

新刊書籍 発売！ 2012年10月10日 刊行

「放射線を科学的に理解する
— 基礎からわかる東大教養の講義」

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著
中川恵一 執筆協力

丸善出版 本体 2500円＋税

- 1章 放射線とは？《放射線入門》
- 2章 放射線の性質《放射線物理学 I》
- 3章 原子力発電で生み出される放射性物質《原子核物理学・原子力工学》
- 4章 放射線量の評価《放射線物理学 II》
- 5章 放射線の測り方《放射線計測学》
- 6章 環境中での放射性物質《環境放射化学》
- 7章 放射線の細胞への影響《放射線生物学》
- 8章 放射線の人体への影響《放射線医学》
- 9章 放射性物質と農業《植物栄養学・土壤肥料学》
- 10章 放射線の防護と安全《放射線防護学》
- 11章 役に立つ放射線《放射線の利用・加速器科学》
- Q&A

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など、多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会は非常に少ないのが実情です。

本書は、東京大学教養学部で行われた講義をもとにし、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので、高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/radiolect-kn.html>



放射線を科学的に理解する

鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎 著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

ごらんのファイル以外にも、別学期の講義シリーズのファイルがあります。

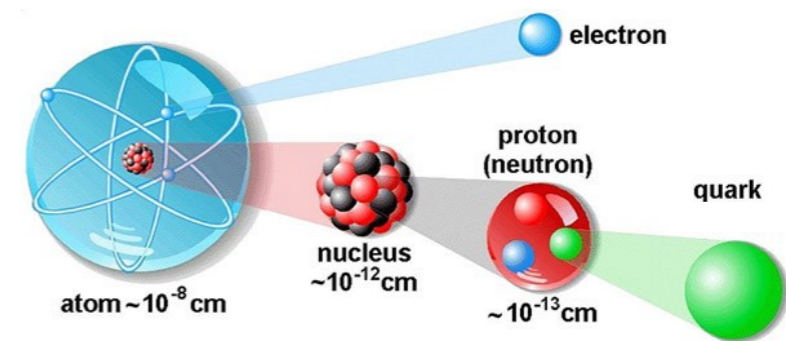
書籍「放射線を科学的に理解する — 基礎からわかる東大教養の講義 —」

とあわせて、どうぞご利用下さい。

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>

2011年度夏学期
自主講義

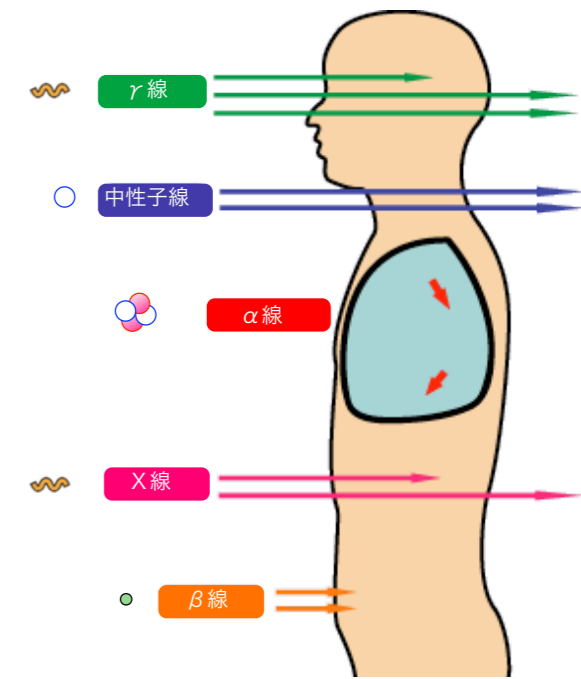
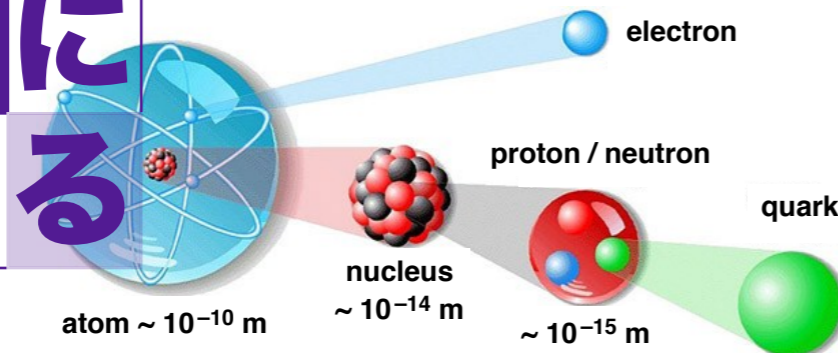
自主講義
放射線学



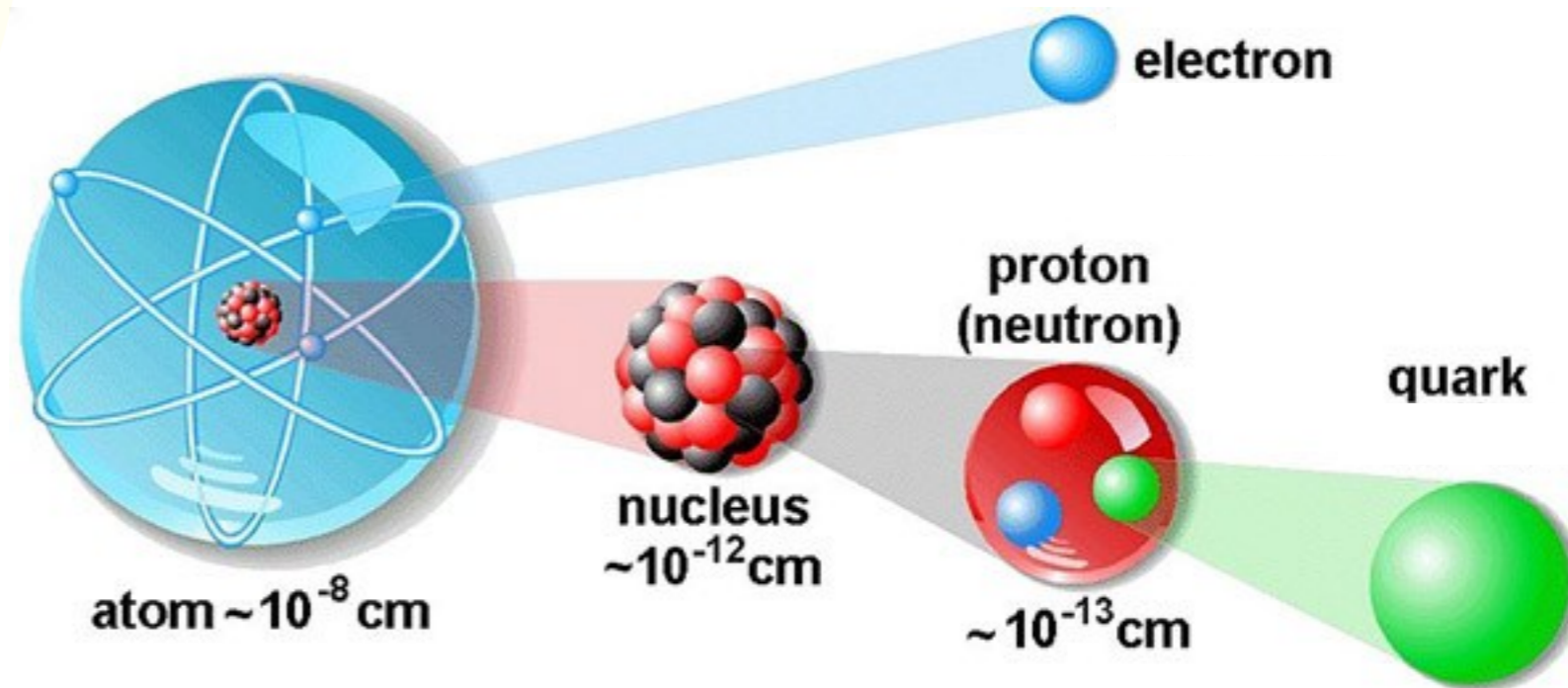
2011年度冬学期
主題科目テーマ講義

2012年度冬学期
主題科目テーマ講義

放射線を
科学的に
理解する



自主講義 「放射線学」



第5回：2011年6月7日

物理部会／広域・相関 助教 鳥居 寛之

(粒子線物理学・素粒子原子物理学)

東京大学 教養学部／大学院総合文化研究科

自主講義 「放射線学」

● 講義日程

- 第1回 5/10 (火)
- 第2回 5/17 (火)
- 第3回 5/24 (火)
- 第4回 5/31 (火)
- 第5回 6/ 7 (火)
- 第6回 6/14 (火)
- 予備日 6/21 (火)

物理部会／広域・相関 助教 鳥居 寛之

(粒子線物理学・素粒子原子物理学)

東京大学 教養学部／大学院総合文化研究科

自主講義 「放射線学」

- 第1回：講義概要のイントロ
(5/10) 放射線とは？
- 第2回：放射線と物質との相互作用《放射線物理学》
(5/17) (エネルギー損失、各種反応・散乱過程)
- 第3回：放射線の生体への作用と影響《放射線生物学》
(5/24) 放射線と放射能の単位
放射線の防護《放射線安全管理学》
- 第4回：原子核の壊変《原子核物理学》
(5/31) 核分裂反応《原子力工学》
- 第5回：放射線の利用
(6/7) 放射線診断・治療《放射線医療》
- 第6回：高エネルギー・素粒子物理学《加速器科学》
(6/14) 放射線の測定《放射線計測学》、discussion

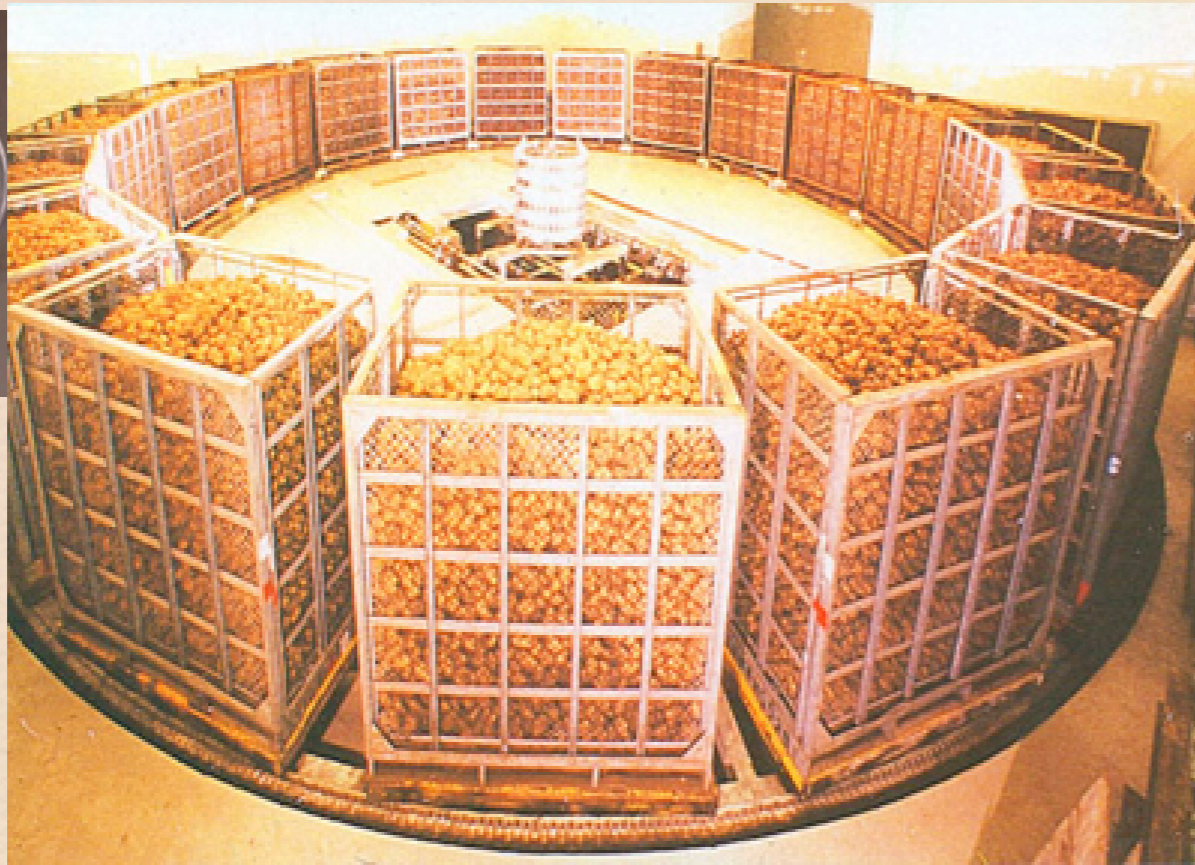
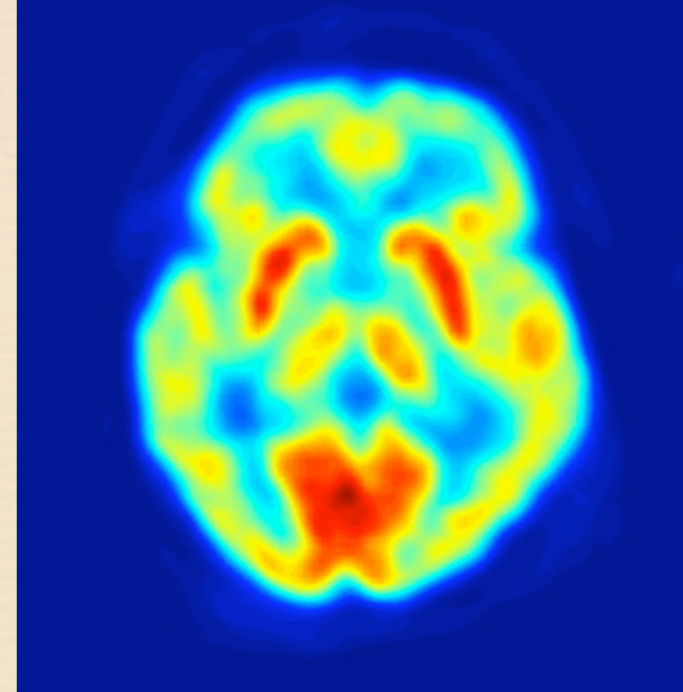
自主講義 「放射線学」

- 第1回：講義概要のイントロ
(5/10) 放射線とは？
- 第2回：放射線と物質との相互作用《放射線物理学》
(5/17) (エネルギー損失、各種反応・散乱過程)
- 第3回：放射線の生体への作用と影響《放射線生物学》
(5/24) 放射線と放射能の単位
放射線の防護《放射線安全管理学》
- 第4回：原子核の壊変《原子核物理学》
(5/31) 核分裂反応《原子力工学》
- 第5回：放射線の利用
(6/7) 放射線診断・治療《放射線医療》
- 第6回：高エネルギー・素粒子物理学《加速器科学》
(6/14) 放射線の測定《放射線計測学》、discussion

第5回 (6/7)

● 放射線の利用

● 放射線診断・治療《放射線医療》



「放射能うつる」といじめ＝福島から避難の小学生に一千葉

2011年4月15日11時6分



福島第1原発事故を受け、福島県から千葉県船橋市に避難した小学生の兄弟が、地元の子どもに「どこから来たの」と話しかけられた。兄弟が「福島」と答えると地元の子どもは「放射線がうつる」と言い、数人が一斉に逃げ出したという。

福島第1原発事故を受け、福島県から千葉県船橋市に避難した小学生の兄弟が、地元の子どもに「どこから来たの」と話しかけられた。兄弟が「福島」と答えると地元の子どもは「放射線がうつる」と言い、数人が一斉に逃げ出したという。

放射線はうつらない

放射能と放射線を混同しない

放射線に対する正しい知識をもって
「正しく怖がる」ことが必要。

他人の放射能を気にすべき場合は特殊例を除いて存在しない。

放射線治療

甲状腺機能亢進症（バセドウ病など）：

ヨウ素131をGBq単位で内服。暫くは他人が近づかないほうがいい。

一方で、福島で服についた放射能の場合は除染すればいいだけ。体内に取り込まれた放射性物質は、本人の内部被曝には問題になるが、傍らにいる他の人にとっては全く関係ないレベル。

また、**放射化**が問題になるのは**原子炉内**や**加速器施設**など、高エネルギー放射線による大量照射の場合のみ。

放射化：安定な原子核が原子核反応により放射性核種に壊変すること。

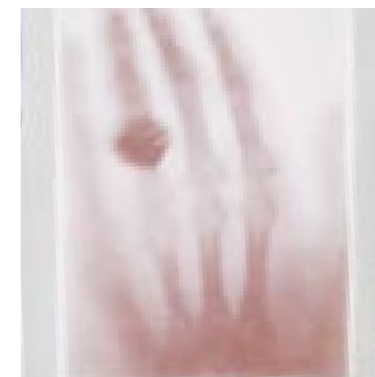
(誘導放射能)

放射線医療

医療で活躍する放射線



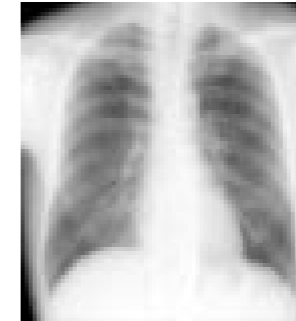
ウィルヘルム・レントゲン博士



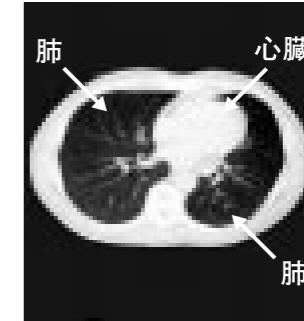
博士が撮った
夫人の手のX線写真

■ エックス線で体内を見る

エックス線(X線)が物質の中を通りぬける性質(透過性)を利用して、体の内部を見ることができます。体を透過するX線の量は、通りぬけた部分の状態(空気や水分量など)によって異なるので、これを白黒の画像として映し出し、腫瘍や炎症などを見分けます。X線を体のまわりに360度回転させて撮影し、コンピュータを使って画像を再構成するCT(コンピュータ断層撮影)では、鮮明な人体の断面図を作成することができます。CT検査により腫瘍や血管疾患などの診断が飛躍的に進歩しました。



レントゲン写真
(胸部の正面)



CT画像
(胸部の断面)

■ 放射性薬剤で病気を診断する

放射性薬剤を体内に投与すると、その化学的性質に応じて特定の臓器や組織に取り込まれます。この薬剤から出る放射線を検出し、病気を診断します。最近、がん診断で注目を集めているPET(陽電子放出断層撮影)では、ブドウ糖をたくさん取り込んで増殖するがん細胞の性質を利用して、ブドウ糖によく似た放射性薬剤を注射し、がんのある場所を診断します。

■ 放射線照射でがん細胞を取り除く

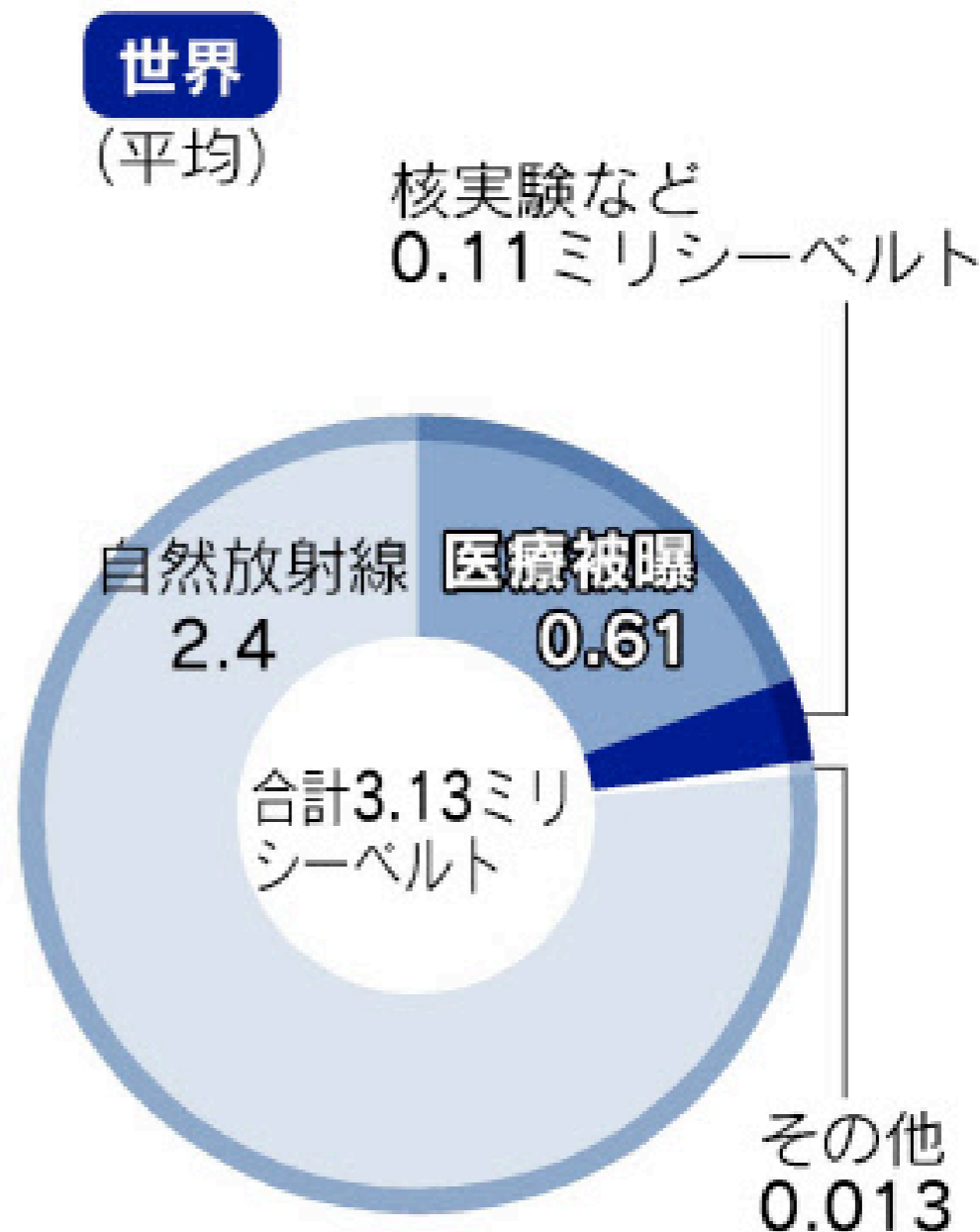
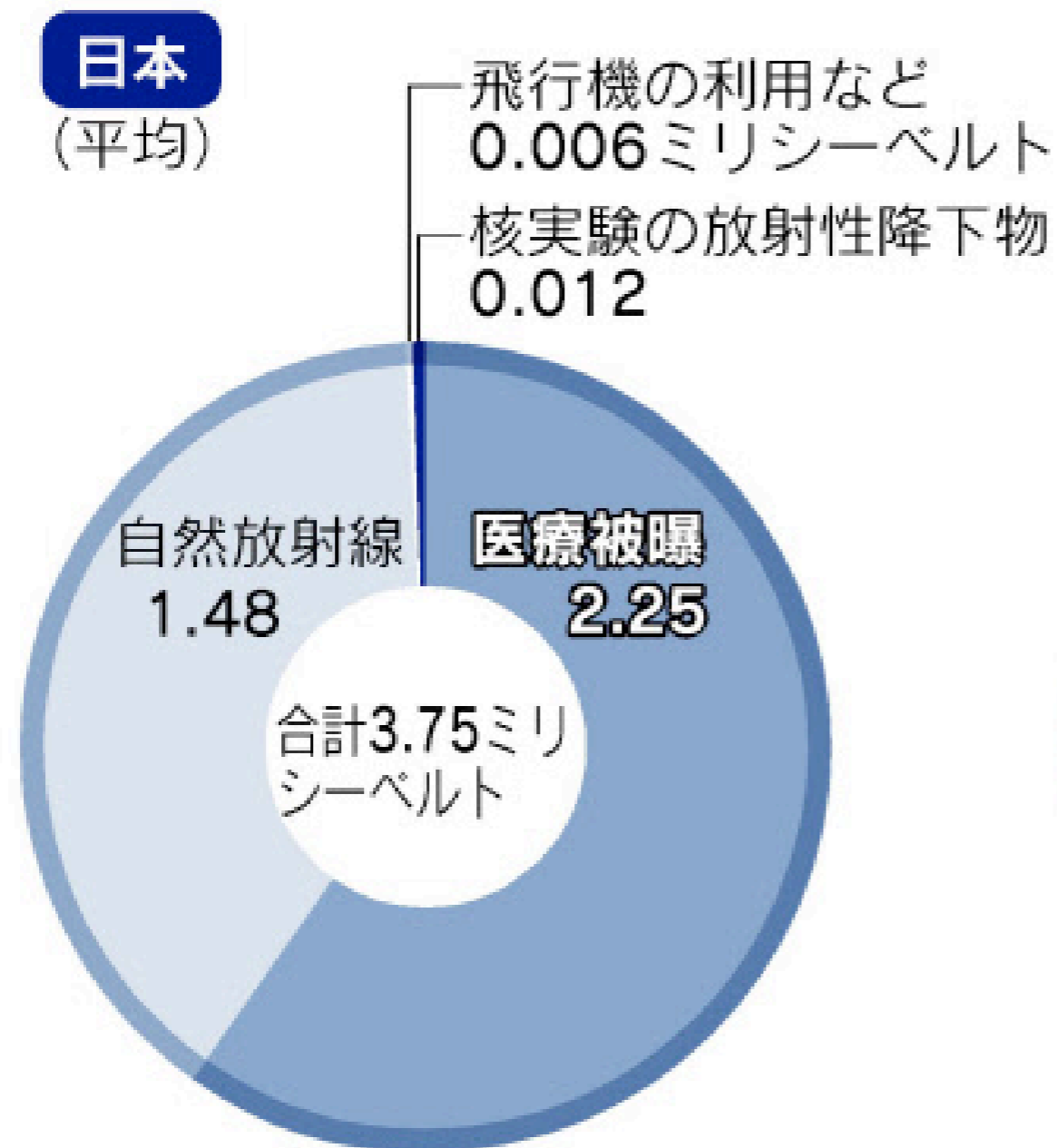
がん細胞は細胞分裂が盛んなため放射線の影響を受けやすい細胞です。そこで、体外から放射線を当てたり、体内に放射性物質を入れたりして、がん細胞を取り除く放射線治療が行われています。この方法は、手術や抗がん剤による化学療法と並んで、がんの一般的な治療法のひとつです。治療には、X線でエネルギーの高いものや、電子線、ガンマ線が用いられてきましたが、最近、陽子線や重粒子線などを用い、標的とするがん組織にエネルギーを集中し、周辺の正常な細胞への影響が少ない放射線治療法が注目されています。

放射線によるがん治療



細胞分裂が盛んながん細胞は
次々に死んでいく

1人が1年間に浴びる放射線量



(注) ICRPが定める一般人が浴びてもさしつかえないとする限度1ミリシーベルトは医療被曝と自然放射線は除く。「原子力・エネルギー図面集 2011年版より」

放射線医療

～ 診断 ～

レントゲン(X線)撮影

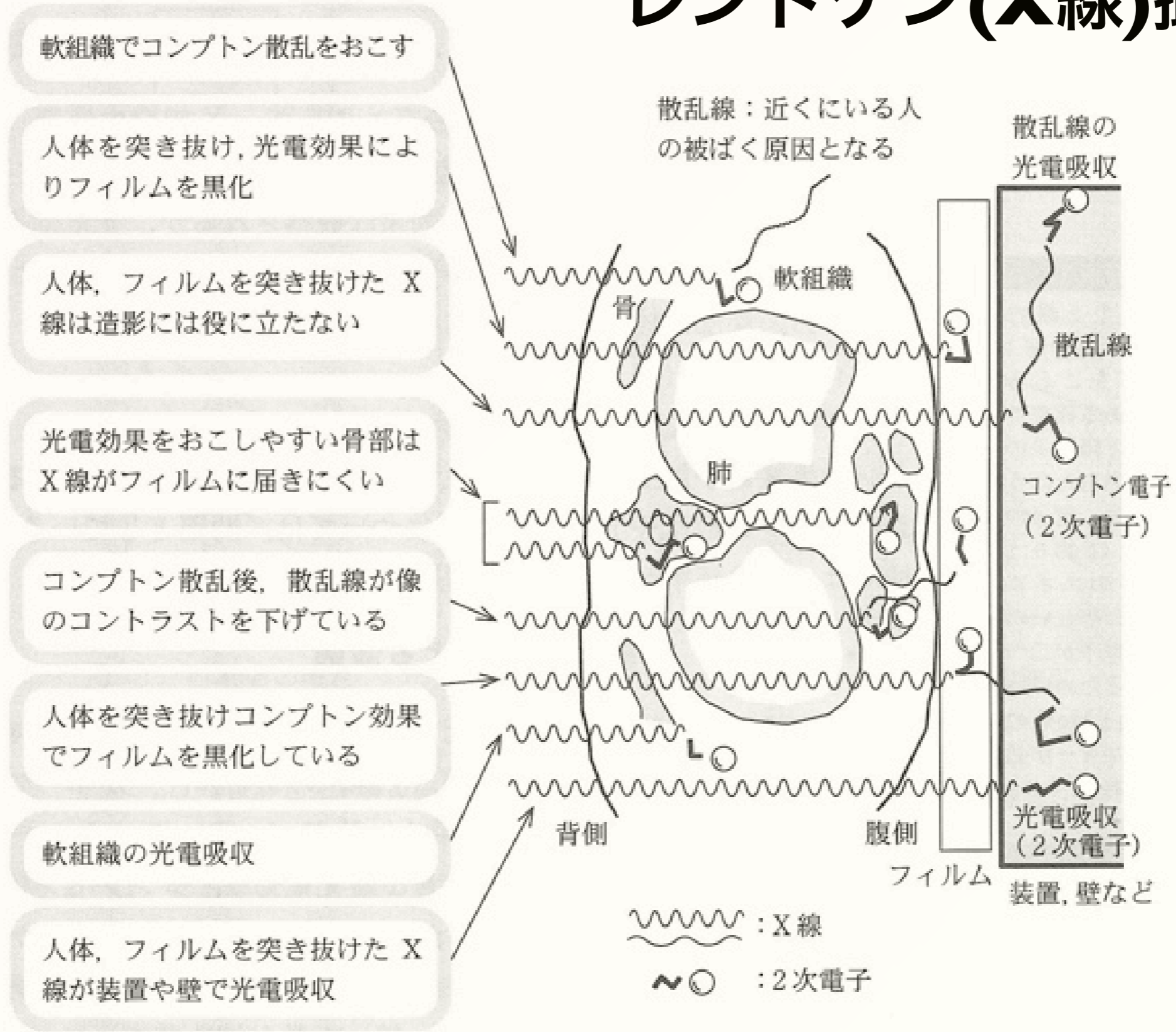
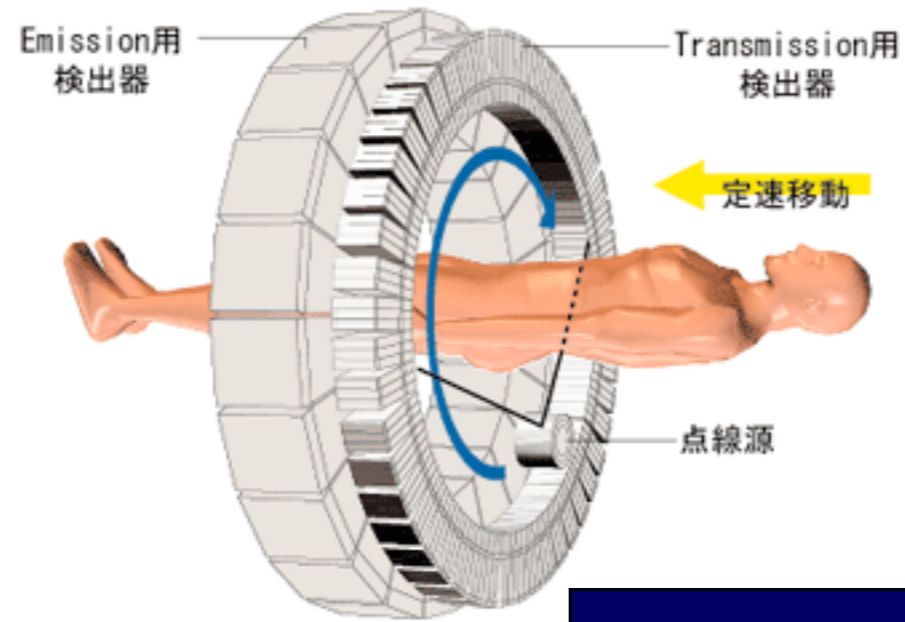


