

COMMISSIONING AND PERFORMANCE OF THE BEAM MONITOR SYSTEM FOR XFEL/SPRING-8 “SACLA”

Hirokazu Maesaka ^{#, A), B)}, Hiroyasu Ego ^{A), B)}, Shinobu Inoue ^{C)}, Chikara Kondo ^{A), B)}, Shin'ichi Matsubara ^{B)}, Takahiro Matsumoto ^{B)}, Tatsuyuki Sakurai ^{A), B)}, Hiromitsu Tomizawa ^{A), B)}, Ken'ichi Yanagida ^{B)}, Yuji Otake ^{A), B)}

^{A)} RIKEN SPRING-8 Center

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

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{C)} SPRING-8 Service Co., Ltd.

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

Abstract

The beam monitor system for the XFEL facility “SACLA” is demanded to measure a beam position with sub- μm resolution, a beam profile with few- μm resolution, a temporal structure with 10 fs resolution. Therefore, we developed and constructed the beam monitor system consisting of rf cavity beam position monitors (RF-BPM), screen monitors (SCM) with OTR targets and YAG:Ce scintillators, high-speed differential current transformers (CT), an rf deflector system (RFDEF), a streak camera and coherent synchrotron radiation (CSR) monitors. After the commissioning of the beam monitor system, the position resolution of the RF-BPM was found to be less than 0.6 μm (RMS) and the temporal resolution of the RFDEF was approximately 10 fs. Although SCMs observed anomalous radiation due to coherent OTR (COTR), COTR was diminished by a YAG:Ce target with an OTR mask. As a result of the beam tuning with the beam monitor system, SACLA succeeded the lasing with a wavelength of 0.12 nm.

XFEL/SPRING-8 “SACLA” 用ビームモニタシステムの試運転と性能

1. はじめに

SPRING-8 キャンパスに建設された X 線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA (SPRING-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) は 2011 年 2 月に電子ビームを加速する試運転を開始し, XFEL 発振を目指した調整をおこなった結果, 同年 6 月に波長 0.1 nm での XFEL 発振を達成した^[1,2]. 現在, XFEL 強度の増強と安定化に向けた調整が続けられている.

SACLA のような SASE 型 (Self-Amplified Spontaneous Emission) の XFEL を発振させるためには, 高いピーク電流と小さいスライスエミッタンスを合わせもった電子ビームが必要で, そのビームをアンジュレータに通す際には X 線と十分に重なりあっていなければならない. SACLA では 3 kA 以上のピーク電流と 1 μm rad 以下の規格化スライスエミッタンスが要求される. このような電子ビームを生成するため, SACLA では熱電子銃からの 1 A 電子ビームを速度変調バンチングと 3 段の磁気シケインによるバンチ圧縮器を用いてバンチ長を 30 fs まで縮めることとしている. このようなバンチ圧縮システムを調整する際には, ビームモニタとしてビームの電荷量・位置・プロファイルの測定などに加えて時間構造も測定できるシステムが必要となる. また, アンジュレータ区間で X 線と電子ビームの軌道を重ね合わせるには 1 μm 以下の分解能をもったビーム位置モニタが必要である.

これらの要求を満たす電子ビームモニタシステムとして SACLA では, 1 μm 以下の分解能を持つ RF 空洞型ビーム位置モニタ (RF-BPM), OTR (Optical Transition Radiation) や YAG:Ce の蛍光を用いてビームプロファイルを数 μm の分解能で測定するスクリーンモニタ (SCM), 高速でノイズに強い差動電流コアモニタ (CT), バンチ長測定用の高周波空洞ビームデフレクタ (RFDEF)・ストリークカメラシステム・コヒーレント放射光 (CSR) モニタを開発・製作した. バンチ長測定についてはこれらのモニタで数 ps から数 10 fs までのバンチ長が測定できる. 本モニタシステムは SACLA に設置されビーム調整に利用されている.

本稿では, これらの電子ビームモニタの概要, および, 電子ビームによる調整と性能評価について報告する.

2. ビームモニタシステムの概要とビームを使った調整・評価

本節では, SACLA のビームモニタシステムの全体像を概観したあと, 各ビームモニタの概要と電子ビームを使っておこなった調整内容や得られた結果について述べる.

