

コンパクト ERL 用ビーム位置モニターとスクリーンモニターの開発 DEVELOPMENT OF BEAM POSITION MONITORS AND SCREEN MONITORS FOR COMPACT ERL

高井良太[#], 帯名崇, 谷本育律, 本田融, 野上隆史, 飛山真理

Ryota Takai [#], Takashi Obina, Yasunori Tanimoto, Tohru Honda, Takashi Nogami, Makoto Tobiyama
High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Accelerator Laboratory

Abstract

Stripline-type beam position monitors (BPMs) and RF-shielded screen monitors (SCMs) have been developed for compact ERL (cERL). The length of the stripline electrode was determined so that its sensitivity was maximized at the frequency of 2.6 GHz, twice the RF frequency, because we have to measure the positions of the accelerating and decelerating beams simultaneously in the energy recovered operation. The time response of the BPMs was improved by using the feedthrough sealed with a low-permittivity glass. The SCMs for cERL were designed to allow us to use two different screens, Ce:YAG scintillator and OTR radiator, according to the beam energy and intensity. The screens are concealed behind an RF-shield tube when not in use in order to reduce the influence of the wake fields induced by the electron beam. These BPMs and SCMs have already been used in the commissioning of the cERL injector and shown the expected performance.

1. はじめに

現在、KEK では次世代放射光源 ERL の原理実証機として、コンパクト ERL (cERL) の建設を進めている。今年 3 月末には、光陰極型 DC 電子銃、電子銃励起用レーザーシステム、前段加速用超伝導空洞、入射ビーム診断ラインから構成される cERL 入射部が完成し、続く 3 カ月でそのビームコミッショニングをほぼ予定通り遂行することができた^[1]。この 7 月からは残る周回部の建設を急ピッチで進めており、12 月中には主加速空洞やダンプレインを含む cERL 全体でのビームコミッショニングを開始する予定である。

大電流かつ低エミッタンスの電子ビームを備えた ERL 固有の問題を正しく理解し、その性能を極限まで引き出すためには、ビームの位置や形、大きさ、強度といった様々なパラメータを精密に計測し得るビーム診断装置の存在が欠かせない。cERL にも

様々なビーム診断装置がインストールされるが、本報告ではそれらの中でも最も基本的で重要な役割を担うビーム位置モニター (BPM) とスクリーンモニター (SCM) の設計思想、および実際に入射部コミッショニングで使用した結果について紹介する。

図 1 に cERL 周回部に設置される BPM と SCM の配置図を示す。各凡例内の数字は、入射部に設置されているものを含めた通し番号となっている。

2. ビーム位置モニター (BPM)

ビームの重心位置を非破壊で計測できる BPM は、大強度ビームを扱う ERL では特に有用な目となる。現在建設中の cERL には、全部で 45 台の BPM が設置されるが、その種類はダクトの内径や電極形状により表 1 に示した 5 つに大別される。本章では、これらの中で最も製作台数の多い直線部用 BPM に注目し、その構造や電気的特性、検波回路の詳細等について述べる。

