

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

令和2年3月27日

次世代放射光施設利用研究検討委員会

目次

はじめに	3
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	4
2) 次世代放射光施設の検討の推移	5
第2章 本委員会の進め方	
1) 本委員会設置の意義、開催	7
2) 利用研究の具体化の検討方針	8
第3章 ビームラインワーキンググループでの検討	
1) ナノ光電子分光ビームラインワーキンググループ	9
計測手法の特徴	
フラッグシップ研究	
エンドステーションの構成	
2) 超高エネルギー分解能非弾性軟 X 線散乱ビームラインワーキンググループ	12
計測手法の特徴	
フラッグシップ研究	
エンドステーションの構成	
3) 磁性・スピントロニクス材料科学ビームラインワーキンググループ	15
計測手法の特徴	
フラッグシップ研究	
エンドステーションの構成	
4) 3本のビームラインの相補利用研究の検討	19
第4章 今後の活動について	
1) 次世代放射光施設の整備スケジュール	21
2) 今後のビームラインの仕様検討・詳細設計の進め方及び その他の検討事項について	22
まとめ	24
謝辞	

【資料】

- 資料1 次世代放射光施設利用研究検討委員会規則
- 資料2 次世代放射光施設利用研究検討委員会委員名簿
- 資料3 次世代放射光施設利用研究検討委員会の開催状況
- 資料4 ビームラインワーキンググループの開催状況
- 資料5 ビームラインワーキンググループ報告書
- 5-1 ナノ光電子分光ビームラインワーキンググループ報告書
- 5-2 超高エネルギー分解能非弾性軟 X 線散乱ビームラインワーキンググループ報告書
- 5-3 磁性・スピントロニクス材料科学ビームラインワーキンググループ報告書
- 資料6 次世代放射光プロジェクトの概要及び進捗状況

【参考資料】

- 参考資料1 「次世代放射光施設検討ワーキンググループ報告書」
https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chousa/gijyutu/022/houkoku/1357455.htm
- 参考資料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(報告)」
https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afieldfile/2018/01/19/1400545_2_1_1.pdf
- 参考資料3 「ビームライン意見募集要領」
https://www.3gev.qst.go.jp/files/betten_files/betten5.pdf
- 参考資料4 「次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書 (1)」
https://www.3gev.qst.go.jp/BL_report.html

はじめに

本報告書は、科学技術・学術審議会量子ビーム利用推進小委員会において、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。）が、2018年（平成30年）1月「次世代高輝度放射光施設の整備・運用を進める国の主体」に指名されたことを受け、量研内に「次世代放射光施設利用研究検討委員会」（以下「本委員会」という。）を設置し、両宮慶幸委員長のもと、次世代放射光利用研究とそれに必要な装置等について検討を重ねた結果を取りまとめたものである。

我が国の放射光研究が開始されてから約半世紀が経過し、これまでに9つの放射光施設が整備され、多数の研究者が利用する共用施設あるいは共同利用研究所として運用されている。光源の高い透過性能や微細構造解析技術等を利用した物質科学、生命科学、地球科学分野等の幅広い分野で数々の高インパクトな学術成果を生み出すとともに、創薬から新材料開発等の広範な産業利用への応用展開を通じて幅広く社会に還元することで、イノベーションの源泉としての役割を果たしてきた。

一方、海外においては、2000年代に軟X線向け高輝度光源が相次いで建設されはじめ、欧米、台湾、韓国で稼働開始するなど、3 GeV級の軟X線高輝度光源の整備が進んでいる。これに対して、我が国には軟X線領域に強みを持つ高輝度放射光施設は存在しておらず、科学的にも産業的にも利用価値の高いこの波長領域の放射光施設を早急に整備し活用することが求められている。

量研は、「量子科学技術による『調和ある多様性の創造』により、平和で心豊かな人類社会の発展に貢献する」との基本理念のもと、世界トップクラスの量子科学技術研究開発プラットフォームを構築することや産学官連携活動を推進しイノベーションハブとしての役割を担うことを重要な経営戦略に位置付けている。その一環として、放射光科学、量子ビーム利用、科学技術・学術の幅広い分野におけるオールジャパンの著名な有識者により構成された本委員会にて、最先端の軟X線高輝度放射光を利用した研究について検討を積み重ねた。

本報告書の構成は以下の通りである。第1章及び第2章にて、次世代放射光施設整備の経緯及び本委員会設置の意義等を述べ、第3章にて本委員会のビームラインワーキンググループによる具体的な検討の結果を記した。第4章には、今後の活動について、整備計画と取組を記載するとともに、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

次世代放射光施設に関する国の検討は、文部科学省科学技術・学術政策局において平成26年度に開催された次世代放射光施設検討ワーキンググループでの会議に端を発する。当ワーキンググループでは、8回に及ぶ会議を通じて、2015年（平成27年）4月に「次世代放射光施設検討ワーキンググループ報告書」（参考資料1）が取りまとめられている。この中で、我が国が世界の動向から遅れを取っていること、軟X線の中型高輝度光源の開発・整備の重要性が指摘されると共に、既存の硬X線大型放射光施設等との相補的な利用によって実現可能な分散型放射光プラットフォームは、量子科学技術基盤の中核を担うことが記されている。

この軟X線光源の実現に向けた次世代放射光施設に関する国の具体的な検討は、文部科学省科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会のもと、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。）において行われた。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や、求められる光源性能、具体的な利用研究及び整備・運用の基本的考え方等について、計14回にわたる議論がなされ、その結果が「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）」（参考資料2）として取り纏められた。この中では、新たな軟X線向け高輝度放射光源の早期整備が必要であること、国の整備・運用の主体は量研が適切であること、整備・運用に積極的に関わる地域及び産業界とともに、財政負担も含め、官民地域パートナーシップにより計画を推進することが適当であること、などが示されている。

この検討結果を踏まえ、2018年（平成30年）1月、文部科学大臣は量研を「次世代高輝度放射光施設の整備・運用を進める国の主体」に指名するとともに、「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のパートナーの募集を開始した。回答のあった1件の応募について、小委員会における提案内容の調査検討の結果、同年7月に、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。）を代表機関として、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たことに併せて、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。

これを受けて、同年9月、国の主体である量研と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、両法人による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、平成31年度政府予算要求案に「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、令和 5 年度に施設の運用開始を目指すことが発表された。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、加速器の整備は国が担い、基本建屋を含む用地整備（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 本、パートナーが最大 7 本を分担するなど、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、次世代放射光施設の整備開始に至っている。

