

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82118

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2018～2023

課題番号：18KK0087

研究課題名（和文）高温超伝導体（HTS）を用いた20-70Kで安定動作可能な高磁場超伝導磁石の開発

研究課題名（英文）Development of superconducting magnet with high temperature superconductor that can be operated under 20-70 K

研究代表者

荻津 透（Ogitsu, Toru）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・教授

研究者番号：30185524

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,800,000円

研究成果の概要（和文）：高温超伝導材料ReBCOを用いた超伝導線材で高放射線環境で高磁場を発生する超伝導磁石実現のための研究開発を行なった。米国ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)とブルックヘブン国立研究所(BNL)と共同で先導的な国際共同研究を行い、超伝導電磁石に用いるReBCO線材の耐放射線性の測定を進めるとともに無機絶縁を用いたコイル開発を進め一定の成果を得た。また開発した無機絶縁コイルをBNLの10T試験装置を用いて高磁場環境での性能評価を行なった。これによって高磁場・高放射線・高温超伝導磁石の基盤技術の確立に向けて一定の進捗を得たと同時に国際的な研究フレームワークが確立された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高磁場・高放射線・高温超伝導磁石の基盤技術の確立に向けて一定の進捗を得たと同時に米国ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)とブルックヘブン国立研究所(BNL)と共同で国際的な研究フレームワークが確立した。これらの成果は粒子加速器技術を大きく進展させるだけでなく同じく高磁場・高耐放射線が要求される核融合分野に対しても大きな貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：Development of superconducting magnet with high temperature superconductor ReBCO that can generate high field under high radiation environment was performed. It was jointly executed with Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Brookhaven National Laboratory (BNL). Measurement of radiation hardness of ReBCO conductor and development of ReBCO coils with inorganic insulation was performed. The developed coils were tested at high field environment with BNL 10 T test stand. The development gave a constant progress on basic technologies for high field high temperature superconducting magnet with high radiation hardness. Strong international collaboration framework for the joint development was also established.

研究分野：加速器用超伝導電磁石

キーワード：高温超伝導 電磁石 耐放射線 加速器

1. 研究開始当初の背景

加速器において磁石の超伝導化は、欧州原子核機構 (CERN) で建設された Large Hadron Collider (LHC) のような大型のハドロンコライダーでは著しい成果を上げて来た。しかしながら、現行の NbTi 線材をベースにした超伝導技術は LHC を超える次世代加速器に対応できない。実際に CERN の将来計画である衝突エネルギー 100TeV を目指す Future Circular Collider (FCC) 計画では、20T 級の高磁場双極磁石が要求されているが、NbTi 線材では臨界磁場を遥かに超えているため超伝導状態を維持できない。さらに、衝突点などでは、非常に高い放射線環境も想定されており、この放射線による熱負荷による運転安定性の劣化や、放射線損傷による磁石寿命の著しい短縮が大きな問題になっている。実際、現在建設が進められている、LHC のルミノシティアップグレード計画でも、衝突点近傍磁石の吸収線量は 150MGy にもなり、タングステンシールドで遮蔽しても 30MGy に達する。これらは核融合炉内部と同等レベルの放射線環境である。熱伝導や輻射に加え、核発熱による数百 W の入熱に対応できる冷却システムが必要になり、これは超伝導システムの特徴である低消費電力を著しく損う。

同様の問題は、現在 J-PARC で建設されている COMET 実験用の超伝導ソレノイドにもあり、放射線遮蔽に 30 トンのタングステン合金シールドを設置しても、超伝導ソレノイド磁石の吸収線量は 1MGy にも及ぶ。また J-PARC では、物性研究などのためのミュオン粒子ビームラインがあるが、ここでは常伝導の捕獲ソレノイドが採用されていて、0.15T の磁場を発生するための 2MW の消費電力と冷却水中での膨大なトリチウムの発生が運用を難しくしている。このような磁石の超伝導化は制御磁場の高磁場化や消費電力の低減だけでなく、冷却水での放射化物生成の低減による環境に対する貢献も非常に大きい。このような標的からの二次粒子制御を目的とした磁石は、素粒子・原子核分野だけでなく物性物理においても利用が広がっているが、粒子ビームの大強度化に伴って磁石の高耐放射線化と高磁場化の要求が大きくなっている。

