

高エネルギー光子線の  
水吸収線量の評価に関する研究

名古屋大学大学院医学系研究科  
医療技術学専攻

木 下 尚 紀

平成 30 年度学位申請論文

高エネルギー光子線の  
水吸収線量の評価に関する研究

名古屋大学大学院医学系研究科  
医療技術学専攻

(指導：小口 宏 准教授)

木 下 尚 紀

## 高エネルギー光子線の水吸収線量の評価に関する研究

### 要旨

#### 【背景】

放射線治療では、腫瘍の局所制御や正常組織の障害発生率に影響を及ぼす投与線量の不確かさを低減することは必要不可欠である。そのため、診療放射線技師や医学物理士は、放射線治療装置から出力される放射線の線量の正確性を担保するため、水ファントム中の校正深における水吸収線量を標準計測法に従い定期的に計測している。

1990 年から 2000 年代初頭に様々な標準計測法[Institute of Physical Sciences in Medicine (IPSM) 1990, American Association of Physicists in Medicine (AAPM) Task Group 51 (TG-51), International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Report Series No. 398 (TRS-398), そして Japan Society of Medical Physics (JSMP) Standard Dosimetry 01]が発刊された。上記の標準計測法が発刊された以降今日の 20 年にわたり、モンテカルロシミュレーションにより求めたより正確な電離箱の擾乱補正係数や線質変換係数に関する新たな知見が報告されてきた。このような背景から、近年、JSMP および AAPM は、それぞれ JSMP Standard Dosimetry 12 (JSMP-12) や AAPM TG-51 の補遺 (Addendum to AAPM TG-51) を発刊した。

標準計測法の違いによる水吸収線量の差異は患者に投与する線量に影響するため、2000 年前後に発刊された標準計測法に従い求められた水吸収線量の比較は、様々な研究者が報告してきた。しかしながら、近年発刊された Addendum to AAPM TG-51 や JSMP-12 を含めた標準計測法に関する水吸収線量の比較は検討されていない。

各施設で測定者の手技や使用機器が異なるため、水吸収線量計測の不確かさは変わることが予想される。これまでに水吸収線量の不確かさを評価した報告はあるが、臨床現場で使用している実際の機器の特徴まで考慮した不確かさの報告はない。例えば、水吸収線量計測で使用する機器の 1 つに水ファントムがある。水ファントムはその種類で特徴が異なるため、電離箱を設置する不確かさは変化することが考えられる。

#### 【目的】

本研究の目的は、以下の2つである。

1. TRS-398, JSMP-12, およびTG-51とAddendum to AAPM TG-51（以降、TG-51とAddendum to AAPM TG-51を総称してTG-51とする）に従い導出された水吸収線量の差異を明らかにする。
2. 電離箱を水ファントムの高エネルギー光子線の校正深（水深さ  $10 \text{ g cm}^{-2}$ ）に設置する標準不確かさ（mm）およびその不確かさが及ぼす6 MVおよび10 MVの光子線におけ

る電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさ (%) を 7 種類の商用水ファントムで明らかにする。

## 【方法】

本研究で使用した放射線は、SIEMENS社製の医療用直線加速器 (ARTISTE) から出力された 6 MV および 10 MV X 線である。ここで使用した X 線は、平坦化フィルターを通過した放射線である。

3 つの標準計測法に従い導出された校正深水吸収線量の相違に関する研究方法を以下に記述する。使用した電離箱は、多くの施設で使用している Exradin A12, IBA FC65-P, および PTW 30013 である。これらの電離箱線量計の校正は、医用原子力研究技術振興財団で事前に行われた。電離箱線量計の表示値の補正係数や線質変換係数は、3 つの標準計測法に従い導出した。校正深水吸収線量測定における幾何学的測定配置は、測定深  $10 \text{ g cm}^{-2}$ 、線源電離箱間距離 100 cm、照射野サイズ  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  とした。

7 つの水ファントムに電離箱を設置する標準不確かさとその不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさに関する研究方法を以下に記述する。本研究では、垂直ビーム用 1 軸 (one-dimensional; 1D, 以降 1D とする) 駆動ファントム (Standard Imaging 社製 DoseView 1D、Sun Nuclear 社製 1D SCANNER、クオリタ社製 QWP-07、そして IBA 社製 WP1D)、垂直ビーム用防浸鞘固定方式ファントム (日本原子工業株式会社製 GRI-7632)、そして水平ビーム用 1D 駆動ファントム (PTW 社製 PTW41023、そしてクオリタ社製 QWP-04) を使用した。電離箱を設置する標準不確かさおよびその不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさは、不確かさの評価ガイド (Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100: 2008) に従い推定した。

## 【結果】

TRS-398 および JSMP-12 に従い導出した表示値は、同一値となり、TG-51 に従い導出した値に比べ 6 MV X 線で 0.2% そして 10 MV X 線で 0.3% 低い値を示した。3 つの標準計測法における線質変換係数は、0.6% 以内の差であった。その結果、3 つの標準計測法に従って導出された水吸収線量は、0.6% 以内で一致した。

7 つのファントムに電離箱を設置する不確かさ (包含係数  $k = 1$ ) は、0.22-0.35 mm であった。それらの電離箱設置の不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさ ( $k = 1$ ) は、6 MV X 線で 0.14-0.25%、10 MV X 線で 0.12-0.21% であった。

## 【考察・結論】

3 つの標準計測法に従い導出された水吸収線量の相違の要因は、各標準計測法における動径分布補正の有無と線質変換係数の値の違いであった。しかし、3 つの標準計測法に従い導出した水吸収線量は、各標準計測法が示す水吸収線量の相対標準不確かさ ( $k = 1$ ) の範囲

内で一致した。

7 つの水ファントムに電離箱を設置する標準不確かさおよびその不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさは、大きな違いは見られなかった。

## Study on evaluation of absorbed dose to water for high-energy photon beams

### 高エネルギー光子線の水吸収線量の評価に関する研究

#### Abstract

##### 【Introduction】

Reducing uncertainty in the radiation dose delivered to a patient is necessary because the dosage may affect the probability of controlling a tumor as well as complications in normal tissues. The absorbed dose of radiation to water at a reference depth is determined to verify consistencies in the radiation-beam and output of the linear accelerator.

Various clinical reference dosimetry protocols, such as the Institute of Physical Sciences in Medicine (IPSM) 1990, American Association of Physicists in Medicine (AAPM) Task Group 51 (TG-51), International Atomic Energy Agency (IAEA) Technical Report Series No. 398 (TRS-398), and Japan Society of Medical Physics (JSMP) Standard Dosimetry 01 (JSMP-01) were published in the 1990s and early 2000s. Since the publication of these protocols, Monte Carlo simulations have been used to determine accurate values for the beam quality conversion factor and perturbation correction factor. Therefore, the AAPM published an Addendum to the AAPM TG-51 in 2014, and the JSMP published a new dosimetry protocol named JSMP Standard Dosimetry 12 (JSMP-12) in 2012.

Comparisons of the IPSM 1990, TG-51, and TRS-398 were performed because differences in the determination of absorbed doses to water, according to these protocols, influence the treatment doses delivered to patients. However, the absorbed doses to water determined using the TG-51 and addendum to the AAPM TG-51, and JSMP-12 were not compared.

In clinical situations, the methods and equipment used by each medical staff would be different; thus, uncertainties exist in the determination of the absorbed dose to water, which may vary between different facilities. While a previous report has described some of these uncertainties, to the best of our knowledge, the uncertainties associated with various types of equipment used in real-world clinical situations have not been discussed in detail.

##### 【Purpose】

The main purposes of this are as follows:

- (1) Comparison of the absorbed dose to water according to the TRS-398, JSMP-12, and TG-51 and addendum to the AAPM TG-51 (the author describe the combined term “the TG-51 and addendum to the AAPM TG-51” as “TG-51”).
- (2) Evaluation of uncertainties due to positioning of an ionization chamber at the reference depth (10

$\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ ) of high-energy photon beams for seven commercial phantoms, and the resulting uncertainties in the chamber readings for 6 MV and 10 MV photon beams.

### 【Methods】

Measurements were obtained using flattened photon beams with nominal energies of 6 MV and 10 MV from a Siemens Artiste linear accelerator.

The method used for comparison of the absorbed doses to water according to the three protocols was as follows. Three commonly used ion chambers, namely Exradin A12, IBA FC65-P, and PTW 30013 were employed for the measurements. The calibration coefficients for the absorbed dose of radiation to water for these three chambers were provided by a Japanese secondary standard dosimetry laboratory (Association for Nuclear Technology in Medicine, Japan). The correction factor for the charge readings and beam quality conversion factors were determined according to the three protocols. In this work, measurements of the absorbed dose to water for the three protocols were performed with a source-to-chamber distance of 100 cm, chamber depth of  $10\text{ g cm}^{-2}$ , and field size of  $10 \times 10\text{ cm}^2$  at the ion chamber.

