臨床技術

論文受付
2011 年 12 月 15 日

論文受理
2012 年 6 月 3 日

Code No. 815

電離箱形状や使用頻度の違いによる 事前照射の測定値への影響

下野哲範¹ 南部秀和² 松原孝祐³ 越田吉郎³ 五味 勉⁴

¹ 星ヶ丘厚生年金病院放射線部

² 近畿大学医学部奈良病院放射線部

³ 金沢大学医薬保健研究域保健学系

⁴ 北里大学医療衛生学部医療工学科

緒 言

放射線治療における電離箱の高エネルギー光子ビームに対するレスポンスは照射からの経過時間や線量によって変化を示すことがある¹⁾。このようなレスポンスの変化を強制的に解消する日常的な対応策として、線量測定プロトコルである米国物理学会(American Association of Physicists in Medicine; AAPM) Task Group 51 report(TG-51)や国際原子力機関(International Atomic Energy Agency; IAEA) Technical Report Series No. 398(TRS-398)は安定した測定値を得るために2時

間前の電位計への電源投入と2~5 Gyの事前照射を行うことを推奨している^{2, 3)}。またRamseyら⁴⁾の極性効果補正の報告では電離箱の印加電圧を反転させた後、安定した測定値を得るために一定量の線量を事前に照射する方法が報告されている。一方、DeBlois⁵⁾やDerikumら⁶⁾の報告では電離箱への事前照射の不足が測定誤差を生じることが指摘されている。McCaffreyら⁷⁾は事前照射における電離箱のレスポンスはステムへの照射が大きく影響し、絶縁体の材質や中心電極の遮蔽範囲などの電離箱の構造で異なることを示した。このよ

Influence on Measurements of Pre-irradiation Due to Differences in Ionization Chamber Shape or Frequency in Use

Tetsunori Shimono,^{1*} Hidekazu Nambu,² Kosuke Matsubara,³ Kichiro Koshida,³ and Tsutomu Gomi⁴

¹Department of Radiology, Hoshigaoka Koseinenkin Hospital

²Department of Radiology, Nara Hospital Kinki University Faculty of Medicine

³Department of Quantum Medical Technology, Faculty of Health Sciences, Kanazawa University

⁴School of Allied Health Sciences, Kitasato University

Received December 15, 2011; Revision accepted June 3, 2012

Code No. 815

Summary

Ionization chamber measurements in radiation therapy should be repeatedly performed until a stable reading is obtained. Ionization chambers exhibit a response which depends on time elapsed since the previous irradiation. In this study, we investigated the response of a set of two Farmer-style, one Plane parallel, and seven small ionization chambers, which are exposed to 4, 6, 10, and 14 MV. The results show that Farmer-style and Plane parallel ionization chambers settle quickly within 9–20 min. On the other hand, small ionization chambers exhibit settling times of 12–33 min for 6, 10, and 14 MV. It will take longer for a settling time of 4 MV. The settling time showed time dependent irradiation. The first reading was up to 0.76% lower in the Farmer-style and Plane parallel ionization chambers. The small ionization chambers had a 2.60% lower first reading and more gradual response in reaching a stable reading. In this study, individual ionization chambers can vary significantly in their settling behavior. Variation of the responses on ionization chambers were confirmed not only when radiation was not used for a week but also when it was halted for a month. Pre-irradiation of small ionization chambers is clearly warranted for eliminating inadvertent error in the calibration of radiation beams.

Key words: pre-irradiation, ionization chamber, response, dosimetry

*Proceeding author

Table 1 Characteristics of Farmer-type and small-cylindrical type ionization chambers used for the study

Chamber	Cavity volume (cm ³)	Thimble	Electrode	Insulator	Unguarded distance (mm)
NE 2571	0.68	graphite	aluminum	PCTFE (KEL-F)	26
PTW 30001	0.6	PMMA	aluminum	PE/PF	0
PTW 23323	0.1	PMMA	aluminum	PE/PF	0
PTW 31015	0.03	PMMA	aluminum	PE/PF	0
PTW 31016	0.016	PMMA	aluminum	PE/PF	0
PTW 31006	0.015	PMMA	steel	PE/PF	0
CC04	0.04	Shonka C-552	Shonka C-552	PTFE (teflon)	0
CC01	0.01	Shonka C-552	steel	PTFE (teflon)	0
CC13	0.13	Shonka C-552	Shonka C-552	PTFE (teflon)	0

PMMA; polymethyl methacrylate, PCTFE; polychlorotrifluoroethylene, PE/PF; polyethylene/phenolformaldehyde, PTFE; polytetrafluoroethylene

うに電離箱に事前照射を行うことは測定誤差を低減できる一つの方法として考えられている。

近年の定位放射線治療や強度変調放射線治療において有効体積 0.1 cm³ 以下の小型電離箱が線量検証に使用されている。小型電離箱は Farmer 形電離箱と比べ長径も短縮し、電離容積も非常に小さくなっている。しかし電離箱壁厚、集電極やケーブルの直径には大きな変化はない。これは電離箱空洞体積に対する電極や絶縁体の体積、ケーブルの導体の比率が Farmer 形電離箱と比較して小型電離箱のほうが大きいことを意味する。また小型電離箱での線量測定ではステムやケーブルへの照射の影響が顕著になり、微弱な電離電流を計測するので注意が必要になる。Farmer 形電離箱への事前照射の有用性は電離箱構造と関連づけて確立されている。一方、有効体積 0.1 cm³ 以下の小型電離箱のレスポンスや事前照射の測定値への影響に関しては十分に評価がされていないのが現状である。

