## 第3章 高エネルギー光子線の水吸収線量計測

物理量または手順	相対標準不確かさ (%)
ステップ1:線量標準機関	
特定二次標準器の校正定数 N <sub>D,w</sub>	0.40
特定二次標準器による基準γ線場の決定	0.18
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の測定値	0.27
ステップ1の合成不確かさ	0.52
ステップ2:ユーザが使用する高エネルギー光子線	
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3
基準条件の設定	0.4
モニタ設定値に対する表示値 <i>M<sub>raw</sub></i>	0.6
補正係数 k <sub>i</sub>	0.4
線質変換係数 k <sub>Q</sub> (計算值)	1.0
ステップ2の合成不確かさ	1.4
D <sub>w,Q</sub> の相対合成標準不確かさ (ステップ1+2)	1.5
相対拡張不確かさ(包含係数 k=2)	2.9

表3.4	<sup>60</sup> Coγ線で校正された電離箱線量計による高エネルギー光子線の校正深における
	水吸収線量 D <sub>wo</sub> 計測値の相対標準不確かさの見積もり

高エネルギー光子線の校正における不確かさの見積りを表 3.4 に示す。リファレンス電離箱 線量計の校正が二次線量標準機関の <sup>60</sup>Co で行われたとき, *D*<sub>w,Q</sub>の標準不確かさは 1.5% と見 積もられる。リファレンス電離箱線量計の校正が一次線量標準機関で行われたとしても,計算 による *k*<sub>Q</sub>の不確かさが優位なため *D*<sub>w,Q</sub>の全不確かさの見積は,0.1%減少するのみである。

フィールド電離箱線量計が用いられるなら, *D*<sub>w,Q</sub>の不確かさは約0.2%程度増加する。これは,校正されたリファレンス電離箱線量計に対するフィールド電離箱線量計の相互校正にともなう不確かさが加わるためである。

#### 第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

	相対標準不確かさ (%)		
物理量または手順	ファーマ形	平行平板形	
	$R_{50} \ge 4 \mathrm{g}\mathrm{cm}^{-2}$	$R_{50} \ge 1 \mathrm{g} \mathrm{cm}^{-2}$	
ステップ1:線量標準機関			
特定二次標準器の校正定数 N <sub>D,w</sub>	0.40	0.40	
特定二次標準器による基準γ線場の決定	0.18	0.18	
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の測定値	0.27	0.27	
ステップ1の合成不確かさ	0.52	0.52	
ステップ2:ユーザが使用する高エネルギー電子線			
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3	0.4	
基準条件の設定	0.4	0.6	
モニタ設定値に対する表示値 M <sub>raw</sub>	0.6	0.6	
補正係数 k <sub>i</sub>	0.4	0.5	
線質変換係数 k <sub>Q</sub> (計算值)	1.0	1.2	
ステップ2の合成不確かさ	1.4	1.6	
D <sub>w,Q</sub> の相対合成標準不確かさ (ステップ 1+2)	1.5	1.7	
相対拡張不確かさ(包含係数 k=2)	2.9	3.4	

表4.4	<sup>60</sup> Coγ線で校正された電離箱線量計による高エネルギー電子線の校正深におけ
	る水吸収線量 D <sub>wo</sub> 計測値の相対標進不確かさの見積もり

確かさに関しては付録3で説明している。校正深水吸収線量 D。の不確かさは、ステップ1お よび2における不確かさの二乗和の平方根となる。

表 4.4 に基準線質を  ${}^{60}Co\gamma$ 線とした場合の校正深での水吸収線量評価の標準不確かさを示す。 この表は、円筒形電離箱および平行平板形電離箱について、それぞれ  $R_{50} \ge 4 \text{ g cm}^{-2}$ および  $R_{50} \ge 1 \text{ g cm}^{-2}$ のエネルギーに対する値である。固体ファントムを使用した場合はこれより大きくなる。

ユーザビーム Qcross による相互校正で平行平板形電離箱の水吸収線量校正定数 N<sub>D,w,Qcross</sub> を決定した場合,最終的な校正深水吸収線量の合成標準不確かさは 1.7% から 1.4% に縮小する。 詳しくは第 7章「フィールド線量計の相互校正」を参照されたい。

-62-

第4章 高エネルギー電子線の水吸収線量計測

3. ファントム	
水ファントム	窓物質:g cm <sup>-2</sup>
固体ファントム	材 質: <u>solid water RMI-457</u> 密度: <u>1.04</u> g cm <sup>-3</sup>
	深さスケーリング係数 c <sub>pl</sub> :0.949(付録 11 表 A 11.1参照)
	スケーリング校正深 $d_{c,pl} = d_{c,w}/c_{pl} = (1.32 - 0.104) / (0.949) = (1.28) g cm^{-2}$
	フルエンススケーリング係数 <sup>b</sup> : <i>h</i> pi= 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 ートや細い糸を電離箱を埋め込む穴に敷いて両端を少し出しておく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、校正深とするために必要な厚さのSWファントムを載せ、SSD=100 cm とする。

ここで、水での校正深  $d_{c,w}$  と等価にするために必要な SW ファントムの厚さ  $d_{c,pl}$  を求める。 水の深さ  $d_w$  (g cm<sup>-2</sup>) と等価な固体ファントムの厚さ  $d_{pl}$  (g cm<sup>-2</sup>) は、深さスケーリング係数 が  $c_{pl}$  であるとき、次式で求めることができる。

