

放射線治療技術学Ⅱ

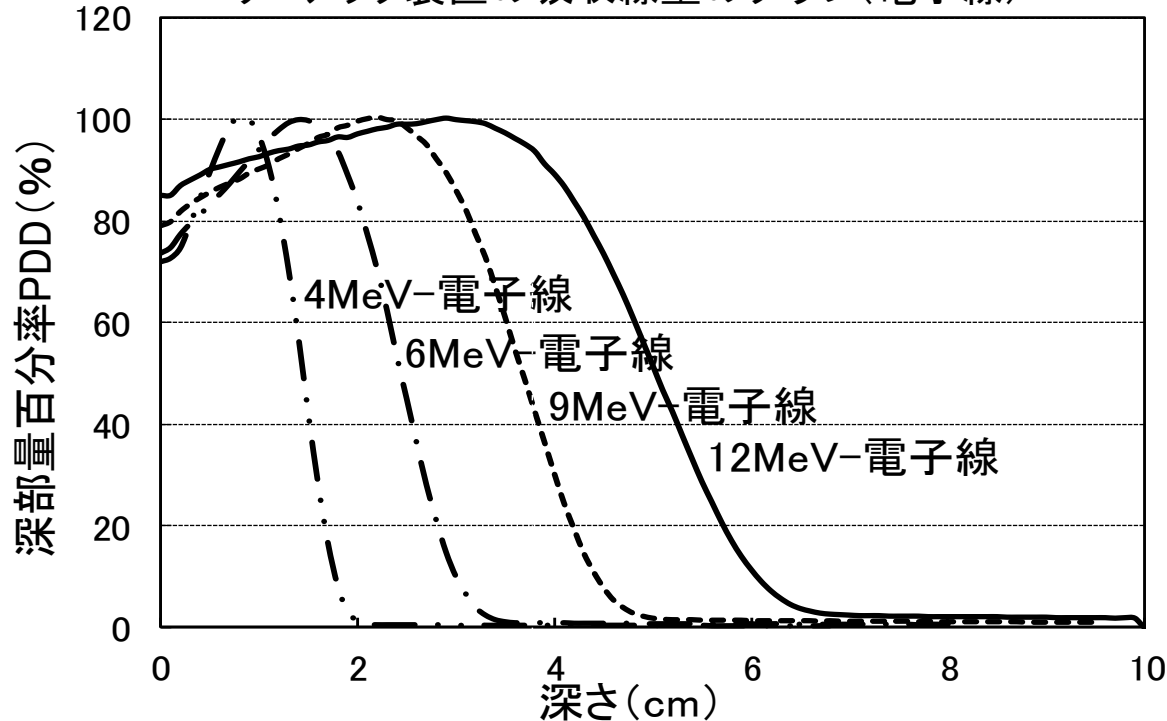
線量計測(電子線-1)



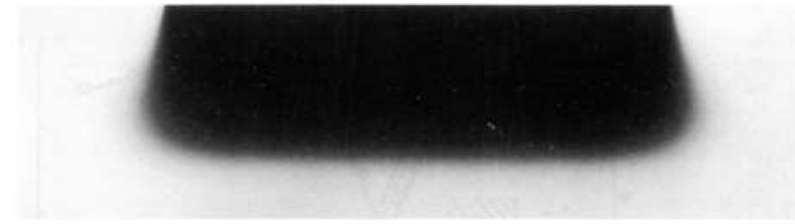
電子線の特徴

- 浅在性の病変への照射に用いられる
- 深さに伴って連続的にエネルギーを失う
- 線質(エネルギー)に依存する補正係数がある
→例えば電離箱の空気と水で単位長さあたりに失うエネルギーの比(阻止能比: stopping-power ratio)は深さによって変わる(後述)
- 線質指標は深部量百分率PDDが50%になる深さ=深部量半価深 R_{50}

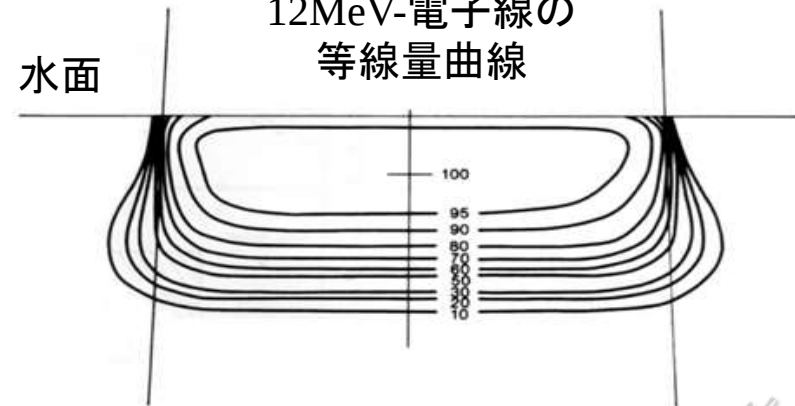
リニアック装置の吸収線量のグラフ(電子線)



12MeV-電子線のX線フィルム画像



12MeV-電子線の
等線量曲線



電子線の吸収線量計測のフローチャート

1. 線質指標 R_{50} の測定
電離量百分率 PDI と I_{50} から深部量百分率 PDD と R_{50} を求める
線質変換係数 k_Q の決定

2. 校正深 d_c における補正前の表示値 M_{raw} の測定
電子線では校正深 $d_c = 0.6R_{50} - 0.1$ [g/cm^2]で測定

3. 校正深 d_c における補正後の表示値 M_Q の計算

$$M_Q = M_{\text{raw}} k_{\text{TP}} k_{\text{pol}} k_{\text{S}} k_{\text{elec}}$$

4. 校正深吸収線量を求める

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

電子線計測のセットアップ(SSD一定法)

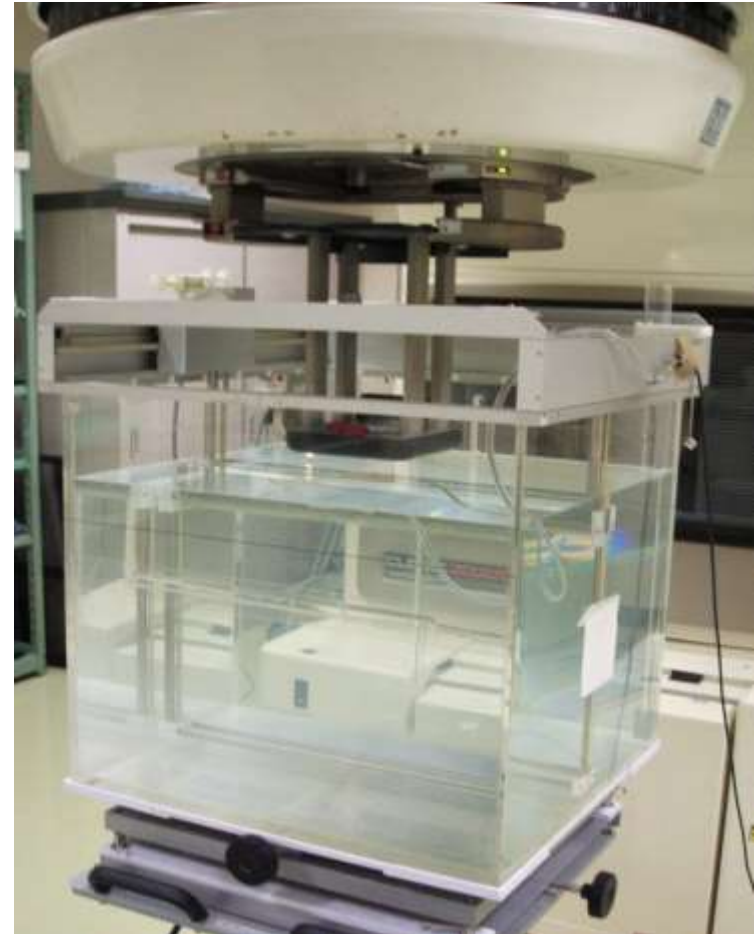
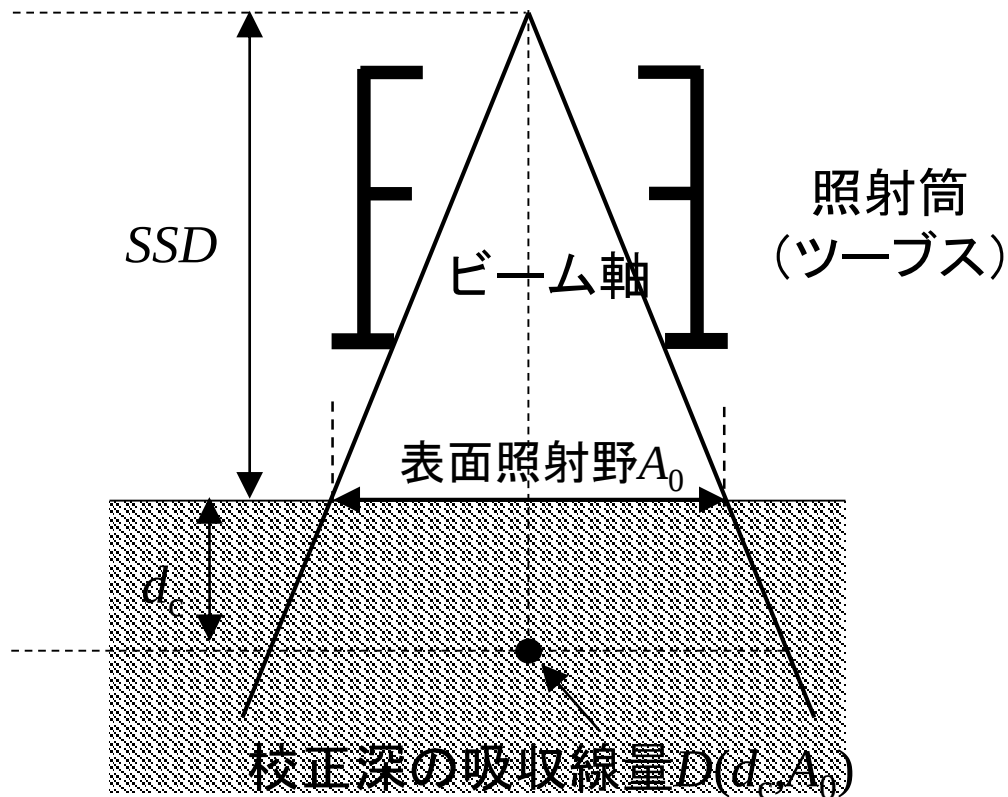
(1) SSD一定法

