

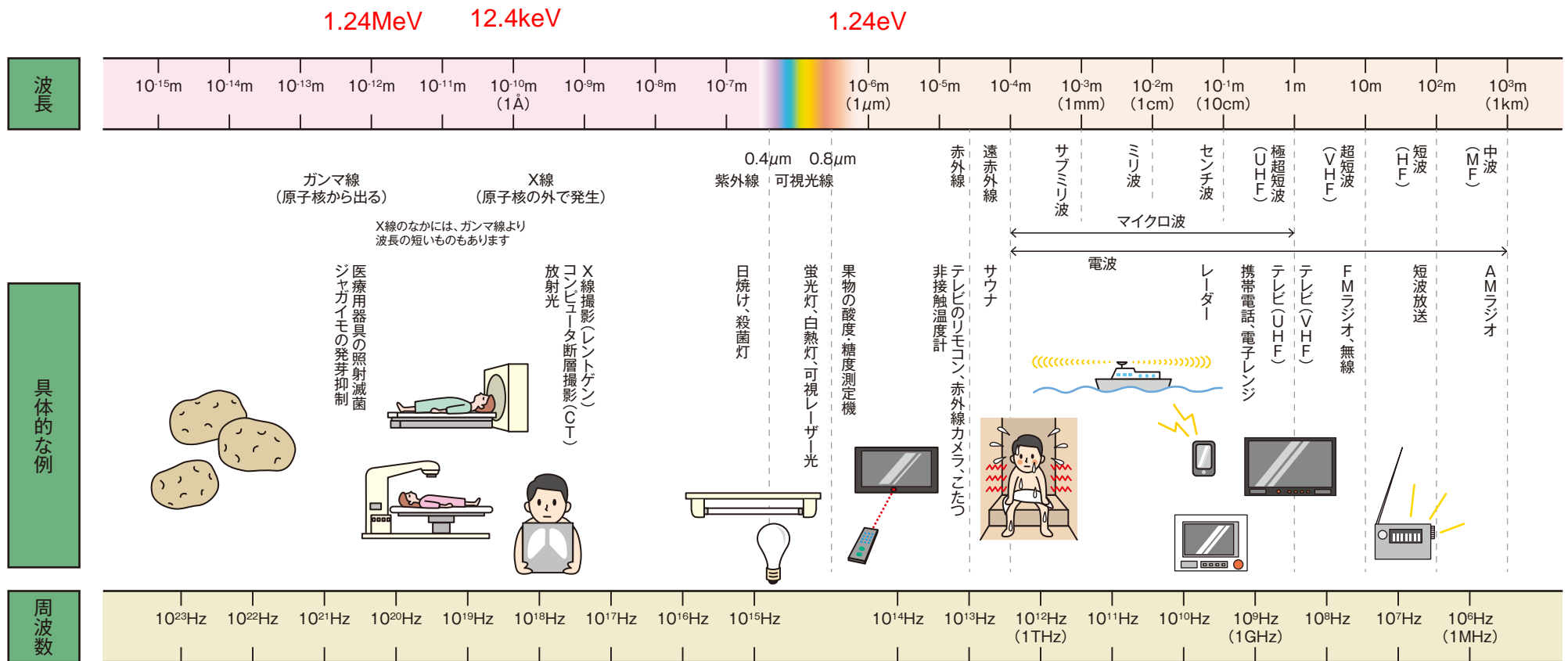
放射線化学バイオ応用理工学特論

# 放射線と物質の相互作用

秋吉 優史

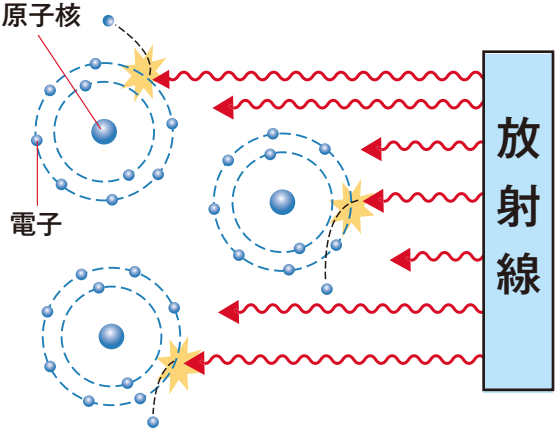
# 電磁波の仲間

光子のエネルギー  $E \div 1240 / \lambda$  [eV],  $\lambda$ : 波長[nm]

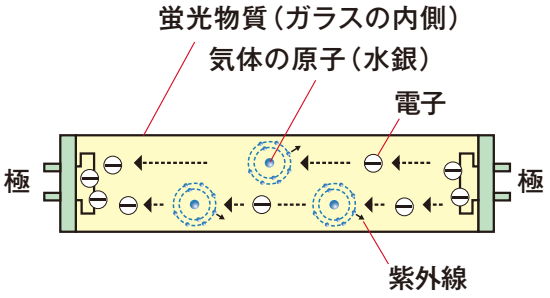


# 放射線の性質

## 電離作用

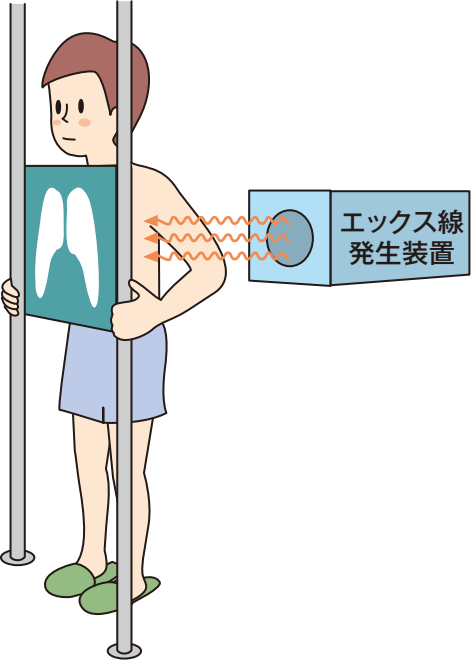


## 蛍光作用

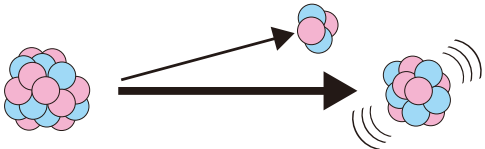
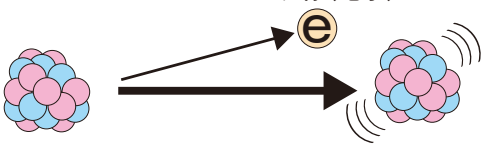
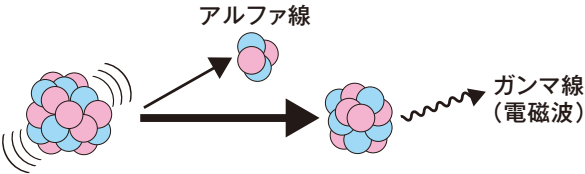


**蛍光灯の仕組み**  
管の両端に電圧が加わると、極から極に電子が流れます。電子が管に封入された水銀に衝突すると、紫外線が発生します。紫外線は蛍光物質を光らせます。

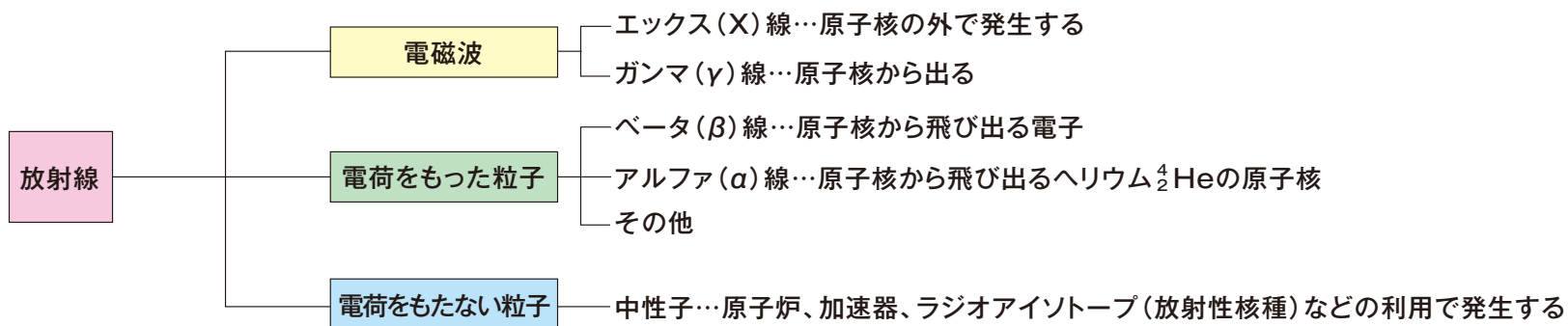
## 透過作用



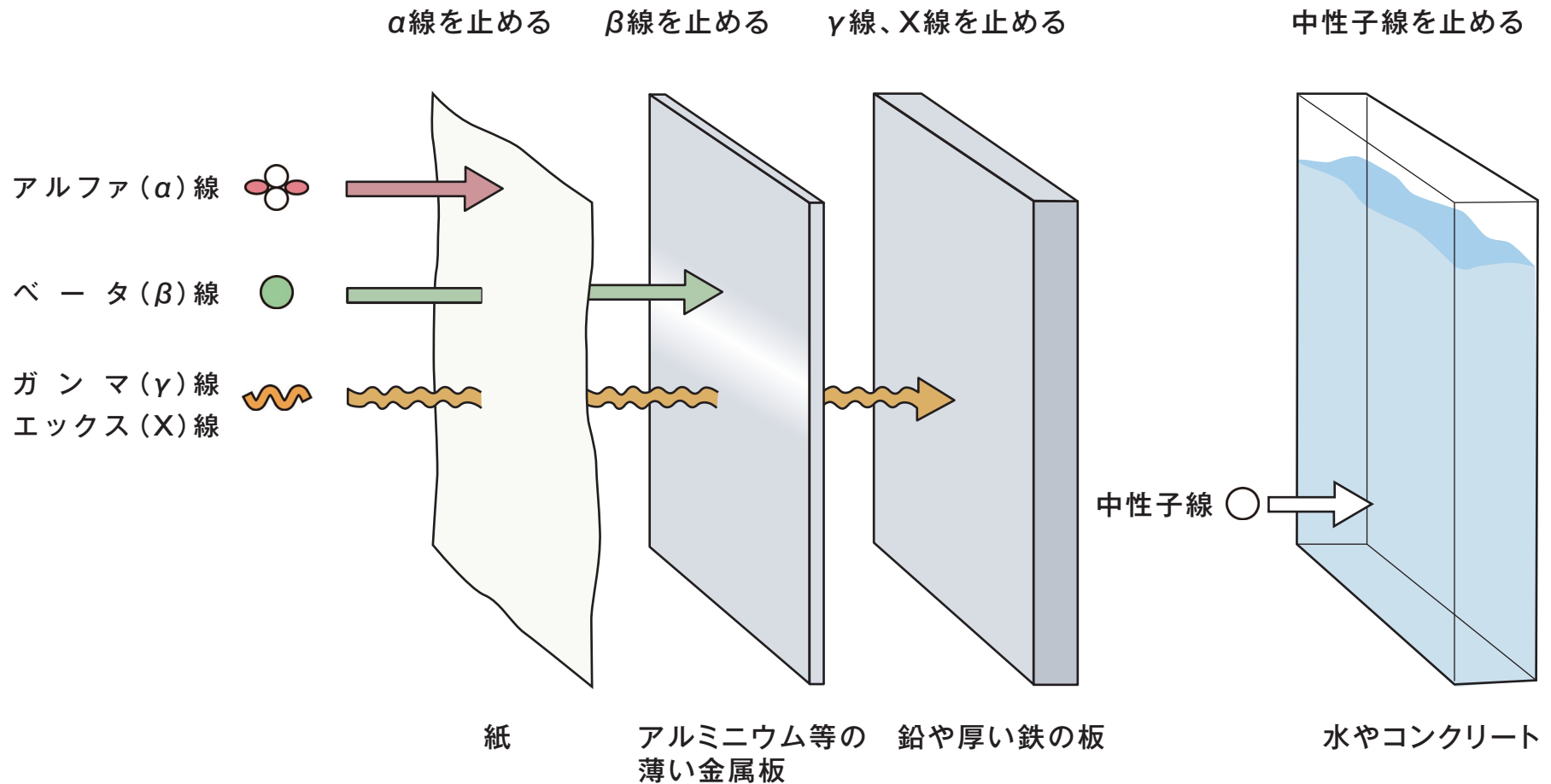
# 放射線の種類

<p>アルファ (<math>\alpha</math>) 壊変 (崩壊)</p>	<p>アルファ線 (<math>{}^4_2\text{He}</math>原子核)</p> 	<p>(例)</p> ${}^{226}_{88}\text{Ra} \xrightarrow{\alpha} {}^{222}_{86}\text{Rn}$
<p>ベータ (<math>\beta</math>) 壊変 (崩壊)</p>	<p>ベータ線 (電子)</p> 	<p>(例)</p> ${}^{24}_{11}\text{Na} \xrightarrow{\beta} {}^{24}_{12}\text{Mg}$
<p>ガンマ (<math>\gamma</math>) 線の放出</p>	<p>アルファ線</p>  <p>ガンマ線 (電磁波)</p>	

