

理研超伝導リニアック用ビームエネルギー・位置モニターのコミッショニング COMMISSIONING OF THE BEAM ENERGY AND POSITION MONITOR SYSTEM FOR THE SUPERCONDUCTING RIKEN HEAVY-ION LINAC

渡邊環^{*A)}、外山毅^{B)}、花村幸篤^{C)}、今尾浩士^{A)}、内山暁仁^{A)}、大関和貴^{A)}、上垣外修一^{A)}、
坂本成彦^{A)}、西隆博^{A)}、福西暢尚^{A)}、山田一成^{A)}、渡邊裕^{A)}、小山亮^{D)}、鴨志田敦史^{E)}
Tamaki Watanabe^{*A)}、Takeshi Toyama^{B)}、Kotoku Hanamura^{C)}、Hiroshi Imao^{A)}、Akito Uchiyama^{A)}、
Kazutaka Ozeki^{A)}、Osamu Kamigaito^{A)}、Naruhiko Sakamoto^{A)}、Takahiro Nishi^{A)}、Nobuhisa Fukunishi^{A)}、
Kazunari Yamada^{A)}、Yutaka Watanabe^{A)}、Ryo Koyama^{E)}、Astushi Kamoshida^{D)}
^{A)}RIKEN ^{B)}KEK/J-PARC ^{C)}Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd.
^{D)}SHI Accelerator Service Ltd. ^{E)}National Instruments Japan Corporation

Abstract

Beam commissioning for the RIKEN Heavy-ion Linac (RILAC) upgrade, including the new Superconducting Linac (SRILAC), has been successfully completed. The RILAC upgrade aims at promoting super-heavy element searches and radioactive isotope production for medical use. When the SRILAC beam is accelerated, the beam loss must be reduced to under 1 W/m. To continuously monitor the beam nondestructively, we have developed a new beam energy position monitoring (BEPM) system capable of simultaneously measuring the beam position and energy by measuring the time-of-flight. At the start of commissioning, the beam was chopped to 3% duty cycle to protect the SRILAC cavity from beam loss. Even though the beam intensity was very weak, we measured the beam position and energy to accuracies of ± 0.1 mm and several 10^{-4} precision, respectively. Here, we present details concerning the BEPM system and commissioning results.

1. はじめに

理化学研究所に於いて、森田グループが発見した 113 番目の元素が、国際機関により新元素として認定され、アジアで初めての快挙となるべく、「ニホニウム」と元素名が命名された [1]。さらなる超重元素の探索と、がん治療用として注目されている放射性同位元素 ^{211}At の製造 [2] を促進するために、RILAC (RIKEN Heavy-ion Linac) [3] のアップグレードプロジェクトが RI Beam Factory (RIBF) で開始された [4,5]。このプロジェクトは、超伝導 ECR イオン源 [6] とブースター線形加速器 SRILAC (Superconducting RILAC) [7] を導入することにより、重イオンのビーム強度とエネルギーを大幅に上げることを目指している。この構成に於いて、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。破壊型ビームモニターを使用した場合、脱ガスを発生することにより、超伝導高周波 (Superconducting RF: SRF) 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。これらの理由により、常時ビームを非破壊で測定する為に、新しくビームエネルギー・位置モニター (Beam Energy and Position Monitor: BEPM) システムを開発した。

2. SRILAC に於ける BEPM システム

2.1 RILAC と SRILAC

新しく建設された RILAC のビームトランスポートと SRILAC は、今年二月にインストールを終えた。既存の RILAC とアップグレードした施設を Fig. 1 に示す。

SRILAC は、三台のクライオモジュール (CM1, CM2, CM3) で構成され、CM1 と CM2 は 73 MHz の四分の一波長 ($1/\lambda$) 型空洞 (QWR) 4 台を、CM3 は 2 台の QWR を備えている。トータル加速電圧は、Q 値が 1×10^9 の時に 18 MW である。高真空を維持し ($< 10^{-8}$ Pa)、真空内の微粒子を極力減らすため、非蒸発型ゲッターポンプ主体の差動排気システムが、SRILAC の上流と下流に設置されている [8]。超重元素探索のための実験装置 (GAs-filled Recoil Ion Separator: GARIS III) とがん治療用 RI 製造装置の配置を Fig. 1 に示す。

