

放射線治療技術学Ⅱ

線量計測(電子線-2)



【例題2】

例題1で求めた校正深吸収線量 $D(d_c, A_0)$ から深部量百分率 PDD を使って線量最大深の吸収線量 $D(d_{max}, A_0)$ を求めなさい。

【補足】

深部量百分率 PDD (percentage depth dose)はSSD一定のときの深部線量変化を百分率で表したものの深さ d 、表面照射野 A_0 での $PDD(d, A_0)$ は、

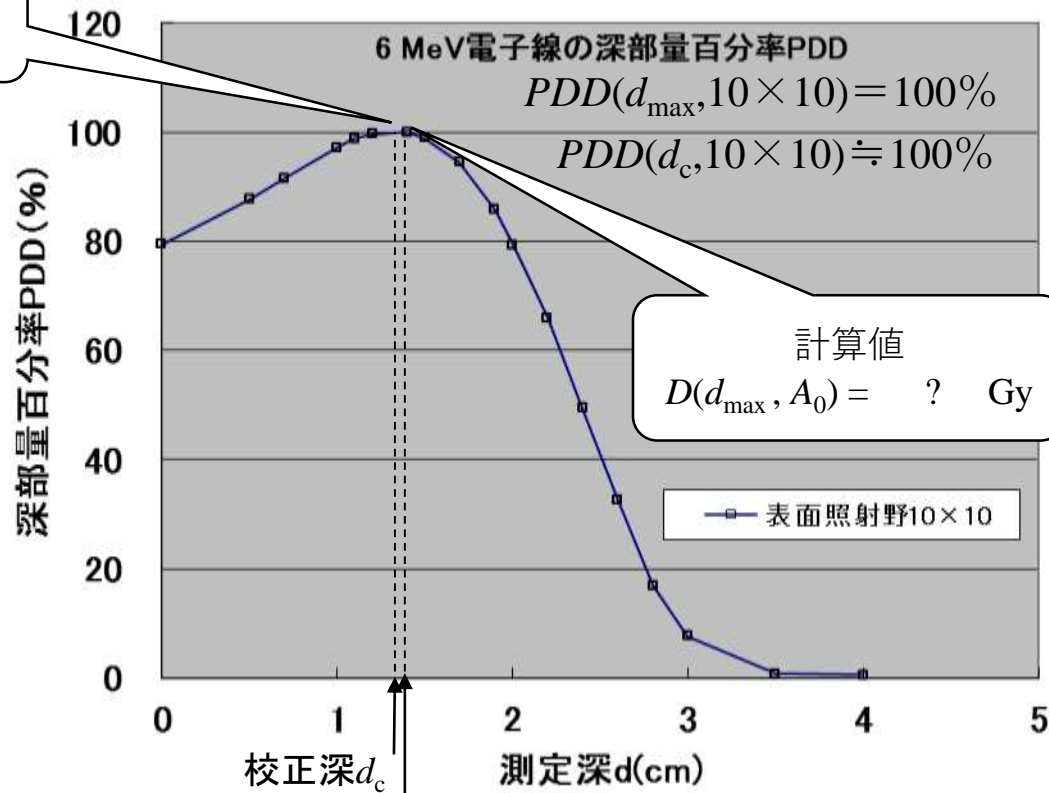
$$PDD(d, A_0) = \frac{D(d, A_0)}{D(d_{max}, A_0)} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

校正深 d_c では

$$PDD(d_c, A_0) = \frac{D(d_c, A_0)}{D(d_{max}, A_0)} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

測定により PDD が分かっている治療装置で、校正深 d_c の PDD が100%のとき（右図）、校正深吸収線量 $D(d_c, A_0)$ を計測すると、式(2)の変形から線量最大深の吸収線量 $D(d_{max}, A_0)$ は計算で求められる。

測定値
 $D(d_c, A_0) = 2.0053 \text{ Gy}$



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)



例題1より, 校正深吸収線量 $D(d_c, 10 \times 10) = 2.0053 \text{ Gy}$

また, 校正深 d_c , 表面照射野 $A_0 = 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ の $PDD(d_c, 10 \times 10) = 100\%$ より

線量最大深での吸収線量 $D(d_{\max}, 10 \times 10)$ は,

【解答】

$$D(d_{\max}, 10 \times 10) = \frac{D(d_c, 10 \times 10)}{PDD(d_c, 10 \times 10)} \times 100$$

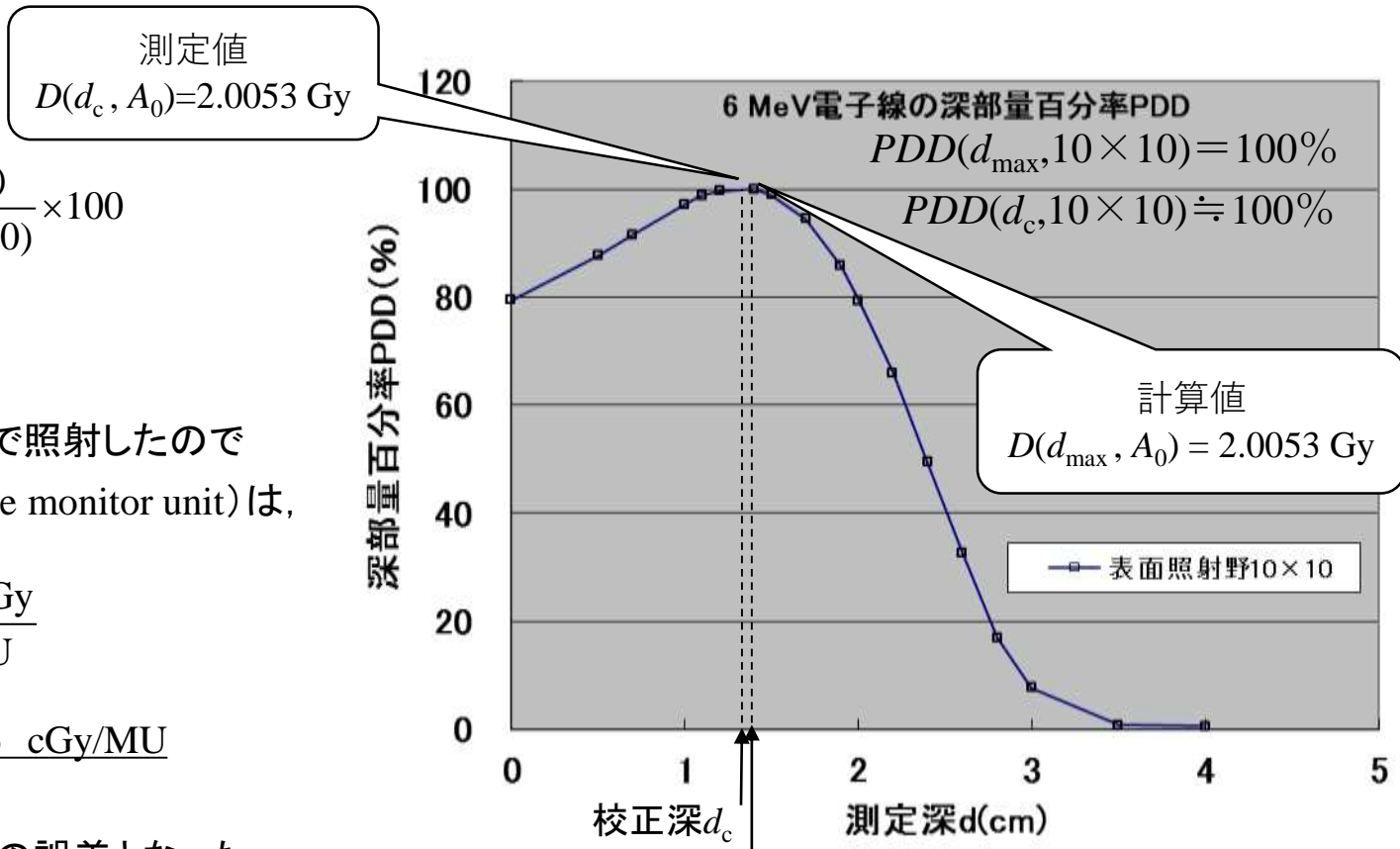
$$= \frac{2.0053}{100\%} \times 100 = 2.0053 \text{ Gy}$$

モニタ線量計の設定値は200 MUで照射したので
1 MU当たりの吸収線量DMU (dose monitor unit) は,

$$DMU = \frac{D(d_{\max}, A_0)}{N} = \frac{2.0053 \text{ Gy}}{200 \text{ MU}}$$

$$= \underline{0.010026 \text{ Gy/MU}} = \underline{1.0026 \text{ cGy/MU}}$$

この結果からDMUは +0.26 % の誤差となった。
電子線においてDMUの許容誤差は $\pm 3\%$ であり,
この場合はモニタ線量計を調整する必要がない。



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)



