

## 2-2 ビームライン

### 1. 概要

2016年度の主な光源および光学系の更新として、ImPACTのタフポリマー研究関連で加速器診断ビームラインBL05SSの改造、NEDO RISING IIプロジェクト関連で、理研ビームライン BL32B2の改造、さらに兵庫県ビームラインBL24XUにおいて遮蔽ハッチ（実験ハッチ）の改造が行われた。

BL05SSでは、まず、タフポリマー研究のためのX線小角散乱実験等を可能とするために縦偏向、横偏向の2台のミラーを光学ハッチ内の二結晶分光器の下流に設置したほか、ミラーによる反射ビームを通すために実験ハッチへの延伸ダクトの改造等が実施され、2016年10月から利用に供された。さらに、挿入光源に関し、これまでのウィグラー（ $\lambda_u=76$  mm,  $N=51$ ）から真空封止アンジュレータ（ $\lambda_u=32$  mm,  $N=93$ ）への変更が行われた。2017年4月から更新された挿入光源を用いた利用が開始される。

BL32B2では、革新型電池研究におけるハイスループット電池材料評価を目指し、XAFSおよびX線回折ステーションの増設を目的として、既存の実験ハッチ1から下流12 mに実験ハッチ2を増設した。この他、二結晶分光器の安定化改造、タンデムミラーへの更新、実験ハッチ1からの延伸ダクトの設置などが行われ、2017年3月末までに改造が完了した。2017年4月から試験調整を経て利用実験が開始される。

また、兵庫県ビームラインBL24XUでは、ステーション機器の増設に伴い、設置エリア拡大を目的とした実験ハッチの延伸改造が行われた。

既設ビームラインの挿入光源、フロントエンド、光学系および輸送チャンネルのそれぞれの部分において、以下に示すようなビームライン共通部に関する維持管理、高度化開発が継続的に実施された。維持管理、老朽化対策に関しては、光源・光学系の各部に起因する運転のダウンタイムの低減をあらためて目標に掲げ推進を図っている。高度化においても多様なニーズに応え、また、最新の光源・光学系技術を提供すべく高度化を推進している。

### 2. 挿入光源

#### 2-1 維持管理

運転開始から10年以上が経過した挿入光源について、老朽化に伴う各種機器の故障や不具合が発生したため、これらの交換作業を実施した。

##### (1) エンコーダ

磁石ギャップ測定を行うためのロータリーエンコーダについて、放射線損傷によると思われる機器故障が数か所発生し、互換機への交換を行った。

##### (2) 磁石冷却水系

真空封止型アンジュレータ用永久磁石を冷却する冷却システムについて、ポンプ交換やカプラ交換などの作業を行った。

##### (3) ステアリング磁石電源

挿入光源上下流に設置されている軌道変動補正用ステアリング電磁石の電源について、冷却ファンの故障に伴う機器停止が発生したため、当該ファンの交換作業を行った。

##### (4) ステッピングモーター

既に多くのメーカーで生産が中止されている、高トルク5相ステッピングモーターを使用している挿入光源について、今後も安定な運転を可能にするため、2相で同等の性能を有するステッピングモーターへの交換を行った。

#### 2-2 高度化

磁場吸引力を相殺することにより、真空封止型アンジュレータの駆動架台を軽量・コンパクト化するための研究開発を行っている。2016年度は、吸引力を相殺するための反発磁石を取り付けたアンジュレータ磁石列を新規に開発した架台に取り付け、アンジュレータとしての磁場性能評価を行った。この結果、主磁石列と反発磁石列の相対的な位相偏差に依存する剪断力が生じることがわかった。位相偏差を補正した状態で磁場性能の計測を行った結果、アンジュレータの性能指標である位相誤差を3度以内に抑制可能であることが確認された。

### 3. フロントエンド

#### 3-1 改造・保守作業

##### (1) 劣化ケーブルの交換

2015年度より進めている建設初期ビームラインの経年劣化対策として、2016年度はBL09XU、BL39XU、BL41XUの収納部内ケーブルの交換を行った。その中で、特にベリリウム製前置スリット下流周りのケーブル損傷が顕著であったため、ケーブル交換後に鉛遮蔽板を設置した。

