

氏名	石原克己 いし はら かつ み
学位の種類	工学博士
学位記番号	論工博第620号
学位授与の日付	昭和48年7月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第2項該当
学位論文題目	Ti-Nb 系超電導材料に関する研究

論文調査委員 (主査) 教授 中村陽二 教授 高村仁一 教授 村上陽太郎

論文内容の要旨

この論文は Ti-Nb 系超電導材料の超電導特性に関する基礎的研究と、その超電導マグネットへの応用に関する研究とをまとめたもので9章からなっている。

第1章は序論で、超伝導現象と超伝導体に関する理論について概説したのち、超電導マグネット材料における問題点を提起している。すなわち超電導マグネット材料として使用される、Ti-Nb 系合金や Ni₃Sn などの金属間化合物のような、臨界温度および臨界磁場の高い不均質硬超伝導体では、外部磁場により超伝導体内に侵入した磁束は不均質点にピン止めされる。このピン止めされた磁束が外部からの擾乱によって移動するときおこるフラックス・ジャンプの発生機構と、フラックス・ジャンプと臨界電流の不安定性やコイルのデグラデーションとの関連性を追求することは、不均質硬超電導材料ならびにマグネットの開発にとって極めて重要であることを指摘している。

第2章では Ti-Nb 系超電導線の製造加工法について述べている。超電導線は一般に臨界電流特性を向上させるため、時効処理をほどこすが、Ti-Nb 系合金は高融点活性合金であるため、その溶解および加工には特殊な技術が要求される。まず原料を焼結したのち、電子ビーム溶解でインゴットを作り、熱間加工時の酸化を防止するためステンレス容器で密封したのち、高温で加工を行い、つぎにグラファイトや二硫化モリブデンなどの固体潤滑材を用いて伸線加工に成功している。このさい表面に銅を被覆して伸線すると、通常の潤滑油で容易に伸線加工が出来ることを見出している。

第3章では Ti-Nb 系超電導線の臨界電流特性について研究した結果を述べている。超電導材料の臨界温度および臨界磁場は物質固有の性質であるが、その臨界電流は合金の金属組織に敏感な量であり、加工条件や熱処理によって変化する。そこで65, 34および28% Nb を含む3種の組成の Ti-Nb 合金について、それらの臨界電流特性と冷間加工ならびに熱処理との関連について研究し、臨界電流密度は加工度とともに増加するが、その値は小さいこと、また強度の冷間加工をほどこしたのち約 400°C で熱処理すると臨界電流が著るしく増加すること、さらに長時間熱処理すると臨界電流は低磁場では増すが高磁場ではかえ

って減少することを見出している

第4章では Ti-Nb 系超電導線における臨界電流の不安定性について論じている。裸線で測定した臨界電流特性には、電流の印加回数とともに臨界電流が増加するトレーニング現象が見られるが、高純度の銅を被覆した超電導線ではこの現象は認められないこと、また一定磁場の下で電流を増加させた磁場-臨界電流特性は、一定電流の下で磁場を増加させた臨界電流-磁場特性とはことなり、一般に前者の方が高い臨界電流を示すが、銅被覆超電導線ではこの差は生じないことを見出している。

第5章は超電導線における臨界電流とフラックス・ジャンプとの関連を検討したものである。超電導線における臨界電流の不安定性とコイルのトレーニング現象およびデグラデーションなどのコイル特性との関連を明らかにするため、フラックス・ジャンプを観測し、フラックス・ジャンプは振幅が大きく単発的なジャンプと、振幅の小さな連続的なジャンプとが交互にあらわれること、また最初の大きなジャンプの起る電流と磁場の積がほぼ一定であるという関係を見出し、これらのジャンプの機構は超電導体内の磁束のピン止め力の分布が一樣でないことに起因することを見出し、このフラックス・ジャンプがトレーニング現象の要因であることを確かめている。

第6章では Ti-Nb 系合金の析出相と加工組織とを電子顕微鏡で調べ、臨界電流と金属組織との関係について考察を加えている。Ti-Nb 系合金は強加工して時効処理すると hcp 構造をもつ α -Ti 相が析出する。この析出相が成長すると、磁束のピン止め効果が増して臨界電流が増加することを見出し、また析出相の間隔と臨界電流との関係を論じている。つぎに伸線加工した試料の加工組織は加工度とともに微細化しかつ均一化され、これに伴って臨界電流も増加することから、転位や粒界もまた磁束のピン止め効果を示すことを見出している。これらの結果は従来のモデルでは説明出来ず、一つの析出粒子に数本の磁束量子線が束になってピン止めされるという新しい機構を提唱している。

