

## HTc-SQUID ビーム電流モニターの実用化

### PRACTICAL APPLICATION OF HIGH-T<sub>c</sub> SQUID BEAM CURRENT MONITOR

渡邊環<sup>#, A)</sup>, 福西暢尚<sup>A)</sup>, 加瀬昌之<sup>A)</sup>, 稲森聡<sup>B)</sup>, 今康一<sup>B)</sup>

Tamaki Watanabe<sup>#, A)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>A)</sup>, Masayuki Kase<sup>A)</sup>, Satoru Inamori<sup>B)</sup>, Kouichi Kon<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN, Nishina Center for Accelerator-Based Science

<sup>B)</sup> TEP Corporation

#### Abstract

To measure the DC current of heavy-ion beams non-destructively at high resolution, we have developed a high critical temperature (HTc) superconducting quantum interference device (SQUID) beam current monitor for use in the radioactive isotope beam factory (RIBF) at RIKEN. Unlike at other existing facilities, a low vibration, pulse-tube refrigerator cools the HTc fabrications including the SQUID in such a way that the size of the system is reduced and the running costs are lowered. Last year, the magnetic shielding system has been greatly reinforced. The new strong magnetic shielding system can attenuate the external magnetic noise to  $10^{-10}$ . Aiming at its practical use for acceleration operation, the prototype HTc SQUID monitor was disassembled, exchange the improved parts and re-assembled. Beginning this year, we have installed the HTc SQUID monitor in the beam transport line in the RIBF. Here we report the present details of the developed HTc SQUID monitor system and the results of the beam measurement.

#### 1. はじめに

理化学研究所、仁科加速器研究センターにおいて、重イオンビームの DC 電流を、非破壊で高感度に測定するために、脳磁や心磁の測定に利用される超伝導量子干渉素子 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) を応用した、ビーム電流モニターの開発を行ってきた<sup>[1]</sup>。特に本研究に於いては、臨界温度の高い高温超伝導体を用い、冷凍機によって冷却を行っているため、装置はコンパクトになり、ランニングコストの大幅な低減が可能となった。Figure 1 に、高温超伝導 SQUID を用いたビーム電流モニター (以下、“SQUID 電流モニター”と略)

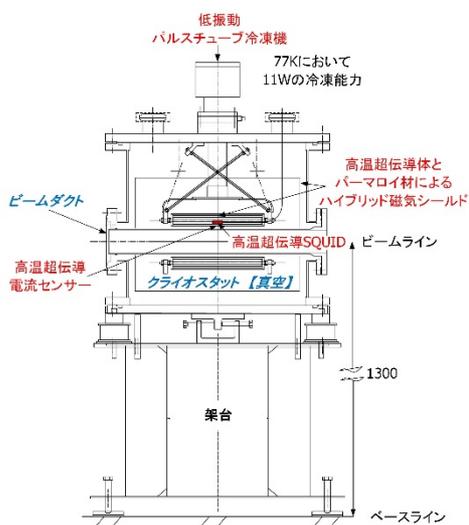


Figure 1: 高温超伝 SQUID を用いたビーム電流モニター。

<sup>#</sup> wtamaki@riken.jp

の構造を示す。99.7% の純度の酸化マグネシウム (MgO) で作られた筒状のセラミックスに、ビスマス系の高温超伝導材 ( $\text{Bi}_2\text{-Sr}_2\text{-Ca}_2\text{-Cu}_3\text{-O}_x$  (Bi-2223)) を  $300 \mu\text{m}$  の厚さで塗布焼成し、高温超伝導電流センサーを製作する。高温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。高温超伝導電流センサーの一部 (ブリッジ部) に遮蔽電流が集中するような工夫を施しているため、ブリッジ部を通過する遮蔽電流によって方位角方向の磁場が形成される<sup>[2]</sup>。ブリッジ部に高温超伝導 SQUID を置くことによって、磁場を高感度に測定し、電流値に換算する事が可能となる。

次章で述べる開発が終了した後、初期に完成したプロトタイプを解体し、再組立の作業を行った。Figure 1 に示す RIBF のビームトランスポートラインにインストールをして、現在、ウランなどの重イオンビームの電流測定を行っている。

