

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23246053

研究課題名(和文)次世代重粒子線がん治療装置用超伝導加速器の基盤技術開発

研究課題名(英文)Development of fundamental technology of next generation superconducting cyclotron for heavy particle cancer therapy

研究代表者

石山 敦士 (Ishiyama, Atsushi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：00130865

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 37,500,000円、(間接経費) 11,250,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題の目標は、次世代の小型・高効率・高性能の重粒子線がん治療用超伝導加速器「先進ハイブリッド・サイクロトロン(「AHC」と略記)の開発」である。AHCは、本研究グループが新しく提案したサイクロトロンで、イオンビームの入射・加速・引出に必要な磁場形成を「空芯超伝導コイルのみで行う」という特徴がある。本研究では、AHC用超伝導コイルシステムの試設計、磁場精度に影響する要因の抽出と影響低減法、耐放射線特性評価の3点について検討を行った。その結果、AHC加速器用コイルとしての成立性の前提となる高磁場・高精度磁場発生を可能とするコイル化技術を確立するための多くの重要な知見を得ることができた。

研究成果の概要(英文)：Our objective is to develop an Advanced Hybrid Cyclotron (AHC) using High-Temperature Superconducting (HTS) coil technology with a compact body, high efficiency, and high performance in heavy particle cancer therapy. For cyclotron application, high accuracy magnetic field distribution with isochronous field and azimuthally varying field (AVF) are required. We proposed a coil system be composed of HTS air-core split coils for isochronous field and HTS air-core spiral sector coils for AVF. In this study, to realize the HTS coil system technology for AHC, we performed the following three issues: 1) optimal design of HTS coil system; 2) reduction of irregular magnetic field caused by coil winding error, deformation due to thermal and electromagnetic stress, and screening current induced in tape type superconductor such as Y-system coated conductor; and 3) Experiments on effects of irradiation on commercially available Bi-2223 and YBCO superconducting tapes.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：加速器 超伝導材料 電気機器工学 量子ビーム 癌

1. 研究開始当初の背景

高齢化が進み、地域医療の高度化が重要となってくる中で、高度先進医療の1つであり、我が国が世界で最も多くの実績を積み重ねてきた「重粒子線がん治療」の普及拡大が強く望まれている。しかし現状の重粒子加速器（シンクロトン）は、広大な敷地、莫大な建設コスト、数多くの電磁石の励磁・冷却のための運転コストおよび維持費のために普及が困難な状態にある。従って必要となる加速器の小型・軽量化とともに高効率化、省エネルギー化が課題となっている。

このような背景のもと、近年の高温超伝導材料・線材の急速な性能向上と応用機器開発の進展の状況から、著者らは放射線医学総合研究所 HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) と同等の出力 (400MeV/核子、300nA) を持つ高温超伝導技術を活用した小型・高効率・高性能の重粒子線がん治療用超伝導加速器「先進ハイブリッド・サイクロトン (AHC: Advanced Hybrid Cyclotron)」の開発・実現を目指すことにした。

2. 研究の目的

AHC は、目的とする小型・高効率・高性能の加速器を実現するために著者らが新しく提案したサイクロトンで、イオンビームの入射・加速・引き出しに必要な磁場形成を「空芯超伝導コイルのみにより行う」という点が従来のサイクロトンと大きく異なっている (雑誌論文④)。そして、従来の AVF (Azimuthally Varying Field) サイクロトンの持つコンパクト性とリングサイクロトンの持つ大出力への拡張性の両特性を合わせ持ったこれまでにない全く新しいサイクロトンである。そして、1) 高温超伝導コイルシステムを用いた高磁場化により、よりコンパクト・高効率で高エネルギーの出力が可能となる。また 2) 鉄心を用いないので、空間自由度を最大限活かした機器の構成・配置による電磁場形成が実現できるため、大電流のビームを集束させながら安定して加速し取り出すことができる。この加速器システムが実現すると、がん治療用だけでなく、ナノ微細加工による新材料創製などの産業分野や、花卉、耐環境性農作物、環境浄化植物の育種など農業分野への応用等、我が国の成長戦略を加速する効果が期待できる。

