

ビームライン開発（新規増設・改造、高度化）

(1) 挿入光源

1) 新規増設・改造

2001年度に増設した挿入光源は真空封止型アンジュレータ2台（BL22XU，BL37XU）で、いずれも2001年12月のSPring-8冬期停止期間中に蓄積リングへの設置を完了した。共用ビームラインであるBL37XUには、周期長32mmの標準型真空封止アンジュレータを採用した。原研ビームラインBL22XUでは軟X線に近い低エネルギー光も実験で使用するため、周期長を標準型よりも大きい38mmとした。その結果基本波の低エネルギー側は、アンジュレータギャップ8mmで2.3keV，6mmで1.8keVから得られ、高調波とともに用いることにより広いエネルギー範囲をカバーしている。

2001年夏期停止期間には、兵庫県ビームラインBL24XUの真空封止8の字アンジュレータの真空漏れ補修を行った。これまでも真空封止アンジュレータの真空漏れは数回発生しており、BL24XUを含めいずれも磁石冷却水管導入部のベローズからの漏れで、ベローズ内面と冷却水管の擦れによるベローズの疲弊が原因である。ベローズについては既に設計の改良を行っており、BL24XUアンジュレータについても、該当するベローズを全て改良型ベローズに交換した。

2) 高度化（円偏光スイッチングの実現）

軟X線固体分光ビームラインであるBL25SUは、光源として直線部にタンデムに配置された2台のヘリカルアンジュレータを使用していたが、新たに5台のキッカー電磁石を設置することにより、左右円偏光の切り替えを1 Hz程度の速さで行うことができるようになった。これは2台のヘリカルアンジュレータを各々左右円偏光にセットしておき、キッカー電磁石を用いて水平方向に電子ビームをキックすることで、ビームライン光軸上に

くる光の偏光方向を切り替えるものである〔1〕。即ち、図1で赤線の軌道Aを電子ビームが通ると左円偏光が、青線の軌道Bを通ると右円偏光がビームライン光軸上に放射される。そしてビーム軌道AとBを周期的に切り替えれば、光の円偏光方向も同じ周期で切り替わる。この方式で重要な点は、電子ビーム軌道の変化が他のビームラインの光軸に影響を与えないようにすることである。このためには、キッカー電磁石磁場の精密調整が必要となる。

(a) キッカー電磁石

キッカー電磁石は、図2に示すようなC型電磁石でギャップ間に垂直磁場を発生する。コア材には透磁率が大きく飽和磁束密度の高いパーマロイを使用し、高周波特性を向上させるために0.1mm厚の板を積層してコアを作成した。電子ビーム軌道は3台の電磁石を励磁して三角形のバンブ軌道をつくるため、3台の電磁石磁場の積分和を正確にゼロにする必要がある。全ての電磁石コアは同じ形状とし、コイルのターン数のみを変えることによって各電磁石磁場の粗調整をおこなった。また磁場変化時のインダクタンスの差による電磁石間の励磁時間応答のずれをなくすため、バンブを形成する3台の電磁石は直列にして1台の電源に接続している。

(b) 磁場調整

キッカー電磁石をSPring-8蓄積リングに設置後、電子ビーム軌道変化を測定しながら電磁石磁場の補正を行った。磁場の水平方向成分は、電磁石をスイベルで傾けることによって調整した。垂直成分については、電磁石の近傍に磁場補正板を設置し（図2）上下補正板間ギャップを変えることによって、電磁石コイルからの漏れ磁場分布を変化させ調整を行った。その結果、

