



- 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

2020 / 5 / 12 (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)

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

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

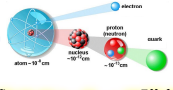
共通技術室にて受講申し込み

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



2019年度 A semester

2018年度 A semester

2017年度 A semester

2016年度 A semester

2015年度 A semester

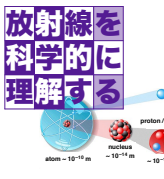
2014年度冬学期

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

2013年度冬学期



日本物理学会誌 (2013年6月号)

シリーズ「物理教育は今」

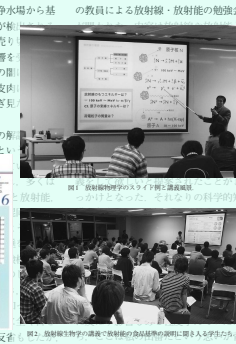
放射線を科学的に理解するための教育

鳥居 寛之

(東京大学教養学部・大学院総合文化研究科 153-8902 東京都目黒区野場 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。さらに迫り来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々が混乱し、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、福島のみならず東京を離れ、なかには海外に子どもを疎開させた親もいる。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



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)

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ので高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと思います。

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

自己紹介 研究: Exotic原子 (ミューオンウム、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

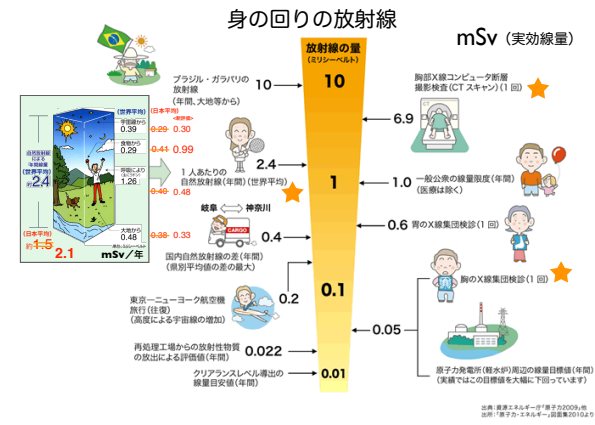
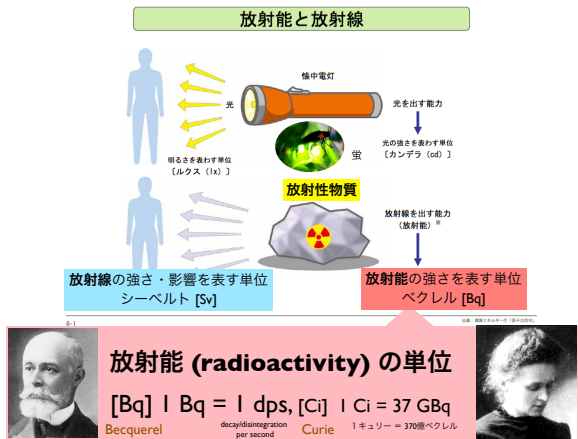
第1話

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



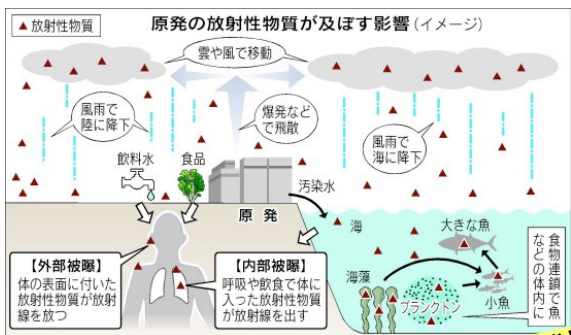
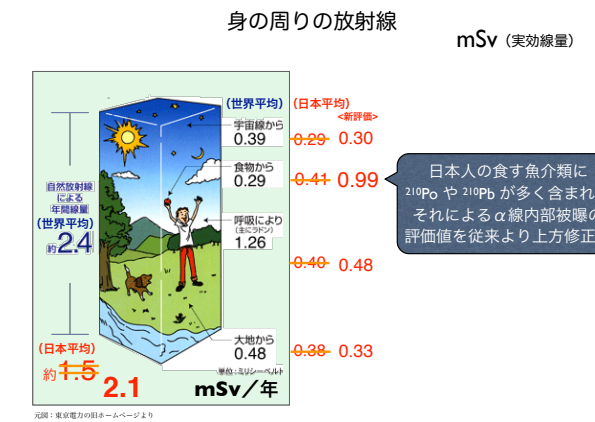
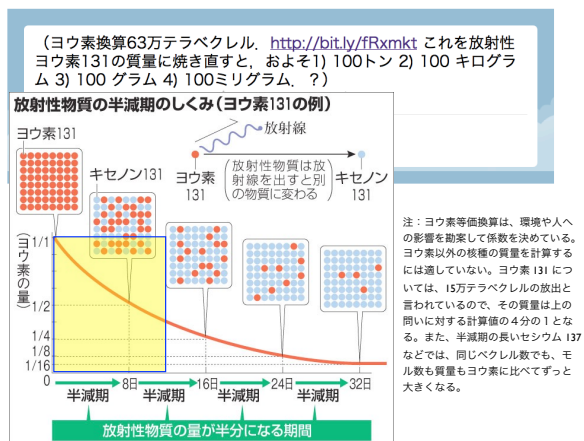
「放射能うつる」といじめ=福島から避難の小学生に一千葉

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「放射能がうつる」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、避難者の不安な気持ちを考え行動に注意し、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、通達を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「どこかへ行ったの」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「放射能がうつる」と言い、数人が一斉に逃げ出したという。

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。



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

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 $E [J / kg] = [Sv]$



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。

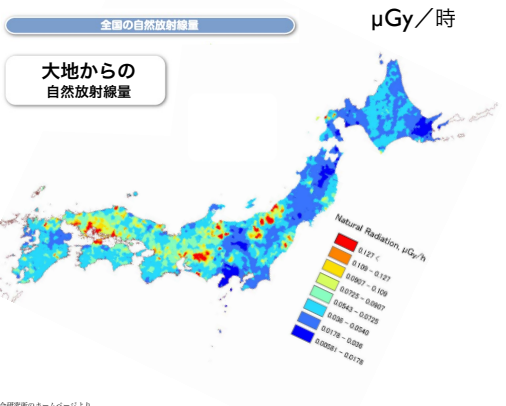
関西は自然放射線量が高い!



放射性物質の種類	放射能濃度 (ベクレル/kg)	
	一般の土壌・岩石	花こう岩
カリウム40	100~700	500~1600
ウラン238 (娘核種を含む)	10~50	20~200
トリウム232	7~50	20~200

出典: 国連放射線影響科学委員会報告 (1982) など

関東ローム層



図：産業技術総合研究所のホームページより

体内、食物中の自然放射性物質

出典：旧科学技術庁(ナプレット)

放射性物質	濃度 (ベクレル/kg)	全身の放射能 (60kg成人のベクレル数)
カリウム 40	67	4,100
炭素 14	41	2,600
ルビジウム 87	8.5	520
鉛 210またはポロニウム 210	0.074-1.5	19
ウラン 238	-	1.1

●食物中のカリウム40の放射線量 (日本) (単位：ベクレル/kg)

干しとうもろこし 2,000, 干しいちげ 700, 干しとうもろこし 400, 干しいちげ 200, ほうろん草 200, 魚 100, 牛乳 100, 小麦 200, 米 30, ビール 10, 牛乳 50, 食パン 30

40K 同位体比 0.012%
半減期 13億年
40K → 40Ar (EC γ) 11%
40K → 40Ca (β^-) 89%

日本人は高い値 (魚介類に多く含まれる)

毎日カリウム 3 g = 40K を 80 Bq 摂取。同量を排泄。

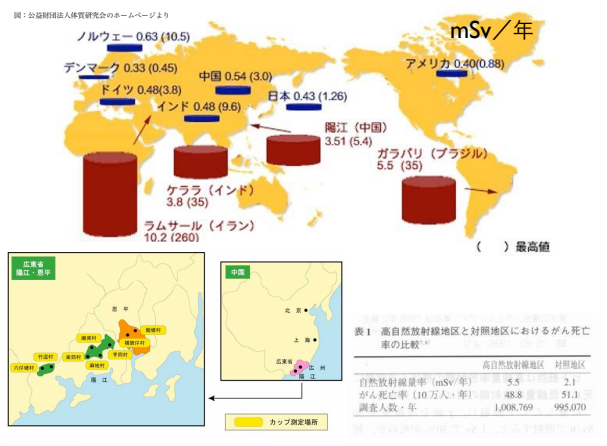
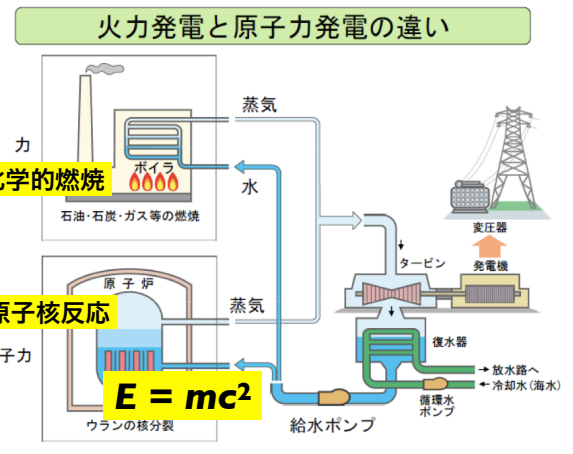


図2 福江市・郡平県放射線環境調査実施地域

放射線の科学と安全

東京大学大学院総合文化研究科 環境安全学

2020 / 5 / 12 (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 nm (10⁻⁹ m) eV Chemistry

