



# 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は非常に少ないのが実情です。

本書は東京大学教養学部で行われた講義をもとに、放射線について多角的に学べるよう配慮しています。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。

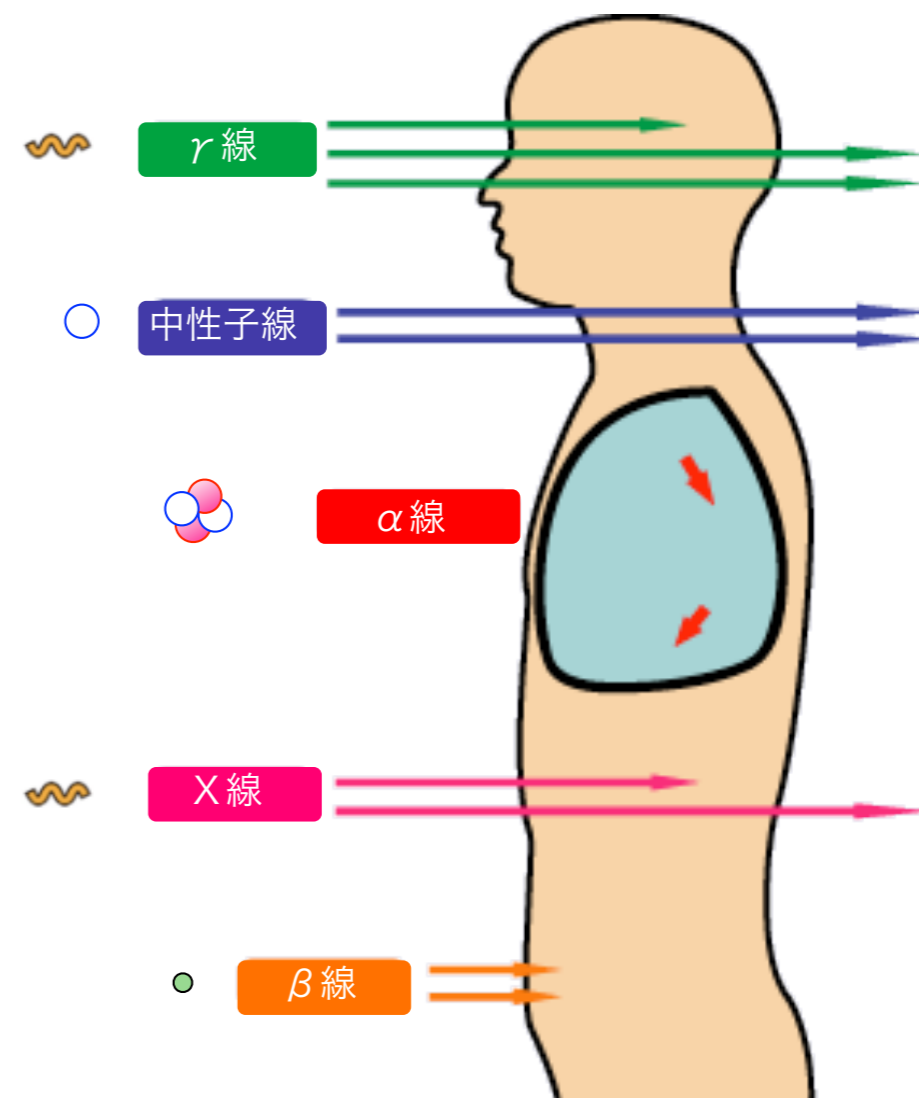
# 放射線

を

科学的に

理解する

東大教養の講義から



2013 / 11 / 8 (金)

鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 放射線

を

科学的に  
理解する

東大教養の講義から

- 放射線入門
- 放射能と放射線の物理学
  - 原子核物理学・放射線物理学
- 環境汚染の放射線計測
  - 放射線計測学・環境放射化学
- 放射線の人体への影響
  - 放射線の単位・放射線化学
  - 放射線生物学・放射線防護学
  - リスクコミュニケーション

2013 / 11 / 8 (金)

鳥居 寛之 (Hiroyuki A. TORII)

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

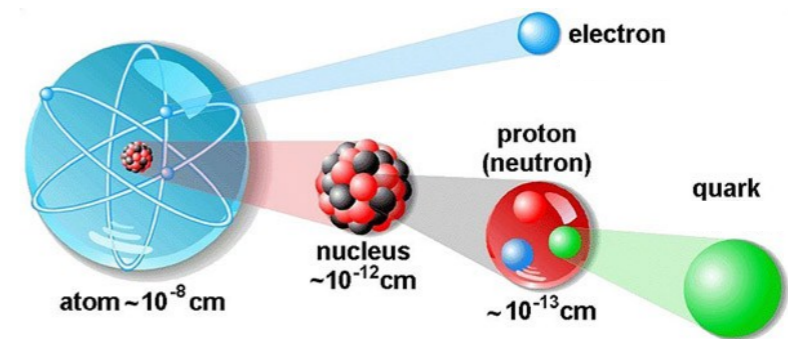
# 東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

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>

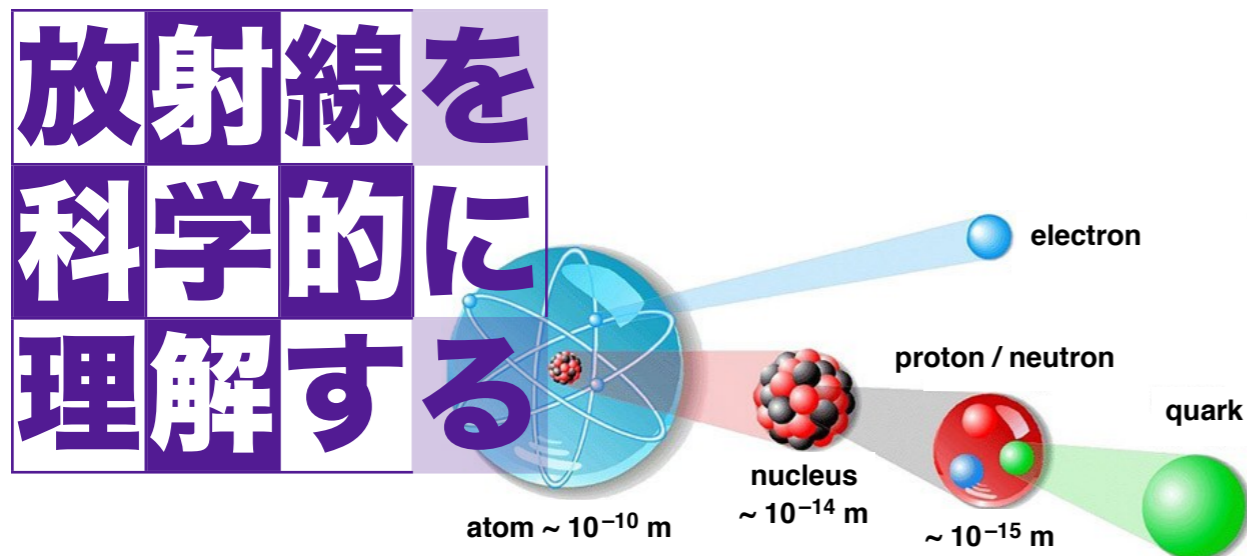
2011年度夏学期  
自主講義

自主講義  
放射線学



2011年度冬学期  
主題科目テーマ講義

2012年度冬学期  
主題科目テーマ講義



# 放射線を科学的に理解する

- 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）、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

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と

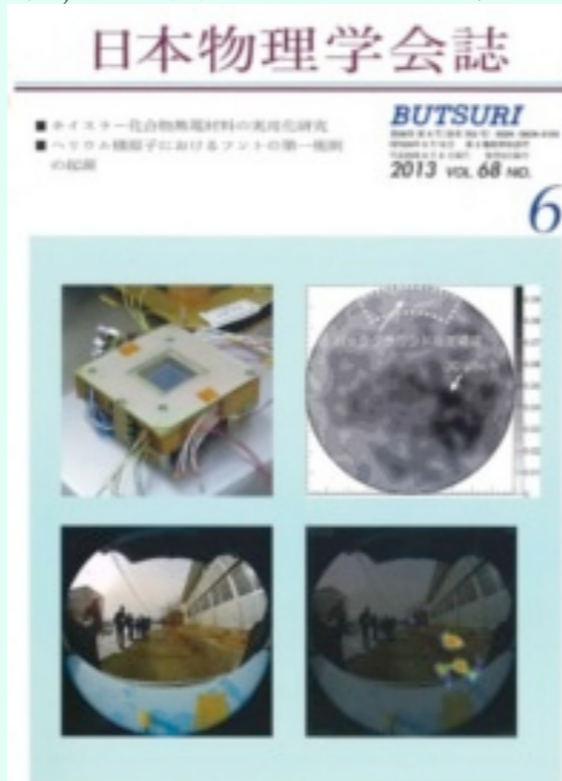


図1 放射線物理学のスライド例と講義風景。



向けていなかったことを反省もしたが、

# 平成 24 年度 放射線取扱主任者試験 受験の手引き

この試験は、「放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（昭和 32 年 6 月 10 日法律第 167 号）」に基づき、登録試験機関である財団法人原子力安全技術センターが行う国家資格試験です。第 1 種及び第 2 種の放射線取扱主任者免状は、放射線取扱主任者試験に合格し、かつ、所定の講習を修了した者に対し、文部科学大臣より交付されます。

## 試験日程 第 1 種放射線取扱主任者試験

平成 24 年 8 月 22 日（水）、23 日（木）

## 第 2 種放射線取扱主任者試験

平成 24 年 8 月 24 日（金）

## 申込受付期間 平成 24 年 5 月 18 日（金）～ 6 月 18 日（月）

郵送の場合、平成 24 年 6 月 18 日の消印まで有効

料金別納及び後納郵便の場合、平成 24 年 6 月 18 日到着分まで有効

試験会場 札幌会場 [東海大学 札幌キャンパス]

仙台会場 [東北学院大学]

東京会場 [成蹊大学]

名古屋会場 [名城大学 八事キャンパス]

大阪会場 [大阪商業大学]

福岡会場 [九州大学 箱崎キャンパス]

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



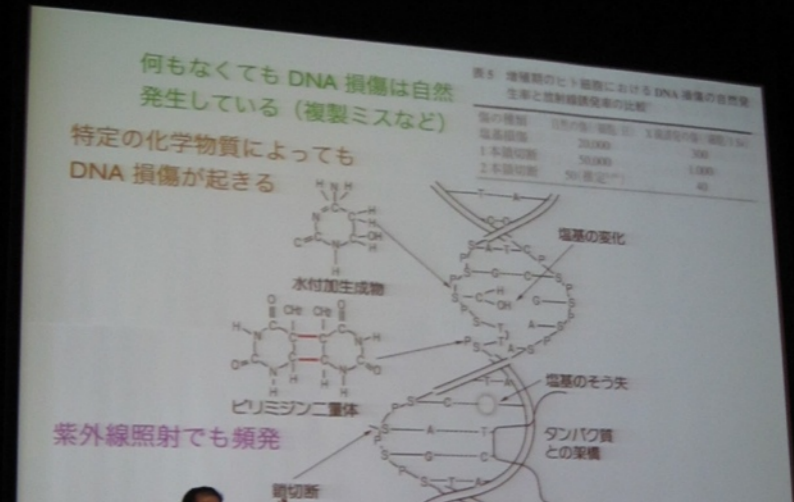
講義 1 時間



# 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—



## 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



# 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。」

「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

科学的に

理解する

東大教養の講義から

- 放射線入門
- 放射能と放射線の物理学
  - 原子核物理学・放射線物理学
- 環境汚染の放射線計測
  - 放射線計測学・環境放射化学
- 放射線の人体への影響
  - 放射線の単位・放射線化学
  - 放射線生物学・放射線防護学
  - リスクコミュニケーション

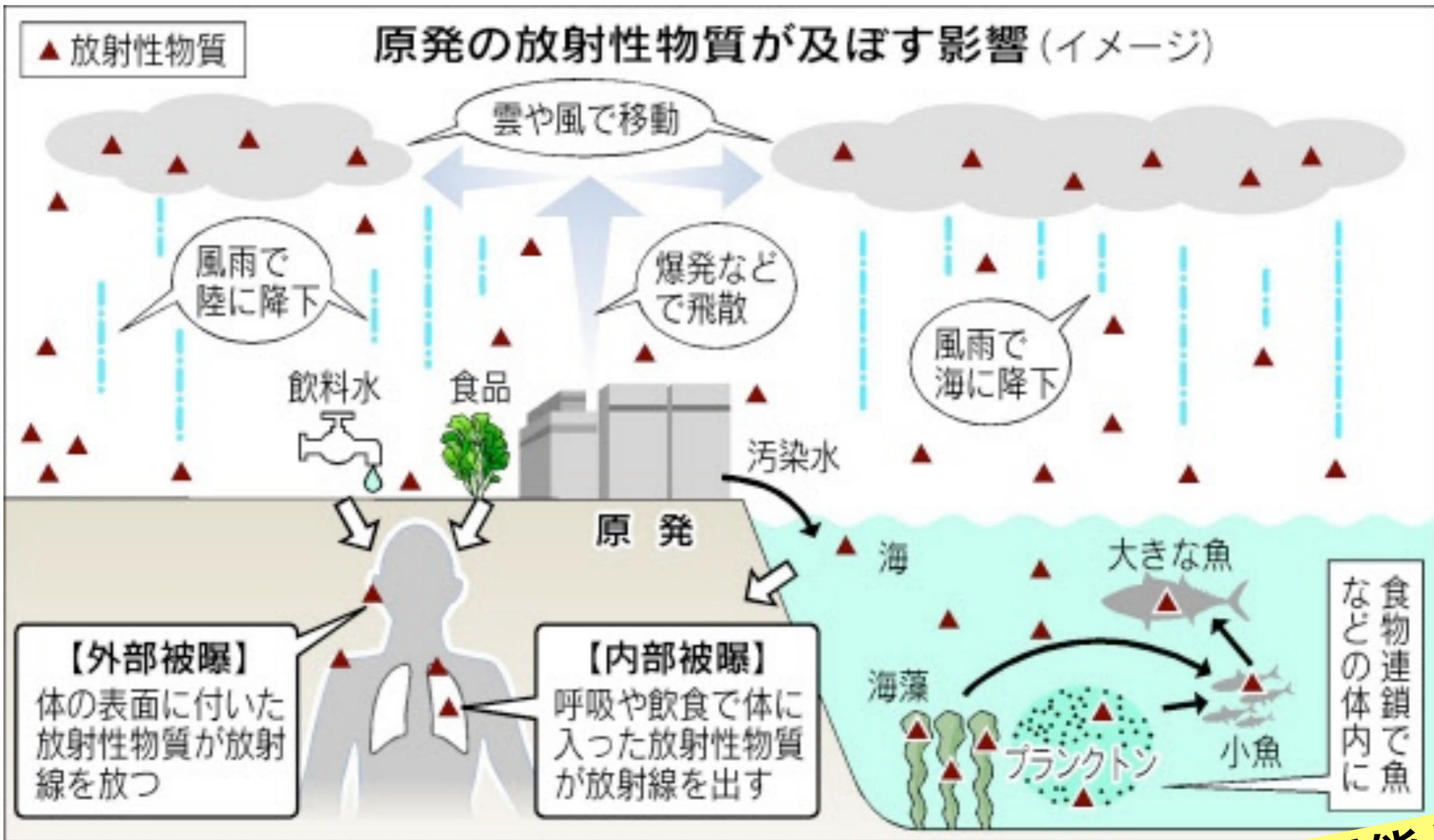
第1話

## 放射線入門

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

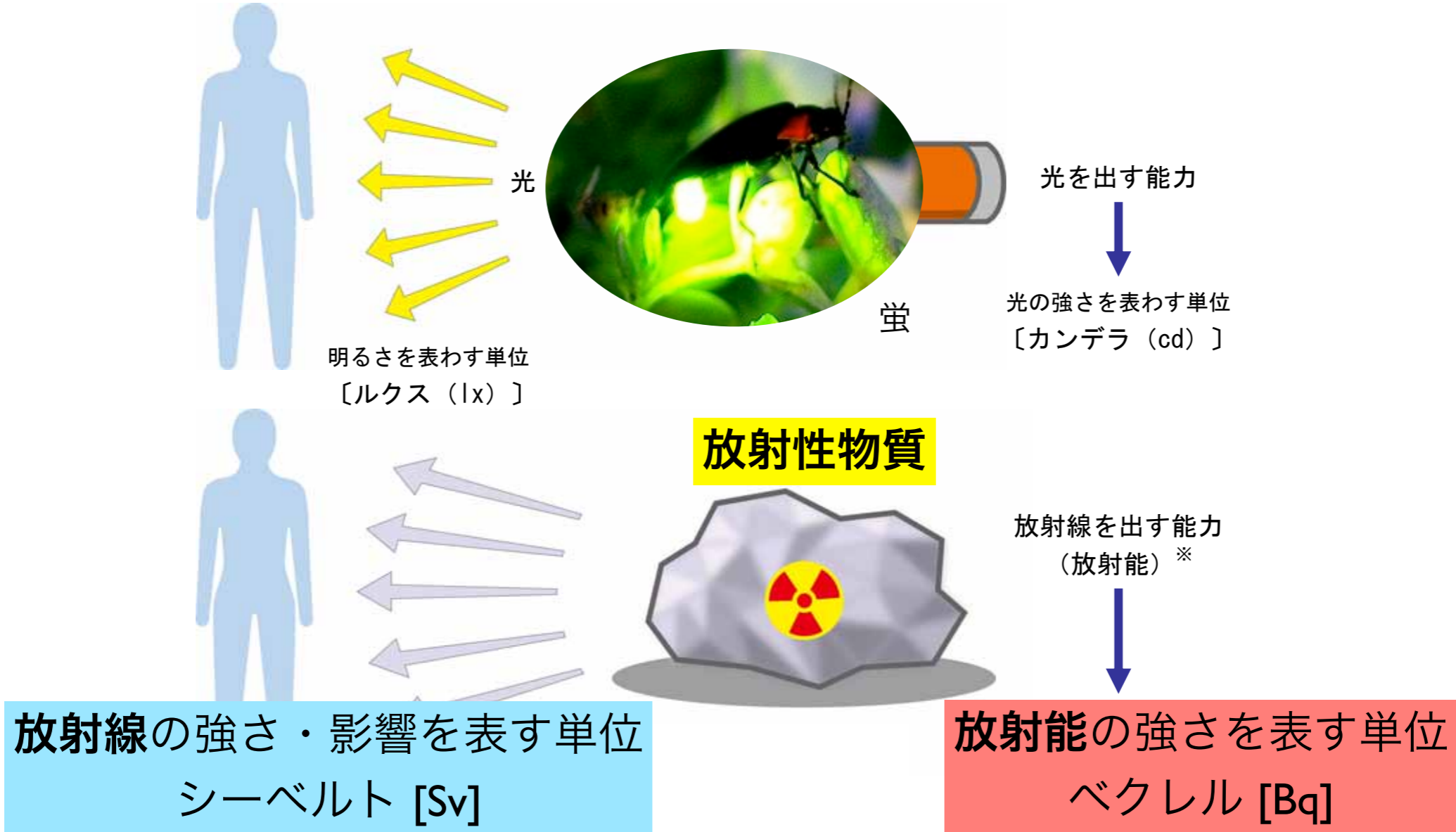
**放射線**  
**放射能**  
**放射性物質**



放射性物質が関東地方まで飛来。  
放射線が直接関東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



6-1

出典：資源エネルギー庁「原子力2010」



## 放射能 (radioactivity) の単位

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





# 自然放射線



# 身の周りの放射線

mSv (実効線量)



ブラジル・ガラバリの放射線  
(年間、大地等から) 10

放射線の量  
(ミリシーベルト)

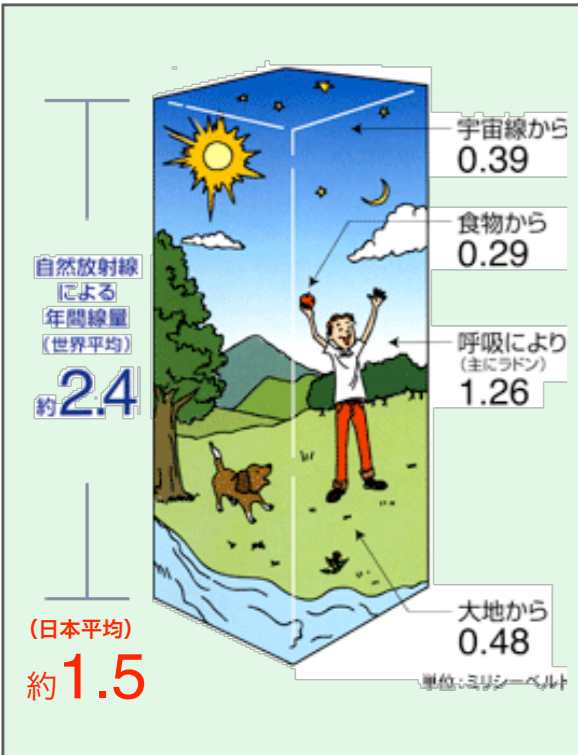
10

胸部X線コンピュータ断層  
撮影検査(CT スキャン)(1回) ★



6.9

(日本平均)



1人あたりの自然放射線(年間)(世界平均) 2.4 ★

1

一般公衆の線量限度(年間)(医療は除く) 1.0



岐阜 ↔ 神奈川



0.4

国内自然放射線の差(年間)(県別平均値の差の最大) 0.38

胃のX線集団検診(1回) 0.6



東京ーニューヨーク航空機旅行(往復)(高度による宇宙線の増加) 0.2



0.1



胸のX線集団検診(1回) ★

再処理工場からの放射性物質の放出による評価値(年間) 0.022

0.05



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)

