

## SACLA における自己シード型 XFEL の観測 OBSERVATION OF A SELF-SEEDED XFEL IN SACLA

稲垣隆宏<sup>#, A)</sup>, 田中隆次<sup>A)</sup>, 犬伏雄一<sup>B)</sup>, 原徹<sup>A)</sup>, 長谷川太一<sup>C)</sup>, 三浦亜由美<sup>B)</sup>,  
大橋治彦<sup>B)</sup>, 大端通<sup>B)</sup>, 登野健介<sup>B)</sup>, 矢橋牧名<sup>A)</sup>, 後藤俊治<sup>B)</sup>, 田中均<sup>A)</sup>  
Takahiro Inagaki<sup>#, A)</sup>, Takashi Taknaka<sup>A)</sup>, Yuichi Inubushi<sup>B)</sup>, Toru Hara<sup>A)</sup>, Taichi Hasegawa<sup>C)</sup>, Ayumi Miura<sup>B)</sup>,  
Haruhiko Ohashi<sup>B)</sup>, Toru Ohata<sup>B)</sup>, Kensuke Tono<sup>B)</sup>, Makina Yabashi<sup>A)</sup>, Shunji Goto<sup>B)</sup>, Hitoshi Tanaka<sup>A)</sup>  
A) RIKEN SPring-8 Center, B) Japan Synchrotron Radiation Research Institute, C) SPring-8 Service Co. Ltd.

### Abstract

A self-seeded XFEL system using a transmitted beam under the Bragg diffraction condition has been developed at the compact XFEL facility SACLA, in order to generate brilliant single-mode XFEL pulses with high temporal coherence. The self-seeding setup is composed of a small magnetic chicane that can delay the electron beam by up to 50 fs, and a diamond single crystal with the thickness of 180  $\mu\text{m}$ . In the beam commissioning, monochromatic X-ray enhancement at 10 keV due to the self-seeding was observed using a single-shot spectrometer. The spectral bandwidth of the seeded FEL was about 3 eV in FWHM, about 1/10 of that of SASE. After the optimization of the number of undulator segments, temporal delay of the electron beam, and the rf phase of the pre-buncher cavity, 4 times higher peak intensity was obtained for the integrated spectrum over 100 shots compared with SASE. The probability for observation of the seeded FEL signal in the single-shot spectra was 42% and the intensity fluctuation for the seeded events was 31% rms. Although further optimization and improvement on long-term stability are still necessary, the results are promising for future practical use.

### 1. はじめに

X線自由電子レーザー (XFEL) は、高輝度、短パルスかつ高空間コヒーレンスを兼ね備えた X 線光源として、数多くのユーザー実験に供されている。しかしながら、SASE 型 FEL は、原理的に自発放射光のゆらぎを増幅するため、時間領域に多くの独立したモードを持ち、スペクトル幅の広がりや強度の統計的変動を避けることはできない。この SASE 型 FEL の欠点を解消し真のコヒーレント光源を実現するため、コヒーレントシード (種光) を増幅するタイプのシード型 FEL が検討されてきた。

X 線領域では、シードとなる外部コヒーレント光源が存在しないため、上流のアンジュレータで生成した SASE 光を単色化し、下流のアンジュレータに導いて増幅のシードとする自己シード型 FEL<sup>[1]</sup>が、実現できる唯一の方法である。2011 年に DESY で考案された方法<sup>[2]</sup>は、短パルス X 線が結晶内で Bragg 回折をする際に、透過光からわずかに遅れて単色成分

分が出現することを利用したものである。単色成分は透過光の方向に出現し、結晶の厚みが 100 ~ 200 $\mu\text{m}$  なら遅延時間は数 10 fs となるので、アンジュレータの途中に挿入した小型のシケインで電子を遅延させ、単色成分と重ねることにより、下流のアンジュレータでシードを増幅することが可能となった。最初の自己シード型 XFEL の実証試験は 2012 年に LCLS にて行われ、シード増幅によるスペクトルの単色化が、明瞭に観測された<sup>[3]</sup>。増幅したシードのスペクトル幅は狭く  $10^{-4}$  台になるため、電子ビームのエネルギー変動が、シード増幅に大きく影響するという、新たな問題も明らかになった。

