

KEKにおける超伝導空洞のための温度・磁場マッピング装置の開発 DEVELOPMENT OF A TEMPERATURE AND MAGNETIC FIELD MAPPING APPARATUS FOR SUPERCONDUCTING CAVITIES AT KEK

岡田貴文^{*A)}、加古永治^{A, B)}、許斐太郎^{A, B)}、増澤美佳^{A, B)}、
阪井寛志^{A, B)}、土屋清澄^{A, B)}、植木竜一^{A, B)}、梅森健成^{A, B)}、
Tajima Tsuyoshi^{C)}、Poudel Anju^{C)}、
Takafumi Okada^{*A)}、Eiji Kako^{A, B)}、Taro Konomi^{A, B)}、Mika Masuzawa^{A, B)}、
Hiroshi Sakai^{A, B)}、Kiyosumi Tsuchiya^{A, B)}、Ryuichi Ueki^{A, B)}、Kensei Umemori^{A, B)}、
Tsuyoshi Tajima^{C)}、Anju Poudel^{C)}
^{A)}SOKENDAI, ^{B)}KEK, ^{C)}LANL

Abstract

The surface resistance of superconducting cavity consists of temperature dependent intrinsic resistance so-called BCS resistance and temperature independent residual resistance. The residual resistance depends on the amount of trapped flux. We are developing a system that combines temperature and local magnetic fields. This system consists of 3-axis magnetic sensors and carbon resistors as temperature sensors. We are planning to study the behavior of magnetic flux trapping during cavity cooling process. The mapping system can measure temperature and magnetic field every 10 degrees azimuthally on the exterior surface of the cavity. The measurement system uses a set of digital multimeters and multiplexer switch module by National Instrument. We have calibrated the resistance of carbon resistors as a function of temperature and carried out some experiments regarding the magnetic field expulsion behavior when the cavity transitions from normal-conducting to superconducting phase. This paper describes the mapping system in detail and the results of recent experiments.

1. はじめに

超伝導空洞は高周波抵抗が常伝導金属を用いた空洞と比較し、極めて低く、電力ロスの少ない運用が可能である。空洞の表面抵抗は、熱的に励起された準粒子によるBCS抵抗(R_{BCS})と、不純物や構造欠陥、相転移時にトラップされた磁束線などに起因する、ほとんど温度依存性を持たない残留抵抗(R_{res})に分けて扱うことができる。このうち、磁束線の残留抵抗に関する寄与は、1.3 GHzの標準的表面処理を行ったNb製超伝導空洞で、磁束密度を単位とすると、約1 n Ω /mGである[1]。しかし、近年の高Q値(High-Q)、高加速勾配(High-G)での研究による、窒素ドーピングや窒素インフュージョンといった処理を行った空洞は、いずれも、通常表面処理を行った空洞と比較し1.5倍から数倍の表面抵抗に対する磁束密度のセンシティブリティを持つ[2]。また、900度でのアニールを行うことで、トラップされる磁束を減らすことができることが報告されている[3]。さらには、冷却時において、温度勾配によって磁束が排除されることも分かっている[4]。つまり、近年の高Q値のための研究においては、磁場環境のコントロールと、相転移時の空洞にトラップされる磁束のダイナミクスの理解が必要である。現在、空洞の相転移の際の磁場分布を測定するため、磁場マッピング装置を開発しているため、その開発状況を報告する。

また、超伝導空洞は空洞の欠陥や表面状態に依存し、理想的加速勾配に達する前に局所的な発熱を経

て、クエンチを起こす。超伝導空洞の性能向上のためには、発熱箇所を特定し、その原因の除去が必要である。そのため、空洞の外側表面の温度を測定する温度マッピング装置を用いるが、KEKにおいては、基礎研究において用いられるシングルセル空洞用の詳細な温度マッピング装置はない。開発中のマッピング装置は前述の磁場マッピングに加え、カーボン抵抗温度計を用いた温度マッピングを複合させた、磁場・温度マッピング装置である。

