

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－

2019年6月28日

次世代放射光施設ビームライン検討委員会

目次

はじめに	3
第1章 これまでの経緯.....	4
1) 次世代放射光施設の整備開始に至る経緯.....	4
2) これまでのビームライン検討推移と本委員会の設置	5
第2章 基本コンセプト	7
第3章 委員会の進め方.....	8
1) 委員会の設置、開催	8
2) ビームラインに関する意見募集	8
3) ビームライン検討の方針	9
第4章 ビームラインに関する意見募集の結果と本委員会の考え方	10
1) 意見・要望のまとめ	10
2) ビームライン提案のまとめ	11
第5章 技術的課題の検討結果.....	13
1) 挿入光源ラインアップ.....	13
2) ビームライン光学系	15
3) ビームライン機器構成の分類.....	16
4) ブランチ化の検討	17
第6章 第1期整備ビームラインラインアップ.....	18
第7章 ビームライン建設の具体化に向けて.....	21
1) ビームラインの配置	21
2) 具体的なビームライン光学系の構成方針.....	22
3) R&D 項目.....	23
第8章 まとめ	25

【別添資料】

- 別添資料 1 ビームライン構想委員会報告書
- 別添資料 2 ビームライン検討委員会設置覚書
- 別添資料 3 ビームライン検討委員会名簿
- 別添資料 4 ビームライン検討委員会開催結果
- 別添資料 5 ビームライン意見募集要領
- 別添資料 6 ビームライン提案および意見・要望のまとめ
- 別添資料 7 基本建屋概念図
- 別添資料 8 技術的検討の結果（光源について）
- 別添資料 9 技術的検討の結果（光学系について）
- 別添資料 10 第 1 期整備ビームラインラインアップ

はじめに

本報告書は、官民地域パートナーシップにより推進されている「次世代放射光施設（軟 X 線向け高輝度 3 GeV 級放射光源）」に関し、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、量研という）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 という）が締結している連携協力協定のもと、2018 年（平成 30 年）12 月に両法人が共同で設置した「次世代放射光施設ビームライン検討委員会」（以下、本委員会という）において行われた、これまでの検討結果を取りまとめたものである。本委員会は、次世代放射光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設置されたものであるが、今後の次世代放射光施設の整備スケジュールを鑑みた場合、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、ならびに 2023 年度（令和 5 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）の概要決定が急務であることから、まずこれらの課題について、2018 年（平成 30 年）12 月から 2019 年（令和元年）5 月にかけて計 4 回の委員会を開催して集中的な検討を行い、報告書（1）として提示することにした。

本報告書の構成は以下の通りである。第 1 章で、次世代放射光施設整備開始に至る経緯及びこれまでに行われてきたビームラインに関する検討推移などを概観し、第 2 章において、次世代放射光施設におけるビームラインに関しての本委員会の基本コンセプトを述べる。第 3 章では、本委員会の設置及び進め方等について記載するとともに、ビームラインに関する意見を広く外部から求めるために実施した意見募集の概要を記載した。寄せられた意見は第 4 章にまとめられており、それらの意見や提案も参考にしながら委員会で行った詳細な議論・検討の結果が、技術的課題について第 5 章で、第 1 期整備ビームラインラインアップについて第 6 章に記述されている。第 7 章には、今後のビームライン建設の具体化に向けての検討課題や方針について記載し、第 8 章を全体のまとめとした。

第1章 これまでの経緯

1) 次世代放射光施設の整備開始に至る経緯

東北地方に放射光施設の建設を目指す地域活動は、2011年（平成23年）12月の東北七大学の有志（代表：入野修福島大学長（当時））による「東日本における新時代中型高輝度放射光施設」趣意書の策定に始まる。2014年（平成26年）7月には、「東北放射光施設推進協議会」（共同代表：宮城県知事、東北経済連合会会長、東北大学総長）が設立され、同協議会を中心として「SLiT-J計画」の名称のもと、種々の本格的活動が開始された。2015年度（平成27年度）に東北大学が文科省「次世代放射光施設に関する技術課題調査」を受託し、2016年（平成28年）6月には、「SLiT-J国際評価委員会（委員長：Jerome Hastings スタンフォード大学教授）」が開催された。また、地域側の計画推進の中心となるべく、同年12月、「一般財団法人光科学イノベーションセンター」が設立された。

一方、次世代放射光施設に関する国の検討は、文部科学省の科学技術・学術審議会のもとに2016年（平成28年）11月に設置された「量子ビーム利用推進小委員会」（以下小委員会という。）において開始された。小委員会では、次世代放射光施設の科学技術イノベーション政策上の意義、求められる性能、整備・運用の基本的考え方と具体的方策などについて様々な議論がなされ、その結果が2017年（平成29年）2月の「高輝度放射光源とその利用に関する中間的整理」[1]及び2018年（平成30年）1月の「新たな軟X線向け高輝度3 GeV 級放射光源の整備等について（報告）」[2]として取り纏められ公開された。小委員会の検討結果を踏まえ、同月、「官民地域パートナーシップ」による同施設の具体化等を進めるため、地域及び産業界のパートナーの募集を行うこと、量研を施設の整備・運用の検討を進める国の主体とすることが文部科学大臣から発表された[3]。パートナー募集には、1件の応募があり、小委員会における提案内容の調査検討の結果、2018年（平成30年）7月に、PhoSICを代表機関とする、同財団、宮城県、仙台市、国立大学法人東北大学、及び一般社団法人東北経済連合会が、地域及び産業界のパートナーとして選定されるとともに、東北大学青葉山新キャンパスが立地場所として決定された[4]。

2018年（平成30年）9月、国の主体である量研とパートナー代表機関である PhoSIC との間で、「次世代放射光施設（軟X線向け高輝度3 GeV 級放射光源）の整備・運用等に係る詳細の具体化に関する連携協力協定」が締結され、両法人の連携協力のもと、次世代放射光施設の整備の検討が本格的に開始された。さらに、同年12月、2019年度（平成31年度）政府予算案に「官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の推進」として、整備に着手するための施設整備費などが認められ、2023年度（令和5年度）の施設の運用開始を目指すことが発表された[5]。

官民地域パートナーシップにより推進される本計画においては、施設の整備に関して、財源負担を含む国とパートナーの役割分担があらかじめ決められている。すなわち、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（用地取得、造成）はパートナーが担うことになっている。また、ビームラインについては、初期段階として10本を整備し、そのうち国が3～5本、パートナーが最大7本を分担することとされている。

