

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月4日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K04749

研究課題名(和文)高温超伝導SQUIDビーム電流計の高感度・小型化

研究課題名(英文)Sensitivity improvement and miniaturization of HTc-SQUID beam current meter

研究代表者

渡邊 環 (WATANABE, TAMAKI)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任技師

研究者番号：30342877

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究に於いて、高温超伝導SQUID(超伝導量子干渉素子)ビーム電流計の開発を続け、理化学研究所の加速器施設に於いて、世界に先駆けて実用化し、特許申請に至っている。SQUIDは、脳磁や心磁など、医療の測定に用いられる超高感度磁気センサーであり、その優れた性能を本研究に応用した。更に高い分解能と小型化を目指し、ビームが作り出す電磁場から得られる信号と、外部環境から受ける雑音、即ち信号対雑音比に焦点を当て、測定分解能の解明を進めた。モデル計算を行い、ビームの模擬電流を用いてSQUIDの出力を観測した結果、計算値と計測値とは良く一致し、モデル計算の正しさを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

RI(放射性同位元素)は、基礎科学研究分野に留まらず、医療や産業など様々な分野において、すでに私達の身近で利用されている。特に近年、最先端のがん治療薬として、線放射する短寿命放射性同位元素であるアスタチン211(211At)が、今注目を集めている。この製造量と質を正しく見積もるためには、加速されたビームの電流とエネルギーの高精度な測定は極めて重要である。211At生成収率はビームエネルギーに、収量は照射積算電流量に依存性を持つが、その測定結果は研究機関毎にばらつきがあるのが現状である。高温超伝導SQUIDビーム電流計は、生成収量の精度を大幅に向上し、211Atの製造法の最適化を実現する。

研究成果の概要(英文)：In this research, we have continued to research the high-temperature superconducting SQUID (superconducting quantum interference device) beam ammeter, and lead to practical use at the accelerator facilities in RIKEN first in the world, and applied for a patent. SQUIDs are ultra-sensitive magnetic sensor which are used studying the neural activity inside brains and diagnosing heart conditions in clinical environments, and its characteristics were applied to this research. Aiming at higher resolution and miniaturization, we focused on the signal obtained from the electromagnetic field produced by the beam and the noise received from the external environment, that is, the signal-to-noise ratio, and proceeded to clarify the measurement resolution. We performed the model calculation and measured the output signal from the SQUID using the simulated current of the beam. As a result, the calculated result was good agreement with the measured one.

研究分野：ビーム物理

キーワード：ビーム電流計 SQUID 高温超伝導 ビーム診断

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

(1) 超高感度磁気センサーSQUID(Superconducting Quantum Interference Device)は、脳磁や心磁の測定に利用されている。重イオンや反陽子を加速・蓄積する加速器に於いては、加速器を構成する各装置群の安定度を分析するため、微弱なビーム電流を、非破壊で高精度に測定することが加速器物理学の観点から極めて重要となる。申請者は世界に先駆けて、非破壊で高感度な高温超伝導 SQUID ビーム電流計の実用化技術を開発し、特許登録を行った。

(2) しかしながら、非破壊測定としての優位性はあるものの、現在の分解能は破壊型測定装置、ファラデーカップと同じオーダーであり、高分解能化が課題として残されていた。この課題を克服するために、“ビーム電流の測定分解能に寄与する要因は何か？”という問いに立ち返って出発した。この問いの答えを得るために、ビームが作り出す電磁場から得られる信号と、外部環境から受ける雑音、即ち信号対雑音比に焦点を当て、測定分解能の解明を進めた。
※以下、読みやすくするために、高温超伝導をHTc (High Critical Temperature)、低温超伝導をLTc (Low Critical Temperature)と略する。

