

## 30周年を迎えた UVSOR 施設の現状と展望

加藤政博

自然科学研究機構 分子科学研究所 極端紫外光研究施設 〒444-8585 岡崎市明大寺町字西郷中38

### 要旨

分子科学研究所 UVSOR は2013年にファーストライトから30周年を迎え、12月には祝賀行事を行った。本報告では、光源加速器やビームライン装置の高度化の歴史を中心に、UVSOR の30年間を概観する。また、UVSOR の現在の姿について述べ、施設がこれからの目指す方向を展望する。

### 1. はじめに

分子科学研究所極端紫外光研究施設は、1983年11月10日のファーストライトから数えて30周年を迎えた。2013年12月6日には自然科学研究機構岡崎コンファレンスセンターにおいて30周年記念祝賀会を開催したところである。まずはその様子から報告させていただきたい。

祝賀会に先立って実施された施設の見学会では、企業関係者などを中心とする一般の見学者と後述する特別講演者など招待者をお迎えし、職員が引率して、ストレージング室を見学していただいた。いくつかのビームラインでは若手研究者による研究内容の説明も行われた (Fig. 1)。

祝賀会では、まず、大峯巖分子科学研究所長より挨拶があり、UVSOR が分子研の基盤研究施設であること、長年にわたる改良の結果不均一で刻々と時間変化する自然現象のありのままの姿を見ることのできる装置に成長しつつあることなどが紹介され、文部科学省を始めとする関係部局のこれまでの支援への感謝が述べられた。引き続き来賓として、安藤慶明文部科学省研究振興局基礎研究振興課長が挨拶され、大学共同利用機関としての分子科学研究所とその中核施設である UVSOR がこれまで果たした役割への評価と今後への期待が述べられた。その後、UVSOR 施設長の加藤政博より、施設のこれまでの歩み、特にこの10年間、施設で取り組んできた光源加速器や測定装置の高度化について報告がなされた。放射光としては低エネルギーの極端紫外線からテラヘルツ波の領域で高い輝度の光を利用できる世界的にもユニークな施設に成長してきたことが説明された。続いて、小杉信博研究総主幹より、UVSOR 施設を用いた分子科学研究の推進について報告があり、低エネルギー・高輝度の UVSOR の特性を分子科学分野へ活用することで、分子集合体の構造や物性を支配する弱い分子間相互作用が観察できるようになってきたことなどが紹介され、他の大型放射光施設や大学の施設などと異なる分子科学研究所ならではの特長のある運営を行っていることが報告された。

特別講演では3名の放射光科学分野で著名な先生方にご講演をいただいた。まず、村上洋一高エネルギー加速器研究機構放射光研究施設長・日本放射光学会会長には、我が国における放射光科学を展望するご講演をいただいた。次に、スタンフォード大学・レント大学のインゴルフ・リンドウ名誉教授に世界の放射光科学を展望するご講演をいただいた。最後に、石川哲也理化学研究所放射光科学総合研究センター長による X 線自由電子レーザーの現状と今後を概観するご講演をいただいた。

講演会の後行われた祝賀会では、所長の改めでの挨拶、山田和芳高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所長のご祝辞に引き続き、茅幸二先生の御発声により30周



Fig. 1 (Color online) Facility Tour in the 30th Anniversary Ceremony.



Fig. 2 (Color online) Congratulations by Koji Kaya sensei (upper) and Makoto Watanabe sensei (lower).

年を記念して乾杯が行われた。乾杯に先立ち、茅先生が所長ご在職当時のUVSORの予算獲得に関する思い出話を拝聴することができた (Fig. 2)。その後、竹田美和あいちシンクロトロン光研究センター長によるご祝辞、また、UVSOR 建設に中心的な役割を果たされた渡邊誠東北大学名誉教授によるご祝辞を頂戴した。渡邊先生からは、先進的な研究だけではなく、共用の研究基盤施設として極端紫外光による汎用性の高い分析装置の整備も重要であるとのこと助言をいただいた (Fig. 2)。

上述の通り30周年記念行事は、ご来賓の方々、所内外の関係者の皆様、施設の利用者の皆様など、170名のご参加を得て、上記の通り盛大に執り行うことができた。また、施設では、30周年記念冊子の発行も行った。関係各位に原稿をお願いし、施設職員が共同利用の業務の合間に編集を行った。十分な準備期間は無く大変な作業であったが、30年間の施設や利用研究の歩みを振り返る良い機会となった。

