

Design study of synchrotron for compact carbon therapy facility

T. Furukawa^{1,A)}, K. Noda^{A)}, K. Yoshida^{A)}, T.H. Uesugi^{A)}, M. Kanazawa^{A)},
M. Torikoshi^{A)}, E. Takada^{A)}, S. Yamada^{A)},
S. Shibuya^{B)}, T. Miyoshi^{B)}, M. Katsumata^{B)}, T. Shiraishi^{B)}, T. Shimojyu^{B)}

^{A)} National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, 263-8555

^{B)} Accelerator Engineering Corporation
2-13-1 Konakadai, Inage-ku, Chiba, 263-0043

Abstract

Based on 10 years experience of carbon therapy at HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba), the new facility project has been in progress at NIRS. This project aims to provide the hospital-based carbon therapy facility for the beneficial treatment around Japan. In the new facility, it is required for the synchrotron to accelerate carbon ions from 4 MeV/u of injection energy to 400 MeV/u. The design of the synchrotron was carried out according to the leading design strategies, which are 1) compactness, 2) high reliability and 3) low cost. For this purpose, at the HIMAC, we have carried out following machine studies: a) Matching of slowly extracted beam with transport line, b) Resonance characteristics and beam lifetime, and c) Reproducibility of beam performance. In this paper, the design of the synchrotron dedicated for carbon therapy based on the machine study at HIMAC and the results of the studies are presented.

普及型炭素線がん治療施設用シンクロトロン設計

1. はじめに

世界で初めてがん治療用重粒子線加速器として作られた放射線医学総合研究所のHIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba) [1]では、1994年から臨床試行が始まり、現在までに2000名以上の患者の治療が行われてきた。我々は、HIMACでの10年におよぶ炭素線治療の経験に基づき、普及型炭素線治療施設の設計を行っている[2]。このシンクロトロンでは、炭素線を4MeV/uから水中残飛程275mmに相当する400MeV/uまで加速し、かつ、HIMACと同じ程度のビーム性能であることが要求されている。これを表1にまとめる。このために、基本設計方針を以下のように決め、設計を行ってきた。1) 既存の技術で可能な限り小型化を実現する事、2) 信頼性が高く、運転が容易となることを実現する事、3) 安価である事。さらに、ビームハンドリング技術の向上による、効率の良い入射・加速・取り出し・輸送を行うことは、小型化しつつビーム強度・安定性を確保するために、重要な技術要素であると考えられる。

これらを実現し、最適設計を行うために我々は以下のマシンスタディをHIMACで行ってきた。A) 遅い取り出しとそのビーム輸送の最適化、B) 共鳴特性とビーム寿命に関する研究、C) ビーム性能の再現性に関する研究。これらを行うことによって、必要なアクセプタンスを適切に定めることが可能になる。さらに、動作点の決定や強度スケジュールにも大きく寄与する。また、日々のビーム調整の時間

をなくすことは、受け入れ患者数を増加させるために重要である。本論文では、このシンクロトロン設計の現状と、これに関連してHIMACでおこなっているビームスタディについて報告する。

表1：シンクロトロンの基本仕様

Lattice Type	FODO
Maximum intensity of C ⁶⁺	1 × 10 ⁹ pps
Circumference	61.5m
Injection energy	4 MeV/u
Extraction energy	140-400 MeV/u
Injection current	250 μA
Emittance and Δp/p of injection beam	10 π mm mrad ±0.1%
Repetition rate	0.3 - 0.5Hz
Injection	Multi-turn injection
Extraction	RF-KO slow-extraction

2. 基本ラティス設計

ラティス構造には、HIMACシンクロトロンと同様にFODO型を採用することにした。ベータ関数の最大値を抑える一方で、三次共鳴を用いた遅い取り出しを行う必要性から、水平方向のチューンは5/3近傍を用い、超対称性を6とすることにした。垂直方向チューンの決定は、ベータ関数の最大値を抑え、さらにリングの共鳴特性を十分考慮した上で行う必

