

IMPROVEMENT OF SACLA ELECTRON BEAM PERFORMANCE

Toru Hara[#], Kazuaki Togawa, Hitoshi Tanaka

XFEL R&D Division, RIKEN SPring-8 Center, RIKEN Harima Institute

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

Abstract

In March 2012, SACLA is open as a public user facility. While the first lasing was achieved at 10 keV after several months of machine commissioning, the pulse energy was about 30 μJ , which is lower than the design value. In the autumn of 2011, we intensively worked on the reduction of a projected emittance, then 120 μJ was finally obtained at 10 keV. After the cathode replacement in the winter shutdown, we re-tuned the accelerator and further increased the pulse energy to 250 μJ by increasing the beam energy and the undulator K-value. Currently the pulse energy more than 100 μJ are routinely available to user experiments at photon energies ranging from 5 to 15 keV. During the user time, the user can freely change the undulator gap to finely adjust the photon energy. Since the floor of the SACLA undulator hall still moves by 50 μm in 2 months, the beam orbit at the undulator section is re-aligned every 2 weeks to maintain the FEL performance. In this presentation, we will report the recent progress of the SACLA laser performance and operation.

SACLA 電子ビーム性能向上に向けての取り組み

1. はじめに

2011年6月にレーザー発振を達成した SACLA では、約1年間の調整運転を経て2012年3月よりユーザー実験のための供用運転を開始した^[1,2]。図1に SACLA の全体図を示す。加速器は、1次元モデルや3次元シミュレーションで得られた計算結果をもとにパラメータベースを作り運転を行っているが、実際には空間電荷効果等に対するシミュレーション精度の限界、RFの設定誤差、アライメントエラーなどの要因があるため、加速器運転を通じて、FEL出力を指標とした加速器電子ビーム性能の最適化を行うことは必須である。本稿では、昨年6月のレーザー発振以降取り組んできた電子ビーム性能の向上について報告する。

2. 投影エミッタンスの最適化

SACLA の入射器では、3種類の RF 周波数を組み合わせることで、熱カソード電子銃から出た1Aの電子ビームを、速度変調バンチングにより20Aまでバンチ圧縮する。このような熱電子銃とバンチャー、ブースター空洞等で構成される入射器は、他の多くの XFEL 施設で使われている RF 光陰極電子銃のシステムと比べ、カソード用レーザーのメンテナンスが不要、エミッションが均一で安定、カソード寿命が長い等のメリットがある。しかし一方で、RF 光陰極電子銃に比べ、入射部収束系のエネルギー収差により投影エミッタンスは必然的に大きくなるという面ももつ。SACLA 入射部では、速度変調バンチングを行うため、30%以上の大きな相対エネルギーチャープを電子バンチに付け、ビームエネルギーが1MeV以下の状態で約5mの距離を飛ば

す必要がある。このときスライスエミッタンスが悪化しないよう、空間電荷効果によるビームの発散を、磁気レンズを用いて抑えているため、収束系のエネルギー収差により投影エミッタンスが増大してしまう。

2011年夏期停止期間前のレーザーパルス出力は、光エネルギー10keV(7.0GeV, K=1.8)で約30 μJ と、当初予想していたパルスエネルギーの1/4~1/5程度であった。Q-scanで測定した規格化投影エミッタンスは、最終バンチ圧縮器(BC3)下流で約2~3mm-mradと、電子銃カソード直後の規格化エミッタンスに比べ4~5倍増加していた。FELゲインカーブとRF deflectorで測定したピーク電流から推定される規格化スライスエミッタンスは、電子銃エミッタンスとほぼ同等の0.7mm-mrad程度であったため、投影エミッタンスのみが加速およびバンチ圧縮の過程で増加している。投影エミッタンスの増加は、バンチ内でベータatron位相が変化しているためであり、アンジュレータへのエンベロープマッチングがバンチの一部でしかとれないことを意味する。

2011年9月からの加速器調整では、まず初段のバンチ圧縮器(BC1)のエネルギースリット開口を開くことでエネルギーチャープ幅を広げ、バンチ電荷量130pCから280pC程度に増やした。その後、投影エミッタンスをなるべく小さくし、レーザー発振に寄与するバンチ内電子数を増やすよう主に入射部パラメータの調整を行った。