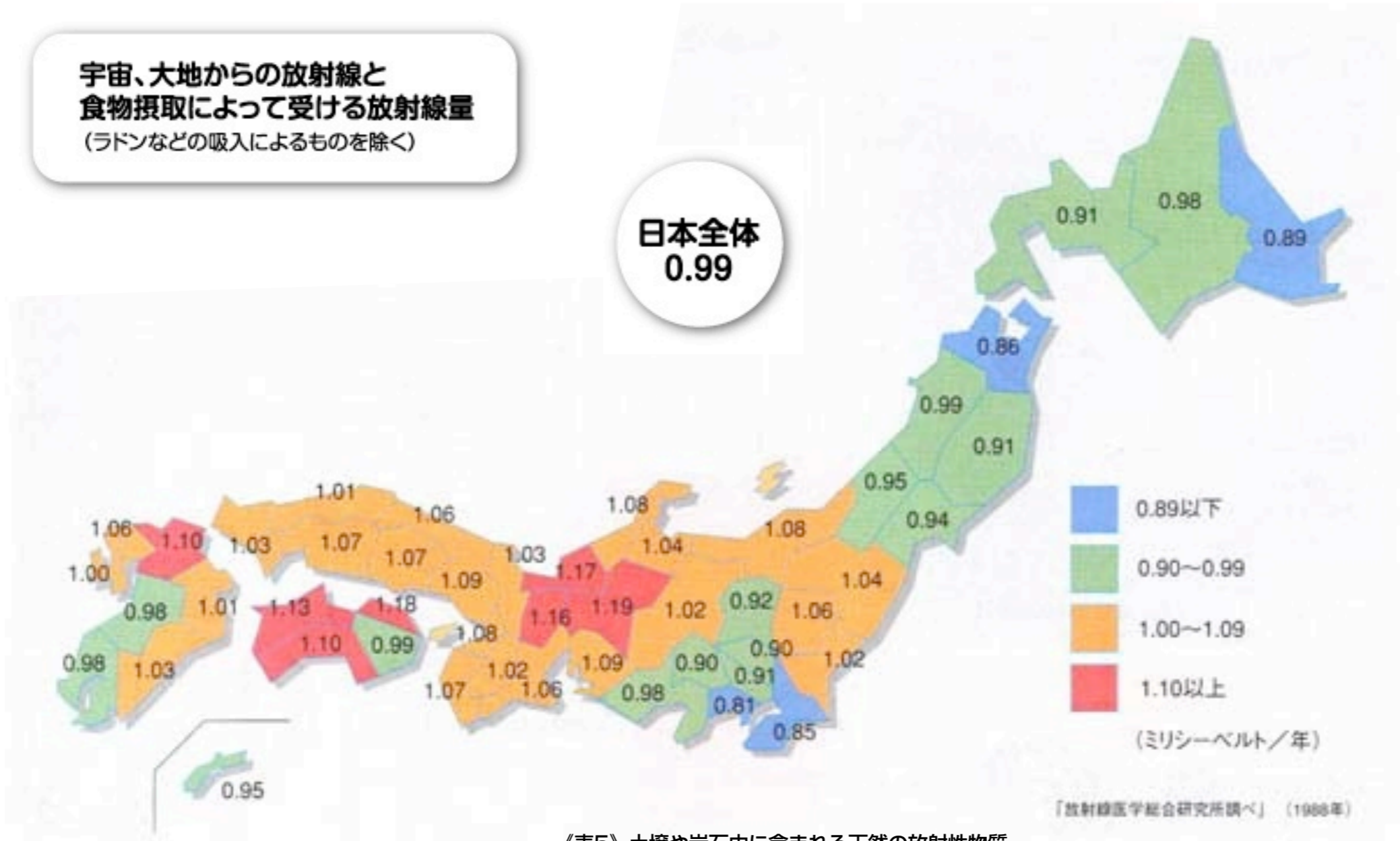
クリアランスレベル導出の線量目安値(年間) 0.01

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)

日本全体  
0.99



《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

出典：国連放射線影響科学委員会報告 (1982) など

# 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

関東ローム層

《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

出典：国連放射線影響科学委員会報告 (1982) など

緑医学総合研究所調べ (1988年)

mSv/年

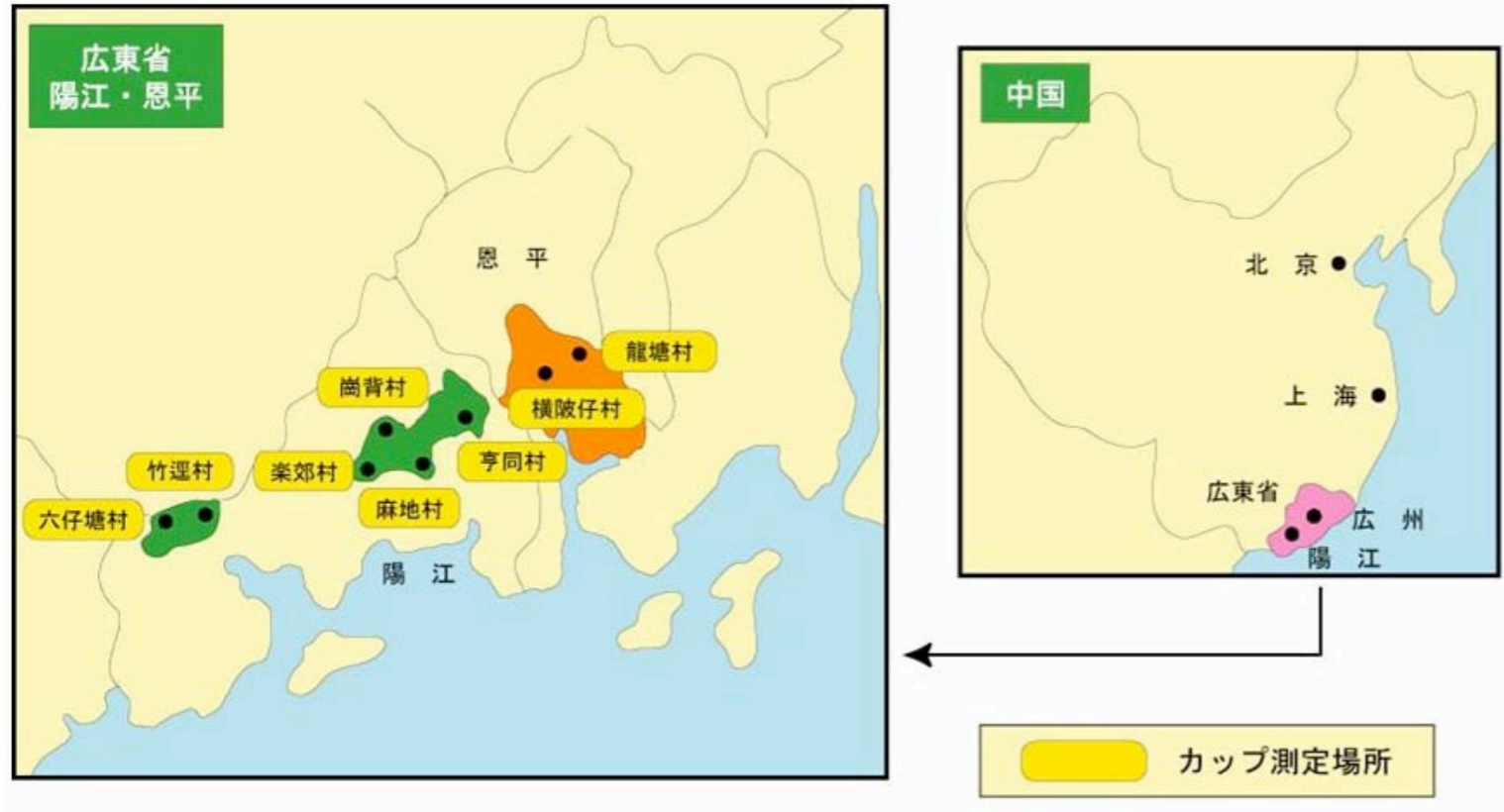
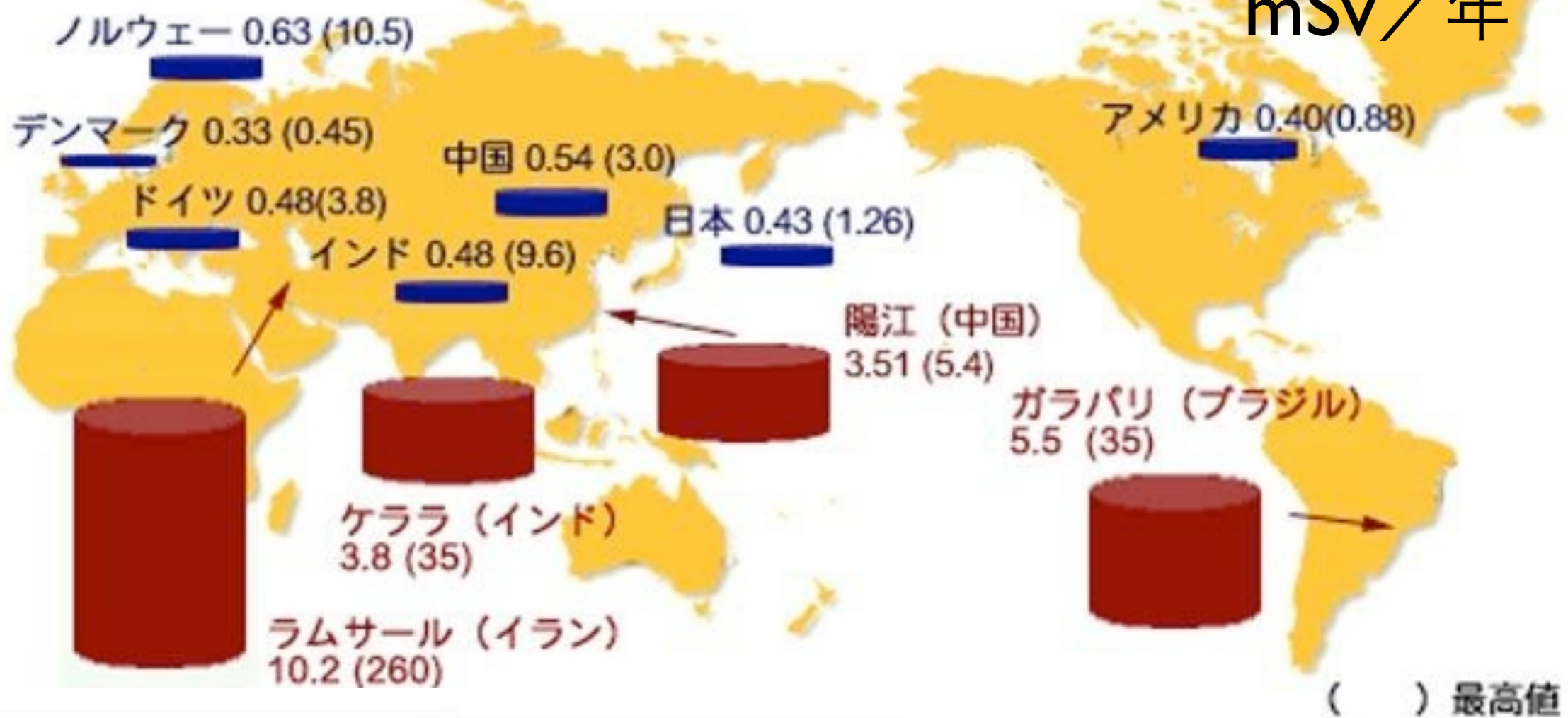
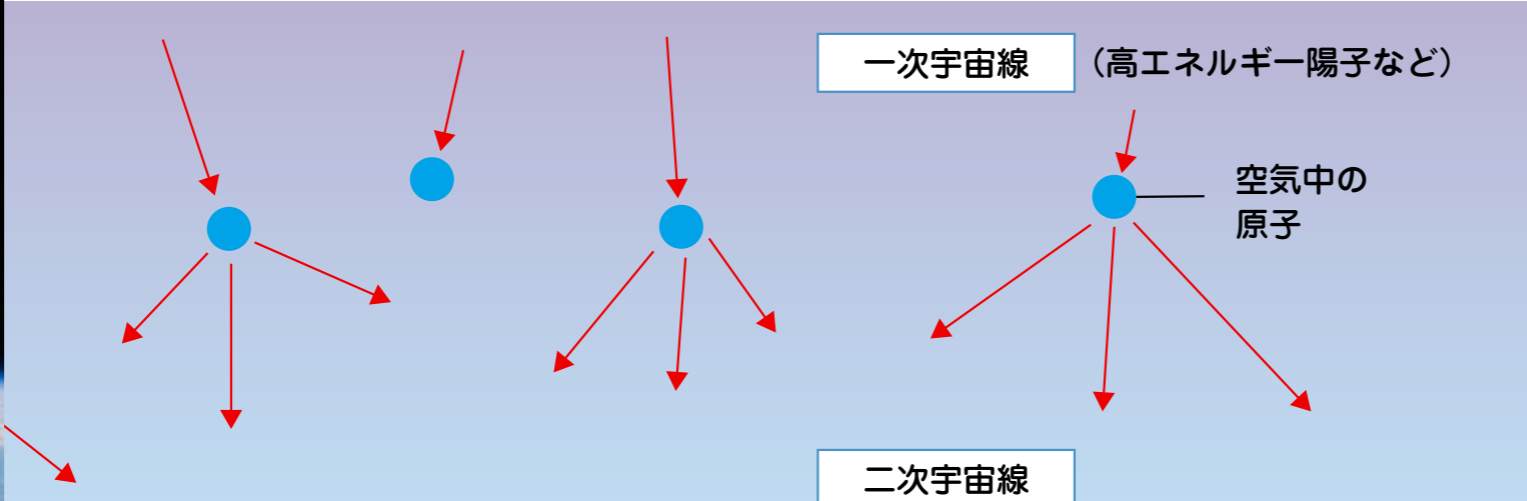


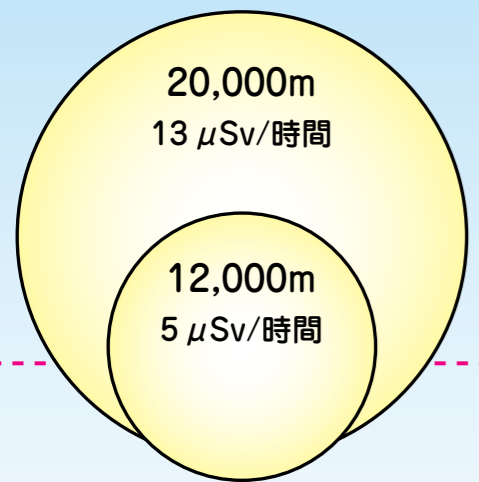
表1 高自然放射線地区と対照地区におけるがん死亡率の比較<sup>7,8)</sup>

	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



※○の大きさは、放射線を受ける量をあらわしている。



4,000m ○ 0.2  $\mu$ Sv/時間

2,000m ○ 0.1  $\mu$ Sv/時間

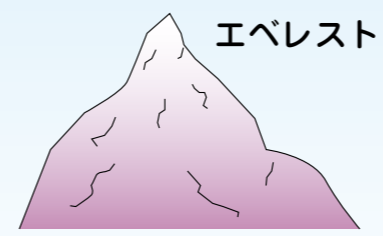
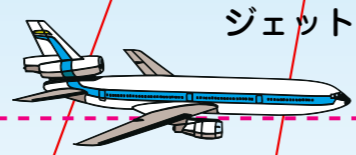
海面 ○ 0.03  $\mu$ Sv/時間

$\mu$ Sv = マイクロシーベルト

100km

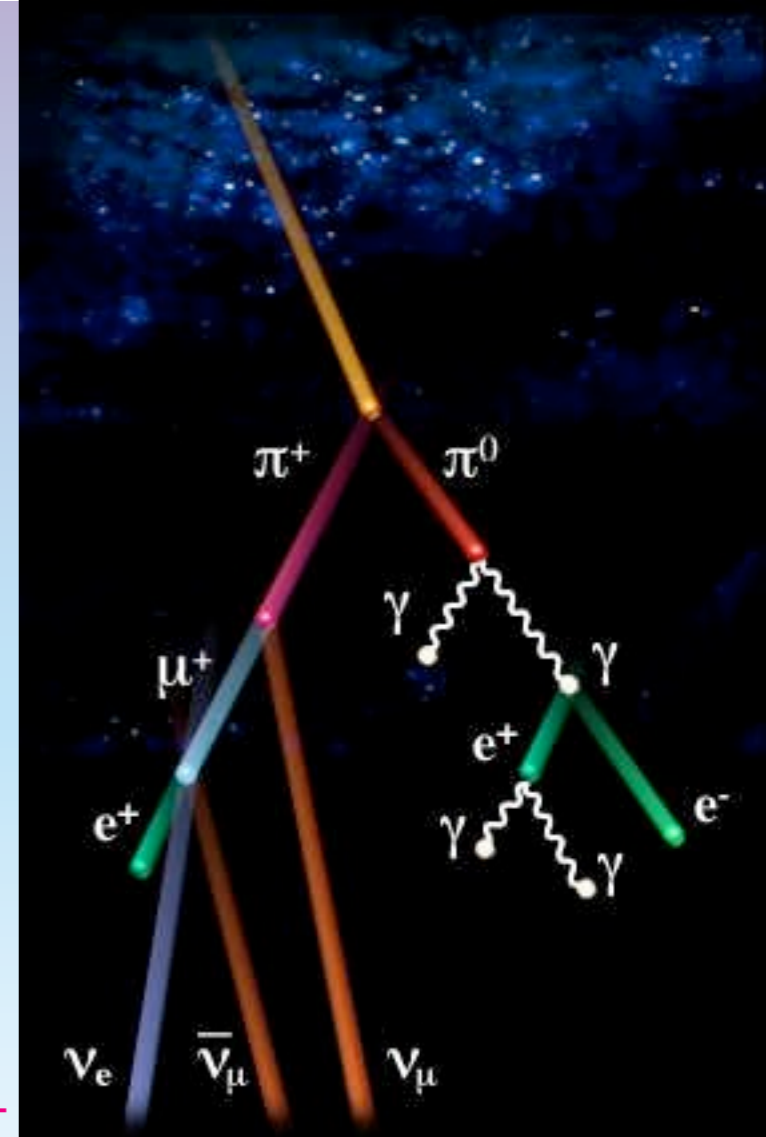
10km

1km



《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 ( $\mu$ Sv)		
			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



東京～NY 往復  
200  $\mu$ Sv (max)

出典：国連放射線影響科学委員会報告 (1993)

# 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

●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

$^{40}\text{K}$   
 同位体比 0.012%  
 半減期 13億年

$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} (\text{EC}\gamma) \quad 11\%$   
 $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} (\beta^-) \quad 89\%$

毎日カリウム 3 g =  $^{40}\text{K}$  を 80 Bq 摂取。同量を排泄。



# 放射線

科学的に

理解する

東大教養の講義から

- 放射線入門
- 放射能と放射線の物理学
  - 原子核物理学・放射線物理学
- 環境汚染の放射線計測
  - 放射線計測学・環境放射化学
- 放射線の人体への影響
  - 放射線の単位・放射線化学
  - 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2話

## 放射能と放射線の物理学

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 原子核物理学





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

# 周期表

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18																																
1	1 <b>H</b> 1.0079	Atomic Sym Mass																2 <b>He</b> 4.0026																																
2	3 <b>Li</b> 6.941	4 <b>Be</b> 9.0121	<table border="1"> <tr> <td><b>C</b> 固体</td> <td colspan="5">金属</td> <td colspan="2">非金属元素</td> </tr> <tr> <td><b>Hg</b> 液体</td> <td>アルカリ金属</td> <td>アルカリ土類金属</td> <td>ランタノイド</td> <td>遷移元素</td> <td>卑金属</td> <td>非金属元素</td> <td>希ガス</td> </tr> <tr> <td><b>H</b> 気体</td> <td></td> <td></td> <td>アクチノイド</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td><b>Rf</b> Unknown</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>										<b>C</b> 固体	金属					非金属元素		<b>Hg</b> 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス	<b>H</b> 気体			アクチノイド					<b>Rf</b> Unknown								5 <b>B</b> 10.811	6 <b>C</b> 12.010	7 <b>N</b> 14.006	8 <b>O</b> 15.999	9 <b>F</b> 18.998	10 <b>Ne</b> 20.179
<b>C</b> 固体	金属					非金属元素																																												
<b>Hg</b> 液体	アルカリ金属	アルカリ土類金属	ランタノイド	遷移元素	卑金属	非金属元素	希ガス																																											
<b>H</b> 気体			アクチノイド																																															
<b>Rf</b> Unknown																																																		
3	11 <b>Na</b> 22.989	12 <b>Mg</b> 24.305											13 <b>Al</b> 26.981	14 <b>Si</b> 28.085	15 <b>P</b> 30.973	16 <b>S</b> 32.065	17 <b>Cl</b> 35.453	18 <b>Ar</b> 39.948																																
4	19 <b>K</b> 39.098	20 <b>Ca</b> 40.078	21 <b>Sc</b> 44.955	22 <b>Ti</b> 47.867	23 <b>V</b> 50.941	24 <b>Cr</b> 51.996	25 <b>Mn</b> 54.938	26 <b>Fe</b> 55.845	27 <b>Co</b> 58.933	28 <b>Ni</b> 58.693	29 <b>Cu</b> 63.546	30 <b>Zn</b> 65.38	31 <b>Ga</b> 69.723	32 <b>Ge</b> 72.64	33 <b>As</b> 74.921	34 <b>Se</b> 78.96	35 <b>Br</b> 79.904	36 <b>Kr</b> 83.798																																
5	37 <b>Rb</b> 85.467	38 <b>Sr</b> 87.62	39 <b>Y</b> 88.905	40 <b>Zr</b> 91.224	41 <b>Nb</b> 92.906	42 <b>Mo</b> 95.96	43 <b>Tc</b> (97.907)	44 <b>Ru</b> 101.07	45 <b>Rh</b> 102.90	46 <b>Pd</b> 106.42	47 <b>Ag</b> 107.86	48 <b>Cd</b> 112.41	49 <b>In</b> 114.81	50 <b>Sn</b> 118.71	51 <b>Sb</b> 121.76	52 <b>Te</b> 127.60	53 <b>I</b> 126.90	54 <b>Xe</b> 131.29																																
6	55 <b>Cs</b> 132.90	56 <b>Ba</b> 137.32	57-71	72 <b>Hf</b> 178.49	73 <b>Ta</b> 180.94	74 <b>W</b> 183.84	75 <b>Re</b> 186.20	76 <b>Os</b> 190.23	77 <b>Ir</b> 192.21	78 <b>Pt</b> 195.08	79 <b>Au</b> 196.96	80 <b>Hg</b> 200.59	81 <b>Tl</b> 204.38	82 <b>Pb</b> 207.2	83 <b>Bi</b> 208.98	84 <b>Po</b> (208.98)	85 <b>At</b> (209.98)	86 <b>Rn</b> (222.01)																																
7	87 <b>Fr</b> (223)	88 <b>Ra</b> (226)	89-103	104 <b>Rf</b> (261)	105 <b>Db</b> (262)	106 <b>Sg</b> (266)	107 <b>Bh</b> (264)	108 <b>Hs</b> (277)	109 <b>Mt</b> (268)	110 <b>Ds</b> (271)	111 <b>Rg</b> (272)	112 <b>Cn</b> (285)	113 <b>Uut</b> (284)	114 <b>Fl</b> (289)	115 <b>Uup</b> (288)	116 <b>Lv</b> (292)	117 <b>Uus</b>	118 <b>Uuo</b> (294)																																

