

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26460729

研究課題名(和文) リニアックX線による新たな電離箱線量計校正法と水吸収線量計測に関する研究

研究課題名(英文) Study on dosimetry of absorbed dose to water using ionization chamber calibrated under dose standard by linac X-ray

研究代表者

齋藤 秀敏 (Saitoh, Hidetoshi)

首都大学東京・人間健康科学研究科・教授

研究者番号：50196002

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：産業技術研究所において、平成26年度にリニアックX線による水吸収線量標準が確立された。このことから、水吸収線量標準の確立による放射線治療領域の線量評価の不確かさの低減を目的として、「リニアックX線による水吸収線量標準と実現可能な線量トレーサビリティ体制」「電離箱の形式ごとに計算で与えられた現在の線質変換係数の不確かさ評価」「リニアックX線による水吸収線量校正定数を利用した水吸収線量計測法」の各項目に関する問題解決を本研究課題の目的とした研究を実施した。現実的な体制として、リニアックX線による電離箱の形式ごとの線質変換係数を使用した水吸収線量計測法を提案し、線質変換係数の再評価した。

研究成果の概要(英文)：At the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, primary standard of absorbed dose to water by linac X-ray was established in FY2014. In order to reduce the uncertainty of reference dosimetry in the external radiation treatment field, "establishment of feasible radiation metrology system where the traceability is achieved between primary dose standard and user reference dosimetry", "Evaluation of the uncertainty of the present beam quality conversion factor given by calculation" and "a new standard reference dosimetry protocol for absorbed dose to water using a ionization chamber calibrated under linac X-ray" was carried out.

As a reliable system, a new standard dosimetry protocol using ionization chamber calibrated under Co-60 γ -rays and beam conversion factor measured by linac X-ray was proposed. Beam quality conversion factor was also re-evaluated for new standard protocol.

研究分野：医学物理学

キーワード：水吸収線量計測 電離箱線量計校正 標準計測法 線質変換係数 外部放射線治療 光子線

1. 研究開始当初の背景

放射線治療では、投与線量の変化に対して腫瘍の局所制御率および正常組織の障害発生率が急峻に変化することが知られている。したがって、吸収線量は重要な管理項目の一つであり、5%の合成不確かさが目標値とされている¹⁾。この目標値を実現するため、AAPM Report 85 では吸収線量評価において1%以内の不確かさが求められている²⁾。

すべての放射線治療施設における吸収線量評価の確かさが保証されるためには、次に掲げる項目が提供されている必要がある。

- a) 吸収線量の国家標準
- b) 吸収線量標準による電離箱線量計校正
- c) 吸収線量計測のための標準計測法

人体軟部組織のおよそ8割を水が占めることから、放射線治療分野では水に対する吸収線量(水吸収線量)を線量評価に使用している。日本では、1972年から2011年7月までは⁶⁰Co γ線による照射線量、2011年7月からは⁶⁰Co γによる水吸収線量を国家標準として電離箱校正体制が整備され、標準計測法が日本医学物理学会から提案されてきた。2011年7月以降、⁶⁰Co γ線による吸収線量標準が整備され、校正では個々の電離箱線量計に対して水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ が直接計測によって与えられるようになり、水吸収線量 D_w を次式で求める標準計測法が提案された⁴⁾。

$$D_w = M N_{D,w} k_Q \quad (1)$$

このとき、従来の電離箱の形式ごとに計算で与えられた $N_{D,w}$ と直接計測によって個々の電離箱に与えられた $N_{D,w}$ では、図1に示すように、1%を超える差が生じた。現状の水吸収線量評価式(1)においても形式ごとに公称の材質、形状で計算された線質変換係数 k_Q を採用していることから、その不確かさを明らかにし、さらに個々の線質変換係数を直接

