

高輝度放射光：次世代放射光施設プロジェクトの概要と整備進捗状況

内 海 渉

1 はじめに

令和5年度の完成を目指して、次世代放射光施設の整備が急ピッチで進んでいる。数々の量子ビームの中で放射光は大型の専用施設に依存するものとしては最も利用者数が多く、本施設が運転開始されれば、国内で10番目の放射光施設となる。軽元素を感度良く観察できる高輝度な軟X線に特長を持つこの施設は、物質の構造解析ばかりでなく、物質の機能に影響を与える電子状態の可視化が可能で、触媒化学や生命科学、磁性・スピントロニクス材料、高分子材料など、学術研究から産業利用まで、広範な分野での利用が期待されている。

ここでは、本プロジェクトの概要と現在の進捗状況について簡単にご報告する。関係機関が多岐に渡っており全体を網羅しきれず、筆者の所属する量子科学技術研究開発機構（以下「量研」という。）からの視点を中心になっていること、整備の進捗が早く本稿が読者の目に留まるころには内容が古くなってしまったため、これまでの経緯に関する記載が多くなっていることをお許し頂きたい。

2 立地場所

次世代放射光施設が建設される立地場所（敷地面積：東西370m×南北250m、約6ha）は、東北大学の青葉山新キャンパス内にある。東京駅から仙台駅まで新幹線で約90分、仙台駅からは、仙台市地下鉄東西線を利用して、大学キャンパス内にある青葉山駅まで9分まで到着できる。2017年（平成29年）4月の新キャンパスのオープン以降、青葉山コモンズ、農学系総合研究棟など、次々と新しい大学の施設・建物が竣工しており、工学部、理学部、薬学部など、次世代放射光を必要とする多くの学術分野が周辺に存在する。また、放射光施設の建設地の近傍には、サイエンスパークエリアが確保されており、次世代放射光施設を中核とする「リサーチコンプレックス」を形成する「都市型」の放射光施設が誕生することになる。

立地場所の地盤については、地表から10mより下に平均N値（地盤の硬さや締まりの程度を評価するための標準貫入試験の数値）が30以上の礫層、凝灰岩質砂岩、凝灰岩等の強固な層がほぼ平行に整合して積層していること、敷地内に活断層が無く、液状化の可能性もな

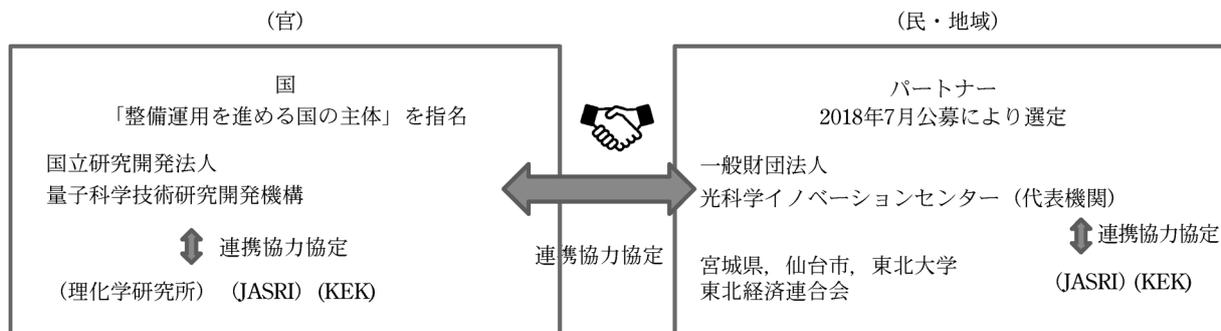
いこと、常時微動の測定値がSPring-8とほぼ同レベルであり、静粛な環境が実現されていることなどが確認されている。

3 官民地域パートナーシップにおける整備分担及びスケジュール

今回のプロジェクトの最大の特徴のひとつは、それが「官民地域パートナーシップ」という新しい枠組みのもとで行われるということである（図1）。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。）における検討結果¹⁾²⁾を踏まえ、「官（国）」側の主体機関として量研が指名されるとともに、「民地域」側のパートナー提案募集が行われ、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、「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、パートナーとして選定されたものである。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」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。