本研究課題では、AHC 実現のキーテクノロジーとなる「高磁場を高い精度で発生可能な超伝導コイルシステムの開発」を目的とした。

3. 研究の方法

重イオンビームを収束させながら安定に加速するための高温超伝導コイルシステムは、大口徑円形スプリットメインコイル (等時性磁場発生用: 以下 SMC と略記) と非円形スパイラルセクターコイル (ビーム集束用磁場発生用: 以下 SSC と略記) から構成される (図 1)。

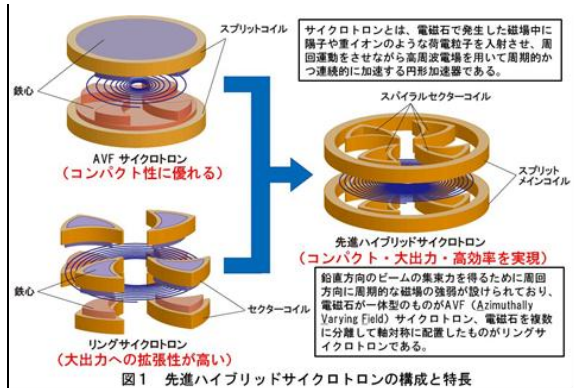


図 1 先進ハイブリッドサイクロトンの構成と特長

本研究では、これらの発生磁場精度と耐放射線性に着目し、実験と数値シミュレーションの両面から検討を行った。すなわち、ビーム軌道計算に基づいて試設計した SMC と SSC について、小型モデルコイルを試作し、発生磁場精度の目標を $10^{-3} \sim 10^{-4}$ として、巻線精度の影響、冷却時・励磁時の応力変形の影響、さらに、コイル巻線に使用される高温超伝導線材内の電流分布 (遮蔽電流分布) の影響等を明らかにして行った。また、加速器用としての実運転環境を想定し、耐放射線特性評価として、超伝導線材の中性子線照射前後の超伝導特性および機械特性 (ひずみを加えた時の超伝導特性) の比較実験等を実施した。なお本研究課題では、主としてイットリウム (Y) 系超伝導線材の使用を前提とした。

4. 研究成果

次世代の小型・高効率・高性能の重粒子線がん治療用超伝導加速器「先進ハイブリッド・サイクロトン (AHC) の実現」を最終目標に、本研究では、高磁場を高い精度で発生可能な高温超伝導コイルシステムの開発を目指し、主として、(1) AHC 用超伝導コイルシステムの試設計、(2) 磁場精度に影響する要因の抽出と影響低減法、(3) 耐放射線特性評価、の 3 点について検討を行った。以下にその成果をまとめる。

(1) AHC 用超伝導コイルシステムの試設計

放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 HIMAC と同等 (炭素 C^{6+} を核子当たり 400MeV まで加速。イオン電流密度: 300nA) の加速器仕様のもとで、シミュレートド・アニーリング・アルゴリズム等を利用し、使用線材の超伝導特性 (臨界電流—磁場特性) や機械特性などを制約条件として線材使用量を最小化する超伝導コイルシステムの設計最適化を行った。また目的とするコイルのコンパクト設計上最も厳しい制約となる機械強度を見積るため、コイル巻線に働く電磁応力分布を有限要素法に基づく 3 次元数値解析により評価するとともに、高強度コイル構造として著者らが開発した「YOROI コイル構造」 (後述) を採用した場合のコイル設計を行い、その有効性を示した (雑誌論文④、学会発表④)。

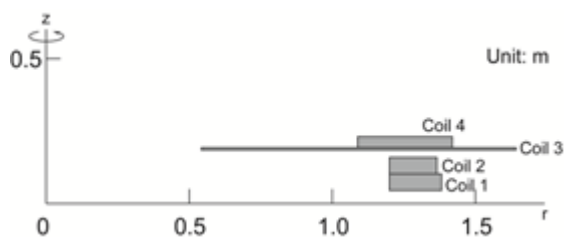


図2. SMCの最適化設計結果例(コイル断面)

