



Title	Development of High Temperature Superconducting Magnet for ECR Ion Source and Cyclotron Application
Author(s)	莊, 俊謙
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/101919">https://hdl.handle.net/11094/101919</a>
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏 名 ( 莊 浚 謙 )	
論文題名	Development of High Temperature Superconducting Magnet for ECR Ion Source and Cyclotron Application (ECRイオン源およびサイクロトロンへの応用に向けた高温超伝導磁石の開発)
<p>論文内容の要旨</p> <p>医療用小型加速器は、病院内での陽電子放出断層撮影（PET）がん検査用短寿命放射性同位元素（RI）の製造やホウ素中性子捕捉療法（BNCT）のための中性子生成などに利用されており、コンパクトで制御し易く、高強度の陽子・重陽子ビームを供給できるといった性能が求められている。しかし、既存のサイクロトロン加速器では鉄芯を使って磁場を生成しているため重量が数10トンを超えており、鉄心の温度変化による伸縮に起因した磁場変動やヒステリシスによる磁場の再現性の低下といった問題を抱えていた。</p> <p>そこで、我々は鉄芯を使わず、空芯コイルのみで磁場分布を構築する信頼性の高い小型加速器を実現するために、高温超伝導REBCOコイルを用いた空芯型スケルトンサイクロトロンの加速器の開発を目指している。高温超伝導REBCO線材は、NbTiなどの低温超伝導線材に比べて臨界温度が高く（～95K）、20～30Kの運転温度においても温度マージンが大きいだけでなく、5Tを超える強い外部磁場環境下でも高い臨界電流密度を維持できるといった利点がある。また、Bi系高温超伝導線材（BSCCO）と比べても大きな応力や強い外部磁場に対して耐えられるといった特長を持っている。先行研究でのREBCOコイルを用いた小型高温超伝導スケルトンサイクロトロン設計においてはビーム引出半径40cmで0.5mAの50MeV陽子ビームを取り出せることを初めて示したものの、実用化に向けたREBCOコイルの性能実証まで至っておらず、メインコイルで使用するREBCO線材も多量で製造コストが高額になり、また鉛直方向のビーム集束の役目を果たすスパイラル形状のセクターコイルも既存のREBCOコイル巻線技術では実用化が困難といった課題があった。</p> <p>そこで、これらの問題を解決するために、大強度の陽子、重陽子、ヘリウムイオンビームの生成を目指した2.45 GHz／10 GHz ECRイオン源の円形ミラーコイル及び非円形六極コイルを設計し、それらに用いるREBCOコイルを実際に製作して超伝導性能試験や外部磁場環境下での特性試験を実施した。REBCOコイルへの通電を繰り返して線材への応力負荷を反復させても超伝導性能の劣化は見られず、常温と低温(77 K, 31 K)の間で温度変化を何度も経験させて線材の伸縮を繰り返してもREBCO線材の超伝導性能は維持されることを実証した。さらに、ECRイオン源やサイクロトロンの運転で必要とされるコイル電流密度を十分に上回る臨界電流密度が保証されうること示す結果を得た。</p> <p>空芯のREBCOコイルを用いたスケルトンサイクロトロンのメインコイルの製造コストを削減するために、メインコイルの電流値、形状、位置、サイズをパラメータとしてビオ・サバールの法則を用いて磁場分布を計算し、等時性磁場との残差とコイル体積を同時に求めて勾配降下法によりメインコイルの体積とサイズの最小化を図る設計手法を新たに考案した。これにより、メインコイルでのREBCO線材の使用量を従来モデル（先行研究）の約4分の1に、コイル全体が占める体積を5分の1以下に大幅に削減する設計を実現した。また、既存のコイル製作技術では実用化が困難な凹み形状（負の曲率）を持つスパイラルセクターコイルの代わりに凸形状のみで製作可能なラジアルセクターコイルを用いて鉛直方向のビーム集束力を強化するために、空芯コイル特有の磁場分布形状を上手く利用したコイル配置を考案してそのビーム集束メカニズムを解明し、ビーム強度をmA級に向上させる目処を立たせた。</p> <p>以上の研究成果により、高温超伝導REBCOコイルの有用性と実用性を実証しただけでなく、空芯型スケルトンサイクロトロンで用いるREBCOコイルの製作コストと占有体積を大幅に削減し、工学的に実現可能なメインコイルとセクターコイルを有する加速器の電磁石システムの設計を最適化したことによって医療用大強度小型加速器の実現に向けて大きく前進させた。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 ( 庄 浚 謙 )			
論文審査担当者	(職)		氏 名
	主 査	教授	福田 光宏
	副 査	教授	青木 正治
	副 査	准教授	嶋 達志
	副 査	准教授	大田 晋輔
	副 査	講師	神田 浩樹
<p>論文審査の結果の要旨</p> <p>近年、医療用加速器は、PET 検査に代表される核医学検査に留まらず、アルファ線放出核種を用いたアルファ線核医学治療や熱外中性子を用いたホウ素中性子捕捉療法などのがん治療にも幅広く利用されており、病院内に設置可能な小型で大強度のイオンビームを加速できる加速器が求められている。しかし、既存のサイクロトロン加速器では鉄芯を使って磁場を生成しているため重量が数 10 トンを超えており、鉄心の温度変化による伸縮に起因した磁場変動やヒステリシスによる磁場の再現性の低下といった問題を抱えていた。本研究は、鉄芯を使わず、高温超伝導 REBCO コイルと常伝導トリムコイルの組合せだけで磁場分布を構築する空芯型スケルトンサイクロトロン加速器の開発を目指したものであり、次世代の汎用性の高い多機能小型加速器の実用化を目指した研究としても注目に値する。</p> <p>本論文には、先行研究で成し得なかった REBCO コイルの性能実証試験の結果、従来のサイクロトロンでは鉛直方向のビーム集束力に限界があったセクターコイルの配置を斬新なアイデアで見直し、空芯型コイルならではの磁場分布の特長を最大限活かした再設計の過程とビーム集束性能の評価、スケルトンサイクロトロンの製作コストを大幅に削減するためのメインコイル起磁力の最大化とコイル体積最小化を両立させる革新的なコイル設計最適化手法の開発内容などが要領よくまとめられており、論文の流れや論理展開は妥当であると判断される。具体的な成果として、REBCO 線材を用いて小型の円形コイル及びレーストラック型非円形コイルのプロトタイプを製作し、コイル単体及び立体的にコイルを組み合わせた状態での超伝導性能試験や外部磁場環境下での特性試験を実施して、REBCO コイルへの通電を繰り返した応力負荷耐久試験においても超伝導性能の劣化は見られず、常温と低温 (77 K, 31 K) の間で温度変化を何度も経験させて線材の伸縮を繰り返すヒートサイクル試験でも REBCO 線材の超伝導性能は維持されることを初めて実証したことは特筆すべきことである。また、既存のコイル製作技術では実用化が困難な凹み形状（負の曲率）を持つスパイラルセクターコイルの代わりに凸形状のみで製作可能なラジアルセクターコイルを用いて鉛直方向のビーム集束力を強化するために、空芯コイル特有の磁場分布形状を上手く利用したコイル配置を考案してそのビーム集束メカニズムを解明し、ビーム強度を mA 級に向上させる目処を立たせたことはサイクロトロン加速器技術の発展に大きく寄与するものとして高く評価される。さらに、空芯の REBCO コイルを用いたスケルトンサイクロトロンのコイルシステムの製造コストを削減するために、メインコイルの電流値、形状、位置、サイズをパラメータとしてビオ・サバールの法則を用いて磁場分布を計算し、等時性磁場との残差とコイル体積を同時に求めて勾配降下法によりメインコイルの体積とサイズの最小化を図る斬新な設計手法を独自に考案したことにより、メインコイルでの REBCO 線材の使用量を従来モデル（先行研究）の約 4 分の 1 に、コイル全体が占める体積を 5 分の 1 以下に大幅に削減できる設計を達成したことは社会実装の観点でも極めて価値が高い。</p> <p>よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。</p>			