▲ 線量最大深における水吸収線量

動画ではp.115と言っていますが
第2版ではこのページです

SSD setup

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

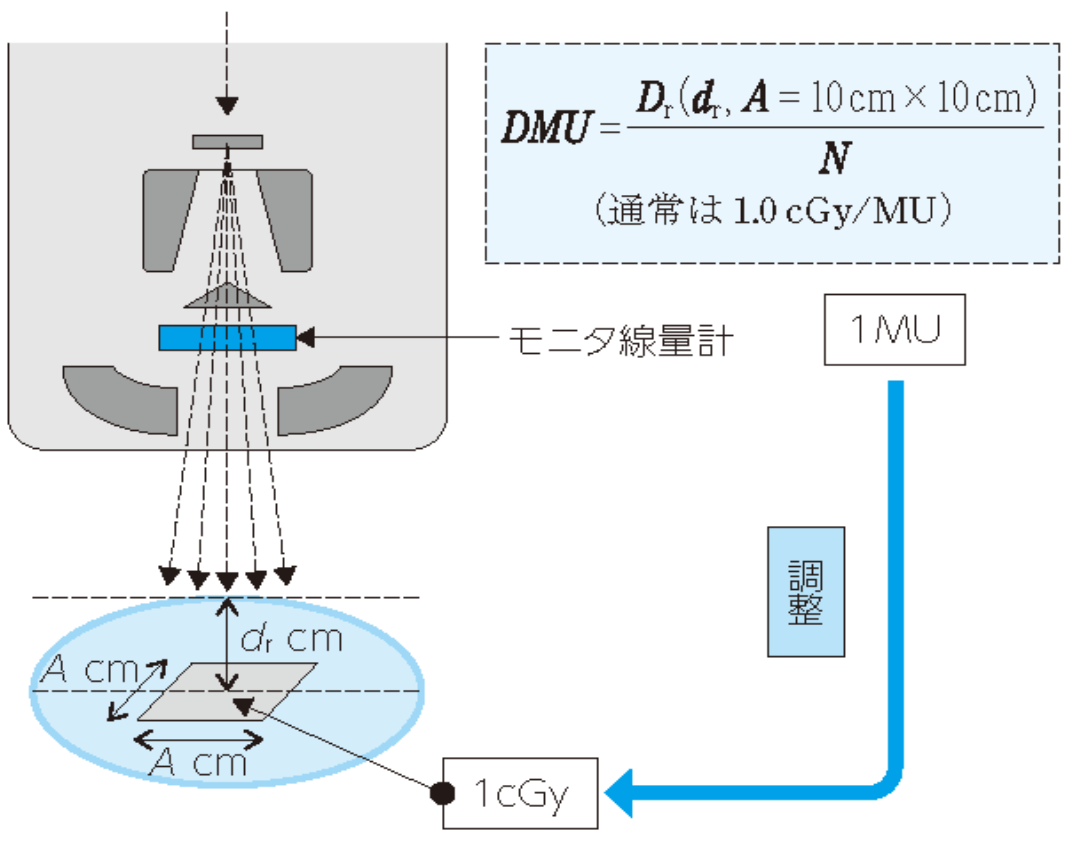
- 線量最大深の吸収線量 $D(d_{\max}, A_0)$ は、校正深の吸収線量 $D(d_c, A_0)$ から $PDD(d_c, A_0)$ を用いて求める
- 電子線では、一般に線量最大深 d_{\max} を基準とする



動画ではp.135と言っていますが
第2版ではこのページです

10 モニタ設定値 (monitor unit : モニタユニット値・MU 値)

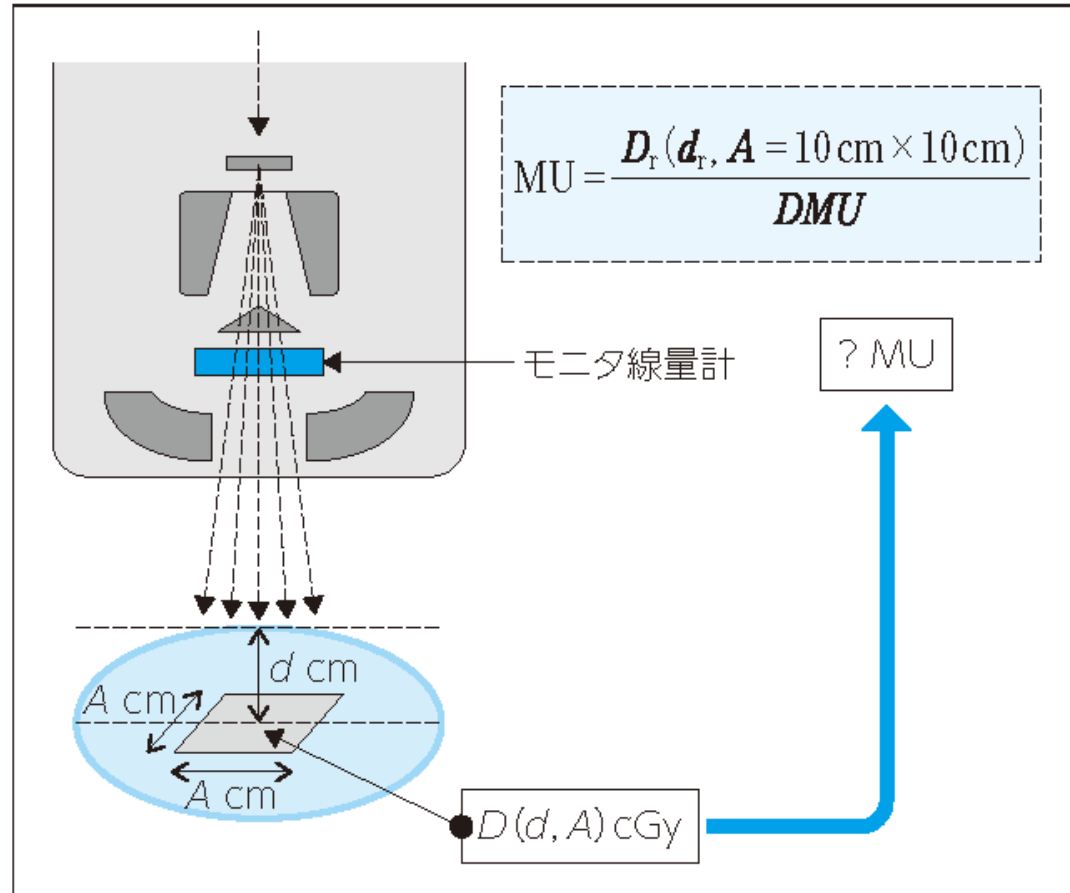
▲ MU 値と DMU



「モニタ線量計の校正」という

- モニタ設定値 (モニタユニット値, MU 値) とは, リニアックからの出力の尺度であり, N と表記される
- MU値はモニタ線量計で制御される
- 基準照射野 (10cm×10cm) における基準深吸収線量 $D(d_r, A=10\text{cm} \times 10\text{cm})$ をMU値 (N) で除した値を DMU (dose monitor unit) と呼び, 通常は $DMU=1 \text{ cGy/MU}$ とする
- ただし, 様々な条件 (温度, 気圧など) によってリニアックの出力は変動するため, 実際には $DMU=0.995 \text{ cGy/MU}$ などの値をとる
- そのため, $DMU=1\text{cGy/MU}$ となるようにユーザーが定期的に調整を行う

▲ MU 値の算出



- 任意（深さ d , 照射野 $A\text{cm} \times A\text{cm}$ ）の条件下における計画線量を $D(d, A)$ とした場合のMU値は、基準深吸収線量 $D(d_r, A=10\text{cm} \times 10\text{cm})$ から算出する

- 上記の条件下における基準深吸収線量 $D(d_r, A=10\text{cm} \times 10\text{cm})$ は、

$$D(d_r, A = 10\text{cm} \times 10\text{cm}) = \frac{D(d, A)}{TMR(d, A) \times OPF(d_r, A) \times otherfactor}$$

で求められる

- 上記で求めた基準深吸収線量の

$D(d_r, A=10\text{cm} \times 10\text{cm})$ を DMU で除することで

MU値を算出する

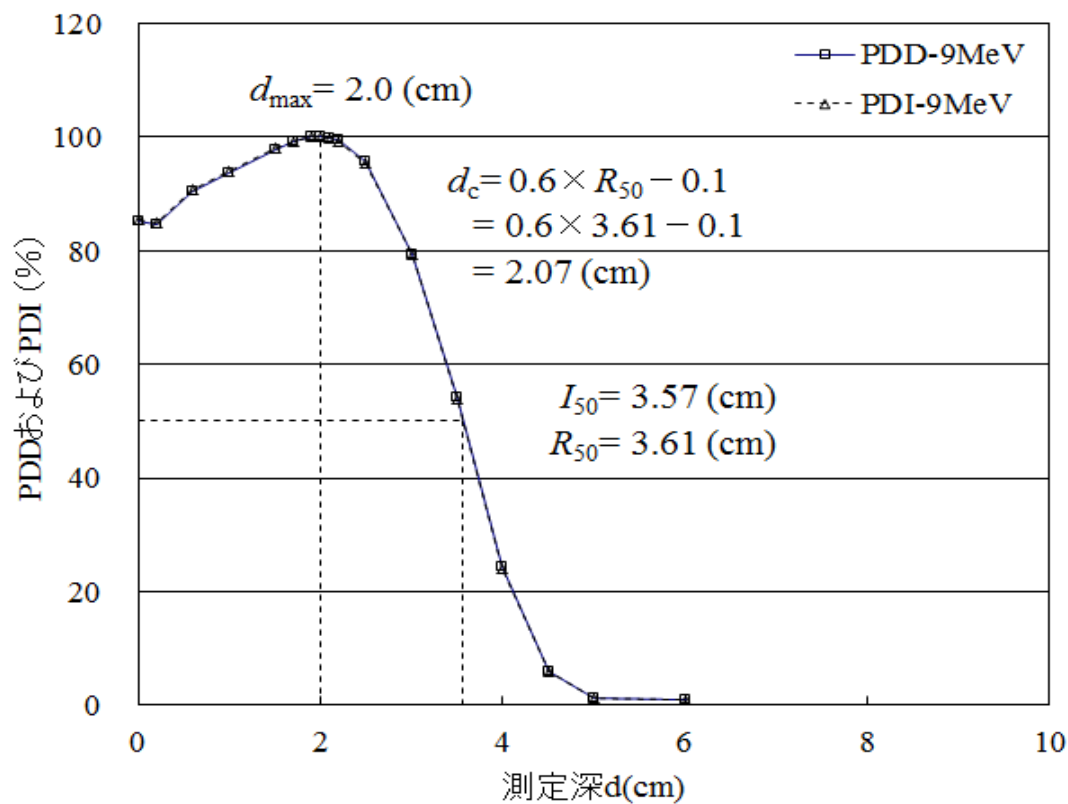
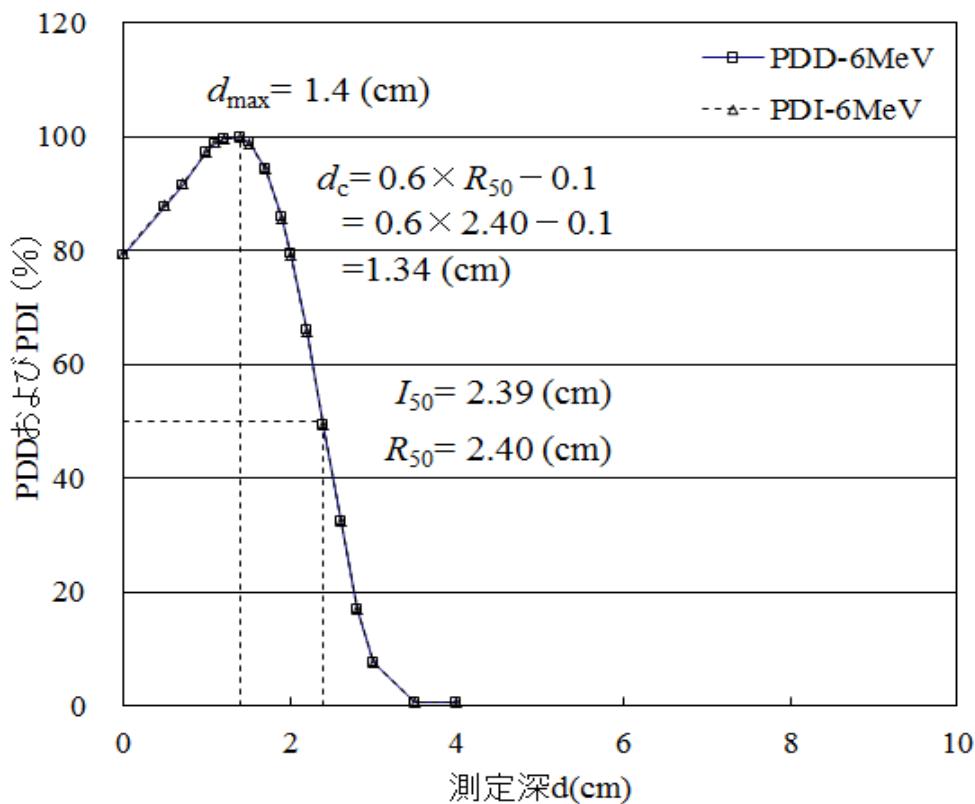
$$N[MU] = \frac{D(d_r, A = 10\text{cm} \times 10\text{cm})}{DMU} = \frac{\left(\frac{D(d, A)}{TMR(d, A) \times OPF(d_r, A) \times otherfactor} \right)}{DMU} = \frac{D(d, A)}{DMU \times TMR(d, A) \times OPF(d_r, A) \times otherfactor}$$

