

4.7 高エネルギー電子線の水吸収線量計測ワークシート

測定者：_____ 測定日：_____

1. 放射線治療装置および水吸収線量計測の基準条件（ユーザビーム）

装置名：_____ 公称エネルギー：_____ MeV
 公称線量率：_____ MU min^{-1} 線質 $Q(R_{50})$ ：_____ g cm^{-2}
 基準ファントム：水 セットアップ法：SSD 法
 基準照射野 A_0 ：_____ $\text{cm} \times$ _____ cm SSD：_____ cm
 校正深 $d_c = 0.6 R_{50} - 0.1$ ：_____ g cm^{-2}

2. 電離箱と電位計の校正（校正線質 Q_0 または Q_{cross} ）

電離箱モデル：_____ シリアル No.：_____
 電位計モデル：_____ シリアル No.：_____
 電離箱壁/窓材質：_____ 厚さ：_____ g cm^{-2}
 防浸鞘/キャップ材質：_____ 厚さ：_____ g cm^{-2}
 電離箱の基準点：☐ $0.5 r_{\text{cyl}}$ （ファーマ形） ☐ 電離空洞内前面（平行平板形）
 校正を受けた医療用線量標準センター：_____
 水吸収線量校正定数 N_{D,w,Q_0} = _____ ☐ Gy nC^{-1} ☐ Gy rdg^{-1} （rdg は電位計の表示単位）
 校正日：_____ 校正線質：☐ Q_0 (^{60}Co) ☐ Q_{cross} 校正深：_____ g cm^{-2}
 相互校正の場合の基準線質 $Q_{\text{cross}}(R_{50})$ ：_____ g cm^{-2}
 基準気圧 P_0 ：_____ kPa 基準温度 T_0 ：_____ $^{\circ}\text{C}$ 相对湿度：_____ %
 印加電圧 V_1 ：_____ V 校正時極性：☐+ ☐- 極性効果補正：☐有 ☐無
 使用時極性：☐+ ☐-
☐ 電離箱と電位計のセットで校正した場合：電位計校正定数 k_{elec} ：1.0 測定レンジ：_____
☐ 電離箱と電位計を個別に校正した場合： k_{elec} ：_____ nC rdg^{-1} 校正日：_____

3. ファントム

水ファントム 窓物質：_____ 厚さ：_____ g cm^{-2}
 固体ファントム 材質：_____ 密度：_____ g cm^{-3}
 深さスケール係数 c_{pl} ：_____（付録 11 表 A 11.1 参照）
 スケール校正深 $d_{c,\text{pl}} = d_{c,w}/c_{\text{pl}} =$ _____ / _____ = _____ g cm^{-2}
 フルエンススケール係数 $h_{\text{pl}} =$ _____（付録 11 表 A 11.1 参照）

4. 線量計表示値および補正係数（以下はユーザビーム）

印加電圧 V_1 ：_____ V 測定レンジ：_____
 モニタ設定値 N ：_____ MU
 V_1 におけるリファレンス線量計表示値 $\bar{M}_{\text{raw}}$ ：_____ ☐ nC ☐ rdg

(i) 温度気圧補正係数 k_{TP}

4.7.2 例題2 ファーマ形電離箱線量計による校正深水吸収線量の計測

電子線の校正深水吸収線量計測に用いられる電離箱は平行平板形の使用が推奨されるが、高エネルギー電子線 $R_{50} \geq 4 \text{ g cm}^{-2}$ ($\bar{E}_0 \geq 10 \text{ MeV}$) においては例外的にファーマ形電離箱の使用も認めている。

本例題で例題1と重複する部分の解説は省き、計算過程のみ示すこととする。

1. 放射線治療装置および水吸収線量計測の基準条件（ユーザビーム）

装置名： <u>Varian Clinac 21EX</u>	公称エネルギー： <u>15</u> MeV
公称線量率： <u>400</u> MU min ⁻¹	線質 Q (R_{50})： <u>6.48</u> g cm ⁻²
校正ファントム： <u>水</u>	セットアップ法： <u>SSD 法</u>
基準照射野 A_0 ： <u>10</u> cm × <u>10</u> cm	SSD： <u>100</u> cm
校正深 $d_c = 0.6 R_{50} - 0.1$ ： <u>3.79</u> g cm ⁻²	

線質 Q の評価において、 $I_{50} = 6.36 \text{ g cm}^{-2}$ であり、式 4.2 を用いて線質指標である線量半価深 R_{50} を求める。なお媒質が水のため面積質量の値 (g cm⁻²) はそのまま水深 (cm) として読み替えることができる。

$$R_{50} = 1.029 I_{50} - 0.06 = 1.029 \times 6.36 - 0.06 = 6.48 \text{ g cm}^{-2}$$

線量半価深 R_{50} が 6.48 g cm^{-2} であることから、校正深 d_c を次式で決定する。

$$d_c = 0.6 R_{50} - 0.1 = 0.6 \times 6.48 - 0.1 = 3.79 \text{ g cm}^{-2}$$

深部量百分率曲線から読み取った線量最大深 $d_{\max}$ と校正深の深部量百分率 PDD_c は、 $d_{\max} = 3.38 \text{ cm}$ 、 $PDD_c = 99.4\%$ であった。

