

## スケルトン・サイクロトロン開発のための 高温超電導コイルの要素技術開発

### DEVELOPMENT OF KEY TECHNOLOGIES OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING COIL FOR THE SKELETON CYCLOTRON

久松 万里子<sup>#, A)</sup>, 福田 光宏<sup>A)</sup>, 依田 哲彦<sup>A)</sup>, 神田 浩樹<sup>A)</sup>, 中尾 政夫<sup>A)</sup>, 安田 裕介<sup>A)</sup>, 友野 大<sup>A)</sup>,  
Koay Hui Wen<sup>A)</sup>, 森田 泰之<sup>A)</sup>, 武田 佳次朗<sup>A)</sup>, 原 隆文<sup>A)</sup>, 大本 恭平<sup>A)</sup>, 荘 浚謙<sup>A)</sup>, 石山 敦士<sup>B)</sup>,  
野口 聡<sup>C)</sup>, 植田 浩史<sup>D)</sup>, 福井 聡<sup>B)</sup>, 鎌倉 恵太<sup>F)</sup>, 松原 雄二<sup>G)</sup>, 三上 行雄<sup>G)</sup>, 鶴留 武尚<sup>G)</sup>,  
高橋 伸明<sup>G)</sup>, 吉田 潤<sup>G)</sup>, 平山 貴士<sup>G)</sup>, 長屋 重夫<sup>H)</sup>, 渡部 智則<sup>H)</sup>

Mariko Hisamatsu<sup>#, A)</sup>, Mitsuhiro Fukuda<sup>A)</sup>, Tetsuhiko Yorita<sup>A)</sup>, Hiroki Kanda<sup>A)</sup>, Masao Nakao<sup>A)</sup>, Yusuke Yasuda<sup>A)</sup>,  
Dai Tomono<sup>A)</sup>, Hui Wen Koay<sup>A)</sup>, Yasuyuki Morita<sup>A)</sup>, Keijiro Takeda<sup>A)</sup>, Takafumi Hara<sup>A)</sup>, Kyohei Oomoto<sup>A)</sup>,  
Tsunhim Chong<sup>A)</sup>, Atsushi Ishiyama<sup>B)</sup>, Sou Noguchi<sup>C)</sup>, Hiroshi Ueda<sup>D)</sup>, Satoshi Fukui<sup>E)</sup>, Keita Kamakura<sup>F)</sup>,  
Yuji Matsubara<sup>G)</sup>, Yukio Mikami<sup>G)</sup>, Takehisa Tsurudome<sup>G)</sup>, Nobuaki Takahashi<sup>G)</sup>, Jun Yoshida<sup>G)</sup>,  
Takashi Hirayama<sup>G)</sup>, Shigeo Nagaya<sup>H)</sup>, Tomonori Watanabe<sup>H)</sup>

<sup>A)</sup>Research Center for Nuclear Physics (RCNP), Osaka University

<sup>B)</sup>Faculty of Science and Engineering, Waseda University

<sup>C)</sup>Faculty of Information Science and Technology, Hokkaido University

<sup>D)</sup>Grad School of Natural Science and Technology, Okayama University

<sup>E)</sup>Grad School of Science and Technology, Niigata University

<sup>F)</sup>Center for Nuclear Study, University of Tokyo

<sup>G)</sup>Sumitomo Heavy Industries, Ltd.

<sup>H)</sup>Chubu Electric Power Co., Inc.

#### Abstract

Preliminary technologies for a compact superconducting skeleton cyclotron (SSC) have been developed. This cyclotron is adopted an air-core structure and high temperature superconductors (HTS) with an extraction radius ~50 cm for 36 MeV  $4\text{He}^{2+}$  expecting the usage across industrial and medical fields especially in generating RI for targeted alpha therapy. In this work, fundamental studies for an HTS ECR ion source (radius ~20 cm) of 10 GHz aiming its mirror and sextupole magnets configuration can be applied to SSC of circular and non-circular magnets with larger scale. After designation and arrangement of magnets, I-V characteristic and magnetic reproductivity of produced sextupole magnets were evaluated under the condition of 77 K.

