

# Optics Design of Rotating Gantry for Particle Therapy

Takahiro Yamada #, Fumiaki Noda, Shinichiro Fujitaka

Hitachi Ltd.

2-1, Omika-cho 7-chome, Hitachi-shi, Ibaraki-ken, 319-1221

## Abstract

A beam scanning method using two scanning magnets for one scan direction has been proposed. In this method, a phase difference of the betatron motion between the scanning magnets is adjusted to  $\pi$  radians to set the downstream scanning magnet to the node of the beam orbit. In an optics design of rotating gantry adopting this method for carbon ion radiotherapy, the beam passing area of bending magnet decreases by 70% compared to that of one scanning magnet system.

## 二重走査法を採用した粒子線治療用回転ガントリーの光学設計

### 1. はじめに

一般的に粒子線治療施設では、治療精度の向上や治療時間の短縮のために、回転ガントリーの設置が望まれている。スキャン照射に用いる粒子線治療用回転ガントリーでは、ビーム走査電磁石を偏向電磁石の上流に配置することにより回転半径を低減することができる<sup>[1]</sup>。しかし、走査後のビームが偏向電磁石を通過することにより、偏向電磁石内のビーム通過領域が大きく、偏向電磁石の小型化が難しいという課題があった。

### 2. 二重走査法によるビーム走査

照射野に対する偏向電磁石内のビーム通過領域を低減可能な二重走査法を考案した。図1を用いて二重走査法の効果を説明する。図1の横軸はビーム進行方向の位置、縦軸は走査方向にビームが通過する領域を表わす。従来走査とは、最終  $90^\circ$  偏向電磁石の上流で1つの走査方向に1台の走査電磁石を用いてビームを走査する手法を意味する。図中の実線ならびに破線はそれぞれ従来走査法と二重走査法でビーム走査した場合のビーム軌道変位を表わす。従来走査法では、偏向電磁石の上流に設置された走査電磁石1台でビームを走査するが、偏向電磁石が持つビーム収束効果により超伝導電磁石内ビーム通過領域と照射幅がほぼ同程度となる。偏向電磁石内のビーム通過領域が大きくなると、偏向電磁石の大型化や励磁電流の増大が問題となる。二重走査法では走査電磁石を2台設置し、ベータatron振動の位相を走査電磁石間で $\pi$  [rad]進むように調整することにより、上流のSCM1でキックされたビームの軌道が下流のSCM2の位置で節となるような光学系とする。下流のSCM2ではSCM1とは逆方向にキックを与える。このように、2台の走査電磁石で逆方向に走査することにより、照射野に対する偏向電磁石内のビーム通過領域を低減することが可能となる。