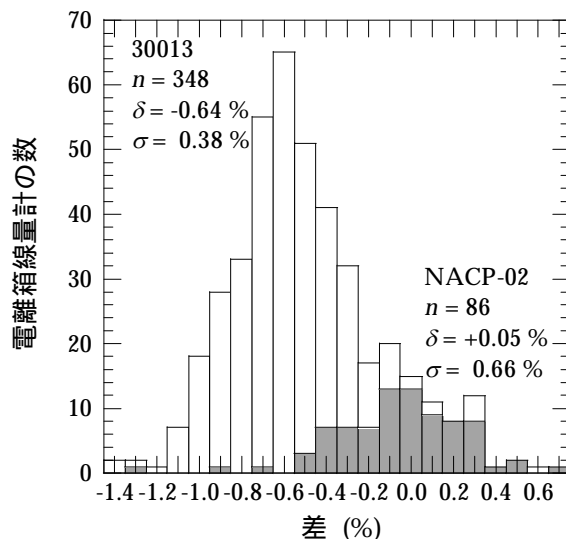


図1 計算と計測による $N_{D,w}$ の差の度数分布

計測で与える電離箱校正体制と水吸収線量計測法の必要性が明らかになった。

2. 研究の目的

産業技術総合研究所(産総研)において2013年にリニアック X線による水吸収線量標準が確立され、電離箱線量計の校正をリニアック X線による水吸収線量標準場で行うことが可能になった。このことから、水吸収線量評価の不確かさの低減を目的として、以下の項目を本研究の目的とした。

- (1) リニアック X線による水吸収線量標準と実現可能な線量トレーサビリティ体制
- (2) 電離箱の形式ごとに計算で与えられた現在の線質変換係数 k_Q の不確かさ評価
- (3) リニアック X線による水吸収線量校正定数を利用した水吸収線量計測法

3. 研究の方法

(1) リニアック X線による水吸収線量標準と実現可能な線量トレーサビリティ体制については、ユーザ施設が所有する電離箱線量計を実際に校正する二次線量標準機関を含めた体制を検討した。

(2) 前述の水吸収線量計測体系における不確かさを減少させるため、電離箱の形式ごとに計算で与えられた現在の線質変換係数 k_Q の不確かさの評価を行った。計算によって与えられた線質変換係数の不確かさは公称の電離箱壁材質および形状が個々の電離箱で異なることが原因と考えられる。このことから、⁶⁰Co γおよびリニアック X線による水吸収線量標準で校正された形式が異なる複数の電離箱線量計の水吸収線量校正定数 N_{D,w,Q_0} および $N_{D,w,Q}$ から、次式によって電離箱の形式ごとの線質変換係数 k_{Q,Q_0} を算出し、比較した。

$$k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} \quad (2)$$

(3) リニアック X線による水吸収線量校正定数を利用した電離箱線量計による多様な照射条件に対応し、新たな水吸収線量計測法を提案することを目的として、線質変換係数算出のパラメータの算出を行った。また、計測と計算により評価された線質変換係数 k_{Q,Q_0} の不一致の解析を行った。具体的には、種々の照射条件における空気に対する水の平均制限質量衝突阻止能比 $(L/\rho)_{w,air}$ 、電離箱壁および防浸鞘と水との不等価性に対する補正係数(壁補正係数 P_{wall})、電離空洞と水との相違による電子フルエンスの変化に対する補正係数(空洞補正係数 P_{cav})、電離空洞の幾何学的中心と測定の実効中心との変位に対する補正係数(変位補正係数 P_{dis})、円筒形電離箱における中心電極と空気との不等価性に対する補正係数(中心電極補正係数 P_{cel})、電離箱の支持部分に対する補正係数(ス

テム補正係数 P_{stem})などをモンテカルロシミュレーションによって評価した。

シミュレーションでは電離箱線量計の構造を詳細にモデル化し、図3に示したように中心電極、ステム、電離箱壁などの構造を水に置き換えた場合の電離空洞のそれぞれの吸収線量 D_1 、 D_2 、 D_3 および D_4 を求め、その比からそれぞれの補正係数を算出した。

