

臨界電流のひずみ依存性が強い超電導線材の
実用化に関する研究

山田 雄一

目次

第1章 序論	1
1. 超電導の特徴	1
2. 超電導体の種類	3
3. 超電導の応用	4
4. 線材化	5
5. 超電導線材の製造方法	6
6. 臨界電流	8
7. 本論文の構成	9
8. 参考文献	11
第2章 Nb ₃ Al 超電導線材の開発と応力・ひずみ依存性	13
1. 緒言	13
2. ジェリーロール法 Nb ₃ Al 超電導線材の製造方法	15
3. 実用超電導線材に向けた特性向上	17
3-1 臨界電流密度と微細組織	17
3-2 J_c - B - T 特性	26
3-3 交流損失	28
3-4 応力・ひずみ依存性(1) 線材の引張ひずみ	30
3-5 応力・ひずみ依存性(2) 線材の曲げひずみ	32
3-6 応力・ひずみ依存性(3) 導体の引張ひずみ	33
4. 大容量導体の開発	36
4-1 10 kA 級導体	36
4-2 40 kA 級導体	37
4-3 12 T-10 kA-100 m 級導体とコイル	41
4-4 ITER 用導体	44
5. 実用化に向けての研究	45
5-1 大型コイル用熱処理条件	45

5-2 クロムめっき付き超電導線材の残留抵抗.....	48
5-3 伸線性の向上.....	51
5-4 ITER インサート・コイル用超電導線材の製造結果と特性分布.....	53
6. まとめ.....	55
7. 参考文献.....	57
第3章 銅酸化物系超電導線材の曲げひずみ依存性.....	59
1. 緒言.....	59
2. 評価サンプルと評価方法.....	60
2-1 評価サンプル.....	60
3. 常温における曲げ戻し評価.....	64
4. 連続曲げ評価.....	66
4-1 常温における曲げ戻し評価との比較.....	66
4-2 曲げ戻しによる不可逆ひずみ.....	68
5. 実用線材の曲げひずみ依存性.....	83
5-1 磁場中における曲げひずみ依存性.....	83
5-2 スクライブ線材及び補修線材の曲げひずみ依存性.....	88
5-3 超電導線材幅による曲げひずみ依存性の差異.....	91
5-4 基板厚さによる曲げひずみ依存性の差異.....	92
6. まとめ.....	93
7. 参考文献.....	95
第4章 銅酸化物系超電導線材の曲げひずみ依存性試験法標準化.....	97
1. 緒言.....	97
2. 評価サンプルと評価方法.....	99
2-1 評価サンプル.....	99
2-2 曲げ前の臨界電流測定.....	100
2-3 両曲げ.....	102
2-4 曲げ後の臨界電流測定.....	102
2-5 臨界電流及び n 値の定義.....	102

3. 実験結果	103
3-1 曲げ前の臨界電流.....	103
3-2 曲げ後の臨界電流.....	104
3-3 変動係数の評価.....	108
3-4 Type B 標準不確かさの評価	108
3-5 それぞれの測定量の標準不確かさ (SU).....	109
4. 議論	113
4-1 分散分析	113
4-2 規格化臨界電流の両曲げ直径依存性の振る舞い.....	115
4-3 実験による不確かさの原因.....	116
5. まとめ	117
6. 参考文献	118
第5章 総括	121
謝辞	126
研究実績	127
査読付き論文	127
その他論文（プロシーディング他）	130
学会発表（国内会議）	131
学会発表（国際会議）	135
特許	137

第1章 序論

1. 超電導の特徴

「超電導」は、「原子力」「光を含むエレクトロニクス」とともに20世紀の三大発明と呼ばれることもあるが、現時点ではその活躍の場が限られていると言わざるを得ない。その最も大きな原因のひとつは、物質によって異なるある条件下でしか、超電導状態が生じないということである。その条件とは、温度、磁場、電流密度であり、ある温度以下、ある磁場以下、ある電流密度以下で、かつそれらの条件が、お互いに独立には働かず、例えば使用する温度が高くなると電流密度の上限が下がるといった関係にある。それらの上限はそれぞれ、臨界温度 (T_C)、臨界磁場 (H_C) 及び 臨界電流密度 (J_C 、工学的には臨界電流 I_C で表す場合も多い) と呼ばれる。特に、臨界温度は、現時点では常温より遥かに低い温度であるために、超電導状態を生じさせるために何らかの冷却が必要で、その程度もエレクトロニクスなどで一般に行われるファンによる放熱程度ではなく、条件によっては超電導現象を利用することのメリットを相殺するほどのデメリットとなる。

1911年にオランダのHeike Kamerlingh Onnesが液化に成功したヘリウムを使った実験で水銀の電気抵抗がゼロになることを発見した¹⁾。これが超電導の発見で、Onnesは1913年に主にヘリウムの液化と超電導の発見によりノーベル物理学賞を受賞している。

超電導の主要な特徴としては、その名称にもつながる①電気抵抗がゼロ、②マイスナー効果、③磁束の量子化、④ジョセフソン効果があげられる。

電気が流れる際には通常、電気抵抗が生じ電圧が発生、電圧と電流の積である熱（ジュール発熱）が生じ、その発熱分が損失（ロス）となる。超電導体を電線とすることにより、電気抵抗がないため、ロスがゼロになる。

マイスナー効果²⁾とは、超電導状態にある物質が磁場をその内部から排除するという性質である。これは超電導体が磁場をその内部に侵入させないだけでなく、超電導状態にならない状態で磁場が入っていても、超電導状態に転移した場合に磁場を押し出す特徴を有している。物質に磁場を近づけた場合、電磁誘導によって、物質中に磁場を打ち消すように電流が流れ、それが抵抗ゼロの場合、完全に磁場を打ち消す＝物質中に侵入させないことになる。しかし、超電導臨界温度以上の状態で既に内部に侵入している磁場を電磁誘導によって打ち消すことはできないため、前述の電気抵抗ゼロでは説明できない、超電導の別の特徴である。なお、マイスナー効果はある一定の磁場（臨界磁場）以下でのみ発現し、それ以上の磁場では超電導状態は壊れるか、部分的に壊れて一部の磁場が超電導体の内部に

侵入する。

磁束の量子化³⁾とは、超電導体の中に侵入した磁束がとびとびの値しかとらないということである。臨界磁場以上では超電導状態が完全もしくは部分的に壊れるが、完全に壊れるものが第一種超電導体、部分的に壊れるものが第二種超電導体と呼ばれる⁴⁾。第二種超電導体では、臨界磁場以上で磁場を完全に排除するより、部分的に超電導状態を壊して磁場を侵入させた方が、エネルギー的に有利になる。この際、磁束の大きさは h をプランク定数、 e を電子の電荷とすると $h/2e$ の整数倍の値をとる。

実用的な超電導体は、ほぼ全てが第二種超電導体であり、磁場が侵入しはじめる磁場である磁場を下部臨界磁場 (H_{C1}) と呼び、それ以上の磁場でかつ完全に磁場が侵入する磁場である上部臨界磁場 (H_{C2}) までの間では磁束量子の単位 ($h/2e$ の整数倍) で分布しており、これを磁束線と呼ぶ。なお、超電導工学の分野において、磁場は真空の透磁率 (μ_0) を掛けた $B = \mu_0 H$ という磁束密度で表すため、以下、磁場は磁束密度の単位 (T) で扱う。実用的な通電電流や高い磁場を実現するためにはこの上部臨界磁場の高い超電導体が必要である。この磁束線が内部に侵入した状態にある超電導体に電流を流すと、磁束線にローレンツ力が働き、電流と垂直方向に動こうとして、電圧降下が発生することになる。そのため、この磁束線の動きを止めなければ超電導状態を維持できなくなる。この磁束線の動きを止めることは「ピン止め」と呼ばれ、超電導体の中の微細な常電導の粒が担う。超電導体の中に微細な常電導の部分があると磁束線は超電導状態を破るよりも常電導部分に侵入した方がエネルギー的に有利になるため、できるだけ常電導部分に留まろうとする。これは磁束の「ピン止め効果」と呼ばれる。実用的な超電導体においては、磁場中で超電導状態をできるだけ維持させたいため、このピン止め効果のある、常電導部分や結晶粒界、転移などの欠陥を積極的に取り込むような構造の材料が作られている。

ジョセフソン効果⁵⁾とは、2つの超電導体がそれぞれ異なる位相を持っていた場合に、その位相差が電流の変化として現れることである。薄い絶縁体で接合 (ジョセフソン接合) された2つの接合箇所を持つ超電導体のリングに外部電流を流すと、接合部には外部電流 (のそれぞれ $1/2$) とリングに加えた磁場による電流が流れる。磁場による電流はジョセフソン効果によって磁束量子を周期として変化するために、超電導状態で流せる外部電流も周期的に変化する。この現象を利用すると磁場を精密に測定することができ、超電導量子干渉デバイス (SQUID)⁶⁾ と呼ばれる機器等に応用される。

2. 超電導体の種類

Onnesが1911年に超電導を水銀で発見して以来、50を超す様々な元素（単体物質）が超電導状態を示すことが発見されてきた^{7)~9)}。中でもNb ($T_c=9.2$ K) やV ($T_c=5.3$ K)、Pb ($T_c=7.2$ K) は標準状態で液体ヘリウムの沸点 (4.2 K) 以上で超電導となる。ヘリウムは標準状態で最も低温の液体であり、超電導状態となりうる温度に維持するための冷媒として好都合であるため、臨界温度が4.2 K以上の超電導体は実用化に非常に意義がある。

Nbは、単体で9.2 Kという臨界温度であること、物質として安定していること、加工がしやすいことから、エレクトロニクス応用のジョセフソン素子や粒子加速器の空洞共振器などに使われている。一方で、このNbは他の元素と組み合わせることにより、さらに臨界温度や臨界磁場の高い超電導体が発見された。

合金系の超電導体としてはNb-Ti、Nb-Zr、Pb-Bi、In-Teなど1000種類以上が発見されているが、Nb-TiとNb-Zrは、臨界温度が高く、上部臨界磁場が10 Tを超えており、実用超電導材料として有望であった。Nb-Zr ($T_c=11$ K, $H_{c2}=11$ T)の方が先に開発されたが、臨界温度が低い(9.9 K) Nb-Tiの方が、上部臨界磁場が高い(12.5 T)こと、熱処理や加工により、臨界電流密度を向上しやすいことから、線材に加工され、超電導マグネットの実用化をもたらした。

広義では合金の範疇であるが、構成元素の比率が一定となる金属化合物や金属間化合物でも超電導現象が発見された。金属化合物では、MoC や NbC 等が発見されているが、なかでもNbNは臨界温度17.3 K、上部臨界磁場15~29 Tであるので実用材料として重要である。

金属間化合物ではA15型と呼ばれる結晶構造の A_3B という化学式であらわされる数十種類の物質で超電導が確認されており、中でもNbとの組み合わせである Nb_3Sn 、 Nb_3Al 、 Nb_3Ge 、 $Nb_3(Al,Ge)$ は非常に高い臨界温度、上部臨界磁場を有している。 Nb_3Ge の臨界温度は23 Kと、 MgB_2 が21世紀に発見されるまで金属間化合物では最高の臨界温度であった。これらの中で、 Nb_3Sn は臨界温度、上部臨界磁場が他のNb系金属間化合物の中では比較的低かったが、Nb-Ti以上の高磁場を発生する用途として線材化に成功し、10 T以上の高磁場超電導マグネットが実用化された。

1986年にBednortzとMullerによって臨界温度が約30 Kの $(La,Ba)_2CuO_4$ 銅酸化物系超電導体の可能性が指摘され¹⁰⁾、Tanakaらによって、それが真の超電導体であることが証明された¹¹⁾。これにより世界中で高い臨界温度を有する銅酸化物系超電導体を開発する「高温超

電導フィーバー」が発生した。1987年にはPaul Chuらによって $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ が発見され¹²⁾、その臨界温度が初めて窒素の沸点（77 K）を超えた。さらに翌1988年にMaedaらによって、臨界温度が100 Kを超える $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ が発見された¹³⁾。これらの銅酸化物系超電導体により、従来存在が極端に偏在するヘリウムの液化ガスによる冷却でしか実現できなかった超電導が、地球上のいたるところに存在する窒素の液化ガスで冷却すれば実現できるものになった。これにより、超電導の実用化が大きく広がるものとして、世界中で開発が進められてきた。

3. 超電導の応用

超電導状態を生じさせ、それを維持するためには、現時点では極低温への冷却が必要となる。 Nb-Ti や Nb_3Sn といった超電導体を冷却するには、最も温度の低い液体である液体ヘリウムが一般に用いられる。これは、ある程度の容積をもつ物体を冷却するのに、直接冷凍機等で冷却するよりは、冷却媒体（冷媒）を使った方が物体の全表面を冷却しやすく、さらに、気体よりも熱容量の大きい液体状態の方が安定した冷却が可能だからである。小型のマグネットでは、超電導線材によるコイルを構造物と一体にしたマグネット自体を液体ヘリウム中に浸す「浸漬冷却」という方法が一般的に用いられる。また、大規模なマグネットでは、外側からの熱伝導だけでは十分な冷却が困難な場合、冷媒をマグネット内部まで導入する配管等が用いられる場合がある。さらに、超電導線材数百本を用いるような大電流が必要な場合、超電導線材を撚り合わせて製作したケーブルを金属の筒（コンジット）の中に入れた構造のケーブル・イン・コンジット導体と呼ばれる導体を用い、そのコンジット内に液体の冷媒を流すことで冷却する「強制冷却」が用いられる。このように、液体冷媒が超電導体の冷却に使われるため、高価なヘリウムより安価で相対的に高温の液体が使える超電導体の発見は、冷却コストの大幅な低減をもたらす。特に窒素は、可燃性でないこと、空気中に大量に存在すること、一般工業的にも大量に使用されていることから、非常に利用しやすい冷媒である。

超電導は電気抵抗がある条件で完全にゼロになることで、通電時のジュール損失を大幅に減らすことができること、また、抵抗がない=発熱がない、ことにより、通電電流の密度を通常の電線よりも非常に高くできることから、強い磁場を、小さな電磁石で発生できるということが2つの大きなメリットである。

マイスナー効果を用いると、磁場の侵入を防ぐ磁気シールドや、浮上などの応用が可能

になる。また、磁束の量子化やジョセフソン効果を用いたエレクトロニクス応用も開発されている。

一方、現時点で発見されている材料では「高温」超電導といいつつも、せいぜい 100 K を超える状態でかろうじて超電導状態を生じさせる能力しか有していない。そのため、これらのメリットの引き替えとして、冷却が必要というデメリットを有している。その結果として、特に損失低減や磁石応用においては、超電導のメリットは比較的大きな応用機器にしか実現できない。それが、超電導の応用を制限している原因のひとつでもある。

大きな応用機器という観点では、家庭用製品等よりも規模の大きい、電気エネルギーの利用に関する応用を目指すのが現在の超電導の用途のひとつであると考えられる。

合金のNb-Tiを用いた超電導線材は、現在ではMRI（核磁気共鳴現象を利用した磁気共鳴撮像装置：Magnetic Resonance Imaging）、シリコン結晶引き上げ装置の溶湯制御用マグネット、高エネルギー物理学研究用粒子加速器、磁気浮上列車等を実現させている。しかしながら、Nb-Tiの 4.2 Kにおける臨界磁場は約 11.5 Tであり、10 T以上の高磁場への超電導応用や、臨界温度が 9.5 Kと、送電などの長距離を冷却しなければならないような用途への応用は難しい。それ以上の高磁場発生用には、Nbの金属間化合物であるNb₃Snを用いることができる。しかしながら、それでもせいぜい 20 T程度までであった。

超電導体を実際に使用するには、応用にあわせたバルク体、薄膜もしくは、線材の形状が必要とされる。特に、通電時の損失低減や磁石応用を目的とすると、長い線材に加工することが可能か、またその線材に可撓性があるかということが最も重要な要素である。

4. 線材化

一般の電線に用いられている銅線は通常、精錬、溶解、鋳造などを経て太い線材を得、それをダイと呼ばれる穴に通して細く加工される。塑性変形を繰り返すと銅は加工硬化するため、中間で軟化のための焼鈍が行われる。電流、電圧、用途によって、単線もしくは、複数本の銅線を撚り合わせ、また絶縁等の処理も施されて、実際の電線となる。

超電導体を用いた電線も同様に細く、また撚り合わせ等が必要であるが、銅とは異なり超電導体単体では電線化が不可能であり、複合構造が必要である。それは、加工上と機能上との2つの理由があり、前者は、「5. 超電導線材の製造方法」の節で述べる。

機能上とは、超電導状態で電流が流れている際に、温度、磁場、電流など何らかの臨界点を超えるような擾乱がもたらされた場合に、超電導体は超電導状態を維持できなくなっ

て抵抗が発生、その抵抗発生部のジュール発熱でさらに抵抗が大きくなり、製品全体が超電導状態を失ったり、超電導体自体が焼損したりすることの防止である。そのために、銅などの良導体を複合化したり、超電導体を複数に分割した多芯（マルチ・フィラメント）化及びツイスト（ねじり）を行ったりすることを安定化と呼ぶ。

これは、超電導体に抵抗が発生した場合に、複合化した良導体部分に電流を分流させ、擾乱の原因が消失すると、再度超電導状態に復帰させるという機能で、これには擾乱を鎮めるような外的機能も必要である。例えば、冷却により発生する熱を十分に吸収できなければ発熱→抵抗上昇が繰り返されることになるので、冷却方法を含めたシステムとしての設計が必要になる。なお、一般的に良導体は熱に関しても良導体なので、電流の分流だけでなく、発生した熱を伝導で逃がす役目も果たす。

超電導は一定の電流が流れている状態では抵抗がゼロになるが、交流や、直流でも電流が変動する場合にはそれを打ち消すような電流が超電導体に流れるため、損失（交流損失）と発熱が生じる。それを効果的に低減する方法として多芯ツイストという構造が発明された。これは、電流変動による磁場の変動を打ち消そうとして生じるループ電流を小さくし、かつその電流ループの大きさを小さくするものである。超電導体を太い単一の構造にするのではなく、細い複数の芯（フィラメント）としてそれぞれに流れる電流を小さくし、超電導フィラメントを撚りあわせることにより、近接効果（非常に小さい超電導体間のすきままでは超電導電子がしみだし、常電導金属が超電導性を示す）によって遮蔽電流を小さなループに抑えることで、この交流損失を低減する。この多芯ツイストという構造により、実用的な超電導線材が得られてきた。

電気抵抗がゼロだとすれば無限の電流を流すことができることになるが、電流が流れることにより発生するローレンツ力が大きくなるため、磁束の動きを止めきれなくなる。このため、この磁束線の動きを止める（ピン止め）強さを強くすることで、電気抵抗ゼロで流すことの出来る電流を大きくすることが重要となり、その電流を臨界電流と呼ぶ。これは超電導体の特性の中で最も重要な特性である。

5. 超電導線材の製造方法

Nb-Ti 超電導線材の一般的な製造方法は次のとおりである。電子ビーム溶解等によって製造された Nb-Ti のインゴットを銅の筒の中に入れ、銅の蓋をした「ビレット」を熱間押出しし、ダイによる伸線加工を繰り返し、鉛筆状の六角線（セグメント）を製作する。それ

を数十~数万本並べて銅の筒の中に入れて、銅の蓋をした「多芯ビレット」をさらに熱間押し出し、伸線加工を施す。その中間で 400 °C前後の熱処理を 1 回もしくは線径を変えて複数回行い、目的の線径の手前でツイスト（ねじり）加工を行い、最終寸法に伸線する。最後に加工硬化されたことによって低温における電気抵抗（残留抵抗）が上昇した銅を焼鈍して軟化させ、電気抵抗を下げる。銅に複合化された Nb-Ti は非常に加工しやすく、銅だけで伸線した場合に加工を続けるために必要な軟化焼鈍は不要である。400 °C前後で行う熱処理は、Nb-Ti 合金中に Ti の α 相を析出させ、それ以降の伸線によって Nb-Ti フィラメント中に適度に分散させることによって、磁束のピン止め効果を与えるためのものである。これによって、高磁場でも高い臨界電流密度を得ることができる。

複合化の加工上の目的は、超電導体によっても異なる。Nb-Ti は前述のように非常に加工性は良いが、Nb-Ti 単体では反応しやすいため、通常のダイによる潤滑伸線が不可能なことであり、銅の中に挿入することで良好な伸線加工性を得ている。

Nb₃Sn等の金属間化合物系超電導体や銅酸化物系超電導体の場合、Nb-Tiのように加工性が良くないため、超電導体をそのまま線材化することは非常に難しい。金属間化合物や酸化物は、瀬戸物のようなものなので、塑性変形によって線材化はできない。そこで、線材化がほぼ終了した状態で、超電導構成元素の複合体や中間体に熱処理等を施して超電導体を生成させる方法が用いられる。または、その熱処理を、コイル等の加工を施した後に行う方法もあり、コイル化においては、熱処理してからコイルにする方法をリアクト&ワインド法、コイル化してから熱処理する方法をワインド&リアクト法と呼ぶ。一般的に金属間化合物系超電導体の場合、小型のコイルでは曲げ径が小さいためにコイル化時のひずみが大きく、ワインド&リアクト法が、大型のコイルで曲げ径が十分大きい場合はリアクト&ワインド法が用いられる。一方、銅酸化物系超電導体の場合は、一般には線材状態で超電導化反応が終了している状態で供給される。

前述のような、金属間化合物系や銅酸化物系超電導線材は、線材を製造する際だけでなく、線材を使用する場合でも、可撓性や線材自体が受ける応力、ひずみに注意する必要がある。これらの超電導線材は、応用製品を製作する際に生じる曲げやコイル化した際の電磁力等による応力やひずみによって、容易に超電導特性（一般には臨界電流）が低下したり、極端な場合には破断したりすることが起こる。金属間化合物系超電導線材の場合は、前述のようなワインド&リアクト法を用いることにより、超電導体が生成した後の変形を抑えている。銅酸化物系超電導線材の場合は、非常に薄い超電導層を生成することによ

て、超電導体自体が受けるひずみを小さくすることで超電導特性の低下を抑えている。

銅酸化物系超電導線材には、現在主としてYやGdといったレアアース系の元素とBa,Cu及びOからなる $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ で構成されるレアアース系（REBCO）超電導線材と $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ や $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_x$ のビスマス系（BSCCO）超電導線材が開発されている。いずれも超電導電流の流れる CuO_2 面と超電導電流の流れないブロック層が交互に積層する形で結晶が構成されている。積層方向がc軸と呼ばれ、その方向には超電導電流はほとんど流れず、a, b軸方向の CuO_2 面内に電流が流れるため、その結晶のa, b軸面（ab面）を配向させることで、超電導電流を流すことができる。

BSCCO 超電導体は、この結晶の劈開性を利用して、圧延を行うことによって線材としてab面を配向することが可能となり、粉末をパイプに入れて銅線のような加工を行う、銀シース・パウダーインチューブ法により、実用的なテープ状の長尺線材が開発された。

一方 REBCO 超電導体は同様な金属シース・パウダーインチューブ法では線材化が不可能で、BSCCO 超電導体の前年に発見されたにもかかわらず、長尺線材の実現が遅れた。REBCO の結晶は配向が非常に難しいため、REBCO と結晶格子間隔が似通った物質の基板上にエピタキシャル成長させることで配向させる。これにより、半導体素子のように基板上に形成した薄膜をエッチングすることで回路を形成し超電導デバイスが実現された。線材化は、この基板を長さ方向に伸ばすことが研究され、テープ状の基板の上に連続的に超電導層を成長させる手法で、長尺線材が得られている。この配向度を向上させる方法には複数の方式が提案され、REBCO 超電導線材の研究機関毎に様々な特徴を持った技術によって実現されている。超電導層との結晶格子間隔の直接整合がとれないため、基板と超電導層の間には中間層や不要な元素の拡散を防ぐバッファ層などの層を多数設けた構造が採用されている。さらに、この基板は一般に高強度を要する目的から、ハステロイ等の高電気抵抗の金属が用いられるので、安定化のための銅を複合化する場合が多い。これには、蒸着、めっき、クラッド等の手法が用いられる。

6. 臨界電流

電気抵抗がゼロであることを厳密に評価することは不可能なので、臨界電流は、単位長さあたりの所定電圧の発生（例えば、1 cmあたり 1 μV の発生点）もしくは、抵抗率の発生（例えば、 $1 \times 10^{-12} \Omega\text{cm}$ の発生点）で定義される。通常は4端子法で評価を行い、超電導体に流す電流を徐々に増加させ、電圧の発生を測定、電流-電圧（ $I-U$ ）曲線から所定の電

圧、もしくは抵抗率が発生した点を臨界電流と定義する。 $I-U$ 曲線は、電流が小さい間は抵抗がゼロであるため、電圧もゼロであるが、徐々に超電導状態が破れ、電圧が増加する。

超電導線材が工業的に用いられる場合、超電導線材が均一でなければならない。それを表す指標として n 値が用いられる。これは、超電導線材における電圧と電流の関係である非線形関数 $U=U_c(I/I_c)^n$ におけるべき乗数 n で、 n 値が大きいほど、 $I-U$ 曲線の立ち上がり（電圧の増加程度）が大きくなる。これは、超電導線材中の超電導体の一部が別々の電流密度で超電導状態から常電導状態に移ってゆくのではなく、全体にわたってほぼ同じ電流密度で超電導状態から常電導状態に転移することを示しており、 n 値が大きいほど、超電導線材が、より均一な臨界電流密度を持つことを意味している。

7. 本論文の構成

これまで述べてのように、合金系のNb-Tiや金属間化合物系のNb₃Snは市販超電導線材として、MRI、磁場印加用マグネット、磁気浮上列車、物理学研究用粒子加速器等の実用超電導機器を実現するに至っている。しかし、超電導というシーズは、さらに広い範囲で社会に貢献できることを期待されており、それには、新しい超電導体の線材化技術開発と、それを応用するための技術開発が必要である。新しい応用としては、Nb-TiやNb₃Snでは実現できない、超高磁場マグネット、超高速励磁マグネット、電力ケーブル等がある。これらは、臨界温度、臨界磁場等の制約によって、Nb-TiやNb₃Snでの実現が不可能であった応用の可能性であり、それを新しい超電導体の性質によって実現させることが期待されている。しかし、この新しい超電導体はNb-Tiと違って臨界電流の応力やひずみ依存性が強い（影響を受けやすい）材料である。そこで、これらの新しい分野への応用を目指した超電導線材を実用化するために、線材化と臨界電流の応力・ひずみ依存性の研究を行った。

第2章では、新しいエネルギー源として注目されているトカマク式核融合炉を実現させるために必要な超高磁場マグネット用の超電導線材の研究について述べる。トカマク式核融合炉では、超高温のプラズマを磁場によって閉じ込めるが、非常に高い磁場を少ない電力消費で発生させるために、超電導マグネットが必須である。そのための超電導線材として、Nb-TiやNb₃Snが検討されているが、Nb₃Snは応力やひずみに弱い（臨界電流が低下する）ため、より強いNb₃Alを新しい候補として実用超電導線材化の研究を行った。また、超高磁場で超電導線材の受ける強い電磁力や大型マグネットを製造する際のひずみが臨界電流に及ぼす影響が超電導マグネット実現の最も重要な要素であり、実使用条件下における

応力やひずみ依存性の研究を行った成果を述べる。

また、銅酸化物系超電導体は臨界磁場が非常に高いため、 Nb_3Al で発生可能な以上の超高磁場マグネットの実現が可能であるだけでなく、臨界温度が非常に高いため、液体窒素による冷却が可能で、これによりマグネットのような集中した構造ではない、長距離の送電ケーブルの実現可能性がある。さらに、臨界温度が高いため、使用時の温度マージン（使用温度と臨界温度の差）を大きくとることができ、超電導マグネットを励磁（電流を増加させて磁場を上げる）することによって発生する交流損失による熱に対する冷却が容易になるため、高速な励磁が可能になる。この銅酸化物系超電導線材は、超電導体が生成された状態であるため、マグネットやケーブル化を行う際に、主として曲げひずみを受ける。線材の構造により超電導層を薄くすることによって本質的なひずみの大きさを抑えているとはいえ、曲げひずみによる臨界電流への影響（以下「曲げひずみ依存性」）は実用化における最も重要な評価項目のひとつである。

第 3 章では、現在世界中の多数の研究機関、メーカーが機関毎に様々な製造方法で開発を進めている REBCO 超電導線材の曲げひずみ依存性の研究成果を述べる。REBCO 超電導線材は、基板となる金属上に REBCO 超電導体を結晶成長させる際の結晶格子や方位の整合性をとるための手法が確立できていないため、機関ごとに特徴ある製法を採用している。そのために、超電導線材として使用される際に REBCO 超電導体と基板やその他の構成材料との間に残留する応力が製法ごとにそれぞれ異なる。その結果、製法によって見かけの曲げひずみ依存性は異なる。それらを考慮して REBCO 超電導線材の本質的な曲げひずみ依存性の挙動を解析した。また、超電導線材の実用上において経験する磁場や線材幅、基板厚さによる曲げひずみ依存性への影響についても明らかにした成果を述べる。

第 4 章では、実用線材が販売され、様々な大型超電導応用プロジェクトで採用されている BSCCO 超電導線材を例にとり、工業材料としての曲げひずみ依存性試験法標準化の研究成果を述べる。 Nb_3Al 超電導線材や REBCO 超電導線材の曲げひずみ依存性研究の経験や世界の経験者から得た情報をもとに、曲げひずみ依存性評価方法の基準となる手順案を検討した。通常の超電導材料を扱う研究機関が所持する臨界電流評価システムを用いて、その手順に従って測定した際の実際の測定データの統計的な不確かさと、理論的に推定される統計的な不確かさを比較検討した。その結果をもとに、工業材料としての曲げひずみ依存性評価方法の国際標準化の提案を行った。

8. 参考文献

- 1) H. K. Onnes: *The Superconductivity of Mercury*, Communications from the Laboratory of Physics at the University of Leiden, **122&124**(1911)
- 2) W. Meissner and R. Ochsenfeld: *Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit*, Naturwissenschaften, **21**(1933), 787
- 3) F. Lonclon and H. London: *The Electromagnetic Equations of the Supraconductor*, Proceedings of the Royal Society of London, **A149**(1935), 71
- 4) V.L. Ginzburg and L.D. Landau: *On the theory of superconductivity*, Zft. Exsper. Teor. Fiz., **20**(1950), 1064
- 5) B.D. Josephson: *Possible new effects in superconductive tunneling*, Physics Letters, **1**(1962), 251
- 6) R. C. Jaklevic, John Lambe, A. H. Silver and J. E. Mercereau: *Quantum Interference Effects in Josephson Tunneling*, Physical Review Letters, **12**(1964), 159
- 7) C. Poole, H. Farach and R. Creswick: *Handbook of Superconductivity*, Academic Press(1999)
- 8) T. Yabuuchi, T. Matsuoka, Y. Nakamoto and K. Shimizu: *Quantum Superconductivity of Ca Exceeding 25 K at Megabar Pressures*, Journal of the Physical Society of Japan, **75**(1975), 83703
- 9) 長村光造: *超伝導材料*, 産業図書(2000)
- 10) J. G. Bednorz and K. A. Muller: *Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system*, Zeitschrift für Physik, **B64**(1986), 189
- 11) S. Uchida, H. Takagi, K. Kitazawa and S. Tanaka: *High T_c Superconductivity of La-Ba-Cu Oxides*, Japanese Journal of Applied Physics, **26**(1987), L1
- 12) M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Z. Wang and C. W. Chu: *Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure*, Physical Review Letters, **58**(1987), 908

- 13) H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano: A *New High- T_C Oxide Superconductor without a Rare Earth Element*, Japanese Journal of Applied Physics, **27**(1988), L209

第2章 Nb₃Al 超電導線材の開発と応力・ひずみ依存性

1. 緒言

現在のエネルギー供給は、石油、天然ガス、石炭等の化石燃料に多くを依存しているが、それらの資源は有限であり、また温室効果ガスの排出などの問題も抱えている。そこで、太陽光、水力、風力、潮力、地熱といった再生可能エネルギーへの転換が期待されているものの、安定した供給源となるには様々な課題が残されている。これらと比較して、核融合発電は無尽蔵といえる海水から得られる水素を利用し、また、核分裂のような暴走の危険性やきわめて長期間にわたる半減期を有した放射性物質の処分の必要性がない点で、究極のエネルギーと言える。その核融合を実現する方法の有力候補としてあげられるトカマク方式の核融合炉には 1 億℃を超える超高温プラズマを閉じ込めるために巨大な高磁場電磁石を用いる。

巨大な高磁場電磁石には大電流が必要であり、通常の電磁石では核融合発電で得られる電力よりも大きな電力を必要とするため、核融合は発電たりえない。そこで、超電導磁石を用いることによって、プラズマの保持に必要な電力を大きく上回る発電が可能な核融合炉が現実的になってくる。

設計では最大 13 T という高磁場の発生が必要であり、広く使われている Nb-Ti 超電導線材（臨界磁場が 12.5 T）では不可能であり、Nb₃Sn 等の金属間化合物系超電導線材が必須になる。このような大きな高磁場空間を発生する場合、超電導線材に印加される応力やひずみが極めて大きくなるが、金属間化合物系超電導体は合金系の Nb-Ti に比べて応力やひずみに弱い。Nb₃Al は同じ金属間化合物系超電導体ながら、臨界磁場が高いこと、応力やひずみによる特性劣化が小さい点で、Nb₃Sn に替わる材料として期待されてきた¹⁾。

そこで、日米欧露他の国際協力で建設が進められることになった国際熱核融合実験炉（International Thermo-nuclear Experimental Reactor、以下 ITER）計画における超電導トロイダル磁場コイルへの適用を想定した Nb₃Al 超電導線材の実用化とともに、高磁場発生により超電導線材が受ける電磁力やコイル製造時のひずみによる臨界電流への影響（応力・ひずみ依存性）を研究した。

Nb₃Al は Wood によって 1950 年に発見され、超電導体であることが 1957 年に、そして 1970 年、Foner によって、高い臨界磁場を持つことが見出された²⁾。

Figure 2-1³⁾ に Al と Nb の二元系合金状態図を示す。Nb₃Al の単相領域は、常温では化学量論組成である 75 at% より Nb の割合が多い 77~79 at% に存在している。75 at% に Nb₃Al の単

相領域が存在するのは約 1900°C以上 1950°C以下の非常に高温の狭い範囲である。これが有望な超電導体であるにもかかわらず、実用的な線材製造方法が見出せなかった最大の要因である。これは銅の融点である 1083°Cよりはるかに高く、実用超電導線材として不可欠な銅安定化後の熱処理が不可能になるためである。

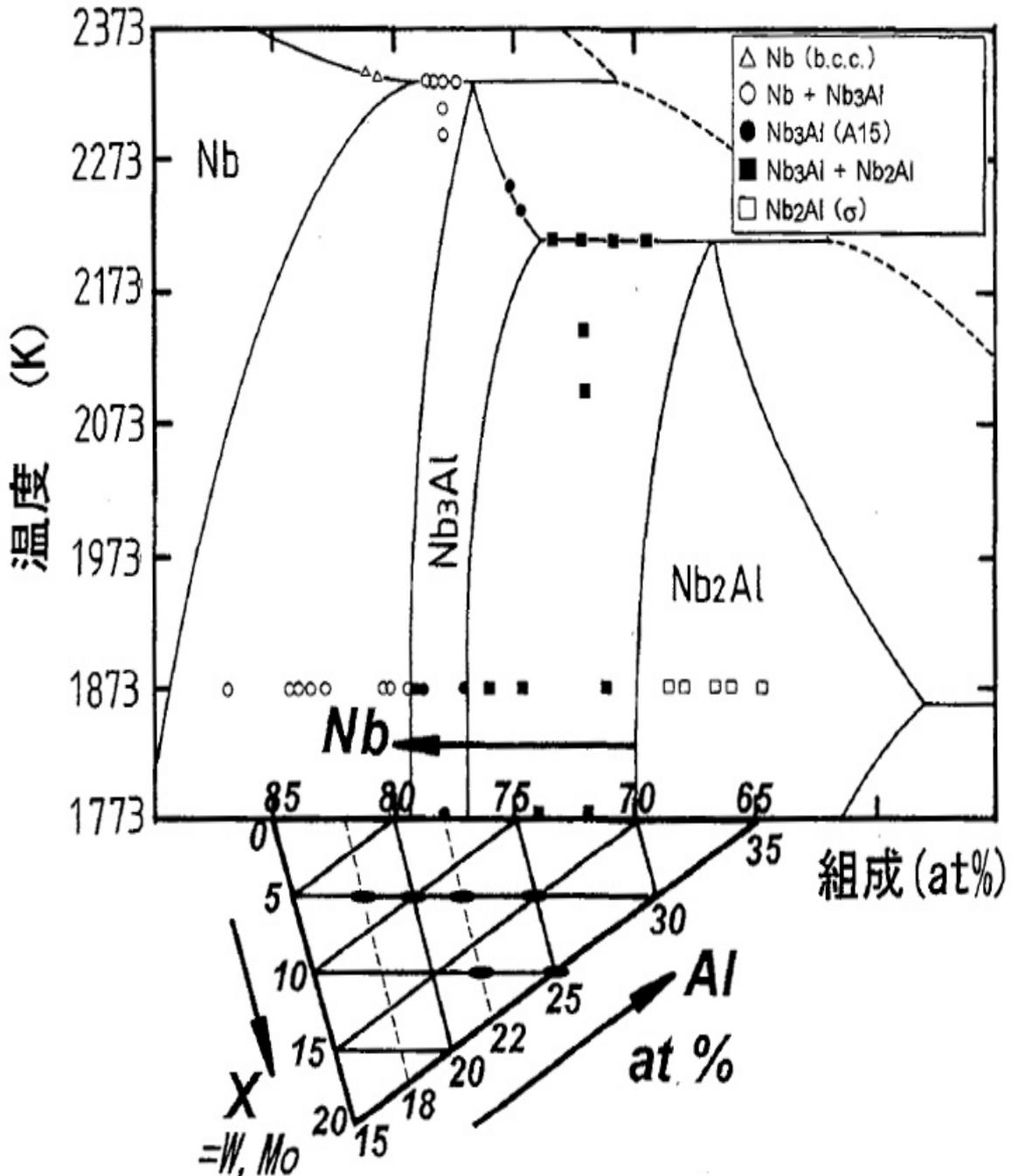


Figure 2-1 Al-Nb 系二元合金状態図

1975年、イタリアのCeresaraらによって、薄いニオブとアルミの層を重ねた構造（ジェリーロール法）により拡散距離を短くした線材では1000℃以下の熱処理条件で、超電導特性を示すことが報告された⁴⁾。この成果によるNb₃Al超電導線材は本格的な利用までには至らなかったが、以降、ニオブとアルミを微細に混合させ、短い距離を比較的低温の熱処理によって拡散させることでNb₃Alを生成する手法として、粉末法⁵⁾、ニオブチューブ法⁶⁾、クラッドチップ押出法⁷⁾などの研究も始められた。しかし、これらについても実用超電導線材として必須である銅安定化多芯ツイスト構造の長尺線材の作製は報告されていなかった。

2. ジェリーロール法 Nb₃Al 超電導線材の製造方法

実用線材としては、銅安定化多芯ツイスト構造の線材を均一に大量に生産する必要がある。ジェリーロール法は最初のニオブとアルミのシートを巻き合わせる工程以降は、Nb-Ti超電導線材とほぼ同じ製造工程が採用できる。この観点から、Nb₃Al超電導線材研究としてイタリアでは断念されていたジェリーロール法を見直し、実用化研究を行うことにした。

Figure 2-2 にジェリーロール法Nb₃Al超電導線材の製造工程を示す。ニオブとアルミの薄いシートを無酸素銅の棒を中心にして重ねて巻き合わせ、お菓子のスイスロールのような形状（ジェリーロール）にして、無酸素銅管の中に挿入する。この際、アルミを含まないニオブだけの層をジェリーロールの外側に設けている。これは、アルミが超電導生成熱処理中に銅中に拡散して安定化材である無酸素銅の低温での抵抗率を上昇させることを防ぐためである。この銅被覆ニオブアルミ単芯線を適当な寸法まで伸線加工し、所定の長さに切断し、複数本束ねて無酸素銅管の中に整列、複合多芯ビレットを組み立てる。この銅被覆ニオブアルミ単芯線（セグメント）は充填率を高めるために、断面を六角とする。複合多芯ビレットは、電子ビーム溶接により真空封止した後、押出しし、伸線を繰り返す、ツイスト加工の後、所定の線材径の銅安定化複合多芯超電導線材を得る。超電導線材の横断面は、ニオブとアルミのジェリーロールが芯（フィラメント）となり、数十本から数百本並んだ構造を有する。

ジェリーロール後はNb-Ti超電導線材とほぼ同様の工程で、銅線のような中間焼鈍は不要である。得られた超電導線材は、目的に応じて、めっきや導体化処理等を施し、通常はその処理後の熱処理によりNb₃Alを生成させる。

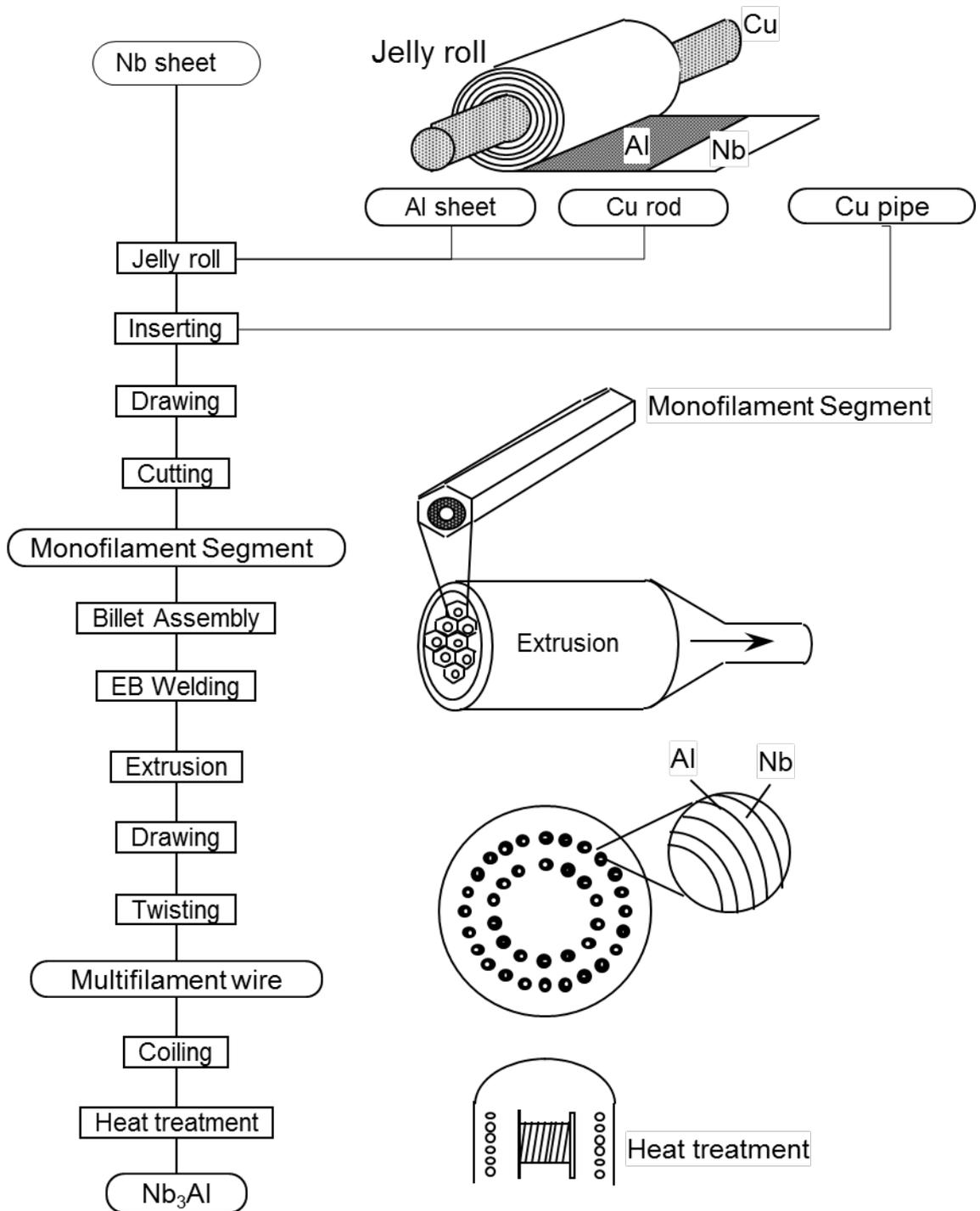


Figure 2-2 ジェリーロール法Nb₃Al超電導線材の製造工程

3. 実用超電導線材に向けた特性向上

3-1 臨界電流密度と微細組織

超電導線材としての最も重要な特性である臨界電流密度は、次の 3 つのポイントから制御される。

(1) 化学量論組成

Figure 2-1 のAl-Nb二元系合金状態図に示されるように、 Nb_3Al の単相領域が 1000°C 以下ではアルミの原子比が 22%前後と、 Nb_3Al の化学量論組成 (3:1) である 25%より少ない。それゆえ、銅を安定化材として使用した超電導線材での熱処理を想定すると、異相 (Nb_2Al) を減らし Nb_3Al の割合を増加するためには、化学量論組成である 25%よりはアルミの原子比を少ない配合にする必要がある。

(2) 層の厚さ

ニオブとアルミの拡散反応を検討したところ、ニオブとアルミの全てが反応するのに必要な時間が長くなるほど、結晶粒が粗大化し Nb_3Al のピン止め点となる結晶粒界が減少するために臨界電流密度は低下する。このため、反応時間を短くすること、すなわち、ニオブとアルミの層を可能な限り薄くして Nb_3Al 生成に必要な拡散距離を短くする方が臨界電流密度を高くすることができる。

(3) 熱処理条件

超電導線材の安定化材として銅を複合しているため、熱処理可能な温度の上限は銅の融点 1083°C である。**Figure 2-3** に熱処理温度及び時間と 4.2 K, 12 T の磁場中における臨界電流密度との関係を示す。熱処理温度が高温になるほど最大の臨界電流密度が得られる熱処理時間が短時間側に移行し、かつ絶対値も高くなることがわかる。よって、銅の融点以下で可能な限り高温にする方が有利である。しかし、 775°C では 10 時間程度で得られたピークが、さらに高温になると短時間側に移行することになる。小型のマグネットや、超電導線材のみの場合は数時間程度を保持する熱処理はさほど難しくはない。しかし、特に核融合炉のような数 m の大きさのマグネットの場合は、導体の容積が大きくなり、熱伝導の遅れ等により、超電導線材の全体を均一に一定の時間熱処理をすることが非常に困難になる。そのため、熱処理を行う際の温度分布や昇温、降温時の時間差による保持時間や保持温度のばらつきにおいても臨界電流密度がばらつきにくい、ある程度の長時間熱処理でなければ実用化は難しい。

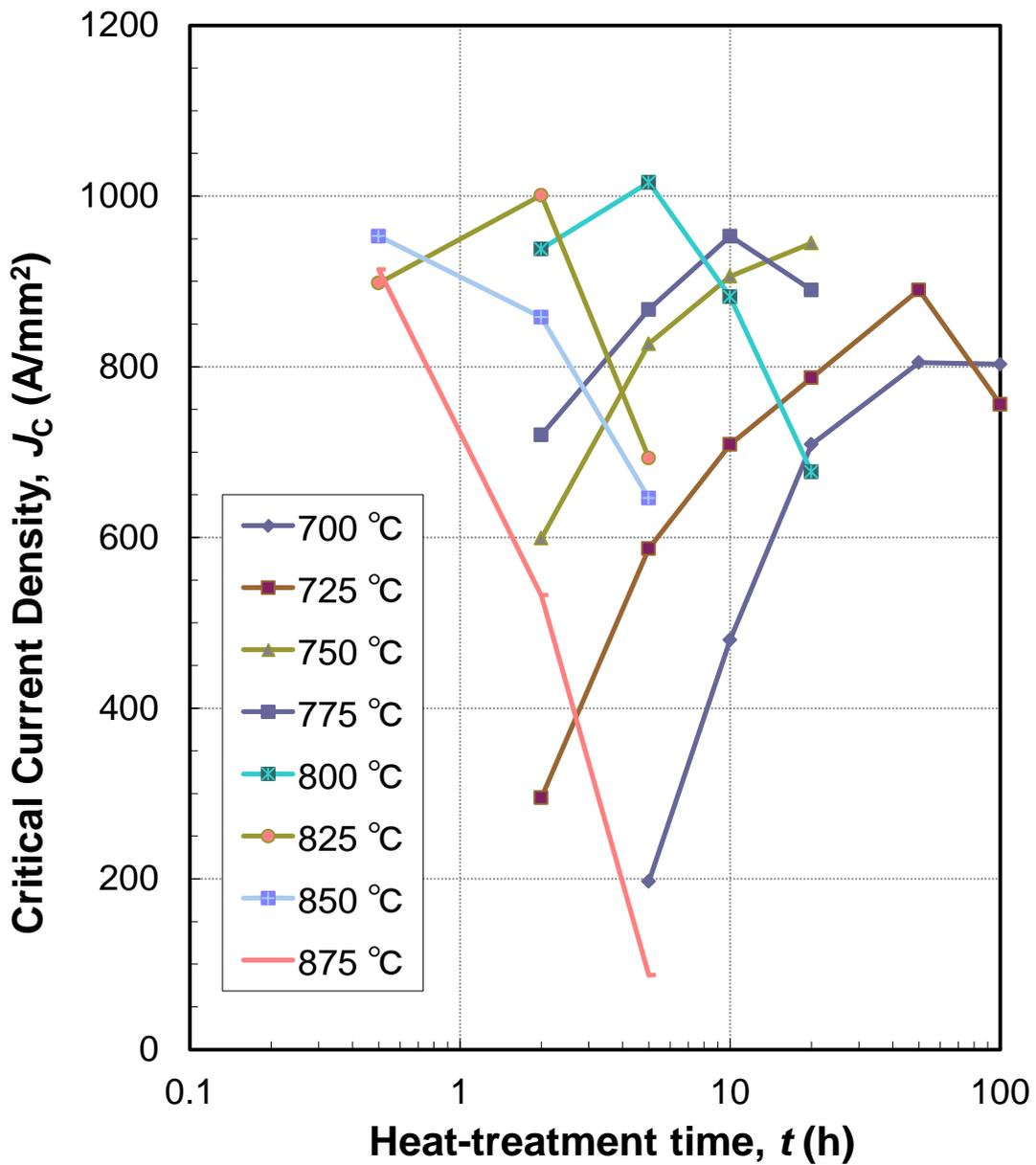


Figure 2-3 熱処理温度を変えた場合の臨界電流密度 J_c (4.2 K, 12 T) の時間依存性

臨界電流密度の向上のため、微細組織について検討を行った。熱処理した超電導線材の超電導フィラメント部分をSEM(走査電子顕微鏡)の2次電子で撮影した写真と、それに対応する箇所を薄膜化しTEM(透過電子顕微鏡)により撮影した写真を**Figure 2-4**に示す。

EDS (エネルギー分散型X線分光分析) パターンからは図中Aの白い部分がNb、Bの明るい灰色部分が Nb_3Al 、Cの暗い灰色部分が Nb_2Al であることが示された。また、TEM像から Nb_3Al の結晶粒径は約100 nmのオーダーであり、 Nb_2Al はそれよりかなり微細な粒径であることがわかる。

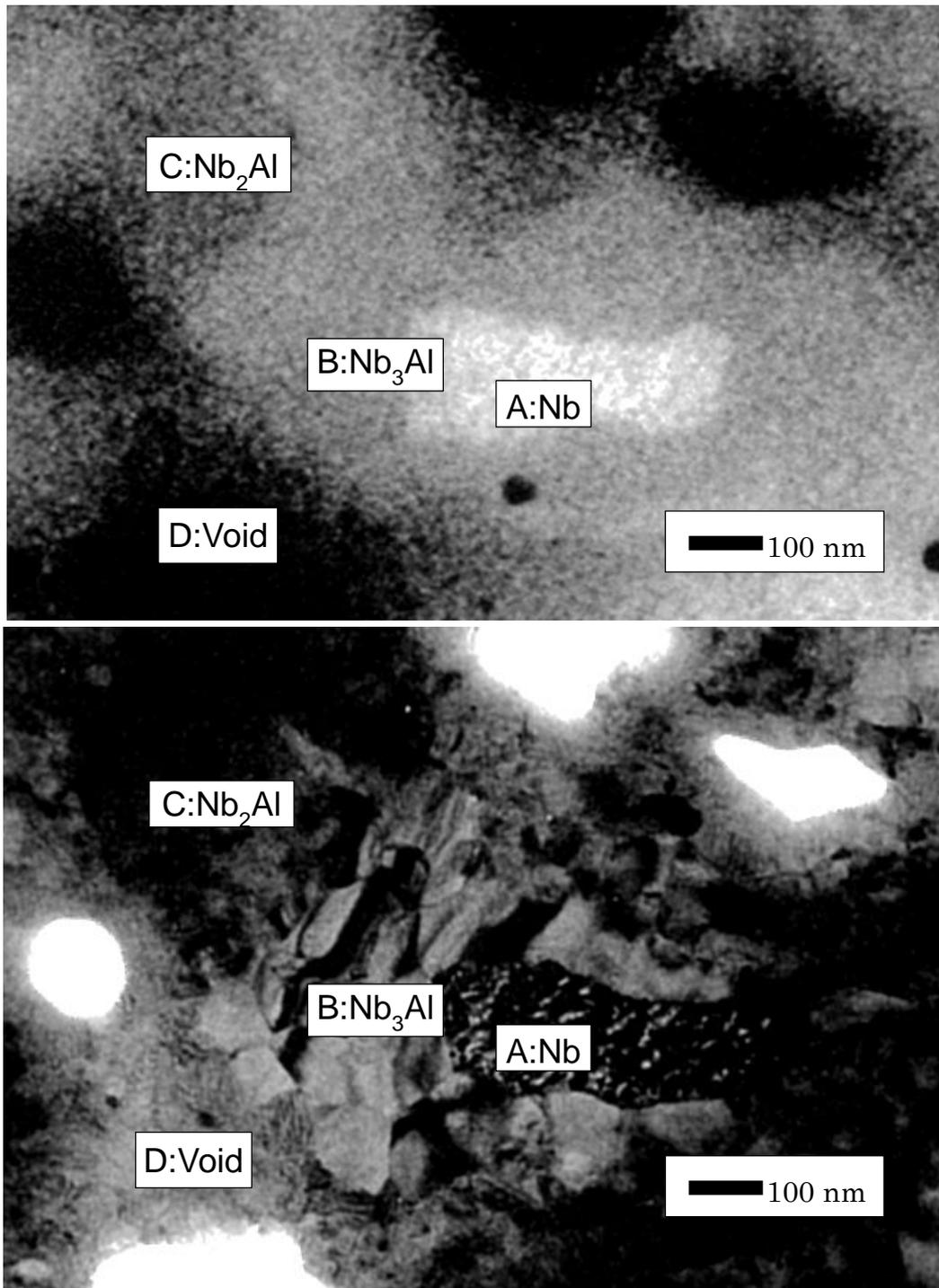


Figure 2-4 超電導線材フィラメント部分のSEM像(上)及びTEM像(下)