校正深の吸収線量 $D(d_c, A_0)$

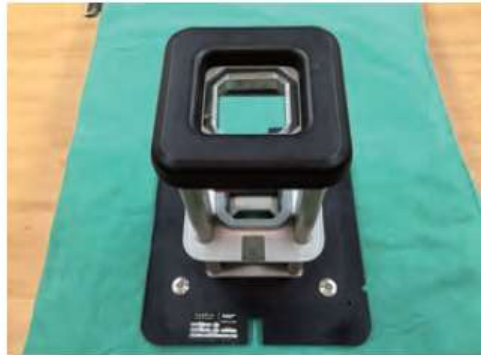
表面での照射野 $A_0 = 10 \times 10$ cm,

校正深 d_c にリファレンス線量計を配置

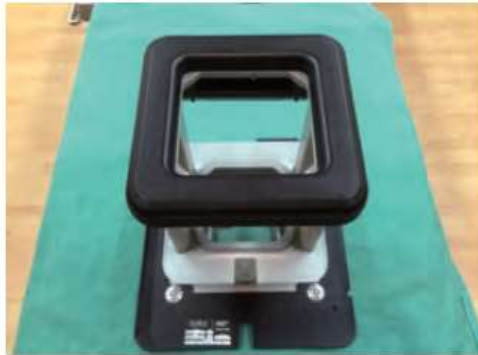
(注) 電子線は線量を与えられる深さが浅いため
セットアップ(位置合わせ)はSSD一定法のみ



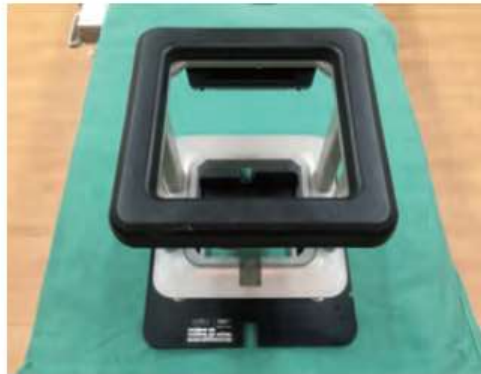
3 照射筒 (ツース, コーン)



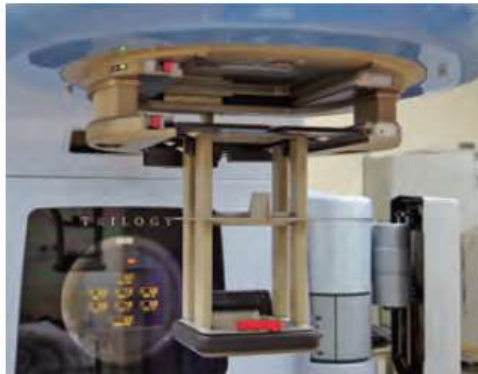
6 cm×6 cm



10 cm×10 cm



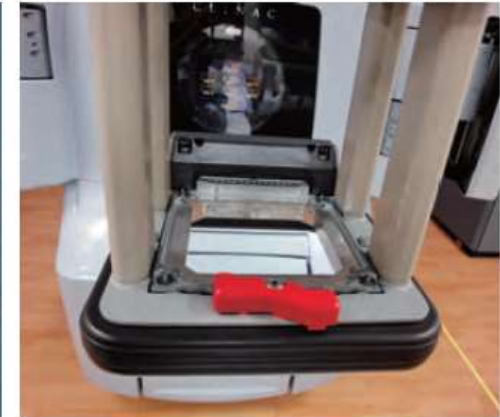
15 cm×15 cm



照射筒の装着



照射野補正具

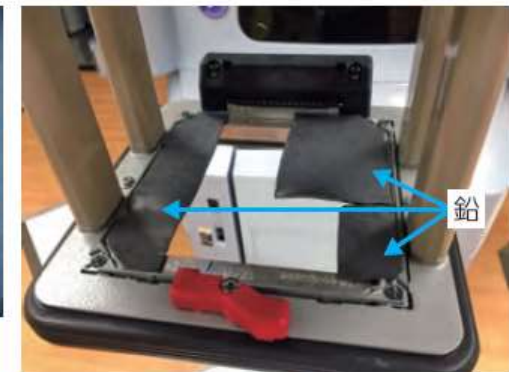


照射筒への照射野補正具の装着

4 遮蔽用鉛板



遮蔽用鉛板



遮蔽用鉛板の使用例

③線質の決定

▲ 線質指標

標準計測法 12 における線質指標

- 光子線

$TPR_{20,10}$ (組織ファントム線量比)

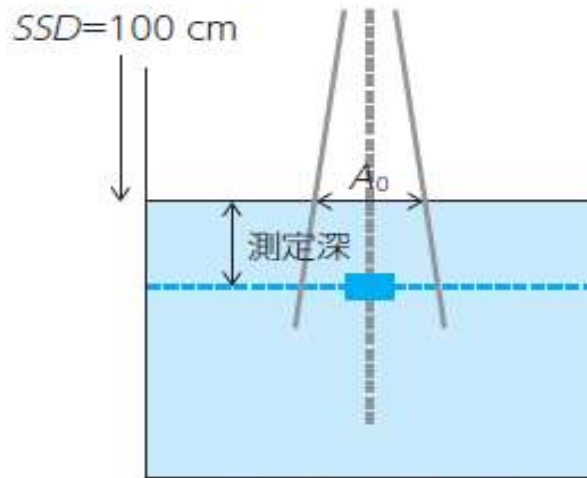
- 電子線

R_{50} (線量半価深)

- 水吸収線量を評価するためには、線質指標が必要となる
- リニアック装置の公称エネルギーが同じでも、線質が異なる場合があるため、線質指標を求める必要がある
- 標準計測法12において、
 - 光子線では組織ファントム線量比 ($TPR_{20,10}$)
 - 電子線では線量半価深 (R_{50})

が線質指標に用いられる

▲ R_{50} (線量半価深)



R_{50} 測定の設定図

$$R_{50} = 1.029I_{50} - 0.06 \quad (I_{50} \leq 10 \text{ g cm}^{-2})$$

$$R_{50} = 1.059I_{50} - 0.37 \quad (I_{50} > 10 \text{ g cm}^{-2})$$

項 目	基準値あるいは基準条件
ファントム材質	水 ($R_{50} \geq 4 \text{ g cm}^{-2}$) 水または固体ファントム ($R_{50} < 4 \text{ g cm}^{-2}$)
電離箱	平行平板形または円筒形 ($R_{50} \geq 4 \text{ g cm}^{-2}$) 平行平板形 ($R_{50} < 4 \text{ g cm}^{-2}$)
電離箱の基準点	平行平板形：電離空洞内前面の中心 円筒形：電離空洞の幾何学的中心から $0.5r_{\text{cyl}}$ 線源側
SSD	100 cm
照射野 (A_0)	10 cm × 10 cm 以上 ($R_{50} \leq 7 \text{ g cm}^{-2}$) 20 cm × 20 cm 以上 ($R_{50} > 7 \text{ g cm}^{-2}$)

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），P57，通商産業研究社，2012

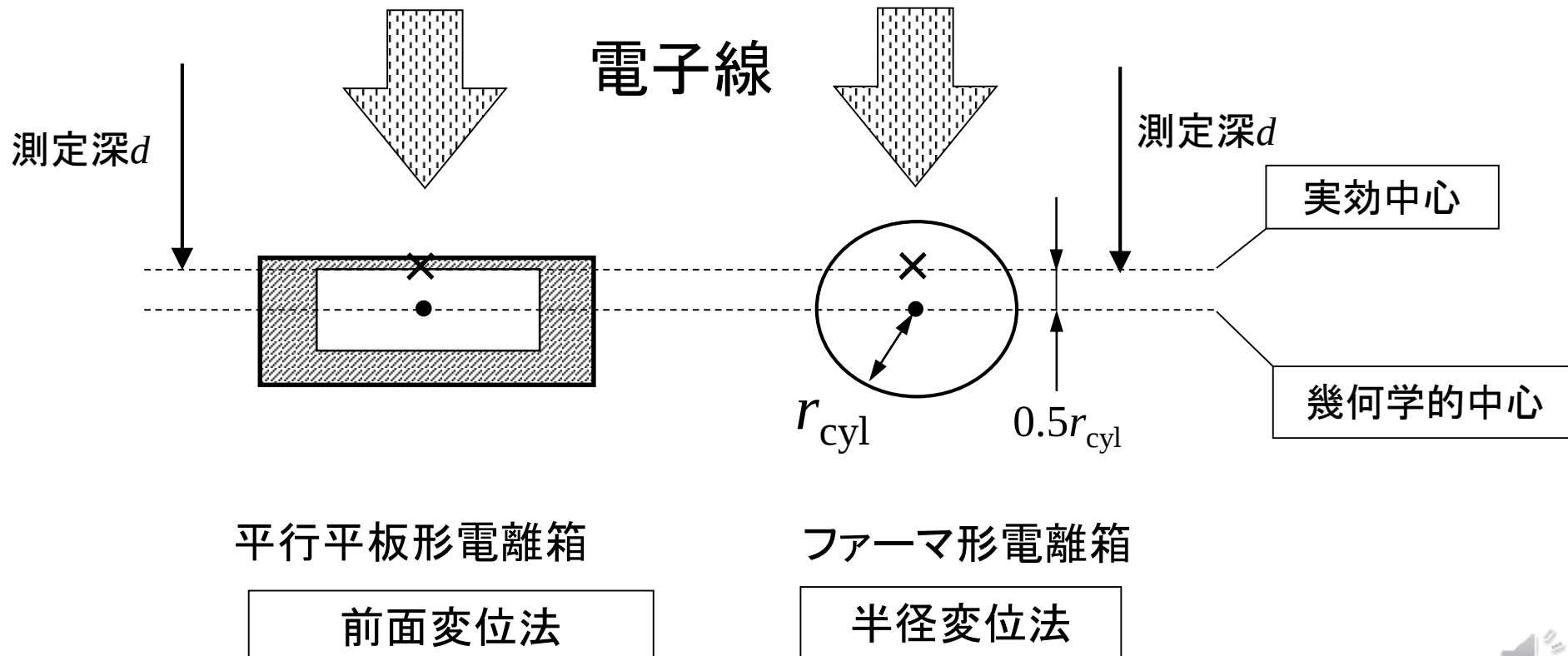
- 水中の深部量百分率PDD (percentage depth dose) が50%になる深さ
- 深部電離量百分率PDI (percentage depth ionization) を測定した後，PDIが50%になる深さ(I_{50} ：電離量半価深)を求め，上式により I_{50} から R_{50} を求める
- 平均入射エネルギー($\overline{E_0}$)は， $\overline{E_0} = 2.33 \times R_{50}$ から求めることができる
- R_{50} の測定では，すべてのエネルギー範囲で平行平板形電離箱を使用できる($R_{50} \geq 4 \text{ g/cm}^2$)では円筒形(ファーマ形)電離箱も使用できる