● 陽子 ● 中性子



# 放射線の種類と透過力



# 放射線と物質の相互作用

## イオンビーム ( $\alpha$ 線)

質量が電子に比べてはるかに重いため、電子との衝突によりほとんど曲げられず、少しずつエネルギーを失う。相互作用は電荷の二乗に比例、速度の二乗に反比例(エネルギーに反比例)し、ブラッグピークで急激にエネルギーを放出し、原子核の弾き出しを起こす。

## 電子線 ( $\beta$ 線)

物質中の電子との衝突によって、簡単に方向やエネルギーが変化するため、まっすぐに進まず、広い範囲に広がる。このため、平均的な飛程という物は求めにくく、最大飛程で評価される。重元素に入射すると、原子核周辺の強い電場で急激に曲げられることにより、制動放射X線の発生割合が大きくなる。

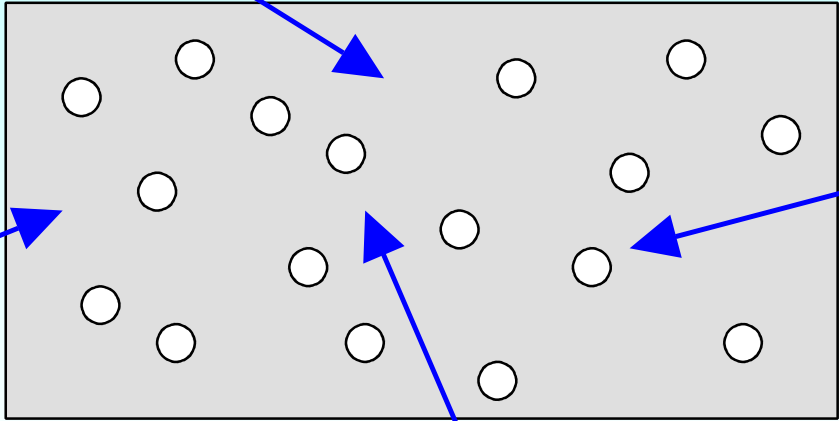
## $\gamma$ 線、X線

物質を進むにつれて指数関数的に強度が弱くなっていくが、その際の線減弱係数は光子のエネルギーによって関与する素過程の違いが変化するため大きく異なる。数MeVの領域では高エネルギーの方が透過力は高い。光電効果、コンプトン効果により物質中で電子線を生成するため、高エネルギーの光子はごく僅かではあるが原子核の弾き出しも起こす。

# 入射粒子による欠陥導入形態の違い

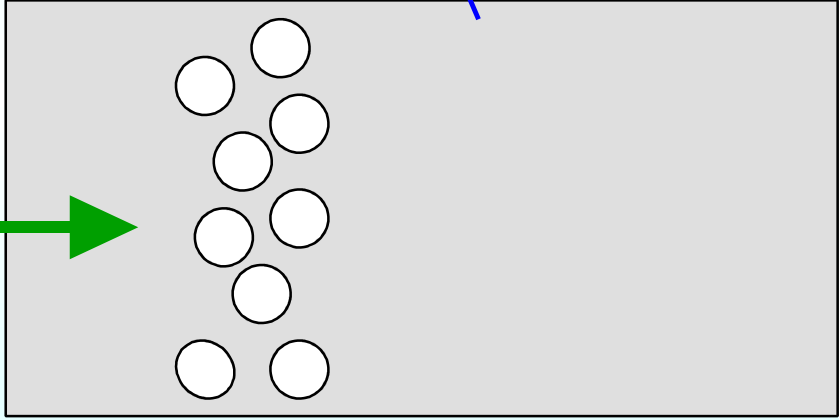
## 中性子照射

透過力の高い  $E > 0.1\text{MeV}$  の高速中性子により試料全体に均質に欠陥が導入される。  
Primary Knock-on Atom (PKA) をはじき出した後は狭い領域に欠陥が集中し、カスケードを形成する。



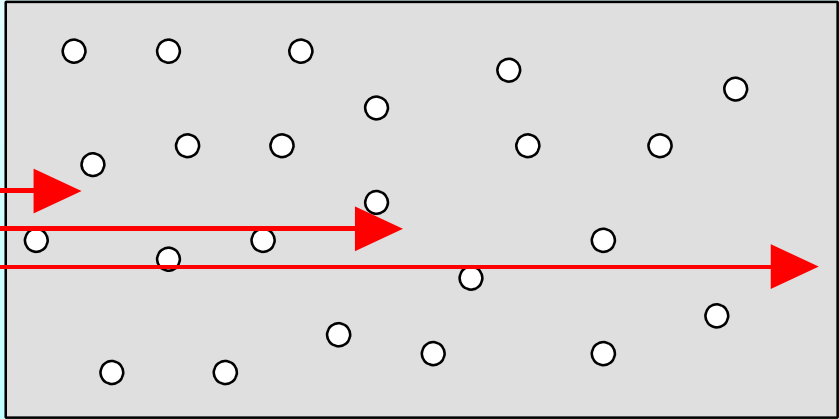
## イオンビーム照射

電子励起によりエネルギーを失っていき、ブラッグピーク付近に集中的に欠陥が導入される。  
PKAをはじき出した後の挙動は中性子照射と似ていて、カスケードを形成する。



## 電子線照射

30MeV の電子線は、セラミックス中でおおよそ 10cm 程度の飛程を持つが、平均 PKA エネルギーは 225eV にとどまるため損傷関数は 3.75個となり、フレンケル対などの点欠陥のみが導入されると考えられる。

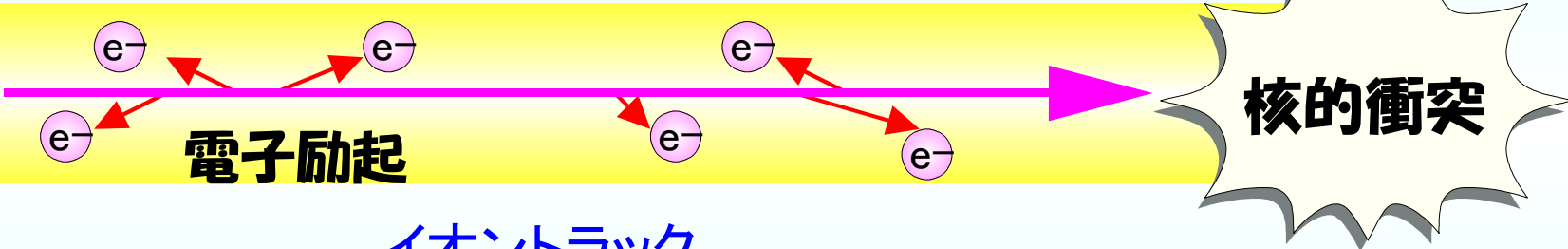


# イオンビーム( $\alpha$ 線)の場合

物質に入射したイオンビームはそのほとんどのエネルギーを電子励起により徐々に失い、それに伴い阻止能が増加し(粒子の速度の二乗に反比例)、最終的に核的な衝突を起こす。弾性散乱された物質の原子はさらに他の原子をはじき飛ばしカスケードを形成する。

Primary Knock-on Atom (PKA)

弾性散乱  
(弾き出し)



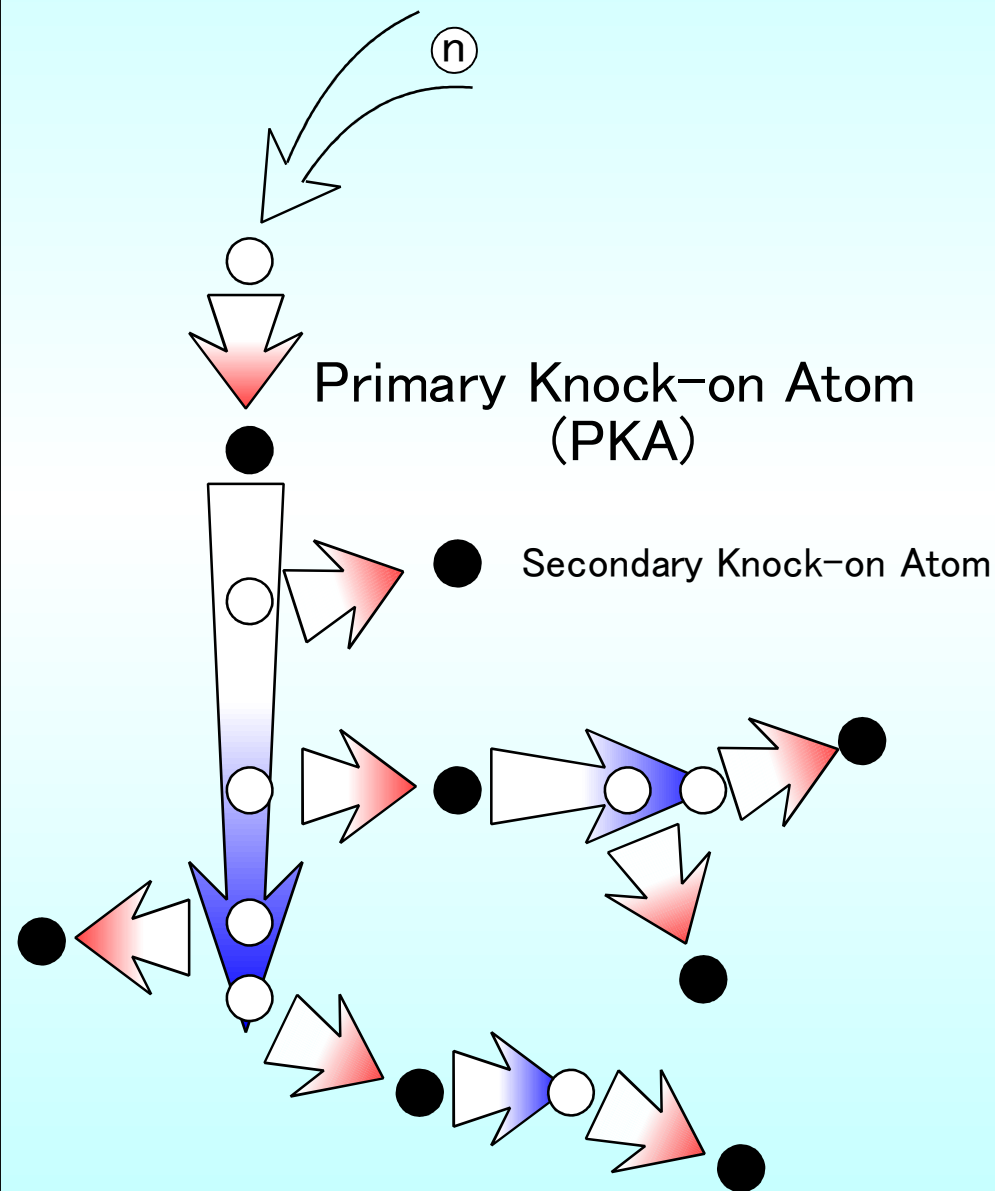
入射粒子がエネルギーを失う過程では極めて多数の電子が励起・電離され、その一部は照射後も残る電子的欠陥として蓄積される。この電子的欠陥を多く含む、入射イオンの通り道をイオントラックと呼ぶ。

阻止能

ブラッグピーク



# 照射カスケード



入射粒子がある格子原子をはじき飛ばすと、その原子は Primary Knock-on Atom (PKA) となり、この原子がまた別の格子原子をはじき飛ばす。

エネルギーが高いうちは弾き出しの確率は低いが、電子励起により徐々にエネルギーを失い、速度が落ちてくると弾き出しの断面積が増加するため、次々と弾き出しを起こして止まる。

この終端付近の連続して弾き出しが起こる領域を照射カスケードと呼び、瞬間的にその領域にエネルギーが解放されるため超高温状態となり、局所的な溶解状態となる。

## $\alpha$ 線の飛程

Q: ウラン系列の核種を含むラジウムボールから放出される $\alpha$ 線の最大飛程を求めよ。

- ・ウラン系列の核種のうち、最大のエネルギーの $\alpha$ 線を放出するのはPo-210でそのエネルギーは7.69MeVである。
- ・ $\alpha$ 線の空気中での飛程は $R = 0.318E^{3/2}$ で表わされる  
(R: 飛程(cm), E: エネルギー(MeV))。

