



- 放射線入門
- 原子核物理学・放射線物理学
- 放射線計測学・環境放射化学
放射線の単位・線量計算
- 放射線生物学・放射線防護学
リスクコミュニケーション

2021/6/22 (火)

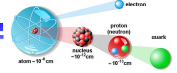
鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 大学院理学系研究科 放射線管理室
(化学専攻 放射性同位元素研究室)

東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

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、どうぞご活用下さい。http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/~torii/lecture/
torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp

2011年度夏学期
自主講義 放射線学



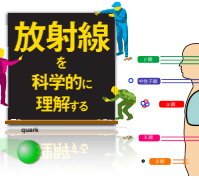
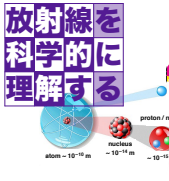
- 2020年度 Aセメスター
- 2019年度 Aセメスター
- 2018年度 Aセメスター
- 2017年度 Aセメスター
- 2016年度 Aセメスター
- 2015年度 Aセメスター
- 2014年度冬学期
- 2013年度冬学期

主題科目テーマ講義/学術フロンティア講義

2011年度冬学期

2012年度冬学期

2014年度冬学期



放射線を科学的に理解する

- 放射線の影響についての様々な意見が乱立している
- 放射線に関する学問は多岐にわたり、一人の専門家ではまかないきれない。
- 原子力工学、原子核物理学
- 放射線物理学、放射線計測学、放射線化学、放射化学
- 放射線生物学、放射線医学
- 環境学、気象学、海洋科学、植物学・土壌学（農学）
- 食品衛生学
- 放射線防護学（安全管理学）
- リスク学、リスクコミュニケーション
- 社会学（社会科学技術論、社会心理学）、法律

日本物理学会誌 (2013年6月号)

シリーズ「物理教育は今」

放射線を科学的に理解するための教育

鳥居 寛之 (東京大学教養学部・大学院総合文化研究科 153-8902 東京都目黒区野田 3-8-1 e-mail: torii@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp)

1. はじめに
東日本大震災は我々の価値観をも大きく変える未曾有の災害だった。さらに追い打ちをかけるように原発事故が起こり、被災地域はもとより、全国に影響を及ぼすこととなった。放射線に関する知識不足から多くの人が混乱し、様々な不確かな、あるいは間違った情報が飛び交っていた。事故後に安全発言を繰り返した政府への不信だけでなく、見解がばらついた科学者に対する信頼も揺らぎ、世の中の不安感が未だに尾を引いている。放射線への恐怖心から、あるいは「安全」な食品を求めて、福島のみならず政府を離れ、なかには海外に子どもを避難させた親もいる。そんななか、私は実験核物理・原子物理学を専門とする物理学者として、学生に対する教育の必要性を感じ、講義活動に奔走した。放射線を理解するには、物理・化学・生命科学・医学・工学など様々な分野の

東京の日常風景も、金町浄水場から基準を超える放射性ヨウ素が検出されたことや、あるいはベクトルボルトが突如計画停電で列車運行に影響をした。辺り一帯が真っ暗の都心のマンションから、皮肉なときはど美しい星空を仰ぎ見なかった。

テレビでは原発の構造の解り、マタロシレポートとい

日本物理学会誌

6

図1 放射線物理学のスクリーンショット

図2 放射線物理学のスクリーンショット

図3 放射線物理学のスクリーンショット

図4 放射線物理学のスクリーンショット

図5 放射線物理学のスクリーンショット

図6 放射線物理学のスクリーンショット

図7 放射線物理学のスクリーンショット

図8 放射線物理学のスクリーンショット

図9 放射線物理学のスクリーンショット

図10 放射線物理学のスクリーンショット

図11 放射線物理学のスクリーンショット

図12 放射線物理学のスクリーンショット

図13 放射線物理学のスクリーンショット

図14 放射線物理学のスクリーンショット

図15 放射線物理学のスクリーンショット

図16 放射線物理学のスクリーンショット

図17 放射線物理学のスクリーンショット

図18 放射線物理学のスクリーンショット

図19 放射線物理学のスクリーンショット

図20 放射線物理学のスクリーンショット

図21 放射線物理学のスクリーンショット

図22 放射線物理学のスクリーンショット

図23 放射線物理学のスクリーンショット

図24 放射線物理学のスクリーンショット

図25 放射線物理学のスクリーンショット

図26 放射線物理学のスクリーンショット

図27 放射線物理学のスクリーンショット

図28 放射線物理学のスクリーンショット

図29 放射線物理学のスクリーンショット

図30 放射線物理学のスクリーンショット

図31 放射線物理学のスクリーンショット

図32 放射線物理学のスクリーンショット

図33 放射線物理学のスクリーンショット

図34 放射線物理学のスクリーンショット

図35 放射線物理学のスクリーンショット

図36 放射線物理学のスクリーンショット

図37 放射線物理学のスクリーンショット

図38 放射線物理学のスクリーンショット

図39 放射線物理学のスクリーンショット

図40 放射線物理学のスクリーンショット

図41 放射線物理学のスクリーンショット

図42 放射線物理学のスクリーンショット

図43 放射線物理学のスクリーンショット

図44 放射線物理学のスクリーンショット

図45 放射線物理学のスクリーンショット

図46 放射線物理学のスクリーンショット

図47 放射線物理学のスクリーンショット

図48 放射線物理学のスクリーンショット

図49 放射線物理学のスクリーンショット

図50 放射線物理学のスクリーンショット

図51 放射線物理学のスクリーンショット

図52 放射線物理学のスクリーンショット

図53 放射線物理学のスクリーンショット

図54 放射線物理学のスクリーンショット

図55 放射線物理学のスクリーンショット

図56 放射線物理学のスクリーンショット

図57 放射線物理学のスクリーンショット

図58 放射線物理学のスクリーンショット

図59 放射線物理学のスクリーンショット

図60 放射線物理学のスクリーンショット

図61 放射線物理学のスクリーンショット

図62 放射線物理学のスクリーンショット

図63 放射線物理学のスクリーンショット

図64 放射線物理学のスクリーンショット

図65 放射線物理学のスクリーンショット

図66 放射線物理学のスクリーンショット

図67 放射線物理学のスクリーンショット

図68 放射線物理学のスクリーンショット

図69 放射線物理学のスクリーンショット

図70 放射線物理学のスクリーンショット

図71 放射線物理学のスクリーンショット

図72 放射線物理学のスクリーンショット

図73 放射線物理学のスクリーンショット

図74 放射線物理学のスクリーンショット

図75 放射線物理学のスクリーンショット

図76 放射線物理学のスクリーンショット

図77 放射線物理学のスクリーンショット

図78 放射線物理学のスクリーンショット

図79 放射線物理学のスクリーンショット

図80 放射線物理学のスクリーンショット

図81 放射線物理学のスクリーンショット

図82 放射線物理学のスクリーンショット

図83 放射線物理学のスクリーンショット

図84 放射線物理学のスクリーンショット

図85 放射線物理学のスクリーンショット

図86 放射線物理学のスクリーンショット

図87 放射線物理学のスクリーンショット

図88 放射線物理学のスクリーンショット

図89 放射線物理学のスクリーンショット

図90 放射線物理学のスクリーンショット

図91 放射線物理学のスクリーンショット

図92 放射線物理学のスクリーンショット

図93 放射線物理学のスクリーンショット

図94 放射線物理学のスクリーンショット

図95 放射線物理学のスクリーンショット

図96 放射線物理学のスクリーンショット

図97 放射線物理学のスクリーンショット

図98 放射線物理学のスクリーンショット

図99 放射線物理学のスクリーンショット

図100 放射線物理学のスクリーンショット

新規 放射線取扱者 講習

全学一括講習会 (丸2日)

1日目: 講義

2日目: 実習

@ 本郷キャンパス or 柏キャンパス

放射線取扱者 健康診断

部局講習会 @ 駒場キャンパス

共通技術室にて受講申し込み

講義の理解目標の一例

以下のような問いに答えられるように

「放射線が物質に及ぼす作用と人体への影響について、物理学的、化学的、分子生物学的、医学的観点からそれぞれ論ぜよ。」

「外部被曝と内部被曝で人体への影響はどう違うか、あるいは同じか。また、放射性核種や放射線の種類によって、どういった違いがあるか。」

「放射性物質が農業や食品衛生に与える影響について述べよ。ゼロでないリスクをどう伝え、どう判断すべきだろうか。安全と安心を確保する方策は？」



「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・土壌肥料学)
- 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に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、放射線について多角的に学べるよう記述しています。日常生活や産業事故にかかわる具体的な例を挙げながらやさしく、いかに理解しましたか？と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/radiolict-kn.html

自己紹介 研究: Exotic原子 (ミュオン原子、反陽子原子)

専門: 放射線科学・素粒子原子物理学

放射線講義・講座

- 2011/4: 東大広域科学専攻にて教員・院生向けに講演・討論会
 - 2011/春夏: 東大教養にて1、2年生向けに自主講義「放射線学」
 - 2011/6: オープンラボで大学・高校生、一般向けシンポジウム
 - 2011/秋冬: 主題科目テーマ講義「放射線を科学的に理解する」
 - 2011/11: 高校生のための特別講座「放射線の科学」福島高校にも配信
 - 2012/3: 東京大学 × 博報堂 × 時事通信社 (特別協力: 環境省)
- 「3.11のガレキを考える」プロジェクト 細野環境大臣に提言

資格: 第1種放射線取扱主任者

委員会: 東大安全環境本部 放射線安全教育WG
放射線取扱者全学一括講習会資料検討TG メンバー
(~2016)

日本学術振興会 先導的研究開発委員会
「放射線の影響とクライシスコミュニケーション」委員



- 放射線入門
- 原子核物理学・放射線物理学
- 放射線計測学・環境放射化学
放射線の単位・線量計算
- 放射線生物学・放射線防護学
リスクコミュニケーション

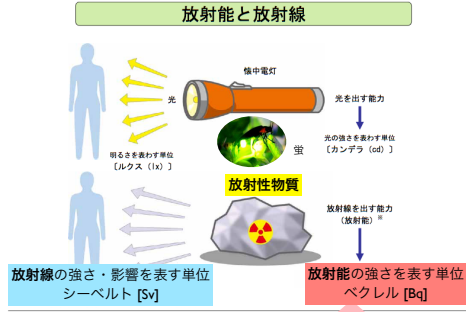
第1話

放射線入門

鳥居 寛之

東京大学 大学院理学系研究科 放射線管理室

放射線 放射能 放射性物質



放射能 (radioactivity) の単位

[Bq] | Bq = 1 dps, [Ci] | Ci = 37 GBq
Becquerel decays/disintegration per second Curie 1 キュリー = 370億ベクレル

放射線量 (radiation dose) の単位

Gray
 吸収線量 absorbed dose $D [J/kg] = [Gy]$
 等価線量 equivalent dose $H_T [J/kg] = [Sv]$
 実効線量 effective dose $E [J/kg] = [Sv]$
 Sievert

放射線量率 (dose rate) の単位

単位時間あたりの放射線量
 [Gy/h], [Sv/h], etc....
 放射線量率の時間積分が (積算) 放射線量になる。

「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「放射能うつる」といじめられたという訴えが市教育委員会で15日、分かった。市教委は同日までに、避難者の不安を考慮し、思いやりを持って被災者の児童生徒に接するよう指導を求め、市立小中学校に出した。

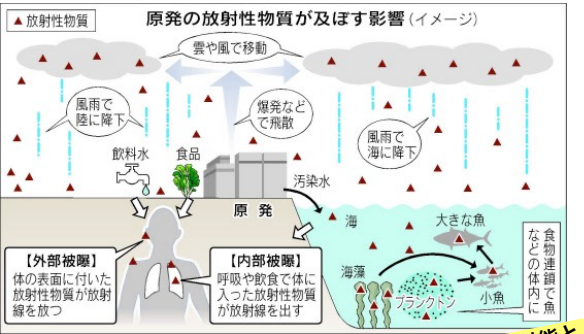
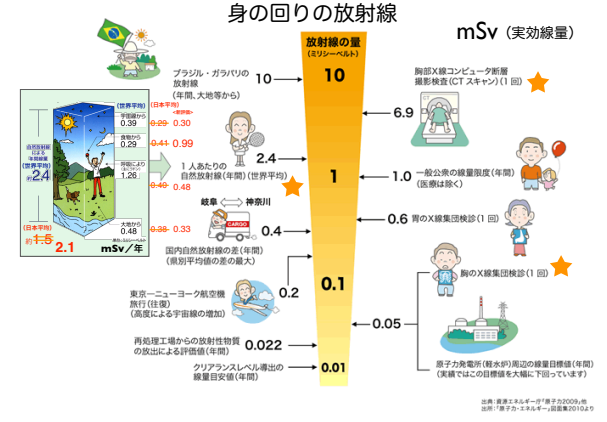
市教委によると、福島県南相馬市から避難した小学生の兄弟が、地元の子どもに「どしゃぶりの」と話しかけられた。兄弟が「福島」と答えると地元の子どもは「放射線うつる」と言い、数人が一斉に逃げ出したという。

放射線はうつらない
 放射能と放射線を混同しない

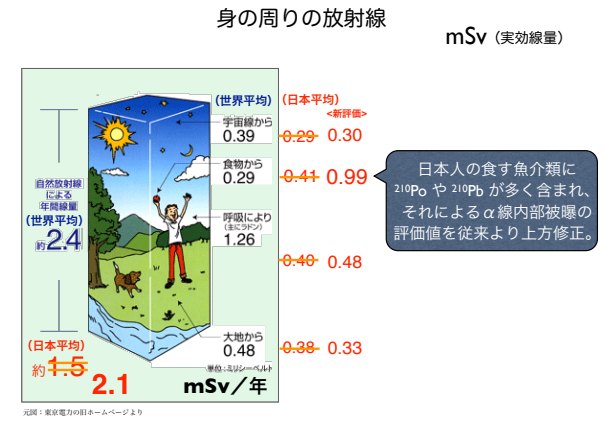
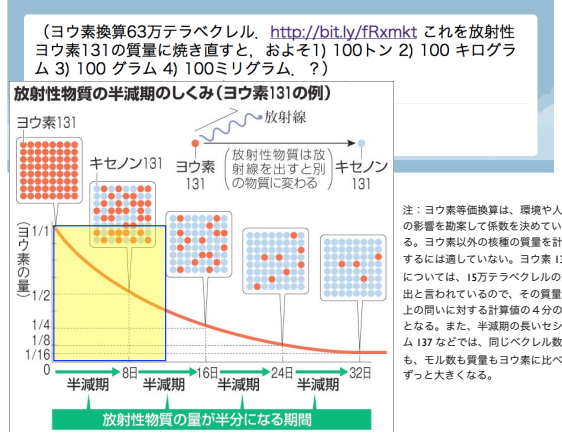
放射線に対する正しい知識をもって「正しく怖がる」ことが必要。