測定深について(電子線)

- 電子線は変位法で測定する(絶対線量、相対線量ともに)
 - 平行平板形は前面変位法
 - ファーマ形は半径変位法($0.5r$)

動画はp.116と言っていますが
第2版ではこのページです

X線と電子線の比較は
p.160を参照



測定深について(X線)

- 絶対線量 ([Gy]など単位があるもの)

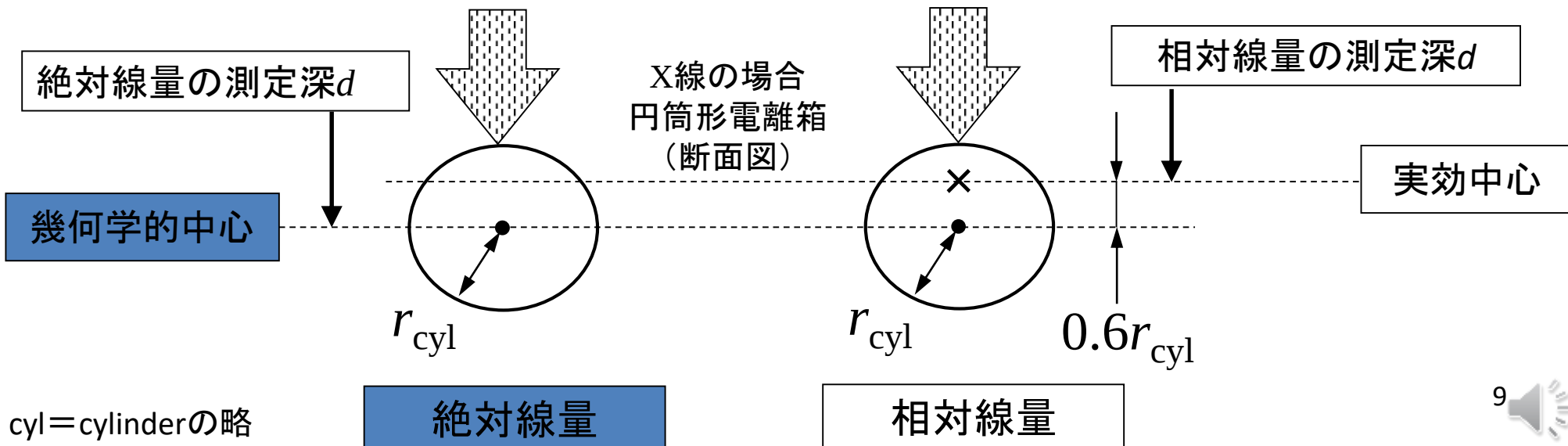
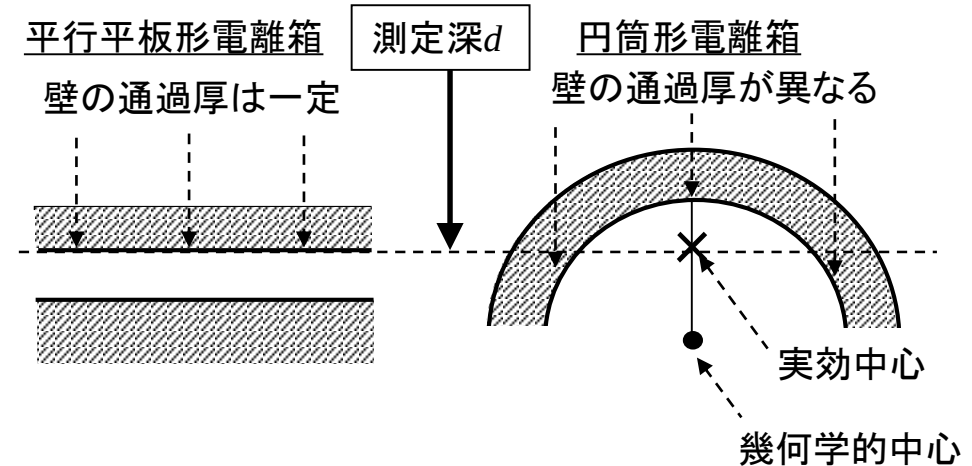
→X線の絶対線量測定は幾何学的中心で行う

(注意)円筒形電離箱はX線の電離箱壁の通過厚が中心軸と周辺部で異なり、幾何学的中心より線源側の点(実効中心)で電離箱の感度が最大になるため測定は実効中心の深さにする。ただし、X線の絶対線量測定では、線質変換係数 k_Q でこの半径方向の電離箱感度の違いを補正しているため、測定深は幾何学的中心で行って良いことになっている。

- 相対線量 (PDD, TMR, OPFなど比率で表すもの)

→X線の相対線量測定は半径変位法(0.6 r)で行う

放射線治療物理学第3版, 文光堂 p.184-5 表VII-4, 図VII-9



平行平板形電離箱（非防浸型）

Markus (PTW社)

ビルドアップキャップ

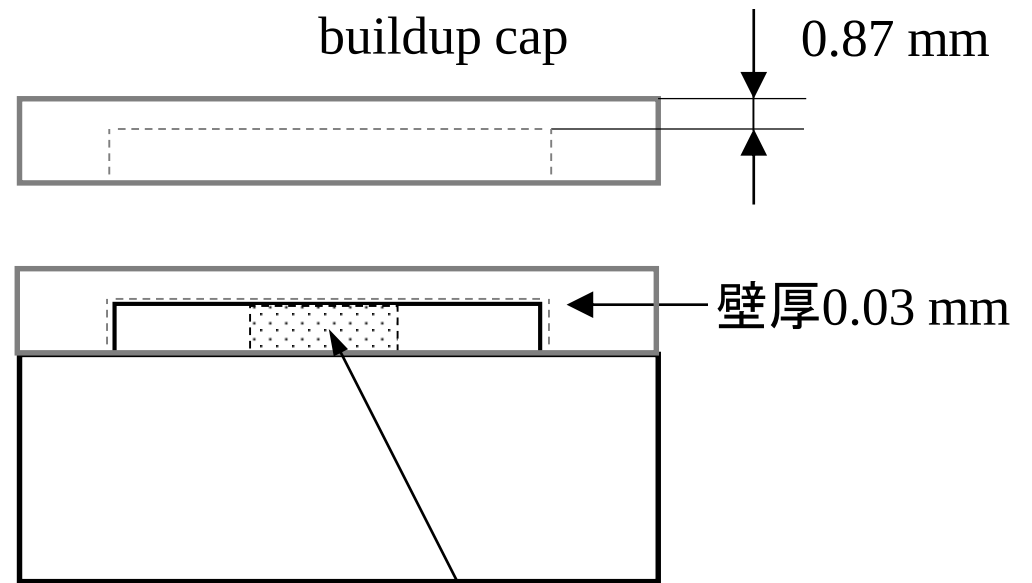


ビルドアップキャップ装着



前面変位法

空洞前面 = $0.87\text{mm} + 0.03\text{mm} = 0.9\text{mm}$
(0.9mm 表面より下に深さを合わせる)



電離空洞の体積
activity volume : 0.055 cm^3

平行平板形電離箱(防浸型)

前面変位法

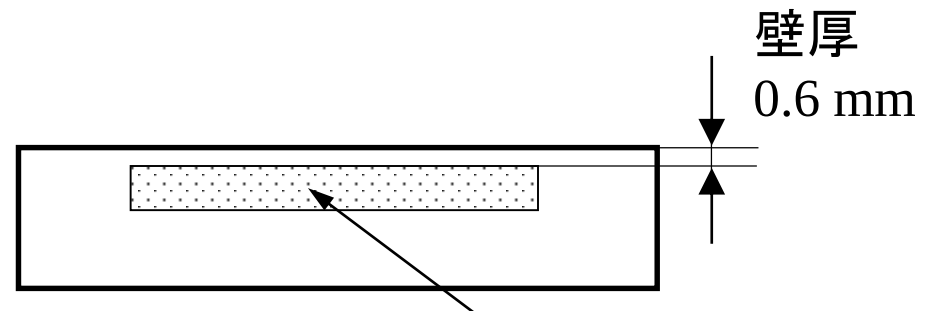
空洞前面 = 0.6 mm

(0.6 mm表面より下に深さを合わせる)

NACP-02 (Scanditronix社)



