

X線の線量測定 — 標準測定法01

放射線の測定と線量校正法の基礎 その(2)

バックナンバーは共有フォルダ内に保存。
『養子関係者専用Fut資料SCC内勉強会』
メンバーは次のURLでもPDFのみなら閲覧可能
<http://www.futami.jp/Study/SCC/>

予定

- 放射線の種類(10/23)
- 放射線計測の原理
- 検出器の種類とその原理
- 線量の定義(10/23～)
- 線量校正法〔標準測定法01〕(10/29～)
- X線の線量測定及び線量校正法(10/23～)
- 電子線の線量測定及び線量校正法

X線と物質との相互作用

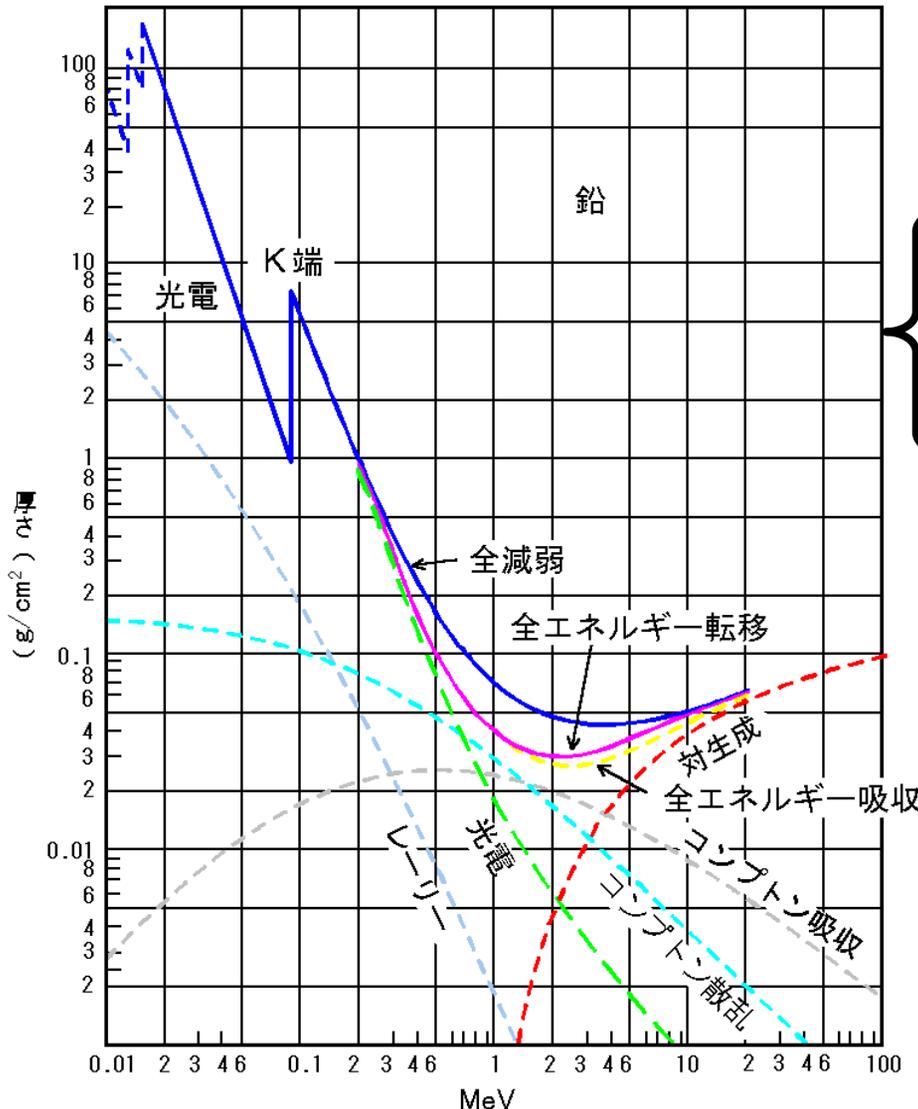


図5 鉛に対する光子の減弱

【出典】石川友清（編）：放射線概論、通商産業研究社（1991年4月）、p100

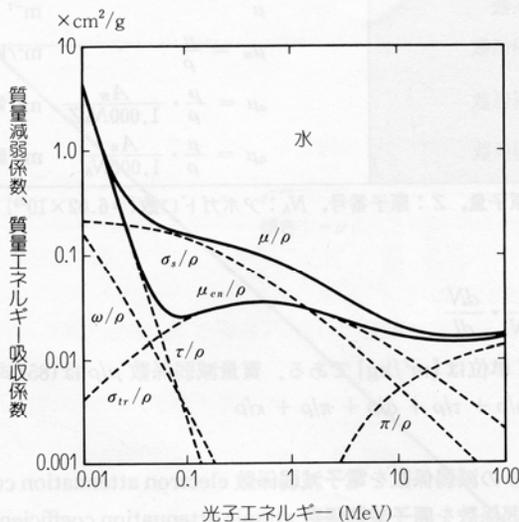
- 光電効果
 - コンプトン散乱¹⁾
 - 電子対生成²⁾
-
- 低エネルギーの干渉性散乱（束縛電子によるレイリー散乱 cf.⇒¹⁾）
 - 三対子生成 cf.⇒²⁾
 - 高エネルギーの光核反応（ γ, n ）等

※図の引用は、『原子力百科辞典 ATOMICA』
<http://mext-atm.jst.go.jp/atomica/> より

⇒ 鉛ではなく人体中ではどうか？

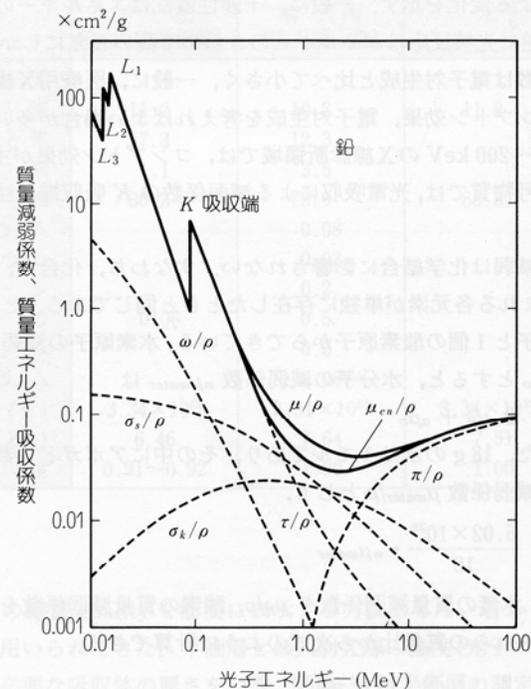
人体(水)ではどうか？

干渉性散乱	$\omega / \rho \propto Z^2 / E$
光電吸収	$\tau / \rho \propto Z^3 / E^3$
