

Beam Transport Line for New Treatment Facility at HIMAC

Toshiyuki Shirai^{1,A)}, Yoshiyuki Iwata^{A)}, Takuji Furukawa^{A)}, Shinji Sato^{A)}, Akifumi Itano^{A)}, Naoya Saotome^{A)}, Eri Takeshita^{A)}, Koji Noda^{A)}, Tetsuya Fujimoto^{B)}, Tomohiro Miyoshi^{B)}, Shinji Shibuya^{B)}, Atsushi Takubo^{B)}, Yoshinobu Sano^{B)}, Yoshiharu Kanai^{C)}, Norio Suetake^{C)}

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

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

^{C)} Toshiba Corporation, Yokohama, Kanagawa, 235-8523, Japan

Abstract

We have constructed the new treatment facility at HIMAC. In the new facility, the developing technologies will be utilized for the carbon therapy, such as a fast 3D scanning system and a rotating gantry. The carbon beam with 430 MeV/n is provided from upper synchrotron at HIMAC and transported through the new high energy beam line. The optics and magnet design of the beam transport have been finished and the components are under construction. The rotating gantry also has been designed, concerning the beam optics, the magnets and the mechanical structure.

放医研新治療エリアに向けたビームラインの建設

1. Introduction

放射線医学総合研究所では、1994年より炭素線による重粒子線治療をおこなっており[1]、その治療患者数は4000人を超えている。我々は、HIMACにおける、これまでの治療の経験ならびに、さまざまな要素技術開発をもとに、新しい治療エリアの建設を進めている[2]。例えば、新治療エリアでは、下記のような新しい技術・システムが、実際の治療に使用される予定である。

1. 呼吸同期照射に対応した高速3次元スキャンシステム。 [3, 4]
2. 炭素線用回転ガントリー。
3. ロボット治療台による自動患者位置決め。
4. 粒子線治療のワークフロー管理システム。

新治療エリアでは、図1に示されているように、HIMACの上側シンクロトロンからビーム供給を受け、水平・垂直の固定ポートを備えた治療室2室と、回転ガントリーを備えた治療室1室が、整備される予定である。新治療エリアの、主たるイオン種とビームエネルギーは、 C^{6+} , 430~140 MeV/n である。

この3つの治療室にビームを供給するためには、水平・垂直コースを含めて、全長200m程度のビームラインが必要であり、現在このビームラインの設計ならびに製作をおこなっている。ここでは、そのビームラインの設計と、回転ガントリーに関する報告をおこなう。

2. Beam Optics

2つの固定ポート治療室（E室、F室）を利用するにあたり、治療計画システムは、同一のビームモデ

ルを使用するため、2室のアイソセンターにおいて、同じエミッタンス、Twissパラメータのビームを供給する必要がある。そのため、水平・垂直ビームラインともに、直線部に π セクションを挟むことで、ビーム条件を同一に保つことにしている。

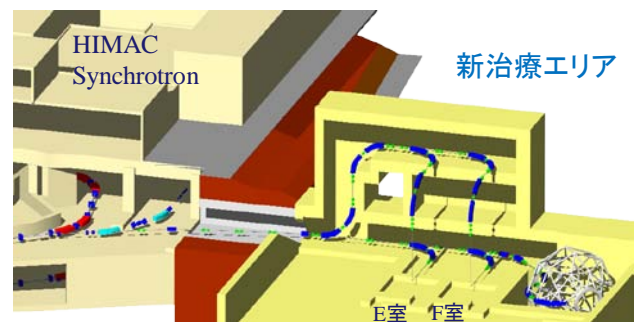


図1：新治療エリアのレイアウト。2つの固定ポート治療室(E, F室)と、ガントリー治療室が建設される。

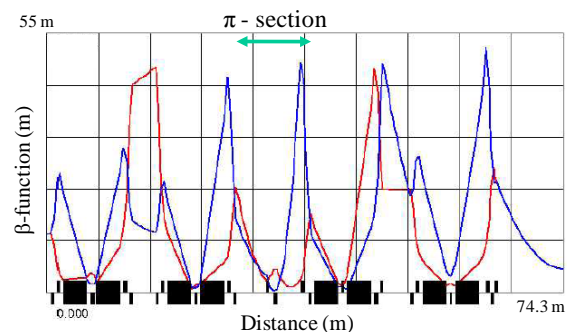


図2：F治療室垂直ビームラインのOptics計算結果（接続トンネル部は除く）。

¹ E-mail: t_shirai@nirs.go.jp

図2は、5つのビームコースの中でも最も長いF治療室垂直コースの β 関数を示している。Dispersionは、直線部ですべて0になっている。 β 関数の最大値は55m以下であり、HIMACシンクロトロンを取り出しビームエミッタンスの実測値が、100MeV/nでも、 $4\pi\text{mm mrad}$ 以下であるため、ビームサイズは、直径30mm以下に抑えられている。これに対し、ビームパイプは、 $\phi 60\text{mm}$ を使用し、電磁石の設計有効磁極幅は、 $\pm 28\text{mm}$ としている。

