

# LabVIEWを用いたSRILACビームエネルギー・位置モニターシステムの EPICSによる分散制御

## DISTRIBUTED CONTROL BY EPICS FOR THE SRILAC BEAM ENERGY POSITION MONITORING SYSTEM USING LABVIEW

渡邊環<sup>\*A)</sup>、鴨志田敦史<sup>B)</sup>、内山暁仁<sup>A)</sup>、福西暢尚<sup>A)</sup>、西隆博<sup>A)</sup>、小山亮<sup>C)</sup>、金子健太<sup>C)</sup>

Tamaki Watanabe<sup>\*A)</sup>, Astushi Kamoshida<sup>B)</sup>, Akito Uchiyama<sup>A)</sup>,  
Nobuhisa Fukunishi<sup>A)</sup>, Takahiro Nishi<sup>A)</sup>, Ryo Koyama<sup>C)</sup>, Kenta Kaneko<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup>RIKEN

<sup>B)</sup>National Instruments Japan Corporation

<sup>C)</sup>SHI Accelerator Service Ltd.

### Abstract

Beam commissioning for the newly constructed Superconducting RIKEN Heavy-ion Linac (SRILAC) has been successfully completed. Presently, the SRILAC is in operation for promoting super-heavy element searches and radioactive isotope production for medical use. For the stable operation of the SRILAC, non-destructive and highly sensitive measurement by the beam energy and position monitor (BEPM) system is essentially important. Even if the beam intensity is very weak, we can measure the beam position and energy accurately. These measurements and controls are programmed with LabVIEW. On the other hand, by sharing these measured values such as beam positions and beam energies with a large-scale EPICS control system, it became easy to obtain the correlation of each relevant machine parameters in time series.

### 1. はじめに

理化学研究所に於いて、既設の理研線形加速器 RILAC (RIKEN Heavy-ion Linac) [1] をアップグレードするために、理研超伝導線形加速器 (SRILAC) [2] を新たに建設し、そのビームコミッショニングに成功した [3]。このアップグレードの目的は、森田グループが発見し、アジア初で命名された 113 番目元素「ニホニウム」[4] に引き続き超重元素の探索と、がん治療用として注目されている放射性同位元素  $^{211}\text{At}$  の製造 [5] を促進することである。ここで、大強度重イオンビームを安定に加速するためには、ビーム診断技術は極めて重要になってくる。従来から用いられている破壊型ビームモニターを使用する場合、ビームの照射により脱ガスが発生し、超伝導高周波加速空洞の Q 値や表面抵抗等、超伝導の性能を維持することが、長時間の運転に於いて困難になる。これらの要請から、新たにビームエネルギー・位置モニター (Beam Energy and Position Monitor: BEPM) システムを開発した [6,7]。現在、大強度重イオンビームの安定な加速のために、ビームを常時・非破壊で測定している。

### 2. SRILAC に於ける BEPM システム

#### 2.1 BEPM のピックアップ

RILAC 後段と SRILAC の加速器群、新超重元素探索を目指す実験装置 (GAs-filled Recoil Ion Separator: GARIS III) とがん治療用 RI 製造装置の配置図を Fig. 1 に示す。設置する箇所に応じて、3 種類の BEPM (Type I, II, III) を設計し、11 台の BEPM を製作した [8,9]。Figure 1 に示すように、BEPM は超伝導高周波加速空洞

間の四重極電磁石内の中心に設置されている。Figure 2 に 3 種類の BEPM とその断面図を示す。パラボラ型にカットされた 4 電極を用いることによって、良好なビーム位置の感度を保ちつつ、理想的な四重極モーメントが得られる [10]。ここで、 $\theta$  を円筒座標系に於ける角度、 $y$  を縦方向の長さとする、電極の形状は  $y = (L/2) \cos 2\theta$  で表される。それぞれの BEPM は、 $x$  軸方向に 4 つ、 $y$  軸方向に 8 つの基準座を持ち、それらは較正のためのマッピング測定時とインストール時のアライメントに使用された。4 電極の中心を真として、これらの基準座の機械的な精度が  $\pm 0.05$  mm に、他の箇所は  $\pm 0.1$  mm に収まるように製作されている。

