

SACLA 加速器における電子バンチ振り分けシステムの開発

DEVELOPMENT OF THE ELECTRON BUNCH DISTRIBUTION SYSTEM AT SACLA

原 徹^{#,A)}, 武部 英樹^{A)}, 稲垣 隆宏^{A)}, 大竹 雄次^{A)}, 深見 健司^{B)}, 近藤 力^{B)}, 田中 均^{A)}
Toru Hara^{#,A)}, Hideki Takebe^{A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Yuji Otake^{A)}, Kenji Fukami^{B)}, Chikara Kondo^{B)}, Hitoshi Tanaka^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

Abstract

In order to meet the increasing demand for XFEL user operation, the second undulator beamline (BL2) will be installed during the 2014 summer shutdown at SACLA. Following the installation of BL2, a pulse by pulse electron beam distribution system composed of a kicker and a DC twin-septum magnet, which are currently under development, is planned to be installed in January 2015. To distribute the electron beam on a bunch-to-bunch basis, the electron beam is deflected into 0 and ± 9 mrad directions at 60 Hz by the kicker, and then the DC twin-septum magnet augments the separation angle to ± 52 mrad. The kicker magnet is driven by 60 Hz trapezoidal waveforms and stability less than 30 ppm (peak-peak) has been achieved. This pulse by pulse distribution system will be also applied for the beam injection to the upgraded low-emittance ring of SPring-8 (SPring-8-II) in future. Since the SPring-8-II storage ring has a small dynamic aperture, low emittance is required for the injection beam. The use of SACLA as a low-emittance injector enables to save the running cost of the injector system during top-up operation.

1. はじめに

SACLA では増加するユーザー実験に対応するため、2014 年度夏期停止期間に 2 本目のアンジュレータビームライン BL2 を設置する。XFEL は電子加速器として線型加速器を用いているため、放射光施設の蓄積リングのように多数のビームラインへ同時に光を供給することはできない。しかしながら、電子ビームをバンチ毎に交互に各ビームラインへ振り分けることで、擬似的な複数ビームラインの同時運用が可能である。

SACLA のアンジュレータホールには、5 本のビームラインが設置できるだけのスペースがあり、線型加速器終端に設置されている DC 偏向電磁石を用いてビームラインを切り替えている^[1]。2014 年度冬期停止期間中に、この DC 偏向電磁石をキッカー電磁石と DC ツインセプト磁石に置き換え、繰り返し最大 60 Hz の電子ビームをバンチ毎に 0° および $\pm 3^\circ$ の 3 方向へ振り分けるシステムを導入する。このとき電子ビームの軌道安定性は XFEL 発振にとって非常に重要であり、特にキッカー電磁石電源には高精度の安定性が求められる。

また XFEL 施設において複数ビームラインの同時運転を行う場合、各ビームラインの利用実験毎にレーザー波長は異なることが当然予想される。アンジュレータギャップを変更し K 値を変えることで、ビームライン毎にある範囲内において波長を調整することは可能である。しかし K 値を小さくするとレーザー出力が下がり、またビームライン間の波長

が大きく異なる場合には、もはやアンジュレータ K 値による波長調整はできない。このため電子ビームエネルギーを電子バンチ毎に制御し、電子バンチ振り分けシステムと組み合わせ、利用実験で使用するレーザー波長に最適なエネルギーをもつ電子バンチを各ビームラインに供給することは、XFEL 施設の複数ビームライン運転において必須となる。

SACLA では、電子バンチ振り分けシステムの開発とともに、線型加速器におけるビームエネルギー制御方法の R&D を行ってきた。これらの技術は SPring-8 のアップグレード計画においても、SACLA を低エミッタンス入射器として用いるために必要となる技術である^[2]。

2. 電子バンチ振り分けシステム

SACLA の電子ビーム繰り返しは最大 60 Hz (現状 30 Hz) であるが、ユーザー実験によってはサンプル照射位置の移動等の点から低い繰り返しで利用される場合も多い。また実験準備や装置撤収時間を有効に利用し、XFEL 施設の稼働効率を向上させるためにも、複数ビームラインの同時運転は重要である。

