

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 17 日現在

機関番号：63902

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760243

研究課題名(和文) 高度先進ガン治療装置のための湾曲型超伝導マグネットの安定化に関する研究

研究課題名(英文) Study on curved superconducting magnets for rotating gantry in cancer therapy

研究代表者

尾花 哲浩 (Obana, Tetsuhiro)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号：60435518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：粒子線ガン治療で使用される回転ガントリーを軽量化・小型化するために、回転ガントリーに装備するマグネットの超伝導化、及びマグネット形状の湾曲化に取り組んだ。本研究により、回転ガントリーで求められる磁場分布を高精度で実現することが可能な、湾曲型超伝導コイル用設計コードを開発することに成功した。また、本設計コードを用いて、湾曲型コイル形状に関する設計研究を行い、鞍型コイルを湾曲化することによって生じる電磁現象を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：A rotating gantry is used to transport a particle beam to a patient in cancer therapy. In this study, the development of curved superconducting magnets for the rotating gantry was conducted to reduce the weight and size of a magnet used in the gantry. As a result, the design code of a curved superconducting coil for the gantry was developed. Using the design code, optimized three-dimensional coil configurations for the gantry can be realized. In addition, the design study of the curved superconducting coil was conducted. As a result, the effect of curing coil configuration on electromagnetic phenomenon of the coil was revealed.

研究分野：超伝導工学

キーワード：超伝導コイル コイル設計 磁場計算

1. 研究開始当初の背景

近年、がん治療法の一つとして、陽子や重粒子を利用した“粒子線がん治療”が注目されている。それは、他のがん治療方法に比べて、患者への身体的負担が非常に軽く、特に体力の衰えた高齢者への治療には最適だからである。そのため、各国において、粒子線がん治療装置のハードとソフトの両面の開発研究が進められている。しかし、現状では、粒子線がん治療装置の主要コンポーネントである加速器の開発研究は精力的に進められているが、それに比べると、加速器から取り出した粒子ビームを患者のがん細胞に目掛けて、精度良く照射することを可能にする、いわばがん治療の鍵となる『ガントリー』の開発研究は進んでいない。現在までに開発された陽子線治療用『ガントリー』は、直径が約 10 m で、総重量が約 100 トンという巨大重量の装置を患者の体軸を中心にして、ミリオーダーの位置精度で回転する装置であるため、機械工学的、施設構造的、経済的に非常に厳しいものである。また、重粒子線治療用『ガントリー』では、陽子線より数倍もの高いエネルギーの重粒子に対応するため、より一層の大型化、重量化、高コスト化が必要となる。それゆえ、陽子線治療に比べて、重粒子治療は格段に治療効果が良いと理解されているながら、重粒子線治療用『ガントリー』は、各医療施設において設置が見送られ、現状では世の中に存在しない(平成 24 年の研究開始時点において)。

平成 21 年度から平成 23 年度において、科学研究費助成事業(若手研究 B、研究課題:高度先進ガン治療装置のための複合磁場型超伝導マグネットの実証的開発研究)により、超伝導工学技術を用いて、世界初の超伝導回転ガントリーの開発に必要な基礎・基盤技術の開発に取り組んだ。その結果、回転ガントリー用超伝導モデルコイルの開発等に成功することができた。それと同時に、今後、回転ガントリー用超伝導コイル開発を進める上で、重要となるいくつかの課題を挙げることができた。

2. 研究の目的

粒子線がん治療において、粒子ビームを患者のがん細胞に向けて照射するために、粒子ビームを偏向させて、更に、安定したビーム輸送を可能にする装置『ガントリー』の小型・軽量化、及び省エネ・低コスト化を実現する“ガントリーの超伝導化”を、超伝導・低温工学の技術を駆使して実証する。その際、実証機的设计・製作・実験を通して、ガントリーを超伝導化する上で、不可欠な基礎・基盤技術を確立する。

本研究期間(平成 24 年度から平成 26 年度)では、『湾曲型超伝導コイルのための設計コードの開発』と『伝導冷却超伝導コイルのた

めの安定性コードの開発』に取り組んだ。

これまでに行ってきたガントリー用超伝導コイルの設計研究では、円筒形の巻棒に超伝導線を接着することを想定していたため、コイル形状が長手方向に、真っ直ぐに延びる『直線型』形状であった。回転ガントリーでは、コイルによって生じる磁場により、粒子ビームを偏向させて輸送する。そのため、コイル形状を『直線型』から『湾曲型』にすることによって、より効率良く粒子ビームを輸送することが可能になる。そこで、本研究では、長手方向に湾曲化した超伝導コイル形状で、設計要求を満たすことが可能なコイル設計コードの開発に取り組んだ。

ガントリー用超伝導マグネットでは、小型冷凍機でのコイル冷却を想定している。そこで、電流導入部から超伝導コイルへの熱侵入を極力低減するため、直径 1mm 程度の NbTi 超伝導線を使用する。ただし、直径 1mm 程度の NbTi 超伝導線では、大電流通電ができないため、コイル形状を多層化する必要がある。多層化された超伝導コイルの冷却には、マグネットの軽量化、及び冷却系統の単純化を実現するために、コイル外層に純アルミ板(冷却板)を取り付けた伝導冷却方式を用いる。冷却板を用いた伝導冷却方式では、コイル発熱時の除熱が懸念されるため、超伝導コイルの通電時における安定性が問題視される。そこで、本研究期間では、超伝導コイルの安定性を評価するための安定性解析コードの開発に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 湾曲型超伝導コイルのための設計コードの開発

本設計コードは、これまでの研究で開発した“コイル断面用最適化設計コード”に、“湾曲型 3 次元コイル形状に関するサブルーチン”と“3 次元磁場計算に関するサブルーチン”を新たに追加したものである。

“コイル断面用最適化設計コード”では、粒子ビームを曲げる偏向用磁場と安定に粒子ビームを輸送するための強収束用磁場を複合した磁場分布を、“1 万分の 1”の高い磁場精度で発生できるコイル断面の最適化が可能である。本最適化設計コードには、各多極磁場成分(2 極成分, 4 極成分, 6 極成分, …, 2n 極)に対応する様々な $\cos(n\theta)$ 型電流分布を重ね合わせることで、複数のコイルを使用せずに、たった 1 つのコイルのみで、複合磁場を実現できるコイル設計手法を導入した。

『湾曲型超伝導コイルのための設計コード』では、下記のような手順で設計を行っている。

手順 I: 湾曲型超伝導コイルの形状パラメータ、磁場計算領域、要求する磁場分布の多

極磁場成分の設定。

手順Ⅱ：Ⅰの設定パラメータを基にして、コイル断面の最適化を行う。

手順Ⅲ：Ⅱで設計したコイル断面を基にして、コイルの3次元形状（湾曲したコイル形状）を作成する。

手順Ⅳ：Ⅲで設計した3次元コイル形状を基に、磁場計算を行い、粒子ビーム軌道に沿った磁場分布（積分磁場）を求める。

手順Ⅴ：Ⅳで得られた積分磁場を評価する。要求される閾値を満たせば、コイル形状が決定する。

要求される閾値を満たさなければ、手順Ⅱに戻る。その際、手順Ⅰで設定していた磁場多極成分の目標値と計算値の差を求め、その差を考慮した新たな磁場多極成分の目標値を設定する。要求される閾値を満たすまで、繰り返し計算を行う。

(2) 伝導冷却超伝導コイルのための安定性解析コードの開発

解析を行う対象として、コイル外周部に冷却板を設置した2層構造の『直線型』コイルを使用した。コイル層間、及びコイルと冷却板間には、接着材として使用するエポキシ樹脂が充填されているとする。

解析コードの詳細を下記（ⅠからⅦ）にまとめる。

Ⅰ. 支配方程式：

非定常1次元熱伝導方程式。ただし、超伝導線の部分では、超伝導と冷却の項を考慮した。また、冷却板の部分では、冷却の項のみを考慮した。

Ⅱ. 初期条件：

コイルと冷却板は、同じ温度である。

Ⅲ. 境界条件：

コイル両端部（電流リード部）の温度を固定した。冷却板は、一方を温度固定にし、もう一方を断熱にした。

Ⅳ. 計算手法：

前進差分法を使用した。

Ⅴ. 物性値の取り扱い：

商用ソフト(Cryocomp)のサブルーチンを使用し、各材料(アルミ、銅、エポキシ)の物性値(熱伝導率、比熱、密度)を求めた。その際、磁場と温度をパラメーターとした。

Ⅶ. 超伝導の項：

超伝導線の臨界電流が、線形の温度依存性を

持つと仮定した。

4. 研究成果

① 『湾曲型超伝導コイルのための設計コードの開発』

上記の“3. 研究の方法”に基づいて、湾曲型超伝導コイルのための設計コードを開発することができた。本設計コードでは、積分磁場を目標値として使用し、最適な湾曲型コイル形状を作り上げることが可能である。

本設計コードを使用して、偏向角が同じで、偏向半径が異なる3つのコイル形状(偏向半径: 2.8m, 3.8m, 4.8m)を設計し、同一電流値におけるコイル中心磁場、及び最大経験磁場を求めた。図1～図3に、設計した湾曲型コイル(偏向半径が2.8mの場合)の図を示す。設計を行う際に使用したパラメータは、下記の通りである。偏向角:22.5度、コイル断面半径:145mm、ターン数:150、層数:1、素線径:1mm、参考半径:99mm。

3つのコイル形状を用いた電磁解析の結果、偏向半径が大きくなるにつれて、中心磁場が増加し、経験磁場が減少する傾向にあることが分かった。また、湾曲型コイルの中心軸に対して、左右非対称な電磁力が生じることがわかった。

本研究結果を踏まえて、今後取り組むべき重要な研究課題は、中心軸に対して左右非対称に生じる電磁力の支持方法であると考えられる。

② 『伝導冷却超伝導コイルのための安定性解析コードの開発』

上記の“3. 研究の方法”に基づいて、伝導冷却超伝導コイルのための安定性解析コードを開発することができた。本解析コードにより、冷却板を介して、伝導冷却された超伝導多層コイルの安定性を評価することが可能になる。

本解析コードを用いて、コイル外側に冷却板を設置した2層構造の超伝導コイル(コイル内径:150mm、コイル長:810mm、ターン数234)の最小クエンチエネルギーを、様々な通電条件下で求めることができた。

上記の解析により、今後取り組むべき重要な課題が得られた。本解析では、冷却安定性の詳細な評価を行うため、超伝導コイル、及び冷却板を模擬した節点の間隔を10mm程度とした。それゆえ、非定常解析で安定な解を得るために、時間刻みを 1×10^{-6} sec程度にしなければならない、解析に膨大な時間を要する。今後、コイルの更なる多層化を目指す際、現状の解析コードで対応するのは、計算時間上、困難であると考えられる。そこで、本解析コードの高速化や並列化が必要であ

る。

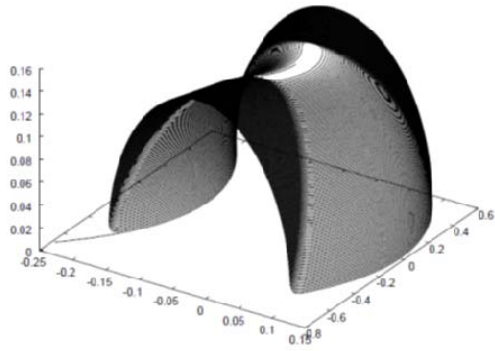


図1. 湾曲型コイルの鳥瞰図 (単位: m)

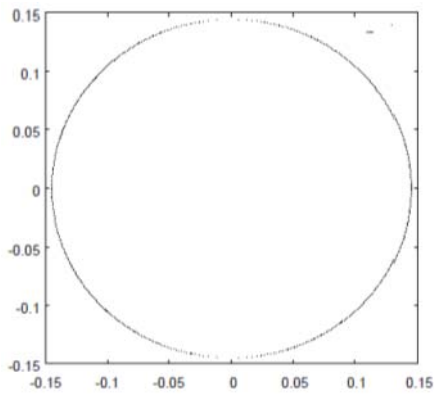


図2. コイル断面図 (x-y 平面、単位: m)

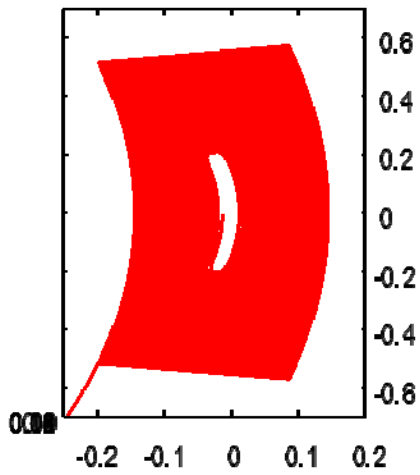


図3. コイル平面図 (x-z 平面図、単位: m)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

尾花 哲浩 (OBANA, Tetsuhiro)

核融合科学研究所・ヘリカル研究部・助教

研究者番号: 60435518

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: