

理研 RIBF における静電誘導型ピックアップによるビーム電流測定への応用 APPLICATION TO BEAM CURRENT MEASUREMENT USING ELECTROSTATIC PICKUPS AT RIBF

小山亮 ^{*,A)}, 渡邊環 ^{B)}, 羽場宏光 ^{B)}, 鴨志田敦史 ^{C)}

Ryo Koyama ^{*,A)}, Tamaki Watanabe ^{B)}, Hiromitsu Haba ^{B)}, Atsushi Kamoshida ^{C)}

^{A)} SHI Accelerator Service LTd.

^{B)} RIKEN Nishina Center

^{C)} National Instruments Japan Corp.

Abstract

We have developed a method to calculate beam current by double-integrating the signal from electrostatic pickups, such as the phase probe (PP) or beam energy and position monitor (BEPM). The “double-integrated” beam current and the measured beam energy using PP or BEPM are utilized to ensure the specified beam current and energy in specific experiments carried out at the RIBF. These experiments include synthesizing super-heavy elements or producing radioisotopes. Additionally, the “double-integrated” beam current has been confirmed to be useful as a non-destructive beam current monitor for the stable operation of RIBF ring cyclotrons.

1. はじめに

最大 4 台のリングサイクロトロンを直列に繋いで加速を行う理研 RI ビームファクトリー (RIBF) においては、各加速器におけるビーム入射タイミングの厳密な管理が決定的に重要である。このため、RIBF の各所に静電誘導型ピックアップである phase probe (PP) を設置し、ロックインアンプ (LIA) で処理して常時モニターするシステムを構築した [1]。モニター結果に対するフィードバックは本来ならば自動フィードバックシステムを構築すべきであるが、ビーム位相がずれる要因は多様で単純なフィードバックは機能しない。このため RIBF では加速器オペレータが測定値を睨みつつ trial & error で時には 1 ヶ月以上に及ぶマシンタイムの間、適宜ビーム位相を維持している [2]。この際にはビーム位相だけではなく LIA が示す信号振幅を参考に照射強度の維持、延いては更なる加速・輸送パラメータの最適化を行い最大ビーム強度の向上も図っている。しかしながら LIA はビーム信号の特定の周波数成分を測定する特性上、RIBF のビーム強度の尺度となっているファラデーカップ (FC) で測定したビーム電流値と一致しないことを度々経験してきた。そこで、PP の出力がビームの縦方向の電荷分布を微分した信号であることに着目し、この信号を積分し更に一周分面積を計算する：即ち二階積分すれば波形情報を全て使うことでより正しいビーム電流の情報を得られると考えた (以後、こうして求めたビーム電流値を“二階積分電流値”と呼ぶ)。また、RIBF では 2016 年に正式名称が決定したニホニウムに続く 119 番新元素合成 [3] や、近年がん治療薬として注目を集めている ²¹¹At を始めとした RI 製造 [4] が精力的に行われている。これらのビーム照射においては厳密なエネルギーが設定されており、我々は PP または PP に位置検出機能も付加したビームエネルギー・位置モニター (BEPM) を用いてエネルギーを測定・常時監視し、必要に応じて加速器のチューニングを行い要求エネルギーを維持している。と

ころが超重元素合成実験においてはヘリウムガスを充填する GARIS という合成装置の特性の問題で、²¹¹At 製造においてはその製造装置の高機能化の都合で、それぞれターゲット側でビーム電流の測定ができない構造になっている。この様な事情からエネルギー測定と同時に何らかの方法でビーム電流の情報を得ることが必要不可欠になっており、二階積分電流値の正確性を検証することで正規のモニターとして確立する必要があった。

本稿では PP または BEPM 信号の二階積分からビーム電流を求める手法、及び実際のマシンタイムで測定した二階積分電流値と FC 電流値や LIA 振幅との相関など得られたデータを元にその有用性について報告する。

2. 二階積分電流値の算出

2.1 RIBF の静電誘導型ピックアップ

RIBF には Fig. 1 にその外観を示した以下 3 種類の静電誘導型ピックアップがある。

- 1) ビームライン用位相プローブ (PP): サイクロトロンの入射・出射点を中心に RIBF 全域のビームライン上に設置されている円筒形状のピックアップ。オシロスコープ、または LIA で強度とタイミングを観測するのが主な用途 [1]。AVF 下流の RI 製造コース、及び RRC 下流の超重元素合成コース (GARISII) においてはそれぞれ 2 組の PP でエネルギーも測定している [5]。
- 2) ビームエネルギー・位置モニター (BEPM) [6]: 円筒形状 PP を 4 分割 ($\cos 2\theta$ 型) することでビームの位置も測定できるようにしたピックアップ。2020 年に運転を開始した超伝導線形加速器 SRILAC コースに設置され、ビーム位置およびエネルギー測定に使用されている。超伝導空洞の汚染を防ぐために、それらを非破壊で測定できる BEPM は必須の診断器となっている。SRILAC に先駆けた試験のため RRC 取出しコースにも設置されており、RI 製造や産業連携実験用に RRC のエネルギー測定に使用している。

* koyama@cyclotron.co.jp

3) 等時性調整用 PP：サイクロトロン動径方向に設置された平行平板型のピックアップ。オシロスコープ、または LIA でタイミングを観測して等時性磁場形成に用いている [1]。

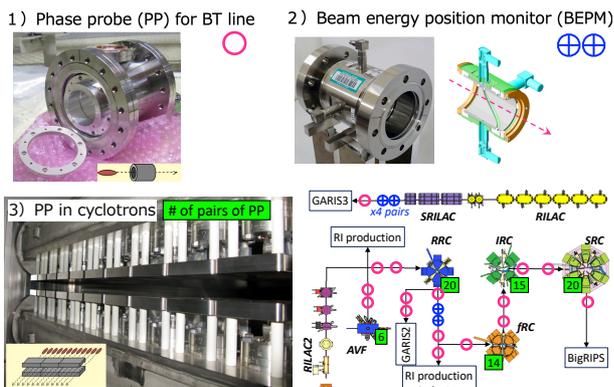


Figure 1: Overview of three types of electrostatic pickups at RIBF.

2.2 ピックアップ波形の処理課程

ピックアップでバイポーラのビーム波形が観測される様子を Fig. 2 に示す。ピックアップにバンチの全電荷が誘導された時にバイポーラのゼロクロスを通り過ぎるが、ここをビームバンチの中心とみなしてビームタイミングや TOF を測定する際の基準としている。

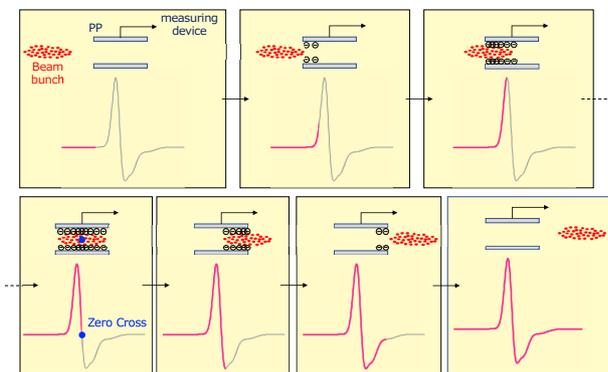


Figure 2: Process by which bipolar waveform is observed in pickup.