2. 電離箱と電位計の校正（校正線質 Q_0 または Q_{cross} ）

電離箱モデル： <u>Exradin A12</u>	シリアル no.： <u>XA022762</u>
電位計モデル： <u>MAX-4000</u>	シリアル no.： <u>E022612</u>
電離箱壁/窓材質： <u>C-522</u>	厚さ： <u>0.088</u> g cm ⁻²
防浸鞘/キャップ材質： <u>なし</u>	厚さ： <u>なし</u> g cm ⁻²
電離箱の基準点： ☒ $0.5 r_{\text{cyl}}$ (ファーマ形) ☐ 電離空洞内前面 (平行平板形)	
校正を受けた医療用線量標準センター： <u>公益財団法人 医用原子力技術研究振興財団</u>	
水吸収線量校正定数 N_{D,w,Q_0} = <u>4.749×10^{-2}</u> ☒ Gy nC ⁻¹ ☐ Gy rdg ⁻¹ (rdg は電位計の指示単位)	
校正日： <u>2012 年 10 月 1 日</u>	校正線質： ☒ Q_0 (^{60}Co) ☐ Q_{cross} 校正深： _____ g cm ⁻²
相互校正の場合の基準線質 Q_{cross} (R_{50})： _____ g cm ⁻²	
基準気圧 P_0 ： <u>101.33</u> kPa	基準温度 T_0 ： <u>22.0</u> °C 相対湿度： <u>50.7</u> %

5.8 陽子線の水吸収線量計測ワークシート

測定者：_____ 測定日：_____

1. 陽子線治療装置および水吸収線量計測の基準条件

装置・照射室名：_____

加速エネルギー：_____ MeV

公称線量率またはフルエンス率：_____ MU/min

実用飛程 R_p : _____ g/cm²

測定対象ビーム：☐単色 ☐SOBP（幅 _____ g cm⁻²）

基準ファントム：☐水 ☐（ _____ ）

基準 SSD : _____ cm 基準照射野：_____ cm × _____ cm

基準深 z_{ref} : _____ g cm⁻² 線質 Q (R_{res}) : _____ g cm⁻²

2. 電離箱と電位計の校正（校正線質 Q_0 ）

電離箱モデル：_____ シリアル no. : _____

電離箱基準点：☐幾何学的中心（ファーマ形） ☐電離空洞内前面（平行平板形）

電位計モデル：_____ シリアル no. : _____

電離箱壁/窓材質：_____ 厚さ：_____ g cm⁻²

防浸鞘/キャップ材質：_____ 厚さ：_____ g cm⁻²

水ファントム入射窓材質：_____ 厚さ：_____ g cm⁻²

校正を受けた医療用線量標準センター：_____

水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ = _____ ☐ Gy nC⁻¹ ☐ Gy rdg⁻¹ (rdg は電位計の表示単位)

校正日：_____ 校正線質 Q_0 : ⁶⁰Co 校正深：_____ g cm⁻²

基準温度気圧 P_0 : 101.33 kPa T_0 : 22.0 °C 相対湿度：_____ %

印加電圧 V_1 : _____ V 極性：☐+ ☐- 極性効果補正：☐有 ☐無

☐ 電離箱と電位計のセットで校正した場合：電位計校正定数 k_{elec} : 1.0 測定レンジ：_____

☐ 電離箱と電位計を個別に校正した場合： k_{elec} : _____ nC rdg⁻¹ 校正日：_____

3. 線量計表示値および補正係数（以下はユーザビーム）

印加電圧 V_1 : _____ V 測定レンジ：_____

モニタ設定値 N : _____ MU

V_1 におけるリファレンス線量計表示値 $\bar{M}_{raw}$: _____ ☐ nC ☐ rdg

(i) 温度気圧補正係数 k_{TP}

気圧 P : _____ kPa 温度 T : _____ °C 相対湿度：_____ %

$$k_{TP} = \frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \frac{P_0}{P} = \frac{273.2 + T}{273.2 + 22.0} \frac{101.33}{P} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(ii) 極性効果補正係数 k_{pol}

☐ 校正時に極性効果補正が行われている場合

6.8 炭素線の水吸収線量計測ワークシート

測定者：_____ 測定日：_____

1. 炭素線治療装置および水吸収線量計測の基準条件

装置・照射室名：_____

加速エネルギー：_____ MeV/u

公称線量率またはフルエンス率：_____ MU/min

測定対象ビーム：☐単色 ☐SOBP（幅 _____ g cm⁻²）

基準ファントム：☐水 ☐（ _____ ）

基準 SSD : _____ cm 基準照射野：_____ cm × _____ cm

基準深 z_{ref} : _____ g cm⁻²

2. 電離箱と電位計の校正（校正線質 Q_0 ）

電離箱モデル：_____ シリアル no.：_____

電離箱の基準点：☐0.75 r_{cyl} （円筒形） ☐電離空洞内前面（平行平板形）

電位計モデル：_____ シリアル no.：_____

電離箱壁/窓材質：_____ 厚さ：_____ g cm⁻²

防浸鞘/キャップ材質：_____ 厚さ：_____ g cm⁻²

水ファントム入射窓材質：_____ 厚さ：_____ g cm⁻²

校正を受けた医療用線量標準センター：_____

水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ = _____ ☐ Gy nC⁻¹ ☐ Gy rdg⁻¹ (rdg は電位計の表示単位)