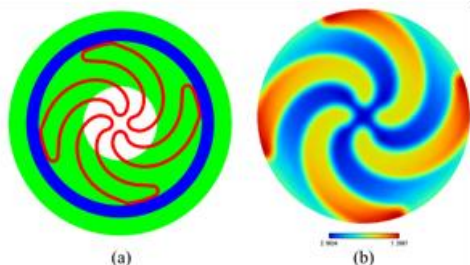


図3. (a) AHC コイルシステム概観
(b)中心面(Z=0面)磁場分布

表1. AHC コイルシステム設計結果例

Type	AVF cyclotron	
Particle	$^{12}\text{C}^{6+}$	
Energy	400 MeV	
Number of sectors	4	
Magnetic field at extraction	6 T	
Extraction radius	1.06 m	
Wire	YBCO tape (Thickness of Hastelloy: 100 μm , Cu stabilizer: 100 μm , width: 10mm)	
Wire length	334 km	
	Main coil	Sector coil
Number of coils	4 pairs	4 pairs
Minimum inner diameter	1.08 m	—
Maximum outer diameter	3.28 m	—
Height	0.462 m	0.13 m
Wire length	225 km	109 km

① SMC コイルシステムの設計最適化

炭素 C^{6+} を 400 MeV まで加速するとして、平均磁場 B_{ave} を 6 T、ビーム取り出し半径を 1.06 m とした。まず SMC コイルの設計最適化を以下の制約条件のもとで行った。

- ・ Y 系 (YBCO) 線材は、幅 1 cm、厚さ 200 μm (基板、安定化銅を含む) とする。
- ・ 超伝導線材の電流-電圧特性の磁場強度・磁場角度依存性を考慮する。
- ・ 冷凍機伝導冷却で運転温度は 20K、負荷率は 0.7 とする。
- ・ 絶縁等を含めて占積率 0.7 とする。
- ・ 巻線内の電磁応力 (磁束密度 \times 電流密度 \times コイル半径) は 1.5GPa 以下に抑える。
- ・ 複数のスプリットコイル (今回は 4 対を想定) は別電源で励磁される。

最適化設計の結果例を図 2、図 3、表 1 に示す。ここで YOROI コイル構造の採用を想定して電磁応力の制約を 1.5GPa とできたことにより、制約を 600MPa としたときに比べ、

必要線材長を約 40%削減できるとともに、超伝導線材の臨界電流特性をより活かした設計を可能とすることができた。

② SSC コイルシステムの試設計

フラッター F^2 (磁場の段差) を 0.06、 $\Delta B = B_{\text{hill}} - B_{\text{ave}} = B_{\text{ave}} - B_{\text{valley}} = 1.47\text{T}$ として SSC コイルシステムの設計を行った (詳細省略)。

(2) 磁場精度に影響する要因の抽出と低減法

① コイル巻線誤差による不整磁場

a) SMC: 先行研究で開発した高精度巻線機を用いて、Y 系ダブルパンケーキコイルを試作した。Y 系テープ状線材の厚みとコイルの半径方向巻線誤差をレーザー変位計 (分解能: 0.25 μm) により、またコイルの軸方向の巻線誤差を表面粗さ測定器 (分解能: 0.2 μm) により測定した。線材の厚み分布は線材を覆う電気絶縁層に最も影響を受けることが確認された。また、径方向の巻線誤差はいずれのコイルにおいても平均値に対して $\pm 30 \mu\text{m}$ の範囲に収まっていた。軸方向の巻線誤差は、ダブルパンケーキ上部コイルが誤差範囲: 410 μm 、標準偏差: 71 μm 、下部コイルが誤差範囲: 262 μm 、標準偏差: 49.2 μm であった。

以上の測定データに基づいて「(1) AHC 用超伝導コイルシステムの試設計」で得られた SMC を対象として、巻線誤差の磁場分布精度への影響を数値解析により評価した。その結果、目標磁場精度である 0.01-0.1% を達成できることが示された。また巻線誤差を含んだ磁場に対して各構成コイルの通電電流の調整・最適化を行うことで磁場精度の向上を図る手法の提案を行い、数値解析によりその有効性を検証した (雑誌論文①、学会発表⑤)。

b) SSC: 「(1) AHC 用超伝導コイルシステムの試設計」で得られた SSC の最小曲率半径 2 分の 1、大きさ約 4 分の 1 モデルを試作し (図 4)、その発生磁場を設計計算により得られた磁場分布と比較評価した。使用した Y 系線材は幅 4 mm、厚さ 150 μm (絶縁層 50 μm 込) である。SSC は 4 つの非円形コイルが中心面を挟んで対を成す構成になっており、実規模設計で 4 対である非円形コイルの 1 対分の片側を試作し、シングルパンケーキ形状に巻線した。コイル横断面における磁場分布は、それぞれ実験と設計計算で得られた値とよく一致しており、Hill and Valley 状磁場分布を確認することができた (学会発表①⑦)。

