

## 5. これまでの活動実績

### ・UVSOR の 40 年の歩み

IMS の小型放射光施設 UVSOR は 1979 年の「極端紫外連続光源計画」にその第一弾の姿を見て  
 43 取れる。物質の化学状態を精密に視ることを目的として、光の波長域で重要な紫外線(UV)を頭文字とし、ultraviolet synchrotron orbital radiation UVSOR(極端紫外光施設)と命名された(その後、計画スタート直後に極端紫外光実験施設、2004 年に極端紫外光研究施設に改称、また 2016 年より UVSOR を固有名詞化した)。その後、1983 年に初点(放射光発生)に成功して以来、分子科学分野への放射光科学の波及を意識して「ケミカルマシン」のミッションポリシーの下に利用されてきた。世界中で放射光建設が進んだことで、老朽設備は陳腐化していく中、2003 年に当時の先端技術の導入による光源高度化(UVSOR-II)、さらに 2013 年 2 度目の高度化に成功した(UVSOR-III)。国際事例を見るに、先端技術を導入した施設を新地に刷新建設するのが常であったが、IMS のコミュニティー基盤の拡張を最優先に捉え、場所を変えずに高度化する戦略がとられた。2004 年、極端紫外光実験施設から極端紫外光研究施設に名称変更し、上記の光源高度化に加えて、ビームラインの先端分析装置の開発を定期的に続け運用拡大しつつあり、2023 年度は初点から 40 周年を迎える。国内では大型 SPring-8、中型 NanoTerasu と相補的な小型施設の位置づけとなる。各施設の役割分担が有効である点は学会の共通認識であり、本施設は長波長帯の光波長域の強化と、それらを利用した分子科学分野の支援を担ってきた。また分子科学コミュニティのみならず、核融合科学のプラズマ実験や天文学における宇宙観測機器の検出器テストなど、貴重な波長帯を利用した研究も進められた。学術機関として国内支援に注力した運営で、基礎学術的な研究成果を中心に国

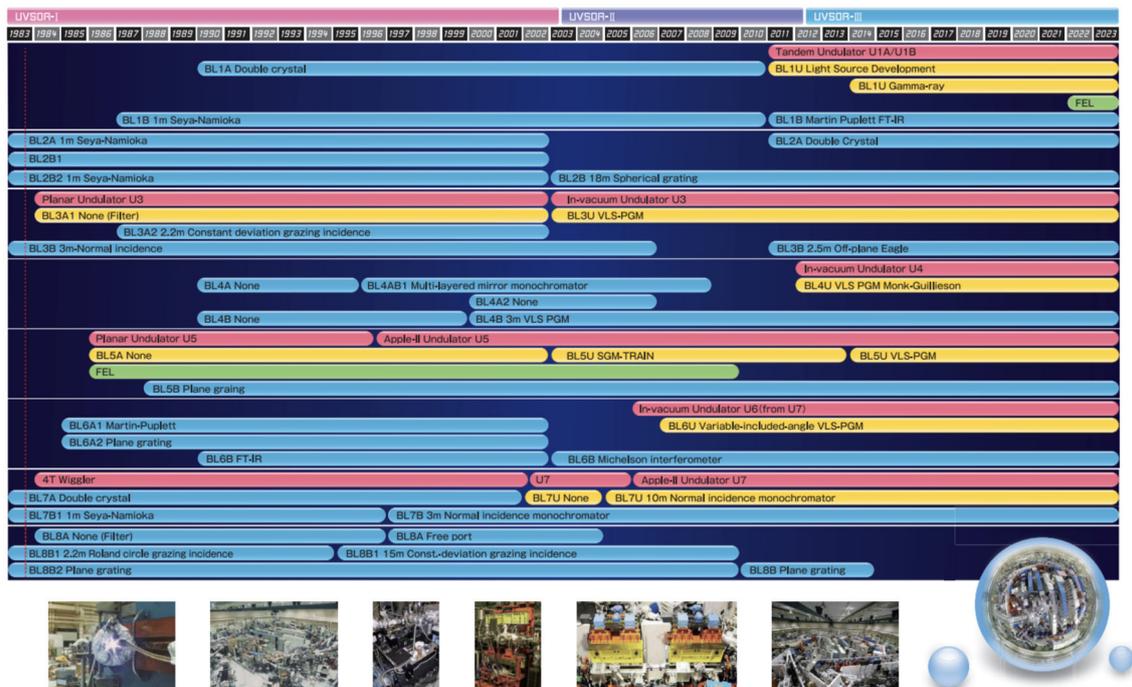


図 5-1: UVSOR の 40 年にわたるビームライン分光器の変遷

内外へ発信しているが、国際的競争力を維持するために、先端設備の技術開発を日々推進し、競争環境のバランスを取りながらユーザーとともに共同利用・共同研究を進めている。

