

**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**

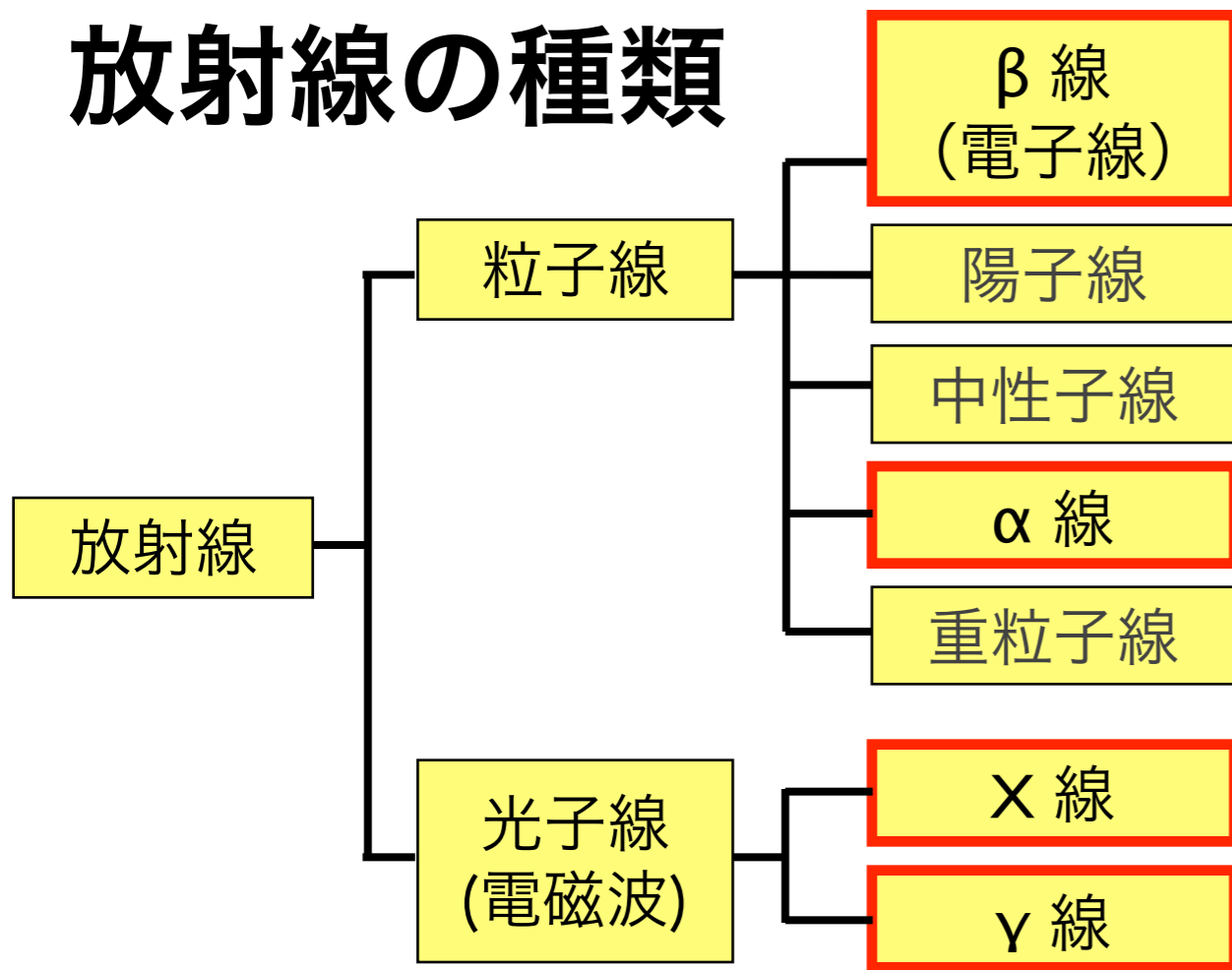
**Safety at Accelerator & Synchrotron Radiation Facilities**

**Safe Handling of Sealed Sources & X-ray devices**

**2020年度 後期**

**Autumn 2020**

# 放射線の種類



原子核 N



放射線のもつエネルギーは？

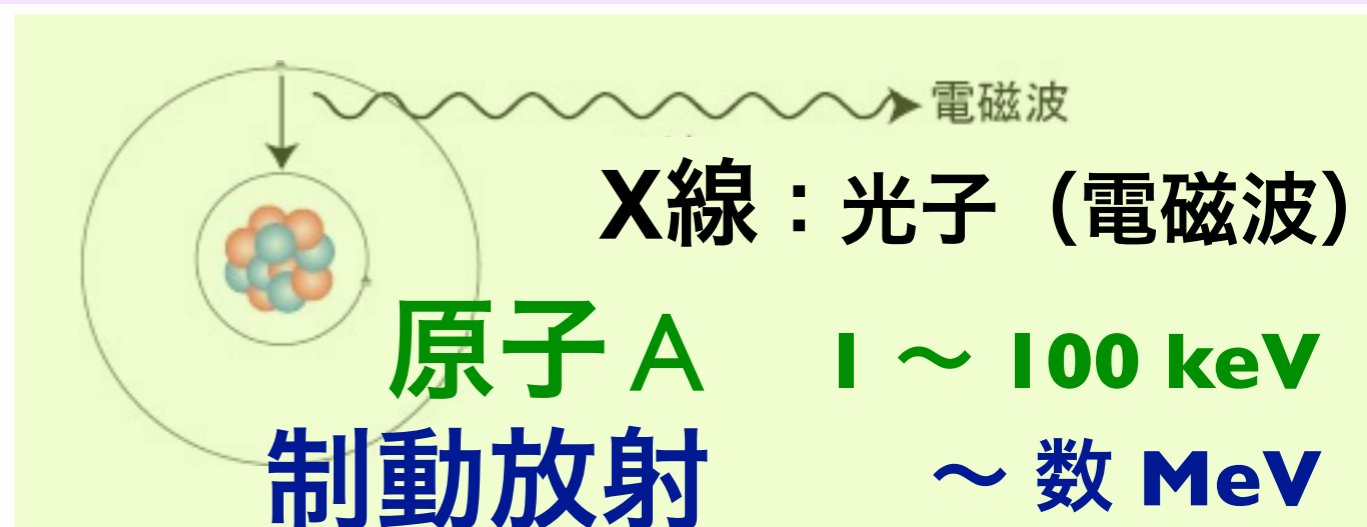
☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

**Cf.** 原子の束縛エネルギーは？

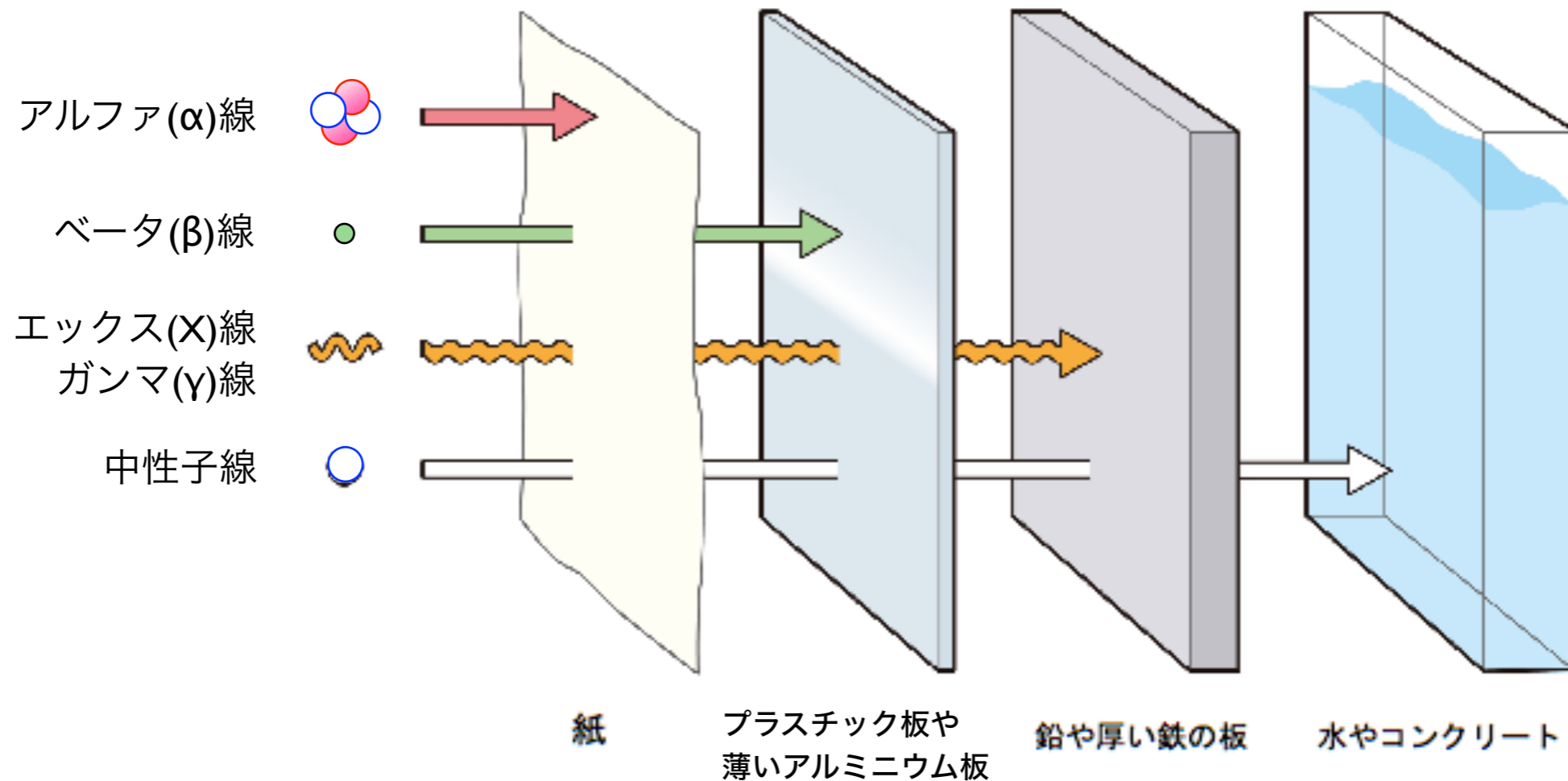
☞ 最外殻電子で 10 eV 程度  
(1 eV = 96 kJ/mol)

