歯学科2年生講義　放射線学総論　放射線物理　講義ノート

担当：西山秀昌

https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/radiation_physics.pdf

放射線とは？

放射線の定義（広義）

伝播する【　　】、あるいは飛翔する【　　】。

医療の分野における放射線（狭義）

透過する物質を**直接**あるいは**間接**に【　　】する能力を有する電磁波、粒子線。

放射線の分類

分類1（電磁波か粒子線か？による分類）

【　　】(electromagnetic wave)

（＝**電磁放射線**、electromagnetic radiation）

電波、赤外線、可視光線、紫外線、エックス線、γ線など

（※量子力学的には光子）

【　　】(particles)

（＝**粒子放射線**、corpuscular radiation）

荷電粒子線（charged particles）

電子線、α線、β線など

非荷電粒子線（uncharged particles）

中性子線、ニュートリノなど

分類2（電離するかどうか？による分類）--- 非常に重要！

●【　　】線(ionizing radiation)

・【　　】線（directly ionizing radiation）

荷電粒子線

重粒子線、α線、β線、電子線など

・【　　】線（indirectly ionizing radiation）

非荷電粒子線

中性子線など

電磁放射線（エネルギーの高いもの）

エックス線、γ線、消滅放射線など

●【　　】線(non-ionizing radiation)

電波、赤外線、可視光線、紫外線

※ほとんどの紫外線は励起作用があるが、

電離作用はない。

スライドハンドアウト

https://www5.dent.niigata-u.ac.jp/~nisiyama/radiation_physics_slide.pdf

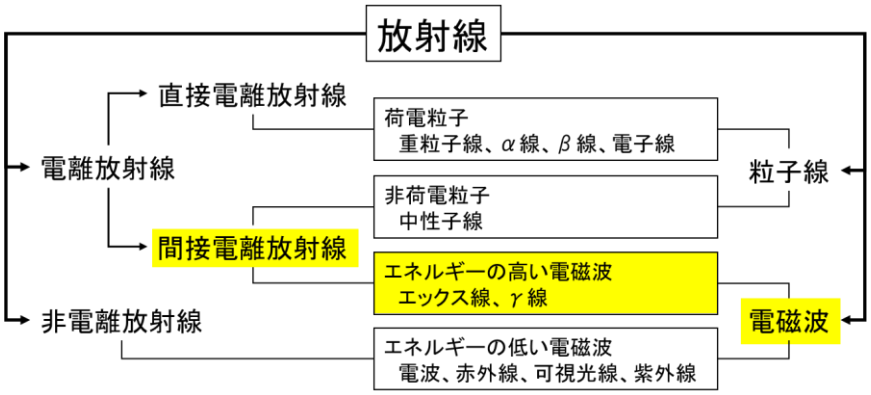
分類3（原子核内から発生するかどうかによる分類）

原子核内から発生

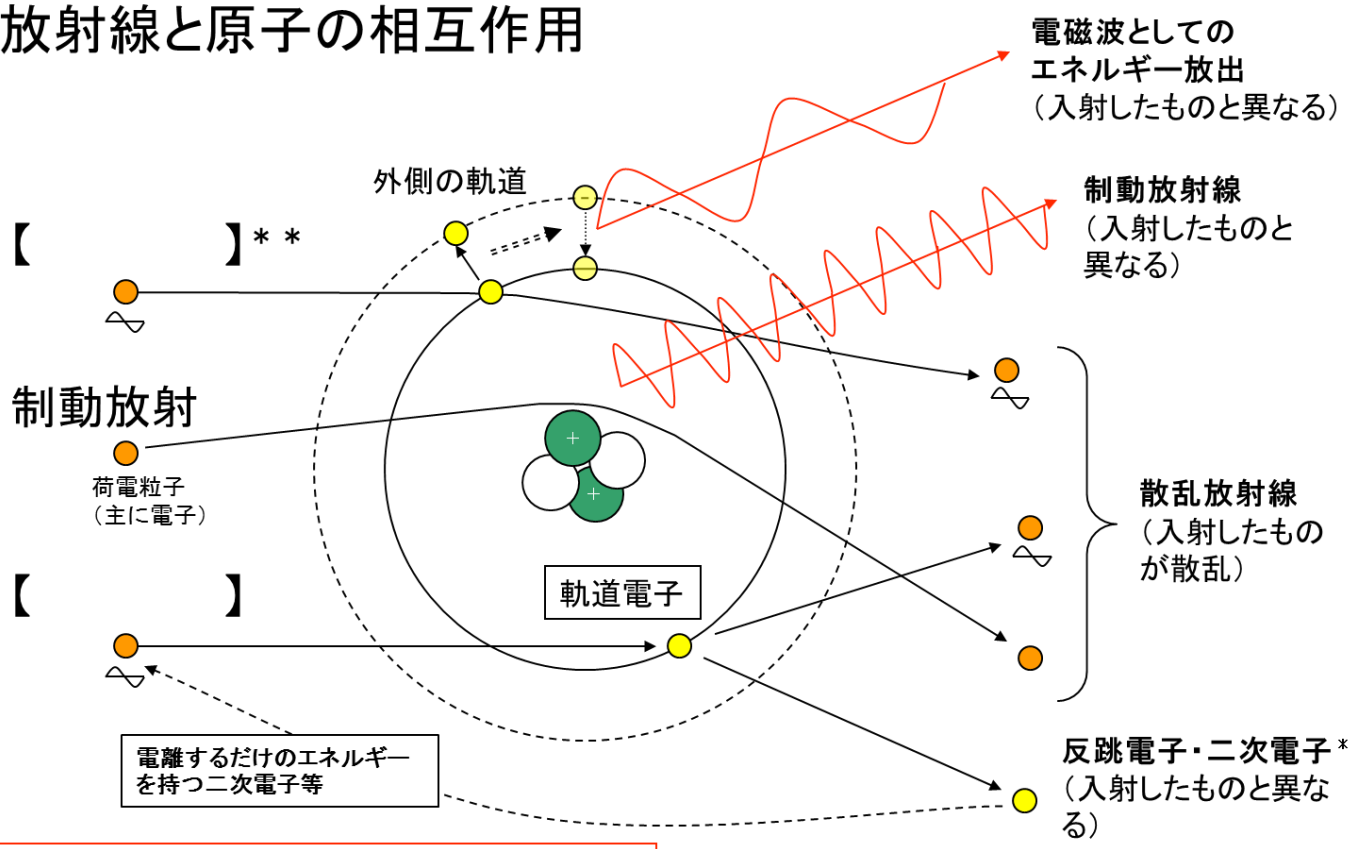
α線(ヘリウム原子核)、β線(電子)、γ線(電磁波)

