

■動向

次世代放射光施設プロジェクトの進捗状況

内海 渉 (国立研究開発法人 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)

2018年春に敷地造成が開始された「官民地域パートナーシップ」による次世代放射光施設の整備は、2023年度末の完成に向けて、現在折り返しを過ぎた段階にある。

国(国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構(量研)が主体機関)とパートナー機関(一般財団法人 光科学イノベーションセンター(PhoSIC)を代表機関とする、宮城県、仙台市、東北大学、東北経済連合会)がそれぞれの所掌分担に従って整備を進めており、基本建屋の大部分が完成し、2022年から加速器機器の搬入・設置作業が開始される。また初期整備ビームライン(国3本、パートナー7本)についても、構成機器の製作が順次進められている。

本稿では、敷地造成及び基本建屋、加速器、ビームライン、放射線安全のそれぞれについての進捗状況を簡単に報告する。

1. 敷地造成及び基本建屋建設

次世代放射光施設が建設される立地場所は、東北大学の青葉山新キャンパス内である。青葉山新キャンパス(総面積81 ha)は、既存の青葉山キャンパスの南側に隣接する旧青葉山県有地(ゴルフ場)を新たに東北大学のキャンパスとして整地したものであり、2017年4月のオープン以降、青葉山コモンズ、農学系総合研究棟など、次々と新しい施設・建物が竣工している。放射光施設のための敷地面積は東西370 m×南北250 mの約9 haである。新キャンパス内には、サイエンスパークエリアが確保されており、放射光利用を伴った「リサーチコンプレックス」の重要拠点となることが期待されている。

敷地造成及び基本建屋建設はPhoSICが施主となって行われ、それぞれ2019年3月、2020年3月から工事が開始された。基本建屋建設位置の地表は標高178.5 mであり、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る。地盤面から10 m程度下方には施設を支持する強固な層がほぼ平行に積層しているものの、これ以浅は粘性土となっていることから、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、支持力を確保している。

基本建屋は、地上2階地下1階建ての延床面積約25,300 m²、高さ約9.5 mの規模で、ライナック棟と蓄積リング棟から構成される。ライナック棟は、長さ約150 m、幅約40 mの東西方向を長軸とする矩形の建物であ

り、線型加速器を収めるライナックトンネル、クライストロンギャラリー、及び各種機械室等を備える。蓄積リング棟は、直径約170 mのドーナツ状の建物であり、蓄積リングを収めるリングトンネル、ビームライン機器等を設置する実験ホール、及び各種機械室等を備えている。また、基本建屋は、実験ホールの大空間を確保するために、リングトンネルを建屋構造の一部としてV字柱を建てるほか、長期にわたって極力変位を小さくし、かつ周辺の振動の伝達を防ぐために、床面にエクспанションジョイントを備える等の特徴を有している。

2021年11月において、特別高圧電力の受電、建屋本体の壁・屋根の構築、及びライナックトンネル、リングトンネル、実験ホール等の主要構造物の構築が終了し、空調・冷却水の配管、電気配線、クレーンの取付等附帯設備の設置工事が鋭意進められている。

2. 加速器

次世代放射光施設における加速器の設計・製作は国の所掌分担であり、理研・JASRIからの手厚い協力・支援を受けながら、量研がこれを担っている。本加速器は、SACLA/SPring-8加速器技術を基盤にして設計されたMBA(Multi-Bend Achromat)高輝度リングラティスを用い、安定な高輝度放射光をオンスケジュールでユーザーに提供することを目標としている。周長349 mの蓄積リングは16セルから成り、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。各セルにアンジュレータおよびウィグラーを配置出来る長直線部(5.4 m)と短直線部(1.6 m)を有し、長直線部に設置するアンジュレータからは、軟X線領域において 10^{21} photons/sec/mm²/mrad²/0.1% b.w.以上の輝度の放射光発生を目指す。入射器は、将来の軟X線FELへの拡張性を備えた3 GeVフルエネルギー線型加速器となっている。各装置開発においては、利用運転における信頼性・安定性を極力考慮した設計を行った。