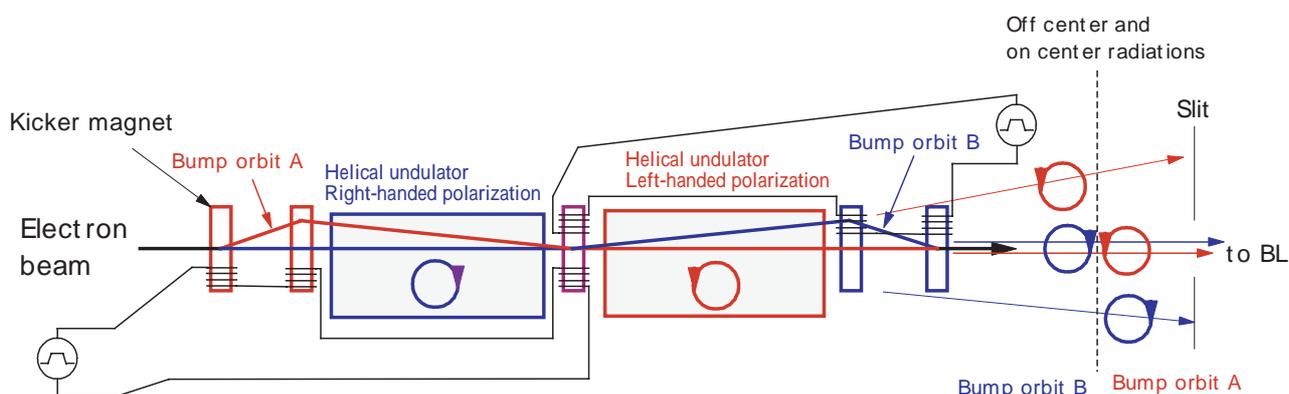


図1 円偏光スイッチング時の電子ビーム軌道バンブ

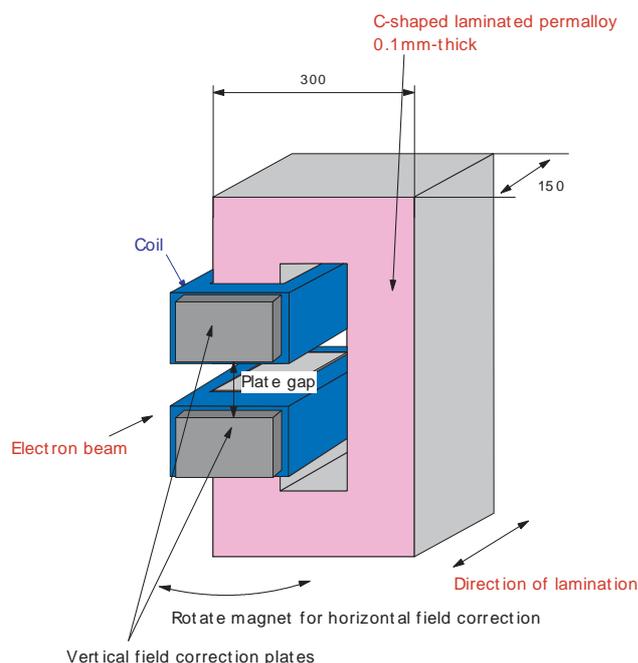


図2 キッカー電磁石磁場補正板

1 Hz 台形波励磁による円偏光切り替えでは、他のビームラインにおける電子ビーム軌道の変化 (RMS) を水平方向 3 ~ 5 μm 、垂直方向 1 μm 以下に抑え込むことができた。

磁場補正板による補正は、電磁石本体の磁場を利用したパッシブな方法であり、真空槽など周辺コンポーネント内で発生する渦電流による磁場エラーは補正できない。電磁石付近の真空槽にはセラミックを用いてできるだけ渦電流の発生を抑制しているものの、1 ガウス程度の磁場エラーは存在し、電子ビーム軌道に影響を与える。このため、パッシブな方法で補正しきれなかった成分については、時間応答の速い空芯補正コ