記念行事のご紹介が少し長くなってしまったが、以下、本報告では、まず UVSOR 施設の30年を主に装置の高度化を中心に振り返り、次に現状について述べ、最後に今後を展望する。

## 2. UVSOR の30年

1983年のファーストライトから2002年から2003年にかけて行われた光源加速器の大幅な改造までを第一期

(UVSOR-I) と呼ぶことにしたい。UVSORは Photon Factory とほぼ同時期に建設された第2世代の放射光源である。周長は53 m, 電子エネルギーは当初600 MeVであったが稼働後まもなく750 MeVとなった。規模や性能は、BESSY-I (独) や NSLS-VUV (米) などとよく似ている。硬 X 線は発生できず、施設の名称通り極端紫外光の発生を得意とする光源である。電子蓄積リングはいわゆる Double Bend Achromat セル (1つのセルが2台の偏向電磁石からなり、挿入光源などを設置する直線部側のエネルギー分散をゼロ (achromat) とする電磁石配置) を基本構造として、4つのセルでリング1周が構成されている。約3 mの直線部4本を有し、当初から挿入光源の設置を想定した設計となっていた。当時のこの規模の光源リングでは、建設経費低減のため、マイクロtronなど比較的低エネルギーの入射器で入射し、蓄積後に運転エネルギーまで加速を行う方式が一般的であったが、UVSORは当初からフルエネルギーの専用入射器を備えていた。

施設の主要部は地下に建設されている。住宅地に囲まれた分子科学研究所の立地を考慮し、放射線の遮蔽や景観に配慮してこのようにしたと想像される。蓄積リングの上にはテニスコートが設けられており、その地下で大型装置が稼働しているというのはなかなか想像が難しいことから、一般公開の際に訪れた市民の皆さんに驚かされている。

1980年代前半に、当時の高エネルギー物理学研究所 (現高エネルギー加速器研究機構)、東京大学原子核研究所その他の協力を得ながら、建設や立上が進められた様子は、春日俊夫先生が本誌に詳しい報告を書かれている<sup>1)</sup>。デザインレポートは、蓄積リングが青い表紙、入射器が赤い表紙の冊子に丁寧にまとめられており、現在でも禁帯出の重要資料となっている。装置設計は、1年先行して建設が進んだ Photon Factory よりも、むしろ、エネルギー的に近い東京大学物性研究所の SOR リングを参考にした様子がうかがえる。建設中の UVSOR 蓄積リングの様子とファーストライトの画像を Fig. 3 と 4 に示す。

上述したように、当初は電子エネルギー600 MeVで運転されていたが、稼働後まもなく、入射エネルギーは600 MeVのまま、蓄積エネルギーを750 MeVへと上げた。ビームエミッタンスは、ビームオプティクスの変更もあり一定ではなかったが、130 nm から160 nm 程度と、第2世代光源としては標準的な数字であり、現在の高輝度光源に比べると一桁以上大きな値であった。稼働初期から、直線部には超伝導ウィングラやアンジュレータなどの挿入光源が設置されていた。幅広い放射光利用の需要に応えるために、多数のビームラインの建設が進められた。8台の偏向電磁石を備え、1台の偏向電磁石から2本の放射光取り出しが可能となるようにポートが備えられていたが、さらに下流で分岐を設けるなどして、最も多い時期には21本ものビームラインが稼働していた (Fig. 5)。

この第一期は、しっかりと設計に基づきハードウエ



Fig. 3 UVSOR storage ring under construction.

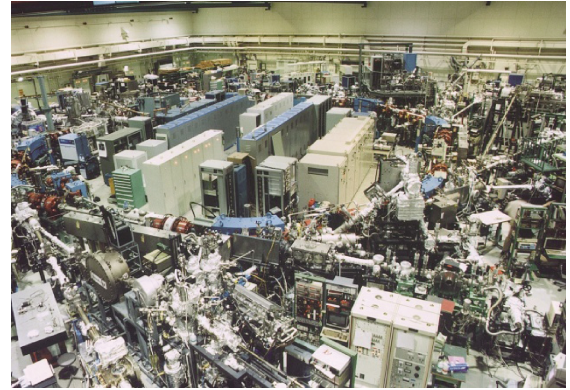


Fig. 5 (Color online) UVSOR in 1990's.