超伝導磁石は、加速器、核融合エネルギー装置、医療画像および先端物質研究などに高磁場を効率的に供給するために利用されているが、加速器分野で現在使用されているすべての超伝導磁石は、2 つの Nb 系低温超伝導体 (NbTi および Nb₃Sn) から作られている。一方、HTS 材料を用いた超伝導磁石は、その高い臨界温度を生かして、動作温度を 20-70K まで上げて高熱負荷条件での効率的な運転を実現したり、NbTi および Nb₃Sn の最高到達磁場を超えて、20T 以上の高磁場を実現できる可能性を持っている。また高熱負荷対応ができるため 1Hz 以上の早い繰り返し運転も可能になり加速器応用の幅が広がる。これらの HTS 線材の特性を最大限生かし『高い放射線環境で高磁場を実現』することが、次世代の加速器の実現や、原子核・素粒子物理学の大きな発展に寄与することが期待されていた。

一方、KEK では NbTi を使った耐放射線超伝導磁石開発に関する知見や、耐放射線性の検証で必須となる照射試験で、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所 (QST 高崎) の線照射施設、東北大学金属材料研究所付属材料科学国際研究センター (IMR 大洗) 及び京都大学複合原子力科学研究所 (KURNS) の中性子照射施設などでの研究実績はあったが、高温超伝導を用いた先進的な超伝導電磁石開発に関する知見や必要となる設備は不足していた。これに対して Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) や Brookhaven National Laboratory (BNL) は、高温超伝導を含めた先進超伝導材料を用いた先進的な加速器用超伝導磁石開発の経験や開発で世界的に先導すると同時にそれらの開発に必須となる各種装備が充実していた。また京都大学大学院工学研究科電気工学専攻の雨宮尚之教授の研究室は、高温超伝導線材の応用基盤技術の研究、特に先進的な電磁解析および熱解析におけるコンピュータモデリング技術やそれを検証する各種実験手法、において世界的に高い評価を得る研究成果を積み上げていた。そこで本研究ではこれらの研究機関・大学のそれぞれの強みを活かして『高温超伝導体 (HTS) を用いた 20-70K で安定動作可能な高磁場超伝導磁石の開発』を目指した日米間の国際協力フレームワークを構築し、アイデアを相互交換するだけでなく、共同開発に新しい手法や材料サンプルの利用を可能にすることにより研究成果の劇的な展開を図った。

2. 研究の目的

本研究が目標とする『高温超伝導体 (HTS) を用いた 20-70K で安定動作可能な高磁場超伝導磁石の開発』では、将来の『大強度ニュートリノ源』、『大強度ミュオン源』、『FCC 用の 20T 級加速器用磁石』、『次世代検出器ソレノイド磁石』、『大強度 RI ビーム生成装置』等、様々な素粒子・原子核実験の将来計画に応用できる『高い放射線環境で高磁場を実現』できる高温超伝導電磁石のための基盤技術を確立することを目的とした。この技術は、『大強度加速器イオン源での収束ソレノイド』や電子陽電子コライダーのための『陽電子源フラックスコンцентрーター』などにも応用可能である。また、産業界で開発されている『がん治療用加速器』、『NMR 用高磁場ソレノイド磁石』、『核融合用超伝導磁石』などにも共通する技術的課題を含んでおり、それらに対しても解決のための重要な知見を与えることが出来る。

3. 研究の方法

本課題では「高温超伝導体(HTS)を用いた 20-70K で安定動作可能な高磁場超伝導磁石の開発」を進めるにあたって以下の3つの項目について研究を進めた。

- HTS 磁石の耐放射線性の検証
- HTS 線材の対クエンチ特性の検証
- 耐放射線 HTS 電磁石の高磁場特性の検証

以下にそれぞれの項目についての研究方法の詳細を述べる。

- HTS 磁石の耐放射線性の検証

ここでは、HTS 磁石に使う主要な材料の耐放射線性の検証を研究分担者の吉田・飯尾を中心に行った。照射は、QST 高崎のコバルト 60 ガンマ線照射施設における γ 線照射と、IMR 大洗の共同利用研究プログラムを利用した中性子照射が行われた。ガンマ線照射後のサンプルについては放射化が起きなかったため一般区域で各種材料特性の試験を行った。一方、HTS 線材の中性子照射後のサンプルは、放射化が顕著であったため IMR 大洗のホットラボに設置されている 15T 超伝導線材試験装置にて超伝導特性の検証を行った。

