

理研超伝導加速空洞用ビームエネルギー・位置モニターのマッピング測定 MAPPING MEASUREMENT FOR BEAM ENERGY POSITION MONITOR SYSTEM FOR RIKEN SUPERCONDUCTING ACCELERATION CAVITY

渡邊環^{*A)}、外山毅^{B)}、花村幸篤^{C)}、今尾浩司^{A)}、上垣外修一^{A)}、鴨志田敦史^{D)}、河内敏彦^{C)}、小山亮^{E)}、
坂本成彦^{A)}、福西暢尚^{A)}、藤巻正樹^{A)}、三浦昭彦^{F)}、宮尾智章^{B)}、山田一成^{A)}、渡邊裕^{A)}

Tamaki Watanabe^{*A)}, Takeshi Toyama^{B)}, Kotoku Hanamura^{C)}, Hiroshi Imao^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)},
Astushi Kamoshida^{D)}, Toshihiko Kawachi^{C)}, Ryo Koyama^{E)}, Naruhiko Sakamoto^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)},
Masaki Fujimaki^{A)}, Akihiko Miura^{F)}, Tomoaki Miyao^{B)}, Kazunari Yamada^{A)}, Yutaka Watanabe^{A)}

^{A)}RIKEN, ^{B)}KEK/J-PARC, ^{C)}Mitsubishi Electric System & Service Co.,Ltd.,

^{D)}National Instruments Japan Corporation, ^{E)}SHI Accelerator Service Ltd., ^{F)}JAEA/J-PARC

Abstract

Upgrades for the RIKEN heavy-ion linac (RILAC) involving a new superconducting linac (SRILAC) are currently underway at the RIKEN radioactive isotope beam factory (RIBF). It is crucially important to develop nondestructive beam measurement diagnostics. We have developed a beam energy position monitor (BEPM) system which can measure not only the beam position but also the beam energy simultaneously by measuring the time of flight of the beam. We fabricated 11 BEPMs and completed the position calibration to obtain the sensitivity and offset for each BEPMs. The position accuracy has been achieved to be less than ± 0.1 mm by using the mapping measurement.

1. はじめに

現在、理研線形加速器 RILAC の後段に、超伝導線形加速器 (SRILAC) の建設を進めている。このアップグレードにより、113 番元素ニホニウムの発見に続き、さらに重い超重元素の発見を目指している。また、最先端のがん治療薬として、 α 線を放射する短寿命放射性同位元素であるアスタチン ^{211}At が、今注目を集めている。現在理研では、AVF サイクロトロンで加速した α ビームを用いてその製造が行われている [1, 2]。SRILAC の建設により、 α ビームの強度を上げ、医療用 RI ^{211}At の製造量増大に期待がかかっている。

SRILAC のビーム加速には、ビーム位置の測定は必須となる。超伝導加速空洞はニオブ材で作られているため、水素ガスの吸蔵により Q 値が著しく下がってしまう [3]。また、空洞表面での酸素濃度が上がることで、ニオブの純度が下がり、表面抵抗が増えることが知られている。これらの理由により、脱ガスを発生するビーム診断装置は使用できず、非破壊型によるビーム位置測定が必須となる。そこで、ビームの位置を非破壊で正確に測定するために、金属の円筒を斜めに四分割した静電型ピックアップの開発を行ってきた [4]。二台の静電型ピックアップを対として用いれば、ビームの飛行時間 (TOF) が測定でき、ビームのエネルギー値も同時に得られるという、大きな利点を持つ。医療用 RI ^{211}At 製造に於いては、 α ビームのエネルギーが 22 MeV を超えると、エネルギーの増大と共に生成量が増えるが、一方 30 MeV を超えると、人体にとって猛毒である ^{210}Po の生成も増え始める。従って、 α ビームのエネルギーの測定とそのコントロールは極めて重要となる。

