

2023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】 コールドスプレーによる革新的超伝導加速空洞製造の調査研究

【整理番号】 TK23-002

【代表機関】 高エネルギー加速器研究機構

【調査研究代表者（氏名）】 山中 将

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】 東北大学：小川和洋

【TIA 外連携機関】 日本大学：嶋田慶太

【報告書作成者】 山中 将

【報告書作成年月日】 2024 年 3 月 25 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）】

1. 定期的な技術検討会の開催
2023.7にキックオフミーティングを行い、月1回のペースで合計8回の技術検討会を開催した。各研究者に分担したテーマについての報告、進捗確認を行った。技術課題の明確化ができた。
2. 企業との協業
コールドスプレー（CS）の専門メーカーであるプラズマ技研と連携して実験を行った。加速空洞は真空容器であるが、コールドスプレーの適用例（アプリケーション）として、これまで真空容器は無かったことがわかった。新しい適用例である。先方にとってもメリットがあった。ニオブ粉については、タニオビス社から提供を受けた。高温超伝導材の調査の一環で、新規に2社へコンタクトした。
3. 外部資金の獲得
本研究に関連して、2件の外部資金を獲得した。
4. 連携機関の拡大
NIMSの超伝導関連の研究者とコンタクトして、協業の可能性を検討した。

【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）】

1. 超伝導加速空洞の製造

山中が提案した、アルミ合金製マンドレル上にコールドスプレー（CS）によりニオブを成膜し、マンドレルを薬品により除去する手法にて、ニオブ製 1.3 GHz 空洞を製造する計画であったが、CS によるニオブ成膜で真空リークがあり、真空リークしない CS 条件を見出すことに時間を要した。CS 条件を変えたいくつかのサンプル試験により真空リークがない条件を見出した。さらに組織観察を行い、リークの原因を考察した。これにより、リークがない条件設定の指針を得ることができた。さらに空洞製造については、小型の 3.9 GHz 空洞を製造することに変更し、その準備を完了した。

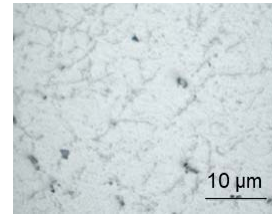
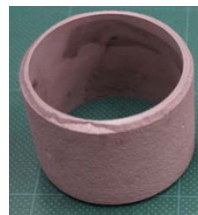
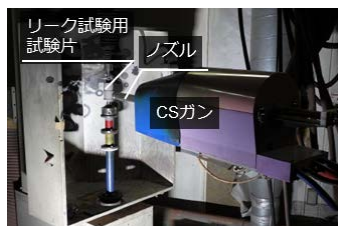


図1 リーク試験片の製造

図2 製造した試験片（HCl溶解前後および表面写真）

表 1 各 CS 条件で製造した Nb パイプのリーク

No.	Gas pressure [MPa]	Gas temperature [°C]	Leak [$\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{s}$]	Density [g/cm^3]
1	3	450	1.0×10^{-3}	7.7
2	4		9.0×10^{-4}	8.1
3			3.0×10^{-5}	8.1
4	5	750	6.7×10^{-9}	8.4
5		900	No data (fractured)	8.4

2. 高温超伝導×CSの検討

ニオブ以外の材料についても、CS に適するものがないか調査を行った。ビスマス系の Bi2212 が CS による成膜の可能性があると考え、粉の入手から CS による成膜トライまでを実施した。CS による数ミクロンの成膜に成功したが、超伝導転移は確認できなかった。



図 3 Bi2212 成膜に用いた CS 装置

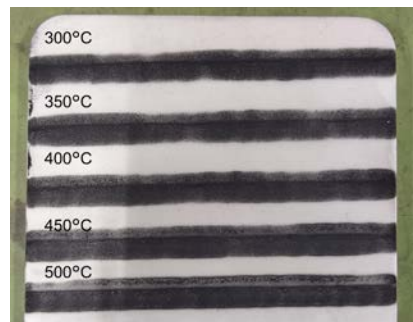


図 4 MgO 基板上に成膜した Bi2212 仮焼体膜

3. 外部発表 (3件)

- Masashi Yamanaka、Keita Shimada、A Novel Manufacture of Niobium SRF Cavities by Cold Spray、21st International Conference on Radio-Frequency Superconductivity (SRF2023) 2023年6月25日
- 山中将、嶋田慶太、コールドスプレーによる新しいニオブ超伝導空洞の製造方法の提案、日本加速器学会年会、2023年8月29日
- 嶋田慶太、山中将、齋藤宏輝、市川裕士、小川和洋、コールドスプレー法によるニオブ超伝導空洞の製造、日本機械学会 機械材料・材料加工部門 第30回 機械材料・材料加工技術講演会 (M&P2023) 2023年9月28日

【今後の活動予定】

1. 今後の計画

○ニオブ空洞の試作

CS条件については5 MPa、750°Cがリークのない最適な条件であることを明らかとした。当初計画では1.3 GHz 空洞を製造する検討であったが、サイズの小さい3.9 GHzを得られたCSの最適条件にて製造し、性能を検証する。本サイズの空洞の縦測定試験を行える施設はKEKにはなく、Jefferson Labにはあることから、先方とコンタクトして試験を実施する。

○高温超伝導のCS可能性の調査研究

引き続きBi2212 仮焼体を造粒した粉末を用いて検証を行う。噴射圧・温度・ノズル経路などの加工条件を変更して成膜効率・超伝導特性の変化について検証する。また、Bi2212 仮焼粉を有機溶媒と混練してスラリーを作り、ディップコート法により超伝導体を創成して性能の比較を行う。さらにY系などの他の高温超伝導体について調査を行う。

2. 新しい調査研究

山中が行っている「液圧成形による空洞製造研究」とコールドスプレーを組み合わせた新しい空洞製造方法を検討中である。実現性について、調査研究に着手する。

1、2ともに今年度に獲得した外部資金により研究を継続する。研究グループの活動は継続する。さらに研究を発展させて、より大型の研究資金の獲得を目指す。

【SDGs17 目標について、調査研究成果について、貢献ができると思われる項目があれば、最大3つまで☑をご記載下さい。】

研究成果に関連する SDGs 目標がある。

関連する SDGs 目標は無い

1 <input type="checkbox"/> 貧困をなくそう	2 <input type="checkbox"/> 飢餓をゼロに
3 <input type="checkbox"/> すべての人に健康と福祉	4 <input type="checkbox"/> 質の高い教育をみんなに
5 <input type="checkbox"/> ジェンダー平等を実現しよう	6 <input type="checkbox"/> 安全な水とトイレを世界中に
7 <input checked="" type="checkbox"/> エネルギーをみんなに、そしてクリーンに	8 <input type="checkbox"/> 働きがいも経済成長も
9 <input checked="" type="checkbox"/> 産業と技術革新の基盤を作ろう	10 <input type="checkbox"/> 人や国の不平等をなくそう
11 <input type="checkbox"/> 住み続けられるまちづくりを	12 <input type="checkbox"/> つくる責任、つかう責任
13 <input type="checkbox"/> 気候変動に具体的な対策を	14 <input type="checkbox"/> 海の豊かさを守ろう
15 <input type="checkbox"/> 陸の豊かさを守ろう	16 <input type="checkbox"/> 平和と公正をすべての人に
17 <input type="checkbox"/> パートナリーシップで目標を達成しよう	

以上