

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 40 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 11 年目を迎え，全 13 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コヒーレント放射光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（7 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，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，今後も国際共同研究の持続的な発展を目指す。また中型放射光施設 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相補的運用と研究主導が求められる。大型・中型・小型の先端放射光施設を国内に有するというコミュニティ総合力は，我が国の国際的にみた優位性である。各施設における光源の波長帯域の相補性だけでなく，ゼロをイチにする学術開拓，研究の厚みを創る学術発展から社会実装までのニーズとシーズの相関とその研究時間スケールの違いによる相補性も重要な因子である。

これまで 40 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。現状の先端研究の活動力を維持すると同時に，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い。

次期施設は小型放射光を軸としつつも，あらゆる光源（高輝度放射光，自由電子レーザー，高次高調波レーザー等）を多彩に活用できる実験設備を一元集約して提供することで，光計測が研究連携の横串となって多くの異分野を融合し，未踏の学術を広く開拓する「分子機能・量子物性などの複雑不均一系の光計測拠点」としての先端施設と位置付けた。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が視野に入る。先端サイエンス分野の細分化の時代における真の異分野融合は容易ではない。各分野が緻密化・専門化されるに従い多くの専門用語が生成され，独自のコミュニティにおける集中的な議論体制の形成もあり，分野の垣根を超えた議論は極めて難しい時代となった。もはや卓越した俯瞰的視野と大局観を有するような研究者がいたとしても，分野横断による新分野創発の作業は，一個人の能力を超えてしまっている感がある。こうした時代においては，横串として適切な規模の設備・人員を整備した拠点センターが総合的な体制として不可欠である。また光科学は，放射光施設の実績と在り方を見れば明らかのように，あらゆる分野における利便性と拡張性を持ち合わせている。今まさに未開拓の分野に「光」をあて，国際的に見て爆

発的にコミュニティ拡大に繋がるような光利用実験のロールモデルを作り上げることが不可欠である。分子研が設置当初にケミストリー分野への放射光利用学術展開を意識して UVSOR を建設し、分野育成に貢献したと同じように、次なる学術開拓を意識した計画を検討している。大学共同利用機関のユーザー支援ノウハウの蓄積と共同研究の実績により、各関連センターと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」を提供することができる。特にバイオ系（生物学、農学、薬学、生命科学等）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。光科学の設備を軸としつつも、周辺の汎用分析器も一元集約する新センターが不可欠である。

こうした背景に基づき、本計画の関連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」の施設計画に提案した。我々の「複雑・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」は、2023年10月にグランドビジョン「量子ビームを用いた極限世界の解明」の一計画に策定された。また、文部科学省のロードマップ2023へ提案「自律型機能の解明に向けたテラメイド光科学研究拠点」を申請した（不採択）。また2023年12月には UVSOR 設立40周年記念事業を開催し、これまでの UVSOR を振り返りつつ、持続的に未来へ向けて次期施設の目指すべき姿について議論した。そこでは40周年記念冊子を発行するとともに、コンセプトデザインレポートを執筆した。その概要については後述する。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。岡崎三機関の基礎生物学研究所、生理学研究所の各研究グループとの共同研究を開始しており、相互連携を強化する政策を進めている。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。こうした計画の経緯は過去の分子研リポート2018～2022もご参照いただきたい。

8-1-2 光源加速器の現状と老朽化対策

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2019年度に決定し順次進めている。2022年度からは電力料金の高騰問題から節電対策を検討し、昨年度比で同月毎2～10%の使用量削減に成功した。2023年度も継続して節電に努めている。そんな中、2023年1月頃から入射効率が減少し始め、2023年3月末の運転において入射効率が10%を切る事例が発生した。2023年4月から5月のシャットダウンや調整運転の期間に様々な調査や調整作業を行ったが、明確な原因は特定できなかった。その後も調整作業により入射効率が25%程度まで回復したが、1週間に入射できる電子数に制限があるため300mAの運転を継続できない。そのため2023年度は蓄積電流値を200mAに下げて運転した。現時点でも原因の特定には至っておらず、2024年度も200mAの運転を継続する。低電流運転は、低ノイズ計測や易損傷系の試料を扱うユーザーなど一部には歓迎する声があるものの、大多数のユーザーは300mA運転を切望している。今後は、シンクロトロンパートを大気開放して内部を確認できれば原因究明に向けて大きく前進できるが、偏向部ダクトが真空漏れを起こしており、大気開放によって深刻な真空漏れを誘発する恐れがあるため、現時点では大気開放

