

アップグレード後の SPring-8 の性能をフル活用するための光診断系

田中 均¹, 後藤俊治^{1,2}, 高野史郎^{1,2},
登野健介^{1,2}, 正木満博², 矢橋牧名^{1,2}

¹特定国立研究開発法人理化学研究所放射光科学総合研究センター 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

²公益財団法人高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

要 旨

次世代放射光光源では、水平エミッタンスが現状から著しく低減され、水平と垂直が共に数 $10\ \mu\text{m}$ (r.m.s.) もしくはそれ以下のシャープな空間分布を有する電子ビームを、アンジュレータ光源のソースとして利用できるようになる。従来光源では、水平エミッタンスが大きいために、アンジュレータからの X 線をナノスケールまで絞り込むには、人工的に水平光源サイズを低減する仮想光源を光学系の上流に挿入する必要があった。次世代放射光光源が提供する 2 次元高輝度電子ビームは、仮想光源を不要とし、格段に明るいナノスケールの X 線ビーム利用へ道を切り開くことだろう。このような高性能光源を有効に活用するためには、ビームの制御技術においても現状からの様々なジャンプが必要になる。その 1 つは高精度の光ビーム制御を実現する光診断系である。本記事では、現 SPring-8 における光ビーム制御上の問題点と SACLA で実現された光診断系に基づく精密電子・光ビーム制御の成果とを基に、アップグレード後の SPring-8 の性能を最大限活用するための光ビーム診断系を概観し、その開発の方針を述べる。

1. はじめに

放射光光源は、今大きな転換点を迎えようとしている。2009年にアメリカの SLAC 国立加速器研究所において、史上初の硬 X 線レーザーが、自己増幅型自発放射 (SASE: Self-Amplified Spontaneous Emission) に基づく X 線自由電子レーザー (XFEL: X-ray Free Electron Laser) として実現された¹⁾。その 2 年後には、兵庫県の SPring-8 において、真空封止アンジュレータと C-band 高勾配加速システム、単結晶熱電子銃を組み合わせたコンパクト XFEL 施設 SACLA が完成し^{2,3)}、2012年から利用運転を開始している。XFEL の利用は今後急速に拡大し、高速現象、非線形光学、無損傷構造解析等、様々な新規分野を開拓していく事が期待されている。一方でリング型放射光光源にも次世代へ繋がる大きなうねりが押し寄せている。長らくエミッタンス $1\ \text{nm} \cdot \text{rad}$ の壁を越えられない状態が続いたが、Multi-Bend Achromat (MBA) と呼ばれるラティス構造を現実的な境界条件にフィットさせるいくつかの技術革新と非線形ラティスの最適化が大きく進展し、既存の第 3 世代リング型光源の規模を維持した上で、ビームエミッタンスを 1 桁以上低減できる可能性が提示された。これにより ESRF のアップグレード計画⁴⁾を筆頭に、SPring-8⁵⁾、APS⁶⁾、ALS⁷⁾等多くの第 3 世代リング型光源において、光源性能を飛躍的に引き上げるアッ

プグレードの検討が猛烈な勢いで進んでいる。

さて現第 3 世代光源とこれから出現する次世代光源の一番の違いは何であろうか？ 意見は様々あるかも知れないが、筆者 (H.T.) は格段に縮小する水平の光源サイズであると考えている。第 3 世代光源の輝度を引き上げてきた主要因は、 σ で $10\ \mu\text{m}$ を切る垂直ビームサイズである。これは、エミッタンス比で 0.1% 程度にまで垂直エミッタンスを抑制する加速器のアライメント技術やビーム制御技術の進展に依るものであった。結果として、現状のアンジュレータ光源点におけるビームプロファイルは水平に広がった偏平な形状になっている。次世代光源では、入射スキームを現状と大幅に変えることを前提に、低エミッタンス化のみならず、アンジュレータ部の水平ベータatron関数を大幅に低減し、アンジュレータ放射に適した電子ビームの水平位相空間分布を確保する設計が検討されている。この結果、水平ビームサイズも $20\sim 30\ \mu\text{m}$ 程度まで低減される見通しだ。次世代光源では、丸に近い楕円の電子ビームがアンジュレータ放射のソースとして利用可能になる筈である。

このような次世代光源は、これまで必要であった仮想光源 (ピンホール) を取り除いた明るいナノ X 線ビームの利用を可能にするであろう。さらに、XFEL において既に実施されているように、対称性の良いシャープなスペクトル形状を活かした大強度ピンクビームの活用が進展する

であろう⁸⁻¹²⁾。一方で、このように細い電子ビームから放射されるアンジュレタ光を、ピンホールフリーの条件で効率よく高精度実験に活用するには、これまで気にならなかった様々な点が問題になってくる。例えば、二結晶分光器やミラー等の光学機器の振動やドリフト、光軸の高精度設定とその長時間の維持、再現化等が挙げられる。本稿では、現状から大きな性能のジャンプが要求される“光診断系”並びに“光診断系を活用するための付帯システム”にフォーカスし、次世代光源に必要となる光診断と光軸制御の全体像をその運用も含め概観し、読者に具体的なイメージを与える事を目的とする。そのため、この導入の1章に引き続き2章では、SPring-8における光軸制御と光診断の現状と問題点を述べる。次に3章ではX線自由電子レーザー施設 SACLA の光診断系において実現された性能を、SPring-8 の現状と比較しつつ紹介する。2章と3章を受け、4章では次世代光源に必要となる光軸制御と光診断系を定義し、その構築に向けた戦略を提案する。最後に5章ではまとめと今後の抱負を述べ本稿を終える。

2. 現 SPring-8 の建設・運転の経験と問題点

アップグレード後の SPring-8 (以下 SPring-8-II と呼ぶ) をはじめとする次世代光源において光診断系が担うべき重要な役割は、ビームコミッシング時に各ビームラインの光軸を適正に設定し、それをユーザー運転において精度良く再現すると共に維持し、10年以上に及ぶ光源のライフサイクル全体を通して光軸を設定値に固定し続けることにある。本章では、現 SPring-8 の経験をビームコミッシングと定常運転の視点から振り返り、次世代光源に必要な光診断系の開発に向けて問題点を整理する。ビームラインの光軸は、挿入光源(アンジュレタ)の中の電子ビームの軌道により決まる。従って、本章では光診断系だけに閉じず、電子ビーム軌道を設計軌道に正確に合わせる上で重要な磁石アライメントと電子ビーム位置モニター^{*1} (BPM: Beam Position Monitor) とを共に議論する。