 $d_{
m pl}\!=\!d_{
m w}/c_{
m pl}$ 

水における校正深  $d_{c,w}$  が 1.32 g cm<sup>-2</sup>, NACP-02 電離箱壁の厚さが 0.104 g cm<sup>-2</sup> であるので,必要な SW ファントムの厚さ  $d_{c,pl}$  (g cm<sup>-2</sup>) は付録 11 表 A11.1 の深さスケーリング係数  $c_{pl}$  から,次のように求められる。

 $d_{\rm c,pl} = \frac{d_{\rm c,w}}{c_{\rm pl}} = \frac{1.32 - 0.104}{0.949} = 1.28 \text{ g cm}^{-2}$ 

SW ファントムの密度 $\rho_{pl}$ =1.04g cm<sup>-3</sup>であるので、次式で面積質量  $d_{c,pl}$  (g cm<sup>-2</sup>) で厚さ  $d'_{c,pl}$  (cm) を求めることができる。

 $d'_{c,pl} = \frac{d_{c,pl}}{\rho_{pl}} = \frac{1.28}{1.04} = 1.23 \text{ cm}$ 

もし、1.50 cm 厚(水等価厚 1.42g cm<sup>-2</sup>)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(1.42+0.104=1.52 g cm<sup>-2</sup>)として測定する。仮の校正深の PDD(1.52 g cm<sup>-2</sup>)に対する校正深の PDD(1.32 g cm<sup>-2</sup>)の比で補正して校正深の水吸収線量とする。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5章 陽子線の水吸収線量計測

部線量分布測定については固体ファントムを使用できる。この場合,フルエンススケーリング 係数 *h*pl は使用する陽子線エネルギー,電離箱および固体ファントムの組合せで,あらかじめ 測定により決定することを推奨する。

# 5.7 基準条件における水吸収線量の不確かさ

基準線量計による陽子線の水吸収線量の決定に関する物理量および手順による不確かさは2 つのステップに分割できる。まずステップ1は、線量標準機関でのユーザ電離箱線量計の  $N_{D,w}$ 校正の不確かさである。ステップ2は、この校正した電離箱線量計を用いてユーザが水 吸収線量を計測する際に生じる。これには、水ファントム中の基準深での測定に関係する不確 かさと線質変換係数  $k_Q$  評価の不確かさが含まれる。これら2つのステップで生じる不確かさ の見積もりを表5.4 に示す。陽子線の水吸収線量の決定で生じる全体の相対標準不確かさは、 円筒形電離箱を用いた場合は2.0%、平行平板形電離箱の場合は2.4% である。線質変換係数  $k_Q$  の計算に関係する物理量の不確かさの詳細は付録3で述べる。

地理是さたけぞ順	相対標準不確かさ (%)		
物理重または于順	ファーマ形	平行平板形	
ステップ1:標準校正機関			
特定二次標準器の校正定数 N <sub>D,w</sub>	0.40	0.40	
特定二次標準器による基準γ線場の決定	0.18	0.18	
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の	0.27	0.27	
測定値			
ステップ1の合成不確かさ	0.52	0.52	
ステップ2:ユーザ施設の陽子線			
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3	0.4	
基準条件の設定	0.4	0.4	
モニタ設定値に対する表示値 M <sub>raw</sub>	0.6	0.6	
補正係数 k <sub>i</sub>	0.4	0.5	
線質変換係数 $k_Q$ (計算值)	1.7	2.1	
ステップ2の合成不確かさ	1.9	2.4	
D <sub>w,Q</sub> の相対合成標準不確かさ (ステップ 1+2)	2.0	2.4	
相対拡張不確かさ(包含係数 k = 2)	4.0	4.8	

表5.4 <sup>60</sup>Coγ線で校正された電離箱線量計による治療用陽子線の基準点水吸収線量 D<sub>w,Q</sub>計測値の相対標準不確かさの見積もり

— 92 —

## 第6章 炭素線の水吸収線量計測

梅田島さたけ工匠	相対標準不確かさ (%)		
初理重または于順	ファーマ形	平行平板形	
ステップ1:標準校正機関			
特定二次標準器の校正定数 N <sub>D,w</sub>	0.40	0.40	
特定二次標準器による基準γ線場の決定	0.18	0.18	
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の	0.27	0.27	
測定值			
ステップ1の合成不確かさ	0.52	0.52	
ステップ2:ユーザ施設の炭素線			
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3	0.4	
基準条件の設定	0.4	0.6	
モニタ設定値に対する表示値 M <sub>raw</sub>	0.6	0.6	
補正係数 k <sub>i</sub>	0.4	0.5	
線質変換係数 $k_Q$ (計算値)	2.8	3.2	
ステップ2の合成不確かさ	3.0	3.4	
D <sub>w,Q</sub> の相対合成標準不確かさ(ステップ1+2)	3.0	3.5	
相対拡張不確かさ(包含係数 k = 2)	6.0	6.9	

表 6.3	<sup>60</sup> Coγ線で校正された電離箱線量計による治療用炭素線の校正点における
	水吸収線量 D <sub>w.Q</sub> 計測値の相対標準不確かさの見積もり

この分野がより発展するために,電離箱線量計と水カロリメータによる線量計測による詳細な 比較検討がさらに必要である<sup>11,12</sup>。また,炭素の線量計測の不確かさの低減には入射粒子と標 的破砕片についてのより総括的な研究も必要である。したがって表 6.3の不確かさの見積もり は予備的なものと考えるべきである。







