

Topics

# 水吸収線量校正定数に基づく高エネルギー光子および電子線の線量測定<sup>a</sup>

熊本大学医療技術短期大学部  
荒木不次男

## はじめに

米国医学物理学会 American Association of Physicists in Medicine (AAPM) Task Group 51 (TG-51) と国際原子力機関 International Atomic Energy Agent (IAEA) は、高エネルギー光子と電子線を用いた外部照射の線量測定に対する新しいプロトコルをそれぞれ、1999年と2000年に出版した<sup>1), 2)</sup>。また、2001年には国際放射線単位測定委員会 International Commission on Radiation and Measurements (ICRU) が、水の吸収線量校正定数に基づく高エネルギー光子の線量測定について出版した<sup>3)</sup>。AAPM TG-51 プロトコル<sup>1)</sup> と IAEA Technical Report Series No. 398 (IAEA TRS-398) プロトコル<sup>2)</sup> における理論式と線量測定の手順は、<sup>60</sup>Co に対する水の吸収線量校正定数の  $N_{D,w}^{60Co}$  使用とユーザービームに対する線質変換係数 (beam quality conversion factor)  $k_Q$  に基づいている。従来の日本医学放射線学会物理部会による JARP プロトコル (1986)<sup>4)</sup>、米国医学物理学会による AAPM Task Group 21 (AAPM TG-21) プロトコル<sup>5)</sup>、国際原子力機関による IAEA Technical Report Series No. 277 (IAEA TRS-277) プロトコル<sup>6)</sup> は、コバルト照射線量校正定数  $N_x$ 、あるいは空気カーマ校正定数  $N_K$  の使用に基づいている。これらのプロトコルは、基本的に  $N_x$  や  $N_K$  から電離箱内の空気質量  $m_{air}$  を評価することが要求される。それから、ユーザービームに対する水吸収線量  $D_w$  が Bragg-Gray の空洞理論に基づいて決められる。

AAPM TG-51, IAEA TRS-398 および ICRU 64 は、Huq<sup>7)</sup> が述べているように一次標準に基づく  $N_{D,w}^{60Co}$  と  $k_Q$  の導入によって、簡便で精度の高い線量評価体系を構築している。この理由は、水吸収線量による標準では直接的に水吸収線量が評価されるため、照射線量や空気カーマに基づく標準に比べ強固な一次標準となる。さらに、 $k_Q$  の導入は後述のように線量評価に伴う不確定度を減少する傾向にある。

AAPM TG-51 は、従来の線量測定プロトコルといくつかの点で異なる。たとえば、光子ビームの線質は、

JARP と AAPM TG-21 で用いられている公称加速電圧 (MV)、あるいは IAEA TRS-277 で用いられている深さ 20cm と 10cm における組織ファントム線量比 tissue-phantom ratio の比 ( $TPR_{10}^{20}$ ) の代わりに、深部量百分率 percentage depth-dose (PDD) に基づいて決められる。すなわち、AAPM TG-51 の線質は PDD(10)<sub>r</sub> によって定義される。PDD(10)<sub>r</sub> は、線源表面間距離 source-surface distance (SSD) 100cm での水ファントム表面における照射野  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 、深さ 10cm での PDD の光子成分 (photon component) を表す。すなわち、PDD(10)<sub>r</sub> は加速器ヘッドからの電子線成分 (electron contamination) を除去した深部量百分率である。線量測定は、SSD あるいは線源回転軸間距離 source-axis distance (SAD) のどちらかでセットアップされる。SSD セットアップではファントム表面で、SAD セットアップでは検出器位置で、それぞれ定義された照射野  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  で線量測定される。線量校正に対する深さ (基準深) は、水ファントムの 10cm 深である。

電子線では、AAPM TG-51 と IAEA TRS-398 における線質 (beam quality) は 50% 線量深  $R_{50}$  によって定義され、従来のプロトコルに用いられている平均入射エネルギー  $\bar{E}_0$  と異なる。 $R_{50}$  は、SSD=100cm、ファントム表面での照射野  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  以上 (AAPM TG-51 は  $R_{50} > 8.5 \text{ cm}$ 、IAEA TRS-398 では  $R_{50} > 7 \text{ cm}$  で  $20 \times 20 \text{ cm}^2$  以上) のビームにおいて得られる。測定は、 $R_{50}$  から与えられた基準深  $d_{ref} = 0.6R_{50} - 0.1 \text{ (cm)}$  において行われる。従来のプロトコルは、電離量ピーク深  $d_{max}$  あるいは線量ピーク深  $R_{100}$  を使用している。基準深  $d_{ref}$  は、10MeV 以下の電子線では  $d_{max}$  に非常に近いが、高エネルギーでは  $d_{max}$  より深くなる。

AAPM TG-51 と IAEA TRS-398 における阻止能比は、ICRU37<sup>8)</sup> に基づく阻止能から計算されている。とくに、電子線ではモンテカルロ計算から得られた臨床ビームに近い電子線エネルギースペクトルを用いて ICRU37 の阻止能から計算されている<sup>9)</sup>。また、いくつかの円筒電離箱に使用されているアルミニウム中心電

極に対する補正も考慮されている<sup>10)</sup>。さらに、これらのプロトコルは $k_Q$ の使用によって、線質に依存する阻止能比や各補正係数がキャンセルされる傾向にあるため、各値の精度よりはむしろ比が重要となる。したがって、各値の不確定度に伴う線量評価の全不確定度を小さくできる<sup>11)</sup>。その上、実際の光子線量測定では、 $k_Q$ の使用によって従来のプロトコルに比べて吸収線量の算出が非常に簡便になる。電子線においては、AAPM TG-51で電子線質変換係数 $k'_{R50}$ と光子-電子線質変換係数 $k_{\text{ecal}}$ 、勾配補正係数 $P_{\text{gr}}^Q$ 、そして基準深での深部量百分率PDD( $d_{\text{ref}}$ )が必要となる。一方、IAEA TRS-398ではAAPM TG-51での $k_{R50}=k'_{R50}k_{\text{ecal}}$ に代わって $k_Q$ が用いられる。

以下にAAPM TG-51とIAEA TRS-398プロトコルの概要および線質変換係数、従来のプロトコルとの整合性などについて詳述する。

## 1. 新しい吸収線量測定プロトコル

### 1-1 AAPM TG-51プロトコル<sup>1)</sup>

AAPM TG-51において、線質 $Q$ の光子に対する水の吸収線量 $D_w^Q$ は、次式によって与えられる。

$$D_w^Q = M_Q k_Q N_{D,w}^{60\text{Co}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $M_Q$ は測定電荷で、 $M_Q = M_{\text{raw}} P_{\text{TP}} P_{\text{ion}} P_{\text{elec}} P_{\text{pol}}$ からなる。 $M_{\text{raw}}$ は測定点(電離箱の空洞中心：幾何学的中心)での補正を含まない指示値である。 $P_{\text{TP}}$ は標準大気状態(22°C, 1気圧)に対する大気(温度, 気圧)補正係数である。 $P_{\text{ion}}$ はイオン再結合損失補正係数、 $P_{\text{elec}}$ は電位計に対する補正係数(電位計と電離箱が一体で校正される場合は $P_{\text{elec}}=1.0$ )で、 $P_{\text{pol}}$ は極性効果に対する補正係数である。 $k_Q$ は線質変換係数で、ユーザービーム( $Q$ )と水吸収線量校正定数が適用されているビーム線質(通常は $^{60}\text{Co}$ γ線)との水吸収線量校正定数の比から次式で与えられる。

$$k_Q = N_{D,w}^Q / N_{D,w}^{60\text{Co}} \dots\dots\dots (2)$$

$k_Q$ は電離箱線量計に依存する係数でもある。 $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ は一次標準校正機関から得られた標準大気状態でのコバルトに対する水吸収線量校正定数である。