放射線の速度は？

☞ 光速の数% ~ 100%



# 放射線の種類と透過力



相互作用の大きい放射線ほど遮蔽しやすい。  
相互作用の小さい放射線ほど透過しやすい。

# 放射線の種類と被ばく

- **$\alpha$ 線**は空気中の飛程が数 **cm**。  
生体では**表層**の細胞で止まる。  
**内部被ばくが問題**。全てのエネルギーが短い飛程の間に細胞に与えられる。
- **$\beta$ 線**は外部被ばくでは**皮膚**への影響を考える。**内部被ばくも問題**。
- **$\gamma$ 線**は多くは相互作用（光電効果・コンプトン散乱）せず**体を素通り**し、一部が体内で吸収される。  
**外部被ばくでも体内も被ばくする**。
- **X線**は高エネルギーの場合は  $\gamma$ 線と同様。  
数十 keV 程度以下の場合には**皮膚**への影響が**問題**。

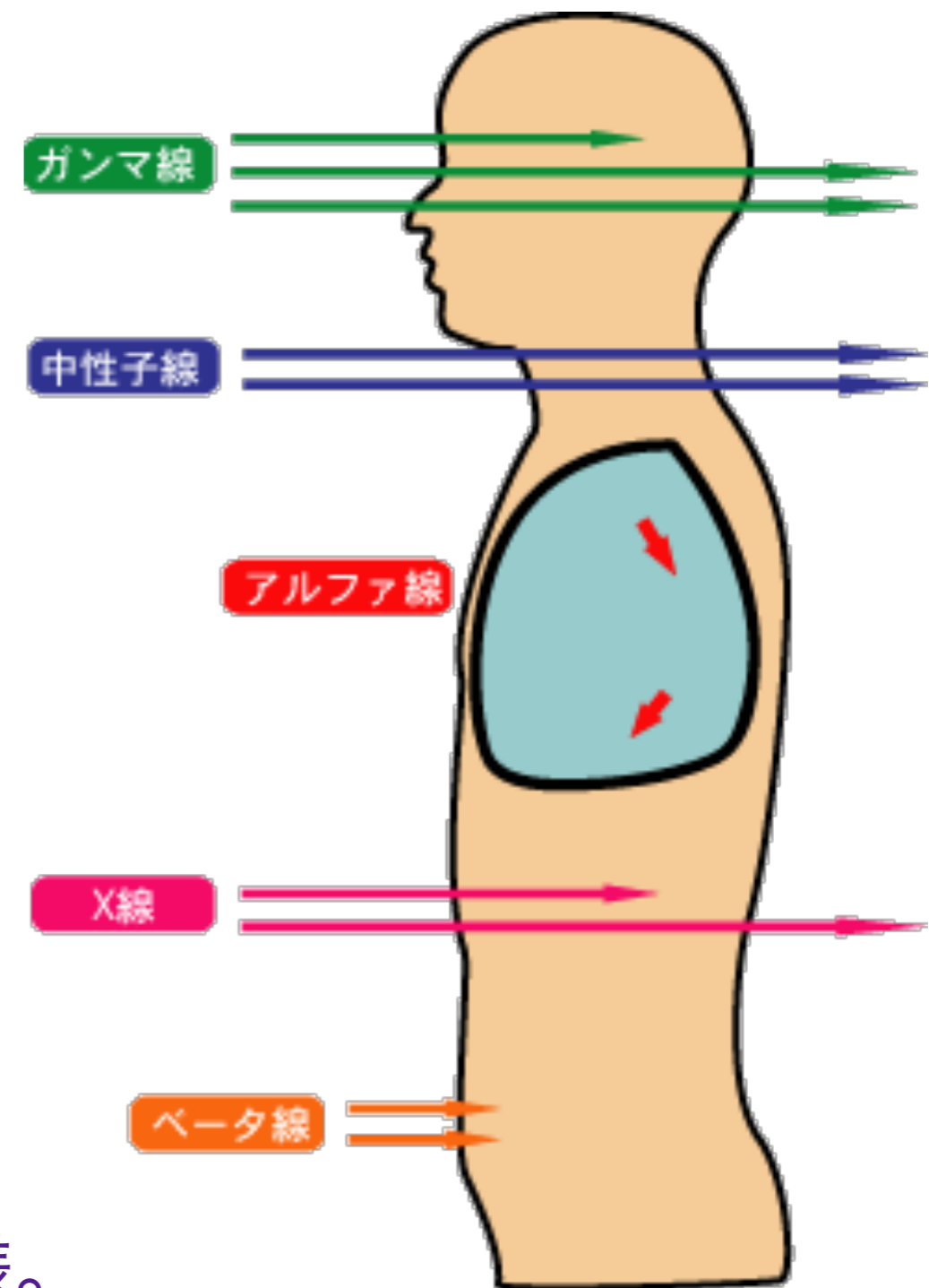


図3 人体を透過する放射線

## 荷電粒子 ( $\alpha$ 線・ $\beta$ 線など) の減速 (エネルギー損失)

荷電粒子は物質中の多数の電子を蹴散らかしつつ  
徐々にエネルギーを失って減速する。

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

単位距離当たりの**エネルギー損失**  $-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$  が重要

## 光子 (X線・ $\gamma$ 線) の減衰 (減弱)

光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて  
一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず  
素通りするものも多い。☞

