

## NEWS LETTER

## 会長挨拶

## 東北大学 多元物質科学研究所 虻川 匡司

2020年4月より木村真一会長の後任として、2020-2021年度のVUV・SX高輝度光源利用者懇談会(VSX懇談会)会長を務めさせていただくことになりました。どうぞよろしくお願いいたします。

VSX懇談会は、東京大学が建設するVUV・SX高輝度光源施設の建設協力ならびにその利用研究計画に関わる情報交換の円滑化を図るとともに、会員相互の交流の促進を図り、放射光科学の発展に寄与することを目的とし、1996年に設立されました。残念ながら、この高輝度光源計画は、2005年10月に中止になりましたが、東京大学に放射光連携研究機構が設置され、2009年、SPring-8に東京大学物質科学アウトステーションビームラインBL07LSUが建設されました。そして、本ビームラインにおける共同利用の支援がVSX懇談会の主たる活動範囲になっています。その後、放射光連携研究機構は、2016年12月に東京大学放射光分野融合国際卓越拠点として再編されています。BL07LSUは「時間分解軟X線分光実験ステーション」、「三次元走査型光電子顕微鏡ステーション(3D nano-ESCA)」、「超高分解能軟X線発光分光ステーション」とフリーポートで構成されており、スタッフの皆様のご努力、会員の皆様の活用により、国内の最先端SX分光研究を牽引しております。

加えて、待望の3GeV高輝度光源の建設が始まり2023年には運用開始の予定です。現在、初期ビーム

ラインデザインが検討されており、東京大学放射光分野融合国際卓越拠点でもBL07LSUで培った技術を元に新しい光源の利用が検討されています。

本会の当初設立目標であった

VUV・SX高輝度光源がようやく実現し、世界各国の高輝度光源に伍する最先端研究が可能になると考えております。ただし、3GeV光源の利用を考えたときに他分野の方にVUV・SX領域の有用性が想像以上に認識されておりません。特に産業界ユーザーの方には顕著です。今後、会員皆様と共に高輝度VUV・SX光の素晴らしさをより多くの方に伝えて、会員の裾野を広げていくことがわれわれの重要なミッションと考えております。ご協力を何とぞよろしくお願い申し上げます。

最後に現在の大変な状況についてコメントいたします。ご存じのように新型コロナウイルス感染防止のために、殆どの放射光施設では共同利用が停止、もしくは利用が大幅に制限されている状況です。この制限は、長期に及ぶことが予想され、今後の会員皆様の研究スケジュールに大きな影響を及ぼすことは間違いありません。皆様の健康にも関わる未曾有の状況の中、VSX懇談会として何ができるか、何をすべきか、是非皆様のお力をお借りして考えていきたいと思っております。ご意見がありましたら是非当会までお知らせ下さい。どうぞよろしくお願いいたします。



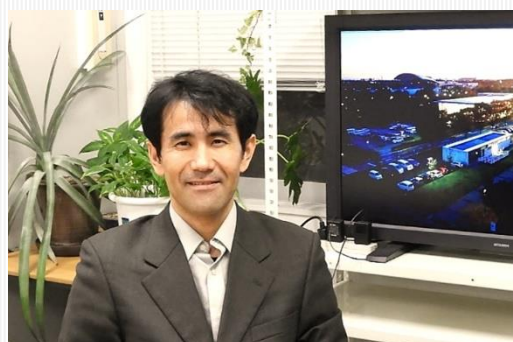
## NEWS LETTER

## 施設長挨拶

東京大学物性研究所 軌道放射物性研究施設 原田 慈久

辛埴前施設長の後を継いで、昨年度より軌道放射物性研究施設(SOR施設)を牽引する役目を負いました。日本の放射光で最も歴史あるSOR施設がVUV・SXコミュニティに対して果たすべき役割を認識しつつ、放射光の価値を再認識する大きな流れの中で、我々自身がアップデートしてゆかなければならないという現実にも目を背けず、皆さまのサポートを励みに、着実に前に進んでゆきたいと思います。

昨年より東北大青葉山新キャンパス内に建設が進む3GeVの次世代放射光施設は、VUV・SXコミュニティの四半世紀来の悲願であったVUV・SX領域(そしてテンドーX線領域)に強みのある高輝度放射光源です。整備・運営主体として量子科学技術研究開発機構(QST)が選ばれ、一般財団法人 光科学イノベーションセンター、宮城県、仙台市、東北経済連合会、東北大学との「官民地域パートナーシップ」という全く新しい枠組みの中で建設が進められています。そのコンセプトは、社会のニーズを理解しながら、放射光分析の利用価値をこれまで放射光に関わったことのない



い人(例えば産業界)でも分かる形で示すこと、これまで常識的には困難であると思われていた使い方にも壁を設けずに新たな利用形態を模索すること、これらの活動を通じて新たな学問分野を作り出してゆくことにあると理解しています。当然ですが、このコンセプトの前提として、最先端の放射光分析の技術開発を行うことが含まれています。これが日本の今後目指してゆくべき方向であることは間違いなく、おそらくは世界のトレンドにもなってゆくだろうと思います。しかし言うは易しで、雨宮慶幸元東大放射光連携研究機構長の言葉を借りれば、研究者というのは元来Curiosity drivenな存在であって、その対象は社会のニーズと必ずしもマッチするとは限りません。外に根を張る活動だけでは息苦しくなってしまう、次の新しい研究分野の芽が出る前に枯れてしまうも

## NEWS LETTER

## 施設長挨拶

のも出てくるでしょう。必ずしも社会のニーズに応えるとは限らないCuriosity drivenな研究テーマや手法開発も一定割合存在することによって、そのバランスが栄養源となって若手が育ち、全体が活性化し、より外に向かって太い根を張るのだと信じています。その栄養源が、放射光そのものを必要とするのか、放射光の周辺で展開して、放射光の効果的利用に繋げる形をとるのかはわかりませんが、そういった最適化も含めて、次世代放射光施設は様々な試みをする場になるだろうと想像しています。

