

ニオブの超伝導状態における磁束トラップの測定

THE MEASUREMENT ON MAGNETIC FLUX TRAPPING OF SUPERCONDUCTIVE NB

Deng Weichao[#], 岩下 芳久, 頓宮 拓, 宮脇 瑛介, 山崎 祐希, 竹内 佑甫

Weichao Deng[#], Yoshihisa Iwashita, Hiromu Tongu, Eisuke Miyawaki, Yuki Yamazaki, Yusuke Takeuchi

Institute for Chemical Research, Kyoto University

Abstract

Niobium (Nb) belongs to Type-II superconductor. During cooling down, at superconducting transition, Nb material may trap magnetic flux if there is magnetic field around. This phenomenon degrades the Q value of superconducting accelerator cavity. In this measurement, we used an Nb cup (approximately 41 mm radius and 55 mm height), which is the part of the HOM coupler for 9-cell superconducting cavity. The cup before anneal was set into a Cryostat. A magnetic field sensor (Bartinton Instrument Single Axis Fluxgate) was set inside the cup. Two coils were placed near the cup. By using liquid-He in the cryostat, the cup is cooled down under the critical temperature of Nb(9.2K). The external magnetic field around the cup can be controlled by adjusting coil currents. The magnetic field variations in the cup were measured around the critical temperature. The measurement results of the magnetic flux trapping are reported.

1. はじめに

加速器空洞に用いられる HOM カプラー[1]のカップを使って、磁束トラップ現象の測定をした。Nb は第二種超伝導体のため、超伝導臨界温度 T_c 以下でも、超伝導体内に外部磁束の一部を侵入させ、捕捉する。[2] 超伝導加速器を運転するとき、磁束トラップ現象によって、Q 値(加速空洞内で共振している電磁場のエネルギーと発熱などによって失われていくエネルギーの比)の上昇や運転経費の浪費となるため防ぐべきである。防ぐために有効かつ実現できる方法で磁束トラップ量を減少させる必要がある。その目的のため、まず外部磁場、温度によって磁束トラップの変化特徴を解析したい。本測定は、Nb カップにおいて、磁束トラップの測定及び磁束トラップ削減方法を探る。

2. セットアップと測定方法

測定装置は Figure 1 と Figure 2 のように、銅板のステージに設置後、真空にし、クライオスタットに入れた後、液化 He を注入し、セットアップは完了する。

コイルは二つ同時装着している。コイル小は外部磁場を小まめに变化できる。コイル大は広く均一な磁場を発生できる。コイル(小)は巻き数は約 100 巻、外径約 80mm、厚み約 4mm である。コイル(大)は 0.2mm 直径の銅線を使用し、コイルを巻く円筒の側面の両端から 6mm を空き、その次の 10mm に 250 巻き、残した真ん中の 45mm に 225 巻き(円筒の側面に高さが 77mm、巻き数が計 725 巻き)のコイルを造った。Pandira によって(Figure 3)中心部は近似的に均一磁場となる。磁気センサーは Bartington Instrument Mag-01H Single Axis Fluxgate、温度センサーは Model 18i Cryogenic Temperature Monitors、電流入力(ヒーター、コイルの電力提供側)は Laboratory Dc power supply MP10-TPL

Series と Kikusui model PAB 18-1.8A Regulated DC power supply を用いた。電流の入力によって、外部磁場やヒーターの強さが変えられ、その後、目測やカメラを使って各センサーからデータを読み取る。全ての実験ではアニールされていない Nb カップが使用されている。

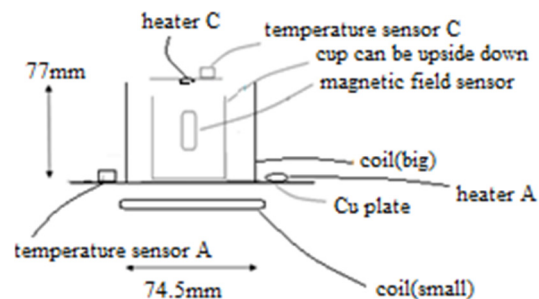


Figure1: Experiment device.

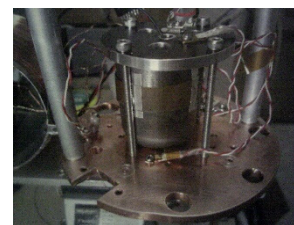


Figure 2: Experiment device (photo).