2) これまでのビームライン検討推移と本委員会の設置

次世代放射光施設における加速器の主要性能諸元に関しては、国の小委員会において、活発な議論がなされ、その大枠が「新たな軟 X 線向け高輝度 3 GeV 級放射光源の整備等について（報告）」[2]に記載されている。これに基づき、具体的な設計が理化学研究所及び公益財団法人高輝度光科学研究センター（JASRI）との連携・協力のもと、加速器の整備を担当する量研によって行われている。

一方、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については、これまで、様々な場において、議論・検討が行われてきた。

地域側の活動の一環として、2016 年（平成 28 年）、東北大学東北放射光施設計画推進会議が外部有識者に委嘱した外部専門委員会（委員長：壽榮松宏仁 東大名誉教授）による「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」が行われた。このコンペには 30 件の提案が寄せられ、11 月の公開シンポジウムでの議論等を経て、2017 年（平成 29 年）7 月にその結果が、東北大学に答申されている[6]。

また、国の小委員会においても、次世代放射光施設で行うべき研究開発について、活発な議論がなされ、設置すべきビームライン候補が報告書に記載されている。

さらに、PhoSIC 理事の諮問委員会として、個別出資を行う参画企業を代表する委員と学術アドバイザーから構成された「ビームライン構想委員会」（委員長：有馬孝尚 東京大学教授）が組織され、主としてパートナーが初期に建設すべきビームラインについて、産業界からの要望も最大限取り込んで詳細な議論・検討が行われた。その結果は、2018 年（平成 30 年）8 月に報告書として取り纏められ、PhoSIC 理事に答申されている（[別添資料 1](#)）。

次世代放射光施設は、国の主体機関である量研とパートナーが連携・協力してその整備・運用を行うものであり、ビームラインの検討や整備についても、財源負担をはじめとする一定の役割分担はあるものの、これらを両者の連携のもと一体的に行っていくべきものであることは明白である。このため、量研とパートナー代表機関である PhoSIC で協議を重ね、両法人の間で締結している連携協力協定のもとに「次世代放射光施設ビームライン検討委員会」（以下本委員会という）を共同で設置し、本委員会でビームラインの検討を進めることにした。本委員会は、上述のこれまで行われてきた様々な検討内容を踏まえ、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、両法人の責任のもと行うことを目的としている。

[1] 高輝度放射光源とその利用に関する中間的整理（小委員会中間報告書）

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/090/houkoku/1384267.htm

[2] 新たな軟 X 線向け高輝度 3 GeV 級放射光源の整備等について（小委員会最終報告書）

http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/090/houkoku/1400544.htm

[3] 官民地域パートナーシップによる次世代放射光施設の推進について

http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/detail/1400561.htm

[4] 次世代放射光施設（軟 X 線向け高輝度 3 GeV 級放射光源）官民地域パートナーシップ具体化の

ためのパートナー選定等について

http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/detail/1406643.htm

[5] 柴山昌彦文部科学大臣記者会見録（平成 30 年 12 月 17 日）

http://www.mext.go.jp/b_menu/daijin/detail/1411881.htm

[6] エンドステーション・デザインコンペ **【結果概要報告】**

<http://www.slitj.tagen.tohoku.ac.jp/DesignCompetition/index.html>

第2章 基本コンセプト

光の輝度やコヒーレンスが既存の施設と比べて格段に向上する本施設を真に卓越した成果を創出する施設とするためには、次世代にふさわしいビームラインやエンドステーションでなくてはならない。特に、各ビームラインが少数の利用者からなるグループに占有される状態は、計測技術の高度化や新しい利用方法、新しい利用者の開拓にとって障壁となりやすい。また、ビームラインを縦割りで管理する形は、異なるビームラインに類似の装置が導入されたり、異なるビームラインで並行して同種の手法開発や機器整備が行われたりするなどの非効率が生じることにもつながる。

同じような非効率性は、各ビームラインを学術専用ビームライン、産業利用ビームライン、特定機関の専用ビームラインなど、ビームラインごとに性格付けを行った場合にもしばしば生じてきた。各ビームライン建設の経緯や予算の出どころなど様々な要素は考慮せざるを得ないが、利用形態、利用目的、利用者を必要以上に厳格に限定しないように、常に意識する必要がある。例えば、放射光を用いた最先端の計測技術はもっぱら基礎研究のためであり産業界では利用されないといった考えは完全に誤りである。学術利用と産業利用の違いは研究の対象や成果の利用方法といった面で現れるにすぎず、計測技術としては絶えず先端性を追求することが必須なのである。このことは、今回の放射光施設計画の特徴でもある官民地域パートナーシップをうまく活用するために特に意識すべきである。また、現代の科学技術において、一つの手法が課題の解決につながる場面は非常に少なくなった。共有すべき情報は共有するというオープンイノベーションの考え方にも合わない。特定の機関や利用者集団が特定の目的のためにビームラインを保有・専有することの意義も今後どんどん薄れていくであろう。

次世代の放射光施設においては、各ビームラインは計測手法によって特徴づけられるべきであり、それを多くの研究者が利用して多様な成果を得ることにより施設全体も卓越したものとなる。また、計測手法が異なっても分光、偏光、集光、検出などの要素技術には共通する部分も多い。そのような要素技術については施設全体として初めから共通化、あるいは標準化しておくことが、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。世界的な競争力を有する個別の技術を結集、統合、システム化し、各ビームラインの連携、融合を促進するこのコンセプトは、新たなイノベーションケースを開拓し、全く異次元の次世代放射光の価値を生み出すものでなくてはならない。

以上を踏まえ、本委員会は、本放射光施設が施設全体としてビームラインを構想し、計画を策定し、建設から利用に至るまでその計画に基づいて量研及びパートナーが連携して一元的な運営を行うことを提言する。さらには、関連技術の日進月歩の進歩を遅滞なく導入して最先端の研究環境を維持し続けるために、各ビームラインの点検と必要な改定を定期的に行う体制も必要である。

今回、本委員会は、上記の考えに基づき、現時点での学術界と産業界の利用者のニーズを踏まえつつも、本放射光光源の特徴や、2023年（令和5年）に予定されている利用開始時点で想定される関連技術の進展（シーズ）の動向にも留意して、第1期整備ビームライン10本について検討を行った。

