

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 39 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（TOP-UP 運転，挿入光源追加，エミッタンス 27→17 nm rad）のように，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 10 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中の次世代放射光施設 NanoTerasu と稼働中の大型放射光施設 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先端分析を利活用できるユーザーを育成することや，コミュニティ全般強化へ向けた組織間連携や，未活用分野への支援による研究領域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ある。こうした潜在的放射光利用者となりうる当該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く，岡崎三機関として基礎生物学研究所，生理学研究所との連携を深めることが重要で，これからの UVSOR が目指すべき方向性と捉えて検討を進めている。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 年度より検討を開始し，日本学会会議へのビジョン提案やロードマップ申請へと準備を進めている。将来計画の経緯は過去レポート 2018～2021 もご参照いただきたい。2022 年度はシンポジウム（第五回検討会：施設間連携）を開催し，UVSOR 利用者懇談会と次期施設の目指すべき形態についての概要がまとまった。概要は，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成熟期にあり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，マルチビームやマルチモーダル計測など，より挑戦的な光計測の手法開拓を目指す。そして，光源として放射光のみならずレーザー光源（自由電子レーザーや卓上小型レーザー）を多彩に活用できる実験設備を提供することで，計測を通じて多くの分野を融合し，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に入射加速器として用いる計画も検討した。この技術は相補的に 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。前者の融合拠点には，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，現組織規模を倍程度に大きくした「極限光科学イノベーションセンター（仮）」の組織改編を検討している。特にバ

イオ系の実験手順では、放射光を利用した実験の前後の評価や試料調製環境の充実が不可欠である。一方、後者の学術開拓は、高出力かつ安定なレーザー光源技術の進展のみならず、入射加速器への応用のための更なる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。こうした以上の提案を日本学術会議が募集した「未来の学術振興構想」の策定に向けた「学術の中長期研究戦略」施設計画の提案に対し、UVSOR 将来計画をベースにした提案「複雑系・不均一系の分子ダイナミクスに挑む量子光科学拠点の構築」を提出した。その後、グランドビジョン「量子ビームを用いた極限世界の解明」にグルーピングされる予定である。その後も議論が進められているが、各種プロジェクトへの申請に向けた議論が進められる中で、バイオ系を中心とした未活用分野への研究展開が検討され、岡崎三機関間連携の方向性が議論された。2023 年度からのバイオ系ユーザーの支援を目指した光計測機能強化を目的に掲げ、文部科学省のロードマップ 2023 へ向けた申請準備を開始している。現 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あるが、同時に、次期施設へ繋ぐための軟 X 線や真空紫外線を用いたバイオ系の斬新な研究成果の発信を狙い、着実な需要開拓を目指したい。また、光源グループによる先端的量子ビーム実験環境・設備の継続的な深化も重要で、低エネルギー帯施設における国際的な発信力を強化したい。

8-1-2 光源加速器の現状と将来計画

現在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、2030 年付近で大規模な更新が想定され、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ているが、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（2019 年度）し、順次進めている。2022 年度は電力料金の高騰問題があり節電対策を検討し、昨年度比で同月毎 2~10% の使用量削減に成功した。電気料の圧縮は一定程度の実行ができたが、予算使途対策としては費用対効果は小さく、抜本的な解決策とはいえない状況である。次年度に向けて、空調設備をインバーター空冷型への変更を検討している。いずれも水冷型で、現 7 台の耐年経過による更新時期が間近である。現状は水冷型空調機であるため on/off のスイッチングにおける設備膨張率の影響があり、蓄積リング内における数 10 マイクロメートル程度のビーム軌道の空間変動に効いてくる。ビーム軌道補正により対処しているが、更新により恒温環境になれば高精度実験へ向けたより高水準の調整が可能と考えている。

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。こうした研究は、大型施設では通常の放射光ユーザーのための定常運転への影響があるため困難であるが、小型施設ならではのメリットとして、光源パラメータ操作の自由度が高いことや、週末実験などで定期的な実験環境が与えられていることがあげられる。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。前述のように特殊運転が必要な実験は、ユーザー利用の無い週末あるいは特定の専用運転週をユーザー利用週の間を設定して運営してきた。今後の需要バランスを鑑みて、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、2022 年春に蓄積リングの電子バンチ軌道を新たに設計し、新軌道で定常運転することに成功した。その他、ここ 1-2 年は、加藤特任教授（クロアポ）らによるタンデムアンジュレータの特性を活用した斬新な光干渉実験等も行われているが、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。アカデ

ミア全般で人材難が深刻になりつつあるが、助教2名の転出等により加速器関連のスタッフ不足に陥っている。共同研究者であるパワーユーザーに兼任職を依頼することで人的補填とし、特殊運転業務を運用している。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、国際的な10年程度の先端開発研究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る方針である。

軟X線BL6Uでは、2020年から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。2022年度に二次元スピン検出ユニットを導入し、スピン分解機能を付加した同顕微鏡装置の最終設備開発が始まった。さらに、低エネルギーVUVのBL7Uの光源をブランチ化し、同顕微鏡に導入する機構を立ち上げ中である。一方、同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ではスピンマニピュレータ機能の導入により、高効率スピン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。またいずれも電子構造の大規模な多次元計測の効率化のために、計測自動システムの構築を進めている。