SOR施設はこれまで、世界初の放射光専用光源施設SORリングに始まり、Photon Factoryの物性研ビームラインBL18, 19の運用、そして高輝度光源計画と中止という苦節を乗り越え、SPring-8 BL07LSUの東大放射光アウトステーションへと渡り歩いて全国共同利用・共同研究を展開し、その時々の世界最先端の分析技術の開発と利用に努めて参りました。東大放射光アウトステーションは昨年10周年を迎え、新たな分析手法を開拓する時期は過ぎました。このタイミングでVUV・SX領域に強みのある次世代放射光が現実のものになって、SOR施設

も次の10年、20年の計画を練る段階に来ました。SPring-8で時間分解分光、オペランド分光、顕微分光が芽吹き、非弾性回折などの次世代への種もすでに撒かれていて、光源がアップデートすれば大きく育ち花開く様々な技術があります。しかしそれにとどまらず、今後はイメージングとの融合に伴うデータ爆発に備えたAI・機械学習の取り込み、光のコヒーレンスの積極的利用、そして他の国内放射光やSACLAなどのXFEL施設と連携した技術開発など、新たな利用技術も模索する必要があるでしょう。これらの活動を通じて、冒頭に述べた「放射光の価値を再認識する」流れに沿いつつ、今後も世界と比肩するVUV・SX領域の放射光科学を牽引する役目を担う覚悟です。

そして今こそ、VUV・SXコミュニティの皆さんと、VUV・SXの「価値」と次世代放射光への関わりについて積極的に議論し、共に成長してゆく関係性を築いてゆきたいと願っています。今後ともどうぞよろしくお願いいたします。



## 特集

## 次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書について・・・5

次世代放射光施設ビームライン  
検討委員会報告書(1)の概要  
の紹介

雨宮 健太 氏

高エネルギー加速器研究機構  
物質構造科学研究所次世代放射光施設における初期建設  
ビームラインについての提案

為則 雄祐 氏

公益財団法人高輝度光科学研究センター、  
分光・イメージング推進室 次世代放射光  
施設ビームライン検討委員会

## ○研究会報告 2019年度

ISSP ワークショップ「次世代放射光へのイノベーション」

2020年2月14日、(東大物性研究所)

[http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/sor/workshop2020\\_2/index.html](http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/labs/sor/workshop2020_2/index.html)

## ○東京大学放射光連携研究機構アウトステーション・実験課題公募要領

東京大学放射光分野融合国際卓越拠点の委託を受け、物質科学ビームラインの共同利用  
実験について公募を開始いたします。応募された共同利用実験課題は、実験課題審査委員会による審査を経て、その採否及  
びビームタイム配分を決定し通知いたします。尚、研究課題 を申請する際には必ず事前に  
実験設備担当者にご相談願います。

詳しくは、以下をご覧ください。

[HTTP://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/jointinfo/offering10.html](http://www.issp.u-tokyo.ac.jp/maincontents/jointinfo/offering10.html)なお、公募時期には案内を放射光学会誌に掲載するとともに、VSX利用者懇談会会員に  
はメールにてお知らせいたします。

## 編集後記 堀場弘司 編集委員長

(高エネルギー加速器研究機構・量子科学技術研究開発機構)

いよいよ次世代放射光施設の建設が本格的にスタートしました。今回の特集記事  
にもある通り、初期ビームラインの検討などが進んでおり、少しずつ施設の形も見え  
始めてきています。私もこのような時代に立ち会えることを喜びつつ、様々な形で実  
現へ向けてコミットしていきたいと思えます。

ご執筆頂いた先生方をはじめ、ご協力頂きました方々には、お忙しいところご協力  
有り難うございました。特に相原様には多大なるご協力をいただきまして、重ねて厚  
く御礼申し上げます。



## 次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書(1)の概要の紹介

雨宮健太

高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所

現在、「官民地域パートナーシップ」によって「次世代放射光施設（軟 X 線向け高輝度 3 GeV 級放射光源）」が推進されているのは周知のとおりである。この施設のビームラインの整備に関する課題等について幅広い検討を行うために、「次世代放射光施設ビームライン検討委員会」が、国の主体である国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構（以下、量研とよぶ）と、パートナー代表機関である一般財団法人光科学イノベーションセンター（以下、PhoSIC とよぶ）との共同で、2018 年 12 月に設置された。表 1 にこの委員会のメンバーを示す。委員会における検討結果の第一弾は、「次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書(1) – 第 1 期整備ビームラインラインアップ」<sup>1</sup>として、2019 年 6 月に公開されている [1]。この報告書は、次世代放射光施設における挿入光源やビームライン光学系に関する技術的課題の検討結果を示すとともに、2023 年度に予定されている施設の完成後、速やかに運用を開始すべきビームライン（第 1 期整備ビームライン）についてまとめたものである。本稿ではこの報告書の概要を紹介する。

表 1：次世代放射光施設ビームライン検討委員会 委員名簿（所属等は当時のもの）

委員長	有馬 孝尚	東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授
委員 (50 音順)	★ 雨宮 健太	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 放射光科学研究施設 教授
	★ 内海 渉	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 センター長
	☆ 小野 輝男	京都大学化学研究所教授
	★ 河内 哲哉	量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所 所長
	★ 後藤 俊治	高輝度光科学研究センター 光源基盤部門 部門長
	☆ 高田 昌樹	光科学イノベーションセンター 理事長
	★ 高橋 正光	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 グループリーダー
	☆ 高橋 幸生	東北大学 多元物質科学研究所 無機材料研究部門 教授
	☆ 唯 美津木	名古屋大学大学院理学研究科 物質理学専攻（化学系） 教授
	☆ 田中 敬二	九州大学大学院工学研究院 機能材料科学分野 教授
☆ 為則 雄祐	高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門 主席研	