**光子数の指数関数的減少**

**反応断面積  $\sigma$**  (単位距離当たりの**反応確率**を与える) が重要

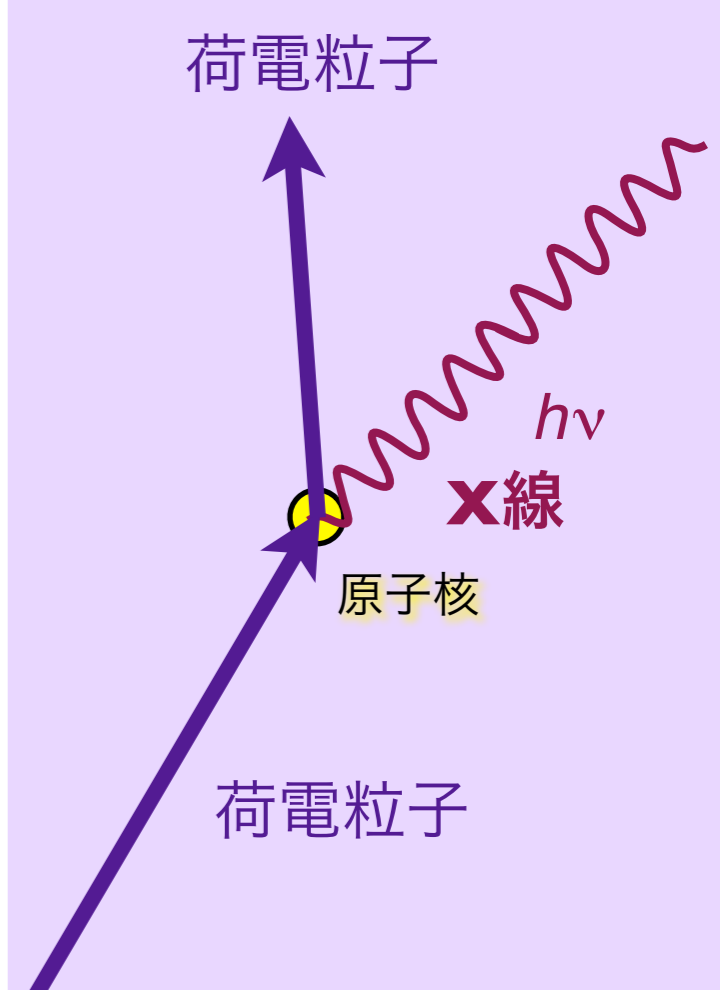
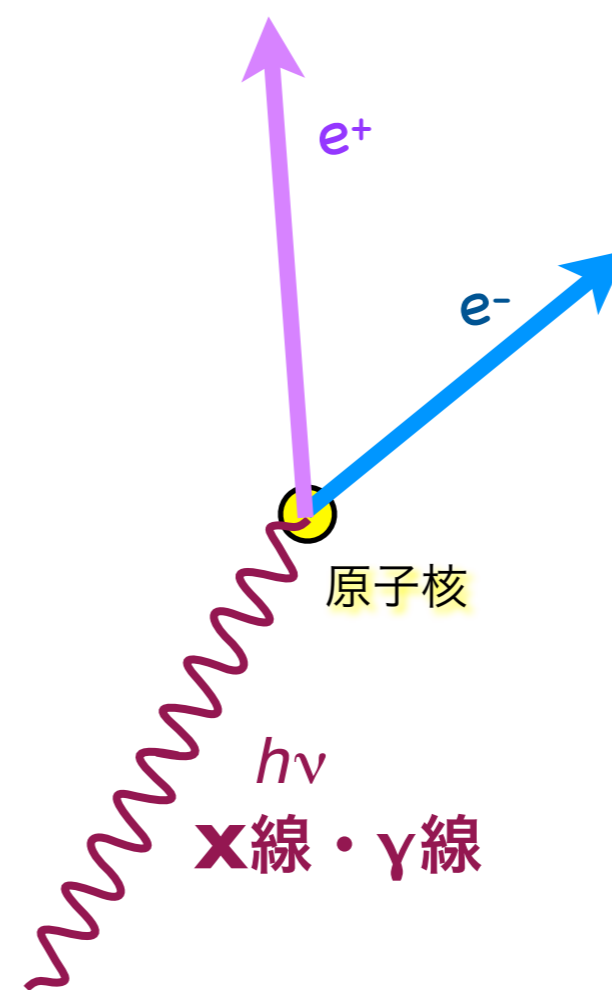
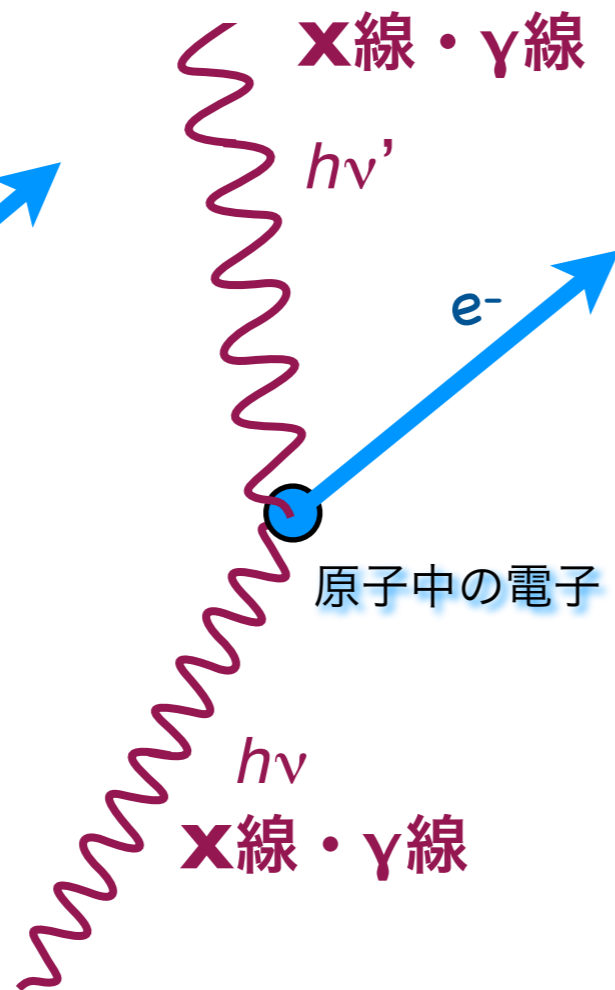
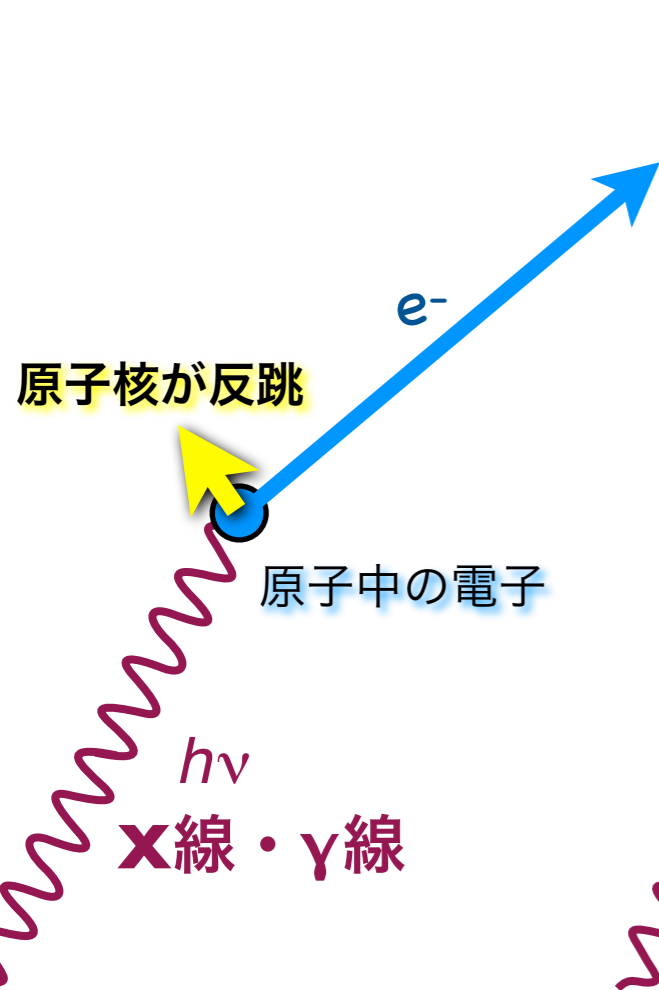
# 光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

