山梨県若手研究者奨励事業研究成果概要書

所属機関名	国立大学法人	山梨ナ	て学
職名・氏名	博士課程3年・藤田	貴紀	ED

1 研究テーマ

高温超伝導体を用いた NMR 用高 Q 値サンプルコイルの開発

2 研究の目的

市販の銅製サンプルコイル(銅コイル)がもつ電気抵抗で制限されるために実現不可能 な、高い信号対雑音比(SNR)を有する核磁気共鳴(NMR)プローブを実現するために、 高温超伝導体(HTS)を用いた高Q値(コイルの性能を表すパラメータ、SNR $\propto \sqrt{Q}$)な サンプルコイル(HTS コイル)を開発する.従来の楕円形 HTS コイルは高Q値を有し、試 料領域に均一な高周波磁場を照射できたが、試料を挿入するとQ値が低下し、試料領域の 直流磁場が歪む問題があった[1].

本研究では、均一な高周波磁場を15mm以上の試料領域に照射でき、試料挿入時のQ値の低下を抑制し、試料領域における鉛直方向の直流磁場の歪みを楕円形HTSコイル搭載時の半分以下に抑制した新しい分割型のコイル構造を有する分割型HTSコイルを開発した. これを用いて¹H核のNMR信号を測定し、銅コイルよりも高いSNRを実現した.

[1] N. Sekiya, et al., "Design of NMR RF Probe Constructed With High-Temperature Superconducting Elliptical-Coupled Resonators," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, Aug. 2019.

3 研究の方法

【設計方法】図1に設計した分割型 HTS コイルの外形 を示す. 平行に対面した 25×50×0.5 mm の2 枚のサフ ァイア基板上に HTS コイルを作製することを想定し, 三次元電磁界シミュレータ「CST Studio Suite (AET)」を 使用して HTS コイルを設計した. HTS コイルを収納す る真空チャンバーや直流磁場を測定するための LOCK コイルが HTS コイルのQ値と共振周波数に影響するた め,実装環境を反映したシミュレーションモデルを作成 した. 試料挿入時のQ値の低下を抑制するために, 試 料の影響を受けやすい電界集中部を試料領域から離れ た位置に配置した. また, 試料領域における直流磁場の 歪みを抑制するために, 試料領域を避けるように HTS コイルを分割した分割型のコイル構造を提案する.



留意事項

①3枚程度で作成してください。

②特許の出願中等の理由により、一定期間公表を見合わせる必要がある箇所がある場合であっても、 所定の期日までに公表可能な範囲で作成・提出してください。当該箇所については、後日公表可能 となった際に追記して再提出してください。

図 2. 作製した分割型HTSコイル

【作製方法】50×50×0.5 mm のサファイア基板上に厚 さ 300 nm の HTS 薄膜 (YBa₂Cu₃O_y)を成膜したものを 購入した.また,設計した分割型のコイル構造を 2 つ 配置したフォトマスクを作製した.薄膜を任意の構造 に加工する一般的な方法であるフォトリソグラフィと イオンミリングによって,HTS 薄膜を分割型のコイル 構造に加工した.最後にサファイア基板を中央で切断 することで,25×50×0.5 mm の分割型 HTS コイルを2 枚作製した.図 2 に作製した分割型 HTS コイルを示す.

【測定方法】図3に分割型HTS コイ ルの測定環境を示す.作製した分割 型HTS コイルをNMR プローブ(日 本電子株式会社製)に実装し,冷却 システムを使用して分割型HTS コイ ルを20K以下に冷却した.周波数特 性を測定するときは(a)のベクトルネ ットワークアナライザ(N9923A, Agilent Technologies)を接続し,直流 磁場および NMR 信号を測定すると きは(b)の分光計を接続して測定し た.



