

東京大学理学部

Radiation Safety Course, School of Science, University of Tokyo

放射線取扱者講習会

(一般講習会)

光子の遮蔽と線量計算

加速器・放射光施設的安全利用

密封線源・エックス線装置の安全取扱

Shielding of Photons & Dose Calculation

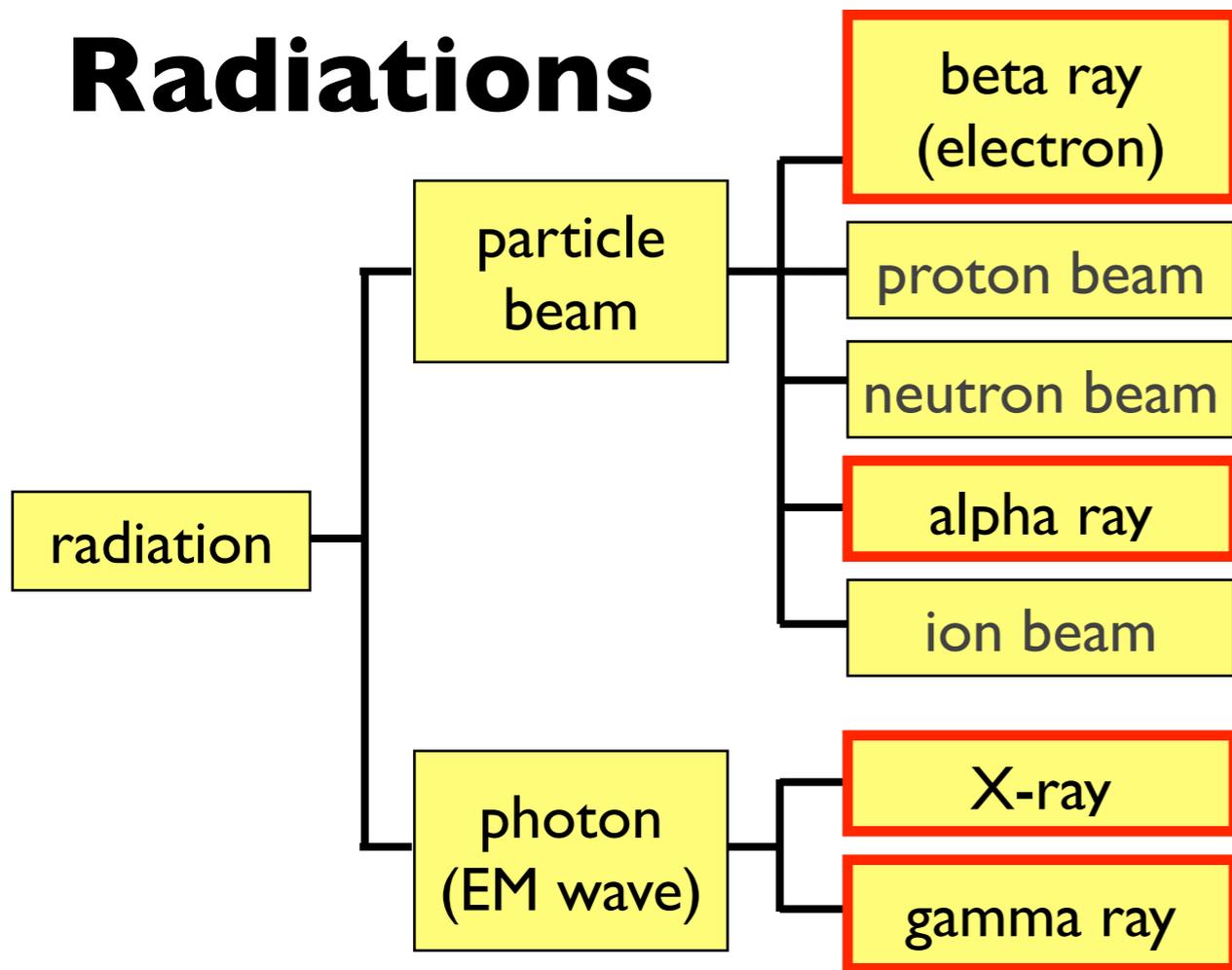
Safety at Accelerator & Synchrotron Radiation Facilities

Safe Handling of Sealed Sources & X-ray devices

2020年度 後期

Autumn 2020

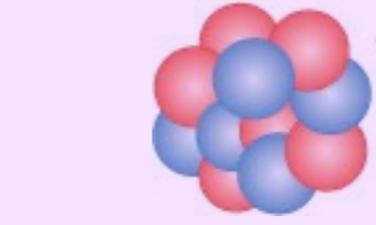
Radiations



Nucleus N

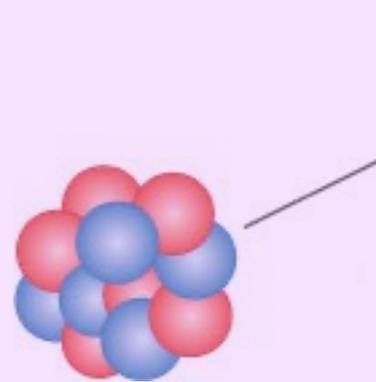
MeV order

high energy



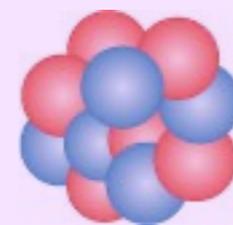
α ray : He nucleus

several MeV



β ray : electron at high speed

10 keV ~ MeV



γ ray : photon (EM wave)

10 keV ~ MeV

Typical energies of radiation

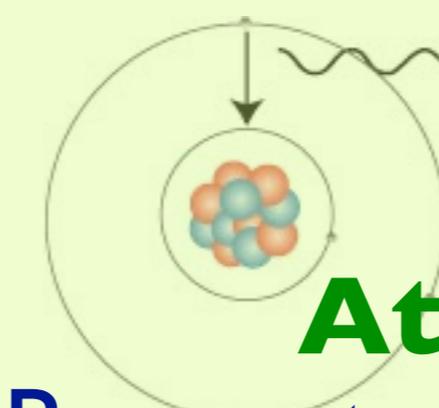
☞ 10 keV ~ several MeV (α, β, γ)

Cf. Atomic binding energies

☞ around 10 eV for outermost-shell electrons (1 eV = 96 kJ/mol)

Speed of radiation

☞ few ~ 100% of light speed

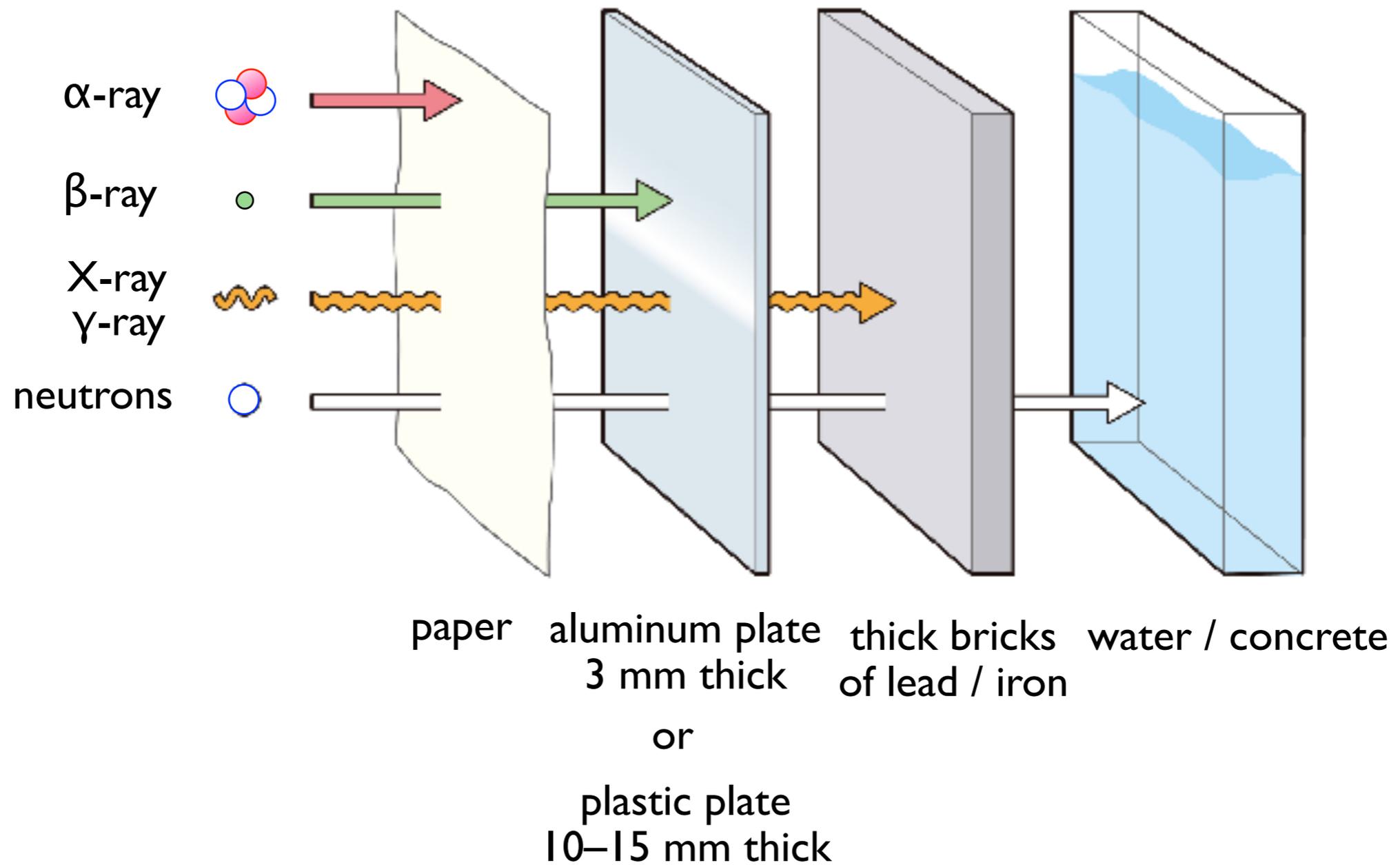


X ray : photon (EM wave)