#### 2. プロトタイプの改良

##### 2.1 高温超伝導電流センサー

SQUID モニターの感度を改善するために、ブリッジ部で形成される磁場と高温超伝導 SQUID のインプットコイルのカップリングを改良する手法を考案した。そのために、(1) ブリッジ部をコイル化することにより発生する磁場を強め、(2) 高温超伝導 SQUID のインプットコイルに高透磁率のコアを挿入することにより磁束を集める、という二つの手法を考案し、高温超伝導材の塗布装置を新たに製作した<sup>[2][3]</sup>。この塗布装置の製作により、従来行われてきた手塗による塗布作業とは違い、むらがなく、均一に超伝導材を塗布する事ができ、焼成中に起きる剥離を減らす事が可能となった。また、並行して MgO の短冊状テストピース ( $5 \text{ W} \times 50 \text{ D} \times 5 \text{ H}$  (mm))

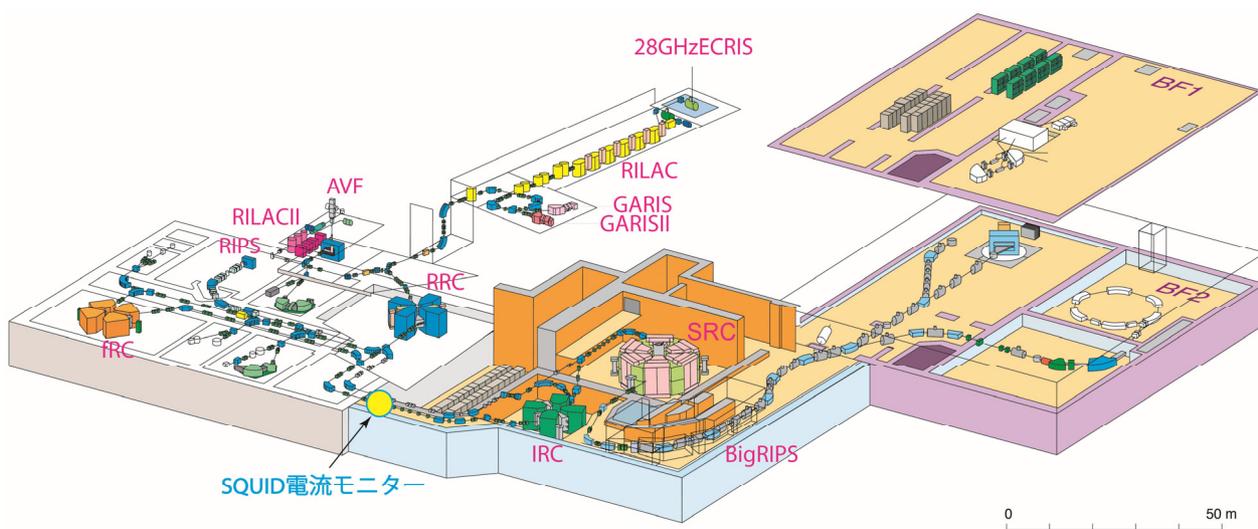


Figure 2: RIBF の鳥瞰図と SQUID 電流モニターの設置位置。

上に高温超伝導材を塗布焼成し、臨界温度、臨界電流、X 線による結晶構造の解析を行った。X 線結晶解析により Bi2223 相の形成が確認され、臨界温度は 105 K、臨界電流は  $3250 \text{ A/cm}^2$  という測定結果が得られた。焼成時に高温超伝導材が剥離する、という最大の問題点を克服し、高温超伝導材の塗布焼成に関するノウハウを確立した。

## 2.2 磁気シールドの強化

SQUID 電流モニターの性能は、SQUID の出力とノイズの比、すなわち SN 比で決まる。そのために、超伝導体による完全反磁性と強磁性体による磁気遮蔽の特性を活かしたハイブリッド磁気シールド法を考案し、SQUID 電流モニターに適用することにより、コンパクトながらも、高いシールド効果が得られるシステムを開発した<sup>[4] [5]</sup>。この磁気シールドシステムの評価のために、有限要素法を用いた電磁界シミュレーター-TOSCA<sup>[6]</sup>を用いて磁場計算を行った。さらに、3 軸高感度磁気センサー及び制御コントローラーが外界変動磁界を常に検知解析し、3 対の