2.1 ビームモニタシステムの全体像

SACLA の概略図とビームモニタの配置・台数を図 1 に示す. RF-BPM, SCM, CT は加速器部分・ア

[#] maesaka@spring8.or.jp

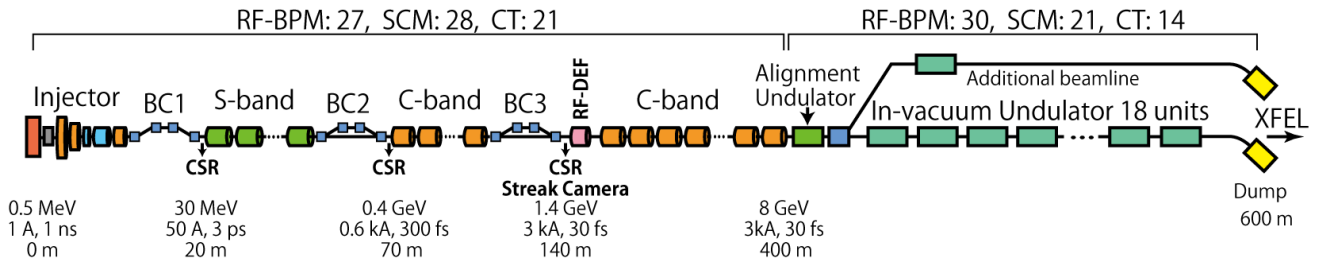


図 1: SACLA の概略図とビームモニタの配置・台数。

ンジュレータ部分とも随所に配置されており、ビームの位置・形状・電荷量が各所で確認できるようになっている。台数は合計で RF-BPM が 57 台、SCM が 49 台、CT が 35 台である。バンチ長測定用の RFDEF とストリークカメラは 3 番目のバンチ圧縮器 (BC3) の下流に設置されており、CSR モニタは 3 台の各バンチ圧縮器の下流に 1 台ずつ設置されている。RFDEF とストリークカメラは 1 台のみだが、BC2, BC3 はバイパスできるので各バンチ圧縮器でのバンチ長を測定することが可能である。

2.2 RF 空洞型ビーム位置モニタ (RF-BPM)

SACLA では共振周波数 4.760 GHz の C バンド RF-BPM^[3]を使用している。各 RF-BPM には位置を検出するための TM110 ダイポールモード空洞と位相原点の検出と電荷量の規格化をおこなうための TM010 モノポールモード空洞を備えている。各空洞からの信号は IQ 復調回路にて処理され VME の波形記憶 AD 変換ボードにて記録される。

アンジュレータ部分の RF-BPM については、X 線を使った精密アライメントのための挿抜可能なアイリスを備えている^[4]。アライメント用の X 線は振り分け用偏向電磁石の上流にあるアライメント専用のアンジュレータ (図 1 参照) で発生させる。その X 線を直径 0.1mm のアイリスに当て、下流の X 線検出器で撮像して位置を測定する。この RF-BPM は隣接する四極電磁石とともに自動 XZ ステージに載っているため、RF-BPM を X 線に沿った直線上に並べることができる。このアイリスに X 線を当てて実際にアライメントをおこなったところ、XFEL 発振時の状態と比較して数台を除き 0.1 mm 以内、もっとも悪いものでも 0.2 mm のずれであった^[4]。0.1 mm 以内を目指していたが、いくつかずれの大きいものもあったという結果になった。

ビーム運転開始後、アンジュレータ部分のビーム調整の前に位置分解能測定をおこなった。アンジュレータ部分の RF-BPM 20 台の位置分解能を評価したところ、7 GeV, 0.1 nC のビームに対して 0.6 μm (RMS) 以下という XFEL 調整に十分な分解能を持っていることがわかった (図 2)^[3]。このように RF-BPM システムは適切に動作しており、Beam-based Alignment^[5]やビーム軌道のフィードバック^[6]などに活用されている。

2.3 スクリーンモニタ (SCM)

SCM は、ビームが金属ターゲット (SUS) に当たったときに出る OTR や YAG:Ce ターゲット (0.1

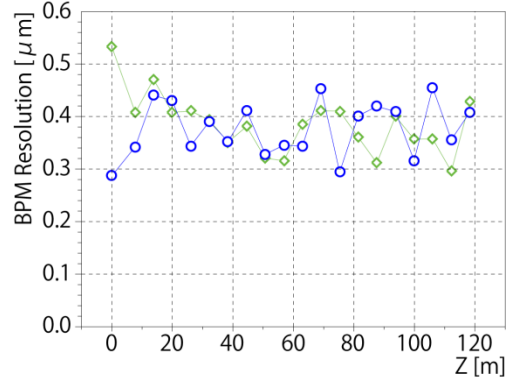


図 2: アンジュレータ部分の 20 台の RF-BPM の位置分解能。青が X, 緑が Y の分解能である。横軸は RF-BPM のビームの進行方向の位置を表している。

mm 厚) に当たったときの蛍光の像を CCD カメラでとらえることによって、ビームプロファイルを測定する装置である^[7,8]。ターゲットからの像はカスタム仕様のレンズ系により CCD カメラに結像する。一部のレンズ系では倍率 4 倍の高倍率を実現でき、そのときの光学分解能は 2 μm という高分解能となっている^[7]。CCD カメラからの画像データは CameraLink を通してカメラ用サーバに記録され、端末にリアルタイムで表示できる^[9]。ビーム運転開始当初から SCM は適切に動作しており、エミッタンス測定やビームエンベロップのマッチング^[10]などに活用されている。

しかし、XFEL 用の短いバンチ長 (≤ 100 fs) のビームを生成した場合、BC3 以降の SCM にてコヒーレント OTR (COTR) による異常発光^[11]のためビームプロファイルが正しくとれないことがわかった。BC3 以降の SCM はすべて OTR 用金属ターゲットを使用していたため、ビーム調整に重要な RFDEF 下流とアンジュレータ上流の各 1 台の SCM のターゲットを YAG:Ce に交換した。YAG:Ce ターゲットでも依然として COTR が発生するため、図 3 に示すように COTR のマスクを光学系に取り付けた。これによりビームプロファイルを正しくとらえることができた。これは、OTR は前方 $1/\gamma$ ラジアン (γ はローレンツファクタ) 以内に指向性を持って放射されるのに対し、YAG:Ce の蛍光は指向性をもたないことを利用している。

このようにして得られたビーム形状の例を図 4 に示す。マスクの範囲内では YAG:Ce の蛍光の像が適切にとらえられていることがわかる。ただし、マスクの外側では COTR による異常な像が見えている。

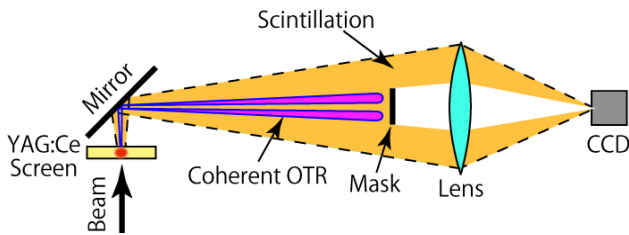


図 3: YAG:Ce ターゲット使用時の COTR のマスクの概略図。

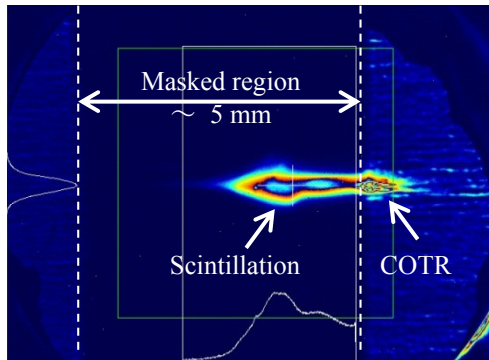


図 4: RFDEF 下流の YAG:Ce ターゲットの SCM 画像の例。

2.4 差動型コアモニタ (CT)

SACLA では図 5 に示すような差動型の CT を使用する^[12]。この CT は出力を 4 ポート備えており、2 つは正の信号、のこりの 2 つは負の信号が出るようにコイルを巻いている。正と負の信号の差を取ることで、コモンモードノイズを低減することができる。また、4 ポートの信号の平均をとることでビーム位置の依存性を抑えることができる。さらに、高周波でも透磁率のあるコアを使用し、コイルをシングルターンとすることで、立ち上がり約 200 ps の高速な動作を実現している。

CT からの信号は検出器本体のすぐ近くに設置されたプリアンプで増幅・波形整形され、クライストロンギャラリの主アンプをへて VME の波形記憶 AD ボードによって記録される。また、入射部の速度変調バンチングの途中にある 2 台の CT については、生波形を 12 GHz 帯域の高速オシロスコープで読み出すことによりバンチ長をモニタできるようにしている。この部分ではバンチ長が数 100 ps レベルなのでこの CT でのバンチ長測定が可能となっている。実際の電子ビームを用いてとった CT の生波形を図 6 に示す。10-90 % 立ち上がり約 200 ps, FWHM 約 500 ps の速い波形が得られていることがわかる。