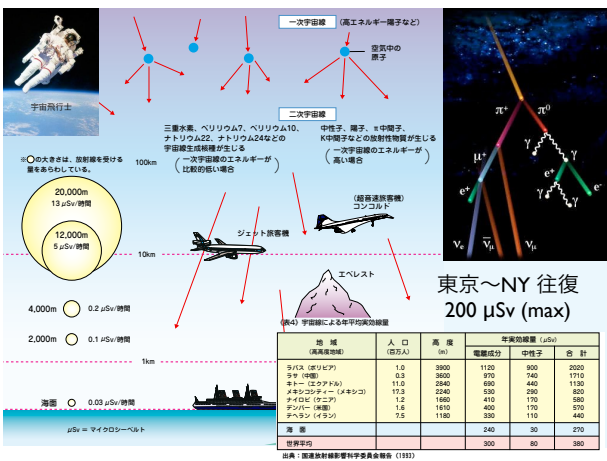
原子 atom Å (10⁻¹⁰ m) eV - keV Atomic Physics

原子核 nucleus fm (10⁻¹⁵ m) MeV Nuclear Physics

陽子 proton fm (10⁻¹⁵ m) MeV

クォーク quark am (10⁻¹⁸ m) GeV Particle Physics

素粒子物理学

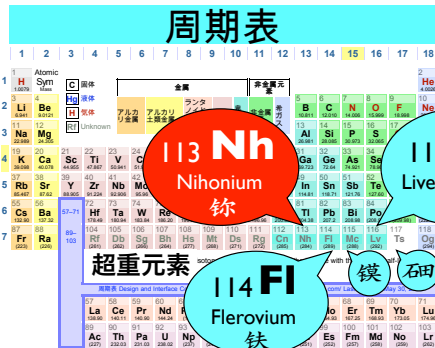


出典：国際放射線物理学委員会報告 (1992)

原子核物理学



113 Nh ニホニウム 生成 2004年 理研 森田浩介氏ら



113 Nh
Nihonium
鉈

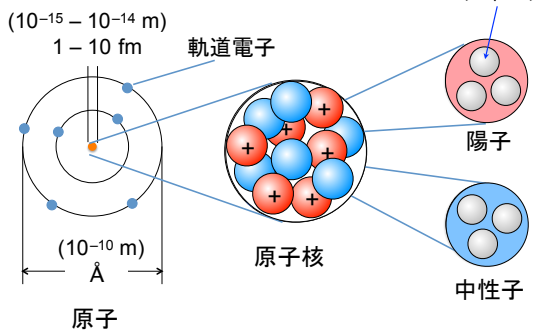
116 Lv
Livermorium
鉈

114 Fl
Flerovium
鉈

超超重元素

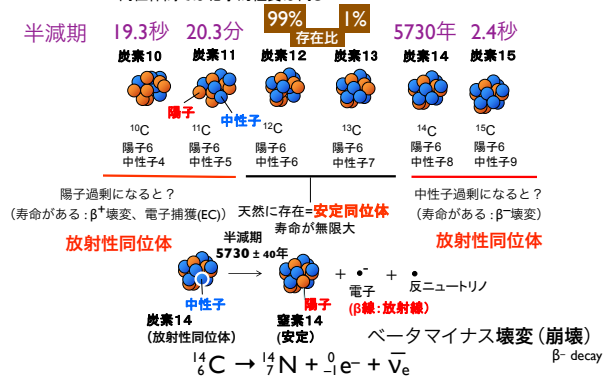
米口の共同研究 ロシア合同原子核研究所の原子核反応研究室創設者 **Georgiy Flérov**
米国 Lawrence-Livermore 国立研究所

原子と原子核



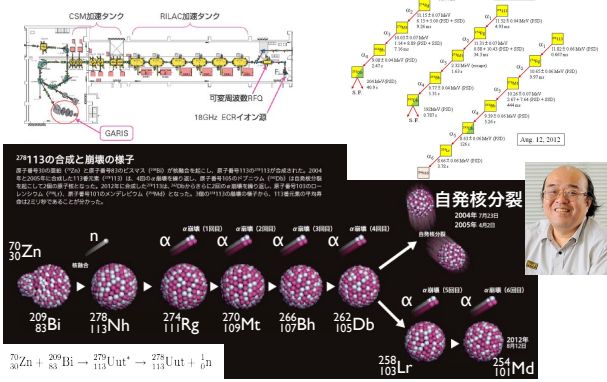
炭素原子 $^{12}_6\text{C}$ の模式図

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

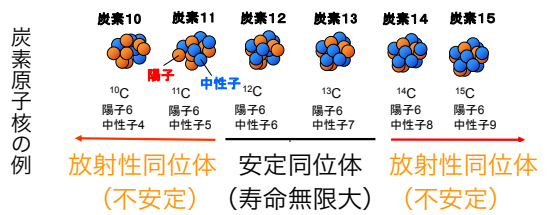
放射性核種 = 放射性同位体 = 不安定原子核

を含む原子からできている物質

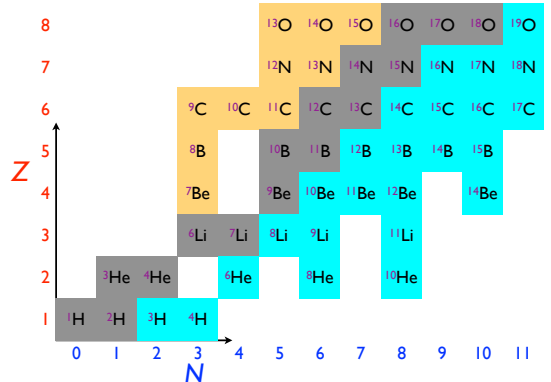
質量数 $A = Z + N$

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

$^A_Z\text{C}_N$ 元素名



核図表



Periodic Table of Elements

陽子 p	重陽子 d = (pn)	三重陽子 t = (pnn)	原子核
アルファ粒子 $\alpha = (\text{ppnn})$	$^3\text{He}^{++} = \text{h} = (\text{ppn})$		
H Hydrogen 水素 氫 qīng	^1H (H) Protium 軽水素 氕 piē	^2H (D) Deuterium 重水素 氘 dāo	^3H (T) Tritium 三重水素 氚 chuān
He Helium ヘリウム 氫 hàì	^4He Helium-4 ヘリウム4	^3He Helium-3 ヘリウム3	原子

核種の表記法
nuclide

$^{12}_6\text{C}_6$

^{12}C

C-12

炭素12

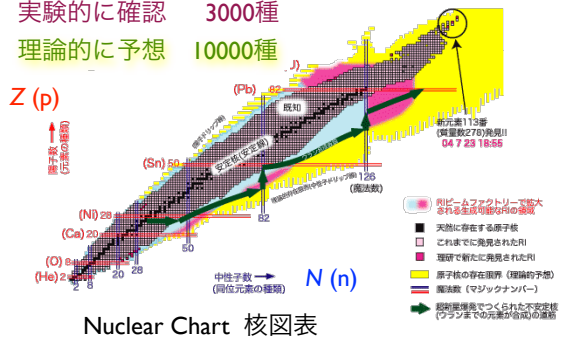
核種の数

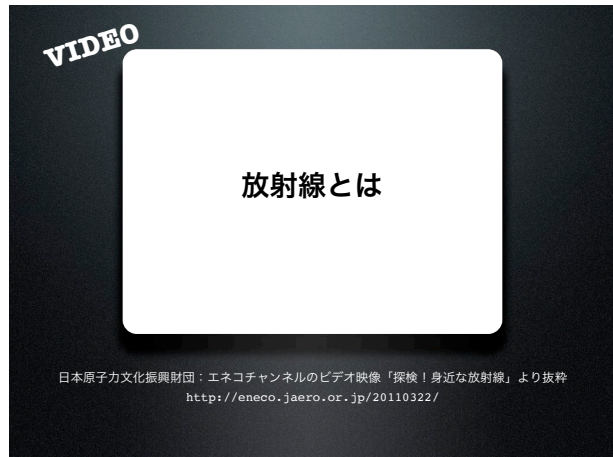
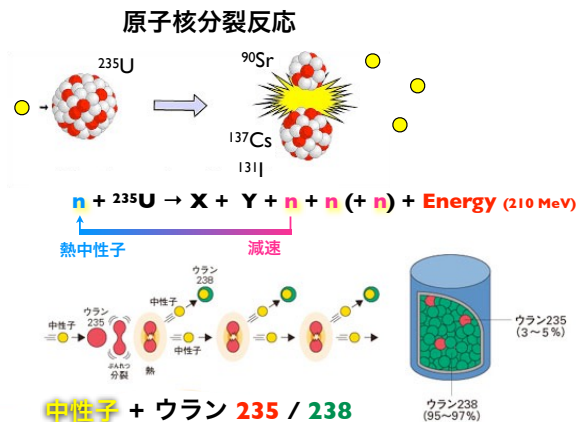
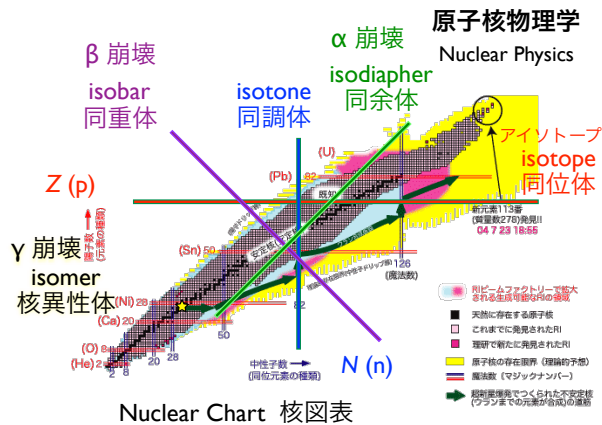
安定核種 約300種

