

PRACTICAL USE OF BEAM CURRENT MONITOR WITH HTS CURRENT SENSOR AND HTS SQUID

Tamaki Watanabe^{1,A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Yuichiro Sasaki^{A)B)}, Masayuki Kase^{A)} and Yasushige Yano^{A)}

^{A)}RIKEN, Nishina Center for Accelerator-Based Science

2-1 Hirosawa, Wako, Saitama, 351-0198

^{B)}Ultimate Junction Technologies Inc.

3-3-1 Yagumonakamachi, Moriguchi-shi, Osaka 570-8501, Japan

Abstract

A highly sensitive beam current monitor with an HTS (high-temperature superconducting) SQUID (superconducting quantum interference device) and an HTS current sensor, that is, an HTS SQUID monitor, has been developed for use of the RIBF (RI beam factory) at RIKEN. Unlike other existing facilities, the HTS SQUID monitor allows us to measure the DC of high-energy heavy-ion beams nondestructively in real time, and the beam current extracted from the cyclotron can be recorded without interrupting the beam user's experiments. Both the HTS magnetic shield and the HTS current sensor were dip-coated to form a Bi(Pb)₂-Sr₂-Ca₂-Cu₃-O_x (Bi-2223) layer on 99.9% MgO ceramic substrates. In the present work, all the fabricated HTS devices are cooled by a low-vibration pulse tube refrigerator. These technologies enabled us to downsize the system. This year, the HTS SQUID monitor was upgraded to have a resolution of 100 nA and was reinstalled in the beam transport line, enabling us to measure a 3.6 μA ¹³²Xe²⁰⁺ (10.8 MeV/u) beam and a 1 μA ¹³²Xe⁴¹⁺ (50.1 MeV/u) beam used for the accelerator operations at RIBF. Hence, we will report the results of the beam measurement and the present status of the HTS SQUID monitor.

高温超伝導電流センサーとSQUIDを用いたビーム電流モニターの実用化

1. はじめに

現在、理研仁科加速器研究センターにおいて、水素からウランまでの全元素のRIビームを発生させる、次世代の重イオン加速器施設「RIビームファクトリー」が稼働中である^[1-4]。この加速器において、重イオンビームの電流値を正確に測定することは、加速器を効率良く運転し、運転性能を向上させ、ユーザーにビームを安定に供給する上で、極めて重要である。RIBFにおいては、ビームの通過効率を測るために、ビーム電流の測定には、ビーム破壊型モニターであるファラデーカップを使用している。しかし、ウランなどの高エネルギー重イオンビームの電流を測定する場合、ビームがカップに当たることによって発生する二次電子を、完全にサプレッスする事は困難であり、測定に誤差が生じてしまう。また、ファラデーカップで測定を行っている間は、ビームユーザーはビームを使用する事ができない。すなわち、リアルタイムな測定は不可能である。さらに、大強度ビームを使用した場合、カップは放射化し、メンテナンスにおける作業者の被爆の問題は無視できない。この問題を解決するために、高温超伝導 (High-Temperature Superconducting, HTS) 電流センサーとSQUIDを用いたビーム電流モニター (以下、HTS SQUIDモニターと略する) の開発を進め^[5-7]、本年実用化に至った。

2. ファラデーカップにおける二次電子発生の問題

RIBFでは、ウラン加速の場合、1台の線形加速器と4台のサイクロトロンにより、カスケード加速を行っている。ビームの通過効率は、全50台のファラデーカップを用いて測定されている。ビームがファラデーカップに当たると、二次電子が発生し、その分だけ電流値を多く読んでしまう。この効果を避け

