

炭素線スキャンニングビームによる位置モニタ劣化

DEGRADATION OF POSITION MONITORING BY CARBON SCANNING BEAM

佐藤亜都紗^{#, A)}, 勝間田匡^{A)}, 小林泉^{A)}, 菅藤洋平^{A)}, 大内章央^{A)}, 永井恭平^{A)}, 李潤起^{A)}, 橋本勝則^{A)},
想田光^{B)}, 李聖賢^{B)}, 岩井岳夫^{B)}, 宮坂 友侑也^{B)}

Azusa Sato^{#, A)}, Masashi Katumata^{A)}, Izumi Kobayashi^{A)}, Yohei Kanto^{A)}, Fumihisa Ouchi^{A)}, Kyohei Nagai^{A)}, Junki
Lee^{A)}, Katunori Hashimoto^{A)}, Hikaru Souda^{B)}, Sung Hyun Lee^{B)}, Takeo Iwai^{B)}, Yuya Miyasaka^{B)}

^{A)} Accelerator Engineering Corporation

^{B)} East Japan Heavy Ion Center Faculty of Medicine, Yamagata University

Abstract

The position and size of the carbon beam in this facility are assured by a position monitor installed downstream of the scanning magnet that scans the beam. The position monitor is a multiwire proportional counter type non-destructive position detector (MWPC) that amplifies the ionized gas and electrons produced when the beam passes through it by applying a high voltage between a flat electrode and several wires, and extracts the signals. The degradation of the position monitor was observed in the plane irradiation as a decrease in sensitivity, especially in the center of the beam where the irradiation frequency is high. This caused the feedback control to work excessively, resulting in higher doses at the center of the beam. To prevent such problems, the position monitor manages the sensitivity of the central part by trending, which enables early estimation of the next replacement time and efficient operation.

1. はじめに

山形大学医学部東日本重粒子センターは、治療室が固定照射室(水平のみ)とガントリー照射室(15度ピッチでの360度角度)を所有する施設である(Table 1)。

Table 1: Treatment Room Comparison of Irradiation Angle

治療室	照射角度
固定照射室	90度のみ
ガントリー照射室	合計 24 角度 (15度ピッチ)

本施設は、2021年から治療が開始され、2023年度には年間治療人数が662人となり年々治療件数は増加傾向である[2]。そのため、より安定したビーム供給が使命であり、それらを支える装置側でも計画的な部品交換を

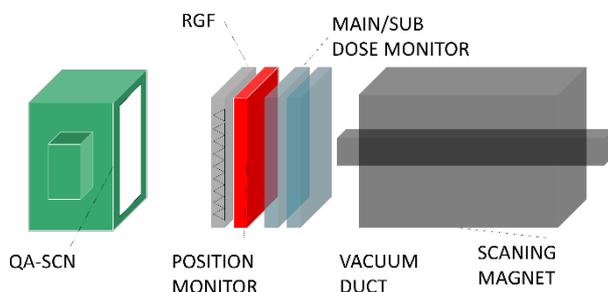


Figure 1: QA-SCN measuring device overview.

することが重要である。特に放射線による経年劣化につ

[#] az.satou@aec-beam.co.jp

いては、ビーム位置とサイズを担保するモニタで顕著に見えており、すでに交換を実施した。

本施設での炭素ビームは、ビームを走査するスキャンニング電磁石(SCM)によって照射野を形成している。SCMから出たビームは、正副線量モニタ、位置モニタを通過する。ビーム線量は線量モニタで測定される(Fig. 1)。また、ビームの位置とサイズは位置モニタで測定され、各モニタ共にリアルタイムで管理している。

位置モニタとは、平面電極と複数本のワイヤー間に高電圧を印加し、ビームが通過した際に生じる電離ガスと電子を増幅し、信号として取り出す多線式比例計数管方式の非破壊型位置検出器(MWPC)である。位置モニタはリアルタイムでビームを監視し、測定された位置ずれ量からフィードバック制御でビーム位置を補正しており、本施設ビーム制御の要である。

位置モニタ劣化は平面照射において、特に照射頻度の高い中心部分での感度低下として観測された。それによって、フィードバック制御が過度に働き、線量が中心部で高くなる不具合が発生した。

位置モニタの劣化は運用開始5年以降に生じると予想されていたが、実際は1-2年で発生し予定外の位置モニタの交換作業が生じた。位置モニタの交換は治療への影響が大きいため計画的に実施する必要があり、そのためには正確な交換周期を把握する必要がある。今回導入粒子数と位置モニタの中心部分の劣化度合いの関係性を調査することで交換時期の予測の実施と、位置モニタ高寿命化を目的として位置モニタ劣化の低減方法について検証した。

