

XFEL のマルチユーザー利用を実現した電子ビーム振り分けシステム BEAMLINE SWITCHING SYSTEM FOR XFEL MULTI-USER OPERATION

近藤 力^{A,B)}, 原 徹^{B)}, 川口 祐介^{C)}, 川口 秀章^{C)}
Chikara Kondo^{A,B)}, Toru Hara^{A)}, Yusuke Kawaguchi^{C)}, Hideaki Kawaguchi^{C)}
^{A)} JASRI, ^{B)} RIKEN SPring-8 Center, ^{C)} Nichicon (Kusatsu) Corp.

Abstract

At the XFEL facility SACLA a beam switching system composed of a pulsed kicker magnet and a DC septum magnet had been installed to perform pulse-by-pulse XFEL switching operations between two XFEL beamlines (BL2 and BL3). However, CSR effects at a 3 degree dogleg beam transport to BL2 severely limited the peak current of the electron beam. In order to cancel out the CSR effects, new beam optics, which is symmetric in terms of the deflecting field distribution, is introduced to the dogleg. Here, a deflecting angle of a new kicker magnet working as the first bending magnet in the dogleg is increased from 0.5 to 1.5 degrees. To drive the new kicker magnet, a high-power pattern power supply, whose maximum output power is 0.3 MW (299 A and 1 kV), has been developed using SiC MOSFETs as switching elements. This power supply can generate bipolar trapezoidal current waveforms at 60 Hz with a current stability of 20 ppm (peak-to-peak), and the amplitude and polarity of each waveform are controllable from pulse to pulse depending on beam energies and destinations. By using the new beam switching system, we have succeeded in the multi-beamline XFEL operation with high peak current electron beams, which almost doubles the time slots for user experiments.

1. はじめに

X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA[1]では、大強度、短パルス、高安定な X 線レーザーを用いた利用実験が年間 3000 時間超行われてきたが、更により多くのユーザー利用が望まれている。利用時間を拡大するにはビームライン (BL) の増設とともに、加速器からの電子ビームを各ビームラインへショット毎に振り分け、複数の BL を同時に運転することが必要である [2-4]。

SACLA では Fig. 1 に示すように、既存の BL3 の隣に新しく BL2 を建設し、これらに線形加速器からの 4-8GeV の電子ビームを入射することで、2 本の BL で同時に XFEL 実験を行うことを目指した。キッカー電磁石を使って電子ビームをショット毎に BL2 と BL3 に振り分けるが、BL2 へは、 3° の偏向角をもつドッグレッグビーム輸送系を通す必要がある。このとき XFEL の安定な発振には、電子ビーム軌道の安定性や、短パルスや低エミッタンスといったビーム品質を保持することが重要である。我々は、これらの課題をクリアするため、大電力かつ高精度のキッカー電磁石用電源を開発し[5, 6]、対称なビーム光学系をドッグレッグに導入することで[7]、BL2 と

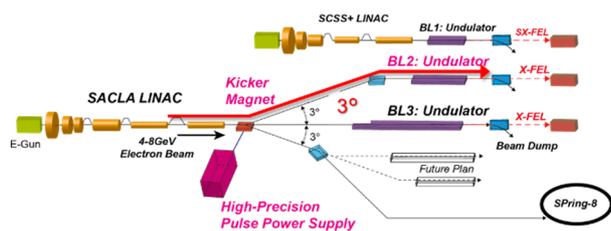


Figure 1: Schematic layout of SACLA.

BL3 の 2 本のビームラインにおける同時 XFEL 発振を達成した。本報告では、振り分けシステムの概要と、それを実現させたキッカー電源について述べる。

2. 振り分けシステムの概要

2.1 初期の非対称ビーム光学系

振り分けシステムの開発は、二段階で行った。第一段階の開発当時、大電力かつ高速スイッチングが可能なパワーデバイスが無かった事もあり、キッカー電源に要求される電流安定度を緩和するために、キッカー電磁石