2) これまでの次世代放射光施設の検討の推移

量研と PhoSIC は、両機関の連携協力協定に基づき、2018 年（平成 30 年）12 月に「次世代放射光施設ビームライン検討委員会（以下「BL 検討委員会」という。）」を合同で設置した。この BL 検討委員会において、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及び、2023 年（令和 5 年）に運用を開始すべき（第 1 期整備）ビームラインの概要の検討が進められた。さらに、量研が整備する 3 本のビームラインとパートナーが整備する 7 本のビームラインについて、「次世代放射光施設ビームラインに関する意見募集」（参考資料 3）が 2018 年（平成 30 年）12 月 26 日～翌年 2 月 15 日の間に行われ、具体的な利用やビームラインの種類、諸元、性能等についての情報が収集された。この中で、PhoSIC における 7 本のビームライン整備の検討においては、「東北放射光施設計画エンドステーション・デザインコンペ」及び「ビームライン構想委員会」での報告内容に対する意見及び産業界からの要望内容が集約された。

一方、量研が整備する 3 本のビームラインについては、最先端科学を推進するための研究課題に必要な施設として、5 件の具体的なビームラインの提案があった。これらの提案内容について、BL 検討委員会にて議論を重ねた結果、軟 X 線ナノ光電子分光、軟 X 線ナノ吸収分光、軟 X 線超高分解能共鳴非弾性散乱の 3 つに絞られた。これらのビームライン用光源としては、概ね 2 keV 以下の真空紫外から軟 X 線までを発生可能な APPLE-II 型アンジュレータを基本とするものの、個々のビームラインにおける各分光手法等の高度化に応じて、それぞれの挿入光源として EUV 型、分割型及び SX 型を選択する。

本施設の最終設置可能ビームラインの本数は当初計画では 26 本とされていたが、その後の検討により 28 本に変更されている。なお、第 1 期に整備する 10 本のビームラインのラインアップについては、「次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書（1）」（参考資料 4）に仕様概要が取り纏められている。この内、国が整備する 3 本のビームラインに関する概要について、表 1 に記す。

表 1 のビームラインの仕様概要を基に、利用研究に必要な光源性能ほか、光学系並びにエンドステーションを含めたビームラインの構築に向けて、より具体的な検討を行うことが、本委員会の主目的となる。

表 1 BL 検討委員会における国のビームラインの仕様概要

BL 番号	名称	典型的な測定手法	光源	エネルギー	偏光	ビームサイズ
BL-VIII	軟X線ナノ光電子分光	<ul style="list-style-type: none"> スピン・角度分解光電子分光 	APPLE-II 75mm x 56	0.05-1 keV	<ul style="list-style-type: none"> 水平直線 垂直直線 左右円 	50 nm - 10 μm
BL-IX	軟X線ナノ吸収分光	<ul style="list-style-type: none"> XMCD XMLD STXM 磁気CDI X線強磁性共鳴 	分割APPLE-II 56mm x 13 x 4	0.15-2 keV	<ul style="list-style-type: none"> 水平直線 垂直直線 左右円 [偏光高速切替]	50 nm - 10 μm
BL-X	軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱	<ul style="list-style-type: none"> 共鳴非弾性X線散乱 軟X線非弾性回折 	APPLE-II 56mm x 75	0.25-1 keV	<ul style="list-style-type: none"> 水平直線 垂直直線 左右円 	< 500 nm

第2章 本委員会の進め方

1) 本委員会設置の意義、開催

先のBL検討委員会での意見募集の結果を基に、国が設置する3本のビームラインについて検討を進めるため、量研は「次世代放射光施設利用研究検討委員会（以下「本委員会」という。）を2019年（令和元年）5月10日付けで機構内に設置した（「次世代放射光施設利用研究検討委員会規則」資料1）。

本委員会は、次世代放射光施設において、以下の事項の検討を行うことを所掌業務としている。

- (1) 国が設置するビームラインを利用した最先端研究（フラッグシップ研究）に関する事項
- (2) 前号に必要なビームラインの付属実験設備、ビームラインに係る運用形態に関する事項
- (3) その他次世代放射光施設の利用研究に関して検討が必要な事項

委員長は、量研の量子ビーム科学部門長による指名または委嘱された外部有識者とし、委員については、当部門長が指名する量研の職員及び委嘱された外部有識者により構成されている。本委員会の委員名簿を資料2に示す。本委員会は、2019年（令和元年）6月から翌年3月にかけて、計3回開催した。

第1回の本委員会では、当委員会の位置付けとして、最先端のサイエンス並びにその実施に必要なエンドステーションについて検討する場であることが確認された。その後、BL検討委員会での意見公募による4つの提案内容についての報告が行われた。この中で、国が設置する3本のビームラインに共通した課題として、国際的観点を十分に踏まえて設置すべきビームラインを構想すると共に、幾つかの技術的課題について検討することとなった。その実施に向けて、本委員会設置細則に基づき、各ビームラインについてワーキンググループでの具体的な検討を行うために、委員長は各グループの主査を選任した。

第2回の本委員会では、次世代放射光施設の整備状況において、基本建屋、実験ホール並びにビームラインの配置図（案）等具体的内容が示された。各ビームラインワーキンググループ主査による技術検討の中間報告の内容に関して、実施の妥当性や現実性等の観点について議論を行った。

第3回の本委員会は、諸般の事情により集合形式の開催に代えてメール審議を行った。各ビームラインワーキンググループの報告書の内容を取りまとめた本委員会報告書「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（案）」を審議した決定、可決された。なお、当審議の際に頂いた修正内容およびコメントに対する修正を、本報告書の該当部分に加えた。

各回の日程及び主な議事内容について、資料3に示す。

2) 利用研究の具体化のための検討方針

第1回本委員会にて、3本の国のビームラインに関する具体的検討を行うために、委員長は、以下のワーキンググループを設置した。

- ◎ 【尾嶋正治 主査】 ナノ光電子分光ビームラインワーキンググループ
- ◎ 【宮脇 淳 主査】 超高エネルギー分解能非弾性軟X線散乱ビームラインワーキンググループ
- ◎ 【木村昭夫 主査】 磁性・スピントロニクス材料科学ビームラインワーキンググループ

それぞれのビームラインワーキンググループは、主査が選任した国内の専門家により構成し、複数回にわたり開催した。その状況について、資料4に示す。

各ビームラインワーキンググループでは、国の小委員会での議論やBL検討委員会からの意見等、また海外の放射光施設の動向や科学技術の現状・将来性を踏まえ、ビームラインで将来実施すべき最先端の学術研究と、その実施に必要なエンドステーションの設備・装置の仕様等について、令和5年度の施設利用開始のスケジュールを想定して、具体的に検討を行った。

次章に、その概要を記す。

第3章 ビームラインワーキンググループでの検討

各ビームラインワーキンググループでの検討の結果、それぞれの利用研究において必要となるビームラインの仕様概要を表2に記す。

表2 利用研究の実施に求められるビームラインの仕様概要

BL 番号	BL WG 名称	エネルギー 範囲(eV)	エネルギー 分解能 (E/ Δ E)	偏 光	ビームサイズ	その他の 特徴
BL-VIII	ナノ光電子 分光 BL WG	50-1000 (円偏光： 50-1000) (直線偏光： 100-1000)	30,000-50,000	左右円偏光 水平・垂直 直線偏光	Aブランチ：30 nm 以下 Bブランチ：1 μ m 程度	
BL-IX	磁性・スピント ロクス材料科 学 BL WG	計測可能範囲 ：128-3000	10,000		Aブランチ： 10 μ m x 10 μ m ~ 1 μ m x 1 μ m 程度 Bブランチ： 10 nm x 10 nm 程度	偏光高速切 替による時 分割計測が 可能
BL-X	超高エネルギー 分解能非弾 性軟X線散 乱 BL WG	250-2000 (1000 eV 以上 は高次光を利 用)	150,000 以上 (1000 eV 以下 にて)		0.5 μ m x 2.5 μ m 以下	

BL：ビームライン WG：ワーキンググループ

「次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書（1）」（参考資料4）で検討された国のビームラインの光源性能（表1）と諸元が一部で異なるが、これらは以下に記載する各ワーキンググループによる詳細検討に基づき改訂した結果である。

各ビームラインワーキンググループでの検討結果の概要を以下に記す。

詳細については、資料5-1，5-2，5-3を参照のこと。

1) ナノ光電子分光ビームラインワーキンググループ

（資料5-1）

研究手法の特徴

物質に(軟)X線が照射されると、光電効果により光電子が放出される。光電子は物質の電子状態を反映する。その光電子放出角度依存性を測定する角度分解光電子分光（Angle-resolved photoemission spectroscopy, ARPES）では、固体内のバンド分散を測定できる。本ビームラインでは、スピン分解かつ30 nm以下の空間分解能で角度分解光電子分光（ARPES）を行う世界でも例のない最先端ビームラインを建設し、これまで不可能であった1) 対象物質の不均一試料への拡大、2) 電子デバイスのオペランド解析、3) 多元環境下

での測定、を世界に先駆けて実現する。現在のところ、数 100 nm のナノ領域の電子状態を解析するナノ ARPES はすでに欧米 4 放射光施設で稼働しているが、本 spin-resolved nano ARPES は初めての試みである。これを実現するポイントは従来のフレネルゾーンプレート (FZP) に比べて約 2 桁の高フラックス化と大きな working distance が実現可能な Wolter ミラー(東大院工三村研で開発)を使用すること、さらに高効率の Multichannel spin detector (広大奥田研などで開発)を使用すること、の 2 点である。

本ナノ光電子分光ステーションでは、上記世界最先端を目指すとともに、ニーズとシーズのマッチングを重要視するため、ブランチビームラインにマイクロ ARPES 装置を設置して高効率・高生産性実験も行う (オペランド測定、光電子回折測定も可能)。

フラッグシップ研究

ナノ光電分光ビームラインとして、30 nm 以下の空間分解能で、かつスピン分解できる角度分解光電子分光(ARPES)を行う世界でも例のない最先端ビームラインを建設することで、これまで困難であった様々な新しい実験が可能になる。

具体的には、1) 多岐に亘る新規物質材料における電子状態決定、2) デバイスのオペランド解析、3) 多元環境下での測定、などにおいて世界を先導する成果が得られる。スピン分解測定においては、従来測定対象とされている強磁性体の交換分裂の観測や、ラシュバ・トポロジカル絶縁体などのスピン軌道相互作用の強い量子物質におけるスピンテクスチャの決定を、3次元運動量を指定してこれまでに無い高精度で行うことができる。軟 X 線を用いた高空間分解能スピン分解 ARPES 装置は世界でまだ稼働しておらず、バルクのスピン偏極電子状態解明において世界を先導する成果が期待される。加えて、世界に例をみない「スピン分解」と「ナノ空間分解」の同時実現により、トポロジカル絶縁体のスピン流(試料エッジのスピン偏極バンド)や、原子層物質等からなる磁気多層膜、磁気抵抗素子など先端スピントロニクス材料・デバイスにおける表面下や埋もれた界面のローカルなスピン構造の決定ができる。さらに、局所高速磁化反転機構の解明やスピン電界効果トランジスタや磁壁移動型メモリにおける局所的なスピン反転や空間(実・逆)スピン制御の可視化や高精度測定がはじめて可能となる (図 1)。

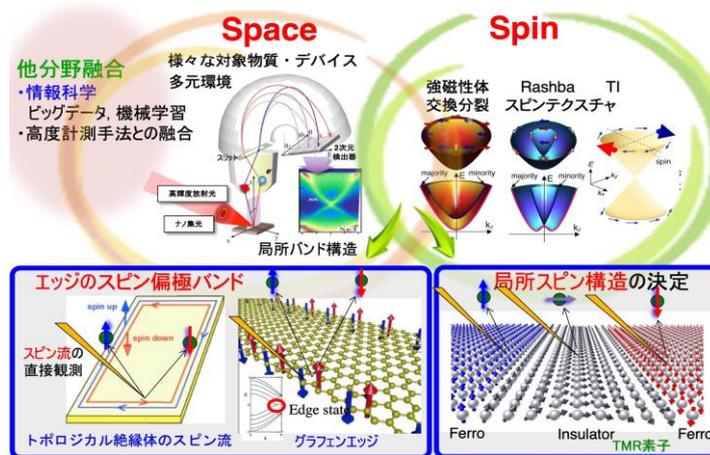


図 1 ナノとスピンの組み合わせによる研究例

エンドステーションの構成

本ビームラインのエンドステーションでは、空間分解能 30 nm 以下、エネルギー分解能 10 meV 以下での世界最高性能のナノ ARPES を行い、更にナノ集光下では世界初となるスピン分解 ARPES の実現を目指す。エンドステーションの光源は、APPLE-II アンジュレータ(名称：APPLE-EUV)とする。また、分光器には不等間隔 PGM を採用し、エネルギー範囲は円偏光 50-1000 eV (直線偏光の低エネルギーでの利用は熱負荷の対応できる範囲)、エネルギー分解能は 50000 以上で、試料上光子密度は 10^{11} photons/s 以上の光を利用できるようにする。