原子核外から発生

電子線、エックス線など



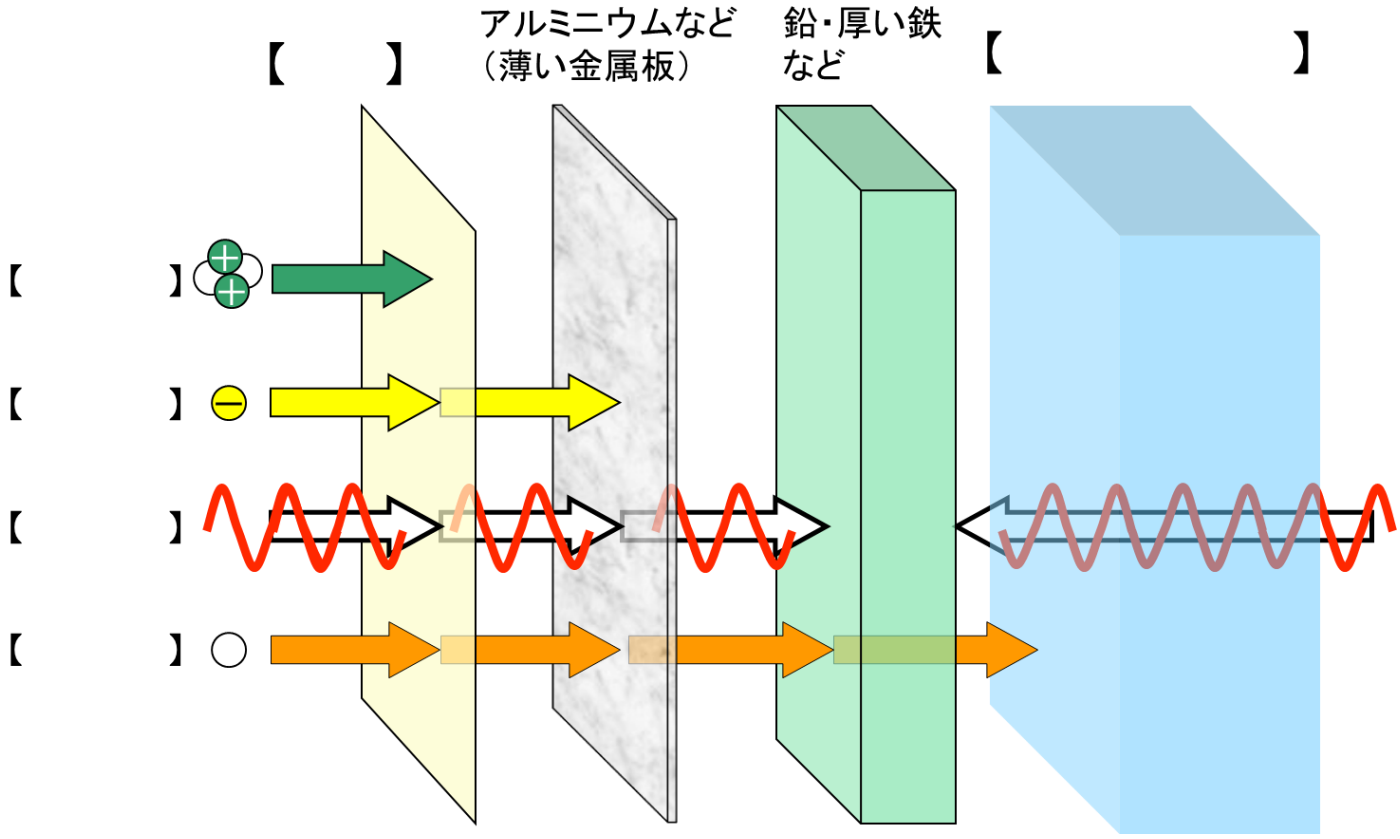
放射線と原子の相互作用



電離・励起が生じると化学的に活性が高い状態（フリーラジカルと呼ばれる状態）になる　→　化学反応を引き起こす。

＊荷電粒子で電離した場合はδ線と呼ぶ
間接電離放射線による電離はこの二次電子による電離の方が、 直接的な電離よりも電離能力が高い。

＊＊励起は紫外線でも生じる



エックス線（歴史学的にはX線）

歴史

発見者：Wilhelm Conrad Röntgen

発見日：1895年11月8日

発見した状態：陰極線研究中Crookes管から離れた位置にあるシアン化白金バリウム結晶を塗った紙スクリーンの蛍光に気づいたことによるとされる。

命名理由：「未知の」といういみでの「X」

定義および性質

【　　】の一種で、【　　】作用を有する。

波長：λは10^{-8}から10^{-14}mと短い。（光子としてのエネルギーが高い）

物理的性質は核内から放出されるγ線と同じ。

真空中を【　　】で伝播する。（3.0×10^{8}m/sec）

数式による物理学的な関係

$\nu\lambda=c$　　波長：λ（m）、振動数：ν（sec^{-1}）、光速度：c（3.0×10^{8}m /sec）

$E=h\nu$　　エネルギー：E(J)、プランク定数：h（6.63×10^{-34}J・sec）

エックス線の性質および作用（重要）（6から10は、1から5によって生じる）

1. 原子と相互作用し【　　・　　】する。
   生物学的影響、写真作用、蛍光作用の原因
2. 真空中を直進し、（直進性に関して）【　　・　　】の影響を受けない。
   電磁波であるが、【　　・　　】を通るときに曲がらない。
3. 波動的性質（反射、屈折、回折、偏向、干渉など）をもつ。
4. 物質を【　　】する。
   診断用エックス線において、画像形成に関与する。
5. 物質と相互作用し【　　】・【　　】（合わせて減弱）が生じる。
   【　　】（減弱）：診断用エックス線において、画像形成に関与する。
   【　　】：診断用エックス線において、画質を低下させる。
6. 【　　】作用、写真作用がある。
   【　　】作用：酸化・還元など
   写真作用（感光作用）：エックス線検査に応用
7. 【　　】作用がある
   【　　】物質（シアン化白金バリウム結晶など）などを発光させる。
   増感紙（【　　】物質を塗った紙）を発光させる。
8. 【　　】的作用がある。
   発癌など、また癌の治療にも使われる。
9. 【　　】作用がある。
   エネルギーを与えることで、温度が上昇する。
10. 【　　】作用がある。
   ガラス・宝石などがエックス線に長時間当たると【　　】する。

エックス線の発生

電子を高速で物質に衝突させると発生する。

必要な条件

1.【　　】、2.【　　】、3.【　　】、4.【　　】、

5. 集束電極、6. その他（容器、冷却装置）

エックス線発生強度

$E=kZIV^2t$　k：定数($=1.0\times10^{-9}$)、Z：ターゲットの原子番号、

I：【　　】、V：【　　】、t：照射時間

エックス線の発生効率

1%以下、99%以上は【　　】となる。

実焦点と実効焦点

陽極面は約19（16）度ほど傾斜

実効焦点の小さい方が半影が小さく、解像度が高い

ターゲットの材質

タングステン($_{74}W$)