SACLA の概略図を Figure 1 に示す。線型加速器で加速、バンチ圧縮された電子ビームは、5 本のビームラインが最終的に設置されるアンジュレータホールへ送られる。ビームラインの切り替えは、線型加速器終端にある DC 偏向電磁石を用いて現状行っているが、複数ビームラインの同時運転には、電子ビームを電子バンチ毎に各ビームラインへ振り分けなければならない。SACLA では、DC 偏向電磁石を 60 Hz のキッカー電磁石と DC ツインセプト磁石に置き換え、2015 年 1 月より電子バンチ毎に複数のビームラインへ振り分けることを計画してい

[#] toru@spring8.or.jp

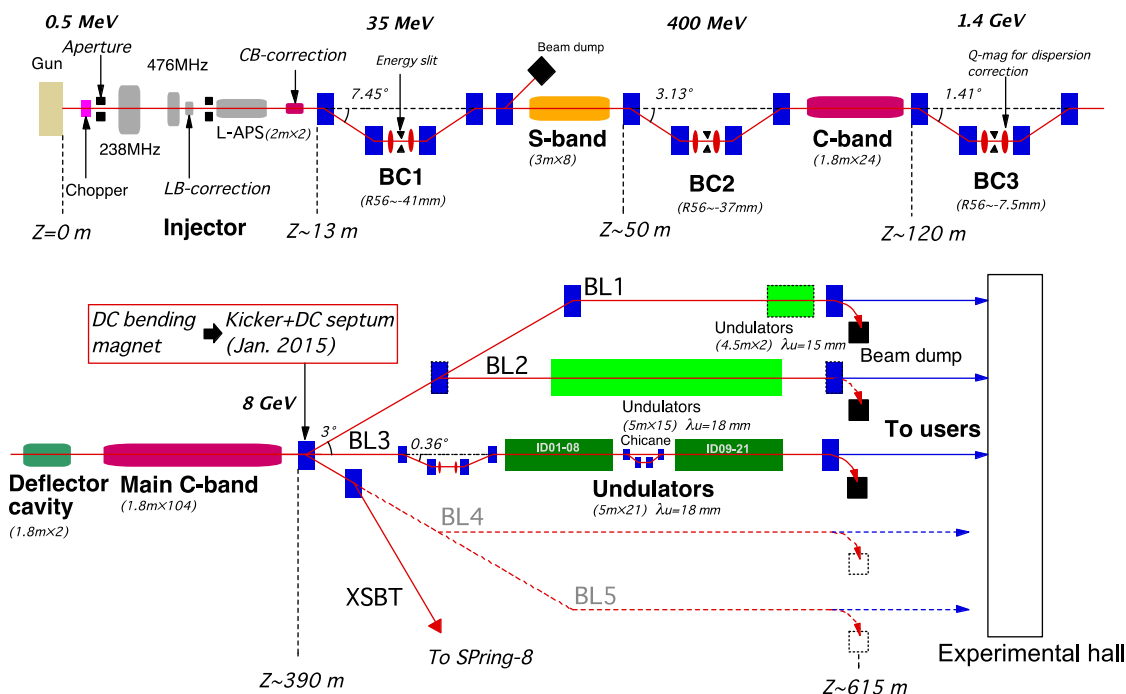


Figure 1: Schematic of SACLA.

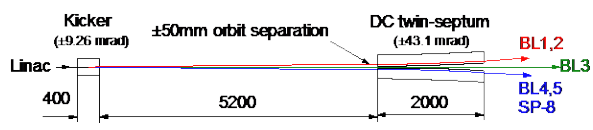


Figure 2: Configuration of a kicker magnet and a DC twin-septum magnet. The unit of the lengths is mm.

る。Figure 2 にその概略を示す。

アンジュレータへの電子ビーム入射軌道の変動は、XFEL の性能に直接影響を与えるため、バンチ振り分けによる軌道変動がなるべく小さくなるよう、キッカー電磁石の偏向角は約 9 mrad に抑えている。一方、トータルで $\pm 3^\circ$ (約 52 mrad) の偏向角を確保するため、約 5 m 下流にある DC ツインセプタム電磁石で残りの 43 mrad 分を偏向させる。

キッカー電磁石ヨークには 0.35 mm 厚の積層ケイ素鋼板を使用し、磁極ギャップ 20 mm、最大磁場 0.67 T、ヨーク長は 0.4 m である (Figure 3)。キッカー電磁石電源は FET 8 ユニットの並列接続した PWM タイプで、最大 60 Hz の繰り返しで各パルスの極性と波高が任意に設定可能な台形電流波形を出力する。共鳴タイプの電源ではないため、各電子バンチの電子ビームエネルギーに合わせ、任意のパターンでビームラインへ電子バンチを振り分けることができる。Figure 4 に励磁パターンの例を示す。この例では、励磁電流 (緑線) が正の時に BL2 側、ゼロの時に BL3、負の時に BL4 側へ電子バンチは偏向される。

DC ツインセプタム電磁石は、2 台の独立した DC セプタム電磁石のセプタム側を向かい合わせて配置



Figure 3: Kicker magnet made of 0.35 mm laminated silicon steel plates.

