

繰り返し横圧縮応力下での導体内接触抵抗による導体評価 Evaluation of Contact Resistance of Mechanically Loaded and Released Multi-strand Superconducting Cable

上智大・理工 中村一也, 高尾智明
東北大・金研 西島 元

K. Nakamura¹, T. Takao¹ and G. Nisijima²

¹ Sophia University

² Institute for Materials Research, Tohoku University

1. はじめに

実用規模の大型超伝導電力機器のためには数 kA～数十 kA 級の超伝導導体が必要とされる。このような大きな電流容量を確保するためには、素線を多数本束ねて、撚り線加工を施し導体化しなければならない。例えば、国際熱核融合実験炉(ITER)のトロイダルコイル(TF)の導体内では 1152 本の素線が 5 段階に撚られている。この撚り線導体の安定性の検討要素の一つとして、素線間接触抵抗が挙げられる。素線間接触は導体作製時だけでなく、導体通電時の電磁力によっても生まれる。先に実施された ITER-CS、ITER-TF モデルコイル実験において、導体横圧縮方向電磁力はそれぞれ約 57 トン/m と約 80 トン/m の発生例が報告されている。これらの電磁力により、素線は隣接する素線と接触して微小な変形が加わり、素線間接触抵抗が変化する。これらの現象は素線に局部的常伝導部が発生した時の電流再配分や、素線間結合損失に大きく影響する。近年、N. Mitchell は、各素線に電磁力が加わると素線内の空隙のために隣接する素線との接触点を支点として素線が長手方向に連続的な変形を受け臨界電流に影響を及ぼしていることを報告している。[1]

超伝導素線間の接触抵抗の研究は、多くの研究機関で行われてきた。しかし、そのほとんどが導体の損失からの逆算や素線の圧縮変形を無視したものが多い。この原因としては、多段階にもわたって撚り線加工が施された導体内の素線間同士の接触抵抗の定量化が難しいからである。また、運転時には電磁現象も三次元的に発生してその素線間の接触状況をさらに複雑にしている。

本研究では、核融合炉用の超伝導コイルに使用されている超伝導線と同レベルの線を用いて縮小超伝導撚り線導体を作製し、機械的に横圧縮を印加する。そして、素線間の接触抵抗測定および導体の潰れ量の測定を行う。これらのデータは撚り線導体の安定性向上に寄与し、また導体化技術にも役立つものと考ええる。

2. 実験

Table 1 に実験条件と試料の緒元、Fig. 1 に試料をホルダーに設置した状態を示す。超伝導線は被覆無しの NbTi 線材を用いている。線材の表面状況により接触抵抗が変化するため、試料をホルダーに取り付ける直前に素線の表面をアセトンとエタノールで洗浄した。試料のツイスト長は 25 mm である。試

TABLE I
EXPERIMENTAL CONDITIONS AND SPECIFICATIONS OF WIRES

Temperature	Liquid helium
Superconductor	NbTi
Strand diameter	0.65 mm
Strand insulation	Bare
Number of strands	3, 9 (=3×3)
Twist pitches	25 mm
Compressive force length	96 mm
Cu/SC	1.8

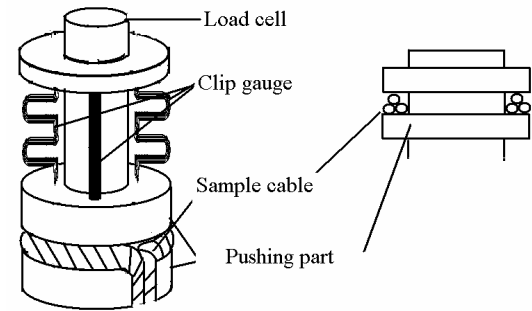


Fig. 1. Schematic of sample setting

料は円形 1 ターンであり両端部は開放状態である。室温から駆動可能な機構を用いてホルダー圧縮部を上部に引き上げ、試料に横圧縮応力を印加した。圧縮される試料の長さは 96 mm である。印加荷重はロードセルで、導体の潰れ量はクリップゲージで測定を行った。接触抵抗は 3 本撚り線のときには導体内部から 2 本、9 本撚り線(=3×3)のときには一次導体内から 2 本の素線を取り出し四端子法で測定した。

昨年度までは荷重印加、除加持のみの接触抵抗の測定であったが、本年度は荷重変化時に連続的に接触抵抗を測定できるシステムを構築した。[2] 印加荷重は素線 3 本撚り線時には 150 kgf まで、9 本撚り線時には 450 kgf までとした。繰り返し試験(印加・除加試験)は印加・除加を 1 サイクルとして 1000 サイクル行った。

3. 実験結果と考察

Fig. 2 は 1000 サイクル繰り返し試験の結果である。3 本撚り線では荷重を 50～150 kgf、9 本撚り線では 50～450 kgf と印加荷重を変化させた。素線 1 本あたり最大約 50 kgf 印加するようにした。この荷重は、想定してい

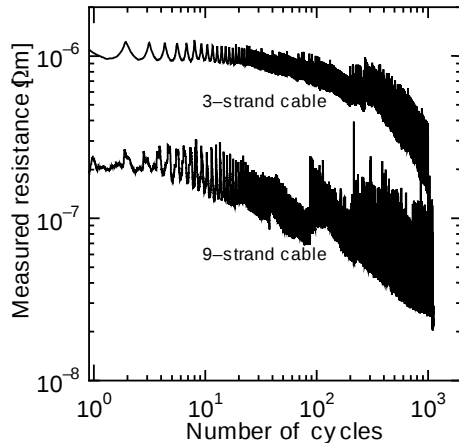


Fig. 2. Resistance in both loaded and released conditions for 3 and 9-strand cables.

