

SACLA マルチビームライン運転に向けての取り組み TOWARD THE MULTI-BEAMLINE OPERATION OF SACLA

原 徹^{#,A)}, 稲垣 隆宏^{A)}, 近藤 力^{B)}, 渡川 和晃^{A)}, 深見 健司^{B)}, 中澤 伸侯^{C)}, 大竹 雄次^{A)}, 田中 均^{A)}
Toru Hara ^{#,A)}, Takahiro Inagaki^{A)}, Chikara Kondo^{A)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Kenji Fukami^{B)}, Shingo Nakazawa^{C)},
Yuji Otake^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)},
^{A)} RIKEN SPring-8 Center
^{B)} JASRI
^{C)} SPring-8 Service CO., Ltd.

Abstract

In order to increase user time, the operation of plural beamlines in parallel is an important issue for XFEL facilities. At SACLA, this multi-beamline operation using two beamlines, which are BL2 and BL3, has been tested since last year. Although simultaneous lasing has been successfully obtained at the two beamlines, the peak current of the electron bunch need to be decreased to 2 kA, which is about 1/5 compared to that used in the nominal operation of SACLA BL3, due to the CSR effects at a dogleg beam transport. In the current beam optics of the dogleg, a kicker deflection angle is made small as possible to relax the current stability requirement for a pulsed power supply at the expense of the CSR effects. To cancel out the CSR effects between bending magnets, the beam optics of the dogleg will be changed to a DBA based lattice. The simulations show an emittance increase can be significantly suppressed with the new lattice for a 10 kA bunch compared to the current lattice. The replacement of the dogleg lattice is scheduled in January 2017.

1. はじめに

XFEL (X-ray Free-Electron Laser) は高輝度電子ビームを必要とするため、電子加速器として線型加速器を用いる。このため XFEL 施設では、電子ビームを同時に 1 本のビームラインにしか供給できず、多数のビームラインの同時稼働が可能な蓄積リングベースの放射光施設に比べ、ユーザーの利用効率が悪い。この欠点を補うため SACLA では、電子ビームをバンチ毎に複数のビームラインに振り分けるマルチビームライン運転を計画している。このマルチビームライン運転によるユーザータイムの拡大は、利用効率向上の面から XFEL 施設にとって非常に重要な課題である。

現在 BL2 と BL3 の 2 本の XFEL アンジュレータビームラインを有する SACLA では、2015 年 1 月にキッカー電磁石と DC セプト電磁石を設置し、最大繰り返し 60 Hz の電子ビームを、バンチ毎に 2 本のビームラインに振り分けることに成功している[1]。Figure 1 に SACLA の全体図を示す[2]。BL3 が線型加速器と同一直線上にあるのに対し、BL3 と平行に置かれている BL2 へは電子ビームを 3° 曲げ、dogleg 部を通して輸送しなければならない。

SACLA ではマルチビームライン運転における 2 本のビームラインの同時レーザー発振を既に達成しており、更にレーザー発振波長領域を拡げるため、ビームライン間で電子ビームエネルギーを変えるマルチエネルギー運転にも成功している[1, 3]。しかしながらこれらの試験運転では、いずれもピーク電流を 2 kA 程度に下げた電子ビームを用いてきた。これは、SACLA BL3 の定常運転に用いている 10 kA 以上まで圧縮した電子バンチを BL2 dogleg 部に通すと、CSR (Coherent Synchrotron

Radiation) の効果により投影エミッタンスが悪化し、電子ビーム軌道も不安定になるためである[1, 4-6]。SACLA BL2 と BL3 のアンジュレータ上流にある 2 台の BPM を用い、位相空間上の電子ビーム軌道のふらつきを測定した結果を Table 1 に示す。Dogleg 部 CSR の影響を受ける BL2 では、特にピーク電流が高くなると水平方向の軌道のふらつきが大きくなっていることがわかる。

10 kA 程度のピーク電流をもつ電子ビームを用いて BL2 で安定なレーザー発振を得るには、CSR 効果をキャンセルするように dogleg 部の電子ビーム光学系を組み直す必要がある[7, 8]。本稿では、2017 年 1 月に導入を予定している dogleg 部における CSR 効果のキャンセルを狙った電子ビーム光学系について報告する。

Table 1: Stability of the Electron Beam Orbit Measured by a Pair of BPMs Located Upstream of BL2 and BL3 Undulators

	Horizontal plane (pm-rad, rms)	Vertical plane (pm-rad, rms)
BL2, high peak current (~10 kA)	16.3	0.74
BL2, low peak current (~1 kA)	2.7	0.64
BL3, high peak current (~10 kA)	1.4	0.27
BL3, low peak current (~1 kA)	0.83	0.24

[#] toru@spring8.or.jp

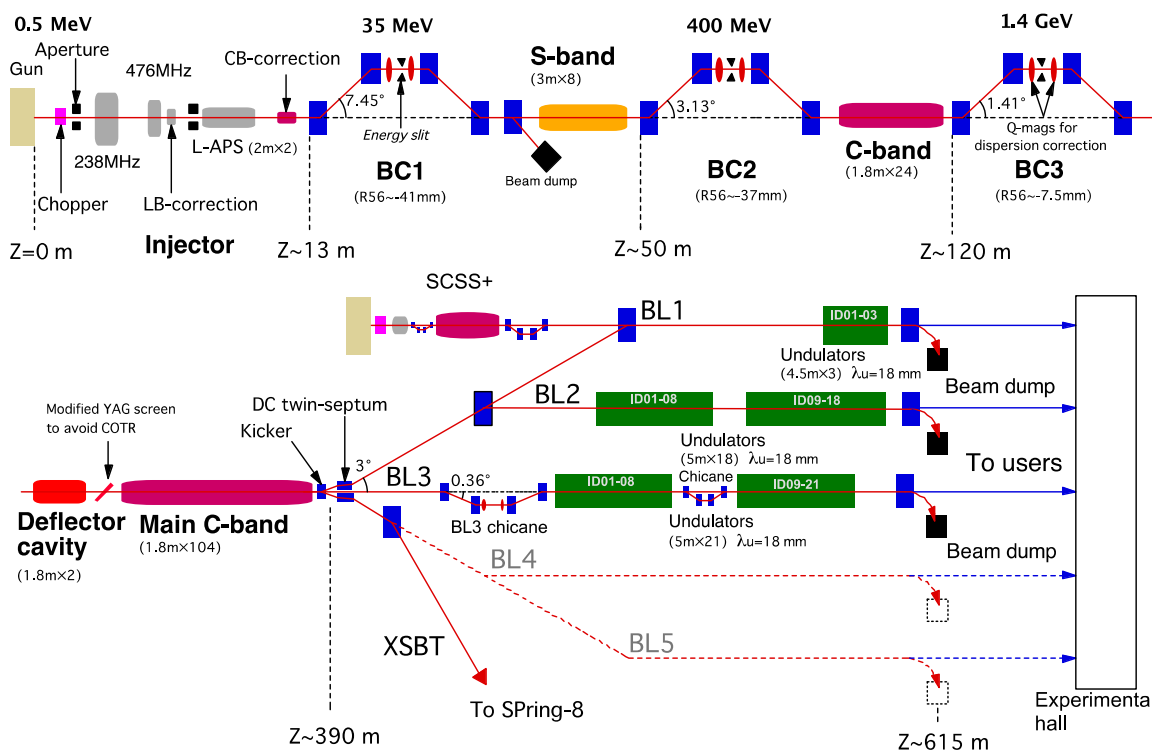


Figure 1: Schematic of SACLA.

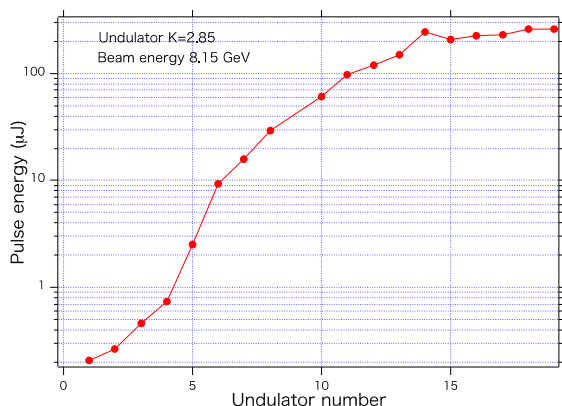


Figure 2: Gain curve of SACLA BL2 (6.8 keV).

2. SACLA BL2 の現状

SACLA で 2 本目の XFEL ビームラインとなる BL2 には、BL3 と同じ長さ 5 m のハイブリッド型真空封止プラナーアンジュレータ(周期長 18 mm)が設置されており、磁極ギャップ 2.7 mm で $K=2.85$ の磁場が得られる。BL2 アンジュレータ部の長さは、上流に dogleg 部があるため BL3 よりも短く、アンジュレータの台数は BL3 の 21 台に対し BL2 は 18 台である。

電子ビームエネルギー 8.15 GeV、レーザー光子エネルギー 6.8 keV ($K=2.85$) 時に測定した BL2 の XFEL ゲインカーブを Figure 2 に示す。Dogleg 部の CSR 効果を抑えるために電子バンチ長を伸ばし、ピーク電流を 2 kA 程度に下げているため、BL2 のレーザーパルス出力は約 250 μJ と、10 kA 以上のピーク電流で運転している

BL3 のパルス出力に比べ 1/2~1/3 程度に留まっている。

BL2 は、XFEL 利用研究の重要課題の 1 つである生物科学分野の利用を主に想定しているが、現在整備中の 500 TW レーザーと XFEL を組み合わせた実験なども行えるようになる。既に光電子分光などの分野のユーザー利用実験が BL2 を用いて実施されているが、BL3 と同様の高ピーク電流短バンチを用いたレーザーパルス出力向上が目下課題となっている。

3. Dogleg 部における CSR 効果

CSR は、電子ビームが偏向される時バンチ長程度の波長の電磁波が前方へコヒーレントに放射される現象である。このコヒーレント放射が偏向電磁石内で発生すると、電子バンチ後方部からの CSR がバンチ前方部の電子に追いつき相互作用するため、電子エネルギーや横方向運動量が電子バンチ内で変化し、その結果、特にバンチ全体のエネルギーブレッドや投影エミッタンスの悪化をもたらす。インコヒーレントな放射光と違い、FEL ゲインを決定する電子バンチスライスパラメータへの影響は投影パラメータへの影響に比べ小さいものの、アンジュレータ内ビームエンベロップのマッチングやビーム軌道の安定性が悪化する。

周囲のビームダクトのカットオフ波長を短くする等の境界条件によって、CSR の発生自体を抑制することも可能であるが、SACLA の 10 μm オーダーの電子バンチ長を考えると現実的ではない。そこで電子ビームに与える CSR の影響を最小限に抑えるという観点から、バンチ内エネルギー変化については許容し、横方向の運動量変化即ち投影エミッタンスの悪化を抑制するように dogleg 部の電子ビーム光学系を組むこととした。

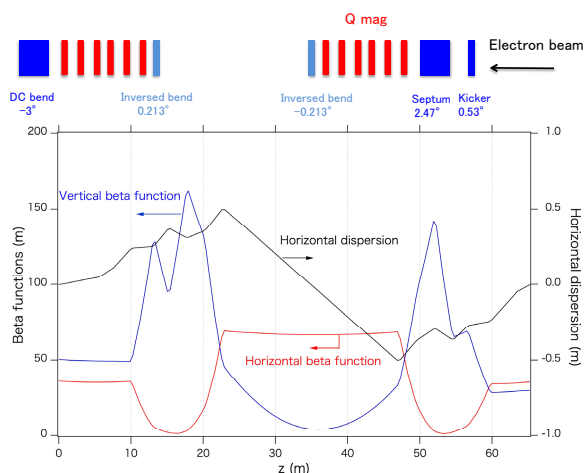


Figure 3: Current magnet configuration (up) and beam optics (bottom) of BL2 dogleg beam transport.

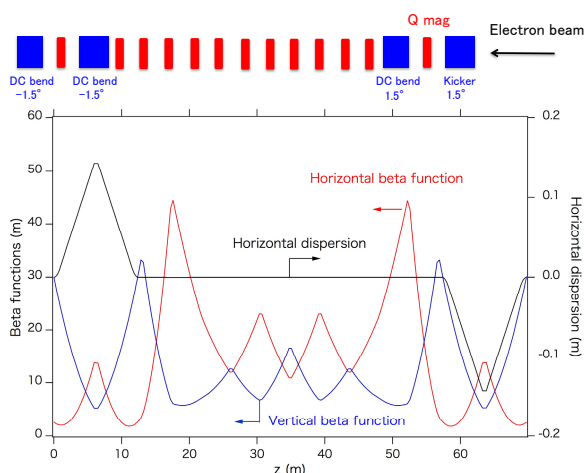


Figure 4: New magnet configuration (up) and beam optics (bottom) of BL2 dogleg beam transport.