第3章 委員会の進め方

1) 委員会の設置、開催

次世代放射光施設の整備・運用を進める国の主体である量研とパートナー代表機関である PhoSIC との間で締結されている「次世代放射光施設（軟 X 線向け高輝度 3GeV 級放射光源）の整備・運用等に係る詳細の具体化に関する連携協力協定」（2018 年（平成 30 年）9 月 12 日締結）のもとに、「国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構と一般財団法人光科学イノベーションセンターとの次世代放射光施設ビームライン検討委員会設置覚書」（[別添資料 2](#)）を 2018 年（平成 30 年）12 月 1 日づけで締結し、本委員会を両法人の共同で設置した。

本委員会は、次世代放射光施設の整備・運用等に関する詳細の具体化の一環として、次世代放射光施設のビームラインの整備に関する課題等について検討を行うことを目的とし（覚書第 1 条）、（1）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及び性能等に関する事項、（2）ビームラインの整備に当たり必要な技術的課題及び開発体制等に関する事項、（3）前号に掲げるもののほか、次世代放射光施設のビームラインの整備、運用及び利用に係る検討に関して必要な事項の検討を行うことを所掌業務としている（覚書第 2 条）。

委員長は、量研及び PhoSIC の職員以外の学識経験のある者のうちから 1 名を委嘱し（覚書第 4 条）、委員については、量研、PhoSIC の職員又はこれら以外の者で学識経験のある者のうちからそれぞれ若干名を選任し委嘱した（覚書第 5 条）。本委員会の委員名簿を[別添資料 3](#)に示す。また、技術的な課題の詳細検討を行うために、覚書第 8 条にもとづき、本委員会の下に専門部会（ワーキンググループ）を設置した。同ワーキンググループメンバーについては、本委員会委員から委員長が選任した。

2018 年（平成 30 年）12 月から 2019 年（令和元年）5 月にかけて、本委員会を計 4 回開催した。各回の日程及び主な議事内容は、[別添資料 4](#)の通りである。

2) ビームラインに関する意見募集

2018 年（平成 30 年）12 月 17 日に開催された第 1 回ビームライン検討委員会において、本委員会における議論・検討に資するため、広く意見募集を行うことが決定され、以下のような内容で実施することになった。

パートナーが整備するビームラインに関しては、すでに PhoSIC 理事の諮問委員会である「ビームライン構想委員会」において精力的な検討がなされ、具体的な構想をまとめた報告書が公開されていることから、今回の意見募集においては、同報告書の内容に関する意見・要望を募集することとした。

一方、今回新たに本格的な検討を開始する国が整備するビームラインについては、一般的意見・要望に加えて、具体的な利用、研究活動を踏まえたビームラインの種類、諸元、性能等についてどのようなものが求められるかについての具体的なビームライン提案も併せて募集することとした。

意見募集対象者は、次世代放射光施設に関心を持つ一般の方々とした上で、国が整備する具体的なビームライン提案に関しては、次世代放射光施設の加速器・光源の基本特性にある程度理解を有する、産官学の研究者・技術者からの具体的な提案を期待するものとした。意見募集期間は、2018

年（平成 30 年）12 月 26 日（水）～2019 年（平成 31 年）2 月 15 日（金）で、電子メールにより提案を受け付けた。公開された意見募集要領を[別添資料 5](#)に示す。

3) ビームライン検討の方針

次世代放射光施設が、その運用期において「特定先端大型研究施設の共用の促進に関する法律」（共用促進法）の適用を受けることを想定した場合、そこに整備されるビームラインは、同法律が求める「先端的な科学技術分野において比類のない性能」や「科学技術の広範な分野における多様な研究等に活用」などの基準を満たすものでなければならない。そのため、ビームライン策定にあたっては、ビームライン性能（エネルギー、輝度、コヒーレント性など）が適切であるか、科学技術の現状・将来性と合致しており高い学術研究・産業利用ニーズが見込まれるか、SPring-8 など他の国内放射光施設との役割分担が明確であるかなどの観点を考慮する必要がある。さらに、「官民地域パートナーシップ」により整備・運用が行われることから、特にパートナービームラインに関しては、利用収入が十分に得られるかどうかという観点も重要である。

これらを踏まえ、本委員会では、第 1 期整備ビームライン 10 本のうちパートナーが整備するビームラインについては、PhoSIC 理事の諮問委員会である「ビームライン構想委員会」によって 2018 年（平成 30 年）8 月にまとめられた初期ビームライン答申を出発点とした。当答申に述べられた利用研究の内容、利用方法、産業界からの要望を尊重しつつ、それらをより合理的に実現できるようなビームライン編成を検討するとともに、認識されていた一つ一つの課題について検討を加えた。さらに、当該ビームラインで利用されるビームタイムの約 50%が共用に附される予定であることから、科学技術分野における先端性、学術研究を含む広範な分野に適用できる汎用性等についても留意した。

一方、国が所掌するビームラインについては、国の小委員会での議論を踏まえつつ、海外の放射光施設の動向や、意見募集に寄せられた具体的なビームライン提案、上記ビームライン構想委員会の初期ビームライン答申に記載されている国ビームラインへの意見等を大いに参考にしながら、どのようなビームラインを整備すべきかについて、新たな検討を行った。

ビームライン整備にあたっては多くの技術的課題があり、現状技術で達成できるもの、開発の見通しが立っているもの、さらなるブレイクスルーを必要とするものに区分し、これらを正確に把握したうえで、2023 年度（令和 5 年度）までに実現可能なビームラインを設計・建設しなければならない。このため、本委員会では、まず、挿入光源やビームライン光学系についての技術的検討を行い、それらについての整理・標準化を行った上で、エンドステーションを含めたビームライン編成の検討に反映させることとした。各々の技術的検討は、これらの知見を有する委員を中心にした専門部会（ワーキンググループ）で行い、その結果をもとに、本委員会で議論する形をとった。

第4章 ビームラインに関する意見募集の結果と本委員会の考え方

ビームラインに関する意見募集に寄せられた意見・要望及びビームライン提案の詳細は、[別添資料6](#)の通りである。これらの概要及び本委員会における検討結果を記す。

1) 意見・要望のまとめ

ビームラインに関する一般的な意見・要望として 31 件が寄せられた。1 件の意見書の中に複数の内容が記載されているものがあり、それらを整理すると合計 55 件となり、(a) 光源性能等に対する要望 (13 件)、(b) 計測装置・試料環境等に対する要望 (28 件)、(c) 運営・ユーザー支援等に対する要望 (14 件) に大別される。多くの意見・要望が寄せられたことは、次世代放射光施設に対する期待と関心の高さの表れであり、貴重な意見として本委員会の議論に役立てられた。このうち、特に注記が必要なものについて、以下にまとめる。

(a) 光源性能等に対する要望

- ① 従来の軟 X 線ビームラインと X 線ビームラインがカバーするエネルギー領域の境目にあたる、2 keV を跨ぐ測定に対する要望が寄せられた。これに関しては、第 5 章 2) で後述する通り、最大 4~5 keV までの測定に対応する軟 X 線ビームラインの光学系を検討し、可能であるという結論を得た。また、一つのビームラインでまかないきれないような幅広いエネルギー範囲をカバーする場合には、複数のビームラインの併用を想定しており、将来的には軟 X 線と X 線を同一試料に照射できるエンドステーションも検討の余地がある。
- ② ビームサイズについては、ナノサイズからミリサイズにわたる広範囲な要望が寄せられた。また、測定試料の観察範囲を変えるためのビームサイズ可変光学系についての要望も寄せられた。ビームサイズについては、これらのニーズを踏まえ、第 1 期整備ビームラインのラインアップに反映させた。ビームサイズ可変光学系は、引き続き検討していく。

(b) 計測装置、環境等に対する要望

- ① 異なる 2 ビームラインの同時照射による診断と治療の同時対応など、新しい放射線治療等、医学利用に関する希望が寄せられた。本希望については、極めて広範な検討が必要であることから、適切なタイミングで、本委員会とは別に、医療関係者を含む検討の場を設け、議論することが必要である。
- ② マルチ量子ビームによるポンプアンドプローブ計測に対する要望が複数寄せられた。時間分解測定については、放射光のバンチ長 (数 10 ps) までは原理的に可能である。
- ③ X 線回折、蛍光 X 線分析、X 線 CT、吸収イメージング、in situ/operand 計測等、多様な実験手法への対応について多数の要望が寄せられた。これらは、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で提唱されているプラグイン装置のコンセプトで実現可能な計画である。一方で、X 線の同時多波長化は現状の技術では実現困難であると判断した。
- ④ パルスレーザー、パルス電子線、走査プローブ顕微鏡、スパッタ装置、光電子顕微鏡、質量

分析計等の補助測定機器や、固液界面や高圧力下等の試料環境機器、自動結晶マウントロボット、自動データ収集プログラム、標準試料ホルダー、多数サンプルにおける複数指定箇所連続自動測定機能、調整機構付エンドステーション架台等、エンドステーション装置に密接に関わるものについても、様々な要望を頂いた。これらは、測定の手法や対象に応じて内容が多岐に渡るため、本委員会で統一的に議論することには限界があった。本委員会とは別の場で引き続き検討が必要である。

(c) 運営、ユーザー支援等に対する要望

運営に関しては、フレキシブルなビームタイム予約、学術研究向けのビームタイムの確保、課題選定基準への配慮とその価格設定、既存放射光施設の運休期間中における代替施設としての機能等、多岐に渡る要望が寄せられた。ユーザー支援に関しては、測定データ解析における専門家のサポート等の人的な技術支援の他、試料準備室・保管場所、工作室、シャワー室、仮眠室等の各種ユーティリティ支援の要望も数多く寄せられた。その他、学生を含むユーザーが最先端ビームライン等に気軽に足を運べる機会や施設側研究者とのフランクな交流等、放射光科学の発展に資する長期的な人材育成の必要性に関する意見もあった。

上記は、次世代放射光施設を効果的でより良い施設として運用する上で極めて貴重な意見・要望であるため、本委員会とは場を改めて、今後も引き続き検討を重ねていくことが必要である。

2) ビームライン提案のまとめ

国が整備するビームラインに関する具体的な提案が5件有り、それぞれ多数の共同提案者を伴うものであった。X線磁気円二色性分光(XMCD)(1件)、共鳴非弾性X線散乱(RIXS)(1件)、スピン分解・角度分解光電子分光(ARPES)(2件)、ガンマ量子研究(コンプトン散乱)(1件)である。その概要を表1に示す。これらの提案は、本委員会で国が整備すべきビームラインを検討するにあたり、重要な参考情報となった。検討の結果については、第6章で述べる。

表1 ビームライン提案の概要

ビームラインタイトル	概要
ナノ集光スピン分極 ARPES 実験ステーション【ARPES】	物質の電子構造(エネルギーと運動量の関係)を直接観測可能な角度分解光電子分光(ARPES)を基軸として、電子のスピン状態を分解し、更にはナノ集光した励起光源を用いることで実空間分解をも可能とする「ナノ集光スピン分解ARPES」を開発し、電子相分離、ドメイン、エッジ状態など、未開拓分野の物性研究を可能とする実験ステーションを提案する。
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【ARPES】	近年、鉄系高温超伝導体、グラフェン、トポロジカル絶縁体に代表される高機能先端材料の発見が相次いでおり、新規物性開拓やデバイス応用へ向けた研究が急ピッチで進められている。多くの材料科学および先端分光研究者の賛同のもと、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を提案する。

<p>磁性・スピントロニクス材料科学ビームライン【XMCD】</p>	<p>磁性・スピントロニクス材料科学研究を主眼とした軟 X 線ビームラインを提案する。磁性・スピントロニクス材料やデバイスの多元素化や多積層化に応じて、それらを分離して計測できる元素選択的な軟 X 線分光の重要性はますます高まる。本提案では、当該研究の将来の発展を見据え、次世代放射光の高輝度性を活かして、ニーズに応えられる新しい(1)計測技術や(2)分光手法を整備した革新的なビームラインを目指す。</p>
<p>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【RIXS】</p>	<p>次世代放射光施設による光源性能の向上の中でも、特に軟 X 線領域での性能向上を活用し、超高エネルギー分解かつ運動量分解が可能な共鳴非弾性軟 X 線散乱（軟 X 線 RIXS）を開発し、最先端の学術・産業研究を追求するビームラインを提案する。</p>
<p>ガンマ量子の基礎・応用研究ビームライン【コンプトン散乱】</p>	<p>ガンマ線領域の光子「ガンマ量子」の本質及び物質との相互作用を研究し、ガンマ線のあらたな産業利用を切り開くことを目的とし、次世代放射光施設に、大強度レーザーコンプトン散乱ガンマ線（LCS-γ）ビームラインを設置することを提案する。</p>

第5章 技術的課題の検討結果

本施設全体は、[別添資料7](#)に示すように、約245m×170mの大きさの基本建屋に収められる。周長約349mの蓄積リングは、16個のセルから構成され、各セルには光源を設置するスペースとして、5.44mの長直線部と1.64mの短直線部が設けられている。光源は、長直線部および短直線部にそれぞれ設置されるアンジュレータ（最大14か所）と多極ウイグラー（最大12か所）の合計26か所であり、偏向磁石部は光源として使用されない。光源からビームラインの末端までの距離は、長直線部、短直線部ともに60mが標準であり、実験ホールにビームラインの光を取り出すポートの出口から末端までは、43m程度である。

本施設の光源面での特色を一言でいえば、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線にも強みを持つ、低エミッタンス光源である。蓄積リング内の電子ビームの水平エミッタンスは、SPRING-8の1/3程度に相当する1.14 nm radで、これに応じてX線の空間コヒーレンスや集光性能等の向上が見込まれる。蓄積電子エネルギーが3GeVであることから、光子エネルギーが10keV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、とくに1keVから5keVにかけてのテンダーX線と呼ばれる領域では、大型放射光施設の将来のアップグレード後もなお優位性が期待される。

このような放射光施設の性能を発揮させるためには、挿入光源やビームライン光学系に新しい技術が必要になる。2018年（平成30年）8月にPhoSIC理事の諮問委員会であるビームライン構想委員会でもとめられた初期ビームライン答申においては、ビームラインを共通仕様のコンポーネントで構成するReady-to-Use (RtU) コンセプトを実現するという観点から、軟X線領域における偏光制御、集光光学系、およびビームラインを分岐するブランチ化の各技術課題について、詳細な検討がおこなわれている。本委員会では、ビームラインを効率的に建設運用する仕組みとしてRtUコンセプトの考え方を引き継ぎつつも、建設期における実現可能性および合理性を重視し、これらの技術的課題に対して、改めて検討を加えた。

1) 挿入光源ラインアップ

本委員会では、実用的な挿入光源のラインアップを決めるにあたり、以下の条件を考慮した。

- ① 利用実験において必要とされる光子エネルギー範囲、偏光の制御性、輝度・光子フラックス・コヒーレントフラックスなどの光源特性をラインアップ全体としてカバーすること
- ② 光学系に対する熱負荷が許容範囲であること
- ③ 個々のビームラインにおける光子エネルギー・偏光の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
- ④ 立ち上げ、運用ならびに更新を合理的に実行できるために、汎用性を有していること

上記の方針に沿った挿入光源として、概ね2keV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。APPLE-II アンジュレータは、1種類の光源で任意の偏光状態を生成できることから、挿入光源ラインアップを単純化するうえで合理的な選択と判断した。ただし、あらゆる偏光モードの利用を想定することは、アンジュレータ磁石列の駆動機構

を複雑にしたり、電子ビーム軌道補正を困難にしたりすることにつながり、現実的とはいえない。そこで、本施設においては、APPLE-II アンジュレータは、水平・垂直直線偏光および円偏光モードに限定して使用するものとする。また、挿入光源の磁石列の操作による偏光モードの高速切替は、電子ビーム軌道の安定性を確保することが著しく困難であることから、行わないことにする。本アンジュレータの主要な用途と想定される軟 X 線分光においては、科学的・産業的に重要な物質・材料の構成元素である炭素、窒素、酸素などの K 吸収端や、マンガン、鉄など 3d 遷移金属元素の L 吸収端が分布する 0.2keV から 1keV 程度までの光が要求される場合が多い。一方、光電子分光などの用途においては、表面に敏感な 0.05keV 前後の光に対する需要が大きい。しかし、これらの光エネルギー範囲を単一の APPLE-II でカバーすることは、現実的には不可能である。そこで本委員会では、周期長の異なる 2 種類の APPLE-II をラインアップに用意して対応することとした。

一方、いわゆるテnder-X 線以上の光エネルギー領域では、次節で述べるように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する。また、2keV 以上のエネルギーにおける広スペクトル光源として、多極ウィグラーを蓄積リングの短直線部に設置する。

以上の挿入光源ごとに試算した光源特性は別添資料 8 に示すとおりである。これらの情報に基づき、本施設における挿入光源は、標準的なものとしては表 2 に示す 3 方式 4 種類に集約するとともに、後述する通り、R&D が必要な分割アンジュレータ方式も一部利用することとした。なお、ここに示したパラメータは、今後の実設計において変更されることがある。

表 2 標準挿入光源ラインアップ

名称	方式	周期長 (mm)	周期数	偏光	エネルギー範囲 (keV)
APPLE-EUV	APPLE-II	75	56	水平直線 垂直直線 左右円	0.05～(3) 0.05～(3) 0.05～1.0
APPLE-SX	APPLE-II	56	75	水平直線 垂直直線 左右円	0.13～(4) 0.23～(4) 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

注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。

注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。

このような標準的な挿入光源ラインアップによって、本放射光施設は、最も輝度の高い 1 keV から 5 keV の軟 X 線およびテnder-X 線を中心に、真空紫外領域にあたる 50 eV から硬 X 線領域の 30 keV に至る広範囲のエネルギーの光を供給するとともに、偏光を制御することが可能となる。

また、標準挿入光源の拡張として、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分割アンジュレータも、第1次整備ビームラインにおける挿入光源のラインアップに含めるものとした。詳しくは、[別添資料8](#)の通りである。

2) ビームライン光学系

挿入光源の後段に配置されるビームライン光学系としては、分光器が必須であるほか、集光するための光学系と偏光制御のための光学素子についても共通的な光学素子として検討を行った。これらの3項目についての本委員会の結論を以下にまとめる。なお、技術的な検討の詳細は[別添資料9](#)のとおりである。

(a) 分光器

本施設が供給する光子エネルギーのうち、0.05 keV から 2 keV まで、および 4.4 keV から 30 keV までの範囲をカバーする分光器としては、それぞれ、既存の放射光施設で使用されている不等間隔回折格子分光器、Si(111)二結晶分光器を用いることが可能である。これらに対し、本放射光施設の最も特徴的なエネルギー範囲である 1 keV から 5 keV のテンダー-X 線領域に対しては、標準的といえる分光器が存在しない。そこで、いくつかの方式について適用可能性を検討した。