Atom A 1 ~ 100 keV

Bremsstrahlung ~ several MeV

Penetration of radiation



Exposure to different radiations

- **α -ray** : a few cm of range in the air.
Stops at surface cells of organism.
Internal exposure needs attention :
all the energies are given to cells within
a short range.
- **β -ray** : **external exposure** to the **skin**
& **internal exposure** need attention.
- **γ -ray** : **penetrates through the body**,
some without any interaction while the
others with some interaction
(photoelectric effect / Compton scattering)
and get **absorbed inside the body**.
The interior of the body are equally exposed
to radiation even in the case of external exposure.
- **X-ray** (> 500 keV): **analogous to γ -ray**.
X-ray (< 50 keV): **damage mainly to skin.**

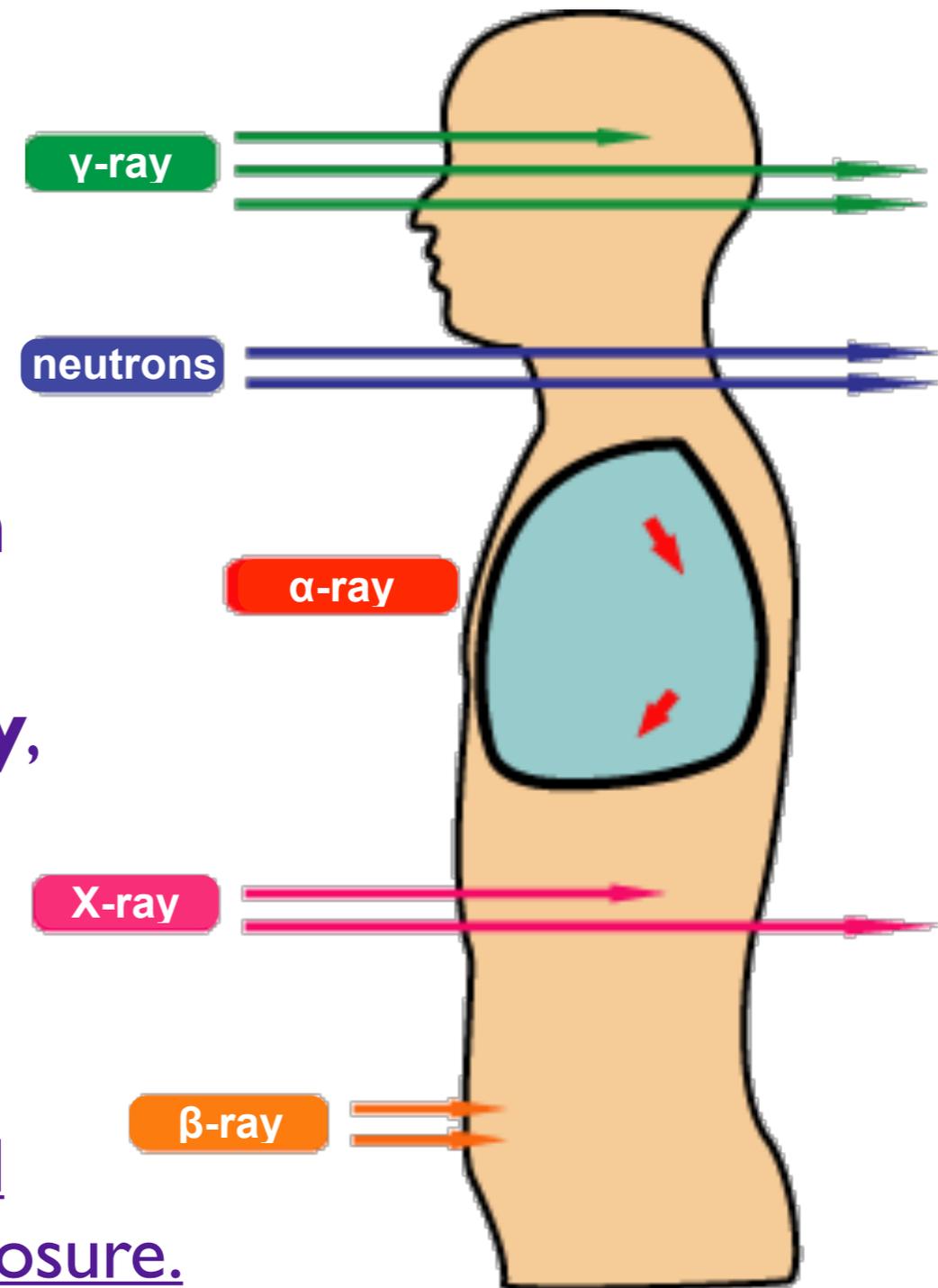


図3 人体を透過する放射線

Slowing-down and **energy loss** of charged particles (α -ray, β -ray etc.)

荷電粒子の減速
(エネルギー損失)

Step-by-step energy loss due to ionization and excitation of atoms / molecules.

Fixed range of the same heavy particles for a given energy.

(with a slight deviation)

Stopping power = energy loss per unit length = $-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$

Attenuation of photons (X-ray, γ -ray)

光子の減衰 (減弱)

Photons are lost by stochastic processes of absorption or scattering, but the rest remain intact through.



Exponential decrease of photon number

reaction cross section σ is proportional to the reaction probability per unit length.

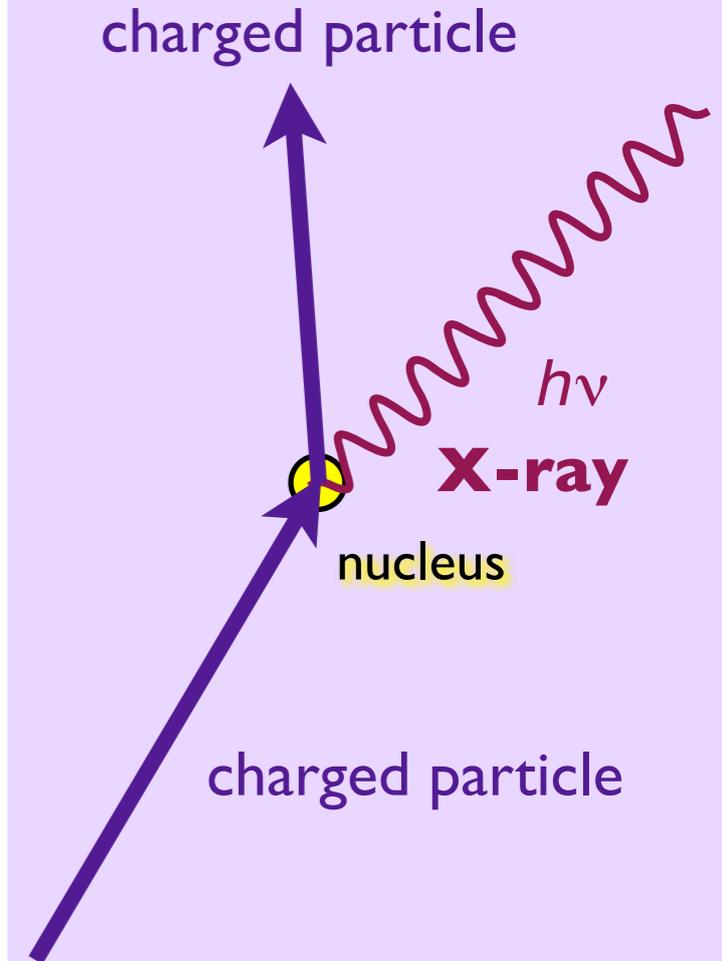
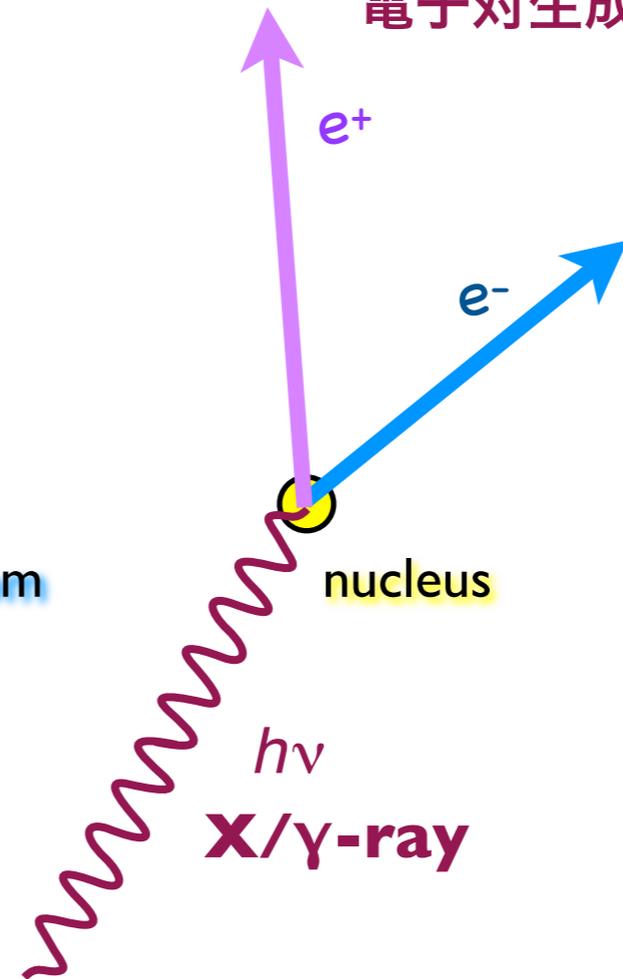
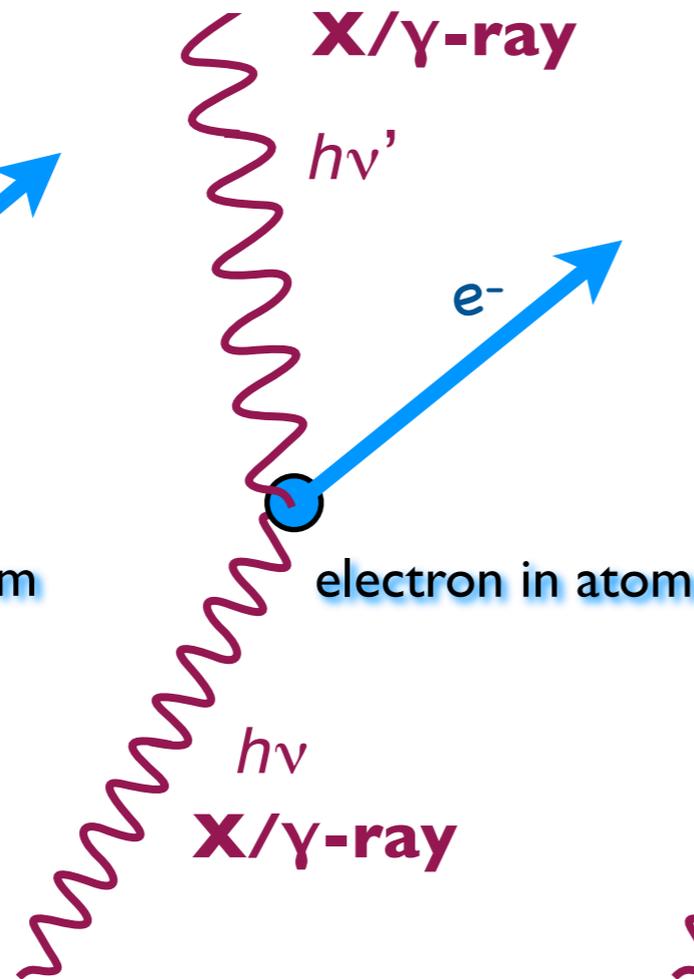
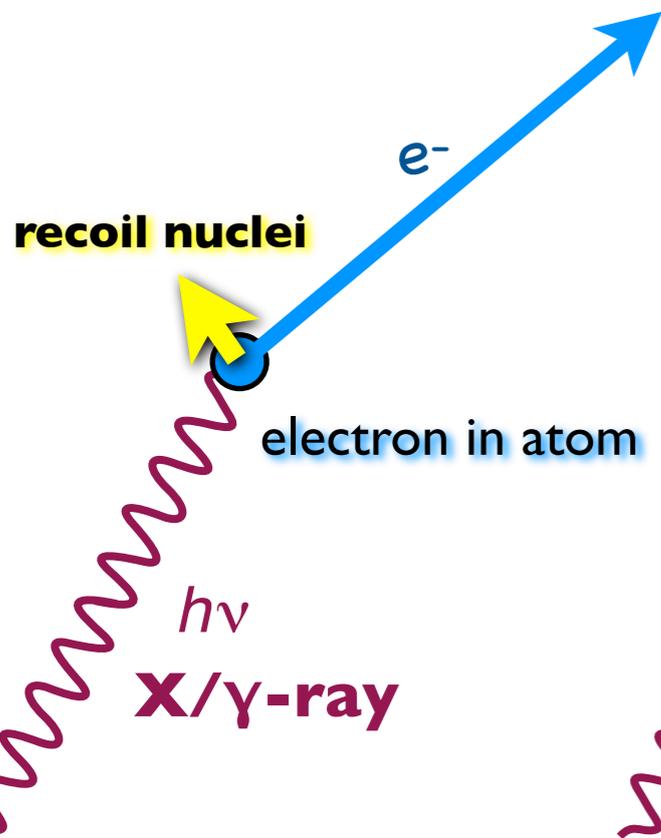
Interaction relating to photons (X-ray, γ -ray)

