

理研超伝導加速空洞用ビームエネルギー・位置モニターの開発 DEVELOPEMENT OF BEAM ENERGY POSITION MONITOR SYSTEM FOR RIKEN SUPERCONDUCTING ACCELERATION CAVITY

渡邊環^{*A)}、今尾浩士^{A)}、上垣外修一^{A)}、坂本成彦^{A)}、福西暢尚^{A)}、藤巻正樹^{A)}、
山田一成^{A)}、渡邊裕^{A)}、小山亮^{B)}、外山毅^{C)}、宮尾智章^{C)}、三浦昭彦^{D)}

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

^{A)}RIKEN, ^{B)}SHI Accelerator Service Ltd., ^{C)}KEK/J-PARC, ^{D)}JAEA/J-PARC

Abstract

Presently, superconducting acceleration cavities are under construction at RIKEN. In order to maintain the Q value and not to increase the surface resistance of the superconducting cavities, it is impossible to use a beam diagnostic device that generates outgassing. A non-destructive measurement with a beam diagnostic apparatus is indispensable. Therefore, to measure the beam energy and the beam position simultaneously, we have developed beam diagnostic devices of high sensitivity and low noise. Last year, we completed the prototype of the beam energy and position monitor (BEPM) system and installed it in the transport line in the RI beam factory (RIBF). As a results, using the BEPM, a uranium beam position and energy were successfully measured with 0.3 mm and 10^{-4} resolution, respectively. It is the purpose of the present paper to describe details concerning the BEPM system for the superconducting acceleration cavities, and an investigation of the sensitivities of the BEPM from the point of view the S/N ratio.

1. はじめに

理研 RIBF では、加速器の性能と運転技術の向上により、年々加速される重イオンビームの強度が増強している。ビームの大強度化に伴い、ビームを非破壊で診断する必要性が増えている。また、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、AVF サイクロトロンで加速した α ビームを用いた医療用 RI の製造も、この SRILAC の建設により、増大化が期待されている。

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 [1]。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、ビームを診断するためには、脱ガスを発生するビーム診断装置は使用できず、非破壊型の診断装置によるビーム測定が必須となる。完成後のコミッショニング時に於いては、 $1\mu\text{A}$ 以下の電流までビーム強度を弱めて、ビームの位置とエネルギーを測定することになる。そこで、ビームの位置を非破壊で測定できるように、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。このシステムでは、二台の静電型ピックアップを用いることにより、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。昨年より、SRILAC での実用を検証するため、ビームエネルギー・位置モニター (BEPM) システムの設計を行い、そのプロトタイプを完成させた。RIBF のビームトランスポートラインに設置後、ウランビームを用いて試験を行った結果、良好な性能を示すことができた [2]。

2. SRILAC に於ける静電型ピックアップ信号の解析

SRILAC に於ける BEPM の感度を考察するために、パンチビームによって静電型ピックアップに誘起される信号について、周波数領域と時間領域の両面から解析 [3] を行う。理研リングサイクロトロンで加速された 10.5 MeV/u 、 $17\text{ e}\mu\text{A}$ の $^{238}\text{U}^{64+}$ ビームを用いた測定では、測定結果と理論式による計算結果は良く一致し、解析の正しさを示すことができた [2]。ビーム位置については信号と熱雑音の比から、ビームエネルギー値については BEPM 間の距離測定やディジタイザーの測定性能から、分解能の評価を行う。

2.1 周波数領域と時間領域における静電型ピックアップ信号の解析

Figure 1 に静電型ピックアップの等価回路を示す。荷電粒子の通過によって誘導された電荷 $Q(t)$ により、ヘッドアンプの入力抵抗 R の両端に電圧 $V(t)$ が現れる。 $V(t)$ は次の微分方程式の解である。

$$\frac{dQ(t)}{dt} = \frac{V(t)}{R} + C \frac{dV(t)}{dt} \quad (1)$$

ここで、 C は静電型ピックアップの静電容量 (フィードスルー、ヘッドアンプ等の入力静電容量も含む) である。 $V(t)$ 、 $Q(t)$ を、 $V(t) = V(\omega) \exp(j\omega t)$ 、 $Q(t) = Q(\omega) \exp(j\omega t)$ とおいて式 (1) に代入し、周波数成分に対する応答を求めると、

$$V(\omega) = \frac{j\omega CR}{1 + j\omega CR} \frac{Q(\omega)}{C} \quad (2)$$

となる。この回路は、時定数 CR のハイパスフィルター

* wtamaki@riken.jp

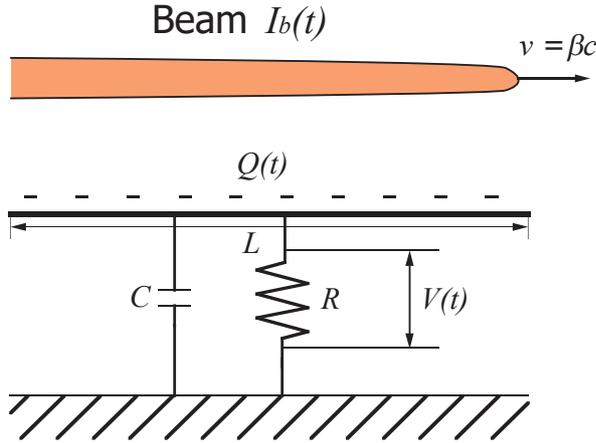


Figure 1: Equivalent circuit for an electrostatic pickup. A beam induces charge $Q(t)$ on the electrodes and voltage $V(t)$ appears on the input-resistance R of the preamplifier, where C is the capacitance of the BEPM-electrodes.

になっている。この式から明らかなように、カットオフ周波数 (f_c) は次の式で表される。

$$f_c = 1/(2\pi RC) \quad (3)$$

例えば、静電容量 C が 100 pF で、ヘッドアンプの入力抵抗 R が 50 Ω の場合、カットオフ周波数 (f_c) は 31.8 MHz となる。

バンチ中の粒子の電流分布が、ビームの進行方向において次のようなガウス関数で表せると仮定する。

$$I(t) = \frac{qN}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

ここで、 q は粒子の電荷、 N は一つのバンチを構成する粒子の数、 σ はこのガウス関数の標準偏差を表す。この $I(t)$ をフーリエ級数に展開すると n 次成分は、

$$I_n = \frac{2qN}{T_0} \exp\left(-\frac{n^2\omega_0^2\sigma^2}{2}\right)$$

と表せる。ここで、 T_0 は高周波加速の RF 周期、 ω_0 はその角周波数である。式 (2) を用いることにより、電極とビームの間のカップリングインピーダンス Z_n は、

$$Z_n = \frac{\phi}{2\pi} \frac{jn\omega_0 R}{(1 + jn\omega_0 RC)} \frac{L}{\beta c} \quad (5)$$

と表せる。ここで、 βc はビームの速度、 L は静電型ピックアップ電極の縦方向の長さ、 ϕ は電極がビームを取り囲んでいる方位角である。ビームによって、電極に静電誘導される電圧の n 番目の成分 V_n は、以下のように表すことができる。

$$V_n = Z_n I_n \quad (6)$$

これらの式を統合すると、変数を時間 t とした出力電圧

$V(t)$ は、以下の式で表せる。

$$V(t) = \frac{qN}{T_0} \frac{\phi}{\pi} \frac{L}{\beta c} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{jn\omega_0 R}{(1 + jn\omega_0 RC)} \times \exp\left(-\frac{n^2\omega_0^2\sigma^2}{2}\right) \exp(jn\omega_0 t) \quad (7)$$

2.2 SRILAC に於ける静電型ピックアップ信号出力のシミュレーション

Table 1: Parameters for the Calculation

| | | |
|----------------|---------------------|------------------------------------|
| β | 0.082 | ($^{51}_{23}\text{V}^{13+}$ beam) |
| N | 1.710×10^5 | (1 pμA) |
| q | 13 | |
| T_0 | 13.6986 ns | ($f_{rf} = 73$ MHz) |
| σ | 0.457 ns | ($3\sigma = 10\%$) |
| σ_{eff} | 0.648 ns | |
| L | 0.05 m | |
| $\phi/2\pi$ | 0.25 | |
| R | 50 Ω | |
| G | 40 dB | |
| C | 100 pF | |
| f_{width} | 3 GHz | |