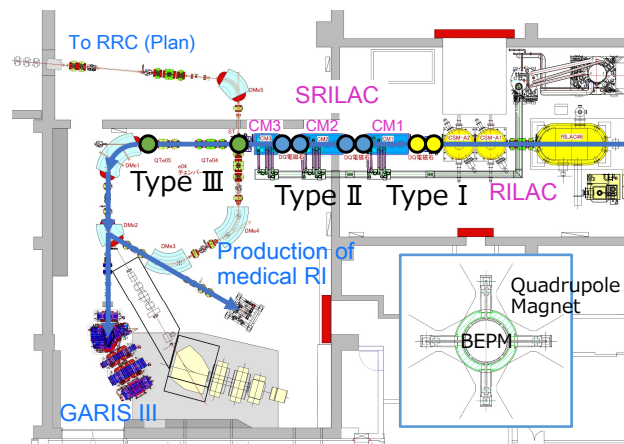


Figure 1: Schematic drawing of the RIKEN Heavy-ion Linac (RILAC), the upgraded Superconducting Linac (SRILAC), and the installation locations of the 3 types of BEPM.

* wtamaki@riken.jp

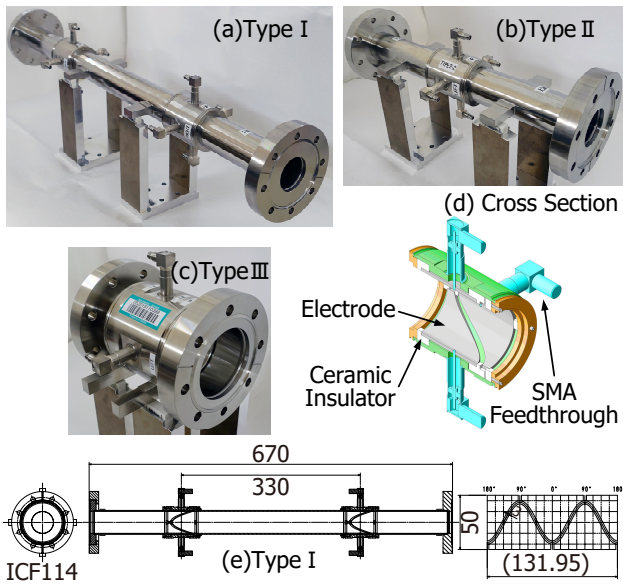


Figure 2: Photographs of the 3 types of BEPM: (a) Type I, (b) Type II, and (c) Type III. (d) Cross section drawing of a BEPM. (e) Schematic drawing of Type I.

2.2 3種類の BEPM

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 [9,10]。BEPM は、SRF 加速空洞間の四重極電磁石内の中心に設置されている (Fig. 1)。Figure 2 に3種類の BEPM とその断面図を、それぞれの BEPM の機械的寸法を Table 1 に要約する。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 [11]。ここで、 θ 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。電極長は、RF の一周期の $\pm 10\%$ がビームの縦方向の拡がりであり、ビームの速度はローレンツ収縮を無視できる低速度のため、縦方向の電場の拡がりを考慮して決定した。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、それらはマッピング測定時の較正とインストール時のアライメントに使用される。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 ± 0.05 mm に、他の箇所は ± 0.1 mm に収まるように製作されている。溶接後は、冷却過程に於ける熱変形が起こり易いので、基

Table 1: Mechanical Dimensions (mm) of 3 Types of BEPM

	Type I	Type II	Type III
Length of chamber	670	360	140
Outside dia. of chamber	58	58	85
Length of electrode	50	50	60
Inner dia. of electrode	40	40	60
Number of BEPMs	2	4	5

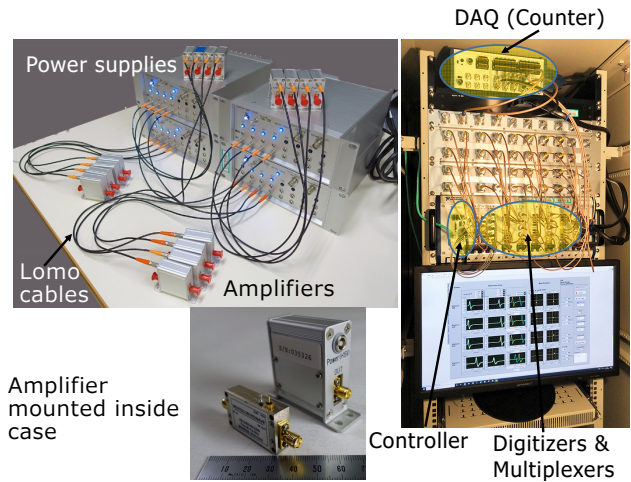


Figure 3: Photographs of the amplifier power supplies, mounted amplifier, and the data-acquisition system (DAQ).

座は再度ミル加工を施し、三次元測定機によって上記の精度に収まっていることを再確認している。真空チェンバーは SUS316L 材を、両端の接続部には ICF114 固定・回転フランジを使用している。電極と真空チェンバーの絶縁には、 $\tan \delta$ が 0.5×10^{-4} と非常に低く、高純度 99.99% のアルミナセラミック材 (AS999 [12]) を使用している。ビームの通過により誘起される信号は、50 Ω SMA フィードスルー [13] を介して大気側へ送られる。

2.3 アンプとアンプ用電源システム

Figure 3 に、特別にデザインしたケースに収められたアンプ、アンプ用電源 [14]、データ収集システムの写真を示す。また、アンプとアンプ用電源の仕様を Table 2 に示す。全てのアンプのゲインはあらかじめ測定しておき、ビーム測定の際に LabVIEW プログラム上で補正をしている。全てのアンプゲインの標準偏差は 0.15 dB であった。アンプが故障した際に、容易に交換ができるように、電力供給用ケーブルとして lomo 端子ケーブルを用いている。電源は、TTL 信号によって遠隔からのオンオフと、その状態の監視が可能となっており、アンプが

Table 2: Electrical Specifications of the Amplifiers and Power Supplies

Amplifier	
Model No.	ABL0300-00-3230 [15]
Bandwidth	9 kHz - 3.0 GHz
Noise Figure	2.5dB typical, 3.0 dB Max @25 °C
Gain	36.5 dB @25 °C
Power supply for Amplifier	
Model No.	LFS50A-15 [16]
Output Voltage	15 V
Ripple Noise	10 mV _{p-p}

フロントパネル上のコネクタに接続されると LED が点灯し、状態を確認することができる。また、故障等の理由により、供給している電流が 110 ± 30 mA を超えると、コンパレータがそれを検知し、LED を消灯すると共にそのステータスを返してくる。信号ケーブルとして、外部ノイズに対するシールド性が極めて良く、3 GHz の周波数バンドを持つ S 07262 BD 同軸ケーブル [17] を採用している。

2.4 データ収集システムとプログラミング

BEMP のブロックダイアグラムとデータ収集システムを Fig. 4 に、その電気的仕様を Table 3 に示す。増幅されたピックアップ信号は、同軸ケーブルを通して信号処理装置に送られる。上流と下流のピックアップ信号は、マルチプレクサによって切り替えられ、ディジタイザ (PXIe-5160) によってデジタル化される。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う条件であれば、ランダムインターリーブ機能を使用することにより、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 シャーシ内に装備されている (Fig. 3)。全ての信号処理過程は、LabVIEW 2019 グラフィカルプログラムによって制御されており、全ての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 [18] によってサポートされている。更に、LabVIEW プログラム言語と EPICS 制御システム間を、ユーザーフレンドリーで軽量な高性能インターフェースとして働く CA Lab [19] を用いて、得られたデータの共有化が可能となっている。EPICS のプロセスバリアブル (PVs) を介すれば、データの読込と書込のプロセスを簡単に行うことができる。現在の BEMP システムでは、50 個のアナログ入力、8 個の波形データ、13 のアナログとバイナリーの出力を使用している。現在は、測定結果はリモートデスクトップによって表示している。一方、これらのデータがサーバー上のメモリーに転送されれば、大規模

Table 3: Electrical Specifications of Signal Processing Devices

	Embedded Controller (NI PXIe-8840)
CPU	i7 5700EQ, 2.6 GHz Quad, 8 GB RAM
Transfer Rates	8 GB/s
	Digitizer (NI PXIe-5160)
Bandwidth	DC - 500 MHz
Sampling rates	2.5 GS/s (1 ch), 1.25 GS/s (4 ch)
Memory	2 GB
Resolution	10-bit
Channels	4
Transfer Rates	600 MB/s
	DAQ (NI PXIe-6341)
IO	16 AI (16-Bit, 500 kS/s), 2 AO, 24 DIO
	DAQ (NI PXIe-6612)
Counter	8-Channel PXI Counter/Time
	Multiplexer (NI PXIe-2746)
Bandwidth	DC - 2.7 GHz
Type	4×1, 4 sets
	PXIe Chassis (NI PXIe-1075)
Slot	18
Transfer Rates	4GB/s