SACLAでは、スクリーンモニターを用いたQ-scanで投影エミッタンスを測定している。既に報告されているコヒーレントOTRの問題を避けるため^[3]、Q-scanで用いたスクリーンは、空間マスク付きのYAGスクリーンである。エミッタンスが小さいXFEL加速器では、Q-scan時のビームサイズも小さく、スクリーンの解像度や光学系の焦点距離の調整

[#] toru@spring8.or.jp

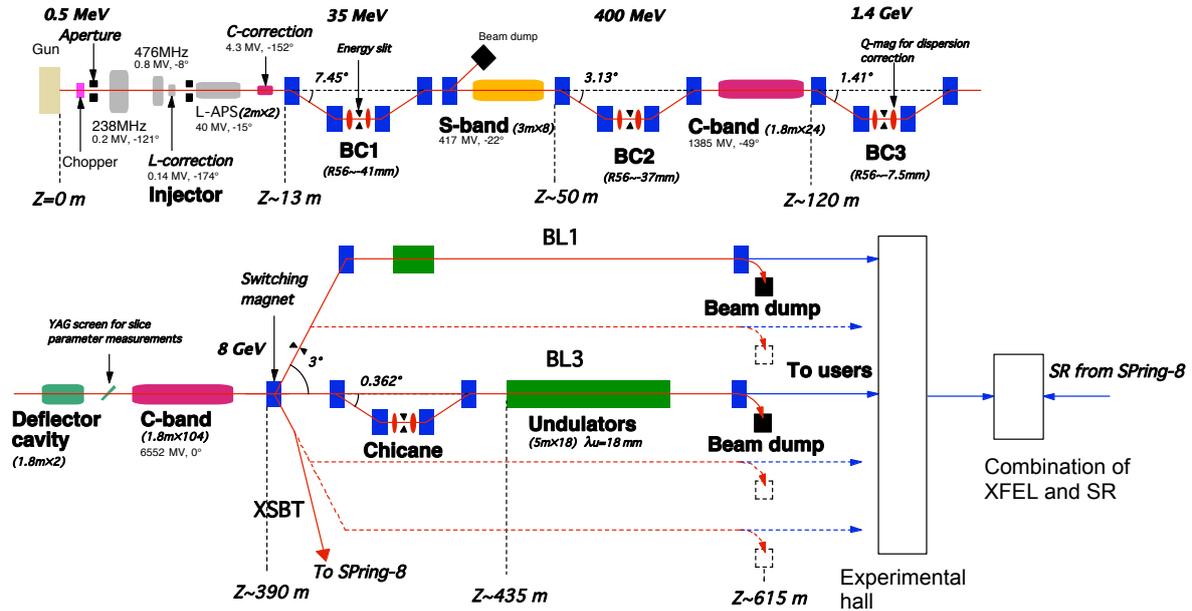


図 1 : SACLA の全体図

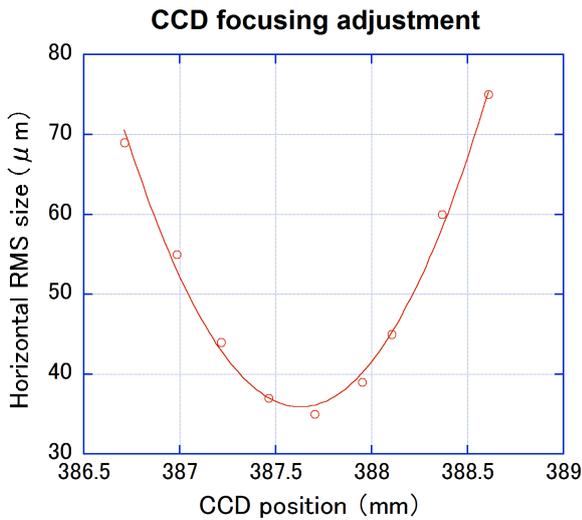


図 2 : 電子ビーム像サイズと CCD 位置 (焦点距離) の関係

が重要になる。焦点距離については、これまでスクリーン位置に置いた基準面やスクリーン表面の傷を用いて、オフラインで調整していたが、実際の電子ビーム像を用いてオンラインで CCD カメラ位置を調整したところ、オフラインの結果と焦点距離が数百 μm ずれることが判明した。図 2 は電子ビーム像のサイズと CCD 位置の関係をプロットしたもので、 $100 \mu\text{m}$ の精度で焦点距離を調整する必要があることがわかる。更に Q-scan の最小ビームサイズが過度に小さくならないよう、ベータ関数を調整しながら測定を行うことで、投影エミッタンス測定の信頼性と再現性を大幅に向上させることができた。