¹ E-mail: t_furu@nirs.go.jp

要がある。これについては、後に述べるHIMACシンクロトロンで行ったマシンスタディの結果を考慮し、動作点を $(Q_x, Q_y)=(1.72-1.68, 1.23)$ とした。また、最もスペースを要する入出射系機器を長い直線部に、補正機器類を短い直線部に配置できるように、また周長を出来るだけ短くするようにレイアウト設計を行った。図1にシンクロトロンのレイアウトを、図2にツイスパラメータを示す。周長は61.5mで、長直線は3m、短直線は0.6と0.45mになっている。偏向電磁石の周長に占める割合は、43%とかなり高い。レクタングラー型の偏向電磁石 (BM) は、曲率半径4.23mで、最大磁場は1.5Tとしている。

入射は、バンプ電磁石2台 (BMPf1,2) を用いた多重回転入射を行い、約100ターンの入射で実効ゲイン18を得る。強度に換算すると、約 $8 \cdot 10^9$ 個となる。入射後の水平方向エミッタンスは、 $200 [\pi \text{ mm mrad}]$ である。補正前の 2σ CODは、水平で約5mm、垂直で約2mm程度と見込んでいる。これをリングに対称的に配置されたステアリング電磁石 (CR) によって補正し、アクセプタンスとして、 $(A_x, A_y)=(240, 30) [\pi \text{ mm mrad}]$ 程度確保する事が可能である。RF加速は、無同調空洞を用いて行われる。ハーモニクスを2とし、RF周波数は0.8から7MHzまで掃引される。入射ビームの運動量幅を $\pm 0.1\%$ とすると、捕獲効率90%以上が見込まれる。偏向電磁石の磁場変化率を3T/sとした時、RF電圧は2kV程度必要である。

一対用いる予定である。静電デフレクター (ESD) 入口でのセパトリクスと、ラスト3ターンの軌道を図3に示す。ラスト3ターン軌道が入射時のアクセプタンスと同程度になるようにする一方で、ESDのギャップを大きくしないために、運動量ずれたものに対してセパトリクスの足が重なるようにした。取り出しビーム強度としては、 $1 \cdot 10^9$ 個/秒程度を見込んでいる。

