

## SACLA におけるマルチビームライン試験運転の現状

### MULTI-BEAMLINE OPERATION TEST AT SACLA

原 徹<sup>#,A)</sup>, 稲垣 隆宏<sup>A)</sup>, 田尻 泰之<sup>B)</sup>, 渡川 和晃<sup>A)</sup>, 金城 良太<sup>A)</sup>, 武部 英樹<sup>\*,A)</sup>,  
深見 健司<sup>C)</sup>, 近藤 力<sup>A)</sup>, 大竹 雄次<sup>A)</sup>, 田中 均<sup>A)</sup>  
Toru Hara<sup>#,A)</sup>, Takahiro Inagaki<sup>A)</sup>, Yasuyuki Tajiri<sup>B)</sup>, Kazuhiro Togawa<sup>A)</sup>, Ryota Kinjo<sup>A)</sup>, Hideki Takebe<sup>\*,A)</sup>,  
Kenji Fukami<sup>C)</sup>, Chikara Kondo<sup>A)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> SPring-8 Service Co., Ltd

<sup>C)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

#### Abstract

In order to meet the increasing demand for XFEL user operation at SACLA, a new undulator beamline (BL2) was installed in September 2014. Following the installation of this second beamline, a DC switching magnet was replaced by a kicker magnet and a DC twin-septum magnet to start multi-beamline operation, in which plural beamlines are switched from pulse to pulse. In the demonstration of the multi-beamline operation of SACLA, the electron bunches are alternately deflected at 30 Hz and simultaneous lasing at BL2 and BL3 has been achieved. Since the undulators of BL2 are placed in parallel to the first undulator beamline (BL3), the electron beam is deflected twice by 3 degrees in a dogleg to BL2 and the CSR effect becomes important. The laser pulse energy of 100-150  $\mu\text{J}$  is currently obtained by reducing the peak current down to 1 kA. To ensure tunability of the laser wavelength over a broad spectral range, the electron bunches are accelerated to different beam energies optimized for each beamline. In this paper, the status and operational issues related to the multi-beamline operation of SACLA are reported.

#### 1. はじめに

2012 年のユーザー供用開始以来、SACLA はこれまで 1 本のアンジュレータビームライン (BL3) でユーザー運転を行ってきたが<sup>[1]</sup>、2014 年 9 月に 2 本目のアンジュレータビームライン (BL2) の設置が完了し、2 本のビームラインを用いたマルチビームラインの試験運転を開始した。BL2 設置当初は、加速器出口にある DC 偏向電磁石を用いて BL2 と BL3 を切り替えていたが、2015 年 1 月に DC 偏向電磁石をキッカー電磁石と DC ツインセプタム電磁石に置き換え、電子ビームをバンチ毎に 2 本のビームラインへ振り分けることが可能になった<sup>[2]</sup>。

XFEL 施設は線型加速器を用いるため、同時に 1 ビームラインにしか電子ビームを供給することができず、基本的にシングルユーザー施設である。これはマルチユーザー施設である蓄積リングベースの放射光施設と比較すると、XFEL の利用効率が劣る要因となっている。しかしながら XFEL 施設においても、電子ビームをバンチ毎に振り分けることにより複数のビームラインを同時に利用することは可能である。XFEL に対する利用実験の要望が増加している今日、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、XFEL 施設の利用効率向上の面から非常に重要な課題となっている。

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

<sup>\*</sup> Present address: Okinawa Institute of Science and Technology (OIST)

波長可変性は光源としての XFEL の大きな利点であるが、アンジュレータ K 値による波長調整はその範囲は限られており、また K 値を小さくするとレーザー出力が減少してしまう。このため波長を大きく変更する場合、XFEL では通常電子ビームエネルギーを変えることで対応する。複数のユーザーが同時に利用するマルチビームライン運転においても、レーザーを各ユーザー実験で使用する波長に合わせるためには、ビームライン毎に電子ビームエネルギーを変えなければならない。SACLA では、電子ビームをバンチ毎に異なるエネルギーまで加速するマルチエネルギー運転の技術を既に確立しており<sup>[3]</sup>、マルチビームライン運転においても従来の広い波長可変性が確保できることを今回実証した。

