



SPring-8 における将来計画

渡部貴宏

理研播磨研究所/高輝度光科学研究センター

SPring-8 次期計画ワーキンググループ 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

要旨 1997年以来、高輝度放射光源として基礎科学から産業利用に至るまで広く放射光利用研究に供してきた SPring-8 は、2019年の実施を目前に次期計画の策定を進めている。その目標は、「X線領域における回折限界」を実現する究極の光源であり、輝度は現在の数百倍に相当する。本稿では、その光源開発の方針および現状について紹介する。

1. はじめに

ここで紹介する次期計画案 SPring-8 II は、SPring-8 次期計画ワーキンググループが中心となって進めてきた検討案をまとめたものであり、ワーキンググループのメンバーによる力を結集した結果である。なお、以下に述べる加速器案の具体的内容は、今後の検討の進展、加速器科学の進歩などにより変更していく可能性がある。

SPring-8 は、1997年3月に 8 GeV 電子ビームの蓄積に成功し、ヨーロッパの ESRF (6 GeV)、アメリカの APS (7 GeV) と並んで世界 3 大放射光施設 (3 極) の 1 つとなった。2000年からは約 30 メートルの長直線部が利用可能となり、通常直線部とは異なる特徴を持つビームラインの設置が可能になった。2002年には、加速器のオプティクスを改良することで更なる低エミッタンスビームを実現し、現在の電子エミッタンスは $\sim 3.4 \text{ nm} \cdot \text{rad}$ 、及びそこから発せられる X 線輝度は $\sim 10^{20} [\text{photons}/\text{sec}/\text{mm}^2/\text{mrad}^2 / 0.1\% \text{ B.W.}]$ に達する。2004年にはトップアップ運転が開始され、光フラックスや熱負荷が一定の光を利用者に提供できるようになった。蓄積電流値の安定度は 0.03% に達している。また、「多彩な運転モード」「光源性能を追求した極低 Vertical エミッタンス (カップリング $\sim 0.2\%$)」「高精度フィードバック等による軌道安定化 ($< \text{数 } \mu\text{m}$)」「高純度バンチ (孤立バンチと前後の空バンチとの電子数比 $\sim 5 \times 10^{10}$)¹⁾」といったユーザーの利便性を重視した光源性能が次々と実現され、高安定なトップアップ運転と共に SPring-8 の重要な特長となっている。以上のような光源性能の高度化に加え、ビームラインおよび実験ステーションの効率化を行ってきた結果、利用課題の採択数は増加し、放射光利用の需要増加に対し最大限に対応してきた。しかし、高効率化には限界があり、ここ数年の採択数は頭打ちになっている。

また、同サイトでは「夢の光」と称される X 線自由電子レーザー (SACLA) の開発・建設が進み、世界最短波

長の 0.8 オングストローム (2011年7月13日現在) の X 線レーザー発振に成功した²⁾。現在も、更なる調整が進められている。

一方、本学会誌 Vol. 24 No. 4 の計画趣意書『「次世代リング型光源計画特集」の企画にあたって』に解説されている通り、世界中で新たなリング型放射光源の開発が進められている。特に 2009 年から PETRA-III (電子エネルギー 6 GeV, 周長 2.3 km, エミッタンス $1 \text{ nm} \cdot \text{rad}$) が始動したことで、もはや「3 極」の構造も崩れてきた。中エネルギー領域では、PETRA-III を凌駕するエミッタンスを持つ NSLS-II (アメリカ)、MAX-IV (スウェーデン) などの建設も進行している。

このような背景の下、SPring-8 では、2019年の実施を目前に蓄積リングのアップグレードを計画している³⁾。計画案の策定において、以下を基本方針としている。

10~20年後のサイエンスを支える次世代光源の開発には、第一に、輝度やコヒーレンス度で代表される光源性能が現状よりも飛躍的に高いものであることが望まれる。光源性能の大幅な向上により、SPring-8 における先鋭的な測定をより高度に進化させることが出来、且つ、現在の汎用実験で得られているのと同程度の光子数を、現在先端技術と呼ばれる技術に適用することが可能となるため、将来の汎用実験のレベルを押し上げることが可能になるからである。更に、輝度の飛躍的向上は各実験時間の短縮に寄与するため、年々増大する施設利用の需要に対し、実質的な研究機会の拡大を可能にする。