樹脂製ケースと一体で成型されている



電離空洞の体積

activity volume : 0.16 cm³

カタログより

reference point in water :

0.6 mm below the outer surface

1. 線質指標 R_{50} の測定

- 深さに対する電離量の変化を測定
- 電離量百分率 PDI を求める

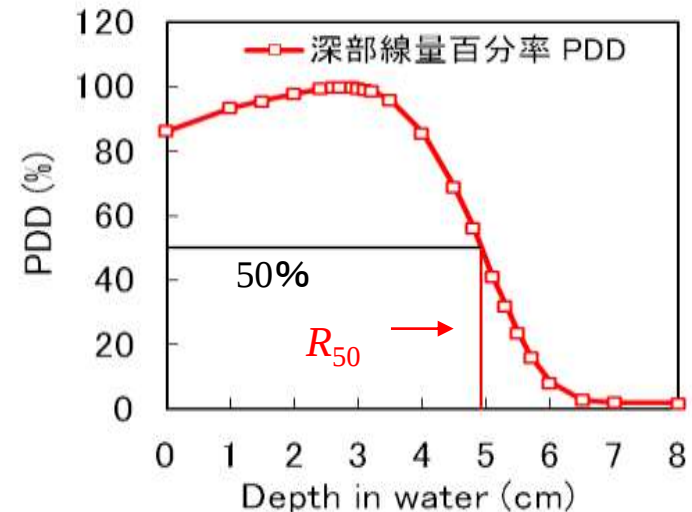
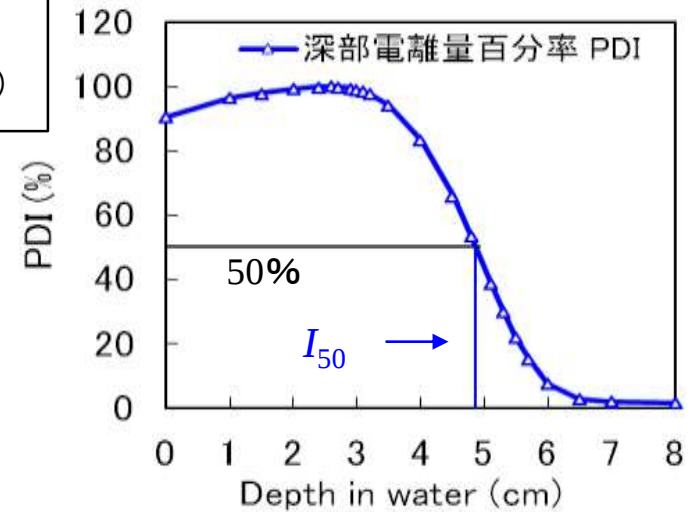
深さごとに k_{pol} , k_s を測定するのは大変 (省略することが多い)

$$PDI(d, A_0) = 100 \cdot \frac{(M_{\text{raw}} \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_s \cdot k_{\text{elec}})_d}{(M_{\text{raw}} \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_s \cdot k_{\text{elec}})_{d_{\text{max}}}}$$

- PDI に水/空気の阻止能比 を乗じて PDD を求める

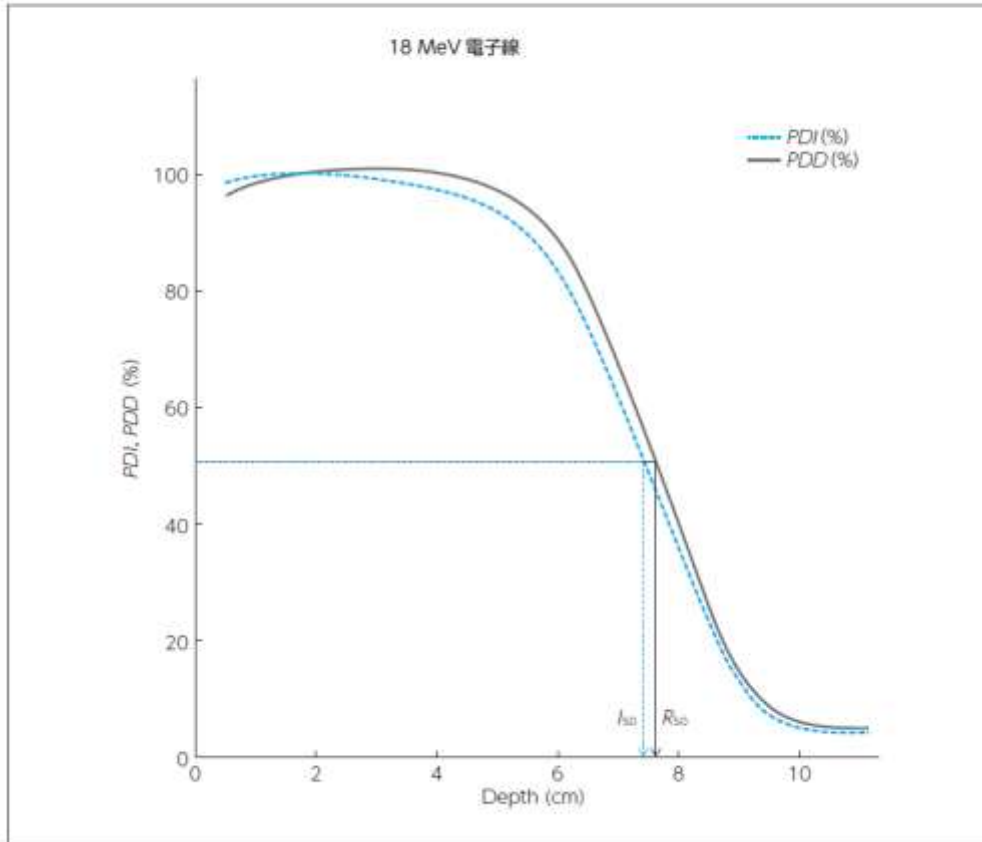
$$PDD(d, A_0) = PDI(d, A_0) \cdot \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{water,air}} \right]_d}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{water,air}} \right]_{d_{\text{max}}}}$$

- 阻止能: 電子(荷電粒子)が物質の単位長さ通過するときに失う平均の運動エネルギー(密度 ρ で割った L/ρ で表す)
- 水/空気の阻止能比: 空気(電離箱)に対する水の阻止能比



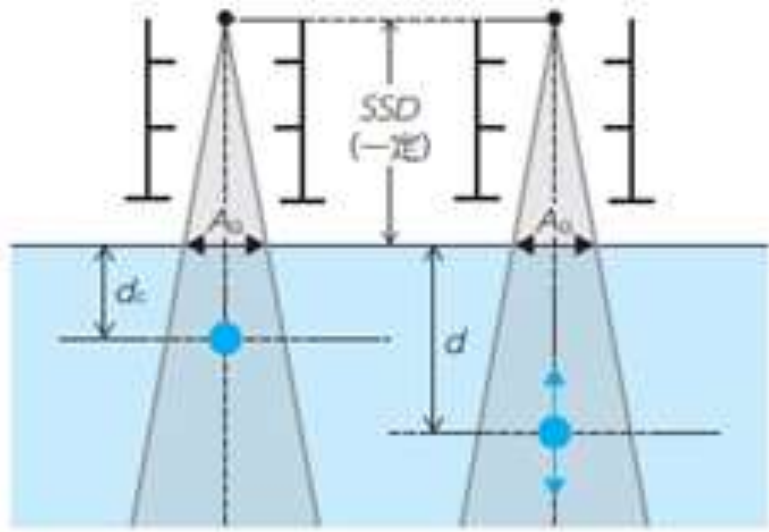
2 深部電離量百分率 (percentage depth ionization : PDI)

▲ PDI , PDD



- PDI とは、水中でのビーム軸上における最大の電離量に対する任意の深さでの電離量の百分率である
- 間接電離放射線であるX線および γ 線の場合、深さに関係なくエネルギー分布は一定となる。すなわち、深さによる電離量と吸収線量は比例関係となる。この場合、 PDI (電離量の比)は PDD (吸収線量の比)と一致する($PDI = PDD$)
- 一方、直接電離放射線である電子線(荷電粒子)は、物質(軌道電子)と衝突もしくは散乱しながらエネルギーを失って飛程の終端まで進む。すなわち、深さによってエネルギーが異なる。そのため、深さによる電離量と吸収線量は比例関係とはならない。この場合、 PDI (電離量の比)と PDD (吸収線量の比)は等価とならず($PDI \neq PDD$)、阻止能比と擾乱に対する補正が必要となる

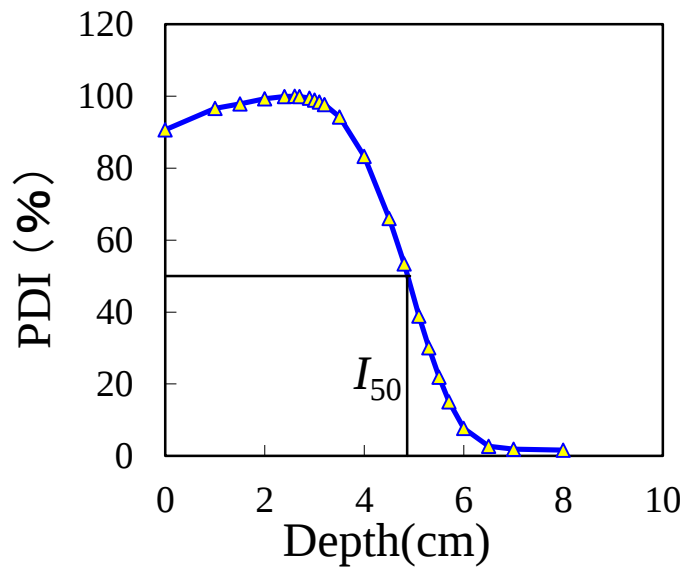
PDIからPDDへ



PDI

②

①

① SSD一定で深さごとの電離量を求め, PDI を作成する② PDI から電離量半価深(I_{50})を決定する③ I_{50} から式1(Eq.1)を用いて線量半価深(R_{50})を求める

$$R_{50} = 1.029 \cdot I_{50} - 0.06 \quad (I_{50} \leq 10 \text{ g/cm}^2)$$

$$R_{50} = 1.059 \cdot I_{50} - 0.37 \quad (I_{50} > 10 \text{ g/cm}^2)$$

式1(Eq.1)

③

 I_{50}

$$R_{50} = 1.029 \cdot I_{50} - 0.06 \quad (I_{50} \leq 10 \text{ g/cm}^2)$$

$$R_{50} = 1.059 \cdot I_{50} - 0.37 \quad (I_{50} > 10 \text{ g/cm}^2)$$

式1 (Eq.1)

④

 R_{50}

$$\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{water,air}}(R_{50}, d) = \frac{a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 y}{1 + a_4 x + a_5 x^2 + a_6 x^3 + a_7 y}$$

式2 (Eq.2)

⑤

阻止能比

$$PDD(d, A_0) = PDI(d, A_0) \times \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{water,air}}\right]_d}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{water,air}}\right]_{d_{\text{max}}}}$$

式3 (Eq.3)

⑥

PDD

④ R_{50} から式2 (Eq.2)を用いて平均制限質量衝突阻止能比を求める

$$\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{water,air}}(R_{50}, d)$$

$$a_0 = 1.0752$$

$$a_1 = -0.50867$$

$$a_2 = 0.088670$$

$$a_3 = -0.08402$$

$$a_4 = -0.42806$$

$$a_5 = 0.064627$$

$$a_6 = 0.003085$$

$$a_7 = -0.12460$$

$$x = \ln R_{50}, \quad y = d/R_{50}$$

$$\text{ただし } 1 \text{ cm} \leq R_{50} \leq 19 \text{ cm}, \quad 0.02 \leq d/R_{50} \leq 1.2$$

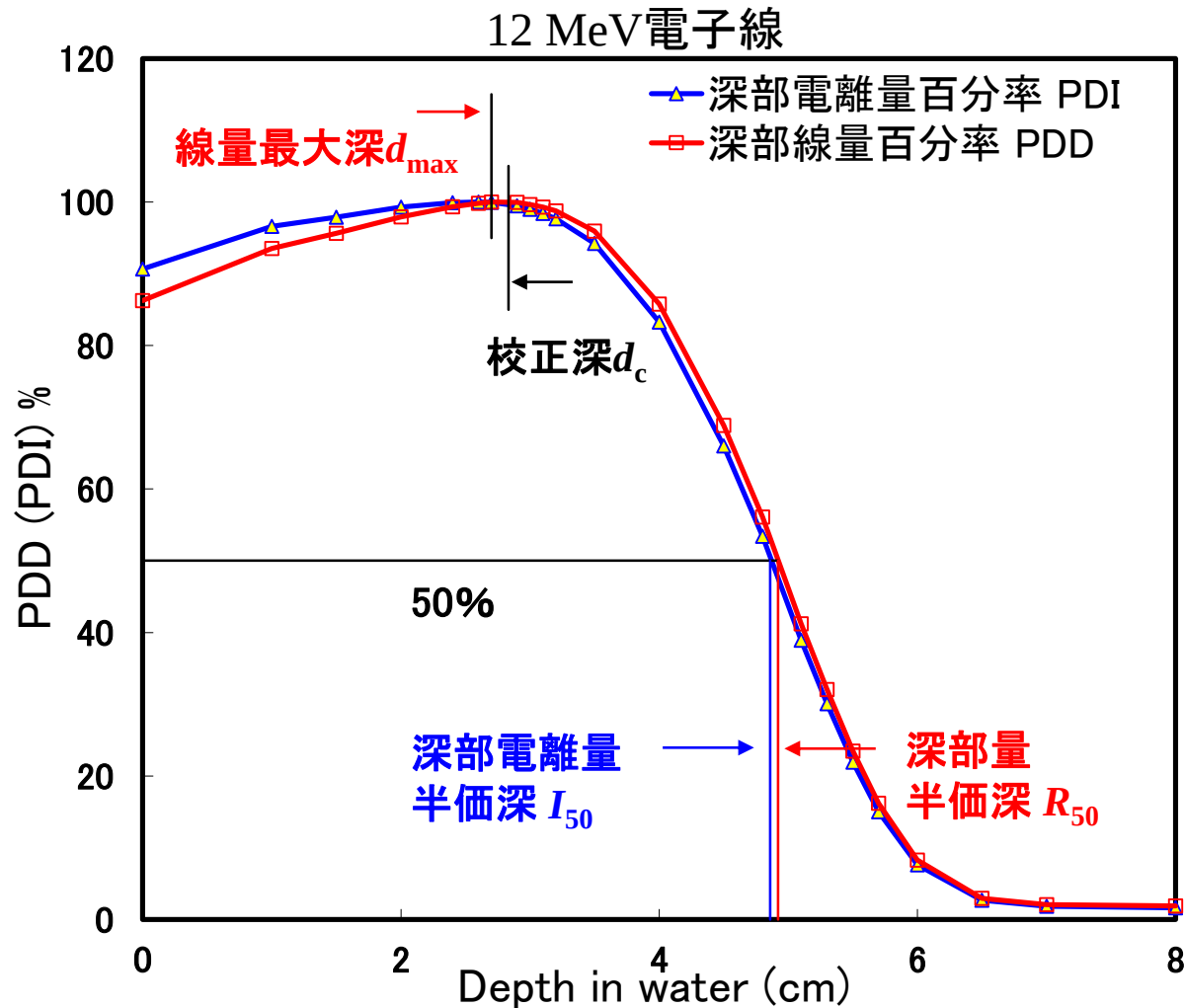
⑤ PDIから式3 (Eq.3)でPDDに変換する

 $\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{water,air}}\right]_d$ は任意の深さにおける平均制限質量衝突阻止能比,

 $\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{water,air}}\right]_{d_{\text{max}}}$ は基準深(=線量最大深とする)における平均制限質量衝突阻止能比を表す

⑥ PDD曲線から求め、③で求めたと比較し、1mm以内の誤差であれば、結果は妥当である

電子線のPDI曲線とPDD曲線



電離箱の空洞内(空気)
での電離を計測する

PDI曲線

空気と水の違いによる
電離箱の応答(感度)
の差を補正するため
水/空気の阻止能比
を乗じる

水での電離に変換して
吸収線量を求める

PDD曲線

水/空気の阻止能比の近似式(1)

- 水/空気の(平均制限質量衝突)阻止能比：Stopping-power ratio

$$\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{water,air}}(R_{50}, d) = \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{water,air}}\right]_d}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{water,air}}\right]_{d_{\text{max}}}}$$

$$= \frac{a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3y}{1 + a_4x + a_5x^2 + a_6x^3 + a_7y}$$

$$1 \text{ cm} \leq R_{50} \leq 19 \text{ cm}, \quad 0.02 \leq d/R_{50} \leq 1.2$$

