

# 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

## HIGH POWER AND HIGH PRECISION PATTERN POWER SUPPLY OF KICKER MAGNET AT SACLA

近藤 力<sup>#,A)</sup>, 原 徹<sup>A)</sup>, 福井 達<sup>A)</sup>, 稲垣 隆宏<sup>A)</sup>, 大竹 雄次<sup>A)</sup>, 田中 均<sup>A)</sup>,  
深見 健司<sup>B)</sup>, 中澤 伸侯<sup>C)</sup>, 川口 祐介<sup>D)</sup>, 川口 秀章<sup>D)</sup>

Chikara Kondo<sup>#,A)</sup>, Toru Hara<sup>A)</sup>, Toru Fukui<sup>A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>A)</sup>, Kenji Fukami<sup>B)</sup>,  
Shingo Nakazawa<sup>C)</sup>, Yusuke Kawaguchi<sup>D)</sup>, Hideaki Kawaguchi<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN SPring-8 Center, <sup>B)</sup> JASRI / RIKEN SPring-8 Center

<sup>C)</sup> SPring-8 Service Co., Ltd, <sup>D)</sup> Nichicon Kusatsu Corp.

### Abstract

At the XFEL facility SACLA a beam switching system composed of a pulsed kicker magnet and a DC separator has been installed to perform pulse-by-pulse XFEL switching operations over two XFEL beamlines (BL2 and BL3). However, CSR effects at a dogleg beam transport to BL2 with a deflecting angle of 3 degrees significantly limited the peak current of the electron beam. In order to cancel out the CSR effects, new beam optics, which is more symmetric in terms of the deflecting field distribution, is introduced to the dogleg. Here, a deflecting angle of the kicker magnet working as the first bending magnet in the dogleg is increased from 0.5 to 1.5 degrees. To drive the kicker magnet, a high-power pattern power supply, whose maximum output power is 0.3 MW (299 A and 1 kV) with a current stability of 10 ppm (peak-to-peak), has been developed using SiC MOSFETs as switching elements. This power supply can generate bipolar trapezoidal current waveforms at 60 Hz, and the amplitude and polarity of each waveform are controllable within the required current stability from a pulse to a pulse depending on a beam energy and a destination. This presentation reports the design overview and obtained performance of the developed power supply together with beam commissioning results of the new pulse-by-pulse switching system.

### 1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA では、年間約 6 千時間もの X 線自由電子レーザー(XFEL)による利用実験が行われているが、増加する実験ユーザーの要求に答えることは難しい。SACLA は、増大する XFEL 利用へのニーズに対応できるように、最大 5 本まで XFEL ビームラインの増設が可能である。建設当初から稼働している硬 X 線 FEL 用ビームライン BL3 に加え、その隣に新たなビームライン BL2 を建設し、2015 年にレーザー振り分け運転を実施した [1,2]。この時、BL2 へのビーム輸送ラインは、非対称の曲げと曲げ戻し、即ち、+0.5°のキッカー電磁石、+2.5°の DC セパレータ、-3°の曲げ戻し偏向磁石で構成されるドッグレッグであったため、CSR によるビーム品質の劣化が顕在化した[3]。レーザー増幅を実現するには、ピーク電流を下げて CSR を抑制する必要があり、BL3 に比べ、XFEL のパルスエネルギーが半減した。

CSR によるビーム品質の劣化を抑えるため、振り分け輸送系を改造する検討が行われた。新しい輸送系 (Figure 1)は、同じ偏向角 1.5°を持つ 4 台の偏向電磁石により、2 組のアクロマット (DBA) 構造をドッグレッグの入口と出口に配置している。偏向電磁石の水平ベータatron 振動位相差を  $\pi$  にすることより、CSR のビームへの影響がドッグレッグ出口部において十分な精度で相殺される設計とした[4,5]。この CSR 相殺の条件を成立させるた

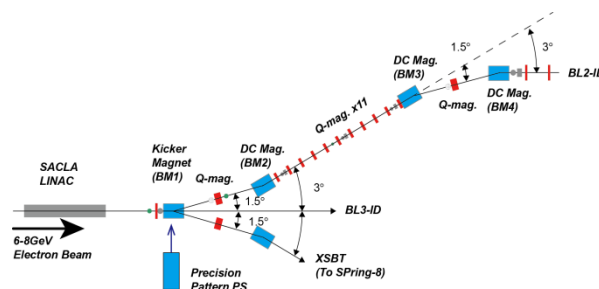


Figure 1: Schematic layout of beam transport from linac to BL2.