コンプトン散乱	$\sigma / \rho \propto 1 / E$
電子対生成	$\pi / \rho \propto (E - 1.02\text{MeV}) \cdot Z$



図III-32 水に対する質量減弱係数と質量エネルギー吸収係数^{*)}

- μ/ρ : 全質量減弱係数
- ω/ρ : 質量トムソン減弱係数
- τ/ρ : 質量光電減弱係数
- σ_s/ρ : 質量コンプトン散乱減弱係数
- σ_{tr}/ρ : 質量コンプトンエネルギー転移係数
- π/ρ : 質量電子対減弱係数
- μ_{en}/ρ : 全質量エネルギー吸収係数



図III-33 鉛に対する質量減弱係数と質量エネルギー吸収係数^{*)}

- μ/ρ : 全質量減弱係数
- ω/ρ : 質量トムソン減弱係数
- τ/ρ : 質量光電減弱係数
- σ_s/ρ : 質量コンプトン散乱減弱係数
- σ_k/ρ : 質量コンプトンエネルギー転移係数
- π/ρ : 質量電子対減弱係数
- μ_{en}/ρ : 全質量エネルギー吸収係数

X線の測定と線量校正

<本日の予定>

- 線量とは(再び！)
- 線量校正と測定
 - Bragg-Grayの空洞理論(再び！)
 - 線量分布の関係式

<次回予定？>

- 【01】で測ってみよう。**DMU**の確認。
 - $TPR_{20,10}$ 、 k_S 、 k_{pol} 、 PDD

線量の定義

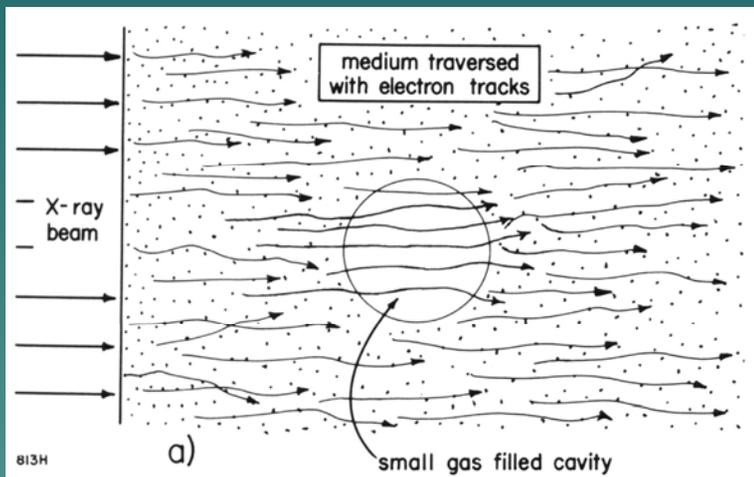
❖ 吸収線量：“質量”あたりの“エネルギー”

$$D = \frac{d\bar{E}_{\text{吸収}}}{dm} \left[\frac{\text{エネルギー}}{\text{質量}} \right]$$