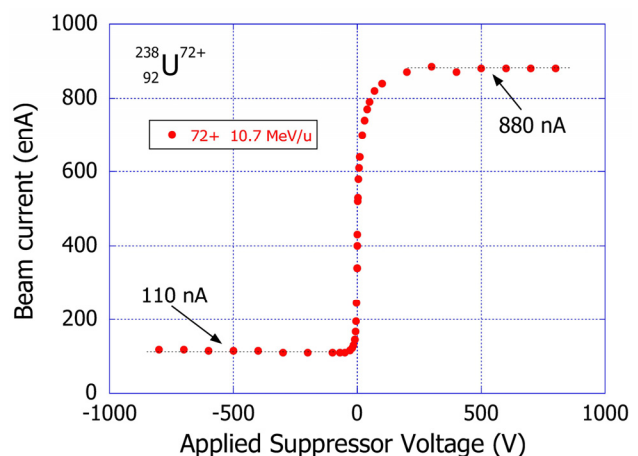


図1: ²³⁸U⁷²⁺ビームを使用した、ファラデーカップにおける二次電子の発生量の測定結果。

¹ E-mail: wtamaki@riken.jp

るために、カップの前方に負の電圧をかけ二次電子をカップに引き戻す、もしくは磁場によって二次電子をトラップする、などの方法を施す。実際に、どの位二次電子が発生しているかを調べるために、サプレッサーの電圧を変化させ、ビーム電流の値を測定した^[8]。測定の結果を図1に示す。通常は、負の電圧を印加した状態で使用する。二次電子の発生量を調べるために、逆にサプレッサーに正の電圧を加え、二次電子を積極的に加速した。その結果、エネルギー11 MeV/u ²³⁸U⁷²⁺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8倍近くの二次電子が発生していることが解った。この測定に於いては、このファラデーカップの前後のプロファイルモニターを用いて、ビームが±15mm以内に入る様に補正用偏向電磁石と四重極電磁石を調節し、位置と軸を合わせた。しかし、ビームの幅が大きく、しかも傾きを持っている状態では、この測定結果よりも、さらに二次電子の量は増える。このように、ウランなどの重イオンビームでは、二次電子の完全なサプレッションは困難であり、ビーム電流値に誤差を生じてしまう。非破壊型のHTS SQUIDモニターは、この問題を解決できる。

3. HTS SQUIDモニターの原理とシステム

図2(a)に、HTS SQUIDモニターの原理図を示す。99.9%以上の純度の高い酸化マグネシウムで作られた筒状のセラミックスに、ビスマス系の超伝導材(Bi(Pb)₂-Sr₂-Ca₂-Cu₃-O_x: Bi-2223)を300 μmの厚さで焼成し、超伝導電流センサーを製作する。超伝導電流センサーの内部をビームが通過すると、マイスナー効果によって超伝導の表面を遮蔽電流が流れる。中心一部(ブリッジ部)だけを除いて鉢巻き状に絶縁すると、遮蔽電流はブリッジ部だけを流れることになり、電流の通過によって方位角方向の磁場が形成される。ブリッジ部にHTS SQUIDを置くことによって、磁場を高感度に測定し、電流値に換算する。HTS SQUIDモニターシステムを図2(b)に示す。

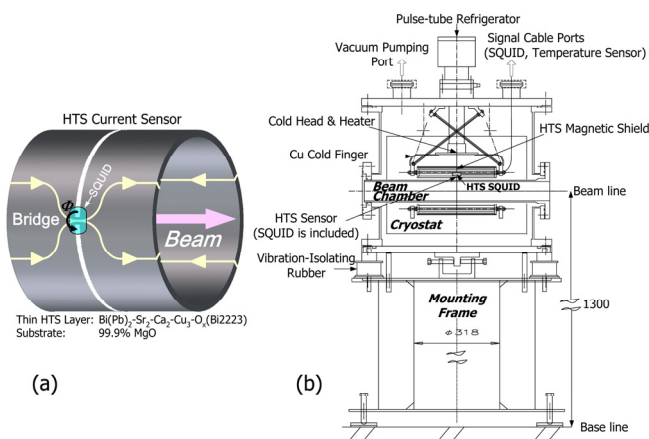


図2 : (a) HTS SQUIDモニターの原理図。(b) HTS SQUIDモニターシステム。

このシステムでは、(1) HTS SQUID、HTS電流センサー、HTS磁気シールド等の高温超伝導体を含むクライオスタット、(2) ビームが通過するビームチェンバー、の二つの真空部は完全に分かれている。これは、ビームチェンバーを大気に開放した時でも、クライオスタット単独で冷却を維持するためである。HTS SQUID素子が受ける振動ノイズを最小限にするために、冷凍発生部に稼働部品を持たない、パルスチューブ冷凍機を採用している。パルスチューブ冷凍機は、77 Kにおいて12 Wの冷凍能力を持ち、銅製のコールドフィンガーによる熱伝導を介して高温超伝導体やHTS SQUIDを冷却する。HTS SQUIDの温度が変化すると、出力にドリフトが生じてしまうので、温度計(シリコンダイオード)とヒーターを用い、PID(Proportional plus Integral plus Derivative)制御を行っている。この制御により、HTS SQUIDの温度が、標準偏差で設定温度の3.4 mK以内に入るよう安定化されている事が実測された。尚、磁気シールドに関しては、超伝導シールドとパーマロイシールドを併用することによって、外部磁場が100万分の1まで遮蔽されていることが実測されている。