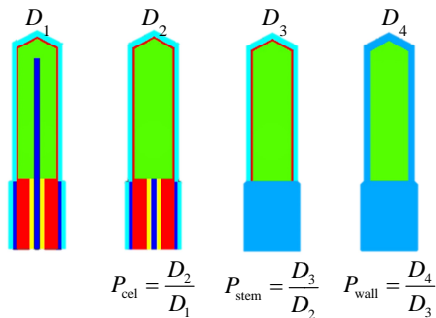


図2 電離箱の各構造による擾乱補正係数算出の説明

4. 研究成果

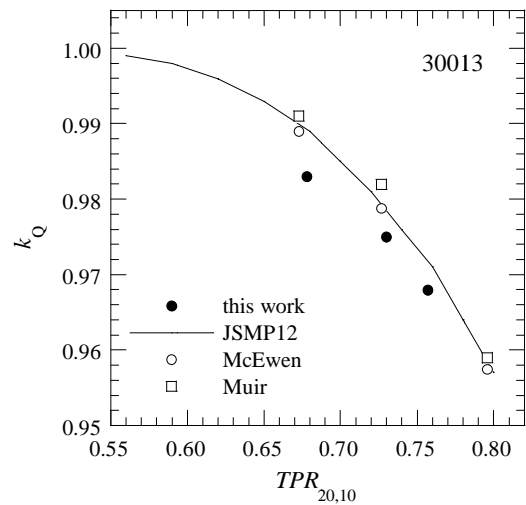
(1) については、一次線量標準機関である産総研では医療用リニアックを導入し X 線の水吸収線量標準を構築しているが、電離箱線量計の校正事業を行う二次線量標準機関ではリニアックの導入が財政的に実現困難である。このことから現実的な解決法として、 ^{60}Co γ 線による電離箱線量計校正とリニアック X 線による電離箱の形式ごとの線質変換係数を使用した水吸収線量計測法を提案する。

(2) 線質変換係数 k_{Q,Q_0} について、図3に本研究での結果、計算によって与えられている現在の標準計測法で与えられている数値 (JSMP12)⁴⁾、および他の研究者による数値 (McEwen、Muir) を比較した結果の一例を示した。

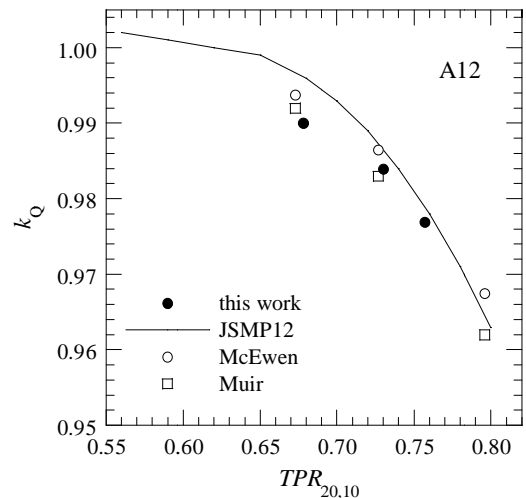
図2(a)の30013では線質指標 $TPR_{20,10}=0.67$ (公称エネルギー 6 MV) で 0.54%、 $TPR_{20,10}=0.73$ (公称エネルギー 10 MV) で 0.38%と低いエネルギーほど JSMP12 との差がみられた。他の研究者が報告した数値と JSMP12 の数値はほぼ一致していた。一方、(b)の A12 では線質指標 $TPR_{20,10}=0.67$ で 0.50%、 $TPR_{20,10}=0.73$ で 0.16%と低いエネルギーほど JSMP12 との差がみられたが、本研究で得られた数値は他の研究者の報告ほぼ一致していた。

線質変換係数 k_{Q,Q_0} については、さらに多くの電離箱を使用した計測を行い、不確かさを評価する必要がある。また、モンテカルロシミュレーション法等の他の評価と比較し、不確かさの要因を明らかにする必要がある。