- HTS 線材の対クエンチ特性の検証

高温超伝導コイルのクエンチ安定及び保護を検証するため、HTS 線材におけるクエンチ時の電磁的・熱工学的な物理描像を実験およびモデル計算の2つのアプローチで明らかにすることを研究分担者の京都大学雨宮を中心に行った。実験的アプローチとしては、LBNL に京都大学の学生を派遣し LBNL の試験設備を使って HTS 線材の短尺試験を各種サンプルにおいて系統的に行うことで HTS 線材のクエンチ特性の詳細を明らかにした。またこの結果を京都大学の先進的なクエンチ解析ソフトを用いたモデル計算と比較・検討することによって HTS 線材におけるクエンチ時の電磁的・熱工学的な物理描像を明らかにした。これらの基礎データは、次に述べるレーストラックコイルの高磁場環境での試験でのクエンチ保護に反映させると同時に、BNL での試験結果を解析することによって大規模な磁石システムでのクエンチ保護技術確立に向けての基盤的知見を得る。

- 耐放射線 HTS 電磁石の高磁場特性の検証

HTS 線材を用いた試験用小型レーストラックコイルの開発・試験を研究分担者の KEK 飯尾・鈴木・菅野を中心に推進する。幅 4 mm、厚さ 0.1mm の ReBCO テープ線材を用いたダブルパンケーキ型レーストラックコイルを複数個作成し BNL に整備されている 10T の磁場が印加できるコモンコイル型の磁石設備を使って最大外部磁場 10T、最大電流 3kA での試験を目指した。素線及び磁石部品の表面にはセラミックコーティングにより絶縁を行い、巻き線はセラミック接着剤を用いた“ウェットワインディング法”で行われた。このコイルは、液体窒素冷却で、高い運転温度での磁場発生能力や運転安定性を検証した後 BNL での試験に望んだ。BNL の試験ではコイルの高磁場環境での運転およびそこでのコイル発生磁場の誤差磁場の影響などについて測定を行った。この結果を LBL や京都大学が電磁解析ソフトなどにより詳細に解析した。

これらの研究を遂行するにあたって、特に米国側での活動を保持するために本科研費以外の外部資金も必須で、日米科学技術協力事業（高エネルギー物理学分野）の課題名「A collaboration framework to advance high-temperature superconducting magnets for accelerator facilities」また BNL での試験には、米国での超伝導電磁石開発プログラム US-MDP (<https://usmdp.lbl.gov>)などからのサポートを得て遂行された。

4. 研究成果

- HTS 電磁石の耐放射線性の検証

γ 線による HTS 磁石の主要材料の放射線効果を調べるために、量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所(QST 高崎)のコバルト 60 ガンマ線照射施設において γ 線照射を行った。照射は LBNL から供与された有機絶縁材料及び HTS 線材について行った。有機材料は最大照射量 100MGy で照射を行い、照射後サンプルは LBNL にて機械特性の検証などが行われ、その結果が学会発表および論文の出版も行われた[DOI: 10.1109/TASC.2023.3252480]。LBNL からのサンプルはエポキシ系のコイル含浸用樹脂 3 種類で 1 種は伝統的に加速器用超伝導電磁石に使われてきた材料で他の 2 種はその代替を期待されたものだったが、良好な耐放射線性を示したのは伝統的に使われたものだけで代替品に関しては 20MGy で

