

## SACLA BL1 における軟 X 線 FEL の発振と調整の状況

### FIRST LASING AND COMMISSIONING STATUS OF THE SOFT X-RAY FEL BEAMLINE AT SACLA

稲垣隆宏<sup>#, A)</sup>, 渡川和晃<sup>A)</sup>, 原徹<sup>A)</sup>, 大和田成起<sup>A)</sup>, 安積隆夫<sup>B)</sup>, 安積則義<sup>B)</sup>, 大島隆<sup>B)</sup>, 大竹雄次<sup>A)</sup>, 木村洋昭<sup>B)</sup>, 金城良太<sup>A)</sup>, 近藤力<sup>B)</sup>, 櫻井辰幸<sup>B)</sup>, 田尻泰之<sup>C)</sup>, 田中信一郎<sup>C)</sup>, 田中隆次<sup>A)</sup>, 富樫格<sup>B)</sup>, 登野健介<sup>B)</sup>, 長谷川照晃<sup>A)</sup>, 備前輝彦<sup>B)</sup>, 細田直康<sup>B)</sup>, 前坂比呂和<sup>A)</sup>, 松井佐久夫<sup>B)</sup>, 松原伸一<sup>B)</sup>, 矢橋牧名<sup>A)</sup>, 田中均<sup>A)</sup>, 石川哲也<sup>A)</sup>

Takahiro Inagaki<sup>#, A)</sup>, Kazuaki Togawa<sup>A)</sup>, Toru Hara<sup>A)</sup>, Shigeki Owada<sup>A)</sup>, Takao Asaka<sup>B)</sup>, Noriyoshi Adumi<sup>B)</sup>, Takashi Ohshima<sup>B)</sup>, Yuji Otake<sup>A)</sup>, Hiroaki Kimura<sup>B)</sup>, Ryota Kinjo<sup>A)</sup>, Chikara Kondo<sup>B)</sup>, Tatsuyuki Sakurai<sup>B)</sup>, Yasuyuki Tajiri<sup>C)</sup>, Shinichiro Tanaka<sup>C)</sup>, Takashi Tanaka<sup>A)</sup>, Tadashi Togashi<sup>B)</sup>, Kensuke Tono<sup>B)</sup>, Teruaki Hasegawa<sup>A)</sup>, Teruhiko Bizen<sup>B)</sup>, Naoyasu Hosoda<sup>B)</sup>, Hirokazu Maesaka<sup>A)</sup>, Sakuo Matsui<sup>B)</sup>, Shinichi Matsubara<sup>B)</sup>, Makina Yabashi<sup>A)</sup>, Hotoshi Tanaka<sup>A)</sup>, Tetsuya Ishikawa<sup>A)</sup>

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

<sup>B)</sup> JASRI

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

#### Abstract

We have upgraded SACLA-beamline-1 from a “spontaneous radiation” to a “soft x-ray FEL” beamline by relocating the SCSS test accelerator to the SACLA Undulator Hall, and operating the machine as a dedicated electron source being independent of the SACLA main linac. One C-band accelerator unit was added to increase the beam energy from 250 MeV to 500 MeV. We started beam commissioning in September 2015, and successfully observed the first lasing at a photon energy of 40 eV after tuning the electron beam energy, trajectory, envelope, and bunch length compression. Recently the beamline provides FEL light with a wavelength range between 40-60 eV and an average pulse energy of 15  $\mu$ J at a pulse repetition of 60 pps. We commenced user operation in July 2016. In the summer of 2016, we will add two C-band units to enhance the beam energy to 800 MeV for producing shorter wavelength FEL.