日本の XFEL 施設 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsar)<sup>[4]</sup>では、熱電子銃の採用と加速器 RF 系の徹底的な安定化により、電子ビームエネルギーの安定性は 0.02% 程度である。加速器の安定性を生かして、自己シード型 XFEL を安定して発振させることができると期待される。

SACLA では、自己シード型 XFEL を安定に発振さ

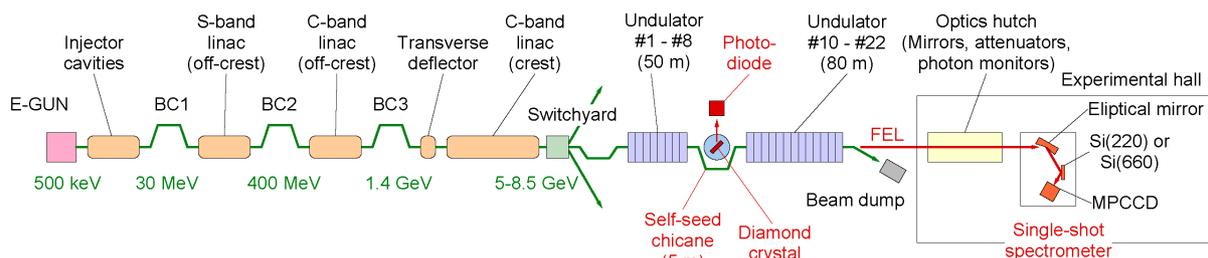


Figure 1: Configuration of the SACLA machine and the self-seeding system. BC1, BC2, and BC3 mean the three bunch compression chicanes.

# inagaki@spring8.or.jp

せ、最終的にはユーザー実験に供用することを目標に、2012年より準備を行ってきた。昨夏にハードウェアの準備が完了し、昨年11月に行った調整試験では、シード増幅によるスペクトルの単色化を初めて観測した。その後も、条件の最適化と安定運転を目指して数回の調整試験を行ってきた。今回の Proceedings では、今年の6月に行った調整試験の結果を中心に報告する。

## 2. セットアップ

Figure 1 に、本試験の構成を示す。CeB6 熱カソード電子銃から取り出された電子ビームは、多段のバンチャー空洞および3段の磁気シケインにて数 10 fs の時間幅までバンチ圧縮され、数 kA のピーク電流を得る。これを高電界の C バンド加速器にて所定のエネルギーまで加速した後、全長 130 m のアンジュレータ・セクションに送る。SACLA では、周期長 18 mm、周期数 277、最大 K 値が 2.2 の真空封止型アンジュレータを 21 台使用している。自己シード化を行うにあたって、2012 年の夏に 9 台目のアンジュレータを後方に移設し、4 台の偏向電磁石を並べて全長 5 m のシケインを設置した。シケインで得られる遅延時間は、最大で 50 fs である。

昨夏には、ダイヤモンド単結晶を備えた結晶チャンバーを、シケインの中央に設置した。結晶チャンバーの構成を Figure 2 に示す。厚さ 180  $\mu\text{m}$  のダイヤモンド単結晶は、予備も含めて 2 枚が用意され、多段のステージ上に設置された。ステージを遠隔で操作することにより、結晶の出し入れや位置調整、回転角の調整ができるようになっている。通常の SASE-XFEL 運転時には、結晶はビーム軸から退避され、シケインも消磁されている。自己シードの試験を行う時には、シケインを励磁して電子ビームを迂回せたくて、SASE の光軸上にダイヤモンド結晶を挿入する。そして結晶の回転角  $\theta$  を調整し、Bragg 回折を起こさせる。結晶チャンバーの外側には、回転アーム上にフォトダイオードと蛍光板付き CCD カメラが備えられ、2 $\theta$  方向に出る回折光をモニタできるようにしている。SACLA の標準的な発振波長である 10 keV の場合、ダイヤモンドの C(400) 回折を用い、Bragg 角  $\theta$  は約 44 度である。極短パルスの X 線が結晶に入射した時、結晶の厚さ (180  $\mu\text{m}$ ) を考慮して Bragg 回折を計算する<sup>[2,5]</sup>と、透過方向の単色成分は約 10 fs 後、24 fs 後、45 fs 後に強度のピークをもつ。実効的なシード強度は、この単色成分の時間分布を、数 fs から 10 fs 程度の SASE のパルス幅で鈍らせたものとなる。また、遅延時間が短い時は、単色成分が SASE のパルス自身に埋もれてしまう。そこで、電子ビームに 20 fs 程度の遅延をつけて、遅延して生じる単色成分と重ねる。そして下流のアンジュレータにて、単色成分をシードとして増幅が行われる。

