

## 3-2 ビームライン開発（新規増設・改造・高度化）

### 1. 挿入光源

#### 1-1 新規増設・改造

SPring-8の軟X線理研ビームラインBL17SU用の光源として考案された新型の偏光制御アンジュレータの開発を行った。このアンジュレータは、電磁石と永久磁石から構成され、電磁石の周期長および極性を選択することにより、8の字アンジュレータモード、ヘリカルアンジュレータモード、非対称8の字アンジュレータモードの3つのモードで運転可能であり、それぞれ、垂直・水平偏光、左右円偏光、高速切替型円偏光をビームラインに供給する。昨年製作した試作機をもとに実機を製作しさまざまな方面から特性を評価した。

まず、従来と同じ方法により永久磁石列のみでの調整を行った後、電磁石コイル単体での磁場測定を行い、これをもとに配列を決定し本体に組み込んだ。さらに、電磁石冷却のための最適な冷却システムについて検討し、実験を行った。この結果、最大電流で運転しても支障がない程度にまで冷却能力が大幅に改善した。また、磁場調整を行うために電磁石ヨークの側面にケイ素鋼板の薄膜を接着し、水平および垂直磁場積分の多極成分を補正した。電磁石による垂直磁場のピーク強度についてはほぼ計算どおりの値が得られた。一方、永久磁石による水平磁場のそれは計算よりも若干小さいことが確認されたが、実用上問題ない程度のものであった。これはヨークによる影響が予想よりも大きかったためであると思われる。

全体の磁場調整が終了した後、COD補正用のステアリングテーブルの作成に着手した。これは本来挿入光源を蓄積リングに設置した後で電子ビームを用いて行っていたものであるが、本アンジュレータでは電磁石によるヒステリシスが確認されたため、その特性を確認するためにオフラインでの試験を兼ねて行ったものである。この結果、全運転パターンにおいて50G.cm以下に磁場積分を抑えることができたが、これは蓄積リングの運転上、無視できないものであるため、電子ビームを用いた通常の手続きによりさらに精度の高い補正が必要となる。

#### 1-2 高度化

##### (1) 左右偏光高速スイッチ型ヘリカルアンジュレータ

円偏光アンジュレータからの左右偏光方向を周期的に切り替える手段は、アンジュレータ磁場方向を反転させるなどいくつかある。SPring-8軟X線ビームライン（BL25SU）では、直線部にタンデムに配置した2台のヘリカルアンジュ

レータを左右各々の偏光にセットしておき、電子ビームのバンブ軌道を作ることによりビームライン軸上へ放射される円偏光方向を切り替えている。平成14年度より、左右円偏光方向を1Hzでスイッチングした光を用いたMCD測定などのユーザー実験が開始された。またビームライン実験と平行して、スイッチング周期高速化のためのR&Dを行った。電子ビーム軌道の最終補正は、軌道変位を反転させた時間波形で空芯コイルを励磁するフィードフォワードによって行っている。高速スイッチングに対応できるように制御系の時間タイミングの高精度化、およびフィードフォワードに用いるデータ作成の自動化をすすめ、その結果10Hz程度までスイッチング周期を上げることができた。スイッチングの高速化により、ビームライン実験においてロックインテクニックなどを用いたS/Nの向上が可能になる。

##### (2) 真空封止型狭ギャップリボルバーアンジュレータの開発

本アンジュレータは、周期長の異なる4種の磁石列を有し、波長選択の必要に応じて磁石ビーム軸の回転によって最適な磁石列を選ぶことが可能な構造（リボルバー動作）となっている。平成14年度は、磁石列の回転再現性試験、形状変換部繰り返し疲労試験を行った。また、本アンジュレータは、韓国浦項加速器研究所との共同研究のため、次年度に当該蓄積リングに設置する予定である。このため、当該ビームラインに適した24mm周期長の磁石列と既設6mm周期長磁石を交換し、磁場測定を行った。

##### 1) 磁石列の回転再現性試験

磁石列の回転軸は、真空槽への大気リークを防止するため、シール材が強い力で押し付けられている。この力は、回転軸に捻れを生じさせるので、軸回転用モータ部のエンコーダ角度表示値と実際の磁石回転角度にずれがあるのではないかとの疑義があった。そこで、磁石列の回転角度が直接測れるように、試験用に軸付近を改造し、レーザーエンコーダを取り付け、計測を行った。その結果、ずれは許容範囲内であった。また、ずれは、再現性のあるヒステリシスを描くことが分かった。

##### 2) 形状変換部繰り返し疲労試験

本アンジュレータの形状変換部（磁石列及び真空槽出口部を電子ビームから見てなめらかに接続するための部材）は、通常の真空封止アンジュレータのようにギャップ開閉に追従するのみでなく、磁石列回転選択時には、磁石列と着脱するような機構が必要となる。このため、形状変換部が複雑な繰り返し動作に対して構造的に問題ないかを確認

する必要があった。そこで、4種類の形状変換部について1万回の繰り返し動作試験を行った。その結果、1万回の動作後においても破壊が起こらないことを確認した。

### (3) 新しい磁場測定法の開発

アンジュレータの性能を改善するためには、磁石交換・反転などによって磁場調整を行う必要がある。このため通常はホールプローブと呼ばれる装置を用いて磁場測定を行い、データを解析して磁場調整を行っている。従来用いられてきたホールプローブのモジュールは厚みが3mm程度あり、このためギャップ5mm以下における磁場測定は困難であった。これを改善するために、パルスワイヤ法と呼ばれる磁場測定法の開発に着手した。これは磁石のギャップ間にワイヤを通し、そこにパルス状の電流を流すことによってワイヤに与えられる振動をアンジュレータ外部に設置された変位検出器で測定することにより、アンジュレータの磁場積分値を測定するものであって、原理的にはワイヤ径(100 $\mu$ m)のギャップまで対応可能である。また、真空封止アンジュレータのように、真空チャンバの中に磁石列が隠れるような構造のものであっても問題なく測定が可能である。この方法について原理の検証を行った後、波の減衰、分散の評価、レーザによる変位検出器の安定性、およびレンズ集光によるS/N比の改善について測定を行い、システムのハードウェアおよびソフトウェアにおいて改善すべき項目についての知見を得た。今後これらを改善し、S/N比を高めることにより、ホールプローブによる磁場測定と同程度の測定精度を目指す。

#### ビームライン・技術部門

光源・基幹チャンネルグループ・光源チーム

北村 英男

## 2. 基幹チャンネル

### 2-1 新規増設

2002年度は、挿入光源用基幹チャンネルを1本(BL17SU)建設した。このビームラインは、将来建設が計画されている軟X線領域の長尺アンジュレータビームラインによって克服すべき課題のR&Dを行う位置付けを持っているため、2001年度の高度化研究で開発・製作した体積発熱型マスクを設置した。また、2001年度に建設したビームラインの内、2002年4月にBL26B1、26B2、32B2の、5月にBL22XU、37XUのコミッシュニングを行い、光軸確認、スリット類と光位置モニタの調整を実施した。

### 2-2 改造

#### (1) ベリリウム窓用冷却系改造

ベリリウム窓は光学ハッチ内に設置されているため、従来FE専用冷却系ではなく光学系機器用の冷却系であるL3系から分岐配管されていたが、L3系は各ゾーンとも全体

流量が少なく、ビームラインの増加に伴い各ビームラインでの流量不足が大きな問題となりつつある。その中で実際に2002年3月末にBL16B2においてベリリウム窓冷却水流量異常(流量低)によるビームアバウトが発生した。これは、隣接するBL17SUの光学ハッチ建設中に冷却系のフラッシング作業を行った際に、Bゾーン全体の流量が一時的に低下したためである。このような事態を踏まえ少しでもL3系の冷却水量不足を緩和させるために、既設の全ビームラインにおいて、ベリリウム窓用冷却系をマシン収納部内のFE専用冷却系に接続するように配管を改造した。

#### (2) 高熱負荷機器改造

供用開始から5年が経過し、高熱負荷機器の損傷状態を調査するために、BL09XU/前置スリット: グラファイト型を取り外し最新式のベリリウム型に交換、BL10XU/マスク、アブソーバ: APS型を取り外し2001年度高度化研究で開発・製作した一体型マスク・アブソーバに交換、BL47XU/XYスリット: 旧型を取り外しダブルスリット型に交換(これはBL担当者からの要求でもあった)した。取り外した機器に対して、材質劣化調査のための光学顕微鏡やSEM観察、機械的強度試験(引張強さ、硬度)、またマイクロ金属組織の状態変化を調べるためのEBSP分析等を実施した。アブソーバ照射部の引張特性に部位による差異が認められた点を除くと、顕著な材質変化を示す兆候は見られなかった。また、前置スリットに対して加熱・温度分布測定試験を実施し受光部であるグラファイトと冷却部である水冷銅ホルダーとの間の口付け接合部の健全性が保たれていることを確認した。

## 2-3 高度化

### (1) 基幹チャンネル部真空特性の向上

#### 1) 研究経緯と目的

基幹チャンネル部には光脱離による多量のガス放出を生じる熱吸収体が多数設置されているため、現在の排気系の能力では、高出力挿入光源ビームラインや大気解放を伴う保守・改造作業後の運転等において挿入光源ギャップの制限といった運転条件の制約を発生する可能性があり、実際にBL19LXUやBL08Wでは、コミッシュニングや機器改造後にギャップ制限を行った経緯がある。さらに、各サイクルの運転期間が伸びることに伴い保守のスパンが長くなっているため、現状よりもさらに一桁真空特性を向上させることを目的とした新しい真空排気系の設計・改造を実施した。

#### 2) 実施内容と成果・評価

BL20XU/排気真空槽3の上部に取り付けてある蒸発型ゲッターポンプ(TVP)の代わりに非蒸発型ゲッターポンプ(NEG)を取り付け真空特性の変化を調査した。排気能力としては、TVPの場合ゲッターの付着面積に大きく左右されるが、カタログ値を参考にするとN<sub>2</sub>換算で両者ともほぼ同

程度（1000～1200ℓ/sec）と推定される。NEGのTVPに対する優位性は、蒸発型のため、TVPで起こる蒸着膜の剥離によるパーティクルの問題が生じない（真空の質の向上）

Getter面で吸着した気体分子をさらに内部へ拡散させる能力を持つため、排気能力が長く持続する（長期運転への対応、保守の簡略）等が挙げられる。作業中に微少リークを検知したため単純に比較はできないが、改造前ではサイクル終了時の真空度がサイクル開始時よりもファクターで2.5倍になっているのに対し、改造後ではサイクル終了時でもほぼ開始時の真空度を保持していることから、NEGの排気能力の持続力の強さが確認できた。また、ほぼ同じ運転条件（リングカレントおよびIDギャップ値）での真空度を短期的に比較しても、約1桁の真空度の改善が見られた。

## （2）高耐熱フロントエンド機器の開発

### 1）研究経緯と目的

益々高出力化・高パワー密度化する光源に対し、現状のいずれの機器も現在の設計基準では限界に近づいているため、受光部や接合部における熱応力と機器の破壊との関係、熱接触部の熱伝導性や接合部の強度評価、繰り返し熱負荷による材料の特性変化や機器の疲労評価等を、系統的かつ定量的に検証して設計に反映させることが不可欠な状況にある。そこで今回は、設計基準の見直しを行うための熱負荷試験・強度評価試験等を実施していくものである。本研究成果は機器の寿命予測を行う上でも貴重な指針になるものと期待される。

### 2）実施内容と成果・評価

熱負荷試験用システムの整備を行った。本システムは、電子銃、ビームストッパー部、被照射体室、ファラデーカップから構成されている。電子銃の加速電圧は30keVで、最大出力パワー13.5kWの能力を持ち、さらに水平方向、垂直方向のビーム走査が可能である。主排気系にはクライオポンプを、バックポンプにはSPring-8輸送系標準のスクロールポンプを準備した。冷却系は全体で100ℓ/minの冷却水システムを整備した。また、熱応力による破壊メカニズムの定量的考察と、間接冷却における接触熱抵抗の定量的評価を行うためのテストピースの製作を行った。前者に対してはANSYS解析を実施し、最大等価熱応力が材料の引張強さを超えるような形状とした。今回の実験で定量的な評価を行うには解析の精度が十分に信頼できることが大前提となるため、各出力時におけるビームプロファイルと試験片への実入熱量の把握が重要であり、ビームチョッパー、ファラデーカップを用いたビーム特性評価を進めた。次年度には上記2種類の実験を遂行するとともに、破壊メカニズムの解明に向けた最適な試験片の製作および解析・測定技術の確立を目指す。

## （3）光伝導型光位置モニタの開発

### 1）研究経緯と目的

基幹チャンネルに設置されている光電子放出型光位置モ

ニタは、主に偏向電磁石の端部より発生する低エネルギーのX線の混入のため、挿入光源ギャップ依存性という問題を抱えており、従来耐熱性、電気的特性に優れたダイヤモンド素子を光伝導型モニタとして使用するアプローチを継続的に実施している。内部光伝導は吸収したX線のエネルギーに比例して信号を生じるため、高いエネルギーのX線に高い検出効率を持つが、SPring-8の強烈的な熱負荷問題のために、信頼できる標準的光位置モニタとして定常的に使用できていないのが現状である。そこで、ダイヤモンドをブレード状に作成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軽減した光伝導型光位置モニタの開発を行った。また、このモニタを実験ステーションでの光位置モニタとして応用するために、汎用X線スリットのエッジ部に装着した装置の製作も進めている。

### 2）実施内容と成果・評価

製作したダイヤモンド検出素子は26mm×10mm×t0.3mmの大きさで、両面にアルミ電極をリソグラフ技術で付着させたものである。BL38B1において、この検出素子に単色の放射光ビームを照射し発生する電流信号を測定した。入射光ビームのスリットサイズを50μm×50μmに固定した検出効率のプロファイル測定により、素子の両面に幅1mmで施されたAl電極対の間のみ検出感度があることが分かった。また、信号電流のバイアス電圧依存性の測定により、信号量はバイアス電圧と比例関係にあること、極性を反転させると電流も反転すること、が分かった。これは、内部光伝導の原理で信号を発生する場合に示す大きな特徴の一つである。今回のビームテストの結果により、この検出素子が光位置モニタとして動作し得ることを確認した。この検出素子を組み込んだ鉛直専用型光位置モニタをBL47XUに設置し、光伝導型のギャップ依存特性、耐熱特性等を評価する予定である。

ビームライン・技術部門

光源・基幹チャンネルグループ・基幹チャンネルチーム  
高橋 直

## 3．光学系・輸送チャンネル

### 3-1 新規増設・改造

光学系・輸送チャンネルに関連して、以下のような新規建設、増設、改造がおこなわれた。

原研量子構造物性ビームライン（BL22XU）、理研構造ゲノムビームラインI、II（BL26B1、BL26B2）、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）および共用分光分析ビームライン（BL37XU）は遮蔽ハッチ、光学系・輸送チャンネルの建設が昨年度までに完了し、BL26B1、BL26B2、BL32B2は引き続き2002年4月から、BL22XU、BL37XUは5月から試験調整運転が開始された。また、共用白色X線回折ビームライン（BL28B2）の三番

目の光学ハッチの増設に伴い、2002年5月から増設分に関する試験調整がおこなわれ、引き続いて利用に移った。

軟X線ビームラインである理研物理科学ビームラインIII (BL17SU) は、今年度は光学系機器の製作が進められ、光学ハッチ内の前置光学系の据付が完了した。また、回折格子など分光光学系は機器製造が終了し、据付は2003年度のはじめにおこなわれる。試験調整運転は2003年度夏期停止期間以降を予定している。

上記のような新規ビームライン建設や増設とは別に、既存のビームラインにおいても、性能向上、利用範囲拡大、使い勝手の改善などを目的とし、光学系・輸送チャンネルの部分的な改造が進められている。

BL29XUでは2001年度までに光学ハッチに40cm長ミラー調整機構が2台タンドムに配置された。今年度は引き続きミラー光学系の調整がすすめられ、これにより高調波除去やビームの平行化、集光などが可能になった。また、BL39XUではこれまで実験ハッチの最上流部、すなわちベリリウム窓の直下流部に移相子のユニットが設置されていたが、これは一枚水平偏向のミラー調整機構の下流に位置しており、ミラーによるビームの偏向角に応じて、移相子ステージの併進回転の調整などを必要としていたため、光学ハッチ内のミラーより上流に移設した。これにより移相子光学系の調整は格段に容易になった。

### 3-2 高度化

#### (1) 輸送系機器開発

加速器の光源としての性能が年々向上し、光源実効サイズが減少してきた結果、今まで問題にならなかった輸送系機器の振動レベルが光源サイズと同程度となってきた。実験ステーション側からみると実効的な光源サイズの増大となり、光源輝度を下げることになるため、光学系・輸送系機器としてこれに対応することが求められるようになった。今年度は、X線ビームライン輸送チャンネル標準排気ユニットのスクロールポンプの振動対策、および、液体窒素冷却モノクロメータ結晶の制振の検討と対策の2項目について実施した。

##### 1) 標準排気ユニットのスクロールポンプの振動対策

X線ビームラインの輸送系は、スクロールポンプおよびターボ分子ポンプを組み合わせた標準排気ユニットによって排気されている。架台上に真空チェンバ、ターボ分子ポンプなどが搭載され、架台は床にアンカー止めされている。スクロールポンプはフレキシブルチューブを介してターボ分子ポンプと接続されている。

現在稼動している標準排気ユニットからの振動周波数やレベルを加速度振動計により実測するとともに、現状の排気ユニットからの振動を一層低減するために、錘や防振素材を用いてスクロールポンプからの振動を絶縁する最も簡便でローコストな手法について実機を用いて効果を検証し

た。また、嵩上コンクリートを10cmはつり、基盤コンクリート部に密着させた床を設け、周りの嵩上コンクリート部と分断した効果を、スクロールポンプを振動源とした場合について調べた。

