



|              |                                                                                                                                                                    |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | 核融合用超伝導マグネットの絶縁材料の開発に関する<br>基幾的研究                                                                                                                                  |
| Author(s)    | 植野, 祝                                                                                                                                                              |
| Citation     | 大阪大学, 1997, 博士論文                                                                                                                                                   |
| Version Type |                                                                                                                                                                    |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/40985">https://hdl.handle.net/11094/40985</a>                                                                                |
| rights       |                                                                                                                                                                    |
| Note         | 著者からインターネット公開の許諾が得られていない<br>ため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利<br>用をご希望の場合は、<a<br>href="https://www.library.osaka-<br>u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文につい<br>て</a>をご参照ください。 |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

|               |                                                  |
|---------------|--------------------------------------------------|
| 氏 名           | 植 野 祝 <sup>うえ しゅう</sup>                          |
| 博士の専攻分野の名称    | 博 士 (工 学)                                        |
| 学 位 記 番 号     | 第 1 3 5 0 1 号                                    |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平 成 9 年 12 月 26 日                                |
| 学 位 授 与 の 要 件 | 学位規則第 4 条第 2 項該当                                 |
| 学 位 論 文 名     | 核融合用超伝導マグネットの絶縁材料の開発に関する基盤的研究                    |
| 論 文 審 査 委 員   | (主査)<br>教 授 岡田 東一<br>(副査)<br>教 授 宮崎 慶次 教 授 田川 精一 |

## 論 文 内 容 の 要 旨

論文は核融合用超伝導マグネットの絶縁材・支持材である繊維強化有機複合材料 (FRP) に着目し、複合材料間の界面強度の観点から超伝導マグネット絶縁材料の高性能化に関する研究を行ったもので、全論文は以下の 5 章から構成されている。

第 1 章では超伝導マグネット (以下 SCM) の放射線照射による強度劣化や、SCM の設計の余裕度向上の必要性を考慮した場合、機械的強度の高い FRP を開発する事が急務である事を述べ、本論文の目的、概要そして構成について記述している。

第 2 章では強制冷却型コイルの絶縁材料を検討し、国際熱核融合実験炉 (ITER) での強制冷却型コイルのようなコイル剛性が重要視されるコイルを検討している。数十  $\mu\text{m}$  の高絶縁性フィルムを FRP でサンドイッチした構造の薄い先進複合材料を提案して、絶縁材厚さを十分の一以下に低減させ、コイル剛性を向上させ、この新材料の極低温特性および放射線照射耐性を検討し、今後の開発方針を導き出している。

第 3 章では、実使用時の複合応力場を想定した応力解析を行い、Tsai-Hill の破壊条件式を用いて有限要素法による計算から、試験装置治具の内部応力補正等の手法を用いて、材料の破断包絡線内を許容応力状態とする、材料設計の指針を明らかにしている。

第 4 章では、第 2, 3 章で検討した先進絶縁材料の界面強度を向上させる方策の一つとして、フィルムのプラズマ表面処理を行い、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) プラズマを用いて、表面の凹凸生成による物理的結合力と、官能基導入による分子間の化学的結合力を向上させ、界面強度向上を極低温領域まで検討している。これより極低温で熱応力での界面剥離を起こすポリエチレンを接着させている。また第 2 章で検討した先進絶縁材料に対して、数分処理で 80% の界面強度の向上を確認している。

第 5 章では以上を総括し、核融合用超伝導マグネット絶縁材・支持材の材料選択およびその作製手法に関して一つの指針を示している。

## 論文審査の結果の要旨

本論文はこの核融合用超伝導マグネットの絶縁材・支持材としてのガラス繊維強化有機複合材料 (GFRP) の高性能化を目指し、絶縁材の機械的特性の設計余裕度の低さを改善する事を目的として、複合材料間の界面強度向上の観点から、大型超伝導磁石に用いる複合材料の開発を行なった一連の研究をまとめたもので、主な成果は以下の通りである。

(1) 強制冷却型コイルのように巻線が一体化される必要のあるマグネットにおいて、数十  $\mu\text{m}$  厚さの高絶縁性フィルムを用いた先進絶縁材料によってコイル一体化と 20 kV の絶縁耐圧の確保の両立が可能という利点を示している。その上で、先進絶縁材料の極低温での層間剪断強度と放射線照射効果を検討し、層間剪断強度が液体ヘリウム温度で 60 MPa と従来材料の半分となる問題点を示し、今後の開発方向を明らかにしている。

(2) 浸漬冷却型コイルで、絶縁材料に負荷される圧縮・剪断複合応力場での材料特性の評価手法の問題点と、これまで不明瞭であった圧縮・剪断強度の評価法を明確にした。有限要素法を用いた解析によって圧縮・剪断強度の破断包絡線を導出し、試験治具の内部応力を補正する事で、設計に供するデータ抽出の手法を導き出している。

(3) 先進絶縁材料の問題点である、極低温下での材料界面での剝離を克服するためにプラズマ処理の手法を用い、従来のプラズマ処理手法よりも進んだ形での処理形態として ECR プラズマの適用性を検討している。そしてポリエチレンのように室温から液体ヘリウム温度までの熱収縮が 1.4% と大きく、材料間界面で大きな熱応力が発生する材料においても ECR プラズマ処理によって界面剝離を防ぎ、液体ヘリウム温度で 0.4 MPa という値を実現する事を確認している。

(4) 極低温での材料間界面強度についてその評価手法を提案し、先進絶縁材料の問題点である極低温下での層間剪断強度の評価法を簡便化している。この手法では層間剪断強度を界面接着強度にて評価し、ECR プラズマ処理によって液体窒素温度での界面接着強度を 1.2 MPa から 1.6 MPa へ向上させる事を確認している。また層間引張強度に至っては液体窒素温度で 20 MPa から 48 MPa へと上昇する事を確認し、ECR プラズマ処理が界面強度向上に有効であることを示している。

(5) 提案した先進絶縁材料は、国際熱核融合実験炉 (ITER) 用超伝導マグネット絶縁材の有力な候補材となっている。また高絶縁性フィルムを従来の GFRP と同時に用いる手法は加速器用超伝導マグネットの絶縁材にも用いられ、最近開発されたガラス繊維とフィルムを同時に編み込んだ低熱収縮・高絶縁耐圧の絶縁材料の出現などに寄与している。

以上のように本論文は、超伝導マグネットの絶縁材の開発について新しい方向性を生み出し、実使用時の条件を考慮した有用な設計データ・知見を得ている。また複合材料間界面強度を向上させる手法・評価の指針を実験的に明らかにしている。これらの成果は核融合工学、超伝導工学に寄与するところが大きい。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。