

8-1 極端紫外光研究施設 (UVSOR)

8-1-1 はじめに

UVSOR 施設は 1983 年 11 月 10 日に「初点」を發してから 37 年が経過した。その間、2003 年度の第一期高度化（低エミッタンス化、直線部増強 4→8 か所）、2012 年度の第二期高度化（TOPUP 運転、挿入光源追加、エミッタンス 27→17 nm rad）を実施した。世界的に見て技術革新の折に旧施設は廃止され、新施設が新地に建設されていくことが常であるが、UVSOR では 2 度の光源加速器高度化に成功したことにより、1 GeV 以下の低エネルギー放射光施設としては、回折限界光源に迫る世界最高性能を達成し（電子ビーム低エミッタンス）、真空紫外光から軟 X 線領域をカバーする国際競争力をもつ放射光施設として運用している。2 度の高度化で生まれ変わった現在の UVSOR-III は、別の見方をすれば国内で最も若い放射光施設であり、国際的にみても特に 10 eV 付近をカバーする真空紫外光領域では希少な第三世代放射光施設で、今後の国際連携の発展が期待されている。また中型放射光施設として建設が決定した東北リング（仮）と大型放射光施設 SPring-8 とともに国際的な先端放射光施設としての研究主導が求められる。一方、国際研究力の維持には高い光源性能に見合う実験設備の整備が不可欠であるが、UVSOR-III として 8 年目を迎え、全 14 ビームラインのうち 6 基の先端計測放射光ビームライン設備が成熟し、主として材料科学、光化学、環境エネルギー分野の先端の実験成果の収穫期に入った。また UVSOR の高い光源性能とコンパクトな運転体制の特徴を活かした、独自性の高い特徴的な研究開発が行われており、新規量子ビーム源の開発や回折限界光源の特性を利用した放射光コヒーレンスの科学も推進している。その他の標準共同利用ビームライン（8 基）においても、国際的に唯一無二の可視光から真空紫外光まで連続した波長可変な分光システムが稼働しており、材料開発研究にて貴重な成果が発信されている。

先端研究の活動力の維持と同時に、今後の放射光利用においてユーザーコミュニティの拡張と増強が重要であり、特に歴史的に放射光利用が普及していない化学・バイオ系への分野展開が国際的な命題である。こうした潜在的放射光利用者となりうる同分野を長年にわたり支えてきた分子科学研究所への期待は高い。さらに 30 余年来にわたり積み重ねられた貴重な学術資産と、共同利用環境の継続的支援を視野に入れると、次期施設の建設計画（UVSOR-IV:仮）を算段する時期にある。本施設規模（小型放射光施設）の光源加速器技術と性能は既に概ね極限化されており、さらなる光源性能の向上を含めた加速器設備の抜本的な改修が必要であるか否かの判断には、既存技術の成熟度に応じた導入の是非、あるいは根本的な技術革新など次世代技術の登場が待たれる。そのため現時点で検討しうる次期施設の形態について、方向性としては大きく 2 つに分かれる。①現状のリング型光源加速器性能を基本構造とし、ビームライン実験設備の高度利用に特化することで未踏の学術を広く開拓する先端施設、②低エネルギー光領域の光源性能を究極的に極限化し、未踏の光源を利用して選択と集中により学術を開拓する先端施設。前者は爆発的にコミュニティ拡大に繋がるようなロールモデルが不可欠であり、光源として放射光のみならずレーザー光源を組み合わせるようなフレキシブルかつ自由度の高い高度研究支援環境のための設備設計が重要であろう。後者はレーザー加速器など光源加速器技術の開発とその利用法の斬新な提案が求められ、国内の他施設の建設計画に留意する必要がある。いずれにせよ、現状の UVSOR-III は次施設建設までへの研究活動の持続性を担保することが責務で、現有の先端光源性能および最適化光源性能を少なくとも今後 10 年程度維持することによる、先端的量子ビーム実験環境・設備の継続的な提供とその高度化・汎用化による計測分野開拓が最重要課題である。UVSOR の国際的なコア・コンピタンスをまとめる。

