

第1章 水吸収線量校正と標準計測法 12

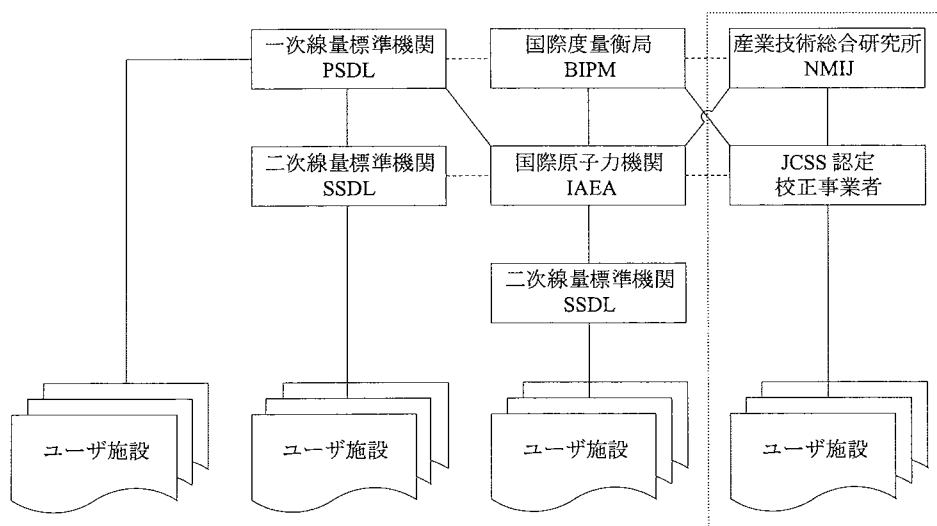


図 1.1 線量の国際計量システムと日本の線量校正体系

標準との間の関係を表す校正定数が与えられている必要がある。

図 1.1 に線量のための国際計量システムの概念を示す¹⁾。ユーザ施設の電離箱線量計は、二次線量標準機関 (SSDL) で校正される。SSDL における水吸収線量標準の値づけに使用する電離箱線量計 (特定二次標準器) は、各国の一次線量標準機関 (PSDL) で定期的に校正され、さらに PSDL と国際度量衡局 (BIPM) の間での定期的な国際相互比較によって正しさを相互に確認し合うことによりトレーサビリティが確立される。

わが国でも産総研と BIPM との間で水吸収線量の国際相互比較が行われ²⁾、さらに計量法校正事業者認定制度 (Japan Calibration Service System; JCSS) で認定された水吸収線量標準による電離箱線量計校正サービスが提供されている。線量のトレーサビリティを保証するため、ユーザ施設のリファレンス線量計について 1 年に 1 度の JCSS 校正を推奨する。

すべての放射線治療施設で水吸収線量を正しく評価するためには、さらに c) の標準計測法が提供されていること、d) の第三者による検証が必須となる。

標準計測法 12 では、外部放射線治療で利用されている以下の光子線、電子線、陽子線および炭素線について、水吸収線量校正定数が与えられた電離箱線量計による水吸収線量計測法を提供する。

- (1) ^{60}Co から 25 MV の光子線 $(0.56 \leq TPR_{20,10} \leq 0.80)$
- (2) 3 MeV から 25 MeV の電子線 $(1 \text{ g cm}^{-2} \leq R_{50} \leq 10.5 \text{ g cm}^{-2})$
- (3) 50 MeV から 250 MeV の陽子線 $(0.25 \text{ g cm}^{-2} \leq R_p \leq 25 \text{ g cm}^{-2})$
- (4) 100 MeV/u から 450 MeV/u の炭素線 $(2 \text{ g cm}^{-2} \leq R_p \leq 30 \text{ g cm}^{-2})$

$TPR_{20,10}$, R_{50} および R_p については、該当の章で具体的に解説されている。

第2章 標準計測法 12 の概要

2.3.1.1 円筒形電離箱

円筒形電離箱は、光子線、10 MeV を超える電子線、陽子線および炭素線の水吸収線量計測で使用する。

ファーマ形電離箱は、およそ電離体積 0.6 cm^3 、円筒形部外径 7 mm、内径 6 mm、円筒形部長さ 24 mm 前後のサイズであり、十分な精度が得られる電荷を収集できる。標準計測法 12 では 0.1 cm^3 未満の空洞体積をもつマイクロ型と呼ばれる電離箱に対しても k_Q を与えている。マイクロ型電離箱は空洞体積が小さく収集できる電荷が小さいため、極性効果、ステム効果、ケーブル漏電等によるノイズ混入について十分に検討してから使用することを推奨する。

グラファイト壁の電離箱は通常長期安定性に優れ、プラスチック壁の電離箱に比べて応答が均一である。一方、プラスチック壁の電離箱は頑丈で通常の使用に適しているが、Nylon や A-150 壁の電離箱では湿度が応答に影響を与えるので注意が必要である。

2.3.1.2 平行平板形電離箱

平行平板形電離箱は、高エネルギー電子線のすべてのエネルギー範囲で使用できるが、特に 10 MeV 以下の電子線の水吸収線量計測には必須である。また、陽子線、炭素線ではそれぞれ $R_{\text{res}} < 0.5 \text{ g cm}^{-2}$ 、SOBP 幅 $< 2 \text{ g cm}^{-2}$ の位置での水吸収線量計測に必須である。

平行平板形電離箱は擾乱が小さく、入射窓からの荷電粒子による電離電荷を収集し、側壁からの荷電粒子の寄与は無視できるよう設計されている必要がある。このような設計によって実効中心を電離空洞の前壁の中心とすることができる。したがって、電離空洞の直径と高さの比が 5 以上で高さは 2 mm を超えず、集電極の直径は 20 mm 以内で、電離空洞の高さの 1.5 倍以上の幅の保護電極が集電極を囲むような構造であり、入射窓の厚さは 0.1 g cm^{-2} (PMMA 厚 1 mm 以内) を超えないものが望ましい。さらに、水中で測定できるように設計されていること、水等価の材質で均質に構成されていることが望ましい。

2.3.2 電位計

電位計は電離箱の集電極に電圧を印加して電離電荷を収集し、表示する装置である。電位計は 0.1 % の読み取り精度を得るため、4 桁の表示桁を有する機種を推奨する。また、極性効果補正のため印加電圧の正負の極性を替えられること、イオン再結合補正のため通常の印加電圧とその 1/2 以下の電圧に調整することが可能で、さらに長期安定性が一年間で $\pm 0.5 \%$ 以内である機種を推奨する。

校正で電離箱と電位計を接続して一体として水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ が与えられている場合は電位計校正係数 k_{elec} を 1 とする。

