

高温超伝導磁石を使った炭素線ガントリーの設計

DESIGN OF HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING GANTRY FOR CARBON

盛田義弥[#], 畑中吉治, 福田光宏, 依田哲彦, 山根浩義, 鎌倉恵太, 植田浩史,
森信俊平, 齊藤高嶺, 永山啓一, 田村仁志, 安田裕介, 横山久美子
Yoshiya Morita[#], Kichiji Hatanaka, Mitsuhiro Fukuda, Tetsuhiko Yorita,
Hiroyoshi Yamane, Keita Kamakura, Hiroshi Ueda, Shunpei Morinobu, Takane Saito,
Keiichi Nagayama, Hitoshi Tamura, Keisuke Yashuda, Kumiko Yokoyama
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University

Abstract

In recent years, the cancer therapy using heavy ions is paid attention. That is because heavy ions have the ability to irradiate a cancer focus with the maximum dose at pinpoint from the feature of heavy ions for Bragg peak. In this research, we choose carbon ions as heavy ions. However, a device for heavy ions is larger-sized than a device for protons, so we must install that in the suburbs. In order to install in general hospitals, the downsizing of the device is necessary. Then, the purpose of this research is to design the down-sized gantry for carbon. The gantry is composed of dipole magnets and quadrupole magnets. We expect the downsizing of the gantry by using high-temperature superconducting magnet as dipole magnets. We also optimize gantry beam line in order the carbon beam to be achromatic and waist in isocenter for raising the quality of cancer therapy.

1. はじめに

放射線がん治療において、重粒子イオン（ここでは炭素イオンとする）を用いた粒子線治療法が注目されている。重粒子のもつ Bragg peak の特徴から、標的となる体内のがん病巣にピンポイントで最大線量を照射できることがその理由である。炭素線は、陽子線に比べて高 LET (Linear Energy Transfer) で最大 RBE (Relative Biological Effectiveness) に到達するという特長をもつが、炭素線の治療装置は陽子線のものに比べて大型になる。そのため、装置を郊外に設置せざるを得ず、一般病院への普及のためには装置の小型化が必要になる。

このような背景から、小型化に向けた 430 MeV の炭素線ガントリーを設計することが本研究の目的である。ガントリーのビームラインには双極磁石と四重極磁石を配置する。その際、双極磁石として高温超伝導磁石を用いることで装置の小型化を目指す。

照射スポットであるアイソセンターで、照射ビームが治療で求められる条件を満たすようにビームラ

インの最適化を行わなければならない。これまでに、計算コード TRANSPORT を用いて 1 次までの matrix で概念設計を行い、四重極磁石の励磁パラメータを求めた。今回、設計の精度を上げるために 2 次、3 次までの効果を考慮して計算コード TURTLE を用いてシミュレーションを行い、その影響を調べた。

2. ガントリーの構成

2.1 ガントリーにおける磁石の配置

ガントリーにおけるビームの収束点である照射スポット (アイソセンター) でビームに求められる条件として、以下の 3 点が挙げられる。

- ・ 二重無分散を満たす。
- ・ horizontal, vertical の両方向においてビームが waist である。
- ・ horizontal, vertical 方向について beam size が可変 (2-10 mm) である。

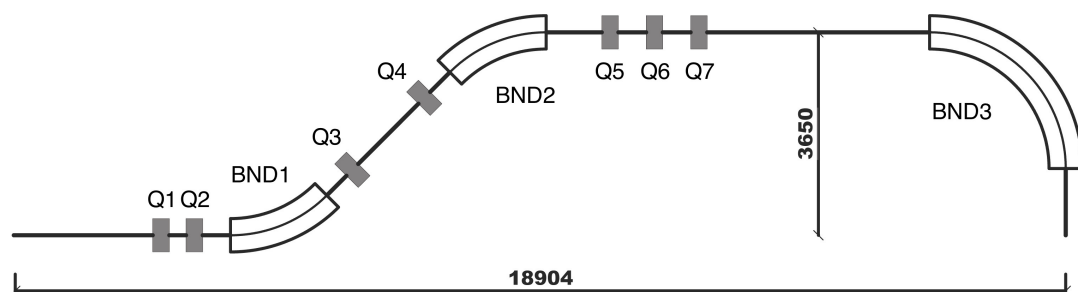


Figure 1: The composition of High-temperature superconducting gantry.

