

## UVSOR 施設の現状

### STATUS OF UVSOR FACILITY

加藤政博<sup>#, A)</sup>, 許斐太郎<sup>A)</sup>, 山崎潤一郎<sup>A)</sup>, 林憲志<sup>A)</sup>  
Masahiro Katoh<sup>#, A)</sup>, Taro Konomi<sup>A)</sup>, Jun-ichiro Yamazaki<sup>A)</sup>, Kenji Hatyashi<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> UVSOR Facility, Institute for Molecular Science

#### Abstract

This year, 2013, is the 30th anniversary of the UVSOR facility since its first light in 1983. We made major upgrade twice in 2003 and 2012 and renamed the accelerator UVSOR-II and UVSOR-III respectively. UVSOR-III, a 750 MeV synchrotron light source is routinely operated in the top-up injection mode with the beam current of 300 mA. This 50m long storage ring is equipped with 6 undulators. The emittance is about 17 nm-rad. The high beam current, the low emittance and many undulators make this machine the brightest synchrotron light source among low energy light sources below 1 GeV. Fifteen beam-lines are operational, which provide synchrotron radiation in broad range from the terahertz wave to the soft X-rays. New light source technologies such as resonator free electron laser, coherent harmonic generation, coherent synchrotron radiation, laser Compton gamma-rays, are being developed.

#### 1. はじめに

分子科学研究所の小型放射光施設 UVSOR は 1983 年のファーストライトから、今年で 30 年目を迎える。2003 年、2012 年を中心に加速器の改造を実施し、これに合わせ加速器の呼称も UVSOR-II、UVSOR-III と改めた。UVSOR-III はビーム電流値 300mA でトップアップ運転され、周長 50m のリングに 6 台のアンジュレータが設置されている。電子ビームエミッタンスは約 17nm-rad で運転されており、電子エネルギー 1GeV 以下のリングでは世界最高水準の高輝度光源である。放射光ビームラインは 15 本が稼働しており、テラヘルツ波から軟 X 線までの低エネルギー放射光が分子科学、物質科学、材料科学をはじめとする幅広い分野で利用されている。その一方、共振器型自由電子レーザーや外部レーザーを利用したコヒーレント放射光発生、レーザーコンプトン散乱ガンマ線発生などの光源開発研究も活発に行われてきた。本論文では、UVSOR 施設の高度化の歴史を概観し、将来を展望する。

#### 2. UVSOR-I から UVSOR-II へ

UVSOR は 1983 年に稼働を開始した第 2 世代の低エネルギーシンクロトロン光源である<sup>[1]</sup>。周長は 53m と比較的小型で、電子エネルギーは運転開始当初は 600MeV であったが、その後まもなく、入射後ストレージリングで 750MeV に加速して運転されるようになった。建設当初からほぼフルエネルギー (600MeV) の専用入射器を有していた。リングの磁石配列はいわゆる Double Bend Achromat (DBA) 型であり、エミッタンスは 100-200nm-rad と大きい。4 本の直線部のうち 3 本には挿入光源が設置可能であり、アンジュレータ 2 台と超伝導ウィグラ 1 台が設置されていた。極紫外領域を中心とする全国共同利用の光源として多くの研究者に利用されてきた。

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

放射光施設として特筆すべき点の一つは、1980 年代よりアンジュレータのひとつでは共振器型自由電子レーザーの研究が行われてきたことである<sup>[2]</sup>。1990 年代に発振に成功し、世界短波長記録 (当時) も達成した。また、レーザーと放射光の同期実験<sup>[3]</sup> や赤外線シンクロトロン光の利用<sup>[4]</sup> に世界に先駆けて取り組むなど、小回りの利く小規模施設の特長を活かした先鋭的な研究が行われてきた。

1990 年代に入ると、低エミッタンス電子ビームとアンジュレータ利用による高輝度シンクロトロン光を特徴とする第 3 世代光源の建設が世界各地で始まった。諸外国では高輝度極紫外・軟 X 線を発生する中規模中エネルギー光源がまず建設され、引き続いて高輝度硬 X 線光源として大型施設が建設されたが、我が国では、大型放射光施設 SPring-8 がまず建設され、その後、東京大学、東北大学などが中規模極紫外軟 X 線光源の建設を提案したものの、今日に至るまで実現していない。

UVSOR は、海外での高輝度光源の建設ラッシュと国内における極紫外軟 X 線高輝度光源の実現の遅れという状況に対応し、2000 年代初頭に、光源性能を第 3 世代に近づけるための高度化計画を提案した<sup>[5]</sup>。ラティスの改造による低エミッタンス化とアンジュレータ増設のための直線部の倍増がその柱であった。特に、SPring-8 ではカバーしきれない低エネルギー領域での高輝度アンジュレータ光を供給することを目指した<sup>[6]</sup>。

この計画は 2002 年度に予算化され、2003 年に約 6 カ月のシャットダウン期間を設け、光源加速器の大改造を実施した。四極磁石と六極磁石の機能を併せ持つ複合機能型の磁石を導入し、また、磁石配列を最適化することで約 1/5 と大幅な低エミッタンス化が実現できた。その一方で、3m 直線部を 4m に伸長するとともに約 1.5m の短直線部 4 本を新たに作り出した。

加速器は順調に立ち上がり、これ以降 UVSOR-II と呼ばれるようになった。挿入光源は、超伝導ウィ

グラと老朽化したアンジュレータ 1 台が撤去され、新たに真空封止型アンジュレータ 2 台が設置された。自由電子レーザーにも流用される可変偏光型アンジュレータ 1 台と合わせてアンジュレータは 3 台となった。アンジュレータの増強はその後も続き、2005 年には可変偏光型アンジュレータ 1 台が新たに設置された。また、この間、高周波加速空洞の増強なども行われた。

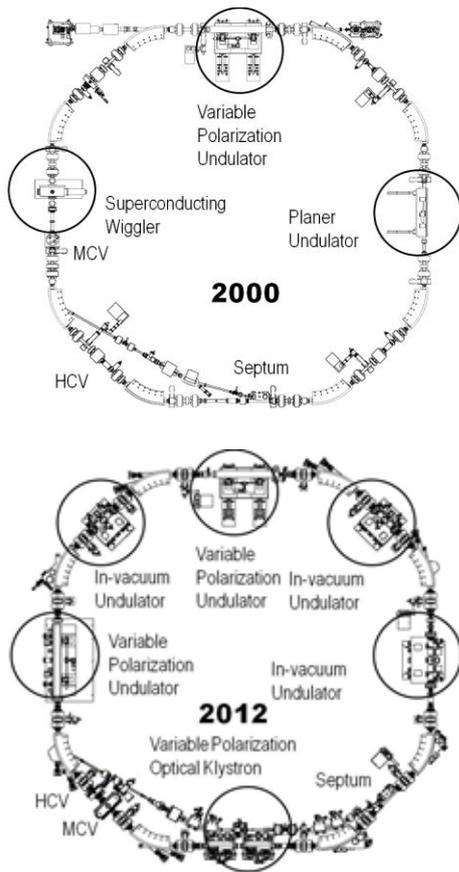


Figure 1: Layout of UVSOR-I (upper) and UVSOR-III (lower).

### 3. UVSOR-II から UVSOR-III へ

2000 年代に入り、いくつかの放射光施設でトップアップ運転の導入が始まった。比較的短い間隔で間欠的にビームを入射し擬似的に一定強度運転を実現するこの手法は、技術力に優れる大型施設で先行して導入されたが、Touschek 効果などで不可避免的にビーム寿命が短くなってしまいう低エネルギーリングでこそ、その威力を発揮するものである。UVSOR は小型施設には珍しくフルエネルギーに近い専用入射器を有することから、2000 年代中頃より、トップアップ運転の導入に向けた準備を開始した。

最初に取り組んだのは放射線遮蔽の増強である。高エネルギーの光源加速器は遮蔽トンネル内部に收容される場合がほとんどであるが、UVSOR 光源加速器は周囲を遮蔽ブロックで取り囲んでいるものの、ビーム入射時には利用者は実験ホールから一時退出

する必要があった。新たに光源加速器を鉛製の遮蔽壁で取り囲み、入射時にも利用者が実験を継続できるようにした。

次に、入射器とビーム輸送路のフルエネルギー化を行った。前述したように UVSOR 建設当初 600MeV で運転されていたが、その後リングは 750MeV で運転されるようになった。しかし入射器の最高エネルギーは 600MeV のままであったため、600MeV で入射後 750MeV まで加速を行っていた。ブースターシンクロトロンやビーム輸送路の電磁石、また、ビーム輸送系のパルス電磁石群の能力を調べた結果、シンクロトロンの電磁石電源とビーム輸送路の偏向電磁石電源の 2 つの装置のみを更新すれば、フルエネルギー化が可能であることがわかった。建設当初に余裕を持ったハードウェア設計となっていたのが幸いした。両方の電源とも製造後 20 年以上が経過しており、維持管理も困難となりつつあったため、老朽化対策と合わせて増強更新を実施した。

ビーム入射制御装置やインタロックの構築、放射線申請などを経て 2008 年より試験的にトップアップ運転を開始し、2010 年度からはユーザー運転 100% トップアップ運転を行っている<sup>[7]</sup>。