SPring-8 の建設及びビームコミッシング時の経験

SPring-8 の建設では、磁石のアライメントを架台内ア

ライメントと架台間アライメントの2ステージで行い、光源性能を決定づける架台内において4極磁石と6極磁石のアライメント精度 $20\text{ }\mu\text{m}$ 以下を達成した¹³⁾。その一方でBPMは、mmオーダーの誤差に相当するノイズが測定信号に混入し、コミッシング時に大きな問題を引き起こした。最終的には、測定した軌道データを周長に沿った空間周波数分析によりフィルタリング処理するなど蓄積ビームを用いた較正の工夫¹⁴⁾により、BPM 原点の誤差は当初の10分の1程度となったが、多大な労力を要した。現 SPring-8 の利用運転中のビーム軌道データのバラツキは主にBPM 原点の誤差によるもので、リング全体のr.m.s.は $300\text{ }\mu\text{m}$ 程度であるが、誤差が1mmを超えるBPM もいくつか存在する^{*2} (Fig. 1)。このようなBPM 原点の誤差は、SPring-8-II で許容できるものではない。BPM 原点較正のポイントは、アンテチェンバー構造に伴う非対称性やケーブルでの信号の反射等による電気中心シフトの精密評価と、磁石磁場中心に対しBPM の電気中心を合わせる際のアライメント誤差抑制の二点である。これらをきちんと実施したとしても $100\text{ }\mu\text{m}$ 程度の精度が限界だろう。SPring-8-II で求められる軌道偏差要求値(数 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以下)に迫るには、蓄積電子ビームの応答を利用して、高精度で各BPM の電気中心を較正するbeam based alignment を効率的に実施できるようリング全体を設計することが必要不可欠である。

SPring-8 定常運転時の問題点

SPring-8 の定常運転の現状に視点をあてると、

- (1) 利用運転中のビーム軌道制御に各光軸の情報を正確に反映させる光診断系がないこと
- (2) 加速器トンネル内と実験ホールの機器アライメントの崩れが、修正困難な程、累積したこと
- (3) 安定且つ精密なビーム軌道制御が困難なこと

が、SPring-8-II に向けた大きな問題点として見えてくる。

第一の問題は、各ビームラインにおいてアンジュレタの光軸を常時測定するために必要な光位置モニターに十分な信頼性がないことによる。SPring-8 では、建設に向けてブレードタイプの光電子放出型XBPM (ブレード型XBPM) とエリアタイプの光伝導型CVD ダイヤモンド

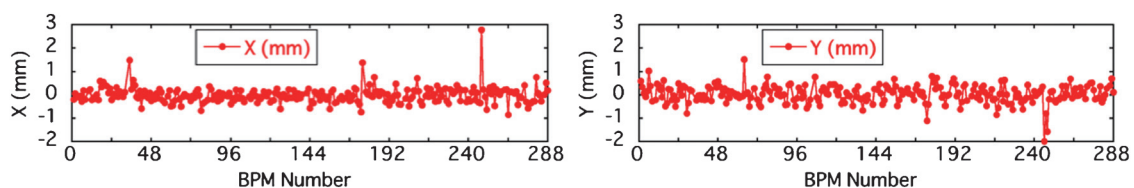


Fig. 1 (Color online) Typical orbit data in user operation of SPring-8 measured by the BPM system.

^{*1} BPM は電子の電磁場から電子ビームの重心位置を計測するモニター。

^{*2} これらの誤差は、軌道補正時には差し引かれるため第1近似としては影響しない。

XBPM (光伝導型 XBPM) の2種類の光位置モニターを試作した。光伝導型 XBPM は、ブレード型に比べアンジュレータギャップに依存した光位置モニターの原点シフトを低減できると期待されたが¹⁵⁾、利用運転時(標準蓄積電流100 mA)の光ビームがもたらす高熱負荷(標準型真空封止アンジュレータの場合、全パワー11 kW、パワー密度470 kW/mrad²)の問題等を解決できず実運用に至らなかった。SPring-8では、ブレード型 XBPM を光位置モニターに採用し、アンジュレータ光源の種類に応じて3種類のブレード配置を使い分けている (Fig. 2)¹⁶⁾。アンジュレータのギャップを同一とした条件の下では、標準型真空封止アンジュレータのXBPM を例にすると、分解能1 μm 以下、1日の安定度5 μm 以下の性能を実現している。しかし、アンジュレータのギャップを変更した場合のギャップに依存した100 μm 程度の原点シフト¹⁷⁾や長期安定性を保障できない(100 μm /2ヶ月程度を超えるシグナルのドリフト)という問題を抱えている。このため、電子ビームの軌道制御に各光軸の情報を反映できない。これは何も SPring-8に限ったことではなく、第3世代放射光光源共通の問題となっている。大きなギャップ依存性は、ブレード型 XBPM が光ビームの裾を測定する方式であるからだ。このため、アンジュレータの上下流の偏向電磁石のエッジからの放射光が信号に比べて大きなバックグラウンドとして混入することが避けられない。

第二の問題は、光源施設の床や建屋の長期間に亘る歪みである。SPring-8は強固で安定な岩盤の上に建設され

た。この条件が世界的によく知られた SPring-8 のビーム安定性を生み出している。このような背景もあり、建設時に実施した磁石の精密アライメント以降、リング全体の再アライメントは行っていない。また、実験ホールの床面の長期変動にも注意を払ってこなかった。この点は、定期的にマシントンネル内の機器を再アライメントしてビームラインの光軸を維持してきた ESRF とは対照的である。建設当時と最近の SPring-8 加速器トンネル内床面高さのデータを見比べると、1996年の建設時には ± 0.5 mm 程で滑らかであったトンネル内全周の高低差が、20年後の2016年には ± 2 mm 程に増大し、しかも多くの高い周波数成分を持つ凹凸が形成されている (Fig. 3)。強固な岩盤に支えられているので20年間でこの程度しか変化しなかった訳だが、この床面の変動は加速器トンネル内に設置され

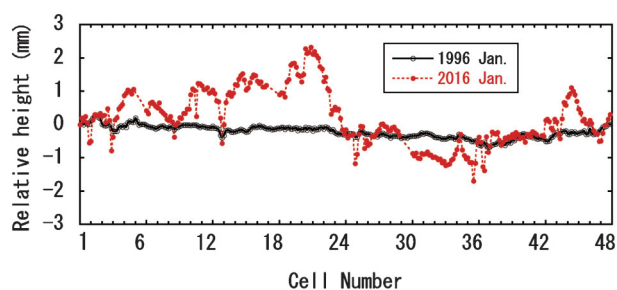


Fig. 3 (Color online) Relative height of the floor of the accelerator tunnel of SPring-8 with respect to a temporary reference point presumed in the first cell¹⁸⁾.

