

MAGNETIC FIELD MEASUREMENT OF THE SUPERCONDUCTING MANGET FOR ROTATING-GANTRY

Shigeki Takayama^{#A)}, Tomofumi Orikasa^{A)}, Shohei Takami^{A)}, Ikuo Watanabe^{A)}, Yoshiyuki Iwata^{B)}, Koji Noda^{B)},
Toshiyuki Shirai^{B)}, Takuji Furukawa^{B)}

^{A)} Toshiba Corporation

2-4, Suehiro-Cho, Tsurumi-Ku, Yokohama, 230-0045, Japan

^{B)} National Institute of Radiological Sciences (NIRS)

4-9-1, Anagawa, Inage, Chiba, 263-8555, Japan

Abstract

We have been developing a superconducting rotating-gantry for heavy-ion therapy. This isocentric rotating-gantry can transport heavy ions to the isocenter with irradiation angles over 0-360 degrees. Ten combined-function superconducting magnets are employed for the rotating-gantry and two of them had been manufactured. The magnetic field of the superconducting magnets was measured. Results of the measurements and calculation are presented.

回転ガントリー用超電導電磁石における磁場測定

1. はじめに

現在、我々は重粒子線がん治療装置用超電導回転ガントリーを開発している。本がん治療装置では医療用重イオン加速器(HIMAC)から出力される最大エネルギー430 MeV/uの重粒子線をがんにラスタースキャンニング照射することで治療しており、照射の際に回転ガントリーを用いることでアイソセンターへの照射角を0度から360度まで連続的に設定することが可能となる。また、二極成分と四極成分を独立に制御可能な10台の機能結合型超電導電磁石を本回転ガントリーに用いることで、陽子線用回転ガントリーと同程度の軸長約13m、回転半径約5.5mまで小型化することが可能となった。今回、二台の機能結合型超電導電磁石が製作完了し、空芯コイルの状態での磁場分布測定を常温下で行った。本稿では、ビームダクト内部の磁場分布測定結果および、測定値と解析値との比較に関して報告する。

2. ガントリーレイアウト

超電導回転ガントリーの鳥瞰図を図1に示す。HIMACより得られる重粒子線は回転ガントリー本体に設置されている機能結合型超電導電磁石によって輸送され、ロボットアーム治療台上の患者へ照射される。図2に回転ガントリーのレイアウトを示す。ビームラインは10台の機能結合型超電導電磁石(BM01~BM10)の他に2対のステアリング電磁石(STX002、STY002、STX003、STY003)、および水平・垂直スキャンニング電磁石(SCMX-001、SCMY-001)で構成されている。各機器は円筒構造の回転構造体に固定されており、本構造体を360度回転させることで患者に対し0度から360度のあらゆる角度から重粒子線を照射することが可能となっている。

前述の機能結合型超電導電磁石の基本諸元を表1

に示す。スキャンニング電磁石上流に偏向半径2.3mの超電導電磁石を6台(BM01~BM06)、下流に偏向半径2.8mの超電導電磁石を4台(BM07~BM10)配置しており、スキャンニング電磁石によって走査された重粒子線を偏向するために、スキャンニング電磁石下流の超電導電磁石ではビームダクト径を大きくしている。アイソセンターに最も近い超電導電磁石(BM10)では照射領域200mm×200mmを確保するためにビームダクトが約φ300mmの大口径となっている。走査された重粒子線はアイソセンター直前の二台の超電導電磁石(BM09/BM10)の四極成分と二極成分のラディアルフォーカスによって整形され、照射領域に対し垂直に照射されると共に、正方形の照射領域を確保している。

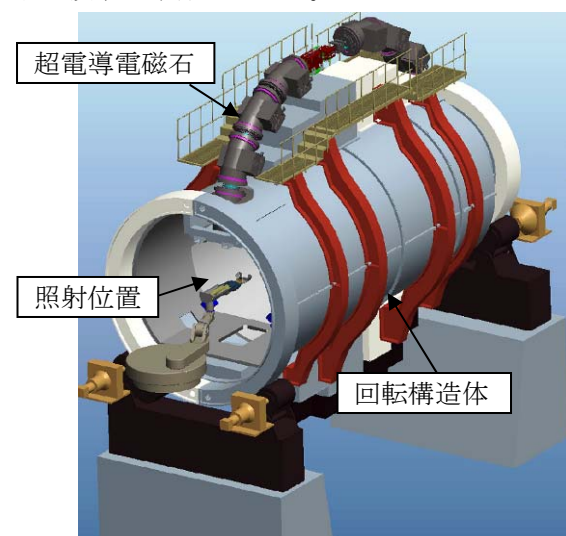


図1：超電導回転ガントリー鳥瞰図

[#] shigeki2.takayama@toshiba.co.jp

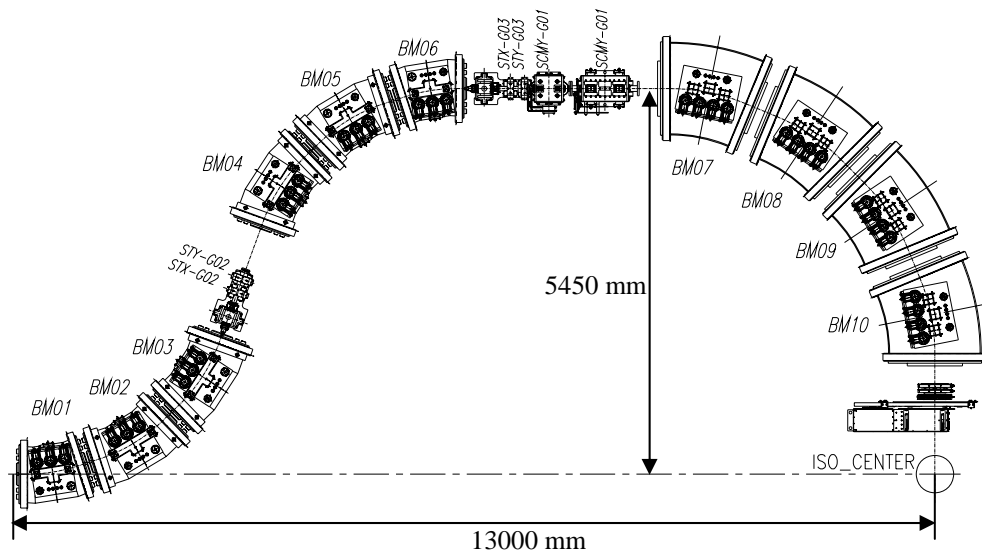


図 2：超電導回転ガントリーレイアウト

表 1：機能結合型超電導電磁石の基本諸元

パラメータ	単位	BM01/BM06	BM02～BM05	BM07	BM08	BM09/BM10
偏向角	deg.	18	26	22.5	22.5	22.5
偏向半径	m	2.3	2.3	2.8	2.8	2.8
ビームダクト内径	mm	60	60	170	240	290
有効磁場領域	mm	±20	±20	±60	±80	±100
最大二極磁場	T	2.88	2.88	2.37	2.37	2.37
最大四極磁場勾配	T/m	9.10	9.10	-	-	0.74
鉄心内径/外径	mm	208/500	208/500	300/700	386/860	460/1000
真空容器内径/外径	mm	760/790	760/790	978/1010	1158/1190	1278/1310

3. 超電導電磁石磁場設計

正確に重粒子線を照射するために、スキャン電磁石上流の超電導電磁石 (BM01～BM06) では磁場均一度 $\pm 1.0 \times 10^{-3}$ 以下、スキャン電磁石下流の超電導電磁石 (BM07～BM10) では磁場均一度 $\pm 1.0 \times 10^{-4}$ 以下を目標としている。本電磁石はビームダクトに沿って湾曲した複雑なコイル形状であり、各電磁石の鉄心や導体配置の設計は二次元導体配置最適化プログラム^[1]と Opera-3dTMによる三次元非線形磁場解析^[2]を用いた^[3]。ここでは機能結合型超電導電磁石 (BM02～BM05) における二次元断面導体配置および鉄心構成を図 3 に示す。ビーム光学設計より、有効磁場領域を ± 20 mm、ビームダクト内径を 60 mm としており、ビームダクトの外周に超電導コイルを配置、さらにコイルを囲うように鉄心 (珪素鋼板)、真空容器 (構造材用炭素鋼) を配置した。超電導コイルはコサインシータ巻構造を持ち、内側に配置された 8 層からなる四極コ

