

次世代高温超伝導サイクロトロンのための入射システムの設計

DESIGN OF INJECTION SYSTEM FOR NEXT GENERATION HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING CYCLOTRON

鎌倉恵太^{*A)}, 畑中吉治^{A)}, 福田光宏^{A)}, 依田哲彦^{A)}, 植田浩史^{A)}, 森信俊平^{A)},
齋藤高嶺^{A)}, 永山啓一^{A)}, 田村仁志^{A)}, 安田裕介^{A)}, 盛田 義弥^{A)}, 山根 浩義^{A)}
Keita Kamakura^{*A)}, K. Hatanaka^{A)}, M. Fukuda^{A)}, T. Yorita^{A)}, H. Ueda^{A)}, S. Morinobu^{A)},
T. Saito^{A)}, K. Nagayama^{A)}, H. Tamura^{A)}, Y. Yasuda^{A)}, Y. Morita^{A)}, H. Yamane^{A)}

^{A)}Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University
10-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

Abstract

We propose a small-size and high-power separated sector cyclotron (SSC) using high temperature superconducting (HTS) magnet for a next generation cyclotron. From its stability and low operating cost, HTS cyclotrons are expected to apply for accelerator-driven subcritical reactors or beam cancer treatment systems. On the other hand, we still have a variety of issues and challenges to implement them. As a first step, we are planning to develop an HTS cyclotron as an injector for K400 ring cyclotron at RCNP. It will be the first attempt in the world. This plan will improve beam intensity of the ring cyclotron and contribute to component developments for the next generation cyclotron. The most serious issues are development of large-size HTS magnets that can be used in SSC and designing a SSC that has high injection and extraction efficiencies. Particularly in small-size SSCs, injection efficiency is the most important problem to be solved for high current beam acceleration. Strong focusing and bunching are necessary for large current injection through a narrow central area. Therefore we have to design injection system using orbit simulation with space charge effect. Until now, we have been developed orbit analysis code with Runge-Kutta method and advanced sector magnet design with finite element method. Here, we report some results on designing the new injector cyclotron.

1. 概要

我々は、次世代のサイクロトロンとして、高温超伝導電磁石を用いた小型のハイパワー（高エネルギーかつ大電流）分離セクター型サイクロトロンを提案している。高温超伝導サイクロトロンは、その安定性の高さで運転コストの低さから、加速器駆動未臨界炉（ADSR）や粒子線癌治療への応用が期待される一方で、様々な解決すべき課題を残して未だ実現に至っていない。その第一歩として大阪大学核物理研究センター（RCNP）サイクロトロン施設に、世界初となる高温超伝導サイクロトロンを、既存の K400 リングサイクロトロンの入射器として開発・導入する計画が進められている。本計画は当施設におけるビームの大強度化に資するとともに、将来における次世代サイクロトロンの要素開発を行うものである。

最も大きな課題となるのはメートル級の高温超伝導コイルの開発と、入射・引出効率の高い分離セクターサイクロトロンのための技術開発である。特に小型の分離

セクター型サイクロトロンで大電流のビームを加速するためには、入射効率が重要課題となる。狭い中心領域で大電流のビームに対し十分な集束・バンチングを行うためには、空間電荷効果を取り入れた軌道計算による入射領域の設計を行う必要がある。現在ルンゲクッタ法による軌道計算コードの開発と有限要素法計算による新入射器のセクター電磁石の設計を進めている。今回はこの新入射器の設計に関して、これまでの研究成果をまとめて発表する。

2. 概念設計

RCNP サイクロトロン施設 (Figure 1) では、イオン源で生成したビームを AVF サイクロトロン ($K = 140$ MeV) 及びリングサイクロトロン ($K = 400$ MeV) を用いて加速し、様々な実験に利用している。現在、陽子 400 MeV (リングサイクロトロン加速後) のビーム電流は約 $1\mu\text{A}$ 程度であるが、原子核実験における統計量確保や、超冷中性子実験、ミューオン科学実験における 2 次粒子生成

