

X線の測定と線量校正

放射線の測定と線量校正法の基礎

その(1)

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
- 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線の測定と線量校正

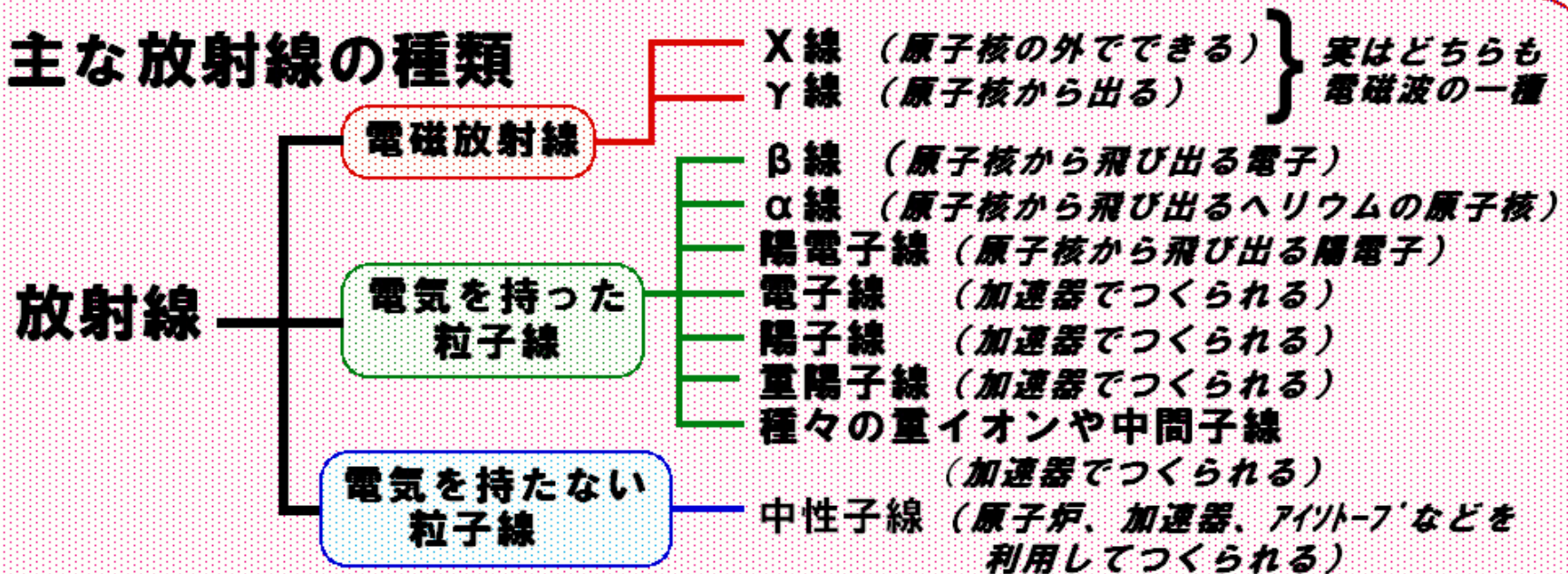
<本日の予定>

- 放射線とは
- X線と物質との相互作用
- X線の性質
 - X線束の減弱、逆自乗則、エネルギー分布
- 線量とは
- 線量校正と測定
 - Bragg-Grayの空洞理論
 - 線量分布の関係式

主な放射線の種類

- ❖ 放射線の定義:「電子や原子核のような粒子(X線や γ 線などの電磁波も「光子」として含む)が高速で走っているもの」
- ❖ 「空間及び物質を通じてエネルギー伝える能力を有するもの。電磁波や粒子線(超音波は除く)」
- ❖ 放射線医学及び放射線医療技術学では、「放射線とは“電離放射線”」