一方で、多くのユーザーの放射光科学を支える SPring-8 では、「予算、および停止期間を考慮した実現性」「現在の特長である高安定、高利便性の維持と発展」といった点も重要事項であると考えられる。その結果、SPring-8 では、次章に示すような究極の蓄積リング (Ultimate storage ring) を、これまでの特長を維持しつつ、現在 SPring-8 が有している資源 (建屋、装置、土地等) を最大限に活用しながら実現することを目指す。更に、昨今の社会事情を

踏まえ、エコの観点から高効率な放射光源の実現を目指す。ERLをはじめとする蓄積リング型以外の将来光源も提案されているが、上記留意点に加え、「2019年という約10年後における実用的な計画の妥当性」「同サイト内で既に始動している SACLA との相乗効果」といった事柄を総合的に判断し、蓄積リング型を選択した。

2. 光源開発を始めるにあたり

一章で述べた究極の蓄積リングとは、具体的には、蓄積電子ビームのエミッタンスを光の回折限界 ($\lambda/4\pi$) と同程度にすることを意味する⁴⁾。この領域では、発せられる光の横方向コヒーレンス度が100%に近づき、更に、輝度が達し得る最大値 (電子エミッタンスがゼロの時の輝度) に飽和してくる。電子エミッタンスと X 線輝度との関係の一例を Fig. 1 に示す。SPring-8 をはじめとする現在最先端の蓄積リングは nm・rad オーダーのエミッタンスを持ち、輝度は最大で 10^{20} [photons/sec/mm²/mrad²/0.1% B.W.] オーダーに達するが、エミッタンスが回折限界 (~ 10 pm・rad) に近づくに従って輝度が更に向上し、そこから先はほぼ飽和する。そういった意味で、回折限界と同等のエミッタンスを達成することは、リング型光源開発として1つの究極の目標と言える。

なお、回折限界 ($\lambda/4\pi$) は光の波長に比例、つまり光子エネルギーに反比例して小さくなる。一方、電子エミッタンスは電子エネルギーの2乗に比例するため、高エネルギーになると電子エミッタンスは大きくなる。従って、SPring-8 のような硬 X 線領域での回折限界の達成は、2

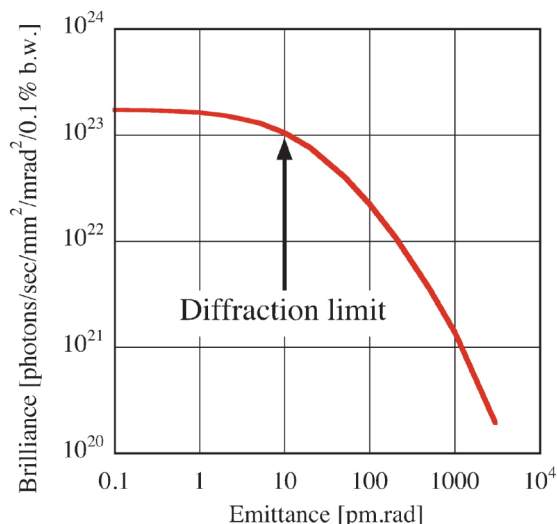


Fig. 1 Brilliance vs Emittance. Brilliance is estimated at 10 keV, of which diffraction limit corresponds to 10 pm.rad. Electron energy of 6 GeV, stored current of 100 mA, coupling ratio of 0.01, energy spread of 0.12%, and betatron functions of 1.0 meter in horizontal and vertical axes are assumed as an example.

重の意味で困難さが増すが、放射光科学における良質な硬 X 線源の開発・確保の重要性は言うまでもなく、SPring-8 ではこれを目指している。

光源開発を進めるにあたり、以下の3つの「境界条件」を設定した。

- (1) 既存の建屋・トンネルをそのまま用いる
- (2) 挿入光源のビームラインの位置は、今と同じ位置を維持する
- (3) シャットダウンは1年程度

(1)(2)は主にコスト、(3)はユーザーへの影響を考慮している。加速器設計の観点から言えば、条件(1)(2)により、蓄積リングの周長や4箇所の長直線部の存在を現在と同じにすることになる。また、上記に加えて、多彩な運転モードや高いバンチ純度といった現在の SPring-8 の特長を維持することも光源開発における条件とする。