電子線では、基準深 $d_{\text{ref}}$ における水吸収線量は次式で与えられる。

$$D_w^Q(d_{\text{ref}}) = M_Q P_{\text{gr}}^Q k'_{R50} k_{\text{ecal}} N_{D,w}^{60\text{Co}} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $M_Q$ は電離箱の空洞中心が $d_{\text{ref}}$ に位置する場合の測定電荷である。 $P_{\text{gr}}^Q$ は勾配補正係数で、円筒電離箱の測定点での電離量の傾きに依存する。 $k'_{R50}$ は基準の電子線エネルギー $Q_{\text{ecal}}$ (ここでは $R50=7.5\text{cm}$ )に対する水吸収線量変換係数 $N_{D,w}^{Q_{\text{ecal}}}$ を、任意の電子線エネルギー $Q$

に対する $N_{D,w}^Q$ に変換するための電子線質変換係数である。 $k_{\text{ecal}}$ は $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ を $N_{D,w}^{Q_{\text{ecal}}}$ に変換する光子-電子線質変換係数である。ここで、積 $P_{\text{gr}}^Q k'_{R50} k_{\text{ecal}}$ は、電子線における基準深での $k_Q$ に等しい。AAPM TG-51では、電子線エネルギーが $R50 < 2.6\text{cm}$  ( $\leq 6\text{MeV}$ )で平行平板形電離箱を推奨しているが<sup>5)</sup>、 $R50 < 4.3\text{cm}$  (10MeV)でも平行平板形電離箱の使用が望ましいとしている。

### 1-2 IAEA TRS-398プロトコル<sup>2)</sup>

IAEA TRS-398において、線質 $Q$ の光子に対する水の吸収線量 $D_w^Q$ は、AAPM TG-51と表記法は異なるが同様に式(1)から得られ、電離箱の空洞中心で測定される。

電子線では基準深 $d_{\text{ref}}$ における水吸収線量は、AAPM TG-51と違って光子と同じ式(1)で与えられる。しかしながら、電子線における $M_Q$ は、円筒電離箱の空洞中心が $d_{\text{ref}}$ より $0.5r_{\text{cyl}}$ 深い位置での測定電荷である。ここで、 $r_{\text{cyl}}$ は円筒電離箱空洞の半径(cm)である。すなわち、電子線におけるIAEA TRS-398の $M_Q$ と $k_Q$ はそれぞれ、AAPM TG-51の式(3)の $M_Q P_{\text{gr}}^Q$ と $k'_{R50} k_{\text{ecal}}$ に相当する。IAEA TRS-398では、電子線エネルギーが $R50 < 4.0\text{cm}$ で平行平板形電離箱を推奨している。

AAPM TG-51とIAEA TRS-398の基本的な違いは、光子における線質指標としてそれぞれ、 $\text{PDD}(10)_x$ と $\text{TPR}_{10}^{20}$ を使用している点である。両プロトコルの詳細な比較はTable 1, 2に示されている。

## 2. 線質変換係数(beam quality conversion factor) $k_Q$ の算出

線質 $Q$ に対する水の吸収線量 $D_w^Q$ は、Spencer-Attixの空洞理論により次式で求まる。

$$D_w^Q = D_{\text{gas}}^Q (\bar{L}/\rho)_{\text{gas}}^w \text{ (Gy)} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、電離箱内の空洞空気(湿潤空気gas)の吸収線量 $D_{\text{gas}}^Q$ は、測定電荷 $M_Q$ (C)から

$$D_{\text{gas}}^Q = (W_{\text{gas}}/e) (M_Q/m_{\text{gas}}) \dots\dots\dots (5)$$

である。 $m_{\text{gas}}$ は、空洞空気(gas)の質量である。この湿潤空気に対する湿度補正係数 $K_h$ <sup>12)</sup>は

$$K_h = (W/e)_{\text{air}}^{\text{gas}} (m_{\text{air}}/m_{\text{gas}}) (\bar{L}/\rho)_{\text{gas}}^{\text{air}} \dots\dots\dots (6)$$

で定義され、相対湿度10%~80%(22°C, 1気圧)では $K_h=0.9973 \pm 0.0005$ <sup>12)</sup>である。添字airは乾燥空気を表す。乾燥空気では、 $(W_{\text{air}}/e)=33.97 \pm 0.05$  (J/C)である<sup>13)</sup>。ここで、 $(W_{\text{gas}}/e)$ 、 $m_{\text{gas}}$ 、 $(\bar{L}/\rho)_{\text{gas}}^w$ は湿潤空気に対する量である。式(4)、(5)、(6)から

$$D_w^Q = K_h (W_{\text{air}}/e) (M_Q/m_{\text{air}}) (\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w \dots\dots\dots (7)$$

Table 1 Comparison of AAPM TG-51 and IAEA TRS-398 protocols for reference conditions used for photon beam dosimetry.

	AAPM TG-51	IAEA TRS-398
Phantom material	Water	
Beam quality	PDD(10) <sub>x</sub>	TPR <sub>10</sub> <sup>20</sup>
Chamber type	Cylindrical	Cylindrical
Measurement depth <i>d<sub>ref</sub></i> (Calibration depth)	10cm	For TPR <sub>20,10</sub> <0.7, 10cm (or 5cm) For TPR <sub>20,10</sub> ≥0.7, 10cm
Measurement point of the chamber	On the central axis at the center of the cavity volume	
Position of the measurement point of the chamber	At the measurement depth <i>d<sub>ref</sub></i>	
SSD/SAD	100cm	
Field size	10×10cm <sup>2</sup>	

<sup>60</sup>Co: *d<sub>ref</sub>*= 5cm (or 10cm), SSD or SCD=80cm or 100cm.

Table 2 Comparison of AAPM TG-51 and IAEA TRS-398 protocols for reference conditions used for electron beam dosimetry.

	AAPM TG-51	IAEA TRS-398
Phantom material	Water	For <i>R</i> <sub>50</sub> ≥ 4cm, water For <i>R</i> <sub>50</sub> < 4cm, water or plastic
Beam quality	<i>R</i> <sub>50</sub> =1.029 <i>l</i> <sub>50</sub> -0.06 (cm) 2≤ <i>l</i> <sub>50</sub> ≤10cm	<i>l</i> <sub>50</sub> ≤10cm
Chamber type	For <i>R</i> <sub>50</sub> ≥2.6cm, pp or cyl For <i>R</i> <sub>50</sub> <2.6cm, pp	For <i>R</i> <sub>50</sub> ≥ 4cm, pp or cyl For <i>R</i> <sub>50</sub> < 4cm, pp
Measurement depth <i>d<sub>ref</sub></i> (Calibration depth)	<i>d<sub>ref</sub></i> =0.6 <i>R</i> <sub>50</sub> -0.1cm	
Measurement point of chamber	For pp-chambers, on the inner surface of the window at its center For cyl-chambers, on the central axis at the center of the cavity volume	
Position of the measurement point of the chamber	For pp chambers, at <i>d<sub>ref</sub></i> For cyl chambers, at <i>d<sub>ref</sub></i>	For cyl-chambers, 0.5 <i>r</i> <sub>cy1</sub> deeper than <i>d<sub>ref</sub></i>
SSD	100cm	
Field size at phantom surface	For <i>R</i> <sub>50</sub> ≤8.5cm, ≥10×10cm <sup>2</sup> For <i>R</i> <sub>50</sub> >8.5cm, ≥20×20cm <sup>2</sup>	For <i>R</i> <sub>50</sub> ≤7cm, ≥10×10cm <sup>2</sup> For <i>R</i> <sub>50</sub> >7cm, ≥20×20cm <sup>2</sup>