2. 位置モニタ

2.1 位置モニタ性能

本施設の位置モニタは240×240ch、1mmピッチのチャンネルを有する多線式比例計数管型の検出器であ

り、これらの信号が信号処理回路で高速に処理されることで、スキニング照射によるがん治療における複雑な照射野の形成を行っている。位置モニタの性能については、Table 2 に詳細を記載する[1]。

Table 2: Position Monitor Specs

検出方式	多線式比例係数管型 / ガスフロー式
有効照射範囲	239 mm × 239 mm
出力チャンネル数	480 ch
ガス種類	水平 240 ch、垂直 240 ch
ガス種類	混合ガス
印加電圧	大気1気圧下において 1800 V

2.2 位置モニタ劣化の発見

本施設では月毎のビーム性能検証試験（以降 Monthly QA）項目で照射野サイズ 200 mm × 200 mm の平坦性を評価している。ビームは最下流に設置した QA-SCN と呼ばれる蛍光膜と鏡、CCD カメラから構成されるモニタによって検出される (Fig. 2)。

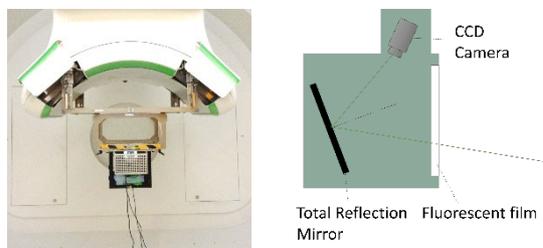


Figure 2: QA-SCN measuring device (left: Setup at gantry irradiation room, right: QA-SCN overview).

2022 年後半でのガントリー照射室の測定結果で、照射野中心部の輝度の上昇が発見された (Fig. 3)。

そのため、原因と予測される以下の項目について調査した。

- QA-SCN 蛍光膜の劣化 (内部点検含む)
- 照射条件による変化
- 治療照射室による変化
- 位置モニタの変化

(1), (2), (3)の結果、QA-SCN 側には中心部の変化は見られず、蛍光膜を新品に交換しても中心部の輝度上昇は再現した。また、照射条件による依存性は特にみられなかった。一方、治療室比較ではガントリー照射室で輝度上昇が顕著にみられた。

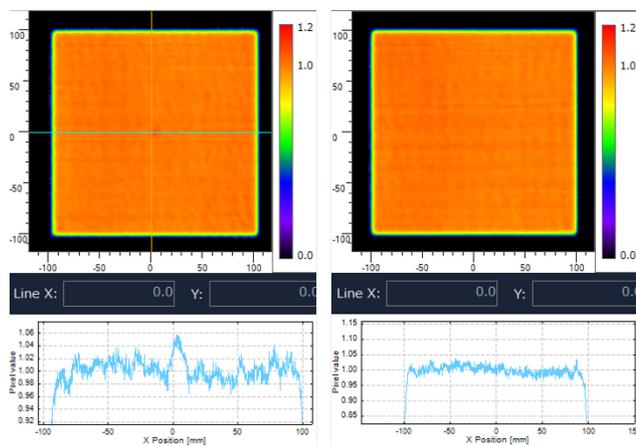


Figure 3: QA-SCN results at gantry irradiation room (left: 1/2023, right: 4/2022).

(4)の結果、位置モニタでは中心部での感度低下が発見された (Fig. 4)。

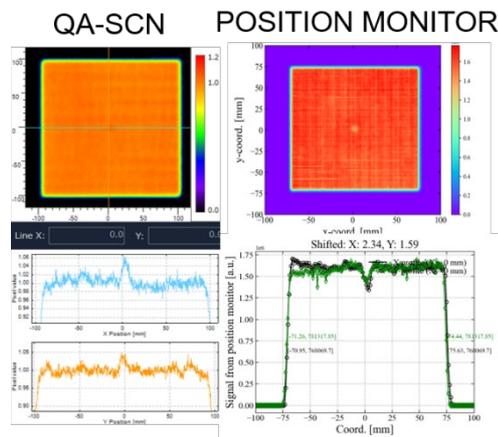


Figure 4: Comparison of QA-SCN and position monitor.

