

重粒子線小型シンクロトン用超伝導電磁石を模擬した ショートモデルコイルによるパターン励磁試験

PATTERN EXCITATION TEST RESULTS USING A SHORT MODEL COIL OF A SUPERCONDUCTING MAGNET FOR A COMPACT HEAVY-ION SYNCHROTRON

高山茂貴^{#,A)}, 天野沙紀^{A)}, 折笠朝文^{A)}, 中西康介^{A)}, 平田寛^{A)}, 藤本哲也^{B)}, 水島康太^{C)}, 楊叶^{C)}, 松葉俊哉^{C)},
野田悦夫^{C)}, 浦田昌身^{C)}, 岩田佳之^{C)}, 白井敏之^{C)}
Shigeki Takayama^{#,A)}, Saki Amano^{A)}, Tomofumi Orikasa^{A)}, Kosuke Nakanishi^{A)}, Yutaka Hirata^{A)}, Tetsuya Fujimoto^{B)},
Kota Mizushima^{C)}, Ye Yang^{C)}, Shunya Matsuba^{C)}, Etsuo Noda^{C)}, Masami Urata^{C)}, Yoshiyuki Iwata^{C)},
Toshiyuki Shirai^{C)}

^{A)} Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

^{C)} National Institutes for Quantum Science and Technology (QST)

Abstract

A project to develop a next-generation small facility for heavy-ion radiotherapy called Quantum Scalpel is underway at the National Institutes for Quantum Science and Technology (QST). One of the aims of this project is to downsize the synchrotron by applying superconducting technology, and the installation area is to be reduced to about one-tenth that of the conventional synchrotron, whose diameter is about 20 m. However, the superconducting magnet used for the synchrotron requires high magnetic field uniformity and repeated high-speed excitation of more than 0.64 T/s. Such high-speed excitation generates large AC loss and this heat generation is one of the major issues in the development. In addition, considering the introduction of superconducting magnets to general hospitals, it is desirable to use only 4K GM cryocoolers that are easy to operate without liquid helium, which is difficult to handle. Therefore, we have developed a low-AC-loss superconducting magnet that can adopt a conduction cooling method using 4K GM cryocoolers. In order to verify the technologies for designing and manufacturing the superconducting magnet for the synchrotron, a short model coil was fabricated and pattern excitation test was carried out. The test results are reported.

1. はじめに

重粒子線がん治療装置の普及拡大を目指し、量子メス研究プロジェクトの一環で超伝導技術による加速器主リング(シンクロトン)の小型化を検討している[1]。現状のシンクロトロンは直径約 20m と大型であるが、超伝導電磁石を適用することで 8.6m 四方と設置面積を 1/10 程度まで小型化可能となっている。一方で、通常のビーム輸送系などに用いられる超伝導電磁石とは異なり、シンクロトロンは何周もビームが電磁石を通過するため、非常に高い磁場均一度が必要となる[2-5]。さらに、5 秒で 0.3T から 3.5T まで励磁する高速な運転が必要となるため、大きな交流損失(発熱)を生じ、その低減と冷却が課題となっている[6, 7]。現在開発中の超伝導シンクロトロンは、90 度の偏向電磁石を 4 台用いた四回対称配置となっている。偏向電磁石内は、45 度の超伝導コイルが 2 つ連結された構成となっており、リング周長短縮のため、二極コイルと四極コイルを中心上に重ねて巻く機能結合型を採用した。超伝導コイルは、小型 GM 冷凍機による伝導冷却方式で冷却され、液体ヘリウムなどの冷媒なしに運転電流 265 A で 3.5 T の二極磁場を発生することが可能である。さらに、ランプ速度 0.64 T/s での高速励磁が可能となる仕様となっている。このような高速励磁による発熱対策としてフィラメント径が細く、臨界電流値の高い NbTi

線材を適用すると共に、楕円状のコイル断面形状を採用した。

本対策の効果を検証することを目的に実機と同一の断面構成を持ったショートモデルコイルを試作し実機を想定したパターン励磁を実施することで冷却成立性を評価したので、その試験結果について報告する。