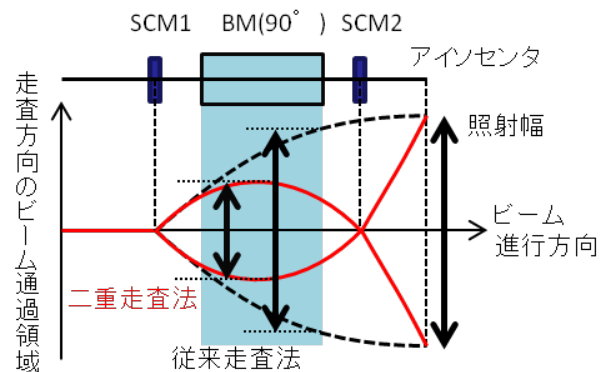


図1：二重走査法のご概念図

### 3. 二重走査法を採用した光学系

二重走査法を採用した炭素線治療用回転ガントリーの光学系を図2に示す。本光学系では X 方向のみ二重走査法を採用している。Y 方向も二重走査する為に図2中の SCY の位置に Y 方向のビーム軌道変位が節を作るような光学系とした場合、上流の走査電磁石を図2中の B 直線部に配置する必要があり、走査されたビームが通過する超伝導電磁石が増えるため、Y 方向は最下流の走査電磁石 SCY の1台で走査する。本光学系では最終  $90^\circ$  の偏向電磁石を2台に分割し、その偏向電磁石間に走査電磁石を配置している。図1のように、最終  $90^\circ$  を1台の偏向電磁石で偏向しその前後で二重走査する場合、最終直線部 2.0 m では SCX2 とアイソセンタ間の距離が近く、超伝導電磁石内ビーム通過領域の低減効果が小さくなる。そこで、本光学系では最終  $90^\circ$  の偏向電磁石を  $60^\circ$  と  $30^\circ$  に分割することで、SCX2-アイソセンタ間の距離を拡大するとともに、BM3 と BM4 の X 方向のビーム通過領域を同程度とし、超伝導電磁石内のビーム通過領域の面積を低減した。

# takahiro.yamada.dp@hitachi.com

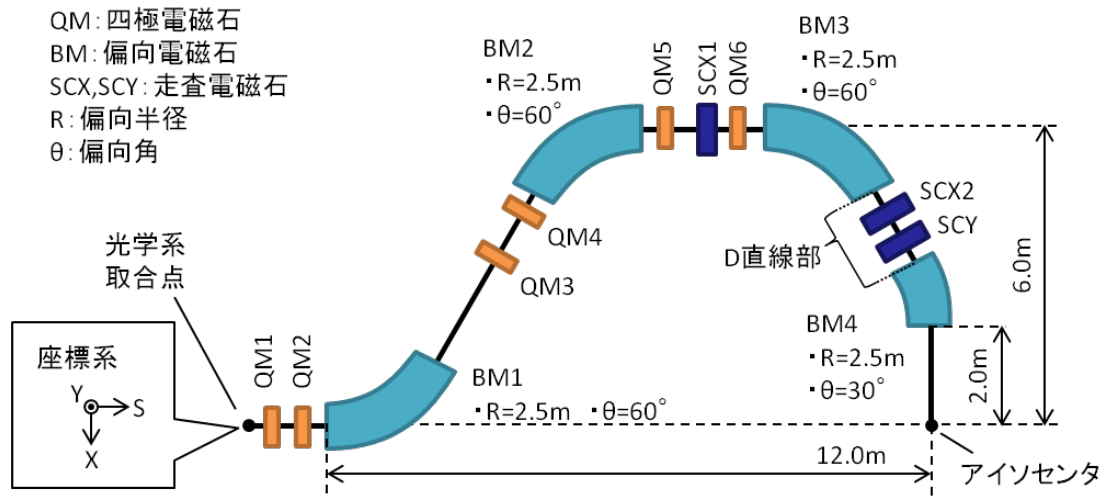


図2：二重走査法を採用したガントリーの構成

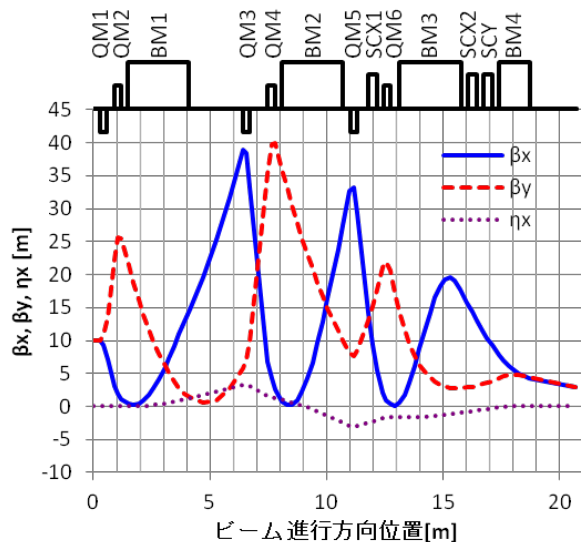


図3：光学パラメータ

次に、図3に本光学系のビームパラメータを示す。実線がX方向のベータatron関数 $\beta_x$ 、破線がY方向のベータatron関数 $\beta_y$ 、点線がX方向の分散関数 $\eta_x$ を意味する。アイソセンタにおける光学条件は $\beta_x = \beta_y = 3.0\text{m}$ 、 $\eta_x = 0\text{m}$ としている。

