

## PRESENT STATUS OF UVSOR-II

Masahiro KATOH<sup>1,A,B)</sup>, Masahito HOSAKA<sup>A,B)</sup>, Akira MOCHIHASHI<sup>A,B)</sup>, Miho SHIMADA<sup>A)</sup>, Jun-ichiro YAMAZAKI<sup>A)</sup>, Kenji HAYASHI<sup>A)</sup>, Toru HARA<sup>A,C)</sup><sup>A)</sup> Institute for Molecular Science, <sup>B)</sup> SOKENDAI

38 Nishigo-Naka, Myodaiji, Okazaki, 444-8585, Japan

<sup>C)</sup> SPring-8/RIKEN

1-1-1 Kouto, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

## Abstract

A 750 MeV synchrotron light source, UVSOR-II, is operated routinely with emittance of 27 nm-rad, which is the world smallest among the low energy light sources below 1 GeV. Three undulators are operational and one is under construction. The energy of the booster synchrotron is being upgraded from 600 MeV to 750 MeV in summer 2006. Full energy injection to the storage ring will be started in spring 2007. Top-up injection will be introduced within a few years. The low emittance and the higher peak current of UVSOR-II make the free electron laser to oscillate in the deep UV (200 – 250 nm) region with high average output power of several hundred milli-watt. Some users' experiments have started. A Ti:Sa laser synchronized with the RF acceleration was introduced in 2005. Intense coherent terahertz radiation was successfully produced by the laser bunch slicing method. By using same laser, coherent third harmonics was also successfully produced.

## UVSOR-IIの現状

## 1. はじめに

分子科学研究所のシンクロトロン放射光源 UVSORは1983年の運転開始以来、20年以上にわたり順調に稼動を続けている。Photon FactoryやSPring-8と並ぶ全国共同利用の放射光施設であり、750MeVと比較的低エネルギーであることから真空紫外、軟X線、赤外線領域で活発に利用されてきた。2000年代に入り、加速器本体の老朽化、光源性能面での競争力低下などが深刻な問題となっていたが、新たに考案されたラティス改造案<sup>[1]</sup>に基づく高度化改造が2003年に実施され、UVSOR-IIと改名された<sup>[2]</sup>。

UVSOR-IIは年間約40週運転され、加速器・光源研究専用週も2, 3週間程度が確保されている。1週間のうち月曜日から金曜日まで運転され、月曜日は加速器・光源研究、残りは放射光利用実験に割り当てられている。朝9時から21時までの12時間運転され、ビーム入射は9時と15時に行われる。放射光利用実験のための運転は主にマルチバンチモードで行われ、蓄積電流値は350mAである。年間2, 3週程度実施されるシングルバンチ運転では、蓄積電流値は100mA、入射間隔は4時間である。

放射光ビームラインは一時は20本近く稼動していたが、競争力のあるビームラインに資金・人員を集中させるという方針のもと、スクラップアンドビルトが進み、現在は13本が稼動している<sup>[3]</sup>。軟X線、真空紫外ではアンジュレータ光を利用するビームラインの整備が重点的に進められている。また、遠赤外・テラヘルツ領域では世界的にも最高強度を誇る

ビームラインが稼動を始めている。

Table 1: UVSOR-II 電子蓄積リングの主要パラメータ

Electron Energy	750 MeV
Circumference	53.2 m
Straight Sections	4m x 4, 1.5m x 4
Natural Emittance	27 nm-rad
Natural Energy Spread	4.2 x 10 <sup>-4</sup>
Natural Bunch Length	160 psec
RF Frequency	90 MHz
RF Voltage	100 kV*
Filling Beam Current	350 mA*

Note: \*In multi-bunch operation for SR users.