め 11 台の四極電磁石が DBA 間に配置されている。

この新しい輸送系に必要なキッカー電磁石の仕様を満たすには、より強磁場を発生できる電磁石の開発と、それを駆動する電源の大電力化が必要となった。キッカー電磁石には、最大約 0.89 T の磁場を、最大繰り返し 60 pps のビームに合わせて発生させることが要求された。また、安定なレーザー増幅には、ビーム偏向時の軌道変動を、SACLA 線型加速器の軌道安定性(角度変動 1  $\mu$ rad)に比べ十分小さく抑える必要もある。このため、電磁石電源の大まかな仕様は、最大繰り返し 60 Hz、 $\pm 299$  A の範囲で任意の電流の出力が可能で、かつショットごとの電流安定度が 3 mA(pk-pk)、定格に対して 10 ppm という困難なものとなった。

本報告では、このキッカー電磁石を駆動するパターン

<sup>#</sup> ckondo@spring8.or.jp

電磁石電源について、設計概要、動作試験結果、そして振り分けビーム運転の結果を述べる。

## 2. キッカー電磁石およびパターン電源

### 2.1 設計方針

キッカー電磁石は、SACLA 線型加速器から入射される 4.8GeV の電子ビームを、 $\pm 1.5^\circ$  で振り分ける。これは旧キッカー電磁石[2]の 3 倍の偏向角となるため、電磁石の磁極長と磁場強度の増強を伴い、結果として電磁石のインダクタンスは 16mH と、旧電磁石の約 6 倍となった。

この電磁石の高いインダクタンスは、電磁石電源の必要電力を増大させた。旧電源[2]の設計を基に、それを大電力化し、特に高い出力電圧を持つ新しいパターン電源を開発することにした。電流安定度はレーザーの安定性に影響するため、旧来と同じ 10 ppm の高い安定度が必要である。以下に設計方針を述べる。

出力電流パターンは、旧来と同様に台形状とし、電流の立ち上げ、電流整定、電流の立ち下げを 16 ms 以内で行ない、これを最大 60 Hz の繰り返しで出力可能とする。電流立ち上げ時には、最大 60 A/ms 程度の電流上昇率が要求され、電源の出力電圧は最大 1 kV と、旧来の 5 倍の電圧が必要となる。パターン平坦部では、電流整定が行われ、ビーム到達のタイミング(出力開始から約 10.4 ms)には、電流の変動を 3 mA 以下に安定化する。また、電流の立ち下がり時は、電磁石に貯まった電流エネルギーを、電源内の電解コンデンサに還流する電力再生を行い、電力効率を上げる。

電流の安定化には、旧電源において 10 ppm(pk-pk)の安定度を達成しているフィードバック制御システムを基とした、高周波スイッチングによる PWM 制御を用いている。このとき、出力回路では、大電力化に伴い損失も増えるため、モジュールの大電力化や発熱対策をとる。

電源の筐体サイズは、設置スペース上の制約から 3 m(W)×1 m(D)×2.4 m(H)以下に収める必要があった。このサイズは旧電源の 1.5 倍にあたるが、増強される電力は約 6 倍になるため、電力密度は 4 倍以上高くなる。そのため、電力部品の配置を見直して無駄な空間を省