図 2・7 胸部撮影時の X 線と人体の相互作用

胸部単純X線撮影

胸部正面像

- ・立位
- ・吸気呼吸停止
- ・管電圧120kVp程度
- ・撮影時間～50ミリ秒
- ・X線投影：背→腹

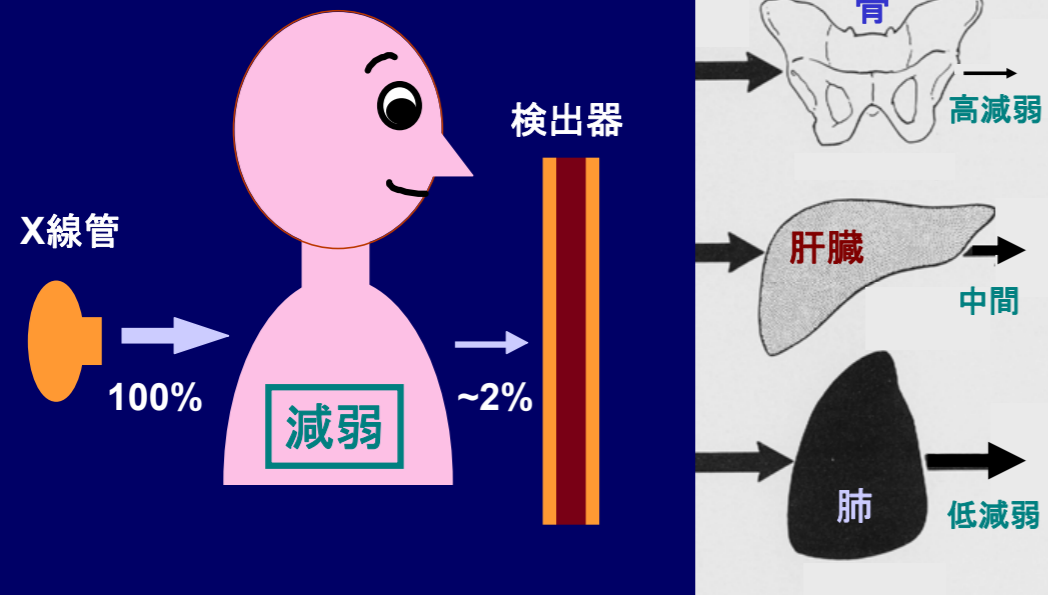
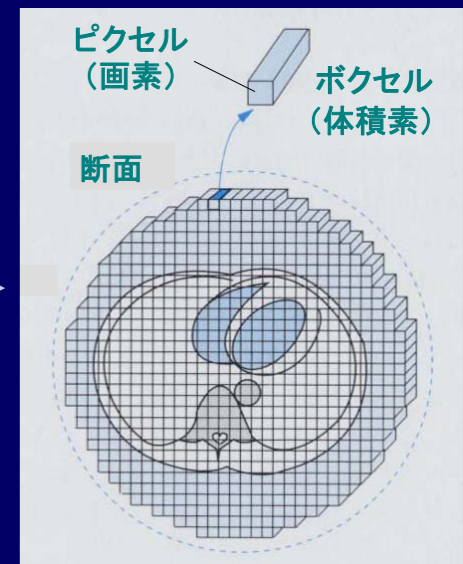
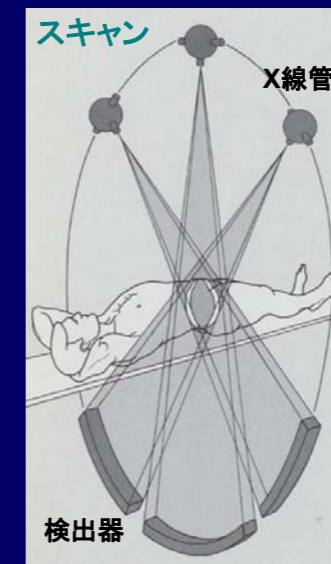


X線 CT

レントゲン(X線)撮影

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

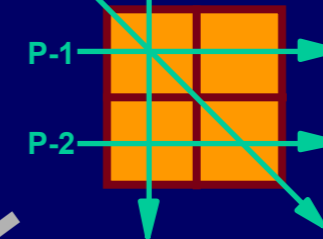
X線コンピュータ断層撮影法:CT



未知の線減弱係数

μ_1	μ_2
μ_3	μ_4

X線投影



連立方程式

- P-1; $\mu_1 + \mu_2 = 8$
- P-2; $\mu_3 + \mu_4 = 9$
- P-3; $\mu_1 + \mu_3 = 6$
- P-4; $\mu_1 + \mu_4 = 5$

解答

1	7
5	4

逆問題

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

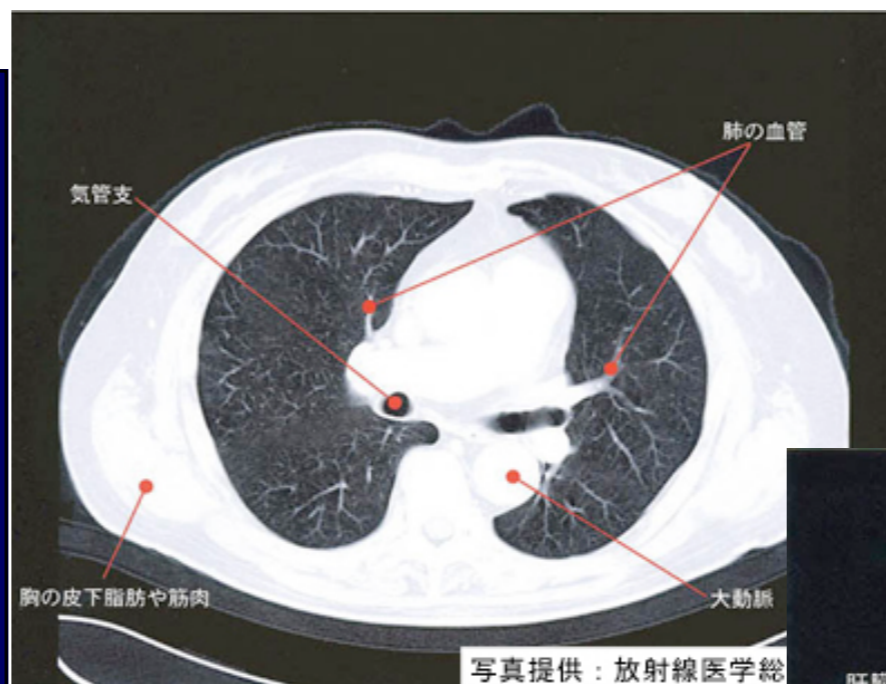
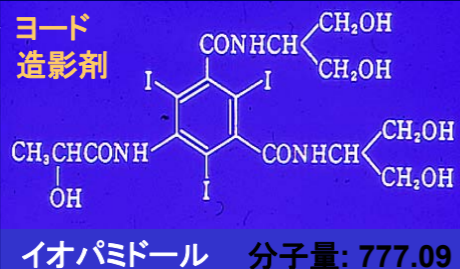
・キセノンガス(脳血流CT)

Xe 54 34.56 keV

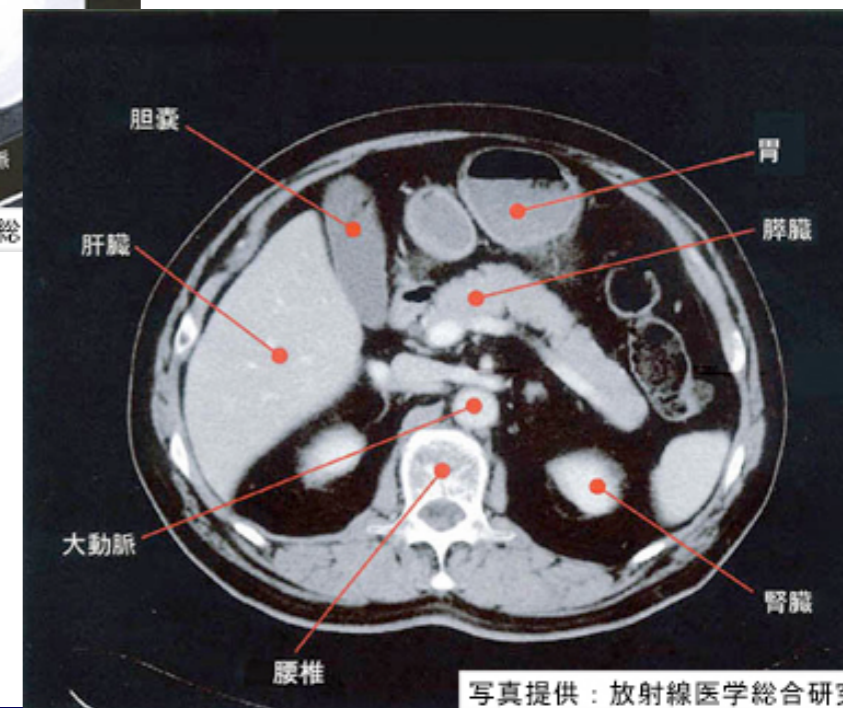
* 陰性造影剤

・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...

・オリーブ油(膀胱CT)



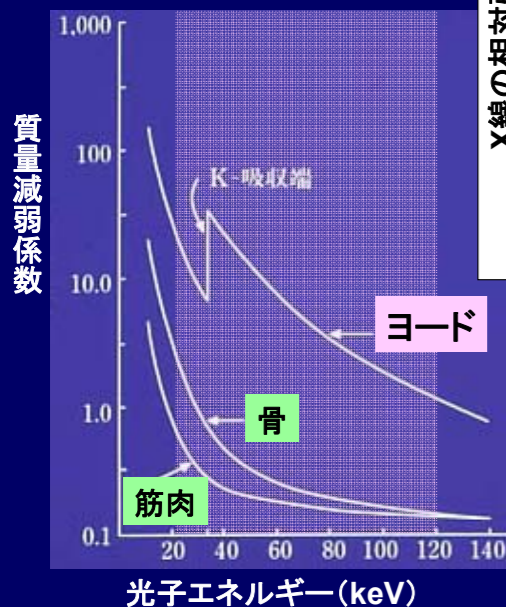
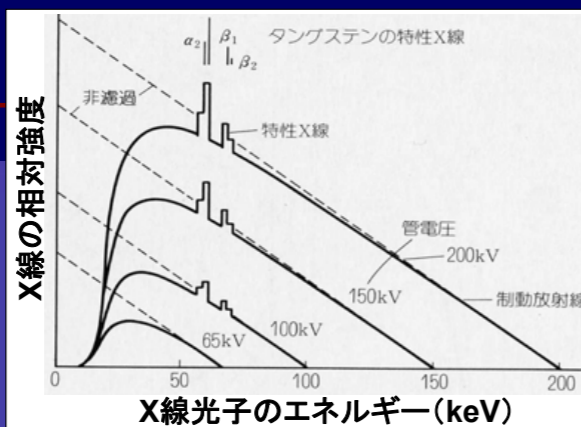
写真提供: 放射線医学総研



写真提供: 放射線医学総合研

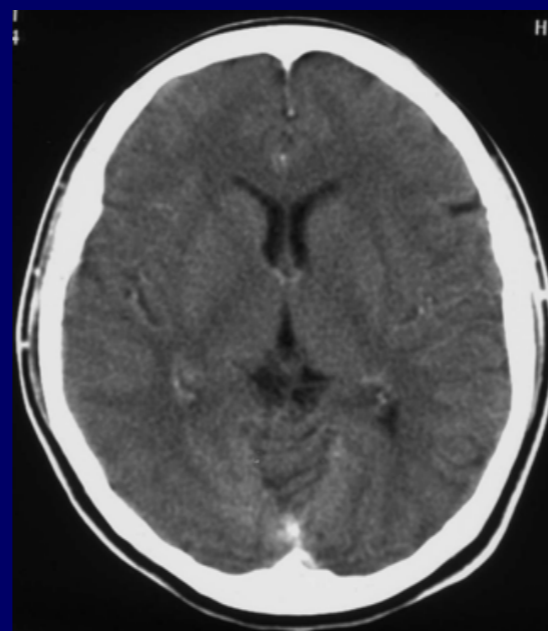
国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

X線の発生と減弱

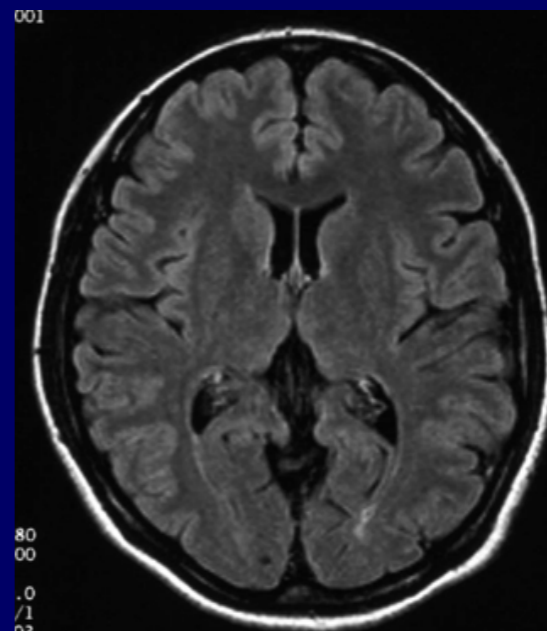


- * 光電効果: 光電吸収
- ・元素のK吸収端 (keV): H 0.0136, C 0.283, O 0.531
- * コンプトン散乱: 非弾性散乱

X線コンピュータ断層撮影法 X-Ray CT: Computed Tomography



磁気共鳴画像診断法 MRI: Magnetic Resonance Imaging



放射線医療

CT scan !!

単純X線撮影より格段に被曝量が多い。

一般の医師が放射線の知識を正しく持っているか疑わしい（学生時代に習っても忘れてる）。医療放射線技師の使う単位は必ずしもSvではない。現場では専門の単位が使われていて、Svへの換算値を即答できるわけではない（体験談）。

CTDI
DLP
 H_T / E

胸のX線CTスキャンは照射される組織の等価線量が1回あたり20–30 mSv。全身被曝に焼き直した実効線量は7 mSv程度。

医療（診断・治療）には線量限度がない！

もちろん医学的メリットがあるからだが、不必要に何度も同じ撮影を繰り返すことなどないよう患者自身も意識をもつべき。

光マップ THE LIGHT MAP

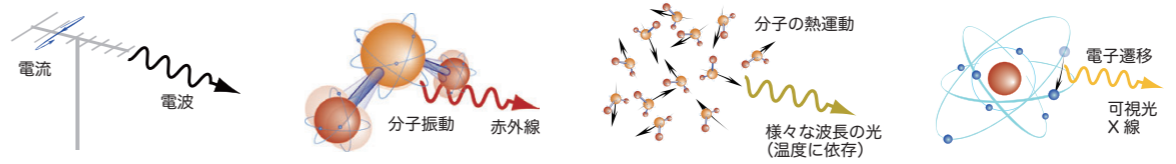
光は、自然界にいつも存在していて、あらゆる植物や生物、人間の生命と営みを支えています。太陽からの光は、地球上に温度をもたらす、植物の光合成のエネルギーとなります。蛍光灯やランプは私たちの生活を明るく照らします。レーザーは材料を加工したり、手術や治療をします。

ラジオやテレビや携帯電話の信号を送る電波、電子レンジで使われるマイクロ波、電気こたつや電熱線で加熱に用いる赤外線、日焼けや殺菌作用がある紫外線、レントゲン写真に用いるX線や、原子崩壊のときに発生するγ線などすべて、光のなかまです。

この光マップは、光が自然界や私たちの生活の中でどのようにつくられ、どのように使われているかをまとめたものです。

光の起源

光はどこで生まれるのでしょうか。光子（フォトン）は電子が加速度を持って動くことによって生まれます。アンテナの中で電子が動くと、低い周波数の光である電波が出ます。複数の原子から構成されている分子の中で原子が互いに動く（分子振動）と、原子の中にある電子も一緒に動くので光が生まれます。その光は赤外線です。水や空気の温度が高くなると、水分子が激しく動き回り、電子も共に動くので光が出ます。温度と光の周波数は対応します。分子の振動はランダムですので、熱が発する光（黒体放射）は単色の光ではなく様々な周波数の光が出ます。原子の周りを回る電子が別の軌道に移ると（電子遷移）、光が出ます。これは振動数の高い可視光です。原子の内殻の電子が遷移するとX線が生まれます。

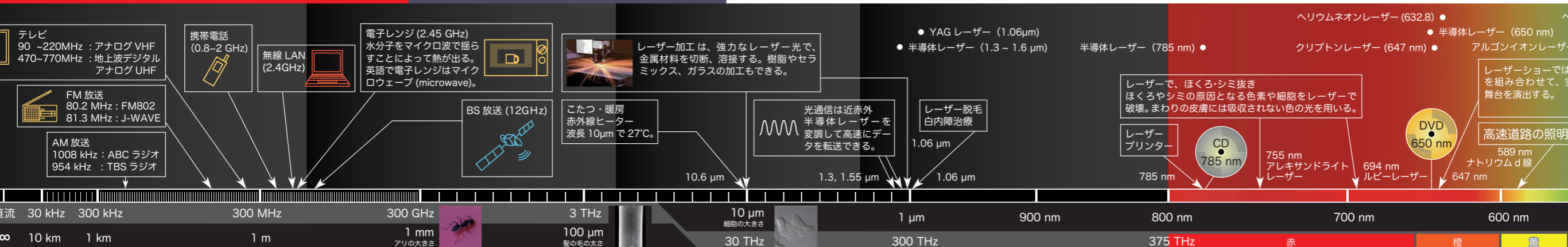


波としての光

光は空間横波です。振動数は1秒間の振動の回数（周波数）です。振動数と距離のかけ算は波長です。振動数や波長に関係なく一定で進む速度があります。

粒としての光

光の強度は光子の密度（振動数）に相当するエネルギーで表すことができます。ちょうど、電流が明るいか暗いかは光子の密度（振動数）に相当するエネルギーで表すことができます。



電波領域（電波も光）

アンテナで送受信

- テレビ: 90~220MHz: アナログ VHF, 470~770MHz: 地上波デジタル アナログ UHF
- 携帯電話 (0.8~2 GHz)
- 無線 LAN (2.4GHz)
- 電子レンジ (2.45 GHz): 水分子をマイクロ波で揺らすことによって熱が出る。英語で電子レンジはマイクロウェーブ (microwave)。
- BS放送 (12GHz)
- FM放送: 80.2 MHz: FM802, 81.3 MHz: J-WAVE
- AM放送: 1008 kHz: ABC ラジオ, 954 kHz: TBS ラジオ

電波の性質: 電波は電磁波で、電圧と電流が同時に伝わる。電波の速度は光速と同じである。電波の波長は、周波数と速度の逆比例の関係にある。

単位: 1km = 10³m, 1m = 10³cm, 1cm = 10²mm, 1mm = 10³μm, 1μm = 10³nm, 1nm = 10³Å

遠赤外光

低温の黒体放射

電波望遠鏡: 波長約1mmから1cmの電波を検出する望遠鏡。日本では野辺山宇宙電波観測所にある。温度が非常に低い星間ガスなどからの黒体放射を観測する。

黒体放射: 物体はその温度に応じて様々な波長の光を放射する。この現象を黒体放射という。

自由電子レーザー (FEL): 紫外から赤外までの広範囲で波長を自由に選択して強力な光をつくる。高速の自由電子を磁場によって蛇行させて発生したシンクロトロン放射からレーザー光線をつくる。国内では大阪大学、東京理科大学などにある。

ハッブル宇宙望遠鏡は、近赤外光検出で63光年離れた惑星でメタンと水を見つけ、太陽系外で有機物が確認された。宇宙の他の星にも生物がいるかも？

中赤外光

分子振動・格子振動、有機分子が見える領域

有機分子の指紋領域: 中赤外は分子の振動単位が豊富。有機分子の「指紋領域」と呼ばれる。

二酸化炭素 (C=O 基): 4.3 μm
水・アルコール (O-H 基): 2.9 μm
メタン (C-H 伸縮): 3.3 μm
トルエン (ベンゼン環): 6.7 μm

二酸化炭素の吸収スペクトル

すばる望遠鏡: ハワイ島にある日本の大型天体望遠鏡。可視光から中赤外光の光を使って宇宙を探る。直径8.2mの反射鏡は世界最大級。

気象衛星ひまわり: 10 μm 付近 (大気窓): 黒体放射から雲や地表温度を観測する。6~7 μm (水の吸収): 水蒸気の分布を観測する。

近赤外光

物質と相互作用しない、物質が透明な領域 (光通信に使われる)

監視カメラ (ナイトビジョン): 近赤外光を照射し、カメラで検知する。目に見えない波長なので、暗闇でも相手に気付かれない。防犯のほか、軍事用にも用いられる。

センサー・赤外線通信 (IrDA): 自動ドアやトイレ、照明用のセンサーや、テレビやステレオのリモコン、パソコンの通信にも近赤外光が使われる。

血糖値測定、果実糖度計: 糖の分子の振動エネルギーが近赤外に相当する。果実を傷つけずに糖度を簡単に測ることができる。

リサイクル識別: 様々なプラスチックの種類を近赤外領域の吸収スペクトルの違いから識別し、リサイクルする。

光CT: 脳の中の酸素濃度を断層画像として取得する。

白熱灯 (2,500°C) の黒体放射のピークは、1 μm 付近。

サーモグラフィ: 赤外光の強度から温度を測定する。体温分布計測、軍事用に用いられる。

可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

血液の赤色はヘモグロビンの色。動脈は酸素を含んで鮮やかな赤色。静脈では黒っぽい色になる。波長800nmで入れかわる吸収率から、近赤外光を使って血中酸素濃度を計測することができる。

紅葉: アントシアン、カロチノイド、クロロフィル。秋になると、葉緑素のクロロフィルが分解されてカロチノイドの黄色に、その後、アントシアンがつくられて赤色に変わる。

3次元ナノ加工は、近赤外パルスレーザーを用いて、レーザー光の波長よりも遙かに小さい100nmの分解能で立体加工を実現。

細胞手術では、近赤外パルスレーザーを細胞内に集光して、細胞内部を加工、刺激する。

半導体量子ドット: 直径数nmの半導体粒子で蛍光を発する。小さい粒子ほど短い波長で光る。

ルビーの赤は不純物のクロムの色。世界初のレーザーはルビーから出た光。

太陽電池は、電卓、腕時計、街路灯から人工衛星にまで使われる。光のエネルギーでクリーン発電。

可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

発光ダイオードは、発光効率の高光源として、信号機、パラボラアンテナ、街のイルミネーション、車のヘッドライト、光合成等、多目に使用される。

太陽が黄色に見えるのは、500nm付近の黒体放射のため、表面温度は約6,000°C。

ホテルの発光の源はルシフェリン。熱をほとんど出さずに発光する。

白色をつくるには青と赤が必要。テレビの液晶の画素、CRTの蛍光体

色づくのは光の干渉

向から伝わってくる光が重なり合うと、互いに強め合ったり弱め合ったりします。シャボン玉や油膜が七色に見えますが、これは膜の表面と裏面反射した光が干渉するからです。立体像である(1971年ノーベル賞)は、光の干渉を使っています。光はコヒーレント(可干渉)であるといえます。コヒーレントな光を出す装置です。

七色に光るシャボン玉

クレジットカードのホログラム

空の青色は光の散乱

光が小さな粒子(分子)に当たると散乱します。波長の短い光は長い波長の光よりよく散乱します。空が青いのも夕焼けが赤いのも光の散乱の効果です。

もとの光が赤色がずれて散乱する光があります。ラマン散乱といいい、分子や結晶の振動エネルギーが光子に足し算(引き算)されるために生じます。この色のずれを計測して、半導体結晶の欠陥や分子の種類を分析する技術があります。

空の色は散乱された青い光

虹の七色は光の屈折

光が空気から水やガラスに入ると、曲がります。この現象を屈折といひます。屈折率は光の波長(色)によって異なります。万有引力の法則で有名なニュートンはプリズムを使って太陽の光には様々な色が混ざっていることを発見しました。雨上がりの路地に虹が見えるのは空気中の水滴がプリズムとして太陽光を分光するからです。最先端の光科学には、負の屈折率の物質(逆方向に光が曲がる)を人工的につくる研究が進んでいます。

折れたように見えるけど、プリズムで屈折して色分けされた光

光は回折する

光の進路に障害物を置くと、光は障害物の裏側にも回り込んで伝わっていきます。細い光線をつくらうとして細い穴に光を通して、すぐ広がってしまいます。光の回折を利用して光を選択することができます。細かい周期構造に光を照射すると、それぞれの構造で回折した光が干渉し、角度によって違う色が見えます。CDやDVDの表面が七色に見えるのは、記録ビットの列が回折格子として働くためです。タマシヤやチョウの羽、貝殻も、表面に周期構造があって七色に見えます。このように回折で現れる色のことを構造色といひます。

モルフォ蝶、羽の電子顕微鏡写真

七色に光るCDの表面

光子ロケットは光の放射圧

光が物質の境界面で屈折や反射、散乱すると、物質に力がかかります。光の放射圧は、400年前に予言されたといわれています。天文学者のケプラーは彗星(ほうき星)の尾がいつも太陽と反対側にのびるのを見て、太陽からの光の圧力のせいだと考えました。ステーブン・チューらは光の放射圧で原子を冷却する技術を発明しノーベル賞を受賞しました。SF小説には放射圧で飛ぶ光子ロケットが出てきます。JAXAやアメリカでは実際にソーラーセイル宇宙船を研究しています。

ハレー彗星

アメリカで光で進む宇宙船

「波」として伝わります。粗密波（縦波）の音波とは異なり、光は進行方向と直交する方向に電場と磁場が交流して振動する電磁波です。単位は Hz)、波長は 1 回振動する間に真空中を進む距離 (単位は m) 光が一秒間に進む距離、つまり速度を表します。真空中の光の速度は、 3×10^8 m/s です。

が非常に弱くなってくると、光が粒々であることが見えてきます。を光子 (フォトン) といいます。光は光子の粒々がたくさん集まって「電子」の流れの集まりで、水が「水分子」の集まりなように。度で決まります。光子一つ一つは、光の色、つまり波長 (あるいは) を持っています。

光に関連するノーベル賞

- | | | | | | | | |
|-------|--------------------------------|-------|--|-------|---|-------|--|
| 1901年 | X線の発見 (W. レントゲン) | 1924年 | X線分光学 (K. M. G. シーグバーン) | 1961年 | γ線の共鳴吸収とメスbauer効果の発見 (R. L. メスbauer) | 1997年 | レーザー冷却法の開発 (S. チュー、C. コーエンタウジ、W. D. フィリップス) |
| 1907年 | 干渉計の考案と分光学の研究 (A. マイケルソン) | 1927年 | コンプトン効果の発見 (A. H. コンプトン) | 1964年 | レーザー、レーザー効果の発見 (C. H. タウンズ、N. G. バソフ、A. M. プロホロフ) | 1999年 | フェムト秒化学 (A. H. ズウェイル) (化学賞) |
| 1908年 | 光の干渉を利用した天然色写真 (G. リップマン) | 1930年 | ラマン効果の発見 (C. V. ラマン) | 1964年 | X線回折法による生物物質の分子構造の研究 (D. M. ホジキン) (化学賞) | 2000年 | 高速/光電子技術のための半導体ヘテロ構造の開発 (Z. I. アルフォーロフ、H. クレーマー) |
| 1909年 | 無線通信 (G. マルコーニ、C. F. ブラウン) | 1932年 | 量子力学の創始 (W. K. ハイゼンベルグ) | 1965年 | 量子電磁力学 (朝永振一郎、J. シュウィンガー、R. P. ファインマン) | 2002年 | 宇宙ニュートリノ検出 (R. デービス Jr., 小柴昌俊) |
| 1914年 | 結晶によるX線回折 (M. フォン・ラウエ) | 1936年 | X線、電子線回折による分子構造の研究 (P. J. W. デバイ) (化学賞) | 1966年 | 光ポンピング法による原子の励起 (A. カスレ) | 2002年 | タンパクのレーザーイオン化法 (J. B. フェン、田中耕一) (化学賞) |
| 1915年 | X線結晶解析 (W. H. ブラッグ、W. L. ブラッグ) | 1953年 | 位相差顕微鏡の発明 (F. ツェルニケ) | 1966年 | ホログラフィーの発明 (D. ガボア) | 2003年 | 核磁気共鳴画像化法 (P. ラウターバー、P. マンスフィールド) (生物・医学賞) |
| 1918年 | エネルギー量子説 (M. K. E. L. プランク) | 1954年 | 原子核反応とγ線に関する研究 (W. ボーテ) | 1974年 | 電波天文学における先駆的研究 (M. ライル) | 2005年 | 光コヒーレンスの量子理論 (R. J. グラウバー) |
| 1921年 | 光電効果の法則の発見 (A. アインシュタイン) | 1958年 | チェレンコフ効果の発見 (P. A. チェレンコフ、I. M. フランク、I. E. タム) | 1979年 | X線 CT (G. N. ハウンズフィールド、A. M. コーマック) (生物・医学賞) | 2005年 | 光周波数コム技術などレーザー精密分光法の開発 (J. L. ホール、T. W. ヘンシュ) |



