

DBA を用いた CSR 効果の抑制

SUPPRESSION OF THE CSR EFFECTS USING DBA LATTICE

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)}, 長谷川 太一^{C)}, 森本 理^{C)},
吉岡 正倫^{C)}, 前坂 比呂和^{A)}, 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)},
Taichi Hasegawa^{C)}, Osamu Morimoto^{C)}, Masamichi Yoshioka^{C)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Yuji Otake^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} JASRI

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd.

Abstract

In order to satisfy the increasing demand for XFEL user experiments, parallel operation of multiple beamlines has become an important issue. The first multi-beamline operation of SACLA was demonstrated in January 2015 using two XFEL beamlines, BL2 and BL3. Although lasing was obtained at both beamlines, the peak current of the electron bunches was limited to 3 kA due to the CSR effect of a BL2 dogleg beam transport. Compared with the single beamline operation of BL3, which uses 10-15 kA electron bunches, the laser pulse intensity was reduced by a factor of 3. In January 2017, the beam optics of the BL2 dogleg was rearranged to suppress the CSR effect, in which symmetric optics based on a DBA lattice is employed. After the introduction of the new lattice, stable lasing has been successfully obtained with high peak current bunches. In addition, a wide spectral tunability of XFEL is ensured by changing the electron beam energy from bunch to bunch at SACLA. From October 2017, the multi-beamline operation using the two XFEL beamlines will start and provide laser pulses for user experiments.

1. はじめに

XFEL は LCLS と SACLA の従来施設に加え、2016 年から 2017 年にかけて韓国、スイス、ドイツ(ヨーロッパ)で次々と新しい施設が稼働を始めている。XFEL 施設では、レーザー発振に必要な高輝度電子ビームを線型加速器で生成するため、蓄積リングを用いる放射光施設と比べるとビームライン数が限られ、増大する利用実験への需要は施設数の増加だけでは完全に満たすことができない。よって、施設の利用効率を上げ実験時間を実質的に拡大するため、複数のビームラインを同時稼働させるマルチビームライン運転が不可欠である [1]。

Figure 1 に SACLA の全体図を示す [2]。アンジュレータホールには、最終的に 5 本のビームラインが設置できるスペースがあり、これまでに BL1、BL2、BL3 の 3 本についてアンジュレータの設置が完了している。このうち BL1 は、SACLA のプロトタイプであった SCSS 線型加速器をアンジュレータ上流に移設し、SACLA 線型加速器とは独立に稼働する軟 X 線ビームラインとなっている [3]。C バンド加速管を追加設置することで、SCSS では 250 MeV だった電子ビームエネルギーを、800 MeV まで上げている。BL2 と BL3 は XFEL のビームラインで、SACLA 線型加速器終端のキッカー電磁石により電子ビームを振り分けて運転する。また BL2 と逆の方向には XSBT (XFEL to Synchrotron Beam Transport)があり、将来の SPring-8 蓄積リングへのビーム入射に向け、既に SPring-8 シンクロトロンダンプまで

[#] toru@spring8.or.jp

のビーム輸送試験が完了している。

BL2 と BL3 の 2 本の XFEL ビームラインを用いたマルチビームライン運転は、線型加速器出口にキッカーとセプタム電磁石を設置し 2015 年 1 月から試験運転を開始した。しかしながら、線型加速器出口と BL2 アンジュレータの間にある偏向角 3° のドッグレッグビーム輸送路における CSR (Coherent Synchrotron Radiation) 効果の影響が著しく、電子ビーム軌道やバンチ形状が不安定になるため、通常 10 kA のピーク電流を 3 kA 以下に制限しないと安定なレーザー発振を得ることができなかった。レーザーパルス出力も通常の BL3 単独運転に比べ約 1/3 程度と低く、CSR 効果の抑制が大きな課題となっていた [4]。そこでこの問題を解決すべく 2017 年 1 月、BL2 ドッグレッグ部に新たな電子ビーム光学系を導入した。新ビーム光学系では、10 kA を超える電子ビームでも安定に電子ビームが輸送できるよう、CSR 効果を 4 台の偏向電磁石間で相殺する設計になっている。

