

平成 30 年 6 月 25 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249036

研究課題名(和文)次世代医療用サイクロトロン開発のための5H超伝導コイルシステムの基盤技術の確立

研究課題名(英文) Establishment of 5H Superconducting Coil System Technology for Next Generation Medical Cyclotron

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) 31,800,000円

研究成果の概要(和文)：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)」の開発を目標に、その実現の鍵となる5H(High)：高機械強度・高電流密度・高安定・高磁場・高精度磁場を可能とするREBCO高温超伝導コイル開発のための基盤技術の確立を目指してきた。そして、高強度化・高磁場化のための「Super-YOROIコイル構造」、高電流密度化と高熱的安定化の両立のための「無絶縁コイル巻線方式」、そして高精度磁場化のための「遮蔽電流磁場の低減法」について有効性を数値解析と実験により検証した。

研究成果の概要(英文)：With the purpose of developing a superconducting accelerator "Advanced Hybrid Cyclotron (AHC)" for heavy particle cancer therapy, we have aimed at establishing basic technology for development of REBCO high-temperature superconducting coil system which enables high mechanical strength, high current density, high stability, high magnetic field and high precision magnetic field. And the effectiveness of "Super-YOROI coil structure" for high strength and high magnetic field, "no-insulation coil winding method" for compatibility between high current density and high thermal stability, and "Method for reducing the shielding current magnetic field" was verified by numerical analyses and experiments.

研究分野：超伝導工学

キーワード：加速器 超伝導材料 電気機器 量子ビーム 癌

1. 研究開発開始当初の背景

重粒子線（炭素線）を用いた放射線治療は、悪性腫瘍を根治的に治癒させるだけでなく、QOLの向上が期待でき、高齢者を含めた広い範囲で適用できるという長所を有している。1994年に世界に先駆けて設置された放射線医学総合研究所（以下、「放医研」と略記）の重粒子線がん治療装置 HIMAC（Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba）は数多くの治療実績を上げてきたが、現状の加速器（シンクロトロン方式を採用）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（ビーム輸送系・照射系・回転ガントリーも含む）の小型・軽量化とともに、高効率化、省エネルギー化が重要な課題となっている。このような背景のもと、本研究では、放医研 HIMAC 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・高性能の超伝導加速器「先進ハイブリッド・サイクロトロン（AHC）」の開発を目指すこととした。

2. 研究の目的

本研究で開発を目指す AHC は、筆者らが提案したこれまでにない新しいサイクロトロン（特許取得）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、「鉄を用いずに空芯の超伝導コイルのみにより行う」点が従来のサイクロトロンと大きく異なっている（図1）。本研究では、AHC 開発の鍵となる 5H（High）「高機械強度・高電流密度・高安定・高磁場・高精度磁場」の全てを可能とする高温超伝導コイルシステムの実現のための基盤技術の確立を目的とした。

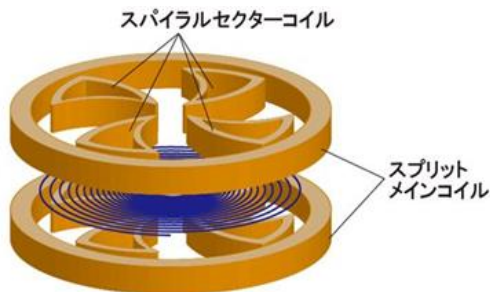


図1 高温超伝導サイクロトロン（AHC）

3. 研究の方法

実験と数値解析の両面からの検討により、線材・コイル巻線・支持構造等に対する新しい発想や技術を提案・導入しながら、1)高機械強度化・高電流密度化・高磁場化と、コイルの小型・低コスト化（使用線材量の削減）、2) 実用上不可欠となる常伝導転移事故に対する安定性の向上と確実なコイル保護、3)サイクロトロンに必要なとされる発生磁場精度を実現する方策を探っていった。