2. 研究の目的

本研究はこうした学術的「問い」に答えるため、以下の二点の解明し、HTc SQUID ビーム電流計の高感度・小型化の研究を目的とする。

(1) マイスナー効果によるビームの遮蔽電流が、SQUID 入力コイルに作り出す磁束を、深い理解に基づいたモデル計算により算出し、そのメカニズムを明らかにする。

(2) 完全反磁性によって不必要な外部磁気は排除するが、ビームの遮蔽電流だけは通過させる磁気フィルターの研究を行う。

3. 研究の方法

ビームが作り出す電磁場が、マイスナー効果によって遮蔽電流を生じ、どれだけの磁束を SQUID 入力コイルに発生させるか、以下のモデル計算により解明を行う。図1に、プロトタイプ of HTc 超伝導ピックアップループ(以下ピックアップループと略す)を示す。MgOの円筒基盤上に、ビスマス系のHTc 超伝導材を500ミクロンの厚さで塗布焼成し、ブリッジと称する箇所を除いて円周に沿って除去している(図中の白線)。このループの内部をビームが通過すると、マイスナー効果によって、超伝導の表面に遮蔽電流が流れ、ブリッジに遮蔽電流が集中する。このブリッジ上に HTc SQUID を設置し、遮蔽電流が方位角方向に形成する磁場を測定すれば、ビームの電流値に換算することができる。

ここで、図中に示したパラメーターを用いてモデル計算を行う。ビームが作り出す磁束 ϕ と、この磁束 ϕ に応じてループ上に流れる遮蔽電流 I は、それぞれ以下の式で表せる。

$$\phi = L_p I_b, \quad I = \frac{\phi}{L_p + L_s} \quad (1)$$

また、HTc SQUID の入力コイルに伝達される磁束 ϕ_s は、

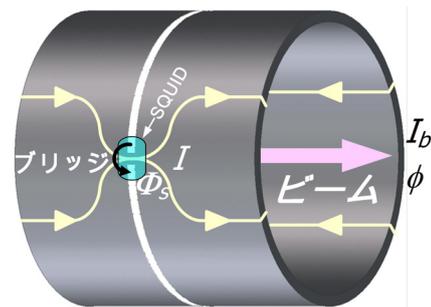
$$\phi_s = MI = M \frac{L_p}{L_p + L_s} I_b \quad (2)$$

となる。ループの内径、外径、長さを、それぞれ a 、 b 、 L とすると、ループの自己インダクタンス L_p は、以下の式で表される。

$$L_p = \frac{\mu_0 L}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad (3)$$

ここで、式(2)における磁束 ϕ_s が、SQUID の出力信号を決めており、測定分解能の鍵となる。注目すべきは、ブリッジの自己インダクタンス L_s が大きくなると、ループを流れる電流 I は減少し、結果として SQUID に伝達される磁束 ϕ_s も減少する点である。このモデル計算により、付加的なインダクタンスによって、遮蔽電流がビーム電流と等しくないことが判明した。即ち、磁場を集めようとすればする程、付加的なインダクタンスが増えて、遮蔽電流を減少させてしまう。

そこで、ピックアップループに絶縁部を持たず、ビームが作り出す磁束を増大するために、



- I_b : ビーム電流
- ϕ : ビーム電流が作る磁束
- I : ループを流れる遮蔽電流
- L_p : ループのセルフインダクタンス
- L_s : ブリッジのセルフインダクタンス
- M : ブリッジとSQUIDの相互インダクタンス

図1 プロトタイプ of HTc 超伝導ピックアップループ

新規に考案したピックアップループを図2に示す。ここでは、自己インダクタンスを増大するために、高透磁率トロイダルコアを導入した。遮蔽電流は高透磁率コアの周りを囲むように一周するので、遮蔽電流が作り出す磁束を効率よく捕捉する。更に、この高透磁率コアは HTc SQUID 入力コイル内を貫通しているため、磁束を高効率で SQUID に伝達することが可能となる。ここで、高透磁率コアの比透磁率を μ_r 、半径を R 、断面積を S 、ビーム電流を I_b とすると、SQUID 入力コイル内に形成される磁束 ϕ_s は、以下の式で表される。

$$\phi_s = \frac{\mu_0 \mu_r I_b S}{2\pi R} \quad (4)$$

高透磁率コアの比透磁率を 10^5 、半径を 50 mm、断面積を 4 mm^2 、ビーム電流を $1 \mu\text{A}$ とすると、磁束 ϕ_s は $1.6 \times 10^{-12} \text{ Weber}$ と算出できる。この磁束は、上述したプロトタイプの 35,000 倍もの値であり、LTc SQUID ビーム電流計に比べても 300 倍に相当する。このモデル計算は、後述する実験によって、現象を正確に表していることを証明した。