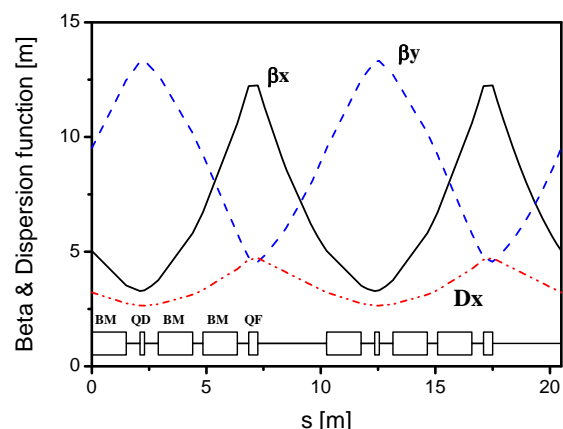


図2：2セル分のベータ関数とディスページョン。

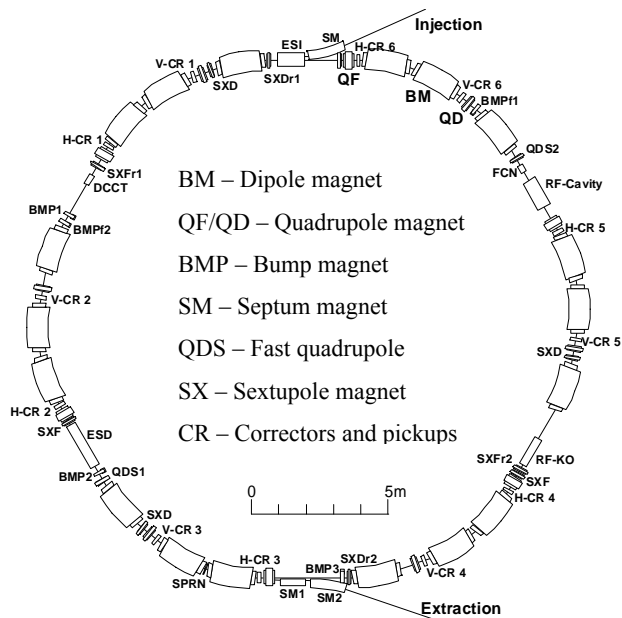


図1：シンクロトロンのレイアウト

取り出しは、チューンに共鳴した電場を印加するRF-knockout法を用いた遅い取り出しを採用する。六極電磁石 (SXFr/Dr) を二対用いることによってセパトリクスを回転出来るようにしている。また、バンプ電磁石 (BMP1-3) は3台である。また、HIMACシンクロトロンと同様に、ビームOFF時の漏れ線量を低減するための速い四極電磁石 (QDS) を

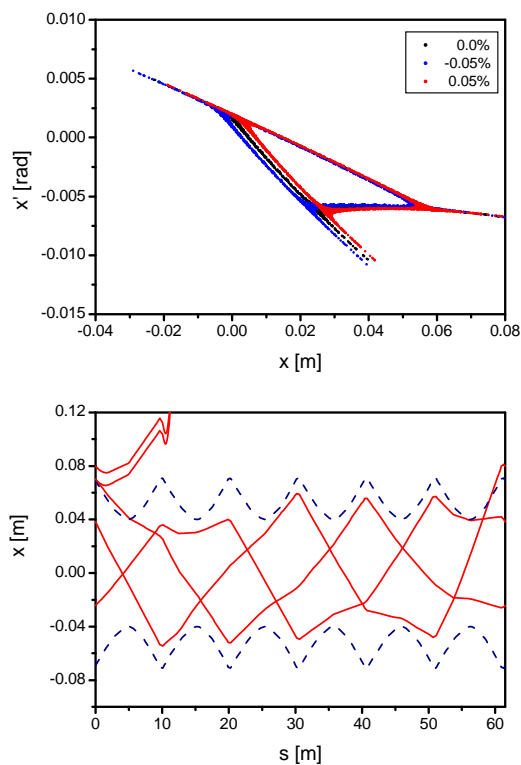


図3：ESD入口でのセパトリクス (上図) とラスト3ターンのビーム軌道 (下図)。点線は入射時のアクセプタンスを表す。

3. HIMACでのビームスタディ

3. 1 遅い取り出しとビーム輸送系の最適化 [3-5]

HIMACでは、RF-knockout法による遅い取り出しを日々の治療に用いる一方で、スパイル・リップルの低減などの取り出しビームの性状向上に関する開発を行ってきた。RF-knockout法による遅い取り出しビームが低エミッタンスを持ち、ビーム輸送系との整合がとれていればビームサイズを計算で正確に予想でき、ほぼ100%の輸送効率にできることを確認した。その一方で、微小なチューンのずれが、遅い取り出しを介して出射角度のずれやツイスパラメータの不整合をもたらすことがわかった。普及型施設では、これをシミュレーションで見積もることによって、ビーム輸送系の適切なアクセプタンスと電磁石電源の仕様を決めていくことを検討している。

3. 2 共鳴特性とビーム寿命に関する研究 [6]

HIMACシンクロトロンにおいて、Tune surveyを行い、 $Q_y=3.0\sim 3.5$ における共鳴の影響を調べた。COD補正をしても、整数共鳴の影響は大きく、空間電荷効果によるチューンシフトを考慮し、 Q_y を3.13から3.23に上げると、 $Q_x+2Q_y=10$ の影響が無視できないことがわかった。その対策として、この共鳴を六極電磁石によって補正し、ビーム強度と寿命を向上させることに成功した。この結果から、普及型治療施設のシンクロトロンでは、HIMACの動作点から整数部を変えた $(Q_x, Q_y)=(1.72, 1.23)$ とし、さらに共鳴補正のためにクロマティシティー補正用六極電磁石に補正コイルを用意する予定である。

