

# UVSOR 光源加速器の現状 2025

## STATUS OF UVSOR SYNCHROTRON IN 2025

金安達夫<sup>#, A)</sup>, 林憲志<sup>A)</sup>, 清水康平<sup>A)</sup>, 山崎潤一郎<sup>A)</sup>, 水口あき<sup>A)</sup>, 平義隆<sup>A)</sup>, 加藤政博<sup>A, B)</sup>  
Tatsuo Kaneyasu<sup>#, A)</sup>, Kenji Hayashi<sup>A)</sup>, Kohei Shimizu<sup>A)</sup>, Jun-ichiro Yamazaki<sup>A)</sup>, Aki Minaguchi<sup>A)</sup>,  
Yoshitaka Taira<sup>A)</sup>, Masahiro Katoh<sup>A, B)</sup>

<sup>A)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

<sup>B)</sup> HiSOR, Hiroshima University

### Abstract

UVSOR-III, a 750 MeV synchrotron facility is routinely operated for synchrotron radiation users in the top-up operation mode with the beam current of 300 mA. UVSOR-III is one of the brightest synchrotron light sources in the extreme ultraviolet region due to its low emittance of 17 nm·rad. In the 2024 fiscal year, UVSOR-III was operated for 40 weeks. Of these, 36 weeks were dedicated for the synchrotron user experiments, and the remainder were used for machine studies. In parallel with the user operations, novel light source technologies such as double-pulsed radiation, optical vortices, vector beams, laser Compton scattered gamma-rays and so on have been developed and made available to users.

### 1. はじめに

分子科学研究所の極端紫外光研究施設 (UVSOR) は、真空紫外・軟 X 線領域を中心に、テラヘルツからガンマ線に至る広い波長域の光の利用を目的とした大学共同利用施設として運用されている。UVSOR は 1983 年のファーストライトから 40 年以上にわたって稼働を続けているが、2003 年と 20012 年に光源加速器の高度化改造が行われ、その都度 UVSOR-II、UVSOR-III と改称されてきた[1, 2]。

現在稼働中の UVSOR-III はビームエネルギー 750 MeV、ビーム電流値 300 mA でトップアップ運転が行われている。周長約 53 m の蓄積リングには 8 個所の直線部があり、入射点と加速空洞が設置された二か所以外のすべての直線部に計 6 台のアンジュレータが設置されている (Fig. 1)。ビームエミッタンスは約 17 nm·rad まで絞られ、真空紫外域においては回折限界光の発生を実現するなど世界最高水準の高輝度光を供給することが可能である。現在 13 本の放射光ビームラインが稼働しており、分子・物質科学、材料科学、地球・宇宙科学や生命科学など幅広い分野で利用されている[3]。

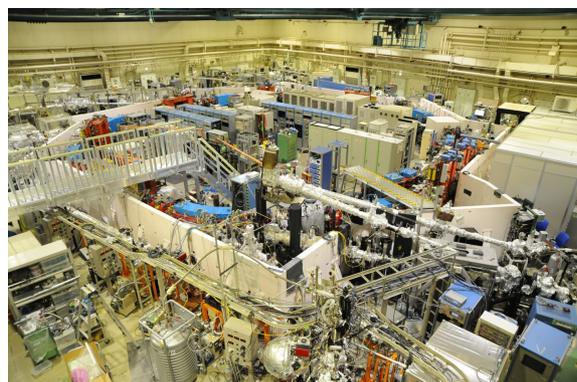


Figure 1: UVSOR-III storage ring.

Table 1: Main Parameters of UVSOR-III

Electron Energy	750 MeV
Circumference	53.2 m
Beam Current	300 mA (Top-up)
Emittance	16.9 nm·rad
Energy Spread	$5.3 \times 10^{-4}$
Betatron Tune	$\nu_x \sim 3.7, \nu_y \sim 3.2$
Number of Straight Sections	4 m × 4, 1.4 m × 4
RF Frequency	90.1 MHz

共同利用を展開する一方で、UVSOR では共振器型自由電子レーザー、外部レーザーを併用したコヒーレント光生成などの光源開発研究が行われてきた。近年はレーザーコンプトン散乱ガンマ線源の開発と利用研究、タンデムアンジュレータによる原子の量子状態制御や超高速分光、高フラックス光によるプラズマ生成、円偏光照射によるアミノ酸分子のキラリティ発現等が精力的に行われている。また単一電子蓄積を利用した放射光の量子性の研究においても成果が出始めている。

本稿では 2024 年度を中心に近年の UVSOR 光源加速器の状況について報告する。

### 2. 加速器運転状況

UVSOR-III は 15 MeV 線形加速器、750 MeV ブースターシンクロトロンおよび 750 MeV ストレージリングで構成される。ストレージリングの主要パラメータを Table 1 に、放射光のスペクトルを Fig. 2 に示す。

UVSOR-III は、2024 年度には合計 40 週運転された。そのうち 36 週は共同利用に供され、残りは加速器運転調整や光源技術開発に充てられた (Fig. 3)。例年同様に 4 月に加速器機器の保守作業のため約 1 ヶ月のシャットダウン期間を確保し、また 10 月下旬に計画停電

<sup>#</sup> kaneyasu@ims.ac.jp

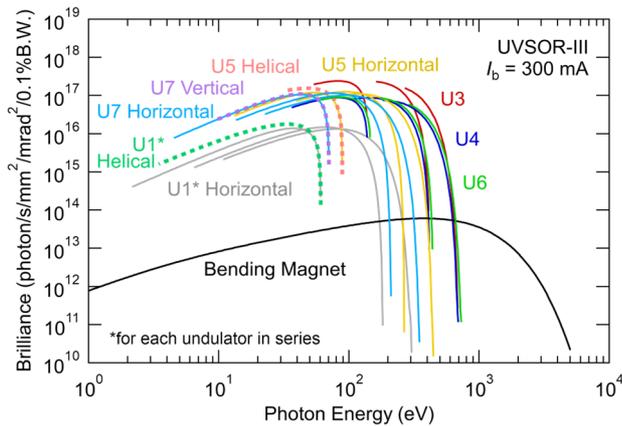


Figure 2: Brilliance spectra of synchrotron radiation in UVSOR-III.

に合わせ 1 週間のシャットダウンを確保した。これ以外に、8 月中旬の 1 週間については、職員の夏期休暇のため運転を停止した。

共同利用週では、月曜日に加速器調整およびマシンスタディを行い、火曜日から金曜日まではユーザー運転となる。基本的に週末は運転を停止するが、必要に応じて光源開発研究を目的としたマシンスタディを実施している。ユーザー運転は 1 日当たり 9 時から 21 時までの 12 時間で夜間は停止するが、木曜日から金曜日にかけての夜間は終夜運転を行っている。このため、1 週間当たりのユーザー運転は計 60 時間となる。

毎朝の入射作業は通常 30 分程度で 300 mA までの積み上げ及びビーム調整が完了し、その後はトップアップ運転に移行する。トップアップ運転中は 1 分毎に 10~20 秒間程度 1 Hz の繰り返しで入射を行い、ビームを補給する。トップアップ運転中は、ユーザーは入射によって中断されることなく実験を継続できる。なお 2023 年の 1 月ころから蓄積リングへの入射電荷量が低下する問題が起き、2023 年度と 2024 年度はトップアップ運転のビーム電流を 200 mA に下げてユーザー運転を実施していた。ごく最近、入射不調の原因はブースターシンクロトロン内のビーム不安定化と判明し、電磁石の励磁パターン

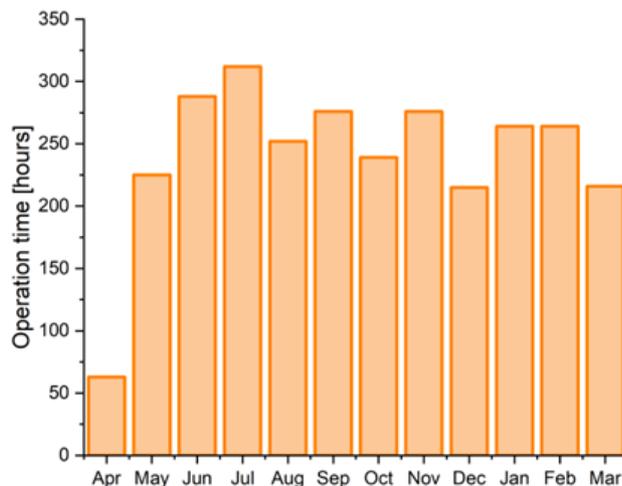


Figure 3: Operation time in FY2024.