2019年度から開始された加速器機器製作は概ね順調に推移しており、蓄積リング用加速空洞など機器の動作確認試験をSPring-8サイトで進めている。2021年12月から基本建屋における測量、樹脂床施工、19インチラック搬入設置等を開始、2022年から加速器機器の搬入設置・アライメントが本格化し、線型加速器棟では40本のCバンド

加速管、蓄積リング棟では16セル分の電磁石架台、真空容器の設置等を約1年かけて順次進める。2023年4月からは線型加速器、2023年7月からは蓄積リングの運転を開始予定で、2024年度から利用運転開始を目指している。

加速器機器の製作に当たっては、コンパクトで高性能な電子銃の開発に成功した他、リング加速空洞、小磁石ボア径に対応した小口径薄肉真空チェンバ、リング入射部におけるツインキッカー磁石など、数多くのR&Dを並行して行っている。

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¹⁾及び「3 GeV 次世代放射光施設加速器デザインレポート」²⁾を参照されたい。

3. ビームライン

次世代放射光施設では、最大28本のビームラインが設置可能で、そのうち第1期整備ビームラインとして、国が3本のビームラインを、パートナー機関が7本のビームラインを、それぞれ整備することになっている。量研とPhoSICでは、「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)を共同で設置し、同委員会において第1期整備ビームラインのラインアップを決定している³⁾。

国(量研)が整備を担当している3本のビームラインは、課題公募・成果公開を原則とする共用ビームラインである。量研では、上記「次世代放射光施設ビームライン検討委員会」及び「次世代放射光施設利用研究検討委員会」(委員長:雨宮慶幸 高輝度光科学研究センター理事長)における検討に基づき⁴⁾、軟X線超高分解能共鳴非弾性散乱(BL02U)、軟X線ナノ光電子分光(BL06U)、軟X線ナノ吸収分光(BL13U)の3本の共用ビームラインの整備を進めている。BL02Uは、回折格子によって鉛直方向に分光された分散光を試料に照射し、RIXS分光器で水平方向に分光する二次元RIXSを採用することにより、超高分解能と高効率の両立を図り、エネルギー分解能100,000(1000 eV以下)を目指す。BL06Uでは、50-1000 eVのエネルギー範囲で水平・垂直および左右円偏光の真空紫外光・軟X線を供給し、光学系には平行化光平面回折格子分光器を採用して、ナノ集光ビームを用いたスピン分解角度分解光電子分光(ARPES)を実現することを計画している。また、BL13Uでは、分割型APPLE-IIアンジュレータ光源によって実現される高エネルギー領域での偏光制御性を生かすため、広いエネルギースペクトルに対応した光学系が設計されている。

一方、PhoSICを代表機関とする地域パートナーが整備を担当している7本のビームラインは、コアリションビームラインと呼ばれ、コアリションメンバーはビームライン横断的な研究が実施できるという特色がある。コアリションビームラインのうち3本(BL07U, BL08U, BL14U)が軟X線ビームラインである。BL07UではAPPLE-II型

アンジュレータを挿入光源として用い、主要な測定手法として軟X線発光分光(RIXS)の整備を計画しており、Liから3d遷移金属などについてオペランド電子状態解析を可能とする。BL08UはAPPLE-II型アンジュレータを挿入光源として用いる雰囲気軟X線光電子分光(AP-XPS)のビームラインで、任意雰囲気下での化学反応のリアルタイム観測などが可能となる。また、BL14Uはツインヘリカルアンジュレーターを挿入光源として用いることで、円偏光の高速ヘリシティ反転を可能とし、軟X線顕微鏡による軽元素や遷移金属の元素分布、磁性やダイナミクスを含む高空間分解可視化などの研究が実施できる。残る4本はテンダーX線の利用も含む硬X線BLであり、そのラインナップは、次世代光源の特長を最大限に生かしたX線コヒーレントイメージング(BL10U)、テンダーX線領域でのXAFS/SAXSを対象とした局所構造解析(BL08W)、白色X線を利用した高速X線トモグラフィを行う階層構造(BL09W)、オペランドでの光電子分光を見据えたX線オペランド分光(BL09U)となっている。このうち、ウィグラーを光源とするBL08Wでは、水平方向に幅広いビーム形状を有するX線ビームの一部に結晶分光器を挿入し、その回折X線を利用したブランチBLの建設を計画している。メインBLには先端計測ステーションを、ブランチBLにはDXによる自動計測ステーションを整備し、利用機会の向上を図ることを目指している。