❖ 単位；

$$[Gy] \equiv \left[\frac{J}{kg} \right]$$

Bragg-Grayの空洞原理



- ◆ 物質中の小空洞で場が乱されなければ (電子平衡; エネルギー分布とフルエンス)、

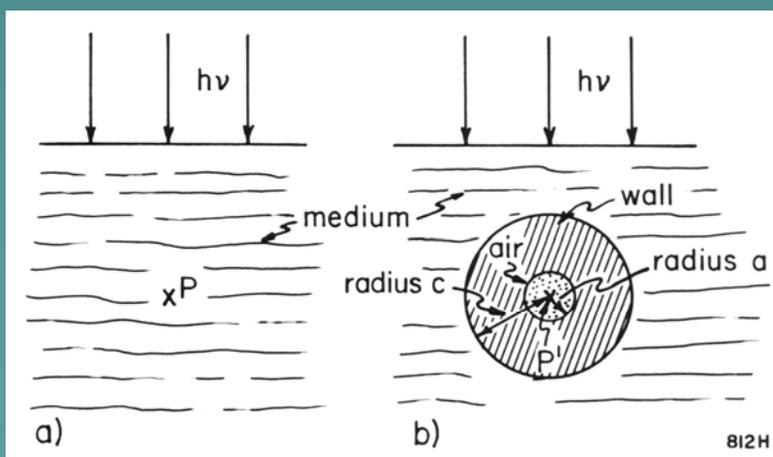
$$D_m = D_{gas} \times S_{m,gas}$$

質量阻止能比

- ◆ 気体の吸収線量: $J \times W$

J : 質量あたりのイオン対数

W : 1イオン対生成に必要なエネルギー

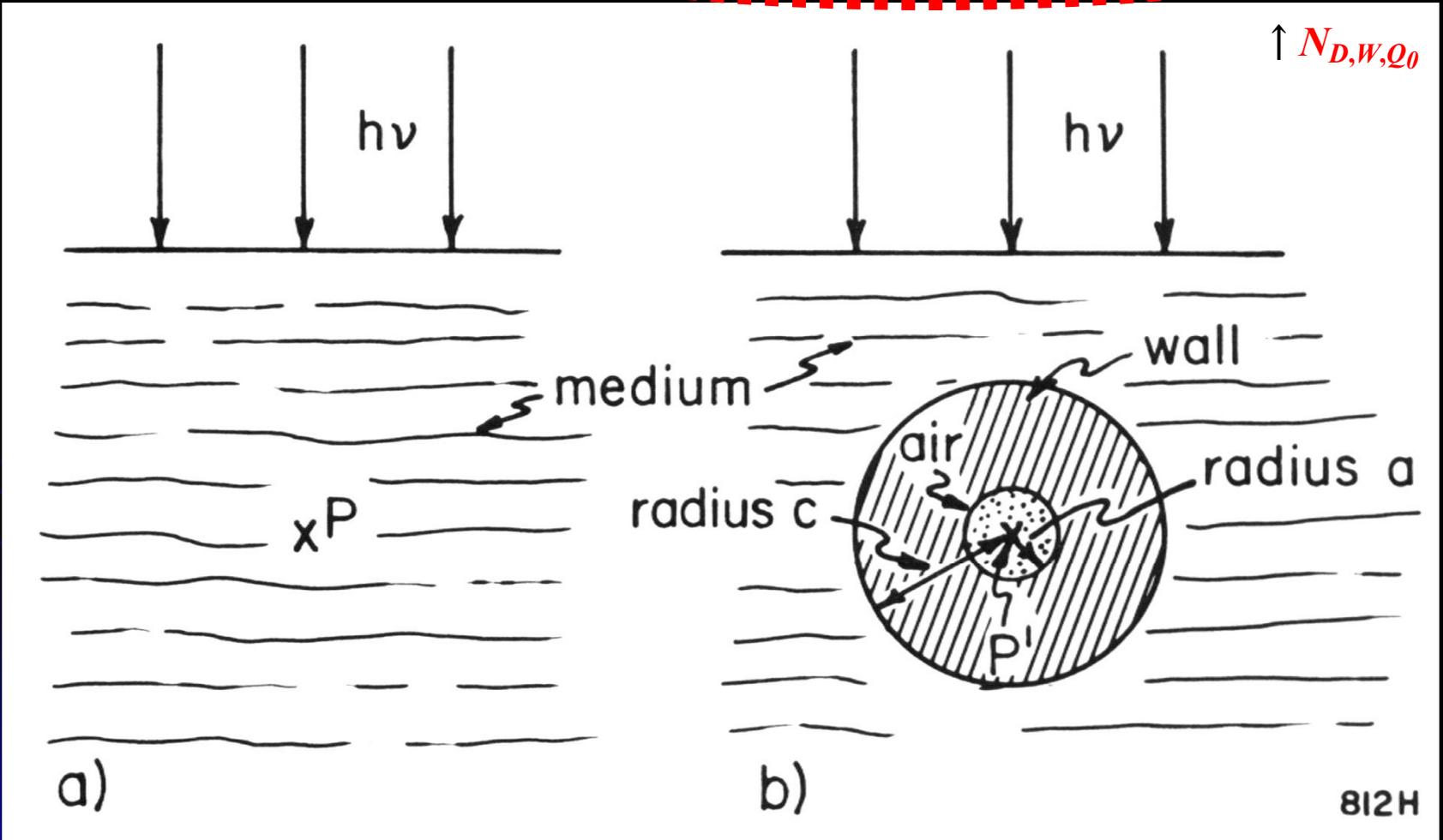


$$Gy = \frac{J}{kg} = \frac{n}{kg} \cdot \left(\frac{J}{n} \right) = \frac{en}{kg} \cdot \left(\frac{J}{e} \right) \frac{1}{n} = \frac{C}{kg} \cdot \frac{eV}{n}$$

$$D_{gas} = \frac{Q}{m_{gas}} W$$

- ◆ $W[eV/\text{イオン対}] \equiv W[J/C]$