校正日：_____ 校正線質 Q_0 ：⁶⁰Co 校正深：_____ g cm⁻²

基準温度気圧 P_0 ：101.33 kPa T_0 ：22.0 °C 相対湿度：_____ %

印加電圧 V_1 ：_____ V 極性：☐+ ☐- 極性効果補正：☐有 ☐無

☐ 電離箱と電位計のセットで校正した場合：電位計校正定数 k_{elec} ：1.0 測定レンジ：_____

☐ 電離箱と電位計を個別に校正した場合： k_{elec} ：_____ nC rdg⁻¹ 校正日：_____

3. 線量計表示値および補正係数（以下はユーザビーム）

印加電圧 V_1 ：_____ V 測定レンジ：_____

モニタ設定値 N ：_____ MU

V_1 におけるリファレンス線量計表示値 $\bar{M}_{\text{raw}}$ ：_____ ☐ nC ☐ rdg

(i) 温度気圧補正係数 k_{TP}

気圧 P ：_____ kPa 温度 T ：_____ °C 相対湿度：_____ %

$$k_{\text{TP}} = \frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \frac{P_0}{P} = \frac{273.2 + T}{273.2 + 22.0} \frac{101.33}{P} = \underline{\hspace{2cm}}$$

(ii) 極性効果補正係数 k_{pol}

☐ 校正時に極性効果補正が行われている場合

V_1 (+) での表示値： $\bar{M}_{\text{raw}}^+$ = _____ V_1 (-) での表示値： $\bar{M}_{\text{raw}}^-$ = _____

2. 電離箱と電位計の校正 (校正線質 Q_0)

電離箱モデル: PTW 30013 Farmer シリアル no.: 1452
 電位計モデル: RAMTEC 1000Plus シリアル no.: 380
 電離箱壁/窓材質: PMMA (アクリル) 厚さ: 0.057 g cm^{-2}
 防浸鞘/キャップ材質: なし 厚さ: なし g cm^{-2}
 水ファントム入射窓材質: なし 厚さ: なし g cm^{-2}
 校正を受けた医療用線量標準センター: _____
 水吸収線量校正定数 $N_{D,w} = 5.336 \times 10^{-2}$ ☒ Gy nC⁻¹ ☐ Gy rdg⁻¹ (rdg は電位計の指示単位)
 校正日: 2011/12/15 校正線質 Q_0 : ⁶⁰Co 校正深: 5 g cm^{-2}
 基準気圧 P_0 : 101.33 kPa 基準温度 T_0 : 22.0 °C 相対湿度: _____ %
 印加電圧 V_1 : -300 V 極性: ☐+ ☒- 極性効果補正: ☒有 ☐無
☒ 電離箱と電位計のセットで校正した場合: 電位計校正定数 $k_{elec} = 1.0$ 測定レンジ: Middle
☐ 電離箱と電位計を個別に校正した場合: k_{elec} : _____ nC rdg⁻¹ 校正日: _____

使用しているリファレンス線量計は付録3に示されているもので、防浸性であるので防浸鞘は必要としない。防浸性でない場合、防浸鞘として1 mm PMMA (アクリル) を使用する。この場合、PMMA の密度は 1.19 g cm^{-3} であるので、防浸鞘の厚さは 0.119 g cm^{-2} である。

医療用線量標準センターで校正された水吸収線量校正定数 N_{D,w,Q_0} を使用する。

ユーザがリファレンス電離箱と電位計をセットで医療用線量標準センターに校正を依頼した場合、電位計校正定数 k_{elec} は1.0である。リファレンス電離箱のみの校正を行い、電位計単独で別機関に校正を依頼した場合は校正で与えられた k_{elec} を使用する。

3. 線量計表示値および補正係数 (以下はユーザービーム)

印加電圧 V_1 : -300 V 測定レンジ: Middle
 モニタ設定値 N : 100 MU
 V_1 におけるリファレンス線量計表示値 $\bar{M}_{raw}$: 19.90 ☒ nC ☐ rdg

(i) 温度気圧補正係数 k_{TP}

気圧 P : 101.00 kPa 温度 T : 23.0 °C 相対湿度: _____ %

$$k_{TP} = \frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \frac{P_0}{P} = \frac{273.2 + T}{273.2 + 22.0} \frac{101.33}{P} = \underline{1.007}$$

(ii) 極性効果補正係数 k_{pol}

☒ 校正時に極性効果補正が行われている場合

V_1 (+) での表示値: $\bar{M}_{raw}^+ = \underline{-19.86}$ V_1 (-) での表示値: $\bar{M}_{raw}^- = \underline{19.90}$