2. ショートモデルコイル

各種機能検証を目的に試作したショートモデルコイルの断面構成を Fig. 1 に、諸元を Table 1 に示す。

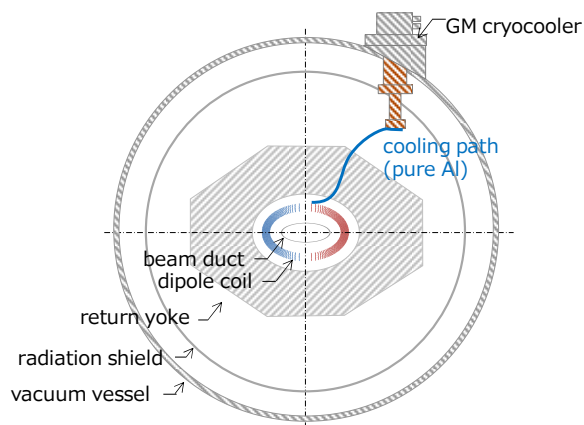


Figure 1: Cross section of the short model coil.

[#] shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

Table 1: Specifications of the Short Model Coil

Central field	3.5 T
Central field gradient	1.5 T/m
Max. ramp rate	0.64 T/s
Coil length	400 mm
Nominal current	265 A (dipole) 123 A (quadrupole)
Number of turns / pole	1070 (dipole) 36 (quadrupole)
Number of layers	22 (dipole) 2 (quadrupole)
Stored energy	42.2 kJ (dipole) 17.5 J (quadrupole)
Self-inductance	1.20 H (dipole) 2.32 mH (quadrupole)

合わせて、諸元検討のために実施した3次元磁場解析結果を Fig. 2 に示す。断面構成は実機と同一としており、 $\phi 1.0$ mm のモノリス線を用いて、楕円断面を有する FRP 製の巻軸外表面に鞍型コイルをサーフェスワインディング法により製作している。適用した線材は実機と同様、フィラメント径の細い低ロスの線材を適用している。コイル長は 400 mm で直線状のコイルとなっている。実機は曲率半径 1.89 m で曲がった鞍型形状でありコイル長約 1.49 m となっているため、本ショートモデルコイルは約 1/3 程度の長さとなっている。本コイルは必要な空間に効率良く磁場を発生するために楕円形状としており、 $\cos 2\theta$ 分布を有する四極コイルの上層に、 $\cos \theta$ 分布を有する二極コイルを配置した形状としている。二極コイルは 22 層 1070 ターン、四極コイルは 2 層 36 ターンでそれぞれ独立励磁可能となっている。二極コイルは 256A で中心磁場 3.5 T、四極コイルは 123 A で 1.5 T/m 発生し、蓄積エネルギーは二極コイルで定格励磁時 42.2 kJ、四極コイルで 17.5 J となる。このコイルのインダクタンスは二極コイルで 1.20 H、四極コイルで 2.32 mH となり、実機の 2 割程度の大きさである。鉄心は 0.5 mm の鋼板を積層して構成しており、鉄心とコイルの間にステンレス製のカラーを配置することで電磁力保持と同時に鉄心飽和による磁場分布の乱れを抑制している。コイル最内外層に伝熱用の高純度アルミシートを接着しており、これを冷凍機に接続することで冷凍機伝導冷却を実現している。ショートモデルコイルの概観と試作したコイル外観を Fig. 3 に示す。ここではコイルを見やすくするため、鉄心の上半分を省略している。

3. 励磁試験

まず始めに基本的な励磁性能を確認する目的で中心磁場の励磁電流値依存性を確認した。その結果を Fig. 4 に示す。本試験ではコイル中心位置にホール素子を配置することで中心磁場を測定した。中心磁場は励磁電流に応じて線形に増加し定格電流励磁時に設計通り中心

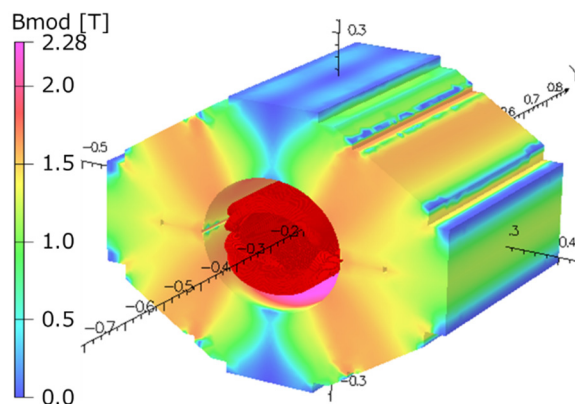


Figure 2: Calculation result of magnetic field distribution when the dipole coil was excited by 265 A.

