

## 高温超伝導 SQUID と磁気シールドを用いた 非破壊型高感度ビーム電流計の開発

渡邊 環<sup>A)</sup>、渡辺伸一<sup>B)</sup>、池田時浩<sup>A)</sup>、片山武司<sup>B)</sup>、加瀬昌之<sup>A)</sup>、  
川口武男<sup>C)</sup>、佐々木雄一朗<sup>D)</sup>

<sup>A)</sup> 理化学研究所 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

<sup>B)</sup> 東京大学原子核科学研究センター 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1

<sup>C)</sup> KT サイエンス 〒675-0012 兵庫県加古川市野口町野口 779-1

<sup>D)</sup> 松下電器 〒570-8501 大阪府守口市八雲中町 3-1-1

### 概要

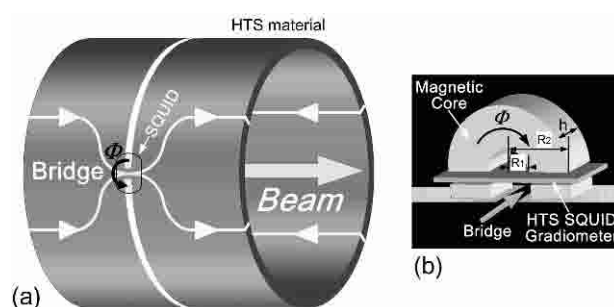
現在、理化学研究所において、高温超伝導 SQUID と磁気シールドを用いた非破壊型高感度ビーム電流計の開発研究を進め[1, 2]、そのプロトタイプを完成させた。動作温度が高温（液体窒素温度）なため、冷却機構を大幅に小型化することができ、冷却費用の圧倒的な軽減を可能とした。また、冷却は低振動パルスチューブ冷凍機による直接冷却によって行われるため、メンテナンスが容易であり、研究開発に必要なサイクルを短縮することができた。現在、東京大学の ECR イオン源と理研リングサイクロトロンのビーム輸送系において、500 ナノアンペアの Ar ビーム電流の測定に成功した。今後、加速器やイオン注入装置への実用化に向けた、高感度化と高安定度化の開発研究を進めていく予定である。

### 1 SQUID 電流モニターの開発経緯

低温（液体ヘリウム温度）で動作する SQUID 電流モニターは、フェルミ国立研究所では反陽子の電流測定のためにプロトタイプが作られ、ドイツの GSI 研究所では重イオンシンクロトロン SIS によって蓄積、加速された重イオンの取り出されたビームの測定のために開発されてきた[2]。また KEK のクーラーリング TARN II では、分子ビームや負イオン等の微弱で特殊なビームと電子の反応断面積を決定するため、世界で初めて蓄積リング内に設置された[3]。しかし、いずれも液体ヘリウムで冷却するため冷却機構が複雑であり、冷媒そのもののコストも安価ではない。また、液体ヘリウムを補給した後は、SQUID 素子が安定に動作するまでに数時間を必要とし、その補給作業にも手間と時間を要する。年間を通して運転した場合、そのランニングコストの差は大きく現れる。現在、理研で開発中の高温 SQUID 電流計は液体窒素温度で作動するため冷却機構を大幅に小型化し、製造コストの削減が可能となった。さらに、冷却が冷凍機による直接冷却のため、メンテナンスの容易さ、運転費のコストダウン、等のメリットが得られる。