スクロールポンプを振動源とした場合、標準排気ユニット架台上には、29Hz、120Hz付近の周波数成分を主とした振動が観測された。標準排気ユニット上への振動の伝達経路を考慮すると、振動を抑える方法として、フレキシブルチューブを伝わる振動の絶縁、および、床への振動の絶縁という2つの方法が考えられる。そこで、フレキシブルチューブを伝わる振動の絶縁のためフレキシブルチューブに錘を取り付ける方法と、床への振動の絶縁のためスクロールポンプと床との間に防振素材を敷く方法を試し、それぞれの除振効果を調べた。排気ユニット上部およびスクロールポンプ設置部の床に振動計を置いて測定した。錘を用いた場合、フレキシブルチューブを伝わる振動はかなり絶縁されており、効果が明らかであった。防振素材を用いた場合、床への絶縁が効果的であるが、スクロールポンプ本体を揺らすため、排気ユニット上での振動は増加してしまう。錘と防振素材を同時に用いることで、双方の特性が組み合わせられ、防振効果が改善できた。

蓄積リング棟の一部ゾーンでは、床はコールドジョイントとなっており、床のやわらかさにおいてばらつきが認められる。そこで、BL17SU光学ハッチ前において固定した標準排気ユニット架台にスクロールポンプから伝播する振動が、床の硬軟によって受ける影響を調べた。またコンクリートを打ち直し、除振効果を計測した。床の硬軟は、ハンマーで床をたたき、反響音の高低によって大別している。軟らかい床(低音の反響音)の基盤コンクリート部を表面から約10cmはつり、再度コンクリートを打ち直し、周辺の高上げコンクリート部との間にゴムを詰め、周辺からの振動を絶縁した。加速度の大きさは総じて軟らかい床は大きく、硬い床は小さい、打ち直しの床は、固い床と同程度かそれ以下の振動量となり、コンクリートの打ち直しが床の除振対策として有効であることを確認した。

##### 2) 液体窒素冷却モノクロメータ結晶の制振の検討と対策

液体窒素冷却は、液体窒素温度付近におけるシリコン結晶の熱伝導率が大きく、しかも線膨張率が小さい性質を利用し、挿入光源からの高パワー密度の放射光を受けても、熱変形が小さく抑えられて分光性能の劣化を少なくすることができる冷却方法である。SPring-8では液体窒素を循環して結晶を冷却する方式を採用し、これまで9つのビームラインに設置し期待通りの冷却性能を得ている。

使用上の問題としては、水冷結晶の場合と同様に結晶振動の抑制がある。結晶の振動を抑えるためには、それにつながるフレキシブル配管の振動を抑えること、このためには、フレキシブル配管の振動原因である管内を流れる液体窒素の圧力変動と渦の発生等を抑えることが重要である。

フレキシブル配管の振動原因のうち気柱部の圧力変動は、液体窒素冷却に特有の問題であり、液体窒素循環配管から分岐した圧力取り出し配管、および循環配管をつなぐパイオネット部に原因がある。圧力計取り出し配管では、室温から液体窒素温度まで連続的に変化していて、液体窒素の飽和条件の位置にガスと液体の界面が存在する。この界面は、温度および圧力が変化しない場合は一定の位置に留まるが、温度あるいは圧力が変化すると配管の中で移動する。循環窒素側の圧力が上昇すると、界面は室温側に移動して温度の高い配管に接触して蒸発するので、ガス側の圧力が上昇して液が循環側に押し出され、この繰り返しによる液体圧力の変動が生じてフレキシブル配管を振動させる。また、パイオネット部においても同様な圧力の変動が生じる。圧力変動は1～数分ごとに発生するかなり大きなものである。さらに、気柱部の形状寸法は様々であり、より周期の短く小さな圧力変動も有ることが予想され、フレキシブル配管振動の主な原因となっていると考えられる。振動の対策としては、気柱部の飽和窒素を無くすか、気柱部での液体窒素の自由な流動を抑えることで振動を減少させることが可能であると考えられる。

まず、配管の曲部を減らす、フレキシブル配管の長さを極力短くする、ステージの剛性を上げるなどの従来式の振動対策をおこない、その効果を調べた。Si333反射のロッキングカーブを測定しその半値幅を理論値と比較することにより、対策前後の振動を比較した。その結果、フォトンエネルギー18.7keVにおいて、理論値0.86secに対して、振動対策前でロッキングカーブ幅2.2secで振動角度はほぼ2secであったものが、対策後にはロッキングカーブ幅0.9sec、振幅が0.2secにまで抑制できた。