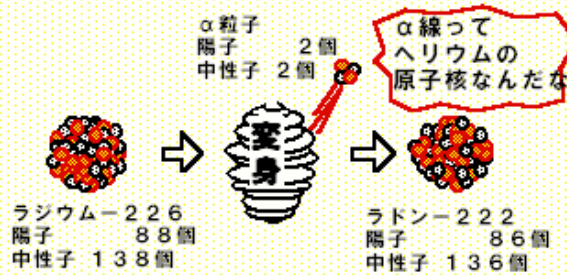
主な放射線の種類



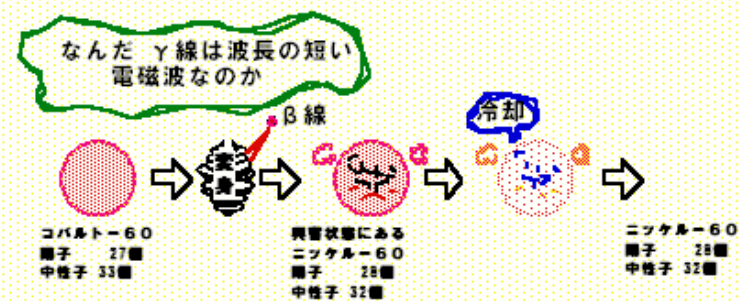
放射線の正体

放射線の正体は？

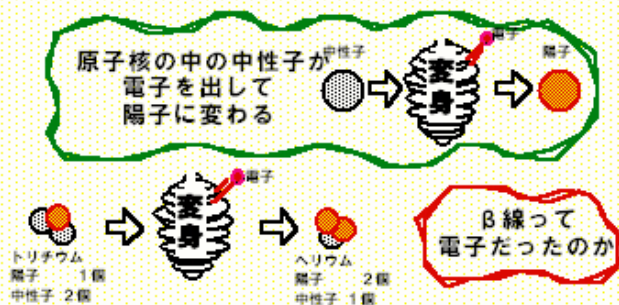
α線の正体はヘリウムの原子核です



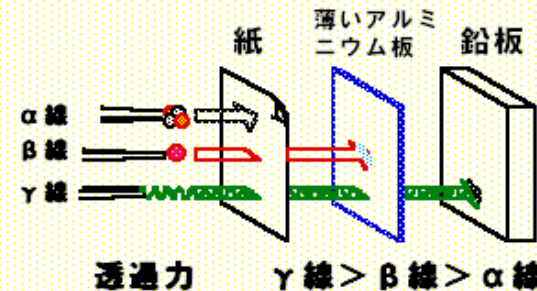
γ線、X線の正体は電磁波です



β線の正体は電子です



放射線（α線、β線、γ線、X線）には物質を突き抜ける能力（透過力）があります。

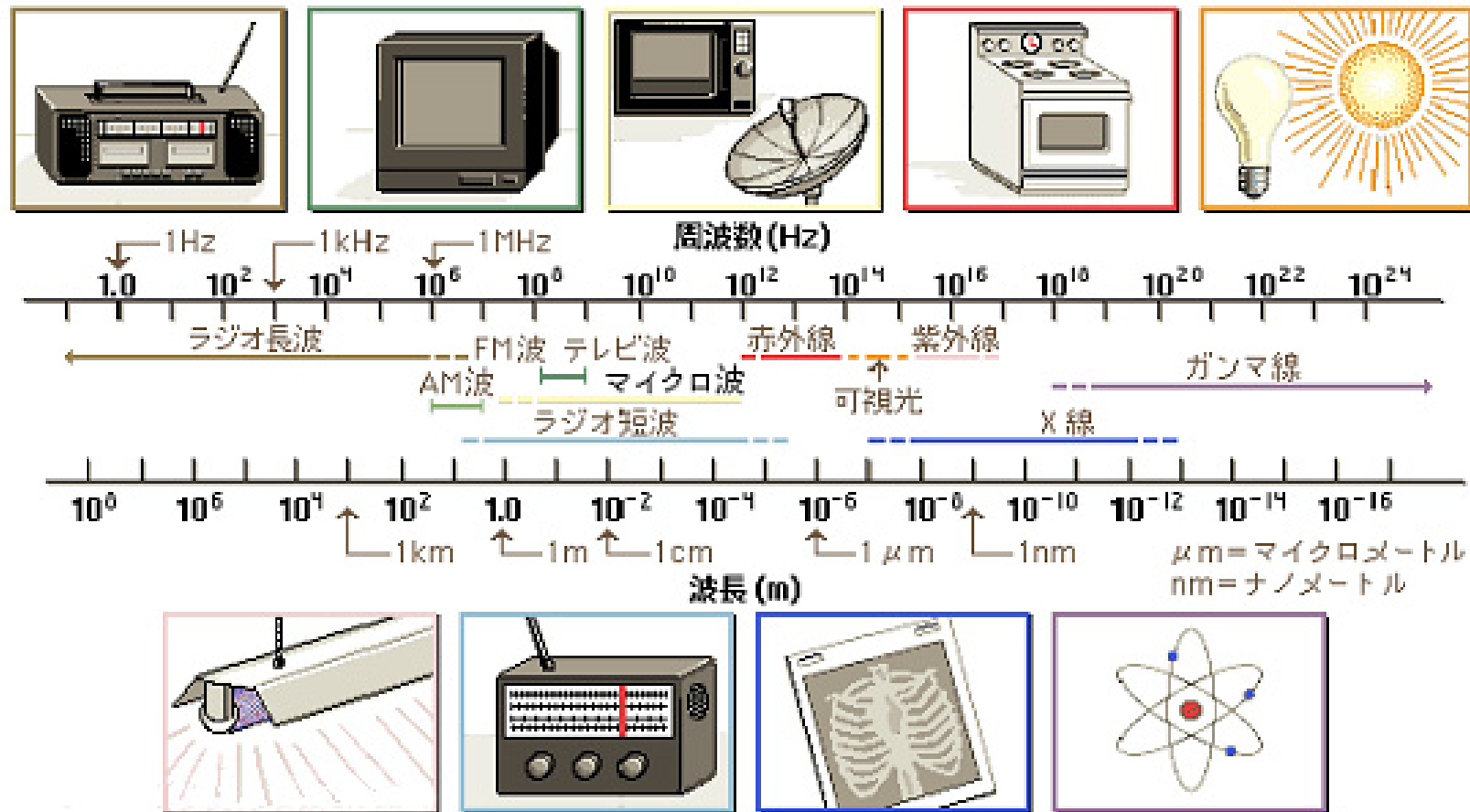


放射線と物質との相互作用

- ❖ 五感で捉えることができない(目で見えない、手で触れない、音がしない、匂いがしない、味がしない)放射線を、人間が認識する手段の原理となる。
- ❖ 放射線が(物質に入射した際)、物質との間でどのような影響の与え合いを起こすか。
 - (物質): 検出器 ⇒ 測定の基礎 ⇒ 学問的基礎(原子核・素粒子)
 - (物質): 患者 ⇒ 治療の基礎
- ❖ “放射線”は『もの』ではなく『状態』も含んだ概念。
 - β 線 ⇔ 電子線、正体の粒子等だけでは放射線ではない

