

令和5年度 修士論文概要			
所属	情報創成工学専攻	指導教員	小田部 荘司
学生番号	226E0318	学生氏名	ZHANG Yuwei
論文題目	有限要素法を用いた超伝導ケーブルの事故時の臨界電流及び表面磁場の評価		

1. 緒言

ビスマス系の超伝導体 $\text{Bi-2223}(\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10})$ が 1988 年に科学技術庁金属材料技術研究所(現・物質・材料研究機構)の前田弘のグループによって開発された。他の高温超伝導体と比較して 110 K 以下で超伝導になることから、液体窒素を冷却剤として利用することが可能になって、多くの用途に適用が期待される。実用化の鍵となる線材化技術が開発されて、今後、多種多様な用途への適用が期待される[1]。現在では超伝導体を用いた送電ケーブルの開発が進み、超伝導ケーブルの接合や、超伝導ケーブルの表面磁場の測定など、さまざまな研究が始まっている [2]。

本研究では、有限要素法を用いて超伝導を線材化して、超伝導線材をシミュレーションし、超伝導線材が捻じっている場の電気特性の計算、またトラブルが発生する場(超伝導素線が断路している場)の臨界電流変化と磁場分析を行う。

2. 計算方法

本研究では、電気特性に対する有限要素法計算のために、JSOL 社製 JMAG を使用した [3]。

2.1 臨界電流に対する線材巻きピッチ長さの影響

線材をケーブル化するには、線材を螺旋や、コイル状に巻き線しなければならない、JMAG による捻じっている Bi2223 線材の FEM 計算を行った、Fig. 1 が示したように幅 4 mm 厚さ 200 μm の Bi2223 線材である、線材にスキューを入れて、捻った形(螺旋状になっている)にした。巻き直径は 20 mm、線材巻きピッチは 50 mm、100 mm、200 mm、300 mm、400 mm に設定し、線材モデルを作る、同じ通電条件で電流を流して、電気特性を計算した。

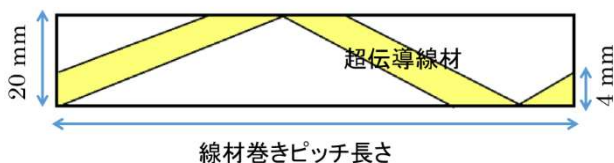


Fig. 1 Twisting superconducting wire.

2.2 事故時の超伝導ケーブルの電気特性

Fig. 2 と Fig. 3 のように外層素線 8 本と内層素線 8 本、螺旋状に巻き線をして、外層と内層の巻き方向は逆になっている。外層直径 20 mm, 内層直径 18.9 mm, 線材巻きピッチは 200 mm の線材モデルを作り、有限要素法を用いて、JMAG で超伝導線材を数値シミュレーションする。数値解析対象のモデリングはベクトルポテンシャル \mathbf{A} と、スカラーポテンシャル ϕ を用いた $\mathbf{A}\text{-}\phi$ 法に基づいて行う。超伝導ケーブルの部分素線を断路し、電流を流して、線材の表面磁場と臨界電流を調査した。

超伝導線材の抵抗率は表面磁場を依存し導入した。 $J_c\text{-}B$ 特性のデータは参考文献[1]で示す 77 K の結果を用いた。

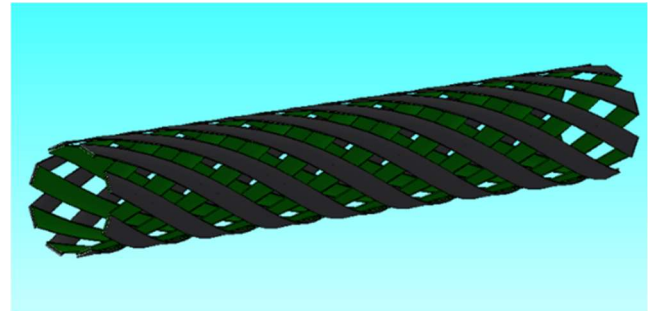


Fig. 2 Superconducting Cable Model.

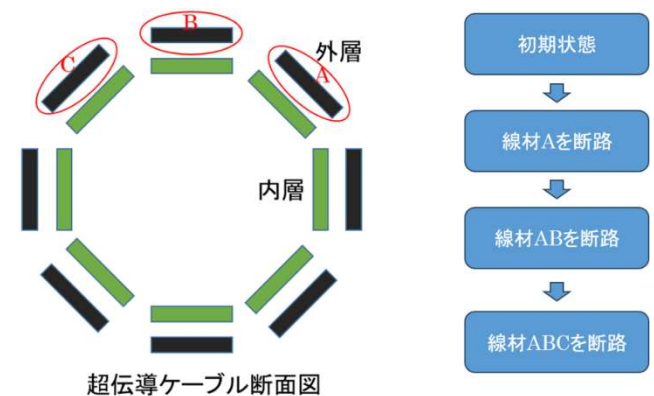


Fig. 3 Cross section of superconducting cable

3. 結果

3.1 臨界電流に対する線材巻きピッチ長さの影響

Fig. 4 が示したように線材巻きピッチが長ければ長いほど、臨界電流の劣化は少なくなる。線材巻きピッチが 400 mm を超えると、臨界電流の劣化はほぼなくなった。