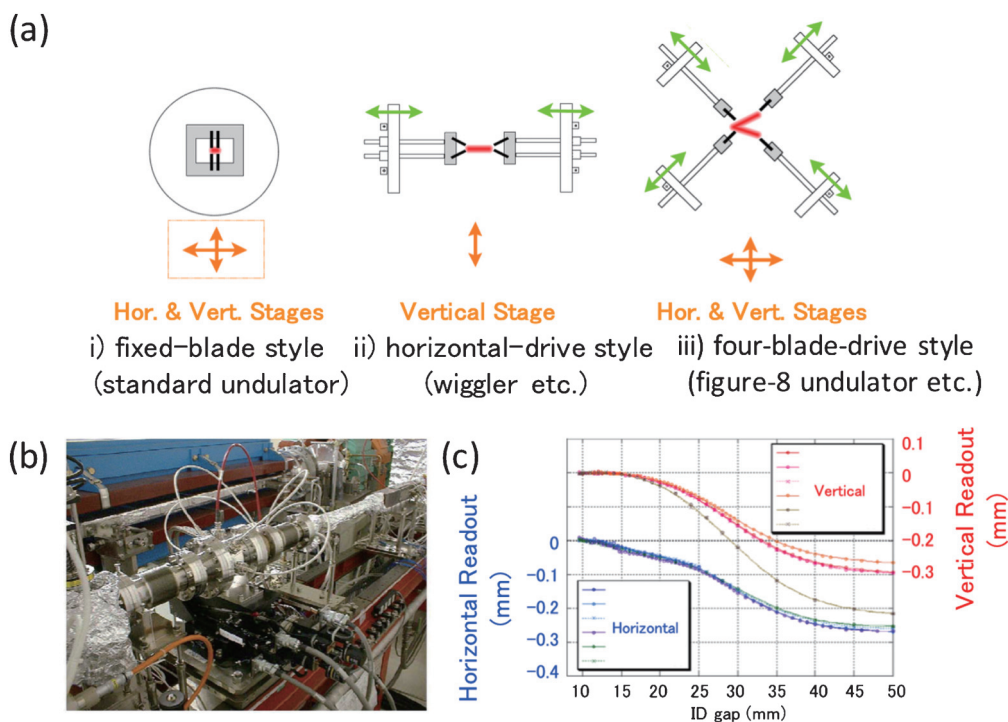


Fig. 2 (Color online) (a) Schematics of three blade styles of SPring-8 XBPMs¹⁶⁾. (b) Photograph of a standard undulator XBPM. (c) Measured undulator gap dependence of a standard undulator XBPM for ID47¹⁷⁾.

た機器のアライメントを崩しアンジュレータの光軸を変動させるには十分な大きさである。利用運転の開始時等に各実験ハッチでは、提供される光軸に対して実験セットアップを合わせる操作が必要となり、次章で述べる SACLA の運用とは全く異なっている。SPring-8 運転開始から放置されてきた機器のアライメントの崩れの影響により、加速器のアライメントがリセットされる SPring-8-II では、アンジュレータの光軸が設計値に戻るため、現状のビームライン側光学系を再アライメントする必要がある。

第三は、主に BPM システムの安定度の問題である。各ビームラインの光軸の情報を反映できない現在の SPring-8 のビーム軌道制御では、光軸制御の安定度は BPM システムの安定度で決まる。現在の BPM システムは原点のドリフト等安定性に問題があり、一昨年より原因の徹底調査と対策を始めた¹⁹⁾。詳細は本稿では割愛するが、得られた知見を全て反映させて SPring-8-II のための新しい BPM システムの設計を進めている。

本章では、ビームラインの光軸に焦点をあてて SPring-8 のビームコミッショニングと定常運転の経験を振り返った。光診断系とともに機器の再アライメントに、SPring-8-II に向けた大きな課題があることを述べた。次章以降では、SACLA で達成した光診断系の成果と、それを踏まえた SPring-8-II に向けた光診断系開発の戦略へと話を進める。あわせて、SPring-8-II で光軸を長期に維持するための加速器及びビームラインの測定とアライメントの課題を考察する。

3. SACLA の光診断系

この章では、X 線自由電子レーザー施設 SACLA を例として、新しい光源における光診断の重要性について述べる。

SPring-8 には 60 近いビームラインが設置されているため、各ビームラインの光診断の情報をリアルタイムで反映させる加速器の運転は難しく、実現されていない。このため、電子ビームの状態を最適に保つように運転を行い、生成された放射光に各ビームラインの光学系と実験装置を合

わせ込んで利用する。極端な言い方をすれば、加速器の運転は電子ビーム診断だけに閉じて行われており、光診断は補助的な役割しか果たしていない。

これに対し SACLA では、加速器の運転と光診断系を切り離して考えることはできず、加速器からエンドステーションまでが一体の実験装置として運用されている。電子ビームだけでなく光の特性値も指標とし、利用実験からの要求を満たす品質の光を供給するよう加速器を運転する。このため、ビームラインの各所に光診断システムが常設機器として配置され、電子ビーム診断系と協奏的に活用されている。次節以降では、SACLA の運転や利用実験において、光診断系がどのように活用されているか、例を挙げて紹介する。

SACLA の加速器運転における光診断系の利用

SACLA の加速器の調整精度は SPring-8 に比べて格段にシビアになっており、電子ビーム診断系はもちろん、光診断系にも高い精度が要求される。電子ビーム軌道の調整を例にとれば、100 m 以上に亘るアンジュレータ区間において軌道アライメントの許容誤差は $0.5 \mu\text{rad}$ 程度である。また、20 台近いアンジュレータを精密に調整する必要がある。このような調整を可能にする精度が光診断系に要求される。SACLA の完成直後のコミッショニングにおいては、各アンジュレータからの自発放射の空間強度分布と波長分布を診断することで、電子ビーム軸およびアンジュレータギャップの精密調整を行った²⁰⁾。このような調整にはモノクロメーターと高感度プロファイルモニターが利用され、現在も定期的実施されている。

