

SACLA からの低エミッタンスビーム入射

国立研究開発法人理化学研究所 放射光科学研究センター
XFEL 研究開発部門 原 徹

Abstract

SPring-8 では、SACLA 線型加速器から蓄積リングへのビーム入射を 2020 年 9 月より本格的に開始した。将来の SPring-8-II 計画を見据えた時、従来の入射器である 8 GeV シンクロトロンはエミッタンスが 200 nm-rad と大きく、入射ビームアクセプタンスが小さい SPring-8-II には対応できない。また XFEL 運転と並行して SACLA からビーム入射を行うことで、老朽化が進む専用入射器にかかっていた設備更新費用や運転経費、電力消費を削減することができる。そこで SPring-8-II に先駆けて、SACLA の低エミッタンスビームを現状の SPring-8 蓄積リングへ入射するシステムを構築し、ビーム入射を実現した。本稿では、SACLA から SPring-8 蓄積リングへのビーム入射の概要を紹介する。

1. はじめに

現在世界各国で進められている次世代低エミッタンス放射光施設の蓄積リングでは、マルチバンドで強い集束力をもつ電子ビーム光学系が採用されている^[1-3]。このため光学系の非線形性が強くなり、入射ビームに対するアクセプタンスが小さい。小さいアクセプタンスに対応するため、電子バンチをリング周回バンチに対してビーム進行方向にずらして入射する longitudinal injection、周回バンチと入射バンチを完全に入れ替える swap-out injection などの on-axis 入射がこれまで提案されてきた^[4,5]。これに対し SPring-8 の次期アップグレード計画である SPring-8-II では、従来の off-axis 入射を踏襲しつつ、SACLA 線形加速器を用いた入射ビームの低エミッタンス化、真空封止パルスセパタムによる入射ビームコヒーレント振幅の低減で小さな入射アクセプタンスに対応する^[6,7]。

SACLA 線型加速器を用いたビーム入射は、入射ビームの低エミッタンス化だけでなく、設備更新費用や運転経費、消費電力削減の面からも利点がある。1 GeV 線型加速器と 8 GeV シンクロトロンで構成される SPring-8 蓄積リングの従来の専用入射器は、建設から 20 年以上が経ち受電設備などの老朽化が進んでいた。SACLA を入射器として活用することで、まず老朽化した専用入射器設備の更新費用やメンテナンス費用が不要になる。更に専用入射器の場合、ビーム入射だけのために常に加速器を運転状態に保つ必要がある

が、SACLA 線型加速器は並行して XFEL ユーザー運転を行っているため、一部の電子バンチを入射に振り分ければ追加の電力消費やメンテナンス費用が発生しない。

SACLA からの低エミッタンス電子ビームの入射は、SPring-8-II 計画に先駆けて現状の SPring-8 蓄積リングを用いて開始した。2017 年に制御系とタイミング系の開発と実装、2018 年から 2019 年にかけてビーム入射試験を行い、2020 年 9 月よりトップアップ運転を含めユーザータイム中の全てのビーム入射を SACLA 線型加速器に切り替えた^[8]。その後、2021 年 3 月末に従来の専用入射器はシャットダウンしている。

2. SACLA からのビーム入射スキーム

SPring-8 キャンパスの全体写真を図 1 に示す。現在 SACLA のアンジュレータホールには、軟 X 線 FEL である BL1 と、硬 X 線 FEL (XFEL) である BL2 と BL3 の合計 3 本のビームラインが設置されている^[9]。このうち BL1 は、SACLA のプロトタイプであった SCSS 試験加速器を移設し、エネルギーを 800 MeV に増強した専用の線型加速器で運転されている^[10,11]。BL2 と BL3 は、SACLA 線型加速器で加速した電子ビームを、加速器終端にあるキッカー電磁石で振り分け同時稼働を実現している^[12,13]。電子ビームの繰り返しは 60 Hz であるため、2 本のビームラインを同時稼働させると、XFEL パルスの繰り返しは各 30 Hz となる。