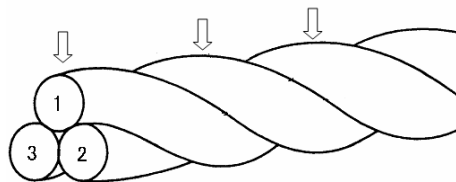


Fig. 3. Schematic of 3-strand cable.

る電磁力に比べて非常に大きな値ではあるが、導体の素線間接触箇所を実験後調べるためにあえて大きな荷重を印加した。サイクルが増加するに従って接触抵抗は減少していく。1000 サイクルでは荷重印加時でそれぞれ約 1 桁減少することが示された。9 本撚り線の接触抵抗が 3 本撚り線よりも小さいのは接触箇所の個数の違いである。実験終了後、試料を観察したところ 3 本撚り線では素線 2 本で素線 1 本を支える部分の素線間が変形していた。Fig. 3 に変形部分を矢印で示す。これらの変形は周期的に起こっていた。これより一次導体内での素線間接触は線接触ではなく点接触であることが示された。同様なことが 9 本撚り線の一次導体間同士でも観察された。

Fig. 4 と 5 は 1000 サイクルまでの 3 本撚り線の各サイクル (First、10、100、1000) における荷重と導体の潰れ量を示す。本研究では荷重印加・除加時に連続的に接触抵抗を測定するシステムを構築したため、このようなデータが取得できた。荷重と潰れ量の増加にともない接触抵抗が減少するが、ある地点までいくとそれ以上減少しなくなる。例えば Fig. 4 では 100 kgf 付近からは抵抗の減少はほぼ無い。その後、荷重を除加すると抵抗値は増加し、荷重印加時の抵抗値に戻る。また繰り返しサイクルにより、導体に変形し潰れ量のループが右に移動する。その変形に伴い、接触抵抗のループは減少することが示された。

4. まとめ

本研究では核融合炉用の超伝導コイルに使用されている超伝導線と同レベルの線を用いて撚り線導体を作

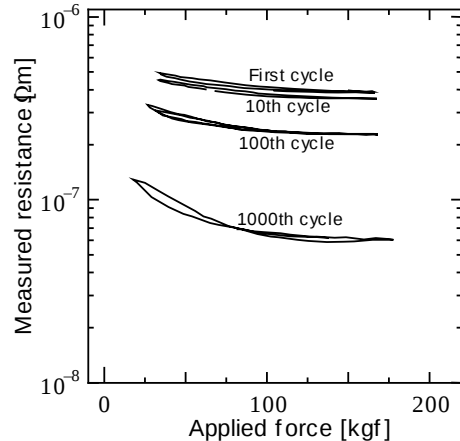


Fig. 4. Measured 3-strand cable's resistance and applied force.

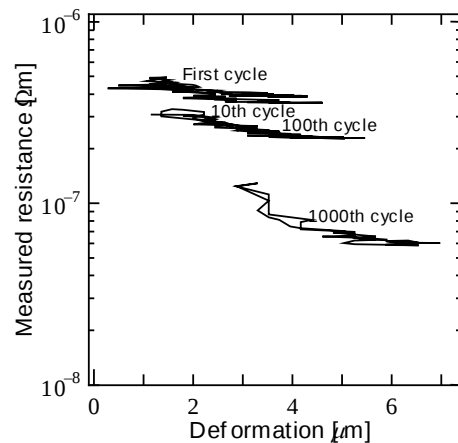


Fig. 5. Measured 3-strand cable's resistance and deformation.

製し、電磁力を機械的に模擬した装置を用いて、素線間の接触抵抗測定および導体の潰れ量の測定を行った。その結果、一次導体内および導体間の接触は線接触ではなく点接触であり、その接触箇所が周期的に起こることが観察された。また、繰り返し試験では、導体の潰れ量と接触抵抗の依存性が示された。この結果は、複数のサブケーブルの電気回路のモデルのシミュレーションやケーブルの結合損失を見積もるための基礎的データになる。

謝辞

実験のアドバイスおよび試料の提供に関して、核融合科学研究所 妹尾和威氏と西村新氏に感謝いたします。

参考文献

- [1]N. Mitchell, Fusion Eng. Des. pp. 66-68, 971 (2003)
- [2]T. Takao, K. Nakamura, et al., 東北大学金属材料研究所強磁場超伝導材料研究センター平成 18 年度年次報告 pp. 215-216.