

BEAM COMMISSIONING OF THE SACLA ACCELERATOR

Toru Hara^{#A)}, Yutaka Kano^{B)}, Yasuyuki Tajiri^{B)}, Shinichiro Tanaka^{B)}, Taichi Hasegawa^{B)}, Takuya Morinaga^{B)},
Ryo Yamamoto^{B)}, Kazuaki Togawa^{A)}, Hitoshi Tanaka^{A)},

^{A)} RIKEN SPring-8 Center/XFEL Research and Development Division

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

^{B)} SPring-8 Service Co., Ltd.

1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno-shi, Hyogo 679-5165

Abstract

The beam commissioning of the X-ray FEL facility of SPring-8, which is named SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free-electron LASer), has been started since February 2011. The position and energy of the electron beam show excellent stability and the fault rate of the RF system is currently decreased to one per a half-hour. The beam tuning was started from the injector, and then proceeded to bunch compression and beam envelope matching. After the orbit alignment at the undulator section, the first lasing was obtained in June 2011 at the wavelength of 0.12 nm. The commissioning status of the SACLA accelerator is reported.

SACLA 加速器のビームコミッショニング

1. はじめに

SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free-electron LASer) と命名された SPring-8 X 線自由電子レーザー施設は、2011年2月下旬よりビーム運転を開始し、およそ1ヶ月で8 GeV 電子ビームからのアンジュレータ自発放射光観測に成功した。ビーム運転と平行してモニター系の立ち上げ、運転制御用ソフトなどのバグ出しと改良を行い、これらがほぼ完了した4月上旬からレーザー発振に向けて本格的なビーム調整を開始、6月上旬に0.12 nmのレーザー発振を達成した[1]。本稿では SACLA 線形加速器のビームコミッショニングについて報告する。

2. SACLA 加速器の概要

図1に SACLA 線形加速器の概要を示す。SACLA 入射部には、安定性とメンテナンスの容易さから RF 光陰極型電子銃ではなく、500 kV パルス熱電子銃を採用している。また、周期長18 mmの短周期真空封止アンジュレータを使用することで X 線 FEL に必要な電子ビームエネルギーを下げ、更に35-40 MV/mの高加速電界 C-band 加速管を採用することによって、施設の重要なコンセプトであるコンパクト化を実現している。

熱電子銃からのビーム電流は1 A程度と低いため、速度変調バンチ圧縮と3段の磁気バンチ圧縮器 (BC) を用いて、電子バンチ長を約1/3000に圧縮しなければならない。このバンチ圧縮率は、RF 光陰極電子銃に比べ約1桁厳しい要求である。最終バンチ圧縮を行う BC3 下流には、バンチ長を測定するための RF deflector を設置した。また各 BC でのバンチ圧縮が確認できるよう、BC2 と BC3 にはシケインをバイパスしてストレートに電子ビームを通せる

よう、ビームパイプが設置されている。

放射光施設と比較して、XFEL のアンジュレータ磁場には非常に高い精度が要求されるため、電子ビーム照射による減磁には細心の注意を払っている。SPring-8 アンジュレータに対する放射線減磁試験のデータから評価すると、XFEL アンジュレータ部で許容できるビームロス量は電子バンチ電荷量の 10^{-6} である[2]。SACLA 加速器ではなるべくビームハローを除去するとともに、高加速電界で動作する C-band 加速管からの暗電流をカットするため、主加速途中とアンジュレータ上流の2カ所にシケインを設置した。また、光ファイバーを用いたロスモニターや、ダイヤモンドブレードを用いたハローモニターをアンジュレータ部に設置し、電子ビームロスを監視している[3]。

ビームラインは最終的に5本建設する予定であるが、コミッショニングの時点では図1のBL3とBL1の2本を使用し、XFEL 用アンジュレータはBL3に設置されている。

3. 入射部の調整

ビームコミッショニングでまず最初に行ったのが入射部の調整である。SACLA 入射部は、500 kV 熱電子銃と238 MHz バンチャー、476 MHz ブースターの各空洞、および L-band APS 定在波加速管で構成され、横方向のビーム収束系には、離散的に配置された鉄ヨーク付磁気レンズ (ML) を使用している[4]。基本的な機器配置は SCSS 試験加速器と同じであるが、速度変調バンチ圧縮過程の非線形性を補正するため、L-band 補正空洞をブースター下流に設置し、またビーム捕捉効率を上げるため、APS 加速管の周波数を S から L バンドに下げている。