そしてこのバイポーラ波形からビーム強度の情報を得るために Fig. 3 に図示したように以下の処理を施す

- 1) バイポーラ波形を積分する
- 2) 右肩上がりのバックグラウンド成分を見積もるために、バンチピーク左右の間をエルミート補間する
- 3) 積分波形 1 からバックグラウンド 2 を差し引いて、最終的な積分波形 3 を得る
- 4) 最終積分波形 3 をもう一度積分し面積を求める
- 5) 二階積分値 4 に対して、測定 PP 最寄の FC 電流値で 1 次の校正を行いビーム電流値に換算する

過程 1) で示した様に、RIBF の測定環境ではほとんどの場合、プラスのオフセットの影響で右肩上がりの積分

波形となるが、所によりマイナスのオフセットの場合もありこの場合は右肩下がりの積分波形となる。両者で信号処理は変わらない。こうして求めた電流値を FC で測定した電流値とは区別して本稿では“二階積分電流値”と呼ぶことにする。

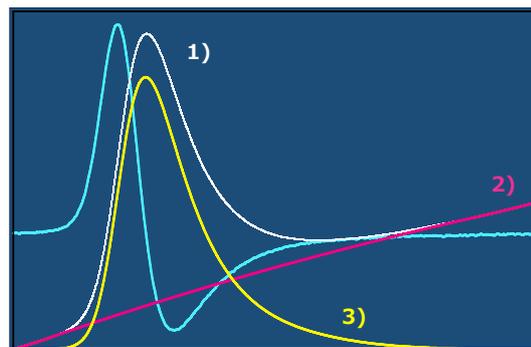


Figure 3: Waveform processing of pickup signal to obtain a “double-integrated” beam current.

3. 二階積分電流値の特性

3.1 特性を調べる意義

冒頭で述べた通り、RIBF では FC で測定したビーム電流値がビーム強度を表す尺度となっている。しかし FC はビームを止めなくては測定できず、当然実験中（ユーザーにビームを供給中）はビーム電流を測定できない。従って非破壊にビーム信号を検出可能な PP を用いることでビーム供給中もビーム強度の情報を得ている。RIBF の各所に設置された PP それぞれに LIA を 1 台ずつ割り当て一括してモニタリングするシステム [1] を採用しており、加速器の状態および供給ビーム強度の維持には必要不可欠なシステムとなっている。しかし実際には維持するだけでなく、ユーザーに供給しながら全パラメータをさらに最適化してビームロスを減らし最大供給強度を引き出す調整も実施することが多い。この様な調整においては次々とパラメータを探りながら通過率効率を改善させ、ビームカレントにして 10~20 enA といったオーダーで徐々に強度を増やしていくが（“落穂拾い”と呼んでいる）、そこで度々問題となるのが指標にしている LIA 振幅と FC 電流値の挙動の不一致である。単純に LIA の示す強度だけを見ながらそれが増える様に加速器のチューニングを行なった場合、LIA 振幅は増えているのに FC 電流値はほとんど変化がないか逆に数%減っている、といったことが珍しくない。この原因は、LIA はビーム信号を構成する周波数成分のうち特定の一週波数成分のみを検出しており、その周波数成分以外の情報は全て捨てているため、と推察している。例えばバンチの電荷分布が相似系で変化しないような調整を行なった場合は、バンチを構成する各周波数成分の信号レベルの分布が変わることになり、FC 電流値との一貫性が損なわれることが考えられる。

この様な背景から、ビームカレントモニタとしての信頼性を示すためには、今回考案した二階積分電流値が LIA 振幅に比べてどの程度 FC 電流値と一貫性があるかが重要な要素となる。

3.2 測定セットアップ

Figure 4 に FC 電流値・LIA 振幅・二階積分電流値を比較するための測定セットアップを示す。PP を通過した信号は最寄の FC、またはユーザーターゲットまで輸送し、その電流値を測定・ログする。PP の信号は直列接続した方向性結合器（結合度：10 dB）3 つで 3 台の LIA へ分配しそれぞれ 3 種類のリファレンス周波数でロックして振幅を測定・ログする。方向性結合器を通過した PP 信号はデジタイザもしくはオシロスコープへ伝送し、二階積分電流値を求めてログする。

