

8-1 極端紫外光研究施設 (UVSOR)

UVSOR は、1983 年完成後、エネルギー 750 MeV、エミッタンス 160 nm-rad の電子蓄積リングにアンジュレータ 2 台と超電導ウィグラを設置した典型的な第 2 世代の低エネルギーシンクロトロン光源であったが、2003 年の大改造以降の一連の改造により低エネルギーリングとして極端紫外光領域に最適化された第 3 世代光源 UVSOR-II へと生まれ変わった。エミッタンスは 27 nm-rad で定常的に運転されており、これは 1 GeV 以下の光源（建設/立ち上げ調整中のものを除く）では世界最高性能である。UVSOR-II の運転時間は建設時の放射線申請により 1 日 12 時間に制限されてきたが、2006 年夏に変更申請を行い、1 日 24 時間の運転が可能となった。これによって、通常の 1 日 12 時間の共同利用に加えて将来に向けての R&D の時間を夜間等に確保できるようになった。

また、UVSOR-II 計画を実現させるための前準備として、22 本あったビームラインの評価を実施し、UVSOR-II 計画が実現したときにその光源性能を生かせるビームラインの強化策/改造策を打ち出す一方、光源性能を生かせないような老朽化したビームラインや他施設に比較して光源性能に優れないエネルギー領域まで拡大したビームラインを順次、廃止していった。現在、13 本まで絞り込んだが、2007 年度の研究成果は、22 本あった時代の研究成果をすでに量・質ともに越えるようになった。現在の UVSOR-II におけるビームライン再構築の大方針は、8 カ所ある偏向電磁石それぞれに明るいビームラインを 1 本ずつとし（光源の発散を複数のビームラインで分割して使うのではなく）、8 カ所ある直線部のうち、4 m の長直線部のすべてにアンジュレータを導入し、1.5 m の短直線部の 2 カ所にもアンジュレータを導入することである。現在、偏向磁石ラインは 10 本 9 本へ、直線ラインは 3 本 4 本へ移行中である。アンジュレータ 2 台は真空封止型であり、比較的短波長領域を、また、残り 2 台は可変偏光型であり、比較的長波長側をカバーする。これらのビームラインはすべて世界トップクラスであり、国際的な利用も始まっている。

8-1-1 UVSOR-II の高度化の現状と展望

今後 1 ~ 2 年の UVSOR-II 光源加速器の高度化としては、トップアップ運転の導入、軌道安定化、挿入光源の更なる増設の 3 つが柱になる。また、多様な利用モードを可能にする運転時間の見直しも必要である。将来的には、

現在、スウェーデンで立ち上げ調整中の小型リング MAX-III の光源性能を超える UVSOR-III のための改造も視野に入れる必要がある。以下に、それぞれについて簡単に説明する。

(1) トップアップ運転の実現に向けては、既に、ブースターシンクロトロンのフルエネルギー化（従来は最大エネルギーが 600 MeV であったが、電磁石電源の増強により 750 MeV まで向上）と放射線遮蔽壁の増強とを完了し、入射路のフルエネルギー化を 2007 年春から可能にした。2008 年春に、フルエネルギー入射調整、輸送効率の向上、インタロックシステムの整備などを行い、2008 年度後半にトップアップ運転の定常化を目指す（加速器施設としての放射線変更申請の許可が必須）。また、トップアップ運転と 24 時間運転を組み合わせれば、予算増加がない中、同じようなビームラインの数を増やさなくても当分は利用者の増加を凌げることになる。ビームラインの絞り込みは質の向上のための予算確保の方策として不可欠である。

(2) UVSOR-II では数時間で 100 ミクロンを超えるような軌道変動が観測されており、光源本来の高輝度特性を活かす妨げとなっているが、現在既にこの軌道変動の原因究明と軌道安定化システムの開発に目処がたったところである。水平方向の軌道安定化については既に部分的にフィードバックシステムを導入しており、今後、水平垂直両方向の安定化システムを導入する。

(3) UVSOR-II 光源加速器の設計はアンジュレータ利用に最適化されたものとなっており、光源本来の特徴を活かすためにも、アンジュレータ及びビームラインの早期の整備が望まれる。どのようなアンジュレータを整備するか、利

用側と協議しながら検討を進めていく。現在、BL6Uを建設中であり、そのあとはBL4Uがターゲットになる。さらに、入射点の移動など機器の再配置を行うことで、現在入射に使用している4mの長直線部(最後の1カ所)を挿入光源用として、長尺のBL1Uを具体化する方向での議論を行っている。当面、外部資金獲得を目指す、うまく獲得できなかったときには、長期リースなどを利用することで、現予算から捻出することも考える。

