

## 省エネルギー運転法確立のための

### がん治療用炭素線シンクロトロン電磁石の磁場測定

#### MEASUREMENT OF MAGNETIC FIELD INDUCED BY MAGNETS OF A SYNCHROTRON FOR CARBON RADIOTHERAPY TO ESTABLISH A ENERGY-SAVING OPERATION METHOD

岩井岳夫<sup>#, A)</sup>, 後藤 彰<sup>A)</sup>, 名雪哲夫<sup>A)</sup>, 河野和利<sup>A)</sup>, 高橋 功<sup>B)</sup>, 大谷利宏<sup>B)</sup>, 根本建二<sup>A)</sup>, 嘉山孝正<sup>A)</sup>  
Takeo Iwai<sup>#, A)</sup>, Akira Goto<sup>A)</sup>, Tetsuo Nayuki<sup>A)</sup>, Kazutoshi Kono<sup>A)</sup>, Isao Takahashi<sup>B)</sup>, Toshihiro Otani<sup>B)</sup>, Kenji  
Nemoto<sup>A)</sup> and Takamasa Kayama<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Yamagata University

<sup>B)</sup> Mitsubishi Electric Corporation

#### Abstract

A carbon synchrotron for radiotherapy requires a considerable amount of electric power, typically a few megawatts. A large part of the energy is consumed by the magnets, especially the bending magnet of the synchrotron. They are generally operated continuously in order to maintain the stability of the magnetic field pattern, but they should be able to be switched off if the magnetic field is stable sufficiently. In this study, the magnetic field induced by a synchrotron bending magnet was measured during a variety of operation sequence. A 5, 10 and 20 minutes' interval causes little difference in the magnetic field before and after the interval when the flat top current level is unchanged. When the flat top current is changed drastically, it needs several tens of cycles to reach some stability.

#### 1. はじめに

重粒子線によるがん治療は国内では放医研で開始され、兵庫県、群馬県、佐賀県でも既に治療が開始されており、神奈川県で建設が進んでいる。現状では東北地方は重粒子線治療の空白地帯となっており、重粒子線治療施設を望む声は地元でも極めて大きい。

山形大学医学部では、2004年より重粒子線治療施設設置の計画を開始し、現在では東北地方唯一の計画として広く認知されている。本計画では最先端技術を可能な限り取り込んだ次世代型治療施設の開発を目指しており、具体的には①省エネルギー、②省スペース、③廃棄物削減、④運転管理の容易化の4つのコンセプトに基づいた研究開発を進めている。ここで、②は加速器の上階に立体的に治療室を配置することで40m×40mの敷地面積まで縮小すること、③はスキャニング照射法の採用によるボラス・患者コリメータの一掃、④は自動制御・遠隔監視の積極的導入により、「エコ型・総合病院接続型」の治療施設としての確立を目指している。

①の省エネルギーについては、電磁石で消費される電力量の削減手法の確立を目指している。シンクロトロン偏向電磁石では台形状の磁場パターンにより周回するイオンのエネルギーに応じた磁場を発生させるが、磁場の安定度を優先するため治療の有無にかかわらず台形パターン運転を継続することが一般的である。我々はその台形パターンを治療に応じて停止すること（フラットベース電流レベルのDC通電）によって、治療待機時間などの合間の電力量を削減させる運転手法を検討中である。

<sup>#</sup> iwai@med.id.yamagata-u.ac.jp

この運転手法を確立するためには、パターン通電を連続した時の磁場の挙動や、パターン通電をある一定時間停止した時に停止前後の磁場の挙動などの基礎データが必要になってくる。これらの基礎データ取得のため、我々は先行施設と同等品質のシンクロトロン偏向電磁石等の電磁石数種と通電用の電源を製作した。製作した電磁石および電源は、山形大学医学部内に新築した重粒子線がん治療装置研究棟に現在設置されている。

本研究では、シンクロトロン加速器の省エネルギー運転法確立のための基礎データ取得を目的として、パターン通電停止を含む種々の運転パターンの下でシンクロトロン偏向電磁石の磁場の挙動を調査した。

#### 2. 試験方法

Table 1 に使用したシンクロトロン偏向電磁石の仕様を示す。仕様はサガハイマットで使用されているものとほぼ同一である。実機で使用されるものとは

Table 1: Specifications of the Synchrotron BM

Maximum Current	2220 A
Maximum Magnetic Field	1.54 T
Maximum Inductance	14.8 mH
Resistance	12.4 mΩ
Bending angle	20°