**図A3.5** モンケカルロ計算値<sup>20</sup>に対する標準 計測法 12 の k<sub>Q</sub>の差

示された。しかし特殊な中心電極構造を持つ NE2561を除いて, PMMA 壁と graphite 壁の電 離箱は全て  $\pm 0.5\%$  以内で一致した。

Muir らが報告した 32 種の円筒形電離箱につい て,  $k_Q$ の差から自由度 df あたりのカイ二乗値  $\chi^2/df$ を次式で算出した。

$$\chi^2/df = \frac{1}{f} \sum_{i=1}^{f} \frac{\varDelta_i^2}{u_{\rm MC}^2 + u_{\rm JSMP12}^2}$$
 (A 3.12)

ここで、fは自由度、 $\Delta_i$ は電離箱 iの  $k_Q$ の相対



図A3.4 標準測定法 01<sup>1)</sup> と標準計測法 12 におけ る光子線に対する k<sub>Q</sub>の差



**図A3.6** 水カロリメータ計測値<sup>31)</sup> に対する標 準計測法 12 の k<sub>Q</sub>の差

差(%),  $u_{MC} \ge u_{JSMP12}$ はそれぞれの $k_Q$ の標準不確かさ(%) であり,  $u_{MC}$ は壁材質と中心電極材質によって異なる不確かさ<sup>26)</sup>を用い,  $u_{JSMP12}$ は1.0%とした。その結果,全ての電離箱で1.0以下(平均0.2,最大0.5)であった。このことから,両者は不確かさの範囲内で一致しているといえる。

また, McEwen  $G^{31}$  が水カロリメータで決定 した  $k_Q$  と標準計測法 12 の  $k_Q$  を比較した。代表 的な 7 種の円筒形電離箱の比較を図 A 3.6 に示

#### 4.3.1 $P_{wall}$

電子線に対する  $P_{wall}$  は 1.0 とした。

Buckley ら<sup>21)</sup> はモンテカルロ計算によって最大 で $P_{wall}$ =1.006 (NE2581, A-150 壁) を報告して おり,  ${}^{60}Co\gamma$ 線に対する ( $P_{wall}$ )<sub>Q,Q</sub>, では最大で -0.7%の相違であった。この他に,電子線エネ ルギーの変化 (4g cm<sup>-2</sup>  $\leq R_{50} \leq 10$  g cm<sup>-2</sup>) に対し て $P_{wall}$ の変化は0.2%程度であること<sup>21)</sup>,計測 時の防浸鞘の有無により $P_{wall}$ は最大0.3%変化 すること<sup>21)</sup>を考慮し,電子線における円筒形電 離箱の ( $P_{wall}$ )<sub>Q,Q</sub>, の不確かさは0.5%とする。

#### 4.3.2 Pcav

 $P_{cav}$ は電離空洞の半径および電子線エネルギー に依存して変化する。標準計測法 12 では  $P_{cav}$ の 計算に Wang  $6^{50}$ の近似式を採用した。電離空 洞の長さ 20 mm,半径  $r_{cyl}$  (mm)の円筒形電離箱 の線質指標  $R_{50}$ の電子線の基準条件における  $P_{cav}$ は次式で近似できる。

 $P_{cav} = 0.9902 - 0.016 r_{cyl} + 0.01218 \log_e R_{50} + 0.000083 r_{cyl}^2 - 0.0035 (\log_e R_{50})^2 + 0.00593 r_{cyl} \log_e R_{50}$ (A 3.16)

この式の適用範囲は1mm ≤ r<sub>cyl</sub> ≤ 5mm, 2.5g  $m^{-2} \le R_{50} \le 10 \text{ g cm}^{-2}$  であり、近似式と計算値と の差は0.2%以下である。同報告では、6 MeV 電子線について空洞長さが0.5 cm から3 cm まで 変化した場合に  $P_{cav}$  が約0.6%変化すること,式 A 3.16 は基準深に空洞中心を配置した場合の  $P_{cav}$ を示すが 0.5  $r_{cyl}$ の変位による  $P_{cav}$ の変化は 無視できることなどが示されている。このため, 標準計測法 12 では空洞長さが 1.0 cm 以上の円筒 形電離箱に限定して計算した。また他の文献値と の比較において、式A3.16は適用範囲で大野 ら51)の報告と0.3%以内で一致した。これらより <sup>60</sup>Coγ線に対する相対値 (P<sub>cav</sub>)<sub>Q,Q</sub>の不確かさは 0.3%とする。式A3.16は従来のプロトコル<sup>1,2)</sup> で採用されている Johansson らの P<sub>cav</sub><sup>52)</sup> と比較し て0.5%~1%の系統的な差を生じる。この原因 として、Wang らは Johansson ら<sup>52)</sup> が実験値を取 得する際に平行平板形電離箱の Pwall 補正を無視 したことなどを挙げている。

#### 4.3.3 P<sub>dis</sub>

標準計測法 12 では測定点(校正点)に電離箱 の基準点(0.5 r<sub>cyl</sub>線源側)を一致させる半径変 位法を採用し, P<sub>dis</sub>は 1.0 とする<sup>52,2,1</sup>。