SASE および増幅したシード光は、下流の実験ホールに導かれ、測定が行われる。SASE の強度や光軸については、常設の四象限モニタ<sup>[6]</sup>でショット毎に測定されている。波長スペクトルの観測には、

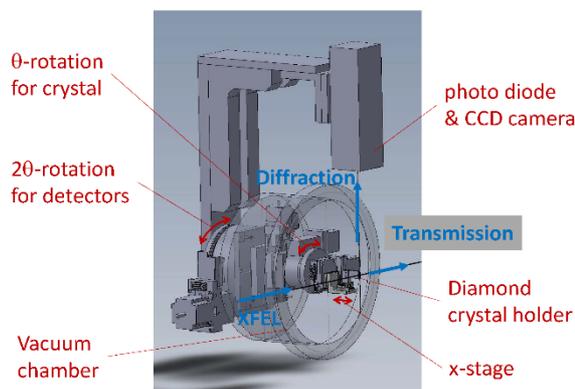


Figure 2: Diamond crystal chamber.

SACLA で開発したシングルショット型スペクトロメータ<sup>[7]</sup>を用いた。スペクトロメータは、シリコン結晶の回折面を選ぶことにより、波長分解能と測定可能な波長範囲を変えることができる。今回は主に、Si(220)面にて約 80 eV の測定波長範囲、0.8 eV の分解能で測定を行った。この測定波長範囲は、SASE のスペクトル (FWHM で 30~40 eV) の大半をカバーすることができる。また、ダイヤモンド結晶の Bragg 回折によりできる透過光スペクトル上の凹みの確認は、Si(660)面を用い 70 meV の高分解能で測定を行った。

## 3 試験結果

### 3.1 アンジュレータの K 値の調整

自己シード化の調整の前に、まず通常の運転にて SASE の強度が十分に得られ、ゲイン長も短い事で、電子ビームの状態が良いことを確認した。今年 6 月の試験では、電子ビームのエネルギーは 7.8 GeV、電荷量は 340 pC であり、アンジュレータ 21 台を K 値 ~2.1 に設定すると、光子エネルギー 10 keV、平均パルスエネルギー約 550  $\mu\text{J}/\text{pulse}$  の SASE が得られる状態であった。電子ビームの繰り返しは、10 pps に設定した。

次に、シケインを励磁し電子ビームに 20 fs の遅延をかけた。この状態でダイヤモンド結晶を挿入し、回転角  $\theta$  を 10 keV のブラッグ回折角に設定した。シケインの上流で SASE を発振させるアンジュレータの台数は、SASE のゲイン曲線から 4 台 (#5~#8) に設定した。アンジュレータ 4 台での SASE のパルスエネルギーは約 30  $\mu\text{J}$  とシード光としては十分な強度があり、なおかつ SASE の線形増幅領域にあって電子ビームの品質が劣化 (SASE によるエネルギー広がり増大等) していないからである。

使用する 4 台のアンジュレータについて、一律に K 値を変えて SASE の発振波長を変え、ダイヤモンド結晶の Bragg 回折の強度が最大となるように K 値を設定した。Figure 3 にその結果を示す。Bragg 回折の強度は、結晶チャンバーに備えられたフォトダイオードの信号強度から求めた。Figure 3 の分布は、SASE のスペクトル幅 (FWHM で 30~40 eV) を反映している。この結果より、K 値をもとの値より

0.002 だけずらし SASE スペクトルの中央に Bragg 回折の波長が来るようにした。

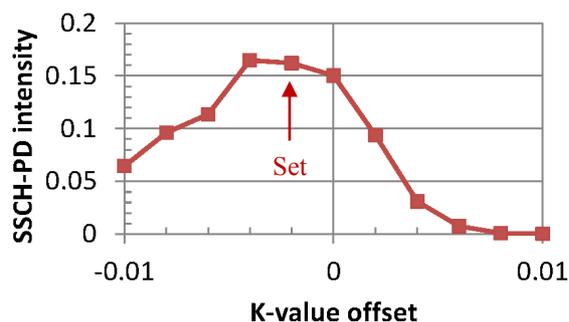


Figure 3: Bragg diffraction intensity measured by the photo-diode as a function of the K-value offset of the upstream undulators.