融点が高く、高原子番号→エックス線発生効率が高い

【　　】効果：**ターゲット内でのエックス線の通過距離による減衰の差**

陰極側と比較し陽極側での減衰が強い。

エックス線管の種類

【　　】エックス線管（口内法、パノラマ、CBCT等）

【　　】エックス線管（一般、セファロ、CT撮影装置等）

フィラメント加熱方式

先点火方式　　安定・正確な照射

同時点火方式　　（旧来の）歯科用装置

整流方式

自己整流方式（歯科用エックス線装置）、半波整流、全波整流

濾過（フィルタ）

固有濾過：エックス線管のガラス、絶縁油など

付加濾過：アルミなどの金属板

【　　】：固有濾過（1mmAl程度）＋付加濾過

管電圧70kV以下で【　　】1.5mmAl以上（医療法施行規則）

絞り（コリメータ）

照射野を必要最小限の大きさに限定する円筒形または漏斗状の金属製絞り

更なる被曝低減のため、【　　】絞りを用いることもある。

不必要な被曝低減、散乱線減少による画質向上

照射野

皮膚表面で直径【　　】以内（医療法施行規則）

照射筒（指示用コーン）

照射方向を明確に指示

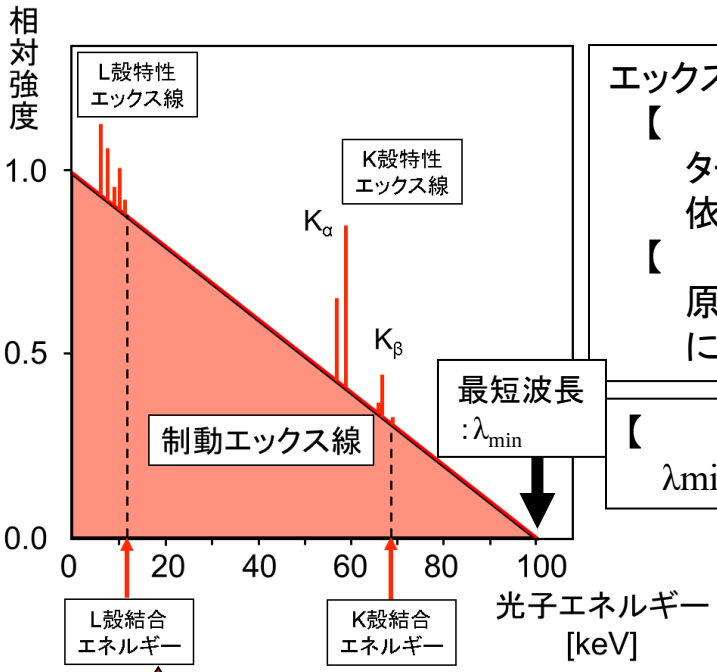
焦点－被写体間距離(15cm以上)を一定に保つ

開放端型コーン、（砲弾型コーン：今は用いられない）

タイマーは【　　】タイプが用いられる。

発生直後の光子の古典的な理論式※に基づくエネルギー分布と最終的なフィルター通過後のエネルギー分布

※Kramersらの式（1959）

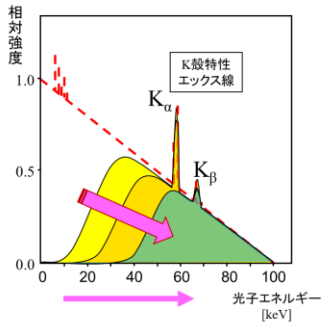


エックス線のスペクトル

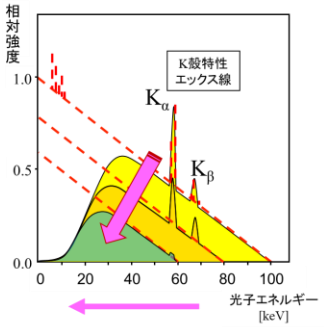
【　　】エックス線
ターゲットの軌道電子の位置エネルギーに依存するエックス線

【　　】エックス線
原子核との相互作用で失う運動エネルギーに依存するエックス線

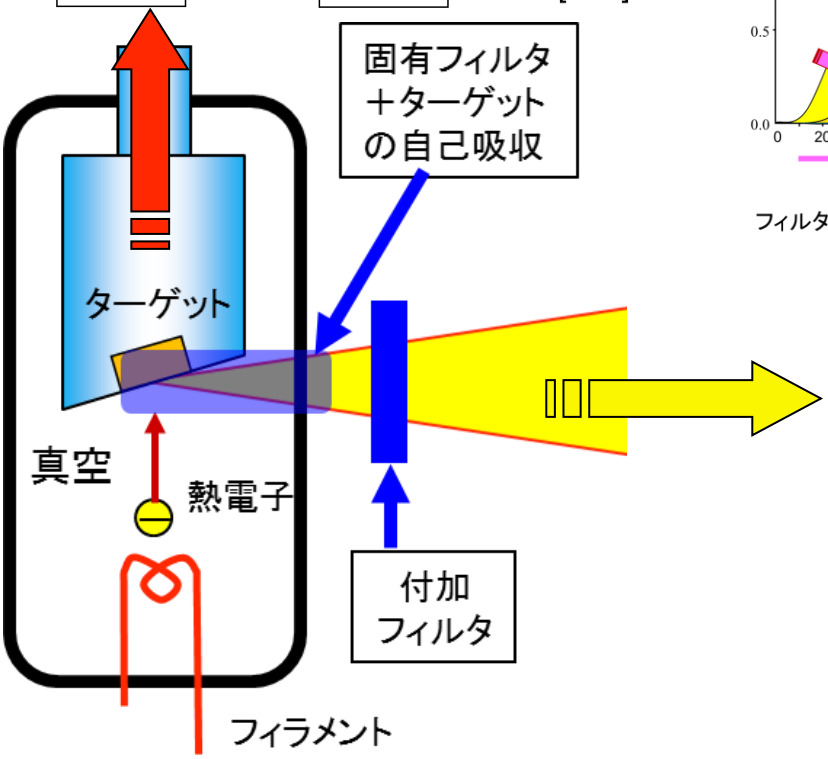
【　　】の法則
λmin × Vmax=12.4　（λmin：Å、Vmax：kV）

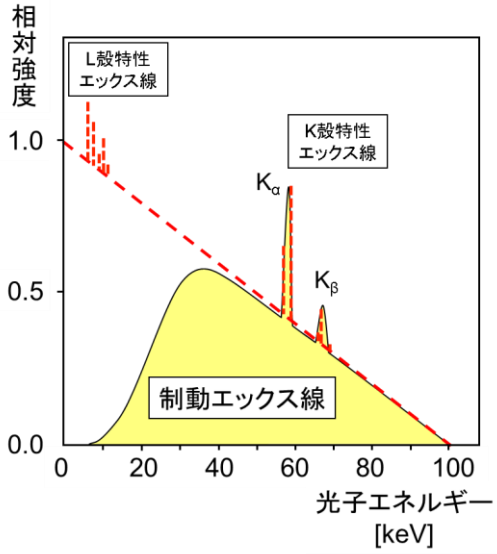


フィルタ（濾過）を厚くした場合



管電圧を低くした場合





原子番号	元素		殻の結合エネルギー[keV]			
	名前	記号	K	L_I	L_{II}	L_{III}
1	水素	H	0.014			
11	ナトリウム	Na	1.080	0.055	0.034	0.034
20	カルシウム	Ca	4.038	0.399	0.352	0.349
29	銅	Cu	8.980	1.100	0.953	0.933
53	ヨード	I	33.164	5.190	4.856	4.559
74	タングステン	W	69.508	12.090	11.535	10.198
79	金	Au	80.713	14.353	13.733	11.919
82	鉛	Pb	88.001	15.870	15.207	13.044
92	ウラン	U	115.591	21.753	20.943	17.163

特性エックス線
タングステンでのK殻の結合エネルギーは69.5keVのため、**管電圧が60kVでは、K_α とK_βの特性エックス線は含まれない**※。管電圧が70kV以上では、K_α とK_βの両方の特性エックス線を含んでいる。

※ナトリウムランプの黄色は3p（M殻）から3s（M殻）への遷移で生じる

参考資料：西臺武弘：「放射線医学物理学」、文光堂(1991/3)

物質との相互作用

・トムソン散乱、レイリー散乱（干渉性散乱、古典散乱）
　診断用の低エネルギー部分で発生しうる。（15～30keV）

・【　　】効果
　診断用エックス線。硬組織で発生。光電子放出。
　光が吸収され、電子が飛び出す現象
　入射エックス線が電子に全エネルギーを渡した状態
　特性エックス線、オージェ電子（特性エックス線を吸収し放出される電子）
　吸収端：エックス線のエネルギーを上げていくとき、電子の束縛エネルギーに等しい所で、突然吸収率が増加する現象。

・【　　】効果（非干渉性散乱）
　診断用エックス線。軟組織で発生。エネルギーの吸収を伴う散乱。

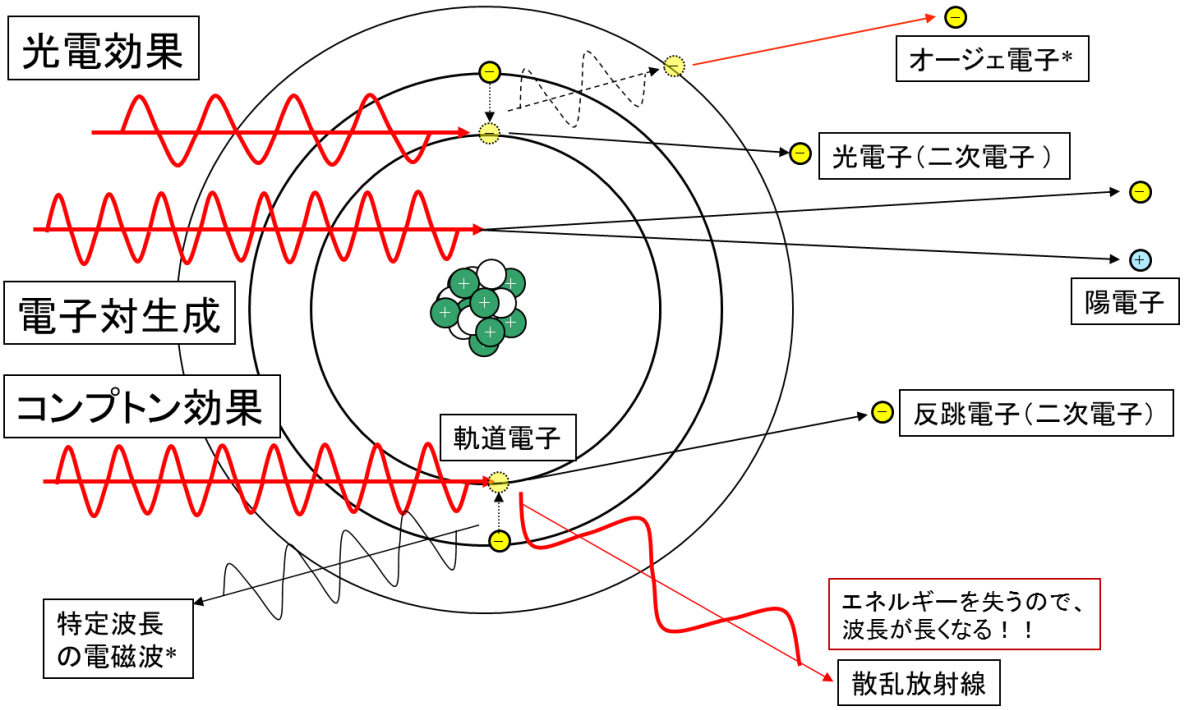
・【　　】生成
　治療用など高エネルギーエックス線。
　1.02MeV以上のエネルギーで発生。
　陽電子は発生後しばらくして、近くにある電子と対消滅を起こし511keVの2本の消滅放射線を放出する。

・その他、高エネルギーの光子にて光核反応、三対子生成等が生じる。

==========

【　　】線
　主にコンプトン効果（**コンプトン散乱**）によって発生する。
　管電圧が高い程、多く発生する。
　診断用エックス線の領域で、写真（フィルム）やIPなどの受光系全体の濃度上昇をもたらす。その結果、フィルムコントラストを低下させる。

エックス線と原子の相互作用



*オージェ効果：弾き飛ばされた内殻の軌道電子の空孔へ外郭電子が遷移するときに「特定波長の電磁波」が放出されず、このエネルギーの全てが他の軌道電子に付与され、結果として該当電子が飛び出す現象。この時に飛び出した電子を「オージェ電子」と呼ぶ。（内殻の電子を電離する、あらゆる現象にて生じうる）

