

5-1 極端紫外光実験施設の将来計画、特に高度化計画について

「分子研レポート 99」に報告したように概算要求の重点事項として極端紫外光実験施設(UVSOR)の高度化と組織再編を計画しているが、まだ、予算化に成功しておらず、来年度実現に向けて鋭意努力しているところである。組織再編については昨年報告した通り、UVSOR施設共同利用17年目に入り、利用研究分野の細分化・先鋭化に対応するための開発研究部制の導入及び長期的に加速器設備に責任を持つ体制作り(教授職要求)を計画している。また、高度化計画は競争的資金等ではカバーできないUVSOR施設の根幹部分の光源加速器に関わるものであり、現在、光源グループの加藤政博助教授を中心にして検討を進めている。なお、2年乃至4年かけて光源の高度化を実現した後は、高度化された光源の性能を十分に生かすための20力所にわたる分光器・実験装置(ビームライン)の高度化が控えているが、これらに関しては競争的資金等を順次、導入してできるところから進めていくつもりである。

以下に高度化について現在、検討している内容の詳細を報告する。

5-1-1 UVSOR高度化とは

UVSORは1984年の共同利用開始以来、我が国における主要な放射光施設のひとつとして順調に稼働を続けている。多数の利用者に安定に放射光を供給する一方で、自由電子レーザー研究など光源加速器技術の開発研究においても目覚ましい成果を挙げてきた。しかしながらUVSORの放射光源としての基本的な性能は建設以来変わっていない。UVSORは典型的な第2世代の放射光源であり、最新の第3世代光源に比べると、挿入光源数や放射光輝度といった点で大きく劣っている。また加速器装置の多くが製造後20年近くが経過しており、老朽化も深刻になりつつある。

UVSOR高度化計画は、

- (イ) 挿入光源設置可能な直線部の増設
- (ロ) 低エミッタンス化による放射光高輝度化
- (ハ) 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
- (ニ) 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年前後、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。

5-1-2 新ラティス

UVSOR高度化の中心となるのはラティス(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。ラティスの改造は図1に示すようなものになる。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短直線部に、新たに1.5mの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3mのフリースペースを4m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低エミッタンス化した場合のダイナミックアパーチャの最適化を行う。最終的に直線部

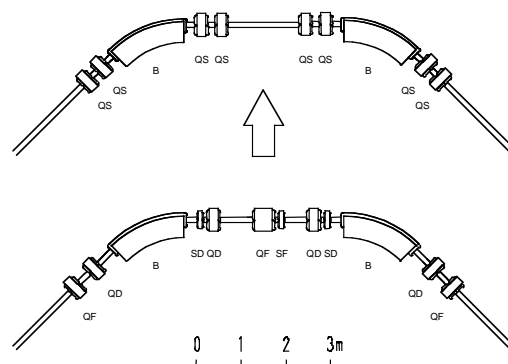


図1 UVSOR 高度化のためのラティス改造
(下:現在のラティス、上:新ラティスXリング1/4周)

数は、現在の3 m直線部4本から、4 m直線部4本、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残りの6本が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、既設ビームラインへの影響は基本的には無い。

ビーム光学は図2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まで小さくできる。新光学では、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。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程度と小さくしてあり、磁極間隙の小さい短周期アンジュレータの導入が可能となっている。

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4ファミリーの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パーチャを得ることができる。新光学のダイナミックアパーチャを図3に示す。

新しいラティスで最大の問題となるのはTouschek効果によるビーム寿命の短縮である。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空洞を利用しパ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ブ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(図4)。なお真空による寿命は、支配的とはならないと予想されるが、制動放射による放射線の問題などもあり、高度化改造には直線部の真空系の増強を含めている。

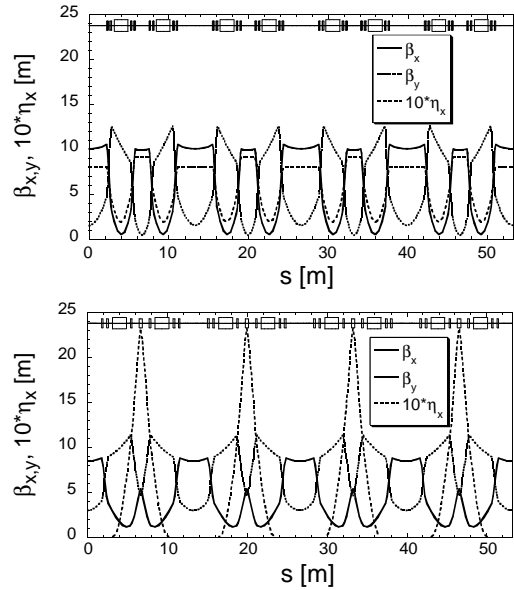


図2 UVSOR 高度化のための新ビーム光学 (上: 新光学、下: 現在の光学)

