

10 GHz 高温超伝導 ECR イオン源のためのミラーコイルの開発 DEVELOPMENT OF HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING MIRROR COILS FOR 10 GHz ECR ION SOURCE

莊浚謙 ^{*A)}、福田光宏 ^{A)}、依田哲彦 ^{A)}、神田浩樹 ^{A)}、畑中吉治 ^{A)}、斎藤高嶺 ^{A)}、安田祐介 ^{A)}、
Koay Hui Wen ^{A)}、森田泰之 ^{A)}、武田佳次朗 ^{A)}、原隆文 ^{A)}、Zhao Hang ^{A)}、石山敦士 ^{B)}、
野口聡 ^{C)}、植田浩士 ^{D)}、福井聡 ^{E)}、松原雄二 ^{F)}、三上行雄 ^{F)}、鶴留武尚 ^{F)}、
高橋伸明 ^{F)}、吉田潤 ^{F)}、平山貴士 ^{F)}、長屋重夫 ^{G)}、渡辺智則 ^{G)}

Tsun Him Chong ^{*A)}、Mitsuhiko Fukuda ^{A)}、Tetsuhiko Yorita ^{A)}、Hiroki Kanda ^{A)}、Kichiji Hatanaka ^{A)}、Takane Saitou ^{A)}、
Yusuke Yasuda ^{A)}、Hui Wen Koay ^{A)}、Yasuyuki Morita ^{A)}、keijiro Takeda ^{A)}、Takafumi Hara ^{A)}、Hang Zhao ^{A)}、
Atsushi Ishiyama ^{B)}、So Noguchi ^{C)}、Hiroshi Ueda ^{D)}、Satoshi Fukui ^{E)}、Yukio Mikami ^{F)}、
Takehisa Tsurudome ^{F)}、Nobuaki Takahashi ^{F)}、Jun Yoshida ^{F)}、Takashi Hirayama ^{F)}、Shigeo Nagaya ^{G)}、Tomonori Watabe ^{G)}
^{A)}RCNP, Osaka University, ^{B)}Waseda Univ., ^{C)}Hokkaido Univ., ^{D)}Okayama Univ.,
^{E)}Niigata Univ., ^{F)}Sumitomo Heavy Industries, Ltd., ^{G)}Chubu Electric Power Co., Inc.

Abstract

We are now designing a high temperature superconducting (HTS) coil for a skeleton cyclotron, a compact AVF cyclotron applied to mass production of radio-isotopes in medical field. We have developed proto-type HTS compact circular coils using a REBCO wire to test the performance of the HTS coils. The coils were designed as mirror coils of a 10 GHz HTS-ECR ion source with properties of low electric power consumption, low operating cost, high stability and high reliability. The HTS-ECR ion source of 10 GHz will provide doubly charged helium ions for acceleration. This paper presents the current - voltage characteristic of the HTS coils at low temperature in 77 K (liquid nitrogen) and 31 K. Besides, the magnetic field configuration of the ECR ion source will also be discussed.

1. はじめに

近年、アルファ線核医学治療に向けて At-211 の大量製造が求められている。At-211 は $^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n)^{211}\text{At}$ 反応から生成されるため、その大量製造には大電流の He^{2+} ビームが必要である。大阪大学核物理研究センター (RCNP) では第二世代高温超伝導材料である REBCO 線材を用いて、高温超伝導 ECR ヘリウムイオン源の開発に取り組んでいる。高温超伝導 ECR イオン源 (HTS-ECR) のコイルシステムを構成するミラーコイルと六極コイルのプロトタイプを製作し、現在、性能試験を行っている。

REBCO 線材を使うことによって、コイルは 100 K 以上の臨界温度を持ち、さらに 30 K で運転することにより、500 A 以上の電流を流せ、ECR イオン源として必要な起磁力を生み出すことができる。本イオン源は、10 GBq 以上の At-211 の大量製造に必要とされる 100 μA 以上の 30 MeV 4He^{2+} イオンビームを供給するため、mA 級の 4He^{2+} イオンビームの生成を目標に開発を進めているものである。

2. 高温超伝導 ECR イオン源の構成

高温超伝導 ECR イオン源 (HTS-ECR) では、ミラーコイルと六極コイルを用いて電子サイクロトロン共鳴及び電子閉じ込めに必要な磁場分布を形成する。六極コイルの基本性能については、2020 年度の加速器学会年会にお

いて報告を行った [1]。ミラーコイルの線材幅は 12 mm であり、30 K の低温では 500 A 以上の電流が期待される。3 つのミラーコイルは 190 mm 程度の内径を持ったダブルパンケーキ構造の円形コイルであり、Fig. 1 に示すように配置している。

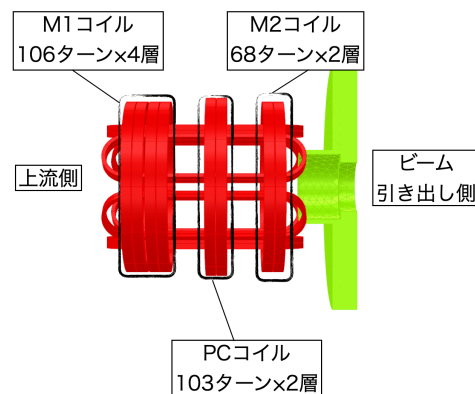


Figure 1: HTS-ECR 3つのミラーコイルとその巻き数.

