



放射線 の科学と 安全

- 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

2022 / 4 / 26 (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)

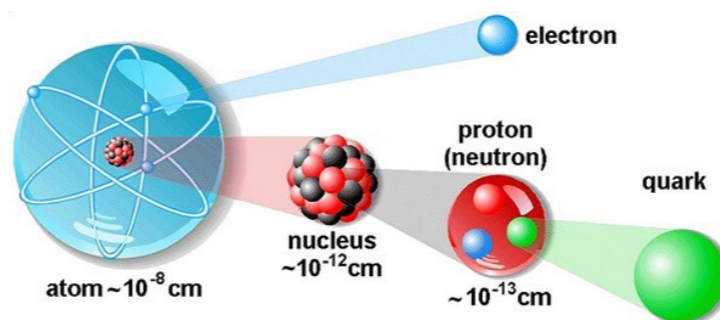
東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

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**



2021年度 Aセメスター

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

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

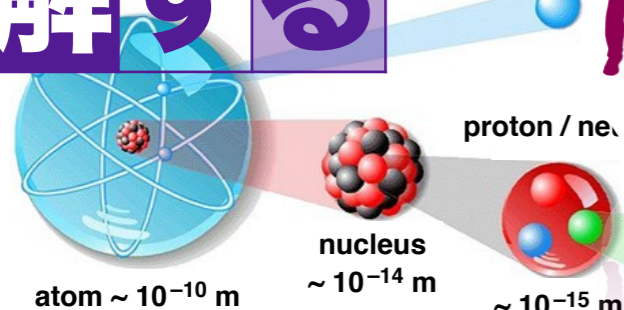
2016年度 Aセメスター

2015年度 Aセメスター

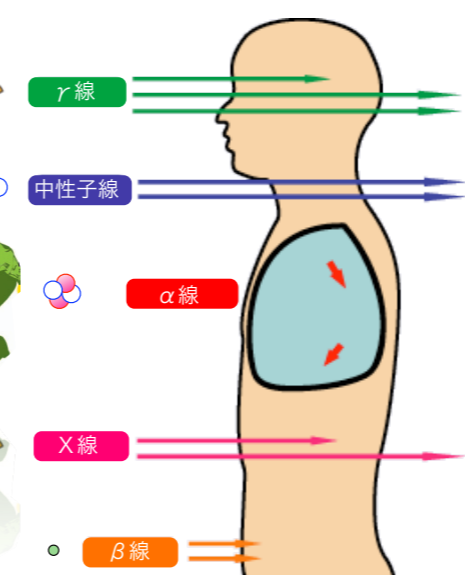
2014年度冬学期

2013年度冬学期

放射線を科学的に理解する



放射線を科学的に理解する



放射線を科学的に理解する



放射線

鳥居 寛之
小豆川勝見
渡辺雄一郎
著
中川 恵一
執筆協力

科学的に
理解する

基礎からわかる東大教養の講義

丸善出版

「放射線を科学的に理解する

— 基礎からわかる東大教養の講義 —

鳥居寛之・小豆川勝見・渡辺雄一郎 著

中川恵一 執筆協力

丸善出版

本体 2500円＋税

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

放射線を理解するには、物理学・化学・生物学・医学・工学など多くの分野の知識が必要です。しかしこれらすべてを網羅することは難しく、系統立てて学べる機会是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配慮しています。日常生活や原発事故にかかわる具体的な例を引きながらやさしくていねいに解説しましたので高校生や一般の方にも広く読んでいただきたいと願っています。

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

放射線を科学的に理解する

- 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

放射線を科学的に理解するための教育

鳥居寛之

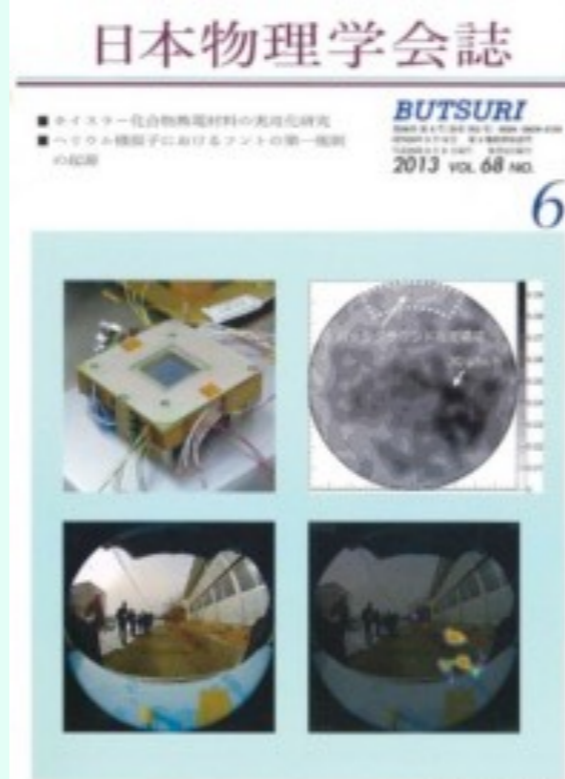
〈東京大学教養学部・大学院総合文化研究科 153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1 e-mail: torii@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp〉

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。さらに追い討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てしまった。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、あるいは間違っただけでなく、見解がばらついた科学者に対する信頼も凋落し、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さえいる。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、やいなやペットボトルが売り切れ、計画停電で列車運行が影響を受けた。辺り一帯が真っ暗の闇、都会のマンションから、皮肉いときほど美しい星空を仰ぎ見ることができなかった。

テレビでは原発の構造の解説が流れ、マイクロシーベルトとい



向けていなかったことを反省もしたが、

の教員による放射線・放射能の勉強会が開かれた。内容は放射線や放射能レ



図1 放射線物理学のスライド下例と講義風景。



図2 放射線生物学の講義で放射能の食品基準の説明に聞き入る学生たち。

自己紹介

研究：Exotic原子（ミューオニウム、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

(~2016)

放射線取扱者全学一括講習会資料検討TG メンバー

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

新規 放射線取扱者 講習

全学一括講習会 (丸~~2~~¹日)

1日目：講義

~~2日目：実習~~

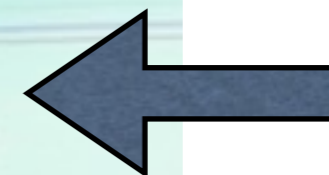
@ 本郷キャンパス or 柏キャンパス

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

質疑応答 2 時間



双方向通信

高校生のための
金曜特別講座

2011/11/11 & 18

主催：東京大学教養学部附属 教養教育高度化機構

全国約20の高校に同時双方向配信

延べ 1000人以上が受講

東大オープンコースウェア (OCW)
にて動画配信を準備中



講義 1 時間

基調講演 「放射線と正しく向き合うために」



子どもの笑顔・元気サミット
—被災地の子どもたちのために いま私たちができること—

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

損傷の種類	自然発生率 (細胞あたり)	放射線誘発率 (細胞あたり)
塩基の変性	20,000	100
塩基のそり欠	50,000	1,000
タンパク質との架橋	50,000	100
明切断	50,000	100

子どもの笑顔・元気サミット in 福島 「被災地の子どもと放射能」

主催：NPO 法人みやぎ・せんだい子どもの丘、財団法人こども未来財団
2011/11/23 於：福島市「こむこむ」わいわいホール





震災がれき処理問題

東京大学 × 博報堂 × 時事通信社



双葉町

飯舘村



対話型講演会 @ 福島県

伊達市・南相馬市・郡山市

2014/8/5-7

チーム
「あいんしゅたいん」

企画：NPO 法人あいんしゅたいん



郡山市



南相馬市



伊達市

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 の科学と 安全

- 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

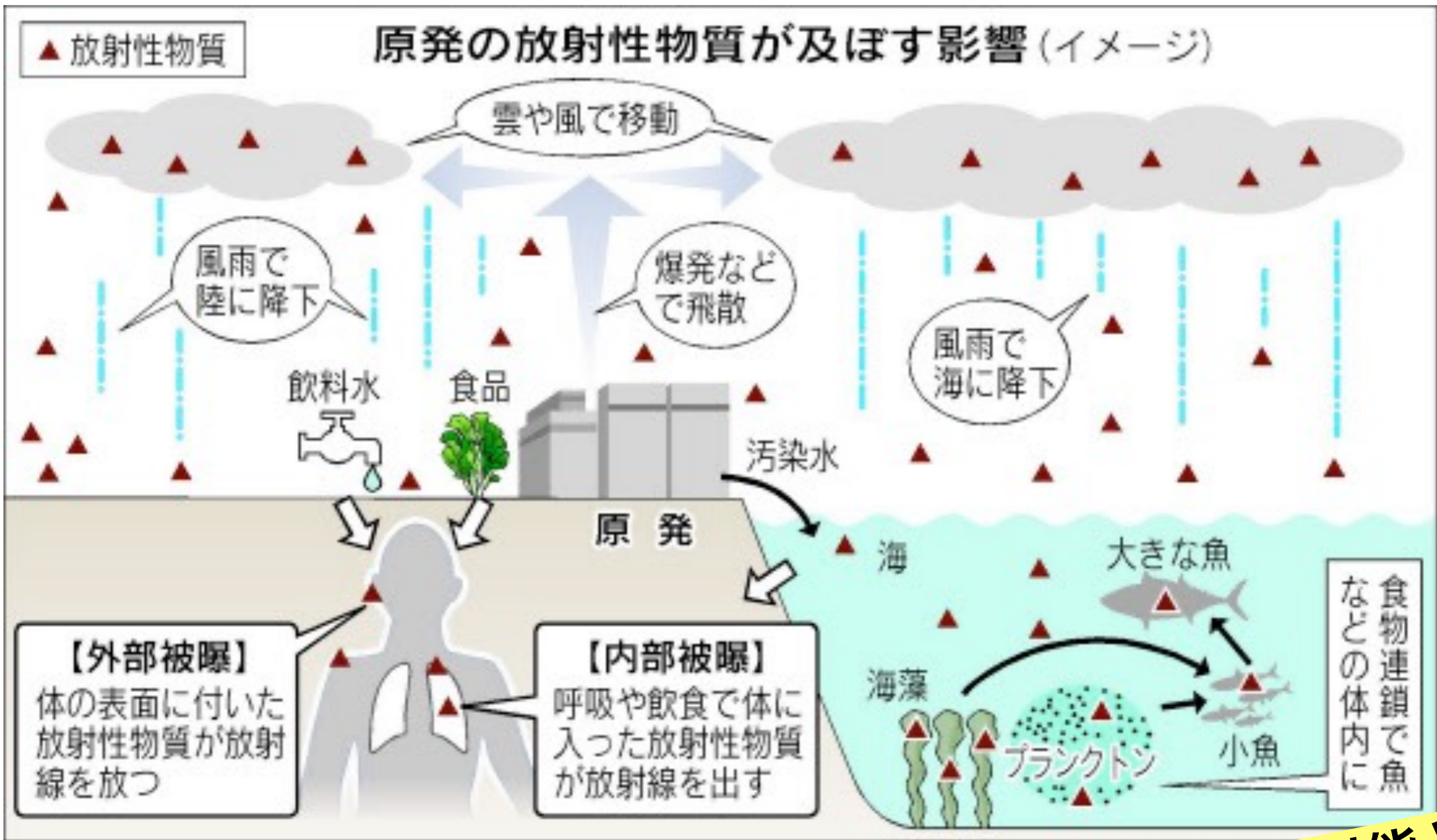
福島第1原発事故を受け、福島県から千葉県船橋市に避難した小学生の「**放射線がうつる**」といじめられたという訴えが市教育委員会で15日、分かった。市教委は同日までに、避難者の不安な気持ちを考え言動に注意し、思いやりを持って被災者の児童生徒に接するよう指導を求める通達を市立小中学校に出した。

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「どこから来たの」と話しかけられた。兄弟が「福島」と答えると地元の子どもは「**放射線がうつる**」と言い、数人が一斉に逃げ出したという。

放射線はうつらない

放射能と放射線を混同しない

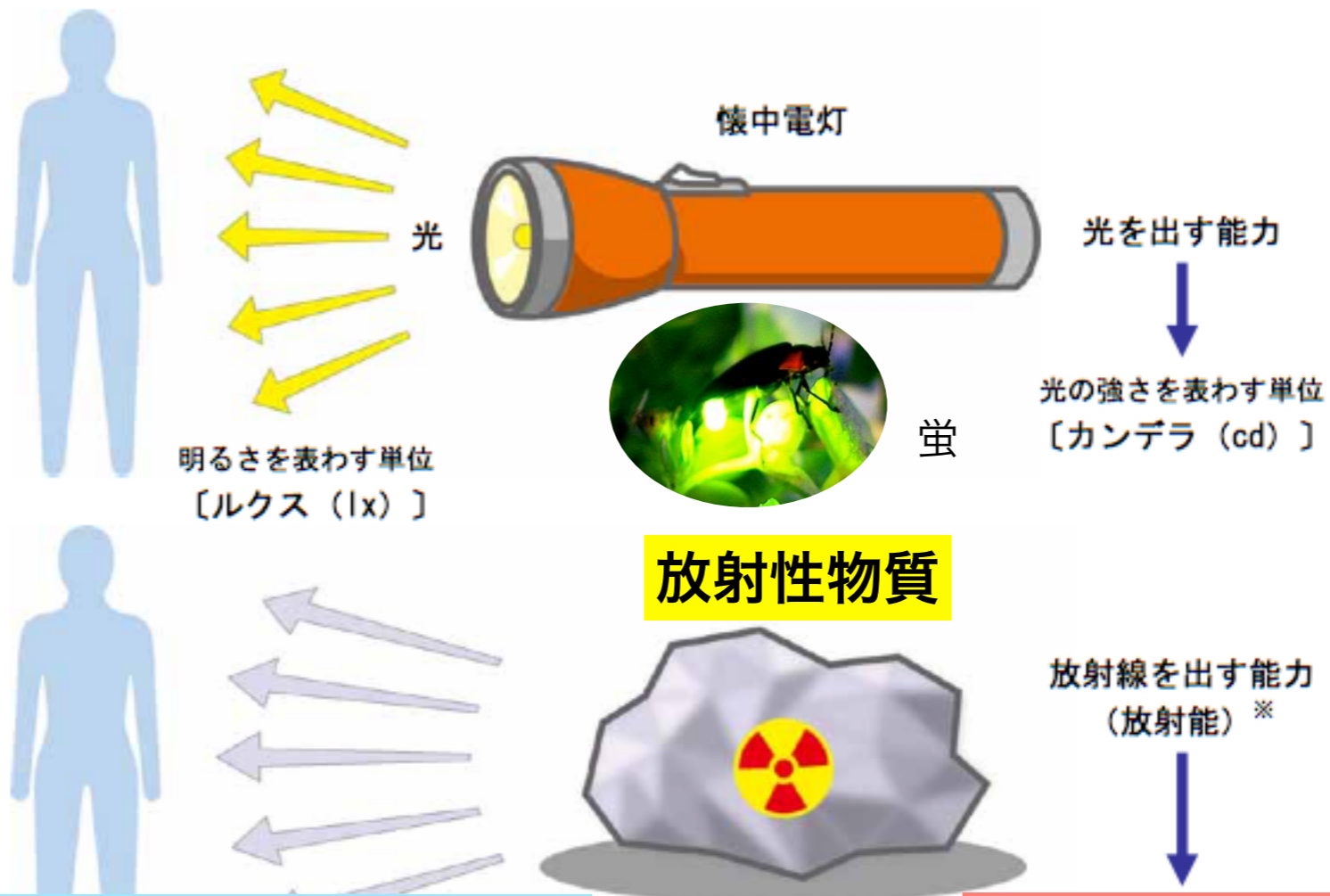
放射線に対する正しい知識をもって
「正しく怖がる」ことが必要。



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

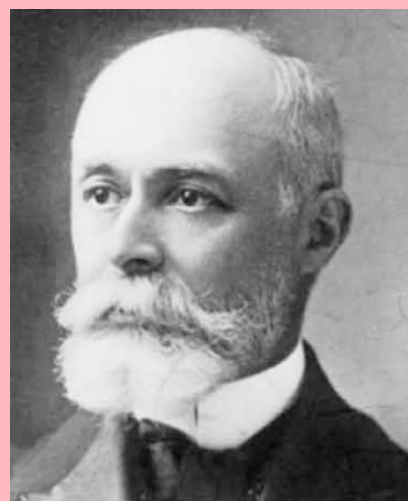
放射性物質、放射能と
放射線を混同しない

放射能と放射線



放射線の強さ・影響を表す単位
シーベルト [Sv]

放射能の強さを表す単位
ベクレル [Bq]



放射能 (radioactivity) の単位

$$[Bq] \mid Bq = 1 \text{ dps}, [Ci] \mid Ci = 37 \text{ GBq}$$

Becquerel

decay/disintegration
per second

Curie

1 キュリー = 370億ベクレル



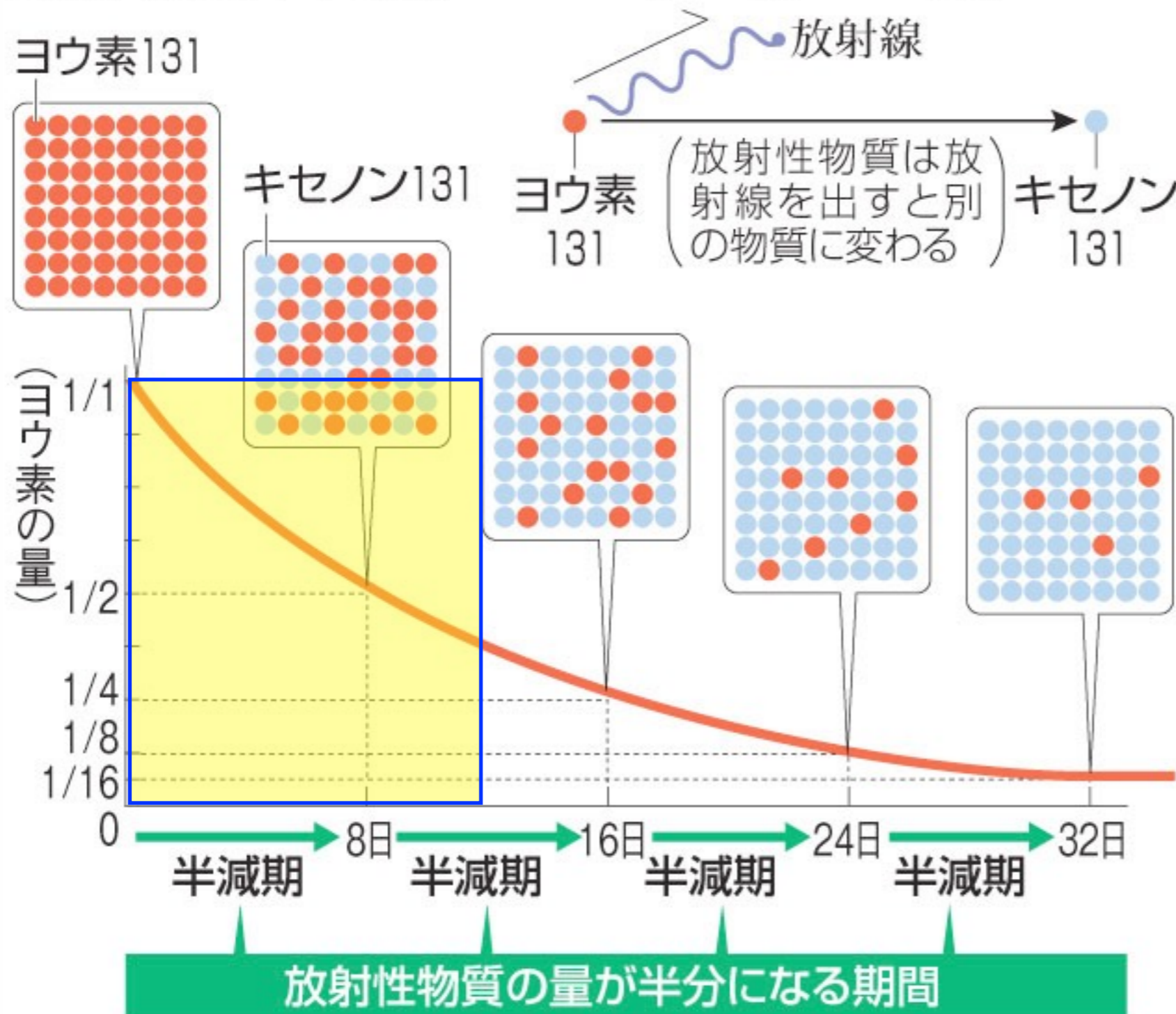
SI (国際単位系)

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}

(ヨウ素換算63万テラベクレル, <http://bit.ly/fRxmkt> これを放射性ヨウ素131の質量に焼き直すと, およそ1) 100トン 2) 100 キログラム 3) 100 グラム 4) 100ミリグラム, ?)

放射性物質の半減期のしくみ(ヨウ素131の例)



注：ヨウ素等価換算は、環境や人への影響を勘案して係数を決めている。ヨウ素以外の核種の質量を計算するには適していない。ヨウ素131については、15万テラベクレルの放出と言われているので、その質量は上の問いに対する計算値の4分の1となる。また、半減期の長いセシウム137などでは、同じベクレル数でも、モル数も質量もヨウ素に比べてずっと大きくなる。

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

$[Gy/h], [Sv/h], \text{etc....}$

放射線量率の時間積分が（積算）放射線量になる。

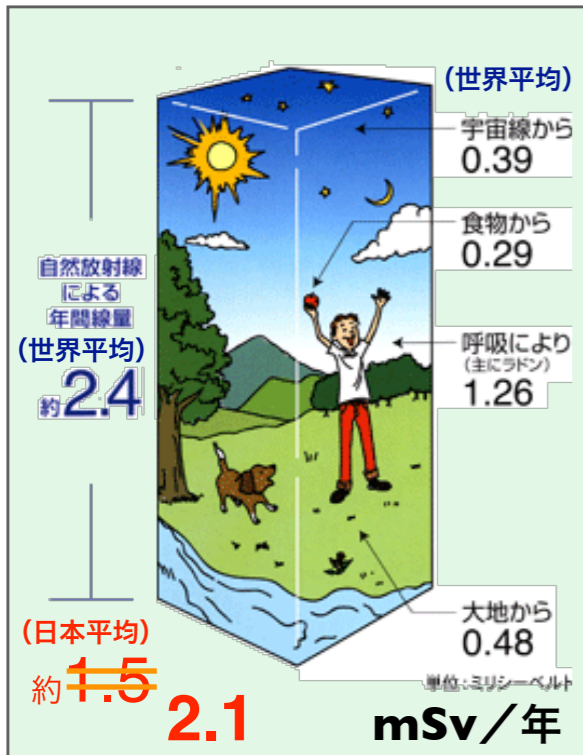
身の回りの放射線

mSv (実効線量)



10 → **10**
 ブラジル・ガラバリの放射線
 (年間、大地等から)

← 6.9 **6.9**
 胸部X線コンピュータ断層
 撮影検査(CT スキャン)(1回) ★



← 2.4 → **1**
 1人あたりの自然放射線(年間)(世界平均) ★

← 1.0 → **1.0**
 一般公衆の線量限度(年間)
 (医療は除く)

← 0.4 → **0.4**
 岐阜 ↔ 神奈川
 国内自然放射線の差(年間)
 (県別平均値の差の最大)

← 0.6 → **0.6**
 胃のX線集団検診(1回)

← 0.2 → **0.1**
 東京—ニューヨーク航空機
 旅行(往復)
 (高度による宇宙線の増加)

← 0.05 → **0.05**
 胸のX線集団検診(1回) ★

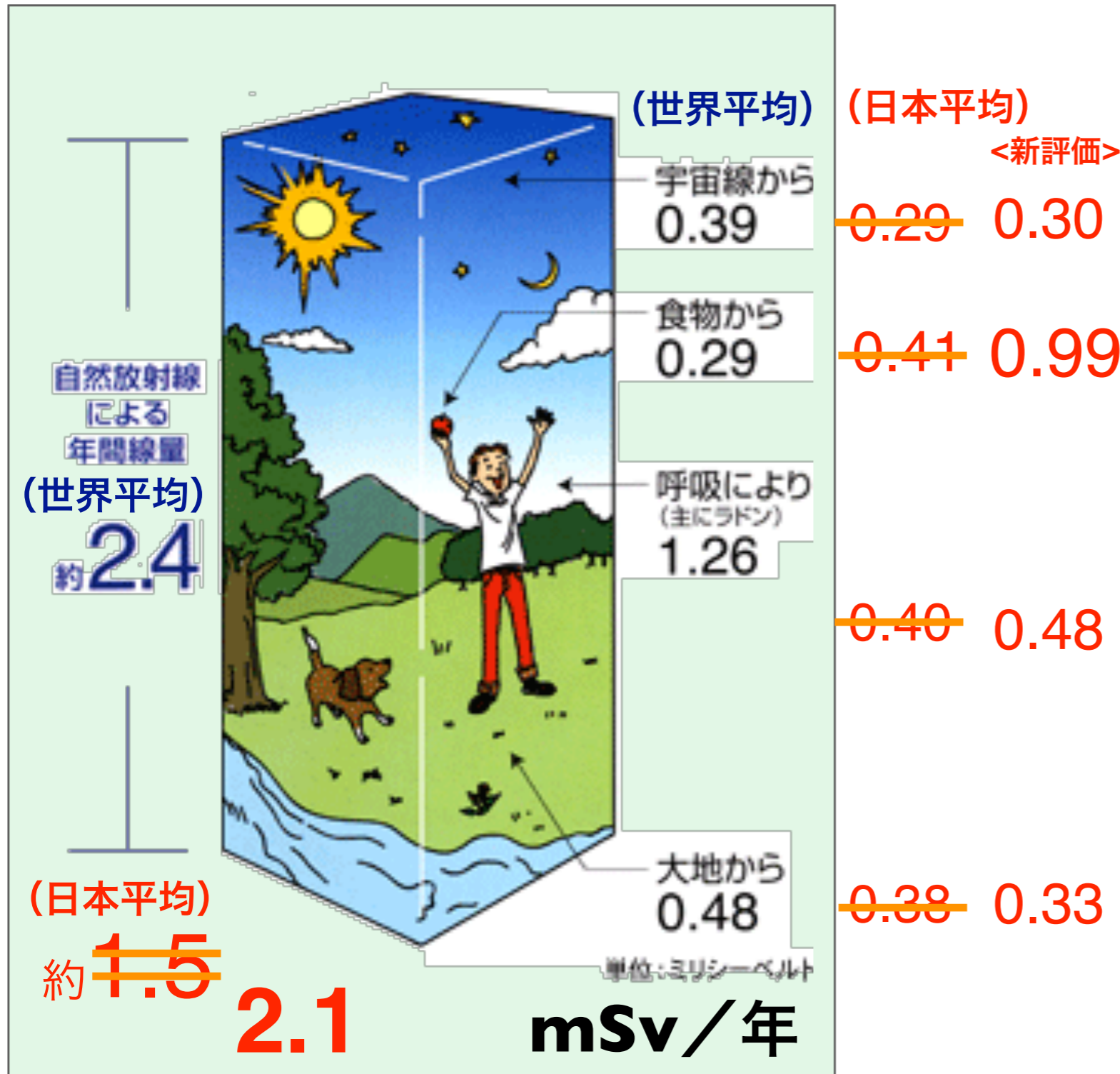
← 0.022 → **0.022**
 再処理工場からの放射性物質
 の放出による評価値(年間)

← 0.01 → **0.01**
 原子力発電所(軽水炉)周辺の線量目標値(年間)
 (実績ではこの目標値を大幅に下回っています)

← 0.01 → **0.01**
 クリアランスレベル導出の
 線量目安値(年間)

身の周りの放射線

mSv (実効線量)



日本人の食す魚介類に ^{210}Po や ^{210}Pb が多く含まれ、それによる α 線内部被曝の評価値を従来より上方修正。

元図: 東京電力の旧ホームページより

関西は自然放射線量が高い！

mSv/年

全国の自然放射線量

宇宙、大地からの放射線と
食物摂取によって受ける放射線量
(ラドンなどの吸入によるものを除く)

関東・東北は低い！

日本全体
0.99

御影石
(花崗岩)

温泉地



《表5》 土壌や岩石中に含まれる天然の放射性物質

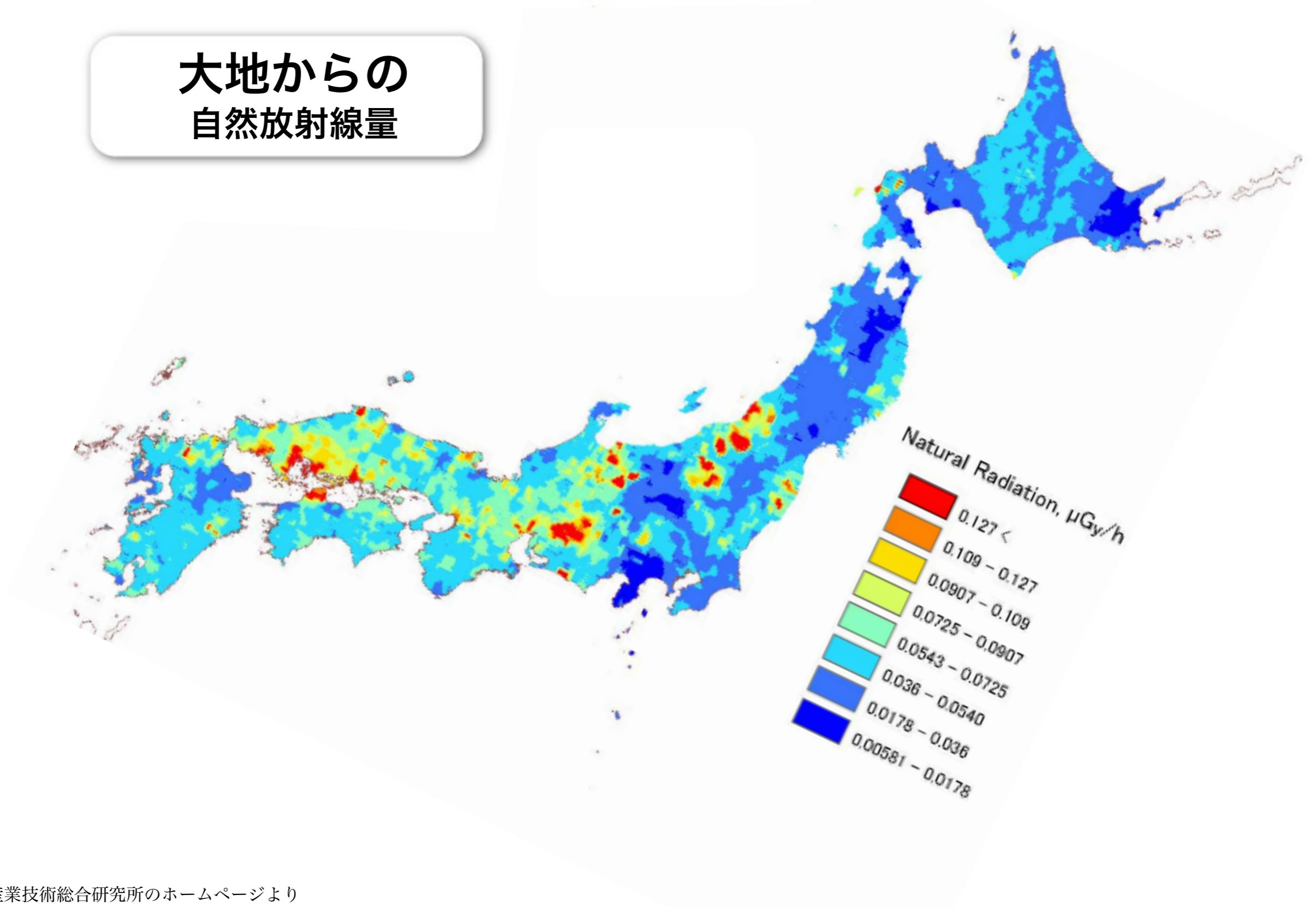
放射性物質の種類	放射能濃度 (ベクレル/kg)	
	一般の土壌・岩石	花こう岩
カリウム40	100~700	500~1600
ウラン238 (娘核種を含む)	10~50	20~200
トリウム232	7~50	20~200

関東ローム層

全国の自然放射線量

$\mu\text{Gy}/\text{時}$

大地からの
自然放射線量



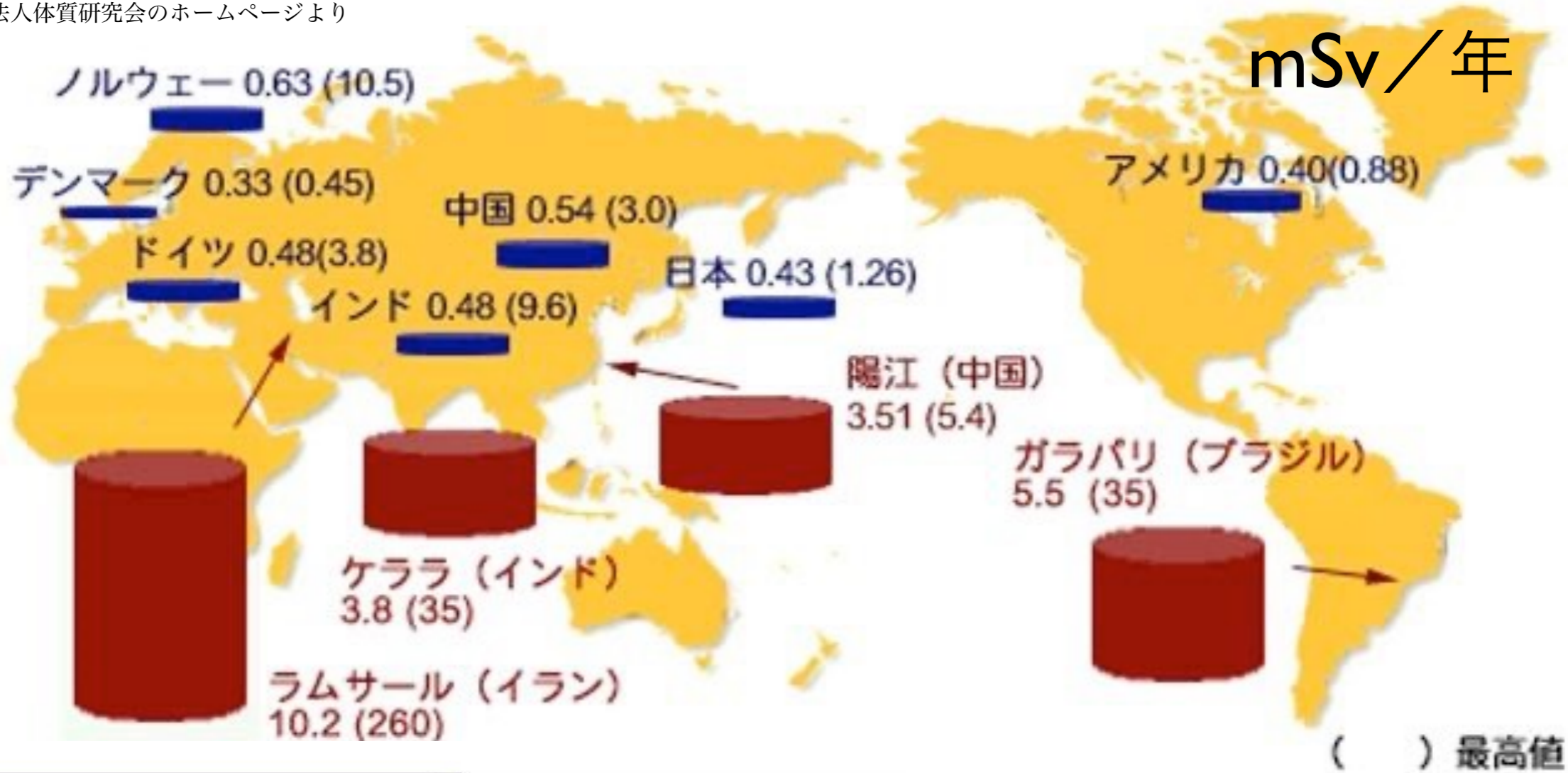
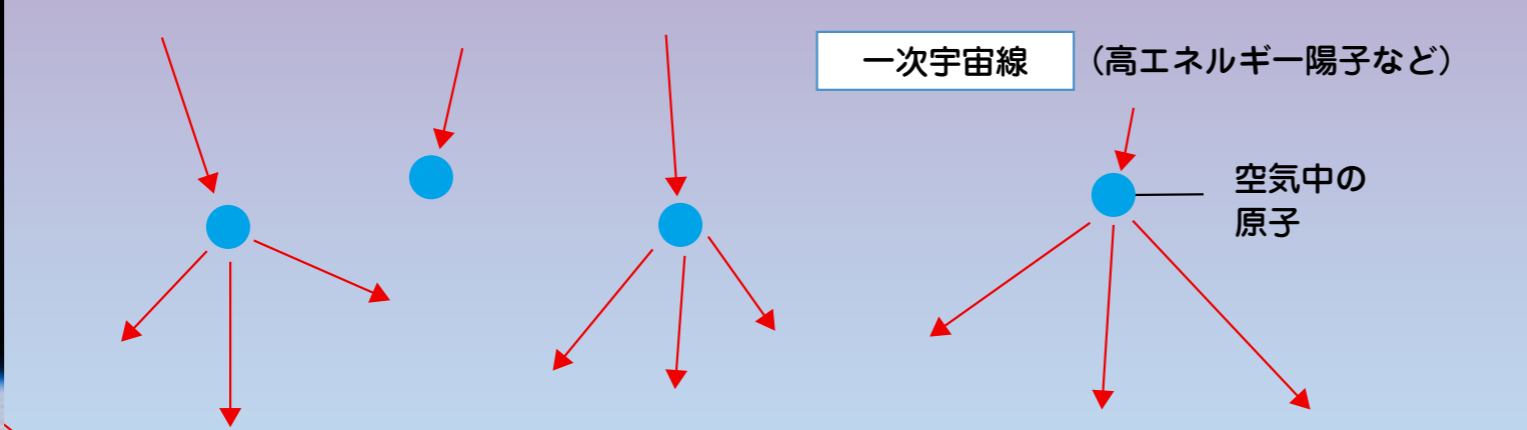


表1 高自然放射線地区と対照地区におけるがん死亡率の比較^{7,8)}

	高自然放射線地区	対照地区
自然放射線量率 (mSv/年)	5.5	2.1
がん死亡率 (10万人・年)	48.8	51.1
調査人数・年	1,008,769	995,070

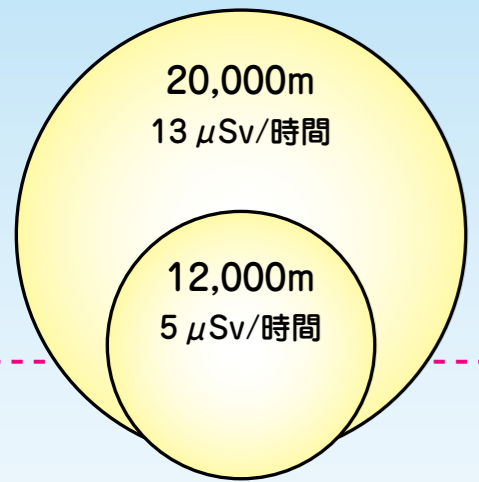
図2 陽江市・恩平県放射線環境調査実施地域



三重水素、ベリリウム7、ベリリウム10、ナトリウム22、ナトリウム24などの宇宙線生成核種が生じる (一次宇宙線のエネルギーが比較的低い場合)

中性子、陽子、 π 中間子、K中間子などの放射性物質が生じる (一次宇宙線のエネルギーが高い場合)

※○の大きさは、放射線を受ける量をあらわしている。



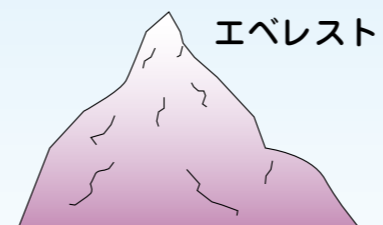
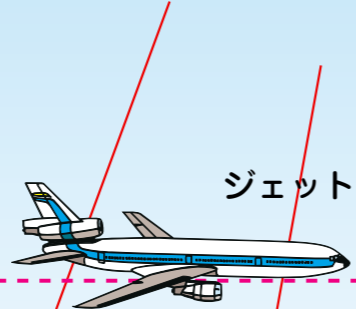
100km

10km

1km

海面 ○ 0.03 $\mu\text{Sv}/\text{時間}$

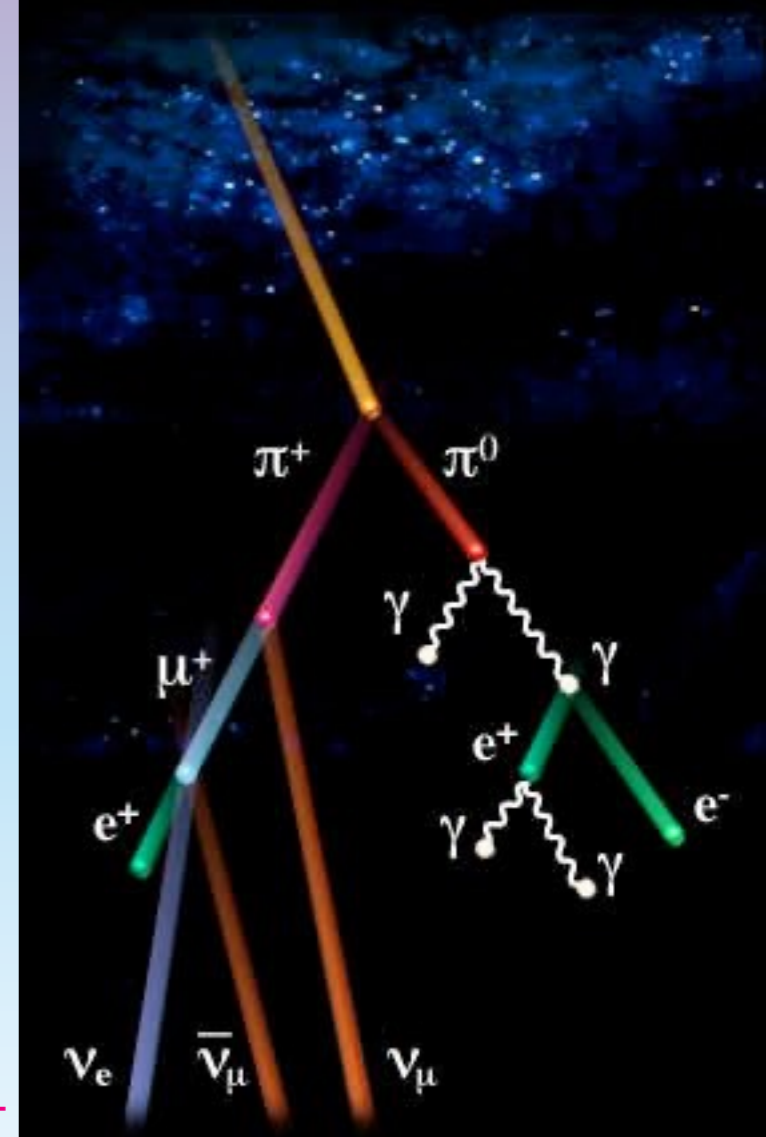
μSv = マイクロシーベルト



《表4》宇宙線による年平均実効線量

地域 (高高度地域)	人口 (百万人)	高度 (m)	年実効線量 (μSv)		
			電離成分	中性子	合計
ラパス (ボリビア)	1.0	3900	1120	900	2020
ラサ (中国)	0.3	3600	970	740	1710
キトー (エクアドル)	11.0	2840	690	440	1130
メキシコシティ (メキシコ)	17.3	2240	530	290	820
ナイロビ (ケニア)	1.2	1660	410	170	580
デンバー (米国)	1.6	1610	400	170	570
テヘラン (イラン)	7.5	1180	330	110	440
海面			240	30	270
世界平均			300	80	380

出典：国連放射線影響科学委員会報告 (1993)



東京～NY 往復
200 μSv (max)

体内、食物中の自然放射性物質

出典：旧科学技術庁パンフレット

Bq / kg

Bq (60 kg)

●体内の放射性物質の量

放射性物質	濃度 (ベクレル/kg)	全身の放射能 (60キログラムの人のベクレル数)
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

日本人は高い値
(魚介類に多く
含まれる)

●食物中のカリウム40の放射能量 (日本)

(単位：ベクレル/kg)



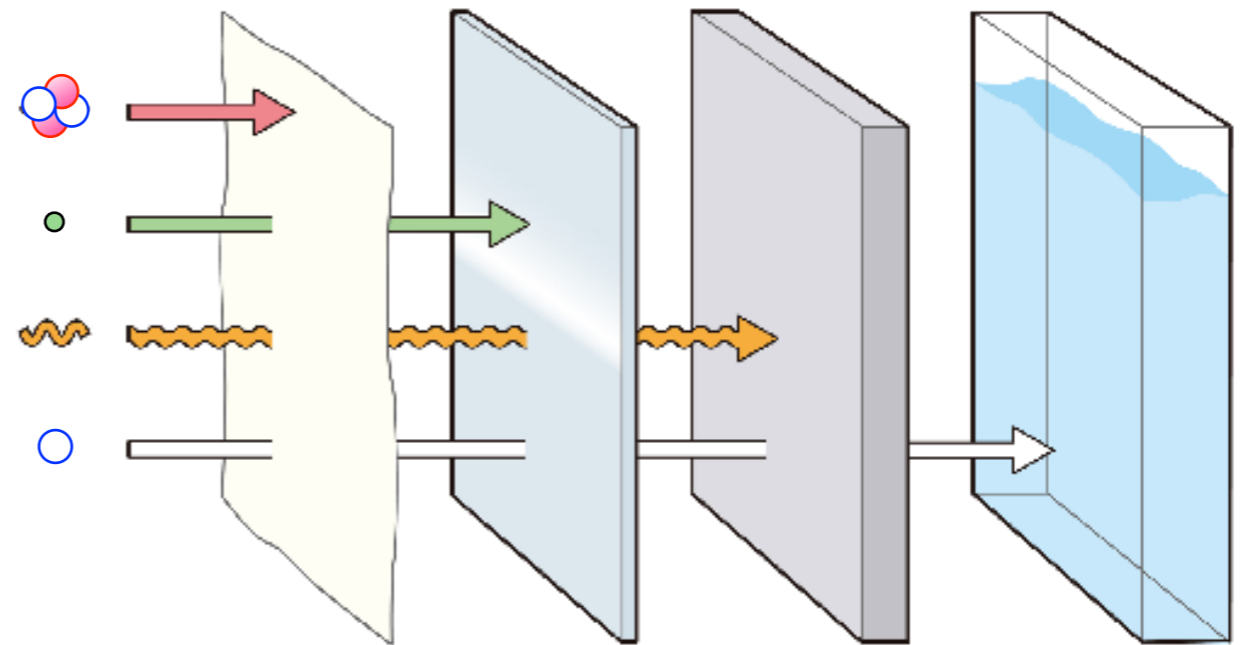
Bq / kg

^{40}K
 同位体比 0.012%
 半減期 13億年

$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ (EC γ) 11%
 $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca}$ (β^-) 89%

毎日カリウム 3 g = ^{40}K を 80 Bq 摂取。同量を排泄。

放射線の科学と安全



2022 / 4 / 26 (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

原子核物理学

火力発電と原子力発電の違い

火力

化学的燃焼

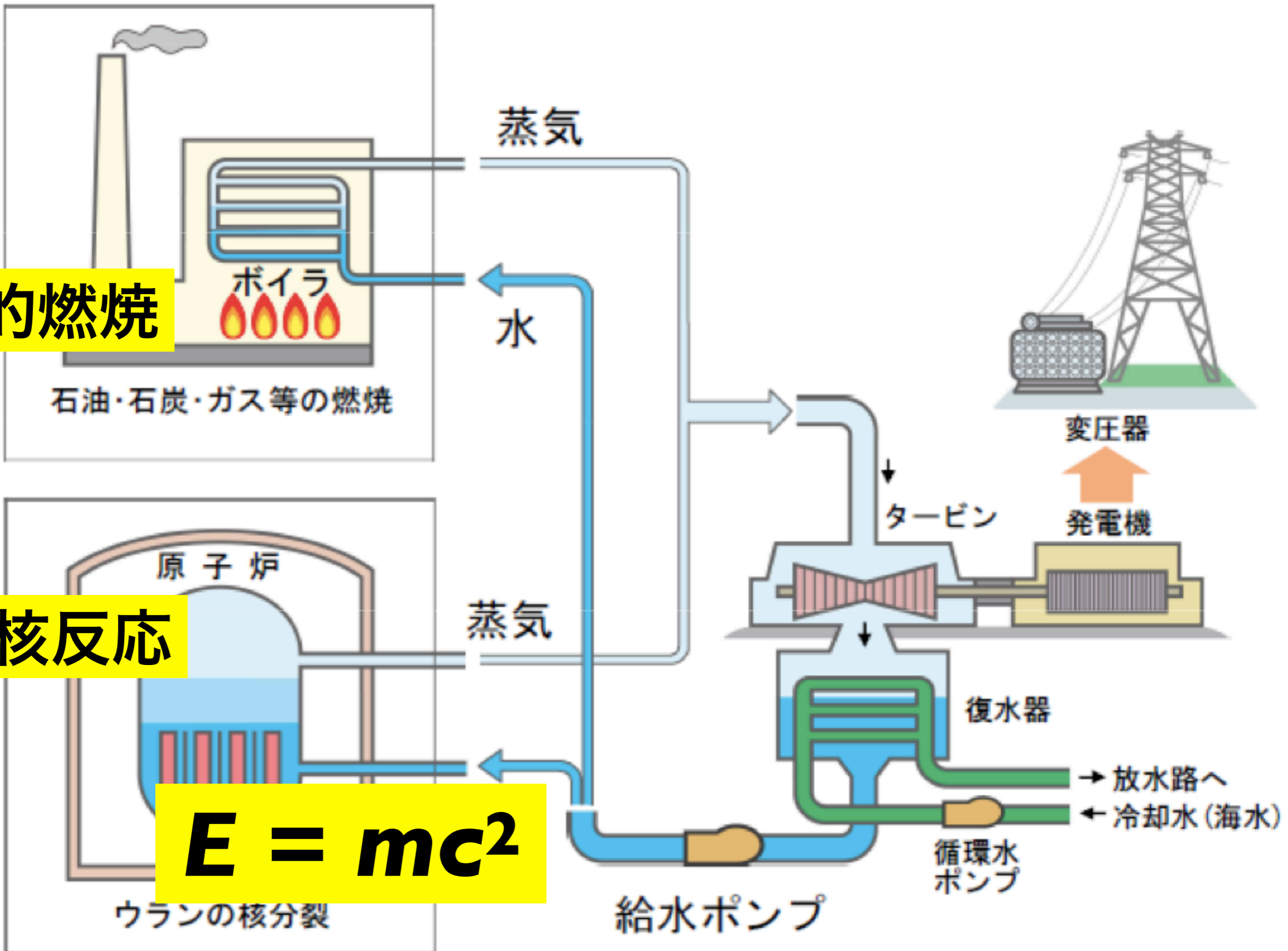
石油・石炭・ガス等の燃焼

原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$

ウランの核分裂





分子
molecule

nm (10^{-9} m) 化学

ナノメートル

eV Chemistry

電子ボルト

原子: atom < atomus < ατομος < a- + témnein + -os
(切ることができない)

原子物理学 Atomic Physics



原子
atom

Å (10^{-10} m)

オングストローム Ångström

eV – keV

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
nucleus

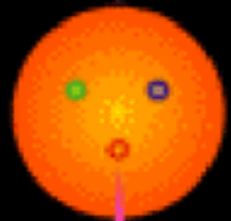
原子核物理学 Nuclear Physics

fm (10^{-15} m)

フェムトメートル

MeV

メガ電子ボルト



陽子
proton

素粒子物理学 Particle Physics

am (10^{-18} m)

アトメートル

GeV

ギガ電子ボルト



クォーク
quark

元素周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
1	1 氢	Atomic Sym																2 氦						
2	3 锂	4 铍	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> 1 氢 Hydrogen 1.00794 1s¹ </div> <div style="font-size: small;"> α A衰变 β β衰变 p Proton emission β+ Beta+ decay n Neutron emission EC Electron capture SF Spontaneous fission □ Stable </div> </div>																5 硼	6 碳	7 氮	8 氧	9 氟	10 氖
3	11 钠	12 镁																	13 铝	14 硅	15 磷	16 硫	17 氯	18 氩
4	19 钾	20 钙	21 钪	22 钛	23 钒	24 铬	25 锰	26 铁	27 钴	28 镍	29 铜	30 锌	31 镓	32 锗	33 砷	34 硒	35 溴	36 氪						
5	37 铷	38 锶	39 钇	40 锆	41 铌	42 钼	43 锝	44 钨	45 铼	46 钨	47 铟	48 锡	49 铊	50 铅	51 铟	52 碲	53 碘	54 氙						
6	55 铯	56 钡	57-71 镧系	72 铪	73 钽	74 钨	75 铼	76 钨	77 铱	78 铂	79 金	80 汞	81 铊	82 铅	83 铋	84 钋	85 砹	86 氡						
7	87 钫	88 镭	89-103 锕系	104 𨭎	105 𨭏	106 𨭐	107 𨭑	108 𨭒	109 𨭓	110 𨭔	111 𨭕	112 𨭖	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og						

铼

锝

这些原理没有一致稳定的同位素,大量的同位素最长的半衰期只有

元素周期表 设计版权 © 1997 Michael Dayah. <http://www.dayah.com/> 30, 2008

57 镧	58 铈	59 镨	60 钕	61 钐	62 铈	63 铈	64 钆	65 铈	66 钆	67 铈	68 铈	69 铈	70 铈	71 镱
89 锶	90 钇	91 铈	92 铈	93 铈	94 铈	95 铈	96 铈	97 铈	98 铈	99 铈	100 铈	101 铈	102 铈	103 铈

周期表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H 1.0079	Atomic Sym Mass																2 He 4.0026
3 Li 6.941	4 Be 9.0121	C 固体 Hg 液体 H 気体 Rf Unknown										5 B 10.811	6 C 12.010	7 N 14.006	8 O 15.999	9 F 18.998	10 Ne
11 Na 22.989	12 Mg 24.305	金属 アルカリ金属 アルカリ土類金属 ランタノイド 希ガス										13 Al 26.981	14 Si 28.085	15 P 30.973	16 S 32.065	17 Cl	18 Ar
19 K 39.098	20 Ca 40.078	21 Sc 44.955	22 Ti 47.867	23 V 50.941	24 Cr 51.996	25 Mn 54.938	26 Fe 55.845	27 Co 58.933	28 Ni 58.693	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.64	33 As 74.921	34 Se 78.96	35 Br	36 Kr
37 Rb 85.467	38 Sr 87.62	39 Y 88.905	40 Zr 91.224	41 Nb 92.906	42 Mo 95.96	43 Tc 98.906	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.32	47 Ag 107.868	48 Cd 112.411	49 In 114.818	50 Sn 118.710	51 Sb 121.757	52 Te 127.60	53 I	54 Xe
55 Cs 132.905	56 Ba 137.327	57-71 Lanthanides	72 Hf 178.49	73 Ta 180.948	74 W 183.84	75 Re 186.207	76 Os 190.23	77 Ir 192.22	78 Pt 195.084	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.38	82 Pb 207.2	83 Bi 208.98	84 Po (209)	85 At	86 Rn
87 Fr (223)	88 Ra (226)	89-103 Actinides	104 Rf (261)	105 Db (262)	106 Sg (266)	107 Bh (264)	108 Hs (277)	109 Mt (268)	110 Ds (271)	111 Rg (272)	112 Cn (285)	113 Nh (284)	114 Fl (289)	115 Mc (288)	116 Lv (292)	117 Ts (294)	118 Og (294)
超重元素																	
周期表 Design and Interface C...																	
57 La 138.90	58 Ce 140.11	59 Pr 140.90	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.36	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.92	66 Dy 162.50	67 Ho 164.93	68 Er 167.25	69 Tm 168.93	70 Yb 173.05	71 Lu 174.96	com/ Last... May 30, 2...		
89 Ac (227)	90 Th 232.03	91 Pa 231.03	92 U 238.02	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (252)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (262)			

113 Nh
Nihonium
铈

116 Lv
Livermorium
鉷

114 Fl
Flerovium
鈇

鎢

砷

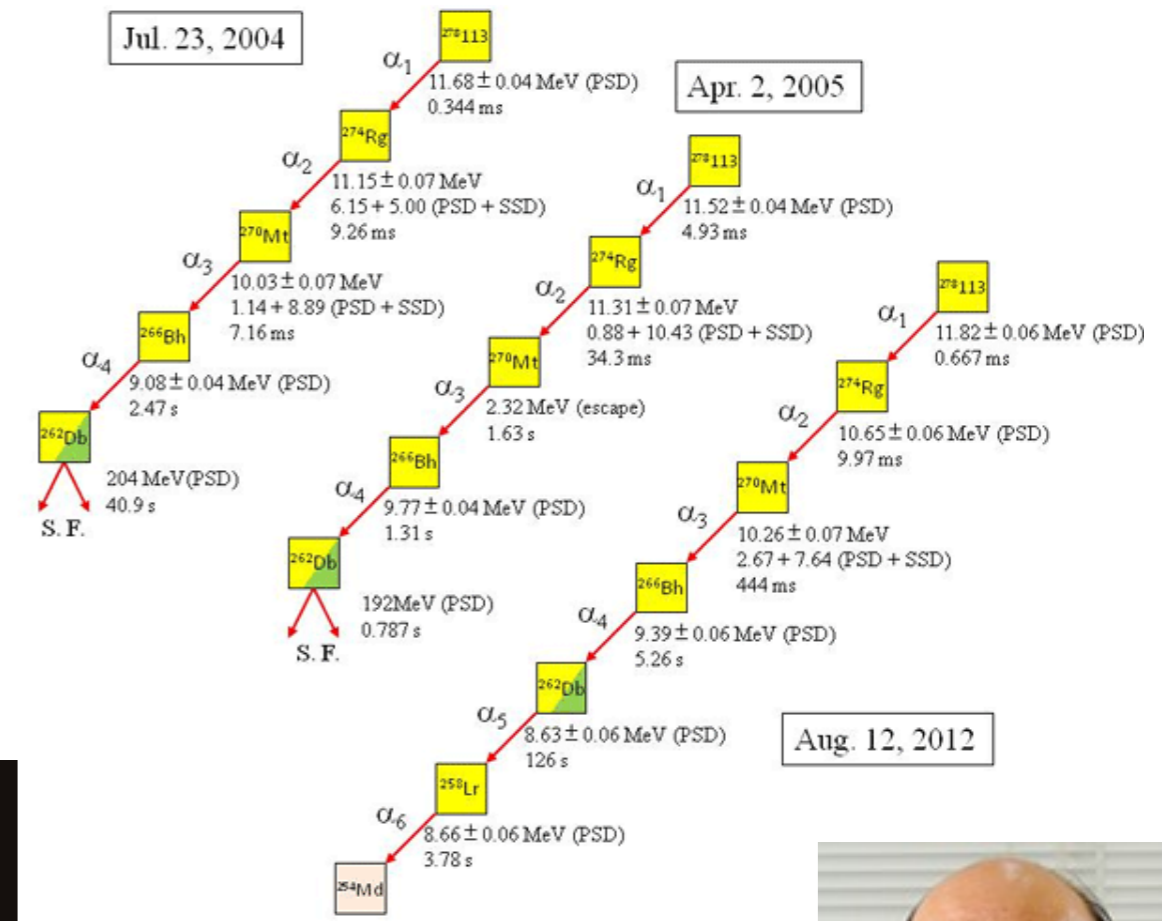
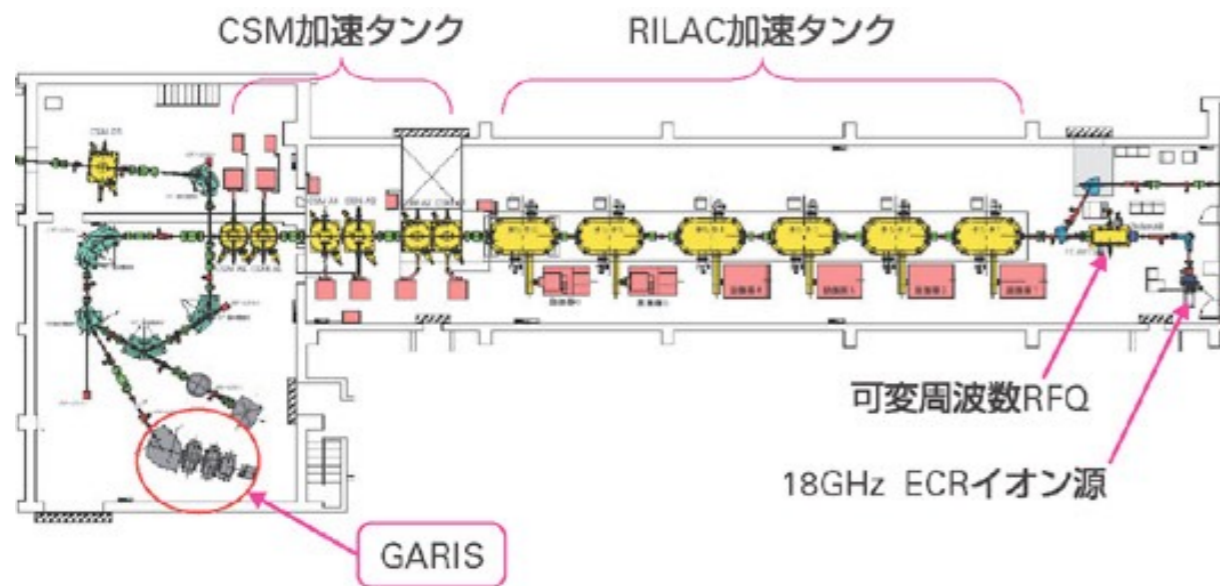
氮

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 Georjy Flërov
米国 Lawrence-Livermore 国立研究所

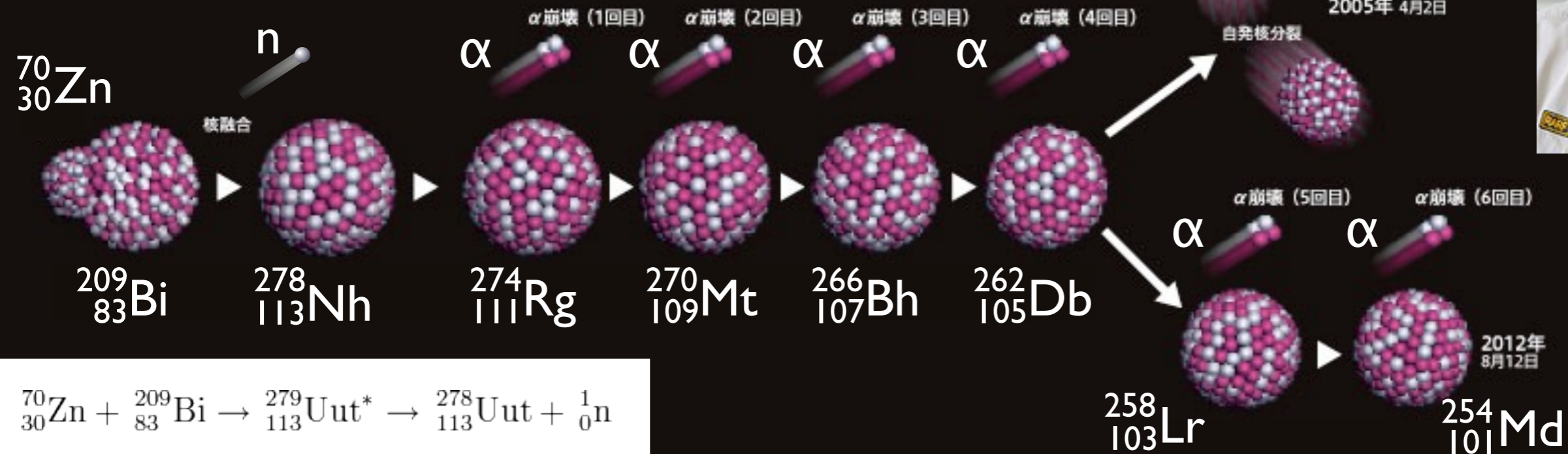
超重元素 $_{113}\text{Nh}$ ニホニウム 生成

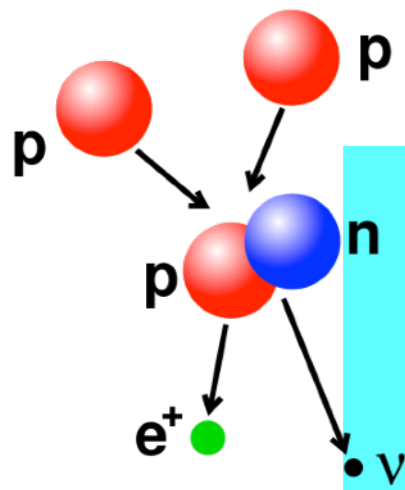
2004, 05, 12年、理研 森田浩介氏ら



$^{278}_{113}\text{Nh}$ の合成と崩壊の様子

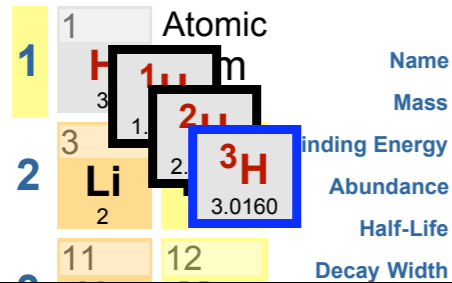
原子番号30の亜鉛 (^{70}Zn) と原子番号83のビスマス (^{209}Bi) が核融合を起こし、原子番号113の ^{278}Nh が合成された。2004年と2005年に合成した113番元素 (^{278}Nh) は、4回の α 崩壊を繰り返し、原子番号105のドブニウム (^{262}Db) は自発核分裂を起こして2個の原子核となった。2012年に合成した ^{278}Nh は、 ^{262}Db からさらに2回の α 崩壊を繰り返し、原子番号103のローレンシウム (^{258}Lr)、原子番号101のメンデレビウム (^{254}Md) となった。3個の ^{278}Nh の崩壊の様子から、113番元素の平均寿命は2ミリ秒であることが分かった。





Periodic Table of Elements

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18



Name Hydrogen-3
Mass 3.01604927767

α Alpha decay

β Beta decay

Selected All

2
He
2

陽子 p

重陽子 d = (pn)

三重陽子 t = (pnn)

原子核

アルファ粒子

$\alpha = (ppnn)$

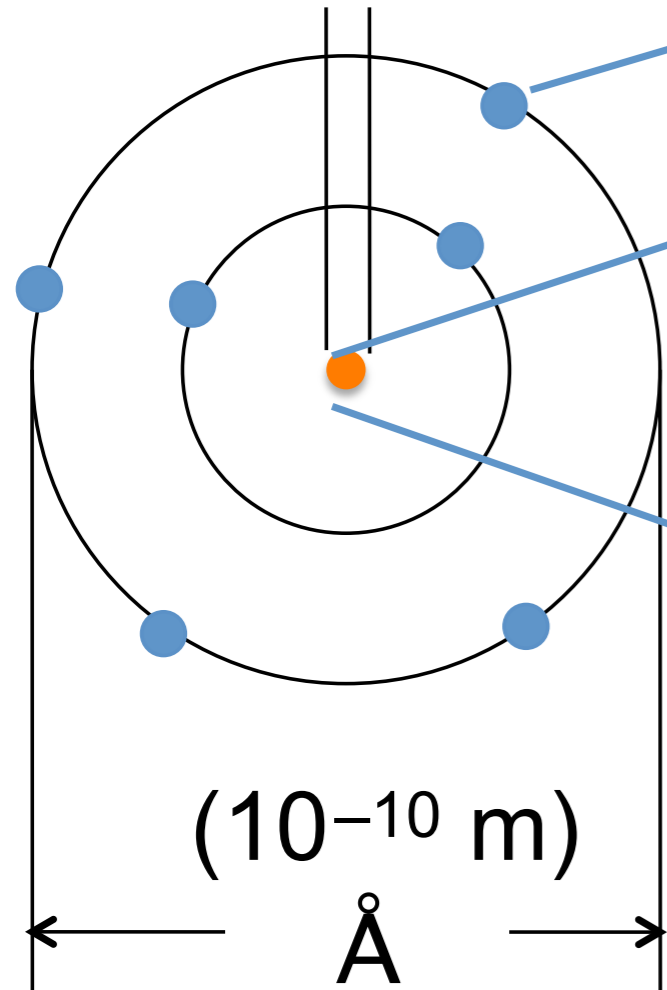
${}^3\text{He}^{++} = h = (ppn)$

H	Hydrogen	水素	氫 qīng
${}^1\text{H}$ (H)	Protium	軽水素	気 piē
${}^2\text{H}$ (D)	Deuterium	重水素	気 dāo
${}^3\text{H}$ (T)	Tritium	三重水素	気 chuān
He	Helium	ヘリウム	氦 hài
${}^4\text{He}$	Helium-4	ヘリウム4	
${}^3\text{He}$	Helium-3	ヘリウム3	原子

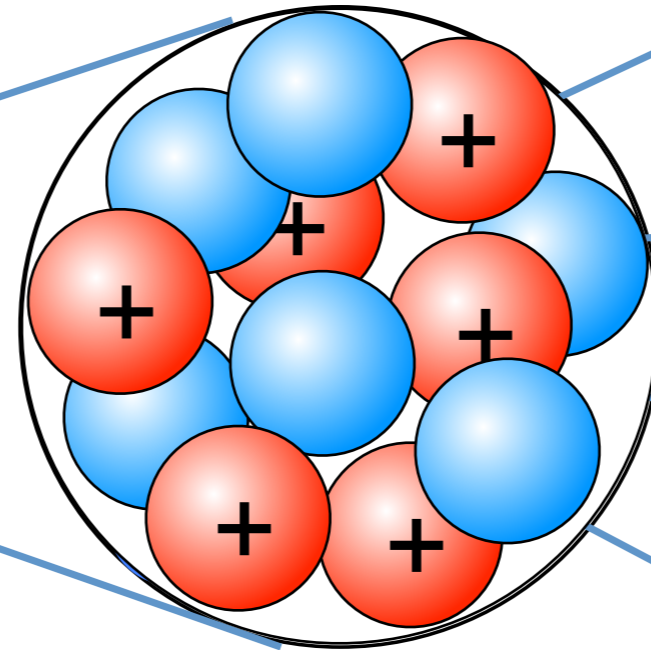
原子と原子核

($10^{-15} - 10^{-14}$ m)
1 - 10 fm

軌道電子

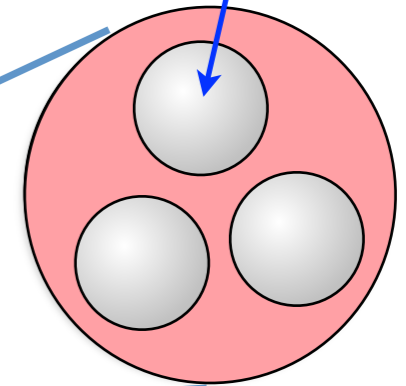


原子

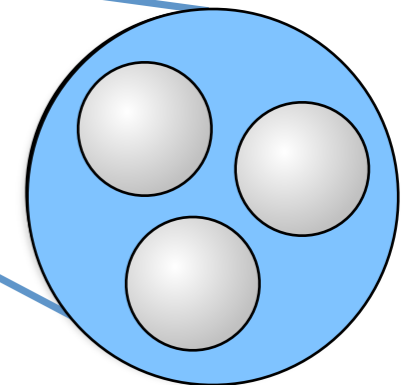


原子核

クォーク



陽子



中性子

炭素原子 ${}^6_{12}\text{C}$ の模式図

放射性物質とは

放射性核種
= 放射性同位体
= 不安定原子核

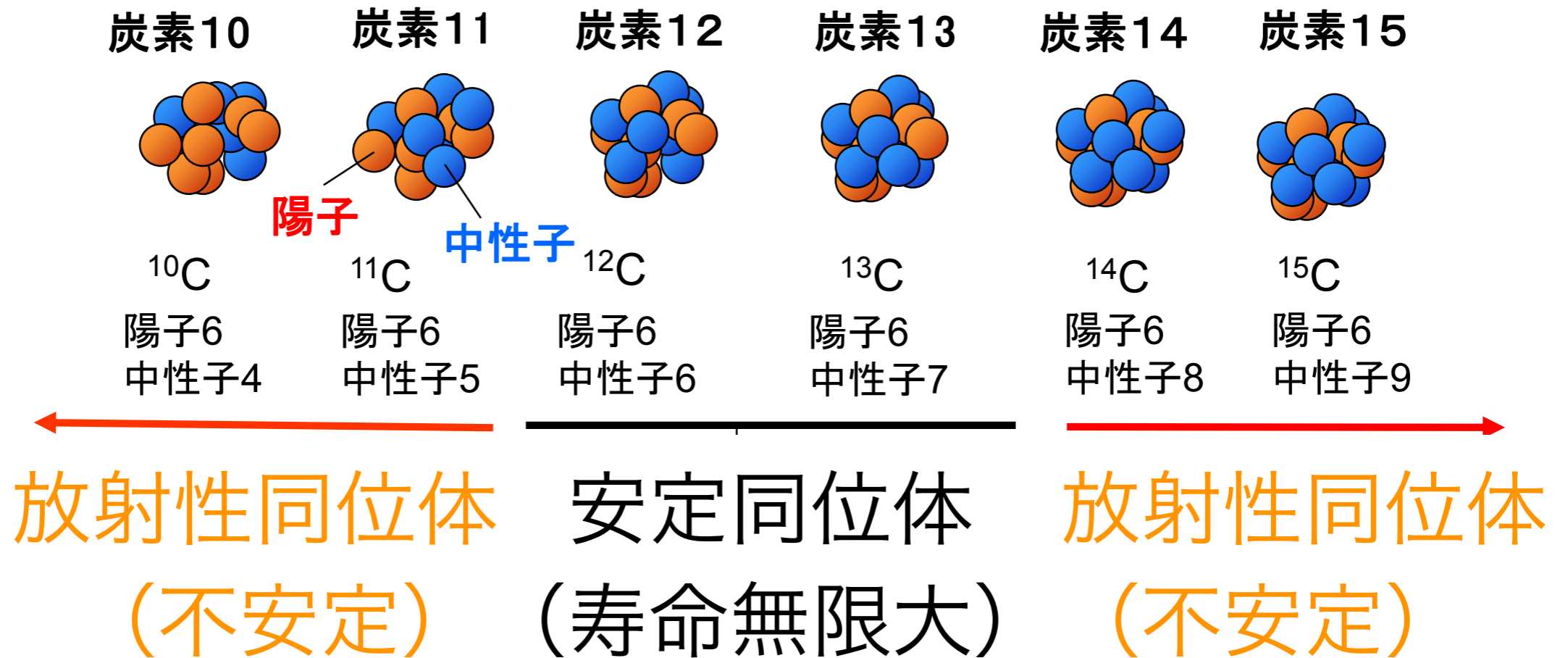
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



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

炭素原子核の例



核種の表記法

nuclide



C-12

炭素12

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

半減期

19.3秒

20.3分

99%

1%

存在比

5730年

2.4秒

炭素10

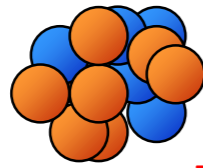
炭素11

炭素12

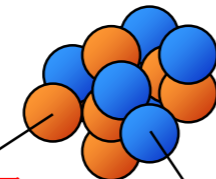
炭素13

炭素14

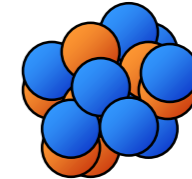
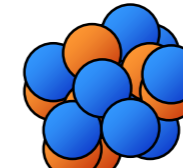
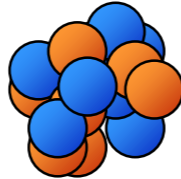
炭素15



陽子



中性子



^{10}C

^{11}C

^{12}C

^{13}C

^{14}C

^{15}C

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

陽子6

中性子4

中性子5

中性子6

中性子7

中性子8

中性子9

陽子過剰になると？

(寿命がある: β^+ 壊変、電子捕獲(EC))

天然に存在=**安定同位体**
寿命が無限大

中性子過剰になると？

(寿命がある: β^- 壊変)

放射性同位体

半減期

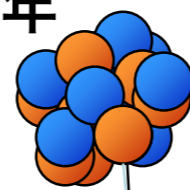
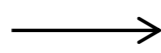
5730 ± 40年



中性子

炭素14

(放射性同位体)



陽子

窒素14

(安定)

+ e^-

電子

(β 線:放射線)

+ $\bar{\nu}_e$

反ニュートリノ

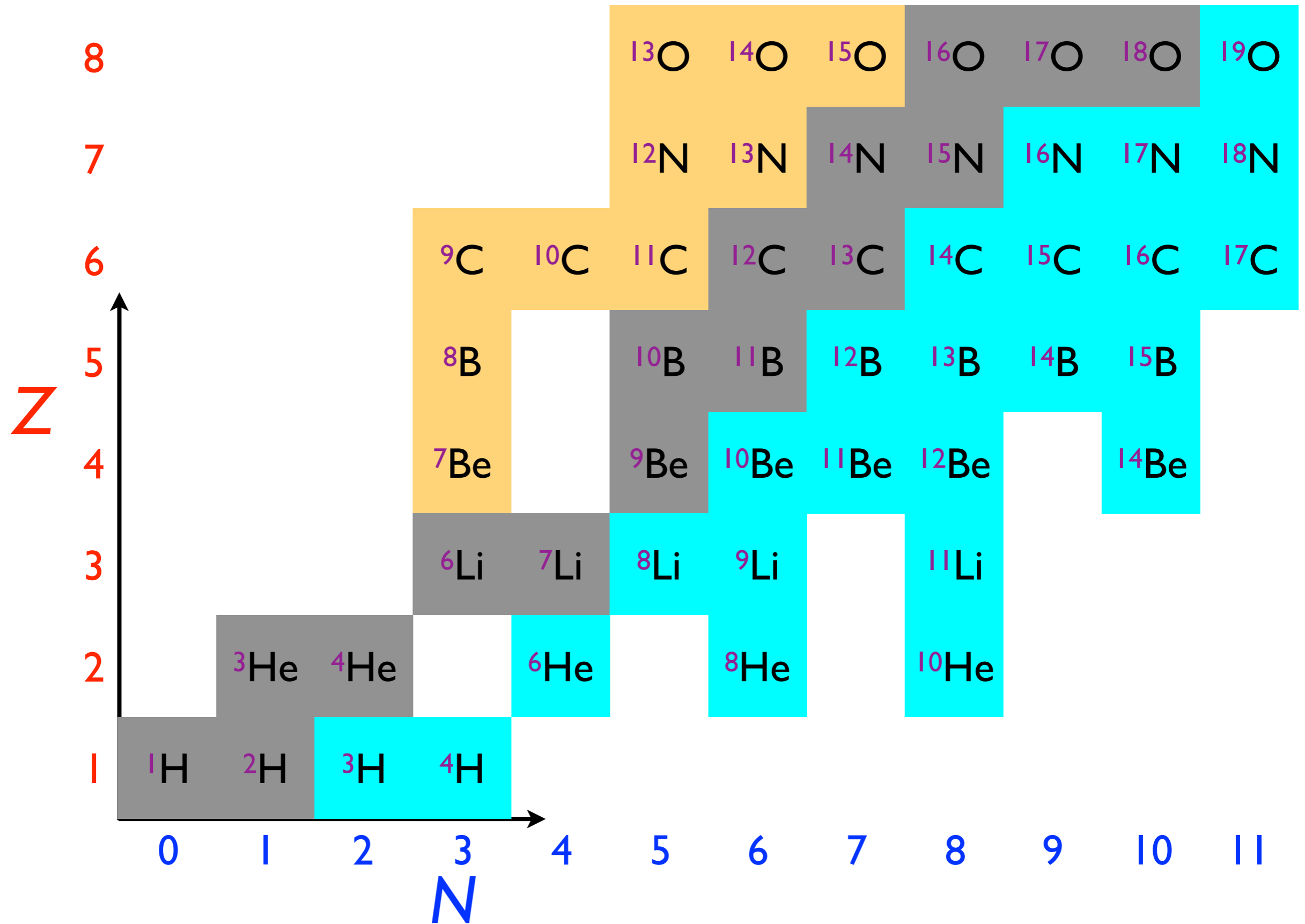
放射性同位体

ベータマイナス壊変 (崩壊)

β^- decay



核图表



核種の数

安定核種 約300種

実験的に確認 3000種

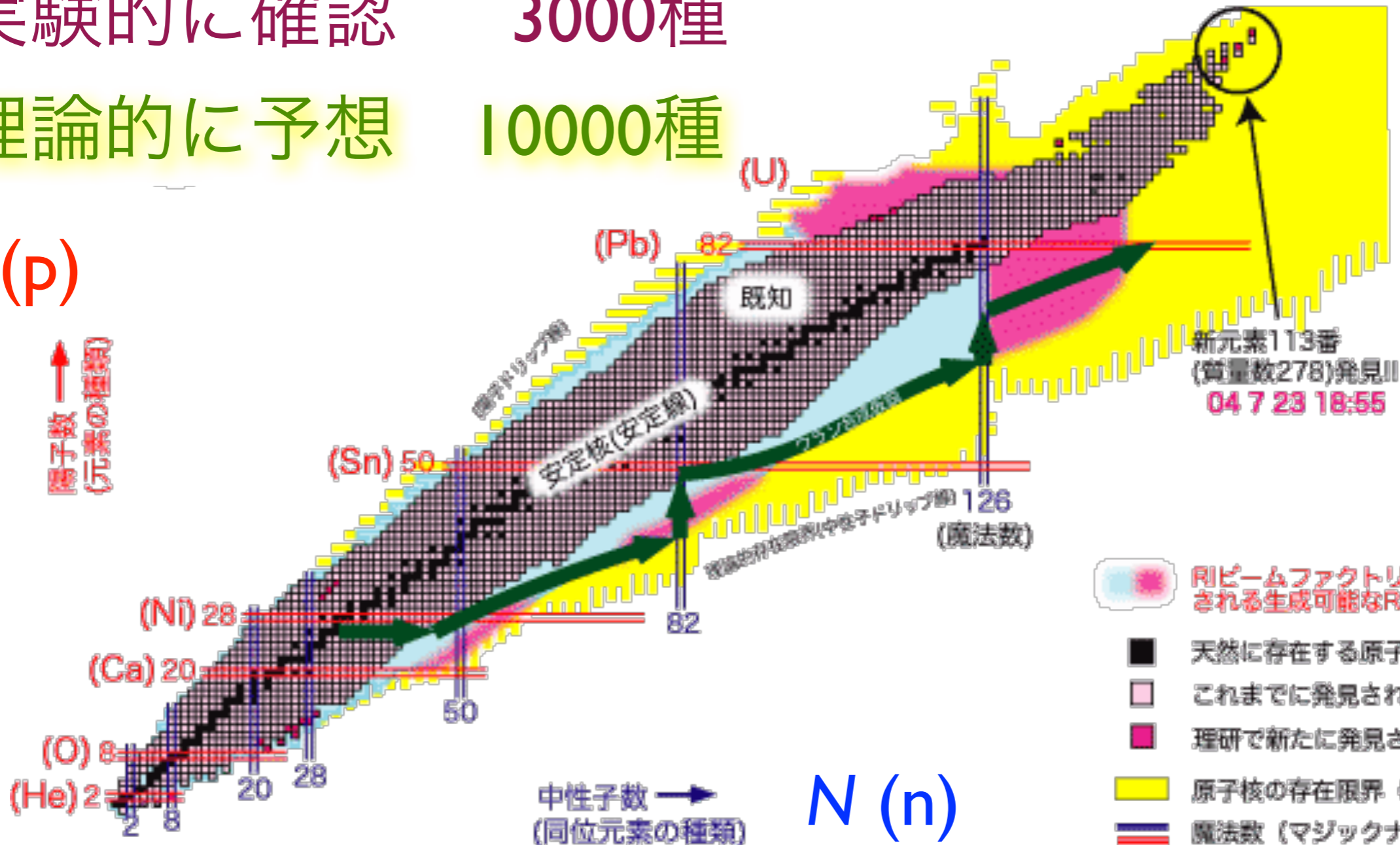
理論的に予想 10000種

原子核物理学

Nuclear Physics

Z (p)

↑
陽子数
(元素の種類)



Nuclear Chart 核図表

原子核物理学

Nuclear Physics

β 崩壊
isobar
同重体

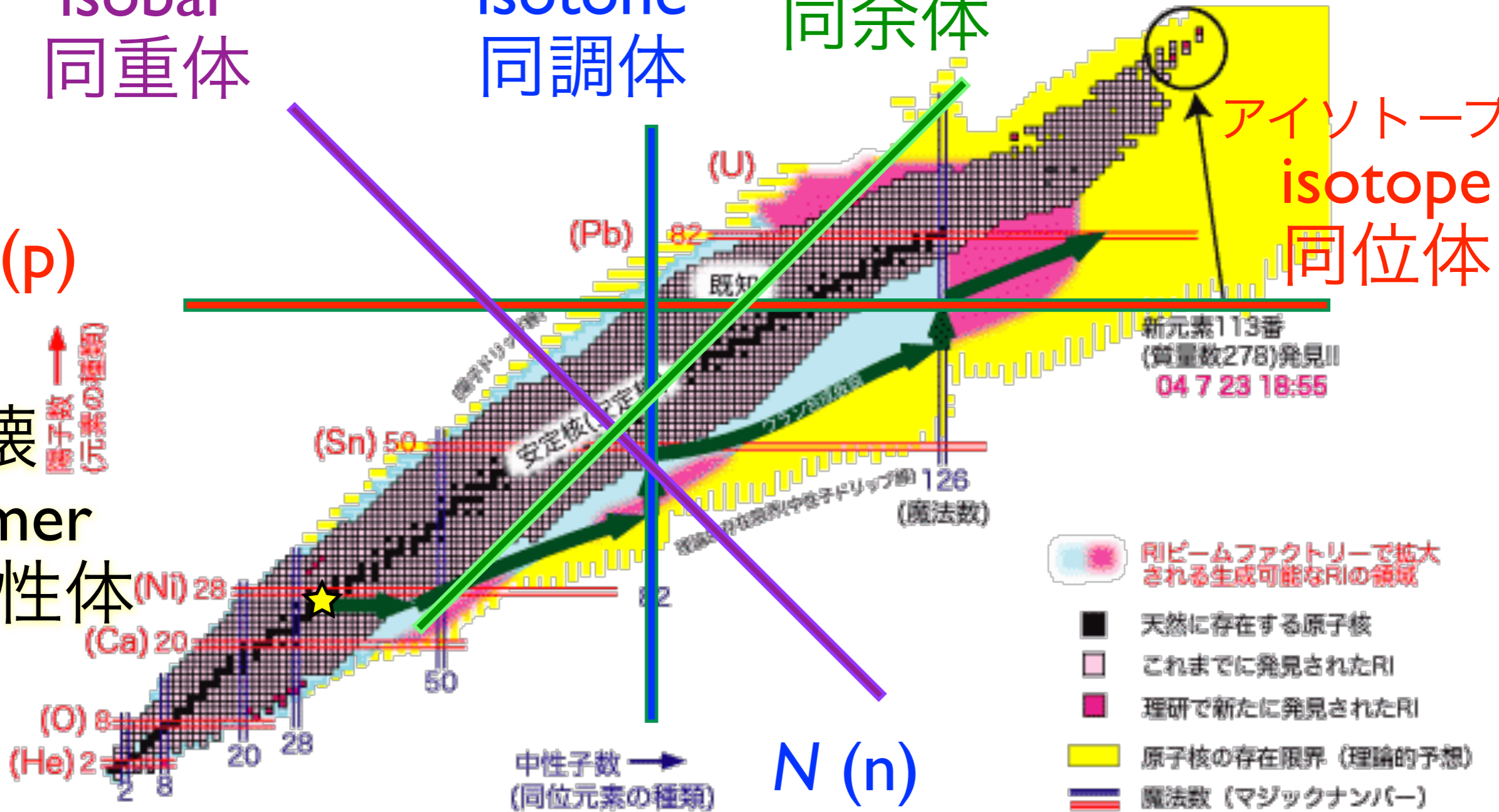
α 崩壊
isodiapher
同余体

isotone
同調体

アイソトープ
isotope
同位体

Z (p)

γ 崩壊
isomer
核異性体



Nuclear Chart 核図表

- RIビームファクトリーで拡大される生成可能なRIの領域
- 天然に存在する原子核
- これまでに発見されたRI
- 理研で新たに発見されたRI
- 原子核の存在限界 (理論的予想)
- 魔法数 (マジックナンバー)
- 超新星爆発でつくられた不安定核 (ウランまでの元素が合成)の道筋

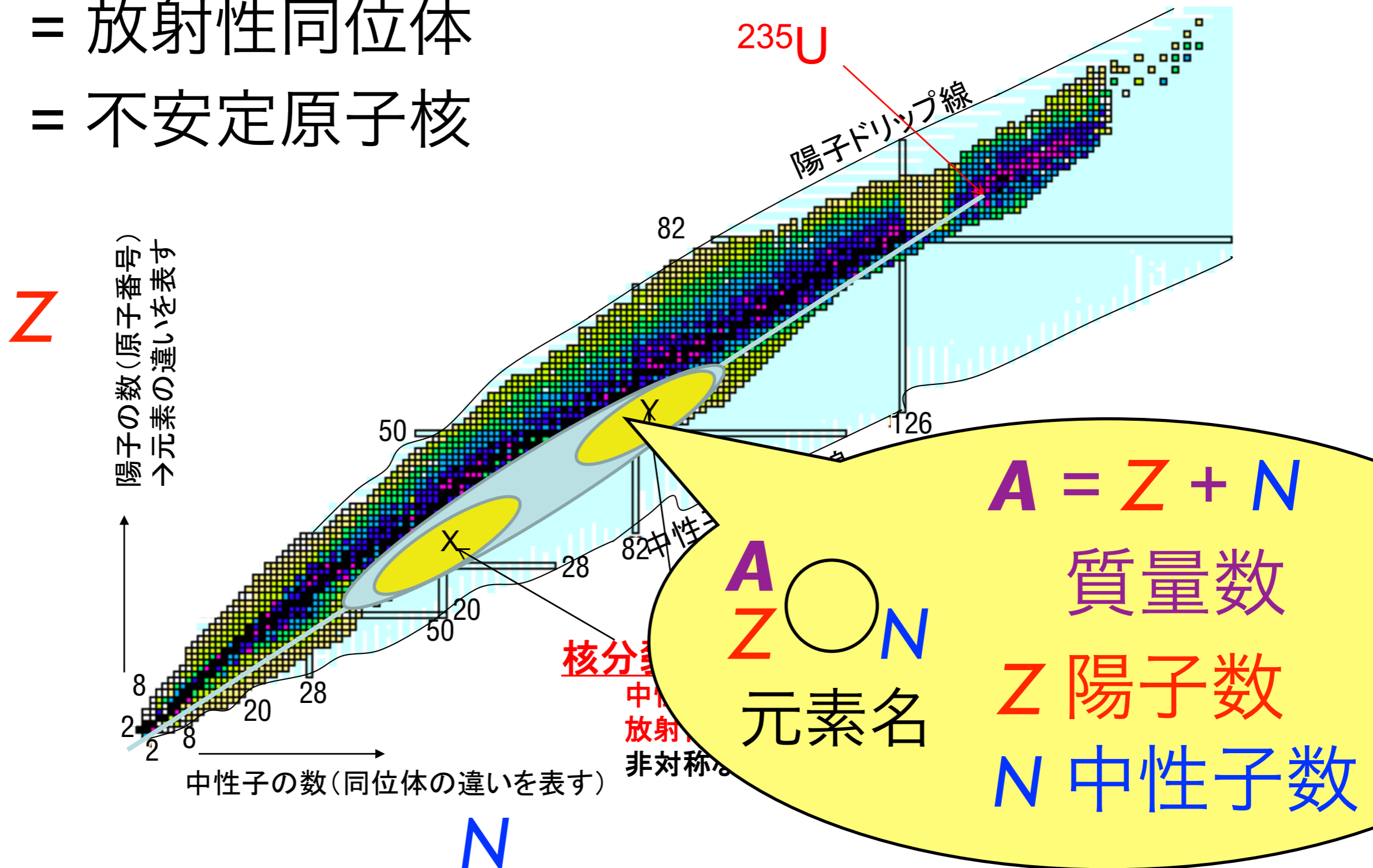
放射性物質とは

放射性核種

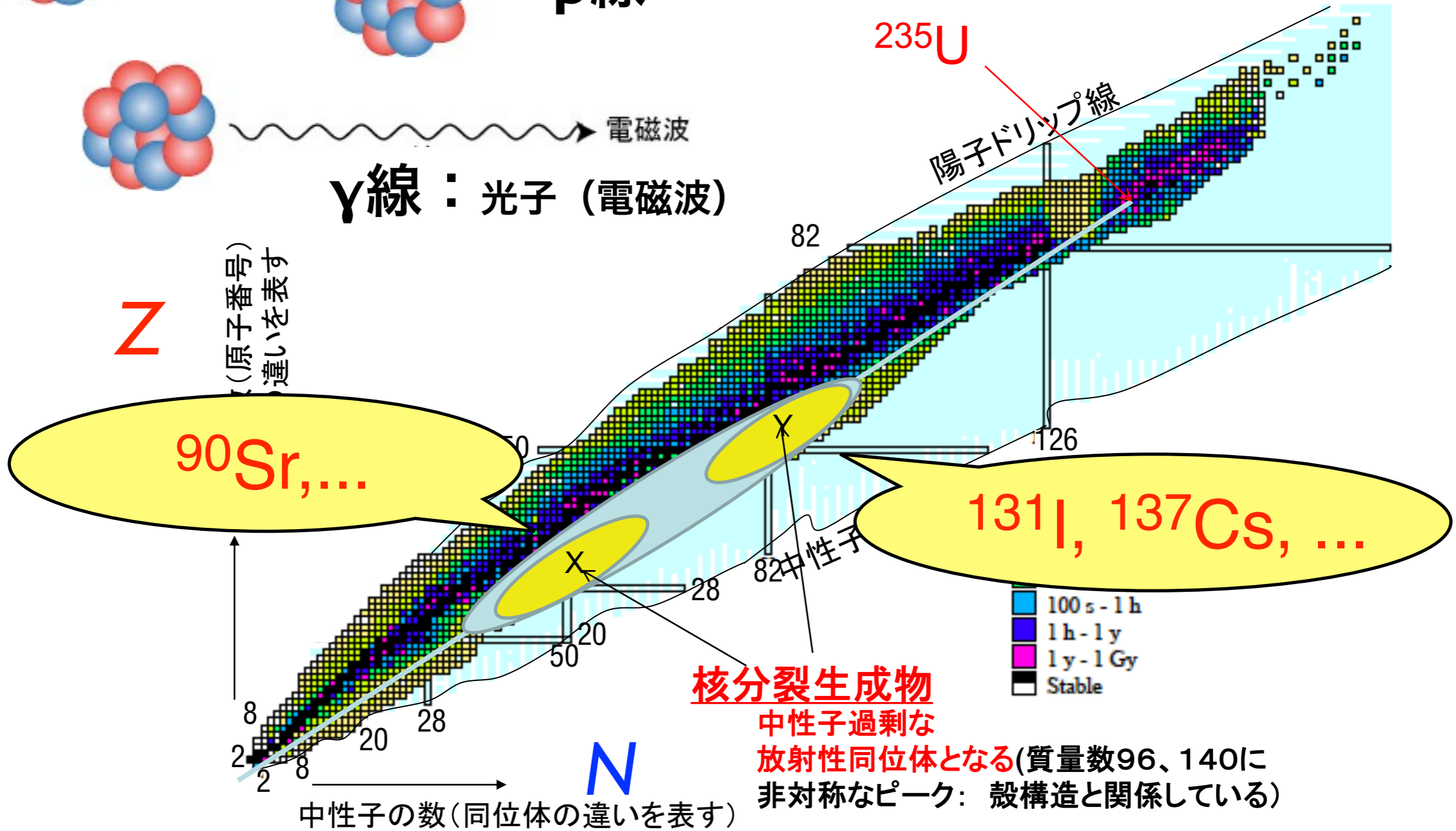
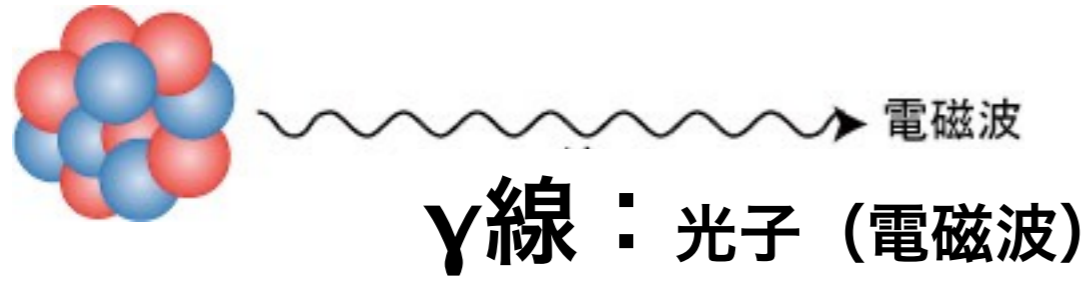
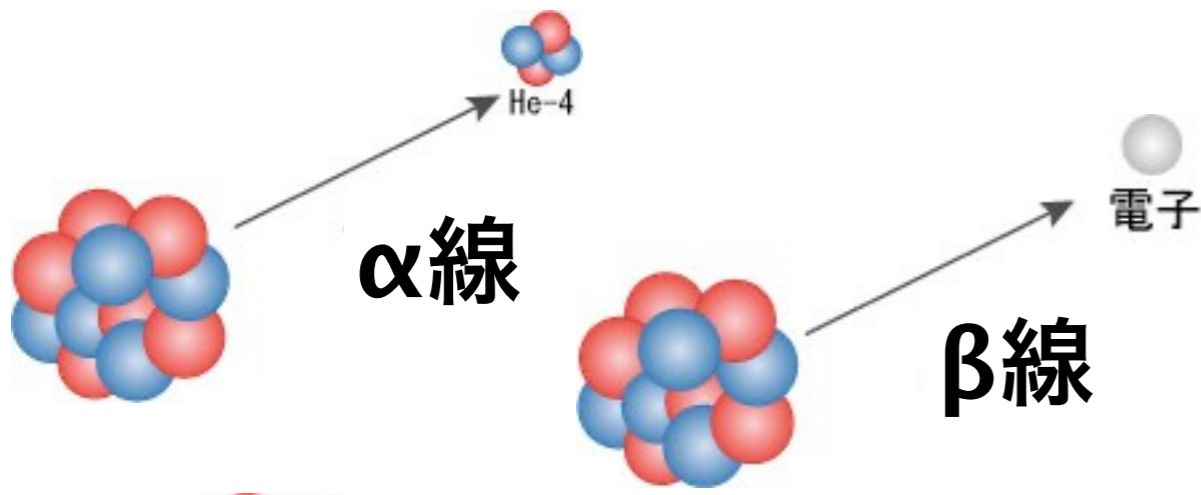
= 放射性同位体

= 不安定原子核

核図表

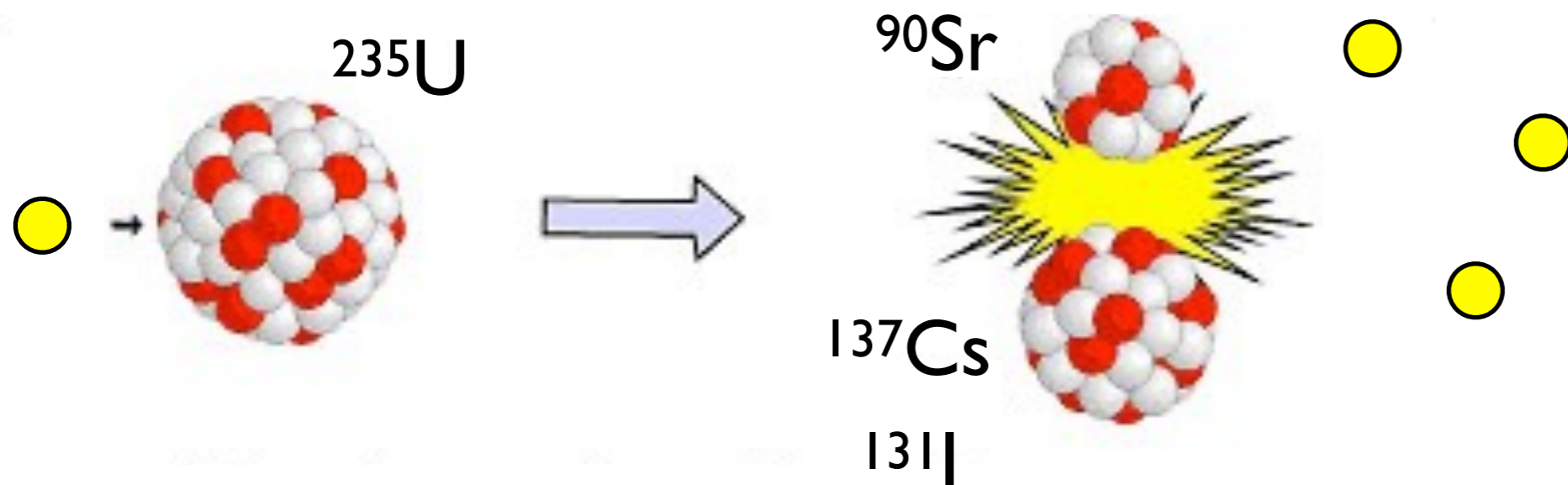


放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



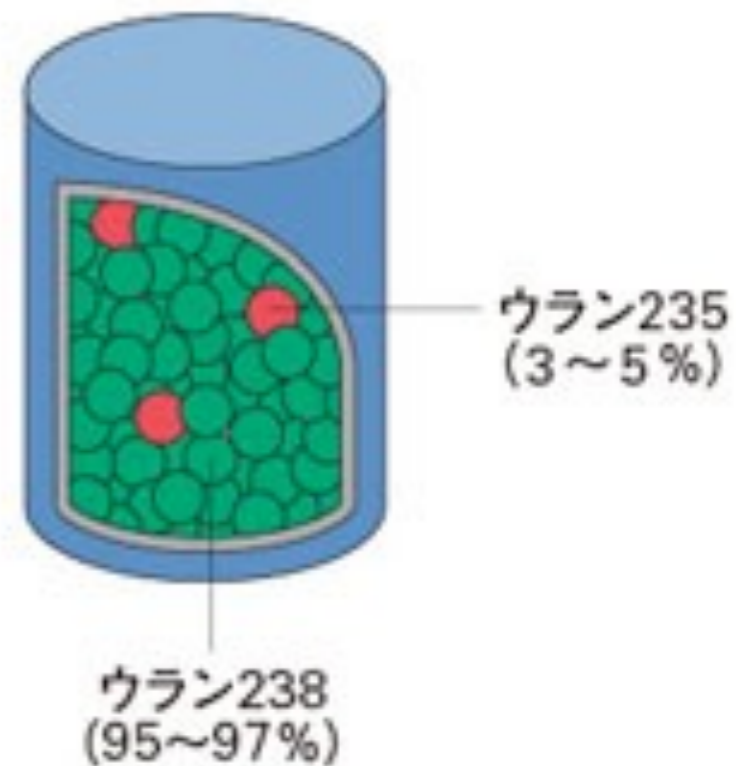
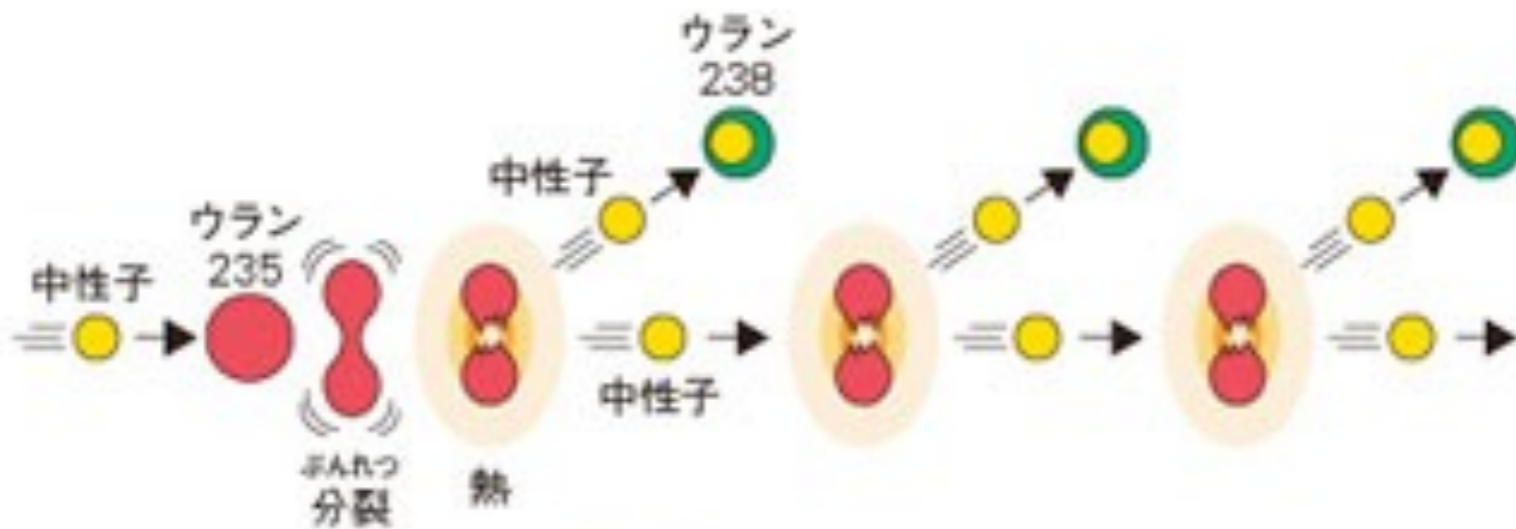
Nuclear Chart 核図表

原子核分裂反応



熱中性子

減速



中性子 + ウラン 235 / 238

放射線の種類



Billet de 500 Francs Français
en circulation: 1993–1999



- α線 ヘリウム原子核
- β線 高速の電子
- γ線 光子（電磁波）
- X線 光子（電磁波）

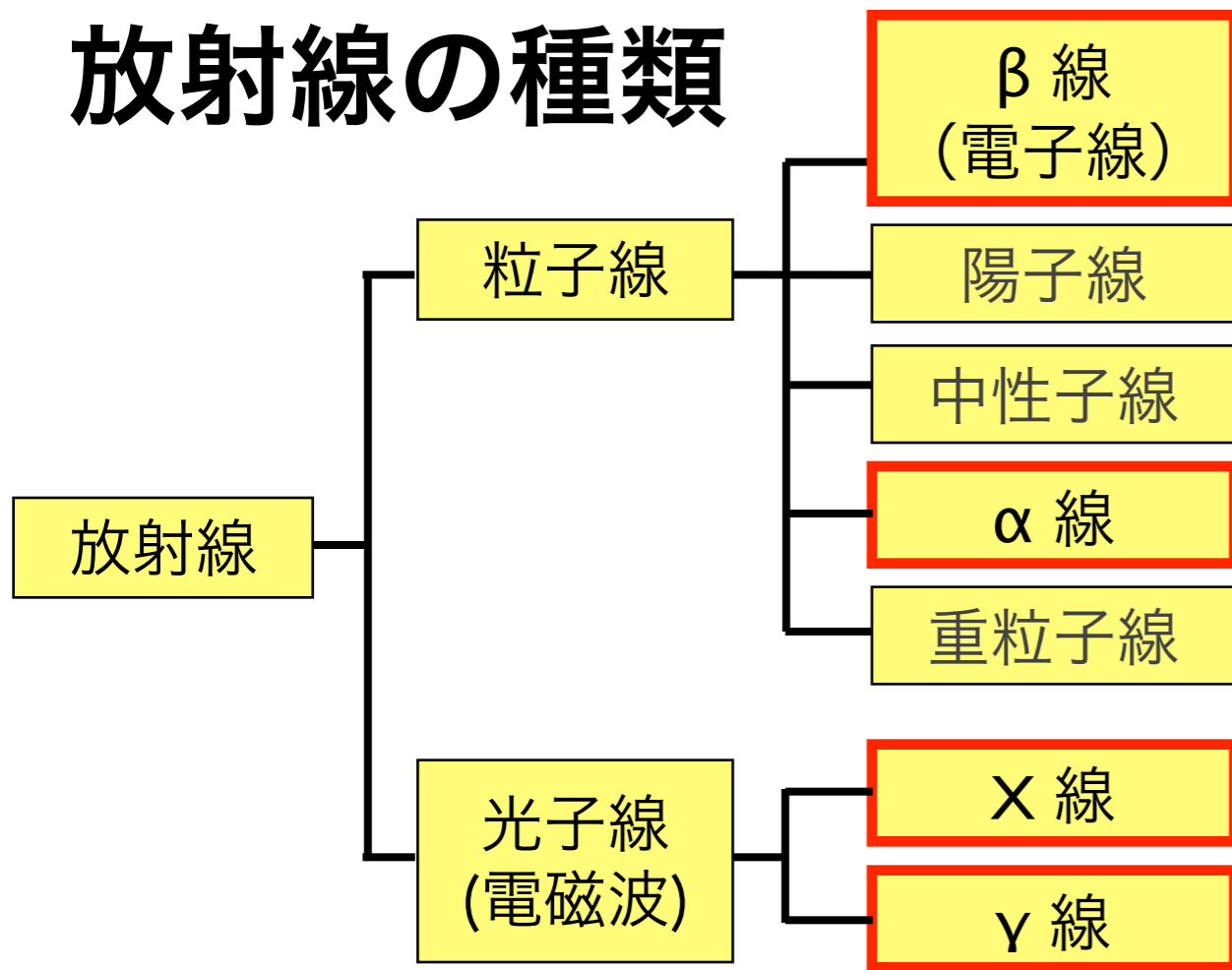
VIDEO

放射線とは

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

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

放射線の種類



原子核 N



放射線のもつエネルギーは？

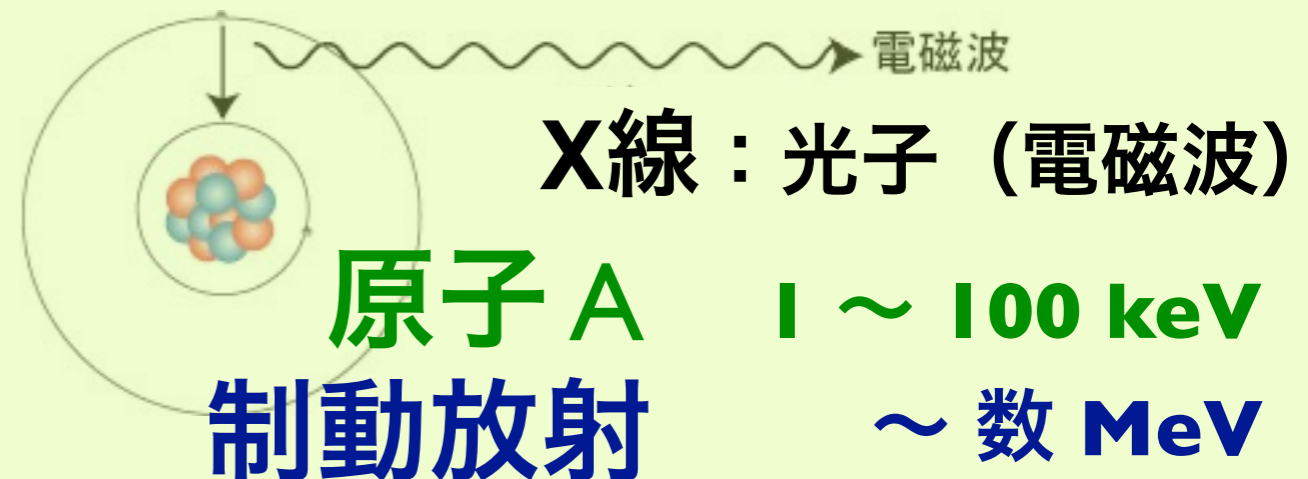
☞ 数十 keV ~ 数 MeV (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

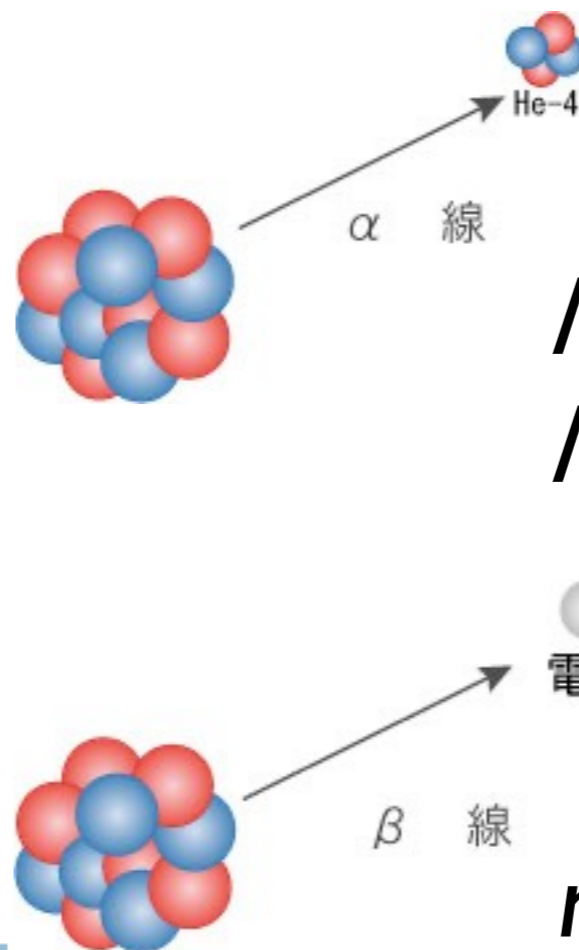
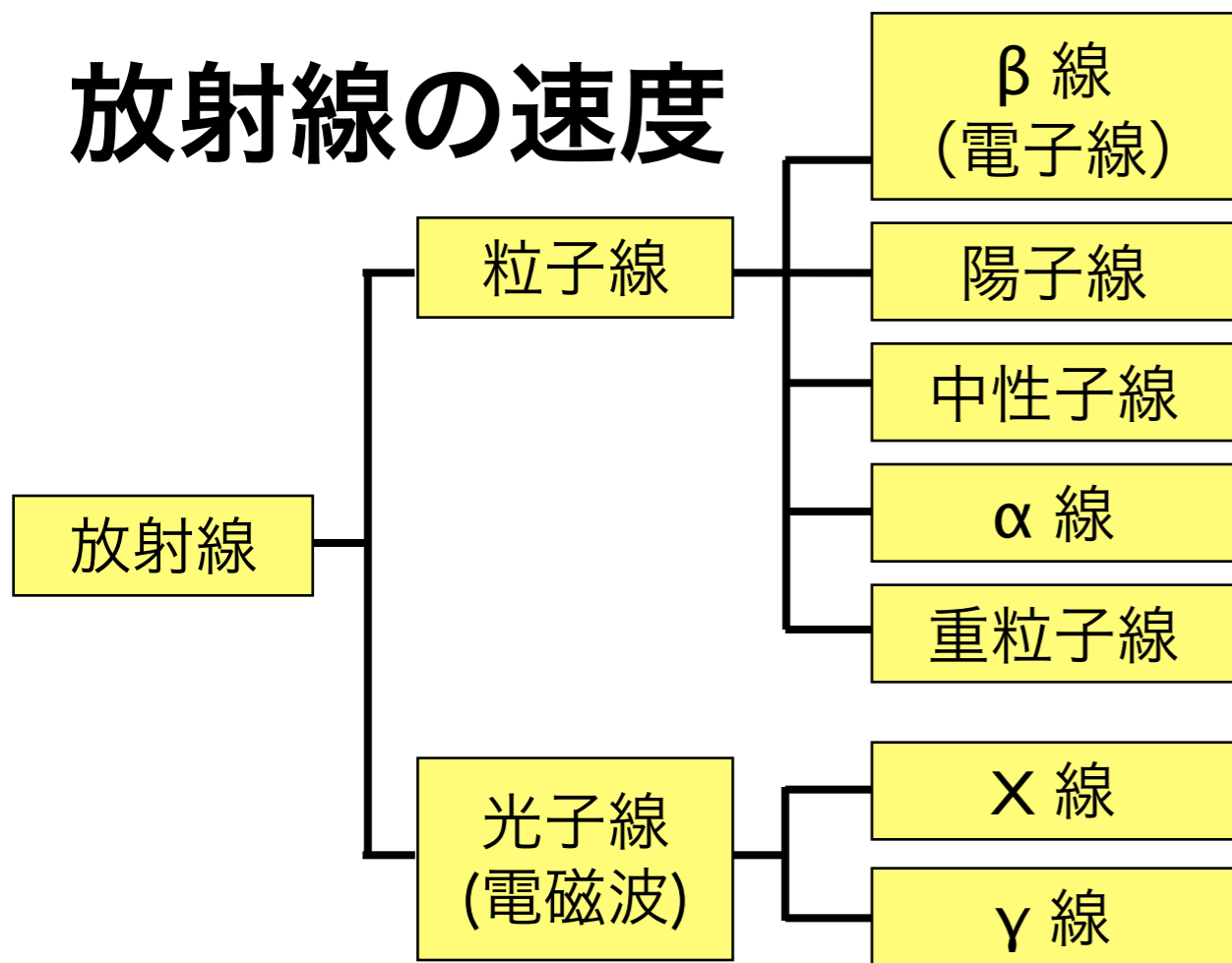
☞ 最外殻電子で 10 eV 程度
(1 eV = 96 kJ/mol)

放射線の速度は？

☞ 光速の数% ~ 100%



放射線の速度



$$M_{\alpha} \approx 4 \text{ GeV}/c^2$$

~~$$1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} \times 4$$~~

$$M_p = 938 \text{ MeV}/c^2$$

$$M_n = 940 \text{ MeV}/c^2$$



~~$$9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$~~

$$m_e = 511 \text{ keV}/c^2$$

$$\approx 0.5 \text{ MeV}/c^2$$

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？

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

$$\beta = v/c$$

$$T = E - mc^2$$

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

5 MeV の α線の速度は？

1 MeV の β線の速度は？

α 崩壊 (壊変)

decay

β⁻ 崩壊 (壊変)

γ 崩壊 (壊変)

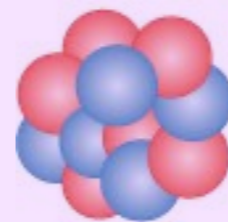
(核異性体転移)

Isomeric Transition (IT)

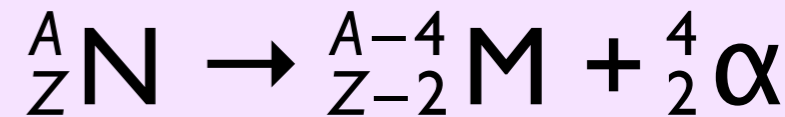
原子の脱励起

制動放射

原子核 N



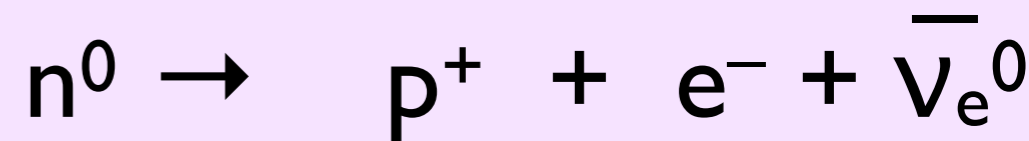
α線



β線

電子

数十 keV ~ MeV

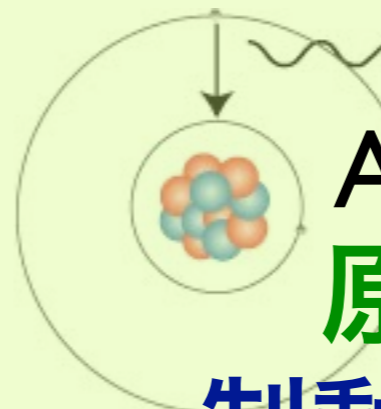


γ線

電磁波



X線



原子 A I ~ 100 keV

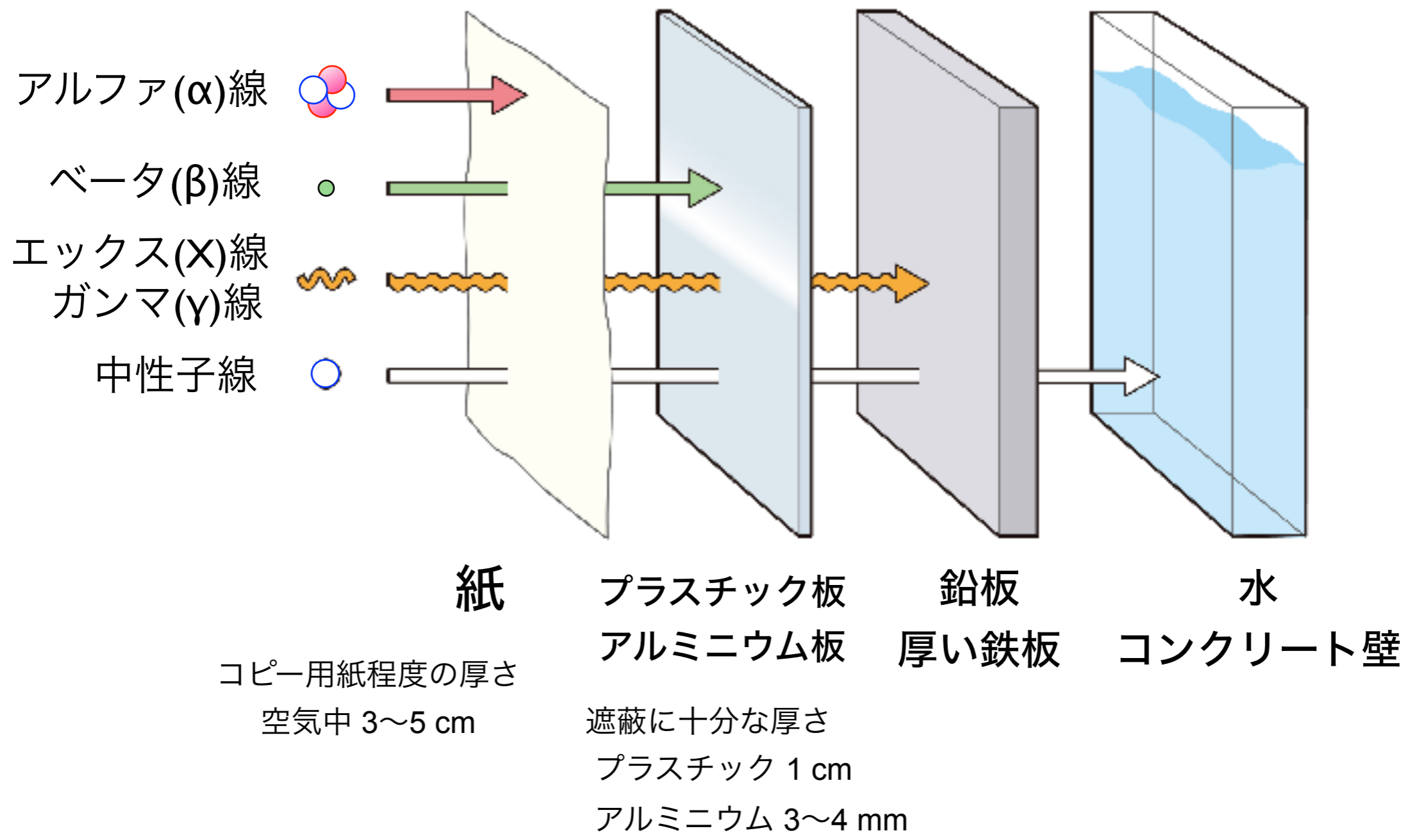
制動放射

~ 数 MeV

放射線と物質との相互作用

荷電粒子の減速

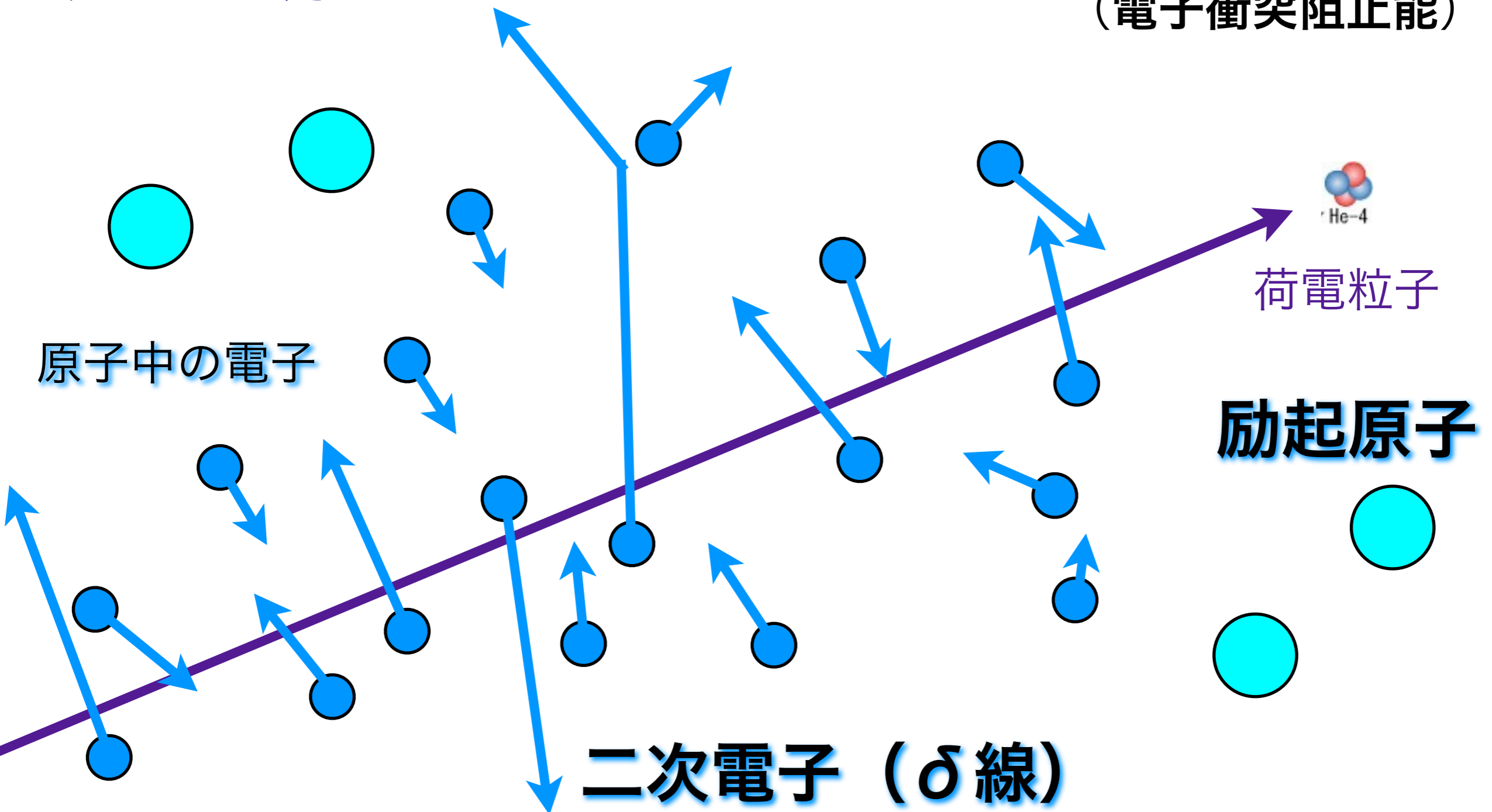
放射線の種類と透過力



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



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。

励起原子

電子

イオン

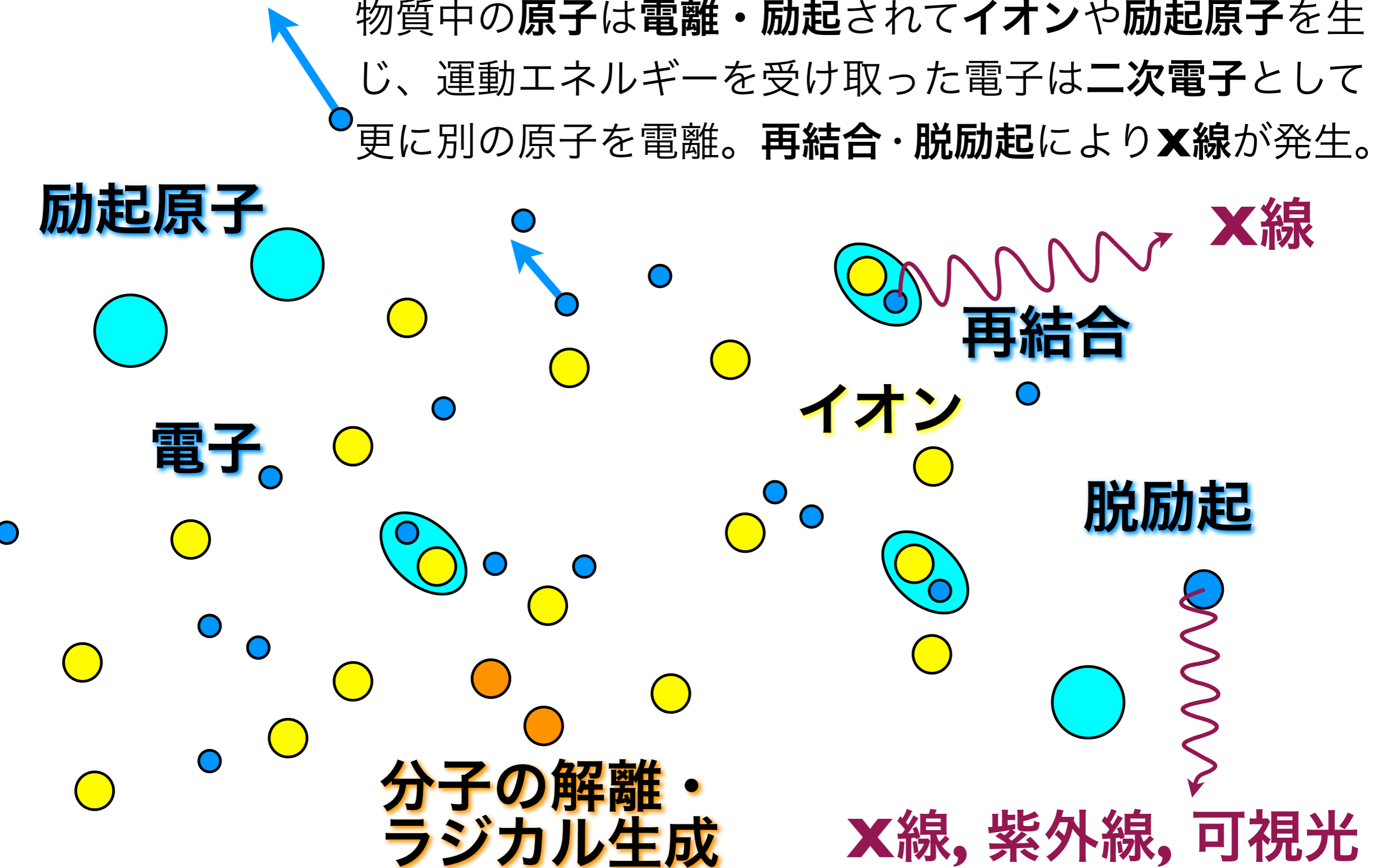
分子の解離・ラジカル生成

再結合

脱励起

X線

X線, 紫外線, 可視光



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

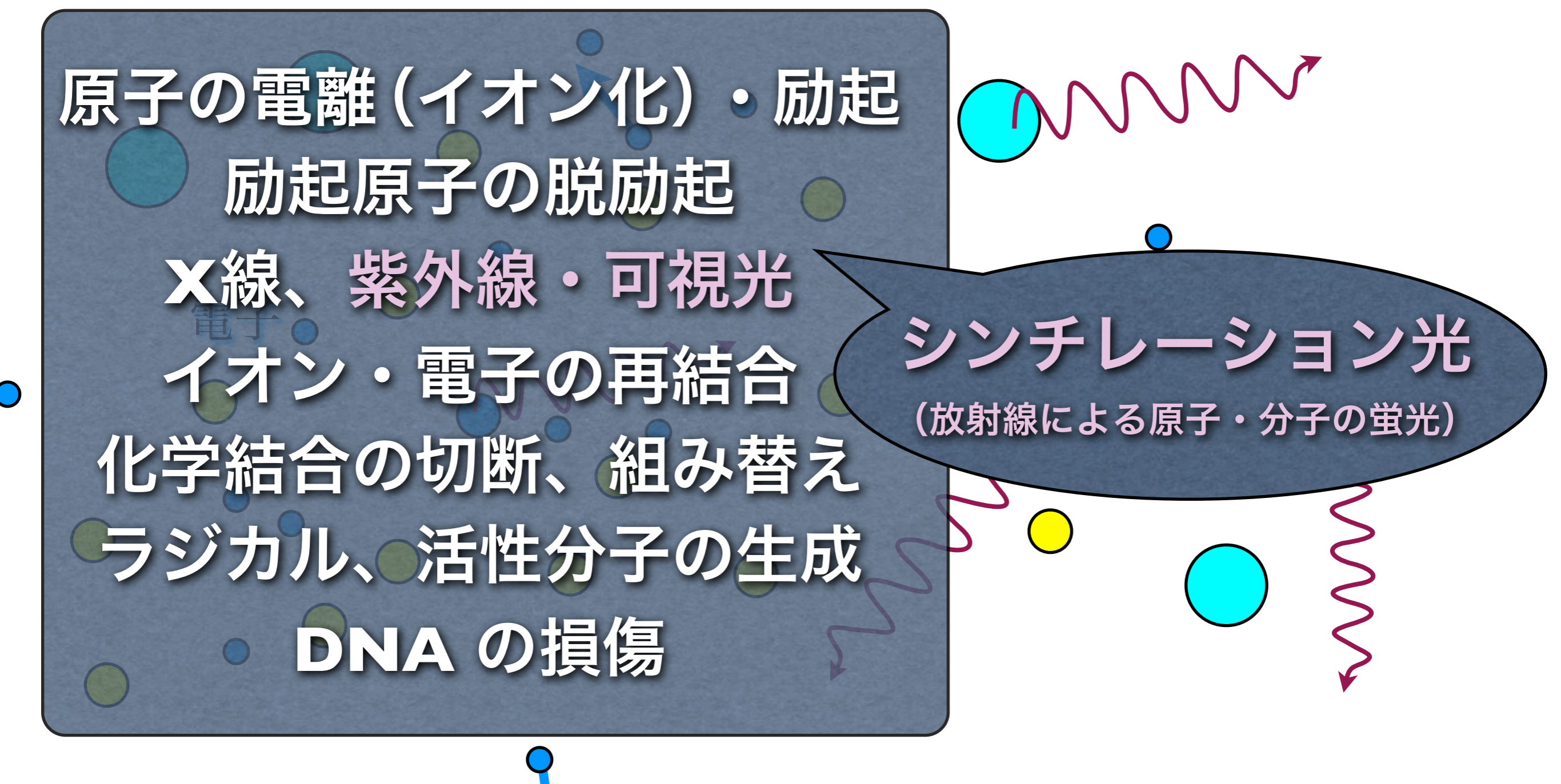
化学結合の切断、組み替え

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)



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

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

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。

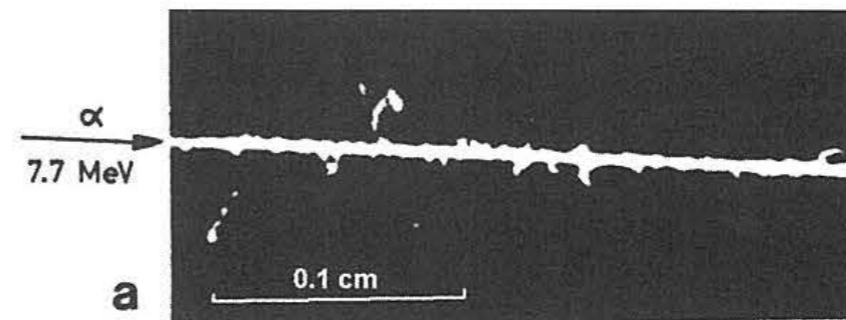
● 軽い粒子：電子(e⁻)・陽電子(e⁺)

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。

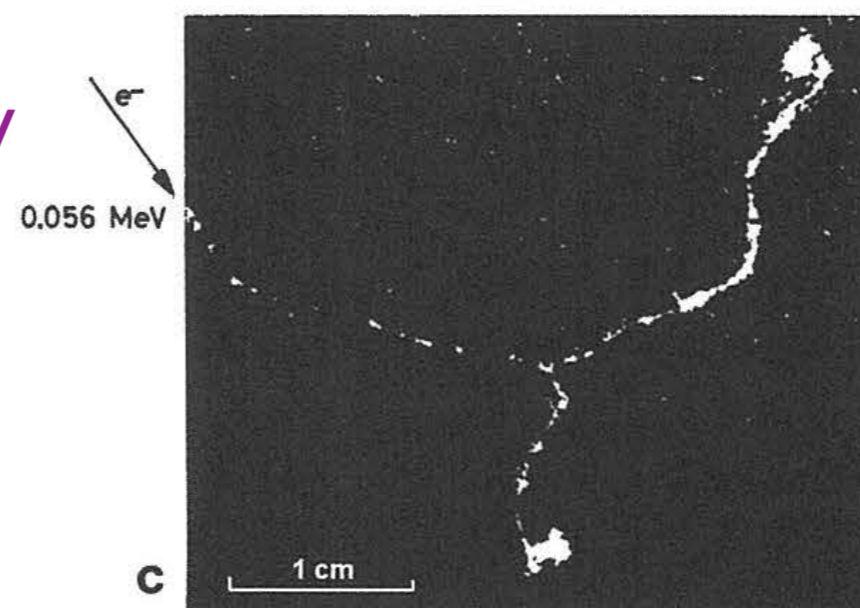
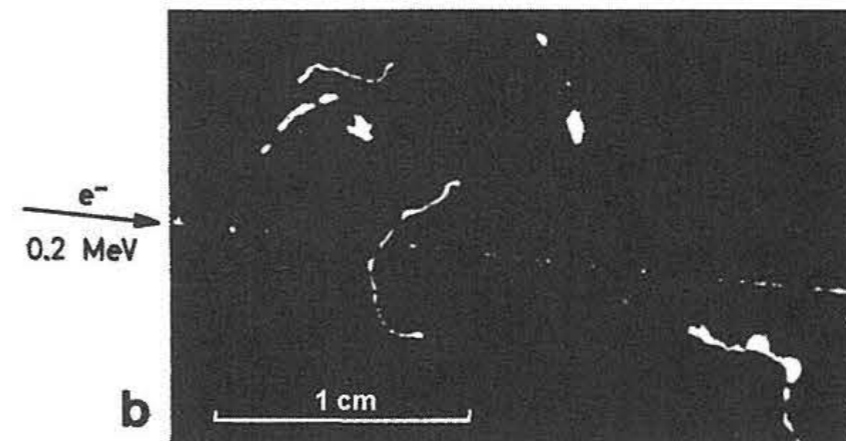
放射線の軌跡

霧箱による観察

α -ray
7.7 MeV



0.2 MeV
 β -ray
0.056 MeV



γ -ray
0.047 MeV

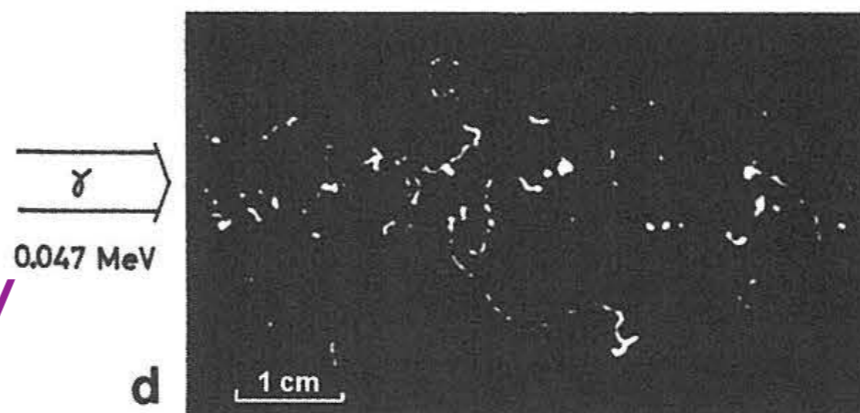


Figure 7.5 Cloud chamber tracks of α , β , (e^-), and γ -rays at 1 bar in air ((a), (b), and (c)) and in methane (d). (From W. Gentner, H. Maier-Leibnitz, and H. Bothe.)