続いて、図4にガントリー回転時のビーム通過領域を示す。実線がX方向の、破線がY方向のビーム通過領域( $2\sigma$ )を表わす。ビーム通過領域は以下の式(1)に従い計算した。なお、 $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$ 、 $dp/p$ はそれぞれX方向エミッタンス、Y方向エミッタンス、運動量分散を表わし、それぞれ $2\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $10\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $0.1\%$ として評価した。

$$\begin{aligned}
 (\text{X方向}) &= \sqrt{\epsilon_x \beta_x + \left(\eta_x \frac{dp}{p}\right)^2} \\
 (\text{Y方向}) &= \sqrt{\epsilon_y \beta_y}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

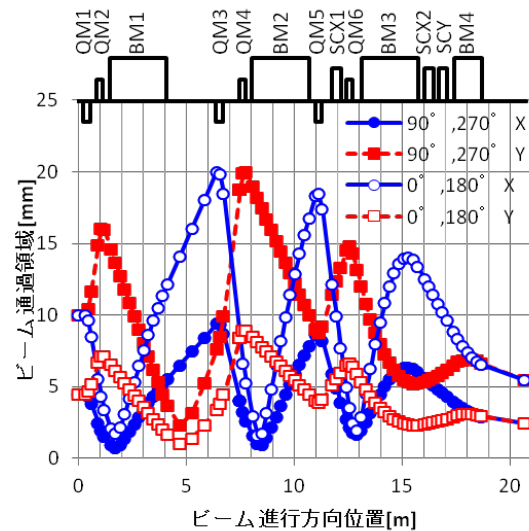


図4：ガントリー角度ごとのビーム通過領域

図4に示す通り本光学系は、走査したビームが通過しないSCX1より上流において、ビーム通過領域の半幅が20mmを超えないようにビーム輸送している。

図5ならびに図6に、X方向に全幅228mm、Y方向に全幅176mm走査した時のビーム通過領域を示す。このとき照射野の面積は $40000\text{mm}^2$ となる。なお、本光学系はBM4内のX方向とY方向のビーム通過領域をそろえるために、照射野の縦横比はX:Y=4:3になる。ビームの通過領域を計算するために、ビームのエミッタンスはX方向、Y方向ともに $10\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$  ( $2\sigma$ )として計算した。二重走査をする事により、X方向では走査幅228mmに対してBM4内のビーム通過領域は114mmに低減できている。一方、Y方向は従来走査ではあるが、走査後に通過する偏向角度が $30^\circ$ と小さいため、走査幅176mmに対してBM4内のビーム通過領域は114mmとなる。

