

氏 名 堀 上 徹

授 与 学 位 工 学 博 士

学位 授与年月日 昭和 5 3 年 3 月 8 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭和 4 1 年 3 月

東北大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了

学 位 論 文 題 目 新複合多心 Nb₃Sn 超電導線材に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 和泉 修 東北大学教授 金子 秀夫

東北大学教授 小野寺 大 東北大学助教授 永田 明彦

論 文 内 容 要 旨

1953 年 Hardy と Hulm により V₃Si の高い超電導転移温度 ($T_c = 17.1$ K) が発見されて以来, A-15 型金属間化合物の研究が超電導物質という観点から活発に行なわれた。翌年に T_c が 18.05 K を示す Nb₃Sn が見い出されたあと種々の作成方法が試みられ, 現在では 18.3 K が Nb₃Sn におけるもっとも高い T_c となっている。ところが Nb₃Sn は機械的に脆弱であるため電磁石用の長尺線材とするためにはその製造方法が極めて重要となる。現在では Cu-Sn 合金と Nb とを複合加工したあと熱拡散処理により Nb₃Sn を生成するいわゆる固体拡散法(ブロンズ法)が実用上の主流となっている。しかし母材である CuSn 合金は加工硬化が著しいため生産性を低下させると同時に純 Cu と比較して 4.2 K の比抵抗が約 2 桁高いため超電導状態から常電導状態への転移時に発熱を伴ない線材が焼損する危険性がある。

以上の情勢に鑑み、 Nb_3Sn 線材の性能改善に関する材料学的研究を系統的に行ない、その成果をまとめたのが本論文である。すなわち本論文では Nb_3Sn 線材の超電導特性を向上させると同時に、従来の線材加工方法における製造上の問題点をあきらかにし、細線加工を容易にする新複合多心 Nb_3Sn 超電導線材を提案した。そして製造上、使用上の諸因子と超電導特性との関連を系統的に検討し、最後に本法で得られた新複合多心 Nb_3Sn 線材を用いて実際に電磁石を作成し、10.6 T の高磁場を安定に発生できることを実証した。

本論文は7章より構成され、その概要は次の通りである。

第1章「序論」では、 Nb_3Sn を主とした化合物超電導材料およびその製造方法についての研究開発経緯を概観し、現在の Nb_3Sn 線材が超電導特性および製造方法のいずれにおいても必ずしも満足する状態でないことを指摘し、特に線材の加工性の改善が必要であることを強調した。そして問題点を整理するとともに、本研究の目的と意義を明らかにした。

第2章「固体拡散法による Nb_3Sn 線材の特性改善と製造上の問題点」では、従来の固体拡散法を用いて Nb と CuSnGa 3 元合金との界面に $\text{Nb}_3(\text{Sn}_{1-x}\text{Ga}_x)$ 相を生成させ、Sn と Ga の組成比と生成相の超電導特性との関連を調べた。その結果、Cu - 5 wt % Sn - 8.5 wt % Ga 合金を母材に用いて生成した化合物相の T_c は Nb_3Sn のそれよりも約 0.4 K 高く、且つ 10 T 以上の磁場における臨界電流密度も Nb_3Sn のそれよりも高いことが明らかとなり CuSn 合金への第3元素添加による Nb_3Sn の特性改善の一つの可能性を提起した。一方 CuSnGa 合金は Sn および Ga の濃度増加と共に加工性が著しく劣化するため細線加工が極めて困難であることも明らかとなった。

さらにもう一つの特性改善として CuSn 合金中の Sn 濃度を増加すると Nb_3Sn の j_c 値が増大することを見い出した。しかし従来の固体拡散法では CuSn 合金中の Sn 濃度の増加と共に加工性が低下するため特性を改善することと加工性を上げることとは二律背反の関係にあることになる。さらに上記2方法のいずれの場合においても母材として比抵抗の高い CuSn 合金または CuSnGa 合金を用いているため超電導状態から常電導状態への転移の際に線材を焼損する欠点もある。従って T_c 、 H_{c2} および j_c というような超電導体の基本特性を向上させるだけでは実用的な観点からは不十分である。特に加工性、安定性の問題を解決する必要がある。

第3章「新複合多心線材の加工性に関する研究」では、第2章で述べた製造上の問題点に特に着目した新複合線材を提案して従来の欠点を解決することに成功した。

新複合多心線材の断面構造は Cu 管、Nb 管、Cu 管および中心に Sn または Sn に富む Cu

合金の三重管構造から成ることを特徴とする。各構成材料は加工硬化が比較的少ないため常温での細線加工が容易で中間焼鈍過程が不要となり、従って線材製造過程の簡略化を可能にすると同時に線材価格の低減に寄与する。また超電導特性の面からは Nb 管内側の Cu 管の厚みを変えることにより Nb 管内の Cu と Sn の組成を任意に選ぶことができ、 j_c の高い Nb₃Sn を得ることができた。さらに Nb 管の外側の材料、すなわち母材が高導電度の純 Cu であるため超電導状態から常電導状態への転移は極めて安定で線材に損傷を与えることなく用いることができる。

このような構造を有する線材を工業的な規模で 19 本から 295 本まで多心化したあと細線加工を行ない細線加工を安定に行なうための基本的な要因を検討した。その結果三重管の最中心に Sn に富む Cu 合金を用いると η' 相が晶出し、これが加工を阻害する最大の要因であることを見出した。さらに第 2 の因子として Nb 管の機械的性質が重要であることもあきらかとなった。SnCu 合金の代りに純 Sn を用いると細線加工が安定にでき、工業的な規模での長尺 Nb₃Sn 線材製造に対する見通しを得た。

第 4 章「新複合線材の熱処理条件と直流特性」では、本線材が従来の構造とは異なり Sn が Nb 管の内側にしか存在しないために、生成する Nb₃Sn 層の厚みが Nb 管の内径により決まることをあきらかにした。熱処理条件による Nb₃Sn 層の厚みと Nb 管内径との関係を調べ、さらにこれらの試料の T_c および j_c を測定することにより Nb 管の各寸法に対する最適熱処理条件を見出した。

第 5 章「新複合線材の直流特性におよぼす歪の影響」では、本線材を電磁石等に撚線するときに加わる張力のため線材に機械的な歪が生じそのため超電導特性が低下する可能性があるため、本線材の引張歪、曲げ歪と超電導特性の変化との関係を定量的に明らかにした。

さらにタングステン線を補強線として、その囲りに 6 本の多心線材を撚線にした構造の線材についても同様に検討した。その結果引張応力による I_c の低下は Nb₃Sn 層の厚みに依存せず 0.9 % 程度の歪量で I_c の低下がはじまり、一方曲げ応力に対しては Nb₃Sn 層の厚みが関係し生成層の薄い方が小さな直径まで曲げることが可能であることがわかった。これは I_c 低下の原因が Nb₃Sn の粒界破壊にあるため、厚膜 Nb₃Sn では粒径粗大のために破壊が容易に生ずるためである。

撚線構造線の曲げ応力に対する I_c 低下は各素線の曲げによる低下現象に従うことがわかった。すなわち 7 本撚線構造線の最小可能曲げ直径は各多心線の最小可能曲げ直径とほぼ同じである。撚線構造線の引張応力に対する現象は複雑で線材のねじれ特性との関係を調べる必要のあることを指摘した。

第6章「新複合線材の交流特性」では、本線材がパルス磁場の条件下で使用されることを想定して本線材の磁化挙動を調べ、その結果より交流損失を求めさらに線材の安定性に関する知見を得た。線材の安定性に関しては磁束跳躍発生の有無で評価した。この評価基準によると Nb_3Sn 層の厚みが約 $8\text{ }\mu\text{m}$ 以上になると磁束跳躍の発生することがわかった。交流損失に関しては Nb_3Sn 層が厚く、且つ線径の太い方が損失は大きいことがわかった。

従って前章の曲げに対する特性劣化の事実とも併せて Nb_3Sn 層の厚みは薄い方が良好であることがわかる。

多心超電導線のエネルギー損失に関しては超電導体から発生する交流損失以外に線材間の結合損失がある。本線材の構造は従来の固体拡散法によるそれとは異なるため、すなわち Nb_3Sn が超電導材料である Nb の内側に生成している構造（本線材）と Nb の外側に生成している構造（従来の固体拡散法による線材）との相異のため結合損失の様子が異なると考えられる。すなわち Nb_3Sn とその外側にある材料との間に流れる結合電流はその外側材料の電気抵抗により異なる。従って本線材の場合 Nb_3Sn の外側材料として Nb が存在するため Nb が超電導状態にあるか常電導状態にあるかにより結合電流は異なる。Nb が常電導状態であれば結合電流は小さく、従って損失も小さいことが期待できる。磁化の減衰の測定から本線材は Nb の H_{c2} 以上の偏倚磁場のもとでは損失低減効果の著しいことが確認された。

