

## 出力可変スケルトンサイクロトロン の磁場設計

### MAGNETIC FIELD DESIGN OF VARIABLE-BEAM-TYPE SKELETON CYCLOYTRON

荘俊謙<sup>\*,A)</sup>, 福田光宏<sup>A)</sup>, 依田哲彦<sup>A)</sup>, 神田浩樹<sup>A)</sup>, 斎藤高嶺<sup>A)</sup>, 安田祐介<sup>A)</sup>, 原隆文<sup>A)</sup>, Zhao Hang<sup>A)</sup>, 橘高正樹<sup>A)</sup>,  
松井昇太郎<sup>A)</sup>, 渡辺薫<sup>A)</sup>, 井村友紀<sup>A)</sup>, 石山敦士<sup>B)</sup>, 野口聡<sup>C)</sup>, 植田浩士<sup>D)</sup>,  
吉田潤<sup>E)</sup>, 長屋重夫<sup>F)</sup> 渡部智則<sup>F)</sup>

Tsun Him Chong<sup>\*,A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Takane Saitou<sup>A)</sup>, Yusuke Yasuda<sup>A)</sup>,  
Takafumi Hara<sup>A)</sup>, Hang Zhao<sup>A)</sup>, Masaki Kittaka<sup>A)</sup>, Shoutaro Matsui<sup>A)</sup>, Kaoru Watanabe<sup>A)</sup>, Tomoki Imura<sup>A)</sup>,  
Atsushi Ishiyama<sup>B)</sup>, Sou Noguchi<sup>C)</sup>, Hiroshi Ueta<sup>D)</sup>, Jun Yoshida<sup>E)</sup>, Shigeo Nagaya<sup>F)</sup>, Tomonori Watabe<sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> Research Center of Nuclear Physics, Osaka University

<sup>B)</sup> Waseda University <sup>C)</sup> Hokkaido University <sup>D)</sup> Okayama University

<sup>E)</sup> Sumitomo Heavy Industries, Ltd., <sup>F)</sup> Chubu Electric Power Co., Inc.

#### Abstract

In recent years, due to the rapid development of beam application technologies, the demands for ion beam has been growing. It includes proton therapy, medical use short-lived RI production and neutron source application, etc. However, conventional cyclotron uses electromagnet with iron-core for magnetic field induction, where the field linear adjustability is limited by the iron-core's hysteresis. As a result, it requires a long time and skilled operators to adjust the field and produce different types of beam from one cyclotron. As to medical cyclotron, the beam type it can produce is usually limited to one. In order to accomplish variable beam type production from one cyclotron, an air-core cyclotron is under development in Research Center for Nuclear Physics, Osaka University. Without any iron-core, this skeleton cyclotron induces magnetic field with only superconducting electromagnet, where the field can be adjusted easily without nonlinearity. This cyclotron, with extraction radius of 50 cm, is designed to produce H<sup>+</sup>, D<sup>+</sup> and He<sup>2+</sup> beam up to 70 MeV, 40 MeV and 80 MeV respectively. The maximum average magnetic field varies from 1.715 T to 2.534 T. In this work, the magnetic field design for the skeleton cyclotron will be presented, and the beam quality will be discussed.

## 1. はじめに

近年、核医学治療や診断によって社会の短寿命 RI への需要が高まっている。その需要に向けて、大阪大学核物理研究センター (RCNP) でスケルトンサイクロトロンが開発が行われている。スケルトンサイクロトロンは鉄芯を使わない、空芯型サイクロトロンである。鉄芯を使わないことにより、鉄によるヒステリシスがなく、磁場を迅速に切り替えられることが期待できる。製造したい RI に必要な磁場を迅速に構築し、一台のサイクロトロンで多種類のビームの供給することで、世界初の出力可変空芯型サイクロトロンになることが期待されている。

## 2. スケルトンサイクロトロン

### 2.1 概要

スケルトンサイクロトロンは引き出し半径 50 cm を持ち、7つのメインコイルと4つのセクターコイルから構成されている。その主な特性を Table 1 に示す。そのモデルは Fig. 1 に示す。鉄芯を使わず、これらのコイルのみで最大陽子 50 MeV、重陽子 40 MeV、He<sup>2+</sup> 粒子 80 MeV の加速を行う。

鉄芯を使わず、ヒステリシスに影響されずに磁場を迅速切り替えることによって、多様な RI 製造の需要を応える。想定している応用は 18 MeV 陽子による PET 検査用 F-18, O-15 製造、28 MeV, 40 MeV の He<sup>2+</sup> ビー

