

## Control of Axial Shift for Therapeutic Beam in HIMAC

Hiroshi Uchiyama<sup>#,A)</sup>, Masahiro Kawashima<sup>A)</sup>, Shunsuke Saito<sup>A)</sup>, Izumi Kobayashi<sup>A)</sup>, Hideki Fujiwara<sup>A)</sup>,  
Kenichi Ichinohe<sup>A)</sup>, Eiichi Takada<sup>B)</sup>, Shinji Sato<sup>B)</sup>, Yoshiyuki Iwata<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Accelerator Engineering Corporation

KA building 3-8-5 Konakadai, Inage-ku, Chiba-shi, 263-0043

<sup>B)</sup> National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8555

### Abstract

At HIMAC synchrotron, RF-Knockout(RF-KO) method and Wobbler method is employed to eject a beam and to form irradiation field for cancer therapy. In this method, if the beam axis will have moved over  $\pm 0.5\text{mm}$ , the flatness of irradiation field will be over permissible value(1%). Then operators are observing the beam position with quasi-nondestructive beam profile monitor throughout irradiation. While we acknowledge almost constantly a beam profile is stirred within range of permissible value, the factors have been identified until recently. Therefore a matter was that we could not make judge of the causes. We researched causes of the beam drift by to consider long period drift and short period drift separately.

## HIMAC 治療ビーム軸変動の抑制

### 1. はじめに

放射線医学総合研究所の重粒子線がん治療装置 HIMAC では、治療ビームの取り出しの方法として RF-knockout(RF-KO)による遅い取り出し法が採用され、呼吸同期照射法の求める早いビームの ON/OFF 要求に対応している。また、走査型照射野形成法(ワブラー法)により最大  $20\text{cm}\phi$  の照射野を形成している。ワブラー法による照射では走査電磁石によって円状に拡散させたビームを散乱体により拡散させることで照射野を成型している。照射野の平坦度は、治療計画作成時の基準となる平坦度から誤差 1% 以内となることとしており、このためにはアイソセンターよりおよそ 2m 手前に設置した治療室内プロファイルモニタでのビーム重心の変動が  $\pm 0.5\text{mm}$  以内であるひつようがある。ビーム供給時には常に加速器オペレータによって、高エネルギービームトランスポートライン(HEBT)末端に設置された準非破壊型のプロファイルモニタでのビームプロファイル監視を行い治療ビームの質を保証している。しかし、上下 2 台のリングからのビーム供給や、治療の無い夜間には様々な核種やエネルギーを要求される実験へのビーム供給を行うような HIMAC の特徴的な運転方法のために、日常的に治療ビーム軸の変動は起こっている。そのため、もしもイレギュラーなビーム変動が起こってしまった場合切り分けが困難なため、原因を明確にすることが求められていた。また、平成 23 年 4 月より治療照射開始が予定されている新治療室での 3 次元スキニング照射では、ビーム軸にもより高い精度が必要になる。これらの要求に応えるために、ビーム軸変動の原因を長時間に渡る遅い変動と短時間での早い変動とに分けて調査し、その抑制の方法を検討、試験した。

### 2. ビーム軸変動の現状

#### 2.1 プロファイルモニタによる監視

HIMAC シンクロトロンは上下に並んだ 2 組のリングと輸送系及び 4 つの治療照射ポート(AVC,BVC,BHC,CHC)、5 つの実験照射ポート(BIO,PH1,PH2,SB1,SB2)で構成されている。図 1 に上リングの概略図を示す。輸送系の末端に準非破壊型のプロファイルモニタ(PRN034, PRN044)、アイソセンター手前に治療室内プロファイルモニタ PRN033, PRN043 が設置されている。

