

放射線治療技術学Ⅱ

線量計測(X線-2)

X線の吸収線量計測のフローチャート

1. 線質指標 $TPR_{20,10}$ の測定
線質変換係数 k_Q の決定

2. 補正前の表示値 M_{raw} の測定
X線, γ 線では $d_c = 10$ cm 深で測定

3. 補正後の表示値 M の計算
$$M = M_{\text{raw}} \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_s \cdot k_{\text{elec}}$$

4. 吸収線量を求める

SSD法

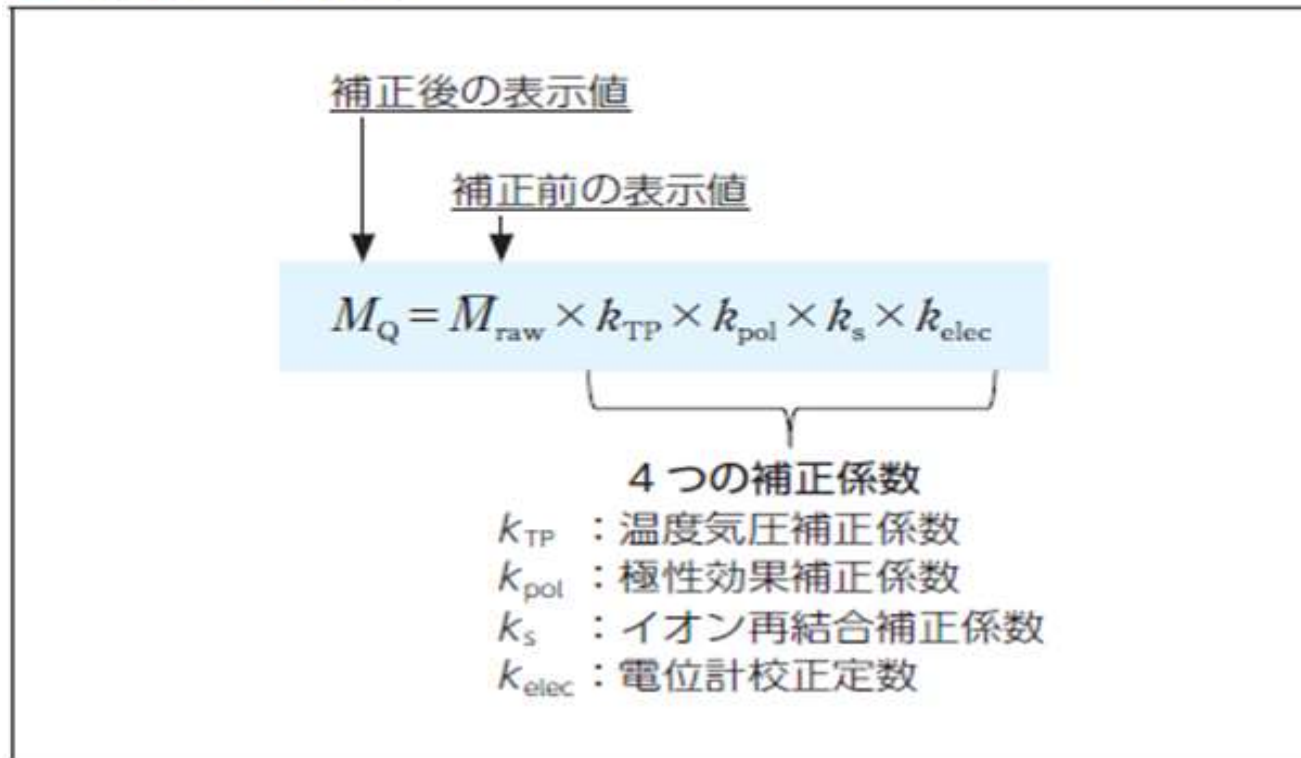
$$D(d_c, A_0) = M \cdot N_{D,W} \cdot k_Q$$

SAD法

$$D(d_c, A) = M \cdot N_{D,W} \cdot k_Q$$

①電荷量（電離量）を求める

▲ 電離箱の表示値



動画では110ページ(第1版)と書いてありますが第2版ではこのページです

- 電離箱では、電離電荷を測定する
- しかし、実際の計測時は水吸収線量校正定数 $N_{D,W}$ が与えられた基準条件とは異なり、電離箱の表示値も正確ではないため補正が必要となる
- 電離箱の表示値には、「補正後の表示値 M_Q 」と「補正前の表示値 $\overline{M_{\text{raw}}}$ がある」
- 「補正後の表示値 M_Q 」は、「補正前の表示値 $\overline{M_{\text{raw}}}$ 」に4つの補正係数($k_{\text{TP}}, k_{\text{pol}}, k_s, k_{\text{elec}}$)を乗じて求める

▲ 温度気圧補正係数 (k_{TP})

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

基準条件：22.0 °C 101.33 kPa

T ：計測時の気温

P ：計測時の気圧

T_0 ：基準条件の気温 (=22.0 °C)

P_0 ：基準条件の気圧 (=101.33 kPa)

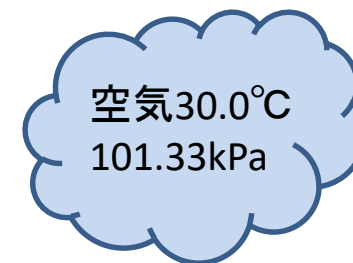
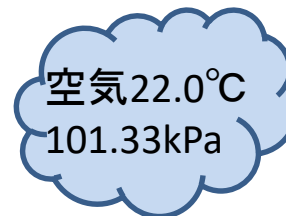
- 温度：temperature, 気圧：pressure
- 温度気圧補正係数 (k_{TP})とは、通気性のある電離箱について、電離空洞内の空気の質量が温度 (T) および気圧 (P) によって変化することに対する補正係数である
- 基準条件は、「 $T_0=22.0$ °C」「 $P_0=101.33$ kPa」である
- 実際、電離空洞内の空気の温度 (T) と気圧 (P) は測定できない
- そのため、温度 (T) は水ファントムの水温、気圧 (P) は大気中の気圧を採用し k_{TP} を求める

【例題】

温度30°C, 気圧101.33 kPaのとき, 温度気圧補正をする場合としない場合の差(%)として近いのはどれか

1. 0.0
2. 1.0
3. 2.0
4. 3.0
5. 4.0

基準条件



体積は $\{1 + (8/273.2)\} \doteq 1.029$ 倍
密度 $[g/cm^3]$ は $(1/1.029) \doteq 0.971$ 倍

【補足】基準条件に比べて, 空気密度は_____なるため, 電離箱の感度は_____する
→ $k_{T,P}$ は基準条件での測定値として扱うために乗じる補正係数

▲ イオン再結合補正係数 (k_s)

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2$$

パルス放射線における 2 点電圧法

$a_0 \cdot a_1 \cdot a_2$ は、 V_1 と V_2 の比 $\left(\frac{V_1}{V_2} \right)$ で決められた定数。

【例】

$\frac{V_1}{V_2} = 2.0$ の場合

$a_0 = 2.337, a_1 = -3.636, a_2 = 2.299$

定数 a_0, a_1, a_2 の理由は
次ページ参照

- イオン再結合補正係数 (k_s) とは、照射によって電離空洞内に生じたイオン対が再結合によって失われることに対する補正係数である
- パルス放射線では、2点電圧法が推奨される
- 2点電圧法では、電離箱に対して「印加電圧 V_1 (通常の電圧※)」と「印加電圧 V_2 ($\leq V_1 \div 2$)」を印加し、その際に得られた表示値「 M_1 」と「 M_2 」を用いて k_s を求める
- なお、印加電圧を変更する際は、表示値が安定するまで時間を空けた方がよい

(※) 通常の (印加) 電圧 = 線量計を校正したときの (印加) 電圧, のこと

2点電圧法による k_s の算出(パルス放射線)