ができない。リスク低減のために新たな偏向部ダクトを製作しており、2025年初めに納品予定である。2025年4月のシャットダウン期間に偏向部ダクトを全て新品に交換し、異常原因の特定に結びつけたいと考えている。そのほかの老朽化対策の状況については割愛する（第82、83回運営委員会資料を参照）。

他機関連携については、マスタープラン2020での協力体制方針を継承し、2023年度からKEK-PF、UVSOR、HiSORさらに名古屋大SRセンターの光源部門が共同でSR加速器情報交換会を月一回程度の間隔で開催し、研究者から技術職員までが参加し、それぞれの施設の運転状況や技術開発への取り組みなどを報告している。技術情報の交換による各施設職員のレベルアップ、要素技術・保守部品などの共通化による維持管理コスト低減、将来計画へ向けた共同技術開発などを狙いとしている。

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。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、こうした先駆的な独自研究への対応として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

ユーザーニーズの観点から2023年度にBL2B（分子固体用光電子分光）をシャットダウンし、現在ビームラインは13基が稼働している。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。ビームライン実験設備については、国際的な動向を鑑みて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等を踏まえた設備の高度化が必要で、分子研予算と外部研究費等により開発研究を継続してきた。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て同顕微鏡に導入する機構を立ち上げ、直入射光源による偏光依存実験に成功している。

また汎用設備であるバ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。バ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。最

近の成果として以下の6点を取り上げる。いずれもこれまで見えなかったものを「観る」ことにより「解る」につなげた研究である。

[BL1U] 蓄積リング内の電子数を漸次減らし、1つだけの電子からの放射光発生に成功

単一電子からの放射光観測により放射光発生原理の実証的な理解が進展した

[BL3U] UVSOR オリジナルの液中軟X線 XAFS による糖類の水和構造の温度依存性精密計測

理論計算と組み合わせゼロビオースと溶媒の相互作用を解明、バイオマス変換技術の進展に寄与

[BL4U] 走査透過X線顕微鏡 (STXM) を核とした複合分析によるハヤブサ2帰還試料の解析

小惑星中で有機物を含有する鉱物環境を特定、宇宙からの生体分子の経路解明の重要な知見

[BL4U] STXM による全天候タイヤ (アクティブトレッドゴム) の機能可視化

SiO₂ 周囲に吸着する水を可視化し、最適な吸湿状態を形成するイオン化技術確立の決定的知見に

[BL6U] 光電子運動量顕微鏡 (PMM) によるカゴメ超伝導体 CsV₃Sb₅ の Fermi 面計測

V と Sb が協力し超伝導状態となることを解明、従来説 (V が主体) を覆す

[BL3B] ベンディングビームラインにおけるシンチレータなどの材料評価計測

福島第一原子力発電所事故における内部調査委に使われる新規材料開発で有効活用されている

2023 年前期の申請件数は 106 件 (うち有償利用 12 件, キャンセル 5 件を含む) で, 2023 年後期の申請件数は 104 件 (うち有償利用 12 件, 協力研究 3 件, キャンセル 1 件を含む) であった。2023 年度は, シャットダウン 10 週, 調整運転 2 週, マシンスタディ 4 週, ユーザータイム 36 週 (うちシングルバンチモード 2 週) であった。マスタープラン 2020 での協力体制方針から HiSOR-UVSOR 合同セミナーを月 1 回ペースで開催している。また技術職員が主導して「開発研究多機能ビームライン検討会 (月 1 回定例開催)」による機関間の連携活動を強化している。

8-1-4 中長期計画 (次期施設計画)