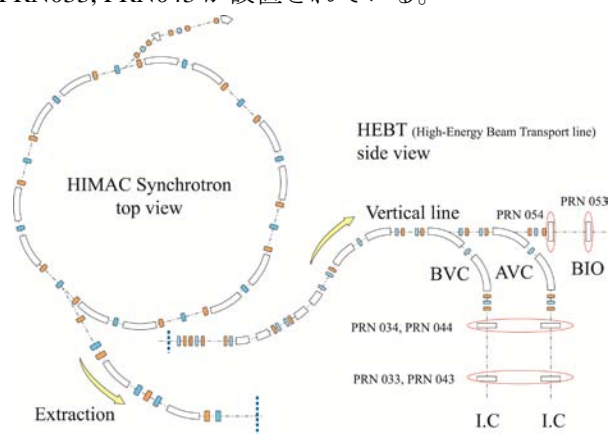


図 1 : HIMAC シンクロトロンと高エネルギービーム輸送系概略図。

治療照射中は各機器の状態監視の他、HEBT の末端に設置した準非破壊型のビームプロファイルモニタでビームプロファイルに異常が現れていないかを監視している。図 2 は普段オペレータが監視しているビームプロファイル画面である。治療開始前に調整したビームのプロファイルをリファレンスとして、

現在のプロファイルと比較し異常がないことを確認している。

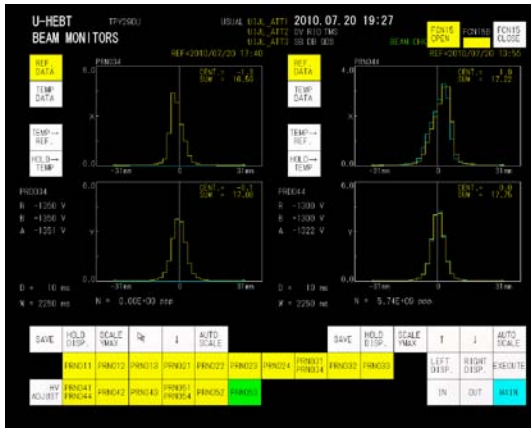


図 2：準非破壊型プロファイルモニタ監視画面。黄色がリファレンスプロファイル、水色が現在のプロファイル。

ただし、通常運転中でも常にビームが調整時を再現するというわけではなく、いくつかの複合的な要因によってビーム軸が変動していることが確認されている。

### 2.2 短いスパンでのビーム軸変動

日常的に確認されているビーム軸変動は水平方向プロファイルの変化のみで、垂直方向のビーム軸は非常に安定している。水平方向のビーム軸変動には大きく分けて、長時間かけて動いていく変動と 1 周期の取り出し内の短い時間でビーム軸が変化していく変動の 2 種類があることが判っている。HIMAC のシンクロトロンでは 3.3 秒周期の運転をしており、そのうちビームを取り出せるフラットトップ区間が約 2 秒間である。フラットトップの取り出し可能区間中に照射側からの照射要求ゲートが立つと RF-KO が印加され、ビームが取り出される仕組みになっている。この 2 秒間のフラットトップ中で取り出しタイミングを 4 分割し、各プロファイルモニタの重心値を測定した(図 3)。

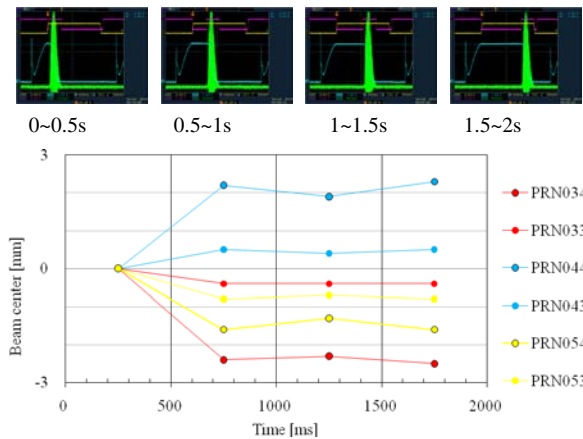


図 3：1 フラットトップ区間中のビーム軸変動。

上がフラットトップを 4 分割した取出しのリング

内 DCCT と取り出し波形。下のグラフが各取り出しタイミングでのプロファイルモニタ水平方向重心値である。始めの 500ms とそれ以降では準非破壊型モニタで 2.3mm、治療室内モニタで 0.5mm のビーム軸変動がある。

