

Upgrade of beam diagnosis system for RIBF

Tamaki Watanabe^{1,A)}, Masaki Fujimaki^{A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Masayuki Kase^{A)}, Kazunari Yamada^{A)},
Naruhiko Sakamoto^{A)}, Kenji Suda^{A)}, Misaki Komiyama^{A)}, Takeshi Nakamura^{A)B)}, Ryo Koyama^{A)B)},
Yasuteru Kotaka^{A)B)}, Osamu Kamigaito^{A)} and Yasushige Yano^{A)}

^{A)} RIKEN, Nishina Center for Accelerator-Based Science
2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

^{B)} Sumitomo Heavy Industries Accelerator Service Ltd.
1-17-6 Osaki, Shinagawa, Tokyo, 141-0032

Abstract (英語)

Beam diagnosis system has been upgraded to measure current, orbit of heavy-ion beams for the RIKEN RI beam factory (RIBF). New Faraday cups have been installed into the transport lines of the RIKEN heavy-ion linac (RILAC), the RIKEN ring cyclotron (RRC), the fixed-frequency ring cyclotron (fRC), the intermediate-stage ring cyclotron (IRC) and the superconducting ring cyclotron (SRC) to measure the current of accelerated heavy-ion beams. The design of the new Faraday cups, the improvement of a differential probe and the experimental results obtained during the commissioning of the RIBF using the heavy-ion beams are described in this report.

RIBFにおけるビーム診断系の高度化

1. はじめに

理研のRIBFでは、1台の線形加速器と4台のサイクロトロンによって、重イオンのカスケード加速を行っている^{[1][2]}。それぞれの加速器で加速されるビームの電流値、加速器内のビーム軌道、位相を正確に診断する^[3]ことは、ビームの質を向上させ、また加速器を効率良く運転するために、極めて重要である。今回、ビーム診断系の高度化を図るために、特にファラデーカップとビーム軌道検出用ラジアルプローブの開発・改良を行った。ファラデーカップの電流測定精度を上げるためには、ビームがカップに当たることによって放出される二次電子を、いかに抑制できるかが重要な問題となってくる。設計にあたって、サプレッサー電極によって形成される電場を、三次元で計算を行った。その結果、従来型とは違う、サプレッサーとカップを分離した構造を採用し、全50台のファラデーカップのうち約半数弱を更新した。また、中間段サイクロトロンfRCとIRCのラジアルプローブにおいては、Flat-top Cavityから加速軌道上に漏洩する電磁場によって生ずる障害を、貫通コンデンサーによる多段フィルターより改善し、ビーム軌道が正確に得られるようになった。

2. ファラデーカップの改良

従来型のファラデーカップのヘッド部を図1に示す。このファラデーカップは、高エネルギー大強度ビームに使用することを想定し、約10 kWの冷却能力を持つように設計をした。ビームによる発熱を緩和するために、カップを斜めにカットした構造を採用し

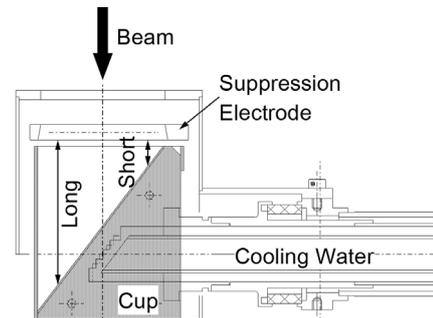


図1：従来型のファラデーカップのヘッド部

た。しかし、カップの構造が非対称なため、カップとサプレッサー電極までの距離が短い程、ビ発生する二次電子の立体角が大きくなるため、二次電子が逃げ出やすくなる。そのため、ビームを調節する時、ビームをカップの浅い個所に移動する程、逃げ出る二次電子が多くなり、その分だけビーム電流を多く読み、ビーム調節を難しくしていることが判明した。