## 光電効果

## コンプトン散乱

## 電子対生成

## 制動放射



高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

# 光子

## 反応断面積

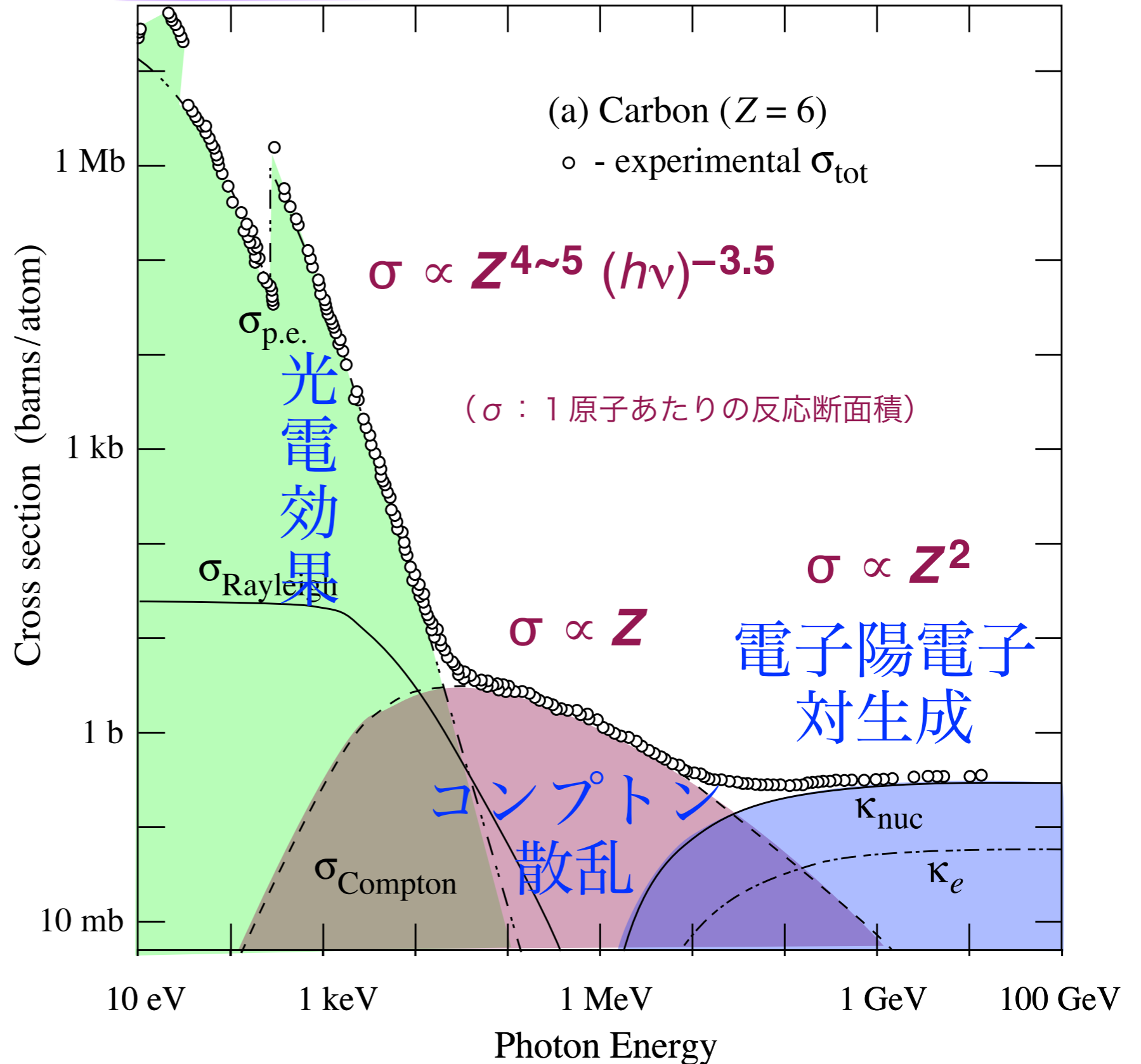
1 Mb  
=  $(0.1 \text{ \AA})^2$

1 Mb

1 kb

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

1 b



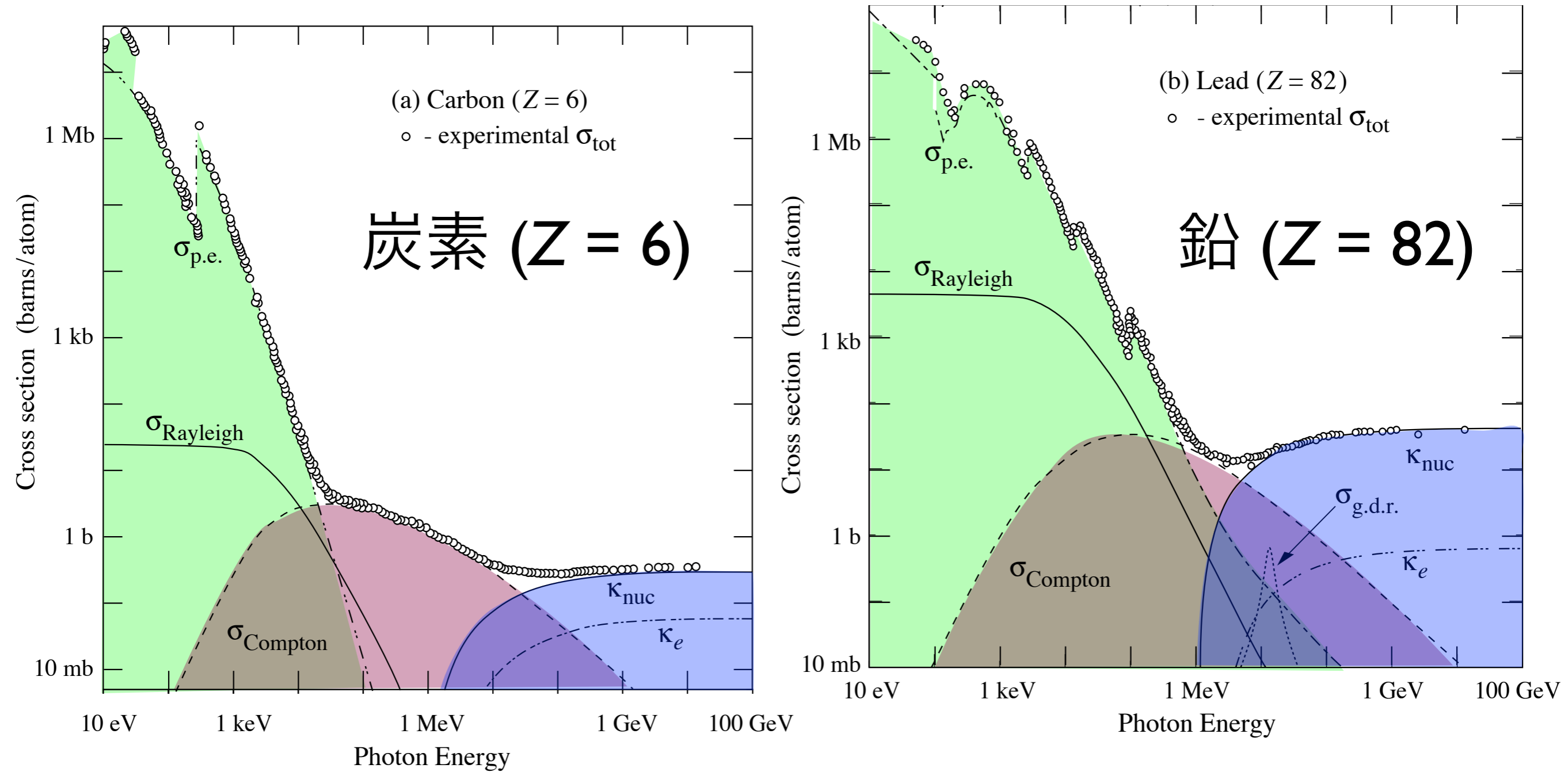
紫外線

X 線

γ

線

# 光子の反応断面積の物質依存性



光電効果  $\propto Z^{4\sim 5}$

コンプトン散乱  $\propto Z$

電子対生成  $\propto Z^2$



# レントゲン(X線)撮影

吸収率の差を利用して撮像する。



(減弱)

造影剤 (I, Ba, Xe) :  $Z$  大 = 減衰係数 大

光電効果やコンプトン散乱の反応断面積は原子番号  $Z$  が大きい元素ほど顕著に大きい。

## X線 CT

### X線検査用造影剤

#### \* 陽性造影剤

・ヨード造影剤: 血管造影用

・硫酸バリウム: 消化管造影用

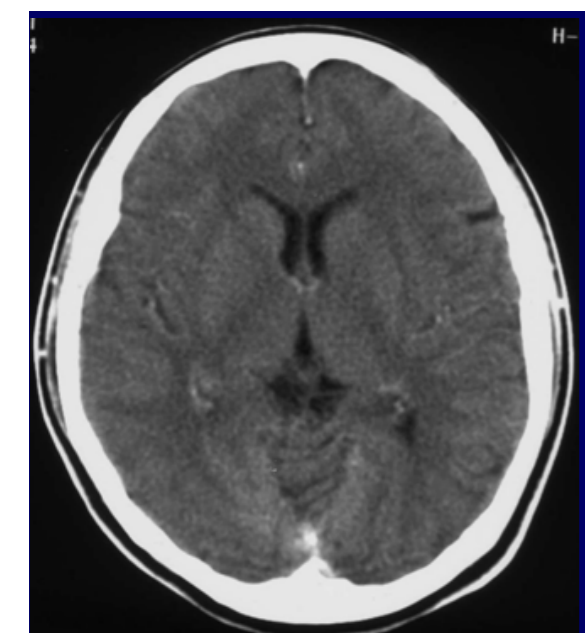
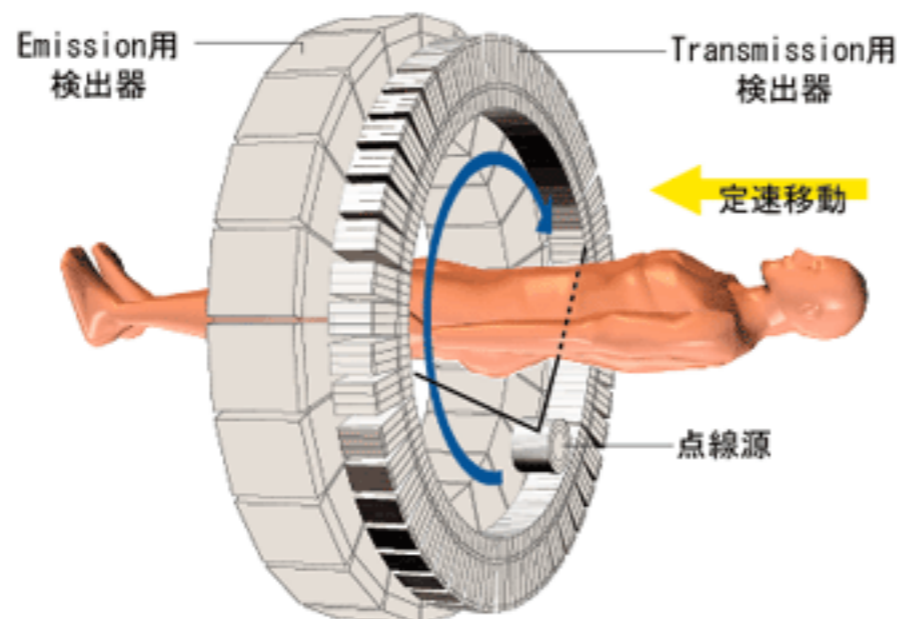
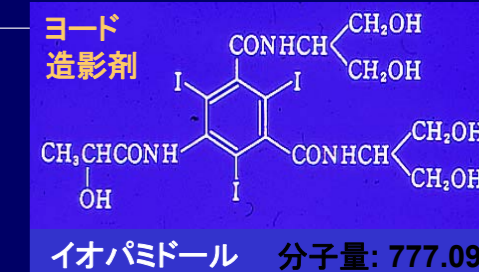
・キセノンガス(脳血流CT)

#### \* 陰性造影剤

・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...

・オリーブ油(膀胱CT)

元素	原子番号	K吸収端
I	53	33.16 keV
Ba	56	37.41 keV
Xe	54	34.56 keV



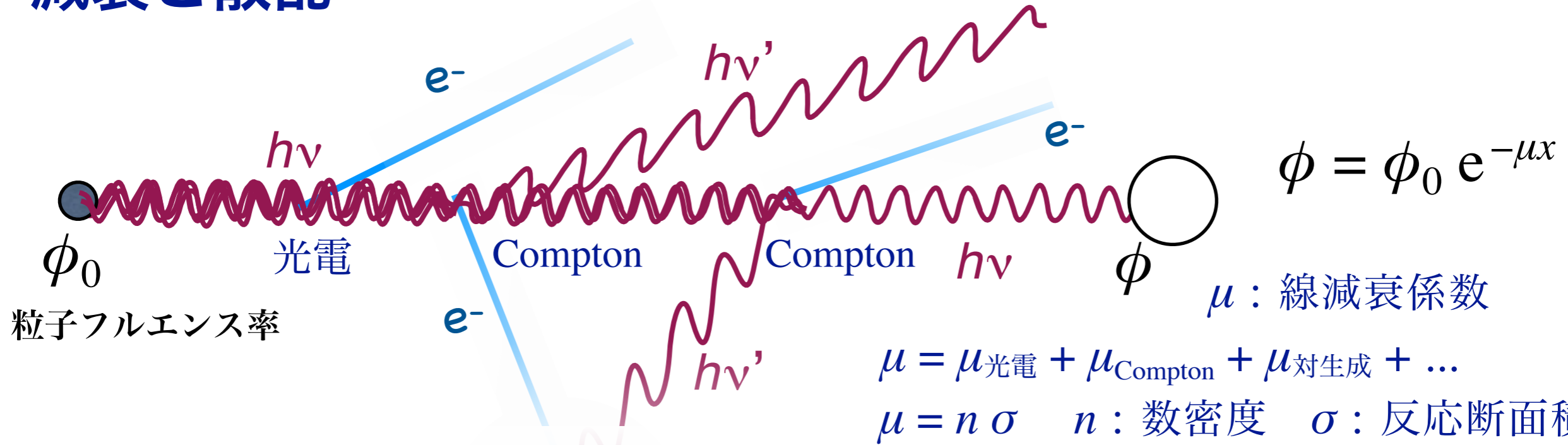
国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

