

無絶縁高温超伝導 ECR イオン源の開発

DEVELOPMENT OF NON-INSULATION HIGH TEMPERATURE SUPERCONDUCTING ECR ION SOURCE

荘 俊謙 ^{*,A)}, 福田 光宏 ^{A)}, 依田 哲彦 ^{A)}, 神田 浩樹 ^{A)}, Zhao Hang ^{A)}, Shali Ahsani Hafizhu ^{A)}, 松井 昇太郎 ^{A)}, 渡辺 薫 ^{A)},
井村 友紀 ^{A)}, 板倉 菜美 ^{A)}, 石畑 翔 ^{A)}, 石山 敦士 ^{B)}, 野口 聡 ^{C)}, 植田 浩史 ^{D)}, 吉田 潤 ^{E)}, 渡部 智則 ^{F)}
Tsun Him Chong ^{*,A)}, Mitsuhiro Fukuda ^{A)}, Tetsuhiko Yorita ^{A)}, Hiroki Kanda ^{A)}, Hang Zhao ^{A)}, Ahsani Hafizhu Shali ^{A)},
Shoutaro Matsui ^{A)}, Kaoru Watanabe ^{A)}, Tomoki Imura ^{A)}, Nami Itakura ^{A)}, Sho Ishihata ^{A)}, Atsushi Ishiyama ^{B)},
Sou Noguchi ^{C)}, Hiroshi Ueda ^{D)}, Jun Yoshida ^{E)}, Tomonori Watabe ^{F)},
^{A)} Research Center of Nuclear Physics, Osaka University ^{B)} Waseda University ^{C)} Hokkaido University
^{D)} Okayama University ^{E)} Sumitomo Heavy Industries, Ltd., ^{F)} Chubu Electric Power Co., Inc.

Abstract

Non-insulation high temperature superconducting magnet has shown great development in recent years. With its properties of high current density and little degradation under strong external magnetic field, it can be used as electromagnet in high field instrument. ECR ion source can be benefited from it, since high magnetic field is required for electron confinement, especially for high charge beam production. As a prototype, a 10 GHz ECR ion source is under development in Osaka University. It uses non-insulation high temperature superconductor magnet for both axial and radial direction magnetic field. The ion source design will be presented in this paper. The high temperature superconducting coil test result will also be discussed.

1. はじめに

磁石は加速器科学において不可欠な存在である。永久磁石や常伝導コイルによる電磁石に加え、低温超伝導電磁石は電流ロスが生じない、電流密度が高い性質から特に強磁場応用で重宝されている。低温超伝導の活用によって ECR イオン源の大電流化、サイクロトロンコンパクト化など加速器科学は大きく発展した。さらに近年、工学分野の目まぐるしい発展により、高温超伝導磁石の加速器分野での応用が可能になってきた。高温超伝導線材 REBCO は強い磁場環境の下でも性能劣化が少ないことから、強磁場磁石として応用でき、注目を集めている。特に高温超伝導体の高い臨界温度より、無絶縁 (Non-insulation, NI) の技術が応用できて、従来の磁石よりも高い熱安定性及び電流密度が実現でき、加速器科学も大きくその恩恵を受けると期待されている。

大阪大学核物理研究センター (RCNP) では、高温超伝導磁石の応用の試みとして高温超伝導 ECR イオン源 (HTS-ECR) の開発を進めている。HTS-ECR は第二世代高温超伝導の REBCO 線材を用いて、円形のミラーコイルが 3 つ、非円形のレーストラック型 6 極コイルが 6 つから構成されている。その全てが無絶縁高温超伝導コイルである。高温超伝導磁石を立体的に複雑に組み立てるイオン源装置は世界初で、HTS-ECR の開発から無絶縁高温超伝導 (NI-HTS) のイオン源や加速器への応用の知見が多く得られると期待できる。