### 3.2 透過光の波長スペクトルの確認

ダイヤモンド結晶で Bragg 回折が起こっていることを、透過光の波長スペクトルからも確認した。スペクトルは、下流の実験ホールにあるシングルショット型スペクトロメータにて、シリコン結晶の Si(660)面を使い高分解能の設定にして測定した。測定した SASE 透過光のスペクトルを Figure 4 に示す。波長 9.995 keV 付近に見られる凹みが、ダイヤモンド結晶での Bragg 回折によるものである。凹みが明瞭に見られることから、結晶の品質は問題なく、設計通りの Bragg 回折が起こっていることが確認された。

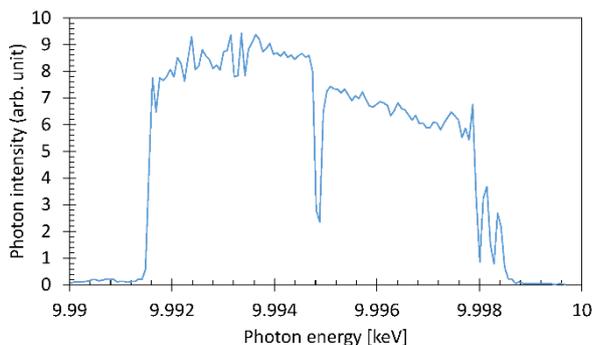


Figure 4: Energy spectrum of the transmitted SASE radiation from the upstream undulators, measured by the single-shot spectrometer with the silicon (660) configuration. There is a clear dip at 9.995 keV due to the Bragg diffraction of the diamond crystal.

### 3.3 シード増幅の観測とアンジュレータの台数の調整

シケインで電子ビームに 20 fs の遅延を与え、Bragg 回折の単色成分と並走させた状態で、下流のアンジュレータを閉めると、波長スペクトルに

シード増幅による単色光の増加が確認できた。Figure 5 に、下流のアンジュレータをそれぞれ 6 台、7 台、13 台使用した時の波長スペクトル (100 ショットの積算) を示す。アンジュレータの台数を増やすごとに、シード化された 9.99keV の単色成分が増幅されてゆくのわかる。下流のアンジュレータを全 13 台使用した時、シード増幅部のピーク強度は SASE の約 4 倍になり、スペクトル幅は FWHM で約 3 eV と SASE の約 1/10 となっている。

下流のアンジュレータの台数を変えた時の、シード増幅された単色成分のピーク強度、および SASE によるバックグラウンドの強度を、Figure 6 に示す。台数を増やすほど、SASE にくらべて単色成分が顕著に増加するのがわかる。なお、ここまでの測定では、シケイン上流のアンジュレータは 4 台を使用している。

次に、シケイン下流のアンジュレータを 13 台に固定して、シケイン上流のアンジュレータの台数を 3 台から 6 台まで変えた時の、単色成分のピーク強度を Figure 7 に示す。上流のアンジュレータは、4 台から 5 台 (SASE のパルスエネルギーで 30~100 μJ 程度) が適切であることが確認された。上流アンジュレータの台数が 3 台以下ではシード光の強度が不足し、またアンジュレータの台数が多すぎると電子ビームのエネルギー発散が大きくなり増幅効率が低下するためと考えられる。

