

加速器を用いたホウ素中性子捕捉療法システムにおける 品質保証プログラム構築の試み

南東北BNCT研究センター 放射線治療品質管理室 ○小森 慎也(Komori Shinya)

竹内 瑛彦 加藤 亮平 山崎 雄平

南東北BNCT研究センター 放射線治療科 廣瀬 勝己 佐藤 まり子 原田 麻由美 高井 良尋

南東北BNCT研究センター 診療放射線科 本柳 智章 原田 崇臣

福島県立医科大学 保健科学部 加藤 貴弘

【背景・目的】

ホウ素中性子捕捉療法(Boron Neutron Capture Therapy;BNCT)は、腫瘍に特異的に集積するホウ素薬剤と熱中性子との核反応 $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ を利用した腫瘍選択的重粒子線治療である。核反応により生じる α 粒子とリチウム反跳核の飛程は短く、高LETの荷電粒子であるため、再発癌、難治癌に対しても治療効果が期待されている。近年、加速器による中性子源の開発及び腫瘍に特異的に集積するホウ素薬剤の改良に伴い、病院に併設された環境でのBNCTの実施が可能となった。当院では、病院併設型加速器BNCTシステムを世界で初めて導入し、2020年6月より切除不能な局所進行又は局所再発の頭頸部癌に対するBNCTが保険収載され、一般診療化が実現している¹⁾。恒常的に高品質な治療を提供するためにも定期的な物理的品質保証(Quality assurance;QA)の実施は重要である。しかしながら、BNCTで用いられる熱外中性子線は、光子線や陽子線とは物理特性が大きく異なり、従来の測定手法や測定機器を直接活用出来ない場合が多い。そこで本研究では、加速器BNCTに適合した実用的なQAプログラムを構築することを目的とした。

【方法】

線量管理(Dosimetric QA)として、熱・熱外中性子、速中性子に対し、それぞれ金、インジウムを用いた放射線化法を、混在するガンマ線に対し熱蛍光線量計による実測を行った。幾何学的管理(Mechanical QA)に関しては、新規開発した患者搬送システムとBNCTのワークフローを基に必要な項目の洗い出しを行った。各管理項目に対し、臨床に及ぼす影響から優先順位を決定すると共に、運用効率を高めるために測定体系、照射条件と実施頻度の最適化を図った。

【結果】

線量管理項目は、日本放射線腫瘍学会が発刊するBPA-BNCTガイドブックを基盤とし、臨床運用とのバランスに配慮したQAプログラムを構築した²⁾。日毎管理は、出力不変性試験として1 cm ϕ の金箔を照射口に直接設置し、金の放射化反応率を評価する方法とした。これは、水ファントム等は用いない簡便な手技であり、始業点検として実施可能である。また、照射電荷量、高純度ゲルマニウム半導体検出器による試料測定カウントを複数条件で計測し、計測時間及び測定精度を考慮した最適条件を決定した。照射条件を0.3 C(照射時間:約5分)とし、測定カウント数を50,000 counts(計測時間:約4分)とすることで装置異常を検出可能な測定精度を担保しつつ、試料準備から結果判定まで約20分と短時間での実施が可能であった(Fig.1 A)。Fig.1 Bに上記条件における、1年間の日毎線量管理のトレンドグラフを示す。観測期間内の出力のばらつきは小さく、2SD(標準偏差の2倍)は約1.5%であった。また、基準値からの誤差は概ね2%以内であり、安定した装置出力が示された。週毎管理は、専用の水ファントムを使用しファントム表面、2.0 cm深、6.0 cm深における熱中性子束の複数点測定とした。月毎管理においても同様の水ファントムを使用し、金線を用いることで、より連続的な深部熱中性子束分布を評価している(Fig.2 A)。これに加え、年毎管理では、軸外放射化反応率の対称性も評価している(Fig.2 B)。BNCTで使用するビームには連続エネルギースペクトルを持つ中性子線及びガンマ線が混在している。そのため前述のQAの他に、インジウム箔の放射化法を用いた速中性子線の測定を年毎に実施した。また、ガンマ線の測定には熱蛍光線量計を使用し、測定箇所を変更して週毎、月毎、年毎で実施した。それぞれの照射条件、計測条件は日毎点検同様に最適化された条件を採用している。

幾何学的管理は、AAPMの報告にある光子線、粒子線装置のQAガイドラインを参考にし、BNCTの特殊性に適合させ包括的な項目の選定を実施した^{3,4)}。一例として当院と企業による共同設計、開発した患者搬送システムに関して、照射時停止位置精度及び座位、臥位治療台の幾何学的精度を評価項目に追加した。また、当院のBNCTシステムでは各治療室にレーザーポインターが計14台設置されており、患者位置照合時に重要な役割を担っている。そのため、レーザーの精度評価の許容値、実施頻度を厳格化した。許容値を超える誤差が認められた場合には、その都度再調整等を実施し、幾何学的な精度管理を実施している。

【考察】

一般診療化から1年が経過し、本QAプログラムは臨床との両立が可能となっている。線量管理に関して、加速

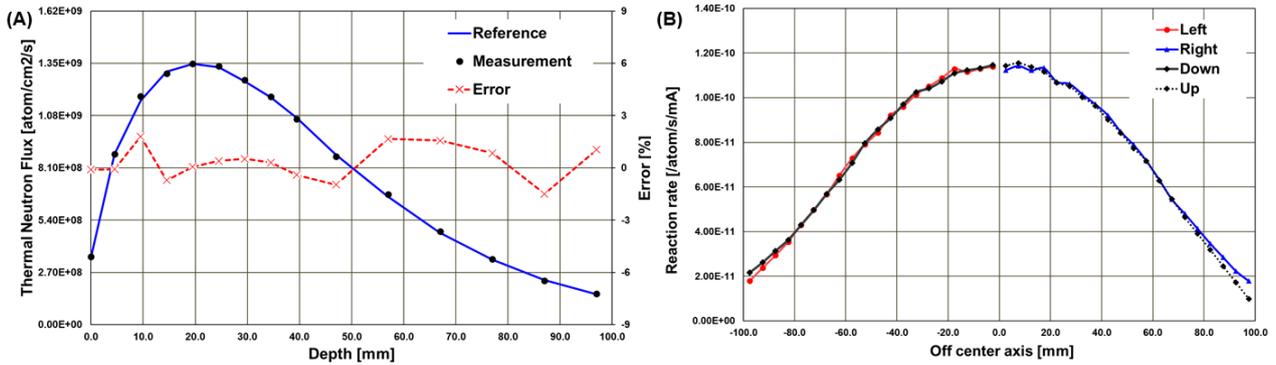


Fig.1 (A)高純度ゲルマニウム検出器による金の放射化測定におけるピークカウントと測定不確かさの関係 (B)1年間の日毎線量管理の結果 金箔の放射化反応率のトレンドグラフ

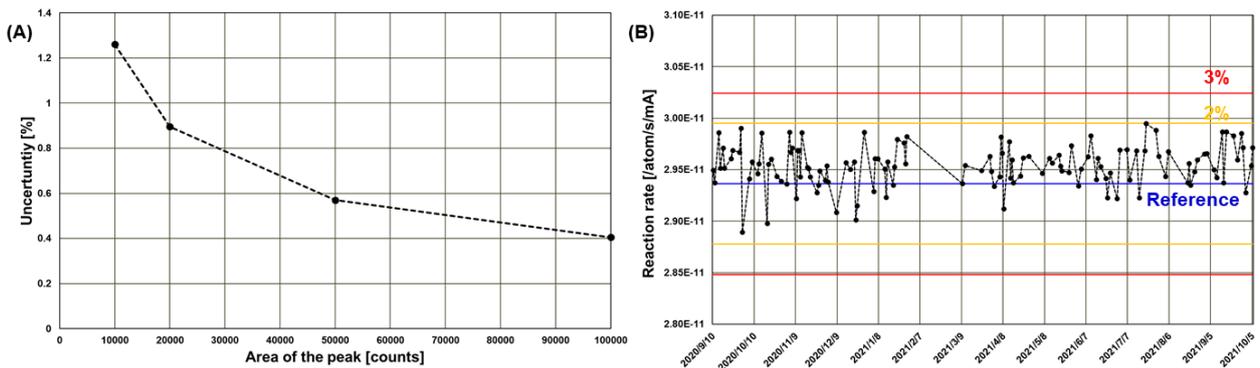


Fig.2 (A)月毎線量管理の結果 水ファントム及び金線を用いた深部熱中性子束分布 (B)年毎線量管理の結果 水ファントム及び金線を用いた軸外放射化反応率

器BNCTシステムは実績が乏しいため、現状では先行施設としてのデータ収集の意義も踏まえ、高頻度のQAを実施している。今後、BNCTの適応拡大に伴う症例数の増加を見据え、収集データの解析と更なる実施頻度の効率化を図る予定である。BNCTで使用する治療ビームには、様々な線種、線質の放射線が混在しているという特殊性がある。線種、線質毎に腫瘍線量や正常組織線量に与える影響にも大きな違いが見られることから、これらを考慮した臨床的な観点を含めた許容値の設定についても現在解析を進めている。また、試料作製、設置精度等の測定手技が大きく測定結果に影響する可能性があるため、新たな汎用性の高い測定ツールの開発も重要と考える。現在、国内外の複数の施設で新たな加速器BNCTシステムの開発、臨床導入が進んでいる。これらのシステムはそれぞれ加速原理やターゲット材質が異なり、装置特性も大きく異なる。そのため、幾何学的管理に関して標準化することは困難であり、導入したシステム毎に十分な検討を行い、各施設が新たに管理項目、許容値を設定する必要がある。

【結論】

本研究では、加速器BNCTの一般診療化に伴い、包括的且つ実用的なQAプログラムを構築した。一年間の稼働実績からシステムの安定性を確認した。今後、収集データの解析を進め、適宜改訂を行う予定である。

【参考文献】

- 1) Kato T, Hirose K, Tanaka H, et al. Design and construction of an accelerator-based boron neutron capture therapy (AB-BNCT) facility with multiple treatment rooms at the Southern Tohoku BNCT Research Center. *Appl Radiat Isot*, 156, 108961, 2020
- 2) 日本中性子捕捉療法学会/日本放射線腫瘍学会編 加速器BPA-BNCTに係るガイドブック, 2019
- 3) Klein EE, Hanley J, Bayouth J, et al. Task Group 142 report: Quality assurance of medical accelerators. *Med Phys*, 36, 4197-4212, 2009
- 4) Arjomandy B, Taylor P, Ainsley C, et al. AAPM task Group 224: Comprehensive proton therapy machine quality assurance. *Med Phys*, 46, 678-705, 2019