

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」を発してから 38 年が経過した。その間、新規光源開発と先端計測の専門家のコラボレーションにより、UVSOR では 2 度の光源加速器高度化に成功し、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（TOP-UP 運転、挿入光源追加、エミッタンス 27→17 nm rad）を実現した。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。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 9 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。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進められている次世代放射光（NanoTerasu）* 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。

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強化や未利用分野への拡張が重要であり、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、UVSOR が目指すべき方向性に合致する。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り、2018 年度より具体的な検討を進めている。将来計画の経緯は過去リポート 2018～2020 もご参照いただきたい。2021 年度はユーザーコミュニティに広くアンケートを実施し、次期施設に対する技術的要望や施設の考え方について意見を聴取した。またシンポジウム（第三回検討会：光源加速器技術、第四回検討会：次期計画概要）を開催し、次期施設の目指すべき形態について概要をまとめた。詳細は本レポートにて後述するが、本施設規模（小型リング型放射光施設）の光源加速器技術と性能は、UVSOR-III にて実証されたように既に概ね極限化されている。そこで現状のリング型光源加速器性能を基本骨格とし、光源として放射光のみならずレーザー光源を多彩に活用できる実験設備を提供することで、未踏の学術を広く開拓する「分子機能・材料物性計測拠点」としての先端光源施設と位置付けた。また今後の技術的成熟に応じて、高出力小型レーザー光を新規加速器として用いる計画も検討した。これにより VUV 波長帯における自由電子レーザーの併用など、時間・空間軸で極限化されたコヒーレント光源を利用した未踏の新規計測による学術開拓の場としての展開も視野に入る。前者は爆発的にコミュニティ拡大に繋がるような放射光利用実験のロールモデルが不可欠であり、分子研の各センターとも連携した多面的な支援による自由度の高い「高度研究支援環境パッケージ」を提供するための組織設計が重要であろう。後者は高出力かつ安定なレーザー光源技術の進展のみならず、加速器応用のための技術開発が求められ、国内外の多くの専門家との協力体制が必要である。いずれにせよ、現状の UVSOR-III は次施設建設まで

* 編集時にニックネームが発表された

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) 国際的に希少な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

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、経年劣化から数年以内に更新時期を迎える設備が複数箇所想定され、特に建設当初1983年来、未更新の基本設備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け、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2019年度に決定し順次作業を進めている。このように、大型設備の持続性担保の観点で、更新にかかる巨額資金の恒常的確保は根本的な課題である。さらに中長期的には10年後を目途に、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る。また付帯する空調設備、冷却設備や放射線管理設備の更新経費は高額で、UVSOR施設棟の改修工事のタイミングを含めた検討が必要であろう。施設棟の建屋は1983年の建設であり耐久年数から改修時期が迫っている。次期施設の建設計画実現とそのタイミングが極めて重要である。緊急性の観点で当面の設備トラブルへの対処としては、予定した更新作業でほぼ十分と判断したところであった。しかし今年度夏、BL7Uの光源出射部の四象限スリット冷却パイプからの水漏れにより、蓄積リング全周にわたる真空破壊事故が発生した。復旧には5週間を要し、ユーザー利用週数としては4週分をキャンセルとした。一部は後期実施で対応できたものの、実験を実施できないグループが複数出てしまい、ご迷惑をおかけしたことをお詫び申し上げたい。

一方、開発研究の視点で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されている。2020年度に、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している。ガンマ線利用実験が通常のビームタイムで実施できるように、蓄積リングの電子バンチ軌道を新たに設計した。2022年春のシャットダウン中に軌道調整を行い、2022年度は新軌道で定常運転する予定である。またBL1Uのタンデムアンジュレータの特性を活用した斬新な光干涉実験等が行われ、新たな分光学的展開が期待されている。これらの実験は、通常の放射光利用と大きくパラメータが異なるために、他ユーザーの影響がない週末に限定して実施している。現在、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いているが、2022年3月に藤本助教が名古屋大学へ転出し、助教1名の休職により加速器関連のスタッフ不足に陥っている。関連するパワーユーザーの協力による臨時的な運用体制を検討している。安定な加速器運転は全ての放射光利用研究に関わるため、中長期的な持続性担保のために早急にスタッフ補強のための人事を進めたい。