Wang  $6^{53}$  は標準計測における電離箱の基準点 として  $0.8 r_{cyl}$ 線源側, PDD などのスキャン測定 で  $0.5 r_{cyl}$ 線源側を最適な変位量として提案して いる。さらに標準計測では  $0.5 r_{cyl}$ を採用した場 合に  $P_{dis}$  が最大 0.2% 相違するとしている。ただ し,標準計測法 12 ではスキャン測定との一貫性 からこの相違を不確かさとして考慮し、 $^{60}Co\gamma$ 線 に対する相対値 ( $P_{dis}$ ) $_{Q,Q_o}$ の不確かさは 0.3%と する。

## 4.3.4 Pcel

電子線に対する  $P_{cel}$  は 1.0 とした。

Muir  $S^{20}$  は、ファーマ形電離箱の $P_{cel}$ につい て 2.6 g cm<sup>-2</sup>  $\leq R_{s0} \leq 8.8$  g cm<sup>-2</sup> の範囲で調査し、 アルミニウム電極の NE2571 で 0.999±0.1、 C552 電極の A12 で 1.001±0.1 と報告している。 このため、 ${}^{60}$ Coy線に対する相対値 ( $P_{cel}$ )<sub>Q,Q</sub>の不 確かさは 0.3% とする。また、スチールなど高原 子番号物質の中心電極をもつ電離箱では  ${}^{60}$ Coy 線で $P_{cel}$ が大きく変化するため計算対象から除外 した。

# 4.4 相互校正された電離箱の線質変換係数 *k*<sub>Q,Q,m</sub>

平行平板形電離箱は擾乱補正係数の不確かさが 大きいため、高エネルギー電子線 ( $R_{50} \ge 7 \text{ g cm}^{-2}$ ,  $E_0 \ge 16 \text{ MeV}$ )による相互校正を推奨する。(7章 参照)

相互校正された電離箱の線質変換係数 $k_{Q,Q_{int}}$ は 平行平板形,円筒形でそれぞれ以下の方法で算出 し,第7章表7.1に掲載した。なお,媒介線質  $Q_{int}$ として $R_{50}$ =7.5 g cm<sup>-2</sup>を採用した。

#### 4.4.1 平行平板形電離箱

4.2節で記述した NACP-02, Roos, Classic

-143 -

# 付録 4 $W_{\text{air}}/e$ , $(\overline{L}/\rho)_{\text{med,air}}$ , $(\overline{\mu}_{\text{en}}/\rho)_{\text{w,med}}$

ここでは、標準計測法 12 で必要となる電子線 に 対 す る  $W_{air}/e$ ,制限質量衝突阻止能比  $(\overline{L}/\rho)_{med,air}$ ,および高エネルギーX線に対する 質量エネルギー吸収係数比 $(\overline{\mu}_{en}/\rho)_{w,med}$ などにつ いて述べる。

#### 1. 電子に対する W<sub>air</sub>/e

 $W_{air}$ は空気中で1イオン対を生成するのに要 する平均エネルギーであり、一般に eV 単位で表 される。 $W_{air}$ を電気素量 e で除し  $W_{air}/e$ として 単位を J C<sup>-1</sup>で表すと、eV 単位で表した  $W_{air}$  と 同じ数値になる。 $W_{air}$ などの放射線計測標準に 必要となる物理定数に関しては、国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) の諮問委員会の一つ、電離放射線諮問委 員会 (Comité Consultatif des Rayonnements Ionisants, CCRI, 1997年に CCEMRI から改名) の第一部会で諮られる。

1979 年発行の ICRU Report 31<sup>1)</sup>では、電子に 対する乾燥空気の  $W_{air}/e$ として 33.85±0.15 J C<sup>-1</sup>が勧告されたが、わが国では気候的に乾燥空 気の条件で測定する機会が少ないこと、湿潤空気 から乾燥空気への補正値が確立されていないこ と、国家標準を維持している電子技術総合研究所 (現産業技術総合研究所)をはじめ他国でも従来 の数値を採用し続けていることなどから、標準測 定法 86 では 1977 年の CCEMRI による 諮問案 33.73 J C<sup>-1</sup>を採用した<sup>2</sup>。

一方 BIPM の Boutillon と Perroche は, 1984 年に出版された ICRU Report 37<sup>3)</sup> において阻止 能が改定されたことから  $W_{air}/e$  の見直しを行い, 33.97±0.05 J C<sup>-1</sup> の 値 を 得 た <sup>4)</sup>。1985 年 の CCEMRI 第一部会では, この報告を受けて, 電 子に対する乾燥空気の W 値としてこの数値を用 いることの合意がなされた。また, この W 値と の 一 貫 性 を 保 つ た め 阻 止 能 と し て は ICRU Report 37<sup>3)</sup> の値を, エネルギー吸収係数として は Hubbell<sup>5)</sup> の値を用いることが決められた。

1991, 1993 および 1995 年の CCEMRI 第一部

会において、カナダ NRC の Rogers はグラファ イトの平均励起エネルギーの誤差が大きいことな どから W 値の見直しの提案を行った。しかし、 Boutillon らの得た値と誤差範囲内で一致してい ることなどから、現状では電子に対する乾燥空気 の $W_{air}/e$ として 33.97±0.05 J C<sup>-1</sup>が採用されて いる。(W 値の経緯については、Isotope News<sup>6</sup>)、 医用標準線量<sup>7)</sup>で詳細に報告されているので参考 にしていただきたい。)