4. HTS SQUIDモニターの実用化

HTS SQUIDは、ノイズレベルが5 kHzにおいて40 fT/Hz^{1/2}の低ノイズグラジオメーター(Y-Ba₂-Cu₃O_{7-δ})を採用している。グラジオメーターは、磁場を検出するためのインプットコイルが、それぞれ左右にワンターンあり、お互いの向きが反対であるため、逆相となっている。そのため、外部ノイズ磁束が左右インプットコイルに等しく入ると、外部ノイズ磁束はキャンセルされる。一方、ビームの通過によってブリッジ部に形成される磁場検出には、インプットコイルは、前述のように向きが反対だが、左右にワンターンあるので、通常使用されるインプットコ

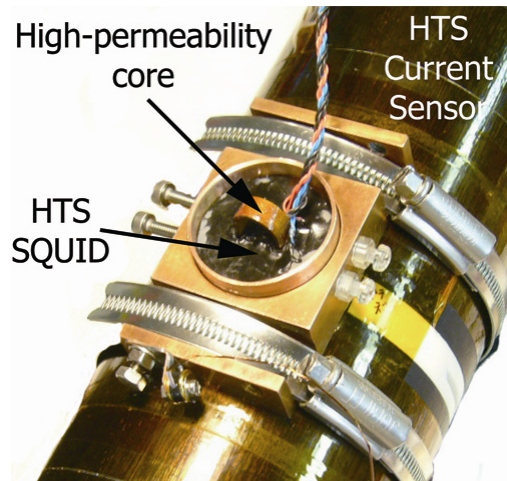


図3 : HTS電流センサー上に装備された、高透磁率コアとHTS SQUID。

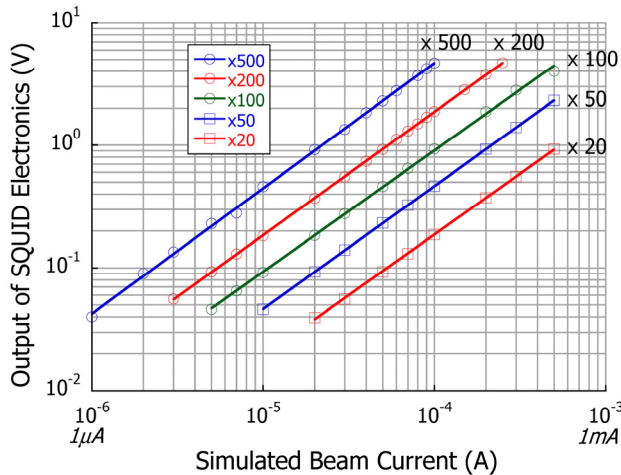


図4：ビーム電流に対するHTS SQUIDコントローラ出力の校正の結果。

イルが1つのモノメーターと比べると、2倍の磁場を検出することができる。今回、さらにRIBFにおける実用化を目指し、新しいHTS SQUIDを開発した。図3に、HTS電流センサー上に取り付けたHTS SQUIDの写真を示す。この新しいHTS SQUIDには、インプットコイルに高透磁率コアがインストールされ、ブリッジ部で形成される磁場を効率良く集めることを目的とした。このコアの主成分は、Ni 80%、Mo 5%であり、他にReとFeが含まれている。ビーム電流に対するHTS SQUIDコントローラ出力の校正を、HTS SQUIDモニターチェンバー内に、直径30 mmの銅パイプを固定し、ビーム模擬電流を流すことによって行った。フィードバックゲインを変えながら測定した結果を、図4に示す。この測定結果から、HTS SQUIDコントローラの出力 V (mV) は、

$$V = S_{co} \times I_b \times G / 500$$

$$= 46.60 \times I_b \times G / 500,$$

で表される。ここで、 I_b はビーム電流 (μA)、 G はHTS SQUIDコントローラのゲイン、 S_{co} はビーム電流とHTS SQUIDコントローラ出力のカップリング係数 (mV/ μA)、をそれぞれ表している。プロトタイプのHTS SQUIDモニターのカップリング計数 S_{co} は、22.8 mV/ μA であったので、感度が2倍改善されたことが解る。これは、先述した高透磁率コアの導入により、HTS電流センサーに流れる電流が作り出す磁場とHTS SQUIDの磁場検出のカップリングが改善された効果である。