次に、対象とする X 線スペクトルを決める必要がある。我々は、現リングと同じスペクトル領域、つまり数 keV~100 keV を対象とすることとした。この領域における輝度を最大にするための加速器設計を行う。

輝度は、トータルの光量であるフラックスを光ビームのエミッタンスで割ることで求められ、これを上げるためのアプローチは主に2つある。1つは、蓄積電流を上げてフラックスを増大させることであり、もう1つは、光エミッタンスを下げることで光の指向性を高めることである。しかし、前者は下流の機器への熱負荷が高くなり、省エネ・高効率化の観点からも好ましくない。一方、後者は、高効率になるだけでなく、輝度増大と共に光のコヒーレンスが上がるという長所を持つ。そこで、我々は後者を選択した。

上記スペクトル領域に最適な電子ビームエネルギーがいくつになるかは、光源開発を進める上で非常に重要な決定項目であるが、厳密に言うとは簡単には決定することが出来ない。まず、昨今の挿入光源技術の進歩に伴い、比較的低エネルギーでも硬 X 線が発生出来るようになってきた。従って、2019年の段階で挿入光源がどの程度進化しているか、具体的にはアンジュレータ周期や最小ギャップがどこまで小さく出来るか、が鍵となる。次に、電子エミッタンス ε は式(1)に示される通り、エネルギー E の2乗に比例するため、低エネルギーの方が低エミッタンスになる (式(1)の他の係数については後述する)。

$$\varepsilon = C \cdot E^2 \cdot \theta^3 \quad (1)$$

しかし、良く知られている通り、発生 X 線の波長 $\lambda_r = \lambda_u(1 + K^2/2)/2\gamma^2$ は電子エネルギーの2乗に反比例するため、あまり電子エネルギーを下げすぎると、硬 X 線が発生できなくなる。更に、電子エネルギーに応じて加速器を構成する主要機器 (磁石、真空機器等) への負荷が異なるため、実現可能な加速器の構成 (ラティス) が電子エネ

ギーにより異なる可能性がある。これら全てを踏まえ、総合的に電子エネルギーの最適化を行った結果、我々は現状案として 6 GeV を選択した。なお、低エネルギー化は、エネルギー拡がりの低減、電磁石設計上の制約条件の緩和、光アブソーバの熱負荷の低減（蓄積電流の増強）、ダンピングウィグラーによるエミッタンス低減効果の増進などにも役立つ。低エネルギー化による Intra-beam scattering 効果および不安定性の増大については、許容範囲内となる電流値を選択する。ただし、最終的な電子エネルギーは、将来の利用実験を見据えながら、今後の要素開発に伴って再設定される可能性がある。

3. 新加速器デザイン概略

加速器のデザインは、その骨子を成す磁石配置（ラティス）を中心に議論する⁵⁻⁷⁾。現在の SPring-8 は、Double-bend lattice と呼ばれるラティス構造をしている。これは、各セル（全48セルのうち、4つの長直線部を除く44セル）に配置される偏向電磁石の数が2つずつあるという意味である。従って、各偏向電磁石は1周360度を2×44で割った約4度ずつ電子ビームを偏向させる。式(1)における θ はこの偏向角であり、電子ビームのエミッタンスは、偏向角の3乗に比例している。従って、各セル内の偏向電磁石の数を多くすればするほど（ただし、ラティス関数がある一定の条件を満たす時）、偏向角が小さくなってエミッタンスは良くなるが、ビームダイナミクス・加速器工学の観点から難易度が急速に増すことが知られている（後述）。我々は、上述の「境界条件」の下、各セルに6個の偏向電磁石を配置する 6-bend lattice を中心に検討を進めている^{6,7)}。

Fig. 2 は、6-bend lattice をデザインした結果であり、1セル内におけるラティス関数を表している。このラティスは、式(1)における係数 C を最小にする TME (Theoretical Minimum Emittance) 型がベースになっている。

以上のように、式(1)の右辺の全ての因子を低減させることで、最終的に電子エミッタンスは $\epsilon = 67 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ に達することになる。これは、現在の SPring-8 のエミッタンス $3400 \text{ pm}\cdot\text{rad}$ の $1/50$ であり、更に、長直線部にダンピング・ウィグラー及び他のスキームを導入することで、エミッタンス半減を目指している。このようにデザインされた新たな蓄積リングの主要パラメータを **Table 1** にまとめる。