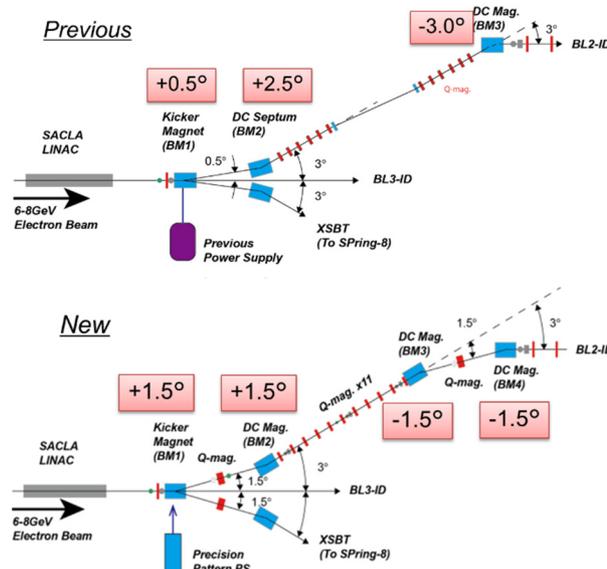


Figure 2: Schematic layouts of previous (upper) and new (lower) beam switchyard system. The angles in red boxes indicate the bending angle in each bending magnet.

ckondo@spring8.or.jp

の偏向角がなるべく小さくなるようなビーム光学系とした。Fig. 2 上図に示すように、偏向角は上流から順に、 $+0.5^\circ$ 、 $+2.5^\circ$ 、 -3° と非対称になっている。

このキッカー電源の開発では、高精度電流制御技術を確立し、目標の電流安定性を達成した [8]。だが、SACLA 通常運転時と同等の約 10 fs という短バンチがドッグレッグビーム輸送系を通過すると、ビーム軌道やプロファイル分布に大きな変動が見られ、安定な XFEL 発振を得ることが出来なかった。電子ビームのバンチ長を約 80 fs まで伸ばし、ピーク電流を下げれば安定な XFEL 発振が得られるものの、レーザーパルス強度は約 170 μJ と通常の半分以下になってしまう。このような短バンチ通過時の変動は、偏向電磁石における CSR(Coherent Synchrotron Radiation) 効果に起因するものであり、変動を抑制するには、ドッグレッグビーム輸送系の光学系を改修する必要があった [3]。

2.2 CSR 抑制のためのビーム光学系

開発の第二段階では、CSR 効果による影響を抑えるため、Fig. 2 下図に示す対称な 4 台の偏向電磁石と 13 台の四極電磁石で構成する DBA (Double Bend Achromat) ベースのビーム光学系を導入した [7]。偏向電磁石の偏向角は、順に $+1.5^\circ$ 、 $+1.5^\circ$ 、 -1.5° 、 -1.5° と同一の偏向角とし、かつ偏向電磁石間のベータatron振動の位相差を π にしている。この光学系を用いることで、各偏向電磁石の CSR 効果が互いに打ち消し合うようになり、ビーム品質の劣化を抑えることができる。

一方で、キッカー電磁石の偏向角は 1.5° と、初期システムの 3 倍となる。Table 1 に、新旧のキッカー電磁石と電源の主な仕様をまとめるが、キッカー電磁石のインダクタンスが増えた結果、電源出力には初期電源の約6倍が要求される。そこで大電力と高い電流精度の両者を併せ持つ、新たなキッカー電源の開発を行った。

3. 高精度キッカー電源

3.1 キッカー電源の概要

Table 1: Specifications of the Kicker Magnet and its Power Supply [5,6,8]

Kicker magnet		
	New	Previous
Magnetic field	0.89 T	0.67 T
Pole length, width	950 mm, 75 mm	400 mm, 40 mm
Inductance	16 mH	2.6 mH
Resistance	25 m Ω	4.4 m Ω
Kicker power supply		
Input	3 Φ - 420V _{AC}	
Output current	+/- 299 A max.	+/- 320 A max.
Pattern profile	Trapezoidal	
Current stability (pulse by pulse)	<6 mA (20 ppm for rated current)	
Output voltage	+/- 1000 V max.	+/- 160 V max.
Repetition rate	60 Hz max.	
Chassis size (W, D, H)	3m, 1m, 2.7m	2.2m, 1m, 2.2m

キッカー電源[5, 6]は、波高 $+299\sim 299\text{A}$ の台形状の電流パターンを、繰り返し 60Hz で出力する。この電流の立ち上がりでは、16mH という高いインダクタンスに約 5ms という短時間で 299A の電流を流すため、約 1kV の高電圧が必要となり、電源の出力電力は最大で 0.3MW に達する。パターン平坦部ではビーム到達時(出力開始から約 10.4 ms 後)までに電流を安定し、ショット毎の電流変動を 20 ppm(pk-pk)以内に抑える。そして、ビーム通過後は電磁石に流れている電流を電源内のコンデンサに流し、磁場エネルギーを回収する回生動作を行うことで、AC 受電部の AC トランスの小型化と、放熱機構の削減により、コンパクト化を図っている。