表 3.3 光子線に対する線質変換係数 k_Q

電離箱	線 質 : $TPR_{20,10}$											
	0.56	0.59	0.62	0.65	0.68	0.70	0.72	0.74	0.76	0.78	0.80	
応用技研												
CI10 (JARP)	0.999	0.998	0.996	0.993	0.989	0.985	0.981	0.976	0.971	0.964	0.957	
Capintec												
PR-06C	1.001	1.000	0.999	0.998	0.994	0.990	0.986	0.981	0.975	0.968	0.960	
PR-5P	1.003	1.002	1.001	1.001	0.998	0.995	0.991	0.987	0.981	0.974	0.966	
PR-5	1.003	1.002	1.001	1.001	0.998	0.995	0.991	0.987	0.981	0.974	0.966	
Exradin												
A1	1.003	1.002	1.001	1.001	0.998	0.995	0.991	0.986	0.981	0.974	0.966	
T1	0.998	0.996	0.992	0.987	0.981	0.977	0.972	0.967	0.961	0.955	0.948	
A1SL	1.003	1.002	1.001	1.001	0.998	0.995	0.991	0.986	0.981	0.974	0.966	
A2	1.003	1.002	1.002	1.002	0.998	0.996	0.992	0.987	0.982	0.975	0.967	
T2	0.998	0.996	0.992	0.987	0.982	0.977	0.973	0.968	0.962	0.956	0.949	
A12	1.002	1.001	1.000	0.999	0.996	0.993	0.989	0.984	0.978	0.971	0.963	
A12S	1.002	1.001	1.000	0.999	0.996	0.993	0.989	0.984	0.978	0.971	0.963	
A14	1.003	1.003	1.003	1.004	1.001	0.999	0.996	0.991	0.986	0.980	0.973	
T14	0.998	0.996	0.994	0.989	0.985	0.980	0.977	0.972	0.967	0.961	0.954	
A14SL	1.002	1.002	1.003	1.003	1.001	0.999	0.996	0.991	0.986	0.980	0.973	
A16	1.002	1.002	1.003	1.004	1.002	1.000	0.997	0.993	0.988	0.982	0.975	
A18	1.003	1.002	1.001	1.001	0.998	0.995	0.991	0.987	0.981	0.974	0.966	
A19	1.002	1.001	1.000	0.999	0.996	0.993	0.989	0.984	0.978	0.971	0.963	
FarWestTech												
IC18	0.998	0.996	0.992	0.986	0.981	0.976	0.972	0.966	0.961	0.954	0.947	
IBA												
CC01	1.002	1.002	1.003	1.004	1.002	1.000	0.997	0.993	0.988	0.982	0.975	
CC04/IC04	1.002	1.001	1.000	0.999	0.995	0.992	0.988	0.983	0.977	0.970	0.961	
CC08/IC05/IC06	1.002	1.001	1.000	0.999	0.995	0.992	0.988	0.983	0.977	0.970	0.962	
CC13/IC10/IC15	1.002	1.001	1.000	0.999	0.995	0.992	0.988	0.983	0.977	0.970	0.962	
CC25/IC25	1.002	1.001	1.000	0.999	0.995	0.992	0.988	0.983	0.977	0.970	0.962	
FC23-C/IC28	1.002	1.001	1.000	0.999	0.995	0.992	0.988	0.983	0.977	0.970	0.962	
FC65-P/IC69	1.001	0.999	0.997	0.995	0.991	0.987	0.983	0.979	0.973	0.966	0.959	
FC65-G/IC70	1.002	1.001	0.999	0.997	0.994	0.991	0.987	0.983	0.977	0.971	0.964	

第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

4.1 概論

本章では、電離箱線量計を用いた基準条件における校正深での電子線による水吸収線量計測法について述べる。なお、本章における電子線とは、医療用加速器において散乱箔により平坦化された公称エネルギーが3 MeV から25 MeV までの電子線を指す。標準計測法12では、 ^{60}Co γ 線による標準場において水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ が与えられた電離箱線量計を使用して、校正深における水吸収線量を計測し、線量最大深の水吸収線量を決定する。

4.2 測定の準備（使用機器）

4.2.1 電離箱

3 MeV から25 MeV までのエネルギー範囲で使用可能な電離箱は、十分な保護電極の幅を持った平行平板形電離箱である。特に線量半価深 $R_{50} < 4 \text{ g cm}^{-2}$ ($\bar{E}_0 < 10 \text{ MeV}$) では、平行平板形電離箱を使用する。

$R_{50} \geq 4 \text{ g cm}^{-2}$ ($\bar{E}_0 \geq 10 \text{ MeV}$) のエネルギーでは、ファーマ形電離箱による計測も可能である。

ここで、深さの表示は物理長 (cm) ではなく単位面積質量 (g cm^{-2}) とする。単位面積質量は媒質の物理長にその密度を乗じて求める。電子線計測では水以外の媒質を使用する場合があるため、このような表記方法を用いる。

計量法に基づく JCSS 登録事業者である医療用線量標準センターの校正によって、水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ が与えられている電離箱線量計を使用する必要がある。

ただし、JCSS 登録事業者によって水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ が与えられたファーマ形電離箱との相互校正によって、ユーザ施設で $N_{D,w,Q_{\text{cross}}}$ を与えられた電離箱線量計を使用する場合は、この限りではない。

平行平板形電離箱の基準点は電離空洞内前面の中心である。別の言い方をすれば、入射窓外

第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

側より窓厚分だけ深い点が平行平板形電離箱の基準点となる。これを前壁変位法と呼ぶ。

円筒形電離箱の基準点は電離空洞の中心から $0.5 r_{\text{cyl}}$ 線源側に移動した点とする。ここで、 r_{cyl} は電離空洞の半径である。この方法を半径変位法と呼ぶ。

電子線の絶対および相対線量計測のいずれでも、変位法を用いて電離箱の基準点を決定し、この基準点を測定点と一致させる。

4.2.2 ファントム、防浸キャップ、防浸鞘

電子線では水を基準媒質とする。水槽の大きさは、最大照射野より各辺で 5 cm 以上、深さ方向では最大エネルギーの実用飛程より 5 g cm^{-2} 以上のマージンが必要である。

垂直ビームの場合、水の蒸発による水面 (SSD) の変化に注意が必要である。

水平ビームの場合、水槽の入射窓の材質はプラスチックで、厚さ t_{win} は 0.2 cm から 0.5 cm を推奨する。この入射窓厚を水等価厚 $t_{\text{win}} \rho_{\text{pl}}$ (g cm^{-2}) に換算し、ファントム内壁からの水深に加えて測定深とする。 ρ_{pl} はプラスチックの密度 (g cm^{-3}) であり、通常窓材として使用される PMMA および polystyrene の密度は、それぞれ $\rho_{\text{PMMA}} = 1.19 \text{ g cm}^{-3}$ および $\rho_{\text{polystyrene}} = 1.06 \text{ g cm}^{-3}$ である。

固体ファントムは $R_{50} < 4 \text{ g cm}^{-2}$ ($\bar{E}_0 < 10 \text{ MeV}$) の電子線において例外的に使用を認めるが、本計測法では水ファントムの使用を強く推奨する。固体ファントムは元素組成や密度のばらつきが大きく、公称データで計算されたスケーリング係数だけでは補正が不確かな場合がある。したがって、日常の品質管理で使用する場合は水との比較を行っておく事が求められる。固体ファントムの補正方法については付録 11 「ファントム」を参照のこと。

非防浸の平行平板形電離箱の防浸キャップは、壁材質と同じか PMMA 製で厚さは 1.0 mm 以下が望ましい。非防浸のファーマ形電離箱では PMMA 製の防浸鞘を用い、厚さは 1.0 mm 以下が望ましい。また防浸鞘と電離箱壁との隙間は 0.1 ~ 0.3 mm 程度で、大気圧との平衡が維持できなければならない。

4.3 線質の決定

4.3.1 線質指標の定義

電子線の線質指標として、水中の深部量百分率が 50 % になる深さ、深部量半価深 R_{50} (g cm^{-2}) を用いる。

なお、平均入射エネルギー \bar{E}_0 (MeV) は本プロトコルにおいて線質指標としては用いない

第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

が、次式により R_{50} から求めることができる。

$$\bar{E}_0 = 2.33 R_{50} \quad (4.1)$$

4.3.2 線質指標の測定

線質指標 R_{50} 測定のための基準条件を表 4.1 に示す。すべてのエネルギー範囲で平行平板形電離箱を使用することができる。 $R_{50} \geq 4 \text{ g cm}^{-2}$ の場合には、円筒形電離箱を使用することもできる。いずれの場合も電離箱の基準点は変位法により決定する。

$SSD = 100 \text{ cm}$ とし、ファントム表面での照射野 A_0 は $R_{50} \leq 7 \text{ g cm}^{-2}$ で $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 以上とする。 R_{50} が 7 g cm^{-2} を超える場合は $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 以上の照射野を推奨する。