# 電子線(β線)とα線の比較

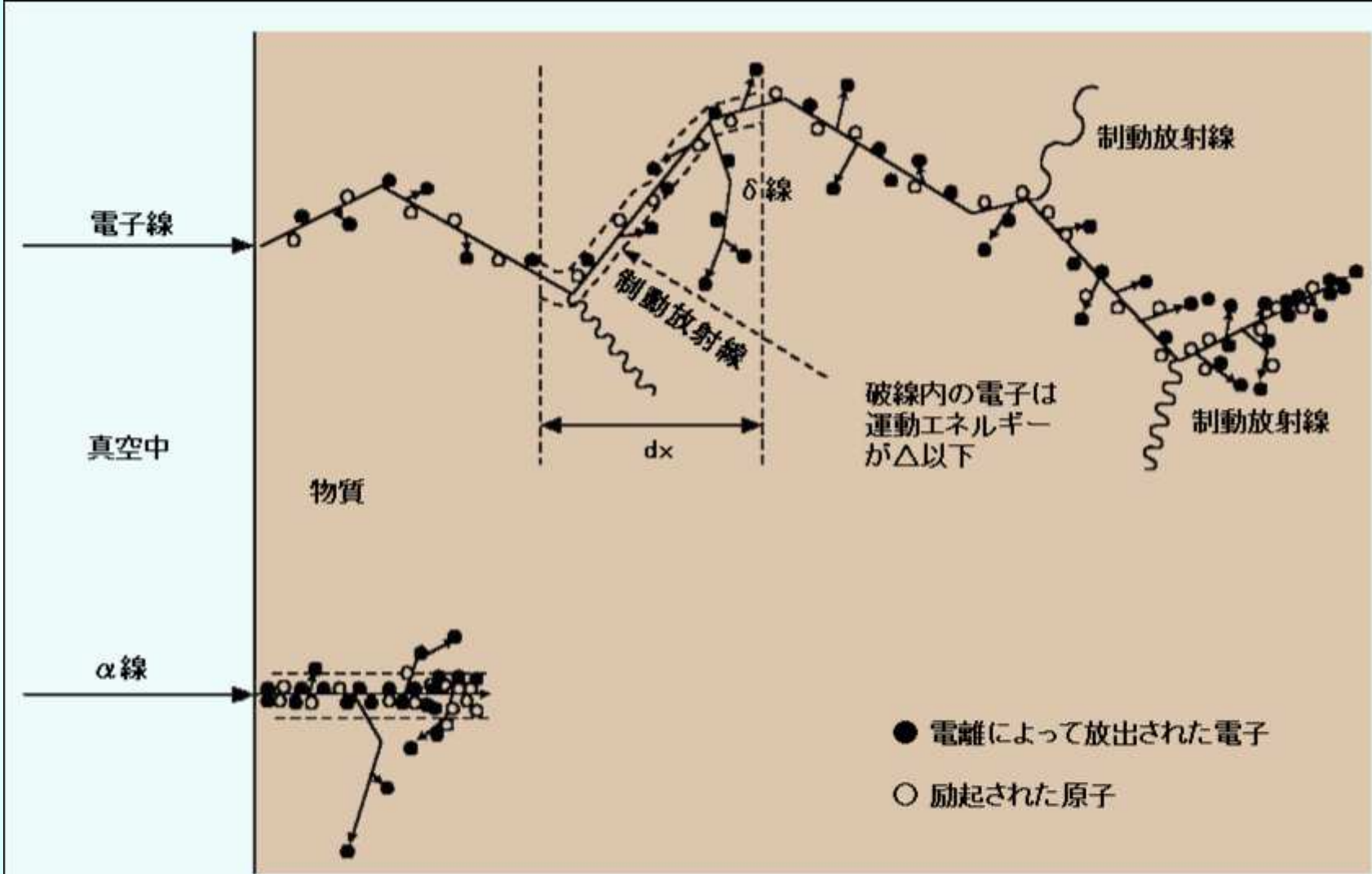
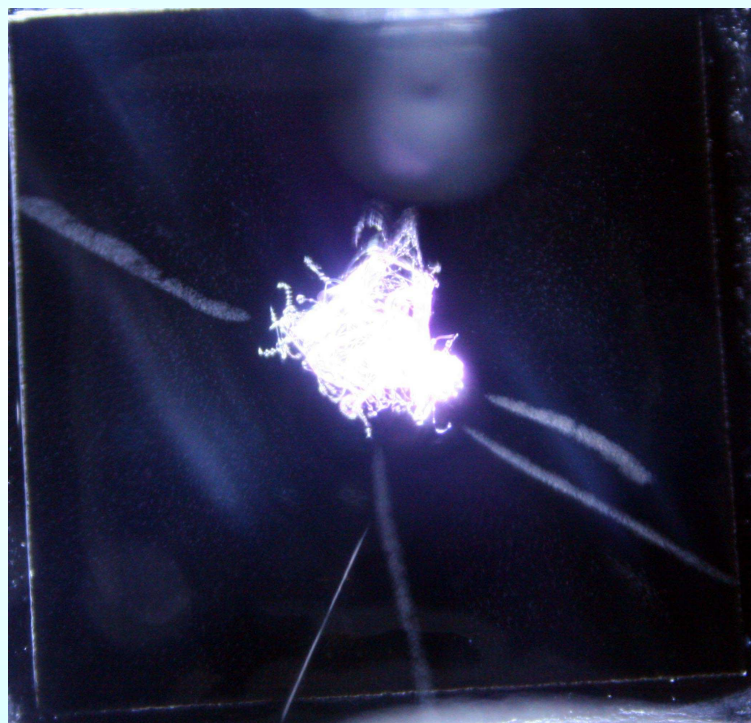


図1 荷電粒子と物質の相互作用

[出典]江藤秀雄(ほか):放射線防護、丸善(1982年12月)、p.54

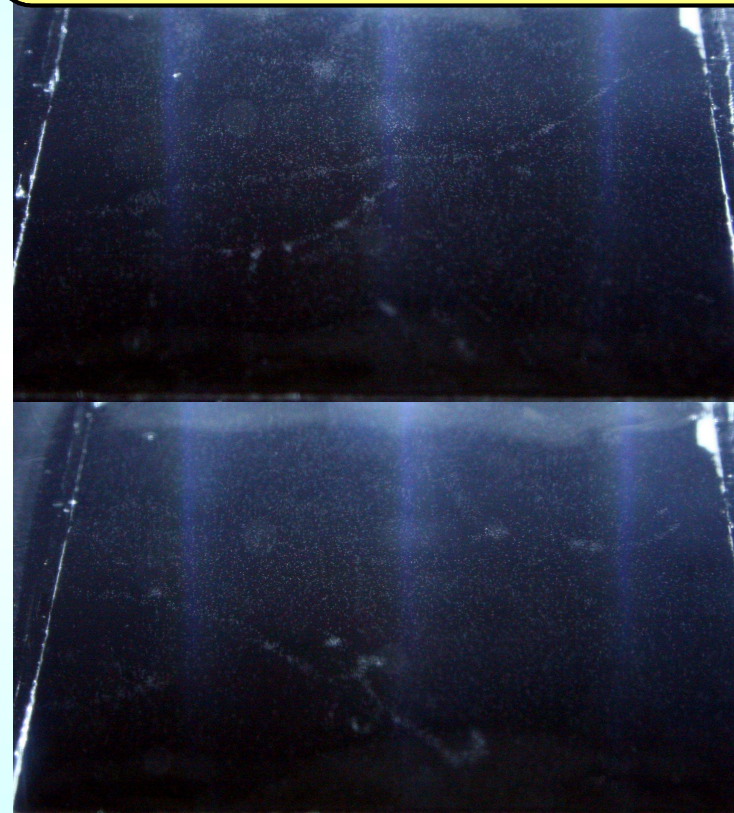
## 霧箱での飛跡の観察

トリウム含有マントルからの  
 $\alpha$ 線の飛跡



直線的ではっきりとした飛跡を示す。気流の関係で生成した霧がたなびく事で曲がって見えることがあるが、散乱や磁石による偏向ではない。

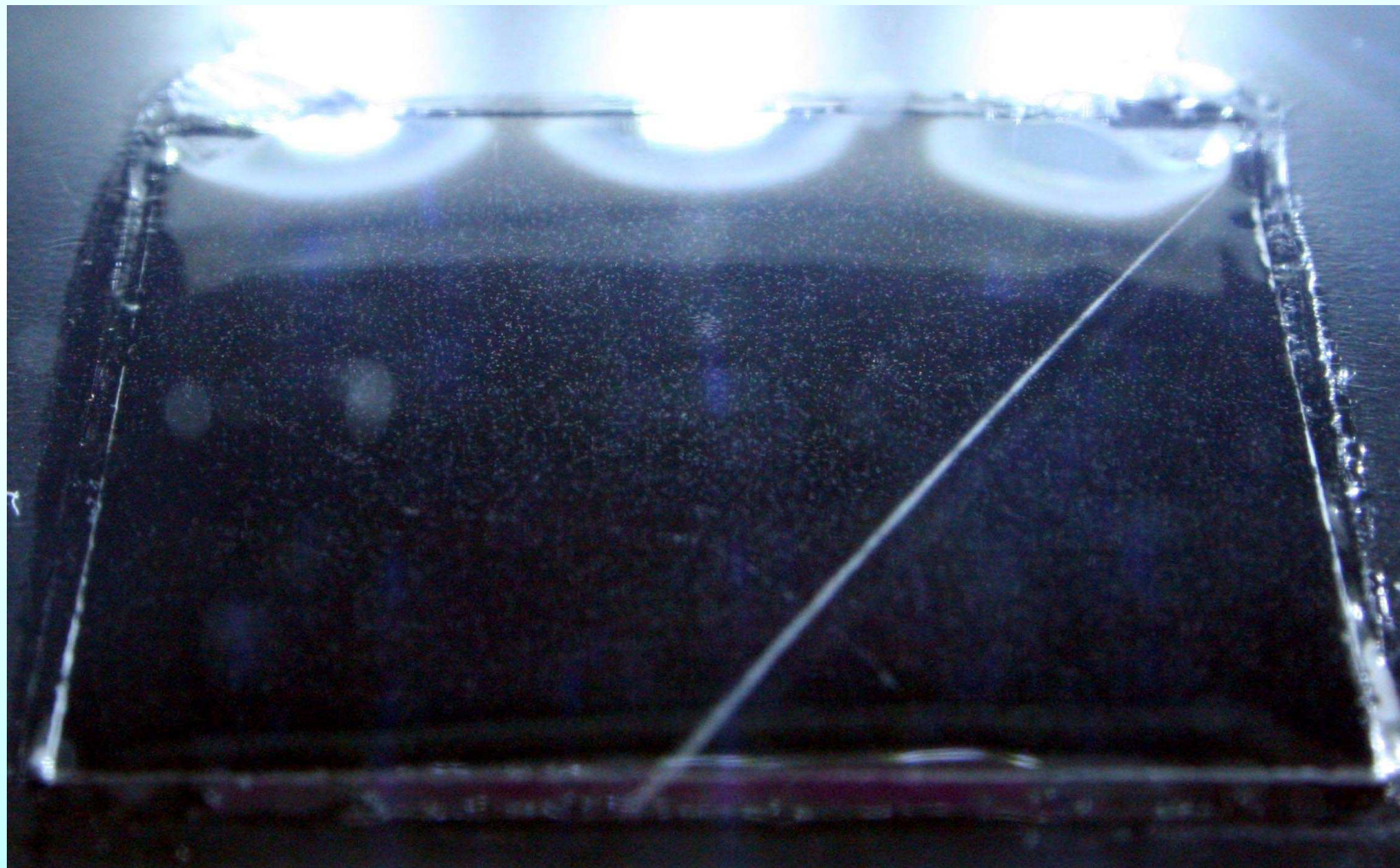
トリウム含有マントルからの  
 $\beta$ 線の飛跡



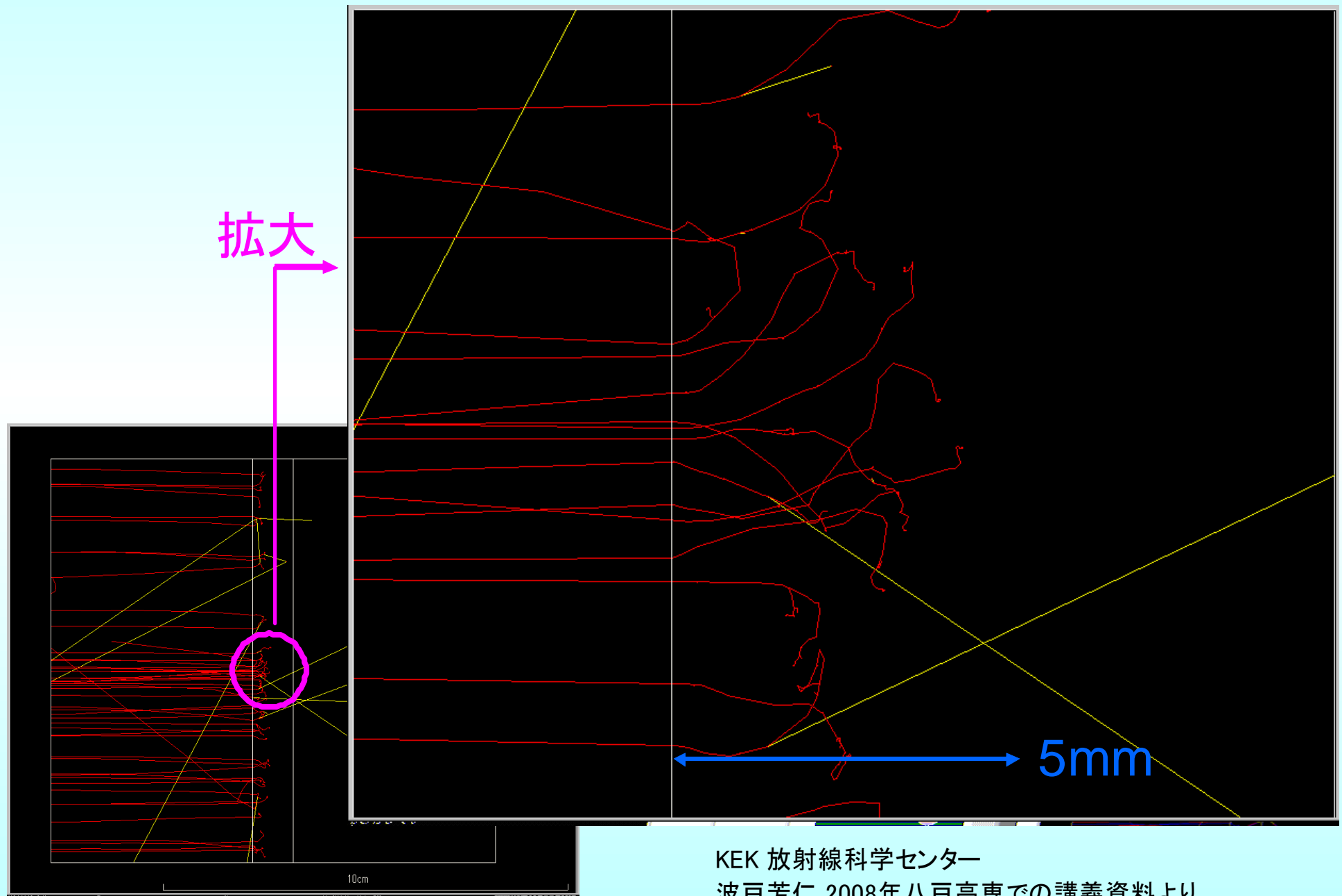
霧の液滴の密度が低く、うっすらとした飛跡しか示さない。電子線の入射方向と関係なく様々な方向に飛び、空気中에서도散乱されている様子を確認できる。