ムによるアルファ線核医学治療用 At-211 の製造など、他には 30 MeV 陽子ビームと 40 MeV 重陽子ビームを中性子源としての利用などがある。

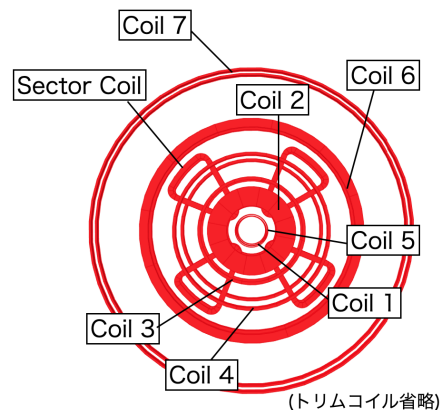


Figure 1: Model of Skeleton Cyclotron, consisting 7 main coils and four sector coils.

### 2.2 空芯コイル

スケルトンサイクロトロンは空芯コイルのみで粒子加速に必要な磁場を生成する。それを可能にするのは無絶縁高温超伝導 REBCO コイルである。REBCO は高い電流密度を持つ高温超伝導物質であり [1]、90 K 以上の臨界温度を持つほか、強い外部磁場の中でも性能が劣

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

Table 1: Specifications of Skeleton Cyclotron

粒子種類	陽子、重陽子、He <sup>2+</sup>
引き出し半径	50 cm
セクター数	4
ハーモニック数, h	2
周波数	25~70 MHz
平均磁場	1.232~2.689 T
Dee 電極	2 個、90°

化しにくいなどの性質がある [2]。さらに高温超伝導材は無絶縁技術を適用でき、それによりコイルの高い電流密度および熱安定性を達成できる [3]。サイクロトロン設計と同時に、無絶縁高温超伝導コイルの開発と試験も RCNP で行われている [4]。

### 3. 磁場設計

#### 3.1 重陽子 40 MeV、陽子 18 MeV 加速の磁場

スケルトンサイクロトロンのコイル配置が上述の複数のビーム加速に対応できるかどうかを調べるために、電磁場シミュレーションソフト OPERA-3D および軌道計算コード OPAL を使って、平均磁場が最大の重陽子 40 MeV 加速と、平均磁場が最小の陽子 18 MeV 加速の磁場の構築を試みた。設計した磁場を Fig. 2 に示す。その時各コイルに印加している電流を Table 2 に示す。図の黒線は重陽子 40 MeV 加速用の磁場で、紫色の線は陽子 18 MeV 加速の磁場である。点線は理論式による等時性磁場であり、実線は粒子が感じる一周あたりの平均磁場である。設計した磁場は 0 cm~15 cm の領域は中心 bump を作り z 方向の収束を行い、15 cm~50 cm ではセクターコイルの磁場で等時性磁場を維持する。この結果より、スケルトンサイクロトロンは一つのコイル配置で、コイルの電流密度を変えることで約 1.3 T の磁場と 2.6 T の磁場を生成できることがわかる。またこの二つの磁場は軌道上の粒子にとって等時性磁場のなることもわかる。

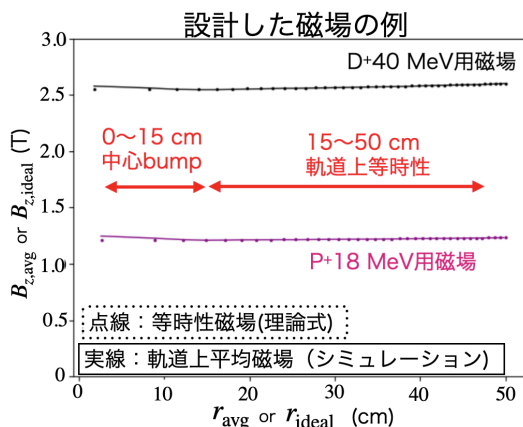


Figure 2: Magnetic field for D+40 MeV acceleration and P+18 MeV acceleration.

