







$10^4$ となった。本測定装置の測定精度が  $1.0 \times 10^{-3}$  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  $\pm 25$  mm および  $\pm 50$  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  $8.0 \times 10^{-4}$  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。

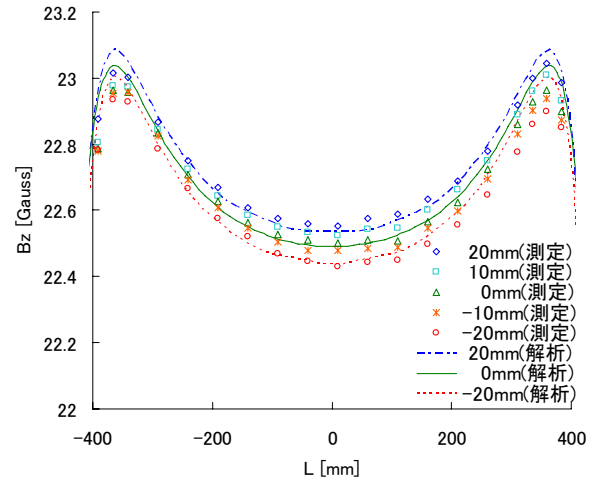


図 9：ビーム軌道に沿った二極磁場分布(拡大)

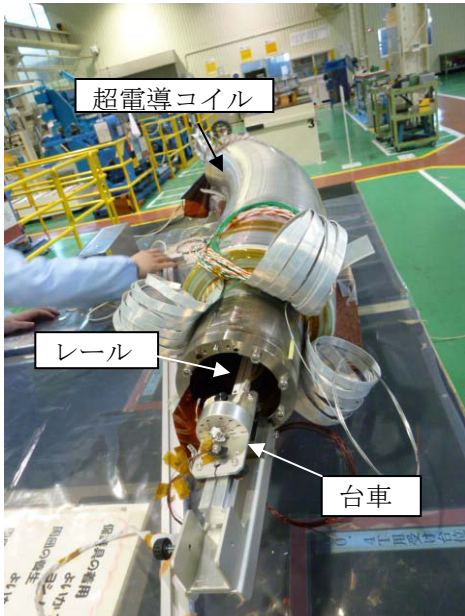


図 7：磁場測定装置コイル取り付け時外観

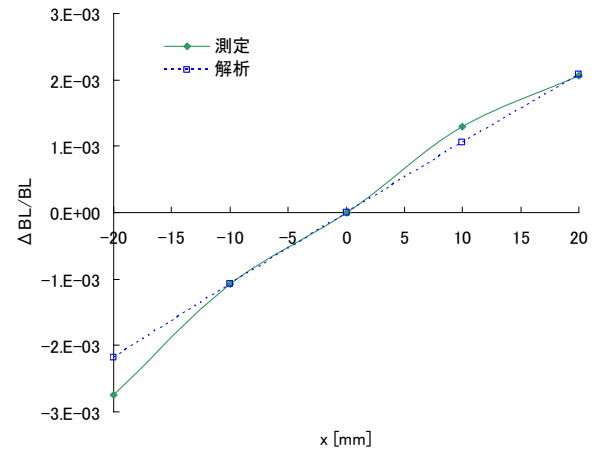


図 10：二極コイル励磁時の垂直  $B_z L$  積均一度

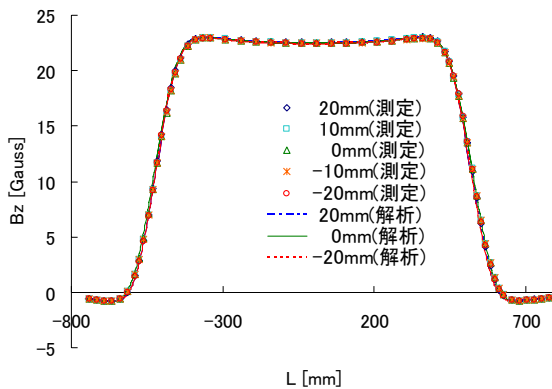


図 8：ビーム軌道に沿った二極磁場分布

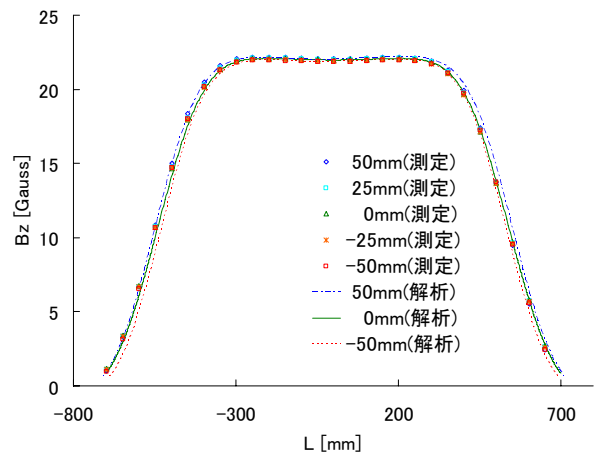


図 11：ビーム軌道に沿った二極磁場分布

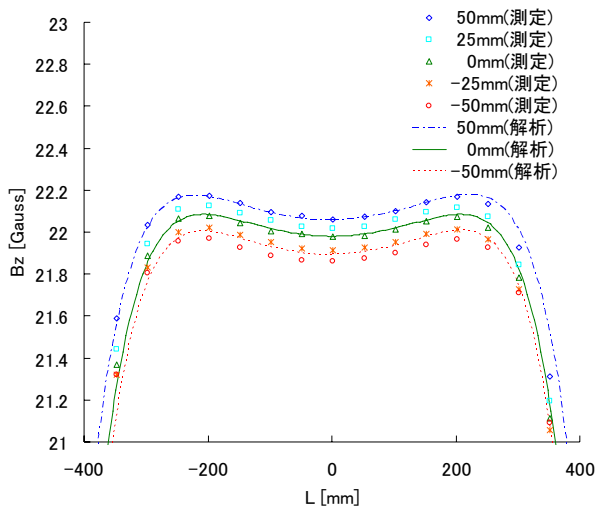


図 12：ビーム軌道に沿った二極磁場分布(拡大)

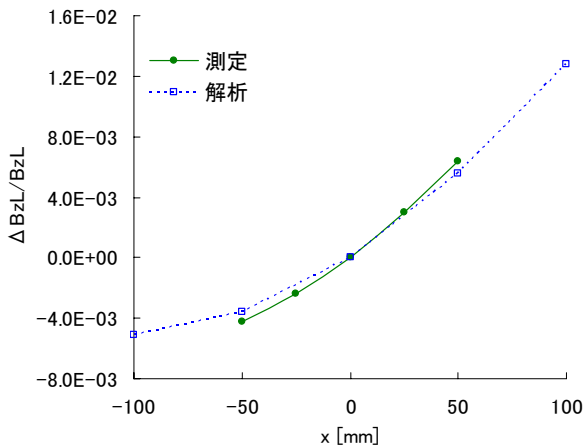


図 13：二極コイル励磁時の垂直  $B_z L$  積均一度

## 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  $5.6 \times 10^{-4}$ 、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  $8.0 \times 10^{-4}$  となり、測定精度 ( $1.0 \times 10^{-3}$ ) 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).