Table 1: Major Specifications of the Kicker Magnet and the Power Supply

| Kicker magnet                                     |                         |
|---|-------------------------|
| Magnetic field                                    | 0.893 T @ 299 A         |
| Pole length and width                             | 950 mm and 75 mm        |
| Inductance  | 16 mH @ 1kHz            |
| Total resistance                                  | 25 m Ohm                |
| Pattern power supply                              |                         |
| Input   | 3-phase 420Vac          |
| Output current                                    | +/- 299 A max.          |
| Pattern profile                                   | Trapezoidal             |
| Current stability at beam timing (pulse by pulse) | 3 mA (10 ppm for 299 A) |
| Output voltage                                    | +/- 1000 V max.         |
| Repetition rate                                   | 60 Hz max.              |
| Chassis size (W, D, H)                            | 3m x 1m x 2.7m          |

略するなど、構造設計を再検討した。特に、抵抗など発熱部品の冷却方法を見直し、機器のサイズダウンを目指した。

この電源では、0.3-1 A という、最大定格の 0.3%以下の小電流出力時でも、3 mA の電流安定度が要求される。小電流出力は、大電流を通電後に、電磁石の積層鋼板に残るヒステリシス磁場の補償に用いられる。具体的には、電子ビームを BL2 に通した後に、中央の BL3 ヘビームを真っ直ぐに通す場合にあたり、この時でもレーザーの必要安定性は変わらないため、要求される電流安定度も大電流出力時と同じになる。このような小電流出力時は、後述するように制御の不安定性が生じやすく、旧電源では出力回路にダイオードを追加することで制御性を確保していた。しかし、大電力化に伴いダイオードの発熱も大きくなるため、損失を抑えられる別方式を採用することにした。

Table 1 に、キッカー電磁石とパターン電源の主な仕様を列記する。

### 2.2 回路構成

Figure 2 に、本電源の回路図を示す。主回路は、AC420V を整流後、5 並列 2 直列で構成したフルブリッジ回路により、約 1 kV の高電圧かつ 299 A の大電流を 100 kHz のスイッチング周波数で PWM 制御が可能である。また、出力部には、高周波フィルタだけでなく、後述する小電流対策に用いる付帯回路(バイパス回路と抵抗回路)を備え、IGBT により電流経路を切り換えられる。

電流のフィードバック制御は、高精度 DCCT(MACC+)により電流を計測し、電流の参照値との誤差を増幅し、PID 補正を与え、フルブリッジ回路の出力 MOSFET の Gate に PWM 制御に帰還を与えることによって行われる。電流の参照値は 1 サイクルの台形パターン信号として与えられる。これは、ショット毎に、タイミングシステムから送られるビームルート信号を受け、それに応じた波高をもつ台形パターンを、FPGA と 16bit DAC

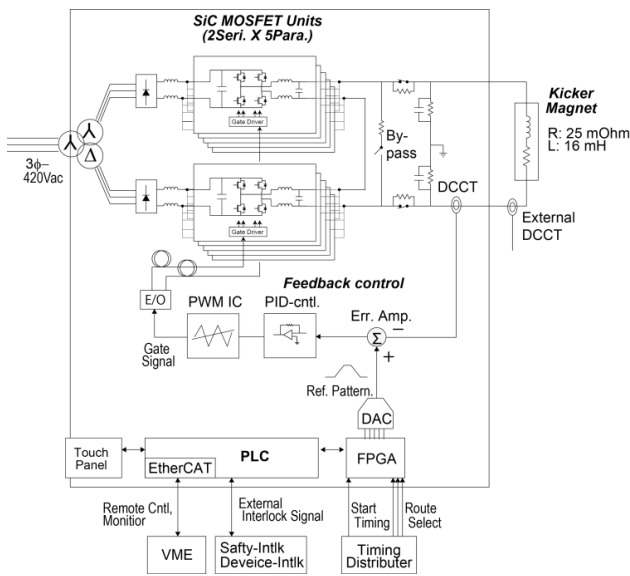


Figure 2: Block diagram of the pattern power supply of the kicker magnet.

