

## 5-2 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、2000 年以降、特に 2003 年の大改造を中心とする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 ( 計画・建設中のものも含む ) では MAX-III ( スウェーデン ) に次ぐものである。また、挿入光源の増強も進み、現在は 4 台のアンジュレータが設置され稼動している。そのうち 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、国際的な利用が始まっている。さらに挿入光源設置可能な空間としては 1m 強の直線部 2 箇所が残されており、今後の検討を行う。

以下では、光源開発の現状と展望について、平成 19 年 2 月 14 日開催の第 49 回 UVSOR 施設運営委員会で議論したものをまとめておく。

### 5-2-1 UVSOR-II 光源加速器の高度化の現状と展望

今後 2 ~ 3 年の UVSOR-II 光源加速器の高度化としては、当面、 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、 MAX-III の性能を超える 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 )、放射線遮蔽壁の増強が完了し、入射路のフルエネルギー化を 2007 年春に実施する予定である。この後、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、できるだけ早期のトップアップ運転の実現を目指す。

(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。現在、軌道変動の原因究明と軌道安定化システムの開発を急いでいるところである。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 1 年以内に水平垂直両方向の安定化システムを導入することを目指している。

(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。

(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、一日 24 時間の運転が可能となった。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ないか、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。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わかっている。四極電磁石の削減に加え、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4 mの長直線部を挿入光源用に転用できる可能性が出てくる。

## 5-2-2 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専用リングの稼動、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。

利用の拡大に向けて当面課題となるのは、出力の安定化、実験装置へのレーザー光の安定な輸送法の確立、ミラー交換の高速化、などである。出力の安定化にはフィードバックシステムの導入を検討中である。レーザー光の輸送は、放射光ビームラインに既設の装置にFEL光を導入したいという希望が多く、場合によってはリングの反対側まで輸送する必要がある。従来のミラーを使った輸送法の改良に加えて光ファイバーを使った輸送の検討を開始している。光共振器には多層膜ミラーを使用しており、波長を大幅に変えるには超高真空中に設置されたミラーを交換する必要がある。交換すると真空立ち上げなどに数日間かかってしまう。超高真空中で複数枚の多層膜ミラーを設置し、随時交換できるようなシステムの検討を始めたところである。

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。UVSOR-IIとなつて長くなった直線部に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ものと思われる。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。

## 5-2-3 UVSOR-IIにおける外部レーザーを利用した新しい光発生法の開発

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。

### (1) レーザーバンチスライスによるフェムト秒パルス生成及びコヒーレント光発生

レーザーバンチスライスは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、このバ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。切り出されたバ

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きたいと考えている。

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。こちらについても今後観測装置を整備し実施したいと考えている。

パンチスライス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便に生成できる。これら各種の光の単独での利用に加えて、通常放射光も含めた、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重要であると認識している。このことは先に述べたFELについても同様である。

## (2) コヒーレント高調波発生

レーザーパンチスライスに用いているレーザー装置を用いて、Soleil(仏)のグループと共同でコヒーレント高調波発生(Coherent Harmonic Generation; CHG)の研究を開始している。CHGは、レーザーパルスと電子パンチをアンジュレータ中で相互作用させることで生じるエネルギー変調を利用することはパンチスライスと同じである。従って、レーザーパンチスライスとほぼ同じセットアップで実験できる。電子パンチがアンジュレータを進行する際にパンチ中にレーザー波長と同じ周期での密度変調が生じ、コヒーレントなシンクロトロン放射(アンジュレータ放射)をするが、密度変調には一般に高調波成分も含まれるために、コヒーレント放射も基本波だけでなく高調波も放出される。

CHGは、X線自由電子レーザーなどいわゆるSASEを基本原理とするコヒーレント光生成における原理的な不安定性を取り除く手段として期待されている。本研究では、直線加速器よりも安定性に優れる電子蓄積リングの電子ビームを利用し、効率的に技術・知見の蓄積を行おうとしている。

## 5-2-4 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手にはいるようにしていく必要がある。なお、

その先の光源加速器はリング型の特性と直線型の特性を併せ持つ ERL と呼ばれる光源になるのではないかとされており、プロトタイプの開発も一部では始まっているが、現在のリング型と直線型の性能を越えるものにするには、まだまだ解決しなければならない多くの困難があり、今後、最低でも 10 年くらいの開発期間が必要とされる。

以下、現在考えられる将来計画の様々な可能性についてまとめておく。

#### (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、これについては名古屋大学と愛知県が協力し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の UVSOR-II では出せない硬 X 線領域を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ものと期待される。そういう意味では現 UVSOR の後継機として岡崎の地で考える必要はないであろう。(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予算規模や敷地の問題など実現は容易ではないが、現 UVSOR の後継機の可能性のひとつとして想定しておくべきである。(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。以下で述べる ERL など比べて安定性に勝る光源が既存の加速器技術を用いて実現できる可能性がある。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。

#### (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 線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。

#### (3) エネルギー回収型ライナックを用いた新しい光源の可能性

エネルギー回収型ライナック (ERL) は現在 KEK-PF と原子力機構が中心となって X 線の発生に重点を置いた大型施設の建設を検討しているが、そこで確立された技術を元に、VUV・軟 X 線領域に最適化された比較的小型の施設を建設する。VUV・軟 X 線領域での回折限界光の発生、極短パルス光の発生に加えて、シングルパス自由電子レーザー、共振器型自由電子レーザーを組み合わせることが出来る可能性もある。ただし ERL 光源が実用になるのは 10 年を超える先の長い話なので現時点では他の検討のほうが重要である。