



SR 用 分 光 器

波岡 武

東北大学科学計測研究所 〒980 仙台市片平 2-1-1

円形電子加速器の円軌道を回る高エネルギーの電子からその接線方向に放射される電磁波はシンクロトロン放射 (SR)*1 と呼ばれ、強力な真空紫外、X 線源として、理工学はもちろん医学、農学などの諸分野においても、基礎研究に利用されている。電子ストレージングからの SR は強力な連続光で、指向性、安定性、清浄性等の面でも、真空紫外、X 線光源として優れた性質をもっている。この優れた光源を効果的に使いこなすためには、それにふさわしい高性能の分光光学系や計測システムの開発が必要である。これらのうち、分光器を含む光学系の問題を以下にとりあげることにする。

現在世界各国の SR 利用施設で用いられている分光器自身についてみると、その大部分はローランド円を利用したマウンティングをはじめとして、従来実験室で広く用いられてきたマウンティングを流用しているにすぎない。初めから SR の特性を念頭において設計・製作された新しい型の分光器といえば、NBS の Madden と Ederer が SURF II のために作った、機械刻線トロイダル回折格子の斜入射定偏角モノクロメーターくらいのものであろう。しかし、この型の分光器も、収差補正をしたトロイダル・ホログラフィック回折格子の出現によって実験室用モノクロメーターとして定着してきている。また、SR 用分光器に特有なものと考えられがちな垂直分散型も、プラズマ分光ではよく用いられているし、ただ横のものを縦にしたというだけのものである。このようにみえてくると、SR 用分光器とはいったい何かという疑問が湧いてくる。

SR 用分光器と通常の実験室用分光器との大きな違いはその使い方にある。実験室用では光源が分光器にぶらさがっているのに対し、SR 用では光源にアクセサリィのように分光器がついている。アクセサリィであれば、それを耳につけるか、腕につけるか、胸につけるかで大

きさも形も変わり、つけ方も違ううえ、その人の好みや出かける場所、目的などによっても大きく左右される。SR 用の分光器がアクセサリィ的であれば、それをつけるストレージングやそこから出てくる SR の利用目的によって大きく制約をうけるのは当然であろう。したがって、ストレージングの超高真空を汚染しないという制約のもとで、いかにして与えられた実験目的に適合した分光器を設計・製作するか、ストレージング周辺の場所的な制約のもとで、強力でしかも指向性のよい SR をいかに効率よく分光器に導入するか、などが分光器を目的にあった立派なアクセサリィとするために、解決すべき前提条件となるわけである。

これらの前提条件を満たすためには、分光器自身の設計や製作にアイデアを盛り込むことが必要なことはもちろんであるが、それらは光学的というよりは、むしろ機構的、材料的なものといえよう。光学的という立場からすれば、分光器そのものより、ビームチャンネルから出てくる SR を分光器へ導くための前置光学系が最も重要な役割を担うことになる。したがって、表題には SR 用分光器と書いたが、たんに分光器そのものだけでなく、前置光学系や、場合によっては後置光学系をも含めた全光学系を意味するものと解釈されたい。

このように考えてくると、まず二つのことが頭に浮んでくる。第一に、ストレージングや SR そのものからくる諸要請をみだす光学素子の開発であり、第二に、SR の有効利用を達成でき、しかも実験目的に適した光学系の設計法の確立である。

光学素子の開発に関してとくに考慮すべき点は、強力な SR による照射損傷、耐熱性、反射特性、非球面研磨法、性能評価法などである。照射損傷が最も問題になるのはビームチャンネルから出てきた SR を分割するために使用する振分け用鏡である。大型ストレージングやウイグラー、とくにアンジュレーターからの SR はきわめて強力で、小さな入射角で SR を鏡に入射させると、ガラス、熔融石英、金属を基板とする鏡は照射損傷をうけ、すぐに使用不能となる。これを避けるためには、新しい

*1 シンクロトロン放射は synchrotron radiation の頭文字をとって SR と略記されることが多い。わが国では synchrotron orbital radiation を略して SOR と呼ばれているが、このよび方はわが国だけのものである。