## 霧箱での飛跡の観察

トリウム含有マントルからの $\beta$ 線の飛跡と  
空气中ラドン由来核種からの $\alpha$ 線の飛跡の比較



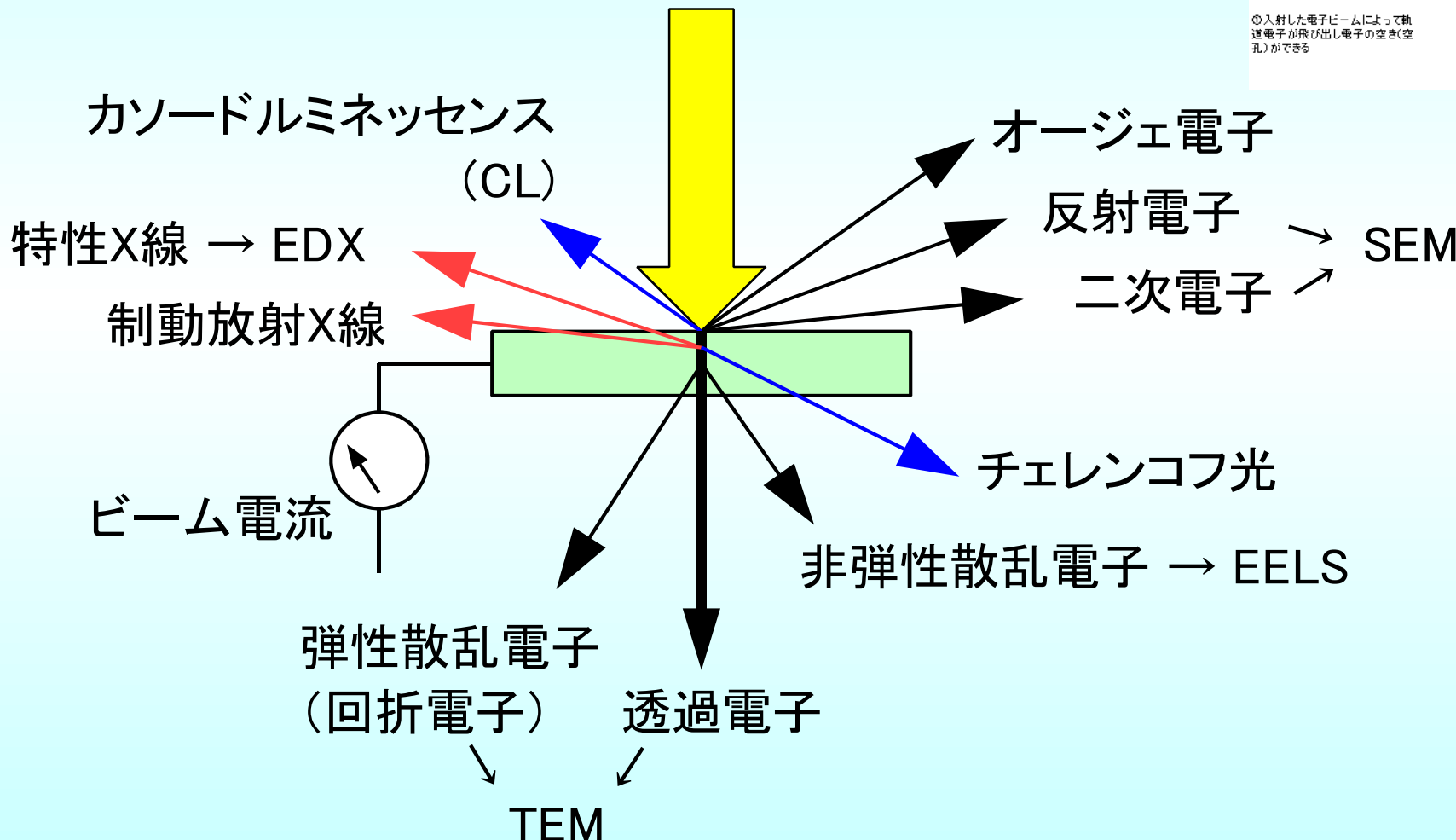
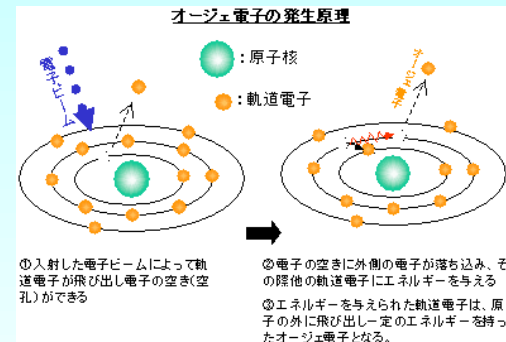
# ベータ線と物質の相互作用



KEK 放射線科学センター  
波戸芳仁 2008年八戸高専での講義資料より

# 電子線の入射で出てくるもの

## 入射電子



# 電子線(β線)の飛程

β線は、そもそも放出される時点でエネルギーが一様ではない。これはベータ崩壊の際に反電子ニュートリノが絡む三体崩壊であり電子のエネルギーが決まらないためである。さらに物質に入射後は非常に複雑な散乱過程を示すのであるが、概ね物質の厚さの増加に伴い指数関数的に強度が減少する。なお、入射する物質が変わっても質量衝突阻止能はほとんど変わらない。数MeV程度のβ線では制動放射に伴う放射阻止能は衝突阻止能よりずっと小さいが、ターゲットの原子番号Zに比例して大きくなるため、遮蔽の際には低Zの材料を使用する。

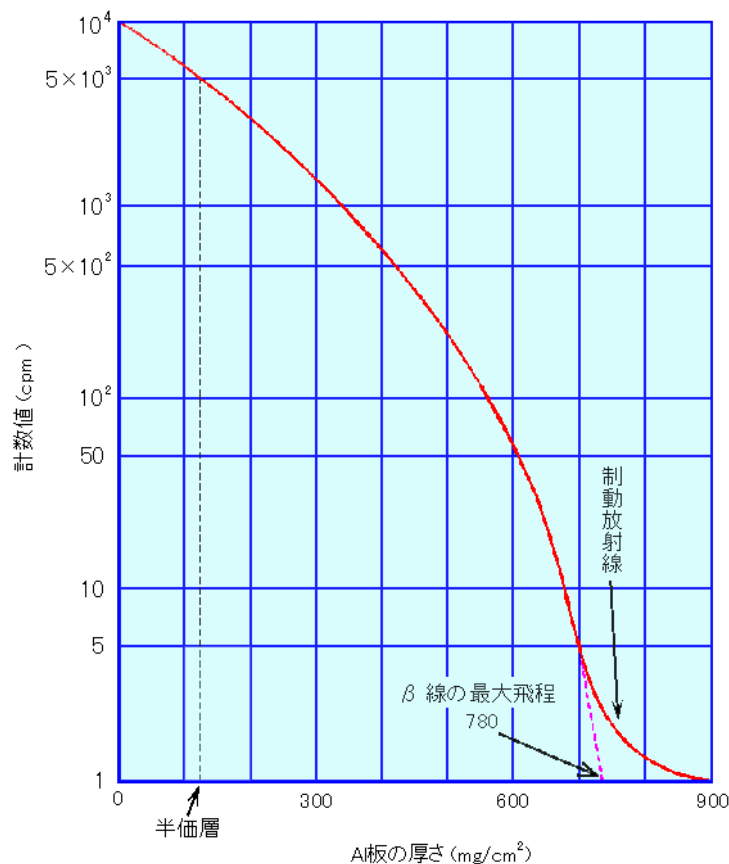


図3  $^{32}\text{P}$ のβ線のアルミニウムによる吸収曲線

[出典] 江藤秀雄(ほか): 放射線の防護, 丸善(1982年12月), p.56

入射電子線のエネルギー  $E$  (MeV),  
 最大飛程  $R$  ( $\text{g}/\text{cm}^2$ ) とすると、  
 アルミ中での最大飛程は以下の様に与えられる

$$R = 0.542 E - 0.133 \quad (0.8 < E)$$

$$R = 0.407 E^{1.38} \quad (0.15 < E < 0.8)$$

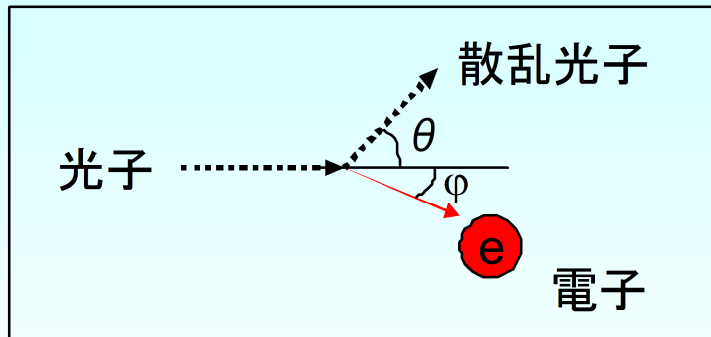


## 電子線 ( $\beta$ 線) の飛程

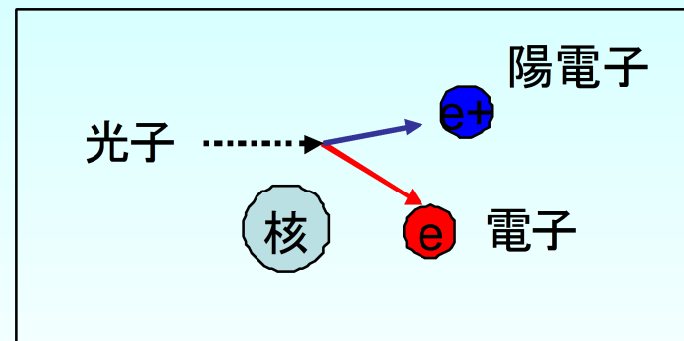
Q: ウラン系列の核種を含むラジウムボールから放出される  $\beta$  線を遮蔽するのに必要なアルミ板の厚さを求めよ

- ・ウラン系列で最も大きいエネルギーの  $\beta$  線は Bi-214 からの 3.27MeV である。  
(Tl-210 4.21MeVもあるが分岐比率0.021%でほとんど出ていない)
- ・アルミの密度は  $2.70\text{g/cm}^3$  である。