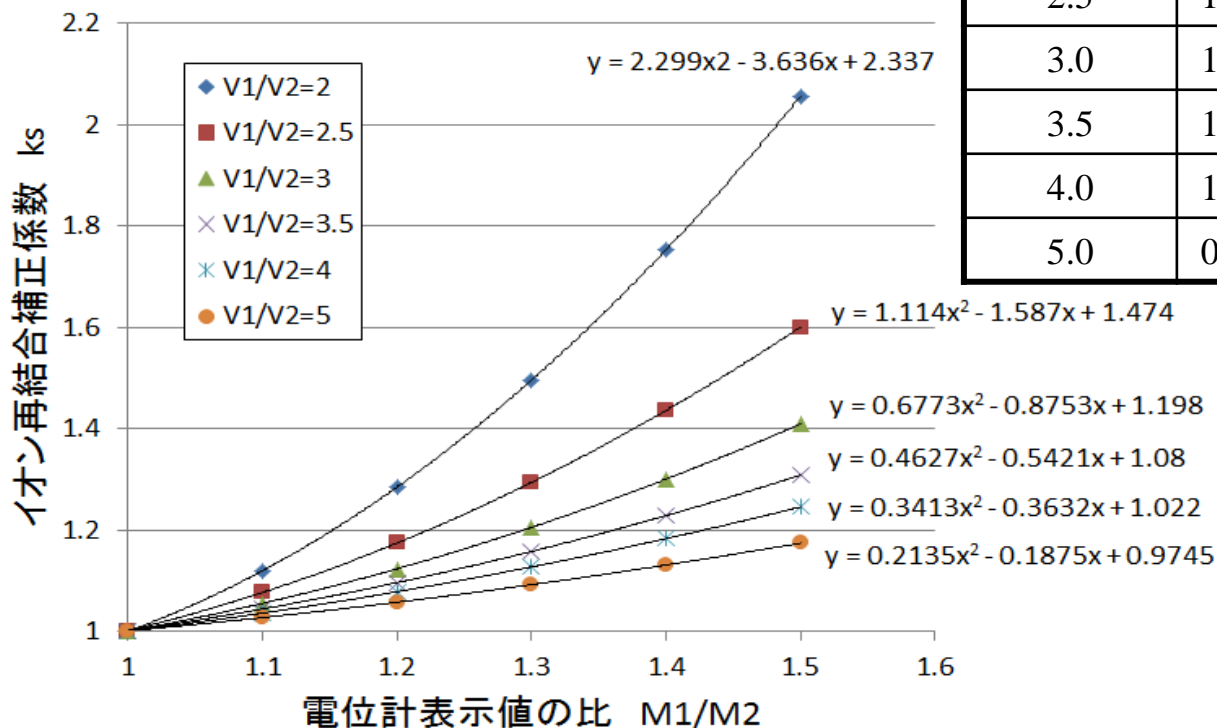
標準計測法では以下の近似式で求める

平坦化フィルタを介するパルス放射線(ほとんどのリニアック)

マイクロトロンの一部で照射野内をビームがスキャンする機種(国内はほとんど無い)

$$k_s = a_0 + a_1 \cdot \left[\frac{M_1}{M_2} \right] + a_2 \cdot \left[\frac{M_1}{M_2} \right]^2$$

パルス放射線の k_s の算出式



V_1/V_2	パルス放射線			パルススキャン放射線		
	a_0	a_1	a_2	a_0	a_1	a_2
2.0	2.337	-3.636	2.299	4.711	-8.242	4.533
2.5	1.474	-1.587	1.114	2.719	-3.977	2.261
3.0	1.198	-0.875	0.677	2.001	-2.402	1.404
3.5	1.080	-0.542	0.463	1.665	-1.647	0.984
4.0	1.022	-0.363	0.341	1.468	-1.200	0.734
5.0	0.975	-0.188	0.214	1.279	-0.750	0.474

(標準計測法12, p.31 表2.2)

- M_1 および M_2 はそれぞれ印加電圧 V_1, V_2 によって得られた電位計の表示値($V_1 > V_2$)である
- $M_1/M_2 > 1$ になる
- $k_s > 1$ になる

イオン再結合補正の考え方

- 飽和 : saturation
- 測定電荷Q, イオン再結合なく
収集される電荷(飽和電荷 Q_s)

$$k_s = \frac{Q_s}{Q}$$

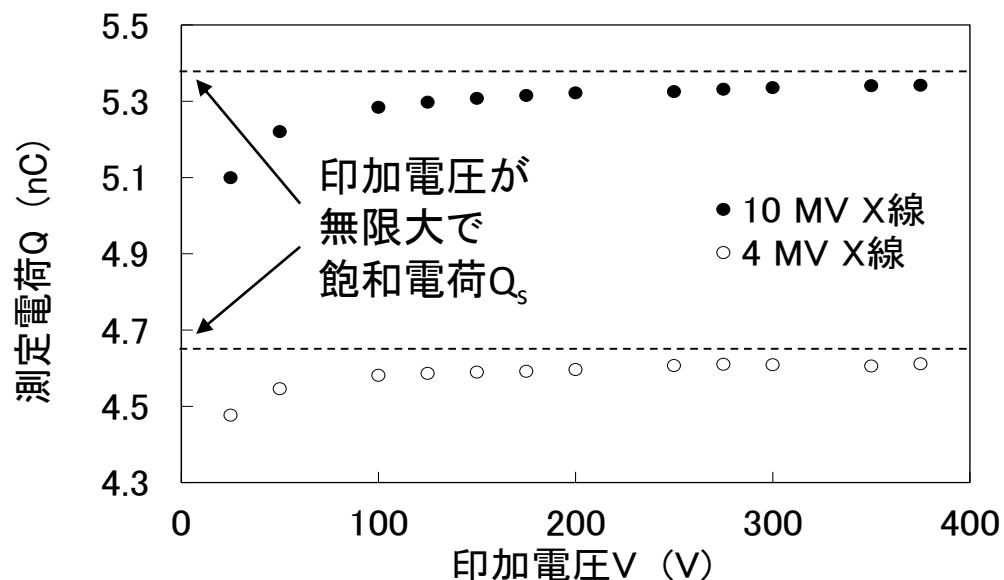
- イオン収集効率を f とすると

$$f = \frac{1}{k_s} = \frac{Q}{Q_s}$$

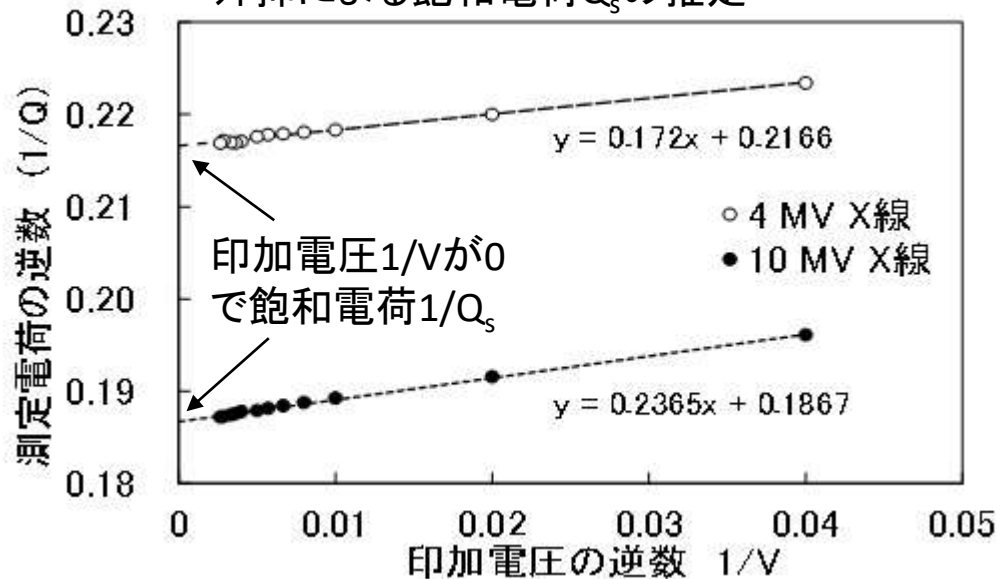
- イオン再結合が起きないとき $k_s=1$ になる。
しかし、実際は起きるため $k_s>1$ を乗じる
→ k_s はイオン再結合が起きないときの
測定値として扱うために乗じる補正係数

- パルス放射線(X線や電子線)
は印加電圧、線量率(Gy/時間)、
電離箱形状に依存
(連続放射線の ^{60}Co - γ 線は影響少)

リニアックX線の測定電荷Q



外挿による飽和電荷 Q_s の推定



▲ 極性効果補正係数 (k_{pol})

$$k_{\text{pol}} = \frac{|M_{\text{raw}}^+| + |M_{\text{raw}}^-|}{2|M_{\text{raw}}|}$$

極性効果に対する補正

M_{raw}^+ : 正の極性 (印加電圧) での表示値

M_{raw}^- : 負の極性 (印加電圧) での表示値

M_{raw} : 通常使用する極性 (印加電圧) での表示値

極性 : polarization

- 極性効果補正係数 (k_{pol}) とは, 印加電圧の極性 (正負) を変化することで生じる電離箱の応答の違いに対する補正係数である
- 光子線では極性効果を無視できるが, 電子線等の荷電粒子線の場合は極性効果が有意である
- 極性効果が有意な場合は, 両極 (正負) で計測した電離電荷の絶対値をとり, 平均値を真の電離電荷とし, $k_{\text{pol}} = 1$ とする
- 正負のどちらか一方で計測する場合は, 上図の式で求める
- なお, 極性を変更する際は, 表示値が安定するまで時間を空けた方がよい

【例題】

+極性での表示値 $|M_{\text{raw}}^+| = 2$, -極性での表示値 $|M_{\text{raw}}^-| = 4$ のとき k_{pol} はいくつになるか
なお, 通常使用の電圧の極性は+とする

1. 1.0
2. 1.5
3. 2.0
4. 3.0
5. 4.0

【補足】 k_{pol} は印加電圧の極性が+か-かによって表示値が異なる現象を補正する係数
(+と-の極性で表示値が同じときは $k_{\text{pol}} = 1$)

上記の例題の場合, +と-での表示値の平均値を真値 M_{raw} とすると,

$$M_{\text{raw}} = (M_{\text{raw}}^+ + M_{\text{raw}}^-) / 2 =$$

+極性での表示値 $|M_{\text{raw}}^+| = 2$ のみで真値 M_{raw} を求めるには $k_{\text{pol}} =$ を乗じる

$$M_{\text{raw}} = M_{\text{raw}}^+ \times k_{\text{pol}} = \quad \times \quad =$$

電位計 (RAMTEC-Smart), 東洋メディック社



ファーマ形電離箱 (型式PTW 30013), PTW社
 感度体積 0.6 cm^3 ,
 直径7 mm,
 長さ23 mm



▲ 電位計校正定数 (k_{elec})



- 電位計の表示値[rdg] (rdgはreadingの略, 読み取り値)を真の電荷[C]に換算するための校正定数である
- 電離箱と電位計が接続された一体の状態では校正した場合は, $k_{elec}=1$ とする

リファレンス線量計校正で, ユーザーの電位計と電離箱は一体(セット)で校正されたときは $k_{elec}=1$ である(次ページ参照)

リファレンス線量計の校正作業(一体校正の場合)

- 国内のすべてのリファレンス線量計の校正は(公益財団法人)医用原子力技術研究振興財団で行っている→標準計測法12の「医療用線量標準センター」はこれにあたる
- ユーザー電位計とユーザー電離箱は、セットで(一体で)校正が行われることが多い

1. 校正前準備

- 1 校正申込書をもとに、校正日ごとにスケジュールを作成します。
また、校正日前日から電離箱(特定二次標準)に電圧を印加し、照射室内で室温に慣らしませす。
- 2 ユーザー線量計の開梱を行います。線量計は形式、製造番号、およびバーコードを用いて確認を行っています。開梱時の梱包状態を校正依頼品保管管理記録シートに記録し、同じ状態で返送出来るようにしています。

医用原子力技術研究振興財団の
放射線治療品質管理HPより引用
(<http://www.antm.or.jp>)



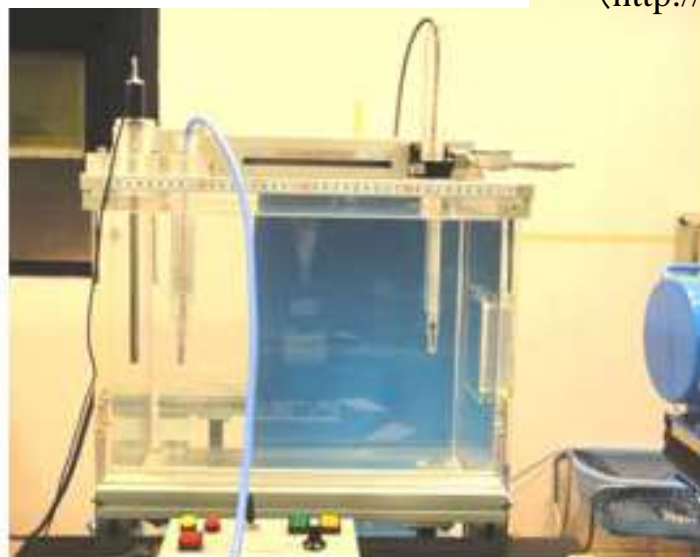
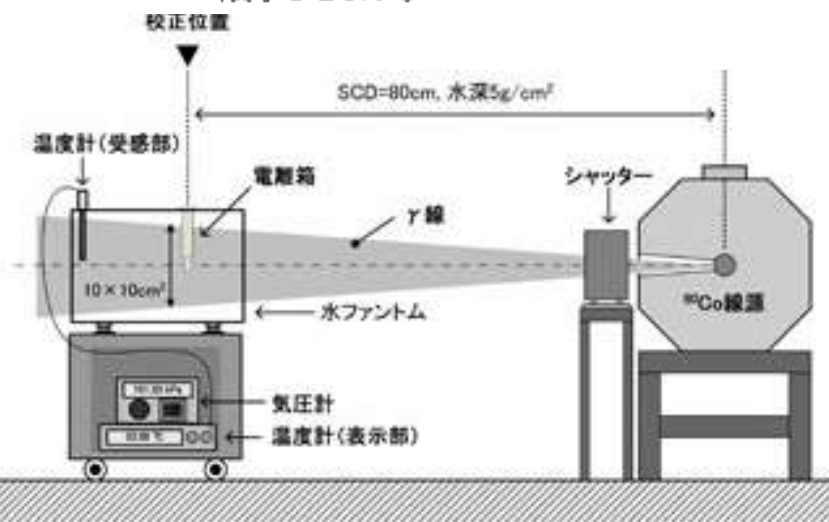
線量計の型式、製造番号、バーコード

- 3 ユーザー電位計の電源を投入し、ウォーミングアップを行います。また、ユーザー電離箱を照射室内へ搬入し、室温に慣らします。

【水中校正】

- 1 レーザーとセオドライトの確認および調整を行います。レーザーとセオドライトは、室内に設置された基準点と一致することを確認し、一致しない場合は調整を行います。
- 2 レーザーおよびセオドライトを用いて、水ファントムを所定の位置に設置します。また、水準器を用いて、水ファントムが水平になるように調整します。
- 3 水温計、気圧計、湿度計を設置し、照射場の環境が基準を満たしていることを確認します。
- 4 レーザーおよびセオドライトを用いて、電離箱(特定二次標準)を水ファントム内の基準位置(SCD80cm、水深5g/cm²)に設置します。