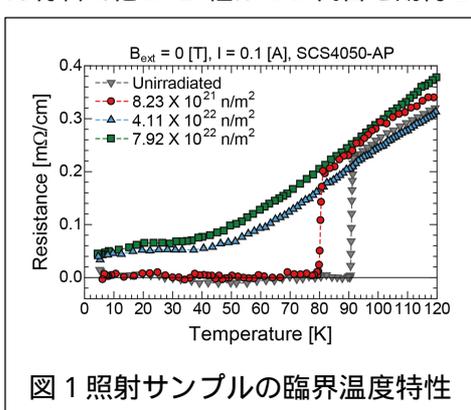


図 1 照射サンプルの臨界温度特性

顕著な劣化が見られた。

HTS 線材についても照射目標 0.2, 1, 5, 10, 20 MGy での γ 線照射試験を行い、サンプルの超伝導特性の検証を液体窒素環境で行い顕著な劣化は観測されなかった。中性子照射は、先行研究である日米科学技術協力事業（高エネルギー物理学分野）の下、東北大学大洗センターの共同利用研究プログラムを利用して開始していた。この段階では、日本国内の照射施設の多くが東日本大震災の影響で稼働していなかったため、サンプルは、東北大学のアレンジでベルギーの照射用研究原子炉 BR3 に送られ中性子を照射された。本研究開始時には、すでに 10^{22} n/m² オーダーまで照射した GdBCO 線材が

あったためそれらのサンプルの特性評価を大洗センターで行った。検証の結果、すべてのサンプルで超伝導特性が消失していることが確認された。このため、より低い照射量での検証を目指して 10^{21} n/m² オーダーでの照射を行いそのサンプルの特性評価を行なった。図 1 にこれらのサンプルの臨界温度特性を測定した結果を並べたものを示す。この結果は、GdBCO においては、 10^{21} n/m² オーダーでの照射においても超伝導特性に顕著な劣化が見られることを示している。一般に超伝導材料の特性劣化は、 10^{22} n/m² オーダーまでは健全性が保たれることが多い、一方で GdBCO においては Gd が熱中性子に対して非常に高い反応断面積を持つため、その各物理的反応が GdBCO の超伝導特性に悪影響を与えていることが疑われた。そこで GdBCO を熱中性子シールドになるカドニウムフィルムで包んだサンプルの照射、また Gd を含まない ReBCO 線材である EuBCO や YBCO の照射試験を計画し照射のアレンジを開始したが、Covid-19 の影響を受け照射計画は大幅に遅れ、本研究終了時にやっとサンプルの一部の照射が終わった状況である。今後別の外部資金などを利用して照射試験を継続し耐放射線性の高い ReBCO 超伝導線材の選定を進めていく予定である。また特性劣化の物理的メカニズムを明らかにするために劣化サンプルを LBNL の研究協力者であるカルフォルニア大学バークレー校に送り、劣化サンプルの組織的観察を TEM や SEM を用いて行いメカニズムの解析をする予定である。

- HTS 線材の対クエンチ特性の検証

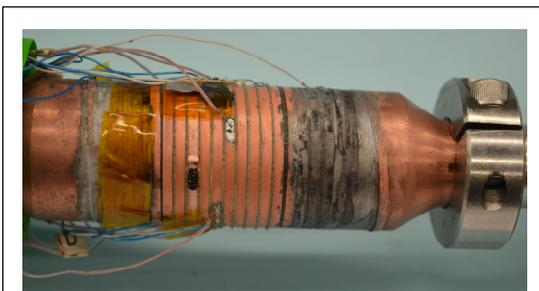


図 2 HTS 線材クエンチ特性試験装置

高温超伝導コイルのクエンチ安定及び保護を検証するため、HTS 線材におけるクエンチ時の電磁的・熱工学的な物理描像を実験およびモデル計算の 2 つのアプローチで明らかにすることを研究分担者の京都大学雨宮を中心に行った。実験的アプローチとしては、LBNL に京都大学の学生を派遣し LBNL の試験設備を使って HTS 線材の短尺試験を各種サンプルにおいて系統的に行うことで HTS 線材のクエンチ特性の詳細を明らかにした。LBNL での試験セットアップの写真を図 2 に示す。