式(7)は、実際にはいろいろな補正係数を考慮する必要があり、水の吸収線量は

$$D_w^Q = K_h (W_{air}/e) (M_Q/m_{air}) (\bar{L}'/\rho)_{air}^w P_{wall} P_{gr} P_{fl} P_{cel} \dots (8)$$

で表される。 $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$ については、2-5-3項で説明されている。ここで、水吸収線量校正定数 $N_{D,w}^Q$ は

$$N_{D,w}^Q = D_w^Q / M_Q \quad (\text{Gy/C}) \dots (9)$$

であり、式(8)と(9)から次式が求まる。

$$N_{D,w}^Q = (K_h / m_{air}) (W_{air}/e) (\bar{L}'/\rho)_{air}^w P_{wall} P_{gr} P_{fl} P_{cel} \dots (10)$$

したがって、 $N_{D,w}^Q = k_Q N_{D,w}^{60Co}$  から線質変換係数 $k_Q$ は、次式で得られる。

$$k_Q = \frac{\left[ (\bar{L}'/\rho)_{air}^w P_{wall} P_{gr} P_{fl} P_{cel} \right]_Q}{\left[ (\bar{L}'/\rho)_{air}^w P_{wall} P_{gr} P_{fl} P_{cel} \right]_{60Co}} \cdot \frac{(W_{air})_Q}{(W_{air})_{60Co}} \dots (11)$$

ここで、高エネルギー光子および電子線と<sup>60</sup>Coγ線の $W$ 値が、 $(W_{air})_Q = (W_{air})_{60Co}$ と仮定すれば $k_Q$ は

$$k_Q = \frac{\left[ (\bar{L}'/\rho)_{air}^w P_{wall} P_{gr} P_{fl} P_{cel} \right]_Q}{\left[ (\bar{L}'/\rho)_{air}^w P_{wall} P_{gr} P_{fl} P_{cel} \right]_{60Co}} \dots (12)$$

で表される。

電子線については、AAPM TG-51は $k_Q$ を $k'_{R50}$ と $k_{ecal}$ に分けている。

$$k_Q = p_{gr}^Q k'_{R_{50}} k_{ccal} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、円筒電離箱の $P_{gr}^Q$ は $0.5r_{cyl}$ 変位した測定から次式で得られる。

$$p_{gr}^Q = M_{raw}^Q(d_{ref} + 0.5r_{cyl}) / M_{raw}^Q(d_{ref}) \dots\dots\dots (14)$$

$k'_{R_{50}}$ は基準の電子線エネルギー $Q_{ccal}$ (ここでは $R_{50}=7.5\text{cm}$ )に対する $N_{D,w}^{Q_{ccal}}$ を、任意の電子線エネルギー $Q$ に対する $N_{D,w}^{Q_{ccal}}$ に変換するための電子線質変換係数で、次式で表される。

$$k'_{R_{50}} = \frac{\left[ \left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^w P_{wall} P_{fl} P_{cel} \right]_{R_{50}}}{\left[ \left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^w P_{wall} P_{fl} P_{cel} \right]_{R_{50}=7.5\text{cm}}} \dots\dots\dots (15)$$

$k_{ccal}$ は $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ を $N_{D,w}^{Q_{ccal}}$ に変換する光子-電子線質変換係数で、次式で表される。

$$k_{ccal} = \frac{\left[ \left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^w P_{wall} P_{fl} P_{cel} \right]_{R_{50}=7.5\text{cm}}}{\left[ \left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^w P_{wall} P_{gr} P_{fl} P_{cel} \right]_{60\text{Co}}} \dots\dots\dots (16)$$

また、任意の電子線エネルギー $Q$ ( $R_{50}$ )と $^{60}\text{Co}$ γ線の線質変換係数は、 $k_{R_{50}}=k'_{R_{50}}k_{ccal}$ より

$$k_{R_{50}} = \frac{\left[ \left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^w P_{wall} P_{fl} P_{cel} \right]_{R_{50}}}{\left[ \left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^w P_{wall} P_{gr} P_{fl} P_{cel} \right]_{60\text{Co}}} \dots\dots\dots (17)$$

で表される。

2-1 電子フルエンス係数,  $P_{fl}$

光子では $P_{fl}=1.0$ である。電子線に対しては、基準深 $d_{ref}$ においても従来のプロトコルから評価される。

2-2 勾配補正係数,  $P_{gr}$

光子では、 $P_{gr}$ は電離箱を $0.6r_{cyl}$ 変位した線量比に相当する。電離箱の幾何学的中心を測定点としたときの勾配補正係数は、SSD=100cmのPDDで線量校正する場合、次式から得られる<sup>14)</sup>。

$$P_{gr} = 1 - 0.6r_{cyl} \left[ (1/10) \ln(D_{20}/D_{10}) \right] (r_{cyl} : \text{cm}) \dots\dots (18)$$

$D_{20}$ と $D_{10}$ はSSD=100cmにおける深さ10cmと20cmの相対深部線量である。あるいは、 $^{60}\text{Co}$ γ線に対しては $P_{gr}=1-0.04r_{cyl}(r_{cyl} : \text{cm})^2$ から得られる。 $^{60}\text{Co}$ γ線~18MV-X線では( $P_{gr}^Q/P_{gr}^{60\text{Co}}$ )比は+0.5%以内である<sup>15)</sup>。

電子線では、AAPM TG-51は $d_{ref}$ と $d_{ref}+0.5r_{cyl}$ の二つの深さに円筒電離箱の幾何学的中心を配置したときの電離量比である実測 $P_{gr}^Q$ を使用するが、IAEA TRS-398では $0.5r_{cyl}$ 変位法での測定を採用している。

Table 3  $P_{cel}$  correction factor required for farmer-like chambers with an aluminum electrode of 1 mm diameter, based on the calculations of Ma and Nahum (Ref. 10). Factors apply past  $d_{max}$  in photon beams and near  $d_{max}$  or  $0.6R_{50}$ — $0.1\text{ cm}$  in electron beams. The table is adapted from Rogers (Ref. 11).

Beam quality			$P_{cel}$
NAP <sup>a</sup> /MeV	TPR <sub>20,10</sub>	PDD(10) <sub>x</sub>	
Photons			
<sup>60</sup> Co	0.58	56%	0.9926±0.0015
4MV	0.62	62%	0.9935±0.0007
6MV	0.67	67%	0.9930±0.0011
10MV	0.73	72%	0.9945±0.0009
15MV	0.76	78%	0.9955±0.0016
24MV	0.80	86%	0.9957±0.0009
Electrons			
<13MeV $R_{50}<5.5\text{cm}$			1.000
≥13MeV $R_{50}≥5.5\text{cm}$			0.998

<sup>a</sup>Nominal Accelerator Potential.

