

SACLA ビームライン高度化のためのビーム診断システム BEAM DIAGNOSTIC SYSTEM FOR THE SACLA BEAMLINE UPGRADE

前坂比呂和^{#,A)}, 大島隆^{A)}, 細田直康^{A)}, 松原伸一^{B)}, 大竹雄次^{A)}
Hirokazu Maesaka^{#,A)}, Takashi Ohshima^{A)}, Naoyasu Hosoda^{A)}, Shinichi Matsubara^{B)}, Yuji Otake^{A)}

^{A)} RIKEN SPring-8 Center

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

In 2014, the X-ray free electron laser facility, SACLA, was upgraded by building a new beamline, BL2, by installing undulators to BL1, by setting up a fast beamline switching system, and by relocating the SCSS test accelerator to the upstream of BL1. In this upgrade program, the extension of a beam diagnostic system, consisting of rf cavity beam position monitors (RF-BPM), screen monitors (SCM), differential current transformers (CT), a halo monitor etc. was carried out. The demanded performance of the extended instrumentation is the same as BL3, e.g. less than 1 μm resolution for RF-BPMs and 10 μm resolution for SCMs. In order to support the fast beamline switching operation, a trigger system and a data acquisition system for the beam diagnostics were also upgraded. We analyzed the data from the extended part of the beam diagnostic system and we confirmed sufficient performance for the XFEL operation, such as a value of less than 1 μm resolution of RF-BPMs and a few 10 μm optical resolutions of SCMs.

1. はじめに

X線自由電子レーザー施設 SACLA において、ユーザの利便性向上のため、2014 年に以下のような高度化をおこなった。

- 新規ビームライン BL2 の設置
- 既存ビームライン BL1 のアンジュレータ増設
- ビームの高速振り分けシステム導入
- SCSS 試験加速器を BL1 専用加速器として転用

これらの高度化後の SACLA ビームラインの概略図を Fig. 1 に示す。これにより SACLA は、供用開始当初は BL1 と BL3 のビームライン 2 本体制であったが、BL2 が新設されて 3 本体制となった。また、これまでは複数のビームラインがあっても、ビームルートを決める偏向電磁石が直流でしか励磁できなかったため、同時には 1 本のビームラインしか利用することができなかった。そこで、我々は加速器の繰り返し（最大 60 Hz）ごとにビームを振り分けるための高速振り分けシステムを導入し、複数ビームラインを同時に利用できるようにした^[1]。さらに、BL1 専用加速器を設置することにより、BL1 は BL2, BL3 とは独立に運転できるようにした^[2]。このように、今回の高度化において、ビームラインが 1 本増えて 3 本となっただけでなく、その 3 本のビームラインが同時に利用できるようになる。

以上の高度化にともない、ビーム診断システムにおいても我々は機器の新設や機能強化をおこなった。BL1, BL2 では空洞型ビーム位置検出器(RF-BPM)^[3]、スクリーンモニタ(SCM)^[4]、差動型 CT^[5]、ハローモニタ^[6]などのビーム診断機器を新たに設置した。これらの機器に対する要求性能は既存ビームライン BL3 のものと同様で、たとえば、RF-BPM の位置分解能は 1 μm rms 以下、SCM の光学分解能は 10 μm

程度が必要となる。そして、高速振り分けシステムに対応するため、ビームラインごとに適切なトリガを供給できるようにして、データ収集がビームラインごとに適切におこなえるようにした。また、既存ビームラインとの協調運転が必要となることや、建設期間が短いことから、新設機器は既存機器と制御性を統一することも求められる。

本稿では、これらの高度化の概略とビーム診断システムの増強について述べ、実際にビーム運転をおこなって確認した性能を示すこととする。

2. SACLA 高度化の概略とビーム診断システムの構成

2.1 新規ビームライン BL2 の設置

Figure 1 に示すように、我々は新規ビームライン BL2 に真空封止アンジュレータ 18 台を新たに設置した。BL2 のアンジュレータは既存ビームライン BL3 と同じで、周期長 18 mm、長さ約 5m となっている。