2. マッピング装置の構成

マッピング装置のセンサー部は、発熱を測定するためのAllen-Bradley社の100 Ω カーボン抵抗を利用した温度計部と、磁束密度を測定するSensitec社の異方性磁気抵抗効果(AMR)を利用した磁気センサーAFF755Bで構成される。カーボン抵抗は、合計で540個使用し、LANLで使用されていた9セル用温度マッピング装置のカーボン抵抗を取り外して使用した[5,6]。また、AMRセンサーはHZBで、低温での使用実績があるものを選んだ[7]。センサーは基板に取り付けられ、シングルセル空洞の外部表面に沿うように配置される。Figure 1にボードデザインを示す。1つのボード当たり、15個のカーボン抵抗と、3つのAMRセンサーを実装する。AMRセンサーはシングルセル空洞の赤道部から約1.5 cmほど離れた場所に設置され、3つのAMRセンサーを用いることで、3軸の測定を行う。

* okadat@post.kek.jp

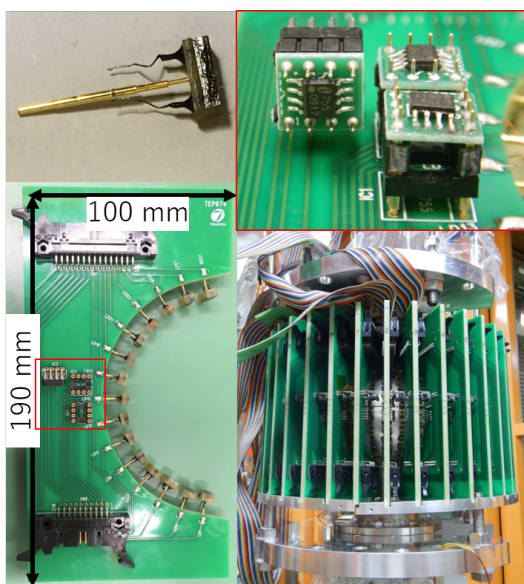


Figure 1: Upper left figure is a carbon resistor used as a temperature sensor. Upper right figure is AMR sensors. Bottom left figure is a board assembled with 15 carbon resistors and a set of AMR sensors. Bottom right figure is figure is a 1.3 GHz single-cell cavity surrounded by 36 mapping boards. The board consists 15 carbon resistors and three AMR sensors.

2.1 カーボン抵抗の温度キャリブレーション

使用したカーボン抵抗は、常温で約 100 Ω の抵抗を持つ。空洞の性能評価試験（縦測定）は約 4.2 K から約 1.5 K の温度範囲で行われるため、この領域での温度キャリブレーションを行った。実験はカーボン抵抗に 10 μA の電流を流し、その電圧を測定することで、抵抗値を求め、シリコン半導体温度計を用いて計測した温度との関係性を求めた。Figure 2 に測定値の例を示す。

関係式は、 R を抵抗値、 T を温度として、

$$\log R + \frac{K}{\log R} = A + \frac{B}{T} \quad (1)$$

を用いて、最小二乗法にて求めた。ここで、 K 、 A 、 B は任意係数である。任意係数をすべてのカーボン抵抗に対して求めることで、温度を測定することができる。

2.2 AMR センサー

使用した AMR センサーは内部にブリッジ回路を有し、端子間の電圧を測定することで、1 軸の磁気の高さを測定することができる [7,8]。Figure 3 に常温と、液体窒素温度での磁束密度のセンシティブリティの測定結果の例を示す。この測定は、3 軸の Helmholtz コイルを用いて、環境磁場を感度方向のみコントロールし、測定を行った。ブリッジ回路にかかる電圧は 5 V とし、この時の常温でのセンシティブリティはおよそ 6 mV/G であるが、低温ではセンシ

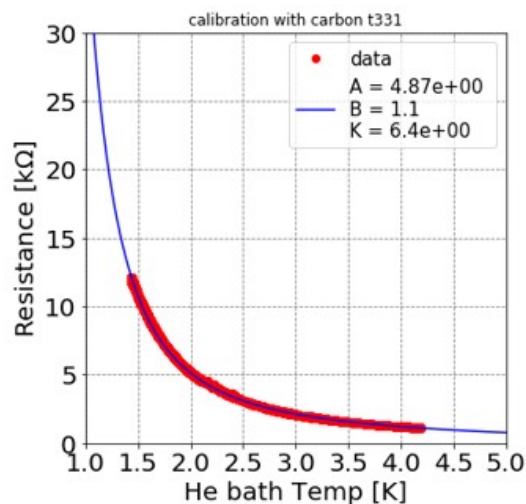


Figure 2: Resistance of a carbon resistor as a function of temperature.