Fig. 3 は、新デザインによって得られる光源性能である。図中、HXBL-A は SPring-8 の標準アンジュレータに相当するクライオアンジュレータ（周期14.4 mm）、HXBL-B は、14.4~26 keV に特化したクライオアンジュレータ（周期10.2 mm）、SXBL は軟 X 線ビームライン、BM は Bending magnet のビームラインである。なお、現在の SPring-8 は蓄積電流100 mA、次期計画は300 mA で

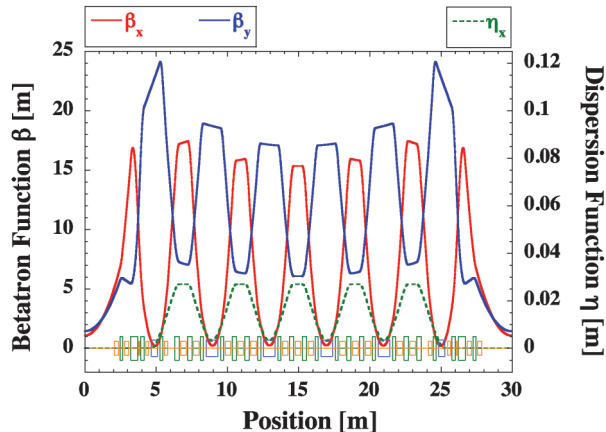


Fig. 2 Lattice functions of 6-bend lattice.

Table 1 Major parameters of newly designed ring

Lattice Type	6-bend achromat
Ring Circumference	1435.9488 m
Beam Energy	6 GeV
Natural Emittance*	67 pm.rad
Relative Energy Spread	0.096%
Beta at Normal Straight (H/V)	1.0 m/1.2 m
Bending Field	0.7 T
Max. Quadrupole Strength $B'L/(B\rho)$	0.84 m^{-1}
Max. Sextupole Strength $B''L/(B\rho)$	120 m^{-2}

* Natural emittance とは、カップリングを考慮しないエミッタンス。Damping wiggler やその他の追加装置の効果は入っていない。

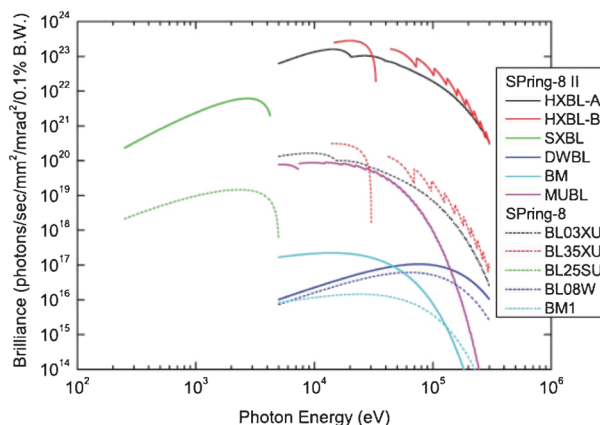


Fig. 3 Brilliance of the current SPring-8 and the newly designed ring, calculated by SPECTRA⁸⁾.

計算している。

Fig. 3 に示される通り、新デザインで得られる輝度は、我々が対象としている数 keV~100 keV、そして軟 X 線領域において現在の SPring-8 より約3桁高く、特に10~

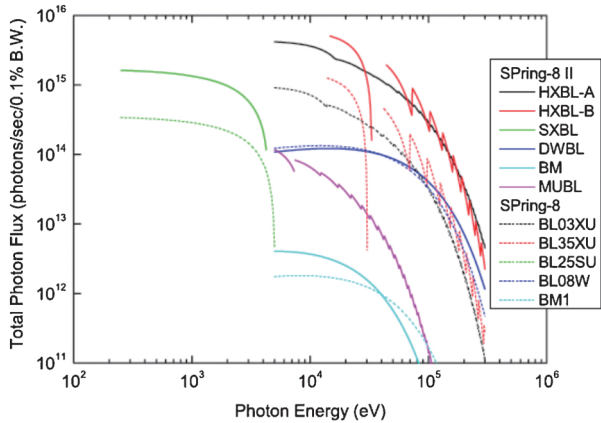


Fig. 4 Flux of the current SPring-8 and the newly designed ring. For bending magnets (BM), a horizontal angular acceptance of 0.1 mrad is assumed. Calculated by SPECTRA⁸⁾.