BL2 のビーム診断システムは、BL3 と要求性能が同じため、BL3 と同じ仕様の機器を用いることとした。まず我々は、アンジュレータの間、および、上下流に合計 22 台の RF-BPM^[3]を設置した。そして、アンジュレータ 4 台ごとに SCM^[4]と CT^[5]を設置し、アンジュレータ上下流のもの合わせて SCM 6 台、CT 7 台を設置した。SCM については、コヒーレント遷移放射光の影響を抑制するため、YAG:Ce スクリーンと穴あきミラーを用いるもの^[4]を採用した。アンジュレータの上流には、ビームハローが磁石列に当たらないように監視するためのハローモニタ^[6]を設置した。そして、線型加速器下流端から BL2 上流端までのビーム輸送部 BTA にも RF-BPM 2 台、SCM 1 台を増設して、Fig. 1 に示すビーム診断機器

[#]maesaka@spring8.or.jp

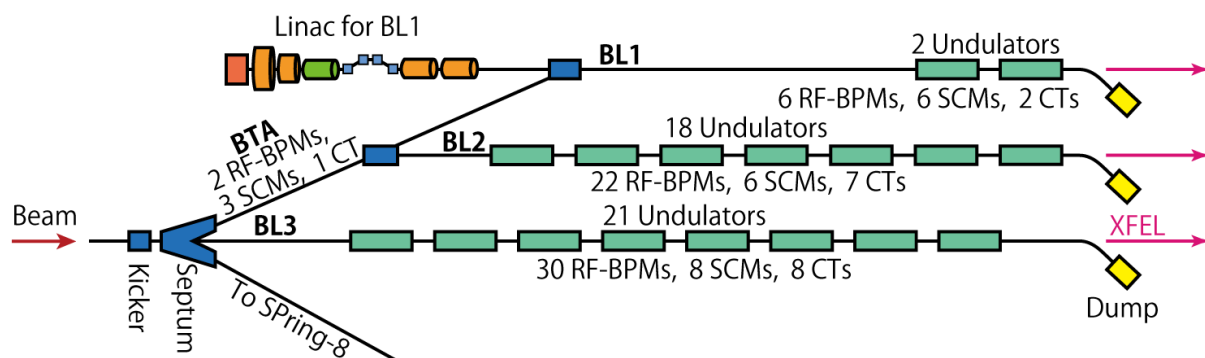


Figure 1: Schematic layout of the undulator beamlines of SACLA after the upgrade in 2014.

の構成とした。この BTA の RF-BPM は、ビームのエネルギー分散の大きいところに設置してビームエネルギーを常時監視することを目的としている。

これらのビーム診断システムの読み出しには、新たに基準高周波信号やトリガ信号が必要となる。そこで、後述する BL1 専用加速器にも前記信号が必要なので、新たに高周波信号用光ファイバの敷設をおこなった。新たに配信する信号は、既存の信号を EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) で増幅して生成することとした。伝送信号は EDFA で増幅したあとも、高周波信号の位相ノイズにほとんど変化はなく、十分に安定な信号が供給できていることを確認している。

2.2 既存ビームライン BL1 のアンジュレータ増設

BL1 では、SCSS 試験加速器で使用していた真空封止アンジュレータを改造、移設することにより、アンジュレータ 2 台の構成とした。アンジュレータのパラメータは BL2, BL3 と同じである。

BL1 も BL2, BL3 と同様のビーム診断性能が要求されるため、同じ RF-BPM, SCM, CT を設置した。それぞれの台数は、RF-BPM 6 台、SCM 6 台、CT 2 台となっている。このうち、RF-BPM はアンジュレータ付近に集中して設置し、SCM はアンジュレータ周辺とその上流のビーム輸送部の各所に設置した。

2.3 高速振り分けシステム

我々は、ビームをパルスごとに振り分ける運転を可能にするため、SACLA 線型加速器下流端のビーム振り分け部の電磁石を、直流励磁のものから 60 Hz のパターン励磁が可能なキッカ電磁石と直流のセプタム電磁石の組み合わせに交換した。こうすることで、例えば、加速器を 30 Hz で運転し、BL2 と BL3 に交互に 15 Hz ずつの繰り返してビーム供給をおこなうような運転ができる。さらに、加速器の一部のユニットを 15 Hz で運転すれば、一部のビームは加速なしで加速管を通過するので、BL2 と BL3 とでエネルギーの異なるビームを供給することも可能である⁷⁾。

