

革新的核融合炉実現へ向けた分割型高温超伝導
マグネットの実証と普遍的接合法の創成

Demonstration of a remountable high-temperature
superconducting magnet and construction of
universal joints toward the realization of
an innovative fusion reactor



課題番号：26220913

橋爪 秀利 (HASHIZUME HIDETOSHI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究の概要

核融合炉実現に向けた工学的ブレイクスルーとなりうる分割型高温超伝導マグネットの実証に向け、本研究では、1) 接合部極限性能予測手法の開発、2) 超伝導物理に基づく機能分割導体の設計、3) 多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計、4) 100 kA 級のモックアップマグネット製作による分割型高温超伝導マグネット総合設計と実証、を行う。

研究分野：工学・総合工学・核融合学

キーワード：高温超伝導、電磁・マグネット

1. 研究開始当初の背景

ITER 計画が進むなど、次世代エネルギー源として期待されている核融合炉の開発は着実に進展している。一方で、莫大な建設コストの低減、保守・点検の合理的なシナリオの構築が工学的課題として残っている状況にある。そこで核融合炉の重要な構成機器の1つである超伝導マグネットを高温超伝導体で製作し、かつ分割化することにより、1) 高コストな超伝導マグネットの製作・保守の合理化、2) 超伝導マグネットよりも内側に位置する炉内構造物へのアクセス性向上、を同時に図る分割型高温超伝導マグネット（図1）を提案している。この方式ではマグネットの接合部での抵抗発熱は不可避であるため、従来の低温超伝導体ではなく高温超伝導体を用いることこそがこの方式を実現させるた

めの解となり、建設コストの劇的な低減と容易な保守・点検ができると我々は考えている。

2. 研究の目的

本研究は、これまでの研究で得られた世界最高性能の高温超伝導体の機械的接合技術（100 kA 導体・抵抗値 $2\text{ n}\Omega$ ）と液体窒素による除熱技術（金属多孔質体の使用により 0.4 MW/m^2 の除熱性能）を基に、1) 接合部極限性能予測手法の開発、2) 超伝導物理に基づく機能分割導体の設計、3) 多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計、4) 100kA 級のモックアップマグネット製作による分割型高温超伝導マグネット総合設計と実証、を行ない、学術的視点に基づいた分割型高温超伝導マグネットの飛躍的性能向上により核融合炉実現に向けた工学的ブレイクスルーを確立することを目的とする。

3. 研究の方法

超伝導マグネットは極低温、強場環境下で使用されるが、このような環境でのマグネット接合部の性能向上を図ることに加えて、接合部施工時（冷却前）に接合性能を予測できることが重要となる。そこで、「1) 接合部極限性能予測手法の開発」として、接合性能を予測することが可能となる非破壊検査手法

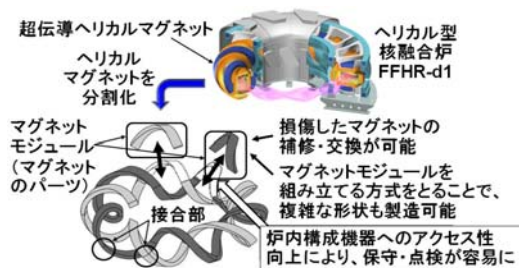


図1 分割型高温超伝導マグネット

の確立を目指す。続いて、第二種超伝導体の電流輸送モデル（超伝導体の物理モデル）を用いて「2) 超伝導物理に基づく機能分割構造導体の設計」を行い、マグネットを構成する導体の性能向上を図る。さらにマグネット接合部の冷却システムの最適化のために「3) 多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計」を実施する。これらの成果をもとに「4) 100kA 級のモックアップマグネット製作」を行い、分割型高温超伝導マグネット総合設計とその実証をする計画となっている。

4. これまでの成果

1) 接合部極限性能予測手法の開発：

接合部非破壊検査手法として、交流電位差法と2色X線CTを検討した。交流電位差法はREBCO高温超伝導線材の安定化層の抵抗成分の影響が大きく適用が困難であることが判明した。また、生体分析に用いられる低原子番号元素分析用の2色X線CTを高原子番号元素分析用に独自に拡張し、接触不良部の原因分析も進めている。接合性能予測のためには、接合抵抗の温度磁場依存性の理解が必要であり、実験データと接触理論を用いて抵抗発生要因を説明するモデルを構築した。

2) 機能分割構造導体の設計：

超伝導輸送電流理論に基づき、臨界電流を向上させる人工ピンの分布を考案した。また、REBCO高温超伝導線材に陽子線照射を行い、臨界電流を向上させることができると想定される欠陥分布を生成させ、その後、液体窒素、自己磁場環境で臨界電流を評価した。現状では、理論を支持する結果が得られている。

3) 多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計：

金属多孔質体と水・液体窒素を用いて得た伝熱データから当該冷却システムの対流熱伝達・核沸騰熱伝達・核沸騰限界点を表す伝熱関連式を構築し、各種極低温冷媒を用いた場合の伝熱性能の予測を行った。また、分割型高温超伝導マグネット接合部をモデル化して伝熱解析を行い、部分強制冷却体系を設計に取り入れること、熱伝導率の高い絶縁材の適用が必要であることを明らかにした。

4) 100kA 級のモックアップマグネット製作と分割型高温超伝導マグネットの総合設計：

直線形状の機械的接合部を有する100kA級のモックアップマグネットを製作し、世界で初めて1時間にわたる100kA安定通電に成功した。また、曲げ形状の機械的接合部の製作技術の開発も行った。さらに、3Dプリンタを用いて、コイル/導体セグメント形状、電磁力支持構造の検討を行い、ヘリカル炉において当初想定していた半ピッチ接続から1ピッチ接続が可能であることを示した。

5. 今後の計画

1) 接合部極限性能予測手法の開発：

非破壊検査については、2色X線CTによる接合面非接触領域の元素分析、渦電流探傷法による接合面状態の評価手法、ホール係数測定によるひずみ分布測定手法（接触圧力分布測定手法）を開発し、各検査手法の特性を基に、検査シナリオの構築を行う。また接合抵抗の温度・磁場依存性データのさらなる取得とともに接触状態をモデル化した電流分布解析を行い、接合抵抗の発生要因の解明、モデルの修正を行い、分割型高温超伝導マグネットの抵抗予測手法を確立する。

2) 機能分割構造導体の設計：

照射欠陥（人工ピン）分布/照射量と線材および積層導体の臨界電流（温度磁場依存）を評価する。実験結果に合わせて超伝導電流輸送理論の解釈の再検討もを行い、最終的に臨界電流を高くできる機能分割導体の設計方針を示す。

3) 多孔質体を利用した冷却システムの性能予測と分割流路設計：

冷却性能予測の高度化のため、当該冷却システムの核沸騰膜沸騰共存領域の伝熱相関式の構築に取り組む。また、伝熱解析を基に冷却安定性についてのデザインウィンドウを策定、酸化絶縁材料の技術開発に取り組む。これらと並行して、接合方法との整合性、複雑流路内の流動検証も踏まえて、分割流路の設計、モックアップの製作を行う。

4) 100kA 級のモックアップマグネット製作と分割型高温超伝導マグネットの総合設計：

機械的接合部を有する数10~100kA級導体を用いたダブルパンケーキコイル（曲げた導体の接合が必要）を製作し、核融合科学研究所の13T大型超伝導導体試験装置を用いて、低抵抗・通電実証試験を行う。また、核融合炉への適用性の評価も行いつつ、最終的には複数導体の接合部・冷却流路を有するモックアップを設計・製作し、低抵抗・通電実証試験を行う。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

・代表的な論文：

[1] 伊藤 悟, 橋爪秀利, 遊佐訓孝, 柳 長門, 田村 仁, 相良明男, 「革新的核融合炉実現に向けた分割型高温超伝導マグネットの研究開発 ~高温超伝導導体の着脱可能な接合法の開発状況~, プラズマ・核融合学会誌, Vol. 92, pp. 623-634, 2016.

[2] 橋爪秀利, 伊藤悟, 柳長門, 寺崎義朗, 田村仁, 江原真司, 遊佐訓孝, 相良明男, 「大型高温超伝導マグネットの開発の現状と展望 -高温超伝導導体の分割製作と接合技術による大型マグネットの開発-, プラズマ核融合学会誌, Vol. 91, pp. 87-96, 2015.