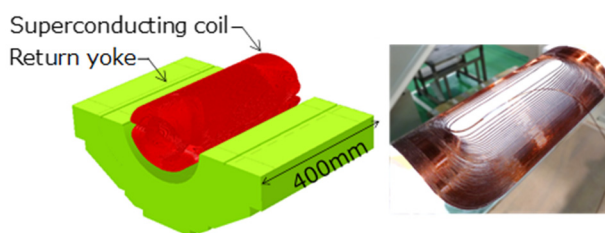


Figure 3: Outer view and photograph of the short model coil.

磁場 3.5 T が得られることが確認された。合わせて B/I の電流値依存性を確認した。定格近傍で鉄心飽和によるわずかな B/I の低下が見られており、これは計算と良く一致している。低電流領域では B/I が計算より高くなる振る舞いが見られ、これは低磁場領域での鉄心の BH 特性が計算と実際とで異なっているためと推測される。上記差は 1 Gauss/A 程度であり線形性のズレとしては十分小さいと考えられる。

更なる評価として実機の運転を想定し三角波で励消磁するパターン励磁試験を実施し、各温度の振る舞いと冷却特性を評価した。試験結果と計算結果を Fig. 5 に示す。ここで実施した計算は実機検討にて行った計算方法にて実施しており[7]、温度測定にはセルノックス温度計を用い、冷凍機 2nd ヘッド、四極コイル、二極コイルの

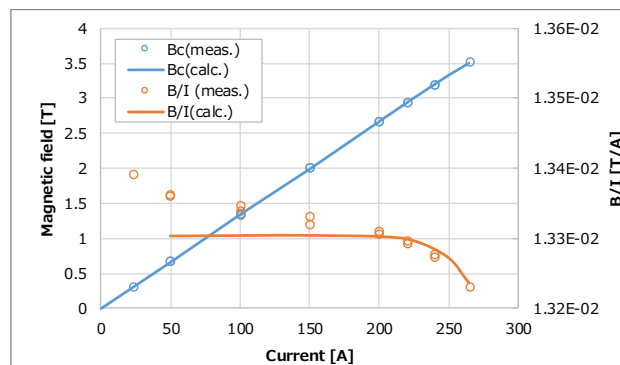


Figure 4: Measured and calculated central magnetic field and B/I characteristics.

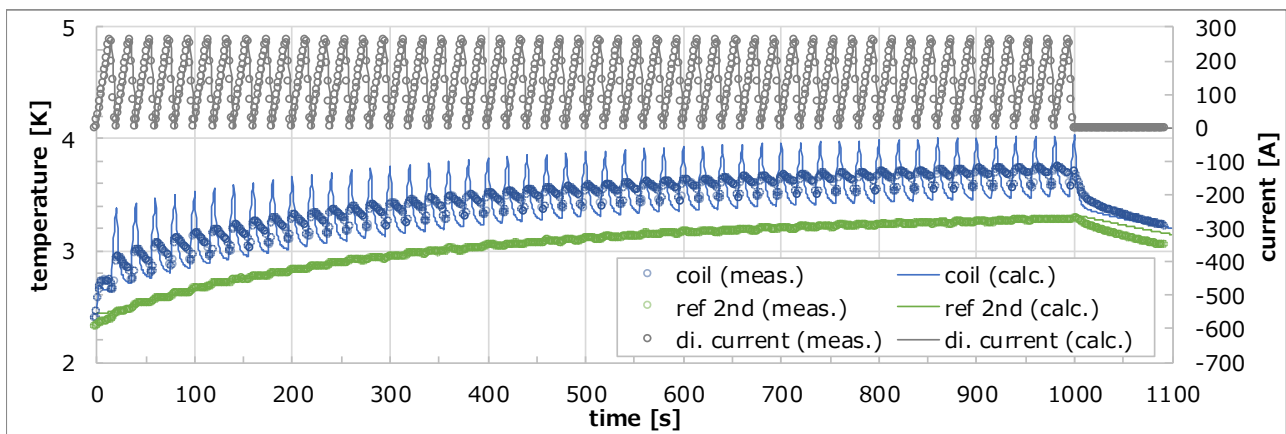


Figure 5: Measured and calculated temperature in the pattern excitation test of the short model coil.

