

氏 名 和田山 芳英

学位（専攻分野） 博士（工学）

学位記番号 総研大甲第 1374 号

学位授与の日付 平成 22 年 9 月 30 日

学位授与の要件 物理科学研究科 核融合科学専攻  
学位規則第 6 条第 1 項該当

学位論文題目 核融合用 Nb<sub>3</sub>Al 導体及びコイルの高性能化に関する研究

論文審査委員 主 査 教授 今川 信作  
教授 三戸 利行  
教授 室賀 健夫  
グループリーダー 竹内 孝夫  
(物質・材料研究機構)  
准教授 淡路 智 (東北大学)

## 論文内容の要旨

本研究は、核融合装置に使用する高磁場・大型超伝導マグネットの実証と実現に向けて、金属系超伝導体の中で最も高臨界特性に優れた Nb<sub>3</sub>Al を研究対象に、その材料合成、線材化、コイル化の各フェーズにおける実験実証と基礎データの取得、および高性能化に関する一連の研究成果を総括したものである。

### 第 1 章 序論

核融合炉の研究背景、及びこれら機器に使用される超伝導機器の概要と特長を述べると共に、本研究の目的が核融合炉の設計製作に適用できる Nb<sub>3</sub>Al の高性能化とその指針を得ることであることを記載。

### 第 2 章 Nb<sub>3</sub>Al 材料の基礎特性

Nb<sub>3</sub>Al の材料学的な特徴と超伝導特性に関する一般的な知見を記載した。また Nb<sub>3</sub>Al の高特性を実現できる非平衡プロセスで作製した粉末の超伝導特性、及びこの粉末を原料とした線材化を検討した。その結果、メルトスピニング法、プラズマ溶射法、遠心噴霧法、メカニカルアロイング法により、非平衡な過飽和固溶体を得ることができた。これを熱処理すると超伝導 A15 相が析出し、臨界温度は約 18K であった。非平衡粉末を用いて金属シース充填法による線材化を試みたが、線材の長手方向の均質性に課題が残された。

### 第 3 章 Nb<sub>3</sub>Al 素線の基礎特性

核融合用の超伝導コイルは大型であるため、その線材には超伝導特性のみならず工業規模での量産性、長尺均一性、熱処理の簡便性等が要求される。本章では、Nb<sub>3</sub>Al の線材化手法として、実用性の高い拡散反応型のジェリーロール法を取り上げ、その高性能化の指針を明確化した。①超伝導相の微細組織は、結晶粒径が 100nm 以下で、Al 濃度が 25at% に近いこと。これを拡散反応で得るには Al の層厚を 100nm 以下に薄くすることが必要である。②線材化手法がジェリーロール法と異なる複合加工法においても、高性能化の指針は上記と同様であった。その他、③超伝導状態を安定化するためのマトリックス材の残留抵抗比が結合損失低減のための Cr めっきで低下することやその比抵抗の磁場依存性が Kohler プロットで推定できること、④コイル設計に必要な素線の温度・磁界・電流密度の三次元臨界特性が Kramer 則を適用することで、計算推定できることを明らかにした。

### 第 4 章 Nb<sub>3</sub>Al 素線の曲げひずみ負荷

大型コイルの製作に際しては、熱処理炉をできるだけ小型化する観点から、線材を小型形状で熱処理（超伝導化合物を生成）した後に実機形状に巻線をする React & wind 法の適用が必要となる。本章では、機械的に脆弱な超伝導線材を巻線加工（特に曲げ）する際の許容ひずみ等の設計データを取得すべく、素線に曲げひずみを負荷させて臨界電流の変化を検討した。その結果、曲げひずみを受けた Nb<sub>3</sub>Al 素線（フィラメント 36 μm）の臨界電流低下は、10% (ε = 1.0%)、15% (ε = 1.4%) であり、(Nb,Ti)<sub>3</sub>Sn 素線より耐曲げひずみ性に優れていた。

## 第5章 Nb3Al 強制冷却導体と曲げひずみ負荷

核融合用の超伝導導体には、大電流・高磁場・高電圧の通電条件を満足する電気特性と、強大な電磁力を支持する機械的特性を併有することが必要である。本章では、これら要求を満足できる導体構造として、超伝導素線を多数本撚り合わせた撚線ケーブルを金属管の内部に配置したケーブル・イン・コンジット型を対象として、縮小サイズ(36本)の導体製作とその基礎特性、及び曲げひずみ負荷の影響を実験評価し、曲げ特性が素線とほぼ同様であることを明らかにした。

## 第6章 コイル励磁における Nb3Al 素線のひずみ負荷

超伝導素線の臨界電流に及ぼす繰り返しひずみの影響を従来の機械試験でなく、電磁力起因により超伝導フィラメント部へ直接負荷させる新しい実験手法を用いて、Nb3Al 試料の繰り返しひずみの影響を検討した。その結果、Nb3Al 素線の疲労特性に関する基礎データを取得すると共に、超伝導フィラメントが疲労破断した亀裂進展の破面を初めて確認した。

## 第7章 Nb3Al 強制冷却コイル

核融合用の大型コイル製作に向けた要素実験として、上述の強制冷却導体や曲げ加工の研究成果を用いて縮小サイズの Nb3Al 強制冷却コイルを世界で初めて製作評価し、超臨界圧 He を強制循環させた冷却条件で通電特性や超伝導安定性の基礎実験を実施した。本章では、強制冷却コイルの概要、強制冷却試験及び安定性の実験結果を記述した。

