

エネルギースキニング照射のためのビーム QA

QA PROCEDURE FOR ENERGY SCANNING IRRADIATION AT NIRS-HIMAC

橋崎慎平^{#A)}, 原洋介^{B)}, 古川卓司^{B)}, 水島康太^{B)}, 早乙女直也^{B)},
丹正亮平^{B)}, 皿谷有一^{B)}, 勝間田匡^{A)}, 三好智広^{A)}, 立川裕士^{A)}, 高田栄一^{B)}
Shinpei Hashizaki^{#A)}, Yousuke Hara^{B)}, Takuji Furukawa^{B)}, Kota Mizushima^{B)}, Naoya Saotome^{B)},
Ryohei Tansho^{B)}, Yuichi Saraya^{B)}, Masashi Katsumata^{A)}, Tomohiro Miyoshi^{A)}, Yuji Tachikawa^{A)}, Eiichi Takada^{B)}
^{A)}Accelerator Engineering Corp.
^{B)}National Institute of Radiological Sciences

Abstract

In National Institute of Radiological Sciences, a three-dimensional scanning irradiation system has been employed for carbon-ion radiotherapy since 2011. In the therapeutic irradiation, the hybrid depth scanning (HS) technique had been used until the July in 2015. This technique changes beam range by combining range shifter plates (RSF) and changing the beam energy extracted Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba (HIMAC). However, the energy scanning (ES) technique has been used since the September in 2015, which changes the beam range by only changing the extracted beam energy not using the RSF. With changing from the HS to the ES, the number of beam energy step used for the treatment was increased from 11 steps to 200 steps. The increase of beam energy increases the time for beam daily QA (quality assurance) conducted before the treatment and it is required to improve the daily QA program which assures the accuracy of the beam scanning system without increasing the measurement time. In this paper, we introduce the improved beam daily QA program for the ES.

1. 背景

放射線医学総合研究所(NIRS)では、2011年から新治療研究棟において、三次元スキニング治療を行ってきた。これまでは、加速器の可変エネルギー運転とレンジシフタ(RSF)を組み合わせてビーム飛程を変化させる照射方式(ハイブリッド照射方式:HS)を適用してきた[1][2][3]。2015年秋には、より高精度な治療のため、使用するエネルギーを11stepから200step以上に増やし、可変エネルギー運転のみで飛程を変えるエネルギースキニング照射方式(ES)での治療が開始された。

現在、新治療研究棟では約60[件/日]の治療照射を実施している。NIRSでは、共同利用実験時間(原則21:00~7:00)と、半年毎の定期点検期間が設けられている。定期点検では、照射装置をシャットダウンして、照射機器の詳細な保守点検が行われる。

日々の治療を安定して行うためには、定期的にビームに関するQuality Assurance(QA)を実施する必要がある。ビームQAはビームの性状確認や照射装置の健全性評価のために、日次(Daily QA)・月次(Monthly QA)・半年毎(Half-yearly QA)に実施する項目が区分される。Daily QAは、治療開始前に必ず実施する。Monthly QAは、治療終了後から共同利用実験開始までの間に実施している。Half-yearly QAは、定期点検の一環として、詳細なQA項目を実施している。

ESによる治療を開始するにあたり、従来実施していたQA内容では網羅できない項目があった。また、治療で使用するエネルギーステップが約20倍に増えたことから、QAに費やす時間が大幅に増加し、治療運用時間の確保が困難となることが予想された。そのため、従来のQA

と同程度の作業時間に抑えつつ、品質を確保した、ES対応の新たなQAが必要となった。

本発表では、ES運用のための、ビームQAの紹介とその実施状況について報告する。

2. エネルギースキニング照射方式

ESは可変エネルギー運転のパターンを200step以上に増やし[4]、RSFを使わずに可変エネルギー制御のみで飛程を変える照射方式である。照射方式をHSからESに変更したことによる主なメリットは、1) 加速器の可変エネルギー制御のみでビーム飛程の変更が可能のため、RSF通過による散乱の影響がなくなったことである。2) 次に、ビーム飛程の変更時間短縮が挙げられる。ESではRSFを使わないため、可変エネルギー運転の高度化を図ることで、照射待ち時間の短縮が可能となり、ひいては全体の照射時間短縮につながる。3) 照射装置の保守管理という視点では、駆動機器の故障に対するリスクが低減されることもメリットとして挙げられる。照射に関わる駆動装置の数が少ないほど、駆動機器系の故障発生頻度は低くなることが期待される。つまり、ESでは駆動機器系統の故障に起因した治療中止や延期のリスクが低くなる。

一方、ESへの変更により、ビームQAの作業時間増大が懸念される。治療に使用するビームエネルギーが約20倍に増加したため、従来のQA内容では200stepのエネルギーを網羅することができない。しかしながら、全てのエネルギーを対象にQA測定を実施すると、大幅にQA時間を増加させてしまい、治療時間の確保が難しくなる。そのため、ES対応のビームQAではQA内容の網羅と一定のQA時間を両立させる必要がある。

[#]aecmed@qst.go.jp

3. ビームに関する QA

3.1 QA 項目

治療照射を安全に実施するためには、放射線治療における QA ガイドラインに沿ったビーム測定を定期的に行うことが求められる。新治療研究棟で実施しているビームに関する QA は、Daily QA, Monthly QA, Half-yearly QA の 3 つに区分される。ビーム QA の主な項目について Table 1 に示した[5]。

Table 1: QA List for Energy Scanning

区分	QA 項目	実施時期
Daily QA	ビーム性状確認	1 日単位で、 治療開始前に 測定する
	モニタ線量計の校正	
	線量率確認	
	三次元線量分布確認	
	線量・位置モニタ等の正常動作確認	
Monthly QA	詳細なビーム性状確認	1 ヶ月単位で、 治療終了後から 共同利用実験開始までの 間に測定する
	ビーム効率確認	
Half-yearly QA	詳細なビーム性状確認	半年単位で、 定期点検の一環として測定 する
	モニタ線量計の校正 (レファレンス測定)	
	線量・位置モニタ等の正常動作確認	
	患者例による線量分布確認	
	インターロック確認	

新治療研究棟では、治療室が E,F 室の 2 部屋あり、それぞれ水平・垂直の照射ポートを持つ。Table 1 の QA 項目を各コースで実施している。Daily QA は治療開始前に必ず実施するため、測定頻度の高い QA であり、この QA 時間が治療運用時間の確保に大きな影響を及ぼす。Daily QA の測定内容には、ビーム軸調整・確認と multi check 測定がある。Multi check 測定とは、1) モニタ線量計の校正 2) 線量率確認 3) 線量・位置モニタ等の正常動作確認 4) ビーム飛程確認 5) 三次元線量分布確認をまとめた総称である。従来の HS では、4 コース分の Daily QA を 1 時間 20 分程度の作業時間で実施してきた。これに治療室内の機器 QA を加えた、システム全体の Daily QA として、計 2 時間弱を QA 時間に充てていた。HS での Daily QA の平均作業時間を Figure 1 に示す。

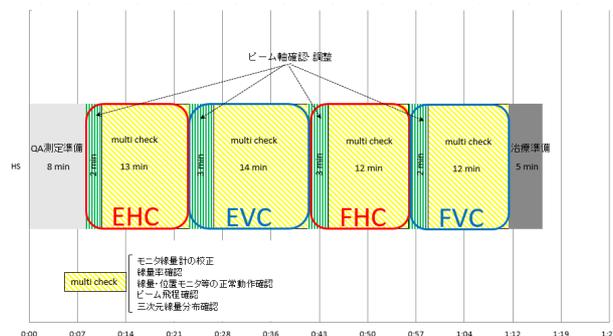


Figure 1: Time schedule of daily QA for HS.

