

BUNCH COMPRESSION PROPERTIES OF AN ELECTRON BEAM AT SACLA

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

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo 678-5148, Japan

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

2-23-1 Koto, Kamigori, Hyogo 678-1205, Japan

Abstract

The x-ray free electron laser facility, which was named as SACLA, has been constructed at SPring-8, and the first lasing was achieved in June 7, 2011. In order to produce a stable x-ray laser light, an excellent electron beam with low emittance and high peak current must be produced and injected to a long undulator line. To make such an electron beam, SACLA adopts multi-stage bunch compression system. At the low-energy injector, an electron beam that is generated by the CeB₆ thermionic gun is compressed by velocity bunching process by means of multi-frequency buncher cavities. At the following high energy linac, the electron beam is gradually compressed by three magnetic bunch compressors. Finally, a high peak current of a few kA was achieved at the end of the final bunch compressor. In this paper, preliminary results of the bunch compression properties at SACLA are described and future improvements of the beam tuning are discussed.

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

1. はじめに

SPring-8 キャンパスにおいて建設が進められていた X線自由電子レーザー研究施設は、昨年度末に予定通り完成し、本施設の特徴を表した名称：SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsEr) と命名された。2011 年 2 月 21 日よりビームコミッションを開始し、加速器における綿密な電子ビームの調整、およびアンジュレータビームラインの精密なアライメントとパラメータ調整により、約 3 カ月後の 6 月 7 日に波長 1.2 Å のレーザー発振に成功した^[1,2]。

X 線領域の安定したレーザー光を生成するためには、エミッタンスが小さくてピーク電流が高い、極めて質の良い電子ビームをアンジュレータに入射す

ることが要求される。これを実現するために、SACLA では多段型のバンチ圧縮方式を採用している^[3,4]。電子入射器より、加速空洞の RF 位相などの圧縮パラメータを段階的に調整し、レーザー増幅に必要な高密度ビームを達成することができた。

本稿では、X 線自由電子レーザー施設 SACLA における電子ビームのバンチ圧縮特性について述べる。

2. SACLA におけるバンチ圧縮の方式

SACLA における電子銃から最終バンチ圧縮器までのレイアウトを図 1 に示す。CeB₆ 電子銃で生成したピーク電流 1 A のマイクロ秒電子ビームを Chopper によって時間幅 1 ns の短バンチに切り出し、バンチャー部に入射する。入射器の低エネルギー領域では、238 MHz バンチャー空洞、476 MHz ブース