ビームの重心位置を、 ± 0.1 mm の精度で測定することを目指し、ワイヤー法によるマッピング測定を行った。本論文では、この詳細について報告する。

2. ビームエネルギー位置モニター

Figure 1 に、現施設の RILAC とビーム輸送系、建設中の SRILAC を記す。SRILAC で加速された重イオンビームは、超重元素探索装置 GARISIII や医療用の RI 製造に用いられる。さらにビームを加速する場合は、後段の加速器である理研リングサイクロトロン RRC にビームが輸送される。ここで、BEPM は超伝導加速空洞間の四重極電磁石の中心に設置される (Fig. 1 右下の図)。設置する箇所に応じて、以下三種類の BEPM、Type I、Type II、Type III、を設計し [5]、トヤマ社 [6] が担当して 11 台の製作を行った。それぞれの BEPM の写真と静電型ピックアップの断面図を、Fig. 2 に示す。また、機械的寸法等を Table 1 に要約する。静電型電極は、パラボリックカット (真横から見て放物線カット) であり、4 極モーメントに最適化し、位置感度の直線性も悪くない。形状

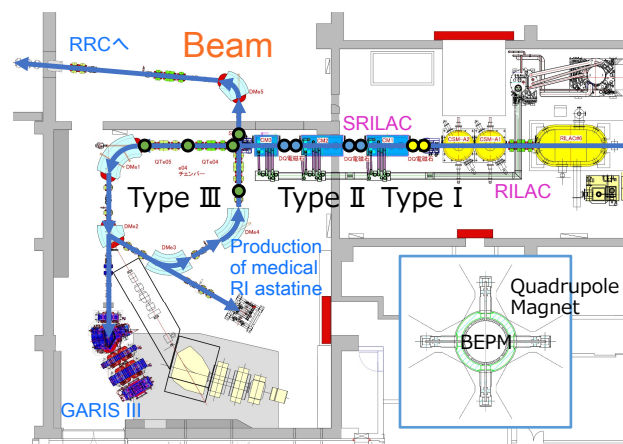


Figure 1: Schematic drawing of RILAC and SRILAC. Depending on the installation location, three types of BEPM (Type I, Type II, Type III) were designed and fabricated [5].

* wtamaki@riken.jp

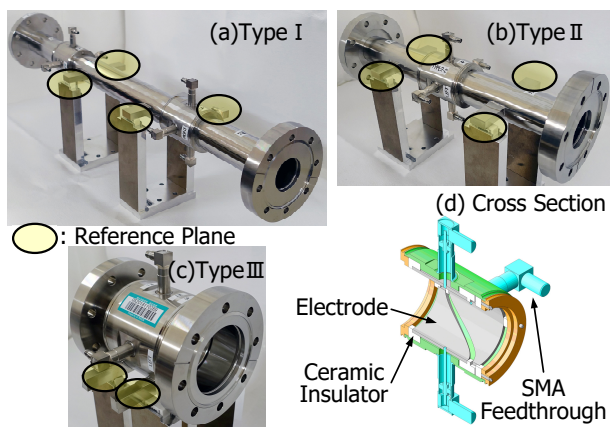


Figure 2: Pictures of three types of BEPM. (a) Type I, (b) Type II, (c) Type III, (d) cross section of the BEPM.

は、円筒方向の角度を θ 軸、ビーム進行方向を y 軸、円筒の長さを L とすると、 $y = (L/2) \cos 2\theta$ で表される。静電型電極の端面は、必ず円筒中心方向を向くように形成し、円筒を真横から輪切りにした加工とは異なる。アライメント及び校正装置用基準面は、Fig. 2 に示すように BEPM 本体の外側に、X 軸方向に 4 箇所、Y 軸方向に 8 箇所存在する。この基準面は、BEPM 本体の位置を真空チャンバーの外側に移しており、製作精度は ± 0.05 mm 以内とし、他の箇所の精度は ± 0.1 mm 以内としている。フランジ等を溶接によって取り付け後は歪みが生じ易いので、溶接の終了後、改めて基準面をフライスによって再加工を行い、上記の精度を得ている。真空チャンバー、静電型電極、フランジおよび回転フランジの材質は SUS316L であり、固定フランジおよび回転フランジは ICF114 を使用している。各々の電極間と真空パイプとの絶縁を取っているセラミックスは、脱ガスを考慮して、低パーティクル性の純度 99.99% のアルミナセラミックス (フェローテックセラミック社製 AS999 [7]) を使用している。各静電型ピックアップで生じた信号は、MARUWA 社製 50 オーム SMA 型真空導入端子 [8] を介して大気側に送られる。

Table 1: Mechanical Dimensions of Each Three 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

Unit of length and diameter : mm

3. マッピング測定装置と治具

理研超伝導加速空洞用 BEPM のマッピング測定は、J-PARC 50GeV シンクロトロン MR 用に開発された校正装置 [9, 10] を利用させて頂き、KEK 東海キャンパス

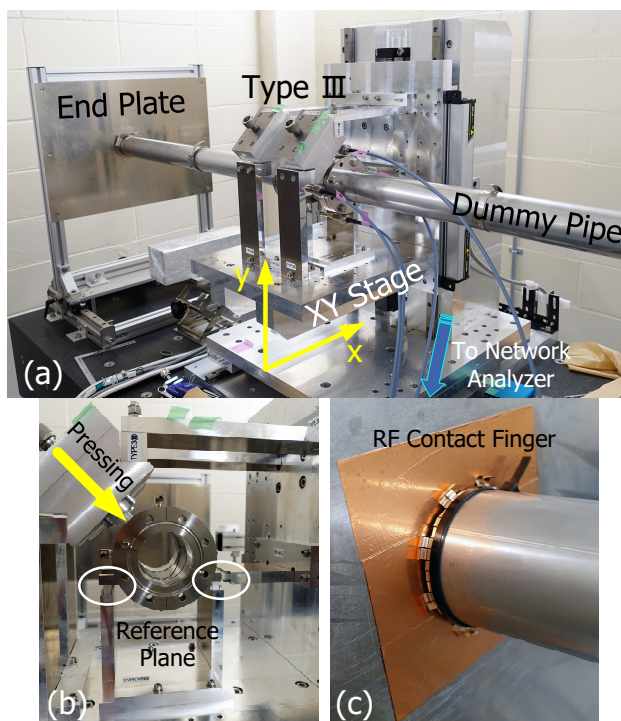


Figure 3: Picture of the mapping measurement device.

東海 1 号館で行った。前述したように、理研超伝導加速空洞用 BEPM は三種類あり、この校正装置に適合するように、BEPM を固定する治具とワイヤーを囲むダミーパイプの設計・製作を行った。

3.1 精密アライメント

マッピング装置を Fig. 3 に示す。Figure 3(a) に示すように、測定する BEPM は、BEPM の内径に等しいダミーパイプを接続した後、XY ステージに固定し、XY 方向に 2 mm 間隔で測定範囲内を移動する。信号源となるワイヤーは固定されている。BEPM の基準面を XY ステージの基準座に押し当てることにより (Fig. 3(b))、 ± 0.05 mm の機械的精度が確保される仕組みになっている。ワイヤーは、 $\phi 2.6$ mm の銅メッキピアノ線を用いており、その両端には丸型圧着端子を、かした後半田付けをして取付けた。ワイヤーの両端を端盤のフック状電極に取

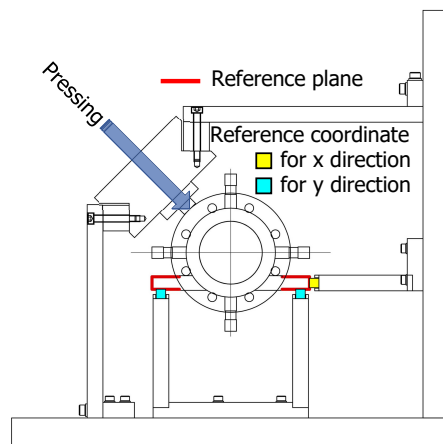


Figure 4: Reference planes and reference coordinates.