$$x = \ln R_{50}, \quad y = d/R_{50}$$

$$a_0 = 1.0752 \quad a_1 = -0.50867$$

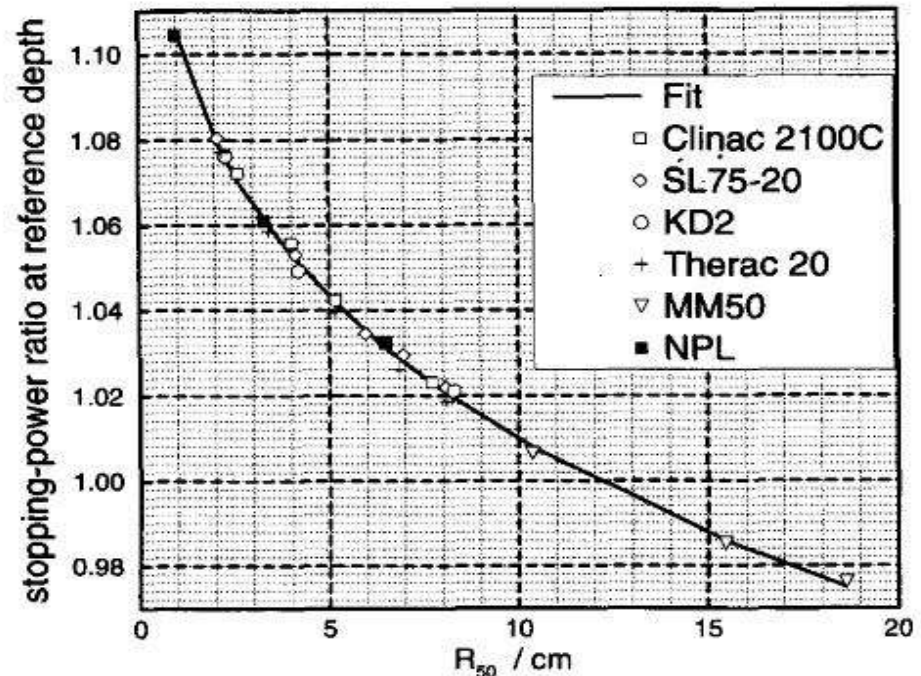
$$a_2 = 0.088670 \quad a_3 = -0.08402$$

$$a_4 = -0.42806 \quad a_5 = 0.064627$$

$$a_6 = 0.003085 \quad a_7 = -0.12460$$

近似式は覚える必要なし

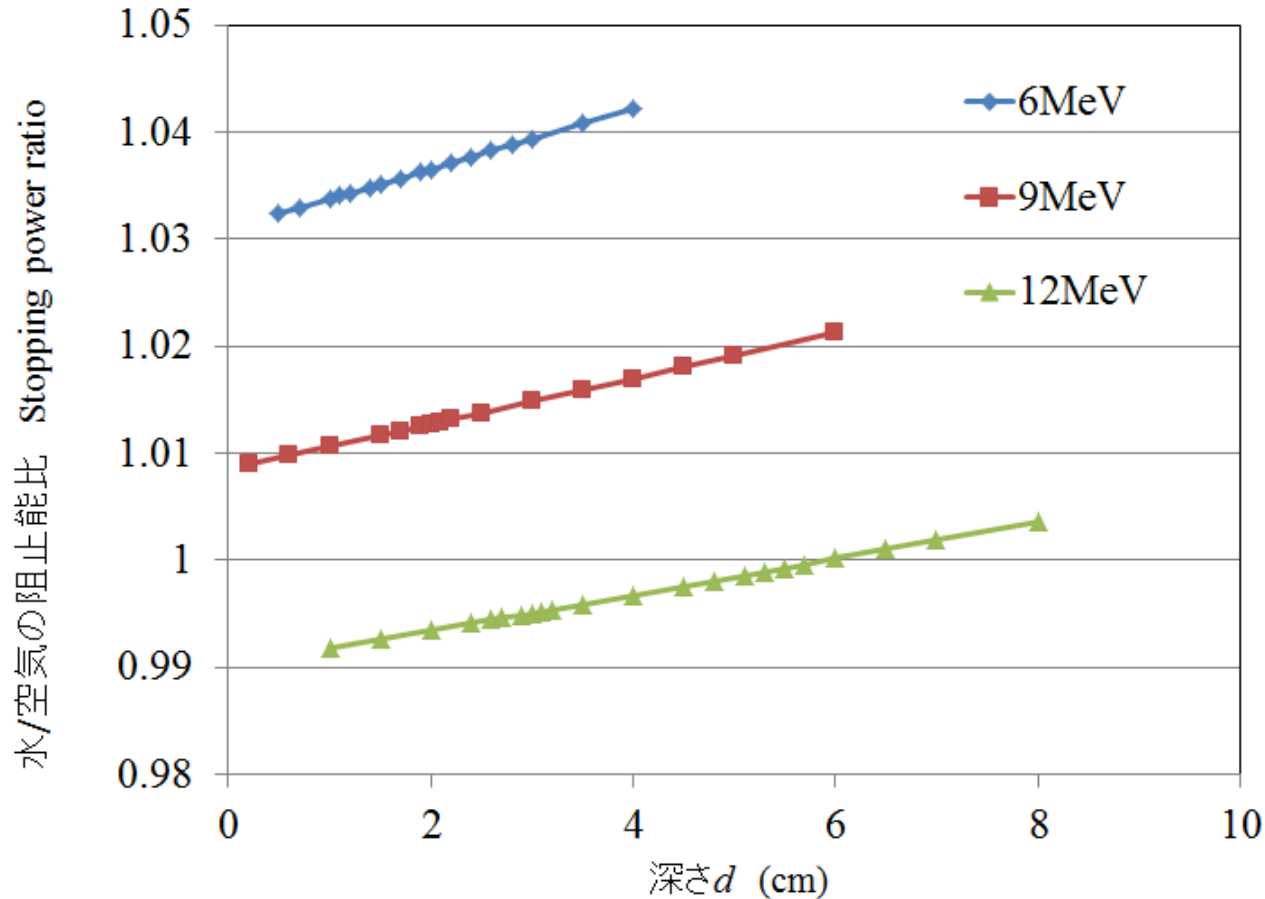
複数の直線加速器で、水/空気の阻止能比は R_{50} で近似できることから、標準計測法12ではこの近似式を採用した



Burns *et al*, Med. Phys. 23(3), 383-388, 1996.

水/空気の阻止能比の近似式(2)

水/空気の阻止能比(近似式で計算)
(新潟大学病院, リニアックClinac2100C/D, Varian社)



- 水/空気の阻止能比

空気と水の違いによる電離箱
応答(感度)の差を補正する

深部ほどその補正值は大きくなる

電子線エネルギーが低いほど補正值
は大きい(10MeV未満では1を超える)

電子線エネルギー10MeV以上では
1を超えない補正值もある

電子線のPDIからPDDを求める式の証明

$$PDD(d, A_0) = 100 \cdot \frac{D(d, A_0)}{D(d_{\max}, A_0)} = 100 \cdot \frac{M(d) \cdot N_{D,W} \cdot k_{Q,d}}{M(d_{\max}) \cdot N_{D,W} \cdot k_{Q,d_{\max}}}$$

じょうらん
擾乱補正係数

平行平板形電離箱の場合
= 1.0

$$= 100 \cdot \frac{(M_{\text{raw}} \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_s \cdot k_{\text{elec}})_d}{(M_{\text{raw}} \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_s \cdot k_{\text{elec}})_{d_{\max}}} \cdot \frac{\left[\left(\frac{L}{\rho} \right)_{\text{water,air}} \cdot P_{\text{wall}} \cdot P_{\text{cav}} \cdot P_{\text{dis}} \cdot P_{\text{cel}} \right]_{Q,d}}{\left[\left(\frac{L}{\rho} \right)_{\text{water,air}} \cdot P_{\text{wall}} \cdot P_{\text{cav}} \cdot P_{\text{dis}} \cdot P_{\text{cel}} \right]_{Q,d_{\max}}} = PDI(d, A_0) \cdot \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{water,air}} \right]_{Q,d}}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{water,air}} \right]_{Q,d_{\max}}}$$

k_Q

水/空気の阻止能比

測定値

エネルギー依存の関数

$PDI(d, A_0)$

線質変換係数 k_Q の表(電子線)

- 基準線質の ^{60}Co - γ 線とは異なる線質(電子線)による電離箱の感度の違いを補正する係数
- 電子線では線質指標 R_{50} に依存して変化する
- ユーザーが測定した値が表の R_{50} の間にある場合は直線補間で求める

校正深における電子線に対する線質変換係数 k_Q の表

電離箱	Type	線質 R_{50} (g/cm ²)				
		1.0	2.0	4.0	6.0	8.0
PTW30001/30010	ファーマ形	----	----	0.911	0.904	0.898
PTW30006/30013	ファーマ形	----	----	0.911	0.904	0.898
Markus	平行平板形	----	0.925	0.910	0.899	0.889
NACP	平行平板形	0.953	0.932	0.909	0.893	0.881

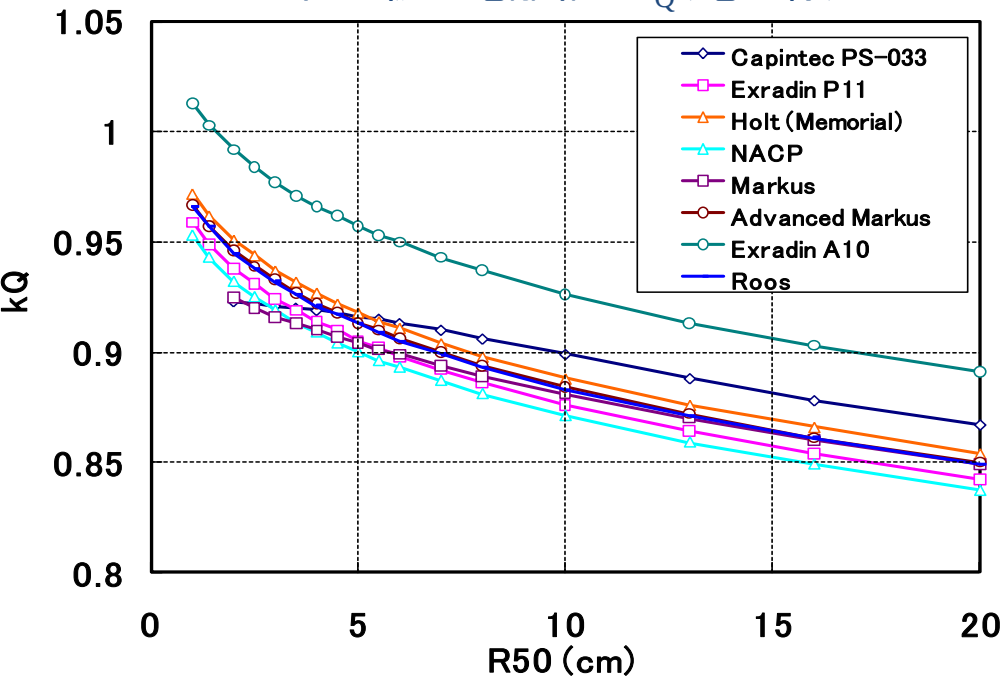
(標準計測法12より一部抜粋)

※ 平行平板形電離箱はすべてのエネルギーの電子線で利用できる。
 ファーマ形電離箱はおよそ10MeVの電子線より高いエネルギー($R_{50} \geq 4.0$ g/cm²)のみ使用できる

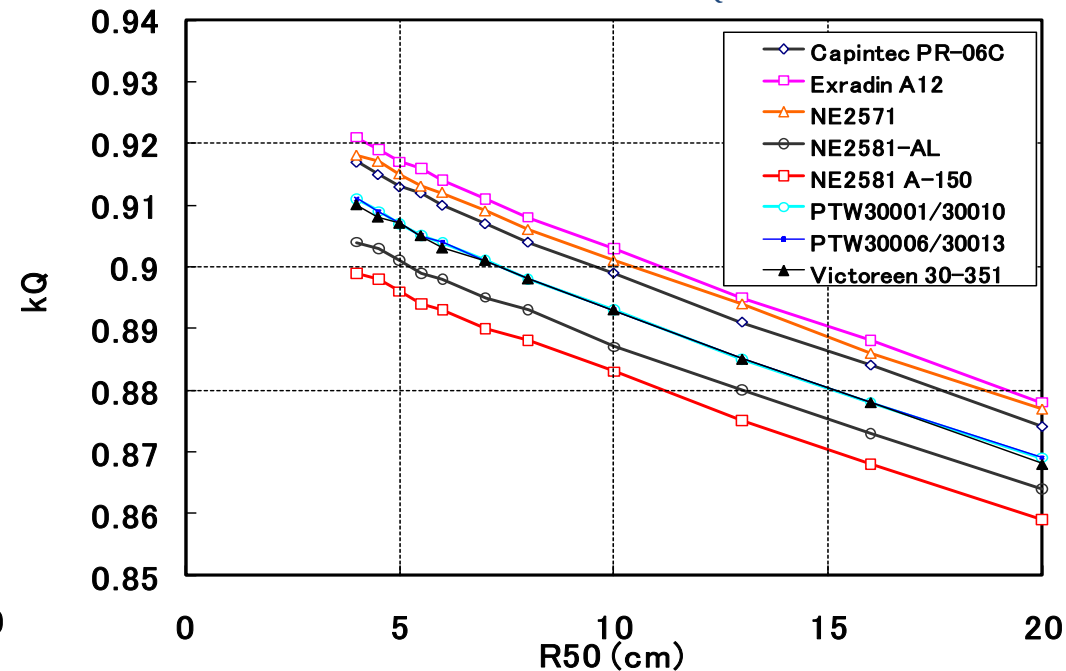
線質変換係数 k_Q のグラフ(電子線)

