

## 1. はじめに

粒子加速器の存在しか知らなかった学生の頃、いつもの参考文献チェックをしていた私は、ある一連の論文に出会った。それは、当時、本格的な活動をし始めたスタンフォード大学シンクロトン放射研究所（SSRL）で測定された、真空紫外光を用いた様々な物質の光電子スペクトルであった。それまで光電子スペクトルといえば、ガス放電管や各種線源から発生する特定の波長の光によるものしか知らなかった私にとって、様々な情報を一挙に与えてしまうこれらのデータは新鮮かつ強い衝撃を与えるものだった。これが私の放射光との最初の出会いかと思う。

何年か後、そんな私も縁あって放射光実験施設（PF）の一員として、ビームライン建設に参加することになった。当時のビームライン設計並びに建設はワーキング・グループ方式をとっており、基本的には実験したい分野の人が中心となり、設計に必要な各分野の方々の協力を仰いで行うというものであった。従って、メンバーはその分野を代表する方々であるが、光学の専門家の方にも加わって頂き、要求に応じた分光器の設計をお願いすることが多かった。また、実際の建設ではほとんど素人に等しい集団がトランシット、オートレベルを覗いて測量を行い、次々に真空ダクトを並べてはフランジを接続していく、そんな状況でもあった。真空に関しても、当時はまだ超高真空技術は真空の専門家、特定の分野の方々が駆使する特殊な技術であり、分光器を製作するメーカーにすら充分理解されていなかった。従って、いわゆる真空に対する常識の違いから、いくつかのトラブルも発生した。ベーキングのために動かなくなった駆動機構や使いものにならなくなった回折格子、ガス放出が多すぎて超高真空に入らない素子等、いくつかの問題が一挙に吹き出してきた。光学系についても同様に、光学素子の研磨の精度、設置の精度、ビームの実際の大きさ、ビームの変動、調整の問題など様々な問題から、事前に行った光線追跡計算のように行かなかった。今にして思えば、これらの多くは用いられた技術がそれぞれ

の分野からの借り物の技術で、相互のマッチングがとれていないことによるものであったと言える。しかし、当時は、これらはひとつひとつ再検討され試され、そして最適化が諮られていった。さらには、それぞれのメーカーへのフィードバックがかけられ、経験、技術の蓄積が行われていった。PFが共同利用を開始してから10年がたった今、ビームライン関連技術としてまとめあげられた技術は、さらに高性能となる光を供給すべく用い始められている。

## 2. 真空紫外用ビームラインの概要

### 2-1. 放射光ビームライン

多数の偏向部と直線部から成り立っている光源リングでは、それぞれの偏向部及び直線部に置いた挿入光源から放射光が発生する。図1に示したように、放射光は幅広いエネルギー範囲の光を含む連続光であるので、特定方向に導き光学的加工を施して任意のエネルギーの光を切り出せば、様々な分野の実験に利用することが出来る。そこでまず、超高真空下にある光源リングから放射光を取り出して実験装置で利用するには、相互間を真空排気されたダクトで接続するか装置直前まで導いてやる必要がある。このダクト部分をビームラインと呼んでいる。さらに、このビームライン上に適当な光学素子を置いて分光光学系を組めば、任意のエネルギーの光を利用できることになる。

利用実験のためにビームライン下流に設置され

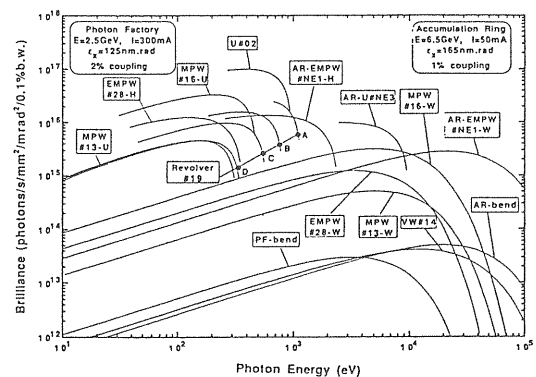


図1 放射光のエネルギー分布<sup>1)</sup>

る実験装置は、様々な真空度であるばかりでなく、実験の都合により気体導入、大気開放といった操作が頻繁に行われることから、定常的な光源リングに比べ真空事故の可能性は高いといえる。仮に、光源リングの真空悪化が起きた場合、シャットダウン／真空再立ち上げという最悪のケースもありうることから、全体に与える影響は大きい。従って、光源リングと実験装置をつなぐビームラインは、これらの状況に対応できる真空系であることが不可欠である。特に、ビームライン最上流の取り出し部分は、下流側からの真空事故に対する最終の防波堤として特別な真空対策がなされており、基幹チャンネルと呼んで他の部分と区別している。超高真空である光源リングと直結する部分である基幹チャンネルは、超高真空を維持するのに必要なポンプ、バルブといった各種真空機器が配置されている。さらに、実験装置側からの大気流入といった事態にも対処できるような高速遮断バルブや音響遅延管等を備えている。また、下流のビームラインへ放射光を導入するかしないかを決定する主シャッター等も組み込んだ、すべてのビームラインの中の共通的な要素が強い部分でもある。

さて、ビームラインは発光点をみこんで放射光の放出方向である接続方向に配置されるので、多数の発光点を持つ光源リングには放射状に多数のビームラインが設置することが出来る。例えば、PF実験ホールのビームライン配置図(図2)を見てみよう。28個の偏向電磁石と7個の挿入光源(計画中の1個を含む)に対して、20本ものビームラインが設置されている。さらに、それぞれのビームラインは2ないし4本のビームラインに分岐し、それぞれの実験ステーションに光を供給している。これは、ひとつのビームラインから取り出される放射光が、PFの偏向電磁石部の場合、垂直方向で数mrad、水平方向では20~40mradにわたる幅広いビームであるのに対し、実際に利用できるビームの取り込み角は前置鏡、分光器等の光学系による制約によりそんなに大きくないことによる。一方、挿入光源の一つであるアンジュレーターからの干渉性放射光は極め

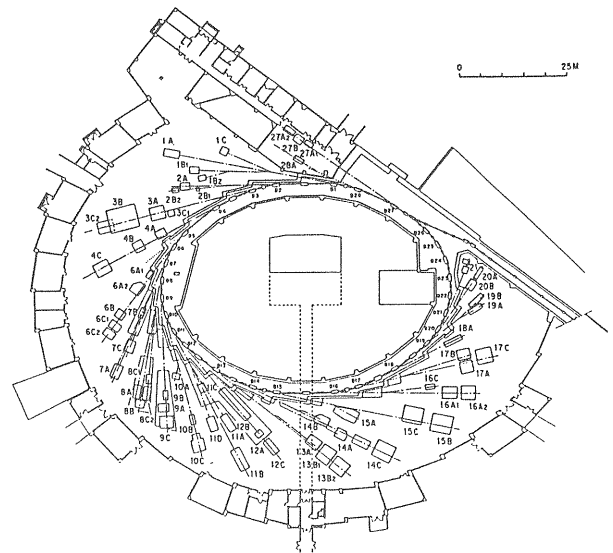


図2 PF実験ホールのビームライン配置図

て指向性が強く、単独の光学系ですべての光を取り込むことができる。しかし、干渉性放射光は偏向部の光では得られない様々な特質を持った貴重な光であることから、得られる光を充分活かし時間的ロスをなくすることが望ましい。そこで図3に示したBL-2のように、振り分け鏡を出し入れすることによって複数の光学系、実験装置で利用できるようにしていることが多い。結果として、

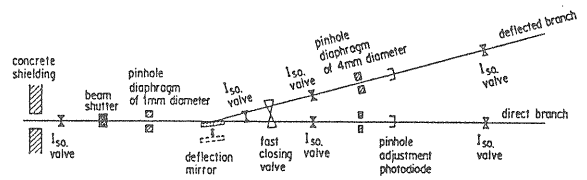


図3 BL-2の配置<sup>2)</sup>

それぞれの実験装置に光を供給しているビームラインの総数は60本近くにもなっている。これらの部分は、末端で行われる利用実験の性格、取り出される放射光のエネルギー、光学系の違いにより異なり、様々な形態が考えられることから、特に分岐ビームラインと呼ばれている。それぞれのビームラインには、末端に必要な光を取り出すためのいくつかの光学的構成要素を配置する必要があるばかりでなく、後述する真空排気、放射線防

護のための様々な構成要素装置・機器が配置する必要がある。しかし、ビームライン相互の間隔は10 mrad程度と狭く、これらの配置にはかなりの空間的余裕が必要である。従って、光源リング及び他のビームラインと干渉することなくビームラインに付随する各種装置・機器を配置するにはビームラインを長くとりざるを得ない。PFリングの場合、ビームラインは20～30 mにも及ぶ。

## 2-2. 真空紫外用ビームラインの特徴

真空の観点からビームラインをもう少し詳しくみてみよう。超高真空下にある光源リングとの接続部である基幹チャンネルは、必然的に超高真空でなければならない。さてその下流の分岐ビームラインとは言うのと、取り出そうとする光のエネルギーが、真空紫外領域かX線領域かで大きく異なっている。最も影響を与えるものは残留気体の光吸収である。気体による吸収を受けた光の強度Iは、吸収係数 $\mu$ 、気体中を透過する距離Lによって、次のように表せる。

$$I = I_0 / \exp(\mu L) \quad (1)$$

また、 $\mu$ は気体の密度nと光吸収断面積 $\sigma$ によって、次のように与えられる。

$$\mu = \sigma n \quad (2)$$

ビームラインの場合、Lはビームラインの長さ、nは真空度に相当する。従って、ビームラインの長さ、真空度及び真空中に残留するそれぞれの光吸収断面積は、光吸収の程度に同等に寄与していることになる。仮に、同じビームラインを真空紫外領域の光とX線領域の光を通した時の光吸収の程度を比べてみると、図4に示した窒素分子の光吸収断面積の波長依存性<sup>3)</sup>から、その違いは容易に推測される。気体による光吸収の影響が少ない硬X線では、たとえ大気中を通したとしても多少の距離ならば減衰は問題となるような量とはならない。そこで硬X線用ビームラインでは上流の段階で硬X線が透過できるベリリウムのような軽元素の箔を張り付けた窓で真空を仕切り、基幹チャンネルから続く超高真空と下流を分離することが