上流側の M1 コイルは 106 ターンのコイルが 4 層、中心部分の PC コイルは 103 ターンのコイルが 2 層、下流側の M2 コイルは 68 ターンのコイルが 2 層からできている。500 A の電流を流した時、それぞれの起磁力は 21200 AT、10300 AT、68000 AT である。

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

3. 高温超伝導コイルの基本性能試験

3.1 REBCO 線材の特徴

REBCO 線材は希土類金属、バリウム、銅酸化物をベースとした第二世代高温超伝導線材であり、100 A 以上の臨界電流を持つ。運転時 30 K 以下の温度に保つことによって、4 K 以下の極低温で運転する従来の低温超伝導コイル NbTi や Nb₃Sn よりクエンチに強く、安全性が高い。さらに、REBCO 線材は線材テープ面にほぼ垂直な磁束密度成分に起因して制限される臨界磁場も高くすることができる。このような背景で、本研究では、12 mm 幅の REBCO 線材 (SuperOx Japan 社製 GdBa₂Cu₃O_x) を用いてミラーコイルを製作し、コイル性能を測定した。

3.2 液体窒素温度性能試験結果

ミラーコイルの基本性能を確認するために、まず液体窒素温度 (77 K) での電流-電圧 (I-V) 特性試験を行った。液体窒素温度で、電流の増大に伴う電圧の増大具合が測定された。コイル製作工場及び阪大 RCNP において、全てのミラーコイルについて同じような条件で複数回測定した。PC コイルの I-V 特性の一例を Fig. 2 に示す。

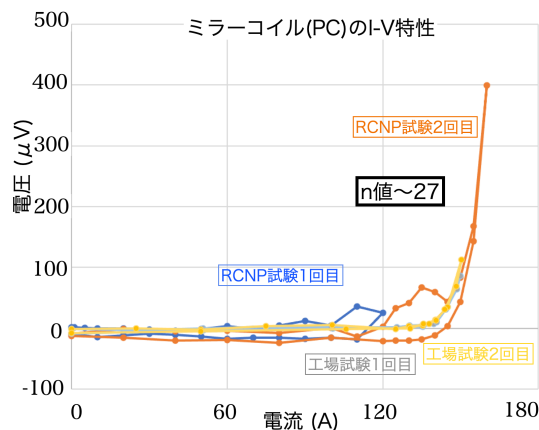


Figure 2: PC コイルの 77 K での電流-電圧特性。

Figure 2 から、PC コイルは液体窒素温度で電流が 140 A まで増大しても電圧がほとんど変化せず、超伝導状態が保たれていることがわかる。約 150 A 前後で電圧が大幅に増大し、超伝導状態が破れ始めたことが確認できた。4 度のコイル電流増減測定で同じような結果が得られていることから、REBCO 線材ミラーコイルの基本性能の再現性の良さが確かめられた。また、電圧と電流の増大具合から線材の均一性についても確認できた。その目安である n 値は約 27 であった。似たような測定結果は他のコイルにも確認できた。

3.3 31 K 低温性能試験結果

ミラーコイルを試験用クライオスタット容器内に固定し、31 K の低温環境下での I-V 特性試験を行った。ミラーコイルは GM 冷却機を用いた伝導冷却方式により冷却し、コイル表面の数カ所に取り付けたセルノックス抵抗温度センサーにより冷却温度をモニターした。ま

た、コイルへの通電により発生する磁場を確認するため、ホール素子をコイル中心に設置した。31 K における M2 コイルの電流値と中心磁場の関係を Fig. 3 に示す。コイ