エックス線束の減弱（理想的な点光源の場合）

距離による減弱

【　　】の法則

物質との相互作用（吸収・散乱）による減弱

I_0：入射エックス線強度、I：透過エックス線強度

$I=I_0e^{-\mu d}$、$\mu \fallingdotseq kZ^3\lambda^3\rho$　---　光電効果主体の場合

μ：線減弱係数、Z：原子番号、λ：波長、ρ：密度

μ/ρ：質量減弱係数

減弱が大きくなるのは、物質が【　　】、原子番号が【　　】、密度が【　　】、波長が【　　】場合

ex.サッカーでシュートを放ち、ゴールできる可能性での喩え

ゴールまでの距離：物質の厚さ

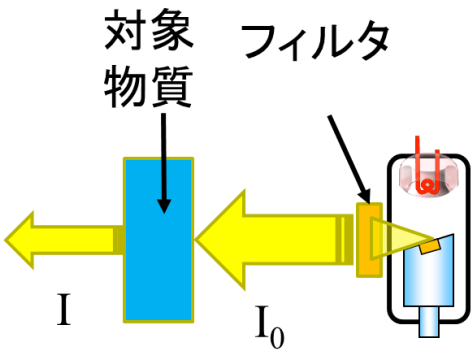
相手選手の守備範囲：原子番号（＝電子密度）

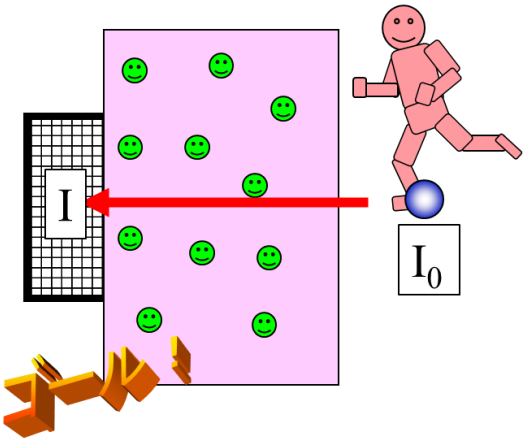
ゴールまでの相手選手の数：密度

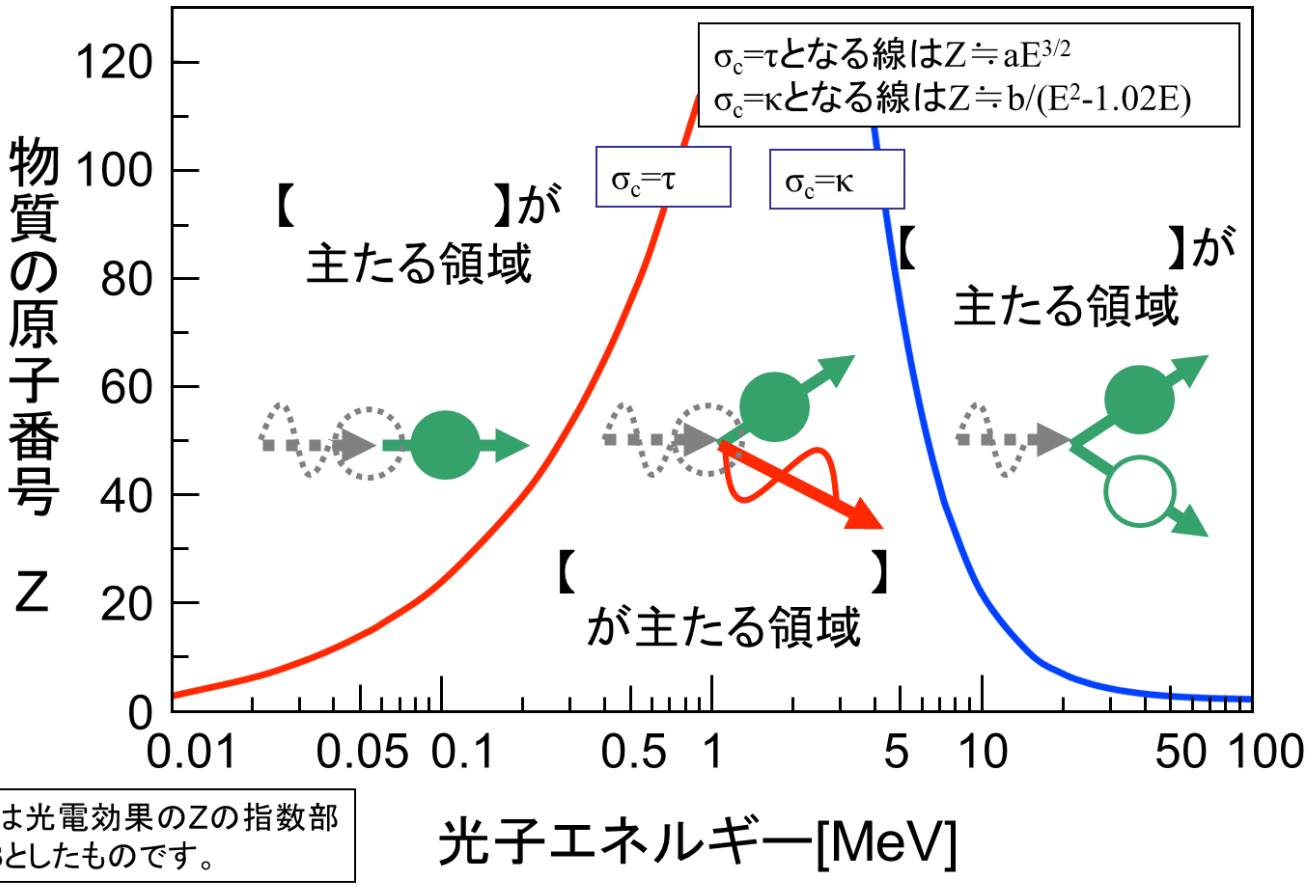
蹴る強さ：管電圧、光子エネルギー（＝波長の逆数に比例）

物質との相互作用による減弱

- シュートしたときゴールする可能性
  - ゴールまでの距離（厚さに相当）
  - 相手選手の守備範囲（原子番号に相当）
  - 相手選手の数（密度に相当）
  - ボールを蹴る強さ（光子エネルギー：波長の逆数に相当）