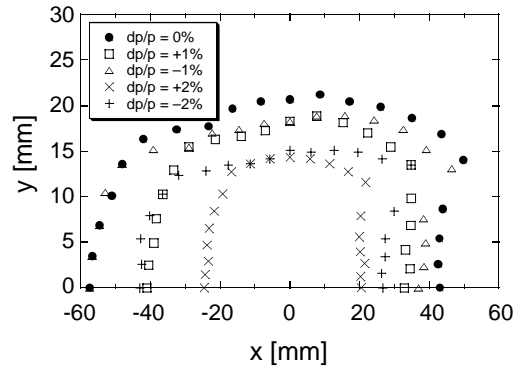


図3 UVSOR新ビーム光学のダイナミックアパーチャ (直線部中心)

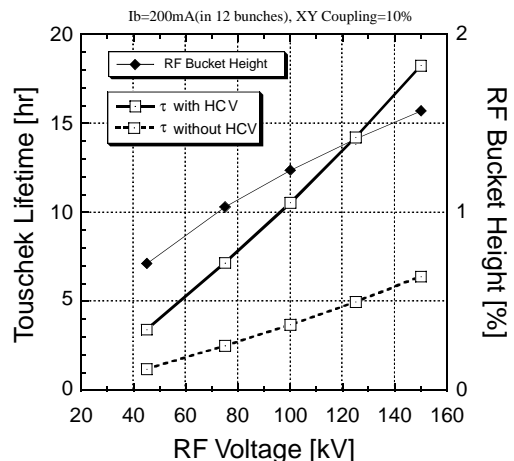


図4 Touschek 寿命
低エミッタンス化後のTouschek寿命がRF電圧の関数として示してある。3倍高調波RF空洞(HCV)の使用によるパンチ長伸長と、主RF空洞の改良により加速電圧を現状の45 kVから80 kV程度まで引き上げることで現状と同等のビーム寿命が実現できる。

表1 UVSOR光源リングの主要なパラメータ

	Present	Upgraded
Circumference	53.2 m	
Lattice Type	DBA	extended DBA
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. Comp. Fac.	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(200mA)	~6 hr	> 6 hr

5-1-3 光源性能

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の放射光輝度の向上の様子を図5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トロン関数を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まで狭めることができる。このような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UVSORの特長を出す必要がある。周期長32 mmのアンジュレータを導入した場合の例を図5に示してある。

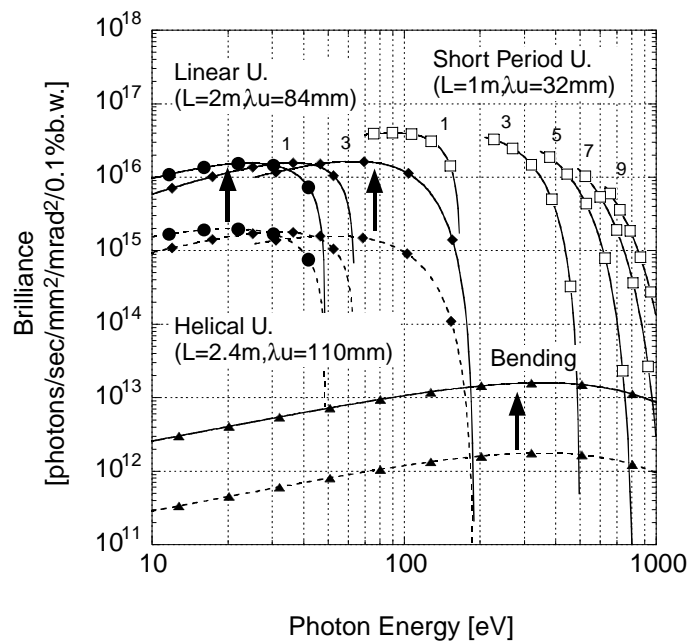


図5 高度化後の放射光スペクトル
既設直線偏光アンジュレータ (Linear U.、○) 既設円偏光アンジュレータ (Helical U.、●) 既設偏向電磁石 (Bending、▲) 将来の真空封止型アンジュレータの一例 (Short Period U.、□; 周期長 32 mm、最小磁極間隙 10 mm) が示してある。既設光源の高度化前後での輝度変化は矢印で示してある。