以上の経緯から標準計測法 12 では、電子に対 する乾燥空気の  $W_{\rm air}/e$  として 33.97±0.05 J C<sup>-1</sup> を採用している。

#### 2. 湿度補正係数 kh

同じ放射線場での電離箱による測定において, 乾燥空気(air)と湿潤空気(humid air)では電 離量に相違が生じることが報告されている<sup>1)</sup>。こ の電離量の相違は、空気中に水蒸気が混在するこ とによって電離体積内の気体の質量、平均制限質 量衝突阻止能および W 値が変化することによっ て生じる。

湿潤空気で測定された電離量を乾燥空気での電 離量に補正するための湿度補正係数 $k_h$ は、電離 箱線量計内の乾燥空気および湿潤空気の質量がそ れぞれ $m_{air}$ および $m_{humid}$ であるとき、乾燥空気 に対する湿潤空気のW/eの比(W/e) $_{humid,air}$ 、お よび湿潤空気に対する乾燥空気の平均制限質量衝 突阻止能比( $\overline{L}/\rho$ ) $_{air,humid}$ から、次式で算出するこ とができる<sup>8)</sup>。

$$k_{\rm h} = \frac{m_{\rm air}}{m_{\rm humid}} (W/e)_{\rm humid,air} (\overline{L}/\rho)_{\rm air,humid}$$
$$= (W/e)_{\rm humid,air} (\overline{L})_{\rm air,humid} (A 4.1)$$

表 A 4.1 に Rogers らの計算による気圧 101.33 kPa, 気温 22.0°C における相対湿度の変化に対す る  $(W/e)_{humid,air}$ ,  $(\overline{L})_{air,humid}$  および湿度補正係数  $k_h$ の変化を示した<sup>8)</sup>。表の第1列は全気圧 *P* に対 する水蒸気分圧 *P*<sub>H2</sub>o,第2列は第1列の条件での 22.0°C, 1気圧における相対湿度,第3列は文献 1の 32 頁 図 5.15 から求めた  $(W/e)_{humid,air}$ であ る。

$$-153 -$$

## 付録4 $W_{\rm air}/e$ , $(\overline{L}/\rho)_{\rm med,air}$ , $(\overline{\mu}_{\rm en}/\rho)_{\rm w,med}$

$\frac{P_{\rm H_{2}O}}{P}$	相対湿度 (%)	$(W/e)_{ m humid,air}$	$rac{ ho_{ ext{humid}}}{ ho_{ ext{air}}}$	$(\overline{L}/ ho)_{ ext{humid,air}}$	$(\overline{L})_{\rm air,humid}$	$k_{ m h}$
0.0	0	1.0	1.0	1.00	1.00	1.00
0.0026	10	0.9966	0.9990	1.0002	1.0008	0.9974
0.0052	20	0.9955	0.9980	1.0004	1.0016	0.9971
				(1.0004)		
0.0078	30	0.9945	0.9971	1.0007	1.0022	0.9967
0.0104	40	0.9938	0.9961	1.0009	1.0030	0.9968
0.0130	50	0.9933	0.9951	1.0011	1.0038	0.9971
				(1.0010)		
0.0157	60	0.9928	0.9941	1.0013	1.0046	0.9974
0.0183	70	0.9924	0.9931	1.0016	1.0053	0.9977
0.0209	80	0.9921	0.9921	1.0018	1.0062	0.9982
0.0235	90	0.9916	0.9911	1.0020	1.0070	0.9985
				(1.0018)		
0.0261	100		0.9901	1.0022	1.0078	

表A4.1 101.33 kPa, 22.0 ℃における相対湿度の変化に対する (*W*/*e*)<sub>humid.air</sub>, (*L*)<sub>air,humid</sub> お よび湿度補正係数 k<sub>h</sub> の変化 (Med. Phys. 1988; 15: 40-48, 版元の許可を得て転載)

注) 第 5 欄は,  $E_{e}$ =300 keV,  $(\overline{L}/\rho)_{H_{2}Ovapor,air}$ =1.136の場合, カッコ内の数値は  $E_{e}$ =20 MeV,  $(\overline{L}/\rho)_{H_{0}Ovapor,air}$ =1.126の場合の $(\overline{L}/\rho)_{humidair}$ 

第4列は,乾燥空気に対する湿潤空気の密度の 比 phumid/pair である。任意の温度,気圧における 一定体積内の気体の分子数は,理想気体の法則か ら一定であり,密度はそれらの分子数の割合に依 存することから,この比は次式で計算できる。

$$\frac{\rho_{\text{humid}}}{\rho_{\text{air}}} = 1 - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P} \quad (1 - d) \quad (A 4.2)$$

ここで, d は水と空気との分子量比であり, 水お よび空気の分子量はそれぞれ 18.015 および 28.964 であるから<sup>4)</sup>, d=0.622 となる。

第5列は、湿潤空気と乾燥空気との平均制限質 量衝突阻止能比  $(\overline{L}/\rho)_{\text{humid,air}}$ であり、Bragg の加 算則と上記の理想気体の法則を適用して計算する ことができる。

$$\left(\frac{\overline{L}}{\rho}\right)_{\text{humid,air}} = \frac{1 - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P} \left[1 - d\left(\frac{\overline{L}}{\rho}\right)_{\text{H}_2\text{O}(\text{vapor}),\text{air}}\right]}{\left[1 - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P} (1 - d)\right]}$$
(A 4.3)

