

東京大学 大学院新領域創成科学研究科
基盤科学研究系
先端エネルギー工学専攻

令和 2 年度

修士論文

核融合装置用 HTS 導体の I_c 劣化の原因の究明

2021 年 1 月 26 日提出
指導教員 三戸 利行 教授

47196078 大辻 慎

目次

1. 序論.....	3
1.1. 研究背景	4
1.2. 研究目的	5
2. 研究の前提.....	6
2.1. 高温超伝導(HTS)テープの構造.....	6
2.2. 核融合装置用大電流容量 HTS 導体の構造.....	7
2.3. REBCO テープの I_c 劣化原因	8
2.3.1. I_c 劣化原因の推定	8
2.3.2. 座屈の理論式.....	11
2.3.3. 熱収縮による座屈の理論式.....	14
3. I_c 劣化の要素実験セットアップ.....	16
3.1. REBCO テープへの圧縮試験.....	16
3.2. 熱収縮による I_c 劣化実験	18
4. I_c 劣化要素実験結果.....	20
4.1. 圧縮試験結果.....	20

4.1.1. 座屈理論式への適応	20
4.1.2. 低温での REBCO テープの必要座屈荷重.....	22
4.2. 熱収縮による局所的な座屈実験	25
4.2.1. 各条件での I_c 測定結果	25
4.2.2. 座屈条件との比較.....	26
5. 解析・考察	27
5.1. 座屈による I_c 劣化のメカニズム	27
5.2. 座屈荷重の推定	32
5.3. 実際の FAIR 導体での座屈による劣化	34
5.4. 座屈による REBCO テープの劣化の防止	36
6. 結論.....	37
参考文献	38

1. 序論

1.1. 研究背景

超伝導材料は数 K から数十 K の材料毎に決まる臨界温度（常伝導状態から超伝導状態に移る境目の温度）以下で電気抵抗が 0 になる。超伝導材料から製造された超伝導導体はオームの法則による損失・発熱を生じないため、銅またはアルミニウムなどの通常の材料で作られた導体よりも桁違いに大きな電流を流すことができる。その性質を利用して超伝導導体で磁石を作成することができれば、より少ない損失ではるかに高い磁場を生成できる。その中でも高温超伝導導体（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。例えば加速器において 20 T を超える高い磁場は、円形加速器の直径が巨大になりすぎることを抑えながら、より高いエネルギーを持つ粒子の加速を可能にし、その結果より大きな衝突エネルギーを生み出すことが可能となり素粒子物理学の新しい発見につながる可能性がある。核融合装置に高温超伝導を適用することができれば、資源枯渇の観点から冷媒としての利用が制限される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。しかし、超伝導を磁石に適用するためには、磁石の規模に応じた大電流容量の導体を製作し巻線する必要がある。従来の LTS 導体では円形断面の素線であることから、撚り線として集合した大電流容量の導体とすることが容易であることに対し、HTS 導体では製作プロセスの制限から薄いテープ形状となってしまうことから、集合導体化をすることが困難である。そのため核融合装置に代表される大規模な磁石への適用が可能な大電流容量の高温超伝導導体は研究開発の段階である[1]。

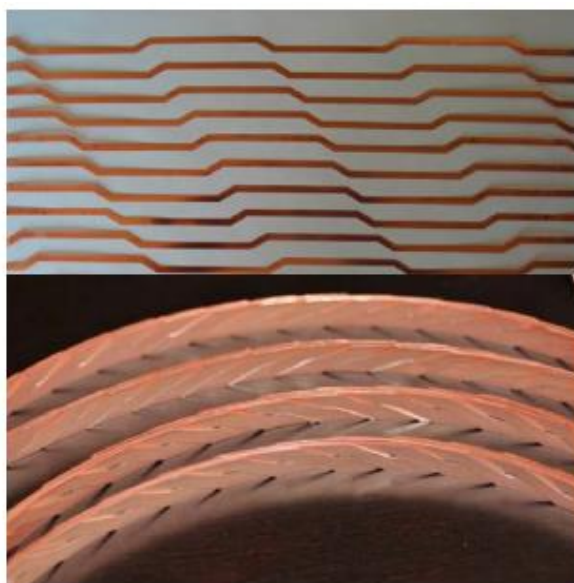


図 1.1 Roebel ケーブルの写真。蛇行形状のものを束ね 1 つのケーブルとしている[2]



図 1.2 TSTC 導体の外観図。ツイストした REBCO テープを積層している[5]

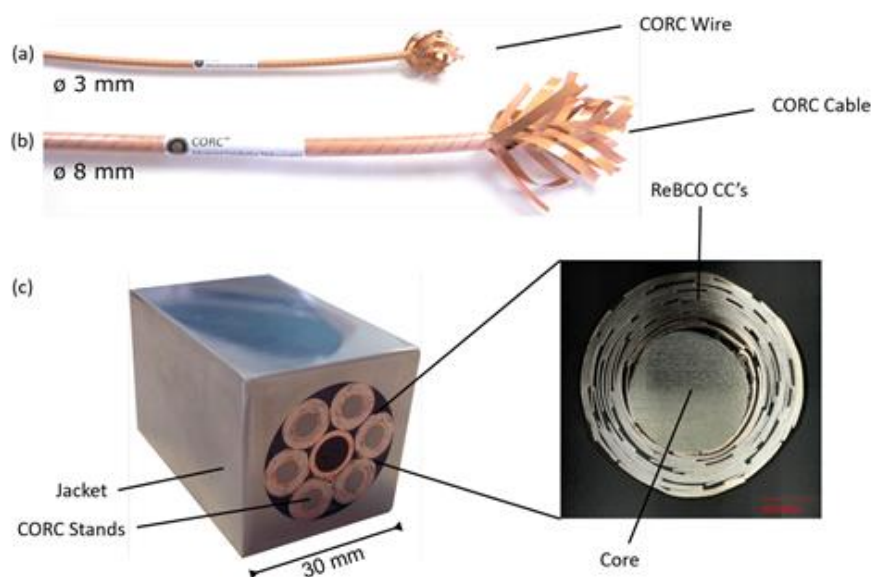


図 1.3 CORC ケーブル(a, b)と CORC ケーブルを構成要素とした CIC 導体(c) [11]

核融合装置、高エネルギー粒子加速器や検出器などに用いられる磁石に向けた大電流 HTS 導体は、ヨーロッパ・米国・日本・中国など様々な国で広く研究開発が行われている。例えばドイツのカールスルーエ工科大学 (KIT) では、REBCO テープを集合した Roebel 導体と呼ばれる導体が研究されており、核融合装置や次世代の高エネルギー加速器での利用を目的として研究開発がされている[2]。Roebel 導体は、図 1.1 のように REBCO テープを蛇行形状にパンチで切り抜き、撚り合わせることで導体を形成しており、Roebel 導体を利用した磁石のデモ機が製作されている[3]。米国の MIT では、ツイストした REBCO テープを積層して集合する、図 1.2 で示されるツイストスタックテープケーブル(TSTC)と呼ばれる構造が提案されている[4, 5]。核融合用の大型高磁場磁石用途としては、複数の TSTC

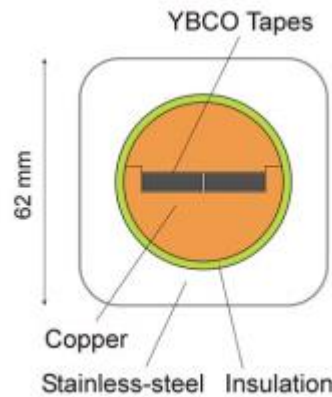


図 1.4 STARS 導体のコンセプト[12]

を構成要素として金属ジャケットに挿入する Cable-In-Conduit(CIC)導体と呼ばれる方法が提案されている。この TSTC と同様の構造を持つ導体は多く存在し、スイスの SPC の RSCCT 導体[6]、イタリアの ENEA のスロット CIC 導体[7]、ドイツの KIT の CroCo 導体[8]、中国の NCEPU の QI 導体などが挙げられる[9]。また、すでに市販が始まっている導体として CORC (Conductor on Round Core) 導体がある。図 1.3 のように中心の金属コアの周りに REBCO テープが多数の層で巻き付けられた円形断面のケーブル形状を特徴としており、核融合装置や高エネルギー物理学の検出器用途として CORC ケーブルを構成要素としたプロトタイプの CIC 導体も開発されている [10, 11]。日本の核融合科学研究所 (NIFS)では、東北大学と共同で図 1.4 のような REBCO テープを単純に積層し、機械的に強いジャケット材料で覆う STARS 導体を提案している [12]。ヘリカル型核融合炉 FFHR への適用を想定して、100 kA クラスの短尺導体がテストされ、20 kA クラスの長尺導体が開発されている。

これらの導体は短いピッチ長でのねじりや曲げにより超伝導特性が劣化し、さらには製作段階においても想定されていない性能の劣化が存在している（詳細は 2 章にて記述）。性能の劣化の原因は定性的には提案されてはいるものの、定量的な評価は今後の研究課題とされている。

1.2. 研究目的

本研究の目的は、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 劣化原因を解明することである。特に核融合科学研究所(NIFS)で開発している大電流 HTS 導体である FAIR 導体（詳細は 2 章にて記述）における I_c 劣化に着目し、 I_c 劣化の原因の解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. 高温超伝導(HTS)テープの構造

まず REBCO テープとは、希土類元素(RE)にバリウム(Ba)、銅(Cu)、酸素(O)と組み合わせた結晶構造に基づくセラミックステープのことを指し、それぞれの頭文字(RE, B, C, O)を並べて REBCO と称している。希土類元素として一般に用いられるものはイットリウム(Y)であり、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (YBCO) 結晶構造を形成している。そのほかにも化学的に類似したいくつかの希土類元素 (例: ガドリニウム(Gd), GdBCO) でも同様の結晶構造を形成している。超伝導層は結晶の配向性の不一致が超伝導状態で流せる電流の大きさに悪影響を与えるため、配向を揃えるように高精度で成長させる必要があり、高度で費用のかかる方法が利用される。REBCO 層が多くの場合は、ハステロイ C-276 基板上に結晶の原子配置を調整する中間層を形成し、中間層の上に生成される。そして、化学的保護のために REBCO 層は銀の薄いコーティングで覆われ、銅安定化層がテープの片面または両面に電気メッキされる。一般的な REBCO テープの構造を図 2.1 に示す。厚さ $50 - 100 \mu\text{m}$ の ハステロイ基板は厚さ $1 - 2 \mu\text{m}$ の超伝導層の機械的支持体として機能する。

REBCO テープやその他の超伝導線材の性能は、臨界電流 I_c と線材長手方向の一様性を示す n 値で表すことができ、どちらも高い値であるほど性能が良いことを示す。これらは磁場 B ・磁場の角度 φ ・温度 T ・ひずみ ε に依存し、テープの電流電圧特性は以下のべき乗則として表される。

$$E = E_0 \left(\frac{I(B, \varphi, T, \varepsilon)}{I_c(B, \varphi, T, \varepsilon)} \right)^{n(B, \varphi, T, \varepsilon)} \quad (2.1)$$

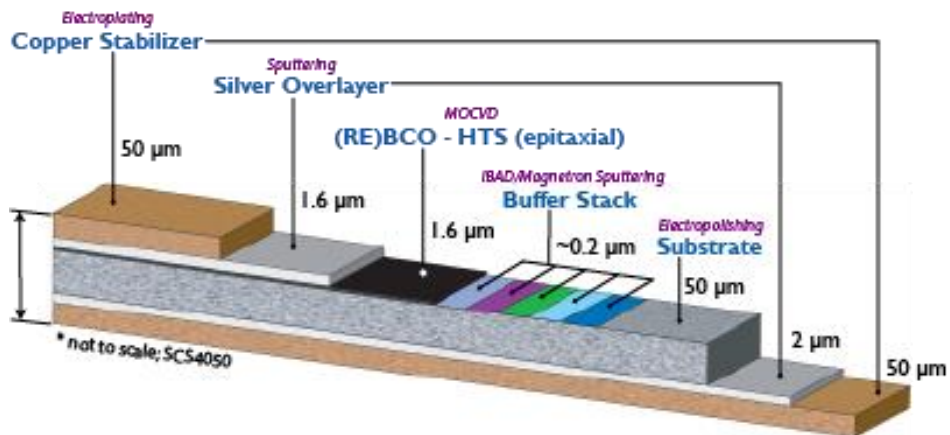


図 2.1 一般的な REBCO テープの構造 (Super power Inc.) [13]

E は電界、 E_0 は電界基準（この論文では $100\text{ }\mu\text{V/m}$ ）、 I は動作電流値、 I_c はテープの臨界電流、 n はテープの n 値である。 n 値は異なるテープメーカー間で類似した値をとり、77 Kで約25～30、4.2 Kで40～60の値をとるものが多い。

2.2. 核融合装置用大電流容量 HTS 導体の構造

ここでは REBCO テープを使用した大電流容量導体の 1 つであり、NIFS で開発中の FAIR 導体について説明する。FAIR 導体とは、製作におけるプロセスと材料（摩擦攪拌接合 (Friction Stir Welding, FSW)、アルミニウム合金ジャケット (Al alloy jacket)、間接冷却 (Indirect cooling)、および REBCO テープ) のそれぞれの文字をとって呼称している。FSW は、英国の溶接研究所(TWI) によって 1991 年に考案された金属接合技術である[14]。図 2.2 に FAIR 導体の構成を示し、実際に製作された導体の写真を図 2.3 に示す。製作プロセスとしては、円形断面のアルミニウム合金ジャケットの溝に REBCO テープと衝撃吸収材となる高純度アルミニウムシートを交互に積層し、FSW を使用してジャケットに蓋を接合した後、REBCO テープ間の電流分布を均等にし機械的および電気的特性を均一化するために、導体をねじることによって製作される。