※ 円筒形電離箱は防浸鞘を、平行平板形電離箱は固定治具を用いて設置します。また、防浸性のない平行平板形電離箱(34045、23343、A10)は付属の保護キャップを締めて浸水させます。



電離箱の設置(水中校正)

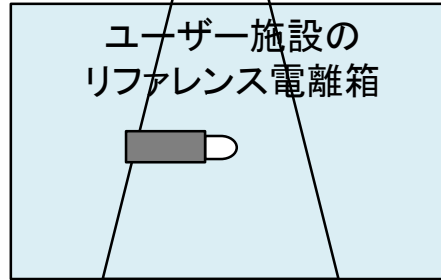


医用原子力技術研究振興財団の
放射線治療品質管理HPより引用
(<http://www.antm.or.jp>)

一体校正

校正機関(線量標準センター)

吸収線量 $D_0 = 1 \text{ Gy}$ ^{60}Co - γ 線
校正線質 Q_0



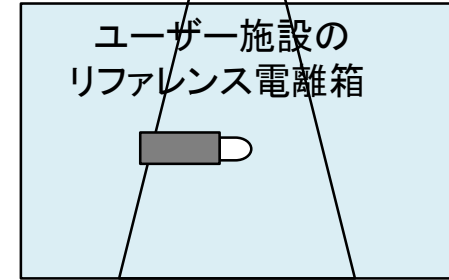
測定値 $M_{Q_0} = 10.0 \text{ nC}$



線質変換係数 $k_Q = 0.909\dots$

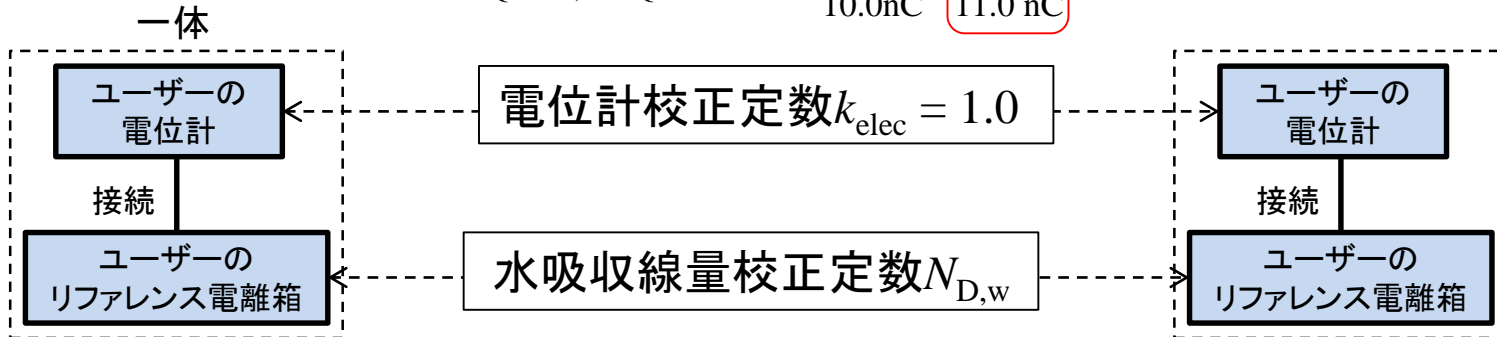
放射線治療施設(ユーザー)

吸収線量 $D = 1 \text{ Gy}$ リニアックX線
線質 Q



測定値 $M_Q = 11.0 \text{ nC}$

$$D = M_Q \cdot N_{D,w} \cdot k_Q = 11.0 \text{ nC} \times \frac{1 \text{ Gy}}{10.0 \text{ nC}} \times \frac{10.0 \text{ nC}}{11.0 \text{ nC}} = 1 \text{ Gy}$$

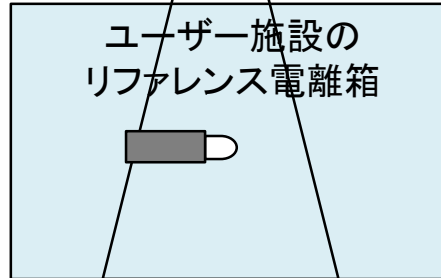


分離校正 (X線計測_資料1の動画も見てください)

校正機関(線量標準センター)

吸収線量
 $D_0 = 1 \text{ Gy}$

^{60}Co - γ 線
校正線質 Q_0



測定値 $M_{Q_0} = 10.0 \text{ nC}$

先週と言ってますが
今週に掲載しました

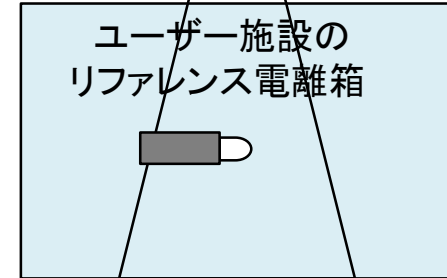
校正

郵送

放射線治療施設(ユーザー)

吸収線量
 $D = 1 \text{ Gy}$

リニアックX線
線質 Q

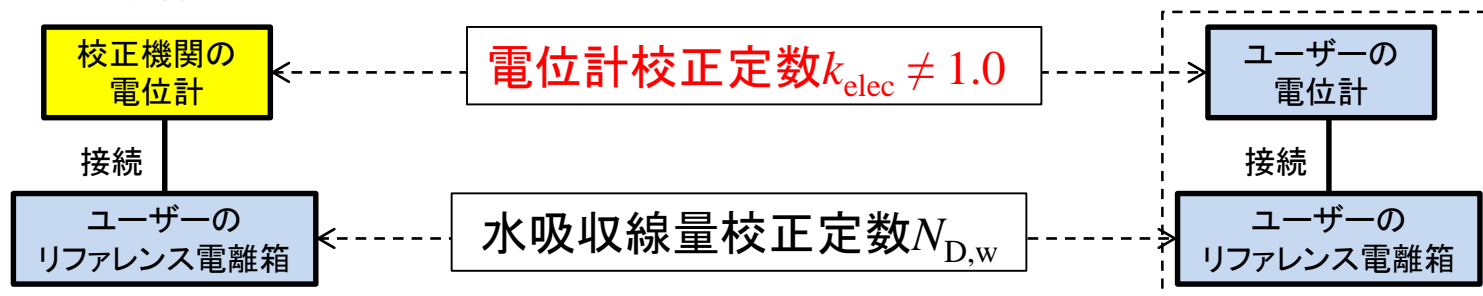


測定値 $M_Q = 11.0 \text{ nC}$

線質変換係数 $k_Q = 0.909\dots$

$$D = M_Q \cdot N_{D,w} \cdot k_Q = 11.0 \text{ nC} \times \frac{1 \text{ Gy}}{10.0 \text{ nC}} \times \frac{10.0 \text{ nC}}{11.0 \text{ nC}} = 1 \text{ Gy}$$

分離



- メリット
- (1) ユーザーはリファレンス電離箱の郵送だけで済む(コストの削減)
 - (2) 線量標準センターはユーザーのリファレンス電離箱を接続するだけで良い
 - (3) ユーザーは複数のリファレンス電離箱の校正ができる

- デメリット
- (1) 電位計の校正が必要になる→標準電荷(例えば1.0 nC)を入力してユーザーの電位計が正しく表示するか定期的に確認する校正が必要になる(ガイドラインでは3年に1回以上)
 - (2) 測定レンジ切替がある電位計は測定レンジごとに k_{elec} の値が必要