高速振り分け運転の際には、上記のそれぞれの加速ビームに対応した測定をおこなうのが加速器の調整上は必須で、ビーム診断システムをはじめとする各種加速器コンポーネントに適切なトリガを供給す

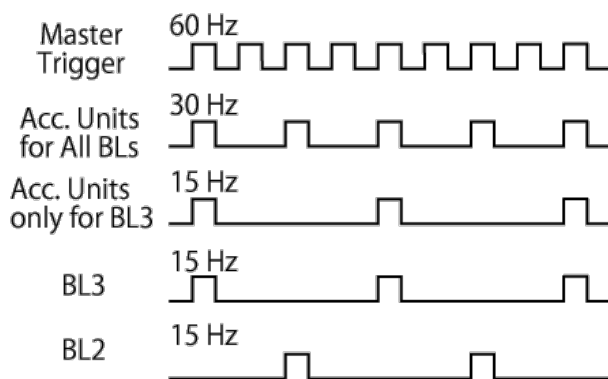


Figure 2: Temporal structure of trigger signals for fast beamline switching operation. In this example, the SACLA accelerator is 30 Hz operation and the beams are delivered to BL2 and BL3 with a repetition rate of 15 Hz each.

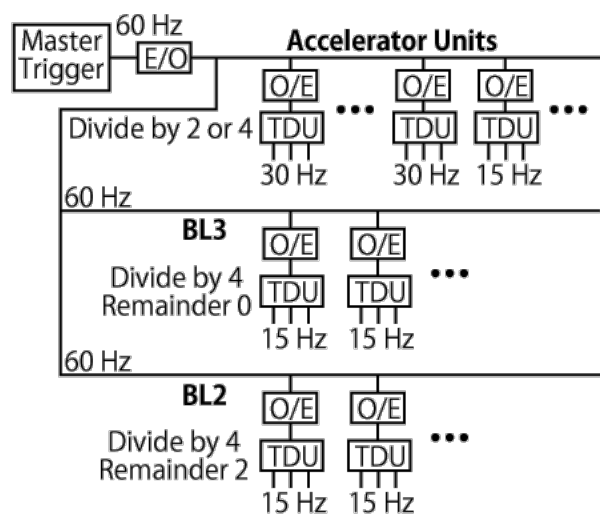


Figure 3: Schematic diagram of the trigger system for the fast beamline switching operation. The operation condition is the same as Fig. 2.

る必要がある。トリガの時間構造は、さきほどの 15 Hz ずつの振り分け運転の例のとき、Fig. 2 のようになる。これを実現するため、SACLA では Fig. 3 の

ようなトリガシステムを構築している。最上流のマスタトリガからは常時 60 Hz のトリガを配信し、受信側のトリガディレイユニット(TDU)で適宜間引いた上で適切なタイミングのトリガを各機器に供給する仕組みである。

Figure 2, 3 の例の場合、BL3 と BL2 の TDU はそれぞれ 15 Hz ずつのトリガ信号を出力するが、BL ごとに互い違いにトリガをかけなければならない。それを実現するため、TDU にはマスタトリガをカウントする機能を実装しており、分周して間引く際には、このカウンタを分周比で割った余りに応じて出力する機能も備えている。この機能を使うことで、60 Hz で入力されるマスタトリガ信号を 4 分周する際に、BL3 のトリガは余り 0 にて、BL2 のトリガは余り 2 にて出力するようにすれば、15 Hz ずつ互い違いにトリガをかけることができる。こうすることで、高速振り分け運転においても各機器に適切なトリガを出力することができる。