異なり、試験においてはユニポーラ電源を使用した模擬通電パターンを採用した。この電源は、実機の台形パターンとは 1 パターンあたりの時間が長い（～10 秒）点と、下げ勾配が指数関数的減衰になっている点異なる。実測した電流パターンを Figure 1 に示す。本研究では、2210A、1710A、830A の 3 段階のフラットトップ電流を設定した（それぞれ  $C^{6+}$  430, 300, 80 MeV/u に対応）。また、それぞれの励磁電流の上昇にかかる時間を一定（1s）にしているため、電流勾配はフラットトップ電流に応じて異なる条件になっている。

試験体系の模式図を Figure 2 に示す。磁場の測定は、磁極間隙の中心にホール素子および NMR プロブを固定し、ホール素子による連続測定を行いつつ、フラットトップ(FT)終盤の磁場を NMR プロブ(Metrolab PT2025、絶対精度 $\pm 5$ ppm、相対精度 $\pm 0.1$ ppm)により測定した。本稿で示す磁場の値は NMR プロブ計測値のパターン毎の平均値である。また、励磁電流の変動や磁極温度（白金抵抗測温体 PT100 使用）の計測も実施した。励磁電流は非常に安定しており、その変動の影響は本稿の試験範囲内では無視できるほど小さかった。

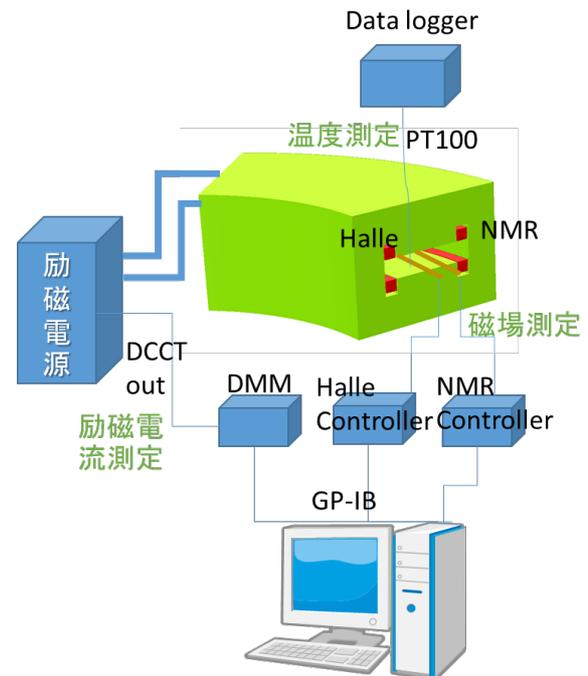


Figure 2: A schematic view of the measurement setup.

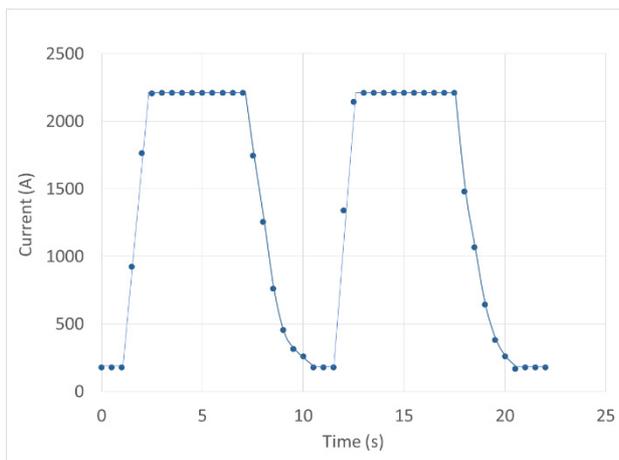


Figure 1: A typical current pattern (FT: 2210 A).

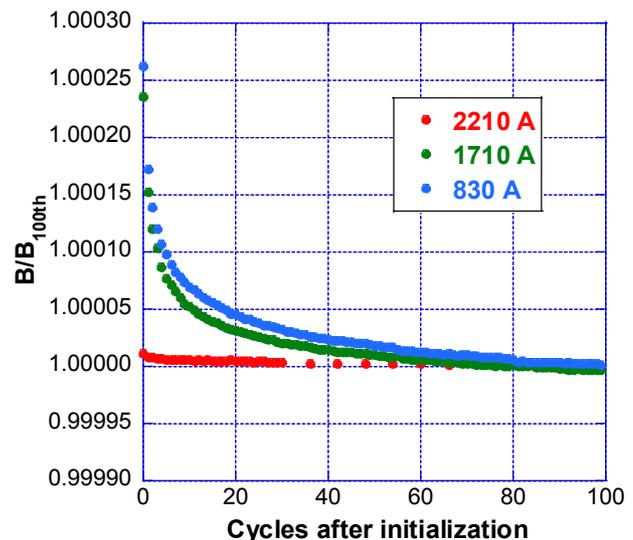


Figure 3: The successive change of the magnetic field after the magnet initialization. The fields are normalized by the field value of 100<sup>th</sup> cycle.

