

DEVELOPMENT OF BUNCH LENGTH MONITORS UTILIZING COHERENT SYNCHROTRON RADIATION AT SACLA

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

SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA) is now under commissioning operation, aimed at the generation of a sub-angstrom free electron laser (FEL). In order to ensure the stable FEL generation, non-destructive bunch length monitors utilizing coherent synchrotron radiation (CSR), which was proposed to indirectly observe bunch lengths from 10 ps to 30 fs, were installed at each of three bunch compressors (BC1, BC2, BC3). The CSRs are detected by pyroelectric detectors and simple organic lens optical systems. We examined the CSR monitor at BC2, and measured the bunch lengths using it combined with that of an RF deflector cavity. The results indicated the monitor enables us to measure the sub-picosecond bunch length with an accuracy of less than 10%.

SACLA における CSR ビームバンチ長モニタの開発

1. 背景および目的

SACLA(旧称: XFEL/SPring-8)では、X線自由電子レーザーを用いた放射光実験にむけてビームコミッションが行われている。この放射光施設では、挿入光源部において、電流 3 kA 以上、バンチ幅約 30 fs という短バンチ、高ピーク電流の電子ビームにより SASE-XFEL を実現している^[1]。このような短バンチ電子ビームを生成するために、線形加速器部においては、電子銃部において生成された 1 ns、~1A の電子ビームを、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)により約 3000 倍にバンチ圧縮する。SASE-XFEL 増幅では、FEL 強度は電子ビームのピーク電流値に敏感であり、FEL 強度を安定化させるためには、バンチ長に対し約 10%の安定度が求められる^[2]。

バンチ長の安定化には、電子ビームのバンチ長を非破壊的に測定し、加速空洞の RF 位相などバンチ長を制御するパラメーターへフィードバック制御をかけることになる。このような約 30 fs のバンチ長を非破壊的に測定できるモニタとして、コヒーレント放射光(CSR)によるバンチ長モニタがあり、他の XFEL 加速器施設においても開発が進んでいる^[3]。

我々は、SACLA に導入する CSR バンチ長モニタの開発を行っており、2010 年には試験加速器 SCSS において実証試験を行い、十分に動作することが確認した^[4]。今回、その結果を踏まえ、新たなバンチ長モニタを開発し、SACLA における 3 箇所 BC シケインの直下流に設置した。

本報告では、CSR によるバンチ長モニタの設計思想と装置概要、そして特に調整が進んでいる BC2 の試験結果について発表する。

2. SACLA におけるバンチ長モニタ

2.1 CSR 光特性

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 λ がバンチ長より長い領域では、光がコヒーレンス性を帯び、その強度は電子数の自乗に比例するようになる^[5]。このとき、光束密度 $P_{csr}(\lambda)$ は、電子 1 個あたりの光束密度 $P_e(\lambda)$ と電子ビーム中の電子数 N_e を用いて、

$$P_{csr}(\lambda) \sim P_e(\lambda) (N_e + N_e^2 F(\lambda))$$

と表される。ここで、 $F(\lambda)$ は形状因子とよばれ、

$$F(\lambda) \equiv \left| \int_{-\infty}^{\infty} f(z) e^{-i\frac{2\pi z}{\lambda}} dt \right|^2$$

であり、 $f(z)$ は電子ビームの進行方向 z における規格化された数密度分布である。この式から、バンチ長が短くなるにつれて CSR の短波長成分が増えることが分かり、結果として全放射エネルギーが増大する。そのため、分光をせずとも光強度測定によりバンチ長の変化を測定できる。

2.2 設計思想

表 1: 各 BC 部におけるビームパラメーター^[6]

	エネルギー	偏向磁場	BC 通過後のバンチ長
BC1	30 MeV	0.044 T	~3 ps
BC2	403 MeV	0.184 T	~0.3 ps
BC3	1.40 GeV	0.291 T	~0.03 ps

SACLA の 3 箇所の BC 部直後における電子ビームの典型的なバンチパラメーターを、表 1 に示す。また、これらのパラメーターと電子ビームの数密度分布のシミュレーション結果^[6]を用い、CSR の強度を SPECTRA^[7]で計算した結果を図 1 に示す。