## 2. 光源リングの現状

現在UVSOR-IIは1GeV以下の低エネルギー放射光源としては世界最高である27nm-radの低エミッタンスで定常的に運転されている。主要パラメータをTable 1に、また、機器配置をFig.1に示す。通常運転では、エネルギー分散関数を直線部で消去しない、非アクロマートなオプティクスを採用している。これにより上述した低エミッタンスが可能となっている。各直線部では垂直方向のベータatron関数を極小化しており、これにより真空封止型など開口の狭いアンジュレータの導入が可能となっている。光学関数は図2に示すとおりである。

周長約53mのリングは8箇所の変向部と8箇所の直線部からなる。直線部のうち4本は約4mと長く、残

<sup>1</sup> E-mail: mkatoh@ims.ac.jp

り4本は1.5mと短い。これら直線部には3台のアンジュレータが設置され、更にもう1台が2006年10月に設置される予定である。これら4台のアンジュレータのうち2台は真空封止型であり100eV以上の軟X線領域で高輝度光を発生する。残り2台は可変偏光型であり真空紫外領域で高輝度光を発生する。リング内には更に2箇所短い直線部がアンジュレータ用に確保されており、最終的には合計6台を稼働させたいと考えている。

2003年の高度化により、偏向電磁石を除く大部分の電磁石、電磁石電源の全て、偏向部を除く真空ダクト及び排気ポンプの大部分が更新された。パルス電磁石など一部に20年以上使用されているものがあるが、老朽化対策は大幅に進んだ。

高周波加速空洞は90MHzの主空洞と270MHzの三倍高調波空洞が設置されている。主加速空洞は2005年春に更新された。旧空洞と同様な形状でありながら性能は大幅に改善され、同じ高周波源を用いながら、旧空洞の約3倍の加速電圧を発生できるようになった<sup>[4]</sup>。これは低エミッタンスに起因するTouschek効果を緩和するのに不可欠である。高調波空洞は、Landau減衰を利用した縦方向ビーム不安定性の抑制とパンチ長を延ばすことによるTouschek効果の緩和のために使用されている<sup>[5]</sup>。

制御系は、ミニコンピュータとCAMACインターフェースを組み合わせたシステムを長年使用してきたが<sup>[6]</sup>、ハードウェアの維持が困難となり、段階的にPCを中心としたシステムに移行してきた。2006年度中に旧システムの使用を完全に停止する予定である。

UVSOR-IIにおける目下の最大の問題はビーム寿命である。低エネルギー・低エミッタンスであるが故の非常に強いTouschek効果によりビーム寿命が制限されている。これを緩和するために、2005年には主加速空洞を更新し、また、高調波空洞による電子パンチ長伸張も導入しているが、現状、ビーム寿命は200mAで6時間程度である。従って6時間の入射間隔を越えるような長時間連続した放射光利用実験は不可能となっている。また、放射光強度の時間変化は光学素子の熱変形を引き起こす。これらビーム寿命に伴う様々な問題を究極的に解決するためにいわゆるTop-Up運転<sup>[7]</sup>の導入を目指している。既に具体化へ向けて、ブースターシンクロトロンフルエネルギー化、放射線遮蔽の増強などに着手している。2007年春からリングへのフルエネルギー入射テストを開始し、入射効率、放射線遮蔽などに関して十分なマシンスタディを行った後、できるだけ早い機会にトップアップ入射のユーザー運転への導入を果たしたいと考えている。

### 3. 入射器の現状

UVSOR-IIの入射器は、15MeVのS-band直線加速器と600MeVのブースターシンクロトロンからなる。光源リングでは600MeVで入射後、750MeVへ加速してきた。2003年の高度化改造に際し、電子銃、パルス変調器、冷却水装置などの主要コンポーネントを

更新することができたが、大型装置であるブースターシンクロトロン電磁石電源の更新は見送られた。この電源は、深刻な故障が年1回程度の頻度で発生し、交換部品の入手が極めて困難となるなど危機的な状況となっていたが、トップアップ運転を視野に入れた入射器のフルエネルギー化の一環として2006年夏に更新することができた。2007年春には、これも老朽化の深刻な入射路の偏向電磁石電源が更新されフルエネルギー入射対応へ増強される予定となっている。