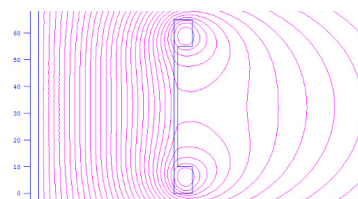


Figure 3: Magnetic field of coil (big) in pandira simulation.

[#] deng.weichao.85x@st.kyoto-u.ac.jp

3. カップが上向きと下向きの磁束トラップ測定

まずはアニールされていない Nb カップを使ってカップ口の上向きと下向きのトラップ効果を測定した。

3.1 口が下向きするとき

Figure 4 の斜線の傾きは $0.4972\mu\text{T}/\text{mA}$ 、背景磁場は $6.355\mu\text{T}$ 、図から見ると、電流と外部付加磁場の線形性が成り立ち、この傾きによって、電流と外部磁場の関係が分かり、電流→外部磁場の換算ができる。これからの外部磁場(コイル大、コイル小)もこのような線形関係が成り立っているので、常にそれぞれの係数で換算ができる。Figure 5 の場合、 $B_{\text{ext}}=0.50(\mu\text{T}/\text{mA})I+6.36(\mu\text{T})$ 。測定過程として、まず 9.5K に昇温しておき、 $60\mu\text{T}$ 程度を掛けておく(①)。次に、 $-40\mu\text{T}$ まで外部磁場を下げ、常伝導状態であることを確認した(Nb の超伝導転移温度 $T_c = 9.2\text{K}$ 。)次に 8.5K まで冷やし(②)、その後電流を -100mA から 100mA まで増加させた(③)。この間、 B_{cup} は $-40\mu\text{T}$ に維持され、磁束トラップ及び遮蔽現象を確認した。③からは heater A を使って昇温させ、 9.5K に戻したところ、 B_{cup} は $60\mu\text{T}$ に戻った。④は①の再現で常伝導状態は再び確認した。斜線の 0 点にずれがあるが、電源の設定精度が $\pm 1\text{mA}$ 程度で、実際コイルが発生した磁場は数値通りに発生していないためである。

3.2 口が上向きするとき

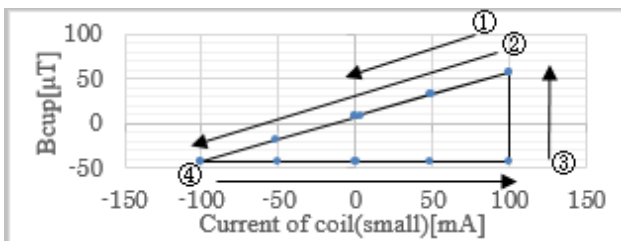


Figure 4: Relation between B_{cup} and current of coil. (Cup is downward)

カップが下向きの時、まだコイル大は追加されておらず、コイル小はカップと若干距離の遠い位置にある。口を上向きにした実験から、コイル大が追加され、コイル小の位置は磁場センサーに近くなったが、線形関係は依然存在する。カップ磁場と電流の傾きは $0.853\mu\text{T}/\text{mA}$ 。

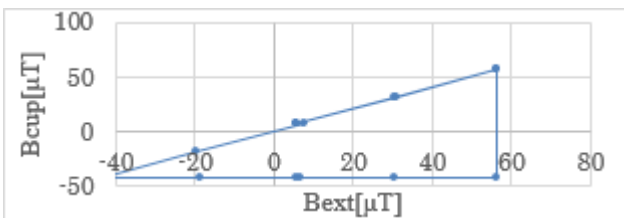


Figure 5: Relation between B_{cup} and B_{external} . (Cup is downward)

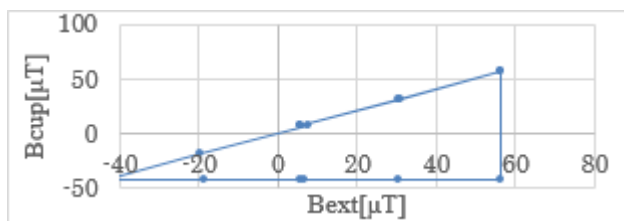


Figure 6: Relation between B_{cup} and B_{external} .