「官民地域パートナーシップ」に基づき、施設の整備に関しては、国とパートナーの役割分担（財源負担を含む）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、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7本を分担することとされている。この役割分担に基づき、国担当部分の整備の実務は量研が行い、パートナー担当部分については、代表者機関であるPhoSICが中心となり、東北大学、宮城県、仙台市、東経連との密接な連携のもとで業務が進められている。

整備スケジュールを図2に示す。国の施設整備費予算が認められ、本格的な整備が着手されたのが2019年度（平成31年度）からである。パートナー機関によ



項目	内訳	役割分担	整備費
加速器	ライナック, 蓄積リング, 輸送系, 制御・安全	国	約 200 億円
ビームライン	共用ビームライン (3本) 課題公募, 成果公開に基づき, 共用ビームタイムとして運用	国	
	コアリションビームライン (7本) パートナー機関が自主運用 (一部, 共用ビームタイムとして運用)	パートナー	約 180 億円
用地整備・ 建屋	土地造成・基本建屋 (交流棟機能含む)	パートナー	

図1 「官民地域パートナーシップの枠組み」及びその役割分担

○国において整備		2018年度	2019年度	2020年度	2021年度	2022年度	2023年度	2024年度
加速器 (ライナック及び蓄積リング)	施設の調査/加速器開発							
	蓄積リングの磁石セル試作		整備着手					
				入射器 (ライナック) 製作 (据付・調整)				
				蓄積リング製作 (据付・調整)				
				ライナック・蓄積リング輸送系				
				制御・安全装置				
ビームライン (3本)		仕様検討						
○パートナーにおいて整備								
基本建屋								
ビームライン (7本)		仕様検討						
土地造成								

図2 次世代放射光施設整備スケジュール

て現地における土地造成が行われるとともに、量研側では加速器の詳細設計及び発注が開始された。2020年(令和2年)春から基本建屋の工事が開始され、加速器コンポーネントの製作が本格化するとともに、ビームラインの一部製作が始まった。今後、基本建屋の一部竣工を待って、2021年(令和3年)12月頃から順次加速器

の設置作業を開始する予定であり、据付・調整期間を経て、2023年(令和5年)12月頃のファーストビーム達成を目指している。順調に整備が進めば、2024年度(令和6年度)から施設の本格運転(運営)に移行し、ビームラインの共用を開始するスケジュールとなっている。

本プロジェクトに組織的に対応するため、量研では2017年（平成29年）6月に「高輝度放射光源推進準備室」を設置し、2018年（平成30年）12月にはそれを発展させた「次世代放射光施設整備開発センター」を発足させた。同センターは当初はSPring-8のある兵庫県播磨地区に本拠を置いていたが、2021年（令和3年）7月1日付で、量研の研究拠点として新しく仙台拠点が設置されたことにともない、センターの本拠を東北大学キャンパス内に移している。また、東北大学は、2019年（令和元年）10月1日に、次世代放射光施設を活用し、学術的挑戦性と産業的革新性の融合が誘発する産学共創の世界最高水準の研究開発拠点の形成を目的として、「国際放射光イノベーション・スマート研究センター」を設置している。

4 次世代放射光施設の目指すもの

次世代放射光施設がどのような施設であるべきかについては、小委員会において白熱した議論が行われ、その結果が報告書に記載されている。基本性能として、蓄積リングに Quadruple-Bend Achromat ラティスを採用し、先端性（エミッタンス $1 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 前後）と安定性（実効性能での安定した定常的運転）を両立するコンパクトな 3 GeV 級放射光源であることが提言されている。また、カバーすべき放射光エネルギー領域について、近年の海外放射光施設の新規建設に伴い競争力低下が懸念される軟 X 線光源の強化を必須とし、軟 X 線領域（ $200 \text{ eV} \sim 5 \text{ keV}$ ）において高い輝度が得られることが重要であるとしているだけでなく、硬 X 線領域（ $5 \sim 20 \text{ keV}$ 程度）もカバーできるよう、必要とする波長領域や偏光特性に最適化したアンジュレータやウィグラーを採用すること、などが定められている。次世代放射光の完成後は、硬 X 線領域に関して国際的優位性を保つ SPring-8 と役割分担をおこない、国際競争力を有する幅広い波長領域の高輝度放射光が国内施設でカバーでき