ニオブとアルミが積層されている状態から、熱処理によってニオブ中をアルミが拡散することで Nb_3Al 相が生成するが、アルミがニオブ層の中を端まで拡散しなければ全体が反応しない。本製法では、ニオブ層とアルミ層が交互に並ぶ形になっているので、アルミがニオブ層の半分の厚さまで拡散すれば、ニオブ層の全体が反応しうる状況になる。そこでニオブ層の厚みに対応する拡散すべき距離と臨界電流の相関を得るために、**Figure 2-5** に示す断面を有した Nb_3Al 超電導線材(A)を試作し、各種の線材径（直径）まで伸線して得たサンプルに同一の熱処理を行った。得られたサンプルの諸元を**Table 2-1** に示す。**Figure 2-5**（左）において、白い部分が銅であり、黒い部分がニオブとアルミを積層した部分である。**Table 2-1** に示す銅/非銅部比率とは、銅の部分の面積と銅以外、すなわち、ニオブとアルミの積層部分の面積の比率である。「2. ジェリーロール法 Nb_3Al 超電導線材の製造方法」の節で述べたように、アルミを含まないニオブだけの層の部分も非銅部に含めている。

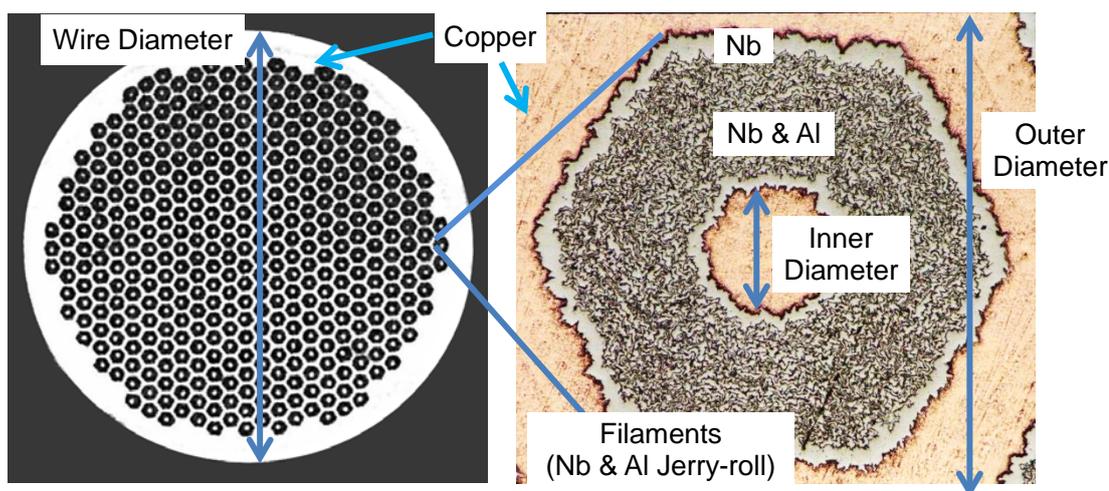


Figure 2-5 超電導線材(A)断面写真（左）と Nb/Al フィラメント部の拡大（右）

Table 2-1 評価サンプルの諸元

線材径(mm)	1.29	1.02	0.81	0.64
フィラメント本数	397	397	397	397
銅/非銅部比率	1	1	1	1
フィラメント外径(μm)	43	34	27	21
フィラメント内径(μm)	9	7	6	5

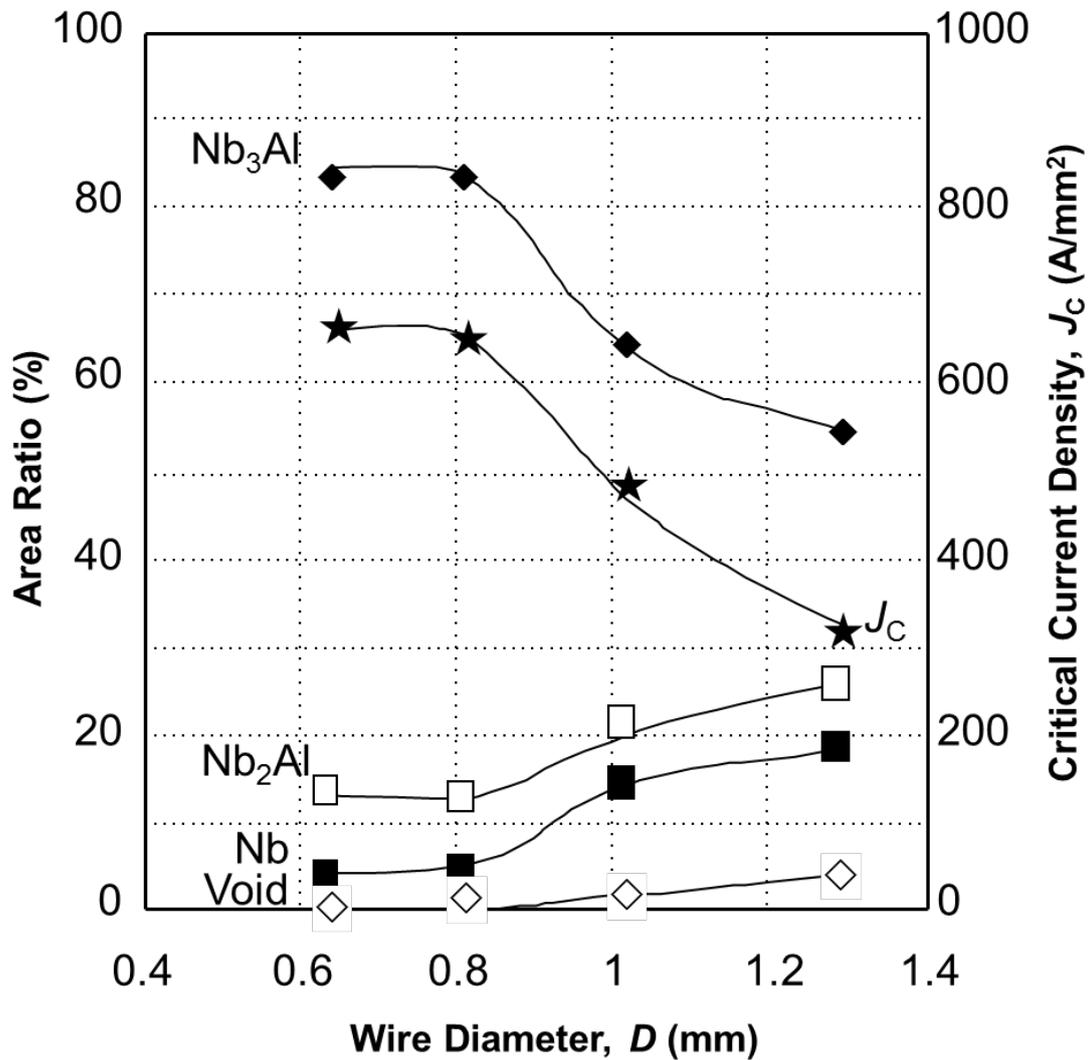


Figure 2-6 各相の面積割合と臨界電流密度 J_c (4.2 K, 12 T) の線材径依存性

それぞれの臨界電流特性を測定するとともに、Figure 2-4と同様のSEM像を撮影し、画像解析により、Nb、Nb₃Al、Nb₂Al及びVoid各相の面積割合を測定した。各相の面積割合と臨界電流密度の線材径依存性をFigure 2-6に示す。線材径が細くなる、すなわちニオブ及びアルミの層が薄くなる、に従って、Nb₃Alの面積割合、即ちNb₃Alの生成量が増加し、それともなって臨界電流密度が向上している。しかし、線材径が1.29 mmから0.64 mmまで細くなるにつれてNb₃Alの面積割合が55%から82%まで約1.5倍に増加しているに対して、臨界電流密度は320 A/mm²から650 A/mm²と倍以上に向上していることから、臨界電流密度にはNb₃Alの生成量以外の要因も関連していることもわかった。

その他の要因を検討するため、X線回折を行った。測定は $2\theta = 20 \sim 120$ の範囲で行った。 Nb_3Al の格子定数は 80 度以上の 4 ピークから計算した。格子定数とNb-Alの化学組成の関係はJordaらによって研究⁸⁾されているので、それに従った。Figure 2-7に格子定数と上部臨界磁場 B_{C2} の線材径依存性を示す。格子定数は、線材径が小さくなるにつれて、アルミ濃度が 25% すなわち化学量論組成に対応する 5.180 \AA に近づき、上部臨界磁場も向上している。しかしながら、線材径が 0.81 mm の場合に対して 0.64 mm では格子定数が化学量論組成である Nb_3Al の格子定数に近づいているものの、臨界電流密度は上昇せず、上部臨界磁場もやや下降している。格子定数が理想値に近づいているのに、臨界電流密度が低下している原因として考えられるのは、ニオブ層の厚さが線材径に比例して約 $3/4$ になったために、拡散距離に対して熱処理時間が最適化できていないことが考えられる。また、今回の試作では、線材の伸線加工性も 0.8 mm 以下で急激に悪化していたために、ジェリーロール部の不均一な加工変形が生じた可能性も推定される。

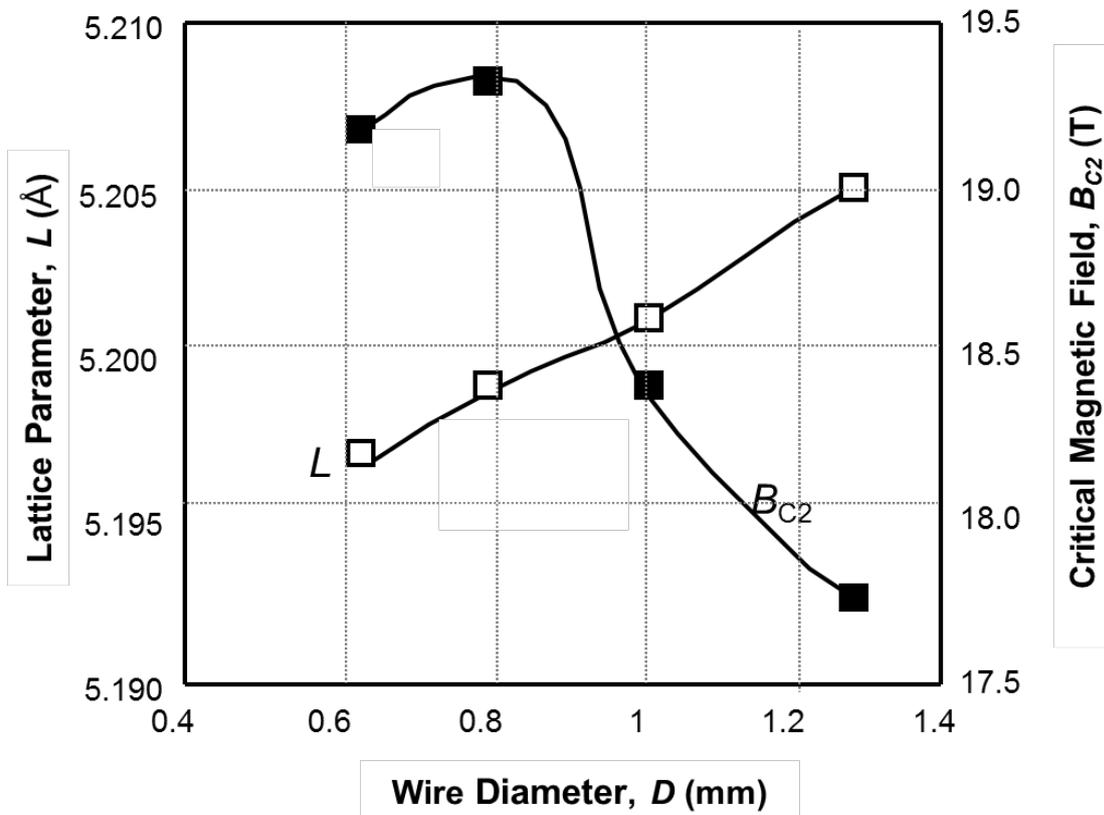


Figure 2-7 格子定数 L と上部臨界磁場 B_{C2} の線材径依存性

横軸は線材の直径 □：格子定数 ■：上部臨界磁場

これらの知見から、目的の線材径でニオブ層とアルミ層を薄くする一方、それらの伸線加工性を向上させることが必要であることが分かった。そこで、ニオブシートの厚さ、硬度、伸線加工方法及び加工限界を考慮しながら、目的線材径である 0.81 mm におけるニオブ層の厚さの最適値を探る実験を行った。

また、工業的な生産においては、ばらつきを考慮する必要がある。長尺でかつ製造コストの低い超電導線材を得るためには、ビレットの単重を大きくするために、1枚のニオブシートの幅、長さを大きくする必要がある。最も重要な管理項目はニオブシートの寸法と加工性、そしてそのばらつきであった。アルミシートは既に一般的な大量生産の工業製品となっているために寸法は安定しているが、ニオブは一般的な材料ではなかったことや加工が比較的難しいことから、特に厚さのばらつきを抑えることは難しかった。そこで、ニオブとアルミの組成比を一定の範囲内に収めるために、購入したニオブシートの厚さを実測し、その厚さにあわせてアルミシートの厚さを変えるなどの実用的な開発を進め、設計及び製造工程の最適化を行った。

これらの最適化の結果、得られた超電導線材(B)の諸元を **Table 2-2** に、超電導線材の断面写真を **Figure 2-8** に示す。**Table 2-1** に示す超電導線材(A)に対して、複合多芯ビレットに組み込む銅被覆ニオブアルミ単芯線の線材径（六角対辺）を大きくし、本数を 397 本から 240 本に減らし、銅/非銅部の面積割合は ITER 仕様である 1.5 となるようにした。これは、最終線材径までのニオブの加工量を減らすことにより、加工性の向上を図ったものである。

Table 2-2 加工性向上を目指した超電導線材(B)の諸元

項目	値
線材径	0.81 mm
フィラメント本数	240
銅/非銅部比率	1.5
フィラメント直径	34 μm
ツイストピッチ	20 mm

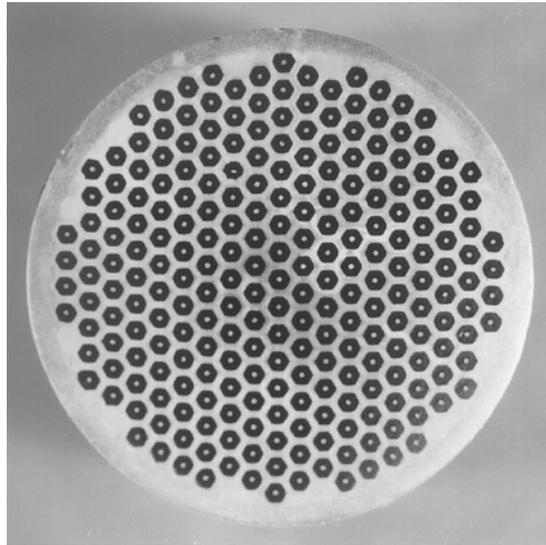


Figure 2-8 加工性向上を目指した超電導線材(B)の断面写真

この超電導線材(B)の 4.2 Kにおける臨界電流密度の磁場依存性をFigure 2-9 に示す。800°Cで 10 時間の熱処理①において、4.2 K, 12 Tの臨界電流密度として 800 A/mm² が得られた。これは、ITER用超電導線材としての実用レベルを超える値である。また、新たな性能向上の試みとして、1050°Cで 1 分熱処理の後、750°Cで 50 時間の追加熱処理を行った②では、4 割以上高い 1130 A/mm²が得られ、より高い磁場中での臨界電流特性が優れている線材が得られた。上部臨界磁場 B_{C2} も、①が 21 Tであるのに対して②では 23.1 T と向上しているが、これは生成熱処理温度が高くなったことにより、 Nb_3Al 相の組成比が化学量論組成に近づいたためと考えられる。

この 1050 °Cで 1 分といった高温短時間熱処理は、ワインド&リアクト法の熱処理が必要な大型導体や大型コイルへの採用は困難であるが、単線や少数本の撚線なら一定温度の熱処理炉内に線材を走らせるような連続熱処理を採用すれば実用化可能である。特に Nb_3Al の良好な耐ひずみ特性を応用したリアクト&ワインド法や、高温短時間熱処理を行った線材の巻線後に低温長時間の 2 段目の熱処理を行うなどの手法により、新たな応用が考えられる。

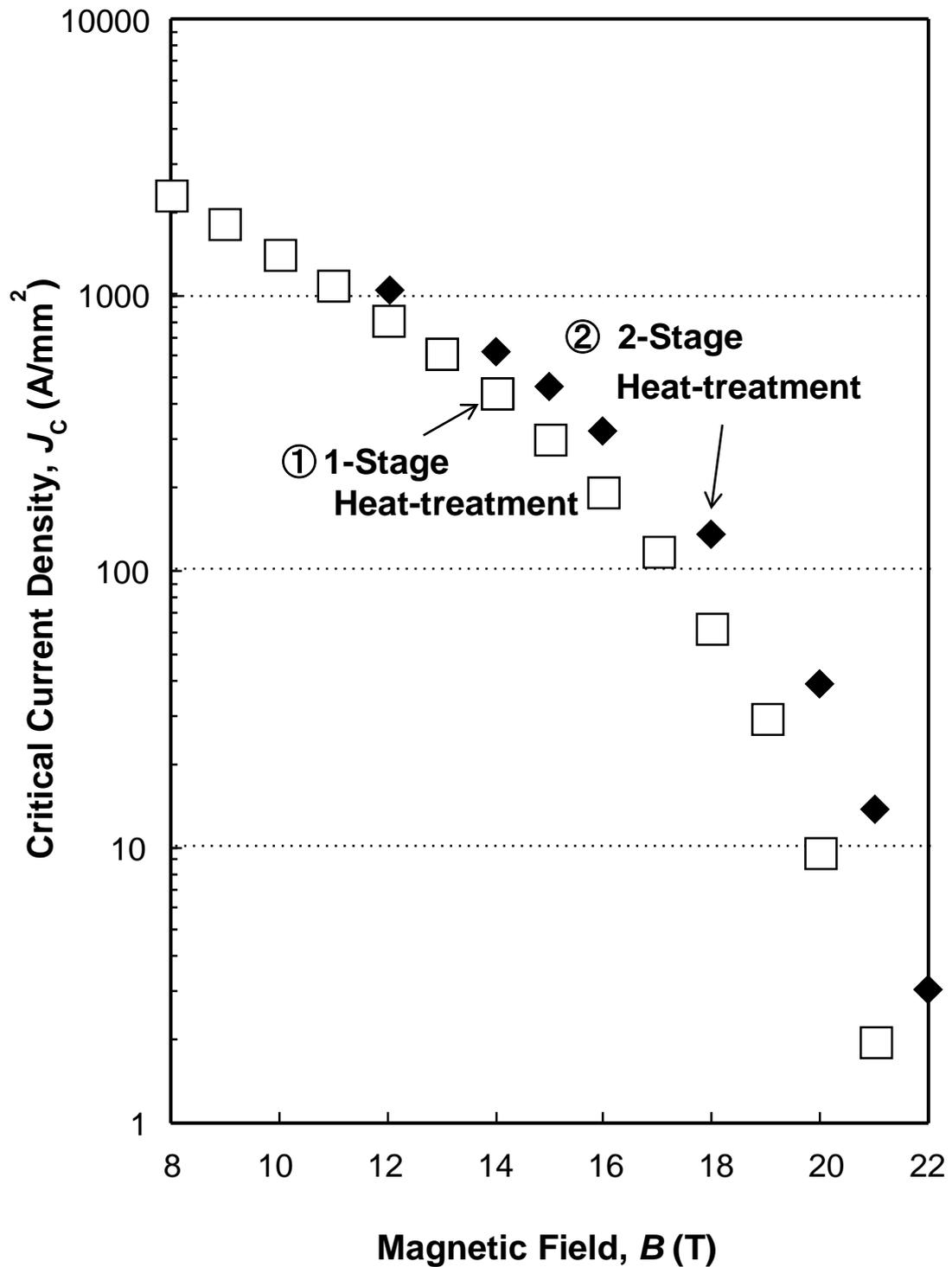


Figure 2-9 超電導線材(B)の臨界電流密度 J_c (4.2K) の磁場依存性

□ : ①800°C×10 時間の通常の 1 段階熱処理を施した線材

◆ : ②1050°C×1 分の短時間熱処理後に 750°C×50 時間の 2 段階の熱処理を施した線材

3-2 J_c - B - T 特性

Figure 2-10 に**Table 2-2** の超電導線材(B)を 4.2 Kから臨界温度近辺まで 0.5 K刻みで温度を変え、3 Tから 16 Tまで 1 T刻みで J_c - B 特性を測定した結果を示す。磁場が高くなるにつれて臨界電流密度は一様に低下し、臨界電流密度の温度依存性は小さくなっている。

臨界温度 T_c は 15.7 K、**Figure 2-9** の J_c - B 曲線①から Kramer Plot⁹⁾により求めた $B_{c2}(4.2K)$ は 21 Tであり、それと**Figure 2-10** から求めた上部臨界磁場 B_{c2} の温度依存性を**Figure 2-11** に示す。これは臨界磁場の放物線則(2-1)に $B_{c2}(0)=22.6$ Tでよく一致する。

$$B_{c2}(T) = B_{c2}(0) (1 - (T/T_c)^2) \quad (2-1)$$

ITERプロジェクトでは、Summers¹⁰⁾の式を変形して以下の式で J_c の温度、磁場依存性を計算してコイル設計を行っている。

$$J_c(B, T) = j_{c1}(B, T) \cdot \frac{1}{1 + j_{c1}(B, T) / j_0(T)} \quad (2-2)$$

ここで、

$$j_0(T) = j_{c0} (1 - t^2)^2$$

$$j_{c1}(B, T) = C_0 B^{-1/\beta} (1 - t^2)^2 (1 - b)^2$$

$$t = T/T_c, \quad b = B/B_{c2}$$

j_{c0} 、 C_0 、 β : 温度と磁場に依存しない定数

T_c : 臨界温度

$B_{c2}(0)$: 0 Kにおける上部臨界磁場

この式において

$$j_{c0} = 7.39 \times 10^{10} \text{ [A/m}^2\text{]}$$

$$C_0 = 2.54 \times 10^{10} \text{ [AT}^{1/2}\text{/m}^2\text{]}$$

$$\beta = 1.44, \quad B_{c2}(0) = 22.6 \text{ [T]}$$

でフィッティングした曲線を **Figure 2-10** の実線で示す。この近似式による臨界電流密度の温度-磁場依存性は測定値と良く一致していることが確認できる。

超電導マグネットを構成する超電導線材は全長にわたって一定の磁場や温度下にさらされるわけではない。また、強制冷却した場合であっても、冷媒が導入された最初の部分と導体の中を流れて最後に出てくる部分では温度が変わる。そのため、温度と磁場によって臨界電流密度がどのように変化するかを把握することは重要であり、このような臨界電流密度の温度-磁場依存性が得られたことは、超電導マグネットの設計に非常に有益である。

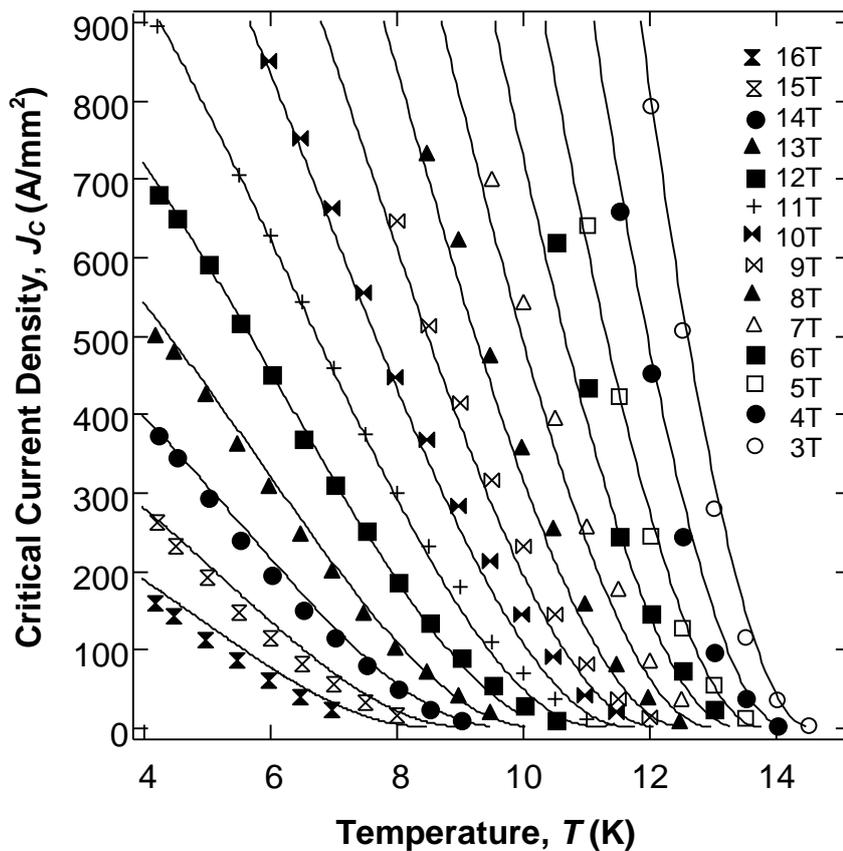


Figure 2-10 外部磁場を変えた場合の超電導線材(B)の臨界電流密度 J_c の温度依存性
 プロット：測定データ 曲線：(2-2)式によるフィッティング値

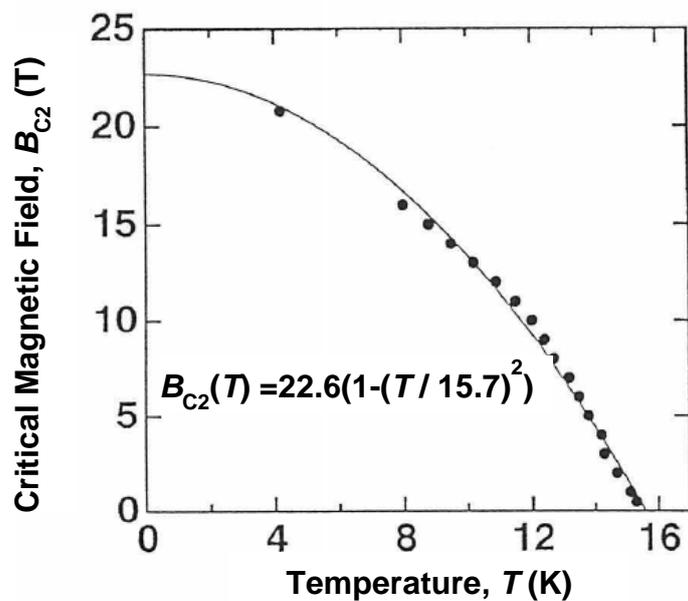


Figure 2-11 Figure 2-10 から求めた上部臨界磁場 B_{c2} の温度依存性

3-3 交流損失

大型コイルでは、電流変動や磁場変動によって生じる交流損失が、システムとして必要となる冷却能力を決める大きな要因となる。交流損失は発生メカニズムで分類するとヒステリシス損失、結合損失及び渦電流損失からなる。トロイダルコイルは、ドーナツ形状のプラズマを閉じ込めるための一定磁場を発生するものであるが、ポロイダルコイルおよびプラズマ電流からの変動磁場を受ける。それゆえ、導体に対して垂直な変動磁場と平行な変動磁場が加わるためヒステリシス損失が主要な交流損失である。そこで、線材に対して垂直な磁場と平行な磁場におけるヒステリシス損失を測定した。垂直磁場に対しては、直径 20 mm で 50 ターンのコイルサンプルを作製し、同軸の 2 つのピックアップコイルの間に挟んで測定した。平行磁場に対しては、長さ 30 mm の線材を 50 本並べてシート状にしたものを、同様に同軸の 2 つのピックアップコイルの間に挟んで測定した。磁化は、2 つのピックアップコイルに誘導される電圧の差の積分から評価した。

Figure 2-12 に超電導線材(A)を用いた直径 0.64mm のサンプルのヒステリシス損失の磁場 (B_m) 依存性を示す。縦軸は外部磁場を低速 (0.017 T/秒) にて半サイクル (0 T → B_m → 0 T) 変化させた際の損失値で、非銅部の単位体積あたりの損失である。

低磁場領域では B_m に対して 3 乗の傾きになっており、平行磁場と垂直磁場ではほぼ同じヒステリシス損失となった。0.5 T 以上の磁場領域では、平行磁場に対して垂直磁場によるヒステリシス損失は徐々に大きくなり 1 T 付近から高い磁場では 3~4 倍になっている。

線材に対して垂直な磁場による磁化曲線から求めた有効フィラメント径は 23 μm で、実際のフィラメント径にほぼ一致し近接効果等によるロスの増加はみられず、フィラメントが健全で、良好な加工がされていることが確認できた。

また、線材に対して平行な磁場によるヒステリシス損失は、垂直な磁場による損失に比べて約 1/4 であった。これはジェリーロール法によるフィラメントが、完全に Nb_3Al のみの一相になっておらず、未反応ニオブや Nb_2Al 相などが積層した構造になっており、実効的にフィラメントが分割されたためではないかと推察される。

トロイダル磁場コイルでは、プラズマ・ディスラプションによって作られる平行な変動磁場の方が垂直な変動磁場より大きいいため、平行磁場に対する損失が小さいという本研究の Nb_3Al 超電導線材の特徴はトロイダル磁場コイルへの実用面から有利である。

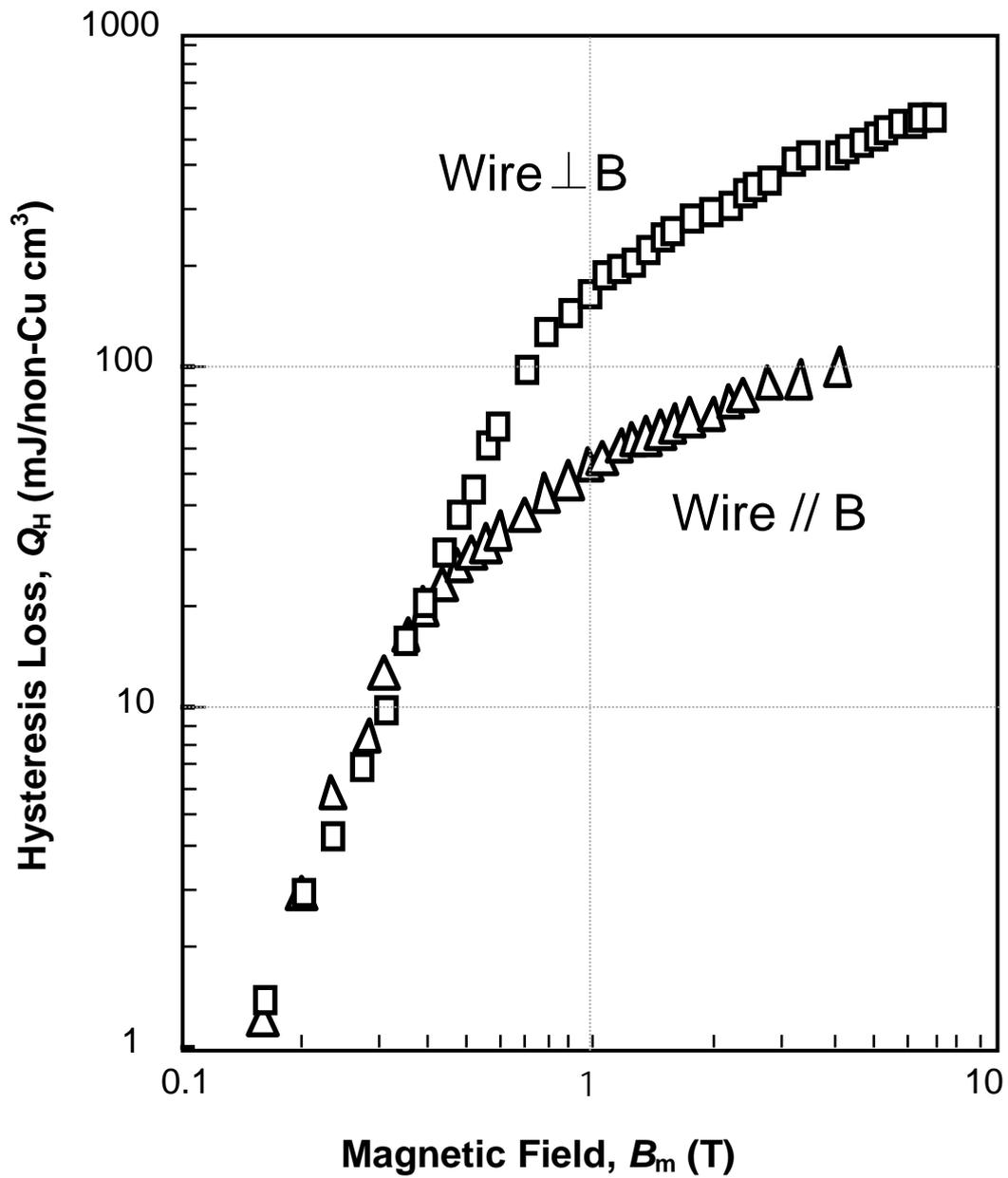


Figure 2-12 ヒステリシス損失 Q_H の磁場依存性

縦軸は磁場を $0\text{ T} \rightarrow B_m \rightarrow 0\text{ T}$ と変化させた時の非銅部体積あたりのヒステリシス損失

横軸は $0\text{ T} \rightarrow B_m \rightarrow 0\text{ T}$ と変化させた時の最大磁場 B_m

□ : 磁場を超電導線材に垂直に印加 △ : 磁場を超電導線材に平行に印加

3-4 応力・ひずみ依存性(1) 線材の引張ひずみ

超電導線材(B)を 50 mm長に切断、クライオスタット中で 4.2 Kの液体ヘリウムに浸漬して試料に引張を加え、ひずみは線材に装着した伸び計によって測定した。Figure 2-13 に、12 Tの磁場で引張ひずみを加えた時の臨界電流のひずみ依存性 (□) を示す。縦軸は最大の臨界電流で規格化した臨界電流である。ここで臨界電流は $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 定義で評価している。引張ひずみが増大するにつれて徐々に低下するが、0.9%のひずみでも臨界電流密度は、ひずみを与えない状態の 50%以上の値を保持した。同図に Nb_3Al (□) と比較して典型的なブロンズ法によって製作された Nb_3Sn (▲) の規格化した臨界電流のひずみ依存性¹¹⁾を示す。

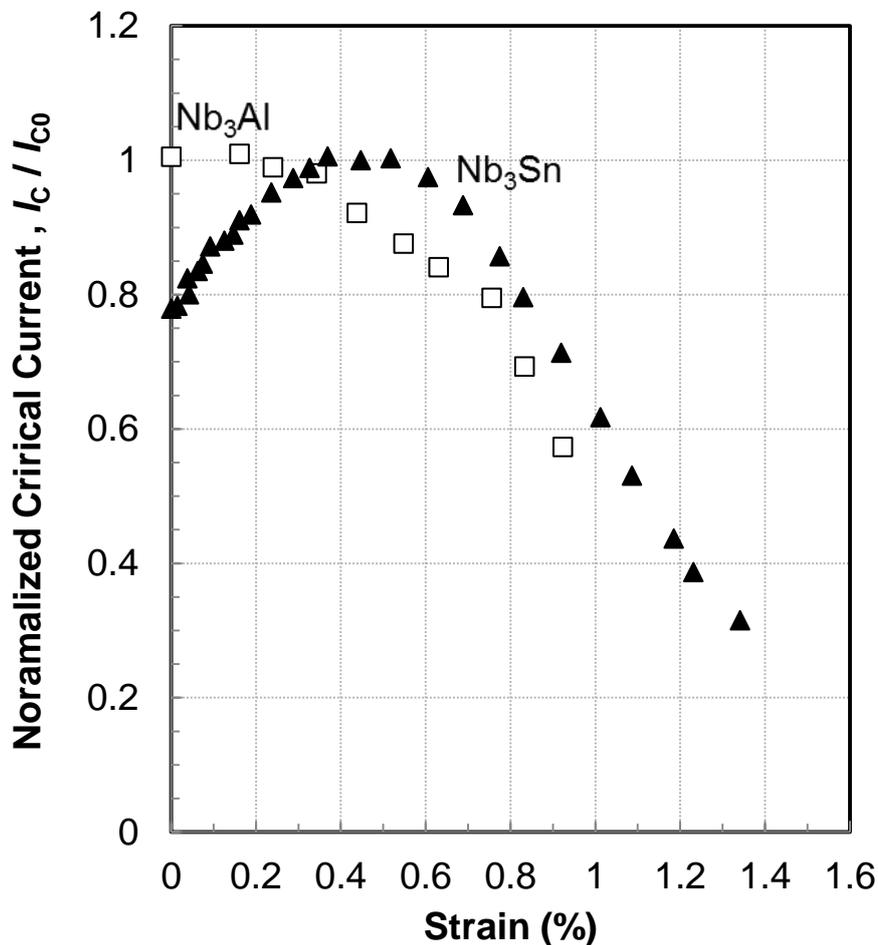


Figure 2-13 規格化した臨界電流 (4.2 K, 12 T) の軸方向引張ひずみ依存性

□ : Nb_3Al ▲ : ブロンズ法 Nb_3Sn

ブロンズ法 Nb_3Sn では引張ひずみを加えると最初臨界電流が上昇し、ある点から下降している。これは、超電導相生成のための熱処理温度から 4.2 Kまで温度を下げた際のマトリクス（銅およびブロンズの部分）と Nb_3Sn の熱収縮差によって、圧縮ひずみが Nb_3Sn に残留していたための回復である。一方 Nb_3Al はそのような回復はほとんど見られなかった。臨界電流がピークをとる点が、超電導相にとってのひずみがゼロの状態であり、その点を基準に規格化したひずみを本質ひずみ（Intrinsic Strain）と呼ぶ。

Figure 2-14 にその本質ひずみで規格化（臨界電流が最大をとる点を本質ひずみゼロと）したひずみと規格化臨界電流の関係を示す。規格化臨界電流が 95%より小さくなるひずみはブロンズ法 Nb_3Sn の 0.2%弱に比較して Nb_3Al は 0.4%弱と、優れた耐ひずみ特性を有していることが確認できた。

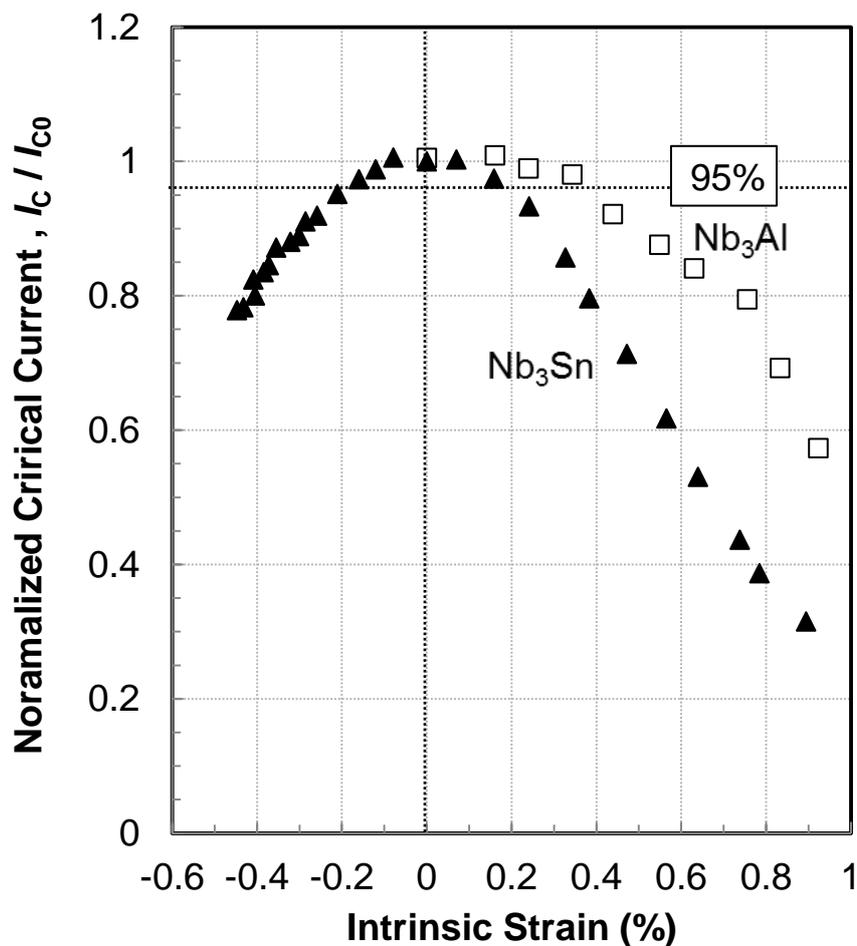


Figure 2-14 規格化した臨界電流（4.2 K, 12 T）の本質ひずみ依存性

□ : Nb_3Al ▲ : ブロンズ法 Nb_3Sn

3-5 応力・ひずみ依存性(2) 線材の曲げひずみ

超電導線材(B)の直線状のサンプルを作製し、各種の曲げ直径（54 mm~650 mm）の溝をつくったホルダーに沿わせて曲げを加え、4.2K、12 T で臨界電流を測定した。ひずみは超電導フィラメント群の直径を曲げ直径で割った値で定義した。Figure 2-15 に、ひずみゼロの状態 で測定した臨界電流で規格化した臨界電流と曲げ直径の関係を示す。ここで、1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義での規格化臨界電流を□、0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義での規格化臨界電流を■で示した。曲げひずみによる影響は0.5%以下ではほぼひずみゼロの臨界電流を維持した。ひずみが0.5%以上に増加すると、0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義での臨界電流は、1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義での臨界電流以上に低下した。0.9%ひずみでの臨界電流の低下は1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義では15%であったが、0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義では37%と、ひずみが大きくなるにつれて、両定義の臨界電流の差は大きく、すなわち n 値（第1章 6. 臨界電流参照）が小さくなった。これは、ひずみが大きくなるほど超電導フィラメントにマイクロな破断が進み、超電導線材が不均一になっていることを示している。

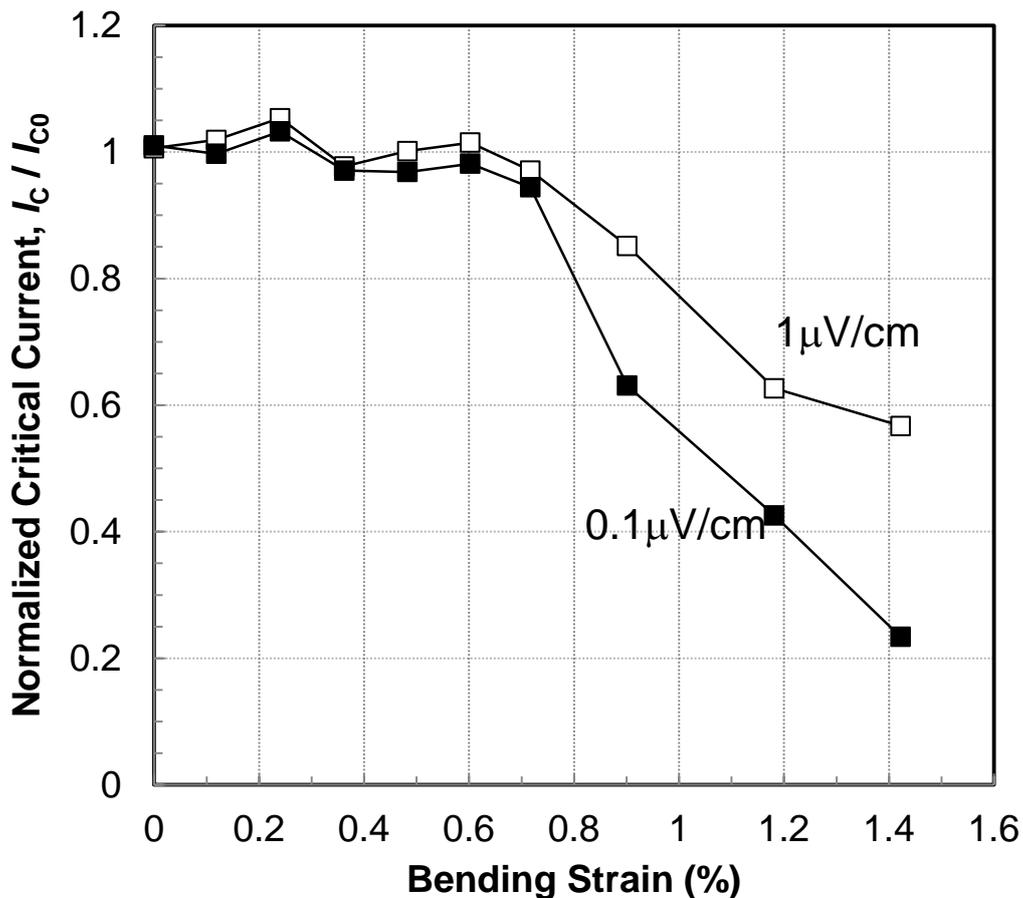


Figure 2-15 規格化した臨界電流（4.2 K, 12 T）の曲げ直径依存性

□ : 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義での規格化臨界電流 ■ : 0.1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 定義での規格化臨界電流

3-6 応力・ひずみ依存性(3) 導体の引張ひずみ

ITERトロイダルコイル用導体は、数十kAの電流を通電する設計となっており、超電導線材を数百本撚り合せ、それをコンジットと呼ぶ金属パイプの中に入れた構造となっている。超電導線材(B)を用いて、それを模擬したケーブル・イン・コンジット導体（以下CIC導体）を製作して耐引張ひずみ特性の調査を行った。ステンレススチールとチタンをそれぞれコンジットとする 3×3×4 本撚線のCIC導体を 3 本ずつ製作し、ドイツのカールスルーヘ研究所（Forschungszentrum Karlsruhe、FZK：現カールスルーヘ工科大学）のFBI装置（力：Force、磁場： B 、電流： I を同時に印加することができるという意味）において測定して頂いた¹²⁾。FBI装置では、最大荷重 100 kN、最高磁場 14 T、最大電流 10 kAの条件での臨界電流測定が可能である。

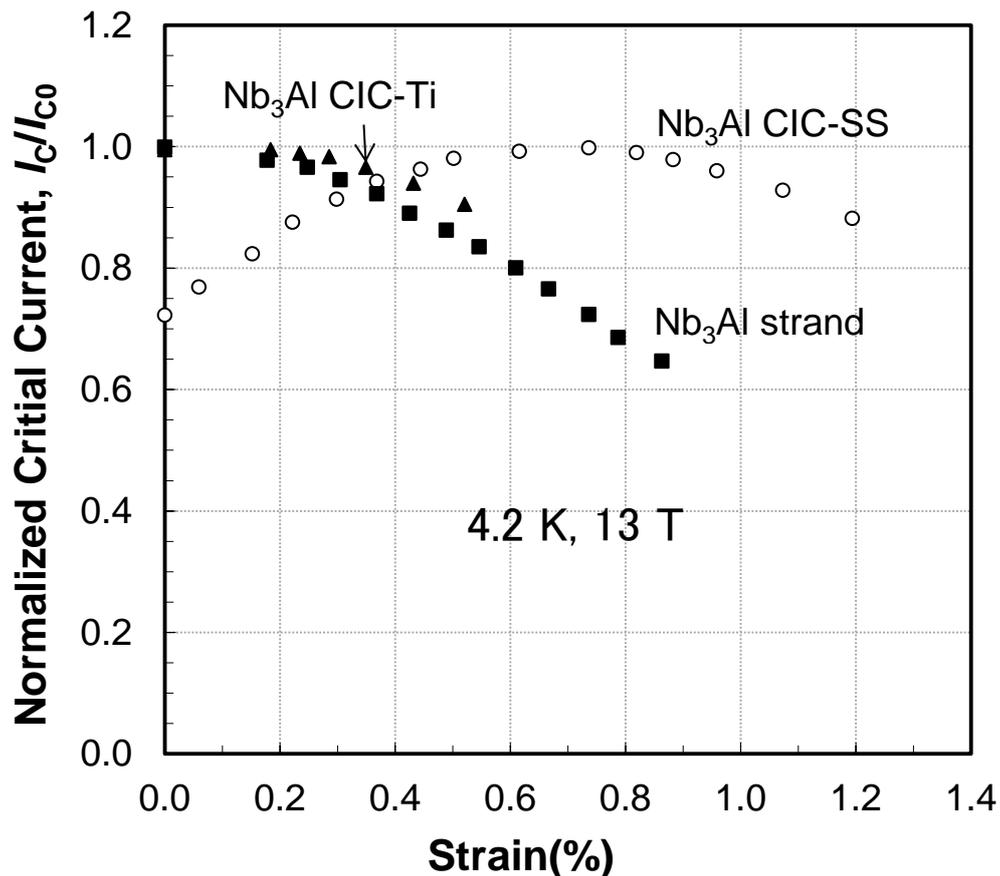


Figure 2-16 Nb₃Al超電導線材及びそのステンレススチールのケーブル・イン・コンジット（CIC-SUS）導体及びチタンのケーブル・イン・コンジット（CIC-Ti）導体の規格化臨界電流（4.2K, 13T）のひずみ依存性

超電導線材素線 (Nb₃Al strand)、ステンレススチールをコンジットに使用した導体 (Nb₃Al CIC-SS)、チタンをコンジットに使用した導体 (Nb₃Al CIC-Ti) に徐々にひずみを加えた際の臨界電流のひずみ依存性を**Figure 2-16**に示す。ここで縦軸は、最大の臨界電流で規格化した規格化臨界電流 I_C/I_{C0} である。**Figure 2-13**と同様Nb₃Al strandはひずみを0から増加すると徐々に臨界電流が減少する。Nb₃Al CIC-Tiも同様であるが、Nb₃Al CIC-SSは最初ひずみが増加するとともに臨界電流は増加し、ひずみ約0.7%のところで最大を取り、それ以降は徐々に減少する。これは、Nb₃Al CIC-SSがステンレススチールと超電導線材との熱収縮差により、冷却された状態で超電導線材が圧縮ひずみを受けていたためである。引張を加えると徐々に圧縮ひずみが減少し、本来の臨界電流まで回復する。一方、Nb₃Al CIC-Tiは、チタンと超電導線材の熱収縮がほぼ同じであるために、臨界電流の回復は見られない。

次に、同じITER計画で開発中のNb₃Snの同様のサンプルとの比較を行った。残念ながら、評価の時期が異なり、Nb₃Alは13 Tで行ったが、それより以前のNb₃Snは評価時期のITER導体の設計磁場の違いから12.5 Tで行われたものである。

臨界電流がピークをとる点が、超電導体にとってのひずみがゼロの状態であり、その点をひずみゼロとした本質ひずみと規格化電流 I_C/I_{C0} の関係を**Figure 2-17**に示す。

ここで、Nb₃Sn、Nb₃Al、それぞれの超電導線材素線をNb₃Sn strand、Nb₃Al strand、ステンレススチールをコンジットに使用した導体をそれぞれ、Nb₃Sn CIC-SS、Nb₃Al CIC-SS、チタンをコンジットに使用した導体をそれぞれ、Nb₃Sn CIC-Ti、Nb₃Al CIC-Tiと示す。ひずみを加えない状態での2種類の導体の臨界電流を比較すると、ステンレススチールをコンジットとしたCIC導体の臨界電流はステンレススチールと超電導線材の熱収縮率差による圧縮ひずみによりNb₃Snは50%以上低下しているが、Nb₃Alでは30%の低下にとどまっている。なお、いずれの導体も熱収縮率差による圧縮ひずみはほぼ同じ0.7%であり、同じ圧縮ひずみによる臨界電流の変化はNb₃Alの方が小さいことが確認された。

「3-4 応力・ひずみ依存性(1) 線材の引張ひずみ」の項では、超電導線材において超電導体が受けるひずみは、超電導体とその周囲にある銅などのマトリクスとの超電導生成熱処理温度から4.2 Kまでの熱収縮差によって生じていたが、CIC導体では、常温でのコンジット化からの熱収縮差が重畳される。ステンレススチールCIC導体はNb₃Sn、Nb₃Alともに圧縮ひずみが大きい、チタンCIC導体はほぼ、素線と同じ程度の圧縮ひずみである。これは、チタンと超電導線材の熱収縮差が小さいことを利用して、CIC導体における圧縮ひずみ

による臨界電流低下を抑える効果を期待したものであり、 Nb_3Al においても、その有効性が確認された。そして、同じひずみに対しては Nb_3Sn に比べて Nb_3Al の方が臨界電流の低下が小さいことが確認できる。

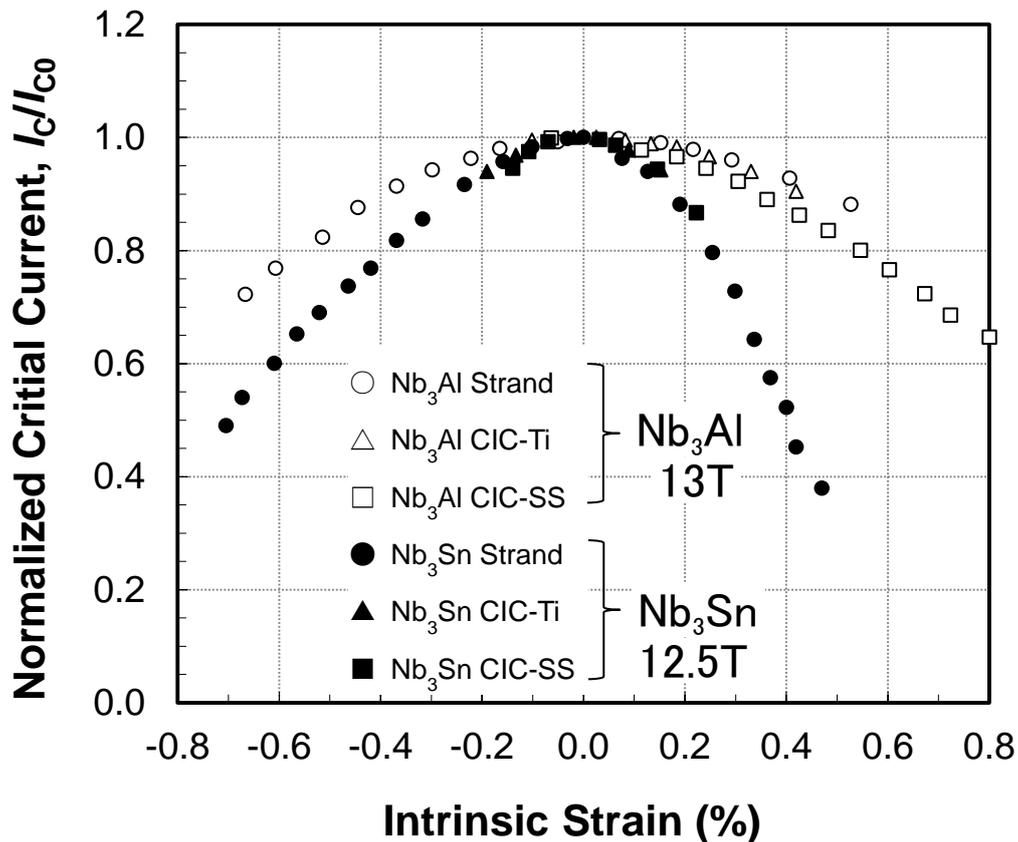


Figure 2-17 Nb_3Al 、 Nb_3Sn 超電導線材及びそれぞれのステンレススチールのケーブル・イン・コンジット (CIC-SUS) 導体及びチタンのケーブル・イン・コンジット (CIC-Ti) 導体の規格化した臨界電流 (4.2K、 Nb_3Al は外部磁場 13T、 Nb_3Sn は外部磁場 12.5 T) の本質ひずみ依存性
ひずみの負の値は圧縮方向、正の値は引張方向

