

走査SQUID顕微鏡による超伝導ニオブ加速空洞の表面抵抗の起源の解明

Study on origin of surface resistance of superconducting Niobium accelerating cavity by scanning SQUID microscope

概要 Outline

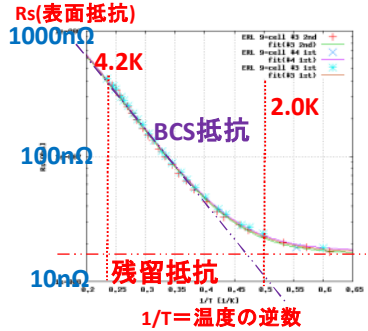
超伝導加速空洞は加速器にて荷電粒子を加速するために用いられるが、その表面損失はヘリウム冷凍機の負荷に繋がる重要なパラメーターである。表面抵抗の原因の一つとして冷却時の周辺磁場の捕捉が寄与していること、材料や冷却方法に大きく依存することがわかってきたが、いまだ詳しいメカニズムが解明されていない。その表面抵抗の起源を解明し、より表面抵抗の少ないニオブ材料の開発および最適な冷却方法の確立を目指す。

超伝導空洞の表面抵抗

$$R_s = R_{BCS}(T, E_{acc}) + R_{res}(T, B_{trap}, E_{acc})$$

$$= R_{BCS}(T, E_{acc}) + R_{flux-trap}(B_{trap}, E_{acc}) + R_0$$

$$R_{BCS}(T, E_{acc}) = A(E_{acc}) \frac{\omega^2}{T} \exp\left\{-\frac{\Delta(E_{acc}) \cdot T_c}{kT_c} \cdot \frac{T_c}{T}\right\}$$

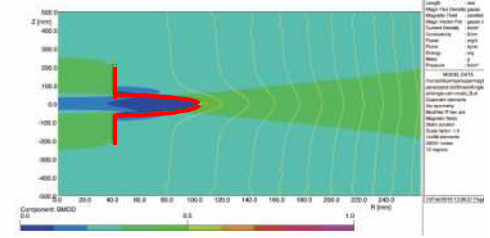


超伝導空洞の特徴と表面抵抗

- 超伝導空洞は、表面損失が小さい事が特徴
- ただし、冷却のためにヘリウム冷凍機を必要とする。
- 超伝導空洞の表面抵抗はBCS抵抗と残留抵抗からなる。⇒ 表面抵抗を低減することはヘリウム冷凍機の負荷を減らすこと
- 残留抵抗は、主に超伝導空洞の冷却時に周辺磁場をトラップすることにより生ずる。
- ニオブは第2種超伝導体であり、磁束捕捉の影響が大きい。
- ニオブ表面への磁束捕捉が鍵を握るが、そのメカニズムはあまり解明されていない。

Single cell の場合の磁束排除(計算)

Bz = 0.3 G として計算

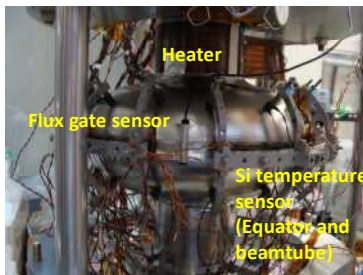


Cell 外表面の磁場 Bz = 0.496 G
(R = 106.6 mm, Z = 0 mm) : cell から 0.5 mm 外の位置
Cell 内部の磁場 Bz = 0.1335 G (R = 0, Z = 0)

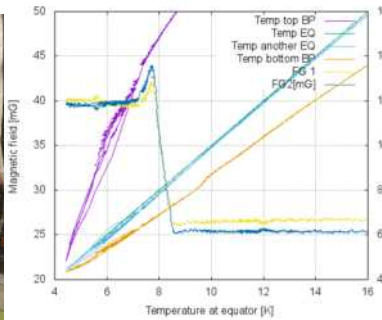
理想的には赤道部の磁場が冷却の前後で 0.496/0.3 = 1.65倍 となる。

超伝導空洞冷却時の磁束排除の観測

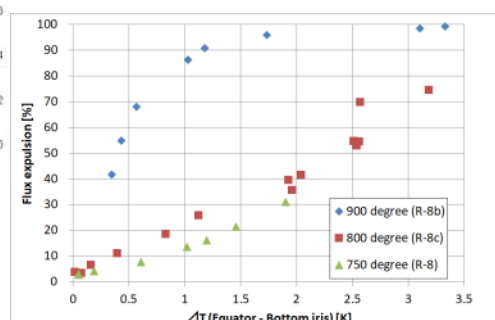
実験セットアップの例



フラックスゲートセンサーにて磁束の測定。コイルで空洞表面の磁場を制御しながら、ヒーターにて空洞表面に温度勾配をつける。温度勾配はSi温度計にてモニターする。



冷却時の磁束排除の様子
9K付近で、赤道部での磁束のジャンプが観測される。

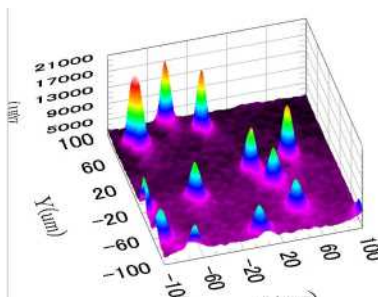


磁束排除の効率は以下の条件に依存する。

- 空洞の熱処理温度
- 冷却時の空洞表面の温度勾配

※ 900度の熱処理にて劇的な変化を示す。

ニオブ材料の観測



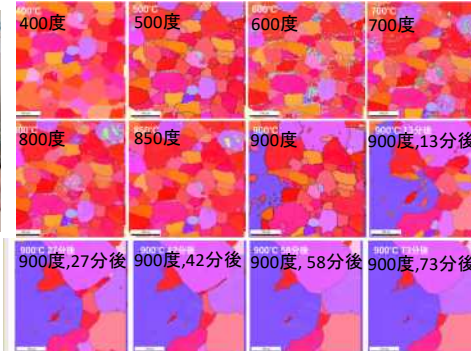
走査SQUID顕微鏡を用いて、ニオブ表面での磁束捕捉を観測し、メカニズムの解明に繋げていく。

電解研磨したニオブ表面を走査SQUID顕微鏡にて観察した例。表面に捕捉された磁束が見える。



EBSD (電子後方散乱回折法) による、ニオブサンプル加熱中の結晶方位解析を行った。

※ 850~900度にかけての結晶粒の変化が観測された。
⇒ 現象を理解する上での大きなヒントとなる。



今後の展望と課題

- 【空洞実験】ニオブ材料や冷却方法に起因した磁束排除の測定および表面抵抗の評価から、体系的な理解を深める。
- 【サンプル実験】様々な熱処理温度または、大粒界/小粒界のニオブを用いて、磁束捕捉しやすい場所、条件を探し出す。
- 【表面観察】磁束を捕捉しやすい場所、しづらい場所の特徴を観察する。
- 【シミュレーション】実験データをシミュレーションで再現し、起こっているメカニズムを理解する。また最適な条件探しを行う。