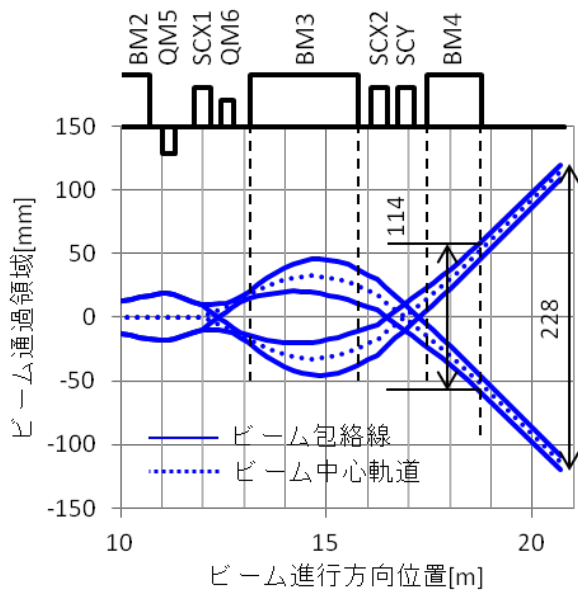


図 5 : 走査時の X 方向ビーム通過領域

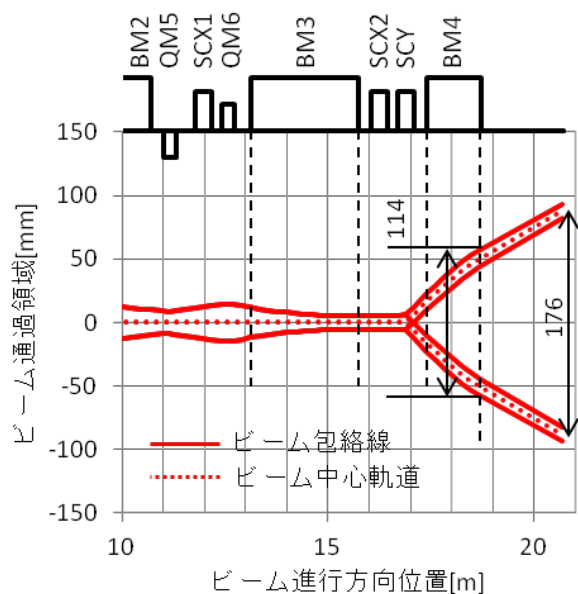


図 6 : 走査時の Y 方向ビーム通過領域

本光学系では、SCX1 と SCX2 に同じ設計の走査電磁石を用いて製作コストを低減する為に、SCX1 と SCX2 の蹴り角は等しい値を持つように設計した。また、SCY の位置で X 方向のビーム軌道変位が節となるようにすることで、SCY のギャップが最小化できる。なお、QM6 は SCX1 の下流に配置されるため走査されたビームが通過するが、SCX1 に近接して配置することにより、X 方向に最大の幅 228mm で走査した場合のビーム通過領域(半幅)を 15 mm に抑え、走査されたビームが通らない QM1-5 と同等の設計とする事を可能としている。

本光学系における、偏向電磁石内のビーム通過領域の最大面積と照射野の関係を図 7 実線に示す。破線は従来走査法を用いた場合である。図 5、6 に示

した照射野  $40000\text{mm}^2(228\text{mm}\times 176\text{mm})$  時の値を(i)として示した。図中破線に見られる通り、偏向電磁石内最大通過領域は従来走査法では照射野と同程度となり、二重走査法を用いることによりその面積を約 30%に低減することが可能となる。また、従来走査法で照射野  $40000\text{mm}^2$  が達成可能な偏向電磁石を用いて二重走査法を採用した場合、図 7 (ii)の領域に示す照射野となり、照射野の拡大につなげることも可能となる。

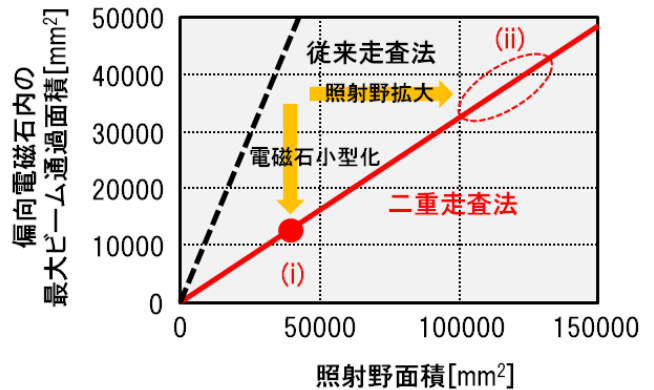


図 7 : 最大ビーム通過領域と照射野

#### 4. 結論

一走査方向に走査電磁石を 2 台用いて走査することで、回転ガントリー中の偏向電磁石内のビーム通過領域を低減するビーム走査方法を考案した。本ビーム走査法を用いることで、ガントリー中の偏向電磁石内における最大のビーム通過領域の面積を約 30%に低減することが可能となる。

#### 参考文献

- [1] C.Kleffner, et al., "COMMISSIONING OF THE CARBON BEAM GANTRY AT THE HEIDELBERG ION THERAPY (HIT) ACCELERATOR", Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy