

Development for turn-key treatment-beam delivery at HIMAC

T.Shiraishi ^{A), #}, M.Katsumata ^{A)}, T.Furukawa ^{B)}, M.Torikoshi ^{B)} and E.Takada ^{B)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation,
Konakadai, Chiba, JAPAN 263-0043

^{B)} National Institute of Radiological Sciences,
Anagawa, Chiba, JAPAN 263-8555

Abstract

We adjust position and intensity of beam for treatment every day, which takes about 15 minutes per port for each beam energy. In order to treat more patients with more flexible scheme, we need to minimize the beam tuning time. Therefore, we studied characteristics of beam behavior with present parameters and investigated cause and remedy for daily variation. We found a change of Horizontal tune strangely affects the beam at the treatment room. We have changed relevant parameters to enhance reproducibility of beam, report about our investigation and present result of the development. We discuss present result and future direction.

HIMACにおける治療ビーム無調整化のための開発

1. はじめに

我々が治療装置の運転・維持管理に携わっているHIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) では昼に治療、夜に実験の供給というような運用を行っている[1, 2]。治療は炭素線によるもので、治療部位により5種類のエネルギーを使い分けている。実験供給では様々なイオン種を使用しており、治療運転日は早朝にイオン種の切り換えを行っている。

治療件数は年々増加しており、昨年度は年間415件の治療を行った[3]。現在の治療運用ではエネルギー別に治療する時間帯を分けていて、一日のエネルギー変更は1~2回行い、その際に掛かる時間は1コース15分程である。しかし今後治療件数の増加や外来での治療を行っていく上で、現在の運用形態を変更し患者ごとにエネルギーの変更を行う要求があり、これを実現するためには調整時間の短縮が不可欠である。

調整時間短縮のためには、ビーム位置と強度の調整時間短縮を行う事が課題となり、最終的にはビーム位置と強度の調整を無くす予定である。そこで我々はビーム位置及び強度の再現性を調査し、無調整化に必要な条件を検討した。

2. HIMAC構成

HIMACには3台のイオン源が存在し、治療供給にはECRイオン源が用いられる。イオン源から出たビームはRFQ、DTLの2つの線形加速器によって加速され、シンクロトロン[1]へと輸送される。

シンクロトロンは、ほぼ同じ構成のものが上下2台設置されていて、ここで必要なエネルギーにまで加速した後、上下それぞれ高エネルギー輸送系

(以下HEBT系)へと取り出しを行い、各治療室まで運搬を行う。

治療室は3部屋で、垂直方向からの照射を行う部屋と、水平方向からの照射を行う部屋、また垂直・水平両方からの照射を行う部屋が各1部屋ずつとなっている[図 1]。

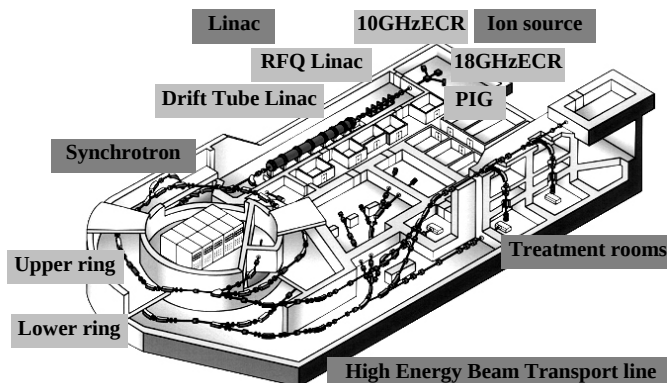


図 1. HIMAC構成図

3. 過去の治療ファイル再現性

はじめに調査を開始した時点でのビーム再現性について記述する。データ取りはビーム位置、強度共に治療のエネルギー変更時に行い、ビーム位置のデータ取りは2004年4月から7月、強度は2003年12月から3月までの期間にそれぞれ測定を行った。ビーム位置再現性のデータは、治療室手前に設置されているPRN**2及び治療室内にあるPRN**3にて未調整時のビームの中心値(X, Y)を測定した。

一方、強度の再現性データは、ビームスクレーパの設定値を一定として、その設定値でのビーム強度を強度測定機能付プロファイルモニタ (PRN**2) にて測定した。

この結果、ビーム強度は上下リング共に $2E+9$ 個/秒の $\pm 10\%$ の範囲で再現する事が確認できた。一方ビーム位置については上リングのX軸のずれが大きく[図 2, 3]、そのずれは前夜の供給条件による事がわかった。以下にその条件を挙げる。