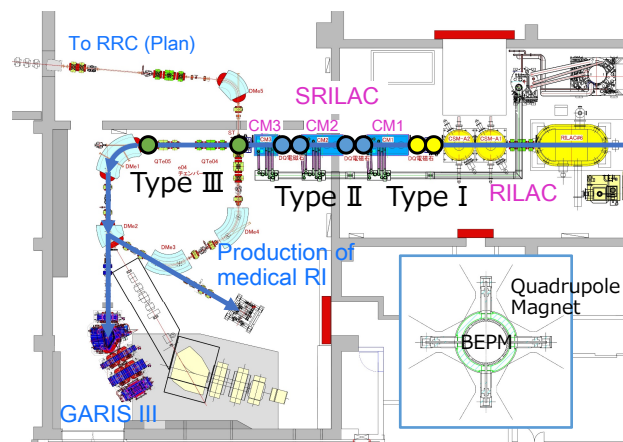


Figure 1: Schematic drawing of the RIKEN Heavy-ion Linac (RILAC), the upgraded Superconducting Linac (SRILAC), and the installation locations of the 3 types of BEPM [6].

\* wtamaki@riken.jp

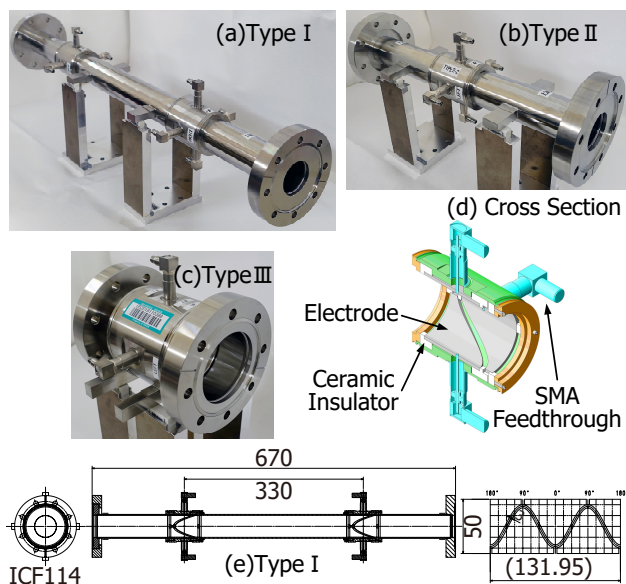


Figure 2: Photographs of the 3 types of BEPM: (a) Type I, (b) Type II, and (c) Type III. (d) Cross section drawing of a BEPM. (e) Schematic drawing of Type I [6].

## 2.2 BEPM システムと LabVIEW によるプログラミング

BEPM システムのデータ収集ブロックダイアグラムを Fig. 3 に示す。増幅されたピックアップ信号は、同軸ケーブルにより信号処理装置に送られる。TOF を精密に測定するため、8 本の同軸ケーブルを 1 セットとして、総計 32 本の同軸ケーブルについて、互いの信号長の相対差が 3 ps 以内に収まるよう精密な微調整を行ってきた。上流と下流のピックアップ信号は、マルチプレクサ (PXI-2599 [11]) が切り替え、ディジタイザ (PXIe-5160 [11]) によってデジタル化される。ディジタイザのサンプリング速度は 1.25 GS/s であるが、信号が繰り返されるといふ条件であれば、ランダムインターリーブ機能を使用