実験的に確認 3000種

理論的に予想 10000種

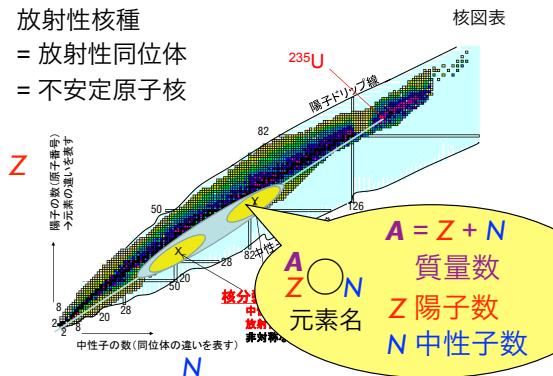
原子核物理学
Nuclear Physics





放射性物質とは

放射性核種
= 放射性同位体
= 不安定原子核



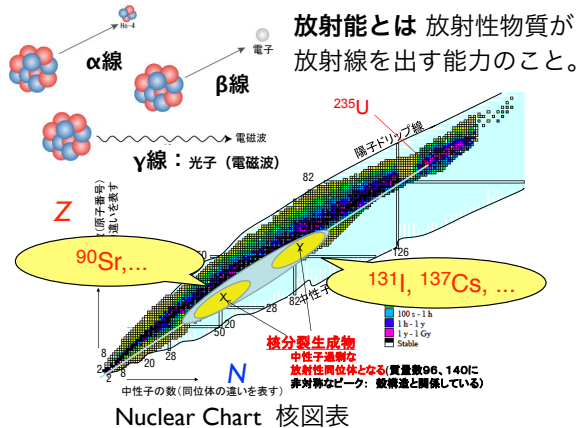
放射線の種類

放射線の種類

放射線	粒子線	β線 (電子線)	原子核 N	α線: ヘリウム原子核	MeV 前後 高エネルギー
		陽子線		数 MeV	
放射線	光子線 (電磁波)	中性子線	電子	β線: 高速の電子	数十 keV ~ MeV
		α線	重粒子線	数十 keV ~ MeV	
放射線	光子線 (電磁波)	X線	γ線: 光子 (電磁波)	数十 keV ~ MeV	電磁波
		γ線	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)	原子核 N	α線	$M_\alpha \approx 4 \text{ GeV}/c^2$ $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$
		陽子線		高速の電子	$M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$
放射線	光子線 (電磁波)	中性子線	電子	β線	$M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$ $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$ $m_e = 511 \text{ keV}/c^2 \approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$
		α線	重粒子線	α線	
放射線	光子線 (電磁波)	X線	γ線: 光子 (電磁波)	X線: 光子 (電磁波)	原子 A
		γ線	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 ~ 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?

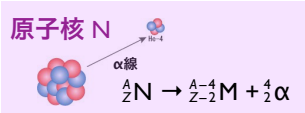
$$E = mc^2\gamma = mc^2 \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$T = E - mc^2 \quad \beta = v/c$$

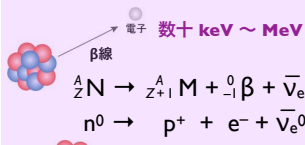
5 MeV の α線の速度は?
1 MeV の β線の速度は?

$$\approx \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} mc^2 \beta^2 \quad (v \ll c)$$

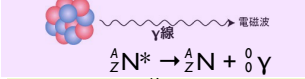
α崩壊 (壊変)
decay



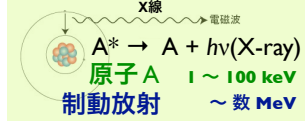
β⁻崩壊 (壊変)



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

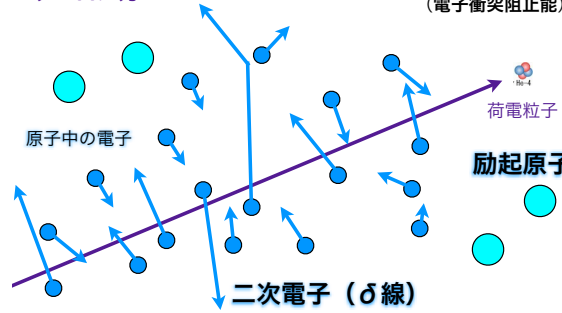


原子の脱励起
制動放射



荷電粒子のエネルギー損失過程

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)



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

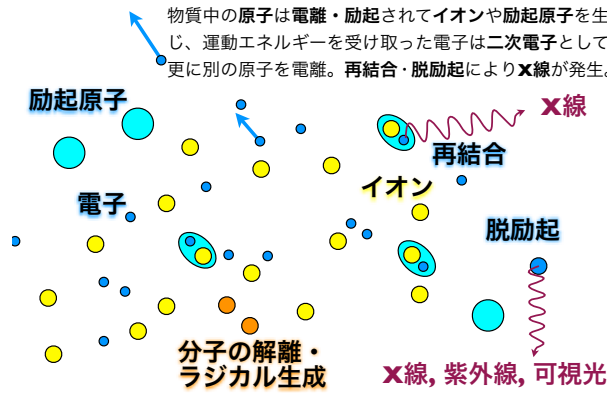
$-\langle \frac{dE}{dx} \rangle$ 荷電粒子：クーロン力
物質中の原子を電離・励起し、多数の電子を散乱して(二次電子)運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される(電子衝突阻止能)。

● 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



放射線の軌跡

霧箱による観察

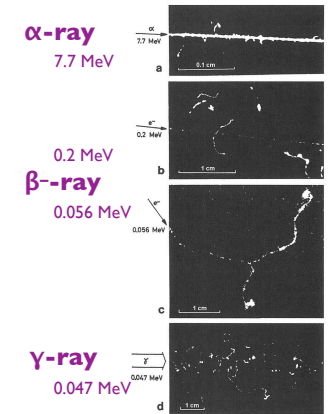
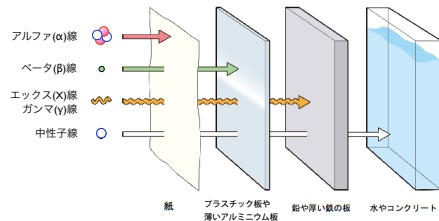


Figure 7.5 Cloud chamber tracks of α, β, γ, and γ-rays at 1 bar in air (a), (b), (c) and in methane (d). (From W. Gentner, H. Maier-Leibnitz, and H. Bothe.)

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。

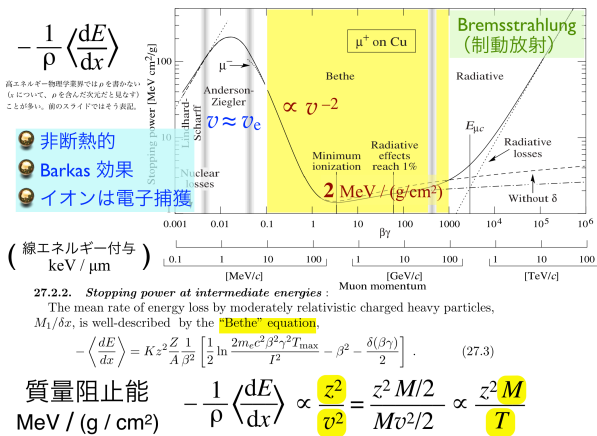
原子の電離 (イオン化) ・励起
励起原子の脱励起
X線、紫外線・可視光
イオン・電子の再結合
化学結合の切断、組み替え
ラジカル、活性分子の生成
DNAの損傷
シンチレーション光
(放射線による原子・分子の蛍光)

荷電粒子：クーロン力

$S = -\langle \frac{dE}{dx} \rangle$ 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

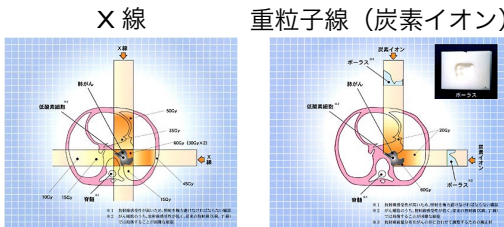
陽子線(p)/α線/重粒子線：高 LET 放射線
中性子線(n)：物質中の陽子を叩いて弾き出すので、高い LET を与える。
電子(β)線：低 LET 放射線
光子(X線, γ線)：物質中の電子を弾き出す。あるいは高エネルギーでは電子陽電子対を生成する。低い LET。

物質の種類にさほど依らない
質量阻止能 $\frac{1}{\rho} \langle \frac{dE}{dx} \rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$
MeV / (g / cm²)

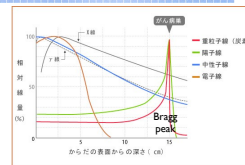


放射線医療：がん治療

数 Gy を複数回



他には：ガンマナイフ、陽子線、パイ中間子
研究中：反陽子



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。

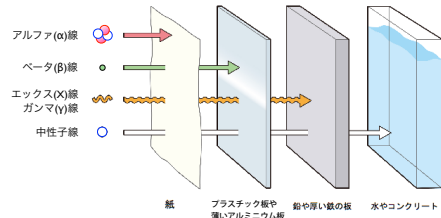
光子数の指数関数的減少

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

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。

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

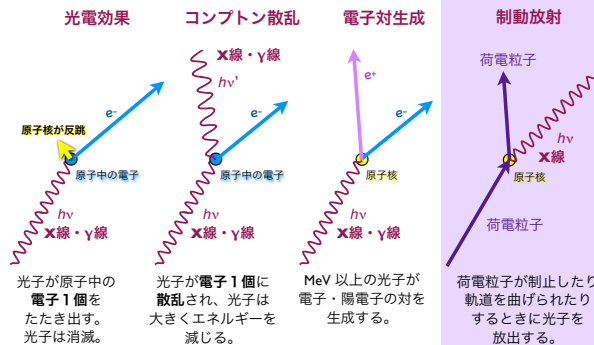


質量阻止能 $\text{MeV} / (\text{g} / \text{cm}^2)$ $-\frac{1}{\rho} \left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle \propto \frac{z^2}{v^2} = \frac{z^2 M/2}{Mv^2/2} \propto \frac{z^2 M}{T}$

放射線と物質との相互作用

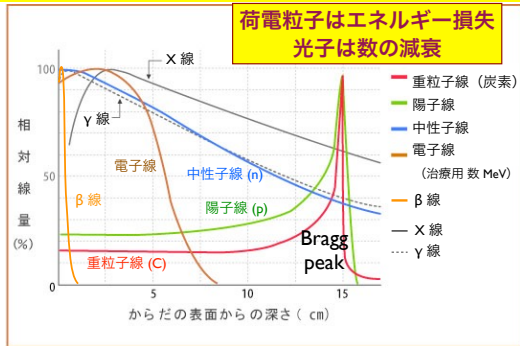
光子の減衰

光子 (X線・γ線) の関わる相互作用



高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

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：群馬大学放射線医学研究センターのホームページより

X線 (X線)