UVSOR-II には 4m の長い直線部が 4 本あるが、そのうちの 1 本は入射用に使用されていた。しかしセプタム磁石そのものは 1m 程度と短く、入射点を短直線部に移動することで、長い直線部をアンジュレータに利用できるようにすることは長年の願望であった。幸い、文部科学省の研究プロジェクト「量子ビーム基盤技術開発プログラム」のもと、レーザーと電子ビームを利用したコヒーレント光発生に関する研究を実施する一環として、これを実現することができた。2010 年春にビーム輸送路の移設を行い、新しく創出された 4m 直線部に光源開発用光クライストロン型アンジュレータを導入した<sup>[8]</sup>。これによって、これまで光電子分光ラインに寄生する形で行われてきた光源技術開発を専用のサイトで実施できるようになり、新しい光源技術の実用化へ向け研究開発を加速できる体制が整った。また、光電子分光ラインでもアンジュレータを改造し、利用研究に最適化する可能性が出てきたが、これは 2014 年春に実施される予定である。

UVSOR-II のビームエミッタンスは偏向電磁石を複合機能型とし Damping Partition Number を変更することでさらに低エミッタンス化できる可能性があった。これについては、挿入光源設置可能な最期の短直線部に 6 台目のアンジュレータとなる真空封止型アンジュレータを導入すること、また、パルス多極磁石による新しい入射方式の実現と合わせて 2010 年度に予算化され、2012 年春に加速器の大規模な改造を実施した<sup>[8]</sup>。新たに製作された複合機能型偏向磁石は磁極面に勾配を持たせることで四極成分を発生し、また、端部の形状により六極成分を発生している。このラティスの変更によりエミッタンスをおよそ 17nm-rad 程度まで小さくできた。また、四極電磁石、六極電磁石の電流値を小さくし省電力化できたことに加え、将来、一部の四極電磁石を撤

去し直線部を伸長できる可能性も出てきた。パルス多極磁石は、キッカーによる入射に比較して入射時のビーム位置変動が小さく、トップアップ運転時に威力を発揮することが期待されている。試験運転を行った結果、25%程度での効率でビーム入射できることが確認できている。今後さらに効率を向上し、早期のユーザー運転への導入を目指す。真空封止型アンジュレータは無事稼働し、国内では初めてとなる透過型軟 X 線顕微鏡装置へ放射光を供給している。

#### 4. UVSOR における光源技術開発

UVSOR では通常のシンクロトロン光利用のための光源高度化と並行して、自由電子レーザーを始めとする光源技術開発を進めてきた。そのひとつである蓄積リングを用いた共振器型自由電子レーザーは、1980 年代から継続している。原理的に波長限界がなく、通常型レーザーの存在しない波長域でのレーザー光源として期待されたが、真空紫外域よりも短い波長域では高反射率ミラーが存在しないため発振が難しく、これまでのところ短波長限界は 200nm である。光源側で偏光可変でありシンクロトロン光と完全同期している等の特長を活かして利用も少しずつ拡大している<sup>[9]</sup>。UVSOR 加速器の安定性の高さもあり、共振器型自由電子レーザーの基礎研究では数多くの成果を生み出している<sup>[10]</sup>。

2000 年代中頃からは、UVSOR の電子ビームに同期可能な極短パルスレーザーを導入し、レーザーと電子ビームを併用したテラヘルツ領域、真空紫外領域でのコヒーレント光源開発を進めてきた。レーザーと電子ビームの相互作用を利用して電子ビーム上に様々な形状の微細な密度構造を形成することで、シンクロトロン光の波形そのものを制御するという極めて独自性の高い技術の開発が進行中である<sup>[11]</sup>。当初、この研究は既存の自由電子レーザー装置を流用して進めてきたが、先に述べたビーム輸送路の移設により新たに作り出された直線部で研究を展開していくこととなった。

また、同じくレーザーと電子ビームを併用した光発生技術としてレーザーコンプトン散乱ガンマ線発生にも取り組んでいる。90 度入射による極短パルスガンマ線発生など、蓄積リングの特長を活かした成果が挙げられている<sup>[12]</sup>。

#### 5. 展望

UVSOR は稼働後 30 年目を迎えたが、2 度の大きな改造とその合間の断続的な改良作業の結果、電子エネルギー 1GeV 以下の真空紫外放射光源としては世界的にも最高水準の高輝度特性を維持しており、小型光源でありながら 6 台のアンジュレータを有し、定常的にトップアップ運転が行われている。しかし、施設そのものが地下にあることから空間的な拡張性は厳しく制限されており、現有施設のこれ以上の高度化改造は難しく、施設の全面更新も含む本格的な次期計画を検討する時期に来ていると考えている。回折限界リングや直線加速器による自由電子レーザー、エネルギー回収型ライナックなどに基づいた