紫外光

目に見えない光、外殻電子遷移エネルギー

光学顕微鏡は微小な物体を拡大して観察できる。物体の反射率や光吸収、蛍光発光の分布をもとに観察像をつくる。分子の振動や偏光特性を観察する顕微鏡もある。紫外から近赤外の広い波長範囲の光が使われる。

昆虫の可視域
ミツバチの可視域は紫外から黄色の光まで。人間には見えない花の様相が見える。

ブラックランプ
の発する紫外線は目に見えないが、周りの物質を発光させる。

地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

光触媒は、紫外光を吸収して、窓ガラスや壁の汚れを分解する。

酸化チタン

SPring-8
兵庫県佐用郡にある大型の放射光施設。X線から赤外線まで広い波長範囲で世界最高輝度の光をつくる。周長 1.4 km の蓄積リングと呼ばれる軌道に電子を閉じ込め、光速近くまで加速した電子からのシンクロトロン放射でX線を得る。

誘虫灯で昆虫を引き寄せ、電気ショックで駆除する。紫外線は昆虫の可視域。

動物の目には2色から4色を見分けるセンサーがあり、それらに入る光のバランスで色を認識する。人間は、550nmの波長を、最も明るく感じる。

昆虫の色
インディゴ (藍色) で染めたのはほとんど害虫よけのため。

ステンドグラスの色は金属の色であり、永遠に褪色しない。金は数ナノメートルの小ささになると赤く色づく。形や大きさを変えるだけで可視から近赤外まで色が変化する。このような科学は「プラズモニクス」と呼ばれ、がん治療や太陽電池、ナノ回路、ナノ顕微鏡に使われる。

青信号の色
日本人は緑色のことをしばしば「青色」という。

ビール・酒の瓶は茶色や緑色。紫外線が透過しないように着色し、お酒の劣化を防ぐ。

軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

レーザープラズマ光源
高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

軟X線顕微鏡
「水の窓」を使えば、高い空間分解能で生物試料を生きたまま観察できる。軟X線は大気をほとんど伝わらないので、装置を真空中に置く。

X線のレンズ
軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。

ウォルター鏡

ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。

フレネルゾーンプレート

反射には、Mo/Si や Cr/Sc などの多層膜が用いられる。

静電気除去
空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

X線

内殻電子遷移エネルギー

レントゲン写真
からだが見える。X線が透過しにくい骨が影となって映る。胃を見るときはバリウム(造影剤)を飲む。空港の手荷物検査もX線。

X線CT (コンピュータ断層撮影)
様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。

X線天文衛星さく
X線は大気層で吸収されるため、望遠鏡を搭載した衛星を宇宙まで飛ばして観測する。

XPS (X線光電子分光)
X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。

γ線

原子核・素粒子の遷移エネルギー

PET (ポジトロン断層法)
放射性分子をマーカーにした新しいがん検診技術。

γ線バースト
太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。

強い放射線
強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

放射線治療
弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

γ線滅菌
弱いγ線なら医療器具などの滅菌にも使える。じゃがいもの発芽防止にもγ線を照射する。

光は横波

水面や金属の表面、照葉樹の葉の表面で反射すると、電場が反射面に垂直な方向に揺れている光がよく反射され、光の揺れる方向に偏りが生じます。これを偏光といいます。

偏光フィルターは、特定の方向に揺れる光だけをカットします。偏光メガネやカメラのフィルターに使われます。テレビやパソコンの液晶ディスプレイは偏光を利用した表示装置です。電圧で液晶分子の向きをそろえ、光の透過を偏光制御します。

光の速度は

真空中で1秒間に30万 km。これは1秒間に地球を7周半回ることができる速さです。月までは1.3秒、太陽までは8.3分かかります。光の速さで1年かかる距離を1光年といいます。太陽から最も近い恒星は4.2光年の距離にあり、銀河系の直径は10光年です。夜空には数多くの星が見えますが、この光は何年も何十年も昔に星を出た光です。真空中の光の速さは、電波も可視光もX線も同じです。また、この速度を超えることは不可能とされています。しかし、速度を遅くすることはできます。屈折率の高いプラスチックやガラスの中での光の速さは、真空中に比べて1.33分の1、1.5分の1になります。最近、**フォトリソグラフィ**や**プラズマディスプレイ** (金属薄膜) で、速度がとても遅い**スローフォトン**をつくり出す研究が進んでいます。

太陽の七変化

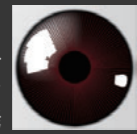
太陽の色は、黄色がかった白色に見えます。太陽の黒体放射で発生した様々な色の光が混ざっているからです。しかし日の出、日の入りの太陽は赤く見えます。陽が傾くと光が大気を通る距離が増え、短波長の光がチリや水滴に散乱されて届かなくなるからです。日没の時、一瞬だけ赤から緑色に見えることがあります。**グリーンフラッシュ**と呼ばれる現象です。太陽が完全に沈んだ瞬間、地球の大気層のプリズム効果で太陽光が屈折し、緑色の光だけが届いて見えます。空気が澄んで地平線や水平線が見える場所でもまれに見る珍しい現象です。

色の見え方

人間は 600 万~1,000 万色を識別できるとされていますが、目の中には、赤、緑、青のセンサーしかありません (犬、猫は2色、鳥は4色)。このセンサーに入る光のバランスで色を認識しています。たとえば、赤と緑の光が同時に目に入ると黄色に、すべての色が混ざると白く見えます。この3色は**光の3原色**といい、テレビ等の発色に使われます。絵の具やインクは光を吸収して色をつくり、赤の絵の具は赤色以外の光を吸収し、赤色の光だけを反射します。シアン (Cyan)、マゼンタ (Magenta)、黄色 (Yellow) の3色 (**色の3原色**) を使えば様々な色をつくることができ、印刷物はこれに黒を組み合わせてつくり、

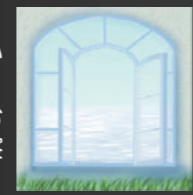
325 nm)

近視矯正手術、角膜切除には、エネルギーの高い紫外光が使われる。エキシマレーザーを使って角膜を蒸発させ削り取る。サブミクロンの精度で精密に一部の角膜だけを削り角膜の形を変えて屈折矯正する。

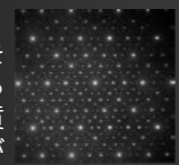


極端紫外光リソグラフィー 極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

水の窓 水の吸収がない波長。水分を多く含む生物試料の観察に使えるX線。



X線回折結晶構造解析 原子の配列による回折を利用し、配列パターンや原子間距離を測る技術。原子間隔に相当する波長のX線を使う。タンパク質分子の立体構造も知ることができる。



XFEL(X線自由電子レーザー) SPring-8に自由電子レーザーの発振器を建設し、X線の波長域でレーザー光を得る施設。2006年から建設が始まり、2010年に完成を目指している。



紫外光

外殻電子遷移エネルギー

紫外線洗浄 半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、質に紫外線を使う。

紫外線殺菌 水、食品、薬品などを殺菌する。

オゾン層 紫外線 可視光

酸化チタン

SPring-8 兵庫県佐用郡にある大型の放射光施設。X線から赤外線まで広い波長範囲で世界最高輝度の光をつくる。周長1.4kmの蓄積リングと呼ばれる軌道に電子を閉じ込め、光速近くまで加速した電子からのシンクロトロン放射でX線を得る。

真空紫外 200nm~10nmの紫外線は大気の中を伝わらない。太陽からの真空紫外線は、地表まで到達しない。微細加工などの応用が期待されている光だが、真空環境が必要。

eV (エレクトロンボルト) 光のエネルギーを表す単位にeVがある。波長1μmの光は1.24eVに相当する。光の波長とエネルギーは反比例し、波長100nmの光は12.4eV、波長1nmでは1.24keV(1240eV)と、波長が短いほど高いエネルギーを持つ。

アト秒レーザー アト秒(atto)は0.0000000000000001秒(0が18個)。そんな一瞬しか光らないパルスレーザー。このレーザーを使えば、電子が止まって見える。100アト秒では光はたった30nmしか進めない。真空紫外線や軟X線の光でつくられる。

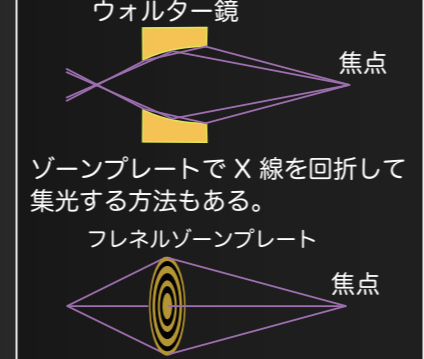
軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

レーザープラズマ光源 高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

軟X線顕微鏡 「水の窓」を使えば、高い空間分解能で生物試料を生きたまま観察できる。軟X線は大気をほとんど伝わらないので、装置を真空中に置く。

X線のレンズ 軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



反射には、Mo/SiやCr/Scなどの多層膜が用いられる。

静電気除去 空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

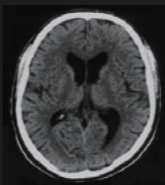
X線

内殻電子遷移エネルギー

レントゲン写真 からだが透けて見える。X線が透過しにくい骨が影となって映る。胃を見るときはバリウム(造影剤)を飲む。空港の手荷物検査もX線。



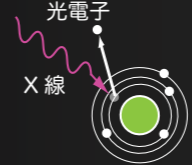
X線CT (コンピュータ断層撮影) 様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



X線天文衛星すざく X線は大気層で吸収されるため、望遠鏡を搭載した衛星を宇宙まで飛ばして観測する。



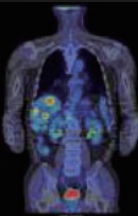
XPS(X線光電子分光) X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。



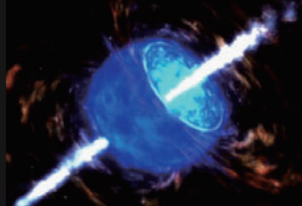
γ線

原子核・素粒子の遷移エネルギー

PET (ポジトロン断層法) 放射性分子をマーカーにした新しいがん検診技術。



γ線バースト 太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。



強い放射線 強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

放射線治療 弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

γ線滅菌 弱いγ線なら医療器具などの滅菌にも使える。じゃがいもの発芽防止にもγ線を照射する。



PET (Positron Emission Tomography) 陽電子断層撮影法


組織の”はたらき”を知る

^{18}F -FDG (fluorodeoxy glucose), $^{15}\text{O}_2$, H_2^{15}O




放射線医療：診断

e^+



陽電子 positron

電子 electron



e^-

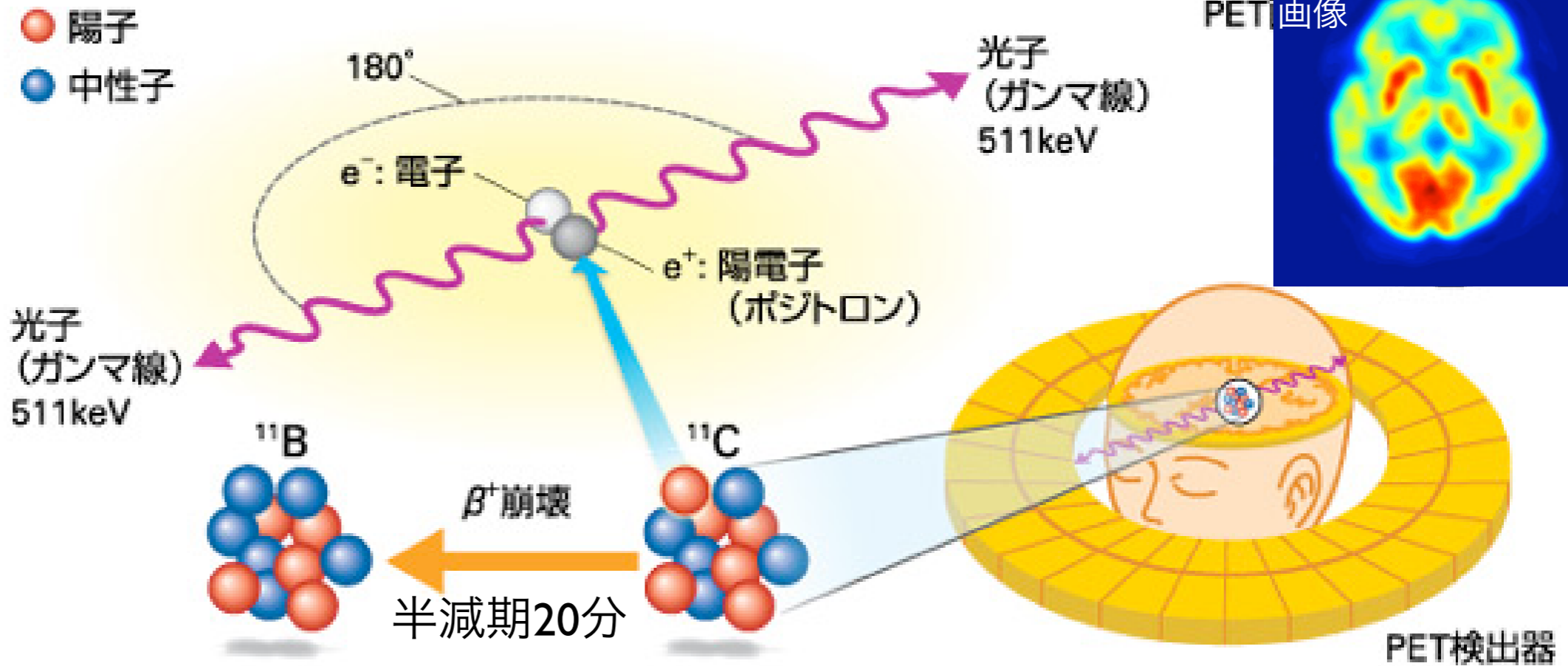


図1 PET (陽電子放射断層画像撮影法) の仕組み

調べたい分子に陽電子を放出する放射性核種を付け、静脈注射によって投与する。例えば、炭素 11 (^{11}C) はホウ素 11 (^{11}B) に崩壊するとき、陽電子を 1 個放出する。その陽電子が近くにある電子と衝突し、両方向にガンマ線が放出される。検出器がガンマ線をとらえることで断層画像が得られ、分子がどこに、どれだけ存在しているのかを知ることができる。

^{11}C , ^{13}N ,
 ^{15}O , ^{18}F

VIDEO

放射線診断

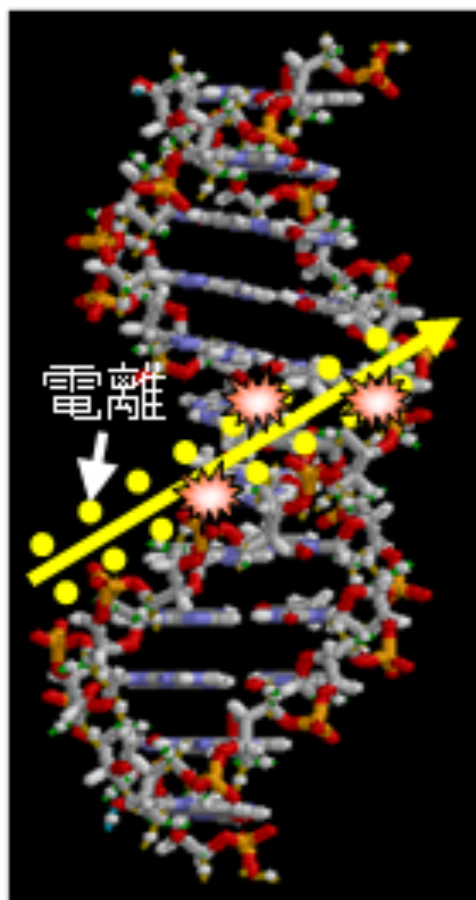
日本原子力文化振興財団：エネコチャンネルのビデオ映像「探検！身近な放射線」より抜粋

<http://eneco.jaero.or.jp/20110322/>

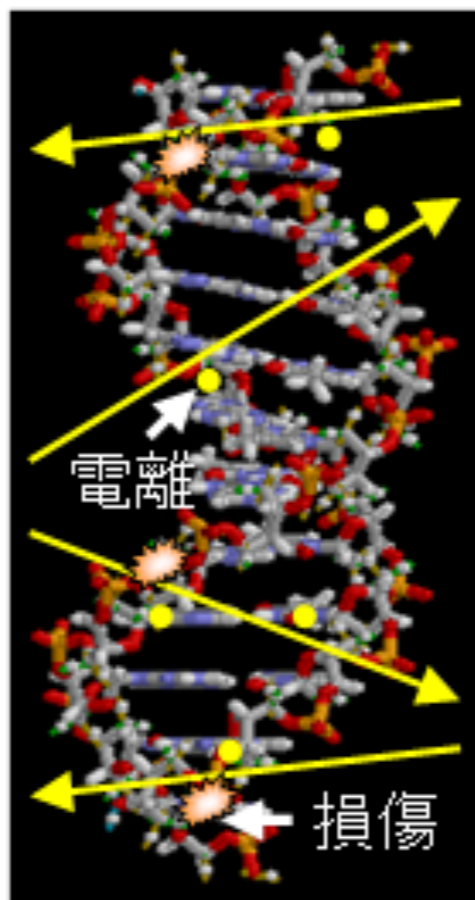
放射線医療

～ 治療 ～

放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

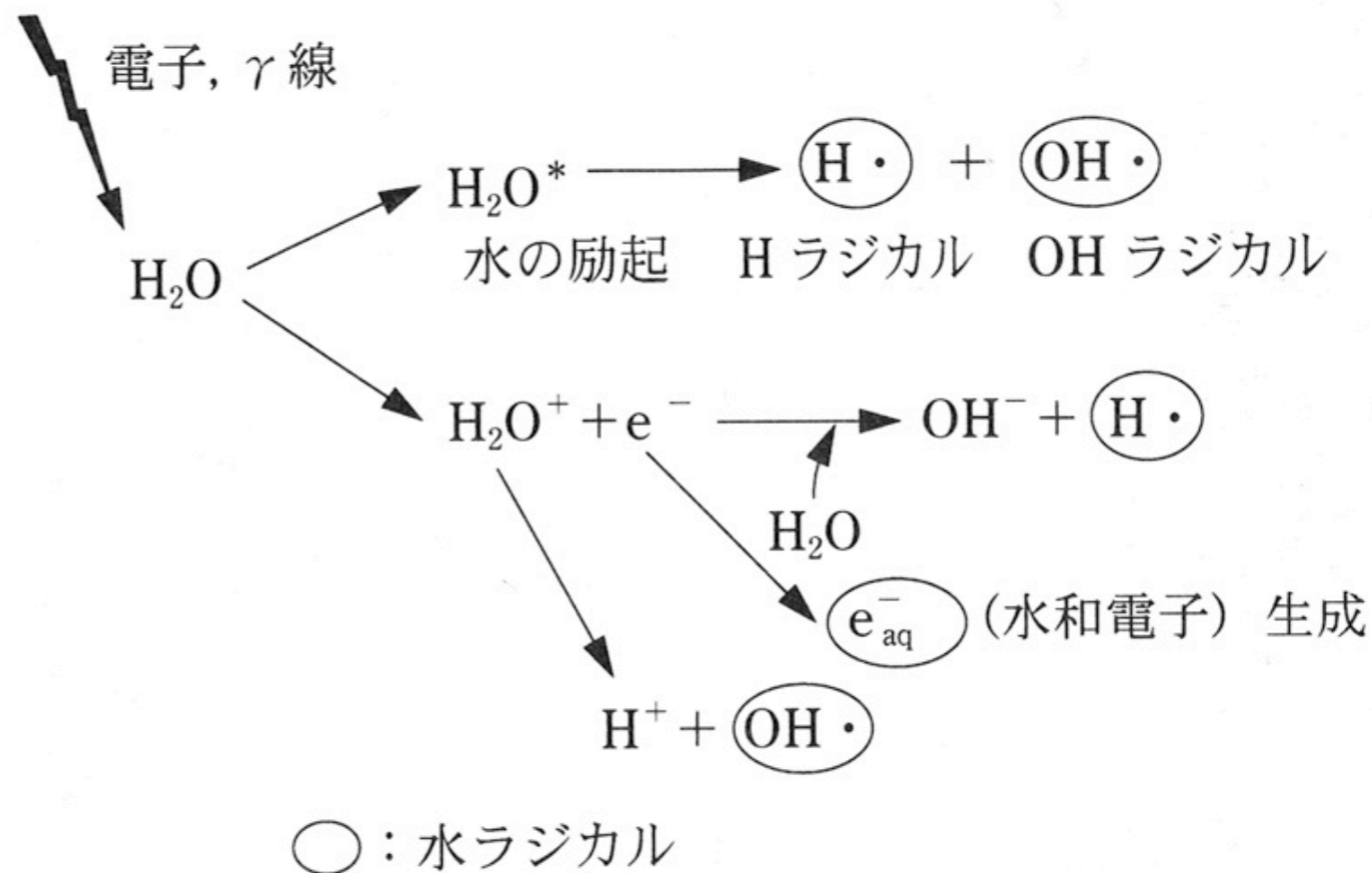


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

LET : 線エネルギー付与

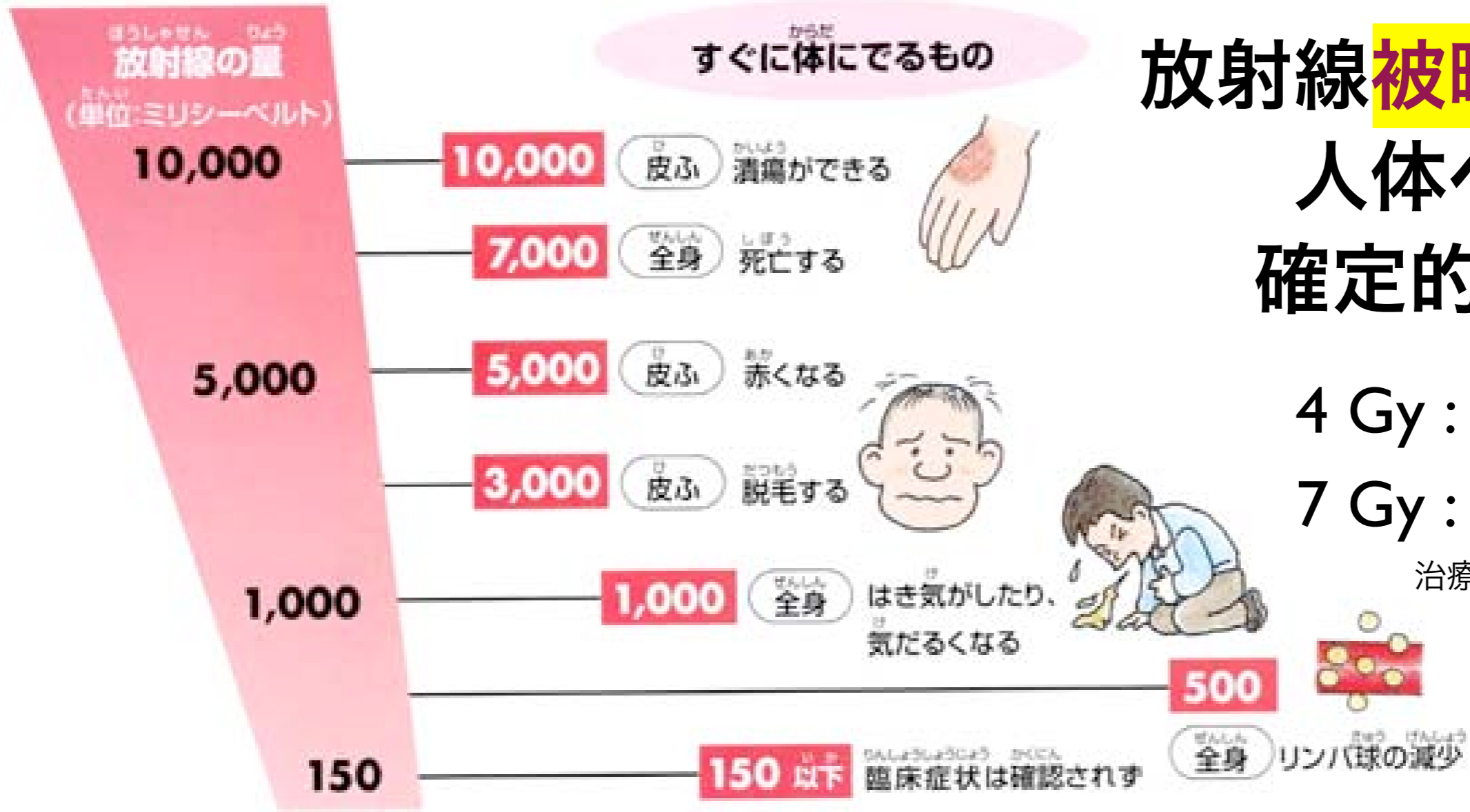
放射線の直接作用 : 荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く **高 LET 放射線**

と間接作用 : 水の電離で生じるラジカルが DNA 分子に作用

低 LET 放射線

放射線被曝による 人体への 確定的影響

すぐに体にできるもの

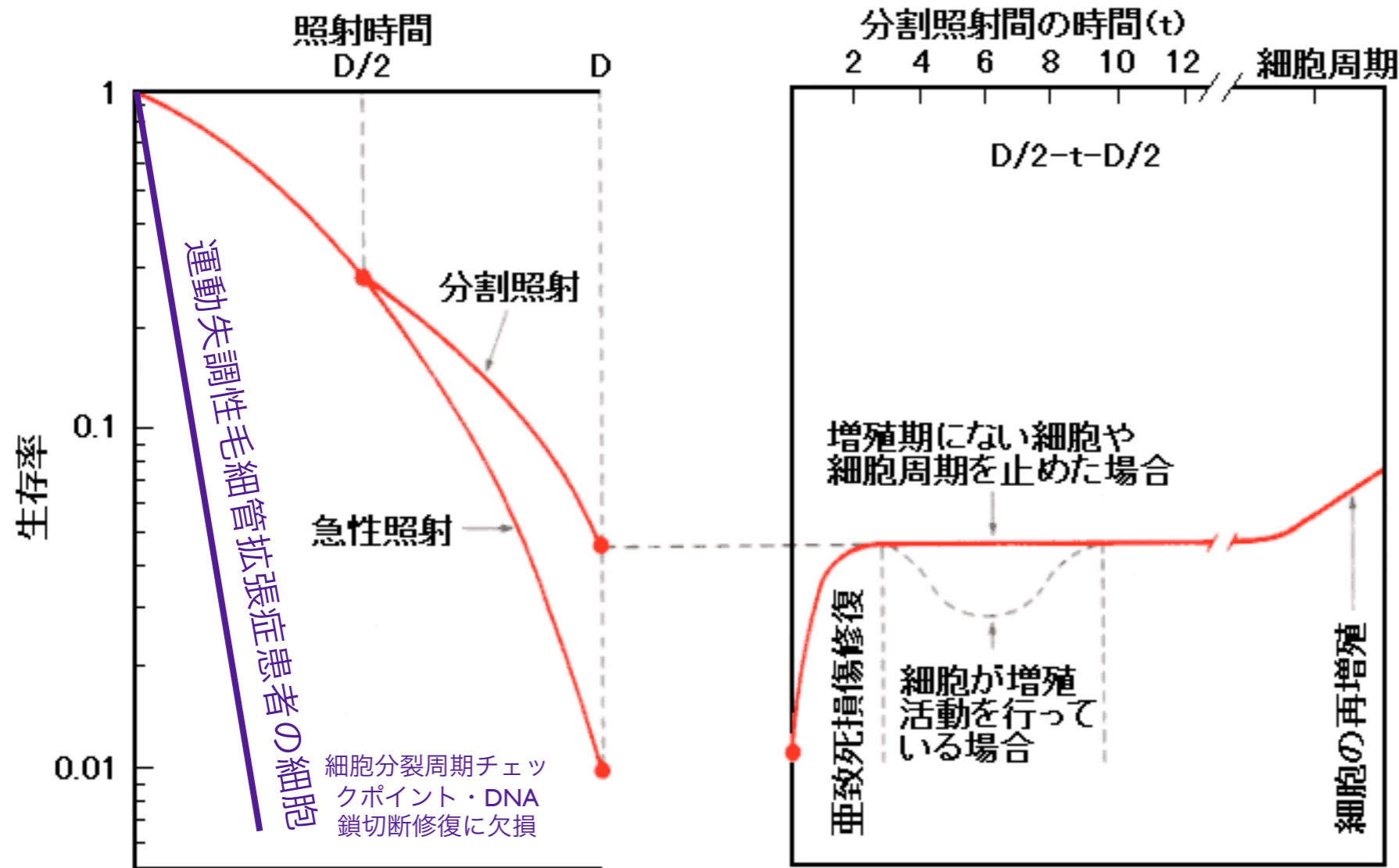


4 Gy : 半数死亡
7 Gy : 全員死亡

治療により助かることも。

細胞再生系	造血組織				腸上皮	皮膚	精巣	水晶体
幹細胞 幹細胞 芽細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)	幹細胞 リンパ球 好中球 赤血球 血小板				腺窩 (幹細胞) 絨毛	基底細胞 (幹細胞) 角質層	幹細胞 精子	上皮 (幹細胞) 水晶体繊維 赤道部
正常な分化過程	4	4	4	4日	2日	2週間	3-4週間	1/2-3年
正常な成熟過程	1	7-10	7	100日	2日		7-8週間	
照射による変化	免疫能力低力	血液凝固時間延長	食作用低力	酸素輸送低力	絨毛の短縮と喪失、出血、下痢	紅斑、萎縮、潰瘍	一時的または永久不妊	白内障

SLD (亜致死損傷) 回復 Sublethal Damage Recovery



数時間の中に
損傷からの回復
(DNA修復)が
行われている。

低LET放射線では
細胞周期によっても感受性が違う。
(分裂期末とDNA合成期が弱い)

がん細胞は頻繁に増殖を続けているので、放射線に対する感受性が高い。DNA修復機能も弱い。低酸素状態のがん細胞は放射線抵抗性。正常細胞への影響を抑えつつがん細胞を殺すには、複数回照射が有効。

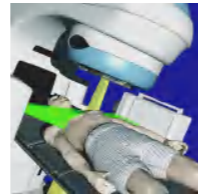
細胞が放射線照射を受けると細胞分裂の周期を止めて（分裂遅延）DNA修復を待つしくみも備えている。

DNA修復に異常がある場合は細胞生存率が著しく低下する。

がんの放射線治療とは？

◆外部照射

体外から遠隔照射装置を用いて病巣に放射線を照射する



◆小線源療法

腔内照射法

自然にある体腔に密封線源を留置して照射する



組織内照射法

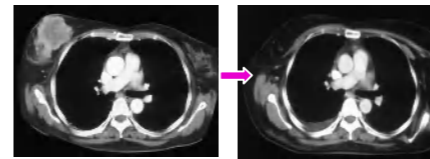
組織内に直接密封線源を挿入して照射する



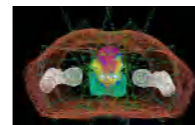
◆内用療法

非密封線源を静脈内あるいは経口投与する

■乳がん



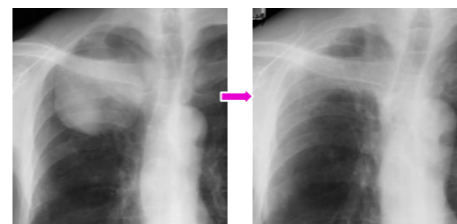
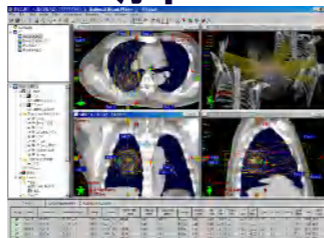
■前立腺がん