Figure 4: A new bending beam duct for the booster synchrotron.

を調整することで対処した。その後 2025 年 4 月のシャットダウン期間に、近年真空漏れが頻発していたブースターシンクロトロン内の偏向部真空ダクトの新品交換を行い (Fig. 4)、ビーム調整を経て、2025 年 6 月のユーザー運転から 300 mA トップアップ運転を再開した。しかしながら真空ダクトの交換後、ブースターシンクロトロン内の加速電荷量が以前の半分程度に減少しており、原因調査を続けている。

老朽化対策として上述のブースターシンクロトロン内の真空ダクト交換の際にイオンポンプや真空計などの機器更新を行った。また同期間にブースターシンクロトロン内の電磁石電源のコンデンサを全数交換した。また応急処置がなされていた水漏れ箇所 (ビーム輸送路の偏向電磁石のコイル) の修理も行った。

### 3. 光源開発研究

UVSOR-III は、文部科学省の量子ビーム基盤技術開発プログラムの支援のもとに建設された BL1U と呼ばれる光源開発専用のビームラインを備える [4, 5]。BL1U の光源は直列配置された 2 台の APPLE-II 型アンジュレータ (光クライストロン) である。アンジュレータ間には位相子電磁石が設置されており、上下流からのアンジュレータ放射の位相差をアト秒レベルで操作できる。

BL1U のビームライン構成と挿入光源の配置を Fig. 5 に示す。ビームラインはアンジュレータ光のダイレクトビーム利用ラインと真空紫外域の分光利用ラインで構成されており、前置鏡で利用ラインを切り替えることができる。またビームラインフロントエンドの上流部の可動ミラーを使ってアンジュレータ光を観測することもできる。ビームラインに併設するレーザーハッチ内にはフェムト秒レーザーシステムが設置されており、主に後述するレーザーコンプトン散乱ガンマ線の生成に使用されている。

ダイレクトビームの利用では時空間構造を持つ光の研究が精力的に行われている。たとえば二台の直列配置されたアンジュレータを通る電子の放射はダブルパルス状の時間構造を持つが、その時間コヒーレンスをアト秒精度で操作することで原子分子の量子制御や超高速分光を実現した [6-8]。またダブルパルスの干渉性を利用して、

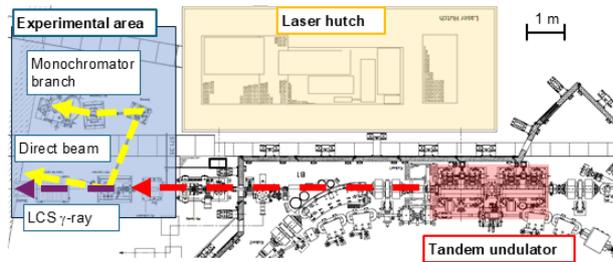


Figure 5: Layout of the beamline BL1U.

アンジュレータ放射の光電場波形の計測法を開発した[9]。空間構造光に関しては、円偏光アンジュレータによる光渦ビームの生成[10]や光渦の重ね合わせによるベクトルビームの生成で成果があがっている[11]。また最近ではダイレクトビームの高フラックス性を活用した光電離プラズマの研究[12]や円偏光照射によるアミノ酸分子のキラリティ発現の研究もおこなわれている。

BL1U ではアンジュレータ光の利用に加えて、レーザーコンプトン散乱で発生する超短パルスガンマ線[13]のユーザー利用が活発に進められている。とくに陽電子計測によるバルク材料内部のナノメートル欠陥分析[14]やガンマ線検出器の開発研究で成果があがっており、近年はガンマ線の偏光測定もおこなわれている[15]。また、単一電子の蓄積実験も精力的に行われている[16]。BL1U の光観測ポートを用いて、単一電子が発する放射の量子性の探索が進められている。

これらの研究は名古屋大学、京都大学、量研機構、広島大学、富山大学、豊田工大、核融合研等との共同研究によるものであり、光源開発研究においても共同利用を積極的に進めている。

#### 4. まとめ

UVSOR-III は低エネルギー放射光源としては世界トップクラスの高輝度特性を有している。2025 年現在、低エミッタンス  $17 \text{ nm} \cdot \text{rad}$  を維持しながらビームエネルギー  $750 \text{ MeV}$  で  $300 \text{ mA}$  トップアップ運転を行っている。周長約  $53 \text{ m}$  の蓄積リングの直線部には計 6 台の挿入光源が設置されており、偏向電磁石ラインを含めると合計 13 本の放射光ビームラインが稼働している。またユーザー利用と並行して光源開発研究にも積極的に取り組んでいる。一方、過去に二回の高度化改造に成功してはいるものの、ファーストライトから 40 年以上が経過した UVSOR では設備の老朽化に伴う加速器トラブルが増えつつある。各コンポーネントの老朽化対策を段階的に進めながら、光源加速器の改修案や将来計画の設計検討を行っている[17]。

#### 参考文献

- [1] M. Katoh *et al.*, “Construction and commissioning of UVSOR-II”, AIP Conf. Proc. **705** (2004) 49-52.
- [2] M. Adachi *et al.*, “Design and construction of UVSOR-III”, J. Phys. Conf. Ser. **425** (2013) 042013.
- [3] H. Ota *et al.*, “UVSOR synchrotron facility update”, J. Phys. Conf. Ser. **2380** (2022) 012003.
- [4] M. Katoh *et al.*, “Light source developments at UVSOR BL1U”, J. Phys. Conf. Ser. **2687** (2024) 032005.
- [5] T. Kaneyasu *et al.*, “Attosecond interferometry experiments at the tandem undulator beamline BL1U of UVSOR-III Synchrotron”, J. Phys. Conf. Ser. **3010** (2025) 012086.
- [6] Y. Hikosaka *et al.*, “Coherent control in the extreme ultraviolet and attosecond regime by synchrotron radiation”, Nat. Commun. **10** (2019) 4988.
- [7] T. Kaneyasu *et al.*, “Electron wave packet interference in atomic inner-shell excitation”, Phys. Rev. Lett. **126** (2021) 113202.
- [8] T. Kaneyasu, Y. Hikosaka and M. Katoh, “Attosecond phase control of extreme ultraviolet light pulses and its applications to atomic and molecular physics”, Butsuri **79** (2024) 661.
- [9] T. Fuji *et al.*, “Spectral phase interferometry for direct electric-field reconstruction of synchrotron radiation”, Optica **10** (2023) 302.
- [10] M. Katoh *et al.*, “Helical phase structure of radiation from an electron in circular motion”, Sci. Rep. **7** (2017) 6130.
- [11] S. Matsuba *et al.*, “Generation of vector beam with tandem helical undulators”, Appl. Phys. Lett. **113** (2018) 021106.
- [12] M. Kobayashi *et al.*, “First attempt at photoionized plasma production with VUV radiation in synchrotron light source UVSOR-III”, Plasma and Fusion Research **19** (2024) 1301028.
- [13] Y. Taira *et al.*, “Generation of energy-tunable and ultra-short-pulse gamma rays via inverse Compton scattering in an electron storage ring”, Nucl. Instrum. Meth. A **652** (2011) 696.
- [14] Y. Taira *et al.*, “Development of gamma-ray-induced positron age-momentum correlation measurement”, Rev. Sci. Instrum. **93** (2022) 113304.
- [15] Y. Taira *et al.*, “Measurement of the spatial polarization distribution of circularly polarized gamma rays produced by inverse Compton scattering”, Phys. Rev. A **107** (2023) 063503.
- [16] Y. Asai *et al.*, “Status of single electron storage experiment at UVSOR-III”, Proc. PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul.-Aug. 2024, pp. 915-916.
- [17] UVSOR 次期施設建設計画,  
<https://www.uvsor.ims.ac.jp/uvSOR4/index.html>