な制御システムを操作するための Eclipse ベースのツールである Control System Studio [20] により、制御室内に場所を選ばず表示することができる。

ビーム調節の際、0.6 W の重イオンビームが真空チャンバーで損失すると、真空度は 10^{-8} 台から 10^{-6} Pa 台へ急激に上昇した。従って、最初のビーム調節や加速試験の際には、真空悪化を避けることを最優先事項として、ビーム電流を最小限に下げる必要がある。上流の信号と下流の信号はマルチプレクサによって切り替えているため、ビームの TOF を測定するためには、基準となる RF 信号は必要不可欠となる。さらに、後述するようにビームをチョップする場合は、ビームがチョップされている間での測定を避けるため、RF 信号とチョップ信号は同期をとる必要がある。この問題を解決するために、RF 信号をカウントし、予め指定した数に達した直後にトリガー信号を発生させるカウンターモジュールを導入した。Figure 5 に、チョッパーが発生してから、30 μ s 後にデータ取得をするタイミングチャートを示す。この例では、チョッパー信号が発生してから 37 番目の RF 信号をカウント直後に、ディジタイザーにトリガーをかけている。このカウンターモジュールは、FPGA のように動作しているが、LabVIEW によるプログラミングは複雑ではない。超重元素探索の際に、このシステムの性能を最大限発揮させることを目指して開発を進めてきた。実験時に用いられる回転ターゲットの模式図を Fig. 5 に示す。ビームによる放射化、温度上昇、バックグラウンドを避けるために、ターゲットへの照射以外の領域では、ビームはチョップされる。回転ターゲット上の

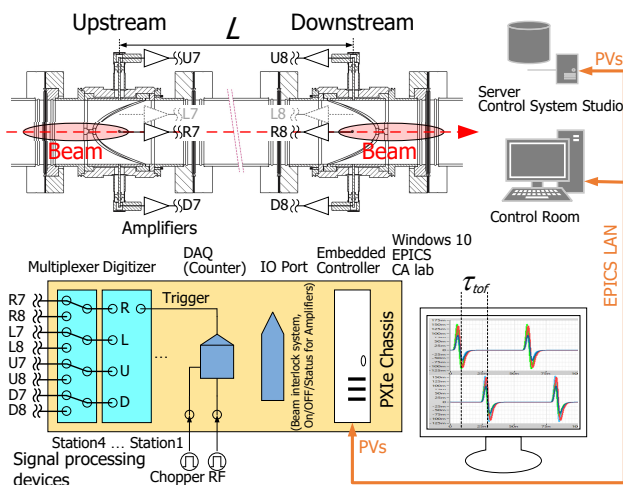


Figure 4: Block diagram of the BEMPs and DAQ.

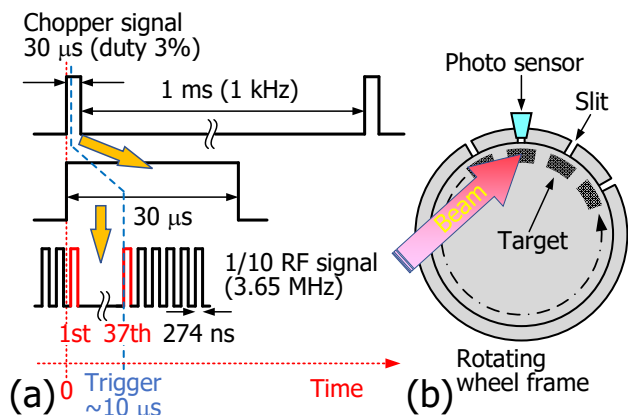


Figure 5: (a) Timing chart showing how the data acquisition is triggered 30 μs after the chopper signal is launched. (b) Circulating wheel target used for the SH element searches. The chopper signal is created by the photo sensor and the slit.

