

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 26 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2014

課題番号：23600015

研究課題名(和文)高温超電導電流センサーとSQUIDを用いたビーム電流計の高感度化

研究課題名(英文)Sensitivity improvement of Beam Current Meter with a High-Tc Current Sensor and SQUID

研究代表者

渡邊 環(WATANABE, TAMAKI)

独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・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) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：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ている超高感度磁気センサーSQUID (Superconducting Quantum Interference Device)を応用した、SQUIDビーム電流計の実用化に成功した。この実用化されたSQUIDビーム電流計は、超伝導部に臨界温度の高い高温超伝導体を用いており、さらに液体ヘリウムフリーの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を実現した。

研究成果の概要(英文)：We have succeeded in the practical use of a high sensitive beam current meter to measure the DC current of heavy-ion beams non-destructively at high resolution. This current meter uses a high critical temperature (HTc) superconducting quantum interference device (SQUID) which is a very sensitive magnetometer used to detect magnetic fields produced by a brain or a heart. 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 greatly.

研究分野：ビーム物理

キーワード：ビーム電流計 SQUID 高温超電導 ビーム診断

1. 研究開始当初の背景

1977年、ドイツのPTB研究所が、世界で初めて超伝導量子干渉素子 SQUID (Superconducting Quantum Interference Device) を用いたビーム電流計(SQUID ビーム電流計)を開発し、静電加速器で加速された電子の電流を測定した。その後、フェ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、SQUID ビーム電流計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、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 SQUID 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。高温超伝導を用いた SQUID ビーム電流計のプロトタイプでは正常に動作することが確認されているが、分解能は 500 nA であり、低温超伝導 SQUID ビーム電流計の 3 nA という分解能に比べて二桁以上悪く、高分解能化が課題として残されていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、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電流計を開発することである。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、1 μ A の電流分解能があれば通常は問題がないが、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電流計が切望されてきた。そこで、脳磁や心磁の測定に利用される SQUID をビーム電流計に応用した SQUID ビーム電流計が開発され、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、これらの SQUID ビーム電流計においては、SQUID を含む超伝導部に低温超伝導体を用いているため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あった。本研究では、超伝導部に高温超伝導体を用いることによりこれら問題点を解決しようとするものである。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。既に完成したプロトタイプにおいて電流分解能をさらに高感度化することが本研究の目的である。

※以下、**高温超伝導**を **HTS (High Temperature Superconducting)**、**低温超伝導**を **LTS (Low Temperature Superconducting)**と略する。

3. 研究の方法

平成 23 年度は、(1) 高透磁率マグネティックコア、(2) HTS 電流センサーの開発、を主に行った。高透磁率コアにおいては、HTS SQUID の形状に合わせて設計し、比透磁率等磁気特性の良いコアを製作した。HTS SQUID と高透磁率のマグネティックコアを組み合わせた形で、下記の性能評価を行った：(1) 模擬ビーム電流を用いた感度の測定、(2) FFT を用いた DC 及び AC のノイズ測定。HTS 電流センサーについては、ブリッジ部のサンプルを作り、臨界温度を始めとした超伝導特性の測定を行い、特性が十分に満たされていることを確認した。平成 24 年度において、上記の高透磁率のマグネティックコアを組み合わせた HTS SQUID、HTS 電流センサーを、プロトタイプを改造することにより組み込み、実機として完成した。完成後は、模擬ビーム電流を用いて感度を測定し、加速器や大電力電源が発生する外部磁場の、磁気遮蔽率の測定も行った。最終的に理化学研究所の加速器施設内にインストールし、重イオンビームを用いて評価を行っている。

4. 研究成果

(1)

① SQUID ビーム電流計の感度を改善するために、HTS 電流センサーで形成される磁場と HTS 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。この HTS 電流センサーの開発は、最も重要な課題であり、科研費の大半をこの研究に充てた。そのために、(a) HTS 電流センサーの磁場発生部をコイル化することにより発生する磁場を強め、(b) HTS 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た。この HTS 電流センサーを実現するために、HTS 材の塗布装置を新たに製作した。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 W x 50 D x 5 H (mm)) 上に HTS 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 A/cm² という測定結果が得られた。超伝導コイル部の NC 旋盤による精密加工、電力中央研究所で開発された MgO 基盤のプラスト法の導入により、焼成時に HTS 材が剥離する、という最大の問題点を克服し、HTS 材の塗布焼成に関するノウハウを確立した。

② SQUID ビーム電流計の性能は、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 ビーム電流計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。

(2)

