

# SACLA 加速器と光源性能の高度化に向けて

## UPGRADED PERFORMANCE OF SACLA ACCELERATOR AND FEL

原 徹<sup>#</sup>

Toru Hara <sup>#</sup> (on behalf of the members of SACLA)

RIKEN SPring-8 Center

### Abstract

In March 2012, SACLA was opened to public users. Since then, SACLA has been operated as scheduled without serious problems. In the fiscal year of 2012, the operation time reached more than 7000 hours. In order to improve the performance of SACLA, a two-color lasing and multi-energy operation have been proposed and tested. The two-color XFEL is realized at SACLA for the first time in hard x-rays with wide tunability. The multi-energy acceleration of the electron bunches is a unique idea to change the beam energy from bunch-to-bunch without degrading the accelerator stability, that will significantly improve the usability of multi-beamline operation. This paper presents the recent R&D activities of SACLA together with the current operation status.

### 1. はじめに

2012年3月のユーザー供用開始より約1年半、SACLAは大きなトラブルなくほぼ当初計画どおり稼働し、2012年度は7016時間の総運転時間を達成した。SACLAではユーザー運転とともに、加速器や光源の安定化および高度化にも継続して取り組んでおり、世界初となる硬X線での2色FELや、10fs以下の短パルスFEL光のユーザー実験への供給を実現している。本稿ではSACLAの現状とともに、これまで達成したFELの性能向上、および今後進めていく高度化について紹介する。

### 2. SACLAの運転状況

Table 1に2012年度のSACLA運転時間を示す。RFトリップ等によるロスタイムは、ユーザータイムの7.7%であり、安定した加速器運転を達成している。Figure 1は、2012年度前半のユーザー実験の種類別割合を示しており、SACLAではcoherent diffraction imagingが全体の約1/3を占める。

Table 1: SACLA Operation Status

Operation period	2012/04/01-2013/03/30
Total operation time (achieved/planned)	7016/7060 hours
User operation	3152 hours
R&D and tuning	3864 hours
Laser availability during user operation	92.3 %

SACLA 加速器の概略図を Figure 2 に示す。2012 年度に行った加速器安定化で、最も効果があったの

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

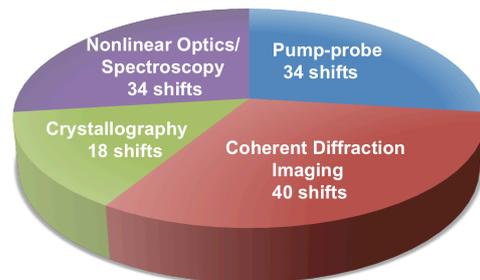


Figure 1: User experiments in 2012A (1 shift = 12 hours).

は冷却水温調システムの改善である。まず2012年夏期停止期間に、入射部温度測定システムを改善することでRF空洞の温度安定性を0.1°C (p-p) から0.01°Cに向上させるとともに、従来使用していたAC冷却水ヒータをDCヒータへと変更した<sup>[1]</sup>。これは受電変動の影響を抑え、更に低エネルギー入射部収納部内に設置されている冷却水ヒータからの、広範囲にわたるACの漏れ磁場をなくすためである。その結果電子ビーム軌道の変動が抑制され、アンジュレータ下流80mにあるビームラインにおけるレーザー光のポインティングスタビリティは、光サイズ比で50%から10%へと飛躍的に改善した<sup>[2]</sup>。

入射部安定化後、S-band セクションに起因する変動がクリアに観測できるようになったため、2013年5月にS-band セクションの温調システムの改善を実施した。受電変動の影響を最小限に抑えるため、温調対象を加速管温度から冷却水温度に変更するとともに、入射部で導入した温度測定システムをS-bandにも採用した。その結果加速器パラメータ調整の精度が改善され、従来250 μJであった10 keVのFELパルス出力が、350 μJへと向上している。Figure 3に、S-band 温調システム改善前後のゲインカーブを示す。