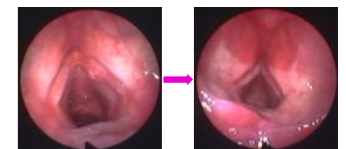
■食道がん



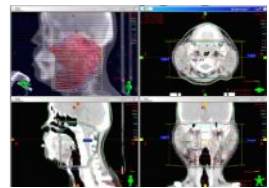
■肺がん



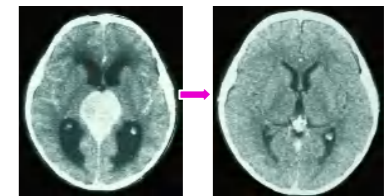
■頭頸部がん



■悪性リンパ腫



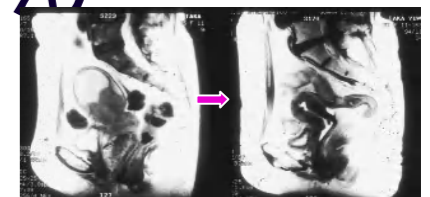
■脳腫瘍



■膝がん



■子宮頸がん

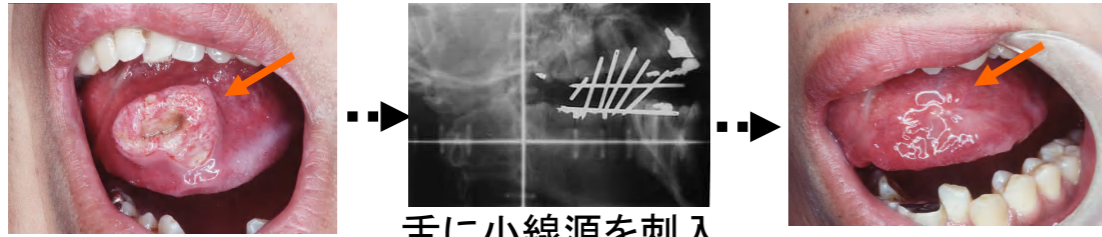


放射線治療が有用ながん

頭頸部癌

舌癌 I期

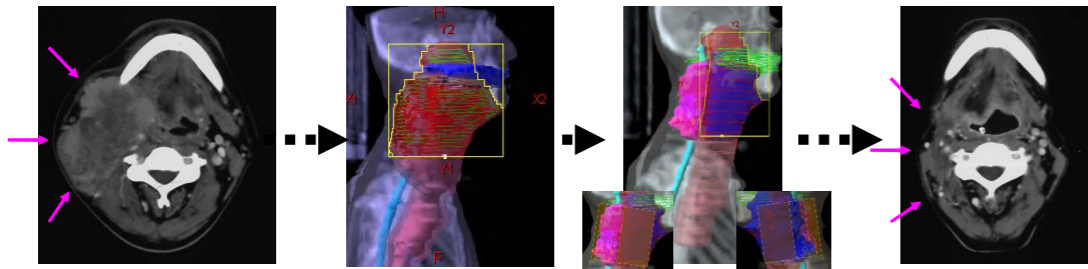
組織内照射



舌に小線源を刺入

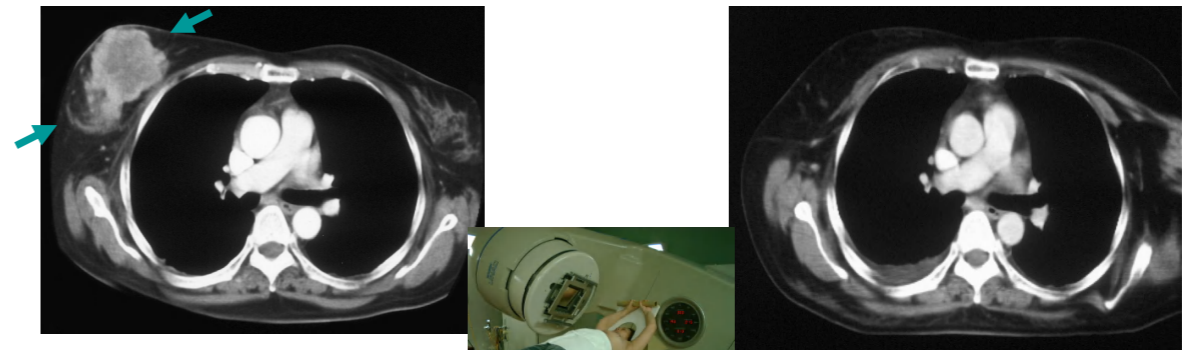
下咽頭癌 IVB期

外部照射



乳癌

進行乳癌に対する抗がん剤療法併用放射線治療



照射前

抗がん剤併用で
62Gy照射後



外部照射

肺癌

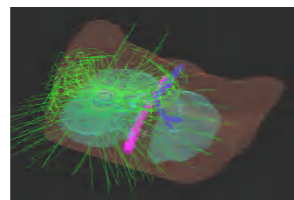
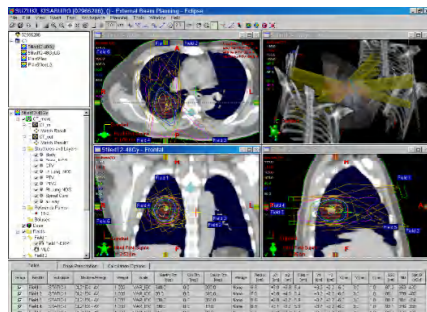
外部照射

IIIB期

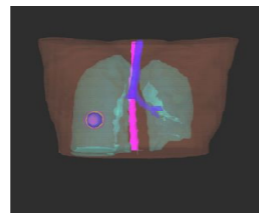


照射前

照射70Gy後6か月

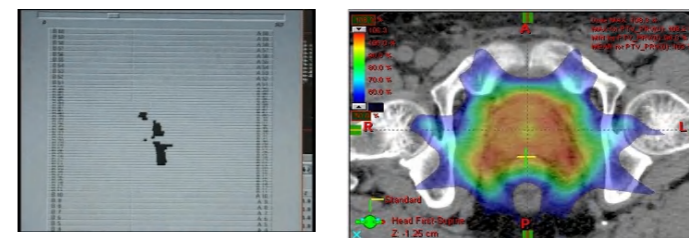


肺定位照射



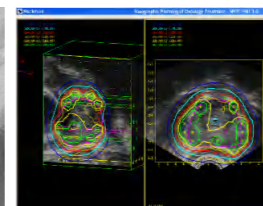
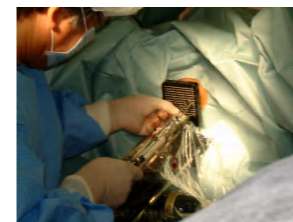
前立腺癌

強度変調放射線治療(IMRT)



IMRT法により前立腺がんの照射線量を70 Gyから90Gyに増加し、直腸出血率を30%から3%に減少させ、治癒率を70%から90%に改善することができた。

ヨウ素125シード密封小線源治療

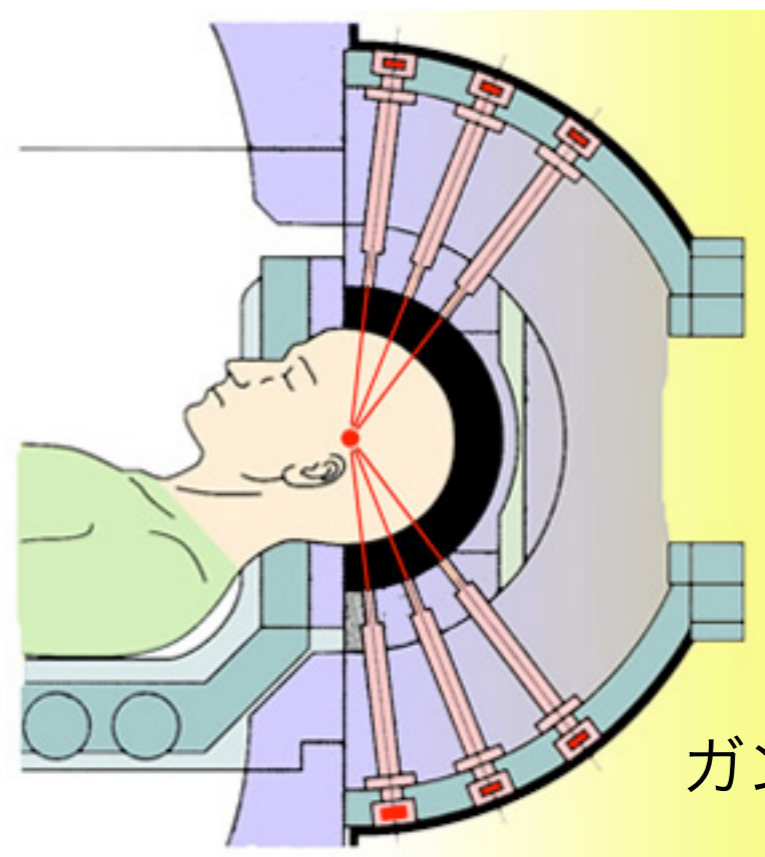
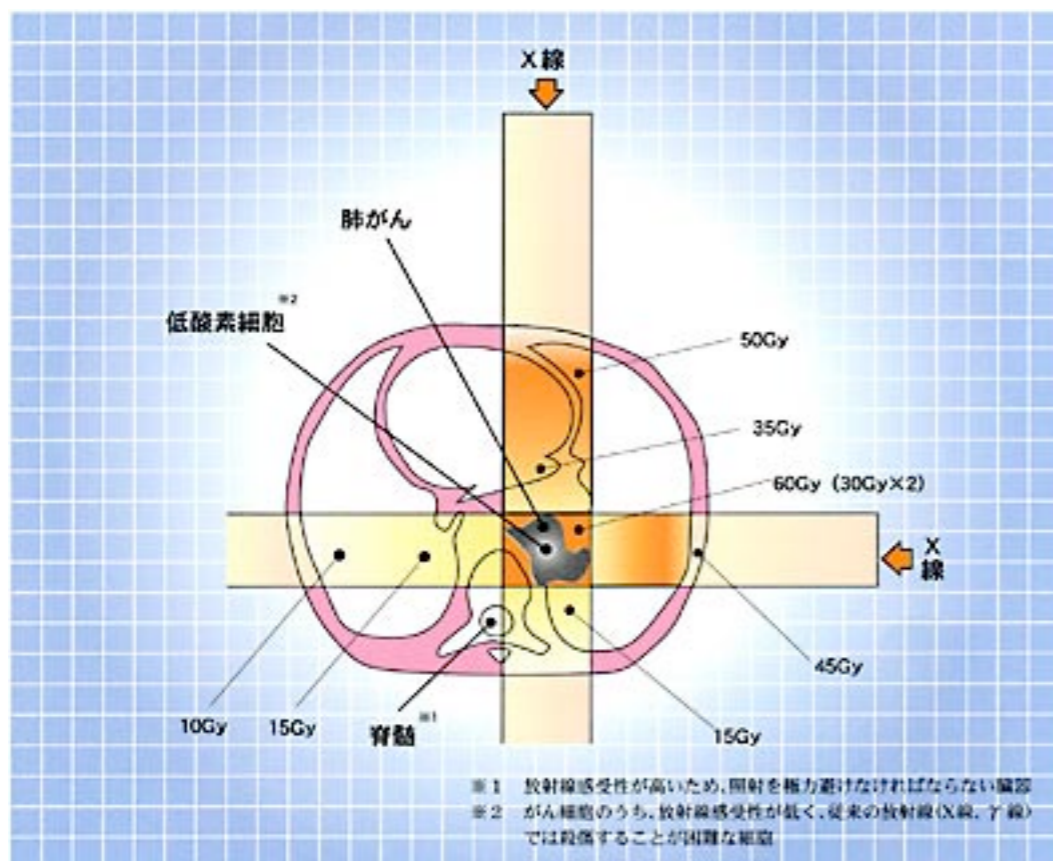


Guiliani元ニューヨーク市長

放射線 がん治療

数 Gy を数十回

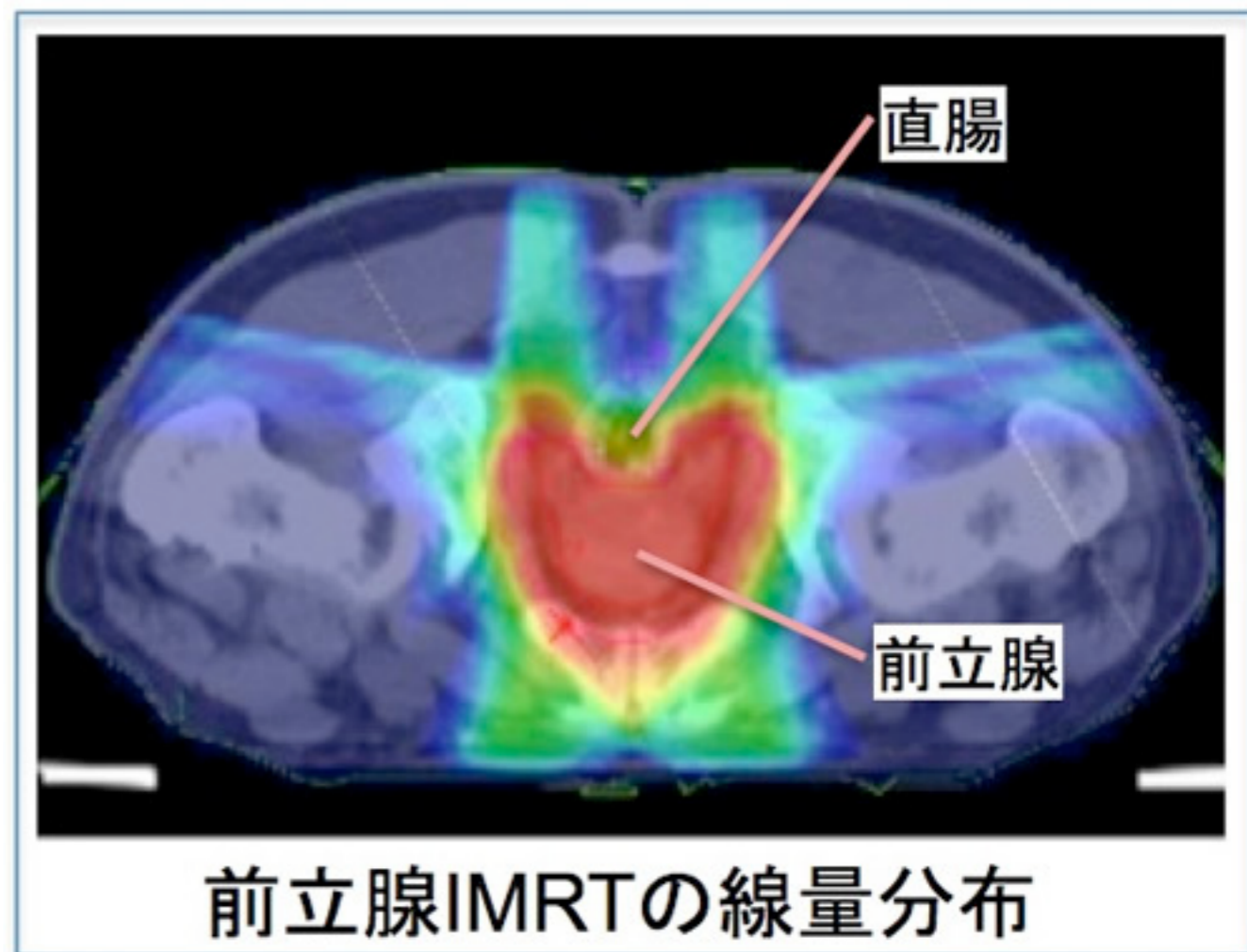
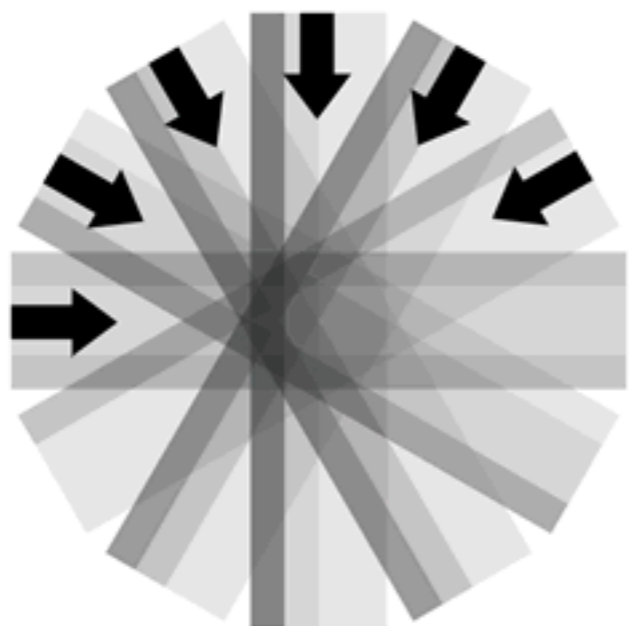
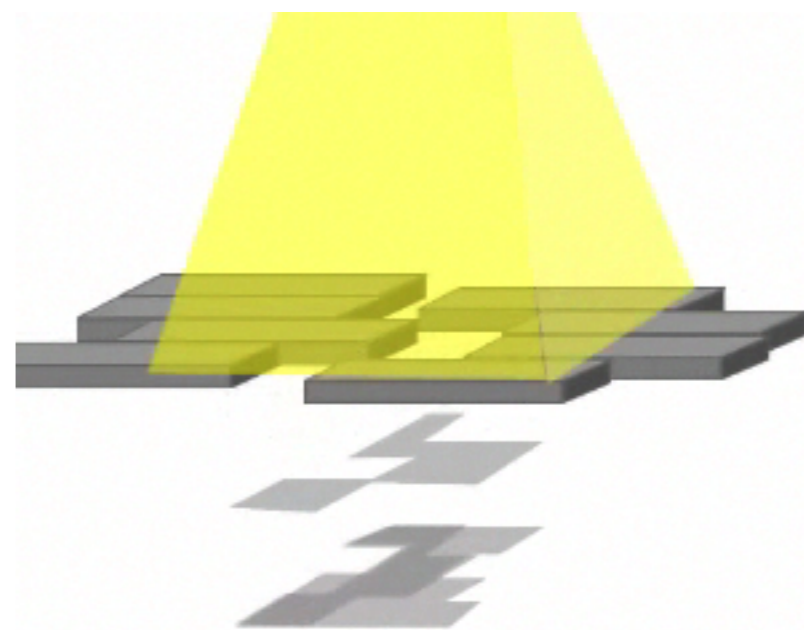
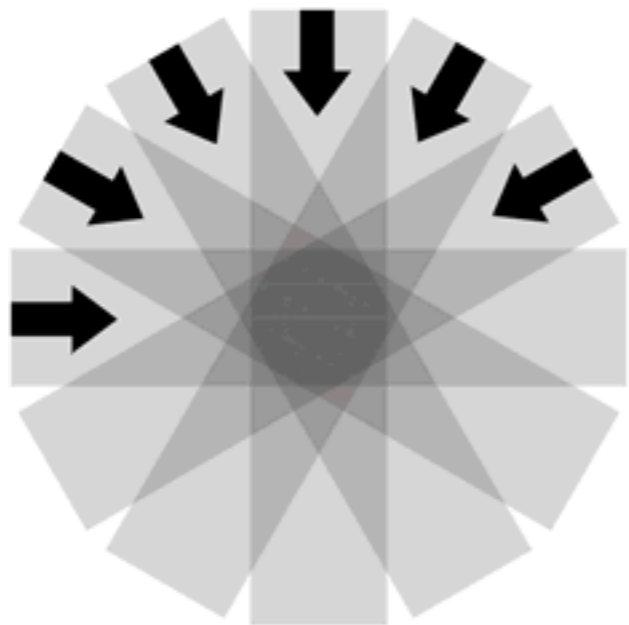
X線 外部照射

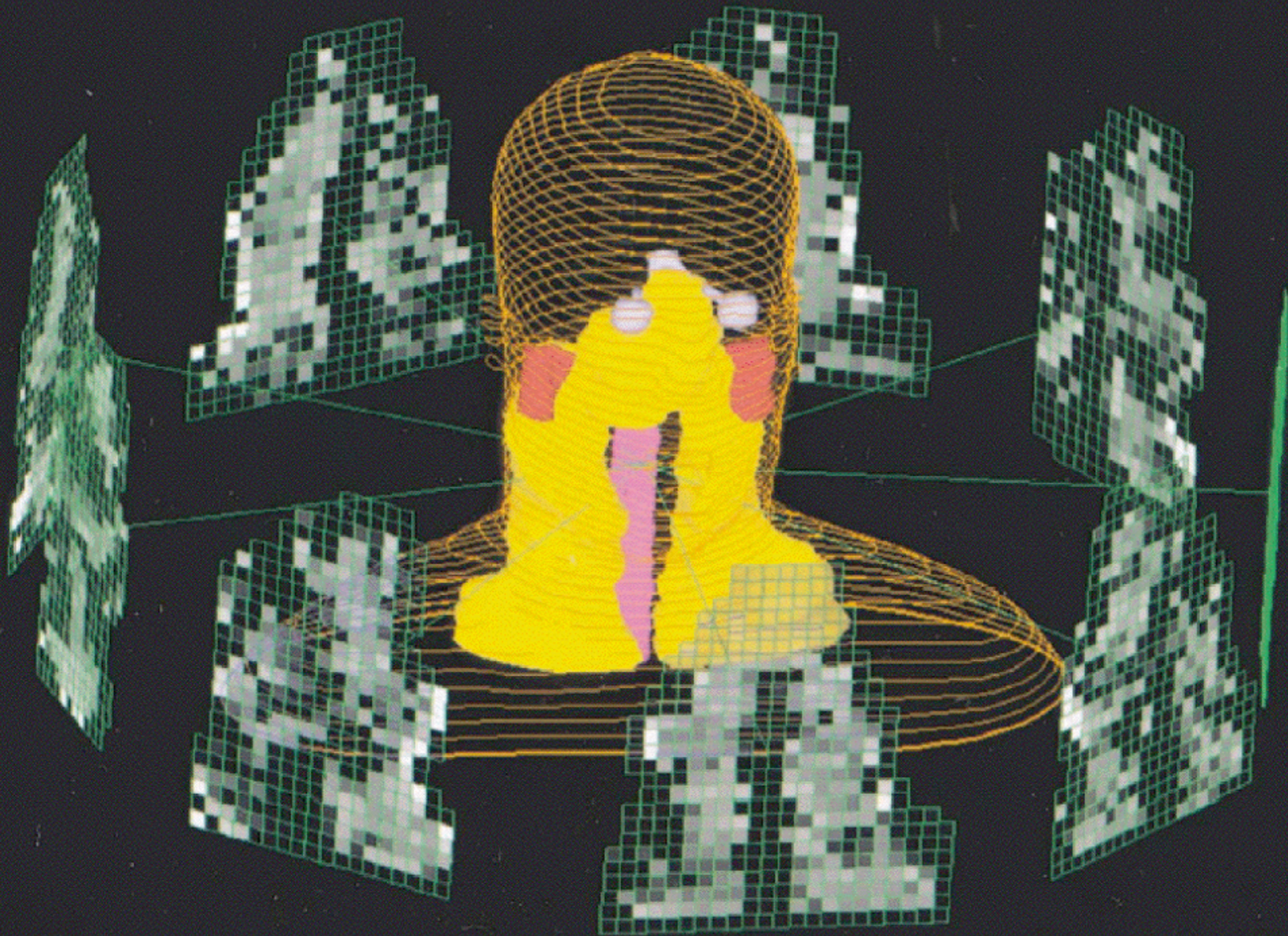


医療技術：ガンマナイフ (γ線)
サイバーナイフ (X線)



写真提供：(独)放射線医学総合研究所





光子

紫外線

X

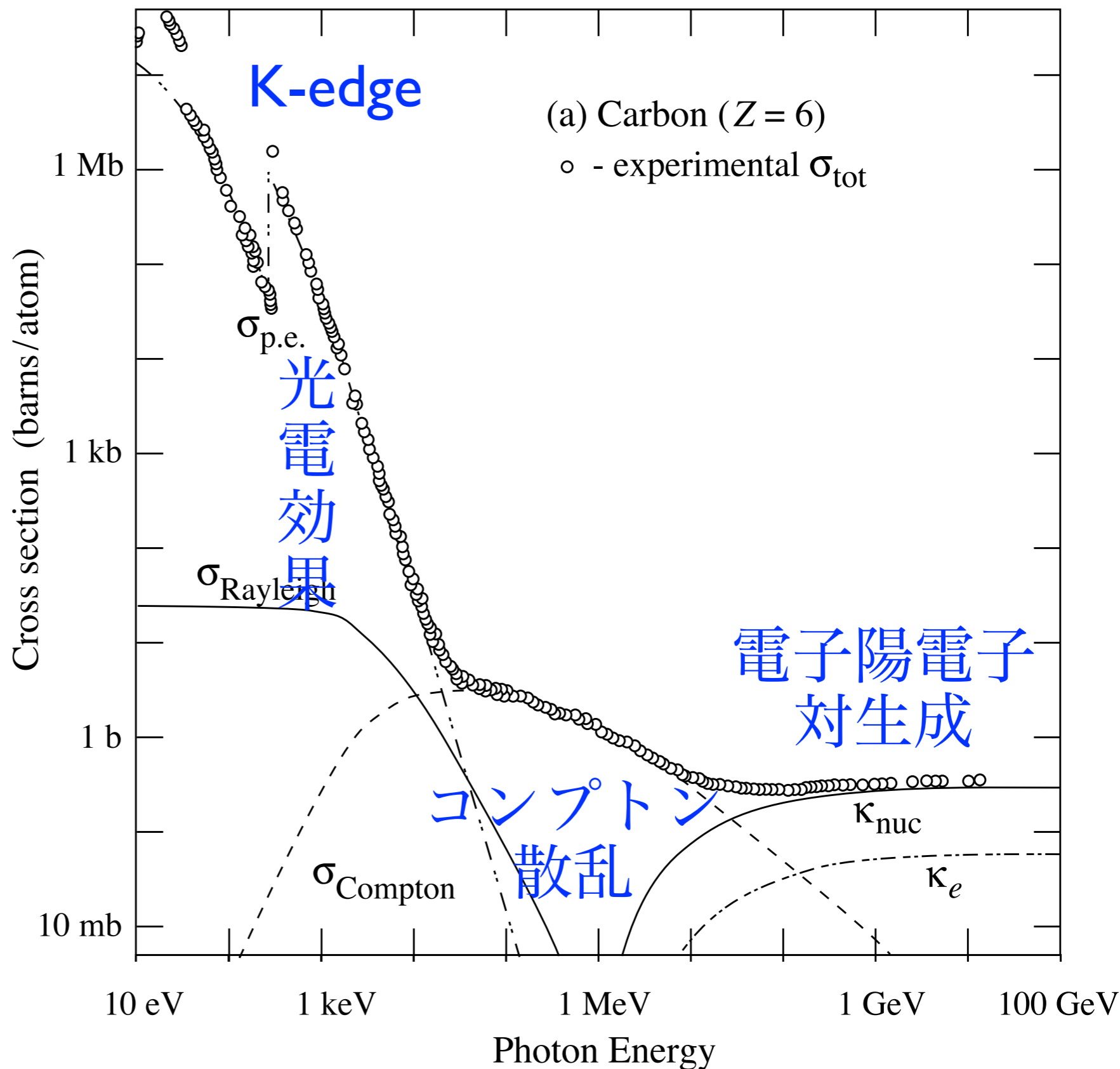
線

γ

線

反応断面積

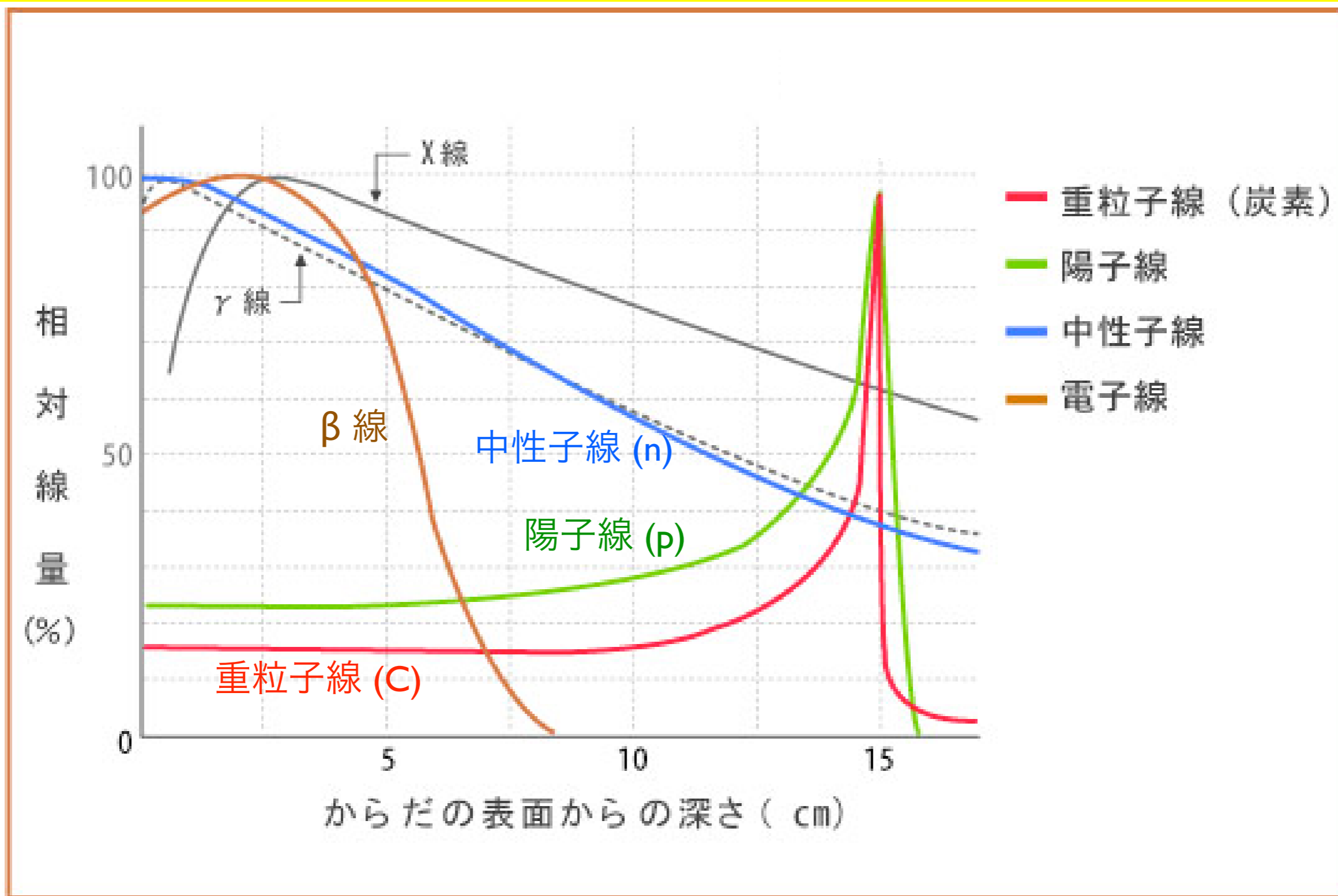
1 barn
= 10^{-28} m^2
= 100 fm^2



陽子(p)、 α 、重粒子線は飛程が揃っている。

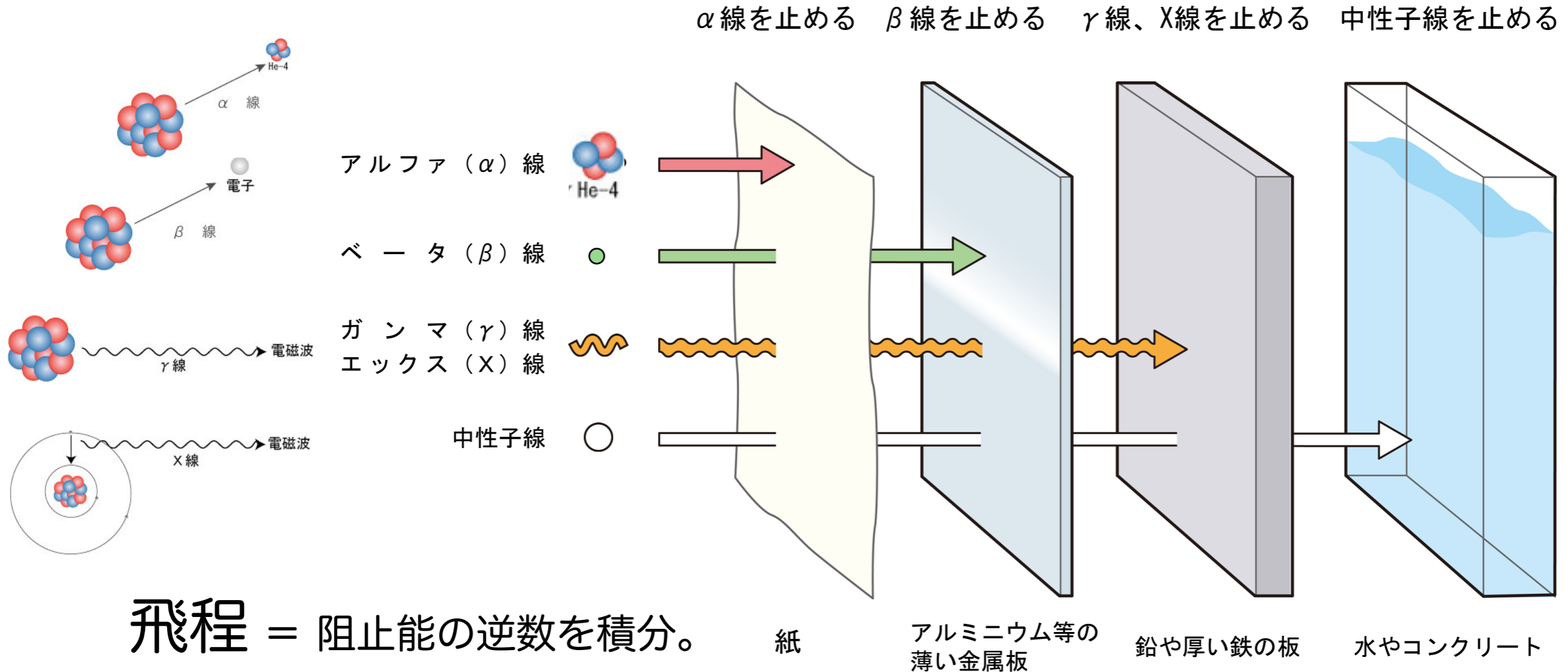
電子(β)は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。