SRILAC に於いて、予想される静電型ピックアップの信号を、Table 1 に示す諸パラメータを用いてシミュレーションした。このシミュレーションでは、速度が一番遅い超伝導加速空洞入口でのパラメータを用いた。ビームの縦方向の拡がりは、一周期の $\pm 10\%$ とすると、超伝導加速空洞入口でのバンチの標準偏差 σ は 0.457 ns となる。6 σ をバンチ長とすると、67 mm となる。ビームが光速に近づくにつれて、相対論効果によるローレンツ収縮を受けるので、縦方向の電場が狭まる。しかし、SRILAC の場合は β が 0.082 であるから、電場はほとんど収縮を受けない。ピックアップまでの半径を b とする

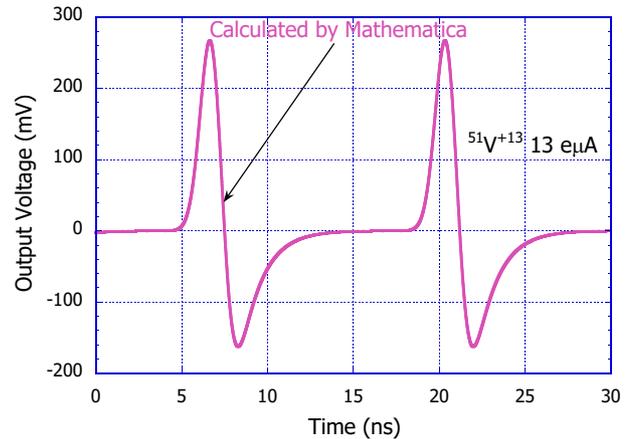


Figure 2: Simulated results of the amplified pick-up voltage in the time domain.

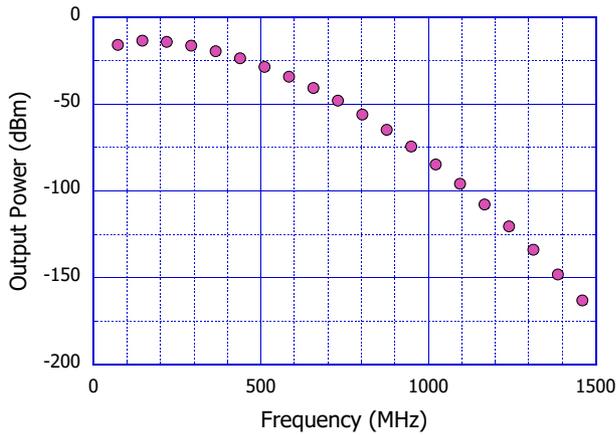


Figure 3: Theoretical calculated plots on the frequency domain.

と、電場は前後に $b/\sqrt{2}$ に広がるので [4]、実効的なパンチの標準偏差 σ_{eff} を 0.648 ns とした。この時、 $6\sigma_{eff}$ に相当するパンチ長は 95 mm である。式 (7) を用い、Mathematica によって計算した結果を Fig. 2 に示す。

次に、周波数領域における、静電型ピックアップの信号出力のシミュレーションを行った。荷電粒子の通過によって誘導された電圧 V_n を、入力抵抗 R 、ゲイン G を持ったヘッドアンプにより増幅すると、その出力パワー P_n は以下の式で与えられる。

$$P_n = G(1/R)(V_n/\sqrt{2})^2 \quad (8)$$

$$P_n(\text{dBm}) = 10 \log \left(\alpha G \frac{1}{R} \left(\frac{V_n}{\sqrt{2}} \right)^2 \right) \quad (9)$$

ここで、パワーにおいては、1 mW が 0 dBm という定義なので係数 α は 1000 である。式 (9) を用い、Mathematica によって計算した結果を Fig. 3 に示す。また、静電型ピックアップはハイパスフィルターとして動作するが、そのカットオフ周波数 (f_c) は式 (3) より 32 MHz と見積もられ、RF 周波数より低い値となっている。

2.3 ビーム位置の分解能

ビーム位置の分解能を検討するために、熱雑音の考察を行う [2]。デジタルサイザ PXIe-5160 の仕様には、入力レンジ 1 V 設定時、RMS ノイズ V_n はフルスケール (1 V) の 0.14% と記載されている。これより、バンド幅は 500 MHz なので、ノイズパワーは -131 dBm/Hz と計算できる。熱雑音電力は 290 K に於いて 174 dBm/Hz なので、雑音指数は $174 - 131 = 43$ dB となる。雑音指数 2.5 dB、増幅率 40 dB のプリアンプによって信号を増幅後、デジタルサイザに入力する。このプリアンプを前段に入れることにより、プリアンプとデジタルサイザのトータルの雑音指数は 6.5 dB と計算でき、デジタルサイザを単独で使用した場合に比べて 36.5 dB 改善される。バンド幅 500 MHz に於ける雑音指数 6.5 dB の雑音電圧 V_N は、0.01 mV に相当する。この雑音電圧 V_N が寄与する、BEPM 位置分解能 (δx) は以下の式で与えられる [4]。

$$(\delta x) = \frac{D}{2}(V_N/V_S) \quad (10)$$

ここで、 V_S はビームによって静電型ピックアップ上に誘起される電圧であり、Fig. 2 のシミュレーションの結果から、ビーム電流が 13 e μ A の場合は 280 mV である。また、 D は BEPM の直径であり 40 mm とした。これらの値を式 (10) に代入すると、ビーム位置分解能は、0.007 mm と見積もられ、SRILAC での仕様を満たすことが解った。しかし、この値はアンプの入力抵抗雑音のみが寄与する理想的な計算結果であって、実際には他から混入するノイズも十分考慮する必要がある。

2.4 ビームエネルギーの分解能

TOF 測定によるビームエネルギーの分解能を考察する。超電導加速空洞加速後の BEPM 間距離の測定誤差を $\Delta L = 0.5$ mm、デジタルサイザの測定分解能を $\Delta T = 20$ ps とすると、光速比 β の誤差は以下の式で与えられる。

$$\Delta\beta/\beta = \sqrt{(\Delta L/L)^2 + (\Delta T/T_{tof})^2} \quad (11)$$

ここで、BEPM 間の距離 L は 3.997 m、飛行時間 T_{tof} は 115.93.83 ns であるから、この式を用いて $\Delta\beta/\beta$ を計算すると 2.2×10^{-4} となる。 $\Delta E/E = 2 \times \Delta\beta/\beta$ であるから、ビームエネルギー測定の測定精度は 2.4×10^{-4} と計算できる。なお、超電導加速空洞間の BEPM に於いては、BEPM 間の距離が短いため、ここで測定されるビームエネルギーの分解能は一桁悪く、 3.3×10^{-3} と見積もられる。

3. SRILAC 用 BEPM の設計

Figure 4 に、現施設の RILAC とビーム輸送系、建設中の SRILAC を記した。ここで、SRILAC で加速された重イオンビームは、建設予定の超重元素探索装置 GARIS III、医療用 RI 製造に使用される。また、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. 4 右下の図)。設置する場所によって、Type I、Type

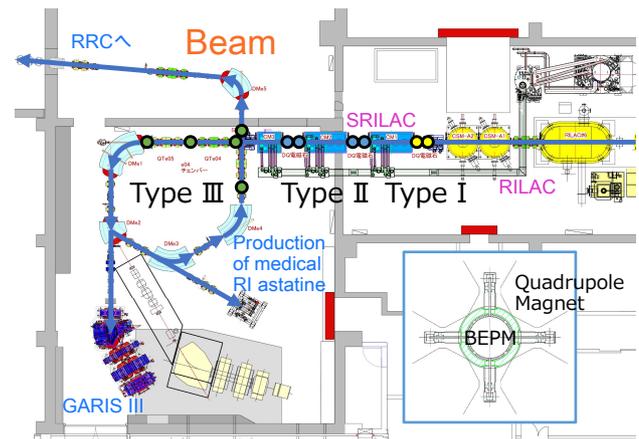


Figure 4: Schematic drawing of RILAC and SRILAC. Depending on the installation location, three types of BEPM (Type I, Type II, Type III) were designed.