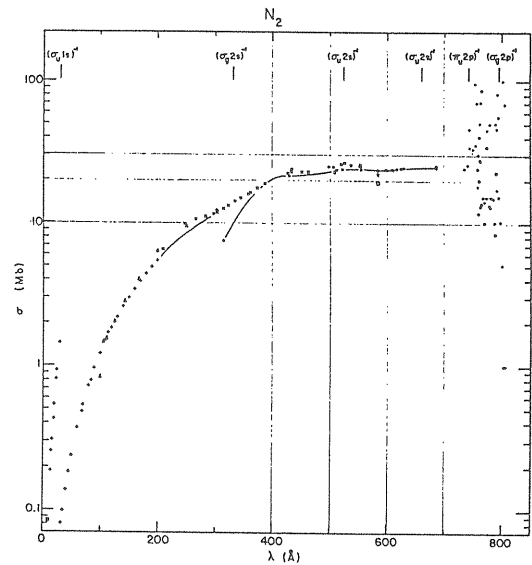


図4 窒素分子の光吸収断面積

出来る。一方、真空紫外領域の光の場合、気体による光吸収を受ける割合が大きく、低真空程度の排気でもダクト中の残留気体による光吸収で大幅に減衰してしまう。従って、真空紫外用ビームラインは実験装置との接続部にいたるまで、超高真空ないしは高真空であることが不可欠となっている。但し、後で述べるように途中に配置される光学素子等の拠点では超高真空まで排気されていることが望ましい。軟X線の場合は、その中間として光吸収の影響は少ないものの、ベリリウム窓を透過できない、もしくは安全な真空隔壁となり得ないほど極端に薄い膜しか透過できないことから、真空的には真空紫外用ビームラインとして扱っている。図5に様々な厚みのベリリウム窓を透過する光子数の波長依存性<sup>4)</sup>を示しておく。真空

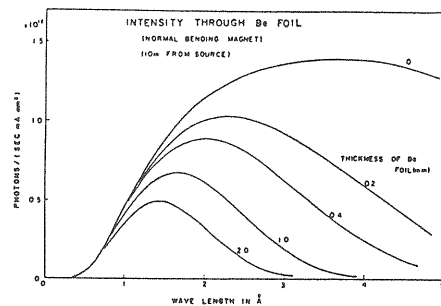


図5 Be窓を透過する光子数

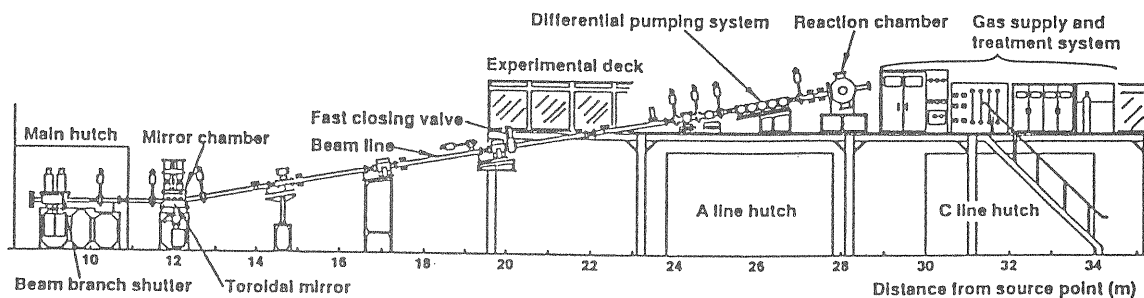


図6 BL-17Bの配置<sup>5)</sup>

紫外用ビームラインの中で、光励起気相エピタキシャル成長、気体の超高分解能測定といった特定の目的に使用される一部ビームライン（図6）ではこの原則は当てはまらないが、これらの場合は、分岐ビームラインの下流部自体がひとつの実験装置と考えることが出来る。

利用実験のために接続される実験装置の真空は利用する光のエネルギー、実験の目的により様々であるが、吸収／反射光、光電子、イオンを検出する実験では、ビームラインとほぼ同等の真空でそのまま接続できることが多い。また、気体を対象とする実験、極高真空を必要とする実験の場合は、ビームライン及び実験装置相互に影響を与えないように、十分な差動排気を行う必要がある。これらの場合を想定して、ビームラインの最下流は排気能力を大きくし、実験装置との接続部はコンダクタンスを小さくしているのが普通である。なお、特定のエネルギー光のみを利用する場合は、その領域の光をバンドパスする物質を使用して真空封止することが出来る。例えば、窓付きゲートバルブの窓材をその物質と取り替えれば、真空度が異なる実験装置を容易に接続することが出来る。

次に光学的な側面を見てみよう。真空紫外用ビームラインで扱う真空紫外／軟X線領域の光とは、数eVから数KeVにわたる幅広いエネルギー範囲の光である。しかし、後で触れるように、ひとつの光学系が切り出せる光のエネルギー範囲はそんなに広くはない。強度的には、構成する光学素子の配置を決めれば、光学素子の反射率の入射角依存性及び取り込み角から、特定の範囲のみに限

定されてしまう。分解能の点でも特徴を発揮しようとすれば、ひとつの回折格子で満足な性能を得られる範囲はたかだか3倍程度である。もちろん、光学素子配置を工夫する、または何枚もの回折格子を用いることによって、幅広いエネルギー範囲の光を出せるものもあるが、やはり特徴を発揮できる領域は他のものと同様に限られている。従って、真空紫外用ビームラインでは要求される幅広いエネルギー範囲を多少の重なりをもたせながら4つ程度に分け、それぞれのビームラインに様々な方式の分光器を設置してカバーしている。このため、それぞれの硬X線用ビームラインが研究分野毎に対応付けられているのに対し、真空紫外用ビームラインでは何本ものビームラインを必要とし、資源が限られている現状では共用という点を考慮して、特定の分野に合わせた最適化が充分に行われていない。一部共用が困難なほど特殊化したビームラインもあるが、この場合でも異なったエネルギー範囲を利用したい時には、再度、ビームライン建設を行う必要があることは言うまでもない。

### 2-3. ビームラインの構成要素

前述したように、ビームラインには光学路としての役割の他に、真空の維持／保護、実験者の安全確保を行うという複数の役割がある。そこで、PFの真空紫外用ビームラインBL-11（図7及び図8）を例にとり、ビームラインに組み込まれた様々な装置をそれぞれの役割毎に分けて解説することにする。

