

HTc-SQUID 電流モニターにおける磁気シールドの強化 REINFORCEMENT OF MAGNETIC SHIELD FOR HIGH-TC SQUID BEAM CURRENT MONITOR

渡邊環^{*A)}、福西暢尚^{A)}、加瀬昌之^{A)}、上垣外修一^{A)}、稲森聡^{B)}、今康一^{B)}

Tamaki Watanabe^{*A)}, Nobuhisa Fukunishi^{A)}, Masayuki Kase^{A)}, Osamu Kamigaito^{A)}, Satoru Inamori^{B)}, Kouich Kon^{B)}

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

^{B)}TEP Corporation

Abstract

To measure the DC current of high-energy heavy-ion beams non-destructively at high resolution, a high critical temperature (HTc) superconducting quantum interference device (SQUID) beam current monitor has been developed for use in the radioactive isotope beam factory (RIBF) at RIKEN. In particular, aiming at the practical use from this year, the magnetic shielding system has been greatly reinforced. Because the measurement resolution is determined by the signal to noise ratio, that is improved by attenuating the external magnetic noise which is mainly produced by the high current power supplies. A new strong magnetic shielding system can attenuate the external magnetic noise to 10^{-10} .

1. はじめに

理化学研究所、仁科加速器センターでは、重イオンビームの DC 電流を、非破壊で高感度に測定するビームモニターの開発を進めている。DC ビームの電流測定には、従来 DCCT (DC current transformer) が使用されてきたが、 $1 \mu\text{A}$ 以下の電流分解能で測定することは困難であった。電子や陽子の加速器では、 $1 \mu\text{A}$ の電流分解能があれば通常は問題はないが、重イオン加速器の場合はビーム電流が低いために、さらに高い分解能を有するビームモニターが切望されてきた。そこで、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) をビームモニターに応用した SQUID モニターが開発され、nA

オーダーの電流分解能で測定が可能となっている。しかし、超伝導部に低温超伝導体を用いた SQUID モニターにおいては、液体ヘリウムによる冷却が必要で、結果として装置の規模は大きく、製作費やランニングコストが高価であるという問題点が残っている。そこで、超伝導部に高温超伝導体を用いることにより、これらの問題点を解決すること、これが本研究の目指すところである。高温超伝導体は臨界温度が高く、さらに、高温超伝導体は冷凍機によって冷却されているため、装置はコンパクトになり、ランニングコストも大幅に低減する事が可能となった^[1, 2]。Figure 1 に、プロトタイプの高温超伝導 SQUID を用いたビームモニター (以下、"SQUID 電流モニター"と略) の構造を示す。既に完成したプロトタイプにおいては電流分解能が 100 nA であるので、これを 10 nA へ高感度化することが本研究の目的である。

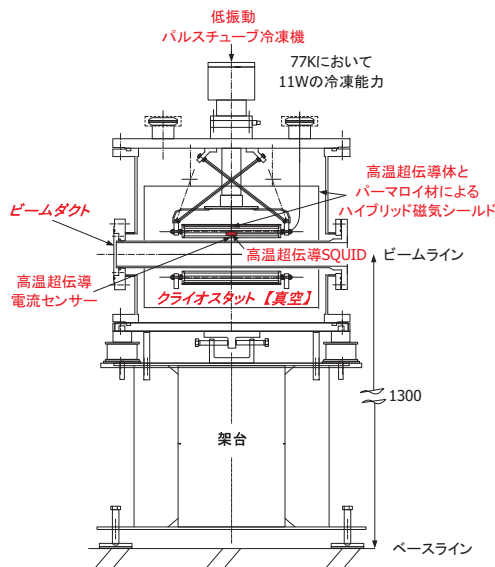


Figure 1: プロトタイプの高温超伝導 SQUID を用いたビームモニター。

2. 磁気シールドの強化

2.1 SQUID 電流モニターの測定原理

Figure 2 に SQUID 電流モニターの測定原理を説明する図を示す。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、ビスマス系の超伝導材 ($\text{Bi}_2\text{-Sr}_2\text{-Ca}_2\text{-Cu}_3\text{-O}_x$ (Bi-2223)) を $500 \mu\text{m}$ 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。