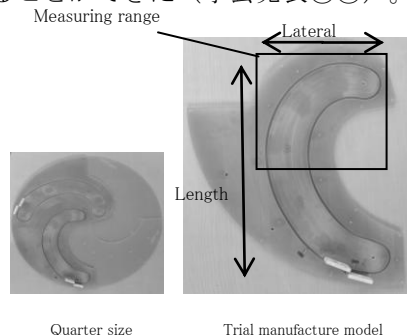


図4. 試作スパイラルセクターコイル

表2 試設計SSCの諸元

Spiral sector coil (one of four part composition)	
Lengthwise (m)	0.815
Lateral (m)	1.50
Height (m)	0.13
Minimum curvature radius (m)	0.053
Maximum curvature radius (m)	2.3
Operating current per REBCO wire (A)	243
Maximum experience field (T)	8.99

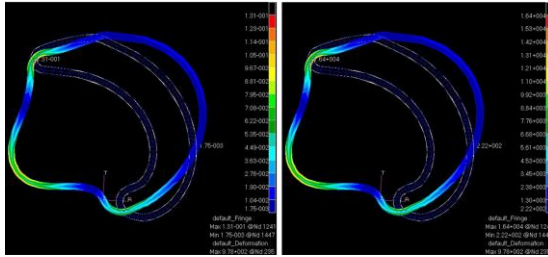


図5. 補強構造なし

巻線内のひずみ(左図)とフープ応力(右図)分布

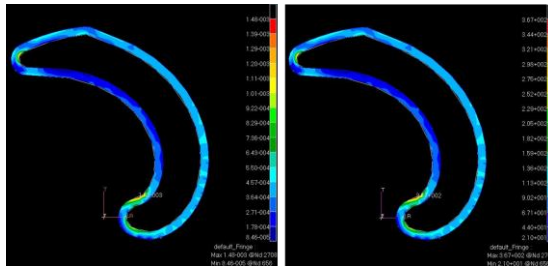


図6. YOROIコイル構造

巻線内のひずみ(左図)とフープ応力(右図)分布

② コイル変形による不整磁場

コイル励磁時の電磁応力による変形に起因する不整磁場を低減するため、先行研究で開発した YOROI 構造を SMC と SSC に適用したときの補強効果を 3 次元構造解析により評価し良好な結果を得た (雑誌論文②)。YOROI コイル構造とは、コイル巻線の外側に外・内枠と上下蓋からなる支持構造を設けることにより応力を面で分担することで強度化を図る方式である。ここでは特に応力集中が予想される実規模の非円形スパイラルセクターコイル(SSC)の評価結果を示す。

「(1)AHC 用超伝導コイルシステムの試設計」で得られた SSC 諸元を表 2 に示す。SSC の電磁力分布計算では、AHC 超伝導コイルシステム (SMC・SSC コイルシステム) 全てが作る磁場を考慮した。巻線部は金属基板層である Hastelloy(厚み 100 μ m)と銅層(厚み 100 μ m), 絶縁被膜である PAI(厚み 100 μ m)の三層で構成される Y 系テープ線材を想定し、パンケーキ数を考慮せず巻線部と支持構造である GFRP の一体モデルとして解析を行った。YOROI-GFRP 補強部は上下側板(50mm)を想定して解析を行った。

YOROI 構造を用いなかった「補強構造なし」のときのひずみとフープ応力分布を図 5 に示す。最大ひずみは約 0.131%であり、最大

フープ応力は約 16400MPa であった。YOROI 構造を応用したときの SSC の巻線に加わるひずみとフープ応力分布を図 6 に示す。最大ひずみは約 0.00148%であり、最大フープ応力は約 367MPa であった。以上より YOROI 構造を SSC に適用することで、補強部が巻線に加わるフープ応力の大部分を分担することが可能となり、巻線は REBCO 線材の許容限界であるひずみ 0.4%と引張応力 600MPa を超過しない高機械強度・高電流密度な設計が可能となることが示された。