① テンダー-X 線領域用回折格子

回折格子を使った光学系で一般的な Au のコーティングは、2.2 keV 前後に存在する Au の吸収端のため、それ以上のエネルギー領域での使用が制限される。そこで、多層膜および Ni コーティングを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、Ni、Au など複数の種類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、分解能を確保しつつ、回折格子分光器でカバーするエネルギー範囲を 2 keV から 4 keV ないし 5 keV 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、低エネルギー側 (50 eV~) の性能は全く損なわれない。ビームライン全体を高エネルギーに対応できるようにしておけば、最初は 2 keV 以下の低エネルギー対応のビームラインとし、その後、テンダー-X 線領域対応の光学素子に更新することは容易である。

② シリコン二結晶分光器

SPring-8 で採用されている標準二結晶分光器では、低エネルギー側で第一結晶と第二結晶が接近するために、ブラッグ角 27 度に相当するエネルギー 4.4 keV が下限である。一方、エネルギーの上限は、ブラッグ角 3 度に対応する 30 keV となっている。同型の分光器で 4.4 keV より低いエネルギー範囲をカバーしようとする、入射 X 線ビームと出射 X 線ビーム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 より大きくすることが必要となる。そうすると、高エネルギー側で使用したとき、第一結晶の移動距離がオフセット距離に比例して長くなり、その結果分光器チェンバーが大型になるという問題がある。そこで、オフセット距離を 50mm と仮定し、使用エネルギー範囲を 2.1 keV から 20 keV までとする条件のもとで試算をおこなったところ、現実的なサイズの二結晶分光器を構成できることがわかった。したがって、2 keV から 20 keV までをカバーするビームライン用として、Si(111)分光器は実用的な選択となりうる。ただし、偏光制御を行う場合の光子エネルギーの下限は、ダイヤモンド結晶移相子が利用可能な 3.1

keV となる。

③ シリコンチャンネルカット分光器

チャンネルカット結晶を2個用いて4面で反射させる分光器を構成すると、二結晶分光器に比べて小型にすることができる。このようなチャンネルカット結晶で現実的な大きさを想定すると、幾何学的には2.4 keV から7.5 keV 程度の範囲をカバーすることがわかった。しかしながら、分光器を通過するX線のスループットを検討してみると、5 keV 以下では、シリコン結晶によるX線の吸収の影響が大きいことがわかった。結晶面での反射の回数が多いチャンネルカット分光器では、二結晶分光器に比べて、角度発散やエネルギー分解能にほぼ差がないにもかかわらず、効率が1/2 から1/5 に低下する。したがって、本分光器をテンダーX線領域で採用することは難しい。

(b) 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、水平直線偏光から垂直直線偏光、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、挿入光源側で偏光制御をする必要があり、偏光状態を保ったまま分光をおこなうために、分光器として回折格子の使用が必須となる。

(c) 集光光学系

集光光学系としては、色収差のないミラーの利用が妥当である。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、50 nm の集光ビームサイズを当面の目標とする。一方、光源サイズの大きい多極ウイ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 までの集光が可能である。

3) ビームライン機器構成の分類

挿入光源およびビームライン光学系に関する上記の検討に基づき、利用が想定される光子エネルギーおよび偏光に応じて、光源および光学系の組み合わせが以下のように整理される。なお、同じ構成であっても、個々の光学素子の仕様は、エンドステーションで実施される測定の種類等に応じて最適化されるため、利用できるエネルギー領域や光子数等ビームラインの仕様が必ずしも同一になるとは限らないことに注意が必要である。

表3 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	< 2 keV	APPLE-II	回折格子 (Au)	-
偏光	< 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。

4) ブランチ化の検討

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となる可能性がある。そこで、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それぞれについて、ブランチ化することの有効性を検討した。しかしながら、その結果は、いずれの挿入光源に対しても、ブランチ化して同時利用を行う意義は乏しく、一つのビームラインをブランチ化して複数のエンドステーションを設置する場合も、排他的な利用が合理的であるという結論になった。

アンジュレータビームラインでは、それぞれの実験で用いる光子エネルギーに合わせて、アンジュレータ磁石列のギャップを変更する必要がある。光子エネルギーを独立に変えられないのは、運用上、著しい制約になるため、同時利用を想定したブランチ化は現実的ではない。

一方、多極ウィグラービームラインは白色スペクトルを供給するため、ギャップの運用の問題はない。しかしながら、多極ウィグラービームラインをブランチ構成にした場合の利点は、挿入光源が1台であるという点だけであり、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本建設する場合と変わらない。さらに、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ことは、マイナス要因である。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考えられる。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、片方が放射光利用実験に供されている間にもう片方で測定の前準備を進めること等を可能にし、実験の効率を高める効果が期待できる。

第6章 第1期整備ビームラインラインアップ

前章の技術的検討等を踏まえ、策定された第1期整備ビームライン10本のラインアップを表4（詳細は別添資料10）に示す。「ビームライン構想委員会」の答申や本委員会が行った意見募集の結果などを踏まえ、10本のビームラインのうち、7本をパートナーが整備、3本を国が整備することが適切であると考えた。表4のビームラインには、ローマ数字でBL-I、BL-IIのように番号を振っている。この番号は、識別のための仮符号であって、ビームラインの配置や建設の順序、優先順位等を示すものではない。また、リスト中の想定される利用分野は、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を記し、ビームラインの特徴を具体的に説明するために付記したもので、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。別添資料10において、多くのビームラインにはA・B二つのブランチが設けられているが、これらは分光器までを共有する排他的利用を想定したものである。

BL-IからBL-VIIは、パートナーにより整備される。これらのラインアップは、PhoSIC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結果を反映している。