ることになる（図3）。

次世代放射光施設の基本方針は、おおむね以下のように整理される。

- 1) 先端性と安定性を兼ね備えたコンパクトな高輝度 3 GeV 放射光源を整備し、放射光による世界レベルの最先端学術研究及び多彩な産業利用成果を創出することのできる、利用者視点に立ったフォトンサイエンス&テクノロジーの研究開発拠点を構築する。
- 2) 国内の他放射光施設との役割分担や相補性を考慮し、「軟 X 線、コヒーレント光利用研究の促進」、「本格的産学連携の推進、産業利用の拡大」、「汎用測定の高スループット化」などに重きを置いた整備運用を行う。産学連携や産業利用の拡大が大きな柱の一つであり、そのための仕掛けとしてパートナーから「コアリションコンセプト」が提案されている。また、近年の世界的潮流である放射光施設を中核とした「リサーチコンプレックス」の形成を目指すことも大きな目標である。
- 3) 「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）の枠組みに基づく科学技術・学術の幅広い分野にわたる共用を見越すが、これまでの制度の枠組みに必ずしもとらわれることなく、柔軟な発想や検討に基づく新しい放射光施設にふさわしい運用を目指す。この方針のもと、課題申請やビームタイム配分・メールインサービスの仕組み、利用料金設定などについても再検討していきたいと考えている。

5 整備の進捗

5.1 基本建屋

基本建屋の整備は、パートナー代表機関である PhoS-IC が中心となって設計・建設が進められている。次世代放射光施設建設位置の地表は標高 178.5 m であり、

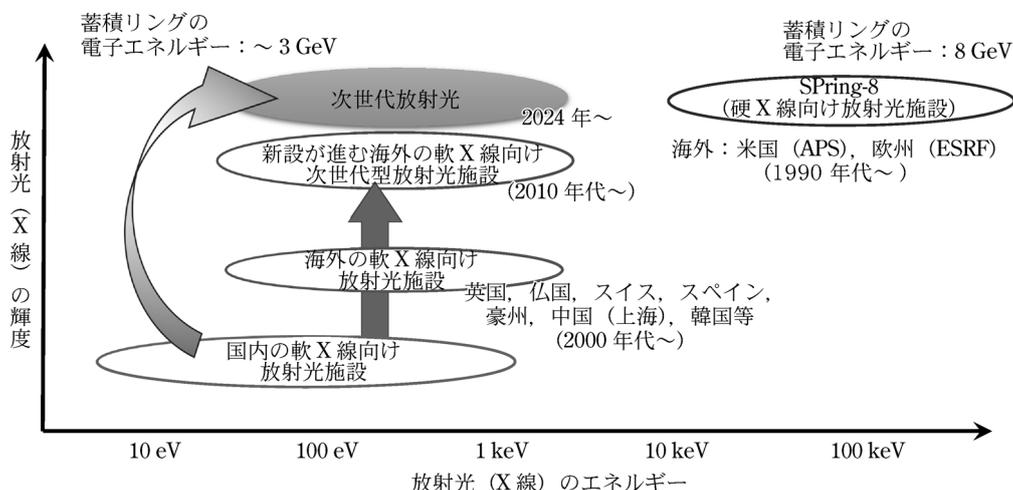


図3 次世代放射光施設がカバーする放射光エネルギー領域

事前の地質調査の結果、標高 165 m 付近までが第四紀の青葉山層、これ以深が第三紀の仙台層であることがわかっていて、青葉山層のうち、特に越路火山灰層は支持力が足りず圧密沈下の可能性があるため、地盤として不適当な表土約 5 m を除去後、支持力が得られる深度まで「地盤改良」が施された。