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。2022年度から、絶縁性試料や易光損傷試料系における需要を鑑み、BL4Bにおける有機用角度分解光電子分光エンドステーションによる実験支援を開始した。代わりに既BL2Bにおける光電子分光システムの利用支援は次年度は停止する。将来的には空きスペースを活用し、オペランド化学状態計測ビームラインの拡張を計画している。なお、結果的にBL4Bは複数の実験設備が併設されることで利用コミュニティが多岐にわたり、磁気円二色性(XMCD)実験や、その他X線吸収分光実験の需要と共に申請競争下に置かれることとなった。審査体制を見直し、半期毎にこれら3分野の割り当て実験週数を策定し、それぞれの枠内で配分審査を実施することとした。

一方で、小規模施設の運営面の課題として、ビームラインスタッフの増強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、UVSORは組織規模に比して極めて少人数で運営している。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(合計60時間/週)。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」という運用方針のも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。また週末運転やスタディ運転では、所外のパワーユーザーに兼任職として支援を依頼している。グループ助教の空きポスト人事も平行しているが、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。運営面では後述のように、課題審査システムを抜本的に見直し、スタッフ業務の軽減をはかっている。

8-1-4 中長期計画（次期施設計画，課題審査システム再構築）

2018年度より、UVSOR-IIIの後継となる次期小型放射光施設の建設に関する検討が進められている。2023年度は40周年事業に合わせ、各実験手法を軸として次期施設コンセプトデザインレポートをまとめる予定である。歴史を振り返ると、光科学は光源技術の深化と共に多様な分野へ発展してきたが、まだ多くの未活用分野が残る。特に近年の化学・バイオ系分野の需要の高まりに対応できていない。かつてUVSORでもそうであったように、複雑系の計測は萌芽的に試みられてきたが、当時の技術背景もあって成功例が十分とは言えない。今後、新たな学術開拓を目指すためには、これまでの易損傷物質への計測技術ノウハウを元にした、放射光施設の支援体制の抜本的な変革が求められる。成熟した各種光源の最適化・安定化を軸に、時代背景に即した使い易いインフラ環境と高度な研究支援体制による光科学の一般化を実現し、岡崎三機関の研究土壌を生かした新たな融合生命分子科学拠点を構築する計画である。個人研究から協調的研究活動の時代へ適合するための融合型ファシリティと組織体制改革が効果的で、光源技術の集約と組織規模の拡大により支援体制を刷新する。新センターは現状の倍程度である60余名規模の支援体制を想定している。また、歴史的にUVSORの強みである新たな量子ビーム開発技術を元にした先端光科学による新規基盤学術の開拓によるブランド化も有効であるため、一般化と合わせた二面展開による中核研究基盤を構築する。

大小様々な検討会を積み重ねてきているが、11月に行われた第五回次期施設建設検討会においては、NanoTerasuとあいちSRセンターとの連携について議論した。あいちSRの産業利用に特化した利用コンセプトと支援システムは極めて特徴的で、利用率の6割強を民間企業が担う稼働実績は、国際的にみて極めて独自であり、同様の目標を掲げる欧州施設のロールモデルとなっているほどである。放射光大国として10か所のリング型施設をもつ我が国の強みが発揮されている点、つまり施設の役割分担が効果的に機能している事例ともいえる。中部地区の放射光施設としては、産学利用の役割分担を意識し、有効な連携関係を継続していくことが望ましいだろう。例えば産業利用でよりアドバンストな実験が求められる時には、UVSORで発展課題を実施するなど、こうした近隣施設間を橋渡しするような利用支援も有効と思われる。NanoTerasuではコアリションメンバーシステムで、同様の民間企業に対する支援環境問題を打破する計画であるが、運転開始からその動向を注視したい。我が国における各施設の将来計画が散見される中、大学共同利用機関の役割やミッションを明確にし、次期施設の詳細について更なる検討を進めていきたい。

一方で、2023年度の申請課題からwebシステムの完全英語対応と、新たな審査体制システムを導入した。次期施設建設の実現へ向けた国際競争力強化のために既存の審査システムの再構築を行うものである。コンセプトは、利用の国際化によって高インパクト成果の件数増加を期待しつつ、未利用分野等のユーザー拡張を目論見、新規参入を拒まない共存スタイルにする。また短期インパクトは低くとも着実な基礎学術的課題と恒常的な成果発信力は施設の特徴付けとなるもので、課題審査で評価することとした。また、小型施設の特徴的な運営の柔軟性は維持し、適宜自由度をもって短期中期的な施設意向が反映できるように設定した。課題審査は前期後期の2回であり、審査項目の内容を一部見直した（web公開情報）。さらに、新たに一段階の審査過程を追加し、複数名の外部審査委員を含む分野別審査体制を初段階に導入した。採択までのプロセスは、3段階（第1次：分野別審査小委員会、第2次：課題採択小委員会、第3次：施設運営委員会）の審査によって進める。第1次では各課題の学術レベルを絶対評価で数値化。第2次は中期計画に基づいた施設ミッション評点と技術評点による配分日数を決めるための合議審査とし、相対評価5段階の査定と採択週数案を決定する。これを第3次で合議し承認する流れとした。これまでは分野別審査に相当するプロセスが無く、今後の分野の細分化・国際化の傾向や競争率の増加に対して煩雑であり運用上の懸念があった（競争率の高い一部のビームラインについては、これまでも第1次に相当する追加審査を実施していた）。今後は審査システム構築によるスタッフの業務負担の軽減が期待される。

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）、文部科学省各課との意見交換、における意見交換を元に改訂してきたものである（過去リポート参照）。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 2021 参照）。