

トピックス

UVSOR 高度化計画

加藤 政博

分子科学研究所*

Upgrade Plan for UVSOR

Masahiro KATOH

Institute for Molecular Science

We are proposing an upgrade plan for UVSOR. This 2nd generation synchrotron light source of 750 MeV will be converted to a high brilliance light source that can compete with the 3rd generation light sources in the next decade. The original DBA (double bend achromatic) lattice will be modified to have low emittance of 27 nm-rad and four new short straight sections. Totally six insertion devices will be installed. All the straight sections will have small vertical betatron function, which is suitable for installing in-vacuum undulators of short period length. UVSOR will produce much more brilliant undulator radiation in wider spectral region for more experimental stations.

1. 始めに

シンクロトロン放射光の利用は高エネルギー物理学実験用の円形電子加速器に寄生する形で開始され、その有用性が明らかになると放射光利用専用の加速器が建設されるようになった。前者は第1世代、後者は第2世代の放射光源と呼ばれている。近年においては第3世代と呼ばれる放射光施設が世界各地で建設され続々と稼動している。これら最新の光源は蓄積電子ビームのエミッタンスが小さく、また、挿入光源設置可能な直線部を多数有するなど、設計段階より高輝度放射光の発生に最適化されたものになっている。このような新世代光源の登場に対して、旧世代光源を有する放射光施設の多くでは、既設光源加速器の高性能化により競争力を維持していこうとする動きがみられる。わが国においては高エネルギー加速器研究機構の Photon Factory で電磁石配置 (ラティス) の改造を行い、放射光高輝度化に成功した¹⁾。また、Stanford の SPEAR でもラティス改造による高輝度化の計画がある²⁾。また、加速器の大幅な改造を伴わない範囲での低エミッタンス化が、NSLS X-ray Ring³⁾や Super ACO⁴⁾などで試みられている。

分子科学研究所・極端紫外光実験施設 (UVSOR) は

1980年代前半に建設された典型的な第2世代放射光源であり、1983年にビーム蓄積に成功して以来17年以上にわたって我が国における主要な放射光源のひとつとして順調に稼動を続けてきた⁵⁾。周長53 m、ビームエネルギー750 MeV という比較的小型の放射光源であるが、20本の放射光ビームラインが稼動している。その半数は共同利用に供されており、現在、年間900名ほどの利用者を受け入れている。世界的に見ても極端紫外光に重点を置き、また、分子科学研究に専用化している放射光施設は UVSOR の他にはない。しかしながら最新の第3世代光源に比べると、電子ビームのエミッタンスは160 nm-rad と一桁以上大きく、また設置可能挿入光源数も3台と少ないなど、約20年前の設計思想と技術で作られた UVSOR は放射光の輝度という点で大きく劣ってしまっている。また加速器装置の多くが製造後20年近くを経過しており、老朽化も深刻になりつつある。UVSOR が全国共同利用施設にふさわしい最先端の放射光利用実験の可能な場であり続けるためには、光源加速器の高性能化は急務である。

UVSOR 高度化計画は、

- (1) 挿入光源設置可能な直線部の増設
- (2) 低エミッタンス化による放射光高輝度化

* 分子科学研究所・極端紫外光実験施設 (UVSOR) 〒444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中38
TEL: 0564-55-7206 FAX: 0564-54-7079 E-mail: mkatoh@ims.ac.jp

(3) 既設挿入光源およびビームラインの更新による高性能化

(4) 加速器各部の更新による高性能化, 信頼性向上を実現することで, UVSOR を第3世代光源と競争可能な放射光源に転換し, 今後10年以上, VUV 軟 X 線領域における最先端の放射光利用実験が行える施設として現在の地位を維持・強化していこうとするものである。

