

「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1～

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。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。

2. 放射線治療における水吸収線量計測の意義

放射線治療では、投与する吸収線量の変化に対して、腫瘍の局所制御率や正常組織の障害発生率が大きく変化することが知られている。従って、吸収線量計測について理解し、管理していくことは重要である。吸収線量 D とは、全ての電離放射線、全ての物質に対して適用可能な、質量 dm の物質に付与される平均エネルギー $d\varepsilon$ であり、以下の式で定義される。単位は Gy または J/kg が用いられる。

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

吸収線量は全ての物質に適用することができるが、人体軟部組織の約8割を水が占めていることなどから、放射線治療では水に対する吸収線量（水吸収線量）による評価が基準となっている。本講座では、放射線は治療で用いられる高エネルギー X 線とし、ファーマ形電離箱を水中に設置して水吸収線量を計測する場合を想定する。

3. 電離箱を用いた吸収線量計測の原理

X 線は間接電離放射線であるため、物質にエネルギーを付与するのは主に二次電子の衝突損失に

よってである。電子などの荷電粒子による吸収線量は、原理的にフルエンス $[m^{-2}] \times$ 質量衝突阻止能 $[Jm^2/kg]$ で表すことができるが、放射線治療のような高エネルギー放射線場のフルエンスを直接計測することは困難である。従って、電離箱により電荷を計測し、それを利用するなどして吸収線量を算出することが一般的である。

図1に電離箱の基本的な概念を示す。荷電粒子（X 線の場合は主に二次電子）が電離箱内の気体中を走ると、気体分子を電離し、電子と陽イオン（イオン対）が多数生成される。負の電荷を持つ電子は正の電極に引き寄せられ、正の電荷を持つイオンは負の電極に引き寄せられるため、その結果電流が流れる。個々の放射線による電流は極めて小さいため一般的に電離箱では多数の放射線によって平均的に流れる電流 $I[A]$ もしくは電流積分値である電荷 $Q[C]$ を電位計により計測する。

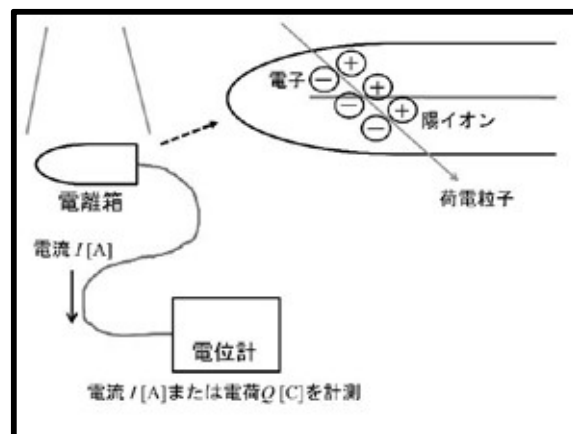


図1 電離箱の基本的な概念図

$Q[C]$ の電荷が収集された時、電子（もしくは陽イオン）1つが持つ電荷は素電荷 $e[C]$ である

ため、電離箱内に生成したイオン対の数 N は以下の式で表すことができる。

$$N = \frac{Q}{e}$$

次に、1つのイオン対を生成するのに必要な平均エネルギーは W 値 [J] で与えられるため、電離箱内に付与されたエネルギーは $W_{\text{air}} \times N$ となる。吸収線量は、単位質量当たりのエネルギーであるため、空気の質量を m [kg] とすると、電離箱内の空気の吸収線量 D_{air} [J/kg] は以下の式となる。

$$D_{\text{air}} = \frac{W_{\text{air}}N}{m} = \frac{W_{\text{air}}Q}{me} = \frac{Q}{m} \frac{W_{\text{air}}}{e}$$

ここで注意すべきは、水中で計測していても、この時点で得られたものは（電離箱内の）空気の吸収線量であり、われわれが評価したい水吸収線量ではない点である。空気の吸収線量から水吸収線量への変換については、次節で解説する。

以下は余談だが、空気の吸収線量は上記式の一番右のように表記されることが多い（図2参照）。これは最右項の左側の Q/m は照射線量 [C/kg] を表しており、空気の吸収線量は、照射線量に W_{air}/e [J/C] を乗ずることで算出できることを示すためにこのように表記されている。

図2 空気の吸収線量と照射線量の関係

4. 空気から水の吸収線量への変換

MV 領域の高エネルギー X 線場において、水中にファーマ形電離箱線量計のような検出器が設置されている場合、（厳密には異なるが）その電離空洞はブラッグ・グレイ空洞と仮定できる。ブラッグ・グレイの空洞理論は、高エネルギー X 線場のように光子によって生成される二次電子の飛程が検出器の空洞サイズよりも長い場合について、吸収線量を評価するために考えられた理論であり、ブラッグ・グレイ空洞とは、図3のように水中のある放射線場に設置しても、その場所の電子フルエンスが変化しない空洞である。

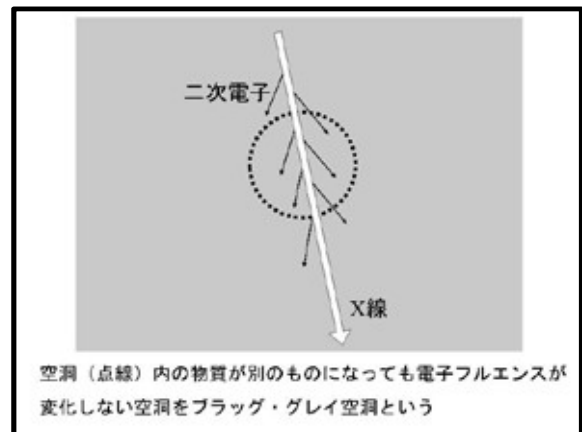


図3 ブラッグ・グレイ空洞の概念図

今回の場合は、物質は水、空洞とは空気（挿入された電離箱）となる。電離箱内でエネルギーを付与しているのは、主に二次電子であるので、電子フルエンス Φ から吸収線量を算出する場合、電子フルエンスと質量衝突阻止能 S_{col}/ρ の積で表すことができる。従って、物質が全て水の（=空洞がない）場合の水吸収線量は以下の式となる。

$$D_{\text{water}} = \Phi_{\text{water}} \left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{water}}$$

また、上記と同じ条件下で、水中に空洞を設置した場合の空気の吸収線量は以下の式となる。

$$D_{\text{air}} = \Phi_{\text{air}} \left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{air}}$$

ここで空洞の存在によって電子フルエンスは変化しない ($\Phi_{\text{water}} = \Phi_{\text{air}}$) と仮定されているため、空気の吸収線量と水の吸収線量の関係は以下となる。

$$\begin{aligned} \frac{D_{\text{water}}}{D_{\text{air}}} &= \frac{\Phi_{\text{water}} \left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{water}}}{\Phi_{\text{air}} \left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{air}}} = \frac{\left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{water}}}{\left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{air}}} \\ &= \left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{w,air}} \end{aligned}$$

従って、

$$D_{\text{water}} = D_{\text{air}} \left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{w,air}} = \frac{Q}{m} \frac{W_{\text{air}}}{e} \left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{w,air}}$$

となる。つまり、理想的な空洞の場合、空気の吸収線量から水吸収線量を算出する場合は、空気の吸収線量に二つの物質の質量衝突阻止能比を乗ずれば求めることができる。

5. 擾乱 (じょうらん) 補正

前述の式が成立するためには、図4の左側のように理想的な空洞でなければならない。実際には、右側のように電離箱壁や中心電極などといった電離箱を構成する物質が存在するため、それらの違いなどによる影響を補正する必要があり、それを擾乱補正という。

従って、実際の水吸収線量の算出のための式は以下ようになる。

$$D_{\text{water}} = \frac{Q}{m} \frac{W_{\text{air}}}{e} \left(\frac{S_{\text{col}}}{\rho} \right)_{\text{w,air}} P$$

ここで、 P は全擾乱補正係数である。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) における全擾乱補正係数には、空洞と電離箱の違いを補正する係数を含め、以下の4つが含まれている。壁補正係数 (電離箱壁と水との不等価性に対する補正係数)、空洞補正係数 (実際の電離空洞と水との相違による電子フルエンスの変化に対する補正係数)、変位補正係数 (電離空洞の幾何学的中心と計測の実効中心との変位に対する補正係数)、および中心電極補正係数 (円筒形電離箱における中心電極と空気の不等価性に対する補正係数) である。これらの詳細については、今回の講座では割愛するが、理想的な状態と実際の電離箱の違いは補正する必要があることは覚えていただきたい。

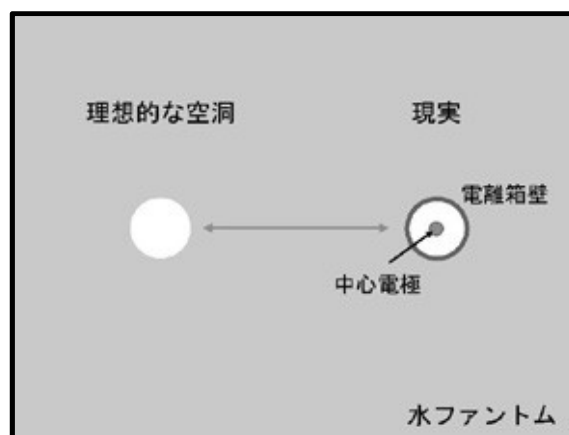


図4 理想的な空洞と現実の違い

6. スペンサー・アティックスの空洞理論

前述のブラッグ・グレイの空洞理論による式では、質量衝突阻止能 S_{col}/ρ が用いられている。これは全ての衝突損失によるエネルギーが空洞内に付与されると仮定されている。しかし、図5のように、二次電子の衝突により、さらに電離を起こす電子 (δ 線と呼ばれる) が生じ、この δ 線の電離によるエネルギーの一部が空洞の外へ出ていくことがある。ブラッグ・グレイの空洞理論では、

この空洞から出ていく分のエネルギーが考慮されていない。標準計測法 12 などでは、その分のエネルギーを考慮するために、ブラッグ・グレイの空洞理論を拡張したスペンサー・アティックスの空洞理論による制限質量衝突阻止能 L/ρ が用いられている。詳細はやや複雑であり、本講座の主旨とは少し逸脱すると考えるため、ここでは割愛するが、次回以降には制限質量衝突阻止能 L/ρ が式の中で登場する。より詳細を知りたい方は、教科書や参考資料などを読んでいただければ幸いである。

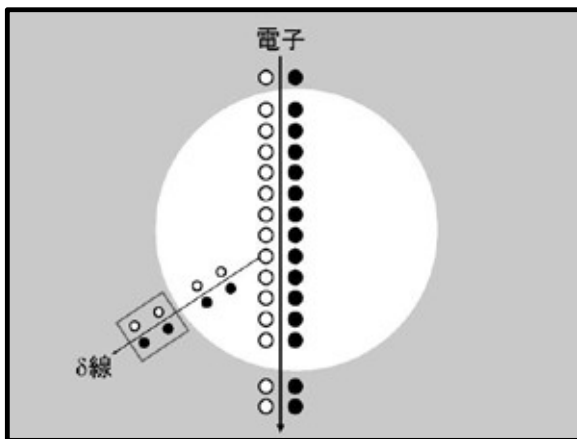


図5 δ線による空洞外へのエネルギーの持ち出しの概念図（ブラッグ・グレイの空洞理論では四角内のエネルギー分も空洞内に付与されると仮定されている。○：電離により生じた電子、●：電離により生じた陽イオン）

7. さいごに

今回は、放射線治療における水吸収線量計測について、原理的な話を簡単に解説した。次回は、今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、より実務に近い水吸収線量計測に関する話をする予定である。

8. 参考文献

- 1) 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
- 2) 西臺武弘 著、放射線線量測定学 第 1 版第 3 刷、文光堂
- 3) 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
- 4) 柴田徳思 編、放射線概論 第 11 版第 1 刷、通商産業研究社