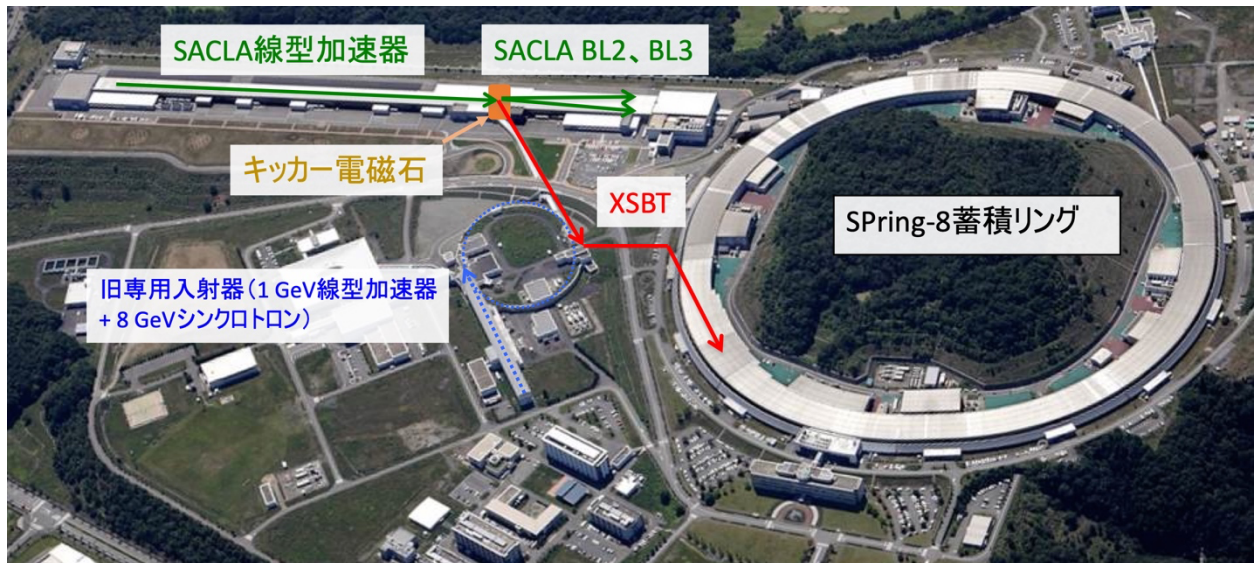


図1 SPring-8 キャンパスの全体写真

SPring-8 蓄積リングへのビーム入射時は、電子ビームをキッカー電磁石でBL2と逆のSPring-8側へ曲げ、XSBT (XFEL to Storage ring Beam Transport) と呼ばれるビーム輸送路を通して蓄積リングへ入射する (図1)。SACLA 線型加速器と8 GeV シンクロトロン出口までのXSBT前半部はSACLA建設時に新たに整備され、XSBT後半部は従来の専用入射器ビーム輸送路をそのまま利用している。

XFELユーザー運転では、実験毎に異なるX線波長のレーザーが求められるため、電子ビームエネルギーなどの加速器パラメータを頻繁に変えなければならない。一方SPring-8へのビーム入射は、8 GeVにエネルギーを固定しておく必要がある。XFEL運転とビーム入射を両立させるため、SACLA線型加速器ではビームの分配先に応じて電子バンチ毎に加速器パラメータを変える制御システムを構築している^[14]。

60 Hzの電子バンチは、2本のXFELビームラインとSPring-8ビーム入射に分配される。電子バンチの分配先は、1秒分(60個)のパターンを予めテーブルにしてマスターコントローラに格納し、このパターンに従ってマスターコントローラは、次のバンチの分配先をreflective memoryネットワークを介してRFユニットやキッカー電磁石などの機器に送信する。各機器にはバンチの分配先に対応したパラメータがプリセットされており、各機器は次のバンチ分配先の情報を受けて、それに対応したパラメータで動作する^[15,16]。

トップアップ運転時は、入射要求を蓄積リングから受け取ると、マスターコントローラは次の1秒間の分配先パターンをビーム入射を含むテーブルに入れ替え、ビーム入射が行われる。

SPring-8の基準クロックは508.58 MHzであるが、SACLAの基準クロックは238 MHzから生成されており、両加速器の基準クロックは通倍関係にない。このままだと蓄積リングの入射したいRFバケットに対して、入射ビームのタイミングが最大で238 MHzの半周期分 (± 2.1 ns) ずれてしまう。そこで両加速器のタイミングを合わせるため、最大リング40周回時間分 (197 μ s) 入射を遅らせ、ずれが小さくなるタイミングを待つ。入射を遅延させることで、タイミングのずれを105 ps以下に抑えることができる。更に入射に合わせてSACLAの238 MHzクロックをわずかに周波数変調することで、最終的な入射タイミングのずれを3.8 ps (RMS) 以下にまで合わせ込む^[17]。これはSPring-8のバンチ長10 ps (RMS) に比べ十分小さい。

3. 低エミッタンスビーム入射

SACLAからのビーム入射時のリング蓄積電流の変化を図2に示す。0 mAから10 Hzで積み上げ入射を行った後トップアップ入射に切り替え、蓄積電流は99.5 mAに保たれている。これまで1 Hzだった蓄積リングへの積み上げ入射は10 Hzで行えるようになり、

0 mA から 100 mA までに必要な入射時間は約 10 分に短縮されている。10 Hz 積み上げ入射は通常 1 週間に 1 回程度のバンチフィリングパターン変更時に行われるが、この間 XFEL ユーザー運転は中断して入射する。一方トップアップ入射は、蓄積電流減少に応じてリングから出される入射要求のタイミングで実施

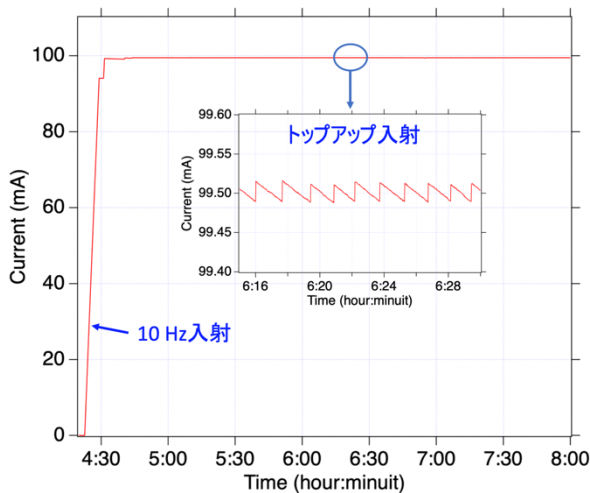


図2 SACLA から SPring-8 へビーム入射時の蓄積電流の変化

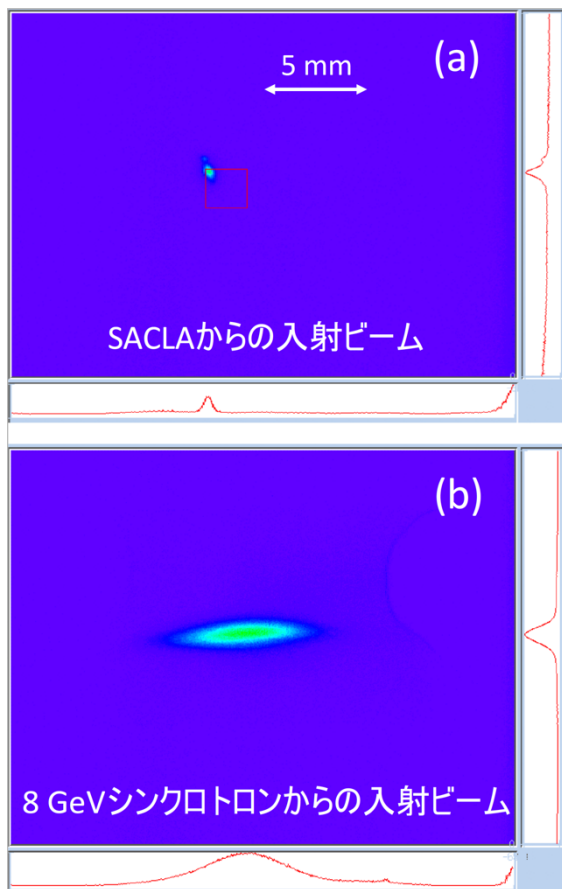


図3 SPring-8 蓄積リング入射点付近の電子ビームサイズ、(a) SACLA、(b) 旧 8 GeV シンクロトロン。

され、XFEL ユーザー運転と並行して行っている。トップアップ入射の頻度は、蓄積リングのフィリングパターンや挿入光源の稼働状態などに依存するが、概ね 1 分間に 2~3 回程度である。

図 3 は、SPring-8 蓄積リング入射点近くのスクリーンで観測した入射電子ビームのプロファイルである^[18]。SACLA からの入射ビームは、従来の専用入射器 8 GeV シンクロトロンに比べはるかに小さく、入射ビームの低エミッタンス化が実現されていることがわかる。