FAIR 導体の特徴の 1 つは蓋部の接合に一般的な溶接やハンダ付けではなく、FSW を使っていることである。アルミニウム合金ジャケットにハンダ付けで蓋を接合すると、導体をねじる際に接合部が破損してしまう。したがって、機械的に強い方法によって蓋を接合することが必要となるが、一般的な溶接では溶接部の温度上昇が大きく REBCO 線の特性を劣化させてしまう。NbTi 等の低温超伝導線にアルミニウムを被覆する場合に使われる同時押し出し法を使用して超伝導線にアルミニウムを接合するには、およそ 400°C 以上に加熱する必要がある。しかし REBCO テープは 200°C を超える温度で加熱すると超伝導層結晶構造

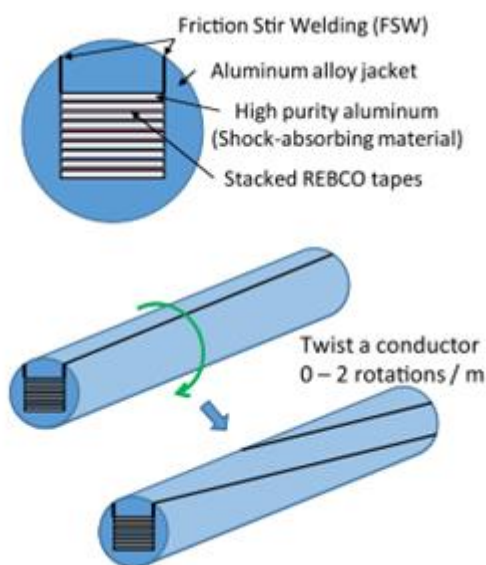


図 2.2 FAIR 導体の模式図 [15]

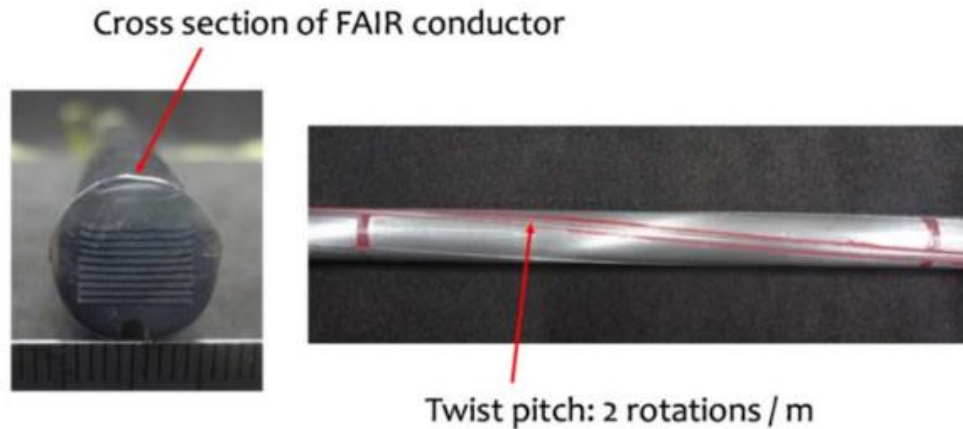


図 2.3 実際の FAIR 導体の断面図と全体図 [15]

の酸素分率が減少して I_c が低下するため使用することができない。FSW の最高温度は接合部分でも 200°C以下で内部の REBCO テープへの温度は 150°C程度にできるため、内部の REBCO テープの温度上昇による I_c 低下の影響を抑えることができる。

2.3. REBCO テープの I_c 劣化原因

2.3.1. I_c 劣化の原因の推定

本研究における REBCO テープの劣化とは、様々な要因で臨界電流 I_c が元々の値より低くなることを表す。図 2.4 は REBCO テープを用いたエポキシ含浸 HTS コイルの劣化の振る舞いである[17][18]。 I_c はエポキシ含浸前の 64 A からエポキシ含浸後において 31 A(58%)に劣化し、立ち上がりの電圧は 45 A から 8 A(18%)になってしまっており、見た目としても REBCO テープの超伝導層が破壊され中間層が表れてしまっている。導体の劣化の例として図 1.3 で示した CORC CIC 導体での特性劣化を図 2.5 に示す[19]。この導体は多数の REBCO テープで構成されているが、そのほとんどで REBCO テープが劣化している結果が得られている。

これまで REBCO テープ単体における I_c 劣化現象の研究はこれまでになされており、以下に劣化事象のいくつかの例を挙げる。

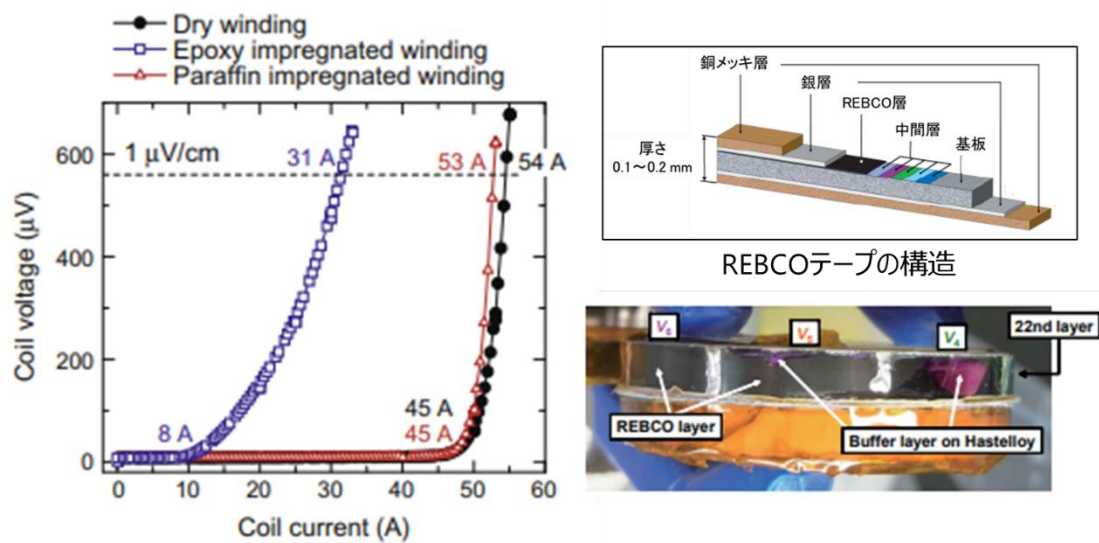


図 2.4 エポキシ含浸 HTS コイルの特性劣化。 I_c が 54 A から 31 A (58%) に劣化。
図中の写真において中間層が露出している [17][18]

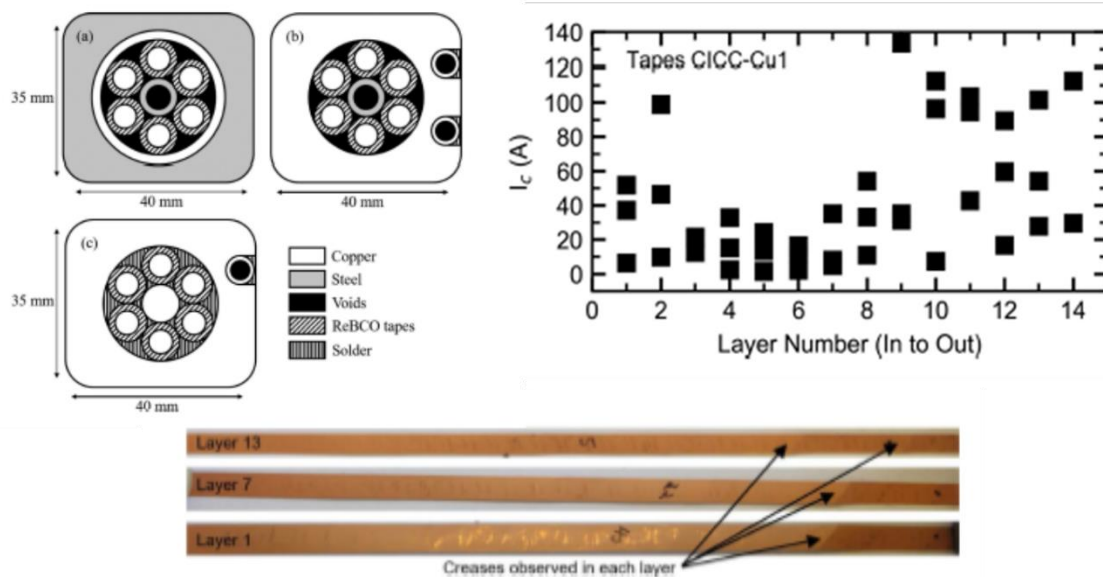


図 2.5 CORCCICC (左上図) の特性劣化。すべてのテープが135 Aの初期 I_c から劣化 (右上図)。写真の矢印は亀裂部分を表す [19]

・テープの引っ張りや圧縮

式(2.1)の通り超伝導体の通電特性はひずみを変数として持つ。図 2.6 に一般的な REBCO テープのひずみ依存性を示す。一般に REBCO テープ線は引張応力よりも圧縮応力に強く、図中では+0.5%の引っ張りひずみを超えると REBCO テープは不可逆的な劣化を示し始める。圧縮ひずみ方向では引っ張り方向に比べ広い範囲で可逆的な振る舞いを見せ、可逆的な範囲においては REBCO テープはひずみを取り除くと I_c は元の値に戻る。

・REBCO テープの剥離

REBCO テープは図 2.1 のように、ハステロイ基板に中間層および超伝導層とその保護層を成長させた構造となっているがこれらの層間には強い結合がない。そのため REBCO 層の表面を xy 平面とした場合、 σ_{zz} の表面を引っ張られる力や σ_{zx}, σ_{zy} といった表面を滑らすような力によって簡単に剥離してしまう。図 2.4 における中間層の露出は剥離が生じて発生したといえる。剥離の原因となるのが、異種材料間での熱膨張率（熱収縮率）の違いによる熱応力と、磁場中で電流を流した際のローレンツ力によるものである。引っ張りや圧縮とは違い剥離は簡単には定量化ができないが、REBCO テープの剥離強度を測定する方法は提案されている[21]。

・REBCO テープの座屈

まず座屈とは、軸方向に圧力を受ける柱や狭い方の面に圧力を受ける板などにおいて、圧力がある限界値に達すると急に力に垂直な方向に湾曲が生ずる現象のことである。図 2.7 に FAIR 導体での I_c 測定の結果を示す。図 2.7 の縦軸の通電特性は元々の臨界電流 I_{c0} を用いて I_c/I_{c0} で規格化してある。この導体では製作直後ですでに 2 割ほど劣化している結果が得ら

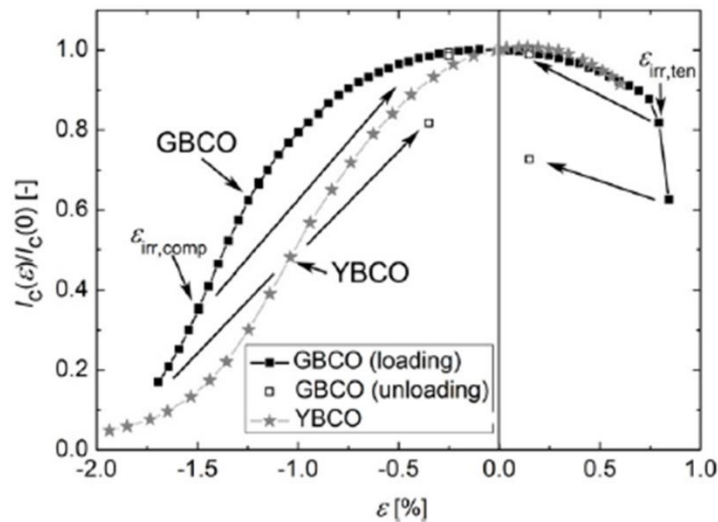


図 2.6 REBCO テープのひずみ依存性 [20]

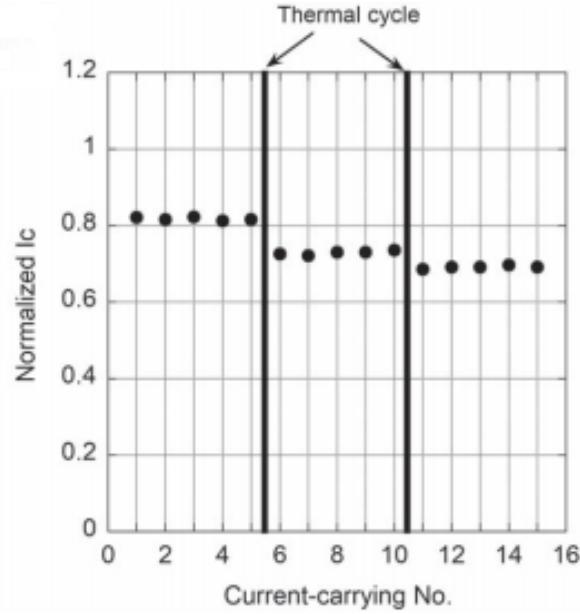


図 2.7 FAIR 導体テープでの I_c 測定結果 [15]