$$D_m = (Q / m_{\text{gas}}) \cdot (W / e) \cdot S_{m,\text{gas}}$$



コバルト校正

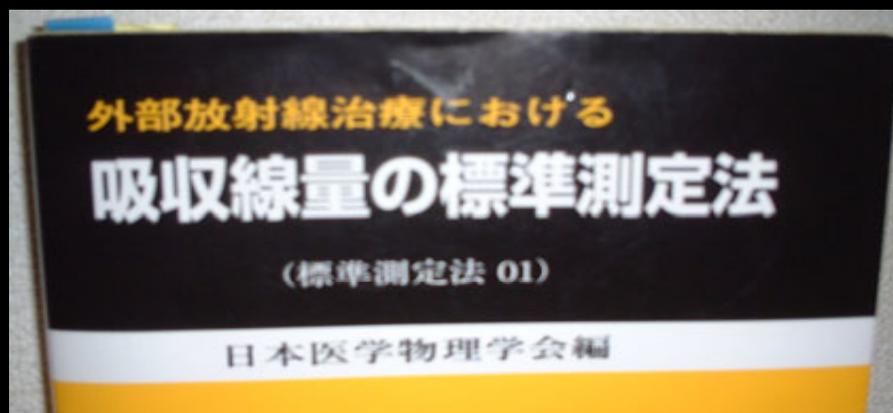
コバルト校正定数 N_C 、 $N_{C,x}$ 、 N_λ

- ◆ 定義： X_{air}/M 、単位： $(C/kg)/(reading)$
- ◆ 校正機関で行う
- ◆ 基準線質は ^{60}Co γ 線
- ◆ “医療用2次標準器”である校正機関の標準線量計で『照射線量』が確定した校正位置(10cm × 10cm)で実施
- ◆ 基準条件は22.0°C 101.33kPa
- ◆ 「ファーマ型電離箱の場合、最初の温度差が4°Cのとき、電離箱内温度が室温と0.3°C以内に一致するためには、約20分必要」

春の学会(JSMP85)のスライドより

Introduction

- 通称『標準測定法01』第1版第1刷発行2002.09.10
- 付録21「荷電粒子線に対する吸収線量の測定法」
⇒ 静岡以外の全粒子線施設相互比較研究(2002.2)の
成果(放医研、東病院、筑波大、兵庫県、若狭湾)