小型電離箱の測定値の安定性を確保するために測定器具の安定性、測定配置の再現性や放射線出力の安定性に相応の注意が必要となる。したがって電離箱の構造や加速器からの高エネルギー光子ビームの照射線量率、照射時間や照射間隔などの測定条件の変化に対する測定誤差を明確にしておく必要がある⁸⁻¹⁰⁾。この報告では小型電離箱の測定値の安定性を電離箱の形状と関連づけ、放射線治療で使用する小型電離箱での照射直後のレスポンスの変動ならびに使用頻度の違いによる事前照射の測定値への影響について検討した。

1. 方 法

1-1 使用機器および測定条件

指頭形電離箱、平行平板形電離箱の 2 種類を対象とした。指頭形電離箱として Farmer 形電離箱を PTW 社

Table 2 Characteristics of parallel-plate type ionization chamber used for the study

PPC 40	Material	Thickness	Diameter
Entrance window	PMMA	1.18 g/cm ³	—
Body	PMMA	—	—
Electrode	graphitised	—	16 mm

PMMA; polymethyl methacrylate

製 30001(0.6 cm³) と Nuclear Enterprises 社 製 NE2571 (0.68 cm³) の 2 本ならびに小型電離箱を PTW 社 製 23323(0.1 cm³)、31015(0.03 cm³)、31016(0.016 cm³)、31006(0.015 cm³) と Wellhoefer Dosimetry 社 製 CC04 (0.04 cm³)、CC01(0.01 cm³)、CC13(0.13 cm³) の 7 本を用いた(Table 1)。平行平板形電離箱は Wellhoefer Dosimetry 社製 PPC40(0.4 cm³) を 1 本用いた(Table 2)。電位計は RAMTEC 1000D(東洋メディック社製)を用いた。

医療用加速器はマイクロトロン HTM2210(日立メディコ社製)を使用した。対象とした放射線は 4 MV、6 MV、10 MV、14 MV の X 線である。線量率は 4 MV の X 線で 100 モニタ単位(monitor unit; MU)/min、6 MV の X 線で 250 MU/min、10 MV と 14 MV の X 線で 300 MU/min とした。

測定用ファントムは校正用水ファントム(501-300 防水鞘 1.0 mm、外寸: 320×320×390 mm、東洋メディック社製)を用い、アイソセンタに電離箱の実効中心を配置し、ガントリ角度 0 度、照射野 10×10 cm、水深 10 cm とした。モニタ単位の設定数は 100 MU とした。測定深での線量は 4 MV の X 線で 71.6 cGy、6 MV で 77.5 cGy、10 MV で 83.0 cGy、14 MV で 86.3 cGy となった。

校正用水ファントムは測定の三日前に水を貯留したものを使用した。電離箱を挿入したファントム内の測定中

Fig. 1 Response of a PTW 30001 and NE2571 ionization chambers (Farmer-type) used weekly and monthly to a constant dose of 4 MV photon beam from a Microtron HTM2210. Ionization chambers were applied with -300 V. Two chambers were connected to a RAMTEC 1000D electrometer. Two chambers were placed at 10 cm depth in a field size of 10×10 cm, and the source-detector distance was 100 cm.

における温度変化はまったくみられなかった。また測定中の気圧の変化も認められなかった。

加速器の安定性を調べるため半導体検出器を使用した。DPD510 ダイレクト線量計(Wellhoefer Dosimetry 社製)を使用し、EDD-2 型 p 型シリコンダイオード検出器(Wellhoefer Dosimetry 社製)を X 線中心軸上の水等価ファントム[WE タフウォータファントム, 30×30 cm, 積層形(京都科学社製)]中 10 cm の深さに設置した線源-表面間距離(source-surface distance; SSD)は 90 cm とし、ファントム表面に垂直に X 線を入射し照射野 10×10 cm とした。モニタ単位の設定数は 100 MU とした。

1-2 測定方法

1-2-1 各電離箱の安定時間

各電離箱を用いて測定値の安定時間を調べた。4 MV, 6 MV, 10 MV, 14 MV の X 線を用いモニタ単位数 100 MU とし連続的に測定を繰り返した。測定を開始した時間を 0 とし、測定を停止した時間に電位計の指示値を読んだ。各測定開始時間の間隔は 4 MV では 90 秒, 6 MV, 10 MV, 14 MV では 60 秒とした。各電離箱の使用間隔は 1 週間と 1 カ月とした。照射野サイズは 10×10 cm で正負 300 V の印加電圧で測定した。測定値の安定時間は最終測定値より $\pm 0.05\%$ の範囲内にすべての測定値が得られた時間とした。Farmer 形, 平行平板形電離箱で測定する際の電位計の測定レンジは Hi レンジ, 小型電離箱は Lo レンジとした。すべての測定値は電位計の読み値(nC)とした。

1-2-2 事前照射の効果

各電離箱の安定に要した累積線量を照射したのち、モニタ単位数 100 MU を測定間隔 30 秒で連続的に測定した。今回用いた電離箱の中で PTW31006, CC01, PPC40, PTW30001 を用い、安定に要した累積線量であるそれぞれ 20 Gy, 20 Gy, 10 Gy, 9 Gy を事前照射し測定した。

1-2-3 線量率依存性

各電離箱のレスポンスの線量率依存性を調べるために 6 MV の X 線において線量率を 50 MU/min, 100 MU/min, 250 MU/min としモニタ単位数 100 MU を測定間隔 30 秒で連続的に測定した。

1-2-4 加速器の安定性

マイクロトロン出力変動を調べるため DPD510 ダイレクト線量計, EDD-2 型 p 型シリコンダイオード検出器を使用して測定した。4 MV の X 線で線量率を 100 MU/min とし, 100 MU を測定間隔 30 秒で連続的に測定した。