高感度化テストのため、HTS SQUID プロトタイプのクライオスタットを使用してきた^[6]。昨年、RIBFでの実用化のために、プロトタイプの再組み立てを行い、fRC (fixed-frequency ring cyclotron) とIRC (intermediate-stage ring cyclotron) の間であり、チャージストリッパ直後のトランスポートライン

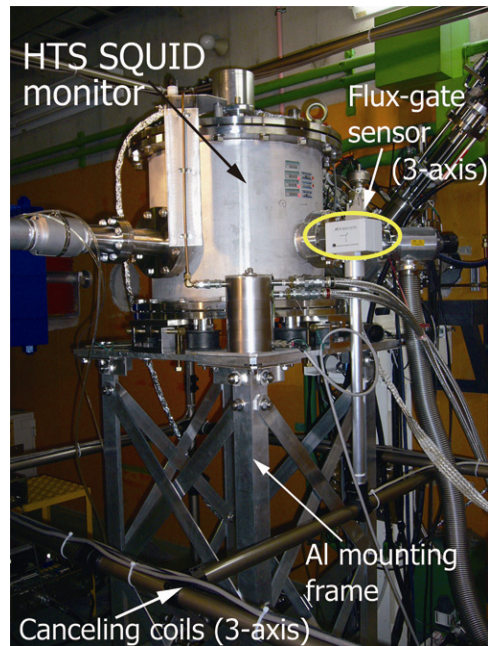


図5：RIBFでの実用化のために、チャージストリッパ直後のトランスポートラインにインストールされたHTS SQUIDモニターとノイズキャンセラーシステム。

にインストールされた (図5)。ここで、外部ノイズ磁場をさらにキャンセルするために、ノイズキャンセラーシステムを導入した。これは、3軸のフラックスゲートセンサーという磁場センサーで外部ノイズ磁場を検出し、3軸のヘルムホルツゲージによって磁場をキャンセルするシステムである。周波数は、DCから20 kHzの帯域をカバーする。図6に、HTS SQUIDモニターの出力を、ノイズキャンセラーのオフの状態(a)と、オン(b)で示す。50 Hzの外部ノイズが、ノイズキャンセラーによって、振幅が1/4に減少していることが解る。プロトタイプでは鉄製の架台を使用していたが、今回のノイズキャンセラーシステム用に、アルミ製の架台に作り替えた。インストール後冷却を開始し、各パーツに取り付けた温度計の記録を図7に示す。この計測か

