

DEVELOPMENT OF RASTER SCANNING SYSTEM AT NIRS-HIMAC

Takuji Furukawa^{1,A)}, Taku Inaniwa^{A)}, Shinji Sato^{A)}, Naoya Saotome^{A)}, Toshiyuki Shirai^{A)}, Yuka Takei^{A)},
Eri Takeshita^{A)}, Takeshi Himukai^{A)}, Ken Katagiri^{A)}, Shigekazu Fukuda^{A)}, Ai Nagano^{A)},
Shinichiro Mori^{A)}, Shinichi Minohara^{A)} and Koji Noda^{A)}
Yasushi Iseki^{B)}, Katsushi Hanawa^{B)}, Nobukazu Kakutani^{B)}, Choji Yamazaki^{B)}, Yoshiharu Kanai^{B)}

^{A)}National Institute of Radiological Sciences

4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba-shi, Chiba, 263-8555

^{B)}Toshiba Corp.

2-62-8-507 Higashi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo, 170-0013

Abstract

A new treatment facility project, as an extension of the existing HIMAC facility, has been initiated for the further development of carbon-ion therapy in NIRS. This new treatment facility will be equipped with a 3D irradiation system with pencil beam scanning. The challenge of this project is to realize treatment of a moving target by scanning irradiation. To accomplish practical moving target irradiation and to fix the final design, a prototype of the scanning irradiation system was constructed and installed into existing HIMAC experiment course. The system and the status of the beam test are described.

放医研におけるスキヤニング照射装置開発の現状

1. はじめに

平成18年度より放医研では、HIMACからのビームラインを延長し、スキヤニング照射、および回転ガントリーを備える新治療室を建設する計画を進めている^[1,2]。ここでは、呼吸性移動臓器に対するアプローチとして、呼吸同期照射と高速な多数回スキヤニングを組み合わせることにより、線量分布の悪化を防ごうと考えている。この高速スキヤニング照射装置を実証し、また装置の完成度を高めていく必要から、新治療棟一建屋の建設（平成22年竣工予定）に先行して、スキヤニング照射装置の開発試作機を製作した。平成20年12月より、これをHIMAC物理汎用照射室に設置し、ビーム試験をスタートした。これらの進捗状況を紹介する。

2. スキヤニング試験システムの製作

2.1 装置概要

スキヤニング照射装置一開発試作機（以後、試験システム）の設計は、計画のスタートした平成18年度から平成20年度の間に行った。初期の概念設計の結果から、“高速なスキヤニングにより照射時間を延ばさずにリスキャニングの回数を確保し、呼吸性移動臓器に適応できるようにする”ということを設計の指針と定め^[3]、設計製作を行った。このため、本試験システムの製作において、重要なポイントは、1) 高速スキヤニング電磁石・電源、2) 高速なスキヤニング制御、および3) モニターシステムであ

る。また、照射法については、スポット移動中にビームOFFしない、ハイブリッドラスタースキヤニング法^[4]を採用することとした。これは高速化に際し、HIMACシンクロトロン^[5]のビーム特性を考慮し、最も相性がよいと考えられたためである。また、この試験システムの製作と平行して、高速化のために、1) 高速化を考慮に入れた治療計画の開発^[5]、および2) シンクロトロン可変周期運転化の開発^[6]が行われてきた。これらを組み合わせることにより、従来の約100倍の速度での照射野形成を実現する。

平成20年12月に完成した試験システムの写真を図1に示す。ポート長は約9mであり、空気やモニターによる散乱を防ぐため、アイソセンター上流1.3mの位置まで真空としている。最上流にスキヤニング電磁石、下流にはモニター、ミニピーク用リッジフィルター、レンジシフターと配置される。



図1：完成したスキヤニング試験システム

¹ E-mail: t_furu@nirs.go.jp

2.2 高速スキャンニング電磁石・電源

スキャンニング電磁石については、スキャン速度を従来の約10倍程度となる $(v_x, v_y)=(100, 50)$ mm/msを達成できるように電磁石を製作した。主な仕様を表1にまとめる。高速な磁場変化を繰り返すため電磁石の温度上昇が懸念されていたが、定格での長時間交流通電時においても磁極温度は50°C程度であり、問題がないことを確認した(図2参照)。

表1：スキャンニング電磁石・電源 主要諸元

	Unit	SMx	SMy
偏向角	mrad	±18	±21
磁極間隙	mm	40	82
有効長	mm	393.6	681.2
ポール長	mm	360	618
ポール幅	mm	90	140
最大磁場	T	0.286	0.190
コイルターン数	turns/pole	12	15
抵抗	mΩ	5.6	10.3
インダクタンス	mH	0.94	2.02
重量	kg	290	730
最大電流	A	±410	±440
最大電圧	V	420	460
スキャン速度	mm/ms	> 100	> 50

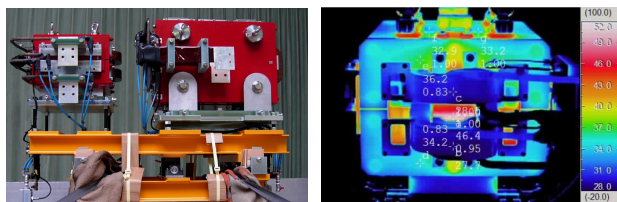


図2：スキャンニング電磁石(左図)、および連続通電試験時の温度測定結果(右図)。

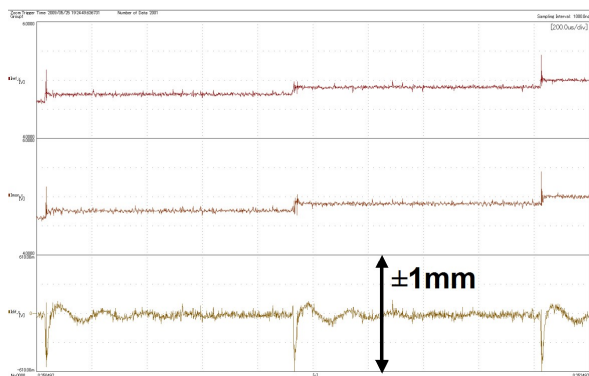


図3：電源試験の様子。上から電流指令値、測定電流値、および電流偏差を表す。時間スケールは200 μs/divisionである。

電磁石電源は、上記スキャン速度を実現するためのフォーミング電圧用IGBT電源部、および電流制御用のFET電源部で構成されている。本電源において

は、高速なIGBT制御が非常に重要な役割を果たす。オーバー/アンダーシュートを抑制するために、スイッチングの時間精度として約300ns程度が要求される。図3に試験結果の一例を示すが、オーバーシュートが0.5A以下に抑えられていることがわかる。この0.5AのずれはFET電源部によって数10μs程度で補正することが可能である。

2.3 ビームモニター

スキャンニング照射装置においてビームモニターは最も重要な要素の一つである。各スポットの照射線量を計測し、スキャンニング照射を実現するために、正、および副モニターの二台の平行平板電離箱を備えている。出力の位置依存性、および再結合などのチェックを行い、使用している。また、スポット毎のビーム位置を測定、および監視するために、水平・垂直、計240チャンネルからなる多線式比例計数管(MWPC)を用いる。これらのビームモニターの有効領域は240×240mm²である。

2.4 リッジフィルターとレンジシフター

上記モニターの下流には、ミニピーク生成用のリッジフィルターとレンジを変化させるためのレンジシフターが配置されている。リッジフィルターは、160本のバーリッジ(1.5mmピッチ)から構成され、ガウシアン形状で3mm幅(1sigma)のミニピークを形成する。また、リッジフィルターからアイソセンターまでの距離は約1mである。一方、散乱の影響を小さくするため、レンジシフターは最下流(アイソセンター上流0.9mから0.6mの間)に設置されている。バイナリー方式を採用しており、厚さ0.2~102.4mmの10枚のPMMA板で構成される。これらの有効領域はビームモニターと同一にしている。

2.5 制御装置

スキャンニング照射の制御装置には、大容量の照射パラメータおよび照射ログを高速、かつ正確に処理し、照射野形成を管理することが要求される。正モニター回路からの信号を元に照射野形成を司る部分には、高速性、信頼性の高さからFPGAを採用し、状態監視やレンジシフター駆動などの高速でないmsオーダーの制御部にはPLCを採用している。

3. ビーム試験

平成20年12月から、スキャンニング試験装置のコミッショニングを開始した。コミッショニングでは、まず初めにスポット径の調整、電磁石電流値とスポット位置の校正、およびモニターや制御系の正常動作確認などの初期試験を行った。図4左に、電磁石電流とスポット位置のキャリブレーションに用いた測定結果を示す。測定には、蛍光スクリーン(ZnS:Ag)とCCDカメラによる測定システム^[7]を用いた。また、各スポットを固定カウントで照射することにより実現する二次元均一照射での平坦度チェックにもこのシステムを用いている(図4右)。

この例では±100mmの広範囲にわたり平坦度が確保されていることがわかる。また、図5には二次元強度変調照射の一例を示す。この例ではHIMACの鳥瞰図をビーム照射により描いているが、所定の強度変調が行えていることがわかる。