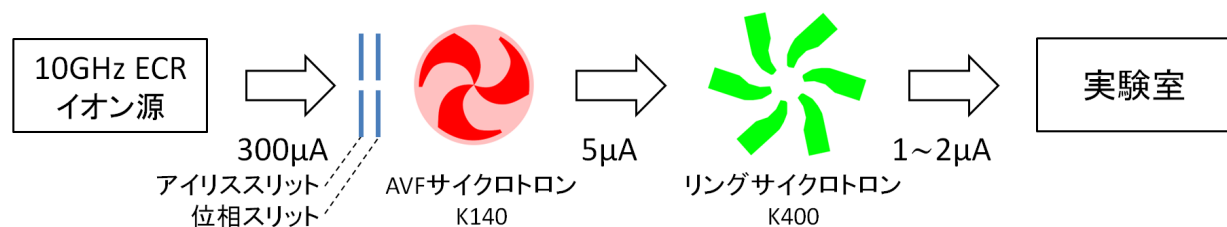


Figure 1: 現状のサイクロトロンカスケード構成とビーム電流

* keita@rcnp.osaka-u.ac.jp



Figure 2: 将来的なサイクロトロンカスケード構成と目標ビーム電流

量向上の要請等から、ビームの大電流化が計画されている。現状の加速における問題点は Figure 1 に示すように、AVF サイクロトロン入射器におけるビームの透過効率が著しく低いことである。そのため入射器における透過効率の向上が課題となっている。

新入射器を用いた将来的なサイクロトロンカスケードを Figure 2 に示した。設計に際しては、まず後段のリングサイクロトロンとのマッチングを考えなければならない。また、これまで AVF サイクロトロン入射器で加速可能だった広い範囲の M/q 値を持つイオンを加速できるようにする必要がある。K 値は 200 MeV とした。これはイオン源で価数が上がらない重イオンを高い M/q のまま加速し、新入射器出射後にストリップしてリングサイクロトロンで加速するためである。以上を考慮し決定した新入射器の諸元を Table 1 に示した。

Table 1: 新入射器諸元; ハーモニック数 9, 15 はリングサイクロトロンのハーモニック数 6 (軽イオン) および 10 (重イオン) に対応している

セクター磁石	
K 値	200 MeV
入射平均半径	1 m
取出平均半径	3 m
セクター数	4
磁極開き角	33°
最大セクター磁場	1.73 T

RF キャビティ	
キャビティ数	2
加速ギャップ数	2
ギャップ開き角	17°
ハーモニック数	9, 15 (RING: 6, 10)
加速周波数	30 ~ 52 MHz

プリインジェクタ	
K 値	21 MeV

Table 1 の諸元を基にしたセクター磁石と RF キャビティの概念図を Figure 3 に示した。

3. 磁場計算

概念設計から要求される理想的な等時性磁場を計算した。加速による軌道のゆがみを無視し、完全な閉軌

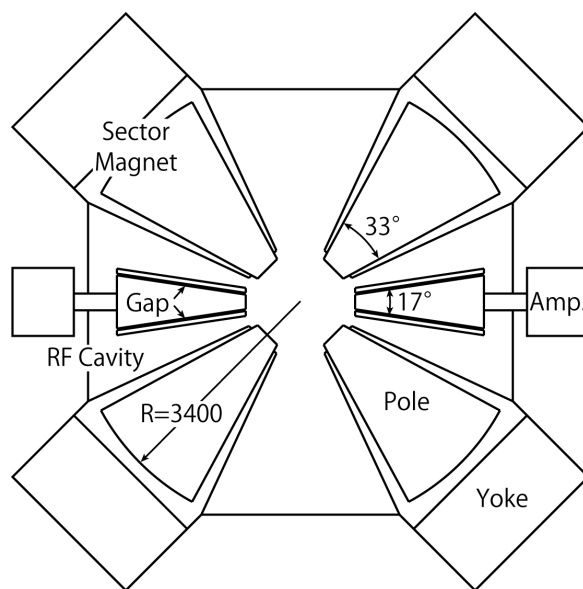


Figure 3: セクター磁石及び RF キャビティの概略図

道を考える。各半径での磁場が等時性条件を満たすためには、粒子のエネルギー (γ) に比例して平均磁場を上げなければならない。磁場の計算結果の一例を Figure 4 に示した。この磁場分布を実現するように有限要素法 (FEM) 計算を用いてセクター磁石の設計を行う。計算コードには OPERA-3d TOSCA を用いており、現在、セ