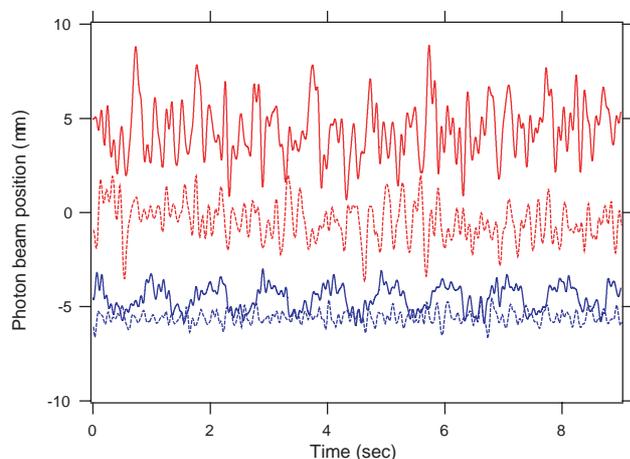


図3 BL20XBPM で測定した放射光の位置変化。赤が水平方向、青が垂直方向、実線は 1 Hz スイッチング時、点線はスイッチング OFF 時。

イルを用いたアクティブな補正を行い、最終的な電子ビーム軌道の変化 (RMS) を水平方向 1.5 μm 、垂直方向 0.15 μm 程度に抑え込むことができた (図3)。水平方向 1.5 μm の放射光軸の変化は、放射光サイズ 400 μm の 1% 以下に相当する。

(c) ビームライン実験

1 Hz で左右円偏光方向を切り替えた光を用いて、ビームライン側で試験的な Fe の MCD 測定を行った。その結果、サンプルに印加していた磁場を反転させる従来の方法に比べて、測定時間を 1/3 程度に短縮することができた。今後は左右円偏光の光軸確認や偏光度測定、10Hz 程度の高速切り替えによる高精度測定法の開発などを行う予定である。

[1] T.Hara et al.: J.Synchrotron Rad. 5 (1998) 426.

ビームライン部門 光源チーム 原 徹

(2) 基幹チャンネル

1) 新規増設

2001年度は、挿入光源用基幹チャンネルを 2 本 (BL22XU, BL37XU)、偏向電磁石用基幹チャンネルを 3 本 (BL26B1, BL26B2, BL32B2) 建設した。いずれも標準型の基幹チャンネルが設置されている。また、2000年度に建設したビームラインの内 2001年 5 月に BL13XU と BL19B2 を、12月に BL12XU のコミッションを行い、光軸確認、およびスリット類と光位置モニターの調整を実施した。

2) 改造

(a) 圧空系改造

基幹チャンネル圧空系の一部においてシール部に樹脂材を使用した配管を使用していたが、放射線損傷が懸念されることから収納部内の配管を全て金属化した。また、従来基幹チャンネルの圧空は加速器 / 真空系ヘッダーから枝配管を行っていたが、お互いの保守作業において制約が生じないように分岐バルブを増設する改造を行った。

(b) BL08W / 局所遮蔽追加

マルチポールウィグラーを光源とする BL08W の基幹チャンネル部には、低エネルギー成分を吸収するための各種フィルターが挿入されているが、特にアルミニウム板をフィルター材とするメタルフィルターが X 線散乱源となり、近接するケーブル、位置検出機器、ケーブルダクト等が激しく放射線損傷を受けているため、当該機器に局所遮蔽 (鉛 2 mm) を行った。

3) 高度化

(a) 高耐熱基幹チャンネル機器の開発

(a-1) 研究経緯と目的

基幹チャンネルチームでは、高出力放射パワー制御技術として、従来、斜入射技術（マスク、アブソーバ、XYスリットに適用）と体積発熱技術（前置スリットに適用）を採用しているが、これらの技術を併用しても基幹チャンネルに与えられている限られたスペースから判断すると、全放射パワーで30～40kWの熱負荷を処理するのが限界な状態にある。そこで本高度化では、次の長直線部対応挿入光源の有力候補である「軟X線用長直線アンジュレータ対応ビームライン」への適用を念頭において、「全放射パワーで60kWの熱負荷を処理できる基幹チャンネルの設計」をターゲットとし、マスク・アブソーバへの体積発熱技術の実用化（体積発熱型マスク）および、マスク機能付きアブソーバ（一体型マスク・アブソーバ）の開発を行った。