以上の研究成果は、主に学会発表で報告し、論文投稿のため、さらにデータの蓄積と差の解析を行っている。



(a) 30013

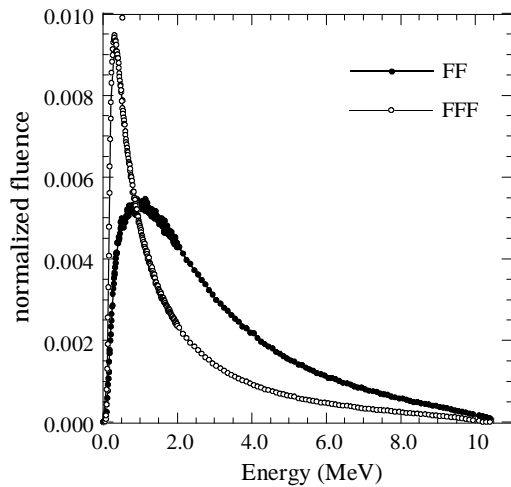


(b) A12

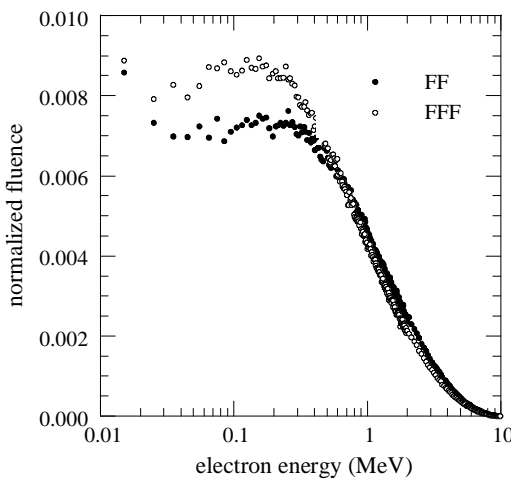
図3 計算と計測による線質変換係数の比較

(3) 図4に新たな治療ビームとしてフラットニングフィルタを使用しないFFFビームと従来のフラットニングフィルタを使用する FF ビームの光子および水中での電子のエネルギースペクトルの比較を示した。FFF ビームは FF ビームに対して低エネルギー光子のフルエンスが増加すること、これに伴って、水中での電子のエネルギースペクトルも 0.1 MeV 以下で顕著な差となることが示された。この結果から、FFF ビームでは低エネルギー成分が多いため、平均の空気に対する水の平均制限質量衝突阻止能比 $(L/\rho)_{w,air}$ 、6 MV では $TPR_{20,10}$ が 5.5% の低下、平均の $(L/\rho)_{w,air}$ が 0.3% 増加、10 MV では $TPR_{20,10}$ が 5.4% 低下、平均の $(L/\rho)_{w,air}$ が 0.4% 増加することを明らかにした。JSMP12 の k_Q を使用して FFF ビームの水吸収線量を評価すると 6FFF では 0.3%、10FFF では 0.4% 水吸収線量を過大評価する可能性があることが示唆された。以上の研究成果は、学会発表で報告し、集約した成果は雑誌論文に掲載された。

また、計測と計算による線質変換係数 k_{Q,Q_0} 不一致の解析について、図 5 に線質指標 $TPR_{20,10}$ による電離箱の支持部分に対する補正係数（ステム補正係数 P_{stem} ）の変化を、構造ごとに示した。 P_{stem} は従来考慮されていなかったが、アルミニウムなど密度の大きい材質でステムを構成する場合、線質変換係数 k_{Q,Q_0} の算出において考慮する必要があることを本研究により明らかにした。以上の研究成果は、学会発表で報告し、さらに、多様な形式の電離箱線量計について検討し、雑誌論文への投稿の準備を行っている。その他、過去の ^{60}Co γ 線により校正された電離箱線量計による水吸収線量評価について多施設での経時的変化の解析、およびリニアック X 線による校正に移行した場合の不確かさの見積もりを、学会発表 および、雑誌論文で報告した。また、将来の標準計測法提案を目的に、その他不確かさの要因解析に関して学会発表、および、雑誌論文などで報告した。



(a) 光子エネルギースペクトル



(b) 水中での電子エネルギースペクトル（水中 10 cm の例）

図 4 FF および FFF ビームでの光子および電子のエネルギースペクトルの比較（10 MV の例）

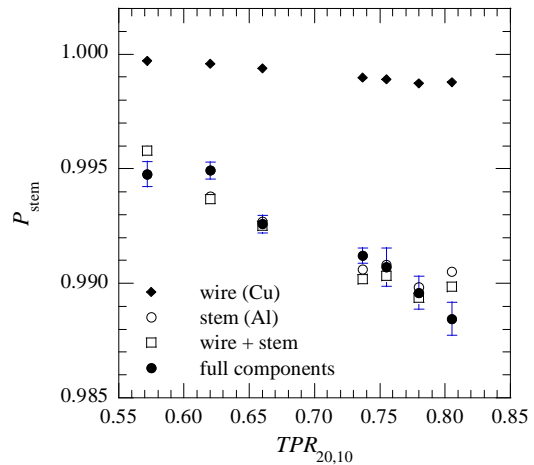


図 5 線質指標 $TPR_{20,10}$ によるステム補正係数 P_{stem} の変化

< 引用文献 >

- 1) ICRU: Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy Procedures (ICRU Report 24). 1976, ICRU
- 2) AAPM Task Group 65: Tissue inhomogeneity corrections for megavoltage photon beams (AAPM Report 85). 2004, AAPM
- 3) 日本医学物理学会編: 外部放射線治療における吸収線量の標準測定法. 2002, 通商産業研究社, 東京
- 4) 日本医学物理学会編: 外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法. 2012, 通商産業研究社, 東京