一家に1枚 光マップ <http://stw.mext.go.jp/>

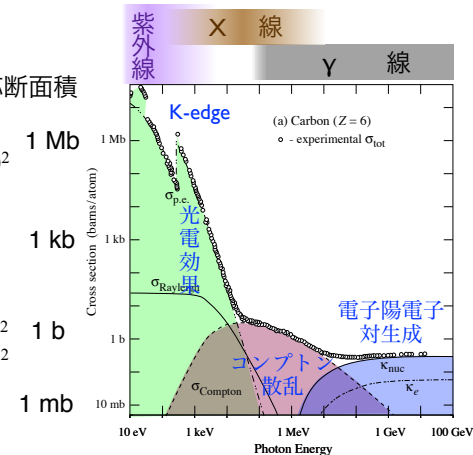
光子

反応断面積

1 Mb = (0.1 Å)²

1 barn = 10⁻²⁸ m²

= (10 fm)²





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)
 Bi₂GeO₇ Cs₂SiO₄
 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

プラスチックシンチレータ
およびライトガイド

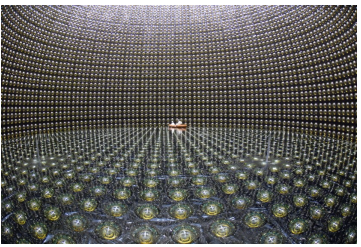
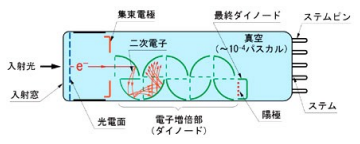


液体シンチレーションカウンタ

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



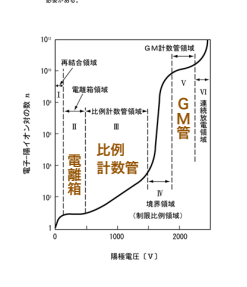
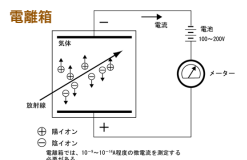
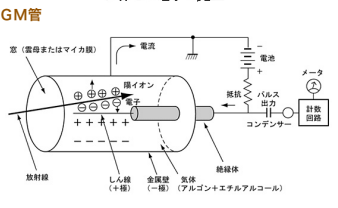
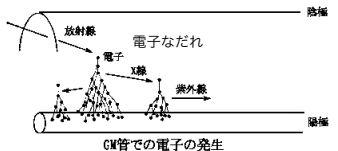
光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)



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



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)



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】

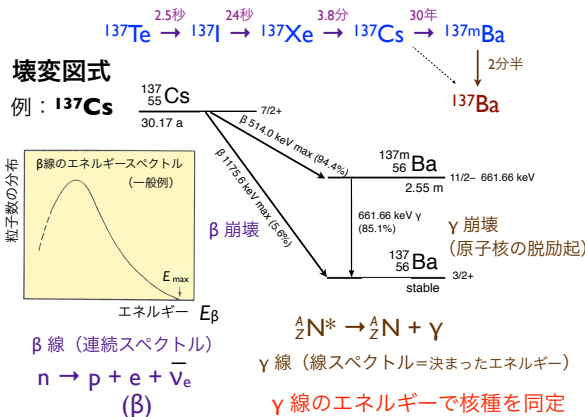
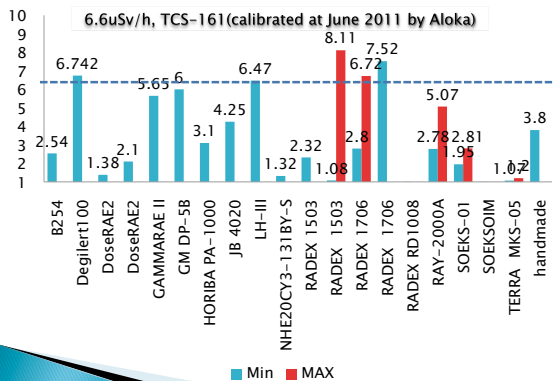


シンチレーション
(放射線照射による物質の蛍光発光)



以前の勉強会での測定結果

(東京大学教養学部 小沼田勝夫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

暫定基準 2011	新基準案 2012
野菜類 500%	一般食品
穀類 500%	野菜類、穀類、肉・卵・魚・その他
肉・卵・魚・その他 500%	その他
飲料水 200%	飲料水 10%
牛乳・乳製品 200%	牛乳 50%
	乳児用食品 50%

(1%あたり)

一般食品の新基準値の出方
msはシーベルト、Bqはベクレル
 食品に含まれるセシウムが1kgあたり何日μm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性別に計算

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
1~6歳	女	320
7~12歳	男	190
7~12歳	女	210
13~18歳	男	150
13~18歳	女	160
19歳以上	男	130
19歳以上	女	160
妊婦		160

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。)

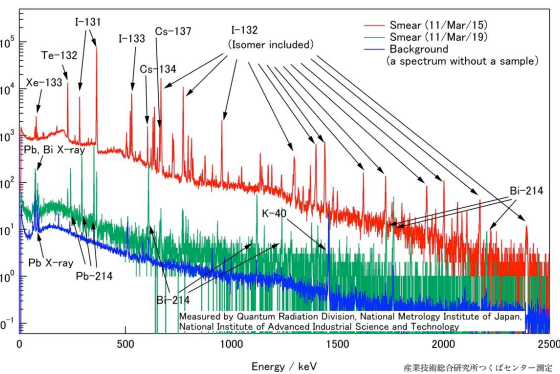
放射線はどうやって測るのか。検出限界以下 (N.D.) とは?

(検出限界値を限りなく下げたより、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)



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

検出効率は 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)

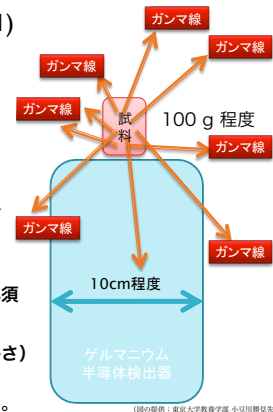
基準値は、測定上はそれぞれの核種で
 0.05 cps / 100 g に相当
 (20秒に1カウント!)

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)



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)

放射線 ⇒ 電離 (γ線・X線)

⇒ 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

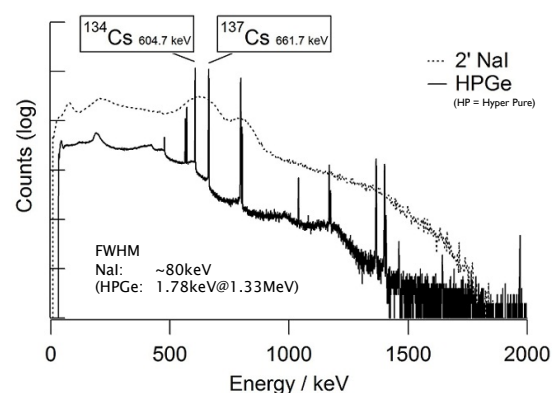
Y ゲルマニウム検出器 (Ge detector)



食品検査用ゲルマニウム検出器



γ線スペクトルの比較 (NaIカウンターvsGe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)

食品に含まれる放射性物質の測り方

(東京大学教養学部 小沼田勝見先生のスライドより引用)

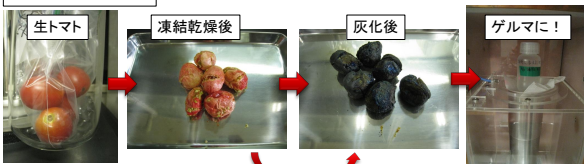
食品の放射能は正確に測りにくい！

- 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(焼却炉の灰と同じ原理)ことで、検出限界値を超えて測りやすくなる

食品(トマト)の前処理



飛灰を発生させないように灰状にする

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)	飲用水	300
放射性セシウム(¹³⁴ + ¹³⁷ Cs)	飲用水	10
	一般食品	100

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)

内部被曝の評価

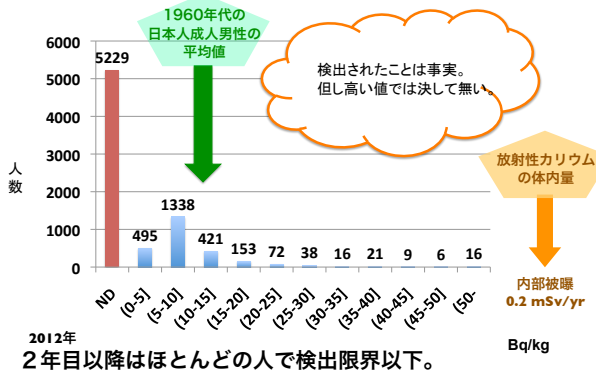
WBC による体内放射能の測定

ホールボディカウンター



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

(東京大学教養学部 小沼田勝見先生のスライドより引用)

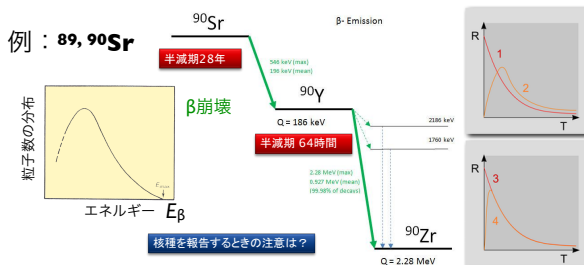


2012年
 2年目以降はほとんどの人で検出限界以下。

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

例: 238, 239, 241Pu

(東京大学教養学部 小沼田勝見先生のスライドより引用)

アルファ線の測定装置

アルファスペクトロメトリ

U, Th, Pu, Am, Cm...はこれ!