(a-2) 実施内容と成果・評価

・体積発熱型マスク

今回の高度化研究を行うにあたり、軟X線用長直線アンジュレータ対応ビームラインにとって克服すべき課題のR & Dを行う予定のBL17SUで実際に照射テストすることを念頭において設計した。BL17SUの光源から放射される全放射パワーは最も厳しい条件で4kWであるが、これを面間距離約0.2mで処理することを目指す。従来の斜入射技術では面間距離1mでの除熱能力が約10kWであるため、今回の高度化ではその約2倍になる。受光部の形状は基本的に前置スリットでの実績をスケールアップしたもので、95mm厚のベリリウムとロウ付けにより接合された無酸素銅から構成される。基本設計を行った後、三次元有限要素法（ANSYS）による解析と、接合部の健全性を確認するために実機と同じ形状の試験片による評価試験（接合面の断面観察および接合部の静的機械強度の測定）を実施した。その結果、今回設計したものは、温度および熱応力的に問題なく、今後は疲労強度に対する評価が課題となる、スケールアップした接合部形状においても、従来前置スリットで得られているものと同等の健全性および機械的強度が得られる、ことが確認できた。これらの検討および試験結果を反映させて製作した実機は、BL17SUが完成後照射テストを行い、熱電対による温度計測結果と熱解析結果との比較検討、および放射光照射時の真空特性について調査を行う予定である。

・一体型マスク・アブソーバ

現在全ての基幹チャンネルでアブソーバの上流側に固定マスクが設置されており、空間に制限を与えて放射パワーの一部を処理している。一方アブソーバはユーザの要求に応じて放射光を光学ハッチに導入/遮断を行うものであり、ひとつの受光ブロックの中に導入用全開部と遮断用全閉部がある。そこで、アブソー

バの全開部をあるサイズの固定開口に変更して固定マスクの機能を付加させることで固定マスクを取り除き、光軸上の面間距離を節約するという手法に着手した。このアイデアは以前BL19LXUの設計を進める際に考案したものであるが、当時まだ各個別の高熱負荷機器の設計や製作が緒に就いたばかりであり時機早尚であると判断していた。その後いくつかの高熱負荷機器を製作し、実機でも順調に稼働を続けている実績をふまえ、今回の高度化での設計・製作に踏み切った。ポイントは、固定マスク開口部と全閉部の間の構造において直入射部分を設けないような設計を行うことにある。開口部まわりの形状は極めて複雑であるため、図面の検討を十分に行った。製作した実機は、来年度BL10XUに設置しその性能確認を行う予定である。本機器が実用に耐えうることになれば、固定マスク前後のベローズの長さも含めて約700mmの空間を別の高熱負荷機器を設置する場所として利用でき、かつコストダウンにも寄与できるものである。

(b) CVDダイヤモンドを用いた光伝導型光位置モニターの開発

(b-1) 研究経緯と目的

挿入光源用基幹チャンネルで標準的に使用している光位置モニターは、検出部にCVDダイヤモンドを採用した光電子放出型で約1μm以下の位置分解能を有しており、X線ビーム診断に定常的に使用されている。しかし、偏向電磁石の端部より発生する低エネルギーX線の混入のため、挿入光源のギャップ値に対する出力値の依存性が大きいことが問題となっている。この問題を解決するものとして、高エネルギーX線に高い検出効率を持つ内部光伝導の原理による検出が有効であると期待できる。その際、機械的強度及び熱伝導率が高い単結晶ダイヤモンドを素材とした検出部が熱負荷対策の面からも理想的であるが、製作上の問題から実用化が難しい状況にある。そこで、多結晶のCVDダイヤモンドをブレード状に製作したものを放射光軸と平行に配置することによって熱負荷を低減する方法を考案した。この方法は、光軸方向のダイヤモンドの厚さを実効的に大きくしているため、より高いエネルギーのX線に対しても検出効率を最大にすることができるという意味においても有効な手法と考えている。

(b-2) 実施内容と成果・評価

多結晶CVDダイヤモンドを用いた光伝導型検出素子の設計・製作を行った。CVDダイヤモンドの表面に施す電極材料としてアルミニウムとチタンが候補として挙げられる。ダイヤモンドとの付着性についてはチタンのほうが優れているが、電極に電流信号が流れる際の電圧降下を抑制するための低い電気抵抗率、温度上昇を抑制するための高い熱伝導率、及び低いX線吸