数10 keV の領域では 10^{23} [photons/sec/mm²/mrad²/0.1% B.W.] に達している。また、電子エネルギーを8 GeV から6 GeV に下げたにもかかわらず、100 keV 以上の硬X線において十分に輝度が増加していることがわかる。

フラックスについての結果を Fig. 4 に示す。フラックスはエミッタンス改善が効かないが、蓄積電流およびアンジュレータ周期数の増加によって、アンジュレータビームラインにおけるフラックスは現リングよりも1桁高くなっている。一方ベンドイングのビームラインにおいては、40 keV 以上でフラックスは低くなっている。

輝度の向上は、集光X線を用いる実験や、X線のコヒーレンス（空間干渉性）を活用する実験に特に恩恵をもたらす。輝度が1000倍向上することで、集光スポット中に得られる光子数あるいはX線強度が最大1000倍になる。コヒーレンスの増加については、水平方向の空間コヒーレンス長が現在の数十倍となり、ほぼビームサイズと同程度の領域が可干渉となる。その結果、コヒーレント回折実験等に使える光子数が最大で1000倍に増加する。それ以外の実験においても、輝度の向上によって光学系の効率が増加するため、ほとんどのビームラインで得られる光子数が増える。また、フラックスが一桁向上することで、試料位置で得られる光子数が現在の10倍になる。この効果はビームラインの光学系に依らない。全ての測定において測定時間が1/10に短縮され、これまでより10倍多くの試料が同じ時間で測定出来る。あるいはエネルギー分解能を10倍高くしてもこれまでと同程度の統計精度が得られる。

また、将来計画では、現在のSPring-8にはないミニ・アンジュレータ（短い周期数で、標準アンジュレータとベンドイングの中間的な役割のもの）やダンピングウィグラーからの光の有効利用についても視野に入れて検討している。なお、ビームラインの本数に関して、次期計画では、現在のSPring-8（最大62本）と同程度の本数を維持

することが重要と考えている。実験ステーションの再構成も視野に入ってくるが、現時点では多くの部分が未定であり、今後検討を進めていく。

4. 光源開発現状

これまでSPring-8では、3章で示すような新ラティスのデザインを行い^{6,7)}、更に、このデザインを実現するための具体的な検討を広範囲に行ってきた。上述の通り、加速器の基本構造であるラティスを多偏向電磁石化（通称、マルチ・ベンド化⁹⁾）することでエミッタンスを減少させることが出来るが、一方で、実現のための難易度は高くなる。この難易度が増す主な理由は2つある。

1つは、ラティスを構成する四極磁石や六極磁石の磁場強度が飛躍的に大きくなることである。これは、ラティス設計の観点から言うと、「低エミッタンスにするために分散を小さくする必要がある」→「四極磁石（光学で言う収束レンズ）を強くしてビームを絞る」→「四極磁石における色収差が強くなる」→「色収差を補正するため分散のある位置に六極磁石を置く」→「大きな色収差を小さくなってしまった分散で補正するため、2重の意味で強い六極が必要になる」という循環に入ってしまうからである。

難易度が増すもう1つの理由は、上記循環によって強くなった六極磁石が、光学で言うところの幾何収差を生み、ダイナミック・アパーチャと呼ばれる電子ビームの安定領域が小さくなることである。電子ビームは、周回軌道の周りに安定領域を持っておりその中に閉じ込められている限りは安定に周り続ける。この安定領域は非線形ビームダイナミクスで決定され、予めトラッキング計算によって予測することが出来る。Fig. 5(左)は、設計された6-bend latticeのダイナミック・アパーチャ(上半分)で、赤線は、設計電子エネルギー（6 GeV）の電子が持つ安定領域、青線は、6 GeV から運動量が1%ずれた電子が持つ安定領域である。どこまで運動量がずれた電子でも安定領域を持つかが、その蓄積リングの電子寿命を決定し、これによって入射システムやRF機器が達成すべき仕様の重要な部分が決まる。例えば、十分な寿命を確保するため、パンチ長を20 ps以上に伸ばすような新機能をRFシステムに追加する必要があり、現在その方針で設計を進めている。