X線の正体

- ❖ X線の定義:「高速の電子が原子にぶつかった時に生じる電磁波」
- ❖ 原子(核外)から放出される光子線。物理的性質は、核内から放出される γ 線と同じ



X線と物質との相互作用

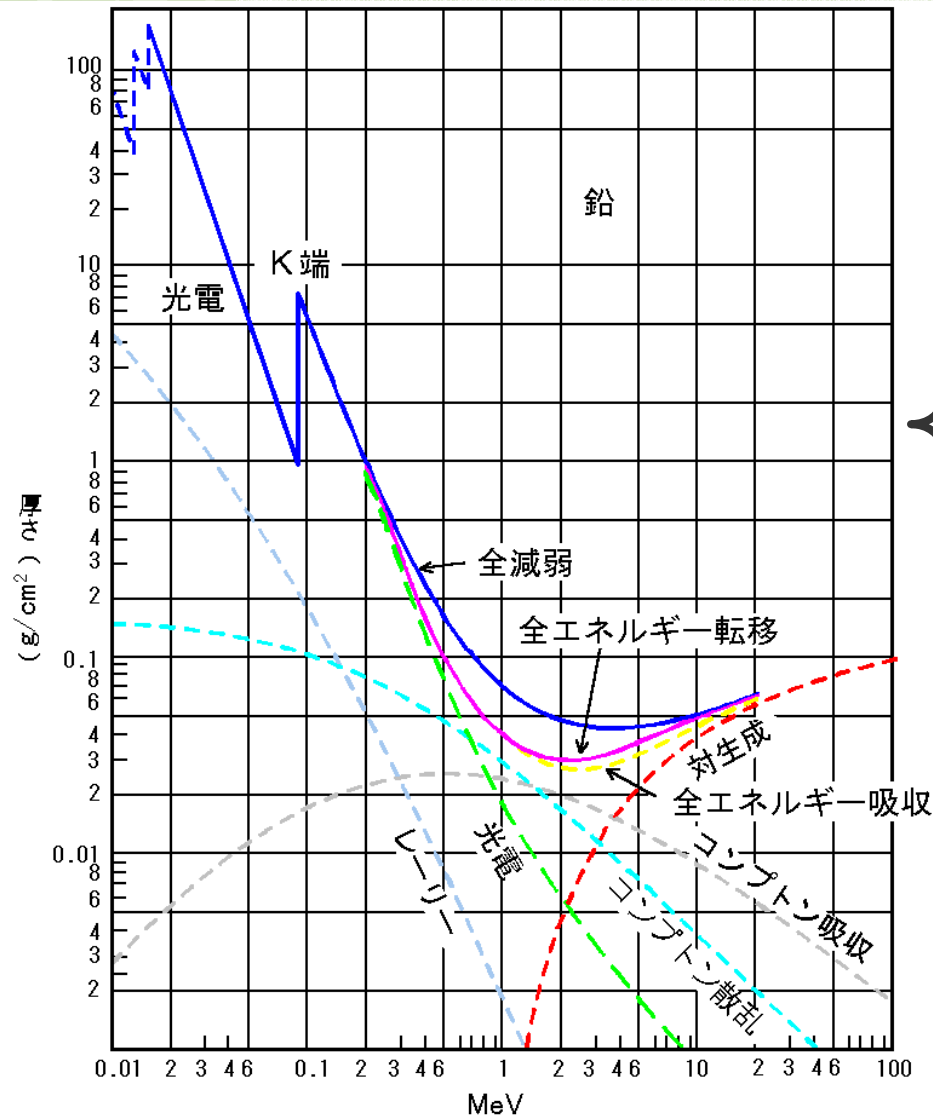


図5 鉛に対する光子の減弱

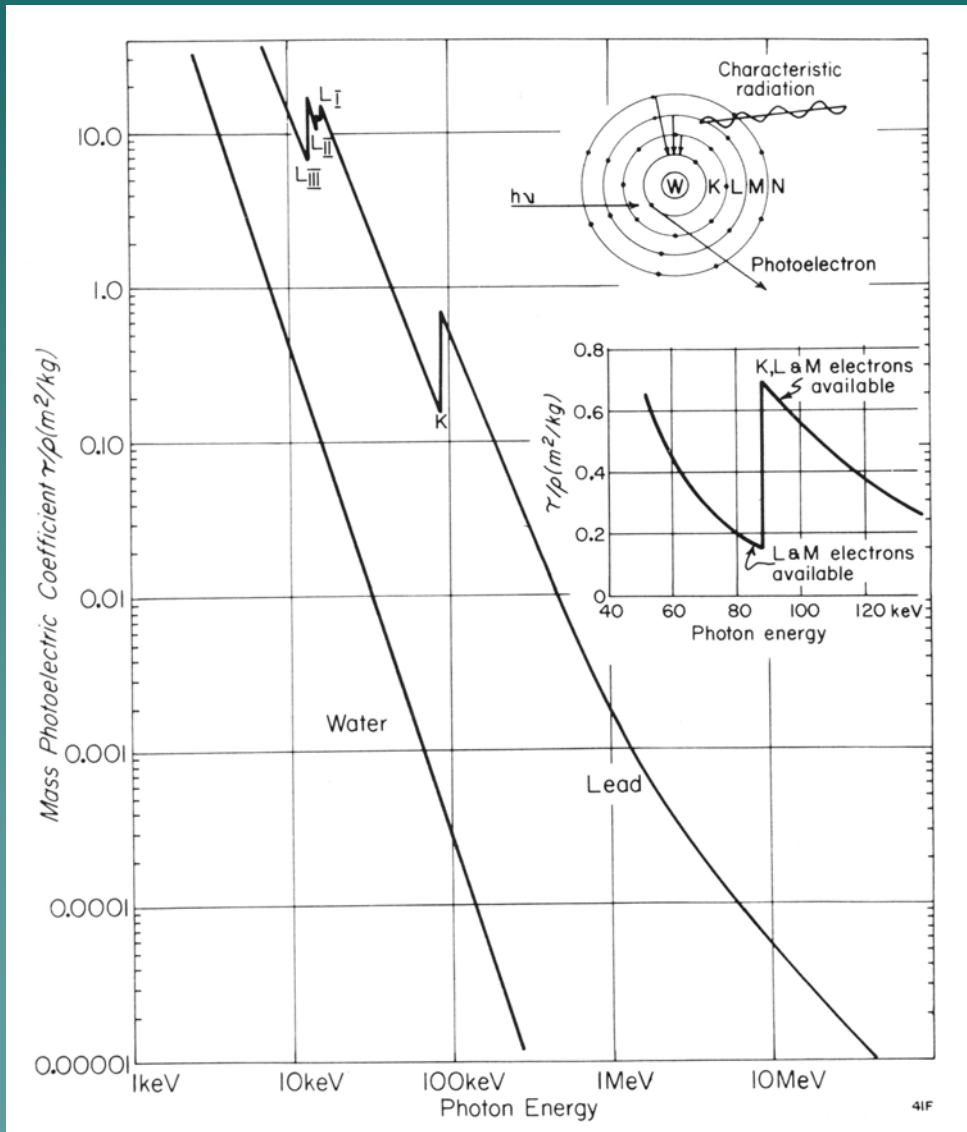
[出典] 石川友清 (編) : 放射線概論、通商産業研究社 (1991年4月)、p100

- ❖ 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

光電効果(光電吸収)



◆ 生体組織で重要となるのは、光子エネルギーが100keV以下の場合。

⇒ カイネマより光電子は直角方向に放出

◆ 発生頻度の一般式は困難

◆ 吸収端の存在

◆ K殻以外に起こる光電吸収断面積は約20%(実験的)