線形加速器のビームエンベロップ (ベータ関数)

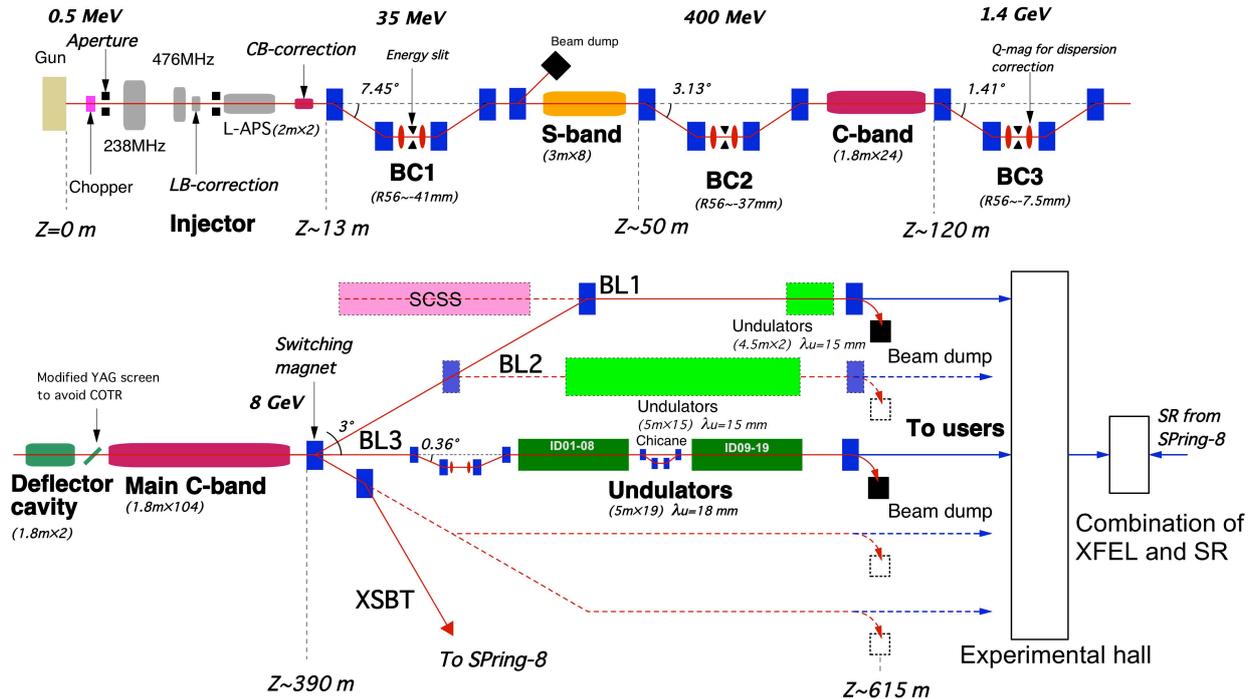


Figure 2: Schematic of SACLA.

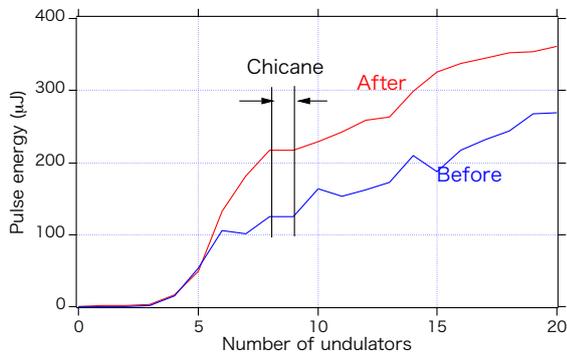


Figure 3: Gain curves before (blue) and after (red) the improvement of S-band temperature control system.

は、蓄積リングのように周期的安定解を持たないため、Q-scan 法で測定した Twiss パラメータやエミッタンスの初期条件を、線形転送行列モデル<sup>[3]</sup>を用いて伝搬させ調整する必要がある。線形転送行列モデルは、PARMELA 等のシミュレーションコードとはよい一致を示しているものの、実際の線形加速器で測定したビーム応答とは大きな差異があった。詳細な測定を繰り返した結果、これまで顧みられなかった進行波加速管端部カプラーセルにおける四極成分が原因であることがわかった<sup>[4]</sup>。この四極成分は、加速管カプラーセル形状や RF 位相に依存し、加速電圧が高い C-band 加速管で特に顕著に見られる<sup>[5]</sup>。実測した四極成分に基づいて線形転送行列モデルを修正したところ、ビーム軌道補正<sup>[6]</sup>やビームエンベロップ調整の精度を各段に向上させることができた。

これまで deflector 空洞で測定した電子バンチ長から推測していた FEL 光のパルス長は、2012 年秋から導入したシングルショットスペクトル<sup>[7]</sup>や auto-correlation を用いた測定により、より詳細な評価を行えるようになった。シングルショットで測定した SASE スペクトルスパイク幅から、電子バンチのエネルギーチャープの影響を差し引いて FEL 光パルス長を評価した結果、通常運転時の光パルスが 10 fs (FWHM) 以下であることが明らかになった。セルフシード導入に向けて BL3 アンジュレータ部に設置したシケインを用いた auto-correlation 測定においても、同様の結果が得られている。また電子バンチ圧縮の条件を変えることで、光パルス出力は減少するものの、光パルス長をある程度制御することが可能である。

線形加速器のパルス繰り返しの向上は、現在 SACLA の大きな課題のひとつになっている。パルス繰り返しはユーザー供用開始以来 10 Hz であったが、RF のコンディショニングが進んだことから、2013 年 5 月より 20 Hz に上げた。更に 2013 年度中に 30 Hz に上げ、設計繰り返しの 60 Hz を早期に実現したいと考えている。しかし一方で、これまで年間 5 本程度であったサイラトロン交換頻度が、2013 年度に入り 3 ヶ月で 6 本と大幅に増えてきている。XFEL 線形加速器の場合、要求される RF の安定性が非常に高く、サイラトロンがまだ使用可能であっても、時間ジッターなどが増加した時点で交換が必要になる。パルス繰り返しを上げると、サイラトロン交換頻度が更に増加すると予測されるため、サイラトロン使用条件の最適化や、固体化を含めた代替品の模索が今後重要になる。

### 3. SACLA 高度化

SACLA では、ユーザー運転や加速器安定化と平行して、光源性能の向上を目指した高度化も進めている。2012 年度は、ユーザー側からの要望に応え 2 色 FEL の実現、ビームライン複数化に向けたマルチビームエネルギー運転やキッカー電磁石の開発などを進めた。

#### 3.1 2 色 FEL

2 色 FEL は、既に 1990 年代に赤外線波長領域で実現されており<sup>[8]</sup>、最近極紫外線や軟 X 線においても発振の報告がある<sup>[9,10]</sup>。しかしながらこれらの 2 色 FEL は、2 波長間の波長差が数%と、ユーザー実験を行う上で使いづらいものであった。SACLA では、可変ギャップアンジュレータの利点をフルに生かすことで、10 keV 以上の硬 X 線領域において、最大 30% の波長差を実現することが可能である。

SACLA BL3 アンジュレータ部中央には、セルフシードや auto-correlation による光パルス長測定のためのシケインが、2012 年夏期停止期間中に設置されている。2 色 FEL では、アンジュレータをシケイン上下流の 2 セクションに分け、各々異なる K 値で FEL を発振させる。上流側セクションには 8 台のアンジュレータ、下流側には 11 台のアンジュレータがあり、アンジュレータギャップを開けることで、各セクション内で使用するアンジュレータの台数を調整することができる。