#### 1. はじめに

自由電子レーザー (Free Electron Laser : FEL) は、従来の放射光光源に比べて桁違いに高輝度、極短パルス長、高コヒーレントの硬 X 線～軟 X 線光源として様々な実験に用いられ、目覚ましい実験成果を上げている。現在稼働中の硬 X 線 FEL 施設としては、アメリカの LCLS[1]と日本の SACLA[2]、軟 X 線～極紫外線域の FEL 施設としてはドイツの FLASH[3]とイタリアの FERMI[4]がある。そしてここ数年、PAL-XFEL[5]、European XFEL[6]、Swiss FEL[7]、Shanghai-XFEL[8]、LCLS-II[9]といった FEL 施設が新たに建設されており、FEL を用いた実験手法が確立しつつある。

SACLA では、供用開始以来、世界最短波長の硬 X 線 FEL を利用して数々の優れた成果が得られてきたが、軟 X 線 FEL を使ったサイエンスを展開したいという内外からの要望も高まっていた。これらの要望を踏まえて、平成 26 年度の補正予算によって、SACLA の高度化に関する予算措置がなされた。これは、SACLA の光源棟の空きスペースに、SACLA のプロトタイプ機として建設された SCSS 試験加速器[10, 11]を移設し、軟 X 線 FEL 専用の加速器として再活用することによって、硬 X 線 FEL と軟 X 線 FEL を同時に供給する施設を、世界ではじめて実現するというものである。

SCSS は、2005 年の建設以来、世界初のコンパクト XFEL コンセプトの検証とともに、FEL 利用の R&D にも用いられ、250 MeV の電子ビームから波長 60 nm (光子エネルギー 20 eV) 程度の極紫外線 FEL が提供されてきた。SCSS は、所期の目的を十二分に達成し、SACLA の供用運転開始後の 2013 年に運転を停止した。今回の高度化[12, 13]は、この SCSS の加速器部分を BL1 振り戻し磁石の上流側に移設し、C バンド主加速器を追加して電子ビームエネルギーを上げ、SASE (Self-amplified spontaneous emission) 型の軟 X 線 FEL を生成するものである。

こうして完成した軟 X 線 FEL 専用加速器 (通称 SCSS+) は、2015 年 9 月より電子ビームの調整を開始し、10 月には 40 eV にて、初めてのレーザー増幅を確認した。冬季停止期間にはアンジュレータを 1 台増設し、光子エネルギー 40-60 eV、パルスエネルギー 15  $\mu$ J 程度の FEL を発生できるようになった。そして 2016 年 7 月からはユーザー実験への供用を開始した。また、今夏の停止期間には、C バンド加速器を 2 台追加して電子ビームエネルギーを約 800 MeV まで上げ、FEL の更に短波長化することを計画している。

本報告では、まず加速器の構成を説明し、次に現在の電子ビームの特性と FEL の特性についての測定結果を示す。最後に今後の予定について述べる。

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

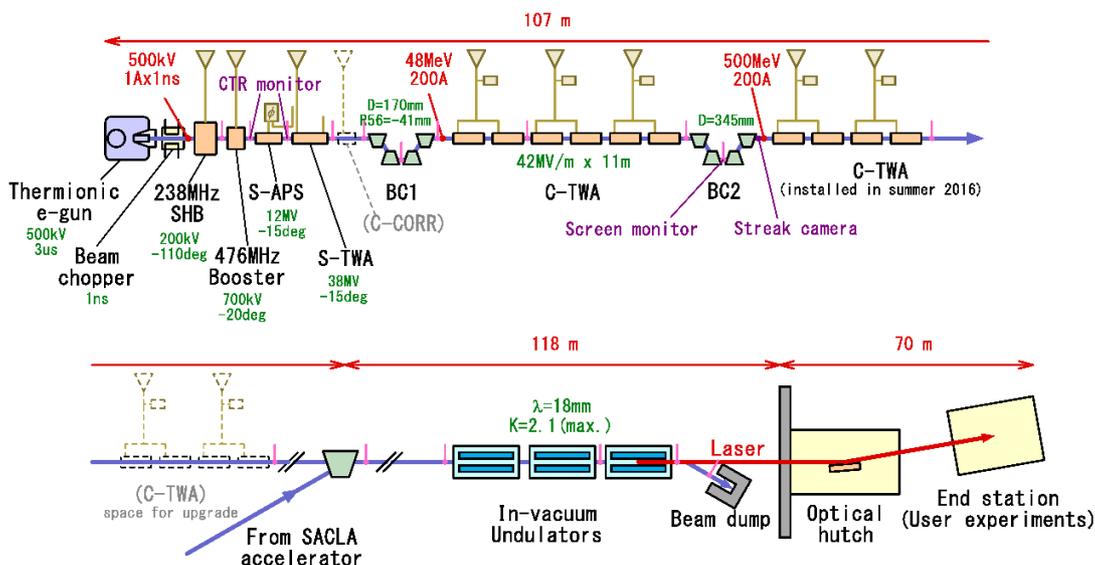


Figure 1: Layout of the SCSS+ accelerator and beamline.

Table 1: Typical Operation Parameters: The Parameters after This Summer Shutdown Period Are Also Written in the Parentheses

Electron	Beam energy (max.)	500 MeV (800 MeV)
	Bunch charge	300 pC
	Peak current	~200 A
	Bunch length ( $\sigma$ )	0.7 ps
	Repetition (max.)	60 pps
Undulator	Periodic length	18 mm
	K parameter (max.)	2.1
	Effective length	14 m
Photon	Photon energy	40-60 eV (40-160 eV)
	Pulse energy	15 $\mu$ J/pulse

## 2. 加速器の構成

SCSS+及びビームラインの構成を Figure 1 に示す。また、典型的な現在の運転パラメータを Table 1 に示す。SCSS[11]は SACLA のプロトタイプ機であり、高安定な熱カソード電子銃と多段バンチ圧縮システム、高電界の C バンド加速器、短周期アンジュレータなどの基本構成は SACLA[2]と同様である。上流から概要を説明する。

電子銃[14]では、CeB<sub>6</sub> 単結晶カソードを約 1500°C に熱し、500 kV、3  $\mu$ s の高電圧パルス印加して 1 A の低エミッタンス電子ビームを取り出す。電子ビームはビームチョッパーで 1 ns の幅に切り出された後、238 MHz プリバンチャー空洞 (SHB) と 476 MHz ブースター空洞 (Booster)、にてバンチ長を圧縮しながら加速される。後続の S バンド APS 型加速管 (S-APS) および S バンド進

行波型加速管 (S-TWA) では、約 15° のオフ Crest 位相にて 48 MeV まで加速され、バンチの先頭と後尾でエネルギー差がつけられる。そしてバンチ圧縮部 (BC1) を通過することによりバンチ長は約 1.5 ps に圧縮され、ピーク電流が約 200 A に高められる。BC1 の手前には、バンチ圧縮過程の線形化によりピーク電流を高めるための C バンド補正加速管 (C-CORR) を、将来に設置できるスペースが確保されている。

圧縮後の電子ビームは、C バンド加速器 (C-TWA) によって、FEL に必要なエネルギーまで加速される。BL1 では、限られた台数の加速器でエネルギーを高め短波長の FEL を発振させるため、SACLA よりも更に高電界で運転可能な C バンド・ディスクロード進行波型加速管 [15]を開発し使用している。現在は、3 台の C バンド加速器 (1.8 m 長の加速管 6 本) を 42 MV/m の平均電場勾配で運転し、電子ビームを 500 MeV まで加速している。今夏の停止期間には、C バンド加速器を BC2 の下流に 2 台追加し、電子ビームのエネルギーを 800 MeV まで上げることを予定している。また、この下流から SACLA との合流部までの間には、C バンド加速器を更に 7 台追加できるスペースがあり、将来に拡張することも可能である。