<エンドステーションの仕様>

①A ブランチ：ナノ集光スピン分解 ARPES

- ・ ±15 度以上の 2 次元角度分解測定
- ・ 2 次元マルチチャンネルスピン検出器
- ・ 空間分解能：30 nm
- ・ 最低試料温度：30 K
- ・ エネルギー分解能：光エネルギー分解能 30000 以上、アナライザ分解能 10 meV 以下

②B ブランチ：マイクロ集光高分解能 ARPES

- ・ ナノ ARPES 装置と互換性のある電子分析器
- ・ シングルチャンネルスピン検出器
- ・ 空間分解能：1 μm
- ・ 最低試料温度：10 K
- ・ エネルギー分解能：光エネルギー分解能 50000 以上、アナライザ分解能 2 meV 以下

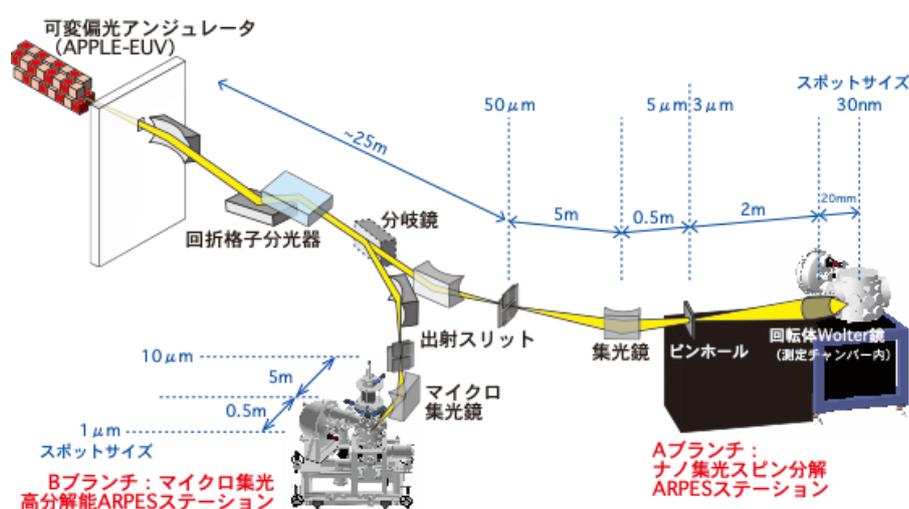


図2 ナノ光電子分光ビームライン構成と距離・スポットサイズの概算

2) 超高エネルギー分解能非弾性軟 X 線散乱ビームラインワーキンググループ

(資料 5-2)

計測手法の特徴

共鳴非弾性軟 X 線散乱 (Soft X-ray Resonant Inelastic X-ray Scattering, SX-RIXS) とは、「軟 X 線」を「共鳴」条件で物質に照射した際の「非弾性散乱」現象を利用した観測手法のことである。非弾性散乱とは、粒子を物質に衝突させた時、散乱過程において粒子と物質間でエネルギーの授受が起こり、散乱前後で粒子のエネルギーが変化する散乱のことである。こ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最も直接的に観測できる。軟 X 線領域の光子を利用することにより、軽元素の *K* 端や 3*d* 遷移金属の *L* 端、ランタノイドの *M* 端などの、物質の機能と密接に関わる価電子への吸収を選択的に行うことができる。

RIXS で観測できる励起は、電子状態そのものを反映する結晶場や軌道内遷移 (*dd* 励起や *f* 励起など)、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 (マグノン) 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の授受だけでなく、運動量の授受も起こるため、散乱角 (検出角) 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、X 線を照射し、X 線を検出するため、試料への侵入長が深くバルク敏感であり、電場や磁場などの外場による影響を受けることなく電子状態の観測が可能であり、物質の状態 (固体や液体、気体) や電気伝導性 (金属や半導体、絶縁体) などを選ぶことなく測定できることから、広く利用されてきた。このように、SX-RIXS は物性研究、物質科学において最強の分光手法の一つと言っても過言ではない。

フラッグシップ研究

量子物質では、銅酸化物超伝導体の擬ギャップ・超伝導ギャップ・電子格子相互作用の解析、多軌道電子系・磁性体のスピン励起解析による物性解明や、磁性と格子が結合したエレクトロマグノンの観測や励起子絶縁体といった特殊な電子状態の解明。原子・分子では気相・液相における振動構造・電子状態解析による機能解明。生体分子系では例えば Cu 等の特定元素周辺のポテンシャルエネルギー曲面の探索による量子論的な機構の理解。これらに加えて、新たな手法である共鳴非弾性 X 線回折の開発も行う。優先順位は、装置の提供順によって決まるものであるが、最初に固体試料系、その後、セルなどの測定環境の開発が必要となる原子・分子および生体分子、触媒、電気化学系、デバイスの研究を行う。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で成果を出す計画である。その他については、固体試料の測定と並行して試料環境の開発を行い順次研究を行う。ただし、超高エネルギー分解能の原子・分子および生体分子系の

RIXS は先例のないものであるが、国内でのこれまでの研究開発を通じて培われた技術・知見の蓄積を最大限活用することで、できるだけ早く開発を進め、世界初の成果の創出につなげる。

エンドステーションの構成

エンドステーションに必要となるビームラインと RIXS 分光器の仕様を表 3 にまとめる。

ビームライン、RIXS 分光器ともに 250–2000 eV のエネルギー範囲をカバーするために、ビームラインは低エネルギー用と高エネルギー用の 2 種類の回折格子を、また RIXS 分光器は低、中、高エネルギー用の 3 種類において高エネルギー分解能をもつ回折格子を備える仕様とする。特に 500–1000 eV での運用に最適化して設計する。このエネルギー範囲は以下の要求を満たすために設定している。(1) 3*d* 遷移金属の $L_{2,3}$ 端 (共鳴効果が特に強く、これらがメインターゲット)、(2) C, N, O の K 端 (有機、生物系の研究で重要)、(3) 4*d* 遷移金属の $M_{2,3}$ 端、(4) ランタノイドの $M_{4,5}$ 端。エネルギー分解能は、ビームライン、RIXS 分光器ともに 1000 eV 以下で $E/\Delta E > 150,000$ を目指し、両者を合わせた全分解能で $\Delta E < 10$ meV を目指す。

散乱角は、様々な配置での実験を想定し、 $30^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$ とする。

RIXS での偏光解析は、観測された励起を同定するのに、特に磁性体において、極めて有用な情報を与える。そこで、光源では APPLE-II 型アンジュレータによって水平・垂直直線偏光、左右円偏光が供され、散乱 X 線の偏光解析には多層膜ミラーを用いた装置を RIXS 分光器に備える予定である。

試料位置での集光サイズは、垂直方向のサイズが RIXS 分光器の分解能を決める要素の一つのため、0.5 μm 以下に集光されるようにビームラインを設計している。原則として、集光位置の安定性を考えて集光サイズは固定であり、可変にすることは想定していない。

エンドステーションは、測定試料と散乱 X 線を平行化するための 2 枚の放物面ミラーを収納するメインチャンバーとその架台、回折格子チャンバーと偏光解析を備えた検出器チャンバーで構成される RIXS 分光器が、主要機器である。RIXS 分光器の全長は、試料位置から検出器までで約 12 m である。ビームライン構成とエンドステーションの模式図を図 3 に示す。

表3 RIXS ビームライン、エンドステーションの様

ビームライン	
エネルギー範囲	250–2000 eV (1000 eV 以上は高次光を利用)
偏光	水平・垂直直線偏光、左右円偏光
エネルギー分解能	1000 eV 以下で $E/\Delta E > 150,000$
試料位置での光量	500–1000 eV で $E/\Delta E \approx 150,000$ の時、 5×10^{10} – 1.0×10^{11} ph/s
集光サイズ	$<0.5 \mu\text{m}$ (V) \times $\sim 2.5 \mu\text{m}$ (H)
RIXS 分光器	
エネルギー範囲	250–2000 eV (1000 eV 以上は高次光を利用)
エネルギー分解能	1000 eV 以下で $E/\Delta E > 150,000$
散乱角	$30^\circ \leq 2\theta \leq 150^\circ$
偏光解析	多層膜ミラーによる散乱 X 線の偏光解析装置を備える

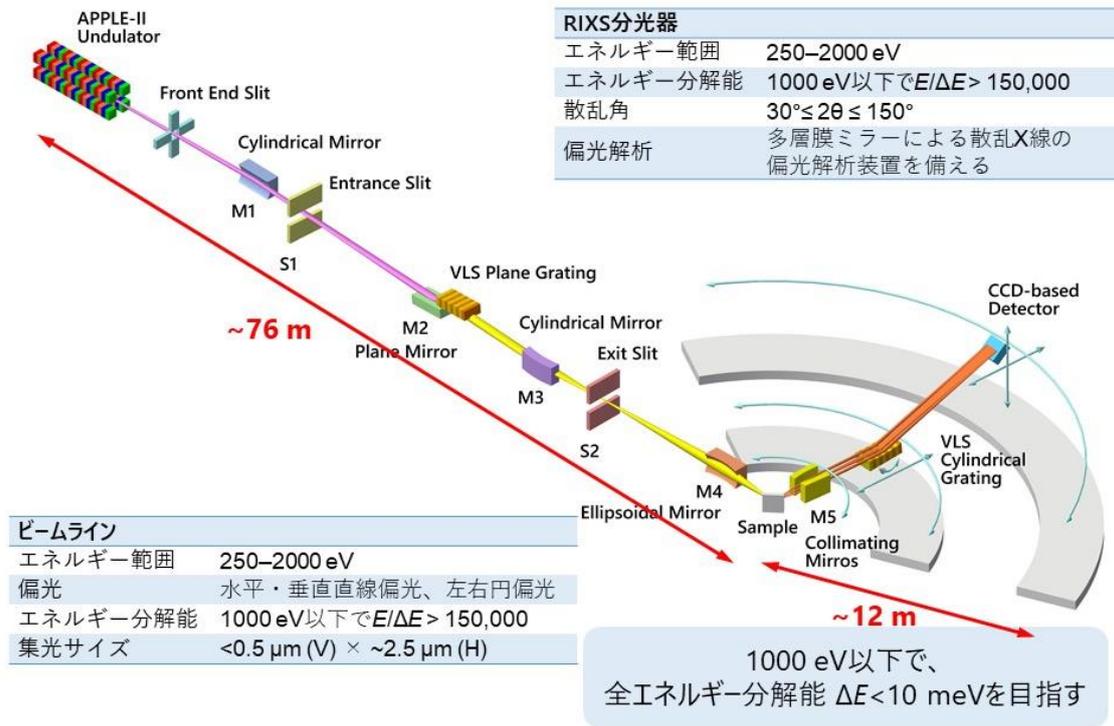


図3 超高分解能 RIXS ビームライン構成とエンドステーションの様

3) 磁性・スピントロニクス材料科学ビームラインワーキンググループ (資料5-3)

計測手法の特徴

磁性・スピントロニクス分野において、材料やデバイスは多元素化や多積層化の方向に進んでおり、それに応じて各元素やレイヤー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。また、デバイスの微細化・高速化が進む中、次世代放射光はその高輝度性により、ナノスケールの実デバイスサイズでの計測および高速なダイナミクス計測に威力を発揮する。さらに、デバイスに応用される材料が、これまでの強磁性体から反強磁性体や低次元磁性体へ、金属から低次元系などの量子物質や絶縁体へと拡大する中、材料研究においてもエッジ等の微細領域の計測が必要となるとともに、軟 X 線吸収分光手法として強磁性を計測する X 線磁気円二色性(XMCD)から、反強磁性体及び低次元物質等の量子物質・材料に対応する X 線磁気線二色性(XMLD)・X 線線二色性(XLD)への拡張が求められている。本ビームラインでは、主な研究目標として、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、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・材料研究を掲げている。

上記の研究開発目標のために、本ビームラインにおいて下記の計測技術開発を実施する。

- デバイスが実際に動作する環境下でのダイナミクス計測・オペランド計測
- デバイスの微細化に対応するナノイメージングおよびダイナミクス計測との融合
- マテリアル・ライブラリの測定に対応するハイスループット計測
- 高度な試料作製と超高真空下での、その場測定が一貫して行える *in situ* 計測