The method used to determine uncertainty due to positioning of the ion chamber at the reference depth of the high-energy photon beams and the resulting uncertainties in the chamber readings for 6 MV and 10 MV photon beams are described here. The following water phantoms were used in this work: DoseView 1D, 1D SCANNER, QWP-07, and WP1D as one-dimensional (1D) phantoms for the vertical-beam geometry; GRI-7632 as a phantom for fixed waterproofing sleeve; PTW 41023 and QWP-04 as 1D phantoms for the horizontal-beam geometry. The uncertainties were analyzed according to the guidelines in Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100: 2008.

### 【Results】

Fully corrected charge readings obtained for the three chambers according to the TG-51 showed variations of 0.2% and 0.3% at 6 MV and 10 MV, respectively, from the readings corresponding to the TRS-398 and JSMP-12. The beam quality conversion factors obtained according to the three protocols agreed with a variation of approximately 0.6%. Consequently, the absorbed dose to water obtained for the three protocols agreed within approximately 0.6%.

The positioning uncertainties ranged from 0.22 to 0.35 mm and resulting uncertainties in chamber readings ranged from 0.14%–0.25% at 6 MV and 0.12%–0.21% at 10 MV among the seven phantoms (for a coverage factor of  $k = 1$  in both cases).

### 【Discussion/Conclusion】

Major discrepancies in the three protocols were with respect to the correction factors to account for

averaging of the detector signal over the sensitive volume of the ionization chamber ( $P_{rp}$ ) and beam quality conversion factor ( $k_Q$ ). However, the absorbed dose to water obtained according to the three protocols agrees within the relative uncertainty for the absorbed dose to water given by TRS-398, JSMP-12, addendum to the AAPM TG-51.

The positioning and resulting uncertainties in chamber readings exhibited minor differences among the seven phantoms.



## 目次

1	序論	1
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	水吸収線量の標準計測法	1
1.1.2	水吸収線量の不確かさ	1
1.2	本論文の概要	2
2	標準計測法の違いによる水吸収線量の相違	3
2.1	目的	3
2.2	方法	3
2.2.1	TRS-398, JSMP-12, TG-51 における光子線の標準計測法	3
2.2.2	使用機器	4
2.2.3	線質の決定	6
2.2.4	校正深水吸収線量の測定	6
2.2.5	不確かさの評価	7
2.3	結果	8
2.3.1	電離箱線量計の表示値	8
2.3.2	線質変換係数	10
2.3.3	校正深水吸収線量	10
2.3.4	不確かさ評価	11
2.4	考察	11
2.5	本章のまとめ	12
3	水ファントムの違いによる電離箱設置の不確かさの評価	13
3.1	目的	13
3.2	方法	13
3.2.1	検討した水ファントム	13
3.2.2	不確かさの評価	15
3.2.3	測定者による手技の不確かさ	15
3.2.4	ファントム固有の不確かさ	17
3.3	結果	18
3.3.1	測定者による手技の不確かさ	18
3.3.2	ファントム固有の不確かさ	19

3.3.3	電離箱設置の合成標準不確かさ	19
3.3.4	電離箱設置の不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の不確かさ	20
3.4	考察	21
3.5	本章のまとめ	22
4	結論	23
	謝辞	24
	参考文献	25
	付録 略語・記号一覧	27

## 1. 序論

### 1.1. 本研究の背景

#### 1.1.1. 水吸収線量の標準計測法

世界中でがんの罹患率およびがんによる死亡率が上昇を続けている[1]近年、集学的がん治療の一翼となる放射線治療が大きく注目されている。従来から放射線治療では、患者に投与する線量のわずかな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大きく変化することが知られている[2]。そのため、投与線量の不確かさを低減することは必要不可欠である。そこで、外部放射線治療装置から出力される放射線の線量の正確性を担保するため、水ファントム中の校正深における水吸収線量を定期的に計測することが臨床で行われている。

校正深水吸収線量の計測は、水吸収線量の標準計測法に従い行われる。1990年から2000年代初頭に Institute of Physical Sciences in Medicine (IPSM), American Association of Physicists in Medicine (AAPM), International Atomic Energy Agency (IAEA), Japan Society of Medical Physics (JSMP)は、それぞれ標準計測法である IPSM 1990 [3], AAPM Task Group 51 (TG-51) [4], IAEA Technical Report Series No. 398 (TRS-398) [5], JSMP Standard Dosimetry 01 (JSMP-01) [6]を発刊した。これらの標準計測法では、電離箱線量計を用いた測定で得られた電離量から水吸収線量を求めるため、 $^{60}\text{Co}\gamma$  線の水吸収線量に変換する水吸収線量校正定数、および  $^{60}\text{Co}\gamma$  線とユーザービームを測定した際の電離箱線量計の応答の違いを補正する線質変換係数が用いられている。

上記の標準計測法が発刊された以降、今日までにモンテカルロシミュレーションにより求めた電離箱の擾乱補正係数[7-9]および線質変換係数[7, 10, 11]に関する新たな知見が報告された。このような背景から、JSMP および AAPM は、それぞれ JSMP Standard Dosimetry 12 (JSMP-12)[12]や AAPM TG-51 の補遺 (Addendum to AAPM TG-51) [13]を発刊した。Addendum to AAPM TG-51 や JSMP-12 では、線質変換係数の見直しにより、従来の標準計測法に比べてより正確な水吸収線量の計測が可能となった。

標準計測法の違いによる水吸収線量の差異を評価することは、患者への投与線量評価に影響するため重要である。これまでに TRS-398 や TG-51 で求めた水吸収線量の比較は報告 [14, 15]されているが、近年発刊された Addendum to AAPM TG-51 や JSMP-12 を含めた標準計測法の違いによる水吸収線量の比較は検討されていない。

#### 1.1.2. 水吸収線量の不確かさ

高エネルギー放射線の水吸収線量計測で使用する電離箱線量計は、従来から  $^{60}\text{Co}\gamma$  線場で校正されている。しかし近年、National Physical Laboratory (United Kingdom), Laboratoire

National Henri Becquerel (France), Federal Institute of Metrology (Switzerland), National Research Council (Canada) そして Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (Australia)のようないくつかの一次線量標準機関は、直線加速器から出力された高エネルギー光子線場で電離箱線量計を校正し、得られた水吸収線量校正定数を提供している[16]。

上記の水吸収線量校正定数を用いて水吸収線量を求める場合、不確かさの大きい線質変換係数が不要になるため、水吸収線量の不確かさの低減が見込まれる。その一方で、水吸収線量の不確かさに占める測定者の手技や使用機器に関する不確かさの割合は、従来に比べ大きくなることが示唆される。Addendum to AAPM TG-51 は、測定者の手技や使用機器に関する不確かさは施設によって大きく異なることを、述べている[13]。

臨床現場では、水吸収線量の定期的な計測で様々な機器を使用している。重要な計測機器の1つに水ファントムがあり、様々な水ファントムが現在販売されている。それらの水ファントムの種類によりその特徴や測定者の操作が異なるため、電離箱を校正深に設置する不確かさが一様ではないことが予想される。これまでに放射線治療における水吸収線量の不確かさについての報告[17]はあるが、実際の臨床現場における様々な機材の違いによる計測の不確かさを評価した報告はない。

## 1.2. 本論文の概要

本論文は全4章から構成されている。第1章では、本研究の背景を述べた。第2章では、TRS-398, JSMP-12 そして TG-51 と Addendum to AAPM TG-51（以降、TG-51 と Addendum to AAPM TG-51 を総称して TG-51 とする）に従い求められた高エネルギー光子線の校正深水吸収線量の違いについて述べる。第3章では、水ファントムの違いによる高エネルギー光子線の校正深に電離箱を設置する標準不確かさ（mm）およびその不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさ（%）について述べる。第4章では、第2章および第3章の研究結果を総括する。

## 2. 標準計測法の違いによる水吸収線量の相違

### 2.1. 目的

第 2 章の目的は、医療用直線加速器から出力された高エネルギー光子線の水吸収線量を TRS-398, JSMP-12, TG-51 に従い評価することである。ここで、使用した高エネルギー光子線は、加速器ヘッド内の平坦化フィルターを通過した X 線である。