2. 結果

2-1 各電離箱の安定時間

2-1-1 Farmer 形電離箱

PTW30001 の使用間隔 1 週間と 1 カ月のレスポンスを Fig. 1 に示す。エネルギーは 4 MV の X 線, 印加電圧を -300 V で測定し, 各測定値を最終測定値に対する比率で示す。使用間隔 1 週間の初回の測定値は安定した測定値に対して 0.40% 低い値を示した。安定する約 13.5 分後(累積投与線量 900 MU: 以下 900 MU)に達するまで測定値は増加傾向を示し $\pm 0.05\%$ 以内に測定値が安定した。6 MV の X 線では初回の測定値は安定した測定値に対して 0.44% 低い値を示し約 9.0 分後(900 MU)で安定した(Table 3, 4)。また使用間隔 1 カ月の初回の測定値は安定した測定値に対して 4 MV, 6 MV の X 線ではそれぞれ 0.58%, 0.46% 低い値を示し, 18.0, 12.0 分後(1200 MU)で測定値は安定した(Table 3, 5)。

4 MV, 6 MV の X 線における NE2571 の安定時間は使用間隔 1 週間でそれぞれ 22.5 分, 15.0 分(1500 MU), 使用間隔 1 カ月で 30.0 分, 20.0 分(2000 MU)であった。使用間隔 1 週間ならびに 1 カ月における初回の測定値は 4 MV の X 線でそれぞれ 0.55%, 0.75%, 6 MV の X 線で 0.51%, 0.53% 低い値を示した(Table 4, 5)。

4 MV, 6 MV の X 線における Farmer 形電離箱のレ

Table 3 The percentage of decrease in the first reading compared with the stable reading ionization chambers used weekly and monthly

Stable time (4 MV)					Stable time (6 MV)				
Chamber	Weekly		Monthly		Chamber	Weekly		Monthly	
	300 V	−300 V	300 V	−300 V		300 V	−300 V	300 V	−300 V
PTW 30001	12.0	13.5	16.5	18.0	PTW 30001	8.0	9.0	11.0	12.0
NE 2571	21.0	22.5	27.0	30.0	NE 2571	14.0	15.0	18.0	20.0
PTW 23323	16.5	18.0	21.0	22.5	PTW 23323	11.0	12.0	14.0	15.0
PTW 31015	25.5	27.0	30.0	33.0	PTW 31015	17.0	18.0	21.0	22.0
PTW 31016	24.0	27.0	30.0	33.0	PTW 31016	16.0	18.0	20.0	22.0
PTW 31006	33.0	36.0	39.0	42.0	PTW 31006	22.0	24.0	26.0	28.0
CC04	34.5	39.0	39.0	46.5	CC04	23.0	26.0	26.0	31.0
CC01	36.0	40.5	45.0	49.5	CC01	24.0	27.0	30.0	33.0
CC13	18.0	18.0	21.0	22.5	CC13	12.0	12.0	14.0	15.0
PPC 40	16.5	18.0	19.5	21.0	PPC 40	11.0	12.0	13.0	14.0

Geometry of the set-up was the same as in Fig. 2. Dose rate for a 4 MV photon beam was 100 MU/min, 6 MV photon beam was 250 MU/min.

Table 4 The percentage of decrease in the first reading compared with the stable reading ionization chambers used weekly

Chamber	Applied voltage							
	4 MV		6 MV		10 MV		14 MV	
	300 V	-300 V	300 V	-300 V	300 V	-300 V	300 V	-300 V
PTW 30001	-0.15%	-0.40%	-0.19%	-0.44%	-0.23%	-0.41%	-0.18%	-0.39%
NE 2571	-0.21%	-0.55%	-0.31%	-0.51%	-0.29%	-0.55%	-0.22%	-0.47%
PTW 23323	-0.16%	-0.41%	-0.20%	-0.48%	-0.18%	-0.45%	-0.16%	-0.40%
PTW 31015	-0.20%	-0.98%	-0.22%	-1.03%	-0.26%	-0.96%	-0.16%	-1.03%
PTW 31016	-0.31%	-1.00%	-0.28%	-1.10%	-0.33%	-1.05%	-0.41%	-1.08%
PTW 31006	-0.41%	-1.40%	-0.45%	-1.47%	-0.39%	-1.49%	-0.36%	-1.41%
CC04	-0.70%	-1.78%	-0.79%	-1.82%	-0.79%	-1.75%	-0.69%	-1.79%
CC01	-0.75%	-2.34%	-0.78%	-2.48%	-0.70%	-2.30%	-0.77%	-2.36%
CC13	-0.24%	-0.65%	-0.28%	-0.73%	-0.31%	-0.75%	-0.27%	-0.68%
PPC 40	-0.25%	-0.56%	-0.22%	-0.55%	-0.22%	-0.55%	-0.27%	-0.51%

Geometry of the set-up was the same as in Fig. 2. Dose rate for a 4 MV, 6 MV, 10 MV, and 14 MV photon beams were 100 MU/min, 250 MU/min, 300 MU/min, and 300 MU/min, respectively.