##### (2) 高熱負荷機器損傷調査

高熱負荷機器の経年劣化状況確認のためBL09XU/アブソーバ受光部(Glidcop製、約20年間使用)を取り外し、最新仕様の一体型マスク・アブソーバに置き換えた。放射光照射による材質変化の有無をマイクロ観察、硬さ分布、転位密度、格子歪み等から調査した結果、受光パワーが最も高い部位と極めて弱い側端部の間で顕著な差異は認められなかった。

##### (3) BL43LXUにおける光位置モニターの補正係数測定

BL43LXUの定点観測Gap値が8.3 mmに変更されたことに伴い、各3台のセグメントについてXBPM補正係数を再測定した。

#### 3-2 高度化

##### (1) フロントエンド出射ビーム用プロファイルモニターの開発

CVDダイヤモンド薄膜のフォトルミネセンスを利用したフロントエンド出射ビーム用プロファイルモニターの開発を進めている。2016年度は垂直方向の強度プロファイルを脱フラット化するためのフィルター材(ジルコニウム)の過渡熱解析を実施するとともに、パルスモータ駆動式フィルターやLabVIEWを用いた画像収集システムを含む装置一式をBL13XUに整備した。なお本成果について誌上発表を行った「Review of Scientific Instruments, 87, 083111 (2016)」。

##### (2) 高熱負荷機器用銅材料の内部残留歪み評価

2016年度は約300°Cで1.1%から4%の圧縮歪みが付与されたGlidcopについて回折プロファイルの測定を行い、転位密度の導出を行った。フーリエ解析法による解析の結果、転位密度は $5.7 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ から $8.0 \times 10^{14} \text{ m}^{-2}$ となり、ひずみの増加に対して転位密度の増加は緩やかであることが分かった。

##### (3) パルス・モード計測型光位置モニターの開発

放射光ビームの光軸変動をパルス毎に計測することを

目指した光位置モニターの開発を進めている。2016年度は、総合動作試験を実施するために、従来型XBPMの機能もあわせ持つ実証機を設計・製作し、BL02B1フロントエンドに設置した。

#### 4. 光学系・輸送系

##### 4-1 標準型X線二結晶分光器の安定運用のための改良と老朽化対策

アンジュレータビームライン用分光器の振動対策として、冗長な第一結晶ティルトステージの排除と、第二結晶ティルトステージの高剛性化を進めた。2つの従来型ティルトステージを連結して高剛性試験を行い効果が確認されたため、ガイドレールを大型化した上で、間隔を拡大した新版を製作した。また第二結晶は熱負荷が小さいので、液体窒素の流量を絞ることで第二結晶の振動の抑制が期待される。具体的には、分光器の真空槽内で配管を1/2インチと1/4インチのチューブに分岐し、1/2インチを第一結晶の冷却に、1/4インチを第二結晶の冷却に使用した。低振動配管の内部構造を抜本的に見直し、1/4インチ配管における低振動性と低圧力損失を1/2配管と同様に両立可能なフレキシブルチューブの開発に成功した。これらの改造をオフラインで試験し良好な結果を確認した上で、2017年3月に4ビームライン(BL19LXU、BL20XU、BL29XU、BL41XU)に導入した。このうち、BL20XUの分光器は機構部品の老朽化が進んだ上、一部部品の調達に困難があったため分光器本体を更新し、老朽化対策と安定化対策を合わせて行った(図1)。

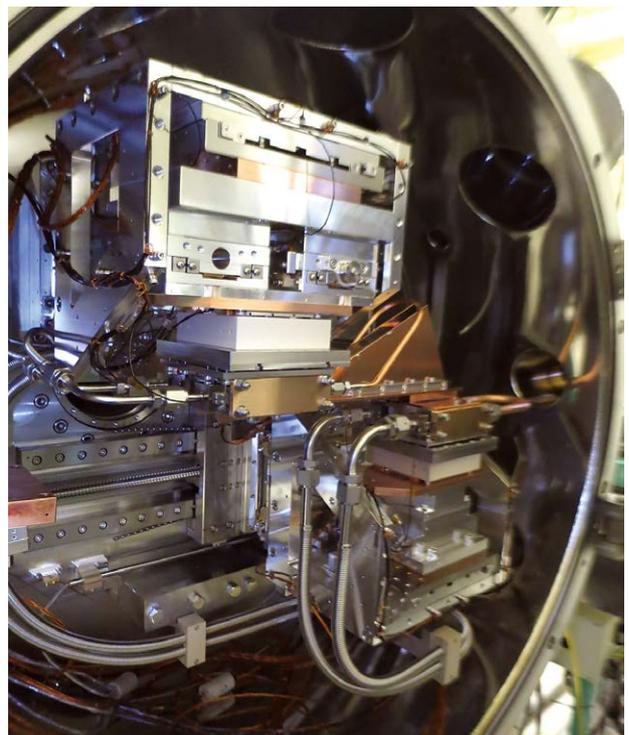


図1 新規製作のBL20XU分光器

従来、分光結晶の液体窒素冷却ではインジウム箔が熱伝達材として使用されていた。レーザー照射試験装置でのオフラインテストと、BL20XUでの試験運用にてカーボンシートの優位性が認められ、先の4ビームラインに加え、BL35XU、BL39XUでも熱伝達材をインジウムからグラファイトシートに変更した。

BL39XUにおいて、放射光照射開始時の大きなドリフトが観測された。これは第一結晶からの散乱線により、第二結晶ホルダの一部の部品が熱膨張するためと推定された。結晶ホルダに散乱線シールドを取り付けた結果、ドリフトは大幅に低減した。結晶交換に合わせて順次シールドを導入している。

偏向電磁石ビームラインBL32B2の分光器にエラストマーチューブによる配管の平滑化とアキュムレータによる脈動吸収を行い、振動を低減させた。

液体窒素循環装置の定期保守と、分光器3台 (BL10XU、BL40B2、BL46XU) の動作確認および定期保守 (グリスアップ) を行った。

#### 4-2 ミラー光学系の高性能化

##### (1) KBミラー集光光学系の高密度化と表面汚染対策改造

BL39XUでは、2010年度より大気圧のHe置換雰囲気下で使用される100 nm集光KBミラー光学系が利用されてきたが、ミラー表面汚染の対策や集光光子密度の増大への要請が高まった。そこで2015年度より100 nm集光あたり従来比20倍の集光光子密度向上を目的とした光学系の改良を実施した。本改良では、KBミラーの作動距離を100 mmと従来と同じ長さに保ちつつ、垂直方向集光ミラーと水平方向集光ミラーの配置を変えることで、前者の焦点距離を従来よりも短く配置した。その結果、仮想光源を使用せず発光点を直接集光し、100 nmサイズの高フラックスビームが得られる。さらに、ミラーの姿勢調整を高真空環境下で行える装置とすることで表面へのコンタミ付着の防止を図った。2015年度末までに構築した高真空対応KBミラー集光調整機構(図2)を利用して、2016A期開始時に光学系の立ち上げ調整、および、集光ビームの評価を実施した。結果、集光ビームサイズ：垂直方向140～115 nm (FWHM)×水平方向93 nm (FWHM)、集光光子数： $2.5 \times 10^{11}$  photon/sを実測し、計画通り従来と比較して集光光子密度の20倍向上に成功した。垂直方向のビームサイズは現在のところ二結晶分光器の振動に制約されているため、上述の高安定化対策を計画している。また、2016A期よりユーザー提供を開始し、高真空環境下 ( $10^{-6}$  Pa台前半) のミラーチャンバー圧力にて運用し、コンタミ付着が防止されていることを確認した。