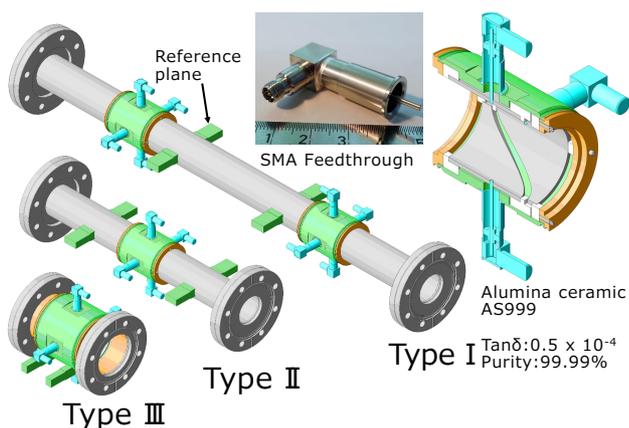


Figure 5: Shape and cross section of each three types of BEPM. SMA feedthroughs are used.

II、Type III、と三種類の BEPM を設計し、現在トヤマ社 [5] が担当して製作中である。それぞれの BEPM の形状と断面図を Fig. 5 に示し、機械的寸法等を Table 2 に要約する。静電型電極の形状は、円筒方向の角度を θ

Table 2: 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

軸、ビーム進行方向を y 軸とすると、 $y = \text{COS}2\theta$ 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を、Fig. 5 に示すように BEPM 本体の外側に取り付けている。この基準面は、BEPM 本体の位置を、真空チェンバー外側に移すものであり、製作精度は ± 0.05 mm 以内とし、他の箇所精度は ± 0.1 mm 以内としている。真空チェンバー、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 [6]) 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 [7] を介して大気側に送られる。

3.1 プリアンプと電源

プリアンプとその電源の仕様を Table 3 に示す。信号用同軸ケーブルには、優れたシールド性を持ち、3

Table 3: Electrical Specifications of Amplifier and Power Supply

| Amplifier | |
|----------------------------|---|
| Model No. | ABL0300-00-4030 (Wenteq Microwave [8]) |
| Bandwidth | 9 kHz - 3.0 GHz |
| Noise Figure | 2.5dB typical, 3.0 dB Max @25 °C |
| Gain | 40 dB @25 °C |
| Power supply for Amplifier | |
| Model No. | LFS50A-15 (Daitron Co., Ltd. [9]) |
| Output Voltage | 15 V |
| Ripple Noise | 10 mV _{p-p} |

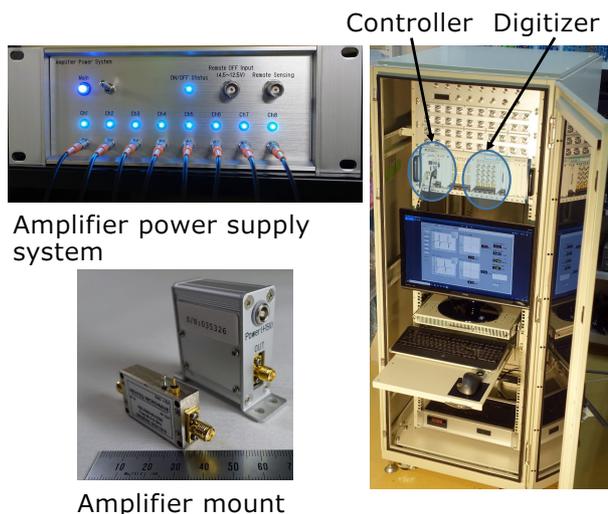


Figure 6: Photographs of the amplifier power supply, amplifier mount and data-acquisition system.

