

次世代放射光施設の共用ビームライン

高橋正光、今園孝志、宮脇淳、堀場弘司、大坪嘉之
量子科学技術研究開発機構 次世代放射光施設整備開発センター

1. はじめに

東北大学新青葉山キャンパス内に現在建設中の次世代放射光施設では、2024年度から運用が開始される第1期のビームラインとして、10本が整備される予定である。そのうち7本は、光科学イノベーションセンターを代表機関とし、宮城県・仙台市・東北大学・東北経済連合会の5者から構成される地域民間パートナーが整備するコアリションビームラインである。他の3本は、共用法に基づき、課題公募・成果公開の原則に基づいて運用される共用ビームラインで、国（量研）によって整備が進められている。これらのビームラインのラインナップは、2018年12月から2019年5月にかけて開催された「次世代放射光施設ビームライン検討委員会」（委員長・有馬孝尚東京大学教授）において議論されるとともに、2018年12月から2019年2月にかけて産官学の研究者・技術者からの意見募集も行われた。その結果、共用ビームラインとして軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱（RIXS）ビームライン、軟X線ナノ光電子分光（ARPES）ビームライン、軟X線ナノ吸収分光（XMCD）ビームラインが整備されることが決定された。共用ビームラインにおける利用研究は、次世代放射光施設利用研究検討委員会（委員長・雨宮慶幸JASRI理事長）およびその下に2019年6月から2020年3月まで設置された各ビームラインに関するワーキンググループにおいて、共用ビームラインで実施すべき最先端研究の目標設定や、そのために必要な光源性能、エンドステーション測定装置の仕様等が議論された。続いて、2020年7月には、共用ビームライン光学系ワーキンググループが設置され、次世代放射光施設整備開発センターが設計したビームライン光学系について、機構外の専門委員による評価・助言を受けるという形で検討が進められてきた。

本稿では、現時点での検討内容に基づいた3本の共用ビームラインの目的及び光源、光学系の概要を報告する。ビームライン利用研究とそれに必要な装置については、2020年3月に次世代放射光施設利用研究検討委員会がとりまとめた報告書「国が設置する3本のビームラインを利用した 国が設置する3本のビームラインを利用した最先端研究について」がWebで公開されており[1]、また、ビームライン光学系についても、2021年3月に次世代放射光施設利用研究検討委員会に提出された報告書が近く公開される予定なので、詳細はこれらを参照されたい。なお、次世代放射光施設は現在も進行中のプ

プロジェクトである。ビームラインの構成や仕様に、今後変更の可能性があることはご了承願いたい。

2. 共通事項

本施設に設置可能なビームラインは、アンジュレータビームライン 14 本、多極ウィグラビームライン 14 本の計 28 本である。蓄積リング全体で 16 か所ずつ存在する長直線部、短直線部のうち、各 2 か所は、蓄積リングに電子ビームを入射するための機器との干渉や、RF 加速空洞および電子ビーム診断用のモニターの設置のため、ビームラインとしては利用できない。ビームラインの番号は、線型加速器からの電子ビーム輸送部付近にポートを持つアンジュレータビームラインを BL01U とし、そこから反時計回りにビームラインに番号を振り、アンジュレータ、多極ウィグラの順に、BL02U、BL02W のように定義されている。

実験ホール外周部床のエクспанションジョイントまでの長さは、光源から約 61 m、遮蔽壁から約 43 m が標準で、これがビームラインの長さの上限となる。ただし、線型加速器に近い BL01U、BL14W、BL15U 及び BL15W については、これよりもビームラインの長さは短くなる。一方、実験ホールの形状により、BL02U、BL02W、BL03U 及び BL03W には、標準よりも長いビームラインが設置できる。これらのビームラインはさらに、将来計画とされている拡張建屋まで延伸することにより、それぞれ 135 m、127 m、120 m 及び 87 m まで延長が見込まれている。

実験ホール内は、加速器トンネル天井部に天吊り設置した空冷式パッケージ空調機を使用して冷暖房・換気を行う。遮蔽壁上部の実験ホール側にノズル型吹出口を設置し、ホール内遠方まで冷温風を吹き出すようにするとともに、実験ホール外周部にも補助的に床置型パッケージ空調機を設置する。温湿度条件は $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、 $50\% \pm 10\%$ となっている。超高分解能を狙うビームラインなど、より高精度な温調が必要な場合は、ハッチ内などに局所的な温調を追加することを検討している。