本稿では、レーザーや電子ビームの安定性、電子ビーム輸送路における CSR (Coherent Synchrotron Radiation) <sup>[4]</sup>効果の影響などを含め、SACLA で行っているマルチビームライン試験運転の状況について報告する。

#### 2. ビームラインの切り替え

SACLA の概略図を Figure 1 に示す。SACLA アンジュレータホールには、アンジュレータビームライン 5 本分の設置スペースがあり、最初に設置したビームラインである BL3 は中央に、2 本目のビームラインである BL2 は、BL3 と並行にアンジュレータが置かれている。BL2 と BL3 のアンジュレータ磁場周期は共に 18 mm である。また BL2 と反対側には、SPring-8 蓄積リングの将来計画<sup>[5]</sup>において SACLA を

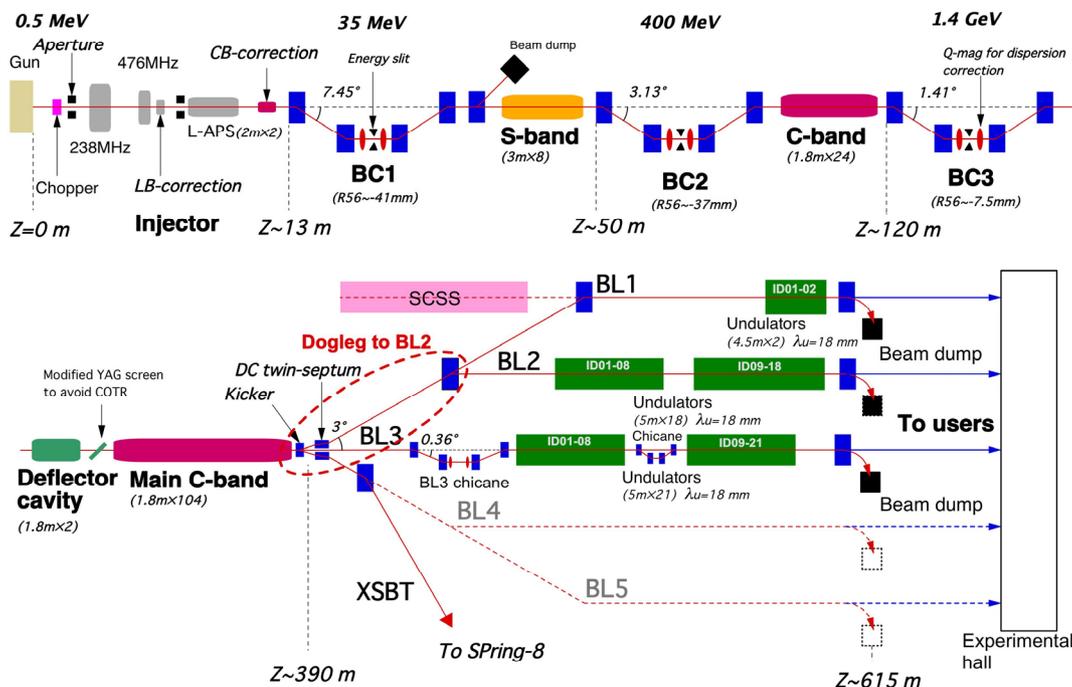


Figure 1: Schematic of SACLA.