電源の構成は、Fig. 3 に示すとおり、電力回路とフィードバック回路、および動作制御回路で構成される。電力回路では、AC420 V を AC トランスで2系統に出力し、各々整流回路を通じて5並列のフルブリッジ・スイッチングユニットに接続、それを 2 直列とすることで、最大出力 299A、1kV を可能とする。このスイッチングユニットでは、出力制御に PWM(Pulse Width Modulation)制御を用いており、キャリア周波数が 100 kHz の高速スイッチングを行うことで、低リップルかつ高速な制御応答を実現している。

電源の出力側にはバイパス回路が付いており、後述する 3 A 以下(定格の 1%以下)の小電流出力時の出力安定化に用いる。

フィードバック回路では、DCCT で測定した電流信号とリファレンスのパターン信号との差分を増幅し、PID(Proportional-Integral-Differential)制御を行う。そして Gate 信号に PWM を加え、スイッチング動作を制御する。

動作制御回路では、PLC を用いて、操作制御やインターロック処理、そしてデータ通信を行っている。また、FPGA(Field Programmable Gate Array)により、外部から

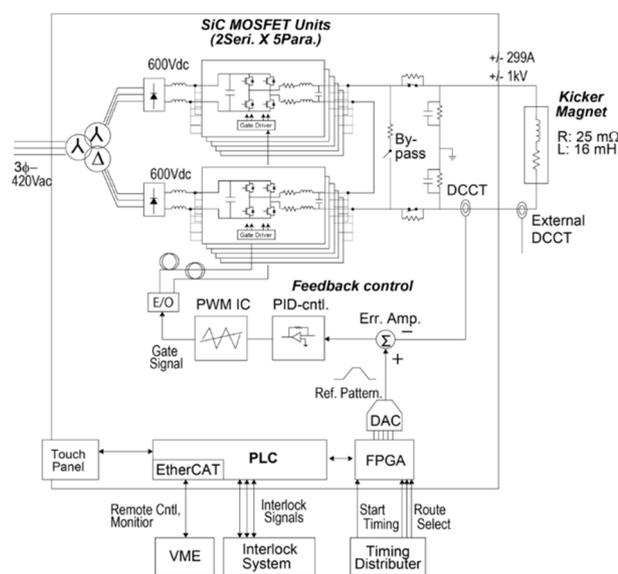


Figure 3: Block circuit diagram of the kicker power supply.

の出力タイミングやルート選択信号に応じて、ショット毎に任意の波高と極性をもつリファレンスパターンを、16bit DACを通じて生成している。

3.2 SiC パワーデバイス

新しいキッカー電源では、大電力出力と高精度な電流整定に加え、電源の筐体サイズを SACLAR クライストロンギャラリーに設置可能なサイズに収めることが要求された。このコンパクト化には、電源の大部分を占めるフルブリッジユニットの数量を減らす必要があり、高速スイッチングが可能で大電力が扱えるパワーデバイスが不可欠であった。

初期電源では、パワーデバイスに Si MOSFET (Silicon Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)[9]を用い、フルブリッジユニットを 16 並列で構成していた。このデバイスをそのまま新しい電源に用いると、筐体サイズが制約を大きく上回ってしまう。またデバイスに IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)を使用した場合、スイッチング速度が遅いため電流安定度が悪化する懸念があった。つまり従来のパワーデバイスではこの大電力電源の開発は難しく、このため初期の振り分けシステムでは大電力電源の開発を断念した経緯がある。

だが 2013 年頃から大容量、高速スイッチングが可能な SiC (Silicon Carbide) MOSFET モジュール[10]が量産されるようになり、第二段階の電源開発にはこれを採用した。この SiC MOSFET のデバイスは、Si MOSFET の約 2 倍の耐電圧と許容電流をもち、またパッケージの放熱性能も向上している。このため、構成ユニット数は 10 ユニットまで減らすことができ、電源のコンパクト化が可能となった。