FRONT END OF BEAM LINE II

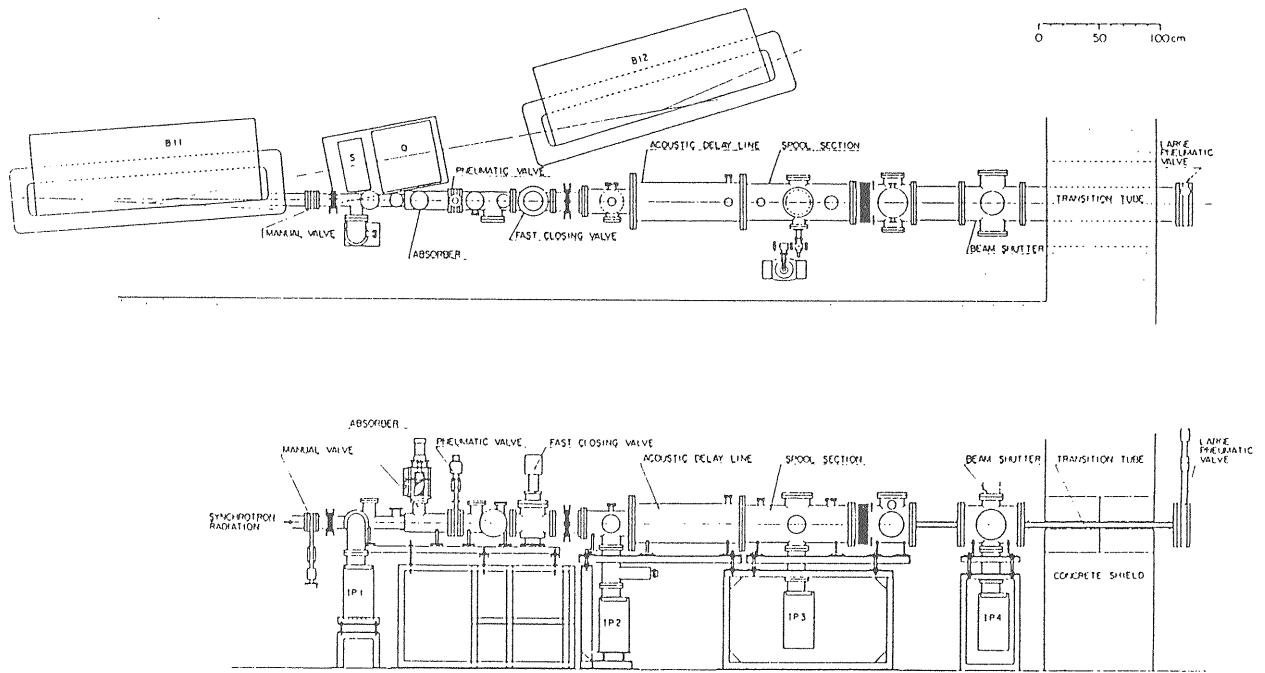


図7 BL-11の基幹チャンネル<sup>(6)</sup>

BEAM LINE II ASSEMBLY

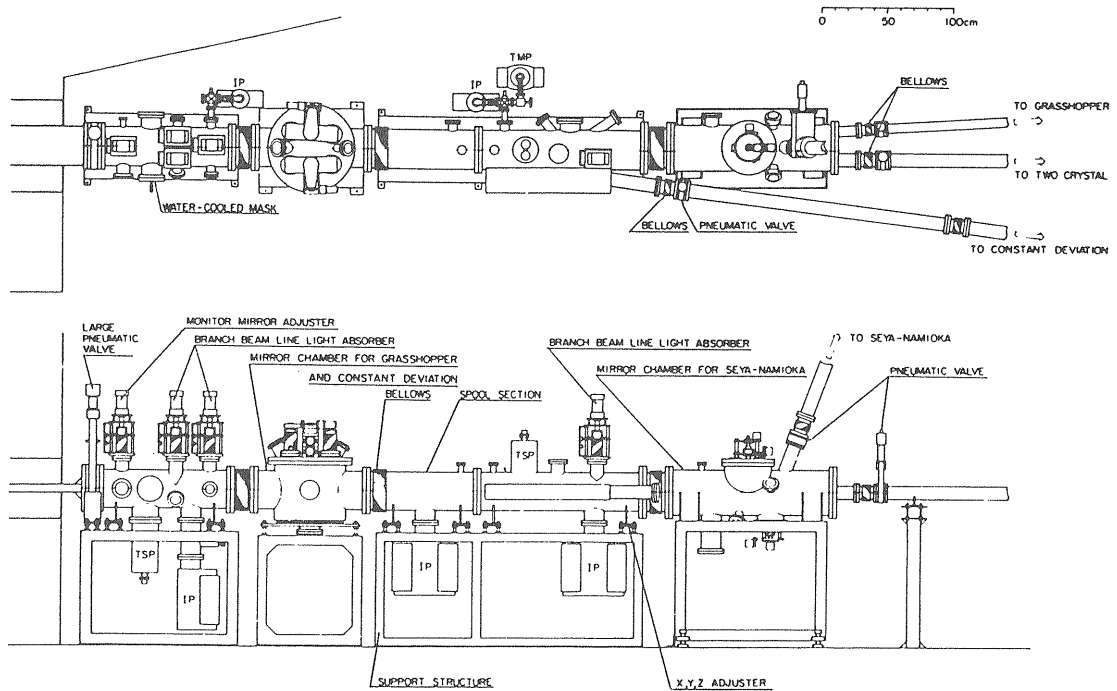


図8 BL-11の中間部<sup>(7)</sup>

## 1) 光学的要素

光学的にみて最も上流にあり、放射光をビームラインへ導入するかしないかという役割を果たしているのが主ビームシャッターである。これについては放射線防護の役割もあるので後で解説する。なお、概ねこの部分までを基幹チャンネルとしている。次にビーム位置モニターがある。ビーム位置の変動は取り出される光の強度、さらにはエネルギーの変動になって現れることから利用実験に大きな支障となる。従って、いち早く光源側へのフィードバックをかける意味においても得られる情報は重要である。

さて、基幹チャンネルからの幅広い光は分岐マスクによっていくつかに分けられる。これは水冷された銅のブロックで、下流の分岐ビームラインで必要とする大きさの光を通すようにいくつかの穴が開いている。その後、各分岐ビームラインへ放射光を導入するかしないかという役割を果たしている分岐ビームシャッターがある。ただ真空紫外光を止めるのであれば金属板程度でも充分であるが、主ビームシャッターと同様、放射光が直接当たるため放射線防護の点から重装備となっている。次には、前置鏡系が配置されている。前置鏡は偏向、集光、不要な高エネルギー成分の除去といったいくつかの働きをしているが、基本的なイメージは必要な放射光を損失なく分光器まで導くためのものである。

放射光は途中、アパッチャー、スリットにより一部整形される。これは導かれた放射光が途中のダクトの壁に当たり迷光となるのを防ぐ配慮であり、光が当たった壁からの脱ガスを防ぐ意味もある。また、スリットは放射光の見込み角による偏光度の違いを利用して、通常とは異なる偏光度の光を取り出す際にも用いられる。さらに、スリットの刃に生ずる光電流の変化を利用して、簡易のビーム位置モニターとして利用されることもある。

このようにして導かれた放射光から、次の設置された分光器によって必要なエネルギーの光のみが取り出される。一般的な真空紫外分光器の場合、分光器は入射スリットで切りとられた像が分光素子でエネルギー発散を受け、それを射出スリットで切り出している。射出スリットから出た単色光はそのままでは次第に広がって行くので、最後に配置された後置鏡系で再集光を行つたうえで実験装置に導かれることになる。

## 2) 真空に必要な構成要素

ビームラインの各所、特に各装置の前後には、真空保護及び保守のために数多くの手動もしくは自動式のゲートバルブが配置されている。また、これらのバルブで仕切られる区間は、焼損の恐れがない冷陰極型とピラニ型を連動させたワイドレンジ真空計が配置されている。この真空計は常時、集中的にモニターされており、こ

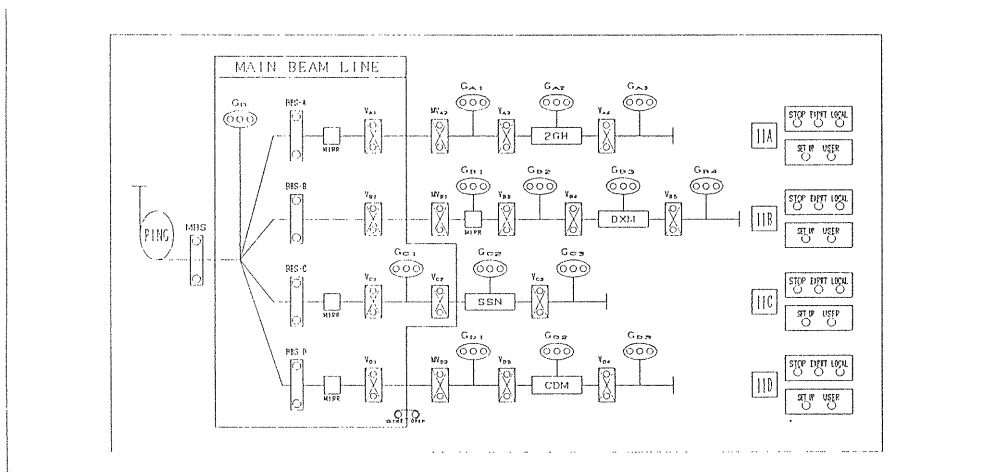


図9 BL-11のインターロック表示パネル

れらゲートバルブとゲージを用いて真空インターロックをかけることが出来る。この状況を表すBL-11のインターロック表示パネルを図9に示す。大気流入などによる真空悪化を検知した際は、悪化した部分の前後の自動ゲートバルブを強制的に閉めて被害が拡大することがないように論理となっている。もちろん、放射線防護が最優先であり、バルブの弁座部分に放射光が当たる恐れもないようにしなければならない。そこで放射光を取り出している時には、まずまたは分岐ビームシャッターを閉め、その後でバルブが作動する論理となっている。また、バルブ動作時は多少のガス放出がみられることから、バルブの開条件と閉条件との間にヒステリシスを持たせ、開けた際の放出ガスですぐ閉まるような事態を回避している。

超高真空下におかれた光源リングとの接続部である基幹チャンネルは、出来る限り下流側の真空が影響を与えることがないように、放射光を取り出しているとき以外は大口径バルブを閉じ下流側と分離されている。さらに、下流側からの大気流入などの急激な真空悪化に備えて2つの特別な装置が組み込まれている。ひとつは音響遅延管（衝撃波遅延管）であり、もうひとつは高速遮断バルブ（図10）である。音響遅延管は太いダクトを方形開口部を持つ何段ものアパチャーで仕切ったものであり、流入する気体を急激に拡散させることにより、真空悪化の速度を少しでも遅らせようとするものである。

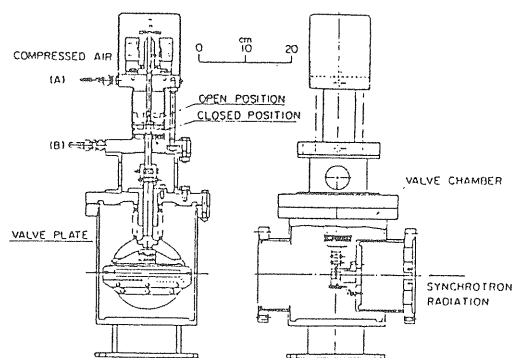


図10 高速遮断バルブ<sup>8)</sup>

また、高速遮断バルブは十分な真空封止が出来ないまでも出来るだけ高速に作動するバルブであり、数十ms程度で作動する。いずれも最終的に真空封止が可能なゲートバルブが作動するまでの時間を稼ぐ目的で取り付けられている。

排気系はイオンポンプ、サブリメーションポンプといった超高真空まで排気出来る閉鎖系のポンプを主排気系として用いており、大気流入の可能性のあるターボ分子ポンプ等の開放系のポンプは真空立ち上げ時の粗排気系としてのみ用い、常時はバルブで切り離している。しかし、最近では真空封止が可能な信頼性の高いターボ分子ポンプが供給されるようになったことから、下流のビームラインではターボ分子ポンプを主排気に使用するようになってきている。この場合、排気側バルブの他に背圧側にも電磁バルブを取り付け二重の真空封止を行う形で使用している。なお、放射光が当たるすべての構成要素は溶融もしくは照射時の大量の脱離ガス発生がないように十分な水冷が施されている。

### 3) 放射線防護に必要な構成要素

放射線安全はビームの利用にかかわらず、最優先に考慮しなければならない事項である。そこで、数多くの実験者が行き来している実験ホールはコンクリート製の放射線遮蔽壁で光源リングと分離されている。また、ビームラインが貫通する部分も鉛毛、鉛ブロックなどの遮蔽物で覆われ、十分な対策が施されている。ビームラインに関しては、実験者は放射光を取り出していない時でもビームラインの光軸上で調整作業をすることも多い。従って、この時放射光を遮断しているビームシャッターは、放射光に含まれる硬X線を遮断できるようにステンレスもしくは鉛をステンレスで覆ったブロックで出来ている。これらは充分水冷されているが、幅広い放射光を受けとめている主ビームシャッターに対しては、基幹チャンネルの中でもさらに上流側に、放射光の含まれる熱成分を吸収するアブソーバーが設置されている。以前のアブソ

ーバーはステンレスのブロックであったが、最近ではより効率よく熱成分を吸収できるようにくさび型をしたものが用い始められている。分岐マスク、前置鏡などの放射光が直接当たる部分では大量の散乱X線が発生する。散乱X線の大半はこれら構成要素をおさめている真空槽のステンレス壁によって遮蔽される。しかし、一部のエネルギーの高い成分や真空内部を確認するために設けられた窓から漏れてくるものもある。そこで、これらの部分が放射線遮蔽壁の外にある場合は、部分的に鉛入りの板でハッチを作りこれらを覆うか、オリ状のハッチを作り影響がなくなる距離まで立ち入り制限を行っている。前置鏡によって偏向を受けた放射光は真空紫外領域の光しか含まれていないので問題はない。しかし、放射光には図1に示したエネルギー成分の光を含むだけでなく、陽電子ビームがリング内の残留気体と衝突した際に発生する制動放射も含まれており、最大、陽電子ビームのエネルギーに近い $\gamma$ 線も含まれている。この $\gamma$ 線は放射光を取り出している際には十分に遮蔽できないことから、光源点を見込むビームラインの延長線上で最も上流に近い部分に、 $\gamma$ 線ストッパーとして大きな鉛のブロックを置いて遮蔽している。幸い、真空紫外用ビームラインでは上流の比較的早い段階で前置鏡による偏向を受けているので設置は容易である。