4. 研究成果

AHC 用コイルのための使用線材としては、現状最も優れた超伝導特性を有していることから、REBCO 系テープ線材の使用を想定した。また、

コイル巻線方式としては、高機械強度化を念頭にパンケーキ巻を採用することとした。以下に得られた成果をまとめる。

(1) 高強度化技術

超伝導コイル巻線に作用するフープ応力は、磁束密度 B と電流密度 J およびコイル半径 R の積 ($B \times J \times R$) で表される。従って大口径 (R) のコイルで高磁場 (B) を発生させるには、フープ応力に抗するコイルの機械的強度が不可欠となる。本研究課題では、筆者らが提案した「Super-YOROI コイル構造」の有効性を検証するため、小口径コイル（内直径：190mm）を対象に、目標値として掲げた機械強度（フープ応力）500MPa、電流密度 500A/mm² を仮定したときの Super-YOROI 構造と先行研究の YOROI 構造の補強効果の比較を三次元数値構造解析により評価した。その結果、Super-YOROI 構造の応力分担機構を明らかにするとともに、その有効性を確認することができた（図2）。次に実規模 m 級コイルに Super-YOROI 構造を適用したところ、線材の強度限界を満たすことができなかつたので、コイルを分割する Super-YOROI 構造を考案し、分割数、内枠外枠の厚みが補強効果にどのような影響を及ぼすのかを検討した。その結果 m 級のコイルでも線材の強度限界（線材引張応力限界：800MPa、ひずみ限界：0.4%）を満たし、特性劣化を防ぐことが可能であることが確認された。

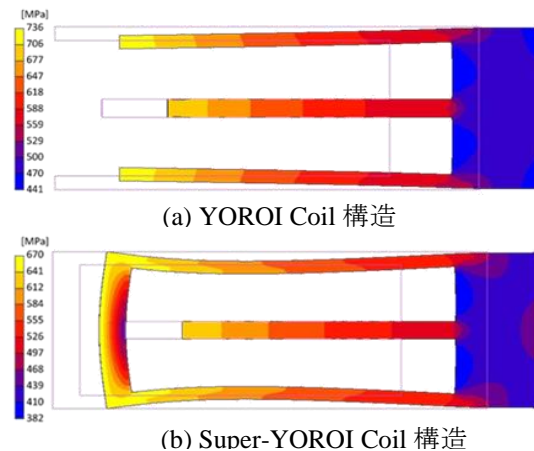


図2 応力分担効果の比較（変位を25倍に拡大）

(2) 高熱的安定化と高電流密度化の両立

REBCO 超伝導線材・コイルは熱的安定性が極めて高いが、低温金属系超伝導線材・コイルと同様に、局所的な常伝導転移等の事故発生に対して、銅やアルミニウムなどの電気抵抗の小さな金属を複合させ、これに電流をバイパスさせることにより、常伝導領域の拡大を抑え、熱的安定性を確保している。従って、線材の臨界電流・運転電流が大きくなると、安定化材の断面積も必然的に大きくする必要があり、結果的に安定化材を含めた線材総断面における電流密度を向上させることができない。このように、高電流密度化と高熱的安定化は本来二律背反の関係にある。

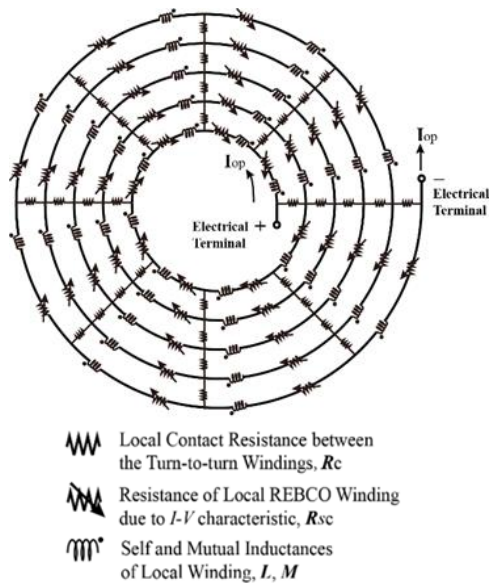


図3 部分要素等価回路

- ① 無絶縁 (NI : No-Insulation) コイル巻線方式
- 高電流密度化と高熱的安定化の両立を可能とする技術として、REBCO テープ線材に電気絶縁を施さずに巻線する「無絶縁コイル (NI コイル) 巻線方式」の可能性を評価した。本研究では PEEC (部分要素等価回路 : 図 3) による電流分布解析と有限要素法に基づく温度分布解析を連成した数値解析プログラムを開発し、これを用いて、局所的常伝導転移発生後の NI コイルの振舞いを、解析・評価した。その結果、以下のことを明らかにすることができた。
- NI コイル内で局所的常伝導転移が起こった際、電流が層間接触電気抵抗を介して局所的常伝導転移部を避けるように流れる現象を解析・可視化することができた。そして局所的常伝導転移が発生した線材 (層) の両隣りの層の電流が過渡的に上昇し、その後コイル全体に再分配される現象を確認することができた。
 - 電流が、局所的常伝導転移が生じた層全体にわたって隣層に転流するため、層間接触電気抵抗によるジュール発熱密度が減少し局所的温度上昇が抑えられることがわかった。
 - 小型 ($\phi 60\text{mm}$) NI コイルと実規模 (m 級) NI コイルの、局所的常伝導転移時の振舞いの比較を行い、実規模 NI コイルにおいても無絶縁巻線方式が有効である可能性を確認できた。
 - 実規模 NI コイルにおいて、NI コイルの熱的安定性は銅安定化層の厚みに依存しないことがわかった。また熱的安定性を損なうことなく、銅安定化層の厚みを減少させ電流密度を向上させることが出来る可能性が示された。
 - 実規模 NI コイルにおいて、NI コイルの熱的安定性は負荷率に依存しないということがわかった。また熱的安定性を損なうことなく、負荷率をある程度高くし電流密度を向上させることが出来る可能性が示された。

