

氏 名	渡 邊 和 雄
授 与 学 位	工 学 博 士
学位授与年月日	平成 2 年 1 月 10 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 52 年 3 月 東北大学大学院理学研究科低温物理学専攻 前期 2 年の課程修了
学 位 論 文 題 目	極細多芯超伝導線材の特性改善と超伝導マグネットの 高磁場性能向上に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 増本 健 東北大学教授 花田 修治 東北大学教授 齋藤 好民

論 文 内 容 要 旨

本論文では、1.8K 加圧超流動冷却方式による高磁場超伝導マグネット用超伝導線材に関する研究結果を述べる。この冷却方式は、超伝導材料を超流動 He 温度 ($\sim 1.8\text{K}$) で使用することにより線材の上部臨界磁場 B_{c2} を高めるとともに臨界電流密度 J_c を向上させる方式である。まず極細多芯超伝導線材の超流動冷却における基礎特性を研究し、それに基づいて、高磁場超伝導マグネット用線材としての可能性を検討した。さらに、その成果を活用し、テストコイルとして三元合金系 NbTiHf と化合物系 Ti 添加 Nb₃Sn の二種類のコイルを作製した。これらのコイルを 1.8K 加圧超流動冷却方式を用いて励磁試験を行い、NbTiHf コイルでは 13.1T、Ti 添加 Nb₃Sn コイルでは 16.7T の高磁場の発生を実証した。

本論文は以上の実験結果及び考察を全文 5 章にまとめるものである。

第 1 章 緒 論

実用超伝導線材においては合金系線材として NbTi、化合物系線材として Nb₃Sn がそれぞれの特性を十分に発揮してきたことを述べる。次に、高磁場超伝導マグネット及び加圧超流動冷却方式の現状について述べる。

加圧超流動冷却方式は、超伝導マグネットの性能を大きく改善するものと期待される。また、NbTi と Nb₃Sn に第三元素を添加することにより線材自身の著しい特性改善が得られるものと考え

られる。本研究の目的は、超流動冷却における第三元素添加の NbTi 及び Nb₃Sn 極細多芯線材の基礎特性を明らかにし、これによって高磁場超伝導マグネットの性能向上を実証することである。

第 2 章 極細多芯 NbTi 合金系線材における上部臨界磁場と臨界電流密度の特性改善

NbTiTa に比べて加工性やコストの面から有利であると考えられる極細多芯 NbTiHf 線材に対して、その高磁場特性を NbTi, NbTiTa の極細多芯線材と比較しながら研究を行った。NbTi に第三元素として Ta または Hf を添加することは、物理的には同様な効果を与えるものと考えられていた。しかし、本研究において図 1 に示すように Ta 添加の NbTiTa と Hf 添加の NbTiHf とでは B_{c2} の改善の仕方が異なる原理に基づくことを見出した。すなわち、Ta 添加の場合はスピン軌道散乱効果によって低温領域での B_{c2} の向上がみられ、これに対して、Hf 添加の場合はスピン軌道散乱効果は二元合金 NbTi の場合と変わらずパウリ常磁性効果が効いていること、Hf 添加による B_{c2} の改善は、残留抵抗の増大ともなう GL パラメータ κ_{GL} の増大に起因するものであることを初めて明らかにした。なお、

Maki パラメータの変化を説明するために、熱処理後に磁束ピン止め力を大きくする目的で冷間加工がなされることに着目し、Ta または Hf の添加は残留抵抗に対し異なった影響を与えると考えた。

図 2 に磁束ピン止め力の温度変化を示す。極細多芯 NbTiHf, NbTiTa の各線材における磁束ピン止め力の温度スケール則 $F_p \propto \kappa_{GL}^{-2} [B_{c2}(T)]^m (B/B_{c2})^p (1 - B/B_{c2})^q$ が成立すること、またスケールリングパラメータ m, p, q はいずれの合金でも大差のない値であることが分かった。極細多芯 NbTiTa の臨界電流密度が、NbTiHf より大きいことは、スケールリングパラメータが大差ないことから GL パラメータ κ_{GL} が小さいためと a-Ti の析出が多くなる