GHz までの帯域を有する HUBER+SUHNER 社 [10] の S 07262 BD を使用する。プロトタイプ BEPM は 32 dB のプリアンプを用いていたが、SRILAC ではさらにゲインが高い 40 dB のプリアンプを使用する。Figure 6 に、プリアンプ用電源とマウントされたプリアンプの写真を示す。プリアンプ用の電源からマウントされたプリアンプへの電流の供給は、Lemo ケーブルを用いている。これは、故障時に素早く交換ができ、現場での煩雑化を避けるためである。また、プリアンプ用電源は TTL 信号により外部からオンオフが可能で、それぞれのアンプのステータスを監視することができる。プリアンプに接続すると LED が点灯し、プリアンプは 140 mA の電流を使用するので、故障等の理由により、この電流値より上下した場合 LED が消灯し、オフ状態のステータスを返す仕様になっている。これらのシステムは、ハヤシレビック社 [11] に製作を依頼した。

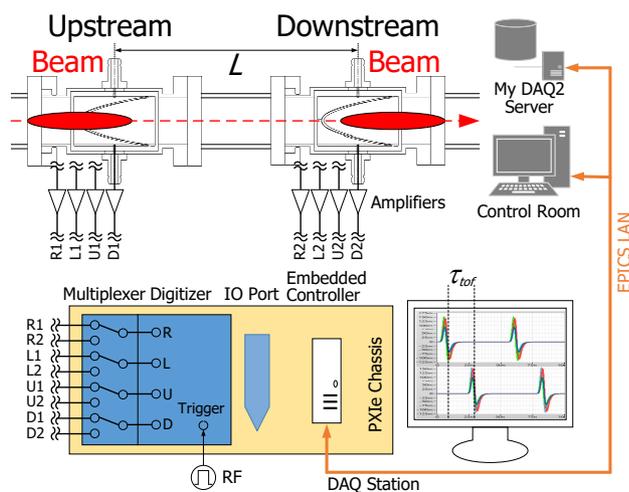


Figure 7: Block diagram of the BEPM and data-acquisition system.

Table 4: Electrical Specifications of Signal Processing Devices

| | |
|-----------------|-----------------------------------|
| | Embedded Controller |
| Model No. | NI PXIe-8840 |
| CPU | i7 5700EQ, 2.6 GHz Quad, 8 GB RAM |
| Transfer Rate s | 8 GB/s |
| | Digitizer |
| Model No. | 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 |
| | Multiplexer |
| Model No. | NI PXIe-2746 |
| Bandwidth | DC - 2.7 GHz |
| Type | 4×1, 4 sets |
| | PXIe Chassis |
| Model No. | NI PXIe-1075 |
| Slot | 5 |
| Transfer Rates | 4GB/s |

3.2 信号処理系とプログラミング

BEPM システムの信号処理系ブロックダイアグラムを Fig. 7 に示す。上流 (1) と下流 (2) のそれぞれの静電型ピックアップに誘導されたビーム信号は、プリアンプで増幅された後、同軸ケーブルによってリニアック棟地下通路に設置する DAQ Station に送られる。信号処理系は、全てナショナルインスツルメンツ社 [12] 製で構成されている。上 (U)、下 (D)、左 (L)、右 (R) の信号は、マ

ルチプレクサーによって切り替えられ、それぞれデジタルタイザ PXIe-5160 によってデジタル化される。組込型コントローラ NI PXIe-8840 とデジタルタイザ間は、PCI Express バスラインを介して、最大 600 MB/s の非常に高速なデータ転送が可能となっている。信号処理系の仕様を Table 4 に示す。サンプリング速度は、4 ch 使用のため 1.25 GS/s であるが、ランダム・インターリーブ・サンプリングモードを選択することにより、最大 50 GS/s のサンプリングが可能になり、高精度な TOF 測定を実現している。ランダム・インターリーブ・サンプリングとは、A/D コンバータを複数並列動作させることにより、より高いサンプリング・レートを実現させる手法である。これら、デジタルタイザ、組込型コントローラ、マルチプレクサー、デジタル IO (NI 6341) は、全てシャーシの中に組み込まれている (Fig. 6)。これらの信号処理系は、LabVIEW を用いたプログラミングによって制御している。取得したデータは、LabVIEW 側から EPICS-LAN を介してコントロールルームに送り、またデータサーバー上のポータブルデータベース (My DAQ2 [13]) 上に保存する。

