

重粒子線小型シンクロトロン用超伝導電磁石の設計 II

DESIGN OF THE SUPERCONDUCTING MAGNET FOR A COMPACT HEAVY-ION SYNCHROTRON II

藤本哲也^{#,A)}, 岩田佳之^{B)}, 水島康太^{B)}, 阿部康志^{B)}, 浦田昌身^{B)}, 野田悦夫^{B)}, 白井敏之^{B)}
Tetsuya Fujimoto^{#,A)}, Yoshiyuki Iwata^{B)}, Kota Mizushima^{B)}, Yasushi Abe^{B)}, Masami Urata^{B)}, Etsuo Noda^{B)},
Toshiyuki Shirai^{B)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation (AEC)

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

Abstract

QST has started the project of a quantum scalpel to realize further compactness and low-cost facility for carbon-ion radiotherapy (CIRT). One of the quantum scalpel projects is the development of synchrotron employing superconducting technology and detailed designing of the superconducting magnet is advancing. Maximum dipole field of 3.5 T is adapted, and it is operated at a ramp speed of 0.7 T/s. To suppress the coil load factor less than 70%, the maximum excitation current is determined to be 265A. In addition, to achieve a lower magnetomotive force with a compactness magnet shape, the effective magnetic field size and the magnetic field uniformity are reconsidered based on the synchrotron's simulation. These are described in this report.

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]のテーマの一つに、超伝導技術を用いたシンクロトロンの開発がある[2]。これは従来型炭素線シンクロトロンを更に小型化、低コスト化することで普及を推進することが目的であり、これによってより多くのがん患者が容易に炭素線治療を選択できるようになることが期待できる。

現在検討が進められている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、最大二極磁場は 3.5 T、 $q/A = 1/2$ 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た[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。前回報告[4]では最大二極磁場を 4 T としていたが、水平方向電磁石外径が大きくなることから、シンクロトロンからの遅い取り出しビーム軌道との干渉が問題となっていた。また、コイル負荷率も 80% と磁場の上げ下げを繰り返すシンクロトロン用電磁石としては厳しい条件となっていた。そこで最大磁場を見直し、最大経験磁場の下げることでより現実的な負荷率、磁石外径となるように仕様を変更した。検討の結果、シンクロトロン用超伝導電磁石の最大磁場は 3.5 T が最適と判断した。その他、治療照射に必要な粒子数を蓄積するため、マルチターン入射が適用されることから、必要な安定磁場領域は水平・垂直で異なる。そこで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。本発表ではシンクロトロン用超伝導電磁石の磁場設計について報告する。

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) | | $< \pm 1 \times 10^{-3}$ |

2. 磁場設計

2.1 負荷曲線

医療用シンクロトロンでは、治療時間短縮のため、できるだけ速い磁場変化率が求められる。本シンクロトロンでは、磁場変化率 $dB/dt = 0.7$ T/s、最大エネルギーまでの加速時間 5 秒を目標とした。このような超伝導電磁石としては速い磁場変化を実現するためには、交流損失のできるだけ低い超伝導線 (低 AC ロス線) が必要である。本磁場設計では、現在開発中の NbTi フィラメント径、ツイストピッチおよび Cu/CuNi/NbTi 比を最適化した低 AC

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

ロス線の使用を想定している。

シンクロトロン用超伝導電磁石では磁場の上げ下げを繰り返し行うため、AC ロスによる発熱によりベースの温度が高めになる。そこで温度マージンに余裕を持たせるため、負荷率 70%@4.2K 程度となるように励磁電流を決定した。Figure 1 はコイルの負荷曲線を示している。265A で負荷率 70%@4.2K となることから、これを最大励磁電流とした。この動作点における上限温度 (Tes: 分流開始温度) は 5.8K である。