また、熱処理されたフィラメントおよび線材の引張強さについての研究がOchiaiらによってなされている¹³⁾。 Nb_3Al フィラメント自体の引張強さのばらつきに比べて素線の引張強さのばらつきは小さく、モンテカルロシミュレーションおよび実験によって、超電導線材としての引張強さは素線長さに依存しにくいことが示された。これは工業生産規模の長尺材へと長くなっても、強度低下が小さく実用的な線材が得られていることを示している。

4. 大容量導体の開発

Nb₃Al超電導線材の主要な開発目的は、核融合炉用途であり、数十kAという大容量導体の製作も平行して行った。線材の臨界電流密度が向上するのにあわせて、徐々に大きな電流を通電可能な導体、そして、長尺導体の試作を通して、実証をすすめた。

ITER 計画では、直径 0.8mm 程度の超電導線材を数百本撚り合わせることで、数十 kA の通電が可能な超電導線材複合導体（以下、導体と呼ぶ）を用いる。また、この導体の直径は数十 mm でコイルも十数 m の大きさになるため、冷媒に浸漬するのではなく、金属の管（コンジット）の中に超電導線材の撚線を挿入し、コンジット中に冷媒を流して冷却する、ケーブル・イン・コンジット（CIC）導体と呼ばれる構造を用いる。

4-1 10 kA 級導体

Nb₃Alを用いた大容量導体の最初の実証として 12 Tの磁場中で使用する 10 kA (12 T-10 kA) 級CIC導体の製作実証試験を行った。10,000 m以上の銅安定化Nb₃Al超電導線材(C)をジェリーロール法で製作し、その超電導線材(C)を素線として 3 本撚りしたものを 3 本撚りし、さらに 3 本撚り、12 本撚りし、総数 324 本の撚線を行った。その撚線を保護用の 0.1 mm厚さのステンレススチールのテープで包み、Cu-Niパイプに挿入し、スウェージングにより、外径 23 mmのCIC導体を製作した。Table 2-3 に 12 T-10 kA級CIC導体の諸元を、導体の断面写真をFigure 2-18 に示す。臨界電流密度は 300 A/mm²以上を目標として開発したが、製作した超電導線材の導体化前の臨界電流密度は約 370 A/mm²であった。

Table 2-3 12 T-10 kA 級 CIC 導体の諸元

CIC 導体		素線 (Nb ₃ Al超電導線材(C))	
コンジット	Cu-Ni(23.0 mm/1.2 ^b)	直径	0.88 mm
素線本数	324 (3×3×3×12)	臨界電流密度(12T, 4.2K)	300 A/mm ²
空隙率	38 %	フィラメント本数	360
保護ラップ	ステンレススチールテープ (0.1 mm ^b)	フィラメント外径	28 μm
		フィラメント内径	11 μm
		銅/非銅部比率	2.1

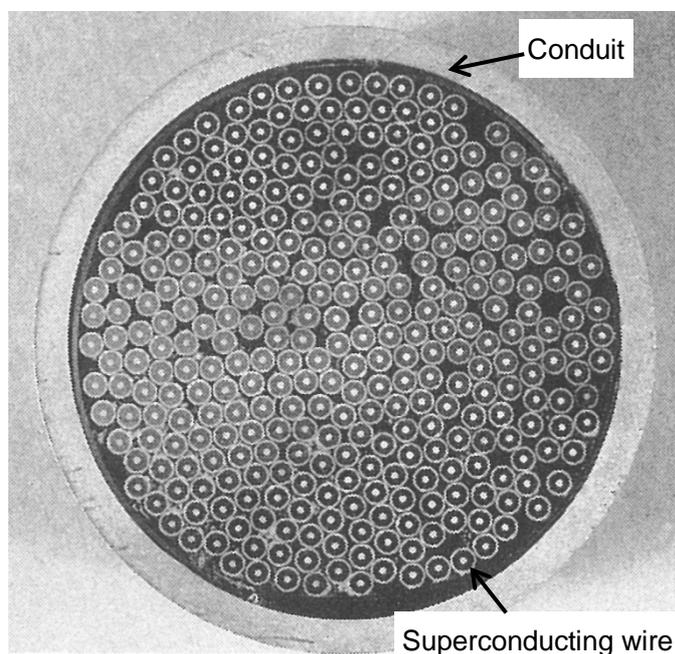


Figure 2-18 12 T-10 kA 級 CIC 導体の断面写真

4-2 40 kA 級導体

10 kA 級 CIC 導体の試作後、さらなる線材の臨界電流密度向上の研究を行った。核融合炉用超電導導体として要求される 12 T における 40 kA 級の大電流 CIC 導体を試作し、実証試験を行った。**Table 2-4** に 12 T-40 kA 級 CIC 導体の諸元、**Figure 2-19** に導体の断面写真を、**Figure 2-20** に素線として用いた超電導線材(D)の断面写真を示す。

Table 2-4 12 T-40 kA 級 CIC 導体の諸元

CIC 導体		素線 (Nb ₃ Al超電導線材(D))	
コンジット	Cu-Ni(29.0 mm/1.7 ^t)	直径	1.02 mm
素線本数	405 (3×3×3×3×5)	臨界電流密度(12T, 4.2K)	400 A/mm ²
撚りピッチ	100/160/200/300/400 mm	フィラメント本数	588
空隙率	35 %	フィラメント外径/内径	24/10 μm
保護ラップ	ステンレス鋼テープ(0.1 mm ^b)	銅/非銅部比率	2.0
		ツイストピッチ	20 mm

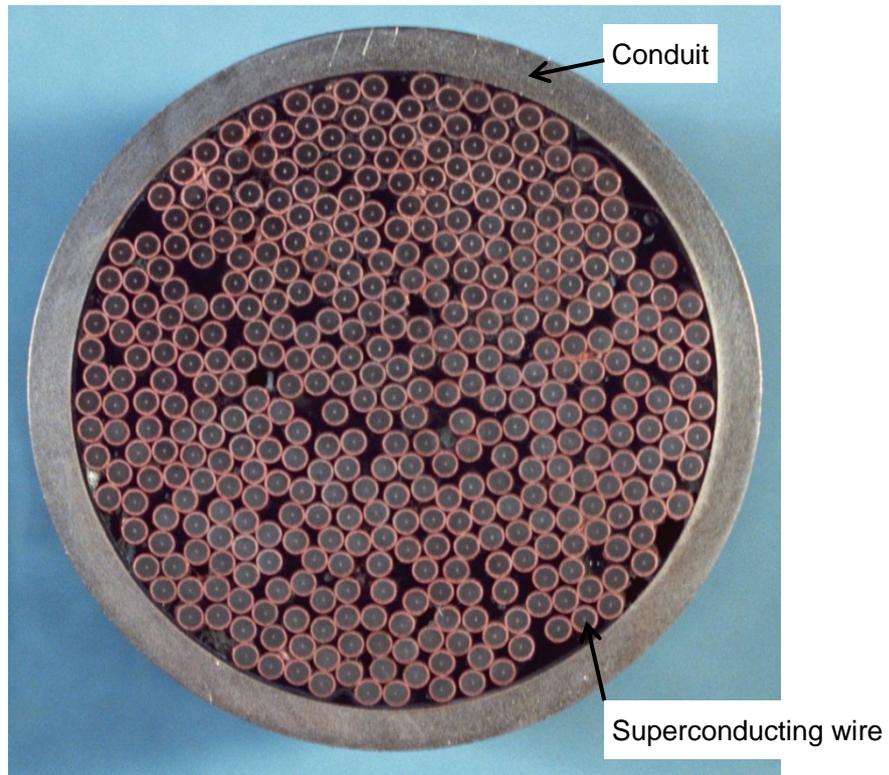


Figure 2-19 12 T-40 kA 級 CIC 導体の断面写真

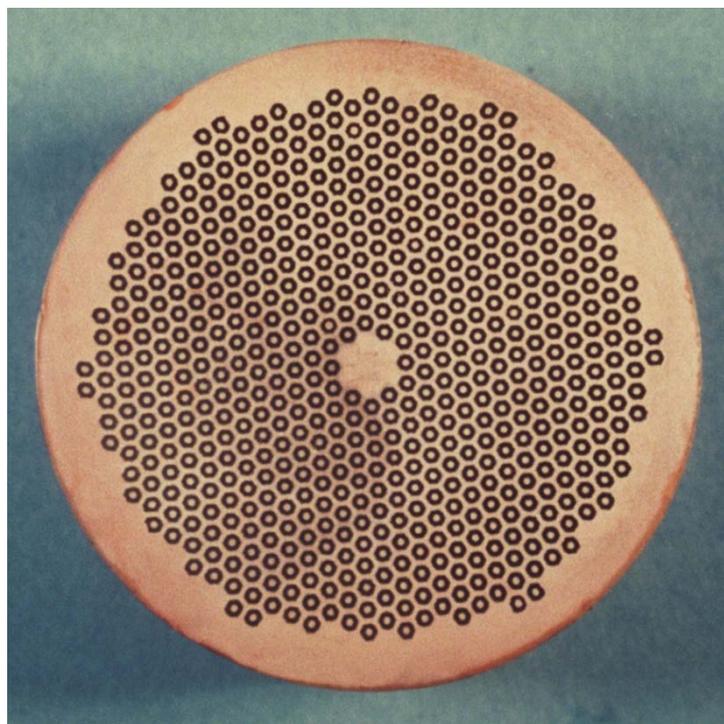


Figure 2-20 12T-40 kA 級 CIC 導体用素線（超電導線材(D)）の断面写真

直径約 1 mm の超電導線材(D)を 100 mm ピッチで 3 本撚りし、それをさらに 160 mm ピッチで 3 本撚り、200 mm ピッチで 3 本撚り、300 mm ピッチで 3 本撚り、400 mm ピッチで 5 本撚りの 5 重撚り 405 本 (3×3×3×3×5) 撚線を製作した。このような多重撚りを行うのは、素線一本一本にすべて同じように導体の内部における位置を経験させることにより、素線のインピーダンスを揃えるためである。インピーダンスが揃っていないと、電流の変動時に超電導線材間の偏流が生じ、損失が増加する。これに 0.1 mm 厚さのステンレステープをラッピングした後、Cu-Ni パイプに挿入し、スウェーピングにより、外径 29 mm のケーブル・イン・コンジット導体を製作した。導体長さは約 1.7m で、両端に銅の電極を取りつけ、100 kA まで通電可能な超電導トランスに接続、最大 12.5 T が発生可能な超電導スプリット・マグネットの中に挿入し、0.2 kA/秒の速度で電流を掃引して臨界電流を測定した。

Figure 2-21 に測定した臨界電流の磁場依存性を示す。通電電流約 33 kA の時に導体の発生する自己磁場は 0.5 T であり、**Figure 2-21** では、自己磁場を考慮した実際に導体を経験している磁場を横軸にしている。ここでの臨界電流の定義は $10^{-13} \Omega\text{m}$ とした。直線は、超電導線材(D)の臨界電流-磁場依存性の撚り本数 (405) 倍であり、測定された臨界電流は、ほぼそれに一致する。すなわち、導体の臨界電流は導体製造及び冷却によるひずみ等によって劣化していないことを示している。

経験磁場 11.9 T (図中▲、印加磁場 11.2 T) では 46 kA で突如常電導電圧が発生し、クエンチした。12.25 T (図中■、印加磁場 11.6 T) では常電導電圧が 40 kA で発生し、徐々に増加し、臨界電流の定義抵抗率に至る前に 42.2 kA でクエンチした。経験磁場 12.6 T 及び 13 T (図中●、印加磁場 12 T 及び 12.5 T) では、正常に臨界電流の定義抵抗率に達成するまでクエンチなく、測定が可能であった。

本実験はケーブル・イン・コンジット導体であるものの液体ヘリウム循環の強制冷却ではなく、液体ヘリウムを導体内部に注入しただけの浸漬冷却で行った。そのため、常伝導領域が発生した際には昇温・気化したヘリウムが導体全体に拡散し、新しい液体ヘリウムが供給されず冷却が不十分になった。これが原因で低磁場 (12 T 未満) ではクエンチが起ったと考えられるが、11.2 T の印加磁場中で 46 kA の通電に成功した。この 11.2 T とは、ITER の CDA (概念設計活動) におけるトロイダル磁場コイル用導体への要求磁場であり、その磁場中で強制冷却を行えば 46 kA 以上通電可能な導体であることを実証した。

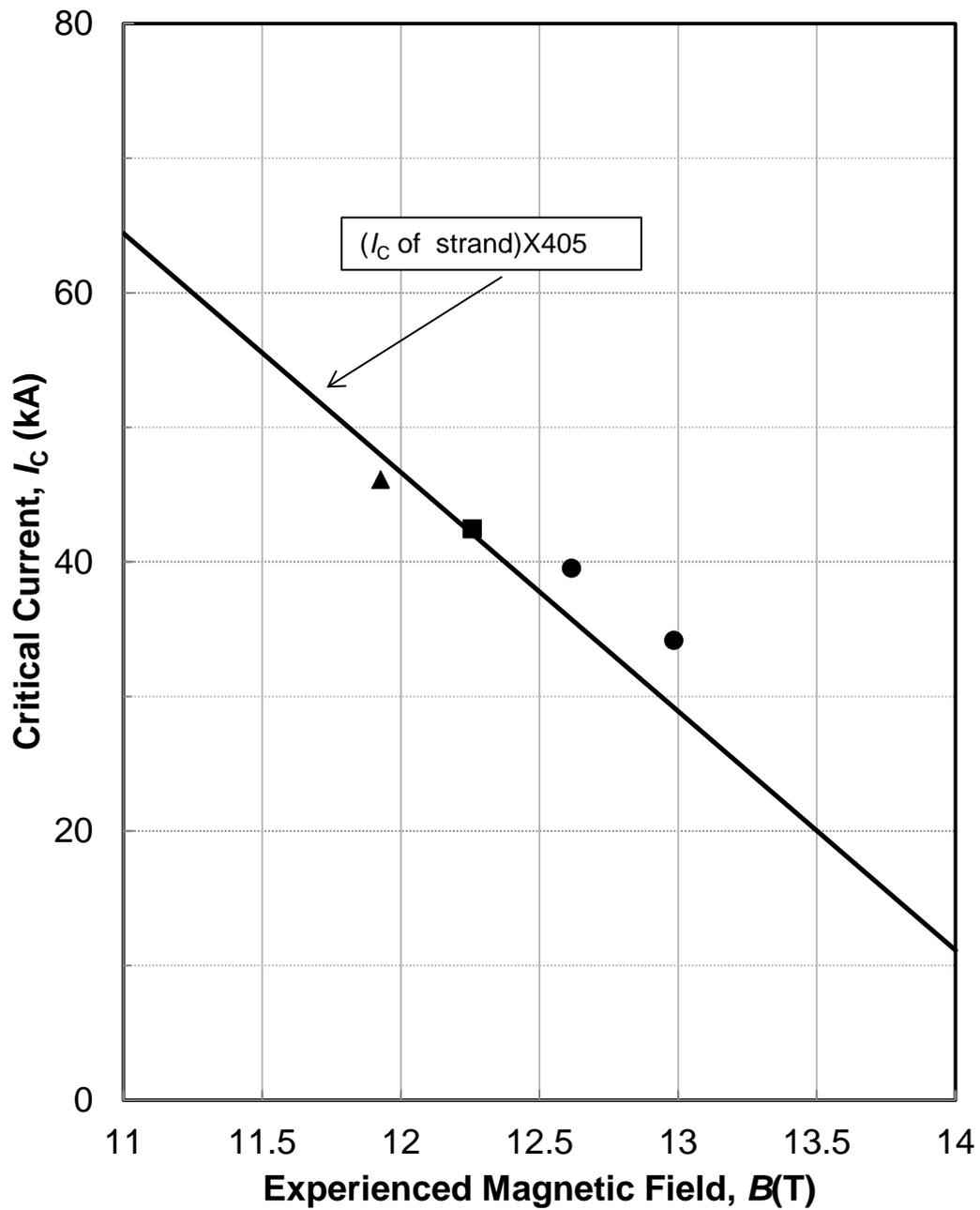


Figure 2-21 40kA級導体の臨界電流 I_c (4.2 K) の経験磁場依存性

横軸は経験磁場 (印加磁場+自己磁場) 縦軸は4.2 Kの臨界電流

実線：素線 (超電導線材(D)) の臨界電流磁場依存性の本数 (405 本) 倍

4-3 12 T-10 kA-100 m 級導体とコイル

大容量、長尺導体の実証のために、12 Tの磁場中で10 kA通電が可能な100 m (12 T-10 kA-100 m) 級の導体を製作した。0.86 mmの素線 (超電導線材(E))を4次撚り (3×3×3×4=108本) し、その上に保護のためのステンレステープをラッピングした。100 mのチタンパイプの中にこのケーブルを引き込み、スウェーピングにより、ケーブル・イン・コンジット導体を得た。チタンは1000 Kから4.2 Kの温度域においてNb₃Alとの熱収縮率差が小さく、熱処理後の熱収縮率差によるひずみを抑えるために用いた。Table 2-5に12 T-10 kA-100 m級導体の諸元を示す。ケーブル・イン・コンジット導体の外径は13 mm、パイプの肉厚は1.2 mm、3×3×3×4の4重撚線において、それぞれの撚線ピッチは1層目70 mm、2層目105 mm、3層目160 mm、4層目は250 mmで、断面あたりの空隙率は25%とした。Figure 2-22に得られた導体の外観写真を、Figure 2-23に断面写真を示す。

Table 2-5 12 T-10 kA -100 m 級コイル用 CIC 導体の諸元

CIC 導体		素線 (Nb ₃ Al超電導線材(E))	
コンジット	Ti(13.0 mm/1.2 ^t)	直径	0.86 mm
素線本数	108 (3×3×3×4)	フィラメント本数	240
撚りピッチ	70/105/160/250 mm	銅/非銅部比率	1.4
空隙率	25 %	フィラメント径	37 μm
長さ	105 m	ツイストピッチ	31 mm



Figure 2-22 12 T-10 kA-100 m 級 CIC 導体外観写真

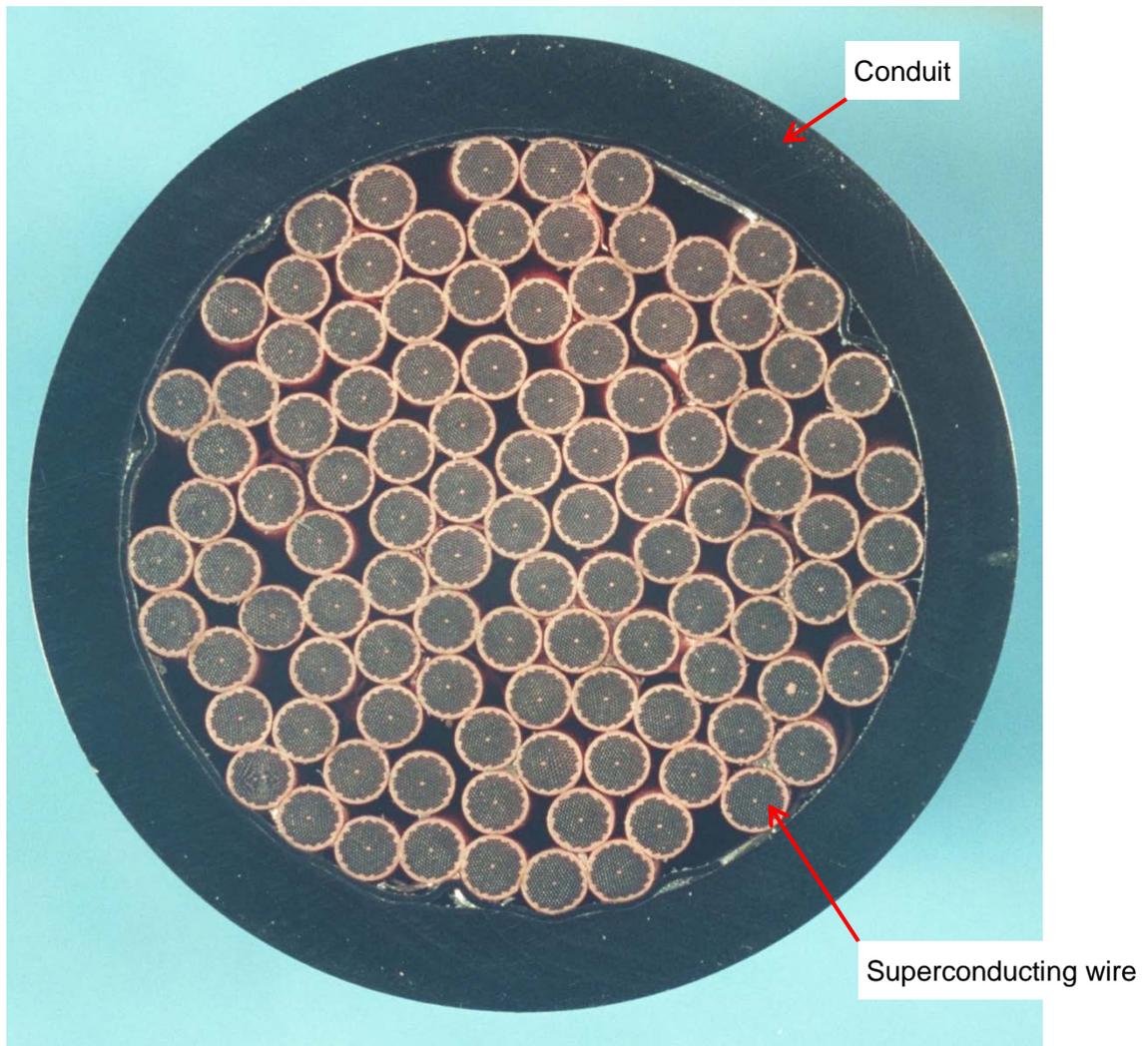


Figure 2-23 12 T-10 kA-100 m 級 CIC 導体の断面写真

本導体を用いて、内径 124 mm、外径 408 mm、高さ 254 mm のコイルが製作された。諸元を **Table 2-6** に示す。超臨界ヘリウムをケーブル・イン・コンジット導体内部に循環させる強制冷却を行い、7.5 T 発生できるバックアップコイルの中で通電実験が日本原子力研究所（現；国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構）において行われた。**Figure 2-24** にコイルのロードラインを示す。コイル単体としては 10 kA の通電を行い、4.5 T の磁場を発生（実線）、また、7.5 T のバックアップ磁場中で 5.5 kA の通電を行い、10 T の磁場を発生した（破線）¹⁴。これにより、Nb₃Al ケーブル・イン・コンジット導体が核融合のような長尺、大電流応用に実用化が可能であることが実証された。これは Nb₃Al 超電導線材による長尺大容量導体の製作と、強制冷却方式によるコイルの初の実証である。

Table 2-6 Nb₃Alコイルの諸元

コイル	外径-内径 高さ	408 mm-124 mm 254 mm
巻線	外径-内径 高さ	372 mm-154 mm 220 mm
巻数		112 ターン
自己インダクタンス		3 mH
絶縁		酸化アルミニウム布+エポキシレジン
冷媒		超臨界ヘリウム

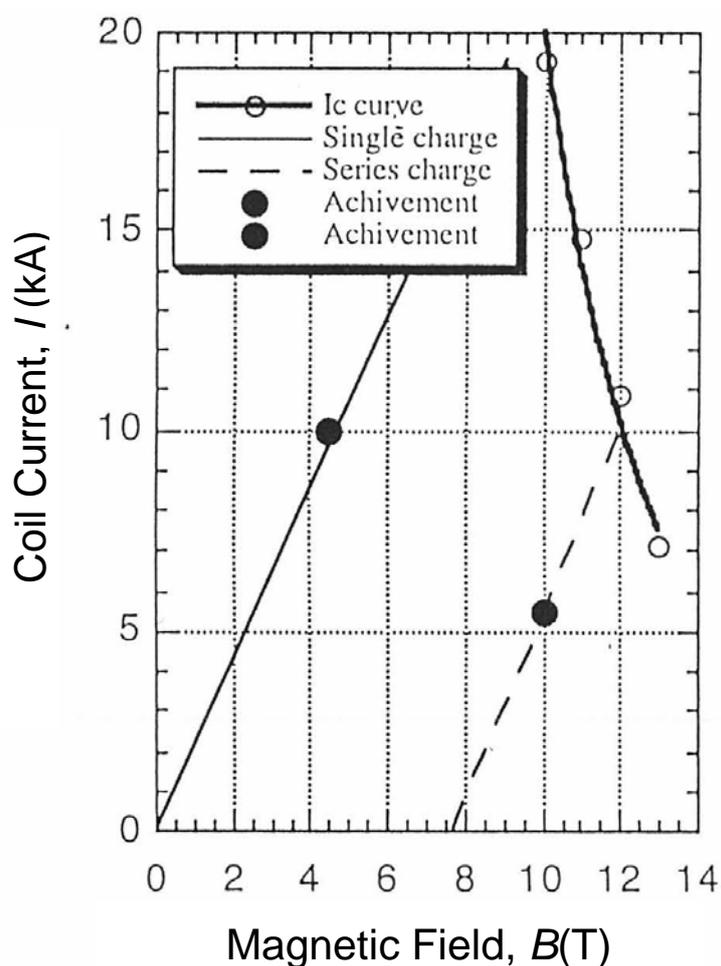


Figure 2-24 Nb₃Alコイルのロードライン（横軸は磁場 縦軸はコイル通電電流）¹⁴⁾

実線：Nb₃Alコイル単体に通電した際のロードラインで、10 Tを発生

破線：バックアップ 7.5T 磁場中で通電した際のロードライン、5.5 Tを発生

太線：超電導線材(E)の臨界電流の磁場依存性を素線本数倍した臨界電流の磁場依存性

4-4 ITER 用導体

引き続き、超電導線材(B)を 10,000 m 以上製作し、ITER 設計仕様の CIC 導体を製作した。0.8 mm の素線を 3×4×4×4 本の 4 重撚線した後、ステンレステープで保護ラッピングし、扇型に成形した。穴をあけたチタンパイプを中心に、これを 6 本並べ、コンジット用のチタンパイプの中に挿入し、スウェージングにより締めつけた。この導体諸元を **Table 2-7** に、導体断面写真を **Figure 2-25** に示す。中央のパイプは加圧された液体ヘリウムを通し、強制冷却するためのものである。

Table 2-7 ITER-TFコイル用Nb₃Al超電導導体の諸元

CIC 導体		素線 (Nb ₃ Al超電導線材(B))	
コンジット	Ti(41.0 mm/1.0 ^b)	直径	0.81 mm
中央パイプ	Ti(13.0 ^φ , perforated)	フィラメント本数	240
素線本数	1152 (3×4×4×4×6)	銅/非銅部比率	1.5
撚りピッチ	25/60/140/250/600 mm	フィラメント径	34 μm
空隙率	37 %	ツイストピッチ	20 mm

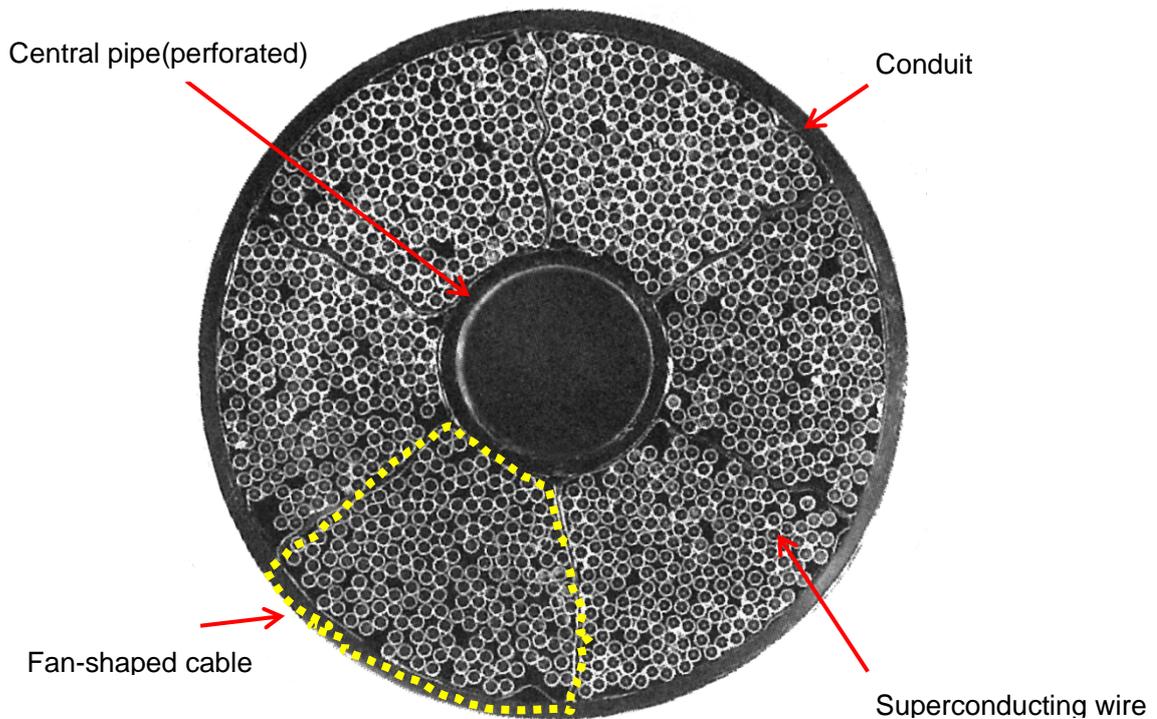


Figure 2-25 ITER-TFコイル用Nb₃Al超電導導体の断面写真

この導体に測定用の電流端子、ヘリウム流入口等の加工を施した後、スイスのポール・シェラー研究所のSULTAN (SUpraLeiter TestANlage) 装置^{15)~17)}によって J_c - B - T 特性を測定した。SULTAN装置はバイポーラの200 A電源から超電導トランスを経て±55 kAの通電が可能であり、サンプルは1 MPaのヘリウムガスにより強制冷却し、このヘリウムの温度をヒーターにより加熱し、サンプル温度を4.5 Kから10 Kの範囲で制御することができる。

6.92 K, 12.2 Tでの臨界電流は36.2 kAで、Summers¹⁰⁾の式を用いて J_c - B - T 特性から外挿すると、4.2 K, 12 Tで120 kAまで通電可能な大容量導体であることが確認できた。また、臨界温度は、12 Tで6.3 K、12.5 Tで5.9 Kと推定された。

5. 実用化に向けての研究

5-1 大型コイル用熱処理条件

ITERのような大型コイルでは、直径1 mm程度の超電導線材を少量使用して製作するようなコイルとは違い、**Figure 2-25**に示すような直径40 mm以上の導体を1 m以上の直径で曲げてコイル状にする必要がある。このように体積が巨大になり超電導線材の位置によって温度履歴の差が大きくなるため、十時間程度の熱処理では一定の温度での保持時間に場所による長短が生じて均一な特性が得られないため実用的でない。ITER用導体程度の規模では安定な熱処理には数十時間以上の保持時間が必要であると考えられる。ここまで超電導線材(B)の熱処理は主に800°Cで行ってきたが、より長時間で性能を満足させるために、熱処理時間を800°Cで2~20時間、750°Cで20~80時間と変化させて作製した試料の12 T, 4.2 Kにおける臨界電流密度の熱処理時間依存性の評価結果を**Figure 2-26**に示す。

800°Cでの熱処理では、熱処理時間が長くなるに従って臨界電流密度が向上し、15時間付近でピークをもち、その後低下した。臨界電流密度700 A/mm²が得られるのは13~20時間の範囲となる。一方、750°Cでの熱処理では、55時間付近に時間依存性のピークがあり、臨界電流密度700 A/mm²が得られるのは45~75時間の範囲となり、800°Cでの熱処理に比べて時間依存性は非常にブロードになる。このように750°Cでの熱処理では臨界電流密度が熱処理時間の影響を受けにくくなるために、熱処理物(コイル状に巻いたケーブル・イン・コンジット導体)の各部分で750°Cに保持された時間に差があっても、臨界電流のばらつきが小さくなる。

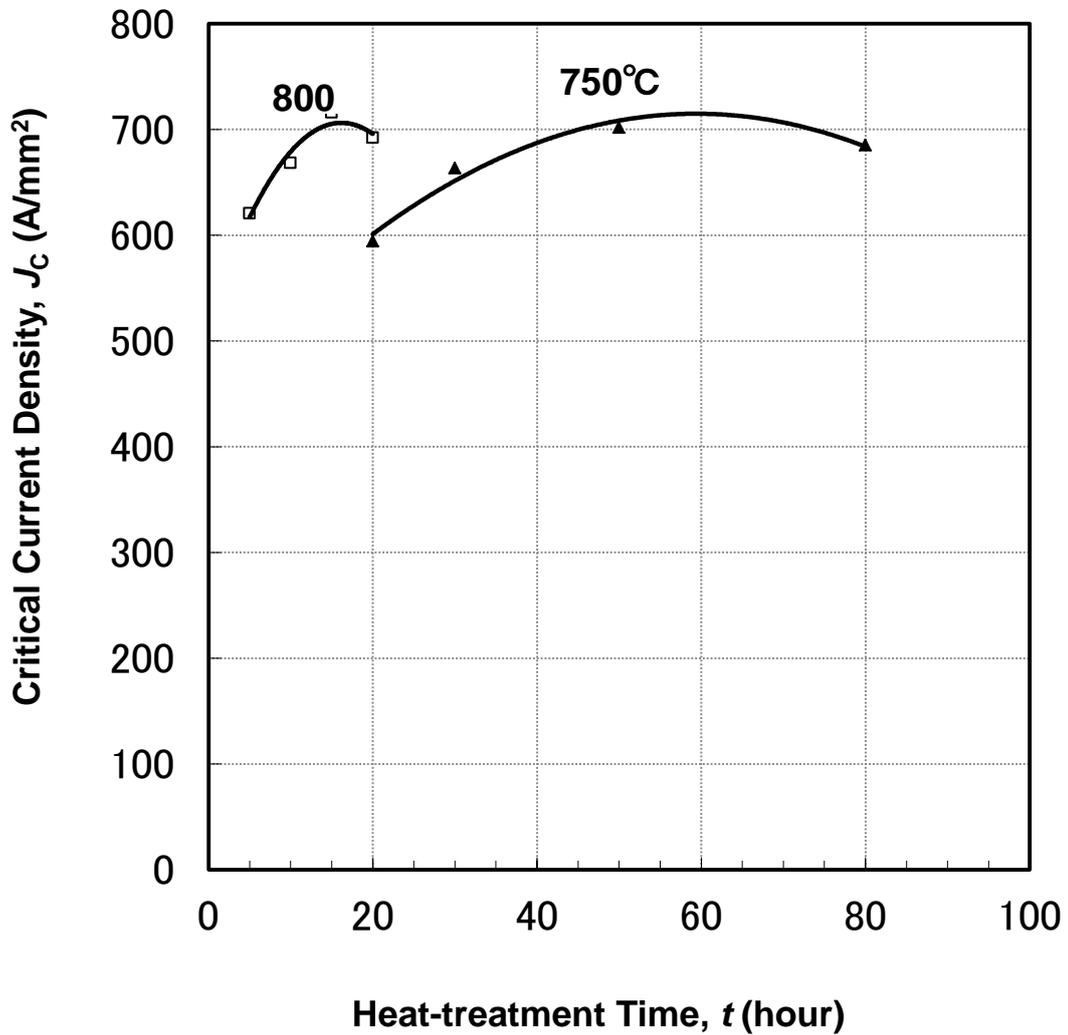


Figure 2-26 750°C及び800°Cにおける超電導線材の臨界電流密度 J_c (4.2 K, 12 T) の熱処理時間依存性

この結果をもとに、ITER-TF コイル用超電導導体の熱処理を想定し、昇温時間、保持時間、降温時間が熱処理炉内の位置によって変動すると想定した場合の臨界電流密度への影響を調査した。熱処理温度は750 °Cとし、目標昇温時間を10時間とし、場所による昇温の遅れを最大10時間と仮定した。また、降温時間は30時間とし、この遅れも最大10時間と仮定した。以上より、保持時間は40~60時間と、最大20時間の差が出ることになる。

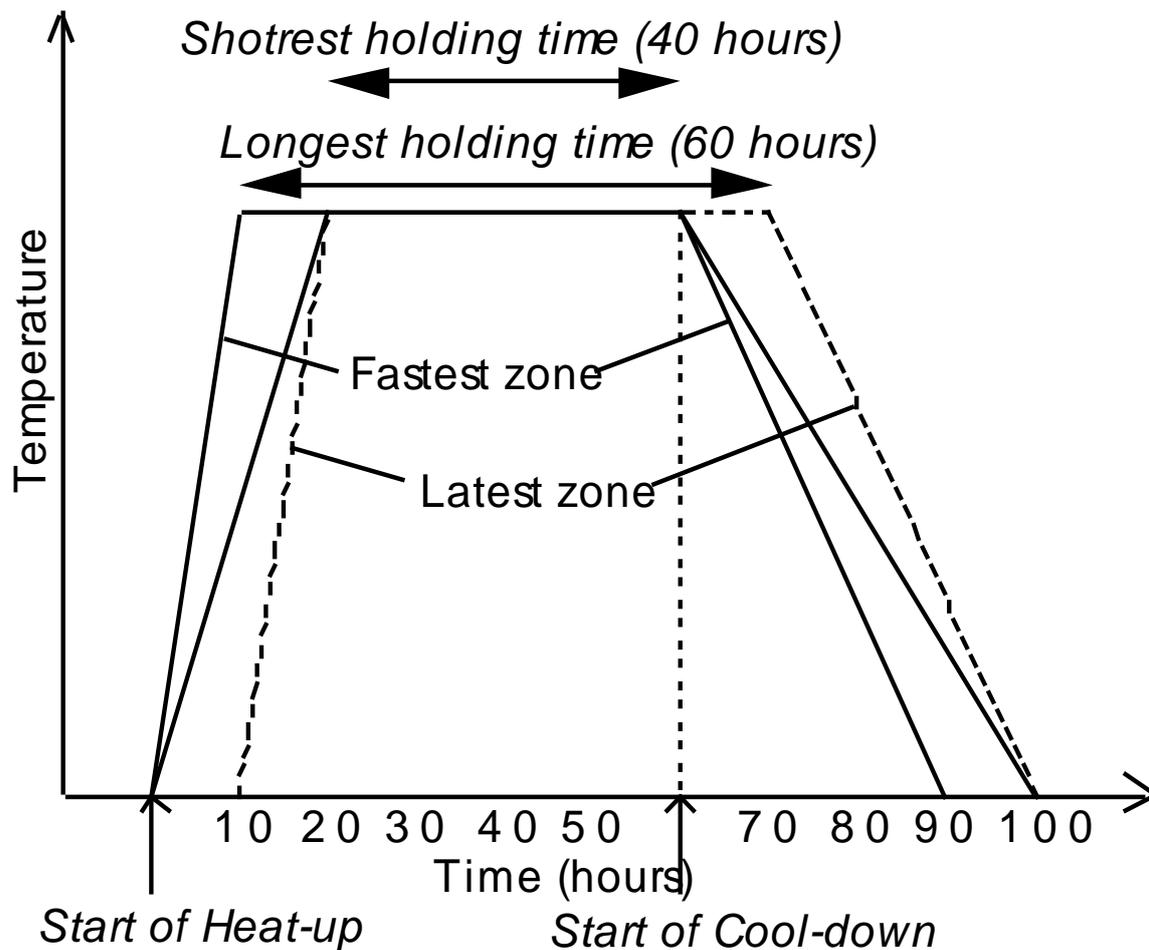


Figure 2-27 導体各部における熱処理条件変動の想定

この時の炉内の位置による導体各部における熱処理条件変動の想定を**Figure 2-27**に示す。**Figure 2-26**の熱処理時間依存性を2項の多項式で近似すると、熱処理温度は750℃の場合40時間で687 A/mm²、60時間で715 A/mm²と推定され、700 A/mm²±2%となった。前述の想定における昇温を10、20時間、保持を40、50、60時間、降温を30、40時間と、それぞれ変えた12種の熱処理で得られた12Tの臨界電流密度は703 A/mm²±1.1%と、推定よりばらつきは小さかった。これは、単純に750℃における保持時間が40～60時間であっても、その前後の昇温、降温時間による影響が加わったからだと推定される。

この結果、大型導体用として臨界電流密度が703 A/mm²±1.1%と、十分ばらつきの小さい熱処理が可能であることを確認した。

また、一般のNb₃Snの熱処理時間が300時間以上必要であるのに比較して、Nb₃Alは、4分の1程度の時間で済み、時間に比例する熱処理コストの点で極めて有利である。

5-2 クロムめっき付き超電導線材の残留抵抗

銅を複合化することにより銅安定化超電導線材の構造が得られるが、銅は超電導線材を製造する過程で大きな加工ひずみを受けるために様々な欠陥が入り、数十K以下の抵抗(残留抵抗)が増加する。このため、Nb-Ti超電導線材では、最終工程で熱処理を行ってひずみを解放し、残留抵抗を下げる(回復する)処理が行われる。一方、Nb₃Al超電導線材では超電導生成のための熱処理温度が残留抵抗の回復する温度より高いために、銅自体の残留抵抗回復は十分行われる。しかし、ニオブと化合するアルミの融点より高いため、アルミが銅中に拡散し、残留抵抗を上昇させる。これを防ぐために、ジェリーロール工程において、ニオブを多く積層し、銅との界面にニオブだけの拡散を防ぐバリア層を設けている。

このバリア層はアルミの拡散を防止する意味では厚くすれば良いが、バリア部分の相対的な割合を増やすことになり、臨界電流の面では不利になる。このバランスを適切にとることにより、0 T、超電導臨界温度直上(常電導状態でないと線材の抵抗は測定できない)での残留抵抗率が750°Cの熱処理で20時間から80時間までほぼ $1 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ と一定であった。すなわち、ニオブだけの拡散バリア層によって安定化銅中へのアルミの拡散が熱処理時間80時間までは抑えられていることが確認できた。

しかし、核融合炉用超電導線材では超電導線材間の結合損失低減のために超電導線材表面に2 μm のクロムめっきが要求されている¹⁸⁾。このクロムが超電導生成熱処理により安定化銅中に拡散し、銅の残留抵抗が上昇する。例えば、加工性向上のために試作して得られた超電導線材(B)では、750 °C、50 時間の熱処理で残留抵抗率が $10 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ とめっき前の線材に比較して約10倍の値をとっていた。

この解決法を検討するために、銅中へのクロムの拡散距離を調査した。2 μm のクロムめっきを施した銅線を熱処理し、銅線材中への拡散状況をEPMAにて分析したところ、表面から約0.02 mmの部分では約0.6 at%のクロムが分析されたが、約0.05 mmの位置では分析限界値である約0.05 at%以下になっていた。この約0.05 mmの占める断面積は約24%であるが、銅線の残留抵抗は約 $0.65 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ に対してクロムめっき銅線の残留抵抗は約 $1 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ と30%以上の面積減少に対応する。すなわちこの分析限界値以下の微量なクロムの影響が無視できないことがわかった。そこで、フィラメントの周囲に配置していた銅を線材の中央部に集中配置することにより微量なクロムの影響を可能な限り避けることを考えて新しい線材を設計した。Table 2-8 に試作した超電導線材(F)の諸元を、Figure 2-28 に従来線材と銅を中央配置した超電導線材(F)の断面写真を比較して示す。

Table 2-8 残留抵抗改善を目指して開発した超電導線材(F)の諸元

項目	値
直径	0.81 mm
線材表面	クロムめっき (2 μm)
フィラメント本数	120
銅/非銅部比率	1.56
フィラメント直径	47 μm

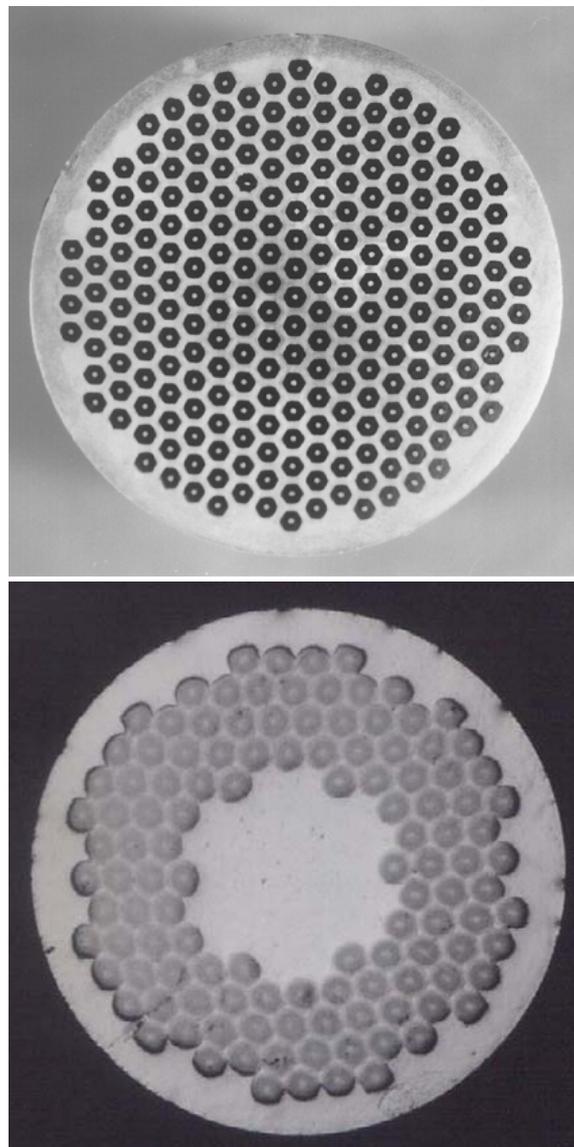


Figure 2-28 従来線材（超電導線材(B)）（上）と銅を中央配置した改善線材(F)（下）の断面写真

この超電導線材(F)の 750 °Cによる熱処理時間を 30、50、80 時間と変えた時の 4.2 K, 12 Tにおける臨界電流密度および残留抵抗の関係を図 2-29 に示す。熱処理時間が増加するにつれて、残留抵抗 ρ は上昇しているが、50 時間の熱処理において、 $1.6 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ に留まっている。一方、臨界電流密度は約 50 時間においてピークの 700 A/mm²が得られており、臨界電流密度及び残留抵抗ともに、ITER用超電導線材に求められる性能を満足する熱処理条件を見出すことができた。

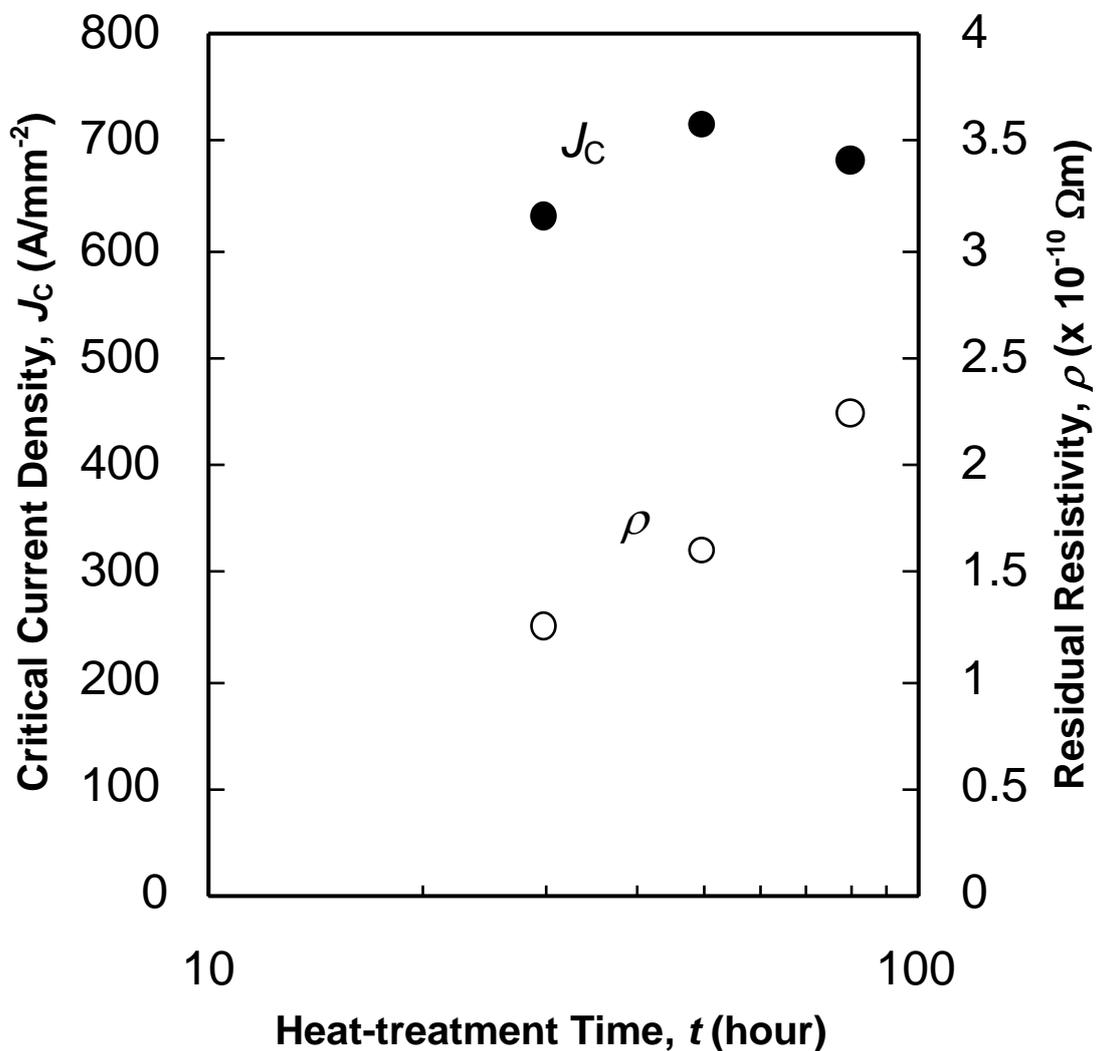


Figure 2-29 臨界電流密度 J_c (4.2 K, 12 T) と残留抵抗 ρ の熱処理時間依存性

5-3 伸線性の向上

ITER計画では、CS（センター・ソレノイド）モデルコイルの中に2層のインサート・コイルを挿入し、高磁場での導体特性実証を行う。Nb₃Al 超電導線材の実証のためのインサート・コイル製作には、約 250,000 m のNb₃Al 超電導線材の製造が必要とされた。

この線材の製造を行うためには、数十 kg 単重の大型複合多芯ビレットから均一な特性の長尺線材を得る技術開発が必要であった。数 kg 単重の小型ビレットにおける研究ではインサート・コイル用超電導線材の技術的問題点はほぼクリアし、量産化へ向けて数十 kg 単重の大型ビレットを製作したが、伸線途中の断線が多発し、ITER で要求される 1,000m 級の線材を効率良く得ることはできなかった。そこで、断線箇所を SEM で詳細に調査することにより、フィラメントにおける不均一変形が断線原因の大部分を占めることを見出した。

この不均一変形の原因となる要素を推定し、材料の不均質性、外部からの異物混入、そして不均一な加工方法を除いていった。複合多芯ビレットは充填率を高くするために六角のセグメントを用いて組み立てているが、その六角化工程において、ジェリーロール部に不均一な変形をもたらしていることに着目した。Nb-Ti超電導線材でもNb₃Sn超電導線材でも、単芯線材の中身は比較的一体物であるが、ジェリーロール法では、巻かれたシートによって出来ており、一体物ではない。この一体化程度が不十分であるために、六角化時にジェリーロール部が不均一変形し、断線原因となるものと推定した。

そこで、この六角化工程を経ない製作方法を検討した。実現方法はいくつかあると考えられるが、単芯線はジェリーロール直後の円形断面のままにしておき、円を3つ互いに接触させた隙間と同じ断面を持つ Figure 2-30 のような銅の異形フィラーを製作し、間を埋める方法を採用した。