3.3 小電流制御

電子ビームを BL2 や SPring-8 蓄積リングへつながる XSBT へ振り分ける時、電磁石には大電流が流れその後残留磁場が残る。この残留磁場は、電子ビームを BL3 へ通すときの軌道変化を与えるため、0.4 A 程度の小電流を逆方向に流して、残留磁場をキャンセルする必要がある。この小電流出力時にも電源には、5 mA(pk-pk)以下の大電流出力時と同等の電流安定度が要求される。

小電流を PWM 制御する場合、Gate 信号のパルス幅

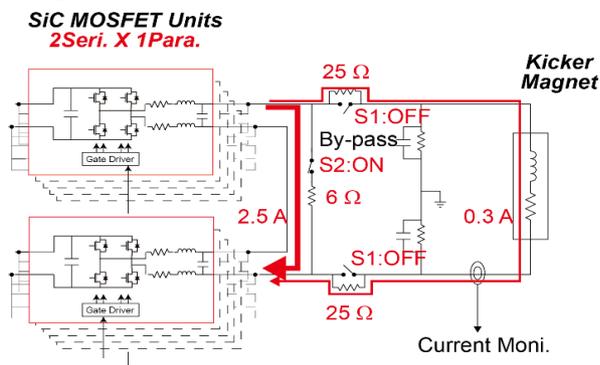


Figure 4: Current flow in a small current operation, 0.3A for the magnet.

が短くなるため、デバイスの動作が不安定になる。また、通過電流が小さくなると、デバイスのターンオフ時間が長くなり、電流制御が不安定になるという問題が生じる。

これらの課題を克服するため、バイパス回路方式を開発した。0.3~3A の小電流時には、パターン出力開始時にバイパス回路に備えられた2種類のスイッチ(SW1, SW2)の ON/OFF を切替え、Fig. 4 に示すような電流経路を形成する。この時、SW1 を OFF して出力電流を抵抗回路に通すことで出力電圧を増加させ、Gate 信号のパルス幅を確保する。また、動作させるユニット数を5並列から1並列に減らし、さらに SW2 を ON にしてバイパス経路に余剰な電流を流すことで、デバイスが安定に動作する電流を確保する。このような経路変更により、小電流出力時にも適正な電流、電圧範囲でデバイスを動作させている。

4. キッカー電源の動作試験

4.1 電流安定度

Figure 5(上図)に、本電源を+240 A, 60 Hz で運転したときの出力電流および出力電圧の波形を示す。なお電流波形は、フィードバック制御を行う電源内蔵の DCCT ではなく、電磁石近くに取り付けた外部 DCCT を用いて測定した。電流波形(赤線)は台形状のパターンであり、約 5 ms で 0 A から 240 A まで立ち上がっている。ビームが到達するタイミング(10.4 ms 後)の電流値のバラツキは、図中のヒストグラムで示すとおり、約 2.3 mA(pk-pk)で

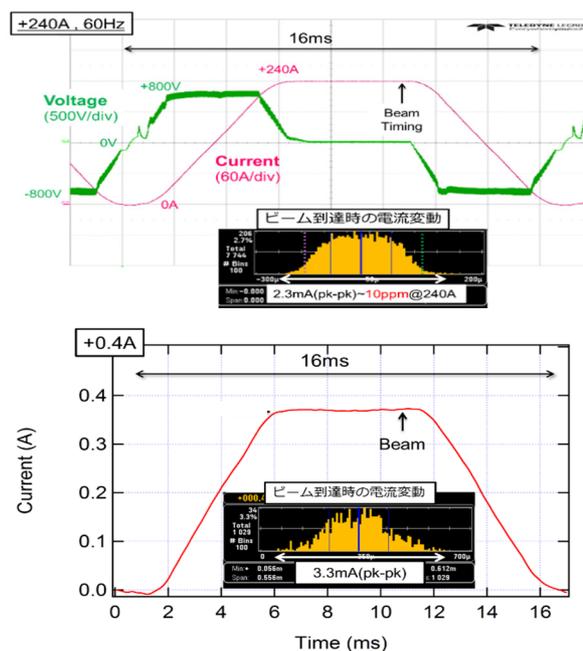


Figure 5: Upper figure is waveforms of voltage(green) and current(pink) of +240 A operation. The histogram of the inner the graph is the current variation at the beam timing. Lower figure is current waveforms of +0.4 A operation, and histogram of current variation.