深部電離量百分率 (PDI) を測定し、 PDI が最大値の 50% になる深さ、深部電離量半価深 $I_{50} (\text{g cm}^{-2})$ から次式により深部量半価深 $R_{50} (\text{g cm}^{-2})$ を決定する。

$$R_{50} = 1.029 I_{50} - 0.06 \text{ g cm}^{-2} \quad (I_{50} \leq 10 \text{ g cm}^{-2}) \quad (4.2)$$

$$R_{50} = 1.059 I_{50} - 0.37 \text{ g cm}^{-2} \quad (I_{50} > 10 \text{ g cm}^{-2}) \quad (4.3)$$

イオン再結合および極性効果が有意な場合には、表示値に対して補正を行う。

半導体検出器やダイヤモンド検出器等で R_{50} を決定する場合、電離箱線量計での測定結果と比較し、代用できるかを判断する必要がある。

表 4.1 電子線の線質指標 R_{50} 測定の基準条件

項 目	基準値または基準特性
ファントム材質	水 ($R_{50} \geq 4 \text{ g cm}^{-2}$) 水または固体ファントム ($R_{50} < 4 \text{ g cm}^{-2}$)
電離箱	平行平板形または円筒形 ($R_{50} \geq 4 \text{ g cm}^{-2}$) 平行平板形 ($R_{50} < 4 \text{ g cm}^{-2}$)
電離箱の基準点	平行平板形：電離空洞内前面の中心 円筒形：電離空洞の幾何学的中心から $0.5 r_{\text{cyl}}$ 線源側
SSD	100 cm
照射野 (A_0)	$10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 以上 ($R_{50} \leq 7 \text{ g cm}^{-2}$) $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 以上 ($R_{50} > 7 \text{ g cm}^{-2}$)

第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

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：Auto

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キャップ（鞘）は必要としない。

今回は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 $N_{D,w}$ を使用する。

ユーザがリファレンス線量計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。リファレンス線量計のみの校正を行い、電位計単独で別機関に校正を依頼した場合、校正された k_{elec} を使用する。

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

深さスケーリング係数 c_{pl} ：_____ (付録11表A11.1参照)

スケーリング校正深 $d_{c,pl} = d_{c,w} / c_{pl} = \underline{\quad} / \underline{\quad} = \underline{\quad} \text{ g cm}^{-2}$

フルエンススケーリング係数^b： $h_{pl} = \underline{\quad}$ (付録11表A11.1参照)

ファントムの水平、電離箱の水平を確認し、水面を $SSD = 100 \text{ cm}$ に設置する。なお、電離箱移動軸がある場合は、その軸移動がビーム軸と平行であることも確認する。

平行平板形では前壁変位法を用いて電離空洞内前面の中心、ファーマ形電離箱では半径変位法を用いて電離空洞の幾何学的中心から $0.5 r_{cyl}$ 線源側を電離箱の基準点とし、照射野の中心および測定深に一致するように設置する。すなわち IBA PPC40 は平行平板形電離箱でその前壁厚は1 mm であるため、電離箱の前壁表面から1 mm 後方の電離空洞の前面を先ず水面（水深0 cm）に一致させ、次に電離箱を沈めて基準点を校正深 2.05 g cm^{-2} に一致させる。

PPC40 等の Roos タイプ電離箱は後壁材による電子線擾乱の影響を減らす目的で電離箱断面が逆凹形状となっている。また電離箱ホルダーに電離箱を取り付けた場合、その断面が逆凹形状となるタイプがある。このような状況で電離箱を沈める場合、逆凹形状の中に空気が閉じ込められていないことを確認する必要がある。

基準照射野 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ の電子線アプリケーションを加速器に装着する。

側方ビームを使用する水ファントムの場合、入射窓厚の補正が必要となる。窓厚を単位面積質量で表し、電離箱の基準点はこの壁厚も含めた深さに一致させる。3 mm 厚の PMMA（アクリル樹脂）の場合、その密度は 1.19 g cm^{-3} であるため、単位面積質量は 0.36 g cm^{-2} となる。したがって水ファントム壁内面から電離箱の基準点までの距離を $2.05 - 0.36 = 1.69 \text{ g cm}^{-2}$ と

5. 校正深 d_c における水吸収線量 $D(d_c, A_0=10\text{ cm}\times 10\text{ cm}$ または $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$)

線質変換係数： 基準線質が ^{60}Co の場合 線質変換係数： $k_Q = 0.935$

基準線質がユーザビームの電子線の場合 (表 7.1 参照)

線質変換係数： $k_{Q,Q_{int}} = \underline{\hspace{2cm}}$ $k_{Q_{cross},Q_{int}} = \underline{\hspace{2cm}}$

$k_{Q,Q_{cross}} = \frac{k_{Q,Q_{int}}}{k_{Q_{cross},Q_{int}}} = \underline{\hspace{2cm}}$

$D(d_c, A_0) = M_Q N_{D,w} k_Q = 2.006 \text{ Gy}$

使用しているリファレンス線量計に対する線質変換係数 k_Q を表 4.3 から読み取る。本例題では、IBA PPC40 平行平板形電離箱 (防浸タイプ) を使用し、表 4.3 から $R_{30} = 3.59 \text{ g cm}^{-2}$ に相当する k_Q を以下のように直線補間で求める。

$$\begin{aligned} k_Q(3.59) &= (k_Q(3.5) - k_Q(4.0)) \times \frac{3.59 - 4.0}{3.5 - 4.0} + k_Q(4.0) \\ &= (0.936 - 0.930) \times \frac{3.59 - 4.0}{3.5 - 4.0} + 0.930 = 0.935 \end{aligned}$$

補正後の表示値 M_Q 、水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ 、線質変換係数 k_Q より、本例題の校正深水吸収線量 $D(d_c, A_0)$ は以下ようになる。

$$D(d_c, A_0) = M_Q N_{D,w} k_Q = 24.13 \times 8.89 \times 10^{-2} \times 0.935 = 2.006 \text{ Gy}$$

表 4.3 に記載のない平行平板形電離箱については、第 7 章の相互校正に従い水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{cross}}$ 、線質変換係数 $k_{Q,Q_{cross}}$ を求め、校正深水吸収線量を評価する。

6. 線量最大深 d_{max} における水吸収線量 $D(d_{max}, A_0)$

線量最大深 $d_{max} = 2.10 \text{ g cm}^{-2}$

校正深 d_c における深部量百分率 $PDD(d_c, A_0) = 100 \%$

(照射野 $A_0: 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)

線量最大深水吸収線量 $D(d_{max}, A_0) = 100 D(d_c, A_0) / PDD(d_c, A_0) = 2.006 \text{ Gy}$

MU 当りの線量最大深水吸収線量 DMU

$$DMU = D(d_{max}, A_0) / N = 1.003 \times 10^{-2} \text{ Gy MU}^{-1}$$

本例題では、線量最大深 d_{max} は、 PDD より 2.1 cm である。線量最大深における水吸収線量 $D(d_{max}, A_0)$ は、校正深 $d_c = 2.1 \text{ cm}$ における $PDD(d_c, A_0)$ を用いて以下のように求まる。

$$D(d_{max}, A_0) = \frac{100 D(d_c, A_0)}{PDD(d_c, A_0)} = \frac{100 \times 2.006}{100.0} = 2.006 \text{ Gy}$$

以上の結果より、モニタ単位 (MU) 当りの線量最大深水吸収線量 DMU は次式で算出される。

$$DMU = \frac{D(d_{max}, A_0)}{N} = \frac{2.006}{200} = 1.003 \times 10^{-2} \text{ Gy MU}^{-1}$$

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 材質： <u>C-522</u>	厚さ： <u>0.088</u> g cm ⁻²
防浸鞘 材質： <u>なし</u>	厚さ： <u>なし</u> g cm ⁻²
電離箱の基準点： <input checked="" type="checkbox"/> $0.5 r_{\text{cyl}}$ (ファーマ形) <input type="checkbox"/> 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> <input checked="" type="checkbox"/> Gy nC ⁻¹ <input type="checkbox"/> 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： <input checked="" type="checkbox"/> Q_0 (⁶⁰ Co) <input type="checkbox"/> Q_{cross} 校正深： <u> </u> g cm ⁻²	
相互校正の場合の基準線質 $Q_{\text{cross}} (R_{50})$ ： <u> </u> 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> %	