荷電粒子：クーロン力

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

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

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

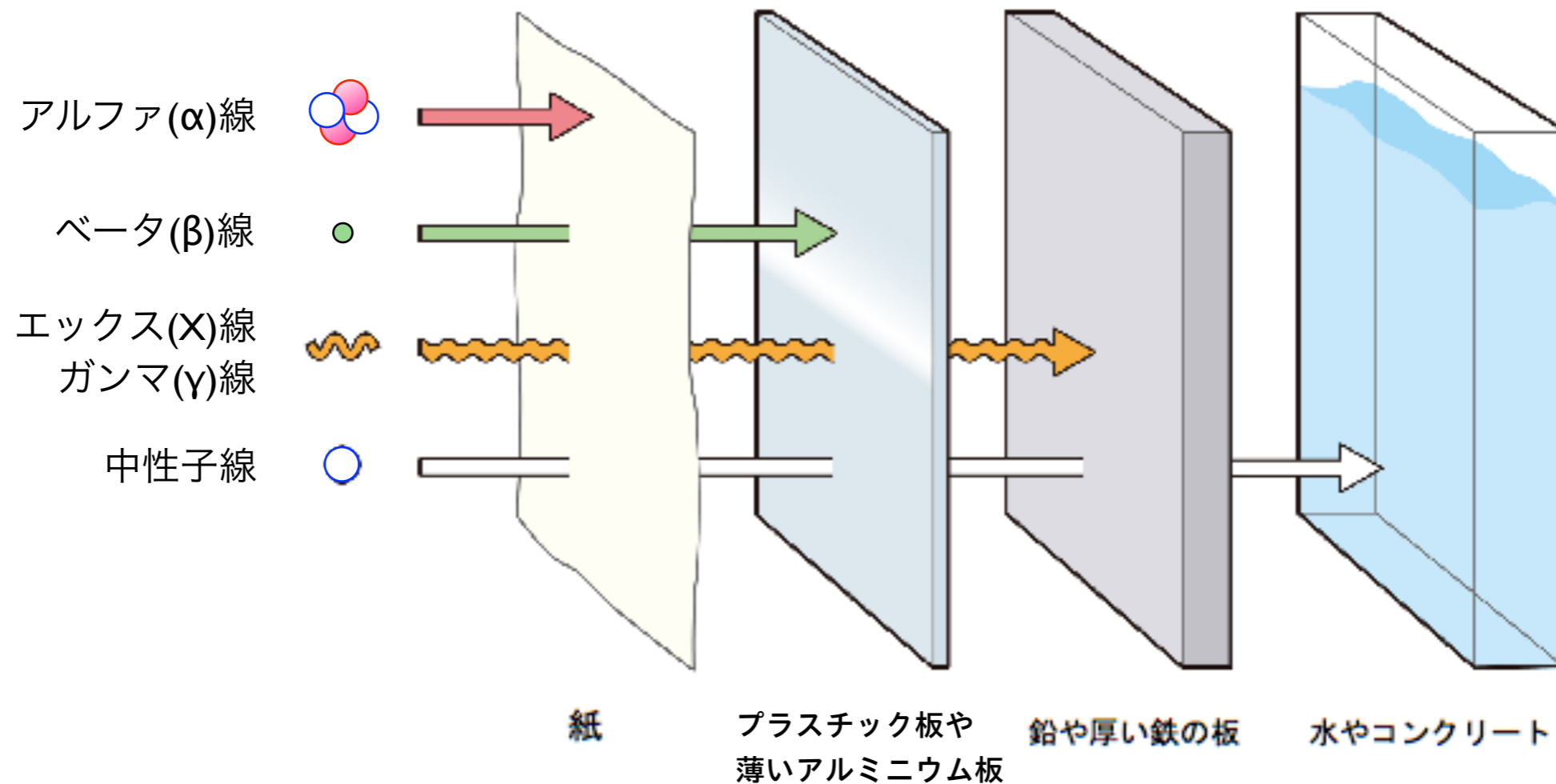
MeV / (g / cm²)

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
MeV / (g / cm²)

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

非密封 RI の使用

β 線



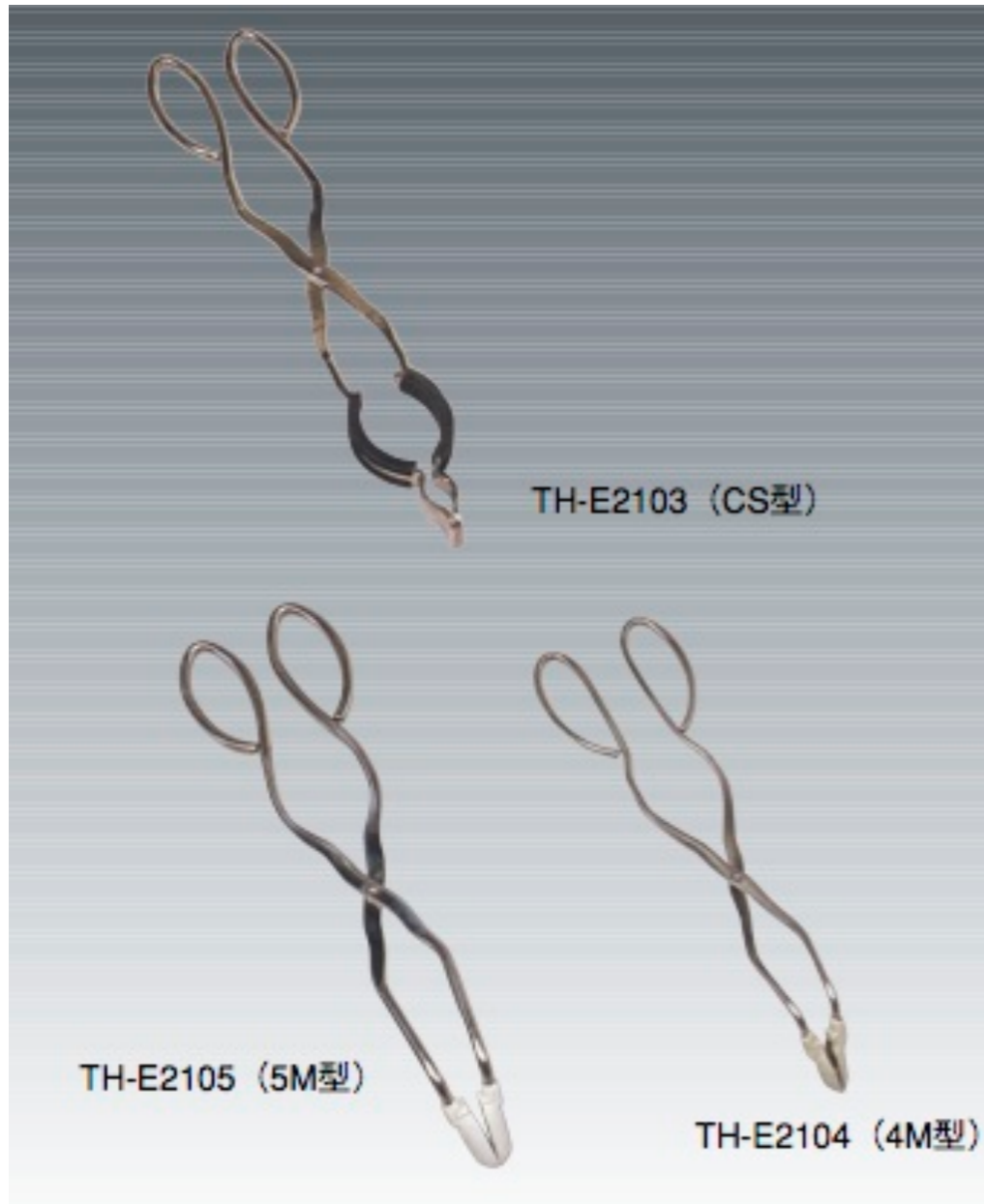
汚染の可能性のあるフード内や実験台をポリエチレン紙で覆う。

バット（受け皿）やトレー内で取扱う。

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。

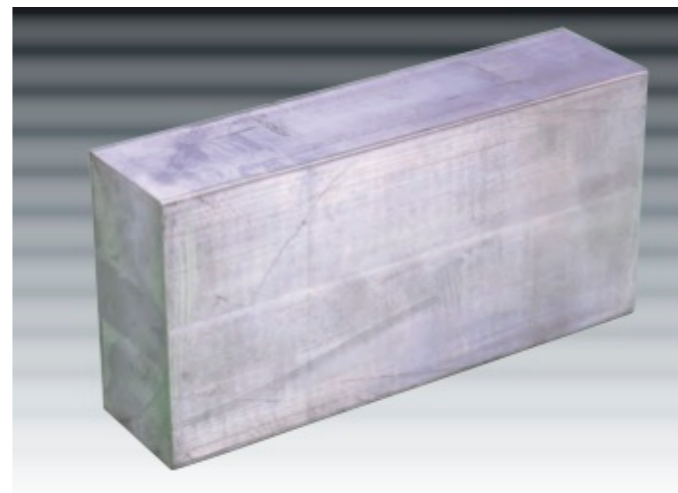
密封 RI (密封線源) の使用



X線

γ線

鉛ブロック

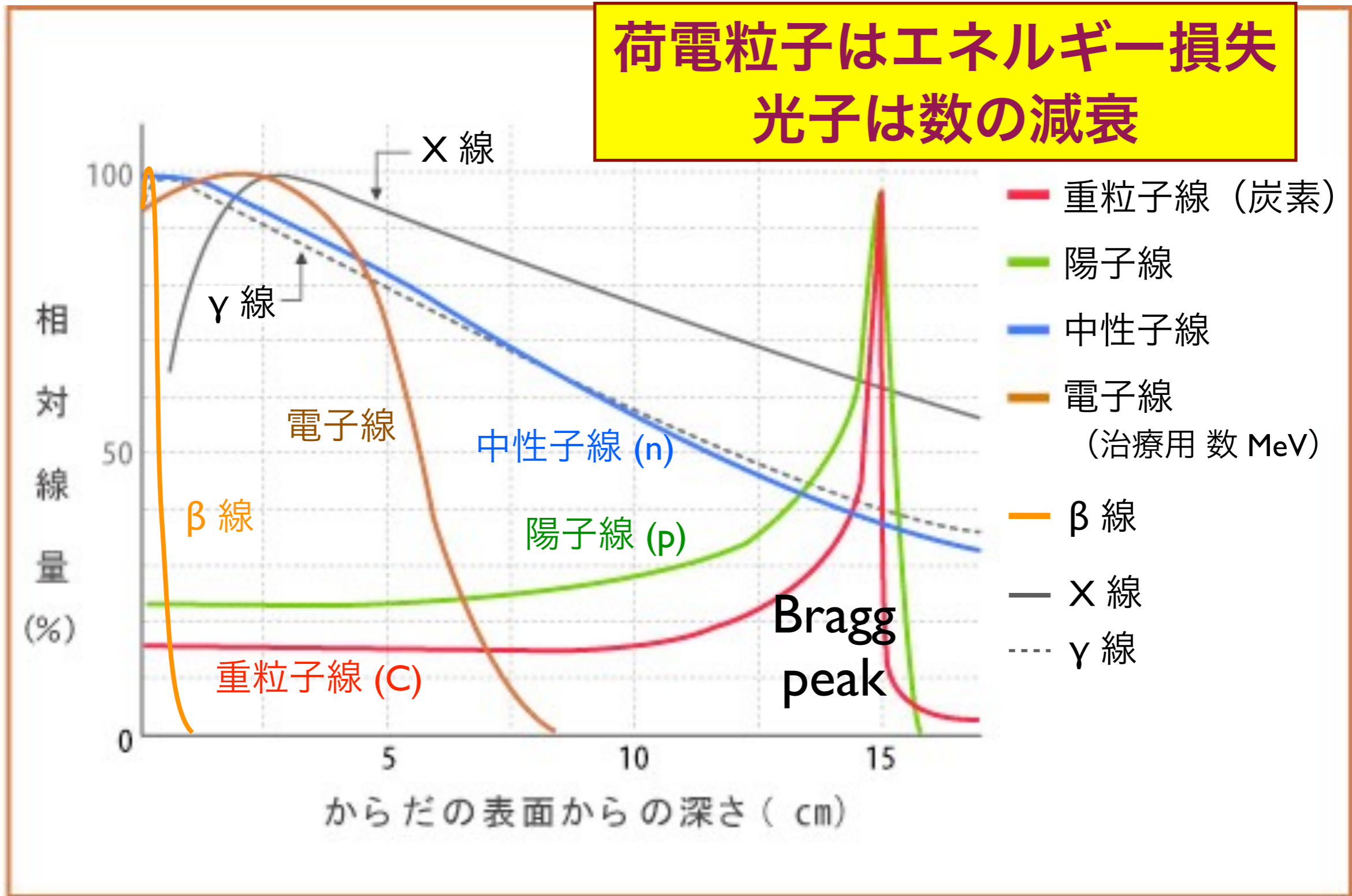


鉛エプロン

ピンセット、 tong 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。

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。

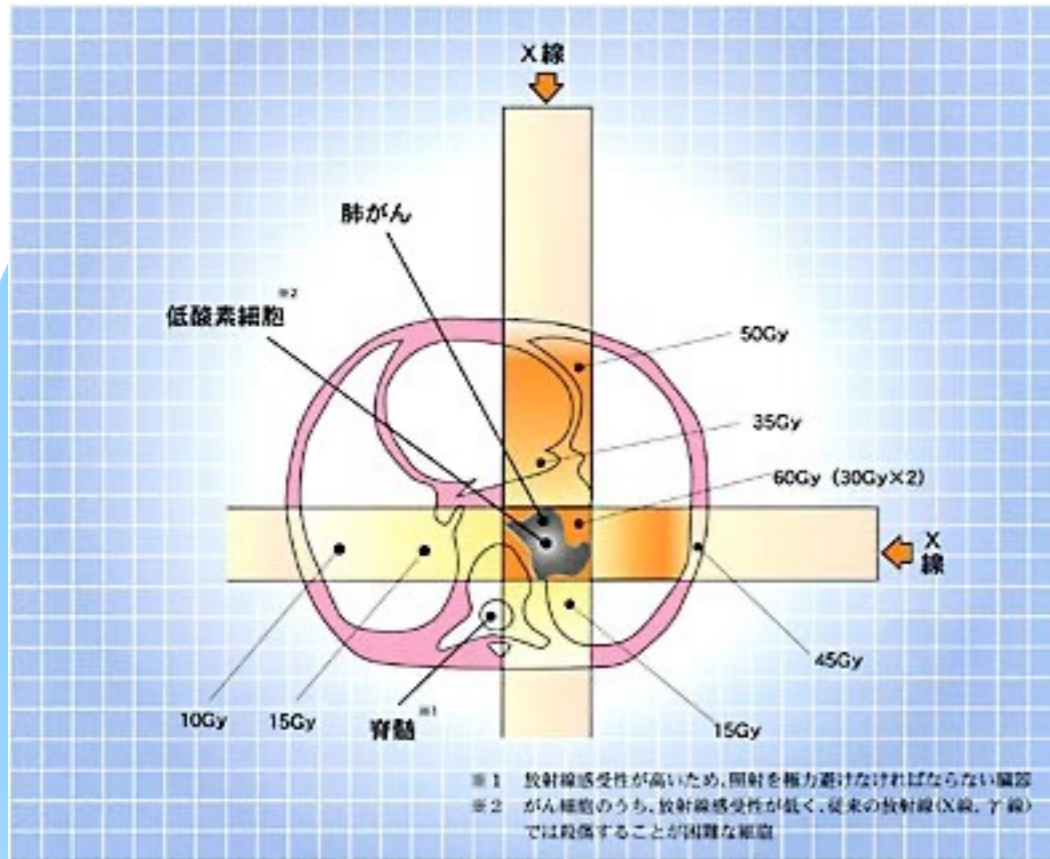
**荷電粒子はエネルギー損失
 光子は数の減衰**



元図：群馬大学重粒子線医学研究センターの旧ホームページより

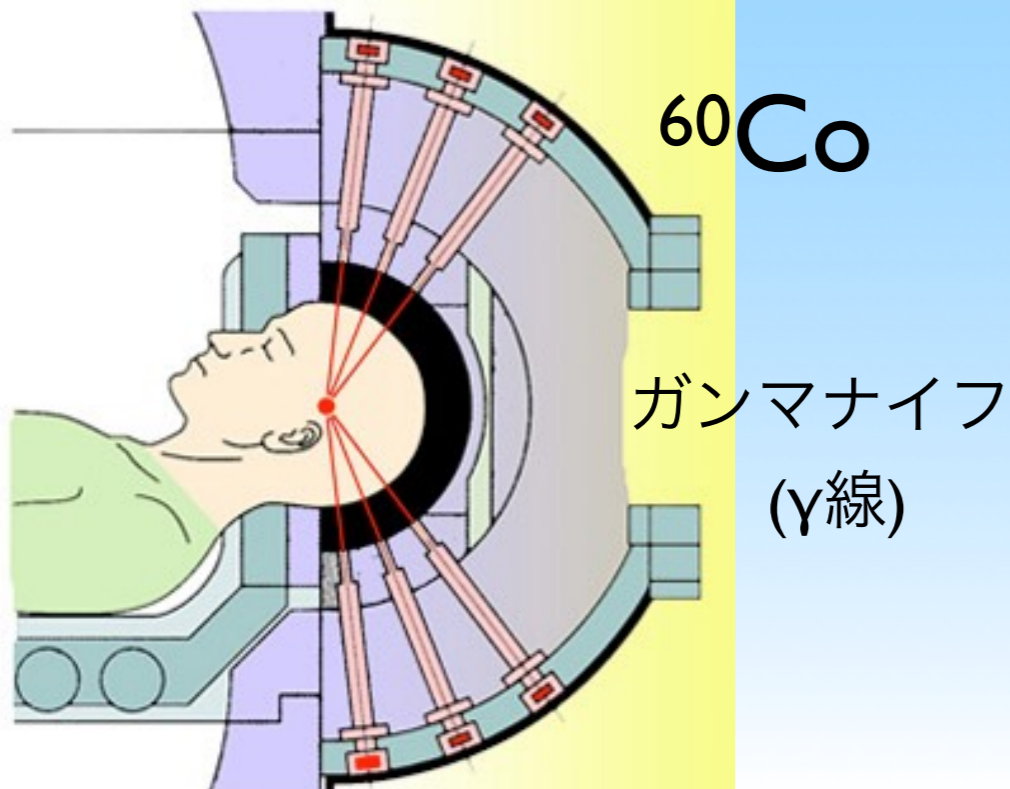
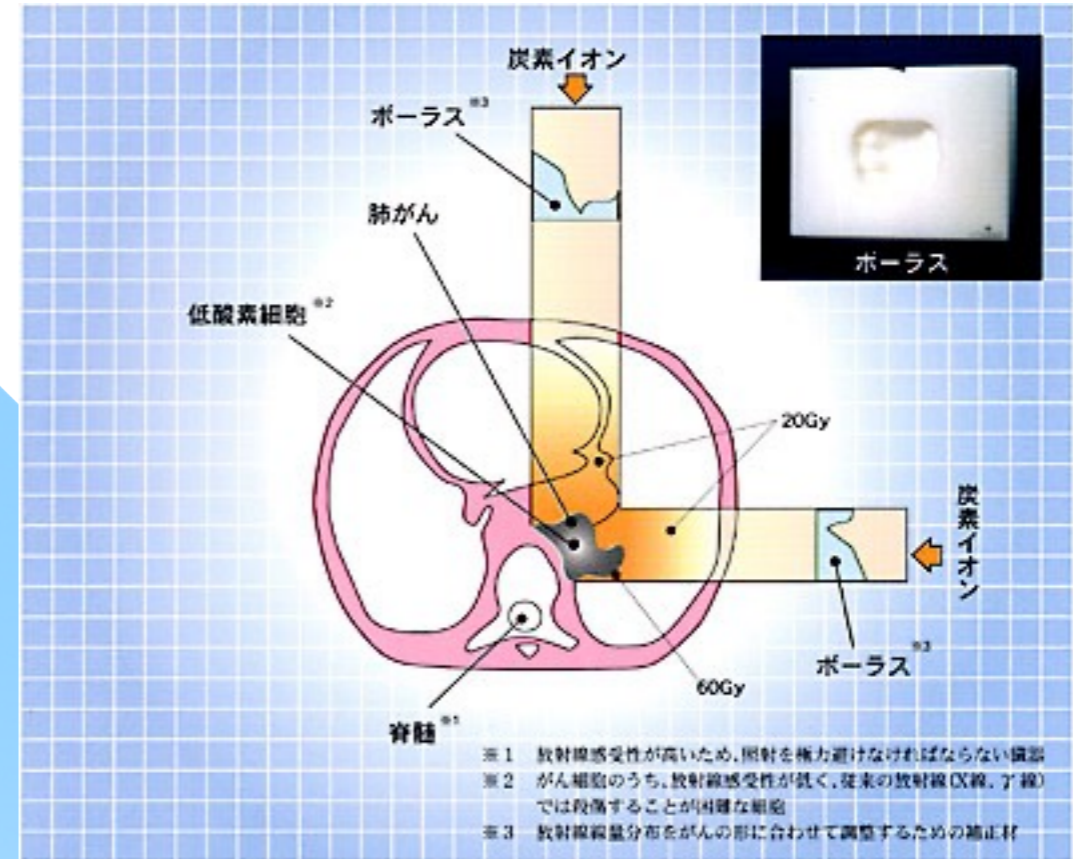
放射線医療：がん治療

X線



数 Gy を複数回

重粒子線 (炭素イオン)



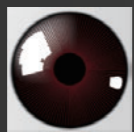
サイバーナイフ
(X線)

放射線と物質との相互作用

光子の減衰

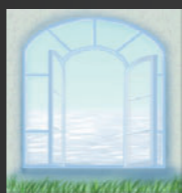
325 nm

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

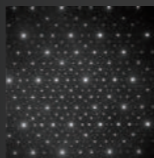


極端紫外光リソグラフィー
極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

水の窓
水の吸収がない波長。水分を多く含む生物試料の観察に使えるX線。



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



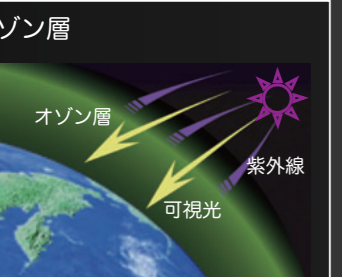
XFEL(X線自由電子レーザー)
SPring-8に自由電子レーザーの発振器を建設し、X線の波長域でレーザー光を得る施設。2006年から建設が始まり、2010年に完成を目指している。



紫外光

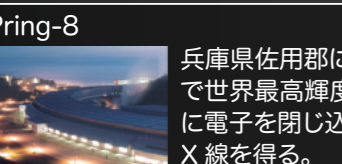
紫外線洗浄
半導体基板や金属、セラミックス、プラスチック表面の洗浄、品質に紫外線を使う。

紫外線殺菌
水と与えずに、水、食品、薬品などを殺菌する。



地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

触媒は、紫外光を吸収して、窓ガラスや壁の汚れを分解する。
酸化チタン



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

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

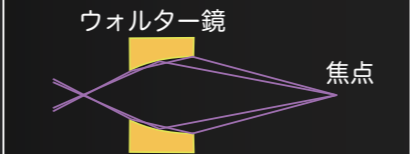
アト秒レーザー
アト秒(atto)は0.000000000000000001秒(0が18個)。そんな一瞬しか光らないパルスレーザー。このレーザーを使えば、電子が止まって見える。100アト秒では光はたった30nmしか進めない。真空紫外線や軟X線の光でつくられる。

軟X線 (極短紫外を含む)

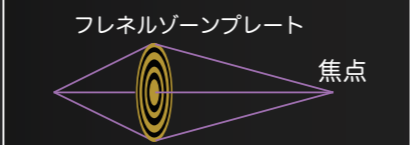
レーザープラズマ光源
高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

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

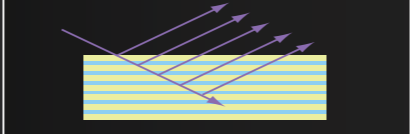
X線のレンズ
軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。



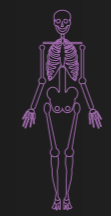
反射には、Mo/SiやCr/Scなどの多層膜が用いられる。



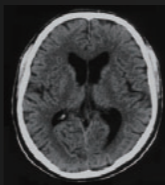
静電気除去
空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

X線

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



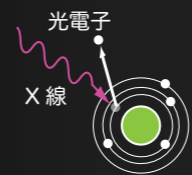
X線CT (コンピュータ断層撮影)
様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



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

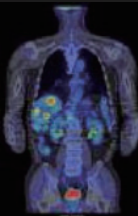


XPS(X線光電子分光)
X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。

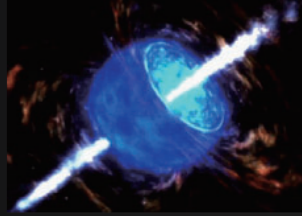


γ線

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



γ線バースト
太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。



強い放射線
強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

放射線治療
弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

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



一家に1枚 光マップ <http://stw.mext.go.jp/>

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)

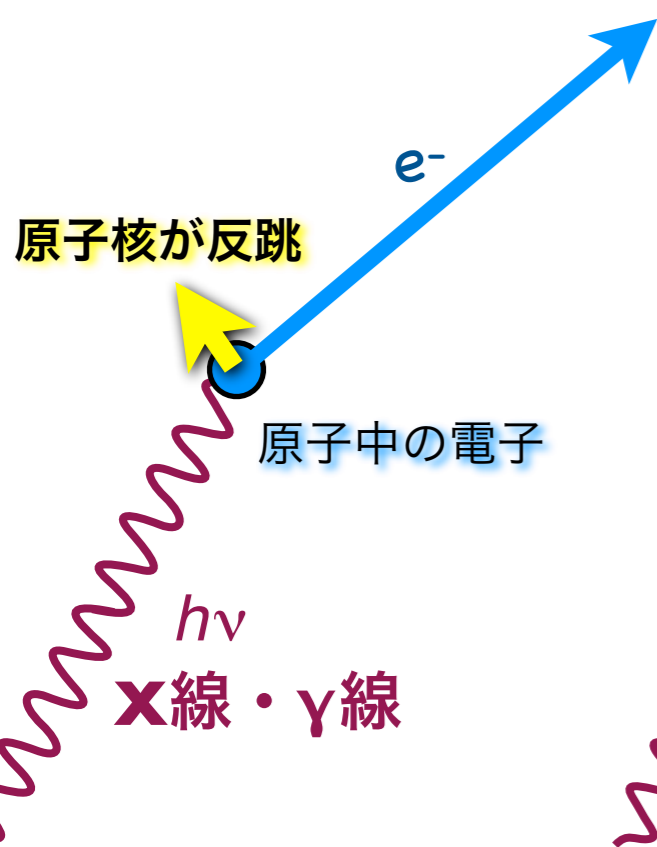
光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて
一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず
素通りするものも多い。☞

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

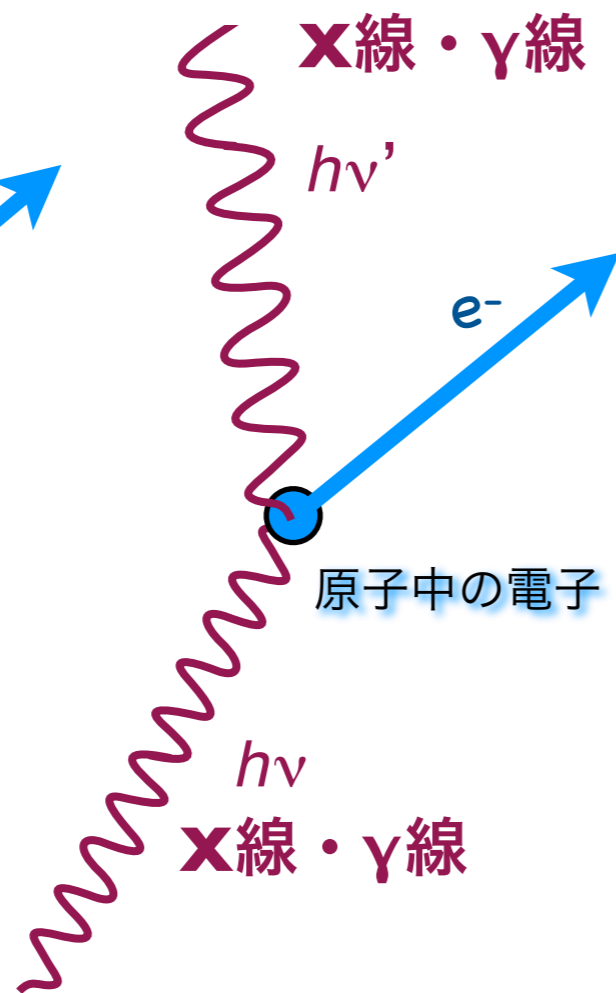
光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

光電効果



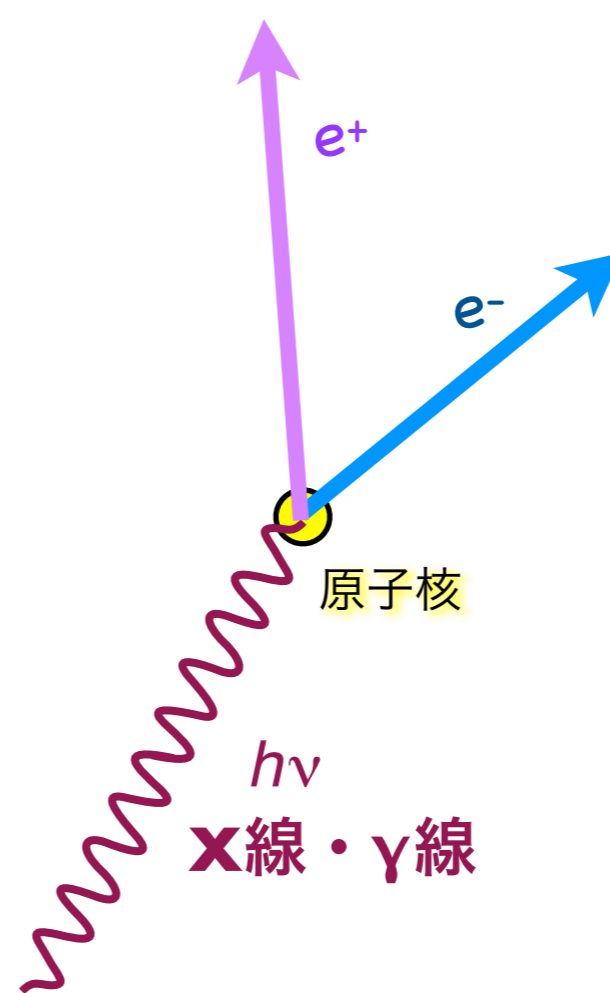
光子が原子中の電子1個をたたき出す。光子は消滅。

コンプトン散乱



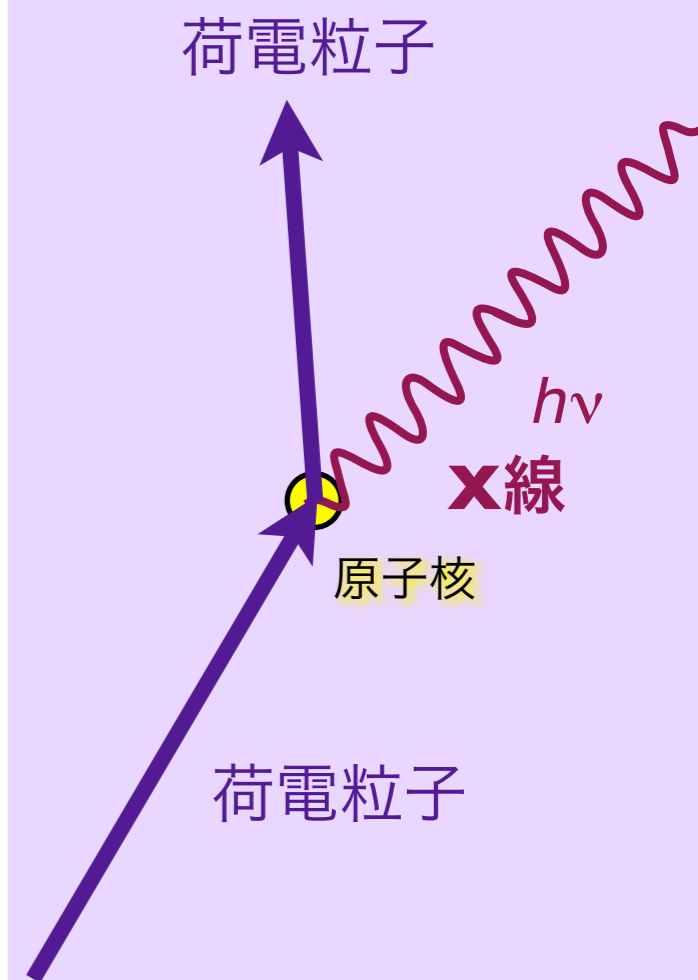
光子が電子1個に散乱され、光子は大きくエネルギーを減じる。

電子対生成



MeV 以上の光子が電子・陽電子の対を生成する。

制動放射



荷電粒子が制止したり軌道を曲げられたりするとき光子を放出する。

高エネルギーの電子線 (β線と同じ) が発生

光子

反応断面積

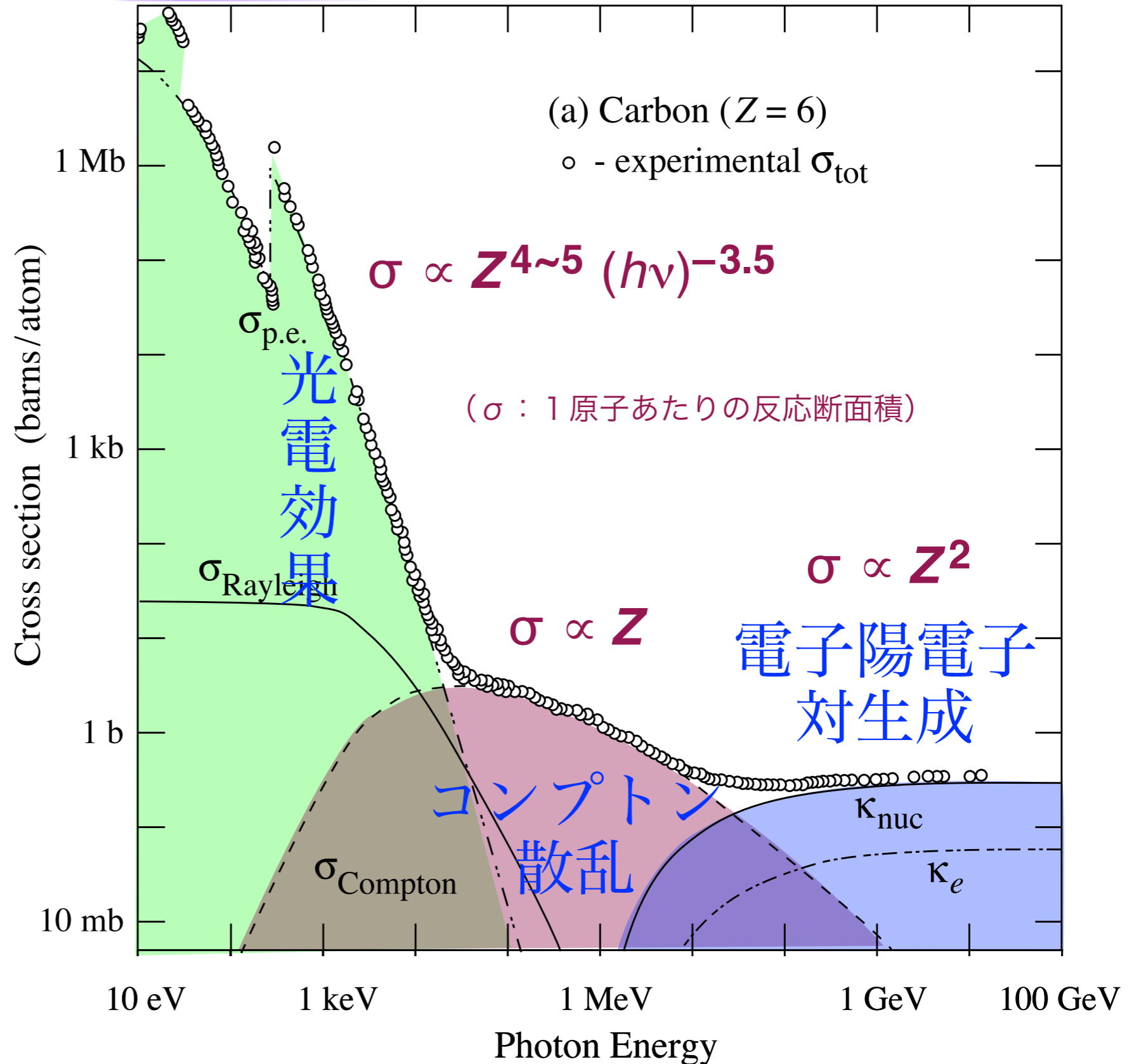
1 Mb
= $(0.1 \text{ \AA})^2$

1 Mb

1 kb

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

1 b



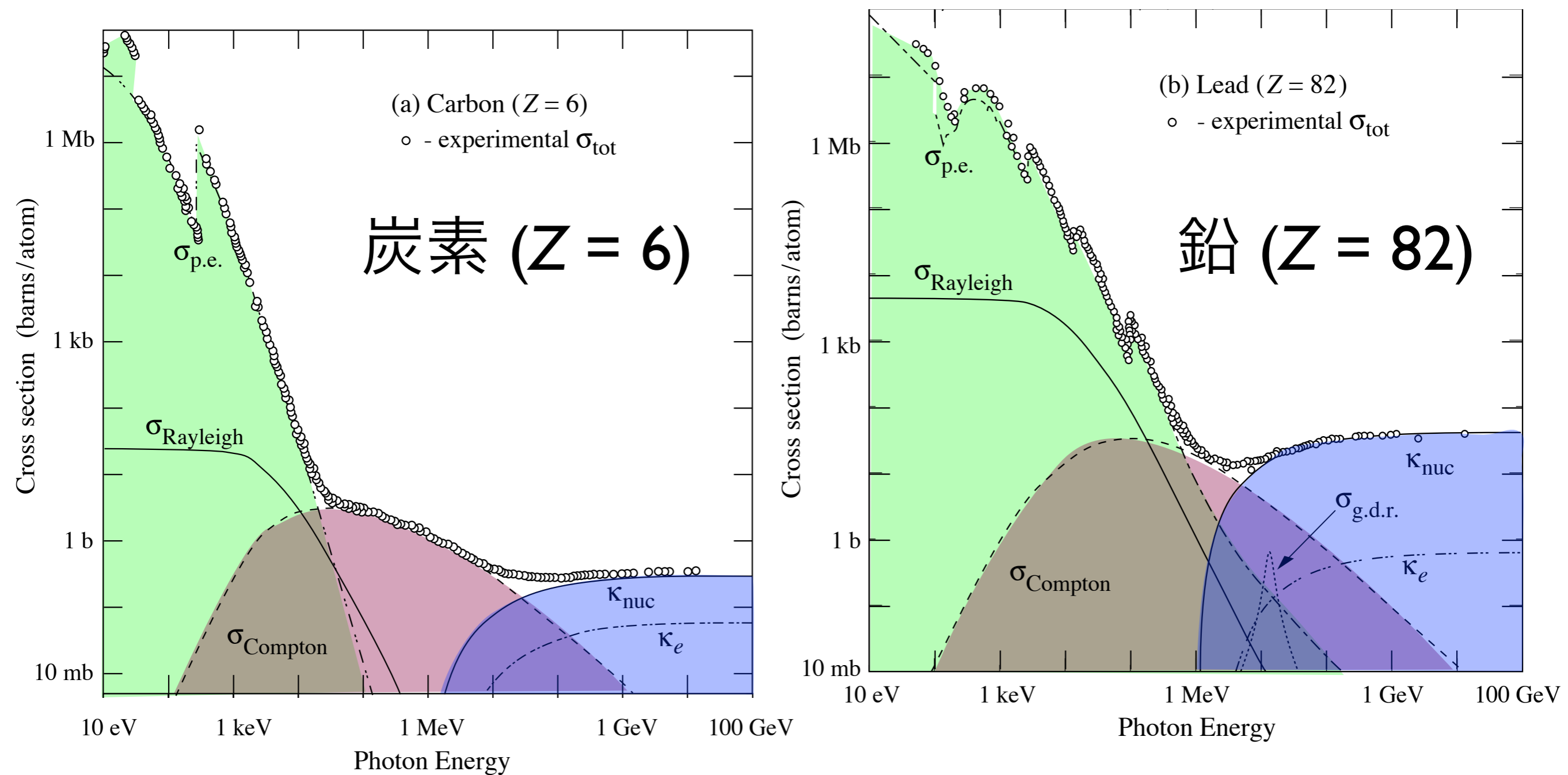
紫外線

X線

γ

線

光子の反応断面積の物質依存性



光電効果 $\propto Z^{4\sim 5}$

コンプトン散乱 $\propto Z$

電子対生成 $\propto Z^2$

レントゲン(X線)撮影

吸収率の差を利用して撮像する。

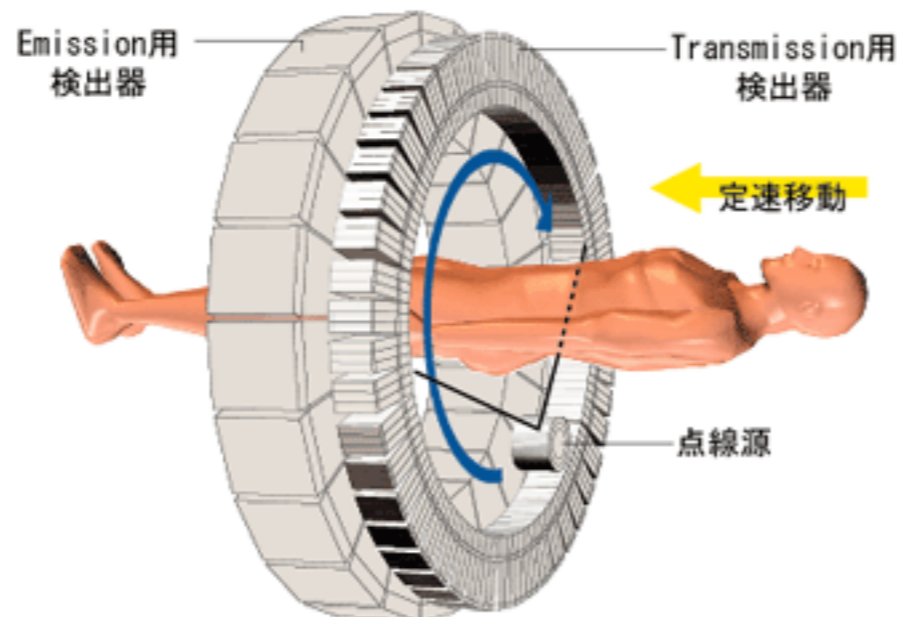
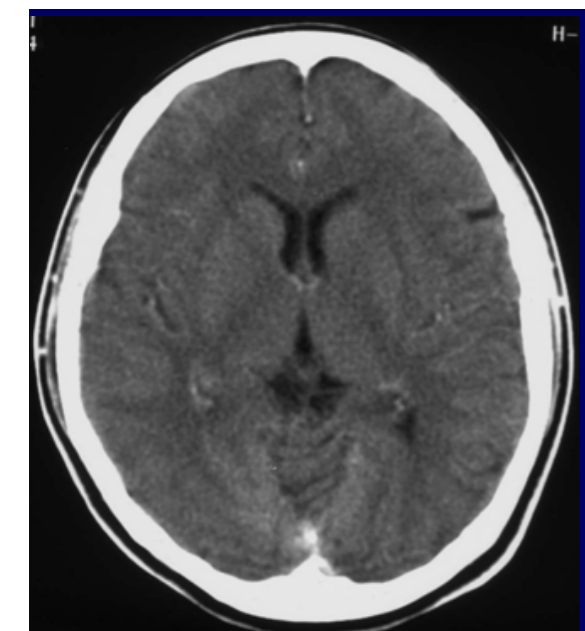


(減弱)

造影剤 (I, Ba, Xe) : Z 大 = 減衰係数 大

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

X線 CT



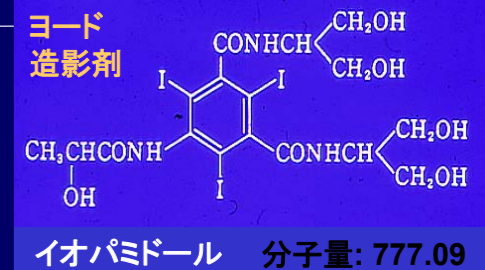
X線検査用造影剤

* 陽性造影剤

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

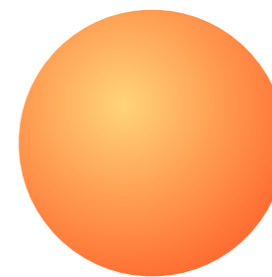
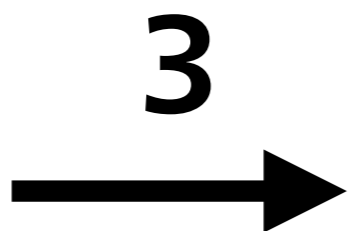
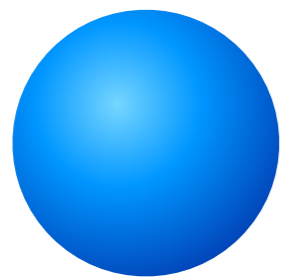
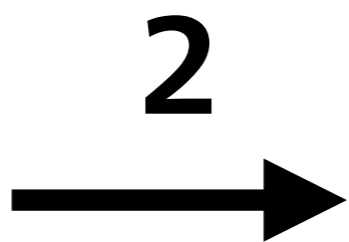
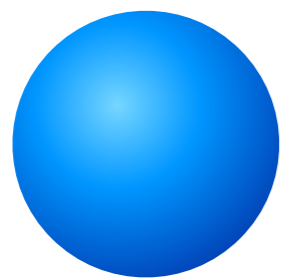
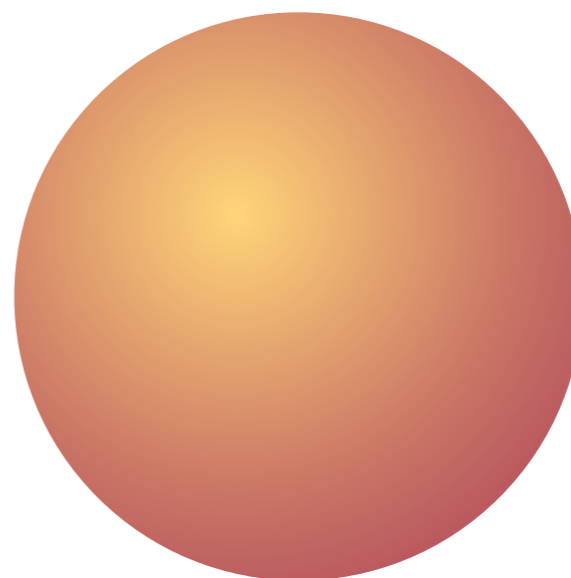
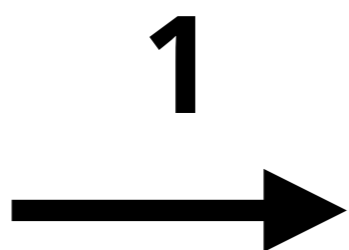
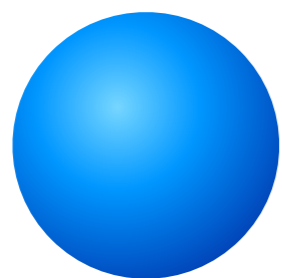
* 陰性造影剤

- ・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...
- ・オリーブ油(膀胱CT)



放射線と物質との相互作用

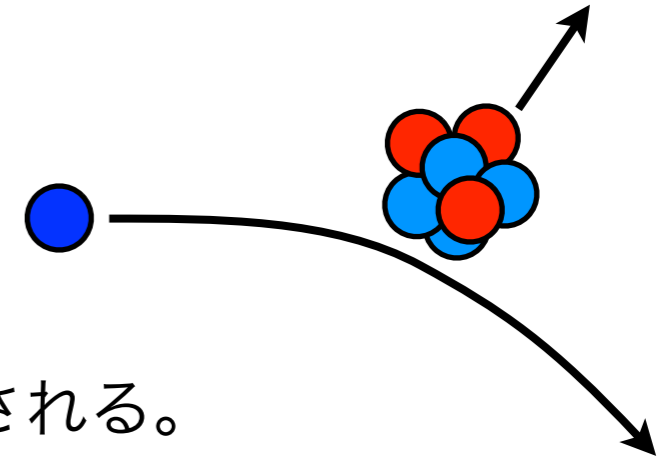
中性子の反応と放射化



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。



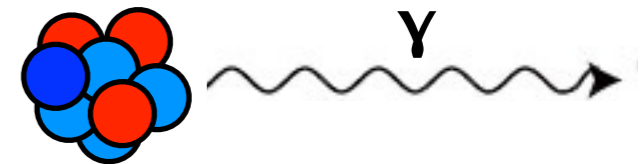
中性子は、同じ質量をもつ陽子により最も効率的に減速される。

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 線などを放出。
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。

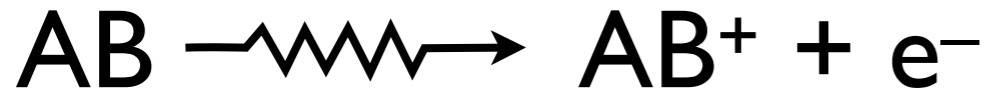
通常の放射性核種による β 線や γ 線、原子からの X 線などでは起こらない。

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。

放射線化学

放射線が誘起する素反応

(一部抜粋)



電離 (イオン化)



励起

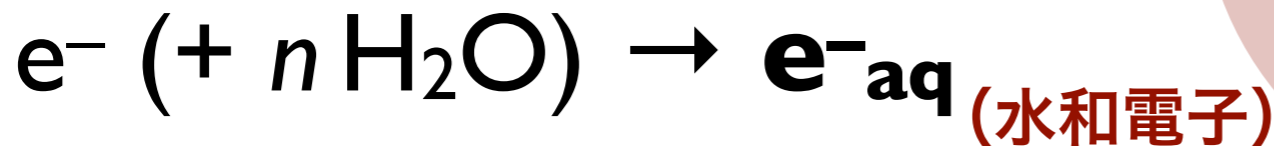
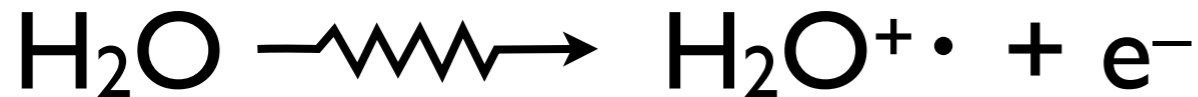


再結合



ラジカル生成

水中での反応



酸素効果



(ヒドロペルオキシラジカル)



(スーパーオキシドアニオン)



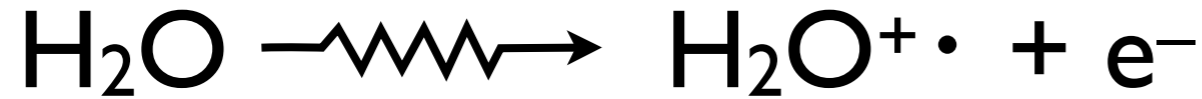
(過酸化水素)

(活性酸素)

水中での反応

γ線照射による
放射線化学収率
(G値)

100 eV あたりに変化・生成する
原子・分子・イオンの数。

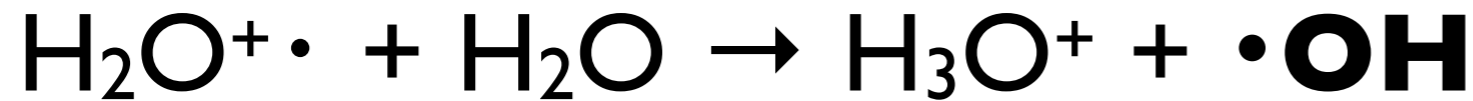


電離 (イオン化)

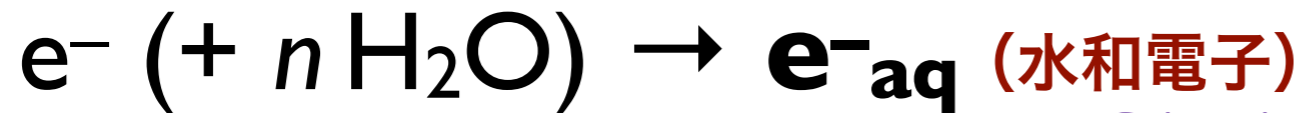


励起

$G(\cdot\text{OH}) = 2.7$
(ヒドロキシルラジカル)



イオン分子反応

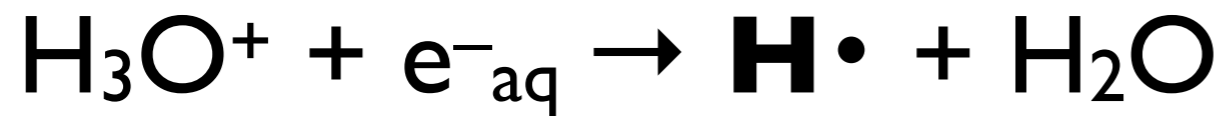


水和電子生成

$G(\text{e}^-_{\text{aq}}) = 2.65$



解離 (ラジカル生成)



電子捕捉

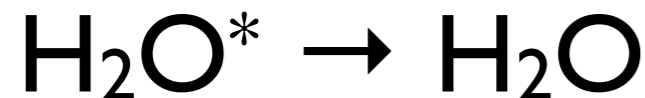
(水素ラジカル) $G(\text{H}\cdot) = 0.55$



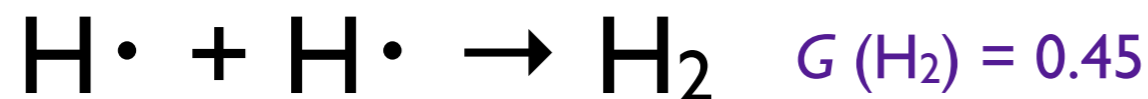
再結合



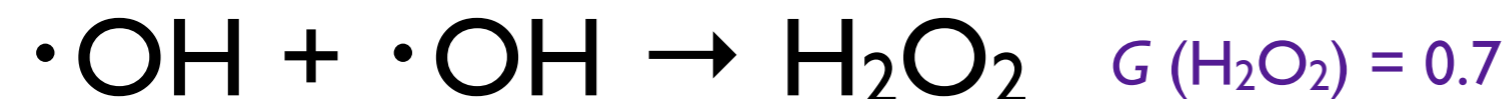
電子捕捉



脱励起



分子生成



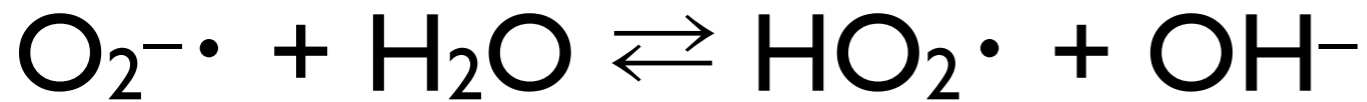
分子生成



分子生成

酸素効果

(活性酸素)



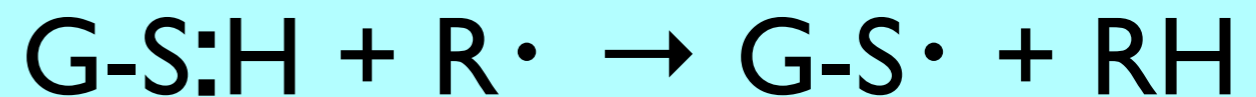
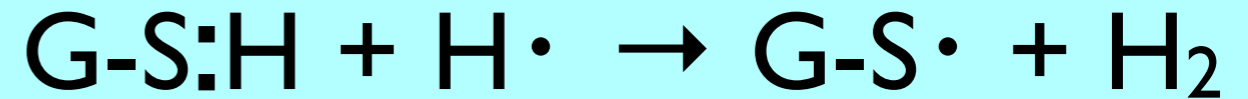
放射線防護剤

(ラジカルスカベンジャー)

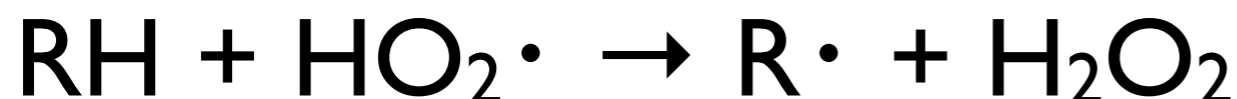
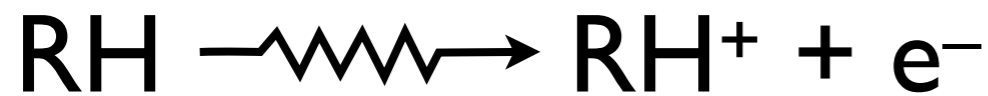
SH基, S-S 結合

例: システイン、システアミン

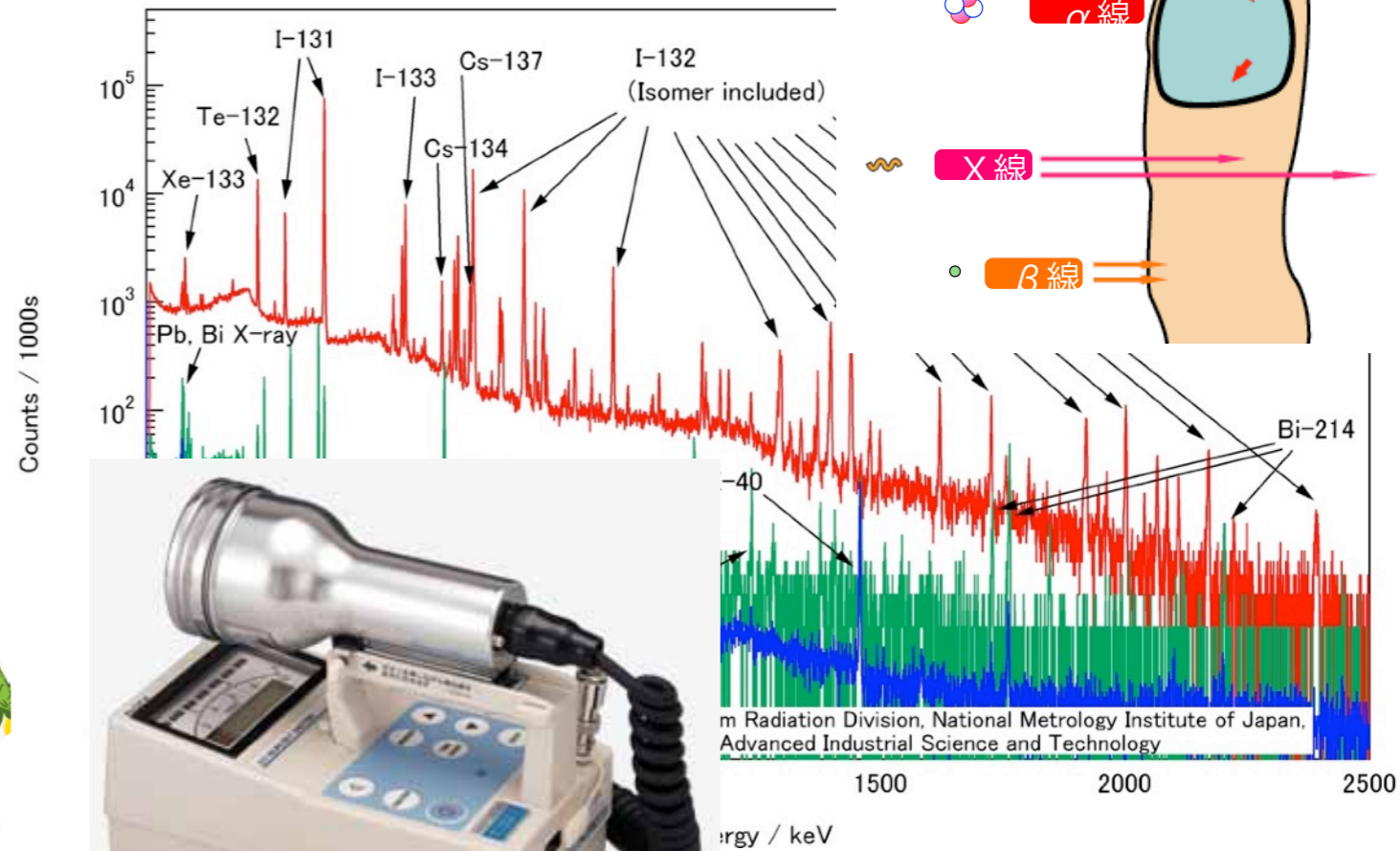
(グスタチオン)



有機物の放射線化学反応



放射線の科学と安全



2022 / 4 / 26 (火)

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

放射線計測学

空間線量率測定 表面汚染検査



β (γ)

放射線の測定



γ

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

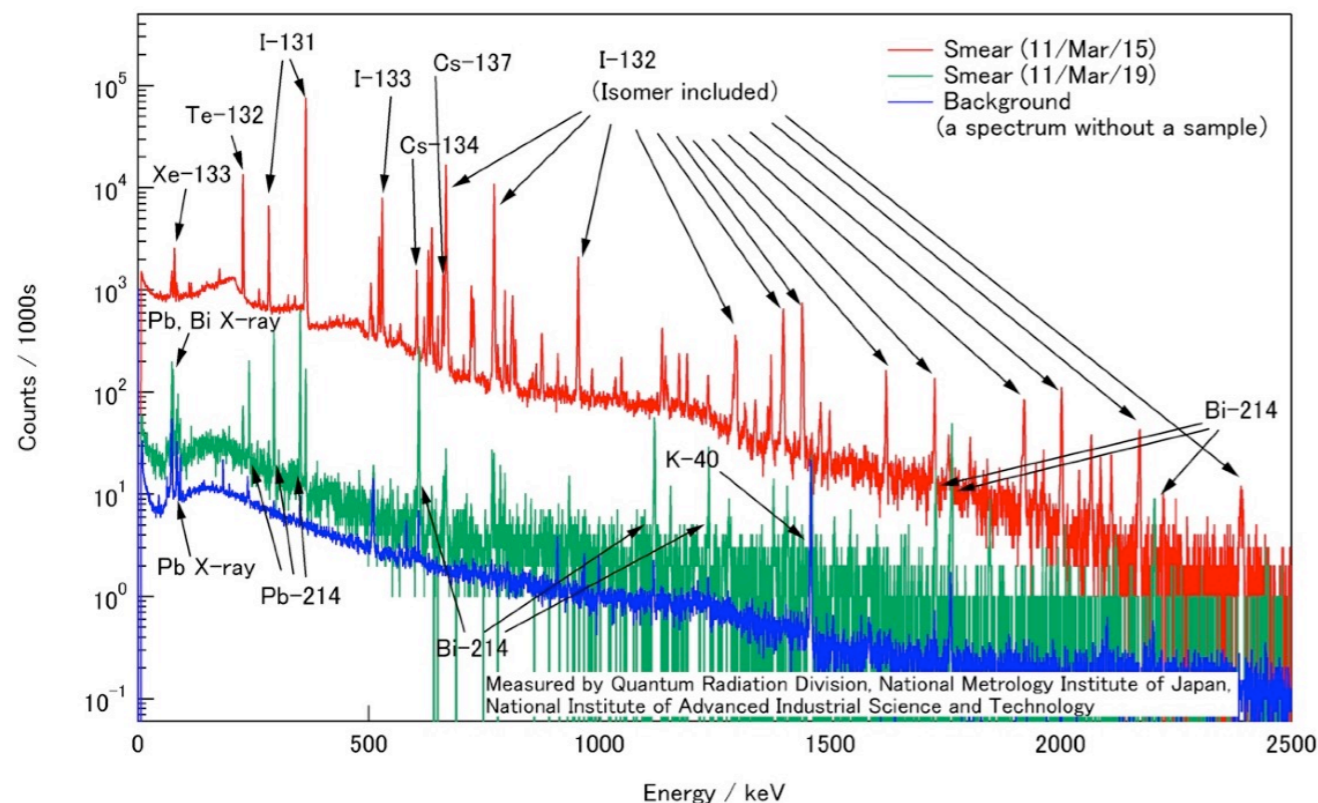
Ge, Si(Li)

計数 (cps = counts per second)

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

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)



食品検査

食品検査用ゲルマニウム検出器



霧箱

Stream chamber



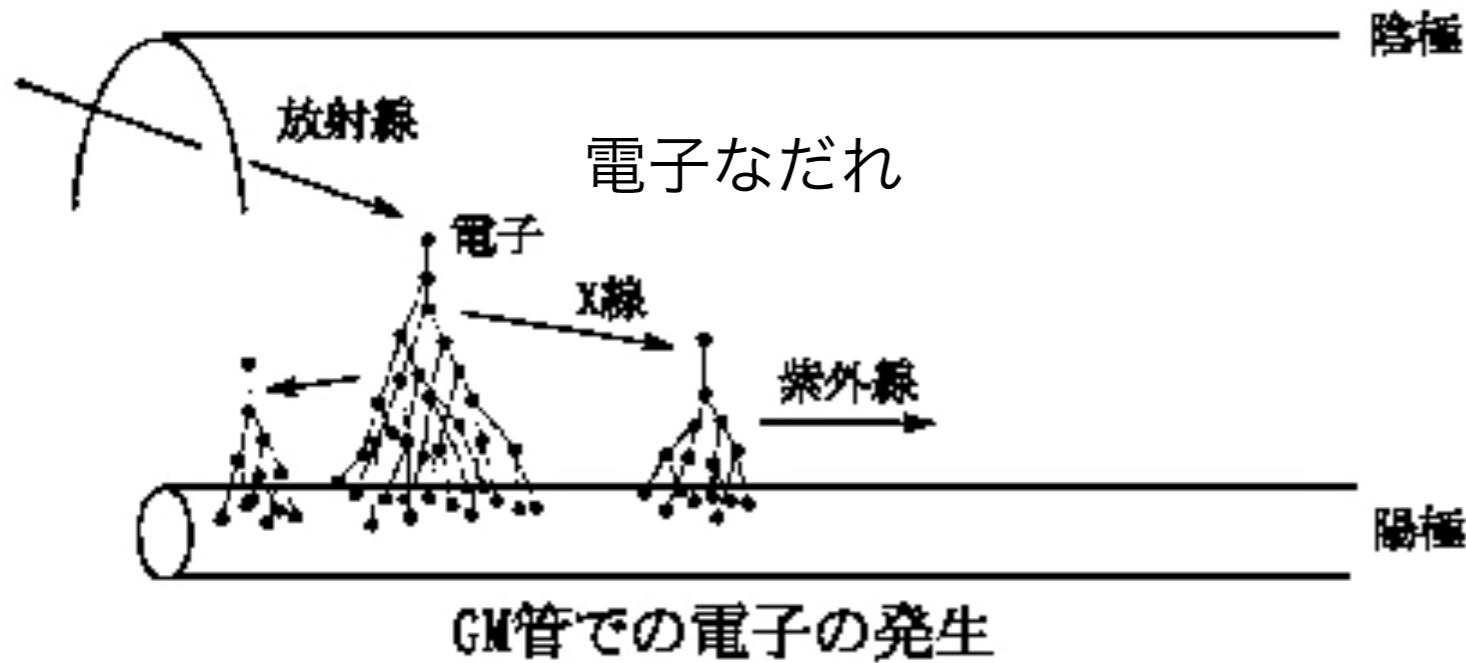
GM管 表面汚染用 サイベイメータ



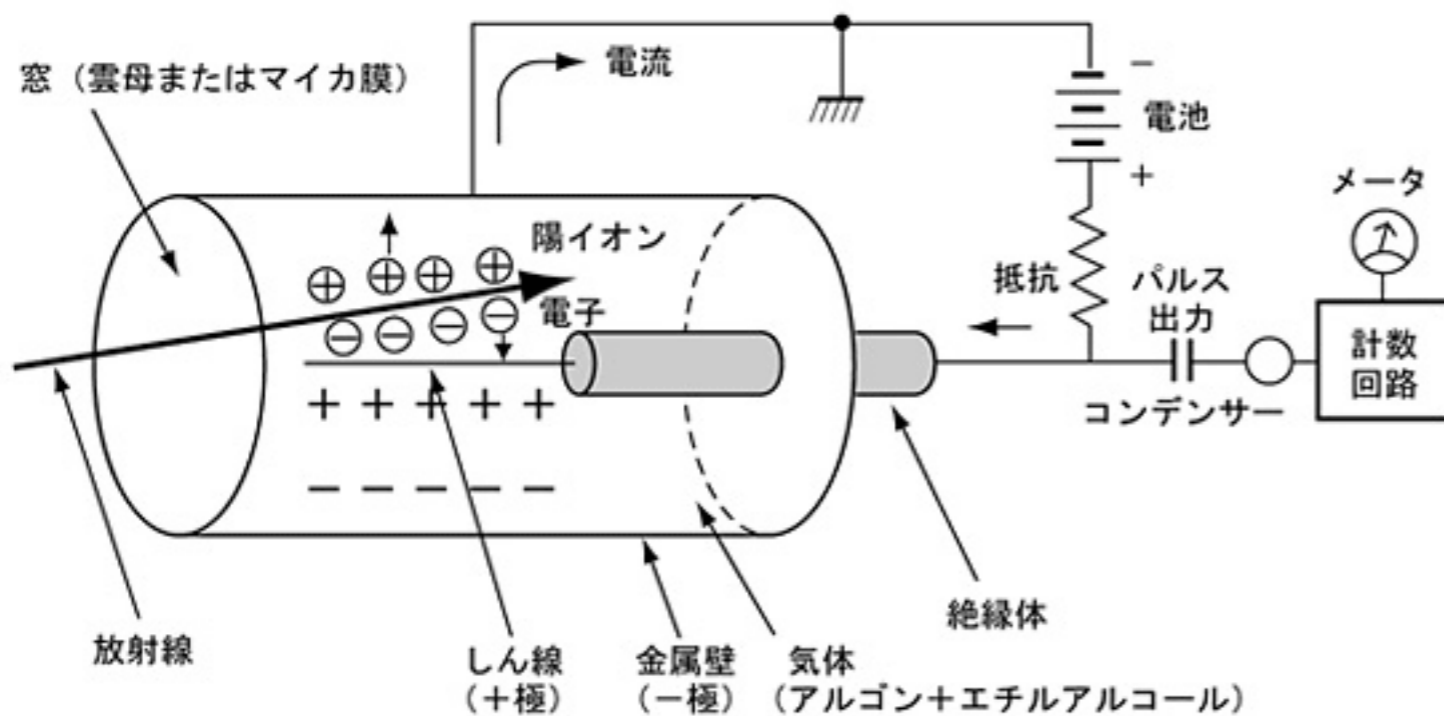
気体の電離を利用する放射線計測

電離箱, 比例計数管, GM管

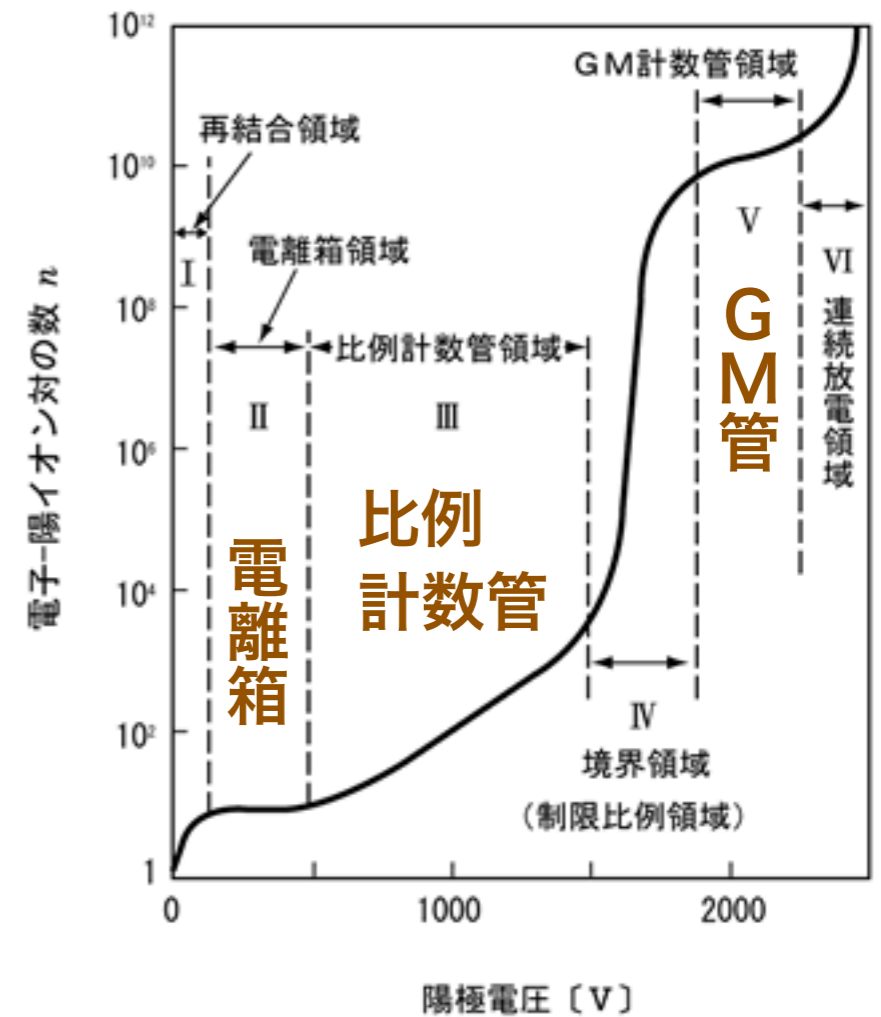
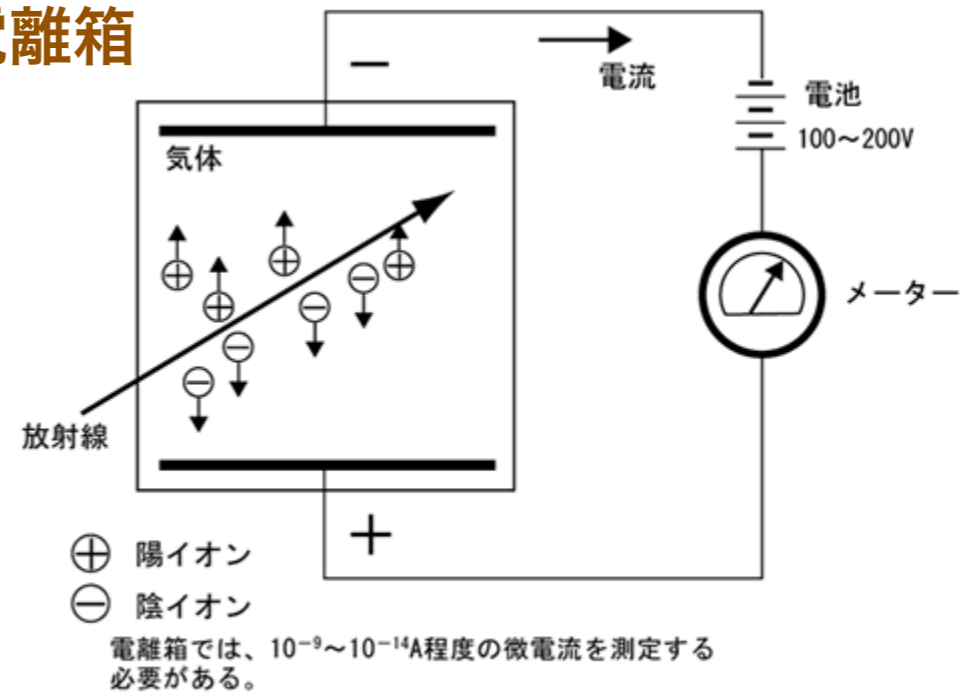
(ガイガー・ミュラー管)



GM管



電離箱



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

プラスチックシンチレータ
およびライトガイド

無機 : NaI (Tl), CsI (Tl) (γ線、X線)

BGO, GSO など (γ線、X線)
 $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ Gd_2SiO_5

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

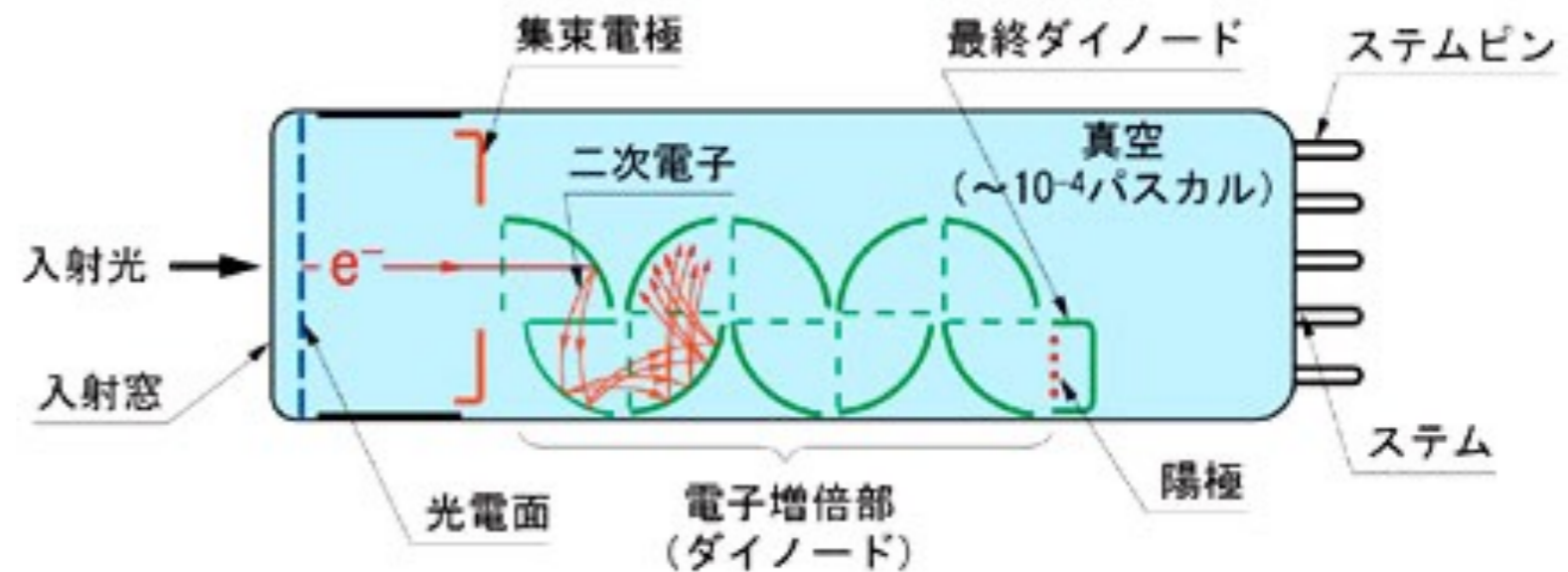
/ トルエン、キシレン

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



液体シンチレーションカウンタ

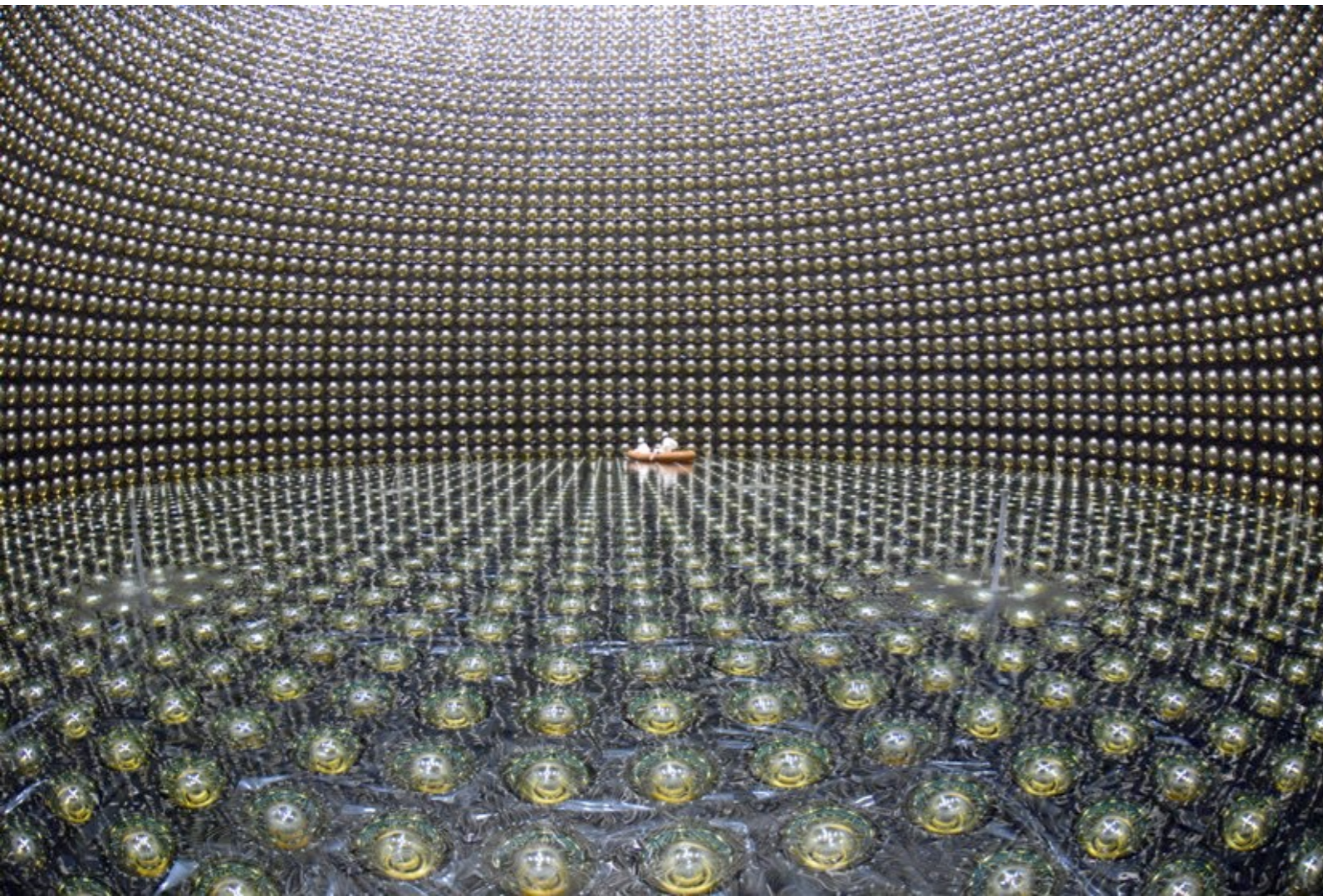
光電子増倍管 (PMT: Photomultiplier tube)



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】

$\beta (\gamma) / \gamma$



GM管

$\beta (\gamma) / \gamma$



電離箱

γ



CsI (Tl)

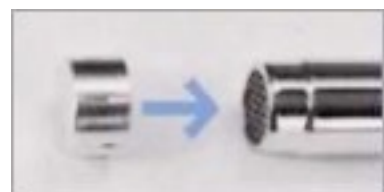


NaI (Tl)

シンチレーション
(放射線照射による物質の蛍光発光)

$\beta (\gamma)$

【表面汚染検査】



気体の電離

γ

$\beta (\gamma)$



GM管

α



ZnS (Ag)

放射線管理区域

管理区域
(使用・貯蔵施設)



許可なくして
立ち入りを禁ず

放射性同位元素
使用室



第 2 種

←開閉→



管理区域 (作業エリア) 用靴履
Shoehouse for Controlled Area
(Maintenance Area)

管理区域 (作業エリア) 用靴履
Shoehouse for Controlled Area
(Maintenance Area)

更衣室
Changing Room

管理区域 (作業エリア) 用靴履
Shoehouse for Controlled Area
(Maintenance Area)



△注意
RPCM の故障の疑いにかりますので
靴面にテープ等が付着していない
ことを確認してください。
放射線安全セッション

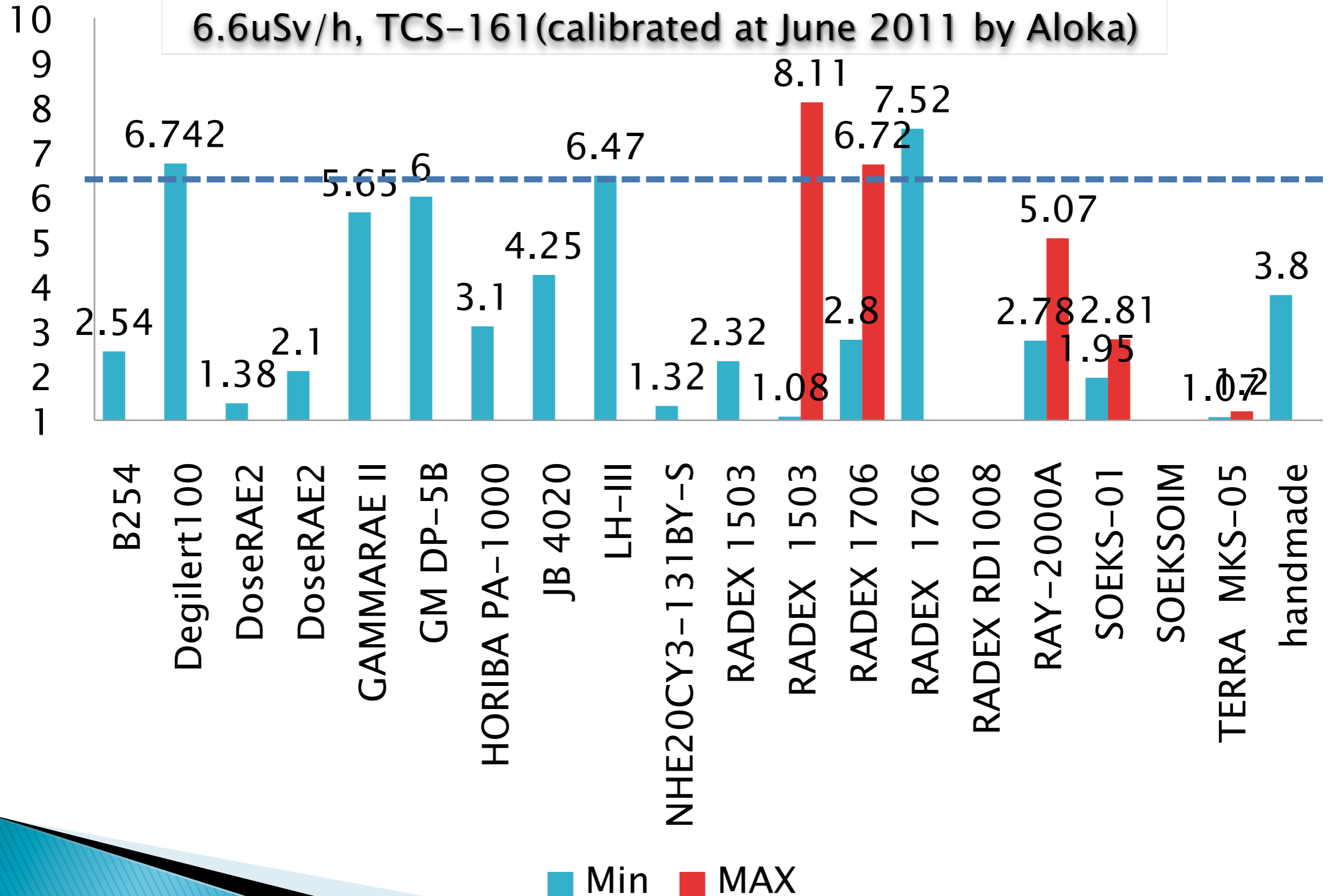
△注意
RPCM の故障の疑いにかりますので
靴面にテープ等が付着していない
ことを確認してください。
放射線安全セッション

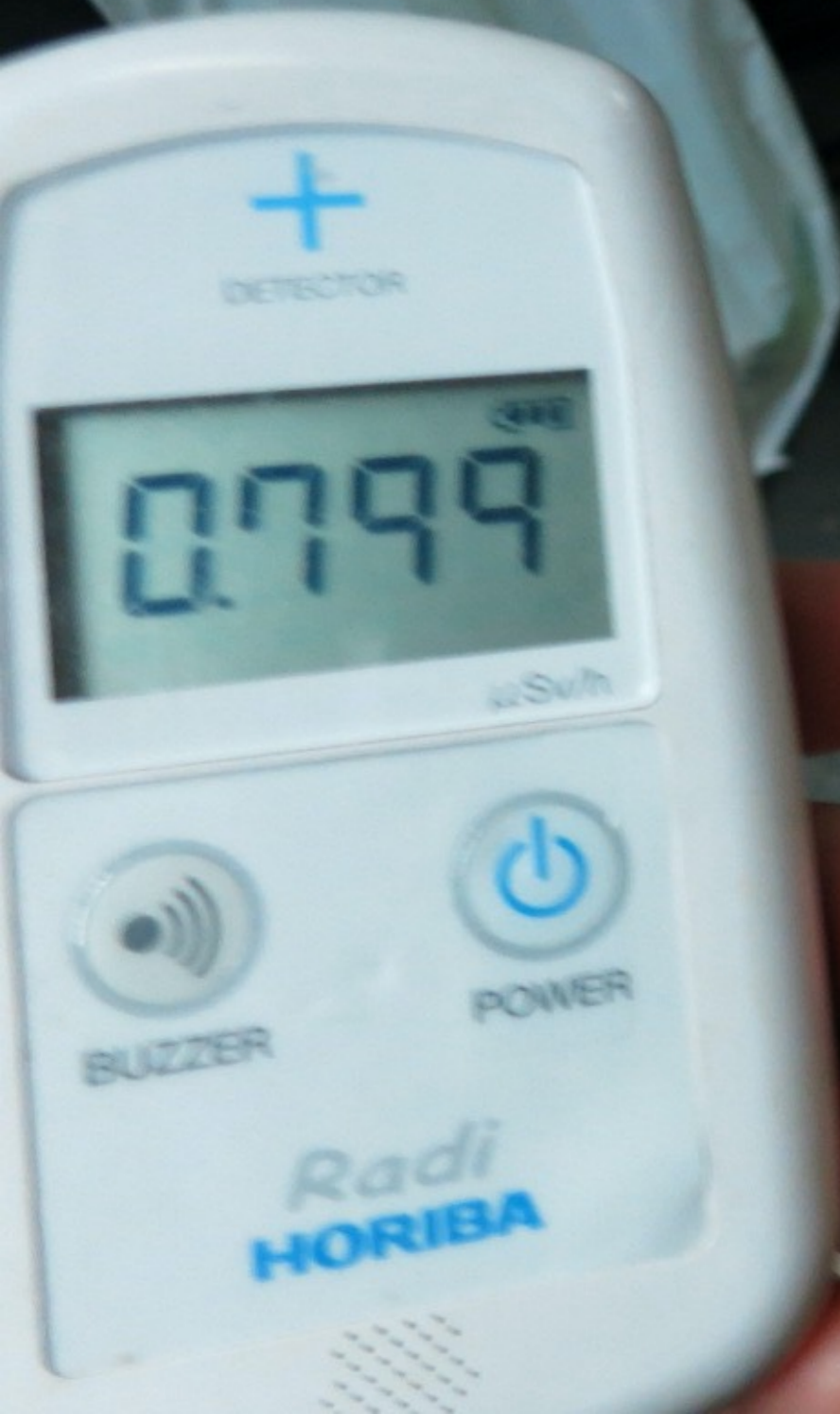
静かにお乗りください。
Please step on the foot detector with care.





以前の勉強会での測定結果





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 \Rightarrow 電離

\Rightarrow 電子正孔対 \Rightarrow 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)



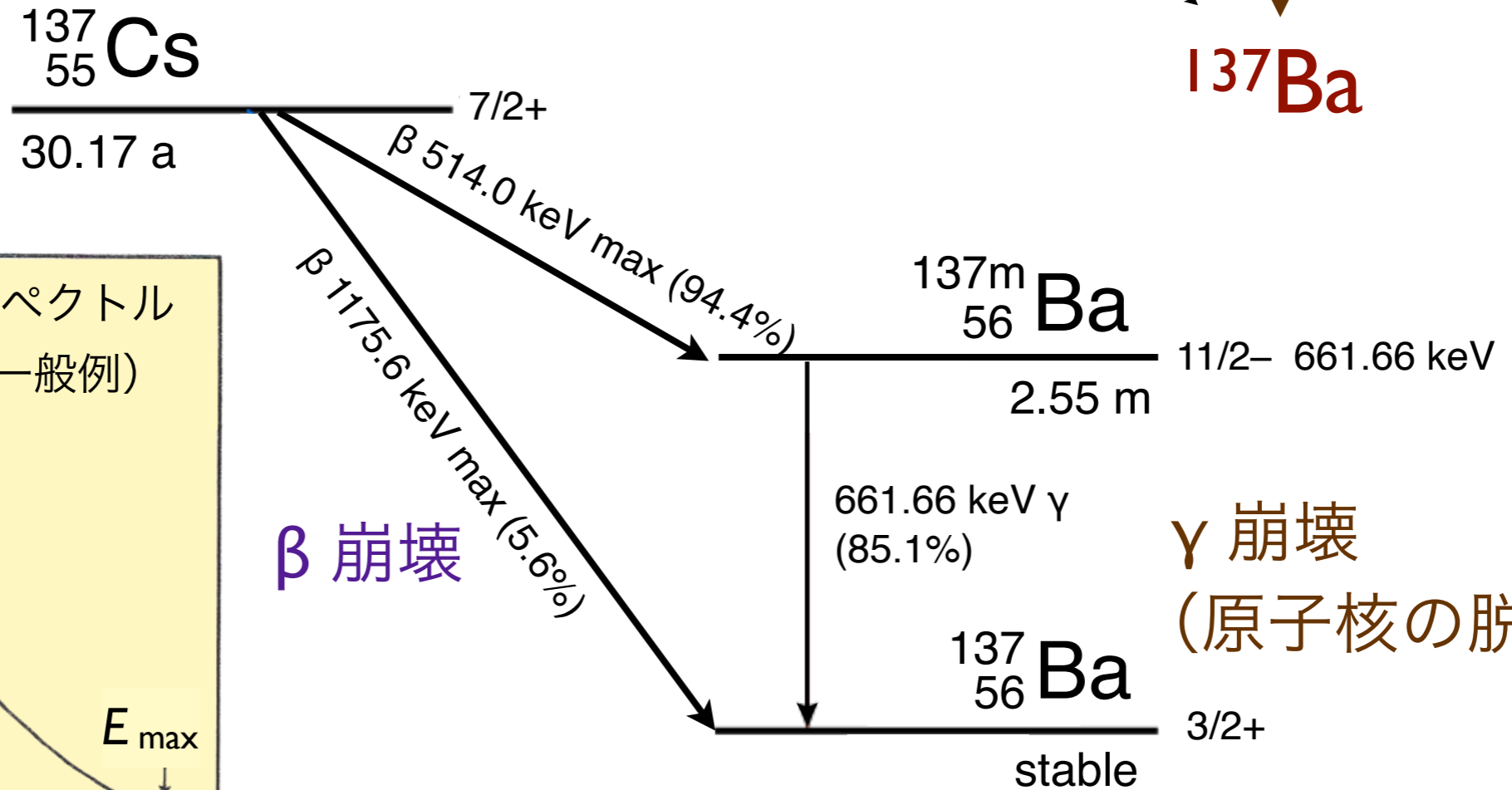
食品検査用ゲルマニウム検出器



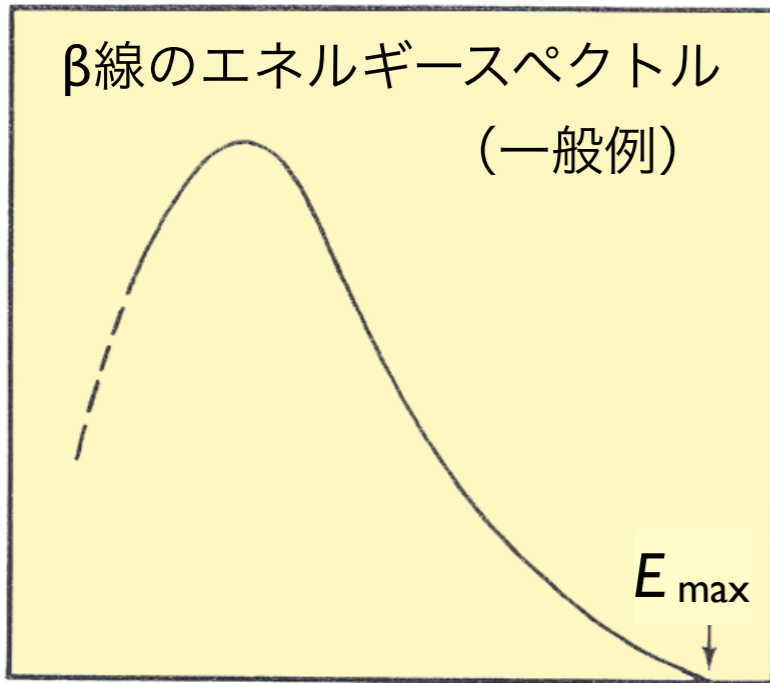


壊変図式

例： ^{137}Cs

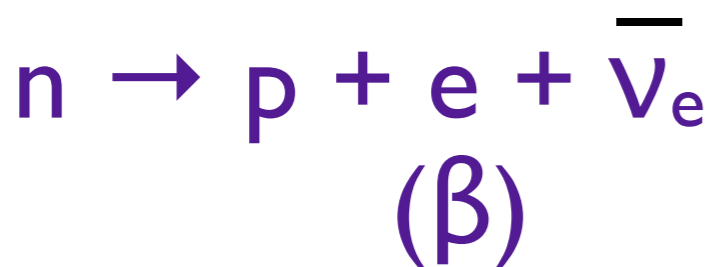


粒子数の分布



エネルギー E_β

β線 (連続スペクトル)



γ崩壊
(原子核の脱励起)

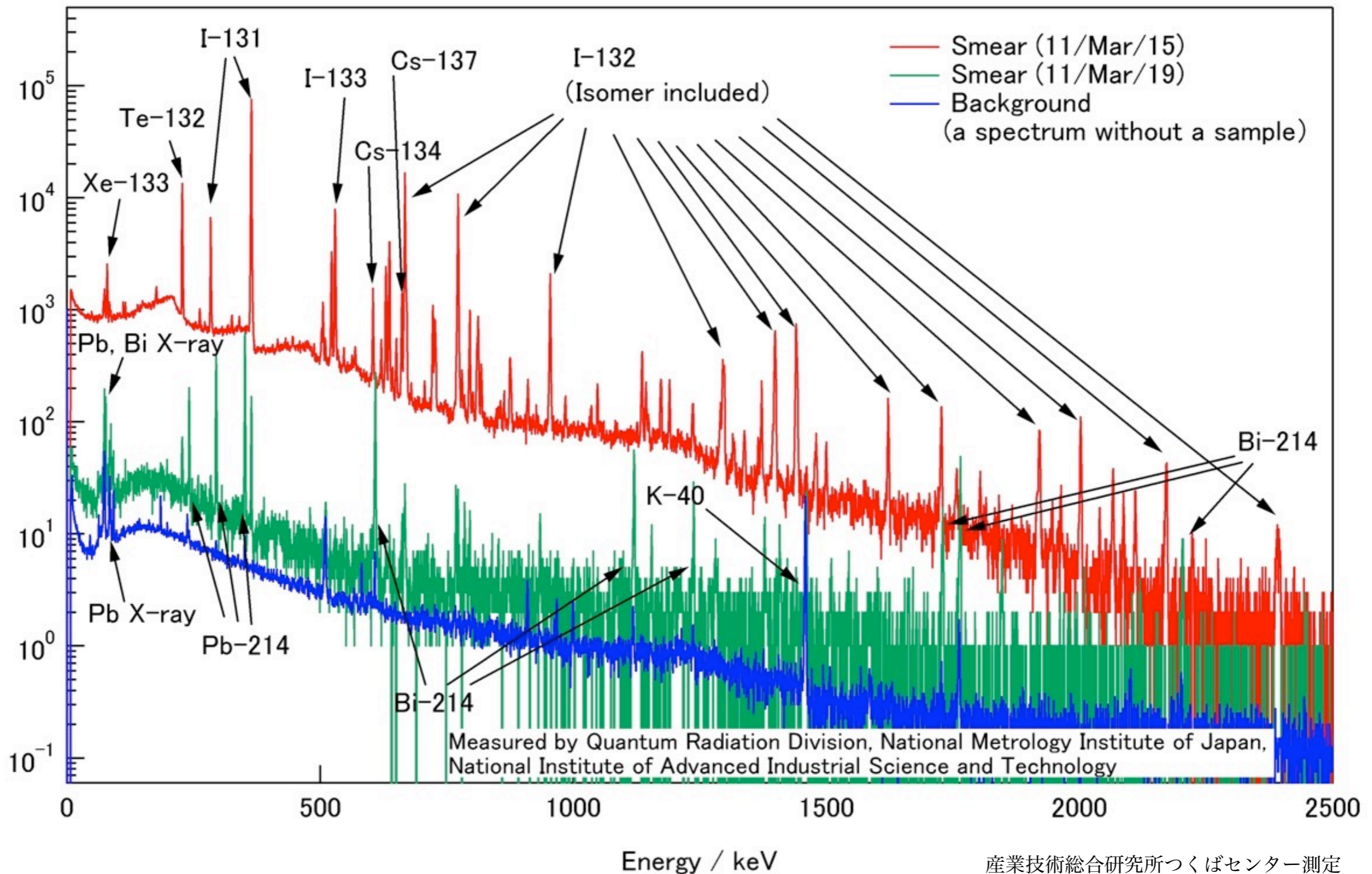


γ線 (線スペクトル=決まったエネルギー)

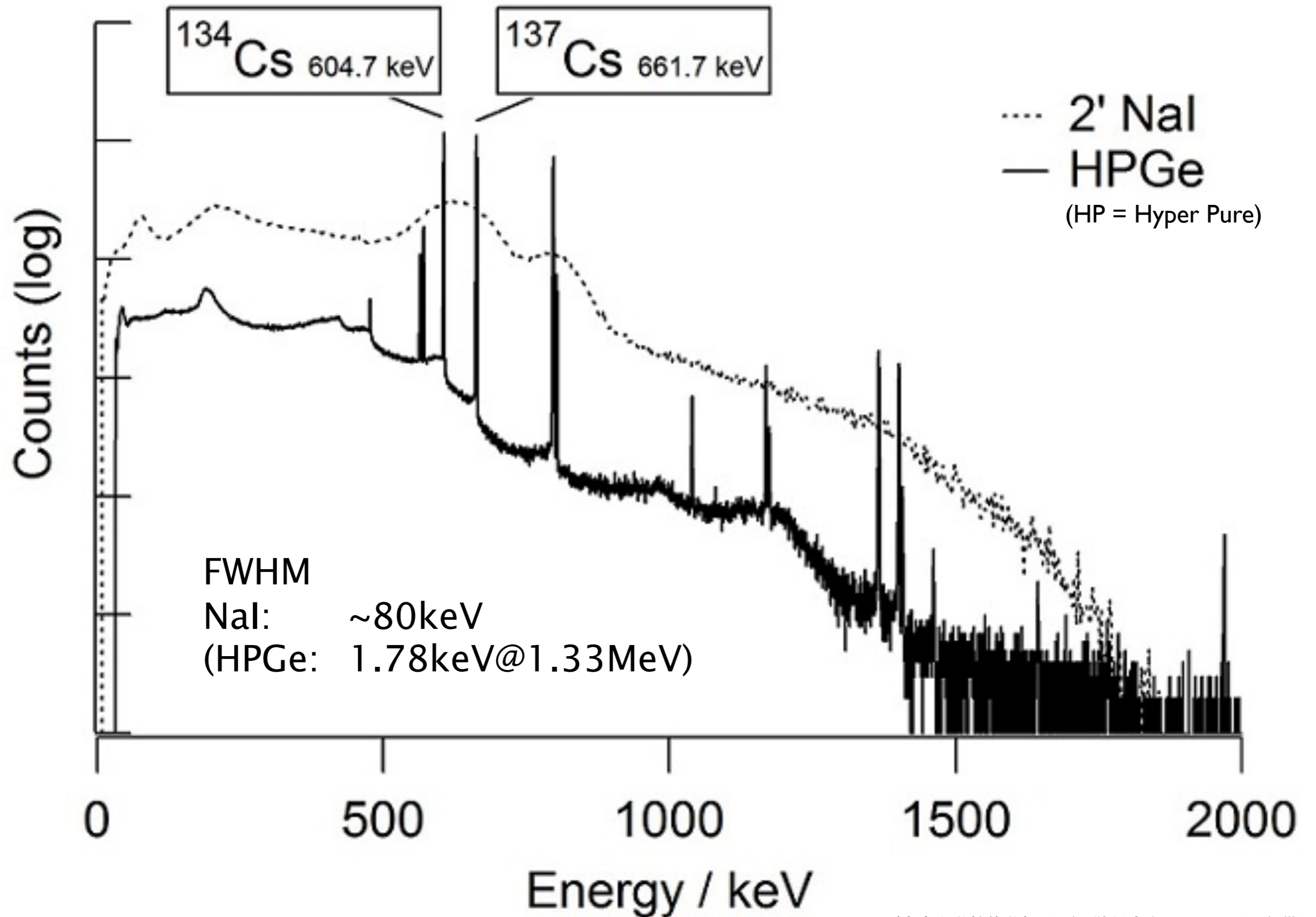
γ線のエネルギーで核種を同定

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)



γ線スペクトルの比較(NaIカウンターvsGe半導体検出器)



食品中の放射性物質の基準値

■放射性セシウムの基準

2012/1/20 朝日新聞

暫定基準 2011		新基準案 2012	
野菜類	500 Bq	一般食品 (野菜類、穀類、 肉・卵・魚・ その他)	100 Bq
穀類	500 Bq		
肉・卵・魚・その他	500 Bq		
飲料水	200 Bq	飲料水	10 Bq
牛乳・乳製品	200 Bq	牛乳	50 Bq
		乳児用食品	50 Bq

(1kg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)

一般食品の新基準値の出し方
mSvはミリシーベルト。Bqはベクレル

食品からの被曝線量の限度

1mSv/年

飲料水分

0.1mSv/年

一般食品に割り当てる分

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、種類などをもとに年代別に計算

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

最も厳しい

さらに切り下げ

新基準値

100 Bq/kg

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

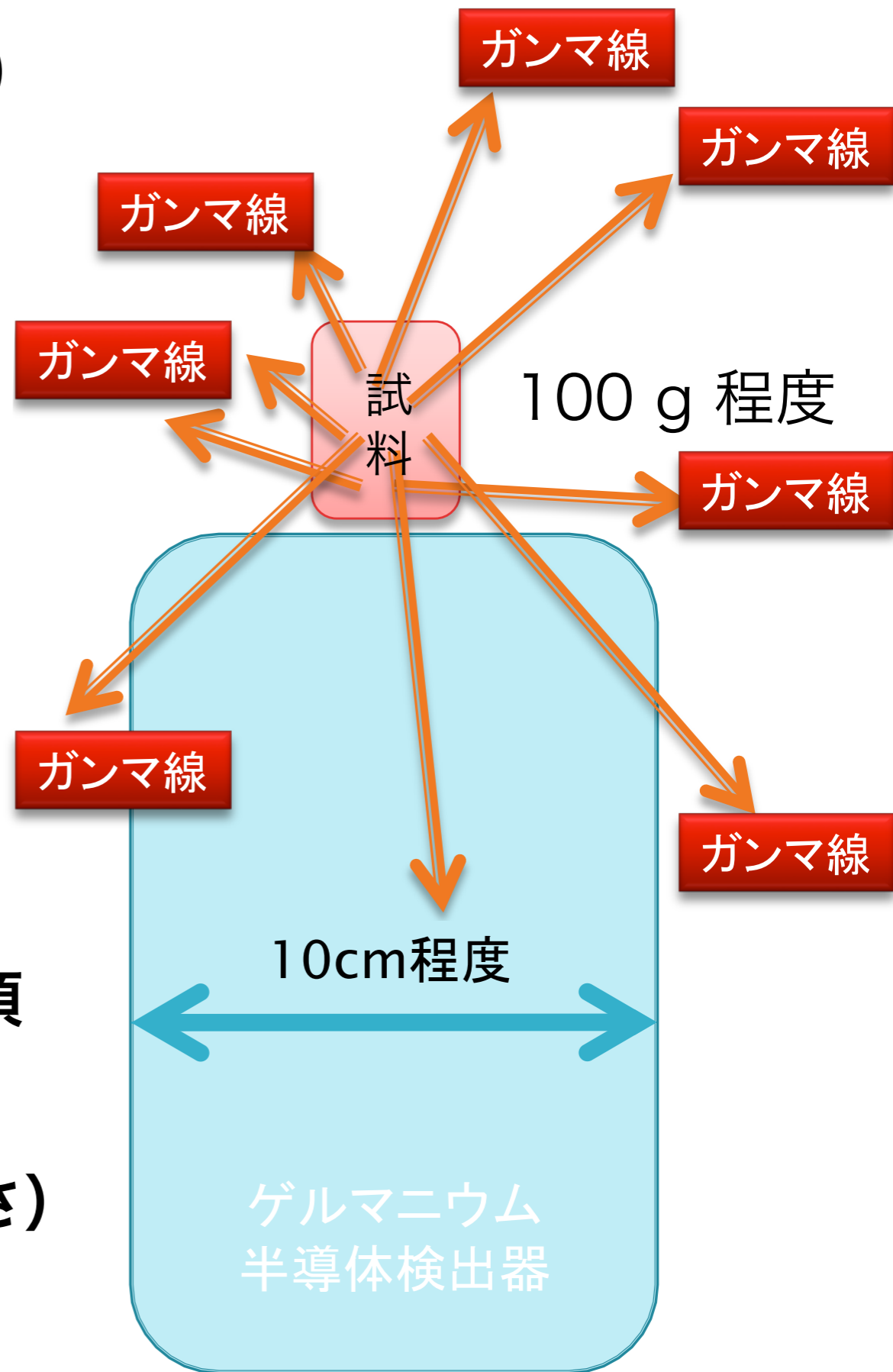
(環境放射線の遮蔽)

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**) \neq 0 Bq (不存在)



(図の提供：東京大学教養学部 小豆川勝見先生)

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	$4.58 \pm 0.55(0.23)$	$7.16 \pm 0.86(2.33)$
3	培養土	練馬区内	$5.95 \pm 1.43(5.82)$	$9.35 \pm 1.89(6.78)$
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	$4110 \pm 20.9(24.6)$	$6330 \pm 38.7(21.6)$
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	$185 \pm 11.6(37.5)$	$298 \pm 19.4(33.5)$
10	ブルーベリー	練馬区内	$1.42 \pm 0.29(1.01)$	ND(2σ)(1.38)

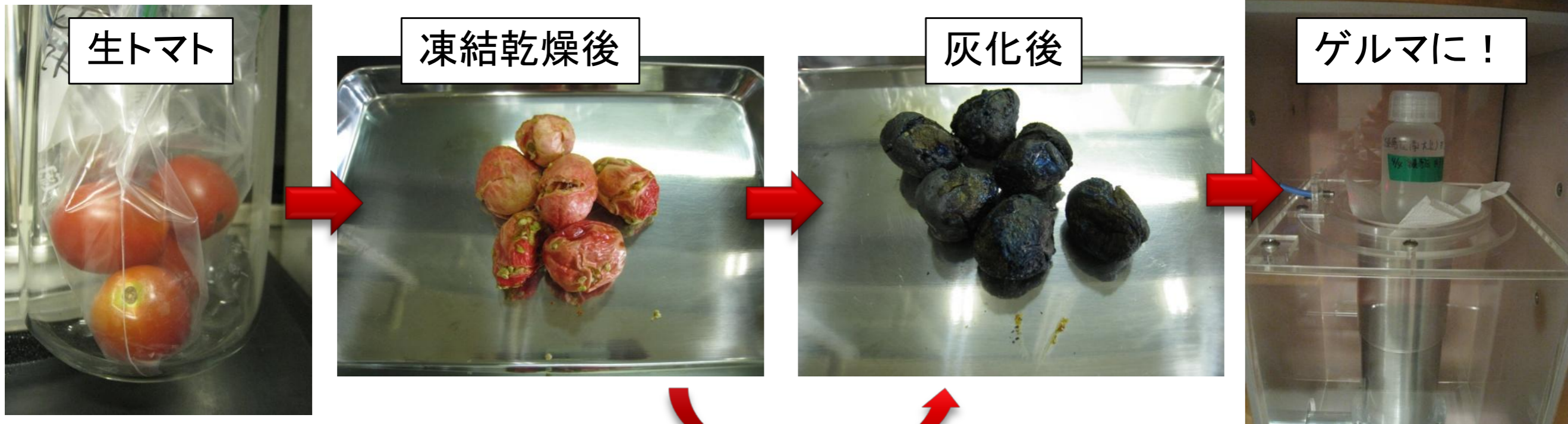
食品に含まれる放射性物質の測り方

- ▶ 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屈)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



飛灰を発生させないように炭状にする

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)	300	
放射性セシウム($^{134+137}\text{Cs}$)	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 / 949万袋 (2019年)

0袋 / 925万袋 (2018年)

0袋 / 998万袋 (2017年)

0袋 / 1027万袋 (2016年)

0袋 / 1050万袋 (2015年)

2袋 / 1101万袋 (2014年)

28袋 / 1101万袋 (2013年)

71袋 / 1035万袋 (2012年)

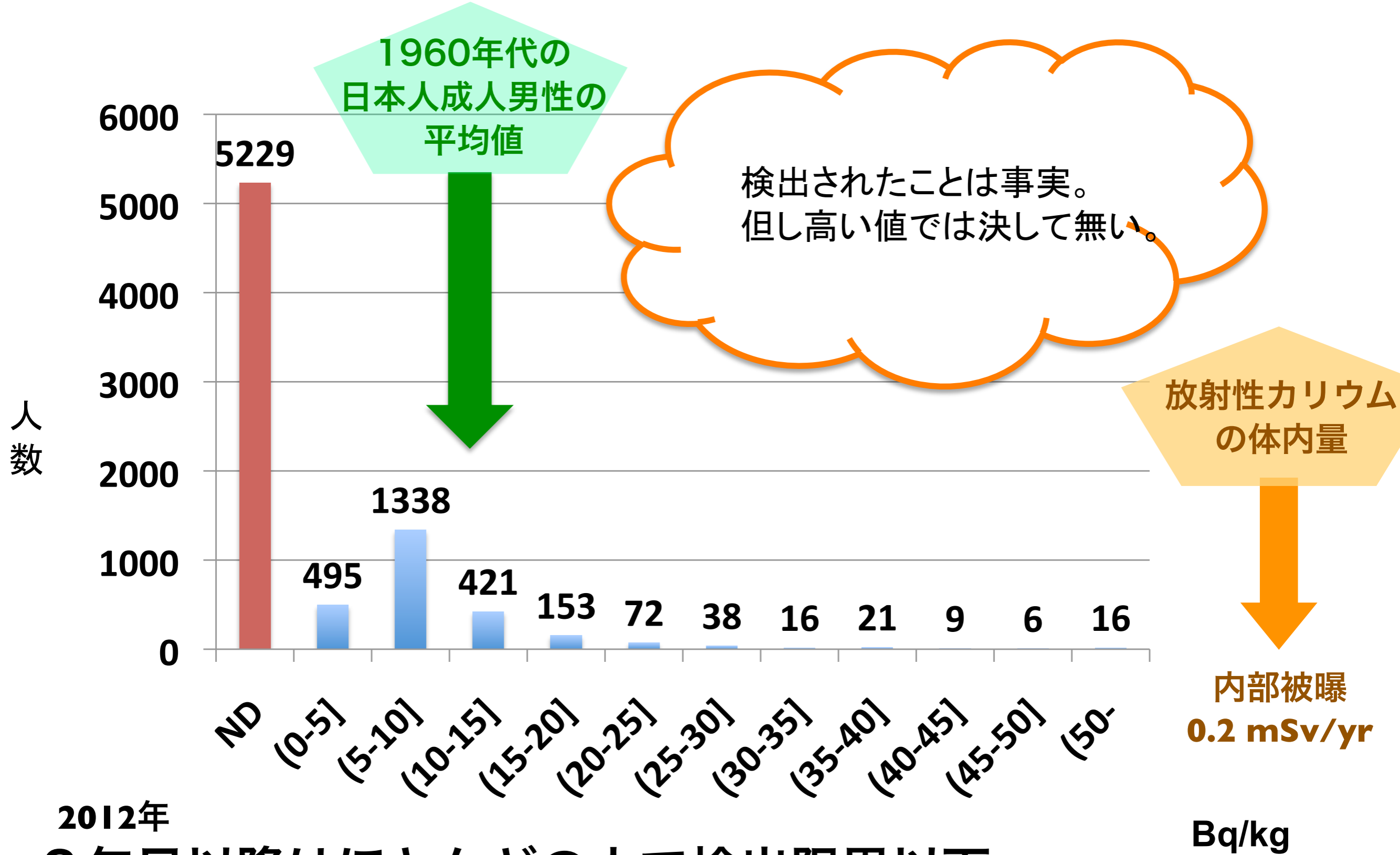
内部被曝の評価

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

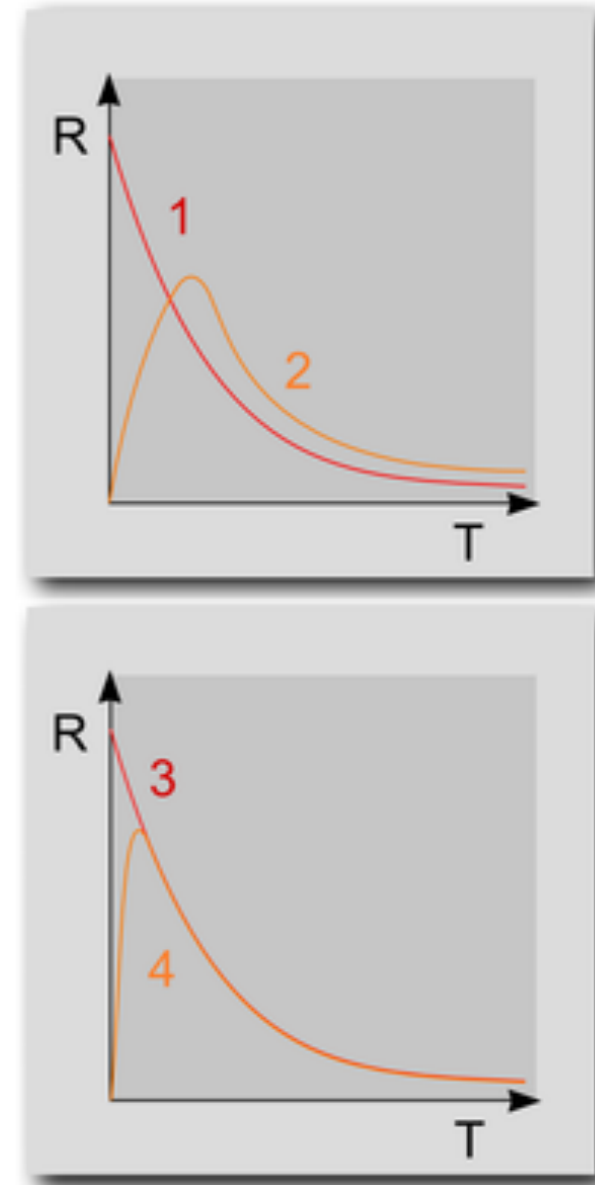
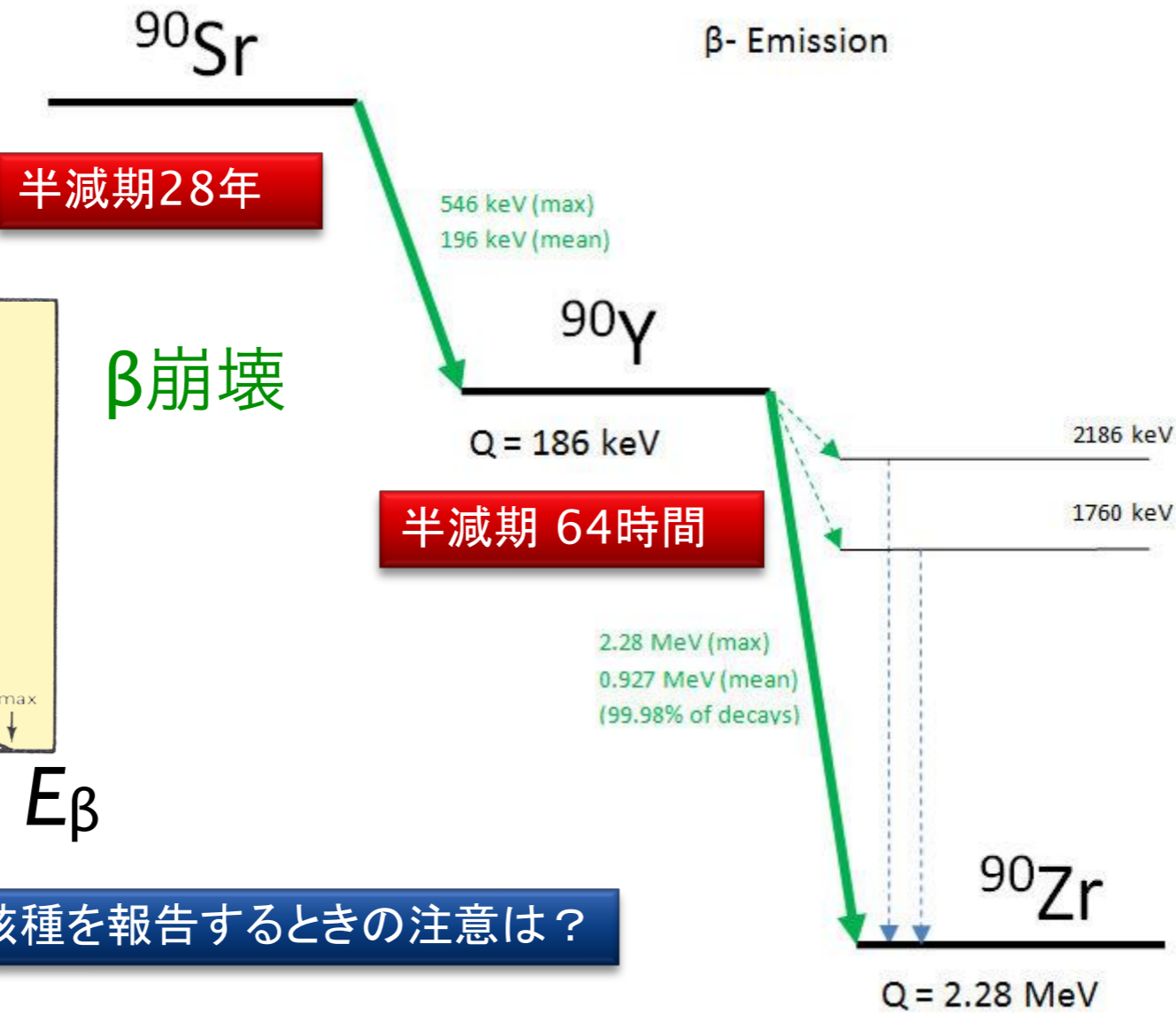
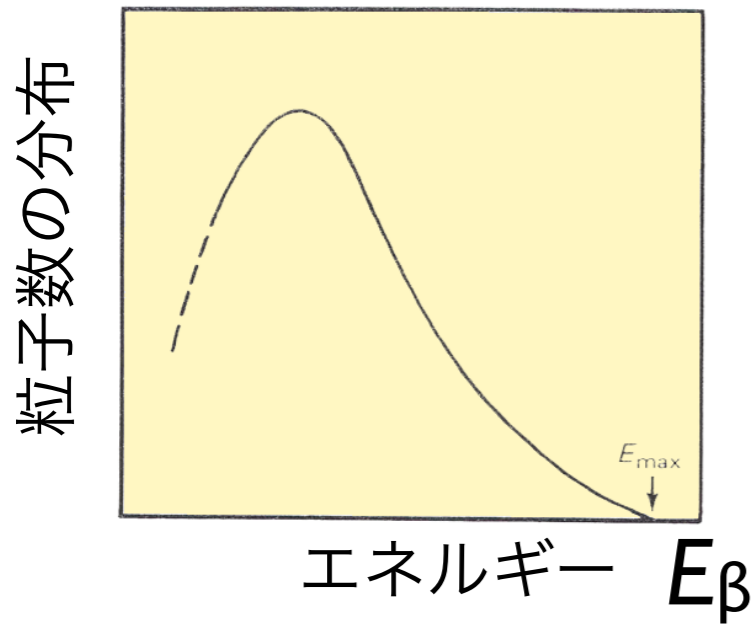


2012年
2年目以降はほとんどの人で検出限界以下。

β崩壊核種の同定 (γ線を出さないもの)

化学分離が必須

例： **$^{89, 90}\text{Sr}$**



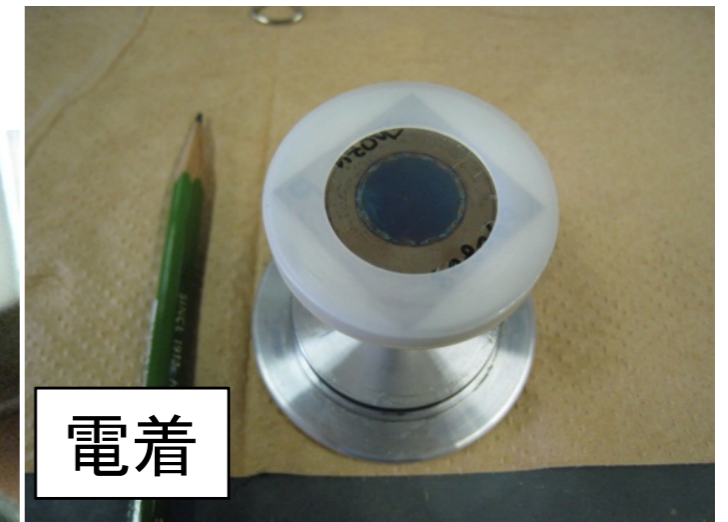
α崩壊核種の同定 \rightarrow アルファスペクトロメトリ

例： **$^{238, 239, 241}\text{Pu}$**

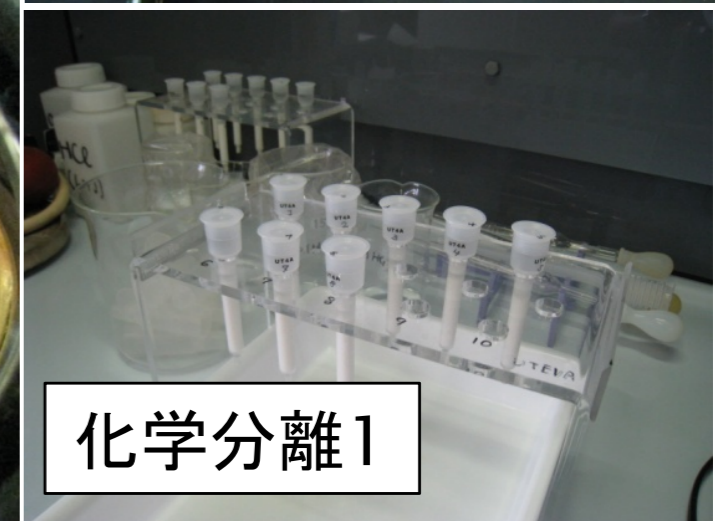
アルファ線の測定装置

U, Th, Pu, Am, Cm...はこれ!