本論文ではまず高温超伝導の性質をまとめ、加速器分野の装置がそれを利用するメリットを説明する。次に RCNP が制作した HTS-ECR イオン源の設計を説明し、その特性をまとめる。最後に HTS-ECR で行ったコイル性能試験結果を報告し、HTS-ECR の実用性について述べる。

2. 無絶縁高温超伝導コイル

無絶縁高温超伝導は 2010 年に提案された [1]、比較的に新しい技術である。その最大の特徴は高い電流密度と高い熱安定性である。無絶縁コイルの構造及び特徴を Fig. 1 に示す。

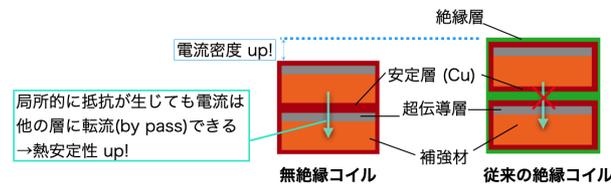


Figure 1: 無絶縁コイルの構造とそのメリットを示す概念図。

従来の絶縁コイルは超伝導層、補強材、安定層の他、コイルのターンとターンの間には絶縁層がある。一方、無絶縁コイルは絶縁層がなく、従来より小さいコイル断面積、より高い電流密度が期待できる。また、Fig. 1 に示したように、コイル運転中に何らかの原因で局所的に超伝導状態破れが生じた場合、無絶縁コイルの電流は局所的な抵抗を避けて別の層に転流できるため、無絶縁コイルはクエンチが起こりにくく、熱安定性が従来と比べて遥かに高い [2, 3]。

従来の絶縁コイルでは、運転中に何らかの原因で超伝導状態破れが起きた時でも、絶縁層が素早く局所的な熱を奪い、コイル全体のクエンチを防ぐ。これは臨界温度が約 10 K で運転の温度マージンが取りにくい低温超伝導コイルにとって、絶縁層が必要不可欠であることを意味する。一方、高温超伝導体は臨界温度が約 90 K であり、絶縁層で熱を奪う必要がなくなる。そのため、無絶縁技術は高温超伝導体だからこその技術である。

高温超伝導体本来の高い電流密度に加え、無絶縁技

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

術を応用することで高温超伝導磁石は従来の磁石よりも高い電流密度を誇る。Table 1 は常伝導コイル、低温超伝導磁石 (NbTi)、及び無絶縁高温超伝導 (REBCO) 磁石の最大運転電流密度を示している。

Table 1: 各種電磁石の最大運転電流密度の比較

	最大運転電流密度 (A/mm ²)
室温常伝導	~3.17 [4]
低温超伝導 (NbTi)	~33.5 [5]
無絶縁高温超伝導 (REBCO)	~466 (20 K, $B_{\perp} = 10$ T) [6]

Table 1 では、室温常伝導コイル、低温超伝導コイル及び無絶縁高温超伝導コイルの電流密度を比較している。超伝導コイルの最大運転電流密度は、臨界電流 I_c の 70% と定義している。無絶縁高温超伝導の電流密度は 20 K 環境で外部垂直磁場 B_{\perp} が 10 T 環境下のカタログ値から概算している。このように、低温超伝導の電流密度は常伝導より一桁高く、無絶縁高温超伝導はさらに一桁高い。電流密度が 466 A/mm² ということは、半径 50 cm で断面積が 5×5 cm² のコイルの場合、中心磁場が約 1.4 T という強い磁場を意味する。

他にも、高温超伝導 REBCO 線材は強磁場環境下での劣化が少ない、高い応力耐性を持つという特徴がある。超伝導体の臨界密度は外部磁場によって制限される性質があるが、REBCO 線材は他の超伝導体よりもその劣化が少ない [7]。そのため REBCO 線材は高磁場環境中の磁石製作に適している。また、強磁場環境でのコイルは通電により強いフープ力が発生するが、REBCO 線材は 700 MPa を超える高い応力耐性を持ち [8]、高磁場環境磁石としての機械的な強度も持ち合わせている。

この高い電流密度、高い熱安定性を加速器分野に応用すると、いくつかのメリットが考えられる。まず高い電流密度は磁石の小型化の可能性を示し、加速器のコンパクト化を意味する。さらに熱安定性の高さから、NI-HTS コイルは小型医療用サイクロトロンで大いに活躍できると期待されている。また ECR イオン源において、イオン源ビーム電流はその磁場の 2 乗に比例する、通称 2 乗則がある [9]。

$$I \propto B^2 \quad (1)$$

これは多価イオンビームの生成において特に重要とされている。無絶縁高温超伝導コイルの高い電流密度、強磁場環境下でも性能劣化が少ない特性から、従来よりも高磁場 (高い運転周波数) の ECR イオン源を作ることが可能となる。現に、より高磁場のイオン源を作る研究にあたって、外部磁場からの低温超伝導磁石の性能の制限が大きな問題になっている [10]。無絶縁高温超伝導コイルを ECR イオン源に応用すれば、外部磁場による制限を克服でき、従来よりも高いビーム電流を生成できる。

3. NI-HTS-ECR イオン源

阪大 RCNP ではプロトタイプとして、無絶縁高温超伝導コイルを用いた ECR イオン源を製作した。それを Fig. 2 に示す。

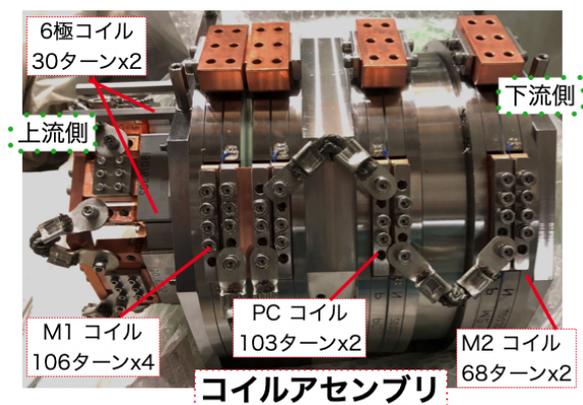


Figure 2: 阪大 RCNP の無絶縁高温超伝導 ECR イオン源のコイルアセンブリ。

NI-HTS-ECR は円形コイル 3 つ、非円形のレーストラックコイル 6 つから構成されている。その名前とターン数も Fig. 2 に示されている。円形コイルと非円形コイルは製作技術が異なるため、本研究を通してそれらを同時に検証できる。

イオン源のビーム種類は陽子、重陽子と He²⁺ を想定しており、運転周波数は 2.45 GHz と 10 GHz を想定している。二つの周波数の運転モード用に設計された磁場は Fig. 3 に示されている。それぞれの運転モードで各コイルに印加する電流は Table 2 に示されている。

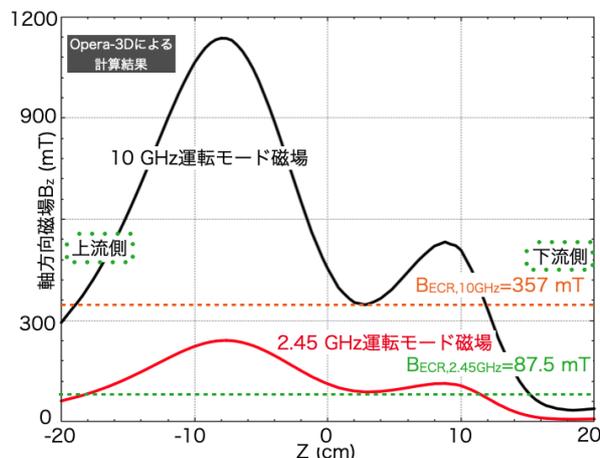


Figure 3: ECR イオン源の設計磁場。

Table 2: NI-HTS-ECR の各コイルの印加電流

	2.45 GHz モード	10 GHz モード
M1 コイル	101.8 A	500 A
PC コイル	-66.6 A	-580 A
M2 コイル	103 A	500 A
6 極コイル	250 A	250 A

Figure 3 に示しているように、二つの運転周波数モードはどちらも minimum-B 構造の磁場を持つ。Table 2

に示されているように、NI-HTS-ECR イオン源は最大 580A の電流をコイルに印加する予定である。また、全てのコイルが鉄芯を持たないことから、軸上の磁場 B_z 及び半径方向の磁場 B_r が運転中に自由に変更でき、各ビーム種類にそれぞれ最適な磁場分布を探索でき、将来のイオン源設計に資する。

イオン源設計において、各コイルが感じる外部磁場を考慮することは重要である。10 GHz 運転モードでの各コイル表面最大垂直磁場成分 B_{\perp} をシミュレーションで調べた [11]。円形コイルが感じる最大磁場は 2.5 T で、非円形コイルは 2.1 T であった。

4. コイルの性能評価

製作した無絶縁高温超伝導コイルの性能を評価するために、液体窒素温度 (77 K) での性能試験を行なった。Figure 4 は 6 極コイルの性能試験結果である。

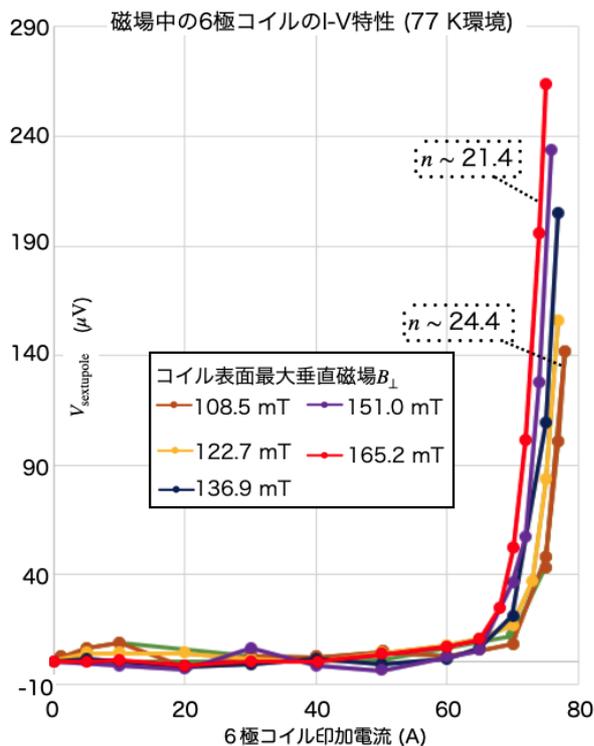


Figure 4: 6 極コイルの外部磁場の下での I-V 特性。

Figure 4 は外部磁場の下で、電流を印加した時 6 極コイルの両端の発生電圧を示している。Figure 4 より、外部磁場が強いほど電圧の立ち上がり早いことがわかる。試験結果の n 値も図の中に示されている。

超伝導体の性能評価の手法として、 n 値モデルがある [12]。それは下の式で表せる。

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c} \right)^n \quad (2)$$

ここで、 E はコイル両端で発生する電場で、 J_c は臨界電流で、 E_c は常伝導転移の基準値であり約 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$

である。 n 値モデルより、6 極コイルの 77 K での臨界電流が約 97.5 A であることがわかる。

REBCO 線材のカタログ値 [6] によると、同線材の 20 K 低温環境で 10 T の垂直磁場の下での臨界電流 I_c は、77 K で自己磁場中の 4 倍であることがわかる。これを外部磁場 108.5 mT の試験結果に適用すると、20 K 環境で 10 T の垂直磁場の下で、臨界電流 I_c は 390 A と概算できる。その 70% を運転電流の上限とすると、6 極コイルの最大運転電流は約 273 A で、設計値の 250 A より高いことがわかる。この結果より、製作した 6 極コイルは NI-HTS-ECR イオン源に必要な磁場を生成できると期待できる。