運転の効率化を図るために、ビームラインには、25セットのステアリング電磁石と、ほぼ同数の蛍光膜をもちいたビーム位置モニターが設置されており[5]、自動でのビーム軌道補正をおこなう。図3は、ランダムな電磁石アライメントエラー (0.2 mm, 0.2 mrad) に対し、F治療室垂直ビームラインでの軌道ずれを、補正の有無に分けて示している。補正により、軌道のずれは、アイソセンターで、ほぼ0mm、ビームラインの途中においても、5mm以下にできていることがわかる。

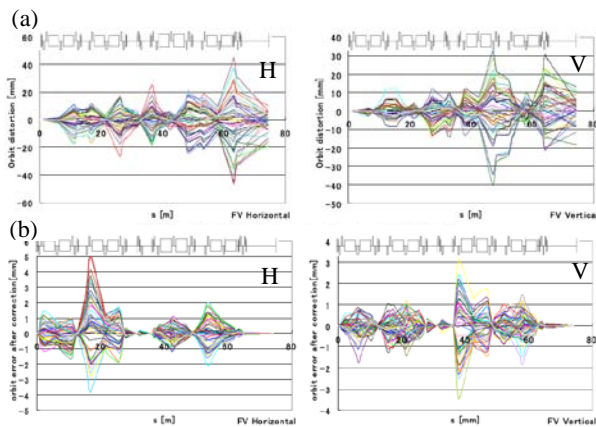


図3：ランダムな電磁石アライメントエラー (0.2 mm, 0.2 mrad) がある状態での、F治療室垂直ビームラインの軌道のずれ。(a): 補正なし、(b): 補正あり。

3. Magnets

ビーム輸送ラインは、2段階に分けて製作される。第1段階では、E, F治療室までのビームラインが整備され、第2段階で回転ガントリーまでのビームラインと、回転ガントリー内部のビームラインが整備される。この第1段階では、18台の偏向電磁石と、56台の四重極電磁石、25セットの水平・垂直ステアリング電磁石が製作・設置される予定である。それぞれの主要スペックは、表1に示されている。

これら電磁石は、シンクロトロンのエネルギーキャンによる、連続的なビームエネルギー変更に対応するため、3秒で40-100%の磁場を変化させる必要がある。そのため、0.5 mm厚の珪素鋼板が使用される。このうち、四重極電磁石とステアリング電磁石は、一体の接着コアで製作され、45度偏向電磁石は複数の接着コアを溶接で接合して、製作される。

Bending Magnet

Number	16 (45 deg), 2 (12 deg)
Field	1.54 T (32000 AT/pole)
Radius	4300 mm
Gap	50 mm

Quadrupole Magnet

Number	44 (370 mm), 12 (170 mm)
Field	14.5 T/m (5500 AT)
Bore Radius	31 mm

Steering Magnet

Number	25 sets (H&V)
Field	0.12 T
Kick angle	2.5 mrad

表1：E, F治療室までのビームラインを構成する電磁石の主要スペック。

電磁石は、すべてOPERA3D-TOSCAによる磁場計算にもとづいて、最適化設計されている。図4(a)は、その1例として45度偏向電磁石の例を示している。端面は直線カットしてあり、有効磁極長を、幾何学的磁極長と一致させている。図4(b)は、その計算結果であり、0.7Tでの ΔB , ΔL , ΔBL を示している。これから、目標有効磁極幅である $\pm 28\text{mm}$ では、 ΔBL が $\pm 2.5 \times 10^{-4}$ に収まっていることがわかる。最大磁場の1.54Tでは、この範囲が $\pm 23\text{mm}$ まで減少するが、高エネルギーでのエミッタンス減少を考慮すると、十分な性能である。

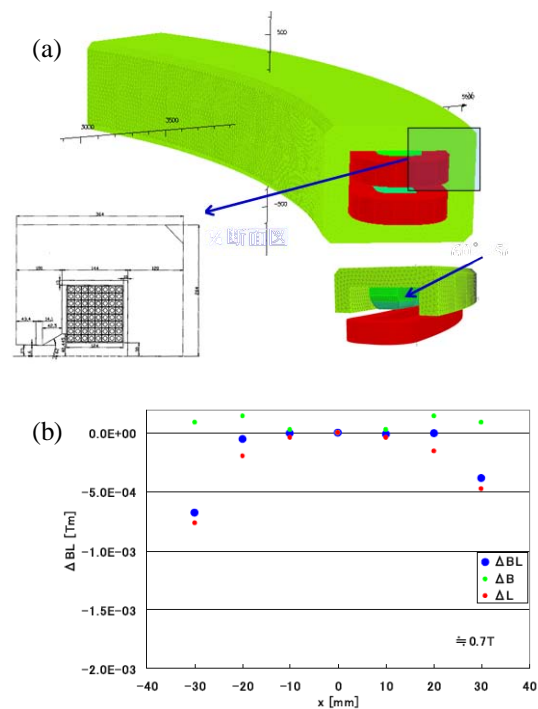


図4：(a) 45度偏向電磁石のOPERA3D-TOSCAによる計算形状モデル。(b) 0.7Tでの ΔB , ΔL , ΔBL の計算結果。

4. Rotating Gantry

回転ガントリーは、360度任意の方向から治療照射を可能とするものであり、多門照射による線量分布の改善や、皮膚線量の低減など、多くの治療上のメリットがある。そのため、X線・陽子線治療では、一般化しているが、炭素線では、重量の問題から、Heidelberg大学のみでしか建設されておらず、それも、まだ稼働状態には至っていない。