Figure 4 (a)は、上流側 8 台のアンジュレータ K 値を 1.92 に、下流側 10 台の K 値を 2.1 に設定し、分光器をスキャンさせて測定した 2 色 FEL のスペクトルである。ビームエネルギーは 7 GeV で、2 波長合計の出力は 130  $\mu$ J である。全アンジュレータを使って単一波長で FEL 発振した場合のパルスエネルギー、250  $\mu$ J (K=2.1) や 200  $\mu$ J (K=1.9) に比べると、2 色 FEL の出力は約半分になる。また Figure 4 (a)では、2 波長目 (K=2.1) のパルスエネルギーが、1 波長目 (K=1.92) よりも小さい。これは、2 つの波長における FEL 発振プロセスが互いに独立であり、上流側 1 波長目の FEL 発振によってエネルギー Spredd など悪化した電子バンチを用いて、2 波長目が発振するからである。即ち上流側で 1 波長目を飽和するまで増幅すると、下流側で 2 波長目の発振が得られなくなる。

Figure 4 (b)は、下流側 2 波長目のパルス出力を上げるために、上流側アンジュレータの台数を 5 台に減らした時のスペクトルである。1 波長目の増幅を抑えることで電子ビーム品質の悪化を抑制することで、2 波長目の出力を上げることができる。

XFEL を用いたポンププローブ実験は、Figure 1 からわかるように、SACLA におけるユーザー実験の約 1/4 を占めている。これまでポンププローブ実験の光源は、SACLA の X 線パルスとチタンサファイアレーザーの可視光パルスを用いてきた。2 色 FEL では、2 波長のパルスを両方とも XFEL から供給することで、X 線ポンプ X 線プローブ実験など新しい実験手法の可能性をユーザーに提供することが

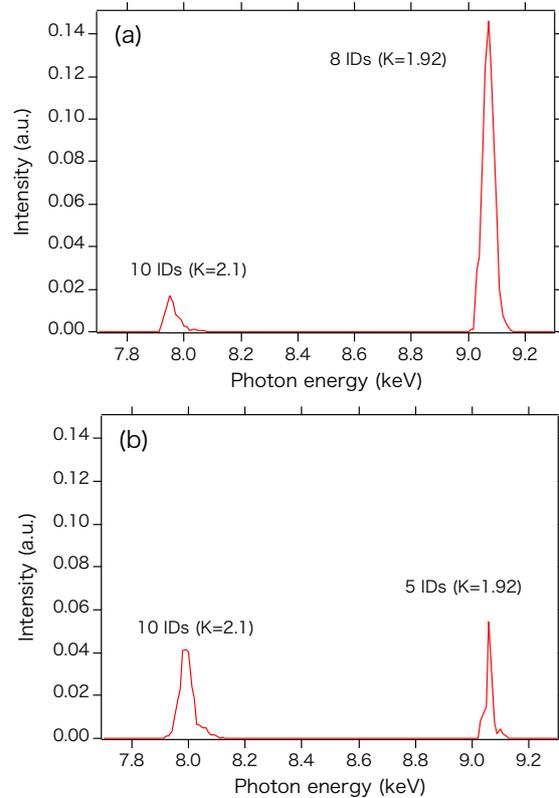


Figure 4: Spectra of two-color XFEL. (a) 8 undulators and (b) 5 undulators are used in the first undulator section.

できる。2 色 FEL の場合、両パルスが同一の電子バンチから生成されるため時間ジッターがなく、両波長とも波長可変である。またアンジュレータ部に設けたシケインを利用することで、2 波長間の時間遅延は、サブフェムト秒の精度で調整することが可能である。

#### 3.2 マルチビームエネルギー運転<sup>[11]</sup>

SACLA では 2014 年度に BL2 の稼働が予定されており、ビームラインの複数化が実現する。ビームラインの切り替えには、現在 DC 偏向電磁石 (Figure 2 の Switching magnet) を使っているが、各ビームラインへのバンチ毎の振り分けを実現するため、キッカー電磁石と DC セプタム電磁石の開発を進めている。

