷からコンポーネントを保護する機能や真空系の保持機能が含まれていることが望まれます。PFでは、ビームラインごとに基幹部および分岐部をカバーするそれぞれ独立な制御システムとして、インターロックシステムが設置されています。これらは蓄積リングの制御系と接続されて総合的な制御系を構成しています。分岐部のインターロックシステムは真空系保持と放射線防御の両面を担い、実験者はこれを操作して実験を行います。ここでは分岐部インターロックシステムの構成と放射線防御のための制御ロジックについて説明することにしましょう。

インターロックシステムで制御される主なビー



メインビームシャッター (MBS) は基幹部に含まれ、その開閉はリング制御システムを通じて行われる。INTLCK 信号はビームラインが正常に動作可能であることを示すもので、リング制御システムに接続されている。MBS の開閉ステータスを除く他の信号はシーケンスコントローラに接続されている。

図38 MBS制御ブロック図

ムラインのコンポーネントは、MBS、BBS、DSS、真空計や真空バルブ類、ハッチなどの遮蔽物、および各種のセンサー類（冷却水の流量計や温度計、圧縮空気の圧力計など）です。システムは、主および分岐部制御部、シーケンスコントローラー、実験ステーションに置かれる操作コンソール、ハッチ取付けの動作表示盤と退室制御盤などの機器から構成されています。個々のビームラインによってその運用環境と必要な制御ロジックが異なることから、ソフトウェアによって容易にロジックを組み込めるプログラマブルなシーケンスコントローラーを中核としたシステムになっています。

X線ビームラインではBBSとハッチの操作頻度が極めて高く、1週間の間に1000回以上に達することがあり、不注意な操作が起きやすくなります。動的放射線防御の立場からビームラインの運転環境を次の4段階のステージに分類して制御条件を考えることができます。ステージA：電子/陽電子ビームの蓄積リングへの入射と蓄積；B：MBSの開閉；C：BBSの開閉；D：ハッ

チへのアクセス。最も高い安全または防御のステージに相当するのはステージAであり、ついでB、C、Dと低下します。システムでは、もしもあるステージにおける異常が検知されると、より高いステージの防御が起動されてバックアップするようになっています。

ステージAの防御では電子/陽電子ビームの入射または蓄積を停止するダンプ機能が重要です。これはビームラインに設けられた非常停止ボタンの操作、またはステージBの異常により起動され、電子/陽電子ビームのダンプと同時にすべてのビームラインのシャッターを閉鎖します。入射時には蓄積リングでの放射線量が高くなりますので、入射はMBSがすべて閉鎖されている場合にのみ行われます。

ステージBはMBSの開閉に関するものです。図38にその制御のブロック図を示します。MBSが閉じられるとBBSも閉じられます。これは制動放射γ線をできるだけ遮蔽するためです。

ステージCはBBSの開閉に関するものです。図39にその制御のブロック図を示します。BB

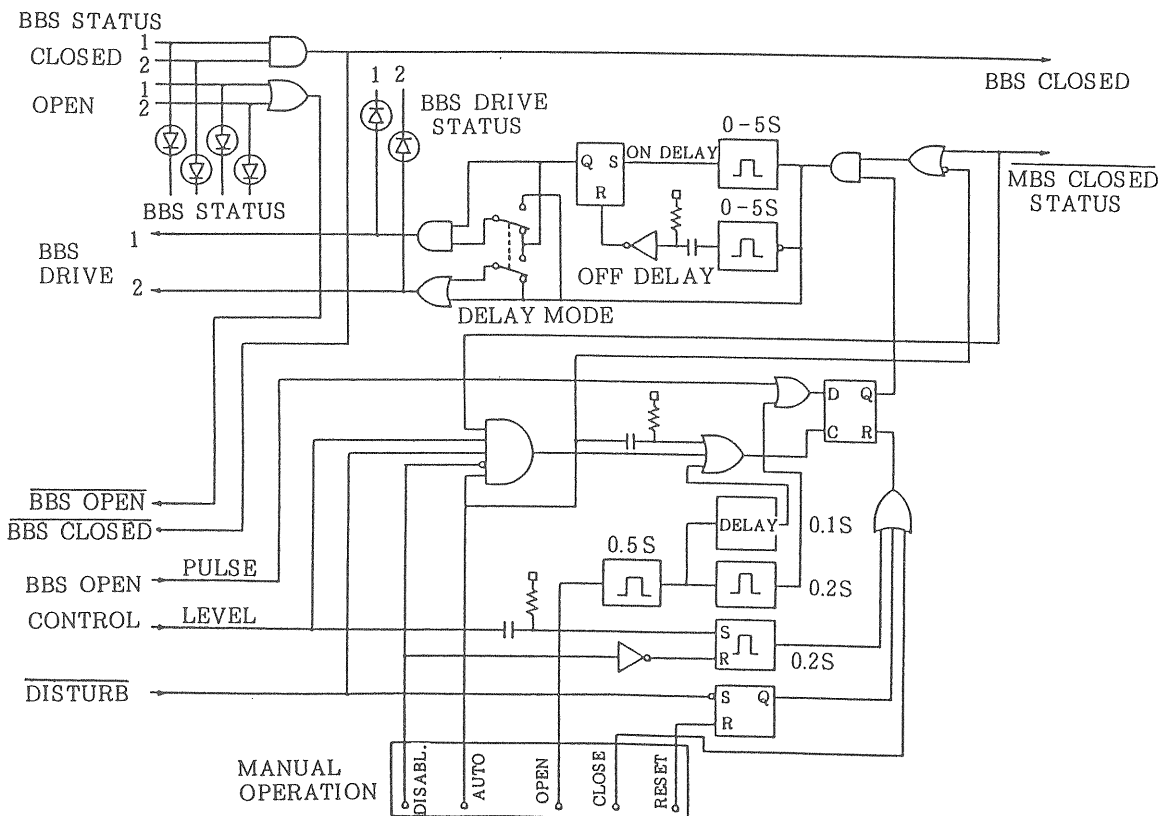


図39 X線ビームラインのブランチビームシャッター（BBS）は、駆動の信頼性を高めるために2個の圧空動作のシャッターユニットから成り、時間差動で駆動される。DISTURB信号は分岐部ビームラインに異常が発生したときに起動され、BBSを強制的に閉鎖する。