本施設用のフロントエンドは、SX/EUV 型、IVU 型、MPW 型の 3 種類が用意されているが、共用ビームライン 3 本にはすべて SX/EUV 型が用いられる。フロントエンドと加速器側との取り合い点は、蓄積リングの光取り出し管終端の手動式オールメタルゲートバルブで、光源から 8.3 m の位置にある。光源から 14.838 m 地点に設置される XY スリットによって、光源の水平・鉛直方向の取り込み角は、使用される最大 K 値における基本波の 4σ の発散角に制限される。フロントエンドシールド壁貫通管は、加速器収納壁を貫通し、下流の実験ホール側（光学ハッチ内）に、I0 モニターとゲートバルブが設置される。ゲートバルブの ICF70 フランジ端がビーム輸送部との取り合い点となり、光

源からフランジ面までの距離は 19.002 m である。実験ホール床面からフランジ中心までの高さは 1400 mm である。

放射光取り出しポート近くの収納壁ラチェット部もしくは実験ホール外周部には、ビームラインで使用される電気、圧縮空気、循環冷却水、ヘリウム回収ラインなどのユーティリティーが設けられる。液体窒素は、基本建屋に隣接して設置される 20m³ のコールドエバポレータから、実験ホールに引き込まれる真空断熱配管を通じて、必要とするビームラインに供給される。

本施設では、実験ホールを非管理区域とすることを目指している。日本の放射光施設で実験をするためには、放射線業務従事者登録が必須であるが、海外の放射光施設では、実験ステーションは放射線非管理区域となっているのがむしろ普通であり、一般ユーザーは放射線業務従事者である必要はない。放射光実験が従事者登録なしでできることは、放射光実験のハードルを劇的に低くするものであり、学術・産業を問わず、ユーザー層の大幅な拡大や研究スタイルの刷新など大きなインパクトがあると考えている。次世代放射光施設における放射光実験を放射線作業従事者登録なしでできるようにするためには、放射線管理上のさまざまな課題をクリアする必要があるが、技術的な必要条件として、光学ハッチから実験ホールへの漏洩線量を管理区域境界の線量限度 1.3 mSv/3 ヶ月 (520 時間) = 2.5 μ Sv/h の半値 (1.25 μ Sv/h) 以下とすることを次世代放射光施設では課すこととしている。光学ハッチは 3 本の共用ビームラインでほぼ共通で、側壁 6.0 m、後壁 2.84 m、高さ 3.3m の大きさである。光学ハッチ内の補助遮蔽体の配置も考慮したモンテカルロ放射線輸送計算コード PHITS による計算及びストリーミング計算により、光学ハッチの側壁および後壁の漏洩線量 (光子線量と中性子線量の合算) は遮蔽設計値の 1.25 μ Sv/h を十分に下回ることを確認している。

3. RIXS ビームライン

3-1 目的

RIXS は、軟 X 線を共鳴条件で物質に照射した際、散乱前後でのエネルギー変化を観測することによって、物質中の低エネルギー励起を直接的に観測できる手法である。その測定対象は、電子状態そのものを反映する結晶場や軌道内遷移、電荷遷移励起などの幅広いエネルギー範囲の素励起だけでなく、固体中の磁気励起やフォノン、分子系の振動励起などにも及ぶ。また、散乱過程ではエネルギーだけでなく、運動量の授受も起こるため、散乱角を変えることによって、固体中の集団励起の分散測定や分子中の励起の対称性を決定することも可能である。さらに、バルク敏感であり、試料の状態や外場の存在下による影響を受けることもないので、測定の対象が幅広い。海外の放射光施設は、

近年、長尺のビームラインと 12–15 m の大型の RIXS 分光器によって構成される超高分解能 RIXS ビームラインが多数建設されている[2,3]ものの、測定対象が固体試料に限られている。これに対して本施設の RIXS ビームラインでは、世界最高の超高分解能最高のエネルギー分解能である $E/\Delta E > 1 \times 10^5$ を目指しつつ、溶液や電池などへの応用を含む様々な試料環境の導入を予定している点に特色がある。

本施設の RIXS ビームラインの諸元を表 1 に示す。エネルギー分解能 $E/\Delta E > 1 \times 10^5$ を達成するためには、ビームライン光学系、RIXS 分光器それぞれで $E/\Delta E > 1.5 \times 10^5$ のエネルギー分解能が必要である。RIXS 分光器の高分解能化が進むにつれ、計測時間がエネルギー分解能を律速する一つの要因となってきた[4]。そこで、本ビームラインでは、計測効率の向上のため、2D-RIXS[5-7]の分光方法を採用する。これにより、計測時間が現実的な長さにおさまることはもとより、装置が安定している時間内に測定できることから、高分解能化が実現する。