◆ $a \sigma_{\tau, K} \propto Z^5$

低E	$\propto (h\nu)^{-3.5}$
	$\propto (h\nu)^{-2}$
高E	$\propto (h\nu)^{-1}$

◆ 診断領域: $Z^3 (h\nu)^{-3}$

コンプトン散乱

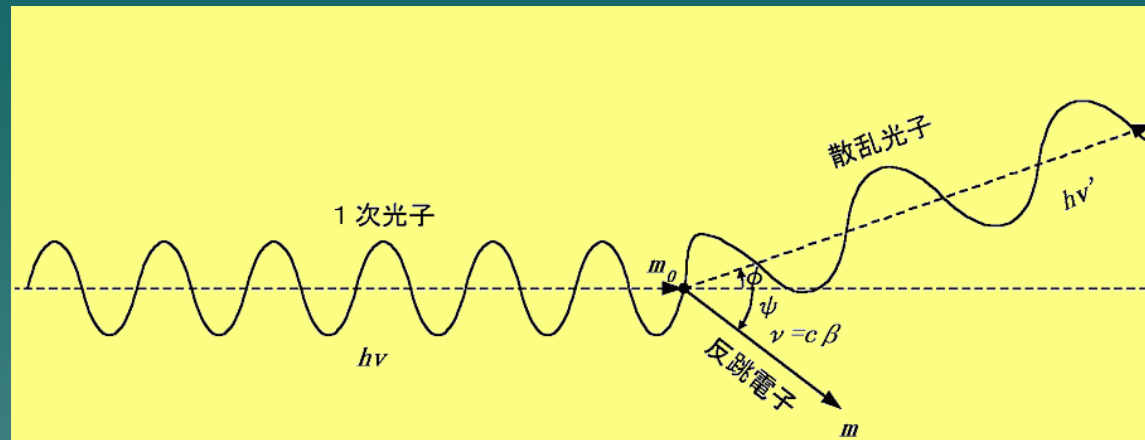


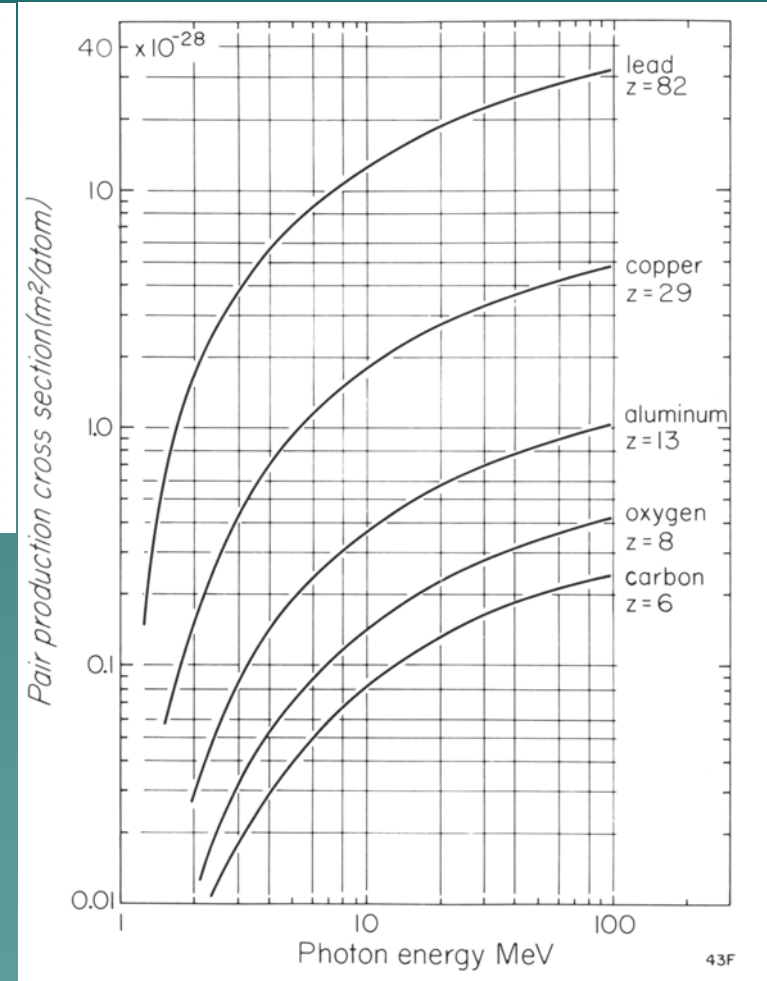
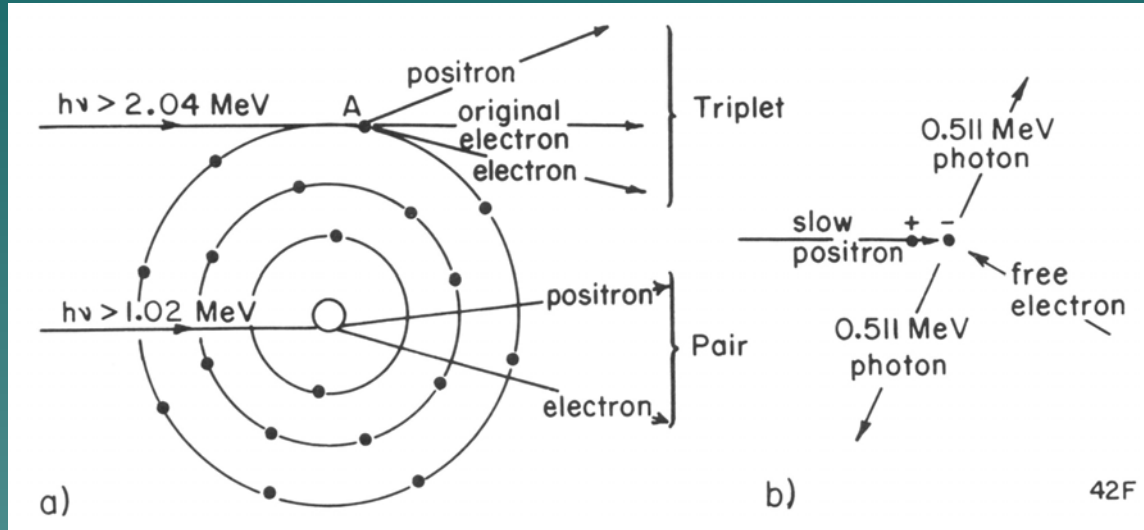
図6 コンプトン効果

[出典] 石川 友清 (編) : 放射線概論、通商産業研究社(1991年4月)、p101

- ◆ 唯一、カインマと微分断面積(Klein-仁科の式)が正確に解けている。
- ◆ 「非干渉性散乱」とも言う。Klein-仁科の式は干渉性散乱も包含する($h\nu \ll m_0c^2$)。

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

電子対生成

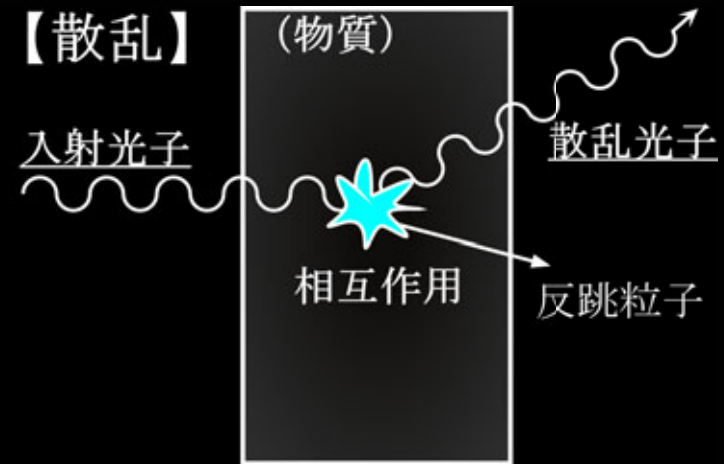


- ◆ 断面積の一般式は存在しない
- ◆ $\sigma_{\pi} \propto Z^2$ (100MeV以上でさける)
- ◆ 三対子生成はほぼ1/2
- ◆ しきいエネルギーは、 $2 \cdot m_0 c^2 = 1.022 \text{ MeV}$ 、
(三対子生成は $4 \cdot m_0 c^2 = 2.044 \text{ MeV}$)

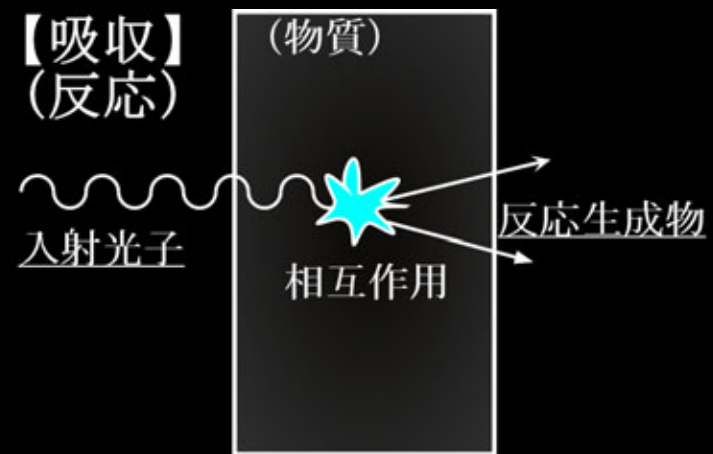
X線と物質との相互作用の概要

— 散乱と吸収(反応)

- 散乱: はじき飛ばされる



- 吸収(反応): なくなる



X線束の減弱

❖ 線減弱係数 μ [m^{-1}] (質量減弱係数 μ / ρ 、
電子 //、原子 //)