イルとその外側に配置された 26 層からなる二極コイルで構成されている。各コイルは独立に励磁可能で、各層で導体位置の最適化が行われている。また、磁石を湾曲形状にしたことやコイルエンドなどに起因する多極成分は最外層の線材配置で補正している。最終的に得られた二極コイルの作る定格通電時の磁場均一度マップを図 4 に示す。x は偏向半径方向、z は偏向面垂直方向を表し、垂直磁場 (B_z) をビーム方向に積分した値 ($B_z L$ 積) の均一度 ($\Delta B_z L / B_z L$) を示している。有効磁場領域 (± 20 mm) においてこの均一度は最大でも 1.48×10^{-4} と目標値である $\pm 1.0 \times 10^{-3}$ 以下に収まっている。

同様の手法で超電導電磁石 (BM10) においても磁場設計を行っている。最終的に得られた二極コイルの作る定格通電時の磁場均一度マップを図 5 に示す。本電磁石の磁場均一度目標値は $\pm 1.0 \times 10^{-4}$ であり、有効磁場領域 (± 100 mm) の広い範囲で目標が達成されている。

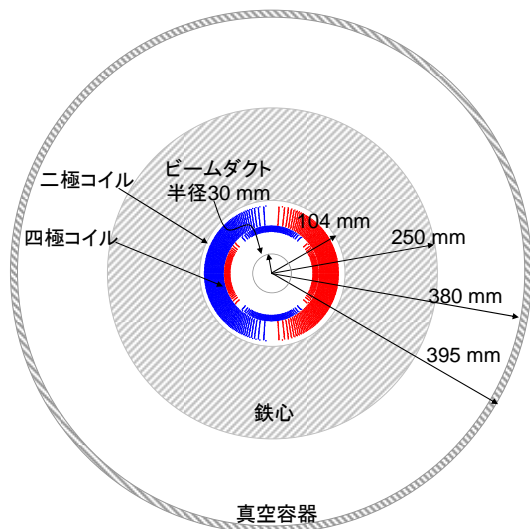


図 3：超電導電磁石断面図

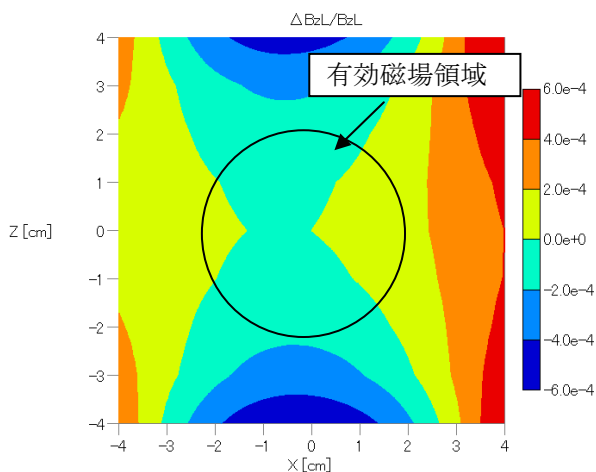


図 4：ビーム軌道での垂直 B_zL 積均一度(BM04)

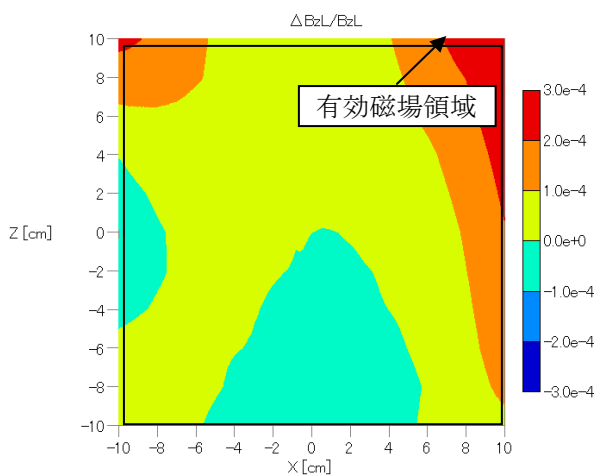


図 5：ビーム軌道での垂直 B_zL 積均一度(BM10)