8-1-3 ビームラインと観測系利用状況

ビームライン実験設備については、10 年程度の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た設備の順次高度化が必要で、分子研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基が稼働しており、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基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。開発が終了したビームラインから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国際的に認知度の高い施設地位を獲得していく方針である。

軟X線 BL6U では、立ち上げ中の光電子運動量顕微鏡の調整を進めつつ、デモンストレーション実験を協力研究により推進している。低エネルギー VUV の BL7U では、光電子アナライザーの電子捕集レンズ部をディフレクタ機能の追加により更新し、高効率角度分解光電子計測装置への改良に成功した。BL5U ではスピニングマニピュレータ機能の導入により、高効率スピニング分解光電子計測装置への改良を行いレンズパラメータの調整を進めている。

また汎用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、アンジュレー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。2021 年度は、易光損傷試料系における需要を鑑み、BL4B における分子固体用角度分解光電子分光エンドステーションについて評価テストを開始した。

一方、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の大きな見直しが起こっている。海外ユーザーの来所は依然として難しく代行測定を進めている。国内のユーザーには with コロナ対応を進め、少人数での来所で実験活動推進を工夫していただいた。特に移動制限から 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ている。VUV- 軟X線領域では「真空」の技術的制約により自動化導入の難易度は高いが、国内施設間の情報共有など連携強化を進め、ベンディングビームラインにて自動化・遠隔化測定に向けた準備を開始した。

また課題として運営スタッフの充実化と技術の伝承があげられる。近年教員の転出や技術職員の定年退職などが相次いでおり、組織規模に比して極めて少人数で運営している UVSOR では、過渡的な人員増減の影響が大きい。2021 年 4 月、出田助教が HiSOR に、2022 年 2 月、大東助教が KEK にそれぞれ准教授として転出した。BL4U は依然として国際先端性の高い成果を発信している設備であるため、大東氏にクロアボとして運営をご協力いただくと共に、新たに主任研究員の人事公募により転出の影響を最小限に抑え、研究活動を維持する。また次年度は2名の技術職員の退職が予定されている。UVSOR では、火曜日から金曜日日中の48時間（12時間×4日間）に加え、木曜夜間の12時間にも運転を実施し36時間連続したトップアップ運転を実現している。ただし夜間のマシングループの人員を恒常的に配置する余裕がないため「木曜夜間の12時間中にトラブルがあっても補償しない」という運用方針ものと供給を行っている。技術職員の負担軽減のため、2021 年 1 月から教員の深夜勤務、準夜勤務を開始した。また次期施設建設計画など、中長期的な運営体制の強化のために、2021 年度施設教授人事公募を行い2名の最終候補者を決定した。主任研究員の松井が教授に昇任し、今後はグループを率いて国際研究を推進しつつ次世代への人材育成に資する。もう1名は残念ながら着任が困難となり、別形式での協力関係の構築を模索している。スタッフの余力が不十分な状態は解消されておらず、転出等による突発的な業務エフォートの変化に対応することが困難であり、引き続き UVSOR 運営スタッフとして適任者が見つければ、採用枠を確保しスタッフとして迎えたい。

8-1-4 次期施設計画

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基本要素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基に、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。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を進めているが、2021 度は、光源加速器と実験設備等に関する具体的な議論を行った。