これら Q-scan 測定システム改良後、投影エミッ

タンスを初段バンチ圧縮器 (BC1) 下流と最終バンチ圧縮器 (BC3) 下流で測定しながら、主に入射部の磁気レンズやビーム軌道を調整し、投影エミッタンスが最小になるようパラメータを設定した。その結果、BC1 下流では夏期停止期間前のエミッタンス 1.6 (水平, mm-mrad) と 1.3 (垂直, mm-mrad) が、9 月の調整後 0.9 と 1.3 に、BC3 下流では停止前の 3.1 と 2.2 が 1.4 と 1.7 に、各々減少させることができた。停止期間前後のピーク電流はいずれも 3 kA 程度で、電荷量を 130 pC から 280 pC に増やした分、バンチ長が 40 fs (FWHM) から 70 fs (FWHM) 程度に伸びている。

電子ビームエネルギー 7.0 GeV、アンジュレータ K 値 1.8 における 10 keV FEL のゲインカーブを、調整前後で比較したプロットを図 3 の (a) と (b) に示す。最終パルスエネルギーが $30 \mu\text{J}$ から $120 \mu\text{J}$ に上がり、投影エミッタンス調整後はアンジュレータ 10 台あたりから FEL の飽和がより鮮明に現れている。

3. 電子銃カソード交換および FEL 出力の向上

2011 年 12 月から 2012 年 1 月にかけての冬期停止期間中に、電子銃 CeB_6 カソードの交換を行った。このカソードは、2011 年 2 月の加速器ビームコミッション開始以来約 1 年間使用してきたもので、FEL 発振に顕著な影響はまだ出ていなかったものの、カソード寿命約 2 年という SCSS 試験加速器の経験から、ユーザー実験の予定を踏まえ早期交換を決めた。

カソード交換後は初期ビーム発散が変わるため、主に入射部収束系を再調整することで SCSS 試験加速器では FEL 出力が再現できていた。しかし今回のカソード交換では、収束系の調整だけではレーザー

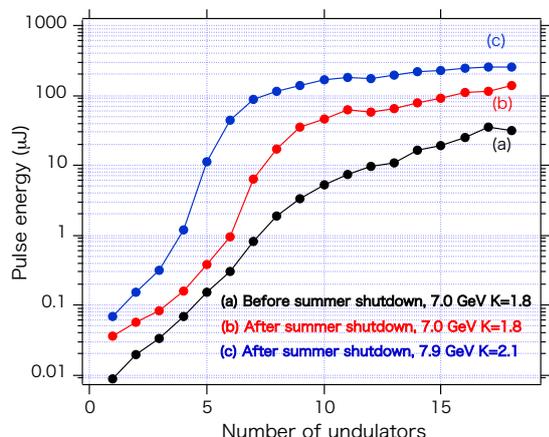


図3：夏期停止期間前後のゲインカーブ、(a)停止期間前（ビームエネルギー7.0 GeV、アンジュレータ K 値 1.8）、(b)停止期間後（7.0 GeV、K=1.8）、(c)停止期間後（7.9 GeV、K=2.1）。光エネルギーはいずれも 10 keV。