日常の運転においても、最良の状態の光を提供するために、光診断系が活用されている^{21,22)}。SACLA においては、電子ビームエネルギー等のパラメーターが実験毎に異なるため、頻繁に運転条件の変更が必要となる。このような日常的な調整においては、光ビームライン上に構築された透過型の診断システムを用いて複数のパラメーターを同時にモニターし、効率的な調整を行っている (Fig. 4)。通常、ビーム形状、パルスエネルギー、ビーム位置および波長を並行してモニターし、速やかに調整を行っている。

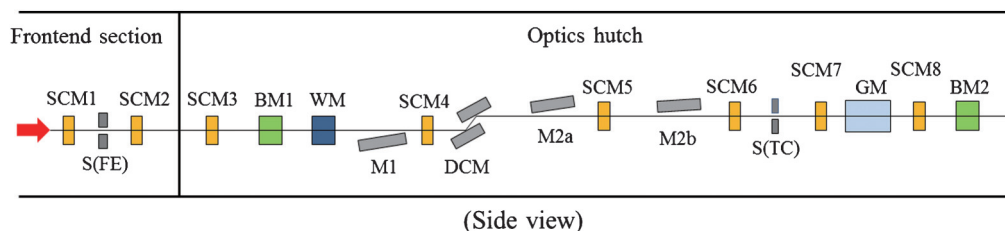


Fig. 4 (Color online) Online monitors and major optics in the frontend section and optics hutch of SACLA BL3. S (FE): Frontend slit; SCM: Screen monitor; BM: Intensity and position monitor using a diamond foil; WM: Wavelength monitor; M1, M2a, M2b: Plane mirrors; DCM: Double crystal monochromator; S (TC): Transport-channel slit; GM: Intensity monitor using gas.

Fig. 5に、透過型の診断機器の例を示す。このような診断機器は、加速器制御室と実験ステーションのどちらからでも操作・測定が可能であり、不要な場合は、光軸から完全に退避させることができる。また、加速器の調整に必要な光診断機器を光学ハッチ内に設置することにより、実験ハッチにおけるユーザーの準備作業を妨げることなく調整を行うことができる。

ユーザーにXFELを供給する際には、エンドステーションの定位置に光が到達するように光軸を設定する。まず、アンジュレータへの電子ビーム入射軌道を調整し、光学ハッチの入口に設置された蛍光スクリーン（Fig. 4のSCM3）を利用してXFELビーム重心を定位置に合わせ込んでいる。この際、定位置から $30\text{ }\mu\text{m}$ 以内に重心が収まるように、 $0.1\text{ }\mu\text{rad}$ 程度の分解能でXFELビームポインティングの調整を行う。さらに、ビームライン光学系の各所に設置された蛍光スクリーンでビーム位置を観測し、常に同じ光軸でXFELが実験ハッチに導入されていることを確認する。このように光軸を固定することにより、実験ハッチの光学系や実験装置のアライメント作業を最小限に止め、速やかに実験を開始することが可能となった。特に、利用実験では集光光学系が多用されるため、入射光軸の固定は、集光ビーム形状の再現性を確保する上で極めて重要である。光源サイズが小さいXFELを集光する場合

はピンホール等の仮想光源が不要となる一方、アンジュレータ部分でのポインティング調整が必須となる。また、光学レーザーを併用する実験も多く、XFELの光軸が定まっていることは、光学レーザーの事前調整を行う上でも好都合である。

利用実験における光診断系の利用

利用実験においても光診断が重要なことは言うまでも無く、適切な診断系を活用することで、光源性能を活かした実験を行うことができる。SACLAの光特性は既存光源のものとは大きく異なるため、それに応じた診断装置を開発する必要があった。各装置の詳細説明は文献に譲るとして、この節では代表的な例を簡単に紹介するに止める²¹⁻³⁰⁾。

まず、XFELの重要な特徴の1つとして、空間コヒーレンスの高さがある。光診断系によってコヒーレンスを損なうことがないように、いわゆるスペックルフリーの光学素子を用いた診断装置が開発された^{21,28)}。例えば、Fig. 5に示した診断機器には高品質ダイヤモンド薄膜が用いられ、XFELの波面を乱すことなく光の特性をモニターすることができる²²⁾。

次に、SACLAは尖頭出力の高い低繰返しのパルス光源であり、SASE型XFELの発生原理に由来する光特性の揺らぎが避けられない。SPRING-8の放射光は連続光とみなせるほど繰返しが多く、光特性の揺らぎも少ないため、時間的に平均してノイズを低減させる計測法が一般的である。また、診断と実験の同時性というものは、あまり重要視されない。これに対し、SACLAにおいては単一パルスの照射で試料が破壊されることが多く、パルス毎にデータ取得を完結させる実験スタイルとなる。光診断についても同様に、各パルスについて測定データを出力し、記録する必要がある。また、パルス毎の光特性の揺らぎがあるため、非破壊診断によって実験と同時に光の特性が記録され、実験データの補正に利用される^{29,30)}。光診断と実験を同時並行で行うためには、上で述べたような透過型モニターを利用するか、ビームスプリッターを利用する。SACLAでは透過型回折格子をビームスプリッターとして利用し、1次回折光は診断機器に、0次回折光が実験に利用される²⁷⁾。基本的に、ビームラインに組み込まれた診断機器（Fig. 4）は単一パルス計測が可能である。他にも、パルス毎にXFELのスペクトルを記録できる高分解能スペクトロメーターがSACLAで開発された²⁴⁾。

短いパルス時間幅も、XFELの重要な特徴の1つである。フェムト秒のパルス時間幅を活かした実験として、光学レーザーと組み合わせたポンププローブ型の計測が多く行われる。このような実験では、光学レーザーとXFELのパルスの到達時間差をフェムト秒の精度で測定する必要がある。SACLAにおいては、フェムト秒の分解能を有する到達時間モニターにより、到達時間差がパルス毎に測定される^{26,27)}。光学レーザーとXFELの到達時間差の変動

