

DEVELOPMENT OF BUNCH LENGTH MONITORS UTILIZING COHERENT SYNCHROTRON RADIATION AT SACLA II

Chikara Kondo^{A)}, Hirokazu Maesaka^{A)}, Shinichi Matsubara^{B)}, Shinobu Inoue^{C)}, Yuji Otake^{A)}

^{A)} RIKEN, SPring-8 Center XFEL Research and Development Group
1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo JAPAN 679-5148

^{B)} JASRI, 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo JAPAN 679-5198

^{C)} SPring-8 service corporation, 1-20-5, Kouto, Shingu-cho, Tatsuno, Hyogo JAPAN 679-5165

Abstract

In SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA), the peak current of an electron beam should be stabilized within 10% to produce a stable X-ray laser. To maintain the peak current, the bunch lengths of the electron beam passing through a bunch compressor chicane (BC) should be monitored, because the peak current is directly associated with the bunch length, when the charge amount of the electron beam is constant. Demanded measurement bunch lengths are a few ps (FWHM) at BC1, a few 100 fs at BC2, and a few 10 fs at BC3, respectively. The monitored results should be fed back into the rf-phase of accelerator structures upstream of the BCs by feedback control. For this reason, we developed simple bunch length monitors utilizing coherent synchrotron radiation (CSR), and already installed into the three BCs. In last year, the sensitivities of the monitors using pyro-electric detectors to bunch length variations were measured, and the sensitivity of the BC2 monitor was only sufficient to realize the peak current stabilization. But the sensitivities of the BC1 and BC3 monitors were not enough to measure proper bunch lengths; at the BC1, a signal-to-noise ratio of the output of the pyro-detector was insufficient, because the CSR at the BC1 had lower frequency components out of the detection band width of the detector and low intensity, and at the BC3, the pyro-detector was insensitive to the bunch length variation, because a silica vacuum viewport placed in front of the detector absorbed the CSR in a THz frequency region. In order to resolve these problems, we installed a pyro-electric detector with high-sensitivity in a sub-THz frequency regime into the BC1, and a crystal-silicon viewing port which has a large transmittance in a THz frequency regime was also installed into the BC3. After these improvements, to measure the sensitivities to the bunch length variations, the outputs of the CSR monitors using the pyro-detectors were observed, while the rf phases of the accelerator structures upstream of the individual BCs were scanned. The result of the measurements indicated that all the CSR monitors enable us to sufficiently measure the bunch length variations with the required accuracies.

SACLA における CSR ビームバンチ長モニタの開発 II

1. 背景および目的

SACLA(SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)では、SASE方式によりX線レーザーを生成しており、これにはピーク電流3kA以上、バンチ幅約30fsという短バンチ、高ピーク電流の電子ビームが必要となる^[1]。このような短バンチ電子ビームは、電子銃において生成された1ns、~1Apeakの電子ビームを、低エネルギー部における速度変調バンチングと、3台のバンチ圧縮用双極電磁石シケイン(BC1,2,3)による約3000倍の高バンチ圧縮によって実現される。また、SASE方式によるFEL発振であ

るため安定したFEL強度を得るには、電子ビームのピーク電流の変動を抑える必要がある。SACLAではピーク電流の変動幅を10%以内に抑えることが要求されており^[2]、それにはバンチ長をフィードバック制御することが有効である。このようなフィードバックシステムには、各BCセクションにおいて圧縮される数psから数10fsという極短バンチ長のビームに対して、そのバンチ長変動を10%以内の精度で測定できる非破壊型バンチ長モニタが必要となる。