加速された電子ビームは、SACLA からの入射ラインと合流し、3 台の真空封止型水平アンジュレータに導かれる。3 台のアンジュレータのうち最上流の 1 台は、SACLA と同じタイプのアンジュレータ (磁石列長 5 m) であり、残りの 2 台は、SCSS で使用していた試作型アンジュレータ (磁石列長 4.6 m) のフレームを利用し、磁石列だけを SACLA と同じものに交換したものである。いずれもネオジム磁石とパーマンジュールを組み合わせたハイブリッド型の磁石列を用い、周期長は 18 mm、最大 K 値は 2.1 (磁極ギャップ約 3.8 mm) である。ここに 500 MeV の電子ビームが入射すると、FEL の発振波長は 30 nm (光子エネルギー 41 eV) となる。これよりも短波長の FEL が必要な時は K 値を下げ、逆に長波長の FEL が必要な時は電子ビームのエネルギーを下げることで、必要な波長の FEL を供給することができる。

FELを発振させた後の電子ビームはダンプに捨てられる。FELは、真空パイプを通して隣接するSACLA実験研究棟に導かれ、実験に提供される。また、実験研究棟内には、FELの強度を測定するガス強度モニタや空間分布を測定するスクリーンモニタ、波長分布を測定するスペクトロメータなどが設置され、FELの発振状態をモニタしている。

### 3. 加速器の調整と電子ビームの状況

#### 3.1 調整項目と手順

SCSS+の電子ビーム調整では、電子ビームの軌道や空間プロファイル、エネルギー、バンチ長などの条件が最適となるよう、加速空洞や電磁石、アンジュレータ等の調整を行っている。調整は基本的に上流から順に、以下の手順で行っている。

- 1) 電子銃～入射部の軌道調整
- 2) 入射部加速空洞による速度バンチ圧縮の調整
- 3) Sバンド加速器とBC1の軌道による磁気バンチ圧縮の調整
- 4) C-TWA 加速器によるエネルギー調整
- 5) アンジュレータ部の軌道、集束、K値の調整

このうち、2)、3)のバンチ圧縮の調整と5)のアンジュレータ部の調整について、詳細を記す。

#### 3.2 238 MHz-SHBの調整

SHBにより、1 nsの電子バンチに約±200 kVのエネルギー変調をかけ、速度差によって圧縮を行う。最適なバンチ長を得るために、下流に位置する2台の電流モニタ(Current Transformer: CT)の信号を高速オシロスコープで観測し、パルス幅が短くなるように調整した。Figure 2に、測定した波形を示す。

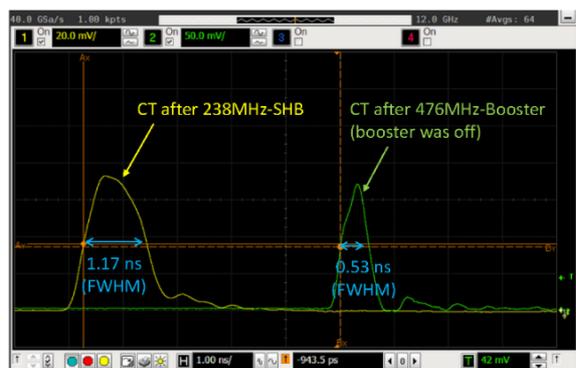


Figure 2: Temporal profiles of the electron beam, measured with the two current transformers (CTs).

#### 3.3 476 MHz-Boosterの調整

BoosterのRFにより、速度バンチ圧縮による集群位置を調整する。圧縮後の相対的なバンチ長を知るため、スクリーンモニタにて発生するコヒーレント遷移放射(Coherent Transition Radiation: CTR)を測定した。CTRの信号は導波管型の周波数フィルタ[11]を通過することで3.75 GHz以上の成分が残るので、これを検波し測定した。Figure 3に、S-APSをOFFにした状態でビームを通し、S-APSの入口と出口にある2カ所のスクリーンモニタでのCTRを測定したものを示す。Boosterの位相を-

40°にするとS-APSの入口でバンチが最も圧縮され、0°にするとS-APSの出口でバンチが最も圧縮される。我々は、S-APSの中央でバンチが最適に圧縮されるよう、この中間である-20°に設定した。

