

重粒子線小型シンクロトロン用超伝導電磁石の熱設計及び、パターン励磁試験

THERMAL DESIGN AND PATTERN EXCITATION TEST RESULTS OF THE SUPERCONDUCTING MAGNET FOR A COMPACT HEAVY-ION SYNCHROTRON

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

^{A)} Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

^{B)} Accelerator Engineering Corporation

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

^{*}Current address: Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

Abstract

A project to develop a next generation small facility for heavy-ion radiotherapy called Quantum Scalpel has been started from 2016 at QST. One of the aim of this project is to downsize the synchrotron by applying superconducting technology, and we have been developing a superconducting magnet for a compact heavy-ion synchrotron in collaboration with QST. This superconducting magnet can generate a dipole field of 3.5 T with operating current of 265 A, and it's designed to be able to raise the magnetic field from 0.3 T to 3.5 T in a 5 second while adopting conduction-cooling with GM-cryocoolers. Such high-speed excitation causes large AC loss in the superconducting coil. The thermal design result including countermeasures for this AC loss is described. In addition, a short model with the same cross section as the designed coil were fabricated and excitation test was carried out. The test result is also reported.

1. はじめに

重粒子線がん治療装置は、他の放射線治療に比べ治療効果が高く、患者への負担も少ないことから、施設数が近年増加傾向にある。一方、本装置は、入射器、加速器主リング(シンクロトロン)、回転ガントリといった大型機器で構成されるため装置全体のサイズが大きく、さらなる普及拡大のためには機器の小型化が必須となる。そこで、装置全体を小型化、高性能化する量子メス研究プロジェクト[1]が、量子科学技術研究開発機構(QST)主導のもと、2016年より進められてきた。このプロジェクトの開発項目の一つに、超伝導技術を用いた小型シンクロトロンの開発があり、本開発を東芝とQSTで進めている。

現状、シンクロトロンは直径約20m程度あるが、超伝導電磁石を適用することで設置面積を約1/10程度まで小型化する計画である。しかし、通常のビーム輸送系などに用い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]。さらに、5秒で0.3Tから3.5Tまで励磁するため、大きな交流損失を生じる。

開発中の超伝導電磁石は、GM冷凍機による伝導冷却方式を採用しており、運転電流265Aで3.5T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0.64T/sでの高速励磁が可能な仕様となっている。この様な高速励磁は、超伝導電磁石内の交流損失を発生さ

せる原因となるため発熱対策が必須となる。本発表では、これら交流損失を含む熱設計の検討結果について報告する。また、実機と同一の断面構成を持った直線型ショートモデルコイルを製作し、パターン励磁試験等を実施したため、その結果についても合わせて報告する。

2. 超伝導電磁石実機設計

2.1 実機コイル構成

現在検討中の超伝導シンクロトロンは、90度の偏向電磁石を4台用いた四回対象配置となっている。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。超伝導電磁石の諸元をTable 1に示す。

Table 1: Specifications of the Superconducting Magnet

Parameter	Value	Units
Bending angle	45x2	deg.
Bending radius	1.89	m
Minimum dipole field	0.3	T
Maximum dipole field	3.5	T
Acceleration time	5	s
Maximum ramp speed	0.64	T/s

[#] saki.amano@toshiba.co.jp

2.2 超伝導線

超伝導体も変動磁場下においては発熱する特徴があり、特に本機器の様な高速励減磁運転では冷却負荷が非常に大きくなる。そのため、発熱を抑制するために、ダブルスタック構造の古河電気工業(株)製低 AC ロス線を適用することとした。線材の諸元を Table 2 に、断面概要図を Fig. 1 に示す。

Table 2: Main Parameters of the Superconducting Wire

Parameter	Value	Units
Wire diameter	1	mm
Critical current $J_c(@5T, 4.2K)$	≥ 2500	A/mm ²
Residual resistance ratio RRR	≥ 100	—
Total AC loss(@2T/s)	≤ 5	kW/m ³

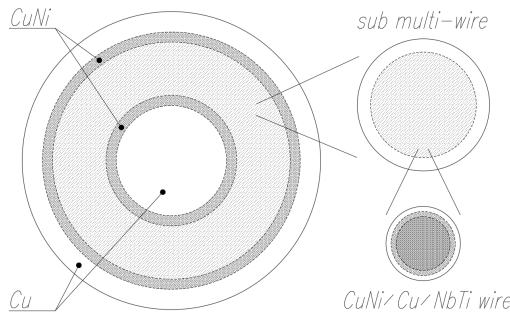


Figure 1: Cross Section of the superconducting wire.

2.3 コイル配置

超伝導コイルは、Table 2 で示した $\phi 1$ のモノリス線を用いて、ビーム軌道に沿って湾曲した鞍型コイルをサーフェスワインディング法により製作する。コイル断面は、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、Fig. 2 に示す様に、四極磁場の $\cos 2\theta$ 分布の上層に、二極磁場の $\cos \theta$ 分布を配置した形状としている。

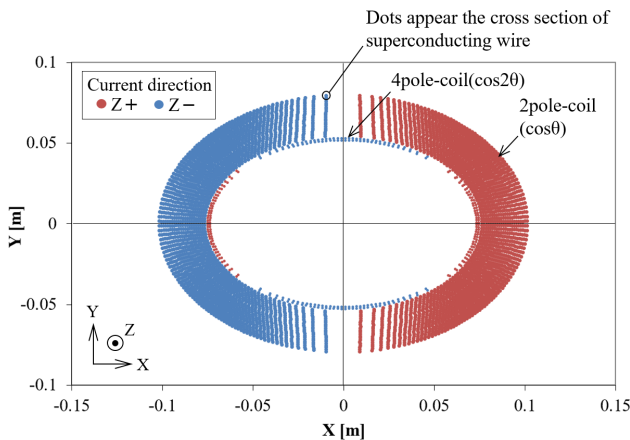


Figure 2: Cross Section of the superconducting coil.

2.4 熱計算

ヒステリシス損失及び結合損失を下記の様に算出した。

まずヒステリシス損失については、Nested Intersecting Circles モデル(交差入れ子モデル)を用いて導体内の遮蔽電流分布を算出し、磁化の外部磁場依存性(ヒステリシスループ)を求めた。そのループを積分することで熱量を算出した。

$$\frac{dB}{dq} = \frac{\xi r \mu_0}{2} J_c(B, T) \quad (1)$$

$$m_i = \frac{4r\xi}{\pi} J_c(B(q))(1-q)^2 \quad (2)$$

ここで、 q は相対的な飽和変数(0~1 の間の実数)、 ξ は磁場変更によるポーラリティ(+1または-1)、 r はフィラメント半径、 μ_0 は真空の透磁率、 m_i は磁化線密度[A/m²]である。

次に結合損失については、素線における磁場変化速度 2 T/s での測定結果(± 2 T, ± 3 T)からの内外挿により求めた。

上記交流損失の他に、伝熱用高純度アルミにおける渦電流損失を Eq. (3)を用いて計算した。RRR は 300 と仮定した。

$$Q_{Al} = \frac{dw^3 \dot{B}^2}{12\rho_{Al}} \quad (3)$$

ここで、 Q_{Al} は単位長さあたりの渦電流損失、 d はアルミの厚さ、 w はアルミの幅、 $\dot{B}$ は磁場の時間変化、 ρ_{Al} はアルミの抵抗率である。

2.5 設計結果

伝熱パスの最適設計を行ない、コイル 1 台(45 度)あたり冷凍機を 3 台搭載した際の冷凍機 2nd ヘッドとコイルの温度変化を確認した。22.7 A (0.3 T) から 265 A (3.5 T) の電流範囲を励消磁時間 5 秒、フラット時間 10 秒でパターン運転した時の計算結果を、Fig. 3 に示す。結果、コイル 1 台あたり冷凍機 3 台での運用が可能である見込みを得た。

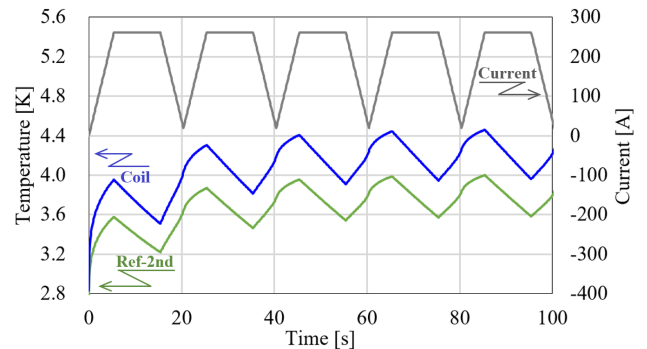


Figure 3: Comparison of calculated temperature at pattern operation test of the 45-degree coil.

3. ショートモデル電磁石

3.1 試験コイル構成

実機製作の前段階として、Fig. 4 に示す様なショートモデル電磁石を製作した。実機と同一断面を持ち、軸長のみ 45 度コイルの約 1/3 の直線型ショートモデルコイルで試験を行った。外観を Fig. 4 に示す。コイルを見やすくするため、鉄心の上半分は省略した。

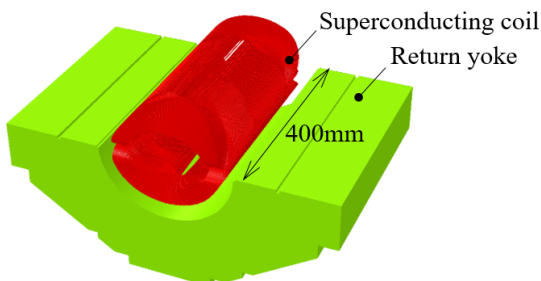


Figure 4: The outer-view of the short-model coil.