### 2.3 長いスパンでのビーム軸変動

図 4 は朝の治療ビーム調整後に測定した長い時間での軸変動の様子である。

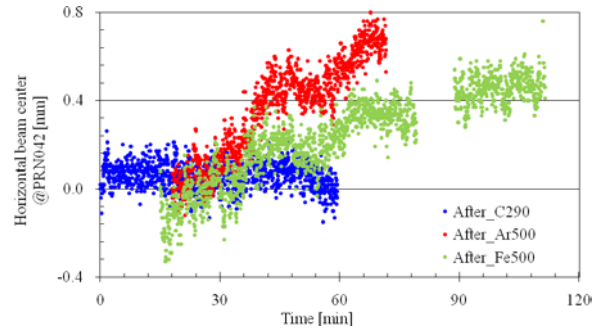


図 4：朝調整後のビーム軸変動。

C290MeV/u の治療用ビームへ切り替え完了時をスタートとして、AVC 室内手前に設置したプロファイルモニタの水平方向重心値変動をプロットしている。夜間に実験で利用された核種とエネルギーが、治療と同じ C290MeV/u(質量 12、電荷+6)のときのプロファイル重心からは特にビーム軸に変動は見られない。Ar500MeV/u (質量数 40、電荷+17)と、Fe500MeV/u (質量数 56、電荷+23/26)でのビーム利用の後は長時間かけてビームがドリフトしていく様子がみられる。

## 3. 変動調査

### 3.1 磁気余効と上下リングの干渉

トランスポートラインの機器はすべて DC で運転している機器であるため、フラットトップ中における変動はリング内での変動である。フラットトップ区間での水平チューンの測定結果を図 5 に示す。

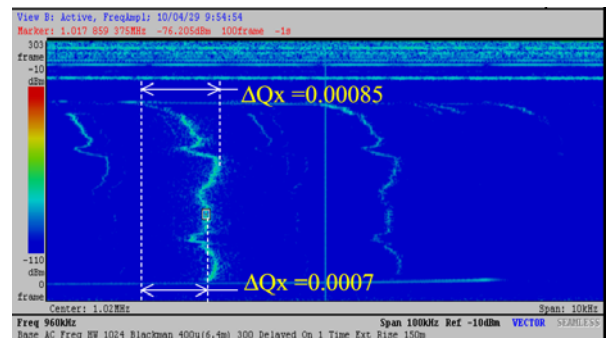


図 5：フラットトップ中のチューン変動

フラットトップ区間内で最大 0.85E-4 のチューン変動がある。この変動の中にも長いスパンの変動と短いスパンの変動がある。短いスパンの変動は上下リングの干渉により起こっている。上下干渉が起こ

るのは下リングの加速終了と減速開始のタイミングで、電源の電圧の変動が大きくなるタイミングである。図6に(株)エコー電子製 NMR 磁場測定器 EFM3000AX で測定したフラットトップ中のリング偏向電磁石(BM)の磁場の変動を示す。

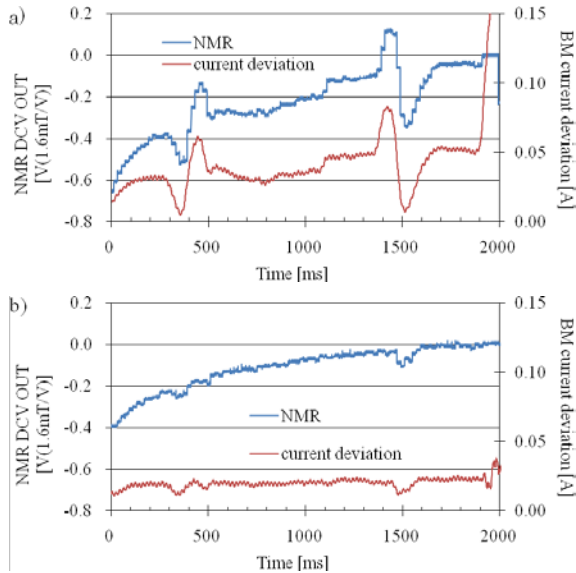


図6 : a)フラットトップ中の BM 磁場変動と電流偏差。b)学習後の BM 磁場変動と電流偏差

電流偏差が大きく出ているために磁場が変動していることがわかる。HIMAC では電源電圧パターンの“学習”と呼ばれる制御を行い電流偏差を小さくすることができる(ただし、下リングの運転パターンが変わった場合には学習をやり直す必要があり、通常上下干渉を消すような学習はしていない)。学習を行うことでフラットトップ中での磁場変動と電流偏差は図6 b)のようにすることができた。

また、チューンの変動と BM 磁場の変動が逆向きであることから、リング収束四極電磁石(QF)の磁場も同様になっていることが予想できる。発散四極電磁石(QD)も含め学習を行った結果のチューンは図7のようになる。