鏡の材料を見いだすか、斜入射にして単位面積当りに入射するSRのパワーを小さくするしかない。幸い、CVD(chemical vapor deposition)で作ったSiCは研磨性、耐放射損傷性にすぐれていることを見いだされたため、現在では高出力SRの振分け鏡の基板材料として広く用いられている。しかし、反射率の点で斜入射方式は避けられないため、SRの有効利用には長さ1mあまりのSiC鏡が要求される。そこでいかにして大型の基板を作り、いかに精度よく所要の面形状、面精度に研磨するかが今後の課題である。また、アンジュレーターできわめて強力なSRを発生させたとしても、適当な鏡や分光素子がないためにそれを有効利用できなければまったく無意味になる。斜入射でなくても高い反射率と耐照射損傷性を持ち、研磨性に優れた新材料が見いだされれば、SR分光に大いに貢献するわけで、その早急な開発が望まれる。

振分け用の鏡でSR中の大部分の照射損傷成分が取り除かれるが、長期的にみると、それでもなお分光器の回折格子に影響を与えるだけの強度が残っている。とくにレプリカ回折格子を用いる場合には、接着剤として用いているエポキシ樹脂による炭素の焼付きが問題となる。この焼付きが分光器の真空度と密接な関係にあることが実験的に知られており、この点からも回折格子はベキング可能であることが望まれる。したがって、耐照射損傷性と耐熱性を兼ね備えたレプリカ製作技術やガラスまたは熔融石英にじかに刻線した回折格子の開発が望まれる。現在でも、イオンエッチングでガラス等の基板に直接刻線できるが、レプリカのようにまったく同じ溝断面形状をもった回折格子を何個でも作れないところに実用上の問題がある。

非常に広い波長範囲をカバーする純連続光というSRの特長は、分光の立場からすると、必ずしも長所とばかりいえない。希ガス連続のように波長幅の狭い連続光であれば、短波長の高次光の影響をうけないが、SRの場合には短波長の高次光が迷光として作用するばかりでなく、高次のスペクトルを利用する高分解能分光では、目的とするスペクトルが可視や紫外の連続と重なってしまうことになる。この種の問題に対しては、各種の薄膜フィルターがある程度役立つが、短波長領域では満足でき

る結果を与えない。一つの可能性として、多層蒸着膜の選択的反射特性を利用した前置鏡の使用が考えられる。しかしその実現には、10Åオーダーの厚さで均一な膜であること、多層膜間で拡散がないこと、1Å程度の膜厚制御が可能なこと、など多くの条件を満たす必要がある。解決すべき問題は多いが、この方面の研究も始まっており、近い将来には、垂直入射でもある限られた波長範囲で高い反射率を有する回折格子が出現する可能性がある。このような光学素子が手軽に入手できるようになれば、収差の大きな斜入射光学系に頼る必要がなくなり、軟X線用分光器の性能を飛躍的に増大させることも決して夢ではなからう。

SR用分光器の設計にあたっては、SRの発光点から最後の検出器に至るまでの全光学系を一体とした、いわゆるトータルデザインの考え方が必要である。鏡の枚数を減らせば分光器に入る光量が増加するとは限らないし、そのためにFナンバーのマッチングがとれなくなれば、分解能まで逆に減少するという結果になる。要は鏡の数にとらわれなくても、全系としてのスループットがあがり、所期の分解能が得られればよいわけで、従来のできるだけ反射面の数を抑えようという考え方とは対照的である。この考え方をとれば、光源の大きさ、輝度分布、鏡や回折格子の大きさ、効率、スリットの幅や高さ等も当然考慮の対象となり、条件に適した不等間隔曲線溝の回折格子の諸パラメータも設計要素となりうる。そこで、できるだけ実際に近い条件のもとで、光線追跡法を併用しながら最適光学系配置を決めてゆく、一種の自動設計法的手法の開発が必要になる。

現在SR用分光器に求められているものは、マウンティングをどうするかとか、超高真空仕様をどのようにして満たすかといった類のものではなく、それを形作る光学素子そのものに関係した基本的な問題の解決であり、分光器の周りを取り巻く補助光学系のあり方である。SR利用実験というと一見華やかに見えるが、しっかりとした基礎の上に立った独自のinstrumentationと計測法の確立なくしては、それを真に実りのあるものとすることは不可能である。ここいらでもう一度、何が本当に必要かということをしつくりと考えてみたいものである。