

FAST CONFIRMATION OF THERAPY BEAM REPEATABILITY AT HIMAC SYNCHROTRON

Hiroshi Uchiyama^{A)}, Masahiro Kawashima^{A)}, Syunsuke Saito^{A)}, Hideki Fujiwara^{A)},
Eiichi Takada^{B)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation

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

^{B)} National Institute of Radiological Sciences

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

Abstract

HIMAC synchrotron has two rings and four beam ports for a carbon beam cancer therapy which requires each four, total eight kinds of energy. While irradiation group demands to speed up the operation of energy change to plan more flexible irradiation schedule, we operator have changed beam energy only 1-3 times in a day at each ring with time constraints. It is necessary to shorten the beam tuning time which contains time of beam confirmation to achieve fast energy change operation. On the other hand, it is more important to guarantee a repeatability of the beam at HIMAC that is medical accelerator. So in order to prevent the repeatability from being involved by speed-up, we researched and considered ways to satisfy both of the beam repeatability and the fast beam confirmation.

HIMAC 治療ビーム再現性確認の高速化

1. はじめに

放射線医学総合研究所 HIMAC では、1994 年の臨床試験開始以来これまで述べ 6500 人超のがん患者の治療を行っており、ここ数年の患者数は年間で 600 人を超えるペースで照射している(図 1)。今後も更に運転時間と治療件数は増加していく方向であり、加速器にはより安定した運転が求められるようになっていく。

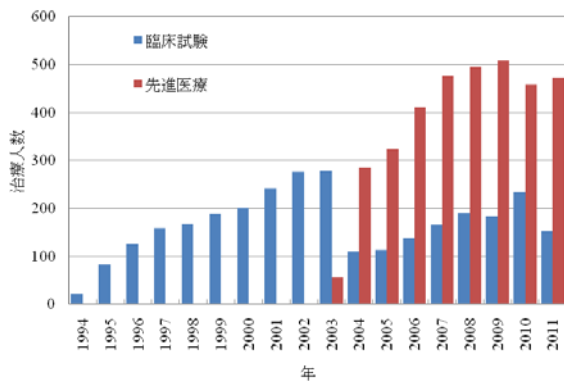


図 1 : HIMAC での治療人数推移

また昨年度からは新治療棟での次世代治療照射が開始されるなどもあり、近年ではこれまで重要とされていなかった以上の品質が加速器に求められるようになっていく。その一つとして、照射側のよりオンデマンドな要求に対応するためのコース切替、エネルギー切替の高速化が挙げられる。HIMAC は上下に並んだの 2 つのシンクロトロンを持ち、平日の昼間には上リングから垂直用 2 ポート(AVC/BVC)、下リングからは水平用 2 ポート(BHC/CHC)、計 4

ポートにビームを振り分けて供給している。また照射の深さ方向を決めるビームのエネルギーは、通常垂直ポートに 290MeV/u と 350MeV/u、水平ポートには 290MeV/u と 400MeV/u のビームを供給しており、その他にも眼の治療用に 140MeV/u(垂直ポート)と 170MeV/u(水平ポート)、より深部への照射が必要な治療のための 400MeV/u (垂直ポート)と 430MeV/u(水平ポート)、水平垂直それぞれに 4 エネルギーを切り替えて供給を行っている。

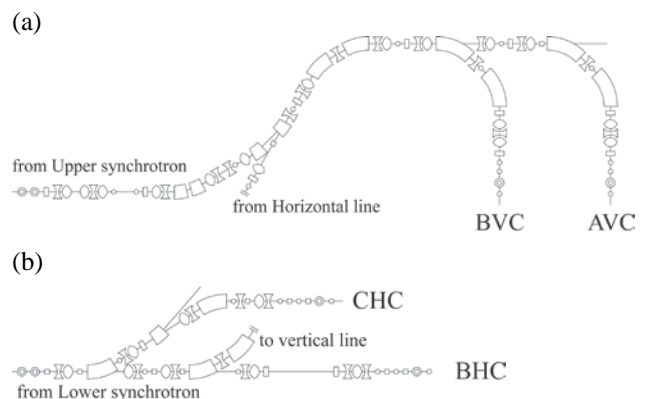


図 2 : 輸送系レイアウト。(a) 垂直コース側面図。(b)水平コース平面図。

現状では加速器のパラメータを変更してビーム軸等の調整を完了するまでに 1 ポート当たり 10~20 分の時間がかかり、照射室側でもエネルギー変更毎に基準測定を行う時間が必要としているため、患者側の都合ではなく加速器側の予定に合わせるように照射スケジュールはエネルギーごとにまとめられている。これを外来での照射等、自由度が高いオンデ