Table 2: Current Density in Each Coils for D+40 MeV and P+18 MeV Acceleration Magnetic Field Induction

	D <sup>+</sup> 40 MeV 磁場	P <sup>+</sup> 18 MeV 磁場
Coil 1	17718 A/cm <sup>2</sup>	16618 A/cm <sup>2</sup>
Coil 2	7189 A/cm <sup>2</sup>	4986 A/cm <sup>2</sup>
Coil 3	-20499 A/cm <sup>2</sup>	-20499 A/cm <sup>2</sup>
Coil 4	27547 A/cm <sup>2</sup>	16205 A/cm <sup>2</sup>
Coil 5	3217 A/cm <sup>2</sup>	-7952 A/cm <sup>2</sup>
Coil 6	-6555 A/cm <sup>2</sup>	-37577 A/cm <sup>2</sup>
Coil 7	-33723 A/cm <sup>2</sup>	-51 A/cm <sup>2</sup>
Sector coil	45000 A/cm <sup>2</sup>	30000 A/cm <sup>2</sup>

#### 3.2 磁場の評価

設計した磁場を評価するために、この二つの磁場を使ってビームの閉軌道計算を行った。計算により得た tune diagram を Fig. 3 と Fig. 4 に示す。

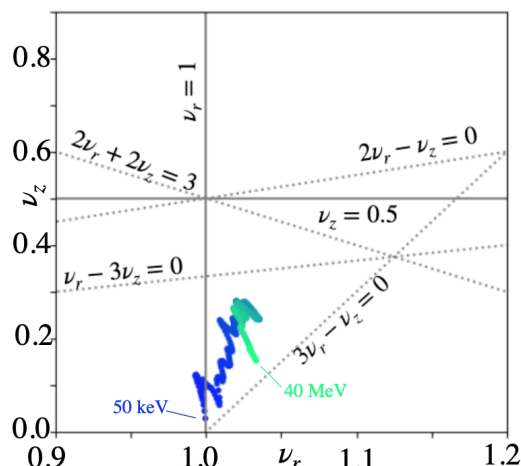


Figure 3: Tune diagram obtaining from D+40 MeV acceleration static equilibrium orbit calculation, using magnetic field induced by skeleton cyclotron.

Figure 3 と Fig. 4 は重陽子ビームと陽子ビームをそれぞれ 50 keV から 40 MeV と 18 MeV までの閉軌道 tune 計算結果である。縦軸は  $\nu_z$  であり、横軸は  $\nu_r$  である。どのビームも  $\nu_z$  が実数であり、磁場は z 方向で十分な収束力を持つことがわかる。また、tune は共鳴線を素早く通り過ぎていることから、ビーム発散が少ないことも期待できる。

さらに、この二つの磁場が十分な等時性を持つことを示すために、閉軌道計算よりバンチの周回時間と RF の周期の比を計算した。それを Fig. 5 に示す。縦軸はバンチの周回時間と RF の周期の比であり、100% はバンチの周回時間が RF の周期と完全一致することを意味する。横軸はバンチの平均半径である。この結果から、半径 15 cm までの磁場中心バンパ領域では、バンチの周回時間は RF 周期より短いことが見られる。15 cm 以降の領域では磁場は高い等時性を持ち、最大の磁場誤

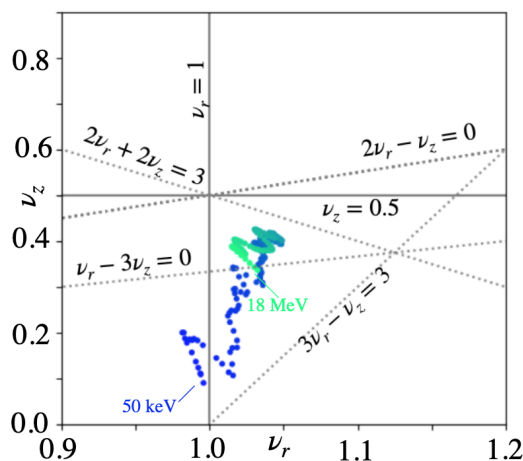


Figure 4: Tune diagram obtained from P+18 MeV acceleration static equilibrium orbit calculation, using magnetic field induced by skeleton cyclotron.

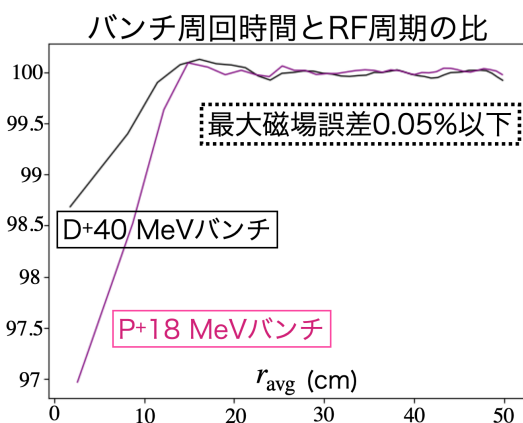


Figure 5: Ration of bunch orbit time to RF period. Except for the center bump part at the beginning, the magnetic field are highly isochronous.