### 2 測定原理

この装置は、二層の筒型超伝導体を有し、超伝導磁気シールドであり、もう 1 つは超伝導体表面にブリッジ構造を



図：1 高温超伝導 SQUID 電流モニターの原理図。

有する電流センサーで構成される。これらは、99.9 %以上の純度の高い酸化マグネシウムで作られた筒状のセラミックに、ビスマス系の超伝導材 ( $(\text{Bi}(\text{Pb})_2\text{-Sr}_2\text{-Ca}_2\text{-Cu}_3\text{-O}_x$  : Bi-2223) を 300  $\mu\text{m}$  の厚さで塗布焼成し製作する（臨界電流：4500 A/cm<sup>2</sup>、臨界温度：106 K）。低温の SQUID 電流計における超伝導シールドは、(1) 環境磁場の遮蔽と、(2) ビームの通過による壁電流の発生、の機能を兼ねていた。しかし、高温超伝導の場合、超伝導物質が形成された後にさらに焼成して再結合することが困難なため、上記の 2 つの機能をあえて分離している。図 1 に高温超伝導 SQUID 電流モニターの原理図を示す。図 1 (a) のような超伝導体の筒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。筒の中心一部（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、電流の通過によって方位角方向の磁場が形成される。ブリッジ部に SQUID センサー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。従来の技術と比較すると、このようなブリッジ部の形成によって、遮蔽電流を効率よく集中させることが可能となる。また、このブリッジ部は、塗布焼成の際にマスクすることで容易に形成することができる。このようなブリッジ部上方位角方向に形成される磁場を SN 比良く測定するためには、グラジオメーター-SQUID を用いることが最適である。何故なら、グラジオメーターは磁場を検出するためのインプットコイルが左右にあり、おのおの向きが反対でシリーズに接続されているので、外部ノイズ磁束が左右インプットコイルに入ろうとする際、もしノイズ磁束の大きさと方向が全く同じであるならば、外部ノイズ磁束は完全にキャンセルされる。一方、ビームの通過によってブリッジ部に形成される磁場は、大きさは同じであるが、

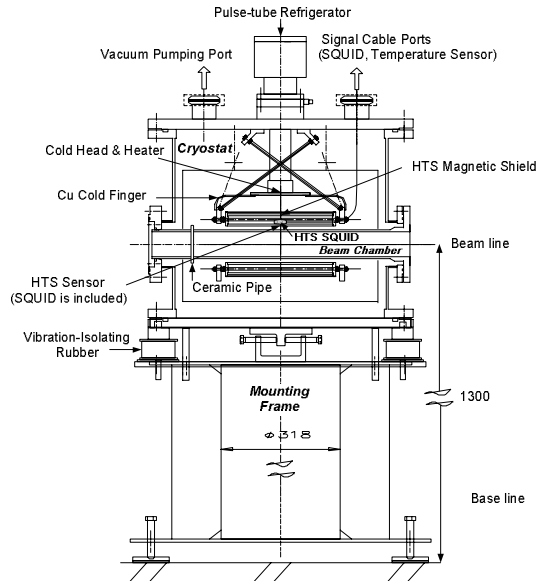


図2：プロトタイプ高温超伝導 SQUID と磁気シールドを用いた電流モニター。

向きが反対なので、インプットコイルが1つであるマグネットメーターと比べると、2倍の感度で検出することができる。グラジオメーターを採用することによって、外部ノイズ磁場が約  $1/320$  (50 dB) に減少されることが報告されている。図1(b)は、電流センサーのブリッジ部を表しており、高透磁率コアは現在まだ導入していないが、現在高感度化を目指して検討中である。

### 3 プロトタイプ高温超伝導 SQUID と磁気シールドを用いたビーム電流モニター

#### 3.1 システムの概略

現在、理化学研究所において完成した、プロトタイプ高温超伝導 SQUID と磁気シールドを用いた電流モニター(以下 SQUID モニターと略す)を図2に示す。SQUID 素子は、超伝導シールドと電流センサーの間で、なおかつブリッジ上部に設置される。図3に SQUID システムのブロックダイアグラムを示す。SQUID 素子の出力は線形ではないため、フィードバックコイルに電流を流し信号電流をキャンセルする FLL (Flux Locked loop) 回路を採用している。ピックアップコイルは SQUID 素子内にモールドされており、直接磁場を検出する。SQUID 素子とコントローラーをつなぐクライオジェニックケーブルは真空気密フランジを通して大気側と接続される。なお、信号に混入するノイズを

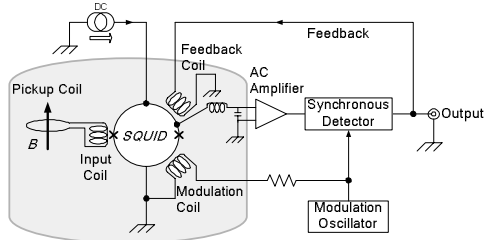


図3：SQUID システムのブロックダイアグラム。ボックスの中が低温部である。

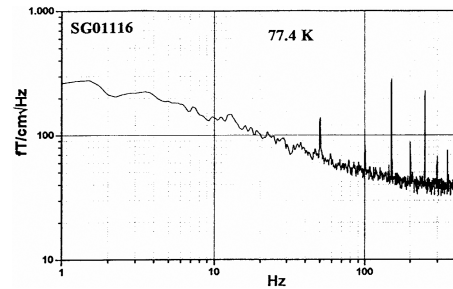


図4：実測した SQUID 素子のノイズスペクトラム

Noise level	34 fT / Hz <sup>1/2</sup> @ 5kHz
Sensitivity	486 pT / V @ ×500
Feedback gain	1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500
High pass filter	DC, 0.3 Hz
Low pass filter	5 Hz, 200 Hz, 2kHz, 20kHz
Modulation frequency	250 kHz
Date accuracy (AD)	16 bit
Date acquisition rates	20000 words / s
Remote control	IEEE-488, RS-232