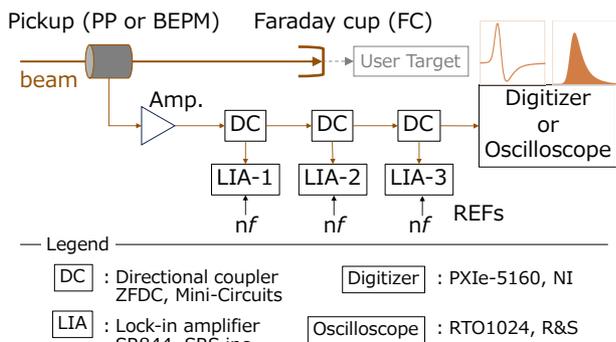


Figure 4: Schematic diagram of measurement setup for comparing the beam intensity of FC, LIA, and double-integration.

測定に関するプログラムは全て LabVIEW で作成した。本稿では数値の安定度の都合によりオシロスコープ RTO1024 で取得した二階積分電流値のみを示し、デジタイザ PXIe-5160 はエネルギー測定にのみ使用した。オペレータがビーム量を見ながらパラメータを調整する場合、モニタしているビーム量の更新周期が 500 ms を超えると調整のしづらさを感じる。このため、測定周期が 500 ms 以下であることを上限に測定器のアベレーシングパラメータ含め測定プログラムの処理過程を決定した。RTO1024 については 1500 波形の移動平均モード（“None” モード）を採用した。波形サンプルの間隔は 1 MHz とのことである。なお、N サンプル毎にリセットをかけるモード（“Waveforms” モード）ではパンチ毎の振幅変動の平均化が不十分で、場合によっては二階積分電流値の変動幅が移動平均モードの 5 倍以上となり、ビーム調整の指標としては使いづらいと判断した (Fig. 5)。PXIe-5160 については後者のモードが相当し、およそ 9000 パンチ毎に平均して波形を取得した。

次項より、二階積分電流値についてさまざまな特性を FC 電流値や LIA 振幅と比較して示す。

3.3 線形性

AVF で加速した ${}^4\text{He}^{2+}$, 7.25 AMeV のビームについて、フルビーム 22 eμA から複数のメッシュタイプのアッテネーターを組み合わせてビームカレントを減らし、FC 電流値との線形性を二階積分電流値とバイポーラ波形の振幅で比較した (Fig. 6)。両者共に良い線形性を示している。この様に 2 倍程度のオーダーでビームカレントを変更する場合の線形性はここでは割愛した LIA においてもそれぞれ良い線形性を示すことがわかっている。

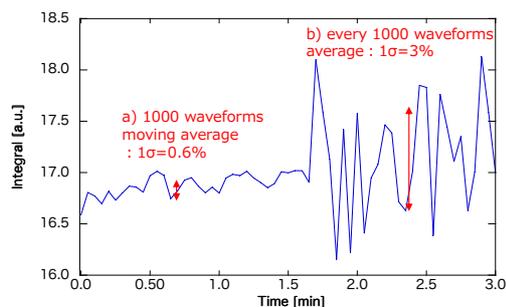


Figure 5: Difference in the stability of the double-integrated beam current depends on the averaging method of RTO1024.

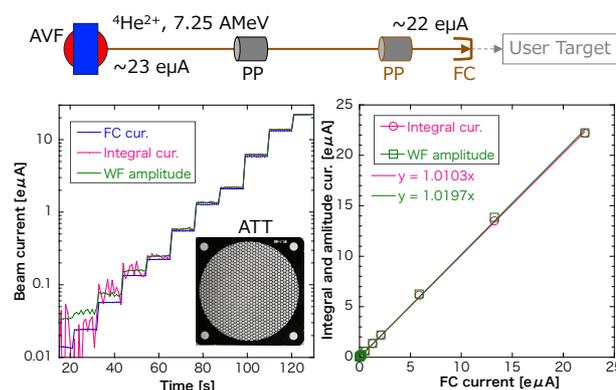


Figure 6: Linearity between FC current and double-integrated beam current or waveform amplitude.