各表面に配置した。実機では励磁 5 秒、消磁 5 秒での運転となるが、今回の試験では励磁電源の制約により、励磁時間は最速で 15 秒、消磁時間は 5 秒としており、本最速の励消磁を 50 回繰り返すパターン運転を実施した。試験の結果、コイル温度振幅は計算で 0.6 K 程度、測定で 0.3 K 程度とわずかに差が見られたが、概ね一致する結果が得られた。計算上コイル内温度は一定としており、温度分布を考慮していないため上記差が生じたものと想定される。本試験における最終的なコイル最大温度は計算で 4.03 K、測定で 3.82 K、最大冷凍機温度は計算で 3.31 K、測定で 3.29 K と概ね一致している。また 50 回の励消磁後も温度が一定となっておらず、微増し続けている。この傾向は計算も測定も同じとなっている。上述の通り、計算と測定とで概ね一致する結果が得られ、計算の妥当性が確認された。

さらにコイル温度の励磁速度依存性を評価するため、励消磁時間を 15 秒、17.6 秒、22.5 秒、30 秒とし、100 回以上パターンを繰り返す試験を実施した。本試験によって得られたコイルと冷凍機 2nd ヘッドの到達温度を Fig 6 に示す。試験の結果、コイル温度、冷凍機温度はいずれも励磁速度にはほぼ線形に増加している。交流損失は大きくヒステリシス損失と結合損失に大別され、ヒステリシス損失は励磁速度に線形に、結合損失は励磁速度の 2 乗に比例して増加する。測定結果から本システムの発熱はヒステリシス損失が支配的であり、結合損失は小さいことが明らかとなった。これは計算・設計結果とも整合している。

これまでに実機熱計算が実施されており、小型冷凍機で冷却可能である結果が計算上得られている[7]。上記ショートモデルコイルでの試験の熱計算も実機と同等の計算を実施しており、本計算と試験との整合性が確認されたことから、実機超伝導電磁石が伝導冷却方式で運用可能であることが明らかとなった。

4. まとめ

重粒子線がん治療装置の小型化を目指し、小型シンクロトロン用超伝導電磁石の開発を進めている。実機と同一の断面構造で、実機の 1/3 程度のコイル長である直線状のショートモデルコイルを試作し励磁試験を実施した。その結果、設計通り定格 265 A にて中心磁場 3.5 T

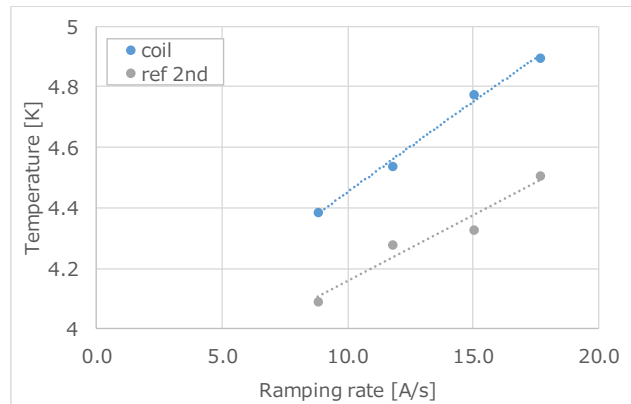


Figure 6: Dependence of the coil and refrigerator temperatures as a function of ramping rate.

が得られ基本的な性能が実現可能であることが確認された。合わせて実機運転に近い、高速での繰り返しパターンで励消磁するパターン励磁試験を実施し冷凍機及びコイルの温度変化を確認した。試験結果は計算結果と概ね一致し、熱計算の妥当性が確認できると共に、小型冷凍機による伝導冷却方式での冷却の成立性が確認された。今後、本試験機で得られた知見を基に実機設計検討を進める。

参考文献

- [1] K. Mizushima *et al.*, proceedings of PASJ2017, WEP131.
- [2] T.Fujimoto *et al.*, proceedings of PASJ2019, THPH019.
- [3] T.Fujimoto *et al.*, proceedings of PASJ2020, FRPP49.
- [4] T.Fujimoto *et al.*, proceedings of PASJ2021, MOP002.
- [5] K. Mizushima *et al.*, “Concept design of a superconducting magnet for a compact heavy-ion synchrotron,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, no. 6, Sept. 2022, Art. no. 4401405.
- [6] S.Amano *et al.*, proceedings of PASJ2021, MOP001.
- [7] S.Amano *et al.*, “Thermal design and test results of the superconducting magnet for a compact heavy-ion synchrotron,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 32, no. 6, Sept. 2022, Art. no. 4401305.