

SENSITIVITY IMPROVEMENT OF BEAM CURRENT MONITOR WITH A HIGH-T_c CURRENT SENSOR AND SQUID

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

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

^{B)}TEP Corporation

2-20-4 Kosuge, Katsushika, Tokyo, 124-0001

Abstract

It is widely recognized that non-destructive measurement at high resolution of the DC current of high-energy heavy-ion beams is important. Therefore, 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 Japan. 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. As a result, using a prototype of the HTc SQUID monitor, the intensity of a 4 μ A Xe beam (10.8 MeV/u) was successfully measured with 100 nA resolution. Furthermore, since higher resolution is necessary, development of an improved HTc current sensor with two coils has begun. A spaying machine was developed to fabricate the new HTc current sensor by dip-coating a thin layer of Bi₂-Sr₂-Ca₂-Cu₃-O_x (Bi-2223) onto a 99.7% MgO ceramic substrate. Results from a new HTc current sensor produced using this machine are reported here.

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

1. はじめに

ウランまでの全元素の不安定原子核を発生させる重イオン加速器施設、「RI (Radioactive isotope) ビームファクトリー (RIBF)」が、現在、理化学研究所仁科加速器研究センターにおいて稼働中である。1 基の線形加速器 (RILAC2) と 4 基のリングサイクロトロン (RRC, fRC, IRC, SRC) で構成される多段式加速器^[1] と、RI ビーム生成分離装置 (BigRIPS)^[2] を使用することにより、RI ビーム発生能力を飛躍的に高めている。345 MeV/u に加速されたウランビームを用いて、2007 年には中性子過剰のパラジウムの同位体である ¹²⁵Pd と ¹²⁶Pd が発見され、2008 年には 45 個の中性子過剰の新同位体が発見された^[3, 4]。

加速器の運転において、加速された重イオンのビーム電流値を正確に測定することは、加速器を効率よく運転し、その性能を向上させ、ユーザーに安定にビームを供給する上で、重要な働きを担っている。RIBF においては、ビーム電流値を測定するために、ビーム輸送系各所に設置した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、完全に抑制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、ユーザーはビームを使用する事ができないため、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曝の問題は無視できない。そのため、高エネルギー重イオンビームの電流値を、非破壊で正確に測定することは、重要な技術となる。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、マグネティックコアが有するバルクハウゼンノイズのため、1 μ 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においては、DCCT の電流分解能でも充分であるが、重イオン加速器の場合は、ビーム電流値が低いために、さらに高い分解能を有するビーム電流計が切望されてきた。

2. SQUID モニター

1977 年、ドイツの PTB 研究所が、脳磁や心磁の測定に利用される超電導量子干渉素子 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) をビーム電流計に応用した SQUID モニターを開発し、静電加速器で加速された電子の電流を、世界で初めて測定した^[5]。その後、フェ

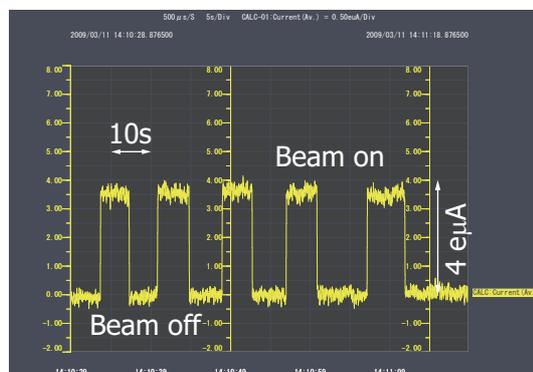


図 1: リングサイクロトロンによって 10.8 MeV/u のエネルギーに加速された 4 μ A の ¹³²Xe²⁰⁺ ビームを、SQUID モニター用いて測定した結果。

* wtamaki@riken.jp

ルミ国立研究所においては反陽子を、GSI 研究所では重イオンを測定するために^[6]、SQUID モニターの開発が行われてきた。しかし、これらは全て低温超伝導体を使用しているため、装置の規模は大きく、また冷媒として液体ヘリウムを使用している。液体ヘリウムは、一日に約 10 L 消費され^[7]、回収し再利用する場合は、回収装置のコストが必要となる。そこで我々は、SQUID を含む超伝導材に、高温超伝導材を使用したビーム電流計の開発を行ってきた。冷凍機を用いて冷却することにより、ランニングコストはコンプレッサーの電気代が主となり、年間約 17 万円に縮小することができた。さらに、装置の大きさも圧倒的にコンパクトになり、設置できるスペースが限られている加速器の環境では、大きな利点を発揮している。理研で完成済みのプロトタイプの高伝導 SQUID モニター用いて、リングサイクロトロンによって 10.8 MeV/u のエネルギーに加速された、4 μA の $^{132}\text{Xe}^{20+}$ ビームの測定を行った結果、正常に動作することが確認された^[8]。図 1 にその測定結果を示す。しかし、電流分解能は 100 nA であり、低温超伝導 SQUID モニターの 3 nA という分解能に比べて一桁以上悪く、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が、本研究の目的である。