#### 1. 概要

大阪大学核物理研究センター (RCNP) では現在、空芯型高温超電導コイルを用いた高強度小型多機能スケルトン・サイクロトロン設計・要素技術の開発が行われている。この加速器の開発目的はエネルギー可変型の高強度で高輝度な小型サイクロトロンの実現で、最大加速エネルギー40 MeV の  $4\text{He}^{2+}$  および  $\text{D}^+$  ビーム、また 50 MeV の  $\text{H}^+$  ビームなどを数百  $\mu\text{A}$  以上供給することを目標としている。この加速器の実現によって核医学検査やがん治療のための RI 生成や大強度中性子源開発など医療、産業などの幅広い分野への貢献が期待される。このサイクロトロンでは空芯型高温超電導コイルを採用して加速器全体の小型化・軽量化を図ると共に、鉄心の温度変化に起因した磁場強度の不安定性やヒステリシス効果による再現性の劣化を排除し、省電力で制御性・操作性に優れた小型加速器の実現を目指している。従来の AVF サイクロトロンのような鉄心を持たないこと

で内部機器の配置の自由度も増し、磁場分布は複数の円形コイルと 3 つ或いは 4 つの非円形セクターコイルの組合せで形成される。この空芯型高温超電導加速器には、比較的高い外部磁場環境でも性能の劣化が抑えられると期待される REBCO (希土類金属・バリウム・銅酸化物) 化合物をベースとした第二世代高温超電導線材を採用する。しかしながら、REBCO 線材を使用した高温超電導コイルはこれまでにほとんど実用に至っておらず、サイクロトロンで必要とされるメートル級のコイルを実用化するためには、まず数十センチメートル級小型コイルの要素技術開発を行い、その結果を基にメートル級にスケールアップする手順を踏むこととした。そのため、10 GHz ECR イオン源のミラーコイルや六極コイルにも利用可能な数十センチメートル級の小型の円形・非円形コイルを設計・試作・性能試験を行い、高温超電導 ECR イオン源の開発を通じたスケルトン・サイクロトロン用高温超電導コイルの開発を目指している。ここでは試験用コイルの設計と性能試験の結

果などについて報告する。

## 2. 高温超伝導 ECR イオン源

### 2.1 Opera 3D を用いた磁場計算によるコイル設計

直径 1 m 程度のスケルトン・サイクロトロンに用いる円形メインコイル、非円形セクターコイルの要素技術開発として、10 GHz ECR イオン源の円形ミラーコイル及びレーストラック型六極コイルを設計・製作し性能試験を行なった。この ECR イオン源はスケルトン・サイクロトロンでの  ${}^4\text{He}^{2+}$  加速に必要なとされる  ${}^4\text{He}^{2+}$  イオン源としても実用化することを目標としている。

RCNP においては、第一世代高温超伝導線材であるビスマス系高温超伝導線材 BSCCO を用いた 1 m 級サイズのスイッチング偏向電磁石を既に開発しており[1]、運転温度 7 K、1.6 T の最大磁場を達成している。今回の ECR イオン源開発では第二世代高温超伝導体である GdBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>x</sub> をベースとした REBCO 線材 (Super-Ox Japan LLC 製) を使用し、内径 180mm の円形ミラーコイルと、曲線部曲率半径 25mm、直線部長さ 180mm のレーストラック型非円形六極コイルを設計した。Figure 1 に空芯型 ECR イオン源の構造を示す。また、設計されたミラーコイルと六極コイルの外観を Figure 2 に示す。ミラーコイルには 12 mm 幅、六極コイルには 6 mm 幅の線材を使用し、いずれもダブルパンケーキ型に巻線され

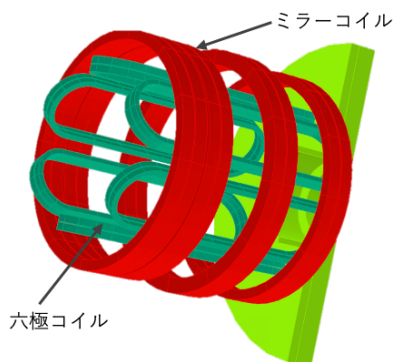


Figure 1: Mirror and sextupole magnets configuration of ECR ion source.