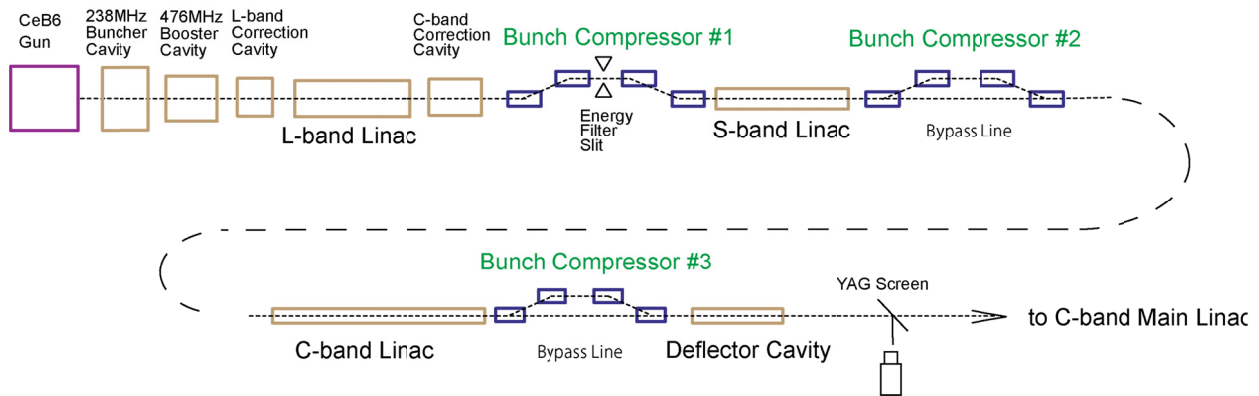


図 1 : X 線自由電子レーザー SACLA におけるバンチ圧縮システムのレイアウト。

[#] togawa@spring8.or.jp

ター空洞、L-band 補正空洞を用いた速度変調バンチングにより、ピーク電流を 20 A にまでバンチ圧縮する。続いて、L-band APS 加速管と C-band 補正空洞により、電子ビームを約 30 MeV まで加速するとともに、線形のエネルギーチャープを与えて、第 1 磁気バンチ圧縮器 (BC1) に入射し、バンチ長を 1/3 程度に圧縮する。次に S-band 加速管において約 400 MeV までオフレスト加速して、第 2 磁気バンチ圧縮器 (BC2) でバンチ長を 1/10 に圧縮する。最後に、C-band 加速管において約 1.4 GeV までオフレスト加速して、第 3 磁気バンチ圧縮器 (BC3) でバンチ長をさらに 1/5 に圧縮し、最終的に 3 kA レベルの高ピーク電流のビームを作り出す^[5]。

表 1、2 にレーザー増幅を達成した時の RF パラメータとバンチ圧縮器のパラメータを示す。

表 1 : SACLA におけるレーザー増幅時の RF パラメータの一例。

Gun Voltage	500 kV
238 MHz Buncher Cavity Amplitude	200 kV
238 MHz Buncher Cavity Phase	-121 deg.
476 MHz Booster Cavity Amplitude	800 kV
476 MHz Booster Cavity Phase	-8 deg.
L-band Correction Cavity Amplitude	140 kV
L-band Correction Cavity Phase	-174 deg.
L-band APS Accelerator Amplitude	40 MV
L-band APS Accelerator Phase	-15 deg.
C-band Correction Cavity Amplitude	4.3 MV
C-band Correction Cavity Phase	-152 deg.
S-band Accelerator Amplitude	417 MV
S-band Accelerator Phase	-22 deg.
C-band Accelerator Amplitude	1385 MV
C-band Accelerator Phase	-49 deg.

表 2 : SACLA のバンチ圧縮器のパラメータ。

	Momentum Compaction (R_{56})	Dispersion (η)
BC1	-41 mm	170 mm
BC2	-37 mm	345 mm
BC3	-7.5 mm	155 mm

3. 縦方向バンチプロファイルの測定

3.1 電子入射器

電子入射器における縦方向バンチプロファイルは、BC1 のエネルギー分散部で測定したエネルギープロ

ファイルから間接的に求めた。分散部の水平座標 (Δx) と時間座標 (Δt) の関係は次式で与えられる。

$$\Delta t = \frac{E}{c \cdot \eta \cdot dE/dz} \Delta x$$

ここで、 E は電子ビームのエネルギー、 dE/dz はエネルギーチャープ、 η は分散部のディスパージョン、 c は光速である。バンチャー部終端のエネルギーは約 1 MeV でエネルギーチャープは無視出来るとして、表 1 に示した L-band APS 加速管と C-band 補正加速管の RF パラメータから Δx と Δt の換算係数を求めた。

図 2 に縦方向バンチプロファイルを示す。実線が、分散部に設置したエネルギーフィルタースリットを全開にした時のデータで、入射器出口の縦方向プロファイルを表す。実際のビーム調整では、ハローの無い綺麗な射影空間プロファイルを得るために、スリット開口幅を 5.4 mm まで閉じて先頭と後尾のバンチ成分を除去している。点線がスリットを閉じたときのデータであり、入射器出口の実質的な縦方向バンチプロファイルを表す。ビームの総電荷量は 0.1 nC/bunch である。