### 3. 試験結果

#### 3.1 連続パターン通電時の磁場挙動

Figure 3 に各 FT 電流で連続パターン通電したときの磁場挙動を示す。それぞれの磁場は 100 サイクル目の磁場で規格化している。いずれの電流においても、初期化直後は高めの磁場を示し、徐々に安定値に近づく傾向は共通している。ただし、完全に安定には至るわけではなく、1 時間あたり  $10^{-5}$  程度で継続的に減少する。ほぼ最大電流の 2210A 初期化からの変動幅は小さく、 $1 \times 10^{-5}$  程度であるのに対し、1710A と 830A では変動の幅は  $2 \times 10^{-4}$  を超えている。また、FT 電流値が小さいほど変動の幅が大きく、安定値に近づくまでの時間も長い傾向が読み取れる。

ただしこの現象は DC 励磁における磁気余効（電流の変動に対して磁場の静定が遅れる現象）とは本質的に異なっており、強磁場パターンから FT 電流を下げた場合も、弱磁場パターンから FT 電流を上げた場合も同じような経過を辿って安定値に近づくことが特徴的である。

#### 3.2 インターバル運転時の磁場挙動

山形大学の計画では治療室 2 室での運用を計画しているため、照射準備などのためにビームが不要と

なる時間が他施設よりも長めになると予測される。本研究では、FB 電流の DC 通電で一定時間待機するインターバル運転を実施し、磁場にどのような影響を与えるかを評価した。インターバルの長さは、5、10、20 分間で設定した。FT 電流 2210A の結果を Figure 4(a)(b)に示す。(a)が 1 回目、(b)が 2 回目の結果である。いずれの試験においても、パターン連続運転時と同様、磁場は 1 時間あたり  $10^{-5}$  程度の漸減傾向を示しつつ、5 分、10 分、20 分それぞれのインターバル前後での磁場の変動は極めて小さい ( $\ll 10^{-5}$ ) が示された。

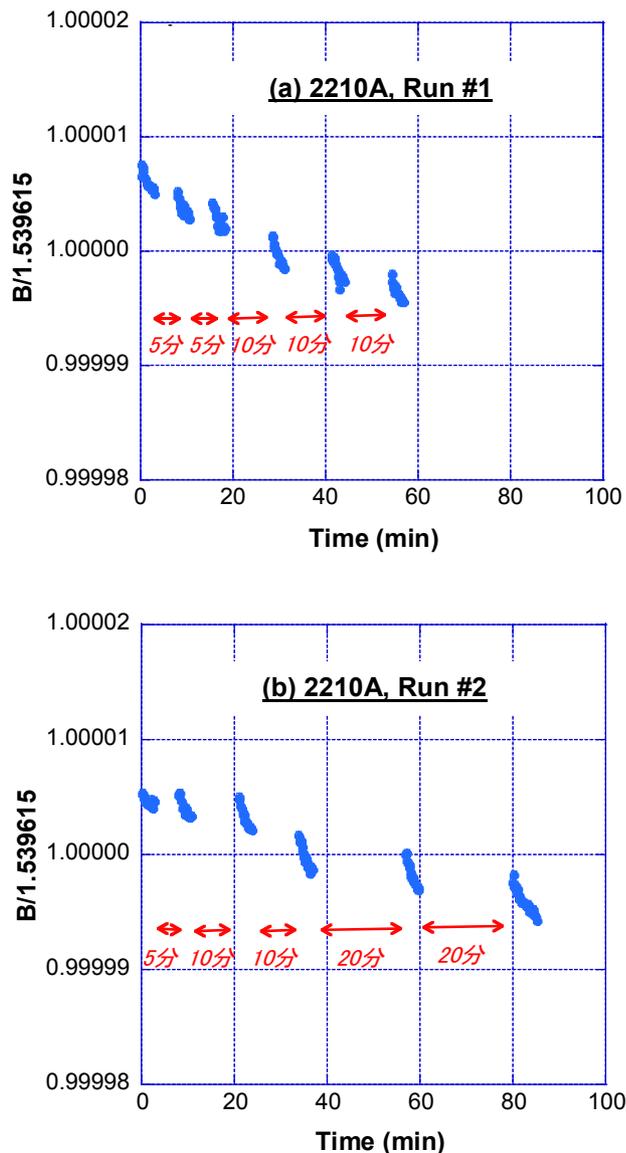


Figure 4(a), (b): Effect of the intervals on the magnetic field induced by the FT current of 2210A. (a) 1<sup>st</sup> run, and (b) 2<sup>nd</sup> run.