現状の SACLA ユーザー運転時の波長範囲は 5~15 keV であるが、数 keV 程度であれば、アンジュレータ K 値を変えることで波長を調整することができる。しかし、K 値を小さくしすぎるとレーザー強度が大幅に落ちるため、大きく波長を変える場合は電子ビームエネルギーを調整しなければならない。複数のビームラインがある場合、最適な電子ビームエネルギーはビームライン間で異なることが予想されるため、各ビームラインに最適なエネルギーをもった電子バンチをキッカー電磁石で振り分け、各ビームラインに供給するのが理想である。そこで電子バン

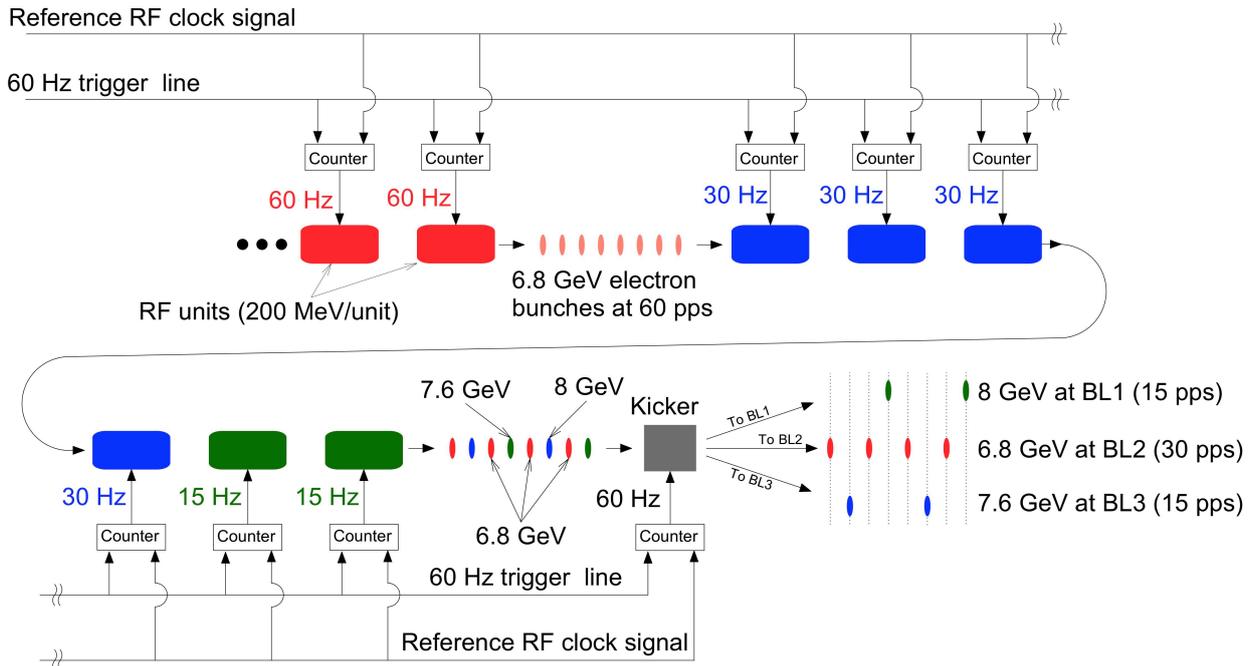


Figure 5: An example of accelerator setup for multi-energy operation.

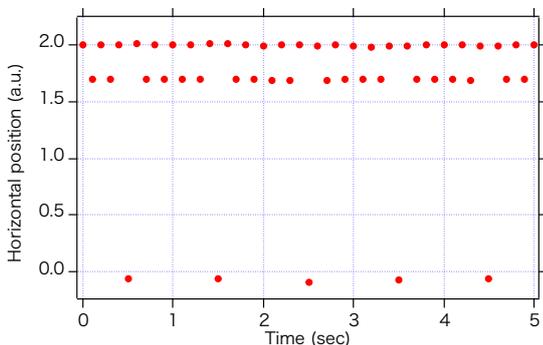


Figure 6: Horizontal beam position measured at dispersive chicane. Note that the BPM is saturated and loses linearity.