第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

認することができる。

$$k_s \approx 1 + \frac{\bar{M}_1/\bar{M}_2 - 1}{V_1/V_2 - 1} = 1 + \frac{-45.59/-45.28 - 1}{302/151 - 1} = 1.007$$

したがって、近似式でも同一の値が確認された。

(iv) 必要な補正を施した電圧 V_1 における表示値 M_Q

以上より、補正後の V_1 における表示値 M_Q は、以下のようになる。

$$M_Q = \bar{M}_{\text{raw}} k_{\text{TP}} k_{\text{elec}} k_{\text{pol}} k_s = 45.59 \times 1.004 \times 1.000 \times 1.000 \times 1.007 = 46.09 \text{ "nC"}$$

5. 校正深 d_c における水吸収線量 $D(d_c, A_0 = 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ または $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm})$

線質変換係数： 基準線質が ^{60}Co の場合 線質変換係数： $k_Q = 0.916$

基準線質がユーザビームの電子線の場合 (表 7.1 参照)

線質変換係数： $k_{Q,Q_m} =$ _____ $k_{Q_{\text{cross}},Q_m} =$ _____

$$k_{Q,Q_{\text{cross}}} = \frac{k_{Q,Q_m}}{k_{Q_{\text{cross}},Q_m}} =$$

$$D_c = M_Q N_{D,w} k_Q = 1.998 \text{ Gy}$$

使用しているリファレンス線量計に対する線質変換係数 k_Q を表 4.3 から読み取る。本例題では、Exradin A12 円筒形電離箱 (防浸型) を使用し、表 4.3 から $R_{50} = 6.48 \text{ g cm}^{-2}$ に相当する k_Q を以下のように直線補間で求める。

$$\begin{aligned} k_Q(6.48) &= (k_Q(6.0) - k_Q(7.0)) \times \frac{6.48 - 7.0}{6.0 - 7.0} + k_Q(7.0) \\ &= (0.918 - 0.914) \times \frac{6.48 - 7.0}{6.0 - 7.0} + 0.914 = 0.916 \end{aligned}$$

補正後の表示値 M_Q 、水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ 、線質変換係数 k_Q より、本例題の校正深水吸収線量 $D(d_c, A_0)$ は以下のようになる。

$$D(d_c, A_0) = M_Q N_{D,w} k_Q = 46.09 \times 4.749 \times 10^{-2} \times 0.916 = 2.005 \text{ Gy}$$

6. 線量最大深 d_{max} における水吸収線量 $D(d_{\text{max}}, A_0)$

線量最大深 $d_{\text{max}} = 3.38 \text{ g cm}^{-2}$

校正深 d_c における深部量百分率 $PDD(d_c, A_0) = 99.4 \%$

(照射野 $A_0: 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)

線量最大深水吸収線量 $D(d_{\text{max}}, A_0) = 100 D(d_c, A_0) / PDD(d_c, A_0) = 2.017 \text{ Gy}$

MU 当りの線量最大深水吸収線量 DMU

$$DMU = D(d_{\text{max}}, A_0) / N = 1.009 \times 10^{-2} \text{ Gy MU}^{-1}$$

本例題では、線量最大深 d_{max} は、 PDD より 3.38 cm である。線量最大深における水吸収線量 $D(d_{\text{max}}, A_0)$ は、校正深 $d_c = 3.79 \text{ cm}$ における $PDD(d_c, A_0)$ を用いて以下のように求まる。

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：solid water RMI-457	密度：1.04 g cm ⁻³
	深さスケール係数 c_{pl} ：	0.949 (付録 11 表 A 11.1 参照)
	スケール校正深 $d_{c,pl} = d_{c,w} / c_{pl} =$	$1.32 / 0.949 = 1.39$ g cm ⁻²
	フルエンススケール係数 ^b ： $h_{pl} =$	1.008 (付録 11 表 A 11.1 参照)

使用した固体ファントムは Solid Water RMI-457 (SW ファントム) である。

固体ファントムを水平に設置し、平行平板形電離箱 NACP-02 を埋め込む。ここで、薄いシート、または細い紐を電離箱を埋め込む穴に敷いて両端を少し出しておくことと電離箱を取り外す際に便利である。なお、固体ファントムの厚さは、測定する電子線の最大飛程以上の厚さが必要である。

照射野中心に電離箱中心を一致させ、校正深に相当する厚さの SW ファントムを載せ、SSD=100 cm とする。

ここで、水での校正深 $d_{c,w}$ に相当する SW ファントムの厚さ $d_{c,pl}$ を求める。水の深さ d_w (g cm⁻²) と等価な固体ファントムの厚さ d_{pl} (g cm⁻²) は、深さスケール係数が c_{pl} であるとき、次式で求めることができる。

$$d_{pl} = d_w / c_{pl}$$

水における校正深 $d_{c,w}$ は 1.32 g cm⁻² であるので、SW ファントムでの校正深に等価な厚さ $d_{c,pl}$ (g cm⁻²) は、付録 11 表 A11.1 の深さスケール係数 c_{pl} から、次のように求められる。

$$d_{c,pl} = \frac{d_{c,w}}{c_{pl}} = \frac{1.32}{0.949} = 1.39 \text{ g cm}^{-2}$$

面積質量表示の $d_{c,pl}$ (g cm⁻²) から厚さ $d'_{c,pl}$ (cm) への変換は、SW ファントムの密度 $\rho_{pl} = 1.04 \text{ g cm}^{-3}$ から、次のように求めることができる。

$$d'_{c,pl} = \frac{d_{c,pl}}{\rho_{pl}} = \frac{1.39}{1.04} = 1.34 \text{ cm}$$

よって、SW ファントムにおける校正深は 1.34 cm となる。なお、NACP-02 の前壁厚 0.104 g cm⁻² を校正深に含め、SW ファントムの厚さを 1.24 cm とする。

もし、1.50 cm 厚の SW ファントムしか用意できない場合は、この厚さを仮の校正深とする。測定後、深さ 2.6 mm の違いを PDD(1.34 cm) と PDD(1.5 cm) で補正した線量が校正深での値となる。この場合、阻止能比が異なるため線質変換係数に差が生じる可能性がある。このように、固体ファントムは幾何学的な再現性は良いが、任意の校正深に電離箱を設置することが難しく、不確かさが増大する可能性がある。さらに固体ファントムの製造ロットごとのばらつきもあるため、ファントムごとに密度や厚さを測定しておくことが必要である。

第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

また、ファントムの温度を直接測定することは難しいため、十分長い時間、ファントムを照射室に置き、固体ファントムと室温が温度平衡となった状態で測定することが望ましい。この場合は、室温をファントム温度とする。

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 : 200 V 測定レンジ : Auto

モニタ設定値 N : 200 MU

V_1 におけるリファレンス線量計表示値 \bar{M}_{raw} : -14.35 nC rdg

(i) 温度気圧補正係数 k_{TP}

気圧 P : 101.45 kPa 温度 T : 25.1 °C 相対湿度 : 55.3 %

$$k_{TP} = \frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \frac{P_0}{P} = \frac{273.2 + 25.1}{273.2 + 22.0} \frac{101.33}{101.45} = 1.009$$

(ii) 極性効果補正係数 k_{pol}

V_1 (+) での表示値 : $\bar{M}_{raw}^+ =$ -14.35 V_1 (-) での表示値 : $\bar{M}_{raw}^- =$ 14.32

通常設定する極性における V_1 での表示値 : $\bar{M}_{raw} =$ -14.35

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

(iii) イオン再結合補正係数 k_s

2点電圧法による再結合補正

印加電圧 : V_1 (通常電圧) = 200 V V_2 ($V_1/2$ 以下の電圧) = 100 V

V_1 と V_2 での極性効果を補正した表示値 : $M_1 =$ -14.35 $M_2 =$ -14.28

電圧比 $V_1/V_2 =$ 2.0 表示値比 $M_1/M_2 =$ 1.005

ビームタイプ : パルス パルススキャン

$a_0 =$ 2.337 $a_1 =$ -3.636 $a_2 =$ 2.299 (表 2.2 参照)