放医研では、炭素線回転ガントリーの実用化に向けて、重量の低減に取り組んでおり、350t以下になるような最適化設計をおこなっている。現在の、設計が、図5(a)に示されており、その電磁石レイアウトだけを抜き出したものが、図5(b)である。3台の60度電磁石の後に、スキャニング電磁石を設置している。60度の偏向電磁石を最大1.8Tで使用することにより、磁石の小型化を図るとともに、スキャニング電磁石の下流の大口径偏向電磁石を30度と角度の小さなものにするこゝで、小型化と軽量化を図っている。

そのため、最後の30度大口径(Gap=148mm, $B_{max}=1.8T$)電磁石の設計が重要であり、現在最適化計算をおこなっている。図6はOPERA3D-TOSCAによる計算の1例であり、計算形状と励磁曲線を示している。飽和しながらも、設計値の1.8Tに達していることがわかる。この電磁石は、高磁場・大ギャップ幅と磁場の漏れの抑制を、両立させるために、鞍型のダブルコイルにして、フィールドクランプをつけている。

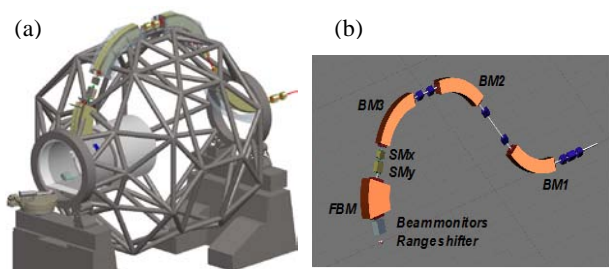


図5：(a) 炭素線回転ガントリーの外観図。(b) 回転ガントリーの電磁石配置。

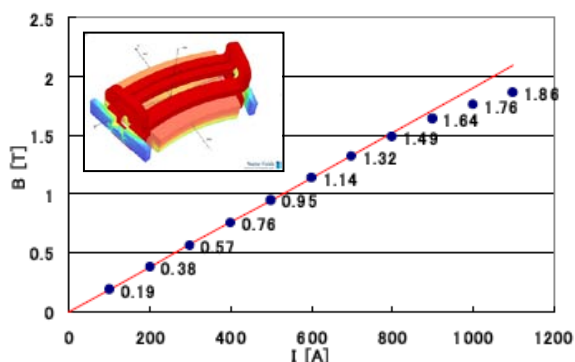


図6：OPERA3D-TOSCAによる大口径偏向電磁石の磁場計算モデルと、励磁曲線に関する計算結果。

電磁石設計と並行して、回転ガントリー構造体の最適化検討もおこなっている。構造体は、金属パイプで構成されており、構造変形と軽量化の最適化をFEMコードによっておこなっている。図7は、回転ガントリーの変形がもっとも大きな、90度横倒しにしたとき計算結果である。電磁石の重量のため、天頂部の電磁石が2mm程度、沈み込んでいることがわかる。この程度の変形であれば、ステアリング電磁石により軌道補正は可能であるが、重量を大きく増やさない範囲で、補強材の追加によって変形量を減少させる検討を進めている。



図7：炭素線回転ガントリー構造体の変形に関する計算結果。ガントリー回転角は90度。

5. Schedule

新治療エリアへのビーム輸送ラインは、現在、電磁石・電源・真空系・ビームモニターなどのコンポーネントの製作を進めており、今年度中の製作終了を目指している。来年度初めからは、新治療エリアの建屋引き渡しを待って、据付調整を開始する予定である。来年度中の新治療エリアでの治療開始に向けて、来年度下半期には、ビーム調整を開始する予定である。

また、回転ガントリーについては、E, F治療室での治療が始まったのちに、建設を開始する予定であり、現在は設計を進めるとともに、建物への埋め込み金具などの製作・設置をおこなっている。

参考文献

- [1] Y. Hirao et al., Nucl. Phys. A538 (1992) 541c-550c.
- [2] K. Noda et al., "NEW HEAVY-ION CANCER TREATMENT FACILITY AT HIMAC", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy (2008), p.1818.
- [3] 古川卓司 他, "放医研におけるスキャニング照射装置開発の現状", in this proceedings.
- [4] 佐藤真二 他, "HIMACにおける取り出しビーム強度変調システムの開発", in this proceedings.
- [5] 早乙女直也 他, "高速準非破壊スクリーンビームモニタシステムの開発", in this proceedings.