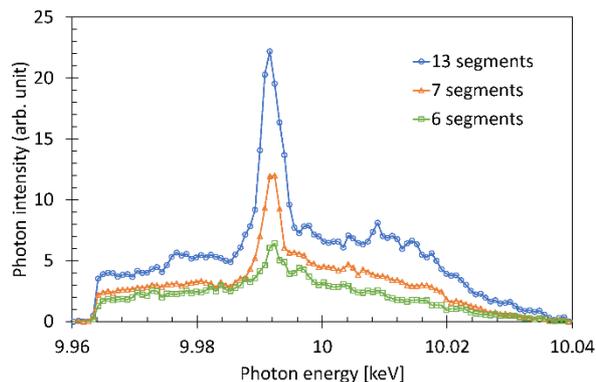


Figure 5: Energy spectra of the X-ray radiation with and without the diamond crystal, measured by the single-shot spectrometer with silicon (220) configuration. The three lines show the spectra with different number of active undulator segments at the downstream of the chicane. The spectra are the integration of 100 shots.

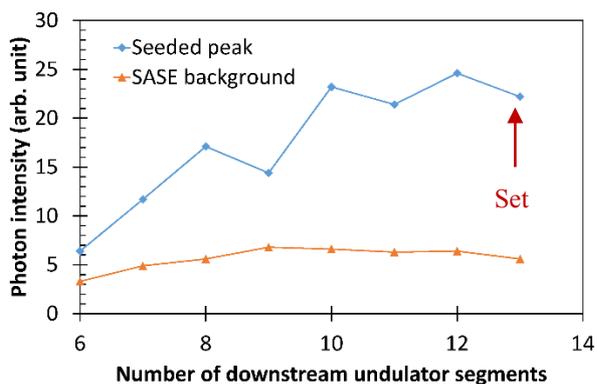


Figure 6: Peak intensity of the seeded monochromatic components and the averaged intensity of the SASE background, depending on the number of active undulator segments at the downstream of the chicane.

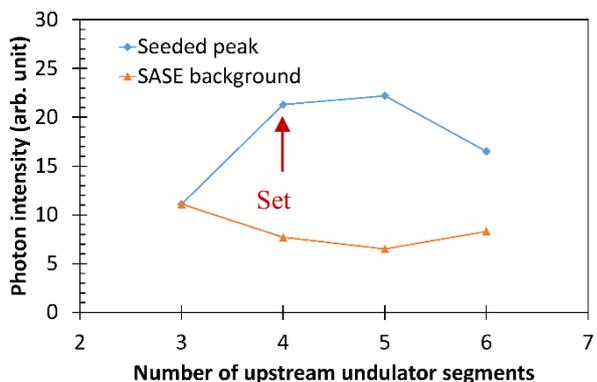


Figure 7: Peak intensity of the seeded monochromatic components and the averaged intensity of the SASE background, depending on the number of active undulator segments at the upstream of the chicane.

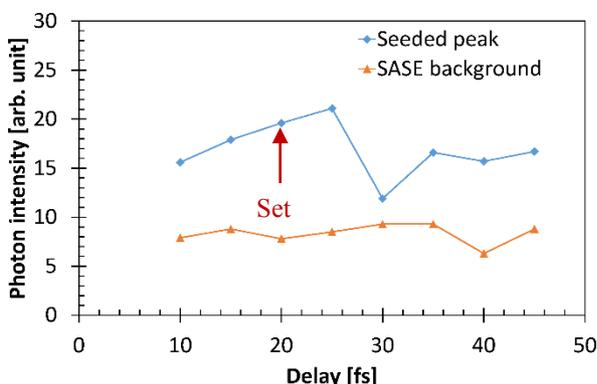


Figure 8: Peak intensity of the seeded monochromatic components and the averaged intensity of the SASE background, depending on the delay time at the chicane.

### 3.4 シケインでの電子の遅延時間

上流のアンジュレータを 4 台、下流のアンジュレータの台数を 13 台として、シケインの遅延時間を

変えた時の単色成分のピーク強度の変化を Figure 8 に示す。シード増幅の大きくなる遅延量は、理論計算 (24 fs、45 fs) とおおむね一致している。今回は、遅延時間を 20 fs に設定して試験を行った。