収係数に関して両者の考察を行った結果、アルミニウムのほうが非常に望ましいと判断した。また、アルミニウムを選択することにより、リソグラフィーの手法を用いることができるため、電極パターンの寸法精度をより高くすることができる。ヒートシンク部分は、熱接触性を高めるため従来通りの Ti/Pt/Au のパターンをマスキング法にて施した。素子の大きさはコストを下げるために 26mm H × 10mm W × 0.3mm t とコンパクトに抑えた。これは、四象限型光位置モニターに用いた CVD ダイヤモンドのサイズの面積比で約 1/3 に相当する。製作枚数は 3 枚で、今後は 1 枚を R & D ビームラインで位置信号としての動作や波長依存性等についてのビームテストに供し、2 枚は BL17SU に設置予定の鉛直専用型光位置モニターに搭載し熱負荷問題を含めた実機での性能確認を行う予定である。

ビームライン部門 基幹チャンネルチーム 高橋 直

(3) 光学系・輸送チャンネル

1) 新規増設・改造

光学系・輸送チャンネルに関連して、以下の 10 本のビームラインについて新規建設、増設、改造などの動きがあった。

(a) APCST 挿入光源ビームライン (BL12XU)

BL12B2 と対をなす台湾 APCST の二本目のビームラインである。今年度、メインブランチの光学系・輸送チャンネル、インターロック・制御系の建設が進められ、2001 年 11 月に完成し、引き続き試験調整運転、利用運転を開始した。

(b) 共用 表面界面構造解析ビームライン (BL13XU)

遮蔽ハッチ建設、光学系・輸送チャンネルコンポーネントの据付け、および、インターロック設置を含みすでに 2000 年度内にビームラインの完成を終えており、2001 年 5 月から使用前検査をはじめとし、試験調整運転、利用運転を開始した。

(c) 理研 物理科学ビームライン (BL17SU)

BL17SU は理研の軟 X 線ビームラインである。今年度は光学系の設計が進められるとともに、前置鏡を収納する光学ハッチが建設された。収差補正型不等刻線回折格子と球面集光鏡を使った回折格子型分光器が採用されパラメータの概要が決定された。また、輸送チャンネルのコンポーネントの配置や真空セクションの構成が設計された。

(d) 理研 物理科学ビームライン (BL19LXU) 蓄積リング棟付属施設 W への増設

2000 年度内に、蓄積リング棟付属施設 W に BL19LXU の 4 番目の実験ハッチが増設され、既存の実験ハッチ 3 との間は、標準的な中尺アンジュレータ用輸送チャンネルにより接続された。

この延長・増設部分に関しては、2001 年 6 月から使用前検査をはじめとし、試験調整運転、利用運転を開始した。

(e) 共用 産業利用ビームライン (BL19B2)

産業利用促進を目的とした中尺偏向電磁石ビームライン BL19B2 は既に 2000 年度内に実験ホール内および蓄積リング棟付属施設 W 内のすべての遮蔽ハッチおよび光学系・輸送チャンネルの建設が完了しており、2001 年 5 月から使用前検査をはじめとし、試験調整運転、利用運転を開始した。

(f) 原研 量子構造物性ビームライン (BL22XU)

原研専用の 4 本目のビームラインであり、同じく原研専用の軟 X 線ビームライン BL23SU に続き RI 実験棟へ導かれる 2 本目のビームラインにあたる。

今年度は遮蔽ハッチ、光学系・輸送チャンネルの建設が進められ 2002 年 3 月に完成した。引き続き 2002 年度から試験調整運転、利用運転を予定している。

(g) 理研 構造ゲノムビームライン (BL26B1, BL26B2)

BL26B1、B2 はハイスループットでの蛋白質構造解析を目的としたビームラインである。光学系は、標準的な偏向電磁石ビームラインのものであり、標準二結晶分光器による単色化および後置のベントシリンドリカルミラーによる二次元集光をおこなうものである。遮蔽ハッチおよび光学系・輸送チャンネルの建設は 2002 年 3 月までに完成し、2002 年度から引き続き試験調整運転、利用運転を予定している。

(h) 蛋白質構造解析コンソーシアム 創薬産業ビームライン (BL32B2)

BL32B2 はコンポーネントの位置、遮蔽ハッチの寸法に若干の違いはあるものの、BL26B1、B2 と同様の光学系を有するビームラインである。

BL26B1、B2 と同様にして遮蔽ハッチおよび光学系・輸送チャンネルの建設は 2002 年 3 月までに完成し、2002 年度から引き続き試験調整運転、利用運転を予定している。

(i) 共用 白色 X 線回折ビームライン (BL28B2)

白色ビームライン BL28B2 の既設光学ハッチの下流に三番目の光学ハッチが増設され、タンデムでの実験ステーション併設となった。光学ハッチ 3 の建設とそれに伴うエンドストップなど一部コンポーネントの再配置などがおこなわれた。

2002 年度から増設分に関する試験調整に入る予定である。

(j) 共用 分光分析ビームライン (BL37XU)

現在、磁性材料ビームライン (BL39XU) で磁性研究グループと相乗りしている分析関係のステーションが分離独立し、新たに分光分析ビームラインとして移

設するビームラインである。

メインブランチは表面界面構造解析ビームライン (BL13XU) と同様に標準二結晶分光器および水平偏向のダブルミラーの構成であるが、新たな試みとして高エネルギーブランチが設けられた。こちらのブランチではブラッグ角1.5度水平偏向の一枚振りの分光器が置かれ、Si 111反射により75.5keVの高エネルギーX線を得ることが可能になる。これにより高い原子番号の元素のK殻励起による蛍光X線分析が可能になる。

今年度は遮蔽ハッチ、光学系・輸送チャンネルの建設が進められ2002年3月に完成した。引き続き2002年度から試験調整運転、利用運転を予定している。

2) 高度化

(a) 輸送系機器開発

SPring-8では供用開始に向け、また、それ以降も、基本的に標準コンポーネントによって輸送チャンネルを構成し、短期間に多くのビームラインを建設、立ち上げてきた経緯がある。一方で、実際に放射光を用いた経験と、当初のコンポーネント設計時からの技術的な進歩により既存コンポーネントの技術的なアップグレードの可能性と新規に必要なコンポーネントの開発の必要性が明らかになってきた。

このような背景に基づいて2001年度は以下の2点について開発研究を実施した。

(a-1) 高平滑表面を持つベリリウム窓の開発による放射光ビーム内の不規則イメージの除去

加速器の性能向上に伴って実効的な光源サイズがより小さくなり、その結果エンドステーションにおける空間的な可干渉性が向上してきている。このため輸送チャンネル最終段にある真空隔壁でありX線取り出し窓であるベリリウム窓の表面の不均一さによってもたらされる可干渉性の破壊がより深刻になり、より質の高いベリリウム窓の必要性が高まってきている。

製法が異なり、研磨仕上げは表面粗さ0.1 μm (rms)と同じ値である二種類のベリリウム箔について評価した。SPring-8でも最も高い空間的な可干渉性を有する1kmビームラインのエンドステーションにおいて、ベリリウムの透過イメージをサブミクロンの高空間分解能を有するズームング管によって観察した。この結果、一方のベリリウムは粉末冶金素材であり研磨時にグレインの抜けに起因すると推定されるようなピット状の欠陥が存在し、このピット状欠陥によるフレネル回折により平均透過強度の数倍も強度の高い輝点として現れることがわかった。また、他方ベリリウムは融解素材でありグレインの抜けによる欠陥の発生は少ないがよりサイズが小さいものと考えられ、前者のような著しい強度ムラは観察されなかったものの、わずかな強度の非均一さが残されていることがわかり、さら

に平坦で表面に欠陥のないベリリウムが必要であることがわかった。

(a-2) 真空排気ユニットの制振装置の試作

加速器の性能向上などに伴い光学系・輸送チャンネル機器の振動レベルが光源サイズと同程度になってきている。光学系・輸送チャンネルの機器の振動をもたらすものには熱負荷光学素子に対する冷媒循環に起因するもの、真空排気系に起因するものなどがあげられる。今回、振動の原因として最も大きなものである粗排気用スクロールポンプにターゲットを絞り、磁気ばね方式のパッシブな防振装置を東芝との共同開発により製作し、その効果について評価した。測定対象のポンプではポンプ回転数一次成分29.4Hzが支配的で最大1 m/s^2 程度の応答加速度成分を有している。これらの条件に最適化した磁気ばね方式の防振装置を製作し、実際に制振効果を測定した結果、最大1/10程度の制振能力を有することがわかった。本防振装置がある程度振動条件(周波数成分、振幅)の明らかなものに対して有効であることが示された。