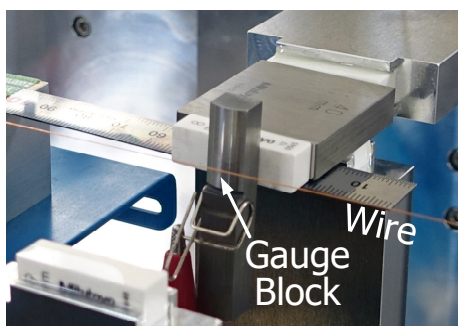


Figure 5: Measurement of the center position of the wire.

り付けた後、端盤を微調整で後退させ、ワイヤーにテンションを加える。ダミーダクトはスライド可能な二重管の構造をしており、スライドさせてワイヤーの取付作業を行い、終了後に元の位置に戻し、二重管同士をバンドで絞めて互いを固定する。端盤とは RF コンタクトフィンガーによって接触し、グラウンドをとっている (Fig. 3(c))。測定を繰り返す中で、RF コンタクトフィンガーは幾つか間引き、銅テープを端盤に貼る事によって、電気的特性と柔軟性を両立できることが解り、測定のエラーを減らすことができた。

XY ステージ上には、Fig. 2 で説明した BEPM の基準面が接触する基準座が、X 軸方向に 2 箇所、Y 軸方向に 4 箇所ずつある。BEPM を支える治具の先にはゲージブロック (セラブロック [11]) を固定し基準座を構成している。ゲージブロックとは、精密部品の比較測定のためのマスターゲージとなるもので、各ゲージブロックの寸法誤差は $0.1 \mu\text{m}$ 以下である。この治具と基準座を、各タイプに合わせて設計・製作をした。BEPM の基準面と XY ステージの基準座の位置関係を、Fig. 4 に示す。BEPM の基準面は、X 軸方向に 4 箇所 (2×2)、Y 軸方向に 8 箇所 (4×2) 存在し、Fig. 4 の赤線で示す。XY ステージの基準座は、X 軸方向に 2 箇所 (1×2)、Y 軸方向に 4 箇所 (2×2) 存在し、それぞれ Fig 4 の黄色の四角と青の四角で示す。XY ステージの基準座は、X 軸方向に 2 箇所だが、BEPM の基準面を押し当てた後に、バネ構造の治具によって押さえ、十分な精度を得ている。

ワイヤーの中心位置は、Fig. 5 に示すように、BEPM の中心から基準面までの長さに等しいゲージブロックを取付けて測定をする。具体的には、XY ステージを移動し、ワイヤーとゲージブロックを接触させた状態で、ワイヤーが離れる点を $1 \mu\text{m}$ の刻みで移動させて求める。ワイヤーとゲージブロックには電流を流して、導通をモニターしている。XY ステージの移動により、導通が無くなる位置が即ち、ゲージブロックからワイヤーが離れた位置となる。この位置とワイヤーの半径を加えた値がワイヤーの中心座標となり、各 BEPM の原点としている。

ワイヤー固定方式のメリットは、(1) ワイヤーの揺れの問題が無い点と、(2) 駆動部を BEPM 近傍に設置することが可能になるので、安定した動作が得られる点、である。

3.2 信号処理系

信号処理系の模式図を Fig. 6 に示す。先に説明したように、ダミーパイプは二重管になっており、両端はスラ

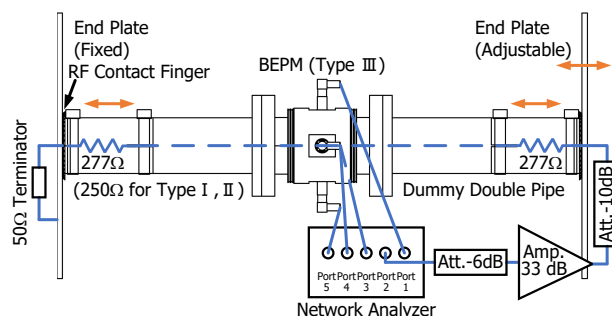


Figure 6: Schematic drawing of the signal processing system.