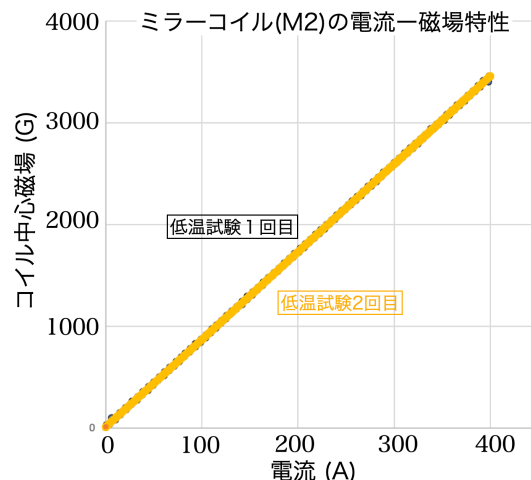


Figure 3: M2 コイルの電流とそれが作る中心磁場の関係。

る電流は、使用したコイル電源の定格電流の都合から最大 400 A までしか通電できなかったが、400 A までの増減を 2 回繰り返し、磁場の再現性と安定性に問題がないことを確認した。この時、コイルの常伝導転移による急激な電圧上昇は観測されなかった。他のミラーコイルも似た試験結果が確認された。

4. イオン源のコイル磁場解析

上述のような REBCO 線材コイルで ECR イオン源を組み立てた時、イオン源内部で生成できる磁場分布の計算を行った。

ECR イオン源は磁場中で回転する電子と同じ周波数で振動するマイクロ波の電場による電子加速、いわゆる電子サイクロトロン共鳴により電子を加速させ、電離作用によってイオンを生成するイオン源である。電子サイクロトロン共鳴を起こす磁場 B_{ECR} はマイクロ波周波数に比例し、ECR イオン源設計においては重要なパラメータである。また、多価イオンを生成する場合、複数回のイオン化衝突が起こる必要がある。電子のエネルギーを維持するためには電子を閉じ込めるミラー磁場を作る必要がある。そこで最大磁場と共鳴磁場との比は電子閉じ込めの効率を示す指標と考えられている。下記では HTS-ECR の共鳴磁場及びミラー磁場の要求仕様をまとめている。

4.1 中心軸上の磁場分布

三つのミラーコイルにそれぞれ 500 A の電流を流した時、中心軸上に発生する軸方向の磁場分布を Fig. 4 に示す。

HTS-ECR を 10GHz で運転する場合、共鳴磁場 B_{ECR} は 3571.4G である。上流側ピーク B_{M1} 、下流側ピーク B_{M2} 及び最小磁場 B_{min} との比をとると、それぞれの磁場比は

$$\frac{B_{\text{M1}}}{B_{\text{ECR}}} \sim 3, \frac{B_{\text{M2}}}{B_{\text{ECR}}} \sim 1.2, \frac{B_{\text{min}}}{B_{\text{ECR}}} \sim 0.65 \quad (1)$$

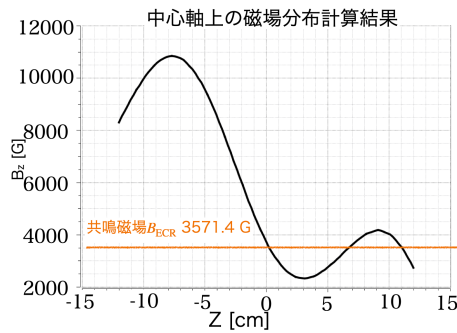


Figure 4: イオン源中心軸上の磁場分布.

である。

4.2 半径方向の磁場分布

中心軸方向と同様に、半径方向でも六極コイルによるミラー磁場があれば電子閉じ込めは効率的に行える。このようにチェンバー中心の磁場が一番低く、電子がどの方向に進んでも磁場が大きくなるような磁場分布は minimum-B configuration と呼ばれる。Figure 5 は HTS-ECR の六極コイルに 250 A の電流を流した時の半径方向の磁場分布を示している。Figure 5 には、中心軸上で

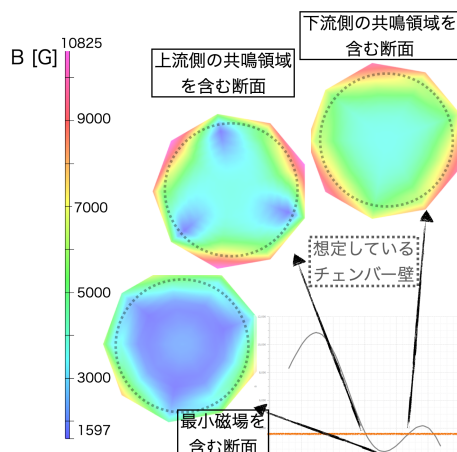


Figure 5: イオン源半径方向の磁場分布.