水吸収線量の算出

▲ 電離量 [C] から水吸収線量 [Gy] へ

$$D_{w,Q} = M_Q \times N_{D,w,Q_0} \times k_{Q,Q_0}$$

$D_{w,Q}$: 線質Qにおける水吸収線量
 M_Q : 線質Qにおける電離箱の表示値(補正後)
 $M_Q = M_{\text{raw}} \times k_{\text{TP}} \times k_{\text{pol}} \times k_s \times k_{\text{elec}}$
 N_{D,w,Q_0} : 水吸収線量校正定数
 k_{Q,Q_0} : 線質変換係数

$$D_{w,Q} = M_Q \times N_{D,w} \times k_Q$$

- 線質Qの水吸収線量[Gy]は、電離箱で測定した電離量[C]から上式を用いて算出する
- M_Q (電離箱の表示値(補正後))に水吸収線量校正定数 N_{D,w,Q_0} と線質変換係数 k_{Q,Q_0} を乗じて求める
- 水吸収線量校正定数 N_{D,w,Q_0} は、線量標準機関によって個々の電離箱に与えられる
- 線質変換係数 k_{Q,Q_0} は、基準線質 Q_0 から使用線質Qに変換するための係数である
- 標準計測法12(基準線質 $Q_0=^{60}\text{Co}-\gamma$ 線)では、 Q_0 を省略して $N_{D,w}$ や k_Q と表記する

吸収線量の計測(補足)

吸収線量の定義

- 放射線により質量 m [kg]の物体が平均エネルギー ε [J]を付与された場合、吸収線量 D は ε を m で除した量である
- 単位は[J/kgまたはGy]

→吸収線量は「質量」と「エネルギー」を計測しなければならない

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm}$$

エネルギー(J)

質量(kg)

放射線

質量 m (kg)

電離箱によるエネルギーの計測

- 電離箱は, W 値と空洞で生じた電離電荷からエネルギーを計測する
- 空気の W 値と電気素量 e より,
「電子が空気中で1クーロンの電荷を生成するために必要なエネルギー」は

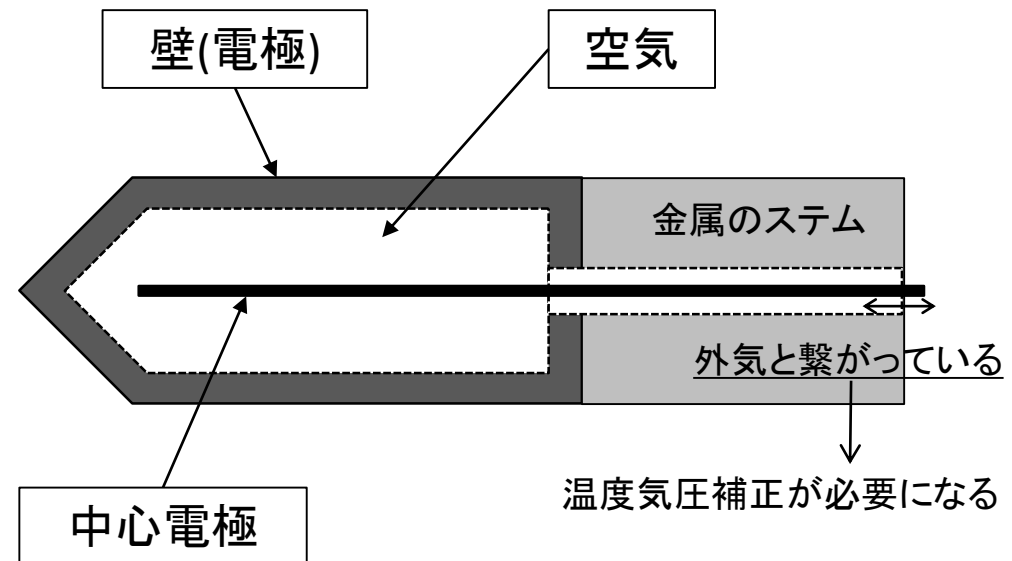
$$\frac{W_{\text{air}}}{e} = 33.97 \quad [\text{J/C}]$$

- 例えば, 空気 m [kg] で M_Q [C] の電離電荷を収集した場合,
(1) 空気に付与されたエネルギー ε [J] は,

$$\varepsilon = M_Q \cdot \frac{W_{\text{air}}}{e} \quad [\text{C}] \times [\text{J/C}]$$

- (2) 空気の吸収線量 D_{air} [J/kg] は,

$$D_{\text{air}} = \frac{M_Q}{m} \cdot \frac{W_{\text{air}}}{e} \quad [\text{C/kg}] \times [\text{J/C}]$$



円筒形電離箱の構造

空洞理論を用いた吸収線量の変換

• 空洞理論

「空洞aの吸収線量を，周囲物質bの吸収線量に変換する理論」

→空洞aを周囲物質bで置換した場合

成立条件(1) 高エネルギー(光子, 荷電粒子)

(2) 置換によって放射線場が乱れない

aを空気, bを水, 電子フルエンス Φ (単位: cm^{-2})

密度 ρ (g/cm^3), 線阻止能 \bar{L} (J/cm)

(a) 空気吸収線量

$$D_{\text{air}} = \Phi \cdot \left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}}$$

(b) 水吸収線量

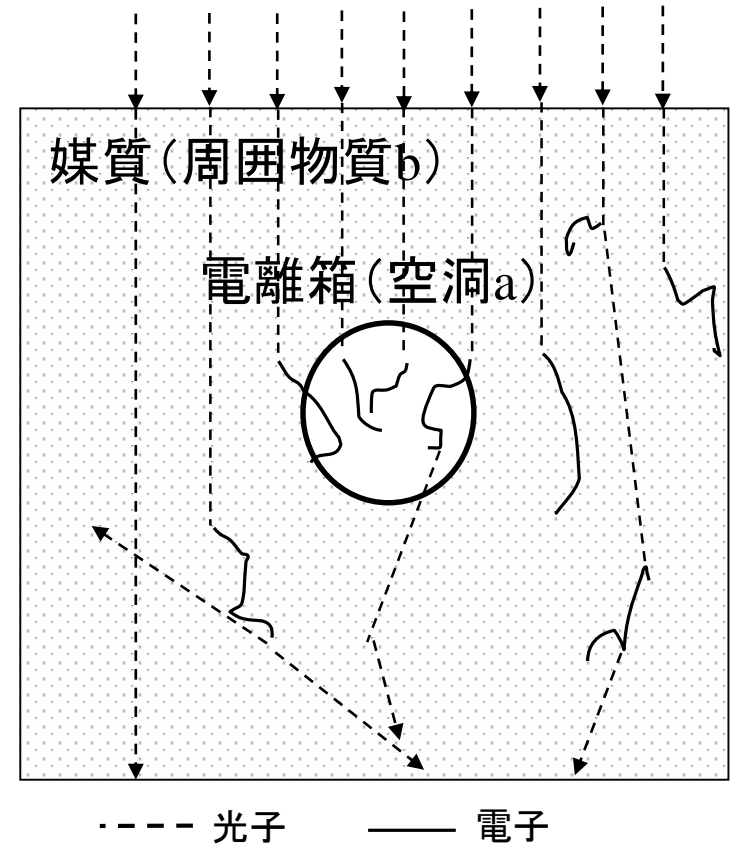
$$D_{\text{w}} = \Phi \cdot \left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{w}}$$

荷電粒子が物質中で単位長さ
当たりに失うエネルギー

$$D_{\text{w}} = D_{\text{air}} \cdot \frac{\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{w}}}{\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}}}$$

$$\bar{L} / \rho : (\text{J}/\text{cm}) / (\text{g}/\text{cm}^3) = \text{Jcm}^2\text{g}^{-1}$$

$\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{w,air}}$ ← 空気に対する水の
平均制限質量衝突阻止能比