基本建屋の完成イメージを図 4 に示す。全体の大きさは、約 245 m×170 m である。2020 年（令和 2 年）4 月から開始された基本建屋の建設は、新型コロナの影響により、開始直後に 2 か月の工期遅れが生じたものの、その後は順調に進行しており、2021 年（令和 3 年）6 月末時点で、リニアック棟及び蓄積リング棟の屋根の施工がほぼ完了し、建屋内部工事が急ピッチで進行している。基本建屋の最終完成は 2023 年（令和 5 年）春であるが、2021 年（令和 3 年）12 月から開始される加速器機器搬入作業のため、部分竣工される予定である。



図 4 次世代放射光施設基本建屋完成イメージ図
(財光科学イノベーションセンター提供)

基本建屋建設の進捗状況については、PhoSIC のホームページ³⁾に逐次詳細が掲載されているので、そちらをご覧ください。

5.2 加速器

加速器の詳細な設計及び整備を進めていくにあたっては、SPring-8 や SACLA, PF などこれまでの放射光施設で蓄積された知見・技術を最大限活用することが重要である。量研では連携協力協定のもと、理化学研究所、JASRI, KEK からの組織的な協力を得て、理研放射光科学研究センターの田中均副センター長を客員グループリーダーとして、KEK 加速器研究施設の恵郷博文准教授を客員研究員として招聘するとともに、JASRI の光源基盤部門所属の研究者 10 数名とクロスアポイントメント契約を結び、量研職員と一体となって業務を進めて頂いている。

次世代放射光施設の加速器の設置イメージ及び主要パラメータを図 5 にまとめた。本加速器は、C バンド加速管を用いた全長 110 m の線形加速器（ライナック）と周長 349 m の蓄積リングで形成される。蓄積リングは Four bend achromat lattice による 16 セルで構成され、加速器の蓄積電子エネルギーは 2.998 GeV、最大蓄積電流は 400 mA である。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 3 GeV であることから、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

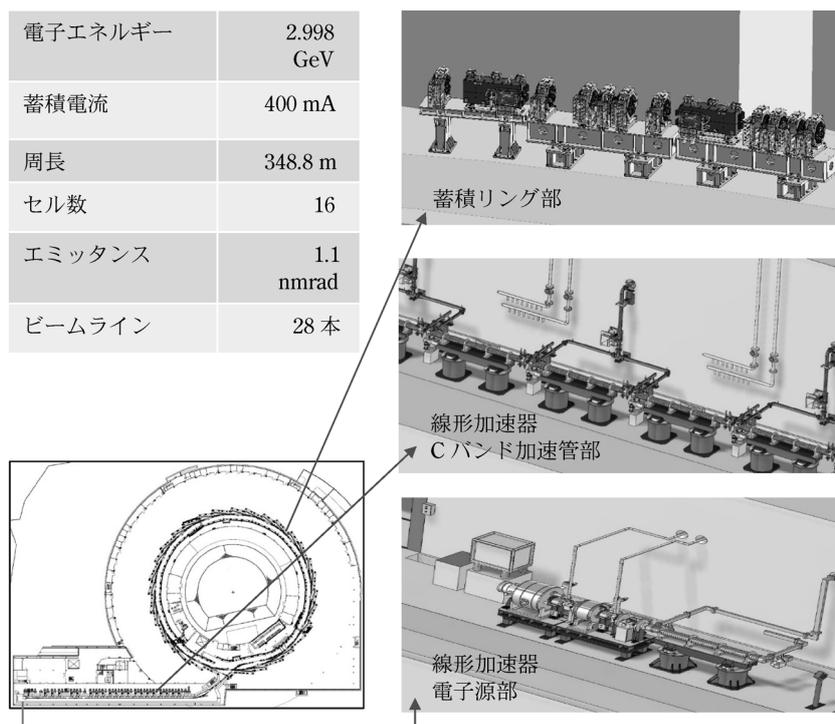


図 5 次世代放射光施設加速器の概略及び主要パラメータ

が実現でき、特に 1 keV から 5 keV にかけてのテンダー X 線と呼ばれる領域では、大型放射光施設の将来のアップグレード後もなお優位性が期待される。

各セルには光源を設置するスペースとして、5.44 m の長直線部と 1.64 m 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）と多極ウィグラー（最大 14 か所）の合計 28 個であり、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 60 m 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 43 m 程度である。