あった。これは、出力電流 240 A に対し 10 ppm に相当し、要求された安定度 20 ppm 以下を達成した。また、0.4 A の小電流出力時の電流波形を Fig. 5(下図)に示す。台形状の電流パターンのビームタイミングにおける電流安定度は、大電流出力時と同程度の 3mA が得られていることが分かる。これにより、小電流時の経路切換方式による電流制御が有効に機能していることを確認した。

4.2 磁場安定度測定

電流安定度に加えて、キッカー電磁石磁場の安定度も直接測定した。この磁場測定では、ppm オーダーの高い測定精度だけでなく、ビームタイミングにおける同期測定が必要となる。この測定には、旧電源製作時に開発した測定時間にウィンドウを掛けられる核磁気共鳴測定装置(Gated NMR; エコー電子 EPM-6700SP)を用いた [8]。+240 A, 60 Hz の連続運転時の磁場強度のトレンドグラフを Fig. 6 に示す。15 分間の磁場の変動幅は 7 μ T であり、磁場強度 0.72 T に対して 10 ppm(pk-pk)と、要求された安定度が達成できていることを確認した。なお、数分以上の長い周期の変動については、ビーム軌道のフィードバックによって補正することができる。

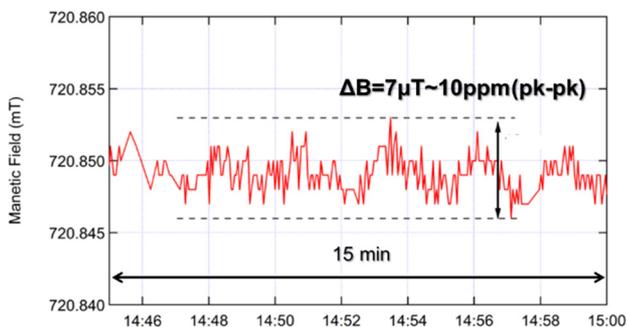


Figure 6: Trend graph of magnetic fields in a gap of the kicker magnet measured by the gated NMR.

5 高速ビーム振り分け

5.1 軌道安定性

新しいキッカー電磁石と電源、およびドッグレグビーム輸送ラインを使って、BL2 と BL3 へのビーム振り分け運転を行った。ビームエネルギーは 7.9 GeV である。BL2 のアンジュレーター上流に設置した 2 台の BPM を

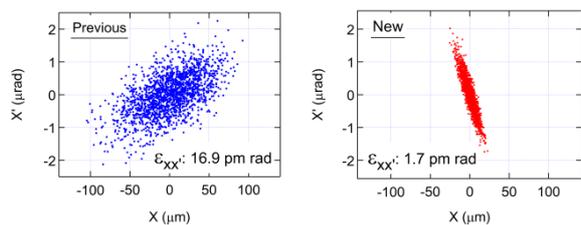


Figure 7: Comparison of the horizontal orbit fluctuation measured before the BL2 undulator: (left) previous beam transport, (right) new beam transport. In these plots, the emittance values are indicated.

用いてビーム軌道の位置と角度を測定し、軌道安定性を測定した結果を Fig. 7 に示す。初期の振り分けシステム(左図)と新しいシステム(右図)で測定した、ビーム軌道の水平方向の位置(X 軸)と角度(Y 軸)の分布を示す。どちらの場合も電子ビームの条件は、BL3 単独運転時に通常用いられる短パルス XFEL 生成用のパラメータが用いられており、電子ビームのバンチ長は約 10 fs である。初期システムでの軌道のバラつきは約 17 pm rad であったが、新しいシステムではその 1/10 である約 1.7 pm rad にまで低減した。すなわち新しい光学系では、CSR による影響が大幅に抑制されていることを示している。

5.2 マルチビームライン XFEL 運転

BL2 と BL3 の両ビームラインに、7.9 GeV 電子ビームを交互に 30pps で入射する、同時 XFEL 運転を行った。この時の条件としては、(1)BL3 単独運転で通常用いる短パルス XFEL 生成用の加速器パラメータをベースとして、各ビームラインにおいてレーザー出力が最大となるよう RF 位相を独立に調整、(2) 両ビームラインとも、アンジュレーターの K 値は 2.1 とし XFEL の光子エネルギーを 10 keV に設定、(3) アンジュレータービームラインへの入射軌道調整は各ビームラインで独立に行う、というものである。これにより両ビームラインにおいて、500 μ J 以上の XFEL 強度を得ることができた (Fig. 8)。これは、今回開発したパルス毎のビーム振り分けシステムにより、BL2 においても BL3 と同様に短パルスで高強度の XFEL 運転が可能になり、フル性能の XFEL が 2 本のビームラインで同時に利用可能になったことを示すものである。