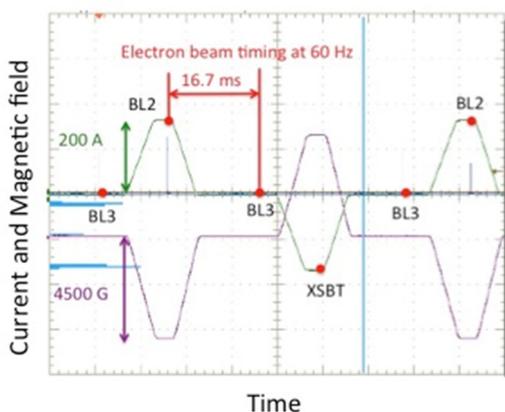


Figure 2: Measured current waveform (green line) and magnetic field (purple line) of the kicker magnet. Red circles on the green line correspond to the beam arrival timing at 60 Hz.

低エミッタンス入射器として使用するための、XSBT (XFEL to Synchrotron Beam Transport) と呼ばれる電子ビーム輸送路が設置されている<sup>[6]</sup>。

BL2、BL3 および XSBT の 3 方向の切り替えは、線型加速器終端で電子ビームを  $0^\circ$  および  $\pm 3^\circ$  偏向させることにより行う。電子ビームの軌道安定性を損なわないよう、キッカー電磁石の偏向角は  $\pm 0.53^\circ$  に抑え、残りの  $\pm 2.47^\circ$  は 5.2 m 下流にある DC ツインセプトで偏向させる<sup>[2]</sup>。

DC ツインセプト電磁石は、独立したセプト 2 台を向かい合わせに対称に置いたもので、BL3 方向へ直進する電子バンチは 2 つのセプト間を通過し、キッカーで偏向された電子バンチだけを更に偏向する。

キッカー電磁石の磁極ギャップは 20 mm、最大磁場 0.67 T、ヨーク長 0.4 m で、ヨークには 0.35 mm 厚の積層電磁鋼板を使用している。キッカー磁極ギャップ部に挿入する真空槽には、渦電流を抑制するためビーム室内面を Ti コートしたセラミックを採用した。

キッカー電磁石を励磁するパルス電源は、8 並列 FET を用いた PWM 制御の非共振型バイポーラパルス電源<sup>[7]</sup>で、極性と波高が任意に設定可能な台形電流パルスを最大 60 Hz の繰り返しで出力することができる。これによりマルチビームライン運転において、異なるビームエネルギーを持つ電子バンチを、想定したビームラインの方向に振り分けることが可能になる。

Figure 2 にキッカー電磁石励磁パターンの例を示す。1 つの台形パルスの長さは 16.7 msec (60 Hz) で、最大 4 波形を電源内のメモリーに記憶させることができる。外部からのトリガー信号とリセット信号により、電源はメモリー内に記録されている波形に従って電流を順次出力する。キッカーパルスのタイミングは、電流制御が十分静定し安定している台形パルスのフラットトップ終端に電子バンチが来るように調整する (Figure 2 の赤丸)。Figure 2 の例で

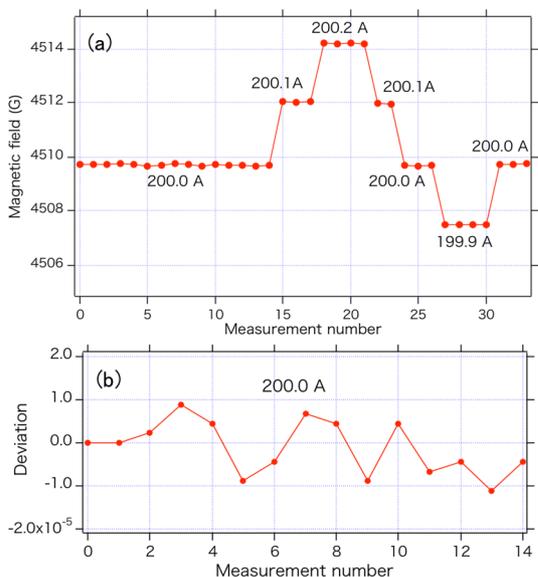


Figure 3: Pulse to pulse stability of the kicker magnetic field. Magnet current is varied by a step of 0.1 A in the vicinity of 200 A in (a). Magnet current is fixed at 200 A and relative variation of the magnetic field is plotted in (b).

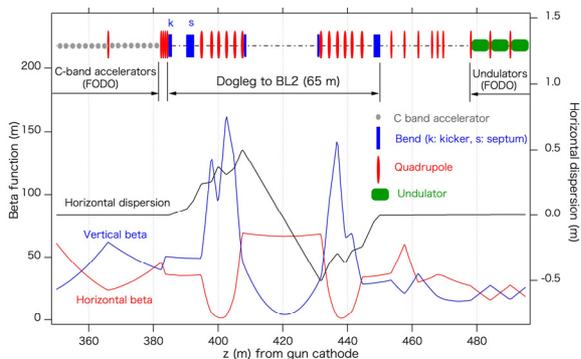


Figure 4: Electron beam optics and magnet configuration of the dogleg beam transport to BL2.

は、60 Hz の電子バンチを励磁電流（緑線）が正の時に BL2 側、ゼロの時に BL3、負の時に XSBT 側へ電子バンチを偏向する。電子ビーム繰り返しは BL2 が 15 Hz、BL3 が 30 Hz、XSBT が 15 Hz となる。

XFEL では電子ビーム軌道の安定性が非常に重要であるため、キッカー電磁石磁場のパルス間のバラツキはできるだけ小さく抑えねばならない。SACLA 線型加速器の水平方向軌道安定性は、角度換算で概ね  $1 \mu\text{rad}$  (peak to peak) であるため、キッカー磁場の安定性はその 10% を目標とし、これをパルス電源の電流精度に換算すると 10 ppm (peak to peak) となる。

DCCT を用いたパルス電流測定では環境ノイズの影響が大きく、30 ppm 以下の測定精度を得ることが難しかったため、ゲート型 NMR<sup>[7]</sup>を用いてキッカー磁場を直接測定し、キッカー電源のパルス間のばらつきを評価した。Figure 3 に示した測定結果から、

安定性については目標の 10 ppm (peak to peak) をやや上回っているものの、キッカー磁場の概ね良好な安定性と制御性が達成されていることを確認できた。

### 3. BL2 ビーム輸送路における CSR 効果

Figure 1 に示したように、線型加速器終端から BL2 アンジュレータまでは、電子ビームを偏向角  $3^\circ$  の dogleg を通して輸送する。Dogleg 部の電子ビーム光学系と電磁石配置を Figure 4 に示す。アンジュレータ部で dispersion による実効的なエミッタンスが悪化しないよう、dogleg は achromatic になっているが、更に中央付近に小さい逆ベンドを 2 台置きバンチ長が変化しないよう isochronous な光学系となっている。

BL3 へは電子ビームが加速器終端からそのままほぼ直線に進むため、CSR によるエミッタンス悪化はほぼ無視できるが、BL2 への電子ビーム輸送では dogleg における CSR の影響は無視できない。特に SACLA は、XFEL パルス出力向上のためピーク電流 10 kA 程度、バンチ長約 20 fsec (FWHM) という非常に短い電子バンチで現状運転しており、ピーク電流は設計時に想定した値の 3 倍以上に上がっている。ここまで高いピーク電流でも加速器を安定に運転できているのは、これまで行ってきた線型加速器安定化に向けた数々の努力の成果であり、また短パルスは時分割実験を行うユーザーにも多大な恩恵をもたらしている。しかし一方で短電子バンチかつ高ピーク電流という条件は、CSR の影響という面からは電子ビームの輸送にとって非常に厳しいものとなる。

BL2 アンジュレータビームラインのコミッションは、2015 年 1 月から本格的に開始した。従来 BL3 において、波長 10 keV で 500  $\mu\text{J}$  程度のレーザーパルス出力が得られているピーク電流 10 kA の電子バンチを BL2 に通したところ、レーザー発振は得られたものの出力が 30  $\mu\text{J}$  程度にとどまり、またパルス間の出力のふらつきも安定させることができなかった。この時スクリーンで観測したアンジュレータ内の電子ビームプロファイルは水平方向に伸びており、電子ビーム軌道の水平方向のふらつきも BL3 に比べ約 1 桁大きくなっている。

次に BL2 レーザーパルス出力を最大化するよう電子バンチ長とピーク電流、電子ビーム光学系のマッチングなどを変え最適な条件を探った結果、ピーク電流が 1 kA 前後で概ね 100-150  $\mu\text{J}$  のレーザー出力を得ることができた。この時、アンジュレータ内の電子ビームプロファイルは円形に近づいており、また電子ビーム軌道やレーザー出力の安定性も飛躍的に改善している。

Table 1 は、BL2 と BL3 のアンジュレータ上流にある BPM を使って測定した電子ビーム軌道のふらつきを、水平垂直各々の位相空間のエミッタンス (RMS) として表したものである。BL2 ではピーク電流が高くなると、水平方向の軌道のふらつきが顕著に大きくなっている。これは dogleg 内で CSR によって電子ビームエネルギーが変化し、下流のビーム軌道変位になって現れた結果であると考えられる。

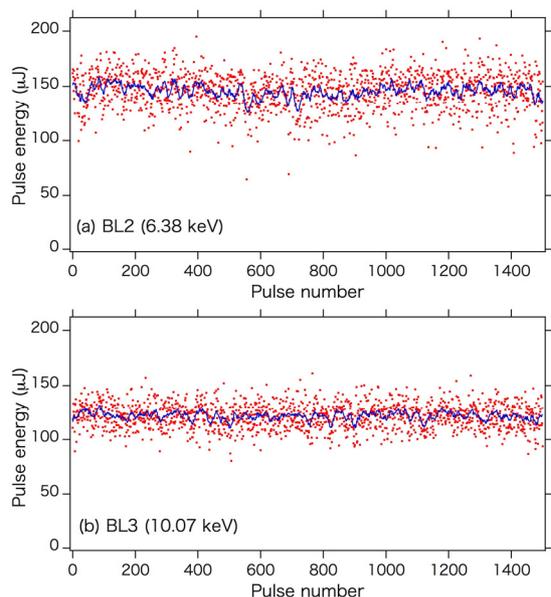


Figure 5: Stability of photon pulse energies measured at BL2 (a) and BL3 (b) in multi-beam line operation. Red points show single-shot pulse energies and blue lines are 15-shot averages. The electron beam energy is 7.8 GeV. The undulator K-values are 2.85 at BL2 and 2.1 at BL3.

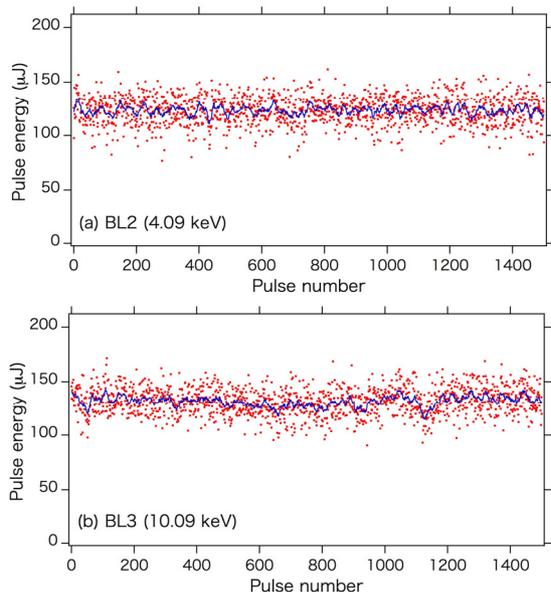


Figure 6: Stability of photon pulse energies measured at BL2 (a) and BL3 (b) in multi-beam line operation. Red points show single-shot pulse energies and blue lines are 15-shot averages. The electron beam energy of BL2 is 6.3 GeV and that of BL3 is 7.8 GeV. The undulator K-values are 2.85 at BL2 and 2.1 at BL3.