4. 超電導コイル製作

今回、機能結合型超電導電磁石 BM04、および、BM10 の二台を製作した。ここでは BM04 の超電導コイルの外観を図 6 に示す。磁場設計で得られた線材配置を巻線で高精度に実現するために、コイル製作はサーフェスワインディング法を用いた。本巻線方法は複雑な三次元鞍型コイルを巻線するのに有効である。

スキャンニング電磁石上流の超電導電磁石 (BM01～BM06) では 3 台、スキャンニング電磁石下流の超電導電磁石 (BM07～BM10) では 4 台の冷凍機を用い、熱伝導でコイルを冷却するが、ラスタースキャンニング照射では 80 MeV/u ～430 MeV/u のエネルギーの異なる重粒子線を照射するため、エネルギーに応じて高速に磁場を変化させる必要があり、磁場変化に起因して超電導線材に交流損失(発熱)が発生してしまう。そのため交流損失の小さい極細多芯 NbTi 超電導線材を採用するなどの対策をとって発熱を抑制している。

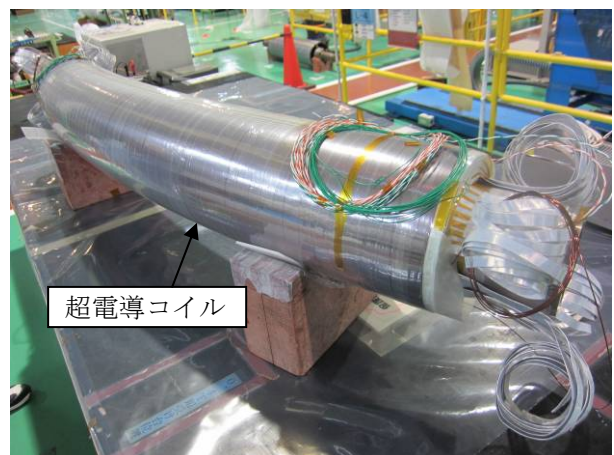


図 6：超電導コイル外観(BM04)

5. 磁場測定

磁場測定装置の外観を図 7 に示す。本磁場測定装置はビームダクトの形状に沿った形でレールを配置し、その上に複数のホール素子を搭載した台車を走査することで各断面での磁場を測定した。

ここでは鉄心を組み立てる前に常温下で励磁した結果を示す。今回製作した機能結合型超電導電磁石(BM04、BM10)のうち、BM04 の二極コイルを 0.175 A(定格 136 A)励磁した際のビーム軌道に沿った垂直磁場 (B_z) 分布を図 8 に示す。図 9 は同じ測定結果の磁場範囲を拡大したものである。断面内の磁場分布については、ビーム軌道中心とミッドプレーン上で偏向半径方向±10 mm および±20 mm の位置において測定した。図中の実線は励磁電流を 0.1715A としたときの解析値であり、これと測定値とで磁場強度が良く一致することを確認した。また本測定結果をビーム軌道に沿って積分した B_zL 積均一度のミッドプレーン上での分布を図 10 に示す。解析値と測定値との差は最大でも $5.6 \times$

10^4 となった。本測定装置の測定精度が 1.0×10^{-3} であることから磁場設計で得た線材配置を精度良く実現していることが分かる。

BM10 においても同様の測定を実施している。BM10 二極コイルを 0.350 A (定格 231 A) で励磁し、その際のビーム軌道に沿った垂直磁場 (B_z) 分布を図 11 に、拡大図を図 12 に示す。断面内の磁場分布については、ビーム軌道中心とミッドプレーン上で偏向半径方向 ± 25 mm および ± 50 mm の位置において測定した。図中の実線は励磁電流を 0.348 A としたときの解析値であり、BM04 と同様、解析値と測定値とで磁場強度が良く一致することを確認した。また本測定結果をビーム軌道に沿って積分した $B_z L$ 積均一度のミッドプレーン上での分布を図 13 に示す。こちらは解析値と測定値との差が最大でも 8.0×10^{-4} となり、こちらに関しても磁場設計で得た線材配置を精度良く実現している。