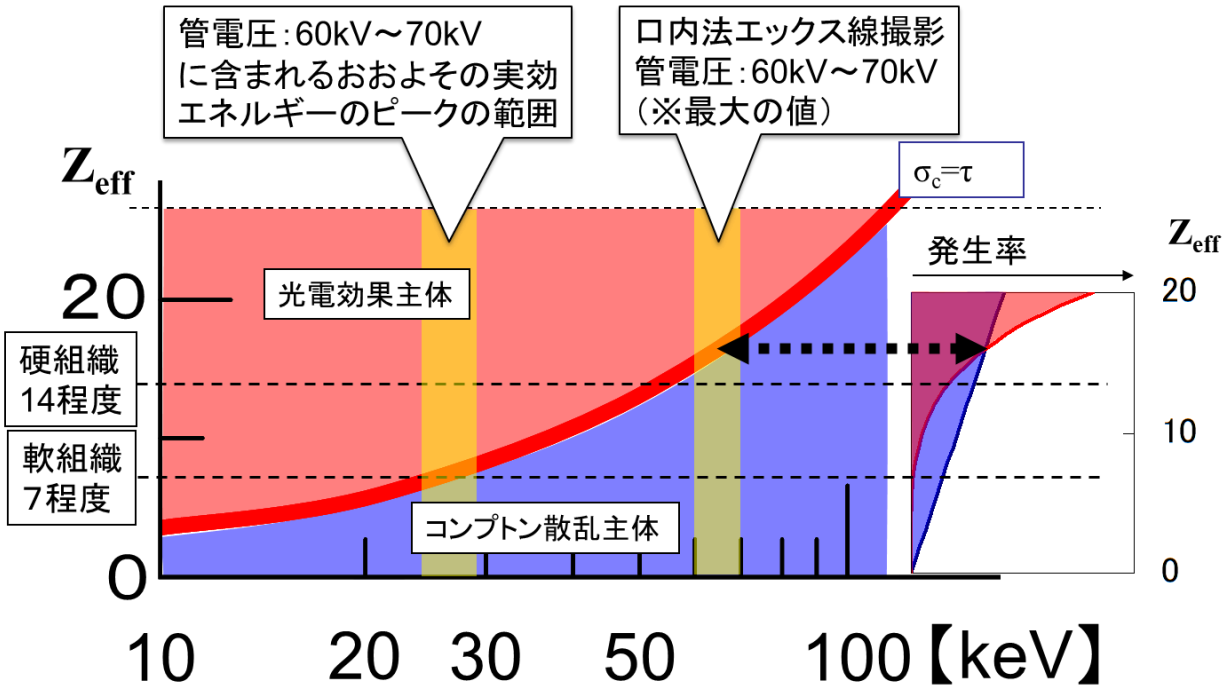




図は光電効果のZの指数部を3としたものです。

Evans, 1955 (Attix, F.H. and Roesch, W.C., eds.:Radiation Dosimetry. Vol. I : Fundamentals. Academic Press Inc., New York, 1968.)

※上記図は左記を引用している図書(「放射線基礎医学」、尾内能夫・坂本澄彦、日本出版サービス等)の図をトレースするように、図中の理論式を少し変えてエクセルシートで計算しグラフ化したものです。
使用した式は$\sigma_c=\tau$: $Z=125*E^{3/2}-3$、$\sigma_c=\kappa$: $Z=1900/(E^2-1.02E+6)+2$です。



一定の光子エネルギーでは、質量減弱係数としてのコンプトン効果の程度は一定であるが、光電効果は実効原子番号(Z_{eff})の3～4乗に比例して大きくなる。したがってZ_{eff}が7程度の軟組織に対し、14程度の硬組織では、コンプトン効果に対する光電効果の比率は約8～16倍になる。

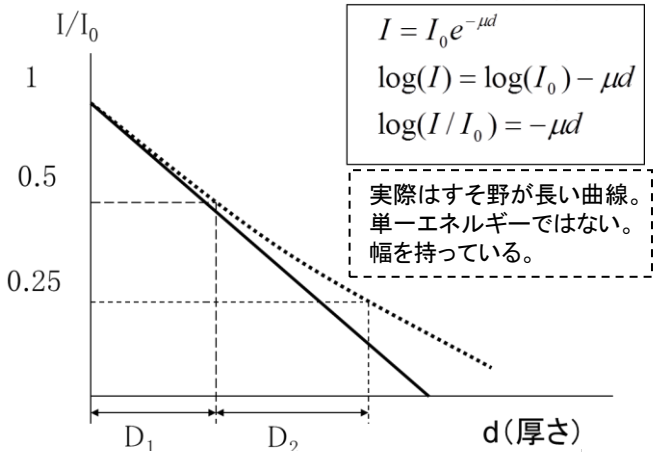
コントラスト
被写体コントラスト
エックス線の透過・吸収によって決まる。
cf. 写真コントラスト
受光系の応答関数で決まる。

コントラスト（contrast）
明暗の差異、濃度差（相対的）

強い・大きい　　弱い・小さい

【　　】層
第1【　　】層（D_1）：ナロービーム条件で、厚さD1の吸収版によって線量の値が半分になるときの厚さ。
第2【　　】層（D_2）：吸収版にて線量が元の値の1/4となるとき、D_1からの厚さの増分。
均等度：$H_c=D_1/D_2$（通常、$H_c<1$）
（不均等度：D_2/D_1）
※物質との相互作用による減弱
$I=I_0e^{-\mu d}$、μ：線減弱係数

片対数グラフ



影響を与える因子	管電圧	低い	高い
	濾過の厚さ	薄い	厚い

線質（広義） エックス線のエネルギーに関する性質			
	エックス線の平均エネルギー※	【　　】	【　　】
	線質（狭義）	【　　】	【　　】
	透過率	【　　】	【　　】
	半価層	【　　】	【　　】
	エックス線コントラスト	【　　】	【　　】

※実効エネルギーに等しい。
全体像はエネルギースペクトルにて表現される。

強度（発生時）：光子エネルギー×光子数

$E=kZIV^2t$
k：定数、Z：ターゲットの原子番号
I：管電流、V：管電圧、t：照射時間

定義です
質×量 ⇒ 量
参考）V × A = W

影響を与える因子	管電圧	低い	高い
	管電流	少ない	多い
	照射時間	短い	長い
エックス線強度		弱い	強い

管電圧の自乗に注意！

発生効率：$\eta \fallingdotseq E/(IVt)=kZV$
※通常は1%以下（$k=1.0\times10^{-9}$）
IV：管電流×管電圧
＝（単位時間当たりの）エックス線管中の電子線の全エネルギー

放射線の単位

線量については放射線防護でも説明があります（特に等価線量・実効線量）

【　　】線量 exposure, X　単位：[C/kg]、X=dQ/dm

dQ：質量dmの空気中で光子（エックス線、γ線）によって放出された全ての電子が空気中で完全に止まったときに、空気中で発生した一方の符号（プラスないしマイナス）のイオンの全電荷の総和の絶対値。

カーマ Kerma, K 単位：Gy（グレイ）、[J/kg]、K=dE/dm

間接電離放射線（中性子線、エックス線、γ線など）によって、質量dm中に遊離された全ての荷電電離粒子の初期運動エネルギーの和。

【　　】線量 absorbed dose, D　単位：Gy（グレイ）、[J/kg]、D=de/dm

de：電離放射線によって質量dmの物質に付与された平均エネルギー。

【　　】線量 equivalent dose, HT　単位：Sv（シーベルト）、[J/kg]、$H_T=\Sigma w_R \cdot D_{T,R}$

$D_{T,R}$：組織・臓器Tについて平均化された、放射線Rに起因する吸収線量。

w_R：放射線加重係数、放射線Rの種類とエネルギーによって決められる値。

H_Tは、組織に照射された全てのRにおいての$w_R \cdot D_{T,R}$の総和。

【　　】線量 Effective Dose, E　単位：Sv（シーベルト）、[J/kg]、$E=\Sigma w_T \cdot H_T$

w_T：組織加重係数、全身に均等被曝されたと仮定した場合に生じる損害の総計に対するその組織・臓器の相対的割合。

光では	線量	単位	適応
明るさに相当	X 【　　】線量 exposure	ー　[C/kg] 旧：R $1R=2.58\times10^{-4}C/kg$	X, γ線 空気
暖かさに相当	D 【　　】線量 absorbed dose	Gy　[J/kg] 旧：rad	すべての放射線 すべての物質
危険度 （日焼けに相当）	H_T 【　　】線量 equivalent dose $H_T=\Sigma w_R \cdot D_{T \cdot R}$ w_R：放射線加重係数※	Sv　[J/kg] 旧：rem	すべての放射線 組織（すべての生物） 組織反応（確定的影響）の指標 エックス線では$D=H_T$
	E 【　　】線量 effective dose $E=\Sigma w_T \cdot H_T$ w_T：組織加重係数	Sv　[J/kg] 旧：rem	すべての放射線 組織（すべての生物） 確率的影響の指標 ガンなどの発生する確率
	A 放射能 activity	Bq　[回/秒] 旧：Ci	放射性同位元素