Table 5 The percentage of decrease in the first reading compared with the stable reading ionization chambers used monthly

Chamber	Applied voltage							
	4 MV		6 MV		10 MV		14 MV	
	300 V	-300 V	300 V	-300 V	300 V	-300 V	300 V	-300 V
PTW 30001	-0.12%	-0.58%	-0.21%	-0.46%	-0.27%	-0.49%	-0.20%	-0.44%
NE 2571	-0.30%	-0.75%	-0.33%	-0.53%	-0.32%	-0.60%	-0.24%	-0.59%
PTW 23323	-0.29%	-0.68%	-0.29%	-0.59%	-0.19%	-0.56%	-0.19%	-0.55%
PTW 31015	-0.24%	-1.15%	-0.23%	-1.19%	-0.29%	-1.12%	-0.21%	-1.19%
PTW 31016	-0.45%	-1.20%	-0.38%	-1.26%	-0.36%	-1.26%	-0.41%	-1.29%
PTW 31006	-0.65%	-1.79%	-0.49%	-1.67%	-0.41%	-1.69%	-0.39%	-1.68%
CC04	-0.90%	-2.20%	-0.85%	-1.99%	-0.84%	-2.03%	-0.71%	-1.96%
CC01	-0.98%	-2.60%	-0.81%	-2.59%	-0.79%	-2.58%	-0.79%	-2.55%
CC13	-0.39%	-0.88%	-0.36%	-0.84%	-0.35%	-0.89%	-0.29%	-0.83%
PPC 40	-0.40%	-0.76%	-0.26%	-0.61%	-0.24%	-0.66%	-0.31%	-0.59%

Geometry of the set-up was the same as in Fig. 2. Dose rate for a 4 MV, 6 MV, 10 MV, and 14 MV photon beams were 100 MU/min, 250 MU/min, 300 MU/min, and 300 MU/min, respectively.

Fig. 2 Response of a PTW 30001 ionization chamber used weekly and monthly to a constant dose of 4 MV photon beam. Measurements were normalized to the final reading of each chamber with applied negative polarity voltage. PTW 30001 ionization chamber applied negative and positive polarity voltage of -300 V.

スポンズ変動の傾向は測定値の繰り返しによる測定値の上昇傾向がみられた。初回の測定値の低下は使用間隔1カ月のほうが使用間隔1週間より大きい傾向がみられた(Table 4, 5)。また使用間隔1カ月のほうが使用間隔1週間より測定値の安定に時間を要した(Table 3)。このような傾向は Farmer 形電離箱に共通の現象であった。NE2571 は PTW30001 と比較して初回の測定値の低下が大きく、測定値が安定するのに時間を要した。4 MV の X 線における Farmer 形電離箱の安定時間は 6 MV に比べ長時間を要した。初回の測定値は 6 MV, 10 MV, 14 MV の X 線においても 4 MV と同様な傾向が示され、エネルギー依存性は認めなかった(Table 4)。

正負の印加電圧における PTW30001 の使用間隔1週間と1カ月のレスポンスを Fig. 2 に示す。正の印加電圧では使用間隔1週間と1カ月の初回の測定値は安定した測定値に対してそれぞれ 0.15%, 0.12% 低い値となり、負の印加電圧での初回の測定値より若干小さい傾向にあった(Table 4, 5)。正の印加電圧では穏やかに安定値に達したが、負の印加電圧では測定値の増加傾向がみられた。6 MV, 10 MV, 14 MV の X 線においても 4 MV と同様な傾向が示され、エネルギー依存性は認めなかった。また正負の印加電圧の違いによる安定時間の差は小さかった(Table 3)。

2-1-2 平行平板形電離箱

PPC40 平行平板形電離箱の使用間隔1週間と1カ月のレスポンスを Fig. 3 に示す。エネルギーは 4 MV の X 線、印加電圧を -300 V で測定し各測定値を最終測定値に対する比率で示す。使用間隔1週間の PPC40 の初回の測定値は安定した測定値に対して 0.56% 低い値を示

Fig. 3 Response of a PPC40 ionization chamber (parallel-plate type) used weekly and monthly to a constant dose of 4 MV photon beam. Ionization chamber was applied with -300 V.

Fig. 4 Response of a PPC40 ionization chamber used weekly and monthly to a constant dose of 4 MV photon beam. Measurements were normalized to the final reading of each chamber with applied negative polarity voltage. PPC40 ionization chamber applied negative and positive polarity voltage of -300 V.

した(Table 4)。安定する約 18.0 分後(1200 MU)に達するまで測定値は増加傾向を示した(Table 3)。また使用間隔1カ月では初回の測定値は安定した測定値に対して 0.76% 低い値を示し(Table 5)、21.0 分後(1400 MU)に測定値が安定した(Table 3)。PPC40 は光子におけるエネルギー依存性を認めなかった。

正負の印加電圧における PPC40 の使用間隔1週間と1カ月のレスポンスを Fig. 4 に示す。正の印加電圧に比べ負の印加電圧において安定値に至るまで測定値の増加傾向がみられた。負の印加電圧における初回の測定値は正の印加電圧と比較すると若干大きい傾向にあった。Farmer 形電離箱と同様に 6 MV, 10 MV, 14 MV の X 線においても 4 MV と同様な傾向が示され、エネルギー依存性は認めなかった(Table 4, 5)。4 MV の X 線における PPC40 の安定時間は 6 MV, 10 MV, 14

Fig. 5 Response of PTW23323, PTW31006, PTW31016, and PTW31015 ionization chambers (small-cylindrical type) used weekly and monthly to a constant dose of 4 MV photon beam. Ionization chambers were applied with -300 V.

Fig. 6 Response of CC13, CC01, and CC04 ionization chambers (small-cylindrical type) used weekly and monthly to a constant dose of 4 MV photon beam. Ionization chambers were applied with -300 V.