パルス出力が交換前の 6 割程度しか得られず、抜本的なパラメータの再調整が必要となった。

投影エミッタンスやバンチ圧縮の調整を行っても、パルス出力が戻らなかったため、最終的に電子銃下流の chopper のコリメータ径を $\phi 5 \text{ mm}$ から $\phi 4 \text{ mm}$ に狭めた。SACLA では、電子銃カソードから約 $4 \mu \text{ sec}$ の電子ビームを出し、直下流にある高速 chopper で中心付近 1 nsec 分を切り出して使っている。また時間方向の切り出しと同時に、chopper 出口の円形コリメータでカソード端部から放出された電子を落とし、横方向のビーム整形も行っている。カソード端部からの電子は、空間電化効果により非線形に発散しているため、スライスエミッタンス悪化の要因となる。 $\phi 5 \text{ mm}$ 円形コリメータを用いた場合約 30 % の電荷が削られるが、これを $\phi 4 \text{ mm}$ にしてスライスエミッタンスが更に小さくなるように加速器の調整を行った。この調整により、バンチ電荷量は 280 pC から 150 pC 程度に減少したものの、パルス出力をほぼカソード交換前のレベルに戻すことができた。

カソード交換前は、加速管の放電頻度を下げるため、電子ビームエネルギー 7 GeV で主に調整運転を行ってきた。しかし、ほぼ 1 年強の運転と加速管 conditioning を経て、加速管の放電頻度が下がってきたため、2012 年に入ってからビームエネルギーを最大 8.4 GeV まで上げて運転を行った。ビームエネルギーを上げれば、同じ光エネルギーに対するアンジュレータ K 値を大きくすることができ、結果として FEL のパルス出力を上げることができる。図 3 (c) は、カソード交換後ビームエネルギーを 7.9 GeV まで上げ、アンジュレータ K 値をほぼ最大の 2.1 に設定した時のゲインカーブである。ビームエネルギーと K 値を上げることにより、 10 keV で約 2 倍のパルス出力 $250 \mu \text{ J}$ が得られた。

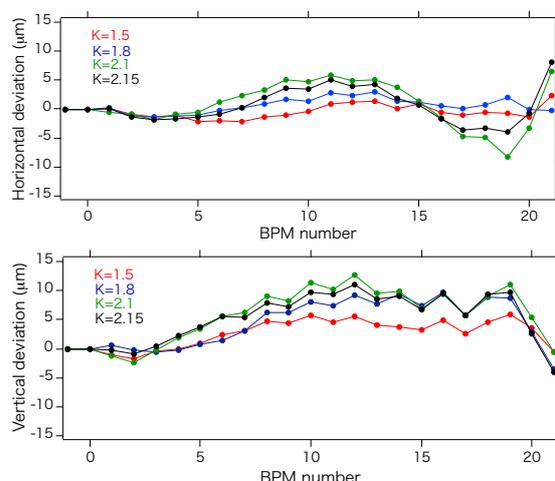


図4：アンジュレータギャップ変化に対する電子ビーム軌道補正後の水平方向（上図）と垂直方向（下図）の軌道変位。ギャップ 10 mm 時の軌道を基準に全 18 台のアンジュレータギャップを変えて測定、K=2.15 は最小ギャップ 3.5 mm に対応。

4. アンジュレータ部軌道補正テーブルの整備

2012 年 2 月のビーム調整では、3 月からのユーザー供用開始に向け、アンジュレータギャップ変更に伴う電子ビーム軌道補正ステアリングテーブルの作成を行った。可変アンジュレータギャップは、これまで FLASH や LCLS など他の短波長 FEL 施設では例がなく、SACLA の大きな特長の一つである。アンジュレータ上下流端に設置した 2 台のステアリングの feed-forward テーブルによる軌道補正は、既に蓄積リング放射光施設アンジュレータにおいて確立された手法であり、要求精度自体も $1 \mu \text{ rad}$ 程度とそれほど大差ない。しかし決定的に違うのは、軌道補正の精度が悪いと、放射光施設の場合他のビームラインを含め若干光軸が動く程度であるのに対し、FEL の場合光の出力が大きく減少してしまう点である。

電子バンチが同じ平衡軌道を周回する蓄積リングと違い線形加速器の場合、各電子バンチの初期軌道のばらつきが大きいいため、アンジュレータギャップ変化に伴う軌道変位を精度よく測定するのは容易ではない。また SACLA で使用している RF cavity 型 BPM は、 $1 \mu \text{ m}$ 以下の高分解能で使用する場合、ダイナミックレンジが $\pm 100 \mu \text{ m}$ 程度に限られてしまう。

補正テーブル作成では、まず 18 台のアンジュレータ部への電子ビームの初期入射軌道を、 10 m のドリフト区間を挟んで設置された 2 台の BPM を用いて正確に測定し決定する。ドリフト区間の真空ダクトには、環境磁場によるビーム偏向を防ぐため磁

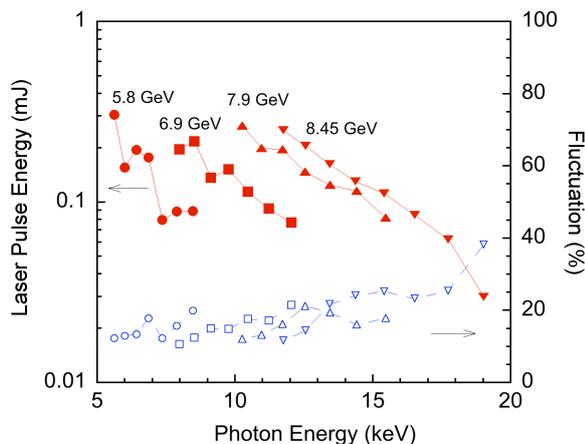


図5：SACLA のパルスエネルギーと光エネルギーの範囲。4つのビームエネルギーにおいて、アンジュレータ K 値を 1.5 から 2.1 まで変化させて測定。右軸は各光エネルギーにおけるパルス強度変動 (σ)。

気シールドが巻かれており、環境磁場を 1/100 以下に抑えている^[4]。測定した入射軌道に対しては、軌道のドリフトを抑えるため、数秒周期の軌道フィードバックを用いて安定化させる。

次に、実際にアンジュレータギャップを変化させビーム軌道を測定するが、ギャップ変化に対応した軌道変位のみを抽出するために、線形転送行列で計算した入射軌道の变位分を測定値から差し引く。また入射軌道の变位が大きいデータを無視し、10~100 回程度の平均化を行うことによって、ギャップ変化に伴う軌道変位をサブミクロンの分解能で測定することができる。各アンジュレータのギャップを 1 台ずつ変えて測定した軌道変位を、当該アンジュレータ上下流 2 台のステアリングを使って補正し、このときのステアリング電流をギャップに対してテーブル化することで補正テーブルが完成する。これを 18 台のアンジュレータについて行った。

図4はギャップ 10 mm 時の軌道を基準とし、全 18 台のアンジュレータギャップを各 K 値に設定したときの軌道変位である。アンジュレータ 1 台のギャップ変更に伴う軌道変位は、補正テーブルによって $\pm 2\mu\text{m}$ 程度に収まっているが、18 台のアンジュレータギャップ全てを同時に変えたと、図4に示すようにまだ $10\mu\text{m}$ 程度の軌道変位が残っている。

図5は、現状 SACLA がカバーしている光のエネルギー範囲とパルス出力をプロットしたものである。電子ビームエネルギーとアンジュレータギャップを変えることにより、概ね 5~15 keV の範囲で $100\mu\text{J}$ を超える出力が得られている。

5. SACLA 運転の現状

2012 年度は 7000 時間の運転が予定され、約半分がユーザー実験、残り半分が施設側の調整運転に割り当てられている。ビームエネルギーが高くなると

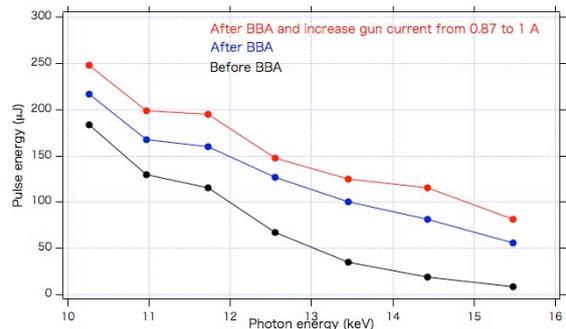


図6：アンジュレータ部電子軌道、および電子銃カソード電流調整前後の FEL パルス出力。(黒)調整前、(青)放射光光軸を用いた軌道調整後、(赤)軌道およびカソード電流調整後の各パルス出力。パルス出力はアンジュレータ K 値を 1.5 から 2.1 まで変化させて測定、ビームエネルギーは 7.9 GeV。