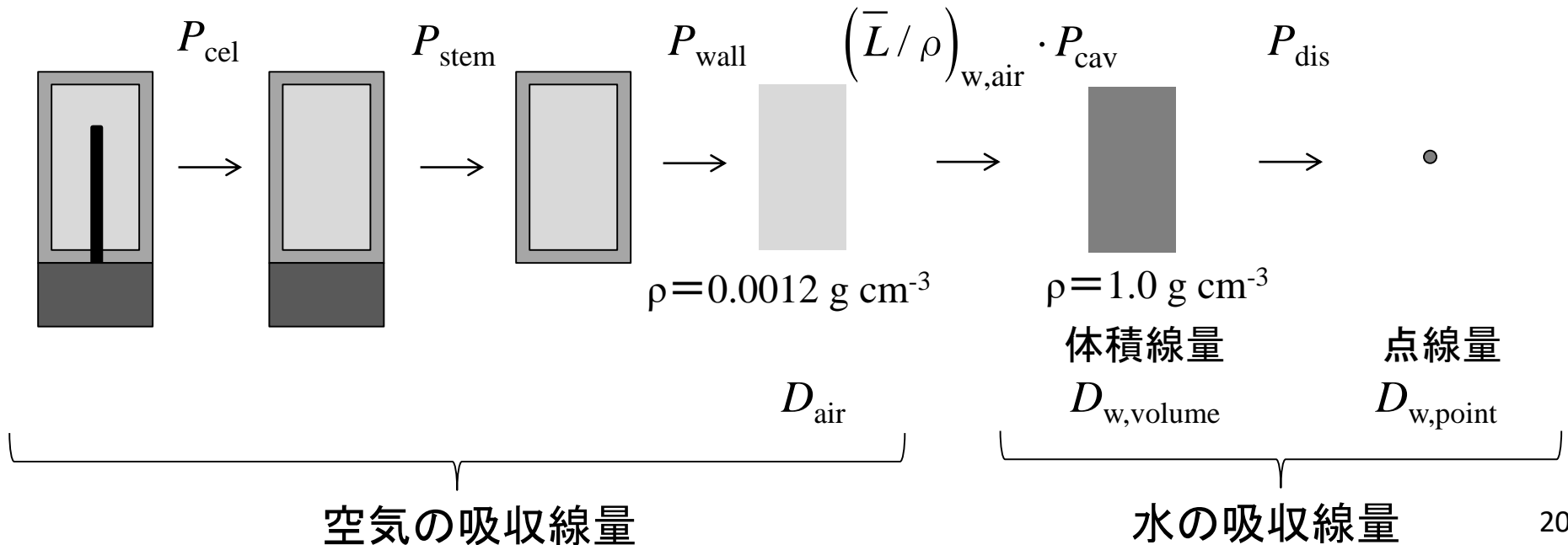


じょうらん 擾乱補正係数 P_i

- 電子フルエンスの擾乱(乱れ)の原因は、電離箱の構造、材質、空気と水の密度の違い
- 擾乱補正係数 P_i : 空洞理論の成立条件からの逸脱(擾乱)を補正する

中心電極補正係数 P_{cel}
 壁補正係数 P_{wall}
 空洞補正係数 P_{cav}
 変位補正係数 P_{dis}

$$D_w = D_{air} \cdot \left(\bar{L} / \rho \right)_{w,air} \cdot P_i$$



標準計測法における水吸収線量

• 水吸収線量

線質Qでは,

$$D_w = D_{\text{air}} \cdot \left(\bar{L}/\rho\right)_{w,\text{air}} \cdot P_i$$

—————>

$$D_{w,Q} = \frac{M_Q}{m} \cdot \left[\frac{W_{\text{air}}}{e} \left(\bar{L}/\rho\right)_{w,\text{air}} \cdot P_i \right]_Q$$

ユーザーの吸収線量

$$D_{w,Q} = \frac{M_Q}{m} \cdot \left[\frac{W_{\text{air}}}{e} \left(\bar{L}/\rho\right)_{w,\text{air}} \cdot P_i \right]_Q$$

線量標準センターの吸収線量

$$D_{w,Q_0} = \frac{M_{Q_0}}{m} \cdot \left[\frac{W_{\text{air}}}{e} \left(\bar{L}/\rho\right)_{w,\text{air}} \cdot P_i \right]_{Q_0}$$

また, ^{60}Co - γ 線で水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_0} = \frac{D_{w,Q_0}}{M_{Q_0}}$ [Gy/C] が与えられるとき,

$$D_{w,Q} = M_Q \cdot N_{D,w,Q_0} \cdot \frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} = M_Q \cdot$$

↓ 線質変換係数

$$D_{w,Q} = M_Q \cdot N_{D,w,Q_0} \cdot k_{Q,Q_0}$$

$$\frac{M_{Q_0}}{m} \cdot \left[\frac{W_{\text{air}}}{e} \left(\bar{L}/\rho\right)_{w,\text{air}} \cdot P_i \right]_{Q_0}$$

~~M_{Q_0}~~

線量標準センターの
校正で与えられる

$$\frac{\left[\frac{W_{\text{air}}}{e} \left(\bar{L}/\rho\right)_{w,\text{air}} \cdot P_i \right]_Q}{\left[\frac{W_{\text{air}}}{e} \left(\bar{L}/\rho\right)_{w,\text{air}} \cdot P_i \right]_{Q_0}}$$

標準計測法の表から引用
(電離箱の構造=型式で決まる)

k_{Q,Q_0} (線質変換係数)

動画では112ページ(第1版)と書いてありますが第2版ではこのページです

$$k_{Q,Q_0} = \frac{\left[\left(\frac{L}{\rho} \right)_{w,air} \cdot W_{air} \cdot P_{wall} \cdot P_{cav} \cdot P_{dis} \cdot P_{cel} \right]_Q}{\left[\left(\frac{L}{\rho} \right)_{w,air} \cdot W_{air} \cdot P_{wall} \cdot P_{cav} \cdot P_{dis} \cdot P_{cel} \right]_{Co}}$$

- $\left(\frac{L}{\rho} \right)_{w,air}$: 空気に対する水の平均制限質量衝突阻止能比 (=1.133)
 - W_{air} : 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 [eV]
 - P_{wall} : 壁補正係数
 - P_{cav} : 空洞補正係数
 - P_{dis} : 変位補正係数
 - P_{cel} : 中心電極補正係数
- } $P_Q = P_{wall} \cdot P_{cav} \cdot P_{dis} \cdot P_{cel}$
(線質 Q における全擾乱補正係数)

- 線質変換係数 k_{Q,Q_0} は $k_{Q,Q_0} = \frac{N_{D,w,Q}}{N_{D,w,Q_0}} \rightarrow N_{D,w,Q} = N_{D,w,Q_0} \times k_{Q,Q_0}$
- $N_{D,w,Q}$ は一般的に測定値として与えられていない
- $N_{D,w,Q}$ は N_{D,w,Q_0} に k_{Q,Q_0} を乗じて算出し, 水吸収線量の算出に用いる
- k_{Q,Q_0} は上の式で表され, 標準計測法12では線量計ごとに掲載されており, それを参照する

6 水吸収線量の決定

▲ 高エネルギー光子線の水吸収線量

$$D(d_c, A) = D_{w,Q}(d_c) = \bar{M}_Q \times N_{D,w} \times k_Q$$

項目	基準値あるいは基準条件
ファントム材質	水
電離箱	ファーマ形
校正深 (d_c)	10 g cm^{-2}
電離箱の基準点	電離空洞内の幾何学的中心
電離箱の基準点の位置	校正深 (d_c)
SCD/SSD	80 cm または 100 cm (臨床で使用しているセットアップ値)
照射野	10 cm × 10 cm (SSD setup ではファントム表面, SAD (STD) setup では校正深での大きさ)

出典：日本医学物理学会編：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），P40，通商産業研究社，2012 より改変引用

- 高エネルギー光子線（線質Q）を用いた校正深 d_c における水吸収線量 $D_{w,Q}(d_c)$ は左式で求められる

M_Q : 電離箱の表示値(補正後)

$N_{D,w}$: 線量標準機関によって個々の電離箱に与えられる定数[Gy/C]

k_Q : 標準計測法12の表3-3(p.41-43)に記載されている電離箱の型式と $TPR_{20,10}$ の交点から値を読み取る
 $TPR_{20,10}$ に該当する値が無い場合は直線補間で求める

