

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 35 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。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, 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。世界的に見て技術革新の折に新施設が建設されていくことが常であるが, 当時のいわゆる第二世代の面影を残している施設は唯一無二と言える。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ービームライン 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 線吸収分光は世界的競争力がある。今後は国際利用率の増加が求められる (昨年度実績:年間 220 件申請, のべ 1,300 名弱来所のうち, 国際利用約 9% @ 先端アンジュレーターライン, 60 名強)。

国内に第三世代放射光施設が SPring-8 のみであり, 分子研ではその一旦を担う可能性を長期にわたり検討してきた。当時の計画 (分子研レポート 2006 ~ 2012) として挙がっていたものは, ① 1.5-2.5GeV 級新第三世代リング, ② 1GeV 級超高輝度リング, ③ライナックによる軟 X 線自由電子レーザー, ④小型エネルギー回収型ライナック, であった。2012 年度の高度化以降, これら大型計画は日の目を見ず, 2018 年度になり, 国内の第三世代施設計画 (3 GeV 東北計画) が具現化し, 分子研における既存施設の更なる高度化や新施設の建設案は非現実的となった。約 20 年後の分野展望を想像するのは難しいが, その時の UVSOR 施設の姿と国内 (+アジア) における位置づけを真摯にかつ可及的速やかに議論していく必要がある。

本報告書は, UVSOR 施設運営委員会 (2018 年 7 月, 2019 年 2 月), UVSOR 将来検討ワーキング (2018 年 10 月以降逐次), UVSOR 利用者懇談会 (2018 年 11 月) における意見交換を元に改訂してきたものである。また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, 2017, 2018 参照)。本施設における中長期計画の概要を以下にまとめる。

【現状】

- ・真空紫外光から軟 X 線領域をカバーする世界的競争力をもつ放射光施設として運用 (先端アンジュレーターラインと汎用偏向電磁石ラインの共存による大学共同利用機関としての共同研究推進)

【課題】

- ・世界的競争力維持のための先端実験機器の開発と利用者分野の拡張
- ・光源加速器の老朽化により現状性能の維持と安定供給に懸念
- ・技術職員の世代交代ができず中期的 10 年後の施設運営に懸念

【計画】

- ・主任研究員を軸として「運動量分解光電子顕微鏡」を導入し 5 年を目処に開発し, 国際的に先端性のある共同利用展開
- ・加速器オーバーホールとシステム自動化による機能強化
- ・新光源機能の探査とそれを利用した評価法開発による機能強化

- ・ケミカルマシンとしての利用拡大のため炭素汚染対策による機能強化
- ・主任研究員、技術職員等の雇用と育成（人材交流、待遇改善）による機能強化

8-1-2 施設の現状と今後の計画

(1) 光源加速器

2度の高度化に成功し世界トップクラスの高い輝度（17 nm rad, 真空紫外領域まで回折限界光源）と完全トップアップ運転（60時間／週。ただし、木曜夜間の12時間中にトラブルがあっても補償しない）で安定した運転を行っている。しかし光源加速器関連は基本となる設備構成が古く、多くが老朽化した状態である。2017年から偏向電磁石の冷却水系統の漏水問題が発生しはじめている。同様な経年劣化による各機器の故障に随時対応している状況であるが、先端実験機器に安定した光源を供給し、国際的な共同利用環境を維持するためには、こうした光源加速器の老朽化設備全体の更新、抜本的なオーバーホールも検討すべき段階に来ていると言える。老朽化した既存の電磁石設備を更新するためには約1～2億円の費用が掛かる。現状の運転状況に合致した効果的な改修方法を検討している。また線形加速器の更新によっては、光源性能のパラメータ調整範囲に自由度が生まれ「多彩な光源（輝度、パルス形状、ビーム形状、その自在化・安定化）」を一層発展させる余地が生まれるが、更新には約10億円の費用が掛かるため昨今の経済状況と国策方針では現実的ではない。国内やアジア隣国の次世代コヒーレント放射光施設の動向に大きく左右されるだろうが、高強度パルスレーザーを用いた新型加速器などの次世代技術の開発動向に留意したい。基本的にUVSOR-III加速器は技術的な成熟期を迎えつつあるため、逐次、トラブルや老朽化対応をしつつ、システムの自動化等による加速器の安定運転技術の確立も検討する。

