

## 核融合装置用HTS導体の $I_c$ 劣化の原因の究明

学生証番号 47196078 氏名 大辻 慎  
(指導教員 三戸 利行 教授)

Key Words : superconductor, HTS conductor, fusion device,  $I_c$  degradation

### 1. はじめに

高温超伝導体(HTS 導体)と呼ばれる超伝導導体は、臨界温度と臨界磁場の高さから、低温超伝導導体(LTS 導体)を超える高い動作温度で高い磁場を生成することができる。核融合装置に高温超伝導を適用することができれば、液体ヘリウム冷却から脱却でき、液体水素を冷媒とする経済的で高性能な装置が実現できる。

核融合科学研究所では、大型ヘリカル装置(LHD)の次期装置への適用を目指した、REBCO テープと純アルミニウムシートを円形断面のアルミニウム合金ジャケットの溝に積層して配置した FAIR 導体を開発している[1]。導体の開発段階において導体の  $I_c$  が劣化することが判明した。 $I_c$  劣化の原因は、REBCO テープとアルミニウム合金ジャケットの熱収縮率の違いにより、導体内の REBCO テープに局所的な応力集中が生じて座屈が起きることが原因と推測している。

本研究では、REBCO テープを用いた核融合装置用大電流 HTS 導体における  $I_c$  劣化原因として、REBCO テープの冷却時の局所的な座屈の発生による  $I_c$  劣化に着目した。特に FAIR 導体における  $I_c$  劣化を対象とし、原因の究明と定量化および劣化防止手段の提案を目的とする。

### 2. 研究の前提

#### 2.1 REBCO テープに生じる局所的な熱応力集中

不十分な固定(拘束されていない部分)があると、熱収縮率の違いによりその部分の REBCO テープには局所的な熱応力の集中が生じる。ここではアルミニウム合金と REBCO テープの二物体の熱応力と想定し、REBCO テープに生じる熱応力を導出する(ここでは熱荷重  $F_{RE}$  で導出)。このとき、REBCO テープにかかる熱荷重  $F_{RE}$  は式(1)で表される。

$$F_{RE} = \left| \frac{S_{RE} E_{RE}}{1 - \bar{\alpha}_{RE} \Delta T} (\bar{\alpha}_{AL} - \bar{\alpha}_{RE}) \Delta T \right| \quad (1)$$

ここで添え字 RE, AL は、REBCO テープ、アルミニウム合金を表しており、 $S, E, \alpha$  はそれぞれの断面積・ヤング率・基準温度から 77 K までの平均熱膨張係数である。また  $\Delta T$  は初期温度からの 77 K までの温度変化を表す。

#### 2.2 座屈の理論式

座屈の理論式として、オイラーの式と呼ばれる公式が存在する。これは細長い柱で成り立つ座屈荷重  $P_{CR}$  の公式で、式(2)で表される。

$$P_{CR} = \frac{\pi^2 E \cdot J}{L_k^2} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (2)$$

ここで  $E$  : ヤング率、 $\lambda$  : 細長比、 $J$  : 弾性二次モーメント、 $L_k$  : 実質座屈長さ (実際に座屈が起こる範囲) である。一般に金属では細長比  $\lambda$  が 80~100 以上で式(2)が成り立つとされ、それより細長比  $\lambda$  が小さい範囲では実験的に求められた式(3)が用いられる。式(3)はジョンソンの式と称され、 $\sigma_Y$  は降伏応力(0.2%耐力)である。

$$P_{CR} = (\sigma_Y - \frac{\sigma_Y}{4\pi E} \lambda^2) S \quad (3)$$

### 3. 実験と結果

#### 3.1 REBCO テープへの座屈の理論の適用

77 K での  $F_{RE}$  は物性値と各種条件によって式(1)で簡単に導出できる。しかし REBCO テープで座屈の理論を適用した研究はなく、 $P_{CR}$  の導出する方法や導出された値の妥当性などの議論はされたことはない。そこで、室温において圧縮試験機を用いて REBCO テープの座屈試験を行った。また座屈荷重を理論的に推定するため、オイラーの式(式(2))とジョンソンの式(式(3))と実験での座屈荷重の比較を行った。室温の結果より 2 つの式の接点を境に、不十分な固定の空間が長い場合はオイラーの式、短い場合はジョンソンの式で REBCO テープの座屈荷重が推定できることがわかった。そこで 77 K での物性値を代入することによって 77 K での座屈荷重を推定した(Fig. 1)。

#### 3.2 熱収縮による $I_c$ 劣化の模擬実験

Fig. 1 の 77 K での座屈荷重の推定値と式(1)で求められる熱荷重を用いて、 $I_c$  劣化の模擬実験を行った。座屈させる空間  $L$  を変数として、基準温度として 300 K と 423 K とし  $I_c$  を測定した結果を Fig. 2, 3 に示す。Fig. 2 は REBCO テープの REBCO 層が圧縮される方向に座屈する場合、Fig. 3 は REBCO 層が引っ張られる方向に座屈する場合の結果である。