(※)照射野サイズ(Area)は正方形照射野 $A \times A$ の一辺の長さ[cm]で表すことが多い

動画では114ページ(第1版)と書いてありますが第2版ではこのページです

例題 1

治療用 X 線に対して線量測定を行った。極性効果，イオン再結合は無視できることとし，算出時に使用すべきデータを表に示す。校正深水吸収線量 [Gy] はいくらか。

☞ 模範解答は 181 頁

電離箱の水吸収線量校正定数 [mGy/nC]	50.0
水中 10cm 深での電離箱の収集電荷 [nC]	20.0
水中 20cm 深での電離箱の収集電荷 [nC]	12.0
測定時の温度 [°C]	22.0
測定時の気圧 [kPa]	101.3

線質： $TPR_{20,10}$	0.5	0.6	0.7	0.8
線質変換係数	1.004	1.000	0.988	0.962

解答： _____ [Gy]



例題 1 (158 頁) 解説

動画では137ページ(第1版)と書いてありますが第2版ではこのページです

校正深水吸収線量 $D_{w,Q}(d_c)$ [Gy] は, $D_{w,Q}(d_c) = \bar{M}_Q \times N_{D,w} \times k_Q$ で求める。

$$\begin{aligned} M_Q &= \bar{M}_{raw} \times k_{TP} \times k_{pol} \times k_s \times k_{elec} \\ &= 20[\text{nc}] \times \frac{(273.2 + 22.0)}{(273.2 + 22.0)} \frac{101.33}{101.3} \times 1.000 \times 1.000 \times 1.000 \\ &\doteq 20[\text{nc}] \end{aligned}$$

$$N_{D,w} = 50[\text{mGy/nc}]$$

k_Q は $TPR_{20,10}$ から求めるため, $TPR_{20,10}$ を算出する。

$$\begin{aligned} TPR_{20,10} &= \frac{M(\text{水中 } 20 \text{ cm 深での電離箱の収集電荷} [\text{nc}])}{M(\text{水中 } 10 \text{ cm 深での電離箱の収集電荷} [\text{nc}])} \\ &= \frac{12.0}{20.0} \\ &= 0.6 \end{aligned}$$

表より, $TPR_{20,10} = 0.6$ の時, $k_Q = 1.000$ となる。

以上より,

$$\begin{aligned} D_{w,Q}(d_c) &= \bar{M}_Q \times N_{D,w} \times k_Q \\ &= 20[\text{nc}] \times 50[\text{mGy/nc}] \times 1.000 \\ &= 1.0[\text{Gy}] \end{aligned}$$

解答: 1.0 [Gy]



【例題2】

例題1で求めた校正深吸収線量 $D(d_c, A)$ から組織最大線量比 TMR を使って線量最大深での吸収線量 $D(d_{max}, A)$ を求めなさい。

ただし、例題1は10 MV-X線で校正深 d_c において照射野 $A=10\text{cm} \times 10\text{cm}$ での測定値とし、事前に測定した TMR はグラフのようだったとする

【補足】

組織最大線量比 TMR (tissue maximum ratio)はSAD一定のときの深部線量変化を比率で表したもの。深さ d 、照射野 A での $TMR(d,A)$ は、

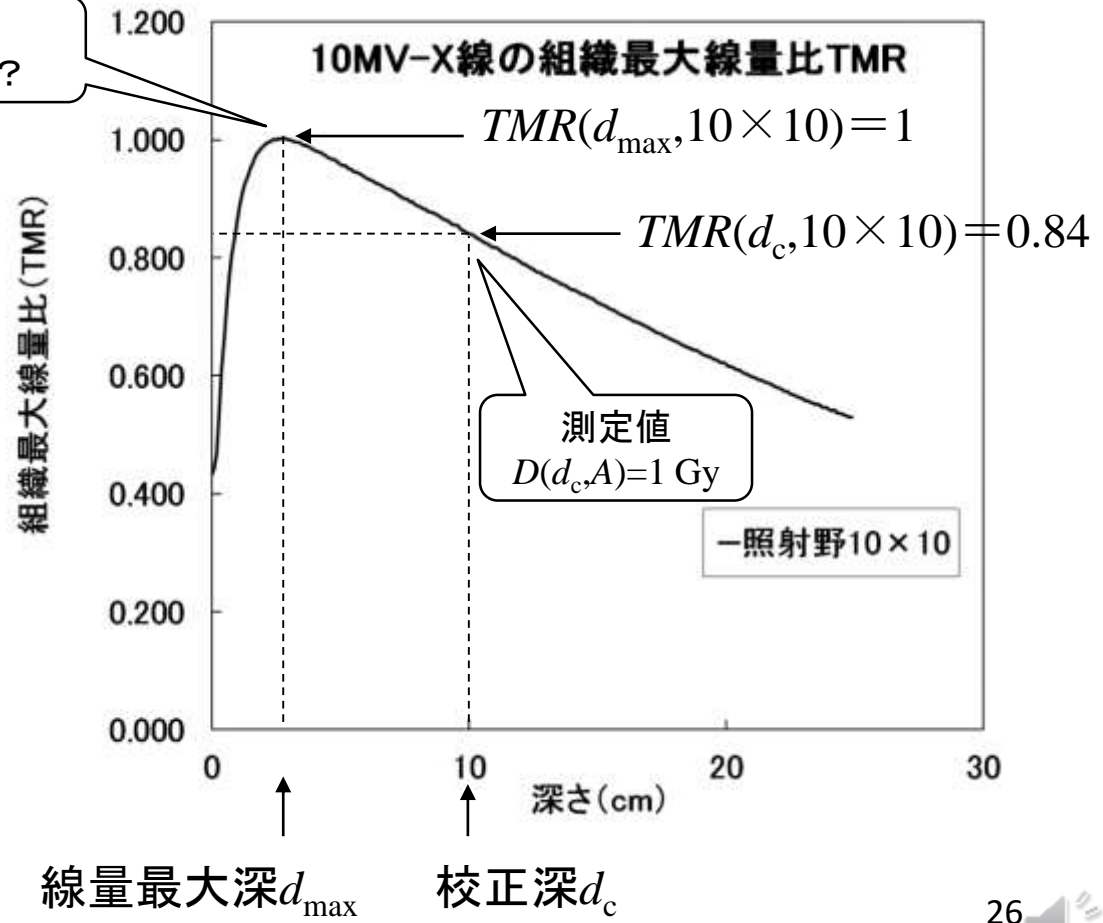
$$TMR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_{max}, A)} \quad \text{式(1)}$$

校正深 d_c では

$$TMR(d_c, A) = \frac{D(d_c, A)}{D(d_{max}, A)} \quad \text{式(2)}$$

事前の測定で TMR が分かっているリニアック装置で例えば、校正深 d_c の TMR が0.84のとき(右図)、校正深吸収線量 $D(d_c, A)$ の測定値から、式(2)を使って線量最大深の水吸収線量 $D(d_{max}, A)$ が求められる。

