

11. 光源仕様

11-1 放射光加速器について

新センターは多彩な光源設備を提供するが、その中でも核となる大型設備が、省エネ型小型高輝度放射光源 UVSOR-IV である。UVSOR-IV 加速器の設計においては以下の 4 点を基本理念とする。

- (あ) SPring-8II、NanoTerasu を補完する真空紫外領域での回折限界光源の実現
- (い) 建設及び運転コストの低減による持続可能性の実現
- (う) 安定性と柔軟性の両立による多彩な利用の実現
- (え) 小型施設の俊敏性を活かした新技術開拓の場の実現

これらを実現するために必要な加速器の仕様を以下で考察する。

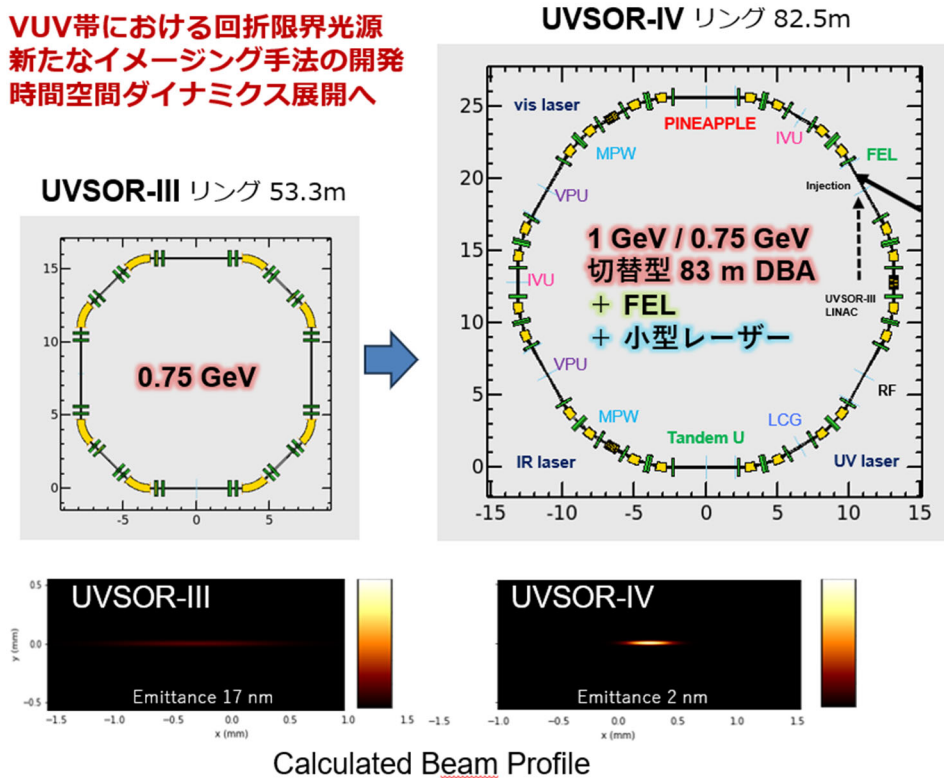


図 11-1: UVSOR-IV の概要と光源性能向上

小型放射光施設の設置目的

今日の放射光源における主力光源装置であるアンジュレータからの放射光の光子エネルギーは、アンジュレータのパラメータが同じであれば、電子エネルギーの二乗に比例する。過去約 30 年間、

我が国の放射光科学の最先端を支えてきた SPring-8、Photon Factory、UVSOR の 3 施設の電子エネルギーはそれぞれ 8GeV、2.5GeV、0.75GeV であり、約 3 倍の等間隔となっている。これにより得意とする光子エネルギー領域は約 10 倍の等間隔となり、それぞれ硬 X 線、軟 X 線、真空紫外線に適した光源となっている。この 3 施設体制により真空紫外線から硬 X 線までの広大な波長域を切れ目なくカバーしてきた。軟 X 線領域は Photon Factory がその任を担ってきたが、輝度の点で国際的競争力の低下が懸念事項であった。2024年度より稼働する NanoTerasu がこれをカバーすると期待されるが、学術利用の側面では Photon Factory の次期計画である PF-HLS がその責務を担っていくことになる。硬 X 線領域は近い将来 SPring-8 を SPring-8II に高度化することで世界最高水準

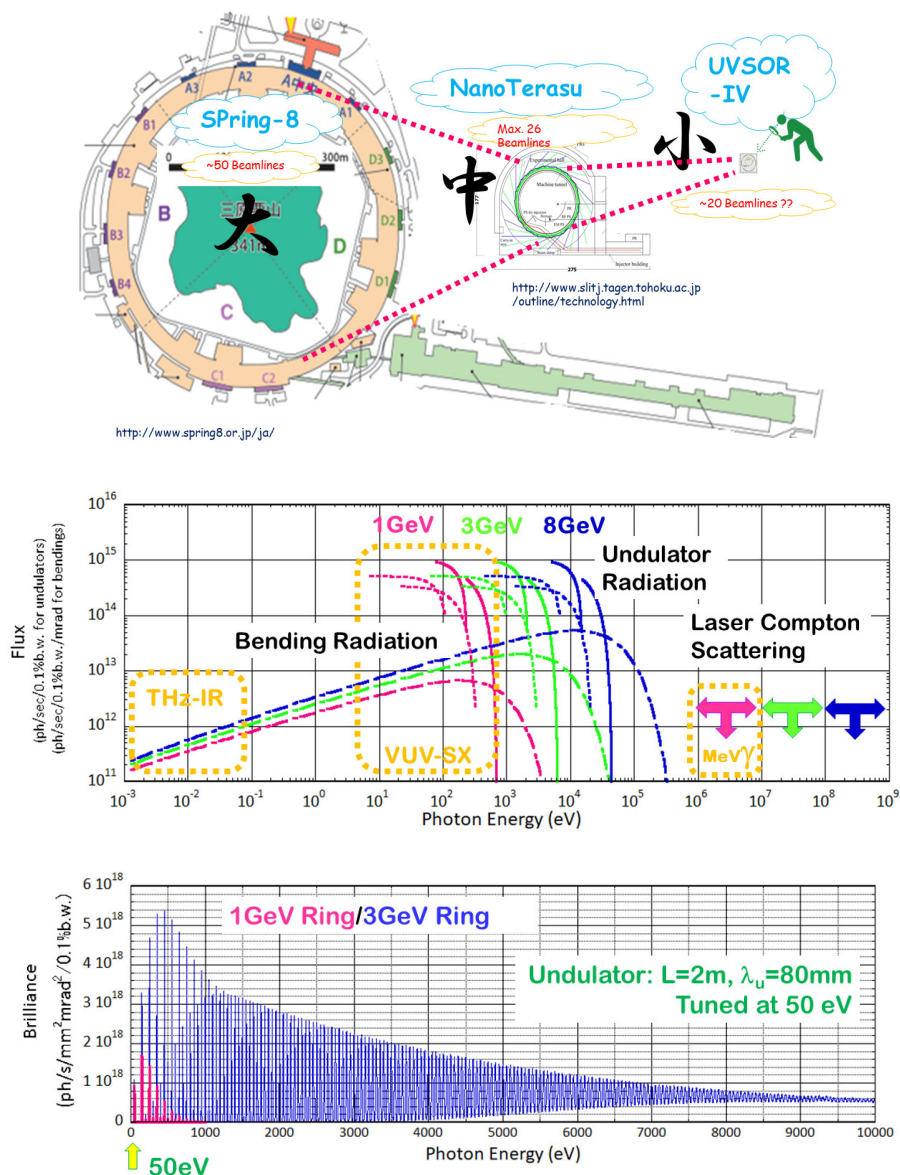


図 11-2: 高エネルギー大型リング、中エネルギー中型リング、低エネルギー小型リングの役割分担。上;施設の規模の比較、中;光子エネルギー領域の比較、下;高エネルギーリングと低エネルギーリングのアンジュレータ放射の違い

の光源性能を維持できる見通しである。残る真空紫外線領域では、UVSOR-III が世界的にも希少な高輝度低エネルギー光源として現在でも世界最高水準の性能を維持しているものの老朽化は確実に進行しており、回折限界までもう一段性能を高めた高輝度光源 UVSOR-IV を建設することで、今後 30 年間の日本の放射光科学の基盤を支える体制が完成する。

75 一般的に大は小を兼ねる、という考え方がある。放射光施設においても、確かに X 線を得意とする大型高エネルギー光源でも磁場が強く磁場周期長が長いアンジュレータを装着することで真空紫外線領域のアンジュレータ光を生成することは技術的に可能である。しかし、この場合、大量に発生する X 線の中にわずかに混じっている真空紫外線を、強力な熱流や放射線を防ぎつつ末端の実験装置へ輸送することになる。必然的にその構造は複雑・高価となり、利用目的に合わせた柔軟且つスピード感のあるビームラインの建設・運用も困難となる。大量に生成されている X 線を利用することなく捨て去ることの非経済性に止まらず、これを安全に捨て去るにも多大なコストがかかる点にも留意すべきである。これまでの我が国における硬 X 線(HX)、軟 X 線(SX)、真空紫外線(VUV)を電子ビームエネルギーの異なる 3 台の最先端光源加速器から供給する体制は技術的にも経済的にも極めて合理的が高く、世界に誇るべきものである。電子エネルギー 3GeV の NanoTerasu が順調に立ち上がりつつあることから、UVSOR-IV の電子エネルギーを 1GeV あるいはそれ以下とし、NanoTerasu、SPring-8II との 3 台体制により、真空紫外線から硬 X 線まで切れ目なく世界最高水準の高輝度／回折限界放射光でカバーする技術的・経済的に合理的な体制が持続できる。大型施設と相補的であるもう一つは、低エネルギー光源の小型であり柔軟な利活用が可能である点である。これは未踏の光源技術へスピード感を持って挑戦する際に極めて重要となる。大型施設では 50 ないし 60 もの異なる実験設備が同時稼働しており、ある特定の用途に特化したサービスは支援しにくいのが実情である。小型施設で原理検証した新しい技術を大型施設へ技術移転し短波長域で展開することで、我が国が世界を先導できる。また、小型であることから光源と利用の距離が小さい点は人材育成の観点からも重要である。あるいは隣の装置が視野内にあり、貴重な開発機会を共有できる現場の雰囲気人材育成の資産である。光源装置をブラックボックス化することなくその動作原理を十分に理解しながら新しい利用法の開拓へ挑むことができるという、まさに光道場と呼ぶにふさわしい環境を提供できる。これらは次世代を担う人材育成の点から極めて重要であり、小型施設で育成された人材を大型施設へ送り出すことで、この分野の基盤を支えることができる。このことは、現在、国内のほとんどの放射光施設(一部の海外施設)において、UVSOR で育った人材が活躍している姿を見ることができ、事実により実証されている。

放射光源発展のこれまでの歴史は、ひたすら輝度の向上を目指したものであったといって過言ではない。偏向電磁石からの放射の利用が中心であった第 1, 2 世代からアンジュレータが主力となる第 3 世代となり、アンジュレータ光が本来持つ高輝度特性を最大限発揮できるよう、電子ビームの低エミッタンス化が図られた。放射光のエミッタンスは光が本来持つ固有のエミッタンスと電子ビームのエミッタンスの畳み込みとなるが、光の波長のみで決まる前者に対し、加速器技術により後者を小さくするのが低エミッタンス化である。低エミッタンス化が進み後者が前者よりも小さくなるとそれ以上輝度は向上しない。この輝度の限界のことを回折限界と呼んでいる。波長の長い真空紫外域では電子ビームエミッタンス数 nm で概ね回折限界となるが、軟 X 線領域では数 100pm、硬 X 線領域では数

10pm 程度のエミッタンスが必要となる。

電子ビームのエミッタンスとは、ビームの進行方向に垂直な面内での空間広がりや角度広がりの積である。これが小さいほど指向性の高いビームということになり、ビームの放出する放射光の輝度、すなわち単位面積、単位立体角を単位時間内に通過する単位スペクトル幅あたりの光子数、も高くなる。ストレージリングの電子ビームエミッタンスは、放射減衰と放射励起と呼ばれる 2 つの過程で決まる。前者は電子が放射光を放出することで失うエネルギー・運動量を高周波電場で加速し補う際に各電子の進行方向が揃うことで指向性が高まる効果である。一方後者は電子が放射光を光子の形で放射し確率的かつ不連続なエネルギー変化を被ることで指向性の劣化が生じる、いわば量子論的な揺らぎの効果である。この 2 つの効果のつり合いにより、エミッタンスが決まる。放射光の放出そのものは防ぎようがないが、それにより生じるエネルギー揺らぎの空間的ビーム広がりへの波及をビーム光学的な手法で抑制することができる。光子の放出が起きるのは偏向磁石中であり、詳細は省略するが、低エミッタンス化のためには偏向磁石中での光学関数と呼ばれるビームパラメータを最適化する必要がある。ところが光学関数は偏向磁石中で場所により変化するため、仮に偏向磁石の中心で最適化しても、端部では最適条件から外れてしまう。偏向磁石の長さが短いほど、偏向磁石の中でまんべんなく最適条件に近づけることができる。以上のことから、低エミッタンスのストレージリングの設計の基本は、偏向電磁石をできるだけ小さく分割し、その周囲に収束電磁石を配置し偏向電磁石中のビームパラメータを最適化する、ということになる。容易に想像できるが、低エミッタンスを指向するストレージリングは必然的に大型化する。

| 76

一般にストレージリングでの電磁石配置(ラティス)はセルと呼ばれる基本構造を繰り返す形になっているが、特に放射光源加速器のラティスは短いセル多数の繰り返しで構成されていることが多い。2台の偏向電磁石の両側でエネルギー分散を消す Double-bend Achromat (DBA) セルは第 2 世代放射光源の一部で採用され、第 3 世代放射光源では標準的といつてよいほど広く採用されてきた。アンジュレータの設置に適した無分散直線部が無理なくリング内に多数確保できる点で他のラティス構造に比べ大きな優位性がある。多彩な利用や新技術開拓において、これら多数の直線部の存在は不可欠なものである。