いずれのビームラインも、2021年11月末現在、挿入光源、フロントエンド、遮蔽ハッチ、回折格子分光器などが製作段階にあり、2022年には、利用実験により密接に関係するエンドステーション機器の詳細設計・製作が始まるとともに、フロントエンド機器の一部の設置を皮切りに、遮蔽ハッチの建設、挿入光源の搬入など、基本建屋内での作業が開始される。

4. 放射線安全

次世代放射光施設では、「ユーザーが放射線業務従事者でなくても可能な限り放射光実験に参加できること」を基本方針として、加速器や放射光ビームラインから実験ホールへの漏洩線量を抑え、実験ホールを非管理区域にすることを目指している。遮蔽設計、線量評価、放射線モニタリングシステムの設計など放射線安全に係る整備については量研が主体となり、「次世代放射光施設放射線安全性検討委員会」(委員長:渡部浩司 東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター長)での審議を通じて学識経験者及び専門家からの意見を頂くとともに、JASRIやKEKなどからの協力も得ながら、これを進めている。

国内の他の放射光施設あるいは加速器施設と同様、次世代放射光施設も運転開始前に「放射性同位元素等の規制に関する法律(RI規制法)」に基づく放射線発生装置の使用許可を得る必要がある。従って放射線安全に係る諸々の検討・設計・製作を経た上で、使用許可申請を行い、これに

伴う施設検査に合格しなければならない。国内外の放射光施設の放射線管理のあり方を比較すると、最大の相違点はユーザーが放射線業務従事者の登録を必要とするか否かにある。海外の、特に2000年代以降に新設された放射光施設の多くでは、実験ホールは放射線管理区域から除外されており、ビームラインハッチ内部もシャッターが閉じていれば管理区域と見なさない（シャッター開では管理区域扱い）。これに対して国内の既存放射光施設では承知の通り、シャッターの開閉の状態にかかわらず、実験ホールはビームラインハッチ内を含めて管理区域になっている。次世代放射光施設ではユーザーの利便性向上と産業利用を含む利用分野の拡大を図るため、「放射線業務従事者でなくとも可能な限り放射光実験に参加できること、かつこれを達成するためにビームライン利用に生じる支障を最小限にする」ことを目標としている。

RI 規制法関連業務を所掌する行政機関事務局である原子力規制庁とはこれまでに種々の協議を行ってきたが、2021年11月からは、放射線発生装置使用許可申請書のドラフト版をもとにした本格的なヒアリングが開始されている。

5. 終わりに

量研は、2021年7月に新しい研究拠点として仙台拠点を設置し、それに合わせて本プロジェクト推進の中核組織である「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」の本拠を東北大学青葉山キャンパス内に移し、現地での活動を本格化させている（オフィスは東北大学工学研究科総合研究棟9階）。また、PhoSICのオフィスは、同じく青葉山キャンパス内のレジリエント社会構築イノベーションセンター棟5階にある。さらに東北大学においては、2019年10月に、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（SRIS）」（村松淳司センター長）を設置している。

次世代放射光に関しては、量研、PhoSIC、東北大学等によって種々のシンポジウム等が開催されており、また、加速器や個々のビームラインについて、それぞれの担当者による様々な学会や研究会の場での発表も精力的に行われている。時々刻々と変化する整備進捗の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⁵⁾、PhoSIC⁶⁾、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⁷⁾のホームページをチェック頂ければ幸いである。

参考文献

- 1) 3 GeV 次世代放射光施設計画の加速器システム, 西森信行, 渡部貴宏, 田中 均: 放射光 **33**, 196 (2020).
- 2) 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)
- 3) 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.3gev.qst.go.jp/files/BL_report.pdf
- 4) 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>
- 5) 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/>
- 6) 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/>
- 7) 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/>