において作成している。なお、フィードバック制御回路は、恒温槽内に設置し、温度安定化を施す。

電源全体の動作制御、インターロック処理、モニタ信号の入出力、および外部通信は、PLCで処理する。特に外部通信では、電流、電圧モニタ値を、60 Hz のショットごとに上位 VME へ送信できるように、高速な通信速度を持つ EtherCAT 方式を採用した。

### 2.3 大電力化への対応

本電源は、旧電源に比べ 4 倍以上の電力密度となるため、大電力モジュールの利用や、発熱の抑制、そして効率的な冷却が必要となる。

従来のシリコン系の MOSFET を用いると、必要なモジュール数が旧電源の 5 倍も必要と見込まれ、電源サイズを要求に収めることが困難であった。そこで、近年実用化された、高耐圧かつ高速スイッチングが可能な炭化ケイ素(SiC)系の MOSFET モジュールを採用した。設計段階において、3 種類の SiC MOSFET の動作を実検証し、スイッチング時間や損失などの特性が優れた ROHM 製の SiC MOSFET モジュール(BSM120D12PC005[6])を選定した。このモジュールの定格は、耐電圧 1200 V、電流量 120 A と、旧電源のモジュール(IXFL132N50P3)の耐電圧、電流量の倍以上の定格を持つ。このモジュールを、使用中の電圧、電圧が定格の半分以下になるよう、5 並列 2 直列の回路構成とした。これは旧電源の 16 並列よりも少ない回路数である。

回路数の削減と共に、冷却の効率化による電力回路の省スペース化も実施した。旧電源では、電源出力部の抵抗による発熱の除去を空冷により行っていたため、部品サイズや通風のために大きな空間が占められていた。今回、発熱の大きい抵抗には、間接水冷ができる小型の高耐圧抵抗を採用した。これを、他の半導体スイッチと共に水冷銅板上に集約し、効率的に冷却することで、省スペース化を図った。

以上の対策を施すことで電力回路を小型化し、電源筐体を要求サイズに収めることに成功した。また、この小型化により電力回路をブロック単位でユニット化でき、交換保守が容易となった。

### 2.4 小電流時の電流制御

本電源には、0.3-1 A 程度の小電流出力時でも、3 mA 以下の電流安定性が要求されるが、このような小電流出力では電流制御が不安定になり易い。以下にその原因と対策を述べる。

電磁石のような低抵抗な負荷に、高電圧出力で小電流を制御する場合、電流整定時には出力電圧が非常に小さくなり、PWM 制御の平均 Duty 比も小さくなる。今回の場合、0.3 A における Duty 比は  $10^{-5}$  以下となり、パルス幅に換算すると 0.2 ns 以下となる。これは、モジュールの ON/OFF の遷移時間よりも短い時間幅であり、PWM 制御は不安定になる。また、今回用いた SiC MOSFET モジュールでは、1モジュールあたりの通過電流が小さいと、ターンオフの遷移時間が長くなる。特に 1 A 以下でのターンオフには数  $\mu$ s かかるため、電流制御の不安定性が増すことが分かった。

これらの不安定性の対策として、Figure 3 に示すように、二種類のスイッチ S1 と S2 を設け、小電流の出力時には、

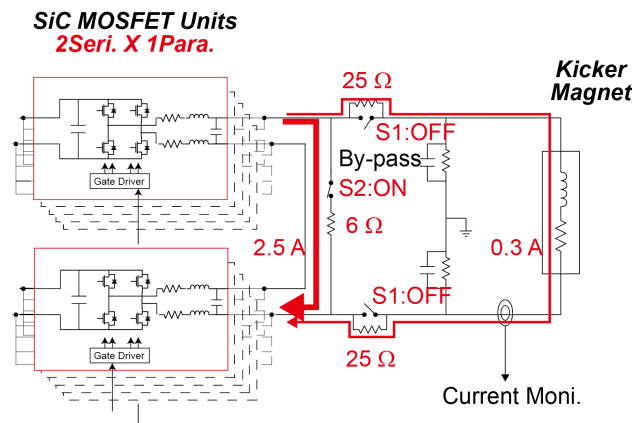


Figure 3: Current flow in a small current operation, 0.3A for the magnet.