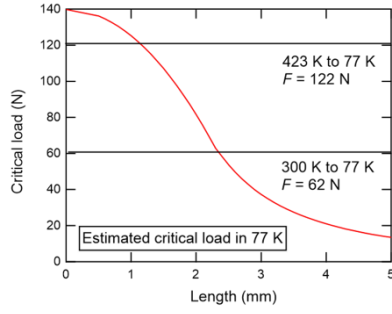


Fig. 1 Estimated the critical load in 77 K

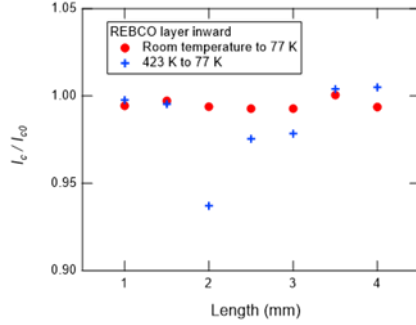


Fig. 2  $I_c$  degradation dependence of the buckling length at REBCO layer inward

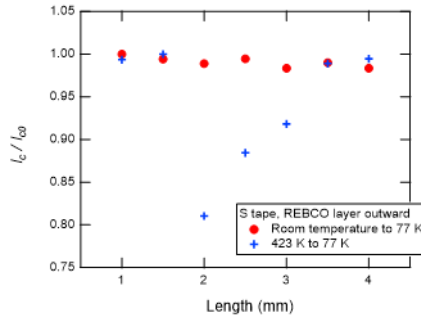


Fig. 3  $I_c$  degradation dependence of the buckling length at REBCO layer outward

#### 4. 解析と考察

Fig. 2, 3 の結果における熱荷重が座屈荷重を超えている範囲において、以下の 3 つのメカニズム (a), (b), (c) から座屈による  $I_c$  劣化が生じるという仮説を立て定量的に検証した。

- (a) REBCO テープとアルミニウム合金ジャケットの異なる熱収縮率により局所的な熱応力集中が生じる。
- (b) その応力集中によって REBCO テープが局所的に座屈する (たわむ)。
- (c) 座屈したことによって REBCO テープに曲げが生じ、その部分で  $I_c$  劣化が生じる。

オイラーの式では座屈の形状は正弦波 ( $A \sin kx$ ) で表すことが出来る。最大振幅での曲率半径  $R$  は以下の式 (4) で表せ、そのときの曲げひずみ  $\varepsilon$  は式 (5) で導出できる。

$$R = \frac{1}{Ak^2} = \frac{1}{A(2\pi/\lambda^2)} \quad (4)$$

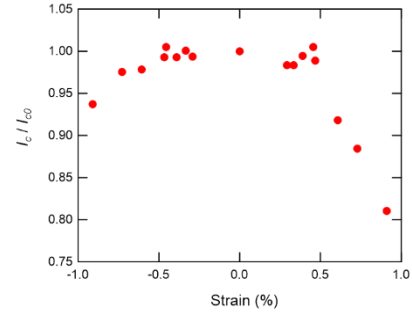


Fig. 4  $I_c$  degradation dependence of calculated strain

$$\varepsilon = \pm \frac{d}{2R} \quad (5)$$

$d$  は REBCO テープの基板の厚さであり、 $\lambda$  は熱収縮後の長さから導出可能であるので、座屈時の振幅 (たわみ量)  $A$  を求めれば REBCO テープにかかるひずみを推定できる。77 K での REBCO テープの長さ  $L_{REB,77K}$  とアルミニウム合金の長さ  $L_{Al,77K}$  の差分  $\Delta L$  だけ REBCO テープがたわむとし、 $A \sin kx \sim Akx$  と線形近似すると、式 (6) が成り立ち、これを  $A$  について解くと式 (7) となる。

$$\Delta L = 2 \sqrt{\left( \frac{L_{Al,77K}}{4} \right)^2 + \left( \frac{\pi A}{2} \right)^2} - \frac{L_{Al,77K}}{2} \quad (6)$$

$$A = \frac{1}{\pi} \sqrt{\Delta L \times L_{Al,77K}} \quad (7)$$

式 (4), (5), (7) を用いて Fig. 2, 3 の横軸をひずみ  $\varepsilon$  変換した結果を Fig. 4 に示す。絶対ひずみ  $|\varepsilon|$  が大きくなるほど  $I_c$  劣化が進むという簡潔なグラフが得られ、具体的な値も先行研究 [2] に一致した。よって座屈による  $I_c$  劣化は仮説の 3 つのメカニズムによるものであると説明できる。

このような座屈による  $I_c$  劣化を防止するには、接合方法の改善や種々の条件出しなどの製作プロセスの改善によって、局所的な応力集中の箇所をなくすることが重要である。FAIR 導体において、接合が一樣に出来た試作導体では、 $I_c$  劣化が生じない結果が得られた。

#### 5. 結論

REBCO テープにおける座屈理論の適用の可能性について検証し、オイラーの式とジョンソンの式によって記述できることを示した。また熱収縮による局所的な座屈実験によって  $I_c$  劣化が生じることを実証し、解析によって座屈での  $I_c$  劣化のメカニズムを解明した。これによって導体開発においては、不均一性から発生する局所的な熱応力の集中で生じる座屈によるひずみも考慮する必要がある、という重要な知見が得られた。

#### 参考文献

- [1] T. Mito *et al.*; *J. Phys. Commun.*, 4 035009 (2020)
- [2] Simon Otten *et al.*; *Supercond. Sci. Technol.* 29 (2016)