

新博士紹介

氏名 井藤 隼人*
(高エネルギー加速器研究機構)

論文提出大学 総合研究大学院大学

学位種類 博士(理学)

取得年月日 2020年3月24日

題目 超伝導加速空洞のための積層薄膜構造による磁束侵入磁場向上に関する研究 (Improvement of vortex penetration field by laminated thin-film structures for superconducting radio-frequency cavity)

1. はじめに

超伝導加速空洞のさらなる高加速勾配化のために、積層薄膜構造というアイデアが提唱されている。積層薄膜構造では、空洞内面に超伝導体や絶縁体を100 nm オーダーの厚さで層状に形成し、超伝導加速空洞の母材であるニオブ (Nb) を GHz オーダーの表面磁場から保護することで磁束侵入磁場 H_v を向上させ、高加速勾配化を実現する。本研究では、この積層薄膜構造による H_v 向上の原理実証として、超伝導体層に NbN、絶縁体層に SiO_2 を用いた NbN- SiO_2 -Nb 構造や、絶縁体層を用いない NbN-Nb 構造を板状 Nb サンプル上に形成し、様々な NbN 層厚さにおいて H_v 測定を行うことで、その NbN 層厚さ依存性を評価した。また Nb_3Sn を用いた積層薄膜構造を目指して、従来の Sn 熱拡散法による Nb_3Sn 形成とは全く異なる電気メッキ法による Nb_3Sn 形成のアプローチを試み、形成した Nb_3Sn に対して臨界温度 (T_c) 測定や走査型電子顕微鏡 (SEM) による観察、 H_v 測定を行うことで、その超伝導加速空洞への応用可能性を探索した。

2. H_v 測定装置

本研究では板状の積層薄膜サンプルに対して片面に局所的に磁場を印加し、 H_v を正確に評価

するための H_v 測定装置を KEK に構築した。本測定装置では、サンプル直上に配置した外径 5.10 mm の微小ソレノイドコイルを用いてサンプルへの 1 kHz 交流磁場の印加と磁束の侵入によるサンプル表面の遮蔽電流の歪みの検出 (三次高調波: 3 kHz) を同時に行う。サンプルはクライオスタット下部に貯めた液体ヘリウムを用いて銅板を介した伝導冷却によって 4.2 K まで冷却される。その後、銅板上部に取り付けられたヒーターを用いてサンプルの温度上昇をコントロールする (図1)。

3. 積層薄膜サンプルの H_v 測定結果

NbN 層厚さの異なるそれぞれ7つの NbN- SiO_2 -Nb サンプルと NbN-Nb サンプルに対して H_v 測定を行い、その NbN 層厚さ依存性を評価した。測定サンプルはアルバック社の DC マグネトロンスパッタリング装置を用いて製作した。

NbN- SiO_2 -Nb サンプルの測定結果として、NbN 層の異なる厚みのすべてにおいてバルク Nb と比較して H_v の向上を確認し、0 K における H_v 推

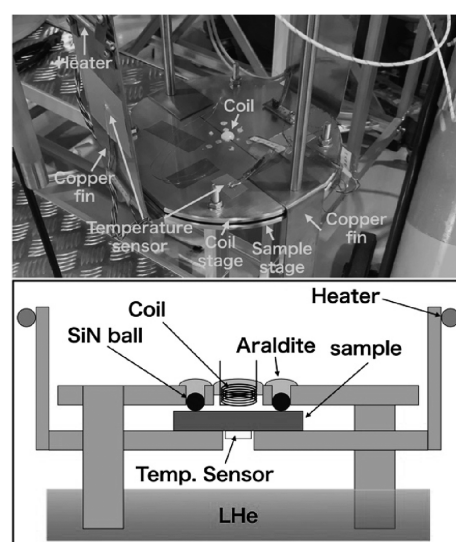


図1 H_v 測定装置のセットアップ。

* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization

(Hayato Ito E-mail: hayato.ito@kek.jp)