通常設定する極性における V_1 での表示値: $\bar{M}_{raw} = \underline{19.90}$

$$k_{pol} = \frac{|\bar{M}_{raw}^+| + |\bar{M}_{raw}^-|}{2|\bar{M}_{raw}|} = \underline{0.999}$$

☐ 校正時に極性効果が行われていない場合

$$k_{pol} = \underline{\hspace{2cm}}$$

付録 3 線質変換係数 k_{Q,Q_0}

Markus については、表 4.3 の k_Q を $R_{50}=7.5 \text{ g cm}^{-2}$ で規格化して $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ とした。その他の平行平板形電離箱の線質変換係数 $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ は次式で求めた。

$$k_{Q,Q_{\text{int}}} = \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{w,air}} P_{\text{cav}} \right]_Q}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{w,air}} P_{\text{cav}} \right]_{Q_{\text{int}}}} \quad (\text{A } 3.17)$$

ここで、 $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ は式 A 3.14 で算出し、 P_{cav} は保護電極の幅が十分ではない Capintec PS-033 のみ次式で補正した。

$$P_{\text{cav}} = 1 - 0.084 \exp(-0.32 R_{50}) \quad (R_{50} \geq 2 \text{ g cm}^{-2}) \quad (\text{A3.18})$$

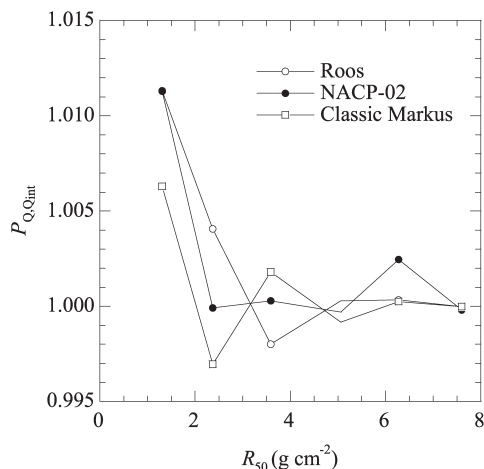


図 A 3.7 線質指標 R_{50} による平行平板形電離箱の全擾乱補正係数 $P_{Q,Q_{\text{int}}}$ の変化

その他の P_{wall} および P_{cav} について、電子線の校正深の P_{wall} はエネルギーの変化で最大 1.0 % 程度変化する^{38,40,42,43)} が、6 MeV 以上の電子線エネルギーでは P_{cav} がこれを相殺する方向に変化する^{39,40)}。このため、 Q_{int} を基準とする $P_{Q,Q_{\text{int}}} (= (P_{\text{wall}} P_{\text{cav}})_{Q,Q_{\text{int}}})$ は 4 MeV の電子線を除いて $1.0 \pm 0.4 \%$ に含まれる (図 A 3.7)。これより、標準計測法 12 では Capintec PS-033 を除いて $P_{Q,Q_{\text{int}}}=1.0$ とし、それぞれの不確かさを $(P_{\text{wall}})_{Q,Q_{\text{int}}}$ で 0.3 %, $(P_{\text{cav}})_{Q,Q_{\text{int}}}$ で 0.3 % とした。

4.4.2 円筒形電離箱

円筒形電離箱では $(P_{\text{wall}})_{Q,Q_{\text{int}}}=1.0$, $(P_{\text{dis}})_{Q,Q_{\text{int}}}=1.0$, $(P_{\text{cel}})_{Q,Q_{\text{int}}}=1.0$ とみなすことができる。(4.3 節参照) このことから、 $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ は式 A 3.17 で算出した。なお、 $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ は式 A 3.14, P_{cav} は式 A 3.16 を用いて算出した。

4.5 不確かさの評価

表 A 3.6 に電子線に関する各パラメータの不確かさをまとめた。不確かさの計算に関する詳細は本付録 3 の 7 節に示す。

標準計測法 12 では k_Q および $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ の不確かさを低減させるため、エネルギー範囲を 4 ~ 25 MeV ($1 \text{ g cm}^{-2} \leq R_{50} \leq 10.5 \text{ g cm}^{-2}$) に限定した。これは、実験およびモンテカルロ計算によるほとんどのデータが、実機が存在するこのエネルギー範囲で評価されているためである。文献によると、4 MeV で $R_{50}=1.4 \pm 0.1 \text{ g cm}^{-2}$, 22 MeV で

表 A 3.6 電子線の k_Q および $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ の標準不確かさ (%)

パラメータ	円筒形		平行平板形	
	k_Q	$k_{Q,Q_{\text{int}}}$	k_Q	$k_{Q,Q_{\text{int}}}$
$(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$	0.5	0.2	0.5	0.2
線質に対する $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ に起因	0.2	0.3	0.2	0.3
W_{air}/e	0.5	0.3	0.5	0.3
P_{wall}	0.5	0.4	0.8	0.3
P_{cav}	0.3	0.3	0.5	0.3
P_{dis}	0.3	0.2	0.1	0.1
P_{cel}	0.3	0.1	-	-
k_Q	1.0	0.7	1.2	0.6