[#] yoshiya@rcnp.osaka-u.ac.jp

アイソセンターにおいてビームが以上の条件を満たすために、7つの四重極磁石、2つの45°双極磁石、1つの90°双極磁石、スキャニング磁石でガントリーを構成する。四重極磁石を Q、

双極磁石を BND、ドリフトスペースを L と記述すると、構成要素の配列は L1-Q1-L2-Q2-L3-BND1-L4-Q3-L5-Q4-L6-BND2-L7-Q5-L8-Q6-L9-Q7-L10-BND3-L11-ISC である。(Fig. 1 参照)

Table 1: Magnetic Field Gradient of Quadrupole Magnet

x half beam size [mm]	1.00	1.50	2.00	2.47	3.00	3.50	4.00	4.99
y half beam size[mm]	1.00	1.50	2.00	2.52	3.00	3.50	4.00	5.01
Q1[T/m]	-24.19	-5.99	6.75	11.96	14.03	13.84	13.21	11.89
Q2[T/m]	21.87	13.29	4.00	-1.95	-5.19	-5.61	-5.37	-4.75
Q3[T/m]	-17.12	-15.05	-14.79	-13.61	-13.21	-13.11	-13.12	-13.24
Q4[T/m]	20.97	32.69	32.46	21.45	21.65	21.98	22.52	24.01
Q5[T/m]	-11.38	7.30	6.47	-15.24	-14.74	-13.84	-12.19	-7.78
Q6[T/m]	24.78	12.45	13.54	27.12	26.90	26.58	25.92	23.80
Q7[T/m]	-14.24	-15.8	-16.49	-17.16	-17.09	-17.14	-17.10	-16.63

2.2 ビームラインの最適化

これまでに TRANSPORT を用いて Q1-Q7 の励磁パラメータについて1次近似解が求められている。^[1]ビームの収束条件は point to waist 収束としており、また入射ビームのエミッタンスを $2\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ と仮定している。Table 1 にその結果を示す。

3. 最適化計算の評価

前節におけるシミュレーションの結果は1次までしか考慮されていない。そこで、高次の効果(2次、3次まで)を考慮して、前節の励磁パラメータを用いてシミュレーションを行い、その影響の有無を調べた。今回、2次・3次の効果として、軌道計算における幾何学的高次成分、双極磁石における磁場の2次の分布の影響を考慮した。

今回は計算コード TURTLE を用いた。Fig. 2 に TURTLE にて算出されたアイソセンターにおける水平方向の beam size の RMS を示す。first-order は1次、second-order は1次・2次、third-order は1次・2次・3次を考慮して求めた値である。横軸は TRANSPORT で求められた beam radius である。Fig. 2 から、TURTLE において1次では TRANSPORT の計算結果が再現されていること、また2次、3次の効果を考慮しても水平方向の beam size の RMS には大きな影響が見られないことが分かる。

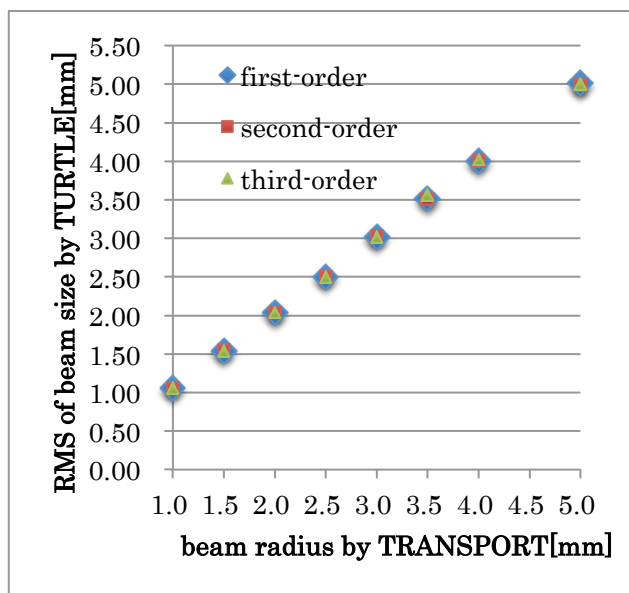


Figure 2: RMS of horizontal beam size by TURTLE.

