

## X線自由電子レーザー施設 SACLA の現状

### PRESENT STATUS OF THE X-RAY FREE-ELECTRON LASER FACILITY, SACLA

渡川和晃<sup>#</sup> SACLA チームを代表して  
Kazuaki Togawa<sup>#</sup> on behalf of the SACLA Team  
RIKEN SPring-8 Center

#### Abstract

In the SPring-8 campus, the x-ray free-electron laser (XFEL) facility, SACLA, started user operation in the beginning of 2012. The undulator hall was designed to operate up to five beamlines that cover the wide wavelength range from EUV to soft and hard x-rays. The three central beamlines are hard XFEL beamlines using 5- to 8-GeV electron beams from the accelerator of SACLA. Presently, two of them (BL3, BL2) are installed and running simultaneously by the pulse-by-pulse switching system. One of the outer beamlines (BL1) was recently upgraded as an independent FEL light source equipped with a dedicated accelerator to generate EUV and soft x-ray FEL lights. Currently these three beamlines are open to public users.

#### 1. はじめに

理化学研究所が SPring-8 キャンパスに建設した X線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA は、2012年に最初の硬 X線 FEL ビームライン (BL3) を用いて供用運転を開始した[1]。その後、2本目の硬 X線 FEL ビームライン (BL2) を建設し、コヒーレント放射光 (CSR) によるビーム不安定性を抑制する電子ビーム輸送系の導入、パルス毎に電子ビームを振り分けるキッカー電磁石の開発を経て、2017年より BL2 と BL3 の同時供用運転を行なっている[2,3]。また広帯域自発光ビームラインであった BL1 では、SACLA のプロトタイプ機であった SCSS 試験加速器を光源棟 BL1 上流に移設し、ビームエネルギーの増強やアンジュレータの増設などを行った後、軟 X線 FEL ビームラインへとアップグレードしている[4,5]。アップグレード後の BL1 は、2016年よりユーザー供

用を開始し、現在 SACLA ではこれら3本の FEL ビームラインを同時に稼働して、幅広い波長帯域の高出力 FEL 光をユーザーに提供している。さらに SACLA は、SPring-8 蓄積リングの入射器として使用する計画があり、本年度よりリング入射に向けた試験運転を開始する。Figure 1 に SACLA 加速器システム全体の鳥瞰図を示す。

SACLA 加速器と BL1 専用加速器 (SCSS+) は、SCSS コンセプトに基づいて設計と建設が行われた[6]。単結晶 CeB<sub>6</sub> カソードを用いた熱電子銃から引き出した電子ビームを、入射器のバンチャーと3段の磁気バンチ圧縮器により段階的にバンチ圧縮しながら C-band 加速管で高エネルギーまで加速し、短周期真空封止アンジュレータで XFEL 光を発生させる。Table 1 に SACLA 加速器システムの性能をまとめる。

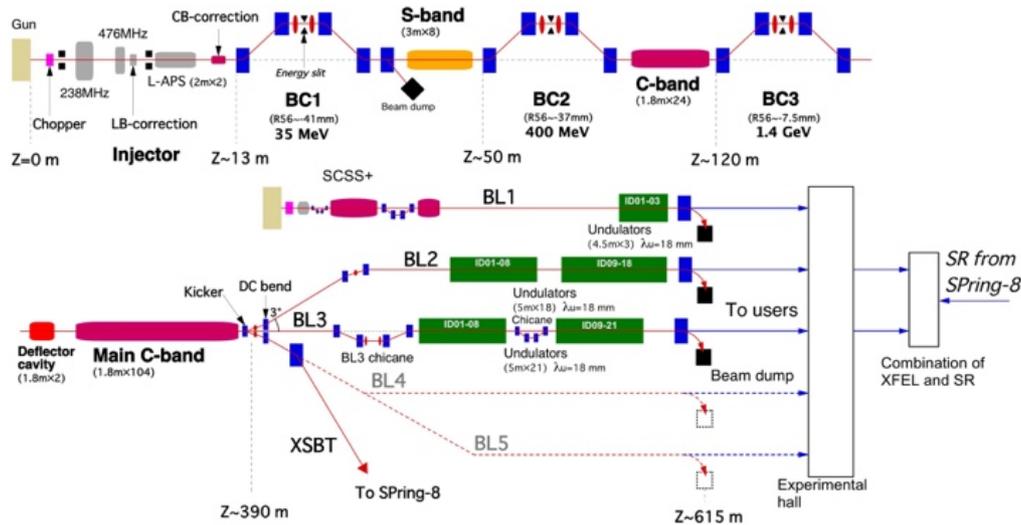


Figure 1: Schematic of the SACLA accelerator.