③ 遮蔽電流による不整磁場

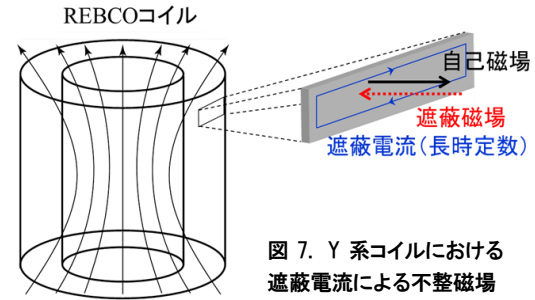


図 7. Y 系コイルにおける遮蔽電流による不整磁場

Y 系線材はテープ形状をしているため、垂直磁場の影響を大きく受け、遮蔽電流が顕著に誘導され、それにより不整磁場が発生する (図 7)。遮蔽電流はコイル全体を巡り、その減衰時定数は非常に長い。そしてこの不整磁場は、コイル発生磁場の空間的均一性や時間的安定性を損なう可能性がある。そのため、加速器に限らず、NMR や MRI といった高い磁場精度が要求される機器への高温超伝導コイル応用において大きな課題となっており、国内外で遮蔽電流による不整磁場の解明と低減に関する検討が進められている。そこで本研究では、筆者らが遮蔽電流と不整磁場分布を精度良く解析・評価するために開発した 3 次元電磁場解析プログラム (有限要素法・境界積分方程式法・高速多重法) を用いた数値シミュレーションと試作コイルによる実験により、遮蔽電流の振舞いを明らかにするとともに、その低減法 (負荷率、細線化等) について検討を行った (雑誌論文③⑤、学会発表②③)。以下にその概要をまとめる。

a) 遮蔽電流発生メカニズムの検討: AHC 用超伝導コイルシステムでは、コイル自身の発生磁場だけでなく、他のコイルの作る磁場の影響を受ける。従って外部磁場環境下での遮蔽電流と不整磁場を評価する必要がある。図 8 は外部一定磁場中、Y 系パンケーキコイルに、三角波 (最大 ± 80 A, Sweep rate 20A/min) を通電したときの遮蔽磁場 (B_s) の変化を実験と数値解析により評価した結果の一例である。遮蔽電流磁場がヒステリシスを描いており、数値解析はその振舞いをよく再現している。これらの実験と解析の両面からの検討により、線材・コイル内の遮蔽電流分布とその変化、それによって発生する不整磁場の振舞いを明らかにすることができた。