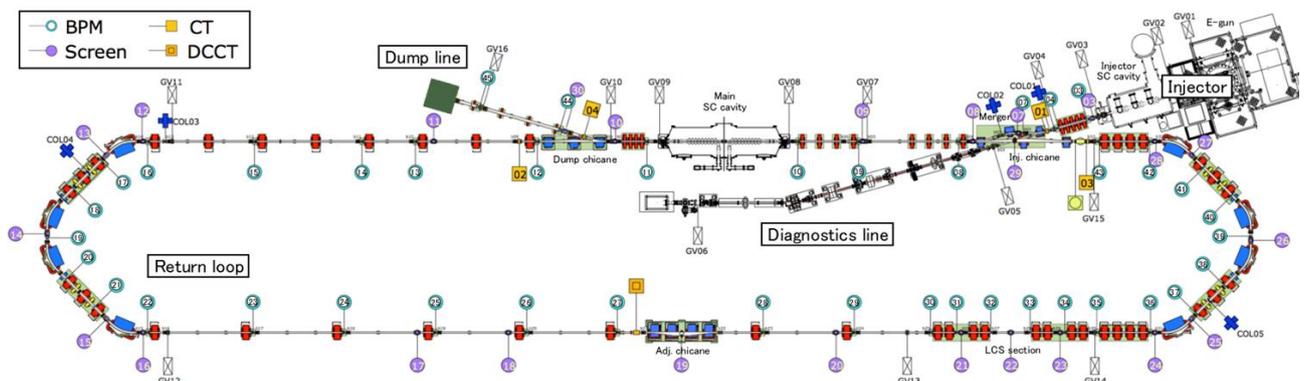


Figure 1: Schematic layout of beam monitors for cERL.

[#] ryota.takai@kek.jp

Table 1: BPM List for cERL

Section	Duct	Type	No.	Output [mV _{pp}]	Loss fac. [mV/pC]
Merger & Straight	φ50	Stripline (Short)	27	103.5	59.1
Inj. & Diag. line	φ63	Stripline (Long)	4	88.6	48.3
Dump line	φ85	Stripline (Long)	2	60.2	21.3
Arc	Octa	Stripline (Short)	10	172.7	82.0
LCS	φ50	Button	2	75.1	26.1

2.1 ダクト構造

図 2 に直線部用 BPM の模式図と電極部の写真を示す。ダクトの内径は 50 mm であり、その上下左右に 4 枚の板状電極（ストリップライン電極）を配している。電極の長さは、最も検出したい高周波信号の周波数で決まる。ERL の直線部では、加速位相に同期したビームと減速位相に同期したビームの両方が通過するセクションがあるため、BPM で検出すべき周波数は RF 周波数の 2 倍である 2.6 GHz となる。したがって、電極の長さは 2.6 GHz 成分に対する感度が最大になるよう選んだ (28.8 mm)。この電極長であれば 1.3 GHz 成分も十分検出できるが、感度としては 2.6 GHz 成分に対して 3 割程小さくなるため (-1.5 dB)、今後の拡張を考えても明らかに加速ビームか減速ビームのどちらかしか通過しないセクション（入射部およびダンプリーン）については 1.3 GHz で最大感度となる長さを採用した (57.6 mm)。表 1 では、前者を Short 型、後者を Long 型と表記している。一方、ストリップライン電極の幅は、どのセクションの BPM についてもビームからの見込み角が 20° となるよう選んだ。

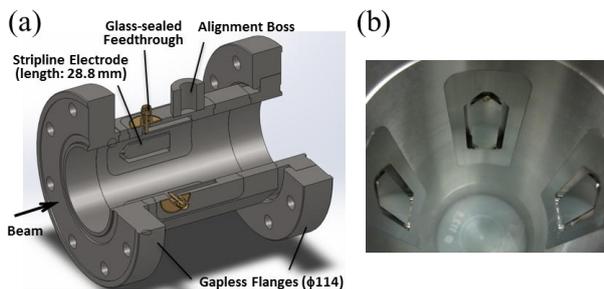


Figure 2: BPM duct for the straight section: (a) schematic drawing, (b) photo of the stripline electrodes.

このストリップライン電極に誘起される高周波信号は、ビームの進行方向に対して上流側に溶接されたフィードスルーを介して外部へ取り出される（下流側は接地）。上述したとおり、ERL では最短で 384 ps の周期で飛来するビームを個別に切り分けて検出しなければならない。このような高速な時間応答を実現するため、フィードスルーには通常のアルミナセラミックスよりも低比誘電率のガラス (BHA, $\epsilon_r = 5.0$) で絶縁・真空シールした“ガラス封止型

フィードスルー^[2]”を採用した。一般的にガラス素材はアルミナセラミックスよりも機械的強度の面で劣るが、今回使用したガラスは母材のコバルトとほぼ同じ熱膨張係数を持っており、適切な溶接代と開先を設けることで組立時やベーキング時に破損した例はない。コネクタには逆芯の SMA 型を採用しており、伝送ラインの特性インピーダンスは 50 Ω となるよう設計されている。図 3 に 3 次元ビームシミュレータ “GdfidL^[3]” を用いて計算したこの BPM の出力波形とビーム結合インピーダンスを示す。テストビームにはバンチ長 1 mm (3.3 ps)、バンチ電荷 1 pC の光速ビームを使用した。同様にして評価した各 BPM の出力信号振幅とビーム進行方向のロスファクターを表 1 にまとめて掲載する。