## 第3問

100 keV の X 線が鉛の遮蔽材で減衰する最大の原因となる物理過程は次のうちどれか。

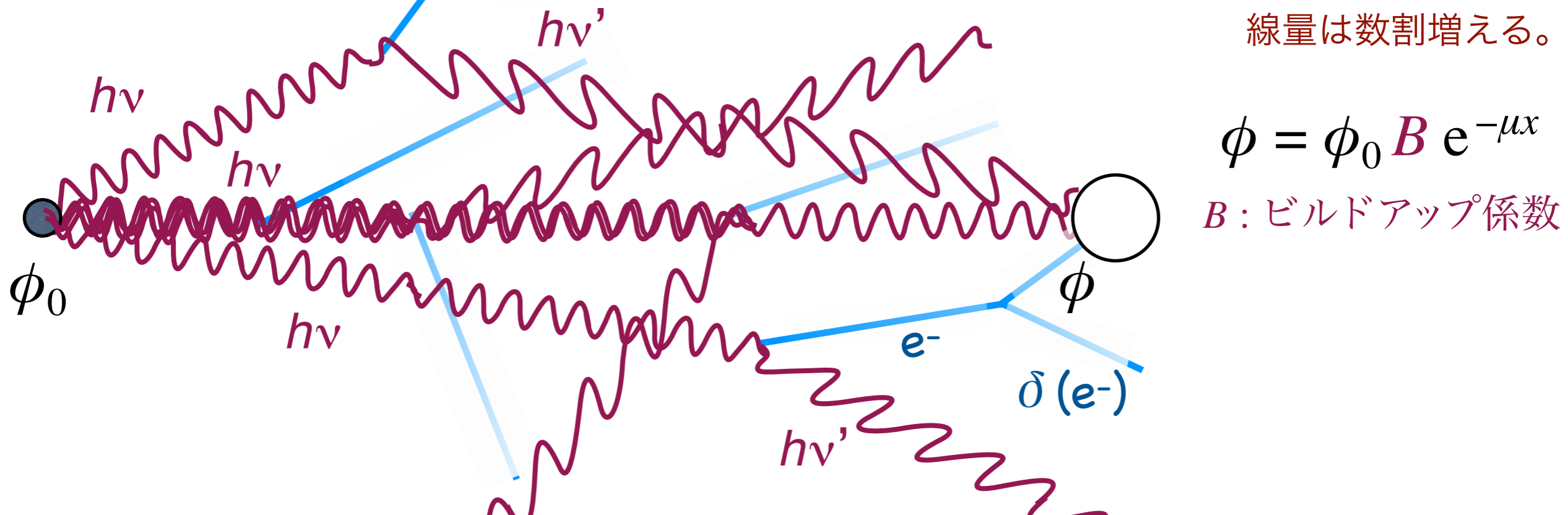
- ・ 光電効果
- ・ コンプトン散乱
- ・ 電子対生成
- ・ レイリー散乱

# 減衰と散乱

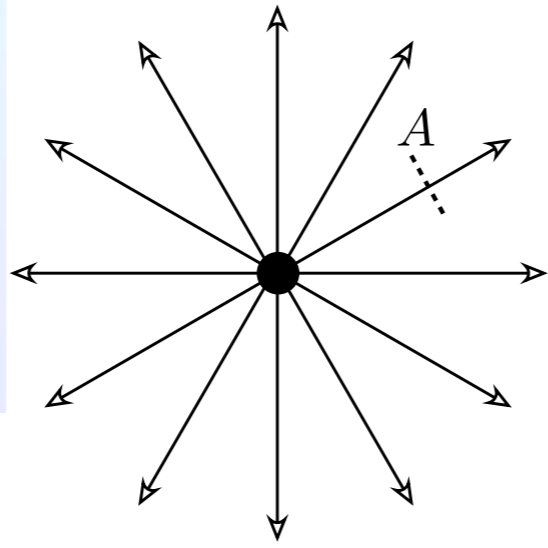


上の式では散乱された  $\gamma$  線は消えると仮定して計算している。  
 実際には、コンプトン散乱による低エネルギーの  $\gamma$  線  
 (ビルドアップ束) による効果を加味する必要があり、  
 線量は数割増える。

# ビルドアップ



# 外部被曝 の線量計算 ( $\gamma$ 線)



$\dot{\Phi}$  : 粒子フルエンス率

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

$$\eta = 0.851$$

$\gamma$ 線の放出率

$P$  : 放射能 [Bq]

$\mu^{\text{air}} = 0.0100 \text{ m}^{-1}$  空気の線減衰定数

$\dot{H}$  : 等価線量率 [Sv/s]

$^{137}\text{Cs}$   $\gamma$ 線は空气中 70 m で半減する。

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

$(\mu_{\text{en}}/\rho)^{\text{water}} = 0.033 (\text{g/cm}^2)^{-1}$  水の質量エネルギー吸収係数

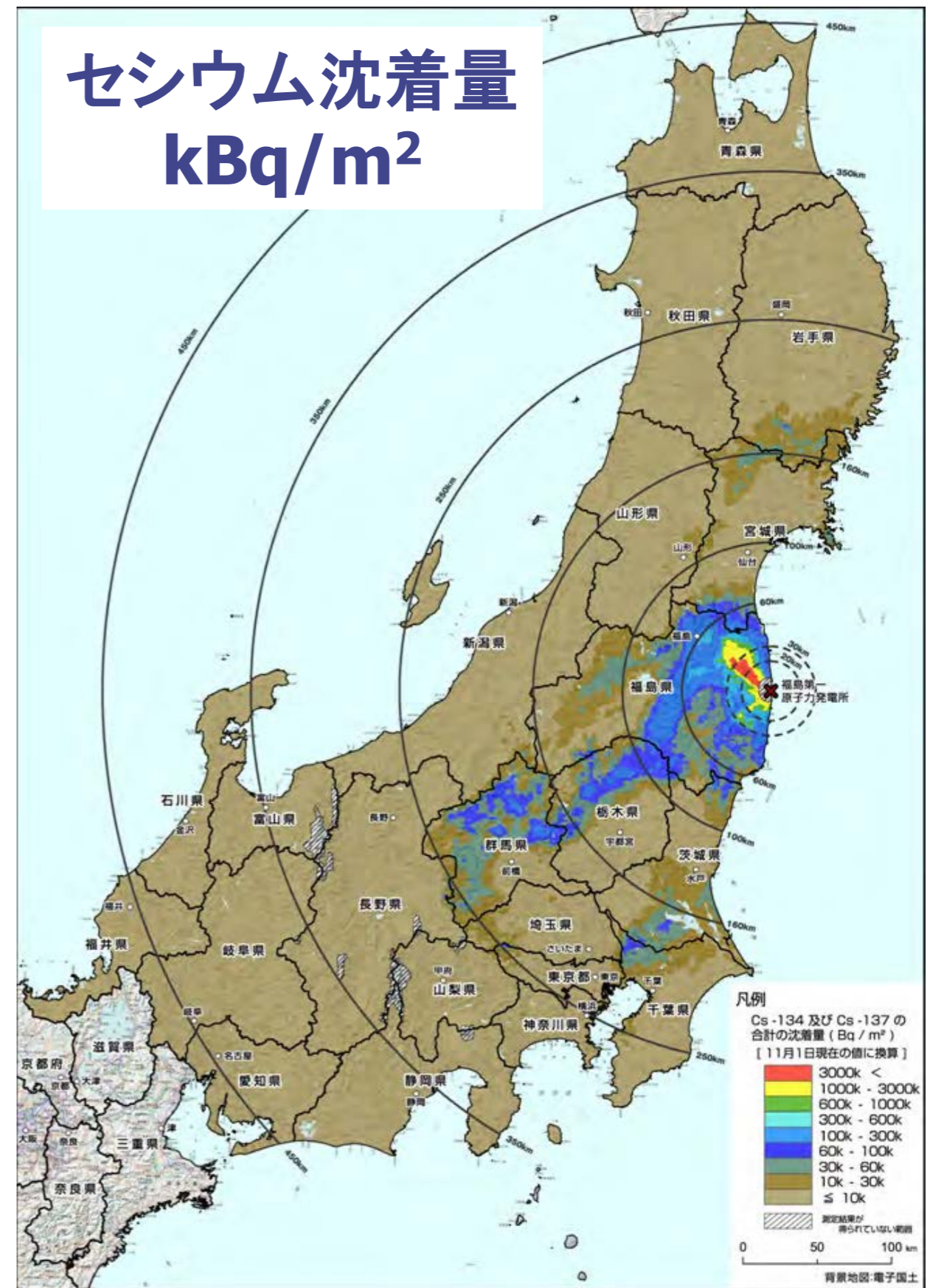
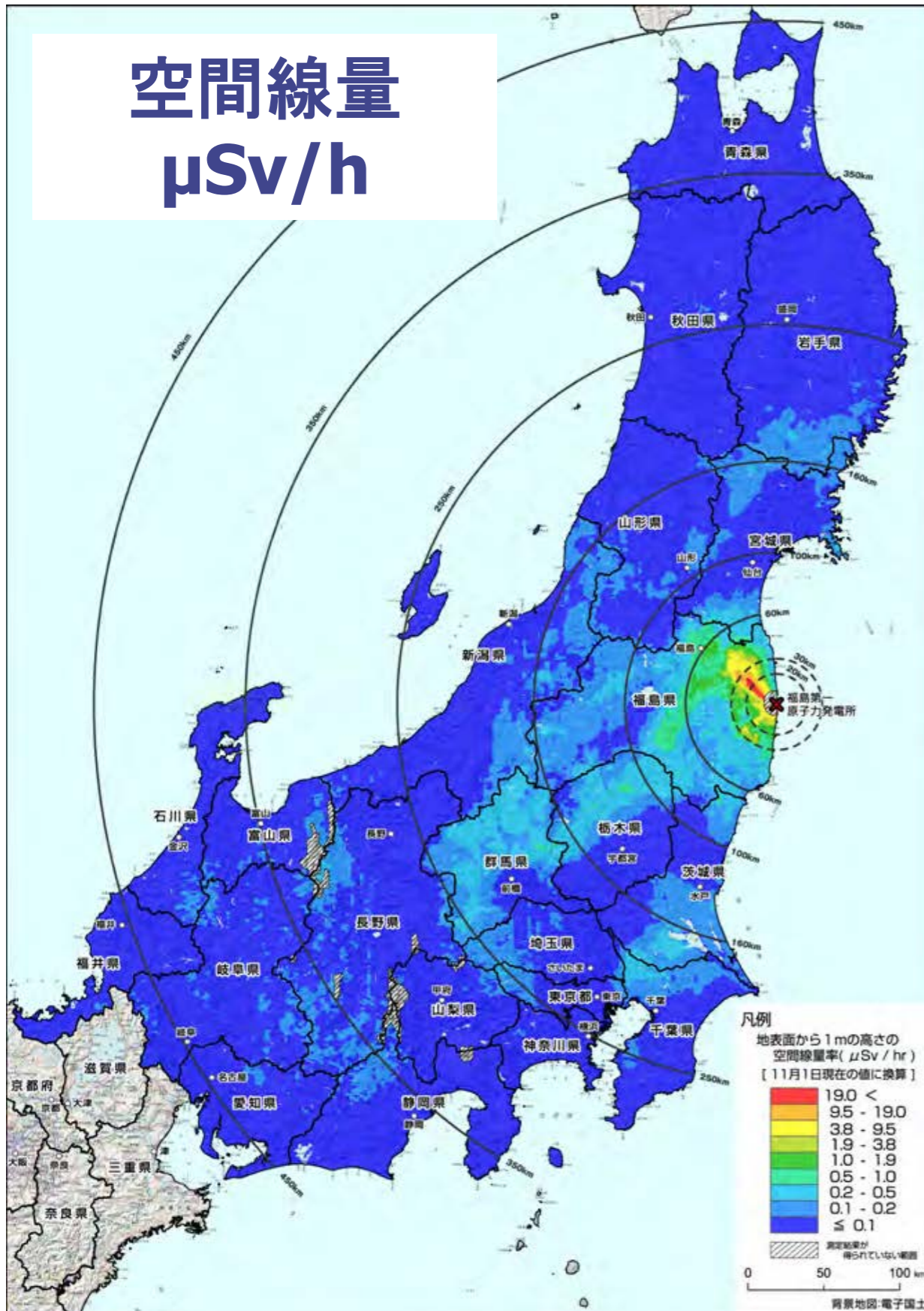
## 平面が一様に放射性物質で汚染されている場合