8 月に行われた第三回次期施設建設検討会においては、次世代の電子加速技術と光源技術に焦点をあて、HiSOR や KEK の専門家を招き 40 名程度の参加者で活発な議論を行った。放射光を利用するためには、蓄積リングで電子ビームを周回し、偏向電磁石や周期磁石列（アンジュレタ）を用いて放射光を発生するのが一般的である。装置全体は、電子蓄積リングの他に、それに電子ビームを入射する入射器と呼ばれる加速器も含めて構成される。従来の入射器では、高周波電場により電子を加速する事が行われているが、はるかに短い距離で同等の電子エネルギーまで加速できるレーザー航跡場加速や誘電体加速の開発が行われている。レーザー航跡場加速は、世界中複数のグループで開発が行われており、エネルギーや電荷量など独立に開発されている内の個々の最良値は、高周波加速と同等の性能が出ている。この要素技術の一端として、ハイパワー小型レーザー光源の開発は分子研社会連携研究部門の平等グループが主導している。5 件の講演では最新の開発状況が紹介され、将来蓄積リングへの入射器をレーザー航跡場加速や誘電体加速に置き換える技術が提案された。今後も密に情報交換を行い、実用水準への到達に合わせ最良の光源技術導入を進めたい。

次期施設の電子蓄積リングの現状の設計に関しては、最新技術を取り入れることで電子エネルギー 1 GeV のリングにより真空紫外域で回折限界に迫る性能を達成でき、アンジュレタ放射の輝度を現状より 1 桁向上する事が可能であることが示された。また、偏光変調型紫外光・軟 X 線を発生できる分割型アンジュレタに関する講演では、偏光放射光利用の幅広い可能性が示され、次期計画においてその導入を積極的に検討する必要がある。次期放射光施設では、実験光源として放射光に加えてレーザー光源もユーザーに供給し、利用目的に合わせて最適な光源を選択し利用できるよう整備し、利便性と多様性を重視した高度研究環境をユーザーに提供できる施設の建設を目指している。

11 月に行われた第四回検討会は、コロナ禍により ZOOM ウェビナーでオンライン開催した。冒頭に文科省研究振興局基礎基盤研究課長の渡邊 淳氏よりご挨拶を戴いた。次期施設における実験設備を検討するため、各ビームラインの現状と将来展望について、主として UVSOR スタッフから現状と展望を紹介し、対応する実験設備についての外部専門家から未来展望を述べてもらった。参加者は 70 名弱であった。軟 X 線オペランド吸収分光、放射光赤外分光、量子ビーム照射研究、真空紫外吸収・発光分光、スピン分解光電子分光、光電子イメージング、X 線イメージング、光源加速器仕様の各テーマで活発な議論が行われた。

1) 軟 X 線分光として、長坂助教から BL3U の液体に対する吸収分光と、液晶に対する散乱分光の紹介があった。液体は計測が難しく未踏の研究領域であったが、継続的な開発研究により多くの技術的課題を克服し実現した。宮脇研究員（QST）から高分解能非弾性散乱分光（RIXS）の技術開発の最新の状況について、世界動向を踏まえて紹介された。UVSOR での展開が期待される低エネルギー帯（極端紫外光領域）では高エネルギー帯に対して高分解能