3. 高温超伝導電流センサーの改良

3.1 電流ブリッジ部の改良と高温超伝導塗布装置の開発

図 2(a) に SQUID モニターの原理図を示す。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、ピ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 300 μm 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。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

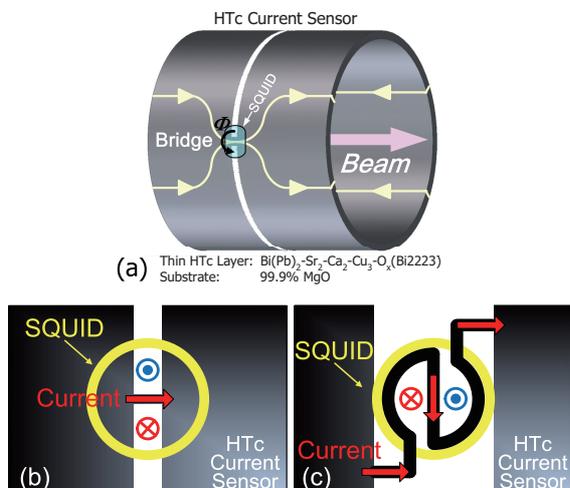


図 2: (a) 高温超伝導電流センサーの原理図。(b) プロトタイプの高伝導ブリッジ部。(c) 新しく考案された高伝導ブリッジ部。

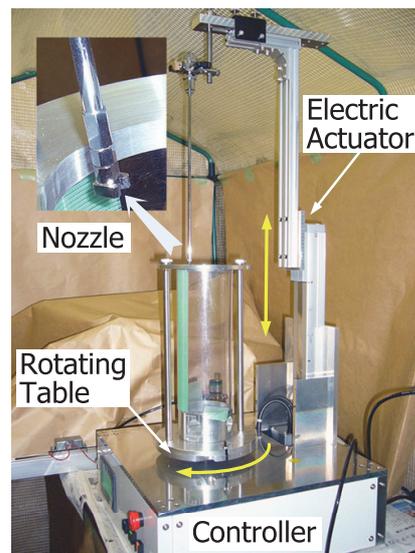


図 3: 高温超伝導電流センサー用に製作された高温超伝導塗布装置。

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。SQUID モニターの感度を上げるためには、この電流ブリッジで形成される磁場と高温超伝導 SQUID のカップリングを改良する必要がある。そのために、(1) コイル化することにより発生する磁場を強め、(2) 高透磁率のコアを用いることにより磁束を集める、手法を考案した。プロトタイプの高伝導ブリッジ部の模式図を図 2(b) に、新しく考案した高伝導ブリッジ部の模式図 2(c) に示す。この高伝導ブリッジ部にコイルを形成した、高温超伝導電流センサーを作成するために、高温超伝導材の塗布装置を新たに製作した (図 3)。回転テーブル上に高温超伝導電流センサーの MgO 基盤をセットし、電動アクチュエータに取り付けられたノズルが上下に動き、ペースト状の高温超伝導材を MgO 基盤に吹き付ける。回転テーブルが一周すると塗布作業が終了となる。今回、高温超伝導材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可能となった。本研究の第一の目的は、図 2 (c) に示すようなコイル状の高伝導電流ブリッジ部を、剥離する事なく製作する技術を確立することである。

3.2 高温超伝導電流センサーの製作

高温超伝導電流センサーの製作の前に、MgO 基盤上に、ブリッジ部だけのサンプルを作り、液体窒素で冷却しても剥離が起こらない事を確認した。また、同時に MgO の短冊状テストピース (5 W x 50 D x 5 H (mm)) 上に高温超伝導材を塗布焼成して、臨界温度、臨界電流、X 線による結晶構造の解析を行った。その結果、X 線結晶解析では Bi2223 相が形成されている事実を示すピークが確認され、臨界温度は 105 K であり、臨界電流は 3250 A/cm² に達した。これらの良好な結果が得られたため、高温超伝導電流センサーの塗布焼成作業を開始した。上記の高伝導ブリッジ部にコイルを形成するた