スリットを通過した光は、フォトセンサーがその光を検出して、チョッパー信号を作り出す。BEPM システムをこのチョッパー信号に同期することにより、正確なビームのエネルギーと位置測定が実現できる。特に、回転ターゲットへの照射が続くと、損傷を受けたターゲットが、次第に破れ始める。破損したターゲットの箇所はマスクをかけることにより、チョッパー信号が作動されるため、この同期機能はより重要性を増してくる。現在では、ビームをチョップすることにより、10 enA までビーム強度を下げて、ビームのエネルギーと位置測定が可能となっている。

3. BEPM の較正

ビーム位置精度が、総合的に $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以下の分解能になることを目指して、KEK の東海キャンパスに於いて較正作業を行った [21]。BEPM は内径同士が同じであるダミーパイプに接続し、サポート治具で固定し、XY ステージ上を 2 mm ステップ間隔で測定領域をマッピング測定した。ビーム信号を供給するワイヤーは固定している。右、左、上、下方向からのピックアップ出力をそれ

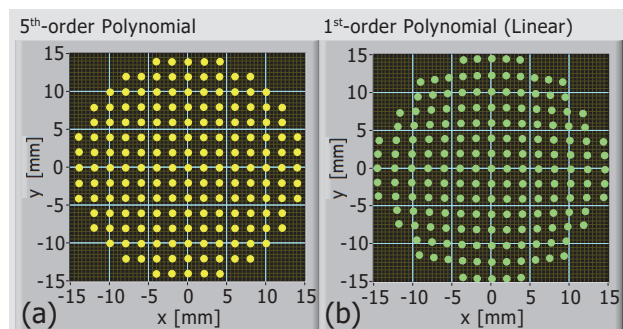


Figure 6: Calculated wire positions plotted by using the calibration coefficients of 5th-order and (b) 1st-order polynomials obtained by the mapping measurements.

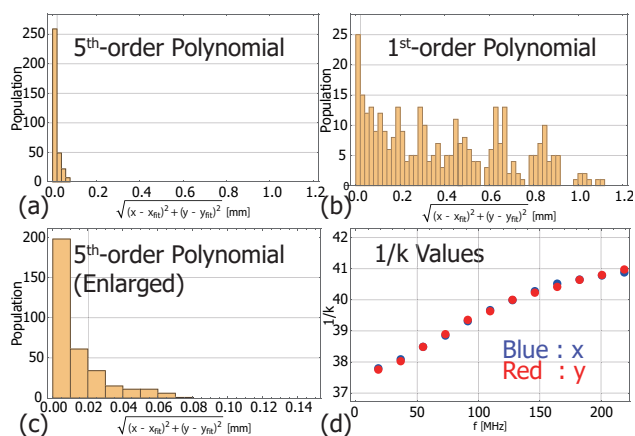


Figure 7: Residuals between the real wire position and the position obtained from the calibrated (a) 5th-order and (b) 1st-order Polynomials. (c) Enlargement of (a). (d) Measured results of the inverse of the position sensitivity coefficients k , which are frequency dependent.

ぞれ、 V_R 、 V_L 、 V_U 、 V_D 、とすると、ワイヤーの水平方向位置 x と垂直方向位置 y は、次の関係式で表される：

$$\frac{V_R - V_L}{V_R + V_L + V_U + V_D} = \frac{\Delta_x}{\Sigma} \approx f_x(x, y)_{5th} \approx k_x x,$$

$$\frac{V_U - V_D}{V_R + V_L + V_U + V_D} = \frac{\Delta_y}{\Sigma} \approx f_y(x, y)_{5th} \approx k_y y. (1)$$

ここで、 $f_x(x, y)$ と、 $f_y(x, y)$ は、ワイヤー（ビーム）位置に対する、精度を考慮して 5 次で打ち切った多項式展開式による近似で、 k は位置感度係数である。 $f_x(x, y)$ と $f_y(x, y)$ の 1 次近似は、それぞれ $k_x x$ 、 $k_y y$ となる。Equation 1 を用いて、出力電圧 V_R 、 V_L 、 V_U 、 V_D と、 Δ_x/Σ の Δ_y/Σ 関係を導くため、これらのデータを 5 次の多項式でフィットする計算を行い、5 次の多項式展開式 $f_x(x, y)$ 、 $f_y(x, y)$ を得た。