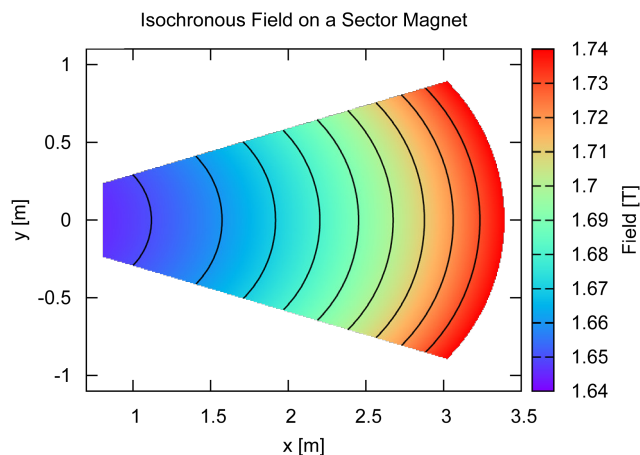


Figure 4: 理想的な等時性磁場の一例 ($M/Q=2$)

クター磁石及びメインコイル・トリムコイルのモデリング (Figure 5) を行い、励磁電流の最適化を進めている。

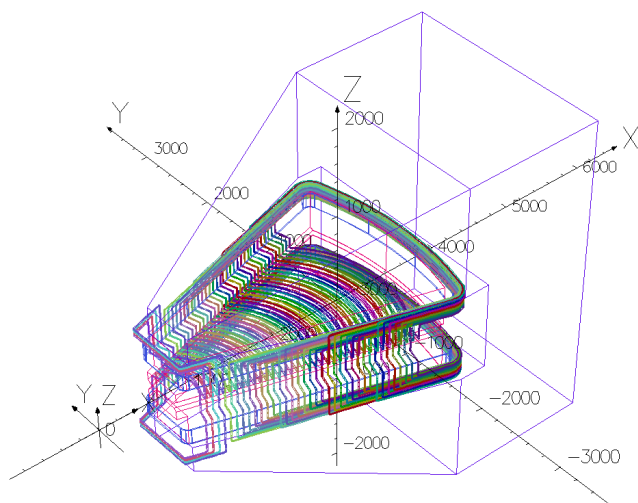


Figure 5: セクター磁石の三次元モデル

4. 軌道計算

4 次のルンゲ・クッタ法を用いて軌道計算プログラムの開発を行った。磁場には Figure 4 の理想的な等時性磁場のハードエッジモデルを使い、加速はギャップを通過した瞬間の電場でインパルスのように加速されるとした。加速に用いた RF 電場は正弦波で電極にかかる最大電圧を 300 kV に設定してある。

Figure 4 の磁場を検討するために、本プログラムを用いてシミュレーションを行った。その一例を Figure 6 に示した。加速粒子は $^{12}\text{C}^{5+}$ 、入射エネルギー 3.67 MeV/u、