ここで, H<sub>2</sub>O は水蒸気である。Rogers ら<sup>8</sup> は ( $\overline{L}/\rho$ )<sub>humid,air</sub>が非制限阻止能比により近似できる とし,文献4のデータを用いて計算した。なお, 乾燥空気に対する水蒸気の質量衝突阻止能比は 200 keV で 1.137, 20 MeV で 1.126 であり,この 1%の変化は ( $\overline{L}/\rho$ )<sub>humid,air</sub>に影響しないとして, 表 A 4.1 の 第 5 列 に は ( $\overline{L}/\rho$ )<sub>H2O,air</sub>=1.136 (300 keV) としたときの計算値が示されている<sup>8)</sup>。ま た,カッコ内の数値は質量衝突阻止能比 1.126 (20 MeV) として計算した値である。

乾燥空気に対する湿潤空気の線阻止能比は次式 で計算できる。

$$(\overline{L})_{\text{humid,air}} = \frac{\rho_{\text{humid}}}{\rho_{\text{air}}} (\overline{L}/\rho)_{\text{humid,air}}$$
 (A 4.4)

この定義より,式A4.2およびA4.3から次式が得られる。

$$(\overline{L})_{\text{humid,air}} = 1 - \frac{P_{\text{H}_2\text{O}}}{P} \left[ 1 - d \left( \frac{\overline{L}}{\rho} \right)_{\text{H}_2\text{O}(\text{vapor}),\text{air}} \right]$$
(A 4.5)

IAEA TRS398<sup>9)</sup> は k<sub>h</sub> として 0.997 を採用して

-154 -

## 付録11 ファントム

## 1. 概 要

放射線治療装置の出力は水吸収線量で評価す る。また,体内の線量計算のために使用する PDD,TMR,OARなどの線量分布もまた水中 で測定している。これは,年齢や性別によって多 少異なるものの,およそ人体軟部組織の70%か ら80%程度が水であり,水が人体軟部組織と等 価な放射線特性を持つからである。さらに,世界 中どこでも均一な組成で容易に,そして安価に入 手できることから水は放射線治療における線量計 測の基準物質となっている。

一方, Polystyrene, PMMA や水等価として販売されている多くの固体ファントムは,非防浸の放射線検出器を使用できること,検出器設置が容易で設置精度が高いこと,任意形状に加工できて取り扱いが容易であることからQA や線量検証などで頻繁に使用されている。IAEA TRS-398<sup>1)</sup> および標準計測法 12 でも,線質指標  $R_{50} < 4.0 \text{ g}$  cm<sup>-2</sup> ( $E_0 < 10 \text{ MeV}$ )である電子線や陽子線の相対線量計測で水等価固体ファントムの使用を許容している。

ここでは、放射線治療における線量計測で一般 的に使用されている固体ファントムについて、元 素組成、密度、実効原子番号、相対電子密度など の基本的な物理特性と、固体ファントムを使用し た各線質での線量計測のために必要となる深さス ケーリング係数  $c_{pl}$ <sup>2</sup>、電離電荷の補正のためのフ ルエンススケーリング係数  $h_{pl}$ <sup>3.4</sup> を紹介する。

#### 2. 組成,密度,電子密度,実効原子番号

表 A 11.1 に, 水および放射線治療で一般に使 用されている Solid Water-457 CTG (certified therapy grade), Solid Water-457 SG (standard grade) (以上, Gammex 社, Wisconsin, USA), Plastic Water DT (diagnostic-therapy range), Plastic Water (high energy range) (以上, CIRS 社, Virginia, USA), Virtual Water (Med-Tech 社, Iowa, USA), WE211<sup>5</sup>, WE211B<sup>6</sup> (以上, 京都科学, 京都, 日本), RW3 (PTW 社, Freiburg, Germany), A-150<sup>77</sup>, MixDP<sup>8,97</sup>, Polystyrene, PMMA の 12 種類の固体ファントムについて基 本物理特性を示す。各ファントムの元素組成と密 度はカタログおよび論文の数値を使用した。

高エネルギー光子と物質の相互作用はコンプトン散乱が主である。したがって、単位面積質量 (g cm<sup>-2</sup>)を深さの単位として深部量を測定する場合、相互作用は単位質量当りの電子数、すなわち電子密度に依存する。ファントムが原子番号 $Z_i$ ,原子量 $A_{r,i}$ の元素で構成され、その重量比が $w_i$ である場合、電子密度 $\rho_e$ (g<sup>-1</sup>)は次式で計算する。

$$\rho_{\rm e} = \sum_{i} \frac{N_{\rm A} w_i Z_i}{A_{\rm r,i}} \tag{A 11.1}$$

ここで、 $N_{\rm A}$ はアボガドロ定数で、 $N_{\rm A}$ =6.022×10<sup>23</sup> mol<sup>-1</sup>である。

