

# サイクロトロン入射器の高温超伝導化への挑戦

## CHALLENGE FOR THE HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING INJECTOR CYCLOTRON

鎌倉恵太\*<sup>A)</sup>, 畑中吉治<sup>A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 依田哲彦<sup>A)</sup>, 植田浩史<sup>A)</sup>, 森信俊平<sup>A)</sup>,  
 齋藤高嶺<sup>A)</sup>, 永山啓一<sup>A)</sup>, 田村仁志<sup>A)</sup>, 安田裕介, 横山久美子<sup>A)</sup>, 竹村真哉<sup>A)</sup>  
 Keita Kamakura\*<sup>A)</sup>, K. Hatanaka<sup>A)</sup>, M. Fukuda<sup>A)</sup>, T. Yorita<sup>A)</sup>, H. Ueda<sup>A)</sup>, S. Morinobu<sup>A)</sup>,  
 T. Saito<sup>A)</sup>, K. Nagayama<sup>A)</sup>, H. Tamura<sup>A)</sup>, Y. Yasuda<sup>A)</sup>, K. Yokoyama<sup>A)</sup>, S. Takemura<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University  
 10-1, Mihogaoka, Ibaraki, Osaka 567-0047, Japan

### Abstract

At RCNP cyclotron facility, high intensity secondary particle production and intensification of high quality beam have been under development. We are aiming to enlarge proton beam current up to 10  $\mu\text{A}$  at downstream of existing K400 ring cyclotron at the request of ultra-cold neutron and muon experiments. Until today we have been using K140 AVF cyclotron as injector for K400 ring cyclotron, however for the sake of injection and extraction performance of the injector, it is difficult to attain the objective. Therefore we are planning to develop new injector that replaces existing K140 injector. As a new injector we are planning to construct a separated sector cyclotron and to use high temperature superconducting (HTS) magnet as a sector magnet. HTS magnets are remarked as next generation cyclotron magnet, because they can operate stably and reliably against quenching compared with low temperature superconducting magnets. The injector will be the first “High Temperature Superconducting Injector Cyclotron” in the world, and this project is the first step to small-sized high energy cyclotron in the future. Here, we introduce the conceptual design of new HTS injector cyclotron.

### 1. 概要

現在、大阪大学核物理研究センター (RCNP) サイクロトロン施設 (図 1) では、高強度二次粒子生成及び高品質ビームの強度増強を目指した開発が進められている。特に超冷中性子実験やミューオン科学実験等の二次粒子生成量増加のための陽子ビーム大電流化への要請から、既存の K400 リングサイクロトロン出射後で 10  $\mu\text{A}$  以上のビーム量を確保することを目標としている。

現状ではイオン源ビームのエミッタンスと、AVF サイクロトロン入射器の入射アクセプタンスの不整合により、300  $\mu\text{A}$  (NEOMAFIOS) を AVF に入射しても、約 100  $\mu\text{A}$  程度の加速にとどまり、取り出し直後で 5~6  $\mu\text{A}$ 、リングサイクロトロン出射後では 1.1~2  $\mu\text{A}$  に減少してしまう。しかし、現状の入射・引出・輸送効率では開発中の高輝度陽子源の目標カレントである 1 mA が達成され、高輝度ビームを AVF に入射することができたとしても、リングサイクロトロン後で 5  $\mu\text{A}$  が限界である。リングサイクロトロンでは入射ビームが低エミッタンス (数  $\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}$  以下) である場合、透過効率がほぼ 100% になるので、さらなる大電流化を図るに

は、リングへの入射ビームの高輝度化が必須となる。これには現行の AVF サイクロトロンでは入射・引出性能に限界があるため、それに代わる新入射器を検討している。

新たな入射器を製作するに当たって、現在注目されている高温超伝導体磁石を用いた分離セクター型サイクロトロンを検討している。高温超伝導体電磁石は低温超伝導体電磁石に比べてクエンチに対する安定性・信頼性に優れ、迅速な励磁電流変更にも対応できることから次世代のサイクロトロン電磁石として期待されている。現在、高温超伝導体磁石にはサイクロトロンに利用できるようなメートル級のものは未だ存在しない。この「高温超伝導サイクロトロン」は世界初の試みであり、将来における小型かつ高エネルギーのサイクロトロン開発への第一歩である。本研究により、現状の高温超伝導磁石製作の問題点を解決し、サイクロトロン磁石として利用可能な大径・変形磁石の開発が可能になれば、加速器開発の分野だけでなく、医療・工学等様々な分野での高温超伝導体磁石の利用が広がることが期待される。

