

重粒子線小型シンクロトロン用超伝導電磁石の磁場設計とショートコイルモデルによる励磁試験

MAGNETIC FIELD DESIGN OF THE SUPERCONDUCTING MAGNET FOR A HEAVY ION SYNCHROTRON AND THE EXCITATION TEST USING A SHORT COIL MODEL

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

^{A)} Accelerator Engineering Corporation (AEC)

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

^{C)} Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

^{D)} Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN)

Abstract

A synchrotron employing superconducting technology has been developing to realize further compactness and low-cost facility for carbon-ion radiotherapy. This superconducting magnet is adapting a conducting cooling system to realize a repeating operation with a ramp rate of 0.7 T/s. Low AC-loss superconducting wire having $\phi 1.0$ mm was newly developed, and it is wound up on the coil bobbin which is made of G-FRP by the method of surface winding so as to obtain the $\cos\theta$ current distribution. The $\cos\theta$ current distribution cannot be maintained at the end of magnet, therefore, multipole magnetic fields are generated. Especially, large sextupole magnetic field is generated and it causes a reduction of a dynamic aperture. We developed a reduction method of the sextupole magnetic field in consideration of a beta-function. To verify the correctness of our magnetic field design, we have manufactured a short-coil model magnet. We will report the magnetic field design of the superconducting synchrotron as well as the result of magnetic field measurement of the model magnet.

1. はじめに

量研機構(QST)が進めている量子メスプロジェクト[1]において、超伝導技術を用いたシンクロトロンの開発を進めている[2]。本超伝導シンクロトロンは 90 度の偏向電磁石 4 台で構成され、0.3 T から 3.5 T の磁場を連続的に 10 秒周期で上げ下げを実現する冷凍機伝熱冷却方式を採用し、 $q/A = 1/2$ のイオンを 4 MeV/u から水中飛程 30 cm に相当する 430 MeV/u まで加速する。リング周長を短くするため、偏向電磁石の中に二極コイルと四極コイルを同心上に重ねて巻く機能結合型を採用している[3]。これにより、従来型と比較して周長で半分以下となる 28 m 程度のシンクロトロンとなる計画である。Table 1 は本超伝導電磁石に要求される仕様をまとめたものである。現行の巻き線機の都合上 45 度のコイルを 2 つ近接に配置することで 90 度の偏向電磁石としている。マルチターン入射を採用することから必要な安定磁場領域は水平・垂直で異なるため、二極磁場の起磁力を下げるために楕円形状のコイル配置を採用することとした。またシンクロトロンのシミュレーション結果を参照し、有効磁場領域は可能な限り狭く、磁場安定度に関しては可能な限り緩和することで、コンパクトで低い起磁力となるようにしている。

[#] t.fujimoto@aec-beam.co.jp

Table 1: Specifications for the Superconducting Magnet

Bending angle	[deg]	90 (45×2)
Bending radius	[m]	1.89
Field ramp speed	[T/s]	0.7
Maximum dipole field	[T]	3.5
Maximum field gradient	[T/m]	2
Effective magnetic field for injection beam (Hori., Vert.)	[mm]	(±30, ±19)
Effective magnetic field for extraction beam (Hori., Vert.)	[mm]	(±47, ±8)
Field uniformity (dipole)		$< \pm 2.5 \times 10^{-4}$
Field uniformity (quadrupole)		$< \pm 1 \times 10^{-3}$

超伝導線には新たに開発した $\phi 1$ mm の低 AC ロス線を採用する。負荷率 70% @ 4.2 K 程度となるように励磁電流を決定し、265 A を最大励磁電流とした。その結果、必要なコイルターン数は二極コイルで 1070 Turn/pole となった。このコイルは G-FRP 製のコイル巻枠上にサーフェスワインディングにより巻かれる。二極磁場は $\cos\theta$ 、四極磁場は $\cos 2\theta$ の電流分布となるようにコイル配置を決定した。Figure 1 に二極、四極コイルの配置を示す。

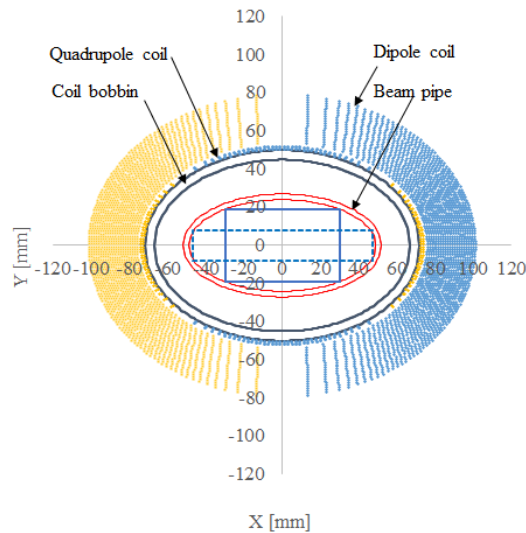


Figure 1: Cross-sectional view of the superconducting coil. Dipole and quadrupole coils are wound up on the coil bobbin concentrically.

二極コイル 22 層、四極コイル 2 層の構成となっている。磁石中心は $\cos\theta$ の電流分布が得られるコイル配置を実現できるが、コイル端部ではコイル取り回しの関係上、この電流分布を維持できない。よって磁場中に多極成分が生じる。とりわけ二極コイルが作る六極磁場成分が非常に大きく、これがダイナミックアパーチャーを狭める要因となる。コイル端部の短い区間においてもベータ関数が増加することから、ベータ関数を考慮した六極磁場成分補正が必要であった。サーフェスワインディングによる巻線ではコイルを任意形状に巻線固着できることから、これを利用した六極磁場成分補正方法を考案した。また、磁場設計の正当性を確認するためショートコイルモデル超伝導電磁石の製作を行い、その磁場測定を行ったので合わせて報告する。

2. コイル端部六極磁場成分補正

超伝導コイルはコイル端部で鞍巻き状に巻かれる。この部分ではコイル配置が $\cos\theta$ の電流分布を作る配置とならないため、コイル端部には多極成分が生じる。特に六極磁場成分が大きく、シンクロトロンでのシミュレーションにおいてもダイナミックアパーチャーが狭まり、ビームロスが生じることが分かっている。Figure 2 は二極コイルが作るコイル端部の六極磁場成分を示している。コイル内側と外側で極性が異なる六極磁場が生じる。本シンクロトロンはコイル端部の短い領域においてもベータ関数が増加する。広いダイナミックアパーチャーを確保するためには、六極磁場成分をただ低減させるだけでなく、ベータ関数を考慮した六極磁場成分の補正が必要となる。ここでは六極磁場成分の補正について検討を行った。

本超伝導電磁石では $\phi 1\text{mm}$ のモノリス線をサーフェスワインディング法によりコイル巻枠上に三次元巻線を行う。本方法では二極コイル上に $\cos n\theta$ (n :整数) の高次成分を容易に乗せることが可能である。これを利用してコイル端部に発生している六極磁場成分の補正を考えた。コイル端部に発生している六極磁場成分を打ち消す極性の

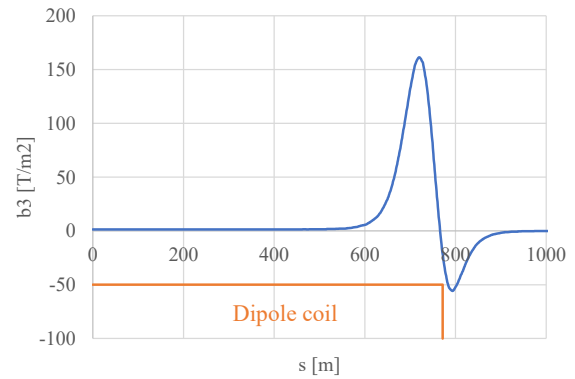


Figure 2: Sextupole magnetic field which occurs in the edge of dipole coil.

b_3 成分、即ち $\cos 3\theta$ の電流分布を二極コイルの端部のみに乗せる方法である。この方法ではコイル端部に乗せる b_3 の大きさを調整するのみで、ダイナミックアパーチャーを広く確保できる六極磁場成分の分布を作ることが可能である。Figure 3 はコイル端部の巻き線の展開図を示している。磁石中心は $\cos\theta$ のコイル配置、コイル端部は $\cos\theta + \cos 3\theta$ のコイル配置を作成し、コイル配置のずれを直線的に接続する構成となっている。本シンクロトロンではコイル端部の短い領域においてもベータ関数が増加することから、六極磁場が分布する領域をできるだけ狭める必要がある。そこで層ごとに $\cos\theta$ 部分の長さを変える調整を行っている。

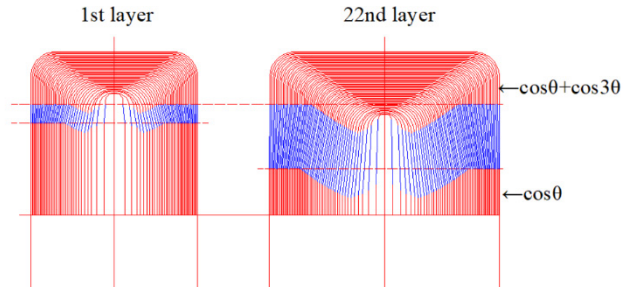


Figure 3: An arrangement of the coil edge for a correcting of the sextupole magnetic field.

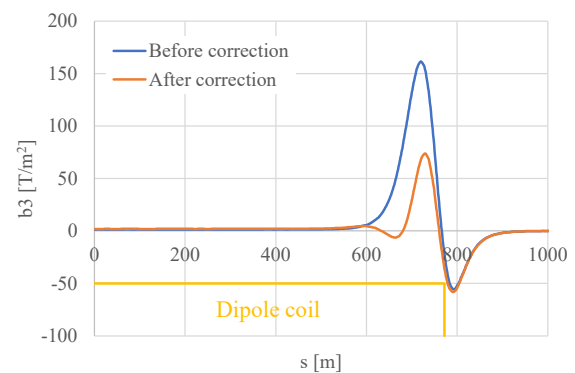


Figure 4: Comparison of the sextupole magnetic field at coil edge between before and after adjustment.

Figure 4 はコイル端部六極磁場成分補正前後の比較を行ったものである。本方法では二極コイル外側に発生する六極磁場を変えることが出来ないが、コイル内側六極成分を低減し、バランスの良い分布を形成できている。

本シンクロトロンにおいては、六極磁場成分により $Q_x+Q_y=3$ が励起され、これがダイナミックアパーチャーを狭める要因となる。特にスペースチャージによるチューンスプレッドが大きい低磁場時に影響が大きいことから、低磁場時にベータ関数を考慮した六極磁場の積分が 0 になるような条件を求めた。その時の結果を Fig. 5 に示す。磁石入口と出口でベータ関数が異なるが、 $\beta_x^{0.5} \times \beta_y \times K_2$ を磁石全体で積分すると 0 になっている。

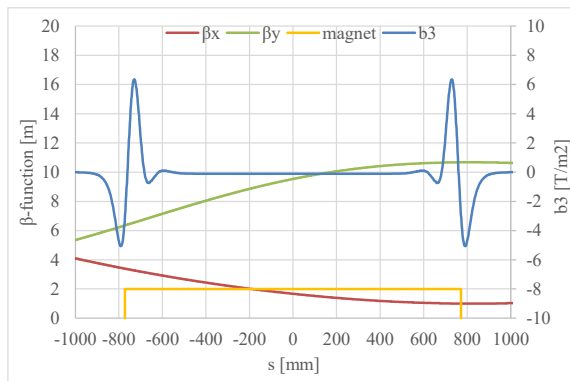


Figure 5: Sextupole magnet field of the dipole coil after adjusting the sextupole distribution and size so as to keep large dynamic aperture.

3. ショートコイルモデル電磁石の磁場測定

これまで行ってきた磁場設計および繰り返し運転に対する温度設計[4]の正当性の検証、また楕円巻棒上への巻線精度の確認等を行うため、ショートコイルモデル電磁石の作成、および試験を行った。上記検証が目的のため、ショートコイルモデル電磁石はコイル長 400 mm の直線形状で製作している。偏向電磁石では湾曲させることにより四極磁場成分が生じる。実機ではこの四極磁場をキャンセルするように二極コイルに四極成分を乗せた $\cos\theta+\cos2\theta$ のコイル配置とする。本モデル電磁石は直線であるが、湾曲させたときに生じる四極成分をキャンセルするコイル配置をそのまま使用している。

3.1 常温磁場測定

冷却前の常温にて励磁電流 0.6 A で磁場測定を行った。ホール素子はミッドプレーン上の $x=0, \pm 30, \pm 40$ mm に配置し、ビーム軸方向に $s=\pm 300$ mm の範囲でマップ測定を行った。Figure 6 は磁石中心の磁場分布を示している。測定結果を 265 A 換算したものであるが、中心磁場 $B_y=3.562$ T が得られている。鉄ヨークの飽和を考慮しない場合の 3D 計算結果は $B_y=3.525$ T であり、ほぼ設計通りの中心磁場が得られている。また、磁場分布を見ると 70 gauss 程度の非常に低い磁場を測定しているため、ばらつきのある結果となっているが、おおよそ設計通りの分布が得られている。

Figure 7 はビーム軸方向の六極磁場の磁場測定結果を 3D 計算結果と比較したものである。測定点が少ない

ため高次の関数でフィッティングが出来ず、3 次関数でフィッティングした結果である。結果を見ると、コイル内側の六極磁場ピーク値にずれが見られるが、六極磁場が分布している範囲などよく一致していると言える。