一方、国が整備するBL-VIIIからBL-Xとしてどのようなものがふさわしいかについては、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、ビームライン構想委員会初期ビームライン答申における国ビームラインの提案等を参考にしながら、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、詳細な検討を行った。その結果、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った。このうち、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、本委員会で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した。また、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、パートナーが整備するBL-VIにおける共鳴非弾性散乱とは明らかに異なるもので、先端的な学術研究に重点をおく国のビームラインラインアップに含めるものとした。なお、意見募集に対して提案のあったガンマ量子研究に関するビームラインは、大強度レーザーコンプトン散乱ガンマ線の基礎・応用研究に関するもので、学術・産業界を含む幅広いユーザーの利用に供する共用ビームラインという目的とは狙いを異にすることから、第1期整備ビームラインには含めず、将来計画のひとつとして今後の検討に委ねることとした。また、ビームライン構想委員会により国ビームラインとして提案されていた、動的現象をリアルタイムで追跡するビームラインは、目的とする計測が今回パートナーにおいて整備すべきとしたビームラインを用いて実現可能であることから、本委員会では国ビームライン側のラインアップには含めていない。

以下に本ビームラインラインアップの策定にあたって考慮したポイントを挙げる。

- ① 各ビームラインは、特定の学術分野、研究テーマに結び付けられるというよりは、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を想定している。

- ② 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オペランド状態での種々の分光測定が可能になる。とくに、多極ウイグラービームラインである BL-II とアンジュレータビームラインである BL-VII を隣接して設置しておけば、将来、BL-VII に横振り光学系を採用することで、同一試料上に軟 X 線とテンダー X 線を照射するエンドステーションを構成できる。これら 3 本の関連するビームラインを近接して配置することは、オペランド測定のために必要になる測定試料を準備するための施設や廃液・排気設備をこれらのビームラインで共通に使用できるという点でも利点がある。
- ③ 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カバーすることが意図されている。
- ④ BL-II と BL-III は、光源は同じ仕様の多極ウイグラーであるが、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。
- ⑤ 国が整備を担当する BL-VIII から BL-X では、高い学術成果の創出につながるべきとする位置づけを考慮し、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おこなっている。BL-VIII、BL-X は、パートナーにより整備される BL-VI で計画されている軟 X 線光電子分光、共鳴非弾性散乱とは異なり、スピン分解を標準仕様としたり、エネルギー分析を高分解能化したりすることで、先端的研究に供することを目的としたものである。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。また、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の高コントラスト化もねらいとしている。BL-IX における開発成果は、一定期間の後に 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想定している。

表 4 第 1 期に整備するビームラインのラインアップ

所掌	BL 番号	名称	計測手法例*)	光源	エネルギー (偏光)	エネルギー分解能	ビームサイズ
パートナー	BL-I	X 線オペランド分光	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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)	$E/\Delta E=7,000$	100 nm
	BL-II	X 線構造・電子状態トータル解析	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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)	$E/\Delta E=7,000$	50 μ m
	BL-III	X 線階層的構造解析	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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)	$E/\Delta E=7,000$	50 μ m

	BL-IV	X線コヒーレントイメージング	<ul style="list-style-type: none"> ・ コヒーレント回折イメージング ・ タイコグラフィー ・ タイコグラフィー-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/ Δ E= 7,000	50 μ m (非集光) 100 nm (集光)
	BL-V	軟X線磁気イメージング	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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/ Δ E= 10,000- 30,000	< 50 nm
	BL-VI	軟X線電子状態解析	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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/ Δ E= 10,000- 30,000	< 50 nm
	BL-VII	軟X線オペランド分光	<ul style="list-style-type: none"> ・ 準大気圧X線光電子分光 ・ 準大気圧X線吸収微細構造分光 ・ 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/ Δ E= 10,000- 30,000	< 50 nm
国 (共用)	BL-VIII	軟X線ナノ光電子分光	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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/ Δ E= 10,000- 30,000	50 nm- 10 μ m
	BL-IX	軟X線ナノ吸収分光	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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/ Δ E >10,000	50 nm- 10 μ m
	BL-X	軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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/ Δ E >150,000	< 500 nm

*) ここに挙げた計測手法はあくまで例示であり、各ビームラインの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。

第7章 ビームライン建設の具体化に向けて

本委員会における初期整備ビームラインのラインアップの策定過程およびそのために必要な技術的要素の検討過程では、直接に本委員会のスコープには含まれないもののビームライン建設に着手する前にさらに検討をおこなう必要があると考えられる事項がいくつか浮かび上がってきた。今後、ビームライン建設チームが詳細設計を進める際の要検討事項として、これらを以下にまとめておく。

1) ビームラインの配置

本施設には、最終的にはアンジュレータビームライン 14 本、多極ウィグラービームライン 12 本の計 26 本を設置可能である。その中で、本委員会で検討した第 1 期整備ビームライン 10 本をどのように配置するかは、施設の長期戦略と関連する重要事項である。一方で、加速器およびビームライン全体を収容する基本建屋におけるスペース上の境界条件も存在する。したがって、今後、ビームラインの配置を決定するにあたっては、様々な観点から検討がなされるべきであるが、本委員会の議論の中では、特に以下の点が指摘された。

- ① これまでの放射光施設では、一つ一つのビームラインごとに建設が検討されてきたため、手法や分野などに対して比較的ランダムにビームラインが配置されてきた。TPS (Taiwan) や NSLS-II (USA) などの最近の放射光施設では、手法(散乱/回折、分光、イメージング)に応じて区画を分けてからビームライン配置を検討したり、計画を複数のフェーズに分けて分野バランスや技術展開を考慮しながら建設ビームラインの優先度を決めたりしている。このような戦略的アプローチを本施設でも検討すべきである。
- ② 極限的なナノ集光やコヒーレント光の利用にあたっては、挿入光源や分光器、ミラーなど個々の光学デバイスの仕様だけでなく、それらのビームライン上での位置関係や、光源からの距離を含めたビームライン光学系全体のデザインを最適化することが、ビームの性能に本質的な影響を与える。すなわち、基本建屋内でのビームラインの配置は、光学系の設計の自由度を左右する要素になりうるため、細心の検討が必要である。
- ③ BL-I、BL-II、BL-VII における計測手法として想定されているオペランド電子状態解析などにおいては、ポンプ・プローブ測定のための励起用レーザーなど、ビームライン機器以外に大型の補助装置が使用される可能性もある。また、BL-X で想定される超高エネルギー分解・運動量分解共鳴非弾性軟 X 線散乱では、大型のビームライン分光光学系と発光分光器が必要である。そのほか、BL-III で想定される階層的構造解析では、超小角散乱の需要も見込まれる。このような利用実験のためには、施設において十分なスペースを用意する必要があり、ビームラインの配置を決定する際に留意すべき事項である。
- ④ 本施設では、一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を想定している。例えば、軟 X 線からテnder X 線にわたる広いエネルギー領域でオペランド状態での種々の分光測定を行うことをねらいとした BL-I、BL-II、BL-VII の組み合わせが典型的である。こういった関連するビームラインは、近接して配置することにより、測定試料準備のための諸施設や廃液・排気設備を効率的に整備できると考えられる。