5-1-4 加速器改造

加速器改造は、直線部の電磁石系、真空系の改造が中心となる。高度化前後の加速器配置(案)を図6に示す。

周長を一定に保ったまま挿入光源のためのフリースペースを作り出すために、限られた空間に加速器要素を効率よく配置する必要がある。このために六極磁場は四極電磁石の磁極面に設けた補助コイルで発生する。新収束電磁石(四

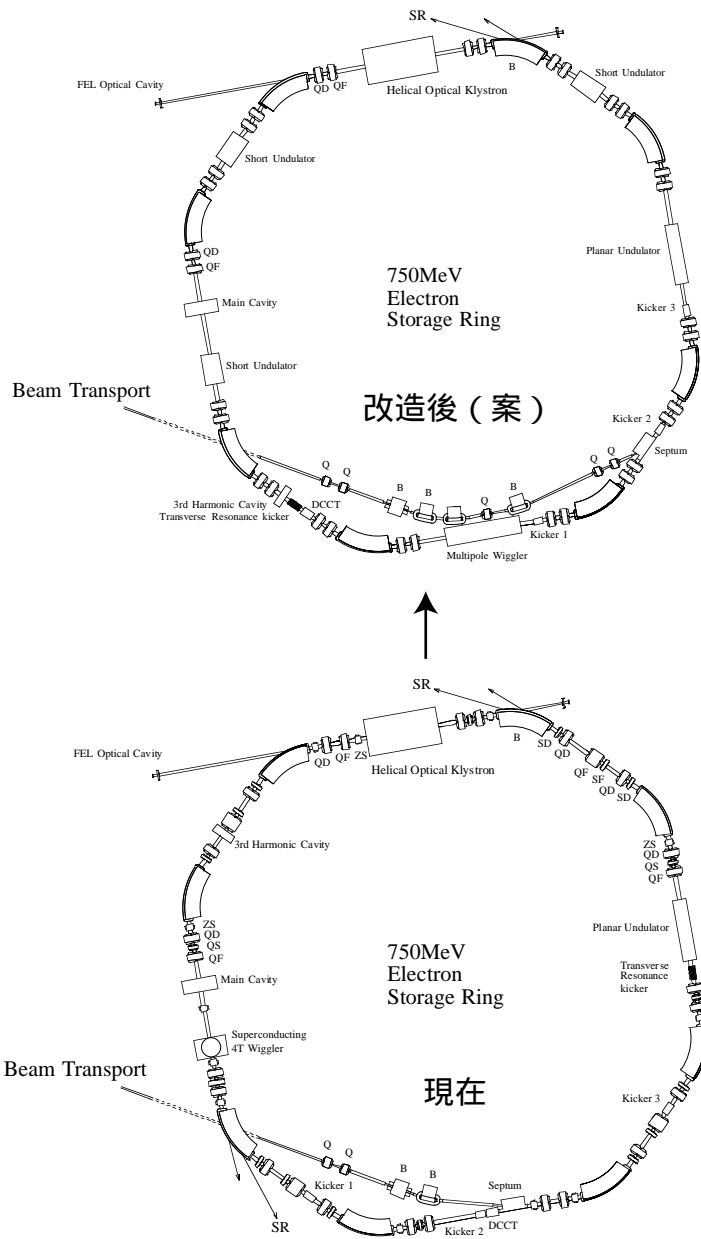


図6 高度化前後の加速器配置

(上：高度化改造後、下：現在)

高度化後の配置にはオプションの一つである入射点の変更も含めてある。また挿入光源の配置は案の一つであり、最終的には利用側と協議して決定する。

加速器改造のもう一つの重要項目は入射器の増強・更新である。入射器も光源リングと同じく製造後20年近くが経過しており、各部の老朽化が進行している。施設の安定な運転のためには入射器に関しても各部の更新による高性能化、信頼性向上を実現する必要がある。今回の高度化では特に前段入射器である線形加速器の主要部分の更新に重点をおく。入射効率の向上、信頼性の向上を実現することに加え、単バンチ入射のための短パルス発生が可能な仕様にする。現状の単バンチ運転では、多バンチで入射した後、不要な電子バンチを削り落とすことで単バンチ化しているが、直接単バンチで入射することで入射時間の短縮、蓄積電流値の一層の向上が実現できる。これは蓄積リング自由

極、六極組込み)の主要パラメータは表2に示すとおり。低エミッタンス化後のダイナミックアパーチャ最適化のために、4ファミリの収束電磁石全てに六極磁場を組み込む。直線部のビームダクトの断面形状は現在と同じく内径110 mm × 39 mmのレーストラック型とし、真空排気ポートを増設する。現在ビーム位置検出器の電極は偏向電磁石ダクトに取り付けられているが、電磁石に対する位置精度が悪い。このため各直線部の収束電磁石近傍に新たに2台ずつビーム位置検出器(BPM)を取り付ける。