本稿の以下の各節では, 高度化計画のうち特に光源加速器本体の高度化とそれによって実現される光源性能に重点をおいて紹介する。この計画では, 施設全体, 即ち, 入射器から光源加速器, 放射光ビームラインも含めた更新, 高度化を目指している。放射光ビームラインの更新は, 高度化された光源を今後どのように利用していくか, どのような利用研究を展開していくのか, という極めて重要な問題であり, 現在, UVSOR 観測系スタッフが中心になり検討を進めているところである。高度化計画のもう一つの重要項目は入射器の増強・更新である。比較的小規模の施設でありながらフルエネルギーに近い専用の入射器を有する点は UVSOR の特徴のひとつであるが, この入射器も光源リングと同じく製造後20年近くが経過している。施設の安定な運転のためには, 各部の更新による高性能化, 信頼性向上は不可欠である。これらも含めた高度化計画の全体については, また, 機会をあらためて報告したい。

2. UVSOR 光源加速器の現状

高度化計画の紹介に入る前に, 光源加速器の現状について簡単に述べておく。UVSOR は15 MeV 線形加速器, 600 MeV シンクロトロンからなる専用入射器を有する。光源リングに入射後750 MeV まで加速し蓄積する。入射は通常1日2回であり, 9時と13時に行われる。ビーム停止は通常18時であるが利用者の要望により21時まで延長が可能である。毎週月曜日と土曜日はマシンスタディ, 火曜日から金曜日までがユーザー利用に割り当てられている。利用実験のほとんどはマルチバンチモードで運転され, 蓄積ビーム電流値は最大250 mA である。典型的な運転の状況を Fig. 1 に示す。最近のマシンスタディの結果では300 mA での運転でも特に問題はないことがわかったが, 今後も引き続きビーム寿命の改善とも合わせて平均電流値の増大に取り組んでいきたいと考えている。なお年間4-5週間程度はシングルバンチモードで運転され, 最大電流値は約70 mA である。

挿入光源は現在3台が設置されている (Table 1)。このうち自由電子レーザーにも使用されている BL5A 円偏光アンジュレータは製造が比較的新しく⁶⁾今後も施設の主力の光源として稼働を続けることになる。今のところギャップ変更は入射時のみに限定されており, ユーザーからの随時変更 (いわゆるフリーチューニング) はできないが, 近い将来の実現に向けてハードウェアの整備を進めているところである。BL7A 超伝導ウィングラについては, 運転維

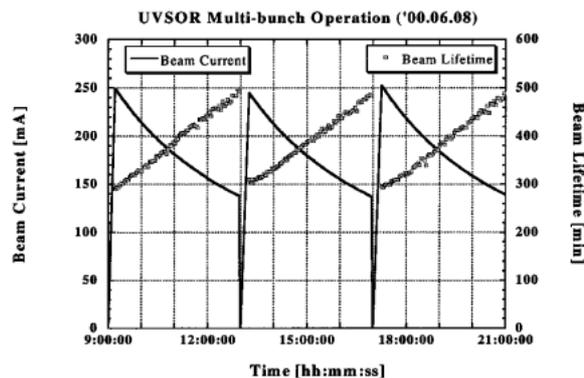


Figure 1. Typical Beam Current History of UVSOR in multi-bunch mode.

Table 1 Insertion devices at UVSOR
Linear Undulator (BL3A)

Number of periods	24
Period Length	84 mm
Total Length	2016 mm
Remanent Field	0.9 T
Magnetic gap	30-90 mm
Deflection parameter (K)	0.6-3.6

Helical Undulator/Optical Klystron (BL5A)

Number of periods	18
Period length	110 mm
Length of dispersive part	302.5 mm
Total length	2351.2 mm
Remanent field	1.3 T
Magnetic gap	30-150 mm
Deflection parameter (K)	0.07-4.6 (helical mode) 0.15-805 (linear mode)

Super Conducting Wiggler (BL7A)

Type	Wavelength-shifter
Max. magnetic field	4 T
Magnetic gap	45 mm
Critical energy	1.5 keV

持管理に要する費用・人員, 利用側にとっての必要性などを総合的に考え, 利用者の了解の上, UVSOR 運営委員会で廃止が了承されている。後述するように高度化計画の一環として跡地利用の計画が既にスタートしている。BL3A 直線偏光アンジュレータは老朽化が進み, 最近では制御系の一部に修理の困難な不具合が生じている。このアンジュレータに関しても高度化計画の一環として, ビームラインも含め更新の対象となっている。