一方,長さ(cm)を単位として深さによる変 化を測定する場合は、単位体積当りの電子数、す なわち電子濃度に深部量は依存する。(注 単位 体積当りの電子数も電子密度であるが、ここでは 混同を避けるため電子濃度という用語を使用す る。)密度が $\rho$ (g cm<sup>-3</sup>)、その電子密度が $\rho_e$ (g<sup>-1</sup>) であるファントムの電子濃度 \* $\rho_e$ (cm<sup>-3</sup>)は、次 式で算出する。

$${}^{k}\rho_{e} = \rho_{e}\rho \qquad (A \ 11.2)$$

表 A 11.1 に、水に対するファントムの相対電 子密度 ( $\rho_e$ )<sub>pl,w</sub>,相対電子濃度 (\* $\rho_e$ )<sub>pl,w</sub>を示した。 ほとんどの固体ファントムの相対電子密度 ( $\rho_e$ )<sub>pl,w</sub> は、1.0より小さい値となっている。一方、水等 価として販売されている固体ファントムの相対電 子濃度 (\* $\rho_e$ )<sub>pl,w</sub> は、1.000±0.015以内である。 これは、密度の調整によって高エネルギー光子に 対する線減弱係数  $\mu$  が水等価となるよう調整さ れていることを示している。

固体ファントムは製造ロット毎に密度が異なる ことがあるので、使用するファントムごとに面積 質量あるいは密度を測定し、表 A 11.1の電子濃 度、相対電子濃度はファントム毎に算出しておく 必要がある。

-196 -

#### 付録 20 CyberKnife および TomoTherapy の水吸収線量計測

項 目	線質指標 CK TPR 20,10	水吸収線量 D <sup>fmsr</sup> w,Qmsr
ファントム材質	水	水
測定深	$10 \text{ g cm}^{-2} \geq 20 \text{ g cm}^{-2}$	$10 \text{ g cm}^{-2}$ ( $\pi$ : 10 cm)
電離箱	円筒形 <sup>a</sup>	円筒形 <sup>a</sup>
電離箱の基準点	幾何学的中心	幾何学的中心
SCD	80 cm	80 cm
照射野サイズ(直径)	60 mm	60 mm

**表 A 20.1** CyberKnife の線質指標 <sup>CK</sup> TPR<sub>20,10</sub> と水吸収線量計測の基準条件 <sup>CK</sup> fmsr

a 電離空洞の長軸が10mm以下の電離箱線量計を推奨する<sup>2)</sup>。

表A20.2	CyberKnife の	$CK f_{msr}$	を基準と	した小	、照射野の	$k_{\Omega_{ollo},\Omega_{max}}^{f_{clin},f_{max}}$ (5)
--------	--------------	--------------	------	-----	-------	---

_	Field diameter (cm)			
Detector	0.5	0.75	1.0	
PTW31014	1.082 - 1.124	1.024 - 1.037	1.013 - 1.017	
Exradin A16	1.067 - 1.112	1.017 - 1.027	1.007 - 1.012	
PTW60012 diode	0.940 - 0.957	1.001 - 1.012	0.999-1.001	

値はターゲットに入射する加速電子の空間的分布を FWHM=1.4 mm から 2.6 mm まで変化させた場合の線質変換係数の範囲を示している。

CyberKnife の水吸収線量計測の基準条件 <sup>CK</sup>fmsr は、直径 60 mm のコリメータを用いた照射野で、 SCD=80 cm,水中深さ 10 g cm<sup>-2</sup> とする.この 校正深に円筒形電離箱の幾何学的中心を一致させ て計測し,式 A 20.1 により水吸収線量を算出す る。CyberKnife はフラットニングフィルタを装 備していないため一般的なリニアックと比較して 線量平坦度が劣る。このため、体積平均効果を考 慮して長さが 10 mm 以下の電離空洞をもつ電離 箱を使用することを推奨する<sup>2,4</sup>。また同様の理 由で、検出器の設置位置に細心の注意を払う必要 がある。

基準条件 <sup>CK</sup> $f_{msr}$  から照射野および水中深さ ( $d \le 20 \text{ cm}$ ) が変化した場合,  $k_{Qmn}^{Cmn}$ の変化は 1.000±0.003 程度であるため無視できる<sup>2)</sup>。しか し,体積平均効果で生じる過小評価を線質変換係 数に含める場合,直径1 cm 以下の照射野ではマ イクロ型電離箱であっても1%を超える補正が必 要である (表A 20.2)<sup>5)</sup>。特に直径5 mm など極 端に小さい照射野の出力係数の計測結果は他施設 のデータや文献値<sup>5)</sup> と比較し,確認してから臨床 で使用することが必要である。 表 A 20.5 に CyberKnife の標準計測の一例を 示す。

#### 3. TomoTherapy

表 A 20.3 に TomoTherapy の線質指標と水吸 収線量計測のための基準条件<sup>HT</sup>f<sub>msr</sub>を示す。

TomoTherapy の線質指標は,照射野 10 cm×5 cm, *SCD*=85 cm における水中深さ 20 g cm<sup>-2</sup> と 10 g cm<sup>-2</sup> での水吸収線量比を <sup>HT</sup>*TPR*<sub>20,10</sub> とする。 この <sup>HT</sup>*TPR*<sub>20,10</sub> と等価な従来の線質指標 *TPR*<sub>20,10</sub> は次式で求めることができる<sup>6</sup>。

$$TPR_{20,10} = 1.027 \text{ HT} TPR_{20,10}$$
 (A 20.6)