5. まとめと展望

無絶縁高温超伝導コイル技術を用いた ECR イオン源は阪大 RCNP で製作されている。円形コイルと非円形 6 極コイルの両方が空芯の無絶縁高温超伝導コイルであり、コイルの製作技術の検証行われている。大電流ビーム出力を目標として、min-B 構造の磁場が設計された。コイルの性能試験において、77 K 環境ではコイルは再現性がよく、複数回の励磁で性能の劣化が見られなかった。性能試験の結果より、6 極コイルの 20 K、10 T 外部磁場環境での臨界電流 I_c は約 390 A と概算でき、ECR イオン源の設計値より高い電流を印加できると期待できる。NI-HTS-ECR 専用のクライオスタットは今製作されており、将来ではそれを用いて 20~30 K 環境の性能試験を行う予定である。

無絶縁高温超伝導コイルは高い電流密度と、強い磁場環境でも性能がほとんど劣化しないことから、将来の高磁場イオン源に大いに活躍できると考えられる。また、本研究の NI-HTS-ECR はすべてのコイルが空芯型であるため、磁場の調整範囲が従来よりも広い。この性質から大電流陽子、重陽子及び He^{2+} ビームの最適生成条件を探索できる。本研究で得た知見に基づいて、大電流イオン源に留まらず、医療用サイクロトロン [13] の研究も推進していく予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP24H00227, 24KJ1595 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] S. Hahn *et al.*, “Current Status of and Challenges for No-Insulation HTS Winding Technique”, (J.Cryo. Super. Soc. Jpn.) Vol. 53 No. 1 (2018).
- [2] 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.
- [3] A. Ikeda *et al.*, “Transient Behaviors of No-Insulation REBCO Pancake Coil During Local Normal-State Transition”, in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp. 1-4, June 2016.
- [4] A. Calanna *et al.*, “A Compact High Intensity Cyclotron Injector for DAEdALUS Experiment”. In: Conf. Proc. C 1205201 (2012). Ed. by Vic Suller, pp. 424 – 426.

- [5] A. Goto *et al.*, “Sector magnets for the RIKEN superconducting ring cyclotron”. In: IEEE Transactions on Applied Superconductivity 14.2 (2004), pp. 300 – 305. doi: 10.1109/TASC.2004.829092.
- [6] <https://www.faradaygroup.com/en/product/>. Faraday Factory Product Data. 2019.
- [7] “Engineering Critical Current Density vs Applied Field for Superconductors Available in Long Length”, National High Magnetic Field Laboratory. 2018.
- [8] Drew W. Hazelton *et al.*, “Recent Developments in 2G HTS Coil Technology”. In: IEEE Transactions on Applied Superconductivity 19.3 (2009), pp. 2218 – 2222. doi: 10.1109/TASC.2009.2018791.
- [9] Ian Brown(Editor). “The physics and Techonology of Ion Sources”. John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [10] T. Thuillier *et al.*, “Prospect for a 60 GHz multicharged ECR ion source”, Rev. Sci. Instrum. 89, 052302 (2018).
- [11] T. H. Chong *et al.*, “Test of High Temperature Superconducting REBCO Coil Assembly for a Multi-Frequency ECR Ion Source”, in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 34, no. 5, pp. 1-4, Aug. 2024, Art no. 4603204, doi: 10.1109/TASC.2024.3360935.
- [12] D Aized et al. “Comparing the Accuracy of Critical-Current Measurements Using the Voltage-Current Simulator”. en. In: 30(4) (1994).
- [13] Hiroshi Ueda *et al.*, “Conceptual Design of Compact HTS Cyclotron for RI Production”. In: IEEE Transactions on Applied Superconductivity 29.5 (2019), pp. 1 – 5.