電子線のPDD曲線とPDI曲線, 校正深 d_c , 線量最大深 d_{max} の関係

→ 6MeV(左), 9MeV(右)

- 線量最大深 d_{max} はPDDが100%の深さ
- 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

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

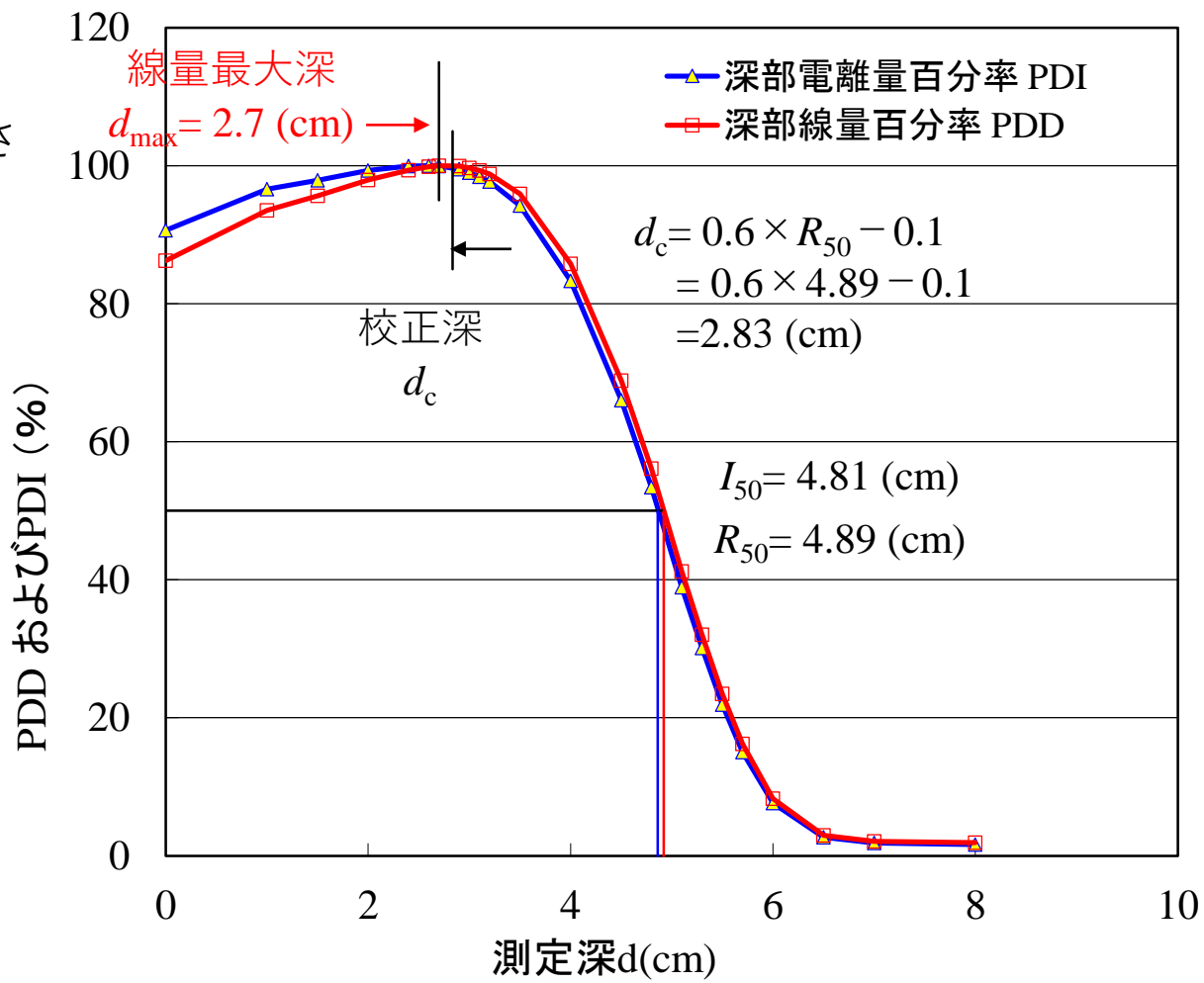


$R_{50} < 4 \text{ g/cm}^2$ ($E_0 \leq 10\text{MeV}$) 校正深 d_c は線量最大深 d_{max} とほぼ等しい

電子線のPDD曲線とPDI曲線, 校正深 d_c , 線量最大深 d_{max} の関係 → 12MeV

- 線量最大深 d_{max} はPDDが100%の深さ
- 校正深 d_c で測定する
- 校正深 d_c は R_{50} から計算で求める

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



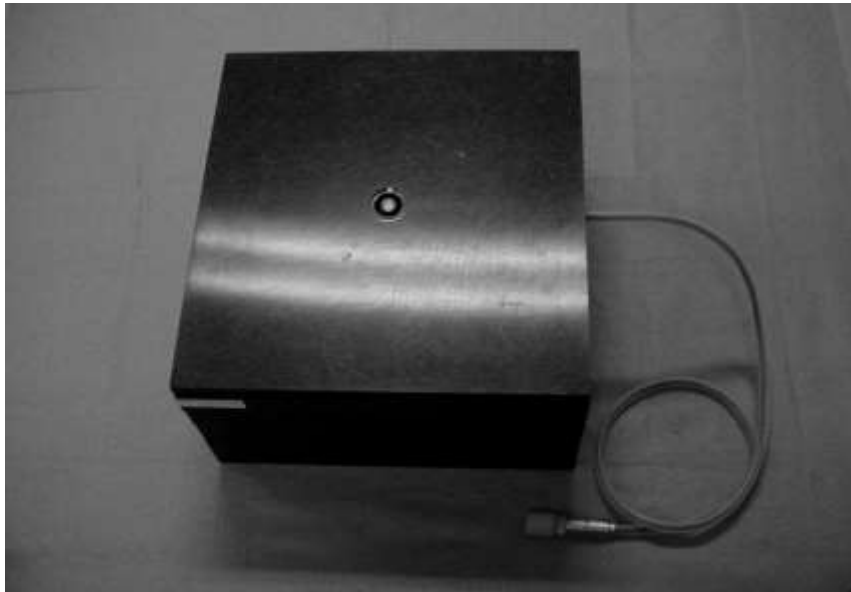
$R_{50} \geq 4 \text{ g/cm}^2$ ($E_0 > 10\text{MeV}$) 校正深 d_c は線量最大深 d_{max} より大きい

水ファントムと水等価固体ファントム

- 光子線と電子線計測の基準物質は水
- 低エネルギー電子線 ($R_{50} < 4.0 \text{ g/cm}^2$) のみ水等価固体ファントムの使用を認めている

水等価固体ファントム

SolidWater RMI-457 (GAMMEX社)



