

論文の内容の要旨

論文題目 「Nb₃Sn 超電導線材の特性向上のための高性能ブロンズ合金の研究」

学位申請者 谷口 博康

キーワード：水冷一方向凝固法，高 Sn 組成ブロンズ，Ti 基化合物，組織制御，
極細多芯線

現在、Nb₃Sn 超電導線材は、医療機器、加速器、核磁気共鳴装置、核融合実験炉などのマグネットに応用されている。超電導マグネットに要求される磁場の強さから、10 T 以下には Nb-Ti 線材、10 T 以上には Nb₃Sn 線材が主に使用される。近年、高磁場用途に使われる Nb₃Sn 線材は、「ITER」に多量に使用されている。「ITER」とは、日・欧・露・米・中・韓・印の7つの国・地域が参加する、核融合実験炉を実現しようとする国際熱核融合実験炉計画である。プラズマを制御する超電導マグネット (13 T) に、540 トンの Nb₃Sn 線材が応用されている。また、たんぱく質などの生体高分子等の構造や性質を調べる核磁気共鳴装置のマグネット (20~24 T) にも、Nb₃Sn 線材が応用されている。この Nb₃Sn 線材の製法には幾つかあり、ブロンズ法と呼ばれる Nb と Cu-Sn 合金 (ブロンズ) を複合加工する代表的な製法がある。この製法は、大型素材に対し熱間押出加工を取り入れ、工業的プロセスにより線材加工ができる。先の応用機器にも、ブロンズ法による Nb₃Sn 線材が多量に使用されている。

ブロンズ法による Nb₃Sn 線材の臨界電流密度 (J_c) に及ぼす要素として、ブロンズの Sn 濃度、微量元素添加、熱処理条件、超電導体の芯径など挙げられる。特にブロンズの Sn 濃度を高めることは、Nb₃Sn 相の生成量を増加させ J_c の向上に最も有効な要素となる。これまでの研究によると、ブロンズの Sn 濃度を 15 から 16 mass% に高めることで高磁場下 (18 T) の J_c が 30 % 向上している。しかし、ブロンズには熱力学的な固有の問題がある。固溶限 (15.8 mass% Sn) 以上に Sn 濃度を高めると、二相組織となり脆い化合物 Cu₄₁Sn₁₁ 相 (δ 相) が現れ、Sn 濃度がさらに高くなると伸線加工が困難となる。このため現在、実用されるブロンズの Sn 濃度は、固溶限近傍までに抑えられている。したがって、線材の J_c を高めることが難しい状況にある。また、超電導マグネットの高磁場化と大口径化に伴い、強い電磁力 (フープ力) が発生する。その電磁力によって、線材に大きなひずみが発生し超電導特性が劣化する。このため強度を高めた線材が求められる。ブロンズ法には以上のような課題がある。

本研究では、ブロンズ法 Nb₃Sn 線材の原料の高性能化を図り、超電導特性向上 (高 J_c 化) に寄与するブロンズ合金の研究開発を行うことを目的とした。量産化が確立したブロンズ法で、さらなる超電導特性の向上を図れば、製造コストの上昇を抑えることができ、高磁場マグネットの用途拡大に期待できる。

本論文は7章で構成されており、以下にその概略を説明する。

第1章では、研究の背景、超電導の基礎、超電導線材の応用例、超電導線材化技術を述べた。また、ブロンズの特徴、超電導線材用ブロンズの溶製技術、論文の目的と構成を述べた。

第2章では、本研究でブロンズの溶製法に選択した「水田式溶製法(水冷一方向凝固法)」の優位性を検証するため、他の製法によるインゴットとの組成分布、組織の違いを評価した。また、既存の実用組成ブロンズの加工性を把握するため、室温での機械的性質の測定、焼鈍温度の違いによる伸線加工性を実験的に評価した。さらには、焼鈍温度による組織の違いを評価し、焼鈍工程で採用する温度を定めた。

第3章では、既存の実用組成ブロンズの高温での機械的性質の把握と、ブロンズの間接脆性を示す温度域を明らかにするため、第2章で選択した製法により単相組織となるブロンズを製作し、高温での機械的性質を測定し脆化温度域を明らかにした。また、実用組成ブロンズには上部臨界磁界(B_{c2})を向上させるため微量のTiが添加されている。このTiについて、高温での機械的性質に及ぼす影響を明らかにした。

第4章では、本研究で開発する高Sn組成ブロンズにはTiを多量に添加しTi基化合物を晶出させ δ 相の共析を抑制する組織制御を行う。このため、固相中でのTi基化合物の熱的安定性を把握する必要がある。先行研究では明らかとなっていない固相中でのTi基化合物の熱的安定性について実験を行い、各温度における組織変化、Ti基化合物の変態温度、温度の上昇とともにTiが $\text{Cu}_{13}\text{Sn}_3$ 相(β 相)や α 相に固溶してTi基化合物の析出が抑制されることを明らかにした。

第5章では、延性が備わる高Sn組成ブロンズを製作するための組織制御の実験と検証を行った。高Sn組成ブロンズの上限Sn濃度とTi添加量を検討した。また、熱間鍛造加工によりTi基化合物を微細に分散することで延性を発現させる組織制御の方法を検討した。化合物相の面積率、機械的性質の測定を行い、延性が得られるブロンズの製作条件を決定した。

第6章では、第5章の製作条件を基に2種類の組織制御を行った高Sn組成ブロンズを製作した。次に、組織制御ブロンズを用いてブロンズ法により、Nb芯数が1615本、Nb芯径が $10\mu\text{m}$ となる極細多芯線を製作した。得られた線材に種々の条件で拡散熱処理を行い、超電導特性を測定した。特性の評価は、実用組成ブロンズ線材との J_c を比較し向上率を検証した。また、拡散熱処理前後の線材について機械的性質を測定し強度の変化を調べた。そして、拡散熱処理後の極細多芯線中のブロンズ母材を強化する有効元素を見出すため、各種Cu合金を製作して機械的性質を測定し強化に有効な元素を示した。

第7章では、本研究を総括し、今後の課題と展望について述べた。

本研究では、ブロンズ法 Nb_3Sn 線材の原料の高性能化を図り、超電導特性向上(高 J_c 化)に寄与する高性能ブロンズ合金の研究を行った。製法には水冷一方向凝固法を選択し、多量のTi添加と熱間鍛造により化合物の微細分散化を図る組織制御を行うことで、ブロンズの固溶限を2.5 mass%上回るSn濃度のブロンズに延性を付与することが可能となった。また、量産製法のブロンズ法を適用して極細多芯線材の製作を行うことに成功した。超電導特性

の評価では、低温で拡散熱処理を行った線材は、実用組成ブロンズを用いた線材より J_c が 25% 向上し目標を達成した。しかし、高温で拡散熱処理を行うと Nb_3Sn 相に Ti が多量に拡散することで特性が劣化する課題が残った。この性能低下のメカニズムについては、詳細なマイクロ組織の観察と解析を通じた、より根本的な研究が必要である。

本研究では三元系組成のブロンズで Ti 基化合物への組織制御を図ったが、四元系組成とし Sn 組成比が高く Ti 組成比の低い化合物を選定して組織制御を行うことで、 J_c の向上化に期待ができる。また、本研究の組織制御を行えば固溶限以上に Sn 濃度を高めることが可能となる。このため、一部の Sn をブロンズ母材に残留させることや、他の元素をブロンズに添加しブロンズ母材に残留させることで線材を強化し特性の劣化を抑制することが期待できる。