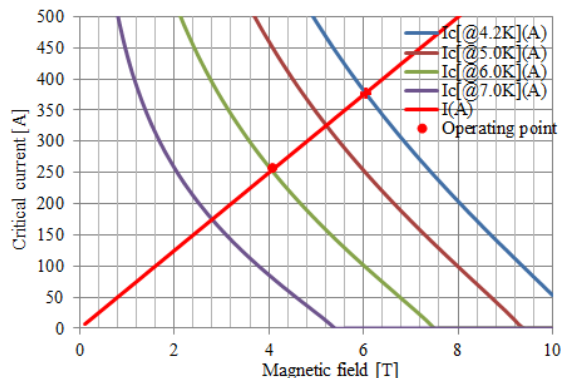


Figure 1: Load line for the synchrotron superconducting dipole coil. Maximum excitation current is determined to 265A under the 70% load factor.

2.2 コイル配置の決定

コイルは $\phi 1$ mm のモノリス線を使用し、サーフェスワインディングにより二極磁場を $\cos\theta$ 、四極磁場を $\cos 2\theta$ の電流分布となるように配置を考える。コイル巻枠は磁場変化による渦電流を考慮して、厚さ 5 mm の G-FRP で製作することを検討している。コイル巻枠とビームパイプ間に 70 K シールドスペースとして 15 mm 以上を確保しつつ、Table1 に示した磁場安定度が満たせるようにコイル

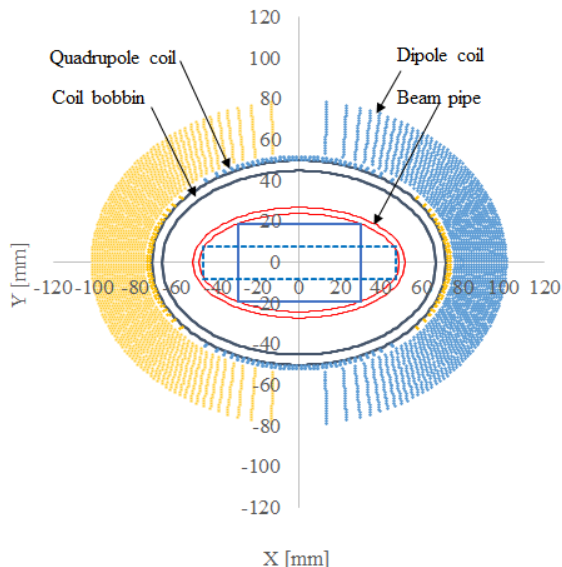


Figure 2: Cross-section of the superconducting coil. The dipole and the quadrupole coils are wound concentrically.

巻枠の水平・垂直比を決定した。設計したコイルの仕様を Table 2 に、またコイル断面を Fig. 2 に示す。今回、有効磁場領域や磁場安定度など、様々なパラメータを改善した結果、前回報告と比較してコイル巻枠サイズが ± 20 mm 程度小さくなり、起磁力は 4 割程度下げることができた。

Table 2: Parameters of the Synchrotron Superconducting Coil and its Bobbin

| | | |
|-------------------------------|-------------|-------|
| Coil bobbin size (H / V) | [mm] | 72/50 |
| Number of layers (dipole) | | 22 |
| Number of turns (dipole) | [Turn/pole] | 1070 |
| Number of layers (quadrupole) | | 2 |
| Number of turns (quadrupole) | [Turn/pole] | 36 |

2.3 ヨークサイズの決定

コイル外周に配置する鉄ヨーク(コールドヨーク)については二次元磁場計算コード POISSON を使って形状を決定する。内径寸法について、最初に鉄の透磁率を無限大として磁場安定度が仕様を満たすように水平・垂直の内径比を決定する。次に鉄の透磁率を与え、求めた内径比を維持しながらヨーク内径を変え、全ての磁場領域で仕様の磁場安定度が得られるヨーク内径を求める。ヨーク外径は鉄の飽和の影響が磁場安定度に生じないヨーク厚となるように決定する。Figure 3 は POISSON 計算モデルを示している。必要な磁場および磁場勾配が得られる起磁力は、二極で $NI=283.4$ kAT/pole、四極で $NI=5.6$ kAT/pole となった。Figure 4 は二極磁場安定度の励磁電流依存性を示している。有効磁場領域 $x=\pm 30$ mm に対して仕様の $dBy/By \leq 2.5 \times 10^{-4}$ が実現できている。Table3 は決定したヨークサイズを示している。磁石外径は(水平, 垂直)=(± 310 mm, ± 230 mm)となり、前回報告に比べてかなりコンパクトになり、シンクロトロンからの取り出しビームラインとの干渉が無いことも確認している。

