

「放射線治療における水吸収線量計測の基本のキホン」

～その2～

埼玉医科大学総合医療センター
畑中 星吾

1. はじめに

本講座は、放射線治療部門に配属となった新人技師やローテーターを主な対象としており、全3回で放射線治療における水吸収線量計測の基本について、できるだけ分かりやすく解説していく予定である（今回は2回目）。また、実習生などの学生向けの資料としても活用いただけると幸いである。

前回の講座では、放射線治療における水吸収線量計測について、原理的な話を解説した。今回は、前回の話と外部放射線治療における水吸収線量計測法（標準計測法12）で使用される式の関係について解説する。

2. 標準計測法12における水吸収線量算出の式

前回の講座で、水吸収線量 D_w は以下の式で算出できることをお話した。

$$D_w = \frac{Q}{m} \frac{W_{\text{air}}}{e} (L/\rho)_{w,\text{air}} P$$

ここで、 Q は収集電荷 [C]、 m は空気質量、 W_{air} は1つの電子-イオン対を生成するのに必要な平均エネルギー、 e は素電荷、 L/ρ は制限質量衝突阻止能、 P は全擾乱補正係数である。

それに対して、標準計測法12では、ある線質 Q （線質＝放射線種およびエネルギー、上記の電荷とは異なるので注意）の X 線で照射された場合の水吸収線量を算出する式として、以下が使用されている。

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

ここで、 M_Q は電位計の表示値に必要な補正係数を乗じた値、 $N_{D,w}$ は水吸収線量校正定数、 k_Q は線質変換係数である。また線質 Q は測定したいリニアックから出力される X 線のエネルギー、基準線質 Q_0 は ^{60}Co - γ 線のエネルギーとイメージしておくとう分かりやすい。

これら2つの式にどのような関係があるか、次節から解説していく。

3. 水吸収線量校正定数

前者の式を用いて、実際に水吸収線量を計測することを考えてみる。電荷 Q は、電離箱と電位計などの計測機器を用いて算出できるが、図1の点線で囲まれた部分を各施設で直接算出するのは現実的ではない。では、どのように値を取得するかというと、施設の所有する電離箱と電位計を医療用線量標準センターに郵送し、基準線質 Q_0 である ^{60}Co - γ 線による計測を実施してもらうことで、値を取得することができる。そして、この値が標準計測法12の水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ に該当する。

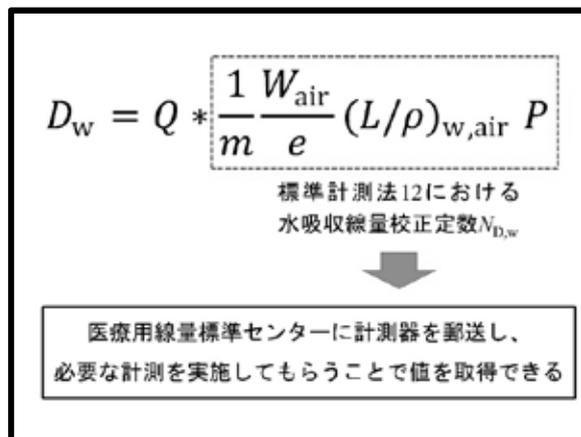


図1 水吸収線量校正定数

この水吸収線量校正定数を計測した電荷に乗ずることで水吸収線量が算出可能となる。しかし、ここで注意すべき点は、これは⁶⁰Co- γ 線に対して与えられた値であり、リニアックによるX線の水吸収線量を計測する場合は、電荷と水吸収線量校正定数だけでは正確な値は得られない。⁶⁰Co- γ 線とリニアックによるX線は線質が異なるため、その違いを補正する必要がある。

4. 線質変換係数

式中で、空気の質量 m と素電荷 e はエネルギーに依存しない。 W_{air} は⁶⁰Co- γ 線とリニアックによる高エネルギーX線ではほとんど変化しないため、違いを考慮する必要があるのは制限質量衝突阻止能 L/ρ と全擾乱補正係数 P である。従って、図2中の式で線質 Q の高エネルギーX線による水吸収線量を算出できる。ここで、図2中の点線が囲まれた部分が標準計測法12の線質変換係数 k_Q に該当する。それぞれの線質における制限質量衝突阻止能 L/ρ と全擾乱補正係数 P を直接算出することが難しいが、標準計測法12には電離箱の種類ごとに、 $TPR_{20,10}$ と k_Q の関係が表で示されており、それを用いて算出することができる。