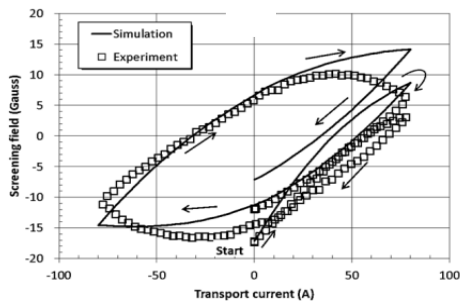


図8. 遮蔽電流磁場測定結果例

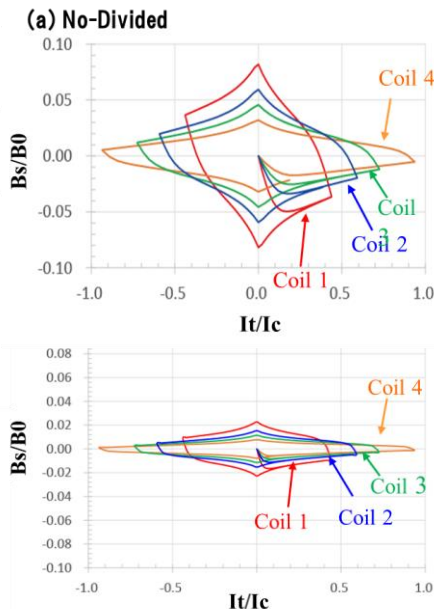


図9. 遮蔽電流磁場：負荷率と細線化の影響

b) 遮蔽電流磁場の低減：遮蔽電流により発生する不整磁場を低減することを目的に、線材の細線化と負荷率 (It/Ic ：コイル臨界電流 Ic に対する通電電流 It の比) に焦点を当て、上述の3次元電磁場解析プログラムにより検討を行った。使用線材は4mm幅のY系テープ線材を想定し、パンケーキコイル(250ターン、内径100mm、外径170.5mm)を8段、10段、12段、16段とスタック(縦積み)していずれも中心磁場3Tを発生する電流を通電電流 It とした。スタック数を増やすと3Tを発生するための通電電流は小さくなり、負荷率 (It/Ic) が下がる。以上のスタック数の異なる4つのコイル (coil 1:16段、coil 2:12段、coil 3:10段、coil 4:8段) を対象に負荷率の変化に対して遮蔽電流による不整磁場を評価した。さらに、各コイルにおいて線材を2分割、4分割と細線化したときの遮蔽磁場も評価した。図9に通電電流とコイル中心の遮蔽電流磁場の関係を示す。負荷率が上がるにしたがって遮蔽電流磁場が小さくなる。これは線材内で通電電流が流れる領域が広がり遮蔽電流が流れる余地が少なくなるためである。また細線化することにより、細線一本あたりに流れる遮蔽電流が抑制されるため不整磁場が低減されることになる。特に今回のモデルコイルでは負荷率が6割以上の時、不整磁場の影響が1%以下となった。

(3) 耐放射線特性評価

加速器応用においては、コイルに用いられる高温超伝導線材の耐放射線性を評価することが不可欠である。特にサイクロトロンでは、加速軌道を逸した粒子が電極などの部品に衝突することにより容易に中性子が放出される。そこでここでは、市販の高温超伝導線材 (Bi系：1種類。Y系：メーカ・製造プロセスの異なるもの3種類) に対して中性子を線材テープ面に対して垂直・水平方向に照射し以下の評価を行った (学会発表⑥⑧⑨⑩等)。なお中性子照射は放医研・サイクロトロン AVF-930 の14 MeV 中性子ビームを用いて室温で行った。

① 放射性核種分析

放射性核種分析 (RI 分析) を、Ge スペクトル分析器を用い、100000秒間測定した。本研究で実施した RI 分析においては、すべてのサンプル線材において、メンテナンスや廃棄時のハンドリングに問題となるような長半減期かつ高放射能の放射性核種は確認されなかった。

② 超伝導特性 (臨界電流特性・機械特性)

a) 臨界電流特性：放射性核種分析と、同じ4種類の試料線材に対して、中性子照射前後の超伝導特性 (臨界電流特性) を評価した。まず外部磁場を印加しない自己磁場中においては、いずれの線材においても照射前後での差異は数%以内で、水平照射・垂直照射についても臨界電流値における差異は確認されなかった。

b) 機械特性：U字治具を用いて中性子照射前後の試料線材に曲げひずみを加えた時の超伝導特性を調べた。今回行った試験の範囲では、ひずみ0.4%以下に置いて中性子照射の影響は観測されなかった。

(4) 研究成果のまとめ

AHC 加速器用コイルとしての成立性の前提となる高磁場 (高強度・高電流密度)・高精度磁場発生を可能とするコイル化技術を確立するための基盤技術の開発 (設計技術、巻線技術、遮蔽電流評価・低減技術、耐放射線性評価など) を行い、当初の目標を達成することができた。今後、特に実規模コイルにおける遮蔽電流による不整磁場の低減法の確立、中性子照射の影響として外部磁場中の超伝導特性の評価が重要と考える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計12件)

① Wang, T, Karino, H, Ishiyama, A (以下6名)、Influence of Winding Accuracy on Magnetic Field Distribution in YBCO Pancake Coil for Cyclotron Application, IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY、査読有、24巻3号 記事番号9002005、2014年、DOI: 10.1109/TASC.2013.2297317

② Wang, X., Ishiyama, A., Yamakawa, H. (以下4名)、Numerical Structural Analysis on a New Stress Control Structure for High-Strength REBCO Pancake Coil、IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY、査読有、24巻3号 記事番号 4601605、2014年、DOI: 10.1109/TASC.2013.2288294

③ Ueda, H., Michitsuji, K., Ishiyama, A. (以下7名)、Measurement and Simulation of Magnetic Field Generated by Screening Currents in HTS Coil、IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY、査読有、24巻3号 記事番号: 4701505、2014年、DOI: 10.1109/TASC.2014.2299537

④ Ueda, H., Fukuda, M., Hatanaka, K., Ishiyama, A. (以下7名)、Conceptual Design of Next Generation HTS Cyclotron、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、査読有、23巻3号 記事番号: 4100205、2013年、DOI: 10.1109/TASC.2012.2232955