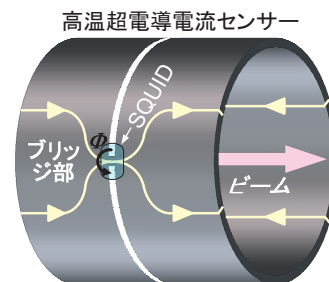


Figure 2: SQUID 電流モニターの測定原理。

* wtamaki@riken.jp

中心の一部（以下、「ブリッジ部」と名称する）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。

2.2 超伝導導体と強磁性体によるハイブリッド磁気シールドシステムの開発

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。測定電流の分解能をさらに 10 倍改良するために、電磁石を励磁している大電力電源ライン等が発生する、外界の磁気ノイズのシールドを、現状よりさらに向上させる必要がある。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方を考案し、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。超伝導導体と強磁性体を用いた磁気遮蔽部材の構成について説明する。Figure 3 において、1 は高温超伝導電流センサーであり、2-4 が磁気遮蔽部材である。ここで、磁気遮蔽部材は、2 フレーム部、3 キャップ部、4 バンド部、で構成され、これらの部材のすべては、例えばパーマロイやミューメタルなどの高透磁率材料により作製される。特に、磁気遮蔽部材は高温超伝導電流センサーの高温超伝導膜の表面に接しており、2 のフレーム部には SQUID を内包しており、高温超伝導電流センサーに固定されている。また、「SQUID 電流モニターの測定原理」で述べたように、高温超伝導電流セン

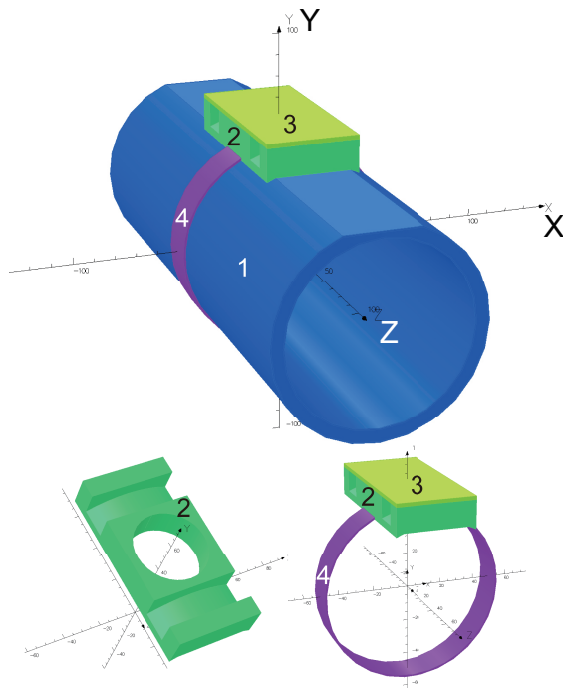


Figure 3: 超伝導導体と強磁性体を用いた磁気遮蔽部材の構成。1 は高温超伝導電流センサーであり、2-4 が磁気遮蔽部材である。ここで、磁気遮蔽部材は、2 フレーム部、3 キャップ部、4 バンド部、で構成される。

サーは、ブリッジ部と称する筒の中心一部だけを除き、鉢巻き状に絶縁されているので、外界の磁気ノイズの侵入経路となり得る。これを防ぐため、高温超伝導電流センサー筒の軸の周りを少なくとも一周する周回路に沿ってバンド部（figure 3 中の 4）を構成する。フレーム部材は、機械加工によりミューメタルのブロックから削り出されている。またフレーム部材には、それ自体を高温超伝導電流センサーに対して固定するための結束バンド（figure 5 を参照）と係合する凹み部が、長手方向両端付近の 2 か所に設けられている。さらに、このシステムでは、高温超伝導電流センサーが超伝導シールドの機能を兼ね備えているため、マイスナー効果を充分活かしながら、磁気シールドの不十分な箇所は、磁気遮蔽部材を用いる事により、磁気センサーである SQUID をほぼ完全に覆う事により、高い磁気シールド効果が実現できる。