▶ アルファスペクトロメトリ



電着



化学分離1



化学分離2

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)

フリッケ線量計 Fricke dosimeter

$\text{Fe}^{2+} + \text{放射線} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$, 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 \rightarrow (加熱) \rightarrow 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 \rightarrow (紫外線) \rightarrow 蛍光

$\text{Ag}^+ \rightarrow \text{Ag}^0, \text{Ag}^{++}$ 発光中心 color center ができる

ガラス線量計: コバルトガラス \rightarrow 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



OSL ルクセルバッジ®



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

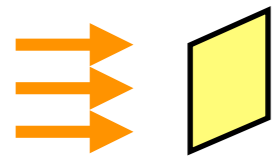
様々な方向を向いて飛び交い、

それぞれの強度で存在している。

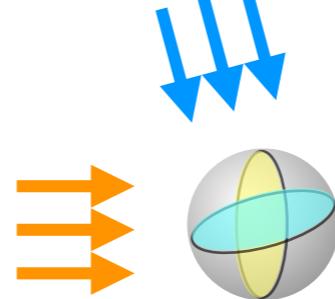
これをひとつの物理量で表すのは

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) 光子 (X線・γ線) 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 空気のみ 光子 (X線・γ線) X [C / kg], röntgen [R] | $R \approx 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$

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] | $\text{Gy} = 100 \text{ ram}$
gray

放射線量の単位

radiation dose

人体 物質が吸収したエネルギー (単位質量あたり)

吸収線量 D [J / kg] = [Gy] グレイ

Gray



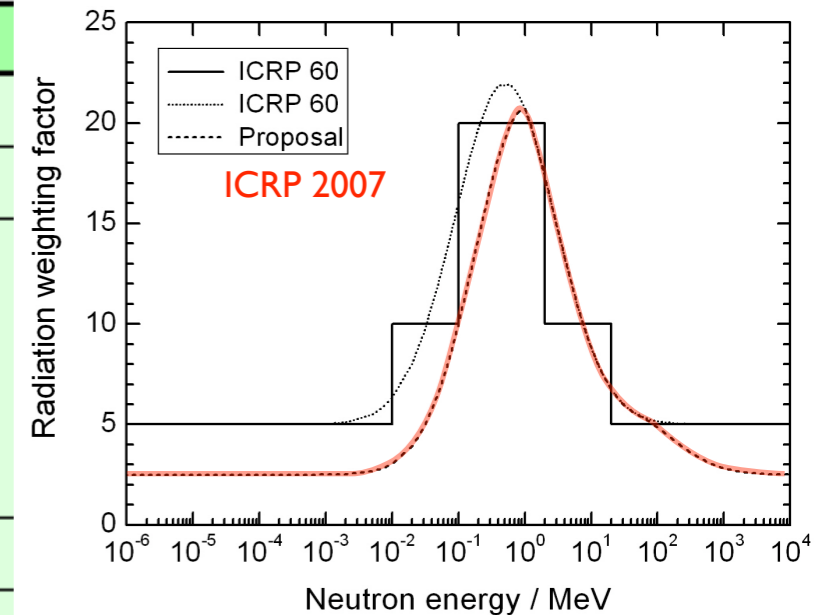
放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

等価線量 $H_T = W_R \times D$ [Sv] シーベルト

sievert

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	1
電子(β線)およびミュー粒子; 全てのエネルギー	1	1
中性子; 10keV 以下	5	右図を参照
10keV~100keV	10	
100keV~2MeV	20	
2MeV~20 MeV	10	
20MeV以上	5	
反跳陽子以外の陽子; エネルギー 2MeV 以上	5	2 (正負パイオンも)
アルファ粒子(α線)	20	20
核分裂片	20	20
重原子核	20	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)

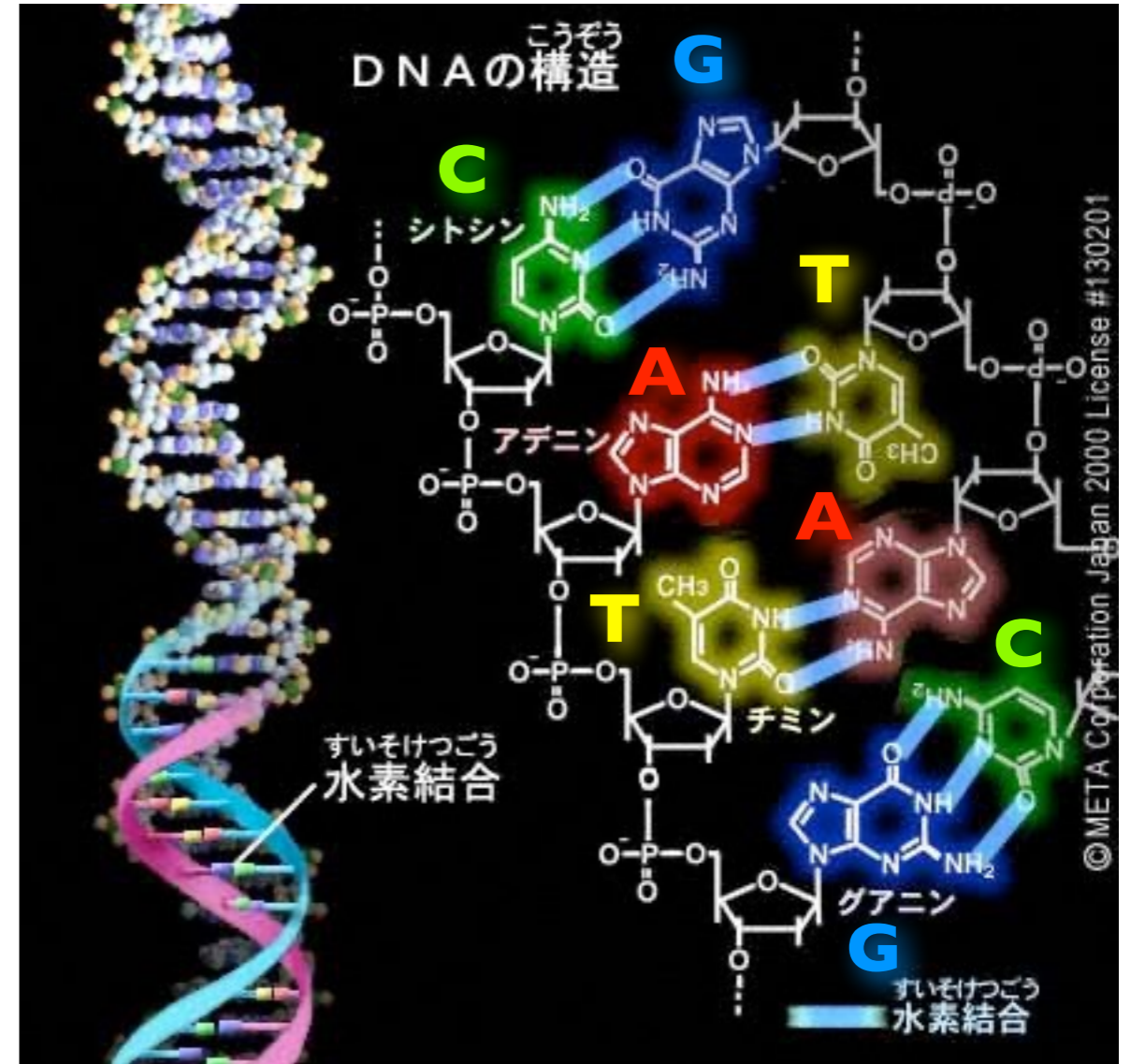
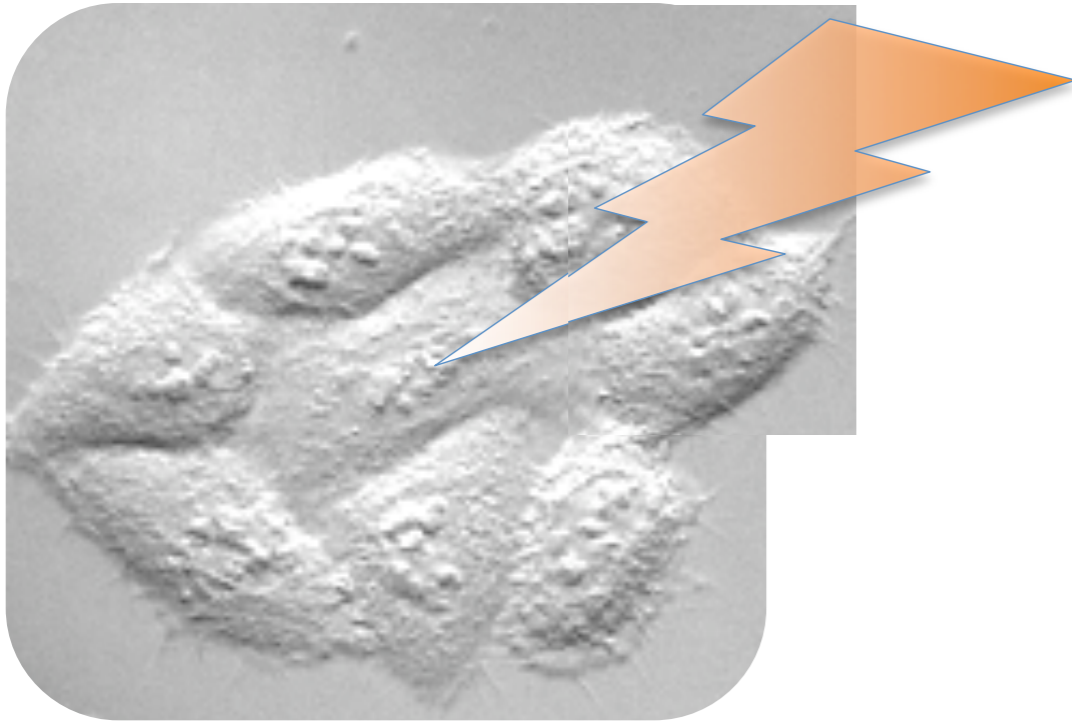
実効線量 $E = \sum_T w_T \times H_T$ [Sv] シーベルト

Sievert

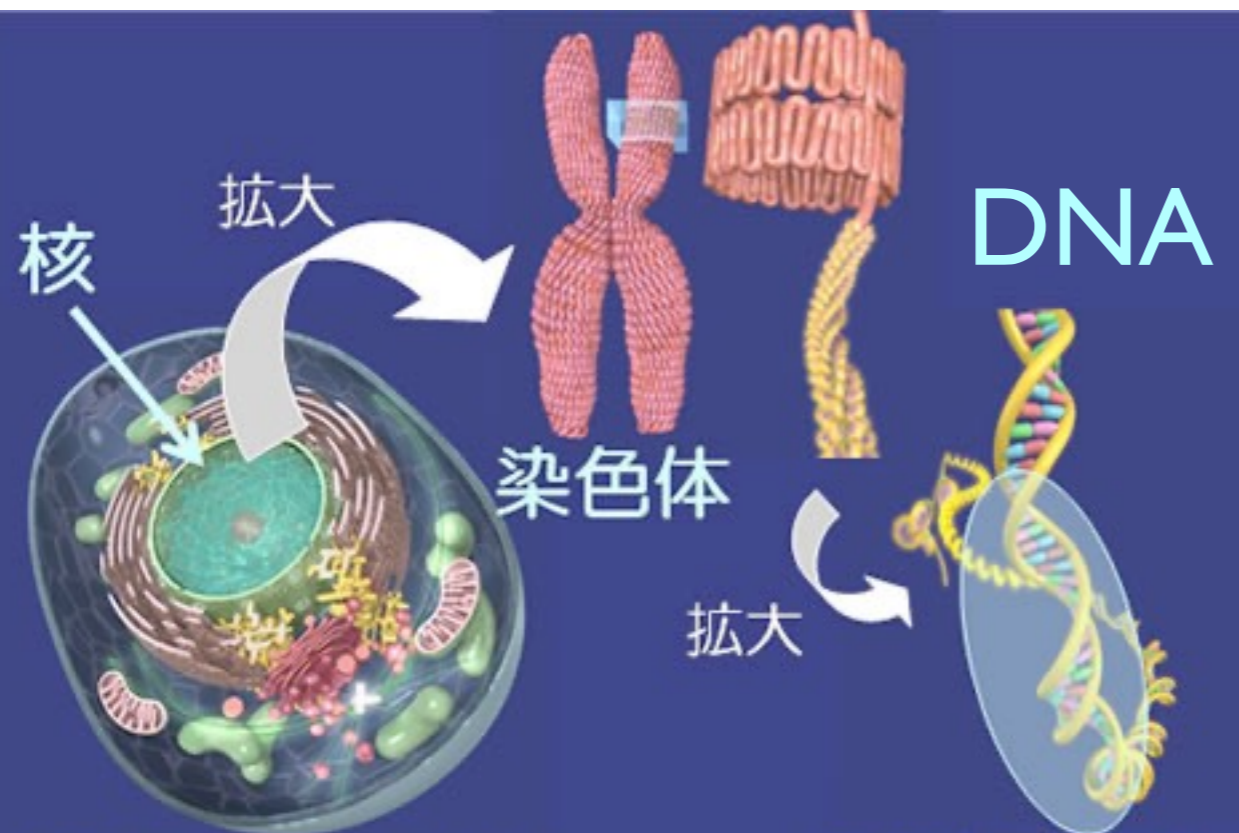


細胞の核に放射線が照射

DNA



出典：IPA「教育用画像素材集サイト」 <http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



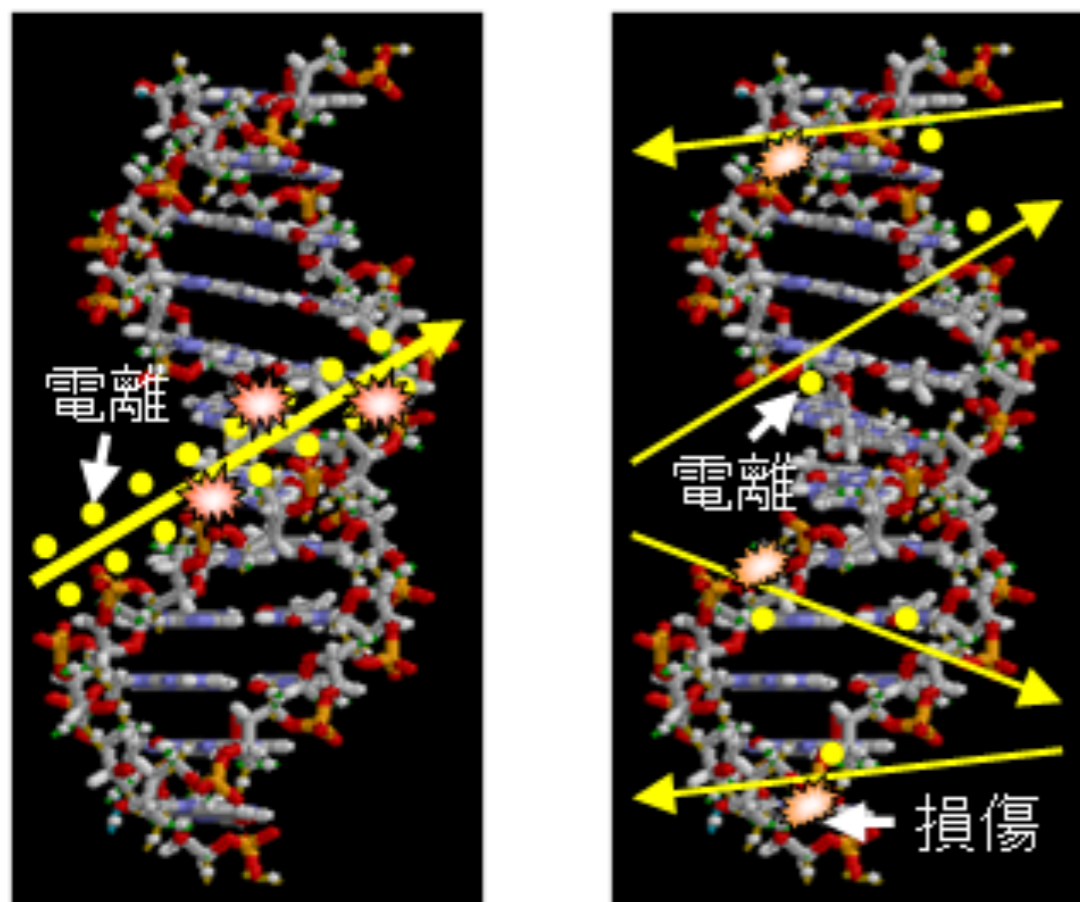
細胞(60兆個)

一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子

放射線による DNA 損傷

**ラジカル
(活性酸素)**



重イオン

電子

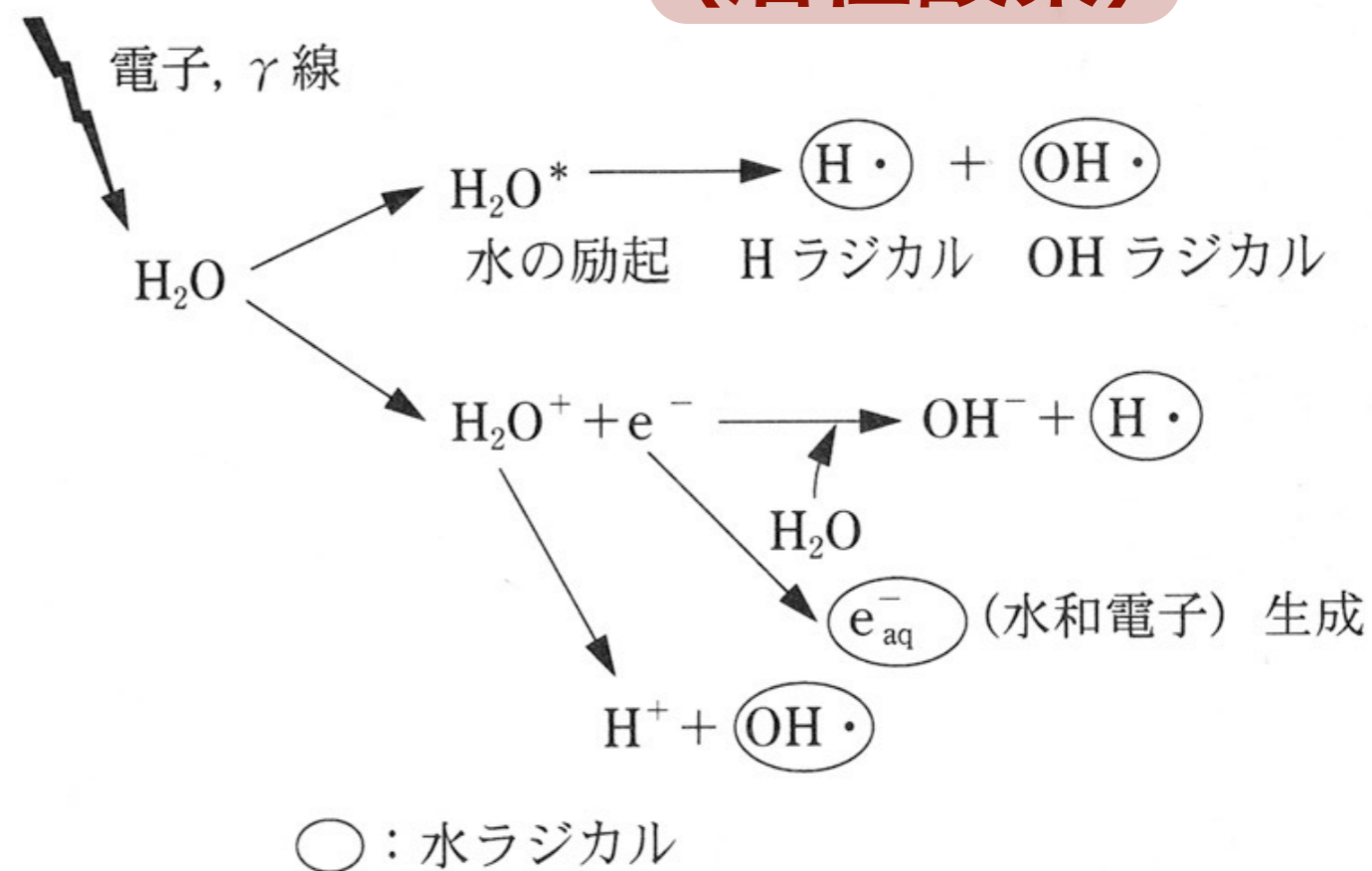


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略
(書籍「図解 放射性同位元素等取扱者必携」オーム社、より引用)

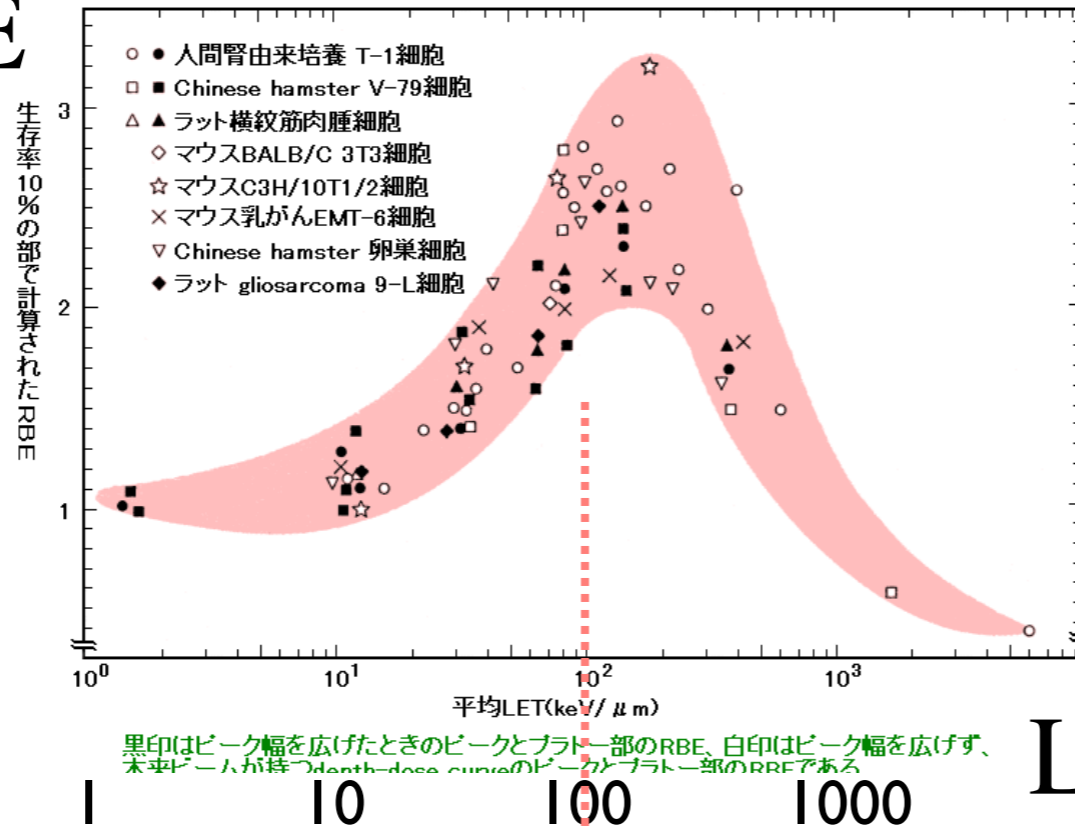
LET : 線エネルギー付与

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**
 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

RBE



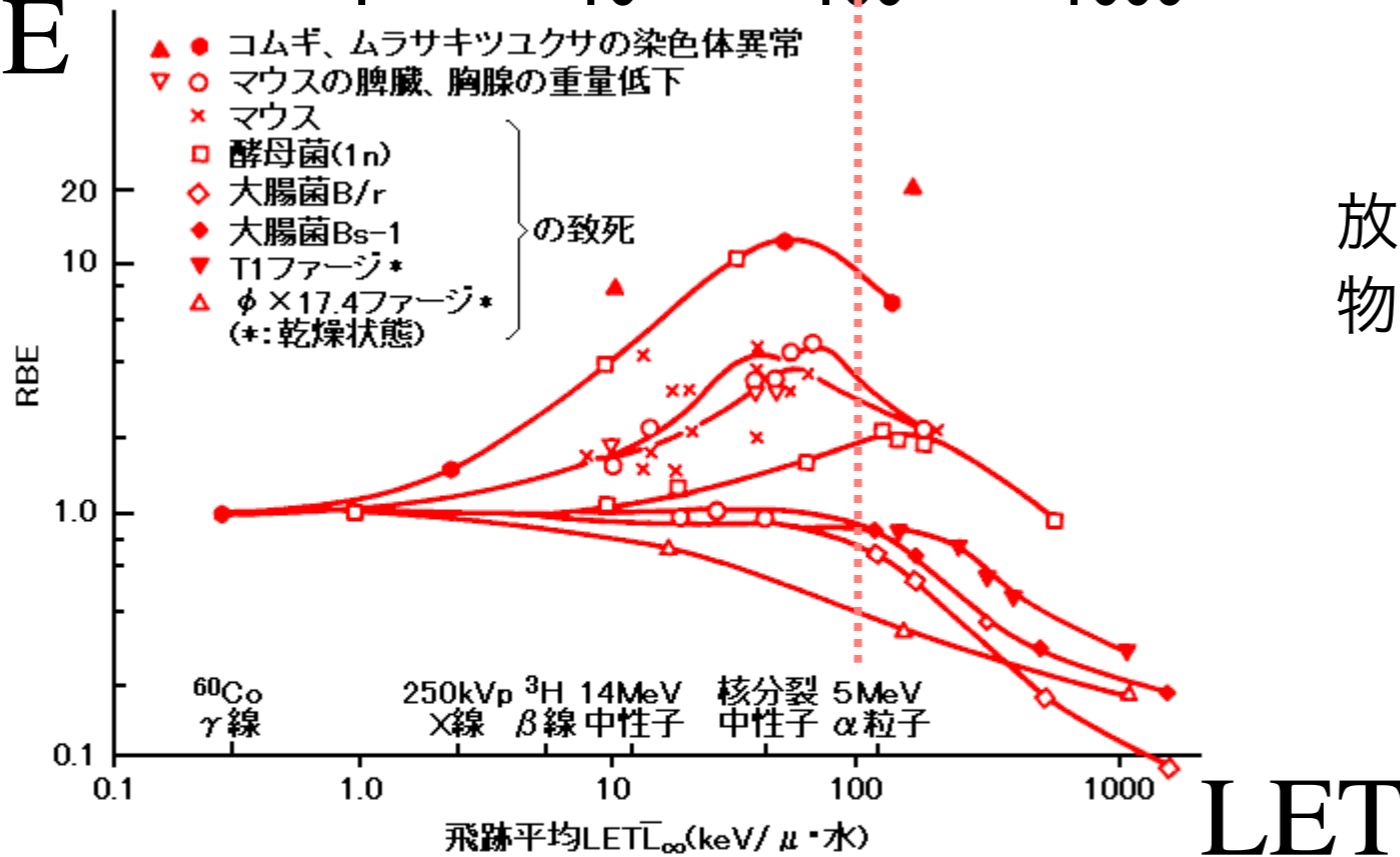
生物学的効果比 RBE

(Relative Biological Effectiveness)

LET (線エネルギー付与)
keV/μm

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

RBE



様々な生物反応(マウスの臓器の重量低下や致死、高等植物の染色体異常等)において、いずれも約80keV/μm付近のLET値をもつ放射線が最大のRBE値を示す。

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]近藤 宗平:分子放射線生物学、東京大学出版会(1972年)、p.174

実効線量 effective dose $E [J / kg] = [Sv]$

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

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]

器官・組織	組織加重係数: w_T	
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
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
脳		0.01
唾液腺		0.01
残りの器官・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

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。

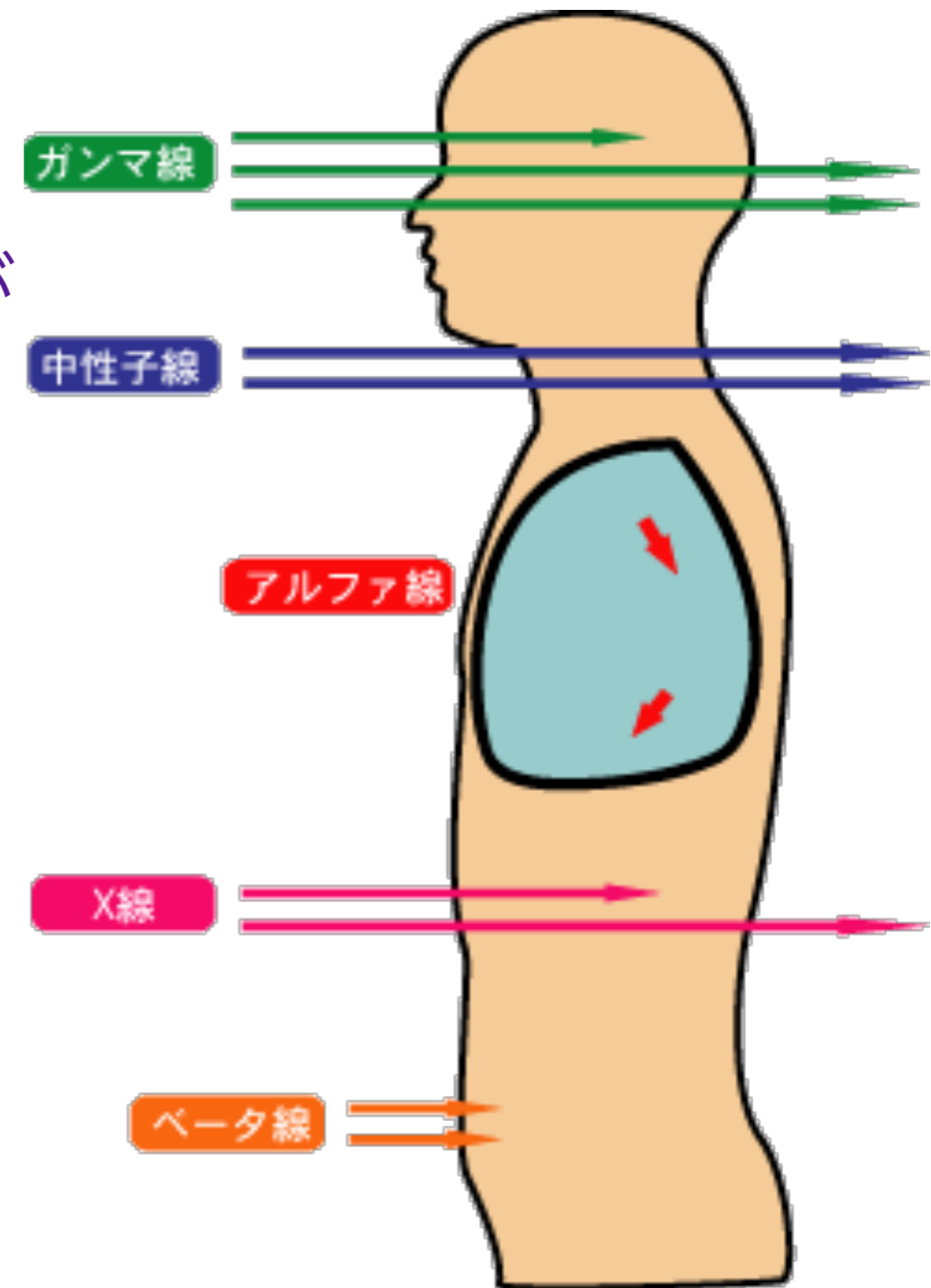


図3 人体を透過する放射線

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 \Rightarrow 筋肉、I \Rightarrow 甲状腺、Sr \Rightarrow 骨、Pu \Rightarrow 肝臓, ...）

に注意しつつ、**預託線量**を計算して、被曝期間を通じてのトータルの**線量**が同じであれば、外部被曝とも影響は同じ。

内部被曝の計算例

(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

預託実効線量

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

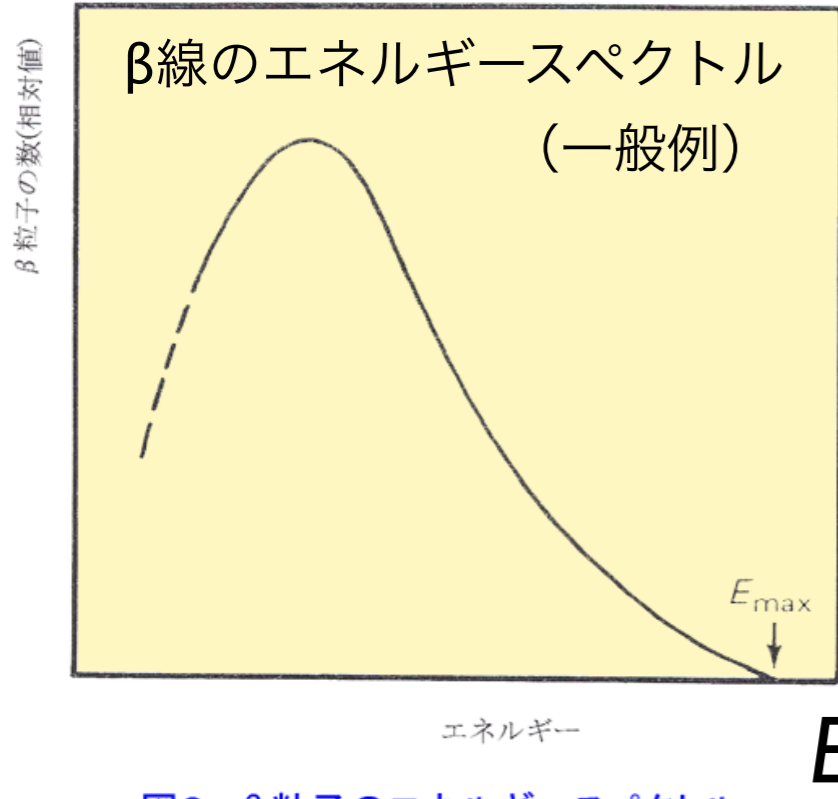
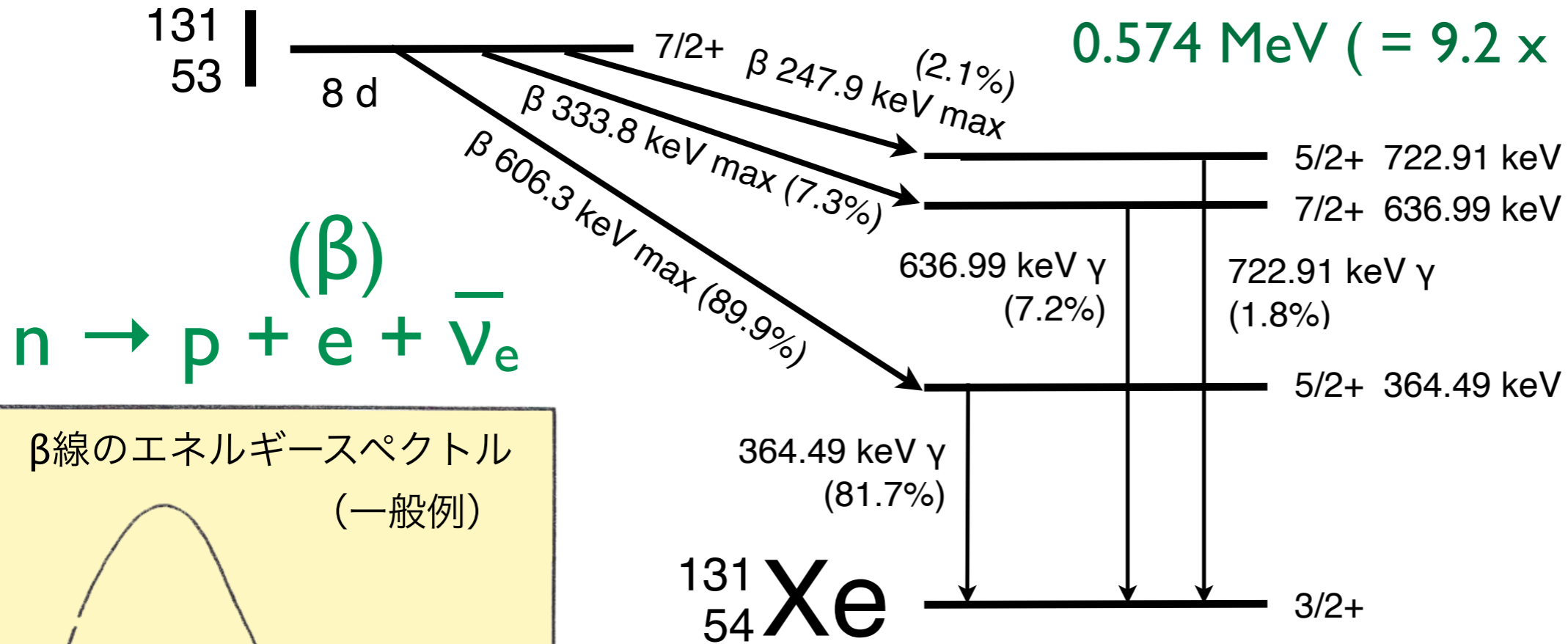
実効線量係数 (成人)

※ 子供や乳幼児は 70歳になるまでの期間

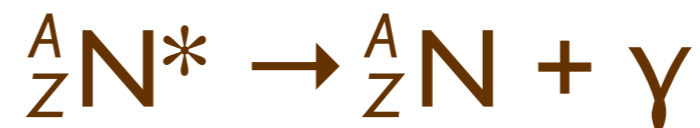
核種	半減期	経口摂取 (Sv/Bq)	吸入摂取 (Sv/Bq)
C-14	5730年	5.8×10^{-10}	5.8×10^{-9}
P-32	14.3日	2.4×10^{-9}	3.4×10^{-9}
K-40	12.8億年	6.2×10^{-9}	2.1×10^{-9}
I-131	8.04日	2.2×10^{-8}	7.4×10^{-9}
Sr-90	29.1年	2.8×10^{-8}	1.6×10^{-7}
Cs-137	30.0年	1.3×10^{-8}	3.9×10^{-8}

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}

β線の最大エネルギーの平均値
 0.574 MeV (= 9.2 x 10⁻¹⁴ J)



γ線：原子核の脱励起

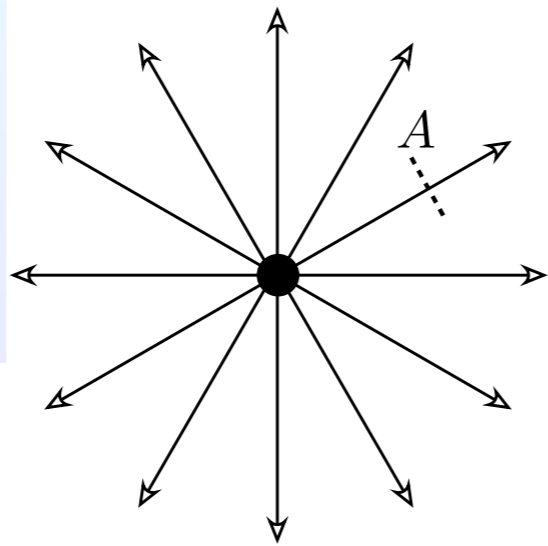


γ線 (定まったエネルギー)

図2 β粒子のエネルギースペクトル
 [出典]石川友清(編):初級放射線、通商産業研究社、p.37

β線 (連続スペクトル)
 エネルギーの平均値 ~ 0.3 MeV

外部被曝 の線量計算



$\dot{\Phi}$: 粒子フルエンス率

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

$$\eta = 0.851$$

γ 線の放出率

P : 放射能 [Bq]

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

\dot{H} : 等価線量率 [Sv/s]

^{137}Cs γ 線は空气中 70 m で半減する。

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

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

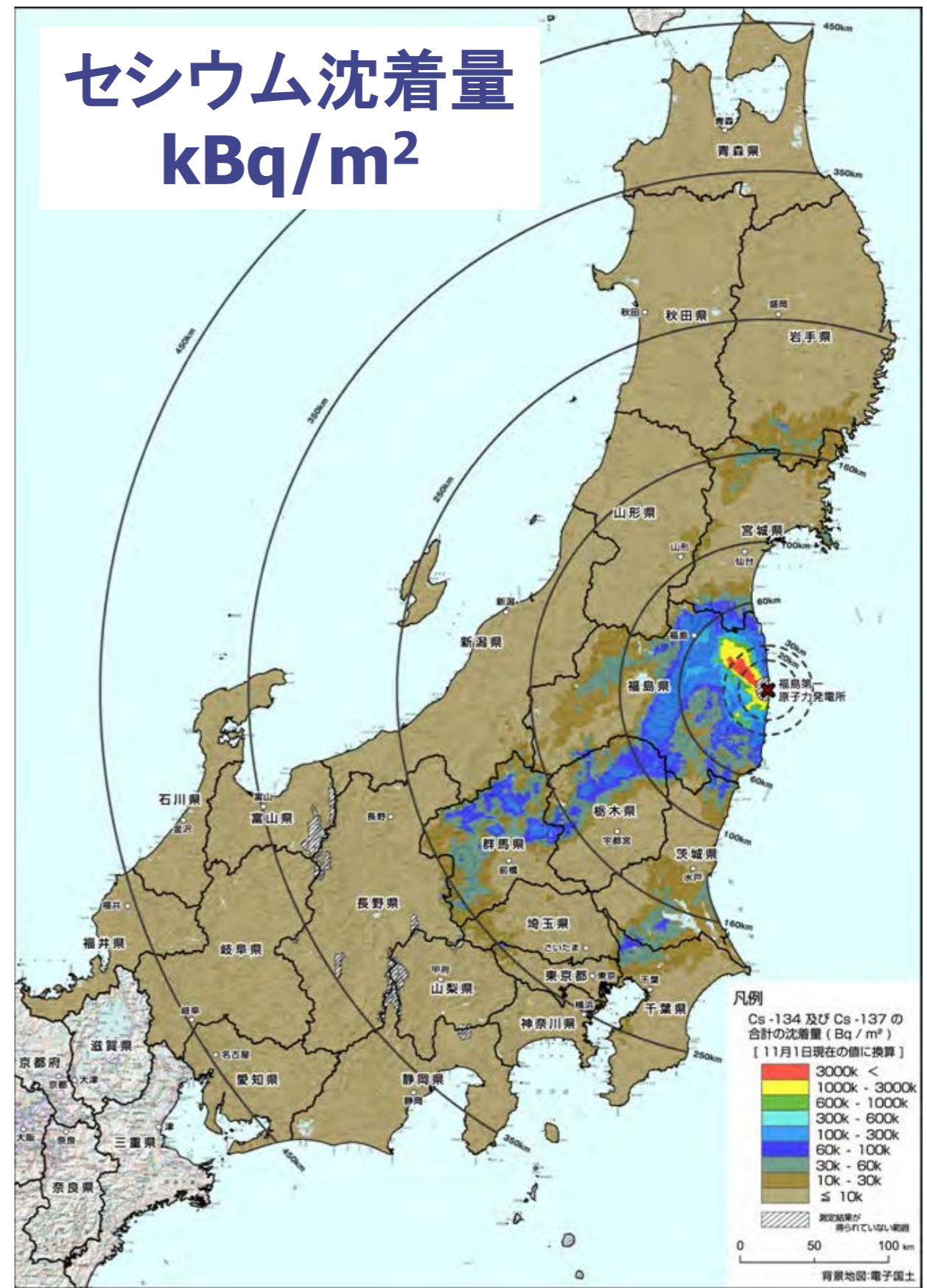
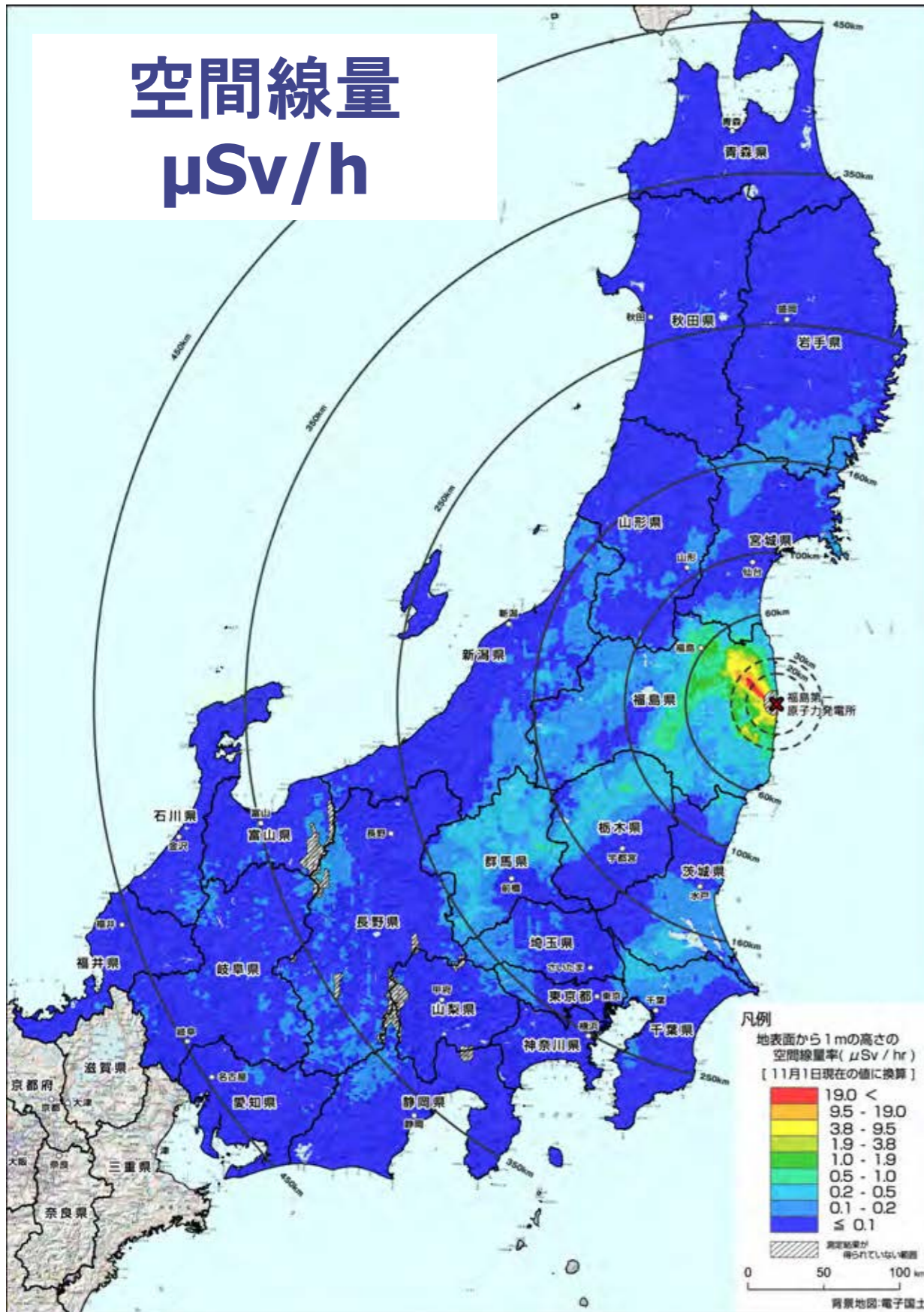
平面が一様に放射性物質で汚染されている場合

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

高さ 1 m でも 50 cm でもさして違くない

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

文部科学省の航空機モニタリングによる広域汚染マップ



環境放射化学

原発北西方向の汚染と「ホットスポット」

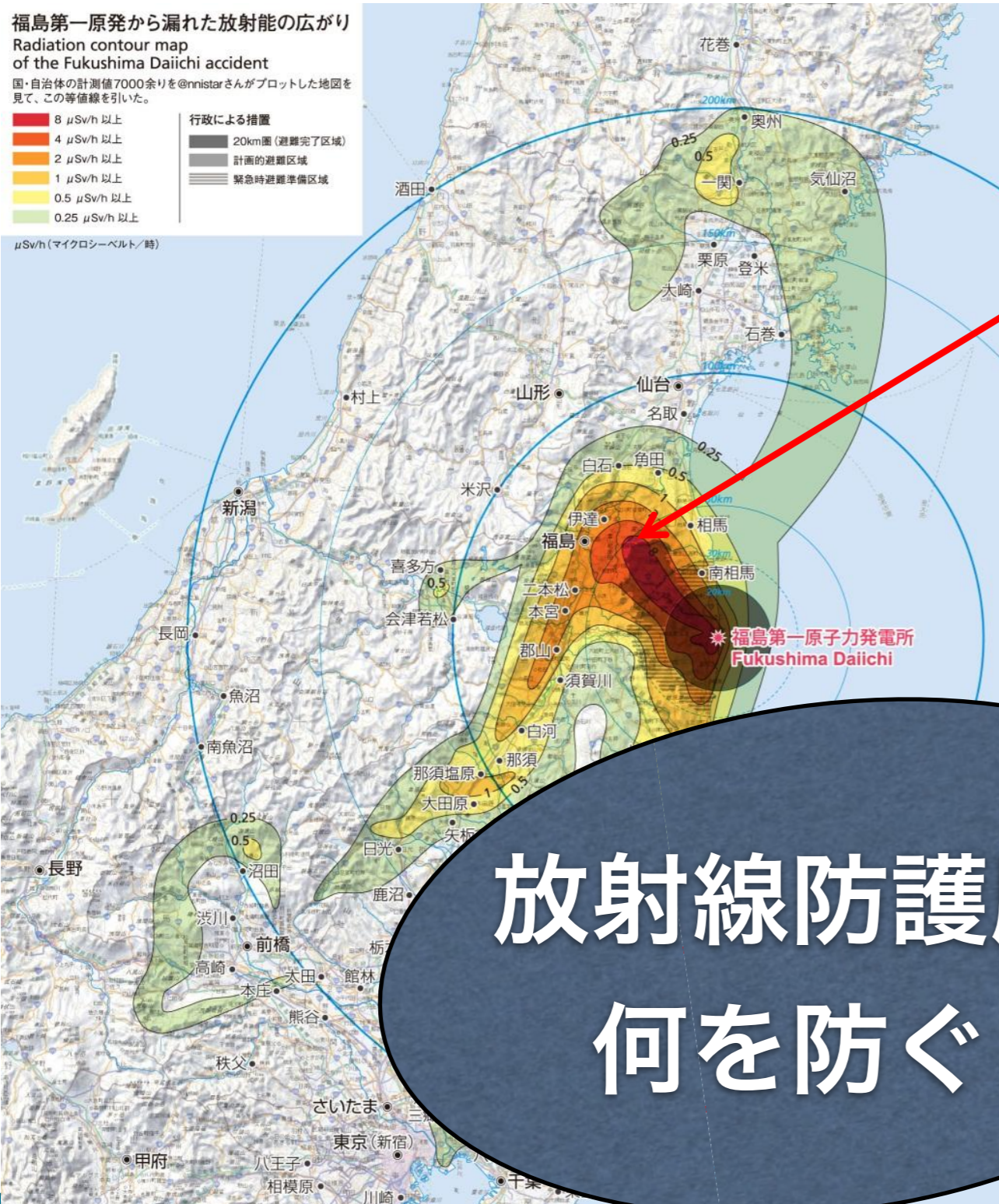
福島第一原発から漏れた放射能の広がり
Radiation contour map
of the Fukushima Daiichi accident

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

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

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

$\mu\text{Sv/h}$ (マイクロシーベルト/時)



放射線防護服は
何を防ぐ？

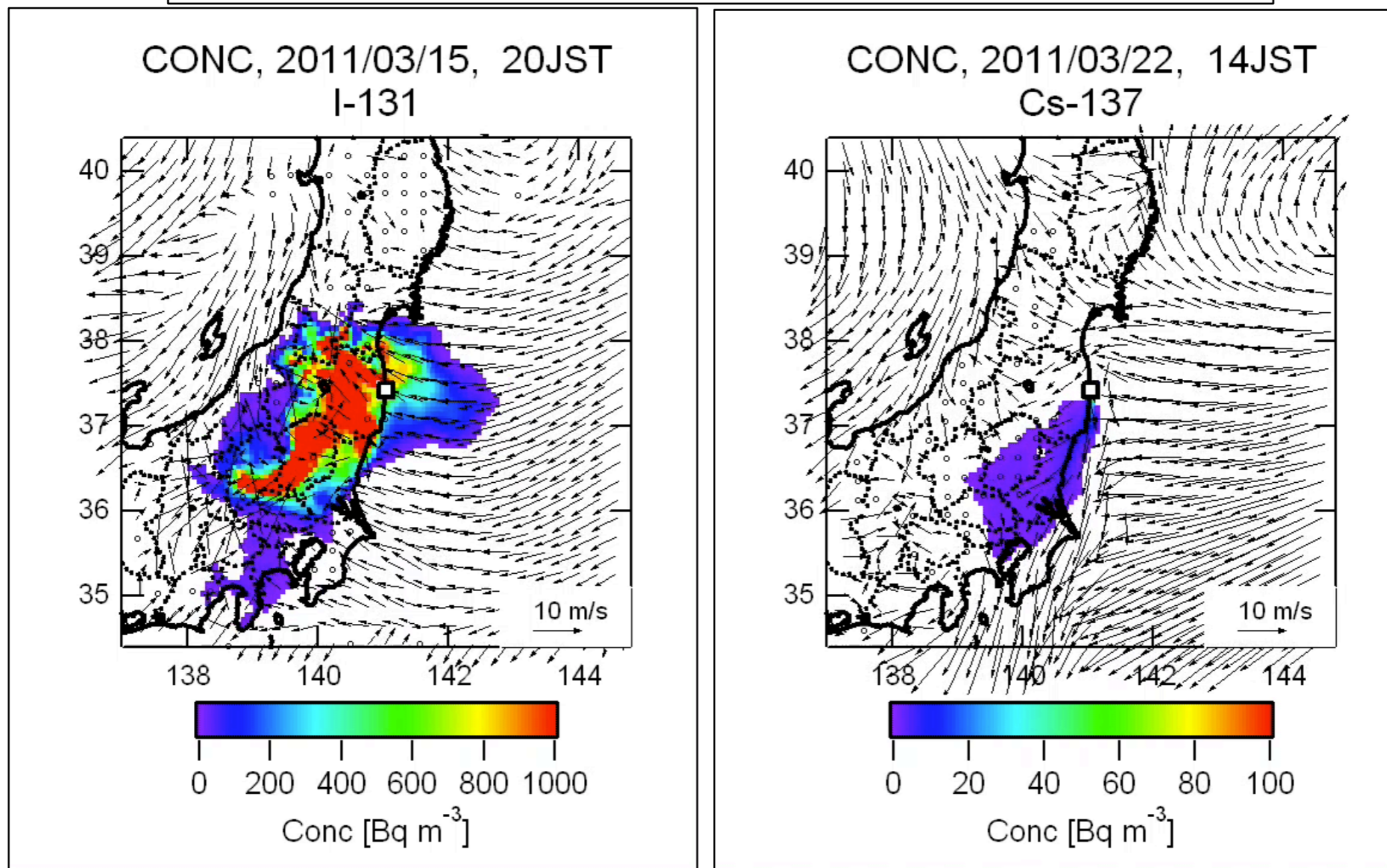


早川由紀夫教授(群馬大学)作成、7月26日版

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

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

2011年8月25日付 国立環境研究所 報道発表資料

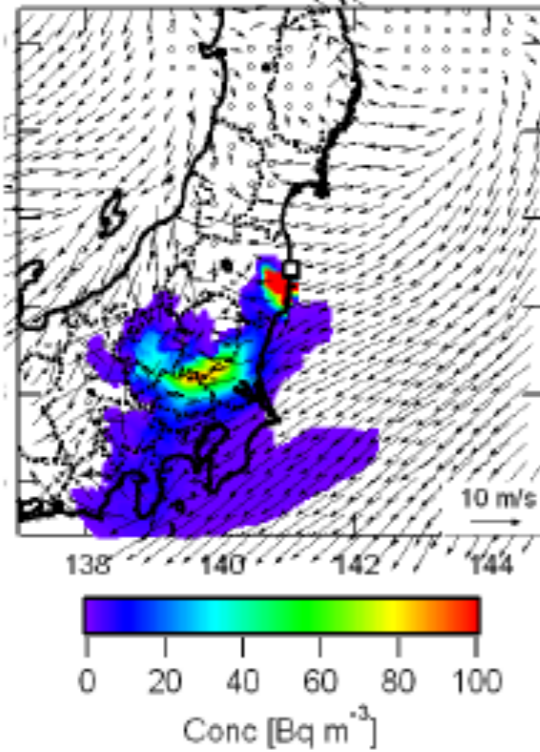


▶ 実測値との差違を議論したい

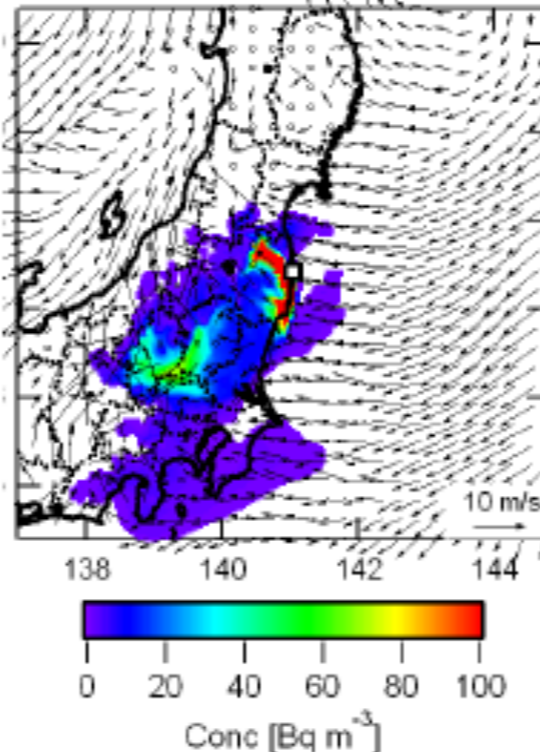
ホットスポットの生成メカニズム

大気濃度

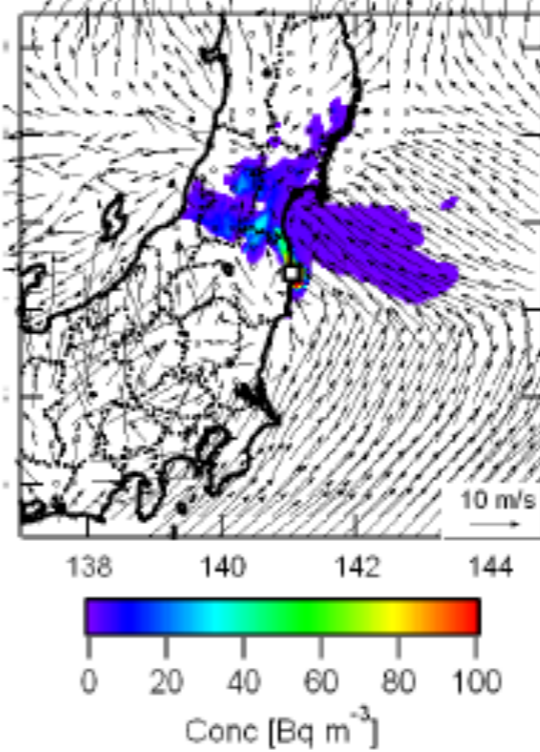
3/15の15時



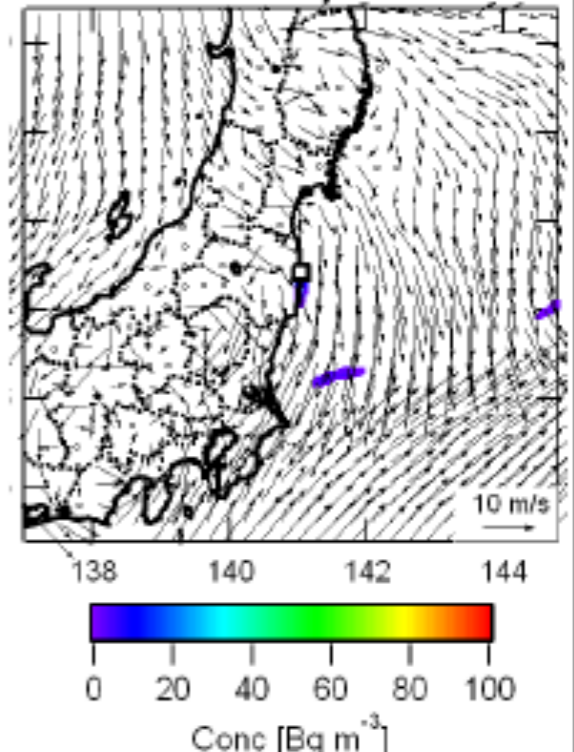
3/15の19時



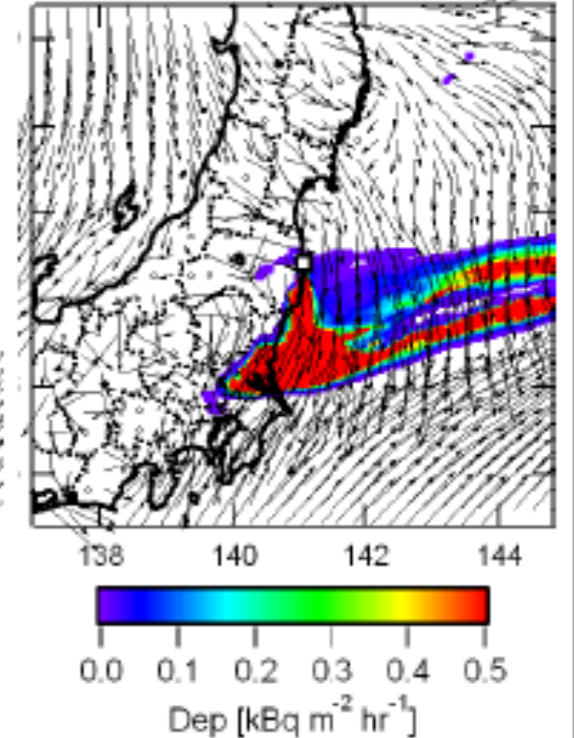
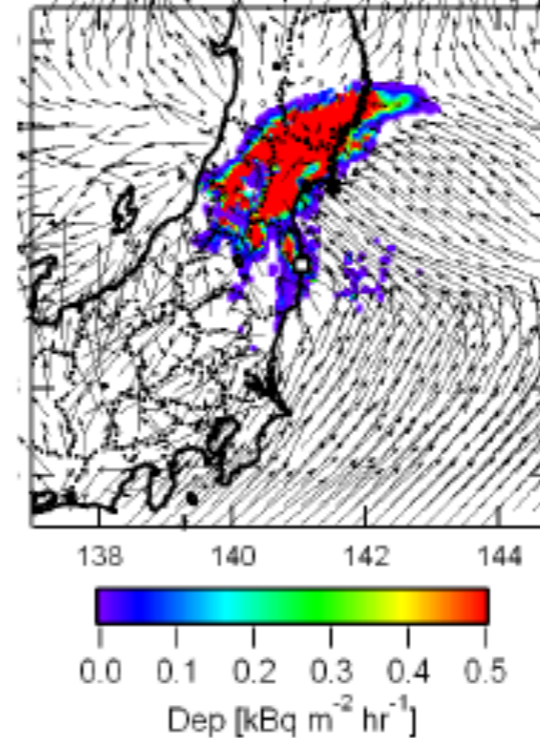
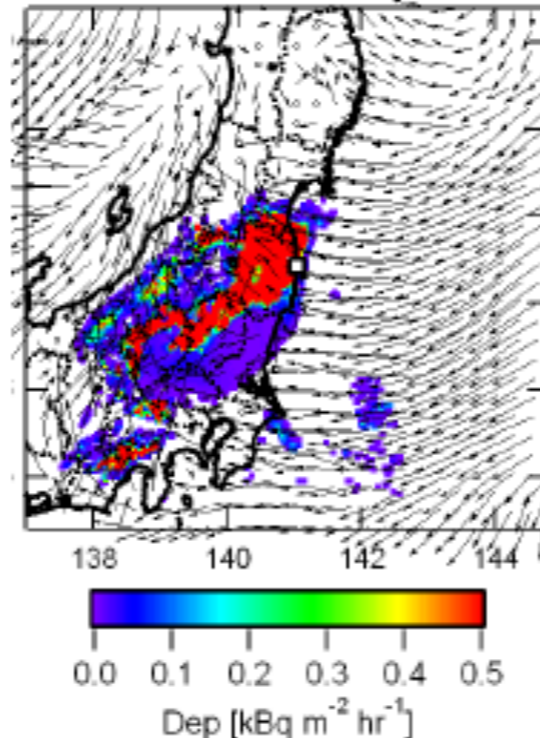
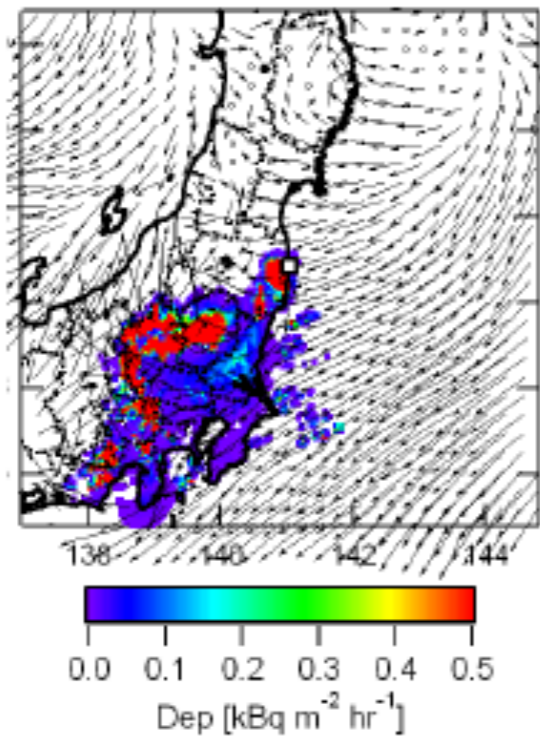
3/20の18時



3/21の8時



降下量



関東への最初の影響

福島 of 深刻な汚染、
北関東の汚染

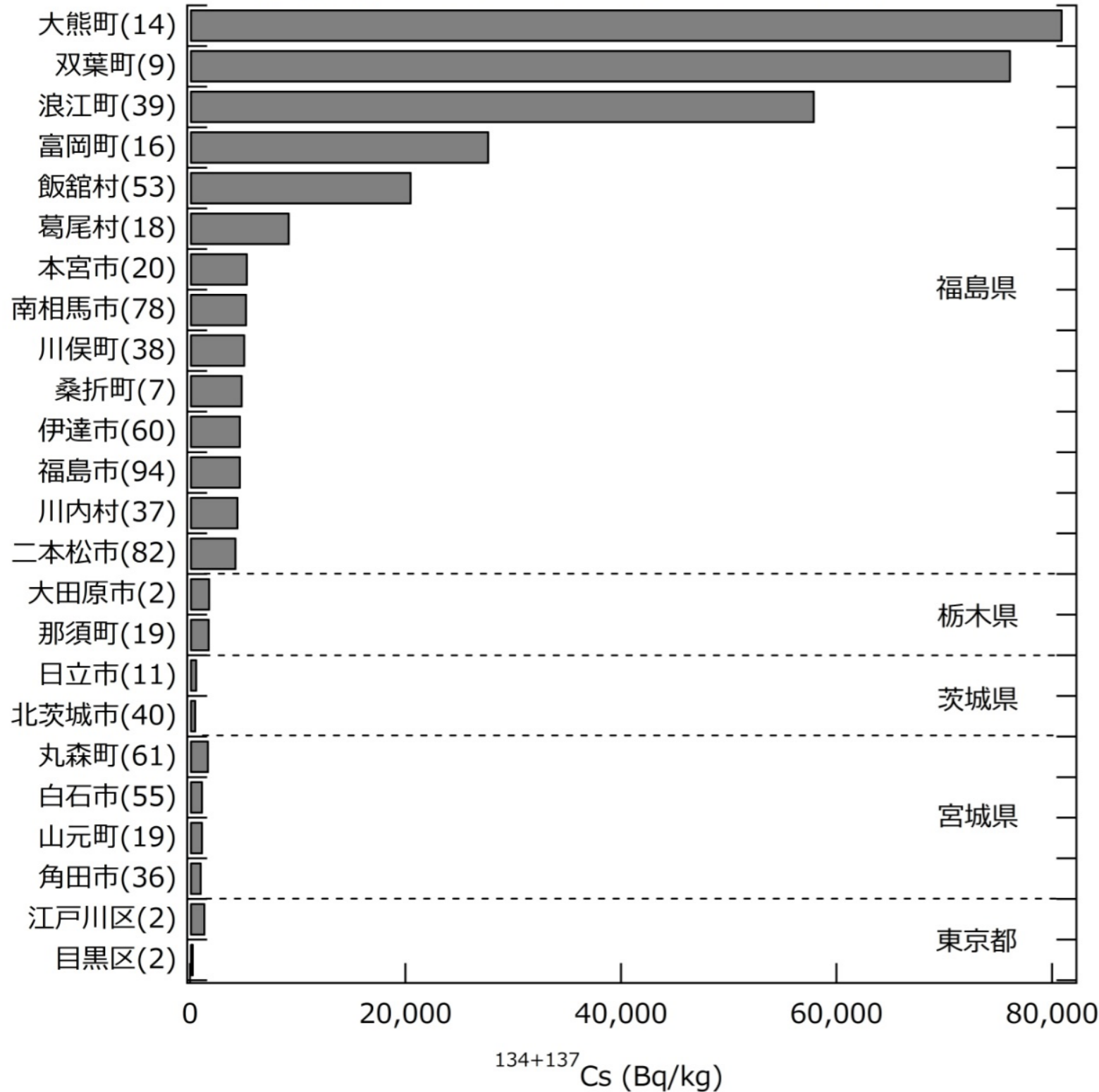
宮城県北部の稲藁汚染

水道水汚染、千葉北西部
のホットスポット

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

(小豆川勝見先生自身の観測データ)

非濃縮地点における土壤中の放射性セシウムの放射能



放射性セシウム(¹³⁴+¹³⁷Cs合算値)
 測定点はすべて非濃縮地点
 それぞれ5-40点程度の平均値



大熊町でのサンプリングの様子

1. 市町村名後の(カッコ)内の数字はサンプル数であり、ここではその平均値を示した。
2. 土壌サンプルの採取は2011年6月から7月であり、採取時点で半減期補正を行っている。
3. 文部科学省から提供された値に筆者の測定結果を加えた。

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

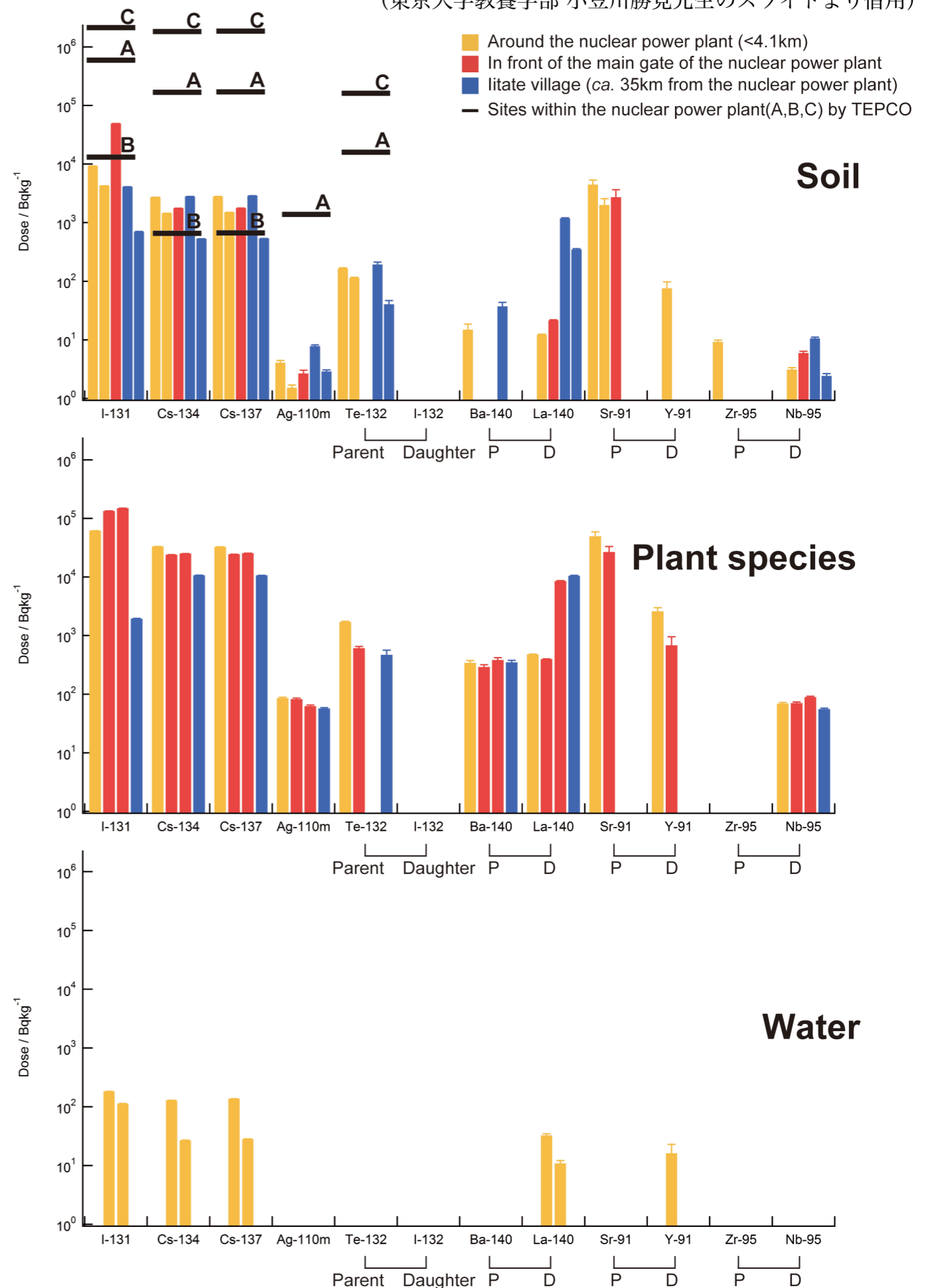
^{125}Sb , $^{127\text{m}}\text{Te}$, $^{129\text{m}}\text{Te}$,
 ^{136}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce , ^{54}Mn ,
 ^{58}Co , ^{60}Co , $^{114\text{m}}\text{In}$

小島ら, 2011,2012

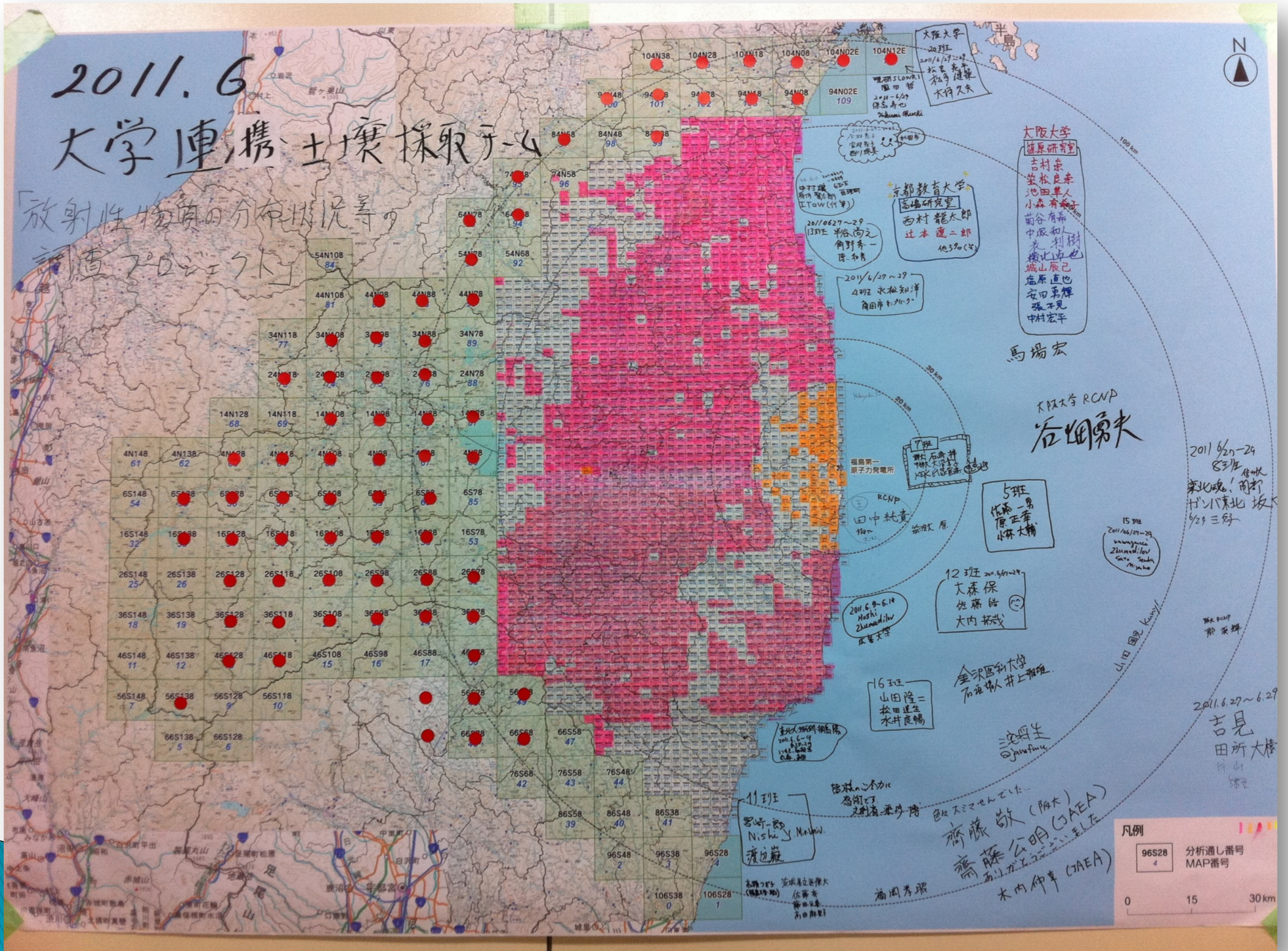
^{241}Pu

Zheng et al, 2012

(東京大学教養学部 小豆川勝見先生のスライドより借用)



文科省主催の土壌採取プロジェクト(2011年6月)



福島での測定例 (東京大学 塩沢らによる)