X,Y,Z 軸ヘルムホルツコイルにより、その外界変動磁界を打ち消す磁界を発生させ、安定した磁場環境を作り出す、アクティブ磁場キャンセラーシステム<sup>[7]</sup>を導入した。その結果、外界磁気ノイズの内、最も強い 50 Hz の AC 磁場を、ほぼ  $1/10^{10}$  までシールドが可能である、という測定結果が得られた。

## 3. プロトタイプ解体と再組立て

### 3.1 周波数特性とゲイン測定

SQUID 電流モニタープロトタイプを解体し、上記に記した様に、新たに製作した高温超伝導電流センサー、高温超伝導 SQUID を入れ替え、ハイブリッド磁気シールド、ノイズキャンセラーをインストールした。組み立て作業が終了した後、SQUID 電流モニターの冷凍機を始動し冷却を開始した。SQUID を動作させ、SQUID 電流モニター内に模擬電流を流す事により、周波数特性の測定と電流ソースを用いたキャリブレーションを行った。その後、Figure 2 に示すように、IRC (Intermediate Ring Cyclotron)の上流

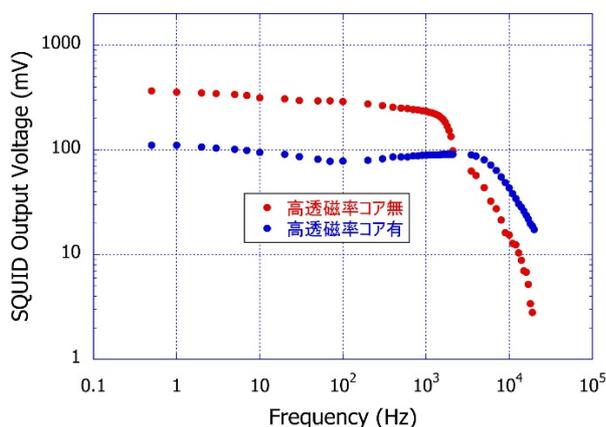


Figure 3: SQUID 電流モニターの周波数特性。

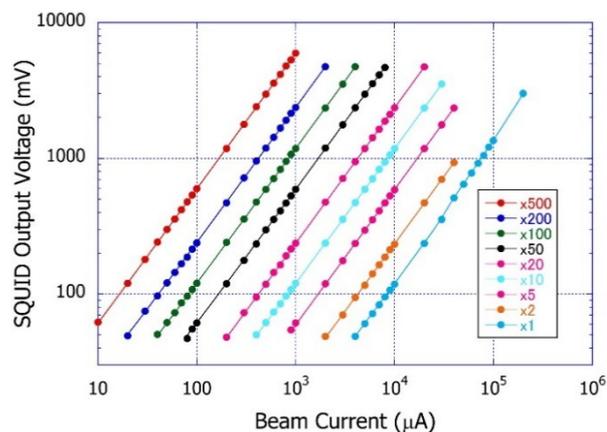


Figure 4: SQUID 電流モニターにおける、電流ソースを用いたキャリブレーションの測定結果。

側のビームトランスポートラインに移設作業を行った。ここで、再度冷却を行ったが、スーパーインシュレーターの劣化により、SQUID を冷却している SQUID フォルダーの温度が 71 K を示しており、SQUID が超伝導状態にならなかった。急遽、現場で再度解体し、スーパーインシュレーターを新調し、SQUID と SQUID フォルダーの間に十分なアピエゾングリスを塗り、冷凍機と冷却部を繋いでいる編組線を強化した。再組立終了後、再冷却を行った結果、到達温度が 67 K まで下がり、SQUID も超伝導状態に入ることができた。周波数特性の測定と電流ソースを用いたキャリブレーションを再度行った。その測定結果を、Figure 3 と Figure 4 にそれぞれ示す。Figure 3 に、高透磁率コアの有無による特性の違いを示した。この両測定に於いて、模擬ビーム電流は同じである。ここで、Figure 3 から解るように、高透磁率コアを使用した場合は、ゲインは 3 倍高いが、高周波での周波数特性が良くない。また、外部磁場ノイズによって、高温超伝導 SQUID のインプットコイルに磁束がトラップされ、ノイズ源となるため、今回の組み立てに於いては、高透磁率コアを使用しない方針とした。コアがない場合、500 倍のアンプゲインで、1  $\mu\text{A}$  の電流に対して 5.95 mV の出力が得られている (Figure 4)。