上記のハイブリッド磁気シールドシステムの効果を定量的に評価するため、有限要素法を用いた電磁界シミュレーター TOSCA（英国、COBHAM 社製^[3]）を用いて計算を行った。即ち、外界の磁気ノイズを、ブリッジ部近傍に配置される SQUID の磁束検出位置において、どの位減少させる事が可能か、定量的に求めた。具体的には、高温超伝導電流センサー筒サイズを、軸方向長さ 200 mm、内径 86 mm、外径 99 mm、筒状部材を MgO とした。また、TOSCA の磁場計算においては、超伝導体が有する完全反磁性という特性が反映できないので、高温超伝導体膜の比透磁率を 1.0×10^{-12} と代入する事で近似を行った。高温超伝導体膜の厚みは $500 \mu\text{m}$ とし、磁気遮蔽部材を構成する全ての要素に、ミューメタルの透磁率（比透磁率 = 1.0×10^6 ）を採用した。磁気遮蔽部材は、フレーム部材の長手方向が 90 mm、厚みが 18 mm、收容開の内径は約 36 mm とした。外界の磁気ノイズの印加条件として、地磁気程度の $1 \times 10^{-5} \text{ T}$ の磁束密度の磁界が、境界内に一様に存在するとした。これらの条件でシミュレーションを実施したところ、磁気遮蔽部材を配置しない場合に SQUID の磁束検出位置において $1 \times 10^{-5} \text{ T}$ であった磁束密度が、上記条件の磁気遮蔽部材を配置することにより $4 \times 10^{-10} \text{ T}$ まで低減できることを確認した。即ち、超伝導導体と強磁性体によるハイブリッド磁気シールドシステムによって、少なくとも

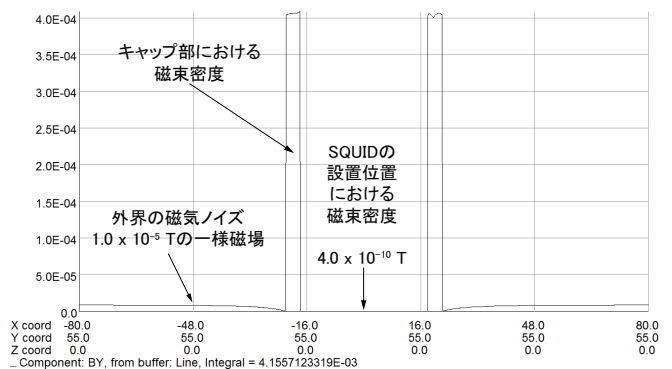


Figure 4: 外界の磁気ノイズを Y 軸方向（figure 3 参照）印加した場合の、TOSCA による磁場計算の結果。

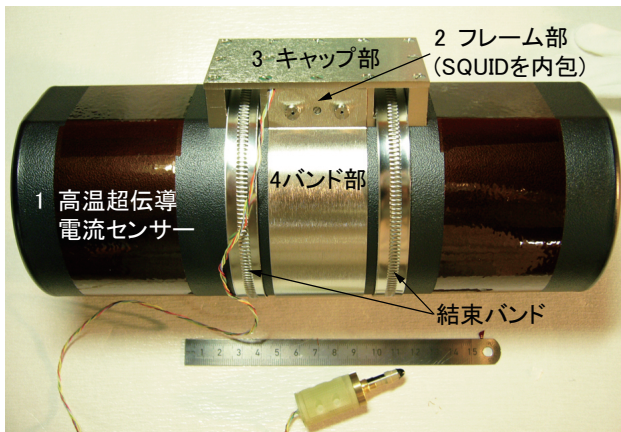


Figure 5: 完成した超伝導導体と強磁性体によるハイブリッド磁気シールドシステム。

も 10^{-4} 程度の減衰率が達成できることを、TOSCA の磁場計算により確認した。計算結果の一例として、外界の磁気ノイズを Y 軸方向 (figure 3 参照) に印加した場合の、TOSCA による磁場計算の結果を、figure 4 に示す。また、完成した超伝導導体と強磁性体によるハイブリッド磁気シールドシステムの実際の写真を、figure 5 に示す。