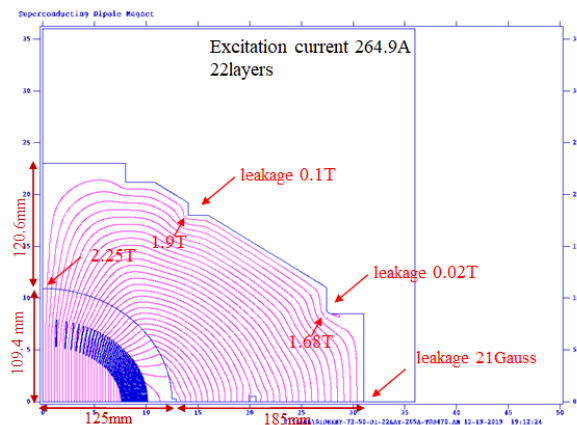


Figure 3: The magnetic field distribution at maximum current excitation that calculated by POISSON.

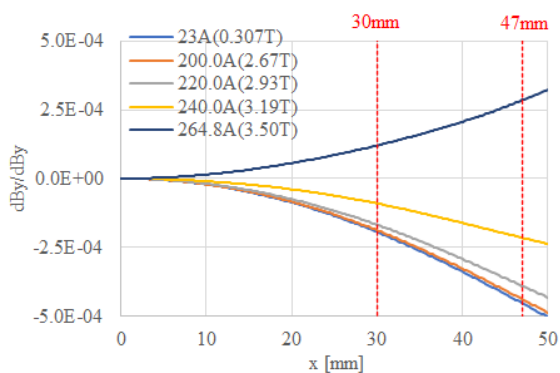


Figure 4: The field uniformity of dipole magnetic field depending on the field strength.

Table 3: The Iron Yoke Size

| | [mm] | |
|--------------------|-------|--|
| Inner diameter (H) | 125 | |
| Inner diameter (V) | 109.3 | |
| Outer diameter (H) | 310 | |
| Outer diameter (V) | 230 | |

2.4 三次元磁場計算

POISSON 二次元磁場計算によりコイルの基本配置およびヨーク断面を決定した後、三次元磁場計算を行った。計算には三次元磁場計算コード Opera-3D を使用した [5]。本電磁石はビーム軌道に沿ってコイルが湾曲する形状のため、磁場分布中に高次成分、特に目的とする磁場成分の一つ上の高次成分が現れる。よって二極コイルが作る磁場中には四極成分が生じるが、これは二極コイル配置に $\cos 2\theta$ の成分を持たせてキャンセルするようにした。

Figure 5 は Opera-3D による二極コイル計算モデルである。コイルエンド部分は鞍巻き形状とし、鉄ヨークとコイルのエンドは同じ長さに合わせている。

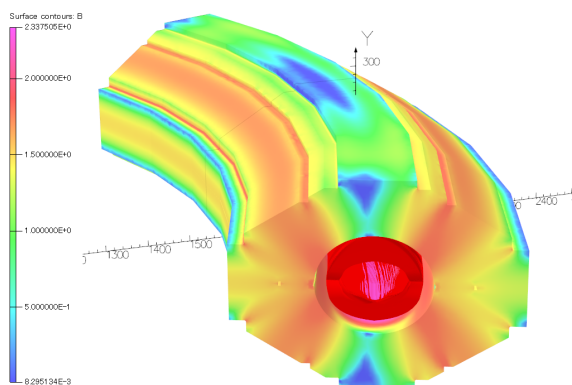


Figure 5: 3D image of the magnetic field distribution for the synchrotron superconducting magnet. A central dipole magnetic field is 3.5 T.