### 2.2. 方法

#### 2.2.1. TRS-398, JSMP-12, TG-51 における光子線の標準計測法

TRS-398, JSMP-12, TG-51 における水吸収線量の計測方法は、各標準計測法で詳細に記述されている。任意の線質  $Q$  を測定した時の TRS-398, JSMP-12 そして TG-51 における電離量の収集に関する各種補正後の電離箱線量計の表示値 ( $M$ ) および水吸収線量 ( $D_{D,w}^Q$ ) は、以下の(1)および(2)式で表される。また各標準計測法における水吸収線量計測の基準条件を Table 1 に示す。

$$M = M_{\text{raw}} P_{\text{TP}} P_{\text{ion}} P_{\text{pol}} P_{\text{elec}} P_{\text{leak}} P_{\text{rp}} \cdots (1)$$

$$D_{D,w}^Q = M k_Q N_{D,w}^{60\text{Co}} \cdots (2)$$

(1)および(2)式におけるシンボルは、TG-51 の表記方法を用いた。ここで、 $M_{\text{raw}}$  は各種補正前の電離箱線量計の表示値、 $P_{\text{TP}}$  は温度気圧補正係数、 $P_{\text{ion}}$  はイオン再結合補正係数、 $P_{\text{pol}}$  は極性効果補正係数、 $P_{\text{elec}}$  は電位計校正定数、 $P_{\text{leak}}$  は漏れ電流に対する補正係数、 $P_{\text{rp}}$  は電離箱の空洞全体に対する電離箱の軸外方向の強度変調プロファイルの変化による補正係数である。 $P_{\text{leak}}$  および  $P_{\text{rp}}$  は、TRS-398 および JSMP-12 には無い補正係数である。線質変換係数は、電離箱の型式で異なり、ユーザービーム  $Q$  と基準線質  $Q_0$  ( $^{60}\text{Co}\gamma$  線) で照射された時の電離箱線量計の応答変化を補正する係数である。 $N_{D,w}^{60\text{Co}}$  は、一次線量標準機関または二次線量標準機関の  $^{60}\text{Co}\gamma$  線場で電離箱線量計を校正して得られた水吸収線量校正定数である。上記の各種補正係数 ( $P_{\text{TP}}, P_{\text{ion}}, P_{\text{pol}}, P_{\text{elec}}, P_{\text{leak}}, P_{\text{rp}}$ ) や線質変換係数は、各標準計測法に従い求めた。

Table 1. Reference conditions for determination of absorbed dose to water for the three protocols.

	TRS-398	JSMP-12	TG-51
Phantom material	Water	Water	Water
Beam quality	$TPR_{20,10}$	$TPR_{20,10}$	$PDD(10)_x$
Chamber type	Cylindrical	Farmer	Cylindrical
Reference depth	$TPR_{20,10} < 0.7, 10 \text{ g cm}^{-2}$ or $5 \text{ g cm}^{-2}$ $TPR_{20,10} \geq 0.7, 10 \text{ g cm}^{-2}$	$10 \text{ g cm}^{-2}$	$10 \text{ g cm}^{-2}$
Measurement point*	Center of the cavity	Center of the cavity	Center of the cavity
SSD/SAD	100 cm	100 cm	100 cm
Field size	$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$	$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$	$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$

\*Measurement point: Measurement point of chamber

## 2.2.2. 使用機器

本研究では、SIEMENS 社製の医療用直線加速器（ARTISTE）から出力された公称エネルギー6 MV および 10 MV の X 線を IBA 社製水ファントム（WPID）に照射を行い、水ファントム中の校正深吸収線量を評価した。多くの治療施設で光子線の標準計測時に使用する電離箱は、PTW 社製 30013（PTW 30013）または Standard Imaging 社製 Exradin A12（Exradin A12）である[18]。そこで、本研究は、上記の電離箱（PTW 30013 および Exradin A12）および IBA 社製 FC65-P（IBA FC-65P）を用いて高エネルギー光子線の校正深吸収線量を評価した。Figure 1 に使用した電離箱の外観を、そして Table 2 にそれらの電離箱の特徴を、それぞれ示す。

使用した Exradin A12, IBA FC65-P および PTW 30013 に対して、電位計 Standard Imaging 社製 SuperMAX, Cardinal Health 社製 Keithley 35040 および東洋メディック社製 RAMTEC 1000plus をそれぞれ接続し、電離箱線量計の校正は医用原子力技術研究振興財団で行った。その結果、Exradin A12, IBA FC65-P および PTW 30013 の水吸収線量校正定数は、それぞれ  $4.902 \times 10^{-2} \text{ Gy nC}^{-1}$ ,  $4.858 \times 10^{-2} \text{ Gy nC}^{-1}$  および  $5.33 \times 10^{-2} \text{ Gy nC}^{-1}$  であった。本研究で使用した電離箱線量計（電離箱と電位計）は一体校正を受けたため、電位計校正定数は 1 である。



Figure 1. Photograph of ion chambers used in this work.

Table 2. Characteristics of the three chambers used.

Ion chamber	Sensitive cavity			Wall		Central electrode Material*
	Volume (cm <sup>3</sup> )	Length (mm)	Radius (mm)	Material*	Thickness (mm)	
Exradin A12	0.65	24.8	3.05	C552	0.5	C552
IBA FC65-P	0.65	23.1	3.1	POM	0.4	Al
PTW 30013	0.6	23.0	3.05	PMMA/Gr	0.335/0.09	Al

\*C-552: air-equivalent plastic, POM: polyoxymethylene, PMMA: polymethyl methacrylate, Gr: graphite, and Al: aluminum.

### 2.2.3. 線質の決定

線質変換係数は線質に依存した関数であるため、まず、3つの標準計測法に従い6 MVおよび10 MV X線の線質を導出した。

TRS-398 および JSMP-12 の線質指標は、線源検出器間距離は100 cm、照射野サイズは電離箱の位置で10 cm × 10 cm、におけるビーム中心軸上の水深さ20 g cm<sup>-2</sup>と10 g cm<sup>-2</sup>の線量比 ( $TPR_{20,10}$ ) である[5, 12]。

TG-51 (1999 年に発刊された標準計測法) の線質指標は、線源ファントム表面間距離は100 cm、照射野サイズはファントム表面で10 cm × 10 cm、における加速器ヘッド内からの電子線成分を除去した水深さ10 g cm<sup>-2</sup>の深部量百分率 [ $PDD(10)_x$ ] である[4]。具体的には、6 MV X線における  $PDD(10)_x$  は、照射野サイズはファントム表面で10 cm × 10 cm、水深さは10 g cm<sup>-2</sup>、における深部量百分率と定義されている[4]。一方、10 MV 以上の X線における  $PDD(10)_x$  は、放射線射出口と水ファントム表面の間に1 mmの鉛箔を設置した状態または鉛箔無しの状態での深部量百分率 (照射野サイズはファントム表面で10 cm × 10 cm、水深さは10 g cm<sup>-2</sup>) から算出するように定義されている[4]。

Addendum to AAPM TG-51 では、測定の間違いを無くすため、オープン照射野で測定した深部量百分率 (ファントム表面で照射野サイズは10 cm × 10 cm、水深さは10 g cm<sup>-2</sup>) から  $PDD(10)_x$  に変換する手順を推奨した[13]。本研究では、不確かさの小さい10 MV X線の  $PDD(10)_x$  を算出するため、1 mmの鉛箔を放射線射出口とファントム表面の間に設置した状態での深部量百分率から  $PDD(10)_x$  に変換した[4, 13]。

### 2.2.4. 校正深水吸収線量の測定

医療用直線加速器から出力される放射線の安定性、測定時の温度気圧補正、そして基準条件設定 (測定深、照射野サイズ、そして線源検出器間距離) 等の不確かさによって、測定結果は毎回変動する。これらの不確かさによる校正深水吸収線量の差異ではなく、本研究は標準計測法の違い (線質変換係数や各種補正係数の違い) による水吸収線量の差異を焦点に置いた研究である。そこで次のような測定条件で水吸収線量の測定を行った。

- (1) 測定配置は、3つの標準計測法で同じ測定配置 (線源検出器間距離は100 cm、照射野サイズは電離箱位置で10 cm × 10 cm、そして測定深は10 g cm<sup>-2</sup>) とした (Figure 2)。
- (2) 各種補正前の電離箱線量計の表示値 ( $M_{raw}$ ) は、各標準計測法で同一値を使用した。

本研究では、IBA 社製の水ファントム (WP1D)、佐藤計量器製作所社製の気圧計 (アネロイド 7610-20)、佐藤計量器製作所社製のデジタル温度計 (MODEL SK-1250MCIII  $\alpha$ ) を使用した。水ファントムに注入する水は、水温と照射室の室温の温度差を少なくするため、測定を実施する3日前より照射室内で保管した。



