

高周波用超伝導線材を用いたソレノイダルコイルの設計

Design of solenoidal coils using superconducting wire for high frequency applications

山梨大¹, 成蹊大², 新潟大³ ○(M1)内田 考紀¹, 作間 啓太¹, 三浦 正志², 小川 純³, 關谷 尚人¹

Yamanashi Univ.¹, Seikei Univ.², Niigata Univ.³

○Takanori Uchida¹, Keita Sakuma¹, Masashi Miura², Jun Ogawa³, Naoto Sekiya¹

E-mail : g21te006@yamanashi.ac.jp

1. 研究背景

現在、カプセル内視鏡はボタン電池によって駆動しているため、限られた機能しか利用できないが、非接触のワイヤレス電力伝送 (WPT : Wireless Power Transfer) による電力供給が可能になれば、治療機能や投薬機能などの多機能化に期待ができる。しかし、カプセル内視鏡のコイルは非常に小さく結合が小さいため、高効率に WPT を行うためには、送電コイル (銅線) の導体損失を減らして高 Q 値コイルを実現しなければならないが、銅線の導体損失を大幅に改善することは困難である。これに対して、我々は、直流用の超伝導線材では高周波 (数 10 kHz ~ 数 10 MHz) で低損失にならない問題があったが[1], 高周波で低損失を実現できる高周波用超伝導線材 (図 1) を開発し、それを用いてスパイラルコイルを作ること、銅コイルよりも大幅に導体損失を低減し、約 14 倍も高い Q 値 (約 14,000) のコイルを実現した[2]。また、高 Q 値コイルを WPT に用いることで伝送効率が大幅に改善できることを明らかにした[2]。そこで、本研究では、カプセル内視鏡の位置によって伝送効率が大きく変化しないように、磁界分布が均一なソレノイダルコイルに高周波用超伝導線材を用いて高 Q 値コイルを設計したので報告する。

2. コイルの最適化

ソレノイダルコイルの設計は 3 次元電磁界シミュレータ (CST Studio Suite) を使用した。ソレノイダルコイルの設計条件は図 1 の長さ 9 m の高周波用超伝導線材を用い、腹部の大きさを考慮し、コイルの直径を 40 cm とした。この条件で固定すると巻き数は 7 となり、図 2 のようなコイルをシミュレーションによって作製した。また、線間距離によって Q 値が変化するが、設計の結果、線間距離が 2 mm の時に最も高 Q 値 (21,067) となり、銅コイルの Q 値 (1,118) の約 19 倍となった。また、超伝導線材を巻いてソレノイダルコイルを実現するためには支持材が必要となる。しかし、誘電体損失の大きな誘電体材料などに直接巻き付けてしまうと、誘電体損失によって大幅に Q 値が低下してしまう。これに対して、比較的誘電体損失の小さな発泡スチロール ($\tan\delta = 2 \times 10^{-4}$) を部分的に支柱として用いることで Q 値の低下を抑制することを考えた。支柱のサイズを 5 cm から 3 cm まで小さくした場合のコイルの Q 値を図 3 に示す。サイズを小さくすることで Q 値の減少を抑えることができたが、3 cm まで小さくしても Q 値は支柱がない場合のおよそ半分 (12,818) であり、強度の問題もありこれ以上支柱を小さくすることは難しい。そこで、更なる Q 値の改善を目指して、支持材に発泡スチロールより誘電体損失の小さなサファイア棒 ($\tan\delta = 1 \times 10^{-7}$) を使用することを提案する。図 4 に示すように、サファイアの使用によって支柱を使用しないときと同程度の Q 値を有するコイルを実現できる可能性をシミュレーションによって示した。

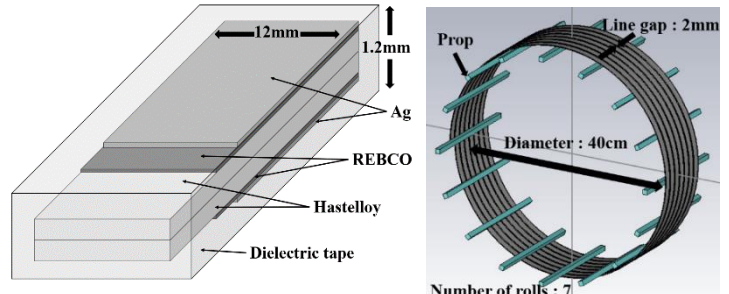


Fig.1 Superconducting wire

Fig.2 Designed coil

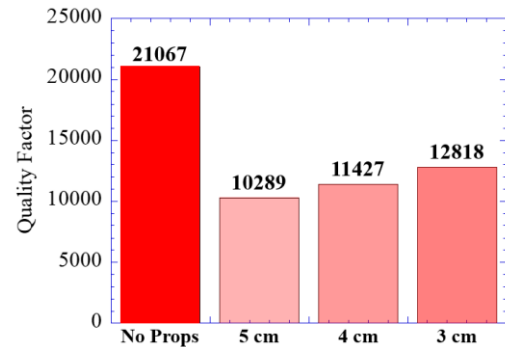


Fig.3 Variation of Q-value with the size of the props

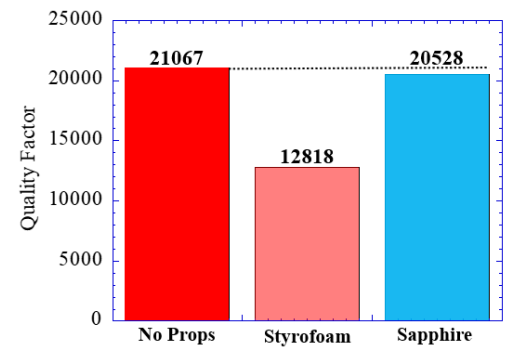


Fig.4 Variation of Q-value by material

3. まとめ

カプセル内視鏡用 WPT の高 Q 値送電コイルを実現するために高周波用超伝導線材を用いたソレノイダルコイルの設計を行い、線間距離を最適化し、支持材にサファイア棒を使用することで高 Q 値 (21,067) を有するコイルの設計を行った。今後は実際にコイルを作製し、高 Q 値ソレノイダルコイルを実現する。

謝辞

本研究は令和 3 年度パワーアカデミー特別推進研究の補助を受けて実施した。

参考文献

- [1] N. Sekiya et al., *IEEE Trans. Superconductivity.*, vol. 27, no. 4, 6602005, June 2017.
- [2] 桶田 他, 信学技報, vol. 121, no. 137, SCE2021-1, pp. 1-4, (2021-8).