2.4 BL1 専用加速器

SACLA BL1 上流の 90 m ほどのスペースを利用して、線型加速器を設置すれば BL1 専用の加速器として他のビームラインとは独立に運転することができる。そこで我々は、SCSS 試験加速器で使用していた加速器コンポーネントを BL1 上流スペースに移設する作業をおこなった^[2]。現状の構成ではエネルギーで最大約 420 MeV まで加速できるようになっている。このスペースには加速ユニットをさらに設置する余地があるので、増設すれば最大 1.4 GeV の電子ビームを加速できることが見込まれている。このエネルギーの電子ビームを使えば波長数 nm の軟 X 線自由電子レーザーが発振可能である。

BL1 専用加速器の構成は SCSS 試験加速器と類似しているため、ビーム診断システムにおいてもその並びは試験加速器とほぼ同じである。しかし、一部コンポーネントは SACLA で新たに採用されたものに変更されている。まず、CT はノイズに強い差動型 CT とし、SCM の光学系についても、SACLA で使用しているものに一新した。RF-BPM については読出回路を SACLA と同じものに更新した。それにより、SACLA とほぼ同じ制御やデータ収集ができるようになっている。

3. ビーム診断システムの性能

本節では、今回の高度化のための機器の建設をおこなってから現時点までに BL2 の運転をおこなったので、そのデータから得られたビーム診断システムの性能について一部の機器の例を使用して述べる。

3.1 RF-BPM の位置分解能

我々は、BL2 の RF-BPM の性能を評価するため、各 RF-BPM の位置分解能を求めた。位置分解能の解析では、解析対象の RF-BPM のビーム位置データと、それ以外の RF-BPM から推定したビーム位置とをショットごとに比較し、その差の RMS を位置分解能とする。

この解析では、ショットごとのビーム位置データがすべて正しく同期している必要があるため、適切に解析できることは、データ収集系の健全性の確認にもなる。そのため、解析に用いるデータは BL2 と BL3 の高速振り分け運転のときのものとした。加速器の運転パラメータは、エネルギー 7.8 GeV、電荷量 0.17 nC で、加速器繰り返しは 30 Hz とし、BL2 と BL3 に 15 Hz ずつ交互に出射することとした。

上記の条件でとったデータを用いて、BL2 の 22 台、BL3 の 24 台の RF-BPM のデータを解析した。このときのビーム位置のショットごとのばらつき（ポインティング安定性）は、平均的に両ビームラインとも 5–10 μm rms 程度であった。解析の結果として得られた BL2 の RF-BPM の位置分解能のヒストグラムを Fig. 4 に、BL3 のヒストグラムを Fig. 5 に示す。BL2 の位置分解能は概ね 1 μm rms 以下となっており、SACLA の要求性能を満たしているとともに、解析時の位置推定値の差し引きが適切におこなわれたことも確認できた。

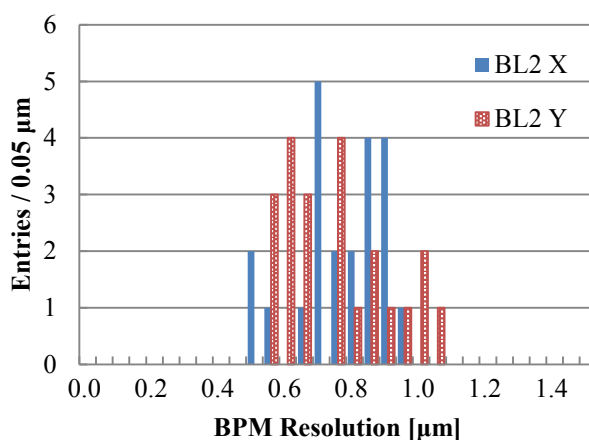


Figure 4: Histograms of the position resolutions of the RF-BPMs in the BL2. The blue solid (red hatched) bars show the horizontal (vertical) direction.

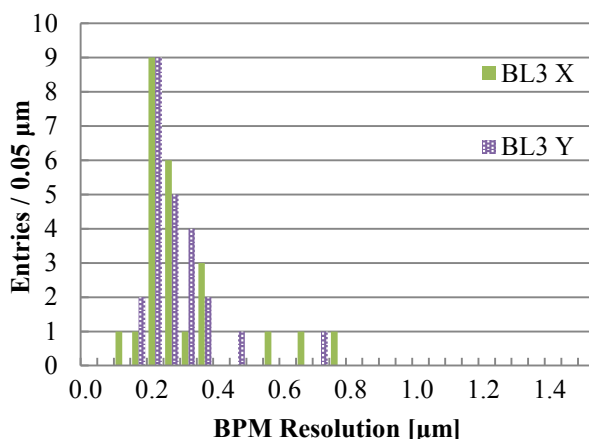


Figure 5: Histograms of the position resolutions of the RF-BPMs in the BL3. The green solid (purple hatched) bars show the horizontal (vertical) direction.

