OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Design Study of High-Intensity Compact High-Temperature Superconducting Skeleton (Ironless) Cyclotron (HTS-SC)
Author(s)	Koay, Wen Hui
Citation	大阪大学, 2021, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/82008
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name (Koay Hui Wen)	
Title	Design Study of High-Intensity Compact High-Temperature Superconducting Skeleton (Ironless) Cyclotron (HTS-SC) （高強度小型高温超伝導（空芯型）スケルトンサイクロトロン（HTS-SC）の設計研究）

Abstract of Thesis

In accordance with the increasing demand of a compact accelerator in medical applications, a compact high-temperature superconducting skeleton cyclotron (HTS-SC) is proposed in this work, aiming to produce a high intensity H^+ beam for a significant reduction in treatment time of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT). The HTS-SC adopts an air-core structure to avoid any residual magnetization from the hysteresis loop of an iron yoke, further results in a higher reproducibility of magnetic field in a shorter time. This structure favors the usage in a hospital environment. Besides, the linear relationship between the coil current and the magnetic field strength also provides an easy calibration of the magnetic field. This facilitates any field modification to accelerate different species of ions for radioisotope production in a hospital environment.

The proposed design is a compact K-80 cyclotron with a challenging small extraction radius of 40 cm for a 50 MeV H^+. It includes a series combination of circular high-temperature superconducting (HTS) coils, acting as the main coil and trim coils, as well as 3 sector coils with a maximum spiral angle of 40°. Active-shielding using HTS coils is also adopted to provide an easier control of the background stray field. The isochronous property of the designed HTS-SC field is confirmed by various orbit analysis using a reference particle.

As a high-intensity beam is the key requirement of this machine, suppression of the space charge effect and minimization of beam overlaps have been the biggest challenge of this work. This is especially true at a central region with limited space and extraction with small beam turn-separation. Therefore, extensive beam dynamics study for multi-particle tracking is also performed using a particle-in-cell (PIC) code such as SNOP and OPAL in these regions for high-intensity beams. In the central region, a spiral inflector with a large k=1.6 is adopted. The emittance and injection energy are maximized in order to reduce the space charge effect. Overall, a satisfactory beam transmission of more than 20% is achieved for both low and high-intensity beams. On top of this, the transmitted particles can be accelerated smoothly without excessive beam loss until extraction. Electrostatic extraction is adopted in this work to prevent excessive particle loss due to Lorentz stripping in a high magnetic field for a negative ion such as H^-. In order to increase the turn-separation, a pair of harmonic coils is used, with its amplitude carefully optimized for the maximum extraction efficiency. Two extraction mechanisms namely brute-force and precessional extractions are also compared. As a result, the precessional extraction appears to be a better option in producing beams with satisfactory beam intensity and quality. It is able to achieve a maximum extraction efficiency of almost 100% for a low-intensity beam and >70% for an ideal 1 mA beam. If a higher energy gain per turn is allowed, a 1 mA beam could be extracted with an extraction efficiency of >90%. A preliminary design of the extraction beamline using gradient correctors is also studied to ensure sufficient focusing along the extraction beamline. Finally, this work concludes the feasibility of a compact HTS-SC to accelerate high-intensity H^+ beam for BNCT and RI production.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　HUI WEN KOAY　）

	（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	能町　正治
	副 査　教授	野海　博之
	副 査　講師	神田　浩樹

論文審査の結果の要旨

病院内などの限られたスペースにも設置可能な小型（直径 2m 以内）で高強度（数百μA 以上）の加速器は、がん治療を目的とした中性子捕捉療法（BNCT）用中性子源やがん検査・治療用 RI 製造装置としてニーズが高まっており、ビームの量と質だけでなく、医療用機器としての高い信頼性・安定性・再現性・制御性などが求められている。本研究は、比較的コンパクトで数十マイクロアンペア級のビーム電流を供給しうるサイクロトロンの利点を最大限活かしつつ、空芯型高温超伝導コイルの採用により磁場の安定性と再現性を飛躍的に高め、軽量性と省電力性を兼ね備えながら究極的に小型化とビームの高強度化の限界を追求した新しい加速器研究であり、世界初の高温超伝導小型スケルトン・サイクロトロンの実現を目指した極めてユニークで挑戦的な研究でもあるといえる。論文審査では特に、研究の位置付け、研究目的を達成するための課題の設定、物理的な理論をベースにした解決策の方向性、目標へ近づくためのアプローチの方法と工夫、得られた結果に対する考察の妥当性などに重点をおいて評価を行った。

論文は、物理的な特長を最大限活かした新しい概念の空芯型高温超伝導サイクロトロンの機器構成と設計仕様の検討、複数の高温超伝導空芯コイルを組み合わせた斬新な電磁石設計の最適化、空間電荷効果を考慮したビームダイナミクス解析によるビーム入射部及びサイクロトロン中心領域のビーム透過効率向上を目指した電極設計の最適化、mA 級ビーム強度でのビーム取出効率の最大化を目指したベータトロン振動共鳴及びビーム軌道中心の歳差運動解析などから構成されており、物理的な理論を背景に数値解析とその結果の考察・議論が十分に行われており、論文としての全体的な質と量は申し分ないという評価は全ての審査委員に共通した認識であった。本研究の根幹をなす小型化と高強度化の両立という難題に対して最も苦労したのはビーム取出方法の工夫とその最適化であったが、引出直前のビームのベータトロン振動運動の共鳴現象とハーモニックコイルの導入による軌道中心の歳差運動について、空間電荷効果を取り入れたビーム軌道計算コードを駆使して綿密なビーム挙動解析を行い、引出軌道平均半径 40cm、ターンセパレーション 4mm で 50MeV、1mA の陽子ビームを 90%前後の高い透過効率で取出しが可能であることをシミュレーション解析により明確に示したことは、サイクロトロンにおける従来の加速器研究では成し得なかった特筆すべき成果である。これにより、高安定で信頼性の高い mA 級の超コンパクトな空芯型高温超伝導スケルトン・サイクロトロンの実現性が大いに高まり、サイクロトロン加速器技術においても新たな道を切り拓くものとして、その学術的な価値は極めて高い。

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。