外部磁場に換算後、Figure 6 の結果が得られる。

結果的に、カップの口が上向き下向きでも、磁束トラップ現象が存在し、Figure 5 (下向き) と Figure 6(上向き)からの違いは見られない。

4. カップの口と底に温度差の影響

カップの口を上向きにして実験を行い、カップの口とカップ底部間の温度差を付けたまま冷やして磁束トラップの変化を測定した。まず、Table 1 のようにある程度外部磁場をつけた後温度制御によって、カップの口と底に温度差を付けたまま 9.2K 以下に冷やし、その後、外部磁場を切り、磁束トラップの変化を見た。結果から見ると、カップの温度差つけたままでも外部磁場より低い磁束トラップは観測されなかった。冷却経過時間は十数秒程度。温度差の度合いは足りない可能性もあるが、カップの口と底の間の温度差を付けることによって、磁束トラップを減らすことは困難と考えられる。

5. 強い外部磁場による磁束トラップ変化

カップの口を上向きにして、次の実験を行った。まず

Table 1: Cool Down with Temperature Difference between Nb Cup's Bottom and Top ($T_{\text{bottom}} < T_{\text{top}}$)

B_{cup} [μT]	Temperature sensor A (bottom) [K]	Temperature sensor C(top) [K]	Temperature difference [K]	B_{cup} [μT] (After cool down)
63.1	9.45	10.15	0.7	63.35
43.23	9.57	10.56	0.99	43.43

背景磁場約 $8\mu\text{T}$ の環境で、カップを 9.2K 以下に冷却した。次にコイル大に流す電流を調節し大きい外部磁場を 10 数秒ほど連続にかけ、その後外部磁場を切り、全過程のカップ磁場、温度、時間データをカメラによって記録した。大きな外部磁場 (パターン 1 外部磁約 $6670\mu\text{T}$ 、

パターン 2 は $12900\mu\text{T}$ 、パターン 3 は $20400\mu\text{T}$ 、この結果はコイル(大)の線形関係と当時の背景磁場によって計算される。 $B_{\text{ext}} = 6.66I + 8.65 (\mu\text{T})$ によって Figure 7 のように三つの磁場の時間発展パターンが観測された。

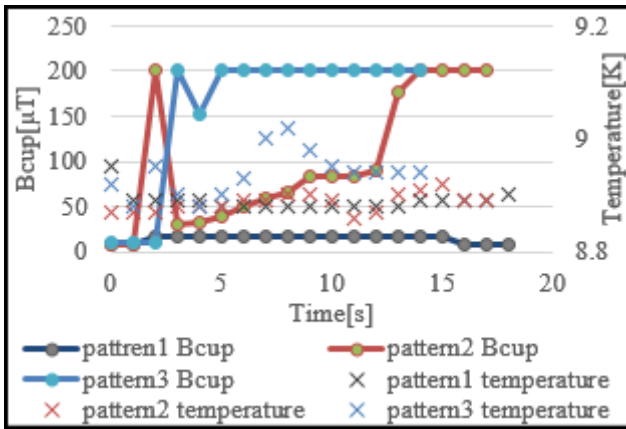


Figure 7: 3 patterns of magnetic flux trapping changed by strong external magnetic field. (Time revolution)

また、磁場センサーの測定レンジは $200\mu\text{T}$ であるため、 $200\mu\text{T}$ に張り付いた値の部分はそれ以上になっている。

パターン 1: カップ内部の磁場は外部磁場($6670\mu\text{T}$)を加えたとき、増加したが、外部磁場を消した後、元の値に戻る。カップ内部に磁場はトラップされない。

パターン 2: カップ内部の磁場は外部磁場($12900\mu\text{T}$)によって、徐々に上昇し、その後、外部磁場を切っても、カップ内部にトラップされた磁場は維持される。元に戻らない。

パターン 3: カップ内部の磁場は外部磁場($20400\mu\text{T}$)によって、跳ね上がり、その後、外部磁場を切っても、カップ内部のトラップされた磁場は維持される。元に戻らない。

結果的にカップ内部にトラップされた磁場は印加する外部磁場によって変わった。

パターン 2、パターン 3 の最初のピークはカップ温度が T_c 以上でも発生したことから、これはステップ状の磁場印加による磁場センサーモニターの過度応答特性と考えられる。この実験結果の状況の把握は、磁場の計算のシミュレーションをすればある程度推測できると考えられる。また、パターン 3 の磁場の強さは、 B_{c1} (臨界磁場 1)の強さに近い[3]。