イドすることができ、その内径を BEPM の内径と等しくすることによって、信号の反射を最小限に抑えている。信号の解析には、ベクトルネットワークアナライザー (RHODE & SCHWART ZVT 8 [12]) を用いており、一つのポートの出力 (Fig. 6 では Port 2) をアンプ (R & K [13] AA300-1S) で増幅し、ワイヤーの始点から正弦波の印加を行う事によりビームを模擬し、ワイヤーから各電極への透過係数を測定している。ベクトルネットワークアナライザーの各ポートとポート間のキャリブレーションは、測定前には必ず行っている。また、反射によるアンプの損傷を防ぐために、減衰器を入れている。また、ワイヤーの直径 (D_{in}) は $\phi 2.6 \text{ mm}$ で、各タイプ BEPM の内径 (D_{out}) は Table 1 に記したとおりである。同軸ケーブルの特性インピーダンス Z_0 は、 ϵ を誘電体の比誘電率とすると、

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon}} \log_e \frac{D_{out}}{D_{in}} \quad (1)$$

で表すことができ、Type I と Type II は 302Ω 、Type III は 327Ω という値が得られる。ここで、反射波を減らすために、BEPM を取り付けたダミーパイプから両端に、Type I と Type II の場合、 250Ω の直列抵抗を入れている。BEPM を取り付けたダミーパイプから外側を見たインピーダンスは、 $250 + 50 = 300 \Omega$ となり、上記で計算した特性インピーダンスに一致し、反射が殆ど無くなった。

4. マッピング測定結果

全ての BEPM に対して、マッピング測定装置により測定を行った。BEPM 付近の温度を 20°C に設定し、温度

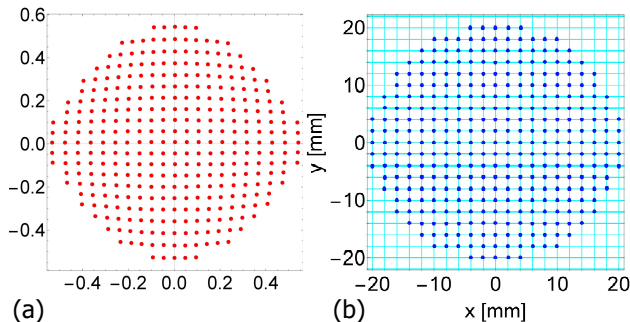


Figure 7: Results of the mapping measurement.

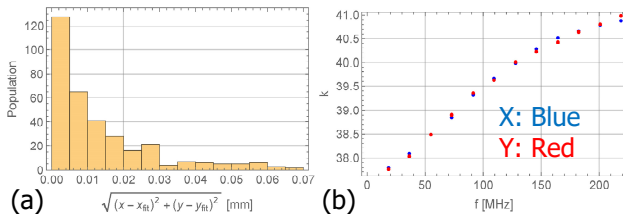


Figure 8: Results of the calculation. (a) Residual between the real wire position and the position obtained from the calibration equation. (b) Measured results of position sensitivity coefficients.

による計測誤差を減らすため、計測中の温度が $20 \pm 1^\circ\text{C}$ を超えるとエラーを出力する。また、同じ測定を二回繰り返し、二つのデータの違いが $50 \mu\text{m}$ を超えると再測定を行った。前述した RF フィンガーの改良と銅テープを利用することで、このエラーは激減し、概ね $10 \mu\text{m}$ 以内に収まっている。

対向する 4 つの左右上下の電極からの出力を、それぞれ V_R 、 V_L 、 V_U 、 V_D で表すと、ワイヤーの水平位置 x と垂直位置 y に対して次式の関係で示される。