3-2 光源

本ビームラインでは、3d 遷移金属の $L_{2,3}$ 端をメインターゲットに、C, N, O の K 端や 4d 遷移金属の $M_{2,3}$ 端、ランタノイドの $M_{4,5}$ 端をカバーする光子エネルギー範囲 250–2000 eV を必要とする。これを満たす挿入光源として、周期長 56mm の APPLE-II アンジュレータを採用する。最小ギャップ 15mm のときの偏向定数 (K 値) は 4.62 である。APPLE-II アンジュレータでは、4 本の磁石列の相対位置を変化させることによって偏光制御が可能である。本ビームラインでの偏光モードは、水平直線偏光、垂直直線偏光、左右円偏光のいずれかで静的に運用することを予定している。

表 1 BL02U 諸元

挿入光源	APPLE-II 型アンジュレータ 周期長 56 mm 磁石列全長 3976mm 最初ギャップ 15mm 最大偏向定数 (K 値) 4.62
エネルギー分解能 ($E/\Delta E$)	1000 eV 以下で 1.5×10^5 以上
偏光 (エネルギー範囲)	水平・垂直直線 (250–2000 eV) 左右円 (250–1500 eV)
フラックス@試料	$>10^{10}$ photons/s@ $E/\Delta E > 150,000$ ($2 \mu\text{m}$ のスリットを仮定)
ビームサイズ@試料	$<1 \mu\text{m}(\text{H}) \times <\sim 5 \mu\text{m}(\text{V})$ (鉛直方向のサイズは単色光相当の時)

3-3 光学系

本ビームラインは、BL02U に設置される。柱などの建屋の構造による制約のため、ビームラインは ID 光軸と平行に全長~76 m (光源から試料位置まで)、RIXS 分光器の全長 (発光点から検出器) が最大~12 m に限定される。この条件のもと、エネルギー分解能 $E/\Delta E > 1.5 \times 10^5$ の目標を達成するために、入射スリットからの発散光を不等刻線間隔平面回折格子に照射する偏角可変分光器を採用し、回折格子からの分散光を試料に照射して利用する配置を取る。表 2 にビームライン光学系の構成を示す。前置光学系を構成する M0 と M1 によって、それぞれ鉛直・水平方向を入射スリット S1v、S1h に集光する。S1v を仮想光源として、M2 と G から成るビームライン分光器に発散光を照射し、試料上に鉛直方向にエネルギー分散、集光させる。超高分解能 $E/\Delta E > 150,000$ を達成するための中心刻線密度 1800 本/mm の回折格子とともに、高分解能、中程度の分解能用に 1000 本/mm、500 本/mm を用意する。中心刻線密度 1800 本/mm の回折格子を用いると、出射スリット幅に $2 \mu\text{m}$ を仮定したとき、1000 eV 以下でエネルギー分解能 $E/\Delta E > 1.5 \times 10^5$ 、試料上でのフラックス $\sim 6 \times 10^{10}$ photons/s が得られる見込みである。M3 は試料の直前に配置し、試料上に水平方向の集光を行う。これによる集光サイズは、約 $0.7 \mu\text{m}$ であり、RIXS 分光器で超高分解能を達成するために必要となる $< 1 \mu\text{m}$ の条件を満たす。

ビームライン光学系の評価においては、ミラーや入射スリットなどの光学素子の不安定性を考慮に入れた場合に、エネルギーのピーク位置や分解能にどのように影響が出るか、光線追跡による検討も実施した。その結果、M0、M1 に求められる安定度は、M2、G、M3 と比較すると高くないことが示されたが、熱負荷や水冷による影響の中で安定させるには、相応の対策が必要である。一方、M2、G では、特に反射面に垂直な方向の位置ずれ ΔZ および入射角のずれ $\Delta \theta X$ に対する要求が高く、超高エネルギー分解能を

表 2 BL02U 光学系の構成

素子	種類	冷却	母材	コーティング
M0	サジタル円筒ミラー	水冷	Si	Au
M1	ベント円筒ミラー	水冷	Si	Au, Si
S1v, S1h	入射スリット	水冷		
M2	平面ミラー	水冷	Si	Au
G1	回折格子 N1800	水冷	Si	Au
G2	回折格子 N1000	水冷	Si	Au
G3	回折格子 N500	水冷	Si	Au
M3	Wolter Type I ミラー		Si or SiO ₂	Au

達成するために、設置環境も含めた慎重な対策と技術開発が求められる。M3 については、試料上の集光位置への影響が大きい。

光源から光学素子に加わる熱負荷は、熱ひずみによるスロープエラーや不安定性を引き起こす主要な要因となる。そこで、熱負荷が最も高い水平直線偏光のときに、M0、M1、M2 と G 以降で吸収される熱量を見積もった。水平直線偏光の 250 eV では、M0 への入熱が 210 W と大きく、超高分解能への影響が考えられる。しかし、実際の運用では 500–1000 eV の利用が中心と想定され、熱負荷が比較的小さいこと、また、利用頻度の低いと想定される低エネルギーで超高分解能への熱負荷の影響が大きいときには円偏光を利用する選択肢があることから、水冷で対応することとした。M0、M1 の入射角は、M2 と G への入熱を 10 W 以下にすることを目安として、 88.8° を選択し、M1 のコーティングを Au と Si で塗り分けて、エネルギーごとに使い分ける。