※ k_Q は Q_0 (^{60}Co γ 線), $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ は Q_{int} ($R_{50}=7.5 \text{ g cm}^{-2}$) に対する相対標準不確かさを示す。

付録 8 熱ルミネセンス線量計および蛍光ガラス線量計

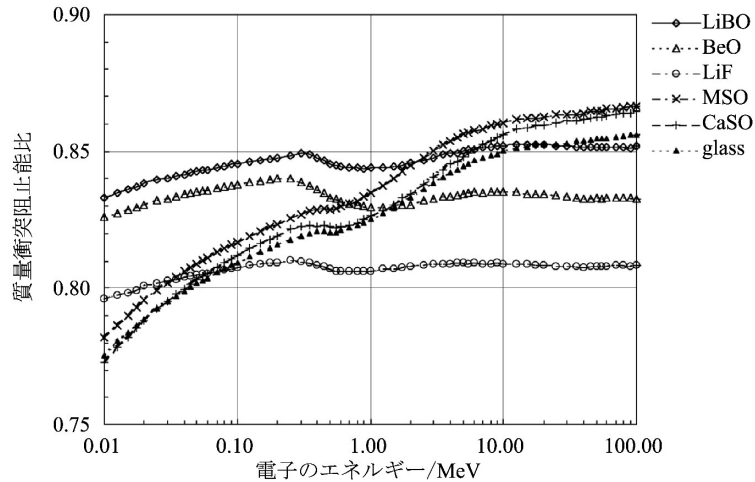


図 A 8.4 TLD および蛍光ガラス線量計の水に対する質量衝突阻止能比

表 A 8.2 図 A 8.3 および図 A 8.4 の計算に用いた素子のデータ

素 子	密度 g cm ⁻³	構成組成の重量比
Li ₂ B ₄ O ₇ :Cu (LiBO)	2.2	Li:0.08204, B:0.25558, O:0.66199, Ca:0.00014, Cl:0.00024, H:0.00001
BeO:Na	3.02	Be:0.35326, O:0.63634, Na:0.0058, S:0.00461
LiF	2.64	Li:0.267585, F:0.732415
Mg ₂ SiO ₄ :Tb (MSO)	2.6	Mg:0.3452, O:0.4544, Si:0.1994, Tb:0.0010
CaSO ₄ :Tm (CaSO)	2.96	Ca:0.2943, S:0.23547, O:0.46997, Tm:0.00026
蛍光ガラス (glass)	2.61	P:0.3155, O:0.5116, Al:0.0612, Na:0.11, Ag:0.0017

各データは LiF を除きメーカーより得た。

い。

Mg₂SiO₄:Tb の場合、この実験では増感と減感が認められ、標準偏差も大きい。Mg₂SiO₄:Tb では ⁶⁰Coγ 線の空気カーマ 2.64 Gy は、超直線性を示す領域であり、製造業者が定めるアニール条件 500℃、20 分が不適当なためと考えられる。中島は、500℃、1 時間を推奨している⁹⁾。

MgB₄O₇ は空気カーマ 2.64 Gy 20 回の反復使用中に出力の減少を示した。この原因は、放射線損傷、アニールによる劣化、またはそれ以外によるのかわからでない。

CaSO₄:Tm は、400℃、5 分の条件は増感アニールなので、超直線性領域である空気カーマ 2.64 Gy での繰り返し使用で増感を示す²⁾。

その他の TLD の取り扱いについては、他の成書^{3,10)}、または物理部会勉強会資料 No. 18⁷⁾ を参

照されたい。

2. 蛍光ガラス線量計, RPLD

銀活性化磷酸塩ガラスは放射線を照射されると電子および正孔が形成され、電子はガラス構造中の Ag⁺ に捕獲され Ag⁰ となる。一方正孔は一旦 PO₄ に捕獲されるが、時間の経過とともに Ag⁺ へ、さらに Ag⁺⁺ に移行する。この Ag⁰ および Ag⁺⁺ が共にガラス中で radiophotoluminescence (RPL) 中心となる^{11,12)}。この RPL 量は素子の吸収線量に比例することから線量計 (radiophotoluminescent glass dosimeter, RPLD) として利用されている。

近年開発された RPLD 素子は、RPL 中心の安定性が高くほとんどフェーディングがなく、線量率依存性は実用的にはほとんどないことが知られ

付録 8 熱ルミネセンス線量計および蛍光ガラス線量計

表 A 8.3 4 MV X 線 45 mGy を照射した 24 素子の読み値と
1 素子 10 回の読み値の平均と標準偏差の比較¹⁹⁾

	平均値	標準偏差	読み値の範囲
24 素子	43.57	0.358 (0.82%)	42.78 – 44.25 (0.982 – 1.016)
1 素子 10 回	43.32	0.128 (0.29%)	43.32 – 43.73 (0.995 – 1.004)

ている¹³⁾。特に最近、ガラスの均一性がよく、測定値の変動が非常に小さい小型円柱型の RPLD が利用可能となり、読み取り精度が飛躍的に向上した¹⁴⁾。本節ではその特性について解説する。