### 3.5 加速器の RF 位相に対する感度

自己シード型 FEL は、SASE に比べてスペクトル幅が 1 桁狭く増幅過程も複雑であるので、加速器の変動に対して非常に敏感である。SACLA の加速器は、Figure 1 に示すように多くの加速器から構成されており、特にバンチ圧縮部 (BC1、BC2、BC3) の前の加速器にて RF の位相を変えると、バンチ長とピーク電流が変わるため影響が大きい。そこで、それぞれの加速器での RF の位相を振った時のシード増幅部の強度の変化を測定した。Figure 9 に、a)BC3 手前の C バンド (5.712 GHz) 加速器の位相を変えた時、b)入射部 BC1 手前の L バンド (1.428 GHz) 加速器の位相を変えた時、c)最前段の 238 MHz プリバンチャー空洞の位相を変えた時、のシード増幅部のピーク強度と、常設の光強度モニターで測定したパルスエネルギーを示す。C バンド加速器では  $\pm 0.2^\circ$ 、L バンド加速器では  $\pm 0.05^\circ$ 、プリバンチャー空洞では  $\pm 0.05^\circ$  位相がずれると、シード増幅部のピーク強度が急激に減少する。一方、SASE を主としたパルスエネルギーは、20~30%程度の減少にとどまる。このように、自己シードによる増幅は、RF 位相の変化に対して極めて敏感であることが確かめられた。今後、自己シード FEL を長期的に運転し、ユーザー運転に供するためには、これまで以上に加速器を安定化する必要があることがわかった。

プリバンチャー空洞の位相を変えた時の、波長スペクトルの変化を Figure 9 の d)に示す。これまで使っていた位相設定値に比べて、 $+0.05^\circ$  ずらした方がシード増幅によるピークが急峻になり適切であることがわかった。この時のシード増幅部のピーク強度は、SASE の約 4 倍で、スペクトル幅は FWHM で約 2 eV であった。今回は時間の都合で、おおまかな特性の測定しかできなかったが、今後加速器の各パラメータをより精細に調整することにより、シード増幅のピーク強度を上げてゆく予定である。

### 3.6 シングルショットでのスペクトル

前節にて説明した、シード増幅が顕著に見られる状態 (Figure 9 d の  $+0.05^\circ$ ) にて、シングルショット毎の波長スペクトルを解析した。波長スペクトル中で最も強度の強い波長 (光子エネルギー) と、その時の強度を散布図にしたものを、Figure 10 に示す。9.991 keV 付近に固まっている事象が、シード増幅によるものであると考えられる。ピークの光子エネルギーが 9.985 keV~9.995 keV にありピーク強度が 20,000 以上であること (Figure 10 の青破線) を「シード増幅」の条件とすると、この条件を満たすものは 100 ショット中 42 ショットであった。この 42 ショットについて、ピーク強度の平均は SASE の約 9 倍であり、変動幅 (標準偏差) は 31%であった。