3.2 試験条件

試験機の構成を Fig. 5 に示す。小型冷凍機による伝導冷却方式にてコイルを冷却した。伝熱材には高純度純アルミシートを使用した。パターン運転時の温度上昇を確認するため、冷凍機 2nd ヘッド、四極コイル、二極コイルの各表面にセルノックス温度計を配置した。試験で使った運転パターンの詳細を Table 3 に示す。今回は電源の制約により、0 A から 265 A 間を 15 秒で励消磁した。

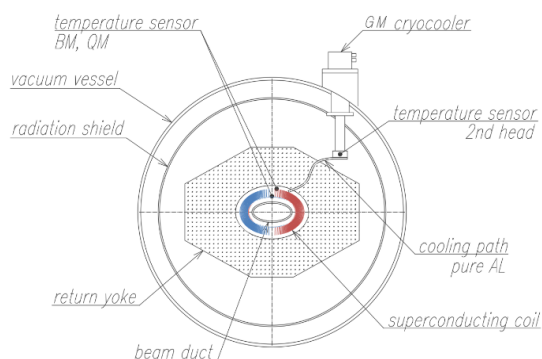


Figure 5: Cross Section of the superconducting magnet, and position of temperature sensors.

Table 3: Detail of the Operation Pattern

Parameter	Value	Units
Minimum current	0	A
Maximum current	265	A
Ramp speed	0.23	T/s
Flat-top time	0	s
Cycle number	10	—

3.3 試験結果・評価

試験結果を Fig. 6、Fig. 7 に示す。試験条件での計算結果と比較して、今回のサイクル数においては 0.1 K 以下のオーダーで一致していることを確認した。本試験により、熱計算の正確性が確認でき、小型冷凍機による伝導冷却方式で運用可能である見込みを得た。

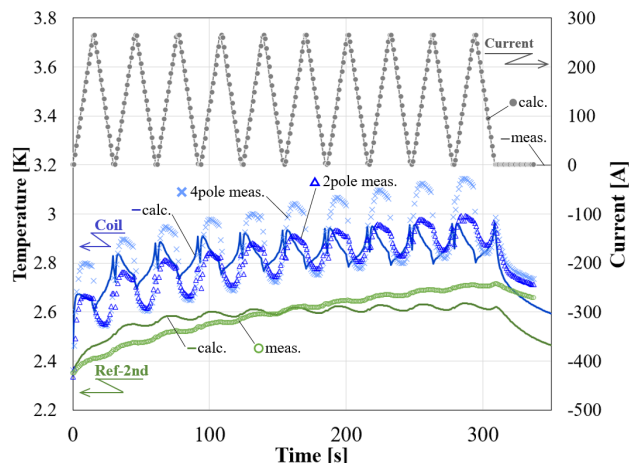


Figure 6: Comparison of measured and calculated temperature at pattern operation test of the short-model coil.

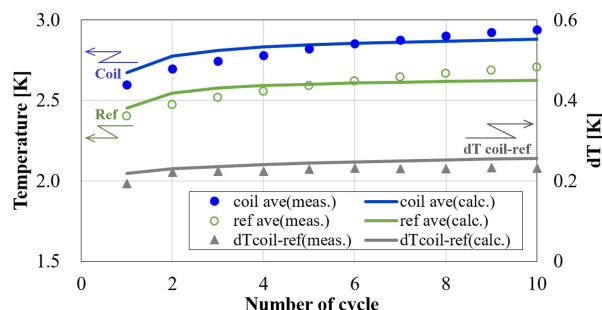


Figure 7: Cycle dependence of measured and calculated temperature.

4. まとめ

重粒子線がん治療装置の小型化を目指し、東芝とQSTで小型シンクロtron用超伝導電磁石の開発を進めている。実機を想定した熱計算にて、コイル 1 台 (45 度) あたり冷凍機 3 台の構成でランプ速度 0.64 T/s の運用が可能である見込みを得た。さらなる検証として、実機と同一断面の直線型ショートモデルコイルを製作し、実機運用に近いパターン運転試験にて冷凍機及びコイルの温度変化を確認した。試験結果と計算結果が 0.1 K 以下のオーダーで一致し、熱計算の正確性が確認でき、小型冷凍機による伝導冷却方式で運用可能な見込みを得た。今後、さらにランプ速度を上げた試験等を実施し、シンクロtron用偏向電磁石の超伝導化への成立性を検証していく。最終的には、本試験機で得られた知見を基に実機製造を進める予定である。

参考文献

- [1] <https://www.qst.go.jp/site/qst-kakushin/39695.html>
- [2] T. Fujimoto *et al.*, proceedings of PASJ2020, FRPP49.