

Status of UVSOR-II Accelerators; 2008

Masahiro Adachi^{1,A,B)}, Jun-ichiro Yamazaki^{A)}, Kenji Hayashi^{A)}, Masahiro Katoh^{A,B,C)}

^{A)} UVSOR facility, Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences
38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki, 444-8585

^{B)} School of Physical Sciences, The Graduate School of Advanced Studies (Sokendai)
38 Nishigo-naka, Myodaiji, Okazaki, 444-8585

^{C)} Graduate School of Engineering, Nagoya University,
Furo, Chikusa, Nagoya, 464-8603

Abstract

UVSOR-II, a 750 MeV synchrotron light source of 53 m circumference, is now routinely operated with four undulators. The full energy injection was succeeded soon after upgrading the injector and the beam transport line. We have operated the machine routinely with full-energy injection in the user's run since July, 2007. We are going to start top-up injection hopefully in this year.

A resonator type free electron laser is successfully operational in very wide range, from visible to deep UV, with high average power exceeding 1 W. Recently, the wave length has reached 200 nm. Intense coherent terahertz radiation was successfully produced by the laser-electron interaction. Coherent harmonic generation was also demonstrated by using the same laser system.

UVSOR-II 光源加速器の現状; 2008

1. 加速器

UVSORは1983年に初めて電子ビームの蓄積に成功して以来、日本の主要なシンクロトロン光源の一つとして運転している[1]。UVSORの持つ低いエミッタンスはVUVからTHzまでの長波長領域のシンクロトロン放射光を取り出すのに適している。稼働開始から20年を経た2003年に、磁場ラティス[2]を含めた大規模な改造を蓄積リングに施した[3]。この改造以降、UVSOR-IIと呼んでいる。UVSOR-IIではそれ以前の6分の1となる27nm-radの低エミッタンスを実現した。直線部は以前の倍の8箇所あり、そのうちの6箇所に挿入光源を導入できる。現在はその内の4箇所にアンジュレータを導入している。UVSOR-IIの主要パラメータは表1に示すとおりである。

UVSOR-IIは全国共同利用施設として年間40週程度運転されている。一日の運転時間は放射線申請上の理由で12時間に制限されているが、2006年に24時間への変更が認められた。運転員の不足のため、ユーザー利用は1日12時間のままであるが、夜間はビームラインの立ち上げ調整、自由電子レーザー利用研究などに随時利用されている。ビーム入射は朝9時と午後3時の2回行われ、マルチバンチモードで350mA、シングルバンチモードで100mA蓄積される。

UVSORの電子エネルギーは750MeVと低いため、2003年の改造による蓄積リングの低エミッタンス化により、強いTouschek効果が現れた。そこで、Touschek効果による電子損失を抑えるために、3次

の高調波空洞を定常的に稼働させている[4]。これにより実効的にビーム軌道方向coupled bunch不安定性も抑制されている。2005年には、それまで20年にわたって使用した主高周波加速空洞を撤去し、新空洞へと更新するとともに、1.5m直線部へと移設した[5]。この更新によってRF加速電圧は3倍になったことも、ビーム寿命の改善につながっている。

現在、ビーム寿命の問題を恒久的に解決するためにトップアップ運転へ向けた準備を進めている。当初、UVSOR-IIには600MeVのブースターシンクロトロンが備わっていた。すなわち入射エネルギーが蓄積時の電子エネルギー750MeVに比べてわずかに低い状態にあった。そこで、磁場計算による検討を経て2006年に電磁石電源の更新を行い、シンクロトロンのフルエネルギー化に成功した。2007年4月には入射路偏向電磁石電源の更新を実施するとともに、同月中にフルエネルギー入射にも成功した。そして、2007年7月よりユーザー運転もフルエネルギー入射を実施している。フルエネルギー入射では以前と同じピーク電力を保つために入射繰り返し周波数が600MeVの時の3Hzから1Hzに制限される。これにより入射レートは以前よりも低い0.5mA/s程度になるが、それでも蓄積に必要な時間は15分程度であり、実用上十分である。

2007年7月には、図1に示すように30分間ではあるが一定電流を保つことに成功している。2006年度と2007年度には放射線防護壁の増強を行い、トップアップ運転中の放射線防御も保障されている。

¹ E-mail: adachi@ims.ac.jp@

表1. UVSOR-IIの主要パラメータ

Electron Energy	750 MeV
Circumference	53.2 m
Natural Emittance	27 nm-rad
Natural Energy Spread	4.2×10^{-4}
RF Frequency	90.1 MHz
Harmonic Number	16
Bending Radius	2.2 m
Straight Sections	4m×4, 1.5m×4
RF Voltage	100 kV
Betatron Tunes (horizontal, vertical)	(3.75, 3.20)
Momentum Compaction	0.028
Natural Bunch Length	108 ps
Filling Beam Current (multi-bunch mode)	350 mA
(single-bunch mode)	100 mA

蓄積リングの更なる改造も計画中である。これまで25年間使用されてきた偏向電磁石をcombined function型の偏向電磁石に更新することにより現在の半分程度までエミッタンスを低下できる。加えて、入射点を移動することで4mの直線部を新たに1箇所作ることができ、そこに挿入光源を設置する。

2. 挿入光源

2001年まで、UVSORでは3つの挿入光源が稼働していた。内1つが超電導ウィグラー、2つがアンジュレータであった。2003年の改造では、ウィグラーとアンジュレータの1台を取り去った。残る可変偏光型のオプティカルクライストロンは、ビームラインへのVUV領域の直線/円偏光アンジュレータ光の供給と、全長13mの光共振器型自由電子レーザーの励起源として使用している[6]。取り去った2台の挿入光源に代わり2台の真空封止型アンジュレータ2を導入し、稼働させた[7]。

2006年にはAPPLE-II型アンジュレータの導入および稼働に成功した。これにより光電子分光ラインにおいて高輝度の直線/円偏光VUV光をユーザーに供与可能になった[8]。また、磁石間隙変更時および磁石間隙100mmでの偏光の変更時に見られる軌道変動

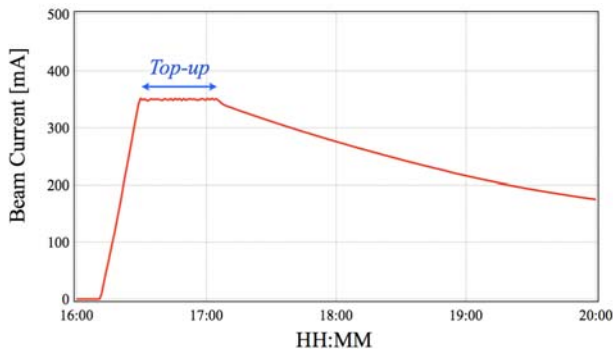


図1. 2007年7月、トップアップ運転の試験運転を行った。

表2. 挿入光源の主要パラメータ

真空封止型アンジュレータ	U3	U6
Number of Period	50	26
Period Length [mm]	38	36
Pole Length [m]	1.9	0.94
Pole Gap [mm]	15~40	15~40
Deflection Parameter	2.00~0.24	1.78~0.19

ヘリカルアンジュレータ / オプティカルクライストロン U5

Number of Period	21 / 9+9 (Opt. Kly.)
Period Length [mm]	110
Pole Length [m]	2.35
Pole Gap [mm]	30~150
Deflection Parameter	4.6~0.07 (Helical) 8.5~0.15 (Linear)

Apple-II 可変偏光アンジュレータ U7

Number of Period	40
Period Length [mm]	76
Pole Length [m]	3.04
Pole Gap [mm]	24~200
Deflection Parameter	5.4 (max. horizontal) 3.6 (max. vertical) 3.0 (max. helical)

のフィードフォワード制御[9]の調整も順調に進み、軌道変動は $10 \mu\text{m}$ 以下に抑えられている。現在、垂直偏光モードにおいて35mm以下の磁石間隙でビーム寿命の短縮が観測されている。このビーム寿命の短縮はアンジュレータの非線形効果によって引き起こされていると考えられ、現在、補正方法の導入を検討している。

現在、この比較的小さな蓄積リングでは4つのアンジュレータが稼働し、2つの直線部が将来的に挿入光源を設置するために残されている。表2に挿入光源の主要パラメータを示す。

3. 最近の光源開発

3.1 自由電子レーザー

UVSOR-IIにおける自由電子レーザー(FEL)研究の歴史は古く、現在も精力的に研究を進めている。2003年の磁場ラティスの改造と2005年のRF空洞の更新以降、FELの能力は飛躍的に向上した[10]。これらの改造を経て、例えば、高出力、800nmから200nmに渡る広い発振波長域、シンクロトロン(SR)光との自然同期、可変偏光など優れた特徴を備えている。そして、このような特徴を備えたFEL光が現在いくつかのグループによる利用実験に供与されている[11]。2007年度には200nmのFEL光の発振に挑戦し、図2に示すように199.4nmのFEL光の発振に成功している[12]。現在我々は190nmより短い波長で

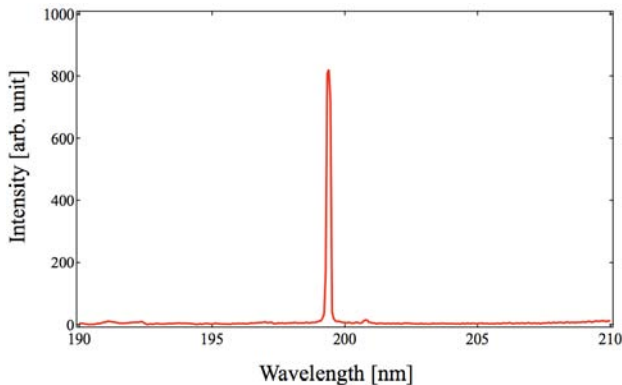


図2. 200nm以下の波長域におけるFEL発振実証実験において、199.4nmのFEL光の発振に成功した。

の発振に挑戦している。これにはVUV領域の診断システムの導入、96%以上の高反射率の共振器ミラーの開発が必要となる。これと並行して行っているFELの生成に関するフランスチームとの共同研究においても目覚ましい成果が得られている[13]。

3.2 レーザーによる電子バンチの密度構造制御

UVSOR-IIにはレーザーバンチスライシングシステムが導入されている。このために、蓄積リングのRF加速と同期して発振可能なTi:sapphireレーザーが導入されている。レーザーパルスの繰り返し周波数は1kHz、1パルス当たりのエネルギーは2.5mJである。レーザーパルスは放射光取り出しポートを通して蓄積リング内に導入され、FELの発振に用いられるアンジュレータ内で電子バンチとレーザーパルスはエネルギーの授受を行い、その後の偏向電磁石内で電子バンチに様々な構造が形成され、コヒーレントシンクロトロン放射光(CSR)が放射される。

これまでに、電子バンチに単一のディップを形成することでシングルサイクルのCSRパルスを取り出すことに成功し[14]、また、振幅変調したレーザーパルスを用いて電子バンチに周期的なディップ構造を形成することで準単色コヒーレントTHz光パルスを取り出すことに[15]、そして、レーザーの波長800nmの周期的なディップを形成することでレーザーの高次高調波を取り出すことに成功する[16]といった、目覚ましい成果が得られている。

4. 謝辞

本研究の一部は日本学術振興会の科学研究費補助金(基盤研究(B), 15360039)の支援の下に行われた。

参考文献

- [1] M. Katoh et al., "Present Status of UVSOR-II", AIP Conf. Proc. 879 (2007), 192-195.
- [2] M. Katoh et al., "Construction and Commissioning of UVSOR-II", AIP Conf. Proc. 879 (2007), 49-52.
- [3] M. Katoh et al., "New Lattice for UVSOR", NIM A 467-468 (2001), 68-71.
- [4] M. Hosaka et al., "Operation of 3rd Harmonic RF Cavity at UVSOR Storage Ring", Proc. 25th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, (2001, Shanghai), 171-173.
- [5] A. Mochihashi et al., "Upgrade of Main RF Cavity at UVSOR Storage Ring", Proc. EPAC2006, (2006, Edinburgh), 1268-1270.
- [6] S. Kimura et al., "Design of a helical undulator for UVSOR", J. Electron Spectrosc. Relat. Phonom., 80 (1996) 437-440.
- [7] A. Mochihashi et al., "In-vacuum Undulators in UVSOR Electron Storage Ring", AIP Conf. Proc. 705 (2004) 259-262.
- [8] S. Kimura et al., "Design of High Resolution and High Flux Beamline for VUV Angle-Resolved Photoemission at UVSOR-II", AIP Conf. Proc. 879 (2007) 527-530.
- [9] K. Hayashi et al., "Independent Tuning of Variable Polarization Undulator U7", UVSOR Activity Report 2007 (2008) 39.
- [10] M. Hosaka et al., "Upgrade of the UVSOR storage ring FEL", NIM A 528 (2004), 291-295; M. Hosaka et al., "High Power Deep UV Lasing on the UVSOR-II Storage Ring FEL", Proc. FEL2006 (2006, Berlin), 368-370.
- [11] T. Gejo et al., "The investigation of excited states of Xe atoms and dimmers by synchronization of FEL and SR pulses at UVSOR", NIM A 528 (2004), 627-631; M. Hosaka et al., "Status and Prospects of User Application of the UVSOR Storage Ring Free Electron Laser", AIP Conf. Proc. 705 (2004) 61-64; T. Nakagawa et al., "Measurements of threshold photoemission magnetic dichroism using ultraviolet lasers and a photoelastic modulator", Rev. Sci. Instr. 78 (2007), 023907.
- [12] M. Hosaka et al., "Lasing below 200 nm at the UVSOR-II FEL", UVSOR Activity Report 2007 (2008) 40.
- [13] S. Bielawski et al., "Feedback Control of Dynamical Instabilities in Classical Lasers and FELs", Proc. 27th FEL Conf. (2005), 391-397; M. Labat et al., "Longitudinal and transverse heating of a relativistic electron bunch induced by a storage ring free electron laser", PRSTAB 9, 100701 (2007).
- [14] M. Shimada et al., "Coherent Terahertz Radiation at UVSOR-II", Jpn. J. Appl. Phys. 46, No. 12 (2007), 7939-7944.
- [15] S. Bielawski et al., "Tunable narrowband terahertz emission from mastered laser-electron beam interaction", Nature Phys. 4 (2008), 390-393.
- [16] M. Labat et al., "Coherent harmonic generation on UVSOR-II storage ring", Eur. Phys. J. D. E2007-00177-6 (2007).