本稿では、CSR 効果を抑制するために BL2 ドッグレッグ部に導入した新ビーム光学系と、マルチビームライン運転の現状について報告する。

2. BL2 ドッグレッグ部における CSR 効果の抑制

CSR は、電子ビームが偏向電磁石を通過する時前方へ放射されるコヒーレントな電磁波で、その波長は電子バンチ長程度となる。偏向電磁石内の電子軌道が円弧であるのに対し、電磁波は直線に進むため、電子バンチ後方から放射された CSR は、同じ電子バンチ内の

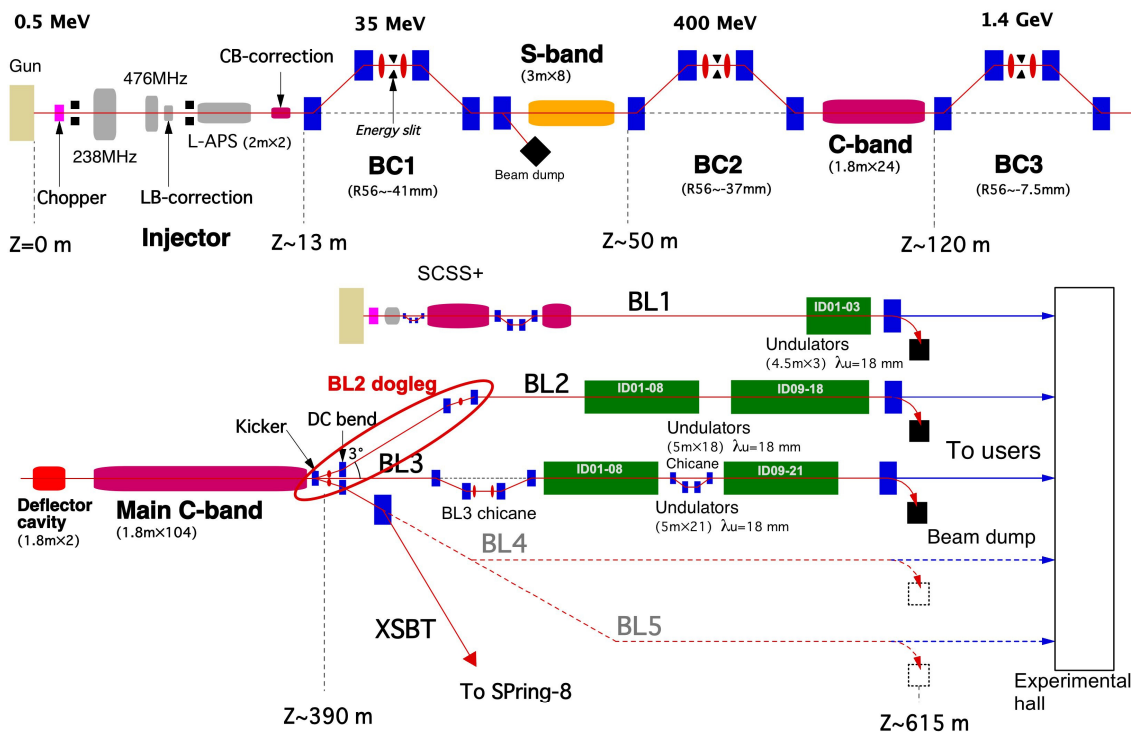


Figure 1: Schematic layout of SACLA.

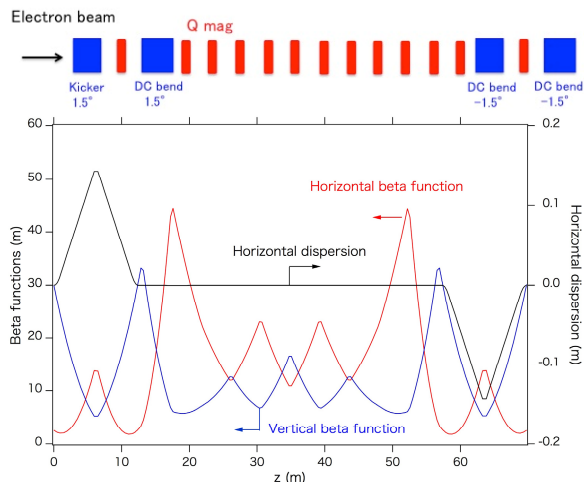


Figure 2: Magnet configuration (up) and beam optics (bottom) of the BL2 dogleg beam transport.