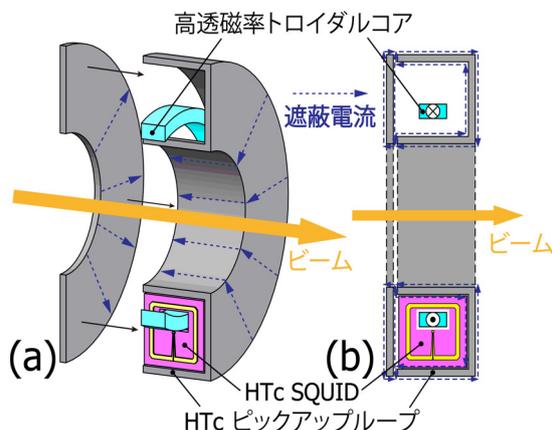


図2 新規に考案した HTc 超伝導ピックアップループと超伝導磁気フィルター

4. 研究成果

(1) SQUID を含む超伝導材として、高温超伝導材を使用した SQUID ビーム電流計の開発を推進し、理化学研究所の RIBF (RI Beam Factory) 計画に於いて、プロトタイプの完成と実用化に成功した (T. Watanabe et al. IBIC2015, 2015)。高温超伝導材 SQUID 電流計のプロトタイプを図3に示す。このプロトタイプは、超電導とパーマロイ磁気シールドに加え、三軸磁気センサーが外界変動磁界を常に検知解析し、三軸ヘルムホルツコイルにより外界変動磁界を打ち消し、安定した磁場環境を作り出すシステムを有している。これにより、50 Hz の外部ノイズを 100 dB 減衰させることに成功した (T. Watanabe et al. IOP 507, 2013)。

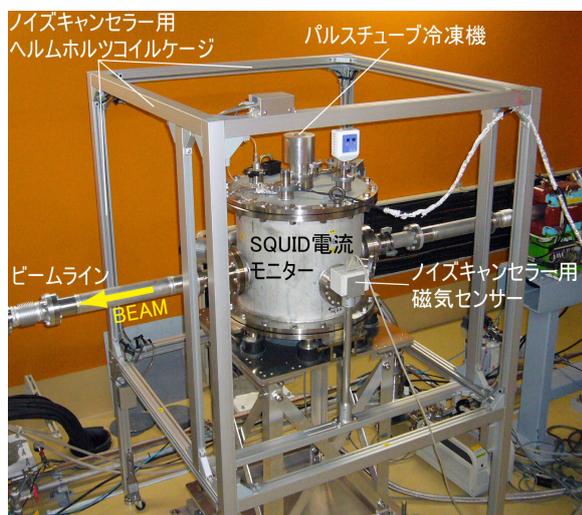


図3 理研プロトタイプ HTc SQUID ビーム電流計

(2) 研究の方法では、SQUID 入力コイルに作り出す磁束を、モデル計算に基づいて導いてきた。このモデル計算が正しいことを実証するために、図4に示す実験を行った。この実験では、まだ貫通型の HTc SQUID が完成していないため、高透磁率コアの一部にギャップを作り、そのギャップ中に SQUID を挟み、磁路中に SQUID を設置する構造とした。信号発生器よりビームの模擬電流を発生させ SQUID の出力を観測した結果、ギャップの効果を含めたモデル計算と計測値が一致し、実際に現象を良く説明していることを実証した。