感度低下した領域付近にビームが照射される場合、ビームの位置計算に実際の位置からの乖離が生じる。それに伴いビームの位置の過剰な補正が生じ中心にビームが集中したことが、中心付近の線量が高くなった原因である。

3. 位置モニタ交換時期の推定

3.1 ビーム導入粒子数からの交換時期推定

初期の位置モニタ使用時期において、治療室への累計導入粒子数を調査した。Figure 5 は、位置モニタ交換前 (1号機) と交換後 (2号機) における累計導入粒子数をプロットした図である。結果、位置モニタ交換時点での総導入粒子数は固定照射室で $1.5E+14$ 、ガントリー照射室で $1.8E+14$ であった。

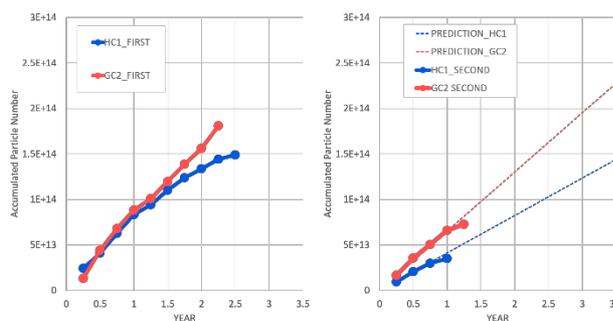


Figure 5: Accumulated particle number (left: first monitor, right: second monitor).

次回交換時期を推定するため、今回交換した位置モニタ(1号機)の総導入粒子数を参考にした。ガントリー照射室の位置モニタ交換は位置モニタの劣化が進行したタイミングで実施したものであるため、交換時の目安としては、より厳しい条件である固定照射室の位置モニタ交換時の $1.5E+14$ を採用した。交換後の位置モニタ(2号機)において、使用開始から1年を経過したため、各治療室での導入粒子数をプロットし、線形近似にて交換時期を算出した。結果、ガントリー室が2.5年、固定室は3.5年であった(Table 3)。

Table 3: Calculation of Position Monitor Replacement Age (Accumulated Particle Number)

固定照射室	3.5 年
ガントリー照射室	2.5 年

位置モニタ1号機の交換までの粒子数から予想した交換周期は非常に短い。その要因としては、位置モニタ1号機はビーム調整期に使用されたため、位置モニタ中心への照射割合が多く、現在の治療運用における中心照射の割合と異なっていることが原因と推定される。現在の治療運用における中心への線量の割合は10~20%であり、調整期における中心照射の割合40~60%の範囲であると予想されるため、実際の交換周期は8~10年程度になると予想される。

3.2 位置モニタ中心部劣化からの交換時期推定

Monthly QA 項目の平坦度測定では、代表のエネルギーにて平面照射 $200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ を照射している。その際の位置モニタデータ(各チャンネルでのビーム検出値)から、照射野全体での線量平均値(AVERAGE DOSE)と中心部の線量値(CENTER DOSE)の比 CENTER DOSE/AVERAGE DOSE を、位置モニタ中心の感度とし評価を実施した(Fig. 6)。評価対象は平坦性の結果が良い Y プロットのみを使用し、エネルギーは 364 MeV/u で固定した。Figure 7 は、CENTER DOSE/AVERAGE DOSE の時間経過をプロットした図である。

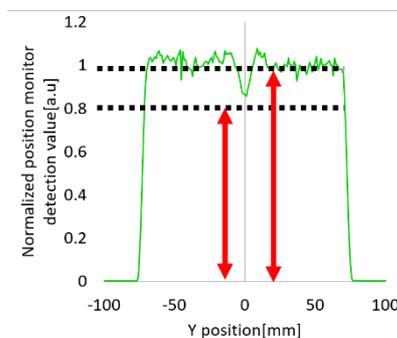


Figure 6: Y plot at position monitor (X=0).

位置モニタ初号機では劣化が始まってからのデータのため、急激に中心部が悪化していく様子が見られる(Figure 7)。

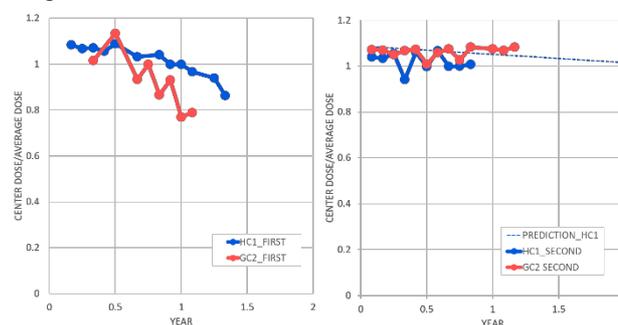


Figure 7: Deterioration of position monitor center (left: first monitor, right: second monitor).