中性子(n)、光子(X, γ)は反応が確率的に起こるため、指数関数的減衰をする。



放射線の種類、透過力と遮蔽

透過力が強い =
なかなか反応しない



飛程 = 阻止能の逆数を積分。

阻止能

LET

(エネルギー損失) (線エネルギー付与)

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

陽子線(p)/α線/重粒子線：短い飛程。高LET。

外部被曝に対して遮蔽は容易。内部被曝は要注意。

中性子線(n)：電子と相互作用しないので遠くまで飛ぶ。

陽子を叩き出せば一気に減速するが、核子同士なので反応断面積が小さい（反応確率が小さい）。

短い飛程。高LET。水素原子を含む物質で遮蔽。

電子(β)線：p, α, 重粒子線に比べて長めの飛程。低LET。

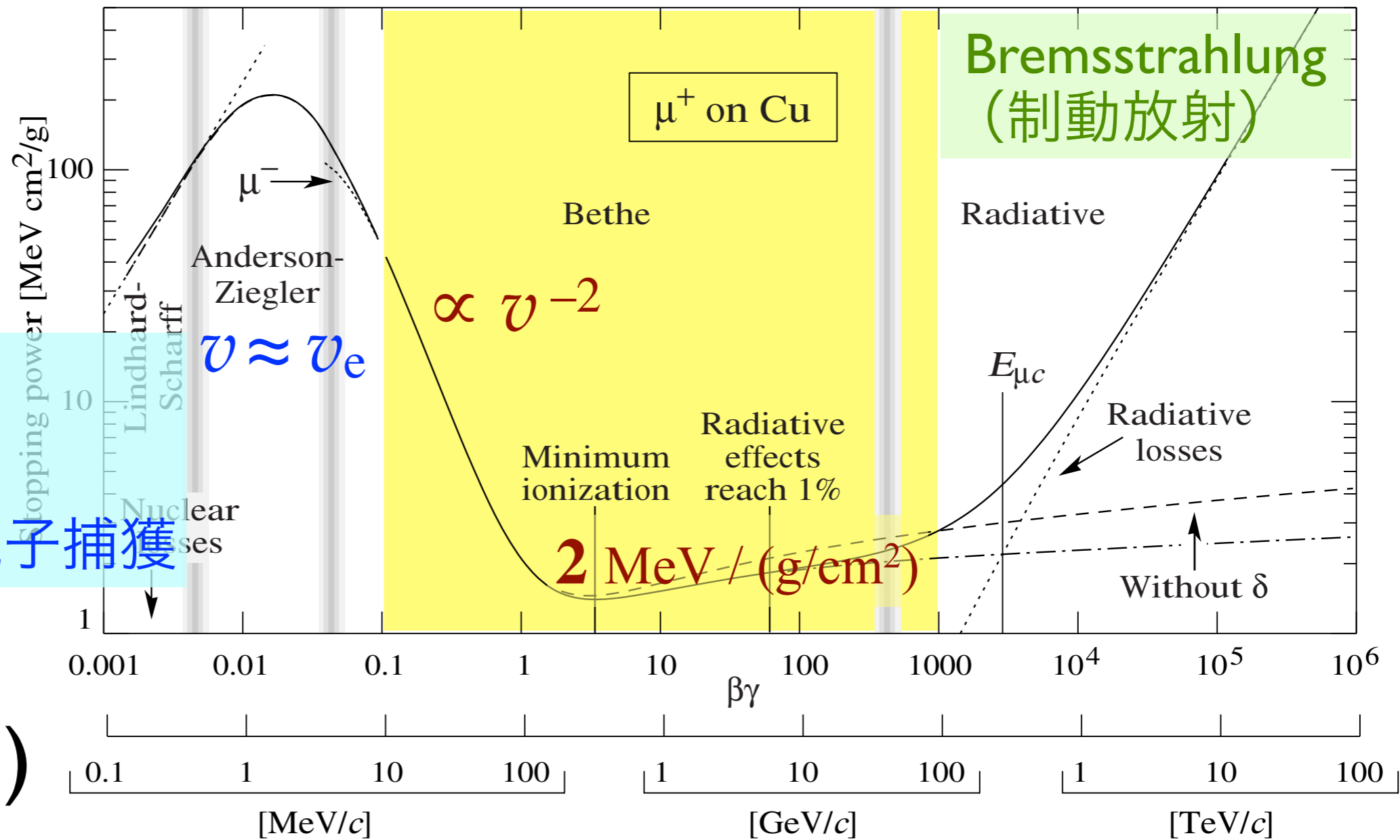
軽いので散乱されやすい（相手も電子）。ジグザグ軌道も。

光子(X線, γ線)：物質中の電子を弾き出す。低LET。

$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle$$

高エネルギー物理学業界では ρ を書かない
(x について、 ρ を含んだ次元だと見なす)
ことが多い。前のスライドではそう表記。

- 非断熱的
- Barkas 効果
- イオンは電子捕獲



(線エネルギー付与)
keV / μm

27.2.2. Stopping power at intermediate energies :

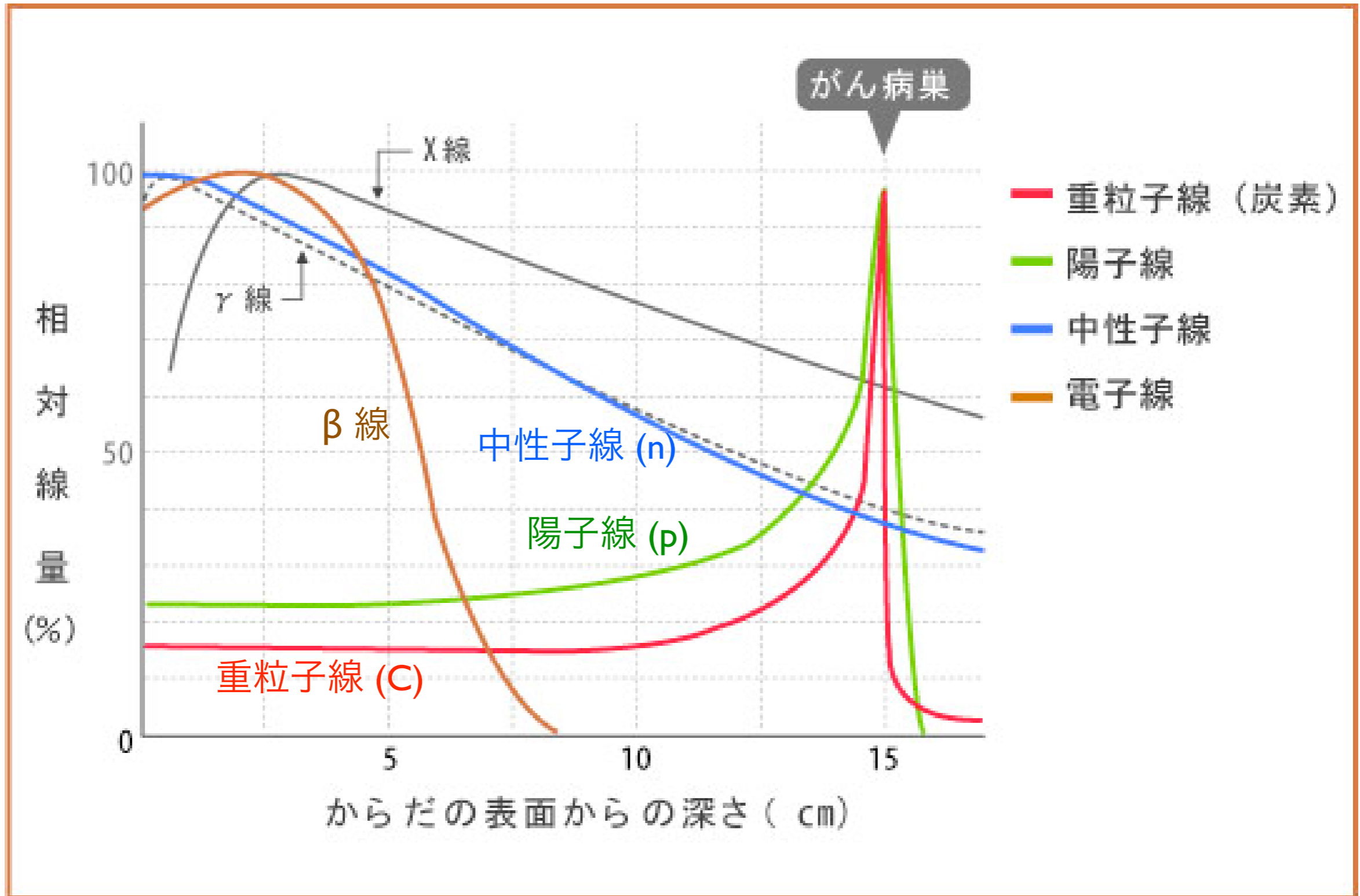
The mean rate of energy loss by moderately relativistic charged heavy particles, $M_1/\delta x$, is well-described by the “Bethe” equation,

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]. \quad (27.3)$$

質量阻止能
MeV / (g / cm²)

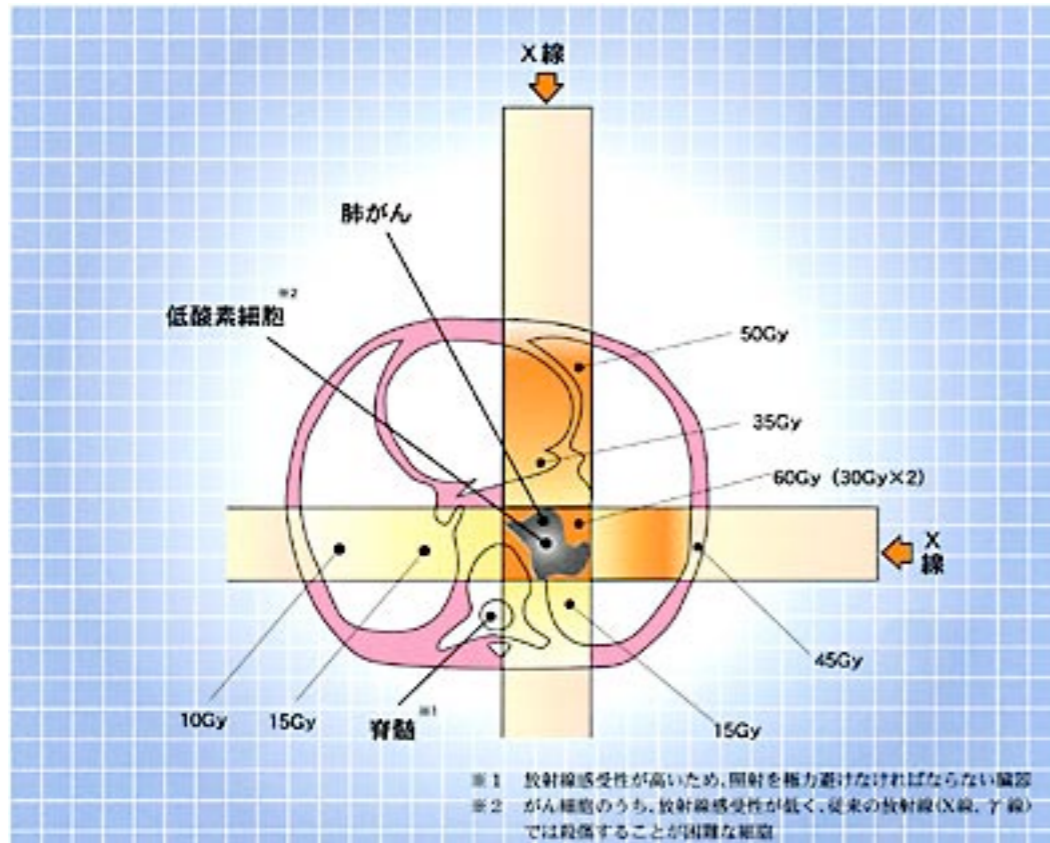
$$-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$$

Bragg peak



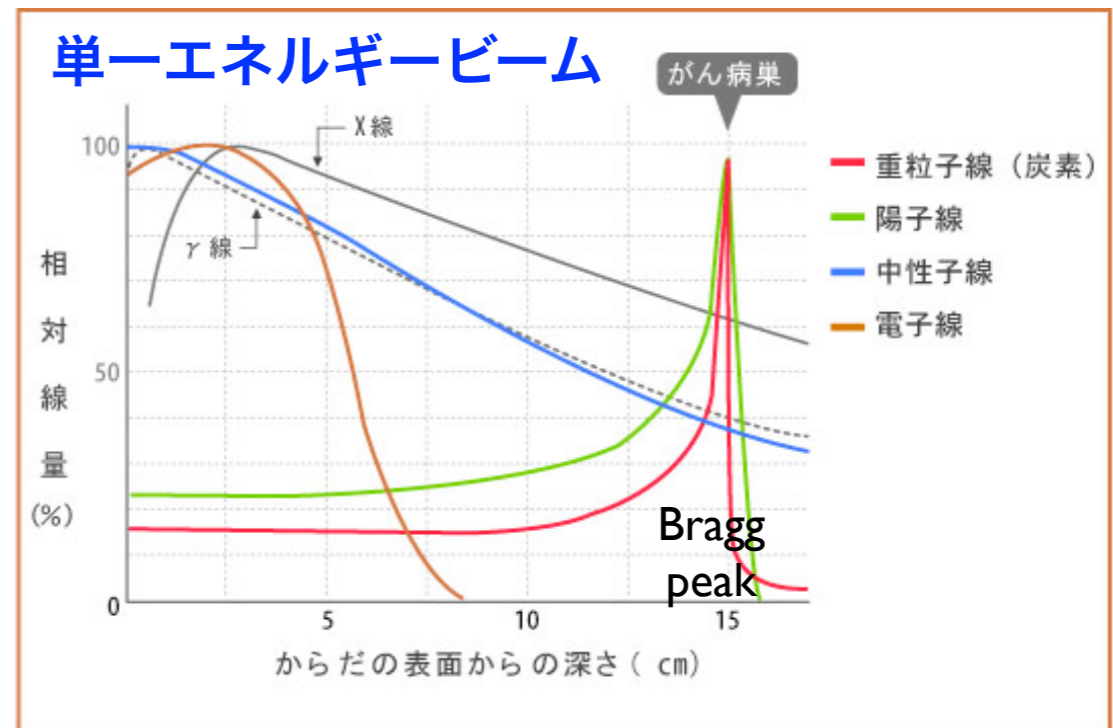
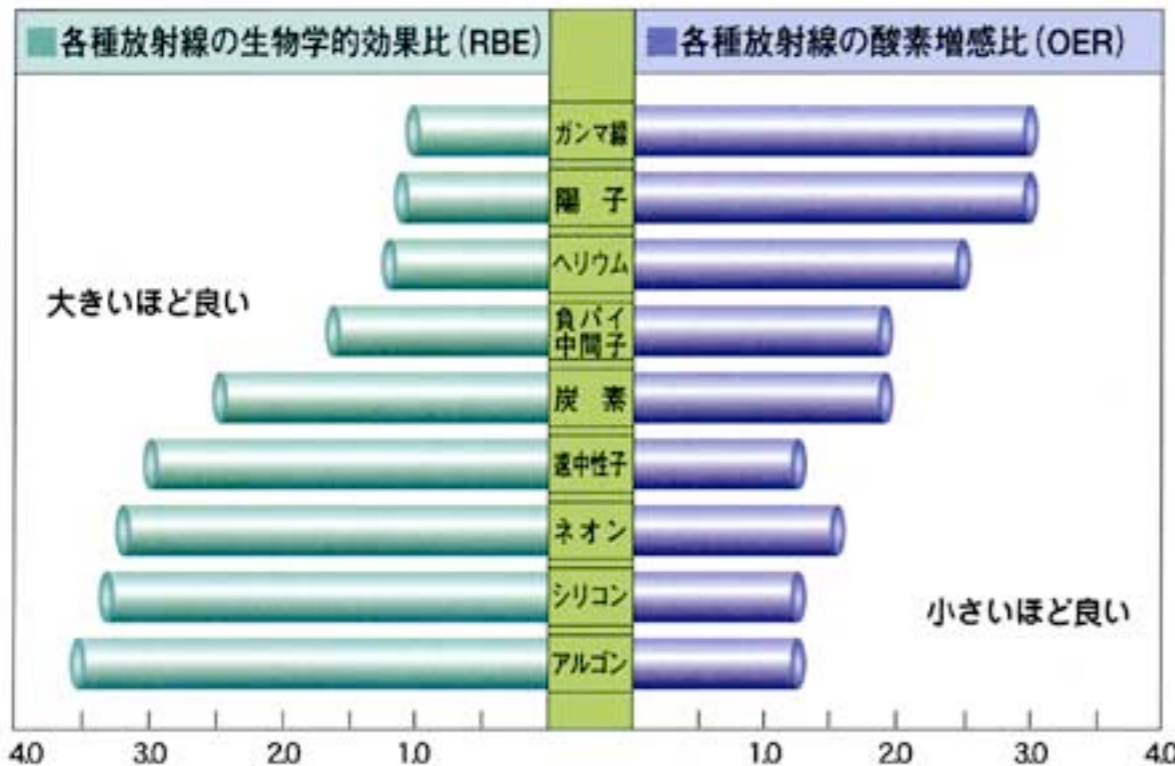
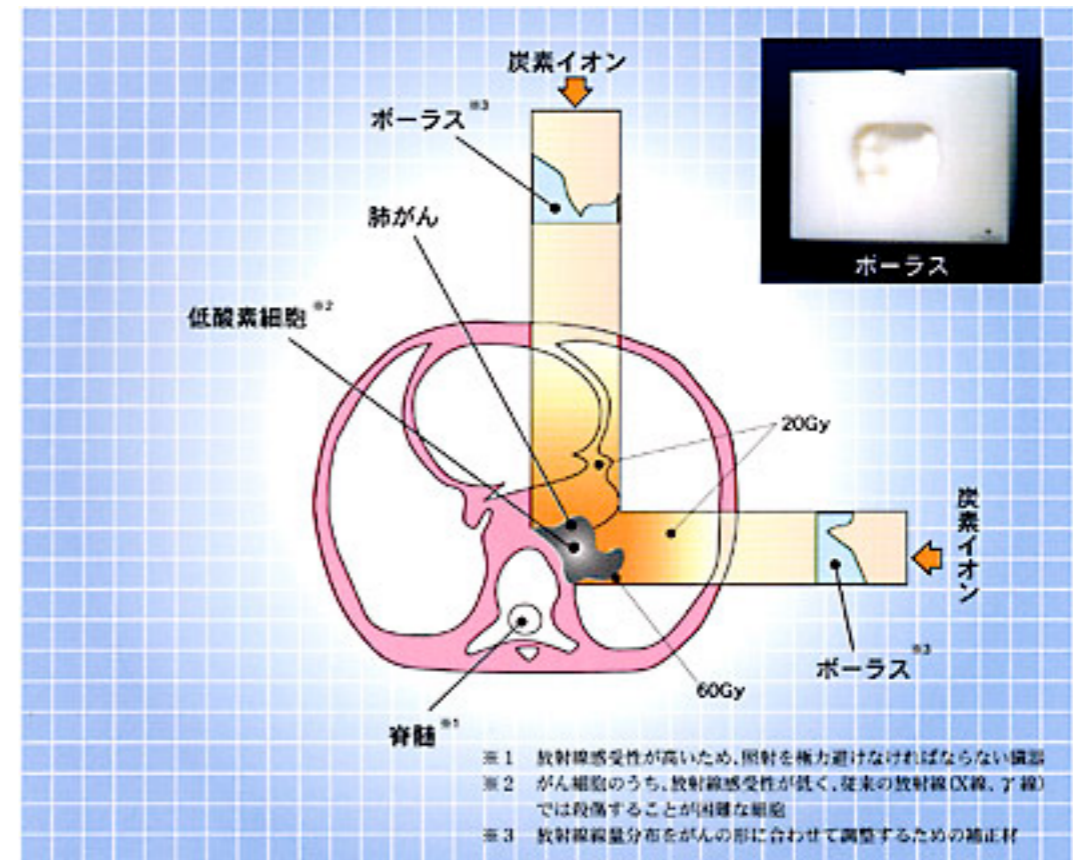
放射線 がん治療

X線



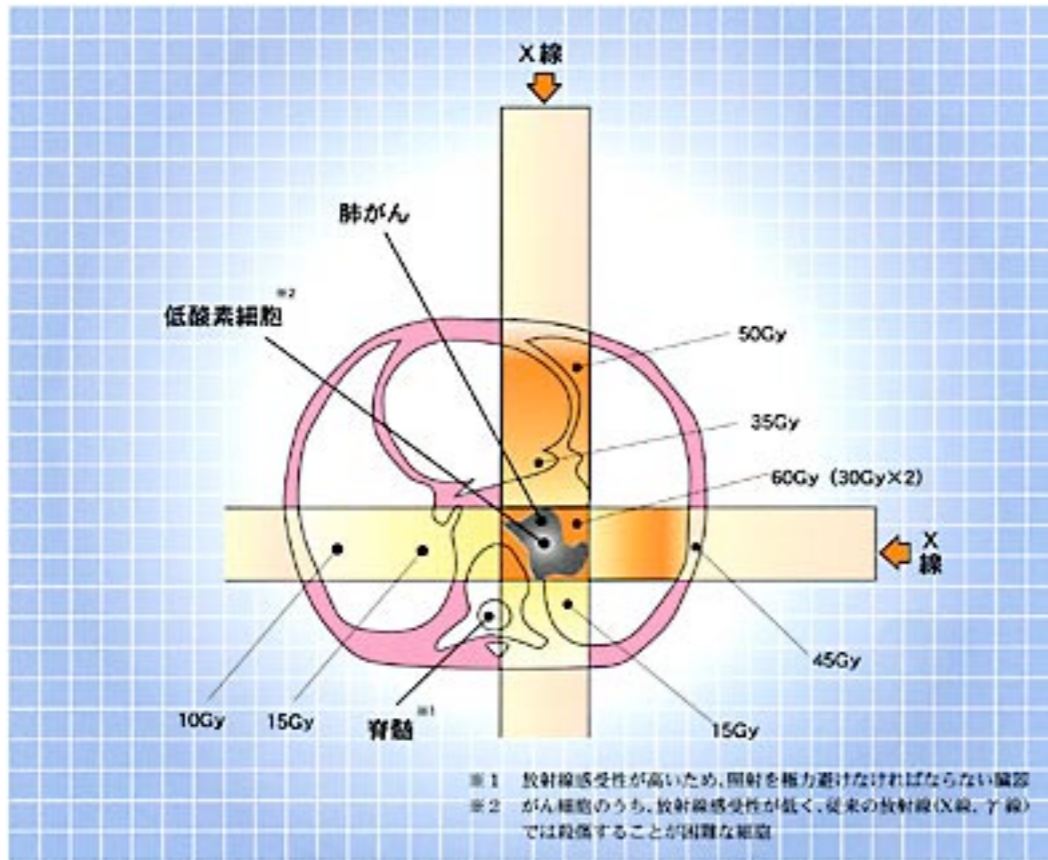
数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)



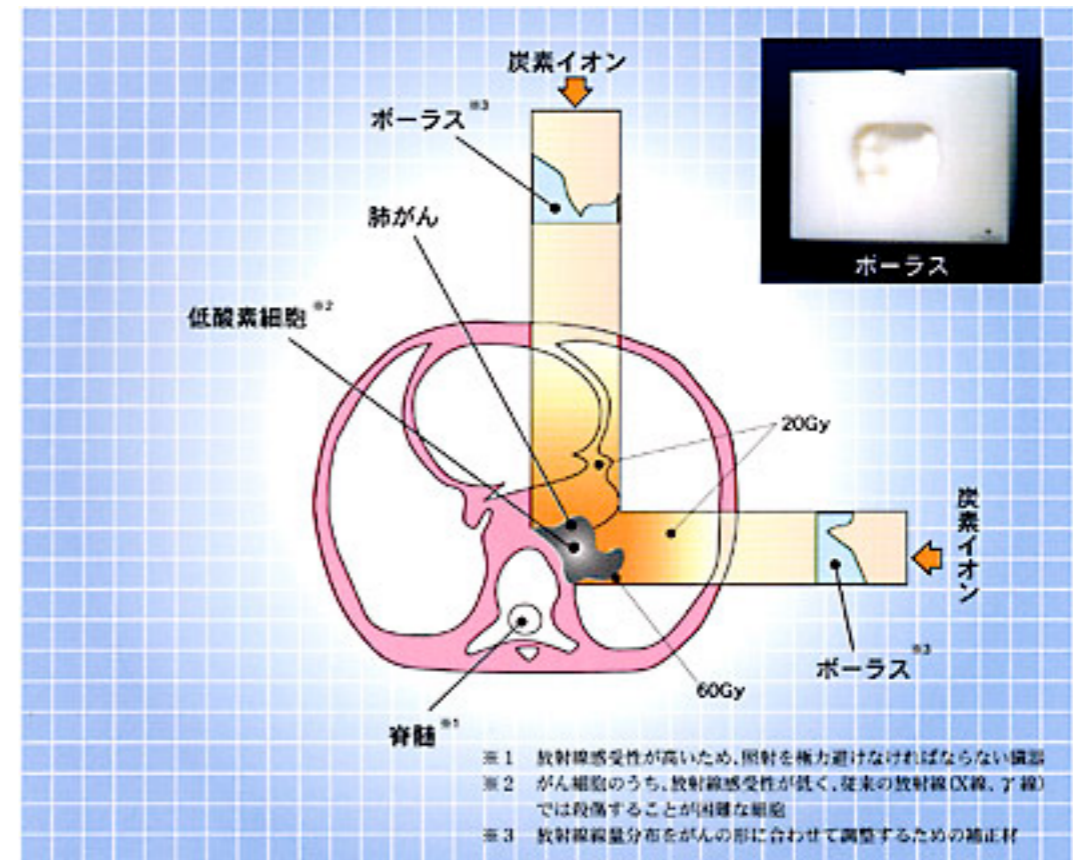
放射線 がん治療

X線



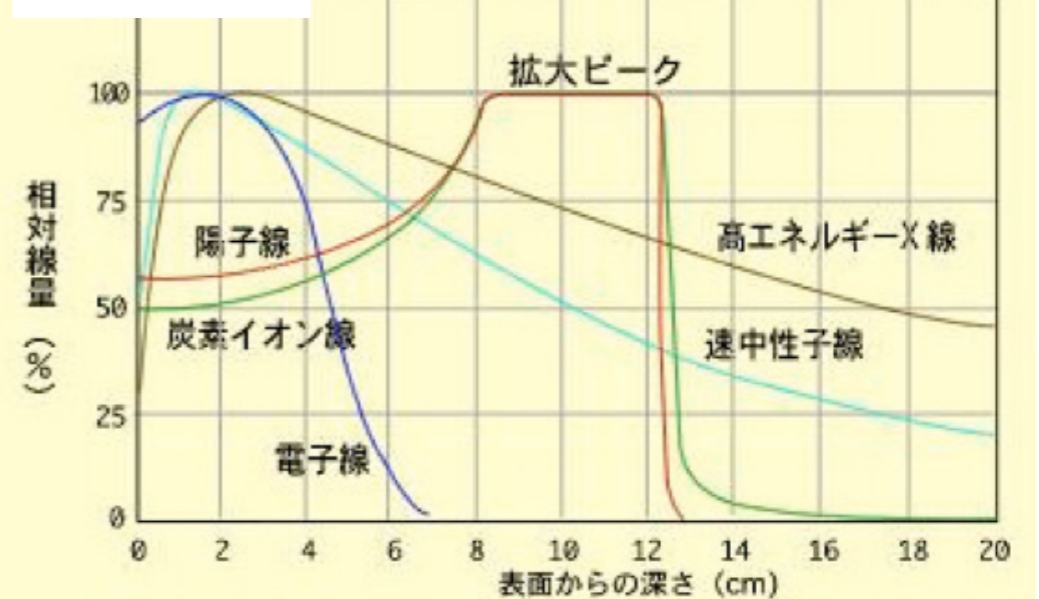
数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)