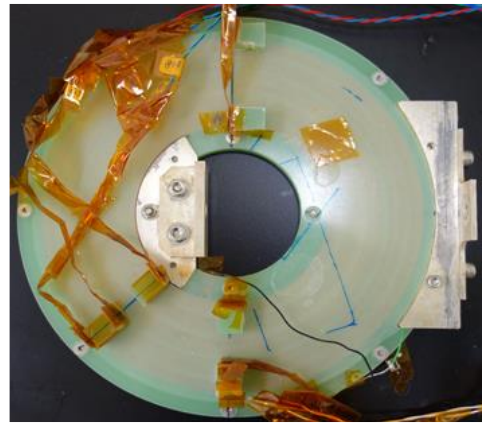


図4 試作したモデル無絶縁コイル

② NI コイル用保護技術

NI コイルに適したコイル保護法について検討を行った。まず試作モデル無絶縁 (NI) コイル (図 4) による実験と解析により、NI コイルにおいて従来の外部保護抵抗法を想定したときのエネルギー回収 (消費) バランスについて調べた。その結果、電源遮断時のエネルギー消費は、NI コイル巻線内の層間接触電気抵抗と外部抵抗の比に依存し、接触抵抗の小さい NI コイルでは外部抵抗が保護の働きをせず多くのエネルギーをコイル内で消費することが分かった。そこで PEEC モデル (図 3) を用いて外部保護抵抗を取り除いた NI コイルにおいて電源遮断後と常伝導転移発生後の電源遮断という実際に起こり得る二つのパターンについて電磁的・熱的振舞いの解析を行った。その結果、局所的常伝導転移の有無によらず、径方向電流はコイル内ではほぼ一様に流れ、コイル全体で均等にエネルギーが消費され温度上昇することが確認された。この時、電流の集中やホットスポットの形成は見られず、実規模マグネットにおいてもコイルの致命的損傷に至る可能性のある 150K 以下に抑えられる可能性があることが分かった。以上より、NI コイルにおいて層間接触電気抵抗が保護抵抗の働きをするため、従来の絶縁コイル保護に使用していた外部抵抗は NI コイルにおいては不要であり、事故が起こった際に NI コイル両端を開放にするという保護法が有効な手段である可能性が示された。

③ NI コイルにおける層間接触電気抵抗決定法

PEEC モデルを用いた解析により、高熱的安定性と励磁遅れ時間 (NI コイルの欠点) の短縮の両方を実現可能な層間接触電気抵抗の求め方を提案した。すなわち、層間接触電気抵抗を変化させた場合の局所的常伝導転移発生時の NI コイル内の発熱について、その要因と温度分布を解析によって求めた。その結果局所的常伝導転移発生時に転移部分を含む層 1 周で発熱を分担する場合にもっとも高い熱的安定性が発揮され、これを実現する層間接触電気抵抗の範囲で最大の値が目的とした高熱的安定性と励磁遅れ時間の

短縮の両者を満足できる値であることが分かった。次に適切な層間接触電気抵抗を実現する手法として、金属テープを共巻する方法(MLMI: Multi-Layer Metal Insulation)を提案し、実験と数値解析により有効性を検証した。その結果共巻きした場合の層間接触電気抵抗に対して有意に関連するのは共巻する金属テープの種類・厚さではなく隣接線材間に存在する金属接触面の数であることがわかり(図5: 厚さ $30\mu\text{m}$ と $50\mu\text{m}$ のSUSテープを共巻)、層間接触電気抵抗の制御にはMLMI法が有効であることが分かった。