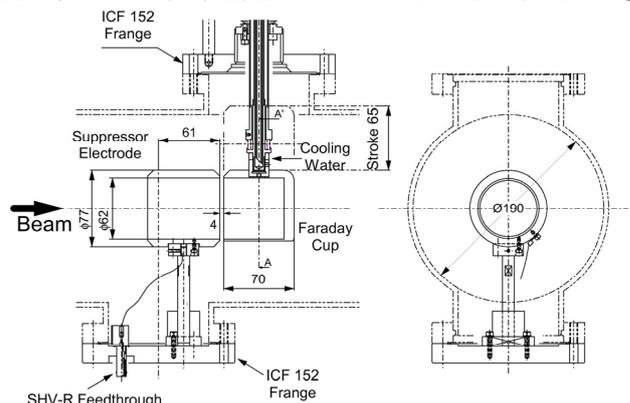


図2：新型のファラデーカップ

¹ E-mail: wamaki@riken.jp

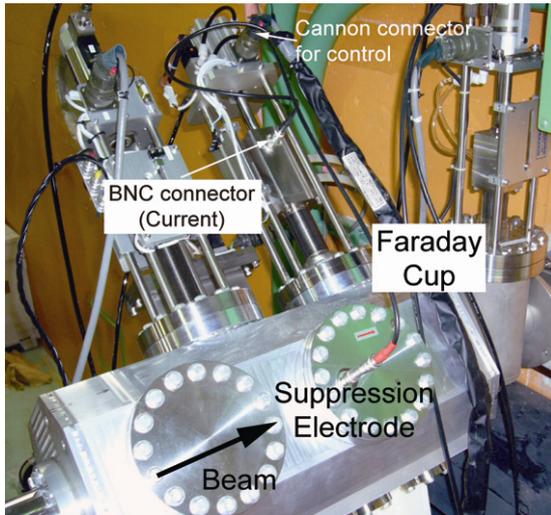


図3：RI-BFビーム輸送系の新型ファラデーカップ (M11:fRC-IR間)

その対策として、ネオジウム系永久磁石（表面最大磁場：約0.6 T）を取り付けることによって、発生する二次電子をトラップさせ、改良を試みた。0.1 Tの磁場中では、1 keVのエネルギーを持つ電子のラーマー半径は、約1.1 mmと計算される。永久磁石のトラップの効果により、一時的に正確に電流値が読めるようになった。しかし、しばらく使用すると、ビームによる発熱により、温度が磁石のキュリー温度を超えてしまい、磁石が減磁してしまった。根本

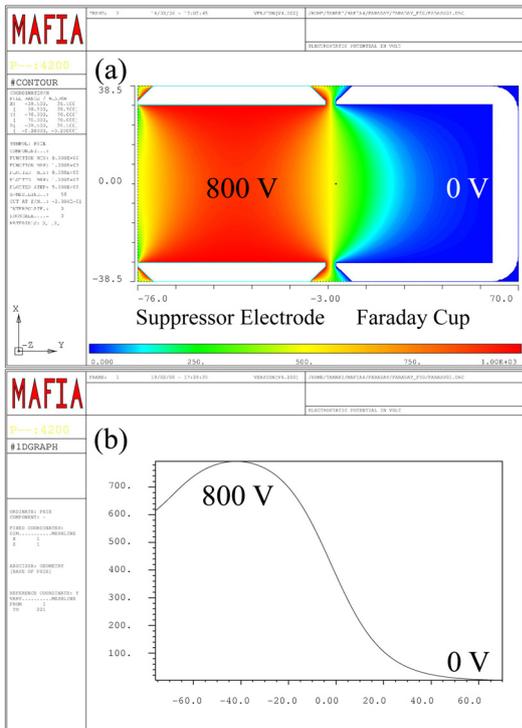


図3：計算コードMAFIAによる、サプレッサーに1 kVの電圧をかけた際の電場計算。(a)カップの断面 (X-Y面)における電位の等高プロット (b) 中心領域 (X=0, Z=0)におけるY軸上の電位。

表1：従来型と新型のサイズと立体角の比較

| | カップの深さ(mm) | サプレッサーの厚さ(mm) | カップの直径(mm) | 立体角 (sr) |
|-----|------------|---------------|------------|----------|
| 従来型 | 26 | 3 | 46 | 0.783 |
| 新型 | 62 | 61 | 62 | 0.715 |