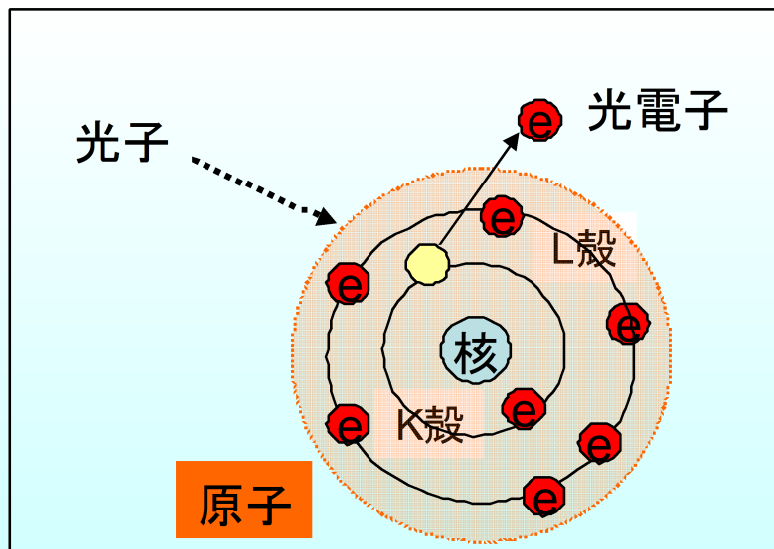
# ガンマ線と電子・原子核・原子との反応



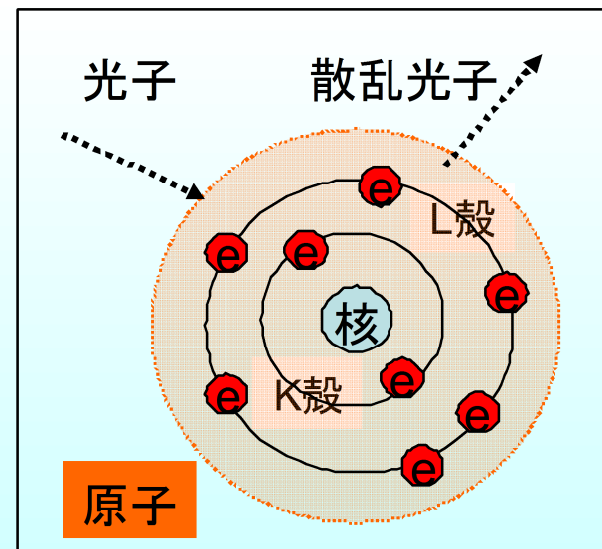
コンプトン散乱



電子対生成



光電効果



レイリー散乱

# $\gamma$ 線・X線と物質の相互作用

## レイリー散乱

弾性散乱。入射光のエネルギーが変化しない散乱過程。

## 光電効果

軌道電子に入射光子のエネルギーを全て与えて、軌道エネルギーを差し引いたエネルギーを持つ高速電子(光電子)を生成する。断面積は入射光子のエネルギーの $-3.2$ 乗に比例する。

## コンプトン散乱

軌道電子に入射光子のエネルギーの一部を与えて、高速電子(コンプトン電子)を生成する。散乱後のエネルギーは散乱角に依存し、連続スペクトルとなる。

## 電子対生成

入射光子のエネルギーが  $1.022\text{MeV}$  以上の場合、原子核近傍のクーロン場中で電子と陽電子の対を生成する。入射光子は全エネルギーを失い消滅し、電子・陽電子の静止質量エネルギーの残りは運動エネルギーとして分配される。

## 光核反応

高エネルギーの光子が原子核と直接反応し、様々な素粒子が放出される。 $Z=50$ 程度の核種では中性子の結合エネルギーが $10\text{MeV}$ 程度であり、これ以上のエネルギーの光子の入射により $(\gamma, n)$ 反応を起こして中性子が放出される。

# γ線・X線の減衰

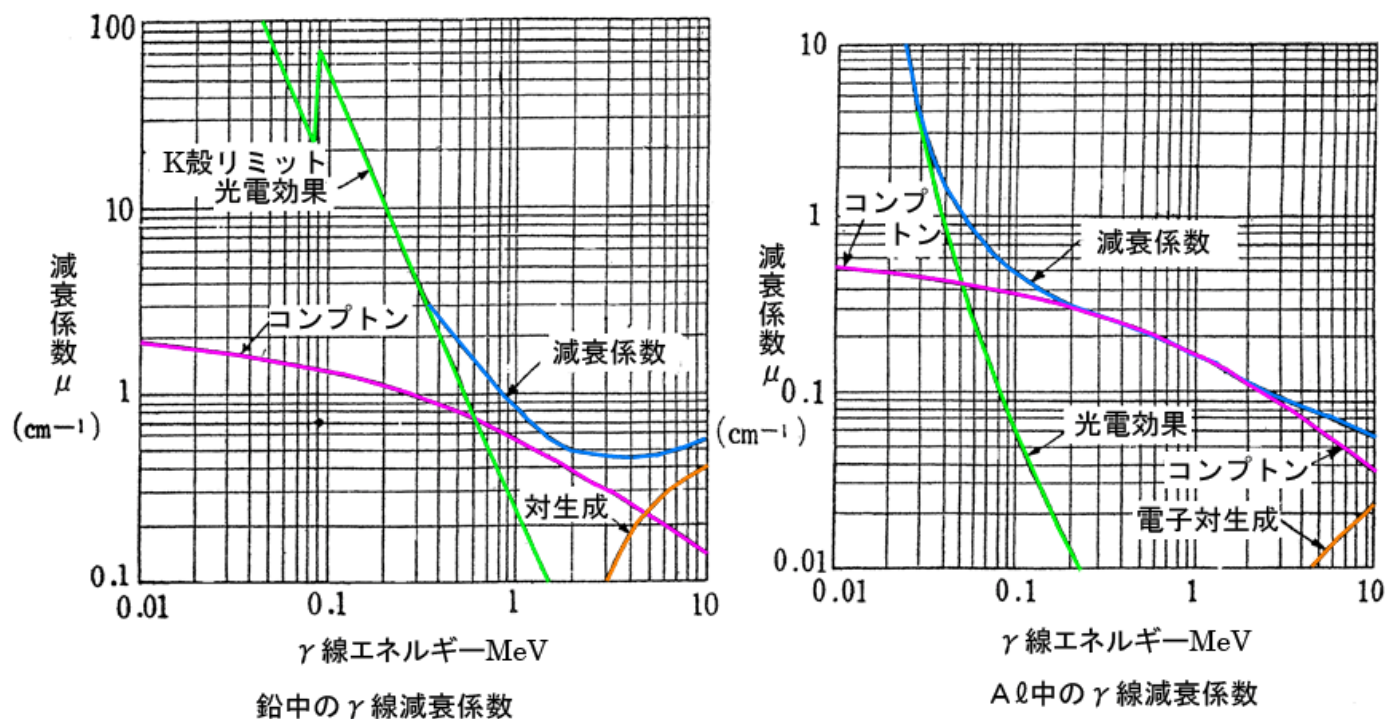


図3 γ線のコンプトン効果

[出典] 三浦 功、菅 浩一、俣野恒夫:「放射線計測学」、裳華房、p.21

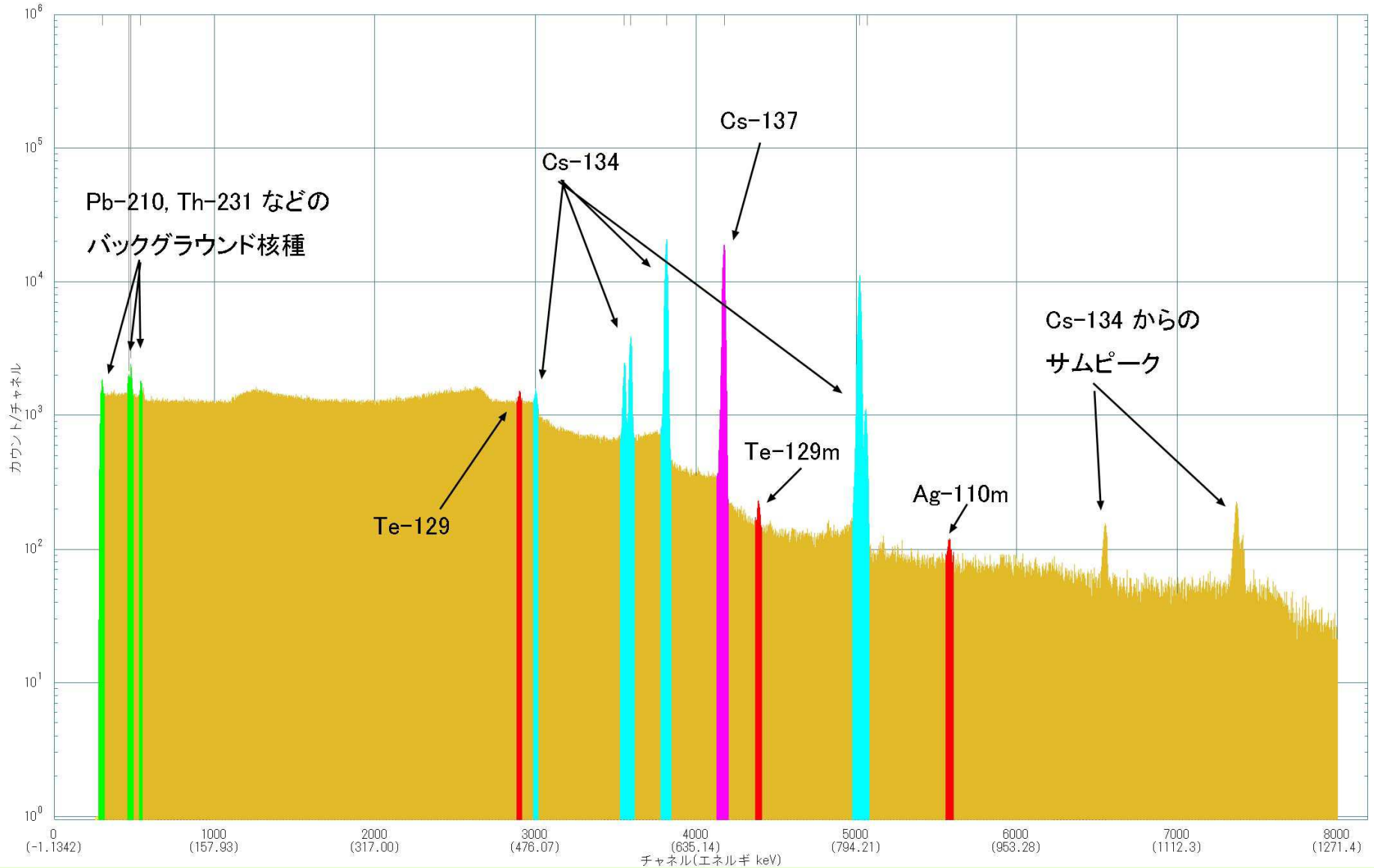
ターゲットとなる物質の原子番号  $Z$  の増加と共に、線源弱係数は  
 光電効果  $Z^4 \sim 5$  に比例  
 コンプトン効果  $Z$  に比例  
 電子対生成  $Z(Z+1)$  に比例  
 となって  $Z$  が大きくなると急激に遮蔽能力が高くなる。

入射光子のエネルギー増加と共に、物質との相互作用を起こす効果が変わっていく。比較的低エネルギーではレイリー散乱、光電効果が主であり、次第にコンプトン散乱が支配的となる。高エネルギーでは電子対生成が主となる。光核反応は12-24MeV 付近で最大断面積となるが  $\mu$  への寄与は5%程度である。また、低エネルギーではK殻電子やL殻電子の電離エネルギー以上になると光電効果を起こせるがそれ以下では起こせないため、光電効果の効率が不連続に変化する。これをK吸収端、L吸収端と呼ぶ。

# γ線スペクトル測定の一例

20110608\_南相馬市馬事公苑-土\_110620.CHN

Acquired:2011-06-20 12:30:07 Real Time:30068.1(sec) Live Time:30000.0(sec)