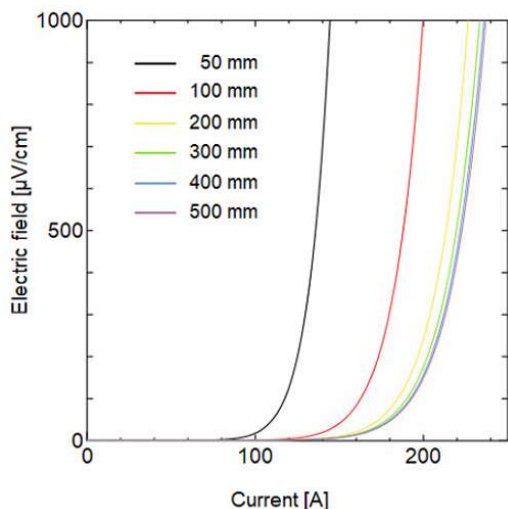


Fig. 4 Results of the effect of wire winding pitch length on critical current

3.2 事故時の超伝導ケーブルの電気特性

Fig. 5 は、素線を壊す本数一つずつ増やす時の、素線一本あたりの臨界電流である。赤い線は外層を壊した場で超伝導ケーブル一本あたりの臨界電流変化、緑の線は外層を壊した場で超伝導ケーブル一本あたりの臨界電流の変化を示す。ケーブル化した線材は元の単一本で捻じった超伝導線材と比べると、一本あたりの臨界電流の値が下がった。内層の線材と外層の線材を壊すと、一本あたりの臨界電流の値は上昇する。内層を壊して上昇した値は外層を壊して上昇した値と比べて明らかに大きい。

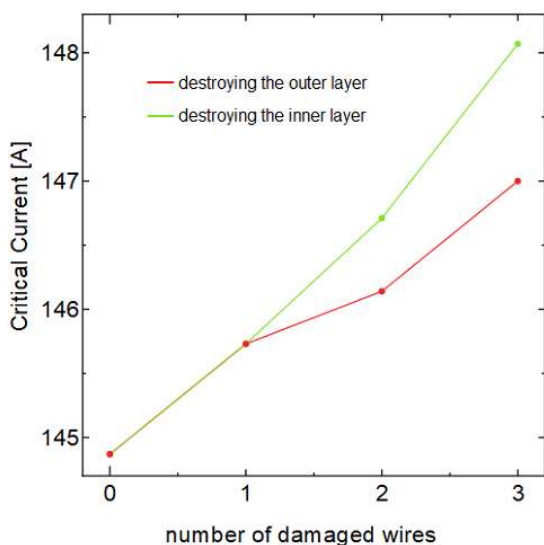


Fig. 5 The relationship between critical current and the number of damaged wires

3.3 事故時の超伝導ケーブルの表面磁場

Fig. 6 は、素線を一本壊している超伝導ケーブルに電流を流すと発生する表面磁場である。

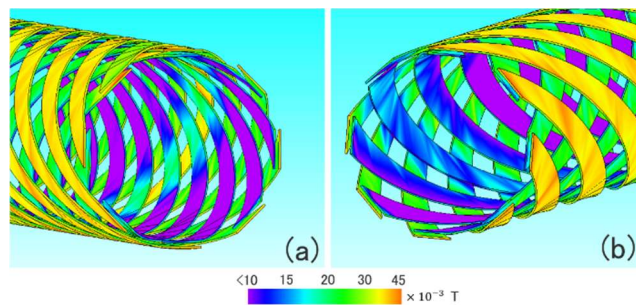


Fig. 6 Surface magnetic field generated by flowing current in damaged superconductor cable, (a) destroying the outer layer (b) destroying the inner layer.

壊した外層素線付近に高磁場が発生している。壊した外層素線と重なっている内層素線の内側の磁場上昇量が大きい。壊した内層素線と重なっている外層素線の磁場は大きく減った。壊した内層素線付近の内層素線の磁場は少し上がった。

4. 結言

本研究では、有限要素法を用いて超伝導線材がケーブル化して、捻じっている超伝導線材をシミュレーションし、臨界電流変化と磁場分析をした。線材巻きピッチが 400 mm を超えると、臨界電流の劣化はほぼなくなった。200 mm 以下にすると、劣化が酷くなっていく。事故時の超伝導ケーブル（超伝導素線が断路している場）の電気特性の計算を行った。ケーブル化した線材は元の単一本の捻じった超伝導線材と比べると、一本あたりの臨界電流が下がった。内層の線材と外層の線材を壊すと、一本あたりの臨界電流の値は上昇する。内層を壊して上昇した値は外層と比べて明らかに大きい。

参考文献

- (1) Recent Progress of Bi2223 HTS Wires and Their Applications. (2007)
- (2) 鐘宇軒, 九州工業大学大学院 2022 年度修士論文
- (3) 本庄昇一, 超伝導家ケーブルに生じる交流損失の数値解析, JMAG Users Conference 2001 6-2