

氏名	もり た あき お 森 田 昭 夫
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学位記番号	理 博 第 2443 号
学位授与の日付	平成 14 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	高精度磁場測定に基づく機能結合型シンクロトロン <sup>1</sup> の性能評価

論文調査委員 (主査)  
教授 野田 章 教授 西川公一郎 教授 笹尾 登

### 論 文 内 容 の 要 旨

荷電粒子線によるがん治療の広範な普及を目的として、小型で日常の運転の容易な機能結合型陽子シンクロトロン<sup>1</sup>の開発が進められているが、本研究はその一環として、FDF トリプレット構造の実寸大の機能結合型モデル電磁石の設計・製作を行い、その性能評価を遂行している。まず、モデル電磁石の設計にあたっては、3次元磁場計算コード TOSCA を用いた3次元磁場計算を遂行し、その計算結果を駆使した粒子トラッキングを実行して、同一性能を有する6台の機能結合型電磁石から構成されるリングについて、ベータatron振動のオペレーションチューンの算出を行い、低次の共鳴線を避けた動作点を実現するため、FとDの境界点を $0.25^\circ$ だけシフトする設計を確定している。

磁場測定にあたっては、機能結合型電磁石は一樣な磁場領域を有しないため、多軸のホール素子を用いて、主成分と直交する成分がゼロとなる平面をサーチすることにより、median planeの同定を行う手法を確立し、このmedian planeを基準としてマッピングを遂行している。その際、利用可能な測定装置の時間的制約や磁場測定を行う場所的な制約からモデル電磁石の片側半分の測定のみ限定した磁場測定を行うことを余儀なくされているが、異なる2つの場所では、反対側の半分の領域を測定しており、異なる測定装置によるこれらの測定結果が、測定誤差の範囲内で一致していることからビームトラッキングを行うアルゴリズムにおいて仮定している電磁石の対称性が成り立っていることを測定結果においても確認している。median planeに関する上下の対称性についても同様に磁場測定データからその確認を行っている。

こうした確認の後、冒頭に述べた磁場計算結果に基づく粒子の軌道トラッキングによりオペレーションチューンを求める手法を磁場測定データに対しても行うことを想定した磁場のマッピングを行っているが、その過程でオペレーションチューンを精度良く算出するために必要な粒子ビームの軌道トラッキング遂行のためには、通常の磁場測定とは異なり、磁場成分のみならず、その空間的位置に関する微分係数も連続関数であることが重要であることを見いだしている。こうした目的から、申請者は恒温槽内に格納したホール素子に対して、磁場分布が極値を有する点に設置したNMRを基準として、温度ドリフト等を測定し、それを補正する努力も行っている。こうした補正を行っても、上述の条件を満たす市販の3軸ホール素子は存在しないことが判明したため、優れた特性を有する1軸のホール素子を2個使用し、これらが互いに直交する2成分を測定することが可能な様に位置関係を固定する治具の製作を行って、目的とする精度を有する磁場測定データのマッピングを可能とした。磁場測定データは計算値とは異なり、測定誤差に起因する変動を伴っているため、得られたマッピングデータから粒子トラッキングを行うためには、さらに生データのスムージングが必要となる。この目的のため二次元離散コサイン変換に基づく二次元 Fourier 級数展開による補間を行い、離散的な測定値を連続で滑らかな分布に置き換えている。

測定結果に基づいて得られたオペレーションチューンは、計算に基づくものと比して垂直方向のチューンが約0.05低くなっているが、これは計算に比して、測定結果では電磁石外部とF磁極において中心軌道上の磁場が強く、D磁極では相対的に弱くなっているため、軌道がF磁極では若干磁場の弱い内側にずれ、反対にD磁極では外側を回っており軌道の若干の変形を生じているためと理解されている。低磁場ではこれに加えて残留磁場によるものと考えられる測定値の変動が観測

されているが、これは F, D 磁極を反対方向に励磁するように結線された 1 ターンの補正コイルを用いることにより、オペレーションチューンが (1.71, 1.69) の近辺に集中するように補正可能であることが実験的に確認されている。高い励磁レベルではチューンの変化は測定値の方が計算よりも小さく、これは電磁石の製作に用いられた珪素鋼板の充填率が計算で仮定した 0.95 よりも大きな値に到達していたことによると評価している。

本研究においては、機能結合型電磁石のように一様磁場を有しない電磁石の磁場測定に際して、多軸のホール素子を用いた median plane の探索方法が示され、粒子ビームトラッキングを可能とする連続性の良い磁場測定の手法が確立された。これにより、磁場測定完了の時点でビーム実験を待つことなくリングのオペレーションチューンを推定できる方法が提示された。この手法を用いた評価の結果、製作されたがん治療専用の機能結合型の小型陽子シンクロトロンモデル電磁石は、これと同一性能の 6 台でシンクロトロンリングを構成した場合、主要な共鳴線を避けた動作点を実現しており、シンクロトロンとしての実用上十分な特性を有することが確認された。

### 論文審査の結果の要旨

申請者は、機能結合型シンクロトロンのモデル電磁石の評価にあたって、従来の磁場成分乃至は磁場勾配の空間的分布の測定に止まらず、このマッピングデータに 2 次元 Fourier 級数展開に基づく補間を適用して平滑化し、これを用いた粒子ビームの軌道トラッキングを遂行して、ベータトロン振動の動作点の算出までを行い、主要共鳴線との位置関係を考慮して、シンクロトロンとしての運転の安定性を考察している。申請者によって確立されたこの手法は、従来はリング建設の後、ビーム実験で初めて可能となったベータトロン振動の動作点を磁場測定完了の時点で推察することを可能とするものであり、単に機能結合型電磁石の性能評価にとどまらず、一般にもシンクロトロンリング建設中の電磁石設計へのフィードバックを可能とする等の波及効果も有している。

申請者を中心として行われた本研究により、以下の知見が得られた。

1. 機能結合型電磁石のように一様磁場領域を有しない電磁石の磁場測定にあたっては、多軸のホール素子を用いて、主成分と直交する成分がゼロとなる平面を search することにより median plane が求められ、この平面の周りに測定データを解析的に接続していくことにより、粒子軌道トラッキングに耐える磁場のマッピングが行える。
2. 磁場のマッピングに際しては、磁場成分及びその空間座標に関する微分係数の両者が連続性を有することが、粒子軌道トラッキングの精度を確保する上で重要である。
3. 測定データを用いて磁場計算データと同様の粒子軌道トラッキングを行うためには、二次元 Fourier 級数展開等を用いて、離散的な測定値を連続で滑らかな分布に補間することが重要である。
4. 本研究で開発した手法によるオペレーションチューンの推定によれば、がん治療専用の機能結合型小型陽子シンクロトロンモデル電磁石は、これと同一性能を有する 6 台の電磁石でシンクロトロンリングを構成した場合、その動作点は、主要な共鳴線から充分離れており安定に動作可能と考えられる。

よって、本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。

主論文および参考論文に報告されている研究業績を中心として、これに関連した研究分野について口頭試問した結果、合格と認めた。