SPring-8 では、核共鳴散乱実験などでバックグラウンドノイズを低減するため、 10^{-8} ~ 10^{-10} のバンチ純度が求められている^[19]。即ち、空であるべき RF バケツに入る不純電子数が小さくしなければならない。当初 SACLA からのビーム入射時に、入射した RF バケツから 9 つ後ろのバケツに電子が観測され、バンチ純度が 10^7 台まで悪化する現象が起きた。調べてみると、SACLA 線型加速器入射部の L-band 加速管で一部の電子が減速逆流し、上流にある 476 MHz 空洞で再び加速され下流に進んでいるということが判明した。即ち L-band 加速管と 476 MHz 空洞の間を一往復して 8 GeV まで加速される電子があるため、往復時間分遅れて 9 つ後の RF バケツに入射され、バンチ純度を悪化させていた。そこでバンチ純度の悪化を防ぐため、以下の 2 つの手法を採用することにした。

(1) パルス電磁場を印可するスイーパーを SACLA 線型加速器入射部の 476 MHz 空洞と L-band 加速管の間に設置し、逆流する電子を除去する。
 (2) 蓄積リングを周回する不純電子に対して RF 電磁場を印可する RF ノックアウトを導入し、入射された不純電子を定期的に除去する。

4. まとめ

この 2 つの手法により、 10^{-10} のバンチ純度を現在達成している。

2020 年 9 月より SACLA 線型加速器は XFEL ユーザー運転だけでなく、SPring-8 蓄積リングの入射器としても利用されている。当初ビーム入射時のタイミング信号変動による XFEL 利用実験用同期レーザーへの影響や、キッカー電磁石の磁場ヒステリシスによる XFEL パルスのポインティングスタビリティの悪化な

どの問題があったが、タイミング系の改善やヒステリシス補正を行うことで解消した。

XSBT後半部のビーム輸送路光学系の設計が古いため、SACLA 加速器出口では 0.1 nm-rad 程度であるビームエミッタンスは、蓄積リング入射点では 1 nm-rad まで悪化してしまう。しかしながら従来の入射器のエミッタンス 200 nm-rad に比べれば約 2 桁小さく、SPring-8-II で要求される 10 nm-rad を十分満たした低エミッタンス入射ビームが得られている。

原 徹 HARA Toru

(国) 理化学研究所 放射光科学研究センター
XFEL 研究開発部門
〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
TEL : 0791-58-0802
e-mail : toru@spring8.or.jp

参考文献

- [1] P. F. Tavares *et al.*: *J. Synchrotron Rad.* **25** (2018) 1291.
- [2] P. Raimondi: *Proceedings of IPAC2016 Busan Korea May 2016* (2016) 2023.
- [3] L. Liu *et al.*: *Proceedings of IPAC2020 Caen France May 2020* (2020) 11.
- [4] M. Aiba *et al.*: *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **18** (2015) 020701.
- [5] K. Harkay *et al.*: *Proceedings of IPAC2019 Melbourne Australia May 2019* (2019) 3423.
- [6] H. Tanaka *et al.*: *Proceedings of IPAC2016 Busan Korea May 2016* (2016) 2867.
- [7] S. Takano *et al.*: *Proceedings of IPAC2019 Melbourne Australia May 2019* (2019) 2318.
- [8] T. Hara *et al.*: *Phys. Rev. Accel. Beams* **24** (2021) 110702.
- [9] T. Ishikawa *et al.*: *Nature Photon.* **6** (2012) 540.
- [10] T. Shintake *et al.*: *Nature Photon.* **2** (2008) 555.
- [11] S. Owada *et al.*: *J. Synchrotron Rad.* **25** (2018) 282.
- [12] T. Hara *et al.*: *Phys. Rev. Accel. Beams* **19** (2016) 020703.
- [13] C. Kondo *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.* **89** (2018) 064704.
- [14] T. Hara *et al.*: *Phys. Rev. Accel. Beams* **16** (2013) 080701.
- [15] T. Fukui *et al.*: *Proceedings of IPAC2019 Melbourne Australia May 2019* (2019) 2529.
- [16] H. Maesaka *et al.*: *Proceedings of IPAC2019 Melbourne Australia May 2019* (2019) 3427.
- [17] T. Ohshima *et al.*: *Proceedings of IPAC2019 Melbourne Australia May 2019* (2019) 3882.
- [18] S. Takano *et al.*: *Proceedings of DIPAC2005 Lyon France June 2005* (2005) 72.
- [19] K. Tamura and T. Aoki: *Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (in English) Funabashi Japan August 2004* (2004) 581.