線質変換係数 $k_{Q,Q_0}$ はこの $TPR_{20,10}$ を用いて表 3.3から決定する。さらに,基準条件<sup>HT</sup> $f_{mst}$ での  $k_{Qmax,Q}^{fmst}$ は1とする。このときの不確かさは表A 20.4から0.3%程度である<sup>6,7)</sup>。<sup>HT</sup> $TPR_{20,10}$ は2005 年に0.632<sup>6</sup>,2009年に0.614<sup>7</sup>)など変遷が報告 されているので,ユーザは装置毎に測定する必要 がある。線質指標として $PDD(10)_x$ を使用する場 合はAAPM TG148を参照すること<sup>8,9</sup>。

水吸収線量計測の基準条件<sup>HT</sup>fmsr は SSD また

付録 20 CyberKnife および TomoTherapy の水吸収線量計測

項目	線質指標 HTTPR20,10	水吸収線量 D <sup>fmsr</sup> w,Qmsr
ファントム材質	水(固体ファントム <sup>a</sup> )	水
測定深	$10 \text{ g cm}^2 \geq 20 \text{ g cm}^2$	10 g cm <sup>-2</sup> ( $\pi$ : 10 cm)
電離箱	円筒形 <sup>b</sup>	円筒形 <sup>b</sup>
電離箱の基準点	幾何学的中心	幾何学的中心
SCD/SSD	SCD=85 cm	SSDまたはSCD=85 cm
照射野サイズ	$10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$	$10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$

**表 A 20.3** TomoTherapy の線質指標<sup>HT</sup>*TPR*<sub>20.10</sub> と水吸収線量計測の基準条件<sup>HT</sup>*f*<sub>msr</sub>

a TomoTherapyの開口部の空間的な制限によって水槽の設置が困難な場合,線質指標は固体 ファントムを用いて計測する。ただし,固体ファントムのサイズと密度を確認して <sup>HT</sup>TPR<sub>20.10</sub>の定義に従った計測をすること。

b 電離空洞の直径 6.3 mm 以下で長さが 10 mm 以下の電離箱を推奨する<sup>7,9)</sup>。

表 A 20.4 Tomo Therapy の照射野 10 cm×10 cm (fref) を基準とした線質変換係数

$f_{ m msr}$	$k_{\mathrm{Q}_{\mathrm{msr}},\mathrm{Q}}^{f_{\mathrm{msr}},f_{\mathrm{ref}}6)}$	$f_{ m pcsr}$	$k_{\mathrm{Q}_{\mathrm{pcsr}},\mathrm{Q}}^{f_{\mathrm{pcsr}},f_{\mathrm{ref}}10,1)}$
$10 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$	0.997	Helical, 5 cm	1.000
$10 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$	0.993	Helical, 2.5 cm	1.000
$2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$	0.990	Helical, 1 cm	0.997

※ k<sup>fmsr,fef</sup>はグラファイト壁のファーマ形電離箱モデルについて計算された 数値であり、体積平均効果を含まない。また、k<sup>fpesr,fref</sup>は NE2611 電離箱 について計算され、体軸方向のコリメータ開度をそれぞれ 5 cm、 2.5 cm および 1 cm とした値である。

表 A 20.5 CyberKnife および TomoTherapy の fmsr での標準計測の例

	CyberKnife	TomoTherapy
電離箱	TM31010 (PTW)	Exradin A1SL (Standard imaging)
電位計	UNIDOS webline (PTW)	Tomo Electrometer (Standard imaging)
N <sub>D,w</sub>	$3.024 \times 10^{-1} \text{ Gy nC}^{-1}$	$5.740 \times 10^{-1} \text{ Gy nC}^{-1}$
CK(HT)TPR <sub>20,10</sub>	0.639	0.614
$TPR_{20,10}$	0.680	$0.631 \ \ (= 1.027 \times^{\rm HT} TPR_{20,10})$
$k_{\mathrm{Q},\mathrm{Q}_0}$	-	1.001
$k_{\mathrm{Q},\mathrm{Q}_0}  k_{\mathrm{Q}_{\mathrm{msr}},\mathrm{Q}}^{f_{\mathrm{msr}},f_{\mathrm{ref}}}$	0.989	1.001×1.000
$M_{ m Qmsr}^{f_{ m msr}}$	4.855 nC	8.785 nC/min
$D_{\rm w,Q_{msr}}^{f_{\rm msr}}(d_{\rm c}=10~{\rm cm})$	1.452 Gy / 200MU	5.048 Gy/min
TMR / PDD	0.728 (TMR)	59.1 (PDD)
$D^{f_{ m msr}}_{ m w,Q_{ m msr}}(d_{ m r})$	$1.995 \text{ Gy} / 200 \text{MU} (d_r = 1.5 \text{ cm})$	8.541 Gy/min ( $d_r$ =1.2 cm)

は SCD=85 cm, 照射野  $A_0$ または A=10 cm×5 cm, 校正深  $d_c$ =10 g cm<sup>-2</sup> とする<sup>6-9</sup>. この校正深 に円筒形電離箱の幾何学的中心を一致させて計測 し,式 A 20.1 により水吸収線量を算出する.

TomoTherapy はフラットニングフィルタを装備していないため,一般的な治療装置と比較して

線量平坦度が劣る。よって、体積平均効果を考慮 して検出器を選択する必要がある(付録19参 照)。本標準計測法ではファーマ形電離箱は推奨 せず<sup>7)</sup>,電離空洞の直径が6.3 mm以下,長さが 10 mm以下の電離箱を推奨する<sup>7,9)</sup>。また同様の 理由で,電離箱の設置精度に細心の注意を払う必