差が0.05%以下であった。この結果より、設計した磁場によるビームの効率的な加速が期待できる。

## 4. 磁場の現実性の評価

### 4.1 超伝導コイル上の磁場

スケルトンサイクロトロンは超伝導コイルの大電流密度の特性を活かして加速用磁場を生成する。しかし超伝導コイルにも臨界電流密度があり、生成できる磁場には限度がある。特に外部磁場は超伝導体の臨界電流密度を制限する特性があり、中でも超伝導線材面と垂直の磁場成分  $B_{\perp}$  は臨界電流密度を大きく下げる。スケルトンサイクロトロンを実現するために、上述の磁場が本当に空芯コイルで形成できるか調べる必要がある。そのために、目標ビームの中で最大の平均磁場を持つ D+40 MeV 加速用磁場を生成する時、スケルトンサイクロトロンの各コイルが感じる磁場を解析した。その結果を Fig. 6 に示す。

Figure 6 では各コイル上の磁場強度  $|B|$  を示してい

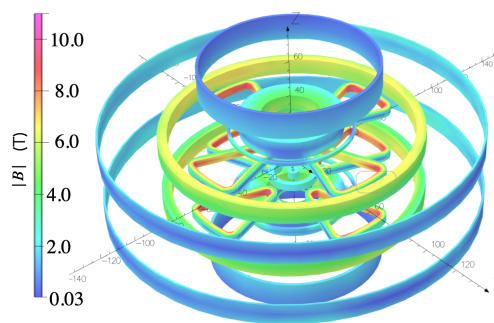


Figure 6: Magnetic field on skeleton cyclotron's coils when inducing D+40 MeV acceleration magnetic field.

る。そこから、コイルシステムのメインコイルは約 2~6 T の磁場を感じているが、セクターコイルは最大約 10 T の磁場を感じている。それはセクターコイルが一番低い臨界電流密度を持つことを意味する。それを調べるためにセクターコイル上の磁場を詳しく解析した。その結果を Fig. 7 に示す。

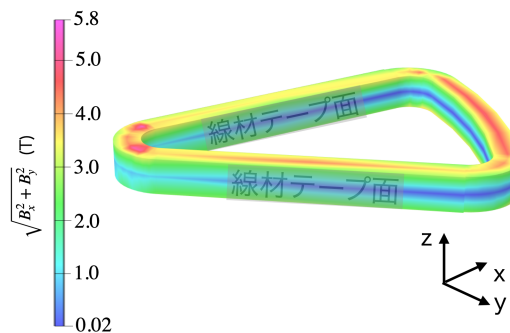


Figure 7:  $\sqrt{B_x^2 + B_y^2}$  magnetic field component on sector coil when inducing D+40 MeV acceleration magnetic field.

Figure 7 は磁場の  $\sqrt{B_x^2 + B_y^2}$  成分を示しており、 $x, y, z$  の方向は図の中に示している。コイルの線材面は  $z$  方向と水平しているため、 $\sqrt{B_x^2 + B_y^2}$  成分は線材面垂直磁場成分  $B_{\perp}$  が各所でとりうる最大値となる。この結果から、セクターコイル上の  $B_{\perp}$  は最大約 3 T であることがわかる。

本研究のスケルトンサイクロトロンは高温超伝導体の REBCO 線材でコイルを作成する予定である。温度 20 K で運転する場合、6 mm 線材からできる無絶縁コイルは  $B_{\perp} \sim 3$  T の磁場環境下で臨界電流密度  $J_c \sim 60700$  A/cm<sup>2</sup> を持つ [5]。本研究が設計した D+40 MeV 加速用磁場ではセクターコイルの電流密度が 4500 A/cm<sup>2</sup> であることから、空芯 REBCO コイルによって必要な磁場を構築できることがわかる。

### 4.2 超伝導 REBCO コイルが作れるフラッター

今までの内容でセクターコイルが一番強い磁場を感じることがわかった。それはセクターコイルが作れる  $z$  方向収束力がスケルトンサイクロトロンの性能の限界に直接つながることを意味する。その  $z$  方向収束力

は以下の式 (1) のようにフラッター  $F^2$  で表すことができる。

$$F^2 = \frac{\overline{B_z^2} - \overline{B_z}^2}{\overline{B_z}^2} \quad (1)$$

セクターコイルが作れる最大のフラッター  $F^2$  を調べるために、臨界電流密度に近い  $60700 \text{ A/cm}^2$  の電流をセクターコイルに印加し、目標ビームの中で最も高エネルギーの  $\text{P}^+50 \text{ MeV}$  と  $\text{D}^+40 \text{ MeV}$  加速用磁場に対して閉軌道計算を行った。この場合、生成できる最大の  $F^2$  は  $0.16$  であった。その状態での  $z$  方向の tune の計算結果を Fig. 8 に示す。