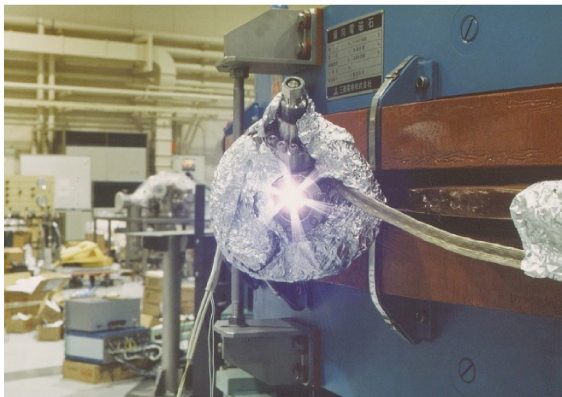


Fig. 4 (Color online) The first light of UVSOR (lower) and its memorial plate by Saburo Nagakura sensei (upper).



Fig. 6 (Color online) A part of UVSOR Storage ring in 2000's.

アを整備し、目標性能を実現し、幅広い分野の需要に応えた時代、と振り返ることができる。ビームライン数に比例するように、共同利用件数や出版論文数は1990年代中頃にひとつのピークを迎えている。赤外放射光の供用<sup>2)</sup>やレーザーと放射光の同期実験<sup>3)</sup>など、国内は言うまでもなく、世界にも先駆けた新しい試みの数々が行われたことも特筆すべきことである。光源技術でも、加速器の設計段階より共振器型自由電子レーザーの構築が想定されており、1980年代から実験に着手し、1990年代には、当時の最短発振波長を記録するなどの成果を上げた<sup>4)</sup>。

その一方で、国内外の情勢としては、1990年代に入り、国外では第3世代と呼ばれる高輝度光源の建設が相次ぎ、国内においても大型放射光施設 SPring-8 の建設が始まり、一方、広島大学・立命館大学など、大学が放射光施設を保有する動きも出てきた。また、同時期に建設された Photon Factory においても高度化改造が行われた<sup>5)</sup>。UVSOR 自身においてもハードウェアの老朽化の問題が顕在化してきた。これらの情勢を受けて、2000年代に入って光源加速器の全面更新を中心とする施設の高度化計画が策定された。

UVSOR の高度化計画第一段の骨子は、四極電磁石と六

極電磁石を複合機能型に置き換え省スペース化を図ると共に、その配置や強度を最適化し、低エミッタンス化と直線部創出を実現する、というものであった。ただし、偏向磁石の配置はそのまま、すなわちリングの形状は変わらず、既設ビームラインはそのまま使えるようにした。計画は、2002年度に予算化され、2002年から2003年にかけて光源加速器の大幅な改造が行われた。その詳細は参考文献に譲るが、光源性能としては、エミッタンスがそれまでの約1/5の27 nm-rad、また、直線部は、それまでの3 m直線部4本が、4 m直線部4本と1.4 m短直線部4本の合計8本へと増強された<sup>6)</sup>。この改造と前後して、超伝導ウィングラ1台と老朽化したアンジュレータ1台が撤去され、代わりに真空封止アンジュレータ2台が導入された。また、引き続き可変偏光型アンジュレータ1台が導入された。アンジュレータ光を利用する発光分光ビームライン BL3U や高分解能 ARPES ビームライン BL7U 等、光源の特長を活かしたビームラインが建設された。この改造により UVSOR は第2期 (UVSOR-II) に入った。2000年代中頃の蓄積リングの様子を Fig. 6 に示す。直線部にアンジュレータの設置が進んでいる様子がわかる。

2000年代に入り、世界的には新第3世代光源ともいえるべき経済性に優れた高輝度光源の建設が相次いだ。その多くでは複合機能型の偏向磁石を採用することで低エミッタンス化と省スペース化を図っていた。さらには、大型施設を中心に、いわゆるトップアップ運転が導入され、標準的な運転方式として定着するようになってきた。UVSORにおいても、これらの新しい技術動向を積極的に取り入れ更なる高度化を目指した。