- 基準線質の ^{60}Co - γ 線とは異なる線質(電子線)による電離箱の感度の違いを補正する係数
- 電子線では線質指標 R_{50} に依存して変化する
- ユーザーが測定した値が表の R_{50} の間にある場合は直線補間で求める

平行平板形電離箱の k_Q (電子線)



ファーマ形電離箱の k_Q (電子線)



※ 平行平板形電離箱はすべてのエネルギーの電子線で使用できる。

ファーマ形電離箱はおよそ10MeVの電子線より高いエネルギー($R_{50} \geq 4.0 \text{ g/cm}^2$)のみ使用できる

▲ 高エネルギー電子線の水吸収線量

$$D(d_c, A_0) = D_{w,Q}(d_c) = \bar{M}_Q \times N_{D,w} \times k_Q$$

項 目	基準値あるいは基準条件
ファントム材質	水 ($R_{50} \geq 4 \text{ g cm}^{-2}$) 水または固体ファントム ($R_{50} < 4 \text{ g cm}^{-2}$)
電離箱	平行平板形または円筒形 ($R_{50} \geq 4 \text{ g cm}^{-2}$) 平行平板形 ($R_{50} < 4 \text{ g cm}^{-2}$)
校正深 (d_c)	$0.6R_{50} - 0.1 \text{ g cm}^{-2}$
電離箱の基準点	平行平板形：電離空洞内前面の中心 円筒形：電離空洞の幾何学的中心から $0.5r_{\text{cyt}}$ 線源側
電離箱の基準点 の位置	校正深 (d_c)
SCD/SSD	100 cm
照射野 (A_0)	10 cm × 10 cm (または出力係数の基準 とする照射野)

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），P58，通商産業研究社，2012 より改変引用

- 高エネルギー電子線（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.60-61)に記載されている電離箱の型式と R_{50} の交点からを読み取る
 R_{50} に該当する値が無い場合は直線補間で求める

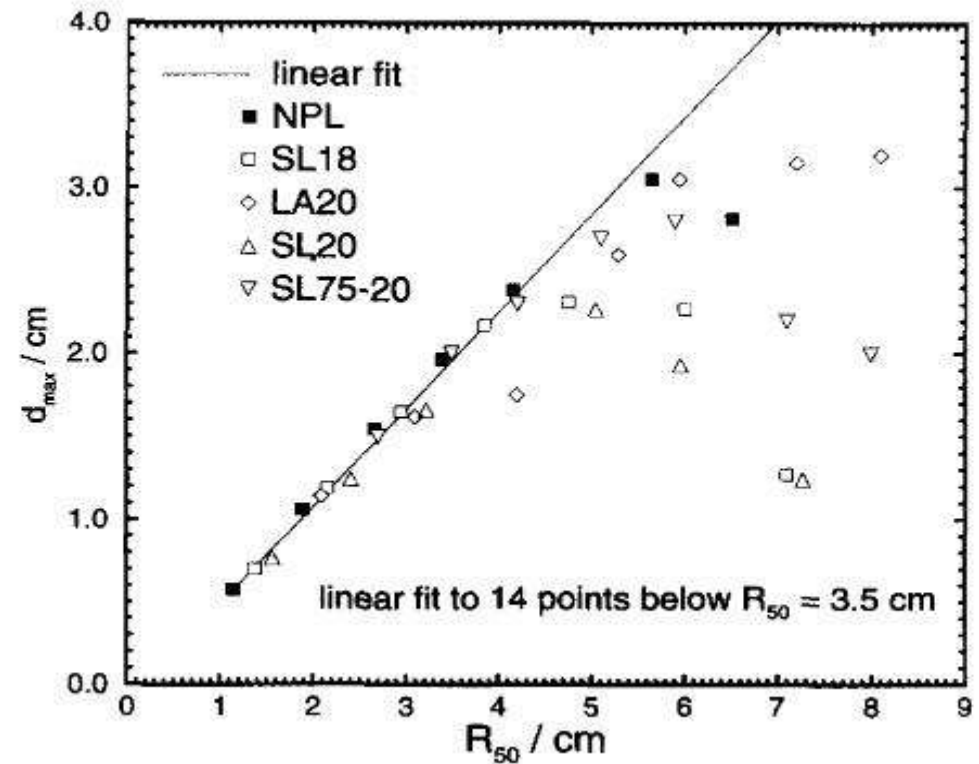
(※)電子線計測のセットアップはSSD一定法であるため照射野サイズは表面照射野 A_0 で設定する

2. 校正深 d_c における補正前の電位計の表示値 M_{raw} の測定

- 校正深 d_c で測定する
- 校正深 d_c は R_{50} から計算で求められる

$$d_c = 0.6 \cdot R_{50} - 0.1 \quad [\text{g/cm}^2]$$

- 複数の直線加速器で最大深 d_{max} は R_{50} との間に直線関係があることが分かり、この直線の式が校正深 d_c を求める式になった(右図)
- 電子線の場合 $d_c \doteq d_{\text{max}}$
- 校正深の式はよく国試に出題される



Burns *et al*, Med. Phys. 23(3), 1996.

3. 校正深 d_c における補正後の表示値 M_Q の計算

- 校正深 d_c における補正前の表示値 M_{raw} から補正後の表示値 M_Q を計算する

$$M_Q = (M_{\text{raw}} \cdot k_{\text{TP}} \cdot k_{\text{elec}} \cdot k_{\text{pol}} \cdot k_s) d_c$$

校正深 d_c のときの補正係数
(算出方法はX線計測と同じ)

k_{TP} : 温度気圧補正係数

k_{pol} : 極性効果補正係数

k_s : イオン再結合補正係数

k_{elec} : 電位計校正定数 (電位計と電離箱が一体校正されたときは1.0)

4. 校正深吸収線量を求める

- 校正点 d_c における校正深吸収線量 $D(d_c, A_0)$

$$D(d_c, A_0) = M_Q \cdot N_{D,w} \cdot k_Q$$

M_Q : 補正後の表示値 [C] , A_0 : 表面照射野

$N_{D,w}$: 水吸収線量校正定数 [Gy/C]

k_Q : 線質変換係数

$$D(d_c, A_0) = M_Q \cdot N_{D,w} \cdot k_Q = [C] \cdot [Gy / C] = [Gy]$$

水ファントム中の校正深 $d_c=1.3\text{cm}$ に平行平板形電離箱を配置し, SSD=100cm一定で, 表面照射野 $A_0=10\text{cm}\times 10\text{cm}$ のときの電離電荷を計測した. モニタ線量計の設定値を200MUで照射したとき下表の結果が得られた. 測定条件と校正深における線量計の表示値 M_{raw} は以下の通りである. このときの校正深吸収線量 $D(d_c, A_0)$ を求めなさい.

(測定条件)リファレンス線量計の平行平板形電離箱(型式NACP02)と, 電位計(RAMTECSmart)は分離校正で行っているため電位計校正定数 $k_{\text{elec}}=1.0013$ (Mレンジのとき)となる. $N_{D,w}=1.721\times 10^{-1}\text{ Gy/nC}$, リファレンス線量計校正時の電圧は±200Vで一極性を通常使用とする.

水吸収線量校正係数 $N_{D,w}$

Gy/nC 1.721.E-01 2019/10/18

測定条件 Mレンジ

電位計 RAMTEC Smart

照射野 10×10cm

6 MeV 電子線 設定200MU

水ファントム

電離箱NACP-02

校正深 d_c cm(電離箱の電離空洞内前面中心)

線量率600MU/min

測定日

2020/5/18

校正深dc=1.3cm深				
印加電圧	=-200V V1, 校正時電圧	-100V V2	+100V	+200V
電位計の表示値Mraw(1回目)	11.982 nC	11.856 nC	11.888 nC	12.018 nC
電位計の表示値Mraw(2回目)	11.989	11.859	11.889	12.02
電位計の表示値Mraw(3回目)	11.986	11.863	11.889	12.021
Mraw(平均)	11.986 nC	11.859 nC	11.889 nC	12.020 nC
標準偏差	0.004 nC	0.004 nC	0.001 nC	0.002 nC
変動係数	0.029 %	0.030 %	0.005 %	0.013 %
温度T	24.7 °C	24.7 °C	24.6 °C	24.6 °C
気圧	100.529 kPa	100.526 kPa	100.533 kPa	100.538 kPa
温度気圧補正係数kTP	1.0172	1.0172	1.0168	1.0168
Mraw(平均) × kTP	12.1917 nC	12.0635 nC	12.0885 nC	12.2211 nC
線質指標R50(cm)	2.31739			
200Vでの極性効果補正係数kpol(分母は-極性)	1.00121	1.00103	100Vでのkpol(分母は-極性)	
イオン再結合補正係数ks	1.01065	2点電圧法(電圧比V1/V2=2のとき)で計算する		
補正後の電位計の表示値M	12.3524	M=Mraw × kTP × kelec × kpol × ks		
線質変換係数kQ	0.94329	電離箱と線質(R50)に応じた値を標準計測法の表から求める		
水吸収線量校正定数N _{D,w}	1.721.E-01 Gy/nC	リファレンス線量計の校正報告書の値		
校正深吸収線量D(dc,10cm × 10cm)	2.005.E+00 Gy	D=M × N _{D,w} × kQ		