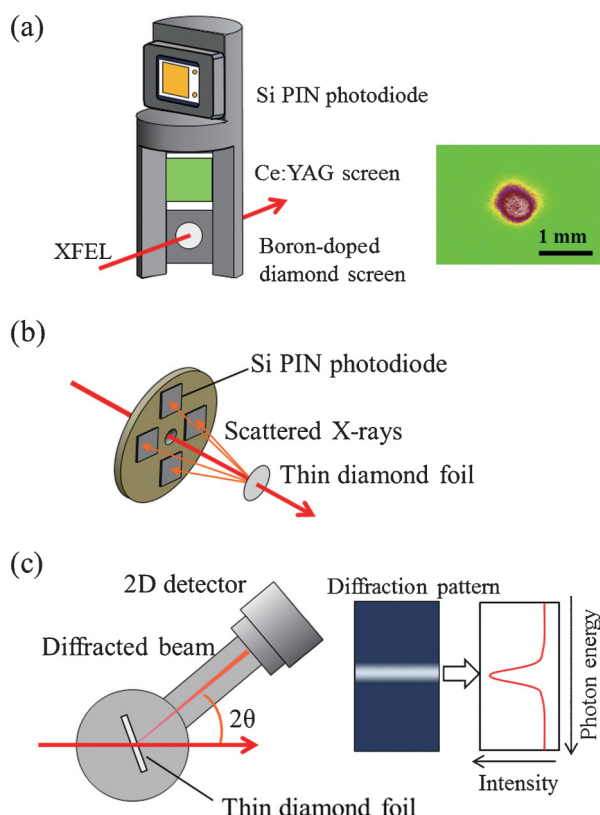


Fig. 5 (Color online) Online diagnostic tools using speckle-free thin diamond foils²²⁾. (a) Screen monitor. (b) Intensity and position monitor. (c) Wavelength monitor.

(ジッター) が数百フェムト秒にもなるため、補正をしなければ、測定の時間分解能が数百フェムト秒程度に制限されてしまう。

上で述べた診断システムを開発する上で最も重要な課題となったのが、利用実験と光診断が両立できるシステムを構築することであった。このことは、光診断自体を目的とするシステムの開発よりも格段に難しい。しかも、特定の種類の実験にしか適用できない間口の狭いシステムにならないよう、注意する必要がある。SACLA における開発の事例は、新しい光源における光診断系を開発する上でも参考になるであろう。

この章では、SACLA における光診断系の運用と開発について述べてきた。SACLA における光診断系の整備から学んだことは、加速器の運転からエンドステーションにおける利用実験までを俯瞰した上で、最適な光診断系を構築し、適切に運用することの重要性である。SPring-8 のアップグレードに向けた光診断系の構築においても、施設全体のパフォーマンスをいかに高めるかという視点が特に重要となる。すなわち、光源特性と利用実験の形態を考慮し、決められた境界条件のなかで最適な光診断システムを構築することが求められる。次章では、アップグレード後の SPring-8 の光診断系構築に向けた戦略について述べる。

4. アップグレード後の SPring-8 で必要となる光診断系構築に向けた戦略

加速器およびビームラインの定期的な測定とアライメント

光軸を長期間安定に維持するためには、「加速器トンネル内の加速器機器」並びに「実験ホール内のビームライン機器」の基準位置を長期間に亘り維持することが必要となる。2 章で述べたように SPring-8 ではこの 20 年でトンネル内の加速器コンポーネントの位置変位について測定をしてきたものの、それを加速器の再アライメントには反映してこなかった。次世代光源 SPring-8-II では、このやり方は許されず、定期的な測定と再アライメントを繰り返す必要がある。経時変化により、仮にトンネル内と実験ホールの相対的な位置がずれてしまうと、加速器コンポーネント単独の再アライメントにより、ビームラインでの光軸が相対的に変化することがあり得るため、加速器側でのステアリングの範囲とビームライン側の調整許容範囲を超える場合には、ビームラインコンポーネントの再アライメントが必要となる。

測定に際しては、トンネル内と実験ホールの個別の経時変化を追うだけでなく、基準位置の相対的な変化を調べる必要がある。これまで SPring-8 ではトンネル内外の長期的な相対位置変動を監視してこなかったため、定量的な相対変位の評価ができていない。最近になってようやく Hydrostatic Leveling System (HLS) 等を用いて、建設

当初に加速器コンポーネントから実験ホールに延伸した基準が 20 年でどの程度相対変化したかについて計測を開始した。今後、トンネル内外の相対的な位置変化を含め定期的に測定していく基本方針に変わりはないが、この計測結果をまわって、具体的に実験ホール側の測定と再アライメントの要求精度、実施頻度等の方針を決めることになる。

再アライメントに際しては、加速器コンポーネントとビームラインコンポーネントの補正量に重みづけを行い適当な評価関数を作ることにより、評価関数が最小になるように最適化し、作業を最小化していく必要がある。このように、トンネル内外の定期測定結果をどのように再アライメントに反映していくか、加えて、運転停止中の限られた期間で加速器コンポーネントとビームラインコンポーネントをどのように再アライメントしていくかの方針を具体的に決めることが今後の課題になっている。

定常運転におけるアンジュレータ放射中心の計測

測定とアライメントにより加速器およびビームラインの基準を設定した後、実際の放射光の光軸が正しく基準の中心軸を通っているかを確認する必要がある。多種多様なビームラインの運転状況を考えると、コミッショニング時や決められたビーム調整時間帯だけでなく、定常運転時にも計測可能なシステムとして構築しておく必要がある。特に SPring-8 および SPring-8-II で主として利用される X 線アンジュレータでは、放射のトータルパワーが 10～20 kW に達するが、これらの放射光の中心を確認できる光モニターシステムを構築することが最優先課題となる。このため、高熱負荷対策が、3 章で述べられた SACLA のビームモニターに加えて課せられる重要な要件となる。

システム構築のポイントは (a) ビーム破壊型でよいのでビーム調整時の定点観測として各ビームラインで光軸を定期的に確認できるモニターと (b) 定常運転中のビーム位置変動をみる常時使用可能なモニターを実現すること、加えてこれらで得られた情報を加速器運転にフィードバックすることである。

現状の SPring-8 のビームラインでは、フロントエンドにおいて高熱負荷機器である固定マスクや XY スリットにおいてアンジュレータ放射のテールを切り、コア (セントラルコーン) のみを取り出すようにし、下流の光学素子へ余分な熱を伝えないような構成になっている。基本的に SPring-8-II でもこの方式を大きく変えることはない。

光モニターをこれらの上流に置く際には、10 kW オーダーの熱負荷を受けるだけの光モニター媒体が必要になるとともに、そこからの信号の取り出し方を検討する必要がある。光電子、二次電子、散乱 X 線、蛍光 X 線、伝導電流などをプローブにするにしても白色の放射光から出てくる信号から正しく情報を得ることはかなり難しい。Table 1 に、SPring-8 および SPring-8-II の標準アンジュレータにおける基本波のセントラルコーンの分布とパワー分布の広