本発表では現在計画段階にある高温超伝導サイクロトロン入射器の概念設計を紹介する。

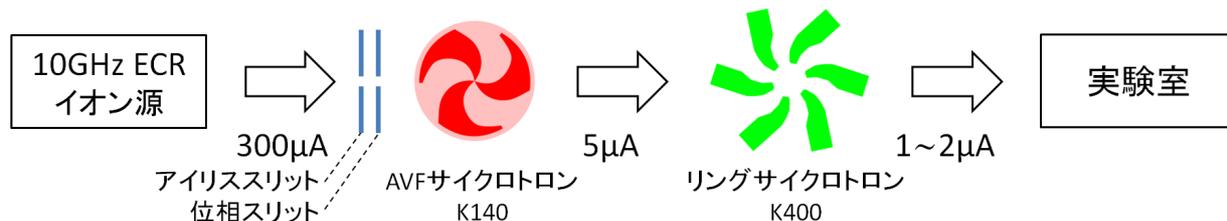


Figure 1: 現状のサイクロトロンカスケード構成とビーム電流

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

## 2. 概念設計

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図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。

### 2.1 入射・取り出し半径

AVF サイクロトロンの欠点は取り出し半径が小さいことにある。取り出し半径が小さいとターンセパレーションが小さくなり、取り出し効率が下がる。そのため新入射器としては取り出し半径を大きくできる、分離セクター型サイクロトロン (SSC) を採用した。また、本体を格納する実験室の大きさとリングサイクロトロンの入射半径と簡単な整数比になるという制約から、新入射器の取り出し半径は 3 m を採用する。中心領域は入射チャンネルや加速キャビティとの干渉を避けるため、入射半径 1 m を想定している。

### 2.2 ハーモニック数と加速周波数

K140 AVF サイクロトロンは加速周波数 6~18 MHz、取り出し半径 1 m。K400 リングサイクロトロンは加速周波数 30~52 MHz、入射半径 2 m なので、AVF のハーモニック数が 1 のとき、リングサイクロトロンのハーモニック数は軽イオン (AVF 加速: 6~10 MHz) で 6、重イオン用 (AVF 加速: 10~18 MHz) で 10 になる。リングサイクロトロンにおいてハーモニック数 6、10 で加速することを想定すると、新入射器のハーモニック数を 9、15 とすることで、加速周波数をリングサイクロトロンと同じ 30~52 MHz で運転することができる。

### 2.3 セクター磁石

セクター磁石のポール角は 33°、セクター数は 4 とした。これはフラッターによる垂直方向の集束力と平均磁場の大きさを考慮して決定した。K=200 MeV の時、要求される平均磁気剛性は 2.03 Tm である。引出半径は 3 m であるから、平均磁場は 0.68 T、セクター磁場は 1.70 T となる。1.7 T の磁場は常伝導コイルでも十分実現可能ではあるが、本研究は大型の高温超伝導磁石を開発するための第一歩として位置づけられるため、このような小電流のものを用いて試験を行うことが望ましい。

### 2.4 プリインジェクタ

入射ビームのエネルギーは陽子で 20.9 MeV になるので、この新入射器への入射には K21 のさらに小さい加速器が必要になる。これには常伝導小型 AVF サイクロトロンを用いて低い磁場でターンセパレーションが大きくなるような設計を考えている。

### 2.5 加速キャビティ

加速キャビティはセクター磁石の間に 2 か所設置する。加速ギャップの開き角は 15°、ハーモニック数 9、15 とともに最大電圧の 92.4% で加速される。

### 2.6 ターンセパレーション

以上のパラメータから新入射器のターンセパレーションを計算すると陽子 65 MeV で 23.3 mm となり、十分シングルターン取り出しが可能であることがわかる。ただし最大電圧は 300 kV を想定している。一方で現行の AVF では取り出し半径 1 m で 2~3 mm である。

## 3. 超伝導線材

高温超伝導体磁石は直径約 30 cm 程度のものまで実用化されているが、サイクロトロンに利用できるようなメートル級の磁石は未だ存在しない。特に分離セクター型サイクロトロン用の電磁石は大型 (コイルの周長が大きい) であることに加え、円形ではなく細長い形をしているため、線材にかかる応力が分散せず変形しやすくなる。コイルの変形はクエンチの原因になるので、このような磁石の開発は難しい。また、磁場中では超伝導線材の臨界電流が下がるため、線材にかかる磁場を減



Figure 3: 中性子劣化試験装置



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

らすようにコイルを設計する必要がある。さらに加速器として利用上、耐放射線性に優れた線材を選ぶことも重要な課題である。これに関してはイットリウム系とビスマス系に対する中性子劣化試験装置を製作している。ビームタイムが取れ次第、実験を行う予定である。

#### 4. 磁場計算

概念設計から要求される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。目標の磁場分布を再現するように磁極やヨークのジオメトリ、コイルの電流密度を調整して計算し最適なパラメータを決定する。計算コードには OPERA-3d TOSCA を用いており、現在設計を進めている段階にある。図 4 に示した計算例は、電流密度  $45.4 \text{ A/mm}^2$ 、コイル断面  $165 \times 10$  で計算したもの。磁極は開き角  $33^\circ$ 、半径  $3.4 \text{ m}$  の扇形である。