さらに、気柱部に液化しないガスとしてヘリウムを添加し、また、パイオネット部に関しては、気柱部の入り口にテフロンのOリングを入れて液体の流入或いは流出を抑えるようにした。ロッキングカーブの肩の部分において反射強度を測定して振動スペクトルを評価した。ヘリウムを添加する前と添加した後の比較では300Hzから400Hzにかけて1～2桁程度振幅が減少した。また、600Hz以上でも振幅が減少しヘリウムを添加することで振動が抑制できた。

液体窒素循環装置の配管系統は各ビームラインで異なることから、すべての循環系統において同様な効果があるかを見極めることも必要であり、今後、各ビームラインにおいて試験を実施する予定である。

## (2) 光学素子冷却技術開発

平成13年度から偏向電磁石光源用光学素子の冷却方法の最適化研究を進めている。偏向電磁石ビームラインでは、分光第一結晶におけるパワー密度はアンジュレータビームラインに比べて格段に小さく、水冷方式の除熱で対応可能である。しかしながら、間接冷却では除熱が不十分であり熱歪が残るため、直接冷却方式において、冷却能力を確保

しつつ、加工歪、水圧による歪を極力抑えることが可能な最適な解を見出すことが課題である。SPring-8の偏向電磁石ビームラインで標準的に用いられている直接水冷式フィンクーリング結晶は、冷却能力の点では十分な能力を持っているが、結晶を取り付ける際に生じる歪や冷却水の水圧による結晶変形、およびフィン部と水路部の除熱能力や剛性の差異によって、得られるX線ビーム強度の振動や空間強度分布の不均一性がみられることが問題となっていた。今年度は、種々の冷却方法の基本的な検討をおこない、試作品の設計、試作をすすめた。

試作した結晶においては、冷却能力を損なわないよう従来の直接水冷式フィンクーリング結晶の冷却方法が踏襲され、また、機械的強度を増し水圧などによる変形を減少させる工夫がなされた。裏面から半円状の水路を掘ったトッププレートと冷却水導入部をもつベースプレートの二つの部品を個別に製作した後、拡散結合により一体化させる方式を選択した。ベースプレートは従来品の拡張フィン部に相当するが、この部分がブロック形状であるため機械強度の増強が得られる。また従来品はフィンの下部が振動の自由端であったが、この部分が固定されるため冷却水の通水により発生する結晶振動も軽減されることが期待できる。冷却水導入部の構造および結晶を取り付ける方法を再検討し、結晶反射面の変形を減少させる設計とした。これは拡散結合技術を適応しトッププレートとベースプレートに分けて製作することにより設計自由度が増したために可能となったことである。Si結晶の接合は本分光結晶製作における重要な技術であるため、現在そのR&Dをおこなっている。新たな分光結晶をビームラインに設置したX線光学的な評価は来年度に実施する。

一方偏向電磁石ビームラインの分光器第二結晶に関しては、必要に応じて湾曲機構を用いて結晶を湾曲させ水平方向にビームを集光し強度をかせぐサジタルフォーカシングがおこなわれているが、第一結晶からのコンプトン散乱X線による加熱（いわゆるコンプトンヒーティング）からいかにして結晶を冷却するか、また、湾曲方向に直交する方向に生じるアンチクラスティックベンディングをいかにして避けるかが課題となっている。今年度はこれらの課題に対応するため従来型よりも厚い結晶を取り付けることのできるサジタルフォーカシング機構を設計した。

コンプトンヒーティングの問題については、現状は湾曲機構を冷却することである程度緩和されているが、第二結晶を冷却するより良い方法について検討し、インジウムシートを介して結晶の両端から熱接触により冷却をおこなう方法が有望との見通しを得た。また、アンチクラスティックベンディングについては、構造計算の結果、現状用いられている2mm厚の結晶では若干反りが残り、5mmまで厚くすると自重でのたわみが問題になることがわかった。3mm程度の厚さが最適であり、集光特性を改善できると

の見通しを得た。

これらのことを実験的に検証するためには現状の2mm厚結晶用の湾曲機構では対応できないため、厚さの異なる数種類の結晶の試験および冷却機構組み込みのスペースのために最大5mm厚の結晶を湾曲させることができる湾曲機構を新たに設計製作した。来年度、本湾曲機構を用いて実ビームでの試験をおこなう予定である。

### (3) 超高分解能分光素子開発

BL35XU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って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のエネルギーをmeV領域の分解能で計測することによって試料内の素励起に関する情報を得るものである。エネルギーアナライザーとしては、分光器と同じ結晶の同じ反射面による背面反射を用い、ある一定のエネルギーのX線のみが反射するように配置する。微弱な非弾性散乱の計測では、信号を効率よく集めることが不可欠であり、このために試料から発散してくる非弾性散乱X線を検出器上に集光する球面アナライザーが用いられる。しかし、球面アナライザーは光学素子歪みや方位誤差により、分解能が低下する。今年度は、性能向上を目指した製作条件の改善を試み、ビームラインにおけるX線による試験評価を進めた。

SPring-8方式におけるアナライザー結晶の製作工程は、Siインゴットから(111)ウェファの切り出し、無歪み鏡面研磨、格子状細溝加工、洗浄および加工歪除去のための異方性エッチング、球面基板への接合、および、結晶底面の化学エッチングによる除去である。今年度は格子状細溝加工において各結晶片の反射領域の幅に対して溝の幅を小さくすること、すなわち溝加工のためのブレードの歯厚を小さくすることがトータルの反射領域確保の上で望ましいと考え、ブレード歯厚について70 $\mu\text{m}$ から60 $\mu\text{m}$ に変更したアナライザー結晶を製作し評価した。

評価の結果、曲率半径9.8m、ブレード歯厚60 $\mu\text{m}$ のエネルギー分解能は半値幅3~4meVであり、歯厚70 $\mu\text{m}$ のもの2meVに比べて劣化していることがわかった。また、結晶の残留歪を反映して分解能曲線が非対称に広がるものが見られた。この結果は、溝幅100 $\mu\text{m}$ 以下で溝深さ3mm程度のエッチングにおいては、溝内部のエッチングの進行状態がブレード歯厚すなわち溝幅に敏感に影響を受けることを示している。溝加工後のエッチングは溝加工によって生じた加工歪を除去する上で重要な工程であり、溝幅に応じてエッチング条件を最適化することが重要であることを示す結果となった。今回の歯厚60 $\mu\text{m}$ のアナライザーでは、エッチングが不足していると判断し、再エッチングをおこなった。再度X線で評価しエネルギー分解能の改善を確認した。しかしながら分解能曲線の裾の部分が幾分強く残った。また、積分強度では70%程度に減少しており、焦点サイズが増大した。

今後、ブレード歯厚を60 $\mu\text{m}$ にしてエッチング条件を最適化していく方法も考えられるが、今回の再エッチング後の結果を見る限り70 $\mu\text{m}$ のものからの著しい性能向上が期待できるわけではなく、ブレード歯厚70 $\mu\text{m}$ のほうがより適当であると結論した。現在、曲率半径9.8mおよび2.8mのアナライザー結晶の製作を終え、再現性を主とした評価を予定している。

### (4) X線ビームコンデンサー

SPring-8での光源性能の向上にともない、微小領域での光子密度を向上させるX線ビームコンデンサーに極限的な性能が求められるようになってきている。すでに、マイクロビームを必要とする実験ステーションにおいては、従来から知られている光学素子を活用したX線ビーム集光の開発が進められているが、SPring-8の極限性能を追及するためには、光学素子としての観点からの新しい方式でのビームコンデンサー開発、および明確な物理的基盤に立った従来の光学素子の高性能化をおこなっていく必要がある。2001年度に開始された本開発研究では、以上の観点から一次元および二次元X線ビームコンデンサーに関して、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、必要な調整機構の検討と試作をおこなってきており、本年度は、さらにこれらの評価を進めた。

#### 1) マルチステップX線フレネルミラー

昨年度、キノホルム形状をマルチステップの階段状に近似することを検討し、4ステップで近似したものと、6ステップで近似したものを試作した。ステップの高さはどちらも5.5nm、X線エネルギーは12.4keVである。基板材料はガラス(表面粗度、 $<1\text{nm}$ )であり、基板上にフレネルパターンをマルチステップで加工し、表面をタングステンでコートした。照射角は0.2 $^\circ$ であり、焦点距離は4ステップでは0.2m、6ステップでは0.5mである。点光源を仮定した場合の設計焦点サイズは0.22 $\mu\text{m}$ となる。

今年度はアンジュレータビームラインで一次元の集光特性を計測し、0.9 $\mu\text{m}$ の実測値を得た。これは、光源サイズを考慮した計算値~0.35 $\mu\text{m}$ に較べると大きいのが、サブミクロン集光は実現されている。理論値と計算値の違いは各ステップの面精度によるものと推定される。