前方の電子に追いついて影響を与える。CSR の影響はバンチ長が短く、ピーク電流が高いほど顕著になる [5, 6]。

電子はローレンツ力により CSR から力を受けるが、ローレンツ力は電子の進行方向と、進行方向に垂直な偏向面内の 2 成分に分解することができる。進行方向成分は電子を加減速するのに対し、垂直成分は電子に横方向のキックを与えるが、SACLA を含め一般的に前者による効果が支配的である。電子のエネルギーが偏

向電磁石内で変化した場合、電子の円弧軌道の半径が変わり、リファレンス軌道からずれる。所謂 CSR 効果による dispersion が発生する [7]。CSR によるバンチ内電子のエネルギー変化は、電子の進行方向のバンチ内位置によって異なるため、偏向電磁石から出た電子バンチは、偏向面内にねじれたような形状となり、投影エミッタンスの増大をもたらす [8]。

SACLA の電子ビームはバンチ長が 10~20 fs (FWHM)、ピーク電流は 10 kA を超えているため、BL2 へ電子バンチを輸送する 3° ドッグレッグ部における CSR 効果が無視できない。ドッグレッグ部の旧ビーム光学系では、キッカー電磁石用パルス電源安定性への要求を緩和するためキッカー電磁石の偏向角を 0.5°、その下流の DC セプタム電磁石を 2.5° としてビームを曲げ、ドッグレッグ終端では DC 偏向電磁石 1 台を使って逆方向に 3° 曲げていた [1, 4]。この場合、3 台の偏向電磁石間の CSR 効果の相殺は完全ではない。SACLA 電子ビームの設計値 3 kA に対しては、CSR 効果による軌道変動や投影エミッタンスの増大は限定的だが、現状の 10 kA を超える電子バンチではその効果を無視することはできない。

BL2 ドッグレッグ部の改造は、2017 年 1 月に実施した。新たに導入したビーム光学系では、偏向電磁石 2 台とその間の四極電磁石 1 台を用いた DBA (Double Bend Achromat) をドッグレッグ部出入口で各々組み、同じ形状の偏向電磁石で電子ビームを水平方向に各

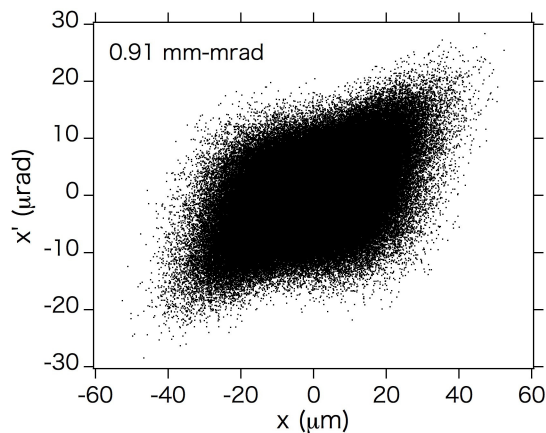


Figure 3: Horizontal phase space distribution of the electron bunch at the end of the BL2 dogleg. The initial conditions of the electron bunch are 8 GeV, 10 kA, 10 fs (FWHM) and 0.8 mm-mrad.

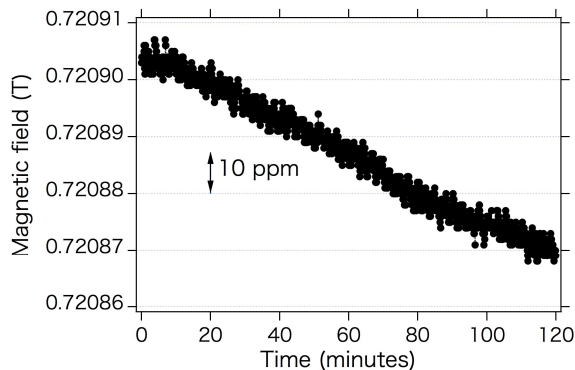


Figure 4: Stability of the kicker magnetic fields. The kicker is operated at 60 Hz and the sampling interval of the pulsed magnetic fields is 3 seconds.