photoelectric effect 光電効果

Compton scattering コンプトン散乱

pair production 電子対生成

bremsstrahlung 制動放射



A photon kicks **one electron** out of an atom. The photon is absorbed.

A photon is **scattered by one electron**. The photon loses a large fraction of its energy.

A photon with more than a MeV energy produces electron-positron pair.

A charged particle emits a photon when they are abruptly decelerated or when their trajectory is curved.

Generation of high-energy electrons
(same particles as β -ray)

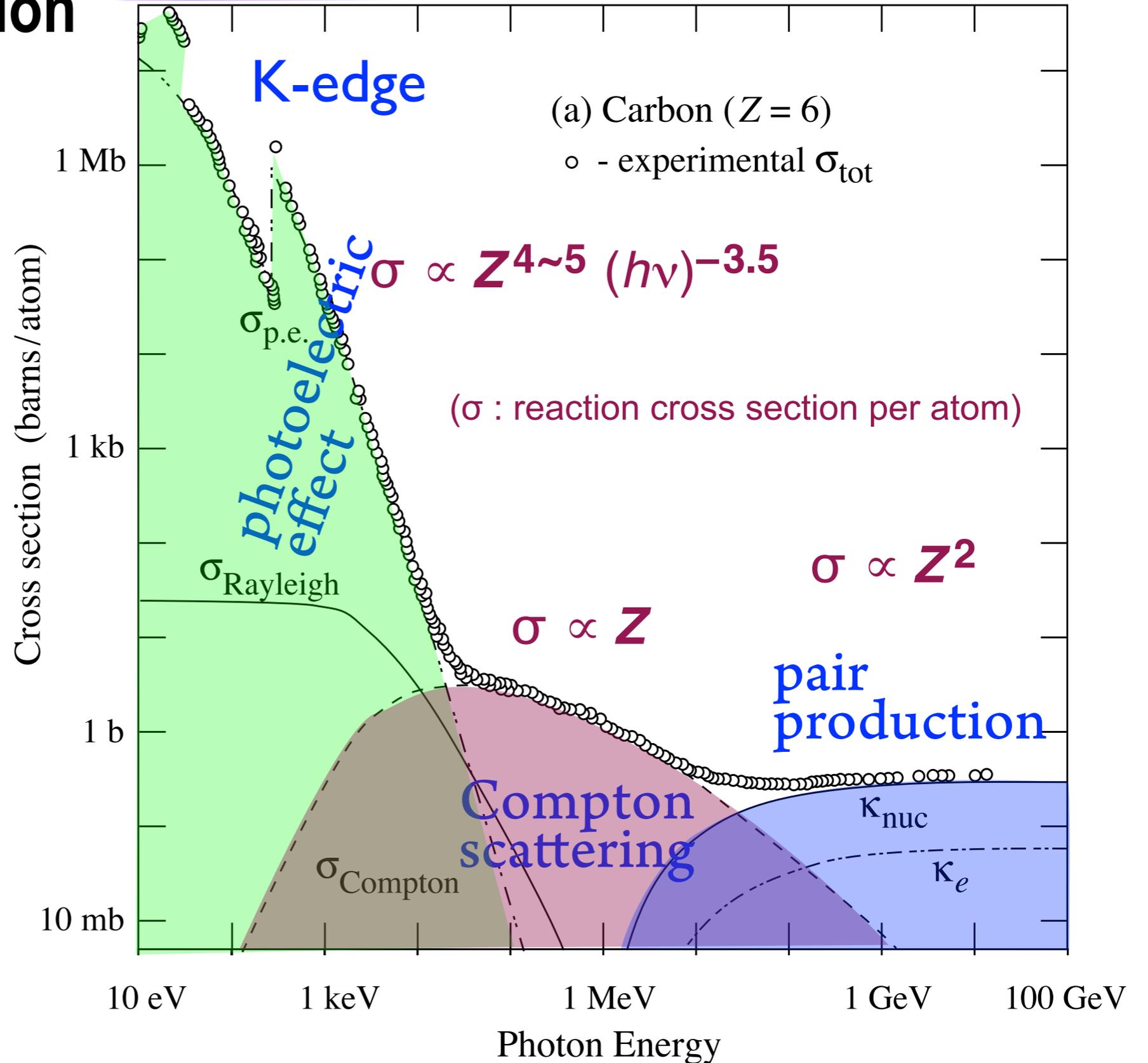
photon



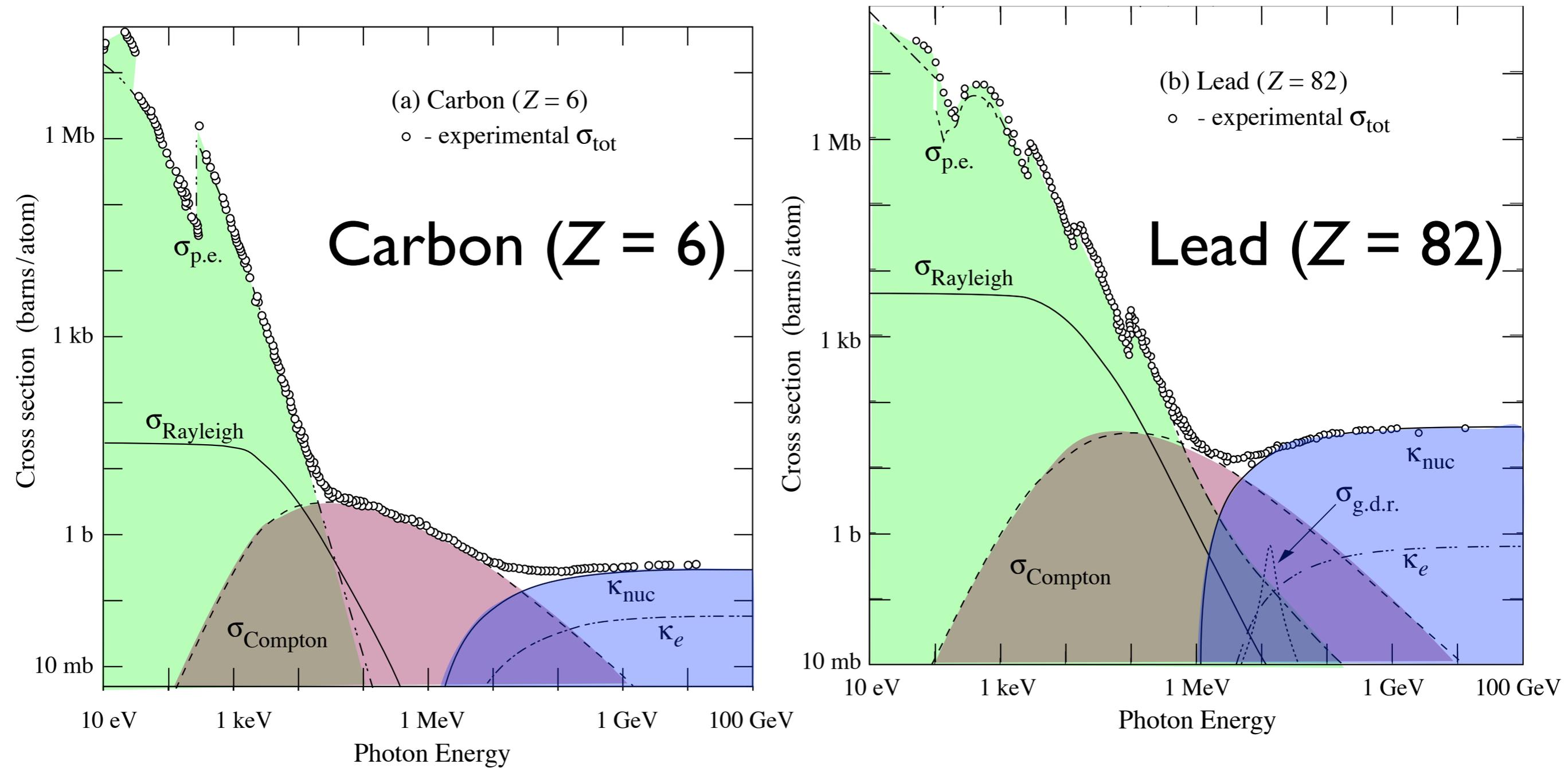
reaction cross section

1 Mb
= $(0.1 \text{ \AA})^2$

1 barn
= 10^{-28} m^2
= $(10 \text{ fm})^2$



Material dependence of photon cross sections



photoelectric effect $\propto Z^{4\sim 5}$

Compton scattering $\propto Z$

pair production $\propto Z^2$

Röntgen radiography