エネルギー7.8 GeV、規格化エミッタンス  $0.5 \mu\text{m-rad}$  の電子ビームエミッタンス  $33 \text{ pm-rad}$  と比較すると、BL2 においてもピーク電流を 1 kA 程度まで下げれ

ば、電子ビームの軌道変動はビームサイズの 10% 以下に収まることわかる。

CSR の効果を抑制するためには、 $3^\circ$  の偏向角を  $1.5^\circ$  ずつ 2 台の偏向電磁石で曲げる DBA ラティスとし、4 台の偏向電磁石間のベータatron振動の位相差を $\pi$ の奇数倍にしてやればよい<sup>[8]</sup>。しかしながら SACLA のキッカー電磁石と DC セプタムは偏向角が異なり、間に四極電磁石を入れるスペースもそのままでは取れないことから、今回 CSR 効果を積極的に抑制するビーム光学系は採用しなかった。

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)	Vertical plane (pm-rad)
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

#### 4. マルチビームライン試験運転

BL2 と BL3 の 2 本のビームラインを電子バンチ毎に交互に切り替えるマルチビームライン運転は、まず繰り返し 30 Hz、エネルギー7.8 GeV の電子ビームを用いて行った。各ビームラインのパルス繰り返しは 15 Hz となる。

BL2 と BL3 のアンジュレータ K 値を各々2.85 と 2.1 にセットし、電子バンチのピーク電流を 1.2 kA まで下げてレーザー発振させたときのレーザーパルス出力を Figure 5 に示す。波長は BL2 が 6.38 keV、BL3 が 10.07 keV で、パルス出力は概ね 100-150  $\mu\text{J}$  で安定している。10 分間のパルス出力の変動幅は BL2 が 11.9% (STD)、BL3 が 9.5% (STD) である。スペクトル幅についても約 20 eV (FWHM) と狭く、パルス出力を除けば通常のシングルビームライン運転と遜色ない安定なレーザー発振が得られている。

次に線型加速器で加速する電子ビームのエネルギーをバンチ毎に変え、2 本のビームラインでレーザーを発振させた。通常常伝導線型加速器のクライストロンは、電子バンチの繰り返しに合わせてパルス運転するが、このマルチエネルギー運転では一部のクライストロンの繰り返しを変えることにより、電子バンチ毎にビームエネルギーを制御する<sup>[3]</sup>。

SACLA には電子バンチ圧縮器の最終段である BC3 下流に 52 台の C バンドクライストロンがあり、1.8 m 長加速管 104 本に RF を供給している。これらの加速管では、電子バンチをクレスト位相で加速す

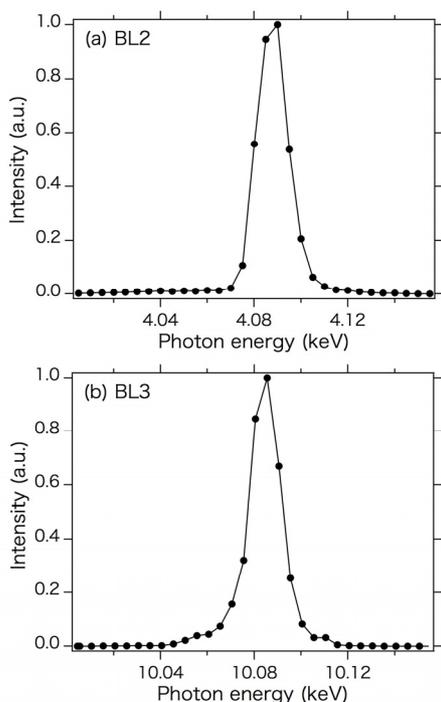


Figure 7: Averaged spectra measured at BL2 (a) and BL3 (b). The beam energy of BL2 is 6.3 GeV and that of BL3 is 7.8 GeV. The undulator K-values are 2.85 at BL2 and 2.1 at BL3.