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

Fe²⁺ + 放射線 → Fe³⁺, 吸光度測定



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るる

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
 Ag⁺ → Ag⁰, Ag⁺ 発光中心 color center ができる

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



Röntgen Gray

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) 非荷電粒子線 K [J / kg] = [Gy]

シーマ cema (Charged particle Energy imparted to MAtter) 荷電粒子線 C [J / kg] = [Gy]

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

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] | Gy = 100 ram

放射線量の単位 radiation dose

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 (2 (正負ハイオンも))
アルファ粒子(α線)	20
核分裂片	20
重原子核	20

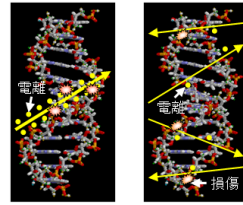
【出典】日本アイソトープ協会・ICRP Pub 60、国際放射線防護委員会の1990年勧告、丸善、p7(1991) 赤字 ICRP 2007

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



放射線による DNA 損傷



重イオン

電子

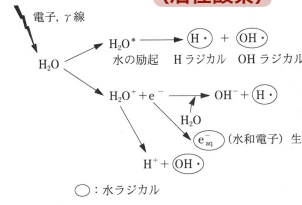


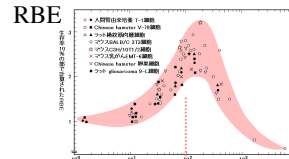
図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略 (出典「放射線生物学」丸善出版)

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 α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)

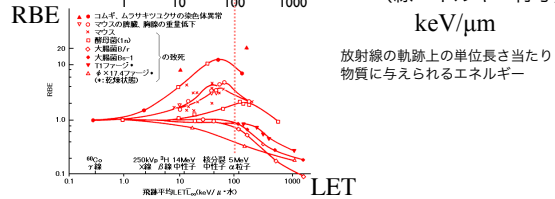


図2 体細胞的効果に対する各種放射線のRBEとLETの関係 (出典「放射線生物学」丸善出版)

線量計算

内部被曝と外部被曝

放射線の種類と被ばく

- α線は空気中の飛行が数 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行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 程度以下の場合は皮膚への影響が問題。

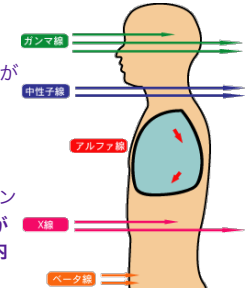


図3 人体を透過する放射線

内部被曝

放射性物質を体内に取り込むことにより、体の内部から放射線に被曝すること。

放射性物質を体内に取り込まないことは放射線防護の鉄則。

放射線防護服 (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うことを防ぐ。

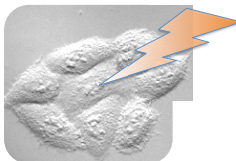


一般に被曝が継続するため、注意が必要。

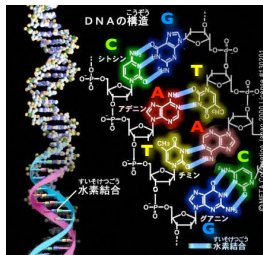
- 物理学的半減期
- 生物学的半減期 (体内からの排出)

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

細胞の核に放射線が照射



DNA



出典: DNA「教育用図像素材サイト」http://www.2edu.jp/ga/jp/197/

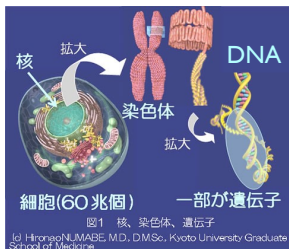


図1 核、染色体、遺伝子 (細胞(60兆個) 一部が遺伝子)

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 T における等価線量 [Sv]

組織 T における平均吸収線量 [Gy]

臓器・組織	組織加重係数: w_T	組織加重係数: w_T
生殖腺	0.20	0.08
骨髄(赤色)	0.12	0.12
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
膀胱	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
腸	0.01	0.01
唾液腺	0.01	0.01
残りの臓器・組織 ²⁾	0.05	0.12
合計(全身)	1.00	1.00

左欄黒字 ICRP 1990

右欄赤字 ICRP 2007

内部被曝の計算例 (131I による甲状腺預託線量)

放射線防護のための線量 protection quantity

預託線量 committed dose (内部被曝) [Sv]

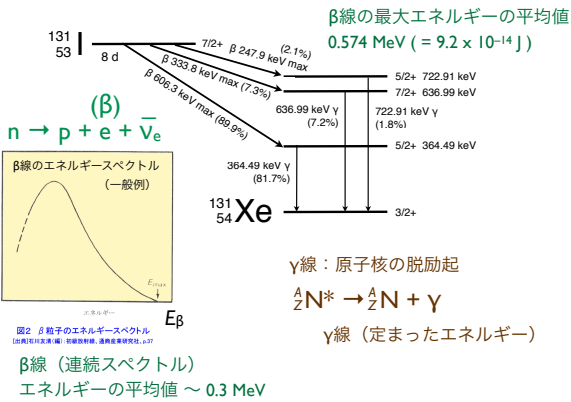
預託等価線量

体内摂取した放射性物質から出す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年間の積分をする。

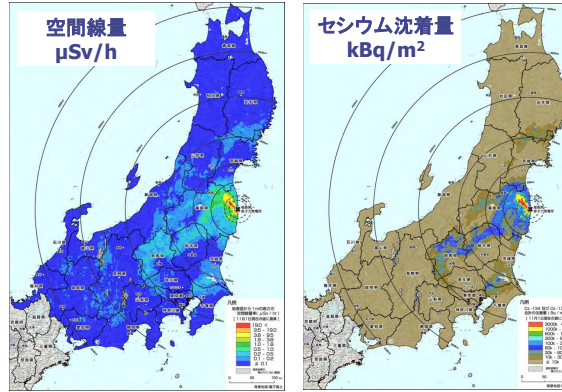
預託実効線量

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}

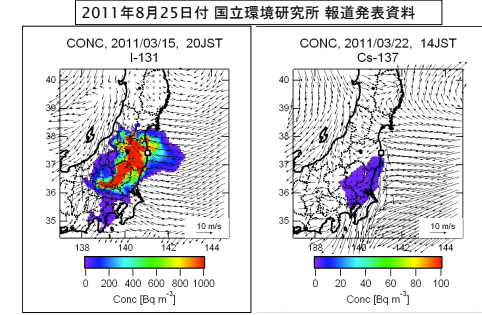


文部科学省の航空機モニタリングによる広域汚染マップ



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

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

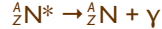


実測値との差違を議論したい

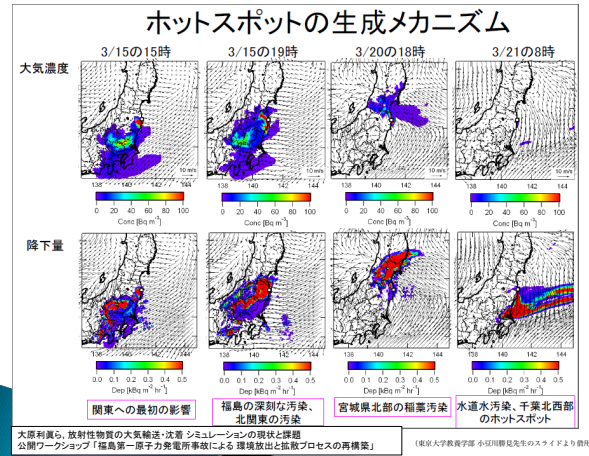
(東京大学教養部 小沼勝見先生のスライドより引用)

環境放射化学

γ線：原子核の脱励起

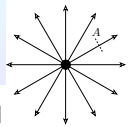


γ線 (定まったエネルギー)



(東京大学教養部 小沼勝見先生のスライドより引用)

外部被曝の線量計算



Φ̇: 粒子フルエンス率

$$\dot{\Phi} = \frac{e^{-\mu_{air} r} \eta P}{4\pi r^2} \quad \eta = 0.851 \quad \gamma\text{線の放出率}$$

P: 放射能 [Bq]

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

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

Ḣ: 等価線量率 [Sv/s]

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

平面が一様に放射性物質で汚染されている場合

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

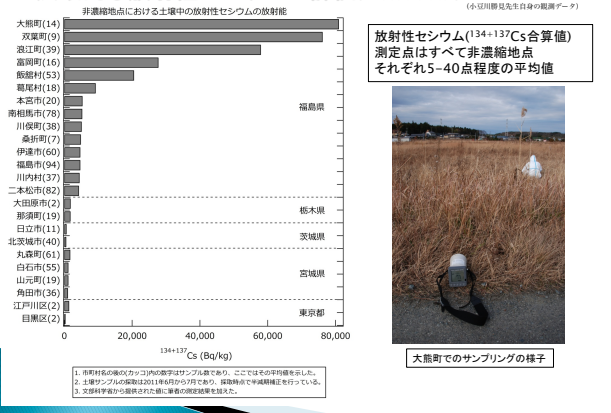
高さ 1 m でも 50 cm でもさして違くない

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

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



原発周辺で観測された核種

^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , $^{110\text{m}}\text{Ag}$,
 ^{132}Te , ^{132}I , ^{140}Ba , ^{140}La ,
 ^{89}Sr , ^{89}Y , ^{95}Zr , ^{95}Nb ,
 ^{239}Np , ^{59}Fe

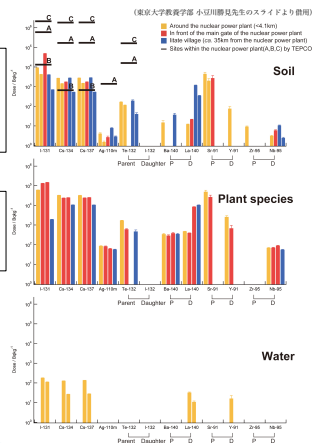
Shozugawa et al., 2012

^{125}Sb , $^{127\text{m}}\text{Te}$, $^{129\text{m}}\text{Te}$,
 ^{136}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{54}Mn ,
 ^{58}Co , ^{60}Co , $^{114\text{m}}\text{In}$

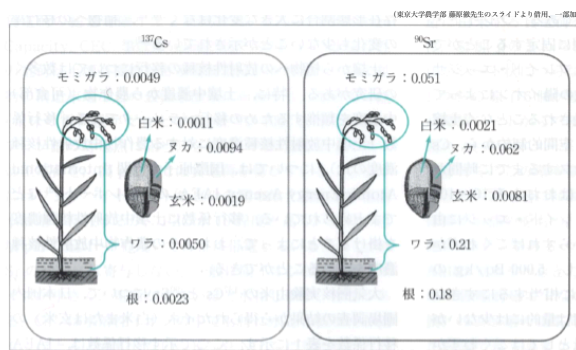
小島ら, 2011, 2012

^{241}Pu

Zheng et al, 2012



(東京大学農学部 小沼勝見先生のスライドより引用)



(東京大学農学部 藤原敏先生のスライドより引用、一部加筆)

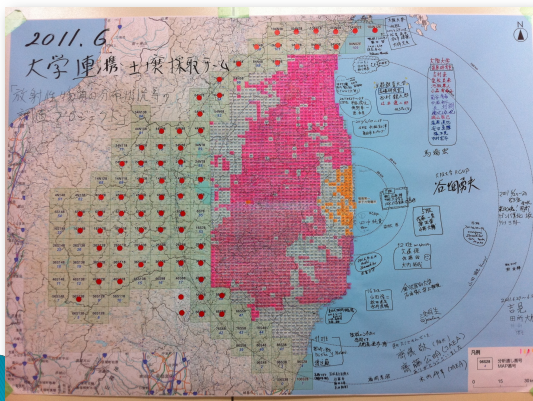
図5 ■ 土壤中濃度を1.0としたときのイネにおける部位別 ^{137}Cs および ^{90}Sr の相対濃度

福島産の米は全袋検査されている。現状はほとんど全てが不検出。



文科省主催の土壌採取プロジェクト(2011年6月)

(東京大学農学部 小沼勝見先生のスライドより引用)



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・みずぎ野・けやき台公園など...

(東京大学農学部 小沼勝見先生のスライドより引用)



福島での測定例 (東京大学 塩沢らによる)

(東京大学農学部 藤原敏先生のスライドより引用、一部加筆)

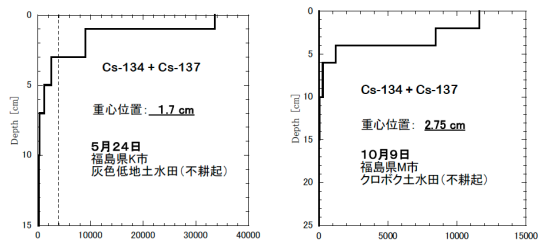


図1-a 水田土壌の放射性Csの鉛直分布例1

図1-b 水田土壌の放射性Csの鉛直分布例2

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

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: 土壌表層
 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



相馬野馬追

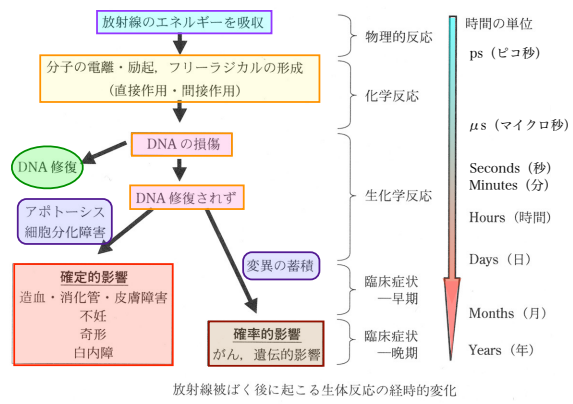
東京大学大学院総合文化研究科
 関連基礎科学系 集中講義 環境安全学

放射線の科学と安全

2020 / 5 / 12 (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



JCO 臨界事故

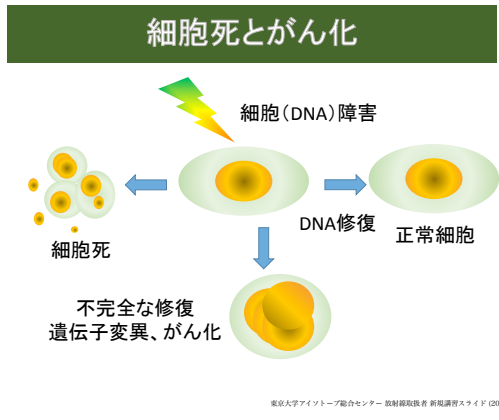
The JCO Criticality Accident

この事故は、株式会社ジェー・シー・オー (JCO) 東海事業所のウラン製錬設備で発生した。当時、この建物では高濃度燃料「愛宕」の燃料原料となる濃縮度18.8%のウランを精製に当たり、均一にする作業が行われていた。

この作業に使用するべきでない設備と呼ばれる設備に、制御棒を大層に上回るウラン溶液を投入した結果、内部でウランがひとりでに臨界反応が起った。このような事故を「臨界事故」とよぶ。

その結果、燃料製造設備による放射線(中性子線およびガンマ線)が施設内外まで放出された。このような状態が約20時間続いたため、事故の発生直後は放射線量が急激に高くなったため、初期段階で作業していた2名の方が亡くなったという大変な結果となった。

放射線生物学



何もなくても DNA 損傷は自然発生している (複製ミスなど)

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

紫外線照射でも頻発

表5 増殖期のヒト細胞における DNA 損傷の自然発生率と放射線誘発率の比較

傷の種類	自然発生の傷/細胞/日	X線誘発の傷/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 (推定値)	40

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：生き物と放射線。東京大学出版会、1975

図は一部内容を改変。

放射線被曝による人体への確定的影響

すぐに体でもめる

10,000: 皮膚、潰瘍ができる

7,000: 全身、死にます

5,000: 皮膚、赤くなる

3,000: 皮膚、脱毛する

1,000: 全身、はき気がしたり、気だるくなる

500: 全身、リン/鉄の減少

150以下: 臨床症状は確認されず「ただちに影響が出ないレベル」

4 Gy: 半数死亡

7 Gy: 全員死亡

治療により助かることも。

東海村 JCO 事故
 チェルノブイリの消防隊員

臓器/組織	放射線量 (Gy)	症状
造血系	0.5	白血球減少
腸管	1.0	嘔吐、下痢
皮膚	2.0	皮膚炎
骨髄	4.0	骨髄抑制
中枢神経	10.0	意識障害
全身	10.0	急性放射線症候群



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

平均生存時間 (時間)

線量 (Gy)

△ ヒト
 ● マウス
 ○ マウス、ラット

(東京大学工学部附属核燃料科学センターの先生のスライドより引用。一部改変)



広島 原爆ドーム



γ線による 推定被曝線量
中性子線による (mGy)

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、長期間かかっても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

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 芽細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)	幹細胞 リンパ球 好中性球 赤血球 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	2週間	7-8週間	
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)(192)

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。

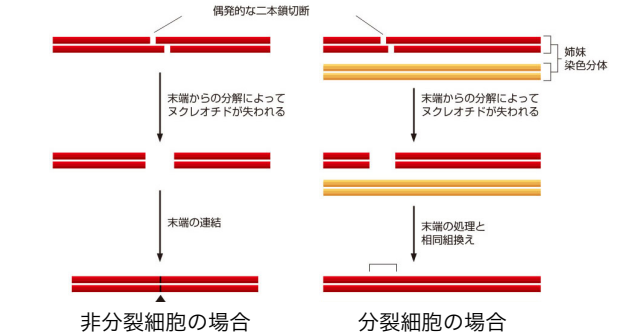
しかしそもそも、放射線を浴びなくても確率はゼロではない。
(日本人の死亡者の3人に1人はがんが原因。)

疫学調査の結果から結論を導きだすのは統計的に困難。

DNA 二本鎖同時切断の場合の修復

非相同末端結合修復

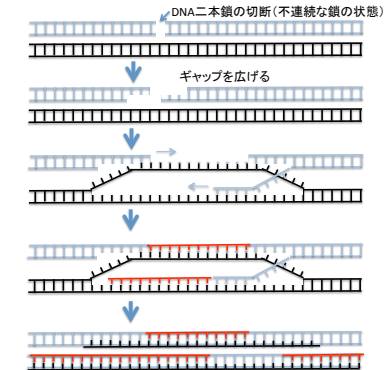
相同組み換え修復



非分裂細胞の場合

分裂細胞の場合

相同組み換え修復



分裂細胞の場合

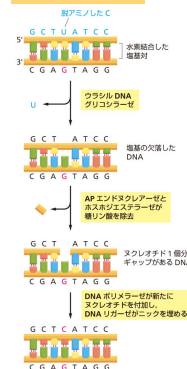
確定的影響の閾値

組織及び影響	しきい値 (1回照射、ミリシーベルト)
骨髄(造血能低下)	500
悪心・嘔吐	1000
精巣 一時的な不妊(精子の一時的減少) 永久不妊	150 3500-6000
卵巣 不妊	2500-6000
水晶体 検知可能な白濁 視力障害(白内障)	500-2000 5000
胎児 奇形 重度精神発達遅滞	100 120-200

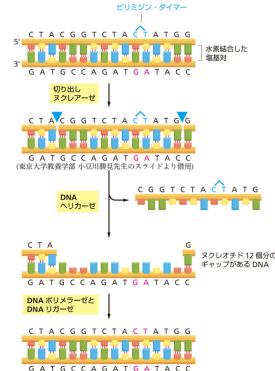
菅原、青山、丹羽、放射線基礎医学、第11版(金芳堂)より引用

Molecular Biology of THE CELL 5th Edition
©2015 W. H. Freeman and Company

塩基除去修復



ヌクレオチド除去修復



The Nobel Prize in Chemistry 2015

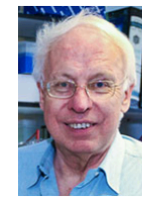


Photo: Cancer Research UK
Tomas Lindahl
Prize share: 1/3



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

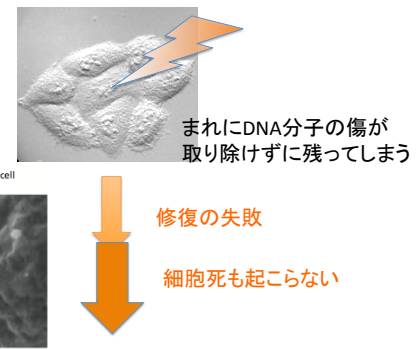
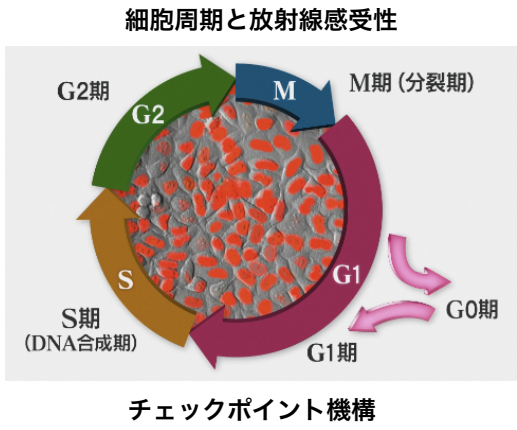


Photo: M. Englund, UNC-School of Medicine
Aziz Sancar
Prize share: 1/3

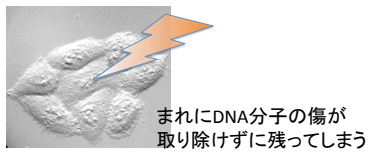
The Nobel Prize in Chemistry 2015 was awarded jointly to Tomas Lindahl, Paul Modrich and Aziz Sancar "for mechanistic studies of DNA repair".