3. 3 ビーム性能の再現性に関する研究 [7]

普及型治療施設では、治療患者数を増加させるために、ビーム切り替え時間を1分以内にすることを目標としている。このために、加速器系では、高い再現性でのビーム切り替えが、また、照射系ではその線量分布を保証することが必要である。以下にHIMACで行っている開発状況を述べる。

現在のHIMACにおける治療運用では、一日のエネルギー変更は1~2回である。その際のビーム切り替えに要する時間は、調整時間を含めて約15分程である。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。この結果、日々のビーム軸の変化に最も影響の大きいのは、シンクロトロンにおける水平方向チューンの微小変化であることがわかった。これによって出射角度が変化し、アイソセンターでの位置のずれになってしまう。これを抑制するために、チューンの微小変化を精度よく補正することは、より長い調整時間を必要とする。従って、我々は、この出射角の微小変化を静電デフレクターによって補正することを検討し、現在テストを重ねている。フィードバックシステムは用いずに、

このようなESDによる補正を毎朝手動で行い、その日はその補正值で運転するという運用を考えている。これにより、ビーム切り替え毎の位置再現性は1mm以内に出来ると考えている。また、ビーム位置のオンラインモニタリングとインターロックについても検討している。一方、照射系では、軸ずれに対する許容範囲を定め、ビーム位置によって線量分布の平坦度を保証するために、ビーム軸と平坦度の関係を調べている。図4に軸がずれた場合の平坦度悪化の一例を示す。線量分布の平坦度は $\pm 2.5\%$ 以内にするのが求められているので、1mm程度ビーム位置が変化しても平坦度を確保できるようにパラメータを再調整する作業を行っている。これらを実現した後に、1mmずれても線量分布が悪化しないことを確認し、無調整によるビーム切り替えを行う予定である。

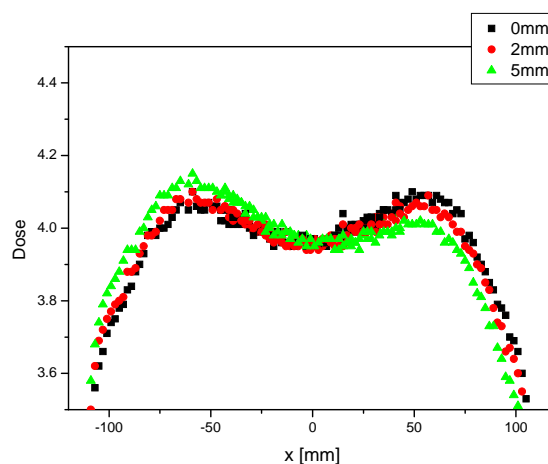


図4：ビーム軸をずらした場合のSOBP中心での線量分布の変化。

4. まとめ

放医研では、普及型炭素線治療施設の設計を行っている。シンクロトロンに関しては、基本ラティスの設計が終わり、周長は61.5mと小型化に成功した。また、関連するビームスタディをHIMACでは行っており、これらの結果を設計に反映している。

5. 謝辞

本開発に協力して頂いたAECの皆さんに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] E. Takada et al, Proc. PAC 2005, in press.
- [2] K. Noda et al, Proc. EPAC 2004, pp.2631.
- [3] T. Furukawa et al, in these proceedings.
- [4] T. Furukawa et al, Proc. EPAC 2004, pp.267.
- [5] T. Furukawa et al, Proc. PAC 2005, in press.
- [6] T.H. Uesugi et al, in these proceedings.
- [7] T. Shiraishi et al, in these proceedings.