① SQUID ビーム電流計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 HTS 電流センサー、HTS 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。組み立て作業の終了後、理化学研究所の IRC (Intermediate Ring Cyclotron) のビームトランスポートラインに移設・設置を行った。ここで、SQUID ビーム電流計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。その測定結果を、図 1 と図 2 にそれぞれ示す。図 1 では、高透磁率コアの有無による特性の違いを示している。この両測定に於いて用いた、模擬ビーム電流の電流値は同じである。ここで、高透磁率コアを使用した場合、高周波での周波数特性は良くないが、ゲインは 3 倍改善されている事が解る。コアを使用した場合、500 倍のアンプゲインで、1 μ A の電流に対して 24 mV の出力が得られている。IRC のビームトランスポートラインにインストールした SQUID ビーム電流計の写真を、図 3 に示す。

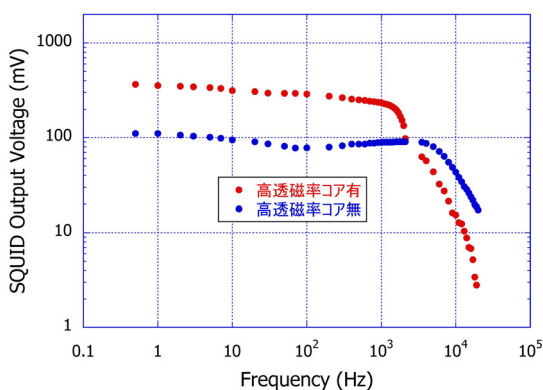


図 1 SQUID ビーム電流計の周波数特性。

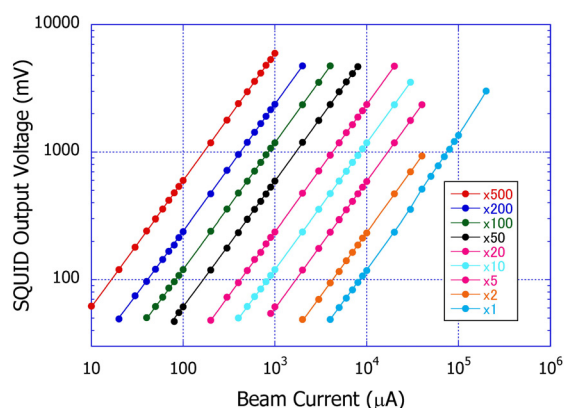


図 2 電流ソースを用いたキャリブレーションの測定結果。

② SQUID ビーム電流計のデータ収集と制御のために、新たにシステムを構築した。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が出力されているので、A/D 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 A/D コンバーターによって取得し、ビーム電流に換算している。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 を用いている。

(3)

① 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、PXI コントローラーがリブートしたまま、停止状態になってしまうなど、放射線障害が発生した。SQUID コントローラーだけは、信号処理回路の近くに設置する必要があるため、IRC 室内



図 3 ビームトランスポートにインストールした SQUID ビーム電流計の写真。

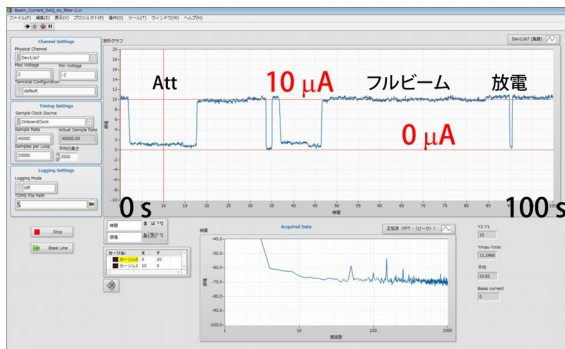


図4 ^{48}Ca ビームの測定結果。

に残し、他のシステムは全て、通信ケーブルを新設する事により、IRC 室外に移動した。

② RI ビームファクトリー(RIBF)に於ける重イオンを用いた原子核実験の間、SQUID ビーム電流計のプログラミングを並行して行い、実験で加速された ^{238}U 、 ^{70}Zn 、 ^{48}Ca ビームの観測を行ってきた。一例として、図4に ^{48}Ca ビームの測定結果を示す。Att とはスリットによりビームを減少させた時であり、時々起るイオン源の放電が観測されている。この時、最大ビーム電流値は $10\ \mu\text{A}$ 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。

③ RIBF の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、ついに磁束のホッピングが起り始めた。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試みた。ビーム加速中のため、IRC 室内に入ることができず、遠隔でヒーターを動作させるプログラムを作成し、30 秒間ヒーターをオンにする事により、トラップした磁束を除去し、ノイズを激減する事ができた。

(4) 今後もさらに整備を進め、加速器の運転中に、ネットワークを通して常時モニターできる環境を整えてゆく予定である。特に大強度ビーム加速時に於ける、電流測定と周波数解析を鋭意進める。

また、新しい方式の HTS SQUID ビーム電流計を考案したので、その実現に向けた予備実験を、別途進めてゆく予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① T. Watanabe, N. Fukunishi, M. Kase, S. Inamori, K. Kon, "PRACTICAL APPLICATION OF HIGH-TC SQUID BEAM CURRENT MONITOR", Proc. of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 査読無, 2014, 292-295, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOM/MOOM11.pdf
- ② T. Watanabe, N. Fukunishi, M. Kase, O. Kamigaito, S. Inamori, K. Kon, "Improvements of a Beam Current Monitor by using a High Tc Current Sensor and SQUID at the RIBF", Journal of Physics: Conf. Series **507**, 042047, 査読有, 2014, DOI: 10.1088/1742-6596/507/4/042047
- ③ T. Watanabe, N. Fukunishi, M. Kase, O. Kamigaito, S. Inamori, K. Kon, "Reinforcement of Magnetic Shield for High-Tc SQUID Beam Current Monitor", Proc. of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 査読無, 2013, 1094-1097, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/SUP0/SUP077.pdf
- ④ T. Watanabe, N. Fukunishi, M. Kase, O. Kamigaito, S. Inamori, K. Kon, "Sensitivity improvement of beam current monitor with a High-Tc Current Sensor and SQUID", Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, 査読無, 2012, 608-611, http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS082.pdf
- ⑤ T. Watanabe, N. Fukunishi, M. Kase, O. Kamigaito, S. Inamori, K. Kon, "Beam Current Monitor with a High-Tc Current Sensor and SQUID at the RIBF", Journal of Superconductivity and Novel Magnetism Incorporating Novel Magnetism, Vol. **25-8**, 査読有, 2012, DOI: 10.1007/s10948-012-1943-0
- ⑥ T. Watanabe, N. Fukunishi, O. Kamigaito, M. Kase, Y. Sasaki, "Improvement of Beam Current Monitor with High Tc Current Sensor and SQUID at the RIBF", 査読無, 2011, Proceedings of IPAC2011, 1260-1262, <https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2011/papers/tupe105.pdf>

[学会発表] (計 11 件)

- ① 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 年 3 月 21 日、早稲田大学 (東京都・新宿区)

- ② T. Watanabe, “Development of beam current monitor with High-Tc SQUID at RIBF”, Institute of Modern Physics Colloquium (招待講演), 2015/03/11, Lanzhou (China)
- ③ 渡邊 環, “HTc-SQUID ビーム電流計”, 日新イオン機器株式会社講演会 (招待講演), 2015年8月11日, 日新イオン機器株式会社 (京都府・京都市)
- ④ 渡邊 環, “HTc-SQUID ビーム電流モニターの実用化”, 第11回日本加速器学会年会, 2015年8月11日, 青森市文化会館 (青森県・青森市)
- ⑤ T. Watanabe, “Development of beam current monitor with High-Tc SQUID at RIBF”, Forschungszentrum Jülich GmbH PGI-5 Colloquium (招待講演), 2013/09/24, Juelich (Germany)
- ⑥ T. Watanabe, “Improvements of Beam Current Monitor with High Tc Current Sensor and SQUID at RIBF”, 11th European Conference on Applied Superconductivity EUCAS2013, 2013/09/18, Genova (Italy)
- ⑦ 渡邊 環, “HTc-SQUID ビーム電流モニターにおける磁気シールドの強化”, 第10回日本加速器学会年会, 2013年8月4日, 名古屋大学 (愛知県・名古屋市)
- ⑧ 渡邊 環, “高温超伝導 SQUID を用いたビーム電流計 ナノアンペアのビームを非破壊で測定する”, 第12回国際ナノテクノロジー総合展・技術会議 (招待講演), 2013年1月30日, 東京ビッグサイト, (東京都・江東区)
- ⑨ T. Watanabe, “Beam Current Monitor with a High-Tc Current Sensor and SQUID at the RIBF”, International Conference on Superconductivity and Magnetism ICSM21, 2012/05/03, Istanbul (Turkey)
- ⑩ 渡邊 環, “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”, 第9回日本加速器学会年会, 2012年8月4日, 大阪大学 (大阪府・豊中市)
- ⑪ T. Watanabe, “Improvement of Beam Current Monitor with High Tc Current Sensor and SQUID at the RIBF”, second International Particle Accelerator Conference, IPAC’11, 2011/09/06, San Sebastian (Spain)

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (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: 同上
 種類: 特許
 番号: 特願 2013-009448
 出願年月日: 2013年1月22日
 国内外の別: 外国

○取得状況 (計 件)

名称:
 発明者:
 権利者:
 種類:
 番号:
 出願年月日:
 取得年月日:
 国内外の別:

[その他]
 ホームページ等

仁科加速器研究センター 運転技術チーム
http://www.riken.jp/research/labs/rnc/accel/beam_dyn_diagn/

6. 研究組織

(1)研究代表者

渡邊 環 (WATANABE, Tamaki)

独立行政法人理化学研究所

仁科加速器研究センター・専任技師

研究者番号: 30342877

(2)研究分担者

()

研究者番号:

(3)連携研究者

()

研究者番号:

(4)研究協力者

福西 暢尚 (FUKUNISHI, Nobuhisa)

独立行政法人理化学研究所

仁科加速器研究センター・副部長

研究者番号: 00523656