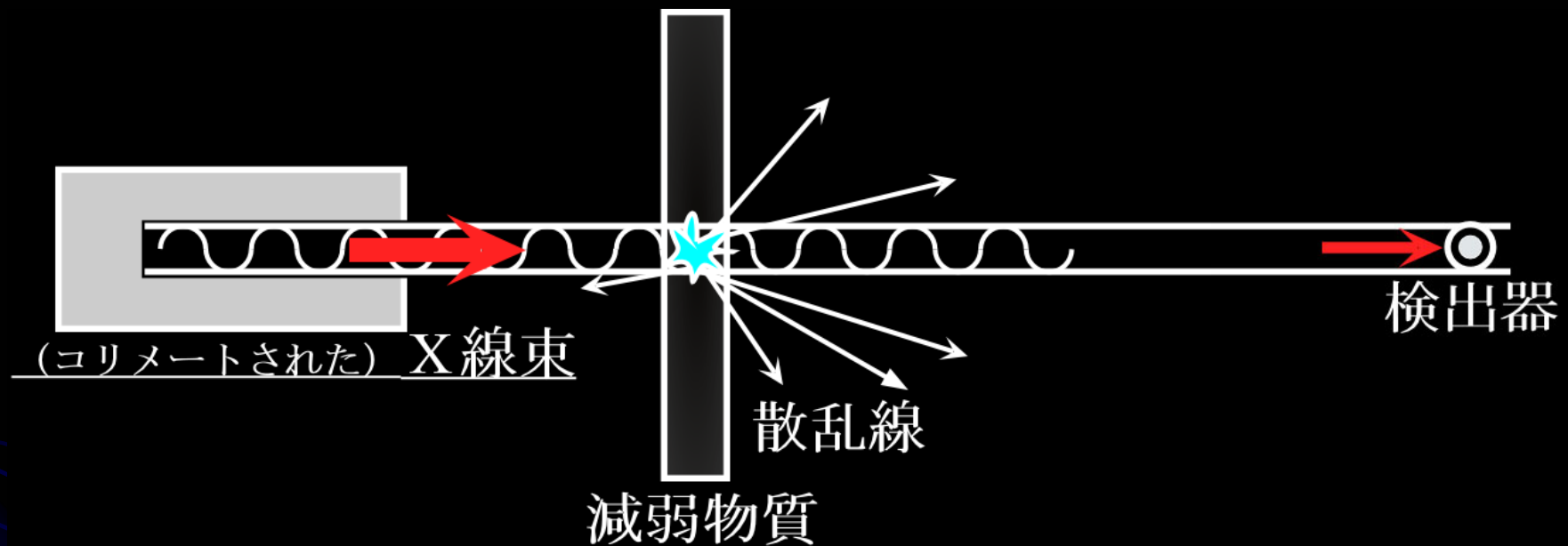
❖ $\mu / \rho \sim \sigma$ (反応・散乱) 断面積

❖
$$\frac{\Delta N}{\Delta(\rho x)} = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot N \Rightarrow N = N_0 \cdot e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot (\rho x)}$$

❖ $\mu = \tau$ (光電効果) + σ (コンプトン散乱) + κ (電子対生成)

X線の性質(1)

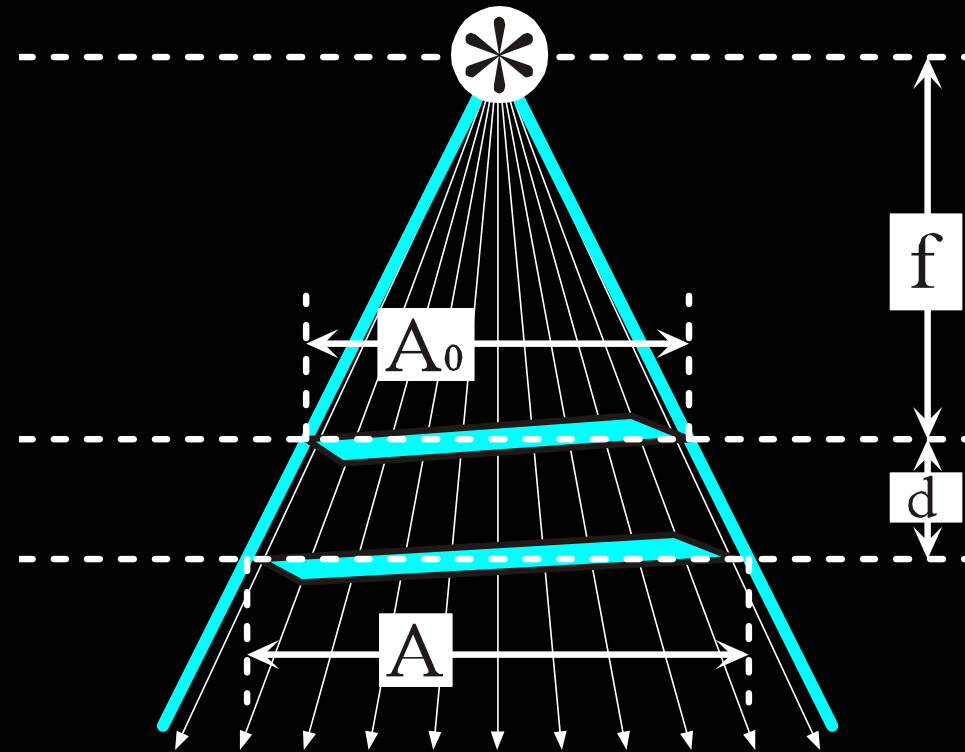
X線束の減弱



- $N=N_0e^{-\mu x}$ 、 $I=I_0e^{-\mu x}$ (N_0 : 入射光子数、 I_0 : 入射X線強度、 μ : 減弱係数)

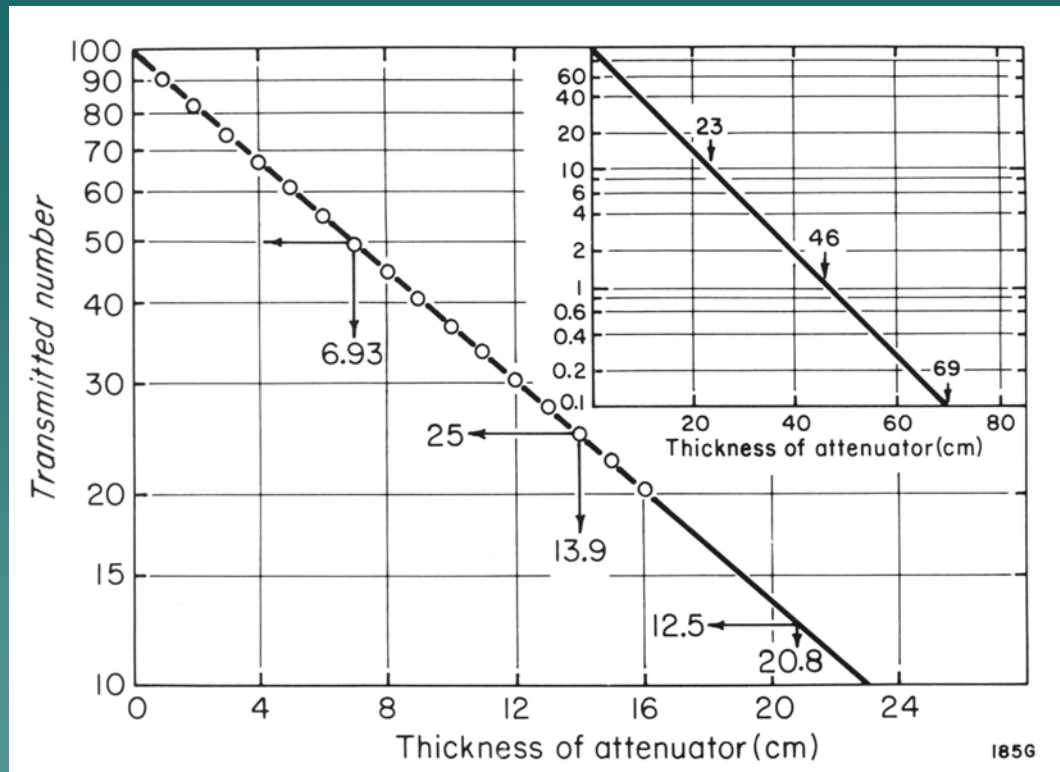
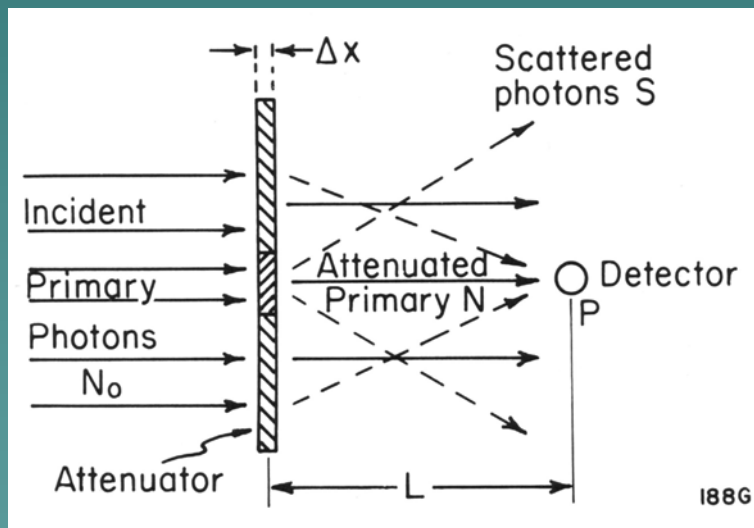
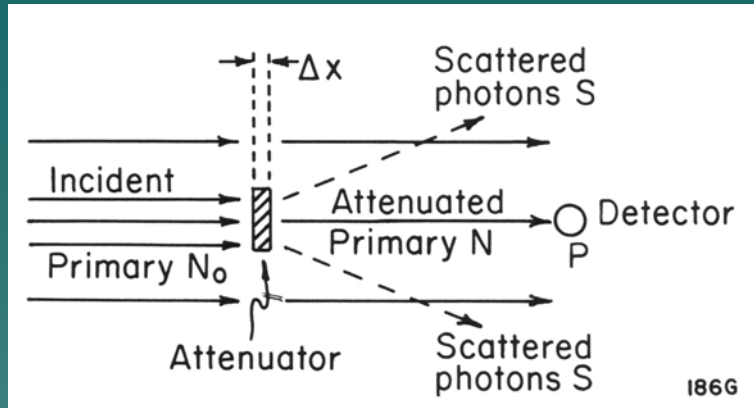
X線の性質(2)