Figure 6 (a) と (b) は、それぞれのワイヤーの位置に於ける、5 次の多項式展開式と 1 次の係数を用いてプロットした結果である。Figure 6 (a) は、ワイヤーの位置と計算されたプロットが良く一致しているが、Fig. 6 (b) は、中心から離れるに従ってずれが大きくなっていることが解る。Figure 7 に、実際のワイヤーとプロットの位置の残差をヒストグラムで表示した。Figure 7(a) では 5 次の多項式展開式を用いた結果 ((c) はその拡大) を、(b) は 1 次の係数を用いた結果を示している。これらの結果から、5 次の多項式展開式を用いれば、 1σ の残差は 10 μm 以内に収めることが可能となる。更に、これらの較正の測定に於いては、18.25 から 219 MHz まで 18.25 MHz 間隔で、12 ステップの周波数に依存性した測定を行っている。各ステップの周波数に於ける、BEPM の位置感度係数 k の逆数の測定結果を Fig. 7 (d) に示す。全ての BEPM に於いて、測定した 5 次の多項式展開式の係数はテーブル化し、LabVIEW プログラムに於いて読み込み、ビーム位置演算の際に用いている。

4. コミッショニング

4.1 BEPM のインストール

先に述べたように、高真空を維持し、真空内の微粒子を極力減少させた環境は、SRILAC にとって非常に重要であるため、全ての BEPM の洗浄は、ISO class 1 クリーンルーム内で行った。まず初めに、BEPM は超純水により十分な時間をかけて丁寧に洗浄し、真空オープンによって、70°C の状態で 5 日間をかけて乾燥した。真空オープンから取り出した後は、イオン化エアガン (TG-3 [22]) によってひたすら埃を吹き出し、粒子ディテクターが 10 粒子/s 以下の表示に至るまで繰り返す。この作業は、一台の BEPM につき 3 時間以上の時間を要した。特に、Type I と Type II の BEPM 両端には真空ダクトが付いているため、イオン化エアガンの吹き出し口が届かず、それ以上の時間を要した。

BEPM は四重極電磁石の中心に設置するので (Fig. 8 (a) (b))、SRF 加速空洞の間に全ての BEPM をインストールするためには、四重極電磁石を水平に半割した下部を、事前に設置する必要がある。しかしながら、BEPM と四重極電磁石の間の許容範囲は僅かに 1 mm しかなく、フィードスルーの絶縁部の強度が屈曲に対して非常に弱いため、レーザートランシットにより監視しながら、細心の注意を払いつつ確実に設置作業を進めていった。特に、BEPM の真空部を接続する際には、ISO class 1 のクリーンルームを SRF キャビティーの間に仮設して、クリーンルーム専用の低発塵作業服を着ながら、大変苦労しながらも真空部の接続作業を終了することができた。接続後は、アンプに接続したセミリジッドケーブルに注意を払いながら、残り上部の四重極電磁石を設置した。これらのセミリジッドケーブルや硬く太い同軸信号ケーブルは、特別に設計した治具を用い、四重極電磁石の端面をに堅固に固定している (Fig. 8 (c))。Type III は、四重極電磁石の中に設置しないため、Fig. 8 (d) に示すよう

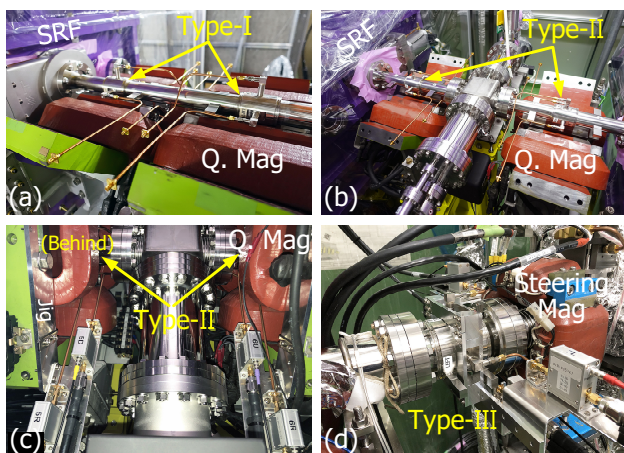


Figure 8: (a), (b) To install the BEPMs into the center of the quadrupole magnets, the half of the quadrupole magnets had to be already settled before. (c), (d) After the installation, the amplifiers connected to the semi-rigid cables and the stiff coaxial signal cables are strongly fixed.