水との材質の違いを補正する必要がある

対面授業の場合、保健学科学生は放射線機器工学実験Ⅰの「フォトタイマの被写体厚特性」の実験で使います

水ファントム

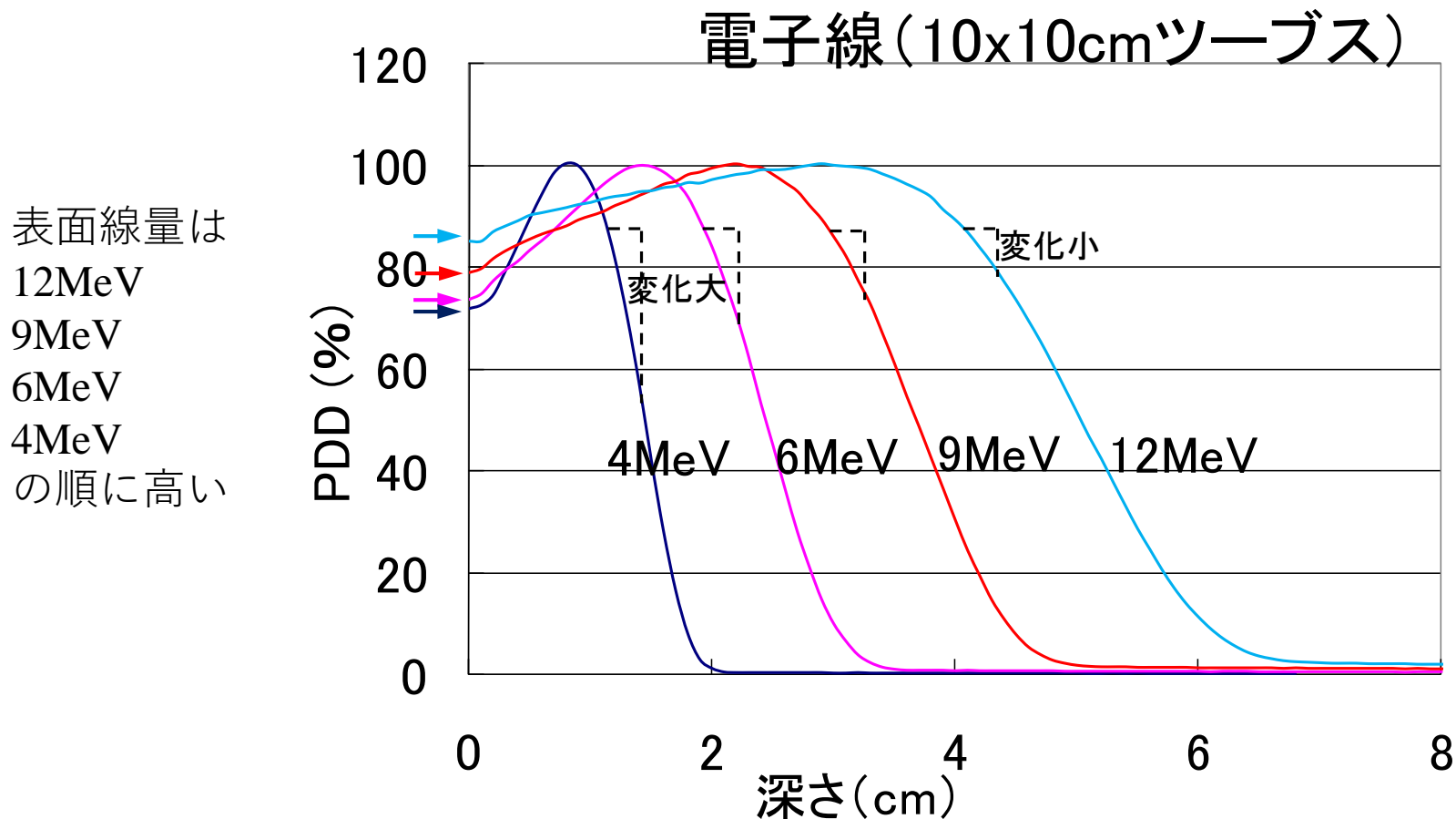


電離箱の位置精度を確保できる構造が必要



電子線のPDDのグラフ

- 低エネルギーの電子線は，単位深さ当たりの吸収線量(PDD)の変化が大きい
 - 水面の揺れなどによる水中深さの変化が吸収線量に影響する
- 電離箱の位置精度が確保できる(水等価)固体ファントムの使用を認めている



固体(水等価)ファントムの使用

- 低エネルギー電子線 ($R_{50} < 4.0 \text{ g/cm}^2$) のみ水等価固体ファントムの使用を認めている
- 水とは異なる材質であるため、材質の違いに対する補正係数 (スケーリング係数) が必要
- 深さスケーリング係数 c_{pl} とフルエンススケーリング係数 h_{pl} がある

深さスケーリング係数 : c_{pl}

$$d_{\text{water}} = d_{\text{pl}} \times c_{\text{pl}}$$

d_{water} : 水等価深 [g/cm²]

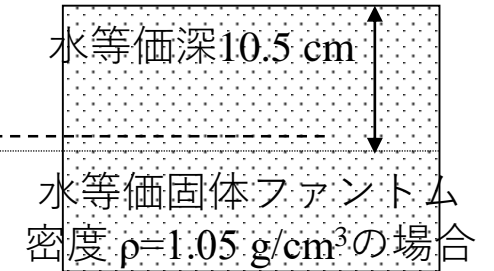
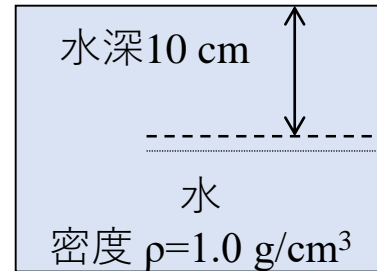
d_{pl} : 固体ファントム中の深さ [g/cm²]

フルエンススケーリング係数 : h_{pl}

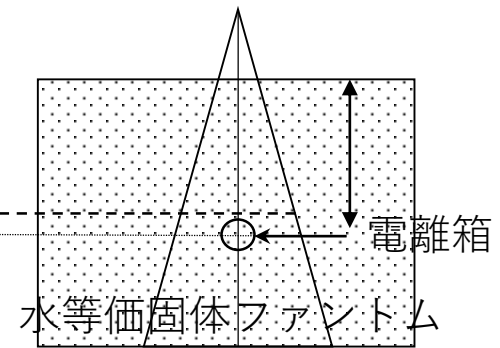
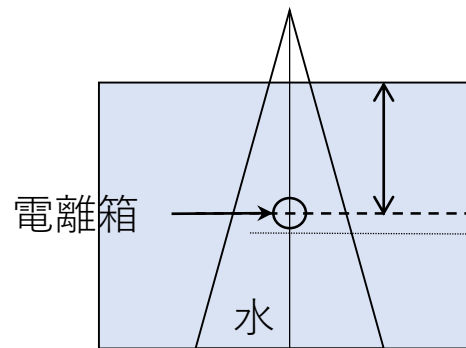
$$M_{\text{raw,water}} = M_{\text{raw,pl}} \times h_{\text{pl}}$$

$M_{\text{raw,water}}$: 水等価表示値

$M_{\text{raw,pl}}$: 固体ファントムでの表示値



$$\begin{aligned} \text{水等価深} &= \text{密度} \rho \times \text{距離} \\ &= 1.05 \times 10 \text{ cm} \\ &= 10.5 \text{ cm} \end{aligned}$$



電離箱の周囲で発生する電離イオンの量は水と固体ファントムでは異なる → 表示値の差

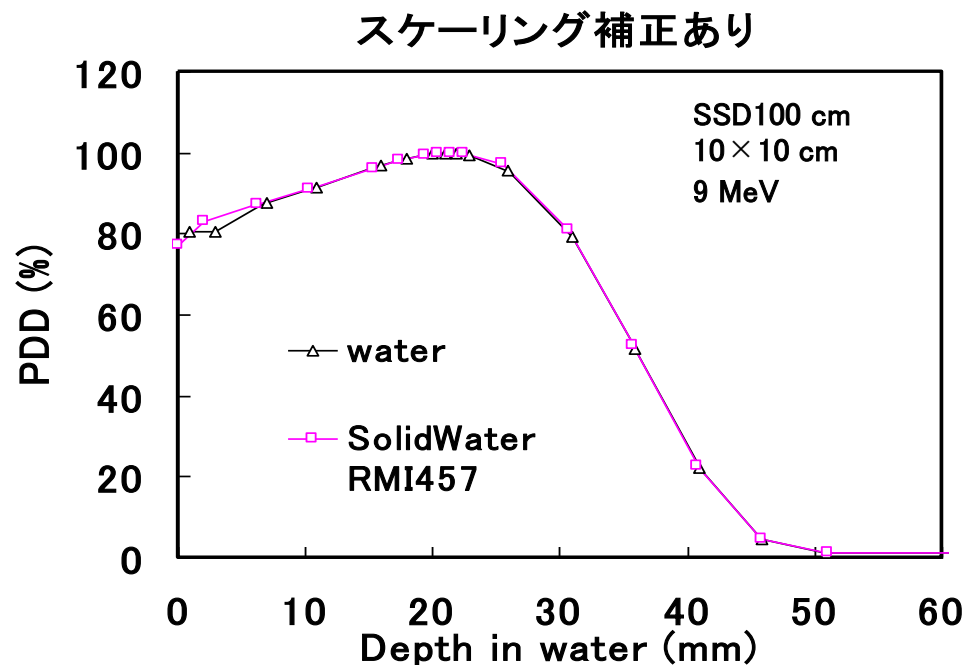
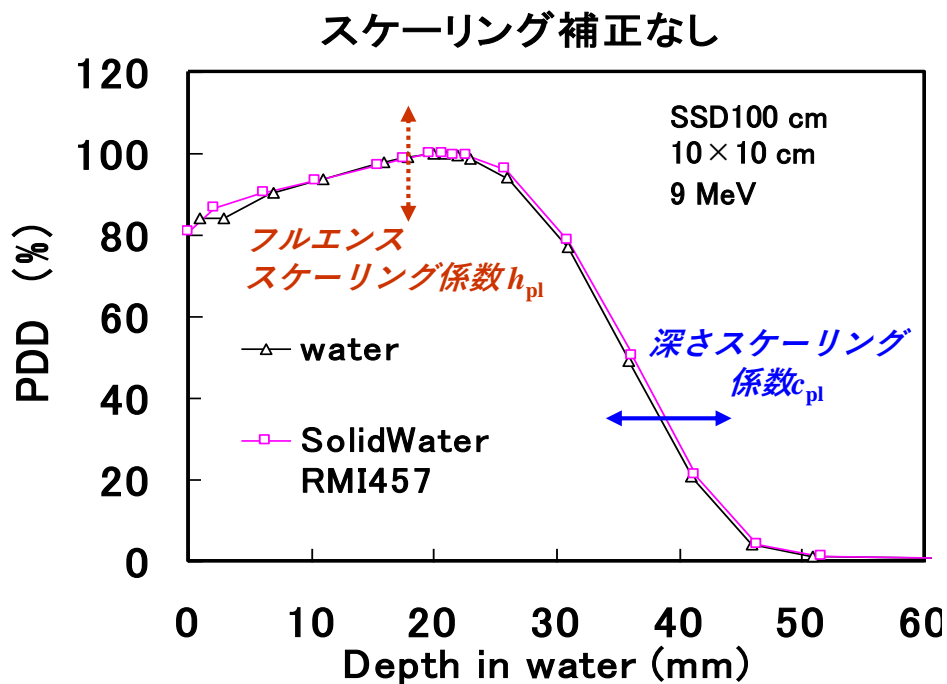