化に要請される技術条件が緩和されるなど、その優位性と希少性が指摘され、オペランド計測など試料環境の優位性を生かした研究が有効であるとコメントされた。

- 2) 放射光赤外分光について、池本研究員（JASRI）から SPring8 の例やレーザー利用、国際的な動向について紹介された。末端装置のユーザー自由度の確保、多様な試料への対応、複合測定の実現が重要であることが示された。将来的に SPring8 における利用が停止される予定であり、東北次世代放射光施設でも利用計画がなく、我が国におけるアクティビティ維持について総合的に考える必要があるとの指摘があった。
- 3) ビーム照射について、平准教授から BL1U の開発例が紹介された。独自性の高い手法の意義と共に、次期施設におけるパルスガンマ線のビームの質の向上に向けた技術展開が提案され、マルチバンチ運転における特定バンチの充填などの手法が議論された。副派生ビームである陽電子の利用も議論された。松田教授（東大物性研）から、4重連アンジュレータによる位相検波計測の有効性が述べられ、レーザー光と放射光の融合の意義と、時間コヒーレンスを利用した各種時間分解計測の未来への期待が述べられた。今後は「顕微×分光×偏光×時間」の多角的計測環境の実現が切望される。レーザー光源の視点から（慣れ親しんだ）放射光利用を如何にして総合的に考えられるかが融合利用に重要な点であると述べられた。物性科学の発展のために、高度技術の開発だけでなく、それを利用した実証実験と、積極的な広報とコンサルタントが重要であることが指摘された。
- 4) 真空紫外吸収・発光分光として、北浦教授（山形大）から、BL3B、BL5B および BL7B のこれまでの経緯と現状、海外施設との比較が紹介された。ユーザー利用は基礎研究から実用化を想定した応用研究にシフトしつつあり、兼務されている NIMS での研究体制の例を挙げ、材料開発のスピード感をふまえたうえで、次期施設においては、ミナラボなどの適切な実験環境の提供による合理的測定が検討軸に挙げられると指摘された。
- 5) 次世代光電子運動量顕微鏡について、松井主任研究員から、BL6U における開発状況とスピン多次元イメージングへの展開について説明があった。職人芸に頼るところの大きい複雑な電子レンズ調整作業について、AI 制御による汎用化の方向性が議論された。矢治研究員（NIMS）から、レーザーを光源とした新たに導入された類似装置による研究展開が説明された。多元系物質の材料開発において、探査効率の向上に向けた AI による測定支援やビッグデータにおけるデータ科学の推進において、人材確保とチーム力の重要性が指摘された。
- 6) 先端光電子分光について、田中准教授から BL5U および 7U の現状と開発経緯について紹介された。スピンマニピュレータ 3 次元操作の新機構の開発状況が議論され、次期施設における光源の高輝度化やサブマイクロフォーカス化の必要性が述べられた。黒田准教授（広大）より、スピン分解角度分解光電子分光による物性研究の一端として光スピントロニクス の提案があった。手法の普及に向けては、若い力の活性化と、多様性への対応が肝要であることが指摘され、そのためのソフトウェア開発や、実験手法の開発テーマの設定の重要性が述べられた。
- 7) X 線イメージングについて、大東助教から BL4U の STXM 開発の経緯と利用状況について説明があった。国際的にみて極めて安定な実験装置環境である利点がユーザー獲得につながっていることが指摘された。今後の高空間分解能化や試料損傷回避のための技術開発が重要である点が指摘された。高橋教授（東北大）から、先端コヒーレントイメージングの技術開発とその利用について紹介があった。タイコグラフィーと X 線吸収分光を組み合わせたビッグデータに対し機械学習を導入した解析例が示された。放射光を単に分析ツールとしての利用にとどめることにせず、計測深堀とデータ科学の融合が重要であると指摘された。
- 8) 次期施設の光源加速器仕様について、加藤教授から 1 GeV リングのデザイン概要が紹介された。これまで UVSOR では現施設形状を維持したままの 2 度の高度化を行ってきたが、更なる光源性能向上においては、新地において小型リングを刷新する方向性が必須である点が述べられた。0.75 GeV と 1 GeV 運転での光源性能の差、多極

ウィグラー装置 MPW の導入効果や、真空槽の小型化のメリット・デメリットが述べられた。100 eV 程度の波長帯ではレーザー光源と同等の空間コヒーレンス性能が達成できる可能性がある事が示された。

最後にパネルディスカッションを行い、ユーザー代表として UVSOR 利用者懇談会のメンバー（岡林教授（東大）、北浦教授（山形大）、木村教授（阪大）、彦坂教授（富山大）、山根研究員（PhoSIC））からパネラーに就いていただき聴衆と議論した。事前アンケートにて UVSOR 利用者や他放射光施設関係者などから寄せていただいた声を基に、光源仕様について利用者側の視点からの意見交換があった。先端技術である挿入光源ビームラインだけでなく、幅広い実験テーマの需要を満たすためベンディングビームラインの堅持を要望する声や、長期的な需要展望を見定めることが重要であるという指摘などがあった。また利用形態や運営体制についての意見交換も行い、建設計画実現に向けた戦略的な活動を求める声を多視点においていただいた。今後は具体的なビームライン設備を念頭に、各要素技術のデザインレポートをまとめていく作業が不可欠であり、各種研究会を開催し議論を深めていく予定である。

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）。