低エミッタンスを狙うラティスでは、強い収束電磁石(四極電磁石)の導入が不可避であり、そのため電子エネルギーの違いによる収束作用の違い、いわゆる色収差が大きくなり、これの補正のために導入される六極磁石も必然的に強くなる。この強い非線形性の存在により電子が安定に周回できる振幅の範囲、いわゆるダイナミックアパーチャが狭くなる。入射直後の電子ビームは大振幅で運動し、また、蓄積された電子も残留ガスとの散乱などにより一定の確率で大振幅の運動を始めてしまう。ダイナミックアパーチャが狭いとこれらの電子を安定的に長時間捕獲できずビーム入射効率の低下やビーム寿命の短縮を招く。この問題を解決するために第 3 世代光源の開発期に考案されたのが harmonic sextupole である。これは色収差補正用六極磁石の非線形効果を打ち消すように追加の六極磁石を配置する手法であり、特に DBA セルでは偏向電磁石の両側に六極磁石を対称的に配置することで極めて効果的にダイナミックアパーチャを改善できる。現在稼働中のほとんどの第 3 世代光源でこの技術が採用されている。

DBA セルの特長のもう一つは運転の自由度が高いという点である。直線部の分散関数を制御する

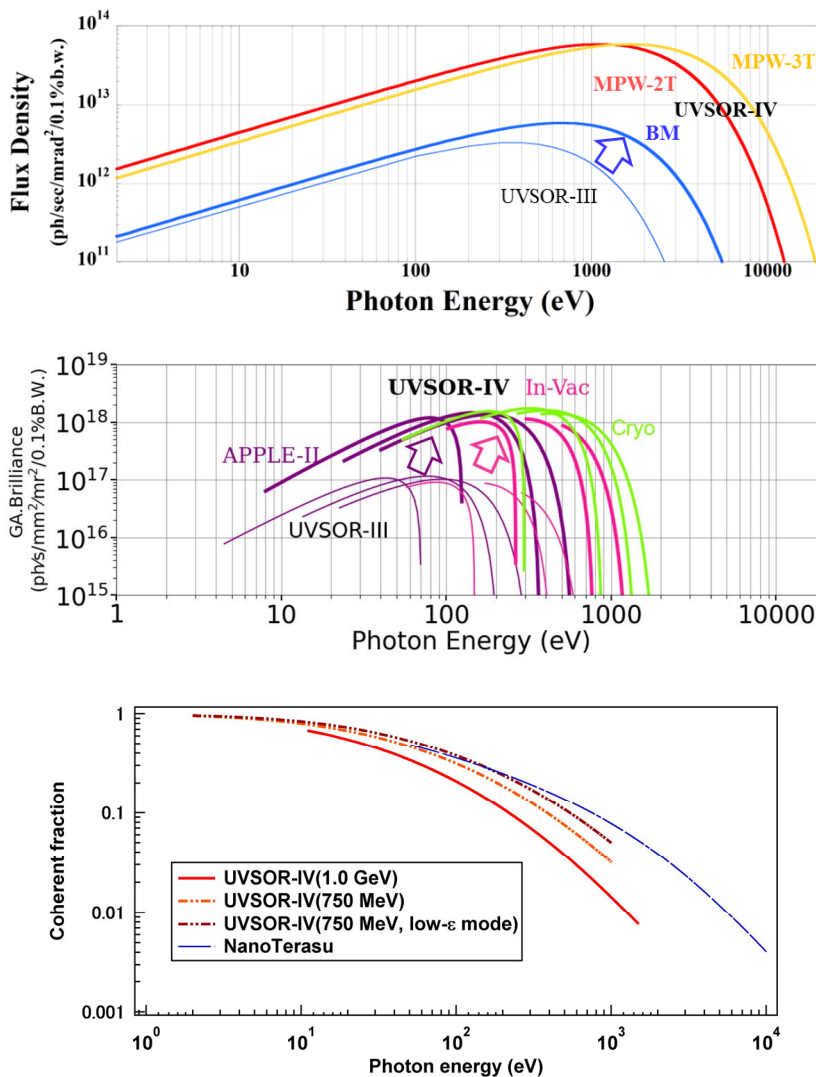
ことで、電磁石パラメータを大きく変えることなく、エミッタンスやモーメンタムコンパクションファクターを
広範囲に制御でき、新しい光源技術や利用技術からの光源パラメータへの様々な要求に柔軟に応
えることができる。構造が単純であるがゆえに調整パラメータ数が少なく、上述したビームパラメータ変
更のみならず運転エネルギー変更などにおける調整も比較的容易となることが期待できる。これらは
| 77 運転の省力化という点でも重要である。

硬 X 線領域での回折限界を目指す次世代の高エネルギー光源加速器のように 1nm を超えて、
100pm 前後の低エミッタンスの実現を目指す場合に DBA セルを採用しようとする先述した偏向磁
石の分割の要求からセル数を必然的に大きくせざるを得ず、その結果、ビームエネルギーの割に周
長が極端に長くなってしまふ。このため、数 100pm のエミッタンスを目指した MAX-IV(スウェーデン)
は一つのセルの中の偏向磁石数を DBA の2台から 7 台へ増やした Multi-bend Achromat(MBA)セ
ルを採用したが、これに追随する形で、以降の高エネルギー次世代放射光源計画の多くで MBA セ
ルが採用されている。一般に MBA セルを採用するリングでは第 3 世代光源のような大きなダイナミ
ックアパーチャの確保が難しいことから、狭いダイナミックアパーチャでも入射蓄積を可能とする新し
い技術の導入が必須となっている。なお、MBA と称しているリングでも2つの DBA セルの間の直線部
を極端に短くする、もしくは無くすることで、一つのセルに連結融合し、これを MBA セルとしているもの
もある。このようなセル構造はビームダイナミクスの DBA セルに近いことから、第 3 世代光源で培
われ成熟した運転技術を適用できるという利点があり採用されているものと思われる。

UVSOR 施設は、建設当初より、小型・低エネルギー施設の利便性・柔軟性・俊敏性を活かして、
様々な新しい放射光の発生法・利用法の開拓に取り組んできた。共振器型自由電子レーザーの開
発は加速器設計段階から盛り込まれており、1990年代を中心に世界最短波長域での発振やレー
ザー発振機構の基礎研究が行われてきた。これを発展させる形で 2000 年以降も自由電子レー
ザーの基礎研究や応用研究が継続されている。低アルファ運転による短パルス生成、コヒーレント高調
波発生、レーザーバンチスライスによるコヒーレント放射光生成、超短パルスガンマ線発生とその応
用、VUV 帯の光渦やベクトルビーム生成と利用法の開拓、タンデムアンジュレータ放射によるアト秒
時間干渉実験、高強度円偏光紫外・真空紫外線照射実験など、世界的にも極めて独自性の高い
光源開発研究とその利用法の開拓に取り組み、世界を先導する成果を生み出し続けてきた。放射
光利用法でも、赤外線放射光利用、レーザー放射光同期実験など世界を先導する新しい技術への
挑戦が行われてきた。小規模放射光施設であり、標準的なユーザー運転とは別に、特定の研究テ
ーマやユーザーの要望に応じた特殊な加速器運転にも柔軟に対応できることで迅速に研究を進める
ことができた。

大型施設では多数のビームラインを有し、ユーザー数も多いことから、加速器を特定の実験が占
有する形で使用することに風当たりが強く、ビームタイムの獲得が困難である。特殊な実験を行うため
の実験装置の製作やその加速器への組み込みも高エネルギー加速器では熱負荷や放射線対策の
ため、格段に高価となる。また、全く新しい技術の開発は、可視・紫外など、安価に実験装置が構築
できる波長域で原理の検証を行うのが効率的であるが、高エネルギー加速器では、このような長波
長域の放射光の発生や取り出しが技術的に困難である場合が多い。これらの事情により、大型施設
では研究開始の意思決定に時間がかかり、また、必要な予算が大型化することでその獲得に時間が

かかり、ビームタイムの確保が難しいことで研究の遂行に時間がかかる。これらは特に全く新しい技術開発への挑戦において決定的に不利であることはあきらかである。実際、1990年代には Photon Factory でも UVSOR と同じような共振器型の短波長自由電子レーザー開発の試みがあったが、上述した大型施設特有の様々な困難のために、発振に至らないまま中止となった [H. Kitamura, K. Tsuchiya (eds.), KEK Report 97-19 (1998)].



Coherent fraction の計算に用いたエミッタンスの値: 4.2 (1 GeV), 2.4 (750 MeV), 1.6 (750 MeV, low-ε) nm rad

図 11-3: 高輝度小型リングの光源特性

加速器設計目標と方針

本計画で狙う科学目標の実現に向けては、新たな手法開拓や装置開発が不可欠であり、光源加速器がこれらの研究開発に柔軟且つ迅速に対応できる必要がある。ニーズプル型の施設利用発想転換として、ユーザーの求める実験条件に合わせて加速器パラメータを柔軟に調整でき、必要な装置を迅速に装着でき、テーラーメイドに光を利用できる実験環境は小型施設でなければ提供できない

いといっても過言ではない。多様な利用目的に応じて光源性能を最適化するためには、ビームエネルギー、エミッタンス、バンチ長などの基本パラメータを柔軟に変更できることが必要である。例えば、ストレージリングの周回電子ビームエネルギーを年間スケジュールの一定期間で区別し、長波長領域での回折限界光の利用に重点を置く 0.75 GeV 運転と短波長域での高フラックス光の利用に重点を置く 1 GeV 運転に切り替えて運用する計画である。また、前述の UVSOR における光源開発の歴史から明らかなように、年間の一定期間を新規光源・利用技術開発の専用期間とすることも重要で、新センターでもその運用を踏襲する計画である。

以上の考察をもとに、UVSOR-IV の設計目標を、

- (1) 電子エネルギー 1 GeV 以下
- (2) エミッタンス数 nm 以下
- (3) 周長 100m 以下
- (4) 10 本程度の挿入光源用直線部
- (5) 300mA 以上のトップアップ運転
- (6) エネルギーやオプティクス柔軟な可変性の確保

とし、これを以下のような方針で実現することを目指す。

- (a) 第3世代光源で培われた成熟した技術を土台にする
- (b) 早期実現のため建設コストを可能な限り抑制する
- (c) 持続可能性のため運転コストを可能な限り抑制する
- (d) 持続可能性のため運転維持管理の省力化を図る

上述したような方針のもと設計した加速器の概要を以下に示す。基本セル構造は DBA セルである。UVSOR-IV が担うべき真空紫外領域では数 nm 程度の電子ビームエミッタンスで概ね回折限界に到達できる。この点は現在の加速器技術では極限的ともいえる 100pm 前後の低エミッタンスを必要とする X 線領域とは異なる。また、UVSOR-IV では、限られた周長でできるだけ多数の直線部を確保し、多彩な利用に合わせた各種挿入光源を実装することを目指している。このような目標を実現するには DBA セルが最も適している。技術的に成熟した単純な基本設計を採用することで光源の安定な運転を早期に実現し、多彩な挿入光源と柔軟な運転モードを組み合わせる新しい光源技術やその利用法の開拓をスピード感をもって進めることができる。これにより開発スピードの速い国際競争に打ち勝つことができる。単純で数多くの直線部(フリースペース)をリングの随所に持つラティス構造は特徴がないともいえるが、長期的な視点からは、特定の目的に特化せず利用目的の動向に応じて柔軟に光源を発展させていけるといえる。

加速器全体のコンパクト化、低コスト化のために、minimal DBA セルとでも呼ぶべき極限まで単純化した DBA セル構造を採用する。その鍵となる技術は複合機能型磁石である。UVSOR では UVSOR-II への高度化の際に四極・六極複合機能型磁石、UVSOR-III の際に偏向・四極・六極複合機能型磁石を導入し、限られた周長の中での性能向上を実現してきた。UVSOR-IV でもこれら実績のある技術を積極的に採用する。第3世代光源の典型的な DBA セル構造では2台の偏向磁石のほかに、四

極磁石7~8台、六極磁石7~8台が用いられる。これに対し、minimal DBA セルは、四極・六極機能を持つ偏向磁石 2 台、六極機能を持つ四極磁石 3 台だけで構成される。このような DBA セル 12 個でリングを構成し、それぞれのセル間には無分散直線部を配する。直線部は現在の UVSOR と同じ、4.2m の長い直線部と 1.6m の短い直線部を交互に設ける。その結果、周長は約 83m となる。

このラティスで achromat 条件のもと、オプティクスを設計すると、エミッタンスはビームエネルギー 1GeV での運転で 4.3nm、750MeV では 2.4nm となる。短直線部へ後述する多極ウィングラを挿入する場合には放射減衰が強まる効果によりエミッタンスは 2.0nm(750MeV)となる。一方、achromat 条件を破れば 1.3nm(750MeV)程度まで低エミッタンス化できる。momentum compaction factor をほぼゼロにする低 α 運転も磁石強度を大幅に変えることなく実現可能で、前述の光源開発の需要に十分応えるものである。

これまでの検討の結果、分散部側の六極磁場成分により色収差を補正し、無分散部側の六極磁場成分によりダイナミックアパーチャを最大化する、という伝統的な harmonic sextupole の手法で入射と安定な蓄積のための必要最小限のダイナミックアパーチャは確保できる見通しである。確実性を高めるため、さらなるダイナミックアパーチャの拡大の検討を続けている。低エミッタンスリングでは、一般に、ビーム内の電子同士の衝突散乱による寿命の短縮やエミッタンスの増大が問題となるが、これらの効果は電子エネルギーが低いほど顕著となる。1GeV 以下という低エネルギーで数 nm という低エミッタンスの UVSOR-IV の場合には、その効果は大きく、これを避けるためには、高調波空洞と呼ばれる、主加速空洞の整数倍の周波数の加速空洞を導入し、電子バンチ長を延ばし電子密度を下げることで、これらの効果を抑制する必要がある。高調波空洞を日常的に安定的に利用している放射光源は今日でもそれほど多くないが、UVSOR では 1990 年代に高調波空洞を導入し、それ以降現在に至るまで継続的に使用しており、その運用に関しては十分な経験を積んでいる。

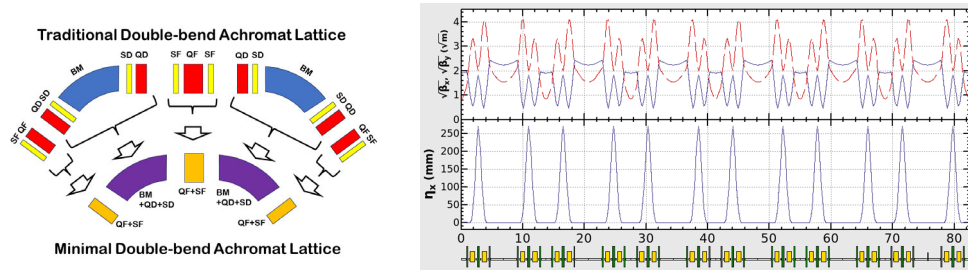


図 11-4: UVSOR-IV のラティスと光学関数

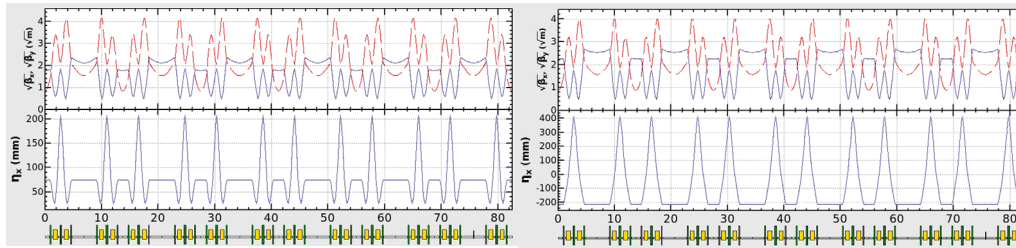


図 11-5: UVSOR-IV で可能な多様なオプティクス例(左;低エミッタンスモード、右;低アルファモード)

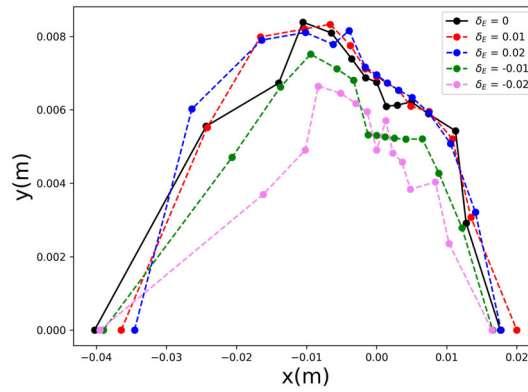


図 11-6: Achromat モードでのダイナミックアパーチャ

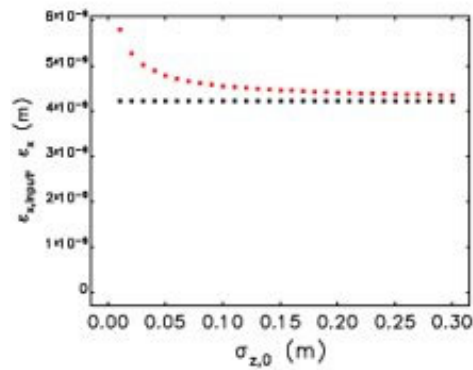


図 11-7: 高調波空洞によるビーム内散乱の抑制

加速器要素技術

UVSOR-IV を実現する鍵となる加速器要素技術について、以下で概要を述べる。

ラティス設計の項で述べたように、すべての主要磁石を複合機能型とし、偏向磁石で二極、四極、六極を、四極磁石で四極、六極磁場を生成することで、ラティスを構成する磁石数を大幅に低減する。またビームパイプ径を限界まで小さくすることで、電磁石そのものの大きさを極小化する。これらは建設コストの低減に大きく寄与する。さらに、これら磁石を永久磁石／電磁石ハイブリッド方式とする。大まかには、起磁力の 2/3 程度を永久磁石で、残り 1/3 程度をコイルで発生することで、消費電力量を 1/10 程度に抑えながら、定格からその 1/3 程度までの間で磁場強度を可変とする。これにより、エネルギー可変、オプティクス可変の柔軟な運用が可能となる。コイルは原則空冷とし、冷却水設備不要のシステム構成とすることを目指す。これにより、電磁石コイルでの電力消費を抑制する直接的効果に加え、冷却水設備を不要とすることでその建設・運転・維持管理のコストを削減する。長期的には、冷却水系をなくすことで老朽化による水漏れなどのトラブルを避けることもできる。永久磁石の弱点は、磁場の均一性が低いこと、磁化の温度変化が大きいことであるが、この弱点をハードウェア面に加え、機械学習を取り入れた運転制御技術を組み合わせることで克服する。このようなハイブリッド複合機能型磁石の開発を広島大学、名古屋大学、KEK などと協力し進める。すでに設計検討作業に着手している。

| 82

建設コストを抑制するために、高周波加速系は既存の UVSOR-III のシステムを可能な限り流用する。RF 周波数は 90.1MHz とし、高周波源や伝送系、低レベル RF 制御などを再利用する。高調波空洞は既存の3倍高調波空洞が真空系に問題があることから、新規に設計製作する。これには KEK との協力が必須である。今日の放射光源の多くでは 500MHz 前後の周波数が採用されていることが多いが、小型加速器から段階的に発展してきた MAX-IV では 100MHz が採用されている。その優劣については議論があるが、低周波の利点として、高周波源の入手と保守管理の容易性、バンチ長が長くなることでのビーム内散乱やビーム不安定性の低減、高調波空洞の設計製作に自由度が高い点などを挙げておきたい。

電磁石系のところで述べたが、建設コスト抑制のため、従来の UVSOR と比較して、ビームパイプ径をビーム力学的に許容される限界近くまで小さくする。これにより電磁石の小型化が可能となる。一方、コンダクタンスの低下により慎重な排気系の配置が必要となる。従来型の排気系に加え、KEK の協力を得てビームパイプへの NEG コーティングの可能性も検討する。

ビーム診断系は、ビーム位置検出器(BPM)、ビーム電流検出器(DCCT)、など標準的なものを一式備えることになるが、初期コストの低減のため DCCT など可能なものについては UVSOR-III のものを転用する。ビーム位置検出器に関しては、狭いビームパイプへの入射に備えて周回毎の位置検出が可能であること、高速高精度の軌道安定化を可能とすることなどが求められるが、これらはいずれも最近の放射光施設では標準的な技術である。制御システムについては加速器分野で標準的となりつつある EPICS を基盤に構築し、将来的な遠隔監視や機械学習による自動制御の導入に対応可能なものとする。これらビーム診断系・制御系の設計にあたって、長期にわたる安定な維持管理、保守部品の確保などの点を重視し、KEK を始めとする国内放射光施設との技術の共有化・共通化を図る。

入射器は建設コスト削減のために UVSOR-III 用の既存装置を転用することもできるが、老朽化対策が必要となる。この装置は 80kV 電子銃、15MeV 直線加速器、750MeV ブースターシンクロトロンからなる。このうち、ブースターシンクロトロンは電磁石系、真空系などの老朽化が進行していることから、UVSOR-IV 計画がスタートする前から、ある程度の老朽化対策を段階的に進める。将来的には、後述するように、最大加速エネルギー1GeV のフルエネルギー入射器を建設する。

ストレージリングへのビーム入射は、トップアップ運転時の軌道変動を抑制しつつ、狭いビームパイプへの入射を実現する必要がある。従来型の二極キッカー磁石によるバンブ軌道入射と PF や UVSOR などで行われているパルス多極磁石による入射の 2 つの方式を検討し、今後の技術開発の動向も踏まえ最終的な方式を決定する。後者のコンパクトさは大きな魅力であるが入射効率などの点でさらなる技術開発が必要である。

従来の放射光利用法は、電子ビームから放射された光の一部を、スリットなどを用いて空間的に切り出し、さらに分光器を用いて周波数領域でスペクトルの一部を切り出し、末端の実験装置に送り込む、というものであった。このため、光源に要求される性能は高輝度特性、すなわち、狭い空間領域、スペクトル領域にいかにも多くの光子を投入できるか、であった。回折限界はこの輝度の向上が限界に達したことを意味しているが、その一方で、空間的にコヒーレントとなることで、光が本来持っている波動性があらわになってくる。光のコヒーレンスを利用する実験は、例えば、硬 X 線領域であっても光学的手法により強度を犠牲にしつつ空間コヒーレンスを高めることで、位相干渉を利用した構造解析法の開発などが行われている。これに対し、UVSOR-III では紫外線領域での回折限界光を利用し、光渦やベクトルビームの生成実験、アンジュレータ放射の時間コヒーレンスに関する基礎研究を進め、真空紫外域においてタンデムアンジュレータからのダブルパルス波束を用いたコヒーレント制御などの実験を行うなど、世界を先導する成果を上げてきた。UVSOR-IV では、これらの研究をさらに波長の短い軟 X 線領域へと展開する。利用できる光学素子の限られている真空紫外・軟 X 線領域で、回折限界条件下で光源が本来有する波動特性を利用することで、これまで不可能であった新しい計測法を開拓し応用展開できる。

挿入光源の活用

光源利用の側面では、特に多段連結型挿入光源の用途は未開拓の部分が多く、その可能性を十分に引き出しているとは言えない。連結型挿入光源は共振器型自由電子レーザーの増幅率向上のための光クライストロンや高速の円偏光スイッチングを可能とするクロスアンジュレータが古くから知られている。前者は、外部レーザーを用いたコヒーレント高調波発生(CHG)などへの展開があり、自発放射光であるが時間的なコヒーレンスを有する光を比較的簡便に生成できる。ただしパルス繰り返しは入射レーザー光のパルス繰り返しで制約される。その一方、パルス幅はレーザー光のパルス幅と同等になるため、サブピコ秒パルスの生成が可能である。波長は入射レーザー光の整数分の一が基本であるが、構成はやや複雑になるものの、Echo-enabled 高調波発生という手法によれば波長の連続可変性も原理的には可能である。さらに最近ではシングルサイクル光の生成も原理実証が行われている。これら、ストレージリングと外部レーザーを組み合わせた時空間コヒーレンスを有する光の発生法は比較的安価に行えることから、挑戦的な新手法の開拓に適しており、後述する自由電子レー

ザーの利用技術への展開を睨んだ技術開発の場となることが期待される。

クロスアンジュレータは放射光黎明期にアイデアが提唱されたが、これまで実用例は少なかった。しかし、SPring-8 においては長大な直線部に設置された多連アンジュレータが稼働し、高速偏光スイッチング光源として利用されている。もともとの二連のアンジュレータよりも高い円偏光度が実現可能とされている。また、高次光も円偏光となることから、カバーできる波長域が広がる点も大きな特長である。長さ 1m 弱の短尺の APPLE-II 型アンジュレータを4連にして UVSOR-IV に導入した場合の放射光スペクトルと円偏光度を図 11-8 に示す。

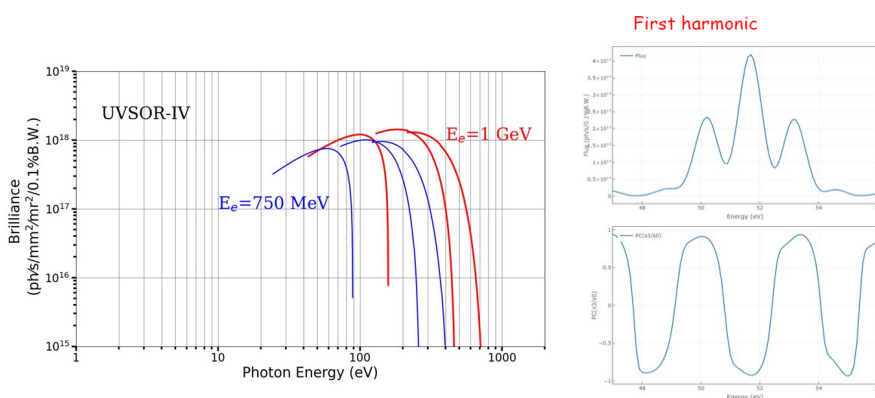


図 11-8: 四連クロスアンジュレータのスペクトル(左)と円偏光度(右)

クロスアンジュレータの応用としてベクトルビームがある。UVSOR-III で世界に先駆けて実証された技術であるが、光渦の空間構造とタンデムアンジュレータの時間構造を組み合わせることで、偏光を空間的に変調できる。複合波長イメージング、示強分布イメージングや物質量子状態操作などへの応用展開が考えられる。多連アンジュレータは、一つのビームラインに異なる特性を持つ光を一度に供給できるという点でも興味深い応用展開の可能性がある。波長、偏光、位相構造、時間構造などを自在に制御できるというのが、アンジュレータが本来持っている最大の特長である。回折限界条件下でアンジュレータ放射が本来持っている優れた特性をすべて引き出すことが可能となる。複数のアンジュレータからの異なる特性を有する光ビームを様々に組み合わせて利用することで、全く新しい放射光の利用法を開拓できる可能性がある。

今日、光の量子性を計測技術へ応用する、量子計測・センシングの研究が活発である。これらの研究は、レーザー光を光源とし、近赤外から可視光の領域で研究が進められている。UVSOR-IV での最近の研究により、アンジュレータは光の波の性質を自在に制御できる技術であるということが明らかにされつつある。例えば磁場周期数 10 周期のアンジュレータからは正確に 10 サイクルだけ振動する波束が生成されことは実験的にも検証された。またその偏光も自在に制御できる。複数のアンジュレータを直接配置することで、ダブルパルス、あるいは複数パルス構造の波束を作り出し、その波束間の時間差をアト秒精度で制御できることも実証され、このような光波束を用いた量子状態制御や超高速現象の観測にも成功した。今まさに UVSOR-III において放射光の量子性を活用する技術が芽生えつつある。このような技術の前提となるのが回折限界である。UVSOR-IV の実現により、

UVSOR-III では真空紫外領域までに限定されていた上記の実験を、生物試料などより幅広い応用展開が期待できる軟 X 線領域まで拡大できる。

量子計測・センシングの分野では単一光子源の開発が活発に行われている。オンデマンドで一個の光子を確実に生成することがその目標であるが、これまでのところ実現されていない。UVSOR-III では、放射光の単一光子利用の開拓を目指して、基礎研究に着手している。通常の放射光源蓄積リングでは 10 の 11 乗前後の多数の電子が周回しているが、技術的には一個の電子だけを蓄積することは可能である。UVSOR-III において、一個の電子をストレージリングを周回させることには成功しており、単一電子からの放射を観測しその特性を調べる実験を進めている(未発表)。このような研究は、将来の放射光量子計測・センシング技術の基礎となるものである。UVSOR-IV ではそのさらなる展開を図る。

11-2 挿入光源とビームライン

UVSOR-IV には 12 カ所の直線部がある。長さ 4.2m の直線部が 6 本、1.6m の直線部が 6 本であり、このうち 2 本をビーム入射点と高周波系に用いるとすると、残り 10 本が挿入光源へ使用可能である。長い直線部をビーム入射と高周波系に使用する場合、比較的長いアンジュレータもしくはタンデムアンジュレータを合計 4 台設置できる。新たに導入する 4 連アンジュレータは用途と開発要素をふまえつつ、長直線部の仕様を検討する。また短い直線部には、短尺のアンジュレータもしくは多極ウィグラ(MPW)を計 6 台設置できる。なお、初期導入コストを低減するため、既存の UVSOR-III にて稼働中のアンジュレータは、UVSOR-IV に移設し使用する方針である。これらには 3 台の真空封止型アンジュレータが含まれるが、その一部については、クライオアンジュレータへの改造による広帯域化や短波長化を検討する。また高周波系もしくは入射部を短直線部に設置する。

UVSOR-IV には短直線部が 6 本あるが、ここに長さ 1m 程度、磁場強度 2~3T 程度の多極ウィグラ(MPW)を 3 台挿入すると、放射減衰が強まることによりエミッタンスが低減することに加え、ビームの安定性の向上も期待できる。さらに 1GeV 運転下での MPW からは tender X 線領域まで伸びる高フラックス X 線が生成される。生物学関連の試料においては硫黄やリンの K 殻励起に対応するため重要な波長帯といえる。また、磁場を適切に選ぶことによりその基本波長を近赤外・可視領域の領域に持ってくることで、外部レーザーと電子ビームの相互作用を利用する様々な光発生、レーザーパルススライス法や Echo-enabled 高調波発生なども実現可能となる。

既存の UVSOR-III のアンジュレータや上述した MPW を UVSOR-IV に装着した場合の放射光スペクトルは図 11-3 に示されている。

UVSOR-III から移設するアンジュレータのビームラインおよびエンドステーションについては合わせて移築し、それぞれ最適化と高度化を行う。24 時間運転を見越して、一部についてはブランチビームラインを設定し、初期投入として計 12 基を検討する。ユーザーの実験装置を持ち込み可能なフリーポートビームラインを 1 基設ける。コンパクト卓上レーザー光源の光学ベンチの設置スペースも配慮する。

ベンディングビームラインは既存 UVSOR-III の活動状況を鑑みて一定数を維持する。初期建設案として、長波長帯の直入射ビームライン、テラヘルツ・赤外ビームライン、低フラックスビームライン、開発専用ビームライン、フリーポートビームラインの計 5 基を検討する。各ビームラインと実験手法の詳細については 12 章にて述べる。

U B	ビームライン	手法例 + イメージング	光源	波長・偏光	空間階層			時間階層												
					nm	μm	mm	as (fs)	ps	ns	μs	ms								
1	生命分子化学状態イメージング	STXM, SXT	VPU, IRL	20-800eV	■															
2	生命分子メゾ階層イメージング	RSoXS, QXAFS	MPW	1~10keV		■														
3	生命分子赤強変数イメージング	cRIXS, XAFS	MPW	0.4~4keV			■													
4	スピン分解光電子運動量顕微鏡	PMM	PINEAPPLE	20~700eV	■	■	■													
5	スピン分解顕微光電子分光	ARPES	IVU	0.1~1.1keV		■														
6A	超高分解能光電子分光	LEARPES	NI-VPU	6~100eV		■														
6B	真空紫外円/渦二色分光	VUVCD, -HD	NI-VPU	6~100eV		■														
7	パルスガンマ線ポジトロン分光	GAGG, PET	LCS, UVL	5, 6MeV				■												
8A	超高速量子ビーム干渉	吸収、散乱、光電子	PINEAPPLE	20~700eV	■	■	■	■												
8B	生命分子時空間階層分離法	新規開拓	PINEAPPLE	20~700eV	■	■	■	■												
9	生命分子広帯域超解像度法	新規開拓	IVU, multibeam	0.1~1.1keV	■															
10	紫外可視反射吸収分光	UV-vis	BM	Vis-VUV			■	■												
11	オペランド光電子分光	ARPES, XAFS	BM	EUV-SX			■	■												
12	赤外顕微イメージング	IR	BM	THz-IR			■	■												
13	レーザー複合利用専用	非線形	IVU, IRL, UVL			■	■	■												
14	手法開発専用オープン	フリー	ブランチ																	

図 11-9: 分野毎にテラレーメイドで最適化された光源と設備、新センターに設置予定の実験ステーションの事例 (14 基の BL と実験ステーションで狙う空間階層と時間階層の特徴)

超異分野融合が創発する新規手法開拓

ハードウェアの観点では、放射光とレーザー光を相補的に捉え、超広帯域な光の複合利用による未踏の量子計測技術開拓と、多彩な光計測と各種分析設備を自在に活用できる計測・分析支援環境を利用分野の要望に合わせてテラレーメイドに提供する。光科学の先鋭化と利用者の裾野拡大の両立へ向けて、歴史的に化学分野強化のために運用してきた UVSOR の研究環境資産と基盤技術を効果的に継承しフォトオートノミー科学を確立する。特に国際的に未開拓な、VUV コヒーレント光源の利用による新規手法開拓と、光の複合利用によるイメージング等による挑戦的量子計測をもとに非平衡現象や超秩序状態の計測を切り開き、ユーザーと共に科学目標達成を目指す。具体的には 4 つの挑戦的手法開拓、1) 水の窓を克服した in-vivo, in-vitro 計測、2) オペランド複合多元イメージング、3) 角運動量制御とダイクロイズム計測、4) 量子もつれ現象と光計測、を実施する。

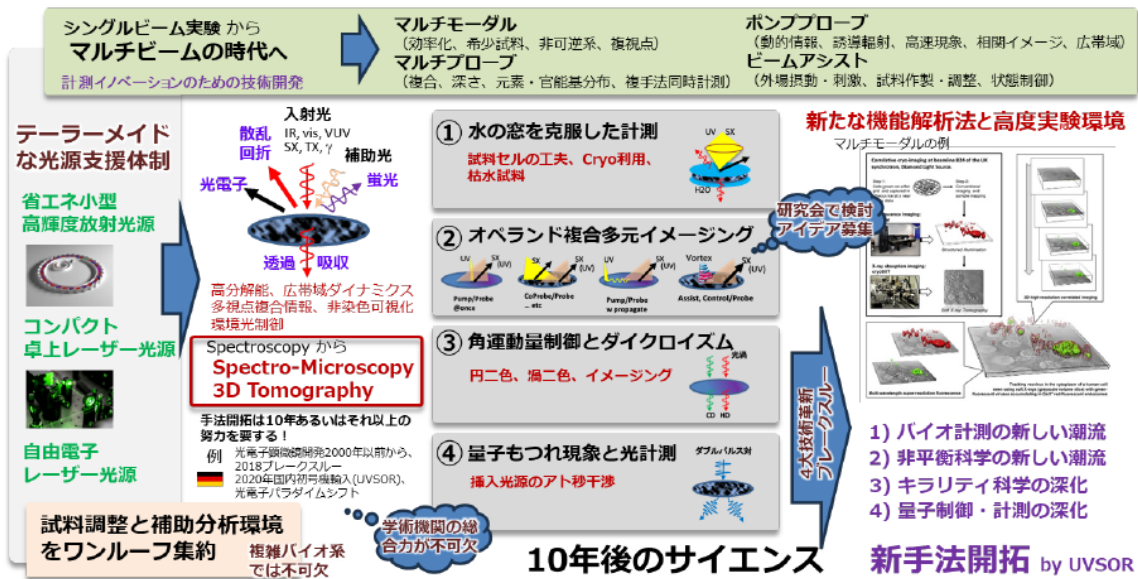


図 11-10: 複雑系・不均一系の光計測で重点開発する 4 つの挑戦手法。多彩な光源の組み合わせによるマルチビーム計測、複数の分析法を同一試料に対して実施するマルチモーダル計測、まだ利用できていない波長域の新たな展開、新規光源を利用した未踏の量子ビーム制御や量子計測の実現へ。

11-3 レーザー入射器と FEL の拡張計画

UVSOR-IV のフルエネルギー入射器として現状直ちに利用可能な加速器としては、ブースターシンクロトロンと常伝導直線加速器の2つが考えられるが、将来的には、近年技術開発の著しいレーザー加速器、すなわち、高強度レーザーによりプラズマ中に生成されるレーザー航跡場による電子加速も視野に入れるべきである。1秒程度の時間をかけてゆっくりと加速するシンクロトロンに比べて1マイクロ秒以下の短い時間で加速を完了する直線加速器やレーザー加速器は電力消費量の点で優位性が高いと考えられる。通常の常伝導直線加速器の加速勾配は 30MV/m 程度であり、単純計算では1GeV まで加速するのに 30m 程度必要ということになるが、実際の加速器は加速管だけで構成されているわけではなく、実際には 50m 以上となる。高価格の消耗品であるクライストロンを多数使用するため保守費用の点で不利である。レーザー加速は原理的にはその加速勾配が通常の直線加速器の 1000 倍以上となるといわれ、コンパクト性という点で大きな魅力がある。GeV 級の電子を加速した例も報告されるなど近年著しい発展を見せている。レーザー加速器の応用としてテーブルトップ X線自由電子レーザーの実現を謳う開発計画が多いが、最近ではシンクロトロンなどへの入射器としても注目されるようになってきている。その場合、ビームのエネルギー広がりが大きいことが難点であり、これをどう克服するかが大きな検討課題となる。

入射器としてレーザー加速器を含む広い意味での直線加速器を選択した場合、リングへの入射以外に、自由電子レーザーの発振に利用できる可能性が出てくる。レーザー加速器からのビームを

用いた自由電子レーザー発振の増幅が確認された例も出てくるなど、技術的には着実に進んでおり、UVSOR-IV 計画においても、その可能性を検討すべきであろう。また、自由電子レーザー以外にも、リングを低アルファモードで運転しておき、直線加速器からのサブピコ秒短パルスで1周だけ周回させ、短パルス放射光を多数のビームラインに取り出すことも技術的には可能である。ただし、自由電子レーザーの場合も同様であるが、パルス繰り返しは数 10Hz程度以下に止まるものと予想される。新しい手法の開拓など、ユーザー側からのニーズに、低コストで即応できる可能性がある。

11-4 光源加速器の代替案について

我が国の光科学において UVSOR 施設が果たすべき役割を熟慮して、上述したストレージリング設計を最適なものとして選択した。当然ではあるが、科学技術は日進月歩であり、UVSOR 施設を取り巻く状況も刻々と変わっていく可能性がある。それに合わせて光源加速器設計案も柔軟に見直していく必要が出てくる可能性もある。この節では、これまでに検討を行った他の光源加速器案についてその概略を述べておく。

レーストラック型で超直線部を有する放射光ストレージリングは、かつて東京大学の放射光計画で検討された[1]。UVSOR の将来経過としてこれを参考に 1.2GeV のレーストラック型ストレージリングの設計検討を行った[2]。周長約 170m、エミッタンス 0.7nm で約 25m の直線部 2 本を有する。直線部はシケイン構造とすることで複数のアンジュレータの設置への対応も想定した。この設計は、長尺アンジュレータによる真空紫外・軟 X 線領域での回折限界光の生成に加え、検討当時 UVSOR で活発に開発を進めていたレーザーバンチスライス法やコヒーレント高調波発生法などの外部レーザーを利用した新しい光源技術を主力光源とするという構想であった。1.2GeV と低エネルギーながら周長 170m は現在の Photon Factory と同等であり、規模の大きな計画である。一方で、アンジュレータ数は構成にもよるが2~6台程度を想定しており、数少ないビームラインで突出した成果を挙げるといった方向性を想定していた。レーザーを用いる新しい光発生法は、急速に発展しつつあった直線型加速器を用いた X 線自由電子レーザーや高出力レーザーを用いた高次高調波発生などとの競争力が懸念された。加速器の構造から、多連アンジュレータや EEHG などの光源技術とは相性が良いと考えられる。

エネルギー回収型直線加速器(ERL)は、超低エミッタンス、超短パルス、高パルス繰り返しなど、その期待されるビーム性能の高さから次世代光源加速器としても期待され、一時期、Photon Factory の次期計画として検討が進められた[3]。X 線発生を目指して電子エネルギー3GeV 級の ERL を検討したが、ただし実現までに乗り越えるべき技術的課題も多く、現在では Photon Factory は次期計画としてストレージリングの検討を進めている。ERL は全く新しい方式の加速器であり、放射光ストレージリングが数 100MeV 領域の低エネルギーVUV リングからスタートしたように ERL も VUV 光源からスタートするのが現実的と思われた。このような発想で UVSOR の次期計画として VUV 光源としての ERL の検討が行われた[4]。多周回方式とすることで小型化・省電力化を目指して設計検討を行った。高繰り返し VUV-FEL や超短パルス放射光などの先進光源を主力とすることが想定された。ERL では超伝導加速空洞がその中核要素であるが、これは液体ヘリウムでの冷却が必須の装置で

ある。このため付帯設備として大型のヘリウム冷却施設が必要であり、またその電力消費量が極めて大きい。また、技術的に成熟したストレージングとは異なり、少人数の要員での運転維持管理は困難と予想される。現在 KEK では compact ERL と呼ばれる MeV 級の小型試験加速器で開発を継続しており、技術的な課題も徐々に解決されていく可能性がある。ERL が期待されるビーム性能を発揮した場合には、極めて魅力的な光源加速器となることは疑いない。今後の技術開発の動向を注視する必要がある。

参考文献

- [1] N. Nakamura et al., Proc. EPAC2000, **669** (2000).
- [2] M. Shimada et al., presented at JSR2007 (2007).
- [3] “Energy Recovery Linac Conceptual Design Report”, KEK Report 2012-4 (2012).
- [4] T. Konomi et al., presented at iPAC14 (2014).