ティブリティは増加し、約 16 mV/G になる。縦測定 of 空洞の冷却時、およびクエンチ時の変化は赤道部において、十数 mG ほどであるから、予想される変化は数十 μV であり、十分検出可能である。

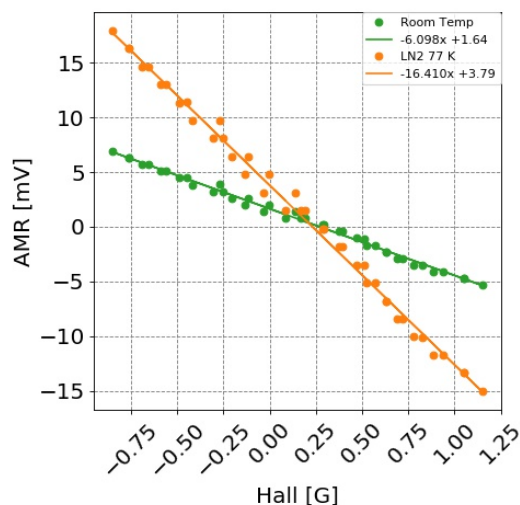


Figure 3: Output voltage of an AMR sensor as a function of magnetic field.

3. フラックスエクスパルジョン実験

超伝導空洞は、温度が相転移点を下回ると、マイスナー・オクセンフェルト効果によって、内部の磁束を排斥する。シングルセル空洞の形状から、縦測定試験における磁束密度は空洞の赤道部がもっとも大きく強められる。しかし、空洞に磁束の一部がトラップされると、その分布は変化し、赤道部で強められる磁束密度の大きさは小さくなる。フラックスエクスパルジョン実験は、空洞周りの磁束密度の大きさを相転移前後で比較することで、空洞にトラップさ

れた磁束の量を比較する実験である。空洞はラージグレイン Nb 製シングルセル空洞を用いた [9]。Figure 4 に実験のセットアップ図を示す。この図では、マッピング装置は表していないが、ボードを 10 度ずつ 36 枚配置し、AMR センサーの出力を測定した。フラックスゲートはある基準点を 0 度として、1 から 4 まで、それぞれ、345 度、65 度、155 度、255 度の位置に取り付けた。今回報告する実験は、まず、新に作成したマッピング装置の動作確認を目的として行った。

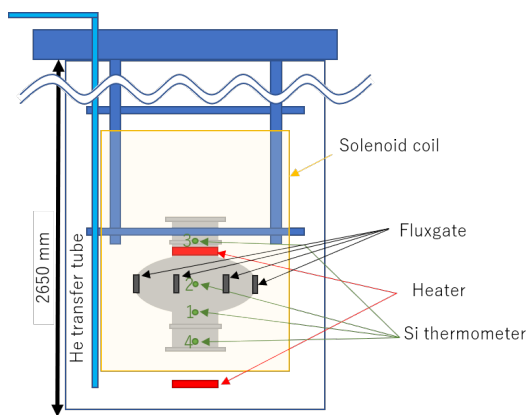
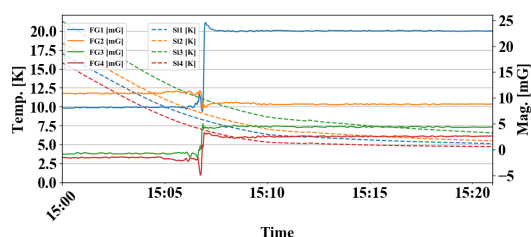


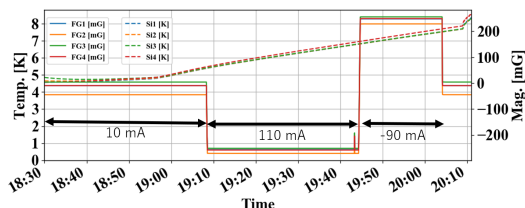
Figure 4: Locations of calibrated Silicon thermometers and Fluxgate magnetic field sensors that were used to compare with the temperatures measured with carbon resistors and the magnetic field measured with AMR sensors. The cooldown rate ΔT was defined between the temperature of the bottom beampipe iris and equator. Si 1: Bottom beampipe iris, Si 2: Equator, Si 3: Top beampipe, Si 4: Bottom flange. Fluxgate sensors were equipped every 90 degrees on the equator of the cavity. This figure does not show the mapping system.

縦測定では、空洞全体を液体ヘリウムによって浸漬冷却し、減圧することで 2 K 測定を行う。室温から冷却する際に相転移点での磁束トラップを減らす目的で、磁気シールドと地磁気方向のソレノイドコイルを用いて、空洞全体を 1 mG 以下に保つ。フラックスエクスパルジョン実験では、このソレノイドコイルを用いて、外部磁場の大きさをコントロールした。また、上部ビームパイプに取り付けたヒーターを用いながら冷却することで、空洞の空間的な温度勾配をつける。Figure 5 に、実験の温度と磁束密度の時系列データを示す。Figure 5a は相転移時の Si 温度計とフラックスゲートの測定値であり、空洞温度が相転移点を下回ると、磁束が排斥されフラックスゲートの値が変化している。

実験は、まず、ソレノイドコイルで磁場をコントロール可能な、Y 軸方向のみを対象とした。Figure 5b にあるように、ソレノイドコイルに電流をそれぞれ、+10 mA、+110 mA、-90 mA の電流を流し、その前後のフラックスゲートの差分値と AMR センサーの差分値を比較することで、磁束密度に対してのセンシティブリティを測定した。また、このセンシティブ



(a) An example of time evolution of temperature and magnetic field measured with Si thermometers and fluxgate sensors.

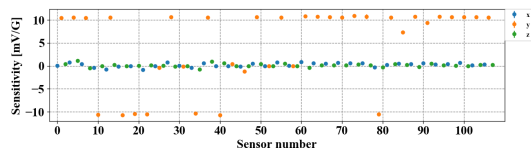


(b) Measurement of magnetic flux density sensitivity of AMR sensors.

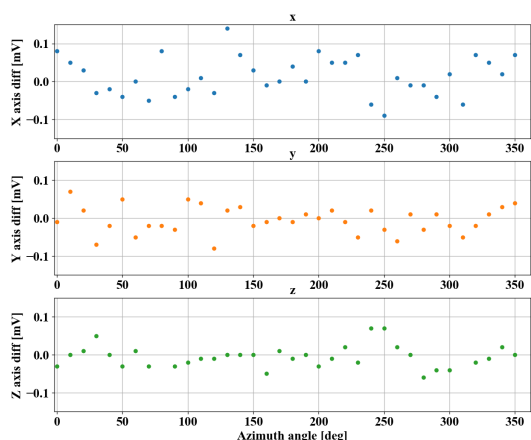
Figure 5: The experiments time-series data.

ティの値を用いて、Fig. 5a での相転移前後での AMR センサーの値を比較し、磁束密度の値に変換することで、AMR センサーとフラックスゲートの値を比較した。

4. 結果



(a) Result of magnetic flux density sensitivity of AMR sensors.



(b) Change in the output voltage of AMR sensors during the superconducting transition in 3 directions.

Figure 6: Test results of the sensitivity of AMR sensors and superconducting transition.

まず、Fig. 6a にソレノイドコイルの電流値を変え

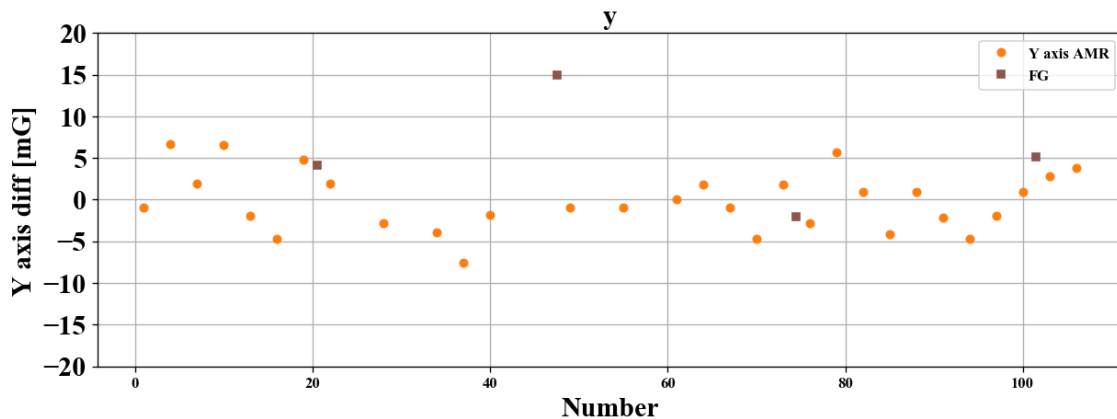


Figure 7: Y-axis magnetic field profile measure with AMR sensors compared with the readings of fluxgate (FG) sensors.