1.5° 曲げる (Figure 2)。更に上下流2つの DBA 間の水平ベータatron振動の位相差を π とすることで、ドッグレッグ部にある 4 台の偏向電磁石間で CSR 効果を相殺させる [9, 10]

偏向電磁石間で CSR 効果を相殺するには、電子バンチの進行方向電流分布が一定であることが前提となる。このため通常の R_{56} (DBA 2 箇所で約 200 μm) により電子バンチ長や電流分布が変化しないよう、電子ビームを DBA 部四極電磁石のオフセンターに通すことで、各 DBA の R_{56} を 0 としている。

Figure 3 は、ビームエネルギー 8 GeV、ピーク電流 10 kA、バンチ長 10 fs (FWHM)、規格化エミッタンス 0.8 mm-mrad のガウス分布の電子バンチを仮定し、ドッグレッグ部通過後の位相空間分布を elegant で計算した結果である [11]。旧ビーム光学系では CSR 効果により約 1 桁増大していた投影エミッタンスが、新光光学系では増加が 15% 程度に抑えられていることがわかる。

3. マルチビームライン運転

新ビーム光学系では、キッカー電磁石の偏向角が旧

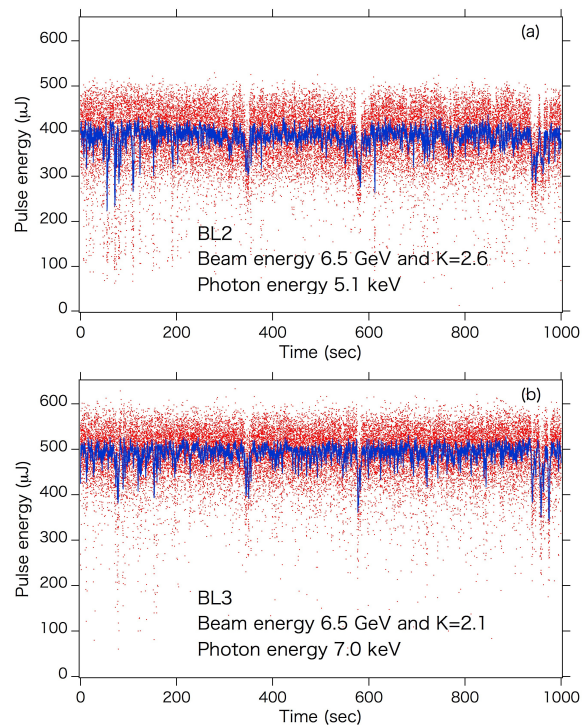


Figure 5: XFEL pulse energies obtained in the multi-beamline operation, (a) BL2 and (b) BL3. Red dots represent single-shot results and blue lines show averaged values over one second. The electron beam energy is 6.5 GeV and the bunch repetition of the accelerator is 60 Hz. The K-parameters of the undulators are set to 2.6 for BL2 and 2.1 for BL3.

光学系に比べ約 3 倍になるため、パルス毎の磁場安定度を保ったままキッカー電磁石用パルス電源の出力を増やす必要があった。パルス電源は、従来の電源の設計を元に新たに SiC MOSFET 素子を使用して、目標である 10 ppm (peak to peak) の安定度を達成した [12]。Figure 4 に、ゲート型 NMR を用いて測定したキッカー電磁石パルス磁場の安定度を示す [13]。パルス間のジッターの他にゆっくりした磁場のドリフトが見られるが、磁場ドリフトによる電子ビーム軌道変化についてはフィードバックで補正が可能である。

2017 年 1 月に、偏向電磁石の入れ替えなど BL2 ドッグレッグ部のビーム光学系の改修を行った後、2 月より新しい光学系でマルチビームライン運転の試験を開始した。SACLA BL3 単独運転時に通常用いている 10 kA の電子バンチを BL2 へ輸送したとき、ドッグレッグ部の CSR 効果により BL2 アンジュレータへの入射軌道の変動が、従来の光学系では約 16 pm-rad であったのに対し、新ビーム光学系では軌道変動を 1.9 pm-rad まで約 1 桁減少させることができた。