2.3 アクティブ磁場キャンセラーシステム

加速器施設内で使用する際には、地磁気より強い、50 Hz (60 Hz) およびその高調波成分を持った外界の磁気ノイズが存在し得るため、それらの磁気ノイズをシールドするために、アクティブ磁場キャンセラーシステムを導入した。アクティブ磁場キャンセラーシステムは、エリア内の 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で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事が可能である。年々、高分解能化が進む電子顕微鏡 (SEM/TEM)、パターンの細線化が進む電子ビーム描画装置などの、電子ビームを磁場で制御する装置に対し、装置性能を向上させるために、アクティブ磁場キャンセラーシステムが導

Table 1: 磁気センサ・制御コントローラーの仕様

| | |
|----------|---|
| 磁場減衰率 | 最大 -40 dB |
| 最大補償磁場 | 6 μ T |
| 対応周波数帯域 | DC(0) ~ 1,000 Hz |
| AD コンバータ | 16 ビット |
| DA コンバータ | 16 ビット |
| 信号処理 | アナログ信号処理 デジタル信号複合処理 (アンチエイリアシングフィルタ内蔵) |
| 磁場検出器 | 直交 3 軸フラックスゲート型 DC 磁場 : Noise ≤ 50 pT / $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz 直交 3 軸サーチコイル型 AC 磁場 : Noise ≤ 150 pT / $\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 Hz |

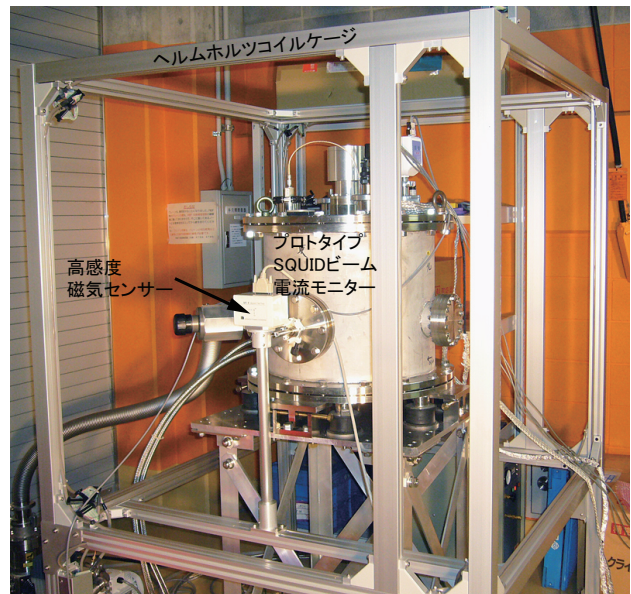


Figure 6: SQUID 電流モニターに導入した、アクティブ磁場キャンセラーシステム。

入されている。そこで、SQUID 電流モニターに於いても、磁気シールドとして適用できるよう、3 軸ヘルムホルツコイルゲージを設計し、製作を行った (日本電子社製 [4])。高感度 3 軸磁気センサと、アナログ/デジタル信号複合処理システムの採用により、DC ~ 1 k Hz までの広帯域周波数領域の磁場変動に対応し、最大 -40dB の減衰率が得られる。コントローラーは、RS-232C を介して計算機と通信ができるので、フィードバックゲインは、各 3 軸を AC、DC パートに分けて個別設定することが可能である。さらに、フィルターの設定、磁場変動のモニタリング、等の計算機制御・監視が可能である。磁気センサと制御コントローラーの仕様を Table 1 を記す。SQUID 電流モニターに導入した、アクティブ磁場キャンセラーシステムの写真を、figure 6 に示す。

3. 磁気シールドの強化による測定結果

超伝導導体と強磁性体によるハイブリッド磁気シールドシステムとアクティブ磁場キャンセラーシステムを、SQUID 電流モニターに導入し、その性能評価のため外界磁気ノイズの測定を行った。Figure 7 に、外界磁気ノイズの周波数領域における測定結果を示す。測定の条件は、以下の通りである。(1) 赤いライン: 2011/12/21 に測定した、磁気シールド強化前の SQUID 電流モニターの出力。(2) 青いライン: 2013/05/16 に測定した磁気シールドの強化後の SQUID 電流モニターの出力。(3) 緑のライン: 超伝導シールドと三重のパーマロイシールドを施した、完全にシールドされた SQUID の出力 (Dr. Faley の測定による [5])。尚、SQUID のゲイン、フィルターの帯域、等のコントローラーの設定は、上記の測定に於いて全て同じである。磁気シールドの強化後の測定時 (2) 青いライン) は、RIBF の実験が行われており、 ^{238}U を 345 MeV/u まで加速し、電磁石を励磁している電源群はフルパワー出力の状態であった。測定は、それ