何でわざわざ【86】から【01】へ変えたのか？

- 「高精度で使いやすい方法だからです。」
- ヨーロッパから始まり、北米や国際機関も追随。新しい線量評価プロトコルが普及。
- 各国一次標準機関におけるカロリメータ等の研究開発が進展。⇒測定誤差やトレーサビリティが水吸収線量と空気カーマ(照射線量)とでほぼ同じレベルに達した！
- 照射線量ベースだと、更に、吸収線量への変換係数の系統誤差が混入する。
- 直接吸収線量に対する感度を評価するため、チェンバーの個性に強い。($N_{D,w}/N_C$ の個性の問題)
- 日本では？⇒(産業構造審議会産業技術分科会・日本工業標準調査会合同会議知的基盤整備特別委員会の“物理標準に関する整備計画H14.6”では『水吸収線量(X線、 γ 線)』は186番目の項目)2010までに整備？

http://www.meti.go.jp/policy/techno_infra/

用語集攻略！

- 大量の用語、複雑な記号、硬くて回りくどい定義文は読んだり聞いただけでは頭に入らない。
- とりあえず、(厳密には)間違っているでもいいので、イメージを作りましょう。
- <解説の方針> 聞く(聴く)のではなく訊く。
- これまで疑問に思っていたこと(用語、記号等)をどんどん質問して下さい。その場で調べて(^_^;)説明します。宿題になるかも。

吸収線量の公式【01】

$$D = M \times N_{D,W,Q_0} \times k_{Q,Q_0}$$

$$N_{D,W,Q_0} = N_C \times k_{D,x}$$

- 参考)【86】の場合; 覚えないうほうが良い

$$D = M \times N_C \times C \times k_{TP} \times P_{ion}$$

$$= M \times N_C \times C' \times P_f \times k_{TP} \times P_{ion}$$

吸収線量の計算(【01】)

- ◆ 校正点吸収線量 D_c

$$D_c = M N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0}$$

- ◆ 基準線質“ Q_0 ”は ^{60}Co γ 線である場合には記号「 Q_0 」は省略できる。
- ◆ リファレンス線量計の指示値 M は、(必要に応じて) 温度気圧、極性効果、イオン再結合、電位計(エレクトロメータ)の各補正(校正)を行なったものを使用しなければならない。

$$M = M_{raw} k_{TP} k_{pol} k_S k_{elec}$$

- ◆ 水吸収線量校正定数 N_{D,w,Q_0} は、基準線質が ^{60}Co γ 線である場合にはコバルト校正定数 N_C と校正定数比 $k_{D,x}$ との積になる。
- ◆ 校正定数比 ($N_{D,w}/N_C$ 変換係数) $k_{D,x}$ は、【86】の ^{60}Co に対する C_1 に相当する。既存の電離箱線量計については文献：“【01】ガイドライン”に値そのものが掲載されている。
- ◆ 線質変換係数 k_{Q,Q_0} は文献：“【01】ガイドライン”に計算法が詳解されており、既存の電離箱線量計については値そのものが掲載されている。
- ◆ ⇒リファレンス線量計の電離箱は、パラメータの値が掲載されている型番のチェンバーを使うべし。

温度気圧補正 k_{TP}

- 『医療用線量標準センターにおいては、気圧 101.33kPa、温度22.0°Cを基準条件として校正定数を決めているので、...』
- 101.3[kPa](@86) ⇒ 101.33[kPa](@01)
- 理科年表：セルシウス温度の定義；

$$t/^{\circ}\text{C} = T/\text{K} - 273.15$$

$$k_{TP} = \frac{273.2 + T}{295.2} \bullet \frac{101.33}{P}$$

イオン再結合補正係数 k_s

- 再結合により、発生したイオン対がある割合だけ中和してしまう。
- 再結合の度合いは印加電圧が低いほうが大きい。
- 連続放射線に対する公式

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

M_i は極性効果が補正された読み値

極性効果補正係数 k_{pol}

- 印加電圧の極性（プラスにかけるかマイナスにかけるか）で得られる電荷の補正。
- 分母は普段使っている（校正時の）極性での読み値。

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

X線における線量校正の手順

- ❖ リファレンス線量計の校正(校正機関)
 - ⇒ 水吸収線量校正定数 $N_{D,W}$ (コバルト校正定数 N_C)
- ❖ 校正点吸収線量 $D_c(A)$ の測定 (SSD一定の場合 $A \rightarrow A_0$)
- ❖ 基準点吸収線量 $D_r(A)$ の計算
- ❖ **DMU** (Dose Monitor Unit) の算出
- ❖ ビーム軸上の任意の深さの点における吸収線量 $D(d,A)$
$$D(d,A) = n \times DMU \times F(d,A)$$
- n : モニタ指示値、 $F(d,A)$: $PDD(d,A_0) / 100$ または $TMR(d,A)$
- ❖ 予め知っておくべき相対分布; 水中深部量比 (PDD 、 TMR)、出力係数 OPF 等 (照射野毎に。また、各深さの OCR も) また、 $TPR_{20,10}$ は k_Q 計算に必要

X線測定の設定アップ

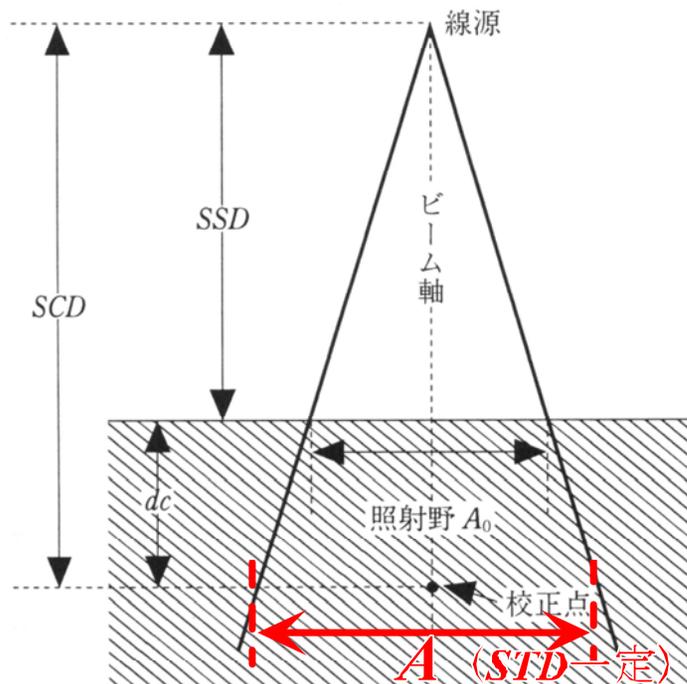


図 2.1 SSD を一定にした照射法の校正点吸収線量測定のための幾何学的配置 (d_c は校正深, 10cm)

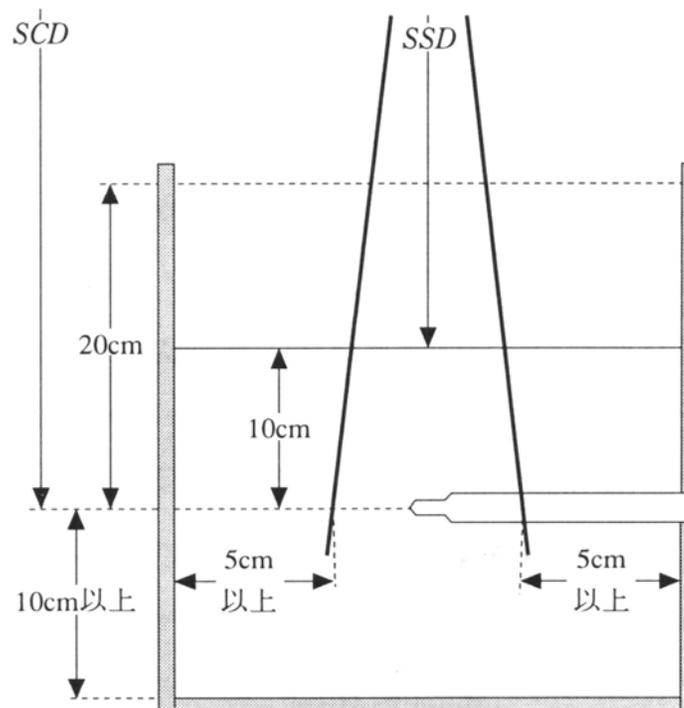


図 2.2 校正用水ファントム ($TPR_{20,10}$ 測定用と共用)
電離箱鞘部の材質は1mm以下のアクリル樹脂

- ◆ 校正深 $d_c = 10\text{cm}$ (基準深 d_r は線量最大深)、照射野は $10 \times 10\text{cm}^2$ 、電離箱円筒幾何学的中心 / 点、変位法 / 深部量比