MV に比べ長時間を要した。

2-1-3 小型電離箱

小型電離箱の使用間隔 1 週間と 1 カ月のレスポンスを Fig. 5, 6 に示す。エネルギーは 4 MV の X 線、印加電圧を -300 V で測定し、各測定値を最終測定値に対する比率で示す。PTW23323 の使用間隔 1 週間の安定時間は 18.0 分 (1200 MU)、PTW31006 は 36.0 分 (2400 MU)、PTW31016 は 27.0 分 (1800 MU)、PTW31015 は 27.0 分 (1800 MU) となった。使用間隔 1 カ月の安定時間は使用間隔 1 週間と比較して 4.5 分から 6.0 分長くなった (Table 3)。使用間隔 1 週間の初回の測定値は安定した測定値に対して PTW23323 は 0.41%，PTW31006 は 1.40%，PTW31016 は 1.00%，PTW31015 は 0.98% 低い値を示した (Table 4)。使用間隔 1 カ月の初回の測定値は使用間隔 1 週間と比較して 0.17% から 0.39% 程度低い傾向にあった (Fig. 5, Table 5)。CC13 の使用間隔 1 週間の安定時間は 18.0 分 (1200 MU)、CC01 は 40.5 分 (2700 MU)、CC04 は 39.0 分 (2600 MU) となった。使用間隔 1 カ月の安定時間は使用間隔 1 週間と比較して 4.5 分から 9.0 分長くなった (Table 3)。使用間隔 1 週間の初回の測定値は安定した測定値に対して CC13 は 0.65%，CC01 は 2.34%，CC04 は 1.78% 低い値を示した (Fig. 6, Table 4)。使用間隔 1 カ月の初回の測定値は使用間隔 1 週間と比較して 0.26% から 0.42% 低い傾向にあった (Fig. 6, Table 5)。小型電離箱の負の極性における初回の測定値の低下率が Farmer 線量計と比較して大きかった。4 MV の X 線における安定時間は 6 MV、10 MV、14 MV に比べ長時間を要した (Table 3)。初回の測定値は 6 MV、10 MV、14 MV の X 線においても 4 MV と同様な傾向が示されエネルギー依存性は認めなかった (Table 4, 5)。

正負の印加電圧における PTW31006, CC01, CC04 小型電離箱の使用間隔 1 週間と 1 カ月のレスポンスを Fig. 7 に示す。PTW31006 における正負の印加電圧の安定時間の差は正の印加電圧のほうが 3.0 分短くなった。負の印加電圧と比べ、正の印加電圧の初回の測定値は安定した測定値に対し最大 1.40% 程度低い値を示した (Fig. 7a, Table 5)。CC01, CC04 においても使用間隔 1 カ月の安定時間が 1 週間と比べ 4.5 分から 9.0 分程度長くなった。また正の印加電圧の安定時間は負の印加電圧の安定時間より 4.5 分から 7.5 分程度短くなった (Table 3)。負の印加電圧と比べ、正の印加電圧の初回の測定値は安定した測定値に対し CC01 は 1.59%，CC04 は 1.08% 低い値を示した (Fig. 7b, c, Table 4)。初回の測定値は 6 MV、10 MV、14 MV の X 線においても 4 MV と同様な傾向が示されエネルギー依存性は認めなかった。また 4 MV の X 線における安定時間は 6 MV、10 MV、14 MV に比べ長時間を要した (Table 3)。小型電離箱の初回の測定値低下率はエネルギー依存性を認めず極性依存を示した。小型電離箱の測定値の変化は Farmer 形電離箱や平行平板形電離箱とは異なった。初回の測定値の低下率は正の印加電圧の測定値に比べ負の印加電圧のほうが大きくなった。負の印加電圧での測定値は穏やかに増加し安定値に達したのに対し、正の印加電圧では安定した測定値に対し最大 0.6% の増加を示し安定値に達した。小型電離箱ではこの傾向は顕著であった。

2-2 事前照射の効果

電離箱の安定に要した累積線量を照射し事前照射後のレスポンスを Fig. 8 に示した。PTW31006, CC01, PPC40, PTW30001 の安定に要した累積線量

a	b
c	

Fig. 7 Response of (a) PTW31006, (b) CC01, and (c) CC04 ionization chambers (small-cylindrical type) used weekly and monthly to a constant dose of 4 MV photon beam. Ionization chambers were applied with negative and positive polarity voltage of -300 V.

Fig. 8 Response of PTW31006, CC01, PPC40, and PTW30001 ionization chambers pre-irradiated at a cumulative dose with 4 MV photon beam. Cumulative doses for PTW31006, CC01, PPC40, and PTW30001 ionization chambers were 20 Gy, 20 Gy, 10 Gy, and 9 Gy, respectively.

Fig. 9 Response of PTW31006 and CC01 ionization chambers pre-irradiated at a dose with 4 MV photon beam. Doses for PTW31006 and CC01 ionization chambers were 25 Gy, 20 Gy, 10 Gy, respectively.

はそれぞれ約 20 Gy, 20 Gy, 10 Gy, 9 Gy であった。PTW30001 と PPC40 は累積線量を事前照射することによって初回の測定値より $\pm 0.05\%$ の範囲以内にすべての測定値があった。小型電離箱である PTW31006 と CC01 は事前照射することによって 18.0 分程度で安定値に達した。次に PTW31006 と CC01 の事前照射に必要な線量を調べるため、各電離箱に 25 Gy, 20 Gy, 10 Gy を 1 回照射した後のレスポンスを調べた。Fig. 9 からわ

かるように安定に要した累積線量の 50% である 10 Gy の事前照射では初回の測定値の低下率は 20 Gy の事前照射時よりも大きかった。また安定値に達するのに PTW31006 は 22.5 分, CC01 では 27.0 分を要した。安定に要した累積線量より大線量を事前照射しても電離箱の安定時間に変化はなかった。

2-3 線量率依存性

6 MV の X 線ビームの線量率を 50 MU/min, 100 MU/min, 250 MU/min としたときの小型電離箱 PTW31006 と

Fig. 10 Response of (a) PTW31006 and (b) CC01 ionization chambers to 6 MV photon beam with various dose rates. The chamber was connected to a RAMTEC 1000D electrometer and a polarity voltage of -300 V. The chamber was placed at 10 cm depth in a field size of 10×10 cm, and the source-detector distance was 100 cm.

CC01 のレスポンスを Fig. 10 に示す。PTW31006 と CC01 の測定値は線量率に依存して変化した。50 MU/min, 100 MU/min における測定値の変化は 250 MU/min の場合と異なり、特に 50 MU/min における測定値は安定した測定値よりも高い値を示した。4 MV, 10 MV, 14 MV の X 線においても 6 MV と同様な傾向を示した。

2-4 加速器の安定性

EDD-2 型 p 型シリコンダイオード検出器のレスポンスを Fig. 11 に示す。初回の測定値から $\pm 0.10\%$ の範囲以内にすべての測定値があった。6 MV, 10 MV, 14 MV の X 線においても 4 MV と同様な傾向を示した。

Fig. 11 Response of an EDD-2 silicon diode detector to a constant dose of 4 MV photon beam.

3. 考 察

3-1 電離箱の構造の影響

放射線治療の線量測定に使用する電離箱のレスポンスの変化があることは知られている。安定した測定値を得るために、いくつかの線量測定プロトコルには事前照射を行うことが推奨されている^{1,2)}。今回の報告では種々の要因における電離箱のレスポンスの変化ならびに事前照射の影響を調べた。

電離箱のレスポンスの変化は繰り返し測定することによって一定値に達する。この傾向は Farmer 形電離箱が他の電離箱と比較して速やかに安定値に達する傾向がみられた (Fig. 1, 2)。しかし同じ Farmer 形電離箱においても PTW30001 と NE2571 では安定時間が異なった。安定時間が異なる原因として電離箱部の異なる構造をもつことが考えられる。PTW30001 は電離箱の空洞部分が完全に保護されているのに対して、NE2571 はステム内に 26 mm の非保護の中心電極部が存在する (Table 1)。通常、ケーブルの導体や電離箱の絶縁体が照射されることによって電荷の移動が生じる。またステ

ム内の空洞が電離箱のような作用をすることで電流がもたらす効果がある。ステムの異なる部分が保護された PTW30001 と NE2571 の示すレスポンスの違いは電離箱部の構造や材質に影響することがわかる。この結果は個々の電離箱によって異なるレスポンスを特徴づけるものとなる。電離箱のレスポンスの変動を最小限にするためにはフルガードの電離箱にする必要があることがわかる。Fowler ら⁸⁾が示したように絶縁体の材質によってレスポンスの変化が生じることは知られている。今回使用した電離箱の絶縁体の材質であるポリマは放射線に対して安定した材質であるため、電離箱のレスポンスへの影響はないと考える。

小型電離箱は他の電離箱とは異なり、安定した測定値にいたるまでの傾向に顕著な相違が認められた (Fig. 5~7)。このレスポンスの大きな変化はステムへの照射の影響であると考えられる。電離箱に接続されたケーブルやコネクタに放射線照射するとその部分が放射線に対して感度をもつ場合がある (ステム効果)。これは信号線とアースとの間に微小な空隙があり、その中の

気体に生じた電離電荷が移動するため生じる擬信号である。したがってケーブルやコネクタは極力放射線ビームに曝さないよう配慮する必要がある。電離箱のレスポンスはステム内部の構造や照射範囲によって異なる。このレスポンスの変化を小さくするためフルガードの電離箱や電離箱の中心電極を囲む絶縁体に amber を使用することがある⁷⁾。

Farmer 形電離箱や平行平板形電離箱の初回の測定値の低下率は負の印加電圧で $-0.2 \sim -0.5\%$ 程度大きくなった。小型電離箱の負の印加電圧における初回の測定値の低下率の差は強調され $-0.3 \sim -1.7\%$ となった。Farmer 形電離箱と小型電離箱のレスポンスの安定時間に差が生じたのは電離容積の影響が考えられる。小型電離箱の空洞容積は Farmer 形電離箱に比べ小さくなっているが電離箱壁厚、絶縁体の体積やケーブルの導体などの比率は Farmer 形電離箱と比べて小型電離箱のほうが大きい。そのためステムやケーブル、漏れ電流などにかかわる影響が大きくなる。電離箱の初回の測定値の低下現象は電離箱の種類やエネルギー、使用頻度に関係なくみられる現象である。また微弱な電離電流を計測する小型電離箱は電離箱やケーブル、電位計を一体のシステムとして考える必要がある。今回使用した電位計(RAMTEC 1000D)に接続するケーブルにおいても静電容量が発生し、電離箱のレスポンスの安定時間に影響を与える可能性がある。今回使用した電位計の測定系のコンデンサはリセット後、数十秒で放電する。電位計の誘電吸収も短時間で収まるが測定系の電氣的な影響に注意が必要である。またケーブルを巻いた状態で長期間保管しているとケーブルを伸ばした際に摩擦やケーブルテンションの変化によって安定時間に影響を与える可能性もある(摩擦電気効果)。ケーブルへの照射の影響は Farmer 形電離箱ではあまり問題にならないが小型電離箱では照射野内に含まれるケーブルの長さによって測定値に変化が生じる。測定精度を高くするためには照射野内に含まれるケーブルの長さを最短にする必要がある。したがって小型電離箱のレスポンスは照射野の大きさに影響するのがわかる。

3-2 印加電圧の極性の影響

平行平板形電離箱(PPC40)は正の印加電圧では速やかに安定値に達したが、負の印加電圧では安定値に達する速さが穏やかであった(Fig. 3, 4)。これは極性効果の影響と考えられる。通常、集電極が小さい Farmer 形電離箱ではあまり問題ではないが安定値に至るまでは比較的に集電極が大きな平行平板形と同様に注意を要する。小型電離箱の初回の測定値低下率は極性依存を

示した。また正負の印加電圧の極性で測定値のレスポンスの飽和傾向に顕著な差がみられた(Fig. 7)。小型電離箱は極性効果の補正において注意が必要である。極性効果は絶縁体の材質などに対する絶縁体中での放射線によって誘導される電流の依存性によることが知られている¹⁰⁾。また集電極の大きさばかりでなく、形状や材質によっても効果が異なる。極性効果の補正を行う際、測定値の変化する傾向が正負の極性で異なる場合は測定タイミングを合致させなければならない。したがってイオン収集効率や極性効果に対する補正係数の算出や加速器のモニタ線量計の校正においては電離箱のレスポンスに留意した条件で測定することが必要である。

3-3 線量率の影響

X 線ビームに対する小型電離箱のレスポンスにおいて線量率依存性がみられ、特に 50 MU/分における測定値は安定した測定値よりも高い値を示した(Fig. 10)。安定した測定値に至るまでの電離箱のレスポンスは線量率によって異なる。また照射時間に依存することも考えられる。今回の測定では 100 MU/回と一定としたが、線量率を変化させることによって照射時間も変化する。50 MU/分、100 MU/分、250 MU/分の線量率での照射時間はそれぞれ 2 分、1 分、24 秒である。電離箱内の絶縁体で発生する過渡漏れ電流は照射時間に依存する、と仮定すると長時間の照射は短時間の照射に比べ多いと考えられる。Farmer 形電離箱と比べ低感度の小型電離箱を用いた場合、線量計システムの漏れ電流によって照射中の収集電荷を低下させる。その程度は測定に要した時間によって影響を受ける。

3-4 電離箱の使用頻度の影響

今回調べた電離箱において使用間隔 1 カ月の電離箱は使用間隔 1 週間のものと比較し安定値に到達する時間を多く要した。電離箱の使用頻度が毎月または頻繁に使用されない場合の線量測定への影響は重要である。各電離箱における初回の測定値と安定した測定値との差は無視できない相違であると考えられる。特に小型電離箱の測定値が Farmer 形や平行平板形電離箱と異なる挙動を示す可能性がある。本研究において測定の分析範囲が限定的であったため、電離箱の使用頻度の差が安定時間に及ぼす影響の原因を断定するには限界があった。今後は電離箱に接続されたケーブルやコネクタ、電離箱の保管環境も考慮にいった調査を検討する。電離箱は空気コンデンサを検出器とする電離電荷測定系である。検出部に電荷捕集のために電圧を印加し、直列するコンデンサの端子電圧を測定することに

よって電荷の生成率や積分値を測定する。高入力インピーダンスの測定系であるため、さまざま影響を受けやすいことに配慮して使用する必要がある。同軸ケーブルは信号線がアース線で遮蔽され、雑音を拾い難い構造になっている。信号線とアース線を隔てる絶縁体に圧電性があるので、ケーブルの曲げ伸ばしによって絶縁体の圧電に起因する雑音が測定に影響する。積分電荷量の測定の場合、ケーブルの敷設から測定開始までは十分な時間が必要である。特に長期間使用している電位計やケーブルの劣化による影響によって電離箱の安定に時間を要する。さらに使用頻度の少ない電離箱での測定値への影響は大きい。また初めて使用する電離箱も同じように注意が必要である。

3-5 事前照射の影響

電離箱に安定に要した累積線量を事前に1回照射することで電離箱の測定値は速やかに安定した。このことからX線ビームに対する電離箱のレスポンスの影響を解消するために事前照射をすることが有効であることがわかる。Farmer形電離箱や平行平板形電離箱における事前照射の効果は9~10 Gyで速やかに安定した。今回の研究で使用した小型電離箱の安定に要した事前照射の線量は10~24 Gyと異なった。電離容積0.1 cm³程度の小型電離箱(PTW23323, CC13)は10 Gy、電離容積

0.04~0.015 cm³程度の小型電離箱(PTW31015: 15 Gy, 31016: 15 Gy, 31006: 20 GyとCC01: 24 Gy, CC04: 22 Gy)は15~24 Gyの事前照射が必要である。線量測定プロトコルは2~5 Gyの事前照射を行うことを推奨している^{2,3)}が、さらに大きな線量が事前照射には必要である。

4. 結 語

電離箱のレスポンスは連続的な測定で変化することが明確となった。測定開始直後の電離箱の測定値は低いレスポンスを示し、その低下率は小型電離箱において使用間隔1週間では最大-2.48%、使用間隔1カ月では最大-2.60%を示した。小型電離箱のレスポンスの変化はX線のエネルギーの違いにかかわらず、電離箱の構造や材質の違いによって生じた。使用間隔1カ月のような使用頻度の少ない電離箱のレスポンスの影響は重要である。電離箱への事前照射は明らかに線量測定における誤差を取り除くために有効である。校正定数や測定における補正係数の決定、高精度な測定を行う場合は電離箱のレスポンスの変化を把握し線量測定をすることが必要である。