$^{137}\text{Cs}$  : 2.1 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) / ( $\text{MBq/m}^2$ ) .... IAEA による値

高さ 1 m でも 50 cm でもさして違くない

遮るものがない平地の場合、半径 10 m だけ除染しても線量は半分も減らない。半径 100 m からの寄与が効く。

# 文部科学省の航空機モニタリングによる広域汚染マップ



# 内部被曝

放射性物質を体内に取り込むことにより、**体の内部から放射線に被曝すること。**

放射性物質を**体内に取り込まない**ことは放射線防護の鉄則。

**放射線防護服**（ $\gamma$ 線を遮ることはできない）  
放射性物質が皮膚や服に付着し、あるいは  
経口摂取してしまうことを防ぐ。



一般に**被曝が継続**するため、**注意が必要**。

- 物理学的半減期
- 生物学的半減期（体内からの排出）

**臓器親和性**（Cs  $\Rightarrow$  筋肉、I  $\Rightarrow$  甲状腺、Sr  $\Rightarrow$  骨、Pu  $\Rightarrow$  肝臓, ...）  
に注意しつつ、**預託線量**を計算して、被曝期間を通じての  
トータルの**線量**が同じであれば、外部被曝とも影響は同じ。

# 内部被曝の計算

(例：<sup>131</sup>I による甲状腺預託線量)

## 放射線防護のための線量 **protection quantity**

預託線量 **committed dose** (内部被曝) [Sv]

預託等価線量

預託実効線量

体内摂取した放射性物質から出るすべての放射線を、摂取した時点で被曝したと見なして計算をする。Bq から Sv への換算には、物理学的半減期のみならず排泄機能による生物学的半減期も考慮のうえ、50年間分の積分をする。

実効線量係数 (成人)

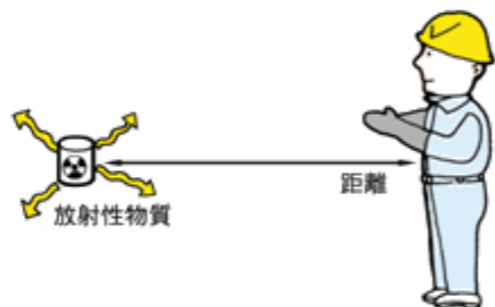
※ 子供や乳幼児は 70歳になるまでの期間

核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取 (Sv/Bq)	
C-14	5730年	$5.8 \times 10^{-10}$	$5.8 \times 10^{-9}$	
P-32	14.3日	$2.4 \times 10^{-9}$	$3.4 \times 10^{-9}$	
K-40	12.8億年	$6.2 \times 10^{-9}$	$2.1 \times 10^{-9}$	
I-131	8.04日	$2.2 \times 10^{-8}$	$7.4 \times 10^{-9}$	
Sr-90	29.1年	$2.8 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$	
Cs-137	30.0年	$1.3 \times 10^{-8}$	$3.9 \times 10^{-8}$	
経口摂取	乳児 (3ヶ月)	幼児 (1歳)	子供 (2-7歳)	成人
I-131	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-8}$

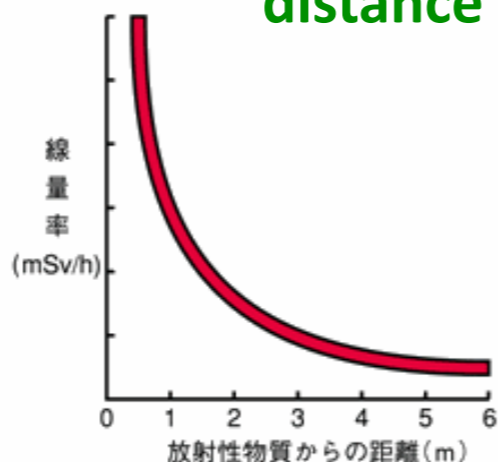
# 放射線防護

## ● 距離による防護

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

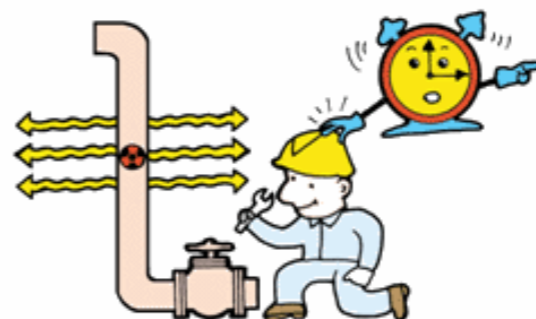


### distance

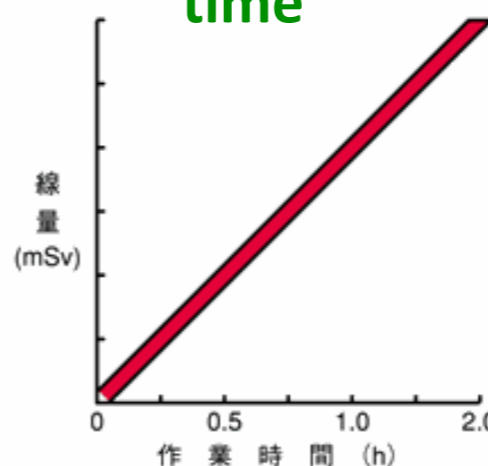


## ● 時間による防護

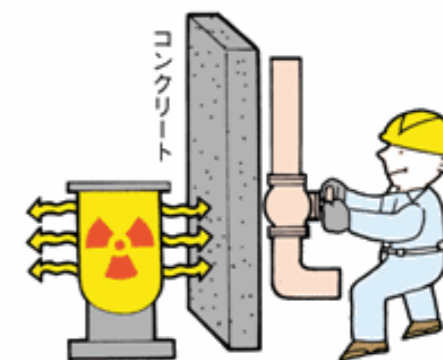
$[\text{線量}] = [\text{作業場所の線量率}] \times [\text{作業時間}]$



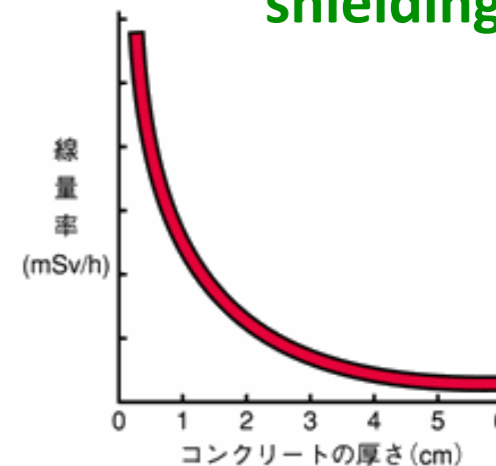
### time



## ● 遮蔽による防護



### shielding



Prevent deterministic effect.

Reduce stochastic effect.

確定的影響は発症させない。

確率的影響をできるだけ減らす。

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.