たことによるセンシティブリティ測定の結果を示す。横軸は、 x, y, z の順かつ、0度から360度まで、AMRセンサーごとに0から107までの番号を割り振り、その番号である。 y 軸センサーは番号 $n(\text{mod}3) = 1$ である。ほとんどのセンシティブリティは約10 mV/Gであった。 Y 軸方向のAMRセンサーの中で、センシティブリティがゼロのものがあるため、セットアップの間違いと考えられるため、確認を行う予定である。Figure 6bはFig. 5aの相転移前後のAMRセンサーの差分である。これらを用いて、 Y 軸方向の相転移前後でのAMRセンサーの出力を磁束密度の値にキャリブレーションし、フラックスゲート(FG)の値と比較したものをFig. 7に示す。

この結果から、フラックスゲートの値とAMRセンサーは、FG1が大きく外れているが、FG2, FG3, FG4に関しては一致している。以上の結果から、新しく構築している温度・磁場マッピング装置のAMRセンサーは、空洞外部の磁束密度測定装置として機能する。今後、このマッピング装置を用いて、空洞の磁場分布の測定を行う予定である。

5. 考察と今後の進め方

今回、超伝導シングルセル空洞に対しての、温度・磁場マッピング装置の開発状況と、フラックスエクスパルジョン実験を通じたマッピング装置の評価を行った。AMRセンサーのセンシティブリティの大きさは、ばらつきはほとんどないが、符合の逆転や、センシティブリティが著しく小さいものなどがあった。前者は、配線の間違いが原因と考えられ、後者はフリップコイルを用いた磁化が不十分であったと考えられる[8]。したがって、今後はマッピング装置の信頼性の向上のため、システムの改良を行う。また、今回は、マッピング装置としてはAMRセンサーの評価のみにとどまったため、今後、カーボン抵抗を用いた温度マッピングを縦測定に対して、行い。本来の目的である温度と磁場分布の定量的評価を行えるよう精査する。また、今回はラージグレイン空洞を用いたが、窒素ドーピングやほかのファイングレイン空洞などを用いることで、磁束と温度の関係の理解を

深めるとともに、空洞性能向上のため、発熱箇所の同定および除去を目的とする。

謝辞

マッピング装置構築にあたり、基盤を作成していただいたツジ電子の方々と、構築を協力していただいた日本アドバンステクノロジーの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] M. Checchin *et al.*, “Frequency dependence of trapped flux sensitivity in SRF cavities”, *Phys. Rev. Lett.*, vol 112, p. 072601, Feb. 2018.
- [2] Dan Gonnella *et al.*, “Impact of nitrogen doping of niobium superconducting cavities on the sensitivity of surface resistance to trapped magnetic flux”, *J. Appl. Phys.*, **119**, 073904 (2016).
- [3] S. Posen *et al.*, “Efficient expulsion of magnetic flux in superconducting radiofrequency cavities for high Q0 applications”, *J. Appl. Phys.*, **119**, 213903, (2016).
- [4] A. Romanenko *et al.*, “Dependence of the residual surface resistance of superconducting radio frequency cavities on the cooling dynamics around T_c ”, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 234103 (2014).
- [5] A. Canabal *et al.*, “Full Real-time Temperature Mapping System for 9-cell ILC-type Cavities”, in *Proc. EPAC’08*, Genoa, Italy, Jun. 2008, paper MOPP121, pp. 841–843.
- [6] T. Tajima *et al.*, “Full Temperature Mapping System for Standard 1.3 GHz 9-Cell Elliptical SRF Cavities”, in *Proc. PAC’09*, Vancouver, Canada, May 2009, paper WESPFP036, pp. 2073–2075.
- [7] B. Schmitz *et al.*, “Magnetometric mapping of superconducting RF cavities”, *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 89, p. 054706, 2018.
- [8] https://www.sensitec.com/fileadmin/sensitec/Service_and_Support/Downloads/Data_Sheets/AFF700_800/SENSITEC_AFF755B_DSE_06.pdf
- [9] T. Kubo *et al.*, “IN-HOUSE PRODUCTION OF A LARGE-GRAIN SINGLE-CELL CAVITY AT CAVITY FABRICATION FACILITY AND RESULTS OF PERFORMANCE TESTS”, in *Proc. IPAC’14*, Dresden, Germany, June 2014, paper WEPRI022, pp. 2519–2521.