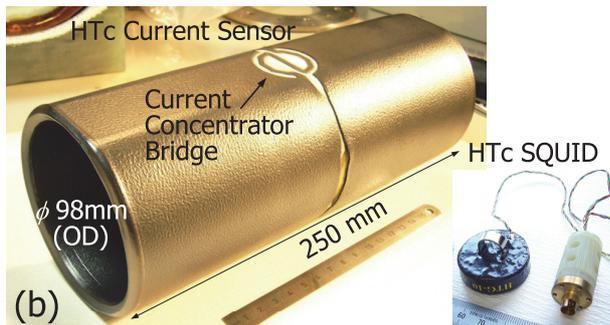


図 4: 高温超伝導電流センサー（電流ブリッジ部）と高温超伝導 SQUID。

に、コイル部以外をマスキングして塗布を行い、乾燥後にマスキングを剥がす作業を行った。焼成後に、超伝導体の密度を上げるため、冷間等方圧加圧 (Cold Isostatic Pressing: CIP) を行うが、今回 CIP 後にコイルに剥離が生じてしまった。この剥離は、コイルと円筒の繋ぎ目に R がなかったため、CIP によって部分的に強い力がかかった事により生じたと推測される。二回目の製作では、コイルと円筒の繋ぎ目に R をつけ、マスキングは行わず、コイル部にあらかじめ 200 μm の深さで溝を掘っておき、全面を塗布し、焼成後に手作業でコイル部以外を除去する手法を選んだ。しかし、二回目の塗布焼成作では、この手法が功を奏し、コイル部の剥離は起きなかったものの、筒の裏側に大きな剥離が起こってしまった。裏側の超伝導材を全て除去し、調査を行った結果、高温超伝導材と MgO 基盤の密着性が不十分である事が判明した。再度、両者の密着性を強める手法を施し、高温超伝導電流センサーの裏側に高温超伝導材を塗布・焼成を行った結果、高温超伝導電流センサーが完成した (図 4)。超伝導性があることは、後述するテストの結果確認された。一度焼成した超伝導材に、再度超伝導材を塗布焼成し、超伝導性が保たれた前例はなかったため、別な面で大きな成果が得られた。

3.3 テスト電流を用いた測定結果

プロトタイプ of SQUID モニターを解体し、旧型の高温超伝導電流センサーを、今回完成した高温超伝導電流センサーと入れ替え、再組立てを行った。SQUID モニターのビームパイプ内に導線を設置し、テスト電流を流すことによって、SQUID の出力を測定した。その結果、テスト電流を流している間は、SQUID の出力に減衰はなく、超伝導状態であることが確認できた。しかし、プロトタイプで使用していた旧型の超伝導電流センサーでは、1 μA の電流に対して 8 mV の出力が得られていたが、新型のコイル型超伝導電流センサーでは、2 mV の出力しか得られなかった。銅板を加工して製作した同形状のモデルコイルでは、60 mV の SQUID 出力が得られていたので、測定は期待した値の 1/30 という結果に終わったが、まずはこの様なコイル状のものが実際に作れるかが問題であり、この技術的問題を TEP 社と共に解決をした。

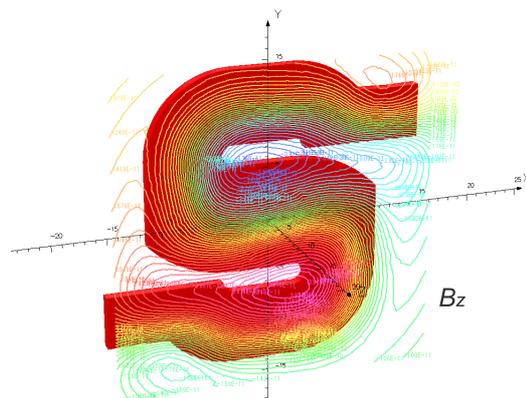


図 5: Opera-3d を用いた、最適化したコイルの磁場計算の結果。

3.4 高温超伝導電流センサーのモデル修正

テスト電流を用いた測定の結果より、コイル部形状に関しては Hao 氏らの指摘の通り^[9]、最適化が必要であることが確認された。すなわち、コイルのインダクタンスは、高温超伝導電流センサーの自己インダクタンスより小さくなるようにコイル形状をデザインする必要がある。三次元の有限要素法を用いた静磁場計算 Opera-3d^[10] を用いてインダクタンスの計算をすると、自己インダクタンスは 8.2 nH という値に対して、コイルのインダクタンスは 54.9 nH という値が得られた。Opera-3d においては、Stored energy E が計算できるので、インダクタンス L は以下の式

$$L = 2E/I^2,$$

より求める事ができる。ここで、 I はコイルに流れる電流である。S 字型コイルのインダクタンスを表す式によれば、コイルのインダクタンスを小さくするためには、コイルの幅を大きくし、内径を小さくする必要がある。そこで、Opera-3d を使い、発生する磁場を減少させることなく、可能な限りインダクタンスを小さくする最適

