

高 Je・低コスト線材量産技術の開発

2025 年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発項目では、高性能の線材をより低コストにかつ量産できるためのプロセス技術の開発を目的としている。本年度はそのための基盤的な技術となるデータ駆動型アプローチによるパルスレーザ堆積（PLD）技術開発のために、極低温、強磁場下という線材の実用環境下での性能をハイスループットに計測する技術開発に取り組んだ。また、このような計測結果に機械学習による画像解析の手法を組み合わせることで、線材内の局所的な不均一性領域の自動検出法についても考案した。これらの手法により、長尺の REBCO 高温超伝導線材の実用環境下における特性を詳細に把握することが可能となり、線材の均一性評価やプロセス条件による線材特性の把握に威力を発揮する。

2. 2025 年度までの成果

線材製造技術高度化のためのプロセスインフォーマティクスの基盤となる実用環境下における線材性能のハイスループット計測を実現し、機械学習モデルによる PLD 装置の挙動の高精度なモデリングにも成功した。本モデルにモンテカルロ法による仮想的な 10,000 の製造条件の組み合わせによる特性を推定することで、支配的なプロセス条件について詳細

な検討を可能とした。図 1-1 に I_c に対する基板温度の影響を明らかとした例を示す。（ I_c ：導体電流密度）

また、液体ヘリウム中の浸漬冷却した線材を連続に搬送しながら、最大 5T までの外部磁界下において I_c の長手依存性を連続に計測することに初めて成功した。図 1-2 に実測結果の一例を示す。極低温・高磁場を含む実用環境下での高温超伝導線材の特性を高速に計測する手法を世界に先駆けて開発できたことで、線材性能の制限因子をより直接的に捉えることが可能になったばかりでなく、データ駆動型のアプローチを線材製造に適用し、プロセスの高度化を図れる点で大きな優位性を有する。

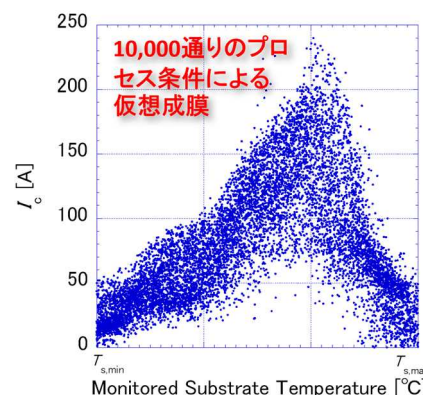


図 1-1 10,000 通りの仮想的なプロセスパラメータの組み合わせにより、基板温度の I_c に対する影響を明らかとした例

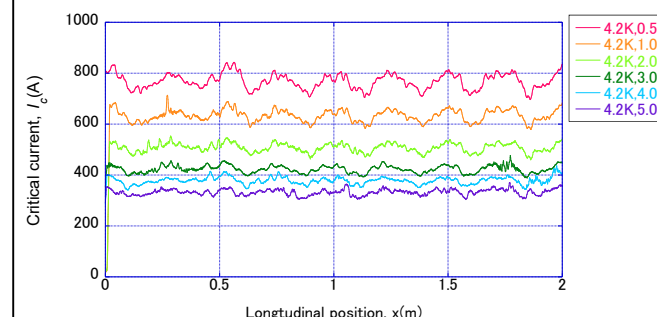


図 1-2 液体ヘリウム温度、最大 5T の外部磁界下においてリアル式連続 I_c 測定に成功

3. 今後の展開

今後は、初年度の成果を基に、データ駆動型アプローチによる空間均一性、再現性ならびに歩留りの向上のためにテンプレート層の影響について調査を開始する。並行して、製造データを蓄積するとともに、初年度得られている PLD 成膜のモデリングの精度を向上させる。また、レーザアブレーションプロセスにおけるレーザの影響度解明とスループット向上の研究開発を行う。さらに、ナノ組織観察との連携によって、REBCO 線材の磁束ピン止め特性を発現するナノ組織構造解析および電流阻害因子の機構解明に関するマクロサイズ欠陥の観察を推し進め、プロセス条件との関係を明確化する。

40 T 級超強磁場コイル技術の開発

2025 年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発項目では、磁場閉じ込め型核融合炉で重要な構成要素となる超伝導コイルの中性子照射耐性を実現するため、従来の有機絶縁にかわるものとしてセラミックスコートを導入し、機械特性や電気特性など短尺試料を用いた基礎特性試験を実施するとともに、長尺の連続成膜のための Roller-to-Roll⁽¹⁾装置の設計に着手した。また、強磁場発生コイルについては、最も重要となる強磁場下でのコイル内の電磁応力について詳細な数値シミュレーションを行い、新たなコイル構造を採用することで応力歪を許容値以下に抑制できる目途を得た。

(1) テープ状の素材を巻き出しから巻き取りまで連続的に処理するための製造装置

2. 2025 年度までの成果

Hastelloy 基板上に数ミクロンの Al_2O_3 厚膜の堆積をおこなったところ、優れた機械的強度を有すると同時に絶縁耐圧にも優れることを確認した。また、中性子照射実験についても今年度末に予定しており、基礎データが得られる見込みである。短尺試験の結果を基に、長尺線材形成時にも実用的な製造速度を実現の目途を得た。長尺線材への適用のために既存実験装置を改造する詳細設計を終えており、次年度よりメートル級コート材の提供を開始できる見通しである。

セラミックスコートはこれまで超伝導コイルの絶縁に用いられたことはなかったが、耐圧、機械的強度（引張強度）、中性子線耐性において、一般的に用いられている有機絶縁材料を圧倒的に凌駕することが期待でき、実現できれば画期的な絶縁技術となり得る。

また、強磁場発生コイルについては、強磁場発生時のコイル内の電磁応力分布について詳細な数値シミュレーションを行い、パンケーキコイル間を機械的に結合するなど、新たなコイル構造を採用することで、図 2-1 に示したように応力歪は最大で 0.35% と REBCO テープのひずみ限界である 0.4% 以下で 40T の発生が可能であることを確認した。

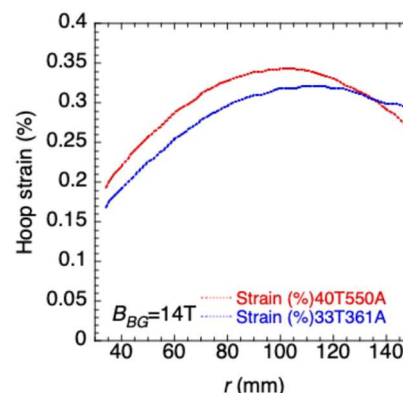


図 2-1 40T-CSM 用内挿 REBCO コイル内のフープひずみ分布の詳細な解析により、応力歪を許容値以下に抑制できることを確認

今年度はこれに加えて遮蔽電流や結合電流などの詳細な電磁現象の影響を検討する段階に入っており、スパコンを活用した遮蔽電流計算コードの構築を完了した。REBCO 線材を用いた強磁場コイルでは、冷却時の異方的な熱収縮にともなう応力歪を回避しつつも、十分な冷却のための伝熱パスの確保、さらに、コイル運転時にかかる巨大な電磁応力による歪を許容値以下に抑えるなど、複数の条件を満足する必要がある。本年度の検討の結果、これらすべてを満足する設計がほぼ確立できたことは、全超伝導マグネットで世界記録を目指す 40 T 強磁場コイル実現にむけた重要な進展といえる。

3. 今後の展開

本年度実施した概念設計において、40T の磁場発生を見通せる解を見いだせたので、今後、詳細な電磁気現象やコイル保護の検討により詳細設計を実施する。また、概念設計に基づいた新ロバスト構造の REBCO パンケーキコイルの性能実証に向けたコイル作製と試験を行う。

また、セラミックスコートによる絶縁技術については、今年度の成果を基に、初期量産レベルの装置立ち上げに向けて、次年度より 10 m 級の長尺絶縁テープ材の試作を開始し、成膜安定性や生産性の向上を検討する。

コイル・導体の試験技術と高温超伝導核融合炉設計技術の確立

2025 年度までの進捗状況

1. 概要

本研究開発項目では、高温超伝導線材を使ったトカマク炉の運転パラメータを評価するため、ITER⁽¹⁾など原型炉の解析実績がある TPC コードを用いて検討した。また、炉設計検討からも明確となった構造材に要求される機械強度 1500 MPa を実現するため、具体的な金属組成の検討を進め、小規模溶解材を用いた試験試料作製を開始した。並行して、導体・コイルの試験設備の準備ならびに、液体水素雰囲気を含む極低温下の機械特性試験設備の準備を進めた。

(1) 国際熱核融合実験炉

2. 2025 年度までの成果

高温超伝導線材を仮定した TF コイルを想定したシステム設計コード解析を実施可能な環境整備は完了し、高温超伝導線材を用いたトカマク炉の設計検討を実施した。トロイダル磁場コイルのプラズマ側コイル表面での最大磁場強度 B_{tmax} を 20T から 40T の範囲とし、プラズマ主半径 R_p は 3m 台で検討した。巨大電磁力への耐性とクエンチ保護を可能とする高温超伝導体設計と整合するよう、本プロジェクトで開発予定の高温超伝導体の設計検討と連携し、同仕様(導体電流密度 I_c : 75 A/mm²)の条件下でパラメータスキャンを実施し

た。同解析により、例えば高温超伝導線材を用いたトカマク炉の設計例である ARC(米国)において、同導体電流密度及び ITER の 1.5 倍の強度の極低温構造材料を仮定すると、 B_{tmax} を 26 T もしくは 27 T とする設計点が得られ、ARC よりもコイルとプラズマ間に設ける

遮蔽領域もしくは燃料増殖領域を 20cm 増加した上で、同等程度の核融合出力を得られることを見出した。図 3-1 にフュージョン出力 500 MW 級のトカマク炉

における TF コイルの比較検討例を示す。

また、コイル・導体の技術実証に向けて、4 種類の導体設計の初案を策定するとともに、サブケーブルを用いた小規模コイルによる技術実証のための試験設備の整備を進め、試験治具の製作および 4K GM 冷凍機の導入、使用する電源設備の点検整備を完了した。

さらに、巨大な電磁力に耐え、小型核融合炉を実現するために不可欠となる超高強度構造材の開発について、候補となりうる材料の検討方針を決定し、それに基づき 50 kg 級小規模溶解試料の試作を開始した。また、評価対象材料に応じた

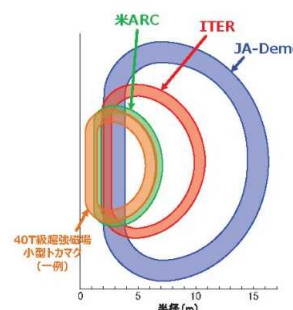


図 3-1 TF コイルの比較例

試験片加工の検討と、強度、低温靱性評価のための環境整備を完了した。

原型炉開発で豊富な知見を有する QST⁽²⁾メンバ等の参画により、システム設計から要求される REBCO 線材や構造材の要求性能の明確化と、逆に材料特性を反映した炉設計の検討など、従来の研究体制では難しかった取組も可能な体制を構築し、優位性を有している。

(2) 量子科学技術研究開発機構

3. 今後の展開

炉設計技術については、高温超伝導体の設計検討と連携しつつ、パラメータスキャンの範囲を拡大するとともに、電磁力評価の詳細化を図っていく。今年度のトカマク炉における高温超伝導コイルの設計結果に基づき、同超伝導コイル設計の詳細検討を進めるとともに、ヘリカル炉などの非トカマク炉における高温超伝導コイルへの要求を整理し、その適用について検討を行う予定である。また、小規模コイル試験による技術実証に向けて、導体の詳細設計によって耐電磁力性および冷却安定性に関する詳細な検討を行い、導体設計の高度化を図る。

さらに、超高強度構造材の開発について、今年度試作した 50 kg 級小規模溶解鍛造板の極低温機械特性試験を実施するとともに、引き続き 50 kg 級小規模溶解試料の試作を行い、組成の絞り込みを進める。