

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	山田 雄一
論文題目	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		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、現在商用化されている Nb-Ti 超電導線材では実現できない高温、高磁場応用機器を作製可能にする Nb₃Al 超電導線材や銅酸化物系超電導線材について、実用的な長尺超電導線材の製造プロセス、および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結果をまとめたもので、5章からなっている。</p> <p>第1章では、超電導応用機器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ている。</p> <p>第2章では、ジェリーロール法を用いた Nb₃Al 超電導線材の開発結果について記述している。開発した超電導線材で温度 4.2 K、印加磁場 12 T における非銅部臨界電流密度(J_c)が実用レベルを超える 800 A/mm² を達成している。また、すべての応用機器には利用できない製法となるが、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、$J_c=1,130$ A/mm²、上部臨界磁場(B_{c2})=23.1 T と更に高い性能の超電導線材が得られることを示した。さらに、臨界電流の温度-磁場依存性を評価するとともに、線材素線及びケーブル・イン・コンジット(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ている。加えて、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ている。そして Nb₃Al インサート・コイル用超電導線材の製造において、500 m 以上の線材製造歩留り 90%以上の工業的な規模の製造プロセスを開発したことが示されている。</p> <p>第3章では、銅酸化物系超電導線材の一種である RBa₂Cu₃O₇(R: 希土類元素)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ており、以下のことを明らかにしている。</p> <p>(1) 引張方向の曲げひずみによる可逆限界は製法に関わらず約 0.5%であり、結晶粒界に亀裂等が入ることで臨界電流(I_c)が低下する。一方、圧縮方向の曲げひずみ依存性は超電導層の結晶方位や製造プロセスの違いによって異なり、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も変化する。</p> <p>(2) 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、可逆範囲は、いずれの製法で製造した超電導線材も 1%強である。</p>			

(3) 超電導層が受ける本質的なひずみを考慮すると、同種の成膜プロセスで製造された超電導線材であればメーカーごとに異なる製法によっても、 I_c の曲げひずみ依存性は、ほぼ同じである。

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ている。

市販されている $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ 超電導線材試料を6試験機関に配布して比較評価測定 (Round Robin Test : RRT) を行い、各研試験機関における測定結果から、統計的解析を行っている。Type-B 不確かさ解析から、主な寄与が曲げ直径と温度測定の項であることを明らかにした。これより、曲げ前後の臨界電流測定時の温度差を小さくすること、曲げ方法の改善で、さらにばらつきを減少させることができることを示した。

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が、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約1.3%であることを示し、その値は比較的小さいものであることを明らかにした。

なお、第4章の研究成果をもとに、試験法が国際標準に提案され、Committee Draft、Committee Draft for Vote、Final Draft International Standard を経て、国際投票により、全10メンバー国の賛成で可決され、2018年6月18日付けで IEC 61788-24:2018 として正式に国際標準として承認されている。

第5章は結論であり、第2章から第4章までの要約である。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、現在、医療用 MRI や粒子加速器、リニア中央新幹線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磁場応用機器の実現を可能にする Nb₃Al 超電導線材や銅酸化物系超電導線材について、その実用化に際して鍵となる臨界電流のひずみ依存性、長尺線材製造法について研究した成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1) Nb₃Al 超電導線材の製造技術としてジェリーロール法の開発を進め、Nb と Al 原料を近接して配置することで実用レベルを超える性能が得られることを明らかにし、原料配置、拡散バリア層導入、伸線加工条件、熱処理条件最適化により、Nb₃Al 超電導線材の製造歩留まり 90%を超える工業量産レベルを達成する製造技術の開発に成功した。さらに、線材素線及び大電流用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。また、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。

2) RBa₂Cu₃O₇(R:希土類元素)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詳細に検討し、製造方法によって臨界電流の見かけのひずみ依存性が異なること、しかしながら製造方法によって異なる線材中の残留ひずみの影響を除去して求めた臨界電流の真ひずみ依存性は同じであることを明らかにした。また、超電導体に加わるひずみが圧縮方向では、結晶の格子定数が変化する可逆な変化を示し、引張方向では、結晶は変化せず組織の破壊をもたらすことを明らかにした。

3) Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ 超電導線材の臨界電流の曲げひずみ依存性試験法として常温における両曲げ評価方法を提案、国際協力によるラウンドロビンテストを実施し、その妥当性を示した。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、また、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が、相対標準不確かさは 1.3%と、国際標準として十分小さいものと判断された。なお、この手法は 2018 年 6 月 18 日付けで IEC 61788-24:2018 として正式に国際標準として承認された。

以上、本論文は超電導機器の実現に重要な超電導線材の臨界電流のひずみ依存性に関して、複数種類の超電導線材についての研究開発を行ったものであり、重要な省エネルギー技術の 1 つである超電導技術の工業的発展に向けての有用な結果を与えている。

よって、本論文は博士(エネルギー科学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 30 年 8 月 28 日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降