トランスポートラインにインストールした SQUID 電流モニターの写真を、Figure 5 に示す。

### 3.2 データ収集と制御システム

SQUID 電流モニターのデータ収集と制御システムのブロックダイアグラムを Figure 6 に示す。ここで、ノイズキャンセラーのフィードバックゲイン等は RS-232C を介してコントローラーに設定し、磁気センサーで測定した 3 軸の AC と DC 磁場は、コントローラーよりアナログ信号として出力されているので、D/A コンバーターを介して観測している。SQUID コントローラーからのアナログ出力も、同じ D/A コン



Figure 5: ビームトランスポートにインストールした SQUID 電流モニターの写真。

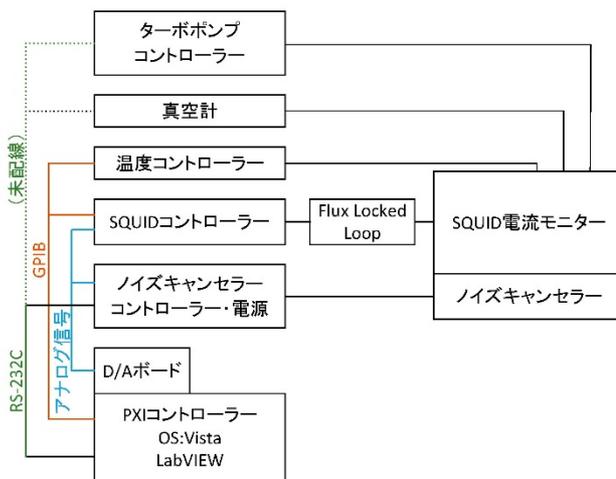


Figure 6: SQUID 電流モニターのデータ収集と制御システムのブロックダイアグラム。

バーターによって取得し、ビーム電流に換算している。一方、このアナログ信号は、放射線障害の理由から 15 m の同軸ケーブルを使用して、加速器室外へ送っているため、ノイズを拾っている可能性がある。一方、SQUID コントローラーには GPIB の高速データ取得機能(20 kS/s)があるので、現在これらのデータ収集法の違いによる、ノイズレベルの比較を行っている。これらのデータ収集と制御には、National instruments 社の PXI コントローラー(PXI-8106, 2.16 GHz dual core)と、D/A ボード(PXI-6281, 16 ch, 18 bit, 500 kS/s)を用いている。なお、これら一連のプログラミングには、同社の LabVIEW<sup>[8]</sup>を用いている。

## 4. 重イオンビームを用いた測定

### 4.1 放射線による障害

移設当初は、上記のデータ収集と制御システムを IRC 内に設置した。しかし、ビームをトランスポートし始めると、放射線の影響で以下の症状が発生した。

- PXI コントローラーがリポートしたまま、停止状態になってしまう。
- ターボポンプのコントローラーが、白抜き表示になったまま停止していた。
- ノイズキャンセラーのコントローラーが通信異常起こし、Z 軸方向のコイル出力が停止していた。

PXI コントローラーが、リポート後停止し、通信不能となってしまうため、IRC 室外に移動した。この移設に伴い、約 15 m の GPIB ケーブル、RS-232C ケーブル、SQUID コントローラー出力用の同軸ケーブルを新たに敷設した。放射線の発生源を正確にはまだ把握できていないが、SQUID 電流モニターの数 m 上流に設置されているファラデーカップより発生した放射線が、この影響を及ぼしている可能性が高いと考えている。このファラデーカップは、ビームチューニングの際には頻繁に使用され、また IRC 室内にビームを通さない際は、このファラデーカップ

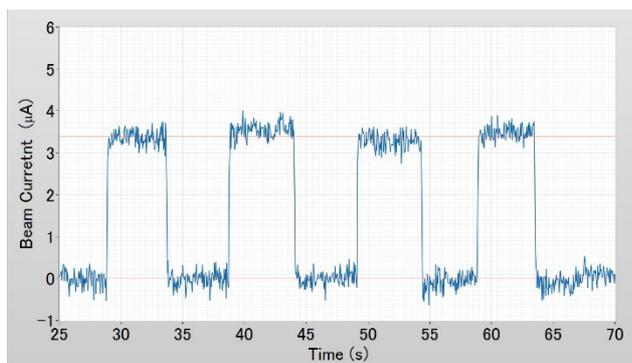


Figure 7:  $^{70}\text{Zn}^{30+}$ ビームの測定結果。

でビームを止める事が多いからである。今後、残りのコントローラーを、IRC 室外に移動する予定である。

#### 4.2 測定結果

今年4月から6月にかけて、RIBFでは重イオンを用いた実験が連日行われてきた。その間、SQUID電流モニターのプログラミングを並行して行いながら、 $^{238}\text{U}$ と $^{70}\text{Zn}$ のビーム電流の観測を行ってきた。一例として、Figure 7に $^{70}\text{Zn}^{30+}$ ビームの測定結果を示す。この時、ビーム電流量は $3.4\ \mu\text{A}$ であり、下流のファラデーカップによる電流量とも良く一致している。この測定では、コントローラーの周波数範囲はDC~20 kHzであり、アナログ出力の2000サンプルを平均化した結果を表示している。

#### 4.3 SQUIDのノイズトラップ除去

実験が始まって以来、外部ノイズ磁場によるSQUIDインプットコイルにおける磁束トラップが始まり、SQUIDのノイズが徐々に増え始め、ついに磁束のホッピングが起り始めた。液体窒素による冷却では、通常SQUID内に備え付けてあるヒーターを用いてSQUIDの温度を上昇させ、一度超伝導状態を常伝導状態に戻す事により、トラップした磁束を逃がす方法を用いている。しかし、SQUID電流モニターは冷凍機によって冷却しているため、ヒーター用のリード線はクライオスタット(真空)内にあり、電流を流す事により焼損してしまう恐れがあり、ヒーターは一切使用してこなかった。しかし、測定ができない状態に至ったため、遠隔でヒーターを動作させるプログラムを作成し、ヒーター時間を1秒から始め、徐々にその時間を増やしていった結果、30秒でトラップした磁束がなくなり、ノイズを激減する事ができた。

### 5. まとめと今後の予定

重イオンビームのDC電流を、非破壊で高感度に測定するために、脳磁や心磁の測定に利用される超伝導量子干渉素子SQUIDを応用した、ビーム電流モニターの開発を行ってきた。高温超伝導電流センサーと磁気シールドの改良を行い、プロトタイプの解体と再組立ての後、RIBFのビームトランスポート

にインストールし、周波数特性の測定と電流ソースを用いたキャリブレーションを行った。その後、RIBFにおける実験時に、重イオンビームの電流の測定を行ってきた。今後は、さらに整備を進め、今年度後期の実験で加速予定の $^{48}\text{Ca}$ ビームを用いて、電流測定と周波数解析を進めてゆく予定である。

### 謝辞

Forschungszentrum Juelich GmbHのDr. Faleyには、高温超伝導SQUIDに関する有意義な助言を頂き、また、電力中央研究所の一瀬中博士には、高温超伝導電流センサーの製作に関する多大なご協力を頂き、謝意を表したい。なお本研究の一部は、学術研究助成基金助成金(基盤研究(C):課題番号23600015)によって行われている。

### 参考文献

- [1] T. Watanabe et al., "DEVELOPMENT OF BEAM CURRENT MONITOR WITH HIGH-Tc SQUID AT RIBF", Proc. 2010 Beam Instrumentation Workshop (BIW10), Santa Fe, New Mexico, U.S.A pp. 523-532 (2010).
- [2] T. Watanabe, et al., "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高感度化", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Osaka, (2012) pp. 608-611.
- [3] T. Watanabe et al., "Beam Current Monitor with a High-Tc Current Sensor and SQUID at the RIBF", J Supercond Nov Magn, **26** pp. 1297-1300 (2013), DOI 10.1007/s10948-012-1943-0.
- [4] T. Watanabe, et al., "HTc-SQUID電流モニターにおける磁気シールドの強化", Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Nagoya, (2013) pp. 1094-1097.
- [5] T. Watanabe et al., "Improvements of a Beam Current Monitor by using a High Tc Current Sensor and SQUID at the RIBF", 11th European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS2013), IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series **50** (2014) 042047, doi:10.1088/1742-6596/507/4/042047
- [6] COBHAM <http://www.cobham.com/home.aspx>
- [7] JEOL Ltd. <http://www.jeol.co.jp/en/>
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS <http://japan.ni.com/>