したものである。Figure 5 にその上流側断面図を示す。キッカー電磁石で 3 方向に偏向された電子ビーム軌道は、50 mm の間隔をもってツインセプタム電磁石に入る。セプタム電磁石ではこのうち両端の軌道を更に偏向させる一方、中央の軌道を取る電子ビームは直線軌道のまま通過させる。

キッカー電磁石および電源は既に製作が完了し、30 ppm (peak-peak) 以下のパルス間磁場安定性を達成している^[3]。DC ツインセプタム電磁石、および電子ビーム軌道を平行に戻す DC 偏向電磁石の安定性は、各々 10 ppm および 3 ppm である。現状の SACLA 線型加速器の電子ビーム軌道変動は、BL3 アンジュレータ上流において約 1 μ rad (peak-peak) であるが、電子バンチ振り分けを行った時の軌道変動はこの値よりも概ね 10-20 %悪化する程度で、

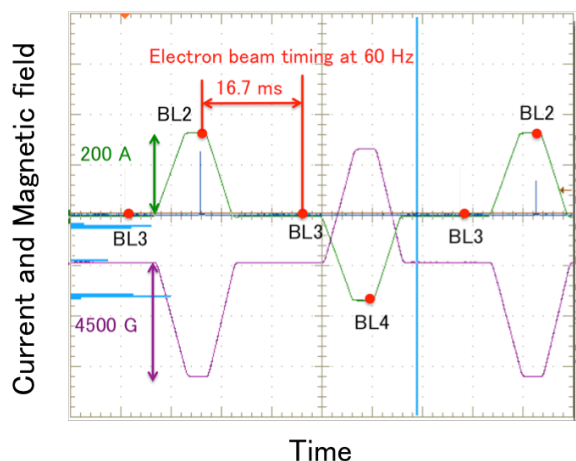


Figure 4: Measured current waveform (green line) and magnetic fields (purple line) of the kicker magnet. Red circles on the green line correspond to the beam arrival timing at 60 Hz.

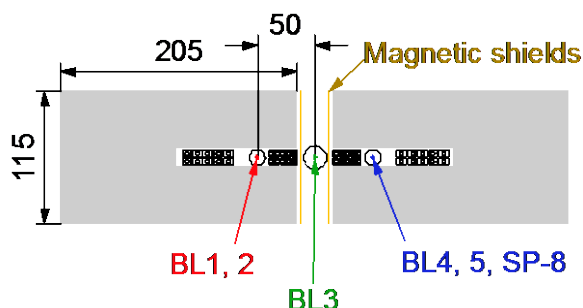


Figure 5: Cross sectional view of the DC twin-septum magnet (upstream end). The unit of the lengths is mm.

XFEL のレーザー発振やレーザー光のポインティングスタビリティに大きな影響を与えることはないと予想している。

3. SACLA における複数ビームラインの同時運転

SACLA では現状 XFEL 用アンジュレータが設置されているのは BL3 のみであるが、2014 年度夏期停止期間に BL2 にもアンジュレータが設置され、2

本目の XFEL ビームラインの運用を開始する。BL2 アンジュレータへの電子ビーム入射は、Figure 1 に示すように線型加速器終端で電子ビームを 3° 偏向し、dogleg を経て再び逆方向に 3° 偏向させることで BL3 と平行な軌道に戻して行く。Dogleg 部のビーム光学系は、逆ベンド 2 台を導入することで、achromatic かつ isochronous な条件を保つ。これは dogleg 部における無用な電子バンチ長の伸縮を防ぎ、BL2 においても BL3 と同じバンチ圧縮条件で XFEL を発振させるためである。

BL2 に設置するアンジュレータは、BL3 に既設のアンジュレータと同じ周期長 18 mm で、2 本のビームラインで行う利用実験を波長域で分けることはしない。よって 2 本のビームラインへは、各レーザー波長に最適なエネルギーをもつ電子バンチの供給が必要となる。