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

Table 1: Parameters of SACLA

|                       | BL3/2            | BL1                   |
|-----------------------|------------------|-----------------------|
| Electron beam energy  | 8.5 GeV (max.)   | 800 MeV (max.)        |
| Bunch charge          | 0.2-0.3 nC       | 0.2-0.3 nC            |
| Peak current          | >10 kA           | >300 A                |
| Pulse repetition rate | 60 Hz (max.)     | 60 Hz (max.)          |
| Photon energy         | 4 – 15 keV       | 20 – 150 eV           |
| FEL pulse energy      | ~0.5 mJ @ 10 keV | ~100 $\mu$ J @ 100 eV |
| FEL pulse width       | <10 fs           | <1 ps                 |
| Spectrum band width   | 0.5%             | 3%                    |

## 2. マルチビームライン運転

電子ビームをパルス毎に振り分け、2本の硬X線ビームラインを同時運転するには幾つかの克服すべき課題があった。一つはCSRによるビーム不安定性の問題である。SACLAでは加速器終端で3°電子ビームを曲げて振り分けるが、その際に発生するCSRによる影響を低減するために、振り分け部および振り戻し部をそれぞれ2台の偏向電磁石から成るDouble Bend Achromat配置を採用した。偏向電磁石間のベータatron位相差を $\pi$ とすることで、CSRによるエミッタンス増加などをキャンセルしている[2]。

高速で精度よく電子ビームを振り分けるキッカーシステムの開発もまた大きな課題であった。ニチコン株式会社との共同研究によりSiC製のハイパワー半導体素子を使用した高精度パルス電源を開発し、振り分け電磁石に流すパルス電流の安定度を0.002% (全幅)以下に抑え、BL2の安定な軌道を確保することに成功している[2, 3]。

さらに、ビームライン毎に異なる加速器パラメータで運転できるよう、RFの制御、モニターのデータ収集などの制御システムにも大幅な改良を加え、仮想的な複数の加速器を制御上構築している。これにより、BL3とBL2で異なるビームエネルギーやバンチ長で加速器を運転することが可能になり、それぞれ独立にFEL出力を最大化するビーム調整が可能となった[2]。

Figure 2に、同時運転時のBL3とBL2のFELパルスエネルギーのトレンドグラフを示す。ビームライン間でビームエネルギーを変えることで、広い波長可変領域をもつレーザー光をユーザー実験に提供している。

## 3. セルフシード

SACLAのXFELはSASEであるので、波長スペクトルは複数のランダムに変化するスパイクを持ち、スペクトル幅は数十eVと広い。これを1eVレベルまで狭めたシングルスパイクにしてXFELのスペクトル輝度を飛躍的に高める試みが、SACLAのBL3においてなされている。2012年にLCLSグループがダイヤモンド結晶を用いた透過型セルフシードの手法でXFELのシード化に成功しているが、SACLAではこれとは異なる反射型セルフシードの手法でシ-

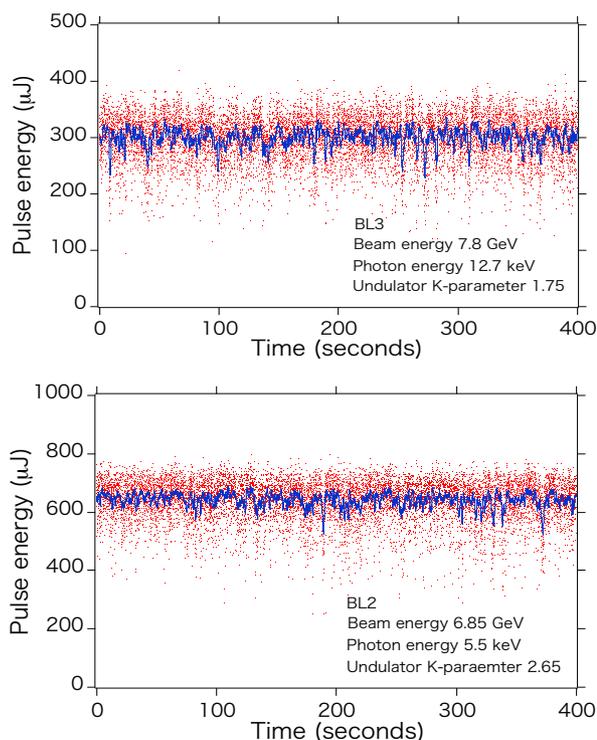


Figure 2: An example of the trend graphs of XFEL pulse energies at BL3/2.

ド化に成功した[7]。アンジュレータ前半部のSASE光をダイヤモンド結晶によって単色化した後、後半部でその単色光と電子ビームを相互作用させることでシングルスパイクのXFEL光を発生する。既にSASEと比較して最大で6倍程度のスペクトル輝度が得られており、今後ユーザー実験に提供する予定である。原子分子物理の非線形実験など、高いスペクトル輝度が要求される実験に活用されると期待される。

## 4. まとめ

SACLAでは、2本の硬X線FELビームラインと1本の軟X線FELビームラインの同時運転を開始し、様々な波長のXFEL光をユーザーへ提供している。また、硬X線FELビームラインにおいてはシード型FEL光の発生に成功しており、ユーザーへ提供するための準備が整いつつある。SPring-8蓄積リングへのビーム入射のための試験運転も本年度に開始する予定で、SACLAは放射光源を駆動する複合加速器として本格的に稼働する。

## 参考文献

- [1] T. Ishikawa *et al.*, Nat. Photon. **6** (2012) 540.
- [2] T. Hara *et al.*, Phys. Rev. Accel. Beams **21** (2018) 040701.
- [3] C. Kondo *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **89** (2018) 064704.
- [4] S. Owada *et al.*, J. Synchrotron Rad. **22** (2018) 282–288.
- [5] K. Togawa *et al.*, Proc. IPAC2017 (2017) 1209-1211.
- [6] T. Shintake *et al.*, Nat. Photon. **2** (2008) 555.
- [7] I. Inoue, T. Osaka *et al.*, in preparation.