

## 6-1 極端紫外光研究施設 (UVSOR)

### 6-1-1 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。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 12 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、特に 10 eV 付近をカバーする真空紫外光領域では国際的にみても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、後述のように 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。

計画概要として、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、分子科学研究所の牽引力とともに未踏の学術を広く開拓する。成熟した各種光源技術を有機的に組み込んだ国際的に見ても稀有な、唯一無二の研究空間の創出を目指す。特に「分子機能・生命機能・量子物性などの複雑系／不均一系の光計測拠点」としての先端計測設備を機能強化し、大学共同利用機関として長期的に支援する施設と位置付けた。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ている。この技術は相補的に EUV 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拡大展開が視野に入る。

先端サイエンス分野の細分化の時代において、異分野融合によるコミュニティの構築は容易ではない。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

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なように、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。特定分野を出口戦略の短期的視点で強化する政策に対し、長期的視点で学術の裾野を広げる役割を担う。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、その第二弾の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、時間と空間のスペース感覚を意図することが極めて重要となる。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必須であろう。

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レー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を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（web公開）。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、Proof of Concept 実験検証を通じて、相互連携を強化する作業を進めている。また、光源グループによる先端の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レポート2018～2023もご参照いただきたい。

## 6-1-2 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年程度には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。2024年度も継続して節電に努めている。

加速器老朽化における緊急課題として入射効率の低下が挙げられる。2023年1月頃から効率が減少し始め、一時は入射効率が10%を切る事例が発生し、蓄積電流値を通常300mAのところを200mAに下げて運転してきた。その後、原因特定の作業を進め、入射効率低下の要因を見出し、次年度は改善する見込みがたった。執筆現在2025年3～5

月は、シャットダウン期間中であるが、シンクロトロンブースターリングの大規模改修を実施している最中であり、偏向部真空ダクトを全て新品に交換を進め、より安定な状態でのビーム入射を目指した設備整備を実施している。

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、若手への技術伝承、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、光源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、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きた。金安教授が 2025 年 4 月着任予定で、新規光源開発とその利用に関する研究力を強化する。これにより、中長期的な加速器運転における持続性が担保されるとともに、次期計画推進に向けた強力な陣容となった。

### 6-1-3 ビームラインと観測系利用状況

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。ユーザーバランスはコロナ禍以前に戻りつつあり、今後は国際申請数や、民間需要への対応、採択競争率を意識した運用となるであろう。

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。大型放射光施設 SPring-8 の大規模更新計画で、赤外分光ビームラインが廃止されることを受け、国内ユーザーコミュニティのアクティビティ維持を目的として、UVSOR で積極的に受け入れを行うことで合意し、2025 年度から設備の移設や関連ビームラインの更新を予定している。2024 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。前期の申請件数は109件（うち有償利用7件、随時申請3件、BL3U水漏れによるキャンセル14件を含む）で、後期の申請件数は123件（うち有償利用9件、キャンセル4件を含む）であった。

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] 世界で希少な高フラックス・エネルギー可変・偏光可変・超短パルスガンマ線源  
円偏光度を制御したガンマ線にて磁性体の空孔などを調べる独自の手法の利用が広がる
- [BL3U] 共鳴軟X線散乱の測定システムを整備。ソフトマターの構造解析手法を開発  
対象は液晶や高分子、生体試料など。100 nm程度のねじれ構造の観測や元素選択的な解析
- [BL4U] 走査透過X線顕微鏡（STXM）を核とした複合分析による化学状態マッピング  
軟X線を使った生命科学ヘフィージピリティスタディを進めている
- [BL5U] 全方位スピン分解ARPESを目指して最終電子レンズ調整  
軟X線の広いエネルギー範囲で高分解能スピン偏極バンド分散計測が可能に
- [BL6U] 光電子運動量顕微鏡（PMM）によるTaS<sub>2</sub>やIrT<sub>2</sub>などのCDW相転移中のFermi面変化観察  
顕微分光と暗視野像法を駆使し相分離の顕微分布と各所の電子状態の変化過程を可視化
- [BL7U] 世界で最も低温まで冷却できる6軸光電子マニピュレータを実装  
低エネルギー帯連続光源で世界トップクラスの高エネルギー分解能バルク敏感電子状態測定拠点
- [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

#### 6-1-4 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時間分解能や周波数特性において高性能を示す側面がある。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。こうしたレーザー設備に対して、放射光分野で培われてきたビームライン技術を転用することで更なる高度化が期待されるとともに、大学共同利用機関の支援体制と運用法を広く展開することによる包括的な効果として、周辺分野の活性化が期待できる。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。

2024年度は自然科学研究機構のオープンミックスラボ（OML）事業支援により、所外グループと連携し、フォトンバイオロジーフィージビリティ研究を開始した。生体試料の多彩な計測を意識した手法開拓を進めている。また、各実験手法や分野毎の研究会を以下のように開催した。

2024.10 分野研究会「物理化学と放射光・先端計測に関する研究会」

2024.12 分野研究会「複雑系へのアプローチ～物質の複雑性をどこまで予測できるのか？」

2024.12 VSX研究会共催（物性研究のためのVUV・SXレーザー光源と加速器光源の協奏利用）

2025. 1 日本放射光学会年会特別企画（日本の放射光施設のポートフォリオと将来展望）

一方で、UVSOR-IVの建設費用の獲得は非常に困難であるため、事業継続性の観点から既存リング設備を軸とするUVSOR-III+（プラス）高度化および光源最適化を同時進行で計画しており、予算を概算要求している。電子ビーム蓄積リングの電磁石構成をDBA型に刷新することで、世界最高レベルの低エミッタンス高輝度EUV光源の超安定運転が実現する。先端光源の更なる高度化により、ビーム安定性が飛躍的に向上するとともに、光源のコヒーレンス特性が向上し、未開の計測手法が開発される。これらの先行開発は、ニーズの高まりをみる複雑系分野への展開に必須で、国際競争が激しさを見せる中、我が国の基礎学術の持続的発展に不可欠である。また懸念の老朽化設備を全て刷新し、ビームプロファイル機構を導入することによる光源安定化により、時空間計測のための先駆的実験の検証が実現し、新イメージング法により国際研究展開をリードすることにつながると考えている。また老朽設備の撤廃により、24時間運転の実施が可能となり、UVSORの強みである挑戦的な光計測法の開発研究機能を維持しつつ、スタッフ対応が困難な夜間タイムにおいては、汎用型計測の自動化機能、AIロボット支援システムを開発することで高スループット型の実験が実現する。大型施設では相容れない汎用自動型と先進開発型の二面展開が可能となり、分子科学の新たな潮流を生み出せると期待している。ここで開発される新規イメージング法やオペランド法など先端実験設備は、次期施設（UVSOR-IV）へ持続的かつ効果的に誘い、新たな要素技術の供給源ともなるだろう。

UVSOR-IVの詳細のコンセプトデザインレポート全容はweb開示している。繰り返しになるが、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。

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



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ーラ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

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 2023 参照）。