マンドな照射スケジュールを可能とするためにエネルギー切替の高速化が求められている。エネルギー切替の高速化実施に向けては現有設備で実現可能な範囲のルーチン等運用方法の改定に始まり、大掛かりな工事が必要な改造まで、何段階かに渡る計画が検討されている。改造工事の必要のない現有設備で実施可能なエネルギー切替の高速化とは、マシンスペックに依存しない分野であり、つまり主にオペレータに依存している調整及び再現性確認の効率化である。この点に対して加速器側として考えられる問題点と対応策について調査検討した結果を報告する。

2. ビーム再現性

2.1 現状と高速化の問題点

リング及び輸送系パラメータの変更後のビーム確認では、リングの再現性を確認するためにリング内周回ビーム量と照射室内直前の強度モニタからリング出射効率および輸送系の輸送効率を測定し、輸送系末端のプロファイルモニタと照射室内のプロファイルモニタのドリフトスペースを挟んだ 2 点間でビーム軸を再現させることで、治療ビームのエネルギーと平坦度を保証している。エネルギー切替に要する時間の内訳は、機器のパラメータファイルをロードして変更シーケンスが完了までがおおよそ 5 分、最終的な確認にかかる時間が約 1 分ほどであり、残りの時間がビーム強度やビーム軸の微調整し再現性を確認することに要する時間で、これが 5 分～15 分程度とエネルギー切替時間が一定せず、長時間に及んでしまうことのある主な要因となっている。マシンスペックの変更なしに機器のパラメータ変更シーケンスの時間を削ることは難しいため、エネルギー切替高速化の第一段階として、この調整及び再現確認時間の短縮が検討されている。その内容は照射室内にビームを入れず輸送系末端の準非破壊型プロファイルモニタの 1 点のみでビーム位置を確認するというもので、この結果ビーム強度とビーム軸共に正しい意味での再現性確認ができないということになる。またチェック項目が減ってもビームの再現が得られなければ再調整が必要になり、結局手間と時間が余計にかかるという事態も想定できる。この問題点に対応するために日常的に起こるビーム変動の要因について調査し対策を検討すると同時に、機器異常などの突発的な要因でビームの変化があった場合に簡略したビーム確認の方法で異常を発見するための確認方法を検討した。

2.2 夜間実験の影響

図 3 は治療ビーム調整前の輸送系末端プロファイルモニタでのビーム位置と、出射点でのビーム位置の変遷である。図 3 (a)のとおり垂直方向のビーム軸再現性は高いが水平方向には日々ばらついており、図 2 (b)と並べると、出射プロファイルと末端プロファイルの変化が連動していることが判る。