ビーム調整は、まず電子銃のエミッタンスが設計値の1 mm-mrad程度であることをスリットスキャンで確認した後、各 RF 空洞と ML のビーム軸出しを

[#] toru@spring8.or.jp

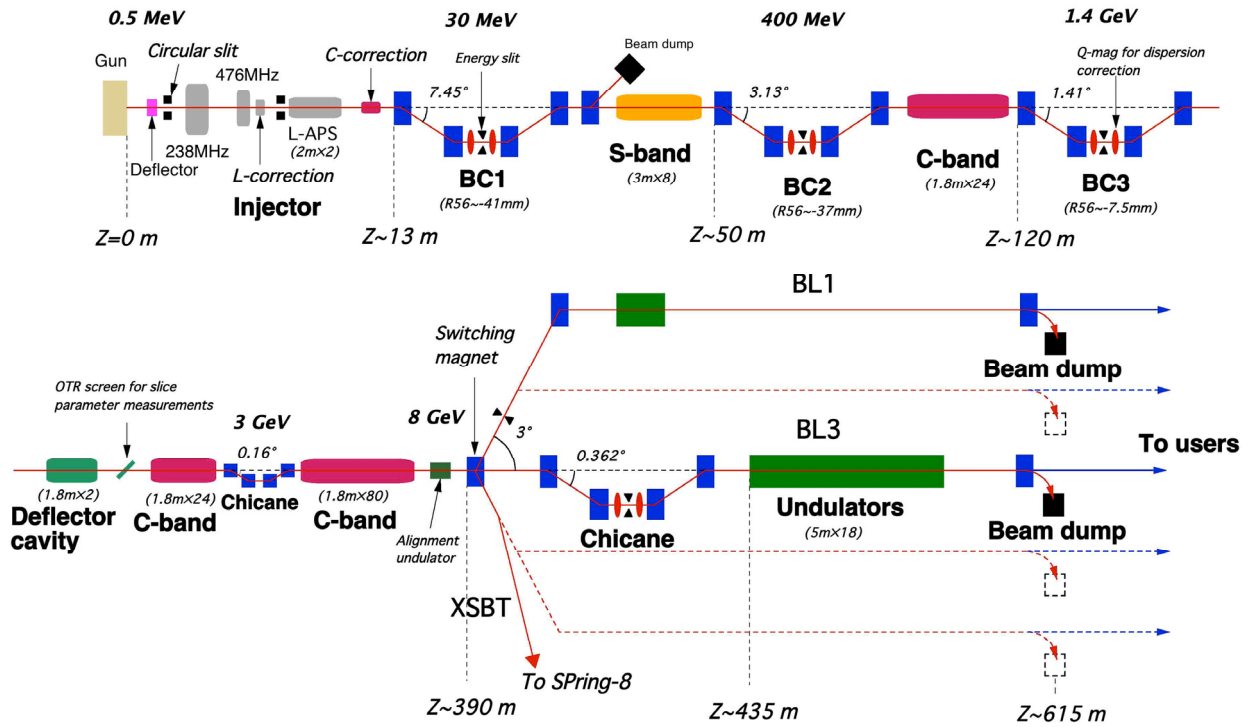


図 1 : SACLA 加速器の概要

行った[5]。RF 位相は、ビーム誘起法 (RF off 時に電子ビームが RF 空洞に誘起する電磁場の位相を測定) とマイクロ波検出器 (波長計) を用いて測定し、設計位相にセットする[6]。

SACLA 入射部の前半はバンチ長が長く、ビームエネルギーが 1 MeV 以下と低いため、環境磁場によるビームの偏向をステアリングで補正するとビーム軌道が蛇行し、精度よくビームの軸出しを行うのは難しいことが SCSS 試験加速器の経験から予想された。そこで SACLA 入射部では、まず建屋鉄筋の消磁や真空ゲージの磁気シールド等を行い、環境磁場分布を一様にした上で、電子銃から L-APS 一台目まで約 7 m の範囲を空芯コイルで覆い、地磁気補正を実施した[7]。その結果、SCSS 試験加速器入射部に比べ、ステアリングによる軌道補正量を 1/3 程度に減少させることができた。

4. バンチ圧縮の調整

SACLA では、電子銃下流の高速 chopper で切り出した 1 A-1 ns の電子バンチを入射部の速度変調圧縮で約 20 倍、更に磁気バンチ圧縮器 3 台で約 150 倍圧縮し、最終的にピーク電流を 3 kA まで上げる必要がある。各加速管の軸出し後、RF 位相と BC の R56 を設計値にセットし、BC3 下流の RF deflector でバンチ形状を測定しながら、補正空洞等のパラメータを調整する[8, 9]。

RF deflector は、ストリークカメラのようにバンチを垂直方向に掃引することにより、縦方向 (z 方向) の分布を垂直方向に射影する。RAIDEN と命名された SACLA の RF deflector は、新たに設計した空

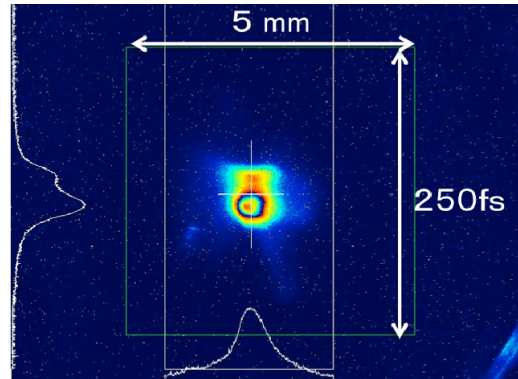


図 2 : FEL 出力 40 μ J 時のバンチ圧縮後の電子バンチ形状 (電荷量 100 pC)

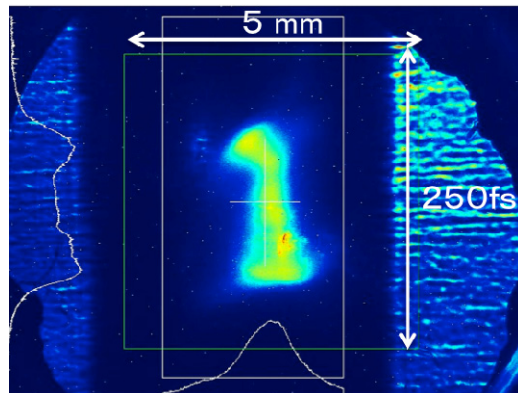


図 3 : 設計パラメータでバンチ圧縮した電子バンチ形状 (FEL 出力 1 μ J、電荷量 400 pC)

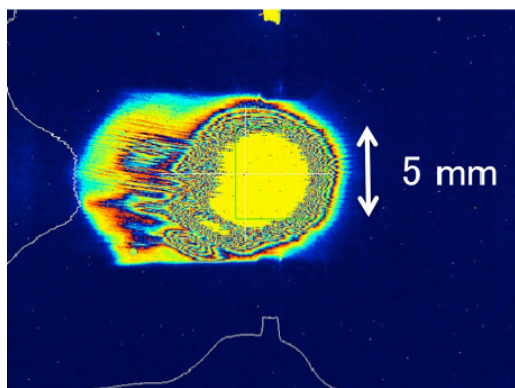


図4：BC3OTR スクリーンで観測されたコヒーレント OTR 光

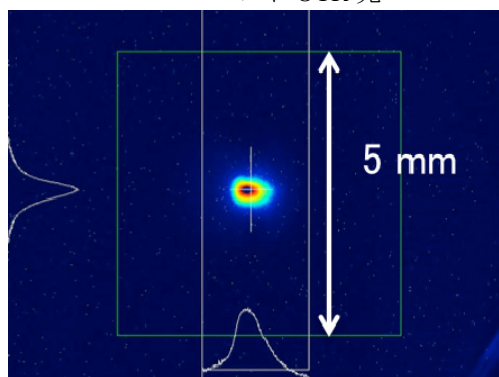


図5：BC3 下流のマスク付き YAG スクリーンで観測したビームプロファイル

洞形状を採用している[10]。主加速部と同じ C-band で動作するため、クライストロンなどの RF 機器を共通化することができる。

ビーム調整の結果、FEL 出力 $40 \mu\text{J}$ が得られたときの RF deflector で測定した電子バンチ形状を図2に示す。このときの RF 位相は、設計値に対して L-band APS で約 15° 、C-band 補正空洞で約 -30° ずれており、また BC1 シケインのエネルギーアパーチャーを絞っているため、バンチ電荷量は 100 pC 程度である。

一方、設計値の RF パラメータでバンチ圧縮を行った結果を図3に示す。バンチ圧縮に関してはほぼ計算通りの値が得られており、バンチ長は図2よりも長いものの、バンチ電荷量が 400 pC と大きいためピーク電流は図3の方が若干高い。しかしながら FEL は発振するものの、出力が $1 \mu\text{J}$ 程度と図2に比べ大きく下がってしまった。恐らくエミッタンスが悪いものと思われる。

限られたビーム調整時間のなかで、電子バンチの時間-エネルギー位相空間分布やスライスパラメータを測定するところまではまだ至っていない。その結果バンチ圧縮の調整も、FEL 出力のみをモニターとして調整を行っているのが現状である。SACLA 加速器には、RF だけでも非常に多数のパラメータがあり、これらを効率よく最適化するための手法を確立することは、今後早急に解決すべき課題である。

5. ビームエンベロップの調整

バンチ圧縮の調整が完了し RF パラメータを決定した後、ビームエンベロップの調整を行う。エンベロップをきちんと調整し、加速に伴ってビームサイズをダンプさせ、アンジュレータ部 FODO にマッチングさせることは、FEL 発振にとって重要である。

SACLA 加速器では、 $x-x'$ 位相空間で線形加速器のビームエンベロップを取り扱うモデルを構築し、エンベロップの制御に用いている[11]。このモデルは規格化エミッタンスを保存量とすることで、ビームエネルギーが変化する場合でも $x-x'$ 位相空間で symplectic 行列を定義でき、蓄積リングと同じようにエンベロップの転送計算を行うことができる。

エンベロップを制御するためには、Q-scan 等を行って実際の電子ビームの twiss parameter をまず求めなければならない。SCSS 試験加速器の経験から、熱電子銃の電子ビームは非常に滑らかで静かであり、コヒーレント OTR (COTR) の問題は発生しないと考え、SACLA 加速器では OTR スクリーン (ステンレス薄膜) をプロファイルモニターとして設置した。しかしながらこの考えは外れ、特にバンチ圧縮が終了した BC3 下流で著しい COTR が観測されるため、現状 BC3 からアンジュレータにかけての OTR スクリーンは全て使用不能となっている。

BC3 で観測されている COTR の様子を図4に示す。この位置でのビームサイズは 1 mm 以下であり、COTR の発光により、ビーム位置、ビームサイズとも全く測定することができないことがわかる。この問題に対処するため、BC3 下流とアンジュレータ上流にある2カ所の OTR スクリーンを YAG スクリーンに急遽交換し、OTR 放射角の範囲をマスクで覆うことにより COTR を除去してプロファイル計測を行った。BC3 下流に設置したマスク付き YAG スクリーンで測定したビームプロファイルを、図5に示す。図4で観測された COTR はほぼ除去することができ、ビームプロファイルや位置の測定が可能になった。

通常ビームエンベロップの測定には、計測の誤差を減らすため複数のスクリーンを用いるが、今回 YAG スクリーンの数が2台しかないため、加速器各所の複数の四極電磁石の収束力変化に対するレスポンスを1台のスクリーンで測定し、fitting することによって twiss parameter を求めた。またアンジュレータ部については、分光後のアンジュレータ自発光ビームサイズをビームラインで測定することにより、各アンジュレータ光源点における twiss parameter を測定した。