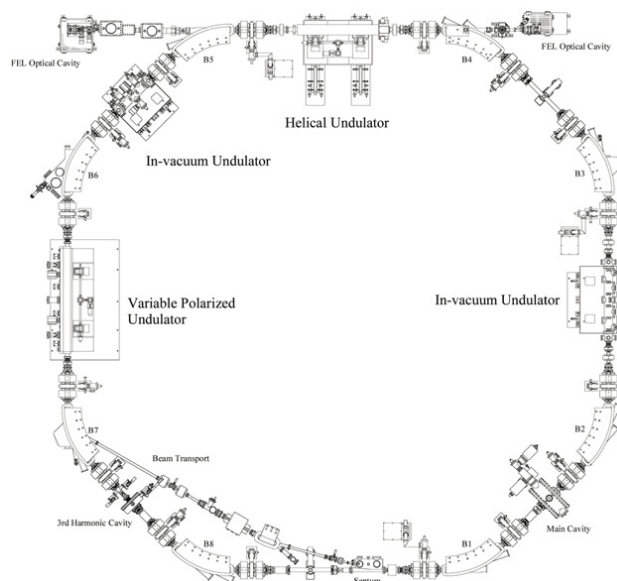


Fig. 1 UVSOR-II電子蓄積リング  
(2006年10月現在)

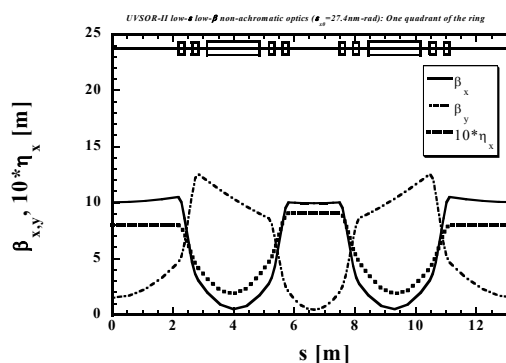


Fig. 2 UVSOR-IIのビームオプティクス

## 4. 加速器・光源研究の現状

### 4.1 自由電子レーザー

UVSORでは、長年、共振器型自由電子レーザー研究を継続している。通常放射光利用に供されている可変偏光型アンジュレータを光クライストロンとして使用し、放射光ビームラインと干渉しないよう

に光共振器を設置している。共振器型の自由電子レーザーはミラーの反射率によって発振波長領域が限定されているものの、いわゆるSASE型の自由電子レーザーとは異なり、スペクトル幅が $10^{-4}$ 程度と狭く、また、高い平均出力が得られるのが特長である。

UVSORでは、1990年代の円偏光型の光クライストロンの導入により達成した239nmの記録<sup>[8]</sup>を長年乗り越えることができなかったが、2003年の高度化により実現された低エミッタンス、2005年の主加速空洞更新により実現された高ピーク電流により、短波長領域での増幅率が大幅に向上した<sup>[9]</sup>。その結果、最近では、最短発振波長は215nmに到達し、更なる短波長化を図っているところである<sup>[10]</sup>。また、平均出力も波長230nmで1Wを超えるまでになってきた<sup>[10]</sup>。利用研究も次第に拡大しており、現在、3つの研究グループが利用している。

UVSOR-II自由電子レーザーは通常の運転エネルギーでレーザー発振が可能であり、ビーム安定性が高いことからレーザー発振も安定であり、自由電子レーザーの基礎的な研究を行うのに最適な施設である。現在、フランスの研究グループと共同でレーザーの発振過程に関する基礎的な研究を行っている。