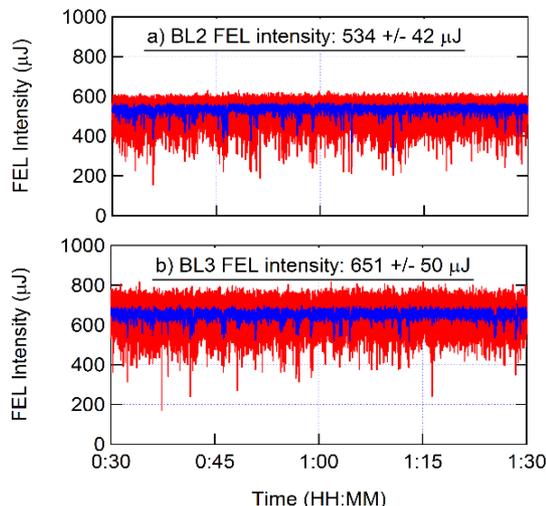


Figure 8: Trend graphs of XFEL pulse intensities measured at BL2 (upper), and BL3 (lower). A photon energy is 10 keV at both beamlines.

6. まとめ

SACLA の複数 BL において同時に XFEL 実験が行えるよう、電子ビームの振り分けシステムを開発した。これは、CSR による電子ビーム品質の劣化を抑制するドッグレグビーム輸送系と、ショット毎にビーム軌道を切替えるための高い電流安定度を持つキッカー電源によって

実現した。

キッカー電源には、0.3MW という大電力出力電源に限られた筐体サイズに収めるため、最新のパワーデバイスである SiC MOSFET を用いている。また小電流出力時にも電流を安定化させるため、バイパス回路などを導入した。この電源のショット毎の電流安定度は、0.4~240 A という広い範囲において 13ppm 以下という高い安定度を達成している。

この振り分けシステムを用いることで、BL2 と BL3 の同時 XFEL 運転において 500 μ J 以上の FEL 強度が両 BL で得られるようになった。2017 年秋から 2 本の XFEL BL の同時運転はユーザーへの供用が開始されており、2018 年度に見込まれるユーザー利用時間は、年間約 6000 時間超と従来からほぼ倍増している。

謝辞

本システムの開発は、理研の田中均氏、大竹氏、稲垣氏、福井氏、スプリングエイトサービスの中澤氏、および多くの SACLA 加速器関係者の協力を得て行われており、深く感謝します。また、電源の開発には、ニチコン株式会社の多くの技術者の多大な努力が注がれており、ここに深く感謝します。

参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, “A compact X-ray free-electron laser emitting in the sub-angstrom region”, *Nature Photonics*, 6, 540–544 (2012).
- [2] T. Hara *et al.*, “Pulse-by-pulse multi-beam-line operation for x-ray free-electron lasers”, *Phys. Rev. Accel. and Beams*, 19 020703 (2016).
- [3] 原徹 他, “SACLA マルチビームライン運転に向けての取り組み”, 第 13 回日本加速器学会, WEOM13, 千葉, 2016.
- [4] B Faatz *et al.*, “Simultaneous operation of two soft X-ray free electron lasers driven by one linear accelerator”, *New J. Phys.* 18 062002, (2016).
- [5] C. Kondo *et al.*, “A stable pulsed power supply for multi-beamline XFEL operations”, *Rev. Sci. Instr.*, 89, 064704 (2018).
- [6] 近藤力 他, “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”, 第 14 回日本加速器学会, TUOM03, 札幌, 2017.
- [7] T. Hara *et al.*, “High peak current operation of x-ray free-electron laser multiple beam lines by suppressing coherent synchrotron radiation effects”, *Phys. Rev. Accel. and Beams*, 21 040701 (2018).
- [8] 武部英樹 他, “SACLA 電子バンチ振り分けの為の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”, 第 11 回日本加速器学会, SUOL03, 青森, 2014.
- [9] IXYS, HiPerFET Power MOSFET IXFL132N50P3;
<http://ixapps.ixys.com/>
- [10] ROHM Semiconductor, SiC Power Module;
BSM120D12P2C005,
<http://www.rohm.com/web/global/>