S1:OFF, S2:ON とすることで、電流を抵抗回路( $25 \Omega \times 2$ )と、バイパス回路に流すようにした。S1 を OFF にすることで、出力電流は抵抗回路に迂回する。これにより、抵抗でのドロップ電圧がスイッチングモジュールの出力電圧に加算され、平均 Duty 比は 1.5%以上が確保される。また、スイッチ S2 を ON にすることで、出力負荷に並列に接続されたバイパス回路に、負荷電流の約 8 倍の電流が流れるようになり、回路全体の電流が大幅に増える。その上で、駆動するフルブリッジ回路を 5 並列 2 直列から 1 並列 2 直列に減らして、電流を 1 回路に集中させた。これらにより、負荷への出力電流が 0.3 A の場合でも、1モジュールあたり 2 A 以上の通過電流を確保した。

以上の対策により、電磁石への電流が小さい場合でも、スイッチングモジュールの出力電流、電圧が適切な範囲で駆動できるものとした。なお、大電流時には、S1:ON, S2:OFF とし、出力電流は直接、キッカー電磁石に流す切り替えを行う。

## 3. 動作試験

### 3.1 出力波形

Figure 4 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(TOPAC)を用いて測定した。電流波形(赤線)は、出力開始後、約 6 ms 程度で +240 A 近くまで上昇し、その後、約 5 ms の定電流状態を経て、約 5 ms ほどかけて 0 A まで立ち下がる台形状のパターンである。

Figure 4 下図には、台形状のパターンの平坦部を拡大した結果を示す。この波形から、ビームが到達するタイミングでは、出力電流の変動は数 mA に収まっていることが分かる。このビームタイミング付近でのショット毎の電流変動を高精度で測定するため、乾電池式高精度オフセットアンプ[2]と、Gate 機能付きデジタルマルチメータ (Keysight 34470A)を用いた。Figure 5 に、測定した電流変動のヒストグラムを示す。その変動の大きさは約 2.3 mA(pk-pk)であった。これは、最大定格 299 A に対し 8 ppm に相当し、要求された安定度を達成できたことを確認した。



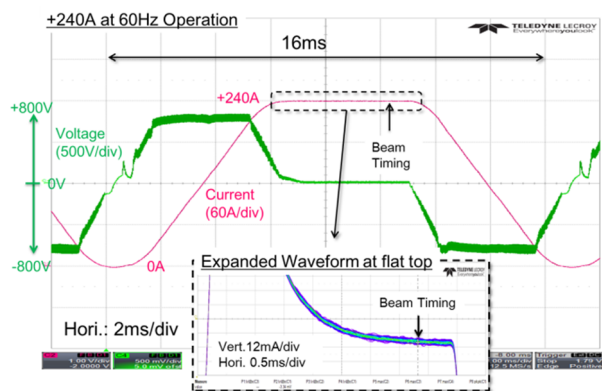


Figure 4: Measured waveforms of the output current (red) and voltage (green). An output current is 240 A and a repetition rate is 60 Hz. In the lower window, the flat-top of the trapezoidal pattern is expanded.

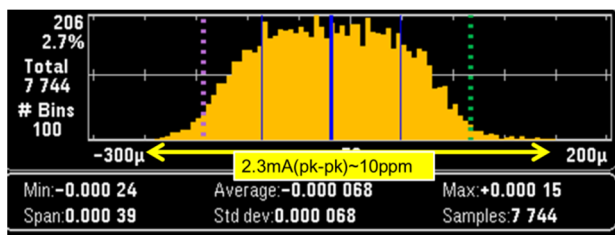


Figure 5: Histogram of current jitter at the beam timing and 240 A operation.