電離箱線量計の測定値は、測定開始後の経過時間やその線量計に照射した累積線量によって変化を示すことがある。そこで、このような線量計の応答変化を解消する対応策として、電離箱線量計への事前照射を実施した[5, 13]。その後、1回の照射量を 100 Monitor Unit (MU)に設定し、照射は測定間隔約 30 秒で連続して行った。本研究では、測定値の変動が 0.1%以下になった時点から連続した 7-8 回の測定結果の平均値を電離箱線量計の測定値 ( $M_{\text{raw}}$ ) として採用した。

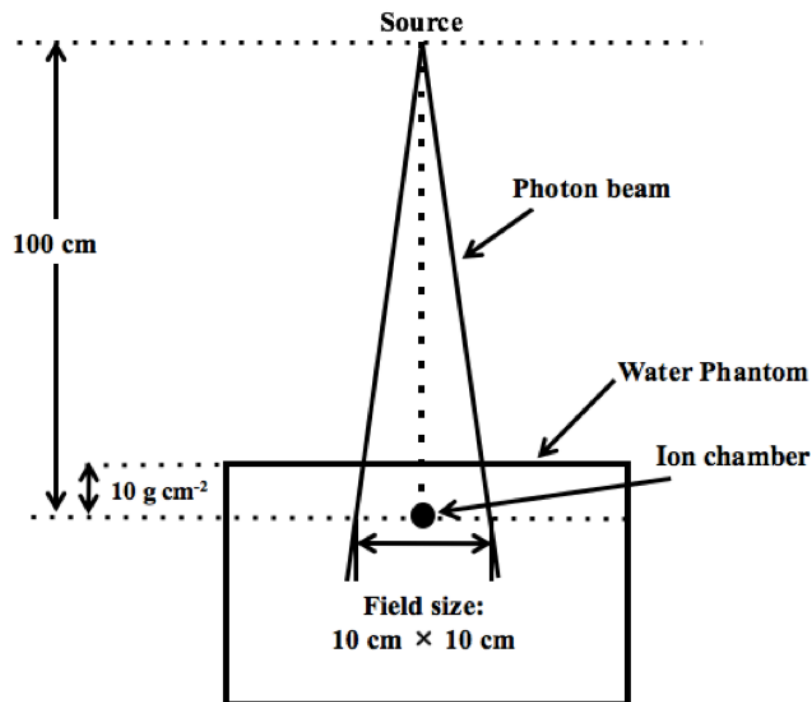


Figure 2. Experimental setup for determination of absorbed dose to water.

#### 2.2.5. 不確かさの評価

本研究では、各標準計測法で同一の水吸収線量校正定数および電離箱線量計で得た測定値を採用した。また、温度気圧補正係数、極性効果補正係数は、各標準計測法で同じ方法で求められるため、本研究では同一の補正係数を採用した。そのため、水吸収線量校正定数、電離箱線量計で得た測定値、測定時の温度気圧補正係数、極性効果補正係数、放射線の出力安定性、そして測定条件の設定（線源検出器間距離、測定深、そして照射野サイズ）の不確かさは各標準計測法で同一である。

線質変換係数は、各標準計測法で異なる。線質指標およびイオン再結合補正係数は、2つの標準計測法（TRS-398 および JSMP-12）と TG-51 で異なる。動径方向分布補正や漏れ電

流補正は、Addendum to AAPM TG-51 で補正係数として取り扱われているが、TRS-398 および JSMP-12 では、補正係数として取り扱われていない。

本研究では、不確かさの評価ガイド (Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100: 2008) [19] に従い、各標準計測法で異なる線質変換係数、イオン再結合補正係数、線質指標、および Addendum to AAPM TG-51 で補正係数として導入されている動径方向分布補正係数 ( $P_{rp}$ ) や漏れ電流補正係数 ( $P_{leak}$ ) の不確かさを評価した。

## 2.3. 結果

### 2.3.1. 電離箱線量計の表示値

電離箱線量計の各種補正係数を Table 3 に示す。また、各種補正後の電離箱線量計の表示値を Table 4 に示す。

各標準計測法で極性効果補正係数と温度気圧補正係数は、同じ手法で算出されるため、同一値となった。TRS-398 と JSMP-12 におけるイオン再結合補正係数は、同じ手法で算出されるため、同一値になった。この結果、Table 4 で示すように TRS-398 および JSMP-12 における電離箱線量計の各種補正後の表示値は、同一となった。

TG-51 とその他の 2 つの標準計測法 (TRS-398 および JSMP-12) のイオン再結合補正係数は、最大で約 0.02% の違いがみられた。また TG-51 における動径方向分布補正係数は、6MV および 10MV X 線でそれぞれ 1.002 および 1.003 となった。この結果、Table 4 に示すように、TG-51 に従い求められた電離箱線量計の各種補正後の表示値は、2 つ標準計測法 (JSMP-12 および TRS-398) に従い求められたそれに比べ、6 MV X 線で 0.2 %、10 MV X 線で 0.3 % 高い値になった。

Table 3. Correction factors for charge readings from three ionization chambers obtained by the three protocols.

Nominal MV	chamber	TG-51						JSMP-12				TRS-398			
		$P_{TP}$	$P_{ion}$	$P_{pol}$	$P_{elec}$	$P_{leak}$	$P_{rp}$	$k_{TP}$	$k_s$	$k_{pol}$	$k_{elec}$	$k_{TP}$	$k_s$	$k_{pol}$	$k_{elec}$
6	Exradin A12	0.990	1.0019	1.000	1	1	1.002	0.990	1.0018	1.000	1	0.990	1.0018	1.000	1
	IBA FC65-P	0.994	1.0013	1.001	1	1	1.002	0.994	1.0013	1.001	1	0.994	1.0013	1.001	1
	PTW 30013	1.005	1.0024	0.999	1	1	1.002	1.005	1.0023	0.999	1	1.005	1.0023	0.999	1
10	Exradin A12	0.990	1.0042	0.999	1	1	1.003	0.990	1.0040	0.999	1	0.990	1.0040	0.999	1
	IBA FC65-P	0.994	1.0055	0.999	1	1	1.003	0.994	1.0053	0.999	1	0.994	1.0053	0.999	1
	PTW 30013	1.009	1.0041	1.000	1	1	1.003	1.009	1.0039	1.000	1	1.009	1.0039	1.000	1

$P_{TP}$  and  $k_{TP}$ : temperature and pressure correction factor,  $P_{ion}$  and  $k_s$ : correction factor for incomplete ion collection efficiency,  $P_{pol}$  and  $k_{pol}$ : correction factor for any polarity effects, and  $P_{elec}$  and  $k_{elec}$ : calibration factor for the electrometer.

Table 4. Fully corrected charge readings (nC) from three ionization chambers obtained according to the three protocols.

Chamber	Protocol	6 MV	10 MV
Exradin A12	TRS-398	16.01	17.62
	JSMP-12	16.01	17.62
	TG-51	16.05	17.67
IBA FC65-P	TRS-398	16.202	17.925
	JSMP-12	16.202	17.925
	TG-51	16.238	17.978
PTW 30013	TRS-398	14.656	16.043
	JSMP-12	14.656	16.043
	TG-51	14.689	16.090

### 2.3.2. 線質変換係数

各標準計測法における線質変換係数を Table 5 に示す。3つの標準計測法における線質変換係数は、Exradin A12, IBA FC65-P そして PTW 30013 でそれぞれ 0.6%, 0.3%, および 0.4% 以内の差で一致した。

Table 5. Beam quality conversion factors for the three protocols.

Ion chamber	Protocol	6 MV	10 MV
		$TPR_{20,10} = 0.671$	$TPR_{20,10} = 0.740$
		$PDD(10)_x = 67.0$	$PDD(10)_x = 74.5$
Exradin A12	TRS-398	0.995	0.986
	JSMP-12	0.997	0.984
	TG-51	0.992	0.980
IBA FC65-P	TRS-398	0.994	0.981
	JSMP-12	0.992	0.979
	TG-51	0.991	0.979
PTW 30013	TRS-398	0.992	0.980
	JSMP-12	0.990	0.976
	TG-51	0.991	0.979

### 2.3.3. 校正深水吸収線量

各標準計測法に従い求めた水吸収線量を Table 6 に示す。Exradin A12 を使用して TG-51 に従い求めた水吸収線量は、TRS-398 に従い求めたそれに比べ、6 MV X 線で 0.1%、10 MV X 線で 0.3%低い結果になった。IBA FC65-P を使用して TG-51 に従い求めた水吸収線量は、TRS-398 に従い求めたそれに比べ、6 MV X 線で 0.03%低く、10 MV X 線で 0.1%高い結果を示した。PTW 30013 を使用して TG-51 に従い求めた水吸収線量は、TRS-398 に従い求めたそれに比べ、6 MV X 線で 0.15%、10 MVX 線で 0.2%高い値を示した。

Exradin A12 を使用して JSMP-12 に従い求めた水吸収線量は、TRS-398 に従い求めたそれに比べ、6 MV X 線で 0.2%高く、10 MV X 線で 0.2%低い結果になった。IBA FC65-P を使用して JSMP-12 に従い求めた水吸収線量は、TRS-398 に従い求めたそれに比べ、6 MV X 線で 0.2%、10 MV X 線で 0.3%低い値を示した。PTW 30013 を使用して JSMP-12 に従い求めた水吸収線量は、TRS-398 に従い求めたそれに比べ、6 MV X 線で 0.2%、10 MVX 線で 0.4%低い値を示した。

Table 6. Absorbed doses to water (Gy) according to the three protocols.