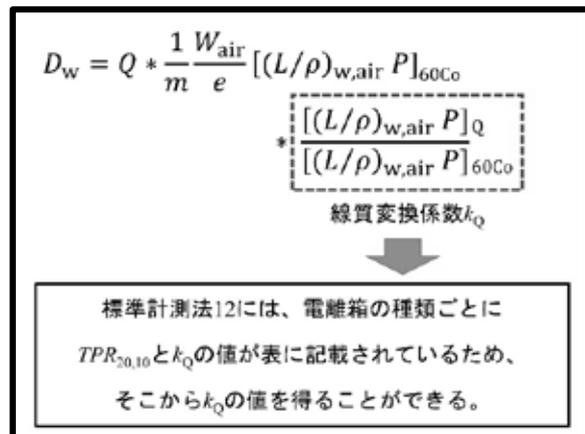


図2 高エネルギー X 線における水吸収線量算出の式

TPR (Tissue-Phantom Ratio) とは、組織ファントム線量比であり、 SCD (source to chamber distance、線源電離箱間距離) 一定で、ビーム軸上の深さ d 、その深さでの照射野が A の吸収線量を D としたとき、次式で定義される。

$$TPR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_r, A)}$$

$TPR_{20,10}$ とは照射野サイズ $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ における 10 cm 深での線量に対する 20 cm 深での線量の比であり (図3参照)、標準計測法12では、リニアックからのX線の線質 Q を表す線質指標に $TPR_{20,10}$ を採用している。図2中にもあるようにユーザーは測定したいX線の $TPR_{20,10}$ を取得することで、 k_Q を算出することができる。

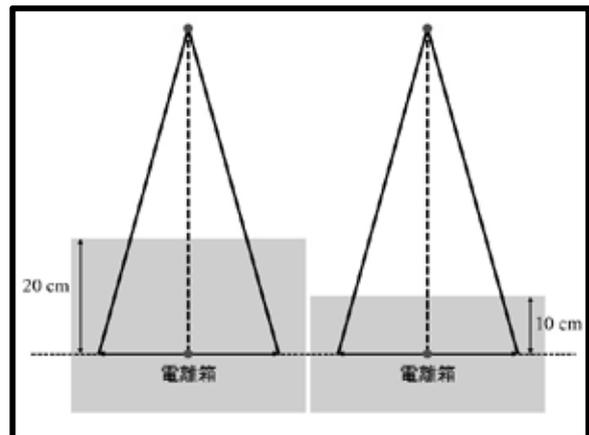


図3 $TPR_{20,10}$ の測定ジオメトリ

5. 表示値の補正

前節までの方法で水吸収線量校正定数および線質変換係数が取得できるため、校正深における水吸収線量校正定数は、基準条件で取得した線量計の指示値にこの2つを乗ずることで算出できる。高エネルギーX線の水吸収線量計測の基準条件を以下の表1に示す。

表1 光子線の水吸収線量計測の基準条件
(STD セットアップ)

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	10 g cm ⁻²
電離箱の基準点	電離空洞の幾何学的中心
電離箱の基準点の位置	校正深
SCD	100 cm (または 80 cm)
照射野	10 cm×10 cm

また、測定環境が校正時 ($N_{D,w}$ 取得時) とは異なるため、線量計の表示値は以下の4つの補正が必要となる。

$$M_Q = M_{raw} k_{TP} k_{elec} k_{pol} k_s$$

ここで、 k_{TP} は温度気圧補正係数、 k_{elec} は電位計校正定数、 k_{pol} は極性効果補正係数、 k_s はイオン再結合補正係数である。次節以降で、これらについて解説する。

6. 温度気圧補正係数

標準計測法 12 では、通気型の電離箱を推奨している。従って、温度気圧補正係数は電離空洞内の空気の質量が温度と気圧によって変化することを補正し、基準条件での質量に換算するための補正係数である。温度気圧補正係数 k_{TP} は次式で算出する。

$$k_{TP} = \frac{273.2 + T}{273.2 + 22.0} \frac{101.33}{P}$$

温度 T (°C) および気圧 P (kPa) は、測定時の電離箱内の空気の温度と気圧である。ただし、電離箱内の空気の温度を直接測定することはできないので、水ファントムの温度 (水温) を採用する。

7. 電位計校正定数

電離箱と電位計が接続された状態で一つの系として校正されている場合は電位計校正定数 k_{elec} を 1 とする。

電位計と電離箱が分離校正された場合には、電位計の表示値を真の電荷に換算する電位計校正定数が与えられる。

今回は割愛するが、電位計についてより詳細を知りたい方は、日本医学物理学会が策定する「放射線治療用線量計に用いられる電位計のガイドライン」を参考にいただきたい。(日本医学物理学会のホームページよりダウンロード可)。

8. 極性効果補正係数

印加電圧の極性の正負によって、電位計の表示値に差が生じる。0.6 cc 程度のファーマ形電離箱における極性効果は少ないので、このことを測定で確認した後であれば、実用的には通常使用の一方の極性だけの測定でよい。平行平板形電離箱では大きく、線質や測定深に依存するため、極性効果に対する補正が必要である。