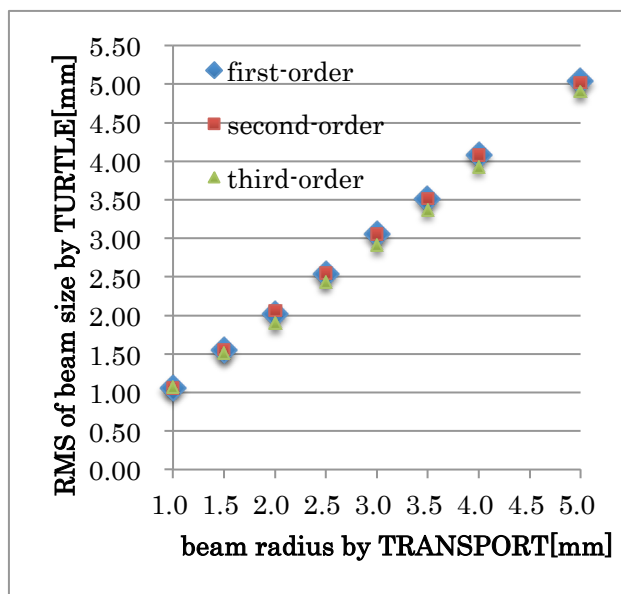


Figure 3: RMS of vertical beam size by TURTLE.

同様に Fig. 3 に鉛直方向の beam size の RMS を示す。鉛直方向においては、最大 6%のずれが生じた。また、beam size が 10 mm になるように励磁したビームラインについて、アイソセンターでの位相空

間分布を Fig. 4, 5 に示す。ここでは、2次・3次の効果を考慮している。Fig. 4, 5 から、アイソセンターにおいてビームが waist であることが確認できる。

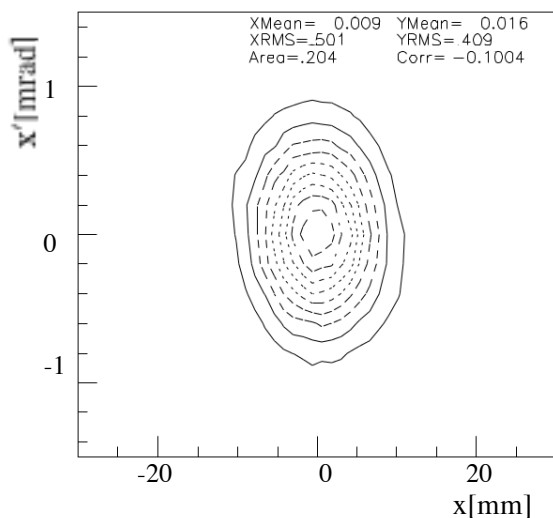


Figure 4: Phase space $[x, x']$ at isocenter with second-order and third-order.

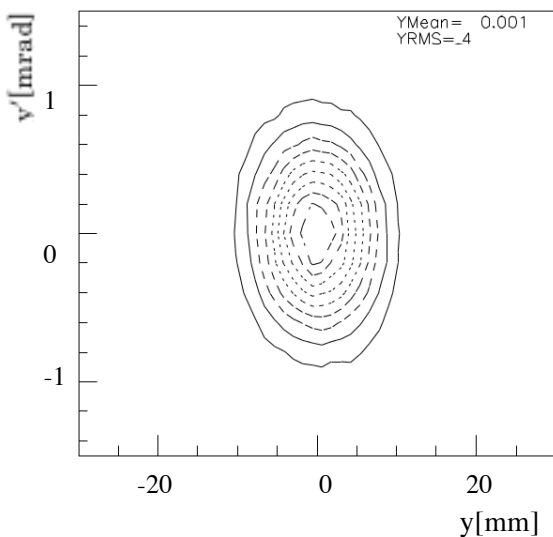


Figure 5: Phase space $[y, y']$ at isocenter with second-order and third-order.

4. まとめと今後の課題

今回は、これまでで TRANSPORT で求めた 1 次近似解によるビームラインについて、デザインの精度を高めるために、TURTLE で高次の効果を考慮してシミュレーションを行い、影響を調べた。2次、3次の効果として、軌道計算における幾何学的高次成分、双極磁石の磁場の 2 次の分布について考慮した。

その結果、高次の効果による beam size の変化は

6%以内であった。また、高次歪みによってアイソセンターにおいてビームが waist でなければならないという条件が破れることはなかった。

今後は、さらに四重極磁石における高次の効果についても評価する必要がある。その結果、必要なら四重極磁石の配置を再検討する。

今回の計算ではガントリーのビームラインにスキヤニング磁石は挿入していない。スキヤニング磁石を組み込み、シミュレーションをする必要がある。

また、小型・軽量で一様性の良い磁場が得られるよう、高温超伝導双極磁石の磁気設計を行う。そして、高温超伝導コイルの電磁力に対する強度および熱的安定性の検討を行い、クライオスタットの設計を行う。

参考文献

- [1] 横山久美子 大阪大学理学研究科物理学専攻修士論文 超伝導磁石を使った炭素線ガントリーの設計(2014).