3-4 エンドステーション

RIXS 分光器には、測定効率を向上させるため、2D-RIXS を採用する[5-7]。ビームラインの分光器が鉛直方向を分散方向とするのに対し、RIXS 分光器では水平方向を分散方向とする不等間隔回折格子を用い、二次元検出器上に集光させる。これにより、二次元検出器上では、鉛直方向が入射エネルギー依存性、水平方向が発光エネルギーに対応した二次元データが得られ、通常の RIXS に比べ、約 10 倍の測定効率が望める。試料からの発光・散乱をできるだけ大きな立体角で取り込んで結像するために、試料の近い位置にウォルターミラーを配置する。

試料については、短期的には、超高エネルギー分解能が観測に直結し、かつ試料環境として技術が確立している固体試料を対象とする。順次、セルなどの測定環境の開発を進め、原子・分子、触媒、電気化学系、デバイスなどの測定ができるようにしていく計画である。試料環境の開発については、国内での研究が多数あり、蓄積された多くのノウハウが活用できる。

4. ARPES ビームライン

4.1 目的

本ビームラインは、30 nm 以下のナノ集光ビームを用いて、スピン分解された固体のバンド構造をエネルギー分解能 1 meV (50 eV) で直接観測する軟 X 線 ARPES 計測に供することを目的としている。表 3 にビームラインの諸元を示す。ナノ集光 ARPES では、微小ビームスポットを生かすことで、微小な試料等の測定対象物質範囲の大幅な拡大が見込まれるのみならず、空間的に不均一な電子状態を持つ物質群の局所的な電子状

態の情報を得ることが可能となる。また、微小デバイス動作時の局所電子状態および化学結合状態の解析[11]により、デバイスの動作原理の解明や機能向上に密接に関係する情報が得られる。

現在、欧米4放射光施設においてフレネルゾーンプレート（FZP）を用いた数百 nm オーダーのナノ集光 ARPES 装置が稼働しているのに対し、本ビームラインでは、次世代技術である回転型ウォルター鏡とマルチチャンネルスピン検出器を導入し、従来比で2桁以上の高フラックスなナノ集光スピン分解 ARPES の実現を目指す。また、汎用のマイクロ集光 ARPES 装置をブランチビームラインとして併設し、高スループット実験・オペランド計測に供する。

4.2 光源

本ビームラインでは50eVの低エネルギーの利用が必要であることから、周期長75mmのAPPLE-II アンジュレータを採用する。偏向定数は最大6.6である。偏光モードは水平直線偏光、垂直直線偏光、左右円偏光の4つのいずれかで静的に運用することを予定しており、動的な偏光スイッチングは行わない。

4.3 光学系

ビームライン光学系はエネルギー分解能と試料上の集光サイズを重視し、エネルギー範囲50-1000 eVで分解能 $E/\Delta E$ が 5×10^4 以上となるように設計した。分光器に等刻線間隔平面回折格子に平行光を照射する入射スリットレス可変偏角平行化分光器(cPGM)を採用したことにより、分解能、フラックス、発散角の選択の自由度が高くなった。

光学系の構成を表4に示す。光学ハッチ内のM0、M1はそれぞれ光源から20 m、22

表3 BL06U 諸元

挿入光源	APPLE-II 型アンジュレータ 周期長 75 mm 磁石列全長 3975mm 最小ギャップ 15mm 最大偏向定数 (K 値) 6.6	
エネルギー分解能 ($E/\Delta E$)	$3 \times 10^4 - 5 \times 10^4$	
偏光 (エネルギー範囲)	水平・垂直直線 (50-1000 eV) 左右円 (50-1000 eV)	
フラックス@試料	$>10^{11}$ photons/s/0.01%BW	
ビームサイズ@試料	A ブランチ (ナノ集光)	<30 nm
	B ブランチ (マイクロ集光)	$\sim 1 \mu\text{m}$

m の距離に設置される。両ミラーをリング側への水平振りとすることで、ナノ集光光学系の構築に必要なビームライン長を確保した。M2-G 間の鉛直方向のオフセットは 20 mm で、出口スリット S2 および試料位置におけるビームの高さは床面から 1,420 mm である。回折格子は刻線本数 1200 本/mm (N1200) と 600 本/mm (N600) の 2 種類とした。パラメータ $C_{ff} = \cos \beta / \cos \alpha$ (α は入射角、 β は回折角) を自由に決めることで分解能、フラックス、発散角を選択できることが cPGM 分光器の特長のひとつである。たとえば、 $C_{ff} = 4.31$ の高分解能 (HR) モードと $C_{ff} = 2.35$ (最小値) の高フラックス (HF) モードにおいて、分解能はそれぞれ 6×10^4 と 3×10^4 が見込まれる。さらに、回折格子には深さの異なる溝パターンを 3 種類刻線し、N1200 だけで 50-1000 eV をカバーできるように広帯域化を図った。一方、N600 は低エネルギー範囲 (50-600 eV) をカバーし、オペランド計測向けにフラックスを重視し設計した。エネルギー 50 eV のとき、 $C_{ff} > 1.9$ で分解能 1.6×10^4 以上、 $C_{ff} > 3.16$ で分解能 3×10^4 以上が期待される。M3 は A および B ブランチにビームを排他的に振り分けるために用いる。A ブランチの試料位置におけるフラックスは、光子エネルギー 50 eV で 10^{11} photons/s/0.01%BW 以上と見積もられる。

スロープエラーによる分解能への影響を光線追跡により評価した。水平方向に反射させる M0、M1、M3 はスロープエラーに対して比較的鈍感である。ただし、M0 のスロープエラーが $1 \mu\text{rad}$ 以上になると、水平方向の光源サイズが増大し、フラックスが低下する。一方、鉛直方向に反射させる M2 と G はスロープエラーに対して敏感であるため、分解能 $E/\Delta E > 5 \times 10^4$ を達成するには、スロープエラーを $0.2 \mu\text{rad}$ 以下に抑える必要がある。

本ビームラインで採用される周期長 75mm の APPLE-II アンジュレータによる放射パワーは、直線偏光モードにおける 50 eV の時が最も大きく、第一光学素子である M0 への入熱は約 900W に達する (蓄積電流 500mA とした場合)。ARPES を目的とするビー

表 4 BL06U 光学系の構成

素子	種類	冷却	母材	コーティング
M0	タンジェンシャル円筒ミラー	液体窒素冷却	Si	Au, Ti, Si
M1	サジタル円筒ミラー	水冷	Si	Au
M2	平面ミラー	水冷	Si	Au
G1	回折格子 N1200	水冷	Si	Au
G2	回折格子 N600	水冷	Si	Au
M3A	サジタル円筒ミラー		Si	Au
M3B	サジタル円筒ミラー		Si	Au
S2	出口スリット ×2			

ムラインでは、光子エネルギー50eVは使用頻度の高いエネルギーであり、熱ひずみによる性能低下は避けなければならない。そのため、M0の冷却には液体窒素冷却方式を採用し、母材であるシリコンの液体窒素温度における非常に高い熱伝導率と小さな熱膨張率によって、熱ひずみによるスロープエラーを抑制することとした。一方、M0以外の光学素子M1、M2、Gは水冷である。M2への熱負荷は、M0に比べると小さいが、エネルギー分解能への影響が大きいため、M2への入熱はできるだけ軽減する必要がある。そのため、M0のコーティングをAu、Si、Tiで塗り分ける。熱負荷の大きい低エネルギー側ではSiを用い、100 eV近傍のSi-L吸収端ではTiを選択する。高エネルギー側ではAuに切り替える。これにより、光子エネルギー50eVにおけるM2への入熱は、Auコーティングだけとした場合の約1/3に相当する10W程度に抑えられる。

本分光器は入射スリットレスであるため、光源の不安定性がエネルギー分解能に影響する懸念がある。光線追跡を用いた評価の結果、鉛直方向の光源サイズ Σy の10%までの増加であれば、目標分解能を下回らないことが確かめられた。光源位置の水平方向の位置ずれはS2上で水平方向の位置ずれを引き起こし、フラックスを低下させるだけでなく、S2上の鉛直方向の光源サイズを増加させるため、分解能も低下させる。また、光源の鉛直方向の位置ずれも分解能を低下させる要因となりうる。光子エネルギー50eVのとき、光源位置が鉛直方向に1 σ 分だけシフトした場合、約0.2 meVのエネルギーシフトにつながる。電子ビーム軌道の安定性はビームサイズの10%程度と想定されており、光学系への影響は許容範囲である。

4.4 エンドステーション

ナノ集光ARPESを行うAブランチでは、最終的には、30 nm以下の回折限界集光を目指している。その実現には、前段にリング集光系を備えた回転体ウォルター鏡の全面照射等の新技術を活用した高N/A集光光学系が不可欠である。しかし、回転体ウォルター鏡は発展途上の技術であることから、2024年の供用開始時点では、現在のところ、作り込み型部分ウォルター鏡を用いた400 nm程度の集光を計画している。発展型の集光光学系にスムーズに移行できるように、出口スリットと集光ミラーの間に平面鏡を追加する等の工夫を行っている。ナノ集光ビームを生成するミラーのワーキングディスタンスは20 mm程度と短く、ARPES装置内に設置される。

Bブランチのマイクロ集光光学系には、ARPES装置とは独立の外部ミラー真空槽に設置した作り込み型部分ウォルター鏡を用いる。集光特性を光線追跡法で評価した結果では、光子エネルギー50eV、焦点距離300 mmのとき、集光サイズは11 μ m(H) \times 1.6 μ m(V)である。

5. XMCD ビームライン

5-1 目的

本ビームラインは、元素選択的な軟 X 線吸収分光法に基づく X 線磁気円二色性 (XMCD)、X 線磁気線二色性 (XMLD) 等によるダイナミクス計測およびイメージング計測を目的とする。ダイナミクス計測では、高輝度光源の活用による時分割の吸収測定やコヒーレント回折イメージングを行うほか、X 線強磁性共鳴法 (XFMR) およびポンプ・プローブ法によって GHz 領域の超高速測定を実現する。また、イメージング計測では、走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) による 10-20 nm の空間分解能を達成する。これらの計測手法を駆使して、スピントロニクス分野を中心とした時間・空間・元素分解スピンドイナミクス研究および XMCD から XMLD・XLD によるスピン・軌道分極分光への拡張による新規磁性物質・材料研究を展開できるビームラインとする。この目的のため、光源には、偏光制御の自由度が高く、円偏光が利用できるエネルギーも広い分割アンジュレータを採用する。本ビームラインの実験ステーションは、表 5 に示すように、マイクロ集光ビームを利用する 3 ブランチ (A1、A2、A3) およびナノ集光ビームを利用する 1 ブランチ (B) に配置される。

5-2 光源

本ビームラインでは、4 台の周期長 56mm の APPLE-II アンジュレータとその間に設置される 3 台の移相器から構成される分割アンジュレータ [13] が光源に用いられる。分割アンジュレータでは、個々のアンジュレータの偏光モードの組み合わせとその干渉によって、さまざまな偏光を生成することができる。たとえば、1 台目と 3 台目の APPLE-II アンジュレータを水平直線偏光モードで、2 台目と 4 台目の APPLE-II アンジュレータを垂直直線偏光モードで用い、隣り合うアンジュレータからの放射光の位相が 1 台目と 2 台目、3 台目と 4 台目の間で $\pi/2$ 、2 台目と 3 台目の間で $3\pi/2$ となるように移相器を調節すると、全体として円偏光が発生する。位相シフト量を周期的に変化させれば、右回り円偏光から 45 度直線偏光を経て左回り円偏光まで連続的に移行させることもできる。一般に、APPLE-II アンジュレータの磁石列の位相を動的に切り替えて偏光を制御するのは、電子ビームの軌道補正が困難であるために現実的でないが、分割アンジュレータの移相器を用いた偏光制御では、電子ビームに与える変動がほぼなく、100Hz 程度までの高速偏光切替も可能性がある [14]。

分割アンジュレータのもう一つの利点は、高エネルギーの円偏光を生成できることである。周期長 56mm の APPLE-II アンジュレータを円偏光モードで用いた場合、実用的な強度が得られるのは基本波のみで、その上限のエネルギーは 1.2keV 程度である。分

割アンジュレータでは、直線偏光の高次光を使うことで、より高いエネルギーの円偏光を利用することができる。とくに、1.2keV 以上 3keV 程度までのテンダー X 線領域の円偏光が得られることは、本光源の特色である。

5-3 光学系

本ビームラインの光学系は、分解能よりもフラックスを重視した。また、テンダー X 線領域で円偏光が利用できることが本ビームラインの特色であるので、軟 X 線からテンダー X 線まで幅広いエネルギー範囲 (180-2850 eV) をエネルギー分解能 $E/\Delta E = 1 \times 10^4$ 以上でカバーできるようにしている。

ビームライン光学系の構成を表 6 に示す。第一光学素子 M0 は光源から 20 m、第二光学素子 M1 は 22 m に設置される。これらのミラーをリング側へ水平に振る方向に配置することでビームライン全体を長くし、4 ブランチ間のスペースを確保できるようにした。分光器には、ラミナー型不等刻線間隔平面回折格子を用いた入射スリットレス可変偏角 Monk-Gillieson 型分光器を採用した。M2-G 間の鉛直方向のオフセットは 14 mm とし、試料位置におけるビームの高さは床面から 1414 mm である。回折格子は中心刻線本数 600 本/mm (N600) と 150 本/mm (N150) の 2 種類を用意する。N600 だけで 180~2850 eV をカバーするために、同一回折格子上に深さだけが異なる溝パターンを 3 種類刻線するとともに、平面形状の光学素子を Au、Si、Rh で塗り分けることで広帯域

表 5 BL13U 諸元

挿入光源	分割 APPLE-II 型アンジュレータ 周期長 56 mm 磁石列全長 672mm×4 最小ギャップ 15mm 最大偏向定数 (K 値) 4.62	
エネルギー分解能 (E/ΔE)	> 1×10 ⁴	
偏光 (エネルギー範囲)	通常 モード	水平直線 (180–2850 eV) 垂直直線 (250–2850 eV) 左右円 (180–1200 eV)
	クロス モード	水平垂直直線 (180–1200 eV) 左右円 (250–2850 eV)
	偏光切替	移相器により DC-100Hz
フラックス@試料	A1, A2, A3 ブランチ	>10 ¹³ photons/s/0.01%BW
	B ブランチ	>10 ¹⁰ photons/s/0.01%BW
ビームサイズ@試料	A1, A2, A3 ブランチ	20 μm(H)×1 μm(V)@700 eV
	B ブランチ	30 nm@700 eV

化を実現した。エネルギー分解能は、N600 では $E/\Delta E > 1 \times 10^4$ を達成できる。オペランド計測や XFMR など高フラックスが必要な場合には、低エネルギー範囲（180-1400 eV）をカバーする N150 を使用できる。ブランチ振り分け用ミラーM3 は、A2 および A3 ブランチ用の M3A と B ブランチ用の M3B の 2 枚である。A2 ブランチと A3 ブランチは、M3A の入射角を変えることによって切り替える。A1 ブランチでは、振り分けミラーで反射しないストレート光を利用する。

スロープエラーによる分解能への影響を光線追跡により評価した。水平方向に反射させる M0、M1、M3 はスロープエラーに対して比較的鈍感で、概ね $2 \mu\text{rad}$ 以下であれば分解能は低下しない上、水平方向の集光サイズもほぼ影響を受けない。一方、鉛直方向に反射させる M2 と G はスロープエラーに対して敏感だが、スロープエラーが $0.2 \mu\text{rad}$ 以下であれば、分解能 $1 \times 10^4 @ 700 \text{ eV}$ を見込める。

本ビームラインでは、光源からの放射パワーは直線偏光モードの 180eV のときが最大で、M0 への入熱は約 300W となる。しかし、M0 のスロープエラーは分解能への影響が比較的小さいことと、本ビームラインで主として使用されるエネルギー700 eV では、入熱が約 18W まで減少することから、M0、M1、M2、G の冷却は水冷とする。一方、分解能に影響が大きい M2 への入熱を低減するために、M1 は Au と Si で塗り分け、使用エネルギーに応じて切り替えることとする。直線偏光、180eV のとき、M1 が Au コーティングの場合、M2 の吸収パワーは 34 W であるが、M1 を Si コーティングに切り替えると、M2 の熱負荷は 17W 程度に減少する。エネルギー700 eV では、M2 の吸収パワーは 4 W 以下である。

本分光器は入射スリットレスであるため、光源サイズの増加や位置ずれが光学性能に影響を及ぼす懸念がある。光源の安定性は、光源サイズの 10%程度と見込まれている。その影響を光線追跡によって評価したところ、まず、鉛直方向の光源サイズ Σy の増加とともにエネルギー分解能は低下するものの、 $1.5 \Sigma y$ の光源サイズとなっても、 $0.7 \sim 1$

表 6 BL13U 光学系の構成

素子	種類	冷却	母材	コーティング
M0	サジタル円筒ミラー	水冷	Si	Au
M1	タンジェンシャル円筒ミラー	水冷	Si	Au, Si
M2	平面ミラー	水冷	Si	Au, Rh, Si
G1	回折格子 N600	水冷	Si	Au, Rh
G2	回折格子 N150	水冷	Si	Au, Si
M3A	平面ミラー		Si	Au, Rh, Si
M3B	平面ミラー		Si	Au, Rh, Si
S2	出口スリット ×4			

keV 近傍では分解能 1×10^4 以上、2-3keV のテンダーX線領域でも分解能 9×10^3 を上回ることが期待できることがわかった。一方、光源の位置ずれは、出口スリット S2 上での位置ずれを引き起こすためフラックスの低下やエネルギーシフトの要因となる。例えば、光源が分散方向（鉛直方向）に半値幅分ずれると、S2 上では鉛直方向に約 0.9σ 分（約 $7\mu\text{m}$ 程度）ずれる。これは光子エネルギー700eV のとき 25 meV 程度のエネルギーシフトに相当する。

5-4 エンドステーション

本ビームラインでは多様な測定ニーズに対応するため、マイクロ集光3 (A1-A3)、ナノ集光1 (B)の計4種類の計測ステーションを最終的には整備する計画である。マイクロ集光ステーションでは集光率1/10の作りこみタイプI型部分ウォルター鏡を用い、短軸方向で $1\mu\text{m}$ 程度の顕微測定を実現する。A1-A3の各ステーションの試料位置で同一の集光サイズとなるように設計した。強磁場 in situ 計測ステーション(A1)には超伝導マグネットを設置し、10 T 程度の強磁場下での顕微磁気分光計測を行う。ハイスループット&ダイナミクス計測ステーション(A2)では超伝導電磁石と比較して簡便に磁場掃引や印可磁場方向の回転が可能な常伝導電磁石あるいは永久磁石を利用し、実デバイスの動作環境下におけるオペランド計測や GHz 領域のスピンの動きを追跡する XFMR 測定を行う。磁気散乱・反射率計測ステーション(A3)では薄膜や多層膜資料の深さ方向の時期状態解析を目的とした in situ 磁気散乱測定および反射率測定を計画している。ナノイメージング計測ステーション(B)には STXM を設置し、フレネルゾーンプレートを用いて 10 nm オーダーの集光スポットサイズを実現し、スカーミオン等のナノ磁気構造のイメージング測定を行う。

A1 は振り分けミラーを使用しないストレートブランチであるため、3 ブランチ中最も明るく、2 keV 以下ではフラックス 10^{12} photons/s/0.01%BW 以上を、2 keV 以上のテンダーX線では 10^{10} photons/s/0.01%BW 程度を期待できる。A2 は振り分けミラーM3 を入射角 89° で使用するため A1 と遜色ないフラックスを見込める。A3 では振り分けミラーに対する入射角が 88.25° と最も大きく、高エネルギー側でフラックスが著しく低下するため、2 keV 以下の使用に限定される。Bステーションの試料上のフラックスは、振り分けミラーとピンホール、フレネルゾーンプレートの効率を考慮すると、 $10^8 \sim 10^{10}$ photons/s/0.01%BW 程度と見積もられる。

6. むすび

本稿では、次世代放射光施設の共用ビームラインの光源および光学系設計を中心に検討・整備の現状を報告した。挿入光源およびフロントエンドはすでに機器製作が始まっ

ており、遮蔽ハッチや光学系も順次製作フェーズに進もうとしているところである。利用実験により密接に関係するエンドステーションの装置については、次世代放射光施設利用研究会で方向性が提案されているが、具体的な仕様決定に向けた検討が今後進められていく予定である。次世代放射光施設の共用ビームラインが 2024 年度から順調なスタートを切るためには、これら機器整備以外に、利用支援の体制作りや、活発なユーザーコミュニティの形成も重要であると考えている。軟 X 線ビームラインの装置開発及び利用研究に多くの経験と強い熱意を持つ VUV・SX 利用者懇談会の皆様のご指導、ご協力をよろしくお願いいたします。

参考文献

- [1] <https://www.qst.go.jp/site/3gev/41909.html>
- [2] N. B. Brookes et al., Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. A **903**, 175 (2018).
- [3] J. Dvorak et al., Rev. Sci. Instrum. **87**, 115109 (2016).
- [4] K.-J. Zhou et al., J. Synchrotron Rad. **27**, 1235 (2020).
- [5] V. N. Strocov, J. Synchrotron Rad. **17**, 103 (2010).
- [6] T. Warwick et al., J. Synchrotron Rad. **21**, 736 (2014).
- [7] Y.-D. Chuang et al., J. Synchrotron Rad. **27**, 695 (2020).
- [8] W. Yao et al., Proc. Natl. Acad. Sci, USA **115**, 6928 (2018).
- [9] Y. C. Arango et al., Sci. Rep. **6**, 29493 (2016).
- [10] J. Avila et al., Sci. Rep. **3**, 2439 (2013).
- [11] P. V. Nguyen et al., Nature **572**, 220 (2019).
- [12] V. Sunko et al., arXiv:1903.09581 (2019).
- [13] I. Matsuda, S. Yamamoto, J. Miyawaki, T. Abukawa, and T. Tanaka, e-J. Surf. Sci. Nanotechnol. **17**, 41 (2019).
- [14] Y. Kudo, Y. Hirata, M. Horio, M. Niibe, I. Matsuda, arXiv:2103.13554