

## 次世代回転ガントリー用超電導電磁石の磁場設計

### MAGNETIC FIELD DESIGN OF SUPERCONDUCTING MAGNET FOR NEXT GENERATION ROTATING GANTRY

高山茂貴<sup>#, A)</sup>, 折笠朝文<sup>A)</sup>, 長本義史<sup>A)</sup>, 吉行健<sup>A)</sup>

Shigeki Takayama<sup>#, A)</sup>, Tomofumi Oriyasa<sup>A)</sup>, Yoshifumi Nagamoto<sup>A)</sup>, Takeshi Yoshiyuki<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Toshiba Corporation

#### Abstract

In collaboration with the National Institute of Radiological Sciences, the superconducting rotating gantry for heavy-ion radiotherapy has developed. By using combined-function superconducting magnets, the size of rotating gantry has been reduced to the size which is comparable to those for the proton gantry. The manufacturing, installation and commissioning of this rotating gantry has been completed, and therapeutic irradiation as a clinical trial is on-going.

Currently, we are conducting design studies aiming at further downsizing of the rotating gantry. It was clarified that the gantry size can be greatly reduced by increasing the dipole field, extending the coil length and improving the scanning magnet. We will report a recent status of the design of next generation superconducting rotating-gantry.

#### 1. はじめに

これまでに放射線医学総合研究所(NIRS)と共同で重粒子線がん治療装置用超電導回転ガントリー(NIRS type)の開発を行っている[1]。本がん治療装置では最大エネルギー430 MeV/uの重粒子線(炭素6価イオン)をがん患部に3次元スキャンニング照射することで治療を行っており、照射の際に回転ガントリーを用いることで患者の周囲360度任意の方向から重粒子線を照射することが可能となり、患部への高い線量集中度が実現できる。一方で重粒子線においては、その大きな磁気剛性のために、装置全体が大型となる。そこで本回転ガントリーにおいては超電導電磁石を用いることで、軸長約13m、回転半径約5.5mと陽子線用回転ガントリーと同程度への小型化を達成している。これまでに本回転ガントリーの製造・据付・調整が完了し[2]、現在臨床試験としての治療照射が実施されている。

上記回転ガントリーの更なる小型化を目指し、現在設計検討を実施している。本稿では上記小型回転ガントリーの構成および機能結合型超電導電磁石の磁場設計結果に関して報告を行う。

#### 2. ガントリーレイアウト・光学設計

現在検討しているガントリーレイアウトをFigure 1に示す。最大偏向磁場を従来(NIRS type)の2.88 Tから3.0 T以上に高磁場化すると共に、1コイルあたりの偏向角を26度から最大45度に長尺化する事で、これまで10台の超電導電磁石で構成されていたものを6台構成(BM01~BM06)としている。さらに二極コイルと四極コイルを同軸配置することで機能結合化しており、小型化とラティス成立の自由度を両立する構成とした。

上記超電導コイルはそれぞれ個別の電源で励磁され、独立に制御することが可能となっている。超電導電磁石以外に、本回転ガントリーは従来(NIRS type)と同様2対のステアリング電磁石、2台のビームモニタ、1対のス

キャンニング電磁石で構成され、上述のような超電導電磁石の変更とスキャンニング電磁石の改良により、大幅な小型化を実現している。さらにスキャンニング電磁石をガントリービームラインの最下流に配置することで、大口径の電磁石を削除し小口径の電磁石のみの構成とした。

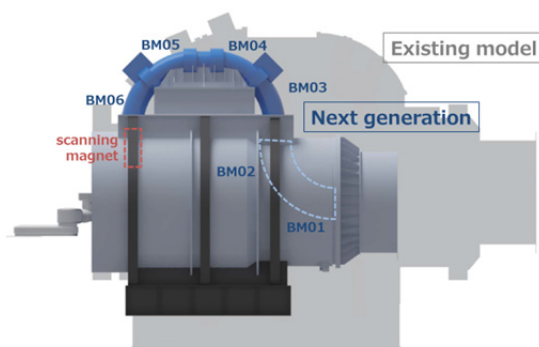


Figure 1: Layout of the next generation rotating gantry.