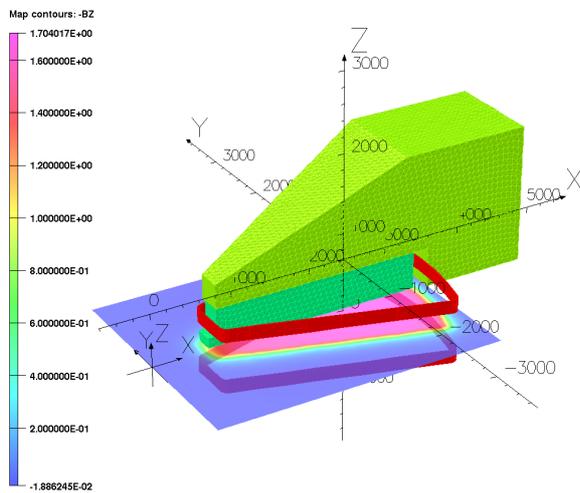


Figure 4: 磁場計算例

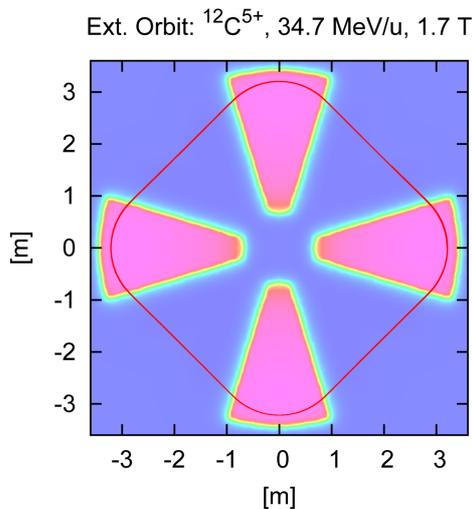


Figure 5: 軌道計算例

#### 5. 軌道計算

磁場計算の結果をもとに軌道計算を行う。まずは中心面上を回る粒子について考えるので、中心面の鉛直方向磁場だけを使う。磁場計算の結果は中心面上の格子点での磁場情報しかないので、任意の位置での磁束密度を得るには、格子状の磁場情報からラグランジュ補間を用いて内挿する。ある任意の座標に対してその近傍の格子点を  $x, y$  方向にそれぞれ 4 列、計 16 個抽出し、まず  $x$  方向の各列に関して 4 点補間を行う。次に補間された  $y$  方向に並んだ 4 点を用いて、さらに 4 点補間し目的の座標の磁場情報を得る。加速電場を考えない場合、これで中心面上の任意の座標で粒子にかかる力が計算できる。シミュレーションはルンゲ・クッタ法を用いて行った。

#### 6. まとめと今後の課題

RCNP サイクロトロン施設における陽子ビーム大強度化のため、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概念設計を行った。セクター磁石には高温超伝導コイルを用いるので、線材選定のため中性子劣化試験装置の準備を行った。また有限要素法による磁場計算とルンゲ・クッタ法による軌道計算を行い、さらに詳細な設計を進めている。

今後はまず磁場計算を進め、磁極やヨークのジオメトリを決定する。次にトリムコイルを磁場計算に取り入れ等磁性磁場が発生するように再度設計を行う。軌道計算においては加速キャビティを含めたシミュレーション、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。高温超伝導体磁石に関しては、まず中性子劣化試験を行い、耐放射線性に優れた線材を選定する。次にメートル級の高温超伝導磁石の試作とその性能評価を行う。そこで得られた大型の高温超伝導磁石に関するデータを基に、高温超伝導サイクロトロン設計を行う。

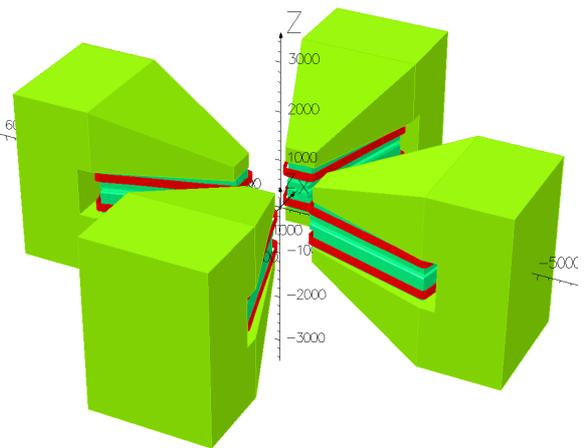


Figure 6: 新入射器本体予想図

#### 参考文献

- [1] K. Hatanaka, et al., "DEVELOPMENTS OF HTS MAGNETS", IPAC 2012 (May, 2012, New Orleans, USA)
- [2] H. Ueda, et al., "CONCEPTUAL DESIGN OF NEXT GENERATION HTS CYCLOTRON", IEEE TRANSACTIONS

ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 23, NO. 3,  
(June, 2013)