

室温変動による粒子線治療用シンクロトロン偏向電磁石磁場への影響

EFFECT OF ROOM TEMPERATURE VARIATION ON MAGNETIC FIELD INDUCED BY A BENDING MAGNET OF SYNCHROTRON FOR ION THERAPY

岩井岳夫^{#,A)}, 横山淳也^{B)}, 小関悠里^{B)}, 門叶冬樹^{A)}

Takeo Iwai^{#,A)}, Junya Yokoyama^{B)}, Yuri Koseki^{B)}, Fuyuki Tokanai^{A)}

^{A)} Research Institute, Yamagata University

^{B)} Faculty of Science, Yamagata University

Abstract

It is ideal to keep a room temperature stable in the accelerator room for the good beam stability, however, it requires a substantial energy consumption. From the economical point of view, rapidly increasing particle therapy facilities are considering to reduce energy consumption including energy for air conditioning. The objective of study is to investigate the effect of temperature variation of the accelerator room on the stability of magnetic field of a dipole magnet. Room temperature variation experiment between 17 and 28 °C indicates that the magnetic field is linearly decreased with increasing temperature of the magnetic pole. The slope of the decreasing is larger for the maximum field strength than for the lower field strength, and almost independent of magnetic field for the lower field strength.

1. はじめに

小型～中型の円型加速器で加速した粒子ビームによって腫瘍を身体の外から照射し、細胞の DNA を破壊してがん細胞を死滅させる粒子線治療は、21 世紀に入ってから世界的に治療患者数および治療施設数が爆発的に伸びており、治療施設数はあと数年で 100 の大台に届く勢いである[1]。この普及の背景としては、特に陽子線治療において装置の低コスト化が進み、収益性が大幅に改善したことが民間病院への導入につながったと考えられる。このように収益性は粒子線治療施設の運営および普及において非常に大きいファクターであり、種々のコスト削減策が検討されつつある。

山形大学医学部では 2015 年から炭素線専用の重粒子線治療施設の建設が進められており、2019 年度の稼働開始を目標としている。本施設では従来の重粒子線治療施設をさらに発展させ、省エネルギー・省スペース・廃棄物削減・運転容易化のコンセプトの下で様々な工夫がなされている。重粒子線治療施設では運転に多大なエネルギーが必要であり、先行施設の例では電力量が年間約 7600MWh に達する[2]。これは 100,000m² クラスの太陽光発電所の年間発電量に匹敵する数値であり、年間の電気料金は 1 億円を優に超えると試算される。山形大学の施設では治療装置のハードおよび運用面での省エネルギー策[3]に加え、空調に関する省エネルギー策も検討中である。

加速器の安定性を考えると、加速器室温度は常時可能な限り一定に保つことが望ましいが、そのために必要なエネルギーは相当大きく、収益性の悪化に繋がる。特に設置地の山形市は盆地であるため昼夜の温度変化が極めて大きく ($\Delta T > 20^\circ\text{C}$ になることもある)、また夏冬の温度差が大きいところとして知られており、加速器室の温度一定に要するエネルギーは他と比べて大きくなるもの

と予測される。こうした背景から、外気を導入する加速器室の温度管理にある程度の裕度を持たせて、空調コストを削減する案が検討されている。

このような空調温度設定の下で加速器室の温度が変動した場合、最も懸念されるのは電磁石の磁場への影響である。これについて系統的に調べた研究はサイクロトロンに関するもの[4,5]など、ごく限られている。本研究では、重粒子線治療用途のシンクロトロン用偏向電磁石において、中心部の磁場の安定性に対する室温変動の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験方法

実験は山形大学医学部重粒子線がん治療装置研究棟設置の H 型 2 極電磁石を使用して実施した。鉄心は磁性鋼板を積層したものであり、最大磁場は 1.54T、このときの励磁電流は 2220A である。この電磁石の中心位置に NMR 磁場測定器(エコー電子社製 EPM-16000YFT 型)をセットし、中心磁場を高精度 ($< \pm 10^{-5}$ T) で測定した。

温度管理は空調機の温度設定で行い、冷却水の設定温度は 32°C とした。実験としては、

- ① 電磁石と熱平衡状態になるまで室温を長時間一定に保ち、磁極の表面温度と直流磁場の関係の測定
- ② 運転中に室温を変化させた過渡的な状態での直流磁場の変動を測定