2-3 中心電極に対する補正係数,  $P_{cel}$

$P_{cel}$ は中心電極が空気等価でないことに対する補正で、グラフアイト中心電極では $P_{cel}=1.0$ であるが<sup>8)</sup>、1mm径のアルミニウム中心電極では光子に対して次式で与えられる<sup>11)</sup>。

$$P_{cel} = 0.9862 + 0.000112 \cdot \text{PDD}(10)_x \dots\dots\dots (19)$$

1mm径のアルミニウム中心電極に対する光子と電子線の $P_{cel}$ 値<sup>10)</sup>をTable 3に示す。光子において( $P_{cel}^Q/P_{cel}^{60\text{Co}}$ )比は+0.3%以内である。

2-4 電離箱壁の補正係数,  $P_{wall}$

$P_{wall}$ は電離箱壁と防水スリーブが水ファントムと等価でないこと(材質の違い)に対する補正で、次式で求められる<sup>2)</sup>。

$$P_{wall} = \frac{\alpha \left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^{wall} (\bar{\mu}/\rho)_{air}^{wall} + \tau \left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^{sleeve} (\bar{\mu}/\rho)_{sleeve}^w + (1-\alpha-\tau) \left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^w}{\left( \bar{L}/\rho \right)_{air}^w} \dots\dots\dots (20)$$

ここで、 $\tau(t_{sleeve})=\alpha(t_{wall+sleeve})-\alpha(t_{wall})$ である。 $\alpha$ は電離箱空洞空気中の電離の内、電離箱壁からの電子による割合、 $\tau$ は防水スリーブからの電子による割合、 $(1-\alpha-\tau)$ は水媒質からの電子による割合である。 $t_{wall}$ と $t_{sleeve}$ は、それぞれ電離箱壁と防水スリーブの厚さ( $\text{g}/\text{cm}^2$ )である。 $\alpha$ と $(\bar{\mu}/\rho)_{med}^w$ はIAEA TRS-277、 $(\bar{L}/\rho)_{air}^{med}$ はAndreo<sup>16)</sup>によってそれぞれTPR<sub>10</sub><sup>20</sup>の関数として与えられている。いろいろな物質に対する $(\bar{\mu}/\rho)_{med}^w$ と $(\bar{L}/\rho)_{air}^{med}$ の値をTable 4, 5に示す。 $(\bar{L}/\rho)_{air}^w$ は、式(28)から計算されている。ただし、 $^{60}\text{Co}$ γ線に対しては

Table 4 Values of mass energy absorption coefficient ratio for water to wall material as a function of  $TPR_{20,10}^{20}$  [from IAEA TRS-277 (Ref. 6)].

$TPR_{20,10}$	$D_{20}/D_{10}^a$	A-150	C-552	Delrin	Graphite	Nylon	PMMA	Polystyrene
$^{60}Co$		1.011	1.110	1.042	1.113	1.015	1.030	1.034
0.59	0.51	1.012	1.110	1.042	1.113	1.015	1.030	1.034
0.62	0.54	1.012	1.110	1.042	1.113	1.015	1.031	1.035
0.65	0.56	1.013	1.110	1.043	1.114	1.016	1.031	1.036
0.68	0.58	1.015	1.109	1.043	1.115	1.018	1.032	1.038
0.70	0.60	1.016	1.108	1.043	1.115	1.019	1.033	1.040
0.72	0.62	1.019	1.107	1.043	1.117	1.021	1.035	1.042
0.74	0.63	1.023	1.105	1.044	1.119	1.026	1.038	1.048
0.76	0.65	1.028	1.103	1.045	1.121	1.030	1.041	1.053
0.78	0.66	1.035	1.100	1.046	1.125	1.037	1.045	1.061
0.80	0.68	1.043	1.096	1.048	1.130	1.045	1.051	1.071
0.82	0.69	1.051	1.093	1.049	1.134	1.054	1.056	1.081

<sup>a</sup>Values calculated from  $TPR_{20,10}=1.2661PPD_{20,10}-0.0595$  (Ref. 22).

Table 5 Values of Spencer-Attix medium to air stopping power ratio ( $\Delta=10keV$ ) as a function of  $TPR_{20,10}^{20}$  ( $10\times 10cm^2$ ) [from Andreo (Ref. 16)].

$TPR_{20,10}$	A-150	C-552	Delrin	Graphite	Nylon	PMMA	Polystyrene	Water <sup>a</sup>
$^{60}Co$	1.141	0.996	1.080	1.002	1.142	1.102	1.110	1.133
0.59	1.139	0.994	1.079	1.001	1.140	1.100	1.109	1.130
0.62	1.136	0.991	1.075	0.997	1.136	1.097	1.105	1.128
0.65	1.130	0.988	1.071	0.992	1.131	1.093	1.101	1.124
0.68	1.124	0.983	1.065	0.986	1.124	1.087	1.095	1.119
0.70	1.118	0.979	1.060	0.981	1.118	1.082	1.090	1.114
0.72	1.112	0.974	1.055	0.976	1.112	1.077	1.084	1.109
0.74	1.105	0.968	1.048	0.970	1.104	1.070	1.078	1.103
0.76	1.097	0.961	1.041	0.963	1.096	1.063	1.070	1.096
0.78	1.087	0.954	1.032	0.955	1.087	1.054	1.062	1.088
0.80	1.077	0.945	1.023	0.947	1.076	1.045	1.052	1.079
0.82	1.065	0.936	1.012	0.938	1.065	1.034	1.041	1.068

<sup>a</sup>Values calculated by Eq. (28).

$$\alpha(t_{wall}) = 1 - e^{-11.88t_{wall}} \quad \dots\dots\dots(21)$$

$$\tau(t_{sliceve}) = e^{-11.88t_{wall}} (1 - e^{-11.88t_{sliceve}}) \quad \dots\dots\dots(22)$$

である<sup>2)</sup>。電子線に対しては $P_{wall}=1.0$ である。

2-5 線質評価と阻止能比

2-5-1 線質評価

光子における線質は、AAPM TG-51では電子線成分 (electron contamination) を含まない光子成分による SSD=100cm, 照射野 $10\times 10cm^2$ , 深さ10cmにおける  $PDD(10)_x$ から評価される。光子エネルギー<10MV-X線に対しては

$$PDD(10)_x = PDD(10) \quad \dots\dots\dots(23)$$

である。光子エネルギー $\geq 10MV$ -X線では、1mm鉛フ

ォイルをファントム表面から50cmあるいは30cmに置いて測定した $PDD(10)_{Pb}$ から次式で求められる。

$$PDD(10)_x = [0.8905 + 0.00150 \cdot PDD(10)_{Pb}] PDD(10)_{Pb} \quad \dots(24)$$

[1mm鉛ファイルをファントム表面から50cmに設定,  $PDD(10)_{Pb} \geq 73\%$ ]

$$PDD(10)_x = [0.8116 + 0.00264 \cdot PDD(10)_{Pb}] PDD(10)_{Pb} \quad \dots(25)$$

[1mm鉛ファイルをファントム表面から30cmに設定,  $PDD(10)_{Pb} \geq 71\%$ ]

ここで、 $PDD(10)_{Pb}$ が閾値より小さければ、 $PDD(10)_x = PDD(10)_{Pb}$ である。また、 $PDD(10)$ ,  $PDD(10)_x$ ,  $PDD(10)_{Pb}$ はすべて $0.6r_{cyl}$ 変位法で定義される。一方、IAEA TRS-398における線質は $TPR_{10}^{20}$ で定義される。