1Sv=100rem、1Gy=100rad

※エックス線では$W_R=1$

放射能とは

従来：放射性同位元素が電離放射線（α線、β線、γ線など）をだす能力（性質）

現在では、下記の「放射能の強さ」を単に「放射能」と呼ぶ場合が多い。

単位時間(dt)に壊変する原子核数(dN)：$-dN/dt = \lambda N = A$

単位：Bq（ベクレル）、[1/sec]

シンチグラフィーや放射線治療での単位として用いられる。

外部被曝と内部被曝の違いについて、留意すること。

放射性同位元素(RI)の壊変

アルファ壊変（α） --- アルファ粒子を放出する

ベータ壊変（β）

ベータ・マイナス壊変（β－） --- 電子を放出する

ベータ・プラス壊変（β＋） --- 陽電子を放出する

電子捕獲（EC: Electron Capture） --- 電子を取り込む

核異性体転移(IT: Isomeric Transition)

$N=N_0e^{-\lambda t}$　　$A=A_0e^{-\lambda t}$

N:t時間後の放射性核種の数

N_0：初期値（t=0）

λ：壊変定数

T:半減期、$N=1/2N_0$になる時間（T）

$A = \lambda N$: 放射能の強さ

$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$（$t = 0$で$N = N_0$）

微分方程式を解くと

$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

半減期をTとした場合

$N_0/2 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T}$

両辺をN_0で割って、$1/T$乗すると

$e^{-\lambda} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{1}{T}}$

（$\Rightarrow \lambda T = \ln(2) = 0.693 \ldots$）

放射能の強さの時間変化は

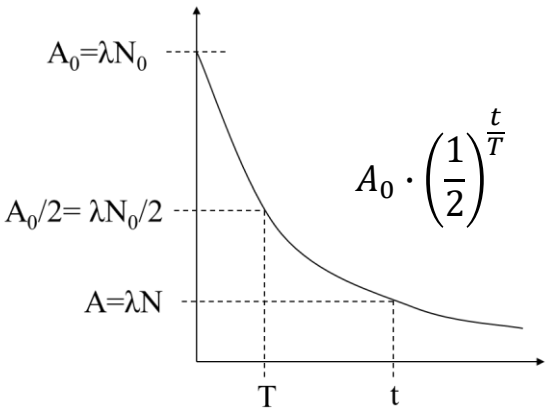
$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}}$

N: t 時間後の放射性核種の数

N_0 : t = 0 での放射性核種の数

λ: 壊変定数

T: 半減期



核種	崩壊	半減期
^{3}H	β^-	12.33 年
^{14}C	β^-	5730 年
^{22}Na	β^+	2.603 年
^{40}K	β^+、β^-	12.7 億年
^{60}Co	β^-	5.26 年
^{67}Ga	γ（電子捕獲壊変）	3.3 日
^{99m}Tc	γ（異性体転移）	6.02 時間
^{131}I	β^-	8.02 日
^{137}Cs	β^-	30.07 年
^{201}Tl	γ、X（電子捕獲壊変）	73 時間
^{222}Rn	α	3.82 日
^{226}Ra	α	1620 年
^{235}U	α	7.04 億年
^{238}U	α	44.7 億年

※核種によって、線種の違い以外に、線種のエネルギーも異なります。したがって、ベクレルから単純にエネルギーへの換算はできないので、注意してください。

物理学的半減期：T_p

生物学的半減期：T_b

代謝や排泄によって体内での放射能が半分になる時間。（同一の放射性核種であっても、化学的な状態等によって異なる）

有効（ないし実効）半減期：T_{eff}

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_p} + \frac{1}{T_b}$$

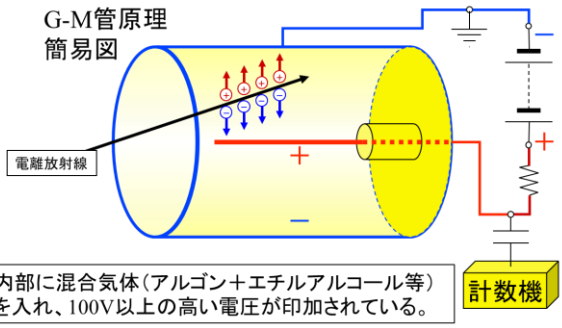
$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{T_p \cdot T_b}{T_p + T_b}$$

線量測定器（内部被曝は直接計測できない）
- 電離作用を利用
  - 気体の電離を利用
    - 電離箱式サーベイメータ
    - GM管式サーベイメータ
  - 固体の電離を利用
    - 半導体式ポケット線量計
- 電離・蛍光作用を利用
  - シンチレーション計数器
  - 熱蛍光線量計（TLD）
  - 蛍光ガラス線量計（ガラスバッチ）
  - 光刺激ルミネッセンス線量計
- 写真作用を利用

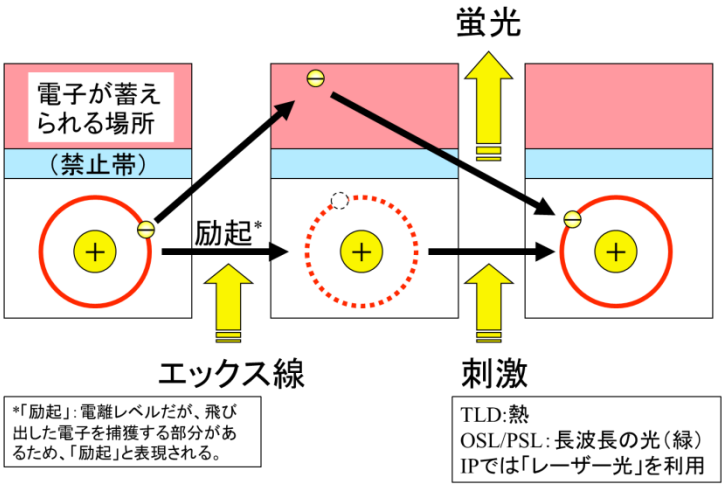
半導体検出器（Si, Ge）
検出器の種類によってα線、β線、γ線、エックス線の計数とエネルギー測定可能。

電離を利用した場合の測定機器と電圧

×低すぎると：イオンが再結合して計測できない
電圧低い　電離箱：エックス線の照射線量など
比例計数管
電圧高い　GM管：β線の計数など
×高すぎると：連続放電して計測できない