れている。FAIR 導体ではアルミニウム合金ジャケットに REBCO テープを入れているため、導体製作時(473 K、FSW 時の最大温度上昇)から通電試験時の液体窒素温度 77 K の冷却で、REBCO テープには材料の熱収縮率の差から圧縮方向の熱応力が加わる。ここで、単純なひずみであるとする REBCO テープには 0.3% のひずみがかかるが、その値は一般的な REBCO テープでは劣化するほどの大きさではないことから I_c 劣化を説明することができない[16]。そこでこの I_c 劣化の原因は熱収縮によって REBCO テープに一様に加わる圧縮ではなく、局所的な応力集中が起きて座屈したためと推定できる。REBCO テープは薄いため均等に固定されていないと局所的に弾性変形をせずに座屈が生じることは定性的には十分考えられる。しかし REBCO テープにおける座屈を、定量的な評価や I_c 劣化につなげた研究はこれまでにない。次項(2.3.2., 2.3.3.)で詳細に説明するが、本研究では REBCO テープの冷却時の局所的な座屈の発生による I_c 劣化特性に着目していく。

2.3.2. 座屈の理論式

REBCO テープの局所的な座屈を議論する前に、ここではオイラーの座屈の理論を記述する。ある境界条件($x = 0, y = 0, L$)で両端が固定されていない物体が両側から力 P を受けて曲げモーメント $P \cdot y$ で図 2.7 のように座屈する(たわむ)とする。このときの微分方程式は以下の式(2.2)となる。

$$\frac{d^2 y}{dx^2} + \frac{P \cdot y}{E \cdot J} = 0 \quad (2.2)$$

ここで E はヤング率、 J は弾性 2 次モーメントである。図 2.7 の場合には弾性 2 次モーメントは式(2.3)で表される y 軸成分を求めればよく(C : 断面 C , dC : 微小断面)、特に REBCO テープのような断面が長方形の場合には式(2.4)で簡単に書き表すことができる。

$$J_y = \int_C z^2 dC \quad (2.3)$$

$$J_y = \frac{1}{12} b \cdot h^3 \quad (2.4)$$

ここで b は z 軸方向の長さ(長方形の幅に対応)、 h は y 軸方向の長さ(長方形の厚さ)であり、境界条件($x = 0, y = 0, L$)のでの式(2.2)の解は式(2.5)(2.6)となる。

$$y = A \sin kx \quad (2.5)$$

$$k^2 \equiv \frac{P}{E \cdot J} \quad (2.6)$$

境界条件($x = 0, y = 0, L$)を満たす $k\pi = m\pi$ ($m \in \mathbf{Z}$)の下で式(2.6)を式変形することによって座屈に必要な荷重 P を求めることができる (式(2.7))。

$$P = m^2 \pi^2 \frac{E \cdot J}{L^2} \quad (2.7)$$

荷重 P は整数 m の値によって無数に存在するが、ここで必要な値は最小の荷重であるので、最小の座屈荷重 P_{CR} は式(2.8)で表すことができる。

$$P_{CR} = \pi^2 \frac{E \cdot J}{L^2} \quad (2.8)$$

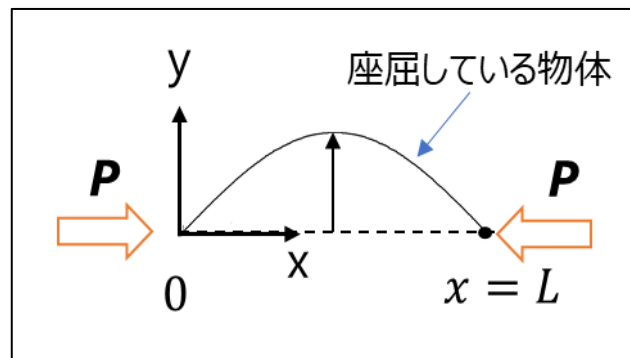


図 2.8 基本的な座屈

式(2.8)は両端を固定していない（ピン-ピン）の場合の座屈荷重 P_{CR} であるが、物体の両端の状態は両方固定しているものや片方のみ固定などがあり、端部の固定方法によって座屈荷重は変わってくる。その場合も各々の条件で式(2.2)のように微分方程式を解くことによって求めることはできるが、実用上座屈長さ L_k を導入することによって記述されることが多い。座屈長さ L_k とは、実際に座屈が生じるとみなせる長さであり、 L_k を用いて書き直した式を式(2.9), (2.10)に表す。

$$L_k = \alpha \cdot L \quad (2.9)$$

$$P_{CR} = \pi^2 \frac{E \cdot J}{L_k^2} \quad (2.10)$$

α は端末係数と呼ばれる値であり、両端の固定方法によって変わる定数である。例えば両端固定の場合は $\alpha = 0.5$ と実際に座屈が生じる長さは全体の半分となり、両端を固定していない場合は $\alpha = 1$ となり式(2.8)に一致する。また座屈長さ L_k は条件によって異なる値をとるので、より一般化した指標として細長比 λ を導入する（ここでは細長比には座屈長さ L_k 用いている）。細長比 λ は J, L_k, S (断面積)を用いて以下の式(2.11)で表され、値が大きいほど細長いことを示す。細長比を用いて式(2.10)を力 P_{CR} から座屈に必要な応力 σ_{CR} 書き換えたより一般的な式が式(2.12)である。同じ細長比を持つ物体であるならヤング率のみで座屈応力は決まる。

$$\lambda = L_k \sqrt{\frac{S}{J}} \quad (2.11)$$

$$\sigma_{CR} = \pi^2 \frac{E}{\lambda^2} \quad (2.12)$$

式(2.12)からわかるように、細長比 λ が限りなく小さくなると σ_{CR} は発散してしまうが、実際には有限な値で物体は座屈する。物体によって差異はあるものの、一般に金属では細長比 λ が80～100以上の場合の細長い柱にオイラーの座屈理論から導出される式(2.12)が成り立つとされる。よって、それ以下の値のいわゆる太くて短い短柱には、以下の式(2.13), (2.14), (2.15)で表される経験則的に求められた短柱用の座屈応力の式が用いられる。

$$\sigma_{CR} = \frac{\sigma_{DL}}{1 + \alpha_L \lambda^2} \quad (2.13)$$

$$\sigma_{CR} = \sigma_{DT} (1 - \alpha_T \lambda) \quad (2.14)$$

$$\sigma_{CR} = (\sigma_Y - \frac{\sigma_Y}{4\pi E} \lambda^2) \quad (2.15)$$

それぞれランキン(2.13)、テトマイヤー(2.14)、ジョンソン(2.15)の式と呼ばれる。
 $\sigma_{DL}, \sigma_{DT}, \alpha_L, \alpha_T$ は実験的に求められた応力定数と定数であり、 σ_Y は耐力である。

2.3.3. 熱収縮による局所的な座屈

図 2.8 に FAIR 導体における熱収縮による局所的な座屈の模式図を表す。アルミニウム合金ジャケットにおける蓋の接合が一樣にできていないことによって、局所的な空間において 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 REBCO テープに局所的な応力集中が生じる。そしてその応力集中によって REBCO テープが局所的に座屈すると考えられる。

ここではまず、局所的な応力集中である熱応力の具体的な推定を行う。異なる熱膨張率（熱収縮率）を持つ物体をある基準となる温度環境下で固定し、温度変化をさせるとそれぞれ異なる長さになろうとするが、それぞれの物体の引張りおよび圧縮力が釣り合う状態で安定する。FAIR 導体の構成はアルミニウム合金ジャケットと REBCO テープの 2 つの物体の熱応力の釣り合いで記述でき、その時の REBCO テープにかかる熱応力を式(2.16)に示す（ここでは熱荷重 F_{RE} で導出している）。

$$F_{RE} = \left| \frac{\frac{S_{Al}E_{Al}}{1-\bar{\alpha}_{Al}\Delta T} \times \frac{S_{RE}E_{RE}}{1-\bar{\alpha}_{RE}\Delta T}}{\frac{S_{Al}E_{Al}}{1-\bar{\alpha}_{Al}\Delta T} - \frac{S_{RE}E_{RE}}{1-\bar{\alpha}_{RE}\Delta T}} (\bar{\alpha}_{Al} - \bar{\alpha}_{RE})\Delta T \right| \quad (2.16)$$

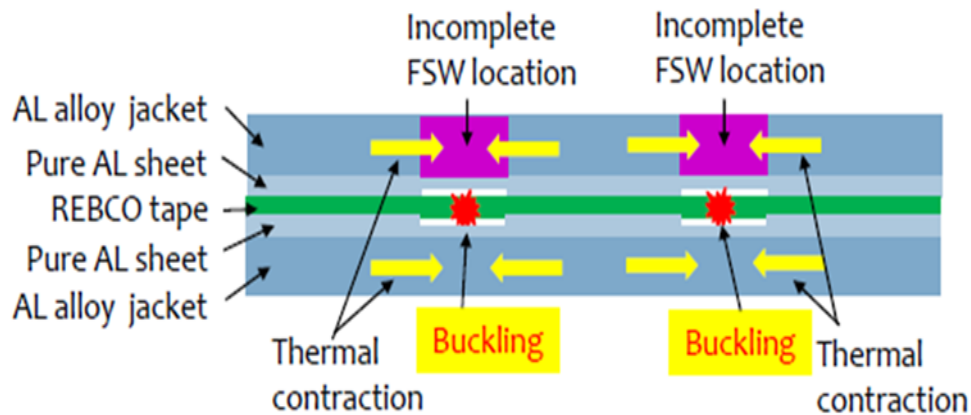


図 2.9 FAIR 導体での熱応力による局所的な座屈の発生

ここで添え字 AL, RE はそれぞれアルミニウム合金ジャケット・REBCO テープを表し、 S, E は変化後の温度（例えば FAIR 導体では 77 K）での断面積・ヤング率、 $\bar{\alpha}$ は温度変化範囲における平均熱膨張係数を表す。また式(2.16)は $S_{AL}E_{AL} \gg S_{RE}E_{RE}$ であれば簡単に近似して式(2.17)となる。また式(2.17)を応力 σ_{RE} および REBCO テープのひずみ ϵ_{RE} に換算したものを式(2.18), (2.19)に示す。FAIR 導体の例として、式(2.19)に 77 K の各種物性値を代入し FSW での温度 423 K を基準温度としたときの REBCO テープのひずみ ϵ_{RE} は、前述の通り 0.3%程度の圧縮ひずみが生じると計算できる。

$$F_{RE} = \left| \frac{S_{RE}E_{RE}}{1 - \bar{\alpha}_{RE}\Delta T} (\bar{\alpha}_{AL} - \bar{\alpha}_{RE})\Delta T \right| \quad (2.17)$$

$$\sigma_{RE} = \left| \frac{E_{RE}}{1 - \bar{\alpha}_{RE}\Delta T} (\bar{\alpha}_{AL} - \bar{\alpha}_{RE})\Delta T \right| \quad (2.18)$$

$$\epsilon_{RE} = \left| \frac{1}{1 - \bar{\alpha}_{RE}\Delta T} (\bar{\alpha}_{AL} - \bar{\alpha}_{RE})\Delta T \right| \quad (2.19)$$

この熱応力（熱荷重）と 2.2.2.項での座屈荷重・応力 P_{CR}, σ_{CR} との比較によって REBCO テープに座屈が生じるか議論することができる。

3. I_c 劣化の要素実験セットアップ

F_{RE} は低温での物性値と各種条件によって導出できるが、REBCO テープで座屈の理論を適用した研究はなく、 P_{CR}, σ_{CR} の導出する方法や値の妥当性などの議論はされたことはない。そこで実験では、圧縮試験機を用いた REBCO テープの室温での要素実験によって座屈の理論をどのように適用すべきかについて確認した。次に低温での座屈荷重・応力 P_{CR}, σ_{CR} をどのように導出すべきかを検討した。そしてそれらの結果をもとに熱収縮による I_c 劣化の模擬実験を行い、座屈による I_c 劣化の検証および定量化を行った。

3.1. REBCO テープへの圧縮試験

図 3.1 に実験で用いた圧縮試験機の全体写真を示す。圧縮試験機は A&D 社の MCT-2150 を使い、REBCO テープを固定する治具は別途製作したものをを用いた。REBCO テープにおける室温での座屈荷重を確認するために、室温において座屈試験を実施した。REBCO テープの両端を固定した治具の空間 L を1 mmから4 mmに変化させつつ圧縮試験を行い座屈させた。図 3.2 は圧縮試験の様子である。ただし視認性をよくするために図 3.2 では空間 L を大きくとっており、実際には図 3.3 のように微小な空間 L を変化させて実験を行った。実験で用いた REBCO テープの諸元を表 3.1 に示す。以下ではこのテープを S テープと記述する。

表 3.1 実験で用いた REBCO テープ

商品名	メーカー	線材幅 (mm)	金属基板 (μm)	安定化層 (μm)	厚さ (mm)
SCS 4050	SuperPower Inc.	4	50	片側 20 (両側 40)	0.097

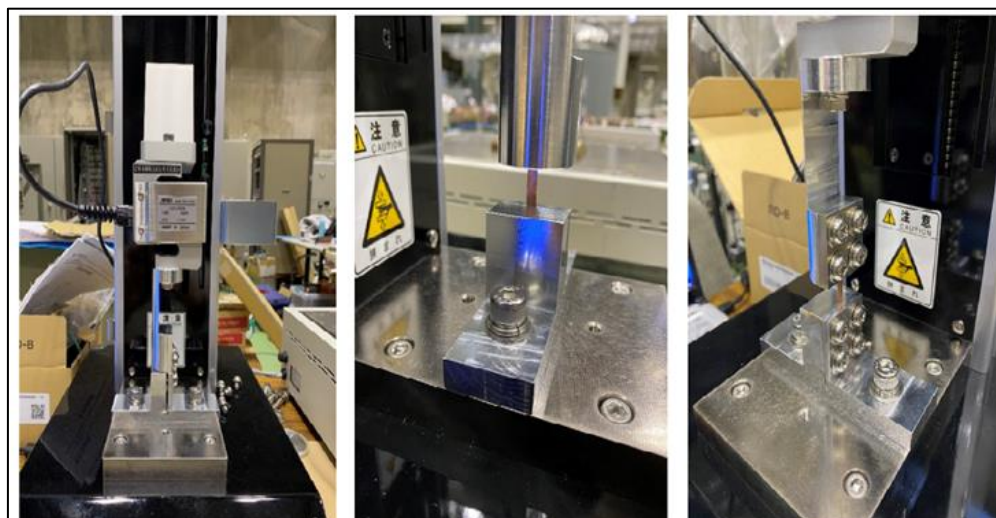


図 3.1 圧縮試験機の全体写真

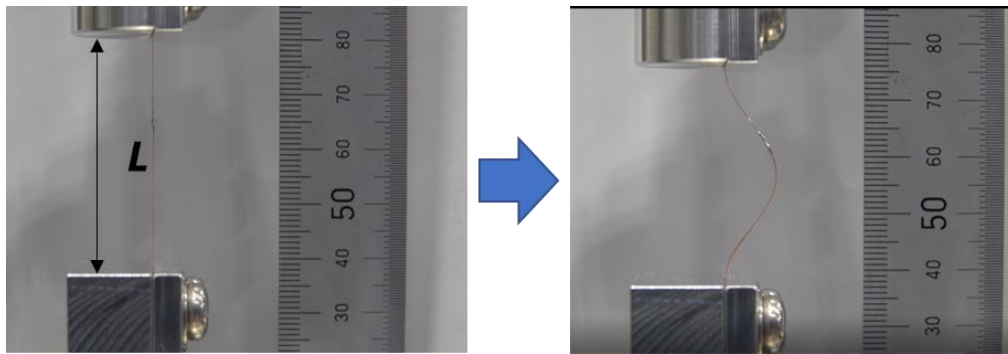


図 3.2 圧縮試験の様子（ただし実際の実験条件とは異なる）



図 3.3 $L = 1 \text{ mm}$ での実際の圧縮試験の様子

3.2. 熱収縮による I_c 劣化実験

熱収縮による I_c 劣化を模擬する実験装置を図 3.4 に示す。REBCO テープをアルミニウム合金製の土台の上に置き、上から局所的な非拘束部である空間 L が刻まれているアルミニウム合金製の固定具で挟みこむことで、図 2.8 で想定するように空間 L において REBCO テープに異なる熱膨張率（熱収縮率）による熱応力が生じさせる。空間 L は1 mmから4 mmまで0.5 mmずつ変えることができ、空間 L を変化させた REBCO テープについて 77 K の液体窒素中で I_c を測定した。また、式(2.16)から(2.19)でわかる通り、熱応力は温度変化があるほど大きくなり、この実験では基準温度から目的とする温度(77 K)までに相当する。ここでは温度変化による熱応力を変化させるために、基準温度として常温(300 K)で固定した場合と、高温(423 K (150°C)、FSW の温度を模擬)で固定した場合の2条件で実験を行った。高温(423 K)の場合は図 3.5 のようにホットプレート上で加熱し、REBCO テープを目的の温度となったときに固定具をネジ締めすることで固定した。図 3.5 の通り、加熱および固定時にネジの頭で土台が浮いて下のアルミニウム合金全体がホットプレート触れていないこともあることから、ホットプレートの温度より REBCO テープの温度は低く REBCO テープの温度の特定が困難であった。そこで、融点 423 K の低温はんだを実験装置に付着させ、はんだが融け始める際のホットプレートの温度の条件出しをし、その時に REBCO テープの温度が 423 K になったと見なすことで固定した。このときの各温度変化範囲での平均熱膨張係数と、実験では $S_{Al}E_{Al} \gg S_{RE}E_{RE}$ とみなすことができるため式(2.17)を用いて求められる熱荷重 F_{RE} の計算値を表 3.2 に示す。この熱荷重 F_{RE} が座屈荷重 P_{CR} より大きければ座屈すると考えられる。実験では、座屈が REBCO 層の内側に生じる場合と外側に生じる場合の2つを比較するため、REBCO テープの裏表を区別して配置した。図 3.4 において REBCO 層が下のアルミニウム合金ジャケットに向いている場合が裏、上に向いている場合が表である。

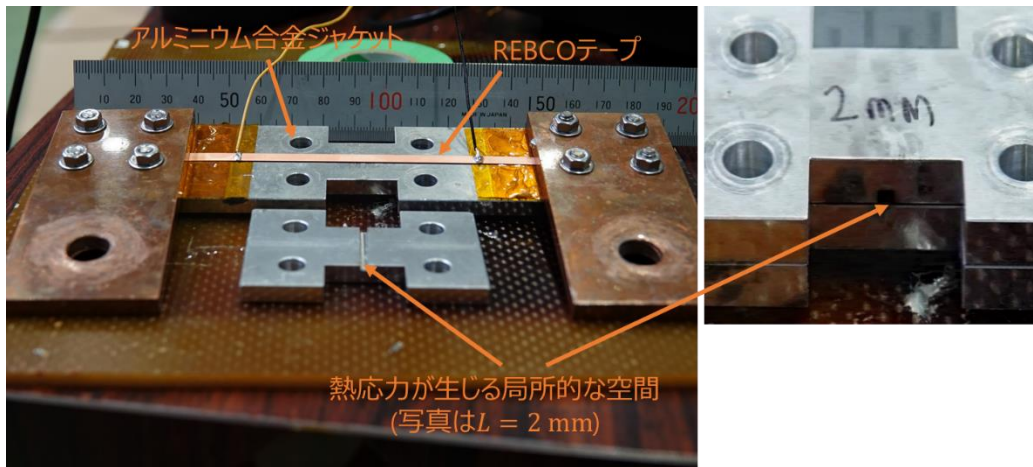


図 3.4 左図は実験装置の全体図。右図は拡大写真。

表 3.2 各温度変化範囲での平均熱膨張係数と熱応力の計算値

温度変化範囲	$\overline{\alpha_{Al}} (10^{-6}/K)$	$\overline{\alpha_{RE}} (10^{-6}/K)$	力 (N)
300 K-77 K	19.3	12.7	62
423 K-77 K	20.6	12.2	122

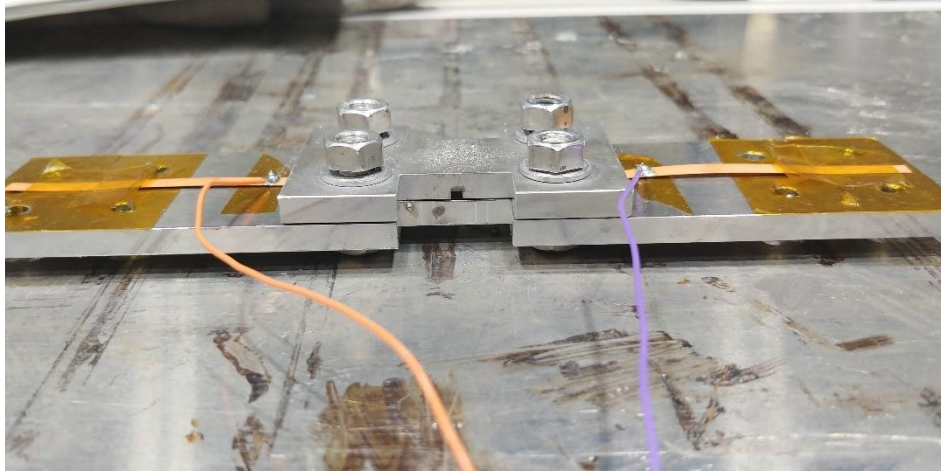


図 3.5 ホットプレートの上に置いた実験装置を加熱する様子。

4. I_c 劣化の要素実験結果

4.1. 圧縮試験結果

図 4.1 に S テープの $L = 2 \text{ mm}$ のときの荷重-変位曲線を示す。荷重-変位曲線の最大荷重を座屈荷重とし図 4.1 の場合は 80 N である。同様の測定を L を変えて行い、それぞれの場合の座屈荷重をプロットしたグラフが図 4.2 である。縦軸の Critical load (N) は、各 L における最大荷重を示している。

これらの室温中での試験値に対し、REBCO テープの熱応力による座屈について検証している実験条件は 77 K であるため、2 章での座屈の理論をもとに 77 K における座屈荷重を理論的に推定していく。

4.1.1. 座屈理論式への適応

座屈の理論式はヤング率と弾性 2 次モーメントによって記述されるが、REBCO テープは複合材であるため値の扱いが単純ではない。ここではまず、REBCO テープはおおよその機械的特性が REBCO テープに用いられている基板によって決まることから、表 3.1 の通り S テープの基板である幅 4 mm 、厚さ $50 \mu\text{m}$ のハステロイ C-276 の単独材であると簡略化して検証した。

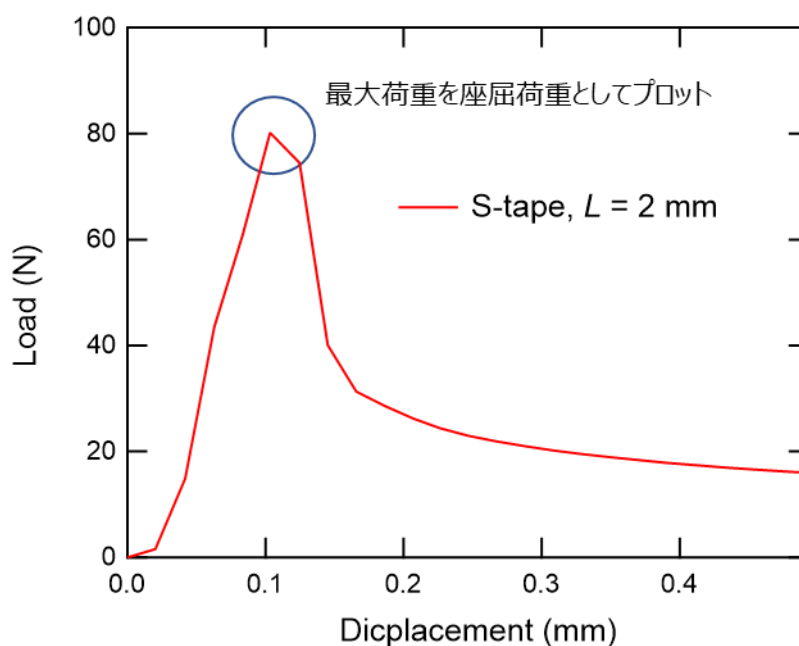


図 4.1 S テープでの $L = 2 \text{ mm}$ における荷重-変位曲線。最大荷重を座屈荷重とした

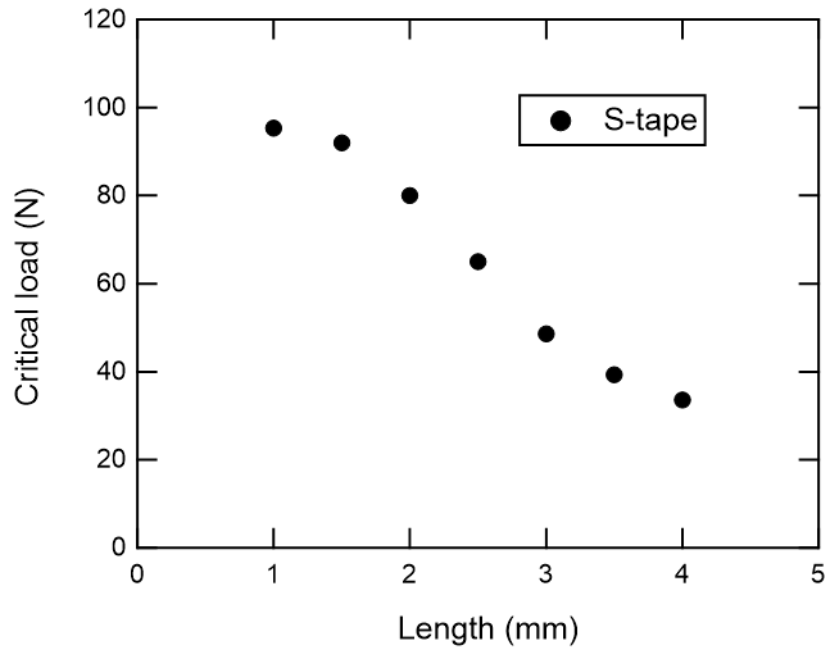


図 4.2 各 L における座屈荷重のプロット

図 4.3 にオイラーの座屈理論の式(2.10)から導出した座屈荷重を重畳させた結果を示す。下軸が L の長さ、上軸が細長比、縦軸が荷重である。また、図 3.3 に示すようにテープの両端を固定し圧縮試験を行っているため、式(2.10)での端末係数は $\alpha = 0.5$ である。およそ以上でよい一致を示しているが、 $L = 2 \text{ mm}$ 未満ではオイラーの座屈理論と乖離が見られる。上軸の細長比で座屈荷重を見ると $L = 1 \text{ mm}, 1.5 \text{ mm}, 2 \text{ mm}$ では細長比が 80 未満となり、厚さ $50 \mu\text{m}$ 薄いハステロイ C-276 にも関わらずオイラーの座屈理論からは短柱とみなされてしまうためである。そこで、式(2.13)から式(2.15)の短柱用の座屈の理論を用いる必要がある。しかし、式(2.13)-(2.15)はどれも経験則的なものであり使い分けの基準は存在していない。どの式を適用すべきかを考えると、式(2.13), (2.14)のランキンの式とテトマイヤーの式には実験的に求められた応力定数と定数が必要となるが、ハステロイ C-276 でのそれぞれの定数の値は不明である(加えて低温における定数の扱いも不明)。それに対しハステロイ C-276 の 0.2%耐力は既知であり、その値によって式(2.15)で表されるジョンソンの式での定数である耐力 σ_Y は換算できるため、この研究ではジョンソンの式(2.15)を用いた。