現状、各 CT からの電荷量データは常時適切に取得されていて、XFEL 調整の際にはピーク電流算出時の電荷量の絶対値を求めることに使用されるなどビーム調整に貢献している。ただし、XFEL 調整の初期に電子ビームを用いて収集したデータを見ても、BC2 以降ではプリアンプ出力の線形性が悪く

なっていることがわかった。これはバンチ長が短くなったことで CT からの信号に高い周波数成分が増えてプリアンプの初段のアンプが不安定になっているためであると考えられる。そこで、プリアンプの入力に減衰器をつけ足して線形性を確保することとした。その結果、0.5 nC 程度まで十分な線形性を得ることができている。

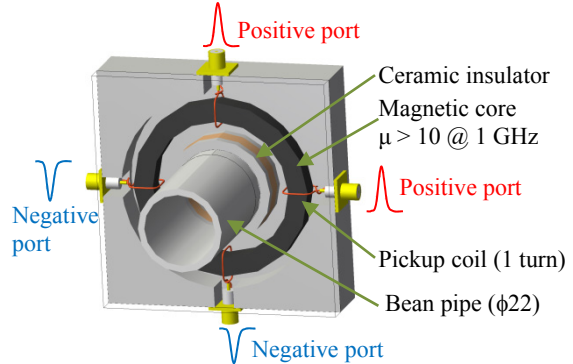


図 5: 差動型 CT の概略図。

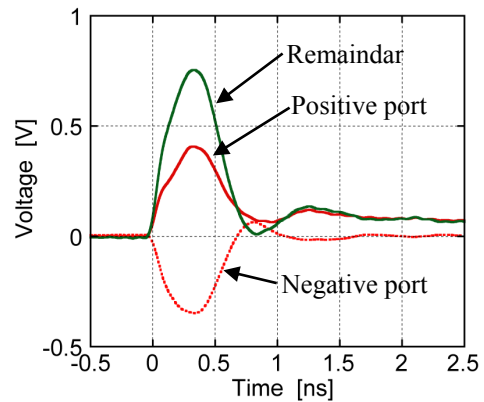


図 6: 高速差動 CT の生波形。

2.5 RF デフレクタ (RFDEF)

RF デフレクタ(RFDEF)^[13-15]は、横方向の RF 電場でビームをキックすることでバンチの時間構造を 10 fs 程度の分解能で測定するための加速空洞である。図 7 に示すように、横方向 RF 電場のゼロクロス位相にビームをのせることで、バンチの時間構造を空間方向に引き伸ばす。それを SCM でとらえることで時間構造を得ることができる。

SACLA におけるバンチ構造の測定では BC3 下流にて 1.4 GeV のビームを 10 m 下流の SCM で 100 fs のビームを 1 mm 以上引きのばすことが要求されている。このためには、RFDEF で 40 MV 以上のキック電圧が必要である。この電圧を出すには、大電力高周波源の加速器からの流用などの理由から C バンドの新しい空洞を開発することが得策と考えた。そして、周波数 5.712 GHz の RAIDEN 空洞^[13,14]を新規開発・製作した。現状、有効長 1.7 m の RAIDEN 空洞を 2 本使用し、50 MW クライストロン 1 本から RF を供給することで、1.4 GeV のビームを 10 m 下

流の SCM 上で 1 mm あたり約 50 fs にビームを引き伸ばすことができています。

RFDEF を用いてビームの時間構造を測定した例を図 8 に示す。ビームが適切に時間掃引されて時間構造を測定できていることがわかる。このデータから 10 fs 程度の時間分解能があることがうかがえる。なお、このデータは 2.3 節で述べたように COTR をマスクして取得している。

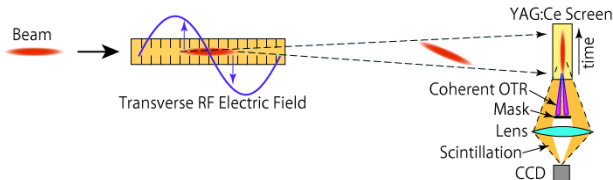


図 7: RFDEF によるビームの時間構造測定システムの概略図。

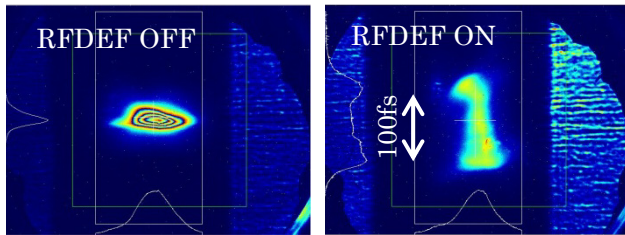


図 8: RFDEF で測定したビームの時間構造の例。左が RFDEF が OFF の場合で、右が RFDEF を ON にして時間掃引した場合である。

2.6 ストリークカメラ

BC3 の下流には RFDEF に加えてストリークカメラシステムも設置している。これは、RFDEF では測定しづらい数 100 fs 以上のバンチ長を測定することを目的としている。セットアップとしては SCM からの OTR 光をミラーでクライストロンギャリまで輸送し、浜松ホトニクス社^[16]の FESCA-200 で測定する形となっている。FESCA-200 は 200 fs (FWHM) の分解能を持っているので、1 ps 未満のバンチ長も測定可能である。BC3 下流では通常バンチ長が 100 fs 以下となるが、BC2 と BC3 はバイパスすることができるので BC1, BC2 のバンチ長 (数 100 fs ~ 数 ps) の測定をおこなうことができる。

実際に電子ビームを使って BC2 のバンチ長を測定した例を図 9 に示す。このときのデータは 1 ショットでは強度が小さかったため、50 ショット積算したものを使っている。また、BC2 上流の S バンド位相を XFEL 発振時より 9 度ほどクレスト側にずらしてバンチ長を 0.5 ps (FWHM) 程度に伸ばしたときのものである (XFEL 発振時のバンチ長は約 0.3 ps)。バンチ長 0.5 ps (FWHM) 程度のビームが適切に測定できていることがわかる。BC2 までのバンチ圧縮であれば COTR が出ないので OTR を使って測定することができている。

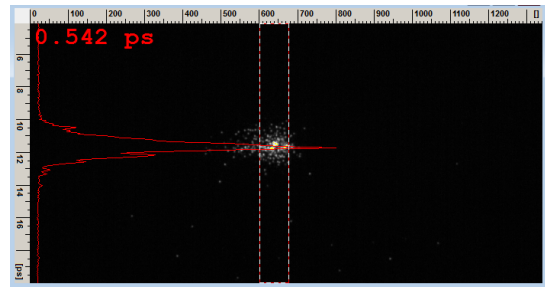


図 9: ストリークカメラで測定した BC2 でのバンチ長の測定結果の例。縦方向に時間掃引しており、赤線は得られた画像を射影したものである。FWHM で 0.54 ps のバンチ長が得られている。

2.7 CSR モニタ

CSR モニタ^[17]は 3 つのバンチ圧縮器のそれぞれに設置されている。各バンチ圧縮器の 4 番目の偏向電磁石から出る THz 帯の CSR を石英ビューポートから取り出して、遠赤外線検出器で検出する。CSR を集光するために THz レンズを使用し、光学系の調整を簡易にしている。

電子ビームを用いて測定した結果、現状、BC2 の CSR モニタでバンチ長と強い相関のあるデータが得られている^[17]。S バンド加速器の位相を振り、BC2 通過後のサブピコ秒領域におけるバンチ長を変えたときの CSR 強度の変化を図 10 に示す。XFEL 発振状態の近傍でバンチ長に十分な感度があることがわかる。

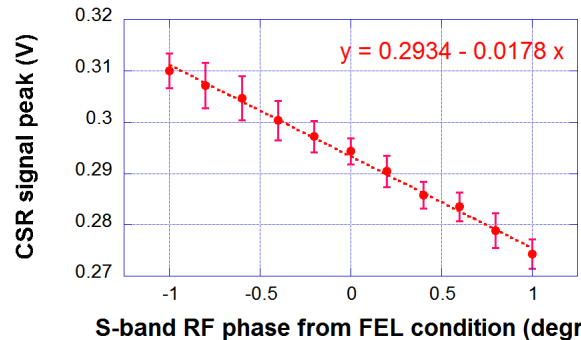


図 10: BC2 の CSR 強度と S バンド加速位相との相関。横軸は XFEL 発振時を 0 度としている。縦軸は検出器の出力信号のピーク電圧である。エラーバーは測定ごとのばらつきの標準偏差を示している。

2.8 データ収集

ビームモニタシステムの各種データは SPring-8 の制御システム MADOCA^[18]によりビーム運転開始当初から安定に取得できている。また、RF-BPM, CT, SCM についてはショットごとのタグをつけてデータ間の同期が取れるようになっている^[19]。そして、RF-BPM と CT のデータは全ショットのデータを欠かさず取れるようになっている。たとえば、RF-BPM については全ショットのデータが同期してとれていることで、Beam-based Alignment^[5]、ビーム軌道

フィードバック^[6], 位置分解能の評価^[3]などに大いに役立っている。

3. まとめ

XFEL 施設 SACLA ではビームモニタシステムとして, RF-BPM, SCM, CT, RFDEF, ストリークカメラ, CSR モニタなどを製作・設置し, ビーム運転に使用している。RF-BPM では分解能 0.6 μm (RMS) 以下を達成し, RFDEF ではバンチ長 50 fs 以下のビームの時間構造測定に成功している。SCM については, BC3 以降で COTR に悩まされたが YAG:Ce ターゲットとマスクの組み合わせでビームプロファイルを測定することができている。CT についてはおおむね設計通り動作しており, ストリークカメラや CSR モニタについてもバンチ長に相関のあるデータが得られている。これらのビームモニタのデータをもとに XFEL の調整を行った結果, 波長 0.12 nm の XFEL の発振を達成することができた。

参考文献

- [1] H. Tanaka, “Operation Status of X-ray FEL facility SACLA at SPring-8”, in these proceedings.
- [2] Y. Otake, “Commissioning and Performance of the instruments for XFEL/SPring-8 accelerator “SACLA””, in these proceedings.
- [3] H. Maesaka, *et al.*, “Performance of the RF-BPM at XFEL/SPring-8 “SACLA””, in these proceedings.
- [4] T. Morinaga, *et al.*, “Alignment of BPMs and Q-magnets using X-rays from an alignment undulator”, in these proceedings.
- [5] R. Yamamoto, *et al.*, “About the Beam Based Alignment in SACLA Undulator Section”, in these proceedings.
- [6] S. Tanaka, *et al.*, “Automatic Orbit Correction of Electron Beam at SACLA”, in these proceedings.
- [7] K. Yanagida *et al.*, “Development of Screen Monitor with a Spatial Resolution of Ten Micro-meters for XFEL/SPring-8”, Proceedings of LINAC’08 (2008).
- [8] S. Inoue, *et al.*, “Prototype Screen Monitor for XFEL/SPring-8”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of the Particle Accelerator Society of Japan (2008).
- [9] T. Matsumoto, *et al.*, “Commissioning of Beam profile monitor DAQ system for XFEL/SPring-8 “SACLA””, in these proceedings.
- [10] Y. Tajiri, *et al.*, “Beam envelope control using linear accelerator model in SACLA at SPring-8”, in these proceedings.
- [11] A. Lumpkin, *et al.*, “Coherent optical transition radiation and self-amplified spontaneous emission generated by chicane-compressed electron beams”, PRSTAB **12**, 040704 (2009).
- [12] S. Matsubara, *et al.*, “Property of high-speed differential CT for the XFEL/SPring-8 “SACLA””, in these proceedings.
- [13] H. Ego, *et al.*, “Development of a High Gradient Transverse C-band Deflecting Structure for the Diagnosis of Temporal Bunch Structure in the XFEL/SPring-8 “SACLA””, in these proceedings.
- [14] T. Hashirano, *et al.*, “Manufacturing of a C-band RF Deflector for XFEL/SPring-8 “SACLA””, in these proceedings.
- [15] T. Sakurai, *et al.*, “High Power Conditioning of C-band RF Deflecting Structure for XFEL/SPring-8 “SACLA””, in these proceedings.
- [16] Hamamatsu Photonics K. K., <http://www.hamamatsu.com/>
- [17] C. Kondo, *et al.*, “Development of Bunch Length Monitors utilizing Coherent Synchrotron Radiation at SACLA”, in these proceedings.
- [18] R. Tanaka, *et al.*, “The first operation of control system at the SPring-8 storage ring”, Proceedings of ICALEPCS’97 (1997).
- [19] M. Yamaga, *et al.*, “Event-Synchronized Data-Acquisition System for SPring-8 XFEL”, Proceedings of ICALEPCS’09 (2009).