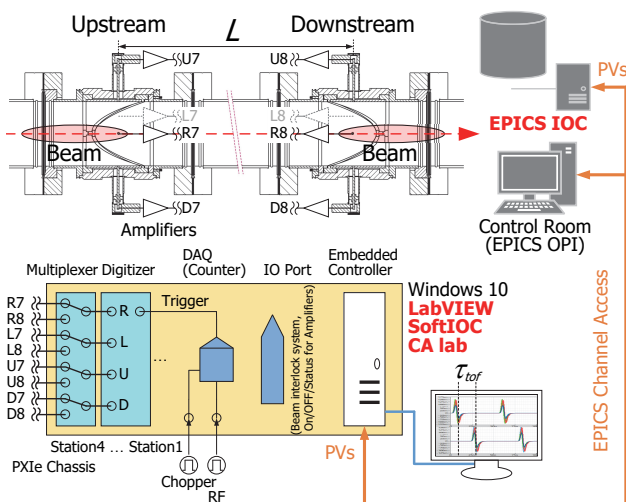


Figure 3: Block diagram of the BEPMs and DAQ.

することにより、50 GS/s のサンプリング速度での測定が可能となり、結果、高精度の TOF 測定を実現している。ランダムインターリーブ機能とは、並列に装備した AD コンバーターを少しずつタイミングを変えながら、実サンプリング内を補間する機能である。これらのモジュールは、全て PXI express シャーシ (PXIe-1082 [11]) 内に実装されている。

この BEPM システムの大きな利点は、ビームの TOF を正確に測定するために、SRILAC を励振している RF 基準信号と測定システムの同期を担保しながら、ビームチョッパーとの同期を取れる点である。このような仕組みは、超重元素探索の実験時や加速調整時の低いビーム電流の測定時に極めて大きな効力を発揮する。即ち、超重元素探索の実験時は、ターゲットの破損から最大限保護するために、ターゲットにビームを照射していない瞬間は、ビームチョッパーによりビームを間引いている。よって、BEPM システムもビームが照射された瞬間に、同期を取って測定を行う必要がある。更に、RILAC や SRILAC の加速調整時は、ビームロスによる超伝導高周波加速空洞の損傷を極力避けるため、ビームチョッパーによりデューティを 0.3 % 程度に下げているため、BEPM システムの測定にはビームチョッパーとの同期が必要不可欠となっている。現在では、ビームをチョップすることによりビーム強度を 10 enA 以下に下げても、ビームのエネルギーと位置の測定が可能となっている。

BEPM システムの制御は、LabVIEW 2020 [11] によってプログラミングされており、全モジュールのドライバーはナショナルインスツルメンツ社によってサポートされている。LabVIEW とは、グラフィカルプログラミング言語による開発環境であり、関数の代わりに VI (Virtual Instruments) を使用し、VI のアイコンを使ってウィンドウ上に配置し、VI 同士を組み立ててプログラムを作成する。更に、高機能なライブラリが提供されており、データのグラフ化の容易さやデバッグ機能を直観的に利用でき、開発を早く進めることが可能である。実際の加速器運転中に、急なプログラムの追加や変更が必要な場合、臨機応変に素早く修正ができる点は非常に使い勝手が良い。

BEPM システムが、ビーム位置、エネルギー、四重極モーメント等を演算する際には、あらかじめ測定した定数の読み込みが必要となるが、それらの定数は CSV ファイルにまとめておき、LabVIEW から読み込んでいる。このことにより、プログラミング上の誤りが低減し、また定数の変更が生じた場合でもファイルの修正だけで済む。以下、ファイルにテーブル化した定数の項目を示す。

- 全アンプのゲイン、全 BEPM の実測アライメントエラー、マッピング測定で実測した 5 次の多項式展開式の係数 [12] と四重極モーメントを演算する係数
- TOF を得るための各 BEPM 間距離、(ビームの) 核種、原子数、質量数、Mass Excess、荷数、RF 周波数

### 3. EPICS による分散制御

#### 3.1 CA Lab と SoftIOC 導入による BEPM システムと EPICS の融合

仁科加速器研究センターの RI Beam Factory (RIBF) に於いては、加速器の運転や制御のために大規模な実験用機器を運用する分散制御システムソフトウェア環境 EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System [13]) が導入されている。BEPM システムで測定されたビームの位置、エネルギー、位相、ピックアップの電圧波形及び振幅、四重極モーメントは、EPICS 制御システムと情報を共有することで更に有効となる。EPICS は、Channel Access (CA) という通信プロトコルにより、サーバーとクライアントのネットワーク通信を行っている。ここで、Input Output Controller (IOC) は、制御システムの制御対象機器と CA 通信のネットワークを接続する EPICS の重要なソフトウェアを担い、ネットワーク上 Process Variable (PV) と呼ばれるデータを提供する。このため、PV の値は EPICS CA で変更することができ、PV の変化に応じて EPICS IOC は担当する装置を制御する。BEPM システムは前述したとおり LabVIEW でプログラミングされているが、SoftIOC と呼ばれるネットワーク上に PV を提供するプログラムと、PV の値が変化した場合に LabVIEW 上でイベント通知する CA Lab [14] を導入することにより、EPICS との間でデータの書き込みと読み込み (Fig. 3) を可能とした。BEPM システムが使用している PV は現在のところ、50 個のアナログ入力、8 個の波形データ、13 個のアナログとバイナリー出力であり、その項目は以下の通りである。

- ビーム位置、ビームエネルギー、ビーム波形、ビーム信号振幅、ビームと RF 信号との位相差、四重極モーメント
- 測定開始時間、垂直感度、アベレーシング回数、ビームオフ状態閾値、BIS 発報閾値、ループ時間制御オンオフ、イメージ印刷命令 (今後の追加予定を含む)

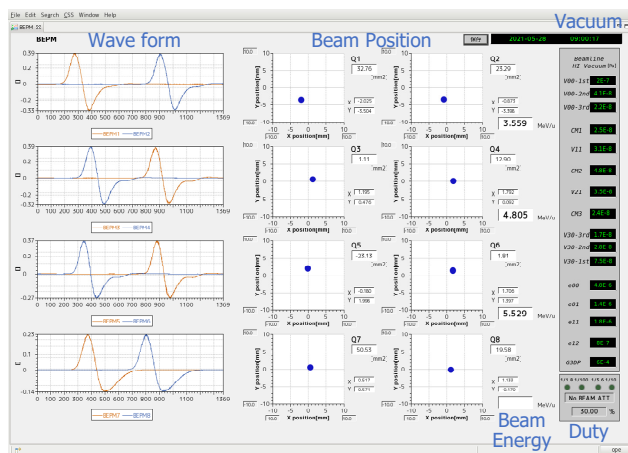


Figure 4: An example of the displayed measurement panel programmed with CSS on EPICS when the  $^{51}\text{V}^{13+}$  beam was accelerated. From left to right, the beam signal waveforms, beam positions, beam energies, vacuums, and duty of chopped beam are shown.

測定結果を EPICS 上のサーバーに集約して共有化することにより、加速器の真空、加速空洞の位相、電磁石の磁場、冷却水の温度等との相関を、時系列で得ることが容易となっている。また、BEPM システムの運用開始時は、リモートデスクトップを使用して測定と制御を行ってきたが、複数のオペレーターによる同時使用が困難であった。そこでヒューマンインターフェースとして、運転に必要なツール類を集約することができる汎用ツール CSS (Control System Studio [15]) を用いて、測定結果の表示や制御を行えるよう改良を施した。CSS に標準で組み込まれている BOY と呼ばれる Display Manager は、多種多様な高機能性を持つグラフィカルユーザーインターフェースである。Figure 4 に、 $^{51}\text{V}^{13+}$  ビームの加速時、CSS で作成され EPICS 上に表示された測定パネルの一例を示す。左から、ビーム信号波形、ビーム位置、ビームエネルギー値、真空度、ビームのデューティを示している。この測定パネルは、制御室内に場所を選ばず複数同時に表示することができるため、複数のオペレーターによる同時制御が可能となった。また、通常行うことはないが、ネットワーク通信による遠隔制御も原理的には可能である。