計算値
 $D(d_{max}, A) = ?$



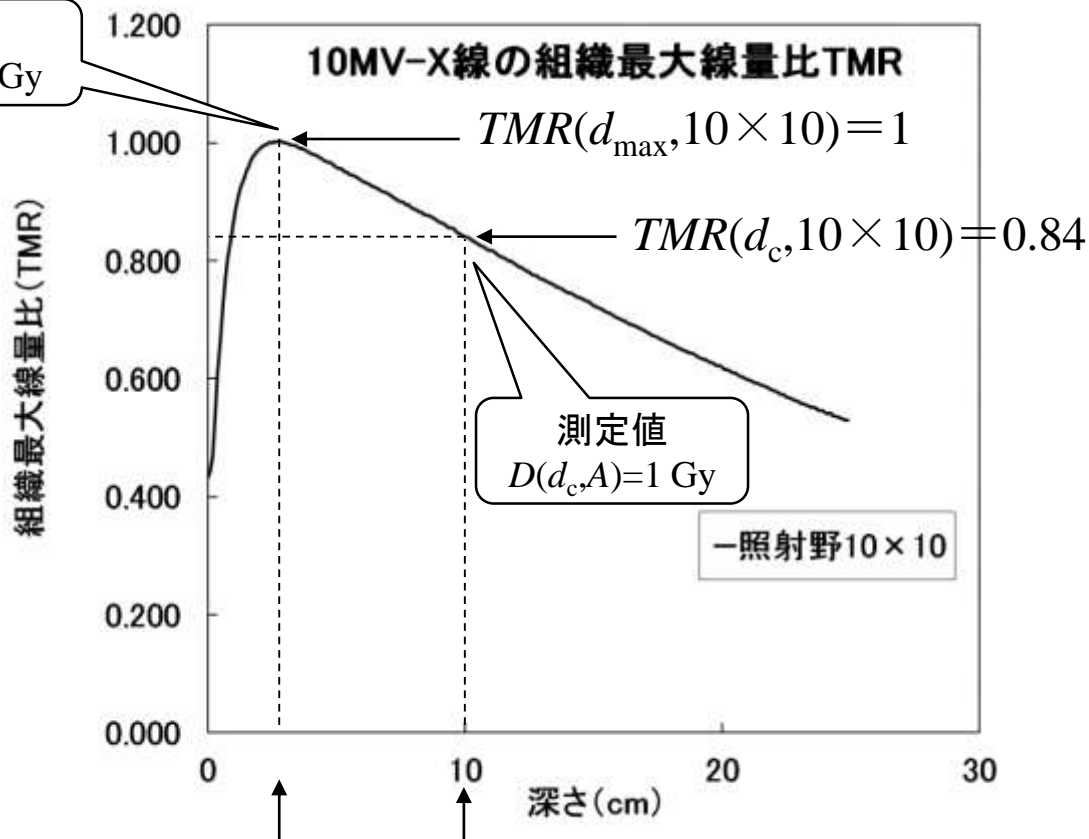
例題1より, 校正深_c水吸収線量 $D(d_c, 10 \times 10) = 1$ [Gy],
 また, 校正深_cで照射野 $A = 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の $TMR(d_c, 10 \times 10) = 0.84$ より,
 線量最大深での水吸収線量 $D(d_{\text{max}}, 10 \times 10)$ は,

【解答】

$$D(d_{\text{max}}, 10 \times 10) = \frac{D(d_c, 10 \times 10)}{TMR(d_c, 10 \times 10)}$$

$$= \frac{1}{0.84} = 1.19 [\text{Gy}]$$

計算値
 $D(d_{\text{max}}, A) = 1.19 \text{ Gy}$



線量最大深 d_{max}

校正深 d_c

▲ 線量最大深における水吸収線量

SSD setup

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

SAD setup

$$D(d_{\max}, A) = \frac{D(d_c, A)}{TMR(d_c, A)}$$

動画では114ページ(第1版)と書いてありますが第2版ではこのページです

*PDD*は電子線のと
きに説明する

- 線量最大深(d_{\max})における水吸収線量 $D(d_{\max}, A)$ は,
 - SSD setupでは事前に測定した校正深 $d_c=10$ cmにおける*PDD*(深部量百分率)
 - SAD setupでは事前に測定した校正深 $d_c=10$ cmにおける*TMR*(組織最大線量比)を用いた上式で与えられる

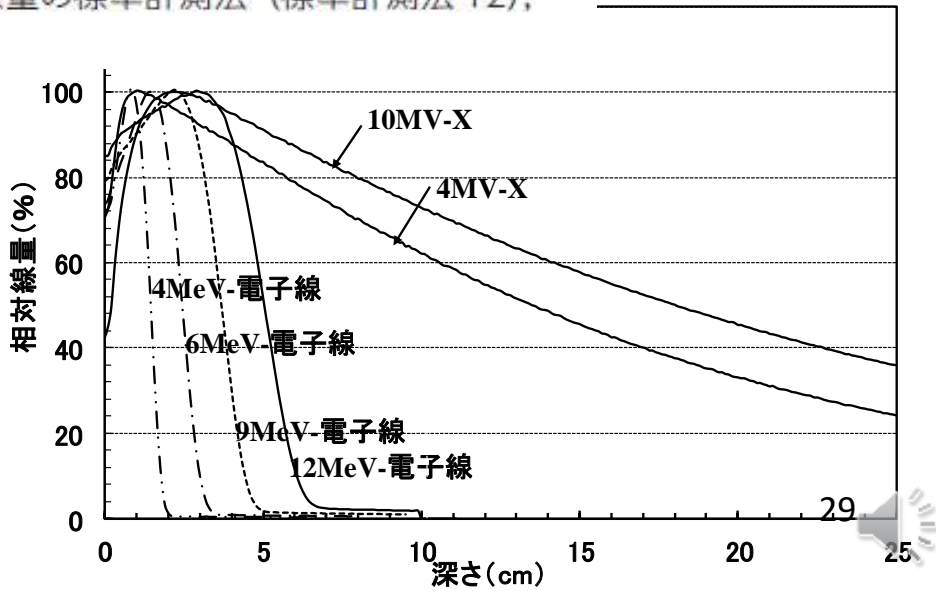
線質	エネルギー	最大深 (水中)
X線/γ線	^{60}Co	0.5 cm
	4 MV	1.0 cm
	6 MV	1.5 cm
	8 MV	2.0 cm
	10 MV	2.5 cm
	15 MV	3.0 cm
	20 MV	4.0 cm
	30 MV	5.0 cm
電子線	$1 \leq E_0 < 5 \text{ MeV}$	d_{max}
	$5 \leq E_0 < 10 \text{ MeV}$	1.0 cm
	$10 \leq E_0 < 20 \text{ MeV}$	2.0 cm
	$20 \leq E_0 < 30 \text{ MeV}$	3.0 cm

... エネルギーの 1/4

X線の線量最大深は国家試験によく出題される

数値は参考値である。線量最大深は入射エネルギーや照射野などに依存するため、エネルギーや装置ごとに測定することによってユーザーが決定する。

出典：日本医学物理学会編：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），P14，通商産業研究社，2012



小テスト

問題1 水吸収線量校正定数が $0.095 \text{ Gy}/\text{“nC”}$ として与えられる電離箱線量計を用いて、水中 10 cm の深さ、照射野 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ で 6 MV X線の水吸収線量を測定したところ、線量計の指示値は 14.4 “nC” であった。また、測定時の気圧は 101.33 kPa 、気温と水温はともに $22 \text{ }^\circ\text{C}$ であった。このとき、線量最大深(d_{max})における水吸収線量はいくらか。ただし、線質変換係数は 0.98 、水中 10 cm の深さ、照射野 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ のTMRは 0.67 、イオン再結合および極性効果はないものとし、実験条件の設定後、十分時間が経過してから測定を開始したとする。

1. 0.90
2. 0.94
3. 1.48
4. 2.00
5. 2.22

問題2 電離箱の読み値を吸収線量に変換するとき関係ないのはどれか。

1. 質量減弱係数
2. 線質変換係数
3. 極性効果補正係数
4. 温度気圧補正係数
5. 水吸収線量校正定数

問題3 温度気圧補正係数について正しいのはどれか。ただし、測定時の温度を $T(^\circ\text{C})$ 、気圧を $P(\text{kPa})$ 、基準条件の温度を $T_0(^\circ\text{C})$ 、気圧を $P_0(\text{kPa})$ とする。

1. $(273.2+T_0) / (273.2+T) \cdot P_0 / P$
2. $(273.2+T) / (273.2+T_0) \cdot P / P_0$
3. $(273.2+T) / (273.2+T_0) \cdot P_0 / P$
4. $(273.2+T_0) / (273.2+T) \cdot P / P_0$
5. $T / T_0 \cdot P_0 / P$