3.4 分解能

同じく ${}^4\text{He}^{2+}$, 7.25 AMeV のビームを用いて、二階積分電流値の分解能を調べた。AVF の上流にあるソレノイドコイルを最適値から 1 A → 2 A と段階的に下げ、続いて 2 A 一度に戻したところ FC 電流値にして 30 e nA ほど変化しその動きが二階積分電流値においてはっきり観測できた (Fig. 7)。この程度の分解能があるので、実際にビーム調整に使っている。また、このプロットで示した様に FC 電流値よりも測定値が安定しており、ビーム調整においてアドバンテージとなる。

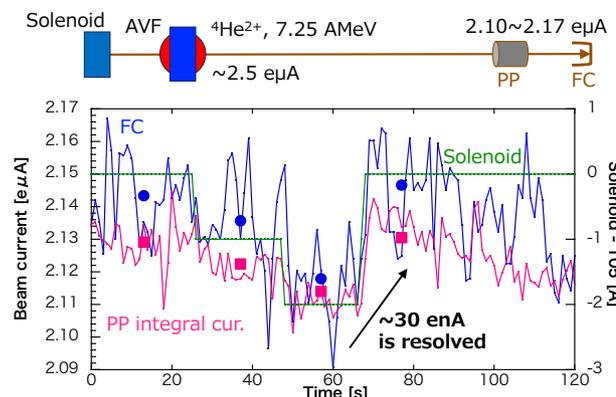


Figure 7: Beam current resolution of FC and double-integration method.

3.5 ^{211}At 製造ターゲット電流値との相関

同じく $^4\text{He}^{2+}$, 7.25 AMeV のビームを実際に ^{211}At 製造ターゲットへ 20 μA 照射中のデータを Fig. 8 に示す。上側が 11 時間分のデータ、下段が四角で囲った 2 時間分の拡大図である。通常は照射中を通して安定して強度が維持されることがほとんどであるが、ここでは取替えてイオン源が不調でオペレータがイオン源を調整しながら照射強度を維持していた時のデータを示している。この時のターゲットは従来から使用しているもので、ターゲット電流値が測定できる構造となっている。二階積分電流値がターゲット電流値ときれいに相関している様子がわかる。また、エネルギーもユーザー指示範囲で推移していることをモニタできている。この様に RI 製造において重要なエネルギーと強度を同時に常時モニタリングできるシステムとなっている。

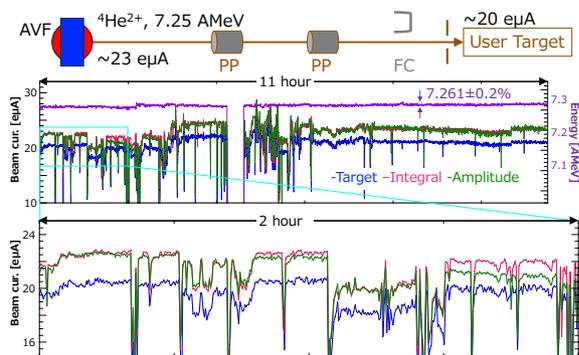


Figure 8: Correlation between target current, double-integrated beam current, and waveform amplitude.