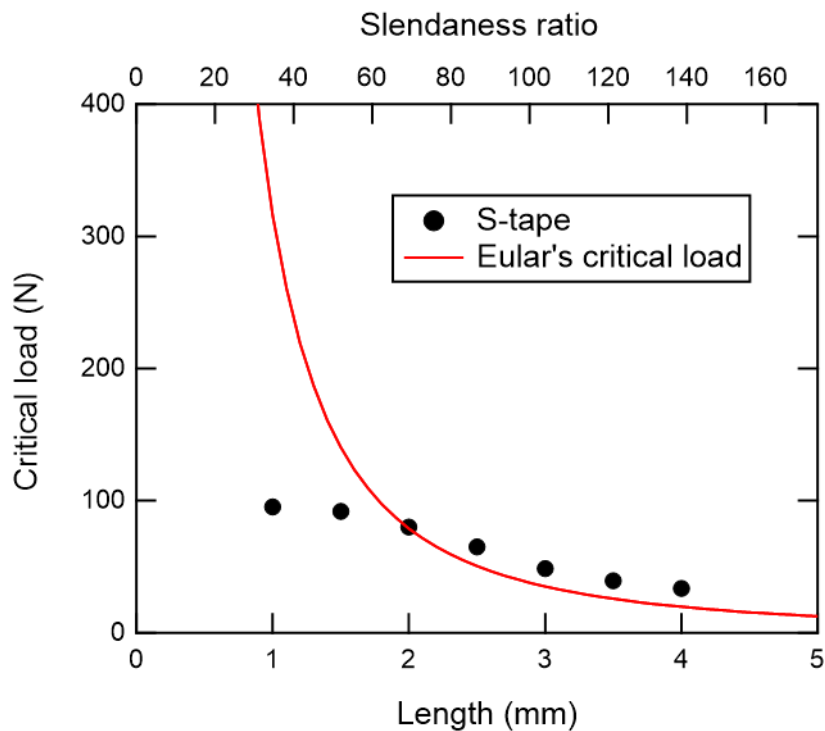


図 4.3 実験値とオイラーの座屈荷重

ジョンソンの式で導出した座屈荷重を加えたグラフを図 4.4 に示し、2つの式の交点でグラフを結合し横軸を拡大したものを図 4.5 に示す。ハステロイ C-276 の物性値は C. C. Clickner *et al.*[22]の論文より引用し、表 4.1 に各温度での物性値を示す（以下、77 K も含めこの論文より引用）。 L が短い区間ではジョンソンの式、長い区間ではオイラーの式で実験の座屈荷重をよく表している。図 4.4 での推定した座屈荷重はハステロイ基板以外の存在を無視していることもあり実験的に得られた値よりやや小さく出ているが、これらの式によって室温での座屈荷重を理論的に推定出来たといえる。

4.1.2. 低温での REBCO テープの必要座屈荷重

図 4.5 は物性値から導出できるため、式(2.10)と式(2.15)に 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できる。表 4.1 にこの研究で用いたハステロイ C-276 での物性値を示し、図 4.6 に 77 K での S テープにおける座屈荷重の推定値を示す。図 4.6 での線は常温と高温での固定の場合に生じる熱荷重である。

表 4.1 ハステロイ C-276 の物性値[22]

温度	幅 (mm)	厚さ (μm)	ヤング率 (GPa)	0.2 %耐力 (MPa)
300 K	4	50	190	699
77 K	4	50	210	477

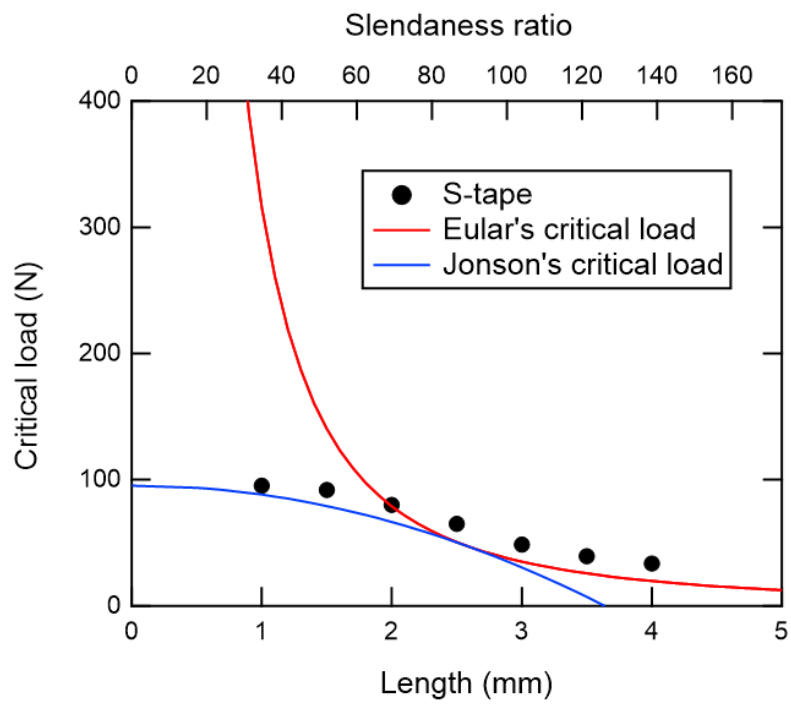


図 4.4 図 4.3 にジョンソンの式を加えたグラフ

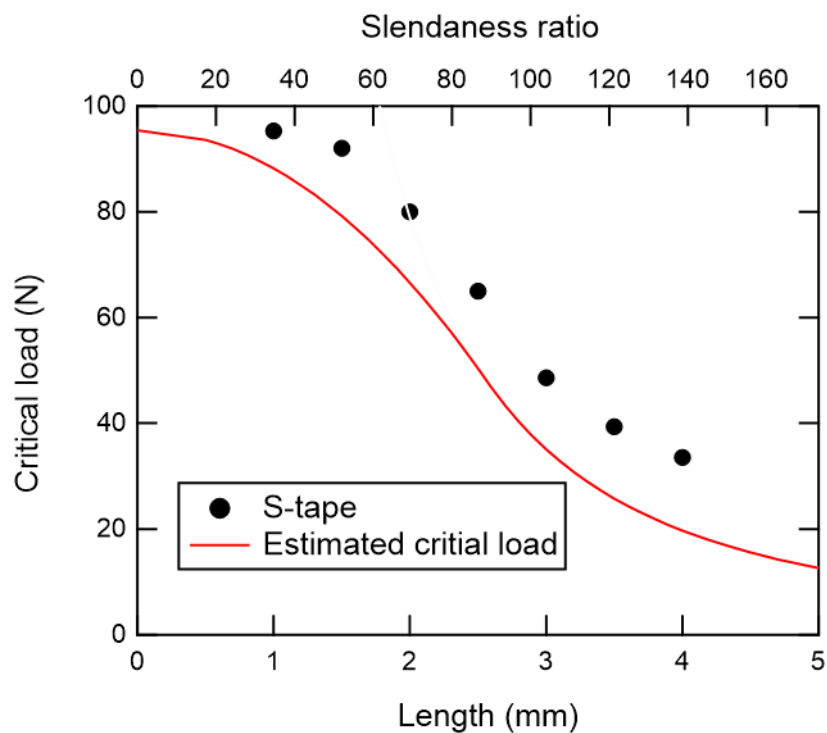


図 4.5 室温での実験で得られた座屈荷重と理論的に求めた座屈荷重

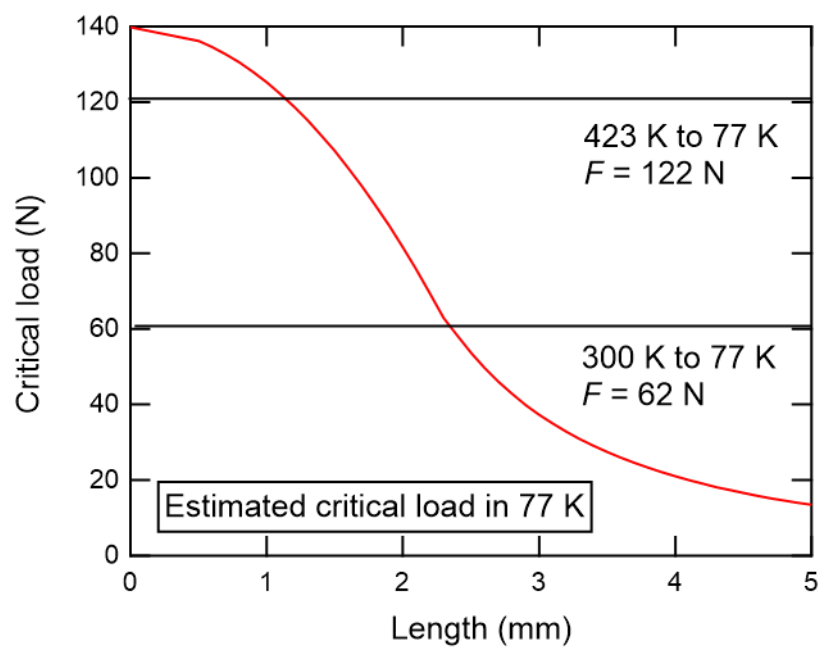


図 4.6 77 K での S テープの座屈荷重の推定値

4.2. 熱収縮による局所的な座屈実験結果

4.2.1. 各条件での I_c 測定結果

図 4.7 では REBCO 層が座屈させる空間に対し下側になるように裏に配置した場合、図 4.8 では上側になるように表側に配置した場合の、S テープを常温および 423 K において REBCO テープを固定し、77 K に冷却して熱収縮による局所的な座屈を生じさせた際の I_c 測定結果を示す。ここで I_c は固定前の S テープの I_c を I_{c0} として規格化してある。図 4.7 と図 4.8 とともに常温で固定した場合ではどの長さ L でも I_c 劣化は見られなかったが、423 K で固定した場合は $L = 4$ mmから小さくなるにつれて劣化していき、 $L = 2$ mmで最大の劣化を示した。ただし $L = 1.5$ mmまで小さくなると劣化が生じなくなり、 $L = 1$ mmでも劣化は生じない結果が得られた。裏側で配置した場合は $L = 2$ mmで 7%、表側で配置した場合は $L = 2$ mmで 19%の最大の劣化と異なる劣化度合いとなった。

