

Table 1: Design Parameters of Magnets

| | BM01, 06 | BM02-05 | BM07 | BM08 | BM09, 10 |
|------------------------------------|----------|---------|------|------|----------|
| Bending angle [degree] | 18 | 26 | 22.5 | 22.5 | 22.5 |
| Bending Radius [m] | 2.3 | 2.3 | 2.8 | 2.8 | 2.8 |
| Magnetic field of dipole [T] | 2.88 | 2.88 | 2.37 | 2.37 | 2.37 |
| Field gradient of quadrupole [T/m] | 9.1 | 9.1 | — | — | 1.3 |
| Duct aperture [mm] | Φ 60 | Φ 60 | □122 | □170 | □206 |



Figure 2: Perspective picture of BM01-03.

3. 磁場測定および高速励磁試験の結果

組み込み前の試験として、ホール素子、NMR 素子による全電磁石の磁場測定を行い、そのうち 2, 3 台で高速励磁試験を行い、温度変化をモニターした。また 202 段のエネルギー 1 段ごとの整定時間をピックアップコイルで測定した。

3.1 2 極電磁石

2 極電磁石では中心磁場の電流依存性、積分磁場の位置および電流依存性を測定している。磁石中心磁場を Nuclear Magnetic Resonance (NMR) で測定した結果を Fig. 3 に示す。小口径の BM02 と大口径の BM10 データを示す。BM10 番では B/I の測定値と計算値を右軸に示した。Table 2, 1 列目に各電磁石の定格電流における設計値との差を示す。B/I の下がり方が測定のほうが早いのは鉄のパッキングファクターの違いで飽和が起きていると考えられる。こういった原因で NMR における測定誤差に比べて大きな個体差があるようだが、0.3% 未満であるので電流値で調整可能な範囲であった。

積分磁場測定はホール素子でビーム軌道に沿った磁場を測定することで行われた。Fig.4, Fig.5 に磁石中心積分磁場に対する、水平方向における均一度を TOSCA による計算結果とともに示す。BM09 のデータだけ違う傾向にあるが、測定の際のホール素子の据付が反転して電圧から磁場を計算するときの校正曲線が異なっているため、ばらつきが大きくなっているものと思われる。ΔBL/BL が均一となるようにコイル設計を行ったが、ほぼすべての電磁石で磁石の外側で積分磁場が高くなっており、収束 4 極成分が見られる。これらはコイル製作誤差に起因するも

のと考えている。Table 2, 2 列目に各 2 極電磁石中の定格電流における積分磁場勾配を示す。磁場勾配は最大で 0.22 T 程度になるが、4 極コイルにより補正できる。

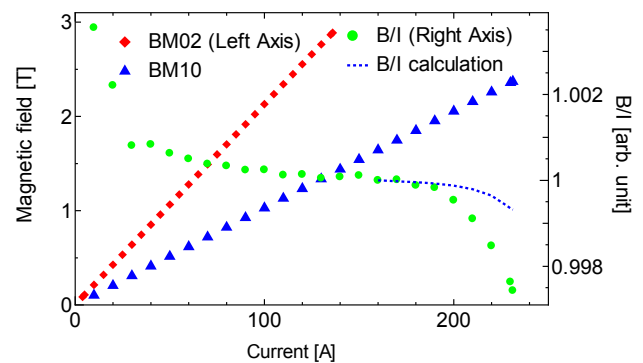


Figure 3: Magnetic field at a center of BM02, BM10 and B/I of BM10 as a function of coil current.

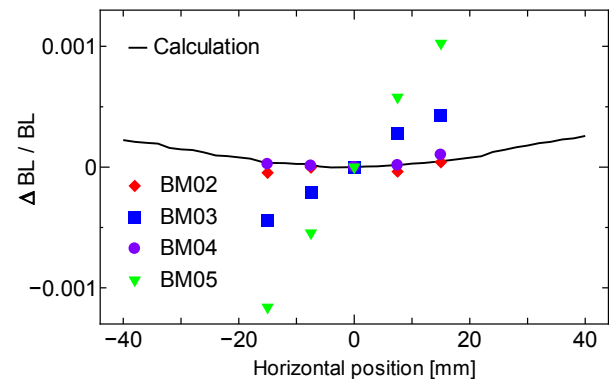


Figure 4: Magnetic field integrals of small aperture magnets. Vertical axis shows deviation from magnetic field integral at central orbit.

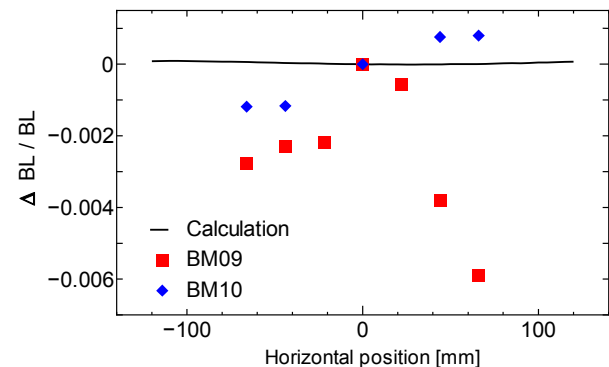


Figure 5: Magnetic field integrals of large aperture magnets. Vertical axis shows deviation from magnetic field integral at central orbit.

Table 2: Measurement results by rated current. $\Delta B/B$ and $\Delta GL/GL$ are deviation from design values.

| Magnet Number | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\Delta B/B$ [%] | 0.231 | 0.190 | - | -0.17 | 0.252 | 0.276 | 0.205 | 0.123 | -0.01 | -0.03 |
| GL in dipole [T] | 0.163 | 0.007 | 0.087 | 0.006 | 0.222 | 0.126 | 0.099 | 0.051 | -0.04 | 0.036 |
| $\Delta GL/GL$ [%] of Quadrupole | -0.70 | -0.62 | -0.51 | -0.42 | -0.53 | -0.73 | - | - | -0.87 | -1.93 |

3.2 4極電磁石

4極電磁石では2極同様にホール素子で積分磁場の水平位置依存性を測定し、結果を1次関数でフィッティングし、中心の磁場勾配、積分磁場勾配、有効長を求めた。Fig.6に積分磁場の測定結果を計算結果とともに示す。全電磁石について同様に測定し積分磁場勾配GLを求め、計算結果と比較したものをTable 2, 3列目に示す。系統的に測定値は計算値より小さい傾向を示す。原因は調査中であるが、軌道計算によれば4極に±0.5%程度のランダムな誤差による影響は補正可能である。

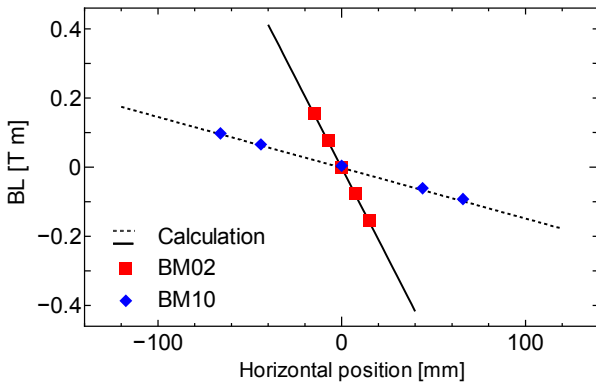


Figure 6: Magnetic field integral in quadrupole magnet.

3.3 高速励磁試験および磁場整定時間測定

治療ではビームエネルギーを430-56 MeV/uまで短時間で変化させる必要があるため、交流損失による温度上昇と磁場の整定時間を確認する必要がある。

高速励磁試験はBM05で行った。インダクタンスが大きく励磁速度の遅いBM09,10の最大電流変化速度に合わせて励磁、減磁したときのコイル温度の変化をFigure 7に示す。電流波形は三角波の形状で上げ速度が1.8 A/s、下げ速度が15 A/sで136 Aから40 Aまで上げ下げを繰り返している。30分程度で温度上昇は飽和しており高速励磁に耐えることが確認された。