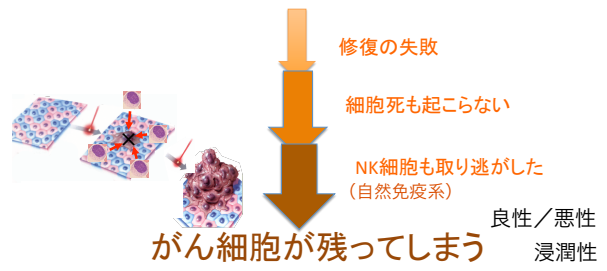
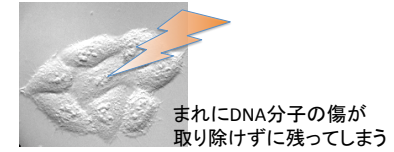
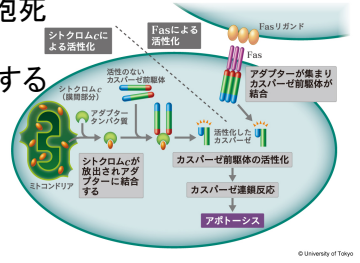
@広島市南区 比治山公園 @長崎市堂茶屋



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
自然免疫系にとらえられる



プログラム細胞死
細胞が自爆する



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)
良性/悪性 浸潤性
がん細胞が残ってしまう

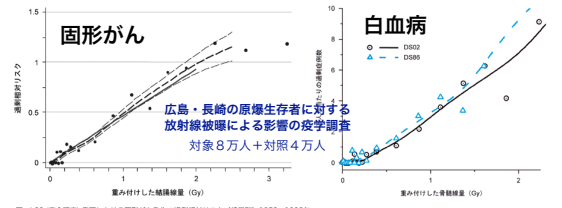
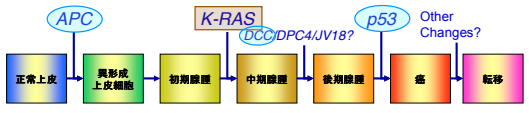


図. LSS (寿命調査) 集団における放射線がん発生の過剰相対リスク (標準化) 1958-1998年。大きい丸は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した割合に当てはめた。両年平均過剰相対リスク (OSR) の線形推定値を示す。太い線は、線形推定リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

累積放射線量 (Gy)	対象人数	がん 総数	期待数	相対率
0.005-0.1	27,789	4,406	81	1.8%
0.1-0.2	5,527	946	75	7.6%
0.2-0.5	5,935	1,144	179	15.7%
0.5-1.0	3,173	688	206	29.5%
1.0-2.0	1,647	450	196	44.2%
>2.0	564	185	111	61.0%
合計	44,635	7,851	848	10.7%

累積放射線量 (Gy)	対象人数	死亡 総数	期待数	相対率
0.005-0.1	30,387	69	4	6%
0.1-0.2	5,841	14	5	36%
0.2-0.5	6,304	27	10	37%
0.5-1.0	3,963	30	19	63%
1.0-2.0	1,972	39	28	72%
>2.0	737	25	28	100%
合計	49,204	204	94	46%

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的に困難。

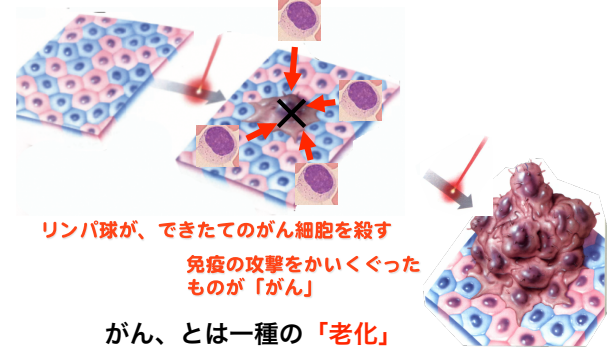


多段階発がん仮説
がん=細胞の異常増加
がん遺伝子 がん抑制遺伝子
ミスマッチ 修復の欠陥 ゲノム不安定性の誘導

- 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が大きい)。
- 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に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 がん抑制遺伝子を含む) 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、通常の人以上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)

がん、とは？

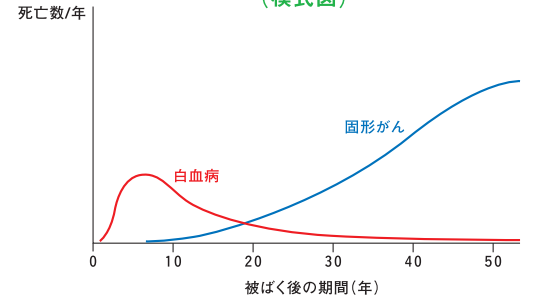
がん細胞は毎日5000個もできている！！



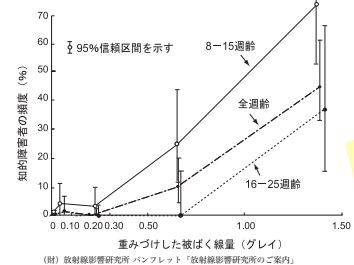
リンパ球が、できたのがん細胞を殺す
免疫の攻撃をかわくったものが「がん」

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)



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)

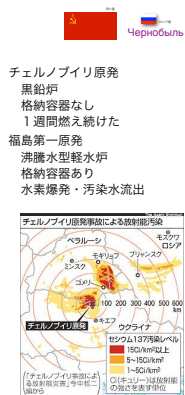
放射線による遺伝的影響は認められず

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

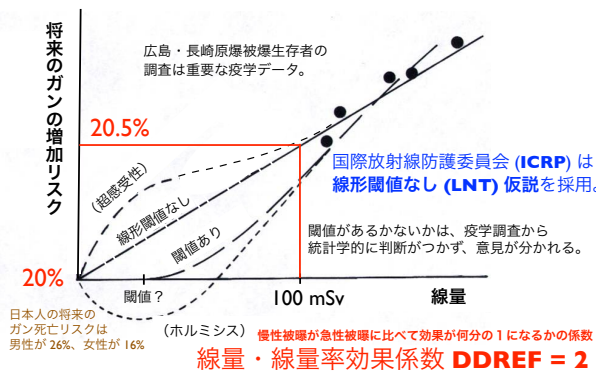
放射線のリスク評価と防護

低線量・低線量率の被曝とガン死亡



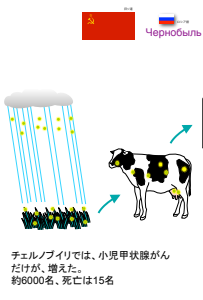
チェルノブイリ原発事故
 131I (ヨウ素131) total 200京ベクレル !!
 初期消火に当たった原発作業員・消防隊員が致死・亜致死量の被曝。28人死亡。
 事故処理に当たった軍人ら“リクビゲートル”60万人が数百 mSv 被曝
 3 km にあるプリピャチ市民は翌日に強制避難半径 10 km 圏内の避難が1週間遅れた。(最大で 750 mSv の被曝)
 30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。一般住民で確認された健康への影響はこどもの甲状腺ガンの増加のみ。
 毎年 1/300,000 人 → 1/10,000 人 (患者数 5000 人、死亡 15 人)
 甲状腺平均被曝量 2 Gy !!
 と、ずっと大きいストレスによる失調

低線量におけるリスク評価



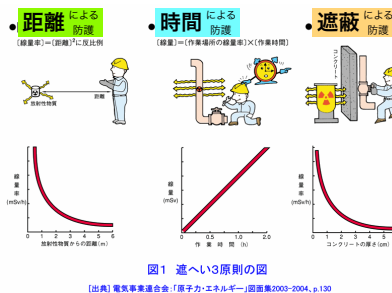
日本人の将来のガン死亡リスクは男性が 26%、女性が 16% (ホルミシス)
 閾値があるかないかは、疫学調査から統計的に判断がつかず、意見が分かれる。
 国際放射線防護委員会 (ICRP) は線形閾値なし (LNT) 仮説を採用。
 線量・線量率効果係数 DDREF = 2

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こ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・事故による喪失感共通

放射線防護



確定的影響は発症させない。確率的影響をできるだけ減らす。

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 (作業員)	線量限度の一覧表 (作業員)	
	1990 勧告	1977 勧告
実効線量	20 mSv/年 (5年平均)	50 mSv/年
水晶体等価線量	150 mSv/年 ¹⁾	150 mSv/年 ²⁾
皮膚等価線量	500 mSv/年 ¹⁾	500 mSv/年 ²⁾
手・足の等価線量	500 mSv/年	500 mSv/年 ³⁾
その他の組織	—	500 mSv/年