逆自乗側



- $N=N_0$ 、 $I=I_0 \left\{ \frac{f}{f+d} \right\}^2$ (N_0 : 入射光子数、 I_0 : 入射X線強度)

散乱線の混入



- ◆ 指数則
- ◆ ビルドアップ効果: 二次電子がある長さ走りながら電離を起こすので、ほぼ二次電子の飛程でピーク線量 ^{60}Co 、4、6、8、10、15、20、30 MVの最大深は、0.5、1、1.5、2、2.5、3、4、5 cm
- ◆ 電子平衡: 場に乱れがない。空洞への流入と流出の平衡。理想的にはエネルギースペクトルとフルエンスの不変であるが、現実的にはビルドアップ領域以降準電子平衡領域と扱う。

X線の性質(3)

エネルギー分布(半価層HVL)

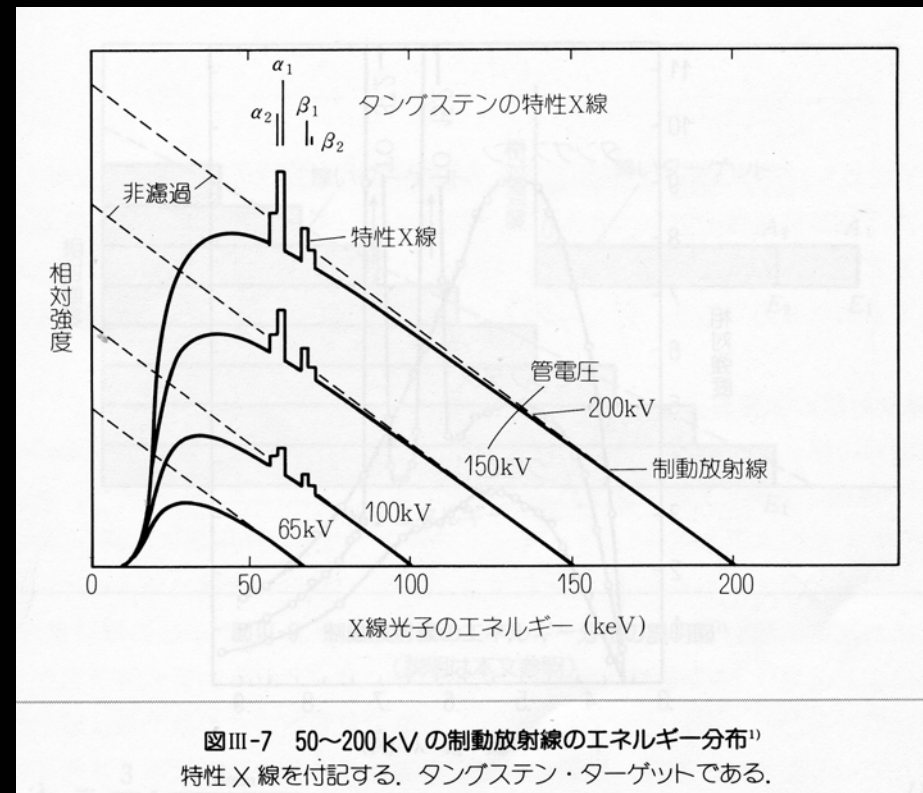
- 制動放射⇒三角形のエネルギー分布
- 半価層:X強度が半分になる厚さ
- (第1)半価層<第2半価層<...
- 第10半価層≒1/1000
- 半価層が等しい単色X線のエネルギーを実効エネルギー、実効管電圧、実効波長

< Duane-Huntの法則 >

$$\lambda_{\min} [\text{\AA}] = \frac{12.4}{V[\text{kV}]}$$

制動放射線の最短波長とX線管電圧の波高値の積は一定。

- 半価層の測定は細い線束やコリメータ等、散乱線が寄与しない対策が必要
- 半価層は線質の目安となる(簡便方法)
⇒正式には $TPR_{20,10}$ が線質指標



ここまでのまとめ

- X線の主な相互作用は吸収(反応)と散乱。
- いずれも、初期線束を変化(減少)させることで、局所への付与エネルギーが変わる。⇒線量分布
- 上記現象は、放射状の各ビーム毎に起こり、マクロな線束全体の挙動は逆自乗則。
- さらに、放射源のエネルギー分布より、以上の現象はエネルギー重畳される。
- 実際の治療では、物質の不均一性がきいてくる。

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

吸収線量 D の定義 詳細(【01】)

- 吸収線量 D : 平均付与エネルギー $d\bar{\varepsilon}$ を質量 dm で割ったもの;

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

- $\bar{\varepsilon}$: 付与エネルギー ε の期待値; $\bar{\varepsilon} = R_{in} - R_{out} + \Sigma Q$

※ある(微小)体積内について、ある(長)時間平均

- ε : 与えられた全ての基礎付与エネルギー ε_i の和; $\varepsilon = \sum_i \varepsilon_i$

※ある(微小)体積内について、あらゆる相互作用について

- ε_i : 一つの相互作用で与えられたエネルギー

$$\varepsilon_i = \varepsilon_{in} - \varepsilon_{out} + Q_i$$

吸収線量 D と照射線量 X の違い

- D (absorbed dose) : 体積内の物質が吸収した全てのエネルギー

- X (exposure) :
$$X = \frac{dQ}{dm}$$

dQ : 質量 dm の空気中で光子により放出された陰陽全ての電子が、空気中で完全に停止するまでの間に発生させた(±どちらか)1符号のイオン群の全電荷の絶対値

単位: $\left[\frac{C}{kg} \right]$; $1[R] \equiv 2.58 \times 10^{-4} [C/kg]$
※厳密に成立、むしろ単位変換の定義

放射過程(制動放射や蛍光X線)起源の光子による電離は含まず
“光子エネルギーが、数MeV以上または数keV以下の場合、照射線量の測定は、現在の技術では難しい”(【01】)

線量校正

- ❖ 治療線量(標的線量)の測定:
「ビーム軸上の任意の深さの深部線量をもとめ、標的容積の中心点での吸収線量を決めること。」
- ❖ (X線の場合)指頭型電離箱リファレンス線量計による絶対線量の評価
- ❖ 校正の目的:モニタ単位 **MU** 当たりの基準点吸収線量 **DMU** の維持管理をすること
- ❖ 測定方法(セットアップ方法)には、『SSD一定の場合』と『STD一定の場合』の2種類ある