20年近く前に製造された光源加速器各部の老朽化は深刻であるが, 高周波源, パルス電源など, 通常予算の範囲で可能なものから順次更新を進めてきている。昨年度にはビーム位置モニター信号処理系の全面更新を実施し, 計測

スピードをおよそ100倍にまで高めることができた。今後挿入光源のフリーチューニングに向けた調整や軌道安定化システムの構築に威力を発揮するものと期待される。

以下で紹介する高度化計画が実現すれば、電磁石系、真空系、高周波加速空洞など、これまであまり手の入っていない部分の更新も進み、光源性能の向上のみならず、故障率の低減など、加速器の信頼性の向上も実現できるものと期待している。

3. 光源加速器の高度化改造

UVSOR 高度化計画の中心となるのは光源リングのラティス（電磁石配列）の改造による直線部の増設と低エミッタンス化である⁷⁾。ラティスの改造は Fig. 2 に示すようになる。現在のラティスは、多くの放射光源で採用されている DBA (double-bend achromatic) セルを基本構造としている。DBA セル4個でリングが構成されている。現在3台の四極電磁石と2台の六極電磁石が設置されている分散部に、新たに1.5 mの直線部（フリースペース）を設け、その両側に四極電磁石2台ずつを配置する。限られた空間を有効に活用するために六極磁場は四極電磁石に設ける補助コイルにより発生する。長直線部についても四極電磁石を全て交換し、現在の3 mのフリースペースを4 mまで拡大する。これらの四極電磁石にも六極磁場を組み込みダイナミックアパーチャの最適化を行う。

高度化前後での加速器配置案を Fig. 3 に示す。最終的に直線部数は、現在の3 m直線部4本から、4 m直線部4本と1.5 m直線部4本の合計8本へと倍増される。これらのうち2本は入射や高周波加速などに使用されるが、残りの6本は挿入光源に利用可能となる。偏向電磁石には手を加えないため、リングの形状は変わらない。従って既存の放射光ビームラインは当面そのまま利用可能であるが、新挿入光源の導入に合わせて、これら既設ビームラインのスクラップアンドビルトを実施する。

ビームオプティクスは Fig. 4a のように変わる。エミッタンスは現在の160 nm-rad から27 nm-rad と約1/6まで小

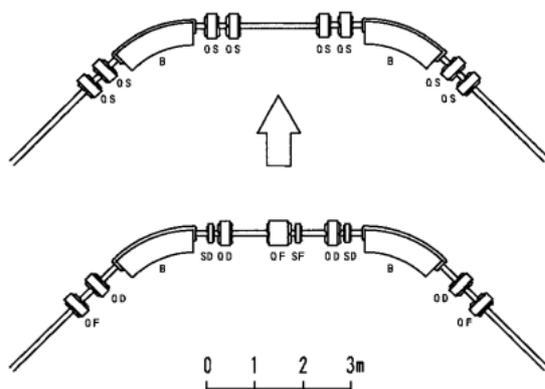


Figure 2. Magnetic lattice of UVSOR (One quadrant of the ring). Present lattice (lower) and new one (upper) are shown.

さくなる。新オプティクスでは、四極電磁石による収束を強めることに加え、全ての直線部に有限の分散を持たせることで効果的に低エミッタンス化を実現している。直線部に有限の分散を持たせることそれ自体は直線部のビームサイズを増大させる方向に働くが、エミッタンスの減少の効果がこれに優るため、放射光輝度にとっては有利となる。高度化前後でのビームサイズ、角度発散の変化を Fig. 4b に示す。リングの全ての場所でビームサイズ、角度発散とも小さくなるのがわかる。また、全ての直線部において垂直方向のベータatron関数を1 m程度まで小さくしてあり、ビーム寿命に影響を与えることなく磁極間隙の小さい短周期アンジュレータを導入することが可能となっている。現在と高度化後の加速器パラメータを Table 2 にまとめてある。