また、1 A の小電流出力時の電流波形を Figure 6 に示す。大電力時同様に、台形状の電流パターンとなっており、平坦部の拡大波形からは大電力時と同程度の安定度が得られていることが分かる。これより、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。

### 3.2 磁場安定性

電流安定度に加えて、キッカー電磁石の磁場安定度も測定した。この磁場測定では、ppm オーダーの高精度

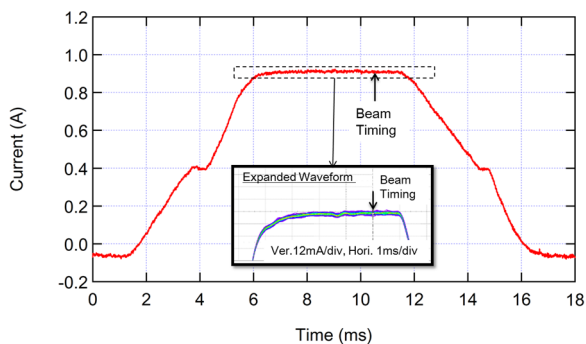


Figure 6: Current waveform at +1A small current operation. In the lower window, the flat-top of the trapezoidal pattern.

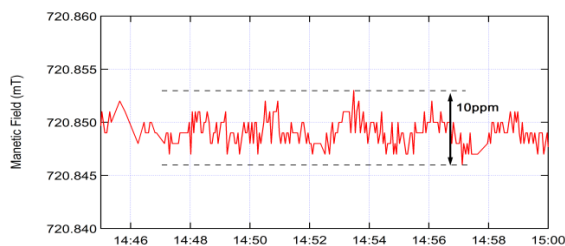


Figure 7: Trend graph of the kicker magnetic field measured by a gated NMR detector at the beam timing. The power supply was operated at 60 Hz with a peak current of 240 A.

だけでなく、ビームタイミングに同期した測定が必要となる。これには、旧電源の製作時に開発[2]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。+240 A, 60 Hz の連続運転時の磁場強度のトレンドグラフを Figure 7 に示す。15 分間の磁場の変動幅は  $7 \mu\text{T}$  であり、磁場強度  $0.72 \text{ T}$  に対して  $10 \text{ ppm(pk-pk)}$  と、要求された安定度を達成できていることを確認した。また、2-3 分周期の小さな変動が見られた。これは電源や電磁石に流している冷却水の温度変動による可能性があるが、この周期の磁場変動は、軌道フィードバックによってビームへの影響を抑えることが可能である。

## 4. 高速ビーム振り分け

### 4.1 軌道安定性

SACLAからのビームエネルギー  $7.9 \text{ GeV}$  の電子ビームを、新しいキッカー電磁石とその駆動電源、およびビーム輸送ラインにより BL2 へ振り分けた。この時、BL2 への振り分けの励磁電流は  $-240 \text{ A}$  であった。BL2 のアンジュレーター入射直前に設置した 2 台の BPM を用いてビームの位置と角度を測定し、軌道安定性を確認した。Figure 8 に、ビーム輸送ラインの改造前(左図)と改造後(右図)での、ビーム軌道の水平方向ビーム位置(X 軸)と角度(Y 軸)のショット毎のバラツキを示す。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、電子ビームのピーク電流が  $10 \text{ kA}$  を超えている。改造前の軌道のバラつき[1]は約  $17 \text{ pm rad}$  であったが、改造後には約  $1.7 \text{ pm rad}$  と、改造前の  $1/10$  まで低減した。この結果は、新しい輸送ラインでは CSR による軌道不安定性が大幅に抑制されていることを示している。

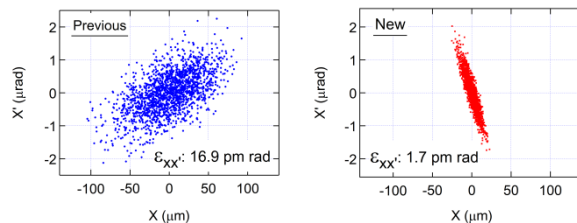


Figure 8: Comparison of the horizontal orbit fluctuation measured before the BL2 undulator: (left) previous beam transport, (right) new beam transport. In these plots, the emittance values are indicated.