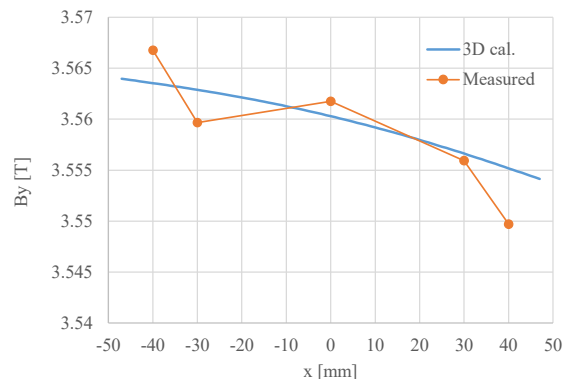


Figure 6: The dipole magnetic field distribution which was converted into 265 A.

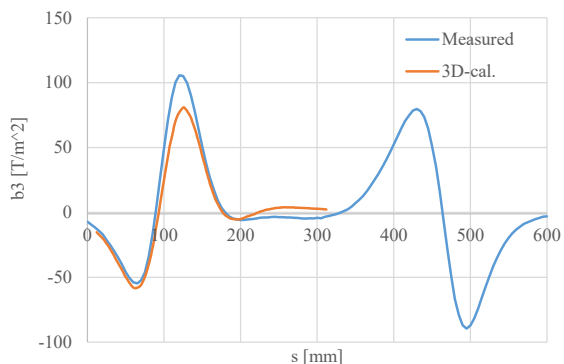


Figure 7: Comparison of the sextupole magnetic field between the result of field measurement result and 3D calculation.

3.2 低温磁場測定

モデル電磁石の冷却後、低温磁場測定を行った。本モデル電磁石はボアの中も低温に冷却する構造のため、磁石中心のミッドプレーン上 $x=0, \pm 30, \pm 40$ mm に固定したホール素子を使って測定を行った。ホール素子も 4K 程度まで冷却された状態であるが、極低温では温度依存性が非常に大きくなるため、ホール素子に張り付けたヒーターを使って 100 K 程度に温めて測定は行った。

Figure 8 は 265 A で励磁した時の磁場測定結果を 3D 磁場計算結果と比較したものである。中心磁場は $B_y=3.503$ T が得られ、3D 計算結果とほぼ一致している。

磁場分布はばらつきが大きく、ホール素子の換算係数およびオフセットの再確認が必要であるが、おおよそ 3D 磁場計算結果と同じ傾向が得られていると言える。

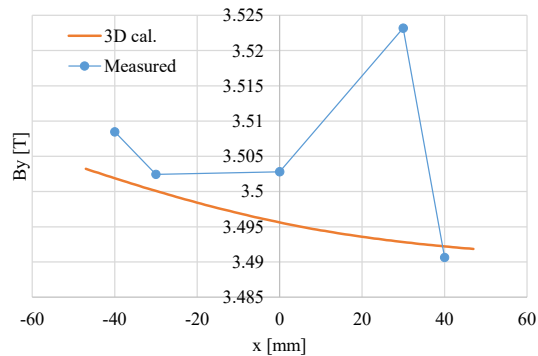


Figure 8: Comparison of the dipole magnetic field between the result of field measurement and 3D calculation under the excitation current of 265 A.

4. まとめ

量研機構で進めている量子メスプロジェクトの一つである、シンクロトン用超伝導電磁石の電磁場設計を行った。コイル端部に生じる六極磁場成分が $Q_x+Q_y=3$ の共鳴を励起し、ダイナミックアパーチャーを低減させることから、この六極磁場成分の改善を検討した。その結果、二極コイル端部のコイル配置を $\cos\theta+\cos3\theta$ とし、 $\cos3\theta$ の大きさを調整することで六極磁場分布の改善を行う方法を考案した。

一方、これまでの磁場設計、温度設計の正当性を確認するために、ショートコイルモデルの製作を行い、常温および低温での磁場測定を行った。その結果、中心磁場はほぼ設計通り得られていることを確認した。ただし、磁場分布にはばらつきが見られた。高い磁場安定度が要求される電磁石のため、使用したホール素子の再校正を行い、また、ホール素子の温度コントロールを高い精度で行うなど、磁場測定精度を上げて再度測定する予定である。

参考文献

- [1] <https://www.qst.go.jp/site/qst-kakushin/39695.html>
- [2] K. Mizushima *et al.*, proceedings of PASJ2017, WEP131.
- [3] Y. Iwata *et al.*, “Development of Curved Combined-Function Superconducting Magnets for a Heavy-Ion Rotating Gantry”, IEEE Trans. Appl. Supercond., 24, 2004, 4400505.
- [4] S. Amano *et al.*, proceedings of PASJ2021, MOP001.