PDDとTARやTMRの関係

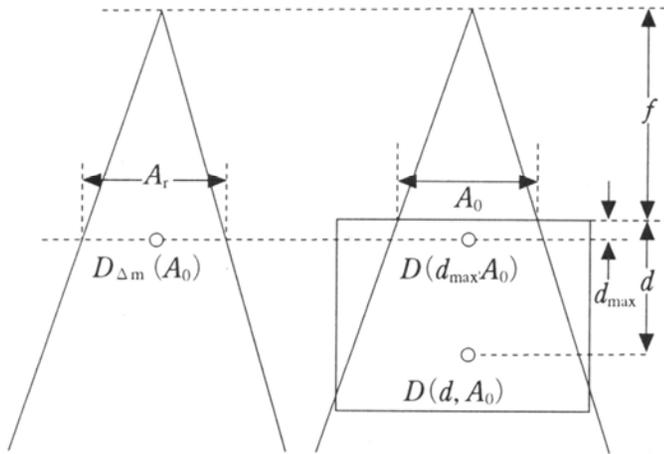


図 A 18.1 深部量百分率の説明図

- ◆ X線では基準深は最大深
- ◆ 深部量百分率**PDD**
- ◆ 組織空中線量比**TAR**
基準深と同じ位置の空中組織吸収線量 $D_{\Delta m}(A)$ との比
(組織吸収線量: 空中にビルドアップ厚 Δm の半径の組織球)
- ◆ 組織最大線量比**TMR**
- ◆ 散乱係数 $SF(A_r)$
 $SF(A_r) \equiv D_r(A_r) / D_{\Delta m}(A_r)$

$$TMR(d, A) = TAR(d, A) / SF(A)$$

- ◆ SSDが40cm以上; TARはSCDに依存しない(誤差は2%以下と証明されている)。

$$PDD(d, A_0) = 100 \frac{TAR(d, A)}{SF(A_r)} \cdot \left[\frac{f + d_r}{f + d} \right]^2$$

$$PDD(d, A_0) = 100 \cdot TMR(d, A) \cdot \frac{SF(A)}{SF(A_r)} \cdot \left[\frac{f + d_r}{f + d} \right]^2$$

ただし、 $A = A_0 \times \{(f+d)/f\}^2$
 $A_r = A_0 \times \{(f+d_r)/f\}^2$

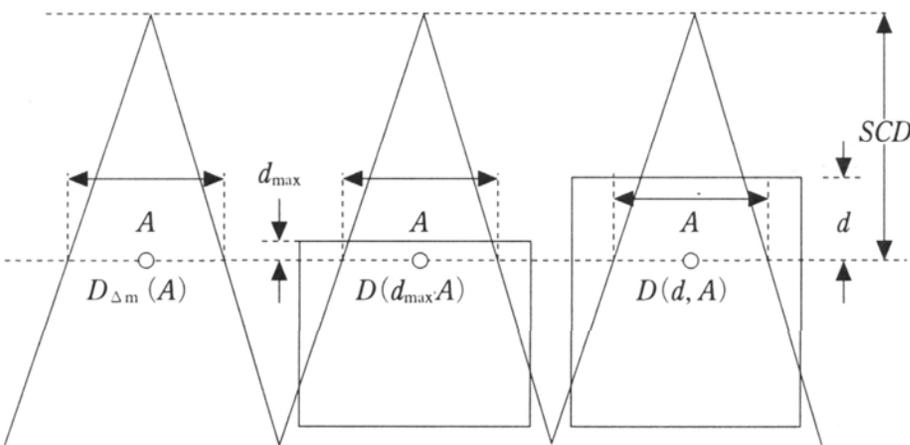


図 A 18.2 組織空中線量比および組織最大線量比の説明図

*TPR*と*TMR*の違い

◆ 組織ファントム線量比 *TPR*

◆ tissue-phantom ratio

$$TPR(d,A) = D(d,A) / D_r(A)$$

◆ 基準深が最大深の場合が、...

TMR (組織最大線量比)

tissue-maximum ratio

$$TMR \subseteq TPR$$

【86】ではこの意味で組織ピーク線量比

tissue peak dose ratio (*TPR*) ⇒ 混乱

等価照射野、出力係数、散乱係数

◆ 等価照射野

– 深部百分率の値;

長方形照射野 < 同面積の正方形(あるいは円形)照射野

◆ 等価正方形: 長方形照射野と同じ深部百分率の正方形照射野

◆ 等価円: // 円形照射野

– 面積 A と周囲長 P との比 A/P が等しい長方形は PDD がほぼ一致⇒等価正方形の一辺は $2 \cdot a \cdot b / (a + b)$

◆ 出力係数 OPF (【86】の照射野係数 F_A)

– 照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$ の場合との基準点吸収線量の比。

– 線源基準点間距離は同一とする。

– 4つの原因散乱; 平坦化フィルタ、コリメータ、コリメータからモニタへ、ファントム内

◆ 散乱係数 SF

– ある基準点の全吸収線量 D_r を一次光子のみによる吸収線量 $D_{primary}$ で割ったもの。ゼロ照射野では1。 $SF(d, A) = TAR(d, A) / TAR(d, 0)$

$$D(d, A_0) = D_r(A_0) \cdot OPF \cdot PDD_d / 100$$

参考文献(今回初出)