Chamber	Protocol	6 MV	10 MV
Exradin A12	TRS-398	0.781	0.851
	JSMP-12	0.783	0.850
	TG-51	0.780	0.849
IBA FC65-P	TRS-398	0.782	0.854
	JSMP-12	0.781	0.852
	TG-51	0.782	0.855
PTW 30013	TRS-398	0.775	0.838
	JSMP-12	0.773	0.835
	TG-51	0.776	0.840

#### 2.3.4. 不確かさ評価

TG-51 におけるイオン再結合補正係数の相対標準不確かさは、0.07%（包含係数  $k=1$ ）であった。一方、TRS-398 および JSMP-12 におけるイオン再結合補正係数の相対標準不確かさは、0.09%（ $k=1$ ）であった。

TRS-398 および JSMP-12 における線質指標  $TPR_{20,10}$  の相対標準不確かさは 0.3%（ $k=1$ ）であった。また補間によって線質変換係数を導出した相対不確かさは 0.05%（ $k=1$ ）であった。TG-51 における線質指標  $PDD(10)_x$  の相対標準不確かさ（ $k=1$ ）は 6 MV および 10 MV X 線でそれぞれ 0.30% および 0.42% であった。多項式回帰式によって線質変換係数を導出した相対標準不確かさは 0.05%（ $k=1$ ）であった。

漏れ電流補正係数の相対標準不確かさは、Addendum to AAPM TG-51 に従い 0.1%（ $k=1$ ）と推定した[13]。同様に動径方向分布補正係数の相対標準不確かさは、0.05%（ $k=1$ ）と推定した[13]。

#### 2.4. 考察

Table 4 で示したように、TG-51 に従い求めた各種補正後の電離箱線量計の表示値は、動径分布補正によって TRS-398 および JSMP-12 に従い求めたそれに比べ、6 MV X 線で 0.2%、10 MV X 線で 0.3% 高い値を示した。一般的に平坦化フィルターを通過した高エネルギー光子線における動径分布補正係数は、照射野中心とその周囲の線量変化が少ないため、1 に近いと考えられる。しかし本研究のように、照射野中心とその付近で線量に違いがある場合、

動径分布補正の有無により各種補正後の電離箱線量計の表示値に差が生じることが明らかになった。

Table 5 で示したように、線質変換係数は各標準計測法で異なる。線質変換係数の相違は、算出方法の違いにより生じたと考えられる。Addendum to AAPM TG-51 の線質変換係数は、Muir と Rogers によって求められたモンテカルロ計算値である[10]。JSMP-12 の線質変換係数では、壁補正係数を除く擾乱補正係数にモンテカルロ計算値が含まれている[12]。TRS-398 の線質変換係数における擾乱補正係数は、電離箱の詳細な構造まで考慮されておらず、半解析的な手法で求められている[5]。モンテカルロ計算によって求められた擾乱補正係数と 2000 年前後に発刊された TG-51（1999 年に発刊された標準計測法）や TRS-398 で採用された擾乱補正係数の比較は、これまでに報告されている。モンテカルロ計算によって求められた Wang らの  $^{60}\text{Co}\gamma$  線の変位補正係数は、TRS-398 および TG-51（1999 年に発刊された標準計測法）におけるそれと比べ、それぞれ約 1%、約 0.5% 高い値を示した[9]。電離箱壁の材質が PMMA（ポリメタクリル酸メチル樹脂）、C-552（空気等価樹脂）、そして POM（ポリアセタール）である壁補正係数では、Buckley ら[8]や Muir ら[10]によるモンテカルロ計算値と TG-51（1999 年に発刊された標準計測法）におけるその値は、-0.2%～0.4%の相違がある。このように線質変換係数に違いがあるものの、本研究結果では、各標準計測法における線質変換係数は JSMP-12 および TRS-398 で記述されている線質変換係数の相対標準不確かさ 1.0% ( $k=1$ ) の範囲内で一致している。

3 つ標準計測法に従い求めた水吸収線量の相違は、動径方向分布補正の有無や線質変換係数の相違で生じた。本研究結果では、標準計測法の違いによって水吸収線量は、最大で 0.6%の違いが生じた。しかしながら、それらの水吸収線量は、各標準計測法で見積もられている水吸収線量の相対標準不確かさ ( $k=1$ ) [5, 12, 13]の範囲内で一致している。

## 2.5. 本章のまとめ

水吸収線量の相違の要因は、各標準計測法における動径方向分布補正の有無および線質変換係数の値の違いであった。しかしながら、各標準計測法に従い導出した水吸収線量は、各標準計測法が示す水吸収線量の相対標準不確かさ ( $k=1$ ) の範囲内で一致した。

### 3. 水ファントムの違いによる電離箱設置の不確かさの評価

#### 3.1. 目的

第 3 章では、垂直ビームおよび水平ビーム用水ファントムで高エネルギー光子線の校正深（水深さ  $10 \text{ g cm}^{-2}$ ）に電離箱を設置する標準不確かさ（mm）およびその不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさ（%）を評価した。ここで、使用した放射線は SIEMENS 社製の医療用直線加速器（ARTISTE）の平坦化フィルターを通過した 6 MV および 10 MVX 線である。

#### 3.2. 方法

##### 3.2.1. 検討した水ファントム

本研究では、垂直ビーム用および水平ビーム用ファントムの合計 7 種類のファントムに電離箱を設置し、その不確かさを評価した。使用したファントムの外観を Figure 3 に示す。また、Table 7 に垂直ビーム用ファントムの特徴を、Table 8 に示す水平ビーム用ファントムの特徴を、それぞれ示す。

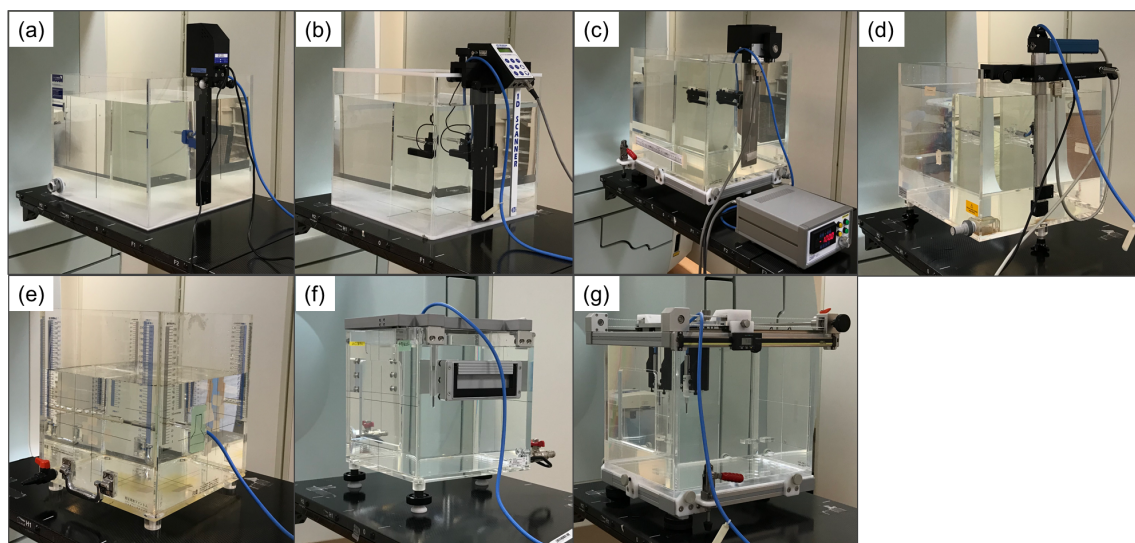


Figure 3. Photograph of the seven water phantoms used in this work: (a) DoseView 1D, (b) 1D SCANNER, (c) QWP-07, (d) WP1D, (e) GRI-7632, (f) PTW 41023, and (g) QWP-04.