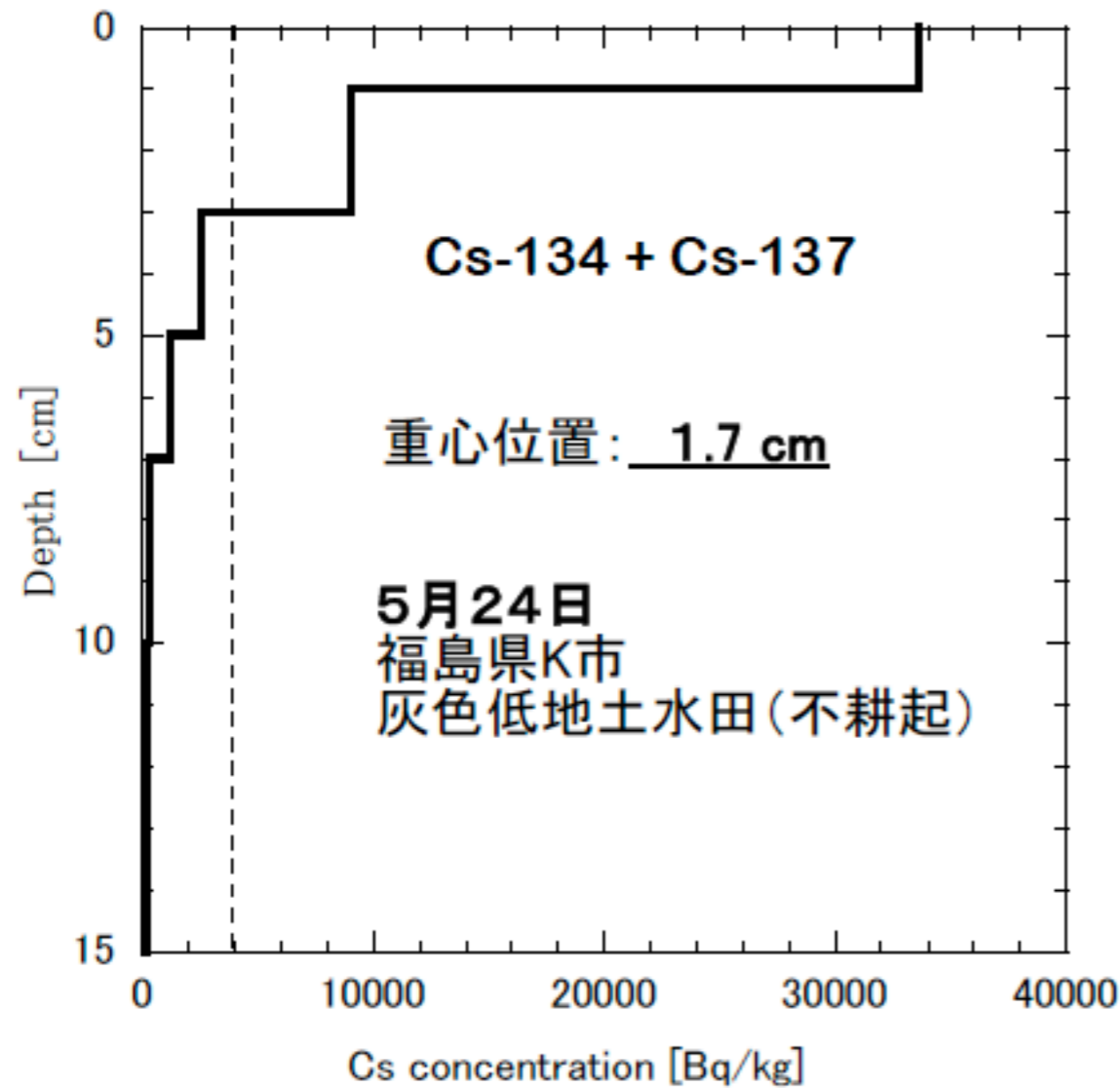


図 1 a 水田土壌の放射性 Cs の鉛直分布例 1

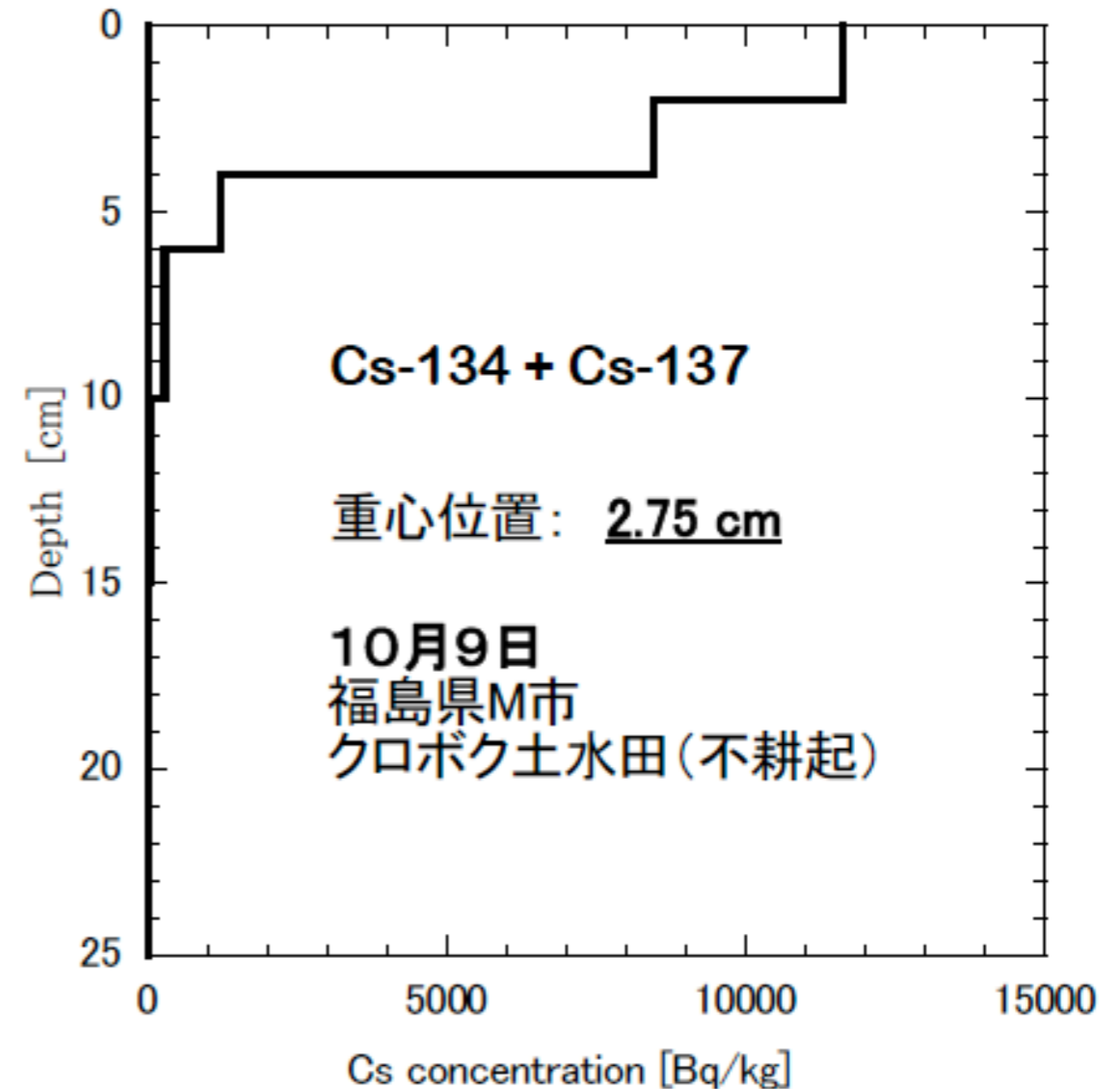


図 1-b 水田土壌の放射性 Cs の鉛直分布例 2

**^{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。**

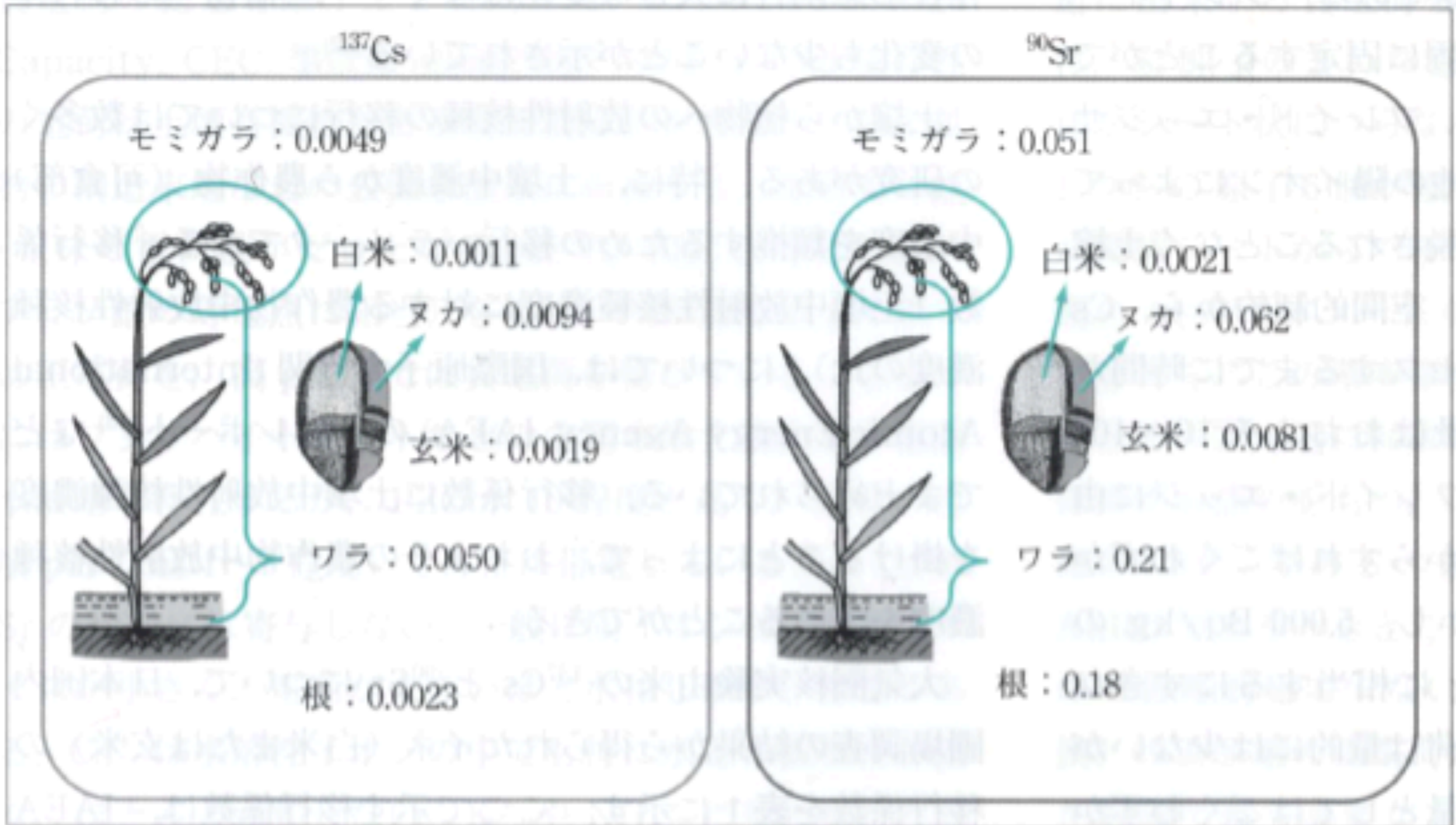


図5 ■ 土壌中濃度を 1.0 としたときのイネにおける部位別 ^{137}Cs および ^{90}Sr の相対濃度

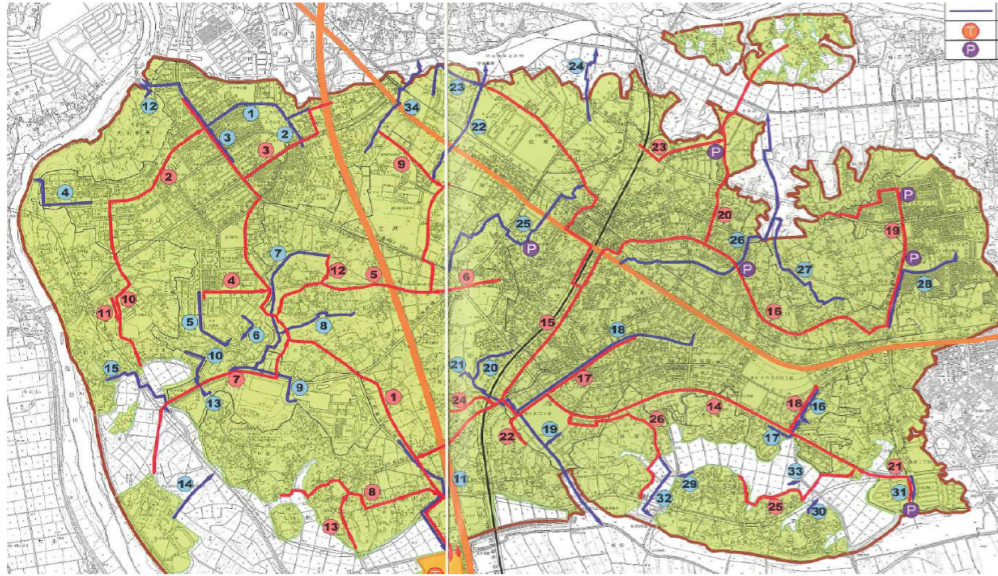
福島産の米は全袋検査されている。現状はほとんど全てが不検出。

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

市役所作成のパンフレットから転載



都市部に降った雨水は地下雨水幹線を通じて周辺部の河川・遊水池・水路に放出される。
【北守谷雨水幹線】
青色1, 2, 3, 12: 新守谷一鬼怒川ルート、5, 6: 北守谷野球場ルート
【南守谷雨水幹線】
青色26: 守谷郵便局ルート、27: 愛宕中学校ルートの合流先、16, 17: 南守谷野球場ルート、18-21: 松ヶ丘ルート

公園は雨天時の調整池として活用



雨天時



住宅地からの雨水の処理



プロムナード水路に雨水を排出する地域
面積約1.9km²

プロムナード水路
全長1.2km
(地上部のみ)

城址公園
水路下流に位置

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 小豆川勝見先生のスライドより借用)

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・稻藁）

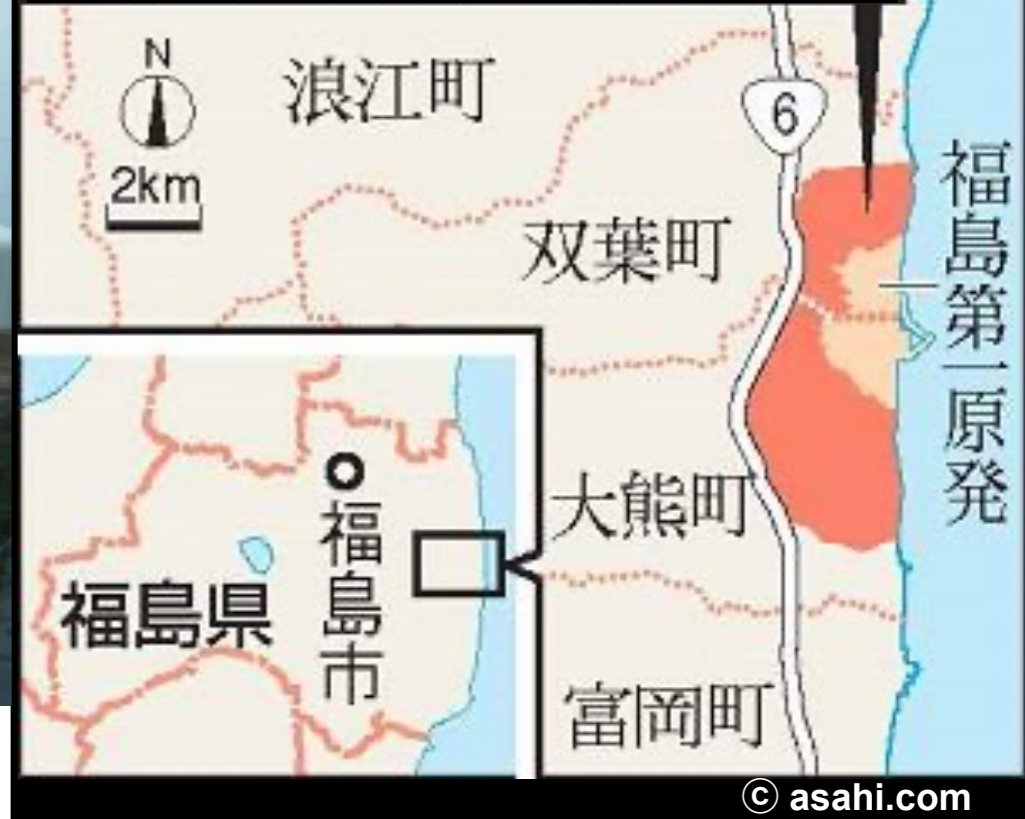
除染物の保管
焼却処分

飯舘村



浪江町

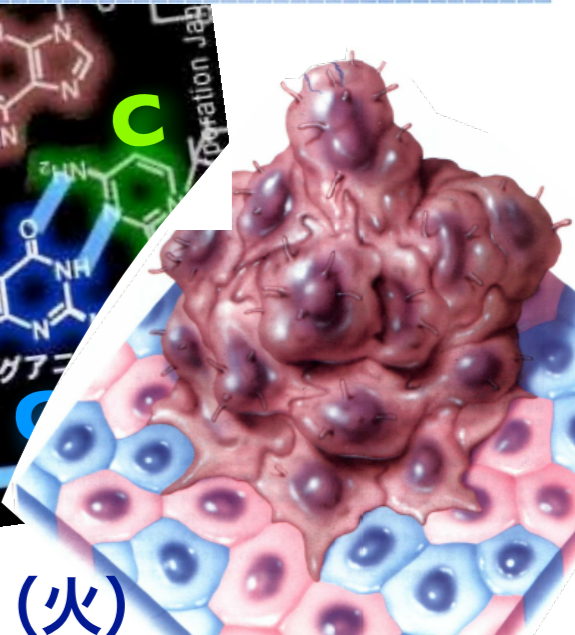
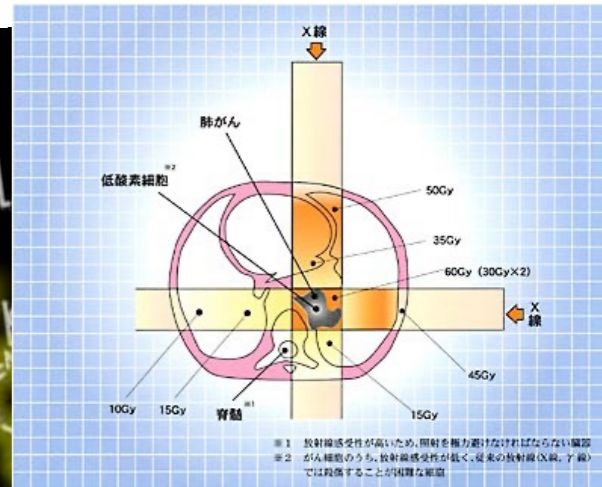
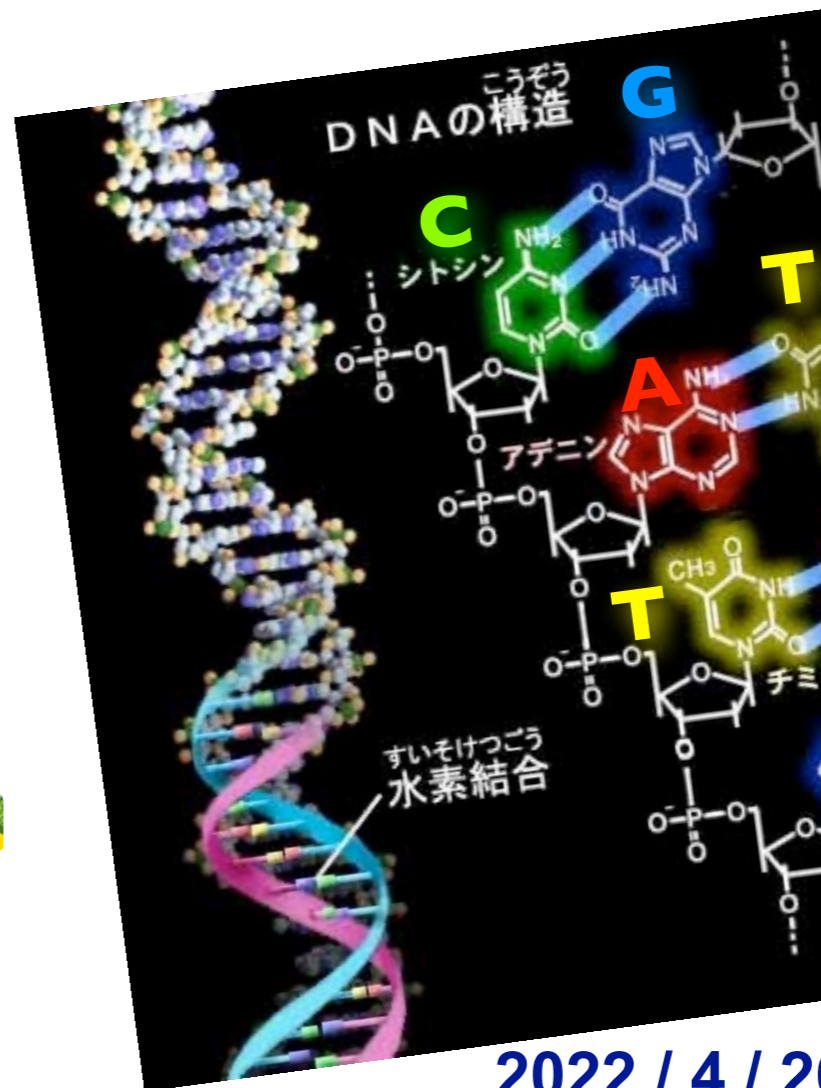
中間貯蔵施設の建設地





相馬野馬追

放射線の科学と安全



2022 / 4 / 26 (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）

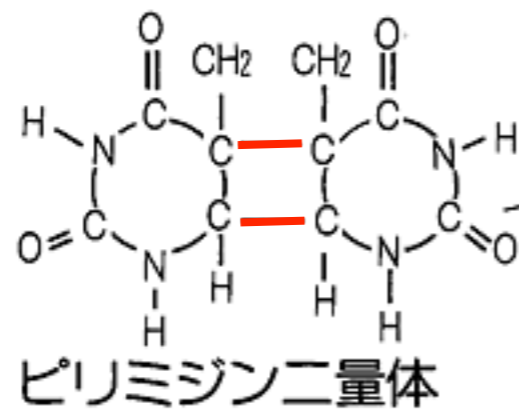
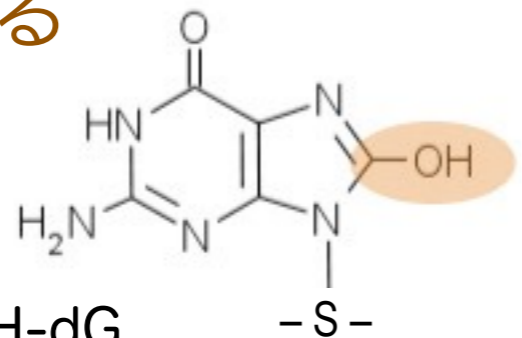
表5 増殖期のヒト細胞における DNA 損傷の自然発生率と放射線誘発率の比較¹⁾

傷の種類	自然の傷(/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 ^{2,19)})	40

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

・OH ラジカルによる酸化

8-OH-dG



ピリミジン二量体

紫外線照射でも頻発

鎖切断

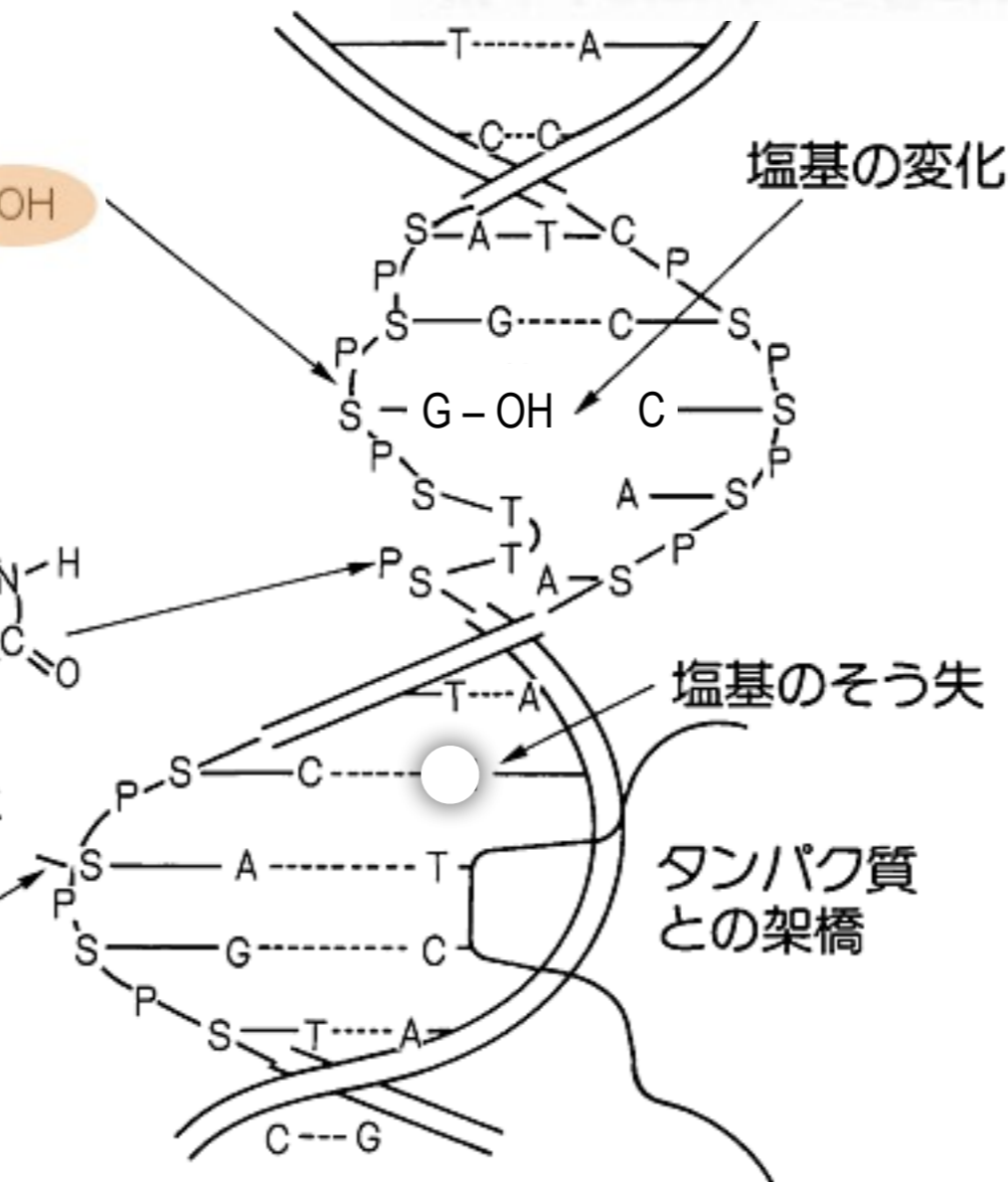
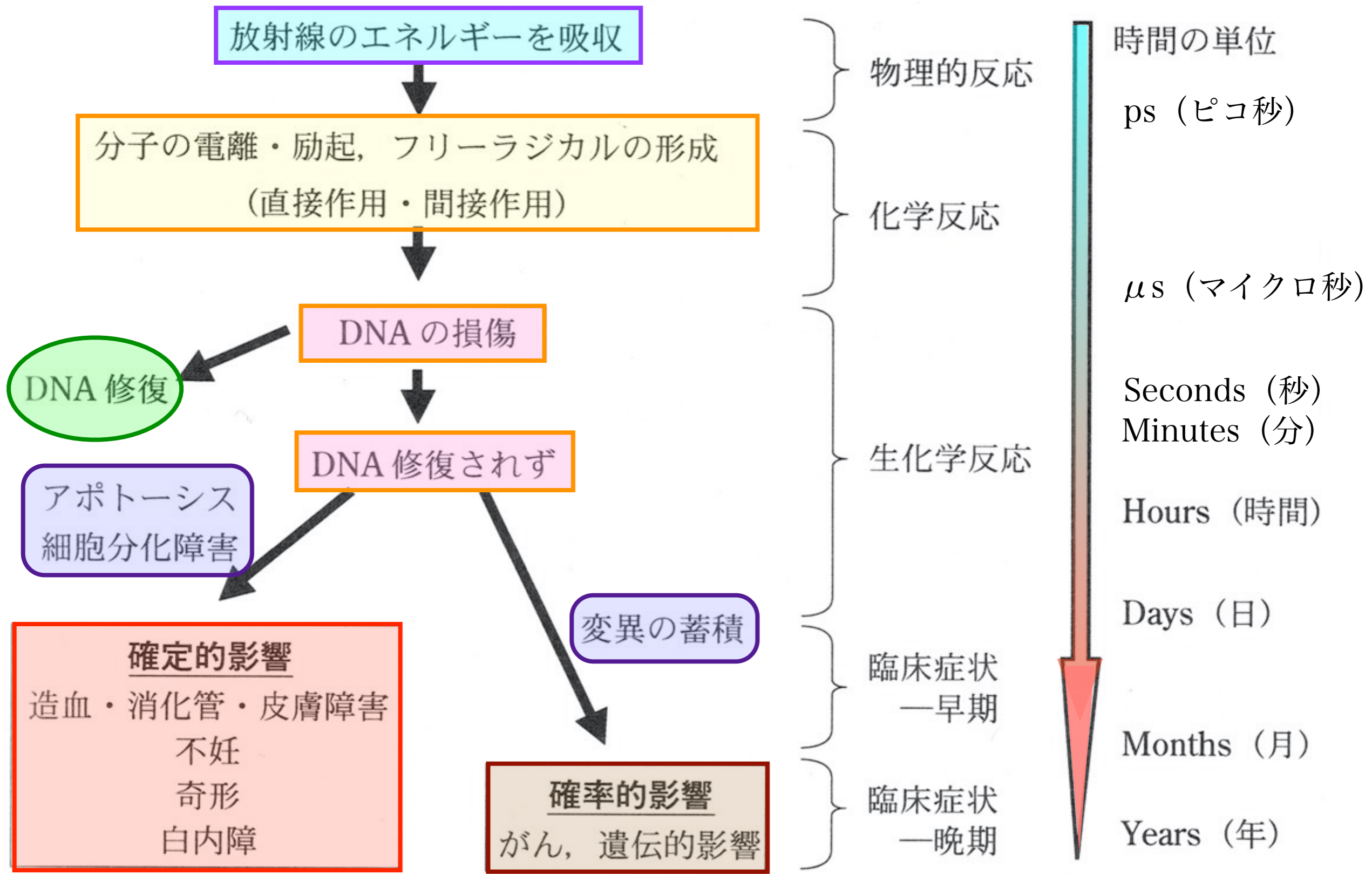


図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNA に見られる種々の損傷

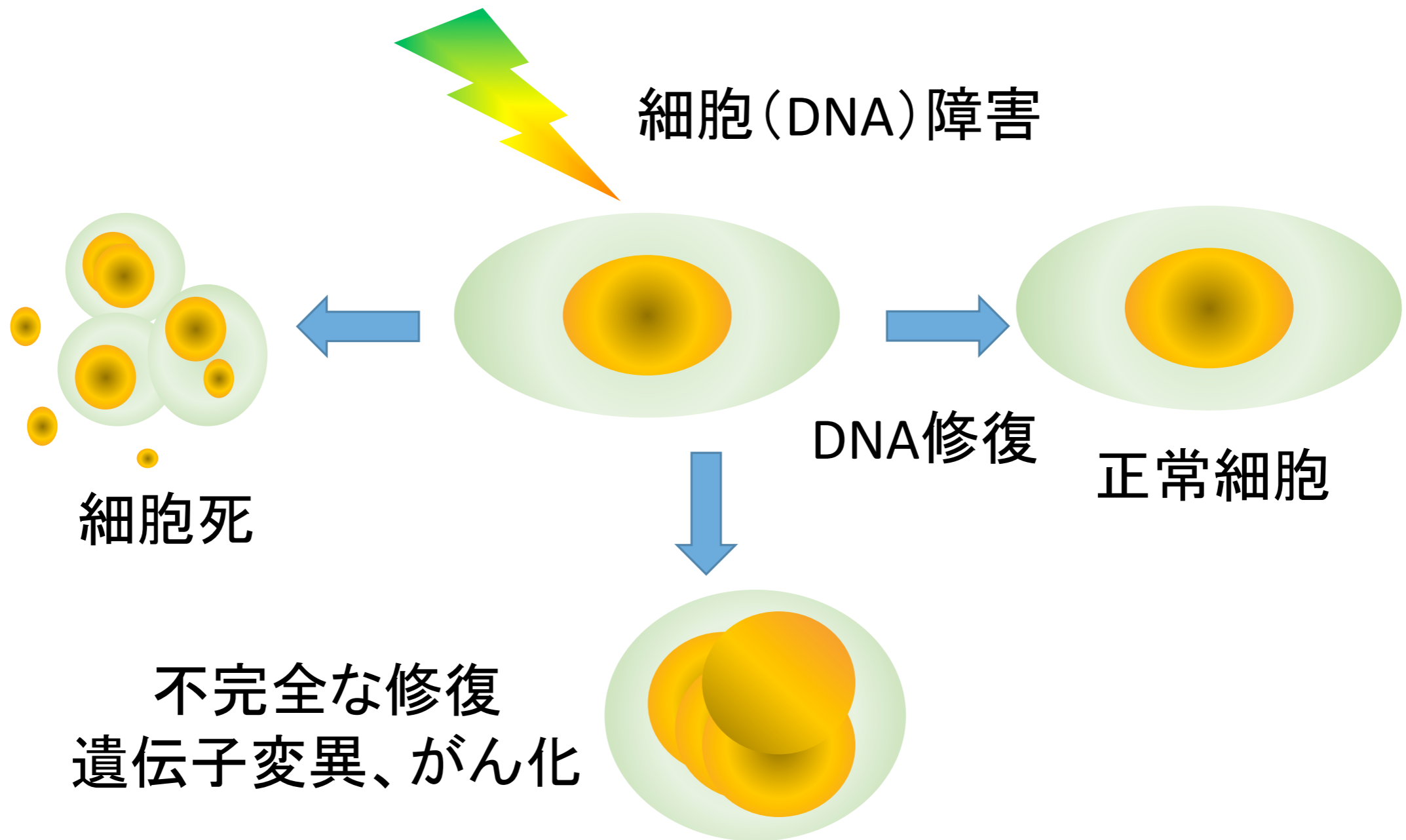
[出典] 江上信雄：生き物と放射線、東京大学出版会、1975

図は一部内容を改変。



放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

細胞死とがん化

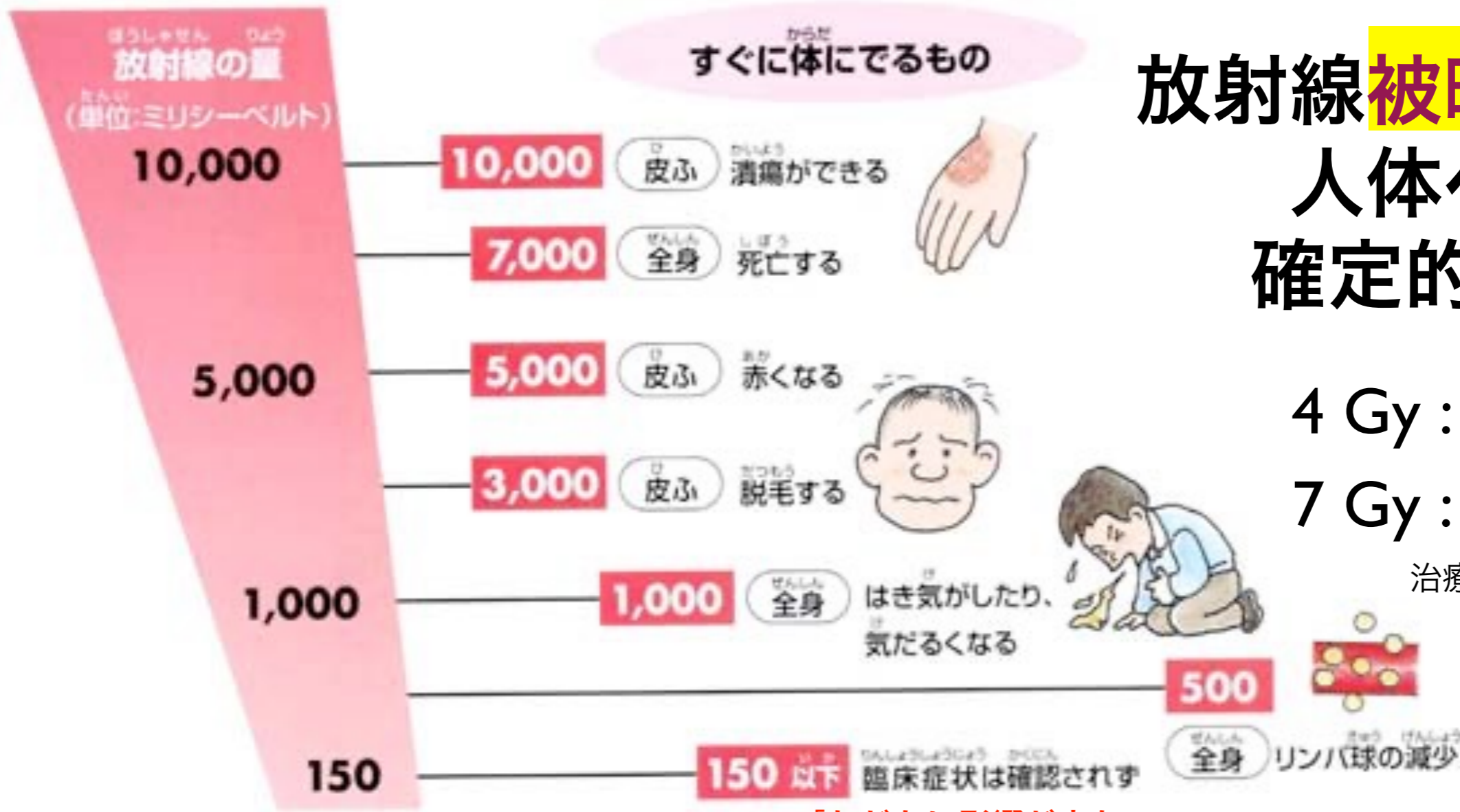


放射線被曝による 人体への 確定的影響

4 Gy : 半数死亡
7 Gy : 全員死亡

治療により助かることも。

すぐに体にできるもの



「ただちに影響が出ないレベル」

東海村 JCO 事故
チェルノブイリの
消防隊員

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

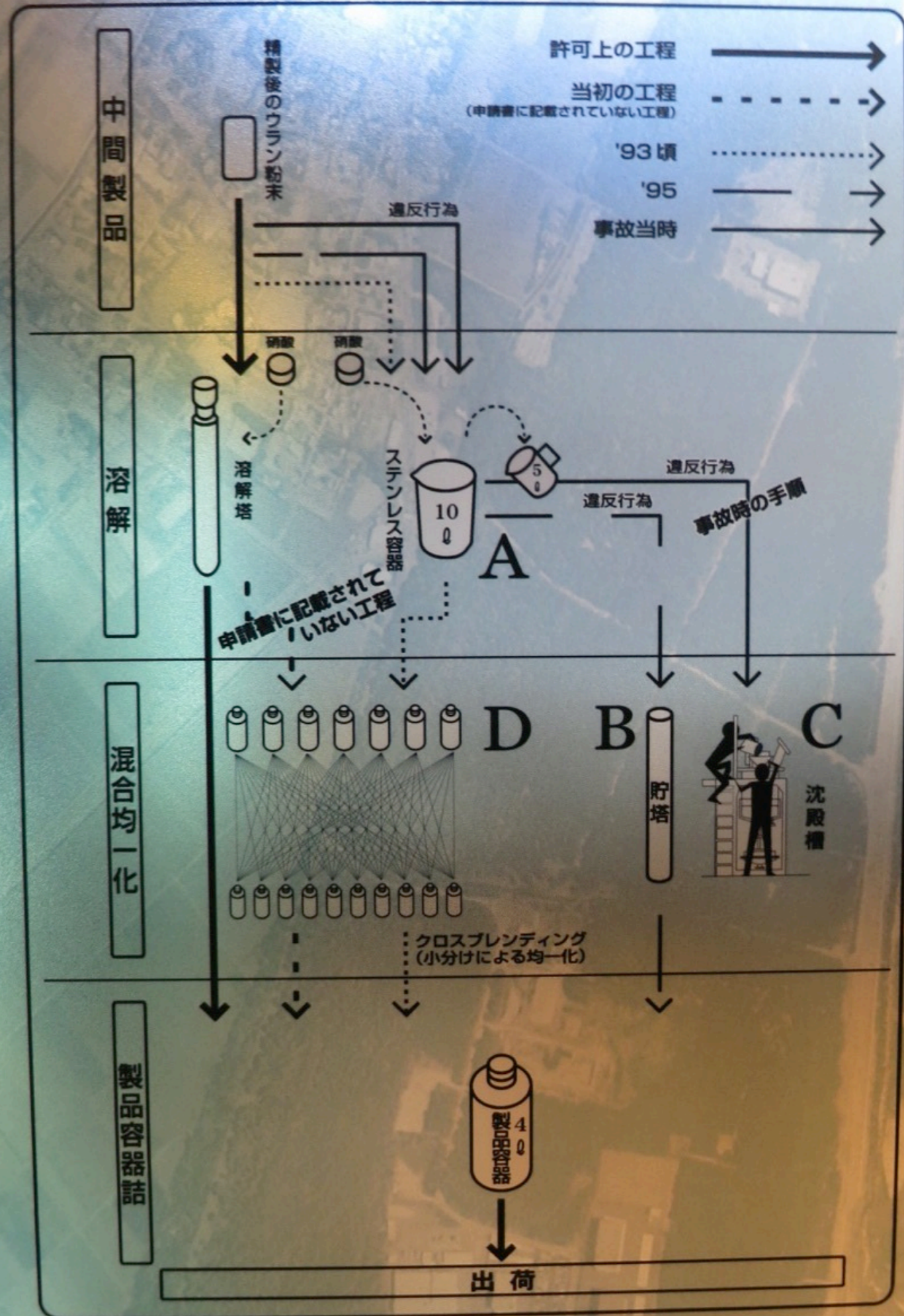
JCO 臨界事故

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転換試験棟で発生した。当時、この建物では高速実験炉「常陽」の燃料原料となる濃縮度18.8%のウランを硝酸に溶かし、均一にする作業が行われていた。

この作業に使用すべきでない沈殿槽と呼ばれる設備に、制限量を大幅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核分裂し始めた。このような事態を「臨界事故」とよぶ。

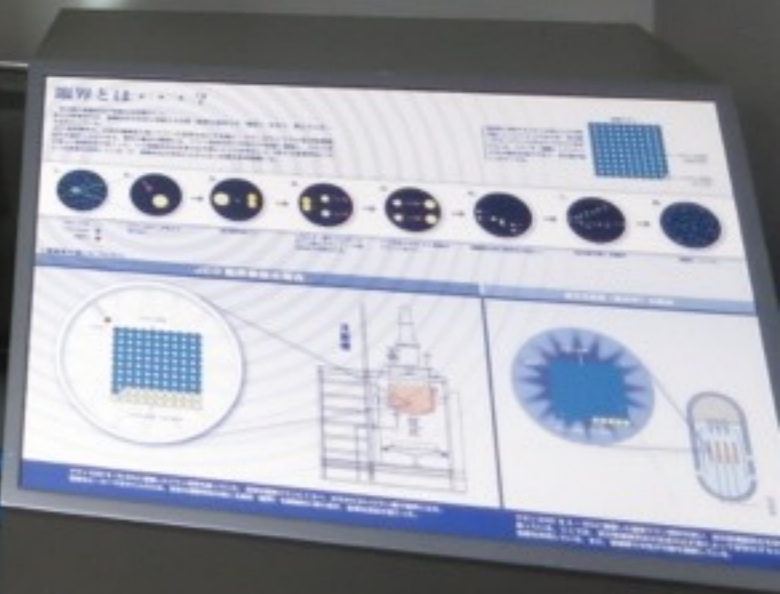
その結果、核分裂連鎖反応による放射線 (中性子線およびガンマ線) が敷地外にまで放出され、このような状態が約20時間にわたって継続した。事故の最初の瞬間には激しい核分裂が起こったため、沈殿槽を使って作業していた2名の方が亡くなるといういたましい結果となった。





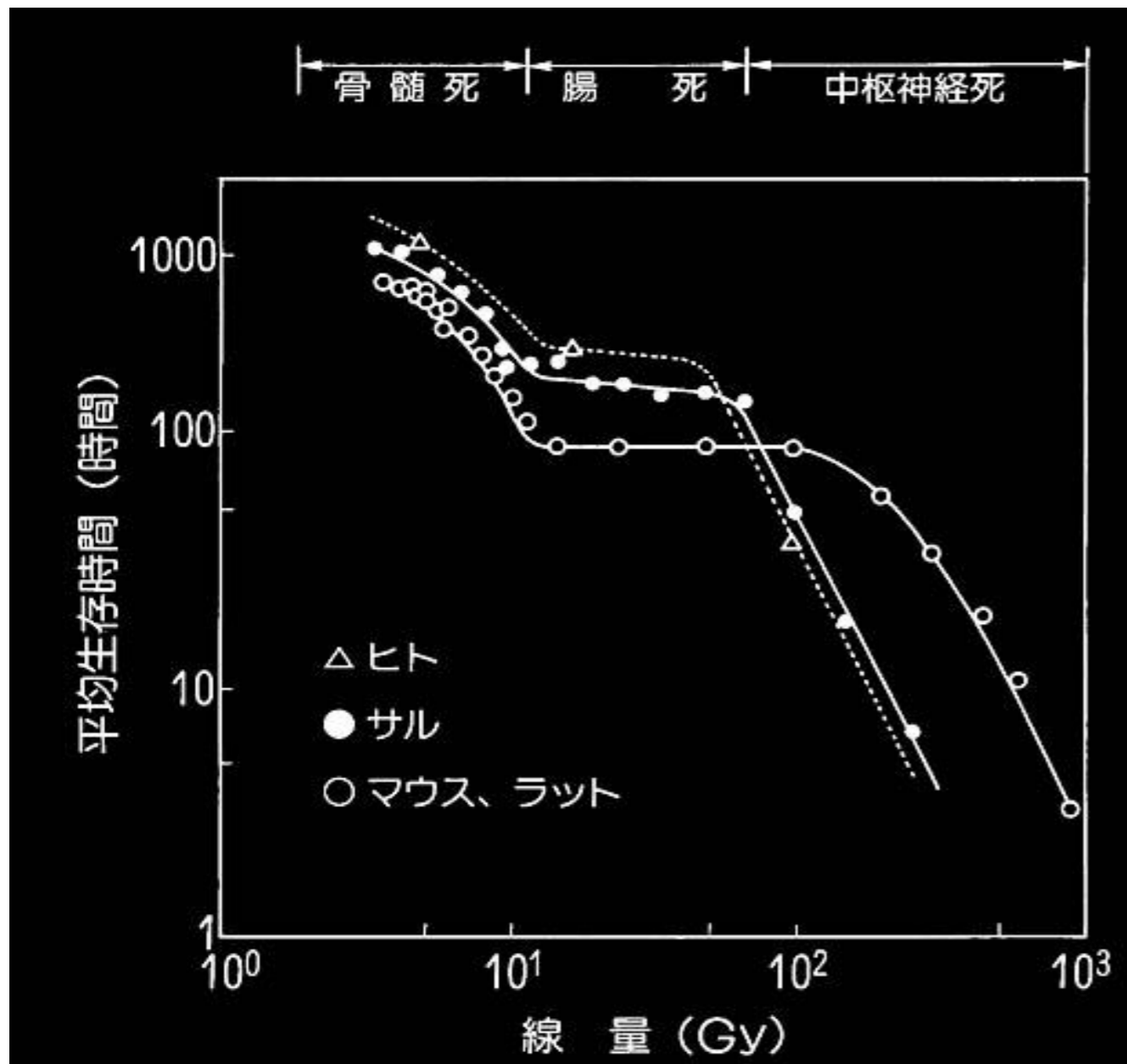
沈澱槽B

ウラン溶液をステンレス製ビーカーと
漏斗を使い、手作業で投入していった。



急性放射線障害

全身被曝による死亡



骨髓死 4 Gy

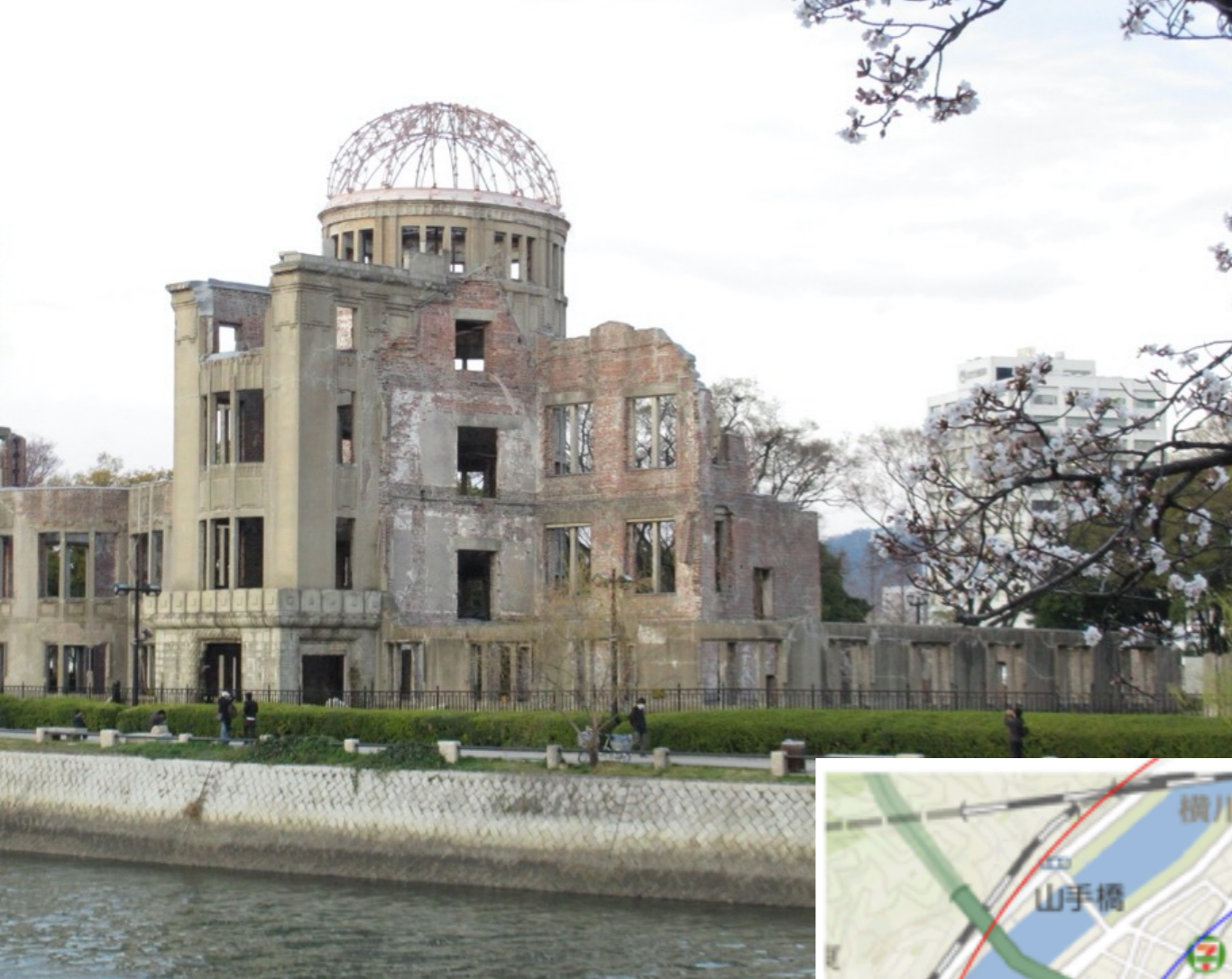
腸管死 10 Gy

中枢神経死 20 – 100 Gy以上

東海村 JCO 事故

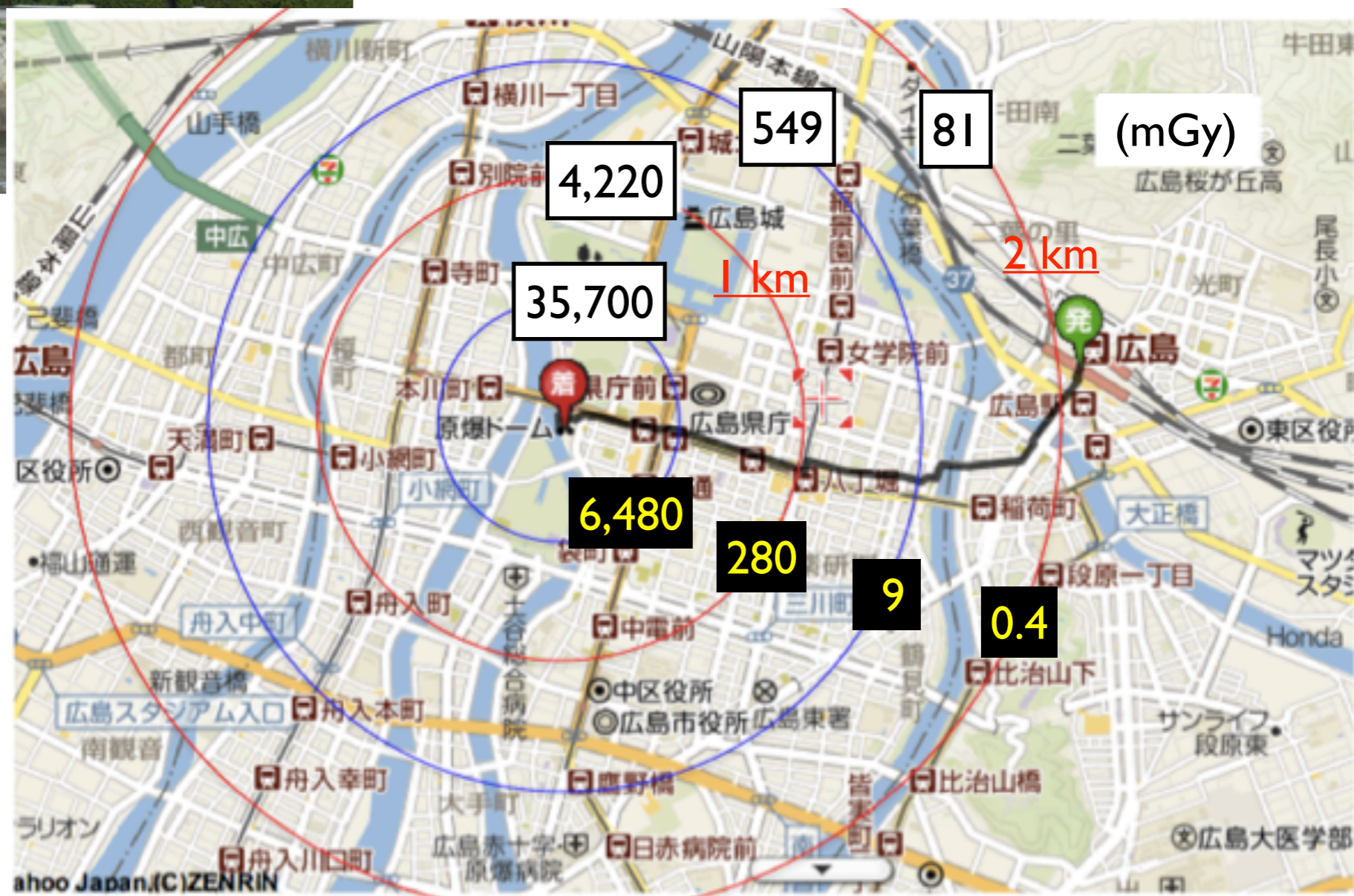
チェルノブイリの消防隊員

原爆



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
<p>幹細胞 幹細胞 芽細胞 (分裂) 機能細胞 (老化) 老熟細胞 (死滅)</p>	<p>幹細胞 リンパ球 粒球 好中性球 赤血球 球(血小板)</p>	<p>腺窩 (幹細胞) 絨毛</p>	<p>基底細胞 (幹細胞) 角質層</p>	<p>幹細胞 精子</p>	<p>上皮 (幹細胞) 水晶体繊維 赤道部</p>
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	免疫能力低力	絨毛の短縮と喪失、出血、下痢	紅斑、萎縮、潰瘍	一時的または永久不妊	白内障
	血液凝固時間延長				
	食作用低力				
	酸素輸送低力				

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)

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

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。

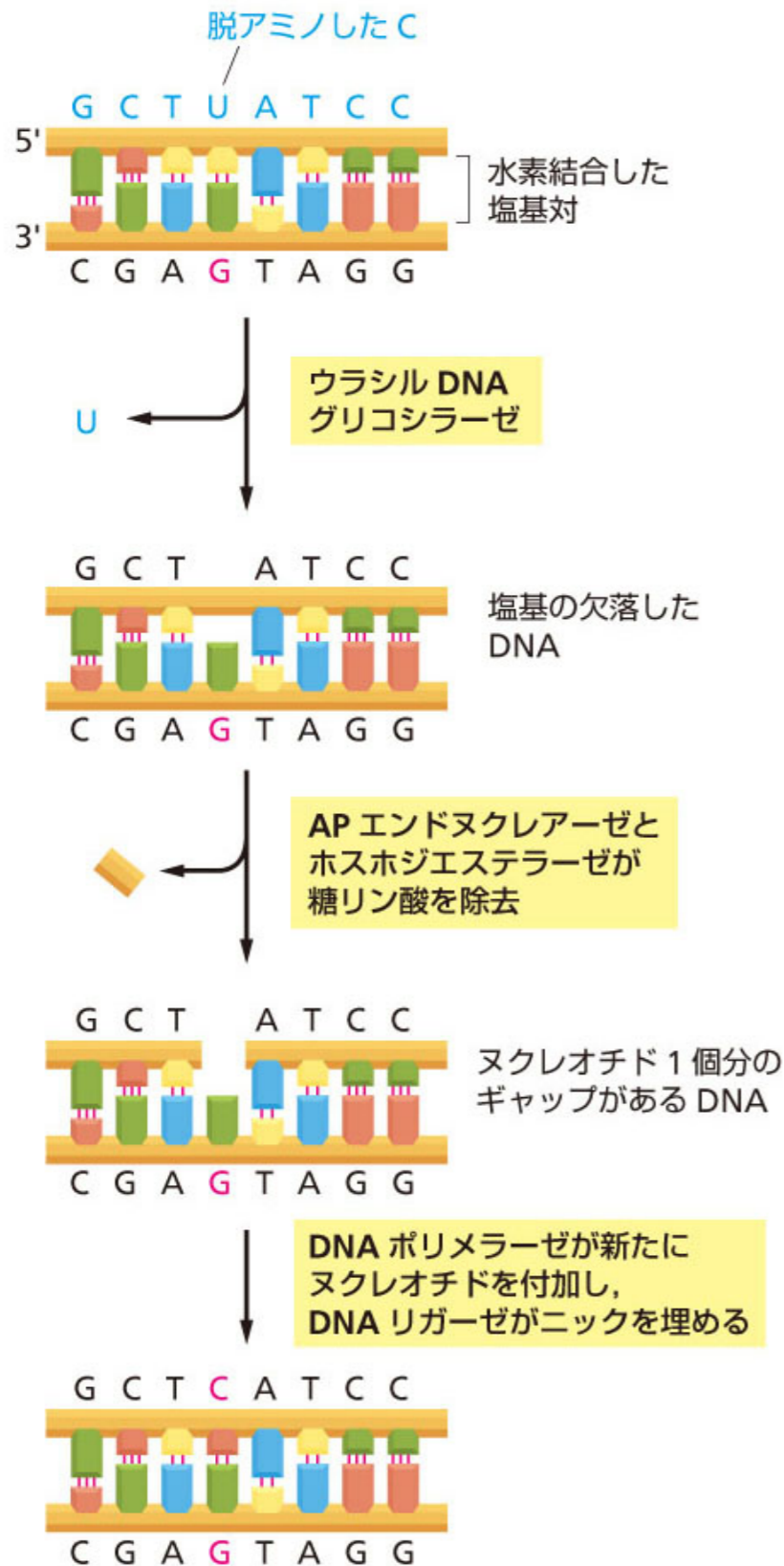
リスクの確率。

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。

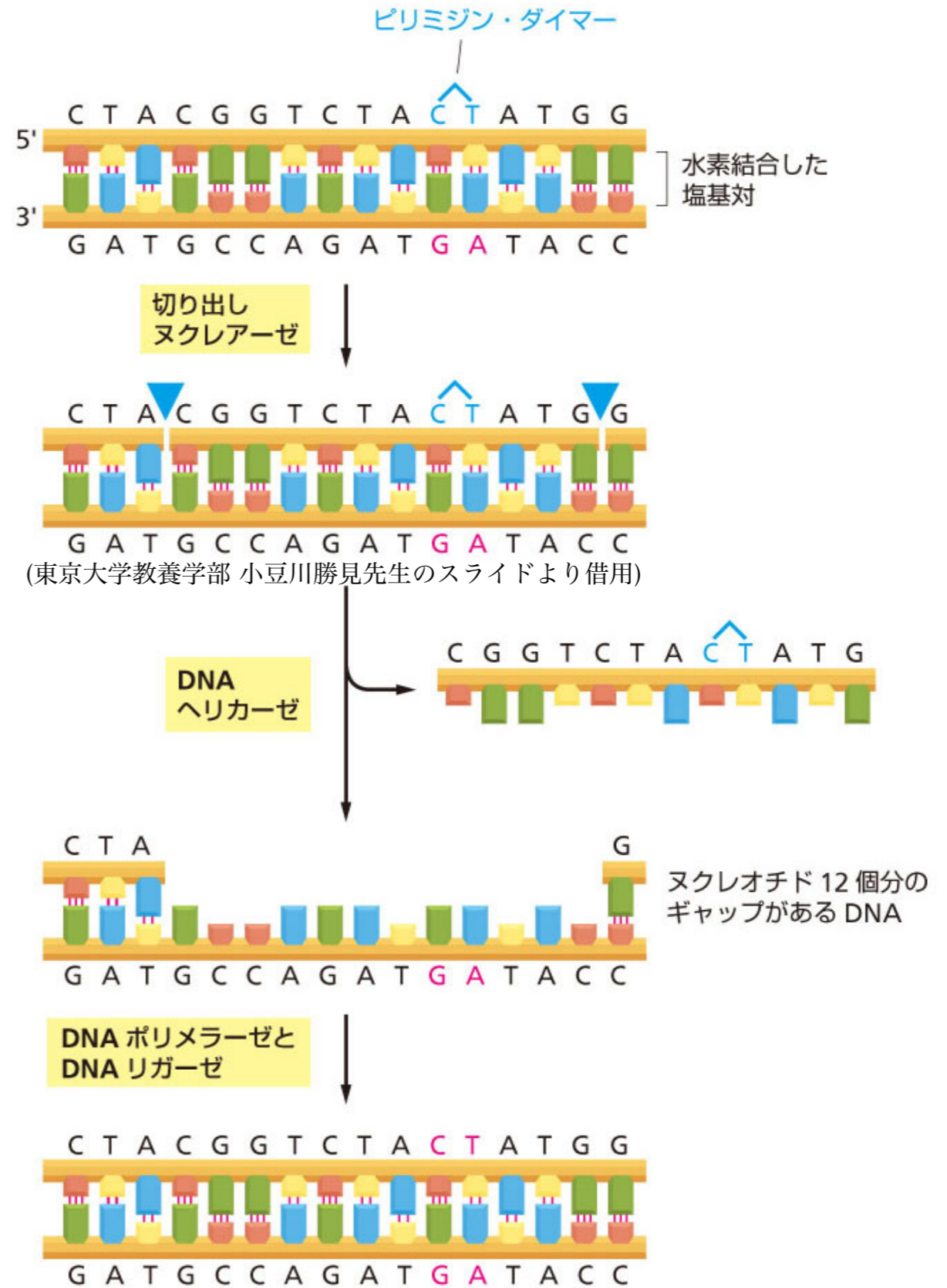
(日本人の死亡者の3人に1人はがんが原因。)