Figure 5 は、BL2 と BL3 で同時にレーザーを発振させた時の、レーザーパルス出力をプロットしたものである。電子ビームエネルギーは 6.5 GeV、バンチ繰り返しは 60 Hz で、キッカー電磁石を用いて電子バンチを交互に BL2 と BL3 に振り分けているため、各 BL でのレーザーの繰り返しは 30 Hz となる。レーザーのパルス出力

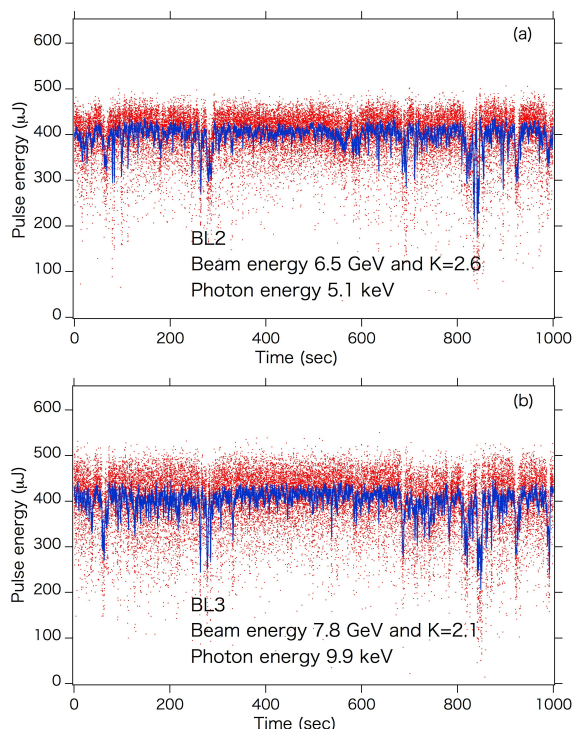


Figure 6: XFEL pulse energies obtained in the multi-beamline operation, (a) BL2 and (b) BL3. Red dots represent single-shot results and blue lines show averaged values over one second. The bunch repetition is 60 Hz. The electron beam energies and K-parameters are 6.5 GeV and 2.6 for BL2, and 7.8 GeV and 2.1 for BL3.

は 400~500 μJ と、旧ビーム光学系の時と比べ 2 倍以上に増加し、BL3 単独運転時と遜色ない出力が得られている。

Figure 5 の例では、アンジュレータギャップを変えることにより BL2 では K 値を 2.6 に、BL3 では 2.1 に設定し、異なる波長の X 線レーザーパルスを出している。波長可変性は FEL が最も重要な光源性能の 1 つであるが、マルチビームライン運転においてもアンジュレータギャップを変えることで、各 BL の利用実験に合わせて独立にレーザー波長を調整することができる。

また更に大きく波長を変える場合、電子ビームエネルギーを変える必要が出てくるが、SACLA では一部の加速管の RF パルス繰り返しを変えることにより、BL 毎に電子ビームエネルギーを調整することが可能である [14]。この線型加速器のマルチエネルギー運転を、マルチビームライン運転に適用した例を Figure 6 に示す。Figure 5 と比較して、BL2 ではビームエネルギーを 6.5 GeV に固定したまま、BL3 のエネルギーのみを 7.8 GeV へ上げることで、BL3 のレーザー波長を 7.0 keV から 9.9 keV に変えている。このように線型加速器のマルチエネルギー運転と可変ギャップアンジュレータを組み合わせることで、SACLA ではマルチビームライン運転においても BL 毎の独立した波長可変性を広いスペクトル範囲で確保している。

線型加速器終端のキッカー電磁石とアンジュレータ

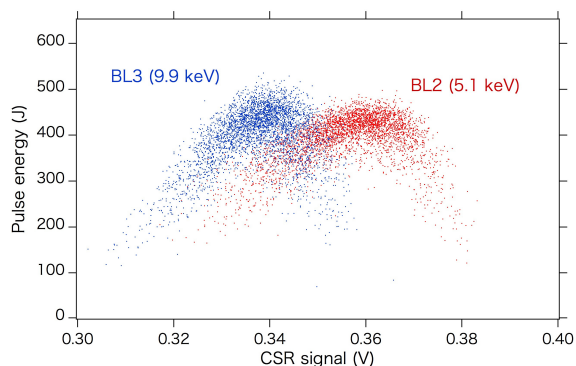


Figure 7: XFEL pulse energies of BL2 and BL3 plotted as a function of the CSR signal of BC3. The beam energies of BL2 and BL3 are 6.5 GeV and 7.8 GeV. Red and blue dots represent the pulses of BL2 and BL3, respectively.