2.1 素子の形状および化学組成

RPLD 素子の化学組成は重量百分率で、P：31.55%，O：51.16%，Al：6.12%，Na：11.0% および Ag：0.17% である。また、指数 2.94 で計算した光電効果領域に対する実効原子番号は 10.9 であり、放射線治療の線量測定によく使用される Si 半導体検出器より小さく、ナロービームの線量評価にも用いられている^{15,16)}。

主に使用されている RPLD 素子の形状は円柱状で、1.5 mm ϕ ×8.5 mm (GD-301) と ID 番号付の 1.5 mm ϕ ×12 mm (GD-302M) の 2 種類がある。このほか、板状や、球形タイプの開発も行われている^{17,18)}。

2.2 RPL 量の測定

RPL 量の測定は、最大 20 素子を収納できる専用読み取りマガジンに収めて行う。RPL 量測定の実効体積は 1 mm 直径の窒素（または半導体励起式固体）レーザビームとこのマガジンの 6 mm 幅または 0.6 mm 直径（レスポンスは 6 mm 幅の約 2.5%）の検出窓により定まる。

RPL 量の読み取りはレーザビームをパルス照射後、汚れによる蛍光が減衰した 2-7 μ s から RPL がほとんどなくなる 40-45 μ s までの積分値を求め、汚れから生じる蛍光およびガラス固有のプレドーズを除いている。なお、レーザ励起による RPL 量は 50 ms 間隔で 10 から 50 回の指定回数で繰り返し測定した平均値および標準偏差として

取得できる。

この RPLD 素子の RPL 量は室温で照射 24 時間後に約 15% ビルドアップする。このビルドアップによる誤差を除く目的で、RPL 量測定前に 70 $^{\circ}$ C、30 分の熱処理を行う。この操作により安定化した RPL 量が随時測定できるようになる。

2.3 出力の変動および直線性

表 A 8.3 は、津田¹⁹⁾の実験結果で 4 MV X 線、照射野 10 cm×10 cm、5 cm 深部で 45 mGy を照射した 24 素子の RPL 読み値、およびその中の 1 素子の RPL を 10 回繰り返して求めたそれぞれの平均値と標準偏差である。24 素子の読み値の平均に対する標準偏差の百分率（変動係数）は 0.82% であり、1 素子を 10 回測定したときの変動係数は 0.29% である。この両者の分散には 1% の危険率で有意差があるので、個別校正をした方が精度は向上することが明らかである。

図 A 8.5 は RPLD 10 素子に ¹³⁷Cs γ 線の各線量を照射して求めた変動である。変動係数は、0.1 mGy で 3%，1 mGy 以上では 1% 以下であった。直線性もこの誤差範囲内で確保されている。

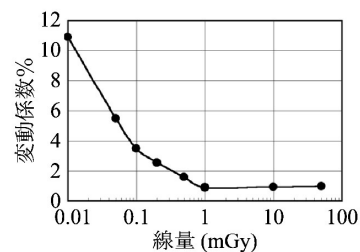


図 A 8.5 蛍光ガラス線量計 (RPLD) 10 素子に照射した線量による表示値の変動係数の変化

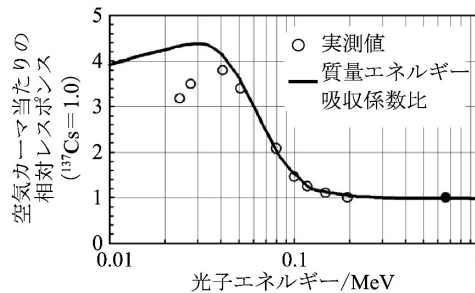


図 A 8.6 蛍光ガラス線量計 (RPLD) の光子エネルギーによる空気カーマ当たりの相対レスポンスの変化

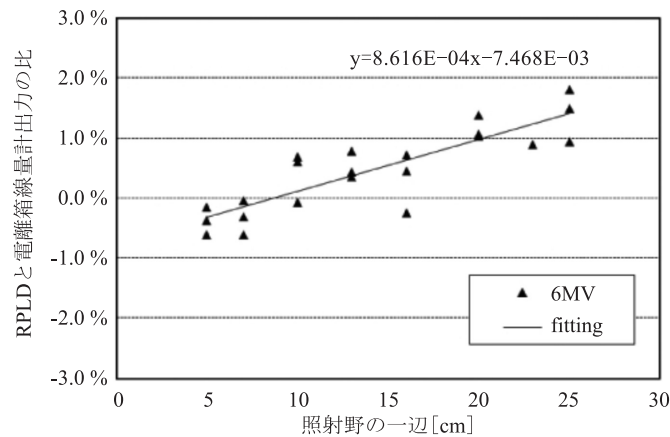


図 A 8.7 蛍光ガラス線量計 (RPLD) の照射野サイズ依存性
10 cm 深にて, RPLD 出力と同条件で測定された電離箱線量計出力の比。各点の不確かさは 1.5% ($k=1$) である。