Fig. 5(右)も同じくダイナミック・アパーチャであるが、実線は、六極磁石にアライメントエラーが最大 $\pm 10 \mu\text{m}$ ある時の安定領域である。実際の加速器建設ではアライメントエラーは避けられず、これによって安定領域が狭くなる。あるいは、磁石配置後に電子ビームの軌道が各六極磁石の中心を通る様に軌道補正を行う手法も考えられるが、その場合、六極磁場に対する電子ビームの位置をどのように計測するかが鍵となる。従って、Fig. 5の結果から、磁石、モニター、入射システム、コミッションング方法への重要な要求仕様が決定される。例えば、電子ビーム

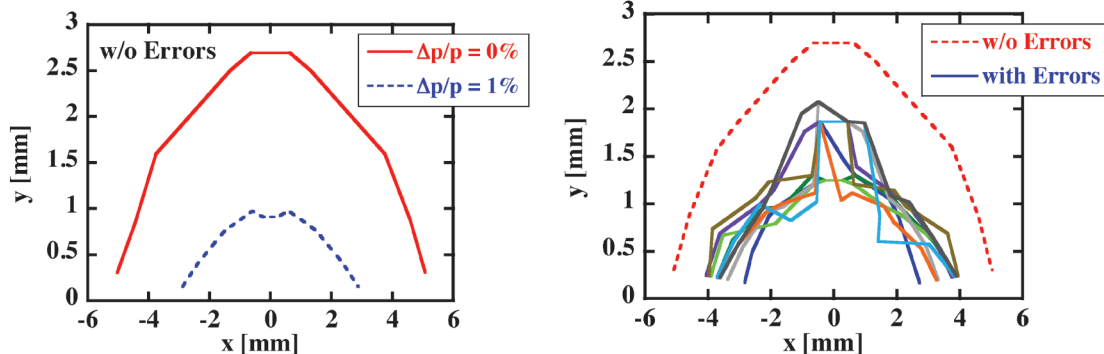


Fig. 5 Dynamic apertures of the 6-bend lattice. Left: (Red) on momentum, (Blue) 1% off momentum. Right: (Dashed) without magnet alignment error, (Solid) with random sextupole alignment errors of $\pm 10 \mu\text{m}$ ⁷⁾.

軌道が各磁石の中心 $\pm 10 \mu\text{m}$ に収まるように磁石、モニター、コミッシュンング方法を開発する必要があり、横方向ダイナミック・アパーチャが3 mm程度の領域に向けて安定に入射出来る新たな入射システムの開発が必須ということになる。

更に、上述のような狭ダイナミック・アパーチャへの入射を可能にするためには、入射器から極低エミッタンスビームを入射する必要がある。そこで我々は、SACLAの線形加速器を新たな蓄積リングの入射器として用いる予定である。また、入射点を現在の通常直線部 ($\beta \sim 1 \text{ m}$) から長直線部 ($\beta \sim 20 \text{ m}$) に移す。

以上のように、新たにデザインされたラティスの実現可能性を確保するには、磁石、モニター、入射システム、RFシステムなど主要コンポーネントの詳細な開発、また、コミッシュンング方法の検討が欠かせない。逆に言うと、これらの開発・検討がラティス設計に影響を与える。

これまで、このラティス設計と主要コンポーネント設計を、お互いフィードバックを掛けながら最適化してきた。

Fig. 6は、実際に設計が進められているRF空洞の図面例であり、新たな6-bend latticeに適したコンパクト・高電場・高効率HOM減衰設計になっている。また、磁石や真空チェンバ等の設計も併行して行っている^{5,10)}。

Fig. 7は、狭いダイナミック・アパーチャに入射することを可能にする新たな入射システムの概念図である。現在の蓄積リングでは、トップアップ運転をするために、リング上を周回している蓄積ビームの少し横から (Off-axis から) ビームを継ぎ足すことで一定の電流量を維持している。この入射ビームと蓄積ビームとの距離をダイナミック・アパーチャよりも小さくしなくてはならず、一般に、これが究極の蓄積リング (Ultimate storage ring) を妨げる理由の1つとなっている。あるいは、究極のリングでは通常のトップアップ運転 (Off-axis 入射) を諦め、On-axis 入射をする案も提案されている。On-axis 入射の場合は、ダイナミック・アパーチャが狭くても入射できるからである。しかし、On-axis 入射は、Off-axis 入射のような電流の継ぎ足し入射が出来ず、バンチ電流の高いフィリン