がりの目安を示す。セントラルコーンの広がり比べてパワー分布は1桁以上広い角度分布であることが分かる。媒体に白色X線を照射しそこからの情報を得るモニター方法では、概ねパワー分布に近いものを見ていることになり、コアの位置を知るには分解能の点で不利である。一方、分光されたスペクトル分布を併せて計測できればアンジュレータのコアに関する位置情報の確度を上げることが可能になる。**Fig. 6**はSPring-8およびSPring-8-IIの標準アンジュレータにおける基本波のスペクトルが光軸から水平方向、垂直方向にずれたときにどのように変化するかを示したものである。いずれも基本波のピーク波長が0.1 nm (12.4 keV) になる条件で計算した。軸上で $10\ \mu\text{rad} \times 10\ \mu\text{rad}$ の開口で取り出したスペクトルと、開口を維持し

て水平、垂直方向に $10\ \mu\text{rad}$ および $20\ \mu\text{rad}$ だけ軸外にはずれた際のスペクトルを示している。なお $10\ \mu\text{rad}$ は、光源から30 mに置かれたフロントエンドスリットでは0.3 mmに相当する。注目すべきは、水平方向にずらしたときのピークのシフトであり、SPring-8-IIの場合、1桁以上小さいエミッタンスのため明瞭に低エネルギー側にピークがシフトしていることである。現SPring-8では水平ビームサイズが大きいためこのようなシフトは観測できず、水平方向の中心位置を知るためには主に強度情報のみに頼らざるを得ないことと対照的である。一方で垂直方向に関しては、SPring-8, SPring-8-II共に軸外で低エネルギーにピークシフトすることが分かる。

このようなアンジュレータ放射の特徴を生かし、アンジュレータのビーム中心を決める試みがBL37XUにおいて行われた²⁸⁾。フロントエンドスリットの下流に厚さ100 μm のベリリウム箔を挿入し、弾性/非弾性散乱X線スペクトルを、シリコン検出器を用いてエネルギー分散型にて計測した。この際、フォトンカウンティングが可能な計数率まで、立体角などを調整して検出散乱強度を下げた。また、ベリリウム箔は水冷しているが、この試験では最大10 W程度の照射に止めている。**Fig. 7**に計測系の模式図と、フロントエンドのスリットをスキャンして得られたスペクトル変化の様子を示す。垂直方向のスリットスキャン

Table 1 Angular divergence of undulator radiation. The upper and lower rows show a central cone of a fundamental wavelength and an angular distribution of radiation power, respectively. Undulator length of 4.5 m for SPring-8 and 3.6 m for SPring-8-II are assumed for the calculation of σ_r .

	SPring-8 (8 GeV)	SPring-8-II (6 GeV)
σ_r (μrad) @0.1 nm	3.33	3.73
$1/\gamma$ (μrad)	63.9	85.2

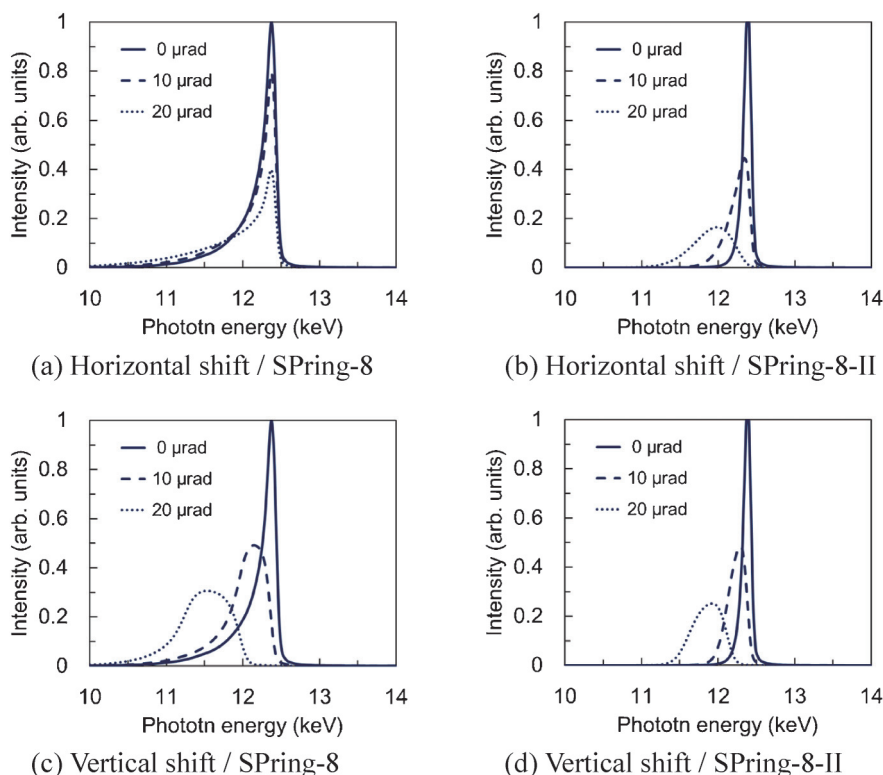


Fig. 6 Spectral change of fundamental peak due to off-axis observation of undulator radiation. Slit opening is assumed to be $10\ \mu\text{rad} \times 10\ \mu\text{rad}$, corresponding to $0.3\ \text{mm} \times 0.3\ \text{mm}$ of frontend slit at 30 m from the source.
(a), (c): SPring-8, $L = 4.5\ \text{m}$, $\lambda_u = 32\ \text{mm}$, 12.4-keV x-rays.
(b), (d): SPring-8-II, $L = 3.6\ \text{m}$, $\lambda_u = 22\ \text{mm}$, 12.4-keV x-rays.

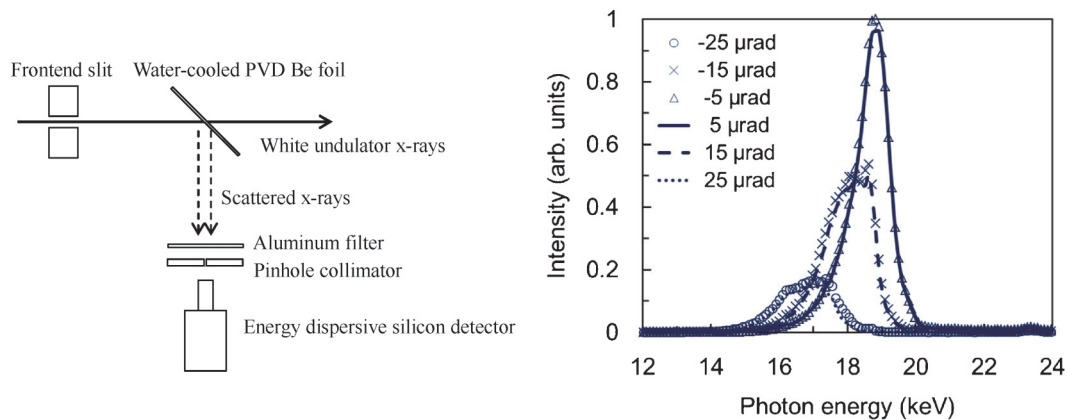


Fig. 7 Schematic of spectrum measurement system for white undulator radiation with PVD beryllium scatterer and energy dispersive silicon drift detector (left). Spectra measured using the system (right). Peak energy and intensity change depending on the vertical position of frontend xy-slit as shown observation angles from $-25 \mu\text{rad}$ to $25 \mu\text{rad}$. It facilitates to find the white undulator beam axis.