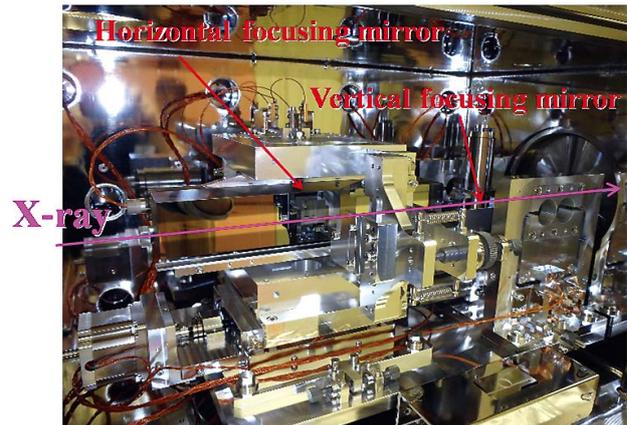


図2 BL39XU超高真空対応KBミラー集光調整装置

##### (2) 軟X線ビームライン用の高効率サブミクロン集光ミラーの開発

軟X線ビームラインで使用されている高分解能回折格子分光器は出射スリット後の縦方向の発散角が大きく、後置集光ミラー位置におけるビームサイズは10 mm (縦) ×数 mm(横) に達する。十分な開口で高効率かつ大きな縮小倍率で集光する光学系として、部分Wolterミラーの設計検討を行った。ミラー面は各焦点を共有する軸対称の部分回転楕円面と部分回転双曲面で構成される。Ray traceによるシミュレーションなどから、この光学系はアライメントエラーに寛容でコマ収差が小さく、ミラー調整軸を半減できることが確認された。加工・計測技術の現状と開発項目を精査した上で、使用する実験装置を念頭に、ミラーの表面形状を各種検討した。一枚の基板上に部分回転楕円と部分回転双曲面を作り込むことが可能な光学パラメータの最適化を行った。2017年度には、このパラメータに基づくミラーの加工と計測技術の高度化に取組みながらミラーを試作し、放射光を用いた評価実験を行う計画である。

#### 4-3 光学素子評価と高度化

##### (1) 大きな入射角分布を有するミラー開発のための形状計測装置の開発

市販の可視光干渉計では測定が困難な、小さな曲率半径や大きな入射角分布を有する非球面ミラーを開発することを目標として、X線ミラー用の光学プローブ走査型の表面形状計測装置の開発を行った。集光ビーム強度の増大や、集光ビームサイズの微小化を図るためには、5 mrad以上の大きな入射角分布を持ち、数 mなどの小さな曲率半径の表面をもつ大開口X線ミラーを1 nm精度で評価することが求められる。本計測装置の特徴として、 $\pm 100$  mrad以上の傾斜した面を測定可能である色収差変位センサを零位法で使用する。2015年度に構築した表面形状計測装置を用いて、2016年度は実際の楕円

筒面形状X線ミラーを作製するにあたり、ミラー送りステージの運動誤差や、変位センサの計測回数と計測再現性、平面ミラーを利用したフィゾー干渉計との比較計測・システムエラーの評価を実施した。開発ターゲットとした $\pm 5$  mradの入射角分布をもつ楕円筒面形状X線ミラーを用いて置き直し計測再現性1.3 nm (RMS)を達成し、X線ミラー開発に利用した。

## (2) 高精度ミラーコーティング技術の開発

サイト内に整備したコーティング装置を用いてビームラインで使用されるミラーへのコーティングを行っている。2016年度は、600 mm長の集光ミラーやBL27SUの回折格子についてコーティングを行った。また、高精度光学素子コーティング技術の開発として、コンパクト、高スループットな集光光学系が実現可能な多層膜集光ミラーの開発を進めている。このミラーに使用される面内で膜厚傾斜を有する多層膜の試験成膜と評価を行った。

コーティング前の基板表面の有機物除去を目的とした、エキシマランプ光源による洗浄装置の立上と試験を行った。有機物除去の試験として、炭素を50 nmコーティングしたSiウエハにエキシマランプを照射し、コーティングした炭素が除去可能なことを確認した。また、放射光分光結晶として長時間使用されたSi結晶の表面に付着した汚染を除去可能なことを確認した。

## 4-4 輸送系機器

### (1) 標準排気ユニットの粗排気ポンプ更新に向けた評価

X線ビームラインの排気系に組み込まれている粗排気ポンプの老朽化対策として、2015年度に現行機種のほか新規2機種をオフラインにて比較検討した。新機種ではノイズレベルや到達真空度は変わらず、騒音レベルを10%以上低減でき、保守周期は3～5倍程度長くなると見込まれる。2016B期より、7本のビームラインの光学ハッチに試験的に導入した。新たなポンプは2機種ともインバーター制御のため、電気ノイズ、放射線耐性を考慮し、従来型ポンプをバックアップ機として配置し、万一のトラブル時に速やかに回復できる体制を整備した上で試験を開始した。2016年度内において、利用実験に支障なく運転が継続されている。引き続き、電氣的ノイズ、振動・騒音、放射線耐性及び発塵状況について評価を行う。

### (2) 標準排気ユニットの主排気ポンプのイオンポンプ化に向けた評価

X線ビームラインの排気系はターボ分子ポンプと粗排気ポンプで構成されている。これらは、大気開放後の立上げには必須であり、光学系・輸送系機器の真空への要請を寛容とする。しかし、いずれも回転型の排出ポンプ