$$\begin{aligned} \frac{V_R - V_L}{V_R + V_L + V_U + V_D} &= \frac{\Delta_x}{\Sigma} = k_x, \\ \frac{V_U - V_D}{V_R + V_L + V_U + V_D} &= \frac{\Delta_y}{\Sigma} = k_y, \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 k は BEPM 電極の位置感度係数である。BEPM の中心近傍では線形性が成り立つが、周辺になるほど成り立たなくなる。各電極から得られた出力 V_R 、 V_L 、 V_U 、 V_D より、X 軸には Eq. (2) に於ける、 Δ_x/Σ の値を、Y 軸には Δ_y/Σ の値を計算し、Fig. 7(a) にプロットした。この値を 5 次関数でフィッティングして、校正する係数を求めた。これにより得られた校正係数を用いて、各電極の出力から再計算した結果を Fig. 7(b) に示す。ここで、ワイヤーの実際の位置と、5 次でフィットして得られた校正係数を用いて得られた位置の違いを、Fig. 8(a) のヒストグラムに示す。これより、この残差は $\pm 10 \mu\text{m}$ という結果が得られた。また、これらのマッピング測定は、周波数を 18.25 MHz から 219 MHz まで、 18.25 MHz ステップで 12 点の測定を行っている。BEPM 電極の感度係数 k は周波数依存性を持っており、その測定結果を Fig. 8(b) に示す。マッピング測定終了後には、各 BEPM の各電極のキャパシタンスも、ネットワークアナライザーを用いて測定した。

5. まとめと今後の予定

理研超伝導加速空洞用 BEPM のマッピング測定を、J-PARC 50GeV シンクロトロン MR 用に開発された校正装置を用いて、KEK 東海キャンパス東海 1 号館で行った。BEPM は三種類あるため、この校正装置に適合するよう、BEPM を固定する治具とワイヤーを囲むダミーパイプの設計・製作を行った。このマッピング測定装置を用いることで、概ね $\pm 0.05 \text{ mm}$ の機械精度でマッピング測定を行う事ができた。今後、全 BEPM の測定結果の解析を進め、理研超伝導加速空洞でビーム加速の際には、その校正値を用いてビーム位置を算出する予定である。

謝辞

BEPM 本体と校正装置治具・ダミーダクトの設計・製作に関して、CAD データをご提供頂いたトヤマ社の大西 裕貴奈氏に感謝致します。

参考文献

- [1] N. Sato *et al.*, “Development of a production technology of ^{211}At at the RIKEN AVF cyclotron: (i) Production of ^{211}At in the $^{209}\text{Bi}(\alpha, n)^{211}\text{At}$ reaction”, RIKEN Accel. Prog. Rep. 50, p. 262 (2017).
- [2] S. Yano *et al.*, “Development of a production technology of ^{211}At at the RIKEN AVF cyclotron: (ii) Purification of ^{211}At by a dry distillation method”, RIKEN Accel. Prog. Rep. 50, p. 263 (2017).
- [3] K. Kabumoto *et al.*, “RECOVERY OF ACCELERATION FIELD GRADIENTS OF SUPERCONDUCTING BOOSTER RESONATORS BY HIGH PRESSURE WATER JET RINSING”, Proceedings of the 6th Particle Accelerator Society Meeting 2009, Tokai, Aug. 2009, pp. 1120-1122; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj6/
- [4] T. Watanabe *et al.*, “DEVELOPMENT OF BEAM ENERGY AND POSITION MONITOR SYSTEM AT RIBF”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 1112-1117; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/index.html
- [5] T. Watanabe *et al.*, “DEVELOPEMENT OF BEAM ENERGY POSITION MONITOR SYSTEM FOR RIKEN SUPERCONDUCTING ACCELERATION CAVITY”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 49-54; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2018/proceedings/index.html
- [6] <http://www.toyama-jp.com/>
- [7] <http://www.ft-ceramics.co.jp/>
- [8] <https://www.maruwa-g.com/>
- [9] K. Hanamura *et al.*, “DEVELOPMENT OF CALIBRATION SYSTEM FOR BPM AT J-PARC 50GEV SYNCHROTRON”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Japan, Aug. 2006, pp. 469-471; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj3_lam31/Proceedings/Contents.html
- [10] T. Miura *et al.*, “Calibration of Beam Position Monitor for J-PARC Main Ring Synchrotron”, Proceedings of the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan And the 31th Linear Accelerator Meeting in Japan, Sendai, Japan, Aug. 2006, pp. 469-471; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj3_lam31/Proceedings/Contents.html
- [11] <https://www.mitutoyo.co.jp/corporate/>
- [12] https://www.rohde-schwarz.com/jp/home_48230.html
- [13] <http://www.rk-microwave.com/jp/index.php>