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} \right) + a_2 \left(\frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} \right)^2 = 1.005$$

2点電圧法による再結合補正が行えない場合 (付録 6 Boag の式による再結合補正)

$k_s =$ _____

(iv) 必要な補正を施した電圧 V_1 における表示値 M_Q

$$M_Q = \bar{M}_{pl} h_{pl} k_{TP} k_{elec} k_{pol} k_s =$$
 14.65 nC rdg

(i) 温度気圧補正係数 k_{TP}

$$k_{TP} = \frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \frac{P_0}{P} = \frac{273.2 + 25.1}{273.2 + 22.0} \frac{101.33}{101.45} = 1.009$$

(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

$$k_{pol} = \frac{|\bar{M}_{raw}^+| + |\bar{M}_{raw}^-|}{2|\bar{M}_{raw}|} = \frac{|-14.35| + |14.32|}{2|-14.35|} = 0.999$$

第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

(iii) イオン再結合補正係数 k_s

本例題では、 $V_1/V_2=2$ 、パルス方式であるから、 $a_0=2.337$ 、 $a_1=-3.363$ 、 $a_2=2.299$ で、 k_s は次式から得られる。

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} \right) + a_2 \left(\frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} \right)^2 = 2.337 - 3.636 \times \left(\frac{-14.35}{-14.28} \right) + 2.299 \times \left(\frac{-14.35}{-14.28} \right)^2 = 1.005$$

$k_s < 1.03$ のとき、再結合補正は次式から0.1%以内で近似できるので、上記の k_s の値を確認することができる。

$$k_s \approx \frac{\bar{M}_1/\bar{M}_2 - 1}{V_1/V_2 - 1} + 1 = \frac{-14.35/-14.28 - 1}{302/151 - 1} + 1 = 1.005$$

したがって、近似式でも同一の値が確認された。

(iv) 必要な補正を施した電圧 V_1 における表示値 M_Q

以上より、補正後の V_1 における SW ファントムでの表示値 M_{pl} に SW ファントムのフルエンススケリング係数 h_{pl} 、およびその他の補正係数を乗じて、補正後の M_Q を以下のように求める。

$$M_Q = \bar{M}_{pl} h_{pl} k_{TP} k_{elec} k_{pol} k_s = 14.35 \times 1.008 \times 1.009 \times 1.000 \times 0.999 \times 1.005 = 14.65 \text{ "nC"}$$

5. 校正深 d_c における水吸収線量 $D(d_c, A_0=10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ または $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm})$

線質変換係数

基準線質が ^{60}Co の場合 (表 4.3 参照) 線質変換係数: $k_Q = 0.943$

基準線質がユーザービームの電子線の場合 (表 7.1 参照)

線質変換係数: $k_{Q,Q_{ref}} = \underline{\hspace{2cm}}$ $k_{Q_{ref},Q_{ref}} = \underline{\hspace{2cm}}$

$$k_{Q,Q_{ref}} = \frac{k_{Q,Q_{ref}}}{k_{Q_{ref},Q_{ref}}} = \underline{\hspace{2cm}}$$

$$D(d_c, A_0) = M_Q N_{D,w} k_Q = 2.005 \text{ Gy}$$

使用しているリファレンス線量計に対する線質変換係数 k_Q を表 4.3 から読み取る。本例題では、NACP-02 平行平板形電離箱を使用し、表 4.3 から $R_{50}=2.36 \text{ g cm}^{-2}$ に相当する k_Q を以下のように直線補間で求める。

$$\begin{aligned} k_Q(2.36) &= (k_Q(2.0) - k_Q(2.5)) \times \frac{2.36 - 2.5}{2.0 - 2.5} + k_Q(2.5) \\ &= (0.949 - 0.940) \times \frac{2.36 - 2.5}{2.0 - 2.5} + 0.940 = 0.943 \end{aligned}$$

補正後の表示値 M_Q 、水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ 、線質変換係数 k_Q より校正深水吸収線量 $D(d_c, A_0)$ は以下のようになる。

第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

$$D(d_c, A_0) = M_Q N_{D,w} k_Q = 14.65 \times 1.451 \times 10^{-1} \times 0.943 = 2.005 \text{ Gy}$$

表 4.3 に記載のない電離箱については、第7章の相互校正に従い水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{cross}}$ 、線質変換係数 $k_{Q,Q_{cross}}$ を求め、水吸収線量を評価する。

6. 線量最大深 d_{max} における水吸収線量 $D(d_{max}, A_0)$

$$\text{線量最大深 } d_{max} = 1.32 \text{ g cm}^{-2}$$

$$\text{校正深 } d_c \text{ における深部量百分率 } PDD(d_c, A_0) = 100.0 \%$$

$$(\text{照射野 } A_0 : 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm})$$

$$\text{線量最大深水吸収線量 } D(d_{max}, A_0) = 100 D(d_c, A_0) / PDD(d_c, A_0) = 2.005 \text{ Gy}$$

MU 当りの線量最大深水吸収線量 DMU

$$DMU = D(d_{max}, A_0) / N = 1.003 \times 10^{-2} \text{ Gy MU}^{-1}$$

本例題では、線量最大深 d_{max} は、 PDD より 1.32 cm である。線量最大深における水吸収線量 $D(d_{max}, A_0)$ は、校正深 $d_c = 1.32 \text{ cm}$ における $PDD(d_c, A)$ を用いて以下のように求まる。

$$D(d_{max}, A_0) = \frac{100 D(d_c, A_0)}{PDD(d_c, A_0)} = \frac{100 \times 2.005}{100.0} = 2.005 \text{ Gy}$$

以上の結果より、モニタ単位 (MU) 当りの線量最大深水吸収線量 DMU は次式で算出される。

$$DMU = \frac{D(d_{max}, A_0)}{N} = \frac{2.005}{200} = 1.003 \times 10^{-2} \text{ Gy MU}^{-1}$$

参 考 文 献

- 1) Andreo P, Almond PR, Mattsson O, et al. (IAEA): The use of plane-parallel ionization chambers in high-energy electron and photon beams: An international code of practice for dosimetry, TRS-381. 1997, IAEA, Vienna
- 2) Burns DT, Ding GX and Rogers DWO: R50 as a beam quality specifier for selecting stopping-power ratios and reference depths for electron dosimetry, Med. Phys. 23: 383-388, 1996
- 3) Andreo P, Cunningham JR, Hohlfeld K, et al. (IAEA): Absorbed dose determination in photon and electron beams: An international code of practice for dosimetry, TRS-277 (2nd ed.), 1997, IAEA, Vienna
- 4) Tello VM, Taylor RC and Hanson WF: How water equivalent are water-equivalent plastics for output calibration of photon and electron beams?, Med. Phys. 22: 1177-1189, 1995
- 5) Ding GX, Rogers DWO, Mackie TR: Calculation of stopping-power ratios using realistic clinical electron beams, Med. Phys. 22: 489-501, 1995
- 6) AAPM Task Group 51: Protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams, Med. Phys. 26: 1847-1870, 1999

[小口, 藤崎]

表 5.3 陽子線に対する線質変換係数 k_Q (つづき)