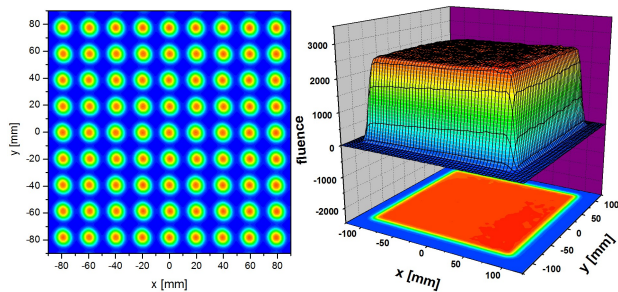


図4：スポット位置キャリブレーション（左図）、および二次元均一照射の測定結果（右図）

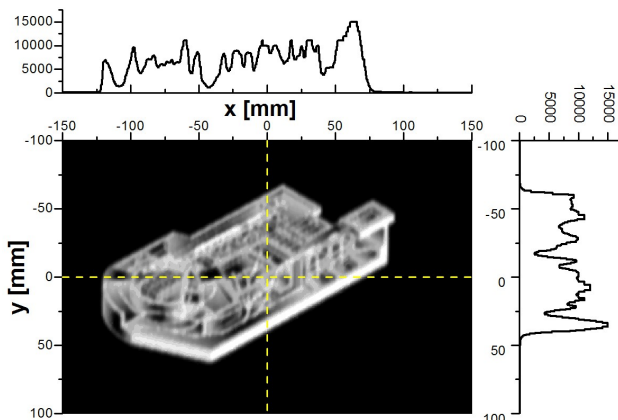


図5：二次元強度変調照射の一例

一方、三次元照射を行うためには、ペンシルビームのレスポンスを正確に押さえ、これを治療計画における線量計算に反映させることが必要である^[8]。このために我々は、ペンシルビームの線量応答を効率よく測定するための測定システムを開発した。この測定システムはシリンダー式の水カラムと測定器により構成される。シリンダー式水カラムは、測定器までの厚みを30mmから380mmまで変化させることができる。また、測定器は積分型の平行平板電離箱（直径100mm）と十字に配置されたピクセル型の電離箱（全94ch）からなり、縦方向と横方向の線量分布が同時に測定可能な構成になっている。測定結果の一例を図6に示す。この専用の測定器を用いることでビームデータ取得にかかる時間の大幅な削減を実現している。

上述のペンシルビームデータを用い、治療計画を行い、三次元照射の試験を行った。線量分布の計画値と測定値の比較を図7に示す。この結果から、計画通りに照射できているのがわかる。この例では、物理線量が平坦になるように60×60×80mm³の直方体ターゲットについて計画、照射を行った。ここでは、高速な照射のために、平坦なビームの時間構造を仮

定し、スポット間に付与される線量を予測し、治療計画に組み込んだ^[5]。図7に示した比較により、所望の強度で、平坦なスピン構造^[9]を実現できていること、さらに治療計画の信頼性が確認できた。また、これらの試験は、HIMACシンクロトロンフラットトップ延長^[6]と組み合わせて行われており、非常に効率よくビーム試験が行われている。

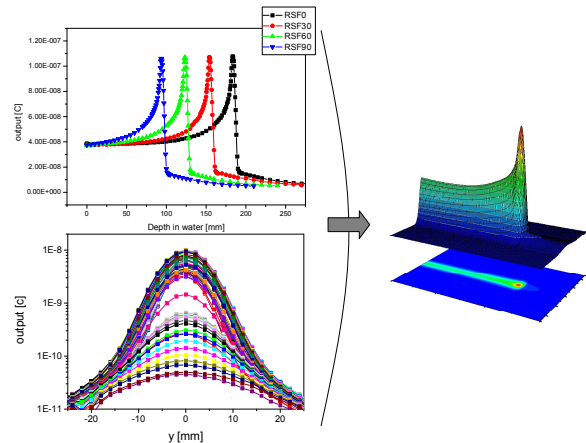


図6：ペンシルビーム測定の一例。左図の測定結果から右図のようなビームモデルとし、治療計画内での線量計算に用いる。

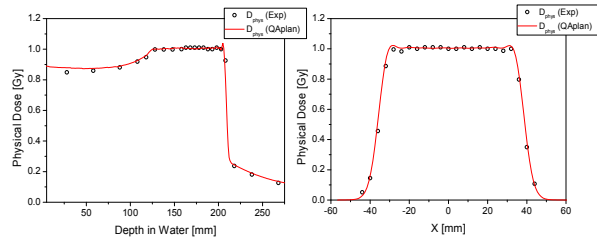


図7：三次元照射の一例。線が治療計画によるもので、点が測定結果を示している。

4. まとめ

建屋建設に先行して、スキャニング照射装置の開発試作機を製作し、ビーム試験を行っている。所期の目標は達成しているといえるが、いくつかのコンポーネントは改善すべき点があり、今後急ピッチで進めていく必要がある。

参考文献

- [1] K. Noda, et al., Nucl. Instr. Meth. B 266 (2008) 2182-2185.
- [2] K. Noda et al, Proc. of EPAC 2008, 1818.
- [3] T. Furukawa et al, Med. Phys. 34 (2007) 1085.
- [4] Th. Haberer et al, Nucl. Instr. Meth. A 330 (1993) 296.
- [5] T. Inaniwa et al, Med. Phys. 34 (2007) 3302.
- [6] Y. Iwata et al, Proc. of EPAC 2008, 1800.
- [7] N. Saotome et al, Proc. of EPAC 2008, 1830.
- [8] T. Inaniwa et al., Nucl. Instr. Meth. B 266 (2008) 2194-2198.
- [9] S. Sato et al., in these proceedings.