トップアップ運転を導入するためには、まず、入射器であるブースターシンクロトロン加速器エネルギーを600 MeV から750 MeV に上げ、フルエネルギー入射を可能とする必要があった。建設資料を調べた結果、幸いにも、ブースターシンクロトロンやビーム輸送路の電磁石は750 MeV での運転が可能余裕を持った設計となっていた。電源のみを増強すればフルエネルギー化ができた。その他のパルスマグネットは、ハードウェアの変更なしでフルエネルギー入射が可能仕様であった。2006年に電源類の更新を行い、フルエネルギー入射を実現、2007年にはトップアップ運転の試行に成功した。加速器の増強と並行して、放射線遮蔽の増強 (Fig. 7) や安全インタロックシステムの改良を進め、2008年度から、ユーザータイムの一部をトップアップ運転で実施し、2009年度からは全てのユーザータイムをトップアップ運転を行っている。

UVSOR-II では4本の4 m 直線部を有していたが、そのうちの一本はビーム入射に使用されていた。4 m 直線部全てをアンジュレータ専用にするために、入射点を短い1.4 m 直線部に移動する改造が2009年に行われた。この結果、挿入光源設置可能な直線部は、4 m が4本、1.4 m が2本となった。新たに作り出された直線部には、量子ビーム基盤技術開発プログラムのもと、コヒーレント光源開発専用の可変偏光型の光クライストロンが設置された。

2010年度には、偏向磁石を複合機能型に交換することにより、エミッタンスを15 nm-rad まで改善し、6台目のアンジュレータとして磁石長約1 mの真空封止型アンジ

ュレータを設置、これを光源とする走査型軟X線透過顕微鏡ビームラインを建設する、という高度化計画が予算化された<sup>7)</sup>。2010年から2011年にかけて行われた改造の結果、1 GeV 以下の低エネルギー放射光リングとしては世界最高水準の高輝度・低エミッタンスを実現し、6台のアンジュレータが装着され、100%トップアップ運転される高輝度光源が実現された。これ以降をUVSORの第3期 (UVSOR-III) と呼んでいる。

### 3. UVSOR の現状

UVSOR-III と呼ぶようになった最近の電子蓄積リングと実験ホールの様子を Fig. 8 に示す。電子エネルギーは750 MeV、周長は53 mの小型リングであるが、設計値15 nm-radの低エミッタンスであり、マルチバンチ300 mAでのトップアップ運転が行われている。2014年1月現在、挿入光源設置可能な6本の直線部全てにアンジュレータが設置されている。このうち3本は短波長域に重心を置いた真空封止型、2本は長波長域に重心を置いた可変偏光型であり、また、残りの一本は可変偏光型の光クライストロンであり、コヒーレント放射光発生や自由電子

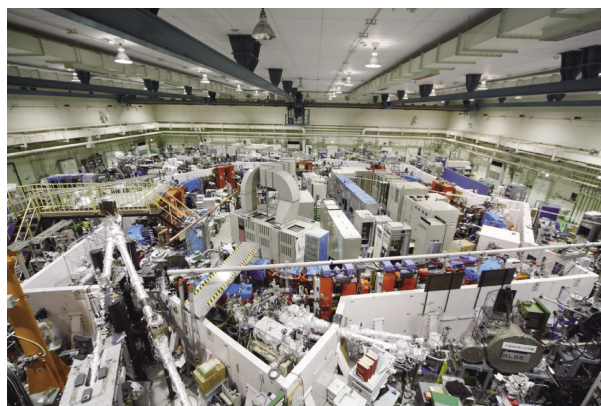


Fig. 8 (Color online) Latest view of UVSOR-III and beam-lines.



Fig. 7 (Color online) Reinforcement of the radiation shielding wall preparing for top-up injection.

レーザーに用いられている。UVSOR-IIIの加速器配置をFig. 9に示す。

ビームラインは、1990年代に最大21本まで増えたが、2000年代に入って後、スクラップアンドビルトを進め、競争力のあるビームラインに限られた資金とマンパワーを集中的に投入する方針を取ってきた。このためビームライン数は一時期よりも少なくなっているが、アンジュレータビームライン数は着実に増えてきた (Fig. 10)。低エネルギーと高輝度という光源の特長を活かしたエンドステーションの整備に努めている。最近では、高分解能角度分解光電子分光装置や国内では初めてとなる走査型軟X線透過顕微鏡装置が建設され稼働を始めている (Fig. 11)。現在のUVSORのビームラインの一覧をTable 1に示す。

UVSOR-IIIは例年約40週運転され、その中でユーザー運転週としては36週が確保されている。週間の運転パターンは、月曜日が光源技術開発・加速器調整のためのビームタイム(マシンスタディ)、火曜日から金曜日がユーザー運転である (Fig. 12)。週末は基本的に運転を停止するが、必要に応じて、マシンスタディや機器調整のために運転される。火曜日、水曜日は9時から21時までの12時

間運転で夜間は停止する。木曜日9時から金曜日21時にかけては36時間連続で終夜運転される。1週間当たりのユーザー運転は60時間であり、年間36週運転することから、ユーザー運転時間は2000時間を超える。光源加速器、すなわち電子ビームの安定性には24時間連続運転が望ましいが、施設のマンパワーの不足のため実現が困難である点に加え、試料を超高真空内に入れることから、夜間を試料交換と真空立ち上げに充てる、という低エネルギー放射光実験特有の事情もある。ユーザービームタイムに限った施設の稼働率は、正確な集計は取っていないが、ほぼ100%である。その理由は、故障発生時には夜間や週末、マシンスタディのためのビームタイムなどをユーザー運転に振り替えているためである。このようないくつかの事情もあり、現在のところ、24時間運転への移行の予定はない。

ユーザー数は、特に最近ではビームライン数・ビームタイムとも大きな増減がないこともあり、概ね年間1000名程度(延べ人数)で一定している。施設利用は年2回公募を行い、書類審査により採否を決定している。競争率の高い一部のビームラインに関しては施設外のレフェリーによる審査を行っている。施設利用は、分子科学研究所の共

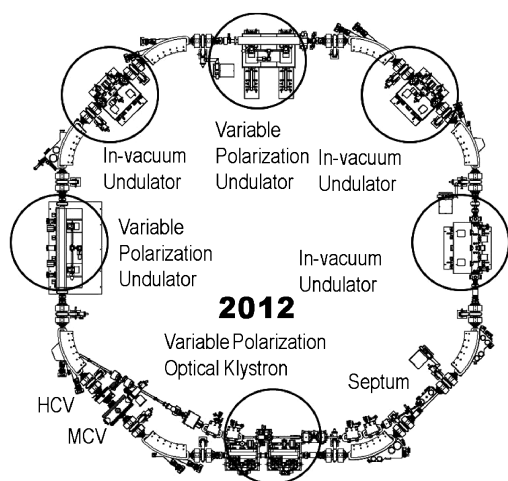


Fig. 9 Configurations of UVSOR-III. The undulators are circled.

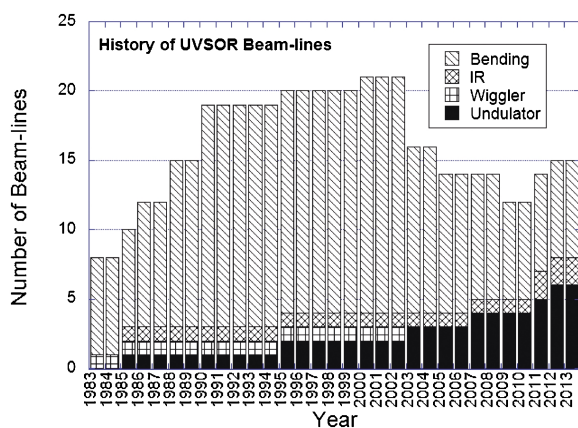


Fig. 10 (Color online) History of UVSOR Beam-lines.

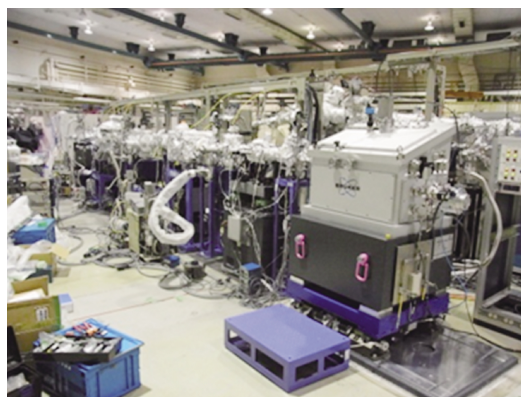


Fig. 11 (Color online) BL4U STXM Beam-lines under construction in 2012.

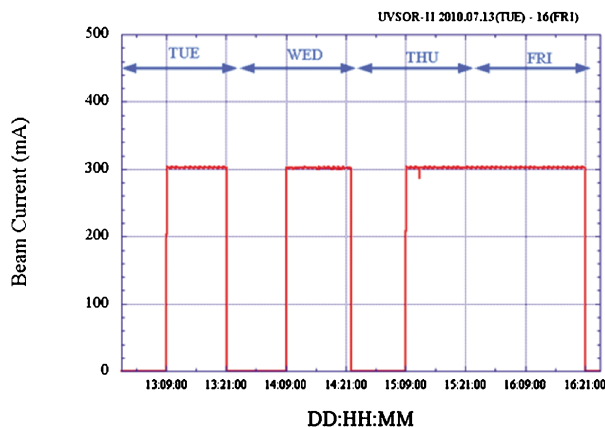


Fig. 12 (Color online) Typical Operation Pattern for users during a week.

Table 1 Beam lines in UVSOR-III

Beamline	Monochromator / Spectrometer	Energy Range	Targets	Techniques
BL1U	Free electron laser	1.6–13.9 eV		
BL1B	Martin-Puplett FT-FIR	0.5–30 meV	Solid	Reflection Absorption
BL2A	Double crystal	585 eV–4 keV	Solid	Reflection Absorption
BL2B	18-m spherical grating (Dragon)	24–205 eV	Gas	Photoionization Photodissociation
BL3U	Varied-line-spacing plane grating (Monk-Gillieson)	60–800 eV	Gas Liquid Solid	Absorption Photoemission Photon-emission
BL3B	2.5-m off-plane Eagle	1.7–30 eV	Solid	Reflection Absorption
BL4U	Varied-line-spacing plane grating (Monk-Gillieson)	130–700 eV	Gas Liquid Solid	Absorption (Microscopy)
BL4B	Varied-line-spacing plane grating (Monk-Gillieson)	25 eV–1 keV	Gas Solid	Photoionization Photodissociation Photoemission
BL5U	Spherical grating (SGM-TRAIN <sup>†</sup> )	5–250 eV	Solid	Photoemission
BL5B	Plane grating	6–600 eV	Solid	Calibration Absorption
BL6U	Variable-included-angle varied-line-spacing plane grating	30–500 eV	Gas Solid	Photoionization Photodissociation Photoemission
BL6B	Michelson FT-IR	3 meV–2.5 eV	Solid	Reflection Absorption
BL7U	10-m normal incidence (modified Wadsworth)	6–40 eV	Solid	Photoemission
BL7B	3-m normal incidence	1.2–25 eV	Solid	Reflection Absorption
BL8B	Plane grating	1.9–150 eV	Solid	Photoemission

同利用の枠組みの中で実施しており、現在のところ、大学や国公立機関などに所属する研究者のみを対象としている。基本的に旅費は支給されるが、自前の旅費で来所できる場合には協力をお願いしている。

共同利用に関する新しい動きとしては、分子科学研究所のナノテクノロジープラットホーム事業への参画がある。分子研内の多数の実験装置と並んで、2013年度より、軟X線顕微鏡ビームライン、X線磁気円二色性ビームラインの2本のビームラインが、ナノテクノロジープラットホーム事業を通して供用されるようになった。これを通して民間企業の利用が増えつつある。従来は、ビームタイムの空いている場合に限り随時で民間利用（成果非公開・有償）を受け入れてきたが、ナノテクプラットホームでは、ビームタイムの30%程度を上限として民間利用を受け入れる方針となっている。

施設の運営における当面の大きな問題は、マンパワーの欠如である。特に利用系では、複数のビームラインを掛け持ちで担当している職員も少なくない。国内の他の施設と

異なるUVSOR特有の事情としては、原則内部昇格禁止という分子研の人事の方針が適用される点がある。このため極めて流動性が高く、助教については5年程度、准教授も10年程度で転出する。その結果として、国内のほとんどの放射光施設、特に新しくできた施設では、数多くのUVSORの出身者が活躍している。流動性が高いことから、若手研究者がのびのび研究できる風土があり、世界に先駆けるような様々な新しい試みが行われてきた点は評価されてよいと思われる。しかし、その一方で長期的な展望の下での装置の運用を難しくしている面もある。このような状況の下、2013年度から、長期利用課題という新しいカテゴリーの共同利用を開始した。施設の高度化に結び付く技術開発を含む研究課題を採択し、ビームタイムの1/3程度を目途に優先的にビームタイムを配分している。現在2件が採択されている。大学などの共同利用者がビームラインの高度化に積極的に関与して下さることを期待している。