6. 外部磁場によるカップ内の磁場の消去

次の実験はカップが上向きで行った。まず $69\mu\text{T}$ 程度の外部磁場を印加した状態で、温度を 9K 以下に下げて、大コイルを使い、Figure 7 のパターン 2 の特徴を表すほどの強度(外部磁場の大きさは $3800\sim 5400\mu\text{T}$ 程度)で交互に(正負)に大きい磁場をかけ、磁場センサーの値を変化させてみた。最初の磁場印加の時間十数から数十秒の長さで、そして終了に近い時点で意図的に印加する時間を減らし、磁場センサーの読みを 0 に近い値に接近させた。得た状況は Figure 8 のように、磁場センサー

の値は外部磁場により変化し、うまくコントロール出来れば、削減される。最終的に 15 回目に磁場センサー

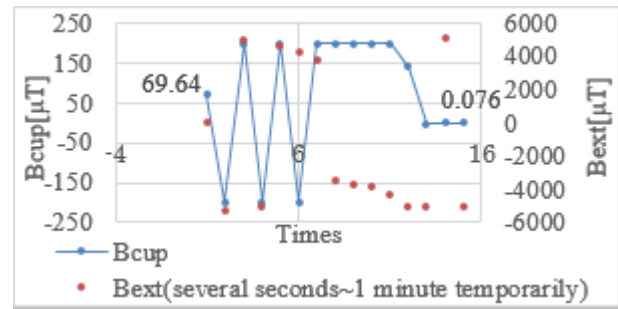


Figure 8: Bcup changed by temporarily strong Bext.

の値は $0.076\mu\text{T}$ までに減少した。これらの過程中、温度は 9.05K から 9.14K までの範囲にあった。

磁場センサーの出力値は消されるが、磁場の計測が出来ないと、この方法は適応できない。また、空間的に一点でしか測っていないので、Nb カップの磁束トラップが無くなっているかどうかは確認できない。壁面至る所で正負のトラップがあつて、縞模様のようになり壁面から少し離れたところで、小さくなっているだけかも知れない。いずれにしてもクライオモジュールの中でこのような磁場をかけると他のものが磁化する可能性があるため、非現実的かも知れない。

7. 一時的な外部磁場による変化量

次の実験もカップが上向きで行った。背景磁場はステージが 0cm (クライオスタート中の調節できる一番底の位置)で $-3.2\mu\text{T}$ と 30cm で $-3.4\mu\text{T}$ 程度である。この実験は磁場センサーを中心から 1.5cm ずらして壁面近傍の磁場を測定するようにした。

初めに背景磁場のまま 9.2K 以下に冷やし、 30cm の位置で磁場センサーの値を変化させるほど大きな外部磁場($10^4\mu\text{T}$ スケール)を 3 秒ほど一回でパルス的にかける。カップ内部の磁場の変化が落ち着くまでかけ続けた。3 秒の理由はコイル大の発熱で温度が上がるので、温度をある範囲に維持するためである。ある温度範囲に一定値の外部磁場をパルス状でかけることによって、磁場センサーはある値に止まって、これ以上変化なかった。またこの時、外部磁場の向きを逆にし、同じ印加方法で、磁場センサーの値は逆方向に増やすと、またある値に止まった。この時の特徴は Figure 7 のパターン 1 と似ているが、磁場センサー外部磁場を切った後、不変ではなく、僅かに変化する。変化後の値を Figure 9 に示す。その後、液体ヘリウムの減少に伴い、ステージを 0cm までに移動させた。すると、理由は分からないが、磁場センサーの値は $0.7\mu\text{T}$ に上がった。つまり、位置の変化によって、磁場センサーの値が変わった。その後、数個のデータを記録した。

結果的にある温度範囲内に同じ外部磁場によって、磁場センサーの変化可能な値はある範囲にあることが確認された。しかし、その範囲の中心部の位置は $0\mu\text{T}$ の近傍にあるが、背景磁場との関係性は明確ではない。