SACLA では複数ビームラインの同時運転に向け、線型加速器における電子バンチ毎の電子ビームエネルギー制御方法の R&D を行ってきた^[4]。Figure 6 にその概要を示す。常伝導 RF 空洞を用いる線型加速器では、電源やクライストロン、加速管から成る RF ユニットの電子ビームの繰り返しに合わせてパルス駆動し電子ビームを加速する。そこで一部の RF ユニットの繰り返しを変えることにより、電子バンチ毎のビームエネルギーの制御が可能になる。

例えば Figure 6 のような場合、ビーム繰り返し 60 Hz に対し線型加速器下流の 4 つの RF ユニットの 30 Hz、2 つの RF ユニットの 15 Hz で動作させると、半分の電子バンチはこれら 6 つの RF ユニットでは加速されず、ビームエネルギーは 6.8 GeV のままである。1/4 の電子バンチは 4 つの RF ユニットで加速されてビームエネルギーは 7.6 GeV に、残り 1/4 の電子バンチは 6 つ全ての RF ユニットで加速されるため、最終エネルギーは 8 GeV となる。

Figure 7 は、実際に SACLA で行った電子バンチエネルギー制御の結果である。ここでは電子ビーム繰り返し 10 Hz に対し、8 つの C-band RF ユニットの 5 Hz で動作させることで、電子バンチのビームエネルギーを交互に 7 GeV と 8 GeV まで加速している。

SACLA 複数ビームラインの同時運転では、電子バンチを各ビームラインに最適なビームエネルギーまで加速後、キッカー電磁石を用いて各ビームラインに振り分ける。XFEL 施設における複数ビームラ

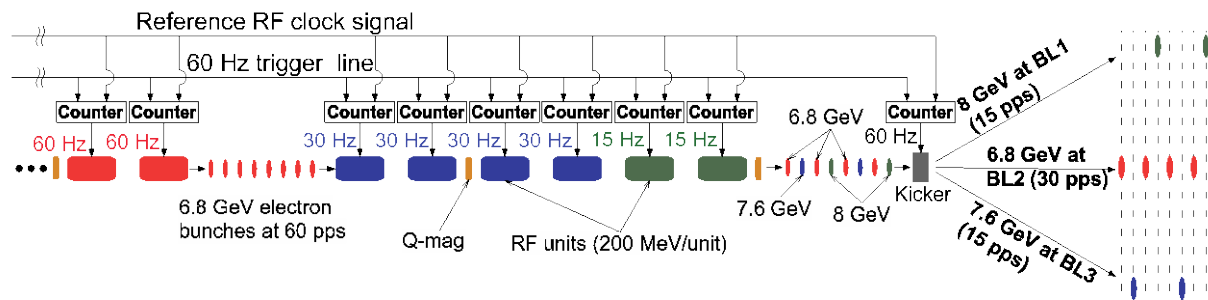


Figure 6: Example of the RF setup for the multi-energy operation.

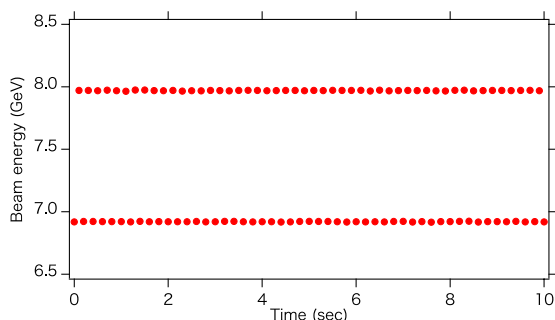


Figure 7: Electron bunch energies measured at the chicane in front of the BL3 undulators during the multi-energy operation.

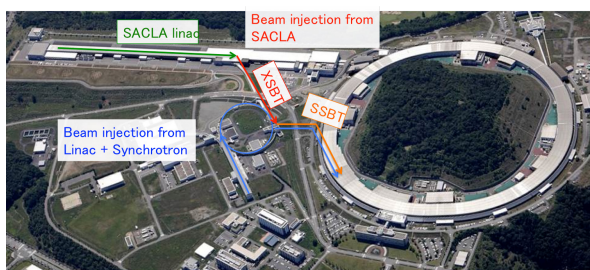


Figure 8: Beam transport line from SACLA to SPring-8 (XSBT and SSBT).