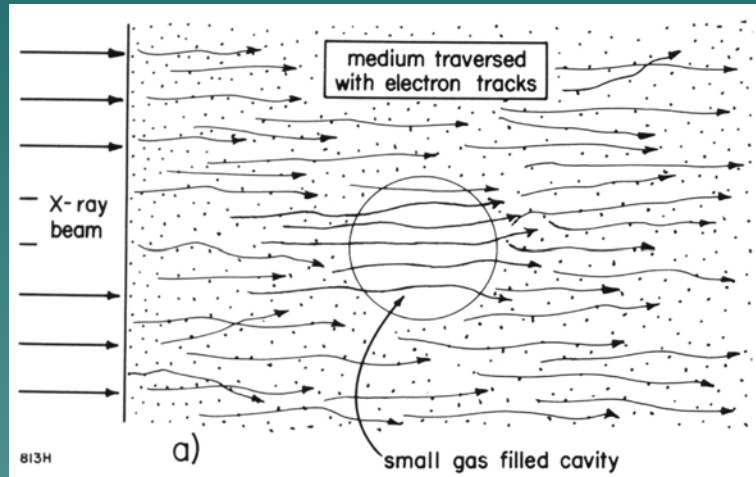
『校正』か『較正』か？

- 現状：“目盛りあわせ”の意味⇒「校正」が正しい
JIS Z 8103 (計測用語)、理化学辞典、物理学辞典
- 本来：“calibration”の意味の「コウセイ」は「較正」。「校正」も可だが当て字
広辞苑(第5版)、速記協会基準(使用する表外音訓「較(コウ)」)
- 「較」の読みとしては「カク」しか認めていない *常用漢字表*
- 「calibration」に対応する日本語⇒2語「目盛定め、校正」 *JIS Z 8103*
“新しく目盛を入れる：目盛定め、既にある目盛の補正を求める：校正”

<参考文献>

- 各種辞書・辞典(広辞苑、理化学辞典、物理学辞典)
- 常用漢字表(<http://www.bunka.go.jp/kokugo/frame.asp?tm=20031002121110>)
- 常用漢字と新聞協会との違い(<http://www.ne.jp/asahi/e-genko/net/column/hyouki6.html>)
- いろいろ(日記風)(<http://www.asahi-net.or.jp/~ez3k-msym/iroiro03a.htm#0418>)
目盛りあわせの意味で「校正」と書くのを「較正」にしたいという話を見て、ちょっと考える。「校正」と書くことは JIS Z 8103 (計測用語)で定められている。また常用漢字表では「較」の読みとしてカクしか認めていないので、JISとしてはこれを採用しにくいだろう。またコウは常用漢字表でもっとも同音字数の多い読みで、コウセイでも「校正」以外に「構成・公正・恒星・抗生・更正・厚生・更生・後世・後生・攻勢」など、ふつうのことばだけで 15くらいある。あまり同音異綴をふやしすぎるのは考えものではないか。
JIS Z 8103 では「calibration」に対応する語として「目盛定め・校正」の 2語があり、「新しく目盛を入れるときは目盛定めといい、既にある目盛の補正を求めるときは、校正という。」と書いてある。両方「目盛定め」にしてしまうのが一番単純な解決方法かもしれない。
- 正しい日本語(<http://deatur.hp.infoseek.co.jp/japanese.htm#ateji>)

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）、

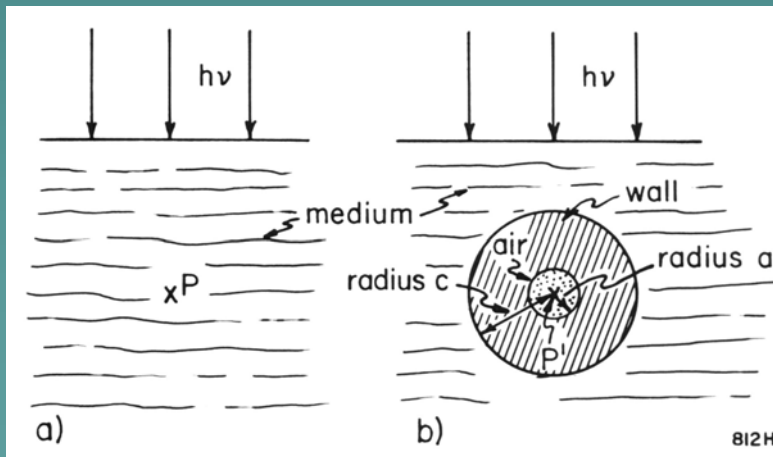
$$D_m = D_{gas} \times S_{m,gas}$$

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



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

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

- ◆ $W[\text{eV}/\text{イオン対}] \equiv W[\text{J}/\text{C}]$

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)

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_A 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](@89) ⇒ 101.33[kPa](@01)
- 理科年表: セルシウス温度の定義;

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

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

X線測定の設定アップ

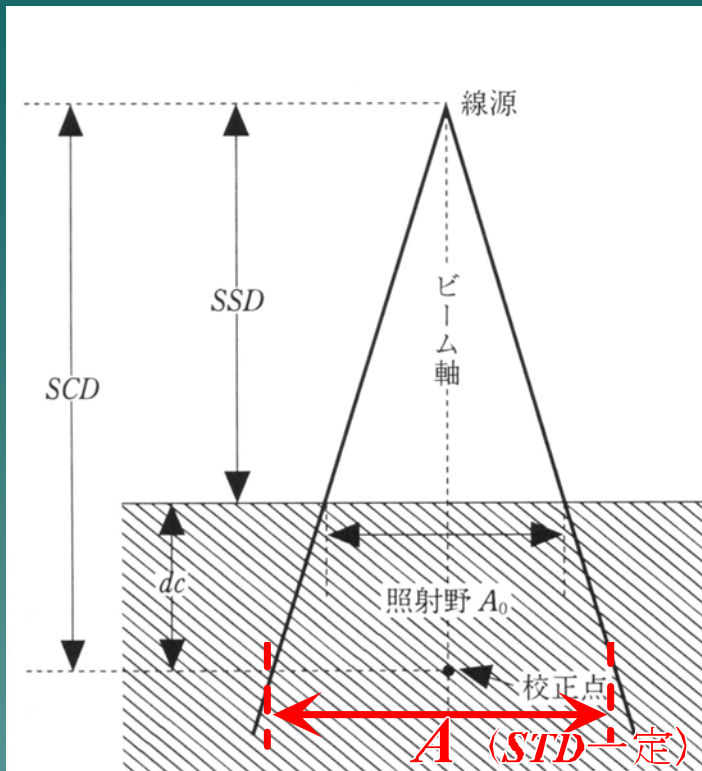


図 2.1 SSD を一定にした照射法の校正点吸収線量測定のための幾何学的配置 (d_c は校正深, 10cm)