電磁石中に挿入したピックアップコイルにより磁場の整定時間を測定した。Figure 8に電磁石電流とピックアップコイルに生じた誘導起電力を示す。誘導起電力を時間で積分し、変化がある範囲に収まる時間を磁場整定時間として採用した。

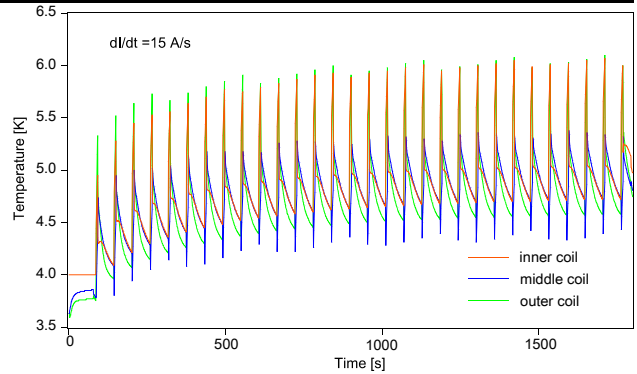


Figure 7: Results of tests of fast slewing by BM05.

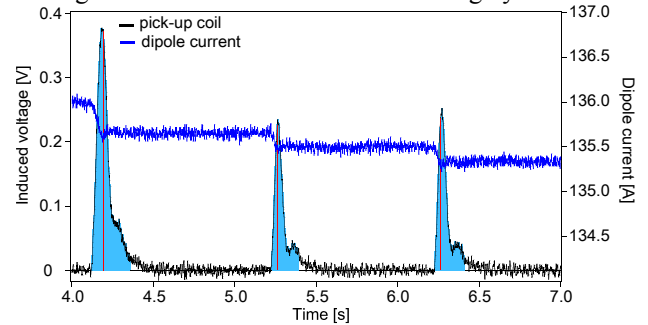


Figure 8: Coil current and voltage of pick-up coil.

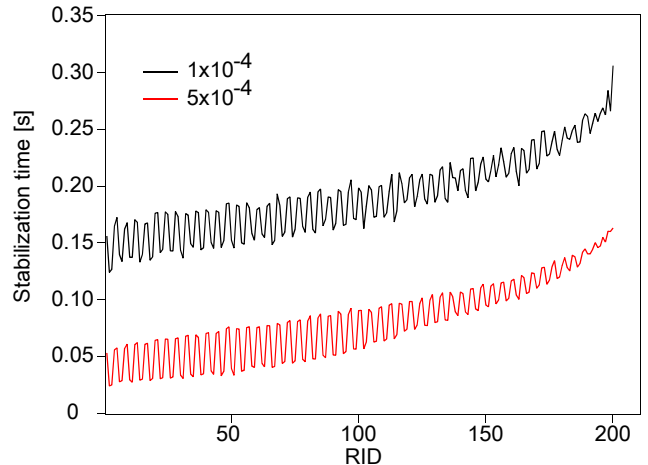


Figure 9: Stabilization time of superconducting magnet.

Figure 9に202段のエネルギー(RID 0-202)に対してそれぞれの磁場整定時間をプロットした。RID値が大きくなると一段ごとの電流変化量が増えるため、整定時間が遅くなる。1×10⁻⁴の精度が必要であれば300 msの待ち時間が必要となることが明らかとなった。

4. まとめ

重粒子線回転ガントリーの超伝導電磁石の磁場測定、高速励磁試験、磁場整定時間の測定を行った。観測された個体差や、2極中の4極成分、計算との誤差等はそれらを含めた補正が現在の電磁石構成で可能であると考えている。また治療を想定した電磁石電流パターンでの熱や磁場整定時間の問題を試験し、こちらも治療に支障ないことが確認された。

回転ガントリーはこの9月に建設が完了しその後ビーム試験が開始される予定である。

参考文献

- [1] Y. Iwata, et. al. “Construction of a superconducting rotating gantry” in these proceedings.
- [2] S. Suzuki, et. al “回転ガントリー用超伝導電磁石の磁場測定及びガントリーオブティクスの最適化” Proceedings of 11th annual meeting of particle accelerator society of Japan.