9 MeV 電子線におけるSolidWaterの R_{50} と d_c の評価

ファントム媒質	c_{pl}	h_{pl}	R_{50} [g/cm ²]	d_c [g/cm ²]
水	----	----	3.622	2.073
SW RMI-457(実測値)	0.990	1.011	3.661	2.095
SW RMI-457(公称値)	0.946 [*]	1.008 [*]	3.820	2.192

ファントムの
個体差が
あるので
実測が必要

*標準測定法01, 表A13.1より



【国試例題】

標準計測法12に基づく電子線の水吸収線量計測の基準条件で正しいのはどれか。

ただし、 R_{50} は線量半価深である。

1. SSDは90 cmである。
2. 照射野は5 cm × 5 cmである。
3. 校正深は電離箱の幾何学的中心とする。
4. 校正深は $(0.6 R_{50} - 0.1)$ g/cm² である。
5. $R_{50} \geq 4$ g/cm²では固体ファントムを使用する。

【答え】



放射線治療技術学 II

線量分布 相対線量(PDD, TPR他)



2 線量計測に関する用語（略語）

動画ではp.118と言っていますが
第2版ではこのページです

▲ 線量計測に関する用語（前項に既出）

SAD	source to axis distance	線源回転軸間距離	線源から回転軸までの距離
SCD	source to chamber distance	線源電離箱間距離	線源から電離箱の基準点までの距離
SSD	source to surface distance	線源表面間距離	線源から患者またはファントム表面までの距離

- 標準計測法 1 2 では、「幾何学的条件に関する用語」、「線量に関する用語」、「水吸収線量に関する用語」、「装置・器具・その他に関する用語」に大別されて用語が記載されている



2 線量計測に関する用語（略語）

▲ 線量計測に関する用語（前項に既出）

d_r	reference depth	基準深	ビーム軸上の目的に応じて定める特定の深さ
d_c	calibration depth	校正深	水吸収線量を校正する目的で指定されたビーム軸上の深さ
d_{max}	depth of dose maximum	線量最大深	ビーム軸上で水吸収線量が最大となる深さ
A A_0	field size	照射野	ビーム軸に直交する特定の平面において軸外線量比が0.5である領域（STD法： A ，SSD法： A_0 ）

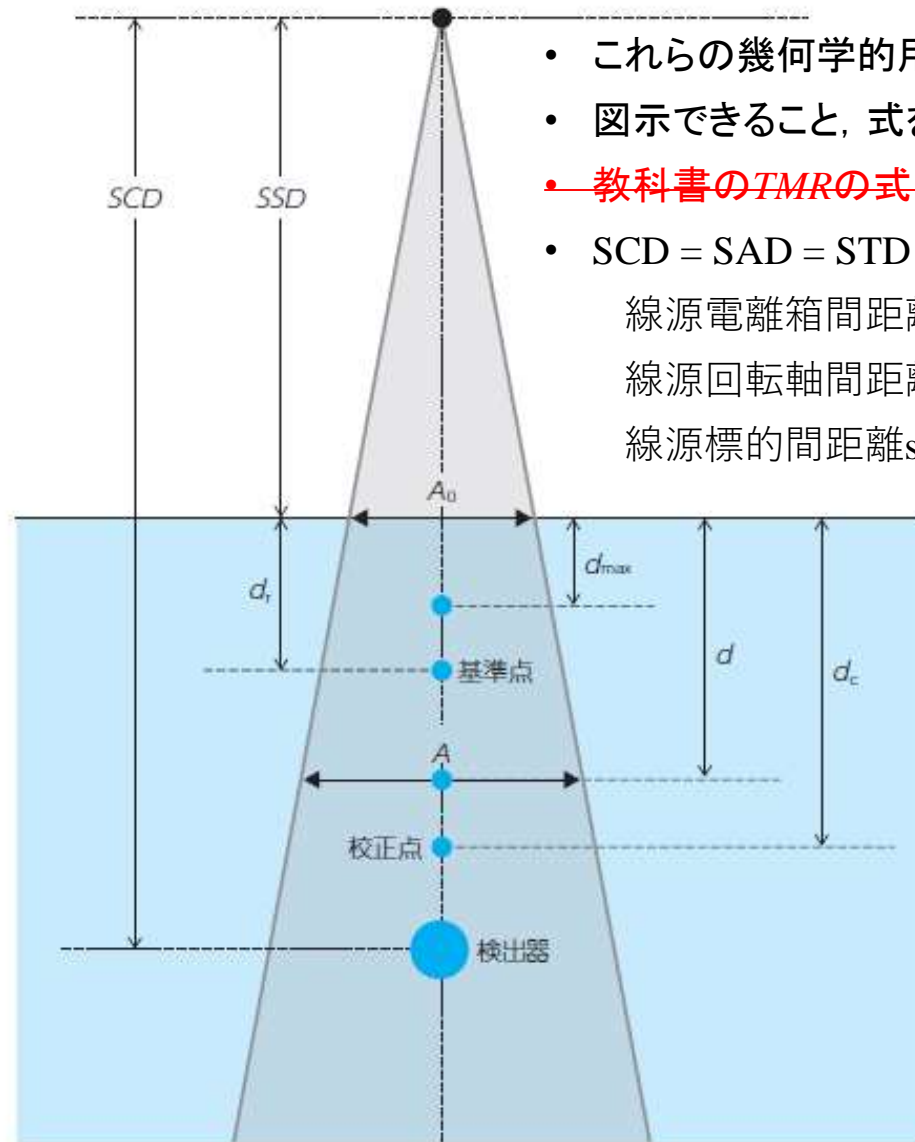


TMR	tissue-maximum ratio	組織最大線量比	<p>ビーム軸上の深さd, その深さでの照射野がAのとき,</p> $TMR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_{\max}, A)}$ <p>で定義される(SCD一定)</p>
TPR	tissue-phantom ratio	組織ファントム線量比	<p>ビーム軸上の深さd, その深さでの照射野がAのとき,</p> $TPR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_r, A)}$ <p>で定義される(SCD一定)</p>
PDD	percentage depth dose	深部線量百分率	<p>水中でのビーム軸上における線量最大深吸収線量に対する任意の深さでの水吸収線量の百分率 ビーム軸上の深さd, 表面の照射野がA_0のとき,</p> $PDD(d, A_0) = \frac{D(d, A_0)}{D(d_{\max}, A_0)} \times 100$ <p>で定義される(SSD一定)</p>
PDI	percentage depth ionization	深部電離量百分率	<p>水中でのビーム軸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</p>

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)より改変引用



▲ 線量計測に関する幾何学的用語



- これらの幾何学的用語から求めるPDD, TPR, TMRの式を下記に記す
- 図示できること, 式を覚えることを推奨する(国家試験によく出る)
- ~~教科書のTMRの式の A_0 はミスプリントでAが正しい~~
- $SCD = SAD = STD$
 線源電離箱間距離source chamber distance
 線源回転軸間距離source axis distance
 線源標的間距離source target distance