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。

塩基除去修復

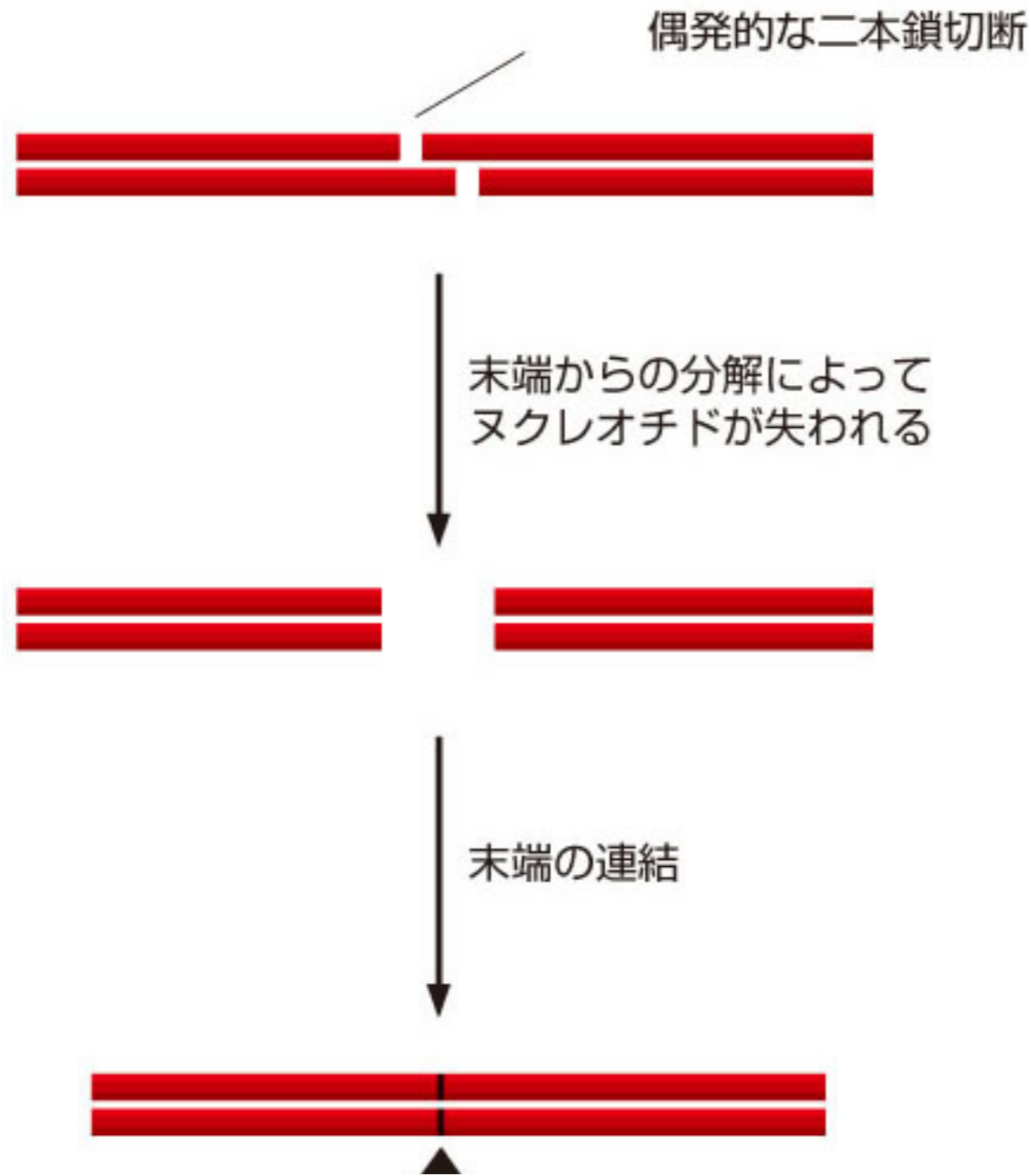


(B) ヌクレオチド除去修復



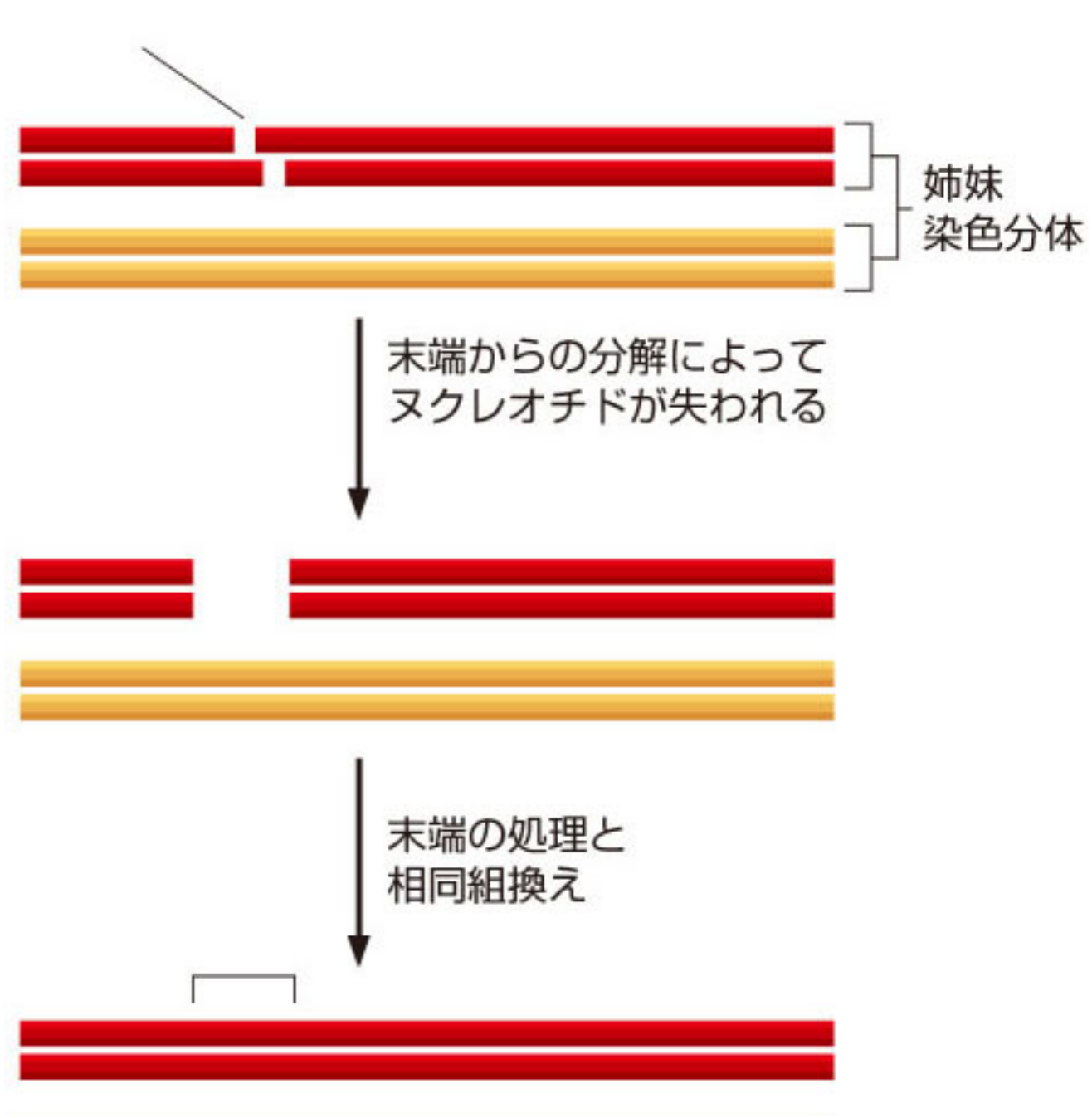
DNA二本鎖同時切断の場合の修復

非相同末端結合修復



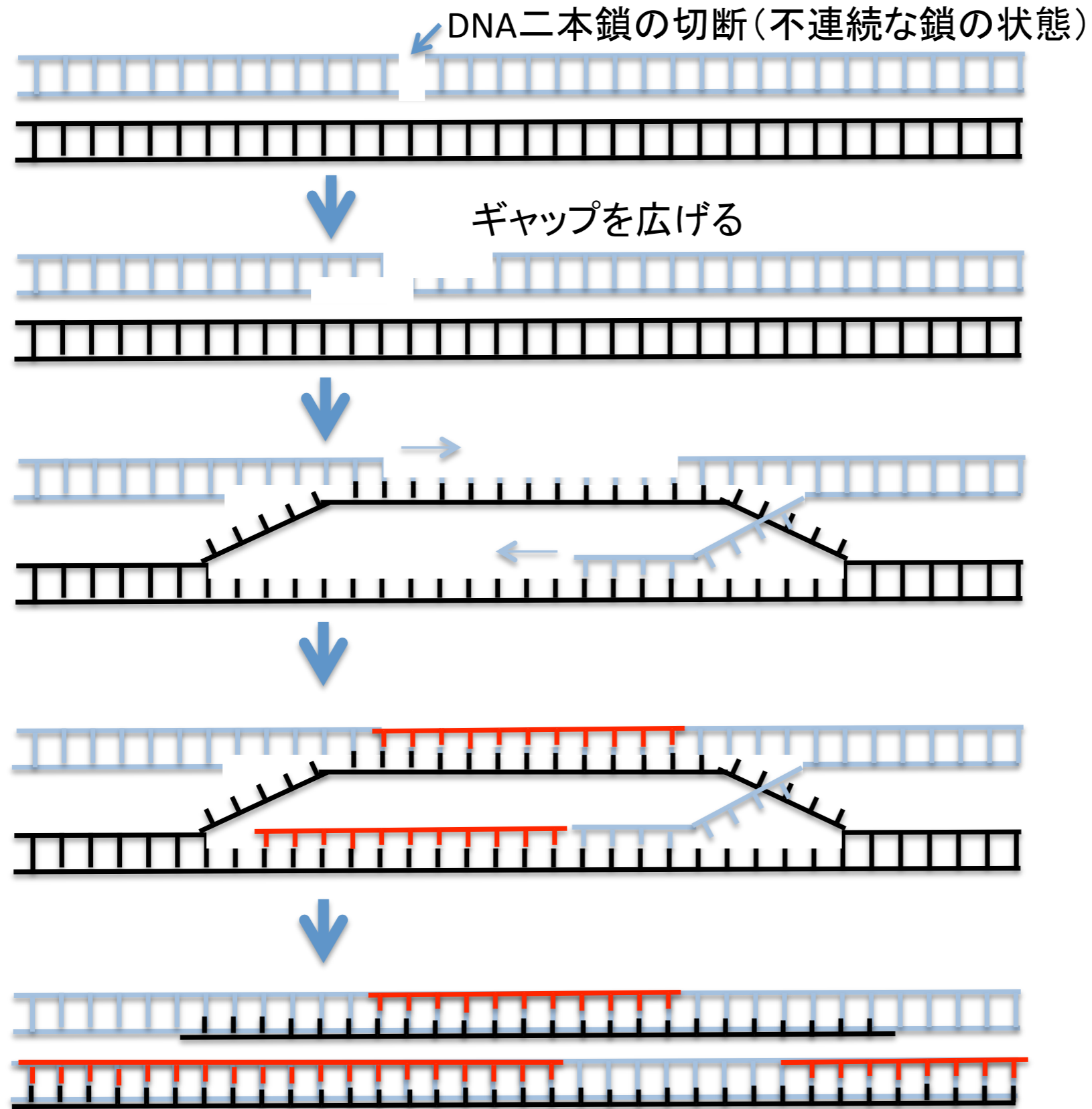
非分裂細胞の場合

相同組み換え修復



分裂細胞の場合

相同組み換え修復



分裂細胞の場合

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



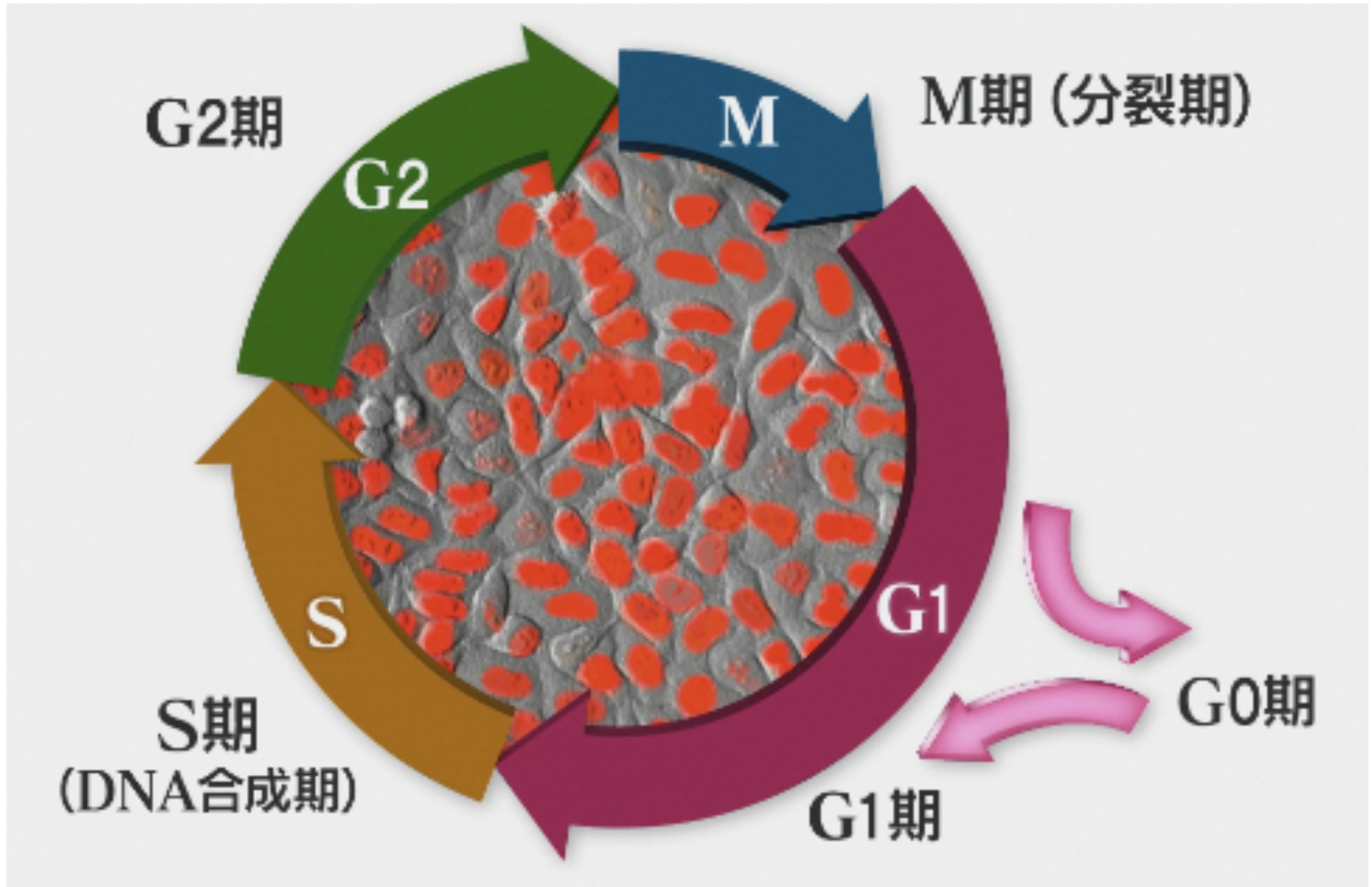
Photo: M. Englund, UNC-School of Medicine

Aziz Sancar

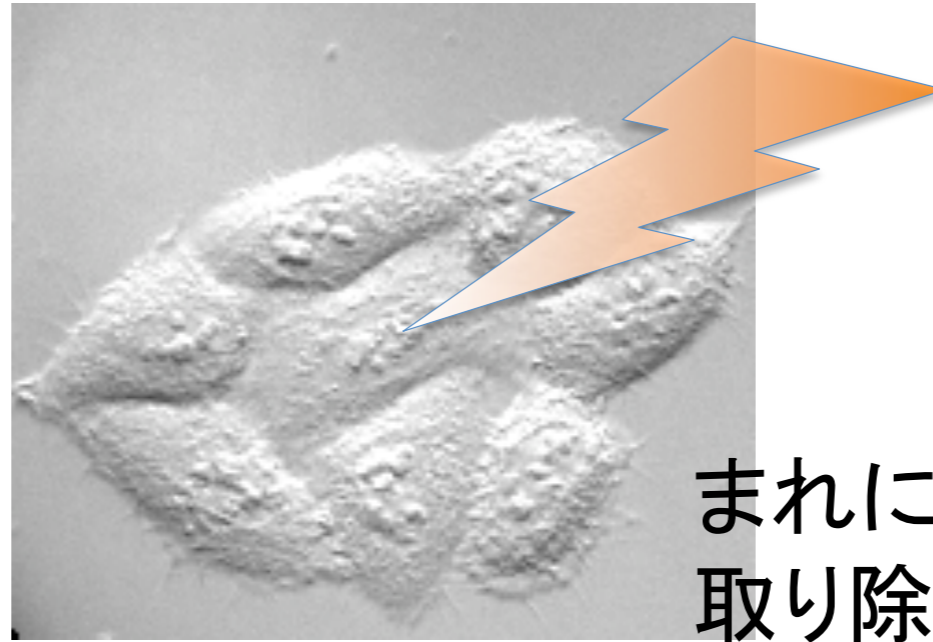
Prize share: 1/3

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

細胞周期と放射線感受性



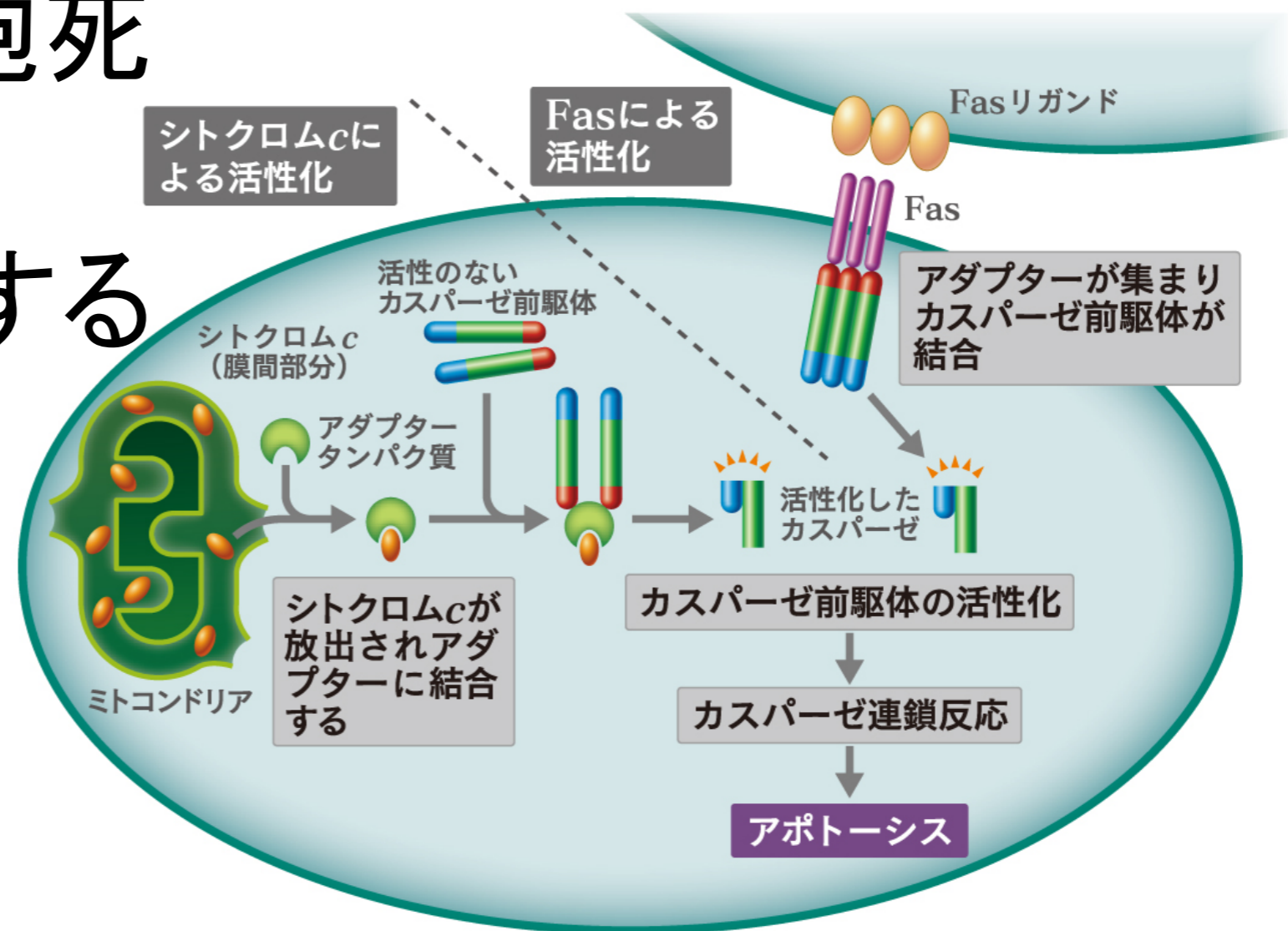
チェックポイント機構

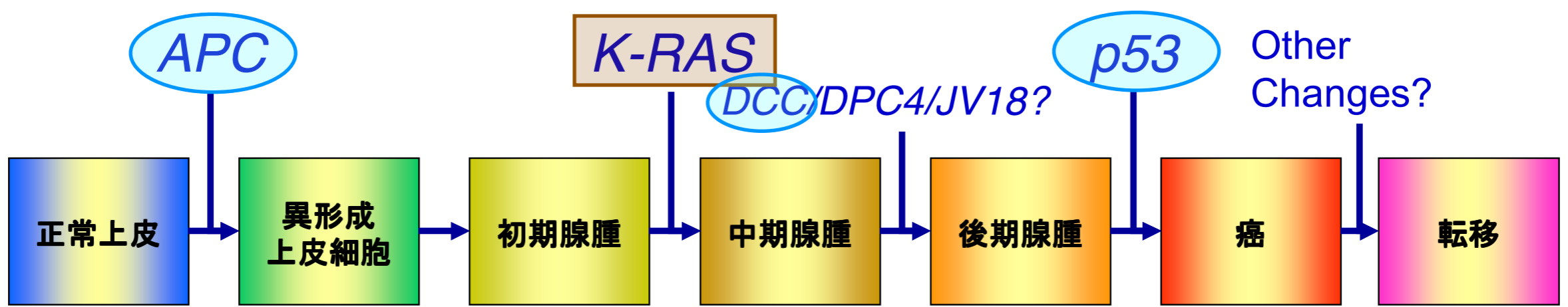


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

プログラム細胞死

細胞が自爆する





多段階発がん仮説

がん = 細胞の異常増加

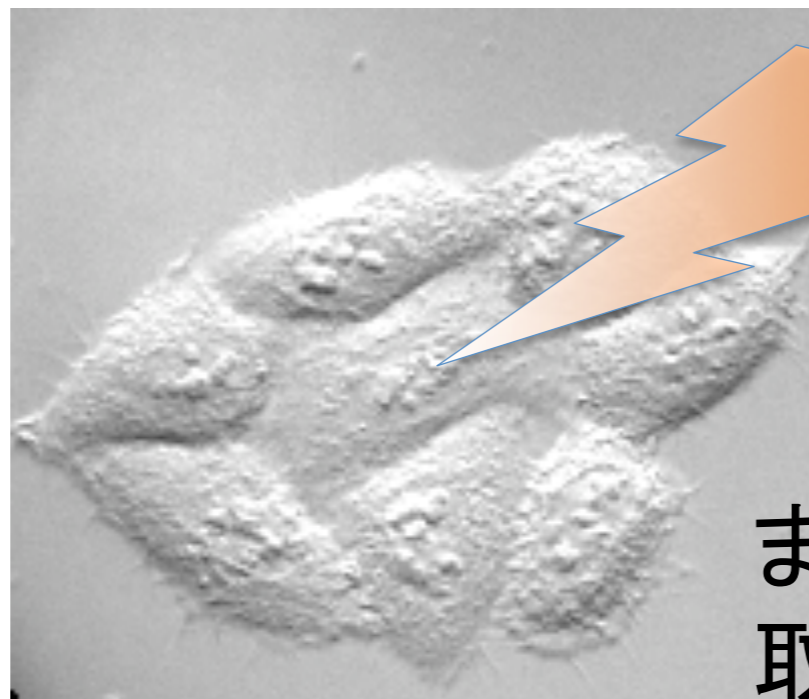
がん遺伝子

がん抑制遺伝子

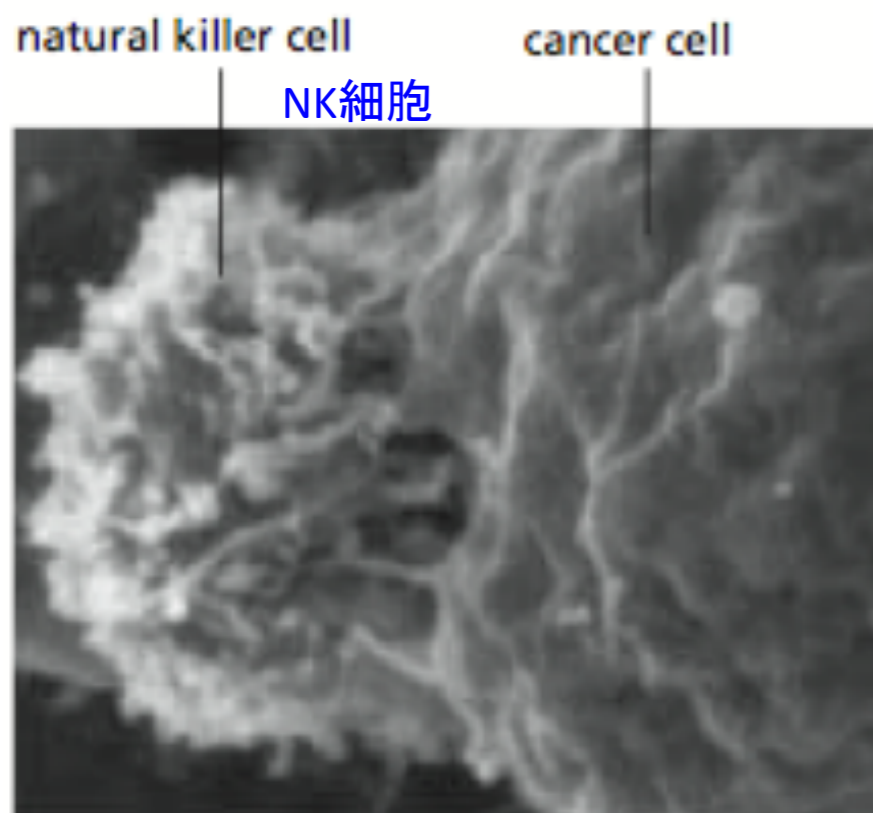
ミスマッチ
修復の欠陥

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 修復遺伝子自体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、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）



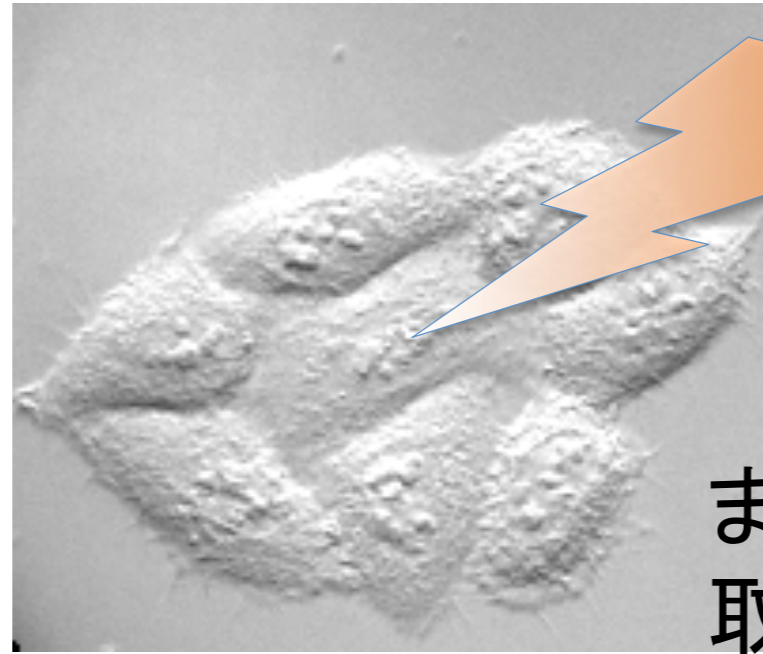
まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう



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

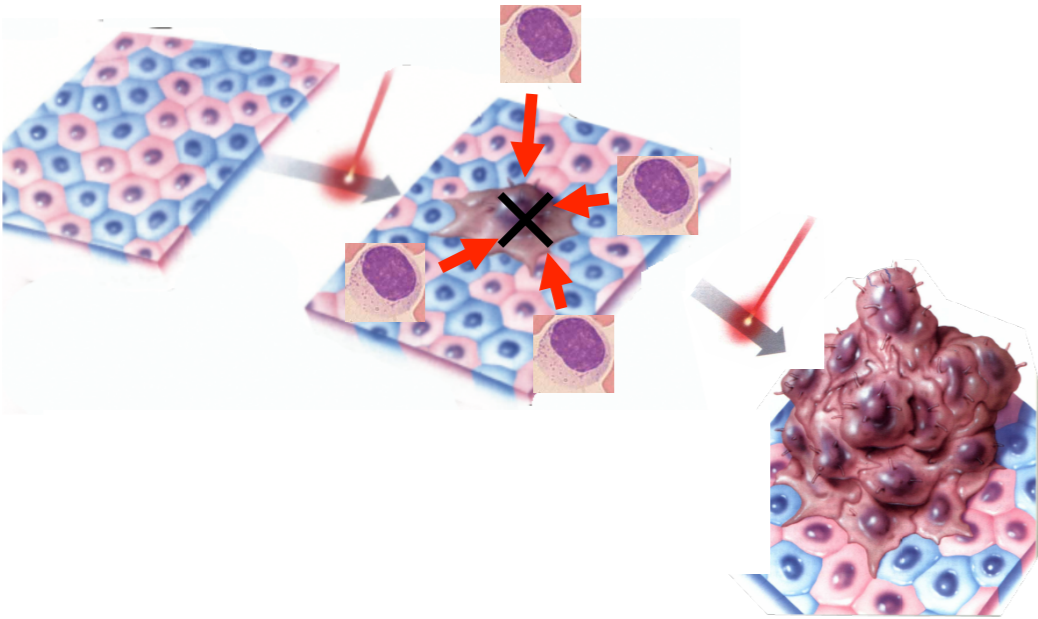


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

修復の失敗

細胞死も起こらない

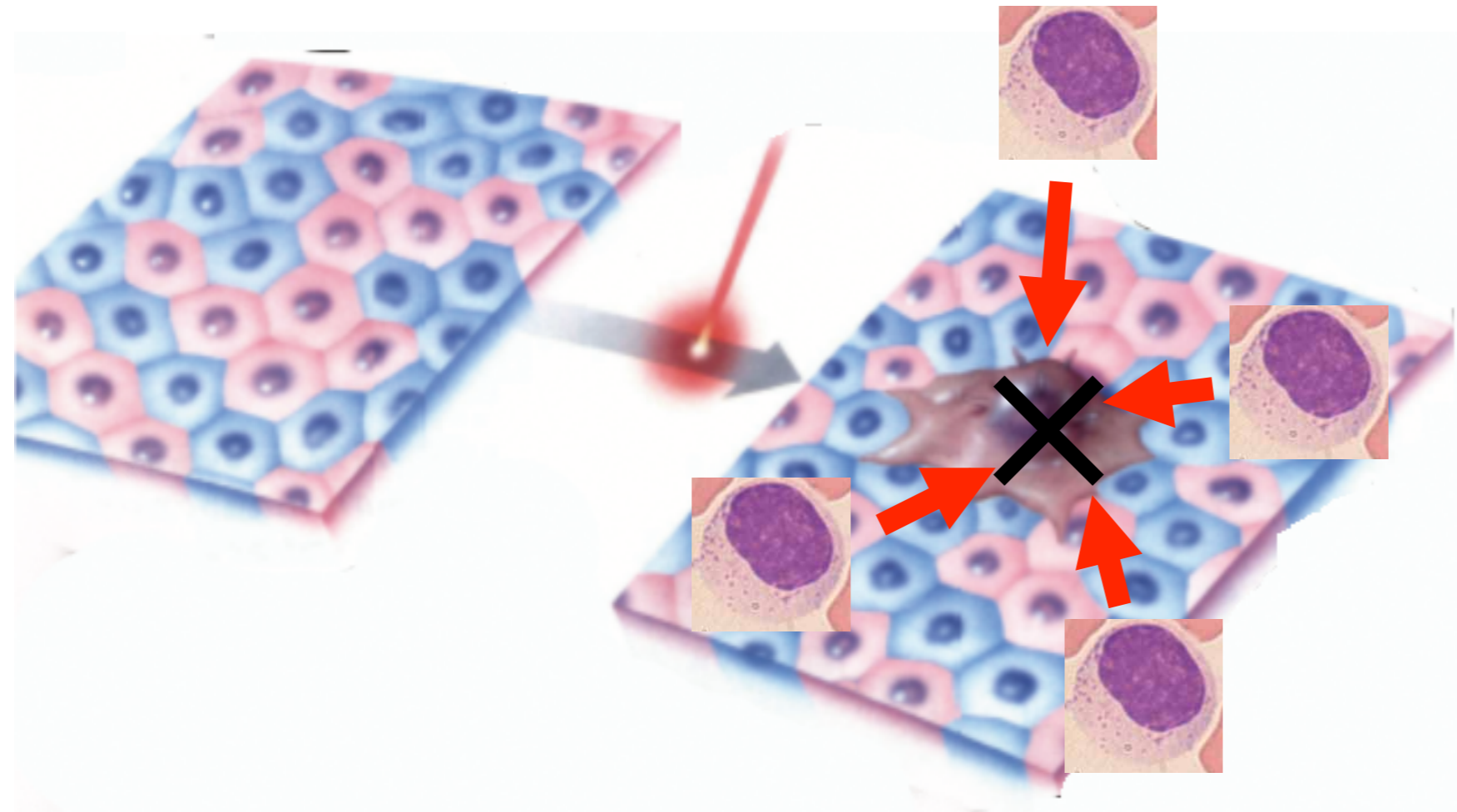
NK細胞も取り逃がした
(自然免疫系)



がん細胞が残ってしまう 良性 / 悪性
浸潤性

がん、とは？

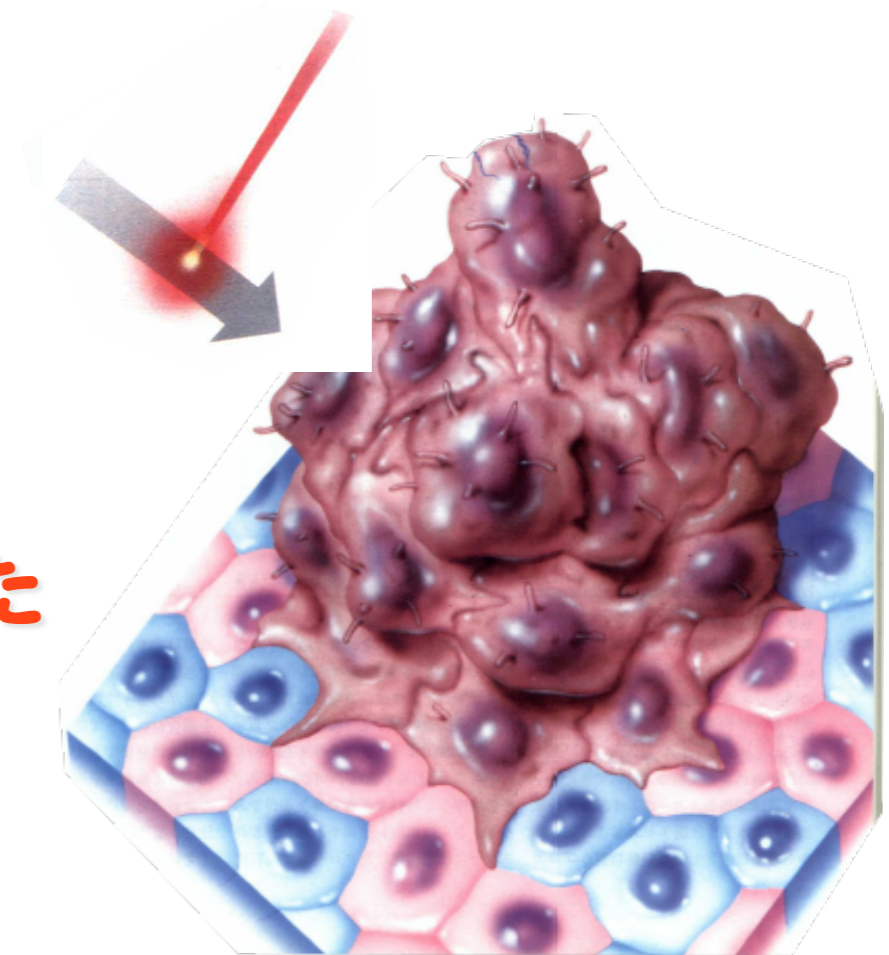
がん細胞は毎日5000個もできている！！



リンパ球が、できたてのがん細胞を殺す

免疫の攻撃をかいくぐった
ものが「がん」

がん、とは一種の「老化」



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



@長崎市蛭茶屋

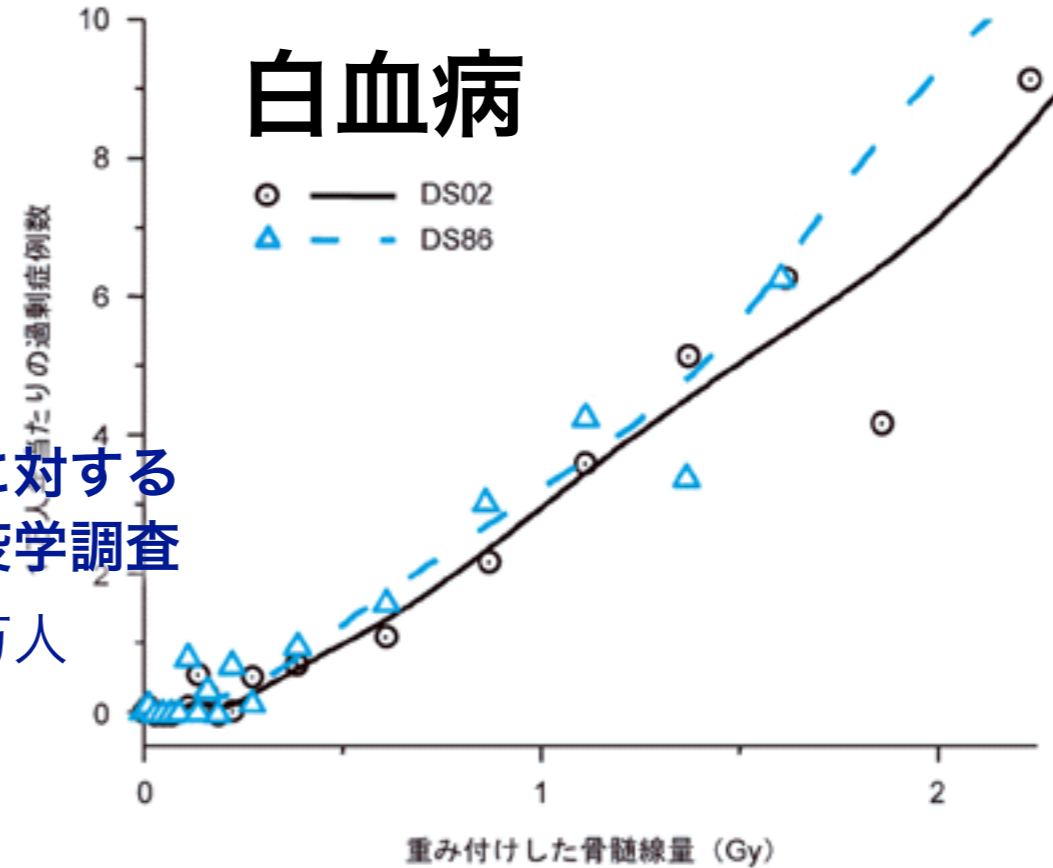
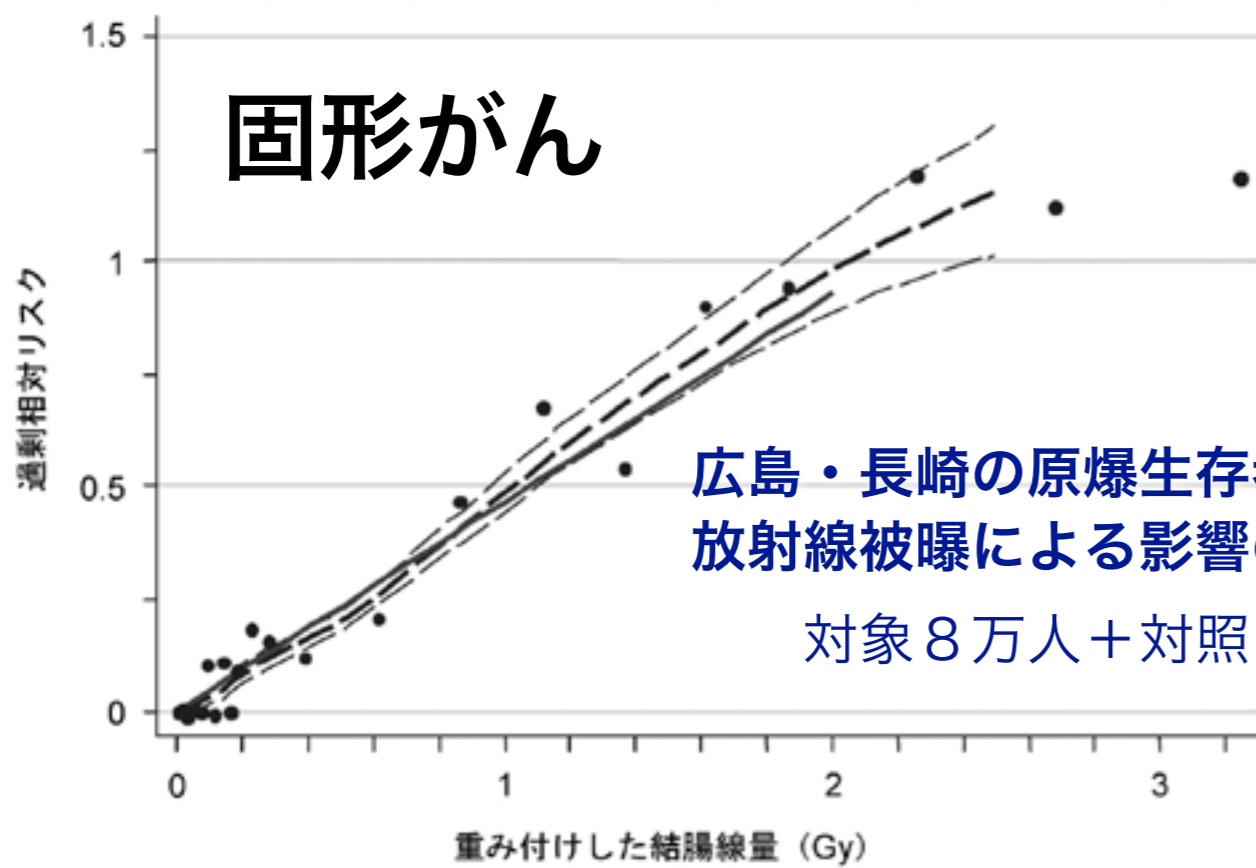


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

図. DS02とDS86による白血病のノンパラメトリックな線量反応、1950-2000年。被爆時年齢20-39歳の人々の1970年における男女平均リスク。

表. LSS集団における固形がん発生のリスク (線量別)、1958-1998年

重み付けした結腸線量 (Gy)	対象者数	がん		寄与率
		観察数	推定過剰数	
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	460	196	44.2%
>2.0	564	185	111	61.0%
合計	44,635	7,851	848	10.7%

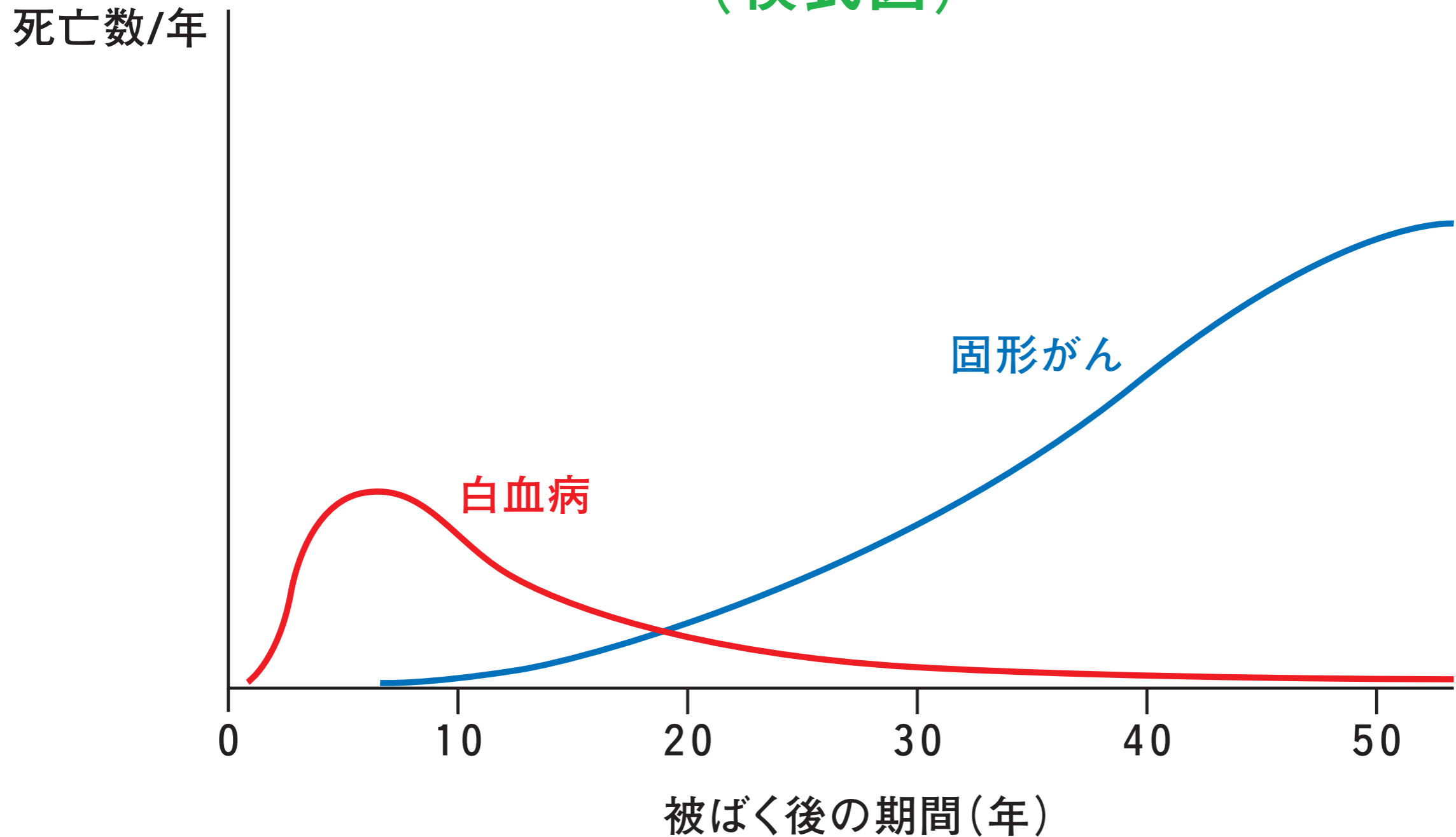
表. LSS集団における白血病による死亡の観察数と推定過剰数、1950-2000年

重み付けした骨髄線量 (Gy)	対象者数	死亡		寄与率
		観察数	推定過剰数	
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%

(財) 放射線影響研究所 データ

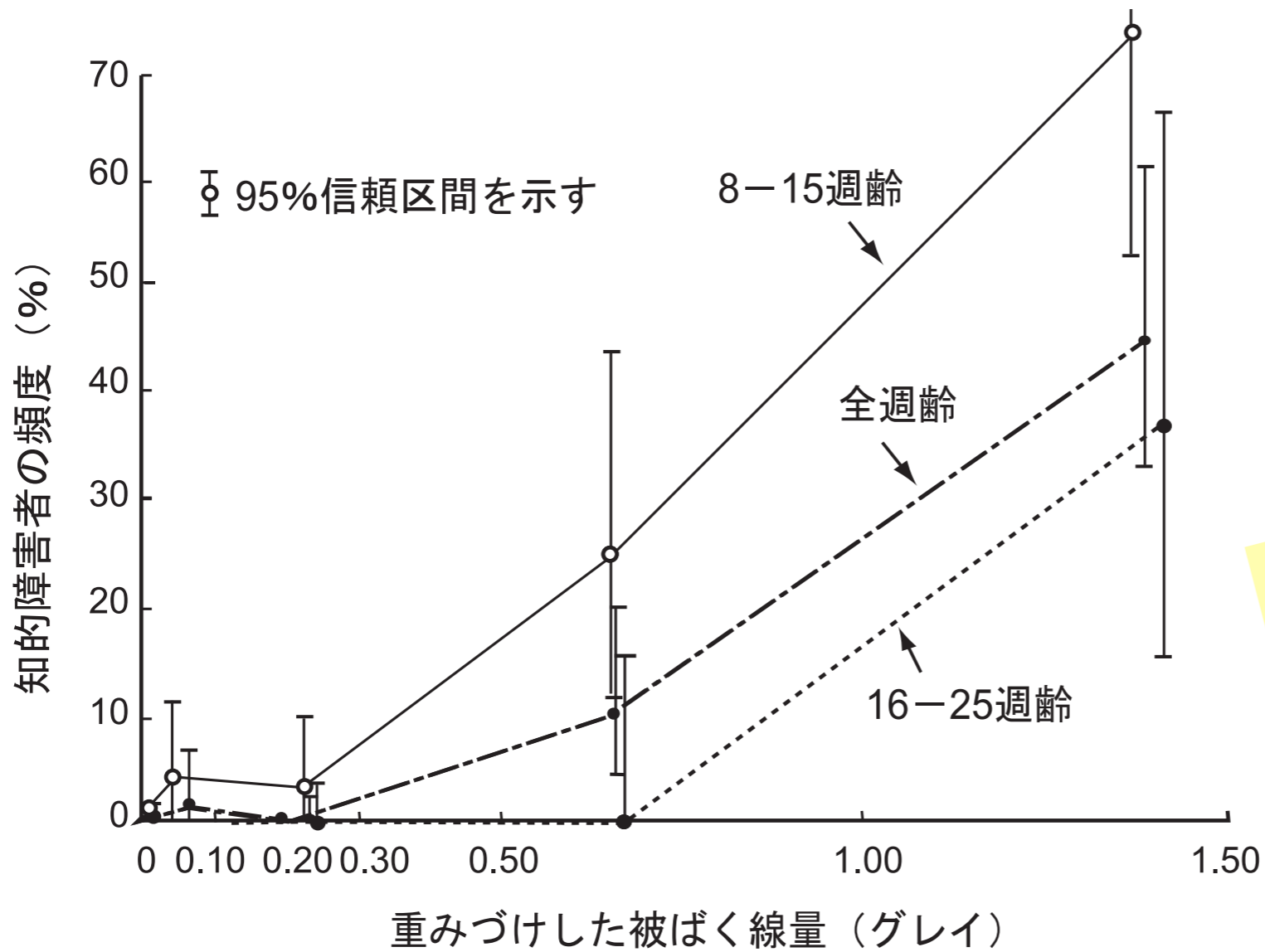
低線量被曝の影響について疫学調査の結果から結論を導きだすのは統計学的に困難。

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必要な墮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)

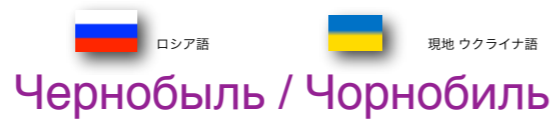
(財)放射線影響研究所 パンフレット「放射線影響研究所のご案内」

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

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

^{131}I (ヨウ素 ^{131}I) **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“リクビダートル”
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)

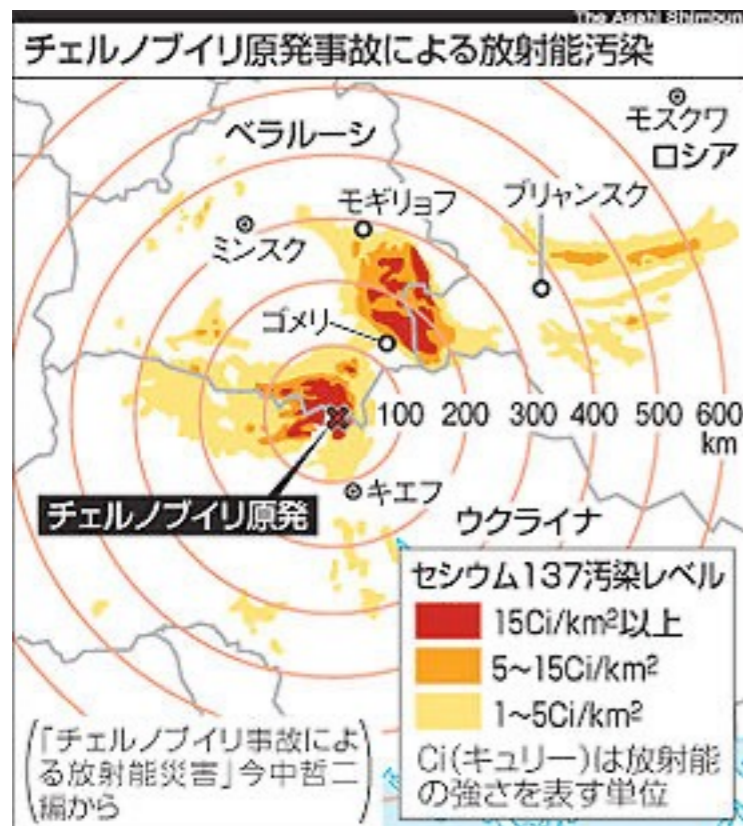
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

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・低線量率の被曝とガン死亡

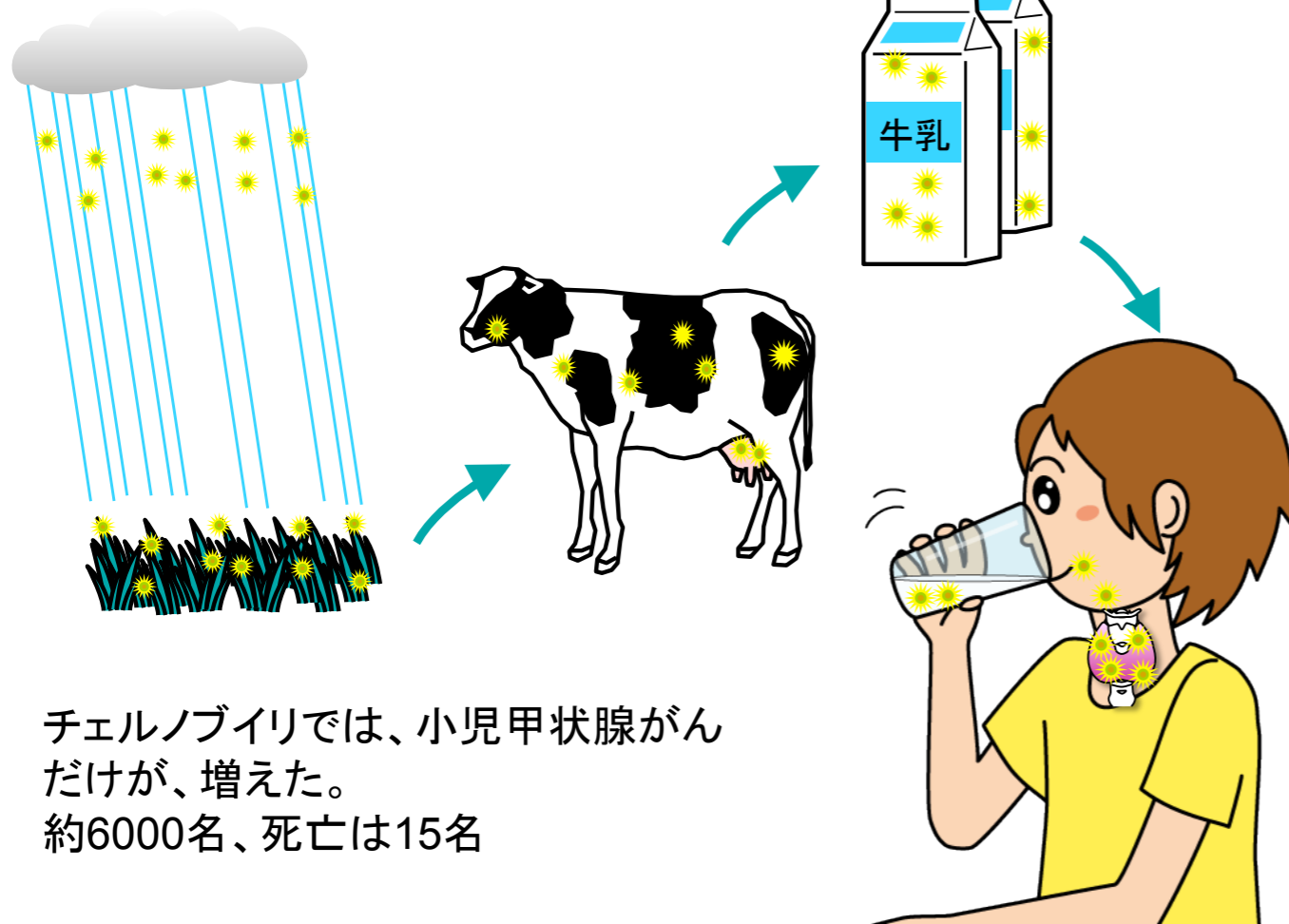


ロシア語
Чернобыль / Чорнобиль



チェルノブイリ原発事故

^{131}I (ヨウ素 ^{131}I) total 200京ベクレル !!



チェルノブイリでは、小児甲状腺がんだけが、増えた。
約6000名、死亡は15名

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

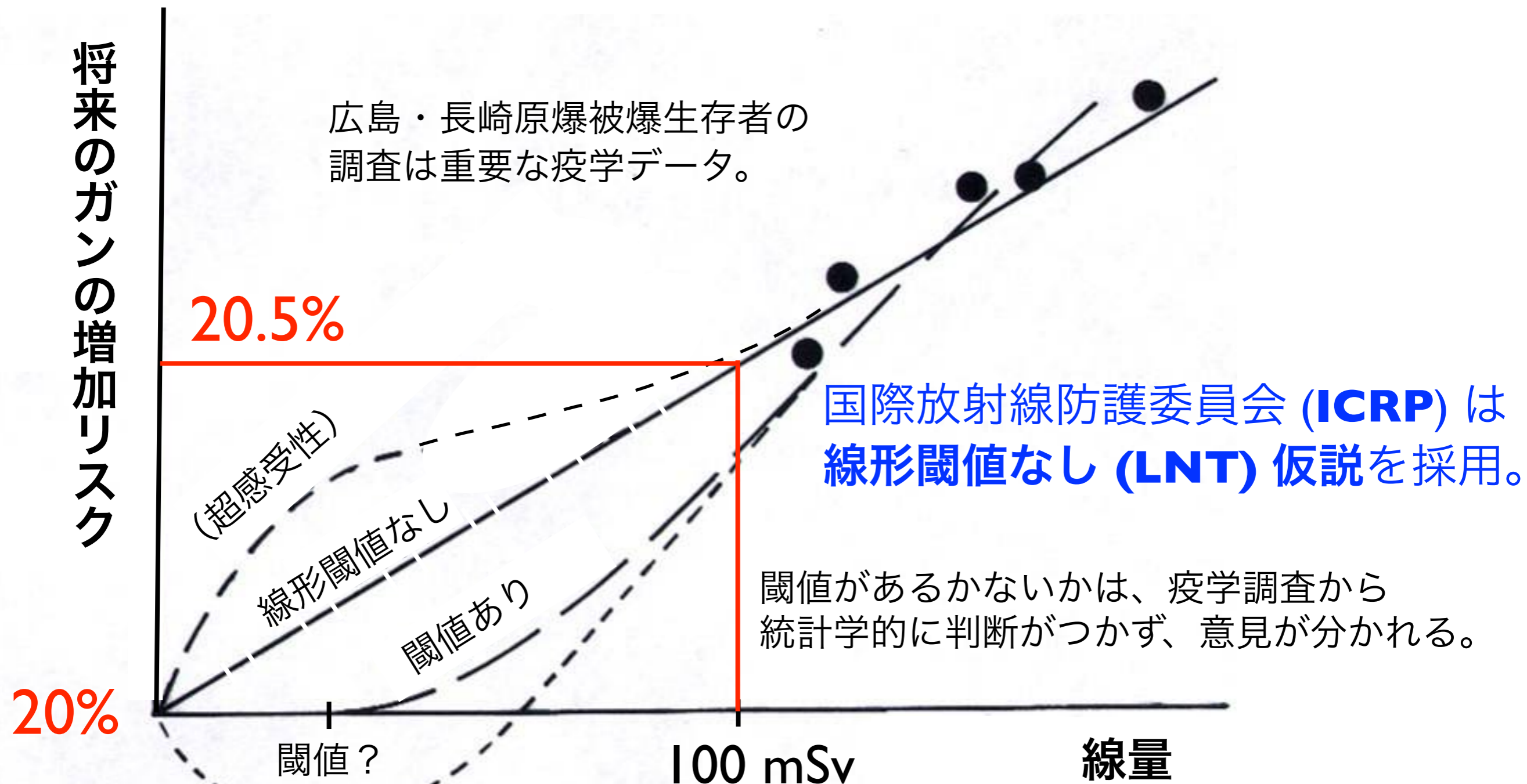
= 2000 mSv !! (10 Gy 以上の被曝も!)
と、ずっと大きいストレスによる失調

いわき市、飯舘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・事故による喪失感は共通

放射線のリスク評価と防護

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)

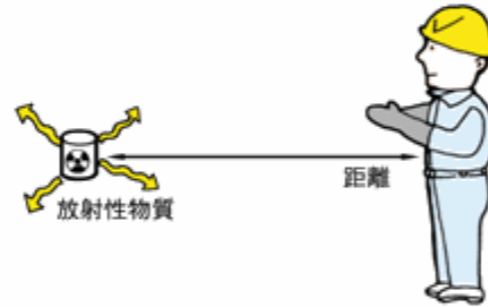
慢性被曝が急性被曝に比べて効果が何分の1になるかの係数

線量・線量率効果係数 **DDREF = 2**

放射線防護

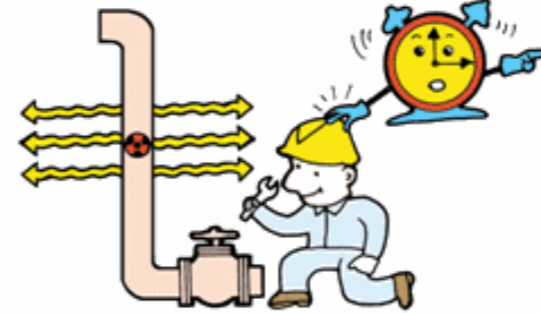
● 距離による防護

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

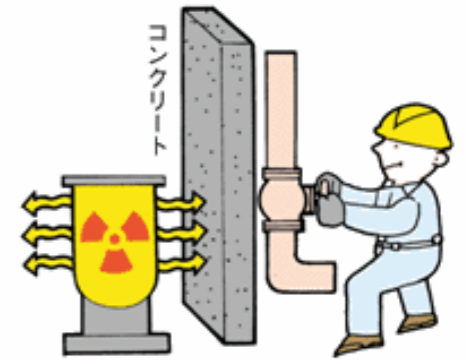


● 時間による防護

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



● 遮蔽による防護



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。

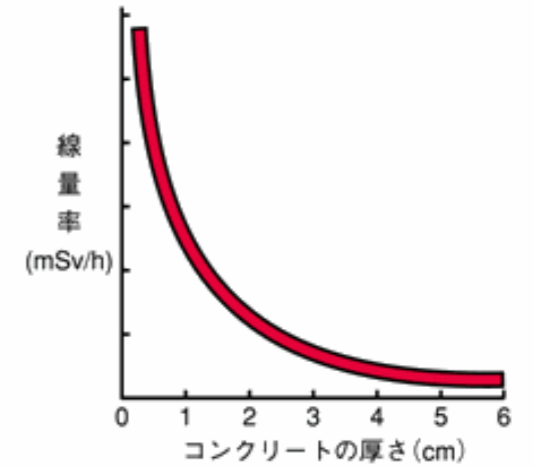
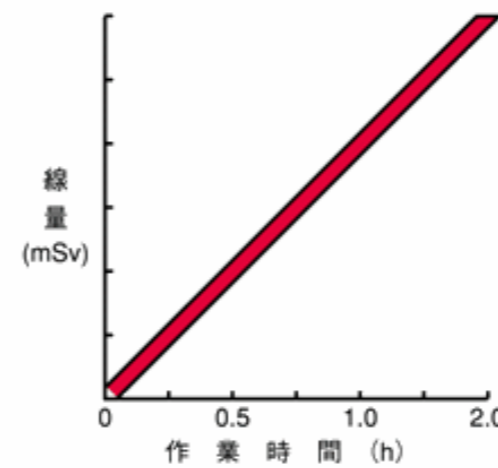
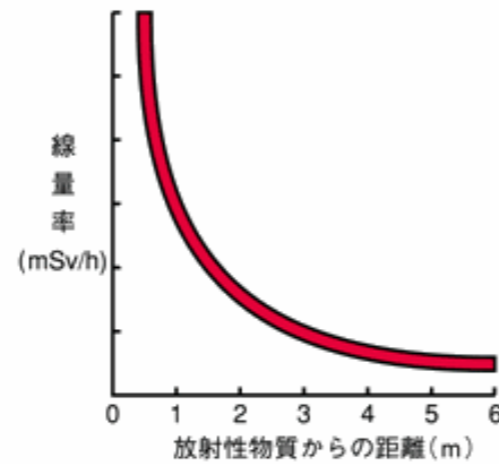


図1 遮へい3原則の図

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

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

(ALARA の原則 = As Low As Reasonably Achievable)

個人被曝の線量限度

線量限度の一覧表（作業者）

職業被曝（作業者 放射線業務従事者）

実効線量	100 mSv / 5年 かつ 50 mSv / 年
女子 妊娠中の女子	5 mSv / 3月 内部被曝について 1 mSv / 期間中
等価線量 水晶体	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

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

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

年リスク千分の1 (18歳から65歳までの就業期間の被曝の場合で、65歳までのリスクの最大値)

線量限度の一覧表（一般公衆）

公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量 水晶体 皮膚	—

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

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

2) 1985年のパリ声明で実効線量当量の制限によって不要になった。

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

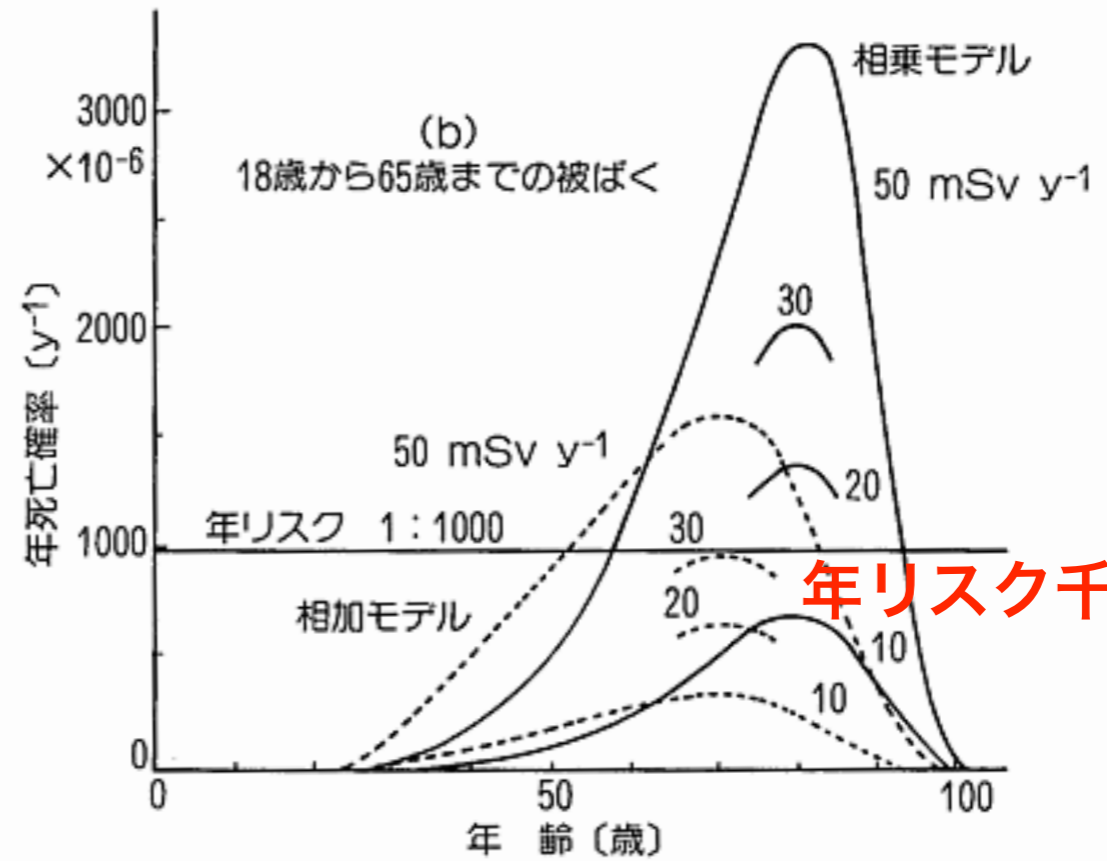
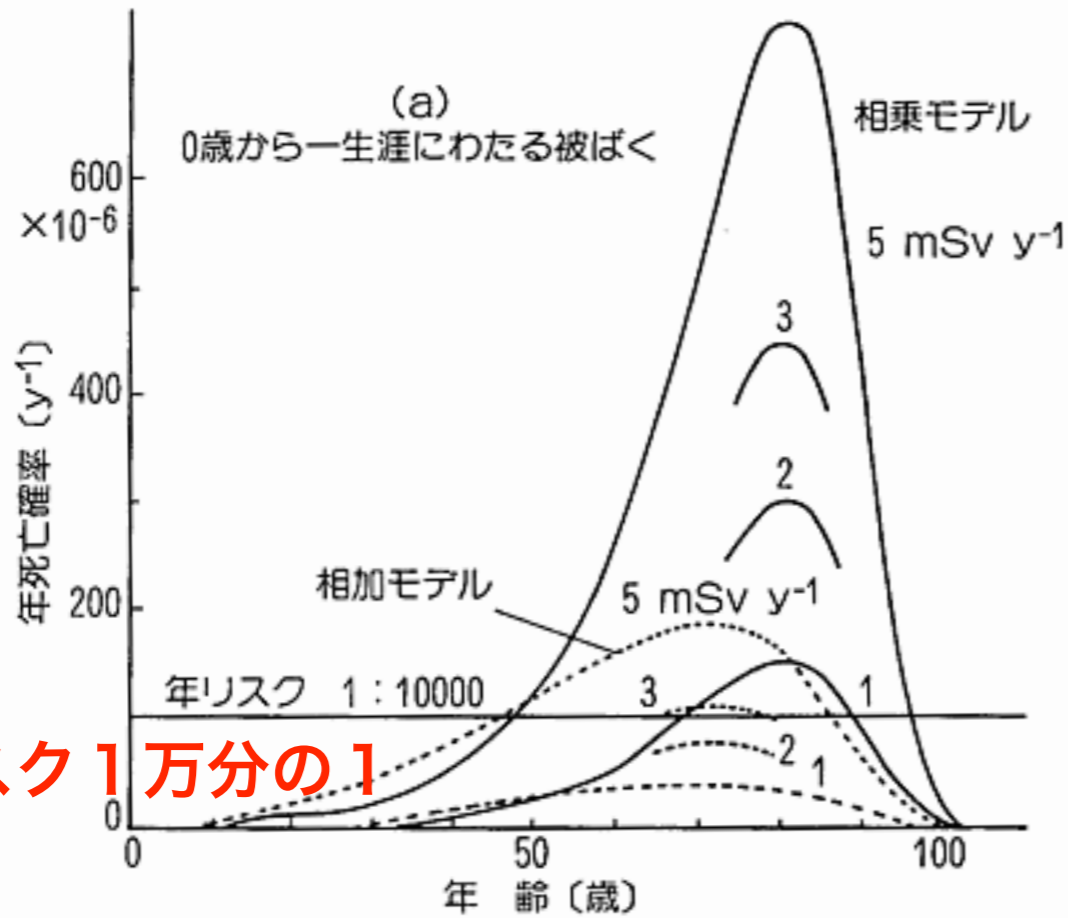
〔出典〕（1990年ICRP新勧告と1977年ICRP勧告における線量限度値対照表）

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

国内法令による防護基準

公衆被曝 (一般公衆)

職業被曝 (作業者)



年リスク 1万分の1

年リスク千分の1

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

図2 生涯死亡率 (無条件年死亡率)

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

放射線管理の法令

- 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
 - 放射性同位元素等の規制に関する法律 (**RI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