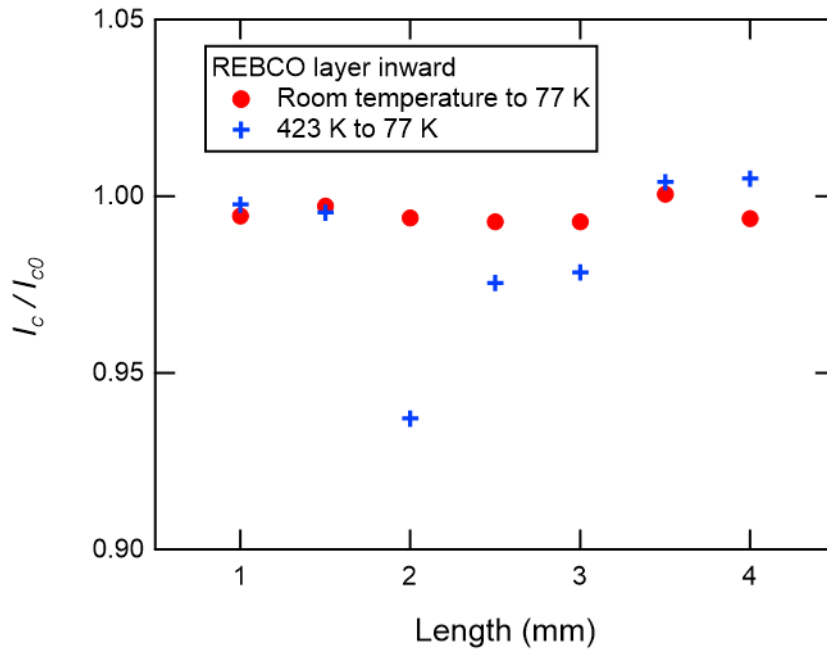


図 4.7 裏側で配置した S テープにおける I_c 測定結果

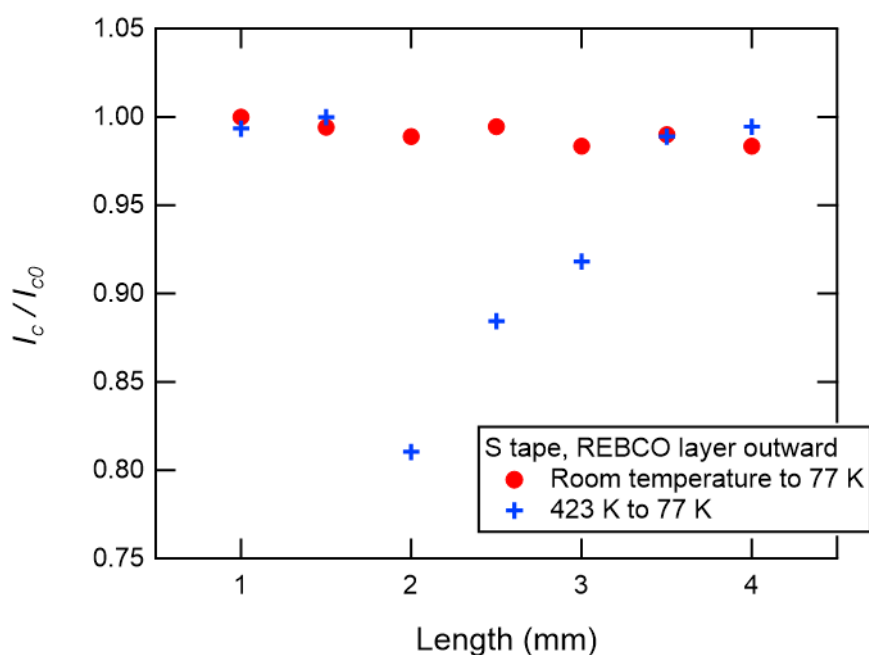


図 4.8 表側で配置した S テープにおける I_c 測定結果

4.2.2. 座屈条件との比較

表 3.2 から、生じる熱荷重は常温固定で 66 N、高温固定で 126 N である。これらの値と図 4.6 を比較すると、常温固定で熱荷重が座屈荷重を超える範囲は $L = 2.5 - 4$ mm、高温固定では $L = 1.5 - 4$ mm である。この範囲以外で I_c 劣化が生じていないことは、座屈が生じておらず 0.3% より小さい圧縮ひずみが生じているだけであるからと説明できる。高温固定での $L = 1.5$ mm の場合は、図 4.6 で得られた推定の座屈荷重は 110 N であり熱荷重を超えているため座屈が生じると予想できる。しかし図 4.5 に示す通り推定値は過小評価であり、 $L = 1.5$ mm での常温における推定値は実測値より 15 N ほど小さく出てしまっているため、低温においても 15 N 程度の過小評価していると考えたら実際は熱荷重が足りなかったと説明できる。ここでは同様の議論から常温固定での $L = 2.5$ mm も座屈が生じていないと考え、残りの常温固定での $L = 3 - 4$ mm、高温固定での $L = 2 - 4$ mm の 8 点で REBCO テープにどのような座屈が生じ I_c 劣化につながったか（もしくは I_c 劣化しなかったか）を考察する。

5. 解析・考察

5.1. 座屈による I_c 劣化のメカニズム

座屈による I_c 劣化は、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 テープに局所的に応力が集中しそこでテープが座屈するためと説明できるが、それだけでは図 4.7, 4.8 の結果は説明できない。そこで以下の 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る。

- (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。

本実験では REBCO テープの両端は固定されているため、図 2.7 は修正されて図 5.1 のように実際に座屈している範囲は $L/2$ となる。2.3.2.項で座屈の理論を述べているが、図 5.1 の場合でも $L \rightarrow L/2$ とすれば同様の議論が成り立ち、解の形状は式(2.5)と同じ $A\sin(kx)$ の正弦波的な形状にたわむこととなる。 $A\sin kx$ で表される式の最大振幅、すなわち一番たわむ場所での曲率半径 R は式(5.1)で表すことができる。

$$R = \frac{1}{Ak^2} \quad (5.1)$$

また REBCO テープにおいて、図 5.2 のように REBCO テープの厚さ d の基板が曲率半径 R で曲がる時、そのときの基板上の曲げひずみ ε は式(5.2)で表すことが出来る。

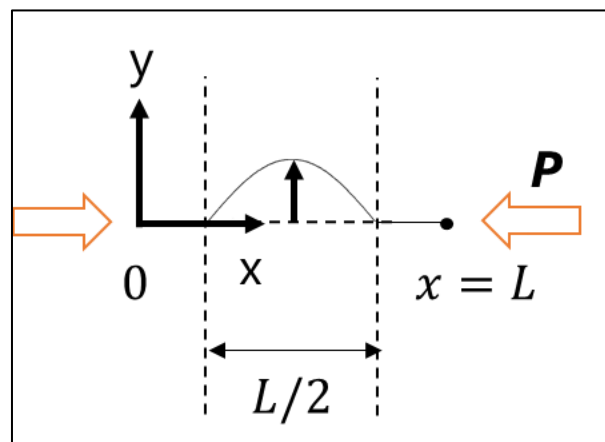


図 5.1 長さ L の物体の両端固定における座屈（たわみ）

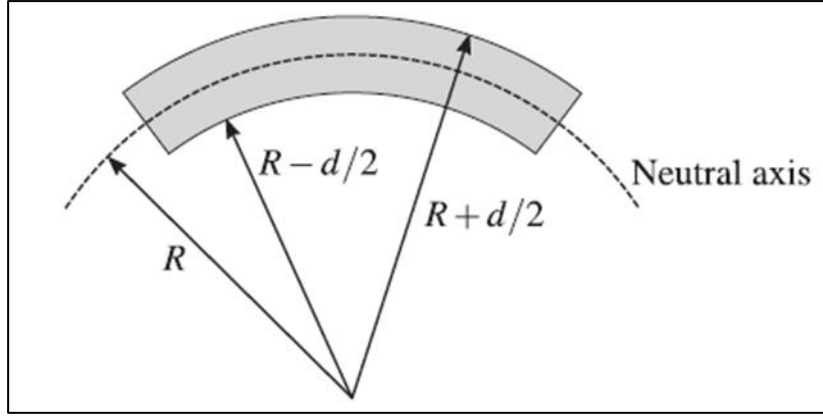


図 5.2 曲率半径 R を持つ厚さ d の曲がった基板[15]

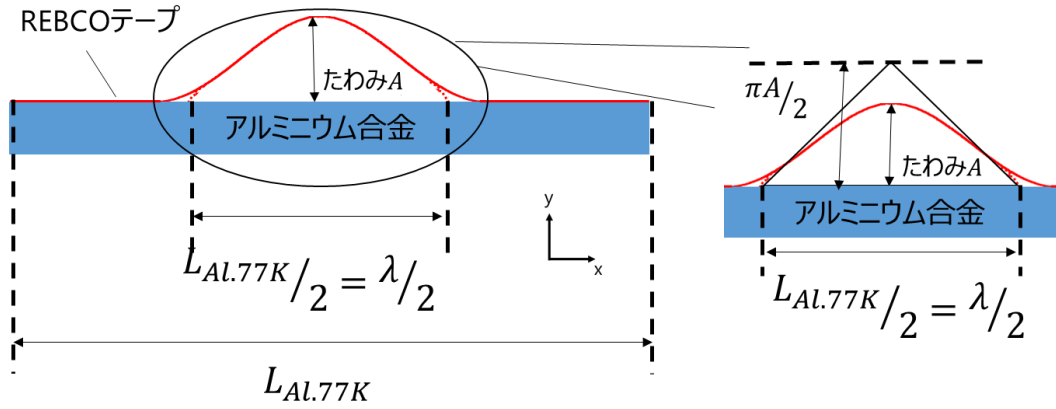


図 5.3 アルミニウム合金上の REBCO テープの概念図

$$\varepsilon = \frac{(R \pm d/2) - R}{R} = \pm \frac{d}{2R} \quad (5.2)$$

図 5.2 において、基板上の REBCO 層が基板表面に対し外側にあるならば、ひずみ ε は正で引っ張りひずみ、内側にあるならばひずみ ε は負となり圧縮ひずみとなる。式(5.1), (5.2)を組み合わせることによって REBCO テープの座屈は REBCO テープの曲げに変換することができる。式(5.2)の基板の厚さ d は REBCO テープに応じた既知の値、式(5.1)の曲率半径 R において k は $k = 2\pi/\lambda$ であり熱収縮後の長さ L より導出可能であることから、残りの座屈時の振幅（たわみ） A を求めれば REBCO テープにかかるひずみを推定できる。

しかし、たわみ A は微分方程式において任意定数であるので初期条件がなければ導出することができない。そこでいくつかの仮定を初期条件として A を求める。図 5.3 は実験においてアルミニウム合金ジャケットの REBCO テープが座屈している様子の概念図であり、図 3.4 の局所的な空間 L において REBCO テープは図 5.4 に示すような形状をしている。まず

1 つ目の仮定として、図 5.3 の右図における、 $Asinkx \sim Ak$ とした時の三角形の斜辺の長さ
と、正弦波部分の長さが一致するとする。この時三角形の高さは $\pi A/2$ となるので、三平方の
定理より正弦波部分の長さを求めることができる。2 つ目の仮定として、77 K での REBCO
テープの長さ $L_{RE.77K}$ とアルミニウム合金の長さ $L_{Al.77K}$ の差分 ΔL だけ REBCO テープがたわ
み図 5.3 の状態にたとし、座屈後は REBCO テープに熱応力による伸び縮みは存在しな
いと仮定する。つまり以下の式(5.3)が成り立つとする。

$$\Delta L = 2\sqrt{\left(\frac{L_{Al.77K}}{4}\right)^2 + \left(\frac{\pi A}{2}\right)^2} - \frac{L_{Al.77K}}{2} \quad (5.3)$$

式(5.3)を $L_{Al.77K}^2 \gg A^2$ のもとで A について解くと式(5.4)となる。また式(5.1)を $\Delta L, L_{Al.77K}$
を用いて書き直すと式(5.5)となる。

$$A = \frac{1}{\pi} \sqrt{\Delta L \times L_{Al.77K}} \quad (5.4)$$

$$R = \frac{1}{A(2\pi/L_{Al.77K})^2} \quad (5.5)$$

式(5.4)の検証のため、実際の REBCO テープのたわむ様子との比較した写真が図 5.4 で
ある。ただし視認性をよくするため実際の実験条件とは異なり $L = 100 \text{ mm}$ としてある。
 $L_{Al.77K} = 99.6 \text{ mm}, \Delta L = 0.2 \text{ mm}$ から式(5.4)によって導出したたわみ A は $A = 1.4 \text{ mm}$ であり、
図中の常温でおよそ 1 mm の初期たわみを持つ REBCO テープが 77 K で 2.5 mm となり、差
し引き 1.5 mm たわむ結果となったことと比較すれば推定は外れてはいないといえる。よっ
てこの式(5.2), (5.4), (5.5)を用いることで、図 4.7, 4.8 の異なる温度、REBCO テープの
REBCO 層が座屈する方向に対し表側にある場合と裏側にある場合の結果を、ひずみ ε の 1
つの変数の下で変換することができる。変換した結果を図 5.5 に示す。図 5.5 にはひずみ
0%において $I_c/I_{c0} = 1$ となる点を加えてある。図 5.5 は絶対ひずみ $|\varepsilon|$ が大きくなるほど I_c 劣

化が進むという簡潔なグラフとなり、図 2.6 のひずみ依存性のグラフや REBCO テープの
曲げによる I_c 劣化を検証した先行研究[16]と傾向がよく一致する。具体的な値として、
+0.9%のひずみで 19%の I_c 劣化、-0.9%で 7%の I_c 劣化は同様に先行研究と比較して一致し
ており、ひずみを取り除いた際、+0.9%の場合は I_c が戻らず不可逆劣化であったが、-0.9%
では I_c が戻る可逆的劣化であったことも図 2.6 の振る舞いと一致している。よって座屈によ
る I_c 劣化のメカニズムは、この節の最初で述べた 3 つのプロセスで説明することができる。

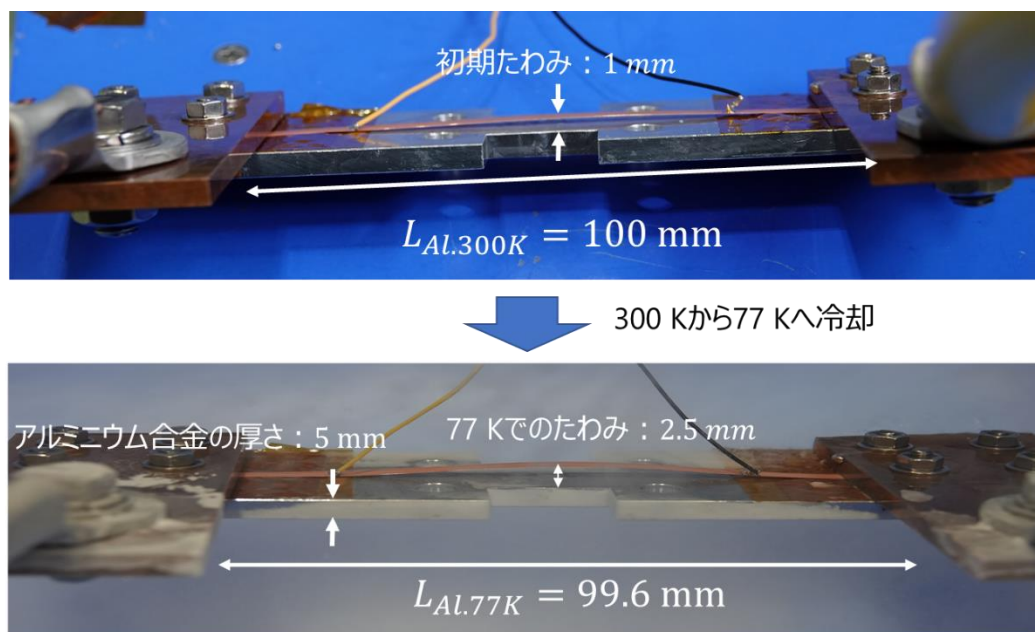


図 5.4 実際の REBCO テープのたわみの様子との比較

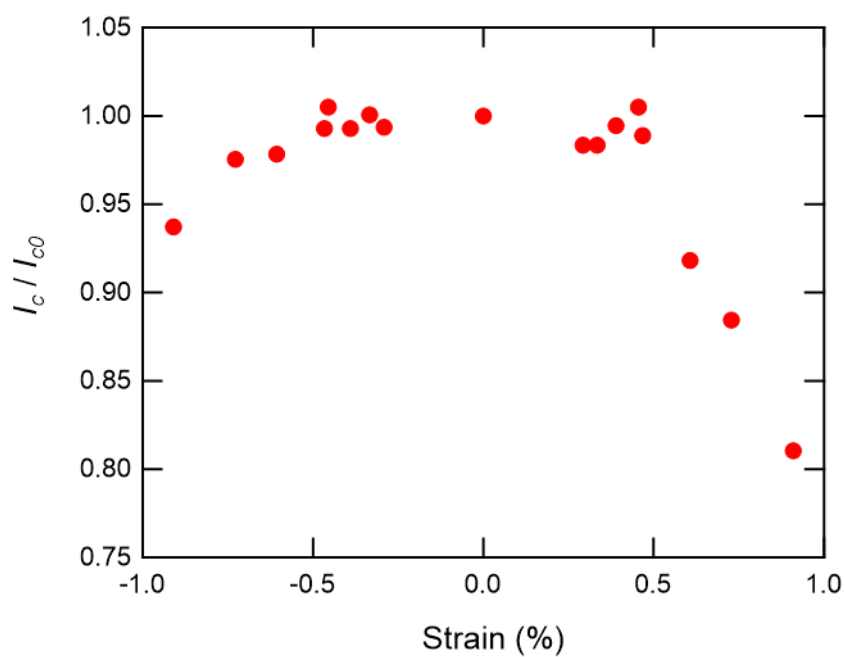


図 5.5 横軸をひずみに変換した座屈による I_c 劣化のグラフ

5.2. 正確な座屈荷重の推定

4.1 節で推定した座屈荷重は、簡単のため REBCO テープをハステロイ C-276 の基板とみなしていたが、実際には図 2.1 の通りハステロイ基板以外の構成要素もあり、図 4.6 の推定値は過小評価となってしまう。特に銅安定化層は表 3.1 の通りハステロイ基板と同等の厚さで存在していることもあり、ここでは銅安定化層も考慮して座屈荷重を推定していく。ハステロイ基板と銅安定化層で全体の構成要素のおよそ 9 割を占めるので、表 3.1 の全体の厚さのうち、50 μm のハステロイ基板以外はすべて銅安定化層であるとみなす。

オイラーの座屈荷重 P_{CR} において構成要素にかかわる変数はヤング率 E と弾性 2 次モーメント J であり、これらの値を 2 物体の場合で導出することによって求めることができる。まず 2 物体の合成ヤング率 E_a は、全体の断面積・ハステロイ基板の断面積・銅安定化層の断面積をそれぞれ S_a, S_H, S_c としたときに式(5.6)で表すことができる。

$$E_a = \frac{E_H S_H + E_c S_c}{S_a} \quad (5.6)$$

次に 2 物体の合成弾性 2 次モーメント J_a を求めるために、式(5.7)で表されるハステロイ基板のヤング率 E_H と銅安定化層のヤング率 E_c の相対比 η を導入する。

$$\eta = \frac{E_c}{E_H} \quad (5.7)$$

異なる素材での弾性 2 次モーメントの導出は相対比 η で換算する必要がある、また導出の際は中心軸を注意する必要がある。ここではハステロイ基板の中心を軸とし、対称に銅安定化層がある長方形の断面積とみなすこととする。図 5.5 のように断面図においてハステロイ基板の厚さを d_H 、片側の銅安定化層の厚さを d_c 、全体の厚さを $d (= d_H + 2d_c)$ 、幅 b として、以下の式(5.8)で導出することができる。

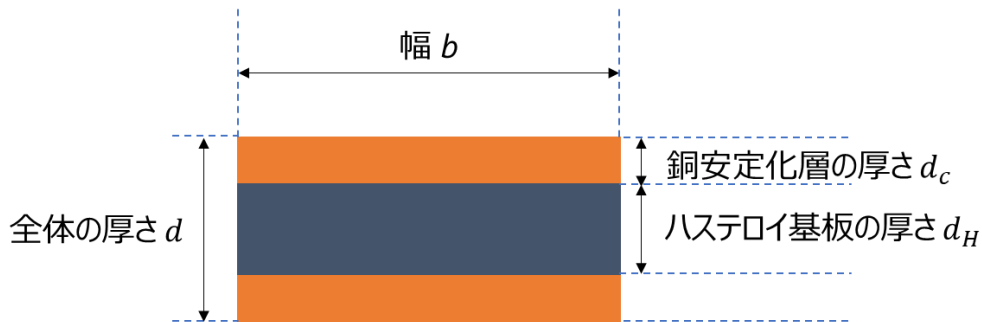


図 5.6 REBCO テープにおけるハステロイ基板と銅安定化層の断面図

$$I = \frac{1}{12}bd_H^3 + \frac{1}{12}\eta b(d^3 - d_H^3) \quad (5.8)$$

オイラーの式における導出ができたため、次は短柱範囲となるジョンソンの式の換算を行う。ジョンソンの式は耐力付近を考慮した座屈の式であるのため、ここでは簡単に全体の力 P が REBCO テープのハステロイ基板と銅安定化層部分に分配され、ハステロイ基板にかかる力がジョンソンの式での座屈荷重を超えたときに座屈するとする。具体的には式(5.9)で図 4.5, 4.6 でのハステロイ基板のみを考慮した場合の力 P_{CR0} を、全体を考慮した力 P_{CR} に換算する。

$$P_{CR} = \frac{E_H S_H + E_c S_c}{E_H S_H} P_{CR0} \quad (5.9)$$

式(5.6), (5.8), (5.9)を用いることで銅安定化層を考慮した座屈荷重を導出することができる。ここで必要な物理量は銅安定化層のヤング率であるが、銅安定化層のような20 μm 程度の薄膜では通常の銅のヤング率より値が低く、薄膜の作成方法によっても大きく変動するためヤング率の扱いが困難となる[23]。ここでは玉川らの論文[23]の銅めっき薄膜のヤング率 29 GPa を用い計算し、銅は 77 K においてもヤング率はほぼ変化しないため 77 K においてもこの値を用いる。

これらの議論の下で銅安定化層も考慮した座屈荷重の値と、実験値及びハステロイ基板のみ考慮した座屈荷重のグラフを図 5.7 に示す。ハステロイ基板のみ考慮した場合より実験値に近い推定値となっているといえる。同様に、77 K での推定値を図 4.9 に示す。4.2.2. 項で座屈が生じていないと考察した、常温固定の $L = 2.5 \text{ mm}$ と 62 N、高温固定での $L = 1.5 \text{ mm}$ と 122 N の関係を図 4.9 で確認すると、確かに生じた熱応力は必要な座屈荷重に足りておらず座屈していないと結論付けることができる。

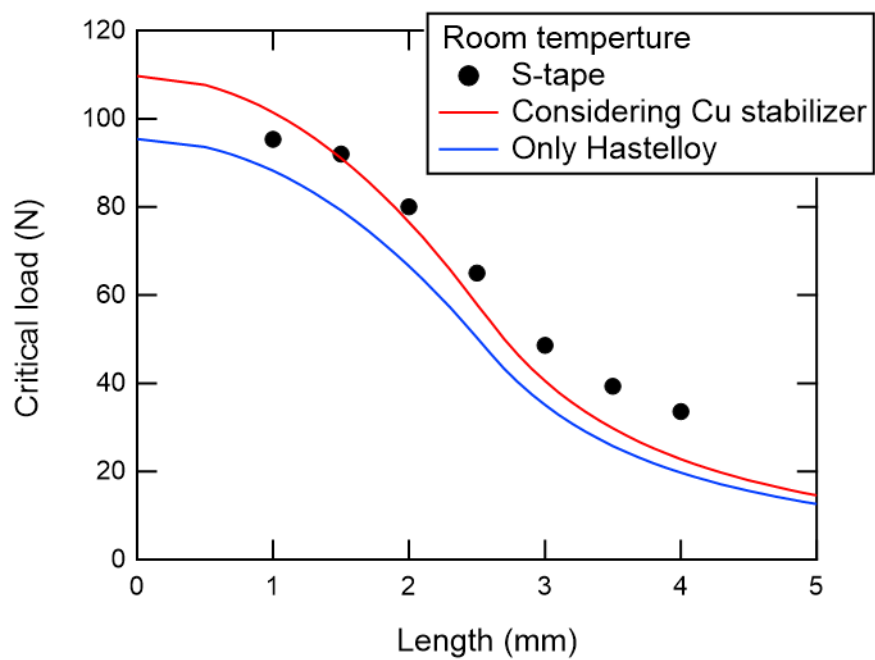


図 5.7 銅安定化層も考慮した室温での座屈荷重

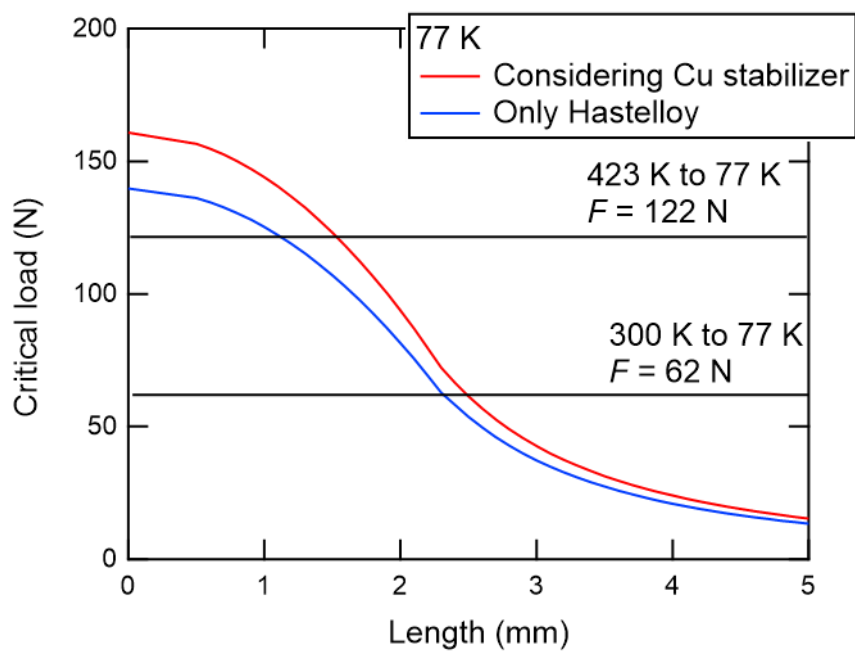


図 5.8 銅安定化層も考慮した 77 K での座屈荷重

5.3. 実際の FAIR 導体での座屈による劣化

本論文では、REBCO テープ 1 枚をアルミニウム合金ジャケットで覆った場合の座屈による I_c 劣化を実証した結果を得られた。しかし、図 2.2 で示すように FAIR 導体では REBCO テープは 1 枚ではなく複数枚の REBCO テープがアルミニウム合金ジャケットに積層して配置された構造を持つ導体である。座屈による劣化が生じるかを議論するためには、積層された REBCO テープにおける座屈荷重の扱いを考慮しなければならない。