この結果から、BC1,2,3 の光束密度はそれぞれ約 50 GHz, 300 GHz, 2 THz において最大になり、これらより高い周波数では急激に減少することが分かる。そこで、この帯域に感度が高い光強度検出器をバンチ長モニタとして用いる。

ckondo@spring8.or.jp

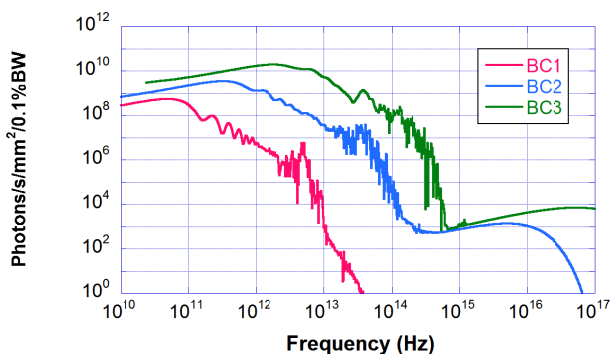


図1: 各 BC 部における CSR スペクトルの計算結果

さらに、モニタの設計を行うにあたり、SACLAの加速器システムに合うよう、次のような方針で設計した。

- FEL 増幅に影響を与えない
- 光強度検出器を用いた簡易な計測系
- 常温仕様のメンテナンスフリーなテラヘルツ光検出器の使用
- 光学系の調整が容易となるよう、屈折光学系のテラヘルツ用集光レンズの使用
- SACLA の制御システムに組み込み、遠隔にて制御可能

2.3 装置概略

本装置は、図 2 に示すように、シケインの第四偏向電磁石の直下流に穴あきミラーを設置し、電子ビームに影響を与えることなく CSR のみをビームパイプ外へ反射する。そして、真空外においてミラーと集光レンズによる屈折光学系を用いて検出部へ導く。CSR 光検出器には焦電検出器を用いている。

2.3.1 ビーム軸上ミラー

ミラーには、ビームが通過する位置に貫通孔を開け、ビームに影響を与えることなく CSR のみを側面についているビューポートへ反射し、ビームダクト外へ導けるようにした。穴径は、SCSS 試験加速器において、機器をビームより 2 mm 以上離せば FEL 増幅に影響を与えないこと、および

ビーム広がりを考慮して直径 10 mm とした。また、ミラーには金蒸着を施したアルミ板を用いた。さらに、ミラーはステッピングモーターにより高さを遠隔にて調整でき、必要に応じてビーム軸から退避できるようにした。

2.3.2 外部光学系

ビームダクトから、ビューポート(合成石英)を透過した CSR は、更に金ミラーにて下方へ反射し、テラヘルツ用のレンズ(Tsurupica レンズ^[8])により、検出器へ集光している。このような屈折光学系により、有機物でできているテラヘルツレンズや半導体が組み込まれている検出器を放射光の照射領域外に設置することで放射線損傷を抑えている。また、焦点の調整は、レンズの高さ(1軸)と検出器の水平位置(2軸)の調整のみで行うことができ、光学系の調整が容易な構成となっている。

これらの光学系および検出器は、遮光筐体に収められており、環境光からの影響を排除している。

2.3.3 焦電検出器

テラヘルツ領域の CSR の検出には、Spectrum 社の焦電検出器 (SPH-62^[9]) を用いた。この検出器は LiTaO₃ の焦電効果によりテラヘルツ光のエネルギー強度を測定する。検出面積は 2 mm×2 mm であり、検出帯域は 0.1-30 THz である。この検出器は常温での動作が可能であるため、ボロメーターのような冷却機構を必要せず、コンパクトかつメンテナンスフリーな検出系を組むことができる。

2.3.4 制御系およびデータ収集系

ビーム軸上のミラーの高さ、レンズの高さ、および検出器の水平位置(XY)の 4 軸を調整するステッピングモーターや、検出器の出力波形を測定しているオシロスコープは、SACLA の制御系に組み込まれている。この制御系により、光学系のパラメーター調整や波形測定は全て制御室から行える。また、出力波形の波高(peak-peak)を 2 s に一回の頻度でデータベースに常時記録している。