国内やアジア隣国の他施設の動向や次世代光源の台頭（第3.5世代、自由電子レーザー光源、卓上レーザー光源）により、連携、共生、競合といったベクトルが散逸し、施設の将来計画には大きな検討課題が立ちはだかる。多くのユーザーにとっては次期東北計画にあるような空間コヒーレンスや超高輝度（超低エミッタンス）に特化した施設による“美しい先端光源”が必ずしもベストとは限らない。第三世代施設の創始期がそうであったように、分野によっては高輝度特性が仇となり、使い熟すまでに長い年月を要した事実もある。一方、卓上レーザー光源の汎用化による研究舞台の台頭が急速で、放射光施設の在り方を問う意見もあるが、まだVUV帯でさえ波長可変性は乏しく、光源として放射光を置き換えるものでは無いだろう。一部の計測・評価分野においてユーザーの移動は想定されるが、本計画期間に技術革新があったとしても、共存時代がしばらく続いたうえで、棲み分けが進むであろう。それでも本施設のような低エネルギー加速器施設は紫外光領域でレーザー光源との協奏実験が発展していくことも予想できる。光源を相補的・融合的に使い熟す時代を想定した研究開発を継続することが望まれる。

トップダウン型で科学技術イノベーションを志向するSPring-8IIや東北放射光施設、あるいは自由電子レーザー光源やアト秒レーザー光源などの次世代光源施設だけで、全ての学術研究のニーズを網羅することはできない。今、光源加速器性能として完成域にあるUVSORが目指すところは、放射光施設の成熟した姿としての「安定した使い易い環境」の提供であり、「ケミカルマシン」としての利用展開を意識した、新たな分野開拓に繋がる研究支援であるといえる。分子研を基軸としたUVSOR施設の特徴であるケミカルマシンへの適合性を見定めた光源特性（輝度制御・時間ドメイン自由度の開発）などのR&Dと若手人材の育成は継続していく必要がある。

一方でUVSORの回折限界光源性能を有効に活用した新奇な光機能の開発は極めて独創的である。より大型の放射光施設では機動性に乏しくこのような光源研究推進は容易ではないだろう。BLIUを活用した光渦やベクトルビームなど新光源探査やその応用技術開発はUVSOR施設のユニークな特徴（小型・高性能）を効果的に活用した研究と捉えている。

(2) ビームライン設備：分光器

光輸送系（分光器）の陳腐化と経年劣化による性能低下も先端研究環境を維持する上での重要な検討因子である。特に UVSOR は「ケミカルマシン」として顕著な業績を上げてきたが、軽元素化合物、特に有機材料等の詳細な知見を得るためには、分光器の炭素汚染は極めて深刻な問題である。依然として多くの放射光施設は化学系視点の研究が少なく、ともすると炭素汚染は先送りの問題となりがちであるが、UVSOR では BL3U の汚染対策実績があり、積極的な対応ができています。予算の重点化により、他5つのアンジュレータラインにおいても同様の汚染対策を施した光学素子に置換していく計画が望ましい。一方で、硬X線領域では、構造生物学など顕著なコミュニティの広がりを見せているものの、特に物性や機能を議論するために極めて有効な波長帯（VUV～SX）をもつ UVSOR において、潜在的なユーザーを広範に上手く取り込んでいるとはいえない。本質的に汎用化が難しい波長帯であるという問題は残るが、中長期的にユーザーコミュニティのすそ野を拡張し、新たな学術分野を切り開いていくためにも、多種多様なユーザー（研究課題）に対応できる環境を実験設備と合わせて維持していくことが重要である。現在、分子研のネットワークを活用して未開拓である化学系のユーザーを招聘し、新たな利用展開が始まっている。今後、他施設の展開に留意しつつ、人事政策を含めて UVSOR の独自性とその方向性を見定めていく必要がある。

今後10年は、先端アンジュレータラインの重点化により、国際的な厳しい競争下にある先端実験ラインを提供し、大学共同利用機関として世界トップレベルの研究を支援する。同時に、汎用性の高い実験は偏向電磁石ラインで安定した実験環境を提供し、地方大学等の学生教育にも貢献するなどして、共同利用機関としてバランスのとれた支援を継続する。