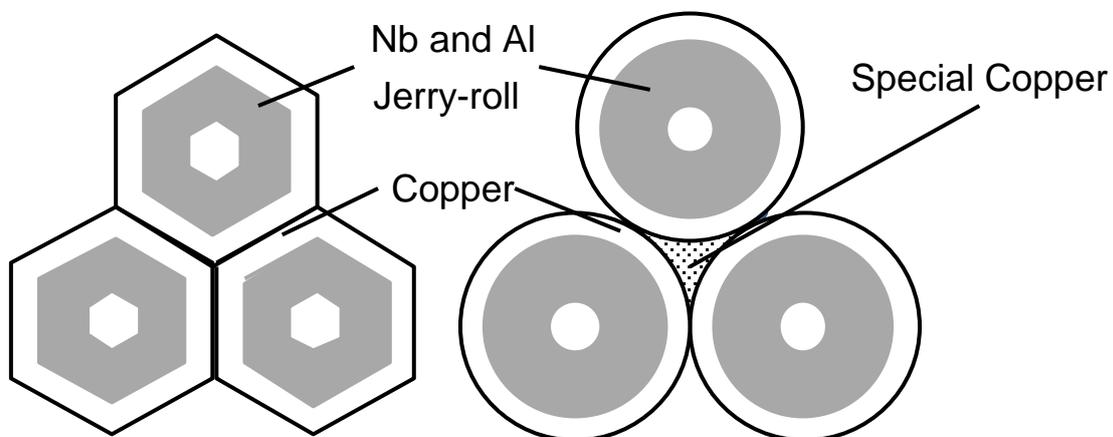


Figure 2-30 従来の六角セグメント配列（左）と採用した異形フィラー配列（右）

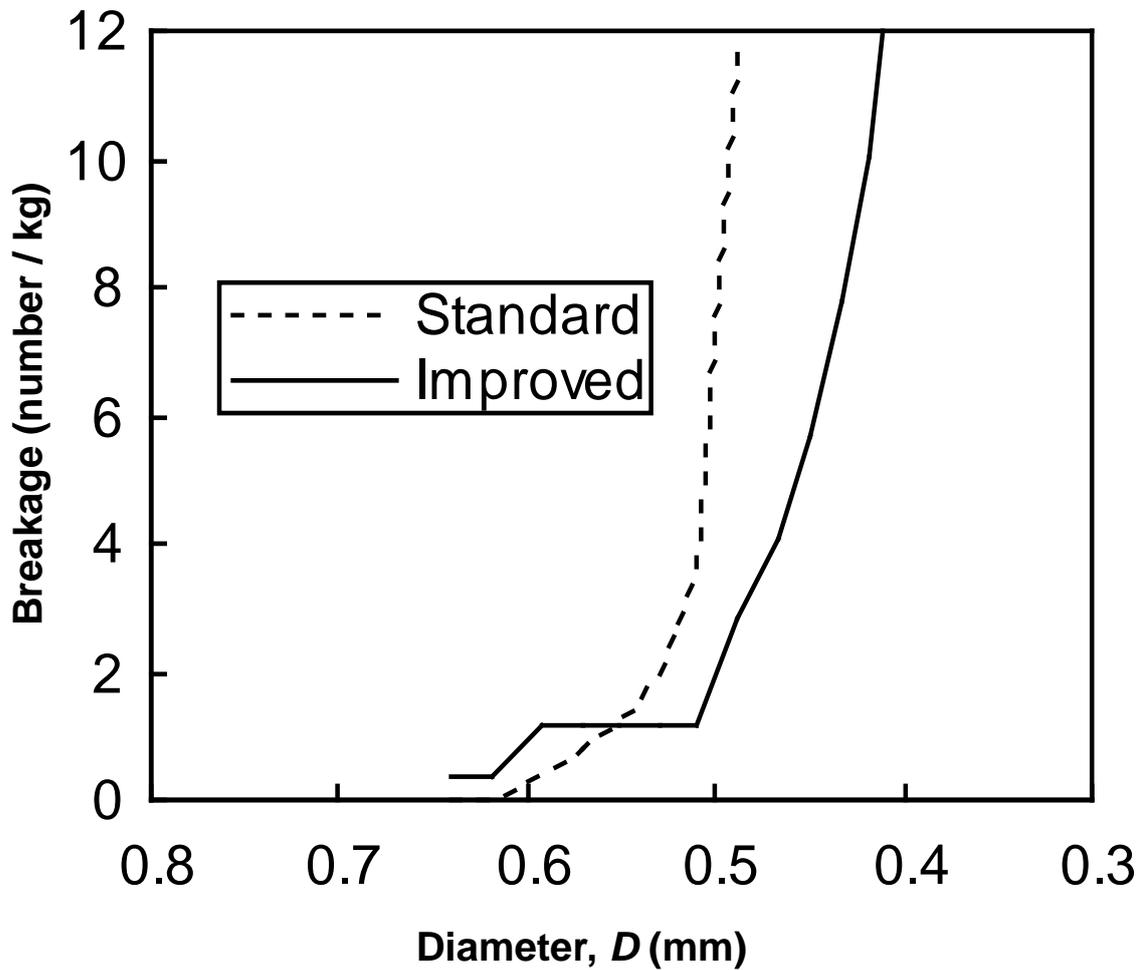


Figure 2-31 従来線材と改善線材の累積断線回数の線材径依存性
 縦軸は超電導線材 kg あたりの累積断線回数 横軸は線材径

まず、数 kg レベルの小型ビレットでの試作を行い、少量では比較できないので仕様の線材直径より小さい直径、0.4 mm まで伸線した際の断線状況を従来設計ビレットと比較した。その結果を **Figure 2-31** に示す。改善したビレットの方が細い線材径での累積断線数が少なくなっている。

本手法の有効性が確認できたので、大型ビレットに採用した。この量産プロトタイプビレットにおいて 1,500 m 以上の線材の歩留りが 90 % 以上に達し、最長 4,000 m の超電導線材が得られた。

5-4 ITER インサート・コイル用超電導線材の製造結果と特性分布

以上の研究結果をもとに量産製作を開始した。Table 2-9 にこの量産用Nb₃Al インサート・コイル用超電導線材(G)の諸元を、Figure 2-32 に素線の断面写真を示す。

Table 2-9 ITER Nb₃Al インサート・コイル用超電導線材(G)諸元

項目	値	項目	値
直径	0.81 mm	クロムめっき厚さ	2 μm
フィラメント	54 μm×96	臨界電流密度(12T, 4.2K)	≥600 A/mm ²
銅/非銅部比率	1.5	残留抵抗	≤1.5×10 ⁻¹⁰ Ωm
ツイストピッチ	30 mm	ヒステリシス損失//B	≤600 mJ/cc

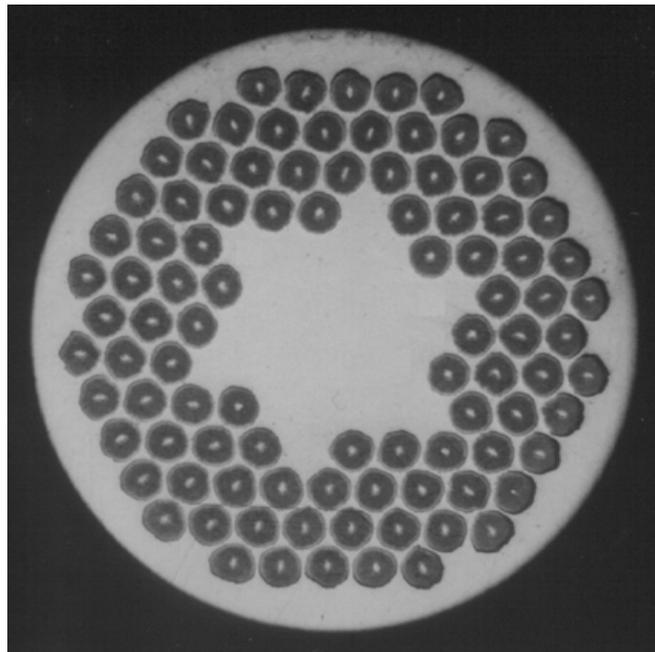


Figure 2-32 ITER Nb₃Al インサート・コイル用超電導線材(G)の断面写真

量産プロトタイプビレットの結果をもとにした更なる異物対策、設備改善等により、最終ロットでは、500 m 以上の歩留まりが約 90%、1,500 m 以上の歩留まりが 70%以上に達した。製造した全超電導線材 515 本（予備を含む単長 180 m、1152 本分）を用いて評価した項目とそれらの統計データを Table 2-10 に示す。

Table 2-10 ITER Nb₃Alインサート・コイル用超電導線材の評価項目と統計データ

項目	単位	測定頻度	平均	標準偏差	CoV	最大	最小	ビレット毎標準偏差の平均	ビレット毎平均の標準偏差
直径	mm	全素線片端	0.814	0.002	0.0025	0.819	0.809	0.002	0.000
銅/非銅比	-	全素線片端	1.43	0.019	0.0133	1.5	1.4	0.016	0.010
クロムめっき	μm	全ビレット片端	2.6	0.25	0.0962	2.9	2.1	-	-
臨界電流密度	A mm ⁻²	全素線片端	621	14.9	0.0240	680	600	11.1	9.5
臨界電流	A	全素線片端	138	3.53	0.0256	152	138	2.4	2.0
n値	-	全素線片端	44	4.2	0.0955	68	24	2.2	3.6
Q _H //	mJ cm ⁻³	1/10素線片端	379	10.5	0.0277	411	379	-	-
Q _H ⊥	mJ cm ⁻³	1/10素線片端	2112	52	0.0246	2210	2030	-	-
残留抵抗	×10 ⁻¹⁰ Ωm	1/10素線片端	1.33	0.10	0.0752	1.54	1.11	-	-

一例として、最重要性能である臨界電流密度についてみると、最低でも 600 A/mm²であり、全ビレットで仕様値を達成した。また、臨界電流密度の標準偏差は 14.9、分散係数CoVにして 2.4%、全測定結果は±40 A/mm² (±6.3%) に収まっており、開発した大型複合多芯ビレットによって、安定して均一な性能が得られることが確認できた。

これにより得た線材を用いて、CIC導体が製作され、Nb₃Alインサート・コイルが製作された。Table 2-11 に製作されたNb₃Alインサート・コイルの諸元を示す。

Table 2-11 ITER Nb₃Alインサート・コイルの諸元

CIC 導体		コイル	
コンジット	ステンレススチール, 2 mm ^t	直径 (熱処理時)	1.2 m
外径	46.2 mm	直径 (実験時)	1.43 m
素線本数	1152 (3×4×4×4×6)	巻線ターン数	20
撚りピッチ	65/90/160/270/430 mm	公称電流値	46 kA
空隙率	36 %	磁場、温度	13 T, 4.5 K

直径 1.23 m で仮巻したCIC導体に 750°C で 50 時間の熱処理を施し、熱処理後に直径 1.43 m に径を広げ、0.4%の曲げひずみが印加された。これはNb₃Al 超電導線材の良好な耐曲げひずみ特性を活用して熱処理をコンパクトに行い、熱処理コストを下げる試みである。

そしてこのNb₃Alインサート・コイルはITERの工学設計活動の一環として製作されたセ

ンター・ソレノイド・モデルコイルの内側に挿入して性能試験が行われ、以下の結果が得られた¹⁹⁾。

(1) Nb₃Alインサート・コイルの励磁試験とクエンチ試験

13 T, 46 kA の 1,000 回の繰り返し励磁試験と導体温度が 150 K 以上に上昇したクエンチ試験後において、臨界電流の低下がみられなかった。

(2) Nb₃Alインサート・コイル導体のn値

導体のn値は素線の超電導線材のn値によく一致しており、同規模のNb₃Snで発生したn値の劣化は観測されなかった。

(3) Nb₃Alインサート・コイル導体に加わる熱ひずみ

導体に加わる熱ひずみは約-0.4%（圧縮）であり、これは同様のNb₃Sn導体の熱ひずみ約-0.7%より小さい。このひずみによる臨界電流の低下はNb₃Alで約 10%、Nb₃Snで約 50%であり本研究で得られたNb₃Al線材の優れた耐ひずみ特性が示された。

(4) 電磁力による臨界電流の低下

Nb₃Al導体では、Nb₃Sn導体で観測された電磁力による臨界電流の低下は観測されなかった。これはひずみによるNb₃Al線材の臨界電流の低下が小さいこと、Nb₃Al線材の剛性が高いことに起因すると考えられ、この点でもNb₃Al線材の優位性が示された。

6. まとめ

高磁場における臨界電流がNbTi超電導体よりも優れるものの、ひずみに弱い（臨界電流が低下しやすい）Nb₃Sn超電導体に比して、Nb₃Al超電導体がひずみに強いとの報告¹⁾があったが、実用的な超電導線材の実現に至っていなかった。その優れた耐ひずみ特性を活かした超電導線材を実用化するため、ジェリーロール法を用いて作製したNb₃Al超電導線材の研究を進め、ひずみによる臨界電流低下が少なく、工業的な規模で製造が可能なNb₃Al超電導線材を開発した。

Nb₃Al超電導体は、**Figure 2-1**の状態図に示されるように、化学量論組成であるNb:Al=3:1の組成比の物質が単相となるのは約 1900°C以上 1950°C以下の非常に高温域であるがために超電導線材の実用化が困難であった。ニオブとアルミの複合加工によってアルミの拡散に必要な距離を短くすることで銅の融点以下の温度でも大型コイルに採用できる熱処理条件で実用的な臨界電流密度を得られることをジェリーロール法による製造プロ

セスで明らかにした。これにより、核融合炉用超電導マグネット用超電導線材に求められる 12 T, 4.2 Kにおける非銅部臨界電流密度で実用レベルを超える 800 A/mm^2 が得られた。

また、ITERのような大型コイルの熱処理では採用が困難であるが、750~800°Cという実用的な温度の熱処理の前に、銅の融点に近い高温（1000°C以上）で短時間の熱処理を行うことで、臨界磁場の高い、高磁場臨界電流特性の優れた熱処理条件を見いだした。これにより、高温短時間熱処理+低温長時間熱処理の2段熱処理により、4.2 K, 12 Tの非銅部臨界電流密度で 1130 A/mm^2 、上部臨界磁場 23.1 T と通常熱処理より約 40 %高い臨界電流密度が得られた。

さらに、そのような銅の融点以下でアルミの拡散距離を短くできる微細構造を得るためにニオブとアルミ及び銅の複合加工が必要であるが、アルミの融点が低く比較的低い温度でも化合物を生成するために、Nb-Ti超電導線材の製造のように、熱間押出法による大単重ビレットを使った製造方法が採用できない。そのため、常温に近い温度での加工を行う必要があり、複合材料の伸線条件が非常に厳しい。そこで、ニオブとアルミを重ね合わせた形状をできる限り相似形に保つような複合伸線方法を開発することで、歩留りを工業生産レベルに向上させた。これにより、ITER開発計画における Nb_3Al インサート・コイル用超電導線材の製造において、500 m以上の線材の製造歩留り 90 %以上の良好な長尺伸線性が得られた。

ITER計画では、超電導導体のロスを低減するためにクロムめっき付の超電導線材が要求されるが、熱処理によりクロムが安定化銅中に拡散し、残留抵抗を増加させる。そのため、クロムの熱処理による拡散状況を調査し、残留抵抗の増加を許容レベルまで抑えることが可能な安定化銅の中央配置方法を開発した。これにより、クロムめっき前のベア線材では $4 \times 10^{-11} \Omega\text{m}$ 以下、2 μm のクロムめっき線材でも $1.5 \times 10^{-10} \Omega\text{m}$ 以下の残留抵抗を持つITER仕様を満足する銅安定化超電導線材が得られた。

また、 Nb_3Al 超電導線材の臨界電流の温度-磁場依存性を評価するとともに、線材素線及びCIC導体の応力やひずみによる臨界電流への影響を明らかにした。

この線材を使った大電流導体の試作を行い、高磁場下で大電流が通電可能な ITER 用超電導導体としての要求性能を満たすことを実証した。

なお、ITER計画において、本超電導線材を使用した Nb_3Al インサート・コイルが製作され、繰り返し励磁試験、クエンチ試験などが行われ、 Nb_3Sn 導体で観測された臨界電流の低下がみられないこと、そしてひずみによる臨界電流の低下が Nb_3Sn に比べて非常に小さ

いことが立証された。

Nb-Ti 超電導線材以上の臨界温度や臨界磁場を有する化合物系超電導線材や銅酸化物系超電導線材では、応力やひずみによる臨界電流への影響が超電導線材の実用化の最も重要な因子のひとつであり、実用的な超電導線材を開発するには、応力やひずみによる臨界電流への影響を評価、把握することが重要であることがわかった。

7. 参考文献

- 1) J. W. Ekin, *Strain Effects in Superconducting Compound*, Advances in Cryogenic Engineering Materials, **30**(1984), 823
- 2) S. Foner, E. J. McNiff Jr., B. T. Matthias, R. H. Willens and E. Corenzwit: *Upper critical fields of high-temperature superconducting $Nb_{1-y}(Al_{1-x}Ge_x)_y$ and Nb_3Al : Measurements of $H_{c2} > 400$ kG at 4.2°K*, Physics Letters, **31A**(1970), 349
- 3) 鎌田勤也, 出川通, 橋本敬三, 壽山竜之, 花田修治: *高強度 Nb-Al 金属間化合物*, までりあ, **35**(1996), 704
- 4) S. Ceresara, M. V. Ricci, N. Sacchetti and G. Sacerdoti: *Nb_3Al formation at temperatures lower than 1000°C*, IEEE Transactions on Magnetics, **11**(1975), 263
- 5) R. Akihama, R. J. Murphy and S. Foner: *Fabrication of multifilamentary Nb-Al by a powder metallurgy process*, IEEE Transactions on Magnetics, **17**(1984), 274
- 6) K. Inoue, Y. Iijima and T. Takeuchi: *New superconducting Nb_3Al MF wire made by Nb/Al, Mg composite process*, Cryogenics, **29**(1989), 418
- 7) S. Saito, K. Ikeda, S. Ikeda, A. Nagata and K. Noto, *Nb_3Al Superconducting wires fabricated by the clad-chip extrusion method*, 11th International Conference on Magnet Technology(1989)
- 8) J. L. Jorda, R. Flukiger, J. Muller: *A New Metallurgical Investigation of the Niobium-Aluminum System*, Journal of the Less-Common Metals, **75**(1980), 227
- 9) E. J. Kramer: *Scaling laws for flux pinning in hard superconductors*, Journal of Applied Physics, **44**(1973), 1360

- 10) L. T. Summers, M. W. Guinan, J. R. Miller and P. A. Hahn: *A model for the predication of Nb_3Sn critical current as a function of field, temperature, strain and radiation damage*, IEEE Transactions on Magnetics, **27**(1991), 2041
- 11) G. Rupp, *The importance of being prestressed*, Filamentary Al5 Superconductors (1980), 155
- 12) W. Specking, T. Ando, H. Tsuji, A. Mikumo, and Y. Yamada: *Effect of static and cyclic strain on J_c of Nb_3Al CIC conductors a comparison with Nb_3Sn* , ICEC16/ICMC(1996)
- 13) S. Ochiai, T. Sawada, S. Nishino, M. Hojo, K. Takahashi and Y. Yamada: *Relation of strength distribution of Nb_3Al filaments to strength of multifilamentary superconducting composite wire*, Cryogenics, **36**(1996), 249
- 14) M. Sugimoto, T. Sasaki, M. Nishi, Y. Takahashi, T. Ando, H. Tsuji, Y. Yamada, N. Ayai, K. Takahashi, T. Fujioka, T. Hanai, S. Oukita and T. Horiya: *Development of 10-kA Nb_3Al Coil*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **5**(1995), 897
- 15) J. D. Elen, et al.: *The Superconductor Test Facility SULTAN*, IEEE Transactions on Magnetics, **17**(1981), 490
- 16) E.P. Balasamo, et al.: *Final Tests of the SULTAN 12 T Facility in the split Coil Configuration*, Fusion Technology, 1992, 768
- 17) G. Pasztor, et al.: *Design, Fabrication and Testing of a 100 kA superconducting Transformer for the SULTAN Test Facility*, 15th International Conference on Magnet Technology(1997)
- 18) T. Ando, Y. Takahashi, M. Nishi, S. Shimamoto, N. Aoki and E. Suzuki: *Effect of Chrome Plating on Coupling Losses in a Nb_3Sn Cable-in-conduit Conductor*, Cryogenic Engineering, **22**(1987), 362
- 19) 小泉徳潔, 布谷嘉彦, Makoto Takayasu, 杉本誠, 名原啓博, 押切雅幸, CSモデル実験グループ: *Nb_3Al インサート・コイルの臨界電流性能評価*, 低温工学, **38**(2003), 399

第3章 銅酸化物系超電導線材の曲げひずみ依存性

1. 緒言

ヒューストン大学の Paul Chu らによって発見された $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ¹⁾ を代表とする RE (Rare-Earth : 希土類) BCO ($\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) 銅酸化物系 (以下、REBCO) 超電導体は、世界で初めて臨界温度が液体窒素の沸点である 77K を超える材料であった。しかしながら、超電導電流が流れるとされる層状ペロブスカイト構造の中に存在する CuO_2 面の ab 面の向きを揃えることがなかなか果たせなかった。一方、翌年に日本の金属材料技術研究所の Maeda らによって発見されたビスマス系 (以下、BSCCO) 超電導体²⁾ は、同じ層状ペロブスカイト構造の銅酸化物であっても、劈開性を有していることから、圧延等によって比較的容易に配向性を向上することができ、銀シース・パウダーインチューブ法による世界で初めての液体窒素温度を超える臨界温度を有する超電導線材が市販されることになった。

BSCCO 超電導体、中でも Bi2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) は臨界温度が 110K と、REBCO 超電導体より 10K 以上も高いものの、次の 3 点で REBCO 超電導体が優位であると考えられ、研究が活発となった。

(1) 臨界電流

高磁場中での臨界電流が高い。

(2) 強度

Bi2223 超電導線材は、銀の中に Bi2223 超電導フィラメントが埋め込まれた構造であり、銀を合金化しても強度は比較的低い。一方、REBCO 超電導体は後述する線材構造において金属基板上に形成されることで、Bi2223 超電導線材よりも強度が高い。これは、特に超高磁場を発生する電磁石用途には大きなメリットであると考えられる。

(3) 製造コスト

Bi2223 超電導線材は線材断面積の半分以上を銀が占めており、その原材料費から線材製造コストの低減に限界がある。REBCO 超電導体はレアメタルを使用するものの、原材料費が占める割合が小さく、製造コストを低くできる可能性がある。

これらの点から、Bi2223 超電導線材に次ぐ、次世代高温超電導線材としての期待のもとに開発が進められてきたが、昨今では Bi2223 線材に続いて市販もされている³⁾。

これらの線材を応用した実用機器として、Nb-Ti、 Nb_3Sn 、 Nb_3Al などの金属系超電導線材では実現が困難であったものの、適用範囲が非常に広いと期待される超電導電力機器の

研究がはじめられた。例えば、新エネルギー・産業技術研究開発機構（NEDO）は経済産業省からの予算で「イットリウム系超電導電力機器開発プロジェクト」を実施した⁴⁾。ここでは、20 MJ の超電導電力貯蔵装置（SMES）、20 MVA の変圧器、275 kV-3 kA の高電圧ケーブル及び66 kV-5 kA の大電流ケーブルを目標とした機器開発とそれらの機器に必要な超電導線材の量産技術開発が行われた。

本章では、特に電力機器への応用において、使用上の特性の中で最も重要なもののひとつでありながら体系的な研究報告の少ない、曲げひずみによる臨界電流への影響（以下、曲げひずみ依存性）に関する研究を行った結果を示す。

2. 評価サンプルと評価方法

2-1 評価サンプル

Table 3-1 に開発対象である電力機器と使用する超電導線材及び開発機関の関係を示す。SMES には、古河電工と中部電力が共同で開発した Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MO-CVD) 線材⁵⁾、ISTEC⁶⁾及びフジクラ⁷⁾2社の Ion Beam Assist Deposition (IBAD)・Pulsed Laser Deposition (PLD) 線材を、変圧器にはフジクラの IBAD-PLD 線材と昭和電線とフジクラが共同で開発した IBAD-Metal Organic Deposition (MOD) 線材⁸⁾、高電圧ケーブルには昭和電線とフジクラが共同で開発した IBAD-MOD 線材、大電流ケーブルには住友電工の配向基板 PLD 線材⁹⁾が使用された。

Table 3-1 超電導電力応用機器と使用線材

応用機器	超電導線材		
SMES	MO-CVD by 古河電工+中部電力	IBAD-PLD by フジクラ	IBAD-PLD by ISTEC
超電導変圧器	IBAD-PLD by フジクラ		IBAD-MOD by フジクラ+昭和電線
高電圧ケーブル	IBAD-MOD by フジクラ+昭和電線, フジクラ		
大電流ケーブル	配向基板-PLD by 住友電工		

線材の詳細な構造を **Figure 3-1** に示す。フジクラ製 PLD 線材 (F-PLD) は、ハステロイ基板上に Al_2O_3 、 Y_2O_3 の中間層を設け、IBAD プロセスによる MgO 上に PLD プロセスによる CeO_2 及び $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 超電導層を形成し、保護層として銀層を設けてある。ISTEC 製 PLD 線材(I-PLD)は、ハステロイ基板上に $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 、IBAD プロセスによる MgO 上に LaMnO_3 の中間層を設け、PLD プロセスによる CeO_2 及び $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 超電導層を形成し、保護層として銀層を設けてある。昭和電線ケーブルシステム (SWCC) 製 MOD 線材 (K-MOD) は、フジクラにおいてハステロイ基板の上に IBAD プロセスによる $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ を設け、昭和電線にて PLD プロセスによる CeO_2 及びトリフルオロ酢酸塩 (TFA)・Metal Organic Deposition (MOD) プロセスによる $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 超電導層を形成し、保護層として銀層を設けてある。住友電工製 PLD 線材 (S-PLD) は、クラッド型配向金属基板上に CeO_2 、YSZ、 CeO_2 の中間層を設け、PLD プロセスによる $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 超電導層を形成し、保護層として銀層を設けてある。中部電力製 CVD 線材 (C-CVD) は、ハステロイ基板上に $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 、IBAD プロセスによる MgO 、 LaMnO_3 、PLD による CeO_2 の中間層を設け、CVD プロセスによる $(\text{Gd},\text{Y})\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ 超電導層を形成し、保護層として銀層を設けてある。以上 5 種類の線材と、それらに K-MOD 及び C-CVD は古河電工にて、I-PLD 及び S-PLD は住友電工にて銅めっきを施したものを評価対象とした。以下、銅めっきを施していない線材のことを“ベア線”、銅めっきを施している線材のことを“銅めっき線”と呼ぶ。

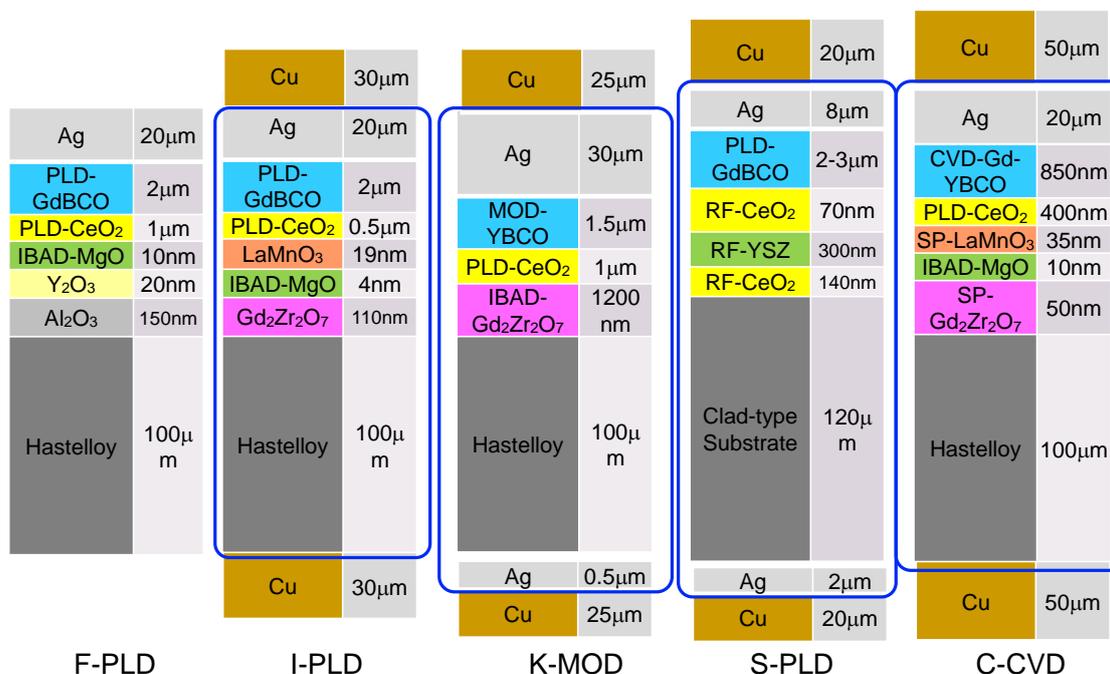


Figure 3-1 各超電導線材の構造

2-2 評価方法

線材の曲げ試験としては、以下の 2 種の方法を採用した。

(1) 曲げ戻し評価

主としてコイルやケーブル巻線時の繰り返し曲げを想定し、常温にて各種の直径をもった FRP 製の治具に線材を巻きつけ、直状に戻して液体窒素中 (77 K) で外部磁場のない (自己磁場) 状態で臨界電流 (I_c) を測定する。

(2) 連続曲げ評価

液体窒素中で連続的に曲げを加え、所定の各状態における臨界電流測定 (77 K, 自己磁場) を行う。この評価には、Goldacker 式曲げ試験装置¹⁰⁾ (Figure 3-2 に外観を

Figure 3-3 に構造を示す) を用いた。本装置を使用すると、1 つのサンプルで各種の曲げ直径におけるひずみ特性を評価することができ、それにより、サンプル間のばらつきを排除して評価することができる。

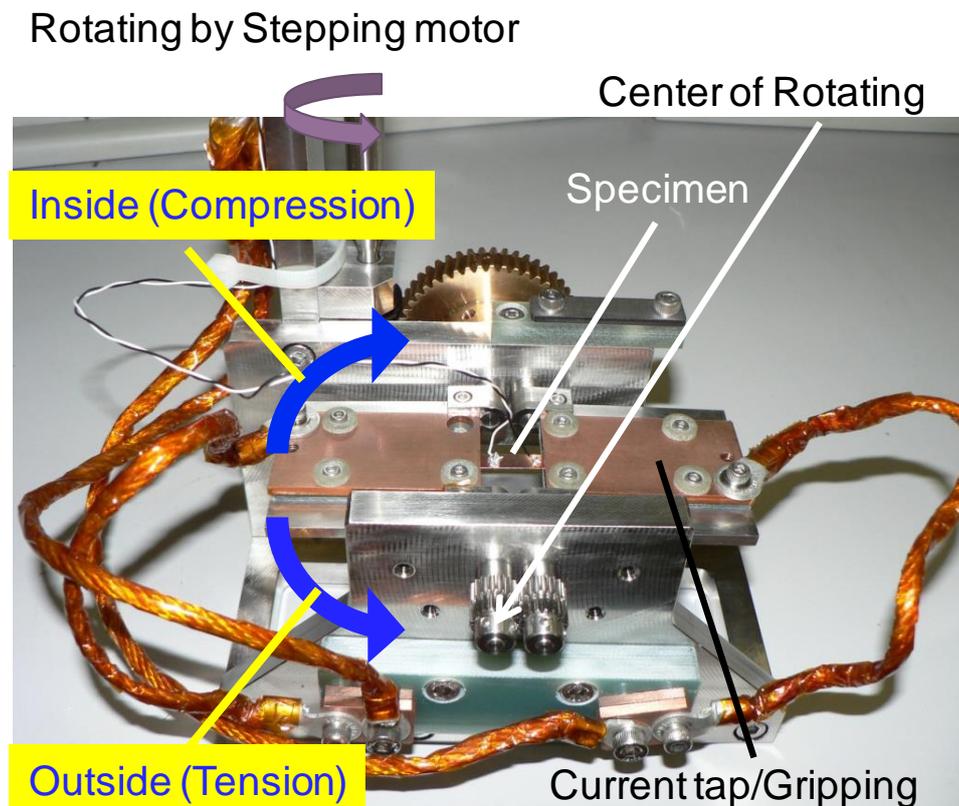


Figure 3-2 Goldacker 式曲げ試験装置

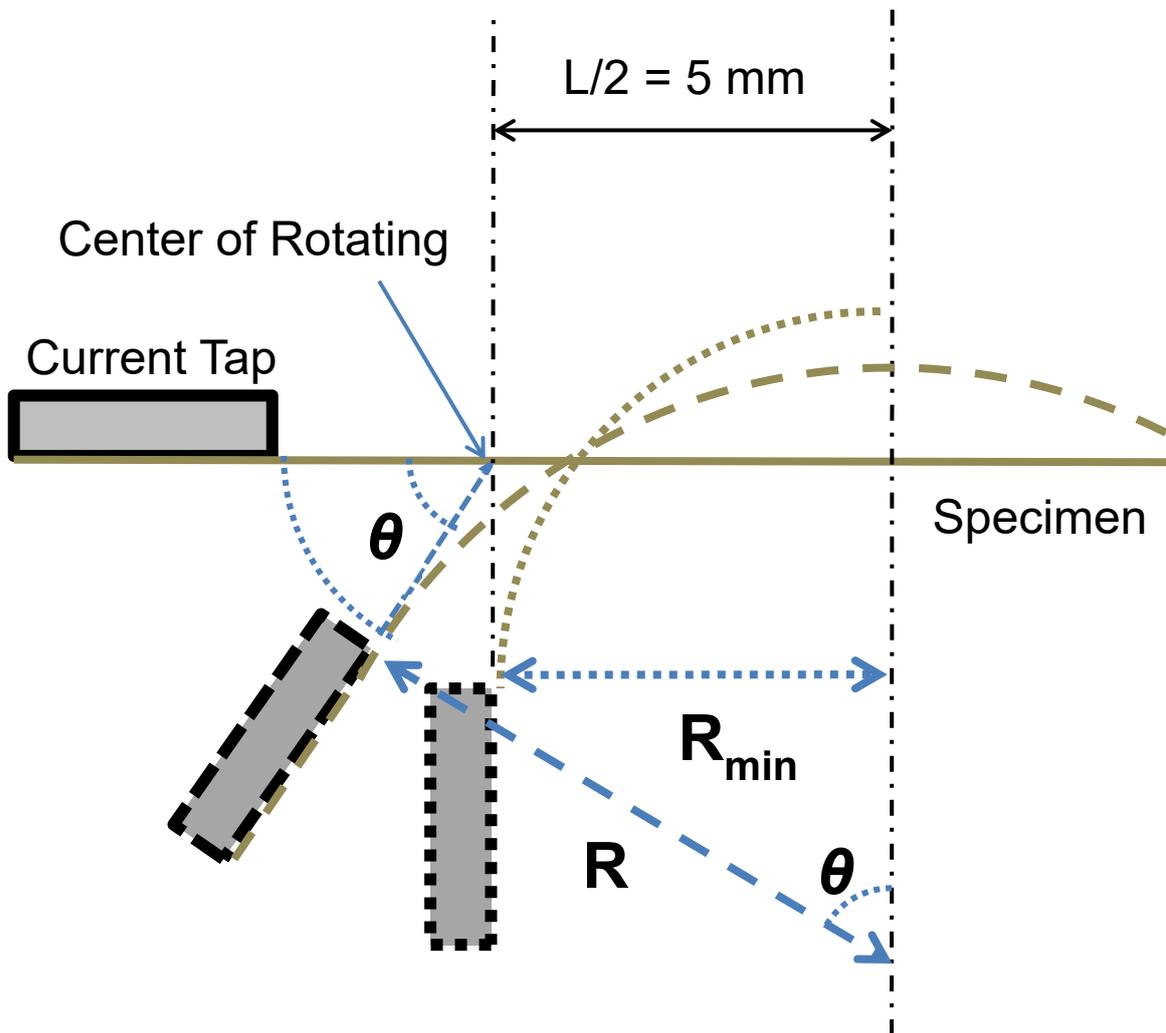


Figure 3-3 Goldacker 式曲げ試験装置の構造

Goldacker 式曲げ試験装置では、**Figure 3-2** に示すようにサンプルの両端を FRP の板を挟んで SUS 製のサンプル台に載せ、電極を兼ねた銅板でつかむ。ステッピングモータからウォームギヤを経た軸を中心に左右とも同角度に回転することによって曲げを加える。ここで、

Figure 3-3 に示すように銅板間の距離は回転する間に変化せず、軸方向のひずみは加わらない構造になっている。

本試験装置は当初、線材に表裏の区別がない BSCCO 超電導線材の評価のために考案されたが、超電導線材に超電導面と基板面がある REBCO 超電導線材の場合は、超電導層を

上部に向け銅電極から銀の保護層を通して超電導層に電流が乗り移るように設置する。

面対象である BSCCO 超電導線材では、回転方向をいずれにしても、中心面から上下にある超電導フィラメントそれぞれ一方が圧縮、もう一方が引張ひずみを受ける。一方、基板上に超電導層が形成されている REBCO 超電導線材では通常、線材の厚さに対して基板の厚さが 1/2 以上あるため、基板側に曲げると超電導層に引張ひずみ加わり、超電導層側に曲げると圧縮ひずみ加わる。よって、本装置の場合、電極部が上部に向かって回転すると圧縮、下部に向かって回転すると引張ひずみとなる。

なお、本試験装置では、最小の曲げ直径は電極部が垂直まで回転した際（図中の R_{min} に対応）に対応し、10 mm である。測定サンプル長は約 120 mm とし、電圧タップ間距離は 10 mm (L) で、10 mm あたりに 1 μ V の電圧発生点で I_c を定義している。また、銅板間距離は約 16 mm で、電圧タップまでの距離が約 3 mm であるが、本評価において特に電流乗り移り抵抗等は検出されなかった。

実用上の曲げは巻線におけるものが大部分であり、線材に曲げひずみ加わるのは、線材の使用温度ではなく巻線の行われる常温である。しかしながら、本評価は応力ではなく、ひずみ（曲げ直径）であるため、常温曲げと低温曲げに曲げ特性の大きな差はないと想定される。最初に、(1)の常温における曲げ戻し評価との比較を行うことにより、その差異を確認する。

3. 常温における曲げ戻し評価

F-PLD 線材（ベア線）を用いて、常温において 12 mm から 50 mm までの各種直径の曲げを加えた後、直状に戻して臨界電流を測定した。これを 10 回まで繰り返し、繰り返し曲げによる臨界電流の変化を測定した結果を **Figure 3-4** に示す。使用した F-PLD 線材（ベア線）は 100 μ m の金属基板上に約 1.2 μ m の中間層が形成された上に約 2 μ m の超電導層と 20 μ m の銀保護層が形成されているという非対称構造である。そのため、超電導層側を内側にして曲げると、超電導層には圧縮ひずみが、超電導層側を外側にして曲げると超電導層には引張ひずみ加わる。以下、圧縮ひずみ加わる方向の曲げ直径を負の数値で示し、引張ひずみ加わる方向の曲げ直径を正の数値で示す。

圧縮方向に関しては、曲げ直径 50 mm から 15 mm まではグラフには記載していないが、評価した最小直径の 12 mm まで、臨界電流が低下することはなかった。一方、引張方向に関しては、曲げ直径が 50mm から 24mm まで曲げ回数 10 回まで臨界電流が低下すること

はなかった。曲げ直径 20 mm の曲げにおいては、曲げ回数が増えると徐々に臨界電流が低下し、曲げ直径 17.5 mm 以下では 1 回の曲げで臨界電流がゼロになった。

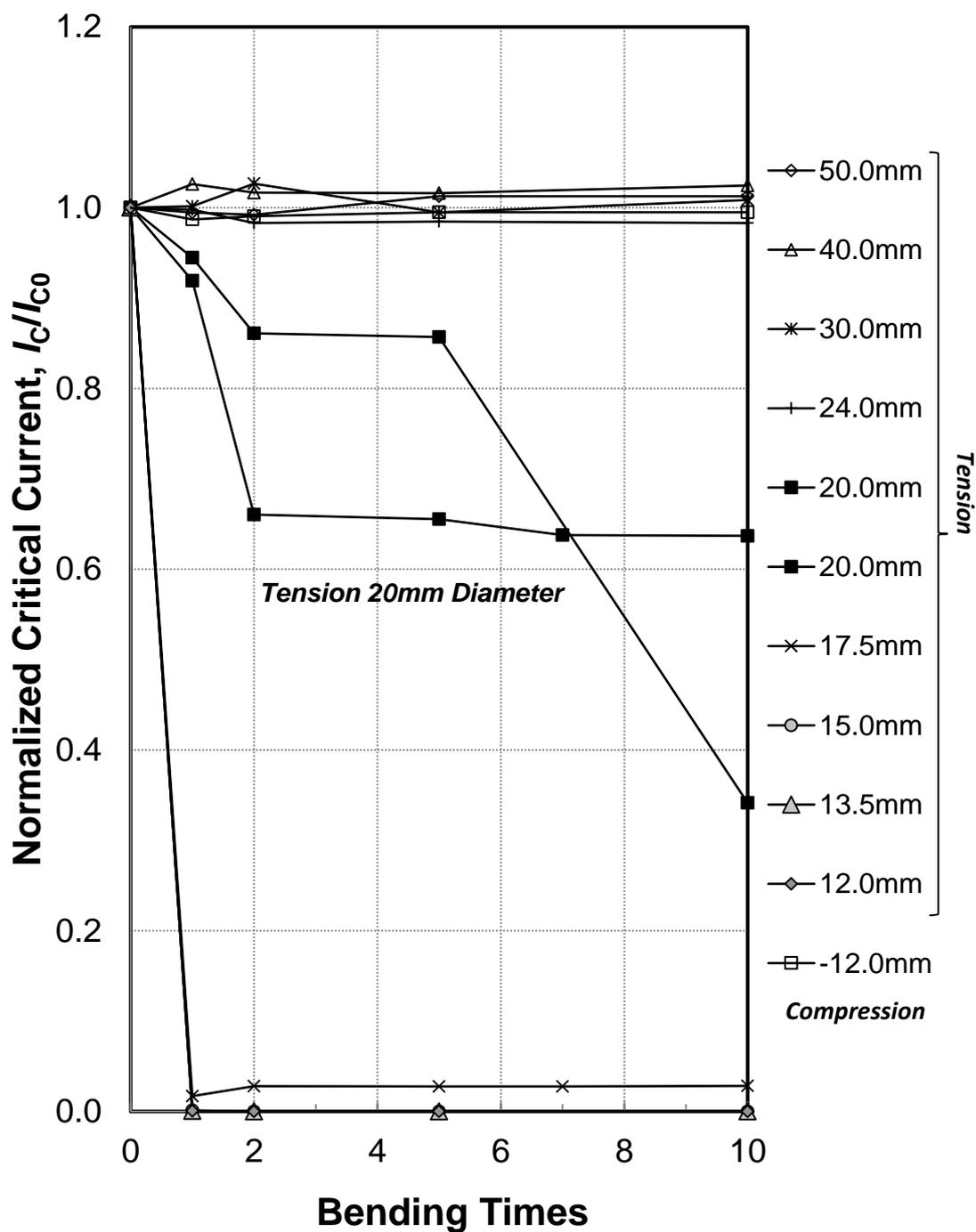


Figure 3-4 F-PLD 線材（ベア線）への曲げ直径を変えた場合の臨界電流（77K, 自己磁場）に加える繰り返し曲げ回数依存性

縦軸は曲げを加える前の臨界電流で規格化した規格化臨界電流

曲げ直径が 12 mm から 50 mm で引張方向のひずみ、-12 mm は圧縮方向のひずみ

4. 連続曲げ評価

4-1 常温における曲げ戻し評価との比較

前項においては、一定の曲げ直径に曲げて戻すことを繰り返した。ここでは、Goldacker 式曲げ試験装置を用いて、F-PLD 線材（ベア線）を評価した結果を **Figure 3-5** に示す。超電導層が圧縮を受ける方向に徐々に曲げながら（図中の(2)）、臨界電流を評価した。曲げ径が小さくなるにつれてやや臨界電流が上昇、装置の最小曲げ直径である 10 mm において約 2%の臨界電流の向上がみられた。この時点で臨界電流に劣化がなかったので、一度直状に戻したところ、ほぼ当初の臨界電流に戻った(3)。それを今度は引張方向に徐々に曲げながら、臨界電流を評価していった(5)。曲げ直径が小さくなるにつれて少しずつ臨界電流が低下し、直径約 20 mm 付近で急激に低下し、15 mm 程度でほぼゼロになった。

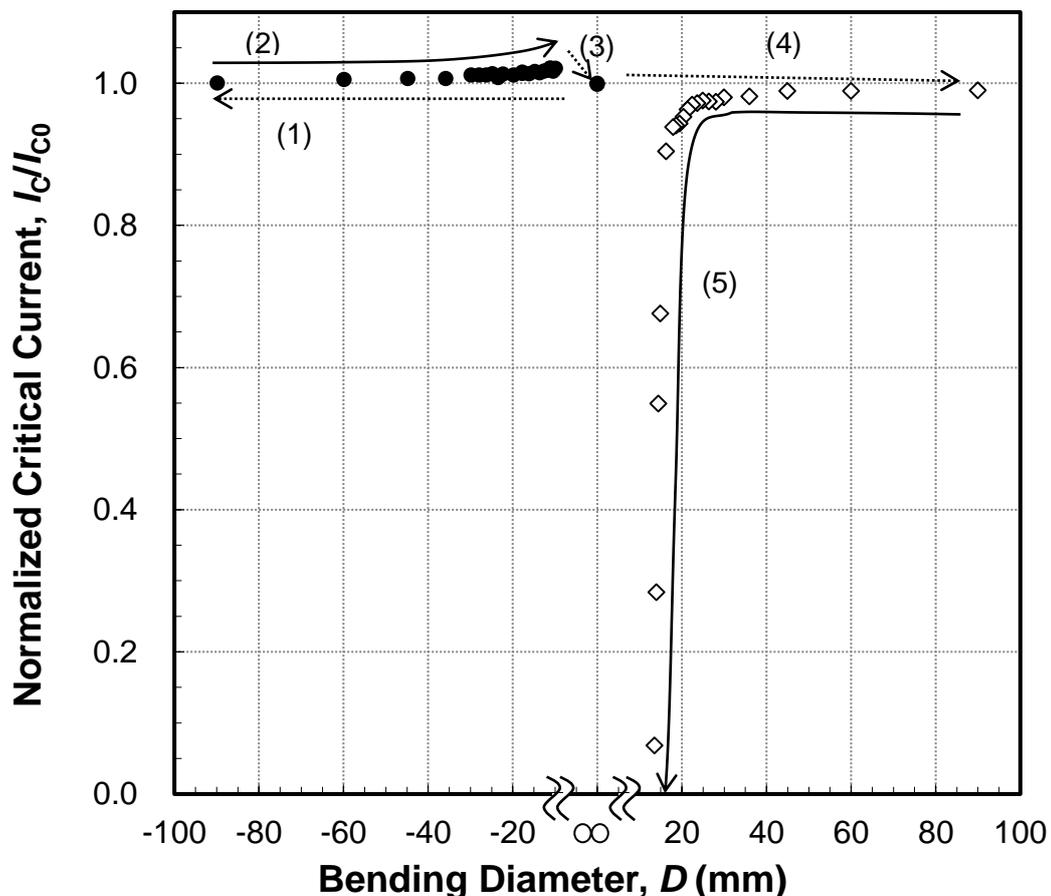


Figure 3-5 F-PLD 線材（ベア線）の臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性

横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向 縦軸は曲げを加える前の
 臨界電流で規格化した規格化臨界電流 (1)-(5)の順に圧縮方向-戻し-引張方向曲げを印加

Figure 3-4 の曲げ戻しにおける結果と比較してみると、曲げを加えたのが常温と液体窒素温度という差と、曲げた状態か戻した状態かという差はあるが、いずれも引張方向の直径 20 mm 以下で臨界電流の低下が生じている。

次に、**Figure 3-6** に I-PLD 線材（ベア線）の曲げひずみ依存性評価結果を示す。圧縮方向では徐々に臨界電流が低下し、曲げ直径 10mm で約 20%の臨界電流の低下が見られるが、直状に戻すことにより、当初の値に回復している。一方引張方向では、曲げ直径約 20 mm において急激に臨界電流の低下が起こっている。F-PLD 線材と I-PLD 線材では、同じ基板、IBAD による MgO 及び PLD による CeO₂ 中間層、超電導層が PLD による GdBa₂Cu₃O_x であるにもかかわらず、圧縮方向の曲げひずみ依存性に大きな差異が認められる。

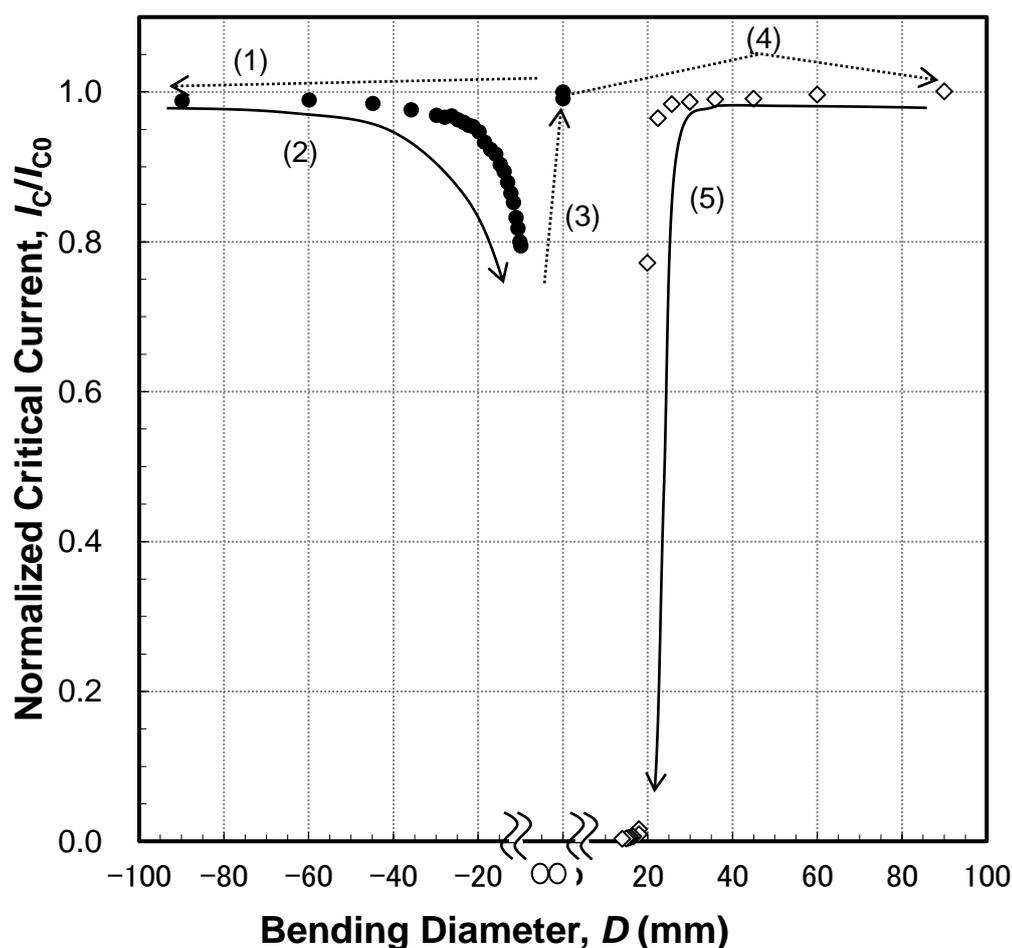


Figure 3-6 I-PLD 線材（ベア線）の臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性

横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向 縦軸は曲げを加える前の
臨界電流で規格化した規格化臨界電流 (1)-(5)の順に圧縮方向げ-戻し-引張方向曲げを印加

4-2 曲げ戻しによる不可逆ひずみ

超電導線材の使用時(巻線等)において曲げ戻し加わる場合に、どの径までの曲げが許容されるかという観点は重要である。また、超電導線材が曲げられた状態で、組織が不可逆的な破壊状態にあるのか、弾性的な可逆状態にあるのかを知ることは、劣化の進行の観点から重要な指標であると考えられる。一般には、応力やひずみに対する実用超電導線材の耐久性の目安として、当初の 95%の臨界電流まで低下する点を仕様値として示される場合が多い¹¹⁾。以下、曲げたままの状態当初臨界電流の 95%を維持する直径を D_{95} と表す。

また、線材に曲げを加えて曲がった状態で臨界電流を測定した後、一旦直状に戻して臨界電流を測定し、次にさらに小さな直径で評価することを繰り返し、直状に戻した状態で臨界電流が当初の値まで戻る限界点を不可逆点とした。ここで、限界点として当初臨界電流の 99%まで回復する点と定義した。以下、直線状に戻したときに当初臨界電流の 99%まで回復する直径を D_{99} と表す。

Figure 3-7 に F-PLD 線材(ベア線)の曲げひずみ依存性評価結果を示す。所定の径に曲げた状態の臨界電流を Bending (●)、その径で曲げた後に直状に戻した状態の臨界電流を Bend-back (■)として示す。比較のために曲げ戻しをせずに順に所定の径に曲げた状態で測定した臨界電流を Simple Bending (○)として示す。

以降の他の線材を含めて、Bending (●)と Simple Bending (○)の臨界電流はほとんど同じ値になっており、同じ線材に曲げ戻しを加えてもその影響はほとんど見られず、最終ひずみの大きさに臨界電流が決まっている。それは、当初臨界電流の 99%まで回復する、すなわち可逆領域を越えても、同じであることがわかった。

また、F-PLD 線材(ベア線)の不可逆点の直径 D_{99} は 19 mm となり、「3. 常温における曲げ戻し評価」の節で臨界電流が低下しはじめる直径 20 mm とほぼ一致することから、常温と液体窒素温度の差、及び、曲げ試験方法の違いがあるものの、同等の曲げひずみ依存性の評価が行えていることが確認された。

F-PLD 線材は、圧縮方向において本装置の限界である直径 10 mm でも臨界電流の低下がなかった。引張方向では、95%の臨界電流維持曲げ直径 (D_{95}) は 18 mm、99%回復曲げ直径 (D_{99}) は 19 mm となり、ほぼ一致した。

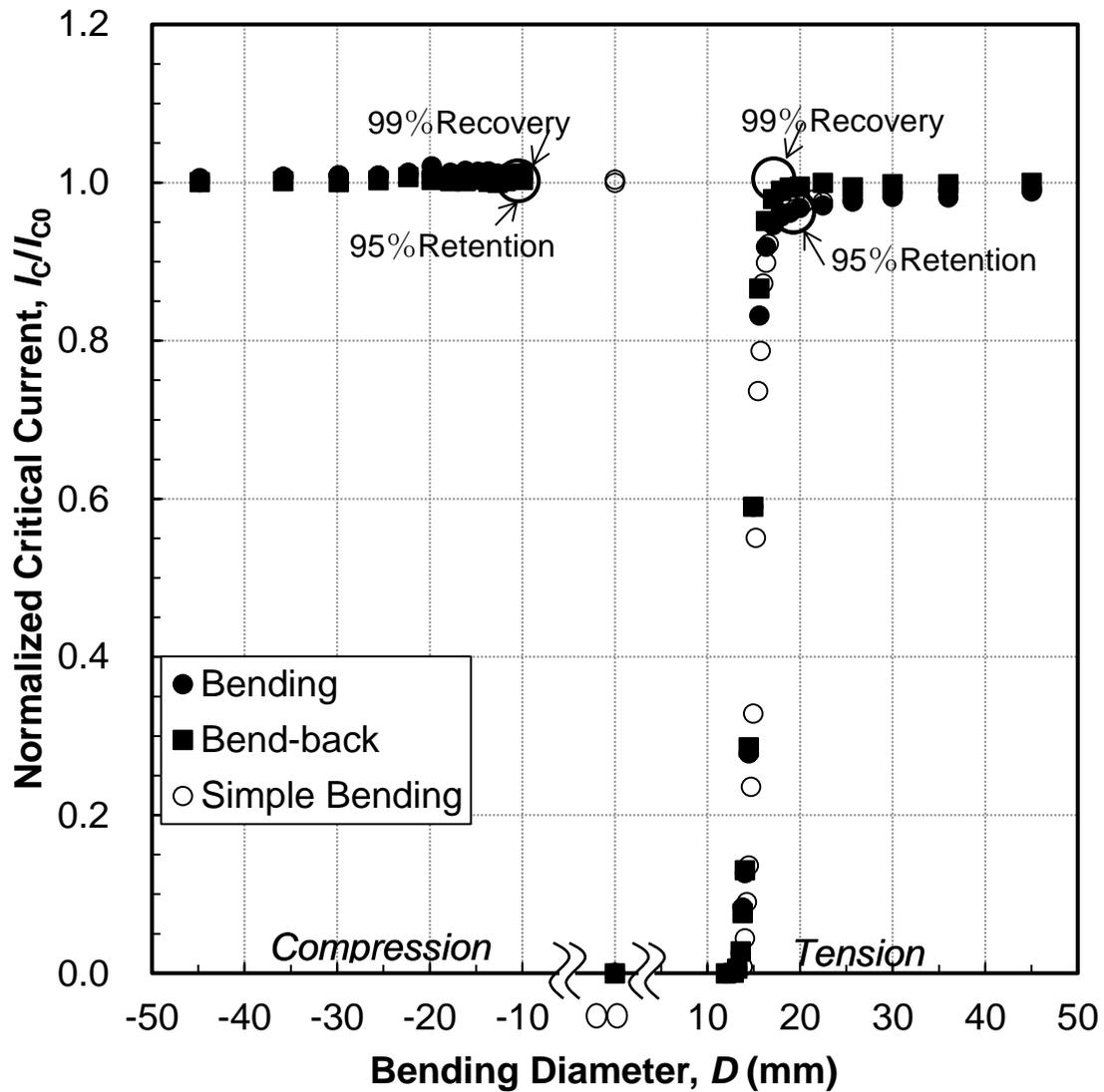


Figure 3-7 F-PLD 線材（ベア線）に加える曲げ径を徐々に小さくしたことによる規格化臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性