イン運転の従来の考え方は、電子ビームエネルギーを固定、または低エネルギー電子ビームを線型加速器の途中から取り出すデザインが主流であった。この場合、利用実験で同時に利用できる波長領域の制限や、複数の実験ホールが必要になるなどの問題が生じる。一方 SACLA で計画している複数ビームライン運転では、実験ホールを一つにまとめ、各ビームラインのレーザー波長に最適なビームエネルギーを持つ電子バンチを供給するため、これらの問題点は解消される。

4. SPring-8-II へのビーム入射

SPring-8 では、2020 年頃を目処に低エミッタンス化を主体とした蓄積リングのアップグレードを計画している^[2]。アップグレード後の SPring-8-II では、低エミッタンス化に伴いダイナミックアパーチャーが減少することから、蓄積リングへ効率よくビーム入射を行うため、入射ビームにも低エミッタンスが求められている。現在の設計案では、電子ビームエネルギーが 6 GeV、エミッタンスは概ね 0.6 nm-rad 以下の入射ビームが必要となり、現状の SPring-8 の線型加速器およびシンクロトロンではエミッタンスの条件を満たすことができない。そこで SPring-8-II の低エミッタンス入射器として、SACLA の利用を検討している。SACLA は SPring-8-II と平行して利用運転を行うため、トップアップ運転時に入射器をアイドルしておく必要がなく、大幅な電力および運転コストの削減が期待できる。フルバンチ入射

の場合は、10 分程度 SACLA の利用運転が中断することが予想されるが、トップアップ運転時のビーム入射は頻度が少なく、一部の電子バンチを入射に用いることで利用実験と両立させることが可能である。

SACLA から SPring-8 への電子ビーム輸送については、SACLA 光源棟から SPring-8 シンクロトロン出口までを結ぶ XSBT (XFEL to Synchrotron Beam Transport) が既に完成しており、実際にシンクロトロン出口までの電子ビーム輸送試験も完了している (Figure 8) ^[5]。

複数ビームライン運転の場合ビームライン間の電子バンチ振り分けは規則的に行えばよいが、トップアップ運転への入射頻度は 1 分間に数回程度であり、任意のタイミングで行わなければならない。また SACLA の XFEL 運転には 3 kA 以上の非常に高いピーク電流をもつ電子バンチが必要であるが、SPring-8-II へのビーム入射では逆にピーク電流を 100 A 程度まで下げる必要がある。これはピーク電流が高いと、SACLA から SPring-8 までの全長約 300 m のビーム輸送路における、CSR によるエミッタンスの悪化が無視できないためである。

ピーク電流を下げるには SACLA からの入射電子バンチの電荷量を下げる、バンチ圧縮を緩める、もしくはエネルギーチャープを付けてビーム輸送路でバンチを伸ばすなどいくつかの方法が考えられるが、いずれにしろより高度な電子バンチ制御が求められる。複数ビームライン運転におけるビームエネルギー制御は、電子バンチ毎に RF ユニットの周期的にオンオフするのみであったが、SPring-8-II へのビーム入射では入射バンチに対する RF ユニットの位相を任意のタイミングで変えなければならない。

5. 今後のスケジュール

SACLA で 2 本目のビームラインとなる BL2 のコミッションングを、2014 年 10 月より DC 偏向電磁石を用いて行う。その後キッカー電磁石および DC ツインセプト電磁石を設置し、2015 年 1 月より電子バンチ振り分けの試験運転を開始する予定である。

SPring-8-II へのビーム入射には、SACLA ローレベル RF 系やタイミングシステムの改造が必要である。ハードウェアの改造や実際のビーム輸送試験、エミッタンスの評価等を、SPring-8-II の計画に合わせ順次行っていく予定である。

参考文献

- [1] T. Ishikawa, et al., Nat. Photon. 6, 540 (2010)
- [2] H. Tanaka, et al., to be published in Synchrotron Radiation News
- [3] H. Takebe, et al., "SACLA 電子バンチ振り分けの為にキッカー電磁石用高精度パルス電源の開発と NMR パルス磁場測定", in these proceedings
- [4] T. Hara, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 080706 (2013)
- [5] K. Fukami, et al., "SPring-8 蓄積リングへの極短バンチビームの輸送", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, Aug. 3-5, 406 (2013)