最小化するために、コントローラーとフィードバック回路の間は、制御信号がデジタル化され、光ファイバケーブルを介して通信が行われている。また、SQUID 素子の基板には、何らかの原因によって磁束がトラップされた際の、磁束除去用の小さなヒーターが搭載されている。図4に実測した SQUID 素子のノイズスペクトラムを表し、表1に SQUID システムの仕様を示す。ノイズレベルは、従来の素子と比較して、非常に小さいことが解る。

シールドに関しては、超伝導とパーマロイを併用することによって、 $3 \times 10^{-5}$  T の地磁気が  $3 \times 10^{-11}$  T まで、つまり 100 万分の1に遮蔽されていることを、ヘルムホルツコイルを外部磁場として発生させ実測した。設計にあたって、磁場計算コード OPERA3D[4]を用いた計算を行い、最適化を計っている。

クライオスタット内は  $1 \times 10^{-3}$  Torr 以内の真空中で断熱され、ビームチェンバーの真空とは完全に真空が独立している。スーパーインシュレーターによって熱輻射のある部分を覆い、これは高周波ノイズのシールドも兼ねている。約 12 W (@77 K) の冷凍能力を持つパルスチューブ冷凍機が、銅製のコールドフィンガーによる熱伝導を介して超伝導体や SQUID を冷却する。SQUID 素子が受ける振動ノイズを最小限にするために、冷凍発生部に移動部品を持たない、パルスチューブ冷凍機を採用した。なお、パルスチューブ

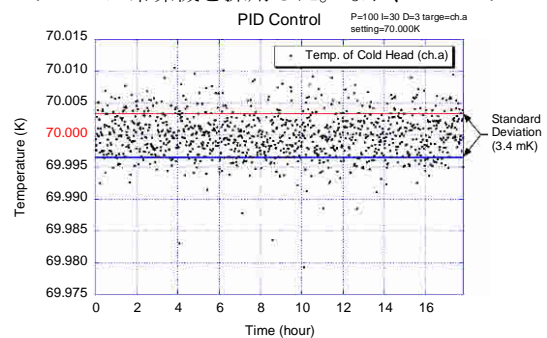


図4：PID 制御した場合の、コールドヘッドにおける温度の記録。16時間で3.4 mK 以内に制御されている。

冷凍機は 5.5 Hz のポンピング周期で作動するが、その周期を加振周波数として装置全体の固有振動数を計算し、両方の周波数が一致しないように、適切なばね定数を持つ防振ゴムを選定した。加速度計を 3 軸に取り付け、条件を変えながら振動の変位を測定したところ、数  $\mu\text{m}$  以下の結果であった。さらに、SQUID 素子は数 mK 以内の安定度が必要のため、冷凍機コールドヘッドに温度センサーとヒーターを取り付けている。温度コントローラーは、温度センサーからの温度情報をもとに、ヒーターの電流値にフィードバックをかけ、温度の安定化を図っている。高安定化の実現のために、コントローラーには PID (Proportional plus Integral plus Derivative) 制御が用いられている。SQUID 素子の温度が変化すると出力がドリフトするが、80 mK の温度変動に対する出力のドリフトは  $1 \mu\text{A}$  のビーム電流に相当することが測定された。PID 制御した場合のコールドヘッドにおける長時間の温度の記録を図 4 に示す。これにより、16 時間にわたる温度のばらつきは、標準偏差で 3.4 mK であり、これは温度計 (シリコンダイオード) の誤差程度に相当する。

### 3.2 オフライン試験

SQUID モニターチェンバー内に、直径 6 mm の銅パイプを固定し、1 Hz のサイン波のビーム模擬電流を流した。コントローラーのフィードバックゲインを、500 倍、50 倍、1 倍と変えることによってダイナミックレンジの測定を行い、その測定結果を図 5 に示す。これより、 $1 \mu\text{A}$  から 0.1 A