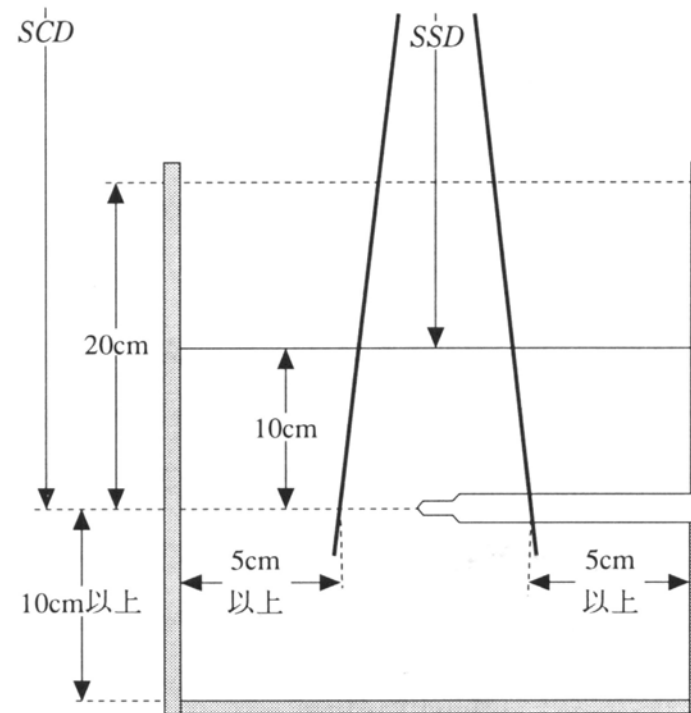


図 2.2 校正用水ファントム ($TPR_{20,10}$ 測定用と共用)
電離箱鞘部の材質は1mm以下のアクリル樹脂

- ◆ 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

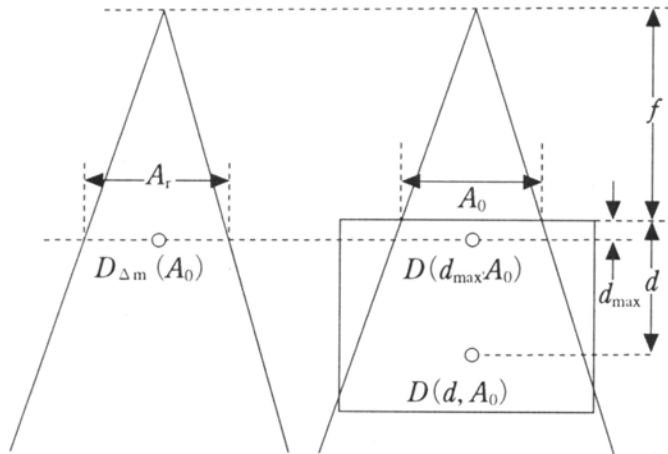


図 A 18.1 深部量百分率の説明図

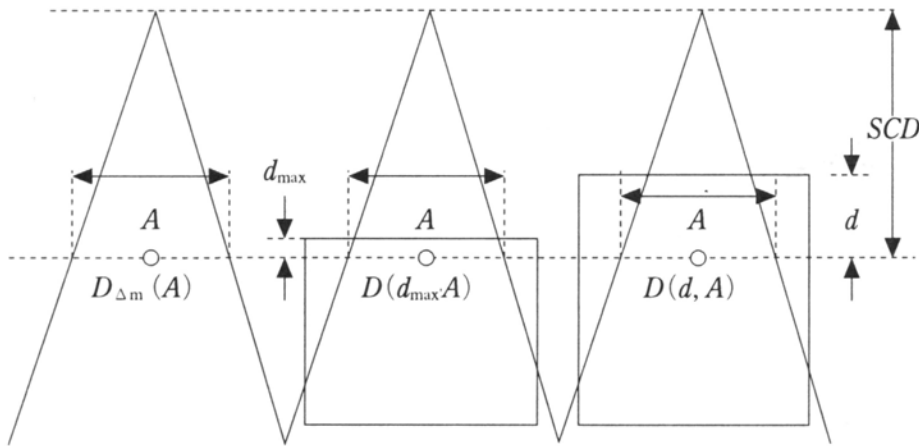


図 A 18.2 組織空中線量比および組織最大線量比の説明図

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

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。 $SF(d, A) = TAR(d, A) / TAR(d, 0)$

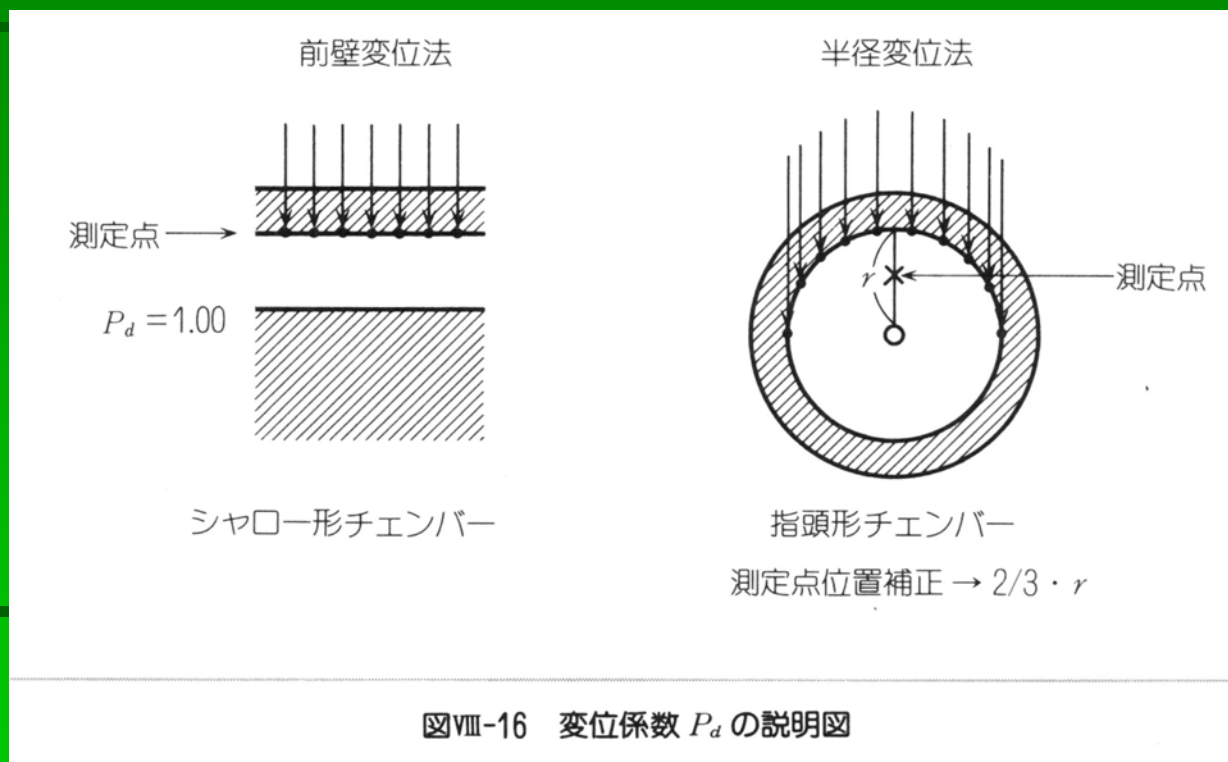
$$D(d, A_0) = D_r(A_0) \cdot OPF \cdot PDD_d / 100$$

参考文献

- 「THE PHYSICS OF RADIOLOGY」(第4版) HAROLD ELFORD JOHNS 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】
- ICRU REPORT 33「Radiation Quantities and Units」、ISBN 0-913394-27-0 【原典】
- 「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)」日本医学物理学会編、ISBN 4-86045-020-5、通商産業社 【(日本の)原典】
- 「放射線医学物理学」西臺武弘、ISBN 4-8306-4203-3、文光堂

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 $0.67r$ ($2/3 r$) であることを導け。



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