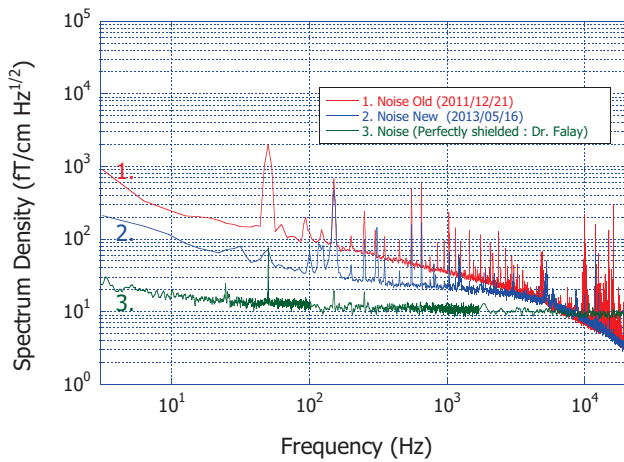


Figure 7: ノイズの周波数領域における測定結果。(1) 赤いライン：2011/12/21 に測定した、磁気シールド強化前の SQUID 電流モニターの出力。(2) 青いライン：2013/05/16 に測定した磁気シールドの強化後の SQUID 電流モニターの出力。(3) 緑のライン：超伝導シールドと三重のパーマロイシールドを施した、完全にシールドされた SQUID の出力 (Dr. Faley の測定による^[5])。

らの電源群に隣接する部屋で行われ、漏えいする磁場をガウスメーターで測定すると、50 Hz 成分が最も強く、 4.5×10^{-4} T であった。したがって、figure 7 の測定結果から、50 Hz 成分は 6×10^{14} T にまで減少しているので、ほぼ 10^{-10} の外界磁気ノイズのシールド率があることが確認された。

4. まとめ

理化学研究所、仁科加速器センターにおいて、ビームの電流値を、非破壊で正確に測定するために、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) をビームモニターに応用した SQUID 電流モニターの開発を行ってきた。理化学研究所では、SQUID を含む超伝導材に、高温超伝導材を使用したビームモニターの開発を行い、冷凍機を用いて冷却することにより、ランニングコストを縮小し、装置の大きさも圧倒的にコンパクトにする事が可能となった。しかし、高分解能化が課題として残されており、10 nA 以下に高感度化することを目標として研究開発を行っている。SQUID 電流モニターのパフォーマンスは、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方を考案し、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。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 を用いて計算を行った。さらに、エリア内の 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で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 磁場は、ほぼ $1/10^{10}$ にまで磁気シールドされていることが測定結果から確認された。

5. 謝辞

Forschungszentrum Juelich GmbH の Dr. Faley には SQUID に関して有意義な情報を頂き、KEK の藤森氏には Opera-3d に関して、日本電子社の根本氏、佐藤氏にはアクティブ磁場キャンセラーに関して、VIC インターナショナル社の小川氏、飯田氏にはムーメタルの磁気シールド製作に関して、多くの貴重な示唆を頂き、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)) によって行われている。

参考文献

- [1] T. Watanabe et al., Proc. 2010 Beam Instrumentation Workshop (BIW10), Santa Fe, New Mexico, U.S.A (2010) p. 523.
- [2] T. Watanabe et al., J. Supercond. Nov. Magn. **26**, (2013) p. 1297-1300, DOI 10.1007/s10948-012-1943-0.
- [3] COBHAM <http://www.cobham.com/home.aspx>
- [4] JEOL Ltd. <http://www.jeol.co.jp/en/>
- [5] M. I. Faley private communication (2012).