の間に、BL2 ではドッグレッグが、BL3 ではビームエネルギーを測定し加速管からの暗電流を除去するためのシケインがある (Figure 1)。CSR 効果を抑制するため BL2 ドッグレッグの R_{56} を 0 にしているのに対し、BL3 シケインの R_{56} は約 -800 μm になっている。SACLA の電子バンチ長は 10~20 fs と短いため、この R_{56} の差は無視することができない。つまり電子バンチ圧縮のための線型加速器 RF パラメータの最適ポイントが BL2 と BL3 では微妙に異なり、RF の最適な位相が BL 毎にずれるという問題が生じる。Figure 7 は、BC3 (3 番目の Bunch Compressor) に設置した CSR モニターの出力に対し、BL2 と BL3 のレーザーパルス出力をプロットしたものである [15]。BC3 シケインの CSR 強度は電子バンチ長に相関しており、Figure 7 から BL2 と BL3 ではレーザーパルス出力が最大となるバンチ長 (CSR モニター出力) が若干異なることがわかる。マルチビームライン運転においても単独 BL 運転時と同様の最大出力を各 BL で出せるよう、SACLA では RF 位相を電子バンチ毎に制御し、2 本の BL とも最適な位相で運転することが可能である。このような電子バンチ毎の RF パラメータ制御は、将来 SACLA を低エミッタンス入射器として用い、XFEL 運転を続けながら一部の電子バンチを SPring-8 蓄積リングへ入射する際にも不可欠な技術となる。

4. まとめ

2017 年 1 月に行った BL2 ドッグレッグ部の改修の結果、ドッグレッグ部における CSR 効果の抑制に成功し、BL2 のレーザー出力を飛躍的に向上させることができた。これにより、マルチビームライン運転時においても BL3 単独 BL 運転時と同程度のレーザー出力を得ることが可能になった。

SACLA では 2017 年 7 月まで制御系の確認などの試験運転を行った後、10 月より BL2 と BL3 を用いたマルチビームライン運転の利用実験への本格的な運用を開始する。また、従来 30 Hz であったユーザー実験中の電子ビーム繰り返しについても 60 Hz へ上げる。これらにより、利用実験を行うユーザータイムが実質的に大幅に増えることが期待される。

参考文献

- [1] T. Hara *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **19**, 020703 (2016).
- [2] T. Ishikawa *et al.*, Nat. Photon. **6**, 540 (2012).
- [3] K. Togawa *et al.*, “SACLA 軟 X 線自由電子レーザービームラインのビーム特性”, in these proceedings.
- [4] T. Hara *et al.*, “SACLA マルチビームライン運転に向けての取り組み”, Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Chiba, Aug. 8-10, 282 (2016).
- [5] E. L. Saldin, E. A. Schneidmiller and M. V. Yurkov, Nucl. Instr. and Meth. **A398**, 373 (1997).
- [6] M. Dohlus and T. Limberg, Nucl. Instr. and Meth. **A393**, 494 (1997).
- [7] Y. Jiao, X. Cui, X. Huang and G. Xu, Phys. Rev. ST Accel. Beams **17**, 060701 (2014).
- [8] B. E. Carlsten and T. O. Raubenheimer, Phys. Rev. E **51**, 1453 (1995).
- [9] D. Douglas, Thomas Jefferson National Accelerator Facility JLAB-TN-98-012 (1998).
- [10] S. Di Mitri, M. Cornacchia and S. Spampinati, Phys. Rev. Lett. **110**, 014801 (2013).
- [11] M. Borland, Phys. Rev. ST Accel. Beams **4**, 070701 (2001).
- [12] C. Kondo *et al.*, “SACLA 高速振り分け電磁石用の大電力・高精度パターン電源の開発”, in these proceedings.
- [13] 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”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 95 (2014).
- [14] T. Hara *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **16**, 080701 (2013).
- [15] Y. Otake *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams **16**, 042802 (2013).