SACLA のビームエンベロップ制御は、 $x-x'$ 位相空間の線形加速器モデルをベースに開発した計算コードと GUI を用いて行っている[12]。ビームエネルギーが低い入射部については、電子ビームを円柱均一ビームと仮定し、空間電荷効果による線形発散力をエンベロップ計算に取り入れている。加速器の任意の場所の twiss parameter を GUI に入力すれば、その値を上下流に伝搬させ、瞬時に加速器全体のエンベロップを計算することができる。また RF やビー

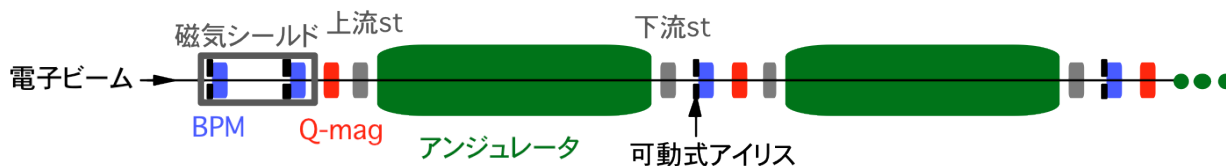


図6：アンジュレータ部の機器配置

ム収束系のパラメータ変更に伴うエンベロップの変化も、ほぼリアルタイムで予測、修正が可能である。

スクリーン光学系の調整やレスポンス関数の確認など、まだ課題は残っているものの、開発した計算コードと GUI を使用することで、アンジュレータ部のビームエンベロップを概ね調整することができている。

6. アンジュレータ部のビーム軌道調整

SACLA BL3には、5 m 長アンジュレータが 18 台設置されている。このアンジュレータ部の電子ビーム軌道は、電子バンチと放射光を重ね、FEL 相互作用によって形成された電子バンチ内密度変調を壊さないよう、直線にしなければならない。要求精度は $\pm 2 \mu\text{m}$ である。

アンジュレータ間に設置した cavity type BPM は、同一のビーム条件であればサブミクロンの分解能がある一方、ダイナミックレンジが $\pm 0.3 \text{ mm}$ 程度しかない。そこで 2 段階に分けて軌道調整を行った。

まずアンジュレータ間にある BPM と四極電磁石 (図6) を、 $\pm 0.1 \text{ mm}$ 程度の精度で直線上に並べるため、ガイド光を用いたアライメントを実施した [13]。アンジュレータ部の BPM には、BPM の電気中心位置に 0.1 mm 径のアイリスを挿入できるようになっている。BPM と四極電磁石を同一の石定盤ステージ上に設置し、お互いの位置関係をワイヤーを用いて計測しておく。あとはガイド光がアイリスを通るようにステージ位置を調整すれば、BPM を直線上に並べることができる。

全長 100 m のアンジュレータ部アライメントのガイド光として可視光レーザーを使うと、回折による拡がり問題になることは容易に想像される。そこで SACLA では、C-band 主加速部終端に設置したアライメントアンジュレータ (図1) からの X 線放射光をガイド光として用いた。

アライメントアンジュレータを用いたアライメントにより、アイリスについては $\pm 30 \mu\text{m}$ の精度で直線上に並べることができたものの、BPM の位置が BBA (Beam Based Alignment) と矛盾する結果となってしまった。挿入時のアイリス位置は大気中で調整していたが、真空中の位置精度に問題がある可能性が残されている。

第2段階のビーム軌道調整では、異なるエネルギーのビームを使った BBA を実施した [14]。ビーム軌道を直線にするためには、各アンジュレータ毎に磁場の 1 次積分 (ビーム角度) と 2 次積分 (ビーム位置) が 0 になるよう、上下流のステアリング電

流値を決定すればよい。即ちこれはアンジュレータ部の dispersion とその傾きを、BPM や四極電磁石位置で 0 にすることと等価である。

各アンジュレータ上下流のステアリング電流を決定するためには、アンジュレータ間におけるビーム軌道の位置と角度の情報が必要である。BPM と四極電磁石の収束力変調を組み合わせることで、異なるエネルギーのビーム位置と角度を測定し、軌道調整を行った。しかしながら調整後の各アンジュレータ放射光光軸は、18 台で一致しない結果となってしまった。この BBA を行うためには、BPM の測定精度が $1 \mu\text{m}$ 程度でなければならないが、BPM 測定値にプロファイル等の電子ビーム条件依存性があるようで、BPM の特性を明らかにするために詳細なビームスタディを今後行っていく必要がある。