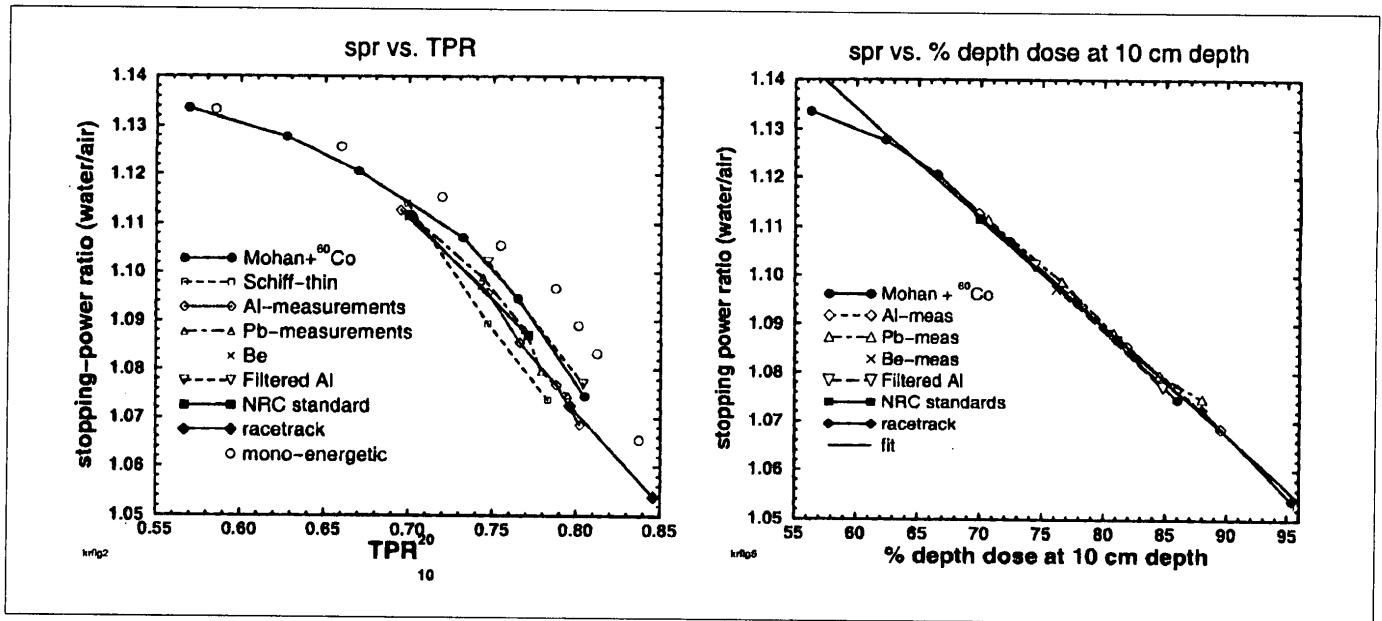


Fig. 1 Water to air stopping power ratios vs  $TPR_{10}^{20}$  or  $PDD(10)_x$  for various photon spectra. The figure is adapted from Kosunen and Rogers (Ref. 18).

電子線における線質は、両プロトコルとも50%線量深 $R_{50}$ (cm)で定義され、50%電離量深 $I_{50}$ (cm)から次式で求められる。ただし、 $I_{50}$ はSSD=100cm、ファントム表面での照射野 $10 \times 10 \text{ cm}^2$ 以上(TG-51は $R_{50} > 8.5$  cm, TRS-398では $R_{50} > 7$  cmで $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 以上)のビームにおいて $0.5r_{cyt}$ 変位法で測定される。

$$R_{50} = 1.029 I_{50} - 0.06 \text{ (cm)},$$

$$\text{(TG-51: } 2 \leq I_{50} \leq 10 \text{ cm, TRS-398: } I_{50} \leq 10 \text{ cm)} \dots (26)$$

2-5-2 制限衝突質量阻止能比,  $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$

$^{60}\text{Co}$ γ線に対する水と空気の阻止能比は、AAPM TG-51で $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w = 1.1335$ , IAEA TRS-398で $= 1.133$ である。X線に対しては、次式から得られる。

$$\text{AAPM TG-51: } (\bar{L}'/\rho)_{air}^w = 1.275 - 0.00231 \cdot PDD(10)_x$$

(RogersとYang<sup>17)</sup>) ..... (27)

$$\text{IAEA TRS-398: } (\bar{L}'/\rho)_{air}^w =$$

$$c_0 + c_1 (TPR_{10}^{20}) + c_2 (TPR_{10}^{20})^2 + c_3 (TPR_{10}^{20})^3 \quad (\text{Andreo}^{16})$$

$$c_0 = 1.3614, c_1 = -1.2963, c_2 = 2.5302, c_3 = -1.6896$$

..... (28)

Fig. 1には、線質指標 $PDD(10)_x$ と $TPR_{10}^{20}$ から評価された $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$ の比較<sup>18)</sup>を示す。 $PDD(10)_x$ と $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$ の関係は、低エネルギー領域を除いて、いろいろな光子スペクトルに対して式(27)に示すように直線関係にある。一方、 $TPR_{10}^{20}$ と $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$ の関係は、光子スペクトルに依存した変動が見られる。しかしながら、 $TPR_{10}^{20}$ は臨床に用いられる光子ビーム (filtrated photon beam) に対し

て、Fig. 2と式(28)に示されるように $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$ と良い相関にある。著者ら<sup>15)</sup>が評価した $^{60}\text{Co}$ γ線~18MV-X線の臨床ビームの $PDD(10)_x$ と $TPR_{10}^{20}$ に対する $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$ 値は、0.3%以内で一致する。

電子線では、AAPM TG-51とIAEA TRS-398とも基準深 $d_{ref} = 0.6R_{50} - 0.1$  (cm)における $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$ <sup>19)</sup>は次式で与えられる。

$$(\bar{L}'/\rho)_{air}^w (R_{50}, d_{ref}) = 1.2534 - 0.1487 (R_{50})^{0.2144}$$

$$(R_{50} : \text{cm}) \dots \dots \dots (29)$$

また、任意の深さにおける $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$ <sup>19)</sup>は次式で与えられる。

$$(\bar{L}'/\rho)_{air}^w (R_{50}, d) = \frac{a + bx + cx^2 + dy}{1 + ex + fx^2 + gx^3 + hy} \dots \dots \dots (30)$$

(ただし、 $1 \leq R_{50} \leq 20 \text{ cm}$ ,  $0.02 \leq d/R_{50} \leq 1.2$ )

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

$$a = 1.0752, b = -0.50867, c = 0.088670, d = -0.08402$$

$$e = -0.42806, f = 0.064627, g = 0.003085, h = -0.12460$$

である。電子線に対する $(\bar{L}'/\rho)_{air}^w$ をTable 6に示す。

2-5-3 PTW 23333 (PTW30001) 円筒電離箱に対する $k_Q$ の算出

A. 10 MV-X線の $k_Q$

JARP標準測定法の付録<sup>4)</sup>から引用した10MV-X線のビームデータは、 $TPR_{10}^{20} = 0.738$ ,  $PDD(10) = 72.6\%$ である。ここで、 $PDD(10)$ は式(18)から得られた $P_{gr} = 0.991$