共鳴磁場が形成されている 2 つの Z 位置での断面内での 2 次元磁場分布と、中心軸上で最小磁場となる Z 位置での断面内の 2 次元磁場分布を示した。点線はイオンチェンバーのおおよその位置である。チェンバー壁での磁場半径方向成分 B_r と共鳴磁場との比は

$$\frac{B_r}{B_{\text{ECR}}} \sim 2 \quad (2)$$

である。

5. 考察

5.1 重イオン源との比較

重イオン生成を目的とするイオン源では、半経験的に以下のような磁場が最適とされている [2, 3]。

$$\frac{B_{M1}}{B_{\text{ECR}}} \sim 4, \frac{B_{M2}}{B_{\text{ECR}}} \sim 2, \frac{B_{\text{min}}}{B_{\text{ECR}}} \sim 0.8, \frac{B_r}{B_{\text{ECR}}} \geq 2 \quad (3)$$

Equation (2) を Eq. (3) と比較すると、HTS-ECR は B_{M2}/B_{ECR} を除いて、Eq. (3) の条件に近い磁場比を持つことがわかる。重イオン源の最適磁場比の条件を参考にすると、より大きい下流側の磁場ピークが必要があるかもしれない。

5.2 大きい磁場比の意味

この最適磁場比は酸素かそれ以上の重イオン源における経験則である [4]。物理的な説明のアプローチでは、最適磁場の条件は magnetohydrodynamic stability と関連し、ECR プラズマの閉じ込め条件は [5]

$$\beta = p_{\text{particle}}/p_{\text{magnetic}} = (n_e k T_e)/(B^2/2\mu_0) \leq 0.1 \quad (4)$$

である。ここで p_{particle} は粒子による圧力であり、 p_{magnetic} は磁場による圧力である。また、 n_e 、 T_e 、 k 、 B 、 μ_0 はそれぞれ電子密度、電子温度、ボルツマン定数、磁場及び磁気定数である。Equation (4) によると、この条件を満たす領域では電子は閉じ込められる。すなわち、イオン源の磁場比が高いほど、より高いエネルギーを持つ電子までチェンバー内に閉じ込められることになる。

また、ミラー磁場による閉じ込めは電子の速度空間で loss cone が存在する [6, 7]。電子の磁場に対する垂直及び平行速度のなす角度 α が

$$\tan \alpha = \frac{v_{\parallel}}{v_{\perp}} \quad (5)$$

のように定義される時、 α が loss cone より小さい場合、電子はミラー磁場を抜けていく。磁場比の増大はこの loss cone を小さくすることに有効だとされている。

5.3 4He^{2+} イオン生成のための磁場比の最適化

しかし、Eq. (3) のような重イオン源の最適ミラー比が He^{2+} イオンのビーム強度を増大させる方向に働くかは自明ではない。Equation (4) 及び Eq. (5) から、大きい磁場比は高いエネルギーを持つ電子を閉じ込め、それらの閉じ込め時間を長くする効果がある。しかし、重イオン例えば O^{7+} のイオン化エネルギーは 739 eV に対し、 He^{2+} のイオン化エネルギーはわずかの 54 eV である。必要以上の閉じ込め時間が He^{2+} イオンを大量に生み出し、効率良く引き出すことを妨げないか、実験的な検討が必要である。 O^{7+} より重いイオン生成の実績に基づいた Eq. (3) の最適磁場 [8] が HTS-ECR に適用できるかどうかの解明は今後の課題である。

6. 今後の展望

REBCO 線材を用いたミラーコイルの性能試験結果は高い再現性、信頼性を示した。ECR イオン源として完成させるために、入力するマイクロ波電場計算によるプラズマチェンバーの設計、ビーム輸送シミュレーション計算による引き出し電極の設計などを今後進めていく。上述のように、重イオン源の磁場比のヘリウムイオン源での実用性についてのスタディもこれからの課題である。イオン源が Eq. (3) のような磁場条件を満たす一方、ミラー磁場を作らず共鳴領域を広め、電子加速及びビーム引き出しを優先した磁場分布を形成した場合の 4He^{2+} イオンビーム高強度化についても併せてスタディしていく予定である。

参考文献

- [1] M. Hisamatsu *et al.*, ”スケルトン・サイクロトロン開発のための高温超伝導コイルの要素技術開発”, Proceedings of the 17th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Online, Sep 2-4, 2020.
- [2] G. Brown (Editor) *The physics and Techonology of Ion Sources* (WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004).
- [3] S.Gammino *et al.*, Rev. Sci. Instrun. **67**, 4109 (1996).
- [4] S.Gammino and G. Ciavola, Plasma Sources Sci. Technol. **5**, 19 (1996).
- [5] S.Gammino and G. Ciavola, Rev. Sci. Instrun. **71**, 631 (2000).
- [6] R. Geller, *Electron Cyclotron Resonance Ion Sources and ECR Plasmas* (Institute of Physics, Bristol, 1996).
- [7] M. H. Rashid and R.K. Bhandari, AIP Conference Proceedings **600**, 261(2001).
- [8] T.A. Antaya and S.Gammino, Rev. Sci. Instrun. **65**, 1723 (1994).