現状アンジュレータ部の電子軌道は、18 台の各アンジュレータから出る放射光光軸をビームラインで測定し、これらが一致するように上流ステアリングのみを使って軌道調整している。この条件で FEL 発振が得られているものの、 $100 \mu\text{m}$ オーダーの dispersion が残っており、まだ軌道が直線になっていないものと思われる。

7. 加速器の安定性と再現性

SACLA 加速器では、RF のコンディショニングをビームコミッション前の 2010 年 10 月から行ってきた。加速器全体の RF 系トリップは現状 1 時間に 2 回程度と、ビーム調整に支障のない頻度まで減少している [15]。またビームエネルギーや軌道についても、タイミングシステムや各種フィードバックによる安定化の結果、設計要求を十分満たす安定性を達成している [16]。

加速器運転の再現性を確保するため、SACLA 加速器の運転パラメータはデータベースを使って一括管理され、保存したパラメータセットをロードすることで、過去の運転状態を容易に再現できる。FEL 発振も、数日のタイムスパンであれば同じ加速器パラメータをロードし、10 分程度の微調整でほぼ同じ出力が得られている。また加速器の状態を変えずに運転すれば、1 日程度は安定に FEL 発振を持続させることができている。

8. まとめ

SACLA 加速器のハードウェアは安定に動いており、期待した安定性がほぼ達成されている。5 ヶ月余のビームコミッション期間中に、制御系のバグだしやモニター系の立ち上げ、ビームラインの調

整等を、レーザー発振に向けた調整と同時に行ってきたため、加速器の調整はまだ十分ではない。現状アンジュレータ後半部の FEL ゲインが若干低く、また電子バンチ電荷の一部しか発振してない兆候も見られる。2012年3月の供用開始に向け、SACLAのフルパフォーマンスが出せるよう更に調整を行っていく予定である。

参考文献

- [1] H.Tanaka, et al.,“動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況”, in these proceedings
- [2] T.Bizen, et al., NUCL. INSTRUM. METH. A, vol.574, p.401 (2007)
- [3] H.Aoyagi, et al., “IMPROVEMENT IN HIGH-FREQUENCY PROPERTIES OF BEAM HALO MONITOR USING DIMOND DETECTORS FOR XFEL/SPring-8”, Proceedings of FEL 2010, Malmö, August 2010, p.700 (2010)
- [4] T.Shintake, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol.12, p.070701 (2009)
- [5] K.Togawa, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol.10, p.020703 (2007)
- [6] H.Maesaka, et al.,“SCSS 試験加速器におけるコヒーレント遷移放射を使ったバンチ長測定のためのマイクロ波波長計の開発”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sendai, Aug. 2-4, 2006
- [7] T.Hasegawa, et al., “SACLA 入射部における環境磁場の一様化対策”, in these proceedings
- [8] K.Togawa, et al.,“X 線自由電子レーザー施設 SACLA における電子ビームの圧縮特性”, in these proceedings
- [9] K.Togawa, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams, vol.12, p.080706 (2009)
- [10] E.Ego, et al.,“X 線自由電子レーザー施設 SACLA における時間構造診断用高電界 C バンドデフレクターの開発”, in these proceedings
- [11] T.Hara, et al., NUCL. INSTRUM. METH. A, vol.624, p.65 (2010)
- [12] Y.Tajiri, et al.,“SACLA における線形加速器模型に基づくビームエンベロープ制御”, in these proceedings
- [13] T.Morinaga, et al.,“アライメントアンジュレータを用いた BPM と四極電磁石のアライメント”, in these proceedings
- [14] R.Yamamoto, et al.,“SACLA アンジュレータセクションにおける Beam Based Alignment 法について”, in these proceedings
- [15] K.Shirasawa, et al.,“SACLA 主加速器の運転状況”, in these proceedings
- [16] Y.Otake, et al.,“SACLA の加速器構成機器の試運転と性能主加速器の運転状況”, in these proceedings