## 第8章 Nb3Al 強制冷却導体の接続

大型コイルシステムの組立てにおいて、導体相互を接続する要素技術は重要である。本章では、強制冷却導体をラップ接続させた基礎実験を実施し、接続抵抗を推定できるデータを取得すると共に、ITER Nb3Al インサートの導体接続部の構造を検討した結果を記載した。

## 第9章 結論

上述のごとく、Nb3Al 超伝導材料を対象として、金属化合物を作製評価する材料フェーズから、ITER Nb3Al インサートに代表される強制冷却型の大型コイルを製作実証するフェーズにいたるまでの、各フェーズにおいて実施した実験と計算により、ヘリカル型核融合炉へ適用できる Nb3Al コイルの設計指針が得られた。

## 博士論文の審査結果の要旨

建設が開始された国際熱核融合実験炉 (ITER) の高磁場コイルには、実用超伝導材料として現時点で最も超伝導特性と製作性に優れた $Nb_3Sn$ を採用することが決定している。しかし、強大な電磁力が加わる核融合装置用超伝導コイルでは、 $Nb_3Sn$ 生成熱処理後に印加される機械ひずみによる超伝導特性の低下が課題となっており、ITERのモデルコイルや導体試験においても繰り返し励磁による $Nb_3Sn$ 導体の性能劣化が明らかとなっている。核融合炉にはさらなる高磁場コイルが必要とされることから、その候補線材として高磁界特性および機械特性により優れた $Nb_3Al$ 導体の開発研究が必要とされている。和田山芳英氏は、企業の研究所に在職中の社会人学生であり、この $Nb_3Al$ の優れた特性に着目し、材料合成、線材化、導体化、コイル化の開発研究を第一線で一貫して進めてきた研究者である。

博士論文は、 $Nb_3Al$ に関して、材料の基礎特性 (2章)、素線の基礎特性 (3章)、素線の曲げひずみ負荷 (4章) から、強制冷却導体 (5章)、強制冷却コイル (7章)、さらに導体接続 (8章) までを網羅した内容となっており、 $Nb_3Al$ の歴史的な開発経過を含めた貴重なデータについて整理し纏めている。博士課程在学中には、これらの開発研究における実験データを材料学や機械工学の観点から分析するとともに、電磁力によるひずみの影響を調べるための新しい実験手法を考案し、 $Nb_3Al$ 素線の電磁力による疲労に関する研究を行った。その成果は6章に纏められている。 $Nb_3Al$ は1950年代に発見され、 $Nb_3Sn$ よりも臨界磁場が高いことから高磁場用途に適した材料として期待されたが、当時の製法では安定な通電を可能にする多芯線の長尺化が困難であったため開発が中断された経緯がある。和田山氏は、周到的な調査研究と系統的な試作・実験に基づき、 $Nb$ と $Al$ の薄いシートを出発原料とするジェリーロール (JR) 法を最適化することによって、長尺線の量産が可能な製法で、 $Nb_3Al$ の持つ高臨界磁場と高臨界温度並びに高臨界電流密度を同時に達成可能であることを示した。特に、 $Nb_3Al$ の臨界電流特性を決定する磁束のピン止め効果が結晶粒径に依存することを世界に先駆けて明らかにし、臨界電流の温度・磁場に対する依存性を記述する経験式を導出したことは本研究の重要な成果の一つである。また、機械ひずみの影響を様々な曲げ半径の試料を準備して実験的に評価し、超伝導多芯線内部の $Nb_3Al$ フィラメント径が小さい線材の方が耐ひずみ性に優れていることを見だし、1.0%の曲げひずみでも90%の臨界電流を維持できることを示したことは注目される成果である。さらに、これらの線材を用いて強制冷却方式のケーブル・イン・コンジット導体を試作し、生成熱処理後に0.4%の曲げひずみを加えて巻線しても性能劣化が無いことを実証したことは、 $Nb_3Al$ を用いた核融合装置用超伝導コイルの有効性を世界に先駆けて示した工学的に価値の高い成果である。博士課程在学中に行った電磁力による疲労特性に関する研究では、 $Nb_3Al$ 素線を用いて平均応力170 MPa、繰り返し回数1500回までの電磁力負荷試験を実施し、 $Nb_3Al$ が疲労特性にも優れていることを明らかにした。さらに、平均応力を高めるため外周の安定化銅を除去した試料において、10回の繰り返し負荷で破断する結果を得て、電磁力による疲労破断面の観測にも成功している。平均応力の上昇から予想されるよりも疲労破断が著しく早いことから、これらの実験結果は、機械強度に対する寄与は小さいと考えられてきた外周の安定化銅が $Nb_3Al$ フィラメントの疲労破壊抑制に役立っていることを示唆しており、今後の超伝導導体及びコイル設計に資する貴重なデータと言える。

以上のように、本研究は将来の核融合装置用高磁界・大型コイルの超伝導材料として期

待されている Nb<sub>3</sub>Al の材料特性から線材化およびコイル化までを工学的な視点で系統的に纏めたものであり、超伝導工学のみでなく核融合工学として非常に価値の高い内容となっている。特に、臨界電流が結晶粒径に依存することを世界に先駆けて明らかにしたことや機械ひずみに対する依存性を経験式に纏めた成果は、世界的に貴重なものであり、新たに考案した電磁力による疲労試験の結果は、導体設計に新たな指針を与えるものであることから、博士論文として十分な価値を有すると共に核融合研究に資するものであると判断した。