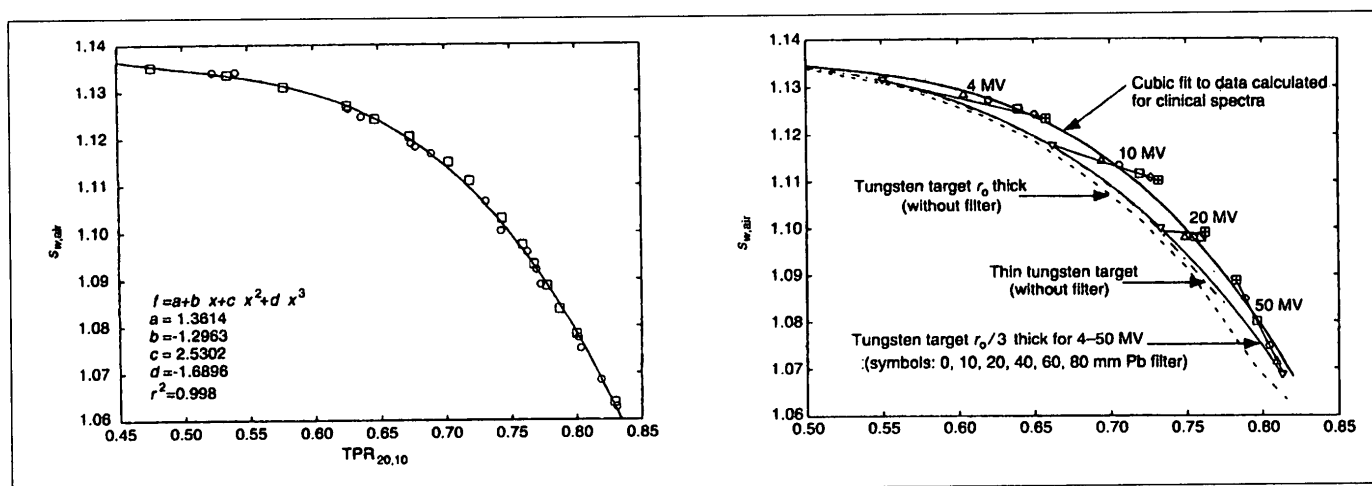


Fig. 2 Spencer-Attix water to air stopping power ratio ( $\Delta=10$  keV) as a function of  $TPR_{20,10}^{20}$ . (a) Clinical photon beams, (b) Photon beams with various target and filter combinations. The thick solid line is the cubic fit to data calculated for clinical beams shown in (a). The figure is adapted from IAEA TRS-398 (Ref. 2).

Table 6 Values of Spencer-Attix water to air stopping power ratio ( $\Delta=10$  keV) as a function of  $R_{50}$  and depth. Values calculated by Eq. (30) [from Burns et al. (Ref. 19)].

depth cm	$R_{50}$ (cm)																			
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0		
0.0	1.075	1.066	1.059	1.052	1.046	1.041	1.029	1.019	1.010	1.003	0.996	0.990	0.984	0.979	0.969	0.961	0.954	0.948		
0.1	1.080	1.071	1.063	1.056	1.049	1.044	1.032	1.021	1.012	1.005	0.998	0.991	0.985	0.980	0.970	0.962	0.955	0.949		
0.2	1.085	1.075	1.067	1.059	1.053	1.047	1.034	1.024	1.015	1.007	0.999	0.993	0.987	0.981	0.972	0.963	0.956	0.950		
0.3	1.091	1.080	1.071	1.063	1.056	1.050	1.037	1.026	1.017	1.008	1.001	0.994	0.988	0.983	0.973	0.964	0.957	0.950		
0.4	1.096	1.085	1.075	1.067	1.060	1.053	1.040	1.029	1.019	1.010	1.003	0.996	0.990	0.984	0.974	0.966	0.958	0.951		
0.5	1.102	1.090	1.080	1.071	1.063	1.057	1.043	1.031	1.021	1.012	1.005	0.998	0.991	0.986	0.975	0.967	0.959	0.952		
0.6	1.108	1.095	1.084	1.075	1.067	1.060	1.046	1.034	1.023	1.014	1.007	0.999	0.993	0.987	0.977	0.968	0.960	0.953		
0.8	1.120	1.105	1.093	1.083	1.075	1.067	1.051	1.039	1.028	1.019	1.010	1.003	0.996	0.990	0.979	0.970	0.962	0.955		
1.0	1.132	1.116	1.103	1.092	1.083	1.074	1.058	1.044	1.033	1.023	1.014	1.006	0.999	0.993	0.982	0.972	0.964	0.957		
1.2	1.146	1.127	1.113	1.101	1.091	1.082	1.064	1.049	1.037	1.027	1.018	1.010	1.003	0.996	0.985	0.975	0.966	0.959		
1.4	1.160	1.139	1.124	1.110	1.099	1.090	1.070	1.055	1.042	1.032	1.022	1.014	1.006	0.999	0.987	0.977	0.968	0.960		
1.6		1.152	1.135	1.120	1.108	1.098	1.077	1.061	1.048	1.036	1.026	1.017	1.010	1.002	0.990	0.979	0.970	0.962		
1.8			1.146	1.131	1.118	1.106	1.084	1.067	1.053	1.041	1.030	1.021	1.013	1.006	0.993	0.982	0.972	0.964		
2.0				1.159	1.141	1.127	1.115	1.091	1.073	1.058	1.046	1.035	1.025	1.017	1.009	0.996	0.984	0.975	0.966	
2.5					1.154	1.139	1.111	1.089	1.072	1.058	1.046	1.035	1.026	1.018	1.003	0.991	0.980	0.971		
3.0						1.165	1.132	1.107	1.088	1.072	1.058	1.046	1.036	1.027	1.011	0.997	0.986	0.976		
3.5							1.155	1.126	1.104	1.086	1.071	1.058	1.046	1.036	1.019	1.004	0.992	0.982		
4.0								1.147	1.122	1.101	1.084	1.070	1.057	1.046	1.027	1.012	0.998	0.987		
4.5									1.141	1.118	1.099	1.083	1.069	1.057	1.036	1.019	1.005	0.993		
5.0										1.162	1.136	1.115	1.097	1.081	1.068	1.045	1.027	1.012	0.999	
5.5											1.156	1.132	1.112	1.094	1.080	1.055	1.035	1.019	1.005	
6.0												1.150	1.127	1.109	1.092	1.065	1.044	1.026	1.012	
6.5													1.145	1.124	1.106	1.076	1.053	1.034	1.018	
7.0														1.140	1.120	1.088	1.063	1.042	1.025	
8.0															1.152	1.113	1.083	1.060	1.040	
9.0																1.142	1.106	1.079	1.056	
10.0																	1.132	1.100	1.074	
11.0																		1.161	1.123	1.093
12.0																			1.149	1.115
13.0																				1.138
14.0																				1.164

を掛けて求めた。また、10 MV-X線ではPDD(10)<sub>x</sub>とPDD(10)の違いによる $k_Q$ 値の違いは、0.1%以下であるのでPDD(10)<sub>x</sub>=PDD(10)とした。

<sup>60</sup>Coγ線に対する阻止能比と各補正係数

$$(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w = 1.1335 \text{ (AAPM TG-51)}$$

$$(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w = 1.133 \text{ (IAEA TRS-398)}$$

$P_{\text{gr}} = 0.992$  (AAPM TG-51: AAPM TG-21から得られている)

$$P_{\text{gr}} = 0.988 \text{ [IAEA TRS-398: } P_{\text{gr}} = 1 - 0.04 r_{\text{cyl}} (r_{\text{cyl}}: \text{cm)}]$$

$P_{\text{wall}} = 1.001$  [AAPM TG-51: 式(20), 防水スリーブなし]

$P_{\text{wall}} = 1.001$  [IAEA TRS-398: 式(20), (21), (22), アクリル0.5mm厚の防水スリーブ]

$$P_{\text{cel}} = 0.993 \text{ (AAPM TG-51とIAEA TRS-398: Table 3)}$$

10 MV-X線に対する阻止能比と各補正係数

$$(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w = 1.1073 \text{ [AAPM TG-51: 式(27)]}$$

$$(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w = 1.1037 \text{ [IAEA TRS-398: 式(28)]}$$

$P_{\text{gr}} = 0.994$  (AAPM TG-51: AAPM TG-21から得られている),

$$P_{\text{gr}} = 0.991 \text{ [IAEA TRS-398: 式(18)]}$$

$P_{\text{wall}} = 1.001$  [AAPM TG-51: 式(20), 防水スリーブなし]

$P_{\text{wall}} = 1.002$  [IAEA TRS-398: 式(20), アクリル0.5mm厚の防水スリーブ]

$$P_{\text{cel}} = 0.995 \text{ (AAPM TG-51とIAEA TRS-398: Table 3)}$$

以上の値を式(12)に代入すると、AAPM TG-51で $k_Q = 0.981$ , IAEA TRS-398で $k_Q = 0.981$ となる。<sup>60</sup>Coγ線と10 MV-X線の各補正係数の比が1.0に近いことから、 $k_Q$ はほとんど $(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w$ に依存することがわかる。なお、 $k_Q$ は<sup>60</sup>Coγ線に対する比であるため、SSDあるいはSADセットアップの校正条件において同じ値が用いられる。