TLD、OSL、PSL原理の簡易図



用いる放射線の特性		計測器の名称	モニタリング対象	感度	エネルギー依存性	測定対象
電離作用	気体	電離箱式サーベイメータ（空気：1気圧～数10気圧程度）	環境	低い	小さい	エックス線、γ線エネルギー測定
		GM管式サーベイメータ（気体：:Ar＋エチルアルコール等）		高い	高い	エックス線、γ線（窓を開けることでβ線）
	固体	半導体式ポケット線量計	個人	α、β、γ、エックス線エネルギー測定、近年高性能化へ		
蛍光作用（励起作用の結果）		シンチレーション計数器	環境	高い	高い	エックス線、γ線
		蛍光ガラス線量計（ガラスバッチ）（RPL）	個人	個人モニタリング用として、広く用いられている。		
		光刺激ルミネッセンス線量計（OSL, PSL）				
		熱蛍光染料系（TLD）		小規模事業所、独自の管理		
写真作用（電離作用の結果）		フィルムバッチ	個人	近年ほとんど使用されない		

RPL　Radio Photo Luminescence
OSL　Optically Stimulated Luminescence
PSL　Photo Stimulated Luminescence　--- 輝尽性蛍光　→　IP（イメージングプレート）でも利用
TLD　Thermo Luminescence Dosimeter

年	人物	事項
1895	レントゲン	X線の発見
1896	ベクレル	自然放射性物質の発見（ウランの感光作用）
1897	J.J. トムソン	電子の発見
1898	マリー＆ピエール・キュリー	ポロニウム、ラジウム発見
1899	ラザフォード	α線、β線の発見
1900	ヴィラード	γ線の発見
	プランク	黒体輻射の量子化仮説
1904	ローレンツ	ローレンツ変換
1905	アインシュタイン	光量子仮説、ブラウン運動の理論、特殊相対性理論
1908	ガイガー	ガイガー計数管の発明
1909 ～ 1911	ラザフォード、ガイガー	ラザフォード散乱の実験→有核原子模型提示
1905 ～ 1913	ソディー	同位体の研究
1911	ヘイケ・カメルリング・オネス	超伝導現象の発見
1913	ボーア	水素原子のバルマー系列を説明
	クーリッジ	クーリッジ管考案（現在のエックス線管球の原型）
1916	アインシュタイン	一般相対性理論
1918	ネーター	ネーターの定理
1917 ～ 1919	ラザフォード	陽子の発見
1918 ～ 1923	コンプトン	コンプトン効果の発見
1924	パウリ	第4の量子数（スピン）の存在と提案
1927	ハイゼンベルグ	不確定性原理
1927	スコベルツィン	宇宙線の発見
1932	コッククロフト、ウォルトン	加速器での初の核反応
	チャドウィック	中性子の発見
1935	湯川秀樹	中間子論の発表
	オット・ハーン、ストラースマン	ウラン核分裂の報告
	ベーテ、クリッチフィールド	核融合反応を報告
1937	セグレ	テクネチウム・最初の人工元素の製作
1970 年代初頭		CT,MRIの開発

教科書に載っている主たる国際機関

ICRU

International Commission on Radiation Units and Measurements

国際放射線単位測定委員会

ICRP

International Commission on Radiological Protection

国際放射線防護委員会

UNSCEAR

United Nations Scientific Committee on Effects of Atomic Radiations

原子放射線の影響に関する科学委員会

IARC

International Agency for Research on Cancer

国際がん研究機関

IAEA

International Atomic Energy Agency

国際原子力機関

参考図書/サイト （偏った見解に陥らないように、気を付けてください。背景事情を理解するには、さらに多くの論文・資料を読む必要があります。）

古本啓一、岡野友宏、小林　馨（編）:「歯科放射線」第6版、医歯薬出版、(2018/2/10)
西臺武弘:「放射線医学物理学」、文光堂(1991/3)
尾内能夫、坂本澄彦:「新訂・放射線基礎医学」、日本出版サービス、(2007/2)
稲邑 清也 、立入 弘(監修), 山下 一也, 速水 昭宗 (編集): 診療放射線技術〈上巻〉、南江堂; 改訂第11版 (2004/10)
代居　敬:「歯科放射線学サイドリーダー第2版」、学建書院
新津　守（監訳）:「はじめての放射線物理」、メディカル・サイエンス・インターナショナル、(2008/9)
青柳泰司:「近代科学の扉を開いた人・レントゲンとX線の発見」、恒星社厚生閣、(2000/9/1)
Jerrold T. Bushberg, J. Anthony Seibert, et.al. : “The Essential Physics of Medical Imaging (Second Ed.)”, LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS（2001/12/15）
鈴木陽典: 口内法X線撮影における最適X線エネルギーの研究. 歯科放射線. 26(3):199–217, 1986.

※放射線被曝・防護関係での参考書（複数の視点から問題を捉えることが必要です）

草間 朋子:「放射線防護マニュアル—安全な放射線診断・治療を求めて」、日本医事新報社; 第2版、(2004/07)
辻本 忠:「放射線防護の基礎」、日刊工業新聞社、第3版、(2001/03)
矢沢サイエンスオフィス編「正しく知る放射能」、学研、（2011/9/7）
ICRP　Publ. 60　国際放射線防護委員会の1990年勧告、日本アイソトープ協会、(1991年)
独立行政法人　放射線医学総合研究所　編著「改訂版　虎の巻　低線量放射線と健康影響　（先生、放射線を浴びても大丈夫？と聞かれたら）」、医療科学社、（2012.11.21）

※以下、ネット上で参考になるサイト （ネット上には多くの情報があふれかえっています。少なくとも、出典の明らかな資料を参照し、食い違う見解については、背景事情を吟味するようにしましょう。）　最終閲覧日: 2023.11.18 現在でアクセス可能なサイト

https://www.jrias.or.jp/books/cat/sub1-01/101-14.html
ICRP勧告 日本語版シリーズ　PDF無償公開のお知らせ
https://www.icrp.org/page.asp?id=506
ICRPサイトでは、多くの日本語資料（PDF等）が入手可能となっています。
https://www.rerf.or.jp/shared/basicg/basicg_j.pdf
「分かりやすい放射線と健康の科学」（公益財団法人放射線影響研究所）
https://www2.kek.jp/kids/
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構(KEK)　キッズサイエンティスト
https://atomica.jaea.go.jp/
原子力百科事典（ATOMICA）（財）高度情報科学技術研究機構（RIST）
https://www.mext.go.jp/b_menu/shuppan/sonota/attach/1313004.htm
文部科学省　放射線等に関する副読本掲載データ
https://eman-physics.net/
EMANの物理学　←　特殊相対性理論や、電磁気関係が分かりやすいです。
http://www.jira-net.or.jp/vm/top-page.html
社団法人　日本画像医療システム工業会（JIRA）医用画像電子博物館
http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/
東京大学教養学部:「放射線を科学的に理解する」
http://radiation.shotada.com/
放射線について考えよう。（高エネルギー加速器研究機構・多田 将）