現在、加速器の要素機器（磁石、電源、真空、モニターなど）工場での製作作業を鋭意進めており、また製作と並行して、SPring-8 サイト内において、電子銃の開発など各種 R&D や、実機設置前の試験・課題洗い出し作業などを行っている。基本建屋が一部竣工する 2021 年（令和 3 年）12 月から、加速器構成機器の基本

表 1 次世代放射光施設第 1 期整備ビームラインラインアップ

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)	$E/\Delta E=7,000$	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)	$E/\Delta E=10,000-30,000$	<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)	$E/\Delta E=10,000-30,000$	<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)	$E/\Delta E=10,000-30,000$	<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)	$E/\Delta E=10,000-30,000$	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]	$E/\Delta E > 10,000$	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)	$E/\Delta E > 150,000$	<50 nm

「次世代放射光施設ビームライン検討委員会報告書(1)」(2019 年 6 月) より

建屋内への搬入・設置作業を順次開始する。

次世代放射光加速器の詳細については、西森らによる論文⁴⁾及び「3 GeV 次世代放射光施設加速器デザインレポート」⁵⁾を参照されたい。

5.3 ビームライン

次世代放射光施設では、第1期整備ビームラインとして、パートナーが7本のビームラインを、国が共用ビームラインとして3本のビームラインを整備することになっている。量研と PhoSIC では、両者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、ビームライン検討委員会という。）（委員長：有馬孝尚 東京大学教授）を2018年（平成30年12月）に共同で設置し、同委員会において、パートナービームライン7本、国ビームライン3本を合わせた形で検討を行うこととした。その結果が、2019年（令和元年）6月28日に「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—」として取りまとめられている⁶⁾。

ビームライン検討委員会で決定した第1期整備ビームラインラインアップを表1に示す。BL-I から BL-VII はパートナーにより整備されるもので、その内容は、同委員会以前に地域側の活動の一環として行われてきた「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」（2017年（平成29年）7月）⁷⁾や、「ビームライン構想委員会」（委員長：有馬孝尚 東京大学教授）がパートナービームラインについて取りまとめた報告書（2018年（平成30年）8月）⁸⁾の内容を尊重しつつ、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検討した結果が反映されている。一方、国が整備する BL-VIII から BL-X については、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国ビームラインに関する提案等を参考にしながら、パートナー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結果である。全体10本のうち、BL-I から BL-IV の4本がテンダー X 線を利用するビームライン、BL-V から BL-X の6本が軟 X 線ビームラインとなっており、国が整備する3本はすべて軟 X 線を利用するものである（それぞれ光電子分光、吸収分光、共鳴非弾性散乱の実験手法を想定）。また、挿入光源としてはアンジュレータが8台、多極ウイグラーが2台である。

ビームラインラインアップの決定を受け、量研、パートナー機関（PhoSIC 及び東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター）で、それぞれの担当ビームラインの詳細設計及び製作が行われている。国が整備する3本のビームラインについては、量研に「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）を設置し、専門性を有する外部有識

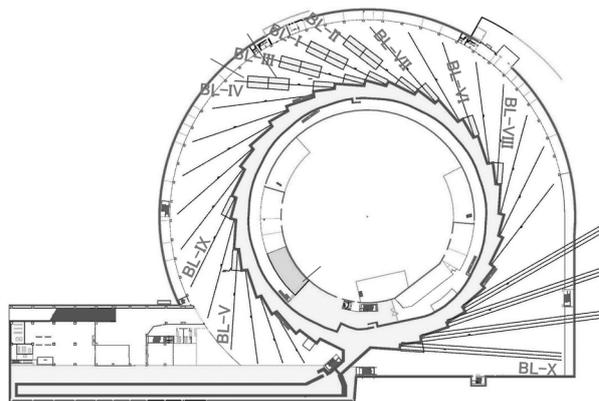


図6 第1期整備ビームライン配置図

者の先生方のご意見やアドバイスを得ながら、想定すべき最先端研究の目標を見据え、必要なビームライン整備を進めている⁹⁾。2021年（令和3年）6月末時点で、挿入光源及びフロントエンド部の製作が進行中であり、光学系部分の詳細設計が完了し契約準備作業を進めているところである。図6に量研と PhoSIC 合意のもと決定された第1期整備ビームライン10本の設置場所（ビームラインマップ）を示す。