Table 7. Characteristics of the water phantoms used here for a vertical-beam geometry.

<b>Tank</b>	<b>Size (inner)</b>	<b>Measurement type<sup>*</sup></b>	<b>Procedure for setting chamber<sup>†</sup></b>
	<b>L × W × H</b>		
	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>		
DoseView 1D	42 × 40 × 36	1D scanner	(1) D and (2) M
1D SCANNER	36 × 39 × 35	1D scanner	(1) D and (2) M
QWP-07	42.4 × 37.4 × 38.7	1D scanner	(1) D and (2) M
WP1D	40 × 34 × 35	1D scanner	(1) D and (2) M
GRI-7632	30 × 30 × 35	Fixed waterproof sleeves	(1) A

<sup>\*</sup>1D scanner: One-dimensional scanner.

<sup>†</sup>D: Definition of origin at water surface (positioning the center of the chamber at the surface), M: motorized adjustment of the desired depth, and A: adjustment of the water level by means of a vertical scale.

Table 8. Characteristics of the water phantoms used here for a horizontal-beam geometry.

<b>Tank</b>	<b>Size (inner)</b>	<b>Window</b>	<b>Measurement type</b>	<b>Procedure for positioning chamber</b>
	<b>L × W × H</b>	<b>thickness</b>		
	<b>(cm<sup>3</sup>)</b>	<b>(mm)</b>		
PTW 41023	28 × 28 × 29	3.05	1D scanner	(1) M <sup>*</sup>
QWP-04	30 × 26 × 32	3	1D scanner	(1) D and (2) M <sup>†</sup>

<sup>\*</sup>M: Manual adjustment of the desired depth by using a caliper on the phantom top.

<sup>†</sup>D: Definition of origin at a water-equivalent depth of 1.0 g/cm<sup>2</sup>, and M: manual adjustment of the desired depth.



### 3.2.2. 不確かさの評価

電離箱設置の標準不確かさおよびそれに寄与する不確かさは、不確かさの評価ガイド (Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement, JCGM 100:2008) [19]に従い推定した。電離箱設置の不確かさに寄与する因子は、標準不確かさを推定するため、A タイプまたは B タイプの不確かさに分類した。各標準不確かさは相互に関連していないと仮定して、電離箱設置の合成標準不確かさは個々の標準不確かさの二乗和の平方根によって求めた。電離箱設置の標準不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさは、感度係数を用いて算出した。ここで、DoseView 1D, 1D SCANNER, QWP-07, WP1D, PTW 41023 そして QWP-04 における感度係数は、線源ファントム表面間距離 90 cm の深部量百分率 (PDD) の傾き (深さを  $9.5 \text{ g cm}^{-2}$  から  $10.5 \text{ g cm}^{-2}$  に変化させて取得) である。また、GRI-7632 における感度係数は、線源電離箱間距離 100 cm の組織最大線量比 (TMR) の傾き (深さを  $9.5 \text{ g cm}^{-2}$  から  $10.5 \text{ g cm}^{-2}$  に変化させて取得) である。

仕様書に記述された装置の性能から不確かさを算出する場合、その性能に関する情報が不十分な場合がある。性能の限度値以外の情報が仕様書にない場合、本研究では、その性能の分布は矩形分布であると仮定した。例えば、最大の限度として  $\pm a$  もしくは  $+a$  が与えられた場合、タイプ B の不確かさは  $a/\sqrt{3}$  とした。本論文では、標準不確かさおよび相対標準不確かさの値は、包含係数  $k=1$  で示した。

### 3.2.3. 測定者による手技の不確かさ

7つのファントムに電離箱を設置する時の測定者が行う手技の不確かさを Table 9 に示す。測定者の違いによる手技の不確かさは、診療放射線技師 19 人のデータの相対的なばらつきから算出した。測定者が手技を繰り返し行った時の不確かさは、一人の測定者が 10 回手技を繰り返した時の結果から算出した。

DoseView 1D, 1D SCANNER, QWP-07, WP1D そして QWP-04 における原点設定の不確かさは、ファントムに表示されている電離箱の位置から算出した。PTW 41023 における電離箱の設置位置 (アナログ目盛りの 10 cm に電離箱を設置) の不確かさは、ミットヨ社製レーザー距離計 (IL-300) が示す位置から評価した (Figure 4)。GRI-7632 における水位調整の不確かさは、クオリタ社製水位調整器 (QWP-43) が示す水位から算出した。ファントム、レーザー距離計、そして水位調整器が示す位置 (デジタル表示) の不確かさは、仕様書に示されている装置の性能から算出した。

Table 9. Uncertainty components in the users' techniques for the seven phantoms.

Tank	Uncertainty type A	Uncertainty type B
1D tanks for vertical beam*	Repeatability of origin definition.	(1) Setting the origin among users. (2) Equipment used for the evaluation.
GRI-7632	Repeatability of the water level adjustment.	(1) Adjustment of the water level among users. (2) Equipment used for the evaluation.
PTW 41023	Repeatability of adjustment of the caliper.	(1) Adjustment of the caliper among users. (2) Equipment used for the evaluation.
QWP-04	Repeatability of origin definition.	(1) Setting the origin among users. (2) Equipment used for the evaluation.

\*1D tanks for vertical beam: DoseView 1D, 1D SCANNER, QWP-07, and WP1D.



Figure 4. Experimental setup for 10-cm adjustment of the caliper on the phantom top.

#### 3.2.4. ファントム固有の不確かさ

すべての水ファントムには固有の不確かさが存在する。本研究で検討した固有の不確かさの項目を Table 10 に示す。

多くの放射線治療施設では、水の密度 ( $\text{g cm}^{-3}$ ) を 1 とみなして、電離箱を設置する深さ ( $\text{g cm}^{-2}$ ) を決定している。しかしながら、実際の水の密度は温度によって変化する。本研究では、ファントム中の水の温度は約  $24^{\circ}\text{C}$  であり、その密度は約  $0.9972 \text{ g cm}^{-3}$  である。水深さ  $10 \text{ g cm}^{-2}$  の位置に電離箱を設置する場合、水の密度を  $1 \text{ g cm}^{-3}$  と仮定して設置した位置は、実際の水の密度を考慮して設置した位置に比べ  $0.3 \text{ g cm}^{-2}$  程度浅い位置である。

電離箱が原点から校正深へ移動する時の不確かさは、ミットヨ社製のレーザー距離計 (IL-300) を用いて評価した。なお、この評価はファントムに水を入れていない状態で行われた。

PTW 41023 および GRI-7632 のアナログ目盛りの不確かさを見積もるために、それらのファントムの目盛りとシンワ社製の JIS (Japanese Industrial Standards) 1 級の直尺の目盛りを比較した。電離箱壁 (PTW 30013) と防浸鞘の隙間 (mm) の情報は、PTW41023 は製造元、GRI-7632 は仕様書、からそれぞれ得た。

水平ビーム用ファントムの入射窓は、水を注入すると膨らむ。この入射窓の膨らみは、電離箱の設置深さに影響を及ぼす。本研究では、入射窓の中心にミットヨ社製ダイヤルゲージ (ID-S112SB) を設置し、ファントムに水を注入していない時の入射窓の膨らみをゼロと仮定し、水を注入した直後から 60 分間経過するまで 5 分間隔で入射窓の膨らみを測定した。

水平ビーム用水ファントムには、水と異なる入射窓壁に関係する不確かさもある。この影響を調査するため、垂直ビーム用水ファントム (GRI-7632) に本研究で検討した水平ビーム用水ファントムの入射窓と同じ厚さの PMMA (ポリメタクリル酸メチル樹脂) の板を置いた場合と PMMA の板を置かない場合で、水深さ  $10 \text{ g cm}^{-2}$  における電離箱線量計の測定値に違いがあるか評価した。また、この時の照射野サイズは電離箱位置で  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  とした。

Table 10. Uncertainty components in the inherent characteristics of the seven phantoms.

<b>Tank</b>	<b>Uncertainty type A <sup>†</sup></b>	<b>Uncertainty type B <sup>†</sup></b>
1D tanks for vertical beam <sup>*</sup>	Repeatability of AM	(1) AM and (2) N
GRI-7632	-	(1) AS (2) AG, and (3) N
PTW 41023	-	(1) D, (2) AS, and (3) N
QWP-04	Repeatability of AM	(1) D, (2) AM, and (3) N

<sup>\*</sup>1D tanks for vertical beam: DoseView 1D, 1D SCANNER, QWP-07, and WP1D.

<sup>†</sup> AM: Actual movement between the origin and the desired depth, N: nonapplied correction attributable to the water density, AS: analog scale, AG: air gap between the chamber wall and waterproofing, and D: phantom window deformation.