- (1) 早朝立上げ時(前夜運転なし)
- (2) アルゴン 500MeV/u などの高エネルギー供給後
- (3) プロトン 100MeV/u などの低エネルギー供給後

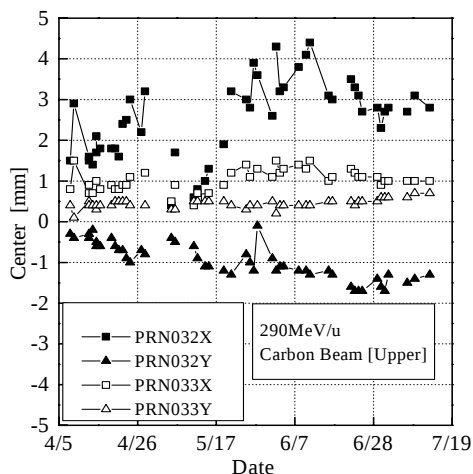


図 2. ビーム位置再現性(上リング)

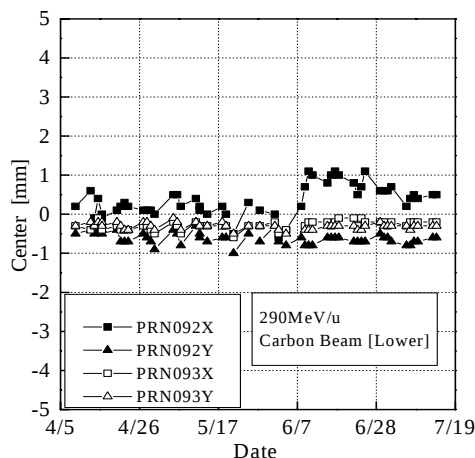


図 3. ビーム位置再現性(下リング)

このうち(1)については冷却水の温度変化、(2)(3)に関しては残留磁場による影響が考えられる。

冷却水温の変化とビーム位置の関係については、これまでもHIMACでは意識されており、冷却水温が安定するまではビーム位置も変動することがわかっている[4]。そのため現在のオペレーションでは冷却水温がある基準値に上昇するのを待って、調整を行うようにしている。(治療供給に関係するのは年5~6回程度である。)

4. 変動要因の考察

前章でも述べた通り、ビーム位置の再現性に

前日の供給条件が大きく影響しており、冷却水温の変化を除けば、残留磁場による影響が最も大きな問題と思われる。

4.1 現在のエネルギー変更シーケンス

現在のシーケンスでは、直流励磁の電磁石群については電磁石を1分程度最大励磁してから設定値へと持っていく“電磁石の初期化”を行っているが、パターン励磁の電磁石群については“電磁石の初期化”を行っていない。これまでのQF電磁石についての調査結果から3サイクル程度最大励磁を行う“初期化”後約15分間リングのチューンが変化し、それに伴ってビーム位置も変化する事がわかっている[4]。そのため、我々は残留磁場によりリングのチューンが影響を受ける事を前提とし、その上で最も再現性が上がるような解を見つけることにした。

4.2 チューンの変化とビーム位置の関係

HIMACにはほぼ同じ構成のシンクロトロンが2台あり、残留磁場による影響も同じだけ受けるはずである。図4は水平方向チューン変更時のビーム位置の変化を見たものである。

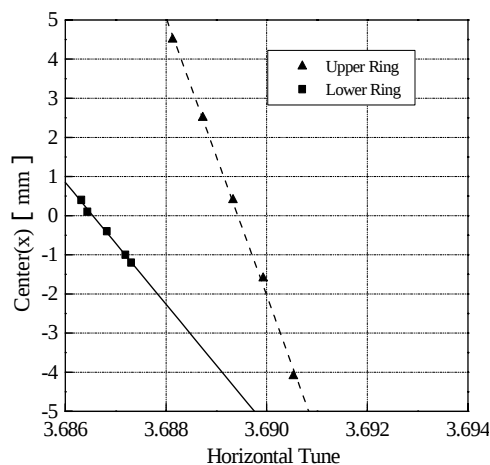


図 4. 水平チューンとビーム位置の関係

この結果、上リングは僅かなチューンの変化でもビーム位置に大きく影響する事がわかった。つまり上下で同じチューンのずれが起きた場合、上リングでは下リングに比べてビーム位置のずれが大きくみえてしまう。

4.3 上リング動作点とその結果

これまでの結果をまとめると、上下リング共に前日には多種イオンの供給を行っており、パターン電磁石の初期化を行っていないため、残留磁場による影響を受けていると考えられる。しかし、現在のビーム位置再現性は上下で大きな開きがあり、それはチューンの変化に対するビーム位置の影響が上下で大きく違うためであると考えられる。我々は上リングについて、現在設定している