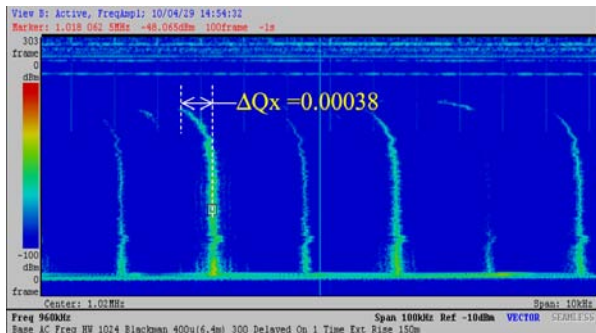


図7 : 学習後フラットトップ中チューン変動

学習によりフラットトップ中の電流値は BM、QF ともにほぼ電流偏差の無い DC 状態になったが、磁場・チューンともに変動している。この変動の要因は磁気余効による磁場変動とギャップの変動が考えられる。

### 3.2 DC 磁場の変動

フラットトップ中のビーム変動に対して、長時間の変動を機器ごとに切り分けて調査した。垂直軸の変動がないことから、垂直方向偏向電磁石と四極電磁石からなる HEBT の機器には問題がないと考え、出射用セプタム電磁石(SM)、出射ライン BM、リング BM 及び QF に要因があると予想した。セプタム電磁石、出射 BM、リング内 BM と QF・QD をそれぞれ単独で Fe500MeV/u 相当のパラメータで励磁し、その後の様子を測定した。セプタム電磁石とリング QF の磁場が測定できないためビーム軸の変動を磁場の変動と考えることとした。図8に結果を示す。

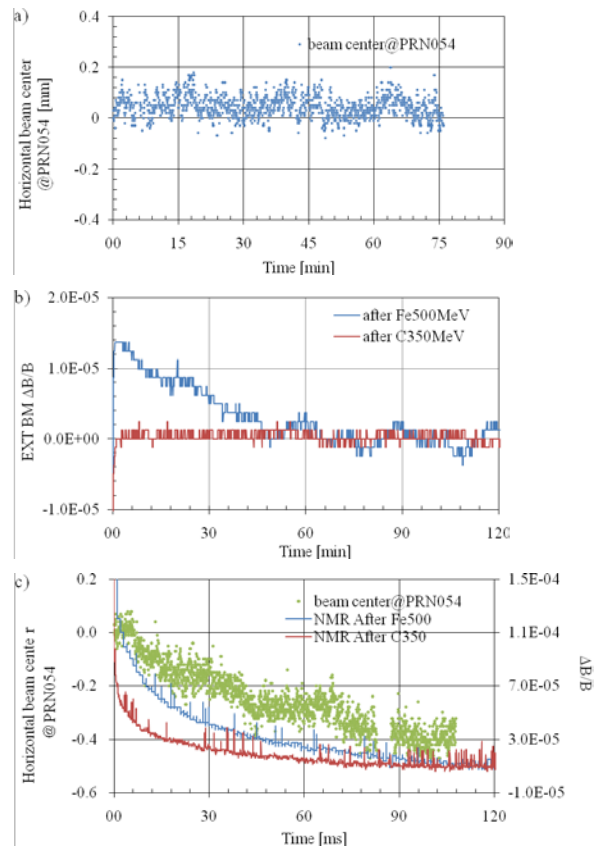


図8 : a)セプタム電磁石 Fe500MeV/u 相当設定値励磁後のビーム軸変動。b)出射 BM、Fe500MeV/u 相当設定値磁場変動。c)リング BM および QF・QD、Fe500MeV/u 相当設定値励磁後のビーム軸変動と BM 磁場変動。

軌道計算の結果(図9)では、セプタムでの磁場変動が $\Delta B/B$ で $1E-5$ があった場合 PRN054 で重心が $0.2\text{mm}$ 動く。この測定ではビーム軸変動は $0.1\text{mm}$ 以内といえるため、セプタムの磁場変動は $5E-6$ 以下であると考えることができる。出射 BM の磁場変動は $1.4E-5$ 程度で、計算では図4と同じ PRN042 の位置で $+0.28\text{mm}$ の変動に相当する。リングに関しても軸の変動量から出射角の変動を計算すると、およそ $0.032\text{mrad}$ の変化になる。これは PRN042 の位置で $+0.034\text{mm}$ 相当のずれになる。これらの結果は Fe500MeV での運転の後の PRN042 でおよそ $+0.6\text{mm}$ 強の変動があった図4の測定結果と一致する。また、