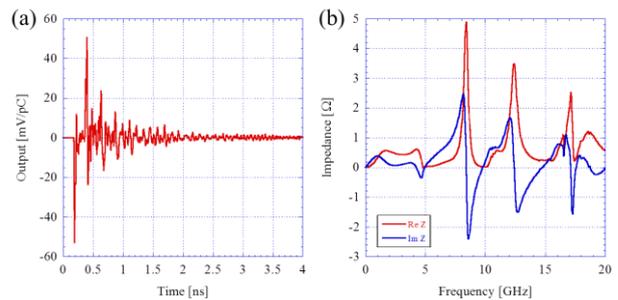


Figure 3: Simulated time response (a) and longitudinal coupled impedance (b) of the straight section's BPM.

ダクト両端のフランジは、ボルトで締結した際にダクト内面に間隙や段差が生じないように設計された特殊仕様となっている^[4]。ダクトの天面には、アライメント用のターゲット座を乗せるためのボスが設けられている。各パーツの接合は TIG 溶接で行い、全て大気側から施工することでダクト内面を平滑に保っている。納品されたこれらの BPM ダクトは、TDR (Time Domain Reflectometry) で各電極の健全性をチェックされた後、位置調整機構を備えた専用架台を介して cERL 各所に設置される。

2.2 検波回路・デジタイザ

コミッション前の段階では、調整時のビームパラメータとして「1 μs のマクロパルスで総電荷量 1 pC ~ 数 pC 程度」が予定されていた。これは、バンチ当たりの電荷に換算すると 0.001 pC ~ 0.002 pC 程度に相当するため、BPM ダクトから出力されるビーム信号の強度はかなり低いと予想された。また、初期の段階で何らかの機器トラブルがあった場合は、上記の予定よりも低い電荷で運転する可能性もあるため、できるだけダイナミックレンジの広い検波回路が望ましい。cERL で目標としている規格化エミッタンスは小さいが、入射部コミッションの段階での実ビームサイズは数 100 μm 程度であるため、高精度の BPM は必ずしも必要ではなく、むしろ最初にビームを出す段階から小電荷でも位置測定可能であることが望まれる。当然ながら、回路としては個別のバンチごとに位置を測定できる必要はなく、マクロパルスとしての位置を検出できれば

よい。検波の中心周波数は 2.6 GHz が望ましいが、アーク部に使用している八角形ダクトのカットオフ周波数がちょうどその付近にあるため、全て 1.3 GHz 検波で統一する。また、今後の量産を考えると、なるべく安価に製作できることも重要な要素である。

以上のような条件を踏まえ、BPM の検波回路には測定のパンド幅が約 10 MHz のログ検波方式を採用した。回路のブロック図を図 4 に示す。この 4 チャンネルを処理する回路は、NIM ビン 1 幅のケースに格納されている。可変減衰器の設定が 0 dB の状態で、-90 dBm から -30 dBm までの入力電圧レベルに対し Log-Linear に応答する。また、1 μ s 幅のパルス信号を入力した場合、立ち上がり 200 ns でフラットトップな波形が得られる。

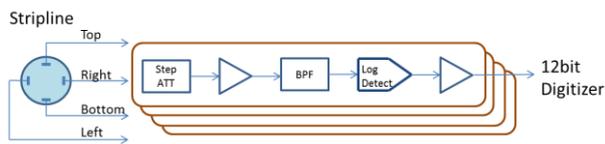


Figure 4: Block diagram of the cERL BPM.

デジタル化としては、横河電機社製の高速データアキュジションユニット“SL1000^[5]”と 100 MS/s, 12 bit の絶縁入力モジュールを使用した。ログ検波出力のデジタル化する点では、固定電圧レンジの ADC ボードを採用することや、大量生産品である安価なオシロスコープを並べて使用することも検討したが、サンプリング速度、ビット数、チャンネル数、価格、占有面積等の点でそれぞれ利点と欠点がある。最終的にはアナログ帯域が十分広いことと 12 bit の分解能があること、また、同じモジュールをファラデーカップやダンプの電流モニター、その他の波形解析にそのまま使用できるという利点から上記の方式を採用した。より多くのチャンネル数が必要となる周回部のデジタル化については現在検討中である。

2.3 入射部コミッションングでの使用結果

図 5(a)に検波回路に入力する前のストリップライン出力、(b)にログ検波回路出力をデジタル化した結果を示す。最初にビームを出したときからこの波形が観測できたため、ビームを下流まで導くのに大いに役立った。また、4 電極の Sum 信号は、ファラデーカップで校正することにより非破壊の電流モニターとして重宝された。ビーム位置の演算は、図 5(b)に示した波形のフラットトップ部分のみを取り出して平均化した後に行っている。その際に使用する

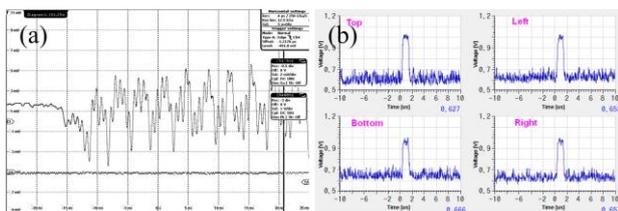


Figure 5: (a) Input signals of the detector circuit. (b) Output signals of the digitizer.

る BPM の感度曲線の計算には“CST PARTICLE STUDIO^[6]”を利用した。

3. スクリーンモニター (SCM)

ビームが当たると発光するスクリーンをビーム軌道上に挿入し、その発光分布からビームの位置やプロファイルを光学的に測定する SCM は、原理が単純で信頼性が高く、非常に低強度のビームでも観測できることから、加速器のコミッションングやビーム品質の評価には欠かせない機器である。ただし、典型的な破壊型モニターであるため、使用する際はビームロスによる空間線量の増加やスクリーン自体の損傷に注意しなければならない。図 1 に示したとおり、cERL にも随所に SCM が配置されており、その数は 30 台に及ぶ。内部の構造は設置場所によって異なっており、表 2 に挙げた 6 種類に分けられる。本章では、これらの中から主に直線部用 SCM を取り上げ、その構造やスクリーン観測用光学系、実際に使用した結果等について述べる。

Table 2: SCM List for cERL

Section	Duct	Actuator	Screen	Size	No.
Merger & Straight	$\phi 50$	Pneumatic	YAG & OTR	$\Phi 28$	16
Inj. & Diag. line	$\phi 63$	Pneumatic	YAG	$\Phi 26$	5
Dump line	$\phi 100$	Pneumatic	YAG & OTR	$\Phi 50$	1
Arc	Octa	Pneumatic	YAG & OTR	20×40	6
Inj. chicane	Flat	Pneumatic	YAG / OTR	26×76	1
Adj. chicane	Flat	Stepping motor	YAG / OTR	26×66	1

3.1 ダクト構造

図 6 に直線部用 SCM の模式図とスクリーンホルダーの写真を示す。スクリーンホルダーは 2 段式となっており、ビームの強度やエネルギーに応じて 2 種類のスクリーンを使い分けられる構造となっている。一つ目のスクリーンは、厚さ 0.1 mm の Ce:YAG シンチレータである。黄色透明なセラミックス素材で、電子ビームが当たると可視域の蛍光を等方的に発する。蛍光の減衰時間も 100 ns 程度と短く、高繰り返しビームの観測に適している。チャージアップによる破損を防ぐため、ビームが入射する面には厚さ 3 nm のアルミコーティングを施している。ビーム軸に対して 90° の方向から観測する場合、スクリーンに対するビームの入射角を 0° にする配置と 45° にする配置が考えられるが、同じ大きさのスクリーンでも有効径を大きく取れること、有限の被写界深度に起因するピントのずれがないこと、結晶内の発光域を斜めから透視することによる分解能の低下がないこと、導電性コーティングによる蛍光強度の減衰がないこと等の理由から、我々は 0° 入射の配置を採用した (一部の SCM を除く)。蛍光はス

クリーンの背後に 45° の角度で取り付けられたステンレスミラー（厚さ：1 mm）を介してビューポートへ導かれる。もう一つのスクリーンは、OTR（Optical Transition Radiation）発生用の金属フォイルである。OTR は荷電粒子が誘電率の異なる物質へ入射する際にその境界面から発せられる輻射であり、上記の蛍光と比べると発光の強度や指向性の面で難があるが、その高い時間・空間分解能やビーム強度に対するダイナミックレンジの広さはそれらを補って余りある。発生源としては各施設で様々な材質が使用されているが、我々は加工や取り扱いの容易さ、熱負荷に対する耐性等を考慮し、厚さ 0.07 mm のシリコンウェハーを採用した。この場合もやはり 0° 入射の配置とするのが理想であるが、通常の反射ミラーを用いるとターゲット裏面からの前方 OTR とミラー表面からの後方 OTR が重複して取り出されることになる。これを避けるためには OTR の角度分布を考慮した穴開きミラーを使用する等の工夫が必要となるため、OTR ターゲットについては 45° 入射の配置とした。使用するシリコンウェハーは両面とも鏡面加工されており、ビームの入射面にはさらに反射率を高めるためのアルミコーティング（厚さ：40 nm）が施されている。これらのスクリーンの開口サイズは 28 mm である（他のセクションについては表 2 を参照）。周辺部の 4 カ所には直径 1 mm の穴が開けてあり、スクリーン表面へのピント調整やカメラ倍率の校正に利用している。

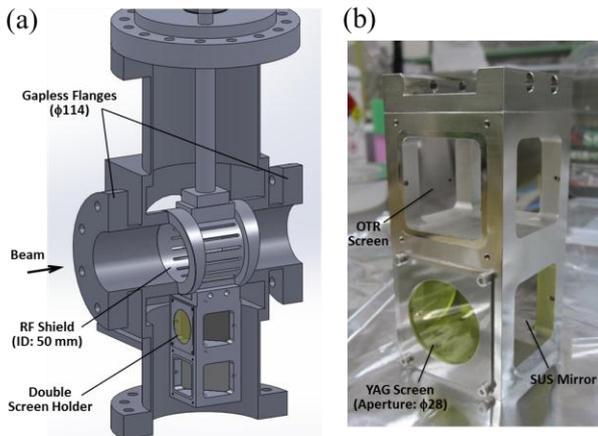


Figure 6: SCM duct for the straight section: (a) schematic drawing, (b) photo of the screen holder.

BPM ダクトでも配慮していたように、100 fs 以下のバンチ長を目標としている cERL では、内面にギャップや段差の少ない低インピーダンスのビームダクトとすることが重要である。そこで、SCM ダクトもスクリーンを使用しないときは両端のビームダクトと滑らかに繋がる RF シールドがビームラインに入る構造にした。シールドとダクトの接触は、コンタクトフィンガーのような弾性を持つ部品ではなく、精密嵌合による物理的接触のみで実現している。内径 50 mm のシールドには幅 3 mm、長さ 30 mm の排気用スリットが合計 18 本、等間隔に配置されており、GdfidL によるロスファクターの試算では、

バンチ長 1 mm (3.3 ps) のビームに対してシールドを設けない場合のおよそ 1/100 (10 mV/pC) まで低減できることが分かっている。

RF シールドと 2 種類のスクリーンは、上部ポートに取り付けた 3 ポジション式の空気圧式アクチュエータにより駆動される。各ポジションの位置決め精度は 0.1 mm 以下である。ダクト本体の両側面には、ビューポート用の ICF フランジが直接溶接されている。ビームダクト両端のフランジには、BPM ダクトと同様、ギャップレスの特殊フランジを採用している。

以上のような直線部用 SCM の他、入射部には RF シールドや 2 種類のスクリーンの代わりに光陰極観測用ミラーやファラデーカップを備えた SCM がある。また、周長補正シケインに設置される SCM は、ビームエネルギーによって大きく変わる中心軌道に対応するため、ステッピングモーターによる無段式駆動となっている。

3.2 スクリーン観測用光学系

図 7 にスクリーン観測用光学系の模式図を示す。前節で述べたとおり、各スクリーンから発せられた光はビーム軸に対して 90° の方向に取り出され、可視域の減反射コーティングが施されたビューポートと 1 枚のアルミ平面ミラーを介して CCD カメラへと送られる。ミラーで一度中継しているのは、光軸の調整を容易にするのと、カメラをビームレベルより低い位置に設置することで放射線による CCD 素子のダメージを軽減するためである。カメラには、ギガビットイーサネットを通じて画像データの高速かつ長距離伝送が可能な GigE カメラ（Allied Vision Technologies 社製、Prosilica GC650^[7]）を採用した。CCD の画素数は 659×493 、画素サイズは $7.4 \mu\text{m}$ 、ダイナミックレンジは 12 bit (4096 階調) である。結像には絞りを備えた低ディストーションの CCTV レンズを使用する。必要に応じて、レンズ前面には吸収型の ND フィルターが取り付けられる。

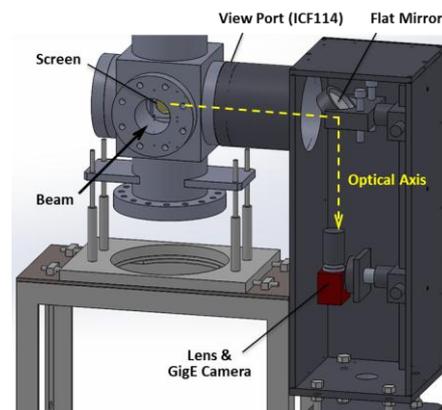


Figure 7: Optical layout of the cERL SCM.

結像光学系の空間分解能は、主に①レンズのザイデル収差と色収差、②絞りによる回折、③CCD 画素による量子化、④被写界深度、⑤結晶内での電子の多重散乱（YAG スクリーンの場合）によって決まる^[8]。①から③については、白色ネオセラムの基板

上の方眼パターン (2 mm ピッチ, 線幅: 0.5 / 0.1 mm) が印刷された校正プレートを実際のセットアップで撮影し、得られた像のエッジ幅から評価した (図 8 参照)。④の寄与は幾何学的に算出し、⑤による像の滲みは結晶の厚み程度と仮定して見積もった。その結果、上記の汎用光学系の分解能は、YAG スクリーンの場合 62 μm 、OTR スクリーンの場合 37 μm となった。ただし、OTR はその指向性から等方的に放出される光とは回折パターンが異なるため②の寄与が増大し、分解能は上記の値よりも大きくなると考えられる。当面はこれらの分解能でも問題は無いが、将来的にはエミッタンス測定に使用する SCM だけ高画素 CCD と倍率可変光学系に換装し、高分解能化を図る予定である。

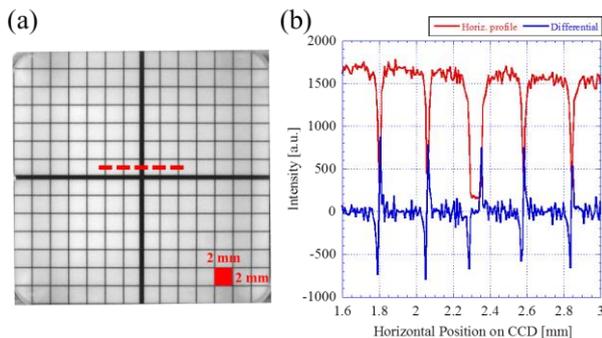


Figure 8: (a) Focused image of the calibration plate. (b) Horizontal profile on the dashed line and its position differential.