的に二次電子の問題を解決するため、新しいファラデーカップの設計を行った。新しいファラデーカップの詳細を図2に、また、一例として、RI-BFのビーム輸送系にインストールされた写真 (M11:fRC-IR間) を図3に示す。この設計にあたっては、計算コードMAFIAを使い、サプレッサーの電場計算を行った。サプレッサーに1 kVの電圧をかけた際の、カップの断面計 (X-Y面) で見た電位の等高プロットを図3 (a) に示し、さらに中心領域 (X=0, Z=0) における、Y軸上の電位を図4 (b) に示す。この計算により、サプレッサーの電場が最小になってしまう軸中心上でも、加えた電圧の8割の電位を形成できるという結果が得られた。従来型と新型のファラデーカップのサイズとカップ中心からの立体角の比較を表1に示す。この新型ファラデーカップは、サプレッサー電極は固定されており、SHVフィードスルーにより電圧が供給される。一方、

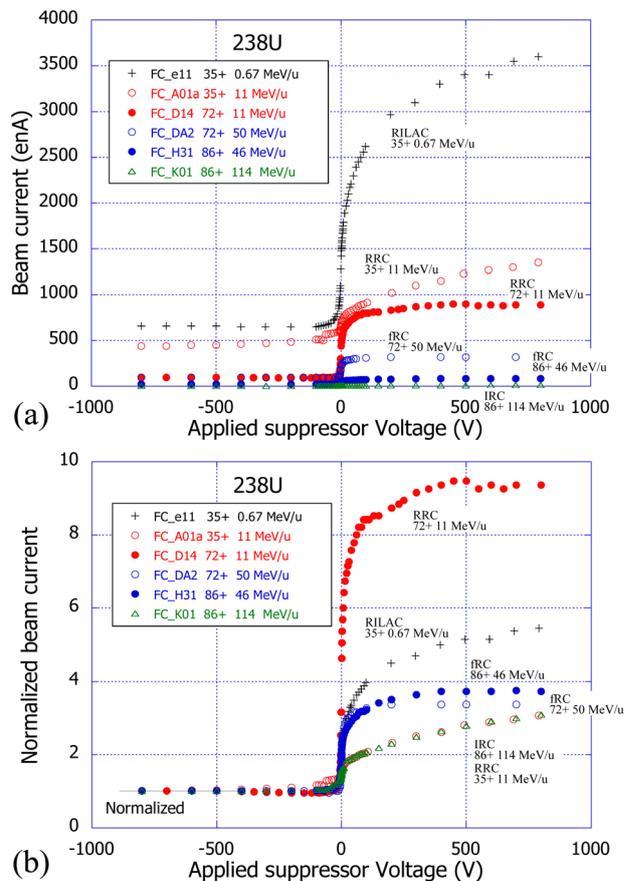


図4：(a) サプレッサーに印加する電圧に対する、電流値の測定結果。(b) (a)の結果を、サチュレーションをした時の電流値でノーマライズした結果。

カップは常時引き出されているが、電流測定の際に、圧空によって真空チェンバー内に挿入される。カップはBNCフィードスルーによって、電流信号が取り出され、120 dBのダイナミックレンジを持つログアンプによって増幅され、その値がEPICSシステム^[4]によって読みだされる。

上記のサプレッサーの効果を調べるために、ウランビームを加速したコミッションングにおいて試験を行った。サプレッサーにかける負の電圧を変化させ、ある電圧以上で電流の値が変化しないサチュレーションの状態を、二次電子が十分サプレスされた状態と考える。各加速器で加速されたウランのエネルギーと価数の違うビームを使用して測定した結果を図4(a)に示す。この結果、ビームエネルギー114 MeV/u $^{238}\text{U}^{86+}$ までのビームは、約70 V以上のサプレッサー電圧で、全てのファラデーカップにおいて、サチュレーション状態に入っていることを確認した。測定前には、ファラデーカップ近傍に設置されたプロファイルモニターを用いて、ビームが ± 10 mm以内に入る様に調節した。さらに、サプレッサーに正の電圧を加えていって、逆に二次電子を積極的に加速し、どのくらい二次電子が発生しているかを調べた。その結果を、同じく図4(a)に示す。測定する箇所が電流値が違うので、比較し易くするために、サチュレーションをした時の電流値でノーマライズした結果を図(b)に示す。これより、RRCで加速され、なおかつチャージストリッパを通過したあとのエネルギー11 MeV/u $^{238}\text{U}^{72+}$ のビームを使用したファラデーカップ(FC_D14)では、ビーム電流の約10倍近くの二次電子が発生していることが解った。ビームのエネルギーが低く、価数が高いほど、二次電子の発生が多い傾向があることが解った。今後、この現象について細かい解析を進める。