これらの計測を高度に実施するために、本ビームラインでは分割型アンジュレータの導入により、左右の円偏光および水平・垂直偏光の発生、100 Hz に至る高速偏光切替、およびその切替を自由な波形モード・周波数で行い、直線偏光の回転も可能とする。こうした分割型アンジュレータによって、上記の計測技術に係る、高速リアルタイム磁気イメージング、XMCD・XMLD・XLD による高速マッピング測定、超高精度オペランド計測、直線偏光を連続的に回転させて分光を行う Rotational MLD などの新しい分光法の構築、及びテンダー領域の X 線を用いた円二色性計測等を可能とする。

本ビームラインがカバーする空間スケールを図4に示す。蓄積リング型放射光源の限界である数 10 ps・数 nm の両立を最高分解能として、時間領域は DC から数 10 ps までを、空間スケールは数 10 μm から数 nm までの範囲をカバーする。この範囲は、日本の既存の施設と比べて次世代高輝度光源が効果的に利用できる領域としている。

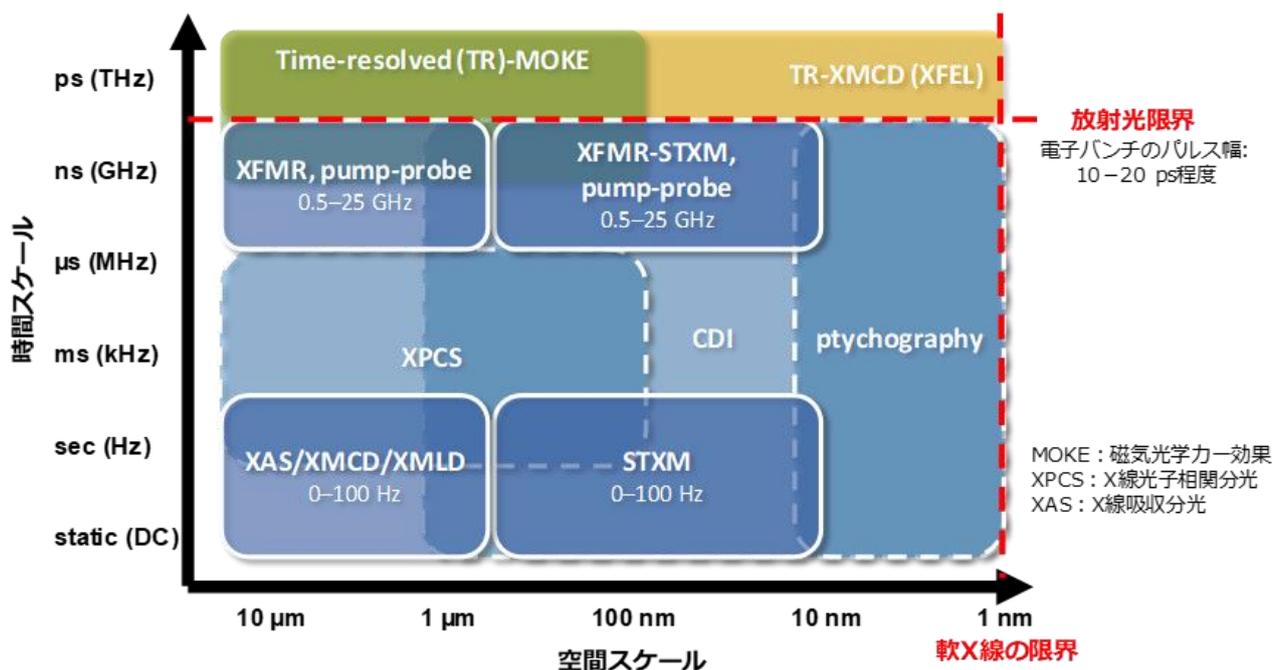


図4 本ビームラインがカバーする時空間スケール

フラッグシップ研究

(A) 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
 応用分野では、スピントロニクスデバイスの機能発現メカニズムを理解し、性能を向上させるために、実デバイスサイズ、且つ、実動作速度におけるスピンドイナミクス解明が求められている他、機能発現に大きく寄与する界面での外場制御時のスピン応答解明などが求められている。基礎分野では、スピン流の発生・伝播メカニズムの解明や、トポロジカルなスピン状態の構造・ダイナミクス解明などが重要なテーマである。そのため本ビームラインでは、①スピントルク発振子などの 100 nm 程度以下の素子について、GHz 領域の実動作速度における元素ごとの超高速スピン動作の解明、②次世代電界制御素子についての、ナノスケールの実デバイスサイズにおける界面スピン・軌道の外場応答の解明、③マルチレイヤー間のスピン流伝播について、例えば、強磁性層・非磁性層接合界面における強磁性層から非磁性層へのスピン流注入の直接観測による伝播メカニズムの解明を推進する。一方で、スピントロニクスデバイスなどの応用展開を図るうえで、磁気スキルミオンに代表されるトポロジカルな特性を有する磁気構造の空間構造・ダイナミクスは重要な知見であることから、④スキルミオンやそのほか新奇トポロジカルスピン状態の構造・ダイナミクスの解明も重要なテーマである。

(B) XMCD から XMLD・XLD によるスピン・多極子分光への拡張による新規磁性材料・物質研究

XMCD から XMLD・XLD へスピン・軌道分極分光に拡張し、物質系を強磁性体に加えて反強磁性体や低次元磁性体へ、金属に加えて二次元系物質やトポロジカル材料などの量子物質や絶縁体に展開する。また、スピントロニクスに加えてスピンオービトロニクスへの展開と、それをもたらす新しい分光法を開拓する。量子物質や絶縁体への展開に係る研究開発としては、①新規磁石材料、および、反強磁性体・ハーフメタルなど新規デバイス材料の多元素探索条件空間における創成・探索、②磁性トポロジカル物質、2次元物質などの新規物性解明、及び③垂直磁気異方性における軌道状態の役割やデバイス界面における軌道の効果の解明、などが挙げられる。

エンドステーションの構成

ビームラインの概要とエンドステーションの配置図を図 5 に示す。光源には 4 台の APPLE-II アンジュレータと 3 台のフェーズシフターからなる、分割型 APPLE-II アンジュレータを採用する。エネルギー範囲は磁性・スピントロニクス材料の主要構成元素である 3d 遷移金属元素や希土類元素、及び二次元系物質の構成元素である軽元素をカバーする 128–3000 eV とする。ただし、偏光モードによって利用可能なエネルギー範囲は異なる。また、エネルギー分解能は $E/\Delta E = 10000$ 程度とする。

ビームラインは 2 ブランチ構成とし、用途の異なる実験ステーションを複数台配置することで柔軟な利用体制を実現する。ブランチ A には、強磁場 *in situ* 計測ステーション、ハイスループット&ダイナミクス計測ステーション等をタンデムに配置し、ブランチ B には走査型透過 X 線顕微鏡 (STXM) を設置する。ブランチ A について、磁気散乱・反射率測定装置、或いは、その他の装置も接続可能とする。ブランチ B の STXM 下流側はスペースを確保し、将来的な小角散乱装置等の設置を可能とする。STXM および後置集光ミラーは温度変化の影響を低減するためにキャビン内に収納する。このキャビンは STXM でナノイメージングを行う際の振動対策も兼ねる。

ビームサイズはブランチ A で $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m} \sim 1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 程度、ブランチ B ではフレネルゾーンプレート (FZP) で集光し $10\ \text{nm} \times 10\ \text{nm}$ 程度を目指す。光子フラックスはブランチ A で $10^{13}\ \text{photons/sec}/0.01\ \% \text{ b.w.}$ 、ブランチ B では、FZP で集光した時点で $10^{11}\ \text{photons/sec}/0.01\ \% \text{ b.w.}$ 程度とする。表 4 に、当ビームラインとエンドステーションの仕様を記す。

表4 磁性・スピントロニクス材料科学 XMCD 等ビームライン、
エンドステーションの仕様

光源	分割型 APPLE-II アンジュレータ (I. Matsuda <i>et al.</i> , eJSSNT 17, 41 (2019))	
偏光	左右円偏光および垂直・水平直線偏光 (DC~100 Hz 偏光切替)	
エネルギー範囲	APPLE 通常モード: 178-1200 eV (左右円), 128-3000 eV (水平直線), 226-3000 eV (垂直直線)	
	APPLE クロスモード: 226-3000 eV (左右円), 178-1200 eV (直線)	
エネルギー分解能	$E/\Delta E = 10000$	
フラックス	ブランチ A	10^{13} photons/sec/0.01 % b.w.
	ブランチ B (FZP 集光後)	10^{11} photons/sec/0.01 % b.w.
ビームサイズ	ブランチ A	$10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m} \sim 1\ \mu\text{m} \times 1\ \mu\text{m}$ 程度
	ブランチ B (FZP 集光後)	$10\ \text{nm} \times 10\ \text{nm}$ 程度

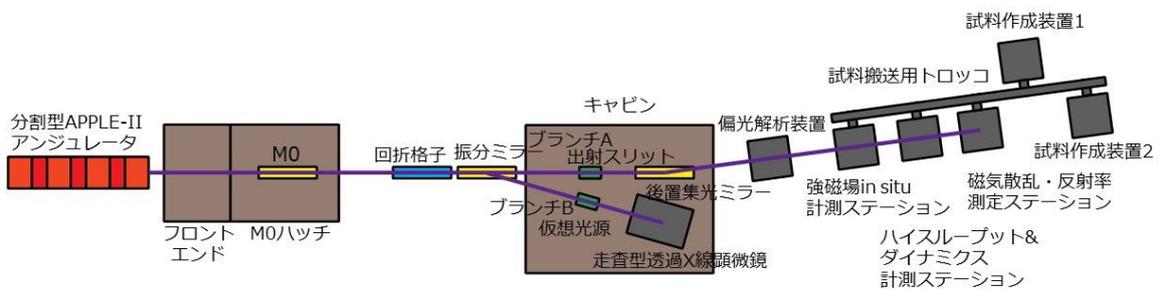


図5 本ビームラインの概要とエンドステーションの配置図

4) 3本のビームラインの相補利用研究の検討

3本のビームラインの手法は、物質中の電子の状態に関して、それぞれ重要かつ異なる情報の取得を可能にする。すなわち、角度分解光電子分光 ARPES では固体内のバンド分散を、X線磁気円二色性 XMCD では軌道およびスピン磁気モーメントを、共鳴非弾性 X線散乱 RIXS では電荷・軌道・スピン・格子などの素励起の分散を観測できる。よって、3本のビームラインを活用することで、物質の電子状態に関する相補的な測定が可能になる。放射光は広い学術分野・産業分野で利用されているが、本報告書で検討されている3本のビームラインに関しては、各ビームラインとも、主要な目的を最先端の固体物理の研究とそれを利用したデバイス開発に置いているため、研究対象が重なると期待される。

さらに研究対象の重なりは、今回の提案に共通する、各手法の守備範囲を広げるという方針により確実に増えると考えられる。例えば、ナノ光電子分光ビームラインではスピン分解による物質中のスピン状態の観測へ、磁性・スピントロニクス材料科学ビームラインでは、XMCD から XMLD・XLD による強磁性体から反強磁性体や低次元磁性体へ、超高エネルギー分解能共鳴非弾性軟 X線散乱ビームラインでは高い分解能を活かした量子物質の低エネルギー励起の観測への拡張が提案されている。さらに、デバイスのオペランド計測は3ビームライン共通の目標であり、空間分解能向上もナノ光電子分光ビームラインと磁性・スピントロニクス材料科学ビームラインに共通する。

具体的に共通する研究対象を各ワーキングの報告から抽出すると、例えば「スピントロニクス」は磁性・スピントロニクス材料科学ビームラインだけでなく、他の2本のビームラインでも頻出する。「超伝導」や「準粒子」は ARPES と RIXS で共通し、ARPES の「原子層物質」と磁性・スピントロニクスの「低次元系」も関連するキーワードと考えられる。これらの研究対象は、量子戦略における「量子マテリアル」に該当する。量子マテリアルの特異な性質は、電子の持つ電荷、スピン、軌道といった性質の複雑な絡み合いにより発現するため、相補的な利用は、量子マテリアルの特異な性質の解明とその応用を加速すると期待される。

一方、論文データベース (Web of Science) で、ARPES、RIXS、XMCD の3つのキーワードの検索をすると、単独では多くの論文が見つかるものの、複数のキーワードを持つ論文は3つの組み合わせそれぞれ10程度しかない。もちろん、同じ物質の異なった測定が別の論文となっている例は多数あると思われる。例えば RIXS は測定時間が長いため、他の手法で十分調べられた試料が対象となる可能性がある。一方、ARPES と XMCD の組み合わせでは、10のうち5までが日本の研究であった。このような伝統は貴重と思われる。