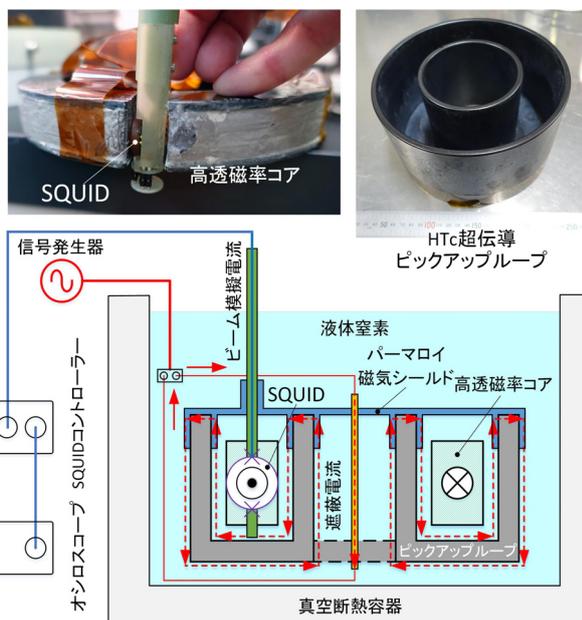


図4 モデル計算を実証する実験

(3) プロトタイプ HTc SQUID ビーム電流計の超伝導ピックアップループは、単純な MgO の円筒を基盤としていたが、複雑な形状に対応することは極めて困難となる。そこで、複雑な加工が可能で、超伝導体と合金を形成しない銀を基盤として選定し、超伝導 Bi2212 相を銀基盤上に形成する方法を選択している。超伝導の性能は、生成の際の溶融温度と徐冷スピードに大きく左

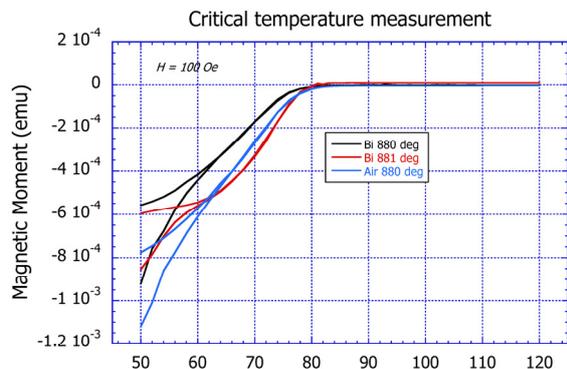


図5 臨界温度測定

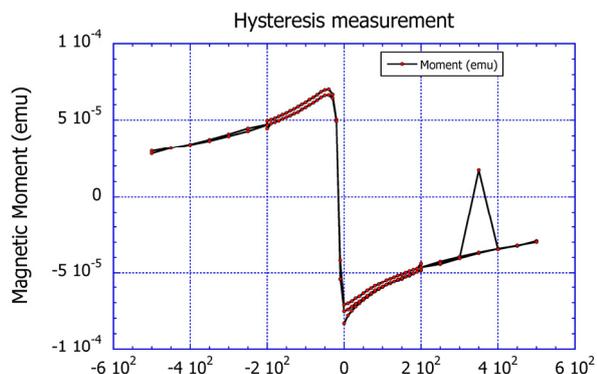


図6 臨界電流の測定

右されるため、以下の方法によりその最適化を行った。(1)走査型電子顕微鏡(SEM)を用いた厚膜の表面画像の観察、(2)X線解析法によるBi2212の結晶構造の解析(XRD)、(3)臨界温度と臨界電流を得るための磁気特性測定装置を用いた磁気モーメントの測定。臨界温度の測定結果を図5に、臨界電流の測定結果を図6に示す。現在、最適化された条件で生成されたHTc超伝導材は、臨界温度が82 Kで、臨界電流が45 A/cm²であるが、超伝導フィルターとして実用化するには、臨界電流はまだ十分ではなく、更に改善する必要がある。

(4) 現在までに完成している(a) Bi2212用の銀基盤、(b)貫通型HTc SQUIDとクライオジェニックケーブル、(c)高透磁率アモルファステープ VITROVAC 6025 I50X、を図7に示す。Bi2212の性能を示す、臨界温度、臨界電流は、上記(3)に於いて記したが、今後これらの改善により、その製法を確立し、(a)の銀基盤上にBi2212を溶解する。また、(b)のHTc SQUIDの貫通穴中を通して、(c)の高透磁率アモルファステープを140回前後巻くことで、コアを形成する。最終的な完成を目指すHTc超伝導ピックアップループと超伝導磁気フィルターは、図2に示した通りである。