CSR の電磁場が電子に与えるローレンツ力を、電子ビーム軌道に平行および偏向面内直交方向に分解して考えると、軌道と平行な成分は電場によるエネルギー変化を、直交する成分は横方向の運動量変化を電子に与える。しかしながら平行成分による電子のエネルギー変化についても、偏向電磁石内でエネルギーが変化すると偏向角が変わるため、偏向電磁石を出た後、結果としてエネルギー変化とともに横方向の運動量変化も残ることになる。

横方向の運動量が電子バンチ内で変化すると、電子バンチを進行方向に対し輪切りにした各スライスの位相空間分布が変わり、投影エミッタンスが増大する[5, 6]。またピーク電流がバンチ毎に変化すると CSR の強度が変わり、電子バンチ重心の横方向運動量が変化するため、偏向方向のビーム軌道が不安定になる。

4. Dogleg 部電子ビーム光学系の改善

SACLA では、線型加速器出口で電子ビームを水平方向に 3° 偏向しビームラインを切り替えている。XFEL は、アンジュレータ内の電子ビーム軌道安定性がレー

ザーの安定性に直結するため、電子バンチ毎にビームラインを切り替えるマルチビームライン運転においても、ビーム軌道の安定性は非常に重要である。

線型加速器出口で電子バンチ毎にビームラインを切り替えるキッカー電磁石の偏向角を大きくすると、パルス電源安定性に対する要求が厳しくなる。そこで現状 SACLA ではキッカー電磁石の偏向角を 0.5° に抑え、ビーム軌道が空間的に離れた約 5 m 下流の地点で DC セプタム電磁石を用いて残りの 2.5° を偏向している。Dogleg 部下流の -3° 偏向については、DC 偏向電磁石 1 台でビームを曲げている。

Figure 3 に、dogleg 部の現状の電子ビーム光学系を示す。現状のビーム光学系では、 R_{56} 補正用の偏向角の小さい逆バンドを除き、dogleg 部には偏向角の異なる偏向電磁石が 3 台ある。CSR 効果によるバンチ内横方向運動量の変化を、この 3 台の偏向電磁石間で相殺することは難しい。計算上特定の電子ビームパラメータに対しある程度相殺することはできても、現実的なベータ関数にならないといった無理が生じる。CSR 効果を高次項まで相殺するには、同一の偏向電磁石が少なくとも 4 台必要であり、かつ電子ビーム光学系が対称であることが望ましい。

Figure 4 に、2017 年 1 月に導入する dogleg 部の新しい電子ビーム光学系を示す。新規ビーム光学系は、偏向角 1.5° の同一の偏向電磁石を dogleg 部上流側と下流側に 2 台ずつ配置する DBA (Double Bend Achromat) とした。またベータ関数は、dogleg 部中心に対し対称にしている。

偏向方向のベータatron振動の位相差を偏向電磁石間で π にすると、CSR 効果によるバンチ内横方向運動量変化が 4 台の偏向電磁石間で相殺される[7, 8]。但し偏向電磁石が同一であっても、ピーク電流や電子バンチ形状が偏向電磁石間で変化すると、CSR 効果が変わってしまうため、dogleg 部の R_{56} によるバンチ長変化は避けねばならない。現状の電子ビーム光学系では逆バンド 2 台を使って R_{56} を制御しているが、新しく導入するビーム光学系では、2 台の DBA 偏向電磁石間にある四極電磁石のオフセンターにビームを通すことで R_{56} を制御する。