(b) 光学素子冷却技術開発

SPring-8ではこれまで分光結晶の冷却技術の技術開発はアンジュレータビームライン用の冷却を中心におこなわれていた。これはSPring-8のアンジュレータのもたらすパワーおよび密度が従来技術の延長では対処不可能なため早急に目処を立てる必要があったためである。一方、偏向電磁石ビームライン用の冷却については照射パワーおよび密度がけた違いに小さいこともあって従来技術であるフィン型直接冷却(第一結晶)と間接水冷の第二結晶により対応していたが、第一結晶においてはフィンと水路の温度差による結晶の歪や水路の水圧による結晶の変形により反射ビームの空間的な強度分布に不均一性が見られる問題が生じ、また、第二結晶についてはサジタル集光用の結晶を用いる場合に第一結晶からのコンプトン散乱によるヒーティングが問題となり冷却方法の確立が急がれていた。

今年度は、第一結晶として間接冷却と直接冷却について、また第二結晶としてサジタル集光結晶を用いる場合の冷却方法について検討した。

第一結晶として間接冷却を用いた場合、前置ミラーの有無およびビームサイズの変化により結晶への熱負荷条件を変え、ロッキングカーブ幅とフォノンフラックスについて実験的に評価した。ビームサイズ1 $\text{mm} \times 1\text{mm}$ においてはミラー有無に関わらず熱負荷の影響を受けないが、ビームサイズを横10 $\text{mm} \times$ 縦2 mm 程度まで大きくするとロッキングカーブ幅の広がり(6%程度増加)フラックス減少(10%程度減少)となる結果が得られた。実際にはビーム幅は40 mm 程度まで広げることもあり、間接冷却は事実上冷却能力が不足していること

を示している。

一方、第一結晶について直接冷却を用いる場合の冷却方法（流路加工など）について貫通円筒水路、屈曲水路、フィン型結晶におけるフィン形状の最適化の3種類について加工方法の検討と有限要素法による熱解析をおこない、いずれの方法も十分な冷却能力を確保できる見通しが立った。試作および実験的な評価を2002年度におこなう予定である。

第二結晶にサジタル集光結晶を用いた場合の曲げによるアンチクラスティックベンディングの抑制と結晶の冷却方法について検討した。受光領域の両側に結晶の厚さより厚めの梁を光軸方向に沿って設けることによりアンチクラスティックベンディングの抑制が可能なが有限要素法による解析から明らかとなった。さらにこの梁の中に円筒状の冷却水路を加工することにより冷却も可能とする。実際に解析により最適化された結晶についての実験的な評価を2002年度におこなう予定である。

(c) 超高分解能分光素子開発

SPring-8の超高分解能非弾性散乱計測装置は背面ブラッグ反射分光器により meV 程度以下のエネルギー幅に絞られた X 線を試料に入射し、試料からの非弾性散乱 X 線のエネルギーを meV 程度のエネルギー分解能を有するアナライザによって計測し、試料の素励起に関する情報を得る。ここで必要となるアナライザは分光器と同じ反射面を有し、同じく背面反射の配置により高いエネルギー分解能を得るものである。

アナライザ結晶に要求される性能は高いエネルギー分解能を確保しつつ、球面形状にして非弾性散乱 X 線を効率よく一点（検出器位置）に集光することである。球面上の各点における結晶方位にばらつきがないこと、球面形状の基板への接合、加工などによる結晶歪を抑制することが要求される。

今回のアナライザ結晶開発は NEC との共同により進められ、(i) Si イングットからの (111) ウェハの切り出し、(ii) 無歪み鏡面研磨、(iii) 格子状細溝加工、(iv) 洗浄および加工歪除去のための異方性エッチング、(v) 球面基板への Au-Si 接合（溝加工した面を球面に当ててウェハを球面状に湾曲させて接合）、(vi) ウェハ表面（溝加工において残された面）の化学エッチングによる除去、の工程を経てアナライザ結晶を製作した。特に (v) の接合工程が最終的に得られるエネルギー分解能を決定しており、今回4個のアナライザ結晶を製作、分解能評価をおこなった結果、1.7meV、1.8meV、2.0meV、2.3meV の実測値を得た。これらに値は計算値の2倍程度ながら現状では世界最高性能のエネルギー分解能を達成している。