3.3 入射部コミッショニングでの使用結果

低強度ビームによる入射部コミッショニングでは、軌道調整からビーム品質の評価まで、SCM が非常に重要な役割を果たした。上述したシリコンウェハからの後方 OTR は、ビームの正反射方向を中心に $\pm 1/\gamma$ (γ : ローレンツファクター) の角度で集中的に放射される。入射ビームのエネルギーは最大で 5.5 MeV 程度であるから、OTR の角度幅は ± 85 mrad となり、上記光学系の開口数 (~ 36 mrad) で観測するのはまず不可能である。したがって、入射部コミッショニングでは YAG スクリーンしか使用しなかった。YAG スクリーンの場合、蛍光の減衰時間内 (~ 100 ns) に単位面積当たりに入射する電荷量によっては発光強度が飽和する可能性があるが、コミッショニングにおける最大電荷 (7.7 pC/bunch) では最もビームを集束した状態でも飽和しないことを実験的に確認済みである。

どの SCM も、光学系はスクリーン全体が見渡せる倍率 (0.13 倍程度) に調整した。1 pixel がスクリーン上でのおよそ 55 μm に相当する。5 Hz のビームトリガに同期して取得された画像データは、カメラごとに用意されたイーサネットポートを通じて平行に画像処理専用サーバへ送られる。サーバは EPICS IOC として機能しており、画像処理した結果をネットワーク上の任意のクライアント (OPI) に提供する。カメラの GUI パネルは、現在 Cosylab を

はじめとした EPICS コミュニティで開発が進められている “CSS^[9]” で作成した。図 9 はコミッショニング中に撮った GUI パネルのスクリーンショットである。上部のプルダウンメニューにより、一枚のパネルで複数のカメラに対応できる。パネルには取得した 2 次元画像の他、任意の範囲の射影プロファイルや各種統計データ、プロファイルのピーク位置のトレンドグラフ等が表示されている。また、リアルタイムで行うバックグラウンド補正やガウシアンフィッティング機能も備えられている。

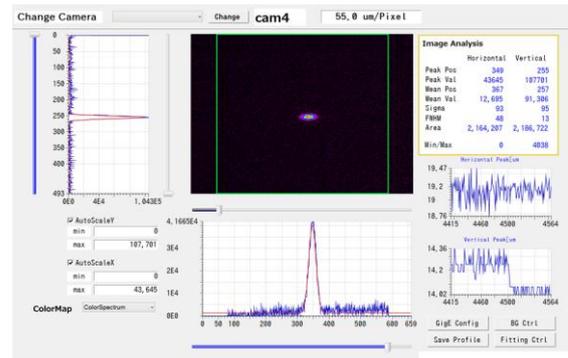


Figure 9: GUI Panel for the SCM camera.

4. まとめ

cERL で使用されるビームモニターの中でも最もスタンダードで重要なモニターである BPM と SCM について紹介した。今後も 2013 年 12 月に開始を予定している周回部コミッショニングへ向けた準備と並行し、将来の大強度・極短バンチビームの診断に備えた機器開発が進められる。

謝辞

KEK 加速器研究施設の本田洋介さん、内山隆司さんには、入射部 SCM の整備において多くのご助力をいただきました。同施設の多田野幹人さんには、SCM 制御盤の改造や GigE カメラの電源整備においてご協力いただきました。東日本技術研究所の路川徹也さんには、GigE カメラの EPICS アプリ開発において大変お世話になりました。この場を借りて、皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] T. Miyajima, “Commissioning Operation of the Compact ERL Injector”, in these proceedings, MOOT13.
- [2] M. Tobiyama, et al., “Development of Button Electrode with Improved Time Response”, Proc. of BIW08, p. 205.
- [3] <http://www.gdfid.de/>
- [4] Y. Tanimoto, et al., “Design of the cERL Vacuum System”, Proc. of IPAC13, p. 3315.
- [5] <http://www.yokogawa.com/jp-yimi/tm/Bu/SL1000/>
- [6] <http://www.cst.com/Content/Products/PS/Overview.aspx>
- [7] <http://www.alliedvisiontec.com/us/products/cameras/gigabit-ethernet/prosilica-gc/gc650.html>
- [8] K. Yanagida, et al., “Spatial Resolution of Screen Monitor for XFEL/SPring-8”, Proc. of Particle Accel. Soc. Meeting 2009, p. 448.
- [9] <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/css/>