5 . 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Tetsurou Katayose, Hidetoshi Saitoh, Mitsunobu Igari, Weishan Chang, Shimpei Hashimoto, Mie Morioka, Changes in deviation of absorbed dose to water among users by chamber calibration shift, 査読有, Japanese Journal of Radiology, vol. 35, 2017, pp. 389-397
DOI: 10.1007/s11604-017-0644-9

河内 徹, 片寄 哲朗, 兒玉 匠, 宮阪 遼平, 清水 森人, 齋藤 秀敏, 日本とカナダの標準線量計測の比較, 医学物理, 査読有, 37 巻, 2017, pp. 25-33
DOI: 10.11323/jjimp.37.1_25

片寄 哲朗, 河内 徹, 宮阪 遼平, 兒玉 匠, 高瀬 信宏, 入山 絵梨, 張 維珊, 齋藤 秀敏, Flattening Filter Free ビームにお

ける水吸収線量計測に関する提案, 医学物理, 査読有, 36 巻, 2016, pp. 79-84
DOI: 10.11323/jjimp.36.2_79

[学会発表](計 8 件)

Eri Iriyama(筆頭口演者), Tetsuro Katayose, Hidetoshi Saitoh: Stem perturbation correction factor for beam quality conversion factor of cylindrical ionization chambers in megavoltage photon beam, 8th Japan-Korea joint meeting on Medical Physic, 2017

岩崎 翼(筆頭口演者), 清水 森人, 森下 雄一郎, 河内 徹, 齋藤 秀敏: 水吸収線量一次標準による Farmer 形電離箱の線質変換係数の決定, 日本医学物理学会第 112 回学術大会, 2016

入山 絵梨(筆頭口演者), 片寄哲朗, 齋藤 秀敏: フラットニングフィルタフリービームでの水吸収線量計測における阻止能比についての基礎的検討, 日本医学物理学会第 112 回学術大会, 2016

山下 直樹(筆頭口演者), 齋藤 秀敏: イオン再結合補正のためのフォトンカウンタによるビームパルス計測, 日本医学物理学会第 112 回学術大会, 2016

Tetsuro Katayose (筆頭口演者), Hidetoshi Saitoh: Evaluation of the scanning and micro ionization chambers for standard dosimetry in photon beam, International Conference on Medical Physics, 2016

猪狩 光伸(筆頭口演者), 齋藤 秀敏, 森岡 美英, 奥村 昭雄: Changes in absorbed dose to water evaluation caused by shift from JSMP01 to JSMP12, 日本医学物理学会第 109 回学術大会, 2015

山内 遼平(筆頭口演者), 猪狩 光伸, 笠井 裕也, 河内 徹, 齋藤 秀敏: Study on stem and cable leakage of ionization chamber, 日本医学物理学会第 109 回学術大会, 2015

Hidetoshi Saitoh (筆頭口演者), Mitsunobu Igari: Changes in absorbed dose to water caused by dose standard shift for ionization chamber calibration in Japan, World Congress on Medical Physics, 2015

[その他](計 2 件)

翻訳: 河内 徹, 片寄 哲朗, 兒玉 匠, 宮阪 遼平, 高エネルギー光子線の臨床における標準線量計測のための AAPM's TG-51 プロトコルの補遺 (TG-51 addendum), 医学物理, 査読無, 37 巻, 2017, pp. 2-24
DOI: 10.11323/jjimp.37.1_2

教育講演資料: 河内 徹, 片寄 哲朗, 宮阪 遼平, 他 9 名, 水吸収線量計測における不確かさ, 日本放射線技術学会雑誌, 査読無, 72 巻, 2016, pp. 701-707
DOI: 10.6009/jjrt.2016_JSRT_72.8.701

6 . 研究組織

(1)研究代表者

齋藤 秀敏 (SAITOH, Hidetoshi)
首都大学東京・人間健康科学研究科・教授
研究者番号: 50196002

(2)研究分担者

清水 森人 (SHIMIZU, Morihito)
国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員
研究者番号: 20613988

河内 徹 (KAWACHI, Toru)
千葉県がんセンター(研究所)・放射線治療部・医学物理士
研究者番号: 10594393