⑤ Ueda, H., Fukuda, M., Hatanaka, K., Ishiyama, A. (以下2名)、Spatial and Temporal Behavior of Magnetic Field Distribution Due to Shielding Current in HTS Coil for Cyclotron Application、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、査読有、23巻3号 記事番号: 4100805、2013年、DOI: 10.1109/TASC.2012.2234813

⑥ Yazaki, S., Ishiyama, A. (以下3名) Critical Current Degradation in High-Temperature Superconducting Tapes Caused by Temperature Rise、IEEE Transactions on Applied Superconductivity、査読有、23巻3号 記事番号: 4602304、2013年、DOI:10.1109/TASC.2013.2244157

[学会発表] (計 57 件)

① 松見絢子、王旭東、石山敦士、植田浩史、(以下6名)、次世代超電導サイクロトロンの開発: 非円形 YBCO パンケーキコイルの試作、平成 26 年度電気学会全国大会、2014.3.18、愛媛大学

② 植田浩史、道辻健太、石山敦士 (以下4名)、REBCO 超電導コイルにおける遮へい電流の影響評価、電気学会超電導応用電力機器研究会資、ASC-15-006、2014.1.30、成蹊大学

③ 齋藤隼、植田浩史、王旭東、石山敦士 (以下7名) 次世代超電導サイクロトロンの開発—YBCO ダブルパンケーキコイルの巻線精度評価—、電気学会超電導応用電力機器研究会資、ASC-13-042、2013.9.25、東京電力・技術開発研究所

④ 植田浩史、福田光宏、畑中吉治、野口聡、石山敦士 (以下5名)、次世代超電導サイクロトロン用コイルの設計最適化、電気学会超電導応用電力機器研究会資、ASC-13-011、2013.1.16、産業技術総合研究所

⑤ 王韜、矢崎真二郎、石山敦士 (以下8名)、次世代超電導サイクロトロンの開発—YBCO パンケーキコイルの巻線精度評価—、電気学会超電導応用電力機器研究会資、ASC-13-012、

2013.1.16、産業技術総合研究所

⑥ 柄澤彰良、石山敦士、宮原信幸 (以下4名)、次世代超電導サイクロトロンの開発—高温超電導線材の中性子照射による特性変化—、電気学会超電導応用電力機器研究会資、ASC-13-013、2013.1.16、産業技術総合研究所

⑦ 梅田大貴、石山敦士、次世代超電導サイクロトロンの開発: 非円形 YBCO パンケーキコイルの試作、第 88 回低温工学・超電導学会研究発表会、2013.12.4-6、ウィンクあいち

⑧ 宮原信幸、石山敦士、植田浩史、福田光宏、畑中吉治、次世代型重粒子線がん治療用超電導サイクロトロン: 中性子照射特性評価 (RI 測定)、第 86 回秋季低温工学・超電導学会、2012.11.8、いわて県民情報交流センター

⑨ 道辻健太、石山敦士、植田浩史、宮原信幸、次世代超電導サイクロトロンの開発: 高温超電導線材の中性子照射特性 (超電導特性)、第 86 回低温工学・超電導学会研究発表会、2012.11.8、いわて県民情報交流センター

⑩ 道辻健太、石山敦士、植田浩史、宮原信幸、次世代超電導サイクロトロンの開発: 高温超電導線材の中性子照射特性 (機械特性)、第 86 回低温工学・超電導学会研究発表会、2012.11.8、いわて県民情報交流センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石山 敦士 (ISHIYAMA, Atsushi)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 00130865

(2) 研究分担者

山川 宏 (YAMAKAWA, Hiroshi)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 00097263

若尾真治 (WAKAO Shinji)
早稲田大学・理工学術院・教授
研究者番号: 70257210

王 旭東 (WANG Xudong)
早稲田大学・理工学術院・助教
研究者番号: 20550346

(3) 連携研究者

福田 光宏 (FUKUDA Mitsuhiro)
大阪大学・核物理研究センター・准教授
研究者番号: 60370467

植田 浩史 (UEDA Hiroshi)
大阪大学・核物理研究センター・准教授
研究者番号: 10367039

宮原 信幸 (MIYAHARA Nobuyuki)
(独) 放射線医学総合研究所・放射線発生装置利用技術開発課・課長
研究者番号: 60260238