る。通常のシングルエネルギー運転では、全てのクライストロンを電子バンチと同じ繰り返し 30 Hz で動作させるが、マルチエネルギー運転では一部のクライストロンを例えば 15 Hz で動かす。このとき半数の電子バンチは、15 Hz で動作している加速管内では加速されないため、線型加速器終端におけるビームエネルギーを電子バンチ毎に交互に変えることができる。今回行った試験運転では、52 台中 12 台のクライストロンを 15 Hz で動作させることにより、電子ビームをバンチ毎に交互に 6.3 GeV と 7.8 GeV まで加速し、6.3 GeV の電子バンチを BL2 に、7.8 GeV の電子バンチを BL3 へ通した。

Figure 6 にマルチエネルギー運転を行った時の BL2 と BL3 のレーザーパルス出力を示す。概ね Figure 5 と同じレベルのパルス出力および安定性が得られていることがわかる。Figure 7 は分光器で測定したレーザー光の平均スペクトルである。Figure 5 の波長と比較すると、BL3 の波長はそのまま、BL2 の波長が電子ビームエネルギーを下げたことにより 4.09 keV まで伸びており、2 本のビームラインにおいて 2 倍以上異なる波長で同時にレーザー発振させることに成功した。

マルチビームライン運転において複数のユーザー実験を同時に行う場合、各ビームラインで使用するレーザー波長に電子バンチエネルギーを最適化するための技術は、広範囲なレーザー波長域を確保する上で重要である。

## 5. 今後の課題

今回 SACLA で行ったマルチビームライン運転は、XFEL では世界初の試みであり、施設やビームラインの数が限られている XFEL 施設において、利用効率の飛躍的な向上を可能にする。また複数のビームラインで並行して利用実験を行う場合、利用実験間で使用可能なレーザーの波長領域が制限される問題を、線型加速器のマルチエネルギー運転で解決できることを今回実証した。

SACLA 通常運転時の電子バンチピーク電流は 10 kA と非常に高いため、BL2 へ電子ビームを輸送する際、dogleg における CSR の影響が現状顕著に現れ安定なレーザー発振が得られていない。ピーク電流を 1 kA 程度に下げて運転することで対応しているが、レーザーパルス出力は従来 BL3 で得られている出力の約 1/4 程度に留まっている。出力向上にはピーク電流を上げる必要があり、dogleg における CSR 効果の抑制が重要なポイントとなる。現在、電磁石や他の加速器コンポーネントの追加および再配置により、dogleg の電子ビーム光学系を DBA ベースのものに組み替えることを検討中である。

マルチビームライン運転は、SPring-8 蓄積リングの将来計画<sup>[5]</sup>において、SACLA を低エミッタンス入射器として用いる際にも適用される。既にキッカー電磁石を用いた XSBT の電子ビーム輸送試験は完了しており、SPring-8 シンクロトロン出口にあるビームダンプまで問題なく電子ビームが輸送できることを確認した。SPring-8 蓄積リングへのビーム入射には、電子バンチ毎のビームエネルギー制御に加えバンチ長の制御も必要であり、かつトップアップ運転には XSBT への切り替えを任意のタイミングで行わなければならない。今後これらの要求を実現するため、タイミング系やローレベル RF 系などの改修を現在検討している。

## 参考文献

- [1] T. Ishikawa, et al., Nat. Photon. 6, 540 (2010).
- [2] T. Hara, et al., “SACLA 加速器における電子バンチ振り分けシステムの開発”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, 21 (2014)
- [3] T. Hara, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 080706 (2013).
- [4] R. Talman, Phys. Rev. Lett. 56, 1429 (1986).
- [5] H. Tanaka, Synchrotron Radiation News 27, 6, 23 (2014).
- [6] 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).
- [7] 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).
- [8] S. Di Mitri et al., Phys. Rev. Lett. 110, 014801 (2013).