		究員
★	原田 慈久	東京大学 物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター 教授
☆	松田 巖	東京大学 物性研究所 極限コヒーレント光科学研究センター 准教授
★	三谷 誠司	物質・材料研究機構 磁性・スピントロニクス材料研究拠点 副拠点長

★：量研選任 ☆：PhoSIC 選任

報告書の第1章には、これまでの経緯として、東北七大学の有志による「東日本における新時代中型高輝度放射光施設」趣意書の策定（2011年12月）から始まる、東北地方における放射光施設の建設を目指した地域活動と、文部科学省の科学技術・学術審議会のもとに「量子ビーム利用推進小委員会」が設置された（2016年11月）ことに始まる、国における検討の過程が記されている。これらの検討の結果、次世代放射光施設の整備は、量研を国の主体、PhoSIC、宮城県、仙台市、東北大学、および東北経済連合会を地域及び産業界のパートナーとする「官民地域パートナーシップ」によって推進されている（パートナーの代表機関はPhoSIC）。報告書にはさらに、次世代放射光施設が2023年度の運用開始を目指すこと、加速器の整備は国が担い、基本建屋、研究準備交流棟、用地整備はパートナーが担うこと、および、初期段階として10本のビームラインを整備し、そのうち国が3～5本、パートナーが最大7本を分担することが記されている。

次に、次世代放射光施設にどのようなビームラインを整備すべきかの議論・検討の経緯について、地域側の活動の一環として2016年に行われた「東北放射光施設計画（SLiT-J）エンドステーション・デザインコンペ」や、国の量子ビーム利用小委員会における議論、およびPhoSIC理事の諮問委員会である「ビームライン構想委員会」の報告書（2018年8月）などが示されている。「次世代放射光施設ビームライン検討委員会」は、これまでの検討内容を踏まえ、次世代放射光施設において整備すべきビームラインの種類・性能その他についてのより具体的な検討や、ビームライン整備にあたり必要な技術的課題・開発体制その他の検討等を、量研、PhoSIC両法人の責任のもと行うことを目的とするものと位置付けられている。

第2章「次世代放射光施設におけるビームラインに関する基本コンセプト」に引き続き、第3章では委員会の進め方について述べられている。中でも2018年12月から2019年2月にかけて行われた、ビームラインに関する意見募集は記憶に新しいことと思う。この意見募集は、(1) 国が整備する3本のビームラインの種類、諸元、性能等についての具体的な提案・意見、(2) パートナーが整備する7本のビームラインに関する「ビームライン構想委員会」報告書に関する意見・要望、の2点に関するも

のであり、その結果と委員会の考え方が報告書の第4章にまとめられている。ビームラインに関する一般的な意見・要望は31件が寄せられ、1件の意見書の中に複数の内容が記載されているものを整理すると合計55件となっている。一方、国が整備するビームラインとして具体的に提案されたのは以下の5件である。

- (1) ナノ集光スピン分極ARPES実験ステーション
- (2) 先端材料開発のためのナノスピン電子状態解析ビームライン
- (3) 磁性・スピントロニクス材料科学ビームライン
- (4) 超高エネルギー分解・運動量分解共鳴非弾性軟X線散乱ビームライン
- (5) ガンマ量子の基礎・応用研究ビームライン

委員会では、これらの意見・要望およびビームライン提案を重要な参考情報としながら詳細な議論・検討が行われ、その結果は、技術的課題について報告書の第5章、第1期整備ビームライン（10本）のラインアップについて第6章に、それぞれまとめられている。また、第7章には、委員会の議論の中で浮かび上がってきた、今後さらに検討を行う必要があると思われる項目が示されている。これらの具体的な内容については、次稿に譲りたい。

最後に、委員の一人として次世代放射光施設ビームライン検討委員会における議論に参加した感想を述べたい。この施設は、国の主体である量研と、PhoSICを代表とする地域及び産業界のパートナーが、役割分担をしつつ共同で整備・運用を行うという、これまであまり経験したことのないものである。しかしながら、ビームライン検討委員会においては、量研とパートナーの間の壁というものをほとんど意識することなく、純粋に技術的な課題について非常に現実的な議論を行うことができたと感じている。今後、第1期整備ビームライン10本のうち、3本を量研が、7本をパートナーが整備・運用することになるが、少なくとも技術的な面に関しては、挿入光源からエンドステーションにわたって、世界に誇れる装置の整備・開発を組織間の垣根なく進められる体制を築いていくことが極めて重要だと思う。

#### 参考文献

- [1] 次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書,  
[https://www.3gev.qst.go.jp/BL\\_report.html](https://www.3gev.qst.go.jp/BL_report.html)

# 次世代放射光施設における初期建設ビームラインについての提案 ～次世代放射光施設ビームライン検討委員会・報告書より～

為則 雄祐

公益財団法人高輝度光科学研究センター、分光・イメージング推進室  
次世代放射光施設ビームライン検討委員会

本稿では、2018年秋から2019年春にかけて行われた、次世代放射光施設ビームライン検討委員会(以下、本委員会)での検討結果について紹介する。本委員会での検討内容はすでに報告書にまとめられ、ホームページ上で一般に公開されている[1]。ここでは、本委員会から提案された初期に建設を検討すべき10本のビームラインの概要、および、その実現に向けて検討されたビームライン技術について紹介する。なお、紙面の都合上、本稿では要点のみの紹介となるため、詳細な検討経過や検討データについては報告書を参照して頂きたい。

## 1. はじめに\_施設の特徴

次世代放射光施設(以下、本施設)の光源の特徴は、これまでの放射光科学では比較的に利用されてこなかったテンダーX線に強みを持つ、低エミッタンス光源である。電子の蓄積エネルギーは、近年世界的に主流となっている3 GeVであり、蓄積リングの周長は約349 mである。ラティスにはマルチバンドラティスの一つであるdouble-double bend achromatが採用され、蓄積リング内の電子ビームの水平エミッタンスは1.14 nm radが計画されている。その結果、本施設では真空紫外領域は回折限界光源となることが期待される[2]。蓄積リングは16個のセルから構成され、各セルには挿入光源を設置するスペースとして、5.44 mの長直線部(最大14か所)と最大1.64 mの短直線部(12か所)が設けられている。長直線部および短直線部にはそれぞれアンジュレータと多極ウィグラーを配置し、合計26カ所のビームポートが用意される一方、偏向磁石部は光源として使用されない。光子エネルギーが10 keV以下の領域において、既存の6-8 GeV級の大型放射光施設を上回る輝度が実現でき、特に1~5 keVにかけてのテンダーX線と呼ばれる領域では、大型放射光施設で計画されているアップグレード後においても、輝度において優位性が期待される。光源から末端までのビームラインの距離は長直線部と短直線部ともに60 mが標準であり、実験ホールのビームポートの出口から末端までの距離は、43 m程度である。

## 2. ビームラインの光源・光学系に対する検討

各ビームラインは計測手法によって特徴づけられる一方で、計測手法が異なっても分光・偏光制御・集光などの要素技術には共通する部分も多い。このような要素技術については、予め施設全体での共通化もしくは標準化の方向性を共有しておくことが、建設コストの低減につながるだけでなく、建設後の各ビームラインの高度化をも容易にする。また、利用実験において必要とされる光子エネルギー範囲、偏光特性、光子フラックスなどの仕様は、単一のビームラインで全てを満たすことは非現実的であり、施設全体でカバーすることが合理的である。そこで、個々のビームラインに配備する計測機器の議論に先立って、光源および光学系に関する技術検討を行い、光エネルギーや偏光制御の条件毎に、標準的なビームライン構成を提案することとした。



### 3.1 光源

本委員会では、個々のビームラインにおける光子エネルギー・偏光の制御操作が、蓄積リングの電子ビーム軌道や他のビームラインに影響を及ぼさない見通しが立てられること、光学系に対する熱負荷が許容範囲であることなど、実現可能性や施設の安定性を光源選定の重要な判断基準とした。検討の結果、表 1 に示す 3 方式 4 種類の挿入光源を標準の光源として提案した。

表 1 標準挿入光源の一覧<sup>1)</sup>

名称	方式	周期(mm)	周期数	偏光	エネルギー範囲(keV)
APPLE-EUV	APPLE-II	75	56	水平直線	0.05～(3) <sup>2)</sup>
				垂直直線	0.05～(3) <sup>2)</sup>
				左右円	0.05～1.0
APPLE-SX	APPLE-II	56	75	水平直線	0.13～(4) <sup>2)</sup>
				垂直直線	0.23～(4) <sup>2)</sup>
				左右円	0.18～1.2
IVU	真空封止平面アンジュレータ	22	190	水平直線	2～20
MPW	多極ウィグラー	120	5	水平直線	2～30

1): 表中のパラメータは、今後の実設計において変更されることがある。

2): APPLE-EUV, APPLE-SX の直線偏光モードのエネルギー上端は、高次光をどこまで利用するか依存する。

概ね 2 keV 以下の、真空紫外から軟 X 線にわたる領域では、APPLE-II アンジュレータを採用することとした。現在のところ適切な移相子が存在しない軟 X 線の領域では、光源による偏光制御が必要である。その点、APPLE-II は 1 種類の光源で任意の偏光状態を生成できることから、挿入光源の選択を単純化するうえで合理的であると判断した。ただし、あらゆる偏光モードを利用するためには、磁石列の駆動機構が複雑になる他、電子ビーム軌道補正が困難であることから、ここでは水平・垂直直線偏光および円偏光モードに限定して、APPLE-II を使用することとした。また、磁石列の操作による偏光モードの高速切替も、電子ビーム軌道の安定性を確保することが困難であることが予想されるため、ここでは行わないこととした。偏光制御については、R&D 項目として並行して光源開発を進めることとし、偏光の高速切替 (100 Hz 程度) および円偏光の利用エネルギー範囲の高エネルギー側への拡大を目的とした、分割アンジュレータ\*1の開発を提案した。

低エネルギー領域においては、0.05 keV 前後の真空紫外域までの利用が、光電子分光などの分野から希望されることが予想される。しかしながら、広範な光エネルギー範囲を単一の APPLE-II で供給することは困難であることから、低エネルギー用として周期長の異なる光源(APPLE-EUV)の導入を提案した。一方、移相子が利用できるテnder X 線以上のエネルギー領域では、挿入光源側で偏光制御が不要であることから、真空封止平面アンジュレータを採用し、2 keV 以上のエネルギーにおける広スペクトル対応の光源として、多極ウィグラーを短直線部に設置することとした。その結果、表 1 に示す 3 方式 4 種類の挿入光源によって、最も輝度の高い 1～5 keV の軟 X 線およびテnder X 線を中心として、真空紫外領域の 0.05 keV から 30 keV に至る広範囲のエネルギーの光を供給すると同時に、偏光を制御することが可能である。

\*1) 周期長 56 mm ・ 周期数 15 の APPLE-II アンジュレータ 4 台と移相器から構成されるアンジュレータ

### 3.2 分光器

0.05～30 keV のエネルギー範囲を利用可能とするにあたり、0.05～2 keV の真空紫外・軟 X 線領域ならびに 4.4～30 keV の高エネルギー領域を対象とする分光器は、それぞれ既存の放射光施設で十分な利用実績がある不等間隔回折格子分光器と Si(111)二結晶分光器を導入することとした。一方で、本施設の特徴的なエネルギー範囲である 1～5 keV のテンダー X 線領域に対しては、現状では標準的といえる分光器が存在しないため、この領域の分光器については詳細に技術検討を行った。