**防護の最適化**：個人線量、被曝人数、潜在的被曝の可能性のすべてを、経済的および社会的要因を考慮に入れたうえで、合理的に達成できる限り低く保つべきである。

**(ALARA の原則 = As Low As Reasonably Achievable)**



# 個人被曝の線量限度

## 線量限度の一覧表（作業者）

### 職業被曝（作業者 放射線業務従事者）

実効線量	100 mSv / 5年 かつ 50 mSv / 年
女子 妊娠中の女子	5 mSv / 3月 内部被曝について 1 mSv / 期間中
等価線量	150 mSv / 年
水晶体	500 mSv / 年
皮膚	2 mSv / 期間中
妊娠中の女子の 腹部表面	

	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 <sup>2)</sup>
皮膚等価線量	500mSv/年 <sup>1)</sup>	500mSv/年
手・足の等価線量	500mSv/年	500mSv/年 <sup>3)</sup>
その他の組織	—	500mSv/年

1) 被ばく部位に関係なく、深さ7 mg/cm<sup>2</sup>、面積1 cm<sup>2</sup>の皮膚についての平均線量に適用される。

**年リスク千分の1** (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)

## 線量限度の一覧表（一般公衆）

### 公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量	—
水晶体	—
皮膚	—

	1990 勧告	1977 勧告
実効線量	1 mSv/年	5 mSv/年 <sup>1)</sup> , 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 <sup>3)</sup>	50 mSv/年
その他の組織	—	50 mSv/年 <sup>2)</sup>

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。

**年リスク1万分の1** (毎年被曝の場合、65歳までの最大値) **ICRP 勧告**

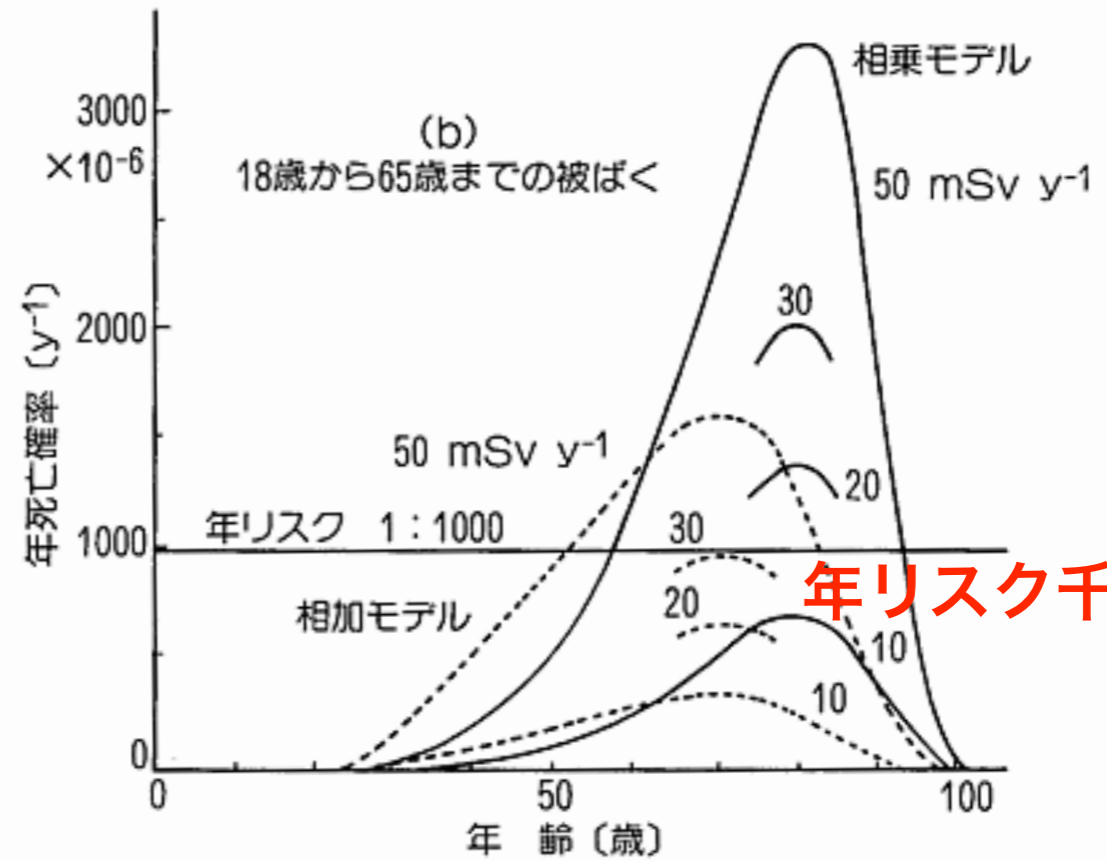
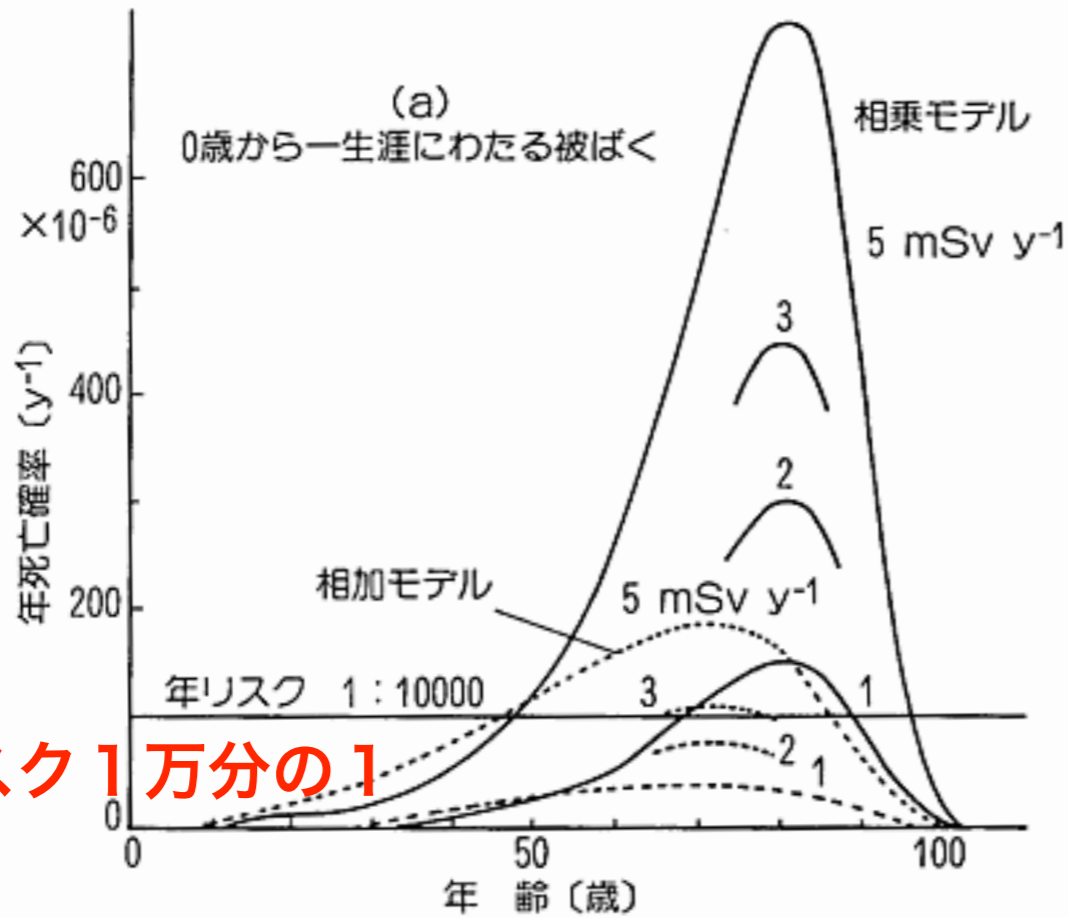
〔出典〕（1990年ICRP新勧告と1977年ICRP勧告における線量限度値対照表）

〔「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〕

国内法令による防護基準

# 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

# 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→



# 密封小線源

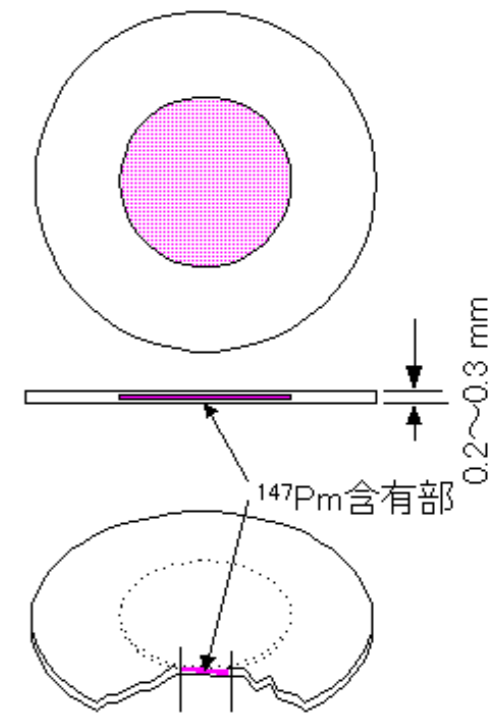
Sealed sources



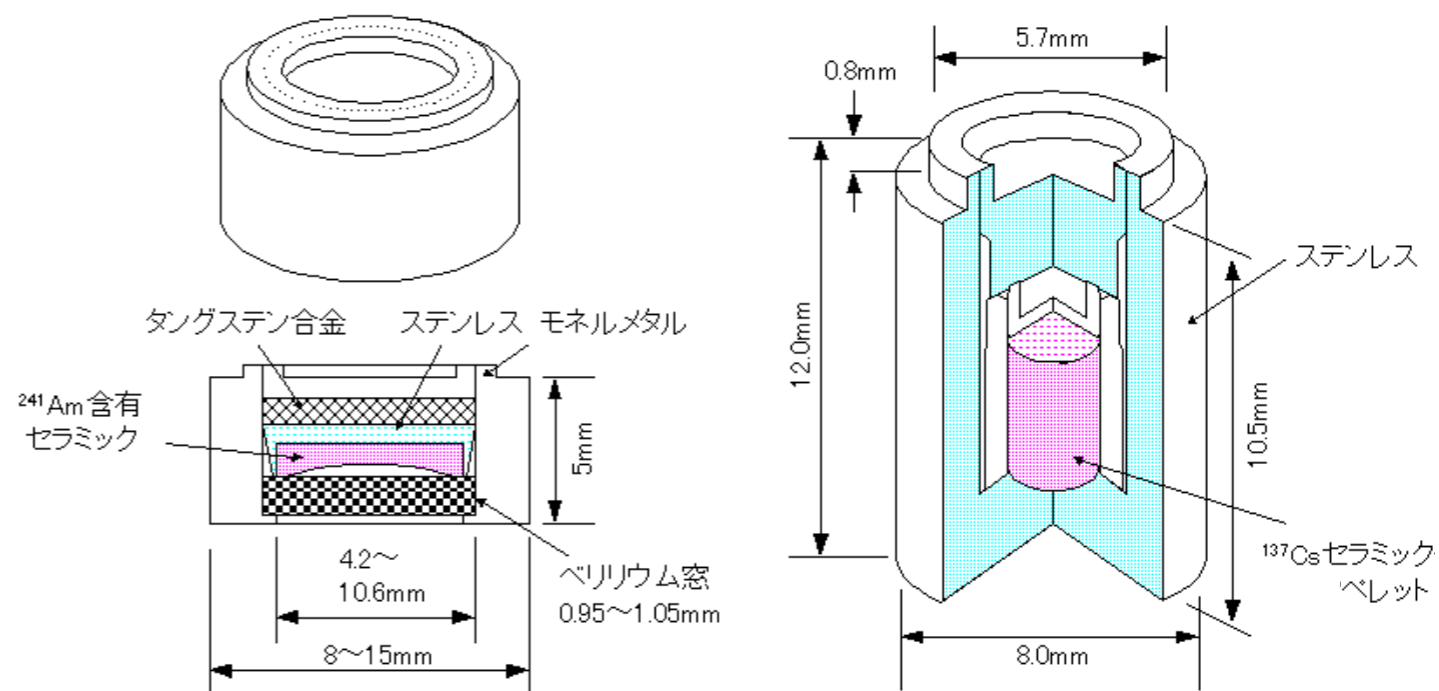
$\alpha$  線源



$\beta$  線源



$\gamma$  線源



# エックス線装置の安全取扱

## Safe Usage of X-ray devices



①X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。

⑤HV 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	完全密閉式
	B	安全機能連動式
非密閉型 non-closed system	C	インターロック解除式
	D	放射線装置室設置式
	E	固定困難・常時移動式

# エックス線装置の安全取扱

## Safe Usage of X-ray devices

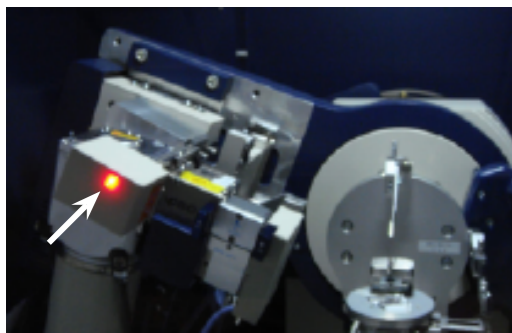


図2 シャッター付近の照射ランプ

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。



図3 外部照射ランプ

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。

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。

使用記録を作成し、  
整備すること。



図4 PC上のシャッター状況



図5 装置制御板上の表示

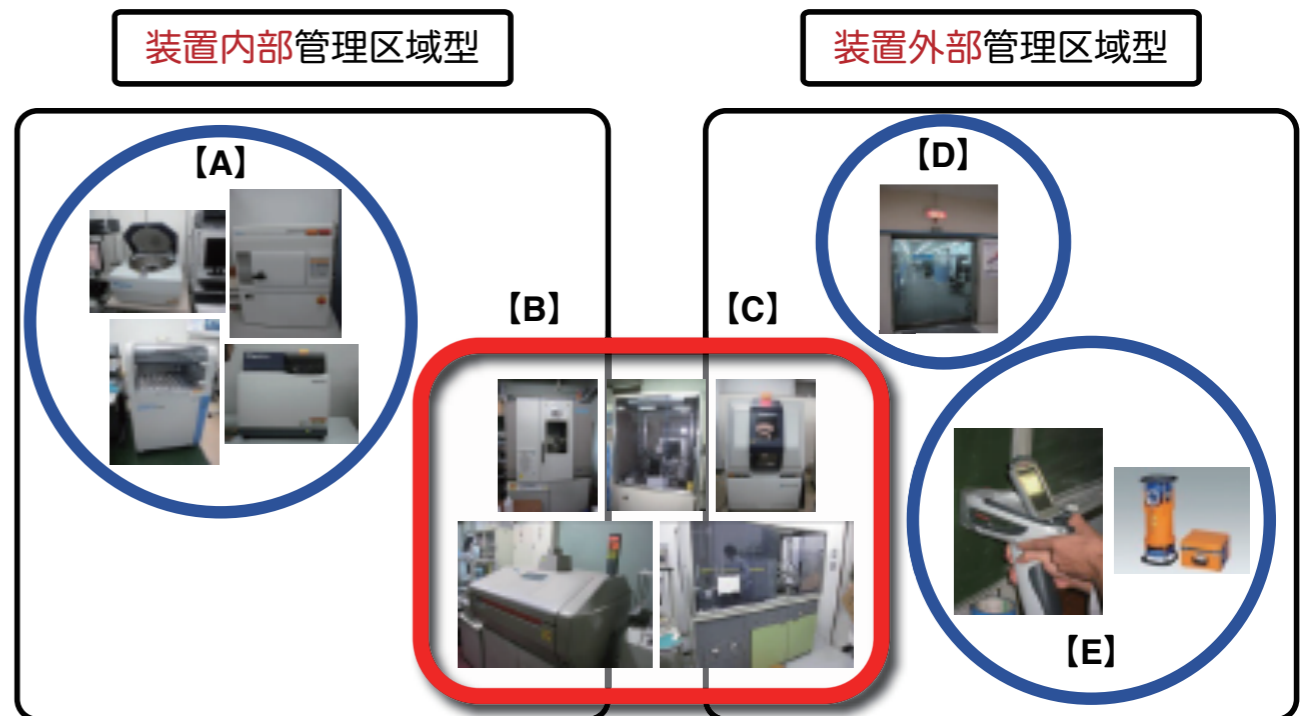


図1 東京大学における研究用エックス線装置の分類

## 東京大学におけるエックス線装置の分類

密閉型 closed system	A	完全密閉式
	B	安全機能連動式
非密閉型 non-closed system	C	インターロック解除式
	D	放射線装置室設置式
	E	固定困難・常時移動式

## Classification of X-ray devices at UTokyo

# エックス線装置等の設置・廃止

## Registration of a new X-ray device

### エックス線装置

- **設置、移転**または**変更**を行う場合は、予定日の**3ヶ月前**までに、まずご相談ください。遅くとも 60 日前までに。理学系から環境安全本部への報告期限が 50 日前です。
- 使用**中止**、使用**再開**または**廃止**は、事前に連絡願います。

### 定格加速電圧が 100 kV 以上の電子顕微鏡

- 定格加速電圧が 100 kV 以上の電子顕微鏡の設置、移転、変更または廃止を行う場合は、事前に放射線管理室に連絡願います。



# 装置責任者に対するお願い

## Responsibility of device managers

- 装置の安全管理
  - 定期検査での装置の安全の点検（年度1回）
  - エックス線装置CDEは作業環境測定が必要  
（Cの場合、設置時および6カ月に1回）
  - 平素の安全点検
- 使用者の指導
  - 装置の使用を開始する学生等に対する  
**安全指導**
  - 使用状況を確認し、問題がある場合は、  
使用者に注意を与える

# 今日の問題一覧

**第1問**：放射線取扱いの認可には、

「RI・加速器」「X-CDE」「X-AB」の3種類がある。そのうち認可の手続きで健康診断が不要なのは「○○○」である。

「○○○」は、3つのうちどれか？

**第2問**：来年4月より、眼の水晶体等価線量の被ばく限度は、5年平均で○○ mSv（年最大○○ mSv）となる。

**第3問**：100 keVのX線が鉛の遮蔽材で減衰する最大の原因となる物理過程は次のうちどれか。

- ・ 光電効果
- ・ コンプトン散乱
- ・ 電子対生成
- ・ レイリー散乱

**解答を出席票に記入して提出すること**

# 出席票の提出方法

令和2年度後期 一般講習会

**ダウンロードサイト：**

<http://jimubu.adm.s.u-tokyo.ac.jp/public/index.php/放射線管理>（講習会資料等）

または、

<http://jimubu.adm.s.u-tokyo.ac.jp/public/>

> 環境安全管理室 > 放射線管理（講習会資料等）

**ダウンロードファイル：** 理学部放射線講習会出席票.xlsx

**提出ファイル名：** 理学部放射線講習会出席票\_[\[専攻名\]](#)\_[\[研究室名\]](#)\_[\[氏名\]](#).xlsx

**アップロードサイト：**

<https://sendfile.s.u-tokyo.ac.jp/public/>

OToogASIEM-ACUcBeTZyrYKSNUOZIX0xLSbZv2IUkSnG

**パスワード：**

「放射線」を表す英語1単語 (radiation)

**講習会終了後すぐに提出。**