

Title	Design Study of Superconducting RF Cavity and Permanent-Magnet-Type Sector Magnet for High Energy-Efficiency Cyclotron
Author(s)	武田, 佳次郎
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/96378
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。

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

論文内容の要旨

氏名 (武田 佳次郎)

論文題名

Design Study of Superconducting RF Cavity and Permanent-Magnet-Type Sector Magnet for High Energy-Efficiency Cyclotron
(エネルギー効率の高いサイクロトロンの実現に向けた超伝導RF空洞と永久磁石セクター磁石の設計研究)

論文内容の要旨

近年、半導体ソフト・ハードエラー評価や非破壊分析、陽子線・重粒子線がん治療、がんの治療・診断用放射性同位元素 (RI) の製造など数多くの分野で陽子・中性子・ミューオン・重イオンが利用されており、加速器のビーム大強度化が大きなトレンドである。加えてFLASH粒子線がん治療や加速器駆動核変換システム (ADS) など大強度ビーム供給を前提とした技術開発も進められてきた。しかし、加速器の大強度化に比例して加速器システム全体の消費電力は増加するため、加速器の省電力化すなわちエネルギー効率改善は大強度化と表裏一体の重要な課題である。エネルギー効率は引き出されたビームパワー (ビーム強度×エネルギー) に対するシステム全体の消費電力の比率で定義される。特にビームを高エネルギーに加速する高周波 (RF) システムは全消費電力の60~70%を占め、加速空洞に投入されたRFパワーの約半分は抵抗損失として失われており、エネルギー効率改善のためにRFシステムの省電力化が大きな課題であった。抵抗損失を抑えるにはRF空洞の超伝導化が必須で、LINACやシンクロトロンでは既に実用化され、RFシステムの運転効率の大幅な改善を達成している。しかし、LINACやシンクロトロンはパルスビーム運転 (数十Hz) のためビーム加速しない待機時間があり、連続的に数MHzのRF周波数で加速できるサイクロトロンの方がRF運転効率は良く、エネルギー効率が高い傾向にある。実際、スイスのポールシェラー研究所 (PSI) のサイクロトロンHIPAでは、常伝導RF空洞でありながら世界最大のエネルギー効率18.2%を達成している。

本論文では、エネルギー効率の更なる改善のためにサイクロトロンに超伝導RF空洞と永久磁石型セクター磁石を世界で初めて応用し、サイクロトロンとしての成立性を担保しつつ抵抗損失を極限まで下げることで30%以上のエネルギー効率を目指した。超伝導RF空洞がサイクロトロンで実用化されていないのはセクター磁極からの漏洩磁場の影響で空洞表面磁場が臨界磁場を大きく上回ることが第一要因であり、本研究ではRF空洞とセクター磁極が独立したリングサイクロトロンを採用し、強力な磁気遮蔽を施すことで空洞表面磁場をほぼゼロ化することを目指した。またリングサイクロトロンRF空洞を配置する領域 (Valley) には通常RF空洞をぎりぎり挿入する幅しか確保されていないが、超伝導RF空洞の場合には極低温化するクライオモジュールを挿入する必要があるため、RF空洞とクライオモジュールの小型化および磁極形状の最適化などを両立させなければならない。これらの課題を解決するために、加速に必要なRF電場、超伝導状態を維持するための熱侵入および漏洩磁場などの理論計算を元に設計パラメータの境界条件を定め、3次元有限要素法解析の反復計算によって超伝導RF空洞のパラメータを最適化した。具体的には、クライオモジュールをValleyに挿入すると熱侵入が増大するが、RF空洞の超伝導物質に臨界温度39Kの二ホウ化マグネシウムMgB₂を使用した上で形状とサイズを最適化した結果、空洞表面温度を23K以下に下げられる温度条件を見出した。さらに磁気遮蔽では磁束の向きを制御できるHalbach Arrayを応用することで磁極形状を変えずに、空洞表面磁場を空洞表面温度から求まる (下部) 臨界磁場未満に抑えることに成功した。これらの最適化により従来導入が困難とされていたサイクロトロンでも超伝導加速空洞は応用可能であることを初めて示した。これらの結果から、超伝導RF空洞と永久磁石の導入により全消費電力を従来の2分の1に抑えられることを確認し、エネルギー効率を目標の30%以上に改善できる目処が立った。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (武田 佳次朗)		
	(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教授 福田 光宏
	副 査	教授 青木 正治
	副 査	教授 野海 博之
	副 査	准教授 大田 晋輔
	副 査	講師 依田 哲彦

論文審査の結果の要旨

近年、中性子を用いた半導体ソフト・ハードエラー評価やミュオンによる非破壊分析、陽子線・重粒子線がん治療、放射性同位元素 (RI) を用いたがん治療・診断など多様な分野での加速器応用が盛んになってきており、イオンビームや中性子、ミュオンなどの量子ビームの高強度化と加速器システムの省電力化は重要な課題として位置付けられる。本研究は、加速器の消費電力の 2/3 を占める高周波 (RF) システムと電磁石の省電力化によりエネルギー効率を 30% 以上に改善することを目的としており、サイクロトロン加速器において世界で初めて超伝導空洞と永久磁石を実現しようという極めて斬新で挑戦的な研究課題である。既に実用化されている線形加速器用超伝導空洞の技術を踏まえ、安定な超伝導状態の維持に欠かせない漏洩磁場の抑制と電力フリーの永久磁石の導入を両立させると共に、20~30K の温度領域で効率的な運転が可能な MgB₂ 超伝導材を用いた超伝導空洞の実現性をシミュレーション計算により示したことは加速器技術の発展に大きく寄与するものであり、研究の意義や成果の波及効果も大きいと判断される。論文審査では、研究の意義と位置付け、研究目的を達成するための課題の設定と解決策、研究目標へアプローチするための手順と工夫、得られた結果に対する考察の妥当性と価値などに重点をおいて評価を行った。

本論文は、超伝導空洞・永久磁石型 (SRF-PM) リングサイクロトロンの要求仕様、超伝導材の選定と運転温度解析、クライオモジュールにおける発熱と冷却の評価、永久磁石を用いた磁気遮蔽設計などから構成されており、論文の論理展開としては問題ないと考えられる。加速に必要な RF 電場を見積もると共に、超伝導状態を維持するための熱侵入および漏洩磁場などの理論計算を元に設計パラメータの境界条件を定め、3 次元有限要素法解析の反復計算によって超伝導 RF 空洞のパラメータを最適化したことは高く評価できる。特に、RF 空洞の超伝導物質に臨界温度 39K の MgB₂ を採用したことにより空洞表面温度を 23K 以下に下げられる温度条件を見出したことは特筆すべきことである。さらに磁気遮蔽に Halbach Array を応用するアイデアを独自に考案し、磁極形状を変えずに、空洞表面磁場を空洞表面温度から求まる (下部) 臨界磁場未満に抑えることに成功したことも高く評価できる。従来、漏洩磁場の存在によって困難とされていたサイクロトロンへの超伝導加速空洞の応用の可能性を初めて示し、超伝導 RF 空洞と永久磁石の導入により加速器の全消費電力を従来の 2 分の 1 に抑えて 30% 以上のエネルギー効率を達成し得ることを示したことは極めて大きな進展である。

よって、本論文は博士 (理学) の学位論文として十分に価値あるものと認める。