

DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE COIL FOR FFAG SUPERCONDUCTING MAGNET

Tetsuhiro Obana^{1,A)}, Toru Ogitsu^{B)}, Tatsushi Nakamoto^{B)}, Ken-ichi Sasaki^{B)}, Akira Yamamoto^{B)},
Masahiro Yoshimoto^{C)}, Yoshiharu Mori^{D)}, Tomofumi Oriyasa^{E)}, Toshiro Fujii^{E)}, Masaaki Iwasa^{E)}

^{A)} National Institute for Fusion Science

322-6 Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu, 305-0801

^{B)} KEK High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

^{C)} Japan Atomic Energy Agency

2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1195

^{D)} Kyoto University Research Reactor Institute

Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka, 590-0494

^{E)} Toshiba Corporation

2-4 Suehiro-machi, Tsurumi-ku, Yokohama, Kanagawa, 230-0045

Abstract

A superconducting magnet for the Fixed Field Alternating Gradient (FFAG) accelerator has been studied. As the first prototype superconducting coil, the design of the coil configuration that consists of left-right asymmetric cross-section and large aperture has been performed. The prototype coil has been developed by using a 6-axis Computer Numerical Control (CNC) winding machine. The magnetic field generated by the prototype coil has been measured in room temperature. As a result, the technical feasibility has been verified with the prototype coil development and the performance test.

FFAG加速器用超伝導電磁石のモデルコイル開発

1. はじめに

粒子線がん治療用固定磁場強集束 (Fixed Field Alternating Gradient=FFAG) 加速器のコンパクト化及び省エネ化の実現に向けて、FFAG電磁石の超伝導化に関する研究開発を行っている [1]。一定磁場で使用されるFFAG電磁石は、交流損失等の諸問題が発生しないため、超伝導化に適している [2]。

今回は、コンピュータ制御された巻線機を用いて製作したモデルコイルについて報告する。

2. モデルコイルの設計

2.1 FFAGで要求される磁場分布

FFAG加速器の基本原理由り、粒子が通過する軌道領域において、式(1)を満たす磁場分布を発生する必要がある [3]。

$$B(x) = B_0 \left(\frac{R_0 + x}{R_0} \right)^k \dots (1)$$

k は k 値 (Field index)、 B は垂直磁場、 B_0 は電磁石中心での垂直磁場、 x は電磁石中心からの距離、 R_0 は加速器中心と電磁石中心間の距離を示す。

2.2 積分磁場を用いた磁場設計

FFAG加速器用超伝導電磁石は、従来の加速器用超伝導電磁石と異なり、コイル直線部に対してコイルエンド部の割合が大きい。そのため、コイルエンド部による磁場分布への影響が大きいため、各コイル断面で設計要求を満たす磁場を発生するのは困難である。そこで、本研究では、積分磁場 BL によって、設計要求を実現するコイル設計を行った。その際、積分磁場をより詳細に評価するために、*local k+1* 式 (2) を用いた。

$$local\ k+1 = \frac{d(BL)}{dx} \frac{R_0 + x}{BL} \dots (2)$$

2.3 モデルコイルの形状

積分磁場で設計要求を満たす 3 次元コイル形状を設計した。設計する際に使用したモデルコイルのパラメータを表 1 に示す。モデルコイル形状は、口径

¹ E-mail: obana.tetsuhiro@LHD.nifs.ac.jp

が円形で且つ左右非対称なコイル断面をもつ鞍型コイル形状である。このコイル形状を用いることで、1層のみで要求される積分磁場分布を実現することが可能である。各視点から見たモデルコイルの概略図を、図1及び図2に示す。

設計したモデルコイルの積分磁場計算結果を図3に示す。図3より、設計したモデルコイルの積分磁場が目標値 ($local\ k + 1 = 11$) に対して、かなり近い値であることがわかる。

表1：モデルコイルのパラメータ

層数	2
ターン数@ 1層あたり	120
k 値	10
径	896 mm
全長	552 mm
使用する超伝導線	
材料	NbTi/Cu
径	0.9 mm

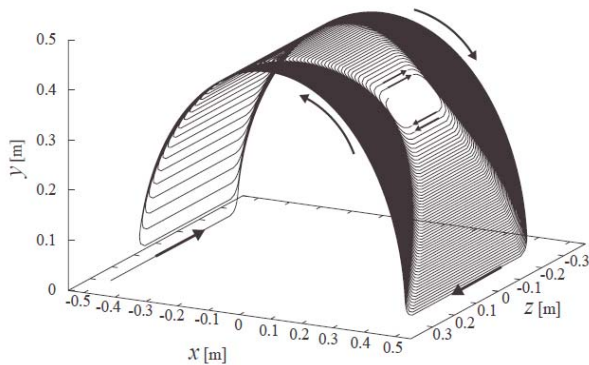


図1：設計した1層目モデルコイルの鳥瞰図 (図中の矢印は、電流の向きを示す)