#### 3.2 BEPM システムと EPICS 間のデータ共有化

BEPM システムと EPICS 間でデータを共有化することにより、加速器の各パラメータとの相関を時系列で解析することが容易になった。Figure 5 に、 $^{51}\text{V}^{13+}$  ビームを加速した際に測定された、BEPM 1 のビーム位置と CM1-CM2 間 (Fig. 1 参照) の真空度の関係を示す。この測定から、BEPM 1 の水平ビーム位置が  $-1\text{ mm}$  から  $-2\text{ mm}$  にシフトすると、CM1-CM2 間の真空度が急激に悪化することが判明した。それ以降は、ビームの位置が  $-2\text{ mm}$  に達する前に、EPICS によるビームアテネーターを駆動する制御を追加して真空悪化を防いだ。経験上、 $0.6\text{ W}$  の重イオンビームが真空チェンバーで損失すると、真空度は  $10^{-8}$  台から  $10^{-6}$  Pa 台へ急激に上昇している。

次に、同じく  $^{51}\text{V}^{13+}$  ビームを加速した際に、BEPM 1 のビーム位置と CM1 (Fig. 1 参照) 近くに設置されているエリアモニターで測定された X 線の空間線量の測定

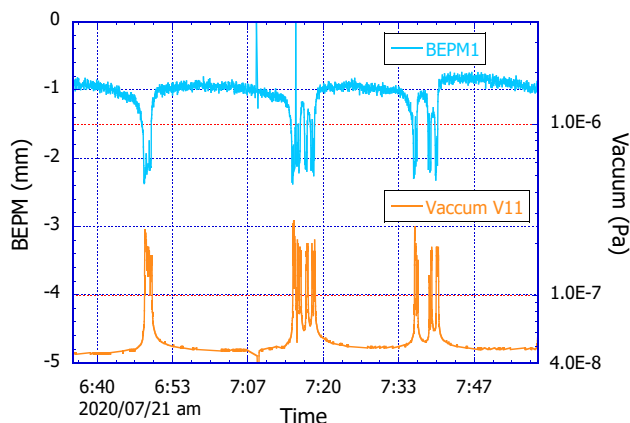


Figure 5: Measured results showing the relationship between the beam position at the BEPM 1 and the vacuum between CM1 and CM2 (see Fig. 1).

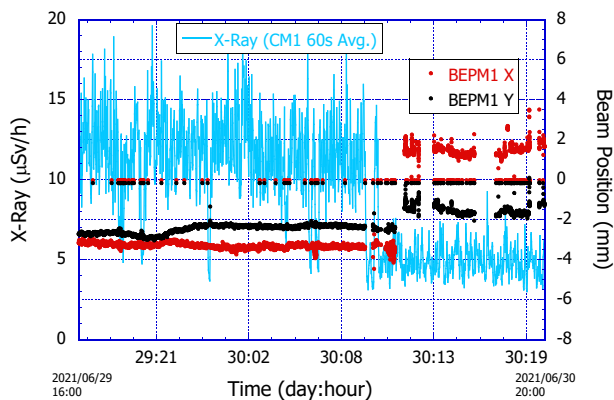


Figure 6: Measured results showing the relationship between the beam position at the BEPM 1 and the air dose of X-ray near CM1 (see Fig. 1).

結果を Fig. 6 に示す。この測定により、BEPM 1 の水平ビーム位置を約-3.5 mm から +1.5 mm に、垂直ビーム位置を約-3.0 mm から-1.5 mm に補正した際、CM1 の X 線の空間線量が半分以下に減少していることが解る。ここで、他の BEPM の位置でもビームが中心に来よう補正を施しているが、グラフが解りづらくなるため表示を割愛している。放射線エリアモニターでさえ、これだけ X 線の空間線量に変化があることが解ったので、感度の良いロスモニター導入の可能性について検討することになった。

更に、BEPM システムは、ビーム信号の振幅が設定した閾値を超えると、すぐさま EPICS 上のビームインターロックシステムに発報し、ビームを停止することが可能である。このインターロック発生時には、どの BEPM にビームが当たったかポップアップ表示し、アンプ保護のためにアンプ用電源を全て停止している。

また、信号切り替え用のマルチプレクサの仕様では、リレー接点の寿命が  $10^7$  回とされている。感覚的には十分長いと思われるが、連続して 1 秒に 1 回の切り替えを行うと僅か 116 日で寿命回数に達してしまう。そこで、EPICS 上でファラデーカップ (FC) の状態を監視し、以下 3 種類のモードを規定し、そのモードに応じて切り替え速度を変えている。加速器の停止時やユーザーのターゲット交換時に自動で停止するモードは、機器の保護やオペレーターの手間の低減に寄与していると考えられる。

- Mode1 : BEPM 上流の FC のどれかが 1 つでも入る  
⇒ 停止
- Mode2 : BEPM 上流の全て FC が抜けて、実験ユーザーの FC が入っている  
⇒ 2 s 切換 (高速モードで調整)
- Mode3 : BEPM 上流の全て FC と実験ユーザーの FC が全て抜ける  
⇒ 15 s 切換 (低速モードで監視)

#### 4. 結論と今後の展望

理化学研究所に於いて新規に建設した超伝導線形加速器 SRILAC は、重イオンビーム加速のコミッション

ングに成功し、ニホニウムに続く新超重元素発見や、医療用放射線同位元素の製造を目指し稼働を続けている。SRILAC を安定に運転するためには、ビームエネルギー・位置モニター (BEPM) システムによる非破壊で高感度な測定が必須である。このシステムは、数ナノアンペアの非常に微弱な電流のビームであっても測定が可能である。BEPM システムの測定や制御は LabVIEW によってプログラミングされているが、大規模な EPICS 制御システムとのデータの共有化により更に有益となった。測定結果を EPICS 上のサーバーに集約して共有化することにより、加速器の真空、加速空洞の位相、電磁石の磁場、冷却水の温度等との相関を、時系列で得ることが容易となっている。これらの測定技術が、さらなる超重元素の探索とがん治療薬として注目されている放射性同位元素  $^{211}\text{At}$  の製造へ貢献できることを願っている。

#### 参考文献

- [1] M. Odera et al., Nucl. Instr. Meth. Sec. A, vol. 227, pp. 187 - 195, 1984. doi:10.1016/0168-9002(84)90121-9
- [2] N. Sakamoto, Journal of Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 17, No.2, 2020, pp. 70-79.
- [3] N. Sakamoto et al., Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sept. 2020, Online, pp. 679-683; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FRPP/FRPP05.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FRPP/FRPP05.pdf)
- [4] K. Morita et al., J. Phys. Soc. Jpn. 81 (2012) 103201.
- [5] H. Haba, Drug Delivery System 35, No.2, 114-120 (2020).
- [6] T. Watanabe et al., Proc. of 2020 International Beam Instrumentation Conference (IBIC2020), Sept. 2020, Santos Brazil, Online, pp. 295-302. doi:10.18429/JACoW-IBIC2020-FRA004
- [7] T. Watanabe et al., Proc. of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sept. 2020, Online, pp. 718-723; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FRPP/FRPP20.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2020/proceedings/PDF/FRPP/FRPP20.pdf)
- [8] T. Watanabe et al., Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2018, pp. 49-54; [https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEOL/WEOL09.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/PDF/WEOL/WEOL09.pdf)
- [9] <http://www.toyama-en.com/>
- [10] G. Nassibian, CERN/SI/Note EL/70-13 (1970).
- [11] <http://www.ni.com/>
- [12] T. Watanabe et al., Proc. of 2019 International Beam Instrumentation Conference (IBIC 2019), Sept. 2019, Malmö, Sweden, pp. 526-529. doi:10.18429/JACoW-IBIC2019-WEPP007
- [13] Experimental Physics and Industrial Control System; <http://www.aps.anl.gov/epics/>
- [14] CA Lab (LabVIEW+EPICS); [https://www.helmholtz-berlin.de/zentrum/locations/it/software/exsteuer/calab/index\\_en.html](https://www.helmholtz-berlin.de/zentrum/locations/it/software/exsteuer/calab/index_en.html)
- [15] Control System Studio; <http://controlsystemstudio.github.io/>