### 3.3. 結果

#### 3.3.1. 測定者による手技の不確かさ

測定者の手技の標準不確かさを Table 11 に示す。垂直ビーム用水ファントムにおける合成標準不確かさは、0.19-0.26 mm ( $k = 1$ )であった。一方、水平ビーム用水ファントムにおける合成標準不確かさは、0.13-0.17 mm ( $k = 1$ )であった。

Table 11. Standard uncertainties in the users' techniques for the seven phantoms.

	<b>DoseView 1D</b>	<b>1D SCANNER</b>	<b>QWP-07</b>	<b>WP1D</b>	<b>GRI-7632</b>	<b>PTW 41023</b>	<b>QWP-04</b>
					<b>water level</b>	<b>adjustment</b>	<b>Definition</b>
<b>Uncertainty<sup>*</sup> (mm) (<math>k = 1</math>)</b>	<b>Setting the origin at the water surface</b>				<b>adjustment</b>	<b>of a caliper</b>	<b>of the origin</b>
Differences among users	0.23	0.18	0.21	0.18	0.25	0.12	0.16
Repeatability	0.02	0.02	0.03	0.06	0.02	0.02	0.02
Instrument	0.003	0.03	0.03	0.03	0.06	0.03	0.03
Combined	0.24	0.19	0.22	0.20	0.26	0.13	0.17

<sup>\*</sup>Differences among users: Technique among users ( $n = 19$ ), Repeatability: repeatability of the technique ( $n = 10$ ), and Instrument: measurement instrument used for the determination of the uncertainty.

### 3.3.2. ファントム固有の不確かさ

ファントム固有の標準不確かさを Table 12 に示す。垂直ビーム用水ファントムにおける合成標準不確かさは、0.12-0.24 mm ( $k=1$ )であった。一方、水平ビーム用水ファントムにおける合成標準不確かさは、0.17-0.28 mm ( $k=1$ )であった。

Table 12. Standard uncertainties in the inherent characteristics of the seven phantoms.

Component*	Uncertainty (mm) ( $k=1$ )						
	DoseView 1D	1D SCANNER	QWP-07	WP1D	GRI-7632	PTW 41023	QWP-04
Movement distance	0.06	0.07	0.06	0.21	-	-	0.07
Repeatability of the distance	0.006	0.01	0.02	0.01	-	-	0.05
Analog scale	-	-	-	-	0.19	0.14	-
Air gap	-	-	-	-	0.06	0.13	-
Window deformation	-	-	-	-	-	0.15	0.11
Water density	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09
Instrument	0.03	0.03	0.03	0.03	0.08	0.09	0.03
Combined	0.12	0.12	0.12	0.24	0.24	0.28	0.17

\*Movement distance: Movement distance from the origin to the desired depth, Repeatability of the distance: repeatability of the distance from the origin to the desired depth, Air gap: air gap between the chamber wall and waterproofing sleeve, Window deformation: phantom window deformation, Water density: nonapplied correction attributable to the water density, and Instrument: Measurement instrument used for determination of the uncertainty.

### 3.3.3. 電離箱設置の合成標準不確かさ

Table 13 に測定者の手技とファントム固有の不確かさを合成した標準不確かさを示す。7つの水ファントムに電離箱を設置する標準不確かさは、0.22-0.35 mm ( $k=1$ )であった。GRI-7632 における電離箱設置の標準不確かさは、他のファントムにおけるそれと比べ大きな値となった。その主たる因子は、測定者の違いによる水位調整の不確かさであった。

水平ビーム用水ファントムに電離箱を設置する不確かさに寄与する主たる因子は、PTW 41023 は入射窓の撓み、QWP-04 は測定者の違いによる原点設定であった。WP1D を除く垂直ビーム用 1D ファントムにおける電離箱設置の合成不確かさは、0.04 mm 以内の差であった。これらのファントムにおける電離箱設置の不確かさに寄与する主たる因子は、測定者の違いによる原点設定の不確かさであった。WP1D における電離箱設置の不確かさに寄与する主たる因子は、原点から測定深までの移動距離の不確かさであった。

Table 13. Combined standard uncertainties in positioning the chamber at reference depth for the seven phantoms.

Component	Uncertainty (mm) ( $k = 1$ )						
	DoseView 1D	1D SCANNER	QWP-07	WP1D	GRI-7632	PTW 41023	QWP-04
Users' techniques	0.24	0.19	0.22	0.20	0.26	0.13	0.17
Characteristics of tank*	0.12	0.12	0.12	0.24	0.24	0.28	0.17
Combined	0.26	0.22	0.25	0.30	0.35	0.30	0.24

Characteristics of tanks: Inherent characteristics of the tanks.

### 3.3.4. 電離箱設置の不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の不確かさ

Table 14 に電離箱設置の不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさを示す。垂直ビーム用ファントムにおける電離箱設置の不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の不確かさは、6 MV X 線で 0.14–0.20%, 10 MV X 線で 0.12–0.16%であった。一方、水平ビーム用ファントムにおける電離箱設置の不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさは、6 MV X 線で 0.16–0.20%, 10 MV X 線で 0.13–0.16%であった。入射窓の影響を考慮すると水平ビーム用ファントムにおける表示値の不確かさは、6 MV X 線で 0.22–0.25%, 10 MV X 線で 0.19–0.21%であった。

Table 14. Relative standard uncertainties in the chamber reading for the seven phantoms.

	Uncertainty (%)													
	DoseView 1D		1D SCANNER		QWP-07		WP1D		GRI-7632		PTW 41023		QWP-04	
Component *	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV	6 MV	10 MV
Positioning	0.17	0.14	0.15	0.12	0.16	0.14	0.20	0.16	0.14	0.12	0.20	0.16	0.16	0.13
Tank window	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.14	0.13	0.14	0.13
Combined	0.17	0.14	0.15	0.12	0.16	0.14	0.20	0.16	0.14	0.12	0.25	0.21	0.22	0.19

\*Positioning: Positioning the chamber; and Tank window: Tank entrance window.

### 3.4. 考察

第3章の結果から主に4つの事項が明らかになった。1番目に、電離箱設置の不確かさとそれが及ぼす表示値の不確かさは、7つのファントムで大きな違いは見られなかった。2番目に、測定者によって手技の不確かさは異なる。3番目に、水平ビーム用ファントムにおけるファントム固有の不確かさは、垂直ビーム用ファントムにおけるそれに比べ、幾分大きい。最後に、電離箱設置の不確かさに寄与する主たる因子は、ファントムの種類で異なる。

Addendum to AAPM TG-51[13]は、特殊な器具を使わずに0.33 mmの不確かさ ( $k=1$ ) で電離箱を設置できると報告している。本研究では、7つのファントムに電離箱を設置した時の不確かさは、その不確かさ (0.33 mm) と約0.1 mm以内で一致した。そのため、本研究結果は、以下の2つの事項が示唆される。(1) 7つのファントムの違いによる電離箱設置の標準不確かさの違いは、小さい。(2) 7つのファントムは、水吸収線量計測で使用する水ファントムとしての満足できる性能を有する。

測定者による手技の不確かさに寄与する主な因子は、測定者の違いによる手技の不確かさであった。測定者の違いによる手技の不確かさを低減するためには、測定者間で統一した手技達成の判断基準が必要である。本研究結果では、測定者の違いによる手技の不確かさの中で水面調整の不確かさは、それ以外の手技に比べ大きい値を示した。水面調整の結果は、表面張力の影響による測定者間の視差により差が生じたと考えられる。水面と電離箱の幾何学的中心位置を一致させる手技に関して、Dasらが提案[20]したような手技達成の判断基準 (水面鏡面法) を定めることで測定者の違いによる水面調整の不確かさは、低減できると思われる。

水平ビーム用ファントムにおけるファントム固有の不確かさは、垂直ビーム用ファントムに比べ、幾分大きい結果であった。その主たる因子は、入射窓の撓みとアクリル入射壁の影響であった。TRS-398[5]や Arib ら[21]は、入射窓の撓みによる電離箱の設置深や線源ファントム表面間距離が変わるため、この影響に注意しながら測定するように述べている。アクリル入射壁の影響については、McEwen らはアクリル入射壁の水等価厚の標準不確かさを 0.45 mm と大きな値を見積もっている[22]。測定者は、水平ビーム用ファントムを使用する際、これらの影響を理解して使用する必要があると考える。

本研究結果では、電離箱設置の不確かさに寄与する主たる因子は、ファントムの種類で異なることが明らかになった。すなわち、電離箱設置の不確かさを低減するために注意すべき項目はファントムの種類で異なる。本研究で示した結果は、水吸収線量測定時の電離箱設置の不確かさ低減の手助けになると思われる。しかしながら、各施設で電離箱を設置する手順や測定者の技量は異なるため、各施設で不確かさを見積もることが大事である。