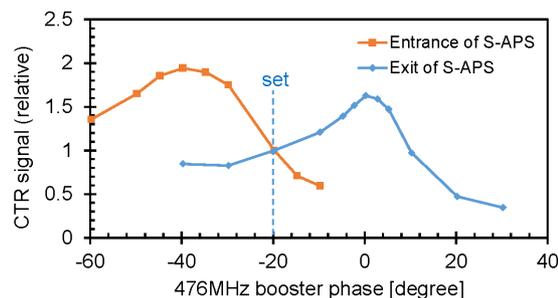


Figure 3: Normalized CTR signal intensity, as a function of the RF phase of the 476-Booster cavity.

#### 3.4 ゼロ位相法によるバンチ長の測定

電子ビームはS-APSとS-TWAでエネルギーチャープを付けられ、BC1にて圧縮される。圧縮後のバンチ長を、以下の2種類の方法で測定した。

一つ目のゼロ位相法による測定[16]は、C-TWAのうち最下流の1台を、+90°あるいは-90°の位相に置き、バンチ内でのエネルギー差をBC2シケイン中間のプロファイルモニタで測定し、時間に換算する方法である。Figure 4に、測定結果を示す。C-TWAの位相を+90°にした場合と-90°にした場合とでは、得られた分布は少し異なる。この理由としては、C-TWA入射時点でのエネルギー分布が足されることと、C-TWAのRFによりバンチの空間広がりが増えることがある。また、ビームの持つ空間広がり、この測定を鈍らせるため、実際のバンチ長は、ここで測定された1.5 ps(FWHM)よりも短く、ピーク電流も160 Aよりも高いと推測される。

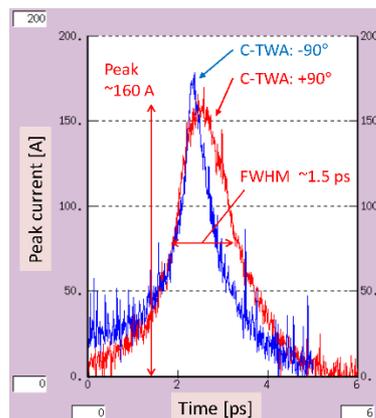


Figure 4: Temporal profiles of the electron bunch, measured by the RF zero-phasing method (see text).

#### 3.5 ストリークカメラによるバンチ長の測定

もうひとつの方法は、BC2出口に設置したスクリーンモニタにて発生する遷移放射光(Optical Transition Radiation: OTR)を、高速ストリークカメラにて時間掃引し、バンチの時間分布を測定する方法である。Figure 5には、この方法で測定した時間分布を示す。OTR光の強度が弱いので、この図の測定では30ショットの分布を積算し

ている。ストリークカメラ内の時間ジッタによって像の位置が上下に変動するため、ショット毎に光分布の重心を計算してそれを合わせるように時間軸を規格化して積算している。ただし、これらの時間調整誤差によってバンチ幅の測定値が実際よりも広めに見えている可能性がある。

両測定ともに、1.5~1.6 ps (FWHM)のバンチ長を示しており、この測定と、BC2 下流の CT で測定したビーム電荷量 (~300 pC) から、電子ビームのピーク電流は約 200 A と見積もられる。ただし両測定とも測定誤差が大きいため、実際のピーク電流は更に高い可能性がある。

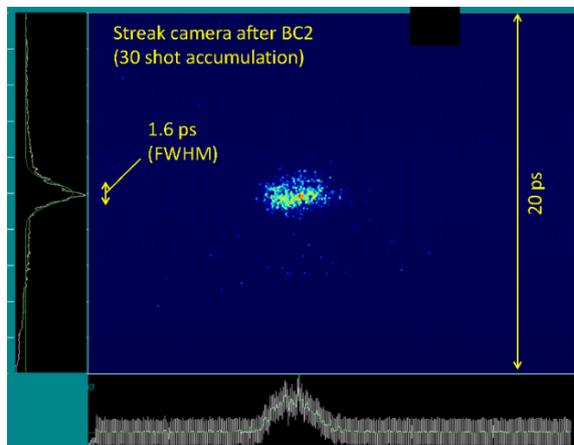


Figure 5: Temporal profile (vertical axis) of the electron bunch, measured using the streak camera at the exit of BC2. This profile is the sum of 30 shots (see text).