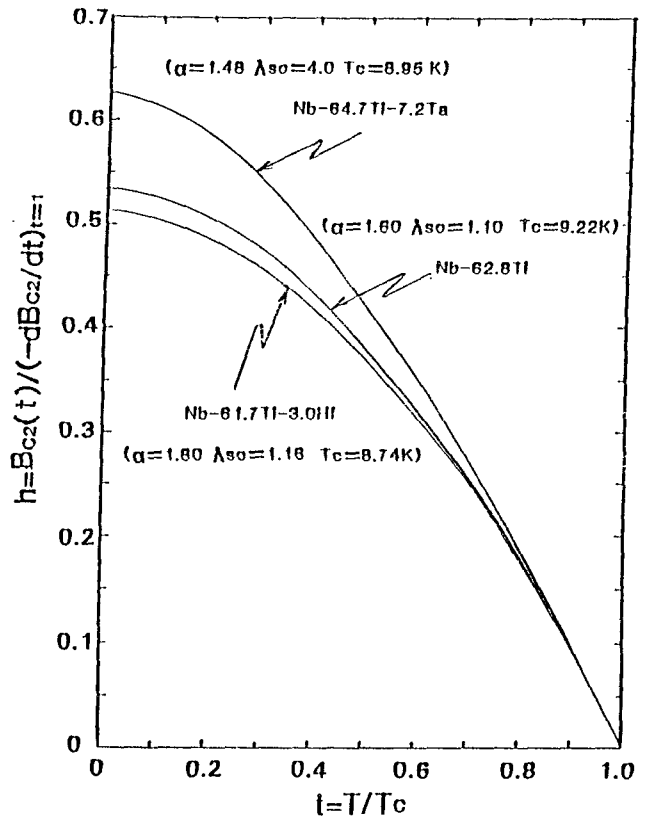


図 1 NbTi, NbTiTa および NbTiHf 線材における規格化された上部臨界磁場と規格化された温度の関係。

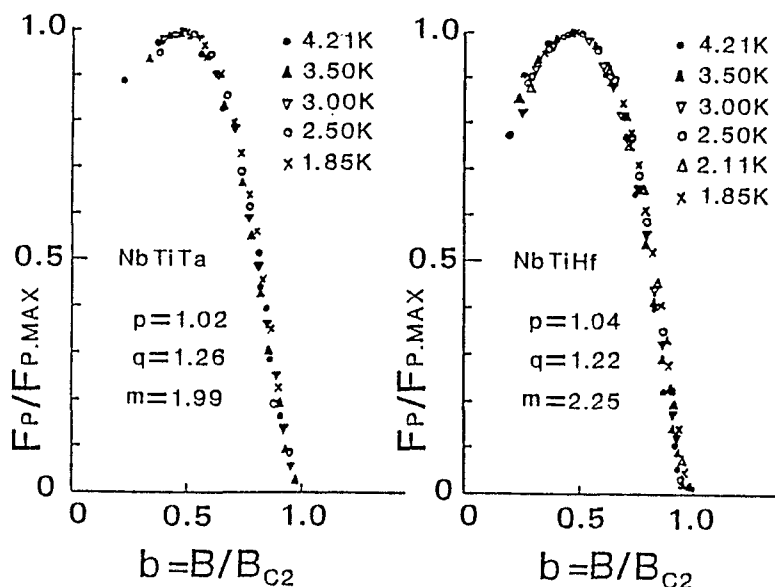


図2 NbTiTa 線材と NbTiHf 線材の規格化された磁束ピン止め力と規格化された磁場の関係。

ためと考えられることを示した。

以上の研究結果から高磁場領域では NbTiTa と NbTiHf は実質的に大差のない特性を示し、1.8K の温度では 4.2K での NbTi 線材よりも B_{c2} が約 3.3T 増大する。実用マグネットの設計基準と考えられる臨界電流値 10^4 A/cm^2 が得られる磁場値はいずれも約 3.5T 増大する。したがって、極細多芯 NbTiHf 線材を加圧超流動冷却方式で用いるのは非常に有利であることを明らかにした。

第 3 章 ブロンズ法極細多芯 Nb₃Sn 線材における上部臨界磁場と

臨界電流密度の特性改善

まず、 T_c 、 B_{c2} 、 J_c の測定の際には、Nb₃Sn 線材が試料ホルダーからの熱収縮歪を受けやすいこと、特に J_c 測定においては重大な問題になることを示した。これを解決して、短尺の直線形試料に対して、正しい T_c 、 B_{c2} 、 J_c を測定する技術を確認した。また、臨界電流値を求めるに際して、 $\rho = 10^{-11} \Omega \cdot \text{cm}$ の抵抗率基準や $E = 1 \mu\text{V/cm}$ の電場基準などによる臨界電流値の決定基準と臨界電流測定における転移状態を表す n 値との関係を検討した。これらの関係から、短尺の直線形試料としてどれだけの試料の長さがあれば正しい実験値が得られるかを明らかにした。また、短尺の直線形試料としては通常広く用いられている $1 \mu\text{V/cm}$ の決定基準を採用するのが実用上妥当であることを示した。以上の測定技術の諸問題を解決した後、 B_{c2} 、 J_c の実験研究を行った。

上部臨界磁場の温度依存性を、Ti 添加及び無添加極細多芯 Nb₃Sn 線材について全温度範囲で測定し、概ねバルクとしての Ti 添加 Nb₃Sn の特性と一致することが分かった。したがって、材料としての Nb₃Sn 線材の上部臨界磁場にはバルクで知られているのと同様にパウリ常磁性効果が全く

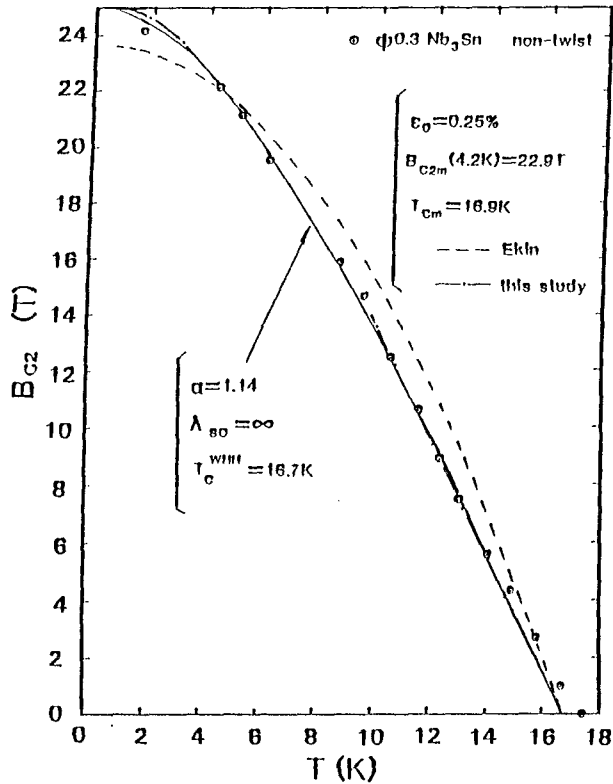


図3 無添加 Nb₃Sn 線材における WHH 理論による B_{c₂}(T) (—) と真歪 0.25% の状態で
B_{c₂}(T) の計算値で Ekin によるもの (---) と本研究によるもの (-・-)。

効かないことを実用線材で初めて明らかにした。また、図3のように実用材料としての Ti 添加 Nb₃Sn は低温高磁場領域で歪効果による B_{c₂} の劣化は、定性的には WHH 理論におけるパラメータ α をストレインフリーの状態より小さくする形で実用できることを示した。これは Ekin による歪がある場合での近似的な B_{c₂} の温度依存性の式より勝るものである。

Nb₃Sn 線材の磁束ピン止め力に関しては、Kramer 則に基づいて J_c の測定値より得られる上部臨界磁場値 B_{c₂} には大きな誤差を含むことを指摘した。最後に、極細多芯の Ti 添加及び無添加の Nb₃Sn 線材は図4に示すように、ともに同じ温度スケール則で説明されることを明らかにした。このことによって、Ti 添加 Nb₃Sn 線材は、無添加の Nb₃Sn 線材と同様、磁束ピン止め力の飽和特性の状態にあることが明らかになった。Ti 添加 Nb₃Sn 線材に対する磁束ピン止め力の温度スケール則の成立は、加圧超流動冷却方式における超伝導マグネットの設計に非常に有用である。これらの研究結果により、極細多芯の Ti 添加 Nb₃Sn 線材は、1.8K の温度では 4.2K の無添加の Nb₃Sn よりも B_{c₂} が約 4.6T 増大し、J_c = 10⁴ A/cm² が得られる磁場値もほぼ同程度改善できることが分かった。これに基づいて次章に述べる Ti 添加 Nb₃Sn 超伝導マグネットを設計できることに

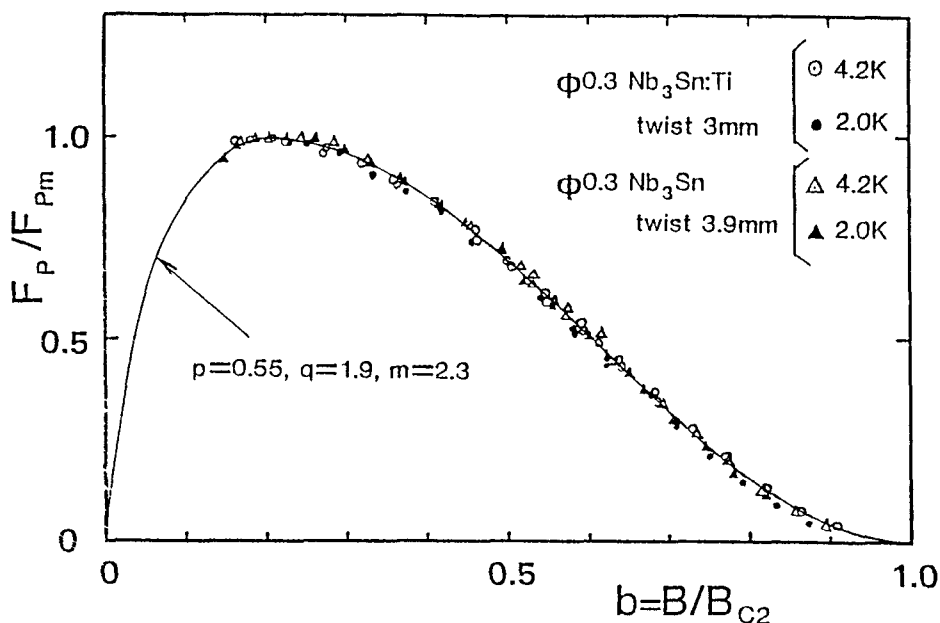


図4 無添加およびTi添加Nb₃Sn線材の規格化した磁束ピン止め力と規格化した温度の関係。

なった。

第4章 加圧超流動冷却方式による超伝導マグネットの高磁場性能向上

第2, 第3章で明らかにされた特性に基づいて設計製作した極細多芯NbTiHf線材及び極細多芯Ti添加Nb₃Sn線材による超伝導マグネットの励磁試験を行った。極細多芯NbTiHf超伝導マグネットでは、50mm直径の空間に1.67Kで13.1Tの磁場発生に成功した。合金系超伝導マグネットとしては現在でも世界最高磁場の記録である。また、極細多芯Ti添加Nb₃Sn超伝導マグネットにおいては、50mm直径の空間に1.7Kで16.7Tの磁場発生に成功した。これは、極細多芯のNb₃Sn超伝導マグネットとして世界で初めて表面拡散法のテープ線材によるNb₃Sn超伝導マグネットと同等になった記録である。これらの高磁場発生を皮切りとして、わが国ではNb₃Sn系超伝導マグネットが次々と製作され、現在では最高18.1Tの超伝導マグネットが金属材料技術研究所で完成した。本研究によって明らかにされたわが国の線材NbTiHf極細多芯線やTi添加Nb₃Sn極細多芯線を使用した西ドイツのカールスルーへの超伝導マグネットは世界で初めて20Tの壁を破るに到った。以上によって、超伝導マグネットの高磁場性能向上を実証した。

第5章 総括

本研究により得られた結果を総括して記した。

審査結果の要旨

近年、超伝導材料の進歩はめざましく、その応用は多方面にわたって展開されている。とくに、超伝導マグネットは高エネルギー物理用の加速器、医療用 MRI などのほか MHD 発電や核融合炉において重要な役割を果たしており、その磁場性能の向上が求められている。本論文は、超流動冷却方式による高磁場超伝導マグネット用超伝導線材の開発とそれを用いた超伝導マグネットの性能向上をはかることを目的として行った研究をまとめたもので、全編5章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の背景および目的・意義を述べている。

第2章では、極細多芯 NbTi 合金系線材の上部臨界磁場と臨界電流密度の特性改善を目的として、第三元素の添加の効果を調べ、その基礎特性を明らかにした結果を述べている。その結果、Ta あるいは Hf の添加が効果的であること、とくに Hf 添加が加工性の面からも有利で、高磁場用マグネット線材として適していることを見だし、その特性向上の原因を考察している。

第3章では、Nb₃Sn 系の極細多芯線材における上部臨界磁場と臨界電流密度の特性改善を試み、Ti 添加が高磁場特性の改善に有効であることを示し、さらに磁束ピン止め力の温度スケールリング則などの基礎物性を明らかにしている。ことに歪効果に敏感な Nb₃Sn 線材の正しい J_c 測定技術を提案したことは重要な結果である。

第4章では、本研究で開発された NbTiHf および Ti 添加 Nb₃Sn 極細多芯線を用いて 1.8K 加圧超流動冷却方式による超伝導マグネットの励磁試験を行った結果を示している。NbTiHf 線材を用いた超伝導マグネットでは、50mm 直径の空間に 13.1T の磁場発生に成功し、合金系超伝導マグネットとして世界最高磁場を記録した。また、Ti 添加 Nb₃Sn 線材においても、50mm 直径の空間に 16.7 T の磁場を発生させることに成功し、表面拡散法のテープ線材としては最高特性を得ている。この超流動冷却方式による高磁場マグネットの試作および実証実験は超伝導マグネットの高磁場性能向上に対する指針を与え、その後のこの方面の研究に大きな影響をおよぼした。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、加圧超流動冷却による高磁場超伝導マグネット用超伝導線材の開発と基礎特性の解明を行い、この線材を用いた超伝導マグネットの高磁場性能向上を実証したもので、材料物性学の発展に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合格と認める。