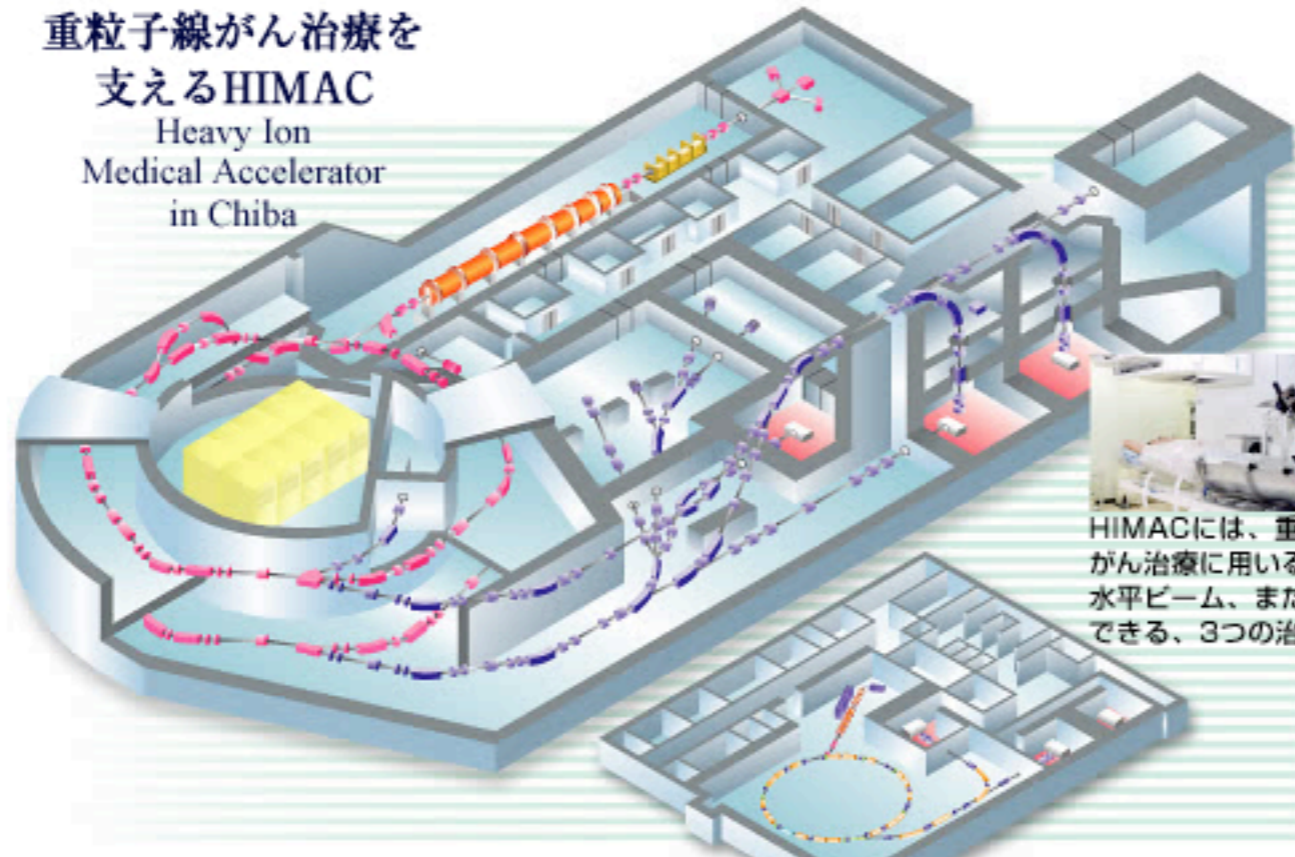
他には：ガンマナイフ、
 陽子線、パイ中間子
 研究中：反陽子

白色ビーム



放射線医学総合研究所（千葉）

重粒子線がん治療を
支えるHIMAC
Heavy Ion
Medical Accelerator
in Chiba



HIMACには、重粒子線を効率的にがん治療に用いるため垂直ビーム、水平ビーム、またはその両方を照射できる、3つの治療照射室があります。

■小型重粒子線がん治療装置

放医研における装置小型化開発研究の成果は、2006(平成18)年度から建設が開始される群馬大学の重粒子線がん治療装置に採用されています。放医研は群馬大学に装置を建設するための技術的な支援を行っています。



写真提供：(独)放射線医学総合研究所

VIDEO

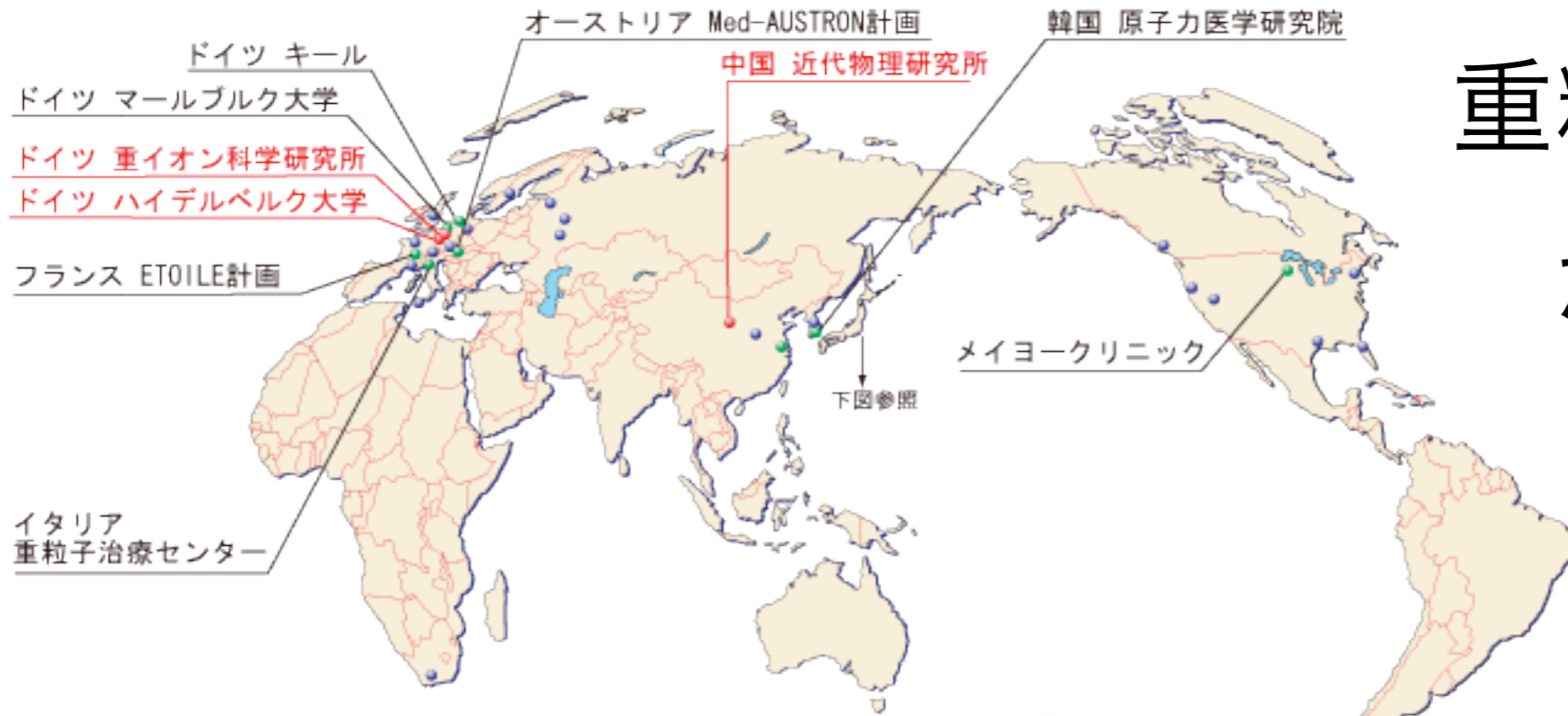
放射線治療

放射線医学総合研究所

放射線医学総合研究所：紹介ビデオ「重粒子医科学センター」を映写

<http://www.nirs.go.jp/information/movie/introduce-dvd/index.php>

重粒子線・陽子線 がん治療施設



- 重粒子線施設
- 重粒子線施設(建設・計画中)
- 陽子線施設



- 重粒子線施設
- 重粒子線施設(建設・計画中)
- 陽子線施設
- 陽子線施設(建設中)

VIDEO

放射線治療

重粒子線治療

放射線医学総合研究所：紹介ビデオ「重粒子医科学センター病院」を映写

<http://www.nirs.go.jp/information/movie/introduce-dvd/index.php>

放射線の利用

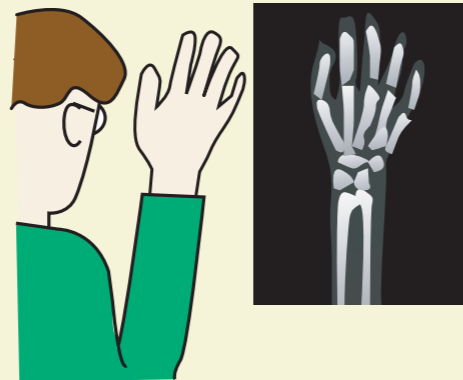
●●●さまざまな放射線の利用●●●

1. はじめに

放射線の代表的な作用

感光作用 例：レントゲン写真

◎写真のフィルムを感光（黒く）させる性質



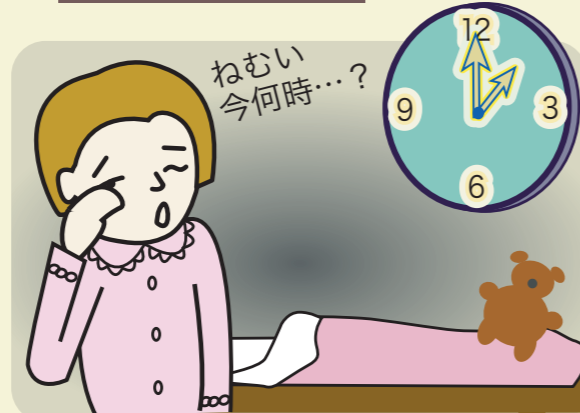
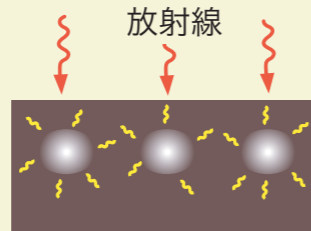
透過作用 例：エックス線検査
非破壊検査

◎物質を透過する性質



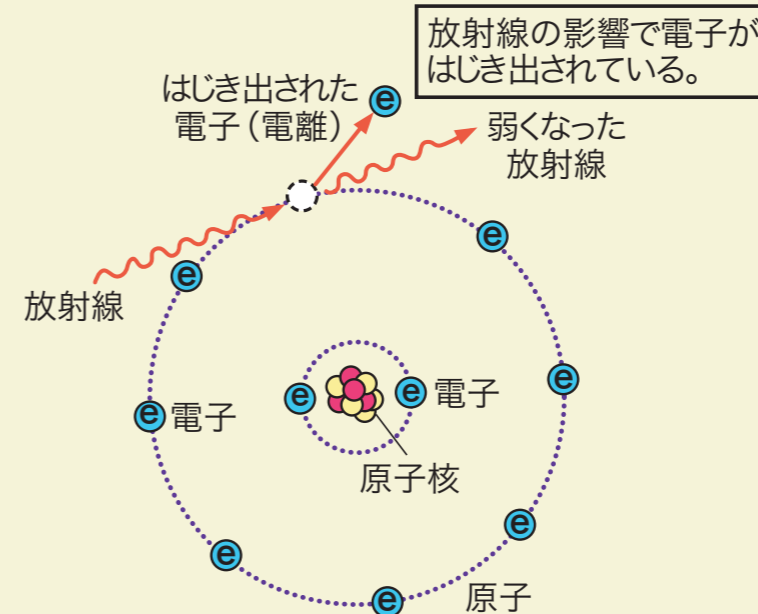
蛍光作用 例：放射性アイストープ入り
夜光時計

◎蛍光物質に当たるとその物質から蛍光を発生させる性質



電離作用 例：品種改良
放射線治療

◎物質を透過する時、その物質を作っている原子や分子にエネルギーを与えて、原子や分子から電子を分離させる性質



VIDEO

放射線の利用

年代測定
産業利用

日本原子力文化振興財団：エネコチャンネルのビデオ映像「探検！身近な放射線」より抜粋

<http://eneco.jaero.or.jp/20110322/>

＊ 年代測定

＊ 農業分野での利用

＊ 花や果物の品種改良

＊ ジャガイモの発芽防止

＊ 害虫駆除

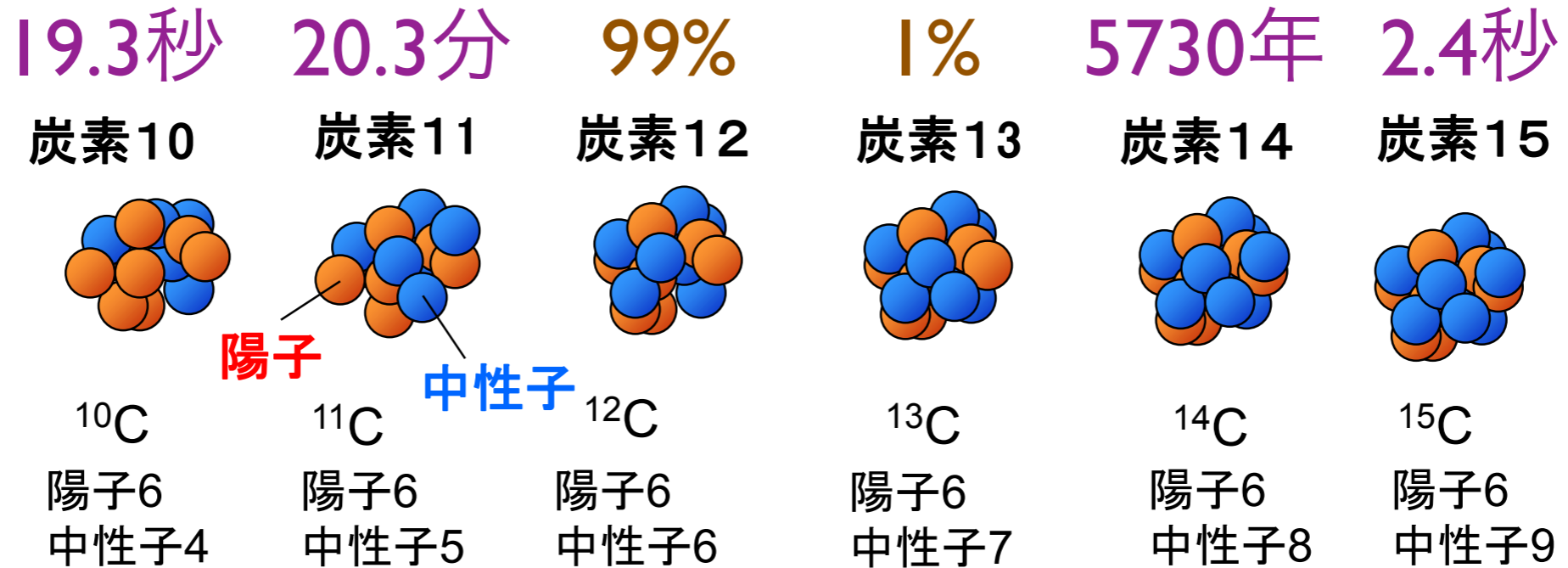
＊ 工業分野での利用

＊ タイヤの耐久性向上

＊ 厚み計測

同位体(原子番号(=陽子数)は同じで中性子数が異なる**原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ



陽子過剰になると？

(寿命がある： β^+ 壊変、電子捕獲(EC))

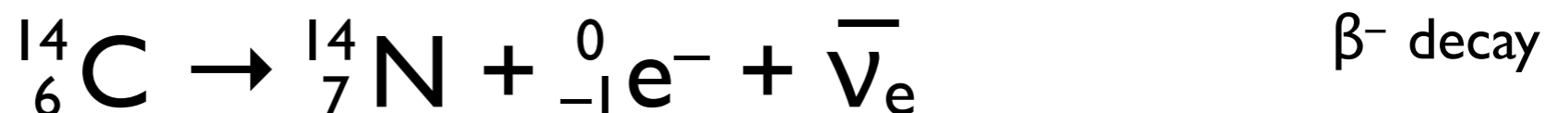
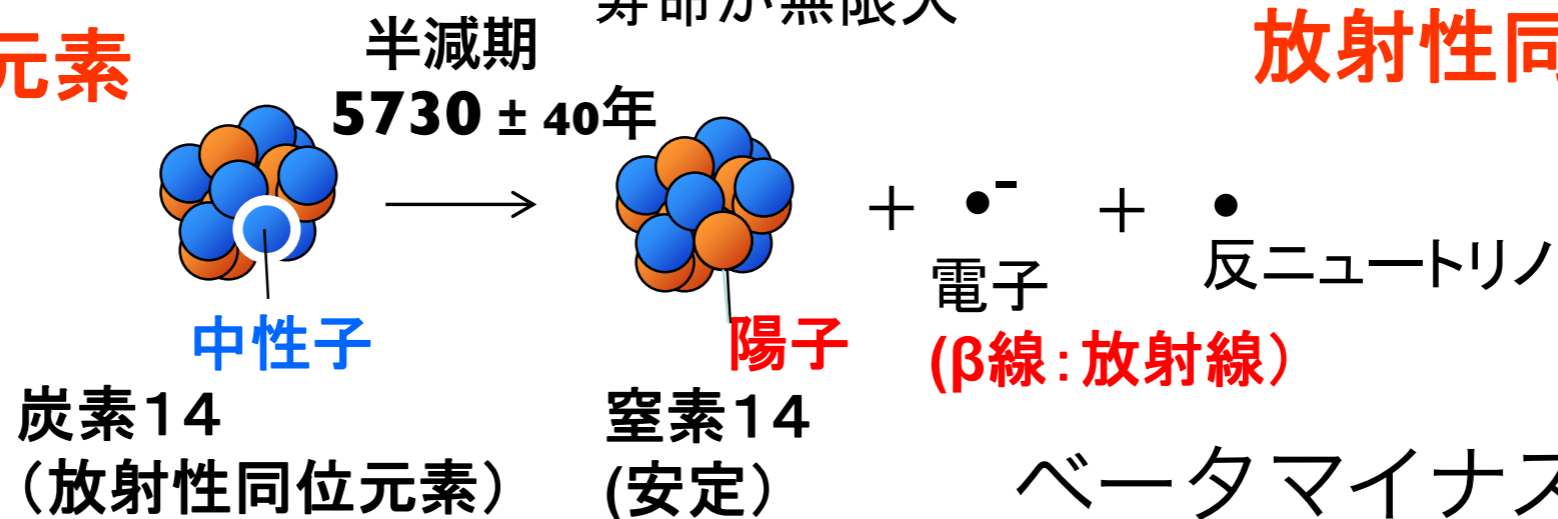
天然に存在=**安定同位体**
寿命が無限大

中性子過剰になると？

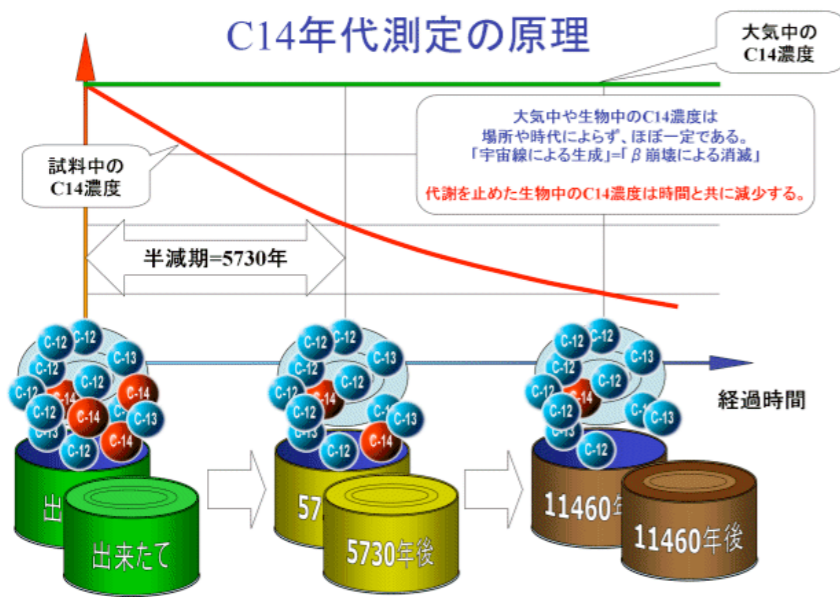
(寿命がある： β^- 壊変)

放射性同位元素

放射性同位元素



放射線年代測定



C14の濃度を測れば「代謝を止めてからの時間」が判る！

測定方法		100年 1000年 1万年 10万年 100万年 1000万年 1億年 10億年	主要対象
放射性同位元素を使う方法	炭素14年代測定法	0 - 50,000	動植物・貝殻・水など
	カリウム・アルゴン法	100,000 - 10,000,000	鉱物
	ウラン・鉛法	100,000 - 10,000,000,000	鉱物
	ルビウム・ストロンチウム法	100,000 - 10,000,000,000	鉱物
	フィッション・トラック法	100,000 - 10,000,000	鉱物・天然ガラス
放射線の照射量を測定する方法	熱ルミネッセンス法	100 - 100,000	鉱物・天然ガラス
	光ルミネッセンス法	100 - 100,000	鉱物
	電子スピン共鳴法	100 - 100,000	鉱物・貝殻・サンゴなど
放射線を使わないその他の方法	ラセミ化法	100 - 100,000	貝殻・甲羅・重炭酸塩
	黒曜石水和層法	100 - 100,000	天然ガラス
	考古(古)地磁気法	100 - 100,000	岩石・磁性鉱物
	火山灰層序法	100 - 100,000	火山灰
	年輪年代法	100 - 10,000	樹木
	氷縞粘土法	100 - 10,000	湖底堆積物(粘土)

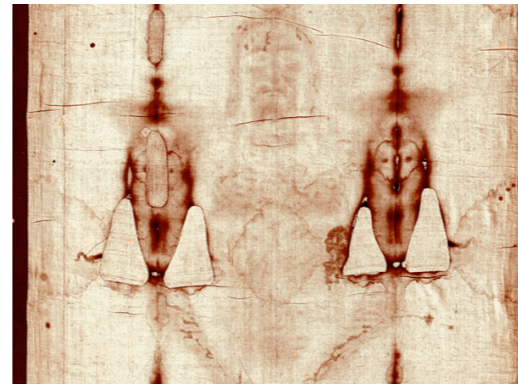
<<図 2-1>> 主な年代測定法による測定可能な年代の範囲

出典:ATOMICA他より作成

- ^{14}C , ^{40}K -Ar, U-Pb, Rb-Sr

- 弥生時代

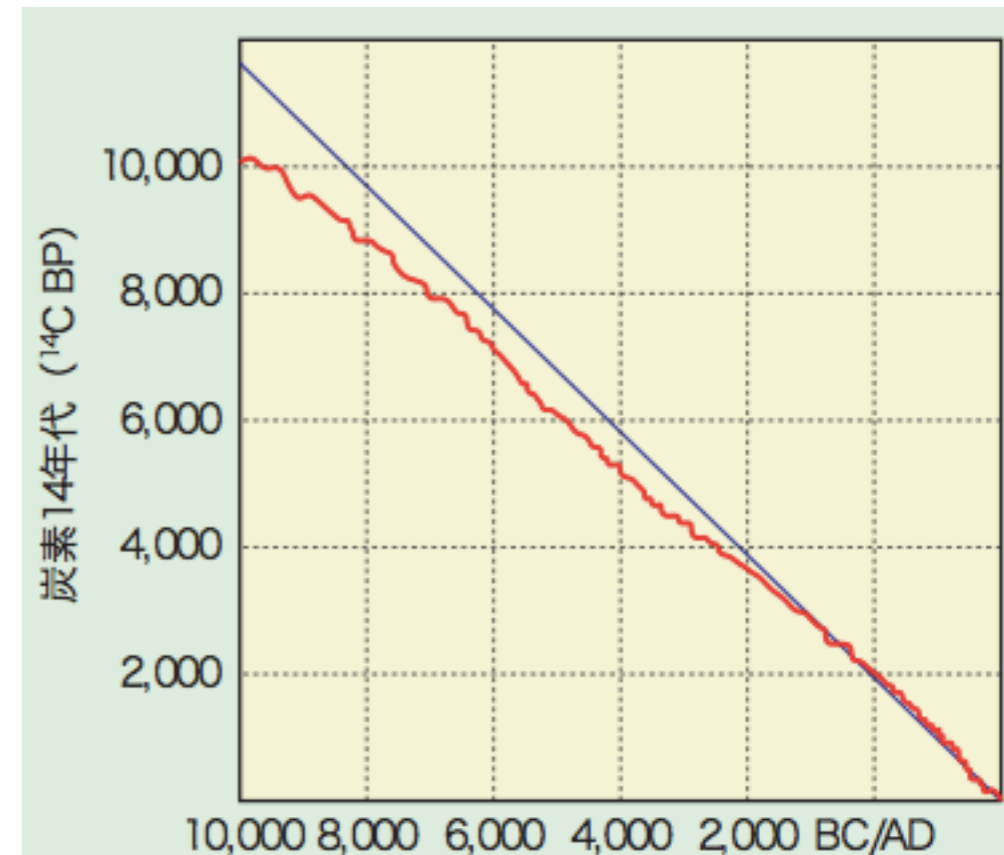
- 聖骸布 (Torino の聖骸布 (1260-1390 A.D., 95% CL))



- 空気中の ^{14}C の比率はほぼ一定

- 微小な変動は年輪中の炭素データで校正

- 地層、火山灰、年輪データと比較

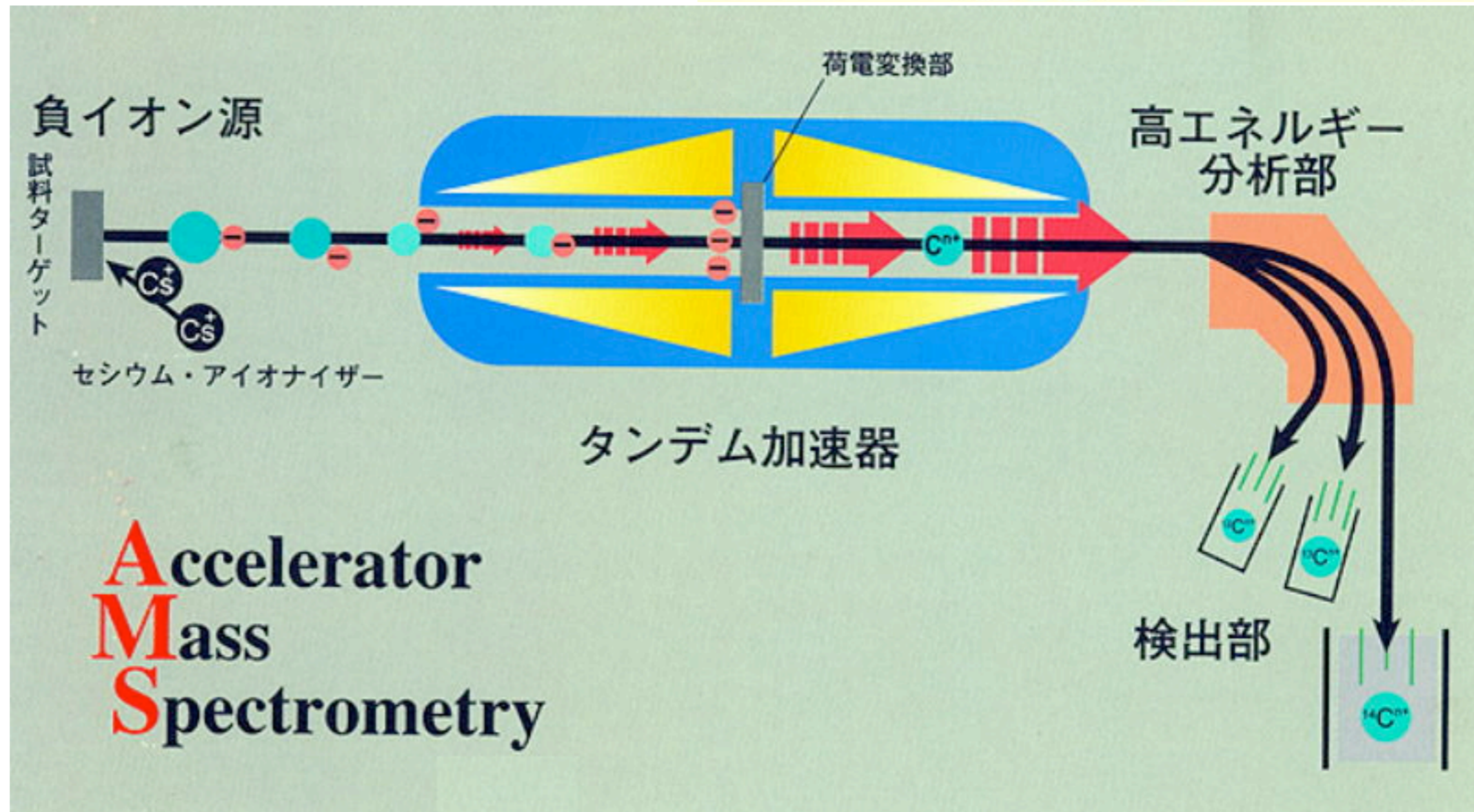


炭素14年代と年輪年代との校正曲線(赤線)(時代が古くなるほど両者がずれることと大気中の炭素14濃度が変動することによる細かな動きが分かる)

出典:国立歴史民俗博物館

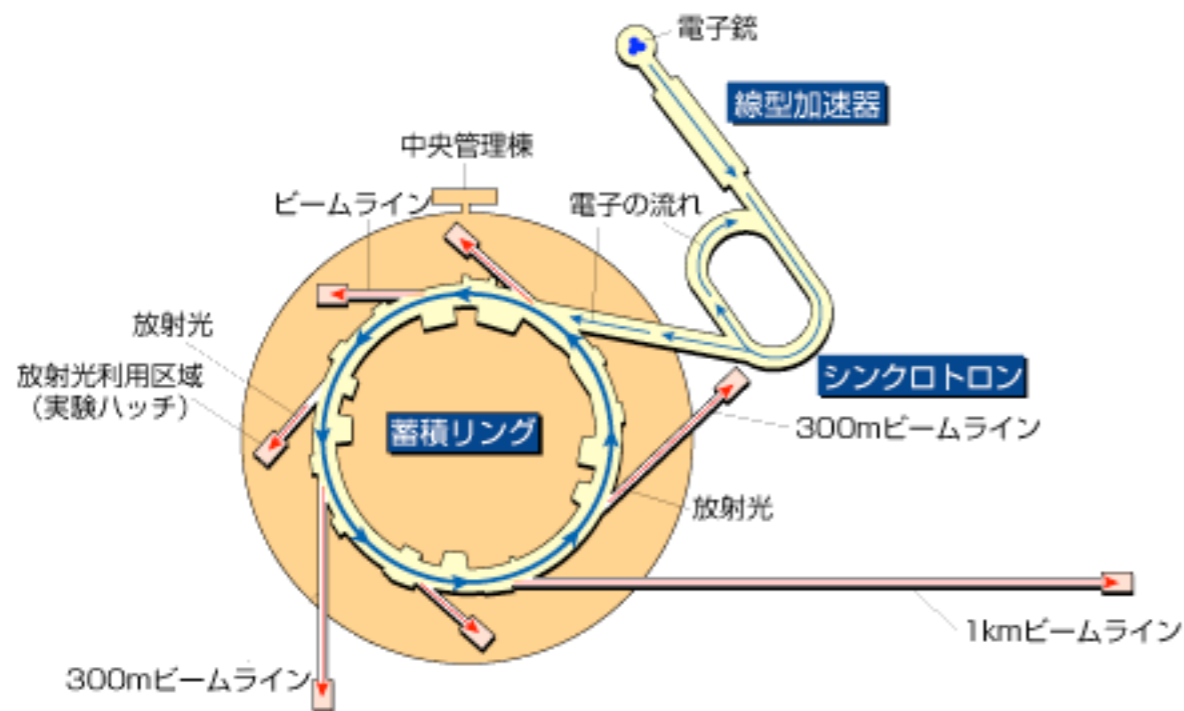
加速器質量分析

AMS (Accelerator Mass Spectrometry)



SPring-8 (大型放射光施設: 播磨)

8 GeV 電子ビーム ⇒ 放射光 (X線, γ線)



- 生命科学への利用: タンパク質巨大分子の3次元構造解析、非結晶生体材料の小角散乱、薬剤設計、**新薬開発**など
- 物質科学への利用: 先端材料の原子・電子の構造、極端条件下の材料物性、産業材料の評価、**新物質創製と材料改質**など
- 化学への利用: 触媒反応の動的挙動、表面のX線光化学過程、原子・分子分光、超微量元素分析及び化学状態、**考古学的研究**など
- 地球科学への利用: 地球深部物質の構造と状態、極限環境下の物性、隕石・宇宙塵の構造など
- 環境科学への利用: 生体試料中の環境汚染微量元素の分析、環境浄化用触媒の分析など
- 医学への利用: 微小血管造影法による腫瘍血管の観察、トモグラフィ、屈折コントラスト映像法による**呼吸器系疾患の観察**など
- 産業への利用: 半導体用新酸化物材料の評価、高性能電池材料の局所構造解析、ナノ材料の評価、**微量元素分析、材料の断面観察、材料の歪み分布解析**など
- 核物理への利用: レーザー電子光 (逆コンプトン散乱) による中間子の生成・クォーク核物理など



放射線による検査・分析など

＊ X線検査

＊ 空港での手荷物検査

＊ 非破壊検査

＊ 装置の溶接部分のひび割れ検査 (γ線も)

＊ 文化財 (土偶・仏像・絵画) の単純X線/CT撮影

＊ 元素分析

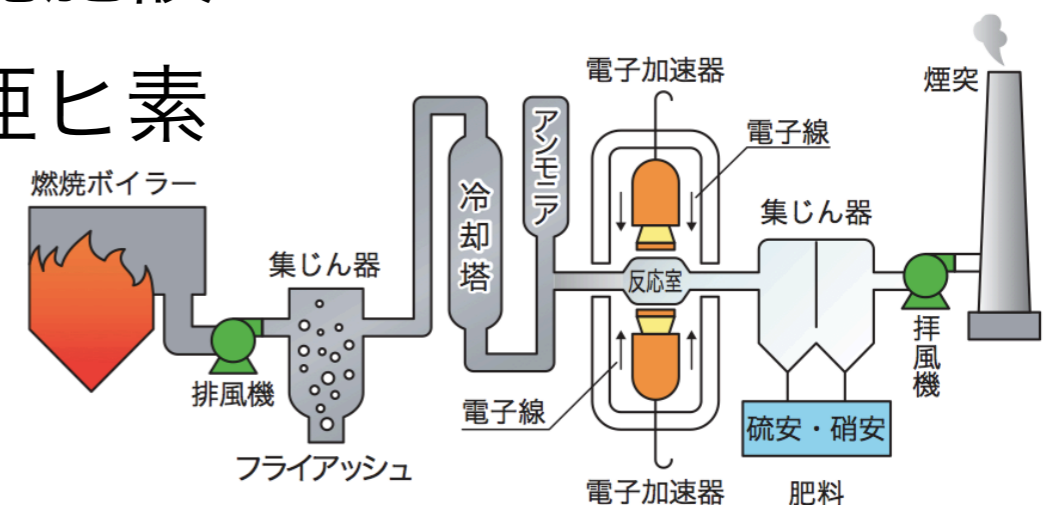
＊ 蛍光X線分析

＊ e.g. 源氏物語絵巻の顔料分析

＊ 放射光の利用 e.g. SPring-8 放射光施設

＊ e.g. 和歌山毒物カレー事件の亜ヒ素

＊ 電子線で排煙中のダイオキシン、
NO_x, SO₂ を分解



<<図4-3>> 火力発電所排煙の電子ビーム処理

出典: 日本原子力文化振興財団パンフレットより

放射線の利用

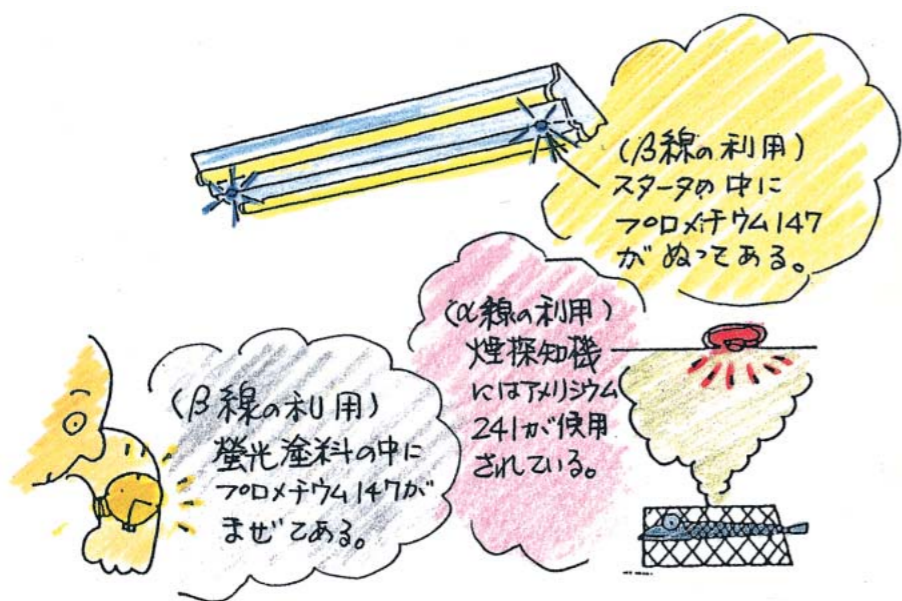
現在、人類が放射線を利用している方法には次ページのように大きく4つあります。

また、透過能力や電離、励起、蛍光などの放射線による**照射効果**を利用するために微量の放射性同位元素を使った製品は身近なところにもいろいろあります。

ベータ線を放出する放射性同位元素（トリチウム、プロメチウム-147）は蛍光体と混ぜ合わせて自発光塗料として夜光時計の文字盤などに使われています。蛍光灯のスタータやカメラのストロボ充電表示などによく使われる表示管は、ベータ線の**電離作用**で放電が確実に始まるよう放射性同位元素が内部に塗られています。

煙探知器にはアメリカシウム-241が使われているものがあり、応答性や感度に優れています。アルファ線の電離作用によって小さな隙間に電流が流れ、この隙間に煙の微粒子が入ると電流を遮るため煙を感知できます。

中性子線を放出するカリフォルニウム-252を利用したものに中性子水分計があります。堤防・ダムなどの水量の管理、コンクリートや製鉄原料などの品質管理に使用されています。



利用方法		利用例（方法、製品）	
トレーサ利用	物理的トレーサ	流速、流量の調査、漏れ調査、漂砂や河泥の移動調査、機械の摩耗測定、潤滑油の循環状況の調査、溶鉱炉の減損量測定、行程解析	
	化学的トレーサ	分析化学的利用、化学反応の機構の研究、化学構造の決定、生体機能の研究、生化学研究、遺伝子工学研究、医学研究、体内診断薬、体外診断薬、新薬開発	
照射利用	透過、吸収散乱作用	計測制御	厚さ計、液面計、レベル計、密度計、濃度計、雪量計、地下検層計、中性子水分計、硫黄計
		非破壊検査	ガンマ（エックス）線のラジオグラフィ、中性子ラジオグラフィ
		診断	エックス線撮影、エックス線透視、エックス線造影検査、エックス線CT
	電離、励起作用	イオン発生	煙感知機、蛍光灯のグロー放電管、表示用放電管、真空計、ガスクロマトグラフ、避雷針
		光の発生	自然光塗料
		分析	蛍光エックス線分析、硫黄計
	化学的作用	改質	耐熱性電線、発泡ポリオレフィン、熱収縮性チューブ、硬化塗料、強化プラスチック、コンクリートポリマー、強化木材
	生物学的作用	殺菌、殺虫、防虫	医療用具の滅菌、検査用具・実験動物飼料・食品の殺菌、害虫防除
		保存	発芽防止、熟度調整
		育種	品種改良、生育調節
	原子核反応	治療	がんの治療、甲状腺治療
		分析、治療	微量元素分析、アクチバブルトレーサ法、脳腫瘍治療
熱源利用		アイソトープ電池： ^{238}Pu 電池（宇宙探査機）	
年代測定		考古学的、地質学的試料の年代測定	

放射線で厚さをはかる

工業の分野では、物質に放射線を照射した時の透過度や吸収の変化を利用する技術が幅広く使われています。食品包装用のラッピングフィルムやアルミ箔、紙、鉄板など厚さが一様でなければならないような工業製品の工程管理には、連続測定のための**厚さ計**が用いられます。これは、放射性同位元素から出るベータ線やガンマ線を膜や板の片側から照射して、透過してくる放射線やある角度に散乱してくる放射線の量で製品の厚さを測定するものです。

過疎地の積雪量を遠くで観測するための積雪計や液面の位置を知る液面計なども同じ原理です。

また、人間がエックス線撮影をするように、エックス線やガンマ線を物体に照射して写真を撮ると、調べたい物を破壊せずに内部構造を調べることができます。このような方法をラジオグラフィーといいます。飛行機のジェットエンジンのタービンにひび割れや亀裂などが生じていないか調べたり、中性子線を照射してロケットの固形燃料の充填状態を調べたり、ラジオグラフィーの技術はいろいろなところに応用されています。

芸術と放射線

調べたい物を傷つけることなく、内部の微細な構造を観察できるというラジオグラフィーの方法は、芸術の分野でもその威力を発揮しています。

ミレーの「種まく人」はラジオグラフィーでその下に車輪が描かれていることがわかったそうですが、このように、名画の下に隠された絵の発見や、一部の書き換えが証明されて話題になったりしています。

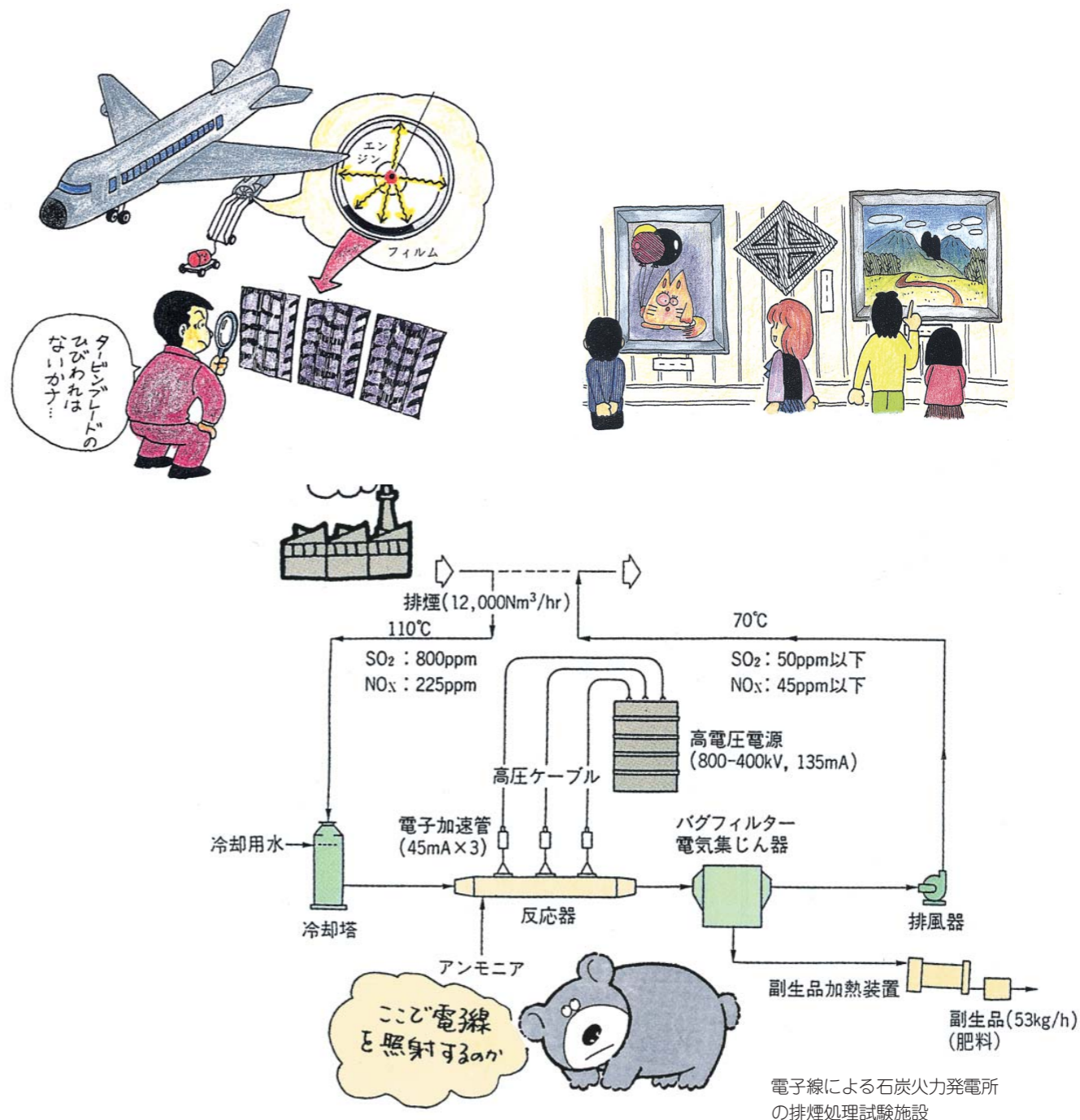
古い仏像などでは、その胎内にいろいろなものが納められていることが発見されています。また、法隆寺の国宝、聖徳太子の座像は瞳の部分にコンタクトレンズのようにガラスが張り付けてあることがエックス線撮影で初めて明らかになりました。

こうした知識は、芸術作品の生まれたいろいろな背景や歴史的な変遷などを明らかにする重要な手がかりとなります。また、彫刻にエックス線CTを用いるとその微細な構造まで立体的に知ることができるというので仏像の修復などに利用されている例もあります。

環境を守る放射線利用

最近、環境保全のための放射線への応用が注目されています。現在日本で開発中なのは、火力発電所やゴミ焼却炉から出る排煙に電子線を照射し、排煙に含まれる窒素酸化物や硫黄酸化物などの大気汚染物質を除去する方法です。NO_xやSO_xは硝酸、硫酸として回収できるので肥料として再使用できます。

また、排水や汚泥に放射線を照射し、有害な汚染物質や微生物を分解、殺菌して再利用する技術の開発も各国で進められています。



農業分野での利用

○食品照射

北海道で生産されるじゃがいもの一部には、発芽を防止するために放射線が照射されています。このじゃがいもへの放射線照射は1972年に許可され、1974年からは年間1～1.5万トンの照射じゃがいもが国内市場を流通しています。

日本では放射線照射が許可されている食品はじゃがいもですが、欧米では香辛料や肉などの殺菌(衛生化)、果物等の殺虫(害虫防除)のための放射線照射が認められています。



(未照射)

(照射済み)

放射線照射によるジャガイモ芽止め

○放射線育種

優れた形質を備えた栽培品種を創り出すために、突然変異種の選抜・育種が行われています。ところで、自然突然変異は、その発生確率が低く、そのためガンマ線やイオンビームを照射することによって突然変異の発生確率を高め、価値の高い変異体を創出することが行われています。

これまでに、耐病性作物(二十世紀なしや稲など)、栄養機能や加工適性を改善した農産物(豆、小麦など)あるいは花卉の色調、形状を有する花卉類(菊、チューリップなど)、今日の生活の向上に役立つ品種が多数作出されています。

→140品種を開発(2003年現在)



耐病性イネの作出



キクの新品種作出

○不妊虫放飼法

農業害虫を人工的に大量に増殖して、これにガンマ線を照射することによって、不妊化したのち野外に放ちます。不妊化したオスと交尾したメスの卵は孵化しないため次世代の発生率は低下します。不妊虫の放飼を続けることによって害虫は根絶します。

(例) 沖縄におけるウリミバエの撲滅: 沖縄では、不妊虫放飼法を適用することによって、ニガウリ等を食害するウリミバエを絶滅しました。この事業は、1972年から開始され、1993年に撲滅宣言が行われました。なお、この間、620億匹の不妊虫が放飼されました。



ウリミバエ

*ジャガイモの発芽防止

^{60}Co γ (1.17 MeV / 1.33 MeV), 50–150 Gy

- ◆ 動物飼育実験などで急性毒性、慢性毒性、発がん性、変異原性、遺伝毒性、催奇形性は見出されておらず、**健康に有害な影響を及ぼすような食品成分の変化は生じない。**
- ◆ 食品照射に用いるCo-60の γ 線、10 MeV以下の電子線、5 MeV以下のX線のエネルギーは核反応のしきい値以下であり、適正な照射条件では**誘導放射能は生成されない。**
= **放射化はおこらない。**
- ◆ 生き残った微生物によるリスクは他の殺菌法と同じであり、照射で病原性や毒性が増大することはない。

化学薬剤を使うより安全

日本では食品照射はジャガイモのみ許可

*品種改良 γ 線、イオンビーム

花卉

ゴールド二十世紀ナシ (黒斑病耐性)



＊害虫駆除（不妊虫放飼法）

^{60}Co γ (1.17 MeV / 1.33 MeV), 70 Gy

さなぎに照射してオスを不妊化。

- ◆ ウリミ蠅（沖縄：ゴーヤ）
延べ 624億匹放飼！
- ◆ ツェツェ蠅（タンザニア：眠り病、ナガナ病）
IAEA（ウィーン）で照射。

❖ 照射線量

発芽防止	50 – 150 Gy	ジャガイモ・タマネギ
殺虫・寄生虫防除	100 – 500 Gy	穀類・豚肉・果実
殺菌（食中毒防止）	3 000 – 10 000 Gy	冷凍魚介類・鶏肉・香辛料・乾燥野菜
滅菌消毒	10 000 – 30 000 Gy	ハム、無菌動物飼料、医療器具



電子線・ガンマ線照射によるグラフト重合

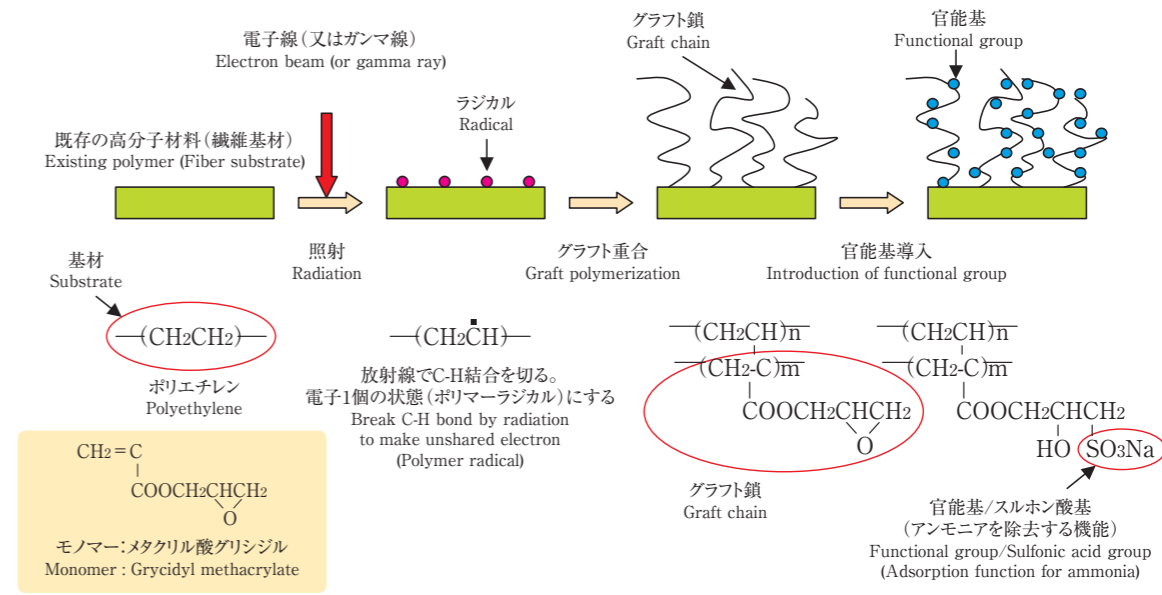
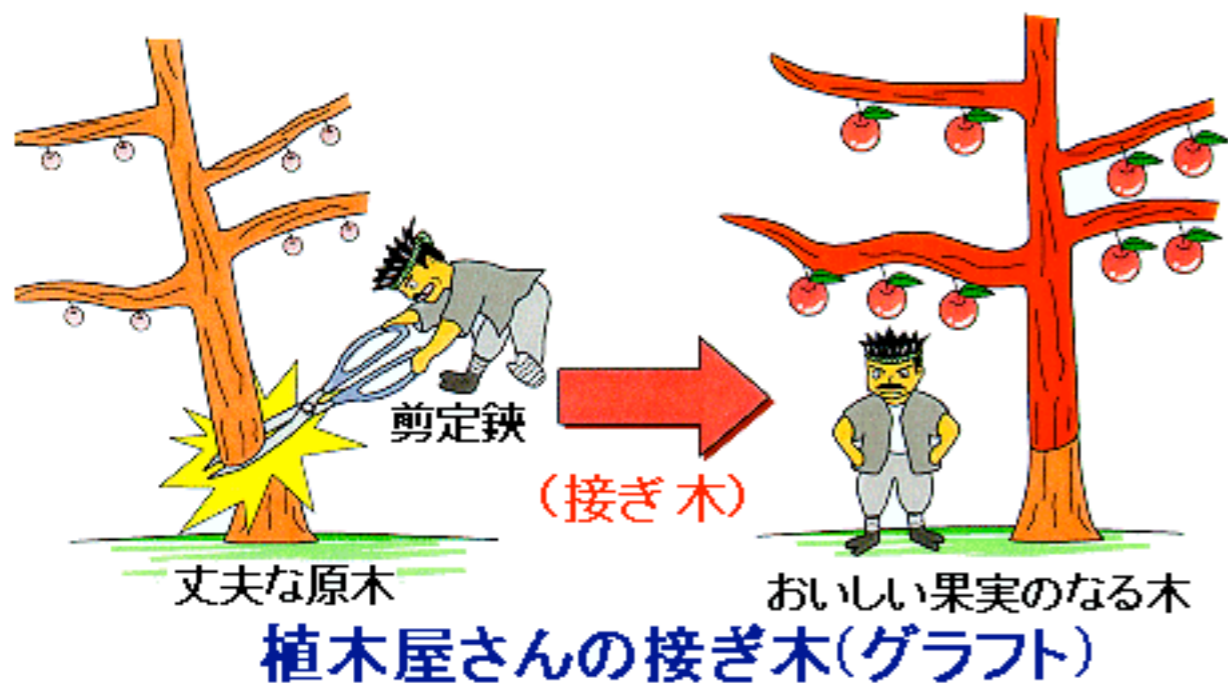


図1 放射線グラフト重合法によるイオン交換体の合成方法
Fig. 1 Reaction scheme of ion exchange material by radiation induced graft polymerization

エバラ時報 No. 216 (2007-7) 藤原邦夫氏論文より引用

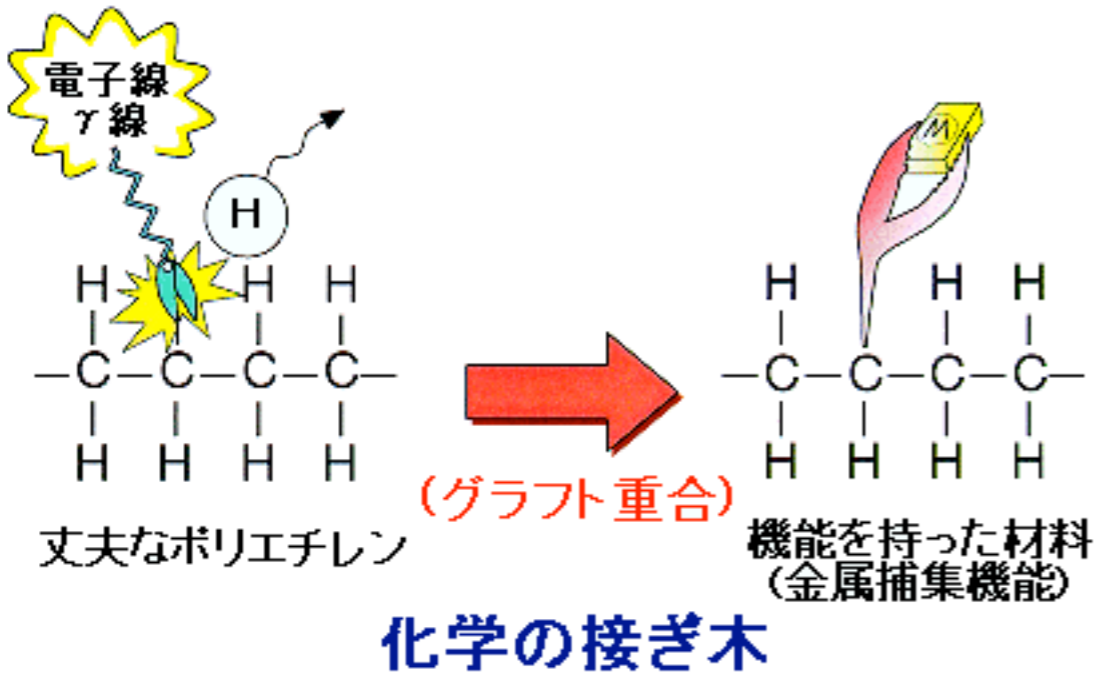


図1 接ぎ木の技術とグラフト重合

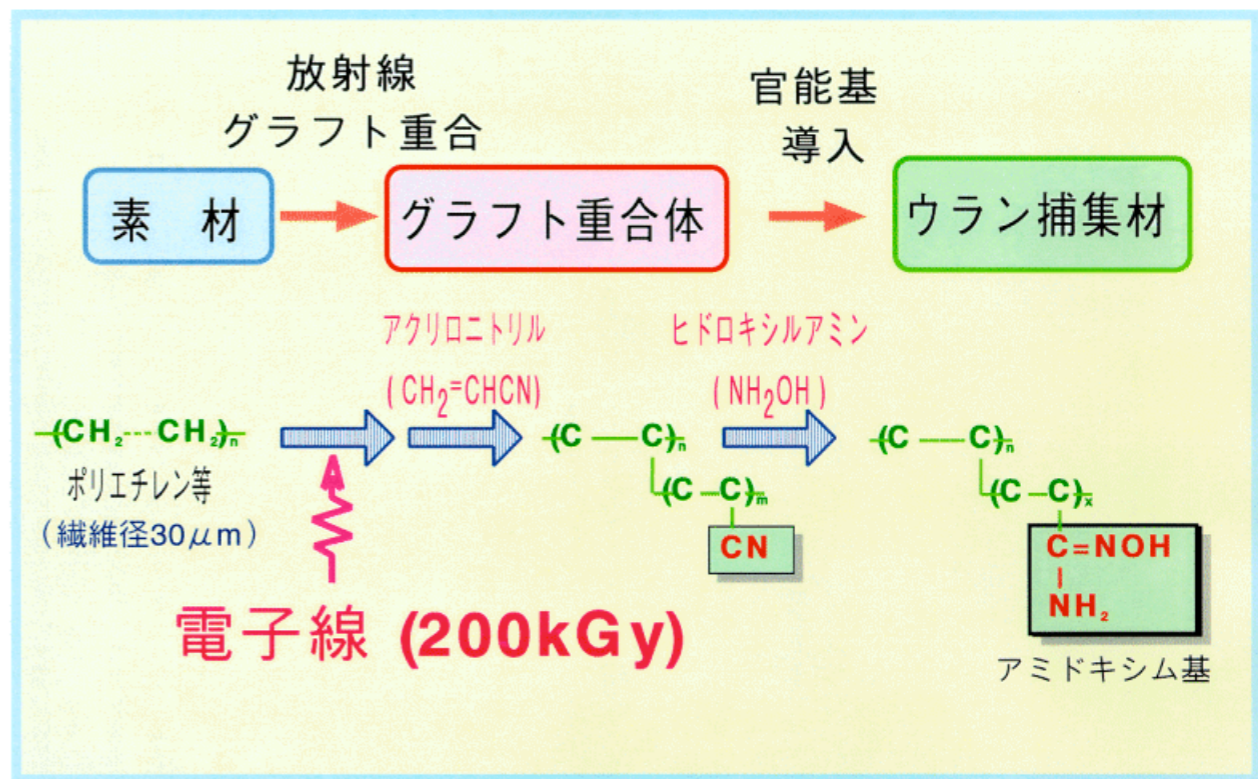


図2 放射線グラフト重合によるウラン捕集材の合成法

[出典]片貝 秋雄、瀬古 典明、川上 尚志、斉藤 恭一、須郷 高信、原子力学会誌 40(11)、879(1998)

工業分野での利用

○ラジアルタイヤ、耐熱電線

ラジアルタイヤは、有機繊維で補強されたゴムで高圧に耐えられる構造になっています。成形器で熱と圧力を加えてタイヤの形にしますが、この時、繊維補強ゴムは大きな変形を受け、補強繊維のずれやはみ出しがおきやすくなります。これを防ぐため、繊維補強ゴムに電子線を照射して強度を上げます。(市場規模:平成15年度1兆円)

また、電線の被覆に使われているゴムやプラスチックはそのまま熱を加えると溶けて流れ落ちます。電子線を照射すると熱を加えても溶けにくくなります。

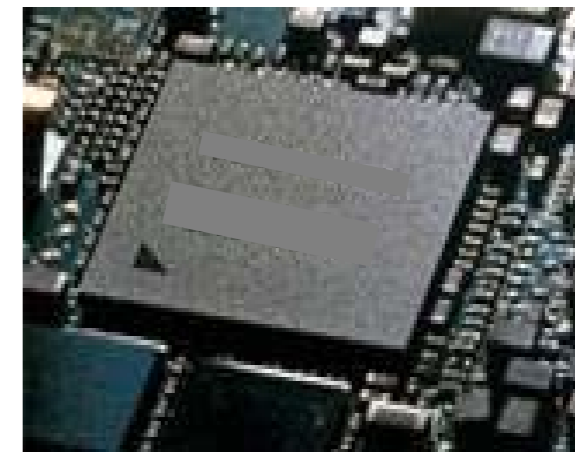


ラジアルタイヤ、耐熱電線

○半導体

IC(集積回路)の回路のパターンの線は髪の毛の太さの50~100分の1であり、その細工をするためにリソグラフィといった技術が使われる。リソグラフィは版画の技術のようなもので、半導体表面に光や放射線を当てると化学変化する感光剤を塗り、加工したい形状に切り抜いた板(マスク)をのせて放射線を当てて、マスクの型どおりに加工するもの。イオンビームや中性子ビームを利用した不純物導入等も行っています。

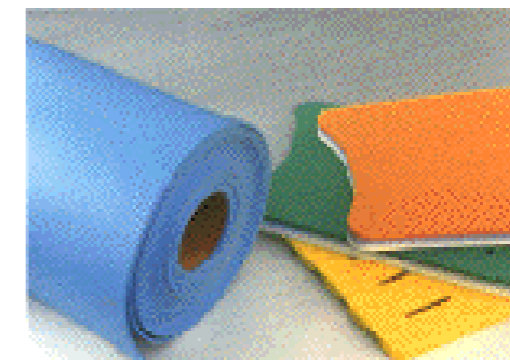
(市場規模:平成15年度6.3兆円)



半導体

○発泡材料(緩衝材料、断熱材料)

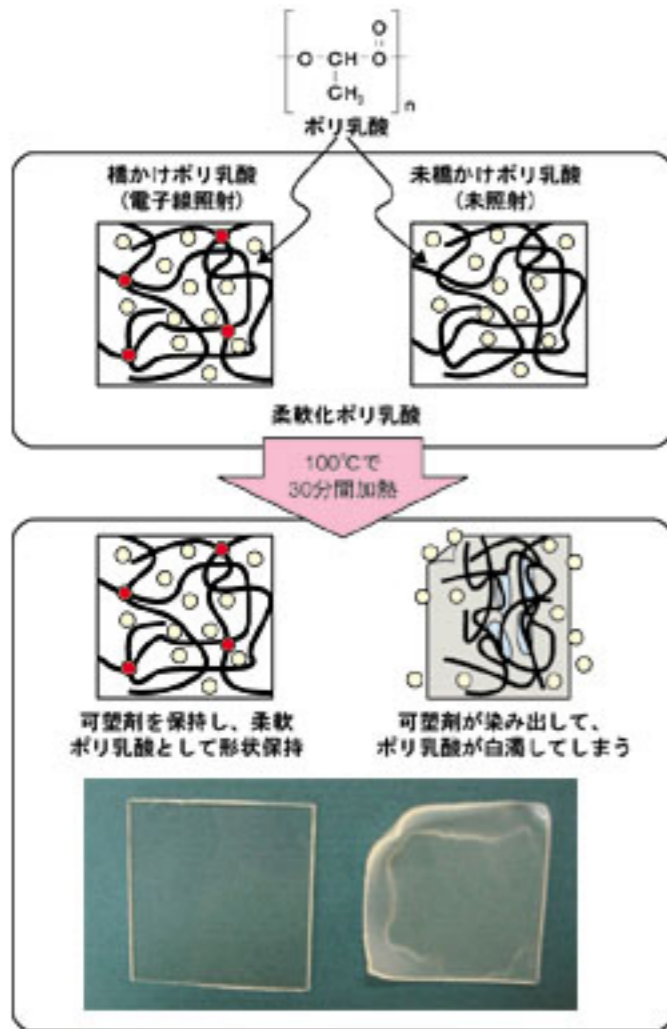
お風呂場で使うバスマット、あるいはプールで使うビート板に使用されている発泡ポリエチレンをご存じですか。あの防水性、浮力が高く、ほどよく硬い素材は、ポリエチレンに放射線を照射し、加熱することで内部に細かい気泡をつくりだしたもので、これもいまから20年以上も前に開発された素材です。



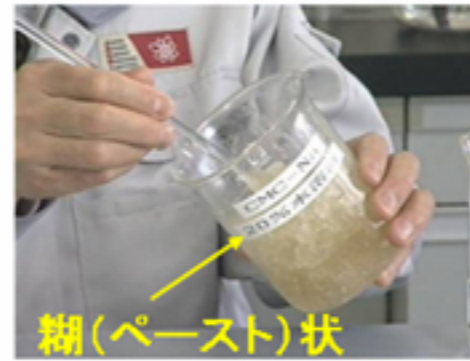
発泡ポリエチレン

放射線橋かけ反応

セルロースゲルの製法と性質



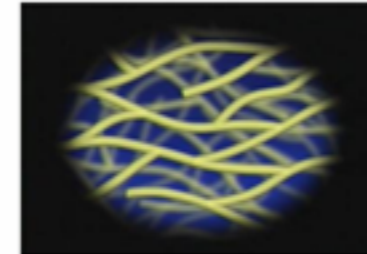
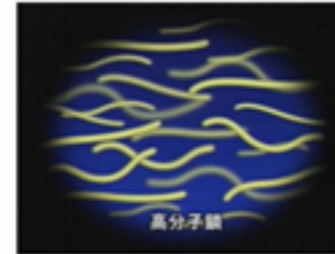
▲放射線橋かけ軟質ポリ乳酸の耐熱性



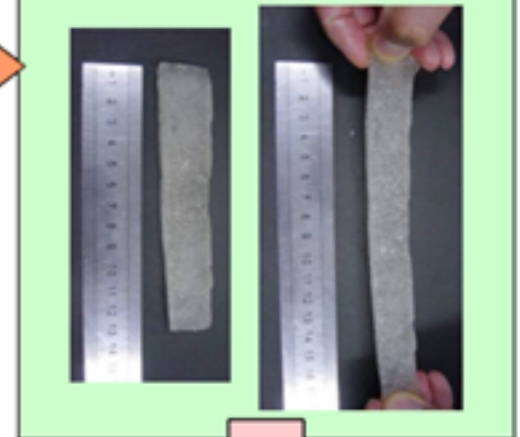
電子線、γ線照射

照射前

橋かけ(分子鎖の結合)

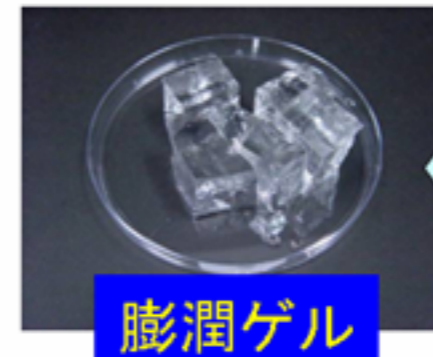


ゴム状を呈す



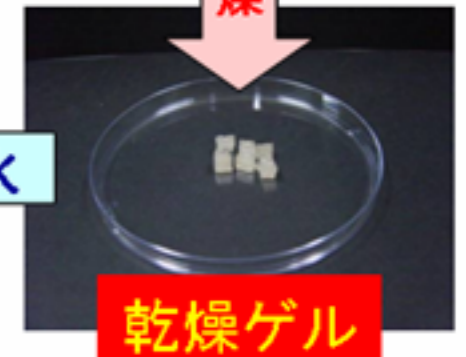
乾燥

吸水



模擬牛糞尿(1%KCl+1.5%Na₂HPO₄)

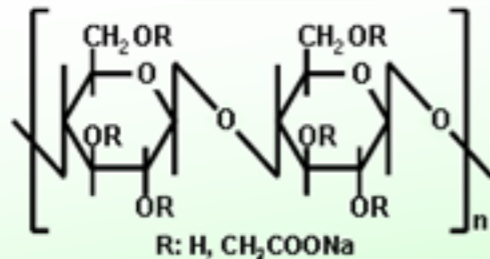
7日間形状保持



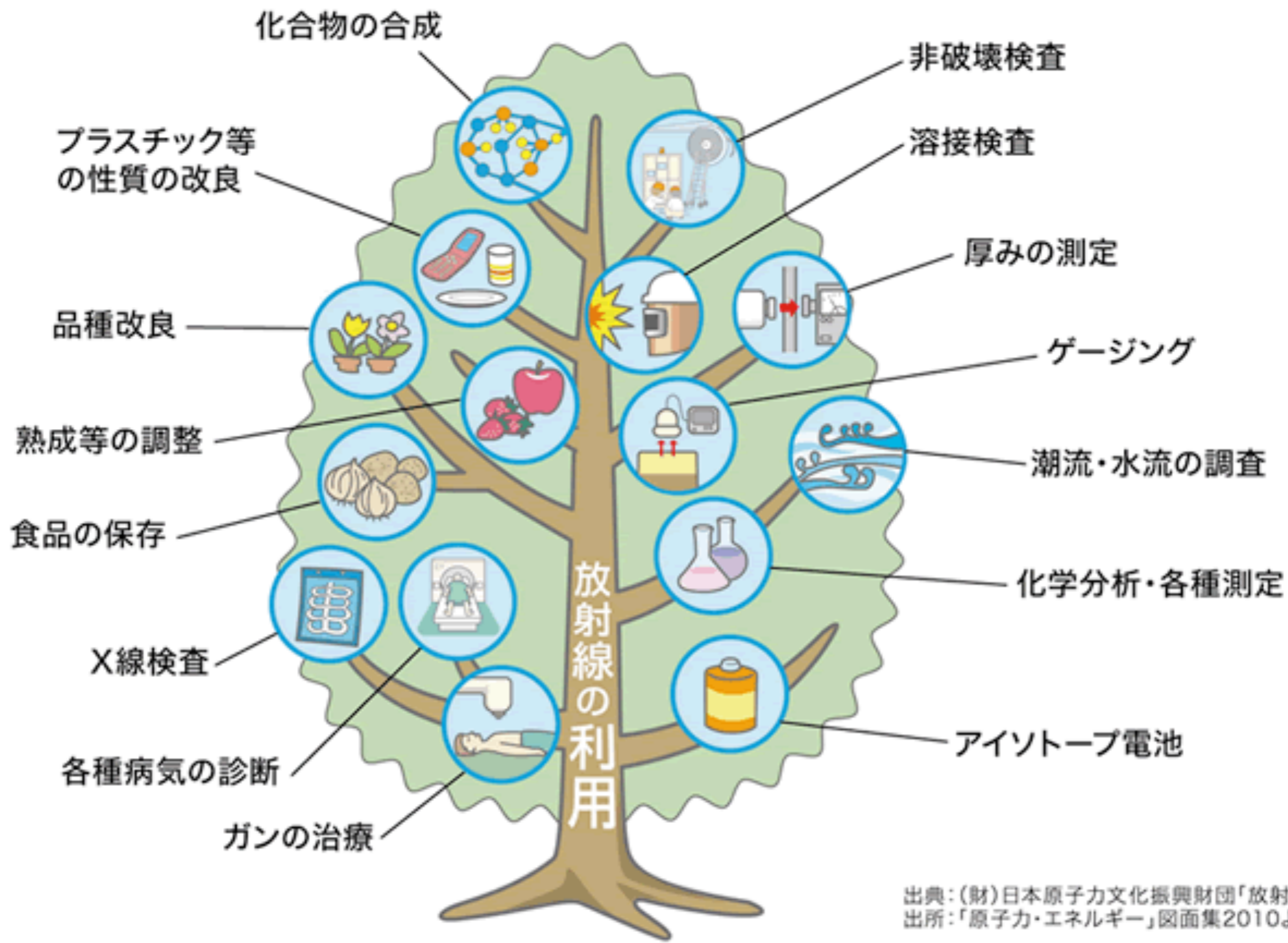
ゲルの特長

- 資源循環型
 - ・ 天然由来の材料
 - ・ 土壤中で分解
- 乾燥ゲル1gの吸水量(g)
 - ・ 純水 : 360
 - ・ 人工尿 : 94
 - ・ 模擬牛糞尿 : 79

カルボキシメチルセルロース(CMC)の特徴



- CMCは天然セルロースを原料として得られる水溶性高分子です。
- CMSは人体に無害で、緩やかな生分解性を有す、環境にやさしい素材です。
- CMCは食品、医薬品、化粧品から、繊維産業、窯業、建設業などの分野まで幅広く利用されています。



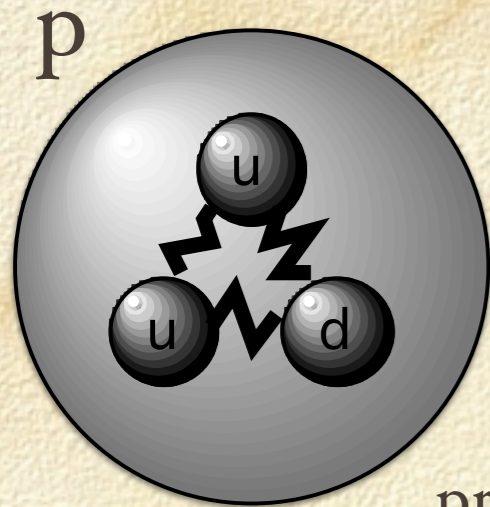
出典：(財)日本原子力文化振興財団「放射線のはなし」
 出所：「原子力・エネルギー」図面集2010より

Hadron

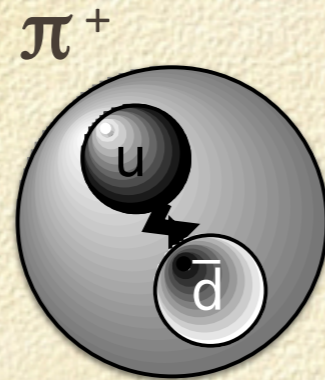
Lepton

Baryon

Meson

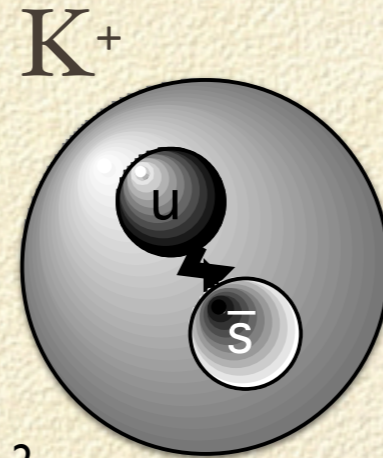


陽子
proton

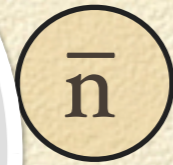
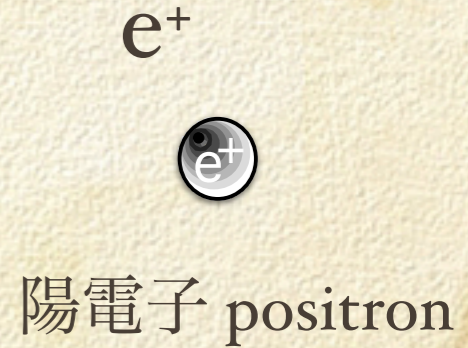
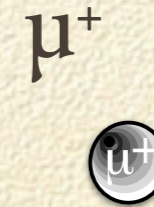


135
 MeV/c^2

パイ中間子
pion

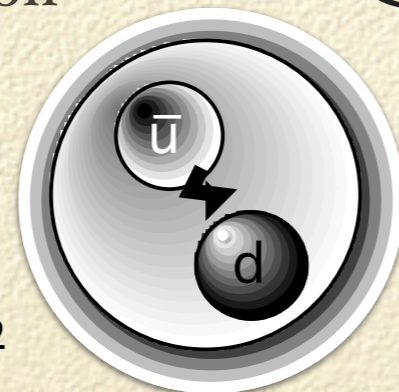


K 中間子
kaon



反陽子
antiproton

940
 MeV/c^2



140 MeV/c^2

$\tau = 26 \text{ ns}$



494 MeV/c^2

$\tau = 12 \text{ ns}$



498
 MeV/c^2

ミュー粒子
muon



電子 electron



938 MeV/c^2

$\tau = \infty$

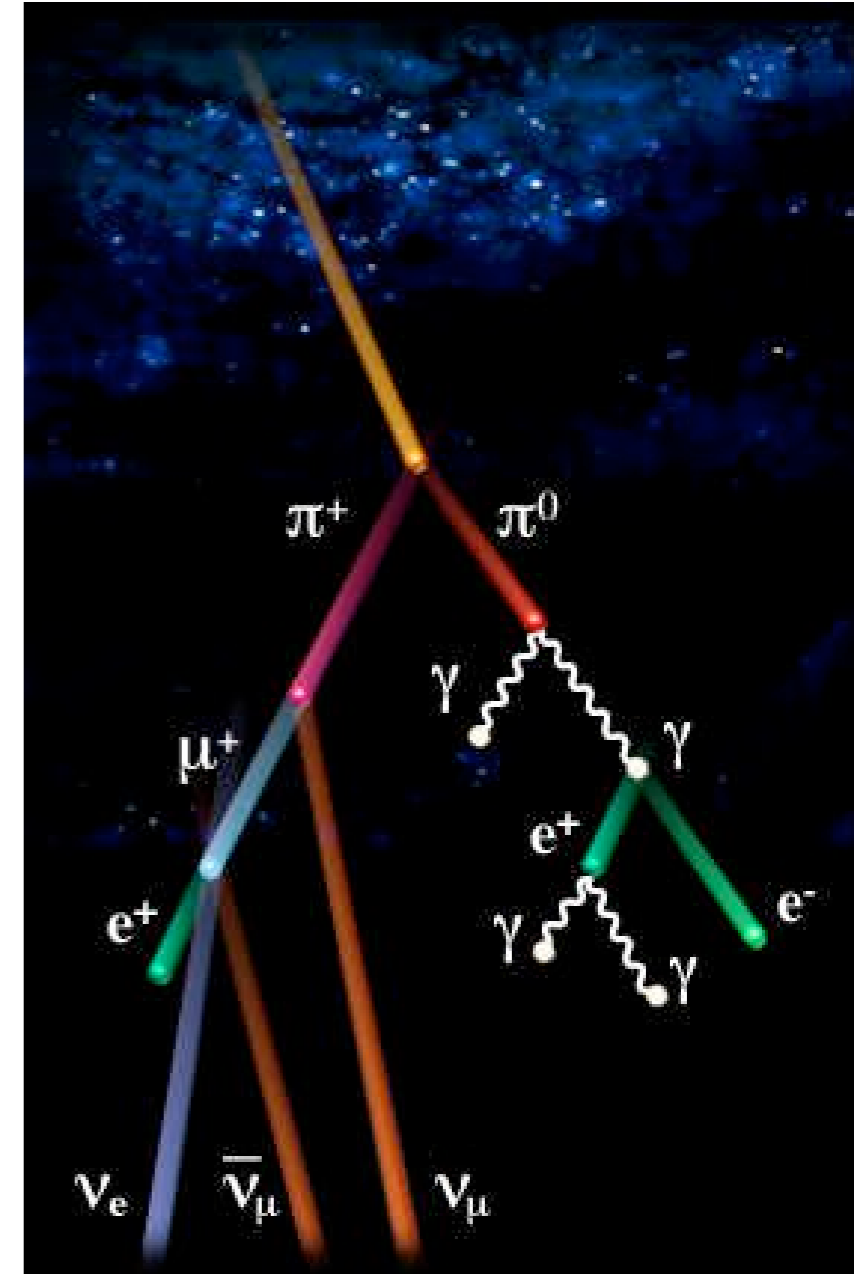
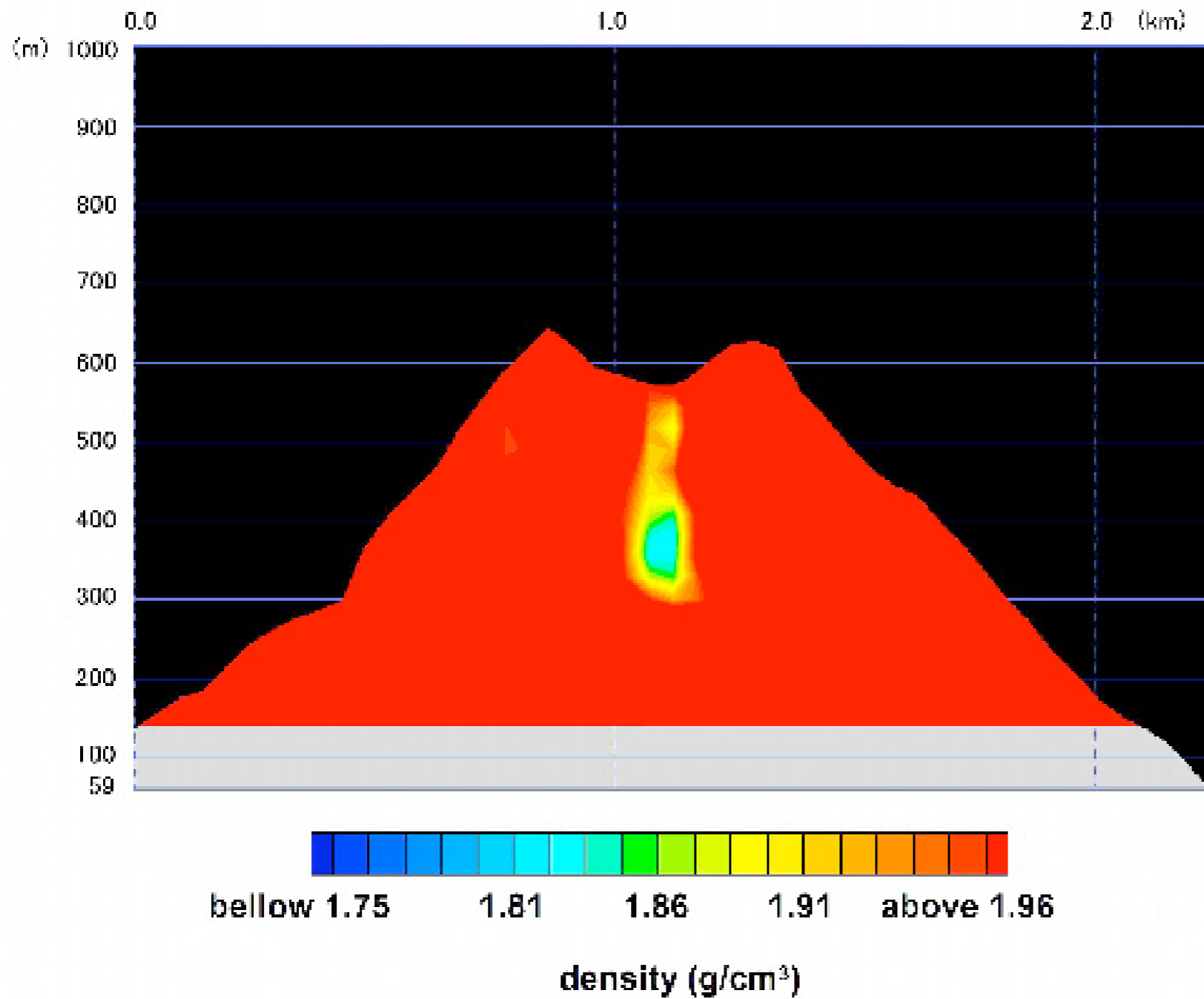
106 MeV/c^2

$\tau = 2.2 \mu\text{s}$

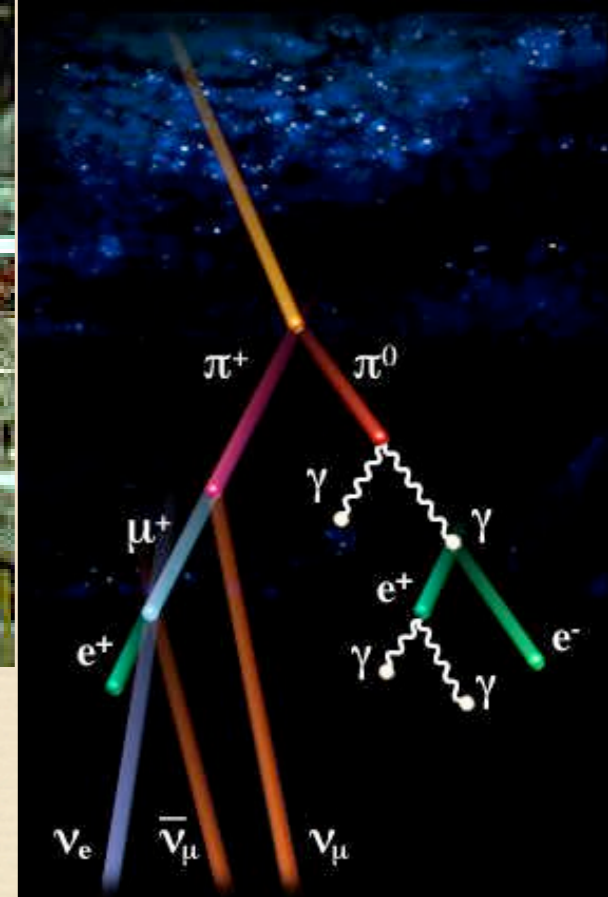
511 keV/c^2

$\tau = \infty$

宇宙線（ミュオン）で火山を覗く

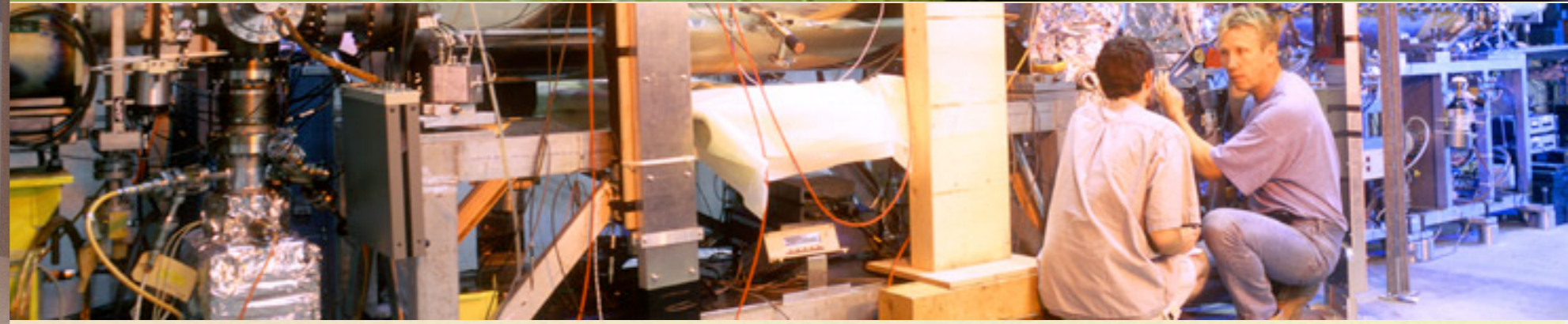
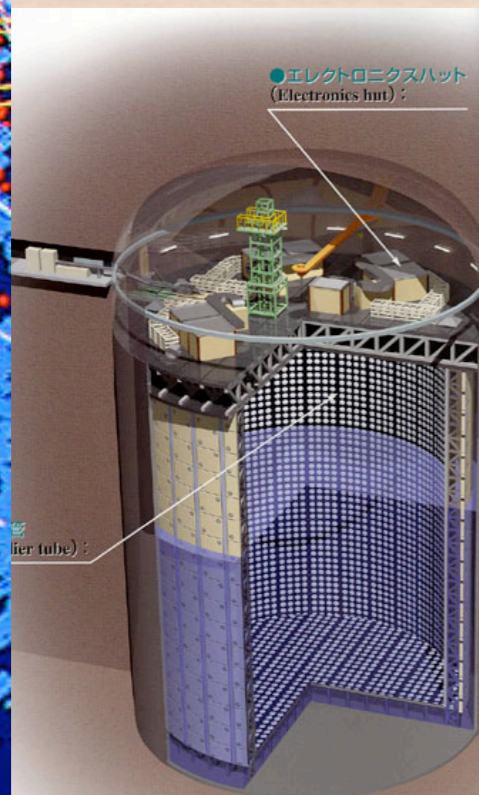


次回予告



第6回 (6/14)

- 放射線の測定 《放射線計測学》
- 高エネルギー・素粒子物理学 《加速器科学》



自主講義 「放射線学」

- 第1回：講義概要のイントロ
(5/10) 放射線とは？
- 第2回：放射線と物質との相互作用 《放射線物理学》
(5/17) (エネルギー損失、各種反応・散乱過程)
- 第3回：放射線の生体への作用と影響 《放射線生物学》
(5/24) 放射線と放射能の単位
放射線の防護 《放射線安全管理学》
- 第4回：原子核の壊変 《原子核物理学》
(5/31) 核分裂反応 《原子力工学》
- 第5回：放射線の利用
(6/7) 放射線診断・治療 《放射線医療》
- 第6回：高エネルギー・素粒子物理学 《加速器科学》
(6/14) 放射線の測定 《放射線計測学》、discussion

講義スライド、講義予定

<http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/>

連絡先

torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp

担当教員:鳥居 寛之

授業アンケート

Fine. Per oggi è tutto.

Fini pour aujourd'hui

That's all for today.

Всё за сегодня.

오늘은 여기까지 하겠습니다.

Ci vediamo la prossima settimana.

On se voit la semaine prochaine.

See you next week.

Увидимся на следующей неделе.

다음 주에 또 만납시다.