FT 電流 1710A、830A の結果をそれぞれ Figure 5,6 に示す。いずれの結果も、Figure 3 に示した曲線とほぼ同じ傾向で減少しつつ、インターバルを挟むこ

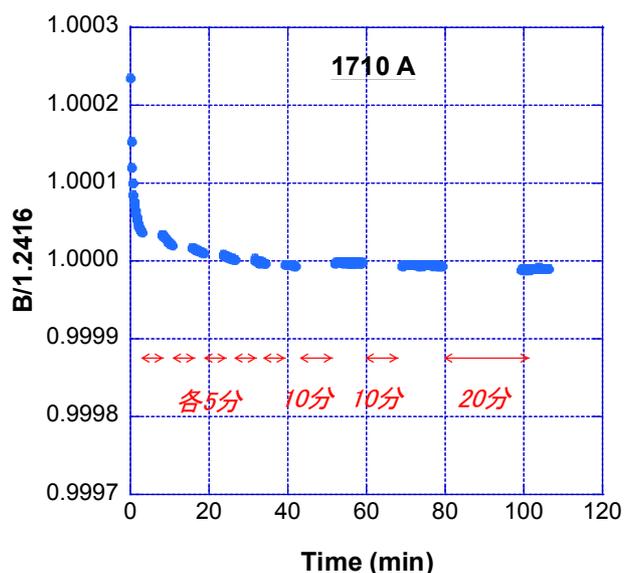


Figure 5: Effect of the intervals on the magnetic field induced by the FT current of 1710A.

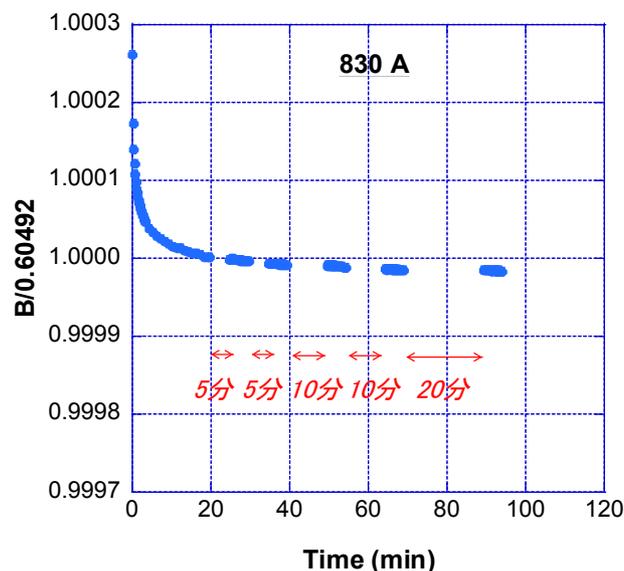


Figure 6: Effect of the intervals on the magnetic field induced by the FT current of 830A.

とによる磁場の変動はごく小さく、 $10^{-5}$  レベルかそれ以下であった。

以上の結果から、シンクロトロン偏向電磁石のパターン運転を一時停止してフラットベース DC 通電状態に落としても、停止前とほぼ同レベルの磁場で再開できることがわかった。したがって、同じビームエネルギーで治療が続く場合においては、ビーム不要な時間にパターン運転を停止することによる省エネルギー運転法は、かなり実現可能性が高いと言える。しかしながら、ビームエネルギー変更直後には初期化から磁場静定までに一定のサイクル数を費やす必要があるため、何らかの工夫が必要と考えられる。

#### 4. 結論

シンクロトロン加速器の省エネルギー運転法確立のための基礎データ取得を目的として、連続運転時およびインターバル運転時のシンクロトロン偏向電磁石の磁場の挙動を調査した。その結果、5~20分のインターバルが磁場に与える影響はごく小さいこと、ビームエネルギー変更時にはフラットトップ電流が小さいほど変更直後の磁場変動が大きく、磁場静定にも時間がかかることがわかった。

#### 謝辞

本研究は、平成 24 年度文部科学省補正予算「次世代型重粒子線装置の開発に向けた革新的技術開発」の助成を受けて実施されました。