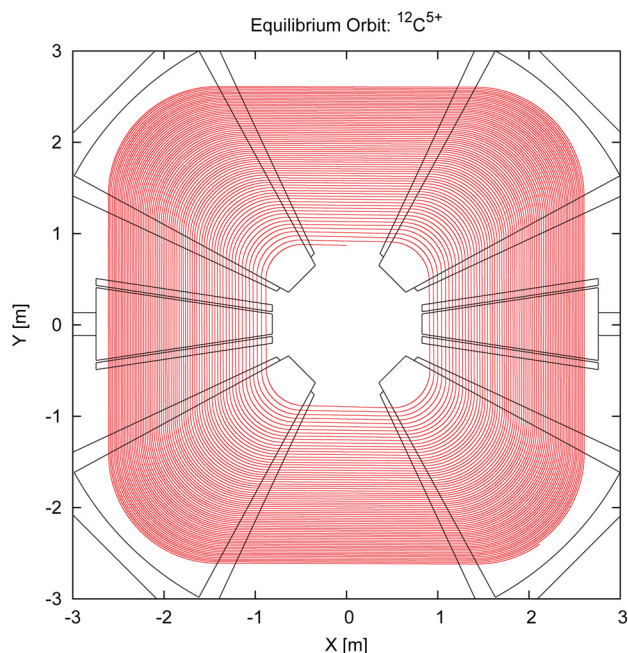


Figure 6: 理想的な磁場を用いた軌道計算の一例

RF 周波数 38 MHz、軌道周波数 4.22 MHz (ハーモニクス数: 9) とする。セクター磁石の間 (Figure 6 では上側) に入射した粒子は 73 ターン後に目標の 34.7 MeV/u に達した。加速キャビティを粒子が通過するときの時間と加速 RF 位相のシフトを表したのが Figure 7 である。軌道が閉軌道からずれる中心領域では位相のずれも大きくなるが全体を通して $\pm 1^\circ$ 程度しかずれておらず、等時性磁場の見積もりが正しいことがわかる。

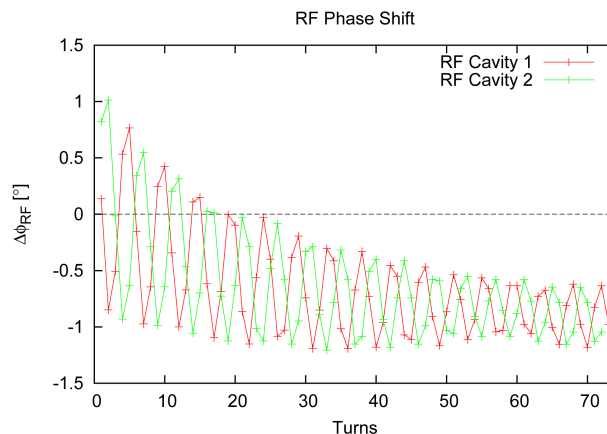


Figure 7: 粒子位相の加速電場に対するシフト

5. まとめと今後の課題

次世代の高温超伝導サイクロトロンの一歩として、RCNP サイクロトロン施設に新たに導入する分離セクター型サイクロトロン入射器の設計を進めている。これまでに概念設計、有限要素法による磁場計算用三次元モデルの作成及びルンゲ・クッタ法による軌道計算コードの開発を行った。

今後はトリムコイルの励磁電流の最適化を行うために、まず Figure 4 の等時性磁場を再現するようにトリムコイルを励磁して FEM で磁場計算を行う。次にその磁場計算結果を軌道計算に内挿し、加速シミュレーションを行い、加速位相のずれが小さくなるように励磁電流を調整する。励磁電流の調整・磁場計算・軌道計算を繰り返し、励磁電流の最適化を行う。また入射チャンネル・取り出し部の設計、加速キャビティの RF 計算なども行っていく。

参考文献

- [1] K. Kamakura, et al., "CHALLENGE FOR THE HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING INJECTOR CYCLOTRON", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August, 2013, Nagoya, Japan).
- [2] A.Goto, et al., "TRIM COIL POWER SUPPLY SPECIFICATIONS FOR THE RIKEN SSC", Sci. Papers I.P.C.R. (RIKEN) 77, 54. (1983).
- [3] K. Hosono, et al., "THE SECTOR MAGNET FOR THE RCNP RING CYCLOTRON", RCNP Annual Report 1987, 7.1.2. (1988).
- [4] K. Hosono, et al., "MAIN SECTOR MAGNET OF THE RING CYCLOTRON", RCNP Annual Report 1988, 9.1.2. (1989).