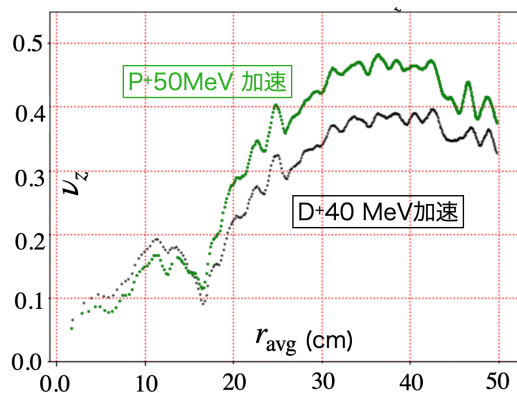


Figure 8:  $z$  direction tune of  $\text{P}^+50 \text{ MeV}$  and  $\text{D}^+40 \text{ MeV}$  acceleration, with current density  $60000 \text{ A/cm}^2$  in sector coils.

Figure 8 では、 $\text{P}^+50 \text{ MeV}$  と  $\text{D}^+40 \text{ MeV}$  加速の場合でも  $\nu_z$  は常に実数である。臨界電流密度の範囲内でセクターコイルは目標のビーム種に十分な  $z$  方向収束力を提供できることがわかる。一方、この二つのビーム種でも  $\nu_z$  は最大  $0.5$  以下であることから、本研究のスケルトンサイクロトロンモデルはこれ以上の高エネルギービームや重イオンビームの加速が厳しいことが考えられる。空芯型サイクロトロンで高エネルギービームや重イオンビームを加速したい場合は引き出し半径を大きくするか、より高性能な超伝導線材を採用するなどの工夫が必要であることがわかる。

## 5. まとめと展望

スケルトンサイクロトロンは鉄芯なしの超伝導コイルで磁場を生成し、ヒステリシスに制限されず磁場を迅速に切り替えて出力可変を目指す。本研究は出力可変に向けて、一つのコイルシステムで、コイルの電流を変えるだけで複数種類ビーム加速できるよう磁場を設計した。その磁場を用いた閉軌道計算で tune と磁場誤差を確認し、 $\text{P}^+18 \text{ MeV}$  と  $\text{D}^+40 \text{ MeV}$  加速の磁場として使えることがわかった。さらに超伝導コイルが外部磁場で臨界電流密度が下がる性質を考慮し、コイル上の磁場を解析した。解析結果より、臨界値以下の電流密度で必須の磁場を構築できることを確認できた。6 mm 幅の REBCO 線材を使う場合、セクターコイルが作れる最大のフラッターが  $0.16$  であり、 $\text{D}^+40 \text{ MeV}$  と  $\text{P}^+50 \text{ MeV}$  加速に十分な  $z$  方向収束力が提供できる。

これらの結果から、引き出し  $50 \text{ cm}$  のスケルトンサイクロトロンは  $\text{P}^+50 \text{ MeV}$  などの比較的軽い・低エネルギービームの加速する能力を十分持っている。しかしその  $\nu_z$  から、 $\text{P}^+50 \text{ MeV}$  より高エネルギーや重いイオンの加速では  $z$  方向の収束力が足りないこともわかった。その明確な限界値およびそれを克服するための工夫を調べるのが課題である。

また、無絶縁高温超伝導コイルの特性は外部磁場で臨界電流が下がることだけではない。他には磁場変動により遮蔽電流が生じ、不整磁場が発生することも大きな特徴である。その不整磁場成分がビーム加速にどのような影響を与えるのかを調べるのも大きな課題である。

## 参考文献

- [1] National High Magnetic Field Laboratory. *Engineering Critical Current Density vs. Applied Field for Superconductors Available in Long Lengths*. 2018. <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots/critical-current>
- [2] Senatore, Carmine *et al.*, "Field and temperature scaling of the critical current density in commercial REBCO coated conductors." *Superconductor Science and Technology* 29 (2015).
- [3] T. Wang *et al.*, "Analyses of Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coils During Sudden Discharging and Overcurrent," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-9, June 2015, Art no. 4603409.
- [4] T. H. Chong *et al.*, "Development of ECR ion source with high-temperature superconducting REBCO coils", 2022 *J. Phys.: Conf. Ser.* 2244.012108.
- [5] Faraday Factory, <https://www.faradaygroup.com/product/>