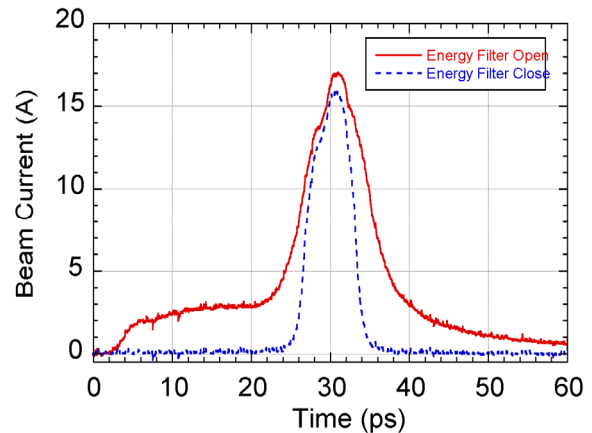


図 2 : 電子入射器出口の縦方向バンチプロファイル。

3.2 磁気バンチ圧縮器

磁気バンチ圧縮器によるバンチ圧縮後の縦方向バンチプロファイルは、BC3 直下流に設置された RF Deflector で測定した。RF Deflector では、垂直方向の RF キックにより電子ビームが掃引されるため、バンチの時間構造を直接観測することが出来る。掃引した垂直座標 (Δy) と時間座標 (Δt) の関係は次式で与えられる。

$$\Delta t = \frac{P_z}{e \cdot k_c \cdot V_y \cdot L} \Delta x$$

ここで、 P_z はビームの進行方向の運動量、 k_c は Deflector 空洞の RF 波数、 V_y は Deflector 空洞の垂直方向の RF 電圧、 L は Deflector 空洞からスクリーンまでの距離である。Deflector 空洞についての詳細は文献 [6, 7] を参照されたい。

BC1 における圧縮後の縦方向バンチプロファイル

は、BC2 と BC3 を直線にバイパスして測定した。同様に、BC2 における圧縮後の縦方向プロファイルは、BC3 をバイパスして測定した。BC1 圧縮後はバンチ長がピコ秒領域であるので、測定レンジを広げる必要がある。そのために、Deflector 空洞の RF 出力を下げて掃引キック量を小さくし、プロファイルを2枚のスクリーン画面に分割して測定した。