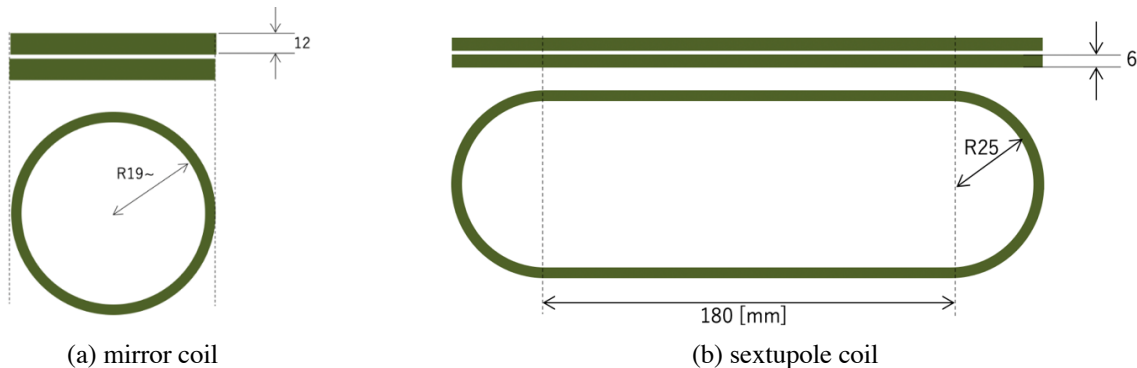


Figure 2: Structure of coils for ECR ion source.

た。

磁場分布については、現在 RCNP で使用されている永久磁石を用いた 10GHz ECR イオン源 NEOMAFIOS と同等の分布を形成するように設計した。マイクロ波周波数 10GHz に必要とされる ECR 磁場 3.7kG に対し、高温超伝導状態での最大ミラー磁場 5.3 kG 程度、最小バレー磁場 2.8 kG 程度の磁場分布が形成されるよう設計した。3 次元磁場解析ソフト Opera 3D/TOSCA を用いてシミュレーション計算したコイル中心軸沿いの磁束密度分布を Figure 3 に示す。緑 (draft) はコイル設計時の値 (目標値)、紫 (fixed) は製作された六極コイルの寸法をもとにミラーコイルに想定される寸法及び電流密度を組み込んだ値、青 (80%) は組み込んだ寸法、電流密度においてミラーコイルに流す電流を設計時の 80% として計算した値である。現在ミラーコイルは製作中だが、シミュレーション上ではプラズマゾーンでの電子やイオンの閉じ込めの調整やビーム引き出し調整に必要なとされるミラー磁場と六極磁場 ECR イオン源の特徴である二つの極大値と一つの極小値を持つ磁場がおおよそ設計通り実現可能であると確認できた。

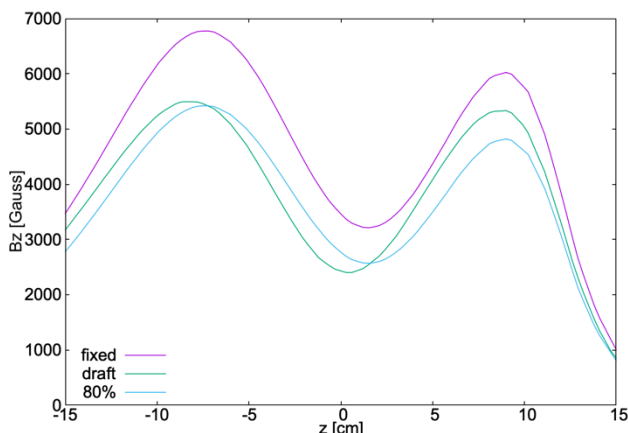


Figure 3: Magnetic flux density along the central axis.

### 2.2 液体窒素冷却下での基本性能試験

製作された六極コイルについては液体窒素で冷やし、単体コイルでの基本性能試験を行なった。この線材の場合、フリーな環境下では 77 K で自己磁場中

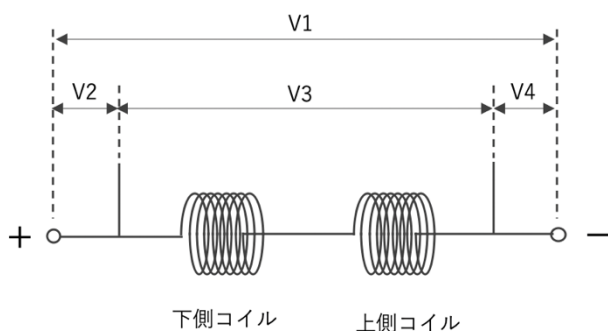


Figure 4: Measured voltages of sextupole coil (double pancake).