各項に挙げた各構成要素の状態を含むビームラインの状況は、冷却水流量、駆動用圧搾空気圧にいたるまでインターロックシステムに取り込まれ、放射線被爆にいたる危険性がないときにのみ放射光を取り出せるような論理となっている。

### 3. ビームライン光学系

#### 3-1. ビームライン光学系への要請

ビームラインを決定付けているのは光学系である。従って、設計の際には光学系で決まった配置に真空系やその他のものを肉付けをしていく形で

行われる。光学系への要請は、実験者がどのような光を欲しているかによって決まる。即ち、必要とするエネルギー領域、光強度、分解能、偏光度、さらにはビームのサイズ、角度広がりといった実験に必要なとされるビームの性質を与えることが必要である。中には相反するものもあり、例えば光強度が大きいことと分解能の良さは一般には両立しない。光強度を大きくするには幅広いビームを目一杯に取り込みフラックスを稼ぐことであるが、通常の光学系では近軸以外の軸から大きくはずれたビームを取り込むと、収差により結像点での像は大きく歪む。その結果、分解能は劣化し、場合によっては途中のスリット、光学素子で十分に受けきれずスループットが悪くなることもある。しかし、この場合でもビームの性質を理解し光線追跡計算を行うことによって最適化をはかればある程度の改善が期待できる。また、はじめにどのような光源を選択するのかによって、充分マッチングがとれる場合もある。例えば、挿入光源のひとつであるアンジュレーターからの光は角度広がりに小さく光強度も強いことから、このような用途に用いることが出来る。

このように要請の妥当性を検討し光源とのマッチングを考えた後で光学系を考えることが必要である。ビームライン光学系の単純なイメージは、光源の像を前置鏡で集光し、スリット上に最結像したものをもとに分光器で取り出すというものである。従って、エネルギー領域を決めれば後で述べる反射率などの条件から光学素子の配置が決まり、分解能を与えれば最適な分光器を決めることが出来る。

#### 3-2. 放射光ビームの取扱い

一般に、放射光は点光源から発生する平行性の良いビームのように思われているが、実際には高速電子の集団運動から発生する光であるので、有限の大きさと放出角度のばらつきを持っている。そこで光源のサイズや平行性を記述するのに位相空間という概念を用いている。

ある方向に向かっている粒子の運動を1次元的に



みると図11のようになる。ここで、特定の位置、例えば $Z_0$ の点での変位を $X$ 、傾きを $X'$ とすると、それぞれの動きは $X$ 、 $X'$ を軸とする2次元空間で表すことが出来る。これを位相空間と呼ぶ。運動している電子ビームや光束はガウス分布に従うことが知られているので、その拡がりにはガウス分布の分散 $\sigma$ で表される。そこで、分布の分散 $\sigma$ の境界を位相空間上に描くと図12のようになる。なお、エミッタンス $W$ はこの楕円の面積を $\pi$ で割ったものとされるから、

$$W = \sigma_x \sigma_{x'} \quad (3)$$

従って、光子の場合であれば、この楕円が各光学素子でどのような変換を受けて行くかを見ればビームの振る舞いがわかることになる。

さて、放射光の場合は電子のふるまいと放射光特有の分布をコンボリューションすれば良い。そこで、偏向磁石からの放射の角度拡がり

$$\sigma_{x'} \sim 1/\gamma = m_0 c^2/E \quad (4)$$

で与えられる。また、光子のサイズ $\sigma_x$ は、光の波動性による回折限界から

$$\sigma_x \sigma_{x'} \geq \lambda/4\pi \quad (5)$$

の関係が成り立つことから求められる。そこで、

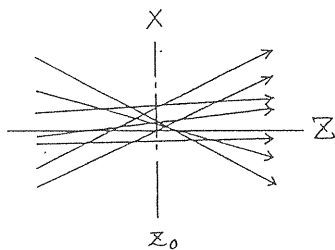


図11 粒子の運動

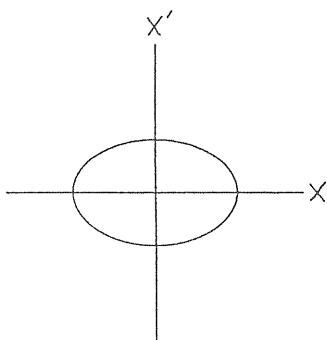


図12 位相空間による表現

電子ビームの大きさ、角度拡がりを $\sigma_x$ 、 $\sigma_{x'}$ とすると、放射光のサイズ $\Sigma$ 、角度拡がり $\Sigma'$ は

$$\Sigma = (\sigma_x^2 + \sigma_{x'}^2)^{1/2} \quad (6)$$

$$\Sigma' = (\sigma_{x'}^2 + \sigma_{x''}^2)^{1/2} \quad (7)$$

で与えられる。エミッタンス $W$ も同様に合成により求められるが、光子のエミッタンスは式(5)より $\lambda/4\pi$ 程度であるので、

$$W = \sigma_x \sigma_{x'} + \lambda/4\pi \quad (8)$$

となる。従って、PFの場合、表1のように各光源点の大きさと拡がり<sup>1)</sup>が与えられていることから、容易にエミッタンスを求めることが出来る。

| location | $\sigma_x$ [mm] | $\sigma_{x'}$ [mrad] | $\sigma_x$ [mrad] | $\sigma_{x'}$ [mrad] |
|----------|-----------------|----------------------|-------------------|----------------------|
| B15&B01  | 0.34            | 0.16                 | 0.41              | 0.033                |
| B02&B16  | 0.60            | 0.13                 | 0.38              | 0.033                |
| B03&B17  | 0.43            | 0.22                 | 0.32              | 0.018                |
| B04&B18  | 0.52            | 0.18                 | 0.29              | 0.045                |
| B05&B19  | 1.26            | 0.21                 | 0.39              | 0.037                |
| B06&B20  | 0.85            | 0.25                 | 0.38              | 0.037                |
| B07&B21  | 1.26            | 0.21                 | 0.39              | 0.037                |
| B08&B22  | 0.85            | 0.25                 | 0.38              | 0.037                |
| B09&B23  | 1.26            | 0.21                 | 0.39              | 0.037                |
| B10&B24  | 0.85            | 0.25                 | 0.38              | 0.037                |
| B11&B25  | 1.26            | 0.21                 | 0.39              | 0.037                |
| B12&B26  | 0.85            | 0.25                 | 0.38              | 0.037                |
| B13&B27  | 0.44            | 0.23                 | 0.31              | 0.045                |
| B14&B28  | 0.50            | 0.20                 | 0.30              | 0.018                |

表1 PFの各光源点でのサイズと拡がり

このように求められたエミッタンスの放射光ビームが、効率よく受け手側である光学系に取り込まれて行くには、同様に定義した光学系のアクセプタンスとのマッチングがとれていなければならない。そのため、これを元にした事前の光線追跡計算はより重要な意味を持っている。

### 3-3. 鏡

#### 1) 鏡の役割

ビームラインに配置される前置鏡系、後置鏡系には何種類かの鏡が使用されている。また、次項で解説する分光素子もある面ではひとつの鏡と考えなければならない。このように、鏡がビームラインに占める割合は大きく、あらかじめ十分に検討しておかなければならない構成要素である。鏡の役割としては偏向、集光及びカットオフの3つのものがある。これらはいずれ

も重要な役割であり、それぞれについて順に解説していく。

## 2) 反射率

さて、鏡の役割を決定付けているものは、面形状と鏡の母材あるいは表面にコーティングした素材で決まる反射率である。特に反射率は物質毎により大きく異なり、また入射する光のエネルギー、入射角度によっても大きく異なる。図13に、真空紫外領域でよく使用される白金の反射率の入射角及びエネルギー依存性<sup>10)</sup>を、また図14にはSiCのそれ<sup>11)</sup>を示した。従って、放射光を効率よく下流側に輸送して行くには、利用するエネルギー領域で最も高い反射率が得られるような物質、入射角度を選択しなければならない。また、鏡の使用は何枚も重なれば最終的なスループットは大幅に低下する。即ち、出来る限り、鏡の使用枚数を減らすことが

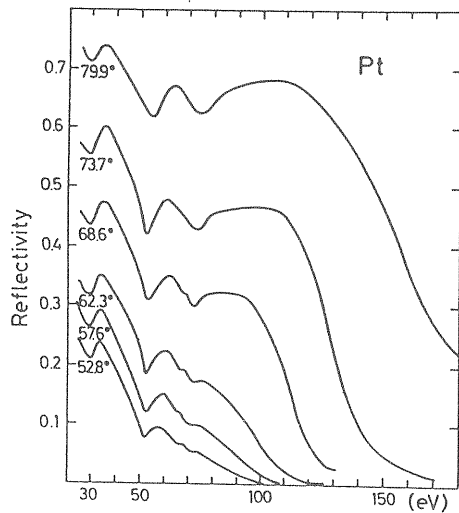


図13 Ptの反射率

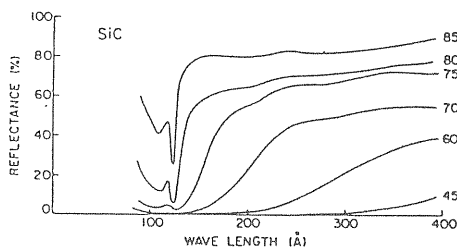


図14 SiCの反射率

肝要となる。以下に示した役割を考えるにはこれらの点を十分に考慮して置く必要がある。

## 3) 偏向

鏡の最も基本的役割は偏向である。光学素子の配置を考えるに際しては、光の向きを変えることによって非常に簡単なものとなることがある。また、隣合ったビームラインで空間的干渉を起こし易い場合には、意識的にビームの方向を左右あるいは上下に振ることによって解消できる。この場合、前述した反射率に対する考慮は充分行う必要がある。図12に示したように、斜入射領域ではほんのわずかの角度の違いが大きく反射率に影響するからである。

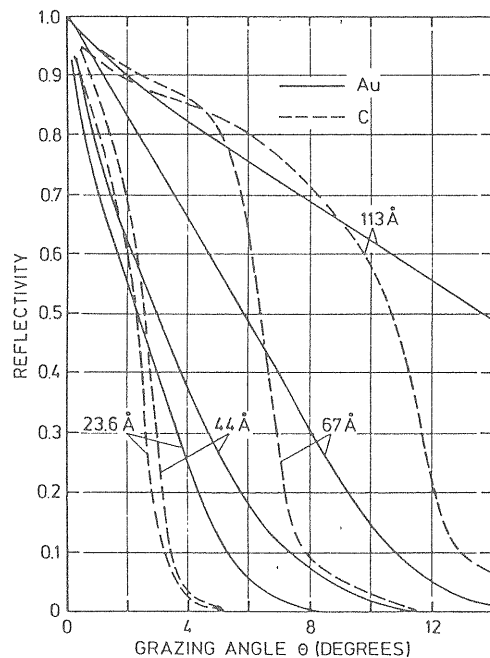


図15 AuとCの反射率<sup>12)</sup>

## 4) 集光

凹面形状の鏡によって果たす役割が集光である。放射光は発散ビームであるから、下流の実験装置にある試料に効率よく導くには、いずれかの段階で集光が必要となる。また、PFのようにビームラインが長い場合には、上流の早い段階で集光しなければ非常に大きな受光面を持つ光学素子が必要になってしまう。さらに、光

源サイズは無限小ではなく、ある程度の大きさを持つことから、小さな曲率半径を持つ分光素子で分解能を得ようとすれば、縮小光学系を作らざるを得ない。このようにビームラインでは様々な意味合いから集光が必要となってくる。この場合、最も良く用いられるのが球面鏡である。これは球面鏡が加工が容易で形状精度が高く、面粗さも小さいことによる。このため、実際に設置した場合の狂いが少なく調整が少なく済む。しかし、球面鏡を用いた斜入射光学系では非点収差が大きく結像のボケ、歪みを生ずる。また、縦横の焦点距離がずれて2次元的な集光が出来ないことが問題となる場合もある。そこで、この点を考慮して、次によく使用されるのがトロイダル鏡である。トロイダル鏡は縦横の曲率半径が異なることから1点集光が可能である。以前は加工精度がばらつき使用に難があったが、最近ではかなり改善されていることから頻りに使用されるようになった。また、多少の偏向角の変更で焦点距離の調整可能な場合もあるので、もっとも収差の少ない1:1配置で使われることが多い。別の非球面として最近では、理想的な結像系が組める楕円面鏡も使われ始めているが、加工が困難で普及するにいたっていない。そこで、このような形状を曲げによって作り出す試みもなされている。この場合、焦点距離を可変とすることが出来る点も大きなメリットとなっている。その反面、X線の場合と異なり、真空紫外領域で使用される場合は、比較的曲率半径が小さくなることから曲げ量が大きく理想的な面が出来るまでにはいたっていない。その他のものとしては、図16に示した直交ミラー系がある。これは円筒鏡を用い結像の縦横分離を行うものである。鏡の枚数は増えるが収差の改善、調整の容易さから、最近よく用いられるようになってきた。

### 5) カットオフ

3つめの役割は、反射率のエネルギー依存性から生じるカットオフを利用したローパスフ

ルターとしての役割である。放射光は最初に示したように硬X線までの光を含む連続光であるから、真空紫外領域の光のみを扱うとすれば早い段階でそれ以外の成分を除去しておいた方がよい。ひとつには、有害な $\gamma$ 線や散乱X線のもととなる硬X線を上流の段階で除去することが必要であること。もう一つは必要範囲外の光は高次光のもととなるので除去する必要がある。カットオフのエネルギーは入射角を選べば任意に選択可能であるし、鏡の母材あるいは表面にコーティングした素材の光吸収を用いれば可能である。

### 6) 鏡の材質

従来、鏡の母材は加工性の良いBK-7か熔融石英が用いられてきた。しかし、様々な成分を含む放射光を最初に受け取る鏡、いわゆる $M_0$ 鏡には熱的歪みあるいは放射線損傷が生ずると予想される。そこでPFでは当初からこの点を考慮し、一部の $M_0$ 鏡をSiCで製作した。SiCは石英等に比べ、高熱伝導率、低膨張率の材料であり、図14に示したように長波長では高い反射率を持つことから、低エネルギー領域の光学系の $M_0$ 鏡には最適と考えられていた。但し、非常に硬く加工が困難であることから、直入射領域の分光器の平面 $M_0$ 鏡としてのみ採用された。使用結果は上々で、以後、コーティングを施して他のエネルギー領域の分光器に、さらには多少の加工誤差は見られるものの円筒鏡、トロイダル鏡としても用いられるようになってきた。一方、熔融石英を使用したものは表面に無数のクラックを生じており、損傷が大き

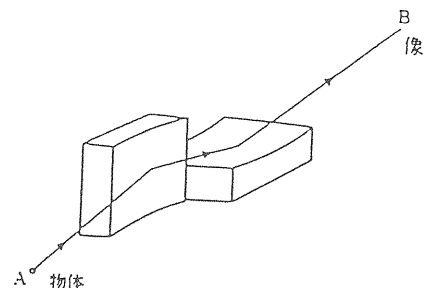


図16 直交ミラー系

いことが確認された。現在では、いくつかの問題点があったSiC鏡もかなりの改善がみられ、安定した性能のものが出来ている。例えば、加工精度の向上の他に、材質面でも、以前のグラフィット母材にSiCを低品位CVD成長させたものから、母材に焼結SiCを用い高品位のCVD-SiC層をつけた、いわゆるオールSiCと呼べるものが供給されている。また、大きさについても1m近いものが製作されるようになった。しかし、一方では光源リングの性能向上にともない、熱負荷によるビーム変動等の熱的問題が再び顕著になり、さらなる母材の検討とともに、原点に戻り効率的冷却を検討することが今後の課題となっている。

#### 7) 光学素子の汚れ

おしまいに光学素子の汚れについて少し触れておく。真空がそれほど良くない状態で光学素子に放射光を照射し続けると、表面がわずかつつ変色し始める。これは残留気体中の炭素系物質が光化学反応により炭素を析出または下地との間で炭化物を形成することによる。その結果、光学素子は反射率の低下や炭素による吸収により、光学系から取り出される光に大きな影響を及ぼす。このような場合、単純な解決法は汚れた光学素子を交換すれば良い。しかし、光学素子の交換にはビームラインの真空を破る必要があるうえ、面倒な素子の再調整が必要となる。そこで、簡単に反射率を改善させる方法として酸素による放電洗浄が考えられた。図17にその効果<sup>13)</sup>を示す。但し、この方法は表面素材に応じた対応及びこつが必要で、保守要員の訓練の問題とあいまって、現在は定常的に行われる状態には至っていない。一方、これは真空の問題と見ることが出来ることから、根本的な解決として後述するようないくつかの方法が模索されている。

### 3-4. 分光素子

#### 1) 分光素子の種類

真空紫外/軟X線領域の光に対して用いられる分光素子は、大きく分けて平面上の周期構造を利用したものと、深さ方向の周期構造を利用したものがある。平面の周期構造を利用したものは以下で述べる回折格子であり、深さ方向のものとしては多層膜、分光結晶がある。深さ方向のものは硬X線の場合によく用いられているので、ここでは後で簡単に紹介するに止めることにする。

回折格子には反射型回折格子と透過型回折格子とがある。真空紫外領域の光の場合、ほとんどの光学材料は不透明であるので、この領域では反射型が主に用いられる。(但し、一部ではあるが、透過型的一种であるゾーンプレートのように微小スリットを並べた形のもの使われている。)従って、ここでは反射型回折格子を解説していくことにする。

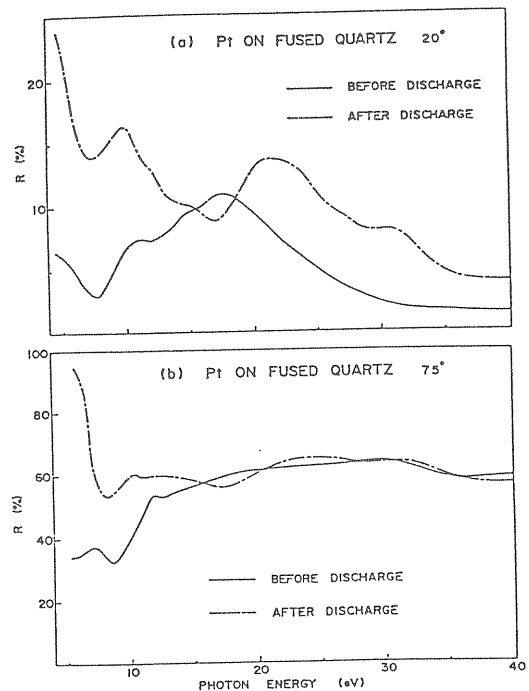


図17 酸素放電洗浄の効果

## 2) 回折格子の公式

どんな形状でも良いが、表面で反射する周期的構造があれば、これは反射型回折格子として機能する。図18に示したように、回折格子に入射角 $\alpha$ で入射した光が回折を受け、出射角 $\beta$ の方向に出てくる回折強度が最大である $m$ 次の回折光の波長 $\lambda$ は、周期構造のピッチを $d$ とすれば、次の回折格子の公式により与えられる。

$$m\lambda = d(\sin\alpha + \sin\beta) \quad (9)$$

ここで、 $\alpha > 0$ とすれば $\beta < 0$ である。

このことから、 $\alpha$ を一定にして $\beta$ を変えて行けば（あるいはその逆）、任意の波長、エネルギーの光が得られることになる。次項で説明する分光器はすべてこの関係式に基づき様々な配置のものが作られている。

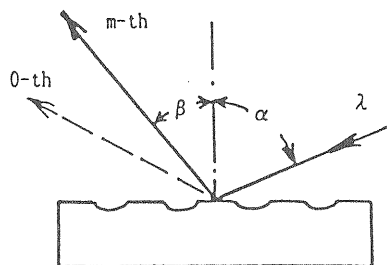
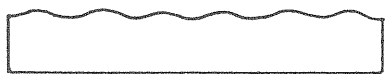