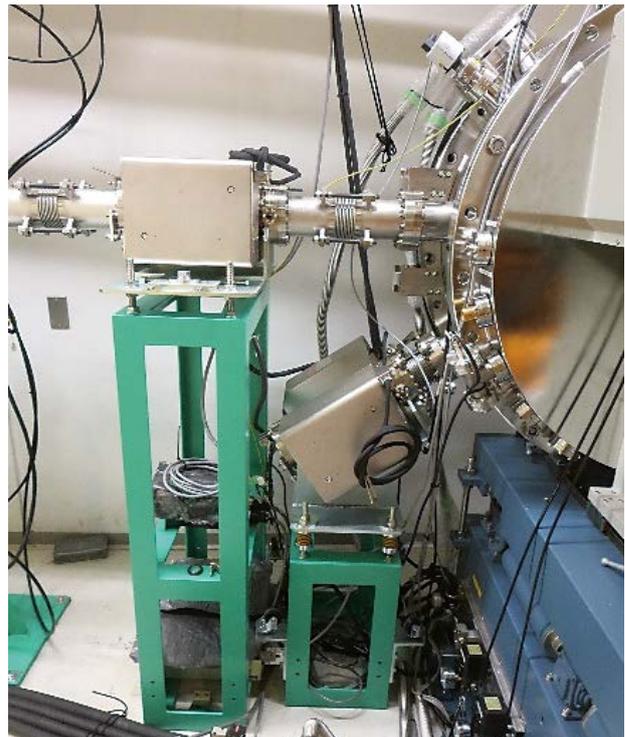


図3 二結晶分光器の主排気ポンプとして試験導入した2台のイオンポンプ

であるため、光学ハッチ内の振動源、騒音源、発熱源となり、また粗排気ポンプについては機種・運転時間に依りて1～3年程度で保守が必須である。そこで、高真空状態が維持されることを前提に主排気ポンプとして溜め込み型となるイオンポンプの採用を検討した。粗排気後に排出型ポンプを停止できれば、これら回転ポンプの保守コスト低減、低振動化、省エネ化、温度安定化につながる。過去の真空度の履歴をいくつかのビームライン・セクションに対して調査・検討し、イオンポンプ化の試験導入を開始した。既設機器をできる限り活用することを念頭に貫通型の溜め込み型のイオンポンプ(300L/s)を配置した(図3)。2017年度に試験運転を開始する予定である。

## 5. 遮蔽

### 5-1 ハッチハードウェアメンテナンス

(1) 以下のビームラインハッチに関して、点検、不具合対策、部品交換などの保守を行った。

BL01B1、BL05SS、BL12B2、BL12B2、BL14B2、BL22XU、BL26B1、BL28B2、BL29XU、BL38B1、BL39XU、BL40B2、BL41XU、BL43XU、BL47XU

(2) 以下のビームラインに関して、改造申請への対応等を行った。

BL19LXU、BL24XU、BL32B2、BL36XU、BL41XU

(3) 以下のビームラインに関して、FEスリット開口制限への検討、助言・指導、実施手順手配策定を行った。  
BL09XU, BL13XU

(4) 共用ビームラインに対し、自動扉リニアガイドおよび下流シャッター等の摺動部点検・グリスアップを各ビームライン担当者に指示し実行した。また、この点検の情報を専用ビームライン等に周知し、必要な指導を行った。

(5) 10月21日に発生した地震の影響調査として、遮蔽ハッチの扉正常動作を確認した。

#### 5-2 申請時遮蔽計算

第40次変更許可申請において、BL05SSの利用可能な最大蓄積電流値の下方変更、挿入光源の変更及び逆コンプトン散乱の利用廃止に伴う線量評価の見直しを実施した。また、BL32B2の実験ハッチ新設及びBL36XU実験ハッチ下流への検出器遮蔽体設置に伴う線量評価の見直しを実施した。第41次変更許可申請においては、BL19LXU出力の上方変更に伴う線量評価の見直しを行った。

#### 5-3 ビームライン放射線漏洩検査

フロントエンドのXYスリット最大開口の変更に伴う放射線漏洩検査をBL13XUにて、また、BL24XUの実験ハッチB1拡張に伴う漏洩検査を実施した。

#### 5-4 放射線測定及び手法の開発

ガフクロミックフィルム読み取り装置の保守を引き続き行った。また、電子線量計による中性子線量の時系列測定を、運転モード毎に蓄積リング収納部天井にて行った。

JASRI 光源・光学系部門

田中 隆次、高橋 直、大橋 治彦

竹下 邦和、成山 展照、後藤 俊治