横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ

所定の直径で曲げて I_c 評価（Bending）後、直状に戻し I_c 評価した（Bending-back）場合

と所定の直径で曲げて I_c 評価（Simple-Bending）後戻さずに小さい径に曲げた場合の比較

Figure 3-8にI-PLD線材（銅めっき線）の曲げひずみ依存性を示す。I-PLD線材（銅めっき線）では、圧縮方向で D_{95} が20 mmで、曲げ12 mmで約20%の臨界電流低下が見られたものの直状に戻すと回復し、 D_{99} は12 mmであった。一方、引張方向では、約20 mmにおいて急激に臨界電流の低下が起こり、 D_{95} は20 mm、 D_{99} は25 mmとなった。

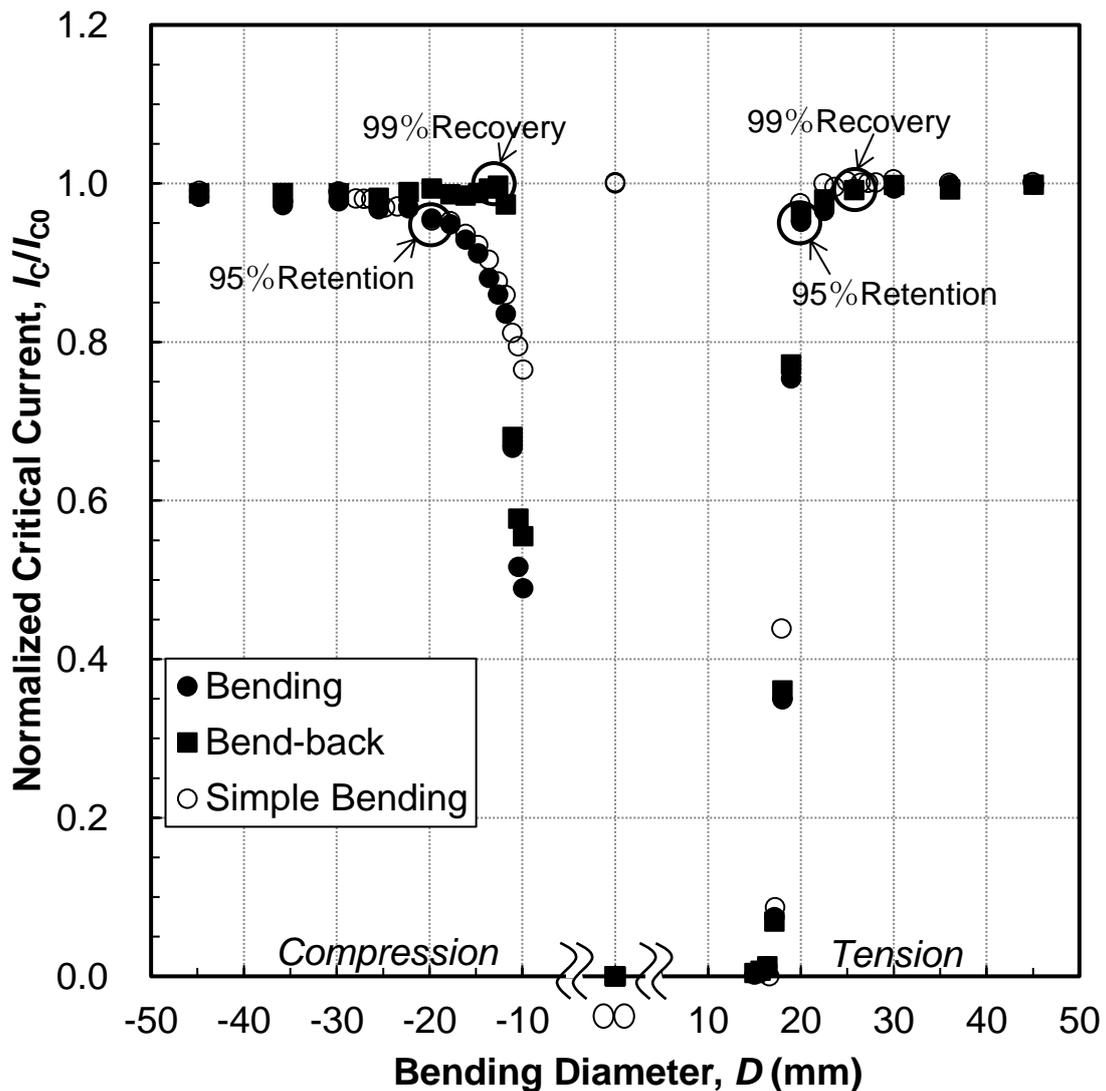


Figure 3-8 I-PLD線材（銅めっき線）に加える曲げ径を徐々に小さくしたことによる規格化臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性
 横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ
 所定の直径で曲げて I_c 評価（Bending）後、直状に戻し I_c 評価した（Bending-back）場合
 と所定の直径で曲げて I_c 評価（Simple-Bending）後戻さずに小さい径に曲げた場合の比較

Figure 3-9 に S-PLD 線材（銅めっき線）の曲げひずみ依存性を示す。S-PLD 線材（銅めっき線）では、圧縮方向の D_{95} が 36 mm で、曲げ 13 mm で約 30%の臨界電流低下が見られたものの、直状に戻すと回復し、 D_{99} は 13 mm であった。一方、引張方向では、約 20mm で急激に臨界電流の低下が起こり、 D_{95} は 17 mm、 D_{99} は 16 mm となった。

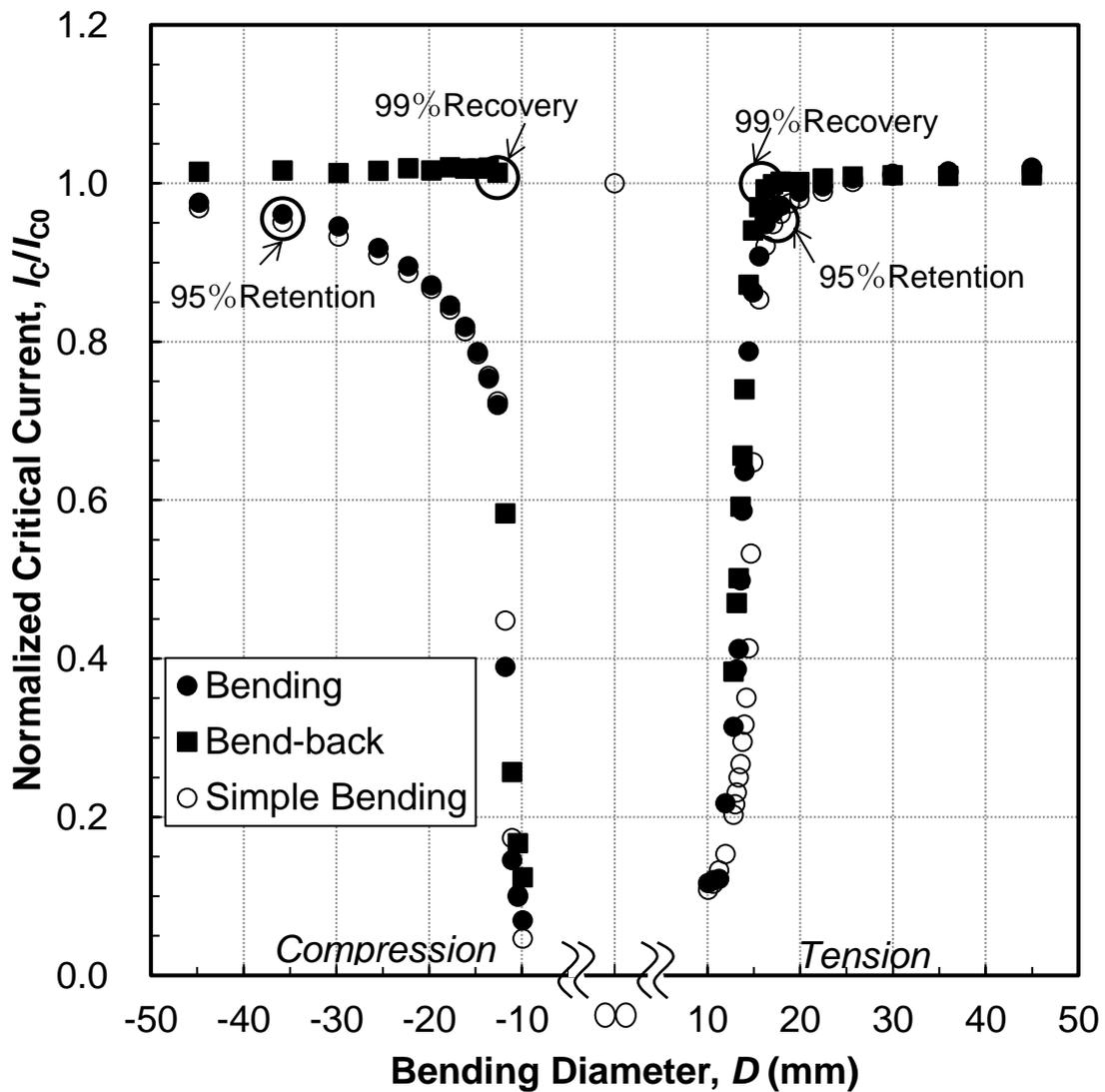


Figure 3-9 S-PLD 線材（銅めっき線）に加える曲げ径を徐々に小さくしたことによる規格化臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性
 横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ
 所定の直径で曲げて I_c 評価（Bending）後、直状に戻し I_c 評価した（Bending-back）場合
 と所定の直径で曲げて I_c 評価（Simple-Bending）後戻さずに小さい径に曲げた場合の比較

Figure 3-10に K-MOD 線材（ベア線）の曲げひずみ依存性を示す。K-MOD 線材（ベア線）では、圧縮方向で D_{95} が 45 mm で、曲げ 10 mm で約 50%の臨界電流低下が見られたものの直状に戻すと回復し、 D_{99} は 10 mm であった。一方、引張方向では、約 20 mm において急激に臨界電流の低下が起これ、 D_{95} は 18 mm、 D_{99} は 16 mm となった。

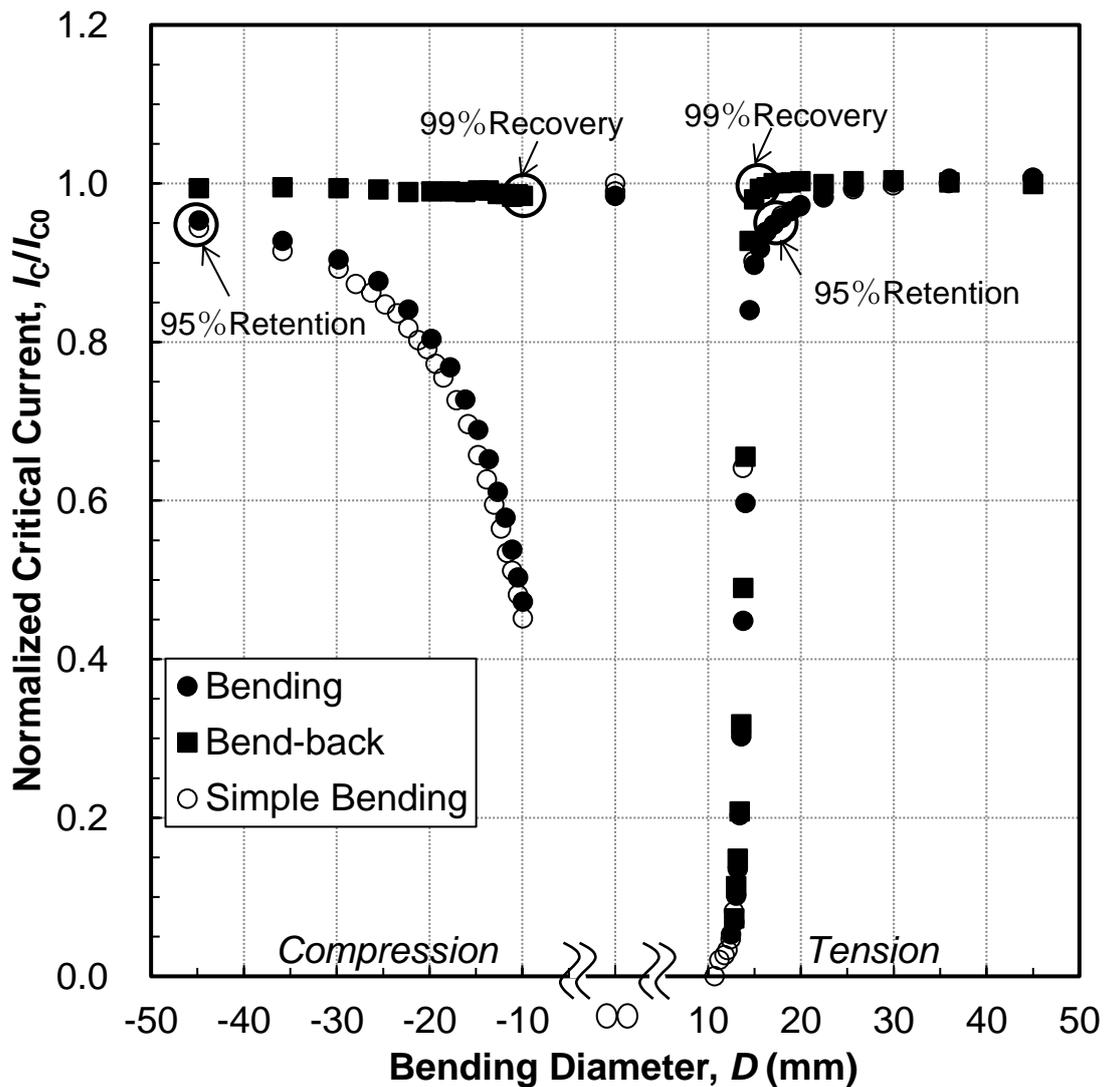


Figure 3-10 K-MOD 線材（ベア線）に加える曲げ径を徐々に小さくしたことによる規格化臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性

横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ

所定の直径で曲げて I_c 評価（Bending）後、直状に戻し I_c 評価した（Bending-back）場合と所定の直径で曲げて I_c 評価（Simple-Bending）後戻さずに小さい径に曲げた場合の比較

Figure 3-11 に K-MOD 線材（銅めっき線）の曲げひずみ依存性を示す。K-MOD 線材（銅めっき線）では、圧縮方向で D_{95} が 45 mm で、曲げ 10 mm で約 60%の臨界電流低下が見られたものの直状に戻すと回復し、 D_{99} は 10 mm であった。一方、引張方向では、約 20 mm において急激に臨界電流の低下が起こり、 D_{95} は 18mm、 D_{99} は 13 mm となった。

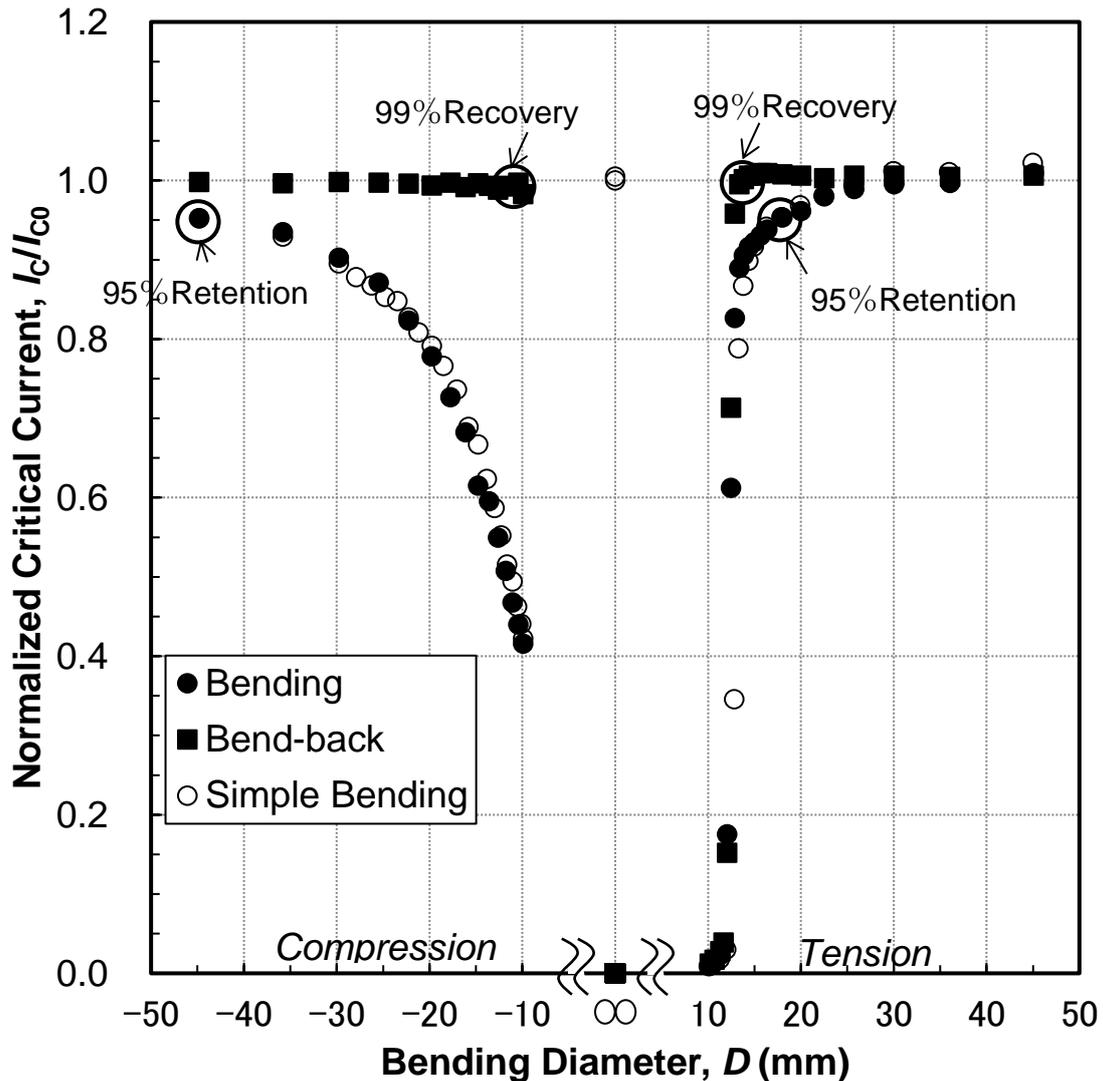


Figure 3-11 K-MOD 線材（銅めっき線）に加える曲げ径を徐々に小さくしたことによる規格化臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性
 横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ
 所定の直径で曲げて I_c 評価（Bending）後、直状に戻し I_c 評価した（Bending-back）場合
 と所定の直径で曲げて I_c 評価（Simple-Bending）後戻さずに小さい径に曲げた場合の比較

Figure 3-12 に C-CVD 線材（ベア線）の曲げひずみ依存性を示す。C-CVD 線材（ベア線）では、圧縮方向で D_{95} が 28 mm で、曲げ 10 mm で約 30%の臨界電流低下が見られたものの直状に戻すと回復し、 D_{99} は 10 mm 以下であった。一方、引張方向では、約 16 mm において急激に臨界電流の低下が起こり、 D_{95} は 20 mm、 D_{99} は 16 mm となった。

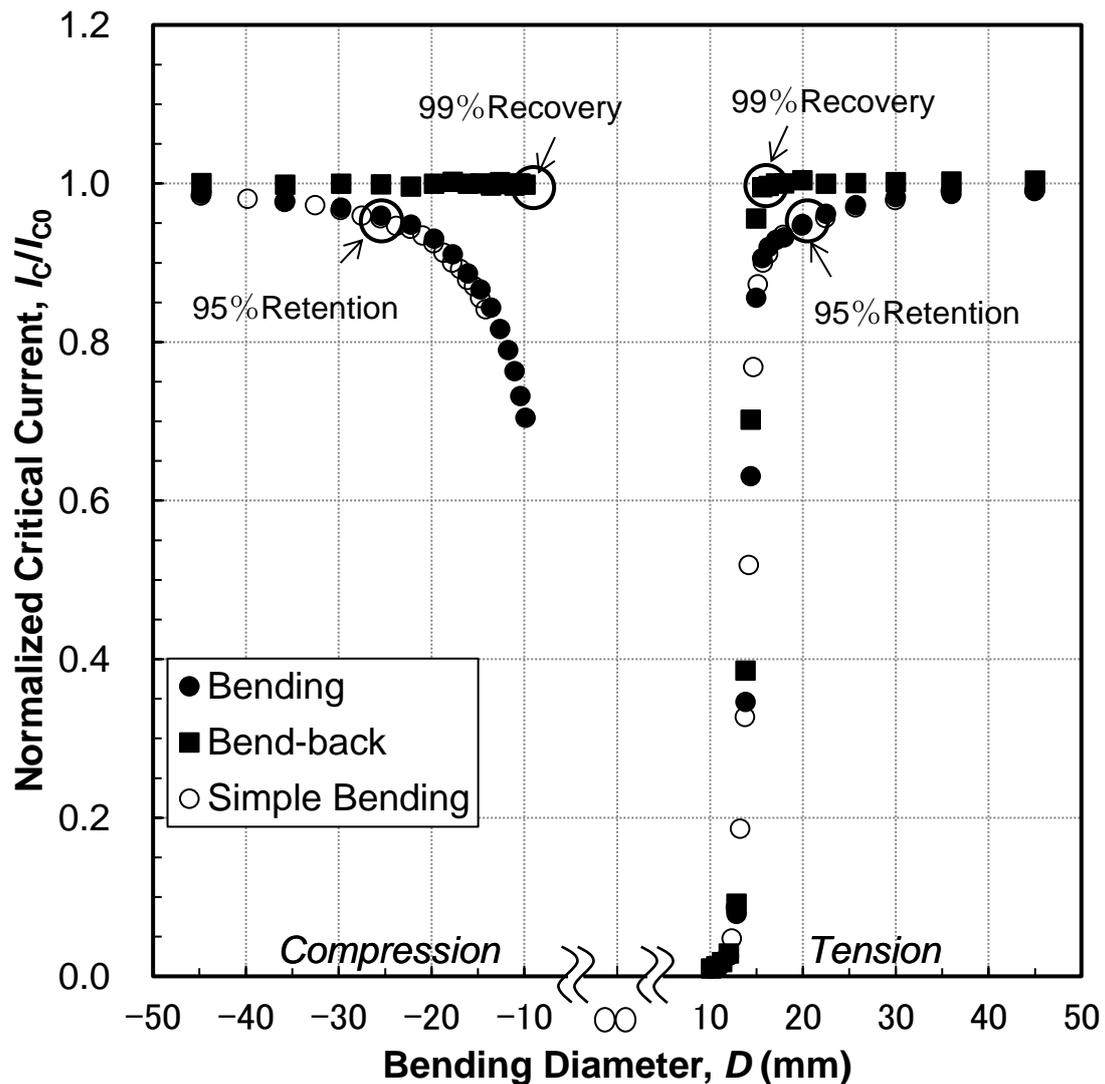


Figure 3-12 C-CVD 線材（ベア線）に加える曲げ径を徐々に小さくしたことによる規格化臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性

横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ

所定の直径で曲げて I_c 評価（Bending）後、直状に戻し I_c 評価した（Bending-back）場合と所定の直径で曲げて I_c 評価（Simple-Bending）後戻さずに小さい径に曲げた場合の比較

Figure 3-13 に C-CVD 線材（銅めっき線）の曲げひずみ依存性を示す。C-CVD 線材（銅めっき線）では、圧縮方向で D_{95} が 26 mm、曲げ 10 mm で約 30%の臨界電流低下が見られたものの直状に戻すと回復し、 D_{99} は 10 mm 以下であった。一方、引張方向では約 14 mm において急激に臨界電流の低下が起こり、 D_{95} は 20 mm、 D_{99} は 15 mm となった。

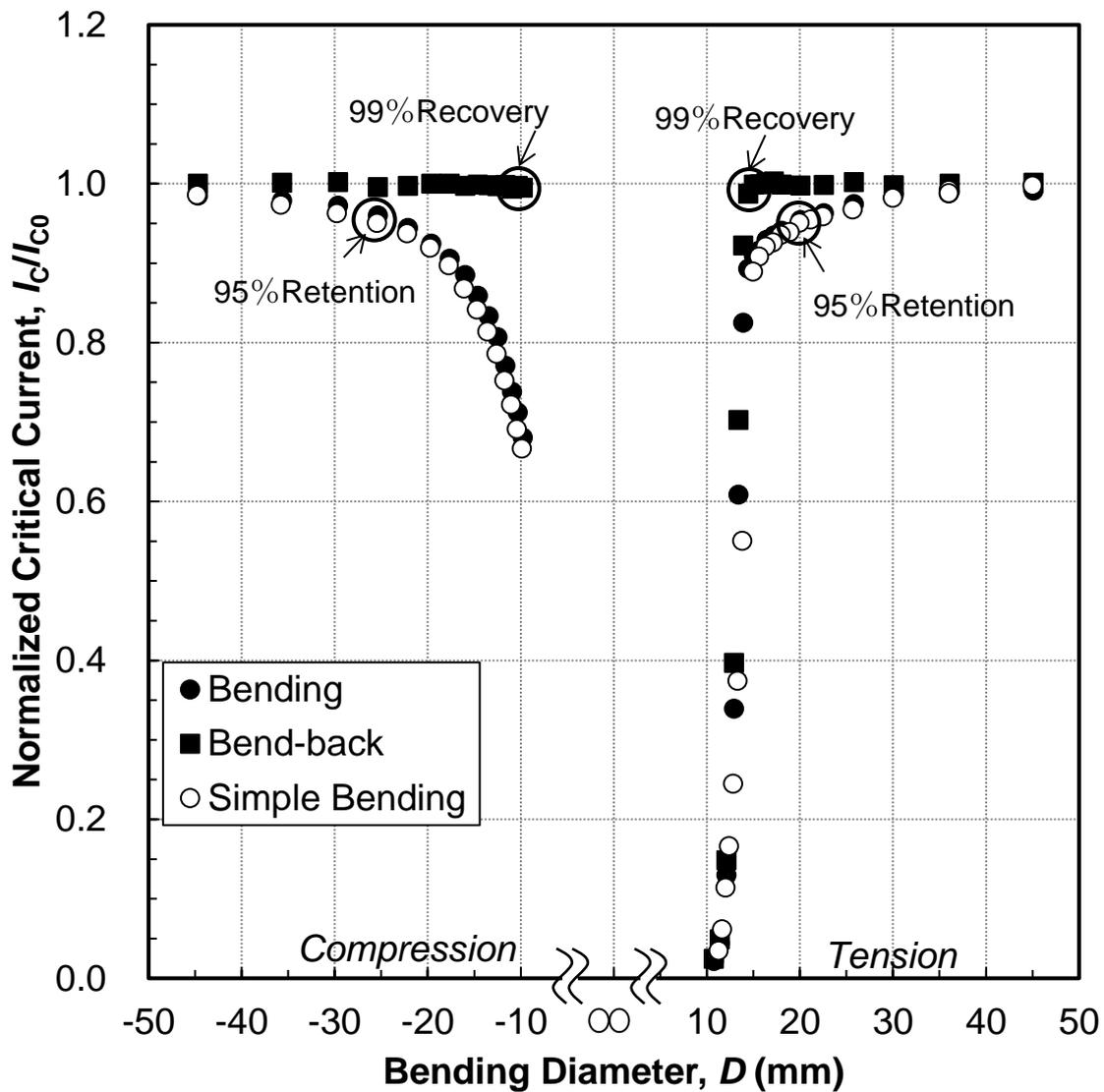


Figure 3-13 C-CVD 線材（銅めっき線）に加える曲げ径を徐々に小さくしたことによる規格化臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性

横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ

所定の直径で曲げて I_c 評価（Bending）後、直状に戻し I_c 評価した（Bending-back）場合と所定の直径で曲げて I_c 評価（Simple-Bending）後戻さずに小さい径に曲げた場合の比較

以上の結果を **Table 3-2** にまとめる。いずれも引張方向の曲げでは 15-20 mm で臨界電流が急激に低下し、 D_{95} と D_{99} がほぼ同一である。圧縮方向の曲げに関しては、臨界電流の低下が 20-60% であるものの、曲げ戻しによって当初臨界電流に復帰している。

これにより、圧縮方向の曲げでは、ある範囲内で可逆なひずみによって臨界電流が低下しており、引張方向の曲げでは 20 mm 程度から不可逆的な組織の破壊が起こっているものと推定される。

銅めっきの有無による差は、K-MOD 及び C-CVD とともにほとんどなく、銅めっきした方が、やや小さい曲げ直径まで臨界電流の低下が起こっていない。銅めっきの厚さは K-MOD で 25 μm 、C-CVD で 50 μm と倍の厚さになっているが、超電導層の強度に変化を及ぼすほどの影響はないと考えられる。

Table 3-2 各線材における 95%維持と 99%回復の曲げ直径

線材	圧縮方向		引張方向	
	D_{95}	D_{99}	D_{95}	D_{99}
F-PLD 線材 (ベア線)	≤ 10	≤ 10	18	19
I-PLD 線材 (銅めっき線)	20	12	20	25
S-PLD 線材 (銅めっき線)	36	13	17	16
K-MOD 線材 (ベア線)	45	10	18	16
K-MOD 線材 (銅めっき線)	45	10	18	13
C-CVD 線材 (ベア線)	28	≤ 10	20	16
C-CVD 線材 (銅めっき線)	26	≤ 10	20	15

4-3 曲げひずみによる整理

ここまで、超電導線材を使用する状況に則して、曲げ直径で整理してきた。ここでは、各線材のひずみ特性を比較するために、超電導層の受けるひずみを計算してみる。Nb-Ti や Nb_3Sn といった金属系超電導線材や一部の BSCCO 超電導線材は超電導フィラメントがツイストされているため、超電導線材を曲げた場合、それぞれの超電導フィラメントがツイストピッチを周期に引張と圧縮を同様に受けることになる。その中でひずみを考慮する時に

は超電導線材の表面に近い部分で最大のひずみと仮定することで大きな差異は生じないため、通常ひずみは(3-1)式で定義される。ここで、 t は線材の厚さ、 R は曲げ半径である。

$$\sigma = \frac{t/2}{R} \quad (3-1)$$

一方、REBCO 超電導線材では、厚さ 100 μm 前後の金属基板の上にミクロン以下の中間層と 1-3 μm 程度の超電導層があり、かつその上に 10-20 μm 程度の銀の保護層や銅の安定化層を設けている。超電導層が線材厚さに比べて非常に薄く、ツイストされたフィラメントのように長さ方向でひずみが異なるということはない。よって、超電導層のひずみは超電導層と曲げの中立面との距離を t' とすると、(3-2)式で表わされる。

$$\sigma = \frac{t'}{R} \quad (3-2)$$

ここでは、(3-1)式で表わされるひずみを公称ひずみ (Nominal Strain)、(3-2)式で表わされるひずみを超電導層ひずみ (SC Strain) と呼ぶものとする。

I-PLD 線材のベア線の規格化臨界電流のひずみ依存性を **Figure 3-14(上)**に、I-PLD 線材の銅めっき線の曲げひずみ依存性を **Figure 3-14(下)**に示す。公称ひずみで整理した場合、ベア線と銅めっき線で大きく異なるが、超電導層ひずみで整理した曲げひずみ依存性を比較すると、例えば 95%の臨界電流維持ひずみ (以下、 ε_{95} と呼ぶ) と 80%の臨界電流維持ひずみ (以下、 ε_{80} と呼ぶ) は圧縮方向でそれぞれ約 0.4%と約 0.8%、引張方向で約 0.4% (急激に低下するので ε_{95} と ε_{80} は同値) とほぼ一致する。

同様に、K-MOD 線材のベア線、銅めっき線の曲げひずみ依存性を **Figure 3-15** に、S-PLD 線材のベア線、銅めっき線の曲げひずみ依存性を **Figure 3-16** に、C-CVD 線材のベア線、銅めっき線の曲げひずみ依存性を **Figure 3-17** に示す。K-MOD 線材では、圧縮方向曲げで ε_{95} と ε_{80} がベア線、銅めっき線ともにそれぞれ約 0.15%と約 0.3%、引張方向曲げで ε_{95} と ε_{80} はともに約 0.5%。C-CVD 線材では、圧縮方向曲げで ε_{95} と ε_{80} がそれぞれ約 0.3%と約 0.6%、引張方向曲げで ε_{95} と ε_{80} がそれぞれ約 0.4%と約 0.5%。S-PLD 線材では圧縮方向曲げで ε_{95} がベア線約 0.25%、銅めっき線 0.3%、 ε_{80} がベア線約 0.6%、銅めっき線 0.7%。引張方向曲げでベア線約 0.5%、銅めっき線 0.65%、 ε_{80} がベア線約 0.75%、銅めっき線 0.72%となった。S-PLD 線材除き、超電導層ひずみで比較すると、ベア線と銅めっき線ではほぼ一致する。なお、S-PLD 線材は規格化臨界電流のピークをとるひずみがベア線に比べて銅めっき線が引張側曲げに平行移動している可能性もある。

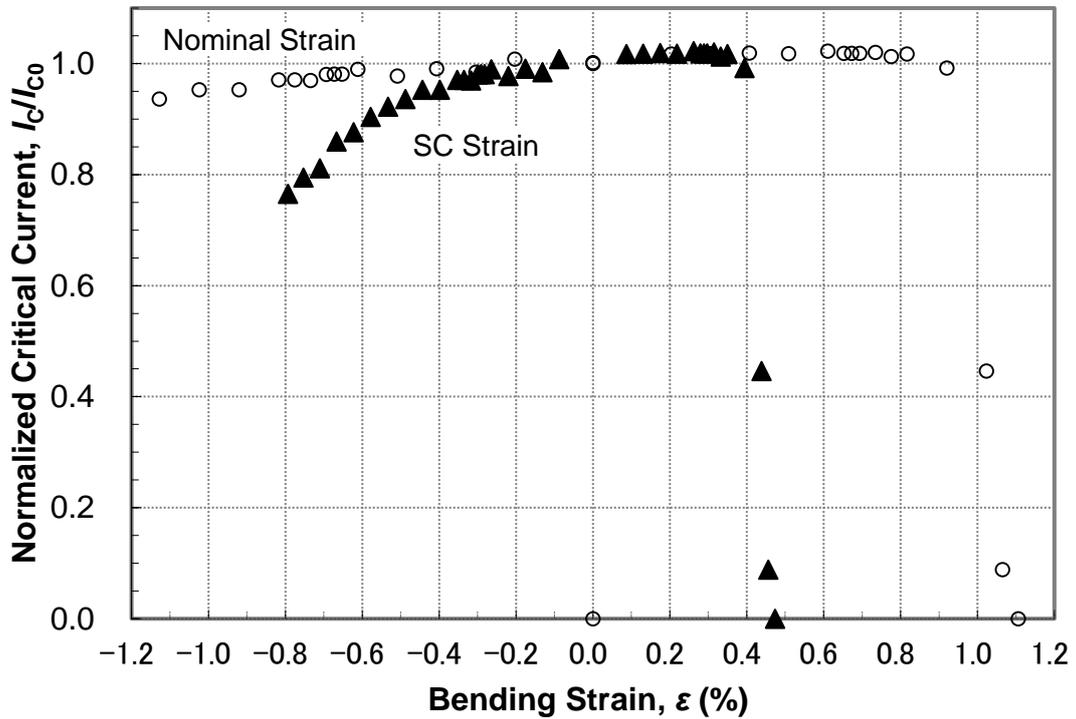
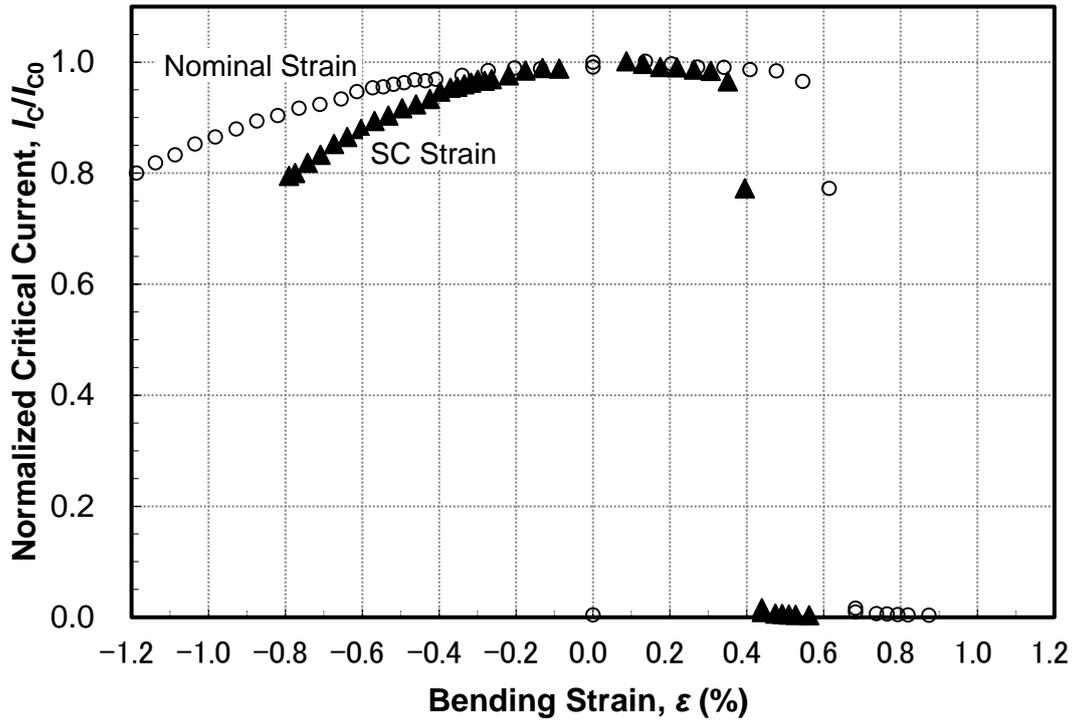


Figure 3-14 I-PLD 線材の規格化臨界電流（77K，自己磁場）の公称ひずみ及び超電導層ひずみ依存性（ベア線（上）と銅めっき線（下））

横軸は曲げひずみで、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ

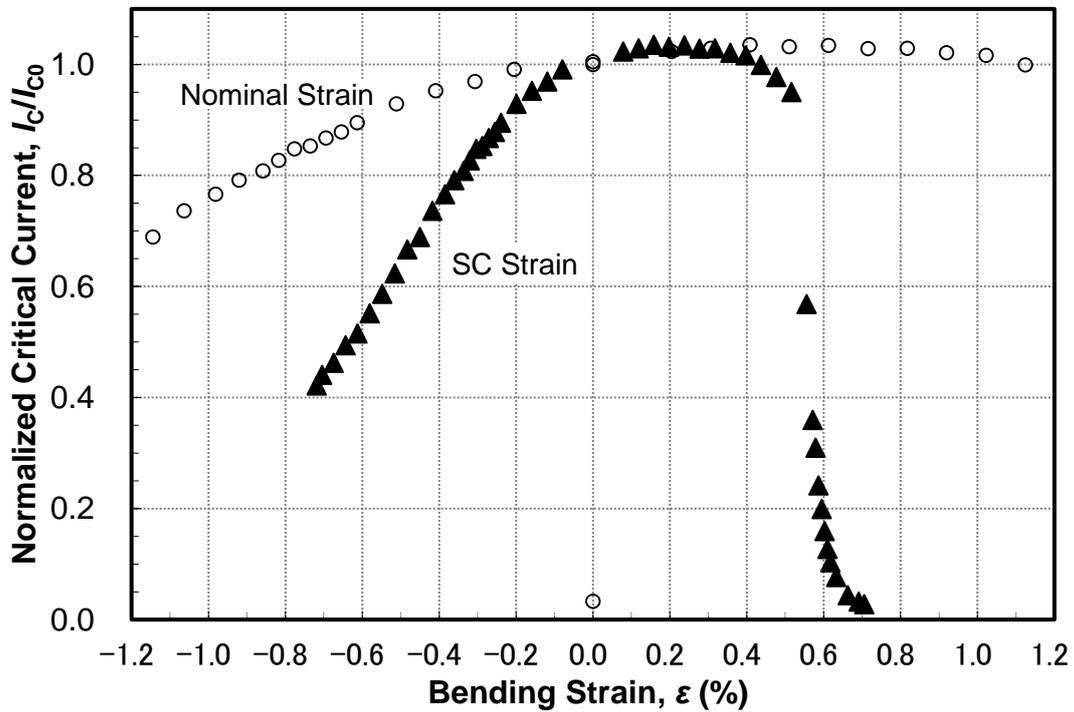
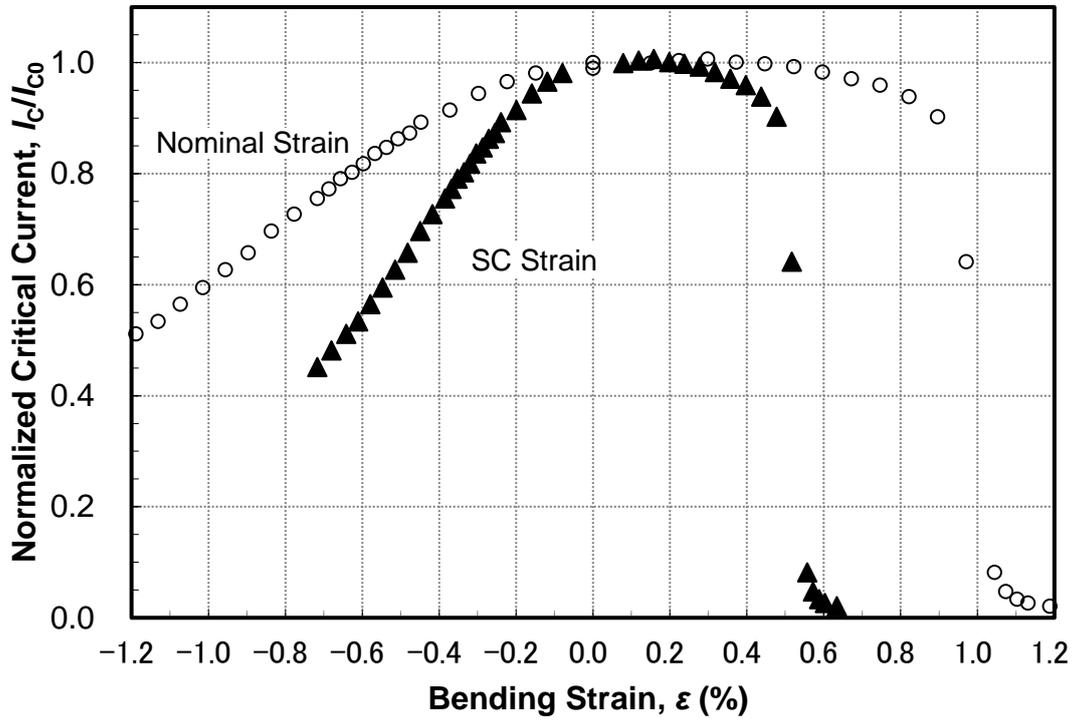


Figure 3-15 K-MOD 線材の規格化臨界電流（77K、自己磁場）の公称ひずみ及び超電導層ひずみ依存性（ベア線（上）と銅めっき線（下））

横軸は曲げひずみで、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ

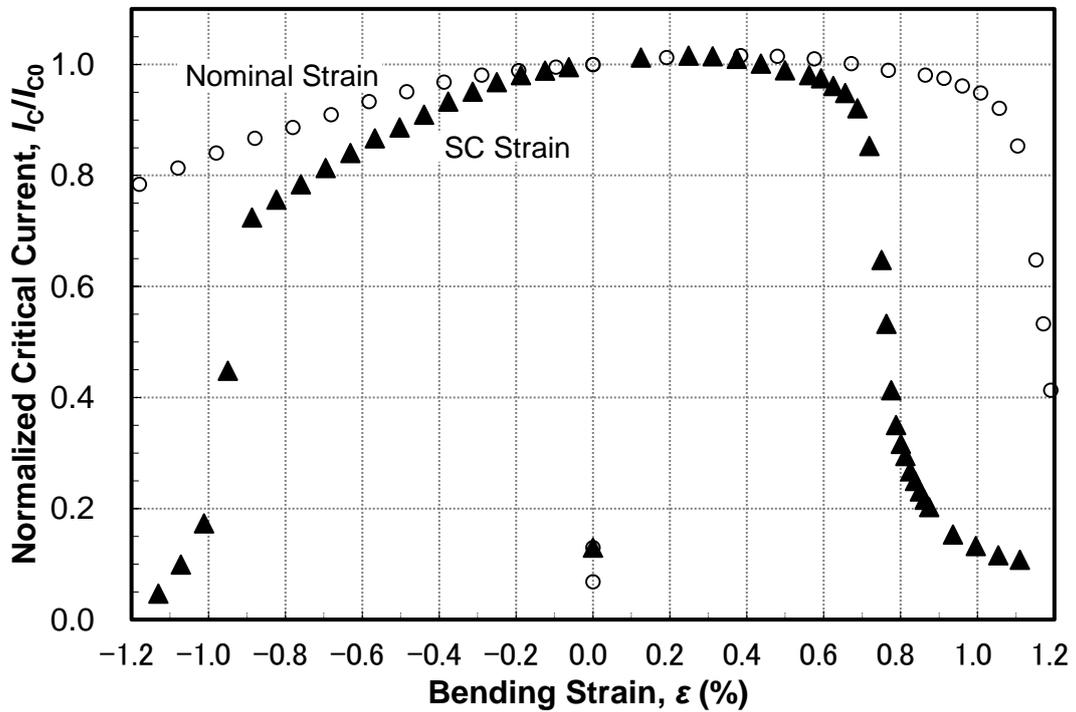
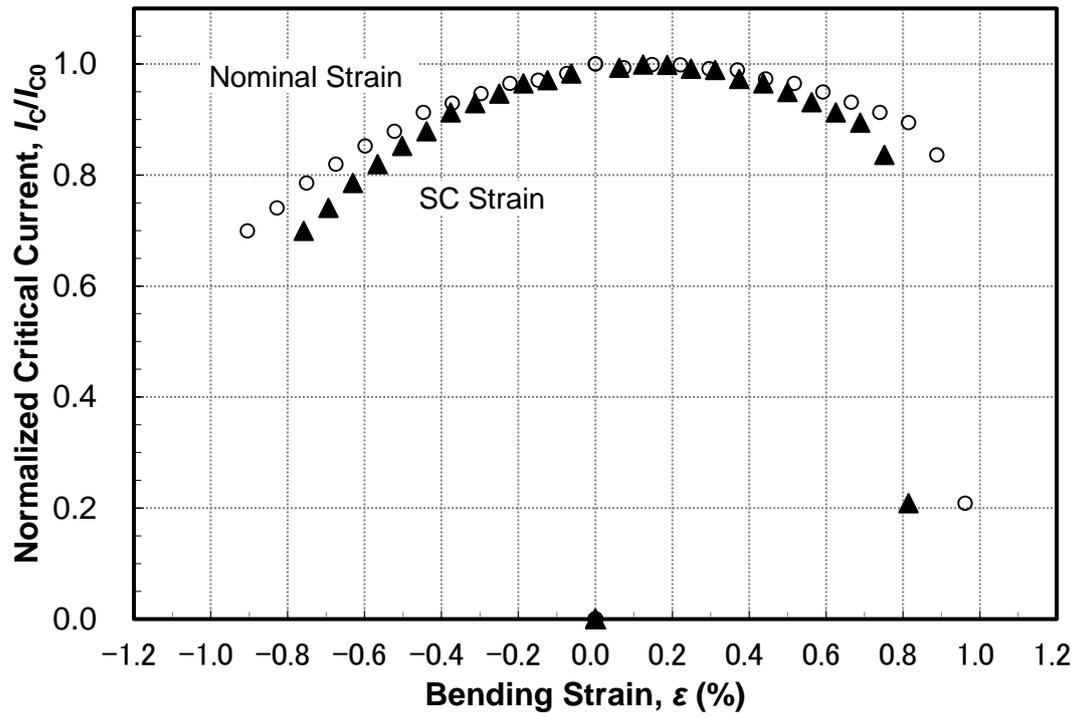


Figure 3-16 S-PLD 線材の規格化臨界電流（77K、自己磁場）の公称ひずみ及び超電導層ひずみ依存性（ベア線（上）と銅めっき線（下））

横軸は曲げひずみで、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ

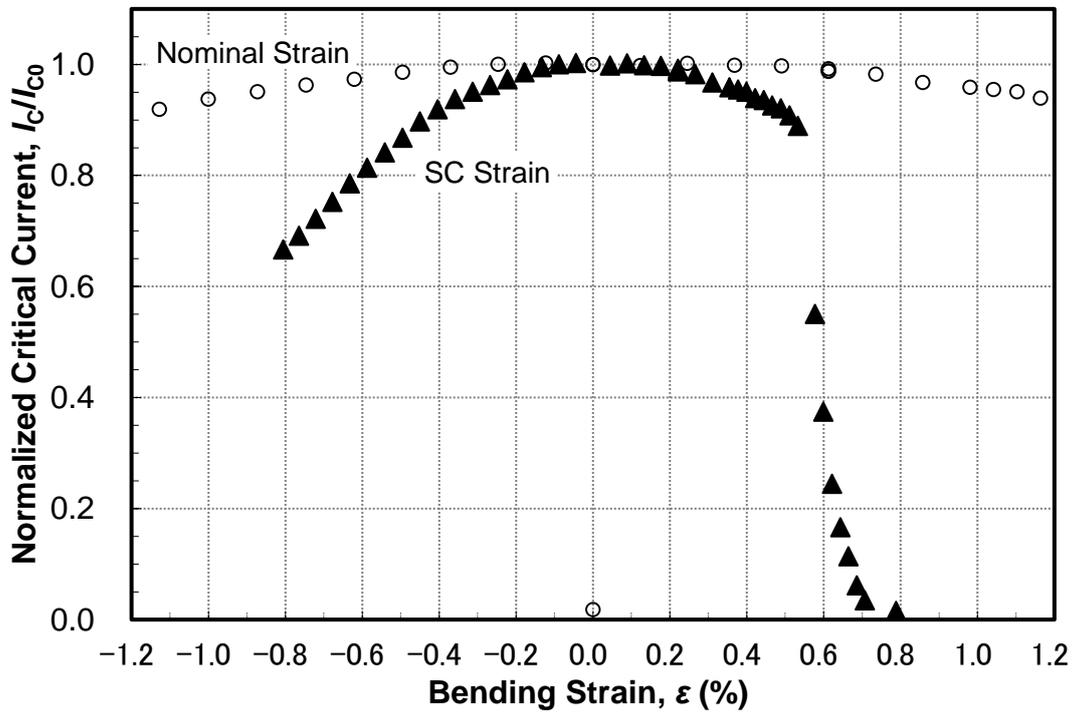
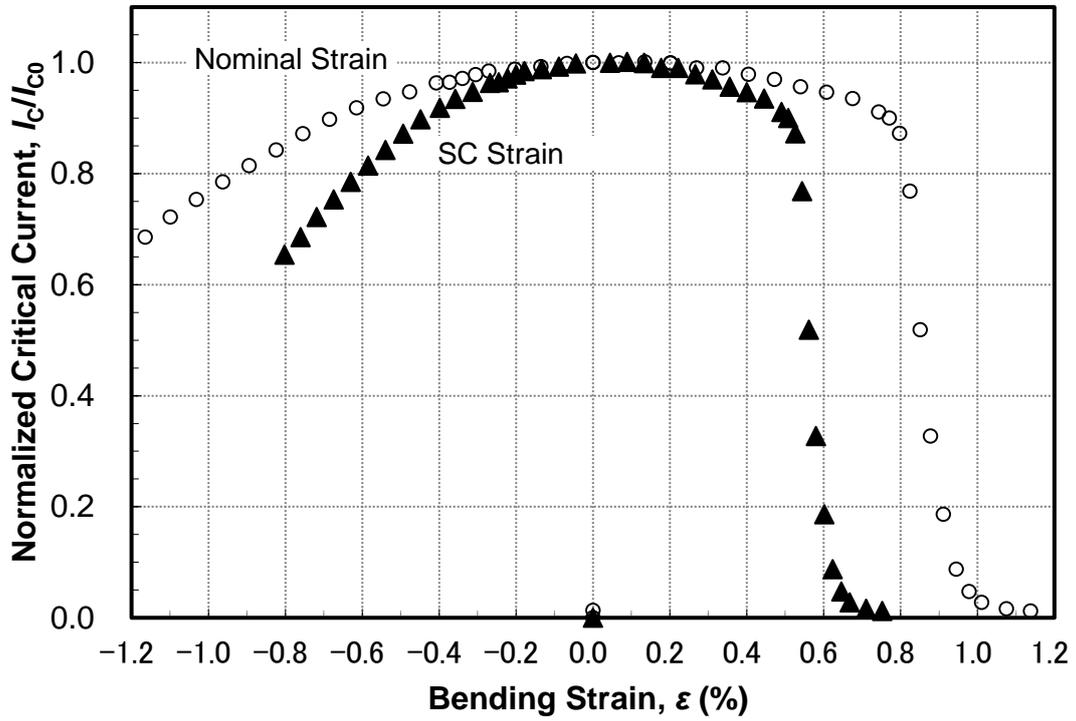


Figure 3-17 C-CVD 線材の規格化臨界電流（77K, 自己磁場）の公称ひずみ及び超電導層ひずみ依存性（ベア線（上）と銅めっき線（下））

横軸は曲げひずみで、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ

Laan らは SuperPower 社、AMSC 社及び Bruker 社の REBCO 超電導線材のひずみ特性を報告した^{12),13)}。SuperPower 製 IBAD-MOCVD 線材 (SP-MOCVD) のベア線、銅めっき線、AMSC 製 RABiTS-MOD 線材 (A-MOD) のベア線、銅被覆線、真鍮被覆線、銅めっき Bruker 製 ABD-HRPLD 線材 (Bruker) の評価結果と本結果の ϵ_{95} (臨界電流が 95% まで低下するひずみ)、 ϵ_{99} (99%回復するひずみ) を Figure 3-18 にまとめる。

圧縮方向の曲げで臨界電流が低下しにくい線材、引張方向の曲げで臨界電流が低下しにくい線材そして圧縮方向曲げと引張方向曲げで臨界電流の低下がほぼ同一の線材と様々で、これは残留ひずみと熱収縮差によって差異が生じていると考えられるが、同一開発機関のベア線と銅めっきや銅被覆線材では傾向は同じである。