電離箱	陽子線 R_{res} (g cm ⁻²)															
	0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	7.5	10	15	20	30
IBA																
CC04/IC04	1.031	1.029	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028	1.027	1.027	1.027
CC08/IC05/IC06	1.032	1.030	1.030	1.030	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028
CC13/IC10/IC15	1.032	1.030	1.030	1.030	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028
CC25/IC25	1.032	1.030	1.030	1.030	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028
FC23-C/IC28	1.032	1.031	1.030	1.030	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028
FC65-P/IC69	1.029	1.027	1.027	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.025	1.025	1.025
FC65-G/IC70	1.035	1.033	1.033	1.033	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.031	1.031	1.031
Nuclear Associates																
30-750	1.031	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028	1.028	1.027	1.027	1.027	1.027	1.026
30-749	1.032	1.030	1.030	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028	1.028	1.027
30-744	1.032	1.030	1.030	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028	1.028	1.027
30-716	1.032	1.030	1.030	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028	1.028	1.027
30-753	1.032	1.030	1.030	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.029	1.028	1.028	1.028	1.028
30-751	1.029	1.027	1.027	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.025	1.025	1.025	1.025
30-752	1.035	1.033	1.033	1.033	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.031	1.031	1.031
Nuclear Enterprise																
2515/3	1.035	1.033	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.031	1.031	1.031	1.031	1.031	1.030
2577	1.035	1.033	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.031	1.031	1.031	1.031	1.031	1.030
2505/A	1.013	1.012	1.011	1.011	1.011	1.011	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010	1.010	1.009	1.009
2505/3, 3A	1.035	1.033	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.031	1.031	1.031	1.031	1.031	1.031	1.031	1.030
2505/3, 3B	1.017	1.015	1.014	1.014	1.014	1.014	1.014	1.014	1.014	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.013	1.012
2571	1.035	1.033	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.032	1.031	1.031	1.031	1.031	1.031	1.031	1.031	1.030
2581 (CE:Al50)	1.011	1.009	1.009	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008	1.007	1.007	1.007	1.007
2581 (CE:Al)	1.018	1.017	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.016	1.015	1.015	1.015	1.015	1.015	1.015	1.015	1.014
2561/2611	1.030	1.028	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	1.027	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.026	1.025

第5章 陽子線の水吸収線量計測

$(\bar{L}/\rho)_{w,air}$ とその深さでの擾乱補正係数を乗じることによって得られる。 $(\bar{L}/\rho)_{w,air}$ は線質指標 R_{res} の関数として付録3の式 A 3.19 から計算できる。陽子線に対する擾乱補正係数は1.0とする(付録3参照)。イオン再結合と極性効果が有意である場合、それぞれの補正係数を用いて電離電荷の表示値の補正を行う。

照射野が小さい場合、照射野直径の1/2倍よりも小さい電離箱、または空間分解能の高い、マイクロ形電離箱、半導体検出器あるいはダイヤモンド検出器などを用いることを推奨する。この場合、測定された分布は水/検出器の阻止能比を用いて線量分布に変換する必要がある。この変換に必要な阻止能比はICRU Report 49¹⁴⁾ に挙げられている。これらの検出器が深部線量分布測定に使用するのが適切であるかどうかは、より大きな照射野で平行平板形電離箱と比較することによって検証する必要がある。

スキニングなどの動的な方法で形成された照射野の線量計測では、表示値の再現性が保たれるよう計測時間を照射野の走査周期より十分に長く設定する。

5.6.2 出力係数

出力係数は基準深 z_{ref} での非基準条件で測定した場合の補正後の線量計表示値に対する基準条件で測定した場合の補正後の表示値との比である(基準条件は表5.2に与えられている)。陽子線に対しては、患者の治療に用いる基準条件を満たさない全ての照射野サイズとSSDについて出力係数を測定する必要がある。

5.6.3 相対線量計測における固体ファントムの使用

固体ファントムの材質や特性については付録11を参照のこと。水等価ファントムの密度 ρ_{pl} は公称値を使用するのではなく、ファントムごとに測定する必要がある。固体ファントムでの深さ z_{pl} ($g\ cm^{-2}$) は、次式で等価な水中での深さ z_w ($g\ cm^{-2}$) に変換しなければならない。

$$z_w = z_{pl} c_{pl} \quad (5.4)$$

ここで、 c_{pl} は深さスケール係数で、陽子線の場合は水と固体ファントム内での $csda$ 飛程 ($g\ cm^{-2}$) の比で近似することができる¹⁴⁾。深部電離量分布から中心軸の深部線量分布を求める方法は5.5.1に準じる。

固体ファントムでの残余飛程を $R_{res,pl}$ とした場合、式5.4によって水中での残余飛程 R_{res} に変換し線質指標とする。

陽子線の水吸収線量計測では固体ファントムは使用するべきではない。しかし、水中で電離箱を正確に位置決めできない場合や防浸性の電離箱が入手出来ない場合、陽子線の相対的な深

第6章 炭素線の水吸収線量計測

表6.2 炭素線に対する線質変換係数 k_Q

電離箱	炭素線	電離箱	炭素線
—円筒形—			
応用技研		PTW	
C110 (JARP)	1.023	23323 (in vivo)	1.021
		23331	1.024
Capintec		23332	1.023
PR-06C	1.028	23333	1.023
PR-5P	1.039	30001	1.023
PR-5	1.039	30010	1.023
		30002/ 30011	1.026
Exradin		30004/ 30012	1.034
A1	1.038	30006/ 30013	1.023
T1	1.002	31002/ 31010	1.023
A1SL	1.039	31003/ 31013	1.023
A2	1.041	31014	1.021
T2	1.005	31015	1.021
A12	1.033	31016	1.021
A12S	1.033	23322 (in vivo)	1.021
A18	1.038		
A19	1.033	Sun Nuclear	
		100700-0	1.023
FarWestTech		100700-1	1.035
IC18	1.000		
		Victoreen	
IBA		555	1.006
CC04/ IC04	1.029	30-348	1.015
CC08/ IC05/ IC06	1.031	30-351	1.023
CC13/ IC10/ IC15	1.031	30-349	1.017
CC25/ IC25	1.031	30-361	1.015
FC23-C/ IC28	1.031		
FC65-P/ IC69	1.027		
FC65-G/ IC70	1.034		
		—平行平板形—	
		NACP / Calcam	0.992
		Roos	1.004
		Classic Markus	1.008
Nuclear Associates		Advanced Markus	1.005
30-750	1.029	Capintec PS-033	1.027
30-749	1.030	Exradin P11	0.985
30-744	1.030	Exradin A10	1.053
30-716	1.030	Holt (Memorial)	1.002
30-753	1.030		
30-751	1.027		
30-752	1.033		
Nuclear Enterprise			
2515/3	1.033		
2577	1.033		
2505/A	1.012		
2505/3, 3A	1.033		
2505/3, 3B	1.015		
2571	1.033		
2581 (CE:A150)	1.009		
2581 (CE:A1)	1.017		
2561/ 2611	1.028		

第7章 フィールド線量計の相互校正

(iii) イオン再結合補正係数 k_s

2点電圧法による再結合補正

印加電圧: V_1 (通常電圧) = −300 V V_2 ($V_1/2$ 以下の電圧) = −100 V

V_1 と V_2 での極性効果を補正した表示値: $M_1 =$ 19.90 $M_2 =$ 19.70

電圧比 $V_1/V_2 =$ 3.0 表示値比 $M_1/M_2 =$ 1.010

ビームタイプ: パルス パルススキャン

$a_0 =$ 1.198 $a_1 =$ −0.875 $a_2 =$ 0.677 (付録6参照)

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} \right) + a_2 \left(\frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} \right)^2 = \underline{1.005}$$

以上より, 補正後の V_1 における表示値 M は, 以下のようになる。

$$M = \bar{M}_{\text{raw}} k_{\text{TP}} k_{\text{elec}} k_{\text{pol}} k_s = 19.90 \times 1.007 \times 1.000 \times 0.999 \times 1.005 = 20.11 \text{ “nC”}$$

4. 校正深 d_c における水吸収線量 $D_c(A_0)$

線質変換係数: $k_{Q_{\text{cross}}, Q_0}^{\text{ref}}$

$$k_{Q_{\text{cross}}, Q_0}^{\text{ref}} = \underline{0.900}$$

$$\text{校正深水吸収線量 } D(d_c, A_0) = M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} N_{D, w, Q_0}^{\text{ref}} k_{Q_{\text{cross}}, Q_0}^{\text{ref}} = \underline{0.966} \text{ Gy}$$