### 3.5. 本章のまとめ

7つの水ファントムで高エネルギー光子線の校正深に電離箱を設置する標準不確かさ ( $k = 1$ ) は、0.22-0.35 mm であった。それらの標準不確かさがおよぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさ ( $k = 1$ ) は、6 MV X 線で 0.14-0.25%、10 MV X 線で 0.12-0.21%であった。本研究結果から、電離箱設置に関連する不確かさは水ファントムの違いにより大きな違いがないことが見られないことが明らかになった。



#### 4. 結論

第2章では、TRS-398, JSMP-12, TG-51 に従い求めた高エネルギー光子線の校正深水吸収線量の違いについて報告した。それぞれの水吸収線量は、各標準計測法が示す水吸収線量の相対標準不確かさ ( $k=1$ ) の範囲内で一致した。したがって、TRS-398, JSMP-12, TG-51 に従い求めた校正深水吸収線量に大差がないことが明らかになった。

第3章では、7つの異なる水ファントムに電離箱を設置する標準不確かさおよびその不確かさが及ぼす電離箱線量計の表示値の相対標準不確かさを評価した。7つの水ファントムに電離箱を設置する不確かさに大きな違いは、見られなかった。電離箱設置の不確かさに寄与する主な因子はファントムの種類で異なるため、測定者はその主な因子に注意を払い電離箱を設置する必要がある。

## 謝辞

三年間の博士後期課程で、多くの方々のご指導、ご協力していただき、本博士論文をまとめる事ができました。

本研究を行うにあたり、終始熱心なるご指導とご鞭撻を賜りました名古屋大学大学院医学系研究科 小口宏准教授に心から御礼申し上げます。

英語論文の作成方法について、約2年間ご指導して頂いたシカゴ大学名誉教授 土井邦雄先生に深く感謝申し上げます。

愛知医科大学病院、名古屋市立大学病院、名古屋大学医学部附属病院、そして福井大学医学部附属病院の放射線治療部門の方々、名古屋大学大学院医学系研究科博士課程前期 瀬野貞博氏、MU ラボ 村澤哲氏をはじめ、本研究に協力いただいたすべての皆様に深謝いたします。

博士課程後期課程の在学を認めていただき、数々の配慮をいただいた福井大学医学部附属病院 安達登志樹技師長、木戸屋栄次副技師長、西本康宏主任そして放射線部の方々に心から御礼申し上げます。

最後に、大学院に通うこと、そして多くの時間を博士論文作成に割くことを理解し、応援してくれた妻と娘に心から感謝します。

## 参考文献

- [1]. International Agency for Research on Cancer. World Cancer Report 2014. IARC: Lyon; 2014.
- [2]. International Commission on Radiation Units and Measurements. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma Rays in Radiotherapy. ICRU Report 24. ICRU: Maryland; 1976.
- [3]. Lillicrap SC, Owen B, Williams JR, Williams PC. Code of practice for high-energy photon therapy dosimetry based on the NPL absorbed dose calibration service. *Phys Med Biol.* 1990;35:1355–1360.
- [4]. Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, et al. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Med Phys.* 1999;26:1847–1870.
- [5]. Andreo P, Burns DT, Hohlfield K, et al. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry based on Standards of Absorbed Dose to Water. IAEA Technical Reports Series no. 398. International Atomic Energy Agency: Vienna; 2000.
- [6]. 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 (標準測定法 01) . 通商産業研究社: 東京; 2002 年.
- [7]. Wulff J, Heverhagen JT, Zink K. Monte-Carlo-based perturbation and beam quality correction factors for thimble ionization chambers in high-energy photon beams. *Phys Med Biol.* 2008;53: 2823–2836.
- [8]. Buckley LA, Rogers DWO. Wall correction factors,  $P_{\text{wall}}$ , for thimble ionization chambers. *Med Phys.* 2006;33:455–464.
- [9]. Wang LLW, Rogers DWO. The replacement correction factors for cylindrical chambers in high-energy photon beams. *Phys Med Biol.* 2009;54:1609–1620.
- [10]. Muir BR, Rogers DWO. Monte Carlo calculations of  $k_Q$ , the beam quality conversion factor. *Med Phys.* 2010;37:5939–5950.
- [11]. Erazo F, Lallena AM. Calculation of beam quality correction factors for various thimble ionization chambers using the Monte Carlo code PENELOPE. *Phys Med.* 2013;29:163–170.
- [12]. 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 (標準計測法 12) . 通商産業研究社: 東京; 2012 年.
- [13]. McEwen MR, DeWerd L, Ibbott G, et al. Addendum to the AAPM's TG- 51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon beams. *Med Phys.* 2014;41:041501.
- [14]. Araki F, Kubo HD. Comparison of high-energy photon and electron dosimetry for various dosimetry protocols. *Med Phys.* 2002;29:857-868.

- [15]. Huq MS, Andreo P, Song H. Comparison of the IAEA TRS-398 and AAPM TG-51 absorbed dose to water protocols in the dosimetry of high-energy photon and electron beams. *Phys Med Biol.* 2001;46:2985–3006.
- [16]. Wright T, Lye JE, Ramanathan G, et al. Direct calibration in megavoltage photon beams using Monte Carlo conversion factor: validation and clinical implications. *Phys Med Biol.* 2015;60:883–904.
- [17]. Castro P, García-Vicente F, Mínguez C, et al. Study of the uncertainty in the determination of the absorbed dose to water during external beam radiotherapy calibration. *J Appl Clin Med Phys.* 2008;9:70–86.
- [18]. Muir BR, Culberson W, Davis S, et al. Insight gained from responses to surveys on reference dosimetry practices. *J Appl Clin Med Phys.* 2017;18:182–90.
- [19]. Joint Committee for Guides in Metrology. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM: Paris; 2008.
- [20]. Das IJ, Cheng CW, Watts RJ, et al. Accelerator beam data commissioning equipment and procedures: Report of the TG-106 of the Therapy Physics Committee of the AAPM. *Med Phys.* 2008;35:4186–4215.
- [21]. Arib M, Medjadj T, Boudouma Y. Study of the influence of phantom material and size on the calibration of ionization chambers in terms of absorbed dose to water. *J Appl Clin Med Phys.* 2006;7:55–64.
- [22]. McEwen MR, Kawrakow I, Ross CK. The effective point of measurement of ionization chambers and the build-up anomaly in MV x-ray beams. *Med Phys.* 2008;35:950–958.

付録 略語・記号一覧

略語・略号	意味
AAPM	The American Association of Physicists in Medicine
$D_{D,w}^Q$	Absorbed dose to water in a photon beam with beam quality Q
IAEA	International Atomic Energy Agency
IPSM	Institute of Physical Sciences in Medicine
JIS	Japanese Industrial Standards
JSMP	Japan Society of Medical Physics
$k_Q$	Beam quality conversion factor
$M$	Fully corrected charge reading from an ionization chamber
$M_{\text{raw}}$	Uncorrected charge reading from an ionization chamber
MU	Monitor unit
$N_{D,w}^{60\text{Co}}$	Cobalt-60 absorbed dose calibration coefficient
PDD	Percentage depth-dose
$PDD(10)_x$	The photon component of the photon beam percentage depth-dose at 10 cm depth in a 10 x 10 cm <sup>2</sup> field on the surface of a water phantom at an SSD of 100 cm
PMMA	Polymethyl methacrylate
$P_{\text{elec}}, k_{\text{elec}}$	Calibration factor of an electrometer.
$P_{\text{ion}}, k_s$	Correction for incomplete ion collection efficiency
$P_{\text{leak}}$	Correction for any contribution to the measured reading that is not due to the ionization released by the radiation beam

付録 略語・記号一覧（続き）

略語・略号	意味
$P_{\text{pol}}, k_{\text{pol}}$	Correction for any polarity effects
$P_{\text{rp}}$	Correction for considering any off-axis variation in the intensity profile of the radiation field over the sensitive volume of the ion chamber
$P_{\text{TP}}, k_{\text{TP}}$	Temperature and pressure correction factor
$SCD$	Source-chamber distance.
$SSD$	Source-surface distance
$TMR$	Tissue-maximum ratio.
$TPR$	Tissue-phantom ratio
$TPR_{20,10}$	Tissue-phantom ratio in water at depths of 20 and 10 g cm <sup>-2</sup> , for a field size of 10 x 10 cm <sup>2</sup> and a SCD of 100 cm, used as the beam quality index for high-energy photon beam.