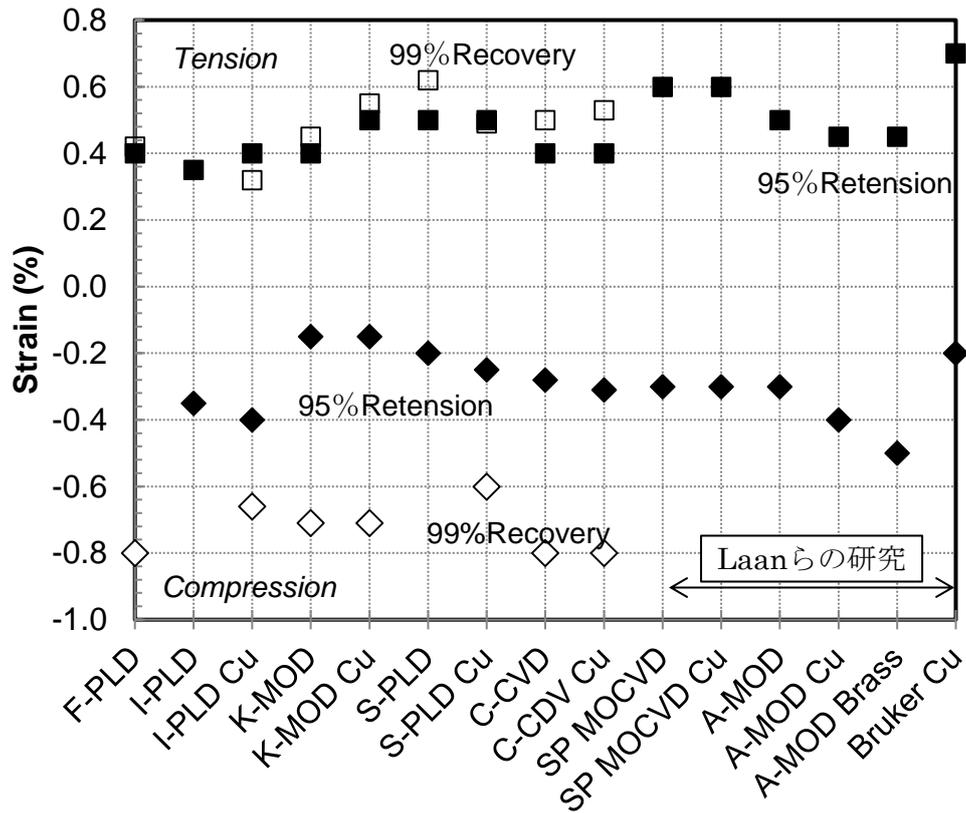


Figure 3-18 曲げた状態で臨界電流が 95%維持するひずみ及び直線状に戻して臨界電流が 99%まで回復するひずみの線材間比較

縦軸は超電導層の実質ひずみで、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向

- ◆ : 圧縮方向 95%維持ひずみ ◇ : 圧縮方向 99%回復ひずみ
- : 引張方向 95%維持ひずみ □ : 引張方向 99%回復ひずみ

F-PLD 及び I-PLD のようにほぼ同様の製法にもかかわらず開発機関によって曲げ特性が異なっている。F-PLD 線材では REBCO の [110] // テープ長手方向であり、I-PLD は REBCO の [100] // テープ長手方向であることが知られていることから、結晶方位によるものと推定される。また、**Figure 3-10** や **Figure 3-11** に示されるように、K-MOD で圧縮方向に曲げた場合に非常に大きな臨界電流低下（約 50%）が見られ、また、曲げ戻しで元の臨界電流までの回復が見られた。これは MOD プロセスによって形成された超電導層に含まれる空隙が緩衝になっているためではないかと推定される。

本研究では 99% まで臨界電流が回復するひずみを評価している。95% の臨界電流が維持されるひずみでみると、引張方向の 95% の臨界電流維持ひずみと圧縮方向の 95% の臨界電流維持ひずみの間の差は 0.5% (K-MOD) ~ 1.2% (F-PLD) と大きく異なっているが、99% 臨界電流が回復するひずみでみると、引張方向と圧縮方向の差が 1% (I-PLD Cu) ~ 1.3% (C-CVD Cu) と小さくなっている。

圧縮方向もしくは引張方向の曲げに対する強さが異なるように見えるが、加工、熱処理による基板と超電導層の熱収縮率差等による残留ひずみが異なることで説明でき、同じ REBCO 超電導層の本質的な破壊の生じる圧縮方向曲げひずみ（負）と引張方向曲げひずみ（正）のひずみの差、すなわち可逆なひずみの範囲は残留ひずみの影響でシフトするものの、いずれの線材も 1% 強であることがわかった。

5. 実用線材の曲げひずみ依存性

電力機器応用において、特に SMES や変圧器では高磁場中に線材がさらされる。また、応用機器の交流損失低減のために線材の超電導層を分割するなどの構造が研究されている。それらの条件下における曲げひずみ依存性についても、Goldacker 式曲げ試験装置によって評価を行った。

5-1 磁場中における曲げひずみ依存性

300 φ の常温空間ボアをもつ冷凍機冷却超電導マグネット中に Goldacker 式曲げ試験装置を装着、液体窒素中で F-PLD 線材（ベア線）の曲げひずみ依存性を測定した。磁場は 0.01T から 3T まで変えて圧縮方向に徐々に曲げを加えて臨界電流を測定した後、一旦直状に戻し、次に引張方向に徐々に曲げを加えて臨界電流を測定した。最初の臨界電流で規格化した臨界電流の曲げ直径依存性を **Figure 3-19** に示す。

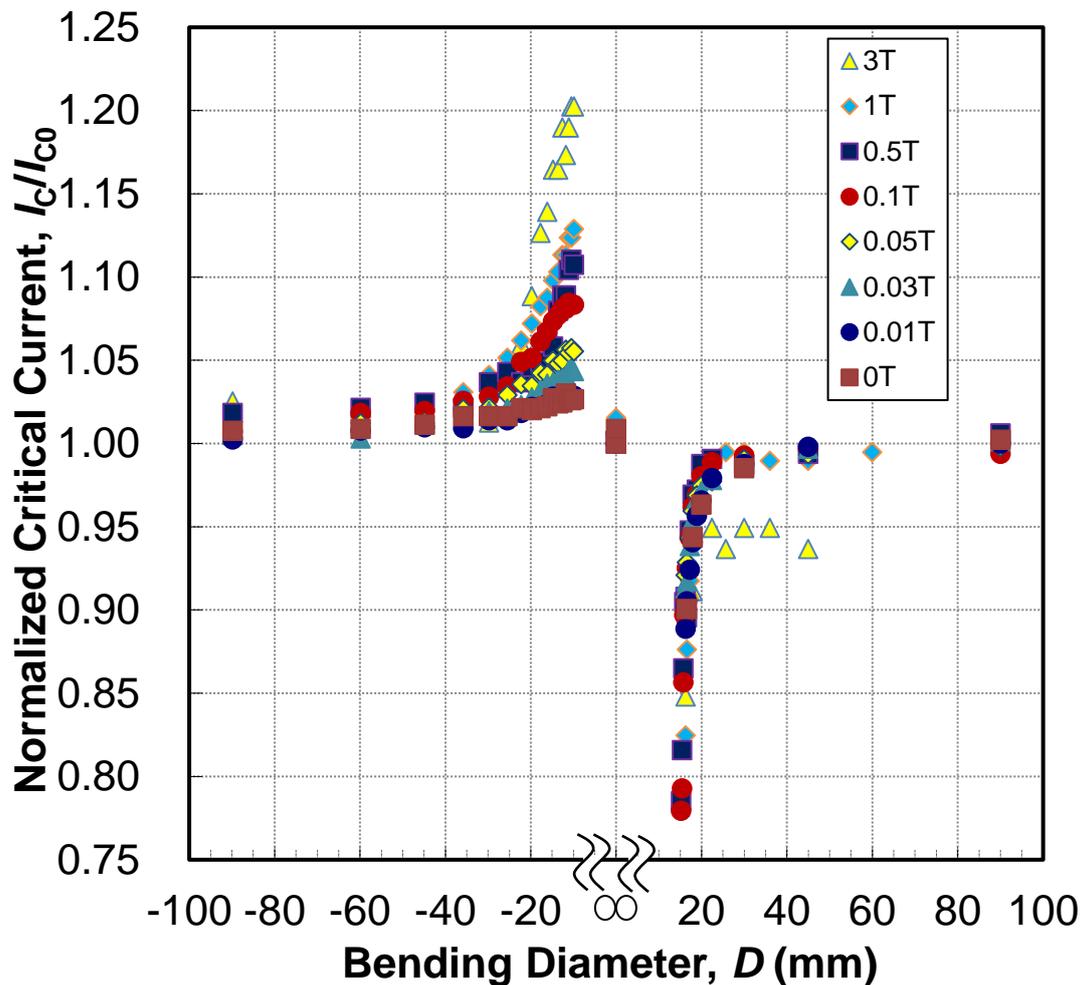


Figure 3-19 F-PLD 線材（ベア線）の外部磁場を変えた場合の規格化臨界電流（77K）の曲げ直径依存性

横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ

圧縮方向の曲げにおいては、曲げ直径を小さくすると臨界電流が上昇し、それは、磁場が高くなるほど顕著であった。一方、引張方向では、磁場による差異は見られず、前項までの自己磁場下での曲げ直径依存性とほぼ同様の、約 20 mm において急激に臨界電流が減少するという結果が得られた。

この結果と「4-2 曲げ戻しによる不可逆ひずみ」の項で観測された結果の関係を考えてみる。圧縮方向では、ある径で曲げた状態での臨界電流が初期状態での臨界電流と比較して低下（F-PLD は上昇）していても、直状に戻すことにより、初期状態とほぼ同じ臨界電流に戻る。これは、不可逆的な超電導体の劣化が起こっていないことを示している。一方、引張

方向では直径約 20 mm 前後から直状に戻しても臨界電流が初期状態までは戻らない。これは不可逆的な超電導体の劣化が起きているということであった。

磁場中の引張方向曲げの臨界電流は磁場に依存せず、同様の減少傾向となったのはこの不可逆的な超電導体の劣化が原因で臨界電流の低下が生じていることに符合する。一方、磁場中の圧縮方向曲げの臨界電流が磁場に依存していることは、超電導体の単純な破壊ではなく、可逆的な物性的変化を起しているために磁場依存性が変わったのだと考えられる。

Figure 3-20 に F-PLD 線材の 3 T における臨界電流の印加磁場角度依存性を示す。横軸は線材の面に対して垂直に磁場をかけた場合の角度を 0 度、線材の面に対して平行に磁場をかけた場合の角度を 90 度としている。±30 度弱の範囲では、角度依存性はほぼないが、それを超えると急激に臨界電流は向上し、90 度では 0 度に対してほぼ 3 倍の臨界電流を有する。

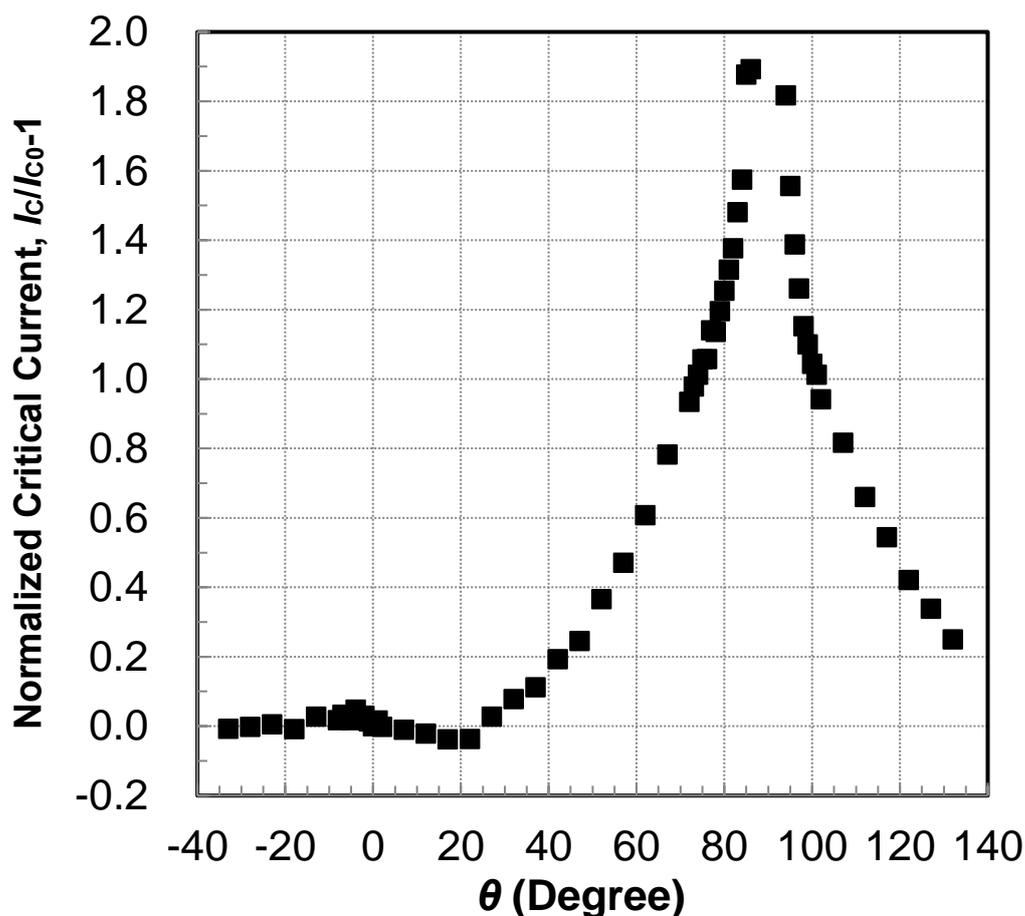


Figure 3-20 F-PLD 線材の規格化臨界電流 (77 K, 3 T) の磁場角度依存性

Goldacker 式曲げ試験装置にて線材を曲げると、線材に加わる磁場の角度は、サンプルの長さ方向における中央部分は常に 0 度（垂直）であるが、サンプルの端部に近づくにつれて磁場に対して角度を有することになる（Figure 3-21）。臨界電流を測定する電圧タップ間距離は 10 mm にしているので、サンプルの中心から±5 mm の部分の磁場角度 γ を考慮する。最も離れた±5 mm の部分の角度とマグネットのボア内における z 位置（軸方向）、r 位置（半径方向）及びその位置の磁場中心からの距離を計算した結果を Table 3-3 に示す。

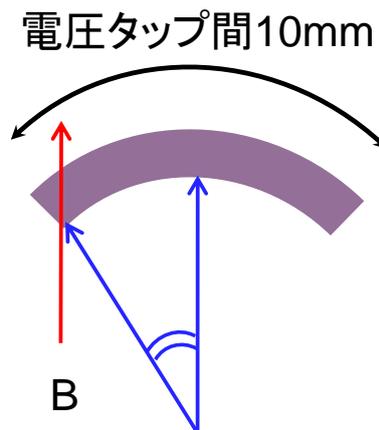


Figure 3-21 サンプルに加わる磁場の角度 γ

Table 3-3 サンプル電圧タップ位置の磁場角度及び z 位置、r 位置

曲げ直径	磁場角度 γ	z 位置(mm)	r 位置(mm)	磁場中心からの距離(mm)
100	5.729578	-0.24979	4.991671	4.997917
80	7.161972	-0.31209	4.986989	4.996745
60	9.549297	-0.4157	4.976884	4.994215
50	11.45916	-0.49834	4.966733	4.991671
40	14.32394	-0.62175	4.948079	4.986989
30	19.09859	-0.82565	4.90792	4.976884
25	22.91831	-0.98674	4.867729	4.966733
20	28.64789	-1.22417	4.794255	4.948078
19	30.15567	-1.28569	4.772336	4.942488
18	31.83099	-1.35353	4.746738	4.935946
16	35.80986	-1.5123	4.680778	4.919018
14	40.92556	-1.71107	4.585545	4.894383
12	47.74648	-1.96553	4.441061	4.856576
10	57.29578	-2.29849	4.207355	4.794256

z 位置、r 位置から、サンプルの電圧タップ間は曲げを加えても磁場中心からの距離は 5 mm 未満であり、超電導マグネットの均一磁場空間 (10 mm 球) 中に位置していることがわかり、磁場の誤差は無視できる。

曲げ直径 20 mm の場合、磁場角度 γ は 28.6 度となり、Figure 3-20 からこの付近が臨界電流の磁場角度依存性がほぼ均一とみなせる限界と考えられる。しかし、20 mm までの曲げでも磁場による臨界電流の変化に差がみられる。そこで、3T における臨界電流の磁場角度依存性をサンプルの電圧タップ間を 1 mm ずつに分割して、それぞれの部分が受ける磁場の角度から得られる臨界電流の変化しかないと仮定して計算した曲げにおける臨界電流の曲げ直径依存性を Figure 3-22 の◇に示す。また、実際の測定値を Figure 3-22 の■に示す。ここで 20 mm に曲げた場合で約 10% の差異がみられる。このことから、圧縮方向の曲げによる臨界電流の変化は磁場に依存するような何らかの物性の可逆的変化が存在していることを示唆している。

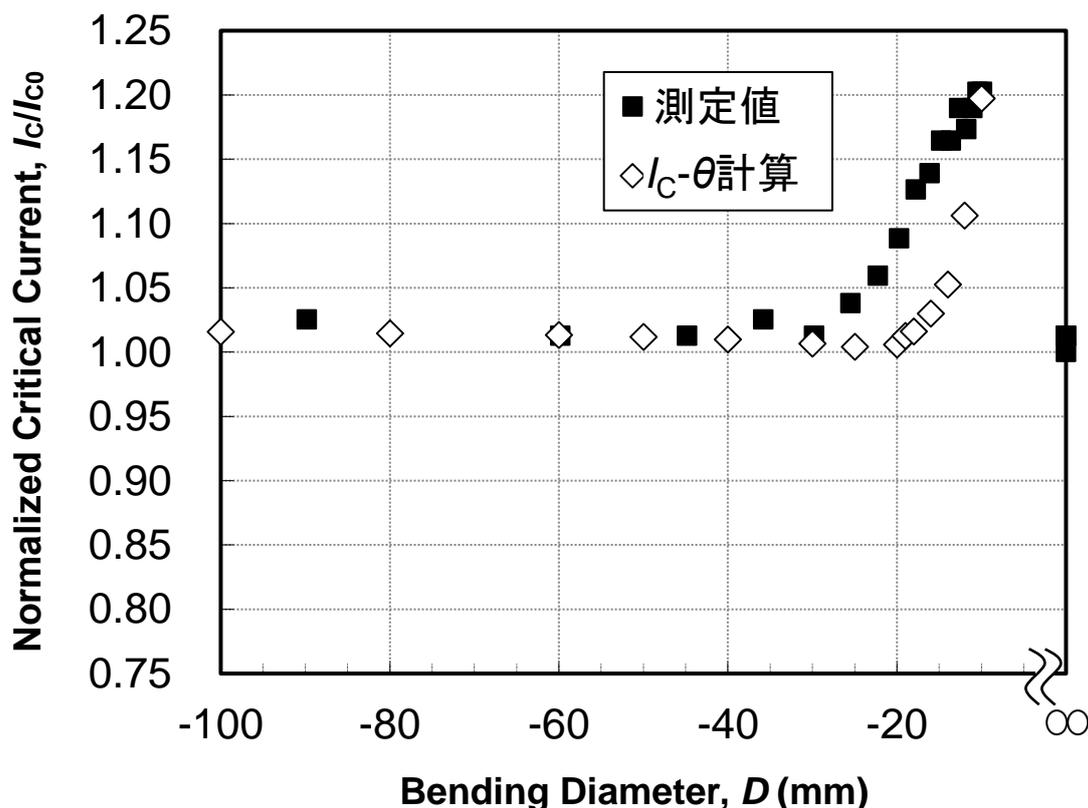


Figure 3-22 磁場を加えた場合の規格化臨界電流 (77K) の曲げ直径依存性

◇ : 磁場角度からの臨界電流変化しかないと仮定して計算した値 ■ : 測定値

5-2 スクライブ線材及び補修線材の曲げひずみ依存性

REBCO 超電導線材の交流損失低減を目指して、レーザーによって超電導層を分割するスクライブ技術が開発されている。

Figure 3-23 にレーザー・スクライブ技術の概略を示す。超電導線材の超電導層側にマスクングを行い、レーザー・ビームにより、マスクの一部を削る。その線材を過酸化水素水とアンモニアの混合液で表面の保護層である銀と、そして硝酸セリウムアンモニウムで超電導層と、2段階でバッファ層までエッチングする。これにより、超電導層は線材長手方向にスリットが入って電氣的に絶縁された複数本のフィラメント状態になる¹⁴⁾。

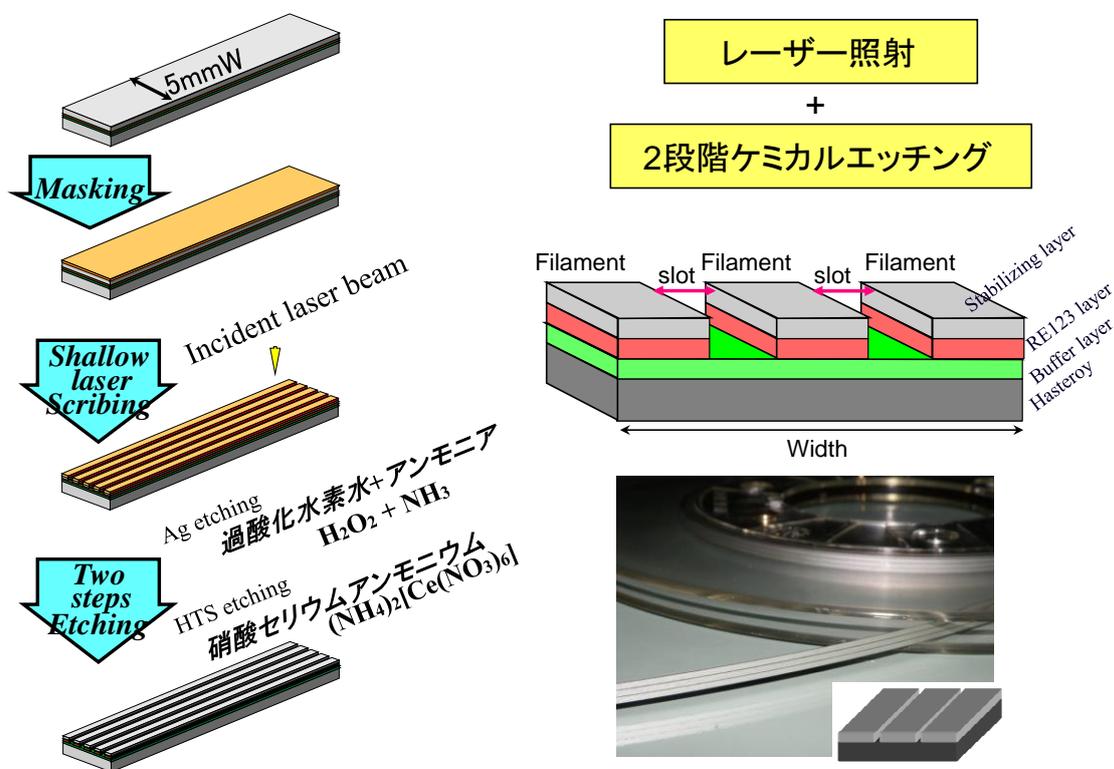


Figure 3-23 レーザー・スクライブ技術

また、超電導応用機器を製作するにあたっては、長尺の超電導線材が必要になるが、十分に長い線材を高歩留で得ることは難しい。そこで、欠陥の入った部分の超電導層側に、超電導層側同士が向かい合うように短い超電導線材を接続することによって、欠陥部分の性能低下を小さくする補修技術が開発されてきた。接続には一般にはんだが使われるが、その場合、はんだは超電導ではないので、抵抗が残る。それを低減するために、銀の保護層同士を拡散接合する技術が開発された (**Figure 3-24**)¹⁵⁾。

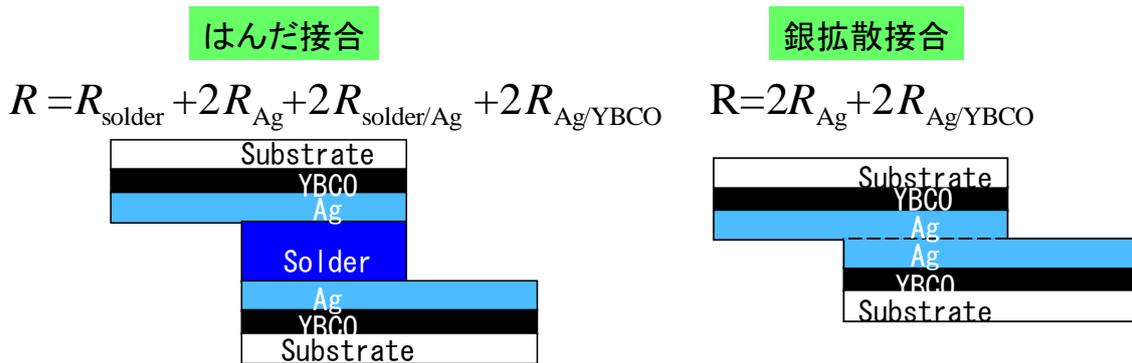


Figure 3-24 補修（接合）技術

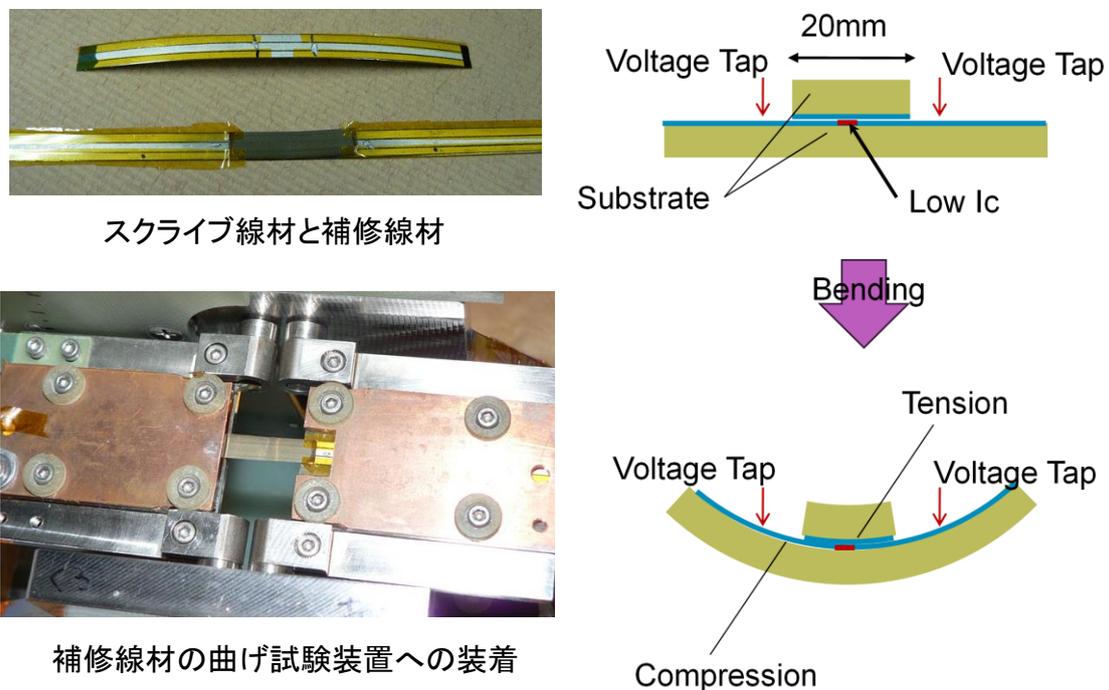


Figure 3-25 補修線材の曲げ評価方法

このレーザー・スクライブされた線材及び、それを補修（接合）された線材は、超電導変圧器等の巻線に使用されるために、曲げが加わる。その曲げによる影響を Goldacker 式曲げ試験装置によって評価した。

Figure 3-25 にスクライブ線材及びスクライブ線材を補修した線材の曲げ試験方法を示す。

コイルの巻線では、超電導層が引張よりも圧縮に強いため、超電導層が内側になるように曲げられる。本試験装置では 3 本にスクライブされた線材のフィラメントそれぞれ独立に電流を流すことはできないので、中央フィラメントのみを評価した。両端側の 2 本のフィ

ラメントにはポリイミド粘着テープを貼り、試験装置の電極部分が接触しないようにした。補修用に貼りつけた線材の長さは 20 mm とし、それを跨いで電圧タップを付けた。曲げは、本線の超電導層側が圧縮になるような方向に曲げを行った。Figure 3-26 に通常（スクライブしていない）の線材、スクライブ線材及びスクライブ線材を補修した線材の曲げ直径と臨界電流の関係を示す。

スクライブ線材（■）は圧縮曲げに対して、曲げ直径 30 mm 以下で若干低下しているが、95%以上は保持している。一方、補修した線材（▲）については、100 mm 程度から徐々に低下している。補修のために貼りつけた線材は超電導層側を合わせたため、本線側が圧縮方向に曲げられると、引張方向に曲げられることになる。通常線材の引張における臨界電流の低下より、低下が大きい。しかしながら、コイルの巻線径は 500 mm 程度であるため、スクライブ及び補修を施した線材は、電力応用機器のような大型機器の曲げ径では問題がないことが確認された。

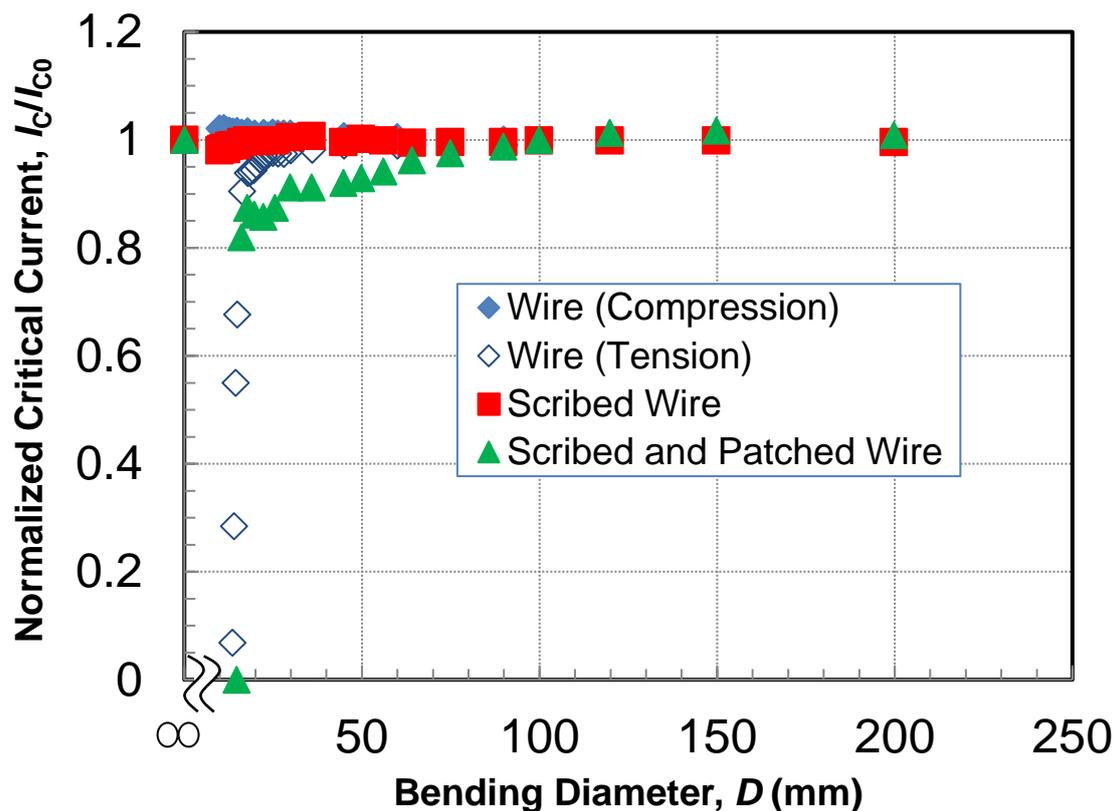


Figure 3-26 元の線材、スクライブ線材及び補修線材の規格化臨界電流（77K, 自己磁場）の曲げ直径依存性

◆ : 圧縮方向 ◇ : 引張方向 ■ : スクライブ線材 ▲ : スクライブ線を補修した線材

5-3 超電導線材幅による曲げひずみ依存性の差異

REBCO 超電導線材は、線材幅と超電導層幅が同一である。そのため、前述のスクライブ線材だけでなく、線材の長さ方向にスリットすることが物理的に可能である。実用化を考えると、高価なプロセスは大量に生産できる方が有利である。それゆえ、線材の基板の幅を大きくして中間層、超電導層の形成を行い、それを最終段階で所望の幅にスリットすることが行われる。それには、機械的に精密な刃やレーザー等の方法が考えられるが、今回は 10 mm 幅で製作した線材を 5 mm、3 mm、2 mm 幅にレーザーでスリットを行った。

それぞれの線材の規格化臨界電流の曲げ直径依存性を **Figure 3-27** に示す。圧縮方向、引張方向ともに、2 mm から 10 mm の幅による差異はほとんど見られない。これより、レーザーによるスリットでは、線材の曲げひずみ依存性の変化は起こらず、超電導電力ケーブル等で検討されている 2 mm 幅にスリットした線材の使用に問題ないことが確認された。

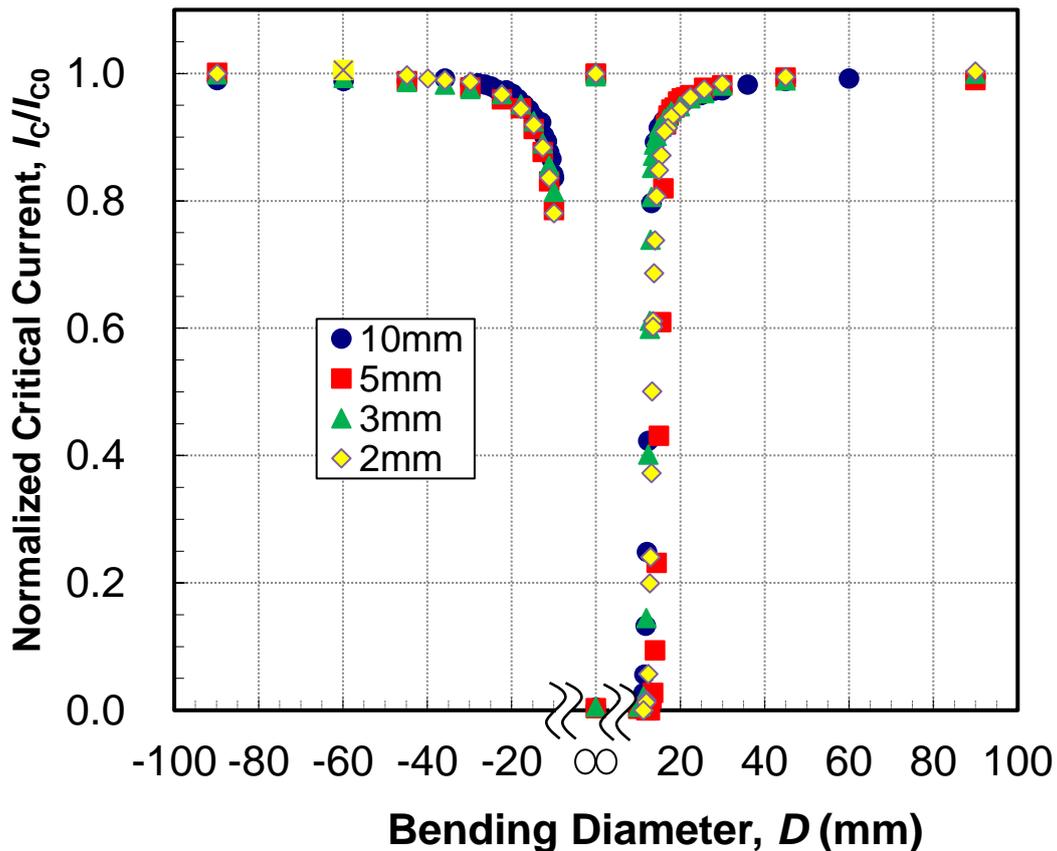


Figure 3-27 線材幅を変えた場合の臨界電流 (77, K 自己磁場) の曲げ直径依存性
横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ
縦軸は曲げを加える前の臨界電流で規格化した規格化臨界電流

5-4 基板厚さによる曲げひずみ依存性の差異

REBCO 超電導線材は、基板に厚さ 100 μm 程度の高強度金属を用い、それより薄い数 μm の超電導層を形成させているため、ほぼ金属基板に近い強度を持つことがひとつの特徴である。しかしながら、一方で、超電導層に対して金属基板が大きな断面積を有するために、電流密度という観点からは損をしていることになる。そこで、所定の応用に対して必要な強度を維持しつつも、電流密度を向上させるために、基板の薄板化の研究も進められている。ここでは、その開発で製作された基板厚さ 70 μm , 80 μm の線材を通常の 100 μm と比較して曲げひずみ依存性を測定した。規格化電流の曲げ直径依存性を **Figure 3-28** に示す。基板の厚さが薄くなるに従って、同じ曲げ直径でも臨界電流の低下は小さい。これは、基板厚さが厚くなるほど曲げ中心からの超電導層の距離が離れ、超電導層ひずみが大きくなるためである。

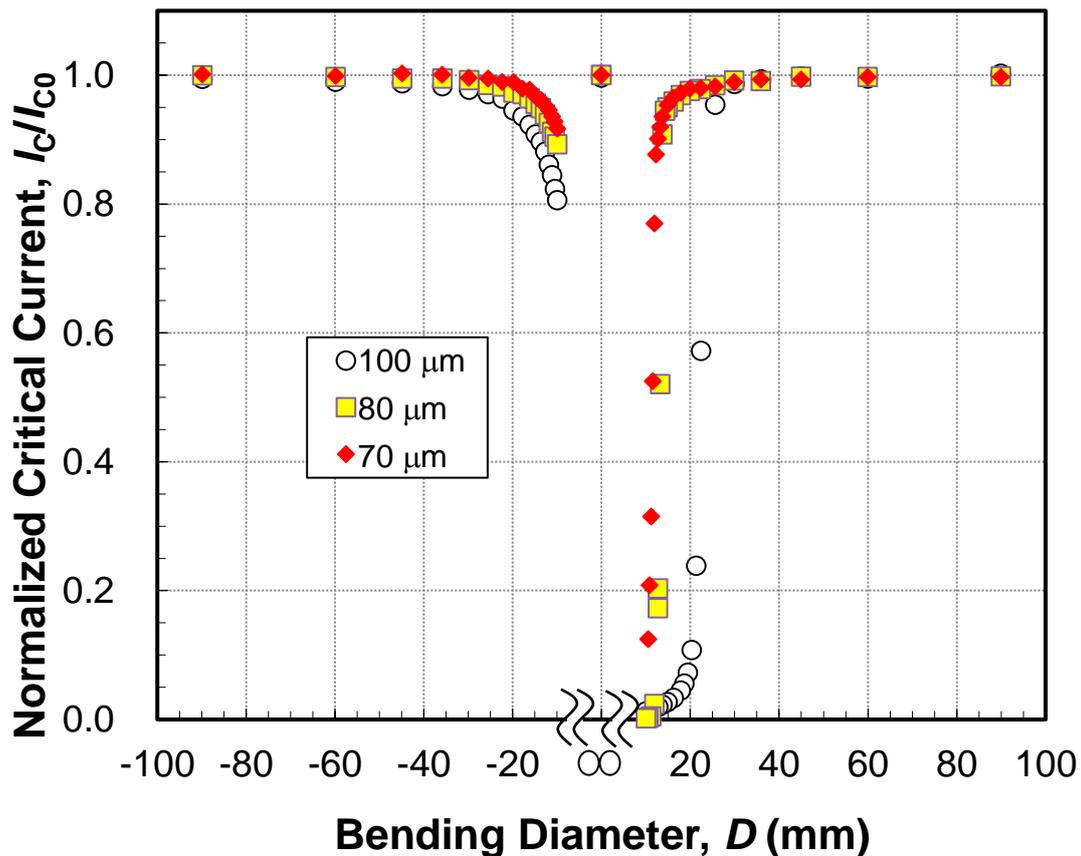


Figure 3-28 基板厚さを変えた場合の臨界電流（77K，自己磁場）の曲げ直径依存性
横軸は曲げ直径で、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向の曲げ
縦軸は曲げを加える前の臨界電流で規格化した規格化臨界電流

その仮説を確認するために、規格化臨界電流の超電導層ひずみ依存性を **Figure 3-29** に示す。引張方向の曲げで $100\ \mu\text{m}$ の傾向が少し離れているが、開発時期に依存するものと推定され、ほぼ同等のひずみ特性を有していることが判明した。このように、基板の薄膜化は、ひずみ特性への影響は少ないことがわかった。

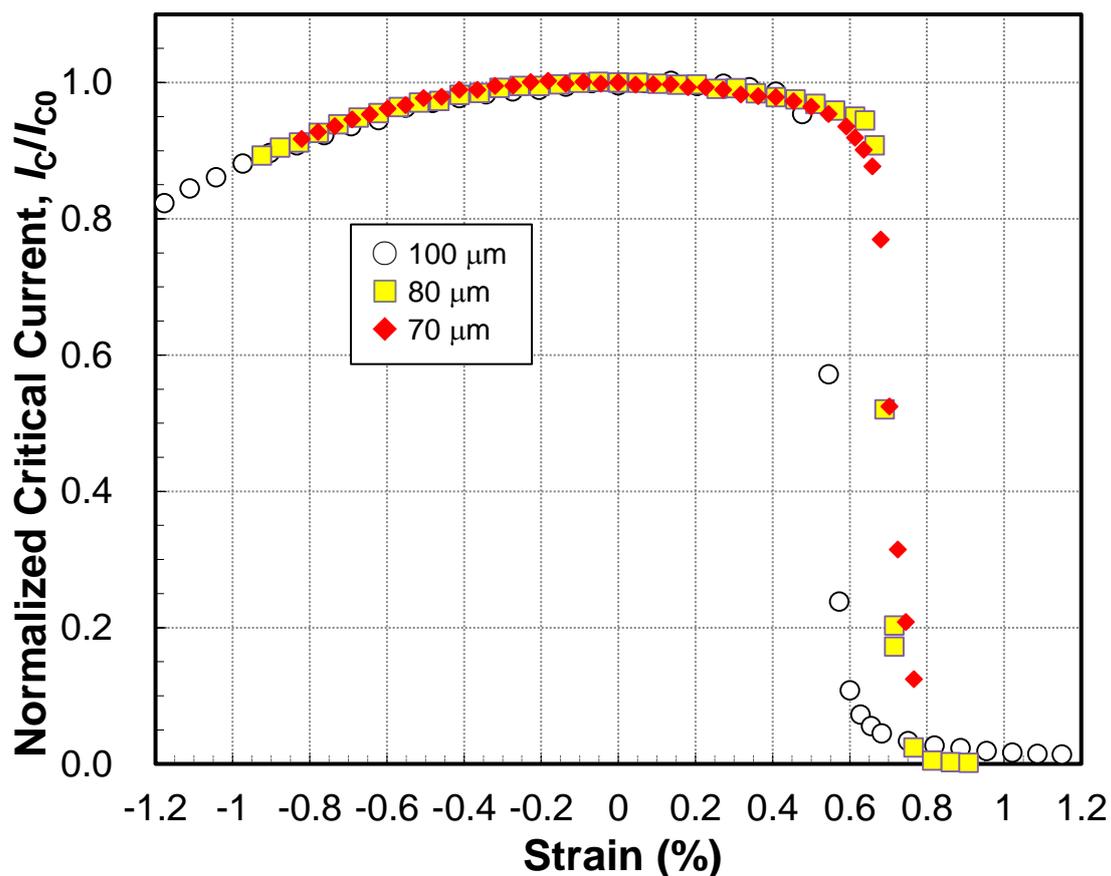


Figure 3-29 基板厚さを変えた場合の臨界電流（77K, 自己磁場）のひずみ依存性
 横軸は超電導層ひずみで、負の数値は圧縮方向、正の数値は引張方向
 縦軸は曲げを加える前の臨界電流で規格化した規格化臨界電流

6. まとめ

各種の REBCO 超電導線材に加えられた曲げひずみによる臨界電流への影響を研究した。REBCO 超電導線材の製造プロセスは種々提案されているが、同様のプロセスでも、線材毎に臨界電流の曲げ直径依存性、特に、超電導層を圧縮する方向に差がみられる。一方、引張方向ではいずれの線材も直径約 $20\ \text{mm}$ で急激な臨界電流の低下がみられる。圧縮方向では、

F-PLD 以外臨界電流が 95%を維持する曲げ直径 (D_{95}) と臨界電流が曲げ戻しによって 99%まで回復する曲げ直径 (D_{99}) に大きな差が見られ、 D_{99} の方が小さい (ひずみが大きい)。引張方向ではいずれも D_{95} と D_{99} の差が小さい。また、実用的な観点から、磁場中での臨界電流の曲げひずみ依存性や、基板の厚さを変えた線材、スリットやスクライプ、そして補修を行った線材の臨界電流の曲げひずみ依存性も評価した。これらの結果により臨界電流の曲げひずみ依存性に関して以下のような知見が得られた。

(1) 引張方向の曲げひずみ依存性

D_{95} と D_{99} の差が小さいことから、ひずみによる可逆的な臨界電流低下は臨界電流低下が 5%程度までであり、それを超えると不可逆的な、すなわち組織の破壊をともなう。これは、製法に関わらず約 0.5%のひずみであり、REBCO 超電導体の引張方向の可逆限界であると推定される。また、磁場中における引張方向の曲げでは、0~3 T の範囲で、曲げ直径に対してほぼ同様の臨界電流の低下傾向を示しており、臨界電流の磁場依存性は変化しないことを見いだした。これは、引張によって結晶自体が変化せず、結晶粒界に亀裂等が入ることで臨界電流が低下したことを示すものと推定される。

(2) 圧縮方向の曲げひずみ依存性

線材の種類によって臨界電流の曲げ直径依存性は大きく異なる。その原因としては、超電導層の結晶方位や製造プロセスの違いによる空隙の存在状態などによるものと推定される。引張方向における臨界電流低下の可逆ひずみを超えてもひずみを解放すると臨界電流は曲げ前と同等まで回復するため、圧縮方向に曲げを加えた場合では組織の破壊をともなっていない可逆的な組織の変化であると推定される。また、磁場中における引張方向の曲げでは、0~3 T の範囲で、曲げ直径に対して線材の種類によらず臨界電流の低下傾向を示していたが、圧縮方向では臨界電流の磁場依存性が異なり、高磁場中ほど圧縮方向の曲げを加えることによって臨界電流が上昇する傾向を示した。これは、可逆的な圧縮により結晶の格子定数が増加し、臨界電流の磁場依存性が変化したためであると推定される。

(3) 曲げひずみに対する可逆限界

可逆限界である ε_{99} の評価から REBCO 超電導層の本質的な破壊の生じる圧縮方向と引張方向のひずみは、残留ひずみの影響でシフトするものの、その差、すなわち曲げひずみに対して破壊しない可逆な範囲は、いずれの線材も 1%強であることがわかった。

(4) 銅めっき及び基板の厚さによる曲げひずみ依存性

銅めっき分の厚さや基板の厚さが、見かけ上の曲げひずみ依存性を異なるように見せるが、超電導層の線材厚さ方向の位置を考慮してひずみを計算し直すことで、本質的な超電導層が受けるひずみを推定できる。この本質ひずみで整理することにより、臨界電流の曲げひずみ依存性は、同様のプロセスで製造された超電導線材では、ほぼ同じであることを示した。すなわち、基板を薄肉化することにより、線材の曲げに対する臨界電流の低下を減少させるといったことが可能になることが明らかになった。

(5) 超電導線材の幅、スクライプ線材における曲げひずみ依存性

超電導線材をスリットやスクライプしても曲げによるひずみは変わらないので、スリットやスクライプ工程による超電導層への影響がなければ、線材の臨界電流の曲げひずみ依存性への影響はないことがわかった。

(6) 補修線材における曲げひずみ依存性

補修を目的とした接合部の特性は、互いに超電導層側を合わせるため、貼り付ける側の線材の超電導層が（一般に本線側が圧縮方向のひずみを受けるように巻線設計が行われるため）引張方向のひずみを受ける。このひずみから推定される臨界電流の低下に比べてやや大きい臨界電流の低下が生じているが、これの正確な原因は把握できていない。スクライプ技術の完成度やスクライプにより細くなった層間接合部に不均一な変形が加わっているなどの原因が推測されるが、100 mm 以上の巻線直径では殆ど臨界電流は低下しないため、用途を考慮すれば実用化は可能であることがわかった。

7. 参考文献

- 1) M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Z. Wang and C. W. Chu: *Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure*, Physical Review Letters, **58**(1987), 908
- 2) H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano: *A New High-Tc Oxide Superconductor without a Rare Earth Element*, Japanese Journal of Applied Physics, **27**(1988), L209
- 3) たとえば、http://www.amsc.com/solutions-products/hts_wire.html
- 4) ISTE Web: *Schedule of Superconducting equipment*, <http://www.istec.or.jp/ep-equipment/lab0-epq-E.html>

- 5) 向山晋一, 八木正史, 平田平雄, 鈴木光男, 鹿島直二, 塩原融: イットリウム系高温超電導電力ケーブルの開発, 古河電工時報, **123** (2009), 23
- 6) 吉積正晃, 福島弘之, 宮田成紀, 衣斐頭, 山田穰, 和泉輝郎, 塩原融: 線材用高速 *IBAD* プロセスの開発, 第 78 回低温工学・超電導学会講演概要集(2008), 110
- 7) 五十嵐光則, 富士広, 柿本一臣, 羽生智, 三浦貴博, 花田康, 林田知朗, 飯島康裕, 齊藤隆: *IBAD/PLD* 法による高特性 *GdBCO* 長尺線材の開発, 第 78 回低温工学・超電導学会講演概要集(2008), 113
- 8) 小泉勉, 中西達尚, 青木裕治, 長谷川隆代, 飯島康裕, 齊藤隆, 高橋保夫, 吉積正晃, 宮田成紀, 山田穰, 和泉輝郎, 塩原融: *TFA-MOD* 法による低コスト *YBCO* 線材の開発 (9), 第 81 回低温工学・超電導学会講演概要集(2009), 126
- 9) 新海優樹, 小西昌也, 阿比留建志, 大松一也: 大電流ケーブル用超電導線材の素線化プロセスの開発, 第 82 回低温工学・超電導学会講演概要集(2010), 106
- 10) W. Goldacker, S. I. Schlachter, R. Nast, H. Reiner, S. Zimmer, H. Kiesel and A. Nyilas: *BENDING STRAIN INVESTIGATIONS ON BSCCO(2223) TAPES AT 77K APPLYING A NEW BENDING TECHNIQUE*, *Advances in Cryogenic Engineering*, **48**(2002), 469
- 11) 住友電工: ビスマス系超電導線仕様, http://www.sei.co.jp/super/hts/type_h.html
- 12) D. Laan, F. Douglas, L. Goodrich, C. Clickner and T. Stauffer: *Electromechanical Studies for Coated Conductor Development*, 2009 DOE Peer Review
- 13) D. Laan and J. Ekin: *Dependence of the critical current of $YBa_2Cu_3O_{7-d}$ coated conductors on in-plane bending*, *Superconductor Science and Technology*, **21**(2008), 115002
- 14) T. Machi, K. Nakao, T. Kato, T. Hirayama and K. Tanabe: *Reliable fabrication process for long-length multi-filamentary coated conductors by a laser scribing method for reduction of AC loss*, *Superconductor Science and Technology*, **26**(2013), 105016
- 15) J. Kato, N. Sakai, S. Miyata, M. Konishi, Y. Yamada, N. Chikumoto, K. Nakao, T. Izumi and Y. Shiohara: *Optimization of the diffusion joint process for the Ag layers of YBCO coated conductors*, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, **463-465**(2007), 747)

第4章 銅酸化物系超電導線材の曲げひずみ依存性試験法標準化

1. 緒言

1998年に日本の金属材料技術研究所のMaedaらによって発見されたBSCCO銅酸化物系超電導体¹⁾は、前年にPaul Chuらによって発見された $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ ²⁾銅酸化物系超電導体と同じ層状ペロブスカイト構造であっても、劈開性を有していることから、圧延等によって比較的容易に配向度を向上することができ、銀シース・パウダーインチューブ法によって世界で初めての液体窒素温度を超える臨界温度を有する超電導線材が量産³⁾されることになった。

BSCCO超電導体、中でもBi2223 ($\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$) は臨界温度が110Kと、REBCO超電導体より10K以上も高いことから、液体窒素温度でも実用的な応用が期待され、金属系超電導体では困難とされていた電力ケーブル用途を目指した開発も行われている。

超電導線材を応用製品に使用するにあたって、線材には多数の曲げひずみ加わりますが、曲げひずみによって線材の臨界電流は大きな影響を受ける。臨界電流は応用製品にとって最も重要なパラメータであり、曲げひずみを受けた後の臨界電流の維持程度を定量的に評価することは重要である。

多くの研究者が、BSCCO超電導線材^{4)~6)}やREBCO超電導線材^{7)~9)}における曲げによる臨界電流への影響を評価する方法を研究してきた。一方で、片方に曲げた後、もう一度逆方向に曲げ(両曲げ)を行った後の臨界電流の維持程度が市販の銅酸化物系超電導線材(Bi2223、REBCO)の技術仕様として一般的に扱われている^{10)~12)}。これは、コイル化やケーブル化における製造プロセス上必要な曲げ戻しによって線材の臨界電流がどう影響するかの情報を提供している。

超電導線材を用いて実用的な応用製品を製造する際、超電導線材をリールから引出し、定められた張力を加えて、コイルやケーブルの巻芯に巻きつけることになる。

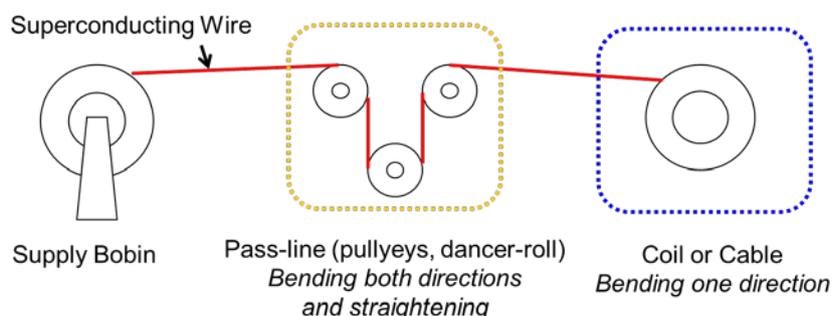


Figure 4-1 超電導線材を用いたコイル製造の模式図

その際、リールから必ずしも直線状に一方へ繰り出して巻きつけられるとは限らない。また、制御された張力を加えるためには **Figure 4-1** のように動滑車を用いることが多い。

このような実用的な応用製品製造時には、超電導線材には 1 回以上、しかも、これらの銅酸化物系超電導線材はテープ状の線材で、テープの両方向の曲げと直線状への戻しを経験することが通常である。曲げによって超電導線材の臨界電流が変化するため、この製造上必要となる曲げ戻しによって臨界電流がどう変化するかを知る必要がある。

また、テープ状の銅酸化物系超電導線材はコイルやスパイラル状のケーブルとして応用される。その曲げられた状態では、ひずみや応力を受けているので臨界電流が変化する。さらに、線材への通電によって発生する磁場で臨界電流が影響を受ける。後者は基本的には可逆であり、超電導線材の磁場と臨界電流の関係が周知であれば、電流による磁場の発生を計算することにより臨界電流への影響を推定することが可能である。一方、ひずみによる影響は、可逆なひずみの成分と不可逆なひずみの成分からなる。可逆な成分は曲げを戻すことによって除外されるので、曲げ戻した超電導線材の臨界電流を測定し、曲げ前の臨界電流と比較することで、不可逆なひずみの成分のみを評価することができる。

このことから、曲げ戻す前後で超電導線材の臨界電流を測定して比較することにより、曲げによる可逆な磁場やひずみの影響を除いた、真の不可逆な影響、すなわち、本質的に超電導線材の損傷を伴う曲げひずみによる影響を評価することが可能になる。

超電導線材の実用化には、最も重要な特性のひとつである曲げによる臨界電流の影響を世界中で共通の評価方法を用いて実施することが必須である。そこでこの曲げによって変化する臨界電流の試験方法を **International Electrotechnical Commission (IEC)** におけるデジュール標準化することを目指した。国内の有識者の支援を得て、その標準化を **JNC** (日本国内委員会) に提案して合意を得、国際標準化プロジェクトの責任者として試験方法の妥当性の研究を行った。

標準的な試験法とするためには、特殊な装置を用いることなく、超電導関係者が一般的に有している標準的な測定装置を用いて実施できなくてはならない。また、試験手順を明確に定義し、正確にそれを実現できなければならない。そして、各試験機関によるばらつきが一定の範囲に収まらなければ評価方法としての信頼性がない。そこで、まず試験手順を定義した試験手順案を作成、各国の研究機関 (大学や研究所) に市販の超電導線材を配布し、試験手順案に沿った試験 (**Round Robin Test: RRT**) を依頼した。そして、その試験結果の統計的な評価を行うことで、試験手順の妥当性を評価した。

2. 評価サンプルと評価方法

2-1 評価サンプル

本測定では対象とする超電導線材に住友電気工業株式会社が市販するDI-BSCCO[®] Type HT-CA¹⁰⁾を使用した。この超電導線材は、DI-BSCCO[®] Type Hと呼ばれる基本となる銀シースビスマス系 (Bi2223) 超電導線材の両面に半田で銅合金を貼り付けて補強したもので、諸元を**Table 4-1** に示す。これは、特に高強度と低接続抵抗の両方が必要な用途向けに開発されたもので、横浜¹³⁾、石狩¹⁴⁾、Essen¹⁵⁾、St. Petersburg¹⁶⁾など、世界の代表的な超電導電力ケーブルプロジェクトや、船舶用モータ、超高磁界マグネット¹⁷⁾にも使用されており、世界で最も多く使用されている銅酸化物系超電導線材とみなしたからである。

Table 4-1 RRT に使用した超電導線材の諸元

項目	値
線材厚さ(mm)	0.36
線材幅(mm)	4.5
補強材料	銅合金
補強材厚さ(μm)	50
臨界電流(A) 77K, 自己磁場	200

この超電導線材を、国内外の 6 者、イタリア・ボローニャ大学、ドイツ・カールスルーへ工科大学、韓国・安東国立大学、日本の応用科学研究所、物質・材料研究機構 (NIMS) 及び住友電気工業に配布し、曲げ試験方法の手順案を定めて試験を委託した。以下、シンボル P_j ($j=1\sim6$ 、順不同) で各機関を示す。

Table 4-2 に各試験機関が行った臨界電流測定条件を示す。

Table 4-2 各機関の臨界電流測定条件

項目	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
サンプル長さ, L (mm)	130	120	100	90	150
電圧タップ間距離, L_1 (mm)	50	36	18.25	30	50
電流タップ長さ, L_2 (mm)	10	20	20	15	20
電圧タップ-電流タップ間距離, L_3 (mm)	20	15	18.25	12.5	19
電圧タップ長, L_4 (mm)	5	4	1.75	2.5	11
電源	高砂 GP08-500R	鈴木商館 SSHR-400B	SuNAM NEOS-5000	HP6671A (220A)	Lambda GEN8-400
電流掃引速度	2A/0.9s hold	7.5 A/s	2A/s	10A/s	2A/10s hold
電圧測定方法 (機器)	Keithley 2182A	Keithley 1801+2001	NI SCXI 1328	Keithley 2182A	HP 3458A
分流器	横河 2215-16	Gildline 9230	横河 2216	横河 2215-15	電流クランプによる 測定
分流器電圧測定方法 (機器)	Keithley 2700	Keithley 2000	NI SCXI 1328	Keithley 2182A	

各機関において、それぞれ5つのサンプルを切り出して3種類の曲げ直径、80 mm、60 mm、50 mmで試験を行った。P₆の試験機関では、他の機関と異なる方法で臨界電流の曲げ直径依存性を評価し、比較の議論を行った。以下「2-2 曲げ前の臨界電流測定」～「2-5 臨界電流及びn値の定義」の項において、第3章の曲げひずみ研究の経験や世界の経験者から得た情報をもとに定めた試験手順案を示す。

2-2 曲げ前の臨界電流測定

臨界電流測定は、基本的にはBSCCO超電導線材の臨界電流測定方法の国際標準（IEC 61788-3）¹⁸⁾に従って実施した。ただし、電圧、電流端子とも半田付けを行わず圧着等によるものとした。**Figure 4-2**にサンプルホルダーの構造を示す。ホルダーにサンプルを載せ、電流接続用の端子に半田を使わずに圧着する。電圧端子も同様に半田なしで圧着する。

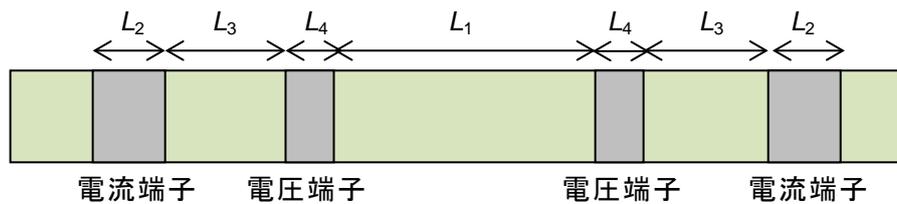


Figure 4-2 サンプルホルダーの構造

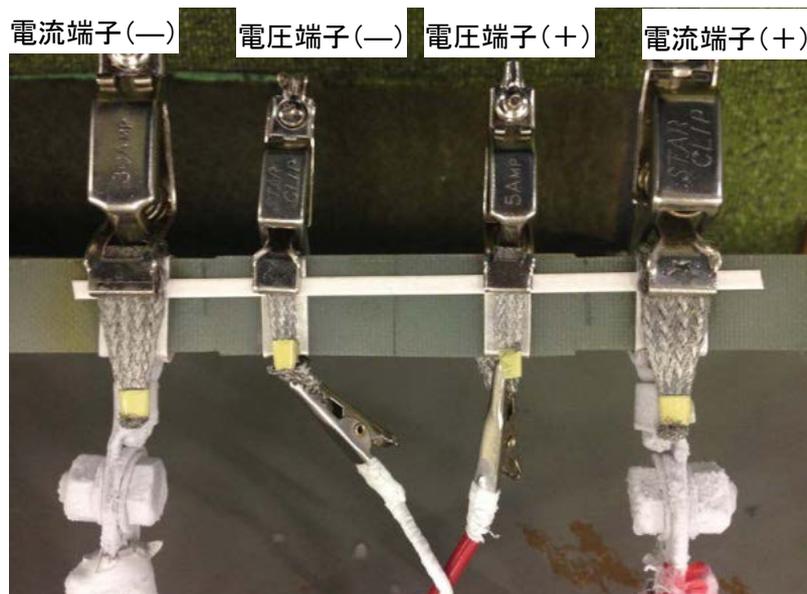


Figure 4-3 サンプルホルダーの具体例と端子付方法

GFRP 板にそれぞれ電流、電圧端子部分に使用する銀テープの厚さ分切込みを入れ、銀テープを巻きつけ、撚線を用いた電流及び電圧線を電極となる銀テープに半田付して形成したホルダーを用意し、サンプルを載せ、クリップで押さえる。この際サンプルへの損傷を避けるために、撚線を挟む (Figure 4-3)。なお、このクリップは通電用のものを流用したが、圧力を加えるためのものであり、電流は撚線及び銀テープを通過するだけで、クリップを経由しない。

ここで、半田付けを使用しないことは次の工程で行う両曲げの際に、半田の付着による局所的な曲げや異常な曲げが加わらないようにするための非常に重要なポイントである。半田もしくは何らかの接着用の物質がサンプルに付着したままだと、Figure 4-4 に示すように付着部がそれ以外の部分と均一な曲率の曲げにならないからである。特に、表裏それぞれの方向にマンドレルに沿わせて曲げるために、接着用物質が付着した面を内側に曲げる場合、付着部で盛りあがり局所的に小さな曲率で曲がる部分が発生するか、マンドレルの直径とは異なる曲率になる可能性があるためである。

臨界電流測定後、線材は常温まで昇温する。

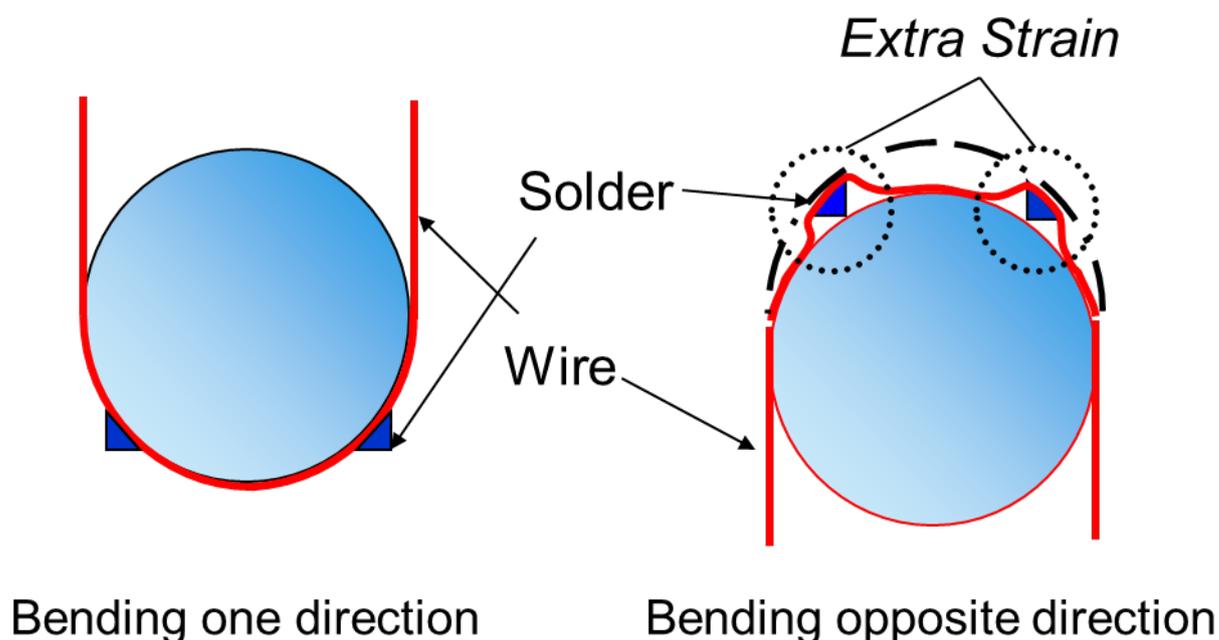


Figure 4-4 線材の反対方向曲げ時に付着物が線材へ及ぼすひずみ

線材の曲げ外側に半田等の付着物がついている場合 (左)

線材の曲げ内側に半田等の付着物がついている場合 (右)

2-3 両曲げ

室温において、サンプルを所定の直径のマンドレルに沿わせて曲げる。**Figure 4-5** に示すように、まずサンプルの一端をマンドレルに固定し (Fix end)、徐々にフリーにした反対端に向けてマンドレルに沿わせるように ((1)→(2)→(3)→(4)) 曲げる。この時、電圧タップ間に対応する部分 (L_1) は全長が曲げられなければならない。

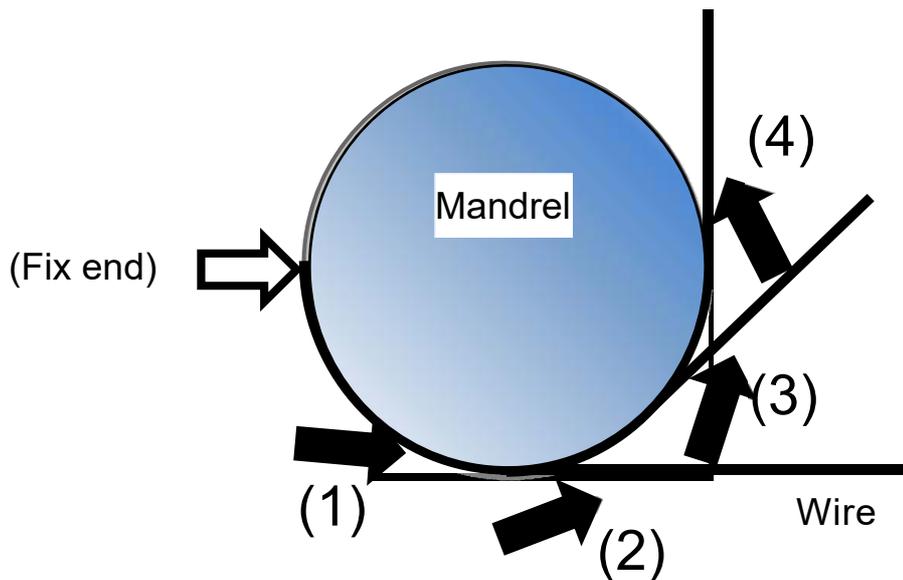


Figure 4-5 線材の曲げ手順

その後、サンプルを曲げから解放する。次に、サンプルの面を反対にして、同様に同じマンドレルに沿って曲げを加えた後、曲げから解放する。

この試験において曲げ直径とは、実用上の便宜のために、マンドレルの直径と定義する。

2-4 曲げ後の臨界電流測定

臨界電流測定は、直状にして「2-2 曲げ前の臨界電流測定」の項と同様に行う。

2-5 臨界電流及び n 値の定義

臨界電流は、電界定義 E_C で評価し、 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 及び $0.1 \mu\text{V}/\text{cm}$ の 2 種類の定義による臨界電流を求める。 n 値は、これら 2 つの臨界電流の間の電圧と電流の対数をプロットして、その傾きから求める。

3. 実験結果

3-1 曲げ前の臨界電流

P₆を除く 5 機関分のデータで統計的処理を行った。ここでサンプル自体の臨界電流である、曲げ前の臨界電流の分布を**Figure 4-6**に示す。3つの曲げ直径に対してそれぞれ5サンプルで試験しているので試験機関ごと15のデータセットとなり、合計で75のデータポイントが1つのデータセットとみなせる。

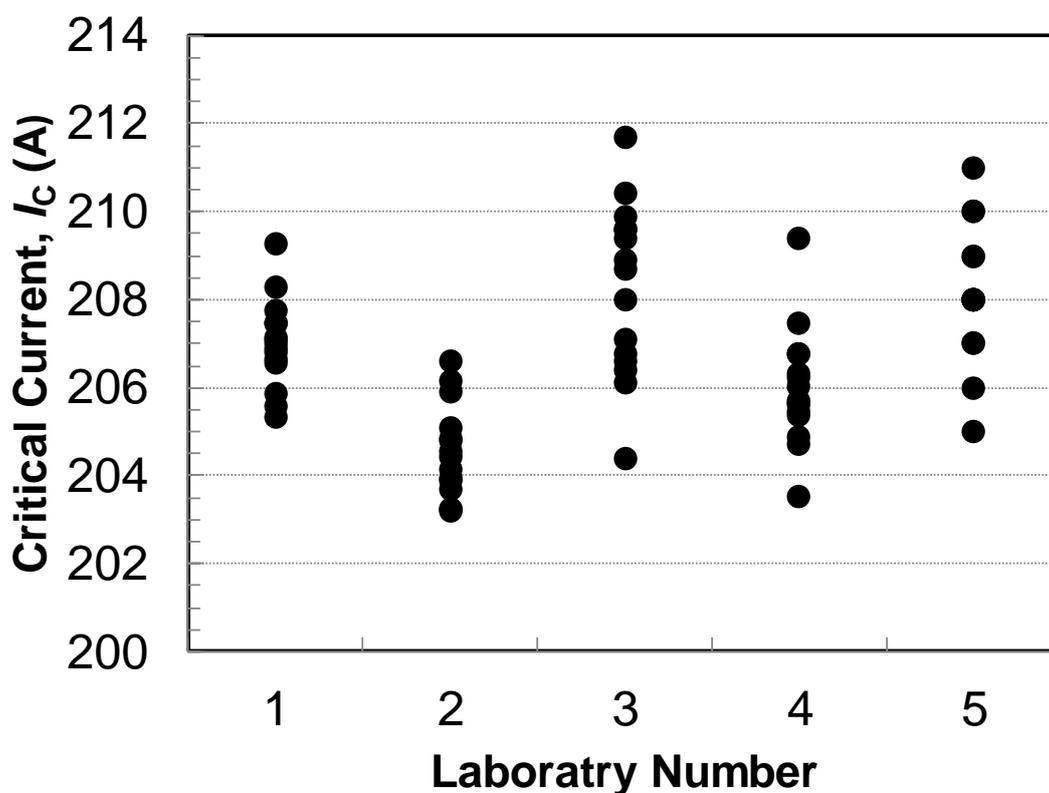


Figure 4-6 曲げ前の臨界電流の試験機関間比較

Table 4-3に各機関で測定された曲げ前の臨界電流、 I_c の統計的解析結果を示す。変動係数 (CoV)、 X_{COV} は観察されたデータの分散を比較するための指標である。それぞれの試験機関内では最も高い X_{COV} (研究機関内)が0.942%で、最も低いものは0.491%であり、全データの X_{COV} (試験機関間)は0.957%と、各研究機関内の値より大きかった。これは、試験機関内の分散より、試験機関間の分散の方が大きいことを示唆している。

相対標準不確かさ (Relative Standard Uncertainty) X_{RSU} は、観察されたデータの平均値がどれだけ真の値に近いかを示すもので、 X_{RSU} が小さければ小さいほど、平均値が真の値に近いということである。15 データから、試験機関内の X_{RSU} は 0.126-0.243% が得られ、75 のデータからは試験機関間の X_{RSU} 、0.110% が得られた。多くのデータから得られた平均値がより少ないデータから得られた平均値より真の値に近いいため、この結果は理にかなっている。

Table 4-3 曲げ前臨界電流の統計値

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Total
N	15	15	15	15	15	75
$\langle I_c \rangle$ (A)	207.0	204.5	208.2	205.9	208.1	206.7
X_{SD} (A)	1.01	1.07	1.96	1.34	1.55	1.97
X_{COV} (%)	0.491	0.524	0.942	0.651	0.745	0.957
X_{RSU} (%)	0.126	0.135	0.243	0.168	0.192	0.110

Figure 4-6 に示されるように、75 のデータはある範囲内に分布している。この分散は、次の 3 つの原因によって生じている。

- ①線材の長さ方向の臨界電流分布
- ②試験機関内の測定のばらつき
- ③試験機関間の測定方法の相違

3-2 曲げ後の臨界電流

Figure 4-7 に直径 80 mm、**Figure 4-8** に直径 60 mm、**Figure 4-9** に直径 50 mm で両曲げを行った後の臨界電流を、曲げ前の臨界電流で規格化した値の試験機関間比較を示す。

また、**Table 4-4** に直径 80 mm、**Table 4-5** に直径 60 mm、**Table 4-6** に直径 50 mm で両曲げを行った後の規格化臨界電流の統計値を示す。

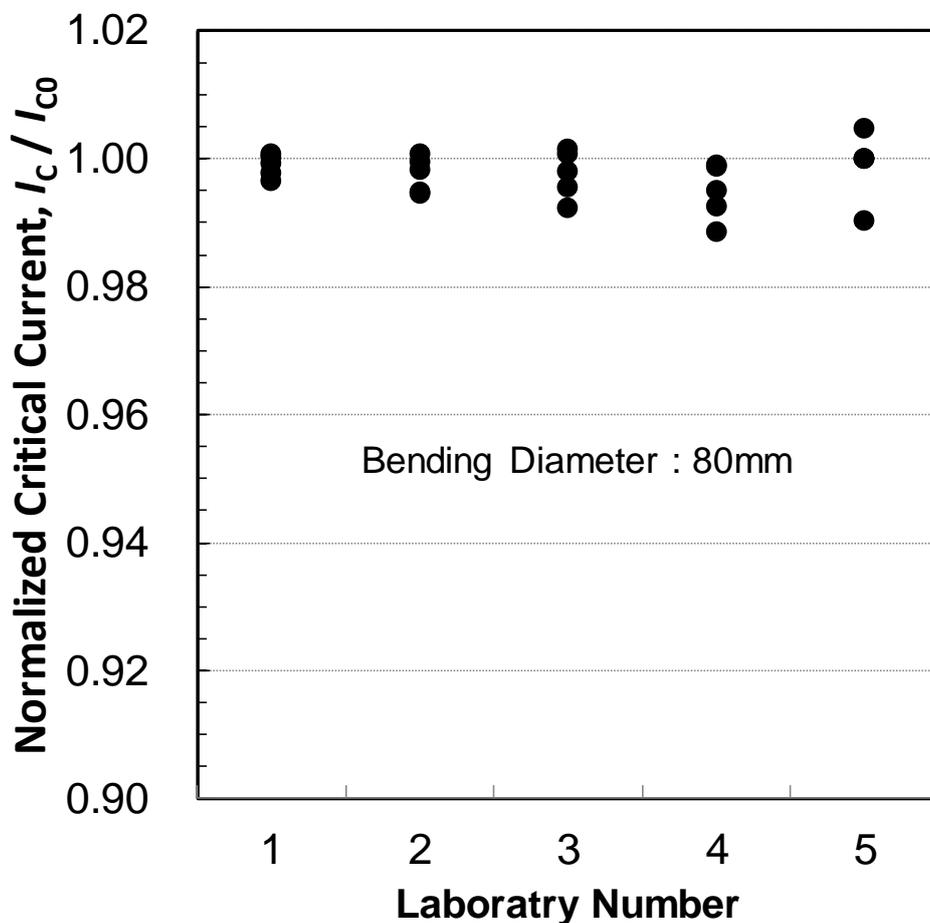


Figure 4-7 直径 80 mm の両曲げを行った後の規格化臨界電流の試験機関間比較

Table 4-4 直径 80 mm の両曲げを行った後の規格化臨界電流の統計値

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Total
N	5	5	5	5	5	25
$\langle I_c / I_{c0} \rangle$	0.998	0.997	0.997	0.994	0.997	0.997
X_{SD}	0.00179	0.00281	0.00377	0.00445	0.00526	0.00381
$X_{COV}(\%)$	0.179	0.282	0.378	0.447	0.527	0.382
$X_{RSU}(\%)$	0.0804	0.126	0.169	0.200	0.235	0.0764

Table 4-4 に示すように、試験機関間の変動係数 X_{COV} は 0.382% であるが、各試験機関内の X_{COV} は 0.179~0.527% に分布している。これは、規格化臨界電流の分散が、試験機関間の分散傾向に似ていることを示している。一方、試験機関内の相対標準不確かさ X_{RSU} は 0.0804~0.235% に分布している。

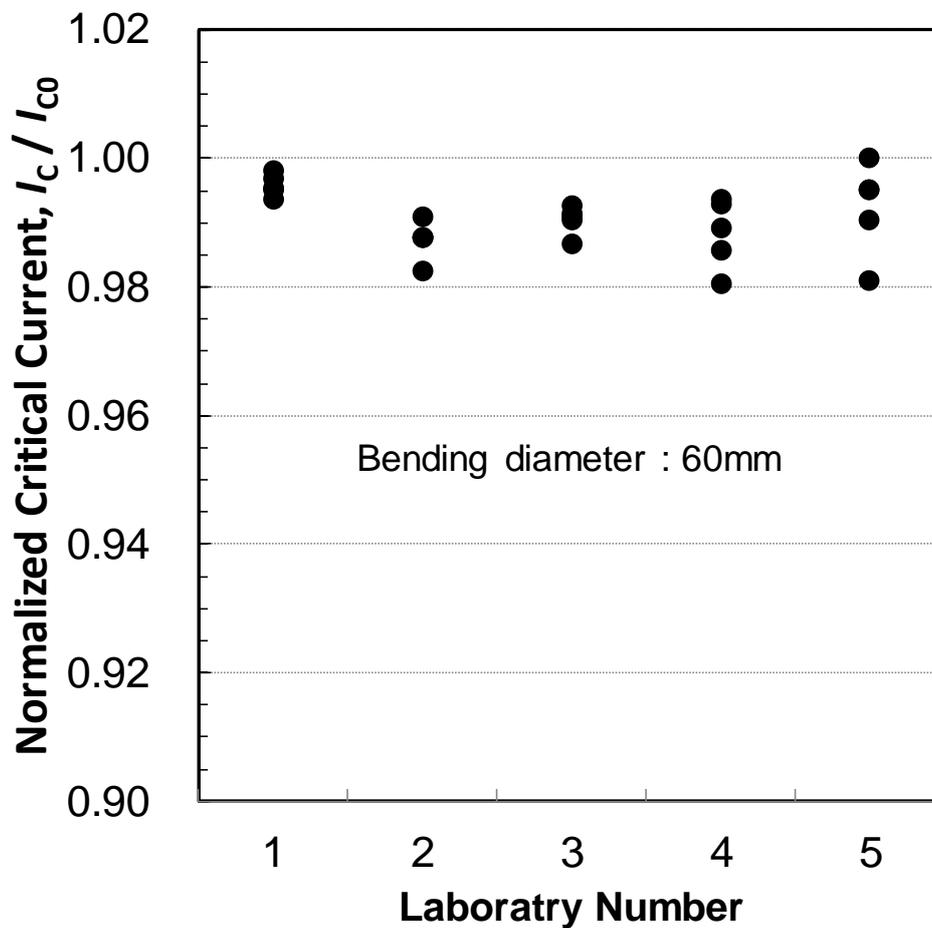


Figure 4-8 直径 60 mm の両曲げを行った後の規格化臨界電流の試験機関間比較

Table 4-5 直径 60 mm の両曲げを行った後の規格化臨界電流の統計値

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Total
N	5	5	5	5	5	25
$\langle I_c / I_{c0} \rangle$	0.995	0.987	0.990	0.988	0.990	0.990
X_{SD}	0.00165	0.00296	0.00223	0.00545	0.00718	0.00508
$X_{COV}(\%)$	0.166	0.300	0.225	0.551	0.724	0.513
$X_{RSU}(\%)$	0.0745	0.134	0.100	0.246	0.324	0.102

Figure 4-8 に示すように、60 mm 両曲げ後の規格化臨界電流は 0.98~1.0 に分布している。また、Table 4-5 に示すように、試験機関間の変動係数 X_{COV} は 0.513% であるが、各試験機関内の X_{COV} は 0.166~0.724% に分布している。しかし、Table 4-4 に示す 80mm 両曲げ結果と比較して分散は大きくなっている。試験機関内の相対標準不確かさ X_{RSU} は 0.0745~0.324% まで大きく分布している。

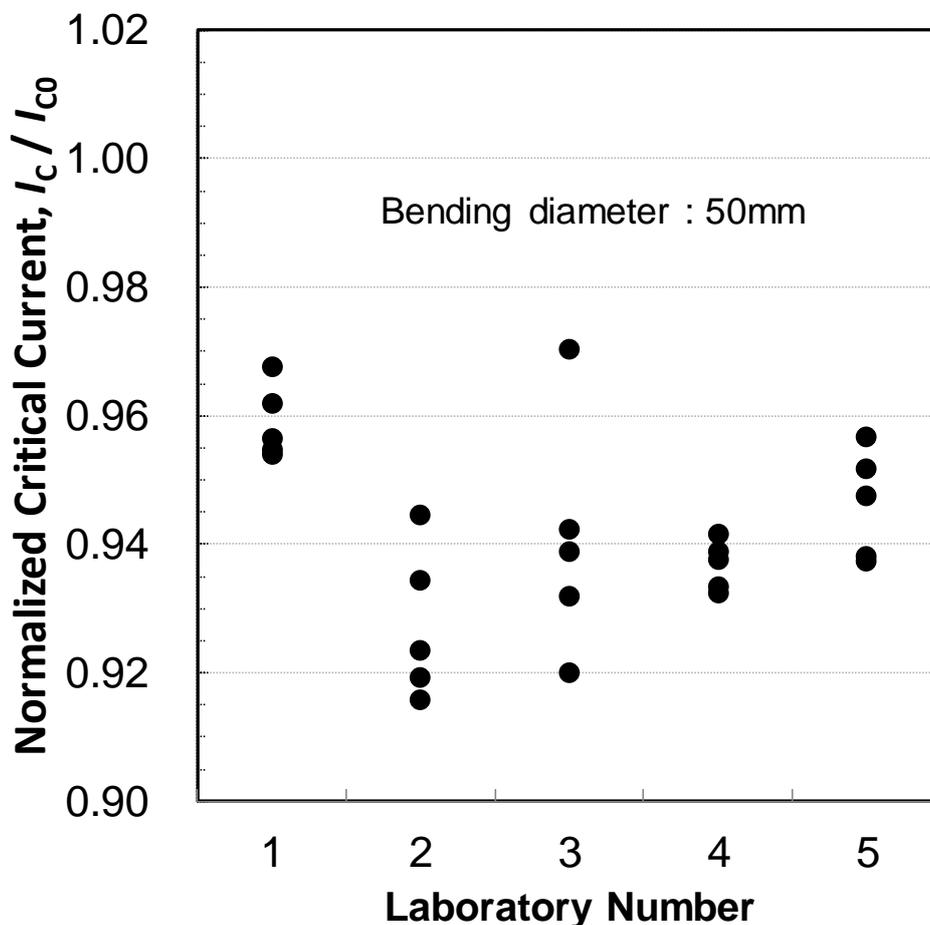


Figure 4-9 直径 50 mm の両曲げを行った後の規格化臨界電流の試験機関間比較

Table 4-6 直径 50mm の両曲げを行った後の規格化臨界電流の統計値

	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	Total
N	5	5	5	5	5	25
$\langle I_c / I_{c0} \rangle$	0.958	0.927	0.940	0.936	0.942	0.942
X_{SD}	0.00576	0.0118	0.0186	0.00386	0.00843	0.0146
$X_{COV}(\%)$	0.601	1.28	1.98	0.412	0.894	1.55
$X_{RSU}(\%)$	0.268	0.573	0.887	0.184	0.400	0.311

Figure 4-9 に示すように、50 mm両曲げ後の規格化臨界電流は 0.91~0.97% に分布している。また、Table 4-6 に示すように、試験機関間の変動係数 X_{COV} は 1.55% であるが、各試験機関内の X_{COV} は 0.412~1.98% に分布している。概して、分散は 60mm や 80mm に比べて大きくなっている。また、試験機関内 X_{RSU} は 0.184~0.887% まで広く分布している。

3-3 変動係数の評価

RRT (Round Robin Test)によって得られた統計量の平均を**Table 4-7**に示す。相対標準不確かさ X_{RSU} と変動係数 X_{COV} には次の関係がある。

$$X_{RSU} = \frac{X_{COV}}{\sqrt{N}} \quad (4-1)$$

この関係は重要な統計的な意味を示している。 X_{COV} は平均値で除した分散の平方根である。実験が多数回繰り返されれば、観察される変動、すなわち X_{COV} は正規分布の半分の幅を表す一定の値に近づく。本研究では、 X_{COV} は**Table 4-7**に示した**25**の実験データセットから評価されている。異なる曲げ直径におけるこれらの値は、それぞれの曲げ直径の個々のケースにおける定数と扱うことができる。

Table 4-7 RRT の 25 のデータセットから得られた統計値

曲げ直径 (mm)	N	$\langle I_C/I_{C0} \rangle$	X_{RSU} (%)	X_{COV} (%)
80	25	0.997	0.0764	0.382
60	25	0.991	0.102	0.513
50	25	0.943	0.311	1.55

3-4 Type B 標準不確かさの評価

標準不確かさを評価するにあたって、「Type B」として知られる不確かさ評価が大変有益である¹⁹⁾。過去においても、標準不確かさの評価がBSCCO超電導線材²⁰⁾やREBCO超電導線材²¹⁾の室温引張試験において使用されている。本研究でも、Type B標準不確かさの評価を以下のように行う。

超電導体に磁束の粘性フローによる電界が発生したとき、電圧と電流の関係は次の非線形関数であらわされる。

$$U = U_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n \quad (4-2)$$

ここで I_c は臨界電流で、定数である U_c は次のように電界に関連する。

$$U_c = L E_c \quad (4-3)$$

ここで L は電圧タップ間距離、 E_c は電界である。式(4-2)と(4-3)から臨界電流は実験的に次の数式であらわされる。

$$I_c = (LE_c)^{\frac{1}{n}} U^{-\frac{1}{n}} I \quad (4-4)$$

そして、次の比率は、臨界電流の維持割合から計算される。

$$f = \frac{I_{c2}}{I_{c1}} = \frac{(L_2 E_c)^{\frac{1}{n_2}} U_2^{-\frac{1}{n_2}} I_2}{(L_1 E_c)^{\frac{1}{n_1}} U_1^{-\frac{1}{n_1}} I_1} \quad (4-5)$$

ここで、 I_{c1} 、 L_1 と n_1 は、両曲げ前の測定における臨界電流、電圧端子間距離及びn値であり、 I_{c2} 、 L_2 と n_2 は、両曲げ後のそれぞれの値である。

式(4-5)は両曲げ後の臨界電流維持率を定める数学的表現で、8つの測定量が表れており、それぞれが標準不確かさを有している。

式(4-5)の合成標準不確かさ (Combined Standard Uncertainty) は次の式で与えられる。

$$u_c^2 = \sum_{j=1}^2 \left[\left(\frac{\partial f}{\partial L_j} \right)^2 u_{1j}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial U_j} \right)^2 u_{2j}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial I_j} \right)^2 u_{3j}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial n_j} \right)^2 u_{4j}^2 \right] \quad (4-6)$$

ここで $j = 1$ と 2 は両曲げ前と後を示しており、式(4-6)の感度係数 (sensitivity coefficient) は次のように与えられる。

$$c_{1j} = \frac{\partial f}{\partial L_j} = \frac{(-1)^{j-1}}{n_j L_j} f \quad (4-7a)$$

$$c_{2j} = \frac{\partial f}{\partial U_j} = -\frac{(-1)^j}{n_j U_j} f \quad (4-7b)$$

$$c_{3j} = \frac{\partial f}{\partial I_j} = \frac{(-1)^{j-1}}{I_j} f \quad (4-7c)$$

$$c_{4j} = \frac{\partial f}{\partial n_j} = \left(\frac{1}{U_j} - \frac{1}{L_j E_c} \right) \cdot \frac{(-1)^{j-1}}{n_j^2} f \quad (4-7d)$$

4番目の項 c_{4j} は非常に小さく、結果に無視できる程度の影響しか及ぼさないので、本研究では検討する必要がないとした。

3-5 それぞれの測定量の標準不確かさ(SU)

(1) 電圧タップ間距離 (L)

距離は最小読み $50 \mu\text{m}$ の (すなわち $\pm 25 \mu\text{m}$) ノギスによって測定された。ゆえに、標準不確かさは次のように計算される。

$$u_{111} = u_{121} = \frac{0.025}{\sqrt{3}} = 1.44 \times 10^{-2} \text{ [mm]} \quad (4-8)$$

電圧タップは線材に対して点接触ではなく、面接触である。線材の軸方向に沿った長さを±1mm とすると、タップは2ヶ所なので、標準不確かさは次のようにあらわされる。

$$u_{112} = u_{122} = \frac{2 \times 1}{\sqrt{3}} = 1.15 \text{ [mm]} \quad (4-9)$$

よって、合成標準不確かさは次の式であらわされる。

$$u_{11} = u_{12} = \sqrt{u_{111}^2 + u_{112}^2} = \sqrt{u_{121}^2 + u_{122}^2} = 1.15 \text{ [mm]} \quad (4-10)$$

$D = 50 \text{ mm}$, $L_1 = 50 \text{ mm}$ 及び $n = 20$ のときの2つの感度係数 $c_{11} = c_{12}$ は **Table 4-7** の $D = 50 \text{ mm}$ における $\langle I_c / I_{C0} \rangle$ を式(4-7a)の f に代入することによって得られ、 $9.43 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ である。

(2) 電圧 (U)

標準不確かさは前提条件である電圧 $5 \text{ } \mu\text{V}$ ($L_1 = 50 \text{ mm}$ の時の臨界電流定義電圧) から評価される。国際標準¹⁸⁾によると、推奨されるゼロから臨界電流までの定速掃引における掃引時間は10秒である。よって、臨界電流付近の電圧の変化速度は次式で与えられる。

$$\frac{dU}{dt} = \frac{dU}{dI} \frac{dI}{dt} = \frac{nU_c}{I_c} \frac{I_c}{10} = \frac{nU_c}{10} = \frac{20 \times 5}{10} = 10 \text{ [}\mu\text{V/s]} \quad (4-11)$$

電圧は Keithley1801 というデジタル電圧計を用いて、フルスケール $20 \text{ } \mu\text{V}$ 、サンプリング時間 60 ms で測定されたので、 $10 \text{ } \mu\text{V/s}$ での標準不確かさは次のように計算される。

$$u_{2j} = \frac{10 \cdot \frac{0.06}{2}}{\sqrt{3}} = 0.173 \text{ [}\mu\text{V]} \quad (4-12)$$

$D = 50 \text{ mm}$, $U = 5 \text{ } \mu\text{V}$ 及び $n = 20$ のときの2つの感度係数 $c_{21} = c_{22}$ は、**Table 4-7** の $D = 50 \text{ mm}$ における $\langle I_c / I_{C0} \rangle$ を式(4-7b)の f に代入することによって得られ、 $9.43 \times 10^{-3} \text{ A}/\mu\text{V}$ である。

(3) 電流 (I)

3つの要因、すなわち、電流測定用シャント抵抗の電圧測定、液体窒素容器内の温度及び曲げのためのマンドレル径の不確かさが電流測定に影響を及ぼしている。それらの合成標準不確かさは次の式であらわされる。

$$c_{3j}^2 u_{3j}^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial U} \right)^2 u_{3j1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)^2 u_{3j2}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial D} \right)^2 u_{3j3}^2 \quad (4-13)$$

標準不確かさは 207 A に電流がセットされたときで評価される。電流測定は $R_s = 1 \text{ m}\Omega$ の分流器（シャント抵抗）が使われる。電圧 207 mV が DVM（Keithley2000-6 1/2）のフルスケール 1000 mV サンプリング時間 20 ms で測定された。

$$\frac{dU}{dt} = \frac{207}{10} = 20.7 \quad [\text{mV/s}] \quad (4-14)$$

ゆえに標準不確かさは次で与えられる。

$$u_{311} = u_{321} = \frac{20.7 \cdot \frac{0.02}{2}}{\sqrt{3}} = 1.19 \times 10^{-1} \quad [\text{mV}] \quad (4-15)$$

また、感度係数は次で与えられる。

$$c_{3j1} = \frac{\partial f}{\partial U} = \frac{\partial f}{\partial I} \frac{\partial I}{\partial U} = \frac{(-1)^{j-1}}{I_j} f \frac{1}{R_s} = (-1)^{j-1} \frac{f}{I_j} \quad [1/\text{mV}] \quad (4-16)$$

よって、 $c_{311} = 4.55 \times 10^{-3} \text{ mV}^{-1}$ 、 $c_{321} = -4.83 \times 10^{-3} \text{ mV}^{-1}$ である。

臨界電流は温度に敏感に依存する。市販の BSCCO 超電導線材の典型的な温度依存性は、次の式であらわされる。

$$I_C = [1 - \gamma(T - T_{b0})] I_{C0} \quad (4-17)$$

ここで $T_{b0} = 77.355 \text{ [K]}$ は標準気圧 ($P_0 = 101.32 \text{ kPa}$) における沸点であり、 γ は定数である。臨界電流の温度依存性の傾きは -9.13 A/K であるため²²⁾、 $I_{C0} = 207 \text{ A}$ の時には、 $\gamma = 4.41 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$ となる。

$$c_{312} = c_{322} = \frac{\partial f}{\partial T} = -\gamma = -0.0441 \quad [1/\text{K}] \quad (4-18)$$

両曲げ処理の前後における最大の温度変化から、2回の臨界電流測定における温度差 $\Delta T = 0.2 \text{ K}$ と推定される。それゆえ標準不確かさは、

$$u_{312} = u_{322} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.0577 \quad [\text{K}] \quad (4-19)$$

今回は、臨界電流の曲げ直径依存性を次のように推定する。

$$I_C = [1 - 2.4 \cdot 10^{-15} \cdot (D_o - D)^8] I_{CD0} \quad (4-20)$$

ここで曲げ前の臨界電流と曲げ後の臨界電流が変わらない最小の直径を D_0 とし I_{CD0} は直径 D_0 での臨界電流で、 D_0 は 97 mm と見なした。式(4-20)は Table 4-7 に示す実験デー

タからフィッティングして得たものである。そこで感度係数は次であらわされる。

$$c_{3j3} = \frac{\partial f}{\partial D} = 1.92 \cdot 10^{-14} (D_0 - D)^7 \quad (4-21)$$

ここで D が D_0 のとき、曲げ処理前であるので、 $c_{313} = 0$ である。 c_{323} は、 $D = 50, 60$ および 80 mm のとき、それぞれ $-9.73 \times 10^{-3}, -1.82 \times 10^{-3}, -7.88 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-1}$ となる。 $\Delta D = 4.0$ mm の場合、標準不確かさは次のとおり。

$$u_{313} = u_{323} = \frac{2.0}{\sqrt{3}} = 1.15 \text{ [mm]} \quad (4-22)$$

Table 4-8 に感度係数(c_{ij})、Type B 標準不確かさ(u_{ij})、そして合成標準不確かさに関連する全ての項の積を示す。主要な影響は $c_{ij}u_{ij}$ が大きい、曲げ直径と測定温度の項からきていることを示している。

Table 4-8 曲げ直径 50 mm における標準不確かさの一覧表

Component	i	j	c_{ij}	u_{ij}	$c_{ij}u_{ij}$
L	1	1	$9.43 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$	1.15 mm	1.09×10^{-3}
		2	$9.43 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$	1.15 mm	1.09×10^{-3}
U	2	1	$9.43 \times 10^{-3} \mu\text{V}^{-1}$	0.173 μV	1.63×10^{-3}
		2	$9.43 \times 10^{-3} \mu\text{V}^{-1}$	0.173 μV	1.63×10^{-3}
R_s	3(1)	1	$4.55 \times 10^{-3} \text{ mV}^{-1}$	0.119 mV	5.44×10^{-4}
		2	$4.83 \times 10^{-3} \text{ mV}^{-1}$	0.119 mV	-5.77×10^{-4}
I	T	3(2)	$-4.41 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$	$5.77 \times 10^{-2} \text{ K}$	-2.55×10^{-3}
		2	$-4.41 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$	$5.77 \times 10^{-2} \text{ K}$	-2.55×10^{-3}
D	3(3)	1	0	-	0
		2	$-9.73 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$	1.15 mm	-1.12×10^{-2}

式(4-6)から得られた合成標準不確かさを**Table 4-9**に示す。相対標準不確かさ(X_{RSU})は u_C を両曲げ前と後の臨界電流の平均で除したものと定義される。

Table 4-9 合成標準不確かさとその相対値

D [mm]	50	60	80
u_C	0.0121	0.00516	0.00472
X_{RSU} [%]	1.29	0.520	0.472

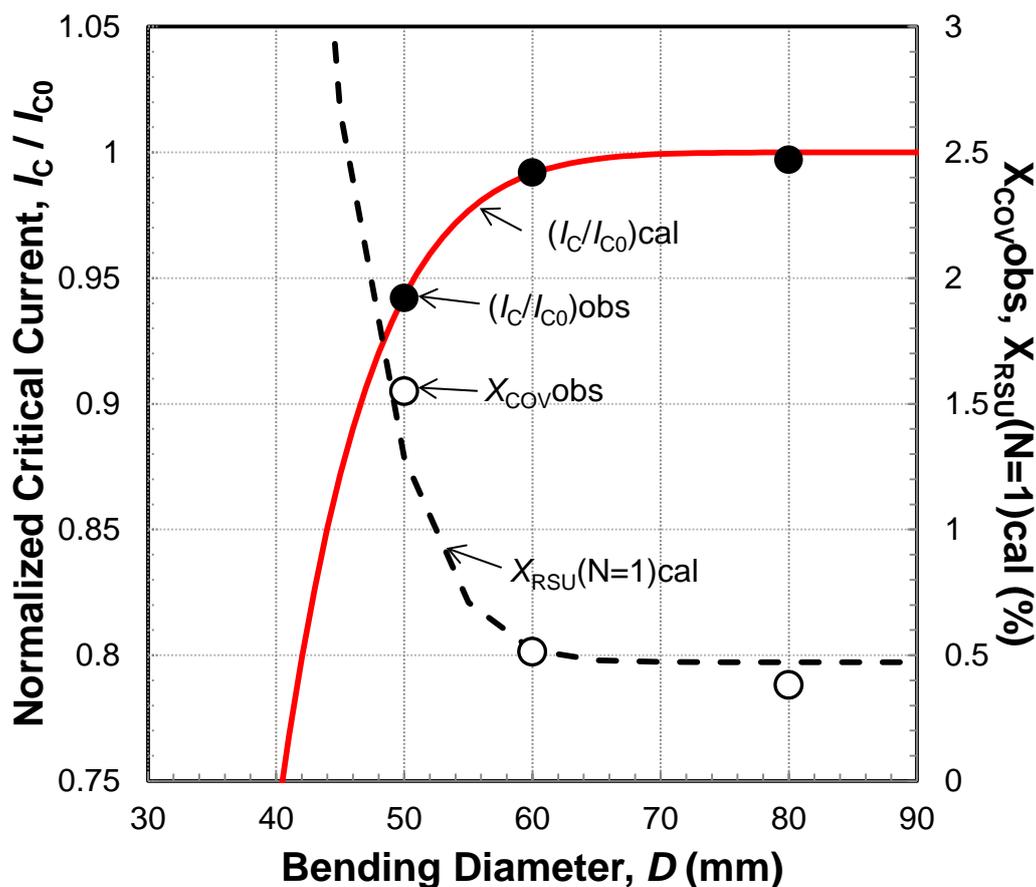


Figure 4-10 曲げ後の曲げ前に対する臨界電流維持率と<COV>の曲げ直径依存性
維持率計算値は式(4-20)

Table 4-9 に示すように、合成標準不確かさとその相対値はType B評価で決定された。それらは $N=1$ における推定に相当するため、 $X_{RSU}(N=1)$ は理論的に X_{COV} と一致する。 $X_{RSU}(N=1)$ もまた、Figure 4-10 に示される曲げ直径の関数として計算され、観察された X_{COV} に一致する。曲げ直径が 60 mm 以下になると、 $X_{RSU}(N=1)$ と観察された X_{COV} は急激に増加した。

4. 議論

4-1 分散分析

実験結果においてばらつきが最初にどこから生じているかを判断するのにF-検定¹⁹⁾は重要なツールである。ここで $(I_c/I_{c0})_{kl}$ を Y_{kl} 、 k を各試験機関の番号、 l を試験機関内での測定番号とする。また、今回は $K=5$ 、 $L=5$ である。各試験機関の部分平均と全データの平

均をそれぞれ $\langle Y_k \rangle$ 及び $\langle Y \rangle$ とすれば、試験機関間の分散の推定は次の式であらわされる。

$$s_a^2(\nu_a) = \frac{L}{(K-1)} \sum_{k=1}^K (\langle Y_k \rangle - \langle Y \rangle)^2 \quad (4-23)$$

ここで $\nu_a = N-1$ 、試験機関内の分散の推定は

$$s_b^2(\nu_b) = \frac{1}{K(L-1)} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L (Y_{kl} - \langle Y \rangle)^2 \quad (4-24)$$

ここで $\nu_b = K(L-1)$ 。F-分布は次の2つの独立した推定値 s_a^2 と s_b^2 の次の比率の確率分布である。

$$F_{\text{exp}} = \frac{s_a^2}{s_b^2} \quad (4-25)$$

F-分布は統計学の文献に示されるように、 ν_a と ν_b の関数として表現される。

試験機関間か試験機関内のいずれからの影響が大きいかを定量的に明らかにするために、の項で得られた生データを用いて、80、60、50 mmの3つの異なる曲げ直径における臨界電流維持率のデータセットからF-検定を行った。F-分布はTable 4-10のように計算され、 $\nu_a = 4$ 及び $\nu_b = 20$ における $F_{0.99}(\nu_a, \nu_b)$ はF分布表から2.87である。

Table 4-10 F-検定の概要

曲げ直径 (mm)	$s_a^2(4)$	$s_b^2(20)$	F_{exp}	主要なばらつき源
80	0.720×10^{-4}	0.145×10^{-4}	4.96	試験機関間
60	2.96×10^{-4}	0.195×10^{-4}	15.1	試験機関間
50	34.0×10^{-4}	1.21×10^{-4}	28.1	試験機関間

80、60、50 mmの全てのケースにおいて、 $F_{\text{exp}} > F_{0.99}$ であるため、試験機関間分散推定は試験機関内分散推定より大きかった。これは、最大のばらつき原因は5つの試験機関間から報告されたデータ間にあることを示唆している。全ての試験機関で「2. 評価サンプルと評価方法」の節に示した同じ実験方法の臨界電流測定法を採用したにもかかわらずこの結果であるということは、それぞれの試験機関で用いられた独特の実験条件によって実験結果が影響を受けることが明らかになった。一つの可能性の高い原因は次に述べる両曲げ工程である。

4-2 規格化臨界電流の両曲げ直径依存性の振る舞い

Figure 4-11 に規格化臨界電流の曲げ直径依存性を示す。ここでは P1、P5、P6 から報告された参考データとともに、今回の RRT で得られた平均値を赤い中実丸点で示す。この“参考データ”とは、同じ線材から採取したサンプルを用いて測定された 80、60、50 mm とは別の曲げ直径で測定した規格化臨界電流である。この図に示された全てのデータは、臨界電流が 60 mm 前後から下がりはじめ、50 mm から急激に低下するという傾向を示している。それゆえ、この臨界電流の曲げ直径依存性をいかに正確に知るかが重要である。

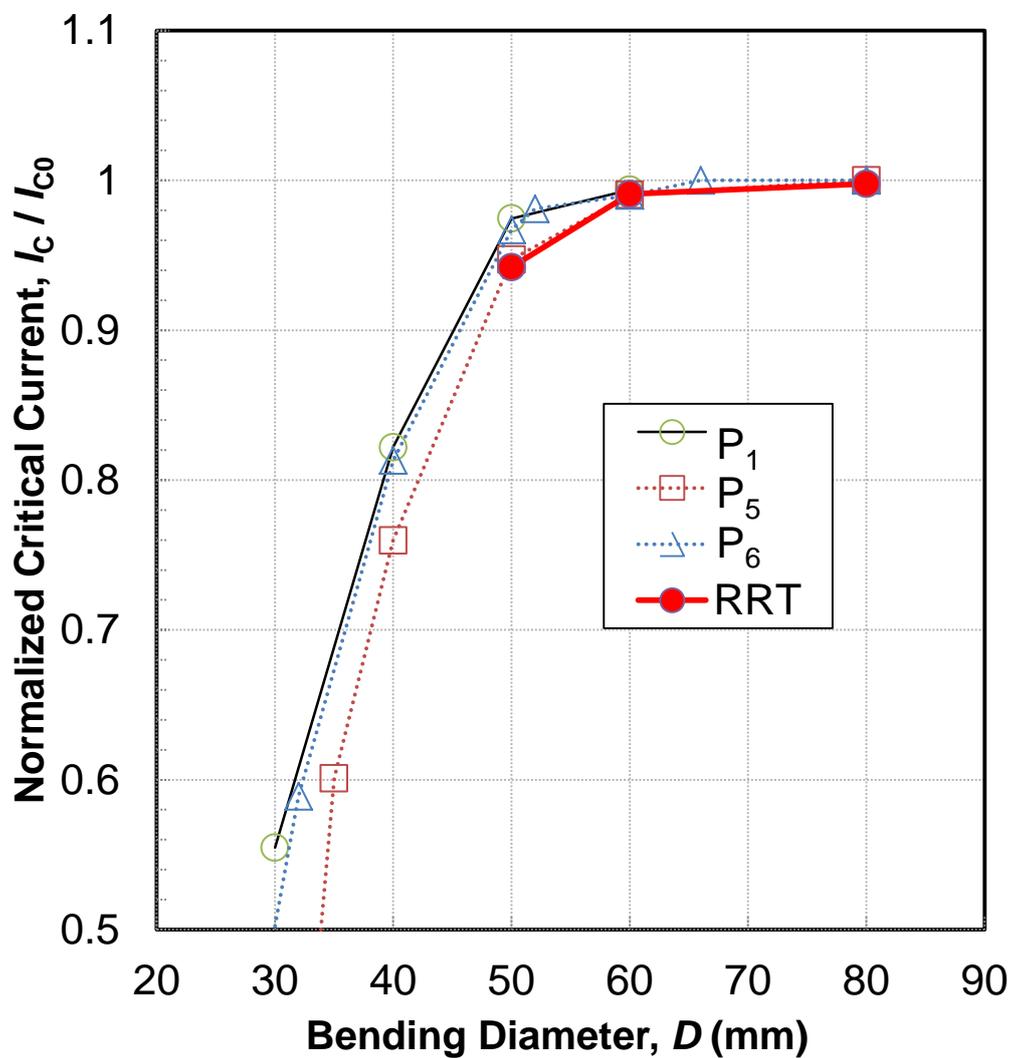


Figure 4-11 規格化臨界電流の両曲げ直径依存性

4-3 実験による不確かさの原因

Figure 4-11 に示されるように規格化臨界電流は曲げ直径が 60 mm 以下で急激に減少し始める。この減少は超電導フィラメントの破壊によるものと考えられる。実用化を考えると、この減少程度を評価することが必要である。

Table 4-7 に示されるように、曲げ直径が減少するにつれて相対標準不確かさは増加する。Type B評価では、Table 4-8 に示されるように、曲げ直径が最も不確かさへの感度係数が高い。マンドレル上で正確に線材を曲げることは難しく、実際に曲げられた直径はそれぞれのハンドリングにおいて異なる可能性がある。式(4-22)から示されるように、曲げにおける標準不確かさ 1.15 mmが推定される。式(4-21)から得られるように、曲げ処理におけるハンドリングからもたらされるばらつきは曲げ直径が小さくなるにつれて増加する。Figure 4-10 に示すように、60 mm以下の曲げ直径依存性の相対標準不確かさ X_{RSU} の急激な増加は、人間の操作に依存する曲げの扱いに関連していると理解することができる。