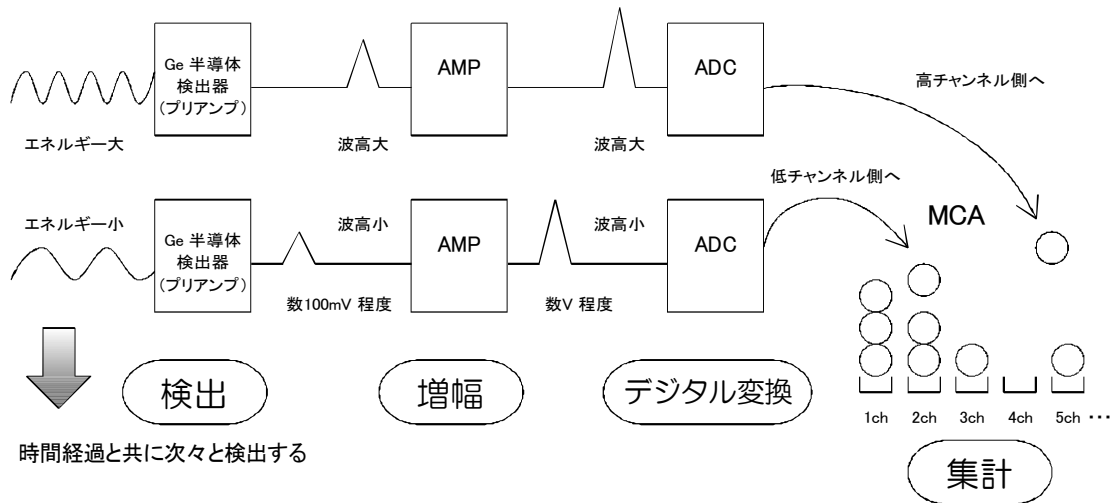


Fig. 1  $\gamma$  線スペクトル測定概念図

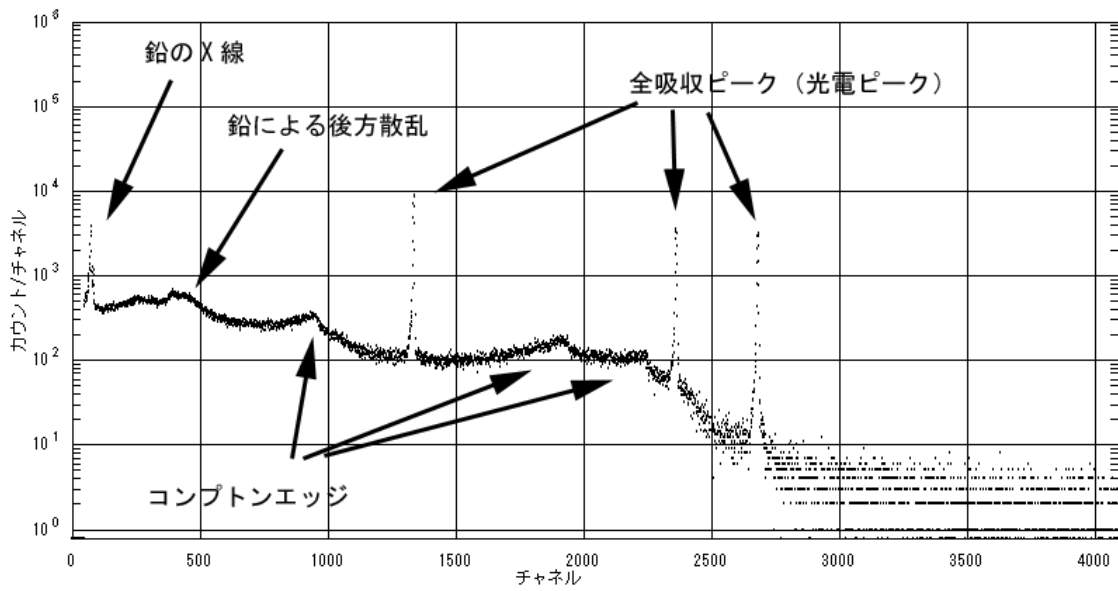


Fig. 2 Ge 半導体検出器で測定した  $\gamma$  線スペクトルの一例

## Features

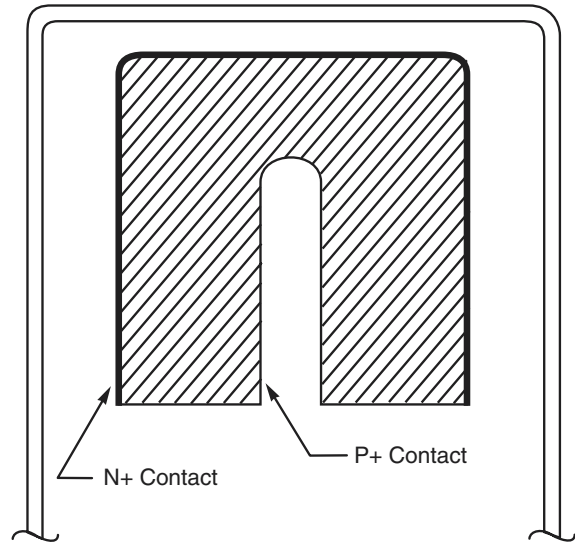
- Wide range of efficiencies
- High resolution – good peak shape
- Excellent timing resolution
- High energy rate capability
- Diode FET protection
- Warm-up/HV shutdown
- High rate indicator

## Description

The conventional coaxial germanium detector is often referred to as Pure Ge, HPGe, Intrinsic Ge, or Hyperpure Ge. Regardless of the superlattice used, the detector is basically a cylinder of germanium with an n-type contact on the outer surface, and a p-type contact on the surface of an axial well. The germanium has a net impurity level of around  $10^{10}$  atoms/cc so that with moderate reverse bias, the entire volume between the electrodes is depleted, and an electric field extends across this active region. Photon interaction within this region produces charge carriers which are swept by the electric field to their collecting electrodes, where a charge sensitive preamplifier converts this charge into a voltage pulse proportional to the energy deposited in the detector.

The n and p contacts, or electrodes, are typically diffused lithium and implanted boron respectively. The outer n-type diffused lithium contact is about 0.5 mm thick. The inner contact is about 0.3  $\mu\text{m}$  thick. A surface barrier may be substituted for the implanted boron with equal results.

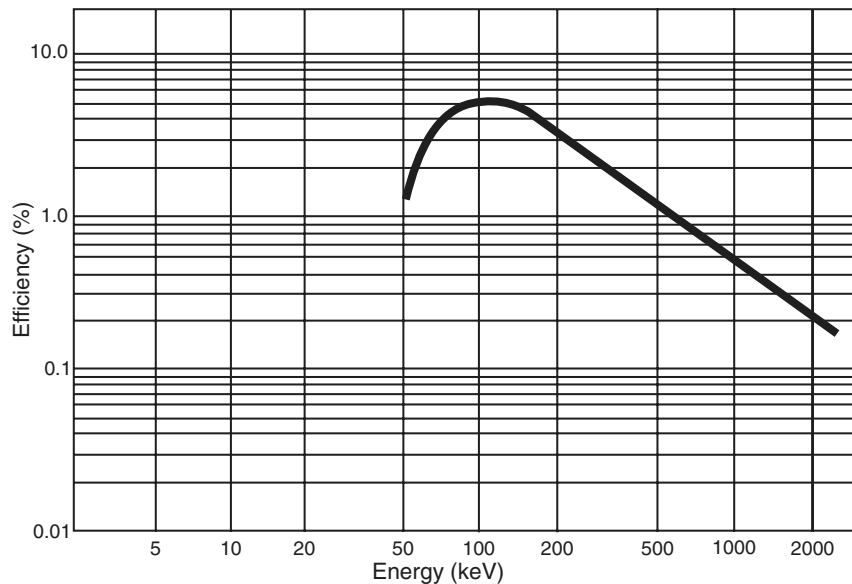
The Canberra Coaxial Ge detector can be shipped and stored without cooling. However, long term stability is best preserved by keeping the detector cold. Like all germanium detectors, it must be cooled when it is used to avoid excessive thermally-generated



Coaxial Ge Detector Configuration

leakage current. The non-perishable nature of this detector widens the application of Ge spectrometers to include field use of portable spectrometers.

The useful energy range of the Coaxial Ge detector is 50 keV to more than 10 MeV. The resolution and peak shapes are excellent and are available over a wide range of efficiencies. A list of available models is given in the accompanying table.



Typical Absolute Efficiency Curve for 15% Detector  
(25 cm detector to source spacing)

## Phone contact information

Benelux/Denmark (32) 2 481 85 30 • Canada 905-660-5373 • Central Europe +43 (0)2230 37000 • France (33) 1 39 48 57 70 • Germany (49) 6142 73820  
Japan 81-3-5844-2681 • Russia (7-095) 429-6577 • United Kingdom (44) 1235 838333 • United States (1) 203-238-2351

For other international representative offices visit our Web Site: <http://www.canberra.com> or contact the Canberra U.S.A. office.

M3839 4/02 Printed in U.S.A.

# Extended Range Coaxial Ge Detectors (XtRa)

## Features

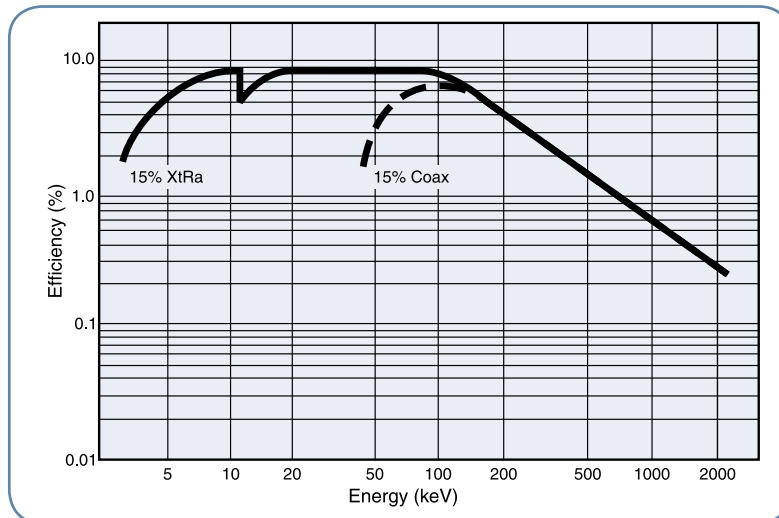
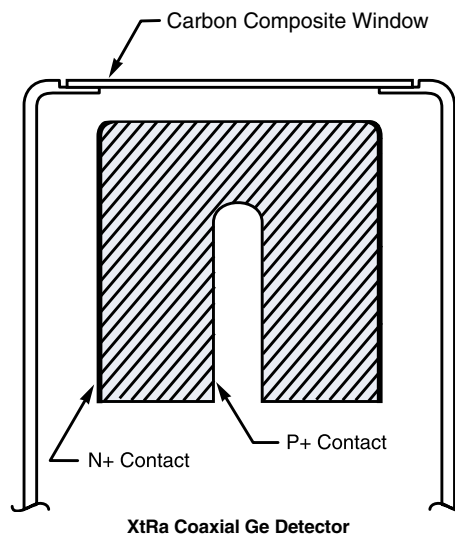
- Spectroscopy from 3 keV to >10 MeV
- Wide range of efficiencies
- High resolution – good peak shape
- Excellent timing resolution
- High energy rate capability
- Diode FET protection
- Warm-up/HV shutdown
- High rate indicator

## Description

The CANBERRA XtRa is a coaxial germanium detector having a unique thin-window contact on the front surface which extends the useful energy range down to 3 keV. Conventional coaxial detectors have a lithium-diffused contact typically between 0.5 and 1.5 mm thick. This dead layer stops most photons below 40 keV or so rendering the detector virtually worthless at low energies. The XtRa detector, with its exclusive thin entrance window and with a Carbon Composite cryostat window, offers

all the advantages of conventional standard coaxial detectors such as high efficiency, good resolution, and moderate cost along with the energy response of the more expensive Reverse Electrode Ge (REGe) detector.

The response curves (below) illustrate the efficiency of the XtRa detector compared to a conventional Ge detector. The effective window thickness can be determined experimentally by comparing the intensities of the 22 keV and 88 keV peaks from  $^{109}\text{Cd}$ . With the standard 0.6 mm Carbon Composite window, the XtRa detector is guaranteed to give a 22 to 88 keV intensity ratio of greater than 20:1. Beryllium and aluminum windows are also available.



Typical Efficiency curves comparing XtRa with Be window and Coax Detectors with detector-source spacing of 2.5 cm