4 研究の成果

図4に試料を挿入しない環境下で測定した分 割型HTSコイルの周波数特性のシミュレーション結果と測定結果を示す.図4より,シミュレ ーション結果と測定結果の差は僅か4.537 MHz (+0.75%)であり,よく一致した.Q値の測定 結果は市販の銅コイルと比べて約21倍の非常 に高い値を有していることを示した.そのため, Q値の倍率のみを考慮したとき,分割型HTSコ イルを使用することで製品のNMRプローブの 4倍のSNRを実現することが期待される.また, 試料なしの分割型HTSコイルのQ値を100%と したとき,0.1%EBおよびD20挿入時のQ値



はそれぞれ 90.3 %, 72.3 %であり, 同様に楕円形 HTS コイルは 85.6 %, 63.5 %だった. し たがって, <u>電界集中部を試料領域から遠ざけた分割型 HTS コイルの方が試料挿入時の Q</u> 値の減少を抑制することを明らかにした.

留意事項

 ①3枚程度で作成してください。
②特許の出願中等の理由により、一定期間公表を見合わせる必要がある箇所がある場合であっても、 所定の期日までに公表可能な範囲で作成・提出してください。当該箇所については、後日公表可能 となった際に追記して再提出してください。 高周波磁場のシミュレーション結果および測定結果はよく一致しており,<u>16 mmの試料</u> 領域に均一な高周波磁場を発生することを確認した.

図 5 に分割型 HTS コイルおよび楕円形 HTS コイルを搭載したときの直流磁場分布の測定 結果を示す.楕円形 HTS コイルは試料領域に おいてコイルの上下が直流磁場と交差するた め,直流磁場分布の端部が大きく歪む.その一 方,分割型 HTS コイルは試料領域において直 流磁場と交差しないため,分割型 HTS コイル 搭載時の直流磁場分布の歪みは楕円形 HTS コ イルの半分以下であり,目標を達成した.

図 3 において(b)を接続し,1H 核観測時の SNR を測定した.提案する分割型 HTS コイル で測定した SNR は銅コイルの SNR の 1.3 倍高



い結果が得られた.したがって、提案する分割型 HTS コイルを使用することで、銅コイル の SNR を上回る NMR プローブを実現した. しかしながら、Q 値の測定結果から予想され た銅コイルの 4 倍の SNR は実現できなかった.SNR が予想よりも上昇しなかった原因は 共振周波数を調整した際に不要共振が現れ、Q 値が半減してしまったことに加え、XY 平面 の直流磁場が不均一だったと予想される.また、分割型 HTS コイルと試料との距離は、銅 コイルと試料との距離よりも離れているため、充填率 (SNR $\propto \sqrt{\eta}$)が低下し、SNR が予 想よりも上昇しなかったと考えられる.

5 今後の展望

Q 値を回復するために,給電線の位置を微調整し不要共振を小さくすることを検討して いる.また,XY 平面の直流磁場の均一性を高める一つの方法として,通常は製品保護のた めに入力電流が制限されている直流磁場補正ユニットに,より強い電流を入力することで, 直流磁場の均一性を高められる可能性がある.加えて,充填率を改善する新しいコイル構 造の設計に既に着手している.新しいコイル構造は今回提案した分割型 HTS コイルよりも 試料に近い位置に配置しており,シミュレーションの結果から充填率の上昇が期待できる. これらの課題に取り組むことで,SNR のさらなる改善を目指す.

6 研究成果の発信方法(予定を含む)

- 16th European Conference on Applied Superconductivity, "Development of High-Temperature Superconducting Split-type RF Coil for NMR Probe," T. Fujita, K. Toshima, K. Sakuma, N. Sekiya, 1-EP-MD-13S
- 2. (予定)国際学会(Applied Superconductor Conference 2024) で研究成果を報告すると ともに、学術論文に投稿する.

留意事項

①3枚程度で作成してください。

②特許の出願中等の理由により、一定期間公表を見合わせる必要がある箇所がある場合であっても、 所定の期日までに公表可能な範囲で作成・提出してください。当該箇所については、後日公表可能 となった際に追記して再提出してください。