- IAEA Technical Report Series 398「Absorped Dose Determination in External Beam Radiotherapy」、IAEA、Vienna (2000)【原典;01もこれに準拠するように改定された。】
- 「AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams」P.R.Almond et. al, Med. Phys. 26 (1999) p.1847-1870【原典;01はいいとこ取りをしている。】
- 「放射線治療における線量のトレーサビリティと標準測定法 —標準測定法01と国際的動向を中心に—」放射線医学総合研究所・福村明史、医学物理23巻Supplement No.1 April (2003) p.55-81、2003年春の学会(JSMP85)の教育講演資料【実際に国際的にも測定を行ない、国内規格を決めている張本人の文章は生々しく勢いを感じる。】

参考文献（出現した順）

1. 「THE PHYSICS OF RADIOLOGY」(第4版) HAROLD ELFORD JOHNES and JOHN ROBERT CUNNINGHAM、ISBN 0-398-04669-7、CHARLES C THOMAS・PUBLISHER、2600 South First Street, Springfield, Illinois 62717 U.S.A. 【レビュー、原典】
2. ICRU REPORT 33「Radiation Quantities and Units」、ISBN 0-913394-27-0 【原典】
3. 「外部放射線治療における 吸収線量の標準測定法（標準測定法01）」日本医学物理学学会編、ISBN 4-86045-020-5、通商産業社【(日本の)原典】
4. 「放射線医学物理学」西臺武弘、ISBN 4-8306-4203-3、文光堂

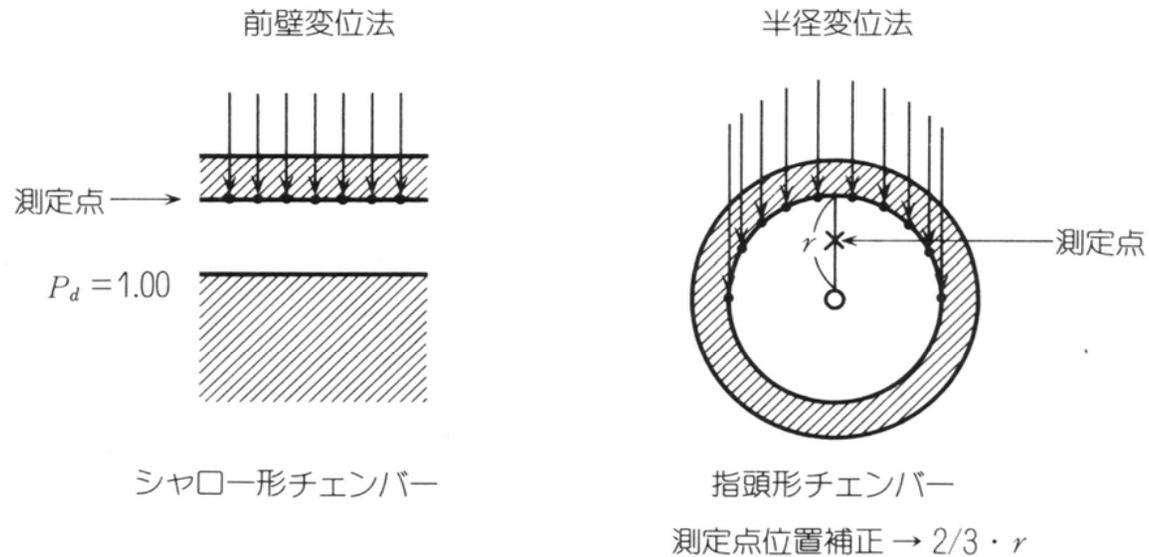
標準線量計の感度管理

	2003.02.05	2003.02.26	変化率[%]
粒子線照射なし (#137)	9.512×10^{-3}	9.601×10^{-3}	+0.9357
粒子線照射あり (#138)	9.546×10^{-3}	9.640×10^{-3}	+0.9847

- 6MVリニアック(15×15cm²、300MU/min)にて、200MU照射5cm深測定による、測定値[Gy/MU]

問題

1. 円筒形電離箱の半径変位法による実効中心補正值が **0.67r** (**(2/3)r**) 程度(?)であることを導け。



図VIII-16 変位係数 P_d の説明図

円筒形の場合、X線の校正と点測定では幾何学的中心、分布測定では0.6r前方
電子線(高E)の校正では幾何学的中心、点測定では0.5r前方
平行平板の場合、X線の分布測定では空洞内前壁
電子線の校正では電極間中心、点測定と分布測定では空洞内前壁