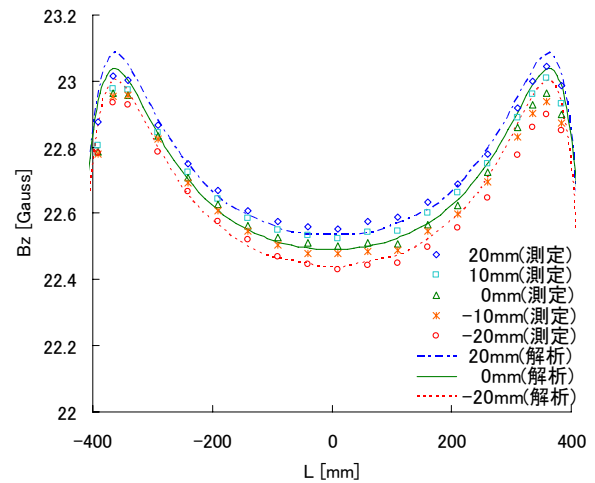


図 9：ビーム軌道に沿った二極磁場分布(拡大)

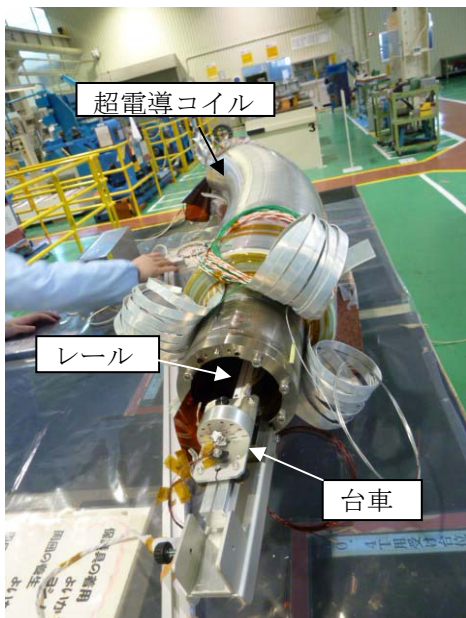


図 7：磁場測定装置コイル取り付け時外観

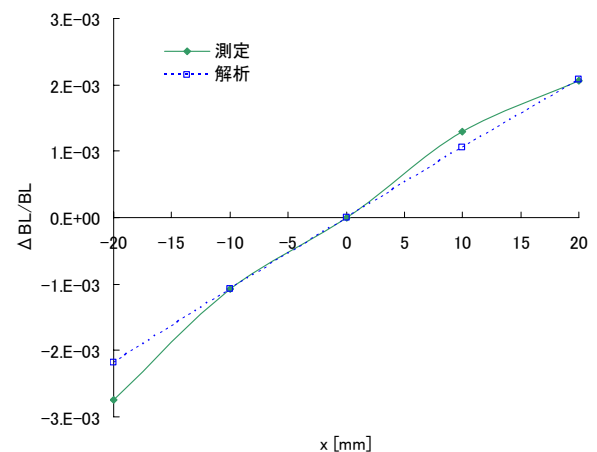


図 10：二極コイル励磁時の垂直 $B_z L$ 積均一度

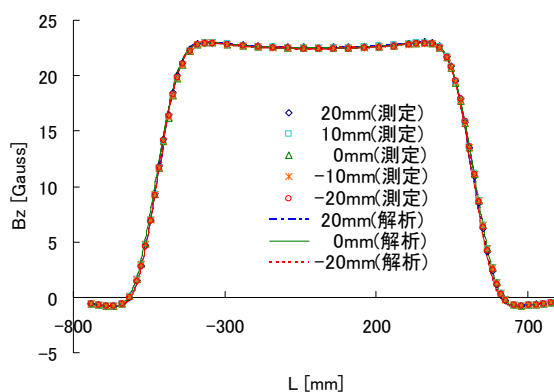


図 8：ビーム軌道に沿った二極磁場分布

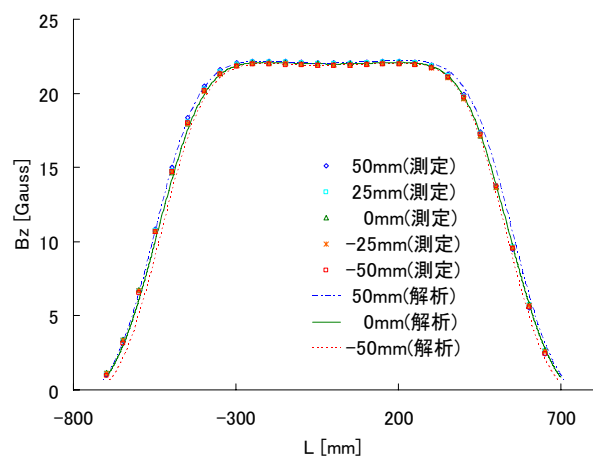


図 11：ビーム軌道に沿った二極磁場分布

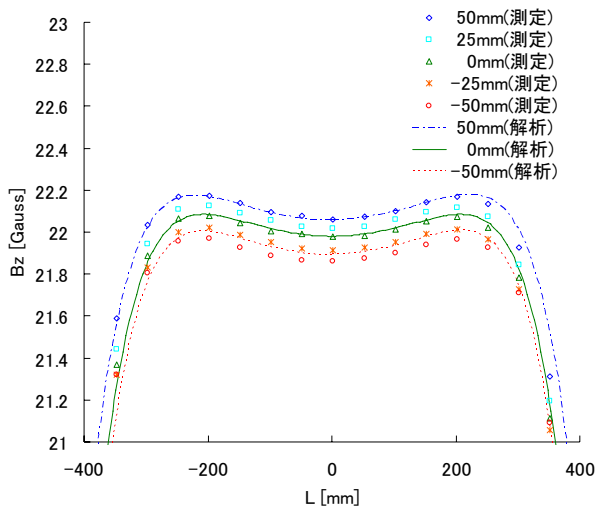


図 12：ビーム軌道に沿った二極磁場分布(拡大)

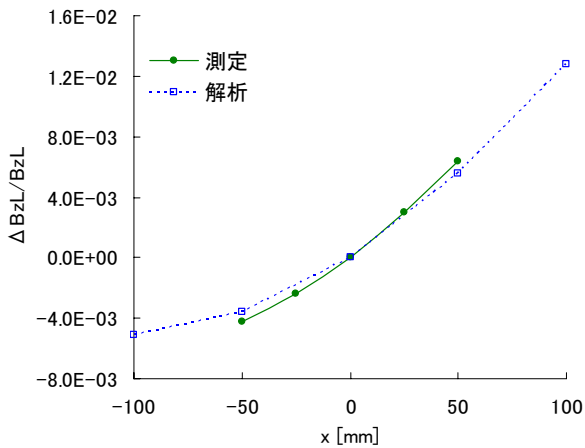


図 13：二極コイル励磁時の垂直 $B_z L$ 積均一度

6. 超電導電磁石の製作

製作した機能結合型超電導電磁石(BM04、BM10)のうち、BM04の超電導電磁石外観を図14に示す。

鉄心も冷凍機を用いて伝導で冷却しているが、ラスタースキャニング照射のための高速な磁場変化に起因してコイルと同様、交流損失(発熱)を発生してしまう。そのため、積層珪素鋼板を使用するなどの対策を行うことでこの発熱を抑制している。