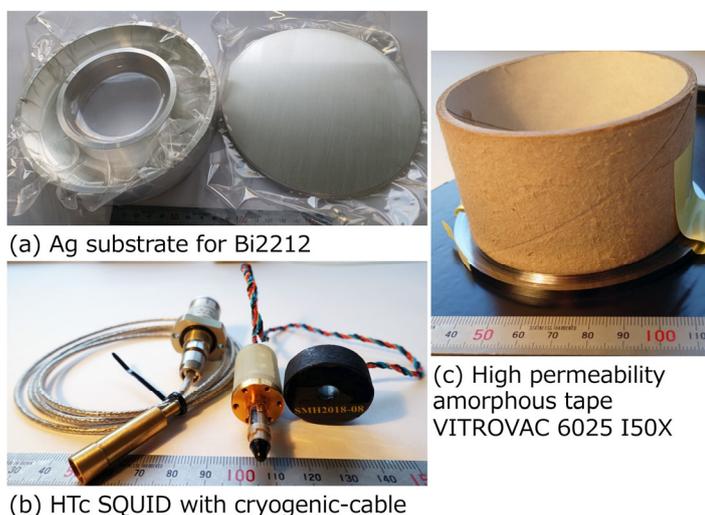


図7 (a) Bi2212用の銀基盤、(b)貫通型HTc SQUIDとクライオジェニックケーブル、(c)高透磁率アモルファステープ VITROVAC 6025 I50X

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計2件)

1. Watanabe T, Fukunishi N, Inamori S, Kon K: “Sensitivity improvement and miniaturization of HTc-SQUID beam current monitor”, 査読無, Proc. of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 1127-1133, 2016, http://www.pas.j.jp/web_publish/pas_j2016/proceedings/PDF/TUP0/TUP088.pdf
2. T. Watanabe, N. Fukunishi, M. Kase, RIKEN, S. Inamori, K. Kon: “HTc SQUID beam current monitor at the RIBF”, Proceedings of the 4th International Beam Instrumentation Conference, Melbourne, Australia, 査読無, 590 - 594, 2015, ISBN 978-3-95450-176-2, <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IBIC2015/papers/wecla03.pdf>

〔学会発表〕 (計4件)

1. T. Watanabe, “Sensitivity improvement and miniaturization of HTc-SQUID beam current monitor”, The 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 2016
2. T. Watanabe, “HTc SQUID beam current monitor at the RIBF”, The 4th International Beam Instrumentation Conference, Melbourne, Australia, 2015
3. 渡邊 環, “理研 RIBF における高温超伝導 SQUID ビーム電流モニターの実用化”, 日本物理学会 第70回年次大会, 2015
4. T. Watanabe, “Development of beam current monitor with High-Tc SQUID at RIBF”, Colloquium at the Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計1件）

名称：CHARGED PARTICLE BEAM CURRENT MEASUREMENT APPARATU

荷電粒子ビームの電流測定装置

発明者：渡邊 環、福西 暢尚

権利者：国立研究開発法人理化学研究所

種類：外国出願（PCT出願）

番号：PCT/JP2017/027580

出願年：2017年

国内外の別：ヨーロッパ、日本

○取得状況（計1件）

名称：荷電粒子ビームの電流検知装置

発明者：渡邊 環、福西 暢尚

権利者：国立研究開発法人理化学研究所

種類：特願 2013-009448

番号：6044033

取得年：2013年

国内外の別：日本

〔その他〕

ホームページ等

http://www.riken.jp/research/labs/rnc/accel/beam_dyn_diagn/

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：福西 暢尚、稲森 聡、今 康一

ローマ字氏名：Fukunishi Nobuhisa, Inamori Satoru, Kon Kouichi

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。