

# 次世代高温超伝導サイクロトロンのためのセクター磁石の設計

## DESIGN OF SECTOR MAGNETS FOR NEXT GENERATION HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING 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<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>  
<sup>A)</sup>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 in our facility and also 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. One-meter-size HTS dipole magnet is made for testing. Now we are going to exam the magnet and evaluate the characteristics of large HTS magnets. The result of the test will be incorporated with the sector magnet design. Moreover, we have been working on conceptual design of the new injector, developed magnetic field and orbit analysis programs. In this session, the current status of designing HTS injector cyclotron at RCNP will be discussed.

## 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、その安定性の高さや運転コストの低さから、加速器駆動未臨界炉（ADS）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。

これまで我々は新入射器の概念設計及びセクター磁石の設計を進めてきた。磁場計算と軌道計算、KBKR 磁場分布解析法などを組み合わせ、設計評価プログラムを考案した。これは概念設計から決めた磁石のジオメトリと各設計諸元から、加速 RF 位相やトリムコイル電流等

の運転パラメータを最適化するプログラムである。このプログラムを用いて作成した等時性磁場に於いてビームが最終軌道まで加速されることを、シミュレーションを用いて確認し、設計したセクター磁石の評価を行った。

## 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

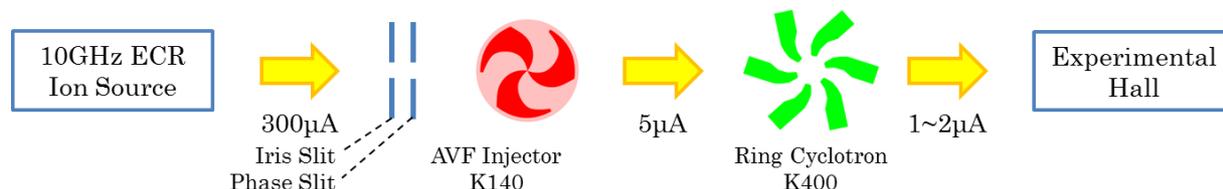


Figure 1: Current status of RCNP cyclotron cascade.

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



Figure 2: New cyclotron cascade under contemplation.

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。[1]

Table 1: Parameters of the New Injector

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. KBKR 法

必要な磁束密度と磁場領域からセクター磁石のジオメトリを決定し、3次元モデル (Figure 4) を作成した。[2][3][4] 等時性磁場を生成するためのトリムコイルは初めに 36 系統を想定し、その電流値の最適化を KBKR 法を用いて行った。[5][6]

ある平衡軌道での磁場はその軌道のエネルギー ( $\gamma$ ) に比例し、平均半径  $R$  の関数で式 (1) のように表わせる。

$$\bar{B}(R) = \gamma(R)\bar{B}_0 = \bar{B}_0 \sqrt{\frac{M^2}{M^2 - (QB_0 R c)^2}} \quad (1)$$

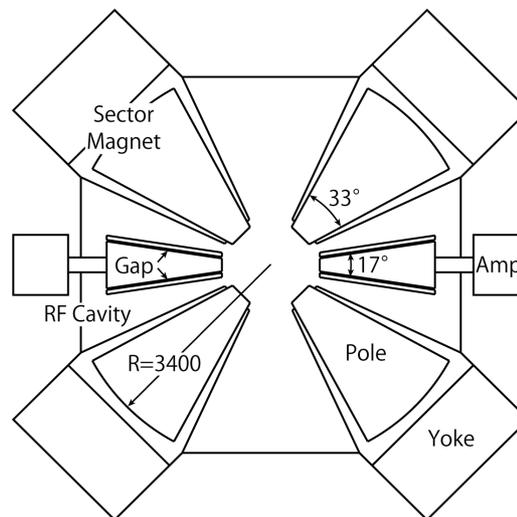


Figure 3: Outline of sector magnets and RF cavities.

各軌道半径での平均磁場をコントロールするには、全ての軌道の形がわかっていなければならない。そのため、まず初めにメインコイルのみを励磁し、磁場計算を行う。計算された磁場上で粒子エネルギーを調整しつつ軌道計算を行うことにより、各半径での閉軌道を決定。各軌道の平均磁場  $\bar{B}$  と、中心軸上磁場  $B(r)$ (セク

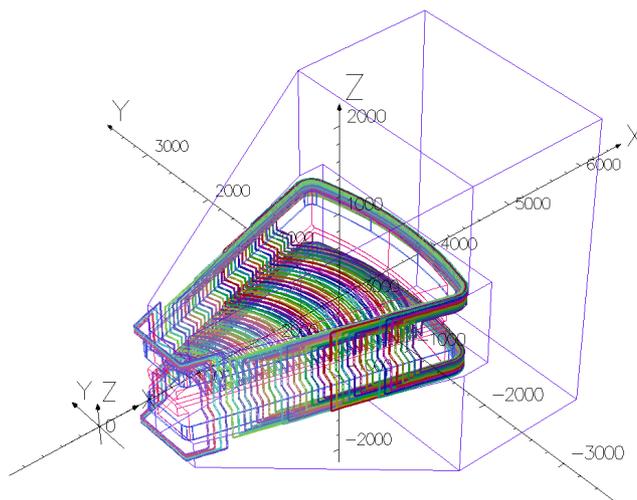


Figure 4: 3D model of sector magnet.

ター磁石の対称軸を通る軸; Figure 4 では X 軸) の関係  $K_B = B(r)/\bar{B}(R)$  および平均軌道半径  $R$  と中心軸上での通過位置  $r$  の関係  $K_r = r/R$  を求めた (Figure 5)。

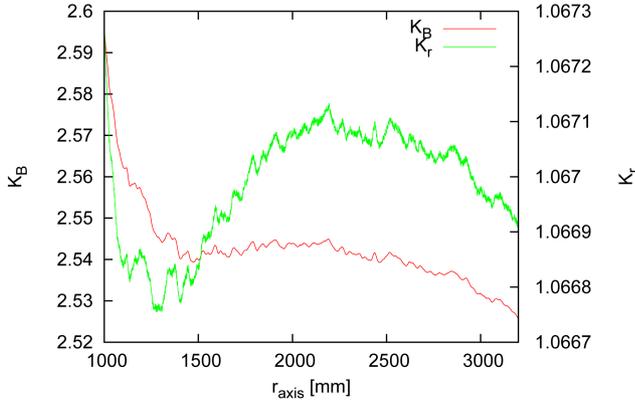


Figure 5:  $K_B$  and  $K_r$  calculated by orbit simulation on main coil field.

$K_B$ ,  $K_r$  を用いて式 (1) は

$$B_{iso}(r) = K_B \bar{B}_0 \sqrt{\frac{M^2}{M^2 - (Q \bar{B}_0 r c / K_r)^2}} \quad (2)$$

と変形できる。従ってトリムコイル励磁電流の最適化は、磁石中心軸上のメインコイルとトリムコイルによる磁場分布を用いて、必要磁場分布; 式 (2) をフィッティングする問題に帰着される。

メインコイルを  $40 \text{ A/mm}^2$  で励磁した結果  $B_{main}$  を Figure 6 に緑の破線 “MAIN”。またメインコイルを  $40 \text{ A/mm}^2$  に励磁し、さらにトリムコイルを一本ずつ  $504 \text{ A}$  に励磁した場合の磁場からメインコイルの寄与を引いたもの  $B_{trim}$  を Figure 7 に示した。中心軸上の等時性磁場は Figure 6 の青の破線 “Isochronous” である。 $K_B$ ,  $K_r$  の計算過程で軌道計算の誤差の積算がありノイズを含んでいるため、それらを 5 次の多項式で近似してから計算した等時性磁場を Figure 6 に紫の実線 “Isochronous (fit)”;  $B_{iso}$  で示した。

励磁電流に対する磁場の線形性を仮定して、次式 (3) のように目的関数  $S$  を決定した。

$$\begin{aligned} \Delta B(r) &= B_{iso}(r) - B_{main}(r) \\ &= \sum_{i=1}^{36} a_i B_{trim}^i(r) + \delta(r) \\ S &= \sum_{j=1}^N \left\{ \Delta B(r_j) - \sum_{i=1}^{36} a_i B_{trim}^i(r_j) \right\}^2 \quad (3) \end{aligned}$$

最小二乗法で  $S$  の最小解を導き、その時の各励磁レベル  $a_1 \sim a_{36}$  を決定するプログラムを作成した。 $i$  番目のトリムコイルの励磁電流は  $504 a_i \text{ A}$  である。また任意の  $a_i$  を 0 とすることで、トリムコイルを減らした場合を想定でき、コイル数をより少なくしたときに十分な等時性磁場が実現されるどうかを検証できる。

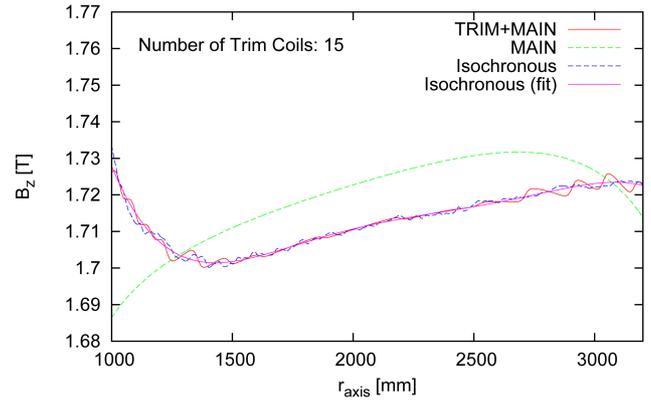


Figure 6: Vertical field  $B_z$  along X axis (see Figure 4). TRIM+MAIN: Field generated by main coil and trim coils by optimized parameters. MAIN: Field generated by main coil alone. Isochronous: Isochronous field shown in Formula (2) using raw  $K_B$ ,  $K_r$ . Isochronous (fit): Isochronous field using  $K_B$ ,  $K_r$  fit by quintic curves.

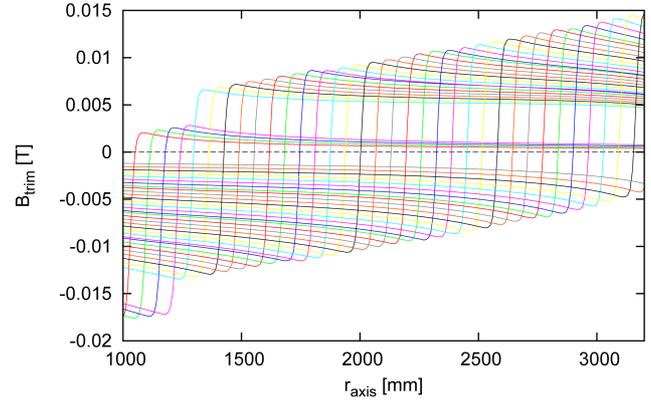


Figure 7: Contributions on vertical field by 36 trim coils excited to  $504 \text{ A}$ .

Figure 6 に赤の実線で “MAIN+TRIM” として示した磁場はトリムコイル数を 15 本に絞って励磁電流の最適化を行ったものである。各トリムコイルの位置や幅は未だ最適化されていない。

#### 4. 磁石設計の評価

KBKR 法で求めた励磁電流を実際に有限要素法モデル内に通電し、目標の等時性磁場が発生しているかを確かめた。Figure 8 に示したのはメインコイルを  $40 \text{ A/mm}^2$  に、15 本のトリムコイルをそれぞれの計算値に励磁した後、磁場計算を行った結果である。その磁場を Lagrange 補間で内挿し、軌道計算プログラムに組み込んだ。

軌道計算には 4 次のルンゲ・クッタ法を用いている。加速はギャップを通過した瞬間の電場でインパルス的に加速されるとした。加速に用いた RF 電場は正弦波、電極にかかる最大電圧を  $300 \text{ kV}$  に設定してある。

Figure 8 の磁場を検討するために、このプログラムを用いて加速シミュレーションを行った。加速粒子は  $^{12}\text{C}^{4+}$ 、入射エネルギー  $2.39 \text{ MeV/u}$ 、RF 周波数  $37.5 \text{ MHz}$ 、軌

道周波数 3.41 MHz (ハーモニック数: 9) とする。セクター磁石の間 (Figure 9 では下側) に入射した粒子は 58 ターン後に目標エネルギーの 22.2 MeV/u に達した。粒子軌道を Figure 9 に示す。なお KBKR 法では閉軌道を想定し、加速による軌道の歪みは考えていないため、等時性条件が少しずれる。このシミュレーションでは RF 周波数を計算上の値の 0.1% だけ変調することで補正している。以上より計算された磁場は、 $^{12}\text{C}^{4+}$  を加速するに十分な等時性を保っていることが確認された。

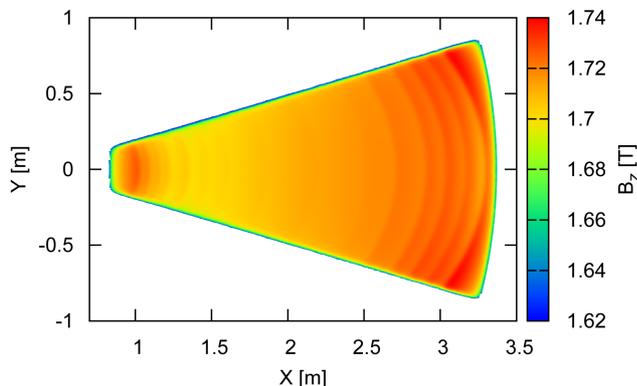


Figure 8: Isochronous field generated by 15 trim coils.

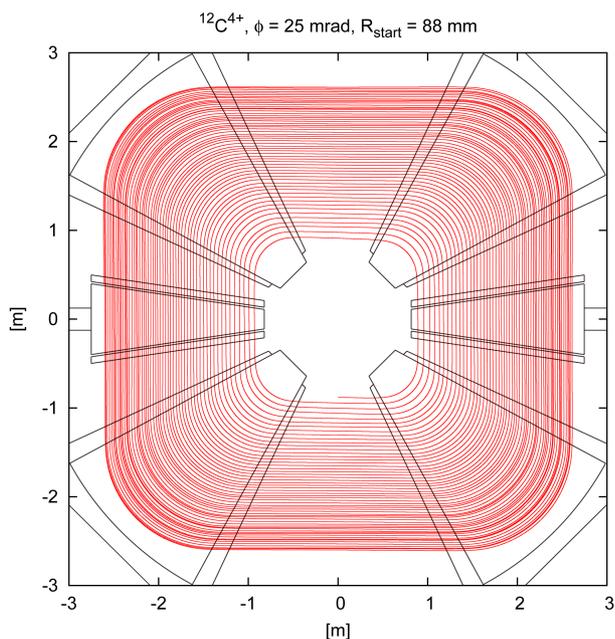


Figure 9: Orbit simulation on isochronous field.

## 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。これまでに加速イオン・加速器の設計パラメータ・セクター磁石のジオメトリから、プログラムにより自動で従属パラメータの設定を行い、等時性磁場を生成することに成功した。また計算磁場上で取り出し半径までイオンが加速されることを確認した。

現在 RCNP ではリングサイクロトロン下流に設置するスイッチング磁石の試験が行われている。これは磁極長 1 m のビスマス系高温超伝導磁石なので、今後はこの磁石をモデルに大型高温超伝導磁石の研究を行っていく。

## 参考文献

- [1] K. Kamakura, et al., "DESIGN OF INJECTION SYSTEM FOR NEXT GENERATION HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING CYCLOTRON", Proceedings of the 10th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (August, 2014, Aomori, 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)
- [5] M. Barré, et al., "MAIN RESULTS OF THE SSC's MAGNETIC FIELD MAPPING AT GANIL", Proceedings of the 9th Intl. Conf. on Cyclotrons and their Applications, (September, 1981, Caen, France)
- [6] A. Goto, et al., "ISOCHRONOUS FIELDS FOR RIKEN CYCLOTRON", Proceedings of the 11th Intl. Conf. on Cyclotrons and their Applications, (October, 1986, Tokyo, Japan)