### ・世界を牽引してきた量子ビーム・光源開発の強み

1980年代の建設当初より、小型・低エネルギー施設の利便性・柔軟性・俊敏性を活かして、様々な新しい放射光の発生法・利用法の開拓に取り組んできた。電子蓄積リングを用いた共振器型自由電子レーザーの開発は加速器の設計段階から盛り込まれており、1990年代を中心に世界最短波長域での発振や光共振器内での逆コンプトン散乱による高強度ガンマ線発生 の原理検証など、世界を先導する成果がある。赤外線領域での放射光利用や放射光とレーザーを併用した実験、また、蓄積リングの低アルファ運転による超短パルス生成も、小型で小回りの利く UVSOR の特性を活かして、1990年代に世界に先駆けて行われた研究の一つである。

2000年以降、UVSOR-II の時代になっても、世界的に希少な研究環境を活かし、フランスのグループとの国際共同研究などにより自由電子レーザー発振の基礎研究で成果が挙げられたほか、自由電子レーザー光を用いた応用研究も展開された[1,2,3]。その後、2000年代半ばに加速器同期超短パルスレーザー装置が導入されたことで、偏光可変コヒーレント高調波発生[4]、レーザーバンチスライスによるコヒーレント放射光生成[5, 6]、など数々の目覚ましい成果があげられた。これらの成果をもとに大型の外部資金を獲得し、それまで光電子分光ビームライン BL5U に寄生する形で行われていた光源開発研究を専用のビームライン BL1U で行えるようになった。

2010年代の UVSOR-III の時代に入り、BL1U では上述した研究をさらに発展させる一方で、光渦やベクトルビームといった特異な空間構造を有する光の発生で世界を先導する成果をあげた[7, 8, 9]。さらに、タンデムアンジュレータからの放射の特異なアト秒精度の時間構造を利用した量子状態制御や超高速分光の原理実証に世界で初めて成功し[10, 11, 12]、放射光の全く新しい利用法の可能性を世界に示した。最近では、超短パルスガンマ線の発生とそれを用いた非破壊分析も開始されている[13]。

UVSOR40年の歴史の中で、継続的に新しい光源開発研究とその利用法の開拓に取り組み、世界を先導する成果を生み出し続けてきた。これを可能にしたのは、UVSOR が小型低エネルギー放射光施設であるからと言えよう。特殊な実験を行うための実験装置の製作やその加速器への組み込みは大型高エネルギー加速器では熱負荷や放射線対策のため技術的に難しく、また格段に高価となる。また大規模施設での新規開発プロジェクトの意思決定に要する時間や、予算規模の大型化によって研究遂行が現実的に難しくなるためである。また専有的実験になることが想定されるため、多くのユーザーを抱えるため必然的にビームタイムの確保は困難である。これらは特に全く新しい技術開発への挑戦において決定的に不利であることは明らかであろう。一方で、時間や資金、マンパワーの必要な高精度化技術や安定化技術は、こうした大型施設の強みであり、これまでも多くの実績がある。小型施設はこの恩恵を受けて、既存の開発されたハードウェアをもとに、スピード感をもって光源開発に注力できるためオールジャパン体制の我が国の強みとなっている。図に示すように、UVSOR では小型であることの強み「俊敏性、柔軟性、利便性」を最大限活かし、光源開発を継続的に行ってきた。この歩みを止めることなく、本計画においても小型低エネルギー、かつ高性能という特質を活かして放

射光科学の最先端を切り拓き続けたいと考えている。

| 45

## 光源開発の40年の歴史

- ・建設当初から継続的に新しい光源技術を開発しその利用法を開拓
- ・世界を先導する成果はその後PFやSPring-8などへ展開



### 放射光-レーザー協奏技術

世界初！放射光レーザー完全同期実験(1989)

### 自由電子レーザー・コヒーレント放射

世界最短波長 自由電子レーザー発振 (1997)

世界初！偏光可変コヒーレント高調波発生 (2008)

世界初！準単色波長可変コヒーレント放射光発生 (2008)

### 特殊波長開拓

世界初！赤外テラヘルツ共用ビームライン(1986)

世界初！超短パルスガンマ線発生(2010)

### 次世代放射光量子技術開拓

世界初！VUV光渦発生の原理解明と実証 (2017)

世界初！放射光ベクトルビーム発生 (2018)

世界初！放射光アト秒制御の実証 (2022)

世界初！アト秒制御放射光による量子状態制御 (2019)

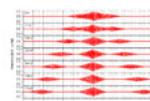
世界初！重連アンジュレータによる超高速分光 (2021)

→ 2000年代になってSPring-8, PF-AR, Saga-LSなどへ展開

→ シード型FELの基礎研究 SACL AなどのXFELへ貢献



→ 2000年代になって SPring-8へ展開



→ 第4世代光源の 基幹技術？

**“光源開発”**  
国際的にみても稀有な利用例

図 5-2: UVSOR の強みである、独自の光源開発の 40 年の歴史を示す代表的成果

### 参考文献

- [1] S. Takano et al., Nucl. Instr. Meth. A **331**, 20 (1993).
- [2] M. Hosaka et al., Nucl. Instr. Meth. A **483**, 146 (2002).
- [3] C. Evain et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 134501, (2009).
- [4] M. Labat et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 164803, (2008).
- [5] S. Bielawski et al., Nat. Phys. **4**, **390** (2008).
- [6] M. Shimada et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 144802 (2009).
- [7] M. Katoh et al., Sci. Rep. **7**, 6130 (2017).
- [8] M. Katoh et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 094801 (2017)
- [9] S. Matsuba et al., Appl. Phys. Lett. **113**, 021106 (2018).
- [10] Y. Hikosaka et al., Nat. Commun. **10**, 4988 (2019).
- [11] T. Kaneyasu et al., Phys. Rev. Lett. **123**, 233401 (2019).
- [12] T. Kaneyasu et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 113202 (2021).
- [13] Y. Taira et al., Rev. Sci. Instr. **93**, 113304 (2022).

### ・分子科学への放射光利用研究の展開

分子科学に特化した利用による学術開拓の成功事例として、有機エレクトロニクス分野の展開があげられる。1990年代、まだ放射光施設そのものが貴重だった時代から、関・上野ら(当時40代)を

中心に当該分野の開拓的研究が創始された。当時は、加速器設備が貴重で、超高真空技術の要請から有機化合物は汚染源として敬遠されていた時代である。両氏は、放射光科学を先行研究していたドイツへ留学し、有機分子固体の光計測技術ノウハウを取得し日本へ持ち帰った。有機化合物の基礎学術的な成果が次々と UVSOR から発信され、我が国が当該分野の基礎学術分野を牽引することに成功し、その後 2010 年代以降の有機エレクトロニクス応用分野の急速な発展に繋がった。ゼロベースの学術知見を得てから製品化まで 20 年程度を要し、現在も発展中の分野を構築した例である。このような学術主導の展開成功事例を基に、本計画ではバイオ系の自律型機能を事例にフットオートノミー科学の創発に挑戦する。

一般的に、試行錯誤の手法開拓や装置技術開発は、大学共同利用機関の中長期的支援が不可欠である。例えば、光電子分光法は古くから知られる手法であるが、最近ドイツで開発された実空間／波数空間電子レンズ切替機構の設定により、イメージング計測へのパラダイムシフトを迎えようとしている。先端機器 R&D の一環として、2020 年に本邦初号機を UVSOR へ導入し、鋭意追加機能を付与した装置を開発中である。実はこのドイツにおける装置開発には 20 年以上の試行錯誤が背景にあり、5-10 年の一般的なプロジェクトでは到底実現不能であった事例として未来に語り継がれるであろう。同様のケースを意識し、我々が持つこれまでの先駆的実験によるノウハウを継承し深化し続けることで、未開拓な VUV 帯コヒーレント光源の利用における量子制御・量子計測手法開拓と、マルチモーダル計測・時空間イメージングによる非平衡系や複雑系の計測科学のブレークスルーを目指す。ダブルパルス光生成など量子光の基礎物理の知見を積み重ね、30~50 年後の光科学は量子

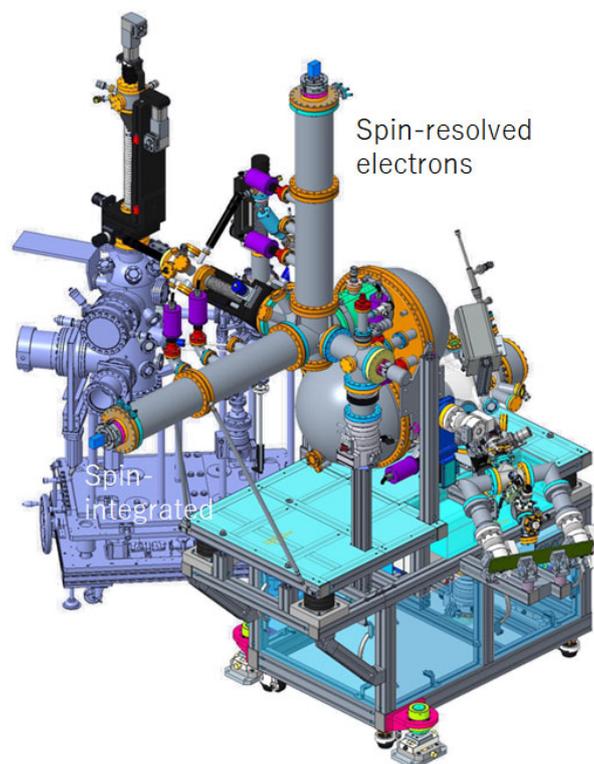


図 5-3: 2020 年度から開発を開始したスピン分解光電子運動量顕微鏡

もつれ現象を利用した光計測技術等により、神経伝達プロセスなど生命科学の深淵にアプローチすることも夢物語ではない。こうしたゼロからイチを構築する手法開発は学術機関が担う大型施設への集中投資が極めて効果的と考える。量子生命科学研究所(以下、量生研)が発足し、我が国におけるバイオ分野の基礎学術の発展に向けた量子計測の新たな潮流が始まろうとしている。また東京農工大(以下、農工大)の OPERA・コアファシリティ SCOP を軸とした先端計測の産学共同利用によるスタートアップ展開に期待が高まっている。

## ・次期計画関連会議リスト

かねてより UVSOR 設備の老朽化に対する中期計画を運営委員会や国際諮問会議にて議論してきたが、2019 年から本格的な次期計画に関する議論を開始し、コミュニティーの合意を得て次期施設のデザインコンセプトを共有してきた。

2019.10 第1回次期施設建設検討会(UVSOR シンポジウム, 共催 UVSOR 利用者懇談会:参加 100 名弱、学術系連携機関 HiSOR, PF および物性研 LASOR と将来展望を議論)

2020.1 マスタープラン 2020「放射光学術基盤ネットワーク」に採択、その後、月一回定期的に 3 機関間の新技術 R&D 研究会を開催

2020.10 UVSOR シンポジウム(コロナ禍 DX 化議論)、

2020.10 分野研究会「次世代光電子運動量顕微鏡」

2021.1 第2回次期施設建設検討会(分子研討論会、分子研における共同研究と大型施設の在り方を PI で議論)

2021.8 第3回次期施設建設検討会(関連施設と光源・加速器要素技術について情報交換)

2021.8 UVSOR 利用者を中心としたユーザー大規模アンケートを実施し第 4 回にて議論

2021.11 第4回次期施設建設検討会(UVSOR シンポジウム共催, 共催 UVSOR 利用者懇談会:文科省基盤課来賓、機器設備仕様の詳細について検討)

2022.1 第 35 回日本放射光学会年会(次期施設計画をポスター発表)

2022.3 シンクロトン放射光設備技術 SRI 国際会議(次期施設計画をポスター発表)

2022.8 軟 X 線分光 XAFS 研究会(次期施設計画を紹介)

2022.11 第5回次期施設建設検討会(NanoTerasu, AichiSR との施設間連携の展望を議論)

2022.12 分野研究会「軟 X 線共鳴散乱・反射率 ソフトマテリアル・ソフトマターのナノ～メソスケール構造解析」

2023.1 分野研究会「フォトン生命科学拠点形成を目指した UVSOR の活用」

2023.3 次期施設建設のコンセプト論文を国際学術誌へ投稿(Electronic Structure 5, 034001-1-9 (2023). DOI: 10.1088/2516-1075/acdf32)

2023.7 分野研究会「Seeds and Needs for Tomorrow's Synchrotron Radiation Photoelectron Spectroscopy Research 明日の放射光光電子分光研究展開のシーズとニーズ」

2023.9 分野研究会「イオン液体インフォマティクスの発展に向けて」

- 2023.9 分野研究会「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 分野研究会「Frontier of Soft X-ray Spectroscopy for Chemical Processes in Solutions 溶液の化学現象の軟 X 線分光測定の前線」
- 2023.10 日本学術会議「未来の学術振興構想」の募集に際し、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 UVSOR 計画の「複雑・不均一系の分子ダイナミクスに挑む量子光科学研究拠点の構築」が採用された。
- 2023.11 分野研究会 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 周年記念式典
- 2023.12 UVSOR シンポジウムおよび第6回次期施設建設検討会

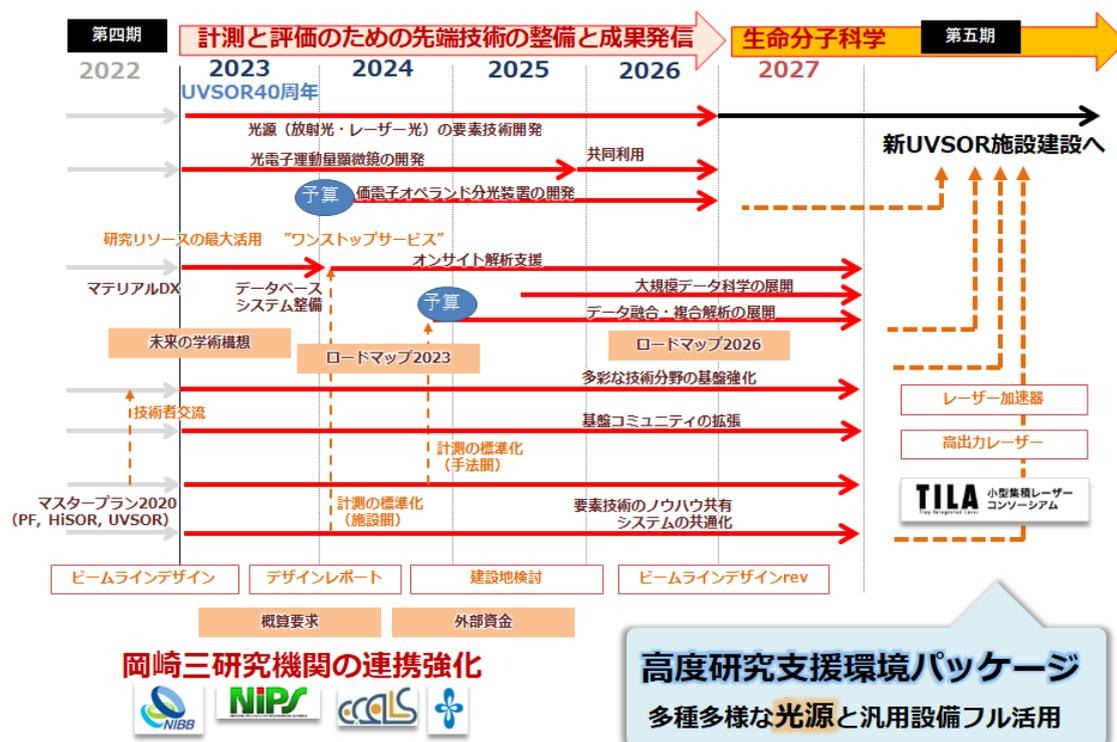


図 5-4: 次期 UVSOR 計画のための第四期目標と準備状況