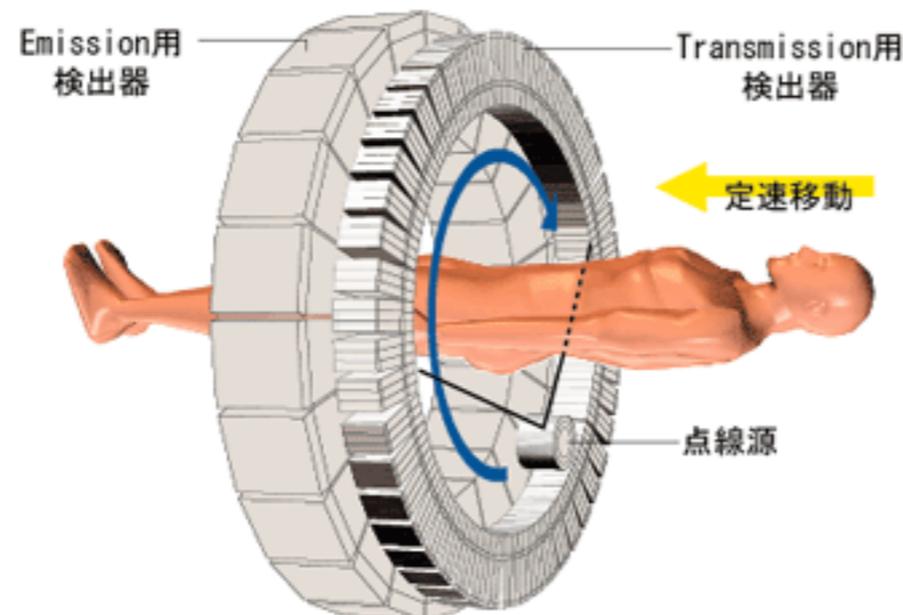
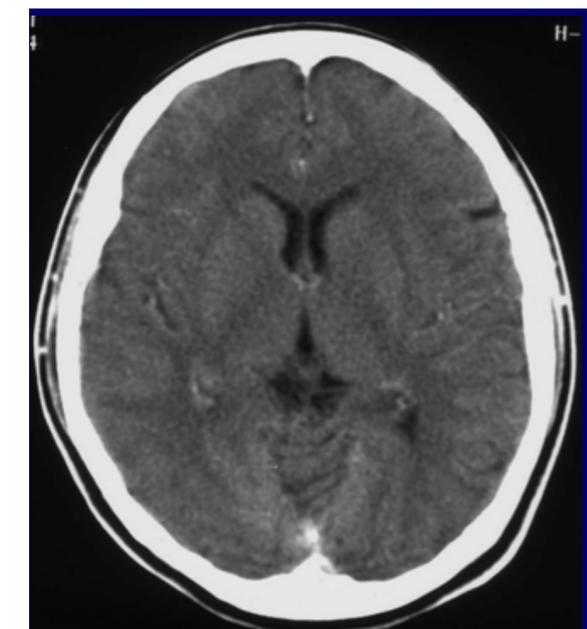
photographing using the difference in the absorption coefficient



contrast media (I, Ba, Xe) : large Z = large attenuation
 造影剤 (radiopaque substances) 減衰(減弱)係数大

drastically larger cross sections for larger atomic number Z of the photoelectric effect and Compton scattering

X線 CT



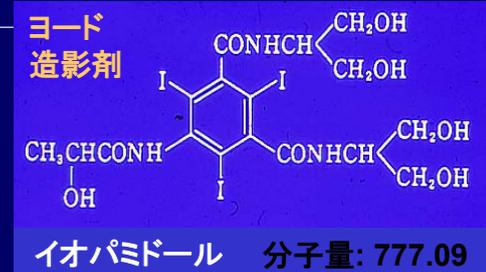
X線検査用造影剤

* 陽性造影剤

	元素	原子番号	K吸収端
・ヨード造影剤: 血管造影用	I	53	33.16 keV
・硫酸バリウム: 消化管造影用	Ba	56	37.41 keV
・キセノンガス(脳血流CT)	Xe	54	34.56 keV

* 陰性造影剤

- ・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...
- ・オリーブ油(膀胱CT)



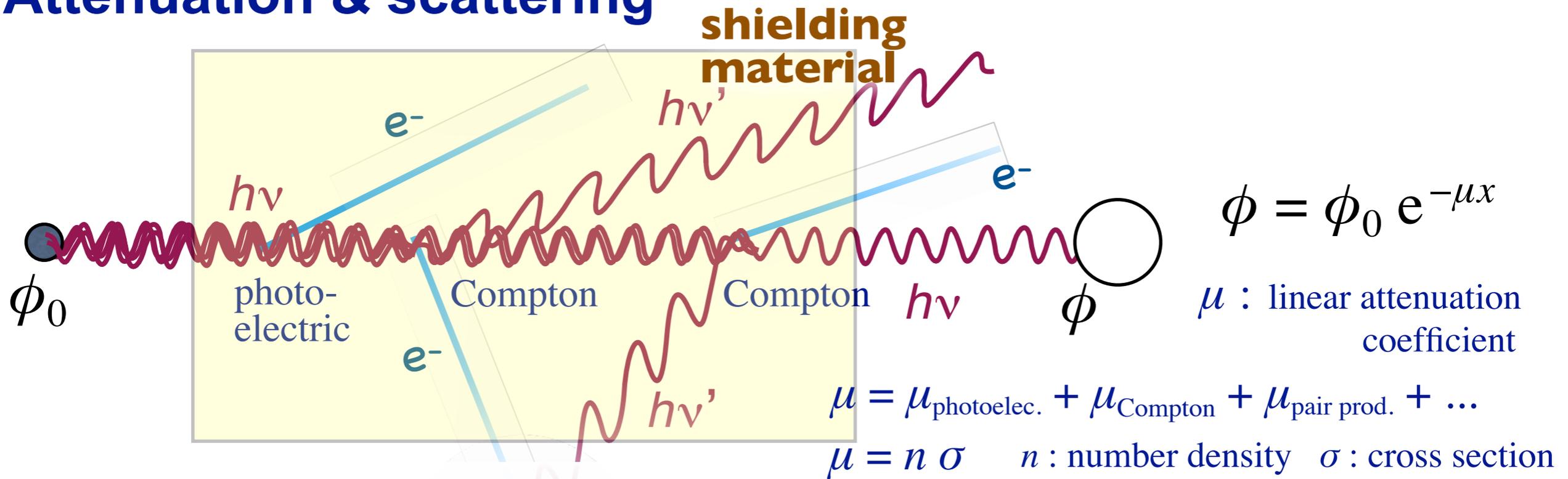
国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

Quiz #3

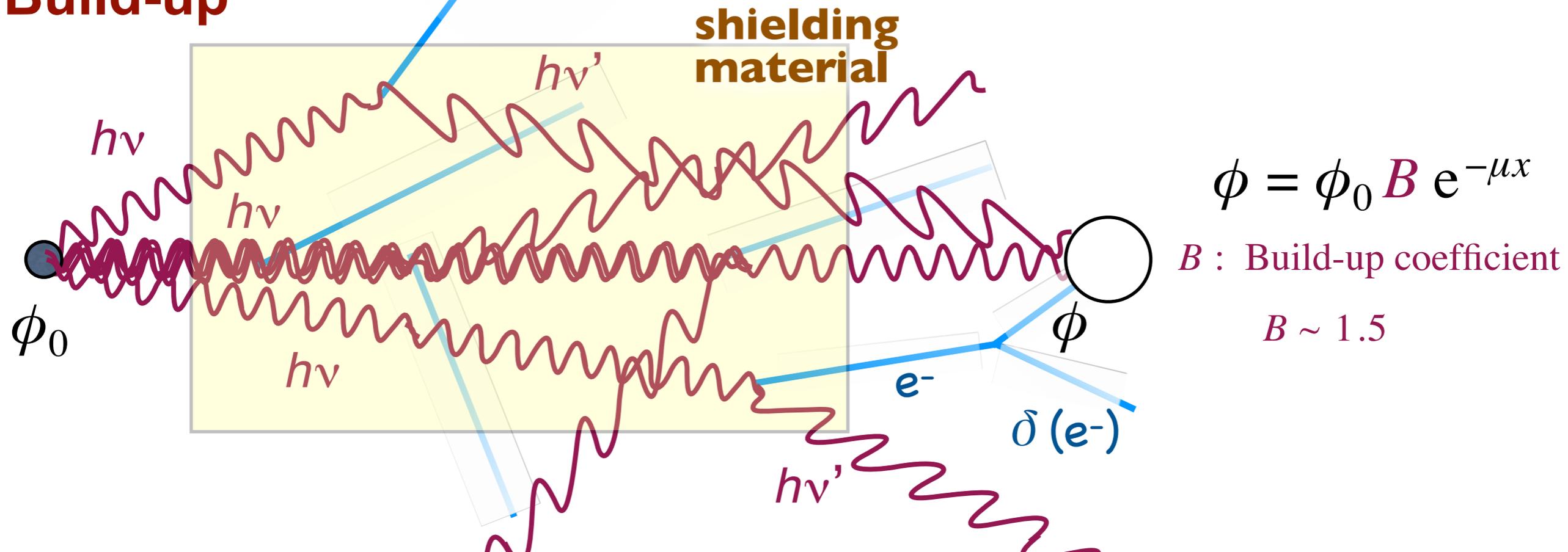
Choose the physical process which contributes most to the attenuation of **100 keV X-rays** in a shielding material of lead ?