交換実績から、位置モニタ中心感度 0.8 を交換閾値として設定した。位置モニタ交換から1年を経過した時点で、除算値の線形近似を取得した。結果、閾値 0.8 となる交換時期は8年と算出された(Table 4)。

Table 4: Calculation of Position Monitor Replacement Age (Position Monitor)

固定照射室	8 年
ガントリー照射室	8 年以上

3.3 位置モニタ交換時期

位置モニタ交換時期については導入粒子数と位置もいた本体の劣化具合から各交換年数が算出できたが、各導入年数で乖離が見られた。原因としては、今回計算で使用した導入粒子数に含まれる中心照射の割合と、現在の導入粒子数の割合は異なっていることが考えられる。調整期における中心照射の割合は現状に比べ非常に高い、そのため導入粒子数からの算出された交換時期3.5年は過度に短いものになると予想される。ビーム調整期における導入粒子数のうち、どの程度中心に照射していたか確認する手段はないため、粗い推定にはなるが調整期における中心照射の照射に占める割合を考慮し導入粒子数による位置モニタの交換時期を推定すると約8年となり、位置モニタの劣化ペースとおおむね一致する。よって8年周期で位置モニタの交換が必要であるとすると本施設における次回の交換は2031年

になる見込みである。

4. 位置モニタ劣化への対策

位置モニタ中心部が早期に劣化した原因として、ビーム調整期における中心への照射割合が非常に高かったことがあげられる。中心照射ではビームの位置の調整からサイズ、ドリフトといった多数の調整と確認において照射される。また、治療開始以降も Daily QA や Monthly QA といった項目で、中心照射が実施されている (Table 5)。

Table 5: Treatment Room Comparison of Beam QA

中心照射	固定照射室	ガントリー照射室
Daily	エネルギー4 step	エネルギー4 step ×4 角度
Monthly	600 エネルギー ×2 回	エネルギー10 step エネルギー5 step ×12 角度

位置モニタの交換は、位置モニタ製作から現地交換作業に日数と費用を要する。特に交換作業は数日作業となるため、治療停止の可能性がある。そのため、できるだけ長期間位置モニタを劣化せずに使用し続けることが重要である。本施設のビーム利用における中心照射のうち約 50%が日々のビーム性状評価で照射されている。そのため、本施設における中心部への照射粒子数低減の施策として、日々のビーム位置精度評価における使用粒子数の低減および中心照射を用いないビーム位置評価を実施した。

Figure 8 は、中心照射における導入粒子数を比較した図である。日々のビーム位置精度評価における測定方法を見直したことにより、測定に必要な粒子数を 1/4 に削減することができた。また中心部への負荷低減として、Daily QA での中心照射位置を分散させることで可能とした。

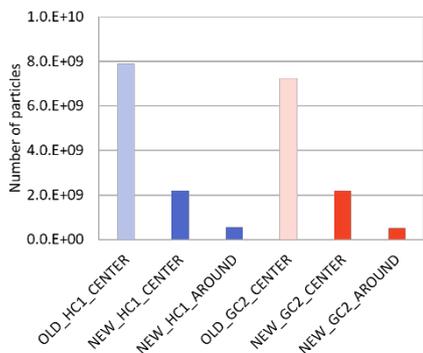


Figure 8: Number of particles in irradiation setting comparison.

Daily QA での中心照射では、基準位置と実際のビーム位置の差分が 1 mm 以内であることを評価している。今回の検証では、位置モニタ中心から ±10 mm の範囲内であれば、中心におけるフィードバック制御と、領域内のある 1 点におけるフィードバック制御は、測定における許容値の範囲内で一致することが判明した。そのため中心 ±10 mm の範囲の中で照射位置をローテーションすることで 1 か所へのダメージを低減している (Fig. 9)。本施設

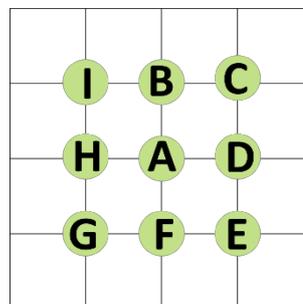


Figure 9: Schematic diagram of position monitor irradiation position (Each interval is 10mm.).

における実運用例を示す、月曜日にはすべてのエネルギーである 600 個分の照射を位置 A にて実施し、火曜日から金曜日では位置 B~I を 1 週毎にローテーションし照射している。このローテーションは照射設定を変更するだけで可能であるため、運転員に対する作業負荷も小さい。

5. まとめ

位置モニタについて交換時期の推定と長寿命化のための対策を実施した。交換時期の推定については、導入粒子数から交換寿命を算出した。また、位置モニタの使用期限においては位置モニタ本体の中心部の劣化度合いから算出した。位置モニタの長寿命化の実現としては、照射粒子数を 1/4 まで削減し、かつ照射位置を分散することで中心部への負荷軽減を実現した。

謝辞

本ポスターにおいて、山形大学大学院医学研究科先進的医学専攻重粒子線医学講座の先生方、東芝エネルギーシステムズ(株)、現地運転員からの多大なるご協力を頂きました。

参考文献

- [1] 東芝 重粒子線治療装置 照射系 スキャニング照射機器仕様書. RS-5202353.
- [2] 治療実績 | 山形大学医学部東日本重粒子センター, <https://www.id.yamagata-u.ac.jp/nhpb/index.html>