以上 2 種の測定を実施した。

3. 結果と考察

3.1 熱平衡状態での磁極温度と磁場の関係

前項①で測定した、磁極温度と中心磁場の関係を Figure 1 に示す。図の縦軸は 22°C での磁場を基準とした磁場測定値の比である。各励磁電流は、高い方から 1.5、

[#] iwai@med.id.yamagata-u.ac.jp

1.2, 1.0, 0.76, 0.50 T の磁場に対応する。この図から明らかなのは、①磁場は温度上昇によって直線的に減少する。②直線の傾きは最高磁場の状態では大きく、それより低い磁場では小さくほぼ一定の値を取る。の2点である。

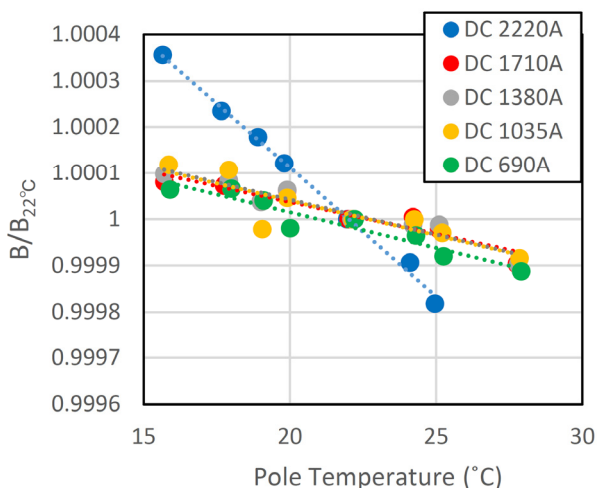


Figure 1: Pole temperature dependence of magnetic field at various currents.

偏向電磁石では、磁極間隙中心を通りヨークを一周する積分回路にアンペールの法則を適用することで、近似的に

$$B = \frac{\mu_0 NI}{g + \frac{l_{iron}}{\mu_r}} \quad (1)$$

が成り立つ。ここで B : 中心磁場、 μ_0 : 真空の透磁率、 N : コイル巻き数、 I : 励磁電流、 g : 磁極間隙、 l_{iron} : ヨーク中の磁路長、 μ_r : 電磁鋼板の比透磁率 である。 μ_r が十分大きい場合、(1)式の分母第二項が無視できて、

$$B = \frac{\mu_0 NI}{g} \quad (2)$$

となり、近似的に磁場強度は磁極間隙に反比例する。

磁極間隙は鉄心材料の熱膨張により増減し、その温度係数は鉄心材料の温度係数 k に等しい。それゆえ、温度 $T+\Delta T$ の磁場は、

$$B(T + \Delta T) = \frac{\mu_0 NI}{g(1+k\Delta T)} \quad (3)$$

となるので、近似的に

$$B(T + \Delta T) = \frac{\mu_0 NI}{g}(1 - k\Delta T) \quad (4)$$

となる。この式より、磁場の温度係数は $-k$ 程度と見積もられる。励磁電流が 690A~1710A の範囲において実験で得られた磁場の温度係数は $-1.5 \times 10^{-5}/K$ であり、この鉄

心材料の $-k=-1.2 \times 10^{-5}/K$ と非常によく一致しており、 μ_r が 5000 程度と十分大きい励磁電流の範囲では、磁極間隙の温度変化が磁場の変化に対して支配的であるということが裏付けられた。

一方で、最大定格電流 2220A で励磁した場合は、鉄心の磁化が飽和し、比透磁率が著しく減少するために (2)式よりはむしろ (1)式で考える必要がある。磁路長の温度係数は線膨張係数に等しく、比透磁率は高磁界では負の温度係数を取ることが知られている [6]。これらはいずれも磁場の温度係数の絶対値を増大させる方向に効くので、本実験で 2220A において傾きの絶対値が大きくなっていることと定性的に一致している。本実験により温度係数は -5×10^{-5} と評価された。

同様の実験をシンクロトロン疑似パターン通電 (フラットベース電流から 1.5T/s でフラットトップ磁場までランプ励磁し、フラットトップ電流で6秒間保持した後放電によりフラットベース電流に下げて保持を繰り返す) でフラットトップ磁場への温度の影響を測定したが、Figure 1 とほぼ同様の結果となり、フラットトップ磁場への磁極温度影響は直流通電の場合と相違ないと考えられる。