我々は、このようなバンチ長モニタとして、コヒーレント放射光(CSR)バンチ長モニタを用いる。

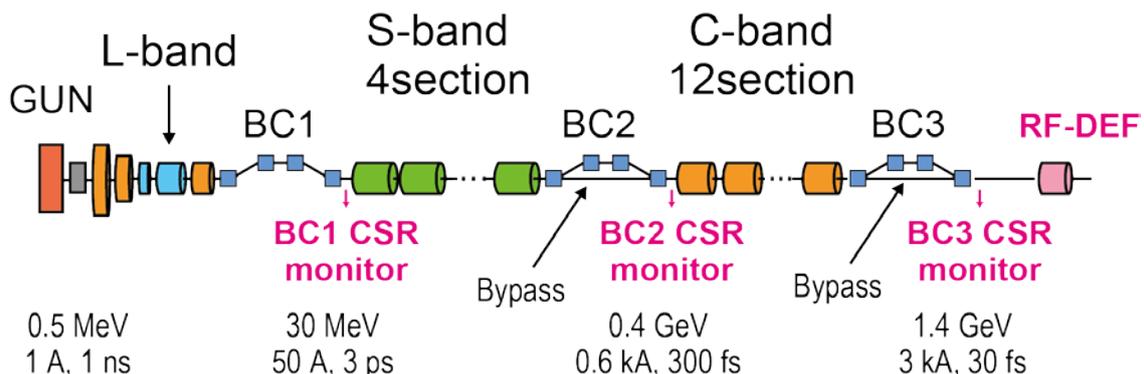


図 1: SACLA 入射部における加速管およびモニタ機器の配置図。

CSR は、電子ビームが偏向電磁石を通過するときに発生する広帯域な放射光のうち、波長がビームのバンチ長より長い周波数成分が、干渉性を帯びた放射光となり、その強度が電子数の自乗で増大する特徴を持つ^[3]。このとき、バンチ長が変動すると CSR の周波数領域も変動し、全光量も変動する。そのため、CSR の強度測定からバンチ長の相対的な変動を知ることができる。SACLA の 3 箇所 BC セクションによって、電子ビームは数 ps から、数 100fs、数 10 fs と段階的に圧縮され、そのバンチ長変動を測定するためには、0.1THz から数 THz のテラヘルツ領域の CSR を測定する必要がある。

我々は、この CSR バンチ長モニタの開発を 2010 年より行っている^[4]。2011 年までには本モニタの SACLA への導入および試験を行った。その結果、BC2 においてはバンチ長の変化に対し、モニタの感度が十分であることが確認できた。一方、BC1 においては、低周波数かつ低強度の CSR に対し検出器信号の SN 比が不十分であったため、より高感度の焦電型検出器を導入した。また、BC3 においては石英製の真空窓によって THz 領域の CSR が吸収されていたため、バンチ長変動に対するモニタの感度が失われていた。そこで、THz 領域の透過率の大きくかつ均一な結晶シリコン製の真空窓を導入した。これらの改良を加えた結果、全 BC 部のモニタにおいて、十分な感度が得られるようになり、バンチ長モニタとして機能することが確認された。

ここでは、その改良の内容および感度評価について述べる。

2. CSR モニタ概要

2.1 装置概要

本装置については、以前の発表^[4]において詳細を述べているので、本節では簡単に概要を述べた後に、前回からの改良点などについて述べる。

本 CSR モニタは、図 2 に示すような屈折型光学系により、BC セクションの第四偏向電磁石部にお

いて発生した CSR 光を、真空内ミラーで反射して真空窓から真空外へ導き、これを反射ミラーとテラヘルツ対応の集光レンズによって焦電素子型検出器に集光し、その光強度を測定するものである。

従来の機器では、3 箇所の CSR モニタのうち、BC2 のモニタのみで、バンチ長変動に対し十分な感度を持つことが確認されていたが、他 2 箇所についてはバンチ長変動を十分な精度で測定できなかった。その原因と改良点を以下に述べる。

2.3 改良点 1：低周波 CSR 光検知用パイロ素子

BC1 の CSR は、BC2,BC3 の CSR に比べて、周波数領域が $\sim 0.1\text{THz}$ 付近と低く、また光強度も 1 桁以上弱いため^[4]、従来の焦電素子型検出器(GENTEC-EO 社 QS2-THZ-BL)^[5]では検出感度が不足し、バンチ長変動を精度よく測定することができなかった。