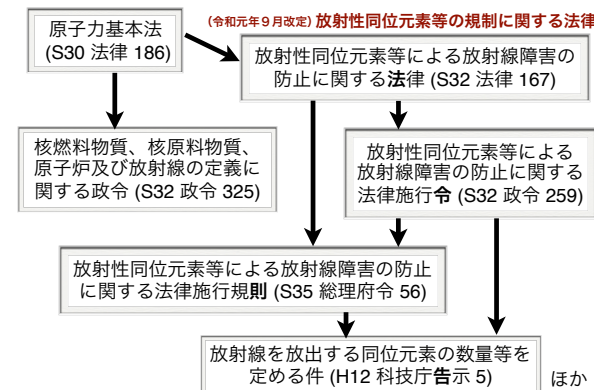
1) 適ば部位に関係なく、実効線量 7 mSv/cm²、面積 1 cm² の皮膚についての平均線量に換算される。
 2) 1988年のICRP勧告(1991年改定)で20mSv/年(5年平均)に引き下げられた。
 3) 1988年のICRP勧告(1991年改定)で500mSv/年(5年平均)に引き下げられた。

公衆被曝 (一般公衆)	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⁾ (生涯の平均)
水晶体	15 mSv/年 ²⁾	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 ²⁾

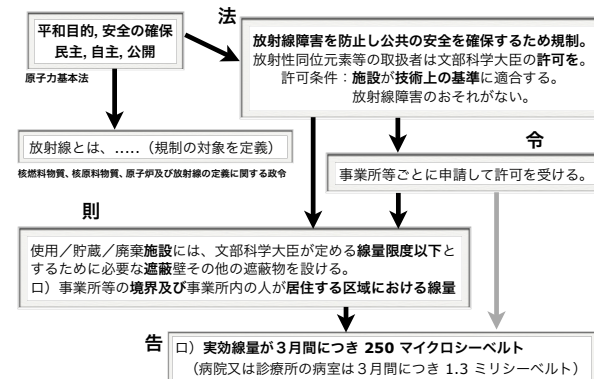
1) 1982年のICRP勧告(1991年改定)で1mSv/年(1年につき1mSv)として、補助的な限度を5mSv/年とした。
 2) 1988年のICRP勧告(1991年改定)で1mSv/年(生涯の平均)に引き下げられた。
 3) 1988年のICRP勧告(1991年改定)で500mSv/年(5年平均)に引き下げられた。

国内法令による防護基準

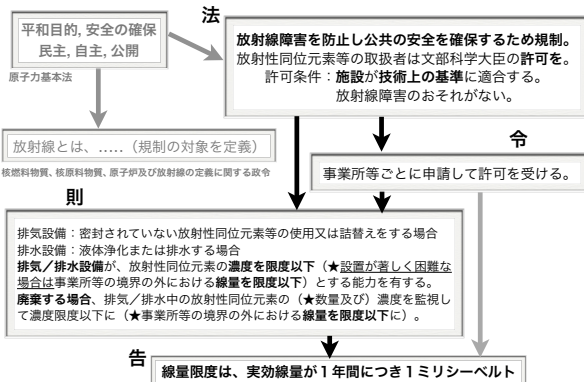
放射性同位元素等による放射線障害防止の法体系



公衆の追加線量限度が 1 mSv である法的根拠 (1)



公衆の追加線量限度が 1 mSv である法的根拠 (2)

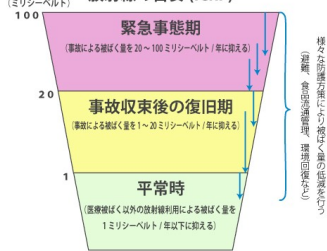


Q. 政府が計画的避難地域を指定しましたが、基準になっている20ミリシーベルトの意味について教えてください。

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。

放射線の目安 (ICRP)



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と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。

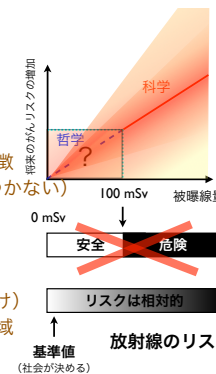
今回の国の方針は、緊急事態期の被ばくとして定められている20~100ミリシーベルトの下限値にあたるもので、福島原発周辺の方々の被ばくが、事故による被ばくの総量が100ミリシーベルトを超えることがないような対応をしつつ、将来的には年間1ミリシーベルト以下まで戻すための防護策を講ずることを意味していると思われます。

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報 (2011年4月)

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

放射線規制に関するそのほかの法令・規則

電離放射線障害防止規則 労働安全衛生法・同施行令

事業者は、労働者が電離放射線を受けることができるだけ少なくするように努めなければならない。

- ◆ 障害防止法に含まれないX線装置およびX線作業が主な対象。
- ◆ 障害防止法同様、管理区域の明示、放射線業務従事者の被曝限度などを定めているが、一般公衆に関わる規定はなさそうである。

医療法施行規則 医療法・同施行令

- ◆ 医療および医薬品は、放射線障害防止法施行規則の適用外

病院又は診療所の管理者は、放射線取扱施設又はその周辺に適当なしゃへい物を設ける等により、人が居住する区域及び敷地の境界における線量を限度以下としなければならない。

- ☞ 実効線量が3月間につき 250 マイクロシーベルトを超えない

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

- ☞ 周辺監視区域外の線量限度は、実効線量について1年間につき1ミリシーベルト

リスクコミュニケーション

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

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

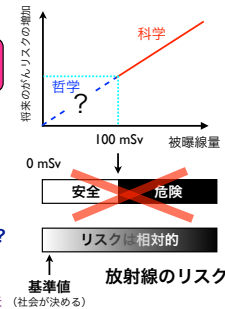
慣れない土地での生活ストレス、生業・収入の損失

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。

風化 放射線の科学的知識を身につけないまま関心が風化しつつある。



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

放射線と生活習慣の差がんの相対リスク比較

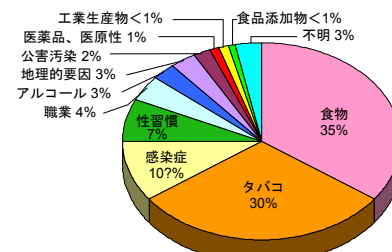
受動喫煙の女性	1.02~1.03倍
野菜不足	1.06倍
100~200ミリシーベルトを浴びる	1.08倍
塩分の取りすぎ	1.11~1.15倍
運動不足	1.15~1.19倍
200~500ミリシーベルトを浴びる	1.19倍
肥満	1.22倍
500~1000ミリシーベルトを浴びる	1.4倍
毎日2合以上の飲酒	1.6倍
喫煙	1.6倍
毎日3合以上の飲酒	1.8倍
1000~2000ミリシーベルトを浴びる	1.8倍

※数値は相対リスク (①) 相対リスクは、例えば喫煙者と非喫煙者のがんの頻度を比較した数字

表の値は短時間で1回の被曝の場合。

(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。)

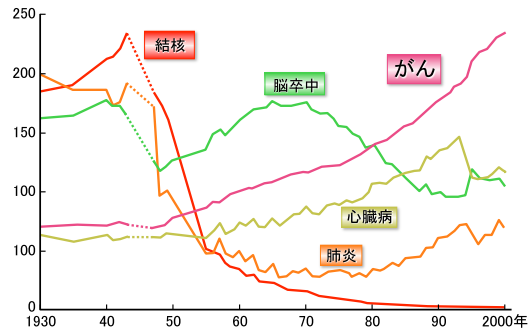
ヒトのがんの原因と関連のある因子



(R.Dool and R.Peto, 1981)

がん死中にしめる各因子の割合 (%) ①

日本人の2人に1人が、生涯のうちにがんにかかり、
毎年の死亡者のうち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



「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

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が
起きなかったらそれでめでたいですものか

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？)

**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

SNS (twitter) での放射線リスク

「ビッグデータ解析による 3.11 以降の放射線に関する科学者の情報発信とその波及効果
の検証：クライシス時に有効な科学者の情報発信法の開発を目指して」

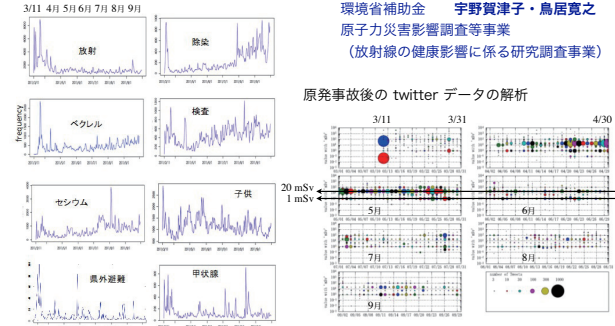
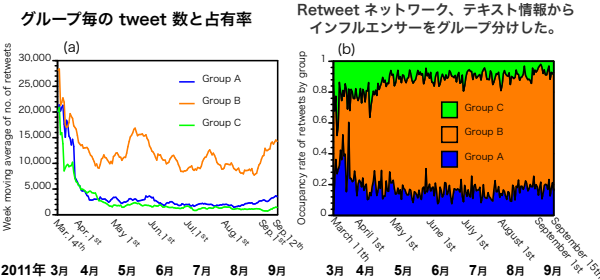


図2 サンプルされた Twitter データ 500 万件のキーワードの推移

図3 数値と「mSv」が連続して現れる Tweet 数

科学者 vs. 危険派匿名一般人

5866	2011-03-13	【伊勢】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で人々の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、それによる健康被害は現在にいたるまで報告されていない。
1446	2011-03-16	全国各地の放射線レベル。鈴木寛文科副大臣がモニタリング担当で降旗指揮。都道府県別環境放射能水準調査結果が出るようになりました。すばらしい、今度はこちらをご観下さい。 http://bit.ly/1BvH2zk
2703	2011-08-29	あなたは何度でも言う！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！本食べることは「被災者支援」ではなく「東電支援」だ！本来なら東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！子供を甲状腺ガンにしてまで東電を助けたいのか？
1057	2011-09-09	「死の前」というのは、もともとは英語の「ゴーストタウン」を取った言葉で「以前はたくさんの人の人がい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？



グループ毎の tweet 数と占有率
Retweet ネットワーク、テキスト情報から
インフルエンサーをグループ分けした。

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