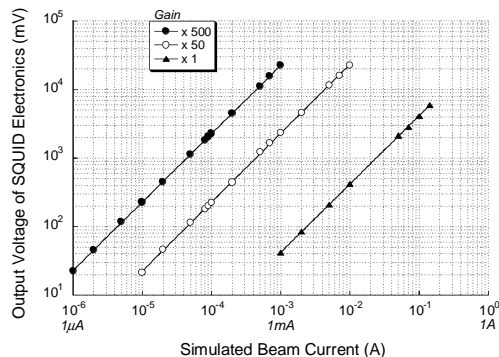


図 5 : ダイナミックレンジの測定結果。

まで 100 dB のダイナミックレンジがあることが解った。また、SQUID の温度が、69.1 K、73.3 K、80.3 K の状態で感度の測定を行ったが、いずれも感度は同じで、温度の依存性は見られなかった。また、SQUID モニターの応答性についても測定を行った。1 mA の DC 電流が 5 ms でリニアに 0 mA に立ち下がり、また 5 ms で回復するという波形 (繰り返し 5 s) データを任意信号発生器にプログラムし、模擬電流として流し、SQUID モニターが追従していることを確認した。他、模擬電流の位置および太さを変化させて電流の測定を行い、共にその依存性がないことを確認した。

### 3.3 ECR イオン源および理研リングサイクロトロン のビームを用いたビーム試験

現在、プロトタイプ SQUID モニターは、東京大学原子核科学研究センターの ECR イオン源で生成され 10 kV で引き出された  $\text{H}^+$  や  $\text{Ar}^{4+}$  ビームの測定に成功し (図 6 (a))、そ

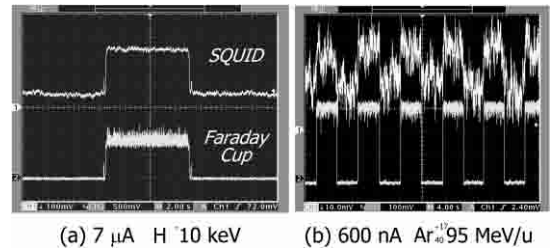


図 6 : ビームを用いた SQUID モニター (上) とファラデーカップ (下) の測定結果。(a) :  $7 \mu\text{A}$  のプロトンビーム (b) : 600 nA の  $^{40}\text{Ar}^{17+}$  ビーム。

の後理研リングサイクロトロンのビーム輸送系に移設し、600 nA の  $^{40}\text{Ar}^{17+}$  (95 MeV/u) ビーム電流の測定に成功した (図 6 (b))。図 6 では、SQUID モニター (上) とファラデーカップ (下) の測定結果を示している。ビームをパルス化して平均化を行うと、約 100 nA の電流の信号を確認できた。理研リングサイクロトロンのビーム輸送系 (E1 照射室) に設置されたプロトタイプ SQUID モニターの写真を図 7 に示す。

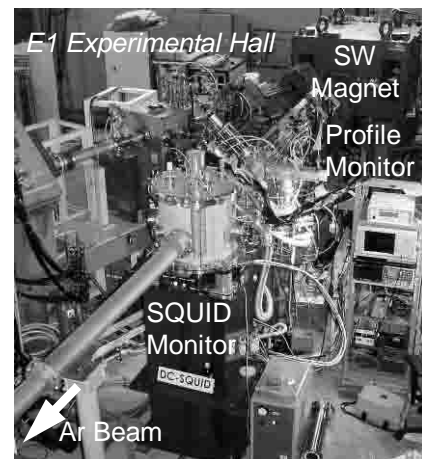


図 7 : 理研リングサイクロトロンのビーム輸送系 (E1 照射室) に設置されたプロトタイプ SQUID モニター。

## 4 今後の研究開発

加速器やイオンインプランターへの実用化を目指し、1 nA の微弱なビーム電流値を測定することを目標として、(1) 電流センサーブリッジ部における、高温超伝導のコイル化、(2) SQUID グラジオメーターにおける高透磁率コアの導入について主に研究開発を進めていく予定である。

## 参考文献

- [1] T. Watanabe, *et al.*, Proc. of 8th European Particle Accel. Conf., Paris, June 2002, 1995.
- [2] T. Watanabe *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. **36**, 2003, 331
- [2] A. Peters, *et al.*, AIP Conf. Proc. 451, 1998, 163
- [3] T. Tanabe, *et al.*, Nuclear Inst. and Methods in Phys. Research A 424, 1999, 455
- [4] Vector Fields Inc. UK.