整備初期には、インパクトのある成果を早期に創出するため、それぞれビームラインの目的に最適な試料が選ばれると思われる。定常的な運用となったときに、新奇物質に対し、相補的な測定によっていち早く物性の総合的な解明を行うには、試料を持っている研究者が横断的にビームラインを使える工夫が必要であろう。そのためには、各ビームラインの現場レベルでの交流を深める、ユーザーに対応するコーディネーターを置く、と言った運用面の工夫や、同一の試料・表面の測定が可能なサンプルホルダーの共通化、試料作製、オフライン装置の共用化、ソフトの共通化といったことも重要と思われる。

第4章 今後の活動について

1) 次世代放射光施設の整備スケジュール

(資料6)

2020年(令和2年)2月末現在、東北大学青葉山新キャンパス内において土地造成工事が進行している。また、基本建屋の詳細設計が終了しており、入札手続き等を経て、今夏頃からその建設が開始される見込みである。これらはパートナーの責任所掌として進められている。

一方、加速器(ライナック、蓄積リング)に関しては、設計が終了し、主要コンポーネントの製作に関する契約が進行中である。基本建屋が部分竣工する2021年(令和3年)10月から加速器の現地での据付を開始、アライメントや調整作業を経て、2023年(令和5年)3月には蓄積リングに電子ビームを周回させることを目指している。2023年度(令和5年度)は、加速器や挿入光源等のコミッショニング期間となり、ファーストビームならびに一部ビームラインの運用開始は、2023年(令和5年)10月の予定である(本格共用開始は2024年度から)。

ビームラインの整備についても、上記のスケジュールに連動して、上流側から順次作業が行われることになる。挿入光源及びフロントエンドに関してはすでに設計がほぼ終了しており、2020年度(令和2年度)には製作を開始、2022年(令和4年)夏に、蓄積リング内に据付作業を行うこととしている。これらは、加速器の整備・調整と一体化したスケジュール管理が求められる。実験ホール内に設置される輸送系・光学系は、2020年度(令和2年度)にその詳細設計を完了させ、2021年度から2022年度にかけて機器製作及び据付が行われる。エンドステーション機器に関しては、光学系の詳細設計内容と密接な連携をとりながら、その具体的な仕様の検討及び詳細設計を2020年度に行い、遅くとも2021年上期には仕様書ベースでこれらが完了している必要がある。その内容はビームラインごとに異なり、また構成機器も多岐に渡ることから、製作に時間を要するものについては、できるだけ早期に契約準備に入ることが望まれる。量研量子ビーム科学部門次世代放射光施設整備開発センターから示された現時点でのビームライン建設スケジュールを表5に示す。

表5 ビームライン建設スケジュール

	2019年度			2020年度			2021年度			2022年度			2023年度					
	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
マイルストーン																		
加速器据付工程 (2019/2)																		
QST-BL (3BL)																		
ID 本体																		
ダクト・据付																		
FE																		
ハッチ																		
インターロック																		
輸送系・光学系																		
エンドステーション																		
使用許可申請																		
加速器 ビームライン																		

2) 今後のビームラインの仕様検討・詳細設計の進め方及びその他の検討事項について

本委員会及びワーキンググループで議論され、本報告書に取りまとめられた国が整備する3本のビームラインについての検討結果をもとに、今後、量研によって、ビームライン（光学系及びエンドステーション）の仕様検討及び詳細設計が開始される。本報告書においては、成果が期待されフラッグシップとなりうる多くの研究内容を示し、各ビームラインエンドステーションの仕様・構成についても詳細な提案を行った。今後、具体的なビームラインの設計を進めるにあたっては、予算やスケジュール、技術的観点などの制約条件を踏まえて、本報告書記載の提案内容を精査あるいは優先順位付けし、当初整備予算によって2023年度（令和5年度）末までに完成させておくべきものを決定することになるものと予想される。これらの検討・設計作業は、量研量子ビーム科学部門次世代放射光施設整備開発センターが中核となり、今回のワーキンググループ有識者メンバーとの間で十分な情報共有を行いながら、適切な連携・協力によって進められるべきものである。策定されたビームライン仕様については、2020年度（令和2年度）末頃を目途に、本委員会にその内容が報告されるものと認識している。

パートナーが整備するビームライン 7 本と国が共用ビームラインとして整備する 3 本を合わせた次世代放射光施設全体のビームライン全体像や、挿入光源・光学系など共通部分の技術的課題については、BL 検討委員会で議論・検討がなされることになっている。本委員会での検討結果については、適宜 BL 検討委員会に報告し、パートナービームラインの進捗と情報共有することが必要と考える。

また、本委員会規則に定められた活動内容

- (1) 国が設置するビームラインを利用した最先端研究に関する事項
- (2) 前号に必要なビームラインの付属施設、ビームラインに係る運用形態に関する事項
- (3) その他次世代放射光施設の利用研究に関して検討が必要な事項

のうち、(2)(3)については、今後のビームライン整備や共用促進法の改定を含む施設全体の運用形態の決定の進捗に合わせて、後年の適切なタイミングで、議論・検討を行うことが望ましい。これらの課題については、必ずしも国が整備する共用ビームラインに特化したものではないため、パートナー側で設置されている諸委員会等との役割分担を整理した上で、それらとの統合も視野に入れつつ、施設全体での包括的議論を行うべきである。

まとめ

本委員会では、国が設置する3本の次世代放射光ビームラインを利用した最先端の研究について、国内の専門家を中心に具体的な検討を進めた。各ビームラインに特徴的な計測手法、それによって実現可能となるフラッグシップ研究、更にその研究に必要なエンドステーションの構成について、幅広い観点から考察を行い、包含的な案を本報告書及び各ビームラインワーキンググループの報告書（資料5）に示した。今後は、これらの案を基に、別途開催されているBL検討委員会での検討結果と合わせて、量研において施設の整備に向けた具体的なビームライン構成の設計が進められることを期待する。

謝 辞

当報告書の作成に関して、各ビームラインワーキンググループのメンバーの方々には、長時間にわたりご検討頂き、厚く御礼申し上げます。今後の活動においても、引き続きご協力頂きますよう、よろしくお願い致します。