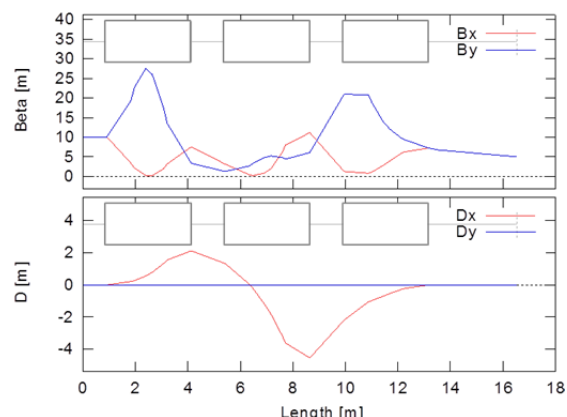


Figure 2: Beta and dispersion function of the gantry beam line.

<sup>#</sup> shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

上記レイアウトにおいて検討した回転ガントリービームラインでの光学設計結果を Figure 2 に示す。アイソセクターでディスパージョンフリーとすると共に、回転対応のため、入口と出口とで  $\beta$  関数などの twiss パラメータの水平方向成分と垂直方向成分をそろえるよう調整し、四極磁場の出力を検討している。

### 3. 超電導電磁石設計

上記光学設計から要求される磁石性能をもとに磁石設計を実施した。磁石の断面構成を Figure 3 に示す。参照半径を 20 mm、ビームダクト内半径を 30 mm とし、その外径側に  $\cos \theta$  状の超電導コイルを配置している。超電導コイルはビーム軌道に沿って湾曲した鞍型形状としており、二極コイルと四極コイルを同軸に配置した構造としている。

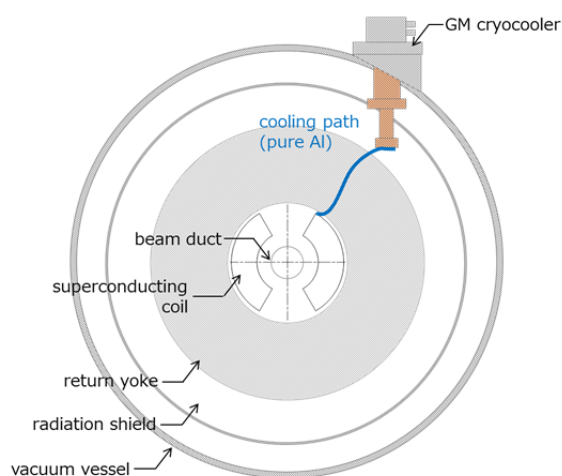


Figure 3: Cross section of the superconducting magnet.

さらにコイルの外径側に電磁鋼板を積層したリターンヨークを配置することで、発生磁場の増加と電磁力の保持を行っている。コイルは NbTi 線材をサーフェスワインディング法で巻線するとした。本電磁石は回転対応のため 4 K 冷凍機による伝導冷却構造を採用しており、コイルと冷凍機のコールドヘッドを高純度アルミで接続することで冷却している。ガントリー全体として冷凍機台数は削減される計画。

コイル設計においては各層ごとに高次多極成分の除去を実施することで導体配置の最適化を実施した[3]。得られた導体配置をもとに 3 次元磁場解析を実施した。解析結果を Figure 4 に示す。より正確に磁場分布を得るため、本解析においては導体を 1 本 1 本モデル化しており、1 ターンを 8 本の曲線の組合せで構成している(ただし、必要に応じて直線を追加している)。

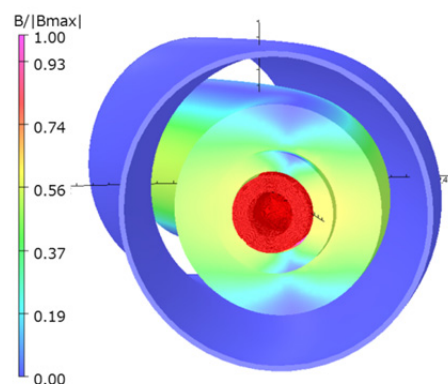


Figure 4: Result of magnetic field calculation.