津田¹⁹⁾ は 4, 6 および 18 MV X 線の直線性を 0 から 10 Gy の範囲内で調べ, 測定誤差範囲内で直線性が得られたことを報告している。

2.4 エネルギー依存性

図 A 8.6 は, メーカーから提供された RPLD 素子の光子に対するエネルギー依存性である。プロット点は RPLD 素子を 0.5 mm 厚の ABS 樹脂ケースに収め, 放射線計測協会において標準照射し, ^{137}Cs γ 線の RPL 量で規格化した空気カーマ当たりの出力である。実線は Hubbell and Seltzer²⁰⁾ を基に求めた空気に対するガラス素子の質量エネルギー吸収係数比で, ^{137}Cs γ 線で規格化した値である。ABS ケースおよびガラス自身の吸収などのため, ガラス素子の出力のエネルギ

ー特性は, 50 keV 付近より低いエネルギー領域でガラス/空気の質量エネルギー吸収係数比より小さくなっている。

図 A 8.7 は 6 MV X 線, SCD 100 cm でファントム中 10 cm 深における RPLD の照射野サイズ依存性である²¹⁾。RPLD 出力は, ^{60}Co γ 線の 10 cm 深における出力で校正した。照射野サイズが増加するに従い, 散乱線の低エネルギー成分が増加し, RPLD の出力が増加していることがわかる。これは RPLD が低エネルギーに対して感度が高いためであり, 照射野の変化に伴う補正が必要である。

図 A 8.8 は, 6 MV, 10 MV X 線, SCD 100 cm, 照射野 10 cm $\times$ 10 cm で, それぞれ線量最大深, 5 cm, 10 cm および 20 cm 深部において, 1 Gy の

付録 8 熱ルミネセンス線量計および蛍光ガラス線量計

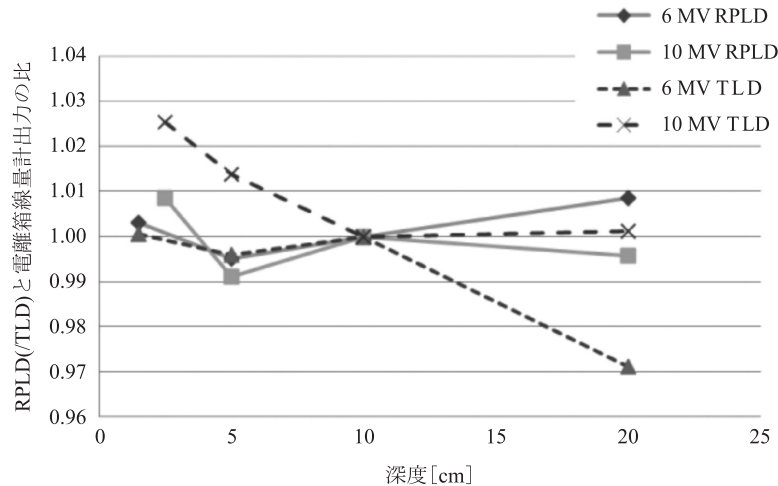


図 A 8.8 蛍光ガラス線量計 (RPLD) および TLD の深度依存性
照射野サイズは 10 cm×10 cm における, RPLD 出力と同条件で測定された電離箱線量計出力の比。各点の不確かさは RPLD で 1.5 % ($k=1$), TLD で 1.6 % ($k=1$) である。

表 A 8.4 校正深 10 cm, 照射野 10 cm×10 cm での RPLD および TLD の $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対するエネルギー補正係数

線質	$TPR_{20,10}$	RPLD の補正係数	TLD の補正係数
$^{60}\text{Co}\gamma$ -rays	0.58	1.000	1.000
4 MV X-rays	0.624	1.007 ± 0.005	
6 MV X-rays	0.669	1.014 ± 0.009	1.011
10 MV X-rays	0.740	1.026 ± 0.007	1.023
20 MV X-rays	0.791	1.029 ± 0.004	

RPLD の補正係数は $^{60}\text{Co}\gamma$ 線を校正深で照射した素子により校正した。

水吸収線量を照射した時の RPLD 6 素子の出力の平均値を電離箱線量計出力で除したデータである²²⁾。RPLD 出力は 10 cm 深で 1 Gy 照射した素子の出力で規格化した。従来用いられてきた TLD と比較して, 出力の深度依存性がないことが示唆される。

表 A 8.4 は, $^{60}\text{Co}\gamma$ 線, 4, 6, 10 および 20 MV X 線, 照射野 10 cm×10 cm で, ファントム中 10 cm 深の RPLD 6 素子にそれぞれ水吸収線量 1 Gy を照射して得られた RPL 量から算出した, $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する各線質でのエネルギー補正係数である²²⁾。参考として TLD に対する補正係数も文献から引用している。結果として, 治療領域の高エネルギー X 線においては, TLD と同程

度のエネルギー補正が必要になることがわかる。

以上から, 適切な補正を施すことにより治療領域の高エネルギー X 線場において RPLD 素子による絶対線量測定が可能であることが判明し, 2007 年より開始された第三者機関による出力線量調査に用いられている²³⁾。

2.5 フェーディング

RPLD 素子は RPL 発光中心が安定していることからフェーディングが少ないことが知られている。津田は 123 日で 1.9 % のフェーディングを認めたと報告している¹⁹⁾。