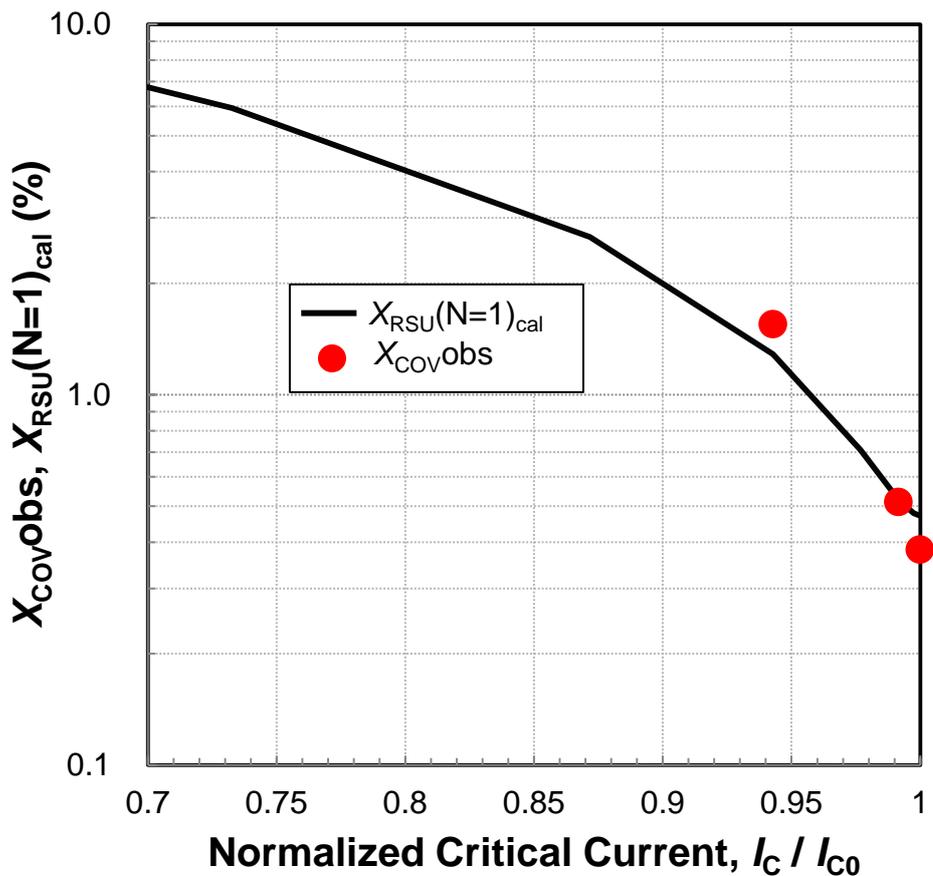


Figure 4-12 相対標準不確かさ X_{RSU} ($N=1$)と観察された分散係数 X_{COVobs} の規格化臨界電流依存性

曲げによる臨界電流の低下を一般化して**Figure 4-12**に示す。ここでは、 $N=1$ における相対標準不確かさ $X_{\text{RSU}} (N=1)$ と観察された分散係数 X_{COVobs} を規格化臨界電流 $I_{\text{C}}/I_{\text{C0}}$ の関数でプロットしている。 $I_{\text{C}}/I_{\text{C0}}$ が1に近づくと、相対標準不確かさは0.4-0.5%に外挿される。本研究で明らかになったように、標準不確かさの増加をもたらす主要因は曲げ処理に起因すると考えられる。**Figure 4-12**は規格化臨界電流が低下するとどのように標準不確かさが増加するかを示している。例えば、規格化臨界電流 $I_{\text{C}}/I_{\text{C0}} = 0.95$ の時、 $X_{\text{RSU}} (N=1)$ は1.1%に、 X_{COVobs} は1.3%になる。

「4-1 分散分析」の項で述べたように、F検定で規格化臨界電流測定の主要なばらつき源が試験機関間から生じていることが明確になった。それぞれの試験機関で曲げ前と曲げ後の臨界電流測定は同じ方法で実施された。式(4-5)で曲げ前後の臨界電流の商をとっているため、臨界電流測定における誤差は減少できている。しかしながら、曲げにおけるハンドリングは両曲げを行った後の臨界電流にのみ影響する。このように曲げのハンドリングが試験機関間の大きなばらつきに影響を及ぼしうる。

曲げ処理において、ばらつきが生じる原因は、斜めに（スパイラル状）に巻きつくことによる直径の変化によるものと推定される。スパイラル角を減少させるには、マンドレルにサンプルを巻き沿わすために帽子のつばのような板をつけるのがよいと考えられる。

5. まとめ

臨界電流の曲げひずみ依存性試験法の標準化をめざし、試験方法の妥当性について研究した。市販されているBi2223超電導線材サンプルを6試験機関に配布して比較評価(Round Robin Test: RRT)を行い、各試験機関における測定結果から、統計的解析を行った。

重要な4つのパラメータ I_{C0} 、 $I_{\text{C}}/I_{\text{C080}}$ 、 $I_{\text{C}}/I_{\text{C060}}$ 及び $I_{\text{C}}/I_{\text{C050}}$ に関して測定値の標準不確かさを評価し、それぞれに対して、 $N=5$ における相対標準不確かさの期待値を得た。試験結果における主要なばらつきがどこにあるのかを見極めるためにF検定を行い、規格化臨界電流測定における主要なばらつき源が試験機関間のばらつきによることが明らかになった。

Type-B不確かさ解析から、不確かさの主な原因が曲げ直径と温度測定の項であることが示唆された。曲げ直径が減少すると相対標準不確かさは増加する傾向がある。臨界電流の維持率95%に対応した所定の曲げ径での相対標準不確かさは1.3%と判定され、その値は比較的小さいものである。曲げ前と曲げ後の臨界電流測定時の温度差を小さくすること、曲

げ方法を改善することで、さらにばらつきを減少させることができると考えられる。

この結果から、この試験方法は超電導線材の国際標準として測定機関内でも、また異なる測定機関と比べても十分小さい不確かさをもつものと考えられ、国際標準化への提案プロセスを開始した。まず、この RRT において作成した試験手順を見直して、新たに国際標準案を作成した。この案を日本国内のエキスパートによる委員会にてコメントを頂いて修正した上で、2013 年に IEC/TC90 国際委員会に提案、新規提案を認められた。それを正式に NP (New Proposal) として 2014 年の 10 月に提案を行い、各国の投票で承認された。その結果編成された国際エキスパート会議のリーダーに任命された。NP をベースに CD (Committee Draft) を作成、さらに国際エキスパート会議において議論を重ね、CD-V (投票用の Committee Draft) を 2017 年 4 月に提出、投票において全メンバー国の賛成を得て 2017 年 8 月に承認された。この後、各国の意見を踏まえて 2018 年 4 月に最終的な FDIS (Final Draft International Standard) を提出、5 月末に全 10 ヶ国の賛成を得て国際標準として承認された。

そして、2018 年 6 月 18 日付けで IEC 61788-24:2018 「Superconductivity - Part 24: Critical current measurement - Retained critical current after double bending at room temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires」として、正式に国際標準として発行された。

6. 参考文献

- 1) H. Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano: *A New High-Tc Oxide Superconductor without a Rare Earth Element*, Japanese Journal of Applied Physics, **27**(1988), L209
- 2) M. K. Wu, J. R. Ashburn, C. J. Torng, P. H. Hor, R. L. Meng, L. Gao, Z. J. Huang, Y. Z. Wang and C. W. Chu: *Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure*, Physical Review Letters, **58**(1987), 908
- 3) ISTEK, *Superconductivity Web21*, Summer, 2001, 6
- 4) W. Goldacker, S-I. Schlachter, R. Nast, H. Reiner, S. Zimmer, H. Kiesel and A. Nyilas: *BENDING STRAIN INVESTIGATIONS ON BSCCO(2223) TAPES AT*

- 77K APPLYING A NEW BENDING TECHNIQUE*, Advances in Cryogenic Engineering, **48**(2002), 469
- 5) T. Kuroda, K. Itoh, H. Kumakura, H. Wada and K. Katagiri: *Complementary analysis of the results of a bending strain effect round robin-test on the critical currents of Ag alloysheathed Bi-2223 tapes*, Superconductor Science and Technology, **16**(2003), 1120
 - 6) K. Katagiri, K. Hiroi, K. Kasaba, T. Asoh, T. Kuroda, K. Itoh, H. Wada and H-S. Shin: *Bending strain characteristics of Ag/Bi(2223) tapes at liquid nitrogen temperature*, Physica C, **412-4**(2004), 1101
 - 7) D. Uglietti, B. Seeber, V. Abächerli, A. Pollini, D. Eckert and R. Flükiger: *A device for critical current versus strain measurements up to 1000 A and 17 T on 80 cm long HTS and LTS technical superconductors*, Superconductor Science and Technology, **16**(2003), 1000
 - 8) P. S. Shankar, J. P. Singh, B. Ma, R. Koritala, B. L. Fisher and U. Balachandran : *Bend strain tolerance of $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ coated conductors fabricated by inclined substrate deposition*, Superconductor Science and Technology, **19**(2006), 930
 - 9) 山田雄一, 山田穰, 大熊武: *RE123 線材の曲げひずみ特性*,低温工学, **45**(2010), 246
 - 10) http://global-sei.com/super/hts_e/type_ht.html
 - 11) http://amsc.com/library/BRSAMP8700_DS_A4_0514_WEB.pdf
 - 12) http://i-sunam.com/home/en_product,1,3,1,1,1
 - 13) 大屋正義, 湯村洋康, 渡部充彦, 芦辺祐一, 滝川裕史, 伊藤秀樹, 南野忠彦, 西村崇, 増田孝人, 本庄昇一, 三村智男, 鬼頭豊, 野口裕, *日本初の超電導ケーブルによる実線路実証プロジェクト(高温超電導ケーブル実証プロジェクト)*, SEIテクニカルレビュー, **176**(2010), 103
 - 14) S. Yamaguchi, H. Koshizuka, K. Hayashi and T. Sawamura: *Concept and design of 500 m and 1000 m DC superconducting power cables in Ishikari, Japan*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **25**(2015), 5402504

- 15) S. Mark, M. Frank, N. Mathias and H. Achim: *AmpaCity - advanced superconducting medium voltage system for urban area power supply*, IEEE PES T&D Conference and Exposition, 2014, 1–5
- 16) V. Sytnikov, S. Bemert, S. Kopylov, M. Romashov, T. Ryabin, Y. Shakaryan and V. Lobyntsev: *Status of HTS cable link project for St. Petersburg Grid*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **25**(2015), 5400904
- 17) S. Hanai, T. Tsuchihashi, Y. Minemoto, S. Ioka, K. Watanabe, S. Awaji and H. Oguro: *Upgraded Cryogen-Free 20 T Superconducting Magnet*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **24**(2014), 4301204
- 18) *Critical current measurement – DC critical current of Ag- and/or Ag alloy -sheathed Bi-2212 and Bi-2223 oxide superconductors*, IEC 61788-3:2006 Ed. 2.0
- 19) ISO/IEC Guide 98-3:2008(E), *Part 3 Guide to the expression of uncertainty in measurement*, page 11
- 20) K. Osamura, A. Nyilas, K-P Weiss, H-S Shin, K. Katagiri, S. Ochiai, M. Hojo, M. Sugano, and K. Ohsawa, *International round Robin test for mechanical properties of BSCCO-2223 superconductive tapes at room temperature*, Cryogenics, **51**(2011), 21
- 21) K. Osamura, H-S. Shin, K-P. Weiss, A. Nyilas, A. Nijhuis, K. Yamamoto, S. Machiya and G. Nishijima, *International round robin test for mechanical properties of REBCO superconductive tapes at room temperature*, Superconductor Science and Technology, **27**(2014), 085009
- 22) Unpublished data of Sumitomo Electric Industries, Ltd.

第5章 総括

現在MRIや粒子加速器等に使用されているNb-Ti超電導線材では実現できない高温、高磁場応用機器に使用可能なNb₃Al超電導線材や銅酸化物系超電導線材は、超電導応用領域を大きく広げると期待されている。しかしながら、合金であるNb-Tiが非常に可撓性の高い材料であるのに比較して、それらの超電導体は可撓性が低く、応力やひずみによって臨界電流が大きく変化する。そのため、それら新しい超電導線材の実用化の鍵となるのは、臨界電流の応力やひずみ依存性である。そこで、Nb₃Al超電導線材の実用化研究を行うとともに、銅酸化物系超電導線材（REBCO超電導線材及びBSCCO超電導線材）の曲げひずみによる臨界電流特性への影響について研究を行った。

第1章では、超電導技術の実用化において必要な超電導線材とその製造方法の現状について概説し、エネルギー分野への応用の拡大を目指した新しい超電導線材の実用化とそれに必要な臨界電流の応力・ひずみ依存性の研究の進め方を示した。

第2章では、ジェリーロール法を用いて作製したNb₃Al超電導線材の研究を進め、応力やひずみによる臨界電流低下が少なく、工業的な規模で製造が可能なNb₃Al超電導線材を開発した。

Nb₃Al超電導体は、化学量論組成であるNb:Al=3:1の組成比の物質が単相となるのは約1900°C以上1950°C以下の非常に高温域であるがために超電導線材の実用化に至っていなかった。ニオブとアルミの複合加工によってアルミの拡散に必要な距離を短くすることで銅の融点以下の温度でも大型コイルに採用できる熱処理条件で実用的な臨界電流密度を得られることをジェリーロール法による製造プロセスで明らかにした。これにより、核融合炉用超電導マグネット用超電導線材に求められる12 T, 4.2 Kにおける非銅部臨界電流密度で実用レベルを超える800 A/mm²が得られた。

また、大型コイルの熱処理では採用が困難であるが、750~800°Cという実用的な温度の熱処理の前に、銅の融点に近い高温（1000°C以上）で短時間の熱処理を行うことで、臨界磁場の高い、高磁場臨界電流特性の優れた熱処理条件を見いだした。これにより、高温短時間熱処理+低温長時間熱処理の2段階熱処理により、4.2 K, 12 Tの非銅部臨界電流密度で1130 A/mm²、上部臨界磁場23.1 Tと通常熱処理より約40%高い臨界電流密度が得られた。

さらに、そのような銅の融点以下でアルミの拡散距離を短くできる微細構造を得るため

には、ニオブとアルミ及び銅の複合加工を行うが、アルミの融点が低く比較的低い熱履歴でも化合物を生成するために、Nb-Ti超電導線材の製造のような熱間押出法による大単重ビレットを使った製造方法が採用できない。そのため、常温に近い温度での加工を行う必要があり、複合材料の伸線加工が非常に厳しい。本研究では、ニオブとアルミを重ね合わせた形状をできる限り相似形に保つような複合伸線方法を開発することで、歩留りを量産レベルに向上させた。これにより、ITER開発計画におけるNb₃Al インサート・コイル用超電導線材の製造において、500m以上の線材の製造歩留り 90 %以上の良好な長尺伸線性が得られた。

ITER計画では、超電導導体のロスを低減するためにクロムめっき付の超電導線材が要求されるが、熱処理によりクロムが安定化銅に拡散し、残留抵抗を増加させる。そのため、クロムの熱処理による拡散状況を調査し、残留抵抗の増加を許容レベルまで抑えることが可能な安定化銅の中央配置方法を開発した。これにより、クロムめっき前のベア線材では $4 \times 10^{-11} \text{ } \Omega \text{ m}$ 以下、2 μm のクロムメッキ付線材でも $1.5 \times 10^{-10} \text{ } \Omega \text{ m}$ 以下の残留抵抗を持つ ITER仕様を満足する銅安定化超電導線材が得られた。

また、Nb₃Al超電導線材の臨界電流の温度・磁場依存性を評価するとともに、線材素線及びCIC導体の応力やひずみによる臨界電流への影響を明らかにした。

この線材を使った大電流導体の試作を行い、高磁場下で大電流が通電可能な ITER 用超電導導体としての要求性能を満たすことを実証した。

なお、ITER計画において、本超電導線材を使用したNb₃Alインサート・コイルが製作され、繰り返し励磁試験、クエンチ試験などが行われ、Nb₃Sn導体で観測された臨界電流性能低下がみられないこと、そしてひずみによる臨界電流の低下がNb₃Snに比べて非常に小さいことが立証された。

第3章では、銅酸化物系超電導線材の一種であるREBCO超電導線材に加えられた曲げひずみによる臨界電流への影響を研究した。REBCO超電導線材の製造プロセスは種々提案されているが、同様のプロセスでも、線材毎に臨界電流の曲げ直径依存性、特に、超電導層を圧縮する方向に差がみられる。一方、引張方向ではいずれの線材も直径約 20 mmで急激な臨界電流の低下がみられる。圧縮方向の曲げでは、F-PLD以外のREBCO超電導線材において、臨界電流が 95%を維持する曲げ直径 (D_{95}) と臨界電流が曲げ戻しによって 99%まで回復する曲げ直径 (D_{99}) に大きな差が見られ、 D_{99} の方が小さい(ひずみが大きい)。引

張方向ではいずれも D_{95} と D_{99} の差が小さい。

また、実用的な観点から、磁場中での臨界電流の曲げひずみ依存性や、スリットやスクライブ、そして補修を行った線材の臨界電流の曲げひずみ依存性も評価した。これらの結果により、臨界電流の曲げひずみ依存性に関して以下のような知見が得られた。

(1) 引張方向の曲げひずみ依存性

D_{95} と D_{99} の差が小さいことから、ひずみによる可逆的な臨界電流低下は臨界電流低下が5%程度までであり、それを超えると不可逆な、すなわち組織の破壊をともなう。これは、製法に関わらず約0.5%のひずみであり、REBCO超電導体の引張方向の可逆限界であると推定される。また、磁場中における引張方向の曲げでは、0~3 Tの範囲で、曲げ直径に対してほぼ同様の臨界電流の低下傾向を示しており、臨界電流の磁場依存性は変化しないことを見いだした。これは、引張によって結晶自体が変化せず、結晶粒界に亀裂等が入ることによって臨界電流が低下したことを示すものと推定される。

(2) 圧縮方向の曲げひずみ依存性

線材の種類によって臨界電流の曲げ直径依存性は大きく異なる。その原因としては、超電導層の結晶方位や製造プロセスの違いによる空隙の存在状態などによるものと推定される。引張方向における臨界電流低下の可逆ひずみを超えてもひずみを解放すると臨界電流は曲げ前と同等まで回復するため、圧縮方向に曲げを加えた場合では組織の破壊をともなっていない可逆的な組織の変化であると推定される。また、磁場中における引張方向の曲げでは、0~3 Tの範囲で、曲げ直径に対して線材の種類によらず臨界電流の低下傾向を示していたが、圧縮方向では臨界電流の磁場依存性が異なり、高磁場中ほど圧縮方向の曲げを加えることによって臨界電流が上昇する傾向を示した。これは、可逆的な圧縮により結晶の格子定数が増加し、臨界電流の磁場依存性が変化したためであると推定される。

(3) 曲げひずみに対する可逆限界

可逆限界である ε_{99} の評価からREBCO超電導層の本質的な破壊の生じる圧縮方向と引張方向のひずみは、残留ひずみの影響でシフトするものの、その差、すなわち曲げひずみに対して破壊しない可逆な範囲は、いずれの線材も1%強であることがわかった。

(4) 銅めっき及び基板の厚さによる曲げひずみ依存性

銅めっき分の厚さや基板の厚さが、見かけ上の曲げひずみ依存性を異なるように見せるが、超電導層の線材厚さ方向の位置を考慮してひずみを計算し直すことで、本質的な超電

導層が受けるひずみを推定できる。この本質ひずみで整理することにより、臨界電流の曲げひずみ依存性は、同様のプロセスで製造された超電導線材では、ほぼ同じであることを示した。すなわち、基板を薄肉化することにより、線材の曲げに対する臨界電流の低下を減少させるといったことが可能になることが明らかになった。

(5) スリットした線材やスクライブ線材における曲げひずみ依存性

超電導線材をスリット（長さ方向に幅狭に切断）やスクライブ（基板は切断せず、超電導層を長手方向に平行に分割）しても曲げによるひずみは変わらないので、スリットやスクライブ工程による超電導層への影響がなければ、線材の臨界電流の曲げひずみ依存性への影響はないことがわかった。

(6) 補修線材における曲げひずみ依存性

補修を目的とした接合部の特性は、互いに超電導層側を合わせるため、貼り付ける側の線材の超電導層が（一般に本線側が圧縮方向のひずみを受けるように巻線設計が行われるため）引張方向のひずみを受ける。このひずみから推定される臨界電流の低下に比べてやや大きい臨界電流の低下が生じているが、これの正確な原因は把握できていない。スクライブ技術の完成度やスクライブにより細くなった層間接合部に不均一な変形が加わっているなどの原因が推測されるが、100 mm 以上の巻線直径では殆ど臨界電流は低下しないため、用途を考慮すれば実用化は可能であることがわかった。

第 4 章では、銅酸化物系超電導線材の臨界電流の曲げひずみ依存性試験法の標準化をめざし、試験方法の妥当性について研究した。市販されている Bi2223 超電導線材試料を 6 試験機関に配布して比較評価（Round Robin Test : RRT）を行い、各研試験機関における測定結果から、統計的解析を行った。

重要な 4 つのパラメータ I_{C0} 、 I_C/I_{C080} 、 I_C/I_{C060} 及び I_C/I_{C050} に関して測定値の標準不確かさを評価し、それぞれに対して、 $N=5$ における相対標準不確かさの期待値を得た。試験結果における主要なばらつきがどこにあるのかを見極めるために F 検定を行い、規格化臨界電流測定における主要なばらつきが試験機関間のばらつきによることが明らかになった。

Type-B 不確かさ解析から、不確かさの主な原因が曲げ直径と温度測定の項であることが示唆された。曲げ直径が減少すると相対標準不確かさは増加する傾向がある。臨界電流の維持率 95% に対応した所定の曲げ径での相対標準不確かさは 1.3% と判定され、その値は比較的小さいものである。曲げ前と曲げ後の臨界電流測定時の温度差を小さくすること、曲

げ方法を改善することで、さらにばらつきを減少させることができると考えられる。

この結果から、この試験方法は超電導線材の国際標準として測定機関内でも、また異なる測定機関と比べても十分小さい不確かさをもつものと考えられ、国際標準化への提案プロセスを開始した。まず、この RRT において作成した試験手順を見直して、新たに国際標準案を作成した。この案を日本国内のエキスパートによる委員会にてコメントを頂いて修正した上で、2013 年に IEC/TC90 国際委員会に提案、新規提案を認められた。それを正式に NP (New Proposal) として 2014 年の 10 月に提案を行い、各国の投票で承認された。その結果編成された国際エキスパート会議のリーダーに任命された。

NP をベースに CD (Committee Draft) を作成、さらに国際エキスパート会議において議論を重ね、CD-V (投票用の Committee Draft) を 2017 年 4 月に提出、投票において全メンバー国の賛成を得て 2017 年 8 月に承認された。この後、各国の意見を踏まえて 2018 年 4 月に最終的な FDIS (Final Draft International Standard) を提出、5 月末に全 10 ヶ国の賛成を得て国際標準として承認された。

そして、2018 年 6 月 18 日付けで IEC 61788-24:2018 「Superconductivity - Part 24: Critical current measurement - Retained critical current after double bending at room temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires」として、正式に国際標準として発行された。

謝辞

本論文の執筆には、京都大学の土井俊哉教授、馬淵守教授、平藤哲司教授のご指導を頂きました。記して深く感謝いたします。

第2章の Nb_3Al 超電導線材の開発に際しましては、住友電工の野田伸夫、(故)松原宏長、永田正之、佐藤謙一、高橋謙一、大松一也、三雲晃、綾井直樹、伊藤睦の各氏、(当時の)日本原子力研究所の安藤俊就、高橋良和、西正孝、杉本誠、布谷嘉彦、辻博史の各氏のご指導とご協力を頂きました。深く感謝いたします。

15 T を超える高磁場の臨界電流特性の測定には、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の高磁界マグネットを使用させて頂きました。ここに渡辺和雄教授、淡路智教授をはじめ、センターの皆様に深く感謝いたします。

第3章では、イットリウム系超電導電力機器技術開発の研究として、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託を受けて実施しました。各種のREBCO超電導線材の提供に関しましては、フジクラ、昭和電線、古河電工、中部電力、住友電工・薄膜線材グループ、そして国際超電導産業技術研究センター(ISTEC)の線材研究部の方々に、スプライス、レーザースリット、接合に関しては、ISTECの物性バルク研究部の筑本知子部長補佐、町敬人部長補佐のご協力を得ました。曲げ試験装置に関しては、カールスルーヘ工科大学のGoldacker教授、富山大学の笠場孝一准教授、そして鈴木商館の水野氏、渡辺氏に多大なご助力を頂きました。また、評価全般に関しましては、ISTEC、電力機器部の藤原昇部長、大熊武部長、山田穰特別研究員から有益なアドバイスとご指導を頂きました。ここに深く感謝いたします。

第4章では、評価試料の準備に関して、住友電工・超電導製品開発部の線材技術・製造担当者及び、VAMAS/TWA16のご協力を頂きました。各試験機関で測定・評価して頂いた、韓国・安東国立大学・申教授、ドイツ・カールスルーヘ工科大学・Goldacker教授、イタリア・ボローニャ大学・Marco教授。住友電工における曲げ特性評価では竹下氏、臼井直美氏。また、応用科学研究所・長村光造教授、物質・材料研究機構の西島元先生には、評価、解析をはじめ、多大なご指導、ご協力を頂きました。ここに深く感謝いたします。

卒業以来、学位取得に対してご助言と激励を頂きました京都大学の長村光造名誉教授、本論文執筆の直接の契機になりましたご助言を頂きました京都大学の雨宮尚之教授、中部大学の筑本知子教授にも、深く感謝いたします。

研究実績

査読付き論文

1. T. Ando, Y. Takahashi, M. Nishi, Y. Yamada, K. Omatsu and M. Nagata: *Development of 10 kA class Nb₃Al Superconducting Cable by Jelly-Roll Process*, IEEE Transactions on Magnetics, **27**(1991), 1775
2. T. Ando, Y. Takahashi, M. Nishi, Y. Yamada, K. Ohmatsu and M. Nagata: *AC losses in a multifilamentary Nb₃Al/Cu composite superconductor made by a jelly roll process*, Advances in Cryogenic Engineering Materials, **38**(1992), 813
3. T. Ando, Y. Takahashi, M. Sugimoto, M. Nishi, H. Tsuji, Y. Yamada and M. Nagata: *Development of Nb₃Al Cable-in-Conduit Fusion Superconductors*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **3**(1993), 492
4. W. Specking, H. Kiesel, H. Nakajima, T. Ando, H. Tsuji, Y. Yamada and M. Nagata: *First results of strain effects on I_c of Nb₃Al Cable in conduit Fusion Superconductors*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **3**(1993), 1342
5. Y. Yamada, N. Ayai, K. Takahashi, K. Sato, M. Sugimoto, T. Ando, Y. Takahashi and M. Nishi: *Development of Nb₃Al/Cu multifilamentary Superconductors*, Advances in Cryogenic Engineering Materials, **40**(1994), 907
6. Y. Takahashi, M. Sugimoto, T. Isono, H. Nakajima, T. Ando, M. Oshikiri, F. Hosono, Y. Wadayama, T. Sasaki, H. Hanawa, S. Seki, H. Wakabayashi, T. Hiyama, Y. Yamada, K. Takahashi and M. Nagata: *Experimental Results of 40-kA Nb₃Al Cable-in-conduit Conductor for Fusion Machines*, IEEE Transactions on Magnetics, **30**(1994), 2531
7. N. Ayai, Y. Yamada, A. Mikumo, K. Takahashi, K. Sato, N. Koizumi, M. Sugimoto, T. Ando, Y. Takahashi, M. Nishi and H. Tsuji: *Development of Nb₃Al Multifilamentary Superconductors*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **5**(1995), 893
8. M. Sugimoto, T. Sasaki, M. Nishi, Y. Takahashi, T. Ando, H. Tsuji, Y. Yamada, N. Ayai, K. Takahashi, T. Fujioka, T. Hanai, S. Oukita and T. Horiya: *Development of 10-kA Nb₃Al Coil*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **5**(1995), 897
9. S. Ochiai, T. Sawada, S. Nishino, M. Hojo, K. Takahashi and Y. Yamada: *Relation*

- of strength distribution of Nb₃Al filaments to strength of multifilamentary superconducting composite wire*, Cryogenics, **36**(1996), 249
10. Y. Iwasa, J. B. Kim, N. Ayai, Y. Yamada, K. Sato and T. Ando: *A niobium-aluminum (Nb₃Al) coil: Performance, including quench behavior, in the temperature range 4.2-12K*, Cryogenics, **36**(1996), 675
 11. N. Ayai, A. Mikumo, Y. Yamada, K. Takahashi, K. Sato, N. Koizumi, T. Ando, M. Sugimoto, H. Tsuji and S. Shimamoto: *Improvement of critical current density and residual resistivity on jelly-roll processed Nb₃Al superconducting wires*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **7**(1997), 1564
 12. C.L.H. Thieme, J.B. Kim, M. Takayasu, S. Foner, Y. Iwasa, D. Rodrigues Jr, Y. Yamada and T. Ando: *Critical current densities of Jerry-roll and Powder metallurgy Nb₃Al wires as a function of temperature and magnetic field*, Advances in Cryogenic Engineering (Materials), **42**(1996), 2439
 13. T. Ando, Y. Nunoya, N. Koizumi, M. Sugimoto, H. Tsuji, K. Sato and Y. Yamada: *Dependence of Critical Current Density on Temperature and Magnetic Field in Multifilamentary Nb₃Al Strands made by the Jerry Roll Process*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **7**(1997), 1568
 14. 山田雄一, 綾井直樹, 三雲晃, 高橋謙一, 佐藤謙一, 小泉徳潔, 安藤俊就, 杉本誠, 高橋良和, 辻博史: *ジェリーロール法Nb₃Al超電導線の特性と実用化の実証*, 日本金属学会誌, **61**(1997), 814
 15. 澤田武洋, 落合庄治郎, 北條正樹, 山田雄一, 高橋謙一, 綾井直樹, 渡辺和雄: *Nb₃Al 複合線材の室温疲労挙動とその超伝導特性に及ぼす影響*, 日本金属学会誌, **61**(1997), 822
 16. N. Koizumi, T. Ando, M. Sugimoto, Y. Takahashi, H. Tsuji, S. Shimamoto, Y. Yamada, A. Mikumo, N. Ayai: *Development of a 13-T and 40-kA Nb₃Al conductor for toroidal coils of fusion reactors*, Fusion Engineering and Design, **41**(1998), 277
 17. S. Ochiai, T. Sawada, F. Sekino, M. Hojo, Y. Yamada, K. Takahashi, N. Ayai and K. Watanabe: *Fatigue behavior at room temperature and its influence on superconducting properties at 4.2 K of multifilamentary Nb₃Al composite wire*, Superconductor Science and Technology, **11**(1998), 322

18. 林和彦, 山田雄一, 綾井直樹, 三雲晃, 佐藤謙一, 小泉徳潔, 松井邦浩, 安藤俊就, 杉本誠, 高橋良和, 辻博史: ジェリーロール法による Nb_3Al 線材開発の現状, 低温工学, **33**(1998), 629
19. Y. Yamada, N. Ayai, A. Mikumo, M. Ito, K. Hayashi, K. Takahashi, K. Sato, N. Koizumi, T. Ando, K. Matsui, M. Sugimoto, H. Tsuji and K. Okuno: *Development of Nb_3Al superconductors for International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)*, Cryogenics, **39**(1999), 115
20. S. Ochiai, T. Sawada, S. Nishio, F. Sekino, M. Hojo, Y. Yamada, K. Hayashi, N. Ayai, M. Koganeya, M. Ono: *Distribution of the strength of the filamentary Nb_3Al compound*, Journal of Materials Science Letters, **18**(1999),137
21. T. Naito, H. Fujishiro and Y. Yamada: *Thermal Conductivity and Thermal Dilatation of Commercial BSCCO (DI-BSCCO) Tapes*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **19**(2009), 3034
22. T. Naito, H. Fujishiro and Y. Yamada: *Thermal conductivity of single and multi-stacked DI-BSCCO tapes*, Cryogenics **49**(2009), 429
23. T. Naito, H. Fujishiro and Y. Yamada: *Anisotropic thermal transport in double-pancake coil wound with DI-BSCCO (R) tape*, Physica C Superconductivity, **470**(2010), 1397
24. 山田雄一, 山田穰, 大熊武: RE123 線材の曲げひずみ特性, 低温工学, **46**(2011), 246
25. K. Osamura, S. Machiya, D. Hampshire, Y. Tsuchiya, T. Shobu, K. Kajiwara, G. Osabe, K. Yamazaki, Y. Yamada and J. Fujikami: *Uniaxial strain dependence of critical current of DI-BSCCO tapes*, Superconductor Science and Technology, **27**(2014), 085005
26. Y Yamada, G. Nishijima, K. Osamura, H. Shin, W. Goldacker, M Breschi and P. Ribani: *International round robin test of the retained critical current after double bending at room temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires*, Superconductor Science and Technology, **29**(2016), 25010
27. T. Naito, H. Fujishiro and Y. Yamada: *Thermal conductivity and dilatation of a Bi-2223/Ag (DI-BSCCO) superconducting wire laminated with various thin alloy tapes*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, **28**(2018), 6400404

その他論文（プロシーディング他）

1. 山田雄一, 大松一也, 奥剛司, 永田正之, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝: ジェリーロール法 Nb_3Al 超電導線の開発, 住友電気, **139**(1991), 93
2. W. Specking, T. Ando, H. Tsuji, A. Mikumo, and Y. Yamada: *Effect of static and cyclic strain on J_c of Nb_3Al CIC conductors a comparison with Nb_3Sn* , ICEC16/ICMC Proceedings (1996), 1661
3. Y. Nunoya, M. Oshikiri, T. Ando, Y. Takahashi, H. Nakajima, M. Sugimoto, H. Tsuji, S. Shimamoto, Y. Yamada, M. Konno, B. Blau, I. Rohleder, G. Vecsey, S. Shen and H. Katheder: *Experimental Results of 13T-46kA Nb_3Al Conductor in SULTAN*, ICEC16/ICMC Proceedings(1996), 1665
4. A. Mikumo, N. Ayai, Y. Yamada, K. Takahashi, K. Sato, N. Koizumi, M. Sugimoto, T. Ando, H. Tsuji and S. Shimamoto: *Development of Practical Nb_3Al Superconducting Strand*, ICEC16/ICMC Proceedings(1996), 1673
5. Y. Yamada, S. Isojima, T. Masuda, K. Hayashi, K. Sato and R. Hata: *Recent development of High-Temperature Superconducting (HTS) cable in Sumitomo Electric Industries, Ltd.*, Proceedings of 18th International Conference on Electricity Distribution(CIRED2005), Session No 1
6. T. Masuda and Y. Yamada: *Development and demonstration of the 3-in-One High Temperature Superconducting power cable*, Proceedings of 19th International Conference on Electricity Distribution(CIRED2007), 0497
7. M. Hirose, Y. Yamada, T. Masuda, K. Sato and R. Hata: *Study on Commercialization of High-Temperature Superconductor*, SEI Technical Review, **62**(2006), 15
8. Y. Yamada, M. Mogi and K. Sato: *Examples and Future Prospects of High-Temperature Superconductor Products*, SEI Technical Review, **65**(2007), 51
9. T. Naito, H. Fujishiro and Y. Yamada: *Thermal conductivity of DI-BSCCO tapes with stacked or sandwiched structure*, Journal of Physics: Conference Series, **234**(2010), 22025
10. Y. Yamada, Y. Yamada, T. Machi, A. Ibi, T. Izumi, H. Kutami, Y. Iijima, T. Saito, T. Koizumi, T. Nakanishi and Y. Aoki: *J_c -bending strain characteristics of RE123 wires in various fabrication processes*, Proceedings of ICEC/ICMC2010, 1229

学会発表（国内会議）

1. 山田雄一, 大松一也, 永田正之, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝, 島本進: ジェリーロール法による Nb_3Al 多芯線の臨界電流特性, 1989年秋季低温工学・超電導学会
2. 西正孝, 高橋良和, 安藤俊就, 大松一也, 山田雄一, 永田正之: Nb_3Al 10kA導体の開発, 1990年春季低温工学・超電導学会
3. 山田雄一, 大松一也, 永田正之, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝: ジェリーロール法 Nb_3Al 超電導導体の開発, 1990年金属学会
4. 山田雄一, 大松一也, 永田正之, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝: ジェリーロール法 Nb_3Al 超電導導体の開発, 1990年秋季低温工学・超電導学会
5. 山田雄一, 大松一也, 永田正之, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝, 伊藤郁夫, 今野雅行: ジェリーロール法 Nb_3Al 超電導導体の開発(2), 1991年春季低温工学・超電導学会
6. 山田雄一, 大松一也, 永田正之, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝: ジェリーロール法 Nb_3Al 超電導導体の開発(2), 1991年金属学会
7. 山田雄一, 大松一也, 永田正之, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝: ジェリーロール法 Nb_3Al 超電導導体の開発(3), 1991年秋季低温工学・超電導学会
8. 山田雄一, 大松一也, 高橋謙一, 永田正之, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝: Nb_3Al ケーブル・イン・コンジット導体の開発, 1992年春季低温工学・超電導学会
9. 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝, 山田雄一, 高橋謙一, 永田正之: ジェリーロール Nb_3Al 多芯線の平行磁界中のヒステリシスロス, 1992年春季低温工学・超電導学会
10. 中嶋, 安藤俊就, 辻博史, 山田雄一, 永田正之, Specking, Kiesel: Nb_3Al ケーブル・イン・コンジット導体の I_c の引張歪特性, 1992年春季低温工学・超電導学会
11. 山田雄一, 綾井直樹, 大松一也, 高橋謙一, 佐藤謙一, 杉本誠, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝, 辻博史: Nb_3Al 超電導線の開発, 1992年秋季低温工学・超電導学会
12. 高橋良和, 杉本誠, 磯野, 押切, 細野, 和田山, 佐々木, 塙, 関, 若林, 安藤俊就, 辻博史, 山田雄一: 40kA級 Nb_3Al 導体の通電試験結果, 1992年秋季低温工学・超電導学会
13. 安藤俊就, 杉本誠, 山田雄一, 綾井直樹: ジェリーロール Nb_3Al 多芯線の平行磁界中のヒステリシスロス, 1993年春季低温工学・超電導学会
14. 綾井直樹, 山田雄一, 大松一也, 高橋謙一, 佐藤謙一, 杉本誠, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝: Nb_3Al 超電導線の開発, 1993年春季低温工学・超電導学会

15. 綾井直樹, 山田雄一, 高橋謙一, 佐藤謙一, 杉本誠, 安藤俊就, 高橋良和, 西正孝, 辻博史: *Nb₃Al素線の高磁界特性*, 1993 年秋季低温工学・超電導学会
16. 布谷嘉彦, 中嶋, 杉本誠, 安藤俊就, 西正孝, 高橋良和, 和田山, 辻博史, 山田雄一, 綾井直樹, 高橋謙一, 佐藤謙一: *Nb₃Al素線の引張ひずみ特性*, 1993 年秋季低温工学・超電導学会
17. 杉本誠, 安藤俊就, 西正孝, 高橋良和, 辻博史, 山田雄一, 綾井直樹, 高橋謙一, 佐藤謙一: *Nb₃Al素線の曲げひずみ特性*, 1993 年秋季低温工学・超電導学会
18. 山田雄一, 綾井直樹, 高橋謙一, 佐藤謙一, 安藤俊就, 杉本誠, 高橋良和, 西正孝, 辻博史, 花井哲, 山本, 伊藤, 藤岡, 大北, 堀谷: *Nb₃Al 10kA コイル - 導体製作*, 1993 年秋季低温工学・超電導学会
19. 花井哲, 山本, 藤岡, 伊藤郁夫, 安藤俊就, 杉本誠, 高橋良和, 西正孝, 辻博史, 山田雄一, 綾井直樹, 高橋謙一, 佐藤謙一, 大北, 堀谷: *Nb₃Al 10kA コイル - コイル製作*, 1993 年秋季低温工学・超電導学会
20. 杉本誠, 安藤俊就, 西正孝, 高橋良和, 佐々木, 和田山, 小方, 辻博史, 山田雄一, 綾井直樹, 高橋謙一, 佐藤謙一, 花井哲, 山本, 伊藤郁夫, 藤岡, 大北, 堀谷: *Nb₃Al 10kA コイル - 通電試験結果*, 1993 年秋季低温工学・超電導学会
21. 山田雄一, 綾井直樹, 三雲晃, 高橋謙一, 佐藤謙一, 杉本誠, 安藤俊就, 西正孝, 高橋良和, 辻博史: *Nb₃Al素線の高磁界特性(2)*, 1994 年春季低温工学・超電導学会
22. 杉本誠, 布谷嘉彦, 安藤俊就, 西正孝, 高橋良和, 辻博史, 山田雄一, 綾井直樹, 高橋謙一, 佐藤謙一: *Nb₃Al素線の引張・曲げひずみ特性*, 1994 年春季低温工学・超電導学会
23. 綾井直樹, 山田雄一, 三雲晃, 高橋謙一, 佐藤謙一, 小泉徳潔, 杉本誠, 安藤俊就, 西正孝, 高橋良和, 辻博史: *Nb₃Al超電導線の実用化開発*, 1994 年秋季低温工学・超電導学会
24. 三雲晃, 綾井直樹, 山田雄一, 高橋謙一, 佐藤謙一, 小泉徳潔, 安藤俊就, 杉本誠, 辻博史: *Nb₃Alインサートコイル用線材の開発*, 1996 年秋季低温工学・超電導学会
25. 綾井直樹, 山田雄一, 三雲晃, 高橋謙一, 佐藤謙一, 小泉徳潔, 安藤俊就, 杉本誠, 辻博史: *ジェリーロール法Nb₃Al超電導線材の残留抵抗の改善*, 1996 年秋季低温工学・超電導学会
26. 綾井直樹, 山田雄一, 三雲晃, 高橋謙一, 佐藤謙一: *高温短時間熱処理によるジェリ*

- ーロール法 Nb_3Al 超電導線材の開発, 1996年秋季低温工学・超電導学会
27. 落合庄治朗, 澤田武洋, 西野重孝, 北條正樹, 高橋謙一, 山田雄一: Nb_3Al フィラメントの強度分布と複合多芯線材の強度特性, 1996年秋季低温工学・超電導学会
 28. 綾井直樹, 三雲晃, 山田雄一, 高橋謙一, 佐藤謙一, 小泉徳潔, 安藤俊就, 杉本誠, 辻博史, 渡辺和雄: Nb_3Al インサートコイル用線材の開発 2, 1997年春季低温工学・超電導学会
 29. 綾井直樹, 山田雄一, 高橋謙一, 佐藤謙一, 高橋良和, 松井邦浩, 牛草健吉, 菊池満, 永見正幸: ジェリーロール法 Nb_3Al 線の交流損失の低減, 1997年秋季低温工学・超電導学会
 30. 綾井直樹, 三雲晃, 伊藤睦, 山田雄一, 高橋謙一, 佐藤謙一, 小泉徳潔, 松井邦浩, 安藤俊就, 杉本誠, 高橋良和, 辻博史: Nb_3Al インサートコイル用線材の開発 3, 1997年秋季低温工学・超電導学会
 31. 三雲晃, 山田雄一, 古金谷正伸, 林和彦, 佐藤謙一: Nb_3Al 超電導線の磁界特性と成型燃線, 1998年春季低温工学・超電導学会
 32. 湯村洋康, 山田雄一, 林和彦, 佐藤謙一, 嘉数修: 交流用 $Nb-Ti$ 導体の大容量化の検討 -VI-, 1998年春季低温工学・超電導学会
 33. 藤上純, 山田雄一, 種子田賢宏, 大松一也, 林和彦, 佐藤謙一, 本庄昇一, 保原夏朗, 岩田良浩: Bi 系転位型ケーブル導体用丸線の高性能化 II, 1998年秋季低温工学・超電導学会
 34. 山田雄一, 藤上純, 大松一也, 佐藤謙一, 本庄昇一, 保原夏朗, 岩田良浩: Bi 系銀シーステープ線材による多層超電導導体の要素検討, 1998年秋季低温工学・超電導学会
 35. 笠場孝一, 山田雄一, 佐藤雅史, 廣内悟: $DI-BSCCO$ テープ線材の臨界電流の応力/ひずみ依存性, 2008年秋季低温工学・超電導学会
 36. 豊谷和晃, 林和彦, 山田雄一, 綾井直樹, 菊地昌志, 北口仁: $DI-BSCCO$ Type H の低温磁場特性, 2008年秋季低温工学・超電導学会
 37. 内藤智之, 藤代博之, 山田雄一: $DI-BSCCO$ の熱伝導率, 2008年秋季低温工学・超電導学会
 38. 山田雄一, 山田穰, 藤原昇, 町敬人, 衣斐顕, 和泉輝郎, 朽網寛, 飯島康裕, 齊藤隆: $RE123$ 系線材の応力-ひずみ特性 1. $IBAD-MgO$ 線材のフラットワイズ曲げ, 2009年秋季低温工学・超電導学会

39. 内藤智之, 藤代博之, 山田雄一: *DI-BSCCO線材を用いて作製されたダブルパンケーキコイルの異方的熱輸送特性*, 2009年秋季低温工学・超電導学会
40. 山田雄一, 山田穰, 藤原昇, 和泉輝郎, 塩原融, 斎藤隆, 青木裕治, 大松一也, 八木正史: *RE123系線材の応力-ひずみ特性(2) 線材製造プロセスと曲げひずみ特性*, 2010年春季低温工学・超電導学会
41. 山田雄一, 山田穰, 大熊武, 斎藤隆, 青木裕治, 大松一也, 八木正史: *RE123系線材の応力-ひずみ特性(3) - 不可逆曲げひずみ -*, 2010年秋季低温工学・超電導学会
42. 本間久雄, 山田穰, 山田雄一, 大熊武, 和泉輝郎, 塩原融, 岩熊成卓: *RE123線材の臨界電流の温度・磁場依存性とコイル化の検討*, 2010年秋季低温工学・超電導学会
43. 山田雄一, 山田穰, 衣斐頭, 筑本知子, 町敬人, 大熊武: *RE123系線材の応力 - ひずみ特性(4) 実用線材のひずみ特性*, 2011年春季低温工学・超電導学会
44. 本間久雄, 山田穰, 山田雄一, 大熊武, 和泉輝郎, 塩原融, 岩熊成卓: *Cuメッキ実用RE123系線材のコイル化の検討*, 2011年春季低温工学・超電導学会
45. 山田雄一, 山田穰, 衣斐頭, 吉積正晃, 大熊武, *RE123系線材の応力 - ひずみ特性(5) 実用線材のひずみ特性 2*, 2011年秋季低温工学・超電導学会
46. 長部吾郎, 藤上純, 山田雄一, 山崎浩平, 小林慎一, 林和彦: *DI-BSCCO線材の臨界電流均一性*, 2013年秋季低温工学・超電導学会
47. 町屋修太郎, 長村光造, Hampshire Damian P., 土屋佳則, 菖蒲敬久, 梶原堅太郎, 長部吾郎, 山崎浩平, 山田雄一, 藤上純: *DI-BSCCO線材の臨界電流の一軸性引張・圧縮歪依存性と白色X線によるBSCCOフィラメントのひずみ測定*, 2013年秋季低温工学・超電導学会
48. 長村光造, 町屋修太郎, 長部吾郎, 山崎浩平, 山田雄一, 藤上純, Hampshire Damian P.: *DI-BSCCO線材の臨界電流の曲げ歪依存性と一軸性引張・圧縮歪依存性との相関*, 2013年秋季低温工学・超電導学会
49. 笠羽一成, 笠場孝一, 山田雄一, 長部吾郎: *DI-BSCCOテープの引張繰返し負荷特性の評価*, 2015年春季低温工学・超電導学会

学会発表（国際会議）

1. T. Ando, Y. Takahashi, M. Nishi, Y. Yamada, K. Ohmatsu and M. Nagata: *Development of 10kA class Nb₃Al superconducting cable by the Jelly-roll process*, Applied Superconductivity Conference (ASC)1990
2. Y. Yamada, K. Ohmatsu, M. Nagata, T. Ando, Y. Takahashi and M. Nishi: *Development of Nb₃Al superconductor by Jelly-roll process*, 7th US-Japan workshop on High Field Superconducting Materials, Wires, ...(1991)
3. T. Ando, Y. Takahashi, M. Nishi, Y. Yamada, K. Ohmatsu and M. Nagata: *AC losses in a multifilamentary Nb₃Al/Cu composite superconductor made by a jelly roll process*, International Cryogenic Materials Conference (ICMC)1991
4. W. Specking, H. Kiesel, H. Nakajima, T. Ando, H. Tsuji, Y. Yamada and M. Nagata: *First results of strain effects on I_c of Nb₃Al Cable in conduit Fusion Superconductors*, ASC1992
5. T. Ando, Y. Takahashi, M. Sugimoto, Y. Yamada and M. Nagata: *Development of Nb₃Al Cable-in-conduit Fusion Superconductors*, ASC1992
6. Y. Yamada, N. Ayai, K. Takahashi, K. Sato, M. Sugimoto, T. Ando, Y. Takahashi and M. Nishi: *Development of Nb₃Al Cu multifilamentary Superconductors*, ICMC1993
7. Y. Takahashi, M. Sugimoto, T. Isono, H. Nakajima, T. Ando, M. Oshikiri, F. Hosono, Y. Wadayama, T. Sasaki, H. Hanawa, S. Seki, H. Wakabayashi, T. Hiyama, Y. Yamada, K. Takahashi and M. Nagata: *Experimental Results of 40-kA Nb₃Al Cable-in-conduit Conductor for Fusion Machines*, Magnet Technology 13(1993)
8. N. Ayai, Y. Yamada, A. Mikumo, K. Takahashi, K. Sato, N. Koizumi, M. Sugimoto, T. Ando, Y. Takahashi, M. Nishi and H. Tsuji: *Development of Nb₃Al Multifilamentary Superconductors*, ASC1994
9. M. Sugimoto, T. Sasaki, M. Nishi, Y. Takahashi, T. Ando, H. Tsuji, Y. Yamada, N. Ayai, K. Takahashi, T. Fujioka, T. Hanai, S. Oukita and T. Horiya: *Development of 10-kA Nb₃Al Coil*, ASC1994
10. C.L.H. Thieme, J.B. Kim, M. Takayasu, S. Foner, Y. Iwasa, D. Rodrigues Jr, Y. Yamada and T. Ando: *Critical current densities of Jerry-roll and Powder metallurgy Nb₃Al wires as a function of temperature and magnetic field*, ICMC1995

11. **Y. Yamada**, A. Mikumo, N. Ayai, K. Takahashi, K. Sato, N. Koizumi, M. Sugimoto, T. Ando, M. Nishi, Y. Takahashi and H. Tsuji: *Nb₃Al Superconductor for High Field*, 9th US-Japan workshop on High Field Superconducting Materials, Wires, ...(1995)
12. Y. Nunoya, M. Oshikiri, T. Ando, Y. Takahashi, H. Nakajima, M. Sugimoto, H. Tsuji, S. Shimamoto, **Y. Yamada**, M. Konno, B. Blau, I. Rohleder, G. Vecsey, S. Shen and H. Katheder: *Experimental Results of 13T-46kA Nb₃Al Conductor in SULTAN*, Cryogenic Engineering Conference and International Cryogenic Materials Conference (ICEC /ICMC) (1996)
13. N. Ayai, A. Mikumo, **Y. Yamada**, K. Takahashi, K. Sato, N. Koizumi, T. Ando, M. Sugimoto, H. Tsuji and S. Shimamoto: *Improvement of critical current density and residual resistivity on jelly-roll processed Nb₃Al superconducting wires*, ICEC16/ICMC(1996)
14. Mikumo, N. Ayai, **Y. Yamada**, K. Takahashi, K. Sato, N. Koizumi, M. Sugimoto, T. Ando, H. Tsuji and S. Shimamoto: *Development of Practical Nb₃Al Superconducting Strand*, ICEC16/ICMC(1996)
15. W. Specking, T. Ando, H. Tsuji, A. Mikumo, and **Y. Yamada**: *Effect of static and cyclic strain on J_C of Nb₃Al CIC conductors a comparison with Nb₃Sn*, ICEC16/ICMC (1996)
16. **Y. Yamada**, S. Isojima, T. Masuda, K. Hayashi, K. Sato and R. Hata: *Recent development of High-Temperature Superconducting (HTS) cable in Sumitomo Electric Industries, Ltd.*, 18th International Conference on Electricity Distribution(CIRED2005)
17. T. Masuda and **Y. Yamada**: *Development and demonstration of the 3-in-One High Temperature Superconducting power cable*, CIRED2007
18. **Y. Yamada**, Y. Yamada, N. Fujiwara, T. Machi, A. Ibi, T. Izumi, H. Kutami, Y. Iijima, T. Saito: *Strain characteristics on RE123 wires fabricated through IBAD-PLD process*, Asian Conference on Applied Superconductivity and Cryogenics(ACASC) 2009
19. **Y. Yamada**, Y. Yamada, T. Machi, A. Ibi, T. Izumi, H. Kutami, Y. Iijima, T. Saito, T. Koizumi, T. Nakanishi and Y. Aoki: *Ic-bending strain characteristics of RE123 wires*

in various fabrication processes, ICEC/ICMC2010

20. **Y. Yamada**, Y. Yamada, T. Izumi, Y. Shiohara, T. Saito, Y. Aoki, K. Ohmatsu, M. Yagi: *Bending strain characteristics of RE123 wires made by various processes*, International Symposium on Superconductivity (ISS)2010
21. **Y. Yamada**, Y. Yamada, T. Ohkuma, T. Izumi, Y. Shiohara: *Bending strain characteristics of RE123 wires made by various processes 2*, ISS2011
22. **Y. Yamada**, Y. Yamada, T. Ohkuma, T. Izumi, Y. Shiohara: *Bending Strain Characteristics of RE123 Superconductors*, 6th Workshop of Mechanical-Electromagnetic Properties of Superconducting Materials (MEM11)
23. T. Naito, H. Fujishiro and **Y. Yamada**: *Thermal conductivity and dilatation of a Bi-2223/Ag (DI-BSCCO) superconducting wire laminated with Ni-alloy tapes*, 13th biennial European Conference on Applied Superconductivity (EUCAS)2017
24. **Y. Yamada**: International Standard for “Retained critical current after double bending at room temperature of Ag-sheathed Bi-2223 superconducting wires”, 9th Mechanical and Electromagnetic Properties of Composite Superconductors (MEM18)2018

特許

1. US8173897 他 超電導ケーブル線路
2. EP609804 他 Nb₃X系超電導線用線材およびNb₃X系超電導線の製造方法
3. US5891585 他 Nb₃Al系多芯超電導線
4. JP2016-207506 超電導線材、および超電導線材の接続構造