六極補正に関しては4ファミリーの四極電磁石のそれぞれに組み込んである六極磁場強度を最適化することで、線形色収差を補正し且つ入射蓄積に十分なダイナミックア

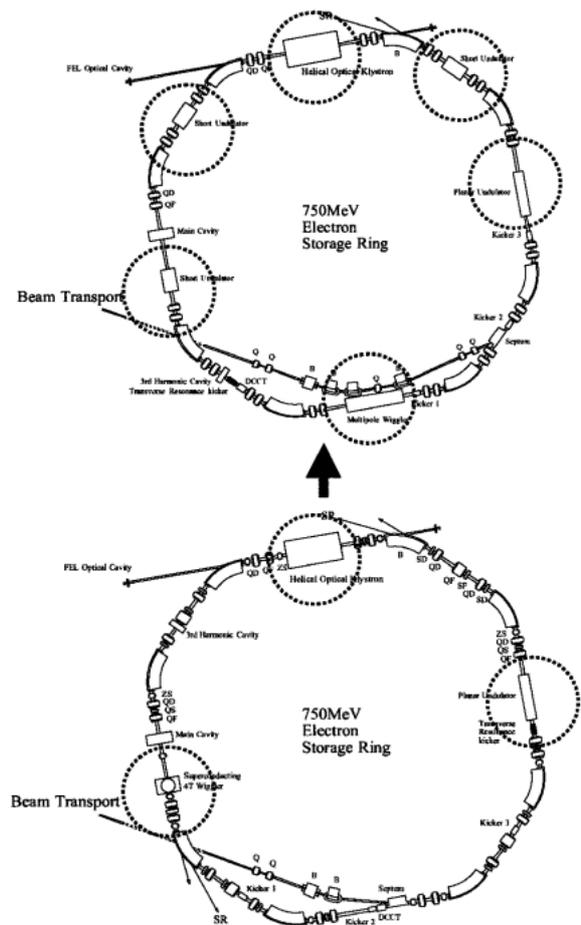
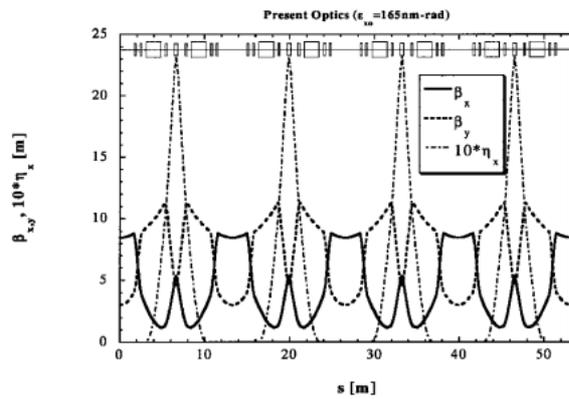
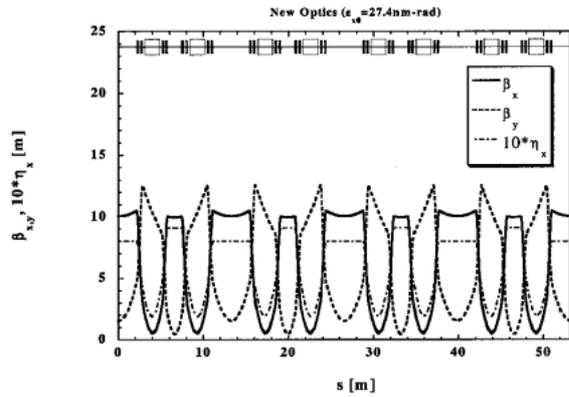
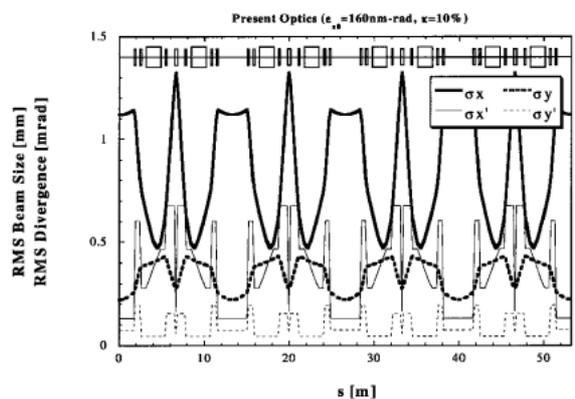
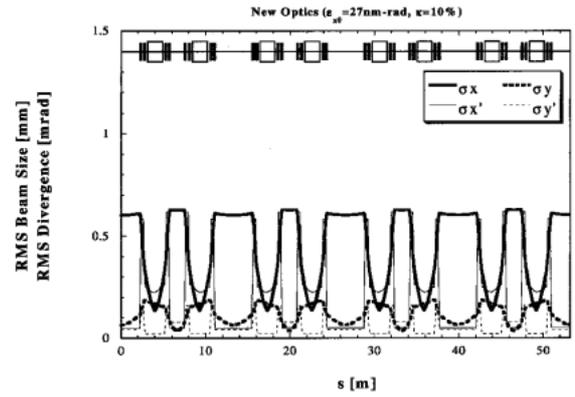


Figure 3. Present (lower) and new (upper) configuration of the accelerator components. The straight sections where insertion devices can be installed are indicated by circles. The new configuration includes an option in which the injection point is moved. Final configuration and the properties or parameters of the undulators are being discussed.



(a)



(b)

Figure 4a. Optical functions of UVSOR storage ring. Those of the present optics (lower) and the new optics (upper) are shown.

Figure 4b. Beam size and divergence of UVSOR storage ring. Those of the present optics (lower) and the new optics (upper) are shown.

Table 2. Main parameters of UVSOR storage ring

	Present	Upgraded
Circumference	53.2 m	
Lattice type	DBA	extended DB
Number of cells	4	4
Straight sections	3 m × 4	4 m × 4, 1.5 m × 4
Beam energy	750 MeV	
Emittance	165 nm-rad	27.4 nm-rad
Energy spread	4.2×10^{-4}	
Betatron tunes	(3.16, 1.44)	(3.75, 3.20)
Nat. chromaticity	(-3.4, -2.5)	(-8.1, -7.3)
XY coupling	~10%	
Mom. compaction factor	0.026	0.028
RF frequency	90.115 MHz	
Harmonic number	16	
RF voltage	46 kV	~80 kV
RF bucket height	0.74%	1.03%
Max. beam current	250 mA	>250 mA
Beam lifetime (200 mA)	~6 hr	>6 hr

パーチャを得ることができる。新オプティクスのダイナミックアパーチャを Fig. 5 に示す。

新しいラティスでは Touschek 効果がビーム寿命を決定

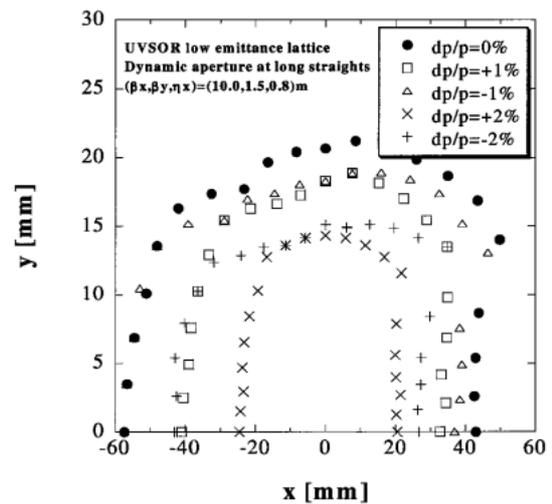


Figure 5. Dynamic aperture of new UVSOR lattice. Those for various momentum deviations between -2% and 2% are shown.

する最大の要因となる。これは UVSOR のような低エネルギーリングを低エミッタンス化した場合には避けられない問題である。これに対しては、まず既設の3倍高調波

RF 空洞⁸⁾を今後も積極的に活用しバンチ長を延ばすことで、Touschek 効果を緩和する。さらに、現在、主 RF 加速空洞に投入できる電力を制限している入力カップラー部を改良し加速電圧を高くすることで RF bucket height を高める。これらにより現在と同等の寿命を実現できる見込みである。

4. 光源性能の向上

低エミッタンス化により放射光輝度は大幅に改善される。既設アンジュレータや偏向電磁石からの放射光輝度の向上の様子を Fig. 6 に示してある。概ね一桁高くなるのがわかる。これに加えて、新オプティクスでは全ての直線部で垂直方向のベータatron関数を 1 m 程度と小さくしてあり、磁極間隙の狭い短周期の真空封止型アンジュレータを導入することが可能となる。磁極間隙は、ビーム寿命に影響を与えることなく、最小で 10 mm まで挟めることができる。短周期アンジュレータを導入することにより、これまで UVSOR では発生することの出来なかった 100 eV 超の領域でアンジュレータ光（基本波）を発生することが可能となる。近年、レーザー光の短波長化が進んでいるので、レーザーでは当分不可能なこのようなエネルギー領域でも UVSOR の特長を出していく必要があると考えている。周期長 32 mm のアンジュレータを導入した場合のスペクトルを Fig. 6 に合わせて示してある。

挿入光源系の高度化に関してはまず既存挿入光源の更新から始める。先にも述べたが真空封止型短周期アンジュレータを 1 台新たに製作し BL7A 超伝導ウィングラを撤去した跡地に導入する。新アンジュレータは、導入当初は、真空封止型アンジュレータの性能評価、ビームへの影響評価を行うために使用し、その後、達成された実性能に適した利用実験に供される。このアンジュレータは SPring-8 挿入光源グループの協力を得て、既に製作が開始されてい

る。アンジュレータ磁極部は Fig. 7 に示すとおりである。周期長は 36 mm、周期数 26 と、現在のオプティクス下での実用性も考慮して Fig. 6 に示した例よりも若干周期長を長く取ってある。期待できる放射光スペクトルを Fig. 8 に示す。1 次光で 100 eV 近傍、3 次光で 300 eV 近傍の放射光が発生できる。

上記、真空封止型アンジュレータの経験の上にならって、次のステップとして約 2 m 長のアンジュレータ 1 台を製作し、現在 BL3A に設置されている直線偏光アンジュレータと交換する。先にも述べたが、このアンジュレータは駆動系、制御系に問題を抱えており、更新が急がれてい

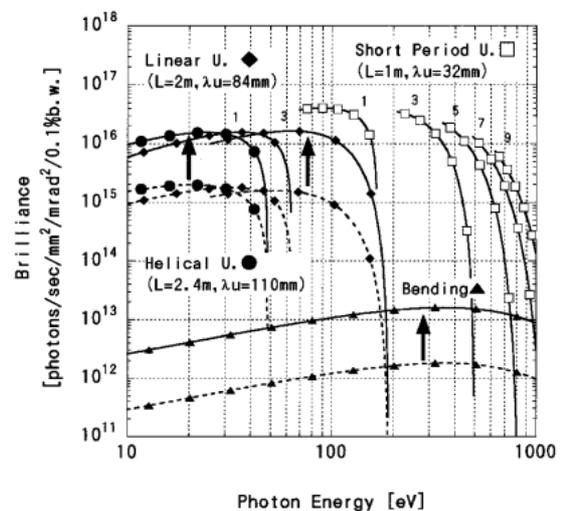


Figure 6. SR Brilliance of upgraded UVSOR. Those from the existing linear undulator at BL3A (\blacklozenge), the existing helical undulator at BL5A (\bullet), bending magnet (\blacktriangle), future short period undulator (\square) of period length 32 mm and minimum magnetic gap 10 mm. Increases of the brilliance of the existing sources are indicated by arrows.

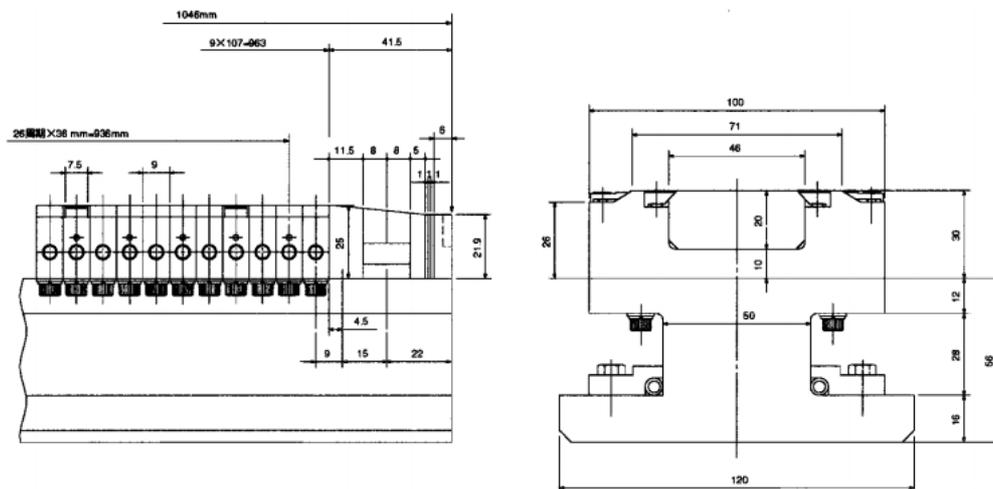


Figure 7. Magnetic poles for in-vacuum undulator at BL7A (under construction). Period length is 36 mm and the number of periods is 26.

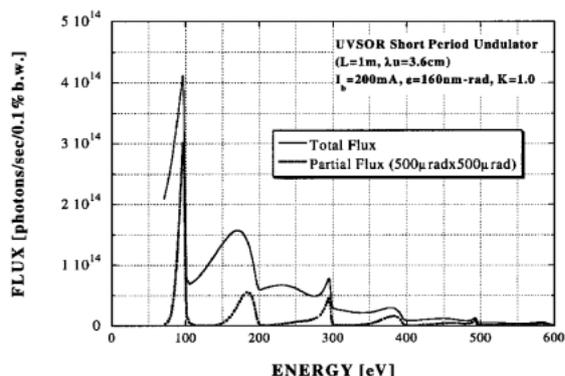


Figure 8. Synchrotron radiation spectra from in-vacuum undulator at BL7A (under construction). The case of $K=1$ is shown. The first and third harmonics will cover the energy ranges around 100 eV and 300 eV.

るものである。光源リング改造により新たに設けられる短直線部については、利用側と協議しながら分光器に適合した挿入光源を設計し順次導入していくことになる。

5. おわりに

UVSOR 高度化計画は、老朽化の進みつつある既存の光源加速器を、安価に且つ効果的に高性能化しようとするものである。高輝度とビーム寿命の両立する適度な低エミッタンス化を実現し、また、増設した短直線部に短尺短周期のアンジュレータを導入し効率的に VUV 軟 X 線領域の高輝度ビームを生成する。また、新たに製造する加速器要素は、将来、光源加速器を全面的に更新する場合にできる限り転用可能なものとするなどの合理化を考えている。

高度化計画の年次スケジュールは、施設のマンパワーを考慮し、また、利用実験への影響を抑えるという観点から (1)入射器系更新, (2)挿入光源更新, (3)リング短直線部 (分散部) 改造, (4)リング長直線部改造と 4 段階 4 年計画で実施することを考えている。停止期間は年間 2-3 ヶ月以内に抑える計画である。現在予算要求中であるが、出来るだけ近い将来に計画がスタートできることを願っている。

2001年7月現在での計画の準備状況は、以下のとおりである。ラティスの設計は完了し、各加速器要素の検討を進めている。新収束電磁石についてはテスト機の製作が完了し、現在性能評価を行っているところである。電磁石とその主要なパラメタを Fig. 9 と Table 3 に示す。真空系については KEK-PF の真空グループの協力を得て詳細設計を進めている。先に述べたように真空封止型アンジュレータの 1 号機は、SPring-8 挿入光源グループの協力を得て、既に製作を開始した。光源リングの改造に先行することになるが、2002年春に超伝導ウィングラを撤去しその跡地に据え付ける予定である。リング本体の改造に向けた準備作業の一環として、2001年春の停止期間中に、電磁石の精密測量を実施した。これは建設期以降では初めてのようになるものである。結果は、リング全体の傾きや膨張を除く

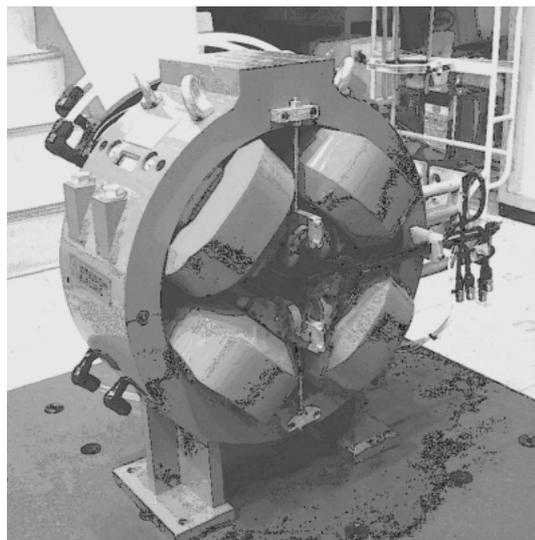


Figure 9. Prototype of the focusing magnet (quadrupole/sextupole combined function).

Table 3. Main parameters of new focusing magnets

Number of magnets	32
Core length	0.2 m
Bore diameter	94 mm
Max. quad. field	15 T/m
Max. sext. field	35 T/m ²

と、近接する電磁石間の位置のずれは概ね200-300ミクロン程度であり、建設後の17年間という年月を考えると予想外に小さいものであった。リング改造時には電磁石の精密据付をやり直すことになるが、このときの移動量が大きいとビームラインへも少なからず影響を与えることになる。今回の結果によりこれがそれほど深刻なものにはならないことがわかった。

これまで光源側の検討・準備作業が先行してきたが、高度化された光源の利用、ビームラインのスクラップアンドビルトについての議論も、観測系スタッフが中心となり、着々と進められている。本高度化計画の早期の実現を UVSOR 利用者とともに願っているところである。

謝辞

UVSOR 高度化計画の立案、準備作業には小杉信博施設長以下、UVSOR 職員全員があたっている。本計画に関して、分子科学研究所茅幸二所長には予算面など様々な形で支援を頂いている。この場を借りて御礼申し上げる。BL7A 用真空封止型アンジュレータの設計開発は、平成12年度分子科学研究所共同研究として、理化学研究所 (SPring-8) 北村英男、原徹、田中隆次の各氏の協力を得て行われているものである。ビーム位置検出システムの開発は、平成12年度分子科学研究所共同研究として、高工

エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所本田融氏の協力を得て行われたものである。高度化計画における真空系の設計は、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所堀洋一郎氏（平成13年度分子科学研究所客員助教授）の協力を得て進められている。

参考文献

- 1) M. Katoh et al.: J. Synchrotron Rad. **5**, 366 (1998).
- 2) R. Hettel and S. Brennan: Synchrotron Radiation News, **11**,

No. 1 (1998).

- 3) E. B. Blum et al.: Proc. of 1999 PAC (New York, 1999), 2304.
- 4) A. Nadji: Proc. of EPAC 2000 (Vienna, 2000), 1057.
- 5) 例えば M. Kamada et al.: J. Synchrotron Rad. **5**, 1166 (1998).
- 6) S. Kimura et al.: J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena. **80**, 437 (1996).
- 7) M. Katoh et al.: Nucl. Instr. and Meth. A Vol. **467-8**, 68 (2001).
- 8) K. Tamura et al.: Jpn. J. Appl. Phys. **Vol. 33**, L59 (1994).