(4) 光源性能そのものではないが、運転時間についても、拡大の余地が出てきている。UVSOR-IIの運転時間は現在、1日24時間が可能となった。マンパワーの問題でユーザー運転の延長を直ちに行える状況にはないが、シングルバンチ運転、自由電子レーザー利用など、ユーザーの限られる特殊な運転モードを夜間を実施することを試験的に開始している。柔軟な運転モードの切り替えは小型施設の特徴を活かせるものであり、従来にないシンクロトロン光の新しい利用形態が開拓できるのではないかと、模索しているところである。

(5) 更に長期的な展望としては、UVSOR-III計画と名付けることのできる光源リングの更なる高度化改造の可能性がある。予備的な検討により偏向電磁石を複合機能型とすることで、現在のエミッタンス27 nm-radを更に15 nm-rad程度まで改善できることが既にわかっているので、長直線部4カ所すべてに高性能なアンジュレータを導入することと併せて、検討を進めていく。

8-1-2 UVSOR 自由電子レーザーの現状と展望

UVSORにおける自由電子レーザー開発は、加速器の設計段階から光共振器の建設を想定しているなど、施設の看板ともいえるものである。実際90年代には、円偏光型光クライストロンの導入により当時の発振短波長世界記録を樹立するなど、FEL研究で華々しい成果を挙げた。しかし、その後は、Duke大学や産総研などにおけるFEL専用リングの稼働、第3世代リングElettraにおけるFEL実験の開始などにより、開発研究面での競争力が低下し、一方、発振波長域は紫外から可視光に限られていることから、通常レーザーとの競合もあり、利用研究はほとんど進まなかった。

しかし、2000年代になり光源加速器がUVSOR-IIへと改造されたことで、再び世界的な競争力を取り戻した。低エミッタンス化と高周波加速系の増強によるピーク電流値の向上で、波長200–250 nmの深紫外の領域で大強度の発振が可能となった。また、従来FEL実験は電子エネルギー600 MeVで行っていたが、750 MeVでも発振できるようになり、その結果、ビーム寿命が長くなり発振継続時間が長くなると同時に平均出力も向上、波長によっては1 Wを超えるまでになり、蓄積リングFELとしては出力で世界最強となった。深紫外領域で波長連続可変、高出力という特徴は、通常レーザーと比べても一定の競争力があり、利用の申し込みも徐々に増えてきている。今後は、利用に向けた研究開発・装置の整備が重要となってくる。

FEL性能そのものに関する今後の展望としては、光クライストロンの更新による更なる短波長化、大強度化が考えられる。BL1U計画を進める際に、3 m強の光クライストロンを導入することで、ElettraやDuke大学と同等の波長180 nm付近での発振も可能となる。更なる短波長化には、ミラーそのものの開発研究が必要となってくる。

8-1-3 外部レーザーを併用した新しい次世代光源開発

2005年にUVSOR-IIの高周波加速と同期の取れるフェムト秒レーザー装置が導入された。これを利用した複数の新しい光発生法に関する研究がスタートしている。

レーザーバンチスライスとは90年代の後半に米国の研究チームにより提唱されたビーム技術であり、極短レーザーパルスと電子バンチをアンジュレータ中で相互作用させることで、電子バンチの一部に強いエネルギー変調が生成さ

れ、このパンチが蓄積リングを進行する際に変調を受けた部分が切り出される、というものである。切り出されたパンチの一部はレーザーパルス長と同程度の長さとなるために、その部分からの放射光を取り出すことでフェムト秒の放射光パルスを生成する、というのが当初のアイデアであった。しかし同時に、残りのパンチ上に形成されたディップ構造からテラヘルツ領域のコヒーレントシンクロトロン放射が生成されるため、現在はこれら2つの目的で研究が進められている。これまで、ALS、BESSY-IIが先行しており、UVSOR-IIでの実験は世界的には3例目ということになる。最近ではSLSでも開始されたとの情報があり、Soleilなどでも導入が検討されているようである。

他の施設ではパンチスライス実験のために加速器の一部を改造するなど大掛かりな準備が必要であったが、UVSOR-IIでは既存の自由電子レーザー用の装置群を流用することで加速器本体には全く手を加えることなく実験を開始することが出来た。また、電子エネルギーが低いために、必要なエネルギー変調を生成するためのレーザーパワーが比較的低くてよい。最初の実験で直ちに、大強度のコヒーレントテラヘルツ光の発生を確認でき、その後、分子研の国際共同研究を利用したリール工科大学（仏）との共同実験で入射レーザーパルス形状の制御により、波長可変準単色のテラヘルツ光の生成に成功するなど、世界的にもトップレベルの成果が挙がるようになってきた。テラヘルツ光の観測は既存の赤外ビームライン BL6B を用いて行っている。今後は利用法の開拓とそれに向けた光源開発を更に進めていく。