3.3 BEPM の校正装置

BEPM 内にワイヤーを張り、ビームを模擬する信号を発生させ、電極型ピックアップに出力される信号を測定する。ワイヤーを上下左右に動かすことにより、そのワイヤーの位置と各電極の出力の相関を測定する校正作業を行う予定である。実際にビームが BEPM 内を通過し、ビームの位置を測定する場合は、この校正されたデータに基づいて位置の算出を行う。理研超伝導加速空洞用 BEPM の校正は、J-PARC 50GeV シンクロトロン MR 用に開発された校正装置 [14, 15] を利用させて頂き、行う予定である。理研超伝導加速空洞用 BEPM が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ダクトの設計を行った。装置全体の設計図を Fig. 8 に示す。前述したように BEPM は三種類あり、それぞれの大きさが違うので、その大きさに合わせて治

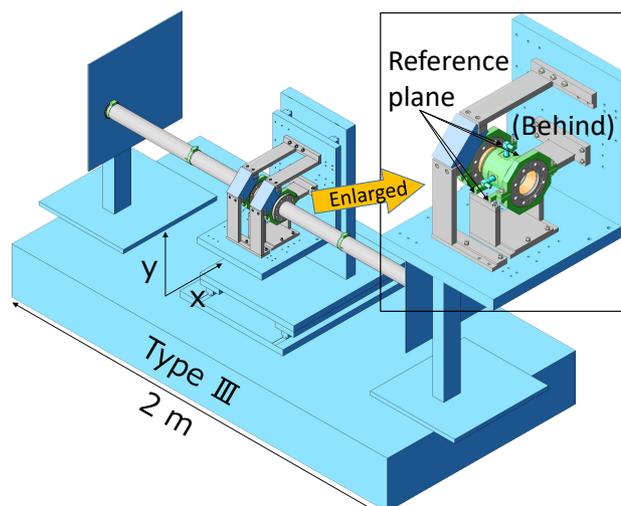


Figure 8: Design drawing of the calibration device.

具とダミーダクトを設計した。BEPMの基準面を治具の基準面に押し当てることにより、±0.05 mmの精度を確保する。ビームを模擬するワイヤーを張ったのちに設置できるように、ダミーダクトは二重管の構造とした。校正装置の台座は上下左右に駆動するため、二重管の端面は、コンタクトフィンガーで接触させ、二重管同士はバンドで絞めて固定する構造になっている。

4. まとめと今後の展望

現在建設中の理研超伝導線形加速器 (SRILAC) で実用する、ビームエネルギー・位置モニター (BEPM) システムの開発を行ってきた。プロトタイプ的设计・製作を行い、RIBFのビームトランスポートラインにインストール後、ウランビームを用いた試験を行った結果、良好な性能を得ることができた。これらの基本仕様を踏襲し、理研超伝導加速空洞用 BEPM の設計と製作を進め、今年の8月に完成を予定している。BEPMの校正装置用治具とダミーパイプも並行して製作しており、BEPMが完成次第校正作業に入る予定である。

また、現在 J-PARC 3-50BT では、BPM を使って大強度ビームのビームサイズを非破壊で測定する開発が進められている [16]。この BEPM システムでも同様に、四極モーメントを測定することにより、非破壊でビームサイズを測定する技術を追求し、その開発を進めてゆきたい。

謝辞

測定システムの構築に関して日本ナショナルインスツルメンツ社の嶋志田 敦史氏より、貴重なご助言を頂き感謝致します。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] 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/
- [2] 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
- [3] T. Watanabe *et al.*, “Beam position monitoring system and COD correction at the cooler synchrotron TARN II”, NIM A **381**, 194 (1996).
- [4] Robert E. Shafer, “Beam position monitoring system”, AIP Conference Proceedings **249**, 601 (1992).
- [5] <http://www.toyama-jp.com/>
- [6] <http://www.ft-ceramics.co.jp/>
- [7] <https://www.maruwa-g.com/>
- [8] <http://www.wenteq.com/>
- [9] <http://www.daitron.co.jp/en/>
- [10] <https://www.hubersuhner.com/en>
- [11] <https://www.h-repic.co.jp/>

[12] <http://www.ni.com/>

[13] A. Uchiyama *et al.*, “IMPROVEMENT OF DATA ARCHIVE SYSTEM AT RIBF”, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Sapporo, Japan, Aug. 2017, pp. 644-647; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2017/proceedings/index.html

[14] 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_1am31/Proceedings/Contents.html

[15] 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_1am31/Proceedings/Contents.html

[16] T. Toyama *et al.*, in this meeting.