表2 新収束電磁石の主要パラメータ

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

直線部以外の改造・増強項目では、光源リングの高周波加速空洞の増強が重要である。これは低エミッタンス化後のビーム寿命確保のために不可欠である。既設のRF空洞は本来75 kV程度の加速電圧を発生できるように設計されているが、現状は高周波入力部の冷却の問題で45 kV程度の加速電圧が限界になっている。空洞を改造することで定格の加速電圧を発生できるようにする。ちなみに既存の高周波源はこれに十分な能力を有している。現在、入力部の小改造と空洞本体も含めた全面更新の両方について検討を進めている。

電子レーザーなど単バンチを利用する光源開発にとっても重要である。入射器の増強は、電子銃部分などの部分更新と全面更新の両方について検討を進めている。

既存挿入光源の更新に関しては、まず真空封止型短周期アンジュレータを1台新たに製作し超伝導ウィングラと交換する。ちなみに超伝導ウィングラについてはこれまでの故障頻度の高さ、運転維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た。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を選定する予定である。このアンジュレータの製作は既に開始されている。周期長は36 mm 全長は約1 mで、現在のオプティクス化での実用性も考慮して図5に示した例よりも若干周期長を長く取っている。期待できる放射光スペクトルを図7に示す。

高度化計画スタート後は、上記、真空封止型アンジュレータの経験の上にならって、さらに約3 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。挿入光源ビームラインの整備についても高度化計画の一部として実施する。なお本高度化計画終了後、新たに設けられた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することになる。

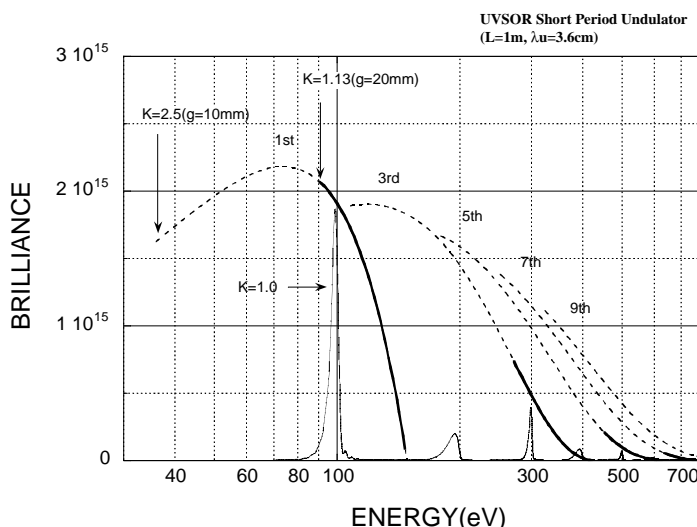


図7 短周期アンジュレータ（テスト機）の放射光スペクトル
周期長 36 m、全長 1 m。現在のオプティクス下での放射光輝度を示してある。高度化前は最小磁極間隔は20 mmが限度となり波長範囲は限定的となる（実線部分）が1次光で100 eV 付近がカバーできる。高度化改造後、短直線部中心に設置した場合には最小ギャップは10 mm程度まで可能となり、VUVの幅広い領域（実線部分+点線部分）がカバーできるようになる。

5-1-5 準備状況など

現在ラティスの設計は完了しており、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 prototype の製作を進めており、今年度中に磁場測定を行う予定である。真空系についてはKEK-PFの真空グループとの協力の下で詳細設計を進めている。真空封止型アンジュレータは、SPring-8挿入光源グループとの協力のもとで、既に製作を開始している。今年度は磁極部分などを製作し、残りは来年度製作する予定である。順調に行けば来年度末には超伝導ウィングラを撤去しその跡地に据え付けることができる。

リング本体の改造のための準備作業の一環として、今年度末の停止期間中に電磁石据付精度の精密測量を実施する。現在の電磁石据付はmm単位で誤差を生じているものと思われ、リング改造時には精密据付をやり直す必要がある。リングの再アライメントはビームラインにも影響するため、事前にどの程度の移動となるか見当をつけておく必要がある。

挿入光源の多数設置された低エミッタンスリングでは、電子ビーム軌道の安定性は、挿入光源の高輝度特性を引き出すために極めて重要である。これを実現するためには高速高精度のビーム位置検出システム（BPM）が不可欠である。既設のBPMシステムは老朽化が進んでいくことに加え、リング1周の軌道を測定するのに約1分を要するなど、能力的にも問題がある。現在システムの更新の準備をすすめており今年度末までに新システムを完成させ、来年度初めには試験運転を開始できる見込みである。