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

周期表 Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah. <http://www.ptable.com/> Last updated: May 30, 2008

57 <b>La</b> 138.90	58 <b>Ce</b> 140.11	59 <b>Pr</b> 140.90	60 <b>Nd</b> 144.24	61 <b>Pm</b> (145)	62 <b>Sm</b> 150.36	63 <b>Eu</b> 151.96	64 <b>Gd</b> 157.25	65 <b>Tb</b> 158.92	66 <b>Dy</b> 162.50	67 <b>Ho</b> 164.93	68 <b>Er</b> 167.25	69 <b>Tm</b> 168.93	70 <b>Yb</b> 173.05	71 <b>Lu</b> 174.96
89 <b>Ac</b> (227)	90 <b>Th</b> 232.03	91 <b>Pa</b> 231.03	92 <b>U</b> 238.02	93 <b>Np</b> (237)	94 <b>Pu</b> (244)	95 <b>Am</b> (243)	96 <b>Cm</b> (247)	97 <b>Bk</b> (247)	98 <b>Cf</b> (251)	99 <b>Es</b> (252)	100 <b>Fm</b> (257)	101 <b>Md</b> (258)	102 <b>No</b> (259)	103 <b>Lr</b> (262)

# 放射性物質とは

放射性核種  
= 放射性同位体  
= 不安定原子核

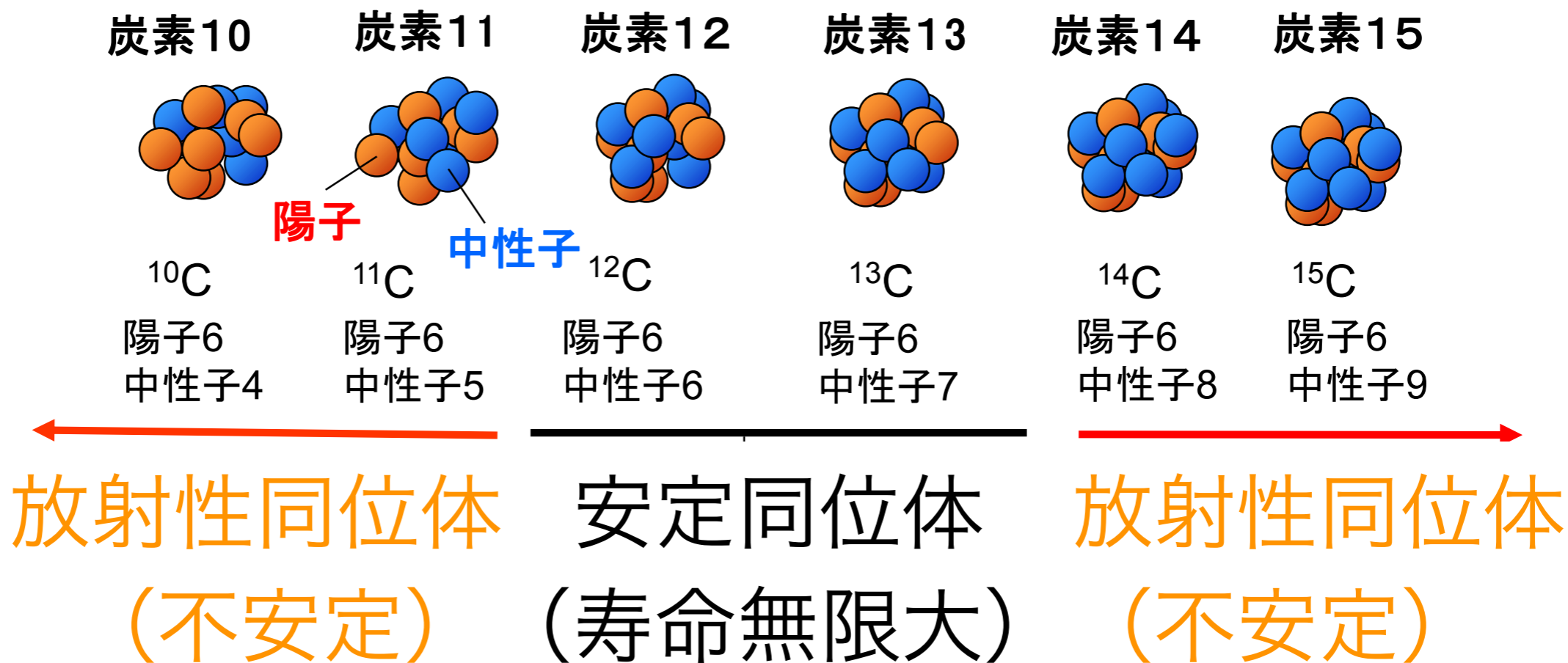
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$



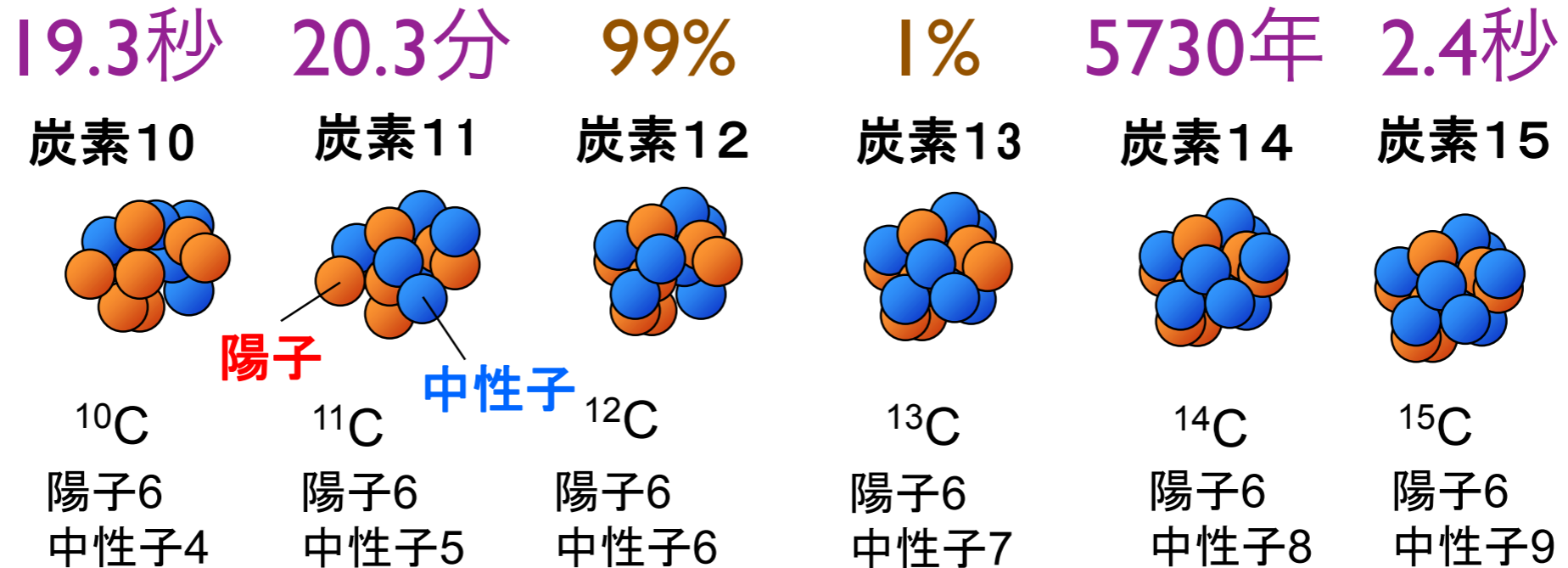
陽子数  $Z$  が同じなら化学的には同じ元素  
中性子数  $N$  が違う原子核が多種存在する

炭素原子核の例



# 同位体(原子番号(=陽子数)は同じで中性子数が異なる**原子核**)

同位体間では化学的性質は同じ



陽子過剰になると？

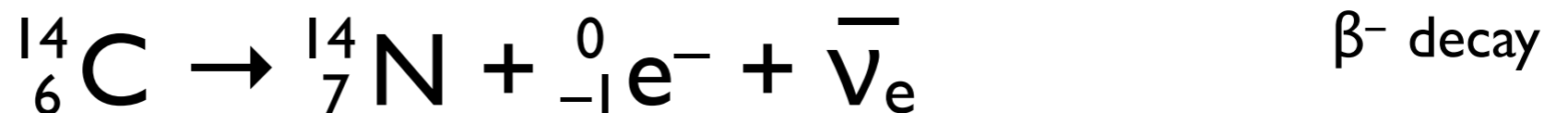
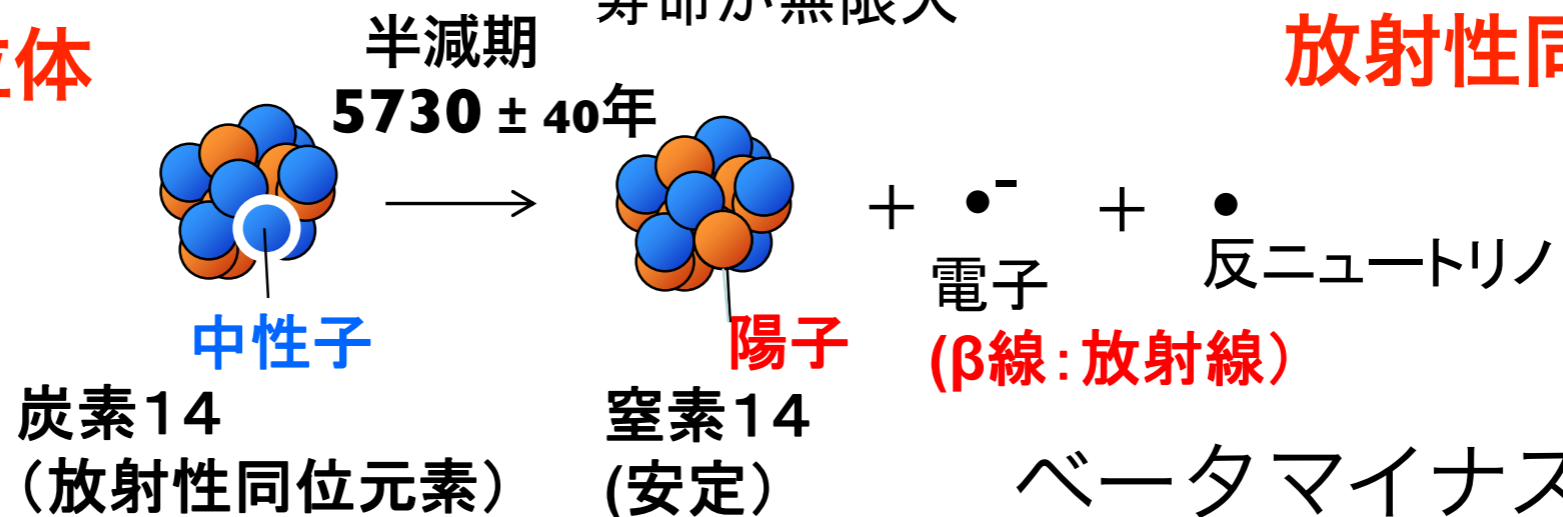
(寿命がある： $\beta^+$ 壊変、電子捕獲(EC))

天然に存在=**安定同位体**  
寿命が無限大

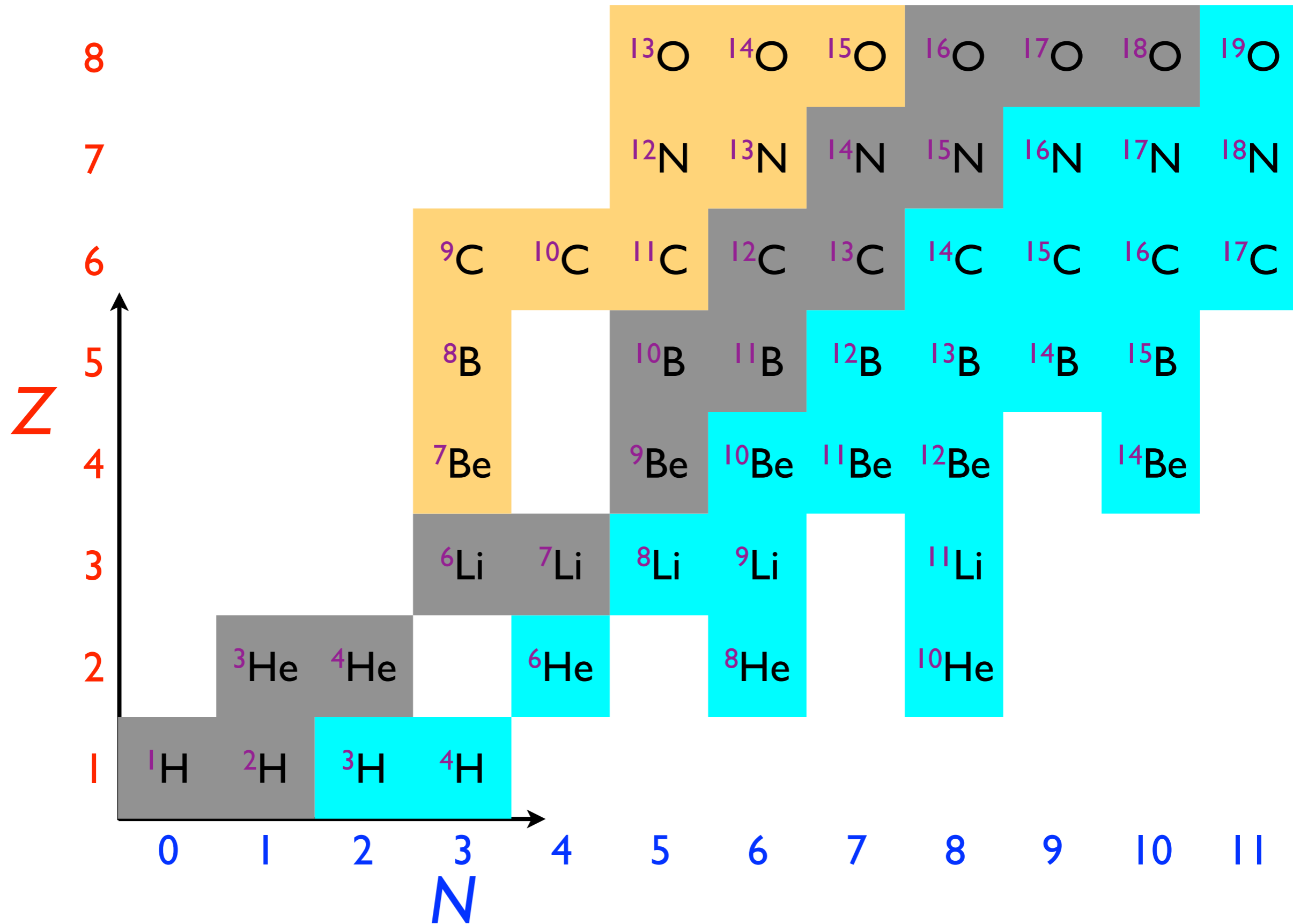
中性子過剰になると？

(寿命がある： $\beta^-$ 壊変)

## 放射性同位体



# 核图表



# 核種の数

安定核種 約300種

実験的に確認 3000種

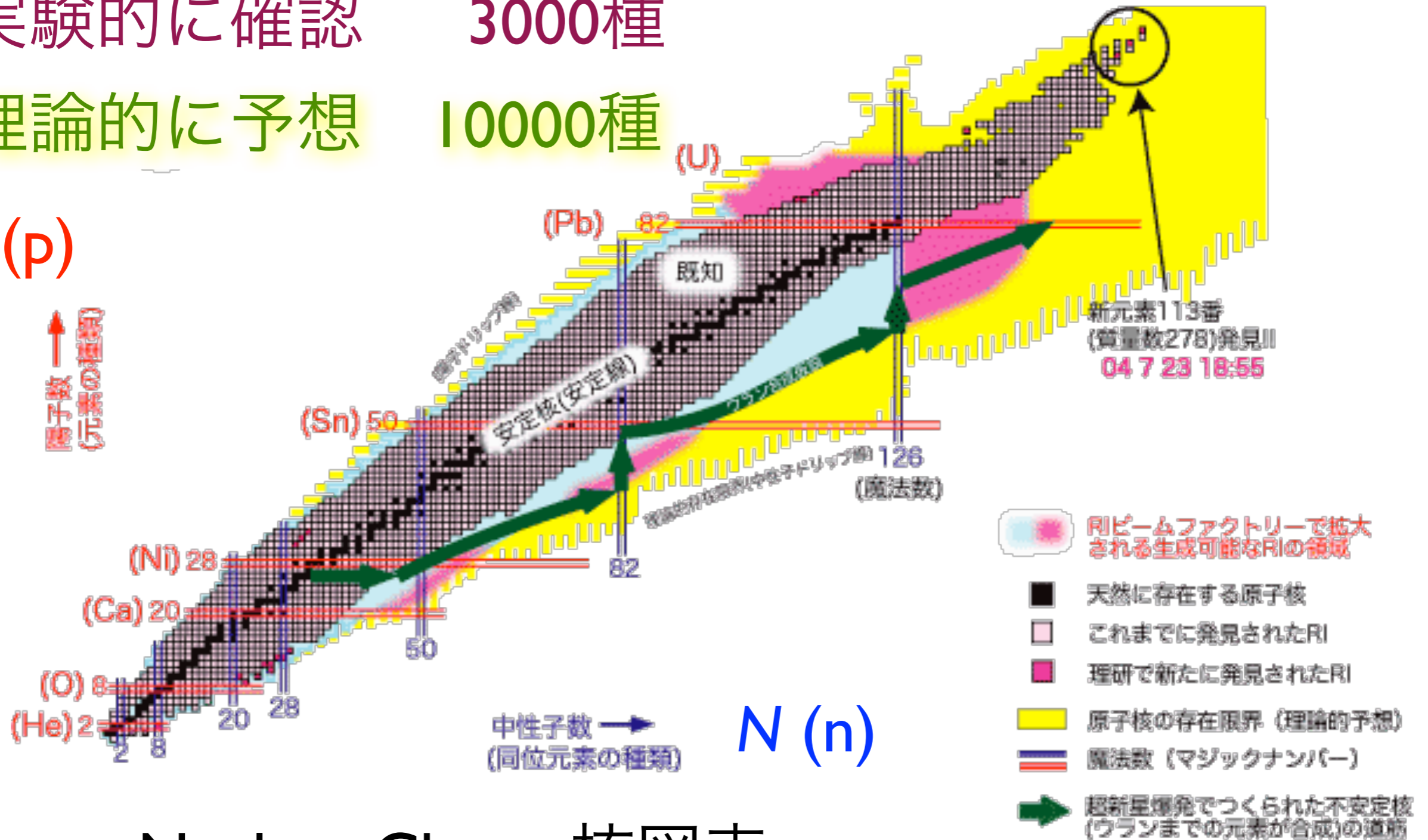
理論的に予想 10000種

# 原子核物理学

## Nuclear Physics

Z (p)

↑ 陽子数  
(元素の種類)