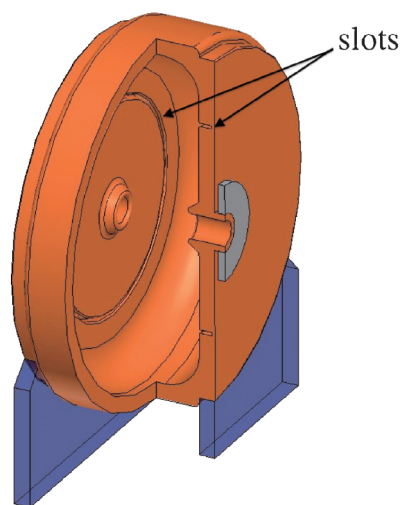


Fig. 6 An example of new RF cavity design.

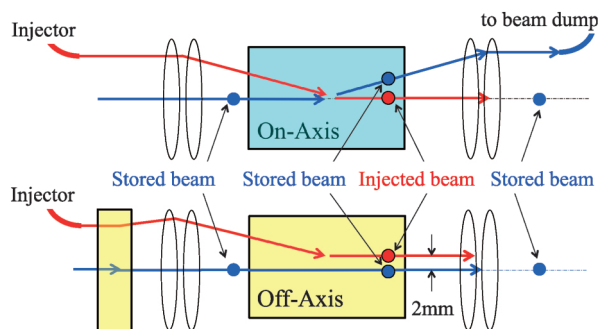


Fig. 7 New injection system based on a bucket-by-bucket fast kicker^{11,12)}.

グパターンによるトップアップ運転には向かない。例えば、バンチ電荷 1 nC の On-axis 入射では、蓄積リング上でバンチ電流 0.2 mA/bunch しか積めず、蓄積可能な平均電流の最大値も制限してしまう。そこで SPring-8 では、この狭いダイナミック・アパーチャに Off-axis で入射でき、且つ、初期コミッシュンング段階では On-axis にも入射出来る (1 台で切換えられる) 装置を提案し、その開発

を進めている¹¹⁾。本装置は高速キッカーによって構成されるため¹²⁾、バンチ毎（バケット毎）にビームの蹴り出し・入射が出来るという特長がある。こういった新たな要素開発が、将来の究極のリングの実現の鍵となることが期待される。

5. まとめ

SPring-8 は、1997年に共用を開始して以来、14年を経た。この間、基礎科学から産業利用に至る幅広い放射光利用に寄与しながら、光源およびビームラインでは多岐にわたって性能・利便性を高める高度化を行ってきた。一方、世界では、夢の光 XFEL の実現や、各国のリング型光源開発の台頭が目立ってきている。

こういった背景の下、SPring-8 では、2019年の実施を目処に次期計画の策定をはじめた。その目標は、「X線領域における回折限界リングの実現」であり、そのために詳細かつ広範囲な設計検討が進められている。既に10 pm・rad オーダーに達するリングの基本方針は立てられており、現在は、それを実現するための要素開発を検討する段階に至っている。新たな RF システムや入射システムに代表されるように、次期計画を支える新たな主要コンポーネントの提案もなされ、周長を変えないままでリング型放射光源の究極を目指した大幅な性能向上をするための検討が続けられている。

また、極低エミッタンスビームと共に、短パルス X 線発生の可能性についても検討している^{5,13)}。これは、XFEL で発生される数10 fs の X 線パルスと、次期リングで発生される数10 ps の X 線パルスとのギャップを埋める光源開発が必要であると考えたことが動機の1つである。また、SPring-8 サイトには XFEL と高輝度蓄積リングが共存し、かつ同時に使用することが可能であるというユニークな特長があり、次期リングと XFEL との相乗効果を高める意味でも、リングからの短パルス X 線発生が期待される。具体的な検討内容については本稿で紹介しなかったが、詳細は文献¹³⁾を参照されたい。

本稿で紹介されたパラメータや設計内容は今後もブラッシュアップされていくものであり、将来の利用実験に対する要望や光源開発の技術進歩を見据えながら柔軟に対応していく。そのためには、利用側と光源開発側の情報交換が必須であり、これまで同様、密接な情報交換をしていきたい。また、消費電力の抑制や高効率化といった観点からの議論も引き続き行いたい。実際、本誌で紹介したデザインは、現在の SPring-8 よりも消費電力を抑制しながら1000倍の輝度を生む仕様になっている。輝度の飛躍的向上は、ナノサイエンスをはじめとする先鋭的な研究への貢献だけでなく、実験時間短縮の観点から実験毎の運転コストが実質的に削減できるという長所がある。更なる消費電力抑制の可能性についても、既に検討を開始している。