- photoelectric effect
- Compton scattering
- pair production
- Rayleigh scattering

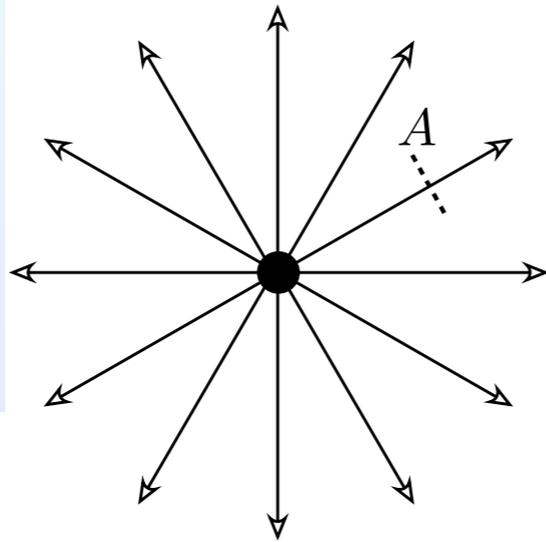
Attenuation & scattering



Build-up



Dose calc. for external exposure (γ -ray)



$\dot{\Phi}$: particle fluence rate

$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu^{\text{air}} r} \eta P}{4\pi r^2} \quad \eta = 0.851$$

$\eta = 0.851$
 γ -ray emission probability

P : radioactivity
[Bq]

\dot{H} : equivalent dose rate
[Sv/s]

$$\mu^{\text{air}} = 0.0100 \text{ m}^{-1} \quad \text{linear attenuation coefficient for air}$$

^{137}Cs γ -ray attenuates to half in 70 m in air.

$$\dot{H}/\dot{\Phi} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho)^{\text{water}} = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2$$

$(\mu_{\text{en}}/\rho)^{\text{water}} = 0.033 \text{ (g/cm}^2\text{)}^{-1}$
mass energy-absorption coefficient for water

Case of soil contamination of uniform surface density :

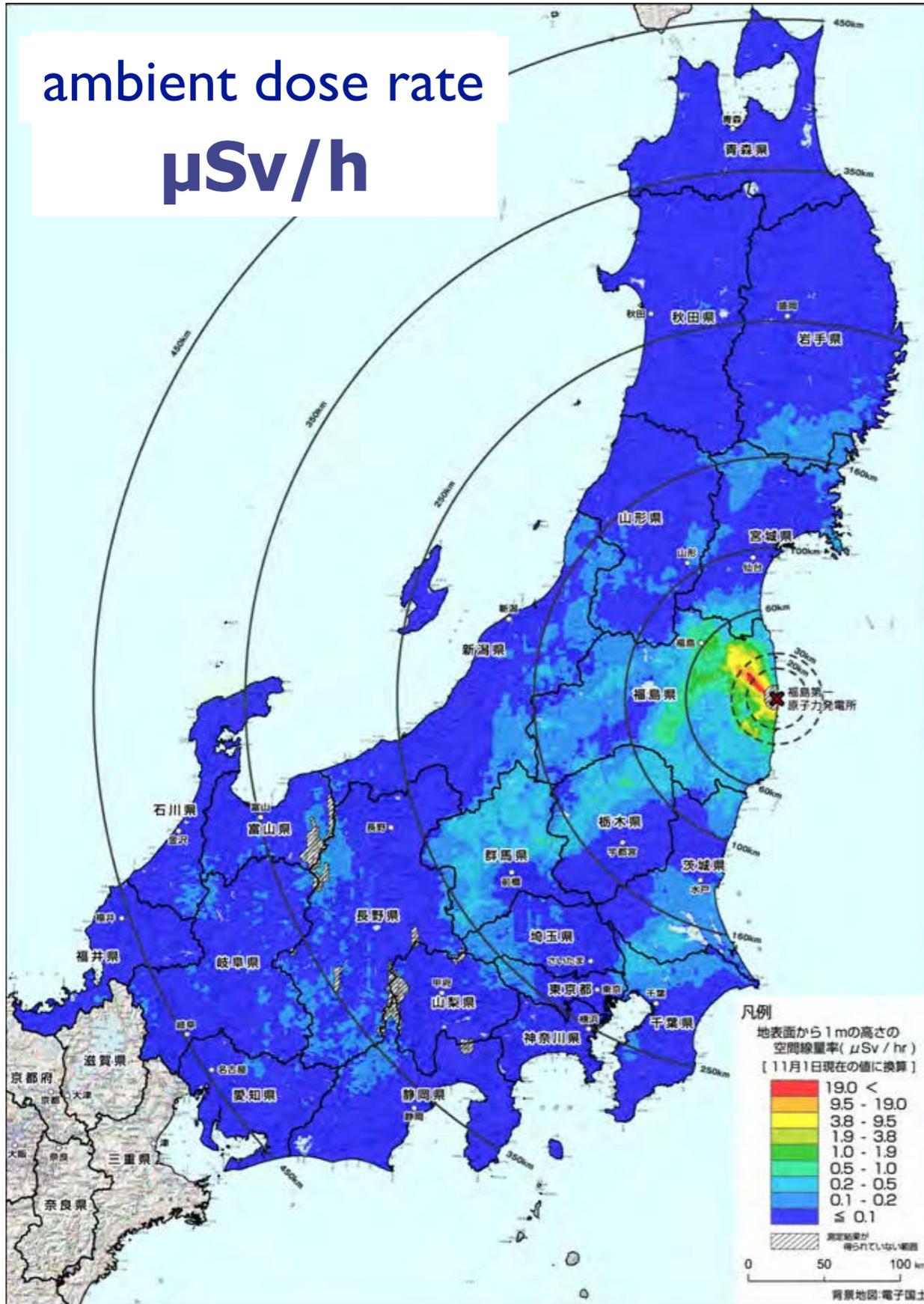
^{137}Cs : 2.1 ($\mu\text{Sv/h}$) / (MBq/m^2) calculation by IAEA

Problem with decontamination :

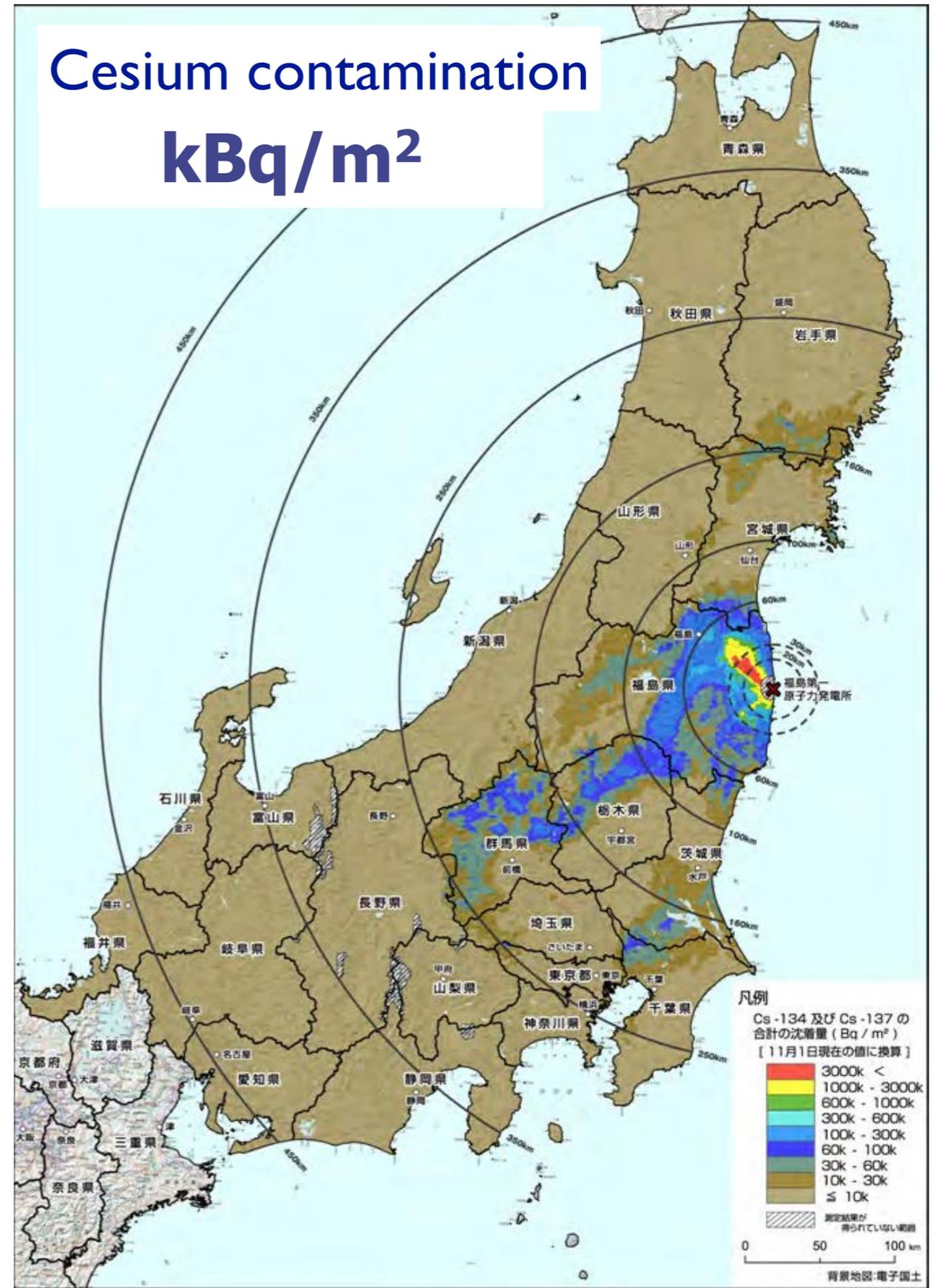
half of the dose due to soil contamination of distance 10–100 m.

Radioactive contamination map : aerial monitoring by MEXT

ambient dose rate
 $\mu\text{Sv/h}$



Cesium contamination
 kBq/m^2



http://radioactivity.mext.go.jp/ja/1910/2011/11/1910_1125_2.pdf

^{137}Cs : $2.1 (\mu\text{Sv/h}) / (\text{MBq/m}^2)$ calculation by IAEA

Radioactive contamination map

福島第一原発から漏れた放射能の広がり
Radiation contour map
of the Fukushima Daiichi accident

国・自治体の計測値7000余りを@nnistarさんがプロットした地図を見て、この等値線を引いた。

- 8 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 4 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 2 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 1 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 以上
- 0.25 $\mu\text{Sv/h}$ 以上

- 行政による措置
- 20km圏 (避難完了区域)
 - 計画的避難区域
 - 緊急時避難準備区域

$\mu\text{Sv/h}$ (マイクロシーベルト/時)



What does
protective clothing
放射線防護服
protect ?



早川由紀夫教授(群馬大学)作成、7月26日版

三訂版7月26日(初版4月21日)
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/)
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),
Source: @nnistar
地図製図: 萩原佐知子
背景地図には電子国土ポータル(portal.cyberjapan.jp)の地図を使用しました。

Calc. of internal exposure

e.g. Exposure to thyroid by I-133

放射線防護のための線量 **protection quantity**

預託線量 **committed dose (internal exposure) [Sv]**
内部被曝

預託等価線量

committed equivalent dose

預託実効線量

committed effective dose

Sum of calculated dose over the coming 50 years
(or dose until the age 70 for children and infants).

Effective dose coefficient

(for adults)

isotope	half life	ingestion (Sv/Bq)	inhalation (Sv/Bq)
C-14	5730 yr	5.8×10^{-10}	5.8×10^{-9}
P-32	14.3 d	2.4×10^{-9}	3.4×10^{-9}
K-40	1.28×10^9 yr	6.2×10^{-9}	2.1×10^{-9}
I-131	8.04 d	2.2×10^{-8}	7.4×10^{-9}
Sr-90	29.1 yr	2.8×10^{-8}	1.6×10^{-7}
Cs-137	30.0 yr	1.3×10^{-8}	3.9×10^{-8}

ingestion	baby (3 mo)	infant (1 yr)	child (2-7 yr)	adult
I-131	1.8×10^{-7}	1.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}	2.2×10^{-8}

Dosimeters (personal / environment monitoring)

Fricke dosimeter フリック線量計

$\text{Fe}^{2+} + \text{radiation} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$, absorbance measurement

thermoluminescence dosimeter (TLD) 熱ルミネセンス線量計

Fluorite or other crystal + radiation \rightarrow (heating) \rightarrow fluorescence

蛍石

Electrons / holes are captured in lattice defects.

glass badge (RPL: radio-photoluminescence) 蛍光ガラス線量計



Ag^+ -activated Phosphate Glass + radiation \rightarrow (UV) \rightarrow fluorescence

$\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}^0, \text{Ag}^{++}$ production of color centers

ガラス線量計

glass dosimeter : cobalt glass \rightarrow color center (colored)



OSL Luxel badge ®

optically stimulated luminescence (OSL) badge

光刺激ルミネセンス線量計

ポケット線量計

pocket dosimeter : ioniz. chamber / semiconductor detector



film badge フィルムバッジ : Silver halide film AgBr



他機関施設でのバッジの使用（加速器・放射光など）

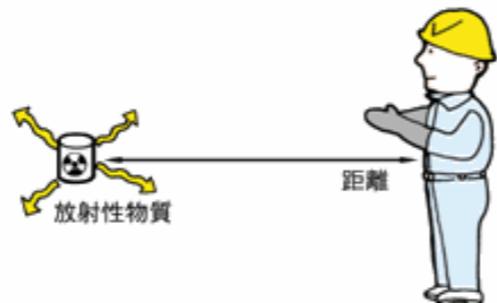
Using Your Radiation Badge (at accelerators, SR facilities)

- **国内**の放射線施設を利用する場合 **at domestic facilities**
 - 東大理学部のパッシも**持参**することを原則とする
Bring your UTokyo-Sci. badge to domestic radiation facilities.
 - 飛行機での**手荷物検査**によるバッジの被曝に留意
Try to avoid X-ray survey of your badge.
- **海外**の放射線施設を利用する場合 **abroad**
 - 特に不要であれば、東大理学部のパッシはむしろ**持参しない**ことを推奨する
We recommend that you do not bring your badges abroad, As long as the facility abroad takes care of your radiation protection.
 - 持参する必要がある場合、**手荷物検査**や**機内での被曝**については、後から記録の修正が必要な場合がある
If you need to bring it abroad, give us reports on possible radiation exposure of your badge at X-ray survey and during your flights.

Radiation protection

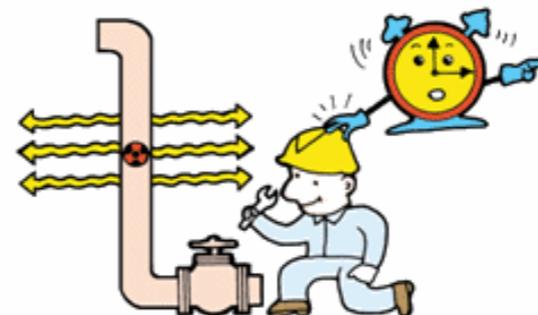
• distance

$$[\text{線量率}] = [\text{距離}]^2 \text{に反比例}$$

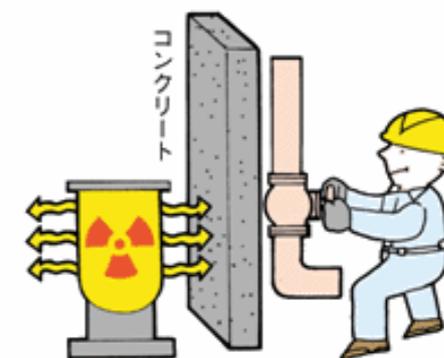


• time

$$[\text{線量}] = [\text{作業場所の線量率}] \times [\text{作業時間}]$$



• shielding



Prevent deterministic effect.

Reduce stochastic effect.

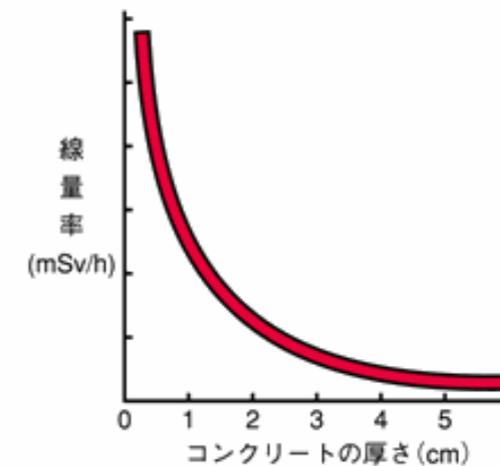
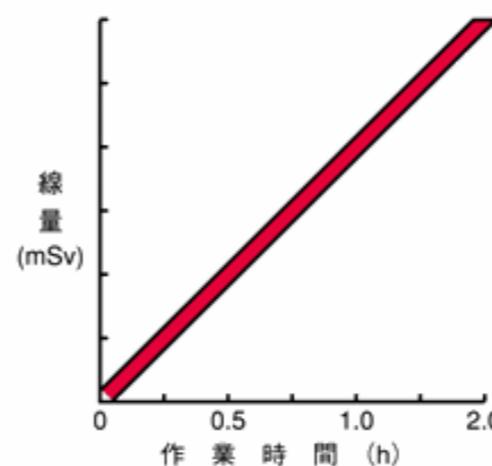
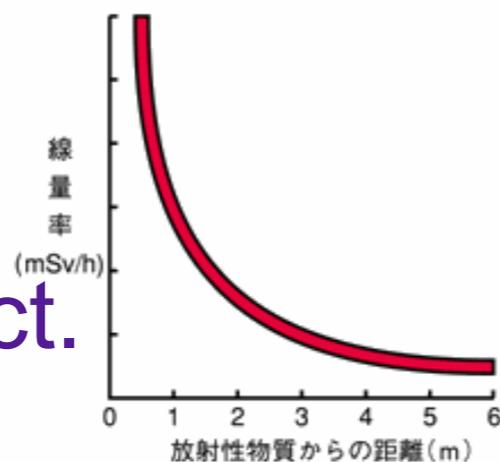


図1 遮へい3原則の図

[出典] 電気事業連合会:「原子力・エネルギー」図面集2003-2004、p.130

Optimization : all exposures shall be kept as low as reasonably achievable, economic and social factors being taken into account.

(**ALARA** principle = As Low As *Reasonably Achievable*)

Dose limit : **1 mSv/yr** for general public (in addition to natural BG).

100 mSv/ 5 yrs and 50 mSv/yr max. for male radiation workers.

Dose limit for individuals

Occupational exposure for Radiation workers

Effective dose	100 mSv / 5 yrs and 50 mSv / yr
women	5 mSv / 3 mo.
pregnant women	1 mSv / period of pregnancy
Equivalent dose	
eye lens	150 mSv / yr
skin	500 mSv / yr
abdomen surface of pregnant women	2 mSv / period of pregnancy

Public exposure for General public

Effective dose	1 mSv / yr
Equivalent dose	
eye lens	—
skin	—

Protection by Jpn domestic law

線量限度の一覧表 (作業者)

	1990勧告	1977勧告
実効線量	20mSv/年 (5年平均)	50mSv/年
水晶体等価線量	150mSv/年	150mSv/年 ²⁾
皮膚等価線量	500mSv/年 ¹⁾	500mSv/年
手・足の等価線量	500mSv/年	500mSv/年 ³⁾
その他の組織	—	500mSv/年

1) 被ばく部位に関係なく、深さ7 mg/cm²、面積1 cm²の皮膚についての平均線量に適用される。

2) 1980年のブライトン声明で300mSv (18歳から65歳までの就業期間の被曝の場合で、65歳までのリスクの最大値)

Annual Risk 1/1000

線量限度の一覧表 (一般公衆)

	1990 勧告	1977 勧告
実効線量	1 mSv/年	5 mSv/年 ¹⁾ , 1 mSv/年 (生涯の平均)
水晶体等価線量	15 mSv/年	50 mSv/年
皮膚等価線量	50 mSv/年 ³⁾	50 mSv/年
その他の組織	—	50 mSv/年 ²⁾

1) 1985年のパリ声明で主たる限度を1年につき1 mSvとして、補助的な限度を5mSv/年とした。

2) 1985年のパリ声明で実効線量当量の制限によって不要になった。

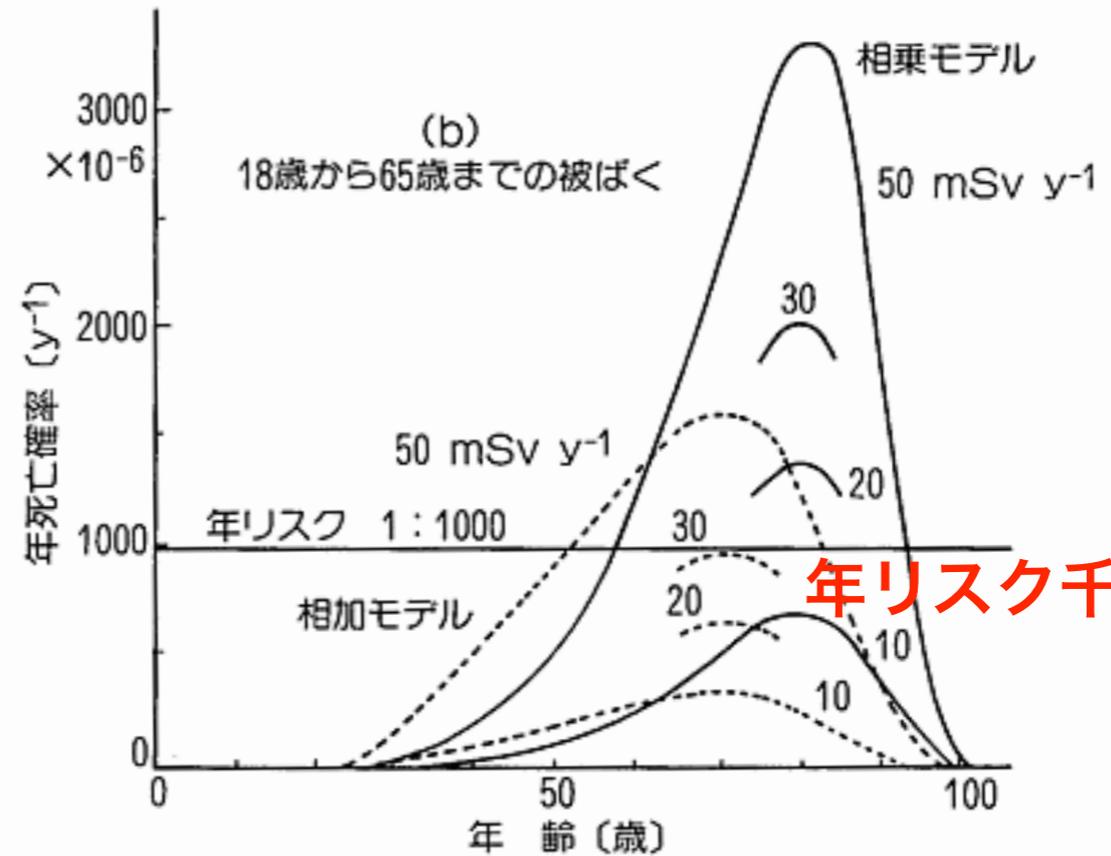
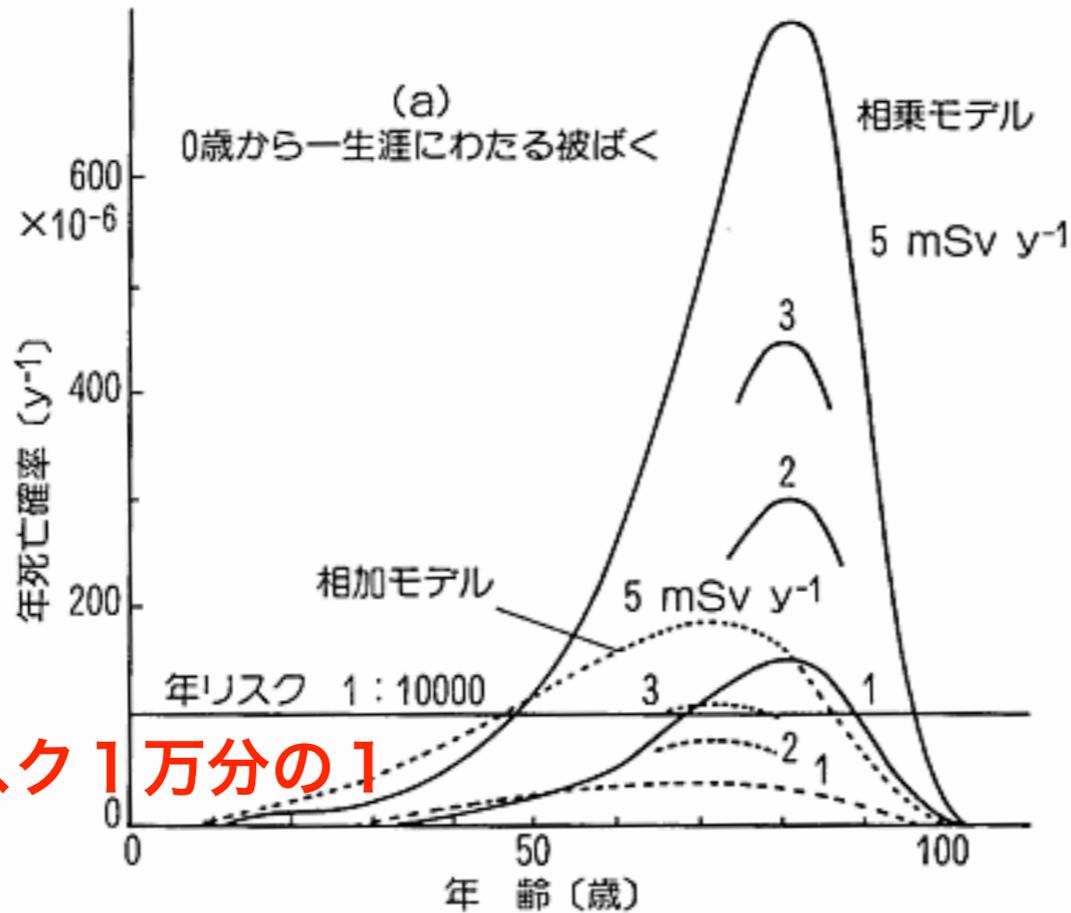
Annual Risk 1/10,000 ICRP recomm.
(毎年被曝の場合、65歳までの最大値)

(出典) (1990年ICRP新勧告と1977年ICRP勧告における線量限度値対照表)

「ICRP1990年勧告-その要点と考え方-」、草間朋子編、日刊工業新聞社、50ページ]

公衆被曝 (一般公衆)

職業被曝 (作業者)



年リスク 1万分の1

年リスク千分の1

a) 誕生から一生涯にわたる被曝 及び b) 18歳から65歳までの被曝
それぞれ女性について計算したもの。線量及び線量率効果係数(DDREF)は2と仮定。

図2 生涯死亡率 (無条件年死亡率)

〔出典〕 ICRP Publication 60 "Recommendation of International Commission on Radiological Protection", (邦訳: 日本アイソトープ協会)、附属書C(図C-9)から引用

Radiation control area

放射線管理区域

管理区域
(使用・貯蔵施設)