Figure 6 は二極磁場の ByL 積マップ (dByL/ByL) を示している。高い磁場安定度が要求される入射ビーム領域 ($x=\pm 30\text{mm}$) に対して、十分な磁場安定度が得られている。二極コイルの主なパラメータを Table 4 にまとめる。

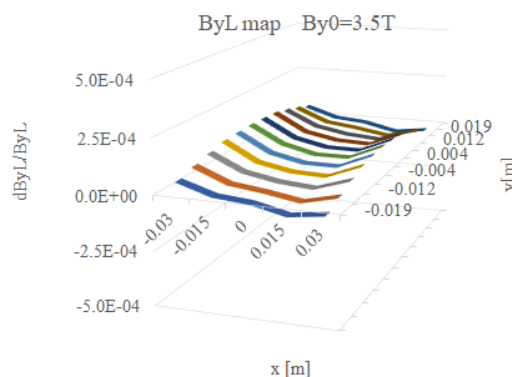


Figure 6: ByL map for the dipole magnetic field. Field uniformity of $<\pm 2.5 \times 10^{-4}$ is sufficiently obtained for the beam injection region.

同様に四極コイルについても三次元磁場計算を行い、GL 積マップを求めた。結果を Fig. 7 に示す。多少の六極成分が見られるが、磁場勾配安定度の要求仕様範囲に十分収まっている。四極コイルの主なパラメータを Table 5 にまとめる。

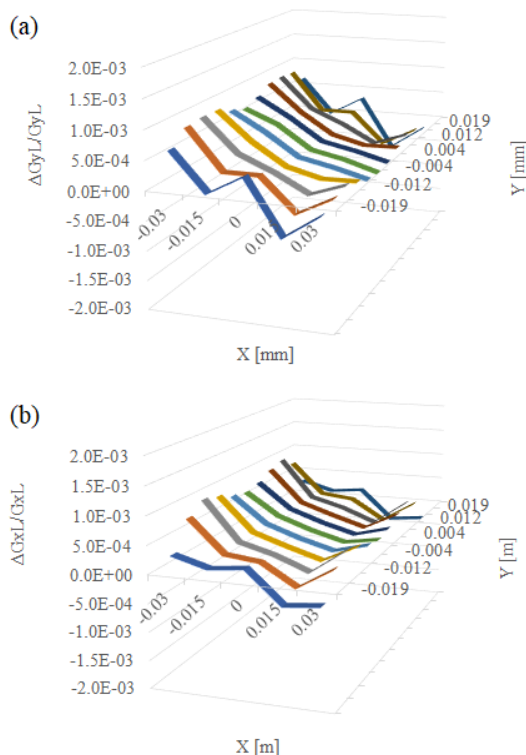


Figure 7: (a) GyL map and (b) GxL map for the quadrupole magnetic field. The field uniformity of $<\pm 1.0 \times 10^{-4}$ is obtained for the beam injection region.

Table 4: The Main Parameters for the Dipole Coil

| | | |
|---------------------|------------|-------|
| Magnetomotive force | [kAT/pole] | 283.4 |
| Stored energy | [kJ] | 181.4 |
| Inductance | [H] | 5.17 |
| Excitation voltage | [V] | 250.1 |

Table 5: The Main Parameters for the Quadrupole Coil

| | | |
|---------------------|------------|--------|
| Magnetomotive force | [kAT/pole] | 5.6 |
| Stored energy | [J] | 101.75 |
| Inductance | [mH] | 8.36 |
| Excitation voltage | [V] | 0.3 |

2.5 コイル巻枠変形の磁場分布への影響

コイル巻枠は磁場変化により生じる渦電流を考慮し G-FRP で製作する。G-FRP は金属と比較して変形しやすく、コイル固定のための締め付けにより変形する可能性がある。また G-FRP 自身の製作精度の問題、楕円形状のため電磁力による変形も考えられる。これらによる巻枠変形による磁場分布への影響を調査した。