に、自身を治具によって真空チェンバーに固定している。

設置終了後に、32 箇所の基準座を用いてアライメントエラーを測定した所、その平均値は 0.08 mm であった。それぞれの基準座に於ける、測定したアライメントエラーはテーブル化し、ビーム位置の測定時に LabVIEW プログラムによって補正を施している。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、トータルとしては 32 本の同軸ケーブルについて、信号長の相対差を 3 ps 以内に収めた。ケーブルの信号長を揃えるために、1 ns で 10 V に達する立ち上がりの速いパルサーを利用し、パルサーから発せられる信号の反射波を観測しながら、非常に細かいステップでカッティング作業を繰り返しつつ微調整を行い、上記の性能を実現した。

4.2 SRILAC による初加速試験

最初の $^{40}\text{Ar}^{13+}$ ビームを用いた加速試験は、9 台の SRF 加速空洞を用いて行った [23]。Figure 9 に、初めて

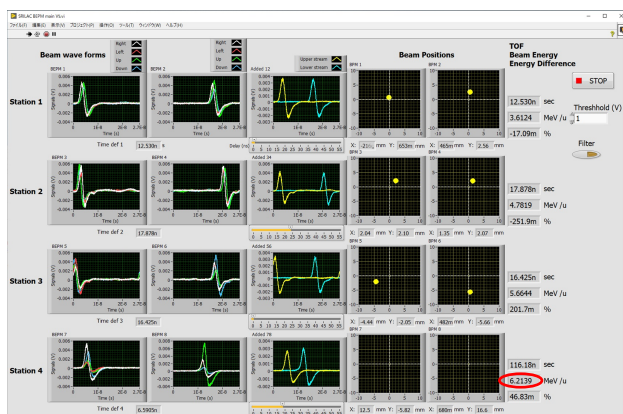


Figure 9: Displayed the BEPM measurement results just after the $^{40}\text{Ar}^{13+}$ beam was successfully accelerated to 6.2 MeV/u (2020/01/28 21:02). The positions at station 4 were off scale, which was corrected after the first trial acceleration.

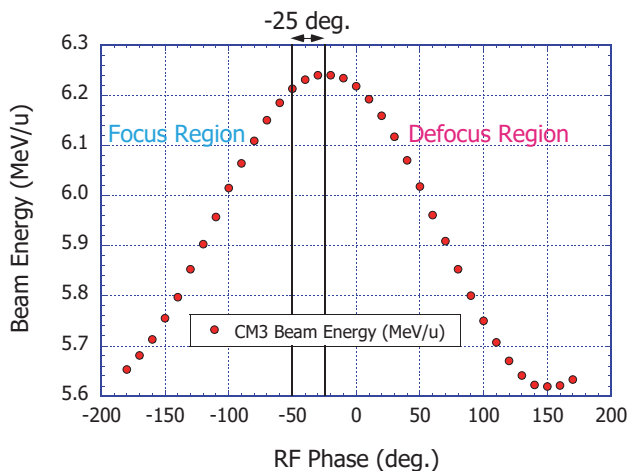


Figure 10: Measured beam energy plotted as a function of the phase of the final SRF cavity CM3.

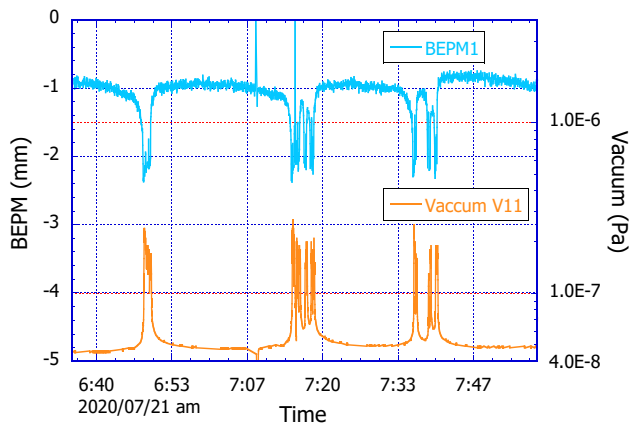


Figure 11: Measured results showing the relationship between the beam position at the BEPM 1 and the vacuum between CM1 and CM2 (see Fig. 1).