における臨界電流は 150 A 以上期待されているが、コイル化により臨界電流値は低下すると予想される。そこで、定電流源とデジタルマルチメータを用いて I-V 特性の測定を行った。コイル全体が一様に十分に冷却されたことを確認した後、コイル電流値を 0A から 80 A 程度まで徐々に流し、コイルの電流導入端子間に発生する電圧として Figure 4 に示す V1 から V4 をそれぞれ測定した。V2、V4 はそれぞれ電極端子板に発生する電圧であり、コイル本体に発生する正味の電圧は V3 である。コイル本体は冷却開始から数十分程度で 77 K に到達し、電流印加中も 1 K 程度の揺れを超える変化はなかった。Figure 5 は一つのコイルについて 1 回目の実験で得られた I-V 特性である。70A 程度までは電圧はほとんど変化せず、その後急激に増加することが確認された。

励磁試験は磁場の再現性とコイルの劣化状況の評価のため 1 本のコイルに対し連続して 4 回行った。一例として Figure 5 と同じコイルの 4 回目の試験結果を Figure 6 に示す。1 回目と大きな差は見られず、4 回目までの励磁においてほぼ同じ I-V 特性が観測された。また、コイルを常温に戻した後に再度冷却して同様の励磁試験を行ってもほぼ同じ I-V 特性が得られたことから、コイル性能に劣化が見られないことが確認できた。

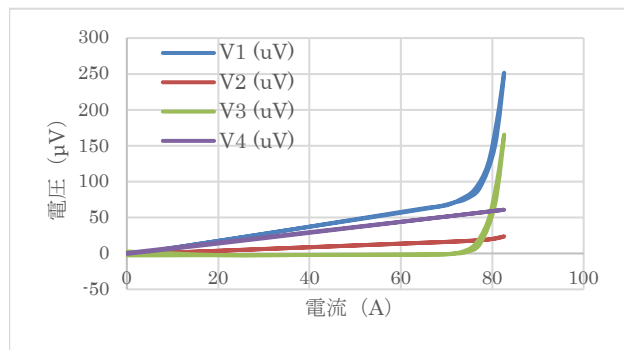


Figure 5: I-V character of sextupole coil (1st test).

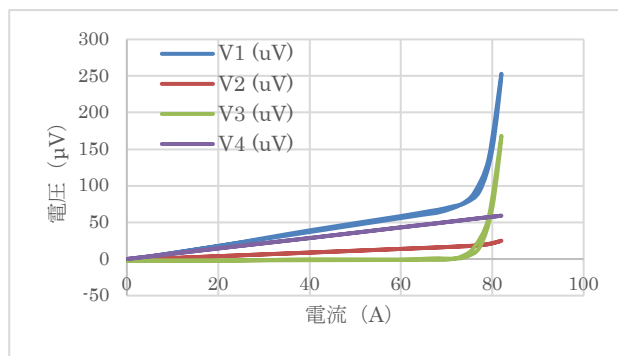


Figure 6: I-V character of sextupole coil (4th test).

### 3. まとめ

今回は ECR イオン源の開発を兼ねたスケルトン・サイクロトロン要素技術開発として円形のミラーコイルおよび非円形の六極コイルを設計し、実際に製作された六極コイルをもとに磁場のシミュレーションと性能試験を行なった。シミュレーションでは目標とする磁場形成が計算上実現可能であることが確認された。性能試験では液体窒素冷却下 77 K において高温超伝導状態が確認された。4 回同じ行程を繰り返しても同様の I-V 特性が現れ、再現性が確認された。

今後はミラーコイルについても製作が終わり次第磁場シミュレーション、性能試験を行い、REBCO 線材での HTS-ECR の実現可能性を評価する。また、ECR イオン源としてマイクロ波の印加やイオン引き出しの設計も進める。このイオン源の実現後はより大きなスケールの線材使用としてスケルトン・サイクロトロンへの実装を目指す。

### 参考文献

- [1] K. Kamakura *et al.*, “DEVELOPMENT OF HTS MAGNETS FOR SEPARATED SECTOR CYCLOTRONS”, Proceedings of the 16th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Japan, Jul. 31-Aug. 3, 2019, pp. 673-675.