Figure8 はコイル巻枠変形を調査するモデルである。水平および垂直線上から $x=y=0$ の方向に引っ張られる、または離れるようにコイルをずらして磁場分布への影響を計算した。ここでの計算には POISSON を使用した。

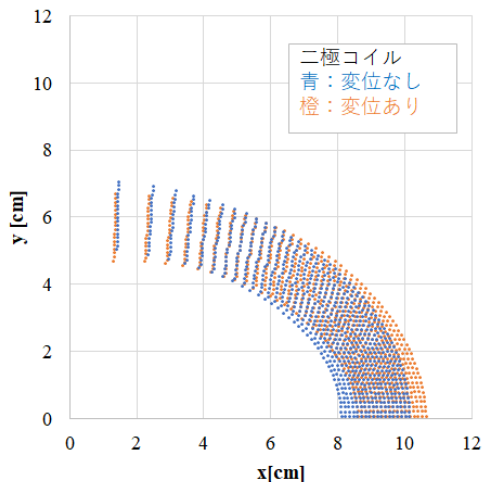


Figure 8: The coil displacement image corresponding to the coil bobbin distortion.

Figure 9 は巻枠変形による磁場安定度の変化を示している。変形の大きさよりも水平・垂直の変形の差が磁場安定度に大きく影響することが分かった。この結果から、巻枠変形によるコイル配置のずれ許容量は水平と垂直のずれ量の差分 ($\Delta x - \Delta y$) が < 0.1 mm 以下であることが分かった。よって、巻枠に関する製作誤差の許容量も < 0.1 mm となり、それ以上のずれは研磨等による修正が必要となる。

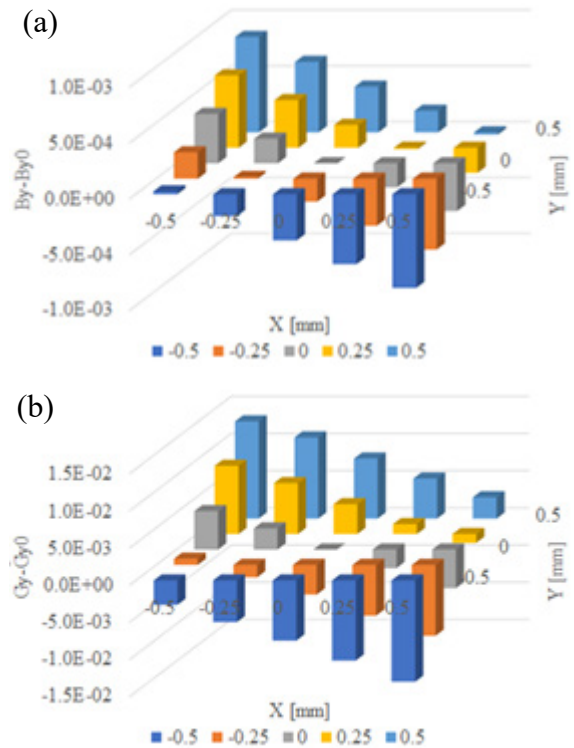


Figure 9: The sensitivity for the magnetic field uniformity corresponding to the coil bobbin distortion. (a) The dipole field (b) the quadrupole field.

3. 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基本設計を行った。今回、起磁力、励磁電圧、コイルの負荷率など、より現実的な値となるように仕様を見直し、中心磁場 $B_y = 3.5$ T を目標に設計を行うこととした。その結果、径方向の磁石サイズがコンパクトになり、問題となっていたシンクロトンからの取り出しビーム軌道と電磁石の干渉も解消されることを確認した。

現在、これまでの磁場設計、温度設計の妥当性を確認するため、ショートコイルモデルの製作を行っているところである。この結果をフィードバックすることで、最終的な実機の磁場設計を行う予定である。

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] T. Fujimoto *et al.*, proceedings of PASJ2019, THPH019.
- [5] Cobham Opera-3d code; <http://operafea.com/>