

(様式4)

学位論文の内容の要旨

藤本 哲也 印

(学位論文のタイトル)

Energy compensation of slow extracted beams with RF acceleration

(加速を伴う遅い取り出しビームのエネルギー変動補正)

(学位論文の要旨)

炭素イオンを使った重粒子線治療は、**Bragg-peak**領域における線量の高い局所性と高い生物効果により体内深くのがん治療にとりわけ適した治療法と言える。重粒子線治療施設では炭素イオンを治療に適したエネルギーまでシンクロトロンにより加速し、その後遅い取り出しと言われる方法により約1秒かけてビームを取り出し患者に照射される。一般に遅い取り出しを行うために3次共鳴現象（シンクロトロンを周回する粒子の横方向振動と共鳴六極電磁石の共鳴）が利用されるが、群馬大学重粒子線施設ではビームを少し加速することで遅い取り出しを実現している。電場を利用した取り出しのため素早いビームの遮断が可能であるというメリットはあるが、この加速をするプロセスにより取り出されたビームのエネルギーは時間とともに変化する、すなわち体内飛程の変化をもたらす。最大の飛程変化量は2mm程度となるが、従来のワブラー電磁石を利用した拡大ビーム照射法においては複数回の照射によりこの変化量は平均化される。しかし、現在治療利用に向けてR&Dが進められているペンシルビームによる3次元スキニング照射ではこのような平均化が期待できないことから、この飛程変化を十分に抑制する必要がある。そこで群馬大学重粒子線施設でスキニング照射を実現することを目的に遅い取り出しビームのエネルギー変動を抑制する研究に取り組んだ。

治療用6価炭素ビームのエネルギー変動幅は最大2.6MeV/uであるが、これを電場で補正するには5.2MVが必要であり、更に電場の大きさをエネルギー変化に合わせて変更する必要があることから電場による補正は難しい。そこで高エネルギーイオンが物質中を通過した時に生じるエネルギーロスを利用してエネルギーを一定化するエネルギーアブソーバーシステムを考案した。また時間とともに連続的に変化するエネルギーを一定にするために回転アブソーバー構造を採用した。これは連続的に変化するエネルギー変化に対応してアブソーバーの回転角度を変化させる、すなわちビームから見たアブソーバー厚を変化させることによりエネルギーロスをコントロールし、一定のエネルギーを得ようとするものである。この回転アブソーバーシステムでは連続的にエネルギー補正が可能だけでなく、回転角度幅を調整することで様々なエネルギー（140～400MeV/u）に対応可能となり、広い範囲で利用できるメリットがある。シンクロトロンの加速周波数の変化分からエネルギー変化量を算出し、これを補正するアブソーバー厚を検討したところ1mm厚のアルミニウムで十分なことが分かり、加速開始タイミング信号を基準にサーボモーターをPLCで制御してアルミニウム板を回転させるアブソーバー装置を新たに開発、製作しこれを用いて検証実験を行った。

エネルギー補正の検証はアイソセンターに水厚可変水槽を配置し、**Bragg-peak**位置を測定す

ることで行った。ビームエネルギー290MeV/uを用いてアブソーバーなしでの測定を行ったところ1秒間の取り出し区間中にBragg-peak位置が1.5mm動くことが観測された。これは1秒間の取り出し区間のエネルギー変動幅（290MeV/uから292.02MeV/u）による水中飛程の変化量と一致している。一方、回転アブソーバーを利用した場合、1秒間の取り出し区間中のBragg-peak位置変化量はほとんど観測されず、Bragg-peak付近の線量のばらつきは1%以下に抑えられていることを確認した。すなわち一定のエネルギーを得ることに成功した。

3次元スキャニング照射ではより複雑な形状のがん治療を可能にするためにアイソセンターで時間変化のない小さいスポットを形成することが要求される。しかしこのシステムではイオンビームがアブソーバーを通過する際、クーロン散乱により横方向に広がる。また時間とともにアブソーバー厚を変化させるため横方向の広がりも時間とともに大きくなる。そこでクーロン散乱による散乱角が加わってもアイソセンターで時間変化のない小さいスポットが実現できるエネルギーアブソーバーシステムを実現するため、アブソーバーの最適な配置を決定すると共に、高エネルギービーム輸送ラインのビーム光学設計の検討を行った。その結果、ビームサイズが小さく絞れた位置にアブソーバーを配置し、またベータトロン振動の位相進み量 $\mu = n \times \pi$ （ n ：整数）とすることでクーロン散乱が加わってもアイソセンターのスポットサイズを小さく一定に保てることをビーム光学設計の最適解を見つけることができた。これにより、治療用ビームの照射精度を劣化させずにこのアブソーバーシステムを適用可能であることを証明した。

このエネルギーアブソーバーシステムはシンクロトロンから取り出された後の高エネルギービーム輸送ラインに配置することが可能なことから、高エネルギービーム輸送の制御方法を変えることなく、スキャニング照射法と拡大ビーム照射法の両立を可能とすることが期待できる。