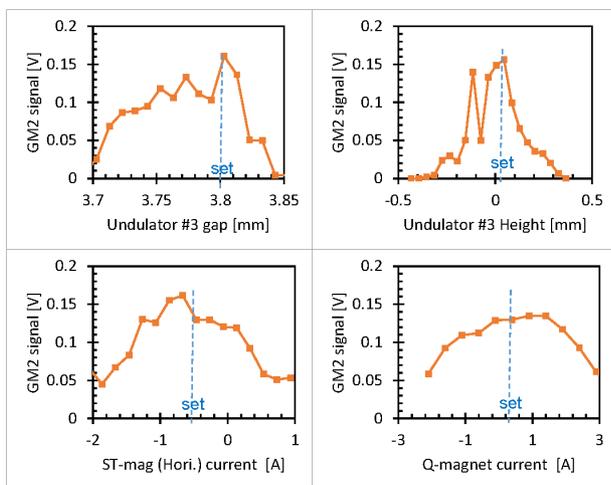


Figure 6: FEL intensity changes measured with the gas intensity monitor (see section 7), as functions of the magnet gap and height of the 3<sup>rd</sup> undulator, the horizontal steering magnet current, and the Q-magnet current.

### 3.6 アンジュレータの調整

アンジュレータ部にて、効率的に FEL を発振させるためには、電子ビームの軌道やエンベロップ、およびアンジュレータの K 値や磁極の水平、垂直位置を精密に調整する必要がある。我々はまず、アンジュレータ内の軌道について、電子ビームのエネルギーを変えた時の軌道変位を無くすよう Q 磁石の位置やステアリング磁石を調整する Beam based alignment (BBA)[17]を実施した。

アンジュレータの磁極ギャップ (K 値) や高さ、および Q 磁石の電流については、FEL の強度が最大となるように微調整した。Figure 6 に、これらのパラメータを振った時の FEL 強度の変化の例を示す。

## 4. ビームラインおよび FEL の特性

### 4.1 ビームラインの構成

BL1 ビームラインの構成を Figure 7 に示す。アンジュレータホール最下流部 (フロントエンド部) には、余光をカットする Front-end (FE) スリット、メインビームシャッター (MBS)、および FEL を測定するスクリーンモニタ、フォトダイオードなどが設置されている。その下流は厚さ 2.7 m のコンクリート遮蔽壁を隔てて光学ハッチがあり、光強度を調節するアテネータ (AT) やガスアテネータ (GAT)、平面ミラー (M)、ガス強度モニタ (GM) などが置かれている。更に下流の実験ホール内には、波長スペクトルを測定するグレーティング型スペクトロメータ、および ユーザーが照射実験を行う実験ハッチが用意されている。本章では、これらビームラインの光診断機器で測定した現在の FEL の特性を記す。

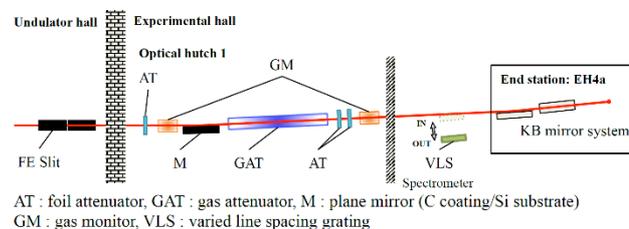


Figure 7: Layout of BL1 photon beamline.

