

博士論文の内容の要旨

令和5年7月21日

研究審査委員会委員長 原 孝光

審査委員 上原 真澄

審査委員 大野 由美子

外部審査委員 小口 宏

研究課題名 「高エネルギー光子線の水吸収線量計測における至適計測回数を決定するための新しい統計的方法の構築に関する研究」

所属・氏名 診療放射線学研究科診療放射線学専攻 博士後期課程 津野 隼人

目的:放射線治療の品質管理は基準条件における水吸収線量を計測することにより, Monitor Unit (MU) と水吸収線量の関連性を紐づけることで実施している. 水吸収線量はファーマ形電離箱と電位計を用いた計測により決定される. よって, 高エネルギー光子線を基準条件下でファーマ形電離箱に照射し, 得られた電荷量を電位計で読み取ることで水吸収線量を計測できる. 水吸収線量の計測において反復計測の精度を確保するために, 計測結果のばらつきを 2σ (σ は不偏分散) より小さくする必要があり, 電位計の有効桁が 4 桁の場合, 10 回の繰り返し計測で 0.05% の再現性があることが, 過去に報告されている. しかし, その反復計測回数が 10 回となるデータや根拠が示されていない問題があり, 放射線治療の品質管理を実施する放射線治療品質管理士は電荷量のばらつきより, 計測結果の精度を判断している. 電荷量は直線加速器 (LINAC) の出力の変動, 電離箱線量計や電位計のレスポンスによってばらつくため計測回数を増やすことによりばらつきを小さくする方法が一般的に用いられるが, 反復計測を何回行う必要があるかは明らかでない. そこで, 本研究は LINAC のビーム出力のばらつきから至適計測回数を計算するための統計的方法を考案した. 水吸収線量計測はファーマ形電離箱と電位計を用いて計測を実施する必要があり, これらの線量計は適切な頻度で校正を受けることで校正定数が与えられる. 放射線治療品質管理士は校正を受けない年の電位計の品質管理をする必要があり, ファーマ形電離箱に放射線を照射して得た電流を電流源として用いる方法が電位計ガイドラインに記載されている. この電離箱線量計に放射線を照射することにより得られる電流を電位計によって読み取る方法は, 得られた電荷量のばらつきがファーマ形電離箱と電位計のどちらに起因するものかを切り分けることができない. この問題を解決するために高精度な電流源を用いた報告はあるが, 高精度な電流源は非常に高価であることから, 多くの放射線治療施設で利用できないという問題がある. そこで, 本研究は次に安価で高精度な電流源を開発することによって, 放射線治療品質管理士が自施設で正しく簡便に電位計の校正を実施することができるので

はないかと考えた。本研究の目的は統計的方法により施設が保有する LINAC と電離箱線量計および電位計の電荷量のばらつきに適した至適計測回数を求めるための統計的方法を考案すること、および、新しく開発した電流源を用いて放射線治療施設によって電位計の校正ができる方法を構築することである。

方法：複数の LINAC のビームを用いて線量最大深部吸収線量を計測した。反復計測 10 回の電荷量の平均値を用いて計算した線量最大深部吸収線量を基準とした。比較対象は反復計測 1 回から 9 回までの電荷量の平均値である。これとは別に、開発電流源からの既知の電流値を電位計に通電し電荷量を複数回計測した。開発電流源から得た電荷量の精度を確認するために、電荷量のばらつき、電流源による電位計へのリーク、および校正機関によって校正定数を値付けされた電位計を基準にした相互校正により電位計校正定数を求めた。

結果：反復計測 10 回の結果の平均値を基準にした場合、計測回数を増やしても線量最大深部吸収線量の計算結果に変化がなかった回数から、この研究で用いたすべての LINAC とエネルギーにおいて、反復計測 5 回の電荷量の平均値は、反復計測 10 回の電荷量の平均値に代わることが示された。また、電流源を用いた電荷量の測定結果のばらつきは変動係数が 0.05%未満であり、且つ電流源による電位計へのリークは無視できる程度であった。電位計校正定数は校正を受けた際に与えられた電位計校正定数の不確かさの範囲内で計算できた。