使用しているリファレンス線量計に対する線質変換係数 k_Q を第4章 表4.3 から読み取る。本例題では, PTW 30013 Farmer は防浸性なので防水靴を使用しない。表から $R_{50} = 8.23$ cm に相当する $k_{Q_{\text{cross}}, Q_0}^{\text{ref}}$ を以下のように直線補間で求める。

$$\begin{aligned} k_{Q_{\text{cross}}, Q_0}^{\text{ref}}(8.23) &= (k_Q(10.0) - k_Q(8.0)) \times \frac{8.23 - 8.0}{10.0 - 8.0} + k_Q(8.0) \\ &= (0.894 - 0.901) \times \frac{0.23}{2.0} + 0.901 = 0.900 \end{aligned}$$

補正後の表示値 M , 水吸収線量校正定数 $N_{D, w, Q_0}^{\text{ref}}$, 線質変換係数 $k_{Q_{\text{cross}}, Q_0}^{\text{ref}}$ より, 本例題の校正深水吸収線量 $D(d_c, A_0)$ は以下のようになる。

$$D(d_c, A_0) = M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} N_{D, w, Q_0}^{\text{ref}} k_{Q_{\text{cross}}, Q_0}^{\text{ref}} = 20.11 \times 5.336 \times 10^{-2} \times 0.900 = 0.966 \text{ Gy}$$

7.3.2 フィールド線量計の相互校正

1. 電離箱と電位計の校正 (校正線質 Q_0)

電離箱モデル: PTW Roos シリアル No.: 145

電位計モデル: RAMTEC 1000Plus シリアル No.: 38

Roos 電離箱の実効中心 (電離空洞内前壁中心) は水ファントム中 4.84 cm の深さでビーム中心軸と一致するように設置する。

第7章 フィールド線量計の相互校正

2. 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 : -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} : 12.50 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 : _____ %

$$k_{\text{TP}} = \frac{273.2 + T}{273.2 + T_0} \frac{P_0}{P} = \frac{273.2 + 23.0}{273.2 + 22.0} \frac{101.33}{P} = 1.007$$

(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 : $\bar{M}_{\text{raw}} = -12.48$ $V_1 (-)$ での表示値 : $\bar{M}_{\text{raw}} = 12.50$

通常設定する極性における V_1 での表示値 : $\bar{M}_{\text{raw}} = 12.50$

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

(iii) イオン再結合補正係数 k_s

2点電圧法による再結合補正

印加電圧 : V_1 (通常電圧) = -300 V V_2 ($V_1/2$ 以下の電圧) = -100 V

V_1 と V_2 での極性効果を補正した表示値 : $M_1 = 12.50$ $M_2 = 12.45$

電圧比 $V_1/V_2 = 3.0$ 表示値比 $M_1/M_2 = 1.004$

ビームタイプ : パルス パルススキャン

$a_0 = 1.198$ $a_1 = -0.875$ $a_2 = 0.677$ (付録6参照)

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} \right) + a_2 \left(\frac{\bar{M}_1}{\bar{M}_2} \right)^2 = 1.002$$

以上より, 補正後の V_1 における表示値 M は, 以下のようになる。

$$M = \bar{M}_{\text{raw}} k_{\text{TP}} k_{\text{elec}} k_{\text{pol}} k_s = 12.50 \times 1.007 \times 1.000 \times 0.999 \times 1.002 = 12.60 \text{ "nC"}$$

3. 校正深 d_c におけるフィールド線量計の水吸収線量校正定数

$$N_{\text{D,w,Q}_{\text{cross}}^{\text{field}}} = \frac{M_{\text{Q}_{\text{cross}}^{\text{ref}}} N_{\text{D,w,Q}_0}^{\text{ref}} k_{\text{Q}_{\text{cross}}^{\text{ref}}, \text{Q}_0}}{M_{\text{Q}_{\text{cross}}^{\text{field}}}} = 7.667 \times 10^{-2} \text{ Gy nC}^{-1}$$

リファレンス線量計から求められた校正深における水吸収線量は 0.966 Gy であるので, フィールド線量計の水吸収線量校正定数は次式から得られる。

$$N_{\text{D,w,Q}_{\text{cross}}^{\text{field}}} = \frac{M_{\text{Q}_{\text{cross}}^{\text{ref}}} N_{\text{D,w,Q}_0}^{\text{ref}} k_{\text{Q}_{\text{cross}}^{\text{ref}}, \text{Q}_0}}{M_{\text{Q}_{\text{cross}}^{\text{field}}}} = \frac{0.966}{12.60} = 7.667 \times 10^{-2} \text{ Gy nC}^{-1}$$

付録3 線質変換係数 k_{Q,Q_0}

表 A 3.1 a 円筒形電離箱のサイズと材質

電離箱	電離空洞			空洞壁		中心電極	防浸
	体積 cm ³	長さ mm	半径 mm	材質	厚さ g cm ²		
応用技研 C110 (JARP)	0.6	22.0	3.0	PMMA	0.059	Al	N
Capintec PR-06C	0.65	22.0	3.2	C-552	0.05	C-552	N
PR-5P	0.07	5.5	2.0	C-552	0.22	C-552	N
PR-5	0.14	11.5	2.0	C-552	0.22	C-552	N
Exradin A1	0.057	6.0	2.0	C-552	0.176	C-552	Y
T1	0.057	6.0	2.0	A-150	0.111	A-150	Y
A1SL	0.057	6.0	2.025	C-552	0.194	C-552	Y
A2	0.54	12.0	4.7	C-552	0.176	C-552	Y
T2	0.54	12.0	4.7	A-150	0.111	A-150	Y
A12	0.65	24.8	3.05	C-552	0.088	C-552	Y
A12S	0.25	10.6	3.05	C-552	0.088	C-552	Y
A14	0.016	2.0	2.0	C-552	0.176	SPC	Y
T14	0.016	2.0	2.0	A-150	0.111	SPC	Y
A14SL	0.016	2.0	2.025	C-552	0.194	SPC	Y
A16	0.007	2.4	1.2	C-552	0.088	SPC	Y
A18	0.125	8.3	2.45	C-552	0.176	C-552	Y
A19	0.62	25.0	3.0	C-552	0.088	C-552	Y
FarWestTech IC18	0.1	9.5	2.3	A-150	0.183	A-150	N
IBA CC01	0.01	3.6	1.0	C-552	0.088	steel	Y
CC04/ IC04	0.04	3.6	2.0	C-552	0.07	C-552	Y
CC08/ IC05/ IC06	0.08	4.0	3.0	C-552	0.07	C-552	Y
CC13/ IC10/ IC15	0.13	5.8	3.0	C-552	0.07	C-552	Y
CC25/ IC25	0.25	10.0	3.0	C-552	0.07	C-552	Y
FC23-C/ IC28	0.23	8.8	3.1	C-552	0.07	C-552	Y
FC65-P/ IC69	0.65	23.1	3.1	Delrin	0.057	Al	Y
FC65-G/ IC70	0.65	23.1	3.1	graphite	0.073	Al	Y
Nuclear Associates 30-750	0.03	3.6	2.0	C-552	0.068	C-552	Y
30-749	0.08	4.0	3.0	C-552	0.068	C-552	Y
30-744	0.13	5.8	3.0	C-552	0.068	C-552	Y
30-716	0.25	10.0	3.0	C-552	0.068	C-552	Y
30-753	0.25	9.0	3.1	C-552	0.068	C-552	Y
30-751	0.69	23.0	3.1	Delrin	0.056	Al	Y
30-752	0.69	23.0	3.1	graphite	0.072	Al	Y
Nuclear Enterprise 2515/3	0.2	7.0	3.2	graphite	0.066	Al	N
2577	0.2	8.3	3.2	graphite	0.066	Al	N
2505/A	0.6	24.0	3.0	nylon	0.063	Al	N
2505/3, 3A	0.6	24.0	3.2	graphite	0.065	Al	N
2505/3, 3B	0.6	24.0	3.2	nylon	0.041	Al	N
2571	0.6	24.0	3.2	graphite	0.065	Al	N
2581 (CE:A150)	0.6	24.0	3.2	A-150	0.041	A-150	N
2581 (CE:Al)	0.6	24.0	3.2	A-150	0.041	Al	N
2561/ 2611	0.33	9.2	3.7	graphite	0.09	Al (hollow)	N

付録3 線質変換係数 k_{Q,Q_0}

表 A 3.2 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する $P_{\text{wall-sl}}$, P_{dis} , P_{cel} および $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}} P_{Q_0}$

円筒形	$P_{\text{wall-sl}}^{*1}$	P_{dis}	P_{cel}^{*2}	$(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}} P_{Q_0}$
応用技研				
C110 (JARP)	1.002	0.996	0.993	1.122
Capintec				
PR-06C	0.990	0.996	1.000	1.117
PR-5P	0.978	0.997	1.000	1.104
PR-5	0.978	0.997	1.000	1.104
Exradin				
A1	0.979	0.997	1.000	1.106
T1	1.014	0.997	1.000	1.145
A1SL	0.978	0.997	1.000	1.105
A2	0.979	0.994	1.000	1.102
T2	1.014	0.994	1.000	1.142
A12	0.985	0.996	1.000	1.111
A12S	0.985	0.996	1.000	1.111
A14	0.979	0.997	1.000	1.106
T14	1.014	0.997	1.000	1.145
A14SL	0.978	0.997	1.000	1.105
A16	0.985	0.998	1.000	1.113
A18	0.979	0.996	1.000	1.105
A19	0.985	0.996	1.000	1.111
FarWestTech				
IC18	1.016	0.997	1.000	1.148
IBA				
CC01	0.985	0.998	1.000	1.113
CC04/IC04	0.987	0.997	1.000	1.115
CC08/IC05/IC06	0.987	0.996	1.000	1.114
CC13/IC10/IC15	0.987	0.996	1.000	1.114
CC25/IC25	0.987	0.996	1.000	1.114
FC23-C/IC28	0.987	0.996	1.000	1.113
FC65-P/IC69	0.997	0.996	0.993	1.117
FC65-G/IC70	0.991	0.996	0.993	1.110
Nuclear Associates				
30-750	0.987	0.997	1.000	1.115
30-749	0.987	0.996	1.000	1.114
30-744	0.987	0.996	1.000	1.114
30-716	0.987	0.996	1.000	1.114
30-753	0.987	0.996	1.000	1.114
30-751	0.997	0.996	0.993	1.117
30-752	0.992	0.996	0.993	1.110
Nuclear Enterprise				
2515/3	0.992	0.996	0.993	1.111
2577	0.992	0.996	0.993	1.111
2505/A	1.013	0.996	0.993	1.134
2505/3, 3A	0.992	0.996	0.993	1.111
2505/3, 3B	1.010	0.996	0.993	1.131
2571	0.992	0.996	0.993	1.111
2581 (CE:A150)	1.008	0.996	1.000	1.137
2581 (CE:A1)	1.008	0.996	0.993	1.129
2561/2611	0.990	0.995	0.993	1.108

付録 14 電子線の深部量百分率

1. 電離箱線量計による深部量百分率の計測

SSD一定で表面の照射野が A_0 のとき、ビーム軸上の深さ d での深部量百分率 $PDD(d, A_0)$ は次式で定義されている。

$$PDD(d, A_0) = 100 \times \frac{D(d, A_0)}{D(d_{\max}, A_0)} \quad (\text{A 14.1})$$

電離箱で計測する場合、電位計の表示値 M_{raw} に温度気圧、イオン再結合、極性効果に対する補正係数および電位計校正定数 (k_{TP} , k_s , k_{pol} , k_{elec}) を乗じ、電離量を求める。深部電離量百分率 (percentage depth ionization; PDI) は、最大の電離量に対する深さ d での電離量の百分率として、次式で算出することができる。

$$PDI(d, A_0) = 100 \times \frac{[M_{\text{raw}} k_{\text{TP}} k_s k_{\text{pol}} k_{\text{elec}}]_d}{[M_{\text{raw}} k_{\text{TP}} k_s k_{\text{pol}} k_{\text{elec}}]_{d_{\max}}} \quad (\text{A 14.2})$$

電子線では深さにより電子の平均エネルギーが変化するため、空気に対する水の平均制限質量衝突阻止能比 $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ 、電離箱壁の水との不等価性、電子フルエンスに対する空洞補正、変位補正および中心電極の空気との不等価性に対する擾乱補正係数 (P_{wall} , P_{cav} , P_{dis} , P_{cel}) を乗じて、式 A 14.1 および式 A 14.2 から、次式によって $PDD(d, A_0)$ を算出することができる。

$$PDD(d, A_0) = 100 \times \frac{[M_{\text{raw}} k_{\text{TP}} k_s k_{\text{pol}} k_{\text{elec}} (\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}}]_d}{[M_{\text{raw}} k_{\text{TP}} k_s k_{\text{pol}} k_{\text{elec}} (\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}}]_{d_{\max}}} \quad (\text{A 14.3})$$

なお、電子線では電離箱の基準点を平行平板形では電離空洞内前面の中心、円筒形では電離空洞の中心から $0.5 r_{\text{cy}}$ 線源側の点とする変位法を用いて計測するため、 $P_{\text{dis}} = 1$ とする^{1,2)}。

2. 電離箱線量計の阻止能比と擾乱補正係数

電離箱線量計を用いた電子線の線量計測では、

式 A 14.3 に示したように空気に対する水の平均制限質量衝突阻止能比 $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ と3つの擾乱補正係数 (P_{wall} , P_{cav} , P_{cel}) を深さごとに評価しなければならない。

2.1 電子線に対する阻止能比

電子線に対する $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ は、線質指標 R_{50} と深さ d の関数で表された次式により算出できる³⁾。(付録 4)

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{w,air}} (R_{50}, d) \\ &= \frac{a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 y}{1 + a_4 x + a_5 x^2 + a_6 x^3 + a_7 y} \quad (\text{A 14.4}) \end{aligned}$$

ここで、 $x = \log_e R_{50}$, $y = d/R_{50}$ であり、回帰式の各係数は、

$$\begin{aligned} a_0 &= 1.0752 & a_1 &= -0.50867 \\ a_2 &= 0.088670 & a_3 &= -0.08402 \\ a_4 &= -0.42806 & a_5 &= 0.064627 \\ a_6 &= 0.003085 & a_7 &= -0.12460 \end{aligned}$$

である。

この回帰式は、 $1 \text{ g cm}^{-2} \leq R_{50} \leq 19 \text{ g cm}^{-2}$ のエネルギー範囲、 $0.02 \leq d/R_{50} \leq 1.2$ の深さで有効である。有効範囲外の $d/R_{50} < 0.02$ では $d/R_{50} = 0.02$ での $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ 、 $d/R_{50} > 1.2$ では $d/R_{50} = 1.2$ の $(\bar{L}/\rho)_{\text{w,air}}$ を適用する。

2.2 電子線に対する平行平板形電離箱の擾乱補正

Buckley らは電離箱の後壁の材質や深さによる壁補正係数 P_{wall} の変化を報告している。しかし、その影響は出力計測においては無視できる程度、また PDD 曲線の深さ方向の移動では 1 mm 以内である⁵⁾ ことから、標準計測法 12 では従来通りすべての深さで P_{wall} として 1 を採用する。

十分な保護電極を持つ平行平板形電離箱に対して空洞補正係数 P_{cav} として 1 が与えられている。しかし、保護電極幅の小さい PTW 23343 (classic Markus) および Capintec PS-033 では、平均エネルギーによる変化を無視できないため^{6,7)}、標準計測法 12 では次の補正式を採用する⁸⁾。

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
2015年3月10日 第1版第3刷発行 © 2015

定価 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