## 4. 展望

UVSOR-IIIは、エミッタンス、アンジュレータ数など、この規模の光源加速器としては極めて高い性能を備え、既知の技術による合理的な範囲での更なる高度化は難しいと考えている。施設が地下にあることで、拡張することも難しい。今後は、光源加速器の運転の安定性を更に高めつつ、アンジュレータやビームラインに新しい技術を導入し、競争力の維持を図っていくことになる。実際、UVSOR-IIIとなった後も、高度化は継続している。光電子分光ビームライン用光源且つ自由電子レーザー開発用として15年以上使用されてきたBL5U可変偏光型アンジュレータは、先に述べた光源開発専用の光クライストロンの導入によりその役割を終え、光電子分光に特化されたアンジュレータへと改造され、また、ビームライン側もスピ分解可能な光電子分光ビームラインへの改造が進められている。2014年度中の稼働を目指している。

以上のような、既存施設の高度化と並行して、新しい施設の建設を含む将来計画の策定を急いでいる。一つの可能性は、回折限界放射光リングの建設である。電子エネルギー1 GeV以下、エミッタンス1 nm-rad程度のリングを作れば真空紫外領域では回折限界となる。もう一つの可能性は、直線加速器を利用した高い繰り返しの自由電子レーザー装置である。技術的な問題に加え、国内他施設の動向など様々な観点から検討を始めたところである。

## 5. おわりに

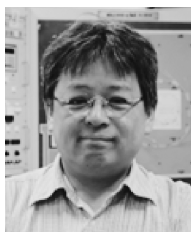
UVSORは2013年にファーストライトから30年目を迎え、低エネルギー高輝度放射光源として順調に稼働を続けていることを報告させていただいた。この30年間、UVSORを見守り支えてくださった文部科学省、自然科学研究機構、分子科学研究所他の関係者の皆様、また、施設

を利用し数多くの研究成果を世に送り出し続けてきた利用者の皆様に、心から感謝いたします。UVSORは、これからも、低エネルギーシンクロtron光利用の世界的拠点として、基礎学術・科学技術の進歩に貢献いたします。30周年を機に、UVSOR職員一同、新たな気持ちで皆様のご期待にお応えすべく努力してまいります。これからも引き続きUVSORへご支援を賜りますようお願い申し上げます。

### 参考文献

- 1) 春日俊夫：放射光 **9**, 344 (1996).
- 2) T. Mitani et al.: Rev. Sci. Instr. **60**, 1569 (1989).
- 3) T. Nanba et al.: Int. J. Infrared Millimeter Waves **7**, 759 (1986).
- 4) H. Hama et al.: Nucl. Instr. Meth. A **393**, 23 (1997).
- 5) 加藤政博, 堀洋一郎：放射光 **9**, 207 (1996).
- 6) 加藤政博：放射光 **17**, 10 (2004).
- 7) 加藤政博：放射光 **24**, 175 (2011).

### 著者紹介



#### 加藤政博

自然科学研究機構分子科学研究所極端紫外光研究施設・教授

E-mail: mkato@ims.ac.jp

専門：加速器、ビーム物理学

#### [略歴]

1986年東京大学大学院理学系研究科物理学専門課程中退、理学博士。高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所助手、分子科学研究所助教授を経て、2004年より現職。2014年4月現在、分子科学研究所分子制御レーザー開発研究センター教授(併任)、総合研究大学院大学物理科学研究科教授(併任)、名古屋大学シンクロtron光研究センター客員教授、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所客員教授。

# The 30th year anniversary of UVSOR facility —Present status and future prospects

Masahiro KATOH

**Abstract** The 30th anniversary of UVSOR was celebrated on 6th Dec., 2013. In this report, the history of the facility was overviewed focusing on the upgrades of the accelerators and beam-lines. Then, the present status of the facility is described. Finally, the future prospects of the facility is briefly mentioned.