PDIの測定 例題1のPDD(PDIの計測から計算)

測定深 d(cm)	M ⁻ (-200V)		設定50MU				水ファントム										
	測定値1	測定値2	測定値3	平均M ⁻ (nC)	標準偏差	変動係数(%)	水温(℃)	気圧(kPa)	k _{TP}	M ⁻ ×k _{TP}	PDI(%)	(L/ρ) _{w,air}	M ⁻ ×k _{TP} ×(L/ρ) _{w,air}	PDD(%)			
0	2.374	2.378	2.373	2.3750	0.0026	0.1114	25	100.505	1.0185	2.4188	79.26	1.033	2.498	76.28			
0.5	2.648	2.645	2.650	2.6477	0.0025	0.0951	25	100.501	1.0185	2.6966	88.37	1.047	2.825	86.24			
0.7	2.764	2.766	2.765	2.7650	0.0010	0.0362	25	100.508	1.0184	2.8159	92.28	1.054	2.967	90.59			
1	2.929	2.932	2.928	2.9297	0.0021	0.0711	24.9	100.512	1.0180	2.9825	97.74	1.063	3.171	96.83			
1.1	2.976	2.972	2.976	2.9747	0.0023	0.0776	24.9	100.516	1.0180	3.0282	99.23	1.067	3.230	98.62			
1.2	2.999	2.998	2.996	2.9977	0.0015	0.0510	24.9	100.517	1.0180	3.0516	100.00	1.070	3.265	99.70			
1.3	2.996	2.998	2.998	2.9973	0.0012	0.0385	24.9	100.524	1.0179	3.0510	99.98	1.073	3.275	100.00			
1.4	2.983	2.979	2.982	2.9813	0.0021	0.0698	24.9	100.526	1.0179	3.0347	99.45	1.077	3.268	99.79			
1.5	2.931	2.930	2.933	2.9313	0.0015	0.0521	24.9	100.526	1.0179	2.9838	97.78	1.081	3.224	98.44			
1.7	2.736	2.736	2.736	2.7360	0.0000	0.0000	24.8	100.521	1.0176	2.7842	91.24	1.088	3.029	92.48			
1.9	2.436	2.437	2.435	2.4360	0.0010	0.0411	24.8	100.519	1.0176	2.4789	81.23	1.095	2.715	82.91			
2	2.220	2.223	2.224	2.2223	0.0021	0.0937	24.8	100.516	1.0177	2.2616	74.11	1.099	2.486	75.91			
2.2	1.798	1.799	1.799	1.7987	0.0006	0.0321	24.8	100.518	1.0176	1.8304	59.98	1.107	2.027	61.89			
2.4	1.254	1.256	1.259	1.2563	0.0025	0.2003	24.8	100.514	1.0177	1.2785	41.90	1.116	1.426	43.55			
2.6	0.786	0.785	0.783	0.7847	0.0015	0.1947	24.8	100.514	1.0177	0.7985	26.17	1.124	0.898	27.41			
2.8	0.379	0.379	0.378	0.3787	0.0006	0.1525	24.8	100.514	1.0177	0.3854	12.63	1.133	0.437	13.34			
3	0.155	0.154	0.153	0.1540	0.0010	0.6494	24.8	100.516	1.0177	0.1567	5.14	1.143	0.179	5.47			
3.5	0.018	0.019	0.021	0.0193	0.0015	7.9010	24.7	100.519	1.0173	0.0197	0.64	1.168	0.023	0.70			
4	0.017	0.018	0.018	0.0177	0.0006	3.2680	24.8	100.522	1.0176	0.0180	0.59	1.196	0.022	0.66			

①電離量半価深 I_{50} を求める

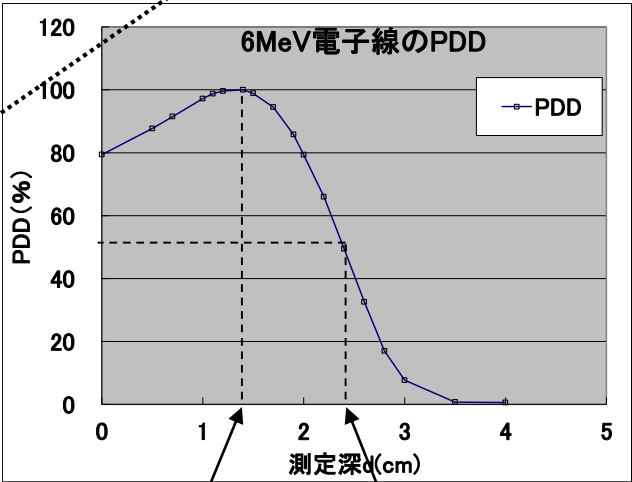
②深部量半価深 R_{50} を求める

③校正深 d_c を求める

$R_{50} = 1.029 \cdot I_{50} - 0.06 \quad (I_{50} \leq 10 \text{ g/cm}^2)$

$R_{50} = 1.059 \cdot I_{50} - 0.37 \quad (I_{50} > 10 \text{ g/cm}^2)$

$d_c = 0.6 \cdot R_{50} - 0.1 \quad [\text{g/cm}^2]$



線量最大深 d_{max}
校正深 d_c と d_{max} はほ
ぼ同じ深さ
(全く同じではない)

R_{50} : 深部量百分率
が50%になる深さ

【解答】

印加電圧±200Vのときの極性効果補正係数を求める(一極性が通常使用なので分母は-)。

$$k_{\text{pol}}^{-200\text{V}} = \frac{|M_{\text{raw}}^{+200\text{V}}| + |M_{\text{raw}}^{-200\text{V}}|}{2|M_{\text{raw}}^{-200\text{V}}|} = \frac{|M_{\text{raw}}^{+200\text{V}} \times k_{\text{TP}}| + |M_{\text{raw}}^{-200\text{V}} \times k_{\text{TP}}|}{2|M_{\text{raw}}^{-200\text{V}} \times k_{\text{TP}}|} = \frac{12.2211 + 12.1917}{2 \times 12.1917} = 1.00121$$

印加電圧±100Vのときの極性効果補正係数を求める(一極性が通常使用なので分母は-)。

$$k_{\text{pol}}^{-100\text{V}} = \frac{|M_{\text{raw}}^{+100\text{V}}| + |M_{\text{raw}}^{-100\text{V}}|}{2|M_{\text{raw}}^{-100\text{V}}|} = \frac{|M_{\text{raw}}^{+100\text{V}} \times k_{\text{TP}}| + |M_{\text{raw}}^{-100\text{V}} \times k_{\text{TP}}|}{2|M_{\text{raw}}^{-100\text{V}} \times k_{\text{TP}}|} = \frac{12.0885 + 12.0635}{2 \times 12.0635} = 1.00103$$

イオン再結合補正係数 k_s を求める。パルス放射線で印加電圧比 $V_1/V_2=2$ のときには、 $a_0=2.337$, $a_1=-3.636$, $a_2=2.299$ を使う。

$$\begin{aligned} k_s &= a_0 + a_1 \cdot \left[\frac{M_1}{M_2} \right] + a_2 \cdot \left[\frac{M_1}{M_2} \right]^2 = a_0 + a_1 \cdot \left[\frac{M_1 \times k_{\text{pol}}^{-200\text{V}}}{M_2 \times k_{\text{pol}}^{-100\text{V}}} \right] + a_2 \cdot \left[\frac{M_1 \times k_{\text{pol}}^{-200\text{V}}}{M_2 \times k_{\text{pol}}^{-100\text{V}}} \right]^2 \\ &= 2.337 - 3.636 \times \left[\frac{12.1917 \times 1.00121}{12.0635 \times 1.00103} \right] + 2.299 \times \left[\frac{12.1917 \times 1.00121}{12.0635 \times 1.00103} \right]^2 = 1.01065 \end{aligned}$$

校正時印加電圧と同じ-200 Vで補正後の電位計の表示値Mを求めて、校正深吸収線量 $D(d_c, A_0)$ を求めると、

$$\begin{aligned} M &= M_{\text{raw}} \times k_{\text{TP}} \times k_{\text{elec}} \times k_{\text{pol}} \times k_s \\ &= 11.986 \times 1.0172 \times 1.0013 \times 1.00121 \times 1.01065 \\ &= 12.1917 \quad \times 1.0013 \times 1.00121 \times 1.01065 = 12.352 \quad [\text{nC}] \end{aligned}$$

$$D(d_c, A_0) = M \cdot N_{\text{D,w}} \cdot k_Q = 12.352 \times 0.1721 \text{ [Gy / nC]} \times 0.94329 = 2.0053 \text{ [Gy]}$$

小テスト

問題1 高エネルギー電子線の線量測定で正しいのはどれか。2つ選べ。

1. 校正深は10 cmである
2. 指頭形電離箱は使用しない
3. セットアップにはSSD法を使用する
4. 線質指標として深部量半価深が用いられる
5. 深部量百分率は深部電離量百分率に等しい

問題2 電子線の線量測定について、正しいのはどれか。2つ選べ。

1. 2 ～10 MeVでは平行平板形電離箱を使用する
2. 線質変換係数の決定には R_{50} が必要である
3. R_{50} は深部電離量分布において最大値の50%となる深さである
4. 校正深はエネルギーに関係なく10 g/cm²の深さである
5. ファーマ形電離箱の幾何学的中心が校正深に一致するように設置する

問題3 放射線の種類と校正深(g/cm²)との組合せで誤っているのはどれか。

1. ^{60}Co の γ 線 ——— 10
2. 4MVのX線 ——— 10
3. 10MVのX線 ——— 10
4. 4MeVの電子線 ——— 最大深
5. 10MeVの電子線 ——— $0.6 \times \text{線量半価深} - 0.1$