Figure 1 から、ES の場合、20 倍に増加したエネルギーすべてに対して QA 測定を行うと、一日の大半を QA 時間に費やすことになる。さらに、将来的にはここに超伝導回転ガントリコースの QA が追加される予定である。そこで、これまでと同じ治療時間を確保するためには、2 時間の枠に収まる測定時間で品質も維持された Daily QA が必要である。以下に、HS から ES への変更に伴って更新された Daily QA 内容について記述する。

3.2 Daily QA

スキヤニング照射では、ビーム軌道を制御することが重要である。シンクロトロンから出射されるビームは日々変動しているため、ビーム位置調整は約 20 倍に増加したエネルギーステップすべてを対象にしなければならない。新治療研究棟では ES の運用開始に向けて、ビーム輸送室の蛍光膜モニタでビーム位置を調整する方法から治療室内の位置モニタを用いて調整する方法に見直された。

● ビーム位置調整 (HS)

HS の運用当初は、BAC と呼ばれるシステムでビーム位置調整をしていた[6]。この測定方法には、ビーム輸送ライン末端にある蛍光膜モニタ 2 台とステアリング電磁石 (ST) 2 台を用いる (Figure 2)。この測定方法で位置調整が完了するまでの時間はおよそ 10 分であった。

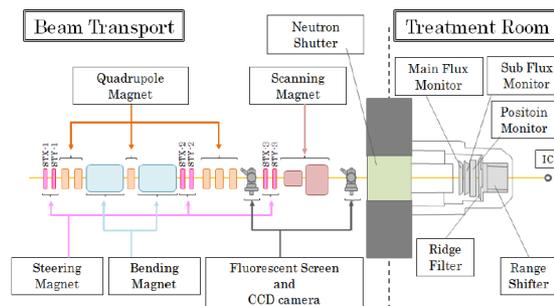


Figure 2: Layout of the scanning irradiation system. RSF is not used for ES.

その後、BAC よりも測定時間の短い方法として、PRNchk という測定手法が取り入れられた。この測定方法では、ST 電磁石 1 台と治療室内の位置モニタを利用

する。BAC から PRNchk に変更したことで、測定時間は 10 分から 2 分弱にまで短縮できた。しかし、この測定内容をそのまま ES に適用すると、1 コースあたり 2 分×20 倍相当の照射時間となる。これでは治療時間が大きく圧迫されてしまう。

● ビーム位置調整 (ES)

そこで、ES ではエネルギー毎のビーム照射時間を約 1/10 に削減するなどの工夫をした。その結果、ビーム位置調整は 8 分弱で終了している。ビーム位置調整の測定内容を比較した図を Figure 3 に示す。

	Hybrid Scanning	Hybrid Scanning	Energy Scanning
測定名称	BAC	PRNchk	PRNchk
測定機器	スクリーンモニター2台 (ビーム輸送室内)	位置モニター (治療室内)	位置モニター (治療室内)
調整する電磁石	2 台	1 台	1 台
測定時間	10 分	2 分	8 分

Figure 3: Comparison of the methods for checking beam position.

ES への変更で当初 40 分掛かると予想された測定時間は、PRNchk の解析手法を見直したことで 8 分に短縮された。

● ビーム輸送系の電流値設定ファイル確認

位置調整完了後、ビーム輸送系の電流値設定ファイル (PS pattern) に調整結果が反映されていることを確認する必要がある。調整していない ST 電流値が変化していた場合は、調整結果を正しく反映させていない可能性がある。この場合、ビーム位置調整をやり直さなければならない。また、ST 電流値が定格電流に近い値の場合、電流値の調整幅に偏りが生じているため、Monthly QA 等で直上流の ST を調整して、該当 ST の電流値調整幅を広く持つことが望ましい。HS では、11step のエネルギー毎に PS pattern のトレンドグラフを作成して、計 11step×4 コースのグラフ変動によりこれらを確認していた (Figure 4)。

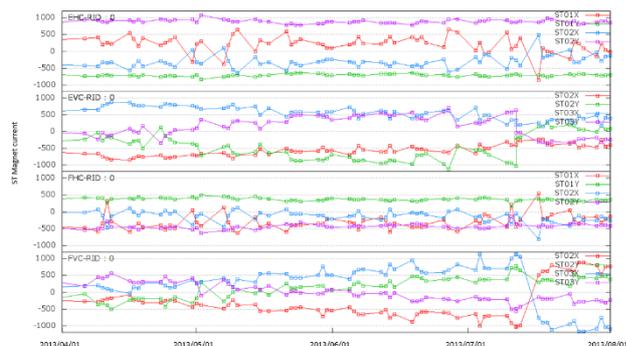


Figure 4: Trend chart of the PS pattern for HS using BAC system.

ES でも同様のトレンドグラフを作成しているが、200step×4 コースのグラフをすべて確認していると時間が掛かり合理的ではない。そこで、調整した ST 電流値をリスト化して、前日との数値比較を行っている (Figure

5)。これにより、短時間かつ定量的に電流値の変化が確認できる。また、調整後の電流値が許容値以内であることも確認する。HS 同様に、調整幅に偏りが生じている場合は、Monthly QA 等で直上流の ST 調整を実施する。このように確認方法を工夫したことにより、短時間で 200step×4 コースの調整結果を確認することができている。

Energy [MeV/u]	Course	2016/5/31		2016/6/1		check
		Magnet current [A]		Magnet current [A]		
98.2	FHC	STX02	-81	900	8A_OVER	
406.7	FVC	STX02	-190	-150		
406.9	FVC	STX02	-184	-143		

Figure 5: The table of example result for checking the change of ST magnet current.

ここで、ES に対応した位置調整の妥当性を ST 電流値トレンドから評価する。EHC ラインにある ST 電磁石の 430 [MeV/u] を例に挙げると、Figure 4 より半年間の HS(BAC)トレンド変動は標準偏差にすると $\sigma = 1.82$ である。これをピックアップしたグラフを Figure 6 に示す。電流値の調整幅はおよそ 7.28 [A] になる。

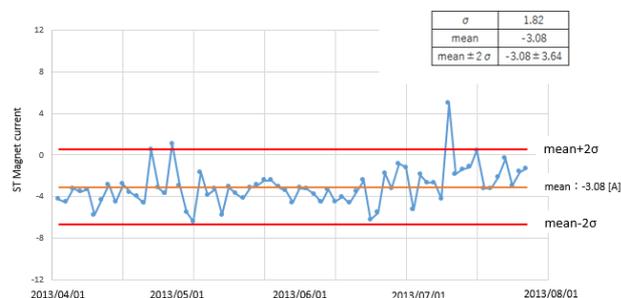


Figure 6: Standard deviation of the EHC_ST when being 430 [MeV/u] in HS.

次に、2014/04~2015/03 までの HS (PRNchk) 電流値トレンドを Figure 7 に示す。日々の変動量は小さくなり、標準偏差 $\sigma = 1.02$ である。Figure 7 でトレンドに大きな変化が見られる箇所は、Monthly QA や Half-yearly QA で調整したことを表している。

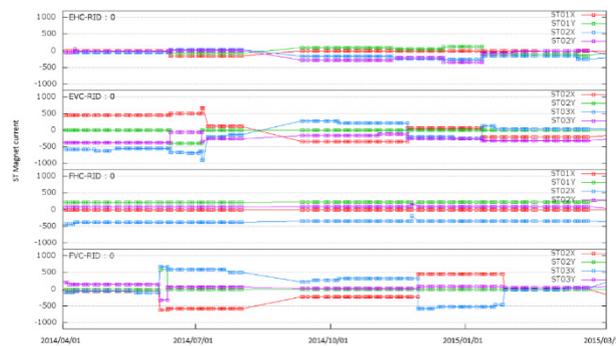


Figure 7: Trend chart of the PS pattern for HS using PRNchk system.

ES になると電流値の変動幅はさらに小さくなっている。2015/09~2016/03 までのトレンドを Figure 8 に示す。ST の標準偏差 $\sigma = 0.49$ である。これは、Monthly QA や Half-yearly QA のビーム性状確認測定も ES に対応した QA 内容になっており、それらの ST 電流値調整幅が少なくなった(または調整の必要がない)ことを反映している。Monthly QA や Half-yearly QA のビーム性状確認では、Iso-Center(IC)に基準点を設置して、ビーム位置を調整する。この時の電流値調整量がほとんどないということは、ビーム位置ずれ量が小さいということになる。つまり、HS から ES へ変更したことで、調整するエネルギーの数は増加したが、それぞれのビーム位置再現性は高まっていることが ST 電流値トレンドから読み取れる。

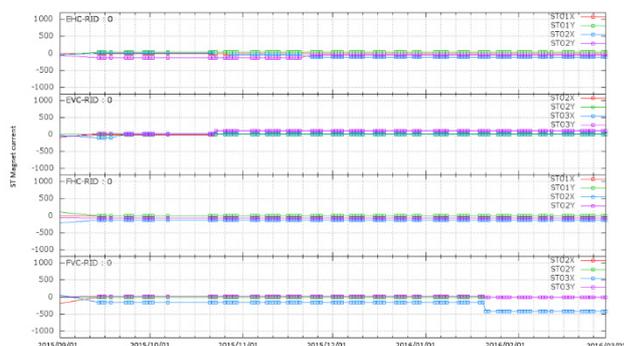


Figure 8: Trend chart of the PS pattern for ES.

• Multi check

Daily QA の各 QA 項目を multi check 測定として順次確認している。測定機器には線量計と電位計から成る Daily QA 装置を使用する(Figure 9)。水平コースから垂直コースへのセッティング変更は治療室の外から行えるため、測定コースの変更によるセッティング準備に時間を取られることはない。



Figure 9: The Daily QA machine used by Beam QA. Dosimeter and Electrometer are established as a measuring instrument.

HS の場合、モニタ線量計校正のための測定は、11step すべてのエネルギーで行っていた。ES では 200step すべてのエネルギーを測定すると数時間がかかってしまうため、200step を網羅するように 11 個のエネルギーをピックアップしている(Figure 10, Figure 11)。特に、290 [MeV/u]については、当日のモニタ線量計校正値として治療で利用される。そのため、290 [MeV/u]のエネルギーについては繰り返し 3 回測定する。線量[Gy]のばらつきは 0.3 [%]以下である。また、併せて線量率確認も実施している。

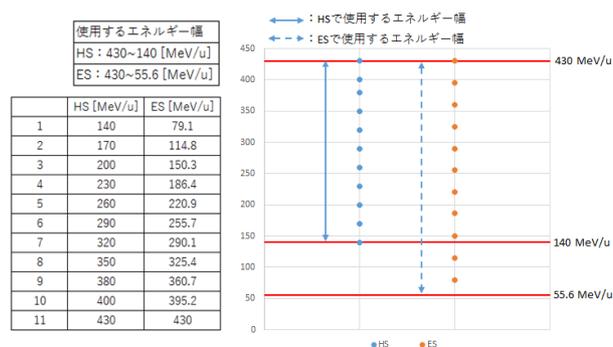


Figure 10: The range of beam energy used for the daily QA dosimetry.

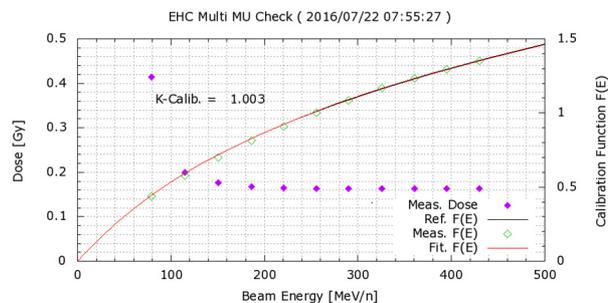


Figure 11: Check of multi MU value.