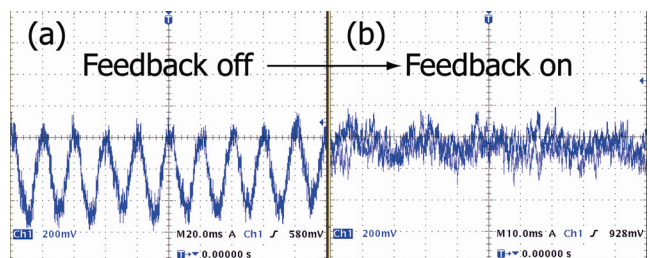


図6：(a)ノイズキャンセラーのオン (a)、オフ(b)の場合の、HTS SQUIDモニターの出力。

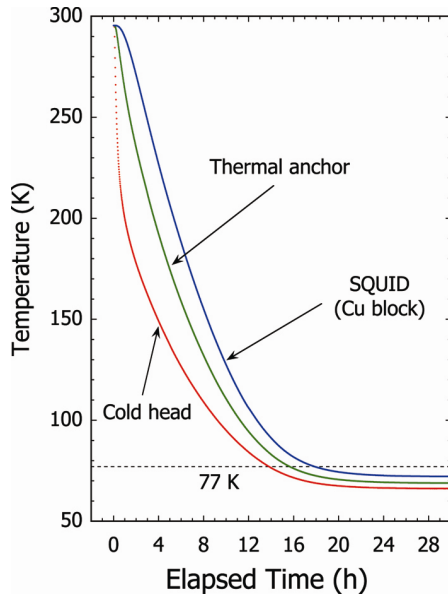


図7：冷却開始後の、各パーツに取り付けた温度計の記録。HTS SQUIDは、約16.5時間後に液体窒素の温度（77K）に到達している。

ら、HTS SQUIDは約16.5時間後に液体窒素の温度（77K）に到達していることが解る。

今年のRIBFにおけるコミッショニング時に、3.6 μA の $^{132}\text{Xe}^{20+}$ (10.8 MeV/u)ビームと1.0 μA の $^{132}\text{Xe}^{41+}$ (50.1 MeV/u)ビームを用い、HTS SQUIDモニターによって、ビーム電流の測定を行った。3.6 μA の $^{132}\text{Xe}^{20+}$ ビームを用いた測定結果を図8に示す。このデータはノイズ除去のため、500 Hzのローパスフィルターを入れ、100データ取得後、平均を取り1データとして表示している。HTS SQUIDモニター直後のファラデーカップでは、やはり2割近い高めの電流量を示していた。この測定においては、信号

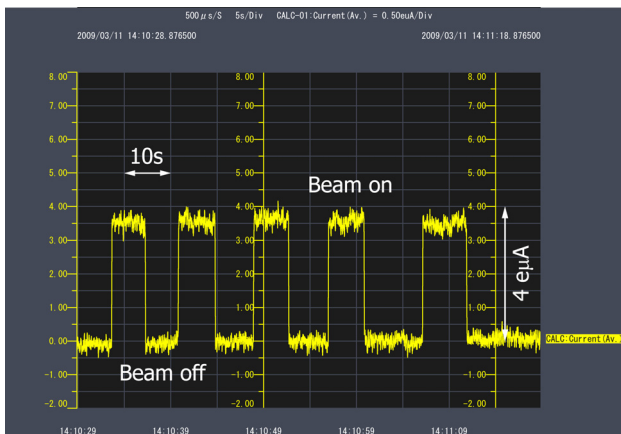


図8：RIBFのコミッショニング時における、3.6 μA の $^{132}\text{Xe}^{20+}$ (10.8 MeV/u)ビームを用いた、HTS SQUIDモニターによる測定結果。

ラインや電源ラインのグラウンド間に発生する共通モードノイズの対策のために、HTS SQUIDのコントローラーやデータ集録(DAQ)などの計測器類はアルミ定盤の上に配置し、全てグラウンドはその定盤に取った。ACラインは途中にノイズカットトランスを入れ、一次ラインと二次ラインのグラウンド（上記に記したアルミ定盤）は、完全に絶縁されている。HTS SQUIDモニター本体とアルミ定盤とは太い編素線で結びグラウンドを共通とした。また、計測器のACラインは全て編素線の中に入れ、ACノイズが伝搬することを防いでいる。また、データ集録や、GPIB・シリアルを介するコントローラーは、LabVIEWによってプログラミングされている。プログラムは現在改良中であり、常時Webから監視できるシステムを目指している。計測用のPCは、放射線管理区域内にあるので、コントロールルームにあるPCからは、リモートログインによって、データ集録や制御を現在行っている。

参考文献

- [1] Y. Yano, Nucl. Instrum. and Meth. (2007) B **261** p. 1009.
- [2] T. Kubo et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **17** (2003) p. 97.
- [3] Y. Yano, Proc. Int. Nuclear Physics Conf. (INPC2007), Tokyo, Japan, June 2007; Proc. 22nd Particle Accelerator Conf. 07 (PAC07), Albuquerque, New Mexico, U.S.A., June 2007.
- [4] T. Ohnishi et al., J. Phys. Soc. Jpn. **77** No.8 (2008) p. 1069.
- [5] T. Watanabe et al., Supercond. Sci. Technol. **17** (2004) S450.
- [6] T. Watanabe et al., J. Phys. **43**, (2006) p. 1215.
- [7] T. Watanabe et al., J. Phys. **97**, (2008) p. 012248.
- [8] T. Watanabe et al., Proceedings of the 5th Accelerator Meeting in Japan, Hiroshima, Aug. 6-8, 2008 p. 409