### Nuclear Chart 核図表

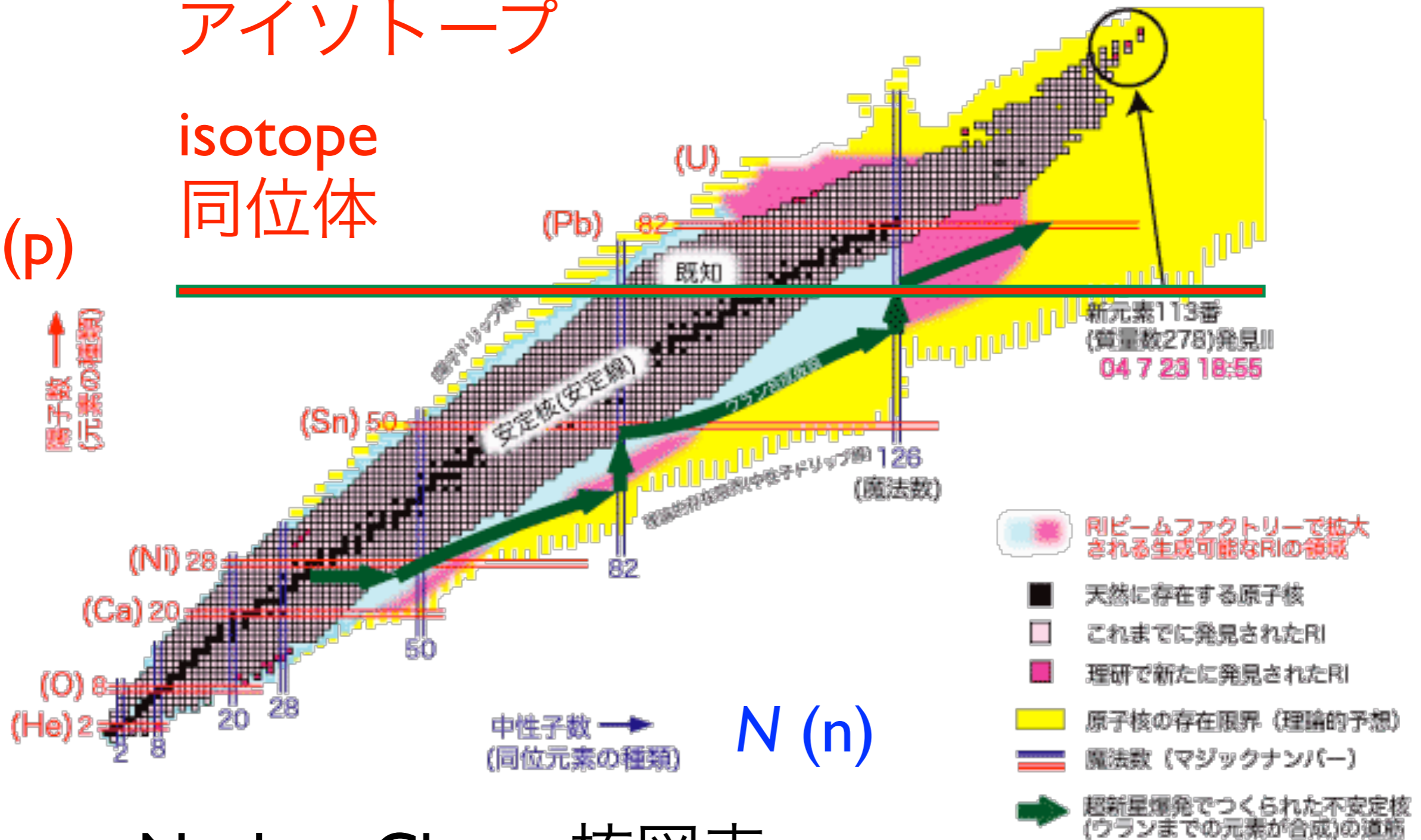
# 原子核物理学

## Nuclear Physics

アイソトープ

isotope  
同位体

Z (p)



Nuclear Chart 核図表

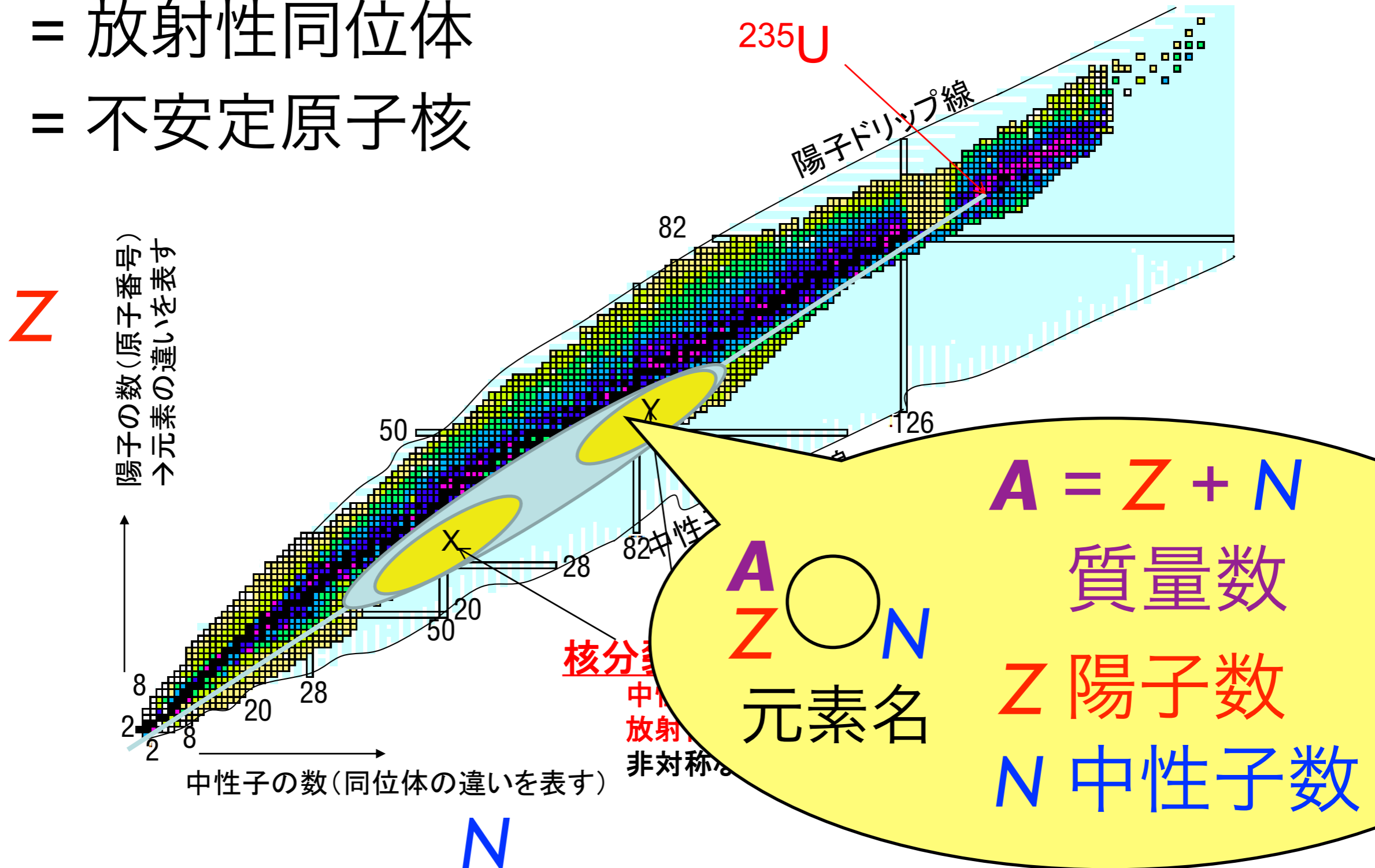
# 放射性物質とは

放射性核種

= 放射性同位体

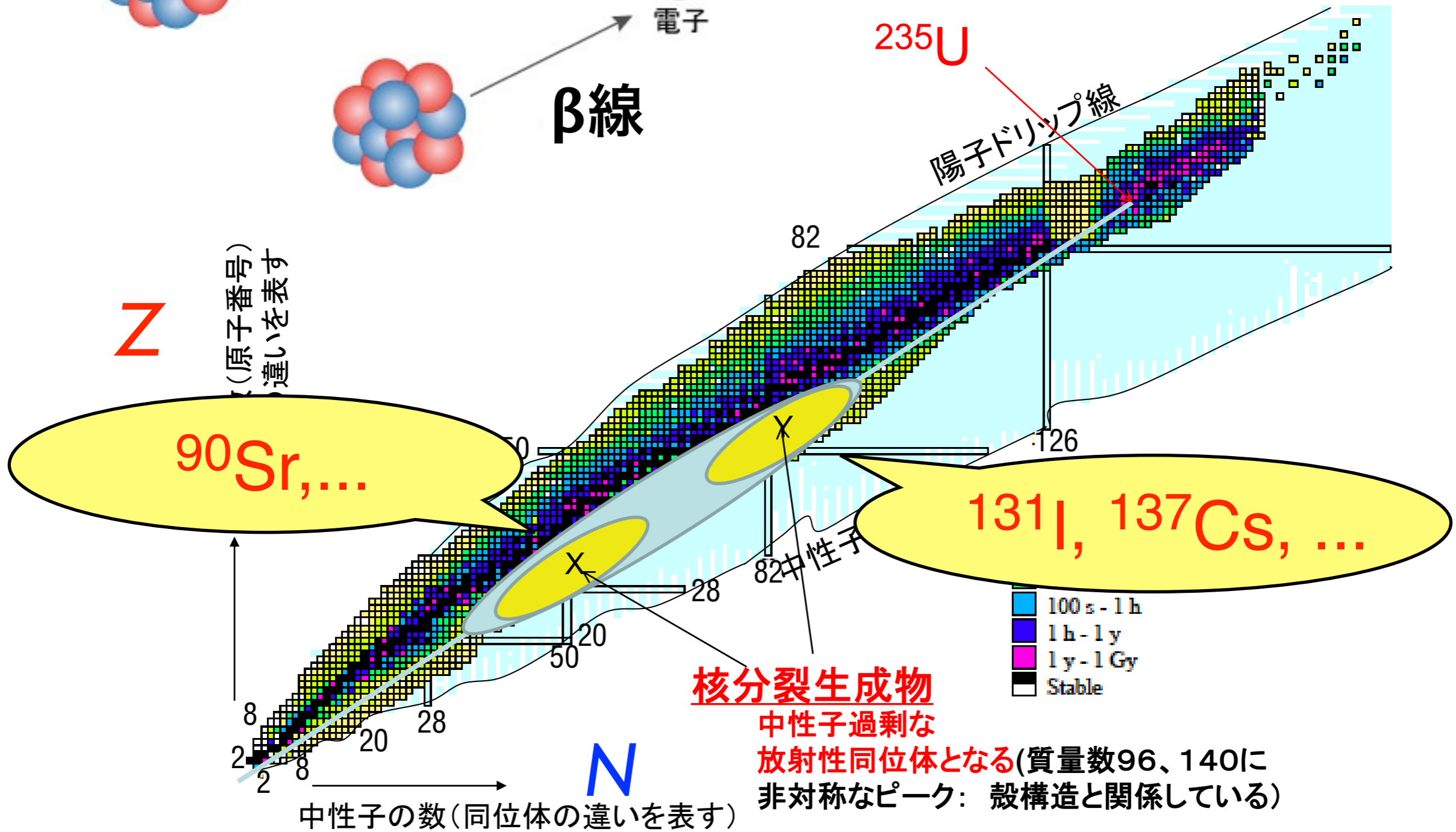
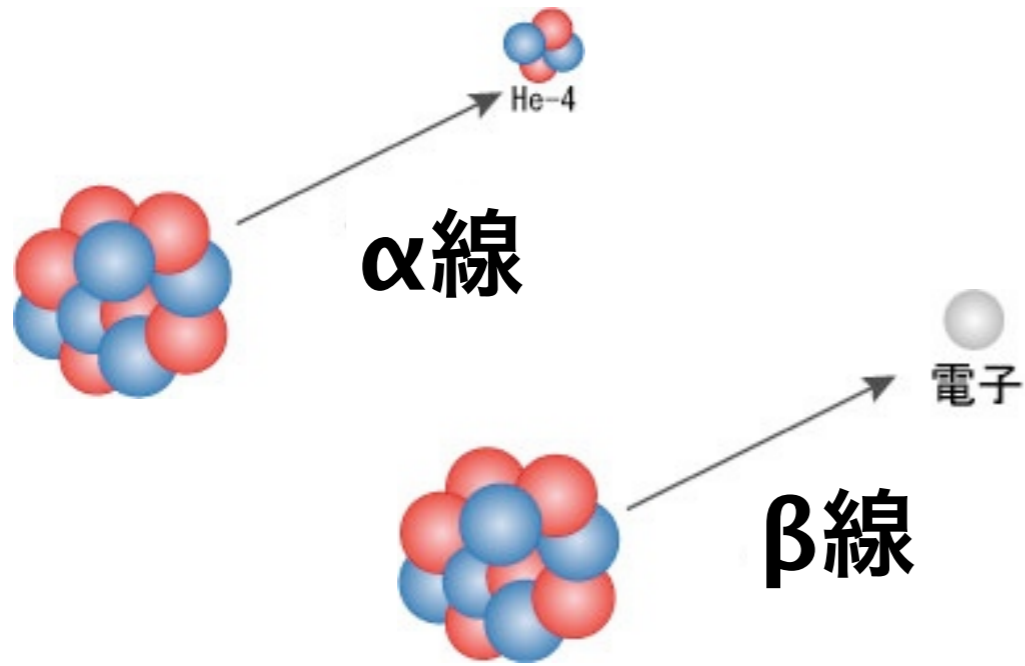
= 不安定原子核

核図表



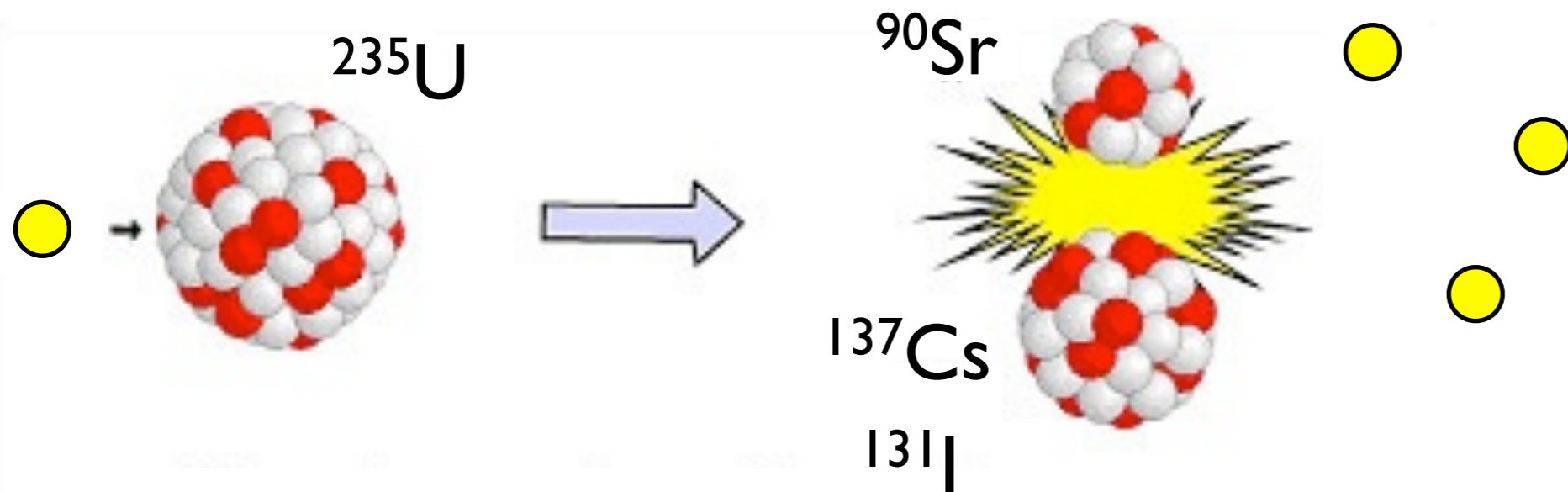


放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



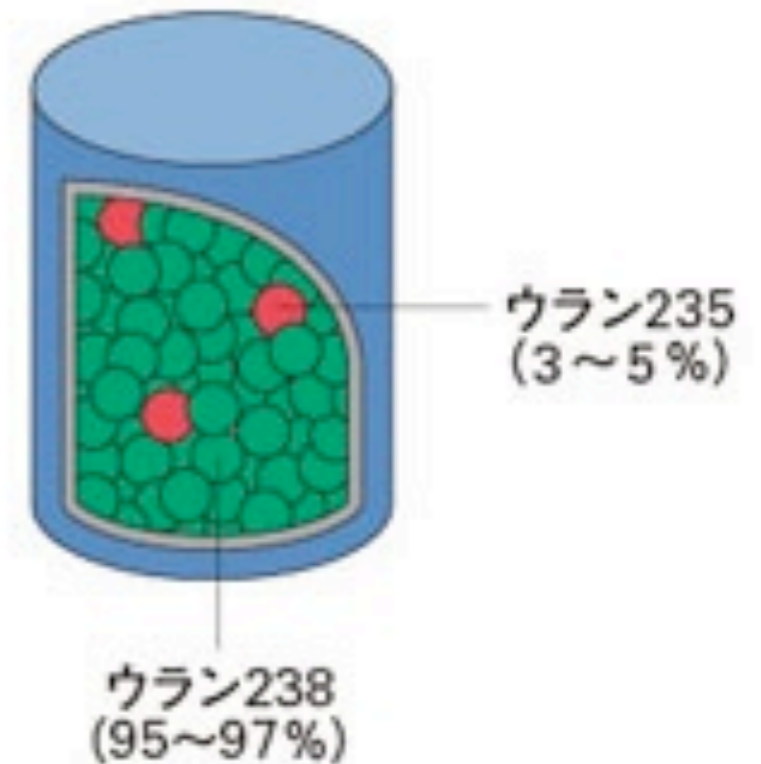
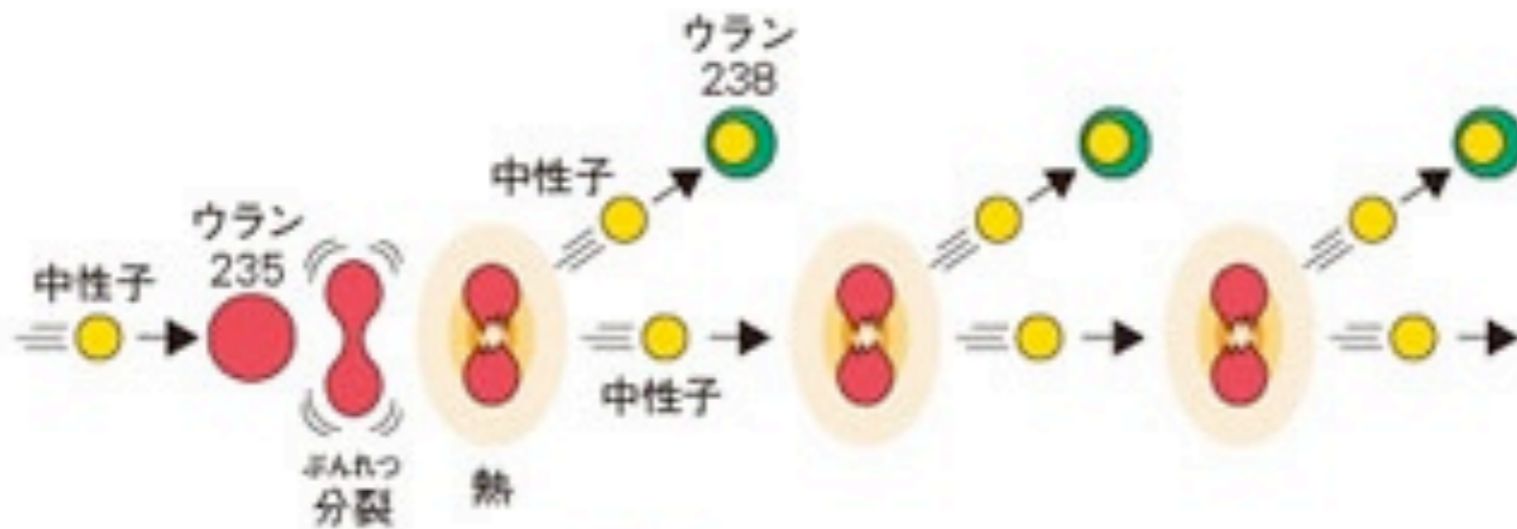
Nuclear Chart 核図表