本超電導電磁石は回転構造体に固定され360度回転する。そのため全方向の荷重に対応するGFRP製のサポートを採用した。このサポートは冷却による熱収縮時も超電導コイルの変位は小さく、0度~360度まで回転させて配置した場合においてもコイルの変位が±0.3 mm以内となっており、回転による磁場分布の変化は十分に小さい。



図 14：機能結合型超電導電磁石(BM04)外観

7. まとめ

重粒子線がん治療装置用超電導回転ガントリーに搭載される機能結合型超電導電磁石の一部(BM04、BM10)が製作完了したため、空芯コイルの状態での磁場分布測定を常温で行った。その結果、BM04における $B_z L$ 積均一度の測定値と解析値との差は最大でも 5.6×10^{-4} 、BM10における $B_z L$ 積均一度の測定値と解析値との差は最大でも 8.0×10^{-4} となり、測定精度 (1.0×10^{-3}) 内で測定値と解析値が一致していることから、磁場設計で得た線材配置を精度良く実現していることが明らかとなった。超電導電磁石の組み立てが完了しているため、現在、鉄心等と組み合わせた詳細な磁場分布の測定を行っている。

参考文献

- [1] T. Obana, *et al.*, IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol. 15, no. 2, pp. 1185-1188, June 2005.
- [2] Opera-3d Version 15, <http://cobham.com/>.
- [3] Y. Iwata, *et al.*, Phys. Rev. ST Accel. Beams 15, 044701 (2012).