RF の放電がまだ若干増加するものの、ユーザータイムにおける FEL の availability は 90~95%と、加速器の運転は概ね順調である。パルスエネルギーの変動は 10~20% (σ)、光エネルギーの安定性は 3×10^{-4} (σ) 程度である。

光エネルギーの調整は、前述の軌道補正テーブルを使うことでユーザー自身がアンジュレータギャップを変えて行うことができ、変更に必要な時間は数秒である。光エネルギーを大きく変える場合は、運転員が BC3 下流の RF を調整することでビームエネルギーを変えて行うが、現状 10 分程度かかっている。

アンジュレータ部での電子軌道の直線性は、FEL 増幅時の電子密度変調の維持や、光と電子のオーバーラップを保つ意味で非常に重要である。建屋完成から 2 年以上経過し、床面の変化は小さくなっているものの、アンジュレータホールではまだ 2 ヶ月で $50\mu\text{m}$ 程度の床レベルの変動が観測されている。このため 2 週間に一度の加速器調整時間に、各アンジュレータからの自発放射光光軸を用いた電子ビーム軌道の調整を行っている。また電子銃カソードのエミッション電流についても、徐々に減少する傾向があるため、1 ヶ月の 1 回程度カソードヒータを調節することで、エミッション電流を 1 A に保っている。

図6は、アンジュレータ部の電子軌道調整および電子銃カソード電流調整前後での、FEL パルス出力を比較したものである。図6ではビームエネルギーを 7.9 GeV に固定し、アンジュレータ K 値を 1.5 から 2.1 まで変化させて、各光エネルギーにおけるパルスエネルギーを測定している。図6では、調整前 0.87 A だった電子銃カソード電流を、カソード温度を上げることにより定格の 1 A まで戻している。図6から、アンジュレータ部電子軌道などの定期的な調整が現状まだ必要であることがわかる。

6. 今後の予定

2012年3月のユーザー実験供用以来、SACLAは重大なトラブルもなく順調に稼働している。ただビームエンベロップのマッチングやバンチ圧縮高次項の補正については、まだ完全に制御しきれておらず、これらの改善は今後の課題である^[5]。光エネルギー範囲やパルスエネルギーの増強については、ビームエネルギーとアンジュレータK値の増強を今後更に行っていく予定である。また、SASEの欠点であるパルス毎のスペクトルと時間構造の変動を抑制するため、self-seed型FELの開発を今年度から開始した^[6]。

SACLA アンジュレータホールには、最終的に5本のアンジュレータビームラインの設置が可能である。電子ビームを振り分ければ、ビームライン当たりのパルス繰り返しは落ちるものの、擬似的に同時に複数のユーザー実験が行える。電子ビーム振り分けシステムについては、2012年度から開発を始めている。節電要請などから現状10 Hzに抑えているパルス繰り返しについても、定格60 Hzでの運転に向け徐々に上げていく予定である。また低光エネルギー領域の光源として、SACLAのプロトタイプと

して様々な開発を行ってきたSCSS試験加速器を、SACLA BL1上流のスペースに移設し、最大ビームエネルギー1.4 GeV程度の軟X線光源用加速器として整備する計画を、3年後の稼働を目指し進めている^[7]。

参考文献

- [1] T. Ishikawa, et al., “A Compact X-ray Free-electron Laser Emitting in the Sub-angstrom Region”, *Nature Photonics*, DOI: 10.1038/NPHOTON.2012.141.
- [2] <http://xfel.riken.jp>.
- [3] T.Hara, et al., “SACLA 加速器のビームコミッションング”, *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tsukuba, Aug. 1-3, p.55, 2011.
- [4] H.Aoyagi, et al., “SACLA 挿入光源入口部の地磁気シールド”, *Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Tsukuba, Aug. 1-3, p.1379, 2011.
- [5] K.Togawa, et al., “SACLA における電子バンチ圧縮高次非線形補正によるレーザー高出力化”, in these proceedings.
- [6] T. Tanaka, et al., “SACLA における光源性能評価と光源高度化”, in these proceedings.
- [7] H. Tanaka, “X線自由電子レーザーSACLAの運転状況と今後の高度化”, in these proceedings.