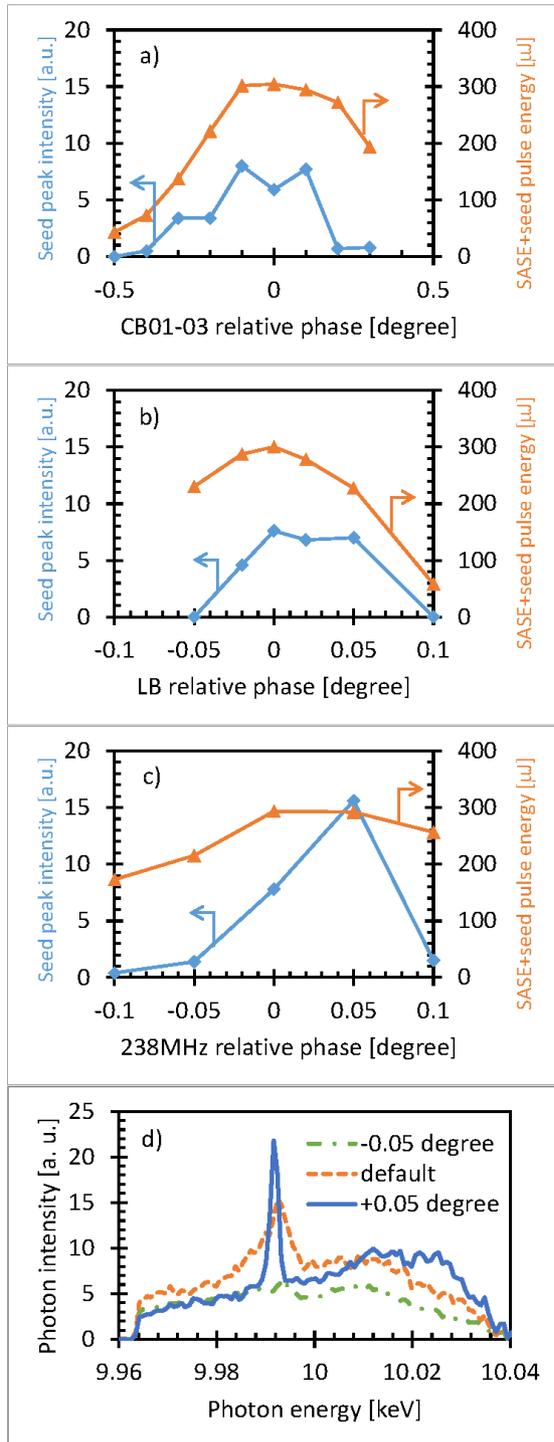


Figure 9: (Plot a, b, and c) Peak intensity of the seeded monochromatic components (Blue line), and the total pulse energy measured by the in-line beam monitor (Orange line), depending on the relative rf phase of the C-band off-crest accelerator (a), the L-band accelerator (b) and the 238 MHz pre-buncher cavity (c), from the initial operating parameters. Plot d) shows the energy spectra for three rf phases of the 238 MHz pre-buncher cavity. The each spectrum is the integration over 100 shot, measured by the single-shot spectrometer.

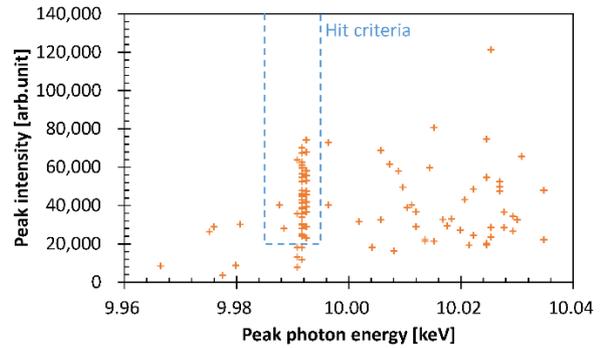


Figure 10: Distribution of the peak photon energy and the peak intensity for each single-shot spectrum, which is the same data set as “+0.05 degree” spectrum in Figure 8 d). Blue dash line box shows the criteria for “seeded” event.

また、ピーク波長（光子エネルギー）の変動幅は0.9 eV と、測定系の分解能と同程度であり安定している。従って現状でも、約半数のショットは、9.991 keV 付近で通常の SASE よりも強い強度の X 線が得られていることになる。今後の自己シード型の実用化、供用化に向けて、期待の持てる結果が得られた。

#### 4. まとめ

XFEL の単色化、高輝度化を目指して、自己シード型 FEL の調整試験を昨年秋より行ってきた。ダイヤモンド単結晶の Bragg 回折によりシードとなる単色光を発生させ、シケインで 20 fs 遅延させた電子パンチを重ねることにより、中心波長 9.991 keV、スペクトル幅 3 eV の単色光を発生させることができた。アンジュレータの台数と遅延時間、加速器の RF 位相等を調整することにより、9.991 keV の単色光に関して SASE の約 5 倍の平均強度を得ることができた。自己シード型 FEL の実用化、供用化に向けて、更なる各パラメータの最適化と安定化を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] J. Feldhaus et al., Opt. Commun. 140, 341–352 (1997).
- [2] G. Geloni, et. al., J. Mod. Opt. 58, 1391-1403 (2011).
- [3] J. Amann, et. al., Nature Photonics 2012.180 (2012).
- [4] H. Tanaka, et. al., Nature Photonics 2012.141. (2012).
- [5] R. Lindberg and Yu Shvydko, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 050706 (2012).
- [6] K. Tono, et. al., New J. of Phys. 15, 083035 (2013).
- [7] Y. Inubushi, et. al., Phys. Rev. Lett. 109, 144801 (2012).