- 1) 国際的に希少な低エネルギー帯（物性機能発現領域）をカバーする世界最高水準の高輝度 VUV 光源とその学術利用
- 2) 易放射線損傷試料に最適化された放射光源と先端分析システムを提供する国際的に希少な実験施設
- 3) 国際的に唯一無二の赤外光から真空紫外光の連続波長可変分光による材料評価システムの提供

8-1-2 光源加速器の現状と将来計画

将来計画の基本的な考え方は過去レポート 2018, 2019 もご参照いただきたい。次年度はユーザーコミュニティの意見聴取とともに、具体的な次期施設の形態を具現化する作業を中心に、次期施設建設計画の検討を重ね内容を充実させていく。

現有の光源加速器については、従来の 15～20 年の設備更新サイクルを鑑みると、2012 年度の高度化で設置された設備群の経年劣化から数年以内に更新時期を迎えることを想定する必要がある。更には当初建設期 1983 年来、未更新の基本設備も残されており、老朽化設備全般への対応が緊迫した課題である。設備トラブルによる不測の運転停止をさげ、国際的にも希少かつ競争力のある貴重な極端紫外放射光源を安定供給し続けることで、多彩な分野の学術発展に資する大学共同利用機関の使命を果たす責務がある。このうち数億円規模の高額設備以外については逐次更新を行ってきたが、過去の履歴から計画的に更新可能な老朽設備（電磁コイル、シンクロコンデンサ、ストレージコンデンサ、クライストロン、シンクロ偏向ダクト真空ベローズの一部）は、今後 10 年間を目安に所長裁量経費によりその約 6 割について更新完了させることを決定し、2019 年度より順次進めている。緊急性の観点で当面の設備トラブルへの対処としては、これらの更新作業ではほぼ十分と判断する。しかしシンクロ偏向ダクト残分、シンクロ電磁コイルが設立以来 38 年間未更新のままとなり、不測の事態は残される。また今後 10 年をめどにシンクロ電源、電磁石電源、各種高圧電源等が二度目の更新時期を迎え、定期的な運営資金準備の観点で大型設備の持続性担保は根本的な課題である。さらに付帯する空調設備、冷却設備や放射線管理設備は、UVSOR 施設棟の改修工事のタイミングも併せて検討する。建屋も 1983 年の建設であり耐久年数の点で改修時期が迫っている。これらの山積する改修要素から次期施設建設計画がコストパフォーマンスの点で有効であると考えている。

一方、光源グループによる新規光源探査や量子ビーム開発とその利用にかかる研究は、今や UVSOR の独創性の代名詞とも呼べるもので、多彩な学術利用あるいは産業利用の展開が期待できるため、今後も精力的に推進する。広島大学へ転出した加藤教授にはクロスアポイントメント制度により、光源開発研究を継続していただく。2020 年度、平准教授が着任し、パルスガンマ線発生と陽電子消滅によるビーム利用研究を推進することとなった。そこで「将来検討ワーキング」を開催し、BLIU の今後の展開について議論した。BLIU での研究テーマの多様化にともない作業環境の改善が必要で、レーザー光源の光学ハッチの移設が提案され、旧 BL8B 跡地へと移動することとした。作業は今年度末のシャットダウン期間を利用する。これにより BL1B の実験スペースとの干渉問題が解決し、BLIU での作業性が向上すると共に、BL3U へのファイバーレーザーの取り回しなど今後の拡張性に長ける仕様となる。また強力なレーザー光源の導入で現在の 150 倍の強度のガンマ線が発生可能だが、放射線の遮蔽について保護システムを構築することとなった。