極紫外・軟 X 線光源について幅広く検討を行っている。また、電子源の開発等、要素技術の開発にも着手している。

#### 参考文献

- [1] M. Watanabe, K. Kasuga, H. Yonehara, A. Uchida, K. Sakai, O. Matsudo, T. Kinoshita, M. Hasumoto, J. Yamazaki, E. Nakamura, H. Yamamoto, K. Takami, T. Katayama, K. Yoshida, M. Kihara, G. Saxon, Proc. 5th Symp. Accelerator Sci. Tech. (1984) 15-17
- [2] S. Takano, H. Hama, G. Isoyama, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A331 (1993) 20
- [3] T. Mitani, H. Okamoto, Y. Takagi, M. Watanabe, K. Fukui, Rev. Sci. Instrum. 60(7) (1989) 1569-1572
- [4] T. Nanba, Y. Urashima, M. Ikezawa, M. Watanabe, E. Nakamura, K. Fukui, H. Inokuchi, Internat. J. Infrared and Millimeter Waves, Vol. 7, No. 11 (1986) 1769
- [5] M. Katoh, K. Hayashi, T. Honda, Y. Hori, M. Hosaka, T. Kinoshita, S. Kouda, Y. Takashima, And J. Yamazaki, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 467-468 (2001), 68-71
- [6] 加藤政博、放射光 Vol.17, No.1 (2004), 10-16
- [7] H. Zen, M. Adachi, M. Katoh, K. Hayashi, J. Yamazaki, T. Tanikawa, Y. Taira, M. Hosaka, N. Yamamoto, Proc. 1st Internat. Particle Accelerator Conf. (iPAC'10) (2010), 2576-2578
- [8] M. Adachi, H. Zen, T. Konomi, J. Yamazaki, K. Hayashi, M. Katoh, J. Physics: Conf. Ser. 425 (2013) 042013
- [9] e.g. T. Gejo, E. Shigemasa, E. Nakamura, M. Hosaka, S. Koda, A. Mochihashi, M. Katoh, J. Yamazaki, K. Hayashi, Y. Takashima, H. Hama, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A 528 (2004), 627-631; T. Nakagawa, T. Yokoyama, M. Hosaka, M. Katoh, Rev. Sci. Instr. 78, 023907 (2007); J. Takahashi, H. Shinjima, M. Seyama, Y. Ueno, T. Kaneko, K. Kobayashi, H. Mita, M. Adachi, M. Hosaka, M. Katoh, Internat. J. Molecular Sci., 10 (2009) 3044-3064
- [10] e.g. M. Hosaka, M. Katoh, A. Mochihashi, J. Yamazaki, K. Hayashi, Y. Takashima, H. Hama, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A, 507 (2003), 289-293; C. Evain, C. Szwaj, S. Bielawski, M. Hosaka, A. Mochihashi, M. Katoh, M.-E. Couprie, Phys. Rev. Lett. 102, 134501 (2009)
- [11] e.g. M. Shimada, M. Katoh, S. Kimura, A. Mochihashi, M. Hosaka, Y. Takashima, T. Hara, T. Takahashi, Jpn. J. Appl. Phys., 46, 12 (2007) 7939; M. Shimada, M. Katoh, M. Adachi, T. Tanikawa, S. Kimura, M. Hosaka, N. Yamamoto, Y. Takashima, T. Takahashi, Phys. Rev. Lett. 103, 144802 (2009); S. Bielawski, C. Evain, T. Hara, M. Hosaka, M. Katoh, S. Kimura, A. Mochihashi, M. Shimada, C. Szwaj, T. Takahashi, Y. Takashima, Nat. Phys., 4 (2008) 390-393; M. Labat, M. Hosaka, M. Shimada, M. Katoh, M. E. Couprie, Phys. Rev. Lett. 101, 164803 (2008); T. Tanikawa, M. Adachi, H. Zen, M. Hosaka, N. Yamamoto, Y. Taira, M. Katoh, Appl. Phys. Express 3 (2010) 122702; I. Katayama, H. Shimosato, M. Bito, K. Furusawa, M. Adachi, M. Shimada, H. Zen, S. Kimura, N. Yamamoto, M. Hosaka, M. Katoh, And M. Ashida, Appl. Phys. Lett. 100, 111112 (2012)
- [12] e.g. Y. Taira, M. Adachi, H. Zen, T. Tanikawa, N. Yamamoto, M. Hosaka, Y. Takashima, K. Soda, M. Katoh, Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. Sec. A, 652, pp.696-700, (2011); Y. Taira, H. Toyokawa, R. Kuroda, N. Yamamoto, M. Adachi, S. Tanaka, M. Katoh, Rev. Sci. Instr. 84, 053305 (2013)