そこで、0.1 THz 領域の CSR に対しても十分な感度を持つ焦電素子型検出器(フラクシ社:PYD-1E)^[6]を導入した。この素子は、従来よりも数桁高い感度を持ち、更にサブ ms の高速な応答を示す。この検出器を用いることで、BC1 においても十分な SN 比を持つ信号が得られるようになった。

2.4 改良点 2：BC3 のシリコン真空窓

図 2 に示すとおり、本装置の光学系では、ビームライン上で発生した CSR を、真空窓を通過させて検出器まで導く。BC3 の CSR では、バンチ長変動によって強度が大きい周波数領域が 3THz 以上であるが、この領域の THz 光は熔融石英の吸収域であるため、真空窓に吸収されてしまいバンチ長の変動に対するモニタの感度が損なわれていた。

そこで、石英製真空窓を THz 領域において均一な透過率を持つ結晶シリコンを窓材に用いた真空窓に交換した。なお、THz 光の透過率は、結晶シリコンよりもダイヤモンドの方が高いが、今回はコストなどの理由から結晶シリコンを選択した。

3. ビーム実験

各 CSR モニタのバンチ長変動に対する感度を測定するために、電子ビームのバンチ長を変化させながらモニタの出力値の変動を測定した。バンチ長の変化は、各 BC 部の直上流にある各加速管の RF 位相を変化させることで、ビームのエネルギーチャープを変え、BC 部の圧縮を調整することで実現した。

また、BC2,3 においては C-band RF デフレクタ空洞^[7](RF-DEF)によって、時間方向のプロファイル測定することで、バンチ長の絶対値測定を行い、CSR モニタとの比較を行った。

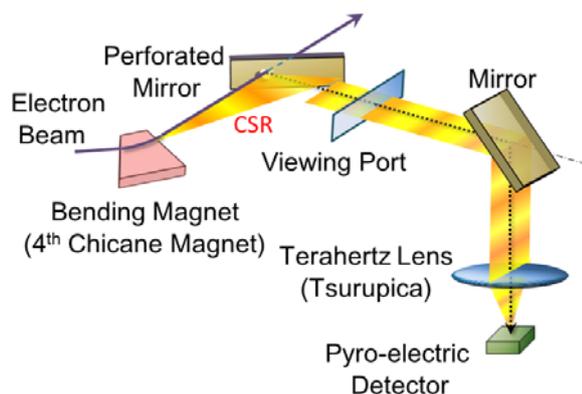


図 2: CSR モニタの概略図

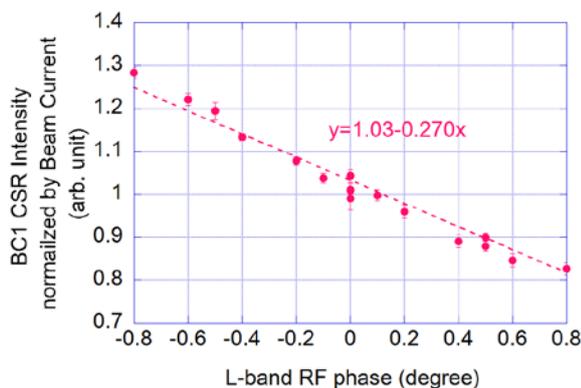


図 3. L-band 加速 RF の位相と CSR 強度。エラーバーは、測定毎のモニタ出力強度のバラつき(標準偏差:約 1%)。

3.1 BC1 CSR モニタの L-band RF 位相依存性

図 3 に、L-band 加速管の RF 位相を、FEL 発振条件付近で $\pm 0.8^\circ$ 変化させ、その時の BC1 CSR モニタ出力の変化を示す。このとき、BC1 の分散部には、電子ビーム切り出し用のスリットが設置されており、RF 位相を変えるとスリットを透過するビーム電荷量も変化するため、CSR の強度も変化する。そこで、電荷量変動の効果を補正するため、CSR モニタの信号強度は、CT で測定したビーム電荷量の自乗を用いて規格化した。

