

# 2020年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」

## 調査研究報告書(公開版)

【研究題目】 小型超伝導加速器のためのニオブスズ薄膜生成の研究

【整理番号】 TK20-035

【代表機関】 KEK

【調査研究代表者(氏名)】 梅森 健成

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】

NIMS 菊池 章弘

東北大学 柏木 茂

【TIA 外連携機関】

(株) 大阪合金工業所

武生特殊鋼(株)

【報告書作成者】 梅森 健成 【報告書作成年月日】 令和3年3月27日

【連携推進(具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等)】

- ・ KEK においては、熱拡散法によるニオブスズ成膜技術、NIMS においてはブロンズ法によるニオブスズ成膜技術の開発を進めた。材料に関しては NIMS、高周波空洞に関しては KEK が専門であり、協力しながら効率的に研究を進めた。
- ・ 東北大学においては、ニオブスズ空洞を用いた小型超伝導加速器の利用および研究分野開拓を目指した調査研究を行った。3月に「ニオブスズ超伝導加速空洞開発の世界動向と KEK における開発状況」と題した研究会を行った。
- ・ KEK、NIMS、東北大学においては、毎月定期的な打ち合わせを行い、適切に情報共有・方針決定をしながら研究を進めた。
- ・ KEK、NIMS、東北大学においては、共同研究「小型超伝導加速器のためのニオブスズ薄膜生成の研究」を締結した(2021年4月より執行)。

【調査研究内容(実験等中心に背景・課題と実行された課題解決の内容と結果)】

研究課題は以下の通りである。

### ① [KEK] 蒸気熱拡散によるニオブスズ空洞の開発

KEK においては、大型加熱真空炉を用いた超伝導空洞用ニオブスズ成膜装置が 2020 年度始めに立ち上がった。この成膜装置を用いて、まずはニオブサンプルへの成膜試験を行った。

成膜工程における温度・時間・スズ投入量を始めとする成膜パラメーターを系統的に変化させながら、成膜パラメーターの最適化を図った。成膜したサンプルに対しては、SQUID を用いた超伝導転移温度測定、SEM を用いた表面および断面観察、EDS を用いたスズ/ニオブ組成比の評価、レーザー顕微鏡による表面粗さの観測などの表面分析を行い、成膜された膜質の評価を行った。その結果、膜厚 1~2 $\mu\text{m}$ 、転移温度 17.5~18K、スズ/ニオブ組成比 23~24%(重量%)の比較的良好と思われる成膜ができるようになった。温度パターンを工夫することで”ボイド”と呼ばれるスズ欠乏領域の生成を避けるような改善も行った。

次にこの成膜パラメーターを用いてニオブ空洞への成膜を行い、ニオブスズ空洞を完成させた。ニオブスズ空洞には液体ヘリウムを用いて低温大電力試験が行われた。その結果、超伝導転移温度が17.5~18Kと観測され、4.2KでのQ値が $3.9 \times 10^{10}$  (@1MV/m)とニオブより高いことから、ニオブスズで成膜されていることが確認された。最大加速勾配は11.5MV/mであった。得られたQ値は本来得られるはずのQ値( $>1 \times 10^{10}$ )より低く、まだ成膜が不十分である事を示唆している。

また超伝導転移時の空洞表面の温度差に依存して、熱起電力由来の磁場トラップが観測された。磁場をトラップするとQ値が劣化することも確認できており、ニオブスズ空洞においては、冷却時に生じる熱起電力による磁場トラップの制御が重要であることが確認された。

## ② [NIMS] ブロンズ法によるニオブスズ成膜方法の開発

Cu-Sn (ブロンズ) 合金とニオブを複合加工して線材とし、これを熱処理して両者の界面における拡散反応で $Nb_3Sn$ 相を生成させる。この手法は「ブロンズ法」と呼ばれ、固く脆い金属間化合物である $Nb_3Sn$ 超伝導体を線材化するための実用製法として大きな成功を収めた。ブロンズもニオブも冷間で優れた組成加工性を持っているため数十~数百キロメートルもの長尺線の加工が実現されている。即ち、Cu-Sn (ブロンズ) 合金とニオブを複合圧延加工して2層構造の板材を作製し、それをプレス加工して空洞形状に作り込み、熱処理してブロンズとニオブの界面に厚く緻密な組織をもつ $Nb_3Sn$ 膜を形成させることを想定している。本製法は、①複合圧延加工、②プレス成形加工、③反応熱処理の三段階の工程で構成されるが、本調査研究では、空洞作製に適用できるサイズの板材を実際に製造できるか民間企業の設備も利用して実証実験を実施し、最終的に、厚さ2.8mm、幅270mm、長さ270mmでニオブ/ブロンズ (Cu-13.5%Sn-0.3Ti) の二層構造の複合板材を製造することに成功し、次につながる大きな成果を得た。

## ③ [東北大学] ニオブスズ小型超伝導加速器の利用および研究分野開拓

3月に「ニオブスズ超伝導加速空洞開発の世界動向とKEKにおける開発状況」と題した研究会を行った。参加者47名。ニオブスズ空洞を用いた小型超伝導加速器の利用および研究分野開拓に関しての情報交換・議論を行った。議論の中で、小型超伝導加速器の産業・医療応用はもちろんだが、基礎科学研究においても超伝導加速器だから作り出すことができる連続ビームを用いたユニークな物理実験が計画できるといった意見があった。

### 【今後の活動予定】

調査研究チームとしてはKEK、NIMS、東北大学の間で共同研究契約を締結した。ニオブスズ等の薄膜技術を使った大電流小型超伝導加速器システムの構築を目指し、今後とも継続して開発研究を行う。

蒸気熱拡散法ならびにブロンズ法でのニオブスズ成膜の技術開発をより向上させ、ニオブスズ超伝導空洞のための成膜技術確立する。また、加速器利用を念頭にニオブスズ空洞を用いたクライオモジュール試作機的设计・製作に取り組む。

2021年度の科研費獲得に向けて、ニオブスズ空洞の開発をテーマに計3件の申請を行っている。科研費等の競争的資金を中心に予算獲得の努力に努める。

以上