### 4.2 空間分布

FEL の空間分布は、YAG の発光を CCD カメラで測定するプロファイルモニタによって測定される。アンジュレータホール最下流での、FEL の空間分布の例を Figure 8 に示す。長波長の FEL は発散角が大きいので、光の空間分布はダクト全体に広がっている。光学ハッチにあるガス強度モニタ (GM) やガスアテネータ (GAT) の前後にある差動排気部では、オリフィスが  $\phi 6$  mm (Figure 7 にて赤点線で図示) と狭いため、42 eV の FEL に対しては半分以上がエンドステーションに届くまでに失われてしまう。一方、波長が短い時には、通過率は向上する。例えば 62 eV (K=1.5) の FEL に対しては、通過率は 70~80% になる。

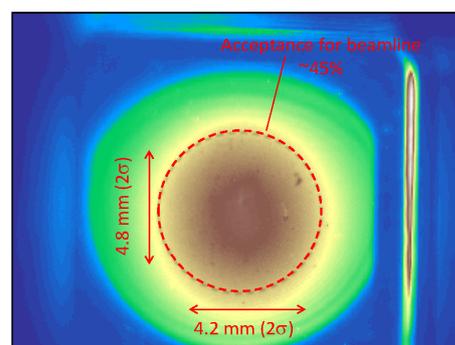


Figure 8: Spatial profile of the FEL at 42 eV (K=2.1).

### 4.3 強度

FEL の強度(パルスエネルギー)の測定は、低強度で使用するフォトダイオードと大強度で使用するガス強度モニタ(GM)とを使いわけている。ガス強度モニタは、薄いアルゴンガス中を FEL が通過した時の電離電子を電子増倍管(EM 管)によって収集し測定している。必要な信号の線形性が得られるように、ガス濃度や EM 管の印加電圧を変えて感度を調整している。また、パルスエネルギーの絶対校正については、カロリメータ[18]を用いた測定を行い、ガス強度モニタの信号強度と比較して校正を行っている。

Figure 9 には、加速器の調整 12 時間の間の FEL 強度(パルスエネルギー)の推移を示す。運転の繰り返しは 60 pps で、FEL の波長は 42 eV である。オレンジ色の点はシングルショットでの強度(30 ショットごとに 1 点をプロット)で、少し色の濃い茶色の点は、100 ショットの強度の平均である。調整の間じゅう、FEL のパルスエネルギーは 15  $\mu\text{J}$  程度を維持できている。ショット毎の強度変動は、現状では約 30% ( $\sigma$ ) であり、SACLA の変動幅( $\sim 10\%$ ) に比べて変動が大きい。この理由としては、SACLA に比べてピーク電流が低く、アンジュレータの台数も少ないので、SASE-FEL が完全な飽和に達していないためと思われる。

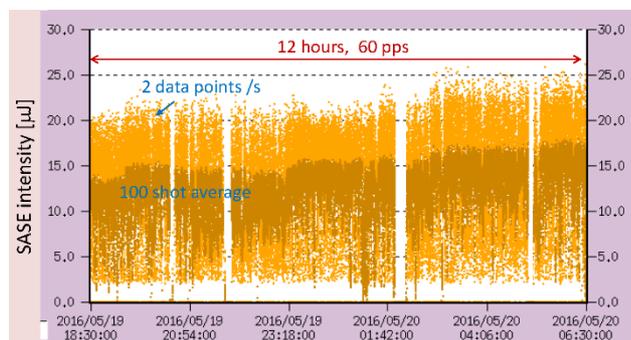


Figure 9: Trend graph of the FEL pulse energy.