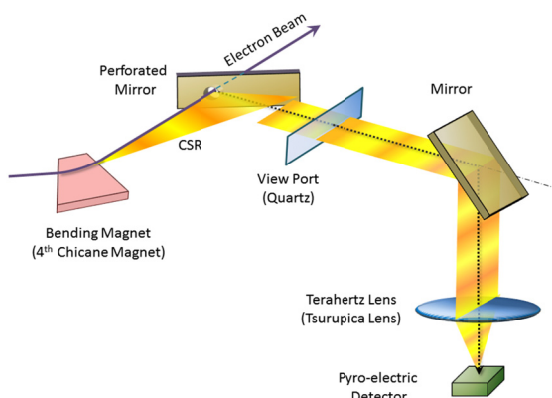
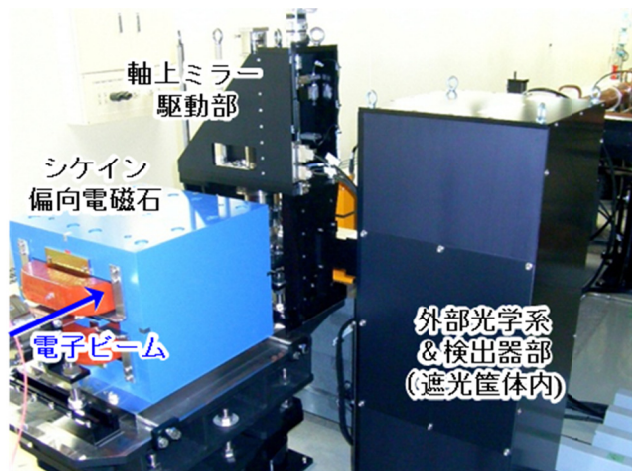


図2: BC2 部の設置した CSR モニタの設置風景 (左) および概略図 (右)。

3. 動作試験

装置の設置完了後、電子ビームを用いた動作試験を行った。まず、ビーム軸上にミラーを入れても FEL 増幅に影響が無いことを確認し、次に検出器の動作確認、焦点サーチを行い、CSR 強度の測定準備を整えた。その後、電荷量やバンチ長を変化させて CSR 強度の変化を測定し、CSR の特性の確認を行った。以下、特にことわりのない限り、BC2 の CSR モニタの結果について述べる。

3.1 応答波形および焦点プロファイル

図 3 に、焦電検出器からの出力波形を示す。検出器の出力波形は、CSR が入射後に約 2 ms で立ち上がる。その後、約 10 ms の時定数で減衰する波形となる。この長い減衰時定数はパイロ検出器の熱的な減衰が比較的遅いためである。本測定では、波形の波高(peak-peak)を CSR の強度とした。

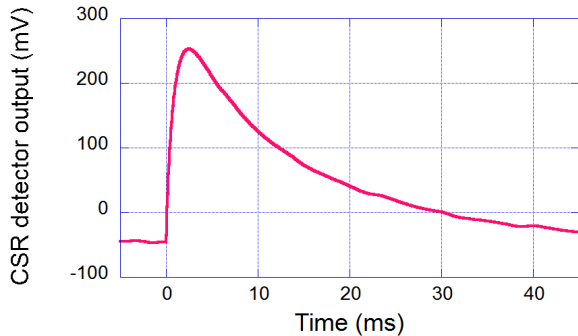


図 3: BC2 における検出器の信号波形

さらに、レンズ高さ、および検出器の水平位置を動かして焦点スキャンを行った。図 4 に焦点付近において水平スキャンを行ったとき、CSR 強度の等高線図を示す。焦点の広がり、半値全幅にて直径約 2.5 mm 程度であり、検出面積の大きさと同程度まで集光できていることが分かる。

以上により、検出器の調整を完了し、CSR 強度とビーム特性の測定に行った。

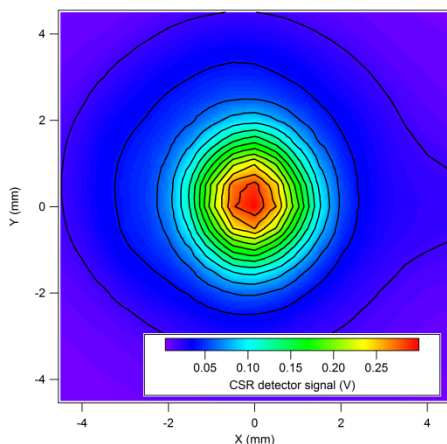


図 4: CSR の焦点プロファイル

3.2 電荷量依存性

加速器の本検出器より上流側の空間コリメーターの開閉により調整し、バンチ長の変化を抑えながら電荷量を変化させた。このときの、CSR 強度とビーム電荷量依存性を図 5 に示す。この結果より、光強度が電荷量の自乗に比例することが分かり、 $P_{CSR} \propto N_e^2$ という CSR の特性を確認した。

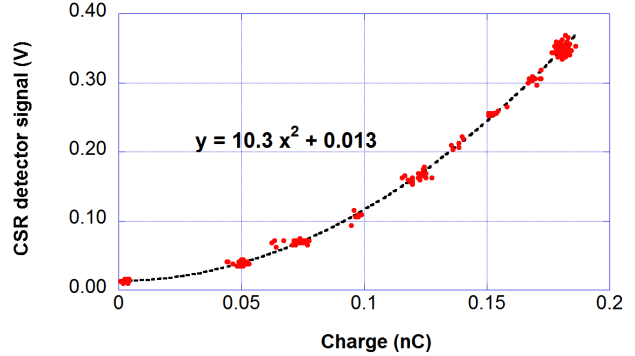


図 5: ビーム電荷量と CSR 強度の関係。

3.3 バンチ長依存性

バンチ長の変化に対する CSR バンチ長モニタの感度を測定するため、次のような測定を行った。BC2 の直上流にある S-band 加速管(全 8 本)の RF 位相を、FEL 増幅位相の $\pm 1^\circ$ (正方向がクレスト位相側)の範囲で変化させ、BC2 直下流における CSR 強度の変化をバンチ長モニタにより測定した。このように S-band 加速管の RF 位相を変化させることで、電子ビームのエネルギー勾配が変化するため、BC2 を通過した後のバンチ長が変化する。このときバンチ長の絶対値は CSR 強度だけでは決定できないため、本モニタよりも下流側に設置されている RF デフレクター空洞(RF-DEF)^[10,11]において時間掃引によるバンチ長プロファイル測定も行い、CSR 強度と比較した。

S-band 加速管の RF 位相を FEL 増幅位相付近において変化させたときの、RF-DEF による時間プロファイルを、図 6 に示す。この結果より、RF 位相が FEL 増幅位相より -1° においては、バンチ長は約

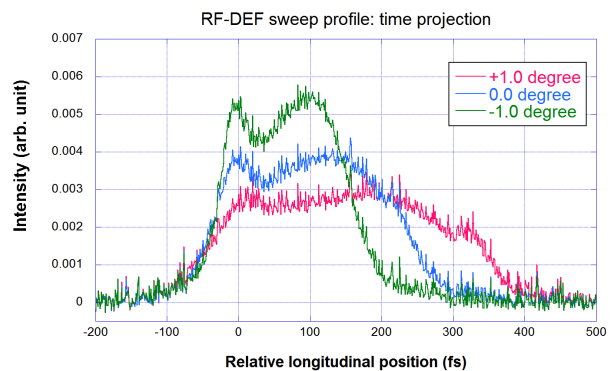


図 6: RF デフレクター空洞による、BC2 通過後の時間掃引プロファイル。

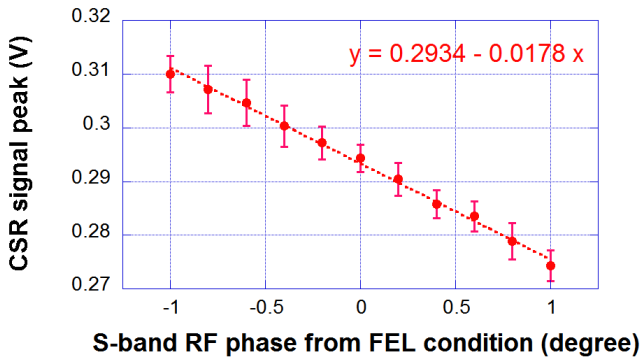


図 7: S-band 加速 RF の位相と CSR 強度。エラーバーは、測定毎のバラつき(標準偏差)。

200 fs(FWHM)と見積もられる。そして、RF 位相をクレスト位相側へ変えたとき、FEL 増幅位相(0°)におけるバンチ長は約 300 fs に、さらに+1°変化させると、約 400 fs と広がっていくことが分かる。