第2版ではミスプリント
は修正されました

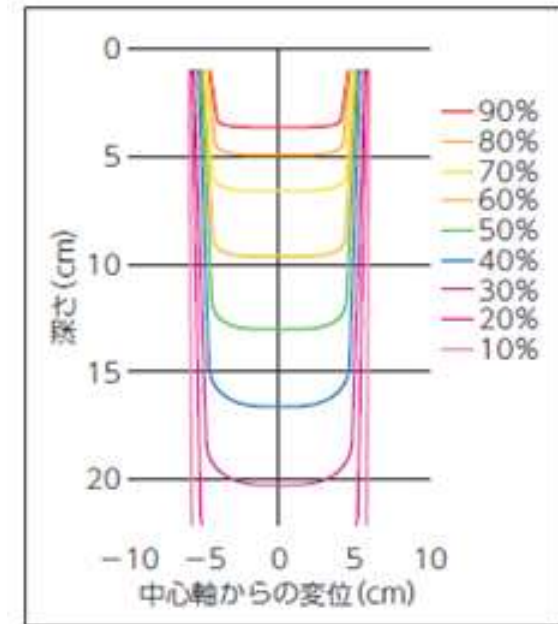
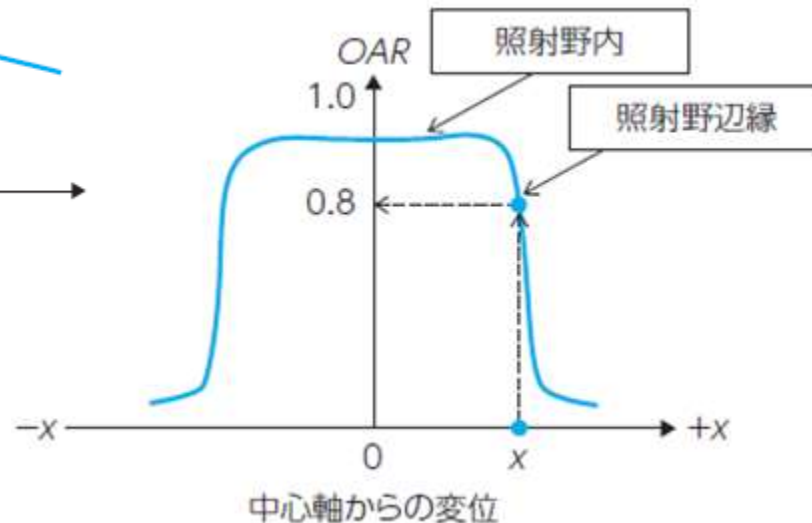
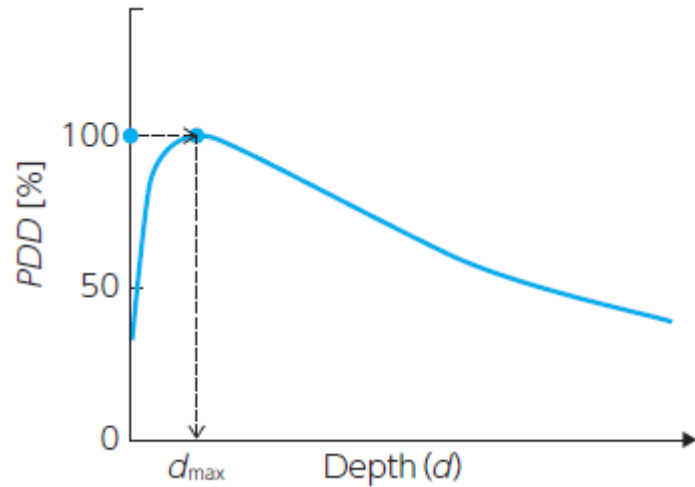
$$PDD(d, A_0) = \frac{D(d, A_0)}{D(d_{\max}, A_0)} \times 100 \quad (\text{SSD一定})$$

$$TPR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_r, A)} \quad (\text{SCD一定})$$

$$TMR(d, A) = \frac{D(d, A)}{D(d_{\max}, A)} \quad (\text{SCD一定})$$



- 放射線治療では、「標的(腫瘍など)に対してはできる限り放射線を均等に照射させつつ、標的以外(正常組織など)にはできる限り放射線が照射されないようにする」ことが重要となる。これを達成するためには、体内における照射ビームの線量がどのような分布にあるかを把握しなければならない。つまり、使用する頻度ごとに正確なビームデータを求める必要がある
- しかし、体内の線量分布を直接的に計測することは不可能である。そこで、あらかじめ水ファントム等を利用してビームデータ(PDD, OARなど)を取得し、これらのビームデータを用いて2次元平面上で線量が等しい点を結んで得られる曲線(等線量曲線)を取得する。この等線量曲線を利用して、体内の線量分布を表現することになる。

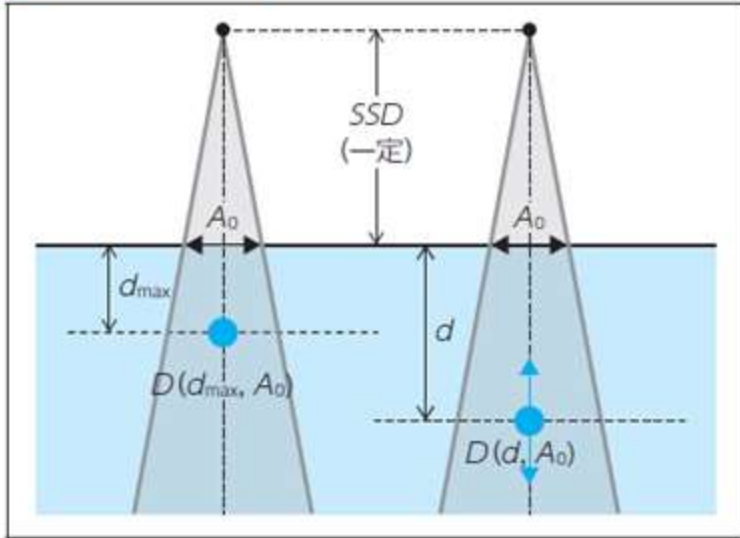


a: 等線量曲線



1 深部量百分率 (percentage depth dose : PDD)

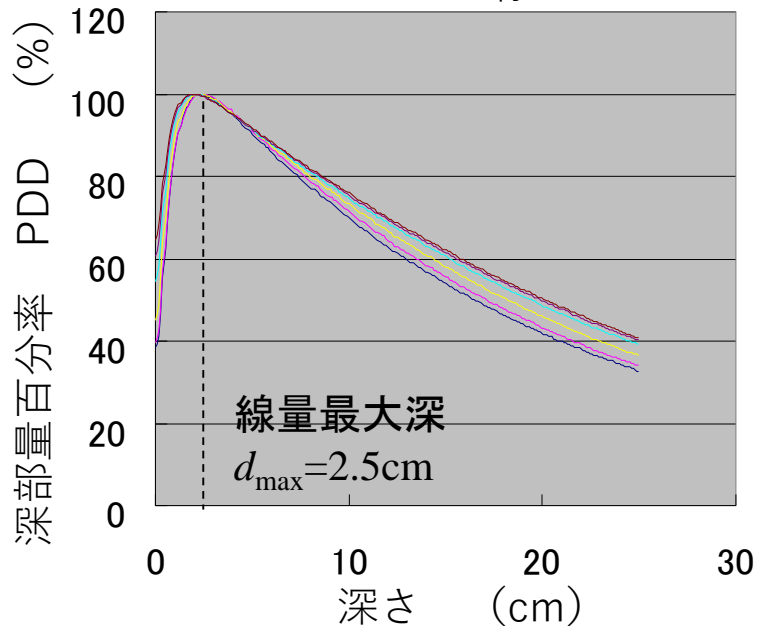
▲ 深部量百分率 (PDD)



- 水中でビーム軸上における線量最大深の吸収線量 $D(d_{max}, A_0)$ に対する任意の深さでの吸収線量 $D(d, A_0)$ の百分率
- 表面照射野が A_0 のとき、ビーム軸上の深さ d での深部量百分率 $PDD(d, A_0)$ を次式で定義する

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

10MV-X線



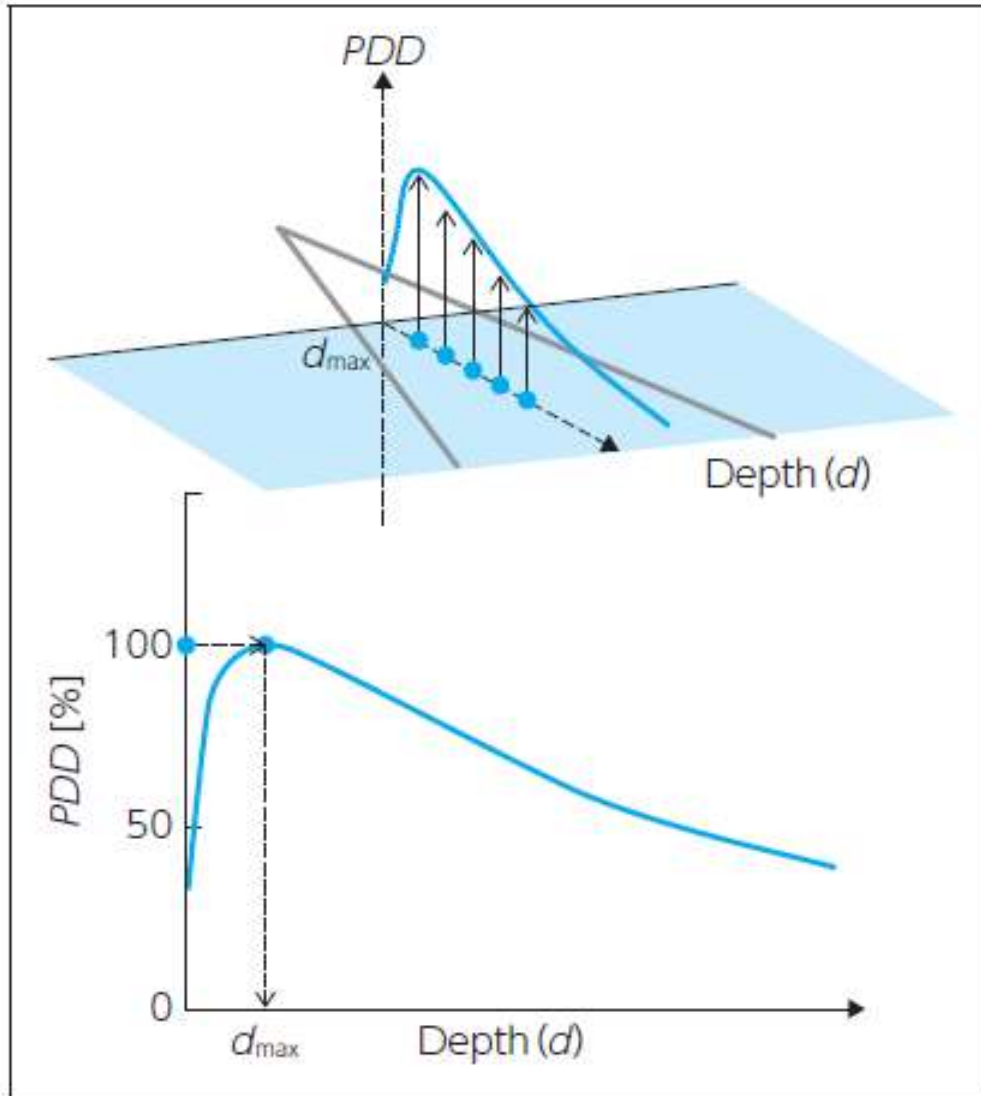
- 3×3
- 5×5
- 10×10
- 20×20
- 30×30
- 40×40