極性効果補正係数は次式で算出し、表示値の補正を行う。

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

ここで M^+ および M^- は、正と負それぞれの印加電圧での電位計の表示値、 M_{raw} は通常使用する極性での電位計の表示値である。通常使用する極性は校正時の極性と同じにするのが一般的である。

9. イオン再結合補正係数

水吸収線量計測で使用される電離箱線量計では、照射によって電離空洞内に発生したイオン対は再結合が生じるため、全てを収集することはできない (再結合損失)。イオン再結合補正係数 k_s はイオンの再結合損失を補正する係数であり、原理的に 1 より大きい値となる。

イオンの再結合現象は初期再結合と一般再結合の2種類に分類される。初期再結合は、1つの飛跡に沿って生じたイオンの再結合である。線量率（電離密度）には無関係であり、高エネルギー X 線や電子線などの低 LET 放射線では小さい。一般再結合は、複数の飛跡間での再結合であり、線量率に依存する。

標準計測法 12 では、2 点電圧法を用いてイオン再結合補正係数を算出することを推奨している。この方法は、高低 2 種類の電圧を電離箱に印加して測定を行う。高い方の電圧は常用の印加電圧とし、低い方の電圧はその 1/2 あるいはそれ以下とする。

一般再結合の影響は線量率、特に、パルス放射線のようにパルス当たりの電離密度の大きい放射線で大きく、パルス放射線と連続放射線では補正が異なる。

パルス放射線の場合、イオン再結合補正係数が小さい範囲では、電荷の逆数と印加電圧の逆数（Jaffe-plot）がほぼ直線関係にあることを利用して算出する。常用電圧 V_1 と、 V_1 の 2 分の 1 以下の電圧 V_2 を印加したとき、線量計の表示値がそれぞれ M_1 および M_2 とすると、 k_s は次式で求められる。

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

ここで定数 a_0 、 a_1 および a_2 は表 2 に記載された値を用いる。

表 2 パルス放射線のイオン再結合補正係数の計算に用いる定数

V_1/V_2	パルス放射線		
	a_0	a_1	a_2
2.0	2.337	-3.636	2.299
2.5	1.474	-1.587	1.114
3.0	1.198	-0.875	0.677
3.5	1.080	-0.542	0.463
4.0	1.022	-0.363	0.341
5.0	0.975	-0.188	0.214

連続放射線の場合は、次式で求めることができる。

$$k_s = \frac{\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^2 - M_1/M_2}$$

使用する印加電圧について、イオン収集効率を上げるため、電離箱へ定格以上の電圧を印加するのは、電離箱の変形、絶縁破壊あるいは電離イオンの増幅が起こる可能性があり望ましくない。また AAPM TG-51 Addendum では、上限 400 V では Jaffe-plot の直線性が崩れる可能性があるため、電離箱に印加する電圧の上限として 300 V を推奨している。

最後に、余談ではあるが、 ^{60}Co - γ 線による $N_{D,w}$ 取得（校正）時のイオン再結合に対する考え方について記載する。校正後に医療用線量標準センターから得られる校正表を見ていただくと分かるが、校正時は「イオン再結合による電離電荷の損失は、補正していません」と記載されている。この理由は、前述した通り低 LET 放射線では初期再結合は小さいこと、さらに ^{60}Co - γ 線による校正条件下では線量率が低く、一般再結合も小さいため、イオン再結合損失が小さく補正する手順を省略できると考えられているからである（当然、リニアックの高エネルギー X 線測定時にはイオン再結合補正係数は必要なので注意）。

10. おわりに

今回は、前回の話と標準計測法 12 で使用される式の関係について解説した。次回は、さらに実際の運用を意識し、エラーの発生率を低減するために注意すべき点などについてマニュアルに近い形式で解説していく予定である。

参考文献

- ・ 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計測法（標準計測法 12）第 1 版第 2 刷、通商産業研究社
- ・ 西臺武弘 著、放射線線量測定学 第 1 版第 3 刷、文光堂
- ・ 納富昭弘 編著、日本医学物理学会 監修、放射線計測学 初版第 1 刷、国際文献社
- ・ 柴田徳思 編、放射線概論 第 11 版第 1 刷、通商産業研究社
- ・ Malcolm McEwen., et al. Addendum to the AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon beams. Med. Phys. 41 (4) , 041501, 2014
- ・ 日本医学物理学会、放射線治療用線量計に用いられる電位計のガイドライン
https://www.jsmp.org/wp-content/uploads/guideline_electrometer.pdf
- ・ Derikum, Standards and Codes of Practice in Medical Radation Dosimetry Vol.I, IAEA, 353-359, 2003