次期計画の現状は、過去2回の公開シンポジウム（東京）と2回の加速器ワークショップ（播磨）を通して公開・議論されてきた。また、本学会をはじめ、適宜個別発表も行われている^{3,5-7,10,11,13)}。今後も、公開シンポジウム等を通して進捗状況の報告・議論が行われていく予定である。

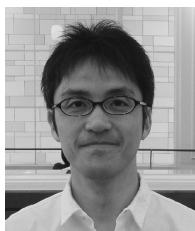
6. 最後に

冒頭でも述べた通り、本稿で紹介した次期計画案は、理研播磨研究所と高輝度光科学研究センターの若手・中堅を中心に組織されたワーキンググループによって検討された結果のまとめである。本稿の作成にあたって、図の作成など多くのメンバーが関与している。本ワーキンググループは、高度化計画検討委員会（石川哲也委員長）の下、2008年10月に結成された。現在約50名（世話人：鈴木基寛、矢橋牧名、渡部貴宏）から構成され、全体の検討はオールジャパンの枠組みで進められる。尚、ビームラインに関する第3章の一部の記述は鈴木基寛氏が文案を作成した。

参考文献

- 1) 青木 毅, 田村和宏:「SPring-8における高純度バンチ運転」日本放射光学会誌, Vol. 19, No. 4, July 2006, p. 223.
- 2) <http://xfel.riken.jp/>
- 3) T. Watanabe, *et al.*: THPC 032 in the Proc. of IPAC '11, San Sebastian, Spain.
- 4) A. Ropert, *et al.*: Proc. of EPAC2000, Vienna, Austria, p. 83.
- 5) 第24回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, つくば国際会議場, 2011; 10P130, 10P131, 10P132, 10P133, 10P135.
- 6) K. Soutome, *et al.*: Proc. of IPAC '10, Kyoto, Japan, p. 2555.
- 7) Y. Shimosaki, *et al.*: TUOAB 01 in the Proc. of IPAC '11, San Sebastian, Spain.
- 8) T. Tanaka and H. Kitamura: J. Synchrotron Rad. 8, 1221 (2001).
- 9) D. Einfeld, *et al.*: in Proc. of EPAC 1996, Sitges, Spain, p. 638; D. Einfeld and M. Plesko: NIM A 335, 402 (1993).
- 10) Y. Okayasu, *et al.*: 第8回日本加速器学会年会 (2011), Tsukuba, Ibaraki.
- 11) T. Nakamura, *et al.*: TUPC 095 in the Proc. of IPAC '11, San Sebastian, Spain; T. Nakamura, *et al.*: 第8回日本加速器学会年会 (2011), Tsukuba, Ibaraki.
- 12) T. Naito, *et al.*: Proc. of PAC09, Vancouver, Canada, p. 1620.
- 13) M. Masaki, *et al.*: THPCO 28 in the Proc. of IPAC '11, San Sebastian, Spain; M. Masaki, *et al.*: 第8回日本加速器学会年会 (2011), Tsukuba, Ibaraki.

● 著者紹介 ●



渡部貴宏

財高輝度光科学研究センター 加速器部門 研究員

E-mail: twatanabe@spring8.or.jp

専門：ビーム物理学, 加速器科学

【略歴】

1996年東京大学大学院工学系研究科中退, 工学博士。1996年東京大学助手, 2003年ブルックヘブン国立研究所物理部門 Research Associate, 2005年同研究所 NSLS 部門 Assistant Scientist を経て, 2008年より現職。

SPring-8 Upgrade Plan

Takahiro WATANABE SPring-8 Upgrade Plan Working Group (RIKEN and JASRI/SPring-8),
Kouto 1-1-1, Sayo Hyogo 679-5198

Abstract Since the SPring-8 was commissioned in 1997, high brightness X-rays have been provided to wide varieties of users from fundamental sciences to industrial purposes. Now the upgrade of the light source is being planned, aiming at so-called an ultimate storage ring where an electron emittance reaches the diffraction limit in X-ray region. In the report, we review the outline and the current status of the SPring-8 upgrade plan.