- SSDは一定とする
- SSDを固定し電離箱線量計の位置(深さ d)を移動させて計測する
- 実効中心で計測する

照射野が大きいほど傾きは小さくなる(散乱線の増加のため)
分子と分母で線源からの距離が異なるため距離逆2乗則の影響がある (下に凸のグラフ)



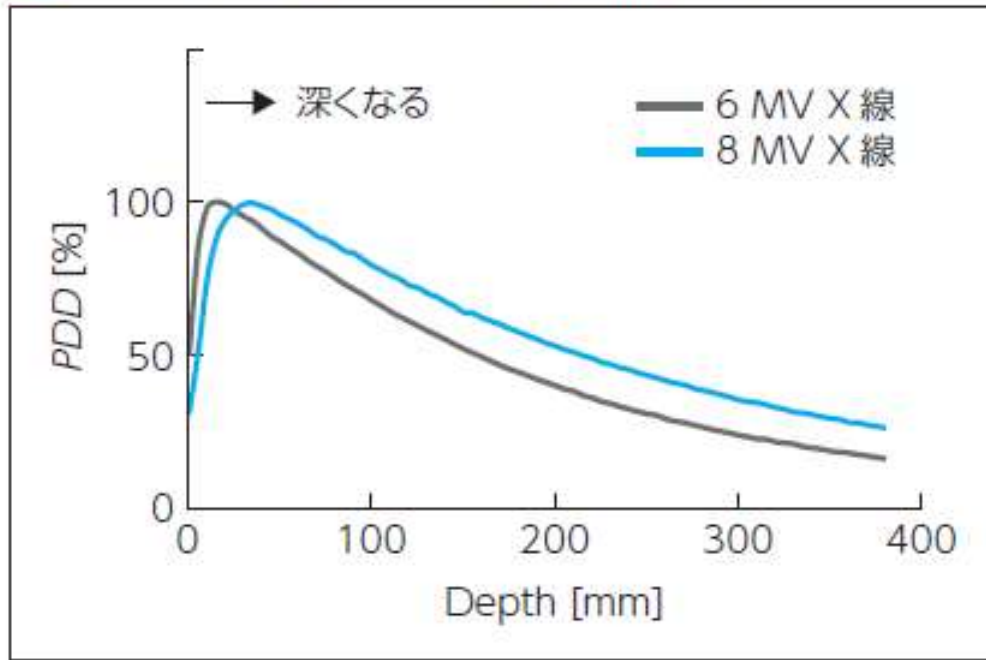
▲ PDD 曲線



- 縦軸をPDD, 横軸を水中の深さで表した曲線とする
- X線の場合, ある深さでビルドアップを呈し, その後は減少する
- PDDが最大(100%)となる深さを $d=d_{max}$ で表す

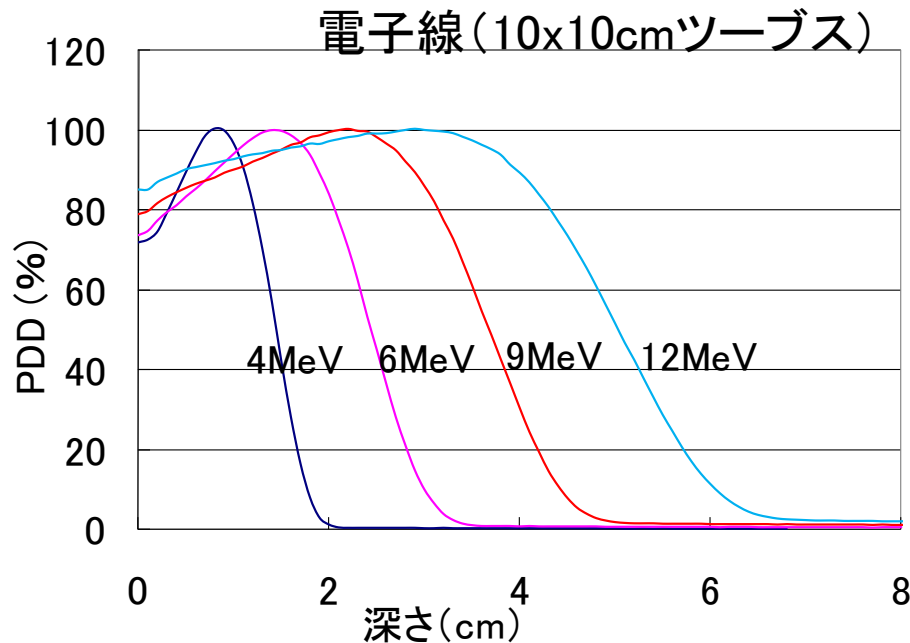


▲ エネルギーの違いによる PDD 曲線の変化



- 図にエネルギーの違いによるPDD曲線を示す
- X線の場合, エネルギーが高いほどPDDのビルドアップピークが深部まで到達する
- 線量最大深が深くなる
- 表面線量が減少する
- 曲線の傾斜が緩やかになる

(※)X線の場合のビルドアップは電離で発生する2次電子の寄与によっておこる. 高エネルギーX線ほど2次電子の飛程が長くなるため線量は表面で小さくなる



(補足)

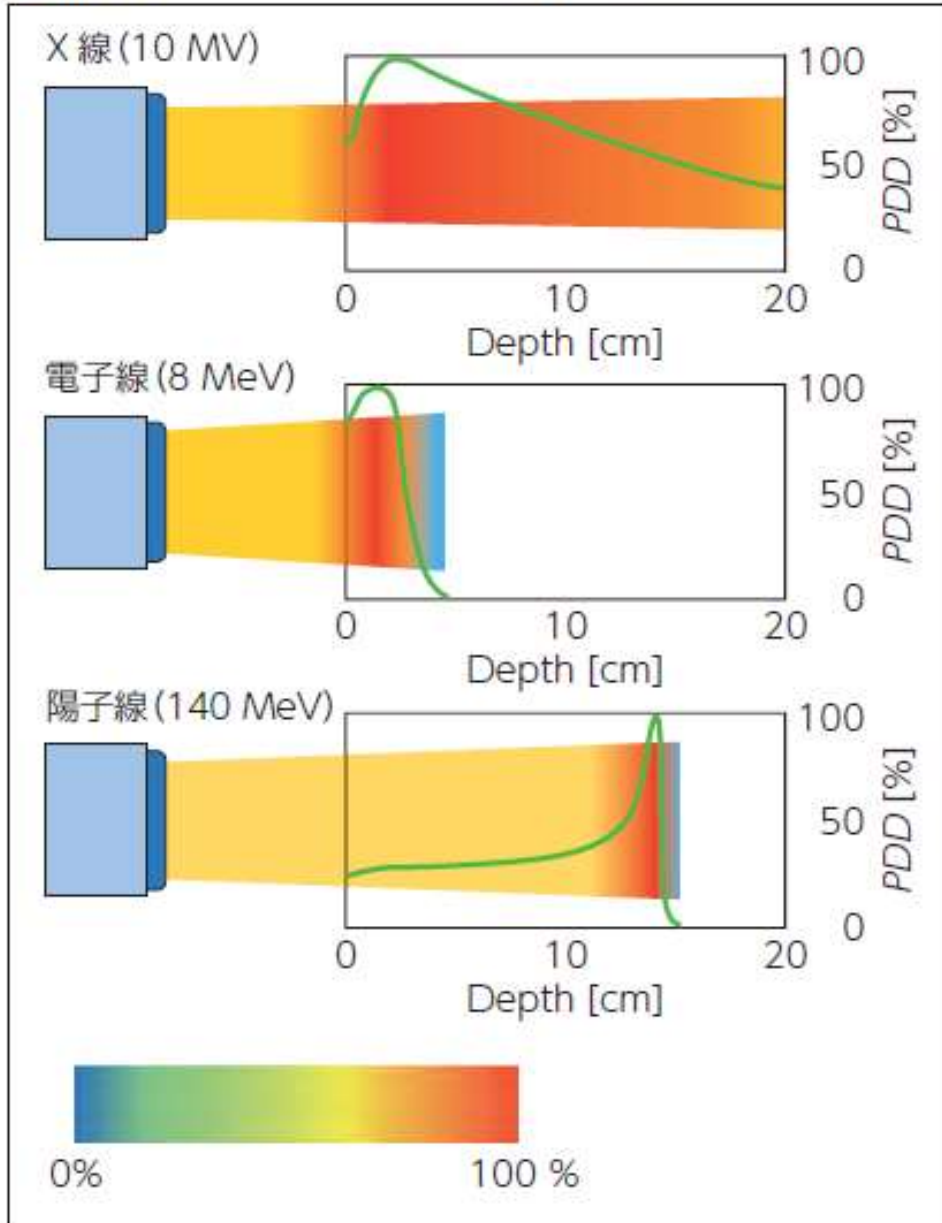
電子線の場合, エネルギーが高いほど

- 線量最大深が深くなる
- 表面線量が増大する
- 曲線の傾斜が緩やかになる

(※)電子線は入射方向に対してある角度で散乱しこの散乱角は低エネルギーほど大きい, つまり側方に散乱しやすく, それにより中心軸上の線量はある深さまで加算されビルドアップ領域での線量勾配は大きくなる



▲ 放射線の種類による PDD 曲線の変化



- 光子線 (X線・ γ 線) は, ほぼ同じ形状を示し, エネルギーが高くなるほどビルドアップ領域は深くなる
- 電子線は光子線と比べて一定の深さまでしか到達しない
- 陽子線は飛程の終端でBragg peakを形成するのが特徴である



絶対線量と相対線量

(1) 絶対線量と相対線量

絶対線量 → 物理量としての単位がある → (例) 校正深吸収線量 D [Gy]