3. ラジアルプローブの改善

fRCとIRCのラジアルプローブを改良し、加速軌道全域にわたってビーム電流を検出できるように改善できた。

これまではFlat-top Cavityからの漏洩電場により、ビーム電流が読めなくなる領域があった。fRCを例に説明する。fRCでは取り出し軌道周辺で影響が大きく、加速器調整に影響を与えていた。図5にその様子を示す。図中右側の乱れた波形部分が取り出し

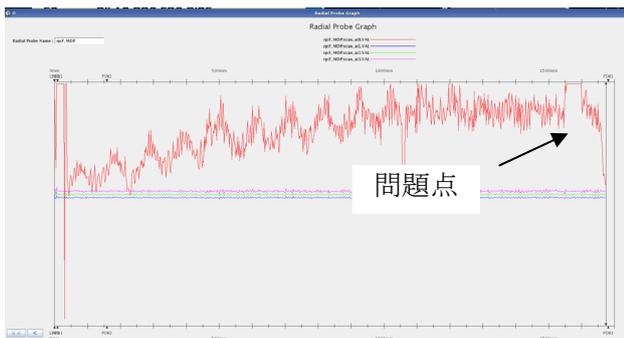


図5. 改良前の状況

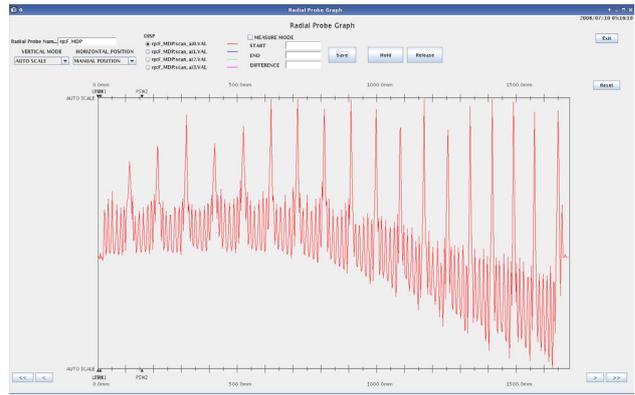


図6. 改良後の状況

軌道周辺に相当する領域である。このような欠陥を改善するために、以下の改良を実施した。

- 電極近傍の配線に小容量貫通コンデンサーによるフィルター1を挿入
- フィルター1は信号伝送路インピーダンスに整合させ反射波による影響を小さくしている
- 信号伝送路を2重シールド同軸線に変更
- 伝送路途中に大容量貫通コンデンサーによるフィルター2を挿入
- プローブ電極支持軸の先端付近が加速器本体に接地するようにコンタクトフィンガー取り付け

以上の改良により図6の様に改善された。フィルターの構成を図7に示す。

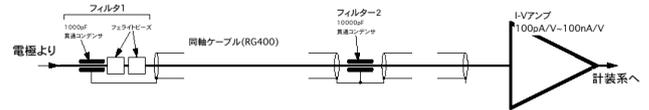


図7. フィルター構成

4. ラジアルプローブ（ソフト）の改善

ラジアルプローブのソフトウェアとして、メニューに以下の改善を行うことによって、操作性が大幅に改善された。

- 縦軸、横軸のスケール変換
- 任意の領域を選択し詳しく表示
- グラフホールド機能の追加
- データの保存機能の拡充
- カーソル機能の追加

参考文献

- [1] 上垣外 修一他, “理研RIビームファクトリーの現状”, *in this proceedings*.
- [2] 福西 暢尚他, “RIビームファクトリーにおけるウランビーム加速試験”, *in this proceedings*.
- [3] 小山 亮他, “RIビームファクトリーにおけるロックインアンプを用いたビーム位相及び加速RF監視システム”, *in this proceedings*.
- [4] M. Kobayashi-Komiyama et al.: RIKEN Accel. Rep. **37**, 277 (2004).