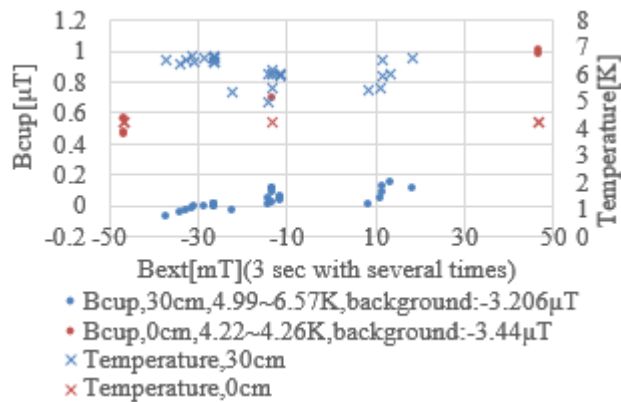


Figure 9: Bcup's variation limitation by same Bext and Temperature. (30cm&0cm)

また 9.2K 以下でも位置の変化で磁場センサーの量は変化する。一方、Figure 10 のように、磁場センサーを 0.0001 μ T 以下の値にすることは出来た。

一方 Figure 9 から、ある一定の傾きが見える。これはカップの中心から側面に 1.5cm ほどずれの位置の測定結果であった。シミュレーション(Figure 11)からによると、Tc 以下に外部磁場の影響で、カップの外側の口の周り部分が著しく磁場密度が高くなる(最大は常伝導状態の 3 倍以上)。この傾き(磁場センサーの読みのと外部磁場の比例)の存在は、口部分の磁場侵入が原因だと考えられる。

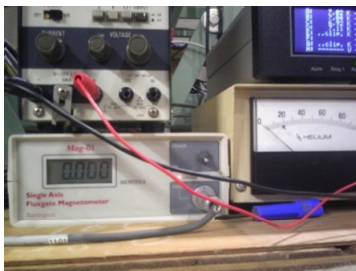


Figure 10: Nb cup's magnetic field decreased to under 0.001 μ T.

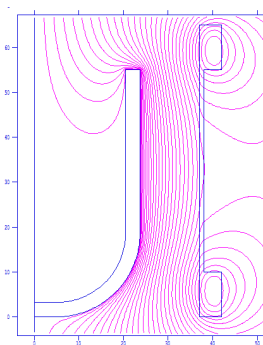


Figure 11: Magnetic field of coil (big) with Nb cup in pandira simulation.

8. 考察

8.1 実験の制限

観測したのはカップの中央部辺り一点だけで、磁束トラップの参考情報にはなるが、Tc 以下で強い外部磁場により変化させた磁場センサーの値は、磁束トラップの実際値を反映するとは限らない。むしろ印加以前より Nb 内部の磁束トラップがより強くなる可能性が存在する。コイル(大)の発熱によって、温度はあまり定かではないので、温度データの精度は高くない。また Table 1(温度センサーA, C のデータを取っている)以外の温度データは温度センサーA の値のみを取っており、温度センサーA はカップとある距離が離れているため、カップの温度を十分反映していない可能性がある。

8.2 将来性

実験したのはアニールされていない素材であり、アニール後のカップのデータから有意義な情報が得られる可能性がある。ゆっくり冷やしながら、外部磁場の交替印加によって、非観測的に磁場センサーの値を消去できないか確かめたい。大きいスケールの磁場センサーや複数の三軸精密磁場センサーによる測定が望ましい。この磁場値の消去方法は将来的に低い磁場環境が作りたいときに役に立つかもしれない。

9. まとめ

磁束トラップは加速空洞の Q 値低下を招く。空洞モデルを簡略化し、クライオスタットに Nb カップ、磁場、温度センサー、ヒーター、磁場発生コイルを設置し、磁束トラップ現象の観測し、磁束トラップの消去方法が模索された。カップ口と底に温度差をつけたまま冷やしても、磁束トラップの減少は見られなかった。またカップ内の一点の磁場を測りながら外部磁場を調整することによって 0.0001 以下に削減可能なことを確認した。

謝辞

Bartington Instrument Mag-01H Single Axis Fluxgate は KEK の増澤先生からお借りしました。長期間お貸し戴いており感謝します。この研究は京都大学化学研究所の共同利用・共同研究プログラム(2016-8, 2017-8, 2017-9)の助成を受けています。

参考文献

- [1] T.Watanuki, Status of the 9-Cell Superconducting Cavity Development at Hitachi;
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/THPS/THPS091.pdf
- [2] Peter Moeck, Superconductivity, p17;
<http://web.pdx.edu/~pmoeck/lectures/312/supercon.pdf>
- [3] K.Saito, Critical Field Limitation of The Niobium Superconduction RF Cavity, p584;
<https://accelconf.web.cern.ch/accelconf/srf01/papers/ph003.pdf>