これまでの議論の通り座屈荷重は式(2.10)で求められヤング率 E と弾性 2 次モーメント J で決まるが、特に弾性 2 次モーメント J は厚さに大きく依存する (式(2.4)) ため、積層された REBCO テープを 1 つの厚い直方系の物体と見るか、もしくはそれぞれ単独で扱うことができるかで大きく値が違ってくる。簡単に S テープを 2 枚重ねて常温 $L = 2 \text{ mm}$ の条件で圧縮試験機による圧縮試験を行ったところ 130 N の結果となり、単独のテープの同条件での 80 N に対し約 1.6 倍の座屈荷重が得られた。概算ではあるが低温でもテープ一枚の 1.6 倍の座屈荷重が必要であるとする、実験で最大の劣化を示した高温固定での $L = 2 \text{ mm}$ では座屈が生じないという推測ができる。実際に 2 枚のテープを絶縁して重ねて上側 (局所的な空間 L) のテープのみ電流が流れるようにして実験を行ったところ、 I_c 劣化は生じなかった。FAIR 導体では 30 層の REBCO テープが積層されるので、それらがすべて重なったものとして扱えるとするなら単純計算ではあるが 1.6²⁹ 倍の座屈荷重となってしまう、座屈荷重は明らかに膨大で絶対に座屈は生じないということになってしまう。ただ、FAIR 導体においては REBCO テープの層の間に高純度アルミニウムの緩衝材が積層されており、その高純度アルミニウム緩衝材によって REBCO テープが単純に 1 つの厚い物体とは見なせないと考えられる。そのため、2 枚重ねた S テープの間に FAIR 導体での高純度アルミニウムの緩衝材と同等のアルミニウム材を挟み込むことでテープをそれぞれを分離し、同様の高温固定の $L = 2 \text{ mm}$ にて実験を行ったところ、1 枚の場合とおおよそ同じ程度の結果が得られた (15%ほどの I_c 劣化)。ただし、何回か実験したところ I_c 劣化が生じないこともあり、これは座屈荷重が 1 枚の場合よりは大きくなって熱応力と非常に近い値となってしまう、座屈荷重と熱応力の間の大小関係が不確かさによって実験ごとに入れ替わってしまうからではないかと推測した。つまり、アルミニウム緩衝材で積層が分離されている場合は 2 枚重ねた場合よりは座屈荷重は小さいが、1 枚単独の場合より座屈荷重が大きくなってしまうと考えられる。定性的には REBCO テープ間のアルミニウムが限りなく薄くなれば 2 枚の重なった状態として扱えるようになる、もしくは限りなく厚くなればそれぞれ単独の 1 枚ずつのテープとして扱えるようになることは十分推測できるので、おそらくテープ間の緩衝材の厚みに依存するものと言える。実際の導体へ REBCO テープの座屈理論を適用するための 1 つの課題になると考えられる。

5.4. 座屈による REBCO テープの劣化の防止

最後に座屈による REBCO テープの劣化の防止方法について考察する。座屈による I_c 劣化は 5.1. 節にて述べたメカニズムによって生じると考えられる。

座屈による REBCO テープの劣化を防止するためにはこのメカニズムを起こさなければよい。特に FAIR 導体はアルミニウム合金ジャケットの蓋の溶接が一様に出来ず局所的な空間が発生してしまうことによって I_c 劣化が生じていることが考えられる。実際に図 5.9 に示す接合が一様に出来た試作導体では、 I_c 劣化が生じなかった結果が得られている。このことから局所的な熱応力を発生させないためには、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。

また、熱応力に着目した劣化防止の方法として、熱膨張係数が REBCO テープと非常に近い金属ジャケットを利用することで熱応力を起こさない、もしくは小さくする方法が考えられる。熱応力は式(2.16), (2.17)で表されるように熱膨張係数の差に依存するため、差が小さくなれば熱応力も小さくなる。ただし、熱膨張係数が REBCO テープより小さいものを利用してしまえば熱応力による熱ひずみが REBCO テープの性質上弱い引っ張り方向となるため熱膨張係数が REBCO テープより大きく差が小さいものであるとよいと考えられる。実際の導体の金属ジャケットとしてはこの実験で対象としたアルミニウム合金以外にも、ステンレス(SUS 304)、銅などが使われる。REBCO テープとアルミニウムの 423 K から 77 K への冷却時の熱収縮差が 0.3%程度であることに対し、ステンレスや銅では REBCO テープとの熱収縮差は 0.2%程度と、アルミニウム合金の場合のおよそ 6 割とな

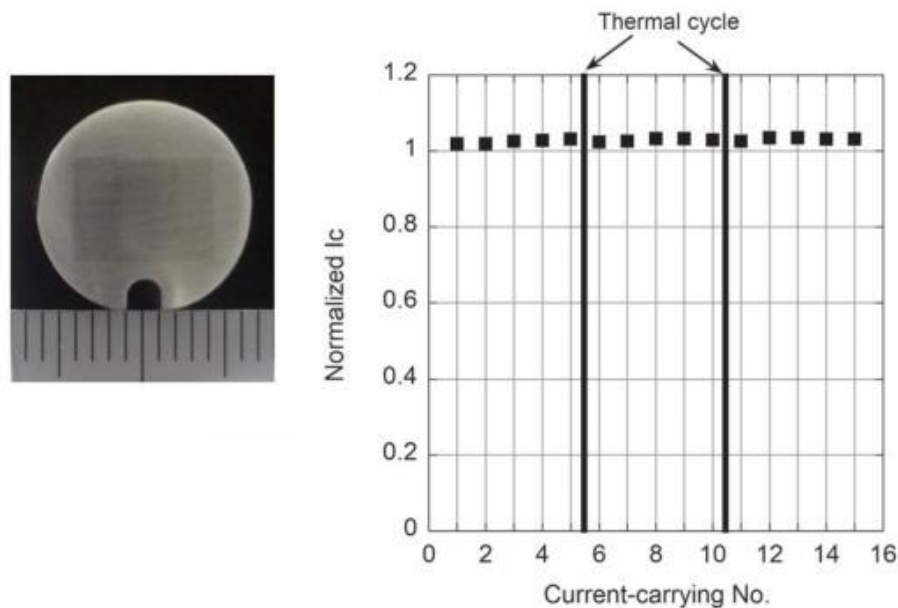


図 5.9 一様に溶接された FAIR 導体の断面図および通電特性[15]

る。ただし、実用上では比熱や熱伝導率などの観点も必要である。例えば銅とアルミニウム合金は比熱や熱伝導性がステンレスより優れており、またアルミニウム合金はステンレスや銅と比べ比重が小さく加工性が優れている。このように熱応力という観点だけではアルミニウム合金が最も不利となるが、別の観点から見るとアルミニウム合金は非常に優れた金属ジャケットとなる。FAIR 導体では間接冷却であり熱伝導性を重視する必要があるため、アルミニウム合金ジャケットを採用している。そのため熱膨張係数も含め、それぞれの物性値を適切に考慮して金属ジャケットを選択する必要がある。

熱応力が生じることを前提とするならば、5.3.節の実験のように REBCO テープをできるだけ一体にすることは、座屈荷重を非常に大きくするので座屈を起こさない方法として提案できる。これは、直線導体かつ単純積層であれば効果的であるといえるが、REBCO テープ間の緩衝材がないことによって曲げやねじりができず、複雑な形状とすることが困難になってしまうため、フレキシブルなコイル巻線を目的としている導体には採用できない。

6. 結論

本研究では REBCO テープの I_c 劣化の原因について検証し、特に定性的には考えられてはいたが定量的な評価がなされていなかった座屈での I_c 劣化の原因およびメカニズムの解明を行った。まず 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 劣化は次の3つのメカニズムによって生じることが定量的に解明され、導体開発においては導体製作時の長手方向の不均一性から発生する局所的な熱応力の集中による座屈から生じ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。

- (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。

今後の展望として、REBCO テープの層間での座屈の扱いは考察したものの、実際の導体への適用がまだ不十分であることから、条件を適切に変えた導体を製作し通電試験と確認を行う必要がある。また、実験では REBCO テープは金属と REBCO テープが直線形状の条件でのみ検証しているが、直線形状以外の条件、例えば曲げやねじりが加わった時にどのように座屈が生じ I_c 劣化となるか検証する必要がある。そのほか、20 K・磁場中で通電試験をした場合の、より大きな熱応力に加えローレンツ力が発生する条件で、どれほど劣化するかといった定量的な検証も必要であると考えられる。

参考文献

- [1] 柳 長門, 伊藤 悟, 寺崎 義朗, 低温工学, 2019 年, 54 卷 1 号, p.10-22
"核融合炉マグネットへの適用をめざした 大電流高温超伝導導体の開発 -現在の状況と将来の展望-"
- [2] Goldacker W *et al.*; *Supercond. Sci. Technol.* **27** 93001
"Roebel cables from REBCO coated conductors: a onecentury-old concept for the superconductivity of the future"
- [3] G. A. Kirby *et al.*; 2017 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **27** 1–7
"First cold powering test of REBCO roebel wound coil for the EuCARD2 future magnet development project"
- [4] Makoto Takayasu *et al.*; 2011 *Supercond. Sci. Technol.* **25** 014011
"HTS twisted stacked-tape cable conductor",
- [5] Makoto Takayasu *et al.*; 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 25–34
"Present Status and Recent Developments of the Twisted Stacked-Tape Cable Conductor"
- [6] D Uglietti *et al.*; *Supercond. Sci. Technol.* **28** 124005
"Test of 60kA coated conductor cable prototypes for fusion magnets"
- [7] Celentano G *et al.*; *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **29** 1–5
"Bending behavior of HTS stacked tapes in a cable-in-conduit conductor with twisted Al-slotted core"
- [8] Michael J. Wolf *et al.*; 2016 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **26** 6400106
"HTS CroCo: A Stacked HTS Conductor Optimized for High Currents and Long-Length Production",
- [9] Changtao Kan *et al.*; *Physica C* **546** 28–33
"Development of a 10 m quasi-isotropic strand assembled from 2G wires"
- [10] D C van der Laan *et al.*; *Supercond. Sci. Technol.* **32** 033001
"Status of CORC® cables and wires for use in high-field magnets and power systems a decade after their introduction",
- [11] Mulder T; PhD Dissertation University of Twente
"Advancing ReBCO-CORC Wire and Cable-in-Conduit Conductor Technology for Superconducting Magnets",
- [12] N. Yanagi *et al.*; 2015 *Nucl. Fusion* **55** 053021
"Design and development of high-temperature superconducting magnet system with joint-winding for the helical fusion reactor"
- [13] Superpower Inc. website
<http://www.superpower-inc.com/content/2g-hts-wire>

- [14] W.M. Thomas *et al.*; International Patent Application PCT/GB92, Patent Application GB9125978.8,6, December 1991
"Friction stir butt welding"
- [15] Toshiyuki Mito *et al.*; 2020 *J. Phys. Commun.* **4** 035009
"Development of FAIR conductor and HTS coil for fusion experimental device"
- [16] Simon Otten *et al.*; 2016 *Supercond. Sci. Technol.* **29**
"Bending properties of different REBCO coated conductor tapes and Roebel cables at $T = 77$ K"
- [17] T. Takematsu *et al.*; *Physica C* **470** 674–677
"Degradation of the performance of a YBCO-coated conductor double pancake coil due to epoxy impregnation"
- [18] Y. Yanagisawa *et al.*; *Physica C* **476** 19–22
"Removal of degradation of the performance of an epoxy impregnated YBCO-coated conductor double pancake coil by using a polyimide-electrodeposited YBCO-coated conductor"
- [19] Tim Mulder *et al.*; 2020 *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **30** 4
"Recent Progress in the Development of CORC Cable-In-Conduit Conductors"
- [20] D C van der Laan *et al.*; 2011 *Supercond. Sci. Technol.* **24** 042001
"Compact $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ coated conductor cables for electric power transmission and magnet applications"
- [21] Xingyi Zhang *et al.*; 2020 *Supercond. Sci. Technol.* **33** 035005
"A standardized measurement method and data analysis for the delamination strengths of YBCO coated conductors"
- [22] C. C. Clickner *et al.*; 2006 *Cryogenics* **46** 432
"Mechanical properties of pure Ni and Ni-alloy substrate materials for Y–Ba–Cu–O coated superconductors"
- [23] 玉川 欣治, 作谷 和彦, 三浦 英生, 材料, 2007 年 56 卷 10 号 p.907-912
"銅めっき薄膜機械特性の微細組織依存性"

学会発表

[1] 大辻慎、三戸利行、小野寺優太、平野直樹

"核融合装置用 HTS 導体の Ic 劣化の原因の究明"

第 99 回低温工学・超電導学会 2P-p17, web 開催, 7 月 28 日～7 月 30 日

[2] Maki OTSUJI, Toshiyuki MITO, Yuta ONODERA, Naoki HIRANO

"The cause of Ic deterioration in HTS conductor for fusion devices"

ITC 29 Poster-2-F4-15, web, Oct 29, 2020

[3] Maki OTSUJI, Toshiyuki MITO, Yuta ONODERA, Naoki HIRANO

" Investigation of the cause of Ic degradation of HTS conductor for fusion device "

Applied Superconductivity Conference 2020 Wk2LPo3K-09, web, Nov 5, 2020

謝辞

まず始めに、興味深いテーマを与えて下さり研究を進めるにあたり様々な議論やご助言をいただき、常日頃から熱心にご指導してくださった三戸先生に深く感謝いたします。学部
の 4 年生のときに急に伺い、修士からの配属でしかも最初は千葉と岐阜ということもあり
ましたが、受け入れていただきありがとうございました。

小野寺さんには、ちょっとしたことから実験にいたるまで親身になって手伝っていただき深く感謝いたします。何がしたいやこうする方法はないかなど多くのお迷惑をおかけしましたが、本当にありがとうございました。

平野先生には、何かあれば自分を気にかけてくださり、様々なことを教えていただき、深く感謝いたします。自分のちょっとした質問や疑問にわかりやすく答えてくださり、本当にありがとうございました。

そのほか核融合研の方々には多くのお世話になりました、深く感謝いたします。

最後に、精神的・経済的に支えてくれた家族に感謝いたします。