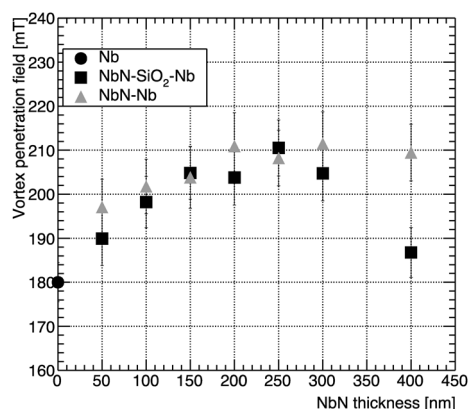


図2 NbN-SiO₂-Nb サンプルの H_v 測定結果と理論曲線との比較.

定値の最大値は17%の向上を示した. また0 Kにおける H_v 推定値と NbN 層の厚さの関係から, 150~300 nm の領域に NbN 層の最適な厚さが存在することを明らかにした.

NbN-Nb サンプルの測定結果としては, NbN-SiO₂-Nb サンプルと同様にすべてのサンプルで H_v の向上を確認し, 0 Kにおける H_v 推定値の最大値は18%の向上を示した. 0 Kにおける H_v 推定値と NbN 層の厚さの関係から, NbN 層厚さ400 nmの測定点に関して NbN-SiO₂-Nb サンプルとの顕著な違いが見られた(図2). 今後の実験で, より詳細な検証を計画している.

4. Nb₃Sn 成膜結果

Nb₃Sn は T_c や過熱臨界磁場 (H_{sh}) の高さから Nb に替わる有力な超伝導加速空洞の材料として盛んに研究が行われている. 本研究では, 電気メッキ法による Nb₃Sn 形成試験を行い, 約10 μ m 厚さの Nb₃Sn 層を形成することに成功した(図3). T_c 測定では17.5 K でシャープな転移を示し, 良質な Nb₃Sn 層が形成されていることを確認した. また Nb₃Sn 層表面に存在するブロンズ層に関しては, 王水を用いた化学処理で除去できることを明

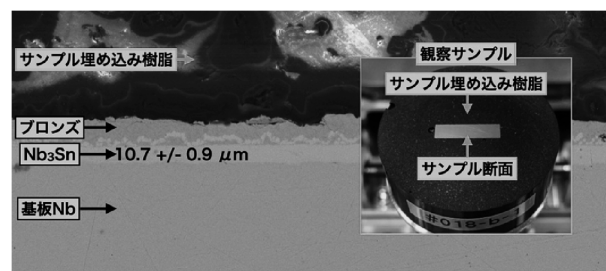


図3 Nb₃Sn サンプルの SEM 断面観察結果.

らかにした. H_v 測定では, 様々な三次高調波信号の変動が重ね合わされたような三次高調波応答が測定されたため, H_v を評価するまでには至らなかった. 測定後の表面分析で, サンプル表面に Nb と Nb₃Sn の両方が確認されたことから, サンプル表面に単一の Nb₃Sn 層を形成するためのメッキ条件の見直しが今後の課題であると結論づけた.

以上の結果から, 電気メッキ法による Nb₃Sn 形成プロセスにおいて, 超伝導加速空洞への応用可能性が十分にあることを示した.

5. これから

筆者は現在, KEK 応用超伝導加速器センターに所属し, 引き続き超伝導加速空洞の高性能化のための研究に従事している. 特に, N-dope や low-temperature baking と呼ばれる処理により高 Q 値と高加速勾配を同時に実現することが目標である. また, 博士論文の研究成果を踏まえた NbN や Nb₃Sn による積層薄膜構造の研究に関しても引き続き注力していく予定である.

参考文献

- 1) H. Ito, H. Hayano, T. Kubo, and T. Saeki: Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **955**, 163284 (2020).
- 2) H. Ito et al.: In Proc. SRF'19, TUP078 (2019).
- 3) H. Ito et al.: In Proc. PASJ 2019, WEOH07 (2019).