結論：本研究は、水吸収線量計測において最適な計測回数を計算する統計的方法を考案し提示した。この新しい方法を用いることにより、計測精度に影響を与えることなく最小計測回数を知ることができる。計測結果の安定性や再現性を許容するための手順や基準は、各施設の LINAC のばらつきに沿って設定されるべきものである。この研究結果により計測回数を大きく増やさずとも、計測結果に起因する不確かさを小さくできる可能性があることを明らかにした。また、本研究で新しく安価で高精度な電流源を開発した。この開発電流源を用いることにより、放射線治療品質管理士が自施設において校正を受けた電位計を基準とした電位計の点検を、校正結果相当の精度を担保して実施可能であることを示した。以上、本研究は至適計測回数を計算するための新しい統計的方法と新しく開発した電流源を用いることにより、放射線治療施設において、電位計の校正を正確かつ効率的に行うことが可能なことを示した。

博士論文の審査の要旨

令和5年7月21日

研究審査委員会委員長 原 孝光

審査委員 上原 真澄

審査委員 大野 由美子

外部審査委員 小口 宏

研究課題名 「高エネルギー光子線の水吸収線量計測における至適計測回数を決定するための新しい統計的方法の構築に関する研究」

所属・氏名 診療放射線学研究科診療放射線学専攻 博士後期課程 津野 隼人

令和5年5月19日（金）の博士論文提出を受け、審査委員が個別に論文査読を行った。

令和5年6月30日（木）に第1回審査委員会を大学院演習室Cにおいて開催した。始めに本人によるプレゼンテーションを約40分間行い、その後、各審査委員による質疑応答を約80分間実施した。審査委員からは、論文の新規性及び研究の独創性、研究方法並びに研究結果に関する信頼性、技術的な裏付けと理論の展開に関して誤りがないかどうか等の確認と今後の展開についての質問がなされた。

主な指摘事項は次のようなものである。

1) 論文の記述内容に関して

本研究の根幹は、水吸収線量計測における至適計測回数を決定する統計的方法の開発にあるので、本論文中の他施設共同研究で求められた至適計測回数5回を普遍的に表記する事は適切でないこと、異なる施設の異なる装置、異なるエネルギーにおいて至適計測回数を提示しているが、根拠のデータの表示がされていないので加えること、統計用語の再現性・不確かさ・許容値などの定義が明確でないので加えること、電流源の開発では使用している乾電池の条件の記載がないので加えること、標準偏差と不偏標準偏差の区別がされていないこと等が指摘された。

2) 論文の記述方法に関して

誤字脱字等を修正すること、文章中の表現で理解がしにくい箇所があり、解釈によっては本来の意味に反して捉えられる場合があるので修正すること、論文内の目的と結論が繋がっていないので、文章構成を見直し適切な形に修正すること、論文中のグラフの数値が見にくいので修正すること、測定の幾何学配置図、生データがないので記載する事、実験方法の記載が不十分なので、詳細に記載する事等が求められた。

3) 考察に関して

論文中では DMU が使用されているが、測定そのもののバラツキを評価する際は測定した電荷量で評価した方が直接的でわかりやすい。どうして本論文では DMU を使用したのか説明を加えてほしい。また本研究の評価結果から、現在国内で使用されているリニアックのビーム出力の変動が 0.1%以内であると予想しているが、その考察を加えてほしい等が指摘された。本研究は 10 回の測定のバラツキの評価で長期的な測定値の傾向についての評価が無い。そこで、10 回の測定データを順次処理したものだけでなくランダム処理したものも評価してほしい。また、本研究の限界に関して偶然誤差に関する記載がないのでそこも加えてほしい等の意見が出た。

以上の指摘に関する修正を令和 5 年 7 月 12 日（水）までに行い、審査委員に再提出をすることとされた。

第 2 回審査委員会（最終試験）を令和 5 年 7 月 21 日（金）、公聴会終了後に大学院演習室 C において開催した。修正提出された論文に関し、以下の点について①新規性（独自性）、有用性を含めた本研究論文の意義、②本研究論文の信頼性（正当性）を確認するために、なぜその方法を採用したのか、他の方法とは何が違うか等を個別質問で確認された。、10 回の反復測定における測定精度を基準値に採用した理由、本研究の発展性、今後の研究方針等に関する質疑応答があった。信頼性において指摘箇所を必ず修正する事を確認し、審査を終了した。