さて、BL2 と BL3 の分解能を比較すると、BL3 の方が 3 倍程度良いことがわかる。これは BL2 の RF-BPM の信号強度を固定アッテネータで調整する際に、BL3 より 10 dB 程度信号強度を小さくしたためである。これにより、位置分解能としては要求性能を満たしつつ、なるべく広い測定レンジが得られる。BL2 ではこの状態で ± 1 mm 程度の測定レンジがある。一方で BL3 はその約 1/3 である。

このように、高速振り分け運転をした状態でも適切な位置分解能が得られたことで、適切なトリガ生成やデータ収集ができていたことが証明された。また、振り分け運転でも $1 \mu\text{m}$ 以下の位置分解能が得られるのに十分なビームの安定度があることも同時に示された。

3.2 スクリーンモニタの性能

SACLA では、電子ビームのバンチ長が数 10 fs と短いため、スクリーンモニタ (SCM) のターゲットに衝突した際にコヒーレント遷移放射光 (C-OTR) が発生し、適切なビームプロファイルを得ることが難しい。そこで SACLA では、C-OTR の指向性と YAG:Ce の蛍光の等方性から、C-OTR と YAG:Ce を穴あきミラーを使って空間的に分離することで C-OTR の影響を抑制している^[4]。BL2 の新設の際にも同様の SCM を設置したので、その性能について述べる。

まず、BL2 のアンジュレータ上流の SCM で撮ったビームプロファイルの例を Fig. 6 に示す。画像中心付近に楕円形のビームプロファイルが適切にとれておていることがわかる。そして、C-OTR のテール部分がミラーの穴の外側から反射されて周辺部が光っているように見える。このことから、C-OTR の影響なくビームプロファイルが測定できていることがわかる。

次に、光学分解能を確かめるため、SCM 上流の四極電磁石を使って Q スキャン法^[8]によるエミッタンス測定をおこなった。そのデータの例を Fig. 7 に示す。横軸はスキャンした四極電磁石の K 値で、縦軸はビームサイズの標準偏差の 2 乗である。このビームサイズは、ビームプロファイルを射影したものをガウシアンでフィッティングすることによって求めている。このデータは、理想的には 2 次関数とならなければならないが、実際にほぼそのような形となっている。また、最もビームを絞ったところではビームサイズが $30 \mu\text{m}$ std. となっている。このことから、最悪でも $30 \mu\text{m}$ 以下の光学分解能があることが確かめられた。

3.3 その他のビーム診断機器の性能

その他、差動型 CT^[5] やハローモニタ^[6] など増設したのでその性能についても確認した。差動型 CT については、ビーム調整時に適切なビーム輸送ができていないかの確認だけでなく、積算電荷の管理や、定常運転時のビーム輸送効率の監視などに重要である^[9]。また、ハローモニタにおいては、アンジュレータの永久磁石に電子ビームが当たって減磁するのを防ぐのに重要である。差動型 CT、ハロー

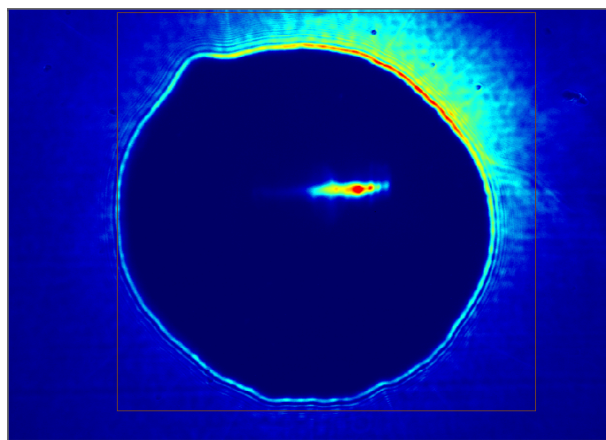


Figure 6: Beam profile taken by the YAG:Ce screen upstream of the BL2 undulator. The elliptic image in the circle shows the beam profile. This circle is generated by the C-OTR scattered at the edge of the perforated mirror. The diameter of the circle is 3 mm.