図39 BBS制御ブロック図

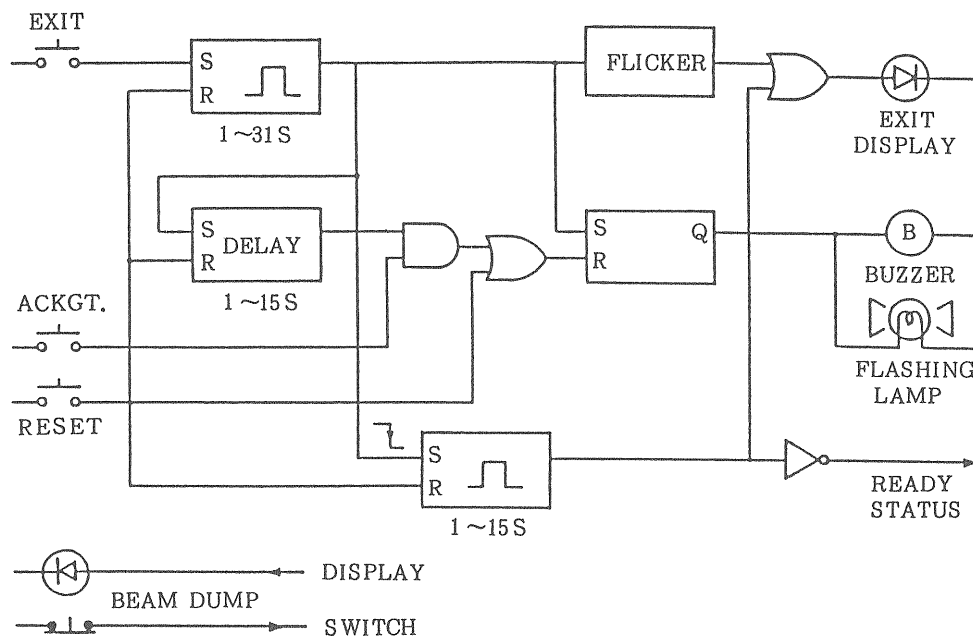
Sを開けられるのはハッチの扉が閉じている場合です。BBSが閉じられていないときにハッチの扉が開かれると、直ちにBBSとMBSが閉鎖されます。DSSはBBSの下流側に置かれ、さらに下流へのビームの出射・遮断のために用いられます。DSSが閉じているとBBSが開いていてもハッチにアクセスできるので、BBSとDSSの間に置かれた光学素子にはビームを照射し続けることができます。これは分光結晶などの光学素子への放射光ビームによる熱負荷を一定に保つのに役立ちます。

ハッチへのアクセスはステージDに属し、操作コンソールとキーを用いて行われます。ハッチの出入用の扉を開くには、BBSまたはDSSを閉じ、操作コンソールからキーを抜いて扉のキースイッチに挿入して行ないます。ハッチの扉をすべて閉じて閉鎖した後、BBSまたはDSSを開くことが再び可能となります。ハッチの閉鎖を確実にを行うために特別なハッチ退室手順を要します。この手順では、ハッチから退室する場合には退室制御盤の退室ボタンを押し、その後所定の数秒間待ってから扉を閉じます。さらに、所定の時間後の数秒間にキースイッチを回して抜いた場合にのみ、ハッチが閉鎖されたこととなります。このよ

うな手順を採るのは、不用意に扉が閉められるのを防ぐためです。図40はこの手順を制御する退室制御盤のロジック図です。READY信号が出力されているときに、ハッチのすべての扉が閉じられたことを示す信号が検知されたときにのみ、ハッチ閉鎖となります。

参考文献

- 柿木二郎：X線結晶学（上）（丸善）、93-177（1959）。
 松下正：シンクロトン放射（培風館）、57-75（1986）。
 吉松満、松下正、菊田愷志：X線回折（共立出版）71-106（1988）。
 佐藤能雅、佐藤繁：シンクロトン放射利用技術（サイエンスフォーラム）、85-98（1989）。
 松下正：シンクロトン放射利用技術（サイエンスフォーラム）、104-116（1989）。
 前沢秀樹：第1回放射光基礎技術講習会テキスト、1-10（1991）。



ハッチ内に設けられる退室制御盤はハッチ退室手順の制御を行うもので、EXITボタンを押してから所定の手順に従ってハッチ扉を閉鎖することによりビームの出射が可能となる。シーケンスコントローラはREADYステータスと扉のステータスの論理積（AND）をとって閉鎖の判定を行う。各退室制御盤にはビームダンプのための非常停止ボタンが付加されている。

図40 退室制御盤のロジック図

- 石川哲也：第1回放射光基礎技術講習会テキスト、53-62 (1991)。
- 河田洋：第1回放射光基礎技術講習会テキスト、63-77 (1991)。
- 石川哲也：第2回放射光基礎技術講習会テキスト、53-63 (1992)。
- 菊田惺志：X線回折・散乱技術(上) (東京大学出版会) (1992)。
- 佐々木聡：第3回放射光基礎技術講習会テキスト、120-140 (1993)。