チューンが高過ぎるため、残留磁場によって更にチューンが変化した場合に取り出し角度が大きく変化してしまうと考えた。そこで、上リングの水平チューンを低く設定して、残留磁場による影響を最小限に押えるような調整を行った。

図5は上リングファイル書き換え後のビーム位置再現性である。

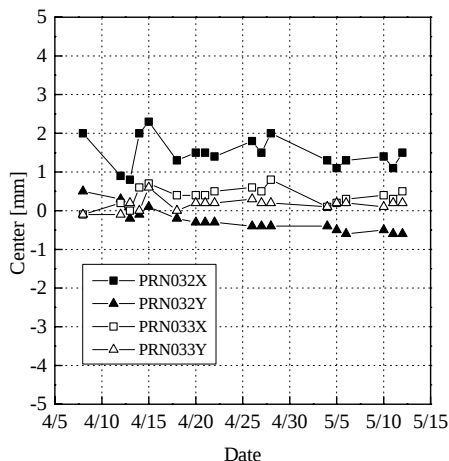


図 5. ファイル書き換え後のビーム位置再現性（上リング）

X軸の再現性は書き換え前と比べれば格段に良くなったが、それでも前日の供給条件に依存する傾向は変わっておらず、現在の基準値である、 $0 \pm 0.5\text{mm}$ の幅には収まっていない。今後も調査を続けていく必要がある。

5. 今後の展望

ビームの再現性は現在の基準値に収まっていないが、それでも無調整化に向けた要求は日に日に強くなってきている。そこで、現在のファイルで如何に無調整供給を行うかを今後の課題として挙げる。

5.1 新規調整法の検討

これまでの調査結果から、ビームのずれはシンクロトロン出射部でのビーム出射角度の微小変化によるものであることがわかっている。そこで、出射部に設置してある静電型デフレクター（ESD）を用いて出射角度の補正を行えば、ビーム位置の補正が可能なのはである。

図6は上リングのESDを用いてビーム出射角度を変化させたときのビーム位置の変化をAVCコースとBVCコースで測定したものである。異なる2つのコースで符号が逆転するのは2コースの光学系が逆転しているためで、この結果を逆算すれば、2コースのビーム位置を一度に補正するためのESDの設定値を算出する事が出来るはずである。この調整法については現在データ取り中を行い、信頼性を検証しているところである。

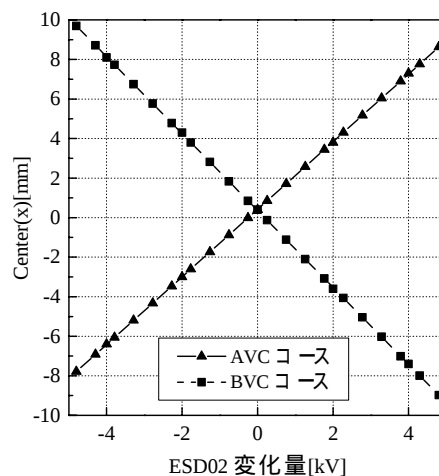


図 6. ESD変化量に対するビーム位置の変化

5.2 ビーム検証機能の追加

現在の調整では、ビーム調整後に必ずオペレータによる確認作業を行っており、時間的なロスが大きく、時間を気にすれば確認ミスを誘発しやすい。そこで現在、確認機能を計算機に入れる案を検討している。

5.3 調整用基準値の再検討

現在の基準値の見直しを検討している。治療供給を行う前提上、基準値は当然厳しくすべきで、その上で影響（違い）がないと判断される値が現在よりも広い範囲であるならば、我々としては変更も可能なのではないかと考えている。

現在のところ、我々ビーム調整を行う側と、実際に治療条件（照射野、平坦度など）を作成する側とで協力して、データの収集と基準値の検討を行っている。

参考文献

- [1] K. Narita *et al*, "Present Status of HIMAC, NIRS", Proc. 1ST Annual Meeting of Particle Acc. Sci., Funabashi, Japan, August 4 – 6, 2004, pp. 251-253.
- [2] C. Kobayashi *et al*, "Operation of HIMAC and cancer therapy," CERN-2001-002, Proc. WAO2001, Villars, February 2001.
- [3] E. Takada *et al*, "Status of HIMAC" the 3rd Asian Particle Accelerator Conference, Gyeongju, Korea, March 2004.
- [4] T. Shiraishi *et al*, "Development for turn-key treatment-beam delivery at HIMAC", WAO2005, Chicago, ARTA2005, Tokyo, Japan, June 2005.