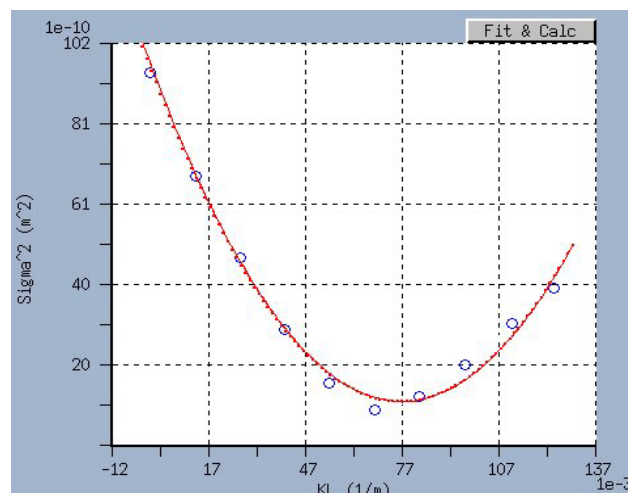


Figure 7: Vertical beam size data from a Q-scan method. The horizontal axis shows the K value of the quadrupole magnet and the vertical axis shows the square of the beam size (std.). The open circles are the data and the solid line is a parabolic function fitted to the data.

モニタとも BL2 での調整・評価の結果、既存ビームライン BL3 と同等の性能が得られていることが確かめられている。

4. まとめ

SACLA では 2014 年に、BL2 の新設、BL1 のアンジュレータ増設、高速ビーム振分システムの導入、BL1 専用加速器の設置をおこない、XFEL の利用機会の増大に向けた高度化を実施した。それにとともに、RF-BPM, SCM, CT, ハローモニタなどの各種ビーム診断機器が新たに設置された。また、高速振り分け運転にあたっては、複雑なトリガ生成や、データ収集機能が必要とされた。ビーム診断システムについて、上記の要求性能・機能を持つものを構

築した結果、十分な性能があることが確かめられた。たとえば、高速振り分け運転の状況下でも、BL2、BL3 の RF-BPM が $1\ \mu\text{m}$ 以下の十分な位置分解能を持つことが示され、また、SCM も最小で $30\ \mu\text{m}$ std. 幅のビームプロファイルが適切に取得できることが確かめられた。加えて、他のモニタも SACLA のものと同等の性能であることが確かめられた。これにより、BL1、BL2、BL3 の 3 ビームライン同時利用に向けた準備がほぼ整ったといえる。

参考文献

- [1] T. Hara, et al., “SACLA におけるマルチビームライン試験運転の現状”, in these proceedings.
- [2] T. Sakurai, et al., “SACLA-BL1 極紫外線 FEL 用加速器の建設と RF コンディショニング”, in these proceedings.
- [3] H. Maesaka, et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **696**, 66 – 74 (2012).
- [4] S. Matsubara, et al., “Improvement of Screen Monitor with Suppression of Coherent-OTR Effect for SACLA”, Proceedings of IBIC’12, pp. 34 – 37, MOCC04 (2012).
- [5] S. Matsubara, et al., “Development of High-Speed Differential Current-Transformer Monitor”, Proceedings of IPAC’11, pp. 1227 – 1229, TUPC094 (2011).
- [6] T. Ohshima, et al., “SACLA でのハローモニタの改良”, in these proceedings.
- [7] T. Hara, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **16**, 080701 (2013).
- [8] S. Y. Lee, Accelerator Physics (World Scientific, Singapore, 2007), 2nd ed., p. 62.
- [9] S. Matsubara, et al., “SACLA 運転インターロックシステムの更新 – 高速振分運転への対応 –”, in these proceedings.