個々のビームラインの詳細内容や整備進捗状況については、今後、それぞれの担当者により、様々な学会や研究会の場や論文の形で発表されていくことになるが、最新情報については、量研次世代放射光施設整備開発センター¹⁰⁾、PhoSIC³⁾、東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センター¹¹⁾のホームページをチェック頂ければ幸いである。

謝辞 本プロジェクトは、多くの方々の情熱と尽力により開始され、現在多数の組織に所属する方々の不断の努力によって整備が進められている。ひとりひとりのお名前を謝辞としてここに記載すべきところ、特に関連の深い組織名を以下に挙げることで代えさせて頂きたい。高エネルギー加速器研究機構、高輝度光科学研究センター、仙台市、東北経済連合会、東北大学、光科学イノベーションセンター、宮城県、理化学研究所、量子科学技術研究開発機構（五十音順）他、関係する組織ならびに所属される方々に深く感謝申し上げます。

文献

- 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）
https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afildfile/2017/02/08/1381978_1_1.pdf.
- 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）
https://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/_icsFiles/afildfile/2018/01/19/1400545_2_1_1.pdf.

- 3) 一般財団法人光科学イノベーションセンターホームページ
<https://www.phosic.or.jp/>
- 4) 西森信行, 渡部貴宏, 田中均: 放射光, **33**, 196 (2020).
- 5) 3 GeV 次世代放射光施設加速器デザインレポート
<https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/18606.pdf>
 (和文版),
<https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/18596.pdf>
 (英文版).
- 6) 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—
<https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/16923.pdf>.
- 7) 「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」【結果概要報告】
<http://www.slitj.tagen.tohoku.ac.jp/DesignCompetition/index.html>.
- 8) 光科学イノベーションセンター諮問機関「ビームライン構想委員会」報告書 (初期ビームライン答申)
<http://www.sris.tohoku.ac.jp/BL201906/02.pdf>.
- 9) 次世代放射光施設利用研究検討委員会報告書
 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

<https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/16914.pdf>.

- 10) 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ホームページ
<https://www.qst.go.jp/site/3gev/>.
- 11) 東北大学国際放射光イノベーション・スマート研究センターホームページ
<http://www.sris.tohoku.ac.jp/>.



内海 渉 (Wataru UTSUMI)

量子科学技術研究開発機構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 (〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6 東北大学工学研究科総合研究棟 9 階)。大阪大学基礎工学部大学院修士課程修了。博士 (理学)。《現在の研究テーマ》次世代放射光施設の完成を目指して奮闘中。《趣味》春風亭一之輔, 藤井聡太, 早見優, シュークリーム。

E-mail: utsumi.wataru@qst.go.jp

~~~~~

## Q & A 欄の質問募集

### Q & A 欄の質問を募集しています

〈応募要領〉実際に分析を行っている現場等での分析法や分析技術に関する質問を 200 字以内でお寄せください。氏名, 住所, 電話番号を明記ください。掲載の場合には原則として質問者及び回答者の名前を記載いたしますが, 希望により匿名も可とします。質問内容に応じて回答を公募することもあります。

◇採用の可否は編集委員会にご一任ください。

採用分には粗品を進呈いたします。

質問の送付先・問い合わせは下記へ。

〒141-0031 東京都品川区西五反田 1-26-2

五反田サンハイツ 304 号

(公社) 日本分析化学会「ぶんせき」編集委員会

[E-mail: [bunseki@jsac.or.jp](mailto:bunseki@jsac.or.jp)]