また、コイルエンドでの誤差磁場を抑制するため 45 度の鉄心に加え、両端部に直線状で外径の小さいリターンヨークを追加している。真空容器は構造体として計算しており、鉄心と同様 45 度偏向部とその両端を直線状に延長した直線部とで構成している。

磁場解析の結果得られたビーム軌道上での BL 積均一度分布、GL 積均一度分布を Figure 5、6 に示す。ここで BL 積均一度及び GL 積均一度を評価する際、軌道の長さの差による積分値のズレを考慮して計算した。計算の結果、二極コイルを励磁した場合は四極成分と六極成分が、四極コイルを励磁した場合は六極成分が混入しており、これはコイル自身が長手方向に湾曲していることと、コイルエンドの形状によるものと想定される。ここでは上記多極成分を最外層のコイル配置で磁場補正することで、要求される均一度 ( $\leq 1.0 \times 10^{-3}$ ) を達成した。

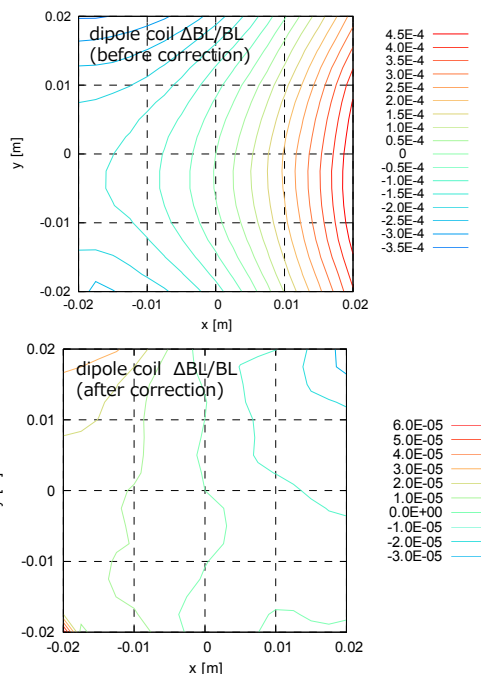


Figure 5: Uniformity of the BL products. Top: Before correction, Bottom: After correction.

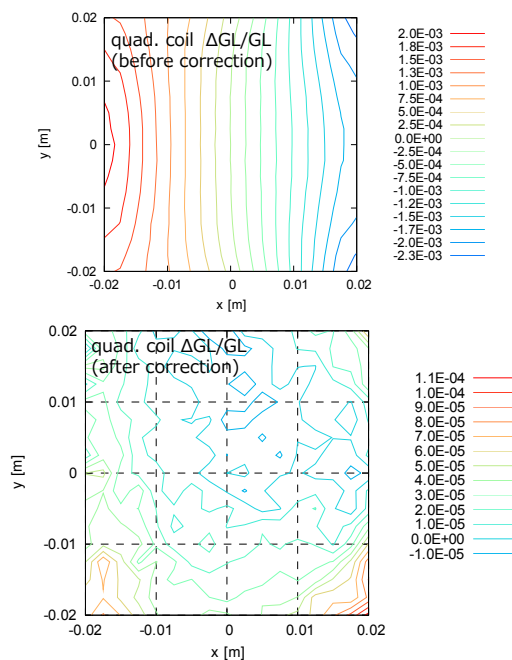


Figure 6: Uniformity of the GL products. Top: Before correction, Bottom: After correction.

#### 4. まとめ

重粒子がん治療装置向け回転ガントリーの更なる小型化を目指し、ガントリーの構成について検討を実施した。その結果、機能結合型超電導電磁石の高磁場・長尺化とスキヤニング電磁石の改良により、ガントリーの大幅な小型化が可能なことを明らかにした。さらに、超電導電磁石の磁場設計を実施した結果、要求される BL 積均一度及び GL 積均一度 ( $\leq 1.0 \times 10^{-3}$ ) を達成する条件を明らかにした。今後、さらなる詳細な検討を実施し、実機適用を検討する。

#### 参考文献

- [1] Y. Iwata *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15 (2012) 044701.
- [2] Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. A 834 (2016) 71.
- [3] T. Obana *et al.*, IEEE Trans. on Appl. Supercond., 15 (2005) 1185.