#### 4.2 コヒーレント高調波発生

2005年春にリングの電子パルスと同期可能なTi:Saレーザーを導入した。これは後述するバンチスライス実験のために導入したものであったが、このレーザーを利用して、コヒーレント高調波の発生実験をフランスの研究グループと共同で行った<sup>[11]</sup>。レーザーパルスを、基本波長をレーザー波長に合わせた光クライストロン中で電子パルスと重畳させ、電子パルス中に密度変調を形成し、コヒーレントな三倍高調波を発生することに成功した<sup>[11]</sup>。共振器型自由電子レーザーの波長の限界を乗り越える可能性を持った光発生法であり、また、種光注入方式のSASE方式自由電子レーザーの基礎となる研究である。

#### 4.3 レーザーバンチスライス実験

レーザーバンチスライス法はレーザーを用いて電子バンチの一部を切り出す手法として90年代後半に提案され<sup>[12]</sup>、これまでにALS<sup>[13]</sup>、BESSY-II<sup>[14]</sup>で実証実験が行われている。この手法を用いると、蓄積リングにおいてサブピコ秒放射光パルスやコヒーレントテラヘルツ光を比較的簡便に生成できる可能性がある。ALSやBESSY-IIではこの実験のためにある程度の規模の加速器の改造を行ったようであるが、UVSORでは既存の自由電子レーザー用設備を流用でき、加速器の改造は必要ではない。また、電子エネルギーが低いためにレーザーのパルスエネルギーも比較的低くてよい。2006年春にUVSOR-IIの加速周波数90MHzに同期可能なTi:Saレーザー（繰り返し1kHz、パルスエネルギー2.5mJ、パルス長130fsec）を導入し、自由電子レーザー用光共振器の一部を流用してレーザーをリングに導入した。これ

まれの実験で、アンジュレータ下流の遠赤外線ビームライン<sup>[15]</sup>で、レーザー光の入射に同期して $10\text{cm}^{-1}$ 付近の波長域で大強度のテラヘルツ光パルスが発生することが確認できた<sup>[16, 17]</sup>。これはレーザーとの相互作用によりバンチの一部が切り取られ、バンチ中に密度の低い部分（ディップ）が形成された結果生じたものと考えている。UVSOR-IIではテラヘルツ領域のシンクロトロン光ユーザーがいることから、今後、実用化を目指して開発を続けていきたいと考えている。

#### Acknowledgements

光源開発研究の一部は科学研究費補助金（基盤研究B 15360039）により行われた。また、光源開発研究の一部は、木村真一、高嶋圭史、高橋俊晴、M. E. Couprie、M. Labat、G. Lambert、S. Bielawski、C. Szwaj博士らとの共同研究である。

#### 参考文献

- [1] M. Katoh et al., NIM A467-468 (2001), 72
- [2] M. Katoh et al., AIP Conf. Proc. 705 (2004), 49
- [3] M. Katoh et al., presented at SRI2006 (Daegu, 2006)
- [4] A. Mochihashi et al., presented at EPAC2006 (Edinburgh, 2006)
- [5] M. Hosaka et al., Proc. 25th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop (Shanghai, 2001) 171
- [6] N. Kanaya et al., NIM A352 (1994) 166
- [7] e.g. H. Tanaka et al., Proc. EPAC 2004 (2004) 222
- [8] H. Hama et al., in Free Electron Laser and its Application in Asia, IONICS Publ. Co., Ltd., (1997) 17
- [9] M. Hosaka et al., NIM A 528 (2004) 291
- [10] M. Hosaka et al., in these proceedings
- [11] M. Labat et al., presented at EPAC2006 (Edinburgh, 2006)
- [12] A. Zholents and M. Zolotarev, Phys.Rev.Lett. 76, 912 (1996)
- [13] e.g. J. M. Byrd et al., Proc. EPAC 2004 (2004), 2445
- [14] e.g. H. -J. Backer et al, Proc. EPAC 2004 (2004), 2284
- [15] S. Kimura et al., AIP Conf. Proc. 705 (2004), 416
- [16] M. Katoh et al., presented at EPAC2006 (Edinburgh, 2006)
- [17] M. Shimada et al., in these proceedings