ビーム飛程確認では、Daily QA 装置に備えられたタフウォータ(減速板)を挿入して、ブラッグピークを形成する。HS では 290 [MeV/u]のエネルギーのみを使用し、RSF を 5 パターン変化させることで飛程を変えていた。ES では 5 エネルギーを用いて、HS と同等の飛程を再現している(Figure12)。ES での日々のトレンドは、標準偏差 $\sigma = 0.01$ で推移しており、十分許容範囲内である。

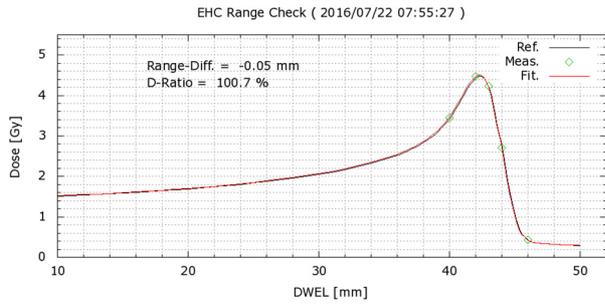


Figure 12: Check of beam range.

最後に、三次元線量分布確認を行う。これは、Daily QA の各項目を最終確認するための測定となる。これも繰り返し3回測定を行う。線量[Gy]のばらつきは、0.4[%]程度である。HS では 320, 290, 260, 230 [MeV/u]の4 エネルギーと RSF を組み合わせて照射野を形成していた。ES は使用頻度の高い 296.5 [MeV/u]から 204.1 [MeV/u]までの 54 エネルギーで照射野を形成している。これら multi check の測定結果は、照射ログを解析することでも、その妥当性を評価している。評価項目は正・副モニタの出力値比較、位置モニタでのビーム変動量、正・副モニタのリーク電流値、PS pattern 電流値設定誤差などである。

4. 結論

ES での Daily QA 平均作業時間を Figure13 に示す。測定内容等の工夫により、1 コース毎に PRNchk で 40 分、multi check で数時間の増加を見込んでいた QA 時間を、トータルで 30 分ほどの増加に抑えることができた。これは、従来の Daily QA 時間枠を考慮しても許容範囲内であるといえる。また、ES 対応の Daily QA 測定結果から、ES の QA 内容は HS と同程度の水準を満たしていることがわかる。以上より、NIRS では ES の治療運用に際し、Daily QA 内容の網羅と一定の QA 時間を両立させることができた。

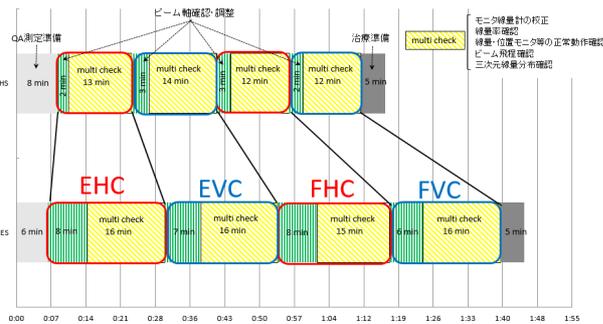


Figure 13: Comparison of the daily QA time between for HS and for ES.

参考文献

- [1] T. Furuawa *et al.*, Med. Phys. **37** (2010) 5672.
- [2] T. Inaniwa *et al.*, Med. Phys. **39** (2012) 2820.
- [3] Y. Iwata *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A **624**, 33 (2010).
- [4] K. Mizushima *et al.* in: Proceedings of the 7th Korea-Japan Joint Meeting on Medical Physics, Busan, Korea, 2014.
- [5] Y. Tachikawa *et al.*, in: Proceedings of WAO'14, Mainz, Germany, 2014.
- [6] E. Takeshita *et al.*, in: Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 2010, 3218.