で強度変化に加えピーク位置のシフトも明瞭に計測可能で、 $10 \mu\text{rad}$ 程度の角度分解能でビーム中心を決定できることが示された。この方法はフロントエンドスリットを定常時とは異なる開口にしてスキャンする必要があることから実利用を遮るビーム破壊型の一種であるが、ルーチンの計測システムとして構築できれば定点観測の有力な手段になる。ここで光軸基準を決めるのはフロントエンドスリットである。こうして決められたフロントエンドスリット中心を通ってくるビームが実際の光軸となる。測定・アライメントにおいては、特にフロントエンドスリットの位置情報を押さえておくことが要となる。

ビームライン上の一点での計測のため、角度情報でなく位置情報のみの計測であるが、2章で述べられたように電子ビームの軌道変動が $100 \mu\text{m}$ 以内で抑えられていれば、トータルとしても $10 \mu\text{rad}$ 程度の精度で角度情報を読み取ることが可能になる。これは、SPring-8の実験ホールの終端部約 100 m の位置で 1 mm 程度の位置変位に相当することになり、光軸のずれが許容できるかどうかの critical な目安となるだろう。次世代光源の少なくとも破壊型ビームモニターとして、このように分光機能を併せもち、コア部分を精度よく計測できるシステムを導入することが重要である。

一方、ミラーや結晶分光器を通過し熱負荷が軽減された光に対するモニターとしては3章で述べられた各種タイプが利用可能となる。薄膜を光軸上に挿入するものであれば波面を乱さないような品質が要求されるが、スペックルフリーなものですでに SACLA で利用可能であれば、SPring-8-II でも問題なく利用できる。今後の検討課題は、光学素子のドリフト、振動を極限まで抑え込むこと、光学素子上流のビームの位置・角度変動と切り分けることである。また、常時モニターであればモニターにおける X 線吸収によるビームロス为数%以下には抑えておく必要があり、材料、厚さの最適化が必要となる。これに対し、2章

において指摘されたように、熱負荷対策をし、波面を乱さず、光学素子上流に設置可能な常時モニターの構築が大きな課題として残される。

計測条件としてアンジュレータのギャップをどう設定するかも重要なファクターである。上で述べた破壊型モニターの例では、スペクトルのピーク近傍が計測できれば原理的にギャップが変わっても計測可能である。また、常時モニターの場合、検出器のダイナミックレンジの範囲内であればアンジュレータのギャップによらない計測が可能となる。アンジュレータのギャップ依存性の問題を解決するためにもコアの部分を計測するモニターが有効となる。

全体でのシステム構築に際しては、SACLA のようにビームラインからだけでなく加速器の調整に活用できるよう、これらの光軸モニターは加速器側でも制御可能であり、その情報が加速器制御 LAN 上で自由に利用できることが必要条件となる。

5. おわりに

本稿では、これまでの SPring-8 における光モニターおよび加速器・ビームラインのアライメント戦略の反省にたって次期光源であるべき姿を概観した。超低エミッタンスリングにおいてはエミッタンスを維持してビームを安定に回すために定期的な測定と再アライメントが必要となること、加えてトンネル内外の偏差を計測し併せてビームライン側の再アライメントも必要となることを述べた。

基準軸が設定されたのちのアンジュレータ放射の光軸中心を知るためには、パワー分布でなく基本波のコア（セントラルコーン）を計測することがより計測精度を高めることを示した。少なくとも破壊型モニターであれば $10 \mu\text{rad}$ の精度で光軸を決めうることを例示した。一方、常時モニターについては熱負荷のない単色光領域ではスペックルフリーであることも含め SACLA の各種モニターが適応可

能であり、これを高熱負荷対応としていくことが今後の課題である。

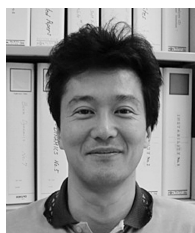
最後に、SACLA の事例に学び、ビームラインに構築した光モニターを活用し、加速器とビームラインが一体となってビーム調整可能なモニターシステムを構築することが、次世代光源の性能を多くのビームラインにおいて活用するために必要であることを強調したい。

参考文献

光診断系を取扱った日本語の解説として、次の文献を紹介する。
登野健介, 光ビームライン, OHO'13高エネルギー加速器セミナー (X線自由電子レーザー ~SACLA~) テキスト, 2013年7月, http://accwww2.kek.jp/ofo/OHOtxt/OHO-2013/11_tono_kensuke_20130711.pdf

- 1) P. Emma *et al.*: Nature Photon. **4**, 641 (2010).
- 2) T. Ishikawa *et al.*: Nature Photon. **6**, 540 (2012).
- 3) 動き始めた XFEL 施設 SACLA : 放射光 **25**, 53 (2012).
- 4) ESRF Upgrade Program Phase II (2015-2022) Technical Design Study, http://www.esrf.eu/Apache_files/Upgrade/ESRF-orange-book.pdf
- 5) SPring-8-II Conceptual Design Report, <http://rsc.riken.jp/pdf/SPring-8-II.pdf>
- 6) Multi-Bend Achromat Lattice White Paper, <https://www1.aps.anl.gov/files/download/Aps-Upgrade/multi-bend-achromat-lattice.pdf>
- 7) H. Tarawneh *et al.*: Journal of Physics, Conference Series **493**, 012020 (2014).
- 8) T. Kimura *et al.*: Nat. Comm. **5**, 3052 (2014).
- 9) K. Tamasaku *et al.*: Nat. Photon. **8**, 313 (2014).
- 10) M. Suga *et al.*: Nature **517**, 99 (2015).
- 11) K. H. Kim *et al.*: Nature **518**, 385 (2015).
- 12) H. Yoneda *et al.*: Nature **524**, 446 (2015).
- 13) K. Tsumaki *et al.*: Proc. EPAC98, p.1356 (1998).
- 14) K. Soutome *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. **A459**, 66 (2001).
- 15) H. Sakae, *et al.*: J. Synchrotron Rad. **4**, 204 (1997).
- 16) H. Aoyagi *et al.*: Nucl. Instr. and Meth. **A467-468**, 252 (2001).
- 17) H. Aoyagi *et al.*: Proc. MEDSI2004, 04-01 (2005).
- 18) H. Kimura *et al.*: Proc. 13th Annual Meeting of PASJ, WEOL09, p.221 (2016).
- 19) T. Fujita *et al.*: Proc. IBIC2015, p.359 (2015).
- 20) T. Tanaka *et al.*: Phys. Rev. ST Accel. Beams **15**, 110701 (2012).
- 21) K. Tono *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **82**, 023108 (2011).
- 22) K. Tono *et al.*: New J. Phys. **15**, 083035 (2013).
- 23) M. Yabashi *et al.*: Phys. Rev. Lett. **97**, 084802 (2006).
- 24) Y. Inubushi *et al.*: Phys. Rev. Lett. **109**, 144801 (2012).
- 25) M. Kato *et al.*: Appl. Phys. Lett. **101**, 023503 (2012).
- 26) T. Sato *et al.*: Appl. Phys. Express **8**, 012702 (2015).
- 27) T. Katayama *et al.*: Struct. Dyn. **3**, 034301 (2016).
- 28) S. Goto *et al.*: Proc. SPIE **6705**, 67050H (2007).
- 29) T. Kudo *et al.*: Rev. Sci. Instrum. **83**, 043108 (2012).
- 30) Y. Joti *et al.*: J. Synchrotron Rad. **22**, 571 (2015).

著者紹介



田中 均

特定国立研究開発法人 理化学研究所放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門 部門長, 先端光源開発研究部門 回折限界光源設計検討グループ グループディレクター

E-mail: tanaka@spring8.or.jp

専門: 加速器におけるビーム物理

【略歴】

1982年3月東京工業大学総合理工学研究科化学環境工学専攻終了, 1982年4月日揮株式会社原子力事業本部, 1989年9月特殊法人理化学研究所サイクロトロン研究室, 1999年5月財団法人高輝度光科学研究センター加速器部門副主席研究員, 2005年4月同部門主席研究員, 2006年4月理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部。2010年4月財団法人高輝度光科学研究センター XFEL 研究推進室室長を経て, 2011年4月から理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門部門長, 2013年5月から先端光源開発部門回折限界光源設計検討グループディレクターを兼務。博士 (工学)。



登野健介

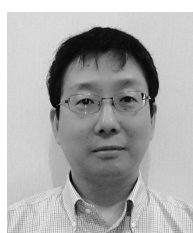
公益財団法人 高輝度光科学研究センター XFEL 研究推進室先端利用グループ 利用技術開発・整備チーム チームリーダー, 特定国立研究開発法人 理化学研究所放射光科学総合研究センター 客員研究員

E-mail: tono@spring8.or.jp

専門: 物理化学

【略歴】

2002年東京大学大学院理学系研究科化学専攻博士課程修了, 博士 (理学)。東京大学博士研究員, 東京理科大学助教, 理化学研究所研究員を経て, 2011年4月より現職。



正木満博

公益財団法人 高輝度光科学研究センター 加速器部門 主幹研究員

E-mail: masaki@spring8.or.jp

専門: 加速器ビーム診断, ビーム不安定性

【略歴】

筑波大学大学院物理学研究科博士課程修了, 博士 (理学)。1995年4月から現職。SPring-8 蓄積リングのビーム診断, 主として光診断系の開発, およびビーム不安定性解析に従事し, 現在に至る。



後藤俊治

公益財団法人高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 部門長, 加速器部門 部門長, 特定国立研究開発法人 理化学研究所放射光科学総合研究センター 先端光源開発研究部門 部門長

E-mail: sgoto@spring8.or.jp

専門: X 線光学

【略歴】

1986年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了。
1986年株式会社富士通研究所, 1995年財団法人高輝度光科学研究センター研究員, 2007年8月より光源・光学系部門 部門長。
2014年4月より加速器部門 部門長を兼務, 2014年10月より先端光源開発研究部門 部門長を兼務。博士 (工学)。



矢橋牧名

特定国立研究開発法人 理化学研究所 放射光科学総合研究センター ビームライン研究開発グループ グループディレクター, 公益財団法人 高輝度光科学研究センター XFEL 利用研究推進室 室長

E-mail: yabashi@spring8.or.jp

専門: X 線光学

【略歴】

1996年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻修士課程修了, 高輝度光科学研究センター研究員。理化学研究所 XFEL 計画推進本部研究員を経て, 2011年より, ビームライン研究開発グループディレクター。2015年より, XFEL 利用研究推進室長。博士 (工学)。



高野史郎

公益財団法人 高輝度光科学研究センター 加速器部門主幹研究員, 特定国立研究開発法人 理化学研究所放射光科学総合研究センター 客員研究員

E-mail: takano@spring8.or.jp

専門: 加速器

【略歴】

1990年東京大学大学院理学系研究科博士課程修了, 博士 (理学)。1990年より分子科学研究所 UVSOR 助手 (自由電子レーザーの研究), 1992年より理化学研究所研究員 (SPring-8 のビーム診断系の研究開発) などを経て, 2001年4月より現職。2016年4月より理化学研究所客員。

Photon diagnostic system to fully utilize the performance of upgraded SPring-8

Hitoshi TANAKA¹, Shunji GOTO^{1,2}, Shiro TAKANO^{1,2},
Kensuke TONO^{1,2}, Mitsuhiro MASAKI², Makina YABASHI^{1,2}

¹RIKEN SPring-8 Center, 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

²JASRI, 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan

Abstract A next generation SR source with an extremely low beam emittance provides a transversally sharp electron beam at every undulator source point. The source beam size is equal to or less than a few tens μm in r.m.s. in both the horizontal and vertical planes. The two-dimensionally brilliant electron beam paves the way for applications of brighter pinhole-free X-ray nanobeams. Utilization of such a next generation SR source requires dramatic performance jumps for various beam control technologies. A photon diagnostic system enabling precise photon/electron beam controls is one of the most essential components. This article outlines target performances of the photon diagnostic system required for the SPring-8 upgrade and proposes a development strategy based on problems found in the photon beam control during the current SPring-8 operation and precise electron/photon beam controls achieved at SACLA by using the photon diagnostic system.