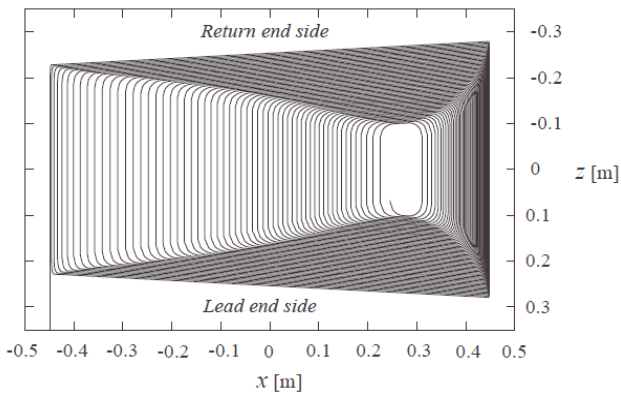


図2：設計した1層目モデルコイルの平面図 (x - z 平面図)

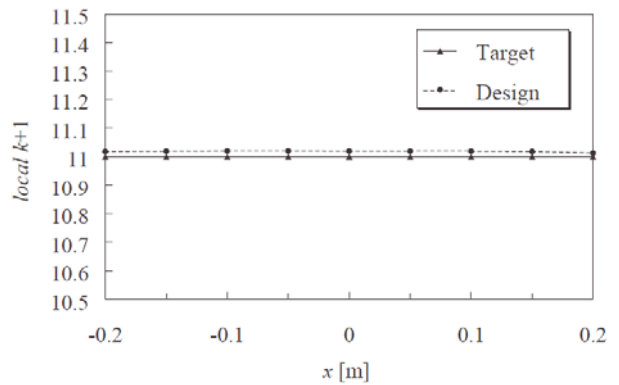


図3：積分磁場計算結果

3. モデルコイルの製作

楕円筒コイル巻線にも対応可能な6軸を持つコンピュータ数値制御 (CNC) 巻線機により、径0.9mmのNbTi/Cu超伝導線を用いて、モデルコイルを製作した。製作の際、始めに、1層目の巻線を行い、その後、ターン間のスペースを樹脂で含浸する。図4に、1層目巻線後の写真を示す。次に、含浸した1層目コイル上に、2層目コイルの巻線を行い、更に、2層目の樹脂含浸を行う。コイル製作後、コイル冷

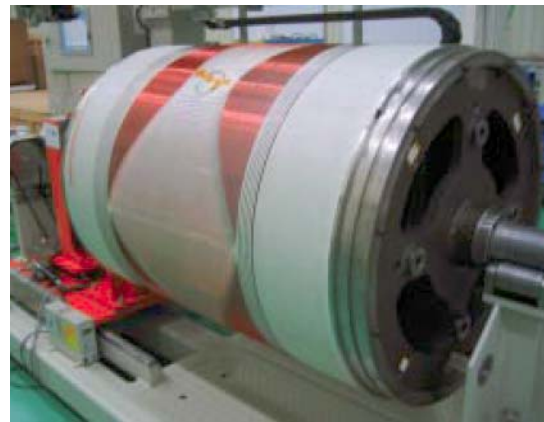


図4：モデルコイル1層目

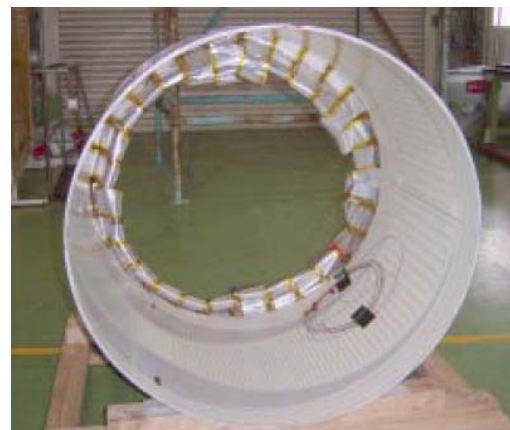
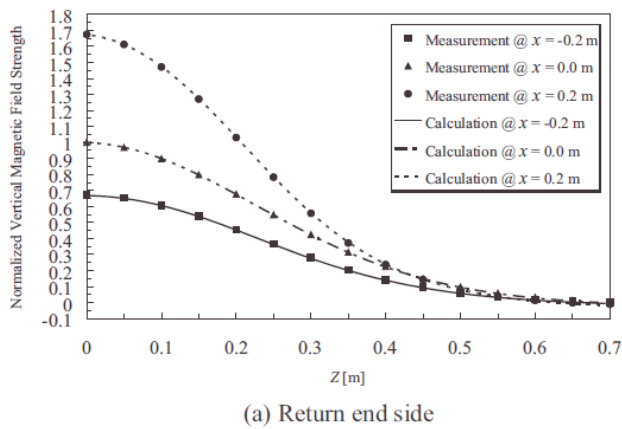