本施設規模 (小型リング型高輝度放射光施設) 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, 利用ニーズに即した組織体制の在り方に重点を置く計画とした。近代サイエンスにおいて欠かせない異分野融合を真に具現化するために必要な拠点スタイルとインフラストラクチャー設備群を検討した。これは奇しくも分子科学研究所の設立時の理念として, ケミストリー分野のための放射光施設を建設する必要性を提示したコンセプトと合致する。つまり光科学を軸とする新たな学術創成計画の第二弾と捉えていただければ幸いである。

光源技術の発展により, 今や放射光のみならずレーザー光源 (自由電子レーザー FEL や高次高調波 HHG レーザー) を自在に利用できる施設が求められている。特に EUV 領域 (100 eV 程度以下) の波長帯は現時点では放射光よりもレーザー光源の方が多面的に高性能である。これまで HHG レーザーは安定性や技術的な困難さから汎用的に普及するには至っていないが, 今後は世界に先駆けて我が国の共同利用施設が主導することで, 広く HHG レーザーを活用するフェーズに移行する必要がある。一方で, より短波長の光源としては放射光の優位性は揺るぎなく, 物性や機能を研究するために不可欠な広帯域の光の利用には, これらの光源 (SR, FEL, HHG) を網羅する設備が欠かせない。

2023 年度は 40 周年事業に合わせ, 次期計画を明文化し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作業を行った。そのために必要な手法や分野毎の研究会を以下のように可能な限り開催した。

2023. 7: Seeds and Needs for Tomorrow's Synchrotron Radiation Photoelectron Spectroscopy Research

2023. 9: イオン液体インフォマティクスの発展に向けて

2023. 9: UVSOR-Spring8 赤外ビームライン合同ユーザーズミーティング

2023.10: Frontier of Soft X-Ray Spectroscopy for Chemical Processes in Solutions (MaxLab 共催)

2023.11: NINS 先端光科学研究分野プロジェクト研究会「放射光の量子性・干渉性に基づく革新的計測手法の探索」

2023.12: UVSOR40 周年行事, 第 6 回次期施設建設検討会 (バイオ系における光科学の展開)

コンセプトデザインレポート全容は web 開示しているのでご高覧いただきたい。リング型放射光の仕様は、UVSOR-III よりも一回り大きな省エネ小型の高輝度光源 UVSOR-IV を新地に刷新する。光源のテラレーメイド利用のために、運営自由度のある小型施設規模が不可欠で、成熟した各先端技術を導入しオペランド・イメージング手法への適用に耐えうる安定性を重視した設計である。SX, VUV の長波長帯域では回折限界性能の高輝度光源となりレーザーを組み合わせたコヒーレント特性を利用する最先端研究が行える。また次世代の最新技術である小型レーザー加速器による入射器を世界に先駆けて導入し、50 年後も持続可能な長期的な展開を視野に入れる。次期計画のコンセプト概要の詳細はリンク先をご高覧いただきたい。以下にミッションおよび目標とタスクを記す。

ミッション：先端光計測による生命と物質の謎の解明

Knowledge innovation by seeing the unseen “観るから解るへ”

戦略目標：

省エネ／高輝度小型リング放射光源設備による新センター建設

サイエンスニーズ視点で光のテラレーメイド利用による未開拓分野の啓発

ゼロをイチにする学術開拓的・異分野融合型研究の推進

次世代への技術伝承と人材育成

研究者・技術者の相補性強化 “技術職員の待遇改善”

タスク：

SR, HHG, FEL の自在提供による先端開発と最新技術の協奏

付帯分析機器群によるマルチモーダル実験設備の複合研究支援

ワンルーフ集約された研究環境による融合型研究の促進

知識・技術を持ち寄り新しい発想を生み出す異分野交流の潮流

シニアと若手が切磋琢磨する光道場による相互作用の仕掛け

<https://www.uvsor.ims.ac.jp/uvSOR4/>



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)、国際諮問委員会や運営顧問会議 (2019 年 12 月、2024 年 2 月) における意見交換を元に改訂してきたものである (過去レポート参照)。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 (分子研レポート 2016 から 2022 参照)。