

## 論文題目要旨

学位申請者: 武田佳次朗

論文題目: 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により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 $MgB_2$ 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。