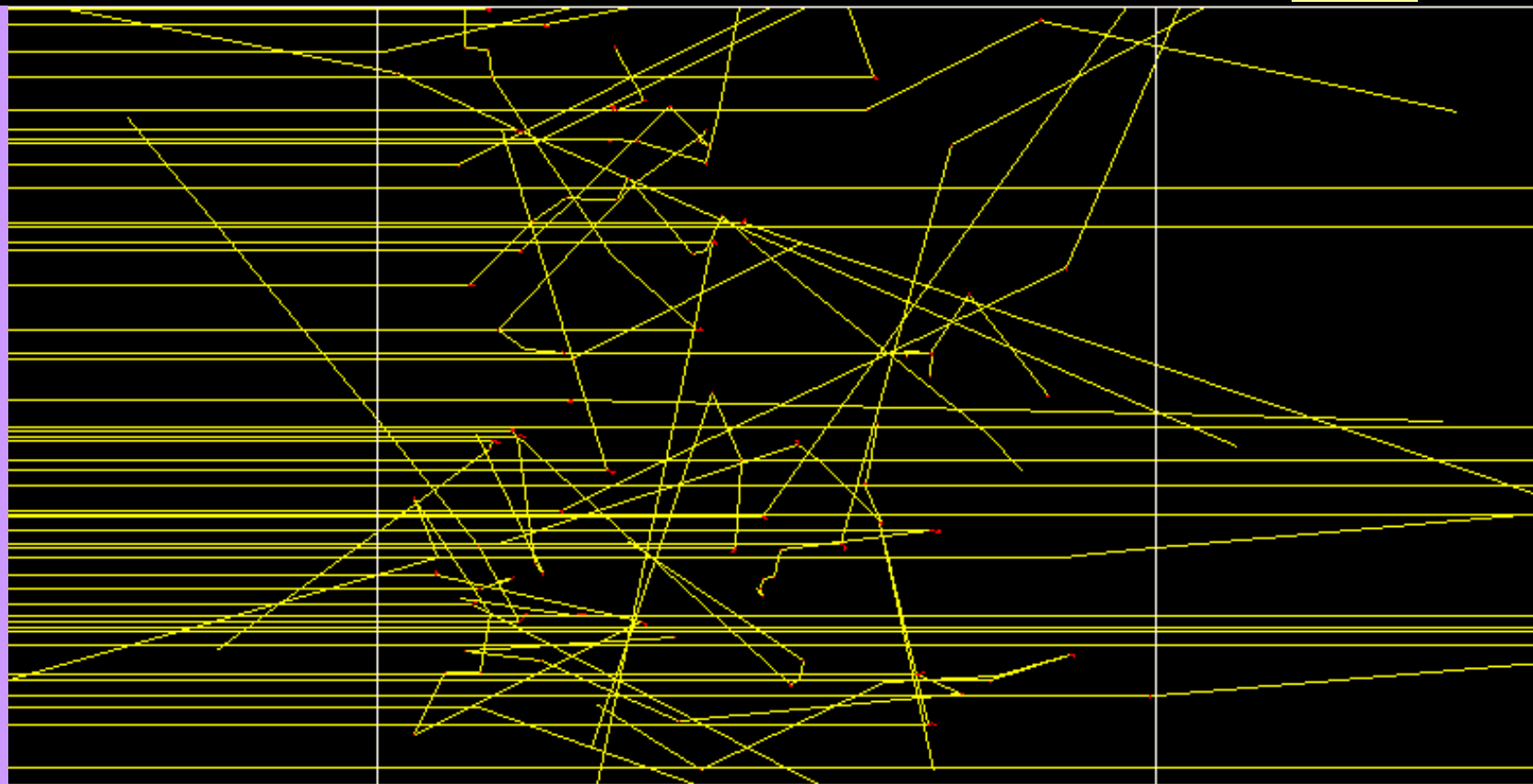
# 1.25 MeV ガンマ線 → Al 10cm

空気

Al

空気

ガンマ線源

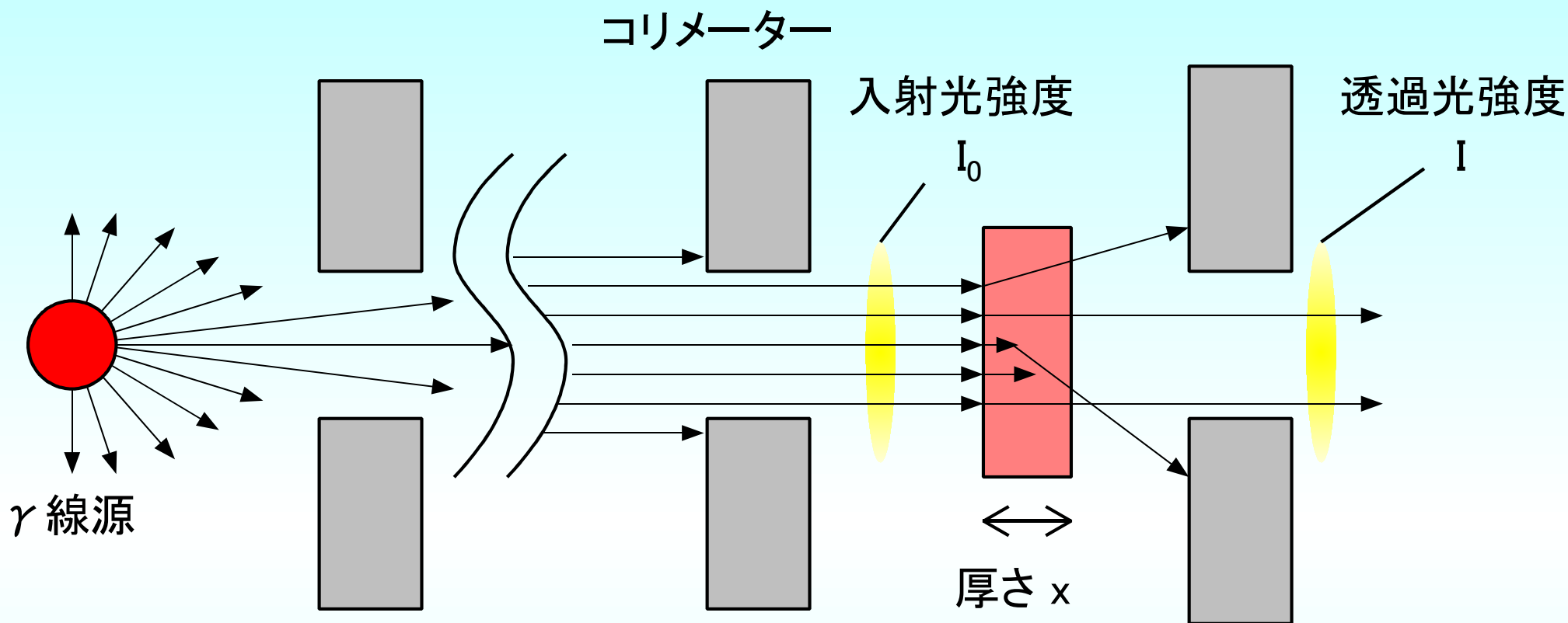


透過：直接線11、散乱線8; 反射4

KEK 放射線科学センター

波戸芳仁 2008年八戸高専での講義資料より

10cm



単一エネルギーで狭い平行線束  $\gamma$  線・X線の減衰は、

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

で表わされる。ここで  $I, I_0$  は光子のフラックスであり、

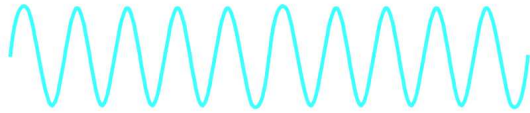
散乱、吸収により試料の厚さ  $x$  に伴って指数関数的に減衰していく。

線減弱係数  $\mu$  の単位は  $m^{-1}$  などで、密度で除した  $\mu_m$  が様々な物質、

エネルギーに対して与えられている。

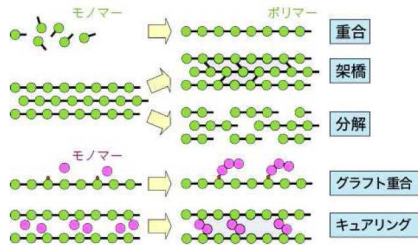
# エネルギー 大

## ガンマ線、エックス線



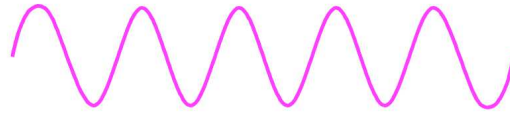
**電離作用**

原子核  
電子  
放射線



エネルギーの大きいガンマ線やエックス線は、物体の中を突き抜けていき、その途中の原子の周りの電子を弾き飛ばす働きがあります。この力を使って、注射器などの医療用の器具を滅菌したり、様々な機能を持った高分子化合物を作ったりすることが出来ます。

## 紫外線

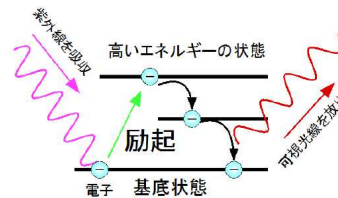


< 太陽光線の種類 >

UVC はオゾン層で吸収されるため地表には届かない。

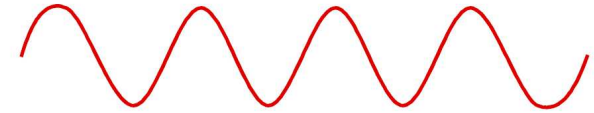
200 280 320 400 760 nm

1nm (ナノメートル)=100万分の1mm



可視光線よりも少しエネルギーの高い紫外線は、目には見えませんが、物体の中の電子に少しだけエネルギーを与えて「励起(れいき)」させることが出来、日焼けの原因になったり、「UVレジン」と言う接着剤を固めてアクセサリーを作ったり、ウランガラスなどの蛍光体を光らせることが出来ます。

## エネルギー 小 可視光線



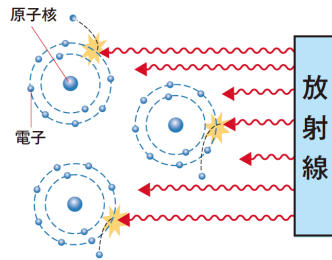
目で見える光、可視光線は波長が長くエネルギーの低い赤から、波長が短くエネルギーの高い紫までの間で、虹の七色のように見え方が異なります。光も電磁波の一種ですから少し電子を励起して、写真フィルムを感光させたり、太陽光発電を行ったり、植物の葉緑体の中で光合成を行うなどのパワーを持っています。波長(波の長さ)と位相(波の位置)の揃った光のことを、レーザー光線と言い、強度(波の高さ)がとても強く、遠くまでまっすぐ飛ぶなどの性質があります。

# 紫外線による遺伝子損傷



放射線を被ばくすることにより細胞中のDNAの鎖が切断されてしまう場合がある。 $\gamma$ 線や $\beta$ 線では**一本鎖切断**が主であるが、LETの大きい $\alpha$ 線では二本とも切断してしまう**二本鎖切断**が起こる場合がある。いずれの場合もバックアップデータから修復が行われるが二本鎖切断ではより困難であり、修復ミスが最終的に発がんにつながる。

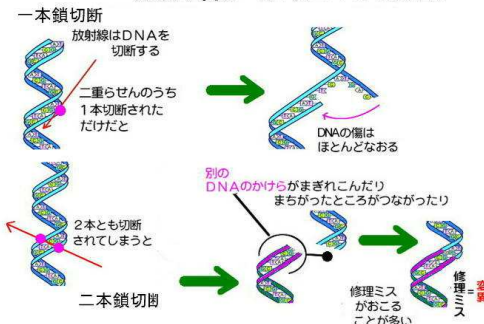
## 電離作用



紫外線は電離放射線には分類されず(法令上空気を電離できるエネルギーを有する光子、荷電粒子を電離放射線と呼ぶ)、DNAの主鎖を切るだけのエネルギーは無いが、配列している塩基同士を**励起**して接合してしまう場合がある。特に、**ピリジミン二量体**の生成が紫外線による損傷の主たる物と言われており、DNAの複製を妨げる遺伝子損傷となるが、ほとんどの細胞はこれらの損傷を修復する酵素を持っている。

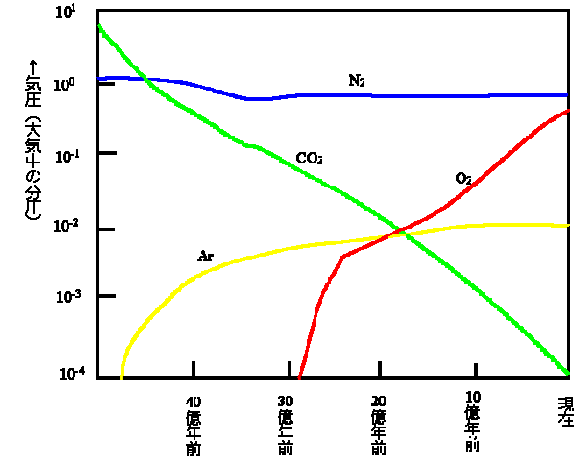
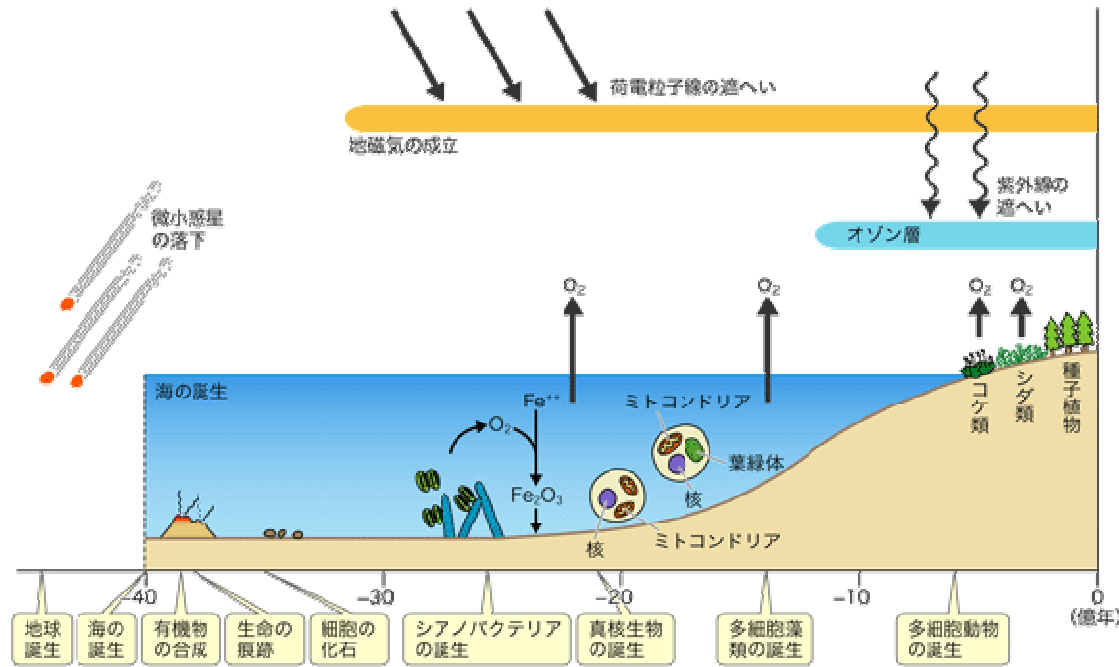
ところがウイルスは自分自身では生命活動を行えず、これらの損傷は感染先の細胞に入って初めて修復される。また、コロナウイルスは**1鎖RNA**ウイルスであり、バックアップを持つ二重鎖では無い。このため比較的紫外線に弱いのでは無いか、と言うのが研究を始めたきっかけ。結局、1鎖RNAタイプのウイルスが系統的に紫外線に弱いというようなことは無いようだが、吸収線量の正確な評価など更なる検討が必要。

## 放射線によるDNA切断



さらに、波長 254 nm の紫外線は 4.9 eV 程度のエネルギーを持ち、酸化還元電位 2.42 eV のスーパーオキシドや同じく 2.85 eV のOHラジカルなどの活性酸素を生成可能で、間接作用も起こりうる。