# 原子核分裂反応



熱中性子

減速

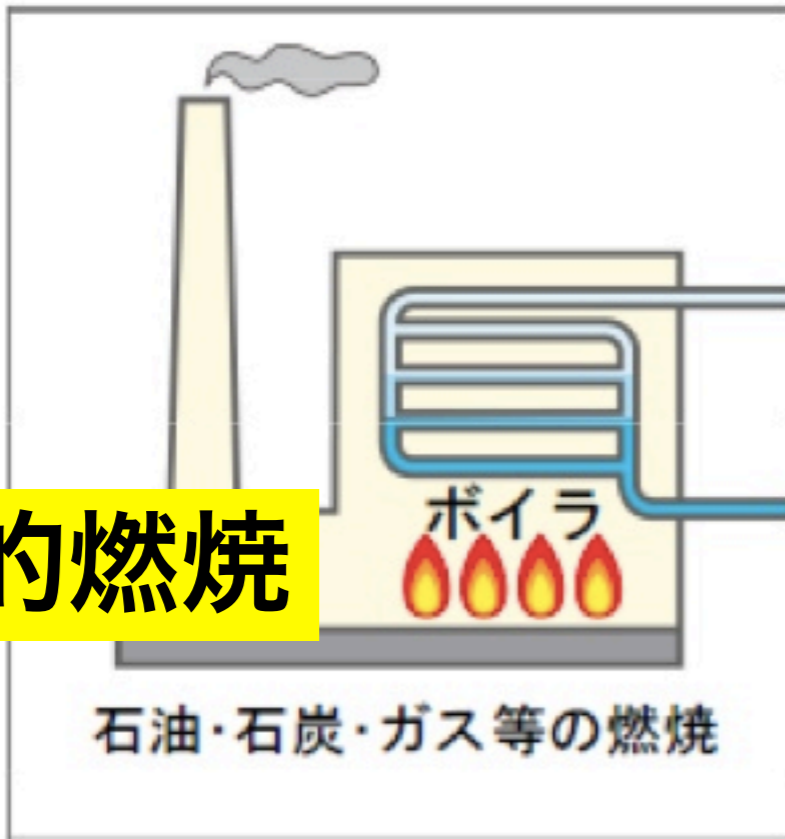


中性子 + ウラン 235 / 238

# 火力発電と原子力発電の違い

火力

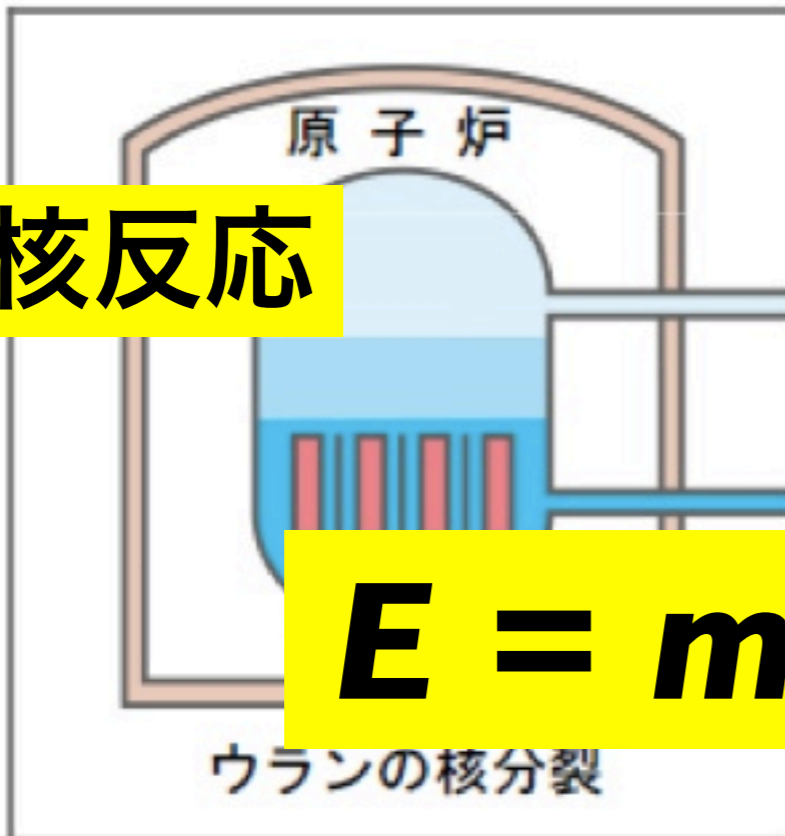
化学的燃焼



原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$



蒸気

水

蒸気

給水ポンプ

タービン

復水器

循環水ポンプ

変圧器

発電機

→ 放水路へ

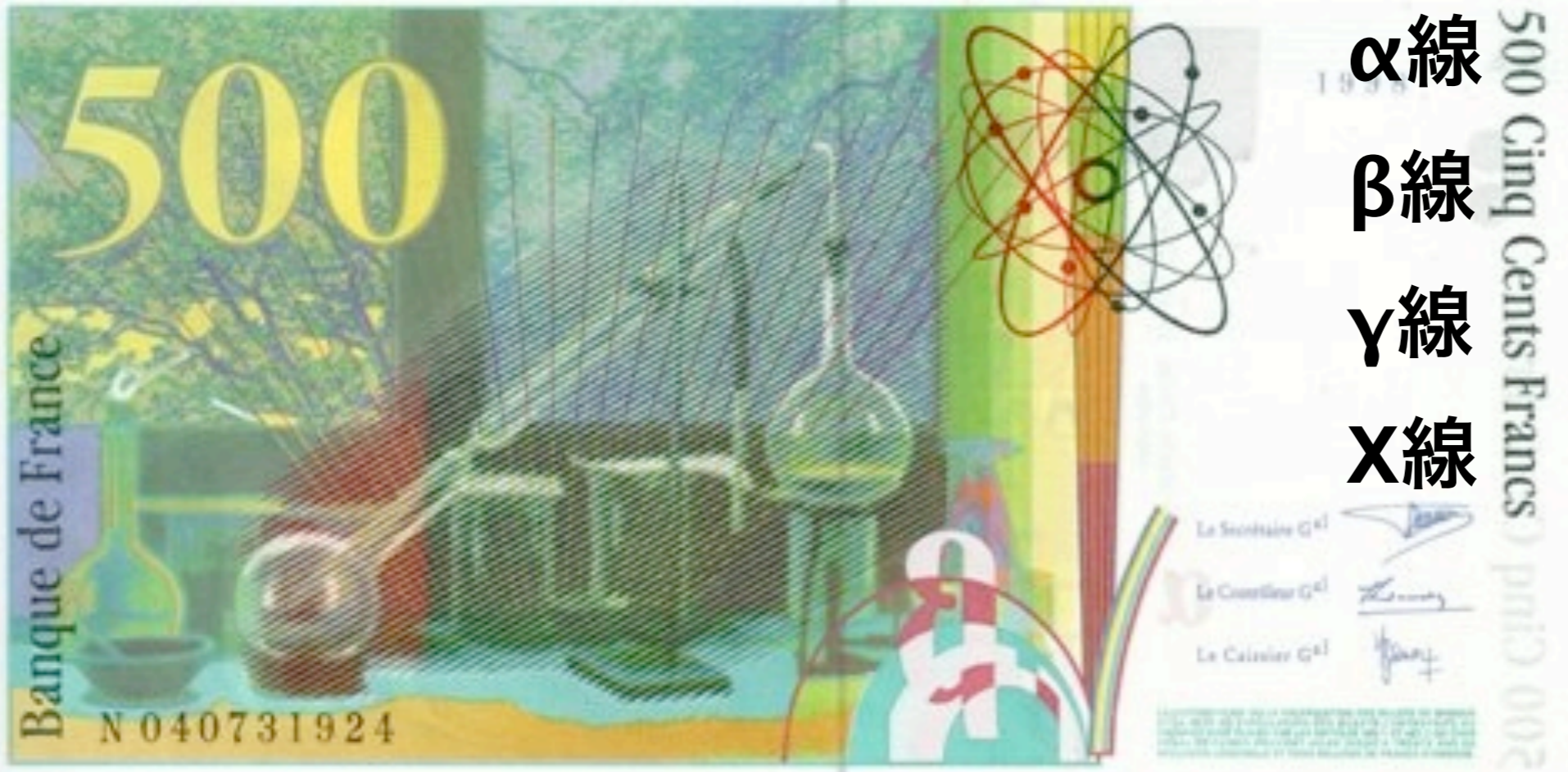
← 冷却水(海水)



# 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）

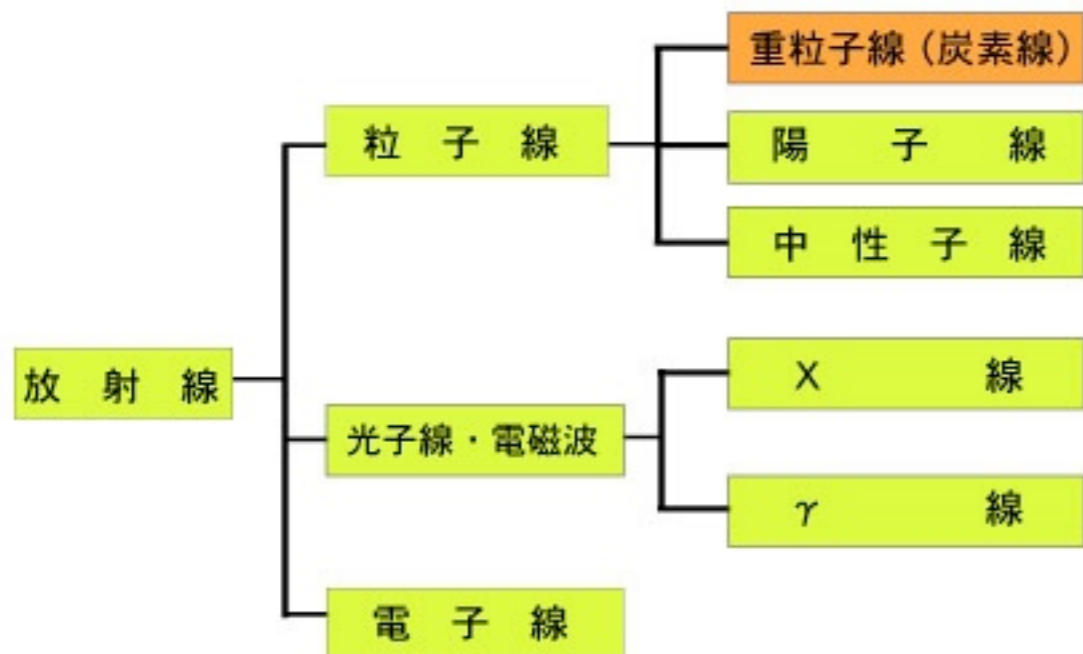
**VIDEO**

# 放射線とは

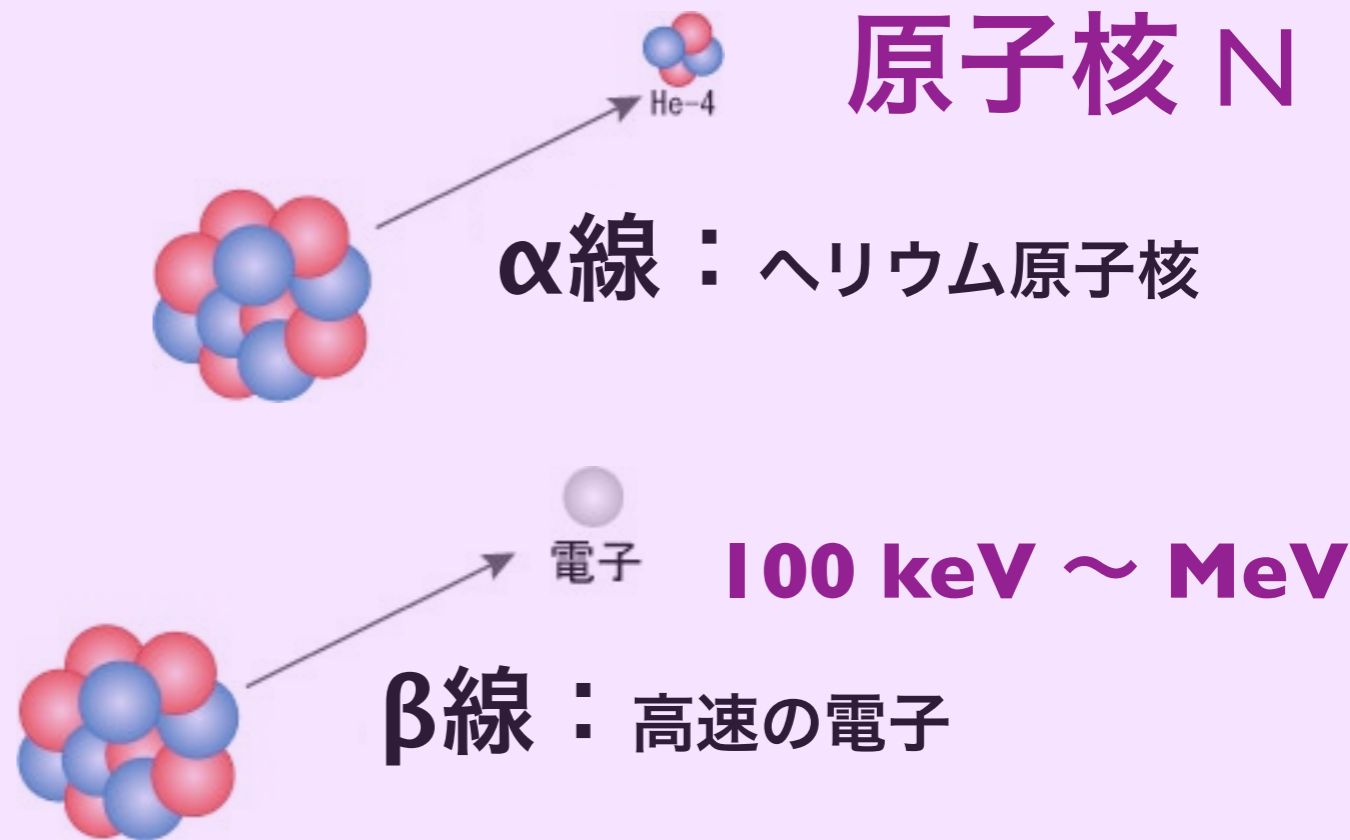
日本原子力文化振興財団：エネコチャンネルのビデオ映像「探検！身近な放射線」より抜粋

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

# 放射線の種類 (放射線治療分野で用いられる分類)



## 原子核 N

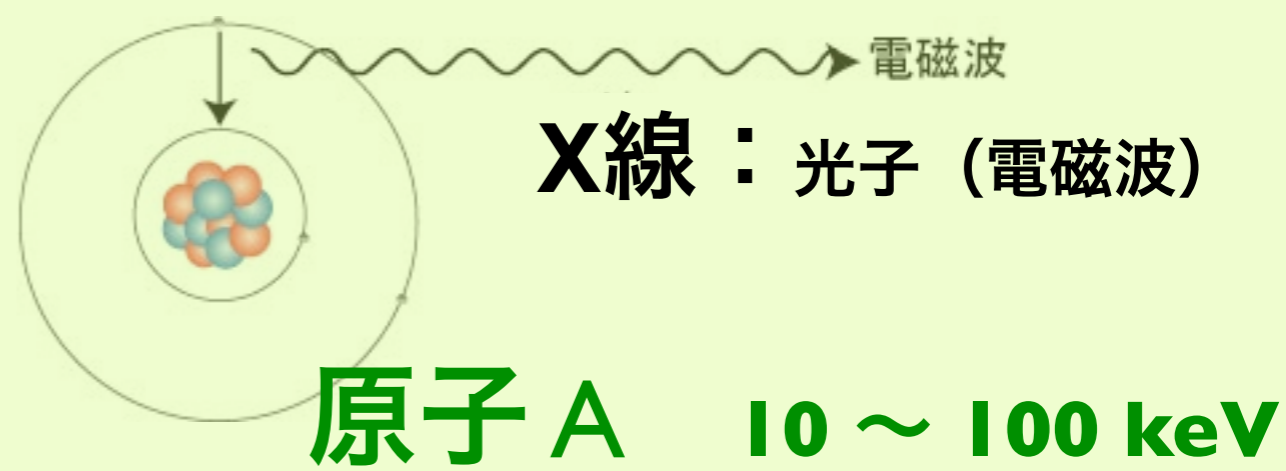


放射線のもつエネルギーは？

👉 **100 keV ~ MeV** ( $\alpha, \beta, \gamma$ )

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)



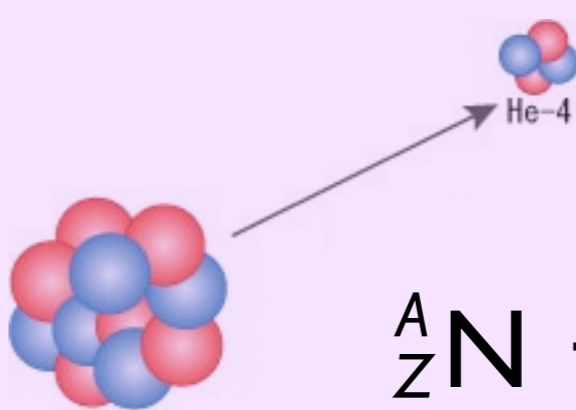
# α 壊変 (崩壊)

decay

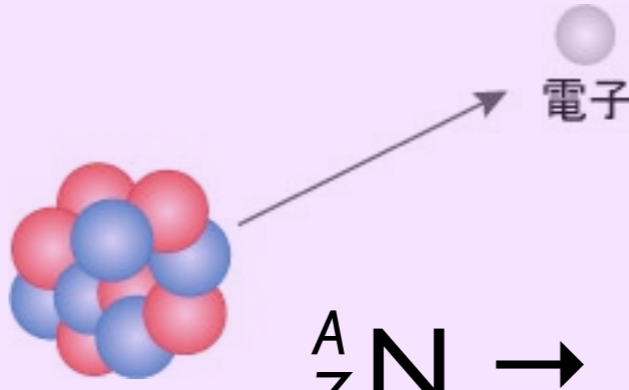
# β<sup>-</sup> 壊変 (崩壊)

# γ 壊変 (崩壊)

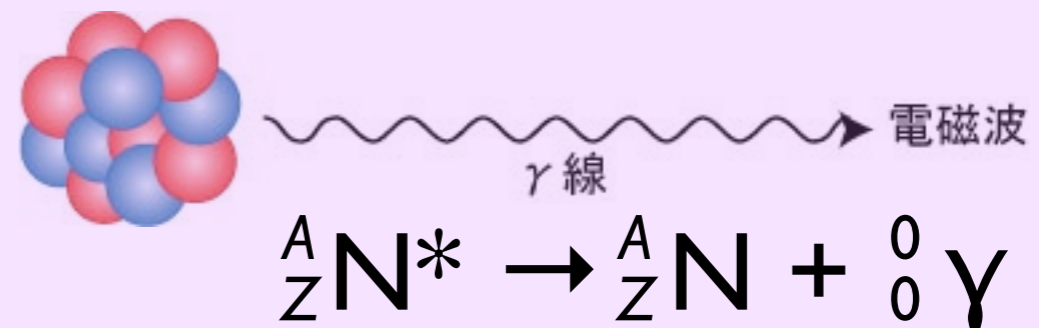
# 原子の脱励起



原子核 N

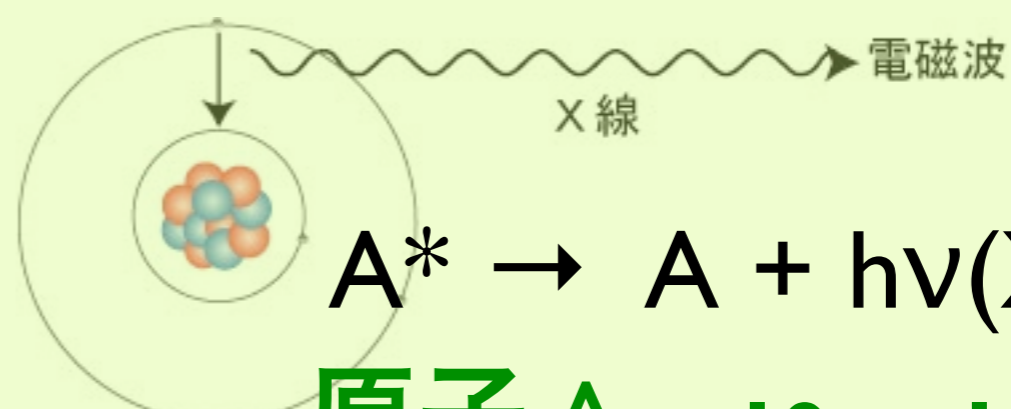
$${}^A_Z N \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} M + {}^4_2 \alpha$$


電子 100 keV ~ MeV

$${}^A_Z N \rightarrow {}^A_{Z+1} M + {}^0_{-1} \beta + \bar{\nu}_e$$
$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e^0$$


電磁波

γ線

$${}^A_Z N^* \rightarrow {}^A_Z N + {}^0_0 \gamma$$


電磁波

X線

$$A^* \rightarrow A + h\nu(\text{X-ray})$$

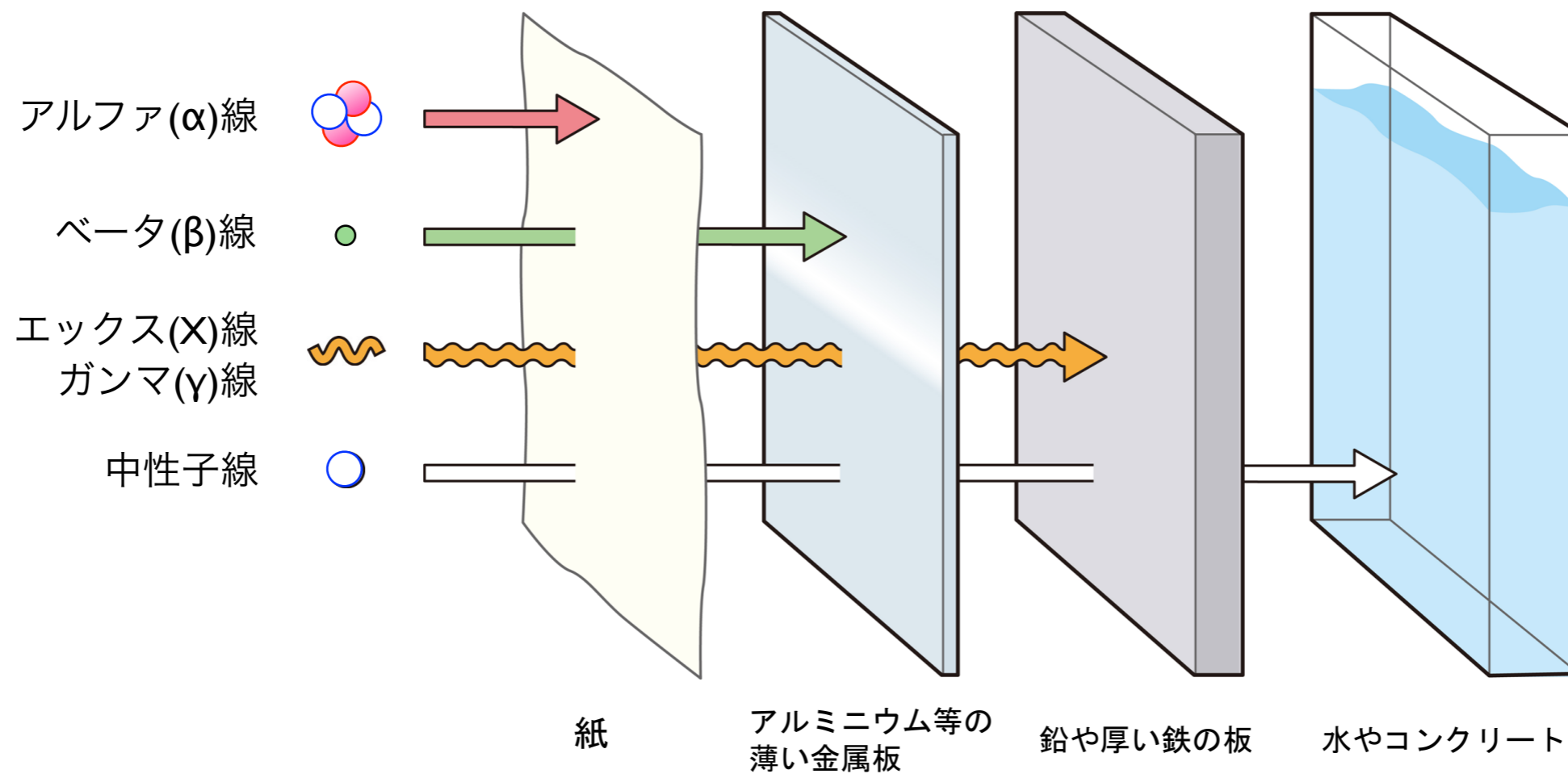
原子 A 10 ~ 100 keV



# 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



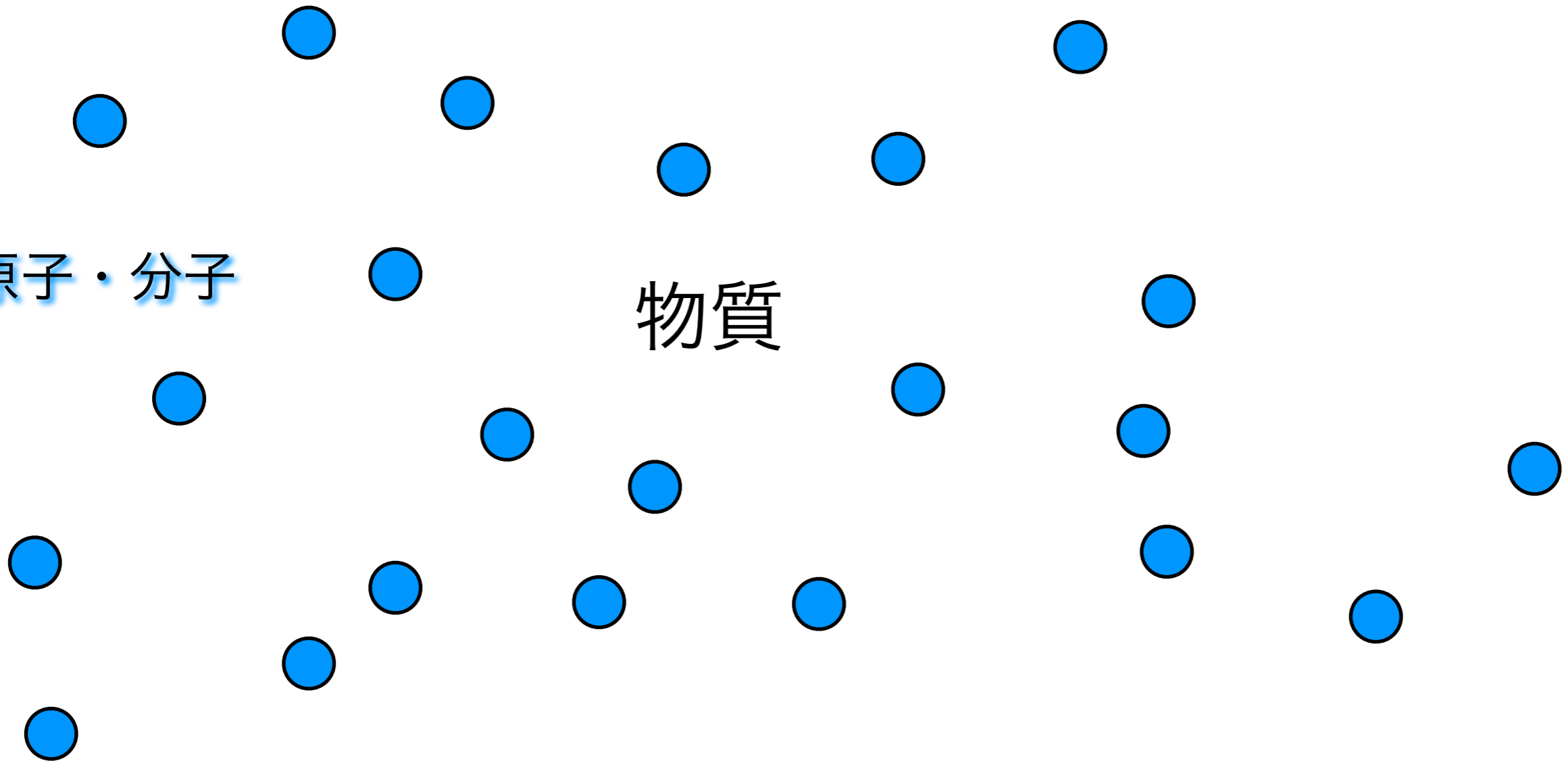
# 荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：  
クーロン力

物質中の原子を電離・励起して電子に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）。  
原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。

原子・分子

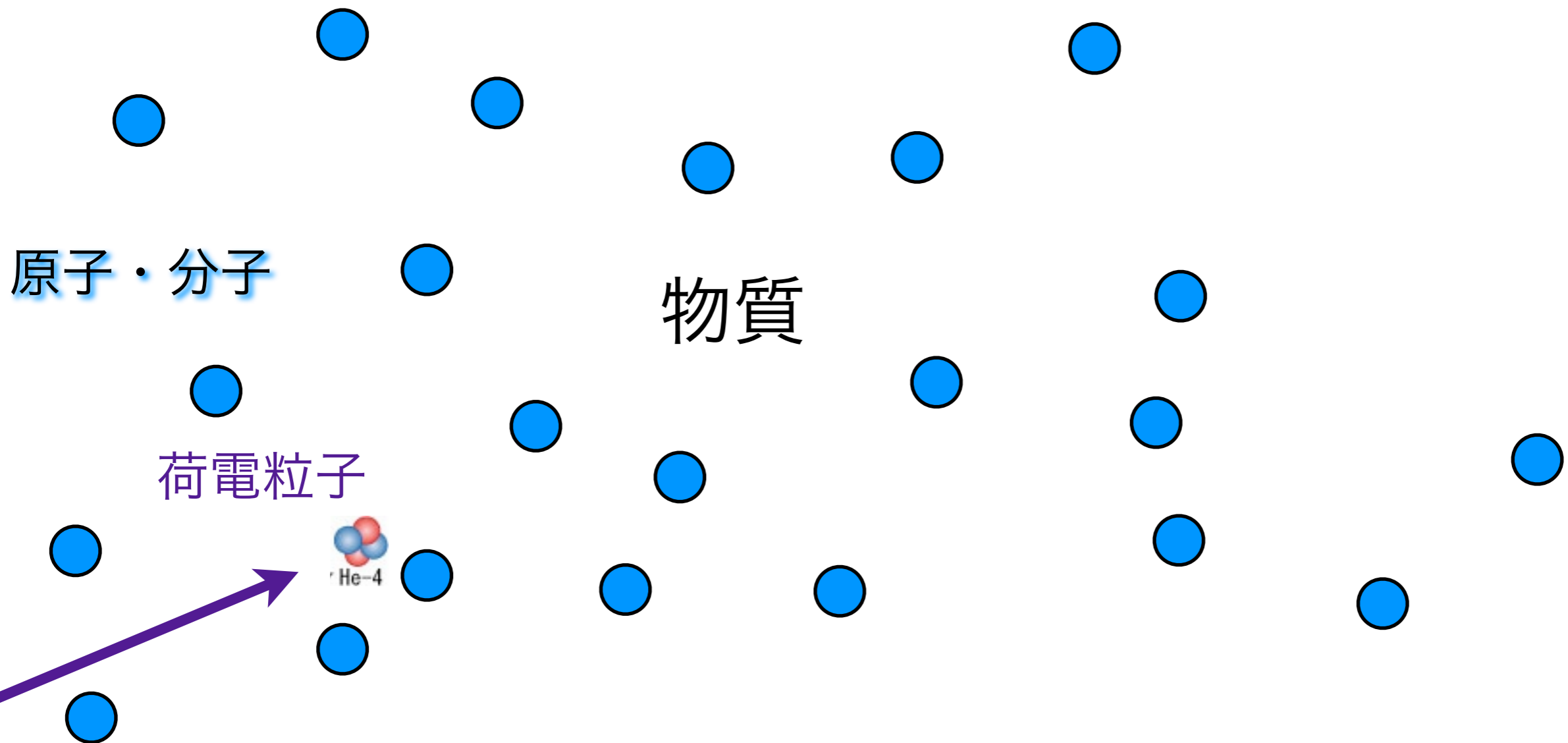
物質



# 荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：  
クーロン力

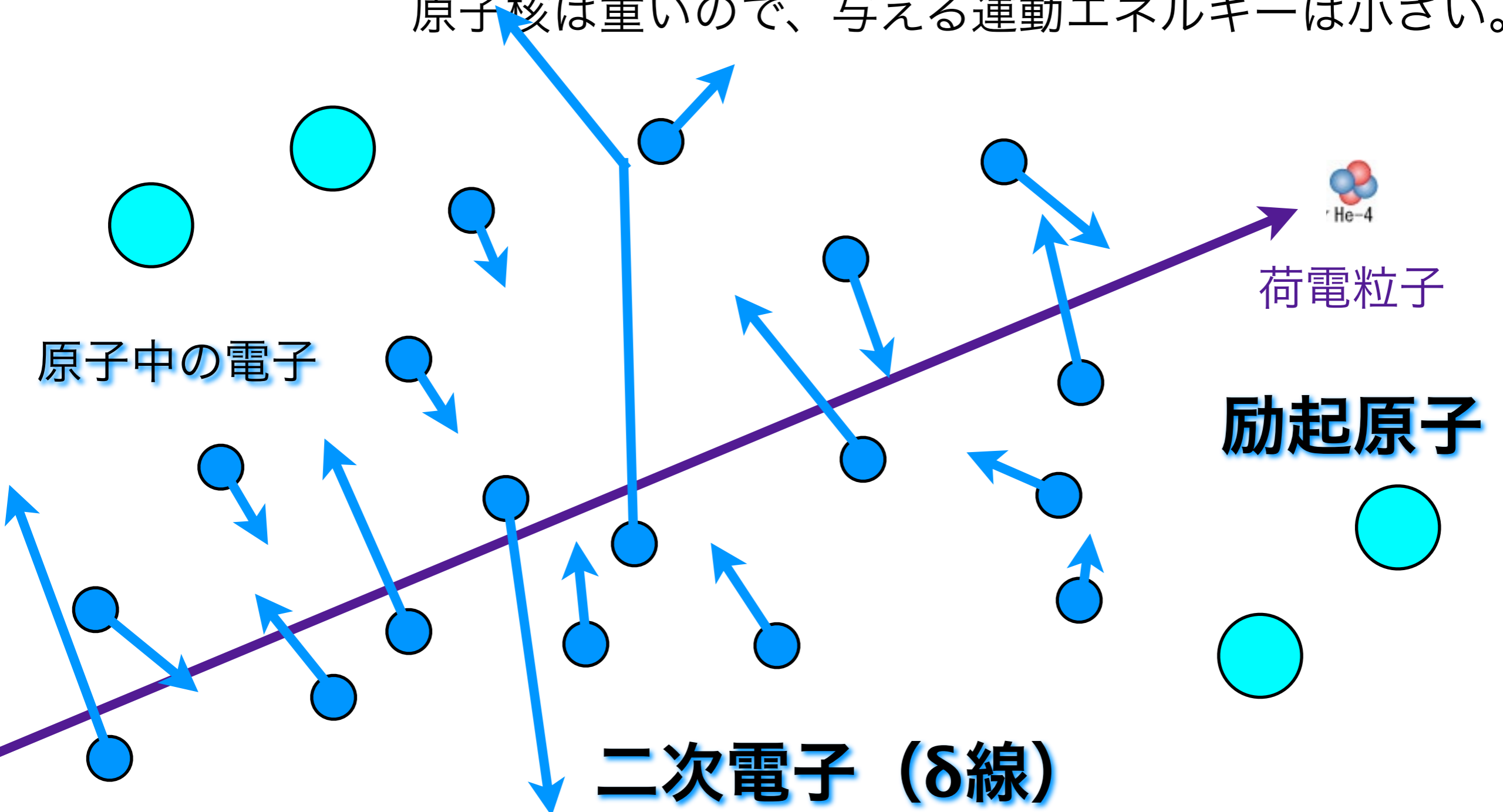
物質中の原子を電離・励起して電子に運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。  
原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。



# 荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：  
クーロン力

物質中の原子を電離・励起して電子に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）。  
原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。



# 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

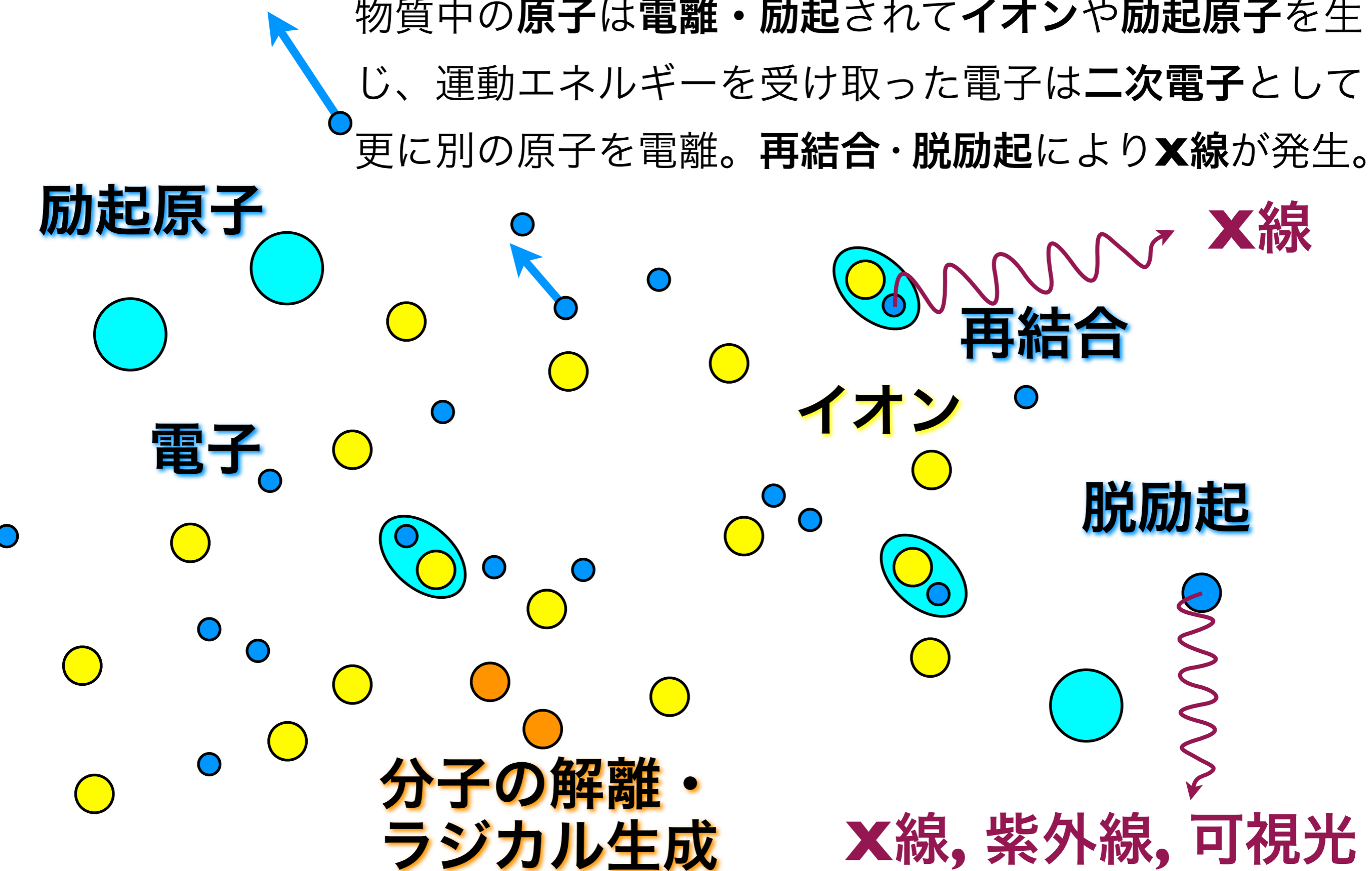
分子の解離・  
ラジカル生成

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

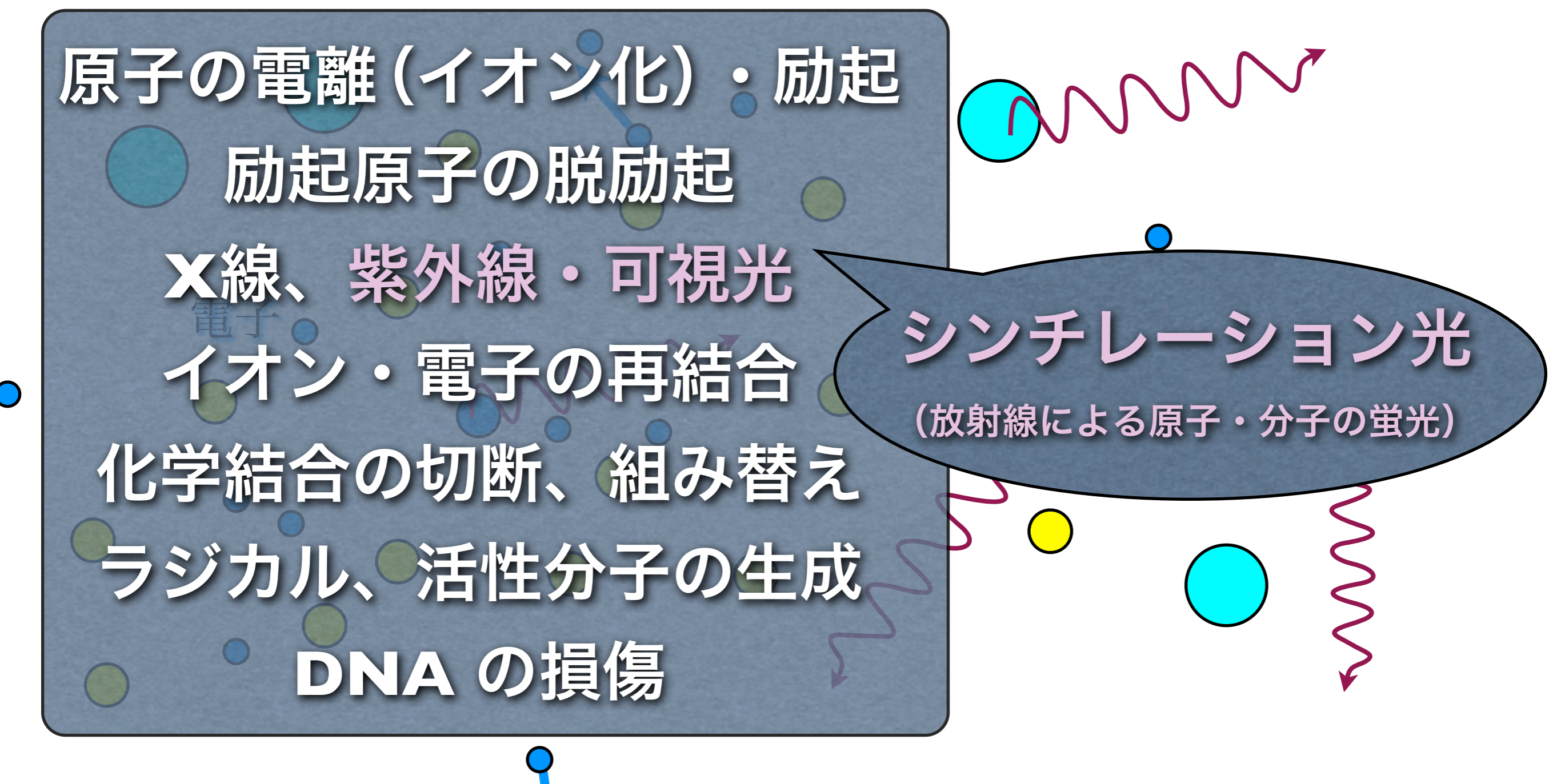
化学結合の切断、組み替え

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)



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

## 荷電粒子

### 阻止能

(エネルギー損失) Stopping power (Energy loss)

荷電粒子：クーロン力

**エネルギー損失**

物質中の原子を電離・励起して電子に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）。

原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。

● **重い粒子**：陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線 /  $\pi$ 中間子 /  $\mu$ 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<sup>-</sup>)・陽電子(e<sup>+</sup>)

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。

エネルギーが高く、電離能力をもつ二次粒子（大抵は二次電子）のことを  $\delta$  線 と呼ぶことがある。



# 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) /  $\alpha$ 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( $\beta$ )線 : 低 LET 放射線

光子(X線,  $\gamma$ 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

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

# 放射線の透過力・線量計算

- **$\alpha$ 線は空気中の飛程が数 cm。**  
生体では**表層**の細胞 2-3 個で止まる。
- **$\beta$ 線も外部被曝では皮膚への影響を**考える ( **$\beta$ 線熱傷**)。
- **$\alpha$ 線も $\beta$ 線も内部被曝が問題。**全てのエネルギーが短い飛程の間に細胞に与えられる。
- **$\gamma$ 線は多くは相互作用 (光電効果・コンプトン散乱) せず体を素通りし、一部が体内で吸収される。**外部被曝でも体内も被曝する。
- **X線の場合も吸収されるエネルギーは何割か程度。**

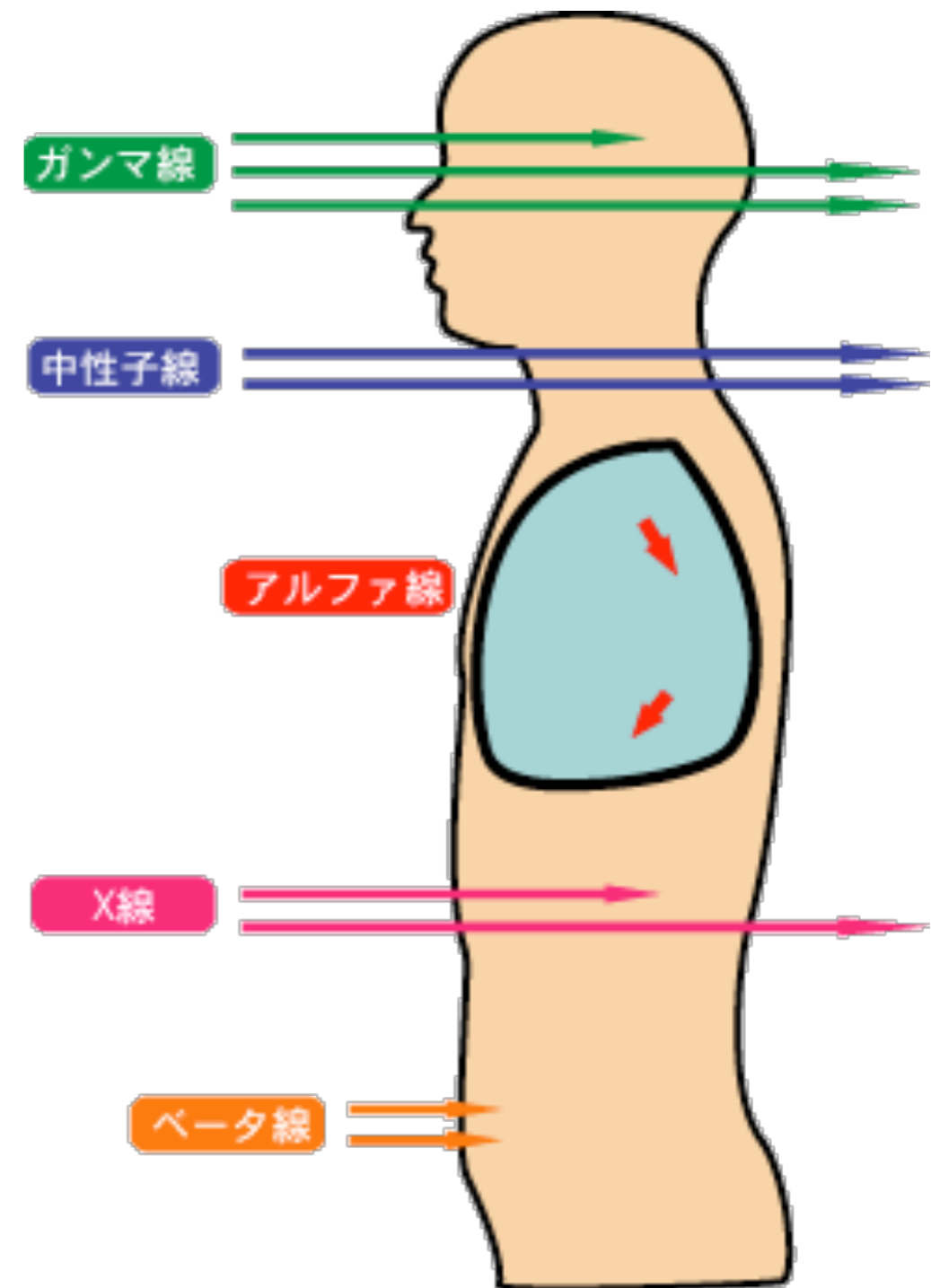


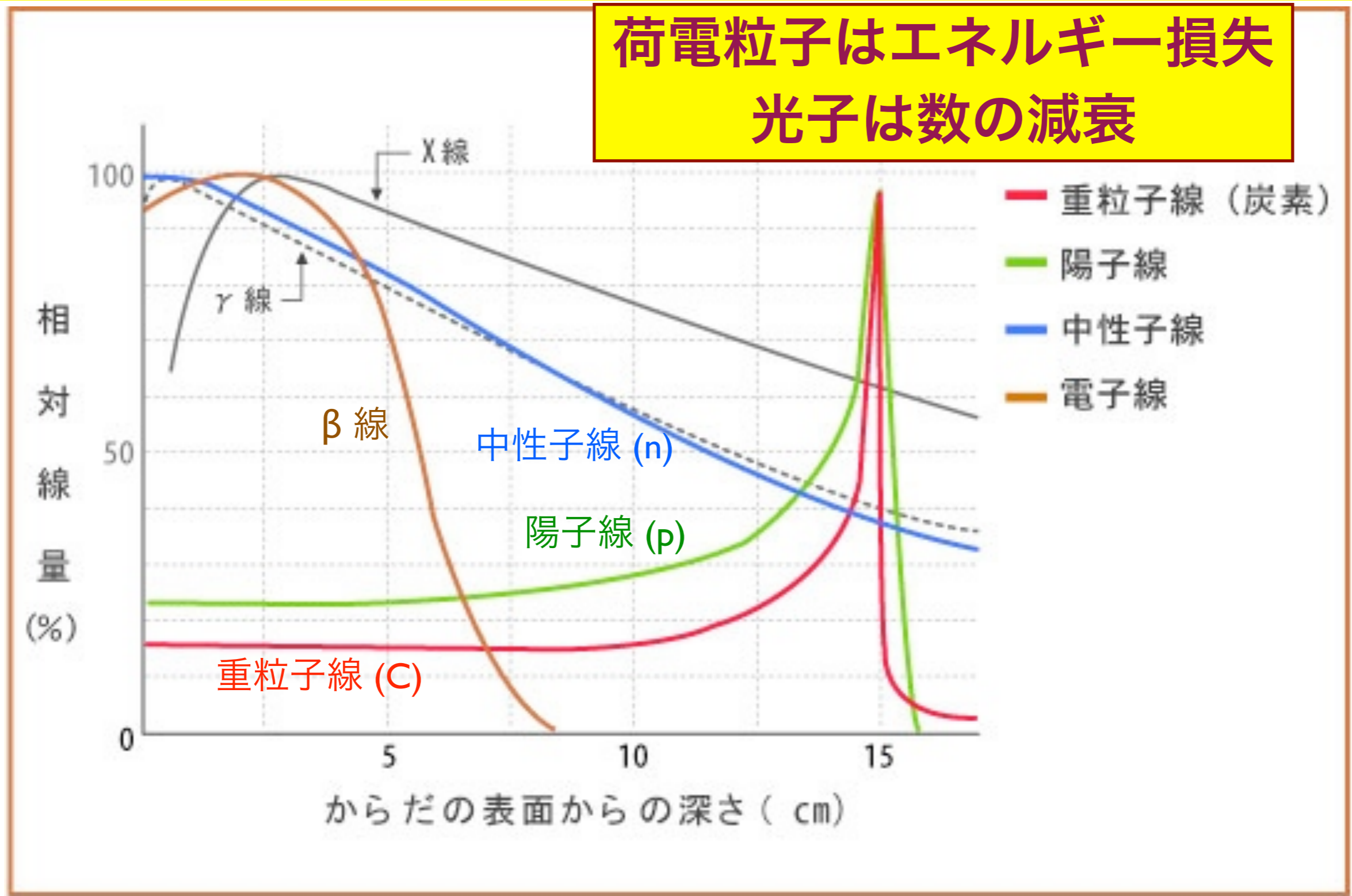
図3 人体を透過する放射線

陽子(p)、 $\alpha$ 、重粒子線は飛程が揃っている。

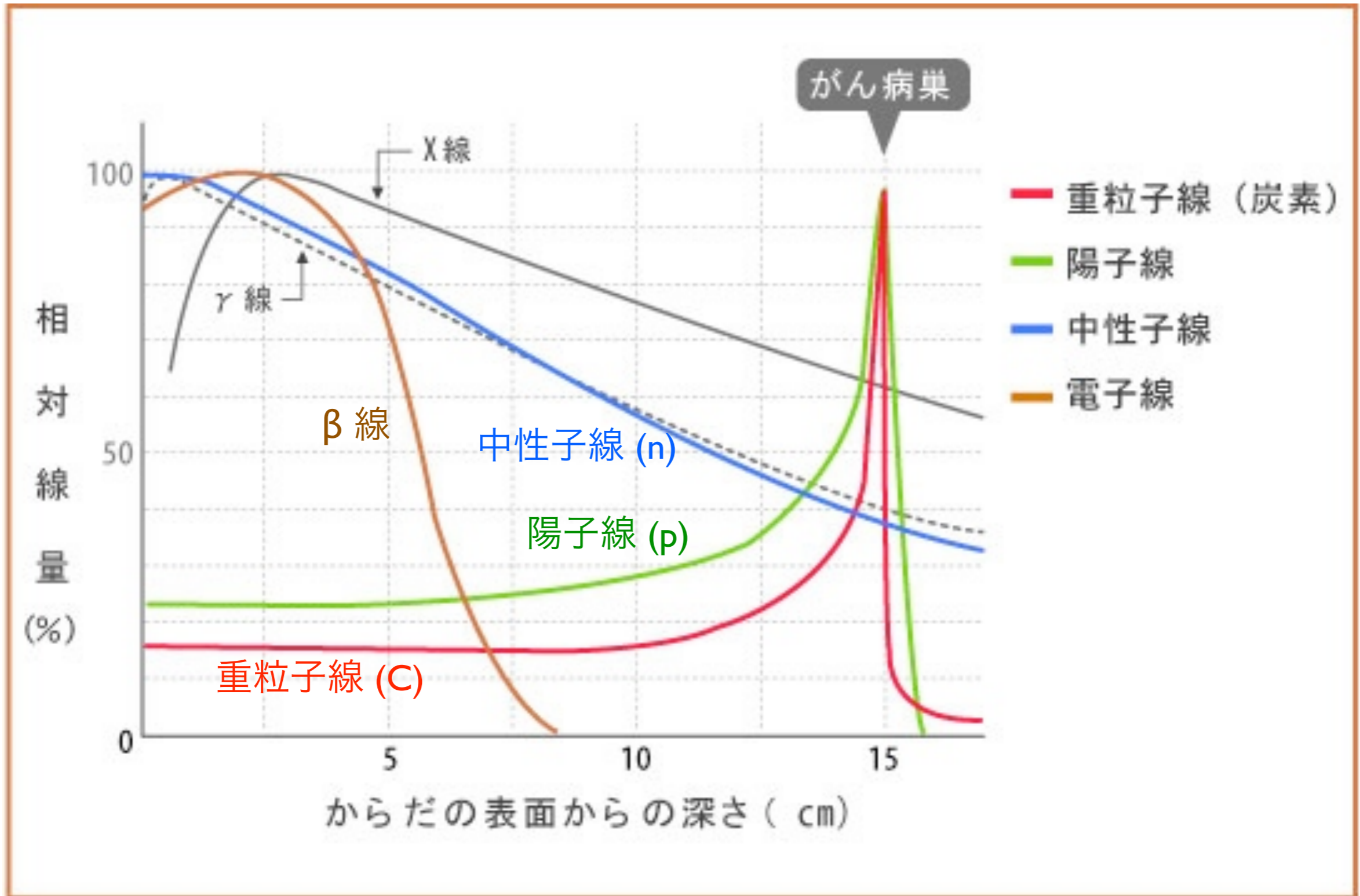
電子( $\beta$ )は散乱されやすく、飛程を直線距離(物質厚)で測るとばらつきが大きい。

中性子(n)、光子(X,  $\gamma$ ) 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**



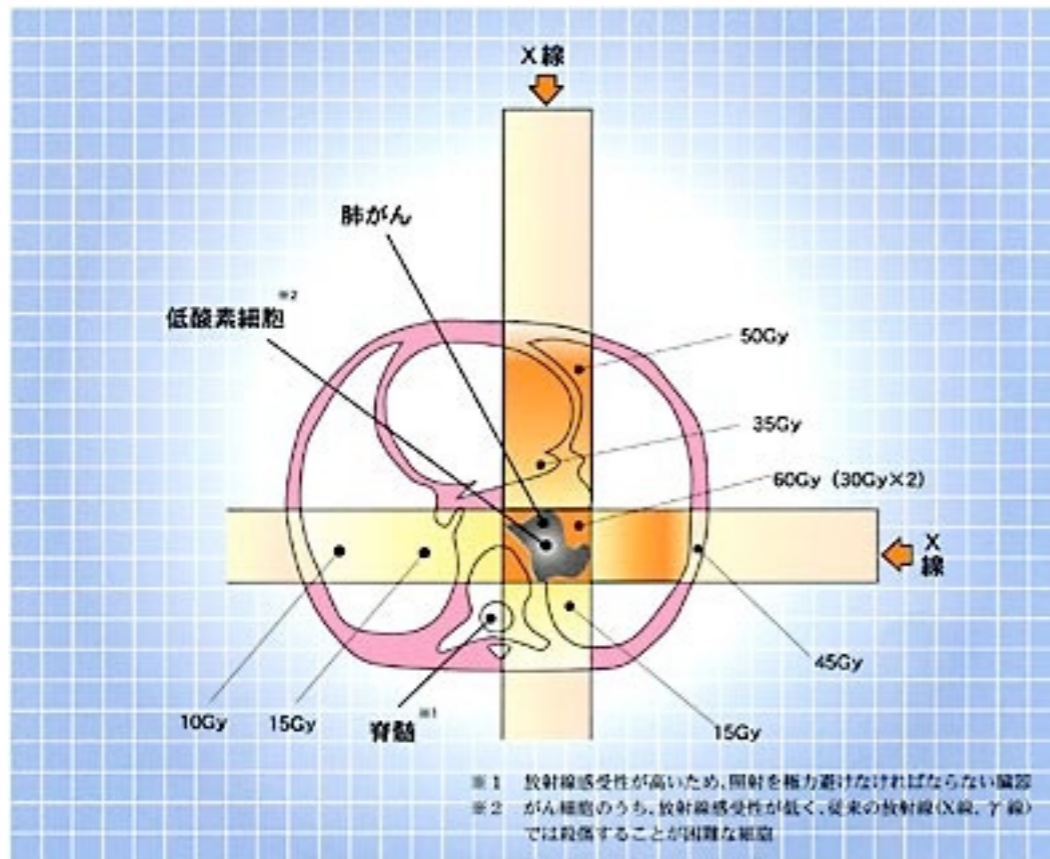
# Bragg peak



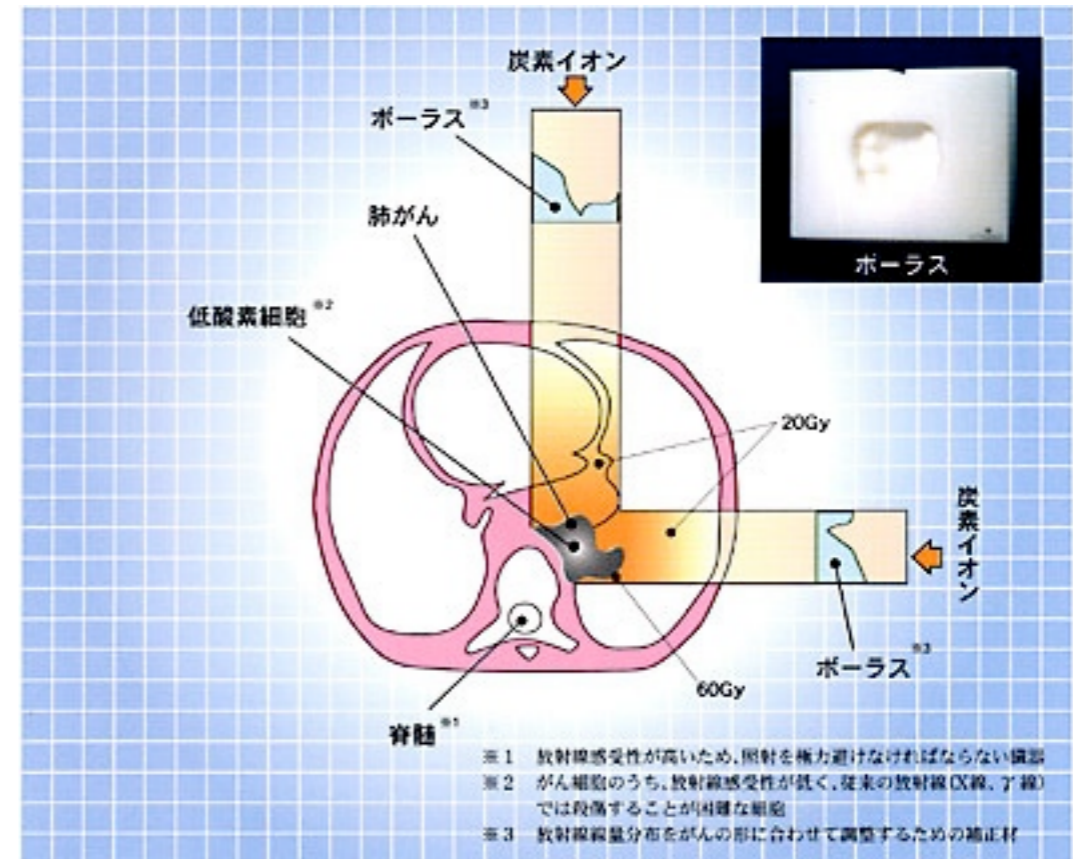
# 放射線医療：がん治療

# 数 Gy を複数回

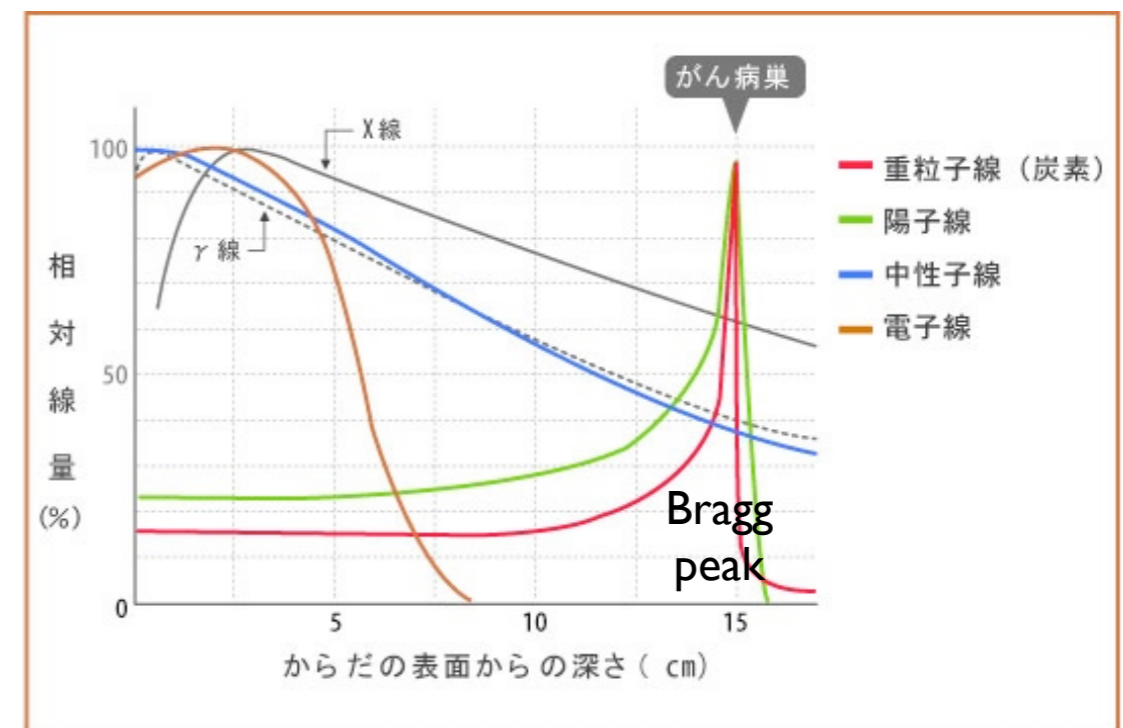
## X線



## 重粒子線 (炭素イオン)



他には：ガンマナイフ、  
陽子線、パイ中間子  
研究中：反陽子



# 放射線と物質との相互作用

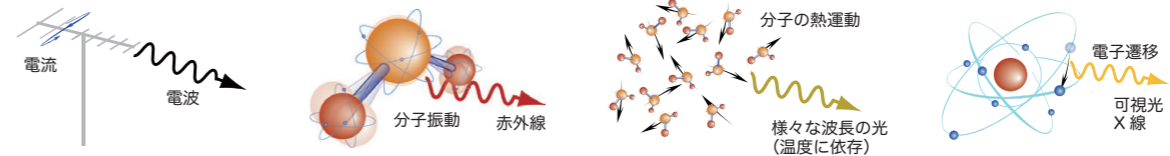
## 光子の減衰

# 光マップ THE LIGHT MAP

光は、自然界にいつも存在していて、あらゆる植物や生物、人間の生命と営みを支えています。太陽からの光は、地球上に温度をもたらす、植物の光合成のエネルギーとなります。蛍光灯やランプは私たちの生活を明るく照らします。レーザーは材料を加工したり、手術や治療をします。ラジオやテレビや携帯電話の信号を送る電波、電子レンジで使われるマイクロ波、電気こたつや電熱線で加熱に用いる赤外線、日焼けや殺菌作用がある紫外線、レントゲン写真に用いるX線や、原子崩壊のときに発生するγ線などすべて、光のなかまです。この光マップは、光が自然界や私たちの生活の中でどのようにつくられ、どのように使われているかをまとめたものです。

## 光の起源

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

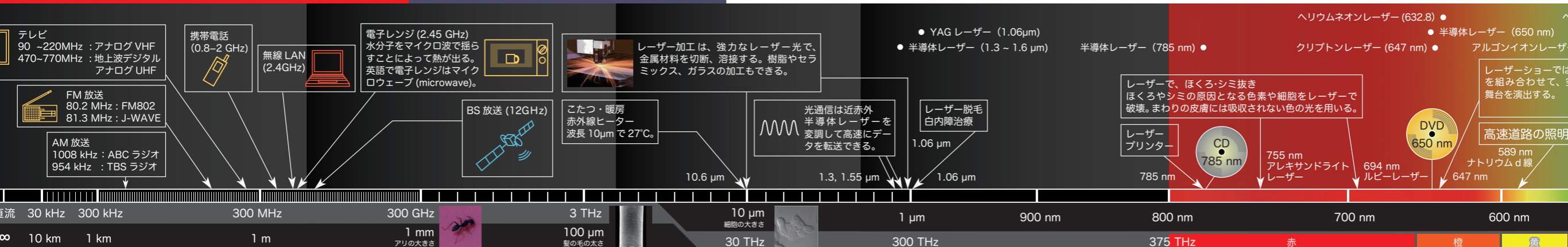


## 波としての光

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

## 粒としての光

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



### 電波領域（電波も光）

アンテナで送受信

- テレビ: 90~220MHz: アナログ VHF, 470~770MHz: 地上波デジタル アナログ UHF
- 携帯電話 (0.8~2 GHz)
- 無線 LAN (2.4GHz)
- 電子レンジ (2.45 GHz): 水分子をマイクロ波で揺らすことによって熱が出る。英語で電子レンジはマイクロウェーブ (microwave)。
- FM 放送: 80.2 MHz: FM802, 81.3 MHz: J-WAVE
- AM 放送: 1008 kHz: ABC ラジオ, 954 kHz: TBS ラジオ
- BS 放送 (12GHz)
- レーザー加工: 強力なレーザー光で、金属材料を切断、溶接する。樹脂やセラミックス、ガラスの加工もできる。
- 光通信: 近赤外半導体レーザーを変調して高速にデータを転送できる。
- レーザー脱毛・白内障治療: 1.06 μm
- レーザー脱色: 785 nm
- レーザープリンター: 785 nm
- CD: 785 nm
- 755 nm アレキサンドライトレーザー
- 694 nm ルビレーザー
- 647 nm ナトリウムd線
- 589 nm ナトリウムd線
- 高速道路の照明: 589 nm ナトリウムd線
- レーザーショー: レーザーショーでは色を組み合わせて、舞台を演出する。

### 遠赤外光

低温の黒体放射

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

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

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

### 中赤外光

分子振動・格子振動、有機分子が見える領域

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

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

二酸化炭素の吸収スペクトル

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

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

### 近赤外光

物質と相互作用しない、物質が透明な領域 (光通信に使われる)

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

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

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

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

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

光 CT: 脳の中の酸素濃度を断面画像として取得する。

白熱灯 (2,500°C) の黒体放射のピークは、1 μm 付近。

さそり座のアンタレス (3,500°C) の黒体放射は 800 nm 付近、赤く見える。

### 可視光

人間の目に見える光、外殻電子遷移エネルギー

紅葉: アントシアン (赤), カロテノイド (黄), クロロフィル (緑)

花火の色は、金属元素の炎色反応の色。それぞれの元素特有の色を出し燃える。

発光ダイオードは、発光効率の高光源として、信号機、パイロットランプ、街のイルミネーション、車のヘッドライト、光合成等、多目に使用される。

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

ホタルの発光の源はルシフェリン。熱をほとんど出さずに発光する。

ルビーの赤は不純物のクロム。世界初のレーザーはルビーから出た光。

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

白色をつくるには青と赤が必要。テレビの液晶の画素、CRTの蛍光体

### 色づくのは光の干渉

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

七色に光るシャボン玉

クレジットカードのホログラム

### 空の青色は光の散乱

光が小さな粒子 (分子) に当たると散乱します。波長の短い光は長い波長の光よりよく散乱します。空が青いのも夕焼けが赤いのも光の散乱の効果です。もとの光から色づれて散乱する光があります。ラマン散乱とい、分子や結晶の振動エネルギーが光子に足し算 (引き算) されるために生じます。この色のずれを計測して、半導体結晶の欠陥や分子の種類を分析する技術があります。

空の色は散乱された青い光

### 虹の七色は光の屈折

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

折れたように見えるけど...