なお、テラヘルツ光の観測によりパンチスライスが起きていることは実証できているものの、フェムト秒放射光の直接観測はまだ行っていない。パンチスライス法は既存の放射光リングで、従来の放射光とは異なる時間構造、あるいは、ピーク強度の桁違いに強い光を比較的簡単に生成できる。これら各種の光の単独での利用に加えて、通常の放射光やFELを含めた、複数の性質の異なる光を同時に利用するタイプの利用方法を開発していくことが今後、新しい研究分野を切り開くことにつながる可能性がある。

8-1-4 新しい光源建設の可能性

新しい加速器の建設を伴う将来計画の検討では、これまで様々な可能性を幅広く検討してきた。現在、世界に於ける先端的な光源加速器施設は全く異なる性質を持つリング型と直線型を併設するのが標準になりつつある。通常のレーザー光源を組み合わせることで、さらなる発展も期待されている。UVSORはこれまでリング型を中心に新たな光源開発を組み込んで共同利用に供してきたが、今後はUVSORで培ってきた光源開発技術を直線型にも応用することで、世界に先駆けて新たな特性をもつ光源が分子科学に於いて最初に使えるようにする必要がある。

現在考えられる将来計画の主なものについて以下にまとめておく。

(1) リング型光源

UVSORの次期計画として、UVSOR-IIからUVSOR-IIIへの改造ではなくて、全く新しいリング型光源を建設する場合、考えられる方向性は以下の3つであると思われる。

- (a) 1GeV 級小型X線リング
- (b) 2-3GeV 級中規模第3世代リング
- (c) 1GeV 級超高輝度リング

このうち(a)は1GeV級の小型リングに超電導偏向電磁石を導入することで硬X線の発生可能な小型施設を建設するというものであるが、これについては現UVSORの後継機として岡崎の地で考える必要はなく、愛知県が名古屋大学等の県内大学の協力（UVSOR施設も部分的に協力）を得て実現を目指しているところである。高輝度ではないも

の UVSOR-II では出せない硬 X 線領域までカバーする施設が近隣にできることになり、UVSOR-II とは相補的な役割を果たす。また、UVSOR ではハード的な資源に限られ、大学等の学術研究に加えて、民間利用を受けるだけの余裕はないが、愛知県の施設では民間利用が中心になるので、UVSOR として愛知県の施設の場を使ってソフト面で民間利用への協力ができる可能性がある。

(b) の 2-3GeV 級中規模第 3 世代リングは、東大・東北大がかつて建設を目指していたような規模・性能の光源である。東大や東北大が断念したことを考えると現在の日本では予算規模や敷地の問題など実現は容易ではなく、UVSOR の後継機の可能性のひとつにするのはあまりに非現実的である。一方、このクラスの施設は現在、中国、台湾、韓国では既に建設されていたり、計画が認められたりしているため、今後は UVSOR の海外展開も視野に入れて考える必要がある。幸い、韓国からは光源開発への全面的協力など期待されているので、今後、連携を深めていく予定である。

(c) は 1GeV 級でエミッタンス 1 nm-rad もしくはそれ以下の超低エミッタンスリングを想定している。VUV 領域での回折限界光源の実現を目指す。既存の加速器技術を用いて実現できる可能性があるものである。また、共振器型自由電子レーザーや CHG など外部レーザーと組み合わせたコヒーレント光発生装置も併設できる可能性がある。UVSOR の後継機としては、これが最も適当であろう。

(2) 直線加速器を用いた自由電子レーザーの可能性

現在、世界に於ける先端的な光源加速器施設は全く異なる性質を持つリング型と直線型を併設するのが標準になりつつある。X 線自由電子レーザーのテスト機程度もしくはもう少しエネルギーの高いライナックを利用して、シード光を用いたシングルパス型自由電子レーザーを原理とする光源を UVSOR に併設する。X 線自由電子レーザーやリニアコライダーなどの建設を通じて確立される加速器技術と、現在 UVSOR-II で行っている CHG に関する基礎研究で得られた知見などをベースに実現する。VUV・軟 X 領域でのコヒーレント光、極短パルス光の発生を目指す。併設が不可能な場合には他機関の加速器装置を利用した光源開発や利用研究も想定しておくべきであろう。