テンダー X 線領域の利用には、軟 X 線領域で広く利用されている回折格子分光器の利用範囲を高エネルギー側に拡大する方法と、硬 X 線領域で利用されている結晶分光器の利用範囲を低エネルギー側に拡大する二通りの方法が考えられる。回折格子分光器で一般的な金コーティングでは、2.2 keV 前後に存在する金の L-吸収端の影響によってテンダー X 線領域の反射率が著しく低下するため、光学素子反射面のコーティングが技術的課題となる。その解決策として、多層膜および Ni をコーティングとして採用した光学系を想定し、回折効率、エネルギー分解能を検討した。その結果、複数のコーティングを適切に選んで切り替えることにより、現実的な強度と分解能を確保しつつ、回折格子分光器が供給するエネルギー範囲を 4～5 keV 程度まで拡張することが可能であるという結論を得た。分光器の動作機構は基本的に従来のみで対応できることから、前置鏡の視斜角などを高エネルギーに対応できるように設計しておけば、軟 X 線ビームラインに光学素子を追加することでテンダー X 線域まで利用可能となる。なお、Si 結晶分光器では、2.8 keV 付近で(111)反射の  $2\theta$  が 90 度になるので、テンダー X 線域で光源側での偏光制御を必要とする場合にも、回折格子分光器は必須である。

結晶分光器をテンダー域で利用する際には、低エネルギー領域で急激にブラッグ角が大きくなることが問題となる。例えば、SPring-8 で採用されている標準二結晶分光器では、第一結晶と第二結晶が接近するために、構造的にブラッグ角 27 度に相当するエネルギー 4.4 keV が下限となっている。そこで、入射 X 線と出射 X 線の光軸のオフセット距離を、SPring-8 標準二結晶分光器の 30 mm よりも大きな 50 mm と仮定し、使用するエネルギーの上限を 20 keV までと制限して、分光器の構造について詳細に検討をおこなった。検討の結果、現実的な機器配置で二結晶分光器を構成できるとの結論が得られ、2～20 keV までを供給するビームライン用として、Si(111)分光器を選択肢として加えることとした。上記の検討の結果、テンダー領域においては、このエネルギー領域に対応した回折格子分光器と結晶分光器を選択肢として準備し、使用するエネルギー範囲や偏光制御の条件に合わせていずれかを選択して使用することが望ましいとの結論に至った。

### 3.3 偏光制御

3.1 keV 以上の光子エネルギーでは、ダイヤモンド単結晶を用いた結晶移相子をビームライン光学系の一部として設置することにより、水平・垂直直線偏光、円偏光を含むあらゆる偏光状態を、蓄積リングや他のビームラインに何ら影響を与えることなく生成することができる。一方、これ以下の光子エネルギーでは、適当な移相子や偏光子が開発されておらず、現状では、従来通り挿入光源で偏光制御をする必要がある。ただし、偏光状態を保ったまま分光をおこなうために、偏光制御が必要なテンダー X 線ビームラインにおいては、分光器として回折格子の選択が必須である。

### 3.4 集光光学系

本施設が軟 X 線・テンダー領域向けの 3GeV リングであることを考慮すると、多くのビームラインに分光計測が取り入れられることが想定される。そのため、集光光学系として、色収差のない全反射鏡の採用が妥当である。ナノ集光を想定するアンジュレータビームラインにおいては、ウォルターミラーや KB ミラーを用い、軟 X 線・テンダー X 線ともに、50 nm の集光ビームサイズを当面の目標とした。一方、光源サイズの大きい多極ウィグラービームラインでは、トロイダルミラー等を用いることで、ビームサイズ 50 μm までの集光光学系を導入することを推奨することとした。

### 3.5 ブランチ化

最後に、ビームラインのブランチ化に関する議論について触れておく。1 本の挿入光源を共通に使い、一つのビームラインを複数のブランチに分割することは、限られたリソースで実質的なビームタイムを増やすための手段の一つである。しかしながら、アンジュレータを光源とするビームラインにおいて、複数のブランチで 1 本のアンジュレータを共用できるのは、両者が同じ波長のエネルギーを利用する場合に限られる。一方、白色スペクトルを供給する多極ウィグラービームラインにはギャップの運用の問題はないが、分光器や集光光学系など下流の構成要素は、単独のビームラインを 2 本建設する場合と大きな差が無いことからコスト的なメリットは小さく、近接したブランチで使用するために特殊な光学系を設計しなければならないという問題が新たに生じる。このことから、多極ウィグラービームラインにおいても、ブランチ化することに明らかな意義は見出せなかった。以上のように、アンジュレータビームライン、多極ウィグラービームラインのいずれも、一つの光源を同時に利用するブランチを構成することは合理的でないとの結論に至った。一方、分光器までを共有し、排他的利用を想定するエンドステーションを複数設置することは、実験準備などを測定と並行して進めること等を可能にするため、実験の効率を高める効果が期待できる。

### 3.6 ビームライン機器構成の分類

以上の検討に基づき、エネルギー領域および偏光の条件に応じて、光源と光学系の組み合わせを表 2 のように整理した。なお、ここで提案するビームライン構成は標準的な仕様であり、設置される分析装置に応じて、最終的なビームラインの仕様は個々に差異が生じることに注意されたい。

表 2 光源・光学系の検討に基づいて分類されたビームライン機器構成

偏光	エネルギー領域	挿入光源	分光器	偏光素子
水平直線偏光	< 2 keV	APPLE-II	回折格子 (Au)	-
	< 4 keV	APPLE-II	回折格子 (Au, Ni) *)	-
	2 - 20 keV	IVU/MPW	低エネルギー用二結晶分光器*)	-
	4.4 - 30 keV	MPW	高エネルギー用二結晶分光器	-
偏光制御あり	< 1.2 keV	APPLE-II	回折格子 (Au)	-
	< 2 keV	分割 APPLE-II*)	回折格子 (Au)	-
	< 4 keV	分割 APPLE-II*)	回折格子 (Au, Ni) *)	-
	3.1 - 20 keV	IVU/MPW	低エネルギー用二結晶分光器*)	結晶移相子
	4.4 - 30 keV	MPW	高エネルギー用二結晶分光器	結晶移相子

\*) 印は、多少なりとも開発要素を含む技術である。

2.2 keV 以下の真空紫外～軟 X 線領域では、APPLE-II アンジュレータと回折格子分光器の組み合わせを、また、4.4 keV 以上の高エネルギー領域を対象とするビームラインは、MPW と二結晶分光器の組み合わせを標準的なビームライン構成として提案することとした。なお、回折格子分光器における回折格子の刻線パラメータや光学配置などの仕様は、エンドステーションに配備される分析装置に依存するため、ビームラインの設計段階において最適化が必要である。例えば、回折格子分光器に要求されるエネルギー分解能を指標にすると、ビームラインの分類は、標準的なエネルギー分解能を提供するビームライン( $E/\Delta E$ :  $\sim 7,000$ )と超高分解能を目指したビームライン( $E/\Delta E$ :  $10,000 \sim 30,000$ )に細分化が必要である。このような要素については、それぞれ目標とする数値性能を個別のビームラインの仕様に反映させた(後述の表 3 参照)。

2～4 keV のテンダー X 線領域のビームラインは、偏光制御やビームラインが提供するスペクトル範囲に応じて、光源(APPLE-II/MPW)と分光器(回折格子分光器/結晶分光器)の組み合わせによって複数の選択肢が生じる。また、アンジュレータと多極ウィグラーでは光源特性が異なるため、集光光学系などについては個々に最適化が必要である。例えば、アンジュレータと多極ウィグラーではビームサイズが大きく異なるため、アンジュレータビームラインでは、KB ミラーによる集光を想定している一方、多極ウィグラービームラインでは、実用的な長さの KB ミラーでは水平方向のビームサイズを受けきれないため、トロイダルミラーを用いて集光をおこなうことを想定している。こちらについても、各ビームラインの目標性能としてビームラインの仕様に反映させている。また、テンダー X 線の領域では、3 倍波や 5 倍波のエネルギーが想定される使用エネルギーの上限である 20 keV ないし 30 keV よりも低く、高調波除去についての配慮も必要である。

実際のビームラインの設計においては、想定するエネルギー範囲によって、高調波の対策を始めとした光学系の設計難易度やコストは大きく左右される。したがって、合理的なビームラインの建設に当たっては、ビームラインの実際の用途を注意深く検討し、真に必要なエネルギー範囲を明確にして細部の検討を進めることが重要である。

### 3. 第 1 期に整備すべきビームラインの提案

本委員会において初期に建設を検討することが提案された 10 本のビームラインを表 3 に示した。本施設は、官民地域パートナーシップという新しい形式で整備が進められている。ビームラインについては、10 本のビームラインのうち BL-I から BL-VII の 7 本のビームラインはパートナーによる整備を、また、BL-VIII から BL-X の 3 本のビームラインについては国による整備を想定している。ビームラインの提案に当たっては、パートナー整備分については一般財団法人光科学イノベーションセンター理事の諮問委員会である「ビームライン構想委員会」の答申内容を尊重しつつ、それらがより合理的に実現できるビームライン編成となるよう本委員会で検討した。一方、国が整備する BL-VIII から BL-X の 3 本のビームラインについては、量子ビーム利用推進小委員会報告書や海外の類似施設の状況、意見募集で寄せられたビームライン提案などを参考にしながら、パートナー整備ビームラインとの役割分担・差別化などの観点も含めて、検討を行った。

表3 第1期に整備が提案された10本のビームライン

所掌	BL 番号	名称	計測手法の例*)	光源	エネルギー (偏光)	エネルギー 分解能	ビーム サイズ
	BL-I	X線オペランド分光	・大気圧 X線光電子分光 ・大気圧 X線吸収端微細構造分光 ・X線回折	IVU	2-20 keV (水平直線)	E/ΔE= 7,000	100 nm
	BL-II	X線構造・電子状態トータル解析	・走査型透過 X線顕微鏡 ・X線小角・広角散乱 ・X線吸収端微細構造分光	MPW	2-20 keV (水平直線)	E/ΔE= 7,000	50 μm
	BL-III	X線階層的構造解析	・吸収・位相イメージング ・走査型蛍光イメージング ・X線回折・散乱 ・蛍光 X線ホログラフィー	MPW	4.4-30 keV (水平直線)	E/ΔE= 7,000	50 μm
パートナー	BL-IV	X線コヒーレントイメージング	・コヒーレント回折イメージング ・タイコグラフィ ・タイコグラフィ-X線吸収端微細構造分光	IVU	3.1-20 keV (左右円) 2-20 keV (水平直線) 3.1-20 keV (垂直直線)	E/ΔE= 7,000	50μm (非集光) 100 nm (集光)
	BL-V	軟 X線磁気イメージング	・位相イメージング ・走査型透過吸収イメージング ・走査型蛍光イメージング ・磁気イメージング ・円二色性 ・X線磁気円二色性 ・X線磁気線二色性 ・X線磁気光学カー効果	APPLE-SX	0.18-1.2 keV (左右円) 0.13-2 keV (水平直線) 0.23-2 keV (垂直直線)	E/ΔE= 10,000- 30,000	< 50 nm
	BL-VI	軟 X線電子状態解析	・ナノ光電子分光 ・共鳴非弾性 X線散乱	APPLE-EUV	0.05-1.0 keV (水平直線) 0.05-1.0 keV (垂直直線)	E/ΔE= 10,000- 30,000	< 50 nm
	BL-VII	軟 X線オペランド分光	・準大気圧 X線光電子分光 ・準大気圧 X線吸収端微細構造分光 ・軟 X線光電子分光	APPLE-SX	0.13-2 keV (水平直線) 0.23-2 keV (垂直直線)	E/ΔE= 10,000- 30,000	< 50 nm
	BL-VIII	軟 X線ナノ光電子分光	・ナノスピン分解光電子分光	APPLE-EUV	0.05-1.0 keV (左右円) 0.05-1.0 keV (水平直線) 0.05-1.0 keV (垂直直線)	E/ΔE= 10,000- 30,000	50 nm- 10 μm
国 (共用)	BL-IX	軟 X線ナノ吸収分光	・X線吸収分光 ・X線磁気円二色性 ・X線磁気線二色性 ・X線磁気光学カー効果 ・X線線二色性 ・X線強磁性共鳴	分割 APPLE-SX	0.18-2 keV (左右円) 0.13-2 keV (水平直線) 0.18-2keV (垂直直線) [偏光高速切替]	E/ΔE >10,000	50 nm- 10 μm
	BL-X	軟 X線超高分解能共鳴非弾性散乱	・超高分解能共鳴非弾性 X線散乱 ・軟 X線非弾性回折	APPLE-SX	0.25-1.0 keV (左右円) 0.25-1.0 keV (水平直線) 0.25-1.0 keV (垂直直線)	E/ΔE >150,000	< 500 nm

\*) ここに挙げた計測手法はあくまで例示であり、実際の用途については別途検討がおこなわれる予定である。



表3に示した想定利用分野は、それぞれのビームラインを使って可能と考えられる測定および測定対象の例として付記したもので、利用目的がこれらに限定されることを意図したものではない。近年では、ひとつの課題解決のために複数のビームラインが横断的に使われることも多いことから、本施設でも、各ビームラインは特定の学術分野や研究テーマに結び付けず、横断的に利用することを想定している。例えば、BL-I、BL-II、BL-VIIを併用することによって、軟X線からテンダーX線にわたる広いエネルギー領域で種々の分光測定が可能である。BL-IIとBL-IIIは、光源は同じ仕様の多極ウィグラーであるが、分光器に差をつけることにより、2本のビームラインでより幅の広いエネルギー領域の測定に対応できるようにしている。さらに、これら3本のビームラインを近接して配置することで、オペランド測定などで必要になる測定試料を準備するための施設や廃液・排気設備を共通に使用できる。同様に、BL-IVとBL-Vの組み合わせは、テンダーX線から軟X線の領域でのコヒーレントイメージングを、広いスペクトル範囲で利用することを意図している。

国が整備を担当するビームラインとして、ナノ集光角度分解光電子分光、ナノ集光X線吸収分光、軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱を主目的とする3本のビームラインを整備することが適切であるとの結論に至り、BL-VIIIからBL-Xの各ビームラインとして提案した。BL-VIIIの軟X線ナノ角度分解光電子分光とBL-IXの軟X線ナノ吸収分光については、意見募集において複数の提案があったほか、構想委員会の初期ビームライン答申でも国が整備すべきビームラインとして提案されており、学術的意義やニーズが高いと判断されたことも提案の要因となった。これら3本のビームラインは、パートナーによる整備を提案するビームラインと重複するところがあるが、国が整備するビームラインは特に高い学術成果の創出を目指すという位置づけを考慮し、パートナーにより整備されるビームラインとの差別化を図った。例えば、BL-VIIIは、パートナーによりBL-VIでの整備を提案した軟X線光電子分光とは異なり、スピン分解を標準仕様として導入し、先端的研究に供することを目的としたものである。また、BL-IXは、BL-Vと同様に偏光制御した軟X線を用いた磁気材料の研究を主要なターゲットに想定しているが、開発要素のある分割アンジュレータを採用して、円偏光を供給できるエネルギーの広帯域化を図っている他、100 Hz程度までの偏光の高速スイッチングによる磁気円二色性測定も視野にいれている。将来的に、BL-IXにおける開発成果は施設の高度化においてBL-Vなどへも還元され、基盤技術として波及していくことを期待している。BL-Xの高分解能共鳴非弾性X線散乱は、世界最高のエネルギー分解能やX線回折と分光の同時測定をねらいとする点等において、パートナーがBL-VIに整備する共鳴非弾性散乱とは目的を異にしている。

#### 4. R&D 項目

本委員会では、実現可能性を重要な一つの判断基準とし、現時点で利用可能な最新技術を集積することによるビームライン建設を想定した。その一方で、本施設の完成まではおおよそ4年の時間があり、その間も継続してR&Dを行うことは重要である。R&Dの結果、ビームラインの建設時点で実現の見通しが得られた技術については、積極的に導入することも推奨する。以下に本委員会で議論されたR&D項目を整理した。これらの技術は、本施設への導入を確定したものではなく、継続したR&Dを行い、新しい技術が開発された際には、遅滞なく導入していくことを想定している。

① 分割アンジュレータ

軟 X 線～テンダー領域において、蓄積リングの電子ビーム軌道に悪影響を与えることなく、高速の偏光スイッチングを可能にする挿入光源の開発

② 高エネルギー（上限 4keV ないし 5 keV まで）をカバーする回折格子

テンダー X 線（1-5 keV）の領域で利用できる回折格子の開発および性能評価

③ 水平方向にエネルギー分散面を持つ軟 X 線用回折格子分光器

挿入光源で発生した軟 X 線を、分光器を含めて水平方向に分散・反射させることにより、隣接するビームラインに軟 X 線を導くことが可能な光学系の開発。本光学系は、軟 X 線とテンダー X 線を同一試料上に照射する二色分光計測や、分光と回折の同時測定など、新しい測定手法の実現を視野にいたったものである

④ 軟 X 線用集光光学系

全反射鏡を用いた、高効率で色収差のない 50 nm 集光素子の開発

⑤ 低エネルギー（2-5 keV）をカバーするシリコン二結晶分光器

テンダー X 線領域を含み、高エネルギー領域で利用できる分光器の開発。

⑥ テンダー X 線用結晶移相子

極薄ダイヤモンド単結晶を利用し、吸収の大きな 3.1 keV から 4 keV のエネルギー領域で実用になる結晶移相子の製作および性能評価。

## 第 8 章 まとめ

本委員会では、次世代放射光施設の特徴や学術研究・産業利用ニーズ、技術的課題などの観点からビームラインに関する種々の検討を行った。その結果、挿入光源及びビームライン光学系の標準化案、第 1 期に整備を検討すべきビームライン 10 本の案を策定し、報告書として提示した。

本委員会のこれまでの議論は、光源や光学系の検討が主となった関係上、エンドステーションについては、主たる測定手法の提示にとどまっている。エンドステーションに設置すべき具体的な計測装置の選定やそこで実施する研究の詳細などについては、本委員会とは別の場において検討・協議が行われ、本委員会の検討内容と合わせてビームライン整備に反映されることを期待する。

## 参考文献

- [1] 次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書, [https://www.3gev.qst.go.jp/BL\\_report.html](https://www.3gev.qst.go.jp/BL_report.html)
- [2] 東北放射光施設計画 “SLiT-J” 3GeV 高輝度光源加速器システム提案書 V2.0

**賛助会員**

賛助会員として、下記の企業各社にご協力いただいております。ここにお礼を申し上げますと共に、掲載させていただきます。(50音順)

**株式会社 アイリン真空**

住所：〒452-0961 愛知県清須市春日東出81

連絡先：Tel:052-401-2061 Fax:052-401-6960 E-mail:info@ailin-va.com

URL: <http://www.ailin-va.com/>

営業内容：各種真空機器メーカー・コンポーネント商品の販売窓口(エドワーズ、樫山工業、アジレント、ライポルト、VAT、サエス・ゲッターズ、キャノンアネルバ、他)、真空チャンバー他製作関連の窓口業務。

**シエンタオミクロン株式会社**

住所：〒140-0013 東京都品川区南大井6-17-10 大森レインボービル5F

連絡先：Tel:03-6404-9133 Fax:03-6404-9134 E-mail:info-JP@ScientaOmicron.com

URL: <http://scientaomicron.co.jp>

表面・ナノ評価技術を通して科学の進歩と産業の発展に貢献する」という理念に基づき、皆様のご要望にお応えするために、用途に応じた高性能高機能光電子分光システム、UHV-SPM、各種成膜コンポーネントを中心とした装置開発、高い技術力と迅速な技術サービスをご提案ご提供いたします。

**ツジ電子株式会社**

住所：〒300-0013 茨城県土浦市神立町3739

連絡先：Tel:029-832-3031 Fax:029-832-2662 E-mail:info2@tsuji-denshi.co.jp

URL: <http://www.tsujicon.jp>

営業内容：ステッピングモータのコントローラを始め、エレクトロニクスを駆使して、より良い実験環境構築のお手伝いをさせていただいております。過去の図面はすべて保存されており、メンテナンスも迅速に対応いたします。

**賛助会員****株式会社 トヤマ**

住所：〒258-0112 神奈川県足柄上郡山北町岸3816-1

連絡先：Tel:0465-79-1411 Fax:0465-79-1412 E-mail:salesdept@toyama-jp.com

URL：http://www.toyama-jp.com

営業内容：創業以来60年余を研究者の為の研究開発用装置の設計製作に尽力。研究者のアイデアを次々と確かなカタチに創り上げて参りました。平成27年4月1日に“モノづくりの殿堂”として新本社兼工場を山北町にオープン。益々頑張ります！

**株式会社 ユニソク**

住所：〒573-0131 大阪府枚方市春日野2丁目4番3号

連絡先：Tel:072-858-6456 Fax:072-859-5655 E-mail:info@unisoku.co.jp

URL：http://www.unisoku.co.jp

営業内容：当社は創業以来一貫して高速分光測定装置や走査型プローブ顕微鏡等、先端的な測定機器の開発、製品化、販売を行ってきました。その技術は大学、研究機関及び民間企業の研究者様から高い評価を得ております。

**ラドデバイス株式会社**

住所：〒192-0071 八王子市八日町8-1 ビュータワー八王子3F

連絡先：Tel:042-622-8818 Fax:042-622-8819 E-mail:sales@rad-dvc.co.jp

URL：http://www.rad-dvc.co.jp

営業内容：光学デバイスを軸に、研究・開発フィールドのニーズにマッチするユニーク且つ優れた海外製品をお届けする輸入商社です。製品に加え、校正・測定、カスタマイズ等のサービスを提供いたします。

研究・開発フィールドのニーズにマッチするユニーク且つ優れた海外製品をお届けする輸入商社です。製品に加え、校正・測定、カスタマイズ等のサービスを提供いたします。

**ロックゲート株式会社**

住所：〒113-0034 東京都文京区湯島3-19-5

連絡先：Tel:03-6284-4567 Fax:03-6284-4568 E-mail:info@rockgateco.com

URL：http://www.rockgateco.com

営業内容：低温・磁場関係の技術がベースになっている会社で、以下の製品の取り扱いがある。ヘリウムフロー式クライオスタット、冷凍機、無冷媒希釈冷凍機、AC抵抗ブリッジ、引抜き式磁化測定装置、低温/磁場用ピエゾポジショナー・ローテーター、STM・CFM・AFM・SNOM、ラマンイメージングシステム、微小磁場測定装置、など。