各バンチ圧縮器における圧縮後の縦方向バンチプロファイルを図3、4、5にそれぞれ示す。

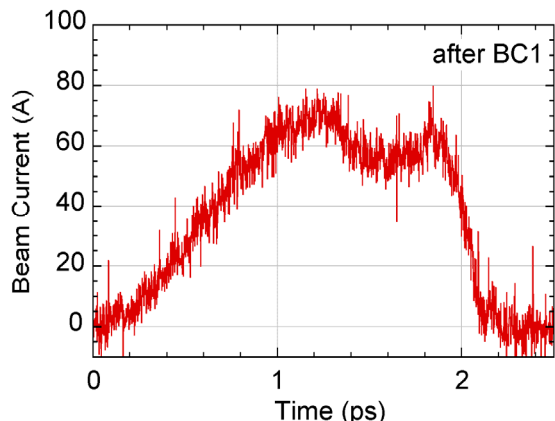


図3：第1バンチ圧縮器出口の縦方向バンチプロファイル。

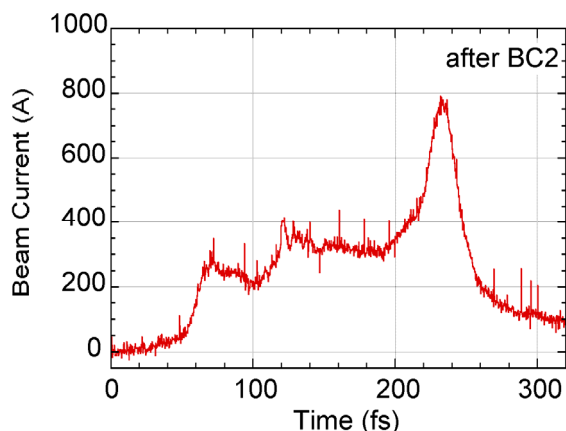


図4：第2バンチ圧縮器出口の縦方向バンチプロファイル。

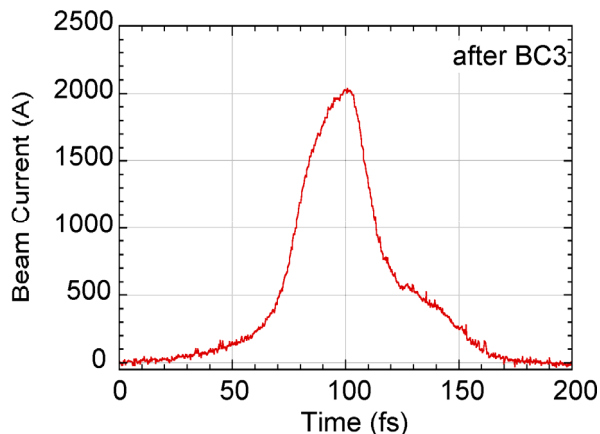


図5：第3バンチ圧縮器出口の縦方向バンチプロファイル。

4. 考察と今後の課題

SACLA における X 線レーザー発振の成功により、多段バンチ圧縮システムによる低エミッタンス高密度電子ビーム生成の方式が有効であることが、実際に証明された。しかしながら、今回行った一連の縦方向バンチプロファイルの測定により、改善すべき課題が明らかとなった。

BC1 および BC2 圧縮後のプロファイルを見ると、バンチ構造がシングルピークとなっておらず、特に BC2 圧縮後では、かなり複雑な構造になっていることが明確である。原因は、電子ビーム全体に渡ってエネルギーチャープが線形になっておらず、圧縮の過程で部分的にオーババンチングを生じているものと推測される。オーババンチングはエミッタンスの悪化を招く原因となるので、これを回避するようにしなければならない。エネルギーチャープの線形性を制御する装置が、入射器に備えられている L-band 補正空洞と C-band 補正空洞なのであるが、これらの RF パラメータが最適化されていなかった可能性がある。今後のビーム調整では、各圧縮器における縦方向プロファイルをモニターし、オーババンチングを生じさせないよう補正空洞等の RF パラメータの調整を行う予定である。

BC3 圧縮後のプロファイルより、レーザー強度を最大化する時のピーク電流が 2 kA 程度と、設計値の 3 kA より低い値であることが分かった。ピーク電流が 3 kA になるように RF パラメータを調整して、バンチ圧縮を強くすることは可能であるが、その状態では逆にレーザー強度が大幅に減少してしまうことも明らかとなった。この原因も、オーババンチングによるエミッタンス悪化であると考えられる。バンチ圧縮状態の健全性を確認する為には、より微細なバンチ構造をモニターする必要があるが、現状の分解能は有限のビームサイズによって 10 fs 程度に制限されている。ビームオプティックスの最適化等により測定分解能を向上することも重要な課題である。

参考文献

- [1] RIKEN Press Release, June 7, 2011
- [2] H. Tanaka, “動き始めた X 線自由電子レーザー施設 SACLA の運転状況”, 本学会 Proceedings
- [3] SCSS X-FEL R&D Group, “SCSS X-FEL Conceptual Design Report”, edited by T. Shintake and T. Tanaka (RIKEN Harima Institute/SPring-8, Sayo, Japan, 2004)
- [4] K. Togawa et al., “Electron-bunch compression using a dynamical nonlinearity correction for a compact x-ray free-electron laser”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 12, 080706 (2009)
- [5] T. Hara, et al., “Beam Optics and Parameter Design of the XFEL/SPring-8”, Proceedings of FEL2010, Malmö, Sweden, p.111
- [6] H. Ego, et al., “Design of the Transverse C-band Deflecting Structure for Measurement of Bunch Length in X-FEL”, Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy, p.1098
- [7] H. 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”, 本学会 Proceedings