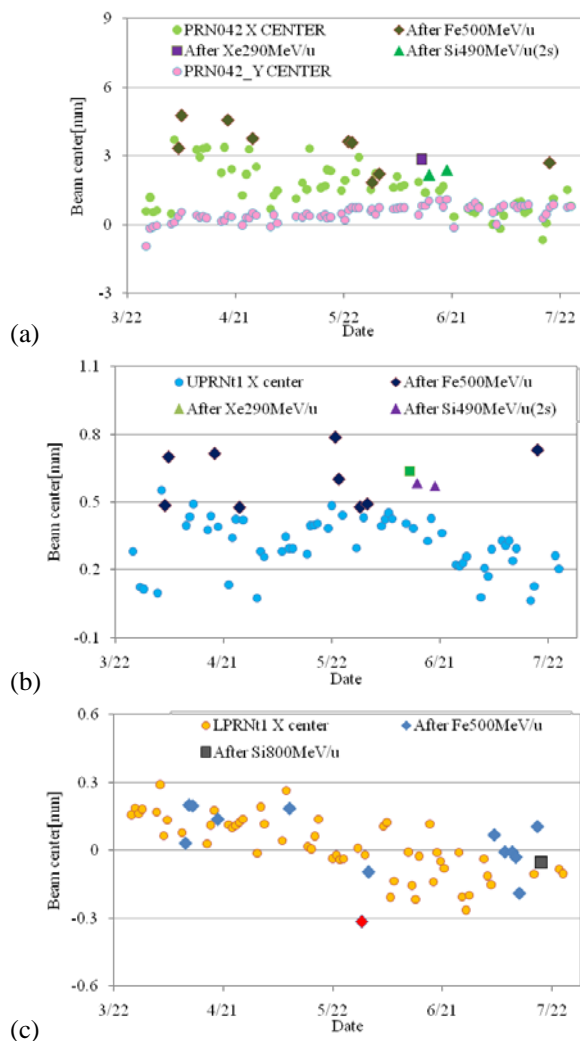


図 3：前夜の実験に用いられた核種エネルギーと日々のビーム軸変動(a)輸送系末端プロファイルモニタでの水平垂直両方向ビーム位置。(b)上リング（垂直コース）出射プロファイルモニタでの水平方向ビーム位置。(c)下リング（水平コース）出射プロファイルモニタでの水平方向ビーム位置。

HIMAC では昼間は治療照射のためのビームで、垂直コースであれば C140～400MeV/u の範囲のエネルギーのみであるが、夜間は実験のために Fe500MeV/u のビームなど B_p 比にして C290MeV/u の 1.6 倍、ほぼ磁石定格の磁場を励磁して運転することがある。そのような運転の後にはリングメイン BM の残留磁場と磁場ドリフトによりリングのチューンが変動し、ビームの出射角が影響を受けることが判っている^[1]。このような HIMAC 特有のマシントイムスケジュールが日々ビーム調整を必要とする要因となっているが、Si800MeV/u 等更に高い磁場での運転が行われる水平コースでは、図 3 (c)のとおり垂直コースのような夜間の実験の影響による変動は見られていない。

2.3 その他の要因

その他に過去ビームが再現しなかった要因として

は、輸送系直流電源機器の初期化未実施や瞬時停電により磁場が再現しなかった事例が挙げられる。これに関しては NMR による磁場監視で対応できると考えている。ただし現在軸調整に使用しているステアリングに異常が生じた場合は、ステアリングとプロファイルモニタの距離が近く、簡略化した確認方法では異常の発見が難しいため、該当するステアリングを使用しないように調整するなどの対策が必要である。

3. 再現性の向上

3.1 2つのリングの違い

前述のとおり HIMAC では上下2つのリングからそれぞれ垂直・水平コースへビームを供給しているが、下リングから水平コースに供給するビームは再現性が高いのに対して、上リングから垂直コースへ供給するビームは日々のばらつきが大きい。2つのリングのスペックと構成は同じでフラットトップでの動作点もほぼ同じであるが、3次共鳴による遅れ取り出しのために6極磁場を励起する2組の取り出し用六極電磁石のパラメータが異なっている。現在治療供給時に使用しているパラメータは他の核種やエネルギーでの運転パターンの基準にしようという思想で調整しており、その結果 COD の違いに伴

うバンプ軌道の違いや、輸送系の定格値の違いによる取り出し静電セパタムのパラメータの違いが生まれた。この違いを吸収する目的でセパトトリクスを調整したため、上下リングで取り出し用六極電磁石が異なるパラメータとなっている。治療用パラメータ調整時には意図せぬことであったが、この違いにより上リングのセパトトリクスの傾きが下リングよりも大きくなり、チューン変動に対して出射角への影響がより大きくなることとなった。図4は同じチューン変動に対する輸送系末端モニタへの上下のリングでの違いである。

下リングでは上リングとは反対にチューン変化が出射角よりもターンセパレーションへ大きく寄与するため、リングのチューンを変えると垂直コース末端ではビームの中心位置が動くのに対して、水平コース末端ではビームサイズ(エミッタンス)の変動することがわかる。

3.2 光学系の違い

HIMAC は2つのリングから水平垂直各々にビームを供給する特性上、図2のとおり水平コースと垂直コースでは大きく異なった光学系となっている。更に垂直コースではアライメントをとることが難しく立ち上げのラインでは10mm 近く理想軌道(治療ポートのアイソセンターと最後の水平 BM 出口を結ぶ軌道)からずれている。まずアライメントのズレにビーム変動による影響を考え、アライメントとステアリングの効果も含め軌道計算を行ったが、ビーム変動の大きさにアライメント誤差が寄与することはなかった。

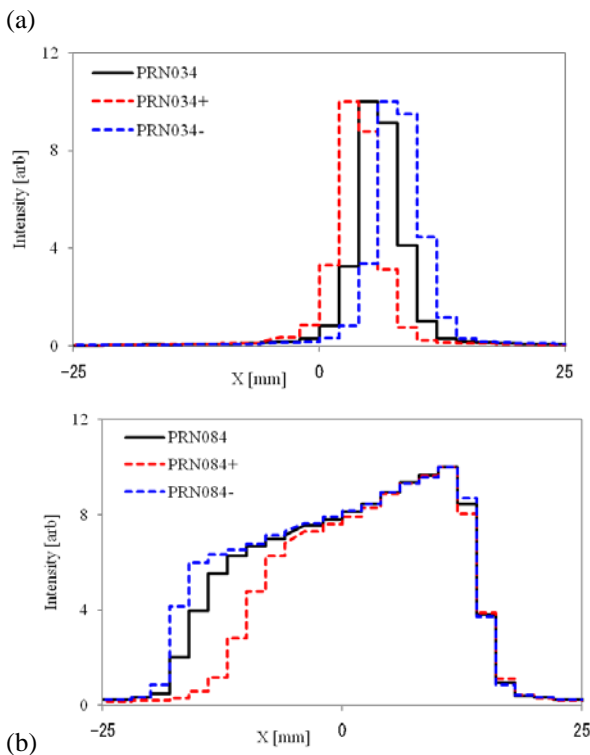


図4：チューン変化に対する輸送系末端のビームプロファイルの変動。(a)垂直コース末端プロファイルモニタ。(b)水平コース末端プロファイルモニタ。それぞれ黒線が通常位置、赤点線がFTチューンを+1e-4動かした時、青点線が-1e-4動かした時。

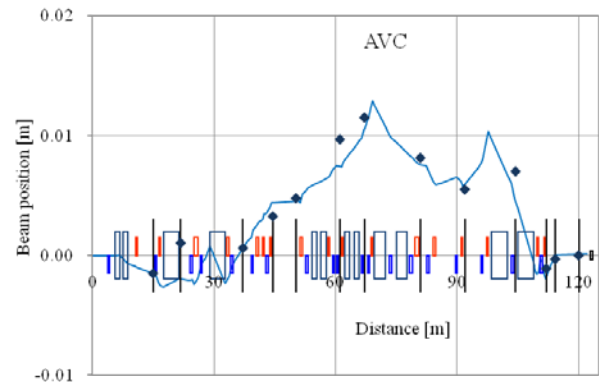


図5：アライメントずれとステアリングによる調整結果を含む AVC ビーム中心軌道とプロファイルモニタでの実際のビーム位置。

この結果を踏まえて、ビーム出射角の変動に対する輸送系末端の位置変動の感度を計算したところ、出射角の変動が 0.01[mrad]のときには、垂直コース準非破壊モニタで約 2mm、アイソセンターで約 0.3mm 動くのに対して、水平コースでのビーム中心位置の変化量は準非破壊モニタで約 1.4mm、アイソセンターで約-0.1mm と、光学系の点からも垂直コースは水平コースに比べてビーム位置の変動が起こりやすいことが判った。

3.3 再現性の向上に向けての取り組み

リングからの出射角の再現性は六極電磁石パラメータ他取り出し系パラメータの改善によって向上させることができる。今後はビームサイズの変動が照射野平坦度に与える影響の確認を行い、パラメータの改善を図っていく。

光学系のパラメータは輸送系取り合い点でのツイストパラメータが同じになる条件でリング出射ラインのQMパラメータを変更し、輸送系末端での変動量が少なくなることを確認した。計算結果に比べて実際のビーム変動量は倍程度であるので、今後計算精度を上げることが必要だが、今回用いた新しい光学系の採用によりビーム変動幅を半分程度に減らし、再現性を向上させることができると考えている。

4. まとめ

長い間悩まされてきた治療ビームの軸変動について、2つのリングの違いを解析することで解決できることが判った。これによりビームの再現性を向上させ、調整時間の大幅な短縮にトライすることも可能となった。今後は今回具体的になった問題点を解消し、さらに長期的な変動の原因も調査し、がん治療のためにより安定なビーム供給を目指していく。

参考文献

- [1] H.Uchiyama., “HIMAC 治療ビーム軸変動の抑制”, 第7回加速器学会年会プロシーディングス(2010).