2.6 繰り返し使用と保存

RPLD 素子は 400℃、30 分のアニール処理で繰り返し使用できる。しかし、湿度に弱く、高湿度中に長時間放置するとウェザリングにより表面が白濁するので、ガラス素子はデシケータ中に保存すべきである。

2.7 RPL 出力の校正

RPLD 素子の蛍光量 (RPL) 出力の素子間の変動は、レーザビーム入射面の研磨精度、マガジン内の固定精度等、メーカーの出荷基準に依存し、5% を超える個体差を持つ素子も存在する。そのため、原則として素子毎に校正定数 (= 基準線量/RPL 読み値) を求められなければならない。

RPLD 素子の RPL 読み取りには専用マガジンを使用する。このマガジンには 20 素子が収納できるが、その場所により出力が変わるため、常に素子とマガジンは (素子設置位置も含めて) セットで用いるか、マガジン位置の補正係数を求めて補正することにより読み取り精度の悪化を防ぐ必要がある。また、マガジン内での素子の回転によりレーザ入射位置が僅かに変化し、入射レーザ量が増減することにより収集される RPL 量の誤差が生まれる。これによる誤差を最小限にするには、校正定数算出時より ID 付きの素子は常に ID を上向きに揃えて読み取る、あるいは角度を意図的に回転して複数回読み取りを行い、その平均を読み取る等の工夫が必要である。

相対線量を求めるときには、RPL 読み値に個々の素子の校正定数を乗じてその相対値を求める。絶対線量計測では、測定対象となる線質での個々の RPLD 素子の感度校正を行う、または感度校正時と異なる線質を測定対象とする場合は、エネルギー依存性による RPL 量の補正が必要である。

参 考 文 献

- 1) Suntharalingam N and Cameron JR: Thermoluminescent response of Lithium Fluoride to radiations with different LET, Phys. Med. Biol. 14: 397-410, 1969
- 2) 都丸禎三: CaSO₄ と BeO 熱ルミネセンス線量計素子の特性と線量測定への応用, 日本医放会誌 36: 808-825, 1976
- 3) 岡島俊三, 他: TLD による医療用放射線の標準測定法, 文部省科学研究費助成金研究成果報告書, 1983
- 4) Yamashita T, Nada N, Oonishi H and Kitamura S: Calcium Sulfate activated by Thulium or Dysprosium for thermoluminescence dosimetry, Health Phys. 21: 295-300, 1971
- 5) Almond PR and McCray K: The energy response of LiF, CaF₂, Li₂B₄O₇:Mn to high energy radiations, Phys. Med. Biol. 15: 335-342, 1970
- 6) 速水昭宗, 井上俊彦, 川越康充, 他: TLD 郵送法による高エネルギー放射線治療用 X, γ 線 11 施設の基準点線量調査, 日放腫会誌 9: 139-145, 1997
- 7) 都丸禎三: TLD による医療用放射線測定の実際, 日医放物理会誌 Suppl. 18: 31-60, 1983
- 8) Zimmerman DW, Rhyner CR and Cameron JR: Thermal annealing effects on thermoluminescence of LiF, Health Phys. 12: 525-531, 1966
- 9) Nakajima T: On the sensitivity factor mechanism of some thermoluminescence phosphors. 3rd international conference on luminescence dosimetry: 466-479, 1971
- 10) Mckinlay AF: Thermoluminescence Dosimetry, in Medical Physics Handbook vol. 5, 1980, Adam Hilger LTD, Bristol
- 11) Yokota R, Imagawa H: Radiophotoluminescent centers in silver-activated phosphate glass, J. Phys. Soc. Japan 23: 1038-1048, 1966
- 12) 横田良介: 蛍光ガラス線量計のメカニズム, 応用物理 40: 1292-1306, 1971
- 13) Piesch E and Burgkhardt B: Photoluminescence dosimetry; the alternative in personnel monitoring, Radioprotection 29: 39-67, 1994
- 14) AGC テクノグラス株式会社: ガラス線量計

欧 文 索 引

Boag の方法	170	RCF	185
clinical radiation field.....	248	RGF	185
CyberKnife	248	RPL	179
machine-specific reference field	248	RPLD.....	179
MOSFET 線量計	194	SOBP	81, 96
plan-class specific reference field	248	sublinearity	174
radiophotoluminescence	179	supralinearity	174
radiophotoluminescent glass dosimeter	179	TomoTherapy	249
RBE	97	TPR _{20,10}	38

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——

2012 年 9 月 10 日 第 1 版第 1 刷発行

2022 年 3 月 15 日 第 1 版第 10 刷発行 © 2022

定価 3850 円 (本体 3500 円 + 税)

編集 日本医学物理学会
発行 (株) 通商産業研究社
東京都港区北青山 2 丁目 12 番 4 号 (坂本ビル)
〒107-0061 TEL 03(3401)6370 FAX 03(3401)6320

(落丁・乱丁等はおとりかえいたします)

ISBN978-4-86045-120-2 C3047 ¥3500E