SI (国際単位系) 表2: 単位の倍数

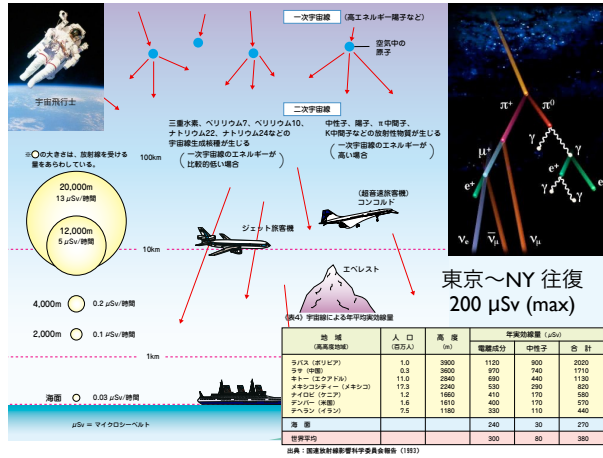
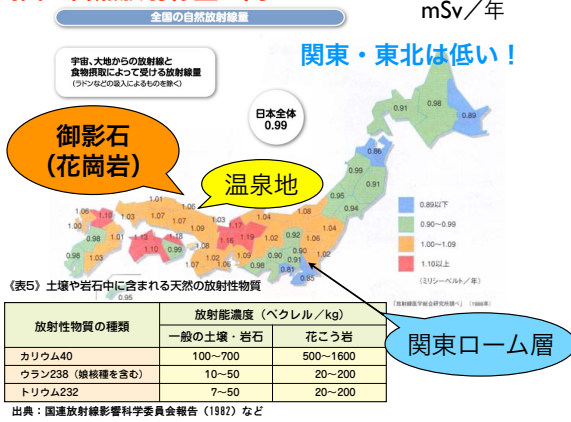
接頭辞	記号	倍数	接頭辞	記号	倍数
デシ (deci)	d	10 ⁻¹	デカ (deca)	da	10
センチ (centi)	c	10 ⁻²	ヘクト (hecto)	h	10 ²
ミリ (milli)	m	10 ⁻³	キロ (kilo)	k	10 ³
マイクロ (micro)	μ	10 ⁻⁶	メガ (mega)	M	10 ⁶
ナノ (nano)	n	10 ⁻⁹	ギガ (giga)	G	10 ⁹
ピコ (pico)	p	10 ⁻¹²	テラ (tera)	T	10 ¹²
フェムト (femto)	f	10 ⁻¹⁵	ペタ (peta)	P	10 ¹⁵
アト (atto)	a	10 ⁻¹⁸	エクサ (exa)	E	10 ¹⁸
ゼプト (zepto)	z	10 ⁻²¹	ゼタ (zetta)	Z	10 ²¹
ヨクト (yocto)	y	10 ⁻²⁴	ヨタ (yotta)	Y	10 ²⁴



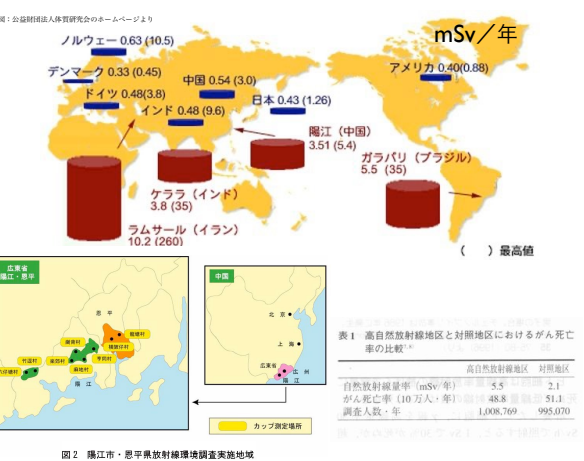
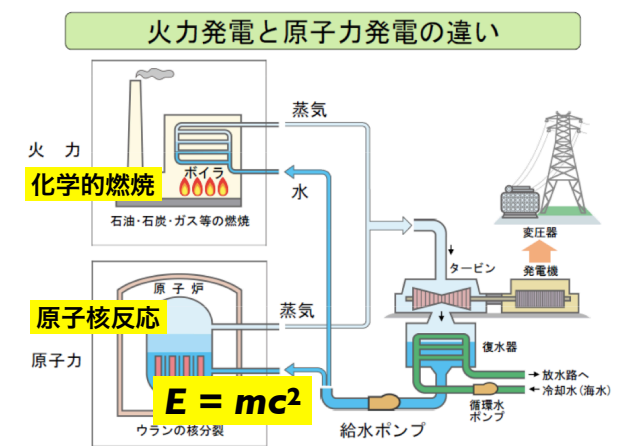
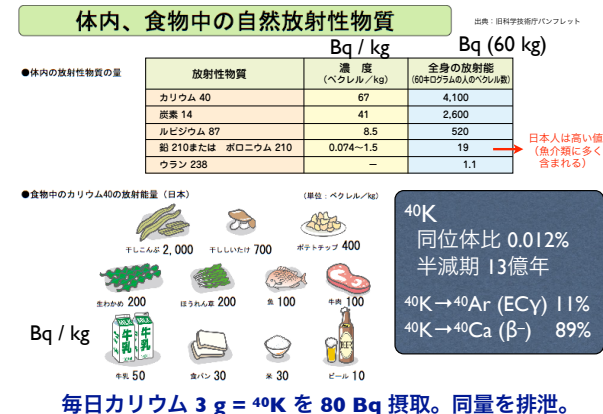
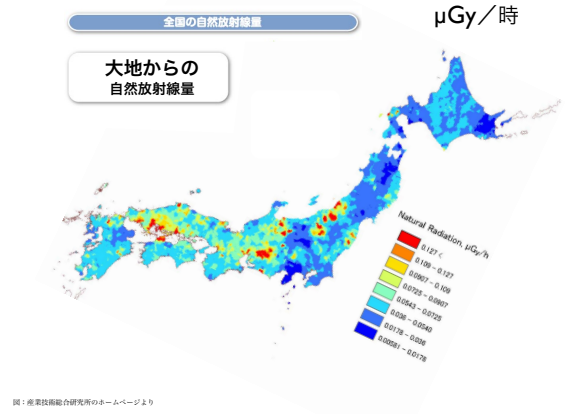
放射性物質が一部東京まで飛来。放射線が直接東京に届いたのではない
 放射性物質、放射能と放射線を混同しない



関西は自然放射線量が高い！



原子核物理学



東京大学大学院総合文化研究科 環境安全学

放射線の科学と安全

2021 / 6 / 22 (火)

第2話 原子核物理学・放射線物理学

原子核と放射能・放射線の種類、放射線と物質との相互作用

東京大学 大学院理学系研究科 放射線管理室 鳥居 寛之

分子 molecule

原子 atom

原子核 nucleus

陽子 proton

クォーク quark

nm (10^{-9} m) 化学 eV Chemistry

ナノメートル 電子ボルト

原子: atom < atomus < ατομος < α + τέμνη + ος (切ることができる)

原子物理学 Atomic Physics

Å (10^{-10} m) eV - keV

オングストローム Angström 数電子ボルト~キロ電子ボルト

錬金術はなぜ失敗したか

原子核物理学 Nuclear Physics

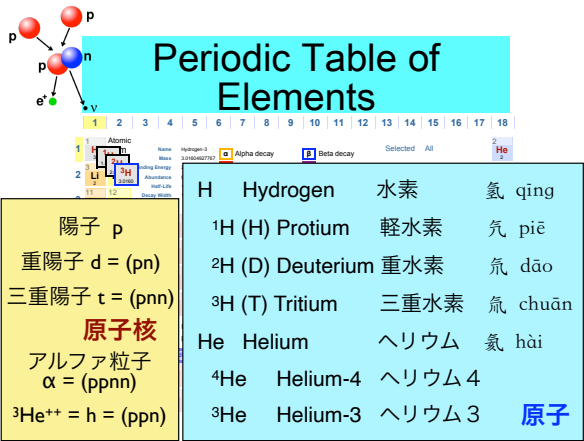
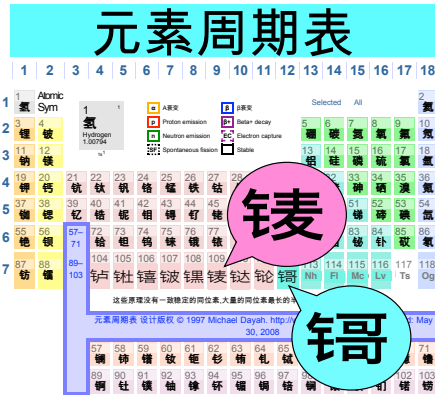
fm (10^{-15} m) MeV

フェムトメートル メガ電子ボルト

素粒子物理学 Particle Physics

am (10^{-18} m) GeV

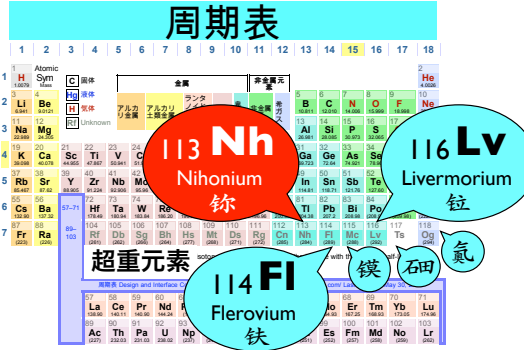
アトメートル ギガ電子ボルト



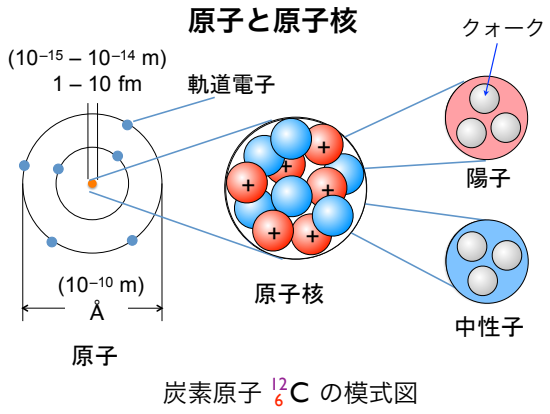
核種の表記法 nuclide

$^{12}_6\text{C}_6$
 ^{12}C
C-12
炭素12

^{113}Nh ニホニウム 生成 2004年 理研 森田浩介氏ら

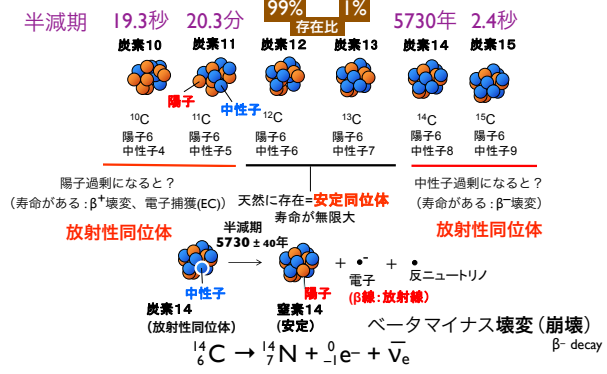


米国の共同研究 ロシア合同原子核研究所の原子核反応研究室創設者 Georgy Flérov
米国 Lawrence-Livermore 国立研究所



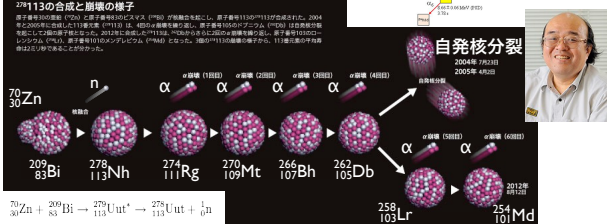
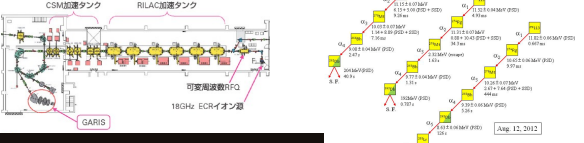
炭素原子 $^{12}_6\text{C}$ の模式図

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



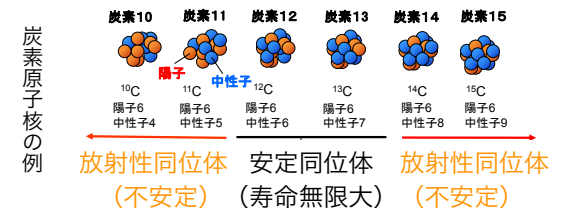
超重元素 ^{113}Nh ニホニウム 生成

2004, 05, 12年、理研 森田浩介氏ら

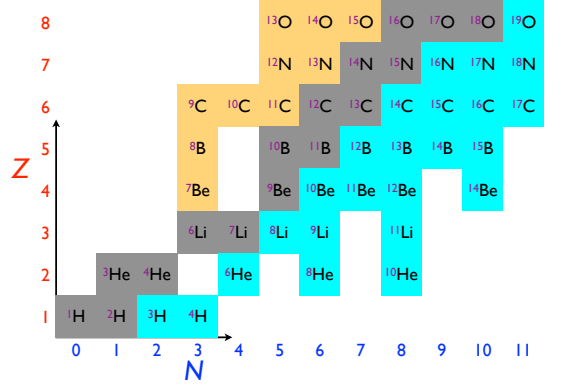


放射性物質とは

放射性核種 = 放射性同位体 = 不安定原子核
質量数 $A = Z + N$
 $^A_Z\text{C}_N$ 元素名
陽子数 Z が同じなら化学的には同じ元素
中性子数 N が違う原子核が多種存在する



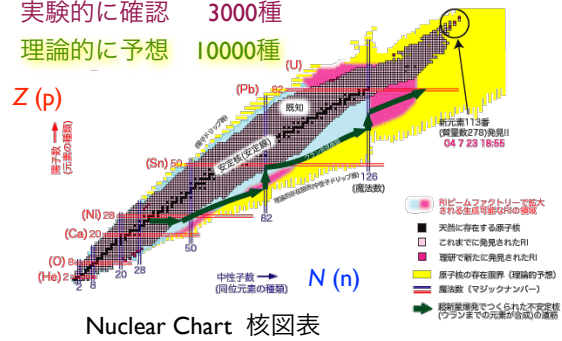
核図表



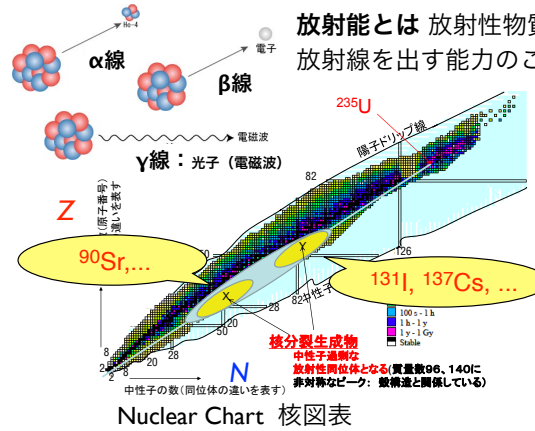
核種の数

- 安定核種 約300種
- 実験的に確認 3000種
- 理論的に予想 10000種

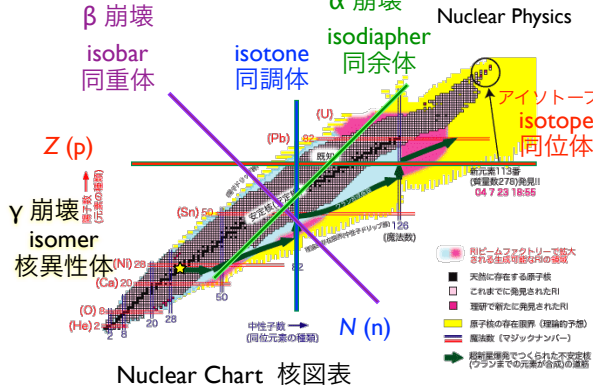
原子核物理学 Nuclear Physics



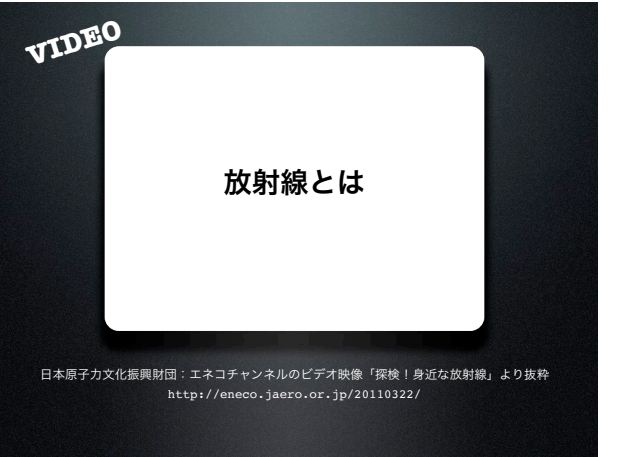
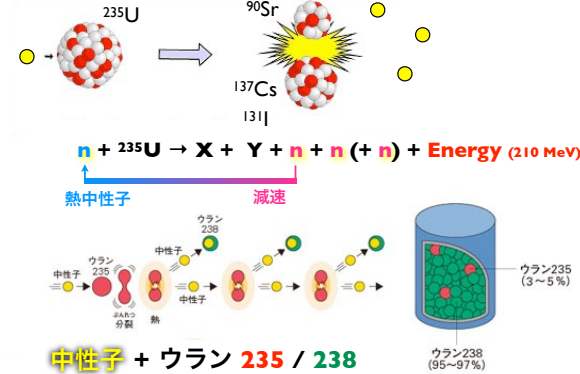
放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



原子核物理学 Nuclear Physics

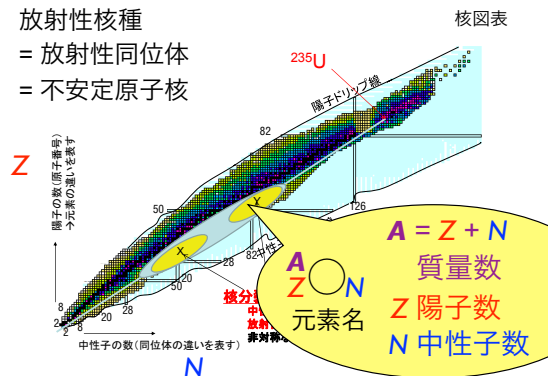


原子核分裂反応



放射性物質とは

- 放射性核種
- = 放射性同位体
- = 不安定原子核



放射線の種類

放射線の種類

- 粒子線
 - β線 (電子線)
 - 陽子線
 - 中性子線
 - α線
 - 重粒子線
- 光子線 (電磁波)
 - X線
 - γ線

原子核 N MeV 前後
高エネルギー

α線：ヘリウム原子核 数 MeV

β線：高速の電子 数十 keV ~ MeV

γ線：光子 (電磁波) 数十 keV ~ MeV

X線：光子 (電磁波) 原子 A 1 ~ 100 keV 制動放射 ~ 数 MeV

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%

放射線の速度

放射線

- 粒子線
 - β線 (電子線)
 - 陽子線
 - 中性子線
 - α線
 - 重粒子線
- 光子線 (電磁波)
 - X線
 - γ線

放射線のもつエネルギーは？
 ◎ 数十 keV ~ MeV for α/β/γ
 Cf. 原子の束縛エネルギーは？

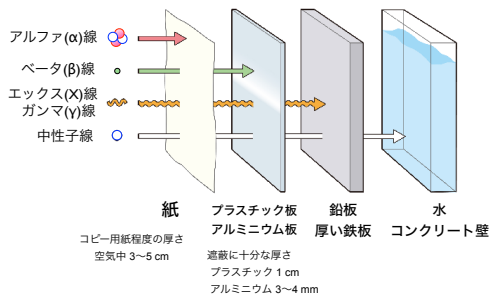
荷電粒子の質量は？
 荷電粒子の速度は？

5 MeV の α線の速度は？
 1 MeV の β線の速度は？

$M_\alpha \approx 4 \text{ GeV}/c^2$
 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$
 $M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$
 $M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$
 $m_e = 511 \text{ keV}/c^2$
 $\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$

$E = mc^2\gamma = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$
 $T = E - mc^2$
 $\beta = v/c$
 $\approx \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} mc^2 \beta^2$ ($v \ll c$)

放射線の種類と透過力



荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

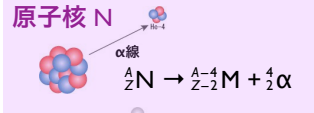
物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。

原子の電離(イオン化)・励起

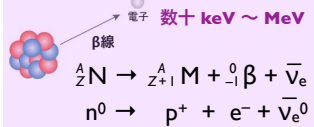
- 励起原子の脱励起
- X線、紫外線・可視光
- イオン・電子の再結合
- 化学結合の切断、組み替え
- ラジカル、活性分子の生成
- DNAの損傷

シンチレーション光
(放射線による原子・分子の蛍光)

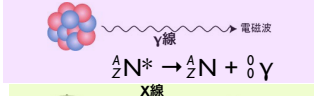
α崩壊(壊変)



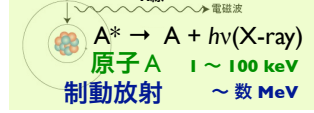
β崩壊(壊変)



γ崩壊(壊変) (核異性体転移) Isomeric Transition (IT)



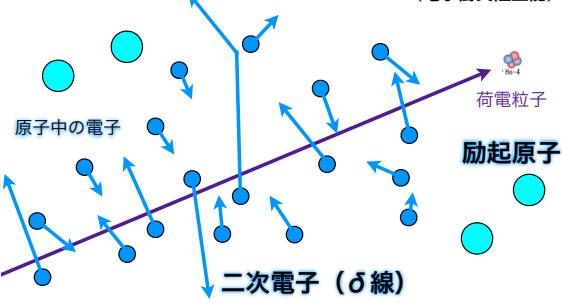
原子の脱励起 制動放射



荷電粒子のエネルギー損失過程

物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される。(電子衝突阻止能)

荷電粒子：クーロン力



阻止能 (エネルギー損失、線エネルギー付与)
Stopping power Energy Loss Linear Energy Transfer : LET

荷電粒子：クーロン力
物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して(二次電子)運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される(電子衝突阻止能)。

重い粒子：陽子線(p)/α線/重粒子線/π中間子/μ粒子
1個の電子に与えるエネルギーは微小。多数個の電子との散乱により減速される。運動量変化も小さいので軌道はほぼ直線。

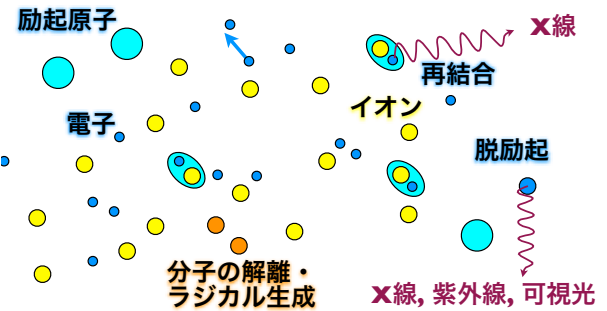
軽い粒子：電子(e-)・陽電子(e+)
1回の散乱で失うエネルギーが大きい。ジグザグの軌道も。大きな運動エネルギーをもつ二次電子を生成しうる。

放射線と物質との相互作用

荷電粒子の減速

荷電粒子通過後の軌跡近傍の様子

物質中の原子は電離・励起されてイオンや励起原子を生じ、運動エネルギーを受け取った電子は二次電子として更に別の原子を電離。再結合・脱励起によりX線が発生。



放射線の軌跡

霧箱による観察

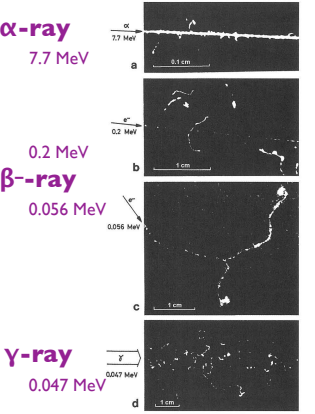


Figure 7.5 Cloud chamber tracks of α, β, γ, and γ-rays at 1 bar in air (a), (b), and (c) and in methane (d). (From W. Gottsch; H. Mair-Leibnitz, and H. Böhm.)

荷電粒子：クーロンカ

$$S = -\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \quad \text{阻止能 (エネルギー損失、線エネルギー付与)}$$

Stopping power Energy Loss Linear Energy Transfer : **LET**

陽子線(p)/α線/重粒子線：高 LET 放射線

中性子線(n)：物質中の陽子を叩いて弾き出すので、高い LET を与える。

電子(β)線：低 LET 放射線

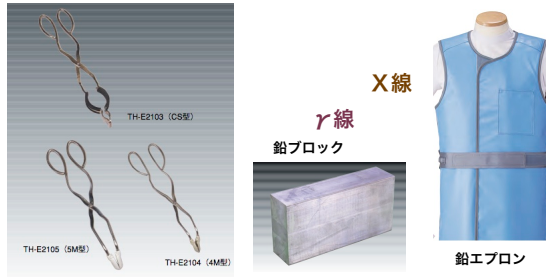
光子(X線, γ線)：物質中の電子を弾き出す。
あるいは高エネルギーでは電子陽電子対を生成する。
低い LET。

物質の種類にさほど依らない

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

MeV / (g / cm²)

密封 RI (密封線源) の使用

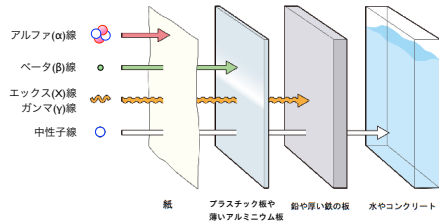


ピンセット、トンクなどを使い、RIからの距離を取る。
適切な遮へい材を活用し、放射線をさえぎる。

飛程 Range 阻止能の逆数を積分。

相互作用の大きい放射線ほど遮蔽しやすい。

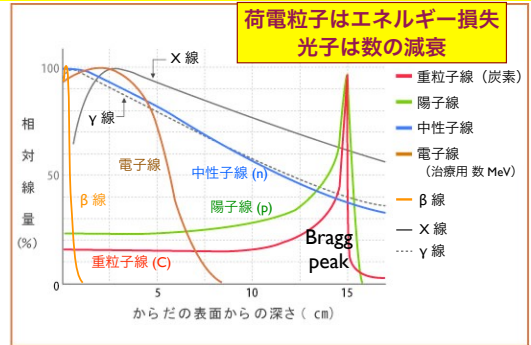
$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle^{-1} dE$$



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

MeV / (g / cm²)

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。



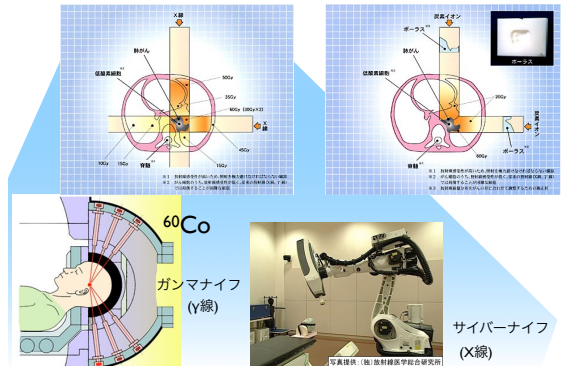
元図：群馬大学原子線医学研究センターのホームページより

非密封 RI の使用 β線



汚染の可能性のあるフード内や実験台をポリエチレンの紙で覆う。
パット (受け皿) やトイレ内で取扱う。
廃棄物の種類ごとに容器を用意。
核種にあった適切な遮へい器具を使う。

放射線医療：がん治療 数 Gy を複数回 重粒子線 (炭素イオン)



放射線と物質との相互作用

光子の減衰

荷電粒子(α線・β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

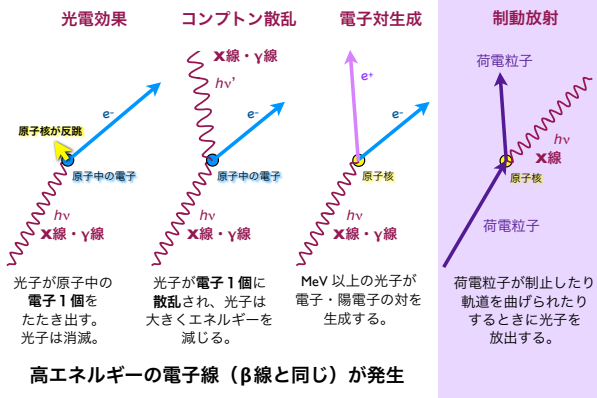
光子(X線・γ線)の減衰(減弱)

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 σ (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

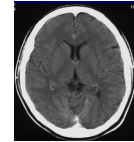


レントゲン(X線)撮影

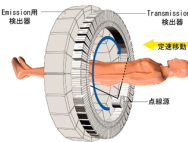
吸収率の差を利用して撮像する。



(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			
造影剤	元素	原子番号	K殻殻殻
陰性造影剤			
・子宮造影剤、血管造影剤	I	53	33.16 keV
・破断造影剤A: 消化管造影剤	Ba	56	37.41 keV
・キセノンガス(脳血管造影CT)	Xe	54	34.56 keV
陽性造影剤			
・造影剤: 造影剤、造影剤			
・イソプロパノール(造影CT)			

国立放射線医学センター 内藤研一先生のスタイルより引用

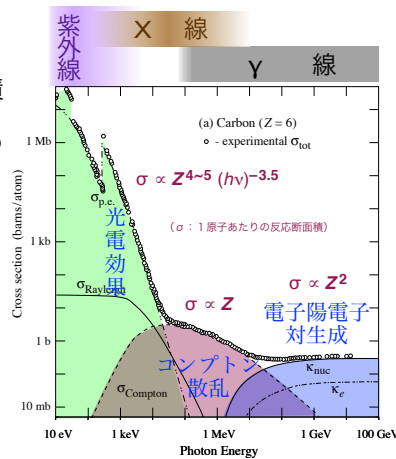
光子

反応断面積

1 Mb = (0.1 Å)²

1 kb

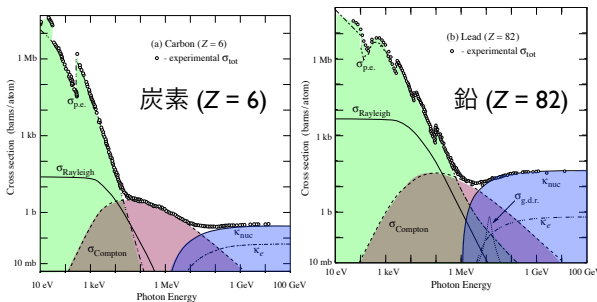
1 barn = 10⁻²⁸ m² = (10 fm)²



放射線と物質との相互作用

中性子の反応と放射化

光子の反応断面積の物質依存性



光電効果 ∝ Z^{4~5}

コンプトン散乱 ∝ Z

電子対生成 ∝ Z²

中性子の反応と放射化

中性子の弾性散乱

高速中性子は原子核と衝突を繰り返して減速する。衝突毎にエネルギーを指数関数的に減らす。

中性子は、同じ質量をもつ陽子により最も効率的に減速される。中性子の遮蔽には、水やコンクリートなど、水素原子を含む物質を用いる。

陽子など散乱された原子核が高 LET の荷電粒子として原子・分子をイオン化する。

中性子の吸収と核反応

質量数が1つ大きい原子核を形成したあと、γ線を放出。放射化の原因となる。

放射化

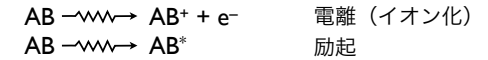
放射性物質でないものが放射線照射によって放射性を帯びること。

中性子や、10 MeV以上のγ線による核反応で放射性核種が生じることがある。

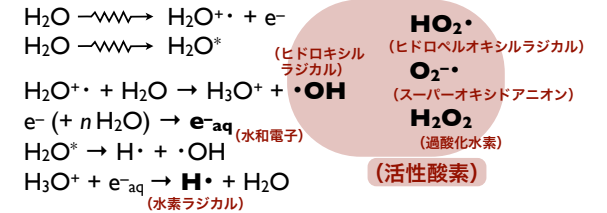
通常の放射性核種によるβ線やγ線、原子からのX線などでは起こらない。

加速器施設や原子炉などの第一種管理区域では放射化に注意が必要。

放射線が誘起する素反応 (一部抜粋)



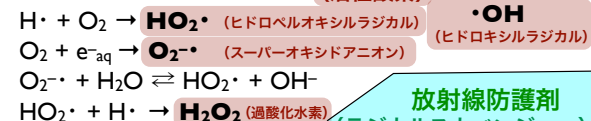
水中での反応



水中での反応



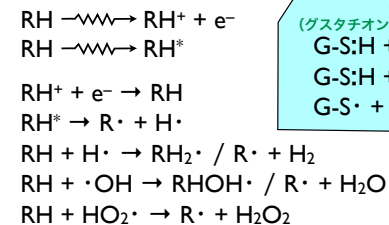
酸素効果



放射線防護剤 (ラジカルスカベンジャー)

SH基, S-S 結合
 例: システイン、システアミン (グスタチオン)
 $G-S:H + H\cdot \rightarrow G-S\cdot + H_2$
 $G-S:H + R\cdot \rightarrow G-S\cdot + RH$
 $G-S\cdot + G-S\cdot \rightarrow G-S-S-G$

有機物の放射線化学反応



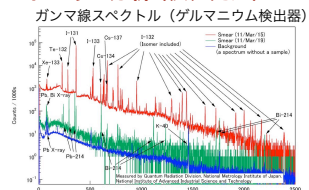
空間線量率測定 表面汚染検査



計数 (cps = counts per second)

表面汚染検査計 (例: GM サーマイメータ) 空間線量計 (例: NaI(Tl) サーマイメータ)

エネルギー分析 (核種同定)



放射線の測定

検出器

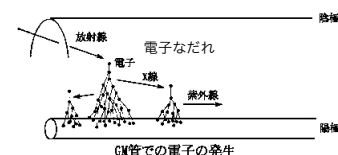
気体の電離を利用
 電離箱・比例計数管・GM管
 シンチレータ + 光電子増倍管
 NaI, CsI, plastic scinti., ZnS
 半導体検出器
 Ge, Si(Li)

食品検査 食品検査用ゲルマニウム検出器

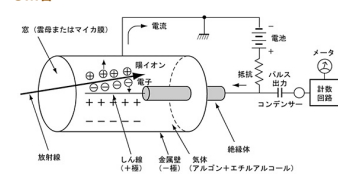


気体の電離を利用する放射線計測

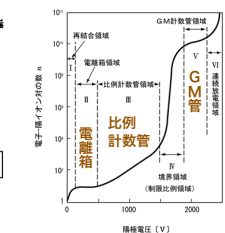
電離箱, 比例計数管, GM管 (ガイガー・ミュラー管)



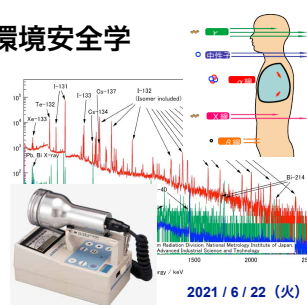
GM管



電離箱



放射線の科学と安全

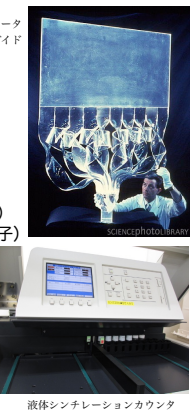


第3話 放射線計測学・環境放射化学
 放射線の単位・線量計算
 東京大学 大学院理学系研究科 放射線管理室 鳥居 寛之



放射線照射による物質の蛍光発光 シンチレータ (Scintillators)

- 無機: NaI (TI), CsI (TI) (γ線, X線)
- BGO, GSO など (γ線, X線)
- ZnS (Ag) (α線)
- BaF₂
- 有機: プラスチックシンチレータ (電子線) (荷電粒子)
例: PPO, POPOP / ポリスチレン
- 液体シンチレータ (β線)
例: p-テルフェニル / トルエン, キシレン

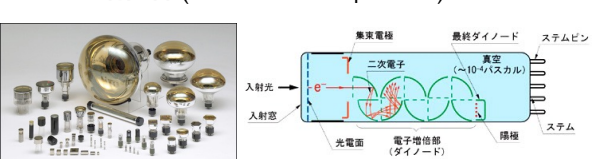


電気パルス: タイミング: 粒子透過時刻
 : パルス高 : エネルギー

放射線計測学



光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)



光 ⇒ 光電効果 ⇒ 電子増幅 ⇒ 電流
 シンチレータとの組み合わせ Scintillator
 放射線 ⇒ 分子の励起 ⇒ 蛍光
 光 ⇒ 光電子増倍管

放射線の測定 計数 (cps = counts per second)

サーベイメータ 【空間線量率測定】

$\beta(\gamma) / \gamma$ $\beta(\gamma) / \gamma$

GM管 電離箱

$\beta(\gamma)$ γ 【表面汚染検査】

気体の電離 GM管

γ $\beta(\gamma)$

シンチレーション (放射線照射による物質の蛍光発光)

α

CsI (Tl) NaI (Tl) ZnS (Ag)



放射線の測定

半導体検出器 (Semiconductor detectors)

例: Si(Li) 検出器 (X線) Ge 検出器 (高エネルギー分解能) (γ線・X線)

放射線 ⇒ 電離 ⇒ 電子正孔対 ⇒ 電荷測定

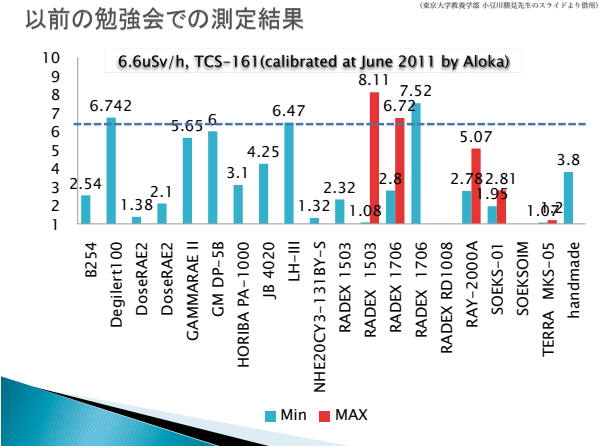
電気パルス: パルス高: エネルギー

エネルギー分析 (核種同定)

試料測定

γ ゲルマニウム検出器 (Ge detector)

食品検査用ゲルマニウム検出器



壊変図式

例: $^{137}_{55}\text{Cs}$ (30.17 a) → $^{137}_{56}\text{Ba}$ (2.55 m)

$^{137}_{55}\text{Cs}$ (30.17 a) → $^{137}_{56}\text{Ba}$ (2.55 m) (β崩壊)

$^{137}_{56}\text{Ba}$ (2.55 m) → $^{137}_{56}\text{Ba}$ (stable) (γ崩壊)

β線のエネルギースペクトル (一般例)

エネルギー E_β

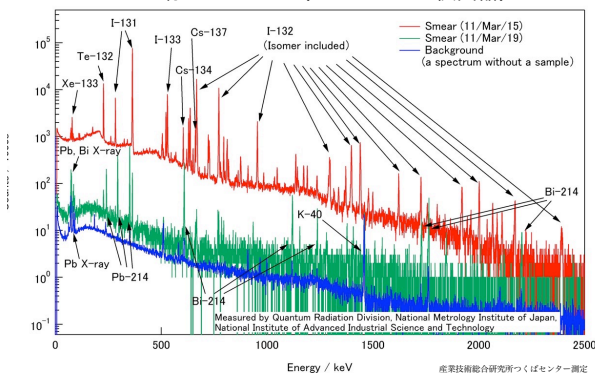
β線 (連続スペクトル) $n \rightarrow p + e + \bar{\nu}_e$ (β)

γ線 (線スペクトル=決まったエネルギー) γ 線のエネルギーで核種を同定

$^A_Z N^* \rightarrow ^A_Z N + \gamma$

エネルギー分析 (核種同定)

ガンマ線スペクトル (ゲルマニウム検出器)



どうやって測っている? (I)

100 Bq/kg = 10 Bq / 100 g

検出効率 1% 程度
(立体角・Ge結晶による検出効率)

^{134}Cs と ^{137}Cs の放射能比は 1:1
(福島原発事故当時)

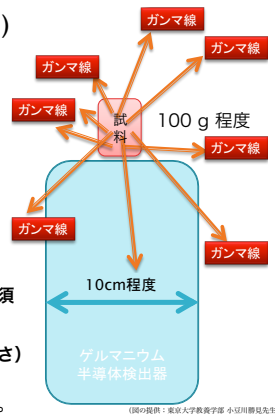
基準値は、測定上はそれぞれの核種で
0.05 cps / 100 g に相当
(20秒に1カウント!)

低バックグラウンド環境での測定が必須
(環境放射線の遮蔽)

長時間の測定が必要 (統計学的不確かさ)
(最低でも1時間以上の測定)

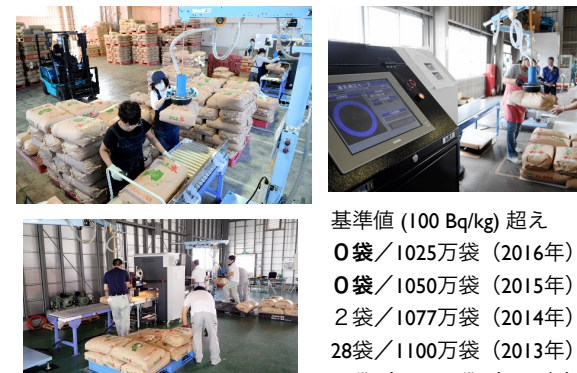
短時間では検出限界値が低くできない。

⇒ N.D. (Not Detected = 不検出) ≠ 0 Bq (不存在)



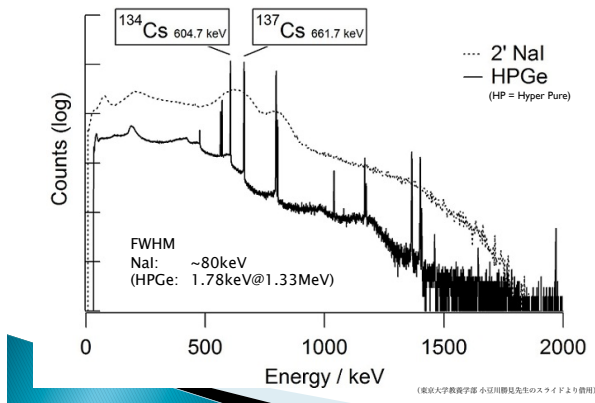
(図の原典: 東京大学教養学部 小豆川勝見先生のスライドより引用)

福島米の全量全袋検査



基準値 (100 Bq/kg) 超え
0袋 / 1025万袋 (2016年)
0袋 / 1050万袋 (2015年)
2袋 / 1077万袋 (2014年)
28袋 / 1100万袋 (2013年)
71袋 / 1034万袋 (2012年)

γ線スペクトルの比較 (NaIカウンター vs Ge半導体検出器)



10試料の測定結果(詳細)

No.	試料	採取場所	^{134}Cs (Bq/kg)	^{137}Cs (Bq/kg)
1	畑の土	練馬区内	ND(5.56)	14.1±2.17
2	ジャガイモ	練馬区内	4.58±0.55(0.23)	7.16±0.86(2.33)
3	培養土	練馬区内	5.95±1.43(5.82)	9.35±1.89(6.78)
4	梅	練馬区内	ND(2σ)(3.98)	ND(2σ)(4.04)
5	干し椎茸	群馬産	ND(26.6)	ND(29.4)
6	路傍の土	練馬区内	4110±20.9(24.6)	6330±38.7(21.6)
7	生椎茸	富山産	ND(5.65)	ND(5.73)
8	カツオ	?	ND(4.12)	ND(5.32)
9	田圃の土	練馬区内	185±11.6(37.5)	298±19.4(33.5)
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42±0.29(1.01)	ND(2σ)(1.38)

(東京大学教養学部 小豆川勝見先生のスライドより引用)

食品中の放射性物質の基準値

放射性セシウムの基準

食品	暫定基準 2011	新基準案 2012
野菜類	500%	100%
穀類	500%	100%
肉・卵・魚・その他	500%	100%
飲料水	200%	10%
牛乳・乳製品	200%	50%
		乳児用食品 50%

(1%あたり)

100 ベクレルの放射性セシウムは何グラムか。

(そもそも、福島第一原発から環境中に放出された放射性物質は全部でどのくらいの量か。)

放射線はどうやって測るのか。検出限界以下 (N.D.) とは?

(検出限界値を限りなく下げると、スクリーニングで多量汚染のものを確実に避けることが重要)

一般食品の新基準値の出し方
食品からの被曝線量の限度

飲料水分 一般食品に割り当てられる分

1mSv/年 = 0.1mSv/月 = 0.9mSv/年

食品に含まれるセシウムが1kgあたり何Bqまでなら0.9mSvを超えないか?

食べる量、種類などをとくに年代別に計算

年齢区分	性別	限度値 (Bq/kg)
1歳未満	男女平均	460
1~6歳	男	310
	女	320
7~12歳	男	190
	女	210
13~18歳	男	120
	女	150
19歳以上	男	130
	女	160
妊婦		160

新基準値を割り下げる

100 Bq/kg

食品に含まれる放射性物質の測り方

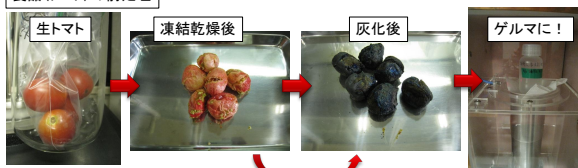
食品の放射能は正確に測りにくい!

- 水っぽい(水は放射線の遮蔽剤)
- 隙間があったり密度が一定でなかったり
- ひとつひとつのサンプルには揺らぎがある

なぜ灰にするの?

含まれる放射性物質を濃縮する
(焼却炉の灰と同じ理由)ことで、検出限界値を超えて測りやすくする

食品(トマト)の前処理



現在の放射性物質の基準値

核種	基準値 (Bq/kg)
放射性ヨウ素(^{131}I)	飲料水 300
放射性セシウム ($^{134+137}\text{Cs}$)	飲料水 10
	一般食品 100



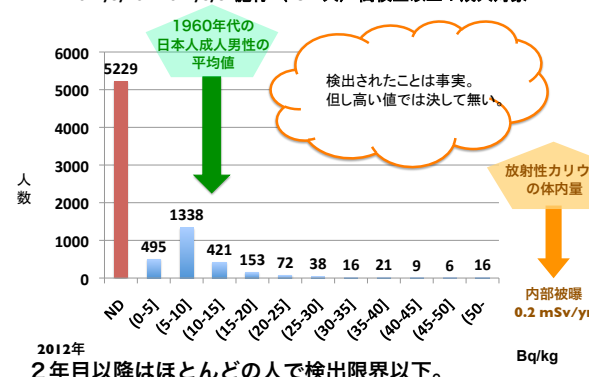
内部被曝の評価

WBCによる体内放射能の測定

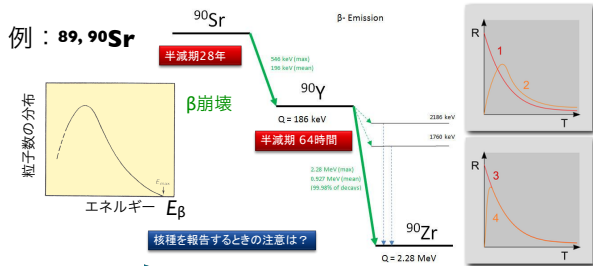
ホールボディカウンター

(東京大学医科学研究所 坪倉正治先生のスライドより引用、一部改変)

南相馬市立総合病院で計測したセシウム137体内放射能量別被験者数
2011/9/26~2012/3/31施行 (7814人) 高校生以上+成人対象



β崩壊核種の同定 (γ線を出さないもの) **化学分離が必須**



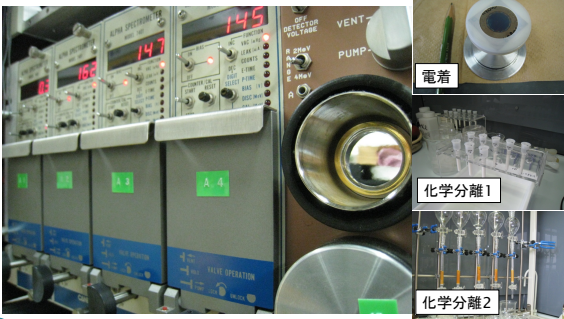
α崩壊核種の同定 **アルファスペクトロメトリ**

例: $^{238,239,241}\text{Pu}$

アルファ線の測定装置

U, Th, Pu, Am, Cm...はこれ!

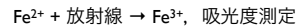
▶ アルファスペクトロメトリ



分析はものすごく大変。
ターゲット元素を化学分離 → 精製 → 電着(線源を作る) → α線計測

線量計 (個人線量計、環境放射線測定)

フリック線量計 Fricke dosimeter



熱ルミネッセンス線量計 TLD: thermoluminescence dosimeter

蛍石などの固体結晶 + 放射線 → (加熱) → 蛍光
電子・正孔が格子欠陥に捕えられる

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

銀活性リン酸塩ガラス + 放射線 → (紫外線) → 蛍光

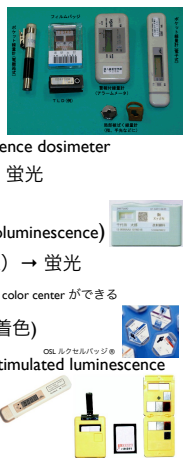


ガラス線量計: コバルトガラス → 発光中心 (着色)

光刺激ルミネッセンス線量計 OSL: optically stimulated luminescence

ポケット線量計: 電離箱、半導体検出器

フィルムバッジ: 銀塩写真フィルム AgBr



放射線の単位

放射線量の単位

放射場には
多様なエネルギーの
多種放射線 (光子、粒子線) が
様々な方向を向いて飛び交い、
それぞれの強度で存在している。

これをひとつの物理量で表すのは
一筋縄ではいかない。

様々な放射線量の単位が存在する。

放射線量の単位

放射計測量 **radiometric quantity**

粒子フルエンス fluence Φ [cm^{-2}]

エネルギーフルエンス energy fluence Ψ [MeV cm^{-2}]

線量計測量 **dosimetric quantity**: エネルギー変換
カーマ **kerma** (Kinetic Energy Released in Material / MATter) K [J / kg] = [Gy]

シーマ **cema** (Charged particle Energy imparted to MATter) C [J / kg] = [Gy]

照射線量 **照射線量** X [C / kg], [R] | $R \approx 2.58 \times 10^{-4} \text{ C} / \text{kg}$

線量計測量 **dosimetric quantity**: エネルギー付与
吸収線量 D [J / kg] = [Gy], [erg / g] = [ram] | $\text{Gy} = 100 \text{ ram}$



Röntgen Gray

物質が吸収したエネルギー (単位質量あたり) **放射線量の単位**

吸収線量 D [J / kg] = [Gy] **グレイ**

放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

等価線量 $H_T = W_R \times D$ [Sv] **シーベルト**

放射線加重係数 W_R

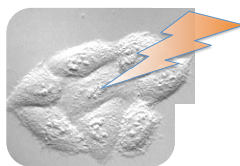
放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線加重係数 W_R
光子 (X線・γ線): 全てのエネルギー	1
電子 (β線) および ミュー粒子: 全てのエネルギー	1
中性子: 10keV 以下	5
10keV ~ 100keV	10
100keV ~ 2MeV	20
2MeV ~ 20 MeV	10
20MeV 以上	5
反陽子以外の陽子エネルギー 2MeV 以上	5
アルファ粒子 (α線)	20
核分裂片	20
重原子核	20

[出典] 日本アイソトープ協会:ICRP Pub 60, 国際放射線防護委員会の1990年勧告, 丸善, p7(1991)

赤字 ICRP 2007

全身被曝での影響に換算 (臓器ごとに組織加重係数 W_T をかけて合算)

実効線量 $E = \sum W_T \times H_T$ [Sv] **シーベルト**



細胞の核に放射線が照射

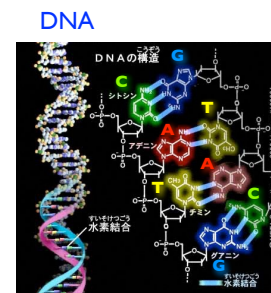
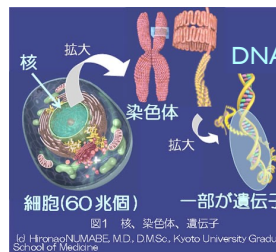
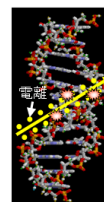
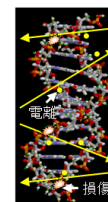


図1 核、染色体、遺伝子
[c] Hirongsoo NUMABE, M.D., D.M.Sc., Kyoto University Graduate School of Medicine

放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

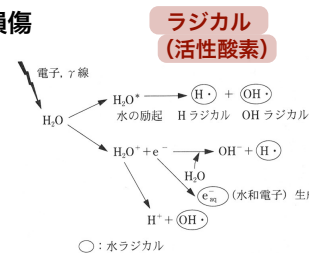


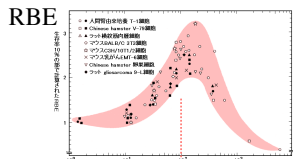
図 6-5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略 (原簿「放射線同位元素等取扱要領」, オーム社, より引用)

LET: 線エネルギー付与

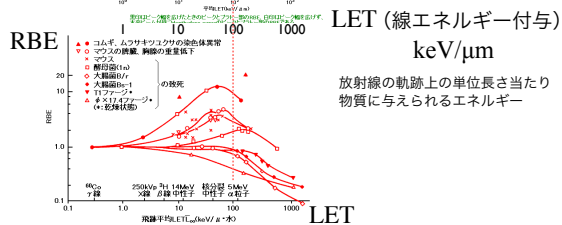
放射線の直接作用: 荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く **高 LET 放射線**

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
β線, γ線



生物学的効果比
RBE
(Relative Biological Effectiveness)



放射線の軌跡上の単位長さ当たり物質に与えられるエネルギー

図2 体細胞の効果に対する各種放射線のRBEとLETの関係
【出典】近藤 昭平「分子放射線生物学」東京大学出版会(1992年)、p.174

放射線の種類と被ばく

- α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。
- β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。
- γ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γ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。

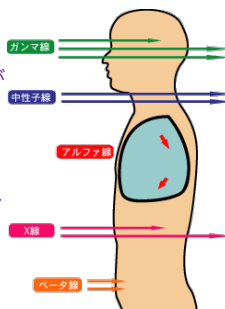


図3 人体を透過する放射線

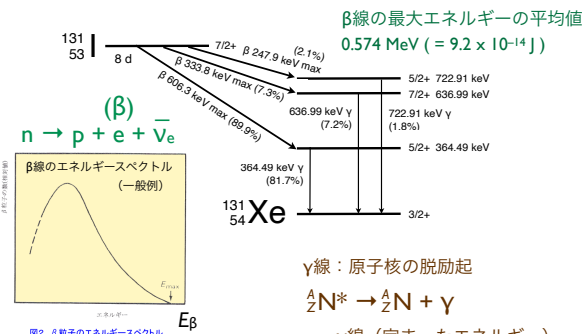


図2 β粒子のエネルギースペクトル

β線のエネルギースペクトル (一般例)

β線 (連続スペクトル)
エネルギーの平均値 ~ 0.3 MeV

γ線: 原子核の脱励起
 $\frac{A}{Z}N^* \rightarrow \frac{A}{Z}N + \gamma$
γ線 (定まったエネルギー)

実効線量 effective dose $E [J/kg] = [Sv]$

$$E = \sum_T w_T \times H_T = \sum_T w_T \times \left(\sum_R w_R \times D_{TR} \right)$$

組織 T の組織加重係数	組織加重係数: w_T	組織 T における等価線量 [Sv]	組織 T における平均吸収線量 [Gy]
腸管・組織			
生殖腺	0.20	0.08	
骨髄(赤色)	0.12	0.12	
結腸	0.12	0.12	
肺	0.12	0.12	
胃	0.12	0.12	
脾臓	0.05	0.04	
乳房	0.05	0.12	
肝臓	0.05	0.04	
食道	0.05	0.04	
甲状腺	0.05	0.04	
皮膚	0.01	0.01	
骨表面	0.01	0.01	
脳			
唾液腺	0.01	0.01	
残りの器官・組織 ^{*)}	0.05	0.12	
合計(全身)	1.00	1.00	

左欄黒字 ICRP 1990
右欄赤字 ICRP 2007

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 (γ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ふことを防ぐ。



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 ⇒ 筋肉、I ⇒ 甲状腺、Sr ⇒ 骨、Pu ⇒ 肝臓、...) に注意しつつ、**予測線量**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 (131I による甲状腺予測線量)

放射線防護のための線量 protection quantity

予測線量 committed dose (内部被曝) [Sv]

予測等価線量

予測実効線量

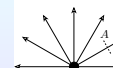
体内摂取した放射性物質から出るすべての放射線を、摂取した時点で被曝したと見なして計算をする。Bq から Sv への換算には、物理学的半減期のみならず排泄機能による生物学的半減期も考慮のうえ、50年間分の積分をする。

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	5.8×10^{-10}	5.8×10^{-9}
P-32	14.3日	2.4×10^{-9}	3.4×10^{-9}
K-40	12.8億年	6.2×10^{-9}	2.1×10^{-9}
I-131	8.04日	2.2×10^{-8}	7.4×10^{-9}
Sr-90	29.1年	2.8×10^{-8}	1.6×10^{-7}
Cs-137	30.0年	1.3×10^{-8}	3.9×10^{-8}

経口摂取	乳児 (3ヶ月)	幼児 (1歳)	子供 (2-7歳)	成人
I-131	1.8×10^{-7}	1.8×10^{-7}	1.0×10^{-7}	2.2×10^{-8}

外部被曝の線量計算



$\dot{\Phi}$: 粒子フルエンス率

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

γ線の放出率

P: 放射能 [Bq]

$\mu^{\text{air}} = 0.0100 \text{ m}^{-1}$ 空気の種類依存定数

\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

^{137}Cs γ線は空气中 70 m で半減する。

$$\dot{H}/\dot{\Phi} = h\nu (\mu_{\text{en}}/\rho)^{\text{water}} = 3.5 \times 10^{-16} \text{ Sv m}^2 \quad (\mu_{\text{en}}/\rho)^{\text{water}} = 0.033 (\text{g/cm}^2)^{-1}$$

水の質量エネルギー吸収係数

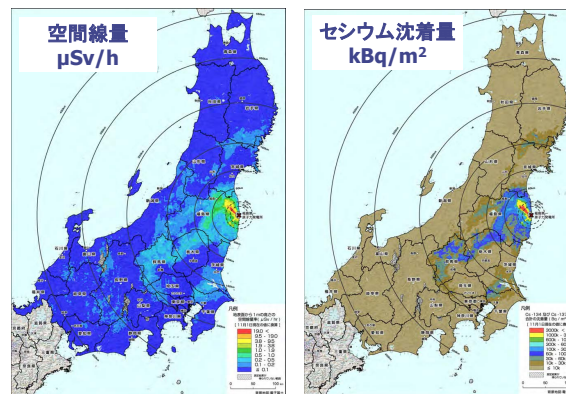
平面が一様に放射性物質で汚染されている場合

^{137}Cs : 2.1 (μSv/h) / (MBq/m²) IAEA による値

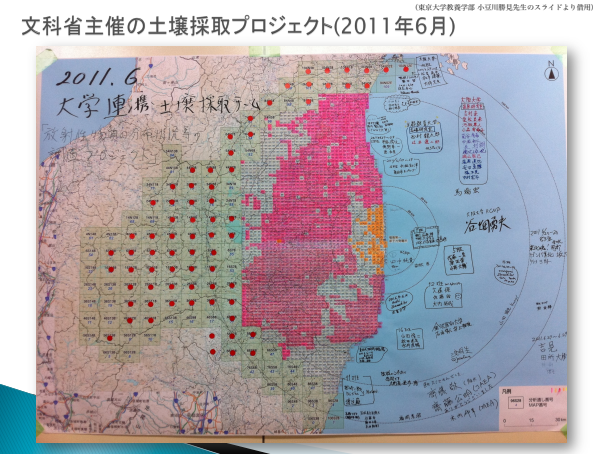
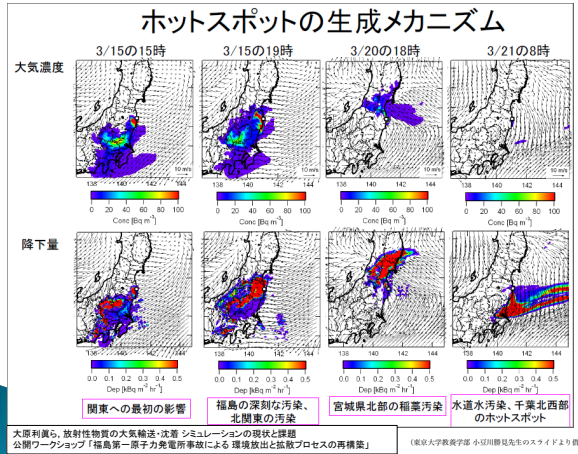
高さ 1 m でも 50 cm でもさして違いない

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



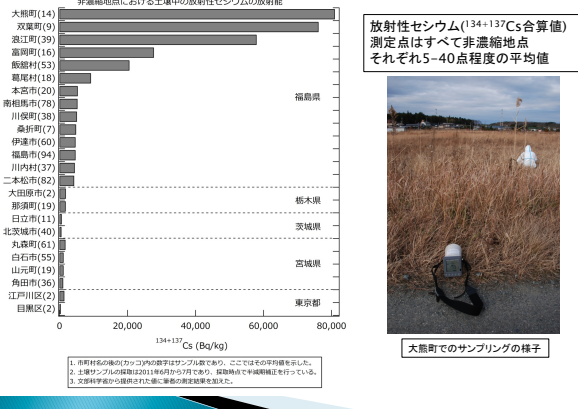
環境放射化学



原発北西方向の汚染と「ホットスポット」



広域的な放射性セシウムの評価(文部科学省提供)+自分のデータ



福島での測定例(東京大学 塩沢らによる)

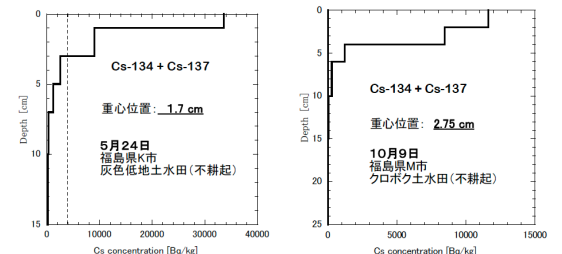
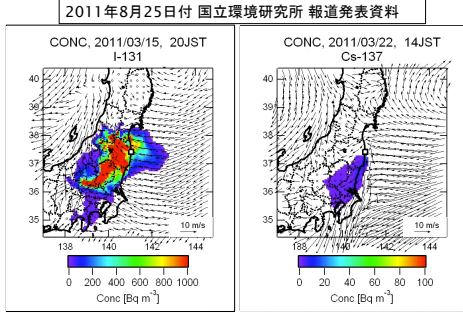


図1-a 水田土壌の放射性Csの鉛直分布例1
図1-b 水田土壌の放射性Csの鉛直分布例2

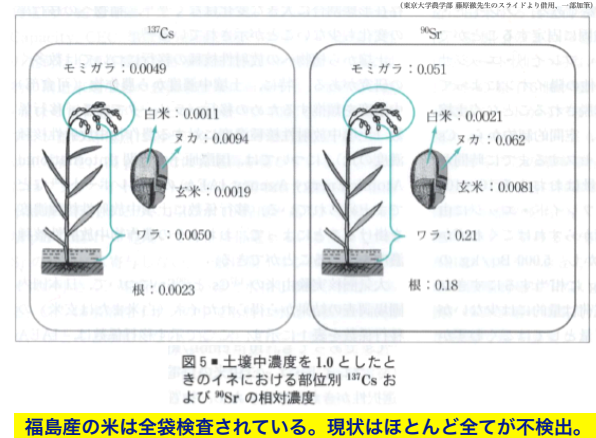
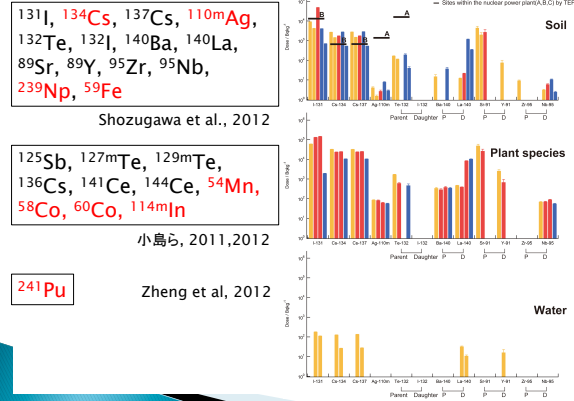
137Csは浅い。表土5cm以内にほぼ収まっている。
うち大半が上層1cmにある。

拡散シミュレーションと実際に観測された放射能の差違



実測値との差違を議論したい

原発周辺で観測された核種



濃縮の顕著な例-茨城県守谷市 放射性物質の都市濃縮

守谷市雨水・下水幹線



住宅地からの雨水の処理



公園は雨天時の調整池として活用



雨天時

ホットスポット・ホットエリアの形成

これまでに測定してきた守谷市内の地点(東大教養:放射化学:小豆川氏)市役所周辺(大柏)・プロムナード水路・城址公園・愛宕中裏手・郵便局・松ヶ丘・五反田川・みずき野・けやき台公園など...

(東京大学教養学部 小豆川明見先生のスライドより引用)



除染

写真: 福島大学キャンパスのモデルケース

セシウム元素: 土壌表面

土壌の引き剥がし、天地返し

拭き取り、高圧洗浄

吸着剤 (ゼオライト・プルシアンブルー・粃殻・稲藁)

除染物の保管
焼却処分



何もなくても DNA 損傷は自然発生している (複製ミスなど)

傷の種類	自然の集(細胞/日)	X線誘発の集(細胞/1 Sv)
塩基損傷	20,000	300
1本鎖切断	50,000	1,000
2本鎖切断	50(推定 ¹⁰⁰)	40

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

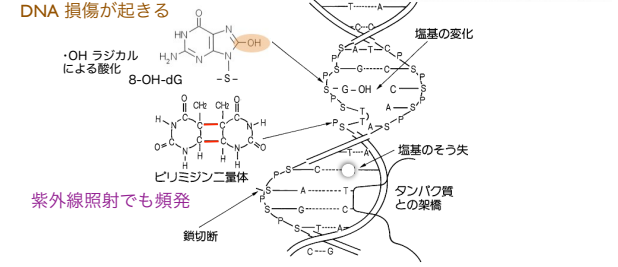


図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNAに見られる種々の損傷

【出典】江上信雄: 生体物と放射線, 東京大学出版会, 1975

図は一部内容を改変。



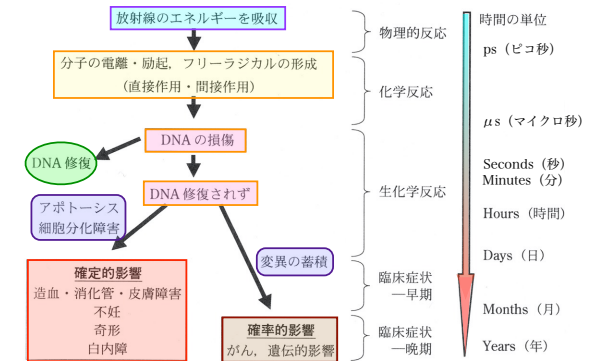
東京大学大学院総合文化研究科 環境安全学

放射線の科学と安全

2021/6/22 (火)

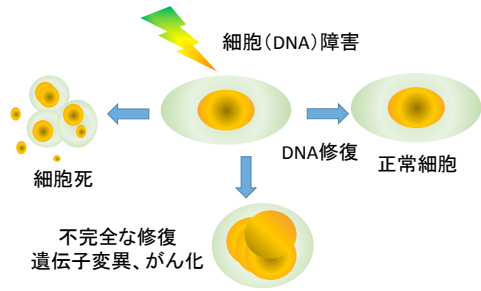
第4話 放射線生物学・放射線防護学 リスクコミュニケーション

東京大学 大学院理学系研究科 放射線管理室 鳥居 寛之



放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

細胞死とがん化



東京大学アソシアートフロンティアセンター 放射線防護学 新規講義スライド(2019)より引用



放射線被曝の確定的影響

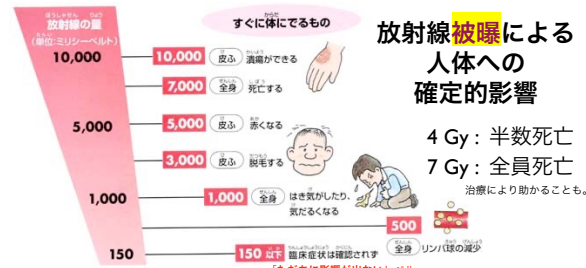
線量閾値あり

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 (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	腸管 (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 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	2週間	7-8週間	1/2-3年
照射による変化	免疫能力低下 血液凝固時間延長	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

図1 細胞再生系

(造血組織、腸上皮、皮膚、精巣、水晶体の分化、成熟過程による変化)

【出典】吉井義一：放射線生物学概論 [第2版] (1922)



放射線被曝による人体への確定的影響

4 Gy: 半数死亡
7 Gy: 全員死亡

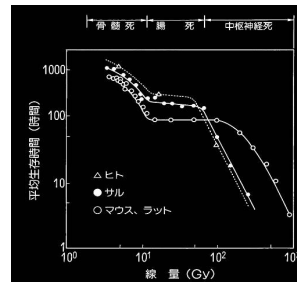
治療により助かることも。

組織再生系	造血組織	腸上皮	皮膚	精巣	水晶体
幹細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)	リンパ球 好中球 赤血球 血小板	腸管 (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 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	2週間	7-8週間	1/2-3年
照射による変化	免疫能力低下 血液凝固時間延長	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

東海村 JCO 事故
チェルノブイリの消防隊員

急性放射線障害

全身被曝による死亡



骨髄死 4 Gy
腸管死 10 Gy
中枢神経死 20-100 Gy以上

東海村 JCO 事故
チェルノブイリの消防隊員
原爆

(東京大学放射線防護学 放射線防護学 新規講義スライド(2019)より引用、一部加工)



広島 原爆ドーム

γ線による 推定被曝線量 (mGy)
中性子線による



放射線の健康影響

確定的影響

放射線によって細胞や組織が障害される線量の高いところで生じる (閾値がある)

重篤度が線量に依存する
急性: 消化管障害、造血障害、不妊 (生殖細胞) など
晩発性: 白内障

確率的影響

放射線によって細胞の DNA に損傷が生じる
ほとんどは修復されるが、修復できなかった場合、他の発がんメカニズムと合わさって、長期間かかってがんが生じる可能性がある。
線量に応じて確率が増す (閾値はないとする)
線量と発症後の重篤度とは関連しない
晩発性: **がん**と、遺伝的影響 (生殖細胞) の可能性

低線量被曝では確定的影響は起きない。
「ただちに影響が出ないレベル」
確率的影響(の可能性)が議論の対象となる。

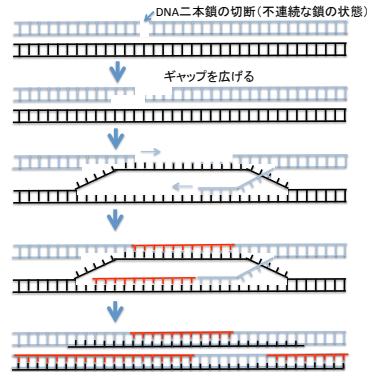
- ❖ がん
- ❖ 遺伝的影響の有無

あくまで確率でしか議論できない。
リスクの確率。

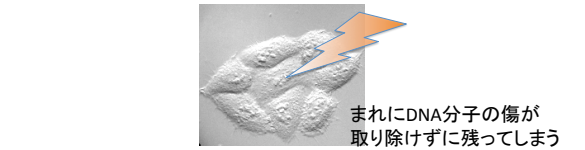
しかしそもそも、放射線を浴びなくても確率はゼロではない。
(日本人の死亡者の3人に1人はがんが原因。)

疫学調査の結果から結論を導きだすのは統計学的に困難。

相同組み換え修復

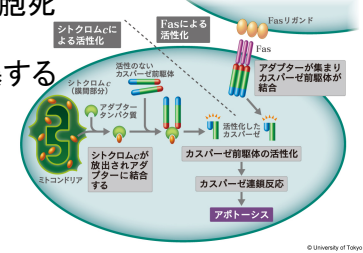


分裂細胞の場合

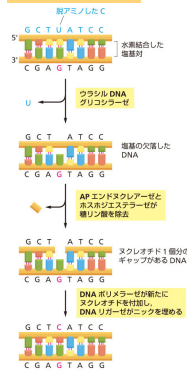


プログラム細胞死

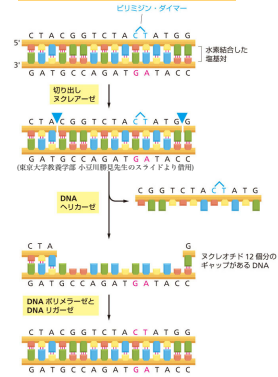
細胞が自爆する



塩基除去修復



ヌクレオチド除去修復



The Nobel Prize in Chemistry 2015



Photo: Cancer Research UK
Tomas Lindahl
Prize share: 1/3

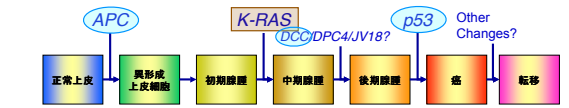


Photo: K. Wolf/AP Images for HHMI
Paul Modrich
Prize share: 1/3



Photo: M. Englund, UNC School of Medicine
Aziz Sancar
Prize share: 1/3

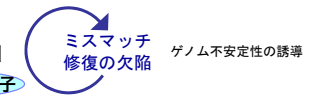
The Nobel Prize in Chemistry 2015 was awarded jointly to Tomas Lindahl, Paul Modrich and Aziz Sancar "for mechanistic studies of DNA repair".



多段階発がん仮説

がん=細胞の異常増加

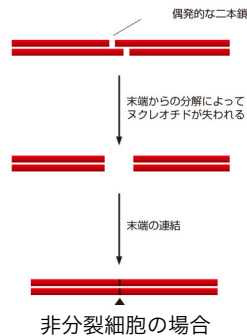
がん遺伝子 / がん抑制遺伝子



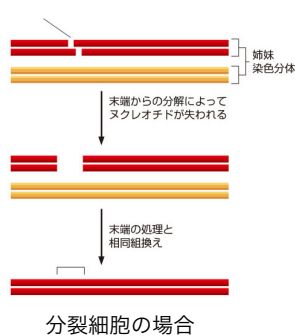
- 放射線による直接電離、および水のイオン化で生じるラジカルはたしかにDNAに損傷を与える(おそらく線量に比例)。なかでも二本鎖切断が特に問題となる(高LETを与えるα線、中性子線は生物学的効果大きい)。
- しかしそもそもDNA損傷は化学物質など放射線以外の要因によっても、また普段のDNA複製の際の複製エラーでも生じている。
- ヒトを含む生物の細胞には、DNA損傷に対する多種多様な修復機能が備わっている。
- それらDNA修復遺伝子自身が損傷を受けると修復機能が低下するが、DNA損傷が残ってもすぐガンになるのではなく、細胞がガン化するのは多段階のガン遺伝子(アポトーシス(細胞死)に関与するp53ガン抑制遺伝子を含む)に次々に突然変異が生じた場合。
- 一方で、DNA修復遺伝子に異常のある病気の人は、通常の人よりはるかにガンにかかりやすい。(色素性乾皮症、運動失調性毛細管拡張症、ナイミーヘン切断症候群など)

DNA二本鎖同時切断の場合の修復

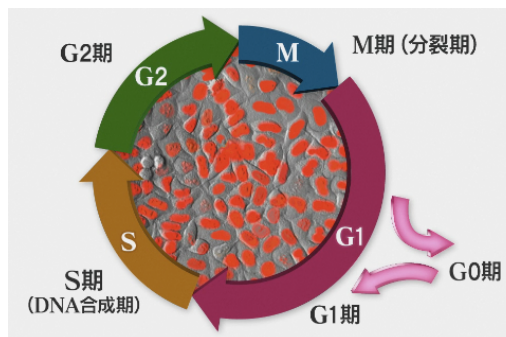
非同相末端結合修復



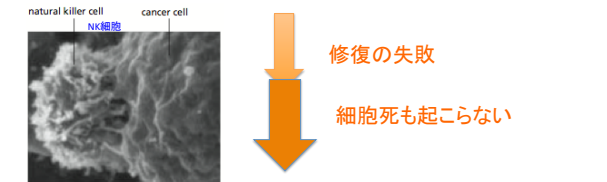
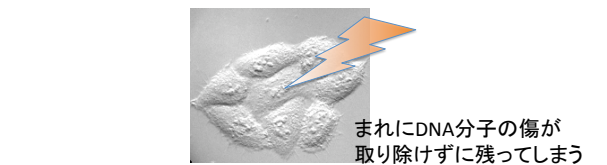
相同組み換え修復



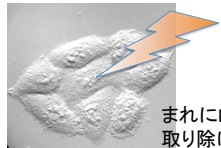
細胞周期と放射線感受性



チェックポイント機構



自然免疫系にとらえられる



まれにDNA分子の傷が取り除けずに残ってしまう

修復の失敗

細胞死も起こらない

NK細胞も取り逃がした(自然免疫系)

がん細胞が残ってしまう

良性/悪性
浸潤性

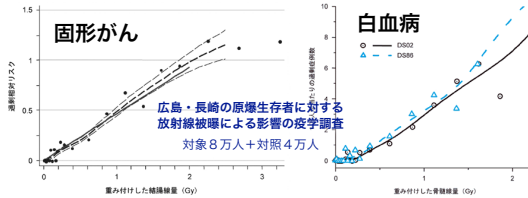


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生との放射線照射リスク (線量率) 1958-1998年。大いに関連は、放射線照射後の平均年齢に達した後に発生した。完全平均線量率対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。左い線量は、線量率別リスクを平均化したシンドラマトリクスな線量率であり、右い線量はこの平均化線量率の上下1標準差を示す。

表. LSS集団における固形がん発生とのリスク (線量率) 1958-1998年					表. LSS集団における白血病による死亡との観察と推定過剰率 1950-2000年				
積み付けた線量率 (Gy)	対象者数	観察数	推定過剰数	発生率	積み付けた線量率 (Gy)	対象者数	観察数	推定過剰数	発生率
0.005-0.1	27,769	4,406	81	1.8%	0.005-0.1	30,387	69	4	6%
0.1-0.2	5,827	946	75	7.6%	0.1-0.2	5,841	14	5	38%
0.2-0.5	5,935	1,144	179	15.7%	0.2-0.5	6,304	27	10	37%
0.5-1.0	3,173	688	206	33.5%	0.5-1.0	3,963	30	19	63%
1.0-2.0	1,647	450	196	44.2%	1.0-2.0	1,972	39	28	72%
>2.0	584	185	111	61.0%	>2.0	737	25	28	100%
合計	44,833	7,851	848	10.7%	合計	49,204	204	94	46%

(注) 放射線影響研究所 データ
低線量被曝の影響について疫学調査の結果から結論を導きだすのは統計学的に困難。

低線量・低線量率の被曝とガン死亡



チェルノブイリ原発事故

チェルノブイリ原発
黒鉛炉
格納容器なし
1週間燃え続けた
福島第一原発
沸騰水型軽水炉
格納容器あり
水素爆発・汚染水流出

131I (ヨウ素131) total 200京ベクレル !!

初期消火に当たった原発作業員・消防隊員が致死・重致死亡率の被曝。28人死亡。

事故処理に当たった軍人ら「リクビダール」60万人が数百 mSv 被曝

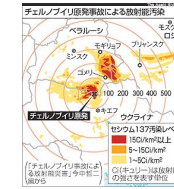
3 km にあるプリピャチ市民は翌日に強制避難 半径 10 km 圏内の避難が1週間遅れた。

(最大で 750 mSv の被曝) 30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

一般住民で確認された健康への影響は子どもの甲状腺ガンの増加のみ。

毎年 1/300,000人 → 1/10,000人 (患者数 5000人、死亡 15人)

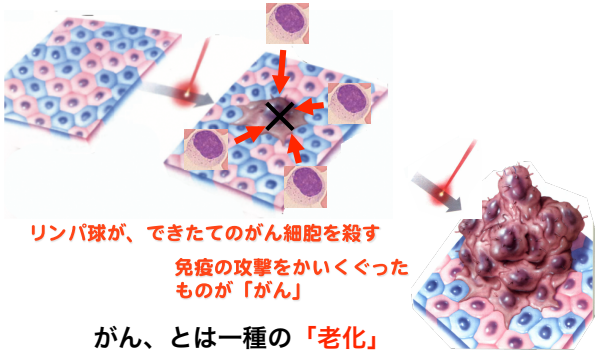
甲状腺平均被曝量 2 Gy !! と、ずっと大きいストレスによる失調



がん、とは?

(東京大学医学部附属病院放射線科 中田一光先生のスライドより引用)

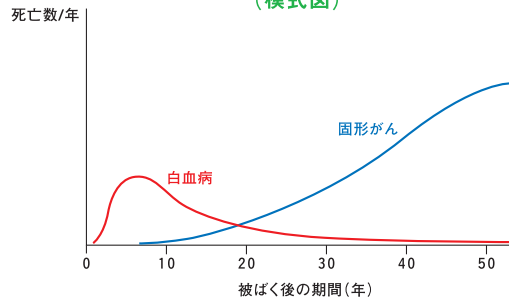
がん細胞は毎日5000個もできています!!



リンパ球が、できたのがん細胞を殺す
免疫の攻撃をかわくぐったものが「がん」

がん、とは一種の「老化」

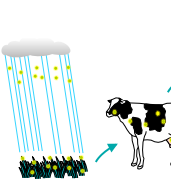
原爆放射線に関連する死亡数の時間的経過 (模式図)



低線量・低線量率の被曝とガン死亡



チェルノブイリ原発事故



131I (ヨウ素131) total 200京ベクレル !!

一般住民で確認された健康への影響は子どもの甲状腺ガンの増加のみ。

(地産地消の牛乳による摂取が問題) 毎年 1/300,000人 → 1/10,000人

(患者数 5000人、死亡 15人) 甲状腺平均被曝量 2 Gy

= 2000 mSv !! (10 Gy 以上の被曝も!) と、ずっと大きいストレスによる失調

いわき市、飯館村のこどもの甲状腺被曝調査 最大で 35 mSv の被曝 (甲状腺等価線量)

震災・事故による喪失感も共通

公益財団法人 放射線影響研究所 (放影研 RERF)

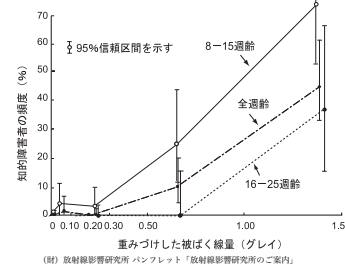


@広島市南区 比治山公園



@長崎市茶茶屋

胎内被爆者における放射線の影響 本人が胎内で被曝



チェルノブイリ事故の後、ヨーロッパ全土で不必要な堕胎が数万人以上だったともいわれる。(風評・過度の心配による犠牲)

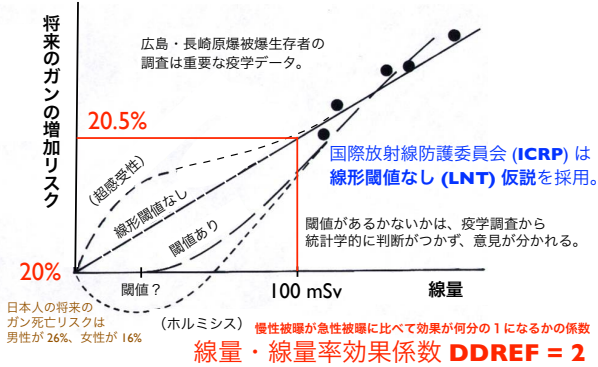
放射線による遺伝的影響は認められず

これまでのところ原爆被爆者の子供に臨床的または潜在的な影響を生じたという証拠は得られていない。事実これはマウスを用いた実験からの予測と一致しており、遺伝的变化に関する限り、ヒトは放射線に対してマウス以上に高い感受性を示すわけではないことを示唆している。

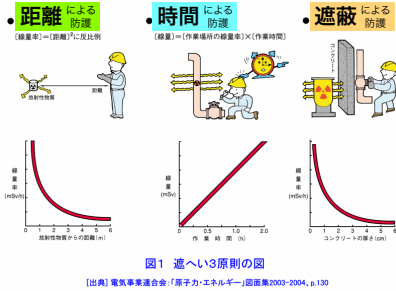
親の精子/卵子が被曝

放射線のリスク評価と防護

低線量におけるリスク評価



放射線防護



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

職業被曝 (作業者)

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 水晶体	(令和3年度から) 100 mSv / 5年 かつ 50 mSv / 年*
皮膚 妊娠中の女子の 腹部表面	500 mSv / 年 2 mSv / 期間中

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7mg/cm²、面積1cm²の皮膚についての平均線量に適用される。

2) 1985年のV1声明で実験的測定値の制限によって不要になった。

3) 1985年のV1声明で実験的測定値の制限によって不要になった。

年リスク千分の1 (ICRP 勧告)

(毎年被曝の場合、65歳までの最大値)

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 ²⁾	50 mSv/年
その他の組織	-	50 mSv/年 ³⁾

1) 1985年のV1声明で主たる限度を1年につき1mSvとして、補助的な限度を5mSv/年とした。

2) 1985年のV1声明で実験的測定値の制限によって不要になった。

3) 1985年のV1声明で実験的測定値の制限によって不要になった。

年リスク千分の1 (ICRP 勧告)

(毎年被曝の場合、65歳までの最大値)

【出典】(1990)ICRP勧告と(1977)ICRP勧告における線量限度対照表

【ICRP】1990年勧告-その要旨と考え方、第5巻第1号、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)

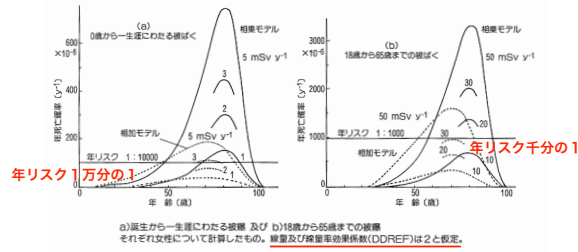


図2 生涯死亡率 (無条件年死亡率)

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

放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律 (障防法)

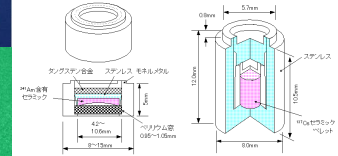
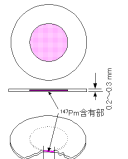
放射性同位元素等の規制に関する法律 (R I 規制法)

- 報告義務の強化
 - 危険時の措置の強化
 - 放射線障害の防止に関する業務の改善の導入
 - 教育訓練
 - 事業者責務の取り入れ
 - 法律名の変更及び法目的の追加強化
 - 防護措置(セキュリティ対策)の強化
- 平成30年4月1日 一部施行
令和元年9月1日 施行

放射線管理の法令

- RI (放射性同位元素) ・ α ・ β ・ γ ・ 陽子線 ・ 中性子線 ・ 重粒子線 & 1 MeV以上の電子線 ・ X線
- 放射線同位元素等の規制に関する法律 (R I 規制法) / 同施行令 / 同施行規則
- X線
- 電離放射線障害防止規則
 - 労働安全衛生法 / 同施行令
- 核原料物質、核燃料物質
 - 核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律 / 同施行令
- 医療および医薬品
 - 医療法施行規則
 - 医療法 / 同施行令

密封小線源



엑스선装置의 安全取扱

Safe Usage of X-ray devices



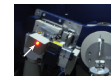
東京大学における 엑스선装置의 分類

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	

엑스선装置의 安全取扱

Safe Usage of X-ray devices



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。



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。

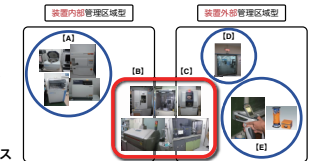


図1 東京大学における研究用엑스線装置의 分類

東京大学における 엑스선装置의 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

国際放射線防護委員会 (ICRP) や国の法令による放射線線量限度は、自然放射線を除いた追加被曝線量についてのもの、検診や治療などの医療被曝も対象外。

年間1ミリシーベルトは、国が事業所に求める基準値 (施設の遮蔽、排気や排水に関して敷地境界で守るべき値)

自然放射線との比較：放射線ゼロの場所は地球上に存在しない
ゼロリスクは存在しない

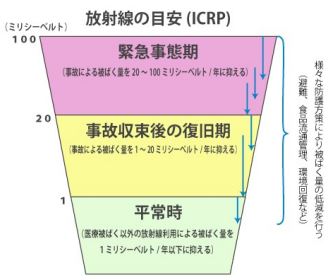
リスクが十分に小さくなるように基準値を決めている (社会的合意)

安全と危険の境界ではない

Q. 政府が計画的避難地域を指定しましたが、基準になっている20ミリシーベルトの意味について教えてください。

国内法未整備

A. 国際放射線防護委員会(ICRP)は専門家の立場から放射線防護に関する勧告を行う国際学術組織ですが、今回の基準は、このICRPの勧告を基に原子力安全委員会の助言を得て定められたと報道されています。



ICRPの2007年勧告では、非常時の放射線の管理基準は、平常時とは異なる基準を用いることとしています。

また非常時も、緊急事態期と事故収束後の復旧期を分けて、以下のような目安で防護対策を取ることとしています。現在の福島第一原子力発電所の状況は、緊急事態期に当たります。

今回の国の方針は、緊急事態期の被ばくとして定められている20~100ミリシーベルトの下限値にあたるもので、福島原発周辺の方々の被ばくが、事故による被ばくの総量が100ミリシーベルトを超えることがないような対応をしつつ、将来的には年間1ミリシーベルト以下まで戻すための防護策を講ずることを意味していると思われま。

放射線医学総合研究所ホームページ：放射線被ばくに関する基礎知識 第6版 (2011年4月)

放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

がんの原因が医学的に分かっていない
疫学調査の問題点

線形のリスクは判断し難い

統計学的有意性

影響の因果関係

科学的知見と防護学の哲学の混同

リスクをどこまで許容するか

安全と危険の線引きはできない。

他のリスクとの相対比較 (トレードオフ)

福島住民のリスクは?

住み続けるリスク 原発作業員のリスクは?

放射線の影響?、日常サービスの低下/欠如

避難生活でのリスク

慣れない土地での生活ストレス、生業・収入の損失 (社会が決める)

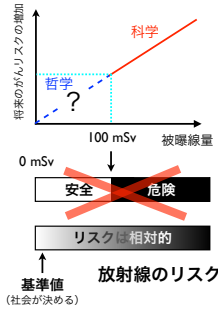
根拠のない過信・安心は問題だが、東海村 JCO 臨界事故

根拠のない恐れや不安もまた問題。パニック、風評、健康被害。

風評

風化 風評被害は落ち着きつつあるが、依然として福島土地や産物を避けようとする人も一定数存在。

風化 放射線の科学的知識を身につけずに関心風化しつつある。



科学的「確率」をどう理解するか。

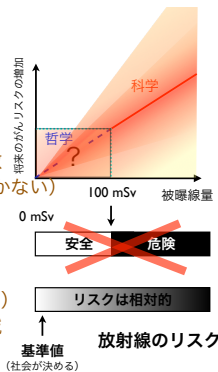
がんの影響は「確率的」に現れる

個別の事象との因果関係は分からない
放射線によるがんは特徴がないのが特徴 (ほかの要因によるがんと全く区別がつかない)

その確率さえ不確かさを伴う

トランスサイエンス

科学に問うことはできるが、科学 (だけ) では答えることのできない問題群の領域



放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

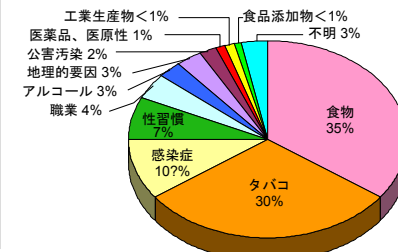
受動喫煙の女性	1.02~1.03倍
野菜不足	1.06倍
100~200ミリシーベルトを浴びる	1.08倍
塩分の取りすぎ	1.11~1.15倍
運動不足	1.15~1.19倍
200~500ミリシーベルトを浴びる	1.19倍
肥満	1.22倍
500~1000ミリシーベルトを浴びる	1.4倍
毎日2合以上の飲酒	1.6倍
喫煙	1.6倍
毎日3合以上の飲酒	1.8倍
1000~2000ミリシーベルトを浴びる	1.8倍

※相対リスクは放射線 (国際放射線防護委員会) の勧告と比較した数字

表の値は短時間での被曝の場合。

(低線量率では損傷の修復のためリスクはより小さい。どれだけ小さいかは議論のあるところで、結論は出ていない。ICRP は係数 1/2 を採用。)

ヒトのがんの原因と関連のある因子

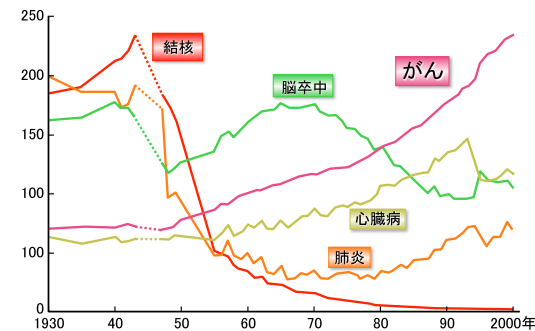


(R.Dool and R.Peto, 1981)

がん死中にしめる各因子の割合 (%)

(東京大学医学部附属病院放射線科 中川恵一先生のスライドより引用、一部改変)

日本人の2人に1人が、生涯のうちにがんにかかり、毎年死亡者のうち3人に1人はがんで死んでいる。



がんで死なないためには、
がんにならないのが一番
+ なくても、早期発見で完治させる
早期発見 = がん検診
(症状に気づいてからでは遅い)

- がんにならない生活習慣
- タバコは吸わない
 - 酒はひかえめ (赤くなる人は特に)
 - 肉と塩分はひかえめ
 - 野菜を十分に
 - 運動

東大医学部附属病院
中川 恵一 先生



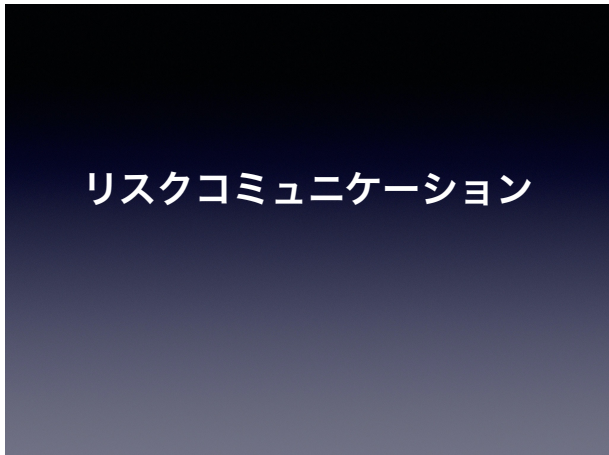
リスクコミュニケーション

原発と共存が現実
自ら置かれた環境
どう見極めるか

国際放射線防護委員会 (ICRP) 副委員長 ジェック・ロシェール さん

無力感漂う人々に
専門家を持つ情報
沈黙せず伝える

2014/3/21 朝日新聞



「ものをこわがらな過ぎたり、こわがり過ぎたりするのはやさしいが、正当にこわがることはなかなかむづかしいことだと思われた。」

寺田 寅彦 (1935年)

被曝を

怖れすぎても、怖れなさすぎても

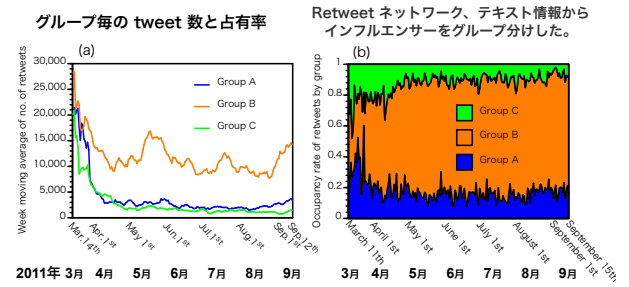
健康被害が出る。

(東大病院 放射線科 中川恵一先生)

病は気から = 精神失調、免疫力低下などに注意

**放射線に関する科学的知識の欠如、
科学者の社会への情報発信の失敗、
行政に対する不信感、が問題。**

事故後の政府・行政や東電のお粗末な対応
ほとんど説明になっていない保安院の会見
参与の涙の辞任会見、文科省と原子力安全委の食い違い
原子力政策の歴史
なぜ東京電力の原発が福島と新潟にあるのか。
原子力村の構造
原発反対運動 v.s. 事故は起きない ☹️ 安全神話
隠蔽体質



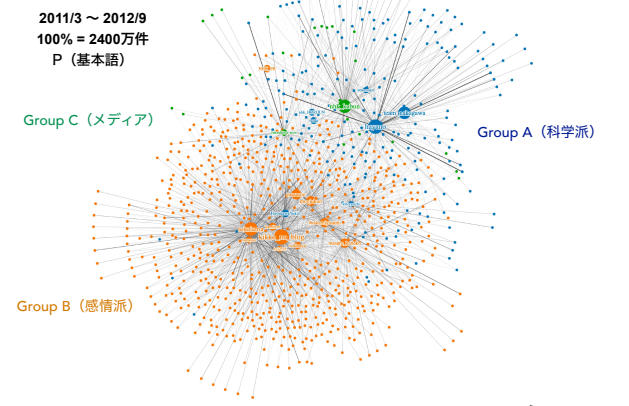
2011年 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月

Group A (科学派) 14: 個人実名/匿名 10/3. 学者 4 ジャーナリスト 2 官僚 1
Group B (感情派) 67: 個人実名/匿名 42/21. 学者 5 実業家 4 ジャーナリスト 8 政治家 9
Group C (メディア) 13: 個人実名/匿名 1/0. 報道機関 12

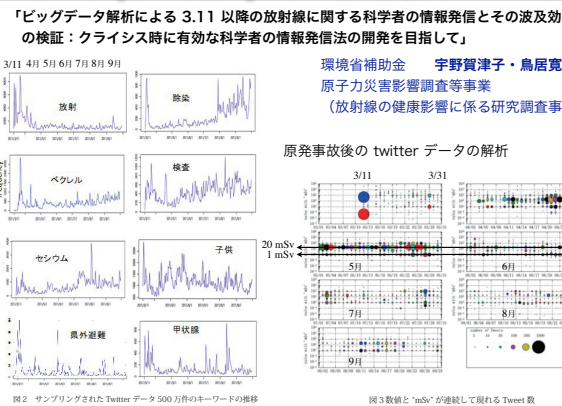
グループ人数	個人実名/匿名	属性
Group A (科学派)	10/3	学者 4, ジャーナリスト 2, 官僚 1
Group B (感情派)	42/21	学者 5, 実業家 4, ジャーナリスト 8, 政治家 9
Group C (メディア)	1/0	報道機関 12

Twitter use in scientific communication ...
M. Tsukokura, Y. Onoue, H. A. Torii et al.,
PLoS ONE 13(9): e0203594.

twitter ネットワーク解析



SNS (twitter) での放射線リスコミ



内部被曝は怖い！という主張
チェルノブイリの「悲惨な例」のイメージ
放射線の安全を説く本は売れない。

小さい子どもを持つ母親が特に過敏

安全と安心
信頼と納得、不信と不安と不満
ゼロリスク神話の盲点
定量的判断の必要性
「放射能の検査は大前提」 安全の担保としての基準値

科学者の立場・役割
情報開示・「伝える」ことの重要性

リスクの伝え方

リスクを誇大に喧伝するのは正義か
リスクの適切な評価が不可欠。
過小評価も過大評価もダメ。
危険(hazard)が起きたら誰が責任をとるのか
起きなかつたらそれでめでたしですむのか

科学者による踏み越え
誰が何の「専門家」なのかの見極め
科学的合意点と論争点との峻別
科学的事実と個人の価値判断の区別

中立な立場での発言
御用学者？/恐怖の煽動？
イデオロギーの問題 (原発推進/反原発、その他の利権?)

科学者 vs. 危険派匿名一般人

5866 2011-03-13 【参考】1974年に中国が大気圏核実験を行い、東京に雨とともに放射性物質が降った。学生だった私はガイガーカウンター
【参考】1974年に中国が大気圏核実験を行い、東京に雨とともに
28 放射性物質が降った。学生だった私はガイガーカウンターで人々の
22 頭髪や衣服などを測定。その数値は、福島の病院で被曝された方々
22 と同程度以上、都民の多くが被曝したはずだが、それによる健康被
16 害は現在にいたるまで報告されていない。
1446 2011-03-16 国際基準は 3000 Bq/kg です。日本の食品基準値 300 Bq/kg は、国際基準より10倍厳しい。
2703 2011-08-29 あたしは何度でも言う！放射能汚染された農作物や水産物を買って食べることは「被災者支援」ではなく「東電支援」だ！本
20 食えることは「被災者支援」ではなく「東電支援」だ！本来なら東
15 電が賠償すべき被害を、消費者が自らの健康を犠牲にして身代わり
14 になるなんて、こんなバカバカしいことは今すぐやめろ！子供を甲
13 状腺がんにしてまで東電を助けたいのか？
1057 2011-09-09 「死の街」というのは、もともとは英語の「ゴーストタウン」を訳した言葉で「以前はたくさんの人があつたが何かの原因で誰も
いなくなってしまう街」という意味。チェルノブイリ関連の書籍や映像では数え切れないほど使われてきた表現なのに、
なぜ福島第一原発周辺を「死の街」と呼んだら問題なのか？

新聞報道の問題点

両論併記
「専門家」は適切に選ばれたのか
両極端の意見だけで、実際の科学者の間の
意見分布が分からない。
中庸がいちばん把握しづらい。

結論ありき 結論のない記事は書けない。
読者自身に判断してもらうことができない

危険報道・批判報道に偏る
「安全です」は記事にならない
書籍も安全を説くものは売れない

美味しんぼ論争の功罪



風評と風化

東京では放射線の話は他人事

風評被害は落ち着きつつあるが、依然として福島の土地や産物を避けようとする人も一定数存在。

放射線影響の疫学データをどう解釈すべきか。

そんなことよりもっと大事な健康影響がある。

福島では放射線の話はタブー

立場や考え方の違い、補償の違い、避難の有無で家庭や地域が分断されてしまった。

「南相馬はひとつになれない」

放射線の科学的知識を身につけられないまま関心が

風化しつつある。



レポート課題 2021

以下の課題 (A) についてレポートを作成して提出して下さい。
学番号、氏名のほかに、研究室や研究分野についても記すこと。

(A) 放射線が物質に及ぼす作用、生体に与える影響を踏まえた上で、放射線防護の考え方と、放射線や放射性同位体を取り扱う際の対策・注意点について述べなさい。被曝事故を起こさないために具体的にどんな準備が有効でしょうか。

ただし、研究において放射線を扱うことがない分野の学生は、上の課題に代えて、以下の課題 (B) を選択してもよい。

(B) 放射線と放射性物質の違い、および放射線と放射能の単位について簡単に説明しなさい。また、福島原発事故後の放射線被曝のリスクと防護対策について、自分の考えを自由に述べなさい。放射線の影響については、安全だという意見と、危険だとする言説とが対立することがありましたが、リスクについてどのように考えるべきなのでしょうか。

講義スライド

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

東大教養 放射線 鳥居 🔍 検索

まとめ

放射性物質が放射線を出す能力を放射能という。

放射性物質は放射性同位体を含んだ物質。

核種に応じて壊変の種類や半減期が決まっている。

γ線のエネルギー測定により核種の同定が可能。

放射線には α線、β線、γ線、X線、中性子線などがある。

MeV オーダーの高いエネルギーで物質をイオン化し、化学結合を切断する。

ラジカルが生成され、これが DNA 損傷を引き起こす恐れがある。

放射線の種類による透過力と線エネルギー付与 (LET) の違いに応じて防護。

人体は DNA 損傷に対する修復機能を備えている。

自然放射線による被ばくは年間 2 mSv 程度ある。

放射線防護の ALARA の原則。リスクの正しい理解と伝達。

Fine.

Grazie per la vostra attenzione.
 Gracias ago pro audientia vestra.
 Спасибо за внимание.
 Dankon pro via atento.
 Merci de votre attention.
 Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit.
 Thank you for your attention.
 경청해 주셔서 감사합니다.
 感謝您的聆聽。
 谢谢您的关注。
 ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之
 Hiroyuki A. TORII