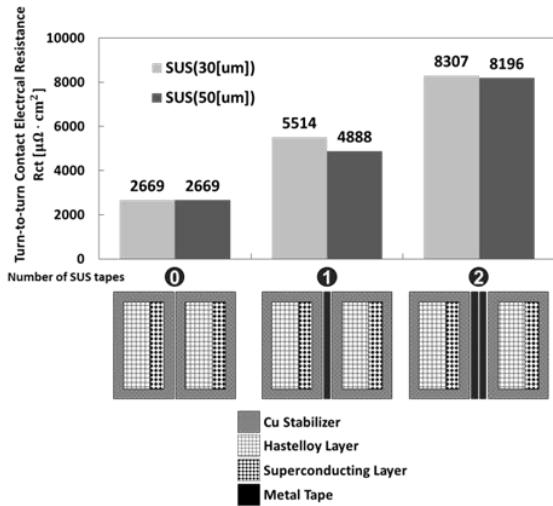


図5 SUSテープの枚数と層間接触電気抵抗

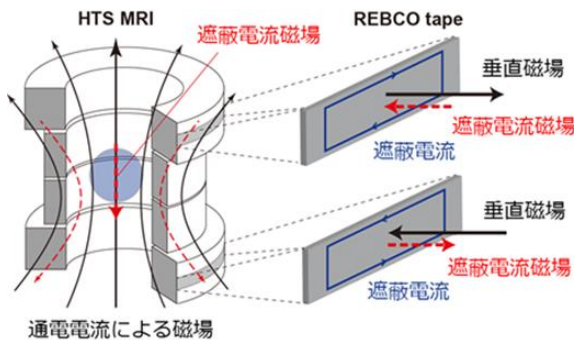


図6 REBCOテープ線材に誘導される遮蔽電流

(3) 高精度磁場技術(遮蔽電流磁場の影響)

超伝導コイル励磁時には、線材に印加される磁場の時間変化によって、線材内に遮蔽電流が流れ、不整磁場(以下、遮蔽電流磁場)が生じ、発生磁場の空間分布と時間安定性を悪化させてしまうことが大きな問題となっている。特にテープ形状をしているREBCO線材の場合は、テープ面に垂直に印加される磁場を打ち消すように、長い時定数を持った遮蔽電流が顕著に誘導されてしまう(図6)。目的とする高温超伝導サイクロトロン(AHC)には100ppmの空間的磁場精度、1ppm/hの時間的磁場安定性が要求されるため、遮蔽電流磁場の低減は必須課題となる。そこで本研究では、実規模級高温超伝導サイクロトロンにおける遮蔽電流磁場の評価とその低減方

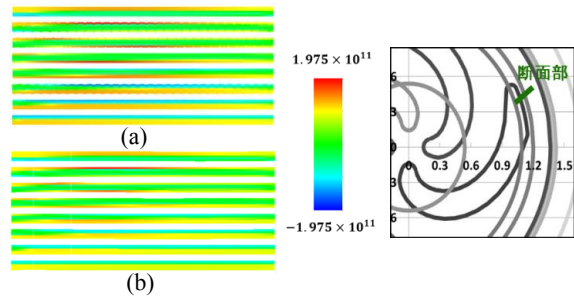


図7 メインコイルの電流密度分布断面図
(a) 同時励磁, (b) 励磁順(メイン⇒セクター)

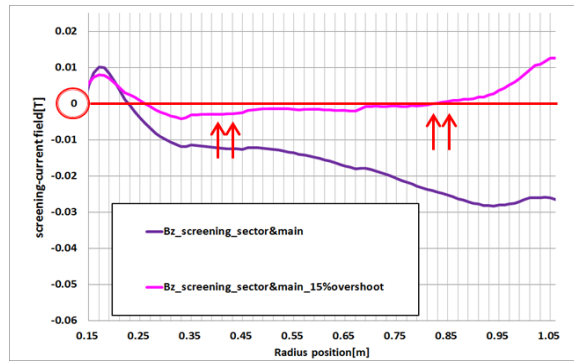


図8 15%オーバーシュート周方向平均遮

法について取り組んできた。

まず遮蔽電流分布および遮蔽電流磁場を精度よく解析するため筆者らが開発した三次元過渡非線形電磁場解析プログラムを用いて、先行研究によって試設計を行った放医研HIMACと同等の出力(400MeV/核子、300nA)を持つ「先進ハイブリッド・サイクロトロン(AHC)」用REBCOコイルシステムを対象に、遮蔽電流磁場の影響評価を行った。結果の一例を図7に示す。次に、遮蔽電流磁場の低減法として、ここでは、オーバーシュート法(コイル励磁時に一旦運転電流より高い電流まで上昇させることにより遮蔽電流磁場の影響を低減する方法)を採用したときの効果を、オーバーシュート率と励磁順を変化させて評価した。図8のように、オーバーシュートによって遮蔽電流磁場が低減することを定量的に示すことができた。