本論文の要旨は、第38回日本放射線技術学会秋季学術大会において発表した。

参考文献

- 1) Cacak RK, Hendee WR. Chapter 3. Ionization chamber dosimetry. Techniques of radiation dosimetry. Mahesh K, Vij DR (eds), Wiley Eastern Limited, India, 1985: 104-105.
- 2) 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(9): 1847-1870.
- 3) Andreo P, Burns DT, Hohlfield K, et al. Absorbed dose determination in external beam Radiotherapy. IAEA Technical Report Series 2000; No. 398.
- 4) Ramsey CR, Spencer KM, Oliver AL. Ionization chamber, electrometer, linear accelerator, field size, and energy dependence of the polarity effect in electron dosimetry. Med Phys 1999; 26(2): 214-219.
- 5) DeBlois F, Zankowski C, Podgorsak EB. Saturation current and collection efficiency for ionization chambers in pulsed beams. Med Phys 2000; 27(5): 1146-1155.
- 6) Derikum K. On the polarizing voltage of ionization chambers Recent Developments in Accurate Radiation Dosimetry, AAPM Symp. Proc. No. 13. Medical Physics Publishing, Madison, 2002; 277.
- 7) McCaffrey JP, Downton B, Shen H, et al. Pre-irradiation effects on ionization chambers used in radiation therapy. Phys Med Biol 2005; 50(13): N121-N133.
- 8) Livsavage WE. The effects of x rays on the insulating properties of polytetrafluoroethylene. Br J Radiol 1952; 25(296): 434-436.
- 9) Fowler JF, Farmer FT. Conductivity induced in insulating materials by X-rays. Nature 1954; 173(4398): 317-318.
- 10) Johns HE, Aspin N, Baker RG. Currents induced in the dielectrics of ionization chambers through the action of highenergy radiation. Radiat Res 1958; 9(6): 573-588.

図表の説明

- Fig. 1 マイクロトロン HTM2210 における 4 MV-X 線の一定線量に対する週 1 回ならびに月 1 回使用の PTW30001 と NE2571(Farmer 形線量計)のレスポンス
電離箱に対する印加電圧は -300 V とした. 二つの線量計は RAMTEC1000D に接続した. 二つの線量計は照射野サイズ 10×10 cm の深さ 10 cm に配置した. 線源検出器間の距離は 100 cm とした.
- Fig. 2 4 MV-X 線の一定線量に対する週 1 回ならびに月 1 回使用の PTW30001 のレスポンス
測定値は負の極性の印加電圧における個々の電離箱による最終測定値に対して正規化した. PTW30001 に対する印加電圧は正負の 300 V とした.
- Fig. 3 4 MV-X 線の一定線量に対する週 1 回ならびに月 1 回使用の PPC40(平行平板形)のレスポンス
線量計に対する印加電圧は -300 V とした.
- Fig. 4 4 MV-X 線の一定線量に対する週 1 回ならびに月 1 回使用の PPC40 のレスポンス
測定値は負の極性の印加電圧における個々の電離箱による最終測定値に対して正規化した. PPC40 に対する印加電圧は正負の 300 V とした.
- Fig. 5 4 MV-X 線の一定線量に対する週 1 回ならびに月 1 回使用の PTW23323
PTW31006, PTW31016, PTW31015(小型円筒型)のレスポンス. 線量計に対する印加電圧は -300 V とした.
- Fig. 6 4 MV-X 線の一定線量に対する週 1 回ならびに月 1 回使用の CC13, CC01, CC04(小型円筒型)のレスポンス
線量計に対する印加電圧は -300 V とした.
- Fig. 7 4 MV-X 線の一定線量に対する週 1 回ならびに月 1 回使用の(a)CC13, (b)CC01, (c)CC04(小型円筒型)のレスポンス
線量計に対する印加電圧は正負の 300 V とした.
- Fig. 8 4 MV-X 線で PTW31006, CC01, PPC40, PTW30001 に累積線量を事前照射したときのレスポンス
PTW31006, CC01, PPC40, PTW30001 の累積線量はそれぞれ 20 Gy, 20 Gy, 10 Gy, 9 Gy とした.
- Fig. 9 4 MV-X 線で PTW31006 と CC01 に事前照射したときのレスポンス
PTW31006, CC01 の線量はそれぞれ 25 Gy, 20 Gy, 10 Gy とした.
- Fig. 10 種々の線量率の 6 MV-X 線に対する(a)PTW31006 と(b)CC01 のレスポンス
電離箱に対する印加電圧は -300 V とした. 二つの線量計は RAMTEC1000D に接続し印加電圧は -300 V とした. 二つの線量計は照射野サイズ 10×10 cm の深さ 10 cm に配置した. 線源検出器間距離は 100 cm とした.
- Fig. 11 4 MV-X 線での EDD-2 シリコンダイオード検出器のレスポンス
- Table 1 この研究で使用した Farmer 形, 小型円筒型電離箱の仕様
- Table 2 この研究で使用した平行平板形電離箱の仕様
- Table 3 週 1 回ならびに月 1 回使用における線量計の安定した測定値に対する初回の測定値の低下率の百分率
実験配置は Fig. 2 と同様であった. 4 MV, 6 MV の X 線線量率は 100 MU/min, 250 MU/min である.
- Table 4 週 1 回使用における電離箱の安定した測定値に対する初回の測定値の低下率の百分率
実験配置は Fig. 2 と同様であった. 4 MV, 6 MV, 10 MV, 14 MV のそれぞれの X 線線量率は 100 MU/min, 250 MU/min, 300 MU/min, 300 MU/min である.
- Table 5 月 1 回使用における電離箱の安定した測定値に対する初回の測定値の低下率の百分率
実験配置は Fig. 2 と同様であった. 4 MV, 6 MV, 10 MV, 14 MV のそれぞれの X 線線量率は 100 MU/min, 250 MU/min, 300 MU/min, 300 MU/min である.

問合せ先

〒 573-0013 枚方市星丘 4-8-1

星ヶ丘厚生年金病院放射線部 下野哲範