この結果から、RF 位相をクレスト方向(+方向)に変化させたとき、CSR モニタ出力が線形に減少していることが分かる。これは、RF 位相がクレストに近づけると、電子ビームのエネルギーチャープが緩やかになり、BC 部での圧縮は弱くなる。このため、BC 部を通過後のバンチ長は伸び、CSR の高周波成分が弱くなるため、全光量が減少する。

更に、この結果を用いて CSR モニタの感度を次のように評価した。CSR モニタ出力強度の変化率 $\partial V/\partial \theta$ と、出力強度のバラつき(標準偏差) δV を用いると、出力強度のバラつきに対する RF 位相のバラつきは

$$\delta \theta = (\partial V/\partial \theta)^{-1} \delta V \quad (1)$$

で求まる。この位相バラつきは、CSR モニタの出力強度から換算される RF 位相の決定精度であり、これを RF 位相に換算した CSR モニタの感度とした。この感度は、RF 位相をフィードバック制御したときの位相安定度の目安となる。CSR モニタには、この感度が、FEL 強度の安定化に必要な RF 位相の許容変動幅以内であることが要求される。

BC1 CSR モニタでは、強度のバラつきが約 1% であり、また強度の変化率は約 27%/degree であった。これらを式(1)に代入すると、モニタの感度は L-band RF 位相に換算して 0.04° と求まる。この感度は、L-band RF 位相に許容される位相変動 0.06° [2] よりも小さく、バンチ長モニタとして十分な感度があるこ

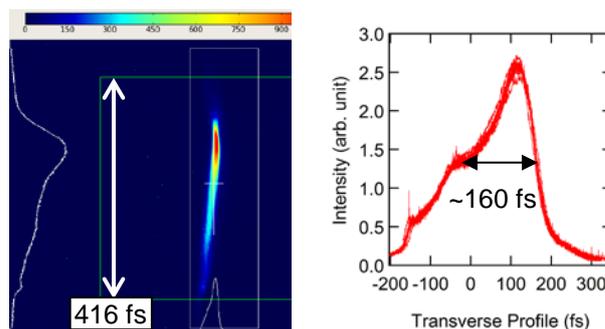


図 4 : FEL 発振条件における RF-DEF による時間掃引時のプロファイル(左)および時間方向のプロファイル 10 ショット分の重ね書き(右)。

とが分かる。

3.2 BC2 CSR モニタの S-band RF 位相依存性

S-band 加速管(4 セクション)における各 RF 位相を一律に変化させることで、BC2 通過後のバンチ長を変化させ、CSR モニタ出力の変化を測定した。同時にこの電子ビームを、BC3 のバイパス経路へ通すことで、BC2 通過後の時間方向分布を RF-DEF によって測定した。RF-DEF による時間掃引の典型例として、FEL 発振条件におけるプロファイルを図 4 に示す。左図が RF-DEF によって時間方向を垂直方向に掃引したプロファイルであり、右図に時間方向プロファイルを 10 ショット分重ね書きした結果を示す。この時間プロファイルの半値全幅(FWHM)を便宜的にバンチ長と定義した。

S-band 加速管の RF 位相を FEL 発振条件から $\pm 1^\circ$ で変化させたときの、CSR モニタの出力値と RF-DEF によるバンチ長の変化を、図 5 に示す。これらの結果より、S-band 加速管の RF 位相をクレスト方向(+方向)へ振ると、バンチ長が増加し、CSR モニタ出力強度は線形に減少していることがわかる。