第7章は Ti-Nb 合金に少量の Ta を添加した3元合金の超電導特性について述べている。Ti-Nb 合金に Ta を約5%加えると臨界温度および臨界磁場が若干高くなることを見出し、臨界電流特性の最適化の熱処理条件を導びいている。Ti-Nb-Ta 合金も Ti-Nb 合金と同様に時効処理により析出した α -Ti 相が磁束のピン止め効果の要因をなしていることを見出している。

第8章では Ti-Nb 系超電導材の小型超電導マグネットへの応用上の問題点について検討を行っている。まずコイルのトレーニング現象は超電導線を高純度の銅で被覆することにより除去出来ること、また同様な方法でコイルのデグラデーションも防止出来ることを見出し、小型超電導コイルの製作上の基本的条件を導びき、これを各種の小型超電導マグネットの製作に応用した実例について述べている。

第9章は大型超電導マグネットの技術的問題点と 75 kG の大型超電導マグネットの製作について述べたものである。コイルの大型化をさけるため、従来用いられていた完全安定化方式にかえて、複合超電導線材に使用する銅の量をデグラデーションを起さない程度に減少させ、複合線の復帰電流と臨界電流の中間の電流で励磁する準安定化方式を採用し、またコイルを内層と外層の2層に分割して、内径 100 mm 磁場 75 kG の大型超電導マグネットの製作に成功したと報告している。

論文審査の結果の要旨

極低温で電気抵抗が完全に零になるいわゆる超伝導現象の応用研究は、長年の間みるべき成果はなく、1960年代になって初めて超電導マグネットとして実用化されるに至った。超電導マグネットには臨界温度および臨界磁場の高い不均質硬超伝導体がいられるが、その超伝導機構にはまだ未解決の問題が多い。この論文は Ti-Nb 系不均質硬超伝導材の超伝導特性に関する基礎的研究と、その超電導マグネットへの応用上の技術的問題点に関する検討の結果をまとめたものであり、得られた成果の主なものは次の通りである。

1. Ti-Nb 系超電導線の臨界電流は、冷間加工とともに増し、熱処理を行って析出硬化させると著しく増加することから、超電導マグネット材料にとって最も重要な因子である臨界電流特性の最適条件を導いた。また臨界電流が電流の印加回数とともに増加するいわゆるトレーニング現象や、裸線で観測される磁場と電流の印加条件の差違による臨界電流の変化は、銅被覆線では認められないという実用上極めて重要な事実を見出した。

2. 超電導線の臨界電流の不安定性を、フラックス・ジャンプとの関連において詳細に研究し、振幅の大きな単発的なジャンプが振幅の小さな連続的ジャンプに引き続いて起ること、また最初の大きなジャンプが起る電流と磁場との間には一定の関係があることを見出し、このフラックス・ジャンプがコイルのトレーニング現象の要因であることを確かめた。

3. Ti-Nb 系超電導線の臨界電流特性とその析出相および加工組織との関係を電子顕微鏡を用いて研究し、強加工後の時効処理によって析出する α -Ti 相を成長させると、磁束に対するピン止め効果が増し、その結果臨界電流が増すこと、また試料の加工組織が加工度とともに微細化し、同時に臨界電流も増加することから、磁束のピン止めには格子欠陥もまた有効であることを見出した。

4. Ti-Nb 系合金に少量の Ta を添加すると、臨界電流特性が若干改良されることを見出すとともに、その製造加工技術に独自の創意を加えることによって、新しい超電導線の開発実用化に成功した。

5. 超電導コイルのトレーニングの除去ならびにデグラデーションの防止方法など、超電導マグネットへの応用上の基本的な問題を解決し、初めて超電導マグネットの国産化に成功し、その製作技術を確立した。

6. 超電導マグネットの大型化に伴なう実用上の種々の難点を改善するため、複合線の臨界電流と復帰電流の中間の電流でコイルを励磁する準安定化方法を採用して、大型超電導マグネットを完成した。

これを要するにこの論文は Ti-Nb 系合金の臨界電流特性と加工、熱処理および金属組織などとの関連を明らかにして、不均質硬超伝導材の超伝導特性に関し重要な知見を与えると同時に、超電導マグネットの実用化に伴なう技術的諸問題の解決についての指針を与えたものであって、学術上工業上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として価値あるものと認める。