相対線量 → 物理量としての単位が無い → (例) PDD, TMR, OAR, OPFなど

(2) 相対線量の種類

• 深部線量関数

深部線量関数	距離の設定	基準深 d_r
深部量百分率 percentage depth dose : PDD	SSD (一定) 法	線量最大深 (d_{max})
深部電離量百分率 percentage depth ionization : PDI	SSD (一定) 法	電離量が最大となる深さ
組織最大線量比 tissue-maximum ratio : TMR	SAD (一定) 法	線量最大深 (d_{max})
組織ファントム線量比 tissue-phantom : TPR	SAD (一定) 法	任意の基準深
組織空中線量比 tissue-air ratio : TAR	SAD (一定) 法	ビルドアップキャップを装着したときの空中線量

- 軸外線量比 (off-axis ratio : OAR , または off-center ratio : OCR)
- 出力係数 (output factor : OPF)
- ウェッジ係数 (wedge factor : WF)
- トレイ係数 (tray factor : TF)



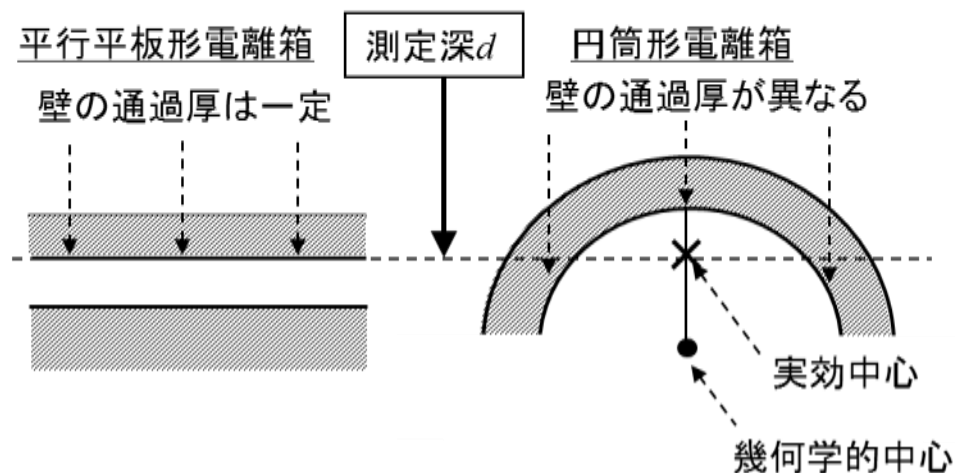
測定深について(X線)

- 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

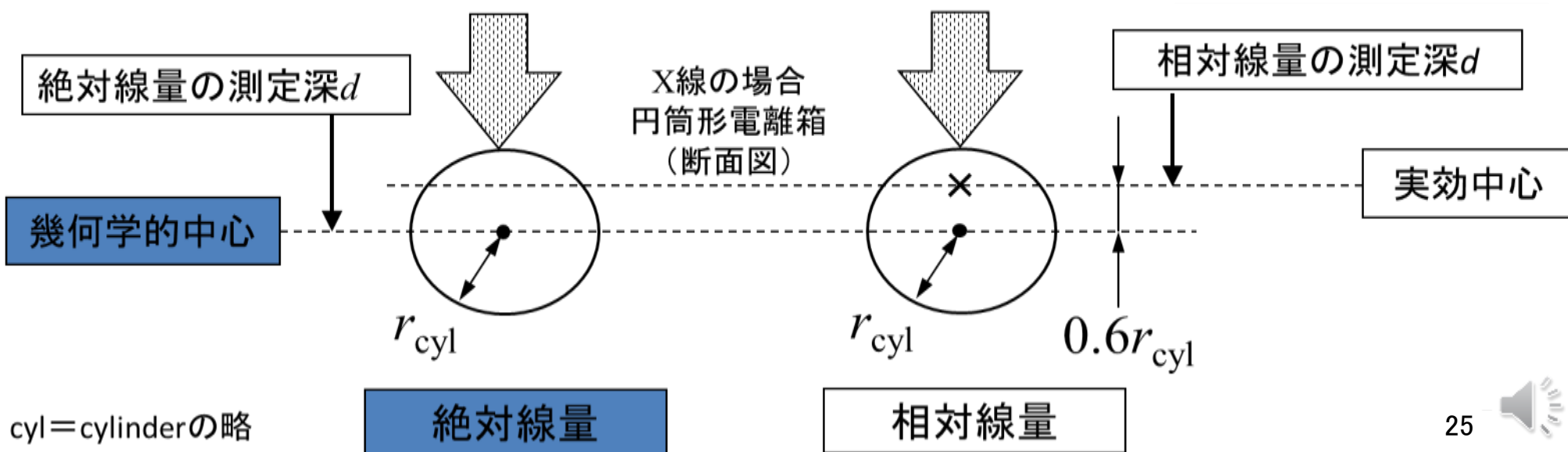
(注意)円筒形電離箱はX線の電離箱壁の通過厚が中心軸と周辺部で異なり、幾何学的中心より線源側の点(実効中心)で電離箱の感度が最大になるため測定は実効中心の深さにする。ただし、X線の絶対線量測定では、線質変換係数 k_Q でこの半径方向の電離箱感度の違いを補正しているため、測定深は幾何学的中心で行って良いことになっている。

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



- 相対線量 (PDD, TMR, OPFなど比率で表すもの)

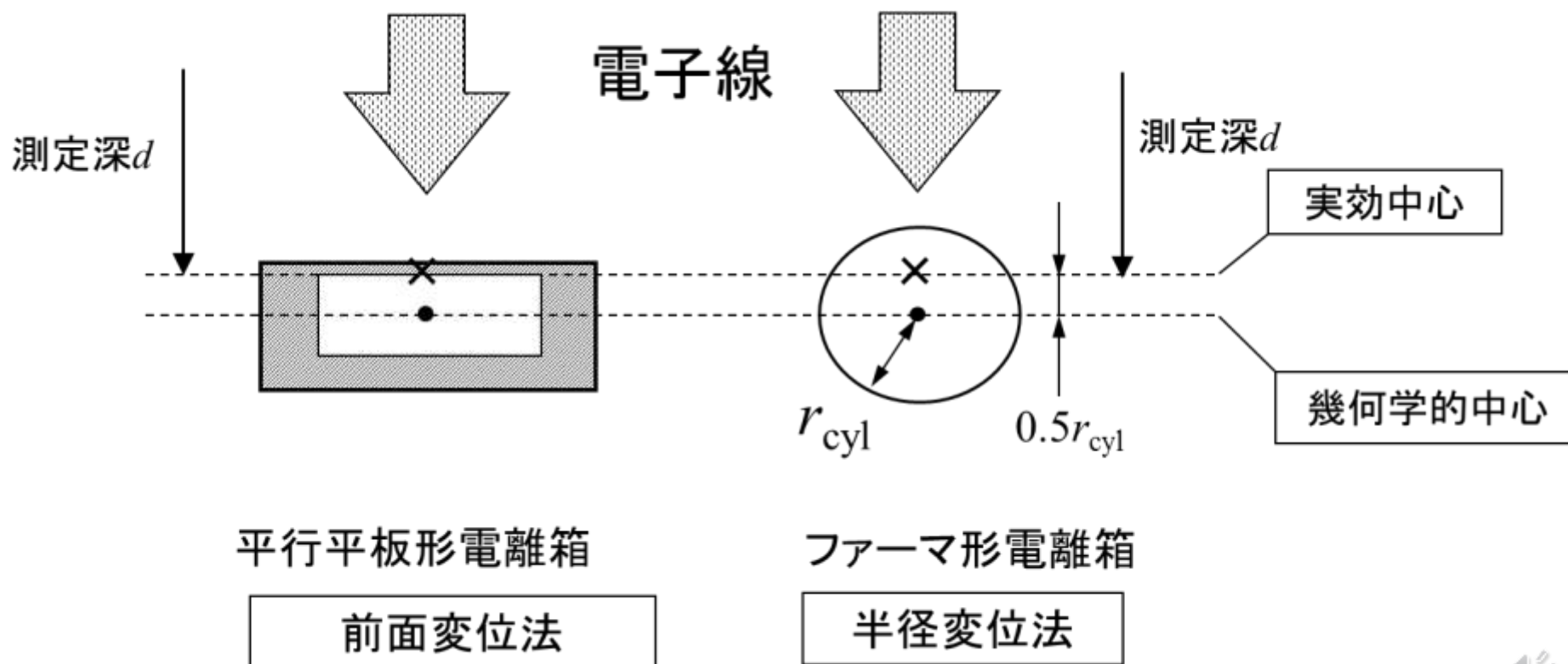
→X線の相対線量測定は半径変位法(0.6r)で行う



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($0.5r$)

X線と電子線の比較は
p.160 を参照



cyl = cylinder (円筒) の略



【国試例題】

深部量百分率 PDD について正しいのはどれか。

- a. 水ファントムを用いて測定する
- b. SSD一定での深さによる吸収線量の変化である
- c. SAD(SCD)一定での深さによる吸収線量の変化である
- d. 測定するときには線源電離箱間距離を一定にして行う
- e. 測定するときには線源電離箱間距離を変化させて行う

1. a,b,c 2. a,b,e 3. a,d,e 4. b,c,d 5. c,d,e

【答え】



小テスト

問題1 リニアックによる電子線の吸収線量測定について誤っているのはどれか。2つ選べ。

1. 電離箱は平行平板形を用いる
2. 年1回校正された電離箱線量計を用いる
3. 水ファントムを用いる
4. 基準深に電離箱を設置して測定する
5. 線質は $TPR_{20,10}$ を指標とする

問題2 校正深吸収線量測定で正しいのはどれか。

1. 校正深に実効中心を一致させる
2. X線の基準照射野は $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ である
3. X線の校正深はエネルギーに関わらず 5 g/cm^2 である
4. 電子線の校正深はエネルギーに関わらず基準深である
5. 10 MeV 以上の電子線では水等価ファントムを使用する

問題3 組合せとして正しいのはどれか。

1. SAD ----- 線源電離箱間距離
2. TMR ----- 組織最大線量比
3. TPR ----- 深部量百分率
4. PDD ----- 組織ファントム線量比
5. SCD ----- 線源回転軸間距離