図18 反射型回折格子



(a) ブレーズ型



(b) 正弦波型



(c) ラミナー型

図19 回折格子の溝形状

## 3) 回折格子の溝形状

さてここで、溝形状をある一定の形にしてみる。その結果は、波長による別の位相差を生じ、特定のエネルギー領域の回折強度を高めることが出来る。これを位相型回折格子と呼び、ブレーズ型、正弦波型、ラミナー型などが知られている。それぞれの溝形状を図19に示した。これらの中でもブレーズ型は頻繁に用いられ、溝傾斜角（ブレーズ角） $\theta_B$ で強度最大となる $m$ 次の波長 $\lambda_B$ は

$$m\lambda_B = 2d\sin\theta_B \cos((\alpha - \beta)/2) \quad (10)$$

で与えられる。ブレーズによる効果は $\lambda_B$ 周辺で強度が持ち上げられた形となる。しかし、短波長域になるとブレーズ角も $1^\circ$ 程度となり、ばらつきも大きく作りにくい。そこで、最近ではラミナー型も用いられるようになってきた。以前のラミナー型は散乱が多く、回折効率も悪いとされていた。しかし、最近の研磨精度の向上とイオンエッチング技術の進歩により、充分使用に耐えるものが製作されてきている。ラミナー型は深さの分だけ位相が異なる上面と底面の2つの周期的構造からの回折光が干渉することから、深さを適当に選べば高次光を打ち消す効果が生じる。最近の幅広いエネルギー範囲をカバーする分光器では、必然的に高次光が生ずる。高次光は測定に大きな悪影響を及ぼすことから、透過フィルター、カットオフ鏡の使用により強度落として使用しているが、必要な光の強度も減衰してしまう。従って、分光する時点で高次光を落とすことが出来るこのような回折格子の利用は測定の大きな助けとなる。

## 4) 回折格子の材質

回折格子はいくつかの方法で溝を作る。基板上に厚くコーティングした金などの膜をルーリングエンジンと呼ばれる精密加工機で加工する、いわゆる機械切りと呼ばれる方法と、基板上に感光材を塗りホログラフィック・パターンを露光させて作ったレジスト膜をマスクにしてイオンエッチングで基板を削る方法がある。いずれ

の場合も、これまで我々が手にするものは、このようにして作ったマスターをエポキシで写しとり、別の基板に貼った安価なレプリカであった。しかし、超高真空が必要なビームラインでの使用のためには、ベーキングに耐えるものが必要であった。また、光源リングの性能向上に伴い、回折格子に当たる放射光の熱パワーも上昇したことから耐熱性の高い回折格子が必要となった。そこで、ベーキングが可能な耐熱性エポキシを用いたベークブルなレプリカが登場した。最近では、いくつかのビームラインでは取り込み角を大きくしたこと、この回折格子でも局所的に温度が上がり膨張率の違いからエポキシがずれる現象が生じたことから、高価ではあるがより安定なマスターの使用が一般的となっている。これは副次的にはあるが、従来入手が困難であった曲率半径の大きな回折格子の製作が容易になった面も見逃すことが出来ない。挿入光源を利用するビームラインでは熱問題はさらに厳しくなる。従って、この場合には鏡の場合と同様に母材の検討が行われ、高熱伝導率かつ低膨張率のSiCの使用が不可欠となっている。

### 5) 回折格子の面形状

回折格子は面形状によっても違いがあり、平面回折格子と凹面回折格子がある。平面回折格子は分散機能を持ち、次項で述べるように実際の使用に当たっては収束のための補助光学系を必要とする。これに対し、凹面回折格子は分散と収束を併せ持つ。しかし、鏡で述べたように収差除去が不完全である。収差を小さくするには微小部分に当てれば良いが、これでは分散しない。また、ある程度の強度を得るためには大きく取り込むことが必要であり、これを縮小して当てた場合には損傷も大きくなる。そこで収差を出来るだけなくするように、最近では収差を含めて刻線するホログラフィック回折格子が現れてきた。同様に機械切りでも数値制御精密加工技術の進歩により、収差補正を考えた不等

間隔の溝製作も可能になってきた。さらにこれを発展させて、収束を伴わない平面でも収束可能なものが考えられるようになってきている。

### 6) その他の分光素子

さて最後に、深さ方向の周期性を利用したものをわずかではあるが解説する。多層膜は、反射率が大きく異なる2つの物質を周期的に交互に積み重ねたものであり、それぞれの深さの反射率の高い面で反射された光が干渉し回折効果を生む。この場合、積み重ねる材料の組み合わせの選択は、界面の整合性に充分気をつけてエピタキシャル成長させることから、かなりの制約を受ける。これを真空紫外領域で利用するには、ある程度の膜厚を持たせたいと透過の都合を考えて20層程度積み重ねてやる必要がある。これらの条件を満たして製作された多層膜の反射率<sup>11)</sup>を図20に示す。現状では、組み合わせの選択の問題から特定のエネルギー範囲で利用出来るものしか製作されておらず、分解能も良くない。しかし、反射率が高い状態で使用できることから、大強度の光を必要とする照射実験での利用や、高次光の除去のための鏡への応用が進められている。

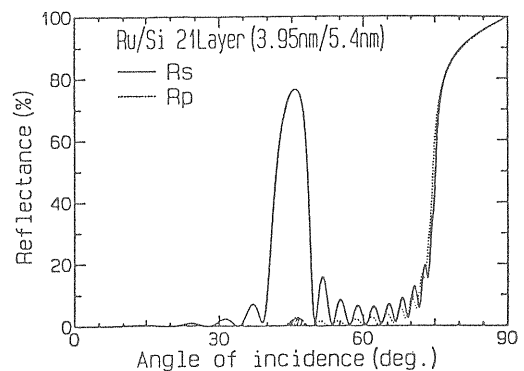


図20 多層膜の反射率

もうひとつの深さ方向の素子である分光結晶は、硬X線の場合とまったく同様であるが、波長が長い真空紫外領域用としてはSi、GeやInSbなどの低指数面が用いられている。また、1KeVまでと言われる回折格子の限界を

重ねつなぐものとして、ベリルや人工結晶が試されている。しかし、これらは放射線損傷、結晶性の点で問題があり、ようやく部分的にはあるが使用され始めたところである。

### 3-5. 分光器

#### 1) 分光器の分類

真空紫外領域で使用される分光器は分光素子の違いにより、回折格子分光器、多層膜分光器、2結晶分光器の3つに分類される。前述したように、最も多く用いられるのは回折格子分光器、特に反射型回折格子を用いたものであるので、ここでは反射型回折格子分光器について述べていくことにする。

反射型回折格子をさらに分類すると、いくつかの方法が考えられる。そのひとつは回折格子への入射角の違いにより、直入射型と斜入射型にわけられるものである。これは回折格子のコーティング材料としてよく用いられる金や白金などの直入射における反射率が、300Åあたりから短波長側で急激に小さくなることに関連している。このことにより、300Åより長波長側を直入射領域と呼び、短波長側を斜入射領域と呼んでいる。即ち、この分類は取り扱う光のエネルギー領域の違いと考えることが出来る。また、前項で述べたように、収束に関して斜入射光学系では非点収差が大きく取扱いが難しくなる点も大きく異なる。しかし一方では、斜入射配置から直入射に近い配置まで変化し幅広いエネルギー範囲を取り扱うことが出来る分光器は、この分類に当てはめるのは難しい。

もうひとつの分け方は、回折格子の面形状によるものである。前項で述べたように、反射型回折格子の面形状には凹面（球面、トロイダル）と平面があり、それぞれの回折格子を用いた分光器を、球面回折格子分光器（SGM）、トロイダル回折格子分光器（TGM）、平面回折格子分光器（PGM）と呼んでいる。これらは回折格子の面形状から生じる収束機能の違いにより、収束のための補助光学系に大きな違いを持

っている。これらには、それぞれ特徴を持ったいくつかのバリエーションがあるので、PF実験ホールに設置されているものを中心に解説することにする。

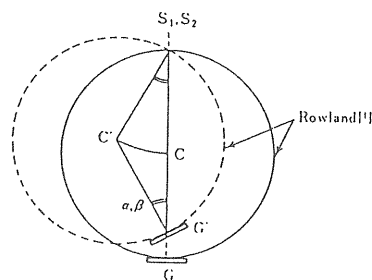
#### 2) 球面回折格子分光器

これまで最も多く使われてきたのが、球面回折格子分光器である。前述したように、球面による収束は縦の焦点と横の焦点が一致しない。従って、実験装置内の試料上に一点集光しようとすれば別の集光光学系が必要となる。さて、回折格子の曲率半径Rを直径とする円、これをローランド円と呼ぶが、この円上に入射及び出射スリットを配置した場合、それぞれのスリットまでの距離 $r$ 、 $r'$ は

$$r = R \cos \alpha \quad \text{及び} \quad r' = R \cos \beta \quad (11)$$

となり、回折格子の公式(9)を満足する。この場合、いくつかの収差はゼロとなることから、出射スリット上で鋭い像となり高分解能が得られる。このような配置をした分光器をローランド円型分光器と呼び、エネルギー領域を問わずよく用いられている。但し、ローランド円の条件を満足しながら波長掃引するためには、スリット、回折格子には複雑な移動機構を必要とし工夫がいる。また、斜入射領域では非点収差が非常に大きくなるので注意が必要である。

直入射領域のローランド円型分光器としては、図21に示したイーグル型が挙げられる。これは非点収差も小さく分解能が高いが、2つのスリットが非常に近づいたものになる。そこで、

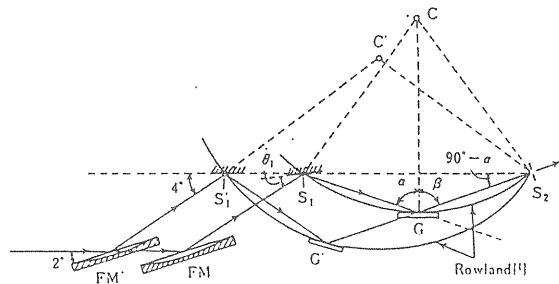


G, G': 回折格子, C, C': Rowland 円の中心, S<sub>1</sub>: 入射スリット, S<sub>2</sub>: 出射スリット

図21 イーグル型分光器

PFのBL-12Bに設置されているものは、スリットをローランド円のある平面からわずかに上下にずらしたオフプレーン・イーグル型としている。さらに前置分散/集光系と曲率半径の大きな回折格子を用いることによって、この分光器では250,000という超高分解能を達成している。<sup>15)</sup>

次に、斜入射型のものとしては図22に示したグラスホッパー分光器が挙げられる。この分光器は、スリットと偏向鏡が一体化したコードリング・スリットと機械的連結機構により、簡単な直線駆動のみでそれぞれの要素の複雑な動きを実現している。また、入射角が90°に近いような斜入射でも掃引出来ることから、取り扱える光のエネルギー範囲が広い。このため、世界中で数多く使われ、PFでもBL-11Aに設置している。

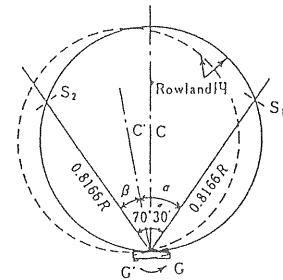


G, G': 回折格子, C, C': Rowland 円の中心, S<sub>1</sub>, S<sub>1</sub>': 入射スリット, S<sub>2</sub>: 出射スリット, FM, FM': 結像鏡

図22 グラスホッパー分光器

一方、非ローランド円型分光器も簡単な機構、斜入射領域での分解能の改善といった利点から、様々な方式のものが考案され数多く使用されている。代表的な直入射領域の分光器としては、BL-11Cに設置されている瀬谷・波岡型(図23)が挙げられる。斜入射領域ではBL-11Dに設置されている定偏角型のものがある。しかし、これは最適化した範囲からはずれた高エネルギー側では、非点収差の問題から分解能が急速に劣化してしまうものであった。このような状況に対して、最近、軟X線領域でも充分な分解能を持つ分光器が登場してきた。ドラゴン型(図24)をはじめとする曲率半径の

大きな球面回折格子を用いた定偏角型のものがそれである。全領域で高分解能を得るためには回折格子の回転と出射スリットの移動が必要であるが、移動量が小さくなるので狭い範囲あるいは分解能をそれほど必要としない場合はスリットを固定して使用することが出来る。さらに、縦と横の収束分離を行ったドラゴン型では、分解能は実に10,000を超えている。<sup>16)</sup>



G, G': 回折格子, C, C': Rowland 円の中心, S<sub>1</sub>: 入射スリット, S<sub>2</sub>: 出射スリット

図23 瀬谷・波岡型分光器

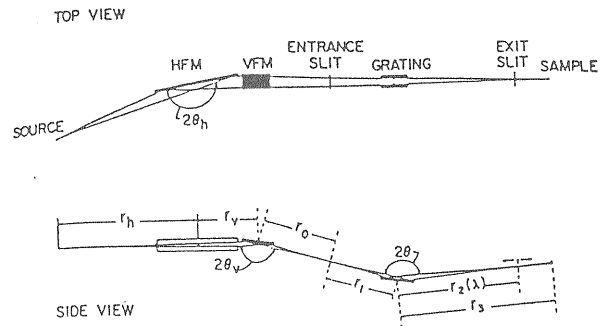


図24 ドラゴン型分光器

### 3) トロイダル回折格子分光器

球面回折格子分光器は斜入射領域で非点収差が大きくなることから、非点収差をなくするように回折格子にトロイダル面を用いたものがトロイダル回折格子分光器である。一般に斜入射領域の定偏角型(図25)として用いられ、定偏角を適当に選べば様々なエネルギー領域で使用することが出来る。また、波長掃引も回折格子の回転のみで容易であり、取り込み角も大きくできるので明るい。しかし、特殊な形状で面加工精度などの問題から供給に不安があり、分



解能もそれほど良くない。

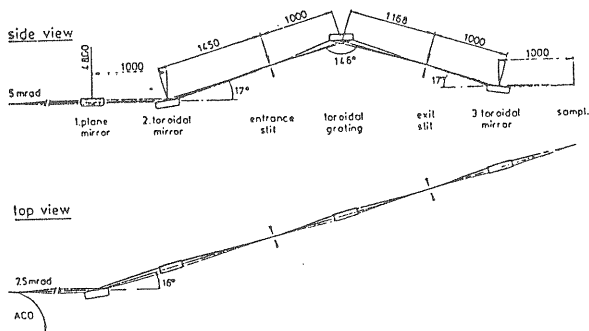


図 25 トロイダル回折格子分光器

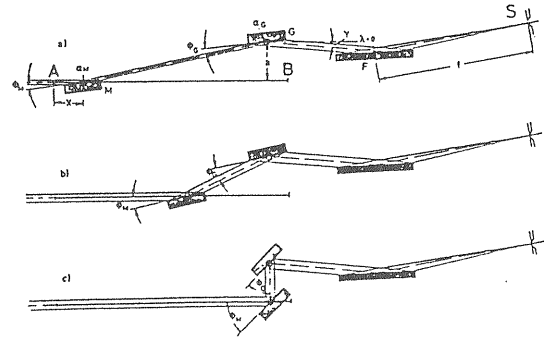


図 26 平面回折格子分光器 (on blaze 型)

#### 4) 平面回折格子分光器

平面回折格子を用いる場合は、平行光線を入射し平行光線の形で取り出すことが必要である。従って、回折格子の下流には平行光線をスリットに収束させる鏡が必ず必要となる。また、光源点から近い場合、取り込み角を大きくする場合は、回折格子上流に光を平行化する前置鏡系が必要になる。但し、PFのように光源点から離れている場合は不要である。基本的には、波長掃引は回折格子の回転のみによる定偏角型として使用できるが、図 26 のように前置鏡を動かして入射角を変えることにより、高次光が少なくないうえに波長範囲の広い分光器として利用できる。これにはいくつかのバリエーションがあり、出射角をかえるものや前置鏡の動きを長い鏡の回転またはいくつもの鏡の出し入れで代用するフリップパー型 (図 27) 等が知られている。その他の特徴としては、入射スリットのない、

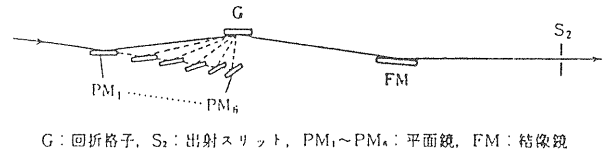


図 27 フリップパー分光器

いわゆるスリットレスで明るいが、分解能は収差もあり光源の大きさにも大きく依存することからさほど良くないと言われていた。しかし、最近では不等間隔のピッチを持つ回折格子により収差の改善をはかったものや、収束鏡として理想的な回転楕円面を用い収差をなくしたものが現れてきた。後者はSX-700 (図 28) と呼ばれ、軟X線領域でも十分な高分解能が得られている。もちろん、これらの分光器といえども分解能が光源の大きさによるが、今後、光源リングの低エミッタンス化がはかられ、光源サイズはますます小さくなることから充分期待が持てる。

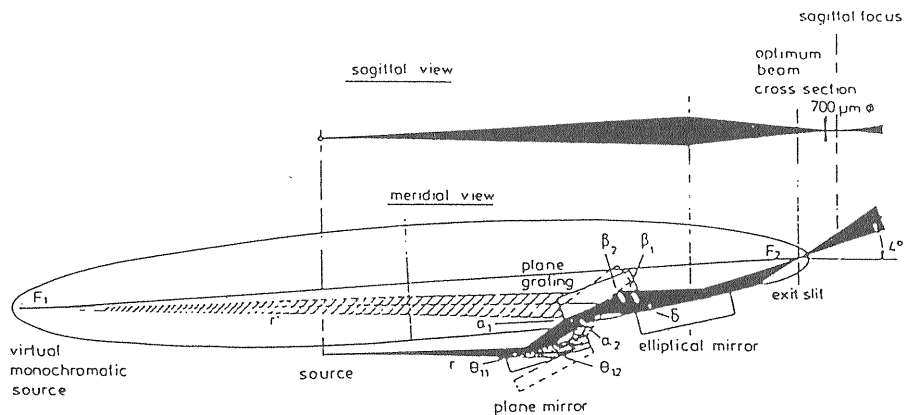


図 28 SX-700

#### 4. ビームライン真空系

##### 4-1. 真空を考えるうえでのポイント

これまで述べてきたように、ビームラインは①光源リングと実験装置との接続部であり、②各種光学素子を設置した光学系という2つの側面を持つ。この2つの点に注目して、どのように排気したらよいかを考えてみよう。

##### 1) 全圧を下げる

まず、真空接続部である点から考えてみよう。これは言い替えば超高真空下にある光源リングと様々な真空度の実験装置に影響を与えないことである。特に真空中の全粒子数さえ問題となる光源リングへの粒子の流れ込みを防ぐ必要がある。そのためには、光源リングとの接続部付近はリングの真空と同等の超高真空にはいっていないなければならない。ビームライン全部を超高真空にするという考えもあるが、ビームラインは長くコンダクタンスからすれば多数の排気系が必要になってしまう。また、前述したように光の導入路という点からは高真空程度でも充分であることがわかっている。従って、光源リングとの接続部、各光学素子、実験装置との接続部といった拠点毎に必要な真空に入っていれば良い。即ち、拠点毎にどうすれば全圧を下げられるかを考えれば良いことになる。

以前は真空の専門家や表面研究などに用いられる何か特別な技術と思われていた超高真空技術も、今では条件さえ整えば容易に得ることが出来るようになってきている。このことから考えれば、高真空までの排気は比較的単純に考えて良いのではないかと思う。即ち、排気速度の大きなポンプを用い、ポンプの性能を充分引き出すことができるようにコンダクタンスを大きくすればよい。さらに超高真空までの排気は残留ガスの組成を考えて効果的な方法を用いる。これは後に述べる分圧を下げるのと同じことをすれば良い。もちろん、一般的な超高真空技術として、漏れをなくすこと、ベーキングで枯らすこと、ガス源となるものを入れないことは重要で

行うべきであることは言うまでもないが、あくまでも拠点排気で充分であるから、拠点間の配管を細くしてコンダクタンスが稼げるようであればそれほど厳密ではないかもしれない。

##### 2) 分圧を下げる

次に光学系という観点から考えてみよう。光の経路上に配置された光学素子は照射を受けた際に瞬時に大量のガスを発生する。これは光学素子に吸着された粒子が光励起脱離によって放出されることによる。また、光学素子で散乱されたX線が付近のダクトの壁を叩き、そこに吸着されていた粒子も同様に飛び出してくる。ビームラインの真空立ち上げをした最初の照射で大量に発生するのは言うまでもないが、さらに休止期のように照射を受けていない時間が長ければ量的には多少少なくなるが再吸着が進み次の照射時にも同様に発生がみられる。特に光学素子の熱歪みを取り沙汰されている昨今では、光学素子が充分冷却され周辺部より低くなっていることからこの傾向が顕著に見られている。発生するガスの組成を調べてみると、いろいろな脱離種が見られる真空立ち上げ後の最初の照射時を除き、毎回主成分として検出されるのは水素である。(一部、水、一酸化炭素等も検出されるが、これらは後述するものの寄与が大きいものと思われる。)これらの大量のガスは一時的にせよビームライン全体の真空バランスを崩すことになる。従って、これらを一気に排気するには、発生するガス種に合わせた選択的かつ効果的な排気を行えば良いことになる。

ポンプは種類によっては排気しにくいガス種がある。従って、ガス種に対処できるポンプ、ガス量に見合った能力のポンプを選んで使用する事が大切である。また、排気状況を確認するうえでも残留ガス分析計の使用することが望ましい。排気するポンプにもよるが、一般に残留ガスの組成は低真空では器壁から脱離しにくい水が中心で、高真空では水素、水、一酸化炭素、メタン、二酸化炭素、各種炭化水素、超高真空

では水素が主で、一酸化炭素、水が観測される。これらの原因は壁への付着の強さ、脱離の程度の違いによる。通常のパターンに比べ、一酸化炭素がめだつ場合は汚染がある証拠であり、水が多い場合は枯れていない、即ちベーキング不足であることがわかる。質の議論として水素以外のものを個々に減らして行けば良いことになる。余談ながら、最後に残る水素まで減らして行けば極高真空の世界に到達できることになる。

### 3) ガス放出を抑える

さらに光学素子への照射を続けていくと徐々にではあるが着実に増加していくガス放出がみられる。これは照射を受けた光学素子の温度上昇により吸着、吸蔵されている粒子が熱脱離過程で放出されるためである。散乱X線の照射を受けるダクトの器壁でも同様なことが予想される。長時間照射した後に付近のダクトの温度をはかってみると60°C近いものもあるし、光学素子では冷却をしない場合、200°Cを超えるものもある。発生するガスにはH<sub>2</sub>O、CO、CO<sub>2</sub>といったところであり、特にH<sub>2</sub>Oは器壁に付着し易く始末に悪い。従って、これらに対する対処としてはどうしたらガス発生を抑えることが出来るかを考えれば良いことになる。

このためには、まずガス源となる光学素子をあらかじめ吟味しておくことが重要であり、出来るだけちゅう密なもの、蒸気圧の低いものを選ぶことが大切である。前置鏡として使用しているSiC素材のうち、初期の頃のものにはガス発生量が多く、残留ガス組成からみても漏れかと思うほどであった。しばらく使用していると徐々に真空がよくなっていくが、取り出して大気下に放置し、再度真空にすると前回と同様のガス放出がみられた。このような場合、組み込んだ状態でのベーキングだけでは不十分で、あらかじめ、洗浄並びに別途単独でベーキングを行い充分ガス出しをしておくことで容易に解決される。最近のものをそれほどひどくはないが、依然同様な前処理は必要であろう。さらに光学

素子、器壁の温度上昇が大きく効いていることから、十分な水冷を行うことが不可欠である。但し、余り低く冷やしすぎると前に述べたようなガス放出源になってしまうことから注意が必要である。

### 4) 炭素系物質を減らす

さて、比較的悪い真空下で長時間放射光の照射を受けた光学素子は、表面が茶色く変色し反射率等の能力低下を起こしている。これは当初から光学素子上にあった、もしくは残留ガス中に含まれていて光学素子の表面に吸着された炭素系物質が、放射光の照射による光化学反応により分解して、炭素の析出または光学素子の表面素材と反応して炭化物を形成する(いわゆる焼き付き)ことによる。従来は極紫外/軟X線領域での問題になっていたが、最近、硬X線領域でも問題が生じ始めている。これには言うまでもないことであるが、どうすれば反応の源となる炭素系物質を減らせるかを考えれば良い。

そのためにはまず、真空系に入れないように真空内の部品の脱脂洗浄が第一である。また、油分を含む大気に触れないよう回りの環境にも気を配る必要がある。例えば、付近で使用しているロータリポンプの排出口は排気ダクトにつなぎ、雰囲気汚さないようにするだけでも大きな効果が期待できる。さらに、油使用ポンプを出来るだけ使わないようにすることも大切である。ロータリーポンプを使用する場合はフォアライントラップを必ず用いてポンプ油の逆拡散を防止し、ターボ分子ポンプを使うのであれば磁気軸受式のようなオイルフリーのものを用いるべきである。但し、背圧側がロータリーポンプの油で汚染されることもあるので注意が必要である。次に不幸にして真空系の中には入ったものを減らすには、最悪の場合は分解洗浄しかないが、通常は炭素系物質の分圧を下げるために全圧を下げるのが簡単である。また、ベーキング、O<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>導入も有効である。なお、イオンポンプに大量の希ガスを引かせた場合、今

までの汚れが電極板から放出されることもあるので注意が必要である。また、チタンサブレーションポンプではゲッター面をあまり熱いままにしていると熱・触媒反応で炭化水素を生じるので注意を要する。

#### 4-2. ビームラインの排気モデル

光源リングの真空悪化が起きた場合、シャットダウン/真空再立ち上げという最悪のケースもありうることから、全体に与える影響は大きい。従って、少しでもこのような可能性を減らすため、光源リング、基幹チャンネルの排気には、立ち上げ時のみ開放系（吐き出し型）であるターボ分子ポンプを用い、運転時は閉鎖系（ため込み型）であるスパッターイオンポンプ、チタンサブレーションポンプのみを使用している。一方、分岐ビームラインは最も真空事故の可能性が高い箇所であることから、以前は同様の排気方式を採用していた。本数の多さ、頻繁な実験装置の付けはずし、実験時の頻繁な気体導入といった点を考えて頂ければ、その可能性の高さは容易に想像できるであろう。しかし、最近、PFでは徐々に開放系のポンプを常時排気に参加させるビームラインが増えてきている。これにはいくつかの理由がある。そのひとつは光源リングに多数のバルブが設置され部分的な真空再立ち上げが可能になったことである。また、ビームラインが長くコンダクタンスが稼げるうえ、各所に配置した自動ゲートバルブが真空インターロックで比較的高速で作動すること、さらには最上流のリングとの接続部に強力なバッファとなる基幹チャンネルを有している点があげられる。そして最大の理由は、前に述べたようにより大きな排気速度を必要とするようになってきたためである。

さて、ここでは開放系のポンプも主排気に加えるものとして、前節で示したいくつかのポイントを考慮した最適な排気系を選んでみることにする。全圧を下げるために超高真空までわたって排気速度の大きなポンプとなると、ターボ分子ポンプが最適である。特に磁気軸受式のもの真空封じ

切りが可能で、バッテリー交換はあるものの保守の面でもメンテナンスフリーといえる。また、オイルフリーであるので炭素系物質を減らす目的にも合致する。ロータリーポンプにはフォアライントラップを入れるのは当然のこととして、さらに小型のターボ分子ポンプを背圧側に使用した2段型にすれば、ロータリーポンプのポンプ油が主たるターボ分子ポンプの背圧側を汚す可能性はより少なくなる。ターボ分子ポンプの排気側と背圧側は自動バルブで仕切り、特に背圧側のバルブは電磁動作として、圧空異常でも確実に封止するようにしておく。これは大気側からみてバルブが2重化された形で安全性を高める意味も持っている。これらのポンプ、バルブは局所的な真空インターロック機能を持つシステムコントローラで制御すれば停電時等の安全対策は容易である。一方、弱点としては水素に対する排気速度が小さいことが問題となる。これは、照射直後の光学素子等から放出される水素は引ききれないことになる。また、停電等の異常時にはポンプ停止となることから、他のポンプとの併用が不可欠となる。この場合、水素に対して大きな排気速度を持つものはサブレーションポンプである。このポンプは比較的安価で、排気速度も蒸着膜の表面積で決まることから大きな排気速度を得ることも容易であるので、組み合わせるポンプとしては最適である。ただ、蒸着膜の枯らしを充分行わないとガス源になるので、気をつけなければならない。その他には非蒸発ゲッターポンプも小型ながら大きな排気速度を持っている。安定した動作という点ではイオンポンプ、特に超高真空に対応したものは捨てがたい能力を持っている。これらの点を考慮してビームラインの排気モデルを選ぶとすると、開放系と閉鎖系のポンプを適宜組み合わせるのが最も良いことになる。即ち、排気の拠点としては2段化した磁気軸受式ターボ分子ポンプシステムとチタンサブレーションポンプを配置し、真空を維持する目的で超高真空対応のイオンポンプを、出来れば非蒸発ゲッターポンプを組み込んだものを随所に配置するのが良いのではないだろうかと思う。

<参考文献>

- 1) Photon Factory Activity Report 1991, #9, R-25 (1992)
- 2) Photon Factory Activity Report 1983/84, V-5 (1985)
- 3)
- 4) I. Nagakura, KEK Report, 81-17 (1982)
- 5) Photon Factory Activity Report 1989, #7, I-6 (1990)
- 6) Photon Factory Activity Report 1982/83, IV-21 (1984)
- 7) Photon Factory Activity Report 1982/83, IV-13 (1984)
- 8) Photon Factory Activity Report 1982/83, IV-22 (1984)
- 9) Photon Factory Activity Report 1990, #8, R-28 (1991)
- 10) W. Gudat, Synchrotron Radiation (editor: C. Kunz), 74 (1979)
- 11) Photon Factory Activity Report 1982/83, IV-23 (1984)
- 12) W. Gudat, Synchrotron Radiation (editor: C. Kunz), 79 (1979)
- 13) Photon Factory Activity Report 1984/85, #3, IV-5 (1986)
- 14) Photon Factory Activity Report 1990, #8, I-16 (1991)
- 15) K. Ito, T. Sasaki, T. Namioka, K. Ueda, and Y. Morioka, Nucl. Instr. Meth., A246, 290 (1986)
- 16) C. T. Chen and F. Sette, Rev. Sci. Instr., 60, 1616 (1989)

この他に、放射光基礎技術講習会テキスト（第1回～第3回）は、各分野にわたる丁寧な解説が載せられている。