3.6 LIA 振幅が FC 電流値と一致しない例

ここでは LIA 振幅が FC 電流値と一致しない例を紹介する。Figure 9-a に示した様に AVF で重水素 (d) イオンを 12 AMeV まで加速中にメインコイルの電流値を規定値 597 ± 0.04 A 変え、等時性をおよそ 0.5 ns 崩した。この時、AVF から取り出されたビームを PP で検出した波形は Fig. 9-b に示したようになった。時系列データは Fig. 9-c に示してあるが、メインコイルの電流値を変えても終始 FC 電流値と二階積分電流値が一致した挙動を示しているのに対し、LIA では各周波数成分いずれも一致した挙動を示していない。これまでの LIA システム運用で経験してきた、“LIA 振幅は増えているのにビームカレントが減少してしまった”という現象を再現できたデータとなっている。このテストにおいては調査のために特別に LIA を 3 台用意したが、通常の運転においては PP1 個に対して LIA1 台、つまり一周波数成分のみの監視である (PP の数に対して用意できる LIA に限りがある都合)。一方で、二階積分電流値は波形データ全てを使っていることになるので、このような場合でも FC 電流値と一致した挙動を示してくれると理解している。

3.7 加速高周波電圧の変動を補償できた例

最後に RIBF の実験中に加速高周波が変動した際に、その照射強度を二階積分電流値を見ながら補償できた

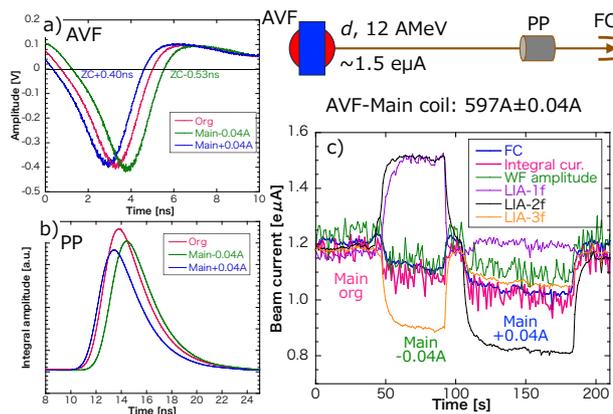


Figure 9: Example of LIA amplitude and FC current not matching when bunch shape is changed.

例を示す。この時は RIBF の 4 つのリングサイクロロン: RRC, fRC, IRC, SRC 全てを使用して、 $^{124}\text{Xe}^{52+}$ イオンを 345 AMeV に加速し、RIBF 実験ユーザーに 5 μA 程度を供給中であった。Figure 10 中 A 点で示したあたりで、ターゲット強度および二階積分電流値が優位に低下した。この時他のモニタを確認したところ、fRC の 1 台の共振器の加速電圧がおよそ 0.2 kV 低下していることに気がつき二階積分電流値を見ながら同電圧を上げ、同図 B 点あたりでビームピークが取れた様子を示している。同時にモニタしていた LIA を見ると、3f 成分 (この時の基本周波数が 18.25 MHz だったので 54.75 MHz 成分) の振幅が比較的ターゲット強度と一致していたので、同図 C 点で 3f 成分のピークを取ってみたが、波形振幅 $\cdot 1f, 2f$ 振幅は逆に低下しターゲット強度と二階積分電流値は変化なしという挙動であった。従って、ここでは 3f 成分が相対的に大きくなる様な電荷分布の変化があったと推察され、このような時にも FC 電流値との不一致が起きると考えられる。ここでも二階積分電流値の正確性が確認できた。

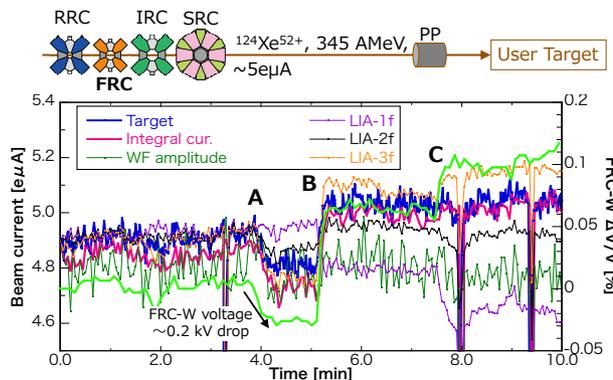


Figure 10: Recovery of voltage drop of fRC-W cavity while monitoring double-integrated beam current.

4. まとめと今後の展望

ユーザーにビーム供給しながら非破壊にビーム強度を計測しつつ加速器をチューニングしたいというモチベー

ションの下、二階積分電流値による計測を考案した。実際の実験において既に運用中であるが、従来のLIAシステムと比べてもその有用性を改めてデータとして示すことができた。

また、RIBF内外においてBEPMの信号を利用してさまざまな研究がなされているが、BEPMで観測した波形振幅で計算するよりも二階積分値を用いた方が正確な値が導けるとの報告もいただいている[7-9]。現状、RIBFにおいては数カ所ではこの二階積分電流のシステムを導入していないが、今後は拡張を検討し任意の点で計測できるようにすることでこの様な研究に貢献したい。

現状の二階積分電流値の欠点は、イオン源や加速器の状態によってはその測定値の変動幅がFC電流値に比べて大きすぎて加速器のチューニングがしづらい場合があるということである。逆に言えばFC電流値では見えない時間的変動が二階積分電流値では観測できているとも言える。Figure 11はデジタイザPXIe-5160で2000バッチ分のバイポーラ波形を一度に取得した画像である。この時はイオン源の状態が不安定で、振幅が暴れている様子が見える。この状態でもFC電流値は比較的安定に見えてしまう。従って二階積分電流値を見ながらイオン源を調整することで、変動幅を抑えつつ絶対量が増える様なパラメータを探ることができれば、加速器の通過効率改善にも役に立つと考えている。

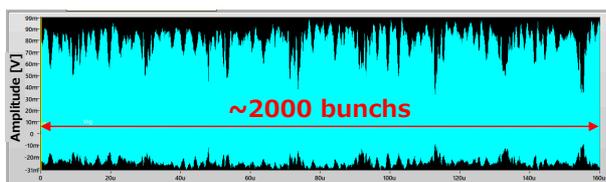


Figure 11: Bipolar waveforms of 2000 bunches for unstable ion source conditions.

参考文献

- [1] R. Koyama *et al.*, “Online monitoring of beam phase and intensity using lock-in amplifiers”, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 729, 2013, pp. 788-799. doi:10.1016/j.nima.2013.08.056
- [2] N. Fukunishi, “Performance Upgrade and Present Status of RI Beam Factory Accelerator Complex”, 「加速器」 Vol. 17, No. 4, 2020, pp. 236-246. doi:10.50868/pasj.17.4_236
- [3] H. Sakai *et al.*, “Facility upgrade for superheavy-element research at RIKEN”, Phys. J. A 58, 238 (2022). doi:10.1140/epja/s10050-022-00888-3
- [4] Y. Wang *et al.*, “Present status of ^{211}At production at the RIKEN AVF cyclotron”, RIKEN Accel. Prog. Rep. 56, 2023, p. 192.
- [5] T. Watanabe *et al.*, “Development of beam energy measurement system by using electrostatic pickups at the RIBF”, Proc. PASJ2015, Tsuruga, Japan, Aug. 2015, pp. 1198-1201.
- [6] T. Watanabe *et al.*, “Development of beam energy position monitor system for RIKEN superconducting acceleration cavity”, Proc. PASJ2018, Nagaoka, Japan, Aug. 2018, pp. 49-54.
- [7] N. Miyawaki *et al.*, “Measurement of beam energy width using beam energy position monitor”, PASJ2024, Yamagata, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2024, FRP011, this meeting.
- [8] T. Adachi *et al.*, “Design study of beam position monitor for heavy-ion beam”, Proc. of PASJ2023, Funabashi, Japan, Aug. 29-Sep. 1, 2023, pp.146-149.
- [9] T. Nishi *et al.*, “Development of non-destructive beam envelope measurements using BPMs for low beta heavy ion beams in SRF cavities”, Proc. of HB2023, 2023, pp.284-289.