(d) X線ビームコンデンサー

SPring-8の光源性能の向上、とりわけ光源サイズの減少にともない、微小領域における光子密度を向上させる X 線ビームコンデンサーに関して極限的な性能が求められるようになってきている。従来の X 線集光光学系を用いたビームの集光のみならず、新たな方式に基づくビームコンデンサーの開発が必要になってきている。今回、いくつかの新しい方式での光学素子を考案し、それらを試作するとともに、性能を引き出すための調整機構の検討と試作をおこなった。

(d-1) マルチステップフレネルミラー

従来の位相フレネルミラーは反射ビームの位相がだけずれるような2レベルの段差によりフレネルパターンを形成しているが、理想的には放物面で位相を連続的に変化させるキノホルム形状が最大の集光効率を与える。今回、このキノホルム形状を4ステップおよび6ステップで近似した形状について検討した。使用波長0.1nm、段差ステップ5.5nm、視射角0.2°、焦点距離0.2m（4ステップ）、0.5m（6ステップ）として設計し、ガラス上へ段差加工をおこない、タンゲステン表面にコーティングした。点光源を仮定した場合の焦点サイズは0.22μmである。

(d-2) エリプティカルミラーの試作と評価

大阪大学精密科学科との協力により従来加工が極めて困難であった高性能の非球面ミラーの開発をおこなった。ミラー基板はCZシリコン単結晶であり(001)面を大阪大学のChemical Vaporization Machining (CVM) とElastic Emission Machining (EEM) を用いてエリプティカルミラーを製作した。長手方向のミラーサイズは80mm、視射角1.4mrad（ミラー中心での値）、焦点距離300mmである。フィゾー干渉計と顕微干渉計を組み合わせたステイティング・インターフェロメトリにより形状誤差を測定した結果、設計値からの誤差7nmのものが加工できた。なお、EEMの加工時間をより増やすことにより1nm程度の誤差まで加工可能である。実際のミラー形状を用い、Fresnel-Kirchhoff積分により集光ビームプロファイルを計算した結果、0.2μm幅への集光が可能であることが示され、理想的な形状の場合とほぼ一致した。実験的にも0.2μm幅へ集光されていることが確認できた。

(d-3) 一次元ウェーブガイド

厚さ50nmの高分子膜をNi膜によって挟み込んだ構造でありNiの厚さを一部薄くしたX線入射部から斜め方向に高分子膜に向けてX線を入射することにより高分子/Ni界面で全反射を繰り返す。これがウェーブガイドとなって、最終的に端面から非常に小さな仮想光源としてX線が射出することになる。2002年度に実験的な評価をおこなう。

(d-4) ブラッグ・屈折レンズ光学素子の試作

きつい非対称ブラッグ反射を用いて回折ビームを表面すれすれに出射させることにより、まず一次元の集光をおこなう。この結晶表面に段差をつけモノリシクに屈折レンズを形成しておくことによりブラッグ反射したビームは屈折レンズを通過する際に直交方向へも集光され、これらの組み合わせにより二次元集光が可能になる。設計上では5000倍のビームコンデンスが可能になる。2002年度に実験的な評価がおこなわれる。

(d-5) クロスエリプティカルミラー調整機構の試作

(d-2)において述べたエリプティカルミラーを二組用い、散乱面を直交させK-B配置を構成することにより二次元のビームコンデンサーをつくることができる。このK-B配置を実現できるミラー調整機構を試作した結果、 $0.3\mu\text{m} \times 0.3\mu\text{m}$ のビーム集光が実現できた。理想的には $0.2\mu\text{m} \times 0.2\mu\text{m}$ が実現できるはずであり調整方法の再検討をおこない2002年度には設計性能への到達を目指している。

ビームライン部門 光学系・輸送チャンネルグループ
石川 哲也・後藤 俊治