許可なくして
立ち入りを禁ず

放射性同位元素
使用室



第 2 種

←開閉→

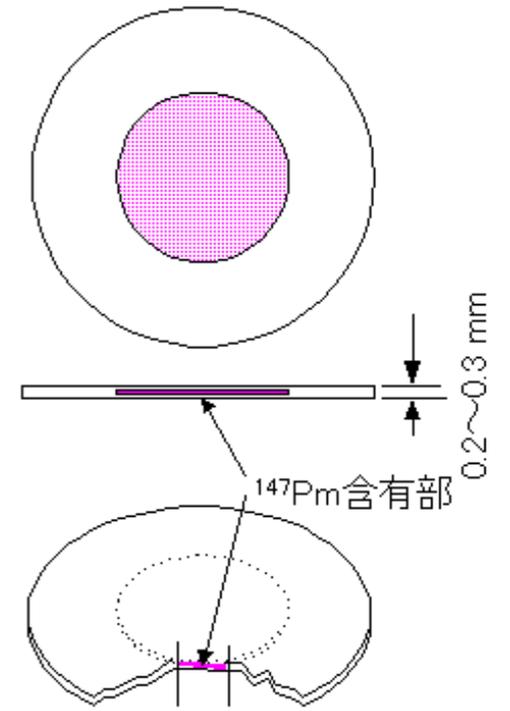


Sealed sources

密封小線源

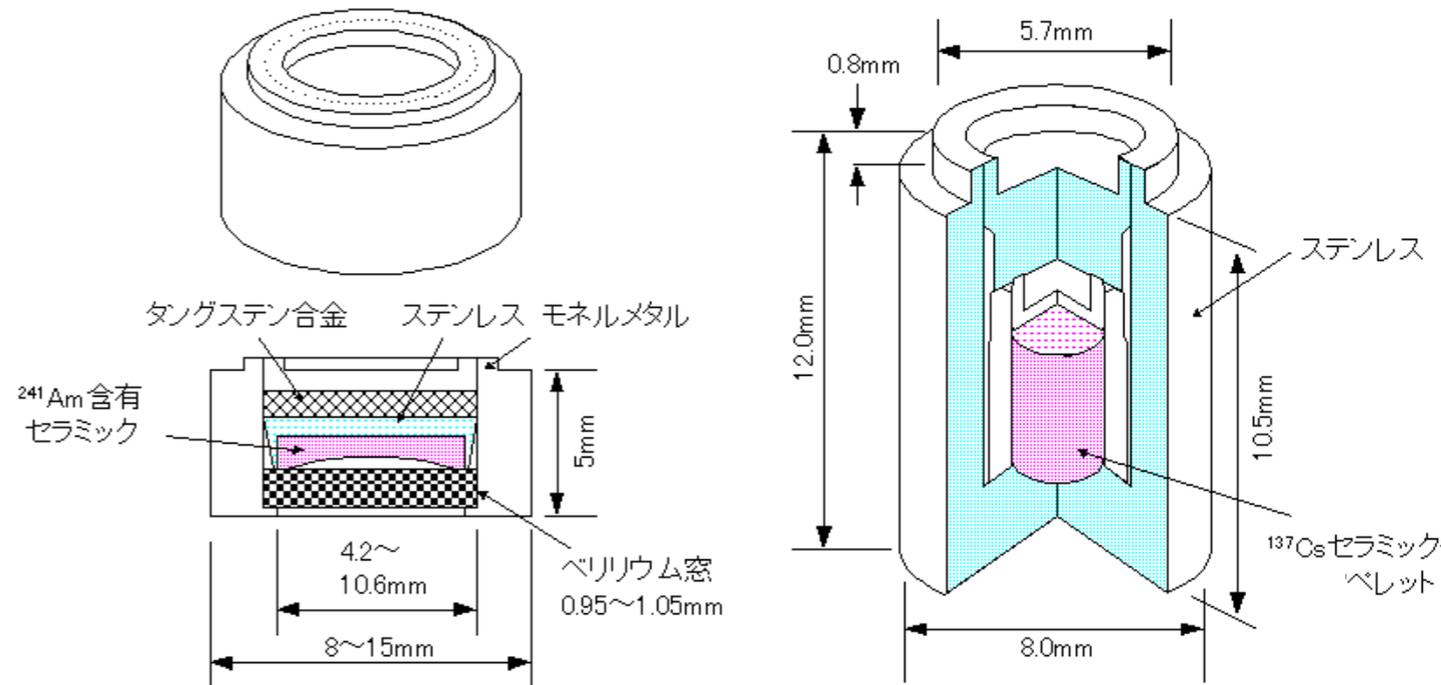
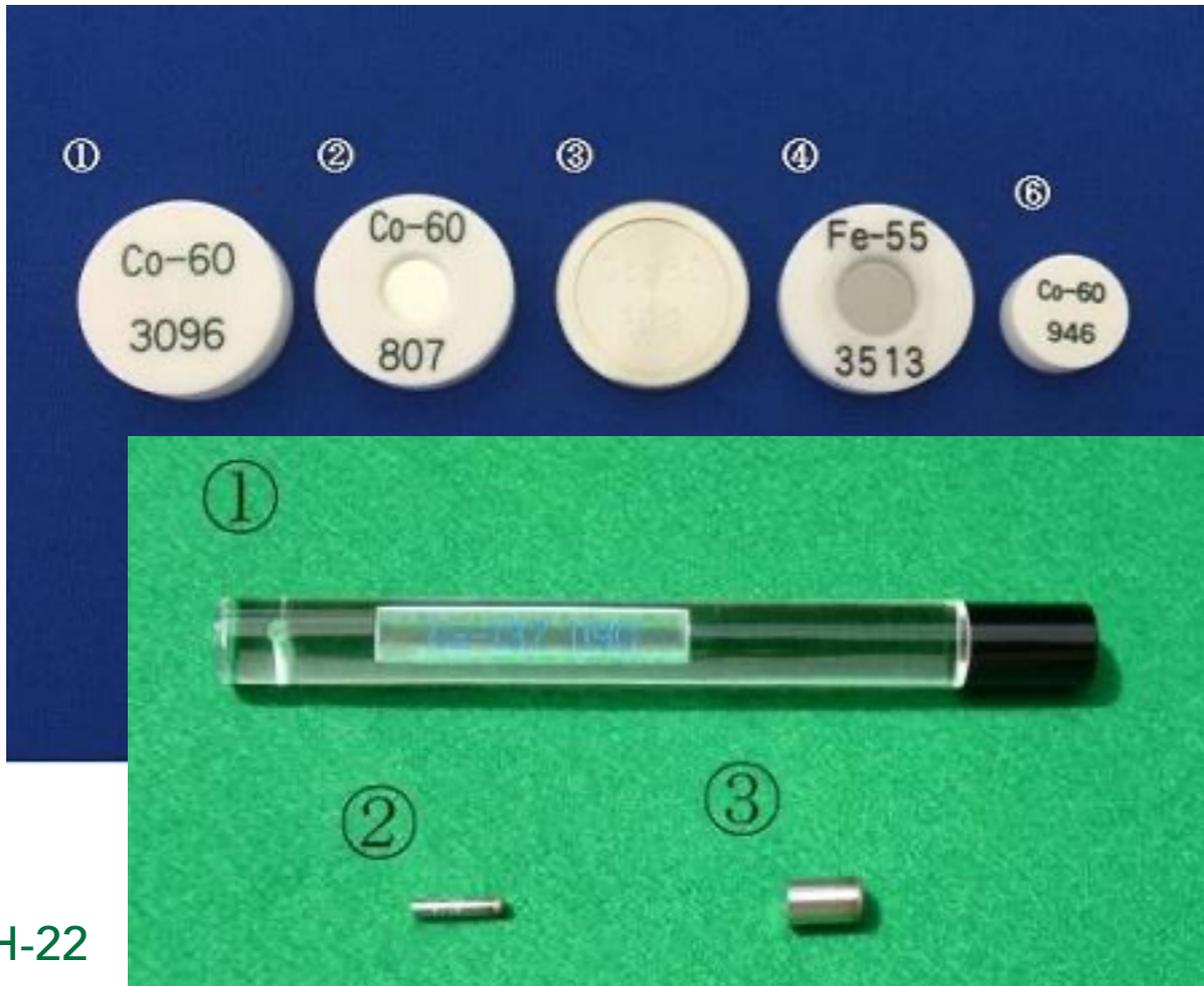


β -ray source



α -ray source

γ -ray source



Safe Usage of X-ray devices

エックス線装置の安全取扱



① X線警告灯（黄色）

X線の発生を防 X線カバーの X線警告灯の黄色 LED で表示します。

② 防 X線カバー（側面）

防 X線カバーにより、ゴニオメータ等の光学系部が覆われています。

③ 防 X線カバーの扉（インターロック）

前面パネルにロック機構が付いており、「DOOR」ボタン（黄色）が消灯している時は扉ロックが掛かり、防 X線カバーは開けることができません。

④ 「DOOR」ボタン

防 X線カバーを開ける時に使用します。

⑤ HV ENABLE キー

キーを右に回し、装置ロックを解除し POWER ON を可能な状態にします。

東京大学における エックス線装置の分類

Classification of X-ray devices at UTokyo

密閉型 closed system	A	Completely sealed
	B	Interlock used all the time
非密閉型 non-closed system	C	Interlock used appropriately
	D	Equipments installed in a room
	E	Not fixed / mobile

エックス線装置の安全取扱

Safe Usage of X-ray devices

Check open/close of the shutter with multiple indicators.

複数の表示でシャッターの開閉状態を意識して確認する。

C分類でインターロックを解除するときは十二分に確認する。

Be extremely careful when you unlock the interlock

ビームの調整やメンテナンス等では、装置の電源を切り、シャッターが閉じていることを確認する。

Turn off the power of the device before beam adjustment and/or maintenance.

使用記録を作成し、整備すること。

Make records of usage

装置内部管理区域型

装置外部管理区域型

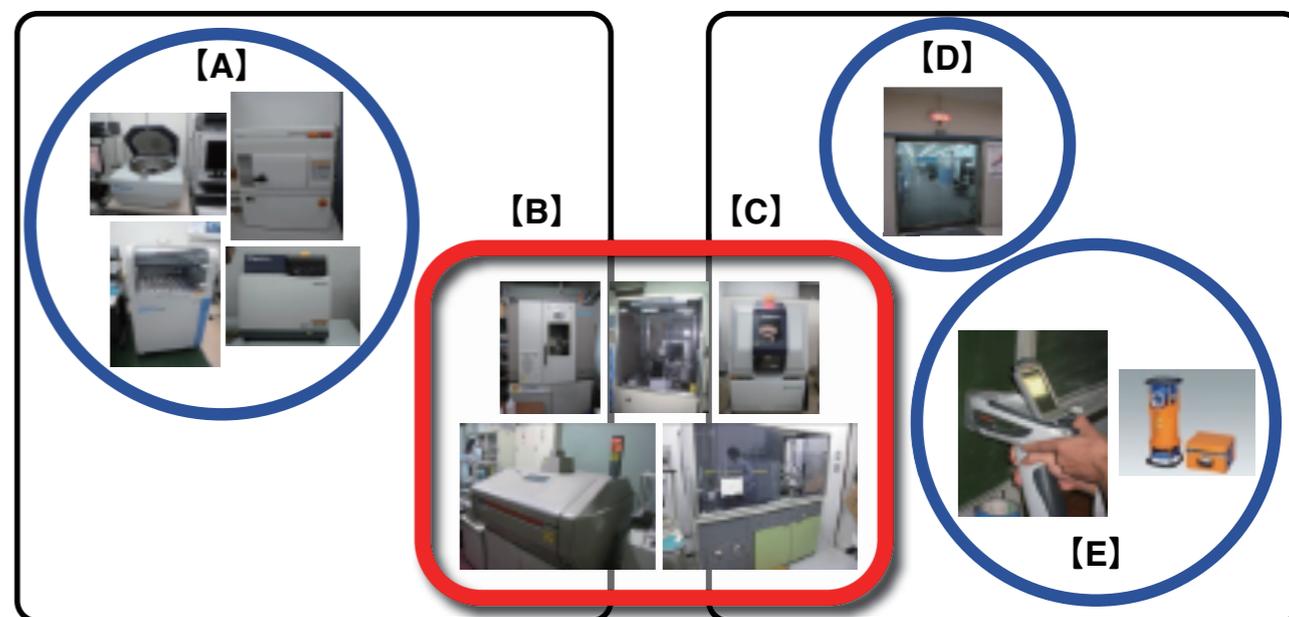


図1 東京大学における研究用エックス線装置の分類

東京大学におけるエックス線装置の分類

密閉型 closed system	A	Completely sealed
	B	Interlock used all the time
非密閉型 non-closed system	C	Interlock used appropriately
	D	Equipments installed in a room
	E	Not fixed / mobile

Classification of X-ray devices at UTokyo

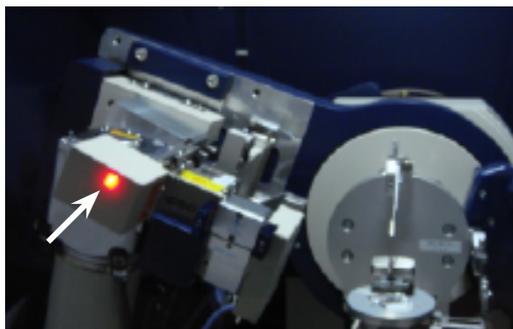


図2 シャッター付近の照射ランプ



図3 外部照射ランプ



図4 PC上のシャッター状況



図5 装置制御板上の表示

Summary of Quizzes

#1 : There are three categories of radiation workers at School of Science, the University of Tokyo : “RI & Accelerators”, “X-CDE” and “X-AB”. One of these categories do not require medical check for authorization as a radiation worker. Answer which category.

#2 : From next April, the equivalent dose limits to the lens of the eye will be renewed to...

Annual average of ○○ mSv for 5 years

(With no single year > ○○ mSv)

#3 : Choose the physical process which contributes most to the attenuation of 100 keV X-rays in a shielding material of lead ?

- photoelectric effect
- Compton scattering
- pair production
- Rayleigh scattering

Write the answers in your Attendance Sheet for submission.