詳細は省くが、遮蔽電流磁場の低減法として、REBCOテープ線材を細線化(線材長手方向にスリットを設ける)したときの振舞い・効果を明らかにした。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計9件)

- ① Katsumata, K., Wang, T., Ishiyama, A., Noguchi, S., Monma, K., Nagaya, S., & Watanabe, T. "Influence of the Turn-to-Turn Contact Electrical Resistance on the Thermal Stability in Meter-Class No-Insulation REBCO Pancake Coils during a Local Normal-State Transition," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, 27(4), 2017, 7833163, DOI:

- 10.1109/TASC.2017.2657679
- ② Kashiwazaki, Y., Ishiyama, A., Wang, X., Ueda, H., Watanabe, T., & Nagaya, S., “Numerical Evaluation of the Reinforcing Effect of the Advanced YOROI Coil Structure for the HTS Coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, 27(4), 2017, 7817852, DOI:10.1109/TASC.2017.2652918
- ③ Noguchi, S., Miyao, R., Monma, K., Igarashi, H., & Ishiyama, A., “Numerical Investigation of Metal Insulation Technique on Turn- to-Turn Contact Resistance of REBCO Pancake Coils. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, 27(4), 2017, 7817744, DOI: 10.1109/TASC.2017.2653203
- ④ Oki, T., Ikeda, A., Wang, T., Ishiyama, A., Noguchi, S., Monma, K., ... Nagaya, S., “Evaluation on Quench Protection for No-Insulation REBCO Pancake Coil. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, 26(4), 2016, 7429748, DOI: 10.1109/TASC.2016.2540001
- ⑤ Ikeda, A., Oki, T., Wang, T., Ishiyama, A., Monma, K., Noguchi, S., Nagaya, S., “Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coil during Local Normal-State Transition. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 査読有, 26(4), 2016, 7390198, DOI: 10.1109/TASC.2016.2521412

[学会発表] (計 43 件)

- ① Zheng, Q., Yashiro, S., Ichikawa, T., Kakimoto, Y., Ishiyama, A., Noguchi, S., “Simulation of Electrical and Thermal Behaviors of No-Insulation (NI) REBCO Pancake Coil with Multiple Defects”, 13th European Conference on Applied Superconductivity, 2017.
- ② Wang, T., Ishiyama, A., Noguchi, S., Hahn Seungyong, H., Iwasa, Y., “Thermal Stability of No-Insulation REBCO Pancake Coil,” 1st Asian International Cryogenic Material Conference (招待講演) 2016
- ③ 池田愛花, 勝俣一輝, 大木隆広, 賈昀昊, 王韜, 石山敦士, 野口聡, 門馬克敏, 渡辺智則, 長屋重夫「m 級無絶縁 REBCO パンケーキコイルの基礎特性評価: 局所的常電導転移時における負荷率と銅安定化層厚みの熱的安定性に対する影響」第 93 回 2015 年度秋季低温工学・超電導学会 (発表賞受賞)
- ④ 勝俣一輝, 池田愛花, 大木隆広, 矢代聡佳, 王韜, 賈昀昊, 石山敦士, 野口聡, 門馬克敏, 長屋重夫, 渡部智則「m 級無絶縁 REBCO パンケーキコイルの基礎特性評価: 局所的常電導転移時における層間接触抵抗の熱的安定性に対する影響」第 93 回 2015 年度秋季低温工学・超電導学会 (発表賞受賞)
- ⑤ Ueda, H., Fukuda, M., Hatanaka, K., Imaichi, Y.,

Ishiyama, A., Noguchi, S., “Numerical Simulation on Magnetic Field Distribution generated by Screening Current in High Temperature Superconducting Cyclotron”, 2A-LS-P-0105, 2015 European Conference on Applied Superconductivity

[産業財産権]

○出願状況 (1 件)

名称: 超電導コイルの保護装置及び保護方法

発明者: 渡部智則、長屋重夫、石山敦士

権利者: 中部電力

種類: 特許

番号: 特開 2016-092152

出願年月日: 2014 年 10 月 31 日

国内外の別: 国内

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

金 錫範 (KIM, Seokbeom)

岡山大学・自然科学研究科・教授

研究者番号: 00287963

植田 浩史 (UEDA Hiroshi)

岡山大学・自然科学研究科・准教授

研究者番号: 10367039

野口 聡 (NOGUCHI So)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号: 30314735

(2014, 2015 年度)