第7章「総括」では、本研究で得られた結果を総括すると共に、本研究で提案した新複合多心 Nb_3Sn 線材を用いて実際に高磁場発生用電磁石を作成し、期待された成果を得た結果について述べている。

線材は心線数 258 本、Nb 管内径が約 $37\text{ }\mu\text{m}$ 、 Nb_3Sn 層の厚み約 $5\text{ }\mu\text{m}$ である。線材寸法は幅 2 mm 、厚さ 1 mm の平角線とした。 Nb_3Sn 線材による電磁石の内径は 40 mm で曲げ応力による Nb_3Sn の特性劣化を避けるために捲線後 Nb_3Sn 生成のための熱拡散処理を行なった。 Nb_3Sn 磁石の外側には内径 160 mm で磁場 5 T 発生可能な NbTi 線材による磁石を用い、これとのハイブリッド方式で 10.6 T の磁場を極めて安定に発生させることができ、励磁中の磁束跳躍も観測されず、且つ超電導状態から常電導状態への数回の転移においても特性の劣化は見られなかった。 Nb_3Sn の磁石のみで 8.6 T の磁場が発生可能であった。

この電磁石の試験結果より本研究において提案した Nb_3Sn 線材の優れていることを確認した。

以上本論文で述べられた一連の研究成果は、超電導材料の改良、発展に大きく寄与するものと期待される。

審 査 結 果 の 要 旨

A-15 型金属間化合物である Nb_3Sn は優れた超電導特性を示すが、その機械的性質の脆弱であることが実用上大きな難点となっている。この対策として現在では Cu-Sn 合金に Nb 線を埋込み、複合線材として線引き加工後に熱処理し、固体拡散により Nb_3Sn を生成せしめるいわゆるブロンズ法が提案されている。しかしこの方法では母材が Cu-Sn 合金であるために加工硬化が著しく、また電気抵抗が高い。前者は加工工程を煩雑にし、後者は超電導状態から常電導状態へ転移の際に焼損する欠点を有する。これを打開するために著者は複合構成材料の組合せを系統的に検討し、細線加工を容易にする新複合多心 Nb_3Sn 超電導線材を開発し、実用試験によりその高性能を実証した。本論文はこれら一連の研究を集成したもので、全編 7 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では固体拡散法における母材 Cu-Sn 合金の組成について Ga 添加ならびに Sn 濃度変化の Nb_3Sn 相生成への影響を調べ、超電導特性改善の効果を見出した。

しかし母相が Cu-Sn 系合金である限り加工性と安定性に難点が残る、それを打開するために第 3 章において新複合線材を提案している。すなわち新線材の断面構造は外側より Cu 管、Nb 管、Cu 管および中心に Sn または Sn に富む Cu 合金の三重管構造を構成単位とすることを特徴とする。各構成材料とも加工硬化が小で多心複合の細線加工が容易となり、また内側の Cu 管の厚みを変えることにより Cu と Sn の組成調節が可能で、さらに外側の純 Cu は焼損事故を防止する。

第 4 章では新複合線材の熱処理条件と直流特性について調べている。すなわち生成 Nb_3Sn 層の厚さと Nb 管内径との関係を調べ、超電導特性を測定して最適条件を明らかにした。

第 5 章では新線材の電磁石への適用性を確かめるために引張り歪、曲げ歪と超電導特性との関係を Nb_3Sn 層の厚さとの対応で調べ、また W 線を補強線として使用した場合についても検討している。

第 6 章ではパルス磁場下の使用を想定し、本線材の交流特性を調べている。 Nb_3Sn 層の厚さが或る値以上になると磁束跳躍を生じて不安定となり、交流損失も大となるため、前章の結果と併せて適正条件を求めた。また Nb_3Sn と Nb とが隣接することによる結合損失についても調べている。

第 7 章では以上の結果を総括するとともに、新多心線材を用いて高磁場発生用電磁石を作成し、優れた超電導特性を確認している。

以上要するに本研究は超電導特性と複合材料条件との因果関係を系統的に検討し、高性能の新しい超電導線材の開発を可能にしたものであり、金属工学、特に超電導材料分野の発展に寄与するところ少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。