### 4.4 スペクトル

FEL のスペクトルは、回折格子を用いたスペクトロメータによって測定される。Figure 10 に、典型的なスペクトルを示す。左は 100 ショットを積算した分布で、スペクトルの幅は FWHM で約 1 eV である。右はシングルショットにて測定した分布の一例である。スペクトルの中心波長は、毎ショットとも安定しており、電子ビームのエネルギーが

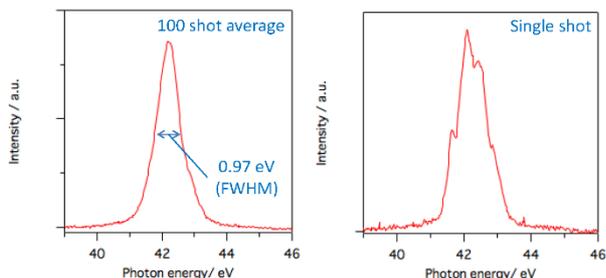


Figure 10: Spectra of FEL light (K=2.1). The left figure shows the average values of 100 shots, and the right figure is an example of the single-shot spectrum.

十分に安定していることを示している。

## 5. まとめと今後の予定

極紫外線(EUV)～軟 X 線領域への FEL 利用の拡大のため、我々は SACLA の BL1 に SCSS を移設し整備した。2015 年の 9 月より電子ビームを用いた調整運転を開始し、10 月には初めての FEL 発振を観測することに成功した。12 月にはアンジュレータを 1 台追加し、その後も調整を進めた結果、現在では光子エネルギー 42 eV にて、15  $\mu\text{J}$  程度の FEL を常時発生させることができている。そして我々は 7 月からはユーザーの供用実験を開始している。

しかしながら、現状ではバンチ圧縮シケインが BC1 のひとつしかないため、圧縮後のバンチ長は 1.5 ps (FWHM) と SACLA 等と比べると 10 倍以上長く、ピーク電流も 200 A 程度である。そのため FEL はまだ完全に飽和に至っておらず、ショット毎の強度変動( $\sim 30\%$ ) が大きいのが課題である。この夏の停止期間に我々は、C バンド加速器を 2 台増設し、エネルギーを 800 MeV まで上げるとともに、電子ビーム条件の最適化を行い、FEL の短波長化と高強度化を行う予定である。

## 参考文献

- [1] P. Emma *et al.*, Nature Photonics 4, 641 (2010).
- [2] T. Ishikawa *et al.*, Nature Photonics 6, 540 (2012).
- [3] W. Ackermann *et al.*, Nature Photonics 1, 336 (2007).
- [4] E. Allaria *et al.*, Nature Photonics 6, 699 (2012).
- [5] J. Han *et al.*, “Beam commissioning of PAL-XFEL”, Proc. of IPAC 2016, (2016).
- [6] F. Brinker *et al.*, “Commissioning of the European XFEL injector”, Proc. of IPAC 2016, (2016).
- [7] R. Ganter (ed.) “SwissFEL conceptual design report”, PSI V20 (2012).
- [8] D. Wang *et al.*, “Soft X-ray free-electron laser at SINAP”, Proc. of IPAC 2016, (2016).
- [9] The LCLS-II collaboration “The LCLS-II conceptual design report”, (2013).
- [10] T. Shintake *et al.*, Nature Photonics 2, 555 (2008).
- [11] T. Shintake *et al.*, PRST-AB 12, 070701 (2009).
- [12] Y. Otake, “Relocation and improvement status of the SCSS test accelerator to provide dual FEL drivers at SACLA”, Proc. of IPAC 2015, (2015).
- [13] T. Sakurai *et al.*, “Commissioning status of the extreme-ultraviolet FEL facility at SACLA”, Proc. of IPAC 2016, (2016).
- [14] K. Togawa *et al.*, PRST-AB 10, 020703 (2007).
- [15] T. Sakurai *et al.*, “Design of the C-band disk-load type accelerating structure for a higher pulse repetition rate in the SACLA accelerator”, Proc. of LINAC’12, (2012).
- [16] D. X. Wang *et al.*, Phys. Rev. E 57, 2283-2286, (1998).
- [17] 山本龍 ほか, “SACLA アンジュレータビームラインの Beam Based Alignment”, 第 8 回日本加速器学会年会 つくば (2011).
- [18] T. Tanaka *et al.*, Rev. of Sci. Instrum., 86, 093104 (2015).