8-1-3 ビームラインと利用状況：コロナ禍対応

ビームライン実験設備については、10 年程度の国際的な先端研究の開発サイクルに後れを取らぬように、各ビームラインの利用状況と国際動向を踏まえ、設備の順次高度化が必要で、施設予算と外部研究費等により開発研究を継続している。現在、ビームラインは 14 本が稼働しており、海外からの第一線の研究者が利用に来るような競争力のあるアンジュレータビームライン 6 本を中心に実験設備の重点整備を進めている。特に真空紫外分光、光電子分光、軟 X 線吸収分光は物性・機能研究の点で世界的競争力がある。数年をかけて開発が終了したビームラインは施設利用課題としてユーザー利用が開始されているが、今後は国際利用率を増加させる方針である。また標準的設備であるベンディングラインにおいても、国際的に唯一無二の波長帯をカバーする光反射・吸収測定設備を提供しており、貴重な

材料物性評価の成果が発信され続けている。ベンディングラインは設備の希少性と稼働率を鑑みて将来計画を立て、アンジュレタ光源の先端ビームラインとのバランスを取りつつ運用を継続していく。今年度はベンディングラインの在り方について「将来検討ワーキング」を開催した。特にBL1BとBL6Bの赤外テラヘルツビームラインとBL3BとBL7Bの真空紫外（VUV）ビームラインを利用している外部の先生方をお招きし、これらのビームラインの今後について意見交換をした。またクロスアポイントメント制度でUVSORを利用されている高谷准教授（京都大）と木村教授（大阪大）からも関連する話題をご提供いただき、UVSORでの利用展開をご説明いただいた。

2020年度はコロナ禍の感染拡大防止対策により全世界的規模で研究活動に支障があった。放射光施設ではそれぞれの地域環境とユーザー環境に応じた対応がとられたようである。UVSOR施設では分子科学研究所の活動制限方針に従い可能な限り研究活動を停止させない、研究者の計画的な実験活動を支援するという大方針で年間運営を行った。具体的には以下の方針をとった。

・2020年度に既に配分された前期ビームタイムはそのまま有効であり、所属機関の規定に準じて来所可能であれば課題を実施することができる。

- ・全ての前期課題を後期課題へ移行し、例外無く採択する。
- ・前期に実施しても後期ビームタイム配分には影響しない。
- ・通年申請課題における前期キャンセル分の補填は原則として無し。
- ・後期の新規利用申請は停止し、残ビームタイムの配分は特別随時申請課題にて対応する。

結果として、ほとんどの申請課題で何某かの実験を実施することができたが、5件（うち海外申請3件）の申請課題については全く都合を調整することが叶わず、課題実施不能と終わった。実施された海外申請についてもユーザーの来日はほぼ不能であったため、多くの課題は所内研究者による代行実験となった。また来所人数を抑えた三密回避の目的と所属機関の派遣指針の影響により、大学院生の来所者数が昨年度比で7割と大きく減少した。今回のコロナ禍では課題実施数の観点では確かに大きな影響はなかったと総括できるが、実施された研究の「質」の面では、のちのち影響はあったと評価されるのではないかと危惧する。実質的な実験従事者の規模縮小やメンバ変更による実験成果への影響、あるいは長期的には学生の経験機会が奪われたことによる人材育成への影響が懸念される。一方で、DX志向の強まりにより自動化・遠隔化・標準化などの技術開発が世界中で活発となった。硬X線を利用した構造解析は自動化がかねてより進んでおりコロナ禍において功を奏したようであるが、VUV-軟X線領域では「真空」の技術的制約により難題を抱えている。それでもこれを機にVUV領域でのDX関連の技術開発が各施設で開始され競争が激化するであろう。国内施設間の情報共有など連携強化の側面が重要視されている。UVSORにおいてもベンディングラインで技術職員が代行測定を担当する試みを実施した。汎用的な設備のDX化に有効であるだけでなく、技術職員の意識改革にもつながったと思われる。試行的にBL3Bにて岩山助教が中心となり、DX要素技術の更新を開始した。

8-1-4 中長期計画

2018年度より、UVSOR-IIIの後継となる次期VUV放射光施設の建設に関する議論が進められていたが、今年度は本格的な議論を開始し所内を中心に積極的に意見交換を行った。中期計画としては前述のように特定の先端手法や光源開発、既存の先端設備を利用した成果発信が最重要課題であり、副次的にDX化の要素技術開発を行うことが求められる。これらは長期計画としての次期VUV放射光施設の建設に向けたマスターピースにもなるものである。特に本施設のオンリーワン要素の強化が最重要課題で、新奇光源開発とその応用展開に加え、設立当初に萌芽的に掲げら

れた「ケミカルマシン」の旗印を確固たるものとし、長年蓄積された計測ノウハウを元に、独創的に放射光の化学利用を推進する研究施設として「ケミカルマシン」の完成を目指したい。そのためには高度研究者支援パッケージングとして、分子科学研究所の全面的な協力が不可欠で、次期 VUV 放射光施設を中心とした「分子機能・材料物性計測によるマテリアル科学の研究拠点」の構築を目指したい。

UVSOR-III 光源は THz, 赤外, 真空紫外線から軟 X 線領域をカバーするため、物性・機能研究に最適化されている。BL3U では、長坂助教らが構築した溶液の軟 X 線分光による電子状態測定を通じた化学反応の追跡が可能であり、新規ユーザーを巻き込みつつ精力的に行われている。今後はより広範な分野への研究展開を意識して、クロスアポイントメント制度を活用した効果的な共同研究展開と人材育成を推進したい。BL4U は大東助教らによる軟 X 線分光の顕微イメージングが可能であり、産業界の要望が強く、リチウム端の X 線吸収イメージング (STXM) に世界で初めて成功するなど共用を含めた多彩な利用展開を見せている。BL5U, BL7U では田中准教授らにより、光電子分光法を基軸とした先端装置開発と、多彩な新規物質群の (スピン) 電子状態・電子構造研究が推進されている。同じく光電子分光法を軸に物性研究に注力している HiSOR 施設との施設間連携が重要である。UVSOR では STXM イメージング装置の開発に次ぐ中期計画として、光電子分光ビームラインの重点整備計画があり、2019 年度より松井主任研究者らを中心となり、イメージング装置として次世代型の光電子運動量顕微鏡 (Photoelectron Momentum Microscope: PMM) の開発を BL6U にて推進している。2020 年 2 月にテスト測定を開始し、2021 年度末にはスピン検出機構を含めた拡張増設を完了させ、国際的に唯一無二の実験設備を構築する予定である。今後は、時間軸を研究課題に紐込むための技術開発を推進できる主任研究者やクロスアポイントメント制度による効果的な共同研究展開と人材育成を推進したい。BL1U では平准教授、加藤教授 (クロスアポイントメント) らにより、コンパクトな高性能 UVSOR-III 光源を用いて、アト秒コヒーレンス制御や短パルスガンマ線発生など、極めて独創的な研究が進められている。国際レベルで本施設でしか実施できない種類の研究であり、今後は開発された量子ビームの各種計測への応用展開が待たれる。UVSOR の施設としての特徴は、小型で小回りの効く運用体制にある。今後もスピード感のある光源開発研究や、先端装置の開発研究の展開を維持する。

中長期的な視点で国内における 10 の放射光施設の役割分担と連携強化が求められている。中でも学術系 3 施設 (UVSOR, PF, HiSOR) の果たす放射光関連分野の学術基盤としての役割は今後も欠かせず、3 施設の基盤強化とネットワーク化を進めながら、技術革新や人材育成・輩出の中核的役割を果たす必要がある。今年度はコロナ禍により活動は停滞しているが、次年度はビームライン開発研究のワーキングを立ち上げ若手研究者と技術者を中心に議論が開始される予定である。

本報告は、UVSOR 施設運営委員会 (2018 年度より年 2 回)、UVSOR 将来検討ワーキング・小委員会 (2018 年 10 月以降逐次)、UVSOR 利用者懇談会 (2018 年度より年 1 回)、国際諮問委員会 (2019 年 12 月) における意見交換を元に改訂してきたものである (本リポート参照)。また継続して外国人運営顧問により意見聴取も行われている (分子研リポート 2016 から 2019 参照)。