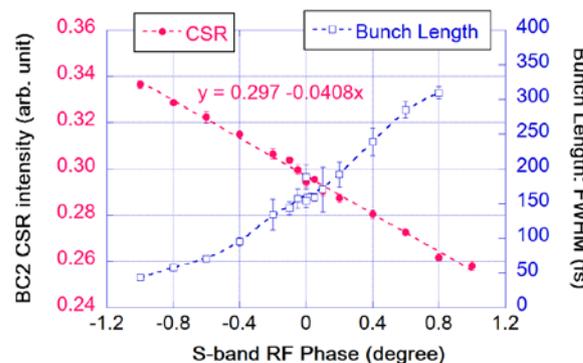


図 5. S-band 加速 RF の位相と CSR 強度(赤)、および RF-DEF の時間プロファイルより概算したバンチ長(青)。典型的な CSR 強度のバラつきは標準偏差にて約 0.6%。

この結果から BC1 の場合と同様に CSR モニタの感度を概算する。CSR モニタの出力強度のバラつき(標準偏差)は約 0.6%であり、S-band RF 位相に対する CSR モニタの変化率は 14%/degree である。これらを式(1)に代入すると、BC2 CSR モニタの感度は、S-band RF 位相に換算して約 0.04° である。これは、S-band RF 位相の許容位相変動 0.1°^[2]よりも小さく、バンチ長モニタとして十分な感度があること分かる。

また、RF-DEF により測定したバンチ長から、CSR モニタの較正を行う。FEL 発振位相付近においてはバンチ長も S-band RF 位相に対して線形な応答を示している。このときの変化率(146 fs/degree)から CSR モニタの感度をバンチ長に換算すると約 6 fs に相当し、これは FEL 発振位相におけるバンチ長 160 fs に対して約 4%の変動を測定できることになる。

3.3 BC3 CSR モニタの C-band RF 位相依存性

BC3 においても、CB01-03 加速管(12 セクション)の各 RF 位相を一律に変化させることで、バンチ長を変化させ、CSR モニタ出力と RF-DEF によるバンチ長測定を行った。

図 6 に、RF 位相を変化させたときの CSR モニタ出力値と RF-DEF によるバンチ長の変化を示す。これより、RF 位相をクレスト方向(+方向)に変化させたとき、RF-DEF から見積もられるバンチ長の変化は、増大する傾向がかるうじて見られる程度であった。

これは下記に述べるようにバンチ長が RF-DEF の測定限界に近いためである。本測定では、RF-DEF の掃引前に、Q 電磁石により電子ビームを絞り、スクリーンにおける垂直方向サイズが最小になるように調整している。このときのスポットサイズ(図 7)は約 0.1mm(FWHM)であったが、この広がりには掃引時のバンチ長に換算して約 6 fs に相当する^[7]。この広がりには掃引時のスポットサイズにも重畳するため、10 fs 以下のビームに対しては、RF-DEF によってバンチ長を数%の精度で測定することができない。

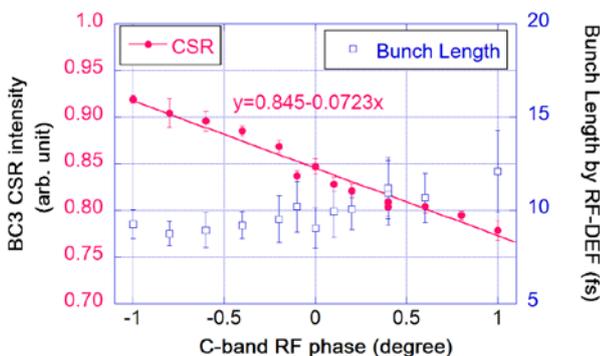


図 6. C-band 加速 RF の位相と CSR 強度(赤)、および RF-DEF の時間プロファイルより概算したバンチ長(青)。典型的な CSR 強度のバラつきは、標準偏差にて約 1%。

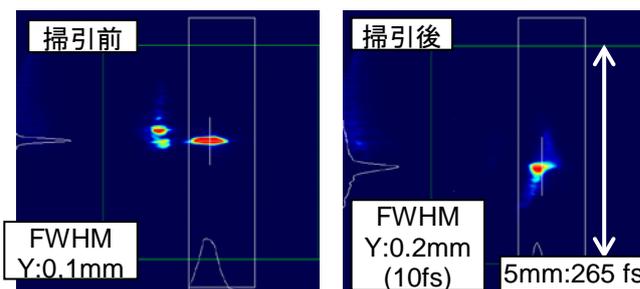


図 7: RF-DEF の時間掃引前後におけるビームプロファイルの比較。垂直方向の時間換算は、掃引時に 5mm が約 265 fs に対応する。

一方、CSR モニタ出力は、線形に減少する傾向が明確に見られた。BC1,2 と同様に、この結果から CSR モニタの感度を評価すると、CSR モニタ出力強度のバラつき約 1%と、強度変化率が約 9%/degree であることを式(1)に代入し、感度は C-band RF 位相に換算し約 0.1° と見積もられる。これは、C-band RF 位相における許容位相変動 0.2°^[2]よりも小さく、こちらのモニタもバンチ長モニタとして十分な感度を持つことが分かる。

4. まとめ

我々は、SACLA におけるバンチ長フィードバック制御に用いる CSR モニタの開発を行なってきた。2011 年に設置および試験を行い、BC2 において CSR モニタによってバンチ長変動を測定した。一方、BC1 においては CSR に対する検出器感度が小さかったこと、また BC3 においては石英真空窓において測定対象となる THz 領域の CSR が吸収されていたことなどにより、バンチ長変動ができなかった。そこで、BC1 における高感度検出器の導入や、BC3 におけるシリコン製真空窓の導入などの改良を行い、検出器感度の改善を行った。

そして、各 BC 部の直上流の加速管の RF 位相を変化させたとき、CSR モニタの強度出力が線形に変化すること確認した。また、モニタの感度を各加速管の RF 位相に換算したところ、BC1 モニタ：0.04°、BC2 モニタ：0.04°、BC3 モニタ：0.1° であった。これより各加速管の RF 位相の許容変動幅よりも小さく、バンチ長モニタとして十分な感度を持つことが分かった。

今後、同期収集系にて CSR モニタ値を収集し、このデータを用いてビームバンチ長のフィードバック制御を行えるようにし、XFEL 強度の安定化を図る。また、CSR の 1 ショット分光システムの開発を行い、そのスペクトル情報から時間分布プロファイルの詳細な情報を得られるモニタシステムの構築を目指す。

謝辞

本装置を設計するにあたり、仙台理研の大谷、南

出両氏よりテラヘルツ光測定についての有益なアドバイスを頂いたことに感謝いたします。また、情報通信機構の齋藤氏には、テラヘルツ対応の真空窓材についてのアドバイスおよび透過率測定にご助力いただき、感謝いたします。

参考文献

- [1] T. Tanaka, T. Shintake (Eds.), SCSS X-FEL Conceptual Design Report, 2005
- [2] 田中, 他, “XFEL/SPring-8 のバンチ圧縮性能におよぼす RF 機器変動の影響評価”, 第四回加速器学会, 和光, 2007
- [3] T. Tanaka and Kitamura, J. Synchrotron Radiation 8, 1221 (2001)
- [4] C. Kondo, et al., “CSR BUNCH LENGTH MONITOR FOR XFEL/SPRING-8 SACLA”, IPAC2011, San Sebastian, 2011
- [5] GENTEC-EO, <http://www.gentec-eo.com/products/thz-detectors/QS-THZ>
- [6] フラクシ(株), <http://www.phlux.com/Pyracanth.pdf>
- [7] H. Ego, et al. “TRANSVERSE C-BAND DEFLECTING STRUCTURE FOR LONGITUDINAL PHASE SPACE DIAGNOSTICS IN THE XFEL/SPRING-8 SACLA”, IPAC2011, San Sebastian, 2011