# 生物進化と紫外線



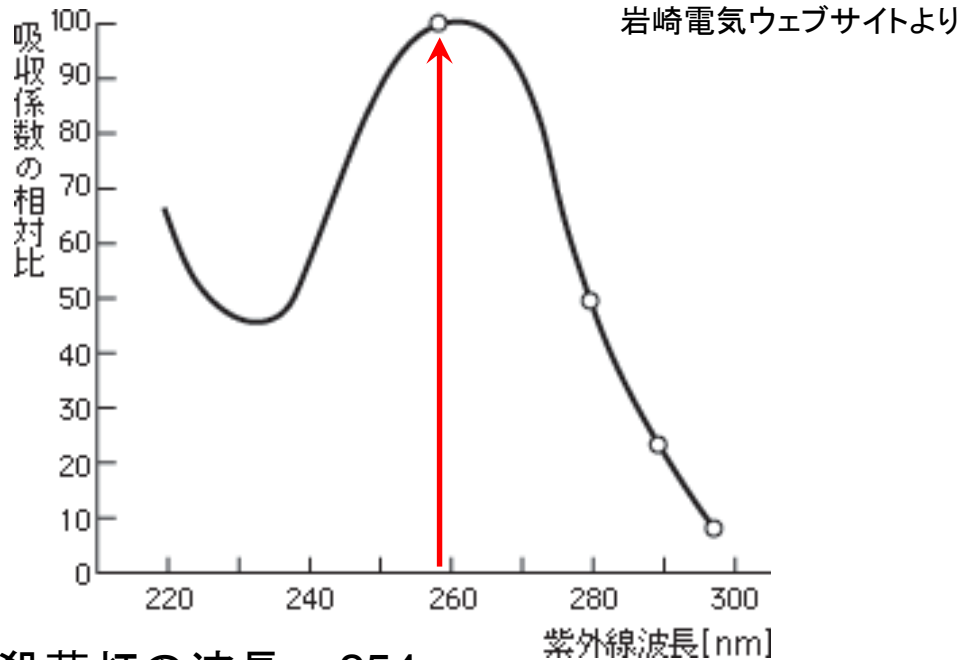
出展: 実験医学 online 生物の多様性と進化の驚異  
[https://www.yodosha.co.jp/jikkenigaku/mb\\_lecture\\_ex/vol2n1.html](https://www.yodosha.co.jp/jikkenigaku/mb_lecture_ex/vol2n1.html)

生物が誕生した当初、有機物のスープからエネルギーを嫌氣的(酸素を使わず)に取りだしていた生物はやがて光合成を行うようになり、酸素を放出しました。

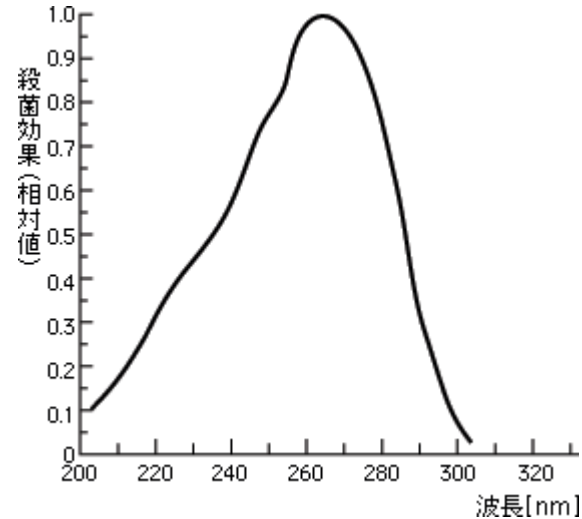
酸素濃度が高くなると生物は酸素呼吸により効率的にエネルギーを取り出すことが出来るようになり、やがて大気上層でオゾンが作り出されると紫外線が遮蔽され、陸上に進出して爆発的な進化を遂げました。

# UV-C によるウイルスの不活化

DNAに対する紫外線吸収の波長依存性



殺菌作用の紫外線波長依存性



UV-C	UV-B	UV-A
200-290nm	290-320nm	320-400nm

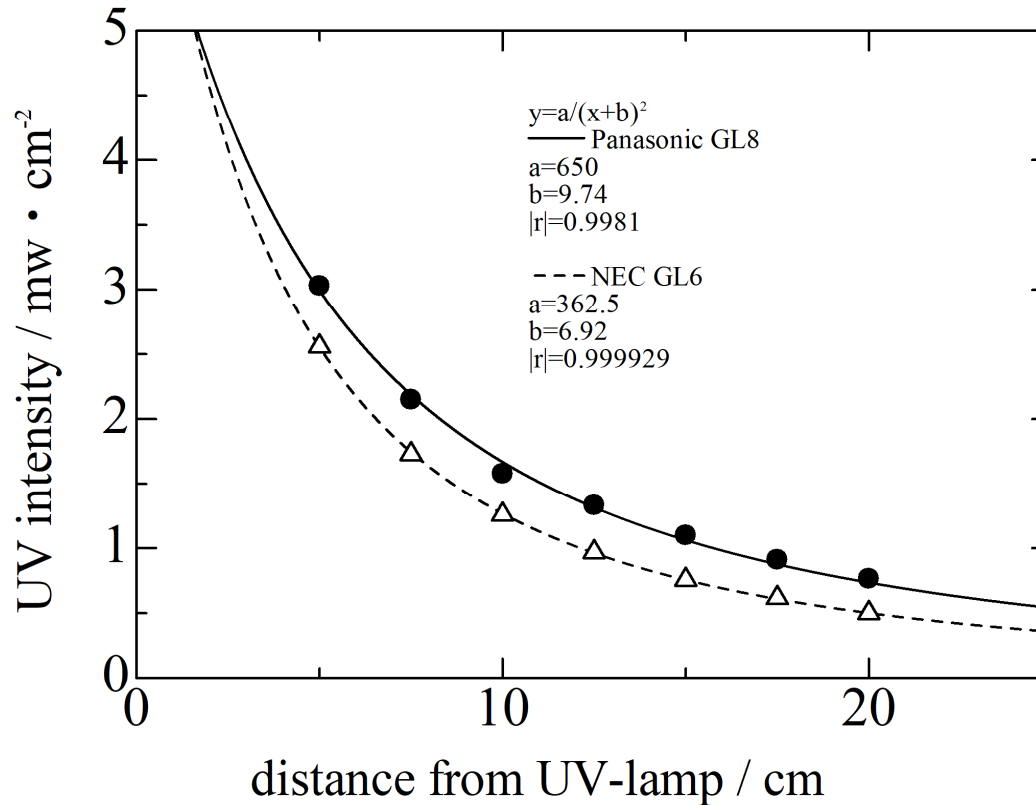
殺菌灯の波長 = 254nm

紫外線に対する殺菌、ウイルスの不活化の研究はほぼ全てが波長254nmの殺菌灯について行われている。様々な菌、ウイルスについて横断的なデータが存在する。

太陽光に含まれるUV-Bについては古くから殺菌効果が知られているが、定量的研究は極めて限られている。

近年話題になっている222nmの遠紫外光は、透過力が極めて小さく、皮膚ごく表面の20 $\mu$ m程度の厚さの角質層などで止まってしまう細胞にまで到達せず、炎症や皮膚癌などを引き起こさない。その一方で物体の表面に付着した直径0.1 $\mu$ m程度のウイルスの中までは届くため、遺伝子に損傷を与えて不活化できる。ウイルスよりも大きい菌(直径1 $\mu$ m程度)の場合細胞質の中のDNAまで到達する量が少なくなるため効果は小さくなる。

# 紫外線強度の評価



紫外線の強度は、放射線と全く同様に距離の二乗に反比例して減衰する。

ランプの出力のみでは照射量を決定することが出来ず、対象物との距離、時間を考慮して積分された照射量の評価が必要。

# 色々な物質に対する透過力

透明なプラスチックであってもほとんど紫外線は透過しない。ポリプロピレンは若干透過したため、マスクリーン4はきっちりと目張りをする必要があった。ガラスは非常に透過率が低いですが石英ガラスは透過率が高いため、殺菌灯に用いられている。通常は天然の水晶を溶解した熔融石英が使われるが、化学的に合成したSiO<sub>2</sub>で作成した合成石英はさらに透過率が高く、185nmの成分も一部透過してオゾンが発生させる。

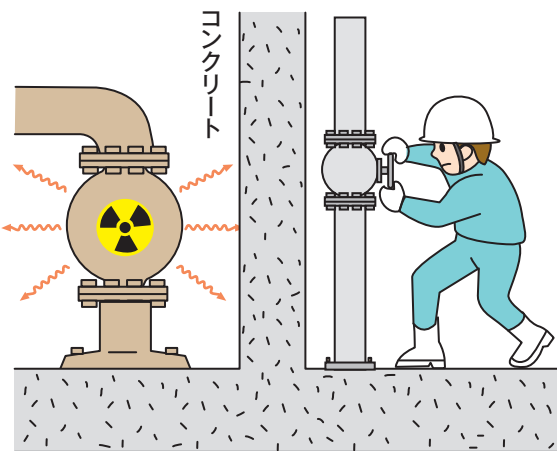
遮蔽物	遮蔽前 I <sub>0</sub>	遮蔽後 I	透過率
	mW/cm <sup>2</sup>	mW/cm <sup>2</sup>	%
メガネ(プラレンズ)	1.10	0.000	0.0
ペットボトル横置き(空)	1.10	0.000	0.0
ポリスチレン(1.4mm厚コレクションケース)	1.10	0.000	0.0
ポリプロピレン(1.5mm厚コンテナケース)	1.11	0.288	25.9
コンテナ遮蔽用アルミシート	1.12	0.003	0.3
サージカルマスク(平面)	1.10	0.080	7.3
サージカルマスク(プリーツ開いて)	1.10	0.140	12.7
塩ビラップ 6μm厚 1枚	1.11	0.952	85.8
塩ビラップ 6μm厚 2枚	1.11	0.900	81.1
塩ビラップ 6μm厚 4枚	1.11	0.660	59.5
ニトリル手袋(モノタロウ、青)生地1枚	1.70	0.000	0.0
クアラテック手袋(アズワン)生地1枚	1.70	0.000	0.0
コピー用紙(再生紙)	0.70	0.000	0.0
コピー用紙(高白色)	0.70	0.000	0.0



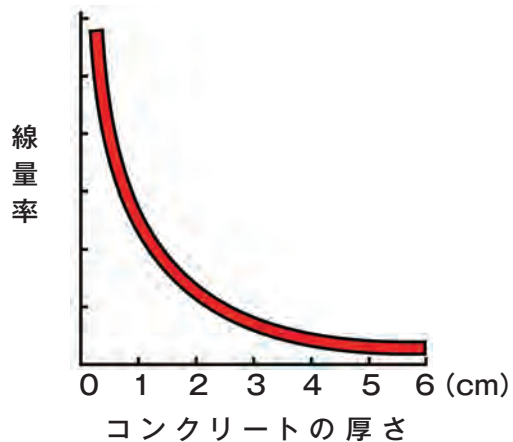
# 放射線防護の基本

## 1. 遮へいによる防護

(線量率) = 遮へい体が厚い程低下

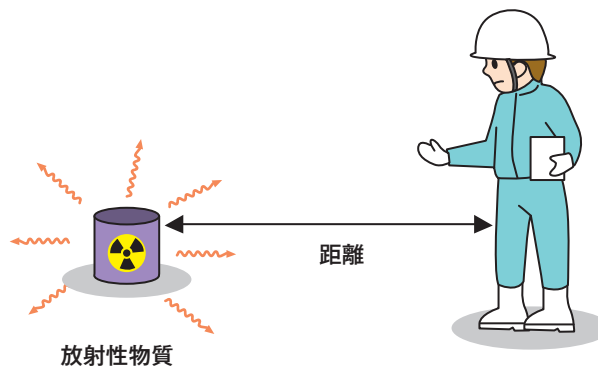


(mSv/h)

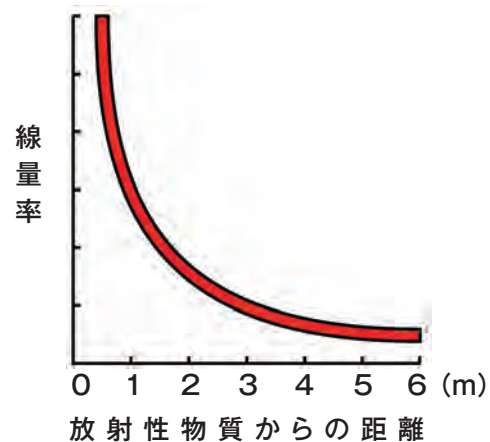


## 2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例

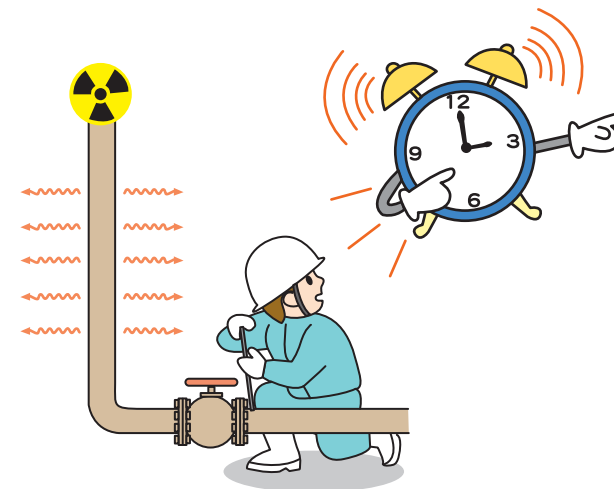


(mSv/h)



## 3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



(mSv)