更にその先10年後は、後述のスタッフ育成問題とも密接であるが、国内他施設やアジア諸国の動向によっては取捨選択による重点化も検討しておくべきであろう。例えばアンジュレータの更新による波長帯の拡張やスイッチング偏向操作が検討できる。また国策転換による基礎学術分野の充実支援により大型予算が措置されるようになれば、汎用ラインを縮小し、先端アンジュレータ6本をタンデム運用することを検討する。これは大規模改造になるが国際的には放射光施設の標準的機能である。現在12時間の運転から24時間運転へ移行し、昼夜で実験装置を切り替え、2交代制で先端実験環境を提供することも可能であろう。この場合、運転時間の倍増によるシステムトラブル増が懸念されるため、加速器のオーバーホールが必須の前提条件である。さらに現在の運転スタッフ人員では全く労力不足であるので、組織体制の抜本的な改革による対応が必要となる。一方で、後述の新規分野開拓の是非によっては、ポスト UVSOR 施設の存在意義が問われるであろう。11施設を抱えることになる日本放射光学会にて国内放射光施設のグランドデザインを検討する議論が開始されたが、同時に所内においても今後20～50年後の施設の在り方の議論を開始した。

(3) ビームライン設備：実験機器とユーザー利用

2018年度は6本のアンジュレータ（U）ビームラインにより、世界最高レベルの極端紫外光を提供している。この他、偏向電磁石（B）ビームラインからの放射光を用いた汎用の分光研究が定期的実施されている。近年 UVSOR ではUラインの高度化を進めており、申請週数はのべ約370週である（H29年度採択率：Bライン97%、Uライン71%）。また国際的な発信力の強化のために海外ユーザーの取り込みを推進している（H29年度海外利用率：Uライン9%）。またいくつかの偏向電磁石のビームラインもユーザーからの要望を受け各装置の高度化を順次計画・実行中である。

幸いにして中期レベルで施設運営費予算を運用することで、自助努力による設備投資が可能で、定期的にエンドス

ーション（実験設備）について、先端技術の開発動向に留意し、重点的に整備していくことが中期戦略となる。世界的な研究動向を把握しつつ、世界を先導する高度な装置で成果を上げていく体制を強化することが不可欠である。そのため研究職員として新たに主任研究員を制度化し、2018年度に1名（電子光学分野）を採用した。最近の動向として、光源の高輝度化に伴い世界的には顕微イメージング技術に注目が集まっており、2016年度から UVSOR では「運動量分解光電子顕微鏡：momentum microscope」を導入する計画を進めている。基本ユニットは2019年度冬頃に導入され、BL6Uにて調整を経たのちに協力研究による R&D を推進する（2019～2023年）。また国際的な先駆性を勝ち取るために新規技術の開発を進め、直入射偏向可変光電子イメージング実験による R&D を検討する（光源としては卓上レーザー光あるいはBL7Uのブランチ化を想定する。早ければ2020年度に20%程度のBL7U専有を想定）。本設備は二段階計画であり、分光器最適化の後、最終形態は運動量分解光電子顕微鏡に2次元スピン分解機能を付加した装置として、唯一無二の先端実験装置にする計画である（後期計画は最短で2023年以降に開始）。電子状態測定 の代表機器である光電子分光装置は約20年毎に大きな技術革新が起こっているが、今まさに情報の次元アップという劇的な変革期を迎えている。実験情報の多次元化により、研究者の脳は全く異なる視点で刺激され、実験方法論そのもののパラダイムシフトが起こるであろう。こうした装置の存在により、海外からも一線級の研究者が来所し高インパクト成果を発信するようになれば、国内ユーザーの意識改革にもつながるであろう。

こうした実験設備が先端である期間は10年程度であるため、課題としては、予算確保により順次、計画的にエンドステーションを UVSOR の光源特性を活かせるものに更新していくことが不可欠である。本 R&D 以後の次計画はユーザーの動向に留意し、小規模施設の機敏さを有効に活用し、その都度、スピーディな決断と共に逐次対応すべきである。先に述べたように UVSOR は独特な「ケミカルマシン」として顕著な業績を上げてきたが、それでも現時点で化学系・生物系のユーザー数は極めて少なく、放射光を利用したまだ未開拓の実験対象が数多く残されているといえる。光源加速器性能が成熟期にある UVSOR では、こうした新規ユーザーの開拓により、分野の裾野を拡張していく使命があると考えられる。そのためには発信力の高い研究グループによる「有効性」のデモンストレーション実験が求められるが、現在その模索段階である。また新規ユーザーの利用障壁となる「使い易さ」の改善も最重要検討課題であると考えられる。現設備では BL3U における液体試料の軟 X 線吸収分光は、化学系ユーザーへの親和性が高い。原子構造の議論で終息している多彩な未評価物質群について、電子構造の視点でケミストリー研究を展開することが可能と考える。標的テーマによっては分光器設備を含めた更新（輝度制御、時間ドメイン自由度、安定化）が必須である。また BL4U における軟 X 線透過顕微鏡による3次元物性情報は、材料系ユーザーからの利用要望が高く、世界的にもユニークな存在として良く知られたビームラインとなった。これらのビームラインの最適化を「ケミカルマシン」のミッションに従い最優先に検討する。以下に各 U ラインの現状を記す。

・タンデム APPLE-II アンジュレータ高次高調波コヒーレント光源開発用ビームライン（BL1U）

加藤らが外部資金（文部科学省量子ビーム基盤技術開発プログラム）を得て建設した。FEL、光渦やベクトルビームなど新光源開発とその利用の開拓を目的とし、これまで協力研究の形で外部の利用も受け入れてきたが、光源技術が確立されつつある紫外・真空紫外線、ガンマ線の照射実験については、2018年度後期から施設利用で受け入れることとなった。なお、その他の利用については従来通り協力研究で受け入れる。

・真空封止アンジュレータ軟 X 線ビームライン（BL3U）

液体試料の軟 X 線吸収分光（XAS）測定を可能にしている、実環境下の液体試料のその場・オペランド観測が行える。

2017年度後期から施設利用に移行した。現在、液体試料だけでなく、電気化学セル、マイクロ流路セル、レーザー照射による光化学反応セルの開発を行うことで、液相の様々な化学・生命現象に、XAS 測定の適用範囲が広がっている。そのため、触媒分野、生命分野などの多方面からのユーザー利用があり、その利用者数は増加している。また、海外の第三世代先端光源施設（BESSY-II, ALS, MAX-IV など）では不可能な実験を可能にしていることにより、ドイツ BESSY-II（協定あり）、ベルリン自由大学（協定あり）、フィンランド・オウル大学（協定あり）、米国 ALS、フランス SOLEIL、中国合肥 HESYRL などの、海外の研究者による施設利用も実施している。

・真空封止アンジュレータ軟X線顕微分光ビームライン（BL4U）

易損傷試料に適応可能な軟X線透過顕微鏡（STXM）として世界的にユニークな実験を実施できる。フォトンフラックスおよび空間分解能向上を目的として、低分解能回折格子を導入した。また最高分解能を実現する最外輪帯幅 18 nm の Fresnel Zone Plate のキャリブレーションを行なった。今後、Li 端など低元素測定への対応を目指し、高次光除去に向けてフィルターセクションを出射スリット下流に設置し最適化調整を進めている。

・APPLE-II アンジュレータ高輝度固体光電子分光ビームライン（BL5U）

固体の2次元スピン分解角度分解高分解能 ARPES 装置。2018年度前期にマイクロフォーカス用ミラーの設置を行い 23×40 μm にビームスポットを絞ることに成功した。後期にアナライザーをメーカーに送り、deflector の最適化を行うことで微小試料の測定ができるようにする。またスピン分解光電子分光に向けてターゲットチャンバーの準備中である。後期にターゲットからの反射を得ることができるよう調整を行う。

・真空封止アンジュレータ軟X線ビームライン（BL6U）：協力研究用ライン

固体・表面角度分解光電子分光装置では、2次元原子・分子薄膜の電子状態に関する研究について、所内および国内外研究者を招聘しての共同利用研究を進めている。2017年度パーマロイ製の測定槽を新たに導入し、真空度と作業効率を大幅に向上させた。また、国際競争力の面で、海外ユーザーから強い改善要望が出ていたため、広い波数空間でのマッピングができるよう電子エネルギー分析器を更新し、現在性能評価中である。将来構想として前述の運動量分解光電子顕微鏡の導入を計画している。軟X線励起の価電子帯光電子分光・エネルギー掃引光電子回折と極紫外光励起の（直入射）偏向可変価電子帯光電子分光・分子軌道トモグラフィーという独自の実験ステーションとなる予定である。

・APPLE-II アンジュレータ真空紫外超高分解能角度分解光電子ビームライン（BL7U）

固体の低エネルギー角度分解高分解能 ARPES 装置。より広範な物性探査への拡張を目的として、高精度の低温・高分解能での測定を目指し、リニアスケールを設けた XYZ ステージと極低温マニピュレータを新規に導入した（所内設計）。十数 μm の精度で試料位置の微調が可能になった。また試料位置で 5 K まで冷却が可能となり、エネルギー分解能が実測可能な範囲で 5 meV を達成した。施設で高い申請競争率をもつラインである。

(4) 施設スタッフと運営体制

施設を維持していく上で、スタッフ体制について「人員の増補」と「世代交代への対策」が急務である。2017年度は転出 10 人、施設（准教授 1、技術職員 1、技術支援員 3）施設外（教授 1、助教 4）に対して、2018年度に 2

名補填で現員，施設 21（教授 1，准教授 1，主任研究員 1，助教 4，技術職員 11，技術支援員と事務支援員 3），施設外関連教員 4（施設長 1，教授 1，助教 2）である。

これは歴代最少人数体制で，同規模の他施設と比しても不十分な人数体制といえ，ユーザーコミュニティから将来について不安視する声もあがっている。少なくとも先端アンジュレータ挿入光源ラインには専属研究者が配置されているべきであるが，現在は各研究者が複数を兼務して賄っている。有能な技術職員の採用を実現するためには，待遇改善が一つの解決策であるが制度改革には多くの障壁が想定される。更に深刻な問題として，約 10 年後には 2 名を除き技術職員は定年を迎える。引継の教育時間を考えると，残された時間は少ない。人口減もさることながら，法人試験での希望者も少なく，魅力のある職種として技術職員を如何にしてスカウトできるか，放射光コミュニティ全体の大きな問題である。また今後増加していくと考えられる国際的な対応を視野に入れると，外国人スタッフ雇用の検討も必要である。

一方で業務内容を整理し，主任研究員を増補することで人材を確保することも視野に入る。運転にかかる簡易業務は外部委託あるいは技術支援員の雇用で対応することもできるだろう。主任研究員を補填すべき専門分野としては，光電子（済），加速器光源，X線光学，VUV 光学，スピン物性，制御システム，情報処理等があげられる。特に少数で運営するうえで，制御システム機能の重点化は有効であろう。また情報処理は，セキュリティ対策が叫ばれる中，施設としての自己防衛機能としても重要であるが，学術的にも実験スタイルとして大規模データを取り扱う時代であり，共同利用機関としてユーザーへの専門的な対応や支援が求められる。5 年程度のプロジェクトで先端設備の R&D を実施するうえで，人員不足は大きな問題である。事業の効果的推進のために主任研究員を技術的に補助するために，特任研究員の雇用によるプロジェクト運用を開始する。

現在，UVSOR を利用する所内ユーザー数（研究系 PI）も歴代最小規模である。所内ユーザーの活性化により，積極的な外部発信が求められる。軽元素 XAFS，偏光・蛍光スペクトル，時間分解分光，放射線損傷，軟 X線イメージング（吸収，発光，光電子），VUV 共焦点イメージング，テラヘルツ分光などの実験手法の発展を牽引できるスタッフが必要である。水を含んだ試料系など，分子生物学，生化学の分光学やイメージング研究を如何に切り開くか，分子科学に律した優れた研究テーマの創成を狙う。これにより分子研内にとどまらず，まずは近隣の生理研，基生研，生命創成探究センターを活性化する。硬 X線による「構造」評価は放射光を使い熟したことにより成熟した。次は UVSOR が得意とする領域での量子デバイス，薄膜界面制御，界面電気化学，ナノ触媒，自己組織化，分子認識，生体模倣などの種々の応用展開を見据えた「機能・物性」評価へ向けた研究展開が待たれる。

UVSOR 利用者懇談会では，次世代を担う優れた人材を育成する機会が欠乏している点が指摘され，本施設での対応を要望する意見があった。多様な視点で学部生・大学院生を広く教育しなければ，科学技術イノベーションを推進できる人材を確保することは難しい時代である。分子研の客員教員部門に加え，新規事業である流動研究部門（クロスポイント制度）による人材交流制度の有効利用を検討したい。