6.2 MeV/u にビーム加速に成功した (2020/01/28 21:02) BEPM の測定結果を示す。それぞれの箇所に於ける、ビーム信号波形、ビーム位置、ビームエネルギーを表示しているが、赤丸で囲んだ数値が SRILAC によって加速されたビームエネルギー値を表している。Figure 10 には、CM3 の SRF キャビティの位相に対するビームエネルギーの実測値を示している。この図中の収束領域では、低エネルギービームはエネルギーを得るが、一方発散領域では、低エネルギービームがエネルギーを失う。この測定結果を見れば、どの領域に加速位相をセットすべきか、明確に判断することができる。現時点では、SRF キャビティの加速位相は、-25 度にセットしている。このように、加速調整は、SRF 加速空洞の加速位相に対するビームエネルギー測定を繰り返しながら、下流から上流に向けて順次行っている。

Figure 11 に、 $^{51}\text{V}^{13+}$ ビームを加速した際に観測された、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 mm から -2 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 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、真空悪化を防いでいる。

現在、非破壊でビームサイズを得るために、以下の式により四重極モーメントを計算し、表示を行っている。

$$Q = k_q \times \frac{V_R + V_L - V_U - V_D}{V_R + V_L + V_U + V_D} - \langle x \rangle^2 + \langle y \rangle^2 \quad (2)$$

各 BEPM で測定した四重極モーメント値から得られるエミッタンス ϵ_x 、 ϵ_y と、ラティスマデルとの比較検証を鋭意進めている。

5. 結論と今後の展望

理研超伝導線形加速器 (SRILAC) の建設を終え、初の加速試験に成功した。常時非破壊で、ビームの位置を測定すると共に、ビームの飛行時間 TOF から、ビームエネルギー値を得られる BEPM システムを開発した。BEPM システムは、SRF 加速空洞の加速位相を決定する為に重

要な働きをしており、ビームの位置とエネルギーを安定に測定し続けている。現在我々は、ビームサイズを得るために四重極モーメントの測定を行っており、ラティスマデルとの比較検証を鋭意進めている。更に、ビームパンチ信号からビーム強度の情報を得る手法や、ロックインアンプのテクニックを応用した TOF 測定の手法等、新規の開発を進めている。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}At の製造へ、これらの開発が貢献できることを願っている。

参考文献

- [1] K. Morita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 103201.
- [2] H. Habu, Drug Delivery System 35, No.2, 114-120 (2020).
- [3] M. Odera *et al.*, Nucl. Instr. Meth. Sec. A, vol. 227, pp. 187 - 195, 1984. doi:10.1016/0168-9002(84)90121-9
- [4] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods Sec. B, vol. 261, pp. 1009 - 1013, 2007. doi:10.1016/j.nimb.2007.04.174
- [5] H. Okuno *et al.*, Prog. Theor. Exp. Phys., vol. 2012, 03C002, 2012. doi:10.1093/ptep/pts046
- [6] T. Nagatomo *et al.*, Proc. 23th International Workshop on ECR Ion Sources (ECRIS' 18), Sep. 2018, pp. 53 - 57. doi:10.18429/JACoW-ECRIS2018-TUA3
- [7] N. Sakamoto *et al.*, Proc. 19th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF' 19), Jul. 2019, pp. 750-757. doi:10.18429/JACoW-SRF2019-WETEB1
- [8] H. Imao *et al.*, Proc. 19th Int. Conf. on RF Superconductivity (SRF' 19), Jul. 2019, pp. 419-423. doi:10.18429/JACoW-SRF2019-TUP013
- [9] T. Watanabe *et al.*, Proc. of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aug. 2018, pp. 49-54; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/index.html
- [10] <http://www.toyama-en.com/>
- [11] G. Nassibian, CERN/SI/Note EL/70-13 (1970).
- [12] <http://www.ft-ceramics.co.jp/eng/>
- [13] <https://www.maruwa-g.com/e/>
- [14] <https://www.h-repic.co.jp/>
- [15] <http://www.wenteq.com/>
- [16] <http://www.daitron.co.jp/en/>
- [17] <https://www.hubersuhner.com/en>
- [18] <http://www.ni.com/>
- [19] BESSY CA Lab; http://www-csr.bessy.de/control/SoftDist/CA_Lab/
- [20] X. Chen *et al.*, Proc. of 2011 Particle Accelerator Conference (PAC'11 2019), March 2011, pp. 1401-1406; <http://accelconf.web.cern.ch/PAC2011/papers/weobn3.pdf>
- [21] T. Watanabe *et al.*, Proc. of 2019 International Beam Instrumentation Conference (IBIC 2019), Sept. 2019, pp. 526-529. doi:10.18429/JACoW-IBIC2019-WEPP007
- [22] <http://www.simcoion.jp/>
- [23] N. Sakamoto, Journal of Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 17, No.2, 2020, pp. 70-79.