Figure 5 に dogleg 部通過後の電子バンチについて、横方向運動量変化を新旧電子ビーム光学系で計算した例を示す。計算には CSRtrack を用いた[9]。電子バンチの初期パラメータは、ピーク電流 10 kA、バンチ長 20 fs (FWHM)、規格化投影エミッタンス 0.8 mm-mrad 、ビームエネルギー 8 GeV である。現状の電子ビーム光学系では、dogleg 部通過後の電子バンチの水平方向運動量が進行方向に沿って大きく変化し、規格化投影エミッタンスが 10 倍以上に増加している (Figure 5 (a))。一方新規ビーム光学系では、CSR の効果が偏向電磁石間で相殺されるため、投影エミッタンスがほとんど増加していないことがわかる (Figure 5 (b))。新しく導入するビーム光学系 (Figure 5 (b)) のケースについては、CSRtrack の 1 次元と 3 次元の両方の計算モードで評価したが、結果はほぼ一致しており差がほとんどなかった。

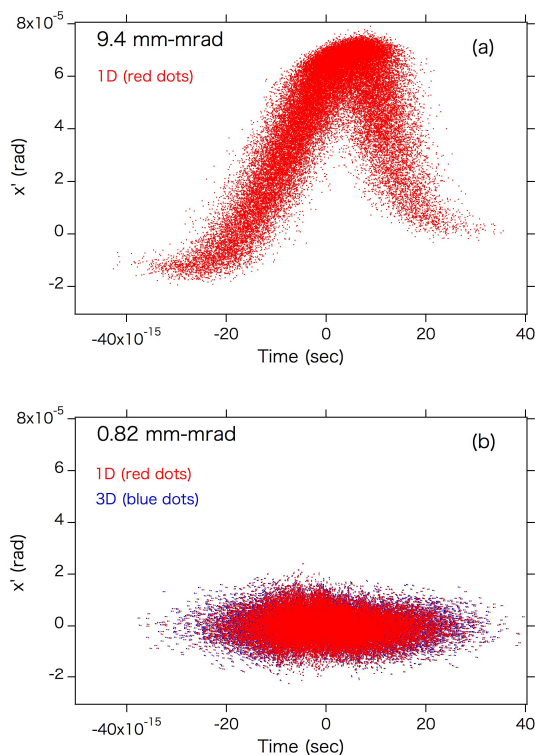


Figure 5: Electron distributions at the exit of BL2 dogleg with current beam optics (a) and new beam optics (b). The numbers indicated upper left are normalized projected emittance in the horizontal plane after the dogleg. The initial emittance before the dogleg is 0.8 mm-mrad.

5. 今後の予定と展望

SACLA BL2 dogleg 部の電磁石再配置を 2016 年冬期停止期間中に行い、2017 年 1 月より新しい電子ビーム光学系で運転する予定である。キッカー電磁石は、偏向角を 0.5° から 1.5° に増やすため、出力電圧を約 5 倍に上げたパルス電源を現在製作中である。現状のパルス電源は、偏向角換算で $1 \mu\text{rad}$ (peak-peak) のパルス間の電流安定性を実現しているが、新しいキッカー電磁石用パルス電源についても同様の安定性が求められる。

新しい dogleg 部電子ビーム光学系の導入により、BL2 でも BL3 と同様に、10 kA 以上の高いピーク電流をもつ電子バンチを用いた安定なレーザー発振がより高いパルス出力で可能になる。その後 BL2 と BL3 を用いたマルチビームライン運転を本格的に開始することで、SACLA ユーザー利用実験時間の拡大が期待される。

参考文献

- [1] T. Hara *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19** (2016) 020703.
- [2] T. Ishikawa *et al.*, Nat. Photon. **6** (2010) 540.
- [3] T. Hara *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **16** (2013) 080701.
- [4] E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller and M. V. Yurkov, Nucl. Instr. and Meth. A **398**, 373 (1997).
- [5] M. Dohlus and T. Limberg, Nucl. Instr. and Meth. A **393**, 494 (1997).
- [6] B. E. Carlsten and T. O. Raubenheimer, Phys. Rev. E **51**, 1453 (1995).
- [7] D. Douglas, Thomas Jefferson National Accelerator Facility JLAB-TN-98-012 (1998).
- [8] S. Di Mitri, M. Cornacchia and S. Spampinati, Phys. Rev. Lett. **110**, 014801 (2013).
- [9] M. Dohlus and T. Limberg, "CSRtrack: FASTER CALCULATION OF 3-D CSR EFFECTS", Proceedings of the 26th International Free Electron Laser Conference, Trieste, Aug. 29- Sep. 3, 2004, pp. 18-21.