B. 16 MeV-電子線( $R_{50} = 6.45 \text{ cm}$ ,  $d_{\text{ref}} = 3.77 \text{ cm}$ )の $k_Q$

$$(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w = 1.0316 \text{ [AAPM TG-51とIAEA TRS-398: 式(29)]}$$

$$P_{\text{fl}} = 0.975^{2)} \text{ (AAPM TG-51とIAEA TRS-398)}$$

$$P_{\text{cel}} = 0.998 \text{ (AAPM TG-51とIAEA TRS-398: Table 3)}$$

<sup>60</sup>Coγ線に対する阻止能比と各補正係数を式(17)に代入するとそれぞれ、AAPM TG-51で $k_{R50} = k'_{R50} k_{\text{cel}} = 0.899$ , IAEA TRS-398で $k_Q = 0.902$ となる。

### 3. 線質指標PDD(10)<sub>x</sub>とTPR<sub>10</sub><sup>20</sup>で評価された $k_Q$ の違い

最近の報告<sup>20)</sup>によると、TPR<sub>10</sub><sup>20</sup>よりもPDD(10)<sub>x</sub>を線質指標に用いる方が、いろいろな光子ビームスペクトル [filtrated (clinical) and non-filtrated (non-clinical) photon beam] に対して、実測と計算した $k_Q$ 値がよく一致する。しかしながら、臨床に用いられる光子ビーム (filtrated photon beam) においては、TPR<sub>10</sub><sup>20</sup>を線質指標としても実測と計算した $k_Q$ 値はよく一致する<sup>21)</sup>。著者ら<sup>15)</sup>が臨床ビームを用いて比較したPDD(10)<sub>x</sub>とTPR<sub>10</sub><sup>20</sup>に対する計算 $k_Q$ 値、すなわちAAPM TG-51とIAEA TRS-398による $k_Q$ 値の違いは0.4%以内であり、とくに10MV以下ではよく一致する。

### 4. 従来のプロトコルとの整合性

JARPプロトコル(1986)を最新の計算式とデータにより改訂することによって、AAPM TG-51とIAEA TRS-398と整合性を持たせることができる。線質 $Q$ に対する $N_x^Q$ は、式(10)によって与えられる。式(10)において電離箱空洞空気(乾燥空気)の質量 $m_{\text{air}}$ は、コバルト照射線量校正定数 $N_x$ から次式で与えられる。

$$1/m_{\text{air}} = N_x A_c A_w K_{\text{cel}} \dots\dots\dots (31)$$

これを式(10)に代入すると

$$D_w^Q = N_x A_c A_w K_{\text{cel}} K_h M_Q (W_{\text{air}}/e) \left[ (\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w P_{\text{wall}} P_{\text{gr}} P_{\text{fl}} P_{\text{cel}} \right]_Q \dots\dots\dots (32)$$

となる。ただし、JARPでは $P_{\text{wall}} = [f_w (\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w]^{-1}$ の関係にある。ここで、 $K_{\text{cel}}$ はコバルト照射線量校正時における中心電極が空気等価でないことに対する補正で、1mm径アルミニウムで $K_{\text{cel}} = 1.006$ , グラファイトでは $K_{\text{cel}} = 1.0$ である<sup>10)</sup>。湿度補正は、 $N_x$ が湿度補正を含んでいなければ測定電荷 $M_Q$ に対して $K_h = 1.0$ とみなせる。この場合の誤差は、相対湿度10%~80%(22°C, 1気圧)で±0.15%以内である。一方、 $N_x$ が湿度補正を含んでいれば測定電荷 $M_Q$ に対する湿度補正は、相対湿度10%~80%(22°C, 1気圧)では $K_h = 0.9973 \pm 0.0005$ <sup>12)</sup>である。また、乾燥空気では、 $(W_{\text{air}}/e) = 33.97 \pm 0.05$  (J/C)を使用する<sup>13)</sup>。

### 5. モニタ線量計の校正

光子におけるピーク線量は、円筒電離箱を使用する場合は0.6 $r_{\text{cyl}}$ 変位法で測定されたPDD(10)あるいはTPR(10)から求める。一方、電子線におけるピーク線量は、0.5 $r_{\text{cyl}}$ 変位法で測定されたPDD( $d_{\text{ref}}$ )から求める。

AAPM TG-51は、水ファントムでの測定に基づいて



おり、防水型の電離箱、あるいはアクリル厚0.5～1.0mmの防水スリーブの使用が必要である。水ファントムは、30～40cmサイズで、20×20cm<sup>2</sup>のマイラー側面窓を持ち、電離箱を水平方向に走査できる側方ビームでの測定が便利である。IAEA TRS-398では、 $R_{50}<4.0$ cmの電子線、すなわち平行平板形電離箱の測定においてのみプラスチックファントムの使用を認めているが、基本的には水ファントムの使用を推奨している (Table 1, 2)。

## おわりに

新しい吸収線量測定プロトコルは、従来のプロトコルに比べ簡便になり、精度の面でも大幅に改善がなされている。最近刊行されたAAPM TG-51とIAEA TRS-

398プロトコルは、基本的には同様な内容になっているが、光子ビームの線質指標において異なる。臨床ビームではPDD(10)<sub>x</sub>とTPR<sub>10</sub><sup>20</sup>による $k_Q$ の差は小さいので、実際の線量測定ではTPR<sub>10</sub><sup>20</sup>を使用する方が簡便である。また、これらの新しいプロトコルは、JARPプロトコル(1986)に比べて光子では1～2%、電子線では2～4%まで線量を高く評価される<sup>15)</sup>。

<sup>a</sup> Dosimetryは線量測定と計算による線量評価の両方が含まれるので線量計測と呼ぶべきであるが、ここでは単に線量測定と表現する。

<sup>b</sup> IAEA Technical Report Series No. 398は、現在下記のサイトよりダウンロードできるので利用すると良い。

<http://www.astro.be/estro/frames/QA.html>

なお、このドラフトには表の修正が新たに加えられた。修正された表については、以下に示す (Table 7)。

Table 7 Calculated values for  $k_Q$  for electron beams, for various chamber types calibrated in <sup>60</sup>Co gamma radiation, as a function of beam quality  $R_{50}$  (the data are derived using values for stopping-power ratios and perturbation factors, as given in Appendix II)