2) 具体的なビームライン光学系の構成方針

(a) 真空紫外および軟 X 線ビームライン

極端紫外～軟 X 線ビームラインの光学系は、回折格子を用いた分光器を主要な構成要素とする。基本的には、標準型 (BL-V、VI、VII、VIII、IX) と超高分解能型 (BL-X) の 2 種類により構成するのが妥当であり、検討の結果の概要を以下に示す。今後、回折格子の刻線数、ミラーに対するビームの視射角等を個々のビームラインの使われ方等を考慮して最適化する必要がある。

【標準型光学系の概要】

- ① 前置集光ミラーについては、トロイダルあるいはシリンダリカルミラーとする。
- ② 分光器のタイプとして、縦方向の収束光を回折格子に照射する場合 (PF、SPring-8 で採用) と、発散光を回折格子に照射する場合 (近年海外で採用例が多い) の 2 通りある。後者の方がシンプルな光学系で高分解能であるが、調整は難しい。
- ③ 分光器の下流側には、ブランチを設けるための振り分けミラーを設置する。
- ④ 後置集光ミラーにはウォルターミラーもしくは KB ミラーを使用する。

【超高分解能型光学系の概要】

- ① 入射スリットを設けるとともに長尺化が必要である。
- ② 前置集光ミラーについては、2 枚のシリンダリカルミラーを用い、それぞれでサジタル方向とタンジェンシャル方向の集光をおこなう。

(b) テンダー X 線ビームライン

テンダー X 線ビームラインは、液体窒素冷却シリコン完全結晶を用いた二結晶分光器と全反射ミラーから構成される。全反射ミラーの役割は、集光および高調波成分の除去である。特に、2 keV から 5 keV にかけての領域では、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、高調波除去のために特別な配慮が必要となる。集光については、ビームサイズがアンジュレータ (BL-I、IV) と多極ウイグラー (BL-II、III) では大きく異なるため、それぞれに対し異なる方式を採用する必要がある。以下の方針で詳細を検討していく必要がある。

【アンジュレータビームライン】

- ① 集光は KB ミラーでおこなう。垂直方向の集光については、光源像を直接結像させる。水平方向の集光については、分光器より下流に設置したスリットによる仮想光源の像を結像させる。
- ② 高調波除去のためには、使用する光エネルギーに応じて、ミラーの X 線全反射臨界エネルギーを切り替える必要がある。それには、視射角を変える方法と、ミラーのコーティング材を変える方法があるが、集光と高調波除去の役割を 1 枚のミラーで兼ねる場合、集光条件が変化してしまうので視射角を変えることはできない。したがって、異なるコーティング材で塗り分けたミラーを適宜移動させる仕組みが必要になる。ただし、実用的なコーティング材の選択肢には、限界があることにも留意する必要がある。

【多極ウィグラービームライン】

- ① 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、集光はトロイダルミラーを用いておこなう。
- ② トロイダルミラーでは、視射角とともにミラーの水平位置も固定とする必要があり、臨界エネルギーを切り替える方法が存在しない。したがって、高調波除去の目的には、別途、平面ミラーを追加する必要がある。

すべてのビームラインに共通することとして、使用エネルギー範囲を狭めることで、高調波をはじめ、光学系の設計に関わる問題はかなり緩和される。したがって、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設定することが合理的なビームライン設計につながる。

3) R&D 項目

本委員会でビームラインラインアップを策定するにあたっては、実現可能性を重要な判断基準とし、現時点で利用可能な最新の技術を採用した。しかし、その一方で、次世代放射光施設の完成がおよそ4年後であることから、それまでに実現の見通しが得られる新しい技術の一部は前提として取り入れた。本委員会で検討され、ビームラインラインアップに組み込まれた R&D 要素には、以下のようなものが含まれる。ビームライン建設に向け、これらの要素技術の R&D を実施する必要がある。

- ① 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
本施設が強みとするテンダー-X線 (1-5 keV) 領域を活用しつつ、さらに高エネルギー側も利用できる分光器の開発。
- 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
本施設が強みとするテンダー-X線 (1-5 keV) を含む低エネルギー側の領域を利用できる回折格子の開発および性能評価。
- ③ 分割アンジュレータ
円偏光の利用エネルギー範囲を高エネルギー側に拡大するとともに、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、偏光の高速スイッチングを可能にする挿入光源の開発。
- ④ 水平振りの軟 X 線光学系
軟 X 線アンジュレータビームラインからのビームを水平に振ることにより、隣接する多極ウィグラービームラインと交差させ、軟 X 線とテンダー-X線を同一試料上に照射する新規光学系の開発およびそれを利用したポンプ・プローブ法や分光と回折の同時測定など、新しい測定手法の開発。
- ⑤ 軟 X 線用集光光学系
従来技術であるフレネルゾーンプレートよりも集光効率が高く、色収差のない、ミラーを用いた 50nm 集光素子の開発。
- 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 3.1keV から 4keV 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。

なお、これらの技術は、次世代放射光施設への導入が確定したものではなく、さらに新しい技術が開発されたときには、その都度置き換えられていくことを想定している。

第8章 まとめ

今回、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、ならびに施設の完成後速やかに運用を開始すべき第1期整備ビームライン10本のラインナップ案を策定し、本報告書に提示した。また、合わせて、今後ビームライン建設の具体化に向けて更なる検討が必要な項目についてもまとめてある。本報告書は、まもなく開始されるビームラインの詳細設計や整備作業におけるベースとなるものであるが、その内容については、常に新しい観点で修正・変更が加えられることを想定している。

本委員会のこれまでの議論では、ビームライン上流側の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ける検討・協議が行われ、本委員会の検討内容と合わせる形でビームライン整備に反映されることを期待する。また、各ビームラインやエンドステーションの配置、建設の具体的なスケジュール、構築するために必要な予算や人員、試料準備やデータの収集、蓄積、解析等に必要な付帯設備についても、今後の継続的な検討が必要である。