図5：モデルコイル

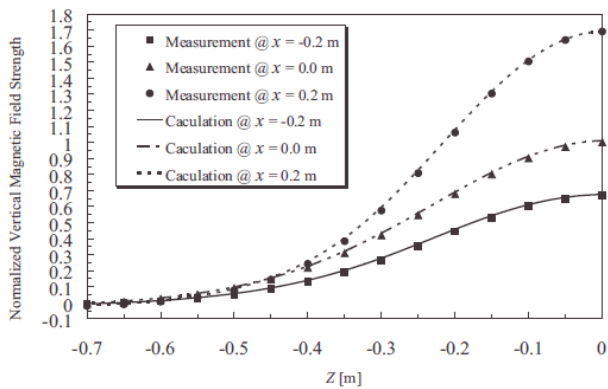
却用の純アルミストリップを、2層目コイル上に長手方向に沿って取り付け。また、電磁力支持用として、アルミ合金も取り付け。図5に、完成したモデルコイルの写真を示す。

4. 常温磁場測定

常温において、製作したモデルコイルに通電を行い、コイルのmid-plane上 ($y = 0.0$ m) で発生した垂直磁場 (B_y) を3軸移動架台に取り付けたホールプローブによって測定した。本測定では、常温での通電のため、通電可能な電流値は数A程度となり、mid-plane上での発生垂直磁場は、数Gauss程度となった。そこで、低磁場測定の際、残留磁場の影響を取り除くため、各通電電流値に対する垂直磁場を測定し、得られた測定結果を最小二乗法により補正した。図6と図7に、コイルz方向(長手方向)とコイルx方向(径方向)に沿った磁場測定結果及び計算結果を示す。図より、ビーム通過領域である $x = -0.2$ m から $x = 0.2$ m の領域において、測定結果と計算結果がほぼ一致していることがわかる。したがって、FFAG加速器用電磁石に要求される非線形磁場分布を発生することが可能なモデルコイルを設計通りに製作することができた。

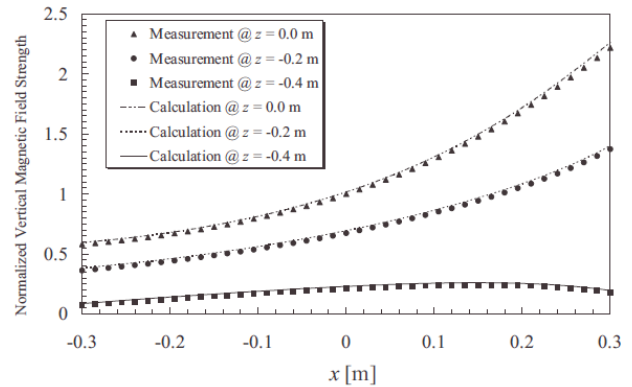


(a) Return end side

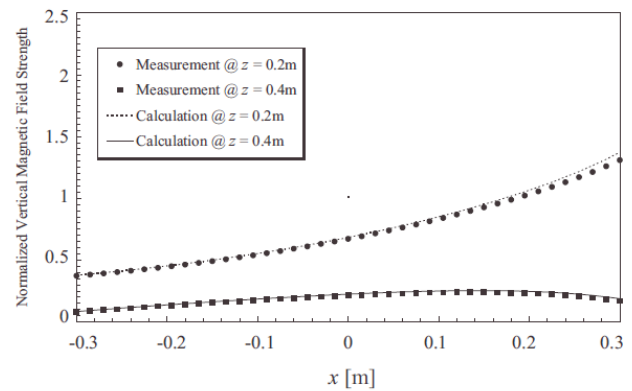


(b) Lead end side

図6 : z 方向 (長手方向) の磁場分布



(a) Return end side



(b) Lead end side

図7 : x 方向 (径方向) の磁場分布

5. まとめ

FFAG加速器用超伝導電磁石の開発を目指して、モデルコイルの設計、製作、磁場測定を行った。モデルコイルの形状は、積分磁場で設計要求を満たすコイル形状を採用した。6軸を備えたCNC巻線機によって、製作されたモデルコイルを用いて、常温磁場測定を行った。その結果、要求される非線形磁場分布を発生することが可能なモデルコイルを設計通りに開発できたことがわかった。

参考文献

- [1] T. Obana et al, "DEVELOPMENT OF A SUPERCONDUCTING MAGNET FOR THE FFAG ACCELERATOR", Proceedings of the 2nd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, p748-p75
- [2] M. Abdelsalam et al, "Superconducting Magnet Design for Fixed-Field Alternating-Gradient(FFAG) accelerator", IEEE Transactions on Magnetics, No.4, Vol.30, p2620-p2623
- [3] M. Yoshimoto et al, "The Magnet Design Study for the FFAG accelerator", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol.14, no.2, p397-p401, 2004