Ionization chamber type <sup>a</sup>	Beam quality $R_{50}$ (g/cm <sup>2</sup> )																
	1.0	1.4	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5	6.0	7.0	8.0	10.0	13.0	16.0	20.0
Plane-parallel chambers																	
Attix RMI 449	0.953	0.943	0.932	0.925	0.919	0.913	0.908	0.904	0.900	0.896	0.893	0.886	0.881	0.871	0.859	0.849	0.837
Capintec PS-033	-	-	0.921	0.920	0.919	0.918	0.917	0.916	0.915	0.913	0.912	0.908	0.905	0.898	0.887	0.877	0.866
Exradin P11	0.958	0.948	0.937	0.930	0.923	0.918	0.913	0.908	0.904	0.901	0.897	0.891	0.885	0.875	0.863	0.853	0.841
Holt (Memorial)	0.971	0.961	0.950	0.942	0.936	0.931	0.926	0.921	0.917	0.913	0.910	0.903	0.897	0.887	0.875	0.865	0.853
NACP/Calcam	0.952	0.942	0.931	0.924	0.918	0.912	0.908	0.903	0.899	0.895	0.892	0.886	0.880	0.870	0.858	0.848	0.836
Markus	-	-	0.925	0.920	0.916	0.913	0.910	0.907	0.904	0.901	0.899	0.894	0.889	0.881	0.870	0.860	0.849
Roos	0.965	0.955	0.944	0.937	0.931	0.925	0.920	0.916	0.912	0.908	0.904	0.898	0.892	0.882	0.870	0.860	0.848
Cylindrical chambers																	
Capintec PR06C (Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.916	0.914	0.912	0.911	0.909	0.906	0.904	0.899	0.891	0.884	0.874
Exradin A2 (Spokas)	-	-	-	-	-	-	0.914	0.913	0.913	0.913	0.912	0.911	0.910	0.908	0.903	0.897	0.888
Exradin T2 (Spokas)	-	-	-	-	-	-	0.882	0.881	0.881	0.881	0.880	0.879	0.878	0.876	0.871	0.865	0.857
Exradin A12 (Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.921	0.919	0.918	0.916	0.914	0.911	0.909	0.903	0.896	0.888	0.878
NE 2571 (Guarded Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.918	0.916	0.915	0.913	0.911	0.909	0.906	0.901	0.893	0.886	0.876
NE 2581 (Robust Farmer)	-	-	-	-	-	-	0.899	0.898	0.896	0.894	0.893	0.890	0.888	0.882	0.875	0.868	0.859

## 参考文献

- 1) AAPM, American Association of Physicists in Medicine, Task Group 51: AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams, *Med. Phys.* 26, 1847-1870, (1999).
- 2) IAEA International Atomic Energy Agency, "Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water," Technical Report Series No. 398, IAEA, Vienna (2000).
- 3) ICRU, International Commission on Radiation Unit and Measurement: Dosimetry of High-Energy Photon Beams based on Standards of Absorbed Dose Water, ICRU Report No. 64, Nuclear Technology Publishing, (2001).
- 4) 日本医学放射線学会物理部会編：放射線治療における高エネルギーX線および電子線の吸収線量の標準測定法，通商産業研究社，東京，(1986)。
- 5) AAPM, American Association of Physicists in Medicine, Task Group 21: A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams, *Med. Phys.* 10, 741-771, (1983).
- 6) IAEA, International Atomic Energy Agency: Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams: An International Code of Practice, Technical Report Series No. 277, IAEA, Vienna (1987).
- 7) M. S. Huq, P. Andreo, and H. Song: Comparison of the IAEA TRS-398 and AAPM TG-51 absorbed dose to water protocols in the dosimetry of high-energy photon and electron beams, *Phys. Med. Biol.* 46, 2985-3006, (2001).
- 8) ICRU, International Commission on Radiation Unit and Measurement: Stopping powers for electrons and positrons, ICRU Report No. 37, Bethesda, MD, (1984).
- 9) G. X. Ding, D. W. O. Rogers, and T. R. Mackie: Calculation of stopping power ratios using realistic clinical electron beams, *Med. Phys.* 22, 489-501, (1995).
- 10) C. M. Ma and A. E. Nahum: Effect of size and composition of the central electrode on the response of cylindrical ionization chambers in high-energy photon and electron beams, *Phys. Med. Biol.* 38, 267-290, (1993).
- 11) D. W. O. Rogers: "Fundamentals of dosimetry based on absorbed-dose standards" in *Therapy Physics, Present and Future*, edited by J. R. Palta and T. R. Mackie (AAPM, Washington, DC: 1996) pp 319-356.
- 12) D. W. O. Rogers and C. K. Ross: The role and other correction factors in the AAPM TG-21 dosimetry protocol, *Med. Phys.* 15, 40-48, (1988).
- 13) M. Boutillon and A. M. Perroche-Roux: Re-evaluation of the W value for electrons in dry air, *Phys. Med. Biol.* 32, 213-219, (1987).
- 14) D. W. O. Rogers and C. K. Ross: Comparison of IAEA 1987 protocols for dosimetry calibration of radiotherapy beams, *Med. Phys.* 19, 213-214, (1992).
- 15) F. Araki and H. D. Kubo: Comparison of high-energy photon and electron dosimetry for various dosimetry protocols, *Med. Phys.* 29, 857-868, (2002).
- 16) P. Andreo: "Improved calculations of stopping power ratios and their correlation with the quality of therapeutic photon beams," *Measurement Assurance in Dosimetry*, (Proc. Symp. Vienna, 1993), 335-359, IAEA, Vienna, (1994).
- 17) D. W. O. Rogers and C. L. Yang: Corrected relationship  $\%dd(10)_x$  and stopping power ratios, *Med. Phys.* 26, 538-540, (1999).
- 18) A. Kosunen and D. W. O. Rogers: Beam quality specification for photon beam dosimetry, *Med. Phys.* 20, 1181-1188, (1993).
- 19) D. T. Burns, G. X. Ding, and D. W. O. Rogers: R50 as a beam quality specifier for selecting stopping power ratios and reference depths for electron dosimetry, *Med. Phys.* 23, 383-388, (1996).
- 20) J. P. Seuntjens, C. K. Ross, K. R. Shortt, and D. W. O. Rogers: Absorbed-dose beam quality Conversion factors for cylindrical chambers in high energy photon beams, *Med. Phys.* 27, 2763-2779, (2000).
- 21) P. Andreo: A comparison between calculated and experimental kQ photon beam quality correction factors, *Phys. Med. Biol.* 45, 25-38, (2000).
- 22) D. S. Followill, R. C. Taylor, V. M. Tello, and W. F. Hanson: An empirical relationship for determining photon beam quality in TG-21 from a ratio of percent depth dose, *Med. Phys.* 25, 1202-1205, (1998).

## 図表の説明

- Fig.1 種々の光子スペクトルにおけるTPR<sub>20</sub>あるいはPDD(10)<sub>s</sub>に対する水/空気の阻止能比。図はKosunenとRogers(文献18)による。
- Fig.2 TPR<sub>20</sub>に対するSpencer-Attixの水/空気阻止能比( $\Delta=10\text{keV}$ )。(a)臨床の光子ビーム，(b)ターゲットと平坦化フィルタの種々の組み合わせの光子ビーム。太い実線は(a)に示した臨床ビームで計算したデータに対する三次回帰である。図はIAEA TRS-398(文献2)による。
- Table 1 光子ビームの線量評価で用いる基準条件に関するAAPM TG-51とIAEA TRS-398のプロトコルの比較。
- Table 2 電子ビームの線量評価で用いる基準条件に関するAAPM TG-51とIAEA TRS-398のプロトコルの比較。
- Table 3 直径1mmのアルミニウム製中心電極を有するFarmer型電離箱の $P_{\text{cel}}$ 補正係数。これらの値はMaとNahum(文献10)の計算に基づく。これらの係数は光子ビームの場合には $d_{\text{max}}$ より深い深部に，また電子ビームの場合には $d_{\text{max}}$ 近傍もしくは $0.6R_{50}-0.1\text{cm}$ の深さに対して適用される。この表はRogers(文献11)による。
- Table 4 TPR<sub>20</sub>に対する水/壁材の質量エネルギー吸収係数比の値(IAEA TRS-277(文献6))。
- Table 5 TPR<sub>20</sub>( $10\times 10\text{cm}^2$ )に対するSpencer-Attixの媒質/空気の阻止能比( $\Delta=10\text{keV}$ ) (文献16のAndreoによる)。
- Table 6  $R_{50}$ と深さに対するSpencer-Attixの水/空気の阻止能比( $\Delta=10\text{keV}$ )。値は式(30)より計算した(文献19のBurnsらによる)。