次に、S-band 加速管の RF 位相を変化させたときの、BC2 における CSR 強度を図 7 に示す。RF 位相を、FEL 増幅位相より-1°からクレスト側(+方向)へ+1°まで変化させると CSR 強度が線形的に減少する相関が得られた。これは、バンチ長が長くなるにつれて CSR 強度が減少するという、CSR の特性と一致している。

これらの結果を用いて、FEL 増幅位相付近における CSR モニタの感度を次のように求めた。RF-DEF による測定で得られたバンチ長変化~100 fs/degree に対し、CSR モニタで得られた RF 位相と CSR 強度の相関係数は約-0.0178 V/degree であった。また、CSR 強度の測定毎のバラつき(標準偏差)は約 3 mV であった。これらより、ビーム電荷量が一定と考えたときの、モニタによるバンチ長の測定精度は約 13 fs と見積もられる。これは、FEL 増幅位相付近の BC2 におけるバンチ長約 300 fs において約 4%程度の精度にあたり、バンチ長の安定度 10%の変動を本モニタで測定することが可能であることが分かる。

4. まとめと今後の展望

SACLA において、サブピコ秒のビームバンチ長を非破壊に測定できる CSR バンチ長モニタの開発を行った。調整が進んでいる BC2 におけるモニタでは装置の調整が済み、CSR 強度が電荷量の自乗に比例することを確認した。また、S-band 加速管における RF 位相を変化させることで、BC2 直下流のバンチ長を変化させ、モニタ出力および RF デフレクター空洞による時間掃引プロファイル測定を比較した。その結果、バンチ長が短くなるにつれ、CSR 強度が強くなり、バンチ長モニタとして動作していることを確認した。このとき、モニタの感度はバンチ長の約 4%の変動を検知できるものと評価され、BC2 のモニタは、要求される性能を満たしていることを確認した。

他の BC1 と BC3 のバンチ長モニタについては次のような問題点が残っている。BC1 のモニタでは、検出器として使用していたミリ波検波器が飽和してしまうため、検出器の再選定が必要である。また BC3 においては、モニタの感度が十分でなく、これはバンチ長変動に対して CSR 強度の変動が敏感となる 2-20 THz の周波数領域において、ビューポート(合成石英)の吸収が大きいと推測されている。今後、これらのモニタに対する改良を行い、全 BC セクションにおいてバンチ長測定が可能となるようにし、SACLA の FEL 安定化に向けたバンチ長フィードバック制御を行えるようにする。

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、設置作業において、真空チームの長谷川氏や、木村氏を始めとするアライメントチーム諸氏に協力頂いたことに感謝いたします。最後に、ビーム測定において、ビーム運転チーム、エージングチームのスタッフに協力頂き、深く感謝いたします。

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] H. Loos, et al., “Beam Instrumentation for X-FELs”, DIPAC2011, Hamburg, 2011
- [4] H. Maesaka, et al., “Development of Bunch Length Monitors using a CSR and a Streak Camera and Measurement Result at the SCSS Test Accelerator”, FEL2010, Malmö, Sweden, 2010
- [5] J. Nodvick, and D. Saxson, Phys. Rev. 96, 180 (1954)
- [6] T. Hara, et al., “Beam Optics and Parameter Design of the XFEL/SPring-8”, FEL2010, Malmö, Sweden, 2010
- [7] T. Tanaka and Kitamura, J. Synchrotron Radiation 8, 1221 (2001)
- [8] パックス(株), <http://papapapax.jp/>
- [9] <http://www.gentec-eo.com/products/thz-detectors/QS-THZ/>
- [10] H. Ego and Y. Otake, “Design of the Transverse C-band Deflecting Structure for Measurement of Bunch Length in X-FEL”, EPAC08, Genova, 2008
- [11] 柱野, 他, “SACLA (XFEL/SPring-8) 向け C バンド RF デフレクターの製作”, 本学会