3.2 室温過渡環境下での測定

加速器室の空調制御温度範囲を広げた場合、加速器運転中において制御温度範囲内の温度変動は不可避である。この過渡的な室温変動の影響を模擬するため、17°C に室温を設定して熱平衡状態まで保持した後、冷却水循環および励磁を開始し、室温を 24°C あるいは 28°C に上昇させた場合の磁場への影響を連続測定した。冷却水は連続的に通水するが、励磁に関しては測定時のみ励磁し、他では励磁オフとした。結果を Figure 2(a)~(c) に示す。(a) は空調設定温度を 17°C に保持した場合、(b) は 17°C から 24°C に上昇した場合、(c) は 17°C から 28°C に上昇した場合である。

(a) で示すように、室温に変化がなくても冷却水通水により磁極表面温度は徐々に上昇し、8時間経過で約 4°C 上昇する。励磁電流 2220A では磁極表面温度上昇に伴って磁場は緩やかに減少するが、1710A ではそのような傾向は観測されなかった。一方、(b) に示す 17°C から 24°C に室温上昇させた場合、磁極温度の上昇はわずかに促進され、磁場の変動のトレンドは (a) の場合とほぼ同様ながら温度変動がわずかに大きい分磁場の変化もわずかに大きい。また、(c) の 17°C から 28°C に上昇させた場合には、磁極温度上昇はさらに促進され、磁場の低下も大きくなった。励磁電流 2220A での磁極温度と、測定開始時の磁場を 1 とした相対磁場の関係を Figure 3 に示す。磁場は磁極表面温度上昇とともに直線的に減少し、温度係数は熱平衡状態におけるこの励磁電流の温度係数とほぼ同じ -5×10^{-5} 程度であった。

今回の結果により、加速器室温度が急激に変化した場合でも、それによる磁極の温度への影響は小さくかつ緩やかであり、磁場出力への影響も同様の傾向を示すことが示唆された。Figure 2(b) や (c) のケースで明らかのように、室温 (●) を急激に変化させても、磁極表面温度の変化はすぐには追従せず、室温 28°C で 8 時間を経過しても磁極温度は 28°C に達しない。これは鉄心と空気との熱伝達率が小さく、かつ鉄心の熱容量が大きいためである。

この結果から推察すると、室温の設定幅を大きく取った場合においては、数10分程度の周期で室温が上下動しても鉄心の温度変化が追いつかず、磁場への影響も顕著には現れないと考えられる。

室温 17°Cを保って8時間運転した場合と、運転中に17°Cから28°Cに上げて8時間運転した場合を比較すると、比透磁率が十分大きい場合は影響が顕著には現れないが、磁気飽和により比透磁率が下がった場合には 1×10^{-4} 程度の影響が現れてくる。このように磁場のレベルによって室温変化の影響が異なってくるということは実運用を考えた場合注意が必要である。

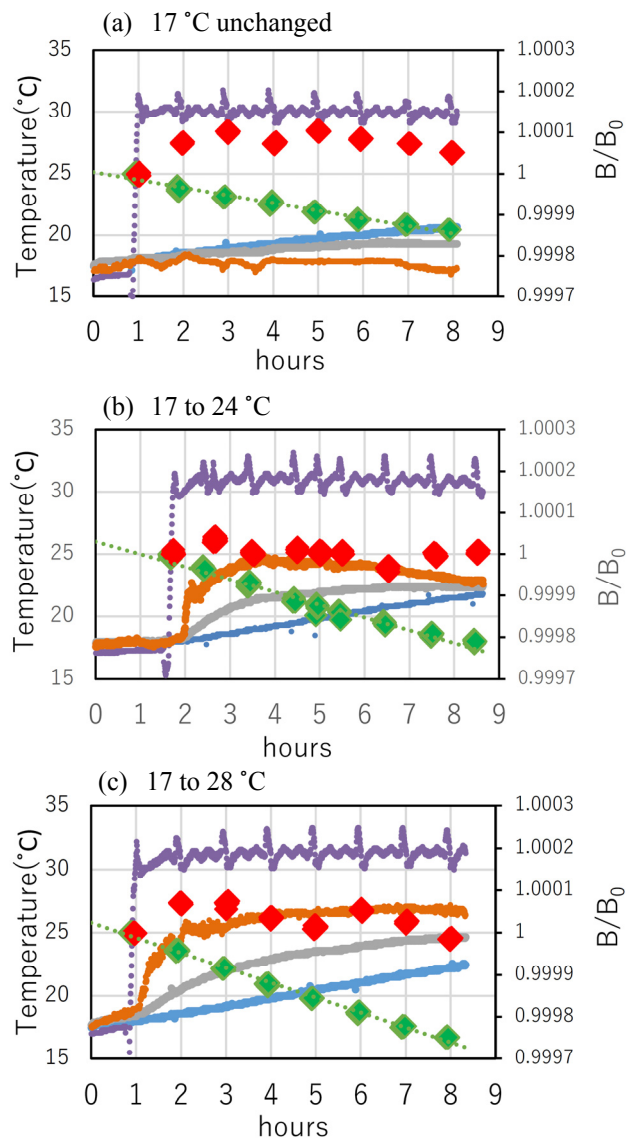


Figure 2: Transient of ambient temperature, pole temperature and relative magnetic field at 2220 and 1710 A. (a) stable ambient temperature at 17°C (b) Changing ambient temperature from 17 to 24 °C, (c) Changing ambient temperature from 17 to 28 °C. ◆: magnetic field at 2220A, ◆: magnetic field at 1710A, ○: ambient temperature, ●: pole surface temperature, ●: yoke surface temperature, ●: coolant inlet temperature.

4. 結論

室温変動が二極電磁石の中心磁場に与える影響を 17-28°Cの範囲で精密に測定した。磁場は鉄心の温度に直線的に依存し、その傾きは磁気飽和の程度によって異なる。磁気飽和に至らない領域では、熱膨張による磁極間隙の変化が磁場変化に支配的であり、磁場の温度係数は鉄心材料の線膨張係数を k とすると $-k$ にほぼ等しくなった。一方磁気飽和が顕著になってくると温度係数の絶対値は大きくなり、磁気飽和に至らない場合の温度係数の約 4 倍に達した。

また、室温が急激に変動したとしても、磁極温度への影響は非常に緩やかであり、磁場への影響も同様に緩やかである。この場合も磁気飽和の場合と非飽和の場合とで挙動が異なっており、磁気飽和の場合の方が影響を顕著に受けることが明らかになった。

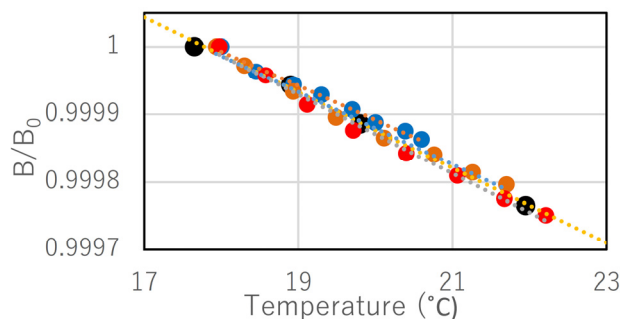


Figure 3: Dependence of relative magnetic field on pole surface temperature. ●: Thermal equilibrium, ●: 17°C (Stable), ●: 17 to 24°C, ●: 17 to 28°C.

参考文献

- [1] M. Dosanjh, "From Particle Physics to Medical Applications", DOI 10.1088/978-0-7503-1444-2 (2017); <http://iopscience.iop.org/chapter/978-0-7503-1444-2/bk978-0-7503-1444-2ch0.pdf>
- [2] 金澤光隆 他、Proc. 11th Ann. Meeting PASJ (2014) 874; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SAP1/SAP122.pdf
- [3] 岩井岳夫 他、11th Ann. Meeting PASJ (2014) 91; http://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/SUOL/SUOL02.pdf
- [4] L.P. Roobol *et al.*, Proc. 15th Int. Conf. Cyclotron, (1998) 211; <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/c98/papers/b-16.pdf>
- [5] 斎藤高嶺 他、Proc. 14th Symp. Acc. Sci. Tech.; <http://conference.kek.jp/sast03it/WebPDF/2CB3.pdf>
- [6] 珪素鋼板特別委員会、「珪素鋼板磁性の温度特性」、電気学会雑誌、(1954)、60.