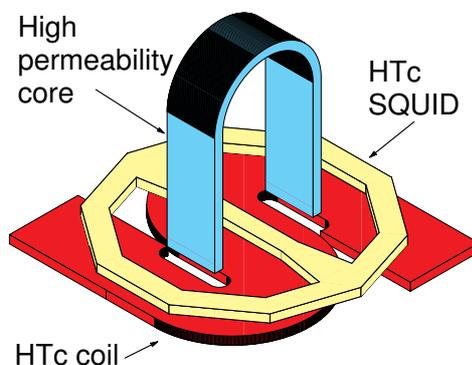


図 6: ブリッジ部における、高温超伝導コイル、SQUID、マグネティックコアの形状。

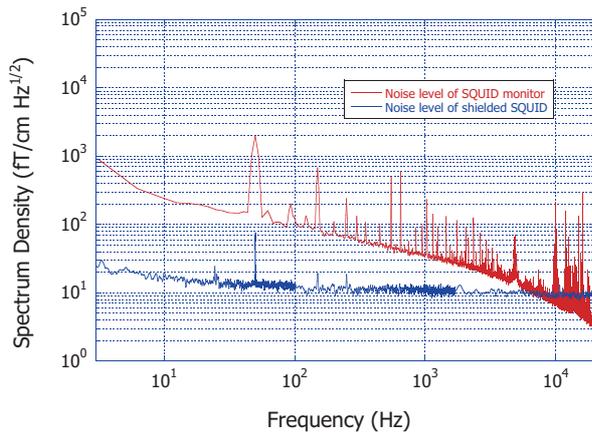


図 7: プロトタイプの SQUID モニターのノイズレベルと、円筒の超伝導シールドと三重のパーマロイシールドを施した SQUID のノイズレベルの比較。

化の計算を行った。いくつかのモデルを修正しながら最適化を繰り返した。最終的に決定したコイルの形状と、その磁場計算の結果を図 5 に示す。このモデルでは、インダクタンスは 15.6 nH であり、前回のモデルに比べて 28% まで減少させる事ができた。現在、MgO 基盤上に、ブリッジ部だけを形成したモデルを製作中である。Opera-3d による計算では、コイル化によって磁場は約 3 倍になり、さらに透磁率が 1000 のマグネテックコアを併用すると、磁場は約 10 倍になるという結果が得られた。後述する磁気シールドで、環境磁場を 1/10 に下げる事ができれば、最終的に感度を 100 倍改善できることが期待される。図 6 に、ブリッジ部における、高温超伝導コイル、SQUID、マグネテックコアの形状を示す。

4. 磁気シールドの強化

SQUID 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。現在のプロトタイプの SQUID モニターにおいて、さらにノイズを下げられる可能性があるか調査するため、ノイズの測定を行った。図 7 に、ノイズの周波数領域における測定結果を示す。赤いラインは SQUID モニターの出力を示し、青いラインは円筒の超伝導シールドと三重のパーマロイシールドを施した SQUID の出力 (Dr. Faley の測定による^[10]) を示している。これらの測定結果を比較すると、プロトタイプの SQUID モニターには、シールドに 10~20 dB の改善の余地があることが解った。現在、SQUID 回りのシールドを強化すべく、磁気シールド体の計算を、Opera-3d を用いて行っている。

5. まとめ

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) をビーム電流計に応用した SQUID モニターが、各研究機関で開発されてきた。しかし、これらは全て低温超伝導体を使用しているため、装置の規模は大きく、また冷媒のコストは高価である。理研では、SQUID を含む

超伝導材に、高温超伝導材を使用したビーム電流計の開発を行い、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。プロトタイプの SQUID モニターを完成し、リングサイクロトロンによって加速された重イオンビームの測定を行った結果、正常に動作することが確認された。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。高温超伝導電流センサーに改良を施すため、高温超伝導塗布装置を製作し、幾つかの失敗を経ながら、剥離することのない高温超伝導電流センサーを製作する技術を確立した。高温超伝導電流センサーの電流ブリッジ部と磁気シールドには、なおも問題点が残っているので、現在その問題点の克服に向けて研究開発を行っている。

6. 謝辞

Forschungszentrum Juelich GmbH の Dr. Faley には、SQUID に関する有意義な助言を頂き、KEK の藤森氏には、Opera-3d に関する多くの示唆を頂き、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] Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods B **261** (2007) 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., (2007).
- [4] T. Ohnishi et al., J. Phys. Soc. Jpn. **77** No.8 (2008) p. 083201.
- [5] K. Grohman, et al., Superconducting quantum interference devices and their applications, Walter de Gruyter & Co. (1977) p. 311.
- [6] A. Peters et al., AIP Conf. Proc. 451 (1998) p. 163.
- [7] T. Tanabe et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. A **427** (1999) p. 455.
- [8] T. Watanabe et al., Proc. 2010 Beam Instrumentation Workshop (BIW10), Santa Fe, New Mexico, U.S.A (2010) p. 523.
- [9] L. Hao et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **11** No.1 (2001) p. 635.
- [10] COBHAM <http://www.cobham.com/home.aspx>
- [11] M. I. Faley private communication (2012).