なお、改造後の輸送系ラインでのビームの角度広がりは、約  $4 \mu\text{rad}(\text{pk-pk})$  と見積もられる。これに対してキッカー電磁石の磁場安定度から見積もられる角度広がりは、概算で  $0.13 \mu\text{rad}$  であることから、電源の出力安定度によるビームへの影響は十分小さく、無視できるレベルである。

#### 4.2 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 15 pps で入射する、均等ビーム振り分け運転を行った。この時の条件としては、(1) SACLA 加速器のパラメータは、両ビームラインにおいて共通とし、BL3 単独運転で通常用いる短パルス XFEL 生成用のパラメータを使用、(2) 両ビームラインとも、アンジュレーター の K 値を 2.1 として XFEL の光子エネルギーを 10 keV に設定、(3) アンジュレータビームラインの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の XFEL 強度として 300-500  $\mu\text{J}$  を得ることができた (Figure 9)。これは、新しいビーム輸送ラインにより、BL2 でも、BL3 と同様に短パルスで高強度の XFEL を生成でき、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、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。

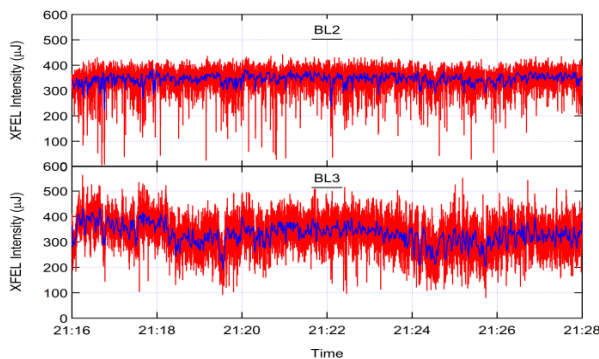


Figure 9: Trend graphs of XFEL pulse intensities measured at BL2 (upper), and BL3 (lower). A photon energy is 10 keV at both beamlines.

## 5. まとめ

SACLA の複数 BL への XFEL 振り分け運転の実用化に向け、CSR による電子ビーム品質の劣化を抑制するビーム輸送系の改造を行った。この輸送系の初段に当たるキッカー電磁石と、それを駆動するパターン電源を新規に製作した。本電源は、最大 1 kV、 $\pm 299 \text{ A}$  のパルスを 60 Hz でショット毎の電流安定度 10 ppm で出力できる。旧電源に比べ、約 6 倍に電力が増大したが、SiC MOSFET モジュールの採用や、水冷による冷却の効率化などにより、電源サイズを 1.5 倍に抑えることができた。また、0.3-1A の小電流出力時でも、バイパス回路などを用いることで安定した電流制御を実現した。キッカー電磁石の磁場強度を、Gated NMR によりショット毎に測定し、10 ppm の高い磁場安定度を実現していることを確認した。電子ビームの振り分け運転では、通常の短パルス電子ビームのパラメータを用いて、(1) BL2 への振り分け時に CSR 効果による軌道不安定性を約 1/10 に抑制で

き、(2) BL2 と BL3 で同時に XFEL のパルスエネルギーとして 300  $\mu\text{J}$  以上を得ることができた。

このビーム振り分けシステムは、1 月の設置以降、BL2 の運転にて安定に使用されている。また、2017 年秋からは、BL2 と BL3 のパルス毎振り分けによる同時ユーザー運転も実施される予定である。更に将来には、SACLA から SPring-8 蓄積リングへの入射のためのパルス毎振り分けにも使用することを計画している。

## 謝辞

本電源の開発に協力して下さった、ニチコン草津株式会社の山本氏、土田氏、高田氏を始め、製作に携わった全ての方々に深く感謝いたします。また、設置や動作試験に協力して下さった、スプリングエイトサービスの運転員の方々に深く感謝いたします。

## 参考文献

- [1] T. Hara *et al.*, “Pulse-by-pulse multi-beam-line operation for x-ray free-electron lasers”, *Phys. Rev. Accel. Beams*, 19, 020703 (2016).
- [2] 武部英樹 他, “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”, 第 11 回日本加速器学会, SUOL03, 青森, 2014.
- [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] 原徹 他, 本学会.
- [5] D. Douglas, Thomas Jefferson National Accelerator Facility Report No. JLAB-TN-98-012 (1998).
- [6] ROHM Semiconductor, <http://www.rohm.com/web/global/>