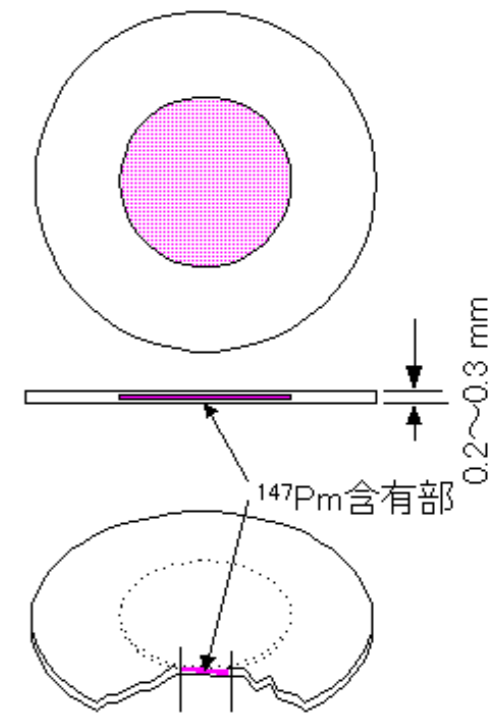
Sealed sources



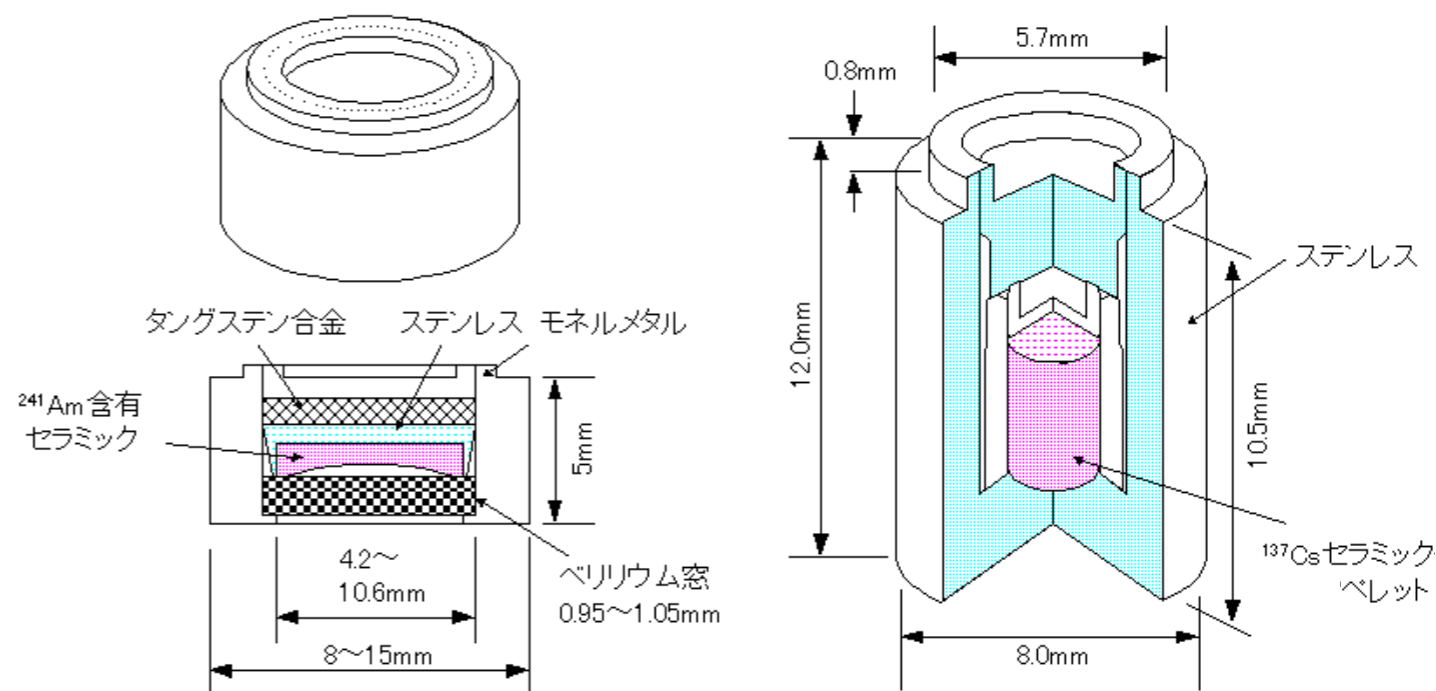
α 線源



β 線源

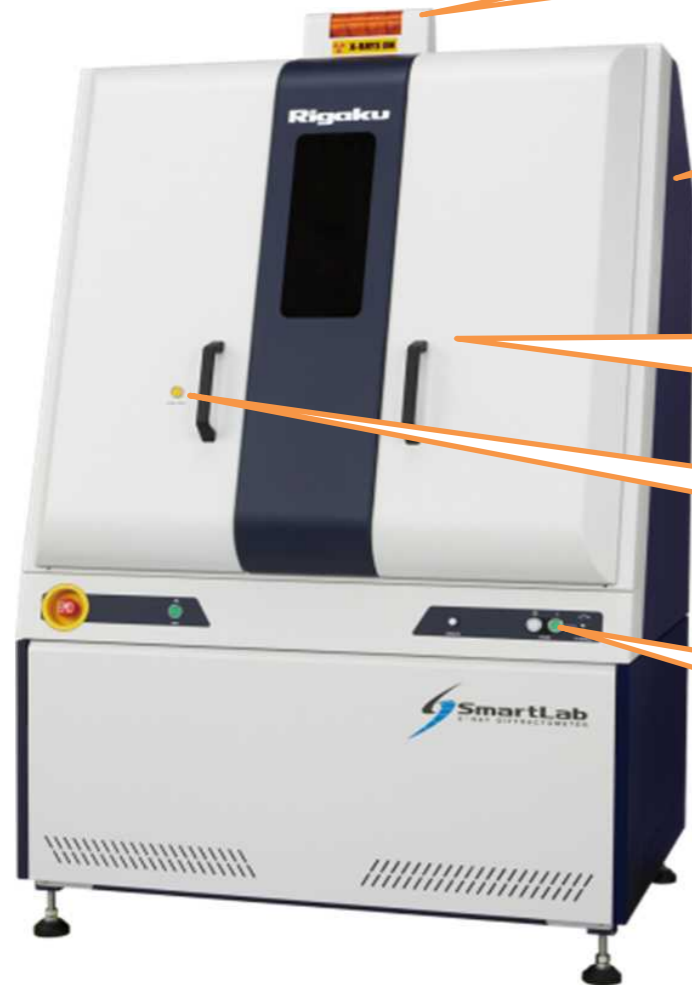


γ 線源



エックス線装置の安全取扱

Safe Usage of X-ray devices



①X線警告灯（黄色）

X線の発生を防X線カバーのX線警告灯の黄色LEDで表示します。

②防X線カバー（側面）

防X線カバーにより、ゴニオメータ等の光学系部が覆われています。

③防X線カバーの扉（インターロック）

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

④「DOOR」ボタン

防X線カバーを開ける時に使用します。

⑤HV ENABLE キー

キーを右に回し、装置ロックを解除しPOWER ONを可能な状態にします。

東京大学における エックス線装置の分類

Classification of X-ray devices at UTokyo

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

エックス線装置の安全取扱

Safe Usage of X-ray devices

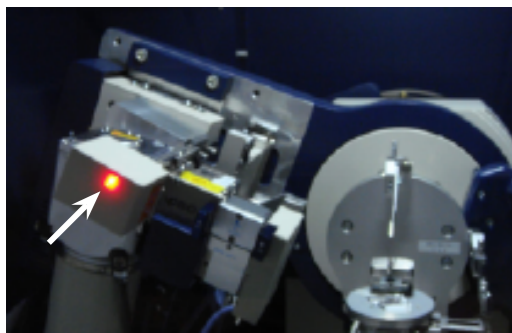


図2 シャッター付近の照射ランプ

複数の表示で
シャッターの開閉状態を
意識して確認する。



図3 外部照射ランプ

C分類でインターロックを
解除するときは十二分に
確認する。

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

使用記録を作成し、
整備すること。



図4 PC上のシャッター状況



図5 装置制御板上の表示

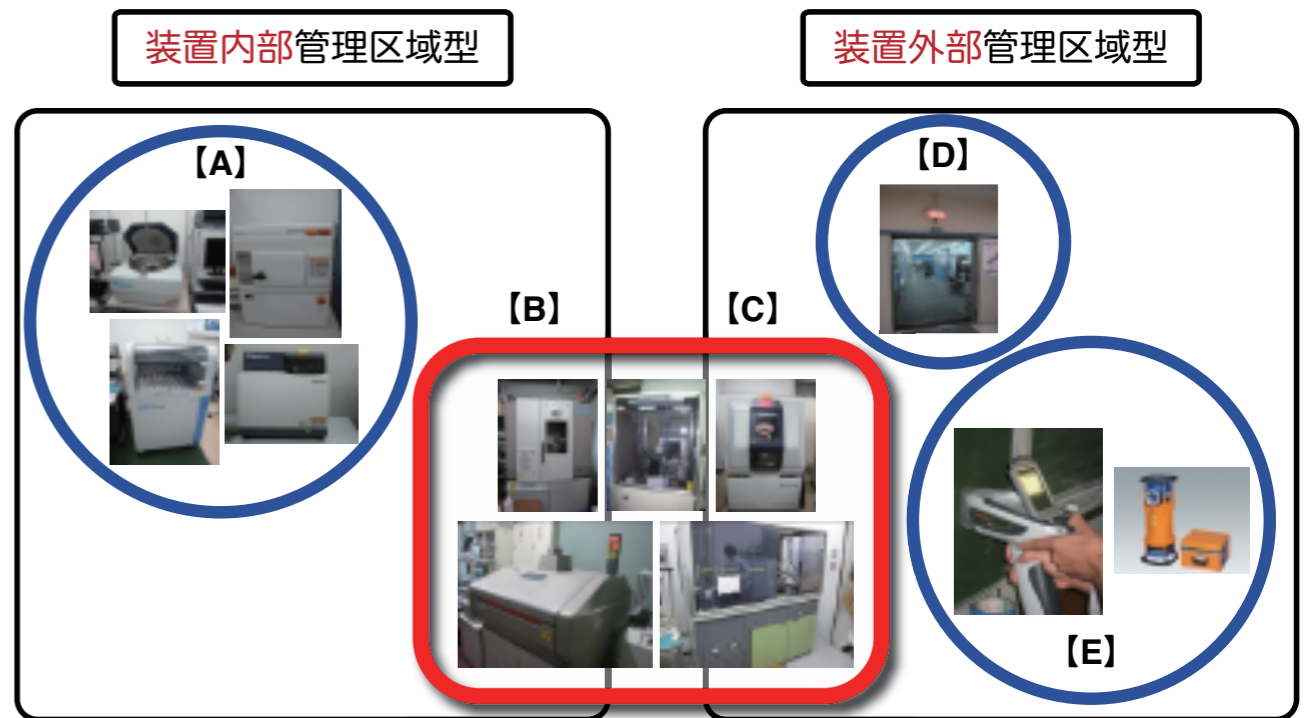


図1 東京大学における研究用エックス線装置の分類

東京大学におけるエックス線装置の分類

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

Classification of X-ray devices at UTokyo

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**についてのもので、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**を決めてある
(**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。

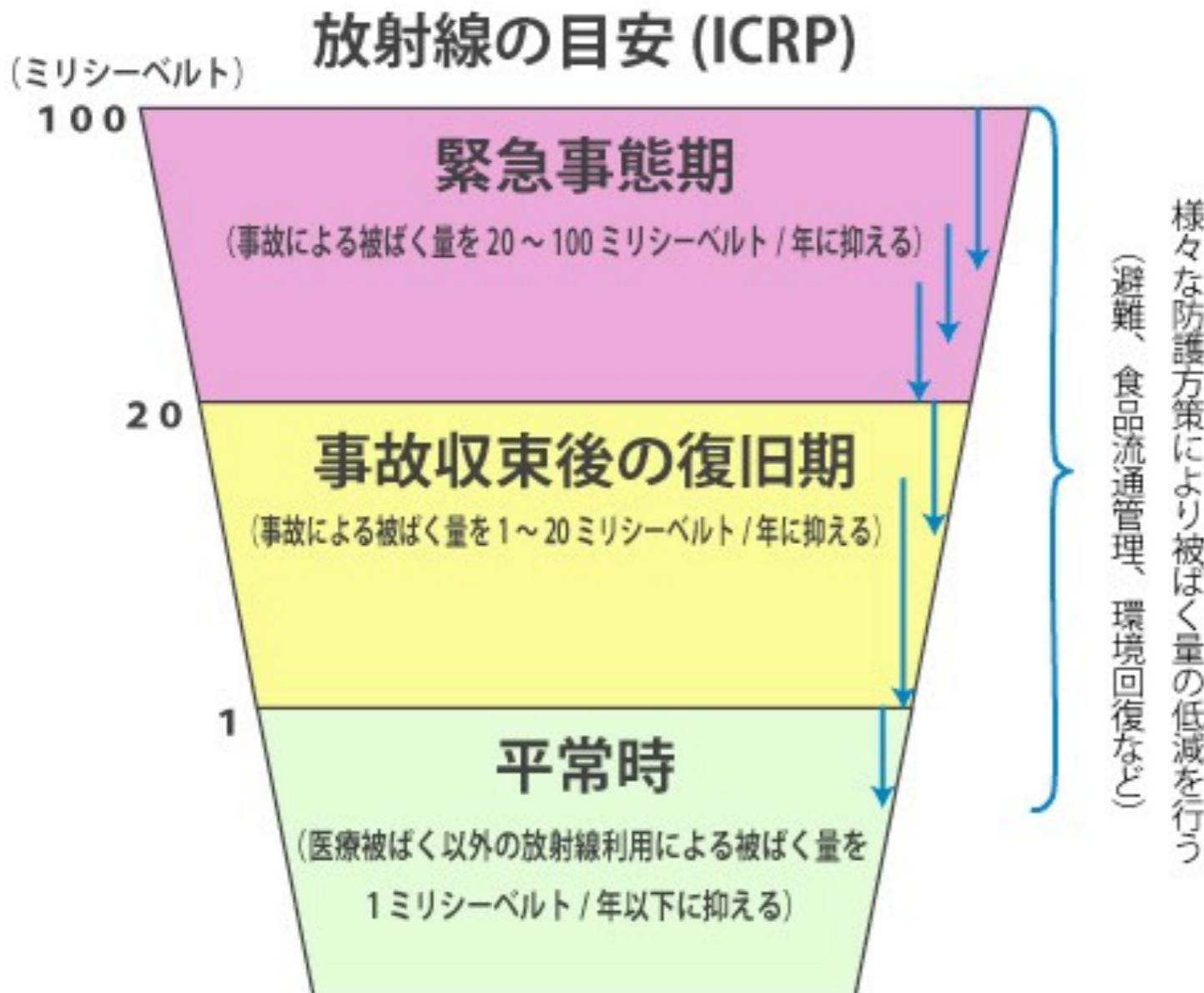
国内法未整備

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す。



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

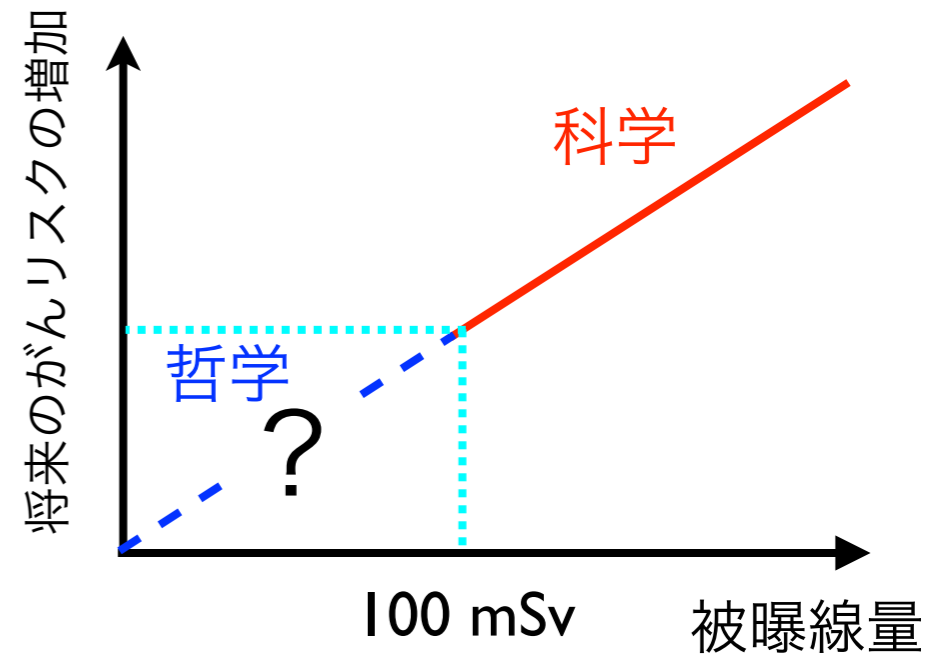
がんの原因が医学的に分かっていない

疫学調査の問題点

統計学的有意性

影響の因果関係

線形のリスク
は判断し難い



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

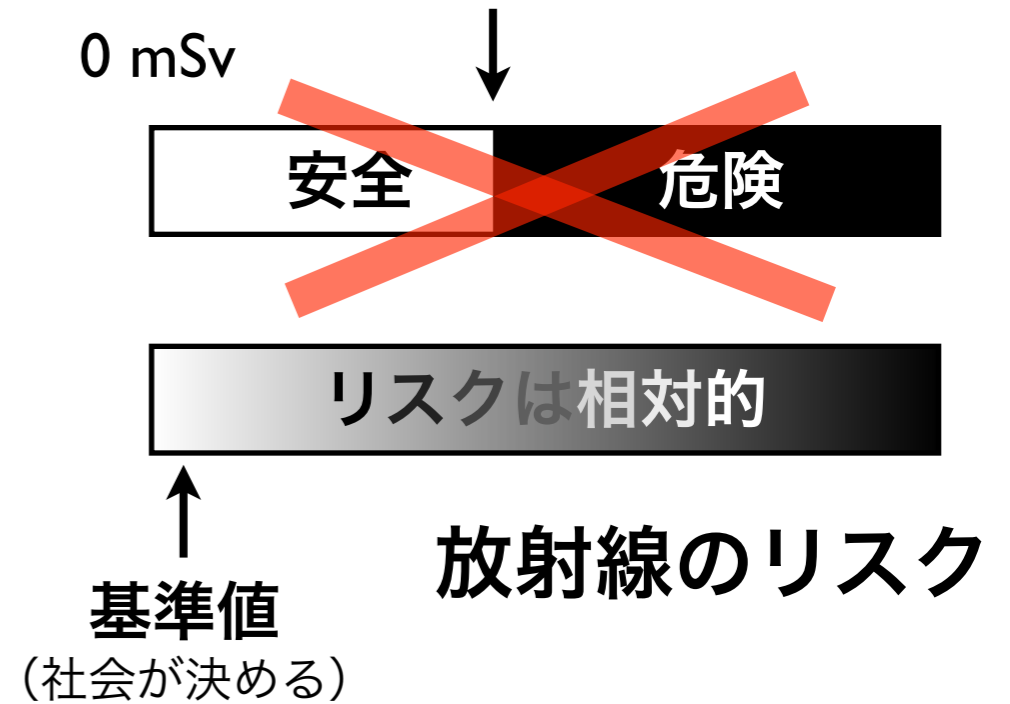
原発作業員のリスクは？

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

リスクのトレードオフは人それぞれに違う。



「絶対安全」は世の中に存在しない。相対的なリスク評価の目を養うべき。

正しい情報をどうやって判断するか。

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。

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

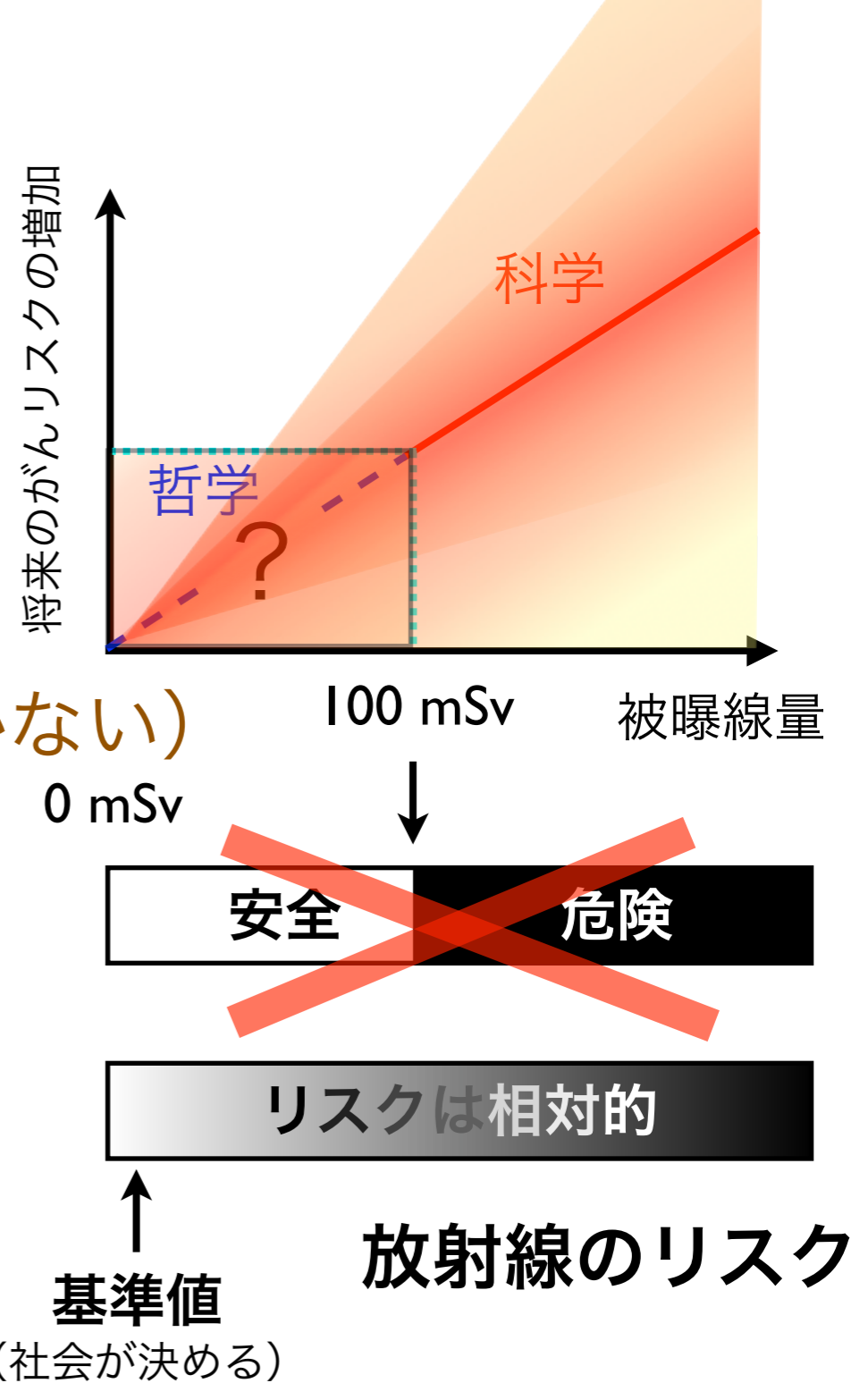
個別の事象との因果関係は分からない

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



原発と共存が現実 自ら置かれた環境 どう見極めるか

原発事故における避難などの根拠となったのが国際放射線防護委員会(ICRP)が示す数値だ。副委員長のジャック・ロシャルールさんは3・11後、福島で被災者との対話を続けてきた。チェルノブイリ原発事故後の歩みもよく知るフランス人の目に、福島や日本はどう映ったのか。専門家が語るべきことは。来日した際に東京で聞いた。

「2年半前の初来日から、福島での対話集会は少人数の車座のものも含めると10回以上になります。そうした集いをなぜ続けるのですか。」
「国際会議で来日した際にNPOの人たちと出会い、復興にかかわる様々な関係者が協力する必要があると感じ、福島市や伊達市、いわき市で開いてきました。最初、被災者は政府や東京電力に懐疑的で、不信感も渦巻き、日本人以外の専門家に話を聞きたいという感じでした。『このまま住み続けても大丈夫か』という質問が大半でした」

国際放射線防護委員会(ICRP)

1928年に前身の組織が生まれた。医療現場でエックス線の利用が広まり始めたころだった。50年にいまの組織に。主委員会と五つの専門委員会構成され、世界約30カ国の専門家が無報酬で参加。運営費は各国にある約20の原子力の研究組織による資金援助が8割、残りは刊行物の収入。日本からは、主委員会のメンバーで震災後に福島に移住した丹羽太貴・京都大学名誉教授ら7人がいる。

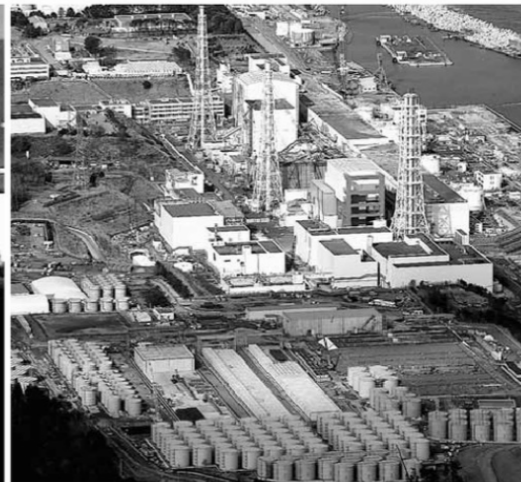
「**で開いてきました。最初、被災者は政府や東京電力に懐疑的で、不信感も渦巻き、日本人以外の専門家に話を聞きたいという感じでした。『このまま住み続けても大丈夫か』という質問が大半でした』**という質問が大半でした」

「しかし、その答えは人生で何を重視するかという個々の価値観によります。冷たく聞こえたと思います。が、人生相談には乗れませんと断ったうえで、どのように自らを取り巻く環境を見極めるか、ということを放射線防護の経験から伝えました」

「個人的に福島への思い入れも強いようですね。」
「個人的に福島への思い入れも強いようですね。」

国際放射線防護委員会(ICRP)副委員長 ジャック・ロシャルール さん

Jacques Lochard 50年生まれ。放射線防護の専門家、経済学者。フランスのNPO、原子力防護評価研究所(CEPN)所長も務める。パリ在住。



東京電力福島第一原発=本社機から



「5月中旬に南相馬市の対話集会に出て福島県立医科大学を訪ねます。ムネオさんにも会いたい」
=麻生健撮影

「5月中旬に南相馬市の対話集会に出て福島県立医科大学を訪ねます。ムネオさんにも会いたい」
=麻生健撮影

無力感漂う人々に 専門家が持つ情報 沈黙せず伝える

「だとなれば、そうした意識はなかなか変わりません。」

「昨年11月のいわき市の集会はそのままで違った雰囲気でした。以前は立場の違う人に向けた言葉が飛び交っている感じだったのが、『私は』という主語が増え、自身について語る人が多かったのです。『事故直後はマラソンを走っているように感じたけれど、私はもう一度歩けるようになった』『どこまで放射線防護が必要なのかと考え続け、私がたどりついた答えはどこまで私がそれを求めているかということだった』など、希望や慈愛、ときにユーモアも感じました」

「もちろん、すべての被災者がそうだとはいけません。ただ、3年という時間を経て、1ミリシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます」

「二つの事故を通して感じたことはあります。『時代背景も国土の広さも経済状況もメディアの発達度も違いますが、驚いたのは二つの事故後の人々の反応が同じだったという点です。親世代の懸念や我々に聞いてくる質問内容。事故直後の怒りがやがて無力感に変わる……。捨てられ、忘れられ、差別を受けるのでは、という恐れへと変容する姿も同じでした』

「日本にはチェルノブイリ事故の経験を福島に生かす以前に、広島や長崎の原爆体験があります。広島大学のシンポジウムに招かれて広島にいらした時に、このように感じました」

「もちろん、すべての被災者がそうだとは言いません。ただ、3年という時間を経て、1ミリシーベルトという数字に振り回されるのではなく、自分の生活圏でいかに被曝量を減らすかという点に意識が向かってきている人もいます」

「ロシャルールさん自身もチェルノブイリ事故の調査や支援に長く関わっていました。どこで折り合いをつけるのか、つまり人間の尊厳とは何かを考へるときにきていると思います」
(聞き手・梶原みずほ)

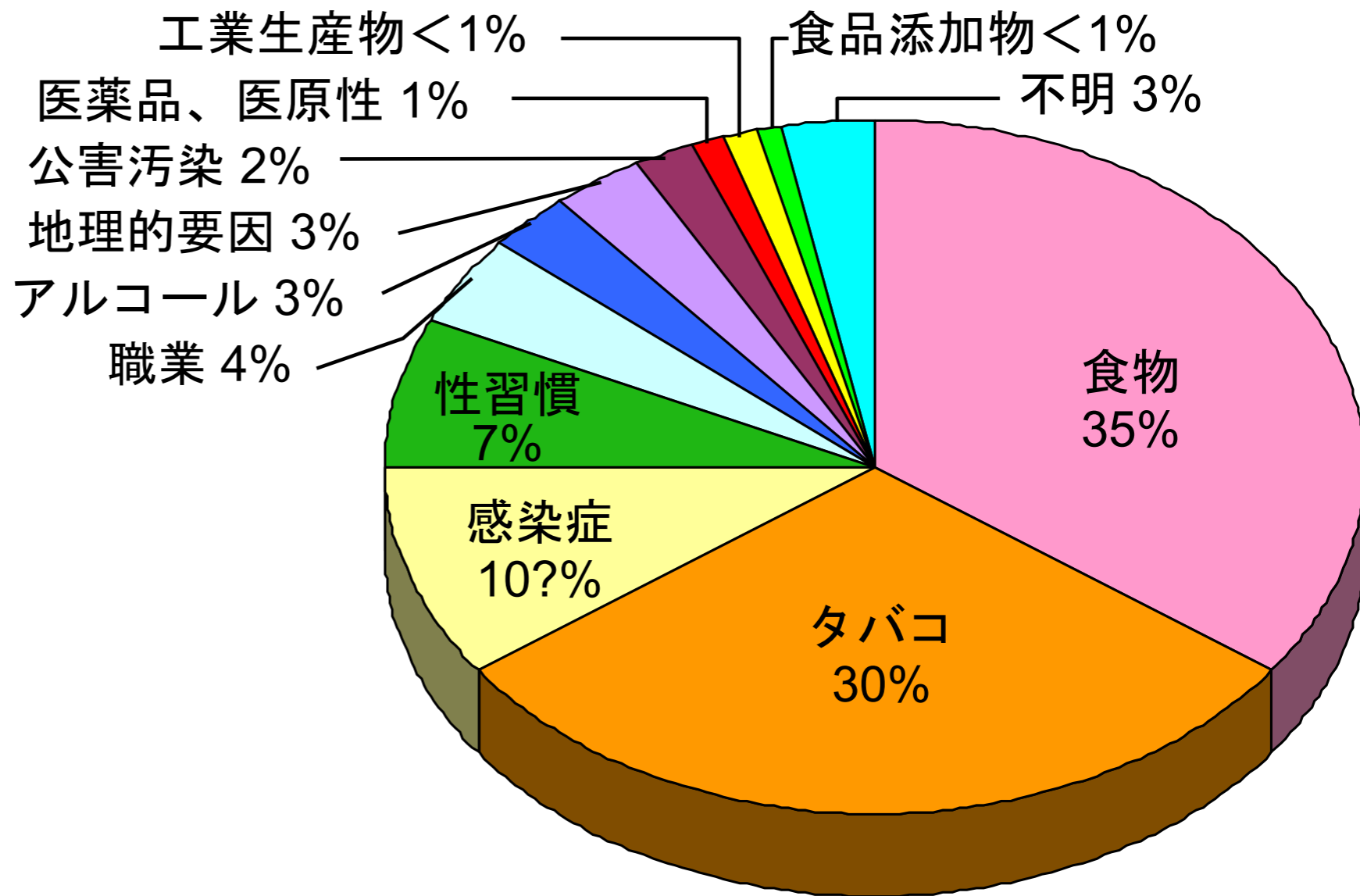
放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

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	
1000~2000ミリシーベルトを浴びる	1.8倍

※網かけは放射線

(注)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

ヒトのがんの原因と関連のある因子



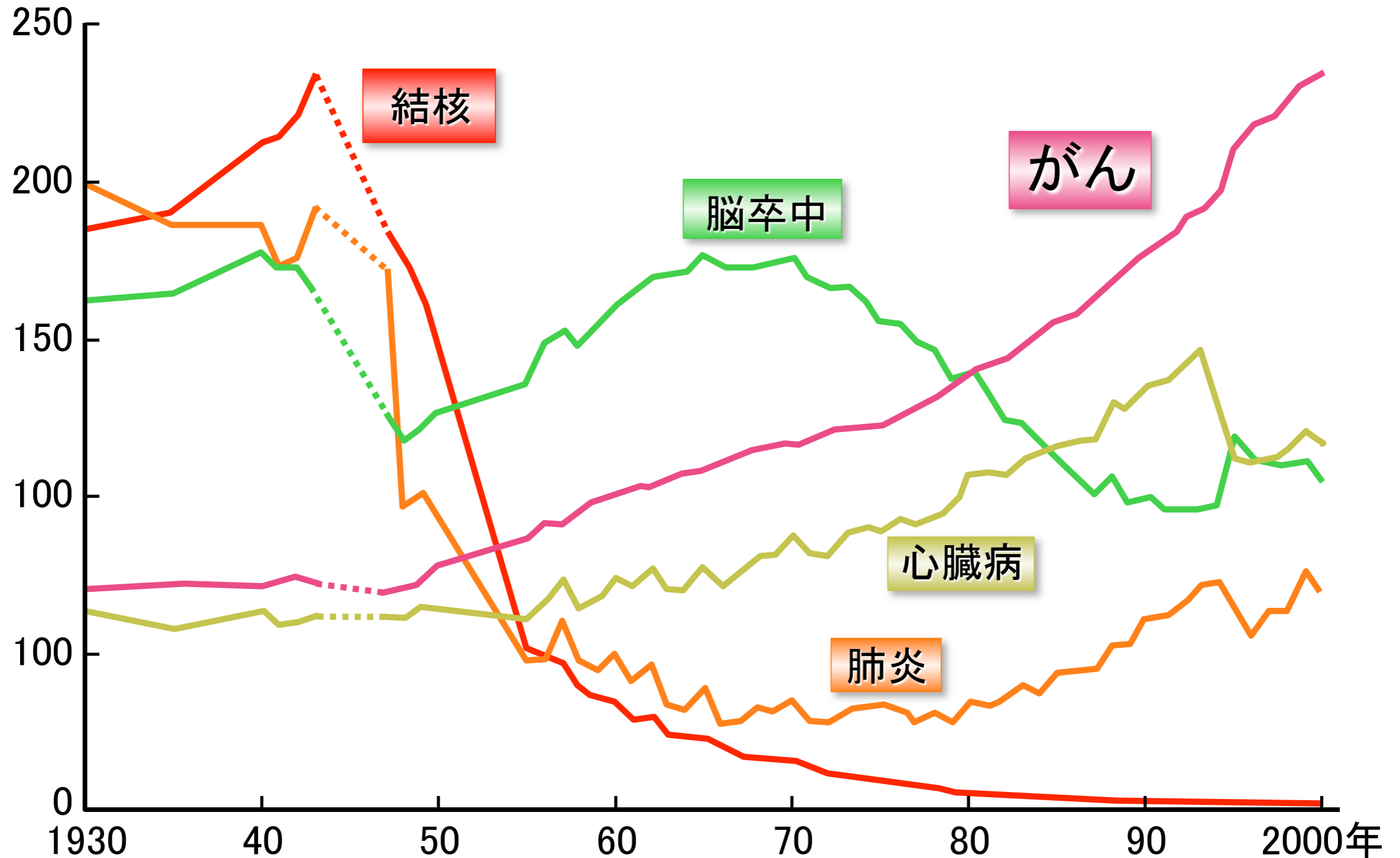
(R.Dool and R.Peto, 1981)

表の値は短時間での被曝の場合。

がん死中にしめる各因子の割合 (%)

(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。)

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

+ なっても、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か
起きなかっ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？）

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

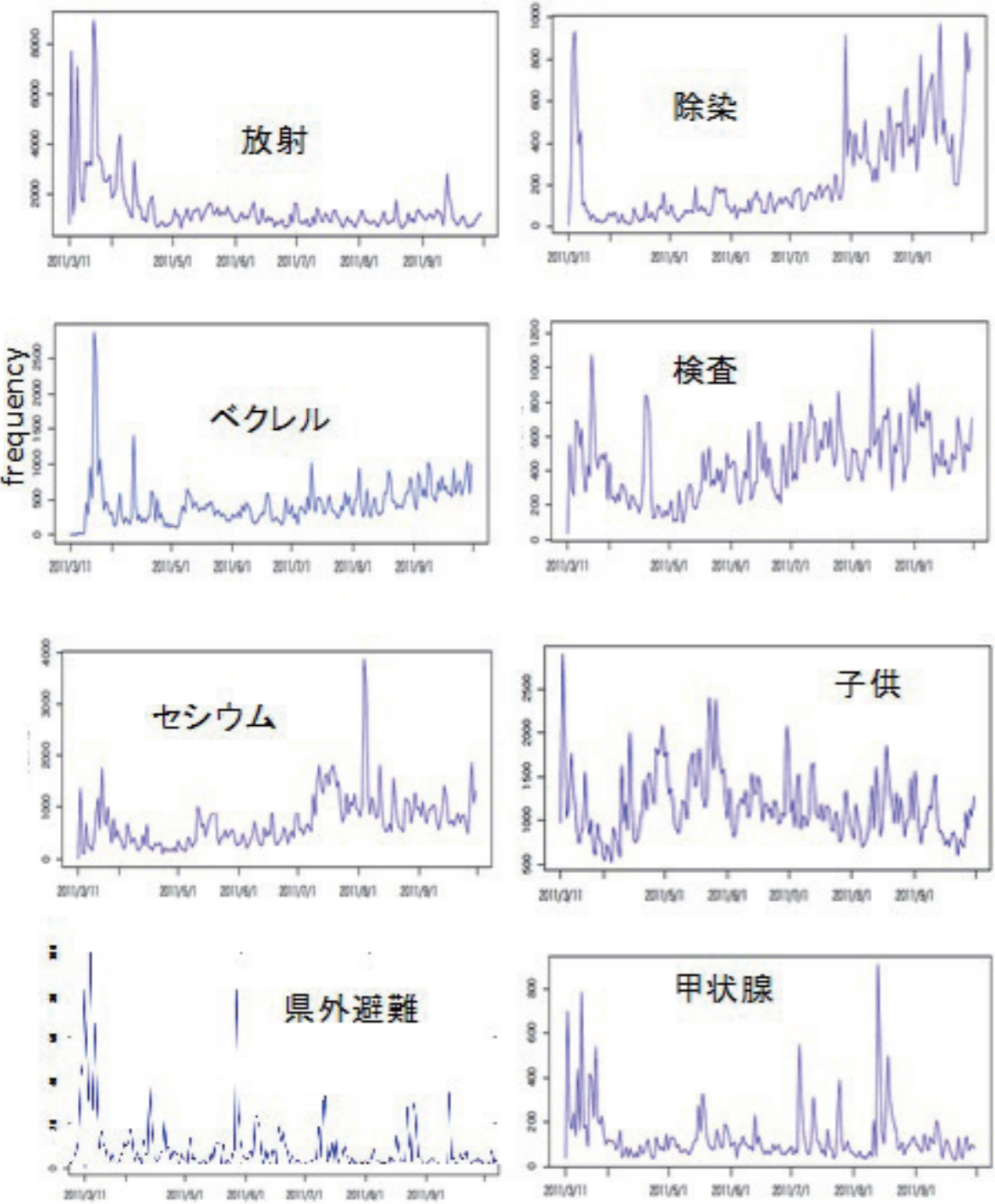
隠蔽体質

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」

3/11 4月 5月 6月 7月 8月 9月

環境省補助金 宇野賀津子・鳥居寛之
原子力災害影響調査等事業
(放射線の健康影響に係る研究調査事業)



原発事故後の twitter データの解析

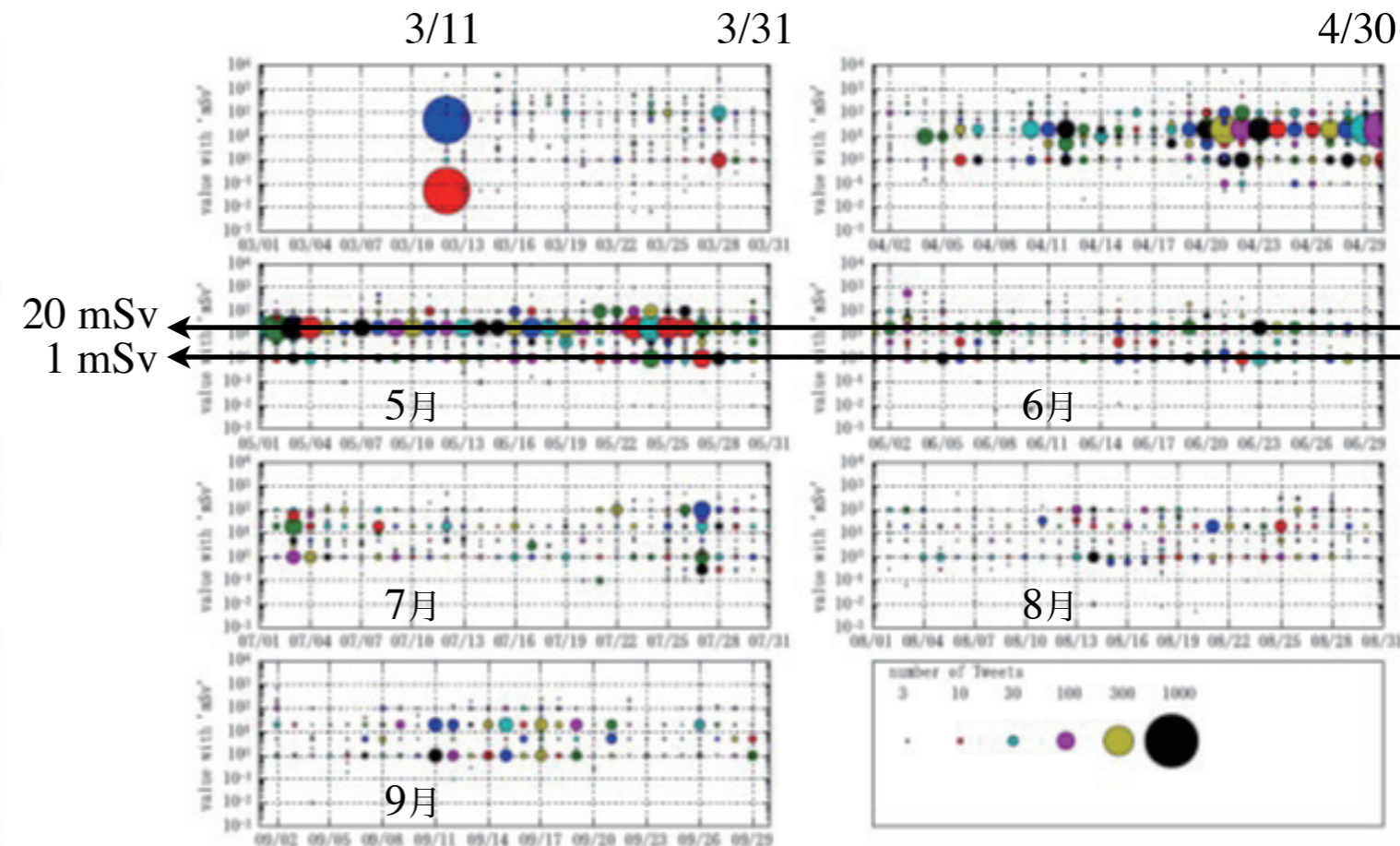


図2 サンプリングされた Twitter データ 500 万件のキーワードの推移

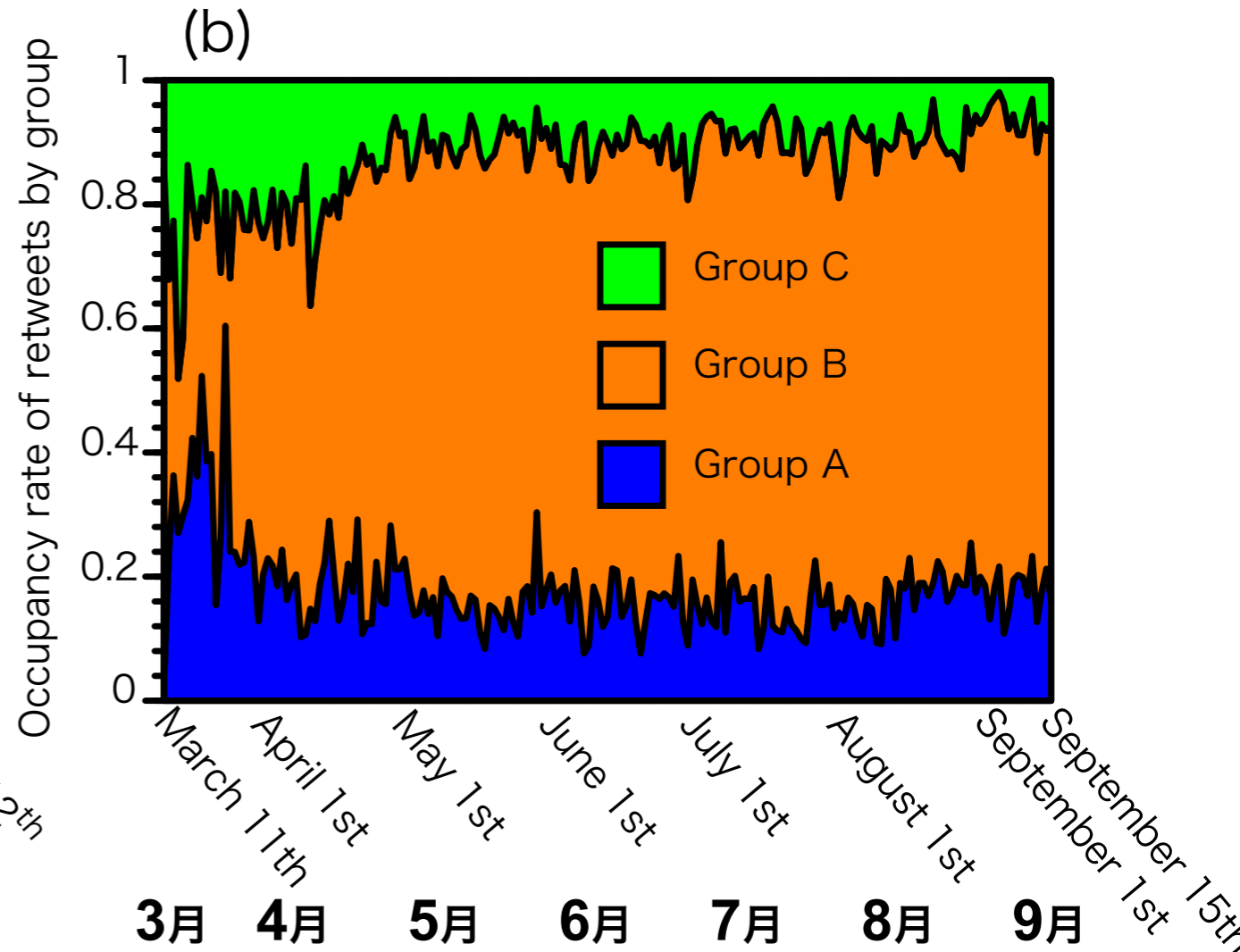
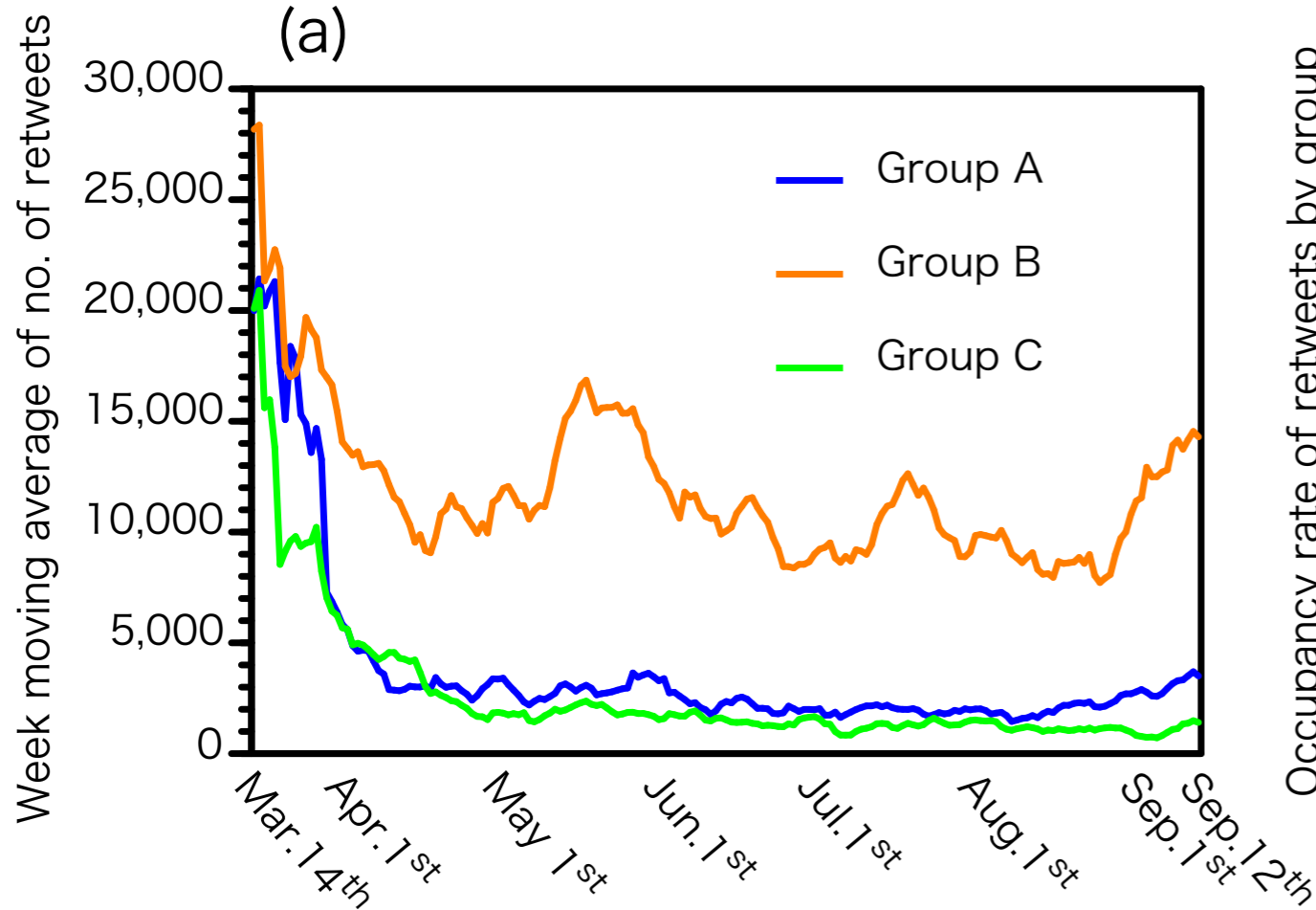
図3 数値と “mSv” が連続して現れる Tweet 数

科学者 vs. 危険派匿名一般人

5866	2011-03-13	【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資が降った。学生だった私はガイガーカウンター
2946	2011-03-24	【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資が降った。学生だった私はガイガーカウンターで人々の
226	2011-03-25	頭髮や衣服などを測定。その数値は、福島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。
220	2011-03-25	ない国際基準は 3000 Bq/kgです。日本の暫定基準値 300 Bq/kg は、国際基準より10倍厳しい。
16	2011-03-25	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陣頭指揮。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、 今後はこちらをご覧ください。 http://bit.ly/fByHZk
1446	2011-03-16	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
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！ 本来なら東
209	2011-09-12	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る！ 子供を甲
159	2011-09-09	状腺ガンにしてまで東電を助けたいのか？
14	2011-09-13	に、ぜひご覧ください。 わずか5分ほどの映像です。これは原発から100キロも離れたキエフでの現実です→ http://t.co/HQ6fSGS
136	2011-09-29	
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「以前はたくさんの方がいたが何かの原因で誰もいなくなってしまった街」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？

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。



2011年 3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月

3月 4月 5月 6月 7月 8月 9月 September 1st September 15th

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.

twitter ネットワーク解析

2011/3 ~ 2012/9

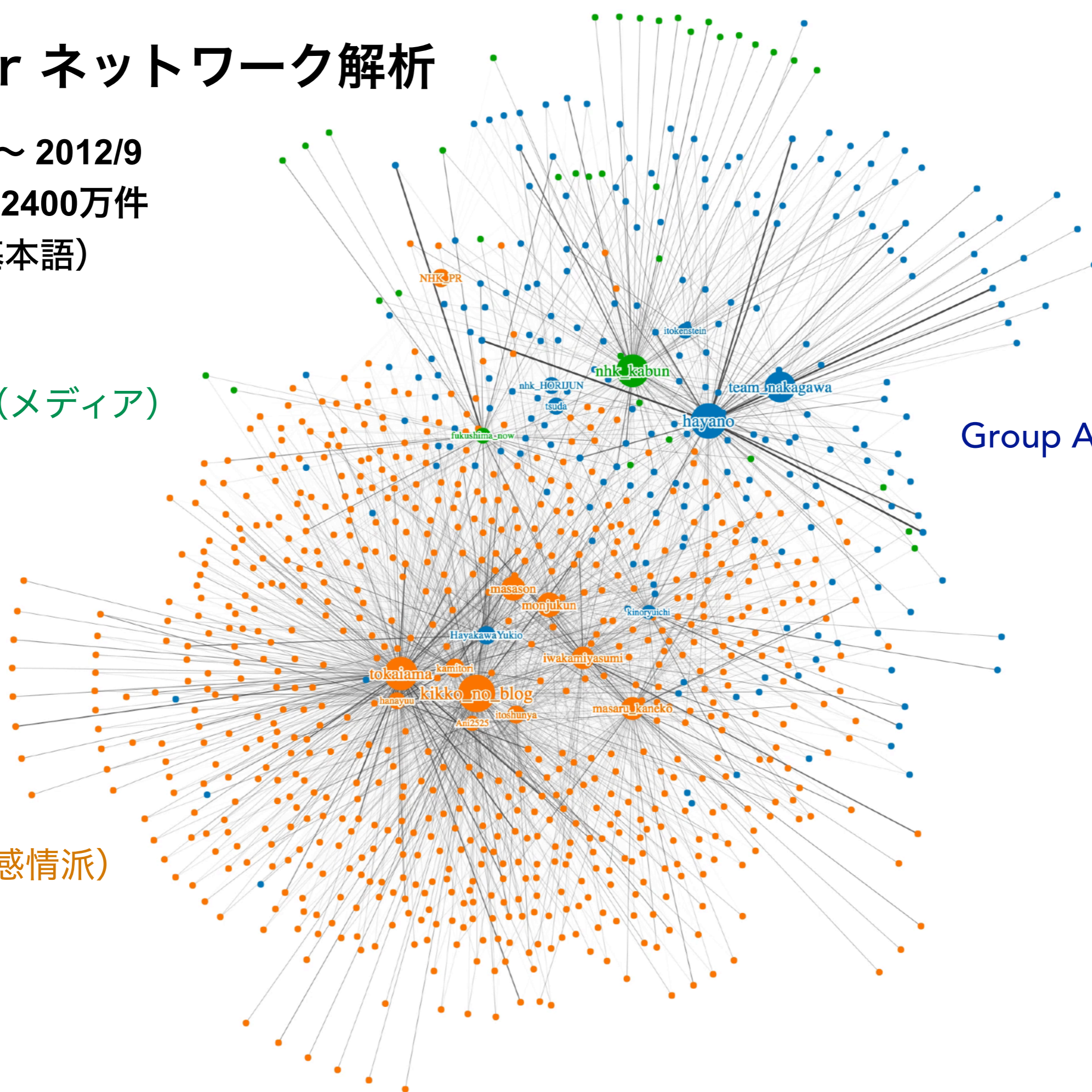
100% = 2400万件

P (基本語)

Group C (メディア)

Group A (科学派)

Group B (感情派)



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。

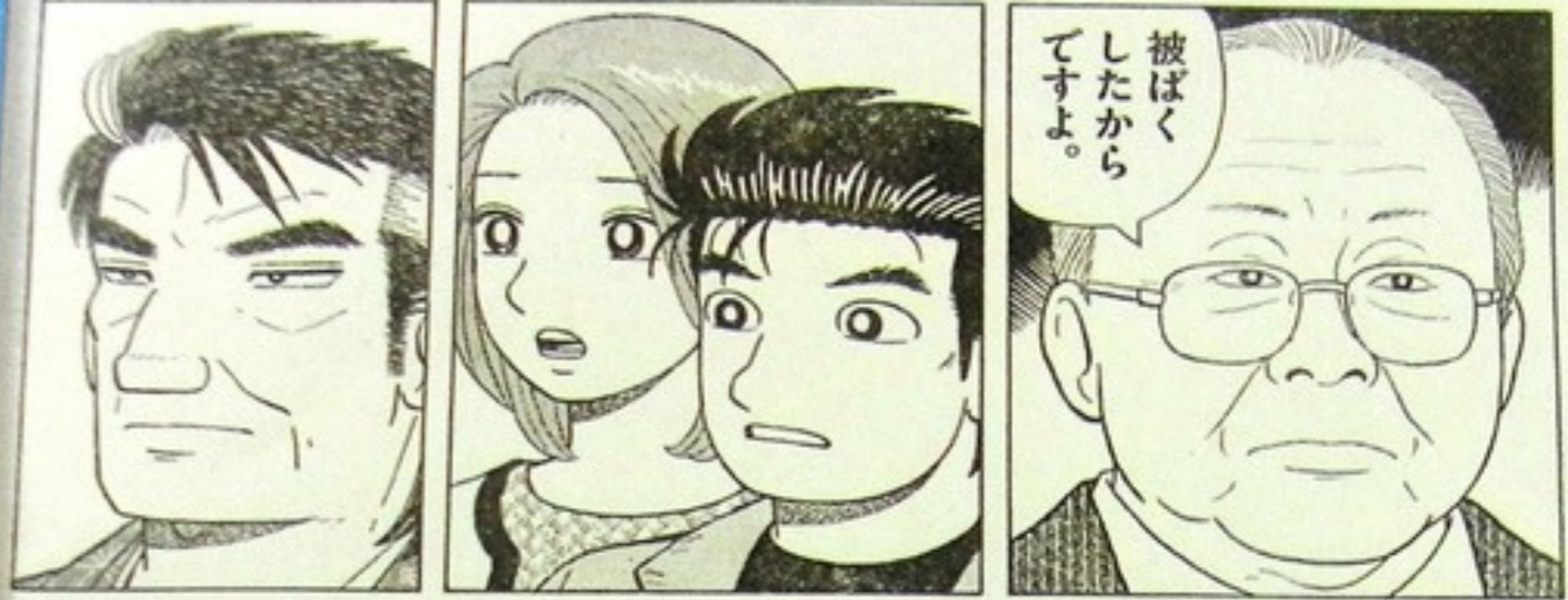
読者自身に判断してもらおうことができない

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

医学研究所所長・松井英介先生が語る福島の実情とは…!!



美味しんぼ



『美味しんぼ』福島の実態編に寄せられたご批判とご意見

弊誌22/23合併号が4月28日に発売されて以降、『美味しんぼ』の内容につきまして、皆様から多くのご批判・ご意見を頂戴しました。福島第一原発の事故は、これからも日本中のすべての人が考え続け、向き合わなければならない問題です。作品内容が提起する問題について、識者や行政の皆様から寄せられたお考えを紹介する、特集記事を掲載させていただきます。頂戴したご意見につきましては、真摯に受け止め、今後の誌面作りに活かしていきたいと思っております。(ビッグコミックスピリッツ編集部)

安齋育郎氏

立命館大学名誉教授
(放射線防護学)

鼻血や倦怠感については、福島の方でそうした症状を心配している方がいるという話は伝わってきています。そして、それが放射線によるものかの議論がある。ただ、原発事故前の鼻血や倦怠感に関する統計データと今を比べなければ、増えているのかどうかはなんとも言えません。具体的な、そういう比較データは承知していません。

こうした症状は「後付けバイアス」によって出ることが知られています。これは心理学用語で、鼻血が出た、疲れたという症状が出た場合、福島で放射線を浴びたからではないかと考える。今、こんなに疲れているのは、きっと福島に行ったせいだろう、などと考えることはよくあることです。そういうふうにいる方が多く現れることはあり得ると思います。が、これは原発事故によるものだと断じるようなものではないでしょう。

放射線の影響が、人々にどういった影響を与えるのか。それは、4つのカテゴリーに分けて考えるべきでしょう。①身体的影響、②遺伝的影響、③心理的影響、④社会的影響です。

このうち、社会的影響というのは、福島に対する差別や偏見、風評被害もそうですし、避難していた人が、これまでかかっていたお医者さんに通えなくなったり、衛生面の変

小出裕章氏

京都大学原子炉実験所
助教(原子核工学)

今も帰れない地域が存在している、危険が存在するという事実を伝える必要はもちろんあります。国や電力会社、大手マスコミがその責任を放棄する、むしろ意図的に伝えないようにしている現状では、そうした活動は大切です。「鼻血」が出ることについては、現在までの科学的な知見では立証できないと思えます。ただし、現在までの科学的な知見では立証できないことであっても、可能性がないとは言えません。科学とは、事実の積み重ねによって進んでいくもので、従来は分からなかったことが少しずつ分かってくるものです。もちろん、心因性の「鼻血」は十分にありうると思います

野呂美加氏

NPO法人「チェルノブイリへのかけはし」代表

私達はチェルノブイリの子どもの達を大病を予防するために、日本へ保養に招待する活動をしてきました(福島原発事故以来は休止しています)。

今、日本で行われている被曝対策は広島・長崎のデータに基づいていますが、チェルノブイリの医師達も、広島の実例は使えないと言っています。特に、低線量内部被曝は、核実験などを頻繁に行っていた旧ソ連の科学者もそこまで被害が悪化すると思っていませんでした。適切で大規模な疫学調査をしなければ、鼻

福島県庁

福島県においては、東日本大震災により地震や津波の被害に遭われた方々、東京電力福島第一原子力発電所事故により避難されている方々など、県内外において、今なお多くの県民が避難生活を余儀なくされている状況にあります。

原発事故による県民の健康面への影響に関しては、国、市町村、医療関係機関、原子放射線の影響に関する国連科学委員会(UNSCEAR)等の国際機関との連携の下、全ての県民を対象とした県民健康調査、甲状腺検査やホルボディカウスター等により、放射性物質による健康面への影響を早期発見する検査体制を徹底しており、これまでにこれらの検査の実施を通して、原発事故により放出された放射性物質に起因する直接的な健康被害が確認されたと例はありません。

蜂須賀禮子氏

元東電福島原発事故調査委員
大熊町商工会会長

主人公の山岡さんは6回福島に入り、1回第一原発の中に入ったというのですが、その程度の放射線量で鼻血が出るというのは、これはあり得ない話です。鼻血が出るほど被曝したとなれば、山岡さんは死んでいるはずですが。どのくらいの知識を持って取材にのぞまれたのか、大変疑問を抱きました。

山田真氏

医師
子どもたちを放射能から守る
全国小児科医ネットワーク代表

私は原発事故後、2011年5月頃から福島に入って健康相談会を行ってきました。その頃から、「鼻血が出る。放射能のせいではないか」という話はあちこちから寄せられていました。多くの方が心配していたのは事実です。ただ、子供が鼻血を出すのは日常のことだから、これを放射線の影響と短絡的に考えるわけにはいきません。

大阪府・大阪市

週刊ビッグコミックスピリッツ
『美味しんぼ』に関する
抗議文

平成26年5月9日付で貴社宛に、「平成26年5月12日発売予定週刊ビッグコミックスピリッツ掲載の『美味しんぼ』の内容の一部訂正」について申し入れを行いました。訂正等の対応をいただけなかったため、次のとおり厳重に抗議いたします。

青木理氏

ジャーナリスト
ノンフィクション作家

メディアは福島原発事故による被害の問題を扱う時、細心の注意を払わなければいけません。現地に今も暮らしている人がいる以上、住民の不安をいたずらに煽る、または県外の人々の不当な偏見を助長するような表現にならないよう慎重を期すべきです。

矢ヶ崎克馬氏

琉球大学名誉教授
(物性物理学)

放射能の健康への影響については、国際的に二つの潮流に分かれています。一つはICRP(国際放射線防護委員会)やIAEA(国際原子力機関)が主張する、放射能の影響は大したことがないという論調。100ミリシーベルトまで問題はなく、チェルノブイリ事故後の健康被害は甲状腺ガンだけというもの。もう一つは、事実をありのままに見つめ、率直に理解する考え方。こちらは、低線量の健康被害を重大視しています。日本政府は、前者のスタン

津田敏秀氏

岡山大学教授
(疫学、環境医学)

チェルノブイリでも福島でも鼻血の訴えは多いことが知られています。(雁屋さんが)実際に対面した人が「鼻血を出した」わけですから、それを描くのは問題ないと思います。「低線量放射線との因果関係をデータとして証明しないかぎり、そのような印象に導く表現をすべきではない」という批判が多いとのことですが、「因果関係がある」という証明はあっても、「因果関係がない」という証明はされていません。

双葉町

小学館への抗議文

平成26年4月28日に貴社発行「スピリッツ」の「美味しんぼ」第604話において、前双葉町長の発言を引用する形で、福島県において原因不明の鼻血等の症状がある人が大勢いると受け取られる表現がありました。双葉町は、福島第一原子力発電所の所在町であり、事故直後から全町避難を強いられておりますが、現

肥田舜太郎氏

医師

私は、原爆投下後の広島で被爆者の治療にあたり、内部被ばくを研究してきた医師として、震災後に日本各地から講演の依頼がありました。そして全国を訪ね歩いたのですが、行く先々でこんな相談を受けたんです。「あまり人には言えないけれど、実はうちの子は鼻血が出て困りました。大丈夫でしょうか」と。鼻血のほか、下痢の症状を訴える人もいました。事故を起こした福島第一原発の放射性物質はアメリカやイギリスにまで拡散したのですから、狭い日本のすみずみまで被害が及んでいてもおかしくありません。

野口邦和氏

日本大学歯学部准教授
(放射線防護学)

福島県内で被曝の原因とする鼻出血(鼻血)が起こることは絶対にありません。ごく短期間に全身が500〜1000ミリシーベルトを超え

風評と風化

東京では放射線の話題は他人事

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題はタブー

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。

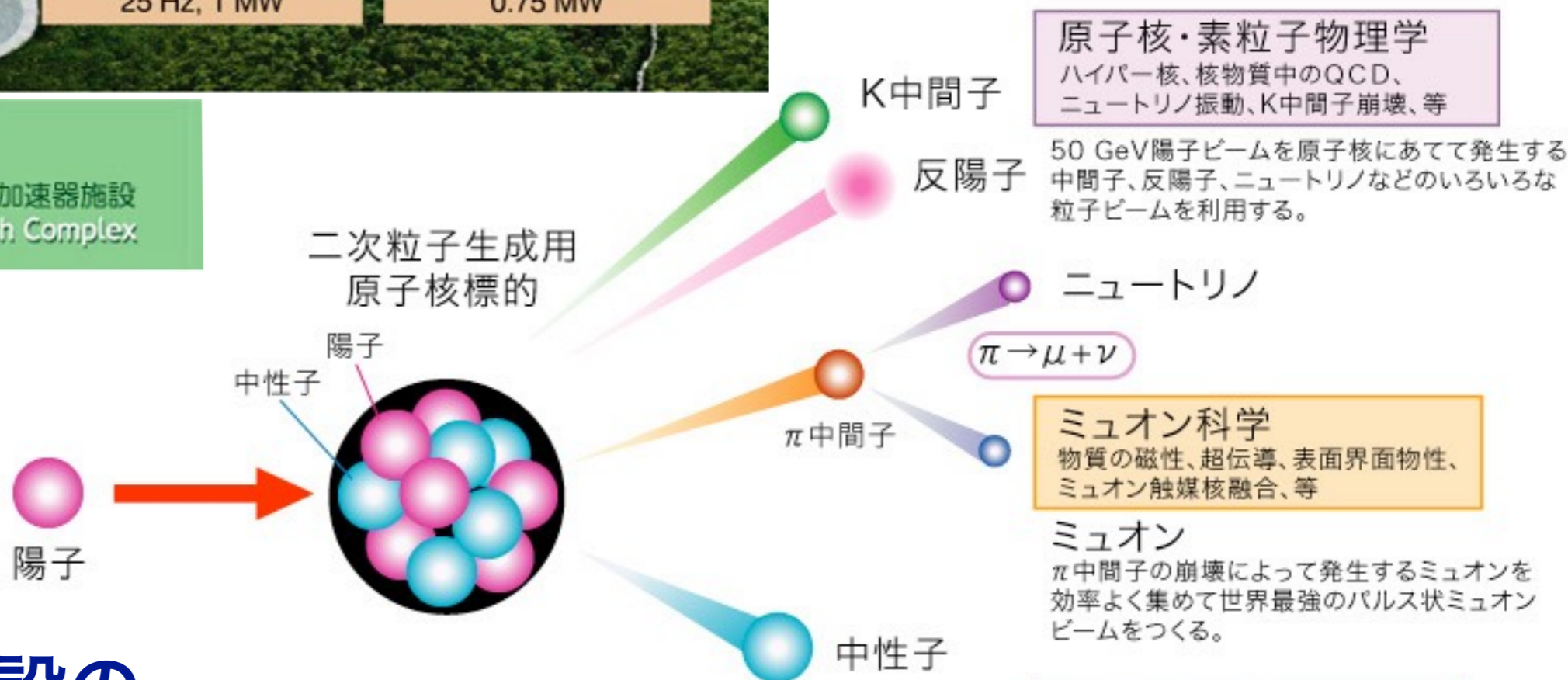
「南相馬はひとつになれない」

放射線の科学的知識を身につけないまま関心が
風化しつつある。



独立行政法人 日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency

J-PARC 大強度陽子加速器施設
Japan Proton Accelerator Research Complex



加速器駆動核変換

リニアックからの陽子ビームを用いて原子力の科学と技術開発を行う。

加速器施設の放射線・放射能管理

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.

Gratias 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

レポート課題 2022

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。

学籍番号、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、生体に与える影響について概説した上で、放射線防護の考え方と、実験研究において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、具体的な社会的事例を参照しつつ、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。

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