リングの出射角はチューンが高くなる方向に変動していることから、長いスパンの変化は QF ではなく BM の影響が支配的であるということもわかった。

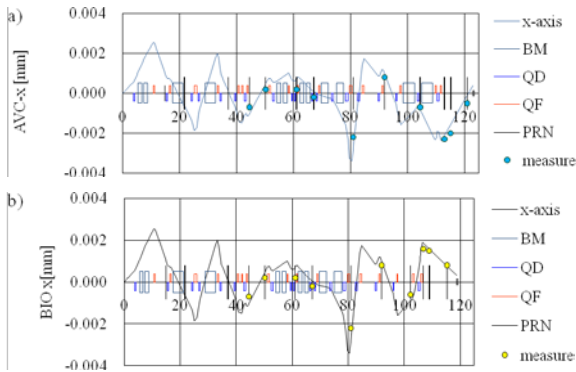


図 9：出射角に 0.15mrad のずれを与えたときの a)AVC と b)BIO コースでの軌道計算結果。"measure"は図 3 で測定したチューン変動によるプロファイルのずれ量。

#### 4. ビーム軸変動の抑制

##### 4.1 磁気余効成分の抑制

磁気余効の成分は BM 電流換算でおよそ 0.1A 程度と、デジタル制御分解能(約 0.03A)からみると非常に小さい。そこで電源の試験入力端子を利用し直接電流設定値に補正信号を足しこむ試験を行った。結果を図 10 に示す。

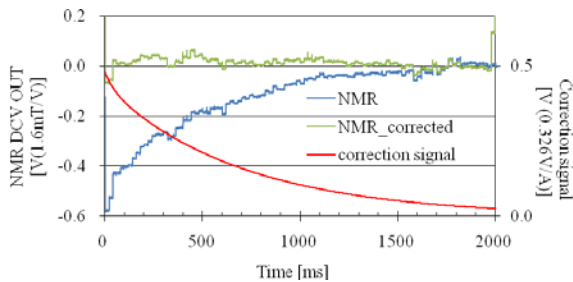


図 10：補正前後の磁場変動と補正信号波形

入力信号は、

$$0.48 \times \left( 1 - 0.9 \times \exp\left(-t/0.7\right) - 0.1 \times \exp\left(-t/0.05\right) \right)$$

の式で、50msec と 700msec の 2 つの時定数の指数関数を加算したものである。実際には FG に入れた信号の電圧を微調整してゲインを決定した。これにより BM の磁気余効による磁場変動を非常によく補正することができた。QF 変動をみることができなため、今後はビームを使ってチューン測定をしながら QF 及び QD の磁気余効補正を試験していく予定である。

##### 4.1 長いスパンの変動の抑制

長いスパンでの磁場変動はヒステリシスのため

あると考えられる。しかし対象となる電磁石電源は極性変更可能な電源ではないため、ヒステリシスを消すことが非常に難しい。

ただし今回の調査により、始めの 30 分でおおよそ半分の磁場変動があることがわかった。また、現在は常に射出 BM、及びリング BM の磁場を監視できるようになっていることから、実験終了後ただちに治療ビームの調整に入るのではなく、磁場の変動が少しでも落ち着いてからの調整を行うようにすることで、治療中の軸変動を抑制できると考えている。

#### 5. まとめ

磁場および準非破壊モニタ監視と軌道計算を活用することで軸変動の要因と室内モニタでの軸の変動量を把握することができるようになった。今後上下干渉と磁気余効の補正試験を進めていき、治療供給に限らず実験ビームの供給においてもより安定したビーム供給を可能にしていきたいと考えている。

#### 参考文献

- [1] T.Furukawa, et al., "HIMAC 運転改善に関する検討報告書", HIMAC Report-114, May, 2006
- [2] T.Furukawa, et al., "Optical matching of slowly extracted beam with transport line", Nuclear Instruments and Method in Physics Research A,560 (2006) 191-196