実験及び解析は順調に進んだが、Covid-19 の影響で京都大学から LBNL に人を送れなくなったため、京都大学に磁場条件以外は LBNL と同等

の試験ができる試験設備を整備し試験を継続した。その測定結果を図 3 に示す。京都大学での試験では高磁場側での試験は行えなかった一方、高電流密度領域での試験を行うことでクエンチ保護について非常に貴重な知見を得ることができた。ここでは、クエンチ後の温度上昇特性が示されているが、電流密度が上がるにつれて線材のクエンチ後の最大温度が大幅に上がっていくことがわかる。またこの温度上昇は $400\text{A}/\text{mm}^2$ 付近から制御不能な形で大幅に飛翔することがわかり実際そこで線材が焼損することも確認された。さらにこの飛翔は安定化材の銅の比率によって変わることがわかり安定化材の比率が下がれば下がるほど条件が厳しくなることが確認された。このことから実際の磁石において高温超伝導材を利用する際には安定化材の比率を考慮に入れた上で安全な電流密度領域で運転することが必須であることがわかった [DOI:10.1109/TASC.2022.3141970]。

- 耐放射線 HTS 電磁石の高磁場特性の検証

HTS 線材を用いた試験用小型レーストラックコイルの開発のためにセラミックコーティングとセラミックボンディング技術を応用した無機絶縁超電導磁石の基礎的な研究開発を行った。研究分担者の飯尾の先行研究の結果、REBCO テープを膜厚 $25\mu\text{m}$ 程度のセラミックでコーティングすることに成功しており、ク ロスカット試験により十分な剥離強度を持つことも確かめられている。また、成形後に LBNL で熱重量分析(TGA)を行い高い TGA 安定性を持つことが確認された。短尺サンプルでの良好な試験結果を受け、無機絶縁の長尺施工に向け施工装置の開発を行った。

この装置の開発によって $25\mu\text{m}$ 厚さで耐電圧 25kV の無機絶縁の安定的な連続成功が可能になりコイル巻線に向けた準備が整った。これを受けてコイルの試作を 2020 年度から開始する。また BNL での高磁場試験に向けても BNL の試験装置にフィットするコイル形状に関して具体的な議論を始めた。最初の試作コイルはコイル化の基本技術の確立が目的であったため比較的簡単な円形のパンケーキ巻き形状とした。コイル施工は、無機絶縁 HTS 線材に無機系の接着剤を塗布しながら巻き込んでいくウェットワインディング法をとったが試作 1 号機では塗布料の最適化がうまくいかず絶縁不良や線材の劣化を招き失敗した。その後 2 号機の試作においては塗布料の最適化がうまく行ったため、良好な絶縁と超伝導特性を持つコイルの製作に成功した。この成功を受けて BNL での試験用のレーストラックコイルの設計製作に入るが、Covid-19 の影響を受け BNL への訪問が難しくなるなど多くの制約がかかることとなり計画は大幅に遅れた。それ

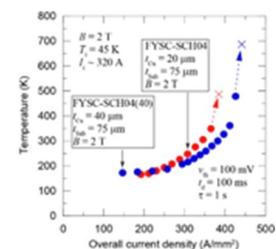


図 3 HTS 線材クエンチ特性試験結果

でも 2022 年度末には試験コイル 3 機の製作を完了する。残念ながら 3 機のうち 1 機は特性劣化が激しく試験には使えなかったが、残り 2 機は (1 機に多少の特製劣化があったが)BNL での試験に耐えられるだけの特性を持っていたのでこれらの BNL に送って試験を行った。試験コイルの製造過程を示す写真を図 4 に示す[DOI:10.1109/TASC.2020.2966427]。

前述した通りコイルは 3 機製作されたがうち 1 機は、線材が劣化してしまって試験に使える状態ではなかった。残り 2 機の液体窒素冷却での自己磁場電圧電流

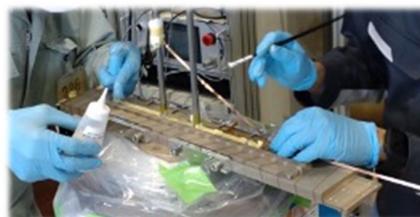


図 4 BNL 試験用コイルの製造

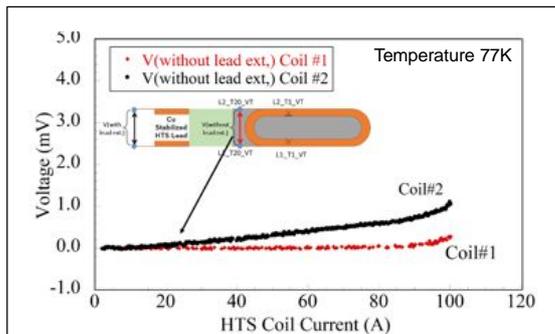


図 5 試験用コイルの電流電圧特性

特性を図 5 に示す[DOI:10.1109/TASC.2024.3365090]。コイル 1 は、90A 付近まで完全に電圧が出てなく超伝導特性がコイル全域で保持されていることがわかる。一方コイル 2 には微小電圧が 90A 付近まで電流に比例する形で生じていることがわかりコイルの一部で超伝導特性が劣化してしまっていることがわかる。詳細な検証の結果劣化部分はコイル端部に近く発生電圧も比較的低いものなので BNL での試験にはある程度耐えられると判断し、この二つのコイルを BNL 試験に使用することとした。図 6 に試験コイルの BNL 試験装置に組み込むためのセットアップ、また図 7 に BNL の 10T 外部磁場印加用の Nb₃Sn 磁石の外観を示す。

ReBCO 線材はテープ形状のため線のテープ面に対して磁場のかかる方向がその超伝導特性に大きな影響を与える。本実験では、二つの試験コイルを一つは磁場がテープ面に対して垂直にもう一つは平行にかかるように設置し磁場による影響を詳細に検証できるようにした。また試験コイル内にホールプローブを設置し超伝導線材内に生じる遮蔽電流が磁場方向によってどう変わるかを計測できるようにした。図 8 はホールプローブによって測定された磁場変動の様子で遮蔽電流の影響で比較的大きなヒステリシスを持つ様子が示されている。LBNL では、この試験を模擬したモデル計算をすでに行われているため、今後此の試験結果と LBNL でのモデル計算との比較検証を行っていく予定である。また試験ではコイルが想定よりも低電流値でクエンチを起こし、さらにその後試験コイルに顕著な劣

化が見られる現象も起きていた。これらの原因についても今後詳しく検証していく予定である。これらの解析結果については 2024 年度に米国で開催される Applied Superconductivity Conference で発表されさらに IEEE から論文として出版される予定である。これらの結果から「高温超伝導体 (HTS)を用いた 20-70K で安定動作可能な高磁場超伝導磁石の開発」に向けて一定の基盤技術を得ることができたと同時にこれらをさらに発展させて将来の加速器科学に大きな貢献[DOI: 10.3390/instruments4040030]が期待できる技術基盤を得るための国際的な研究フレームワークが構築された。このフレームワークを活かした研究計画はすでに日米科学技術協力事業や科研費などを使って継続されつつあり、また新しい提案も出されていく予定である。

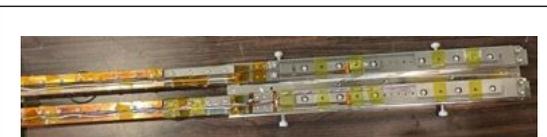


図 6 試験用コイルの試験セットアップ



図 7 10T 外部磁場印加用 Nb₃Sn コモンコイル磁石

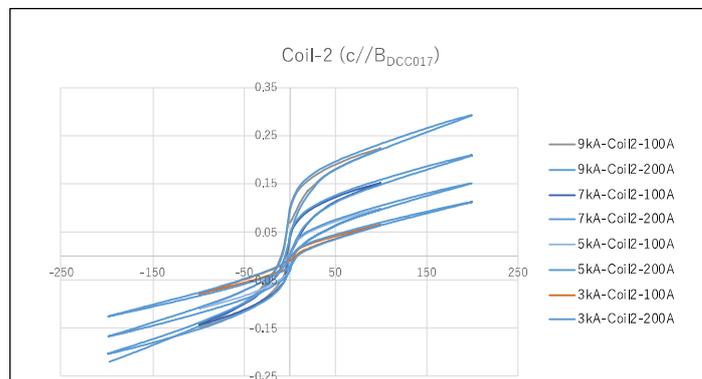


図 8 ホールプローブによって測定された磁場変動

化が見られる現象も起きていた。これらの原因についても今後詳しく検証していく予定である。これらの解析結果については 2024 年度に米国で開催される Applied Superconductivity Conference で発表されさらに IEEE から論文として出版される予定である。これらの結果から「高温超伝導体 (HTS)を用いた 20-70K で安定動作可能な高磁場超伝導磁石の開発」に向けて一定の基盤技術を得ること

とができたと同時にこれらをさらに発展させて将来の加速器科学に大きな貢献[DOI: 10.3390/instruments4040030]が期待できる技術基盤を得るための国際的な研究フレームワークが構築された。このフレームワークを活かした研究計画はすでに日米科学技術協力事業や科研費などを使って継続されつつあり、また新しい提案も出されていく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Reis Chris, Shen Tengming, Prestemon Soren, Hosemann Peter, Nair Mehul, Nakamoto Tatsushi, Ogitsu Toru	4. 巻 33
2. 論文標題 Investigating Irradiated Superconducting Magnet Insulation Materials for Particle Accelerators and Other High-Dose Environments	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2023.3252480	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Luo Xijie, Zhao Yifan, Sogabe Yusuke, Sakamoto Hisaki, Yamano Satoshi, Amemiya Naoyuki	4. 巻 32
2. 論文標題 Thermal Runaway of Conduction-Cooled Monofilament and Multifilament Coated Conductors	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2022.3141970	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ogitsu Toru, Iio Masami, Kawamura Naritoshi, Yoshida Makoto	4. 巻 4
2. 論文標題 Development of Radiation-Tolerant HTS Magnet for Muon Production Solenoid	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Instruments	6. 最初と最後の頁 30~30
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/instruments4040030	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Iio Masami, Yoshida Makoto, Nakamoto Tatsushi, Suzuki Kento, Sugano Michinaka, Ogitsu Toru	4. 巻 30
2. 論文標題 Research and Development of Future Radiation-Resistant Superconducting Magnets With Mineral Insulated REBCO Coils	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TASC.2020.2966427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Iio Masami, Yoshida Makoto, Nakamoto Tatsushi, Suzuki Kento, Sugano Michinaka, Ogitsu Toru	4. 巻 30
2. 論文標題 Research and Development of Future Radiation-Resistant Superconducting Magnets With Mineral Insulated REBCO Coils	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Applied Superconductivity	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TASC.2020.2966427	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Reis Chris
2. 発表標題 Investigating Irradiated Superconducting Magnet Insulation Materials for Particle Accelerators and Other High-Dose Environments
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 曾我部友輔
2. 発表標題 CORC 導体で構成されるコイルを対象とする数値電磁界解析における簡略化手法に関する検討
3. 学会等名 第101回2021年度春季低温工学・超電導学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Osami Iio
2. 発表標題 Irradiation effect on superconductivity of REBCO coated conductors
3. 学会等名 27th International Conference on Magnet Technology (MT27)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masami Iio
2. 発表標題 Research and Development of Future Radiation-Resistant Superconducting Magnets With Mineral Insulated REBCO Coils
3. 学会等名 Applied Superconductivity Conference (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masami Iio
2. 発表標題 Research and Development of Future Radiation-Resistant Superconducting Magnets With Mineral Insulated REBCO Coils
3. 学会等名 International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯尾 雅実
2. 発表標題 Research and development of future radiation resistant accelerator magnets based on high temperature superconductors
3. 学会等名 6th International Conference on Magnet Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	飯尾 雅実 (Iio Masami) (00469892)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導 低温工学センター・准教授 (82118)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	菅野 未知央 (Sugano Michinaka) (30402960)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・准教授 (82118)	
研究分担者	吉田 誠 (Yoshida Makoto) (70379303)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師 (82118)	
研究分担者	鈴木 研人 (Suzuki Kento) (80764878)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・助教 (82118)	
研究分担者	雨宮 尚之 (Amemiya Naoyuki) (10222697)	京都大学・工学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	曾我部 友輔 (Sogabe Yusuke) (40847216)	京都大学・工学研究科・助教 (14301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関		
米国	Lawrence Berkeley National Laboratory	Brookhaven National Laboratory	UC Berkeley