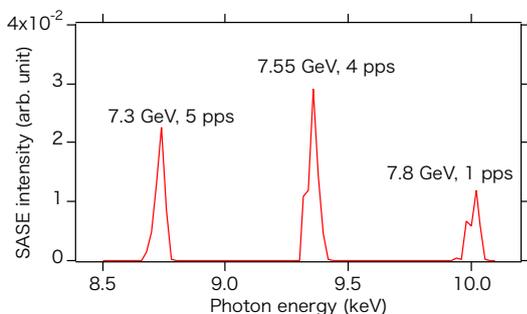


Figure 7: FEL spectra measured with multi-energy operation.

ち毎にビームエネルギーを制御する、マルチビームエネルギー運転の試験を行った。

マルチビームエネルギー運転のシステム構成例を、

Figure 5 に示す。線形加速器のビーム繰り返しが 60 Hz である場合、例えば加速器下流の 4 RF ユニートを 30 Hz で、更に 2 ユニートを 15 Hz で動かすことで、周期的に電子バンチのエネルギーを変えることができる。Figure 5 の例では、半数の電子バンチは繰り返しを変更した加速器下流の 6 RF ユニートで加速されないため、ビームエネルギーは 6.8 GeV となる。1/4 のバンチは、30 Hz で動作している 4 ユニートで加速されるため 7.6 GeV に、残りの 1/4 は 15 Hz で動作する 2 ユニートでも更に加速され、ビームエネルギーが 8 GeV となる。

RF ユニートの動作周波数と位相を選べば、様々なパターンでバンチ毎にビームエネルギーを制御することが可能である。このマルチビームエネルギー運転のパターンに、ビームラインを切り替えるキッカー電磁石の励磁パターンを合わせれば、各ビームラインに最適なビームエネルギーを持った電子バンチを供給することができる。マルチビームエネルギー運転において、RF ユニートは一定の動作周波数で定常的に動き、早いパラメータ変更などは伴わない。また、キッカー電磁石以外のステアリングや四極電磁石の磁場は一定とし、バンチ毎に変化させないため、通常の単一エネルギー運転と比較して、電子ビームの安定性を損なうことはない。

SACLA ではキッカー電磁石がまだ設置されていないため、1 本のビームライン (BL3) を用いてマルチビームエネルギー運転の試験を行った。BC3 下流にある C-band 主加速器部 (Figure 2 の Main C-band) には、RF ユニート (クライストロン) が 52 台あり、1 台の RF ユニートで 2 本の加速管に RF を供給している。C-band 1 RF ユニートの加速ゲインは、約 130 MeV である。

マルチエネルギー運転の試験では、10 Hz で加速器を運転し、C-band 主加速部の 2 ユニットの 5 Hz、他の 2 ユニットの 1 Hz に設定した。全加速管で加速された場合、ビームエネルギーは 7.8 GeV となる。よって 10 Hz の入射電子バンチは、1 pps で 7.8 GeV、4 pps で 7.54 GeV、5 pps で 7.28 GeV まで加速される。

Figure 6 は、BL3 アンジュレータ上流にあるシケイン中央部の BPM で測定した、水平方向のビーム位置である。測定場所のエネルギー分散関数は負であるので、ビームエネルギーが上がるとビーム位置変化は負となる。但し Figure 6 では、予想通りの周期的なバンチ毎のビームエネルギー変化があることはわかるが、ビーム位置が BPM の線形測定範囲を大きく超えているため、BPM の測定結果からビームエネルギーを直接求めることはできない。そこで電子ビームをアンジュレータに通し、分光器スキャンで FEL スペクトルを測定した結果が Figure 7 である。3 つのビームエネルギーで各々 FEL 発振が得られていることから、各エネルギーにおいて顕著なビーム品質の悪化がないことがわかる。Figure 7 図中に示したレーザーの波長から求めたビームエネルギーは、C-band 加速ゲインから予想される値とほぼ一致している。

今回の試験は、1 本のビームラインを使って行ったため、ビーム軌道やエンベロップがビームエネルギーに依存し、FEL 出力は単一ビームエネルギー運転時と比べると低い。しかしながらマルチビームライン運転では、キッカー電磁石で各ビームラインに電子バンチを振り分けた後、ビーム軌道やエンベロップを各ビームラインのアンジュレータに対し個別に最適化することができる。また今回の試験では、ビームダンプ部真空ダクトでのビームロスを避けるため、電子バンチ間のエネルギー差が制限されたが、キッカー電磁石設置後のマルチビームライン運転では、最大 4 GeV 程度のエネルギー差を電子バンチ間に付けることができると考えている。

### 3.3 高度化の今後の予定

2013 年秋には、BL3 アンジュレータを使ったセルフシード試験が予定されている。また、SACLA を SPring-8 将来計画の低エミッタンス入射器として用いるために、2013 年秋に SACLA から SPring-8 シンクロトロンビームダンプまでのビーム輸送試験、2014 年度には蓄積リングまでの輸送試験を実施する。ビームライン増設については、既に述べたように

2014 年夏期停止期間に BL2 アンジュレータの設置が予定されている。また 2013 年 5 月にシャットダウンした SCSS 試験加速器を、2014 年度に SACLA 光源棟収納部内 BL1 上流部に移設し (Figure 2 参照)、SACLA 加速器とは独立した極紫外域 FEL 光源として BL1 を稼働させることを予定している<sup>[12]</sup>。

## 4. まとめ

これまでのところ、SACLA は年間スケジュール通り順調に稼働しているが、60 Hz 運転に向けた RF 源の熱負荷問題や、サイラトロン交換頻度の増加など、一部課題が出てきている。これらの課題を克服し、今後もユーザー実験への安定したレーザー供給を継続するとともに、精力的に光源性能向上のための高度化にも取り組んでいきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] T. Hasegawa, et al., "SACLA 入射部の精密温度調節装置高度化", Proceedings of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, 1014 (2012).
- [2] H. Maesaka, "SACLA 加速器構成機器の高度化状況", in these proceedings.
- [3] T. Hara, K. Togawa and H. Tanaka, "Transverse envelope analysis for accelerating relativistic electron beams in a linear accelerator as a photon source", Nucl. Instrum. Methods A624, 65 (2010).
- [4] Y. Tajiri, et al., "SACLA 加速器における進行波加速管のビーム輸送モデルの修正", in these proceedings.
- [5] H. Maesaka, et al., "進行波型電子線形加速器の収束効果の解析と測定", in these proceedings.
- [6] T. Hasegawa, et al., "SACLA における線形加速器モデルに基づく電子ビーム軌道の自動補正", in these proceedings.
- [7] Y. Inubushi, et al., "Determination of the pulse duration of an x-ray free electron laser using highly resolved single-shot spectra", Phys. Rev. Lett. 109, 144801 (2012).
- [8] D.A. Jaroszynski, et al., "Two-colour free-electron laser operation", Phys. Rev. Lett. 72, 2387 (1994).
- [9] G. De Ninno, et al., "Chirped seeded free-electron lasers: self-standing light sources for two-colour pump-probe experiments", Phys. Rev. Lett. 110, 064801 (2013).
- [10] A.A. Lutman, et al., "Experimental demonstration of femtosecond two-colour x-ray free-electron laser", Phys. Rev. Lett. 110, 134801 (2013).
- [11] T. Hara, et al., "Time-interleaved multienergy acceleration for an x-ray free-electron laser facility", Phys. Rev. ST Accel. Beams 16, 080701 (2013).
- [12] T. Inagaki, "SACLA における極紫外線 FEL 整備計画", in these proceedings.