#### 2) 一次元ウェーブガイドの評価

昨年度試作した一次元X線ウェーブガイドは、50nm厚の高分子薄膜をNiで挟んだ構造で、X線入射部のNiを薄くして高分子薄膜内にX線が導入されるものである。入射したX線は、50nmのウェーブガイド内をNiとの境界面で全反射を繰り返しながら進み、端面から出射する。このときウェーブガイドの高分子薄膜の厚さが実効的なビームサイズを決めるため、見掛け上非常に小さな仮想光源が実現できる。

今年度は、アンジュレータビームラインでの集光特性評価をおこなった。ウェーブガイドから出射直後のビームは、

非常に細くなっているが回折効果のためにすぐに広がってしまう。応用は特殊な用途に限られる。

### 3) ブラッグ・屈折レンズ光学素子の試作

ブラッグ・屈折レンズ光学素子は非対称ブラッグ反射を用いた一次元的なビームコンデンサーと一次元屈折レンズをブラッグ反射で縮小される方向と直交する方向でビーム集光をおこなうように配置して、二次元ビームコンデンサーとするものである。ブラッグ反射のための結晶としてはSi(001)を用い、非対称反射部分を無歪鏡面研磨するとともに、出射ビーム部に100 $\mu\text{m}$ の段差をつくり、そこに一次元屈折レンズを形成した。レンズ形状は放物面であり、リソグラフィによる微細加工が施されている。レンズは異なるエネルギーのX線に対応できるように、形状の異なるレンズ列を5列並べた。それぞれの列のアパーチャは100 $\mu\text{m}$ であり、設計上では光子密度を5000倍程度とするビームコンデンサーが可能である。

今年度は、アンジュレタビームラインでの性能評価をおこない、設計値とほぼ同じ $\sim 5000$ 倍の光子密度が得られたが、集光ビームサイズは数ミクロン以上と評価した中では最悪であった。また、非対称反射で角度幅、エネルギー幅の両面で損失があるため、数ミクロンアパーチャが大きいことを除けばあまりメリットは見出せない。しかしながら、数ミクロンアパーチャが大きいので、大きなビームを適当な焦点サイズに集光するには応用できる可能性がある。

### 4) クロストエリプティカルミラー調整機構の性能向上

昨年度に一次元で0.2 $\mu\text{m}$ の集光が確認されたエリプティカルミラーの形状修正をおこなうことにより、理想形状に近づけ今年度には理論限界に近い90nmの一次元集光を達成した。この性能のミラーを2枚用いた二次元集光試験がおこなわれた。2枚のミラーを用いた集光では、ミラー姿勢の精密調整を要し、初回のマニュアル調整時には最終集光値に達するまでほぼ二昼夜を費やしたが、調整手順を順次プログラム化し、年度後半には開始後1～2時間で最終集光値に達するに至った。最終的には、二次元集光においてもほぼ理論限界値である90nm $\times$ 90nmを達成した。この二次元コンデンサーは既に走査型蛍光マイクロスコピ等に応用されている。

### 5) 結晶分光器の安定化 (MOSTAB)

二結晶分光器の微小回転角をフィードバック制御して分光器下流の放射光X線ビームを安定化するMonochromator Stabilization (MOSTAB)について検討した。この制御は分光結晶に取り付けた平行度微調整用のピエゾ素子にフィードバック電圧をかけることにより実現され、X線ビーム強度または位置を安定化することができる。BL29XUでおこなわれたMOSTABの評価では、X線ビーム強度の時間変動を $=6.4 \times 10^{-3}$ から $1.7 \times 10^{-4}$ に改善し、X線ビーム位置の時間変動を $=1.9 \mu\text{m}$ から $0.13 \mu\text{m}$

に改善することに成功した。また、光源から1km下流での測定などから、MOSTABによるビーム強度とビーム位置の同時安定化には、光源(蓄積リング軌道)の安定性が不可欠であることが示された。

MOSTABをビームラインに普及する上で、回折強度曲線ピークへのビーム強度の安定化、フィードバックパラメータ調整作業の簡略化、の2点が懸案となっていた。これらを解決すべくBL38B1でR&Dをおこなった。は、MOSTABと位相敏感型検波を組み合わせることで実現できることを確認した。については、専用回路モジュールと制御ソフトウェアを含むSPring-8型MOSTABシステムを開発し、操作性の向上を図った。このシステムは分光器のエネルギー設定に応じたPID制御パラメータを自動的に取得することができ、調整作業を大幅に簡略化した。

現在、3ビームラインでMOSTABが導入されており、11ビームラインで導入を検討している。他に次年度以降の課題としてビームラインワークステーションによるMOSTABの制御を目指している。

ビームライン・技術部門

光学系・輸送チャンネルグループ  
後藤 俊治