プリズムで屈折して色分けされた光

### 光は回折する

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

モルフォ蝶と、羽の電子顕微鏡写真

七色に光るCDの表面

### 光子ロケットは光の放射圧

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

ハレー彗星

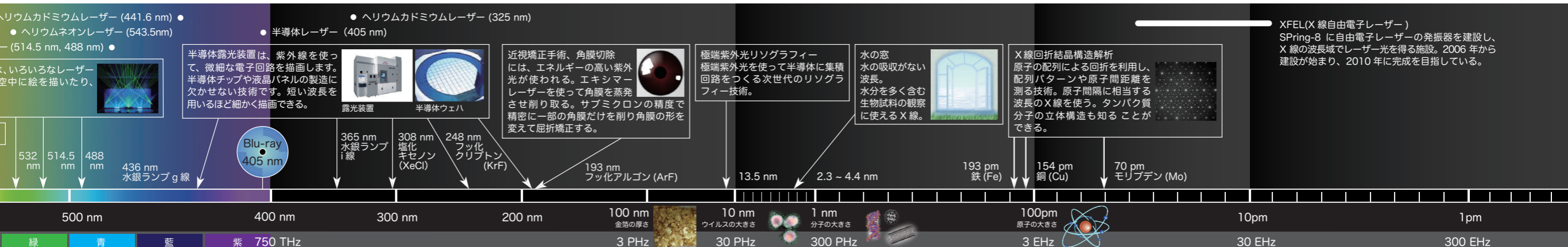
アメリカで光が進む

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

光が非常に弱くなってくると、光が粒々であることが見えてきます。光を光子 (フォトン) といい、光子の粒々がたくさん集まって「電子」の流れの集まりで、水が「水分子」の集まりのように振動で決まります。光子一つは、光の色、つまり波長 (あるいは周波数) を決めています。

### 光に関連するノーベル賞

- |       |                                |       |  |       |   |       |  |
|-------|--------------------------------|-------|--|-------|---|-------|--|
| 1901年 | X線の発見 (W. レントゲン)               | 1924年 | X線分光学 (K. M. G. シーグバーン)                        | 1961年 | γ線の共鳴吸収とメスbauer効果の発見 (R. L. メスbauer)              | 1997年 | レーザー冷却法による中性原子の凝縮 (S. チュー、C. コーエンタウジ、W. D. フィリップス) |
| 1907年 | 干渉計の考案と分光学の研究 (A. マイケルソン)      | 1927年 | コンプトン効果の発見 (A. H. コンプトン)                       | 1964年 | レーザー、レーザー効果の発見 (C. H. タウンズ、N. G. バソフ、A. M. プロホロフ) | 1999年 | フェムト秒化学 (A. H. ズウェイル) (化学賞)                        |
| 1908年 | 光の干渉を利用した天然色写真 (G. リップマン)      | 1930年 | ラマン効果の発見 (C. V. ラマン)                           | 1964年 | X線回折法による生物物質の分子構造の研究 (D. M. ホジキン) (化学賞)           | 2000年 | 高速・光電子技術のための半導体ヘテロ構造の開発 (Z. I. アルフォーロフ、H. クレーマー)   |
| 1909年 | 無線通信 (G. マルコーニ、C. F. ブラウン)     | 1932年 | 量子力学の創始 (W. K. ハイゼンベルグ)                        | 1965年 | 量子電磁力学 (朝永振一郎、J. シュウィンガー、R. P. ファインマン)            | 2002年 | 宇宙ニュートリノ検出 (R. デービス Jr.、小柴昌俊)                      |
| 1914年 | 結晶によるX線回折 (M. フォン・ラウエ)         | 1936年 | X線、電子線回折による分子構造の研究 (P. J. W. デバイ) (化学賞)        | 1966年 | 光ポンピング法による原子の励起 (A. カスレ)                          | 2002年 | タンパクのレーザーイオン化法 (J. B. フェン、田中耕一) (化学賞)              |
| 1915年 | X線結晶解析 (W. H. ブラッグ、W. L. ブラッグ) | 1953年 | 位相顕微鏡の発明 (F. ツェルニケ)                            | 1971年 | ホログラフィーの発明 (D. ガボア)                               | 2003年 | 核磁気共鳴画像法 (P. ラウターバー、P. マンスフィールド) (生物・医学賞)          |
| 1918年 | エネルギー量子説 (M. K. E. L. プランク)    | 1954年 | 原子核反応とγ線に関する研究 (W. ボーテ)                        | 1974年 | 電波天文学における先駆的研究 (M. ライル)                           | 2005年 | 光コヒーレンスの量子理論 (R. J. グラウバー)                         |
| 1921年 | 光電効果の法則の発見 (A. アインシュタイン)       | 1958年 | チェレンコフ効果の発見 (P. A. チェレンコフ、I. M. フランク、I. E. タム) | 1979年 | X線 CT (G. N. ハウンズフィールド、A. M. コーマック) (生物・医学賞)      | 2005年 | 光周波数コム技術などレーザー精密分光法の開発 (J. L. ホール、T. W. ヘンシュ)      |



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

目に見えない光、外殻電子遷移エネルギー

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

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

ブラックランプの発する紫外線は目に見えないが、周りの物質を発光させる。

オゾン層  
地球上の生物に害のある紫外線を遮ってくれる。

光触媒は、紫外光を吸収して、窓ガラスや壁の汚れを分解する。

酸化チタン

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

### 軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

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

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

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

ウォルター鏡

ゾーンプレートでX線を回折して集光する方法もある。

フレネルゾーンプレート

反射には、Mo/Si や Cr/Sc などの多層膜が用いられる。

静電気除去  
空気中の分子を分解してイオンを発生し、基板の帯電を除去する。

### X線

内殻電子遷移エネルギー

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

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

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

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

### γ線

原子核・素粒子の遷移エネルギー

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

γ線バースト  
太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。

強い放射線  
強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

放射線治療  
弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

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

### 光は横波

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

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

### 光の速度は

真空中で1秒間に30万 km。これは1秒間に地球を7周半回ることができる速さです。月までは1.3秒、太陽までは8.3分かかります。光の速さで1年かかる距離を1光年といいます。太陽から最も近い恒星は4.2光年の距離にあり、銀河系の直径は10光年です。夜空には数多くの星が見えますが、この光は何年も何十年も昔に星を出た光です。真空中の光の速さは、電波も可視光もX線も同じです。また、この速度を超えることは不可能とされています。

しかし、速度を遅くすることはできます。屈折率の高いプラスチックやガラスの中での光の速さは、真空中に比べて1.33分の1、1.5分の1になります。最近、**フォトリソグラフィ**や**プラズマディスプレイ** (金属薄膜) で、速度がとても遅い**スローフォトン**をつくり出す研究が進んでいます。

### 太陽の七変化

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

### 色の見え方

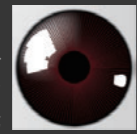
人間は 600 万~1,000 万色を識別できるとされていますが、目の中には、赤、緑、青のセンサーしかありません (犬、猫は2色、鳥は4色)。このセンサーに入る光のバランスで色を認識しています。たとえば、赤と緑の光が同時に目に入ると黄色に、すべての色が混ざると白く見えます。この3色は**光の3原色**といい、テレビ等の発色に使われます。

絵の具やインクは光を吸収して色をつくり出します。赤の絵の具は赤色以外の光を吸収し、赤色の光だけを反射します。シアン (Cyan)、マゼンタ (Magenta)、黄色 (Yellow) の3色 (**色の3原色**) を使えば様々な色をつくることができ、印刷物はこれに黒を組み合わせてつくり出します。



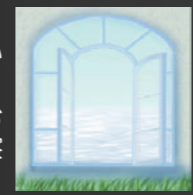
325 nm)

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

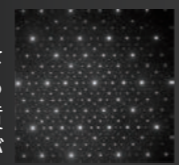


極端紫外光リソグラフィー 極端紫外光を使って半導体に集積回路をつくる次世代のリソグラフィー技術。

水の窓 水の吸収がない波長。水分を多く含む生物試料の観察に使えるX線。



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



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



### 紫外光

、外殻電子遷移エネルギー

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

外線殺菌 水、食品、薬品などを殺菌する。

オゾン層 紫外線 可視光

酸化チタン 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。

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

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

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

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

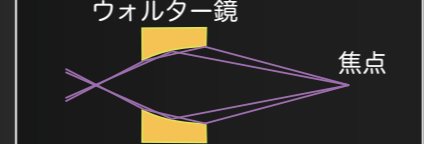
### 軟X線 (極短紫外を含む)

内殻電子遷移エネルギー、水に吸収されない

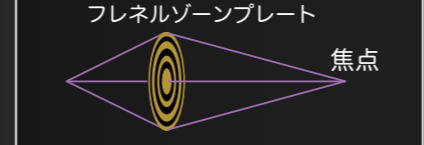
レーザープラズマ光源 高出力のレーザー光をターゲットに当てて発生するプラズマから軟X線を出す。未来の半導体製造光源。

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

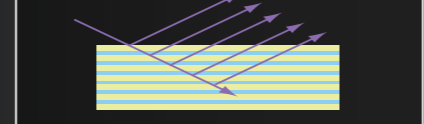
X線のレンズ 軟X線やX線の領域では、ガラスも金属も屈折率がほぼ1.0で、反射も屈折もしない。浅い角度の反射でX線の進行方向を変えて集光する。



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。

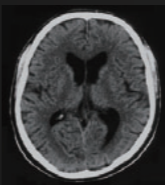
### X線

内殻電子遷移エネルギー

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



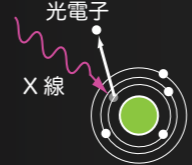
X線CT (コンピュータ断層撮影) 様々な方向でX線を照射して測定した透過強度から、コンピュータ解析によって断層像を取得する。



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



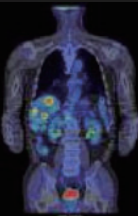
XPS(X線光電子分光) X線を試料に当てて出る光電子から、半導体の構成元素や電子状態を分析する。



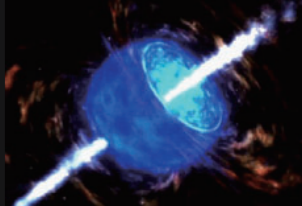
### γ線

原子核・素粒子の遷移エネルギー

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



γ線バースト 太陽系外からやってくる原因不明の突発的なガンマ線。



強い放射線 強力なX線やγ線は人体に致命的な障害をもたらす。

放射線治療 弱い放射線を使えばがん細胞を退治できる。

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



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

荷電粒子は物質中の電子を蹴散らかしつつ

徐々にエネルギーを失って減速する。

重い粒子は飛程がほぼ揃っている。

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

## 光子（X線・ $\gamma$ 線）の減衰（減弱）

光子は原子に吸収されたり、大きく散乱されて

一気にエネルギーを失う反面、何も相互作用せず

素通りするものも多い。☞ **光子数の指数関数的減少**

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

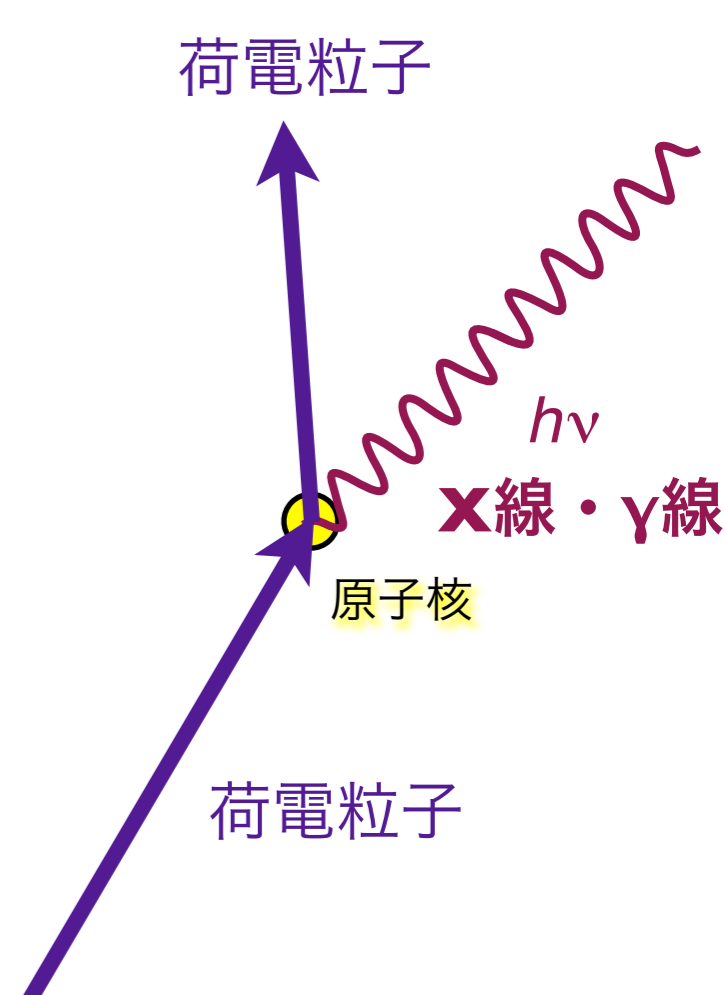
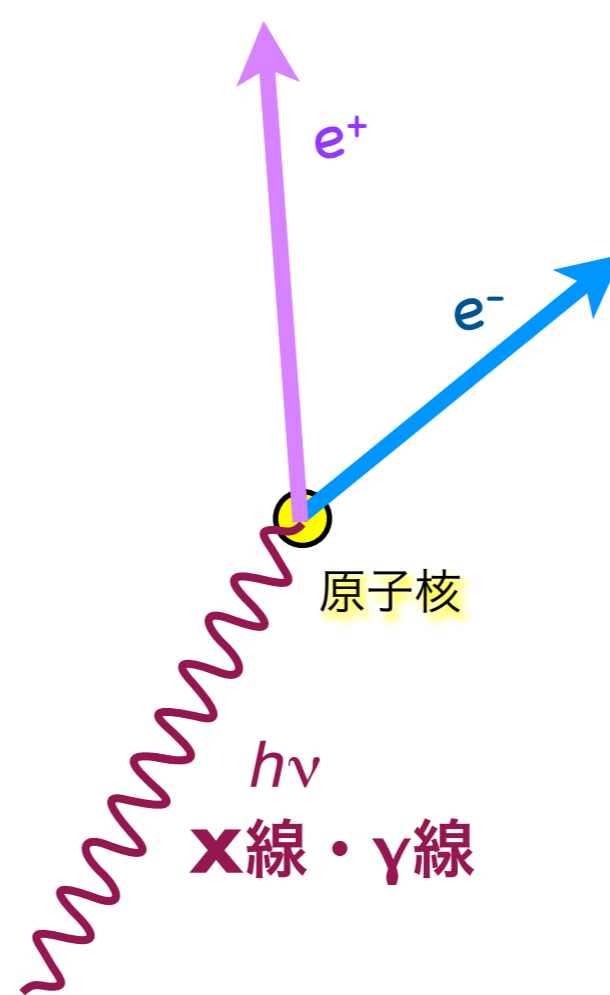
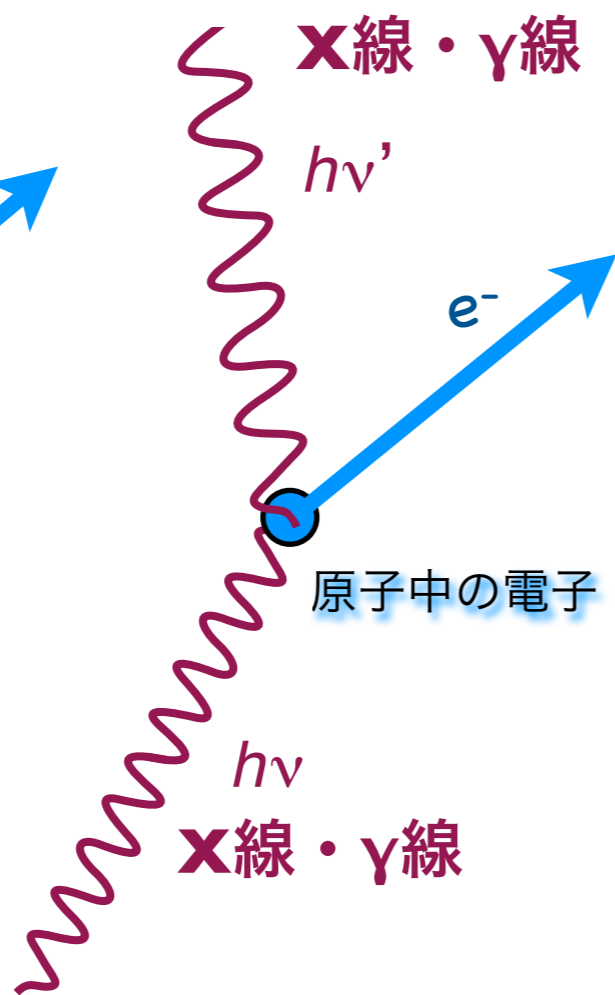
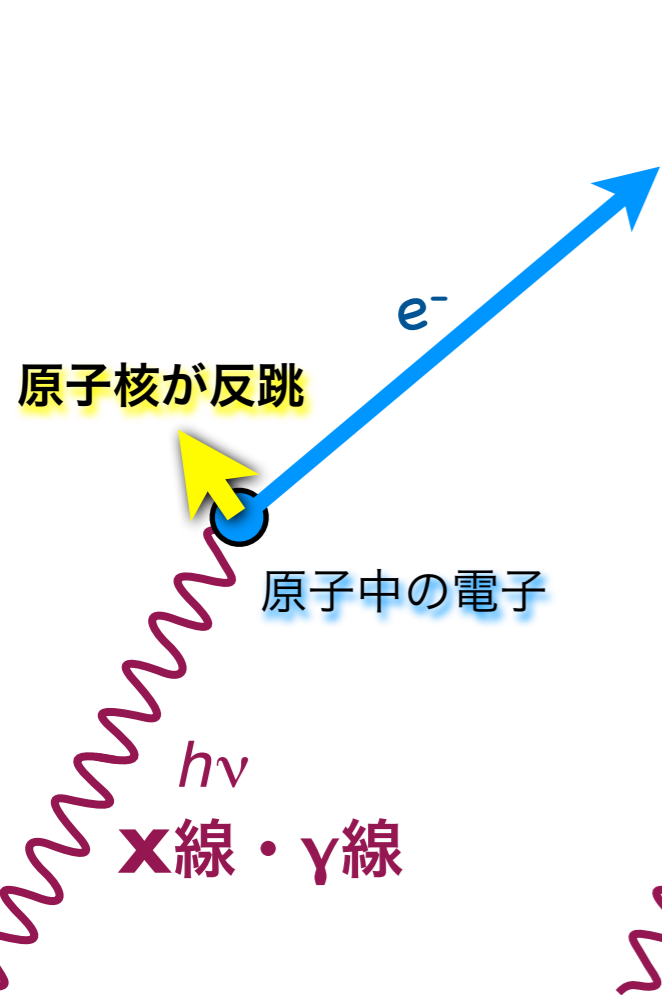
# 光子 (X線・γ線) の関わる相互作用

## 光電効果

## コンプトン散乱

## 電子対生成

## 制動放射



# 光子

紫外線

X

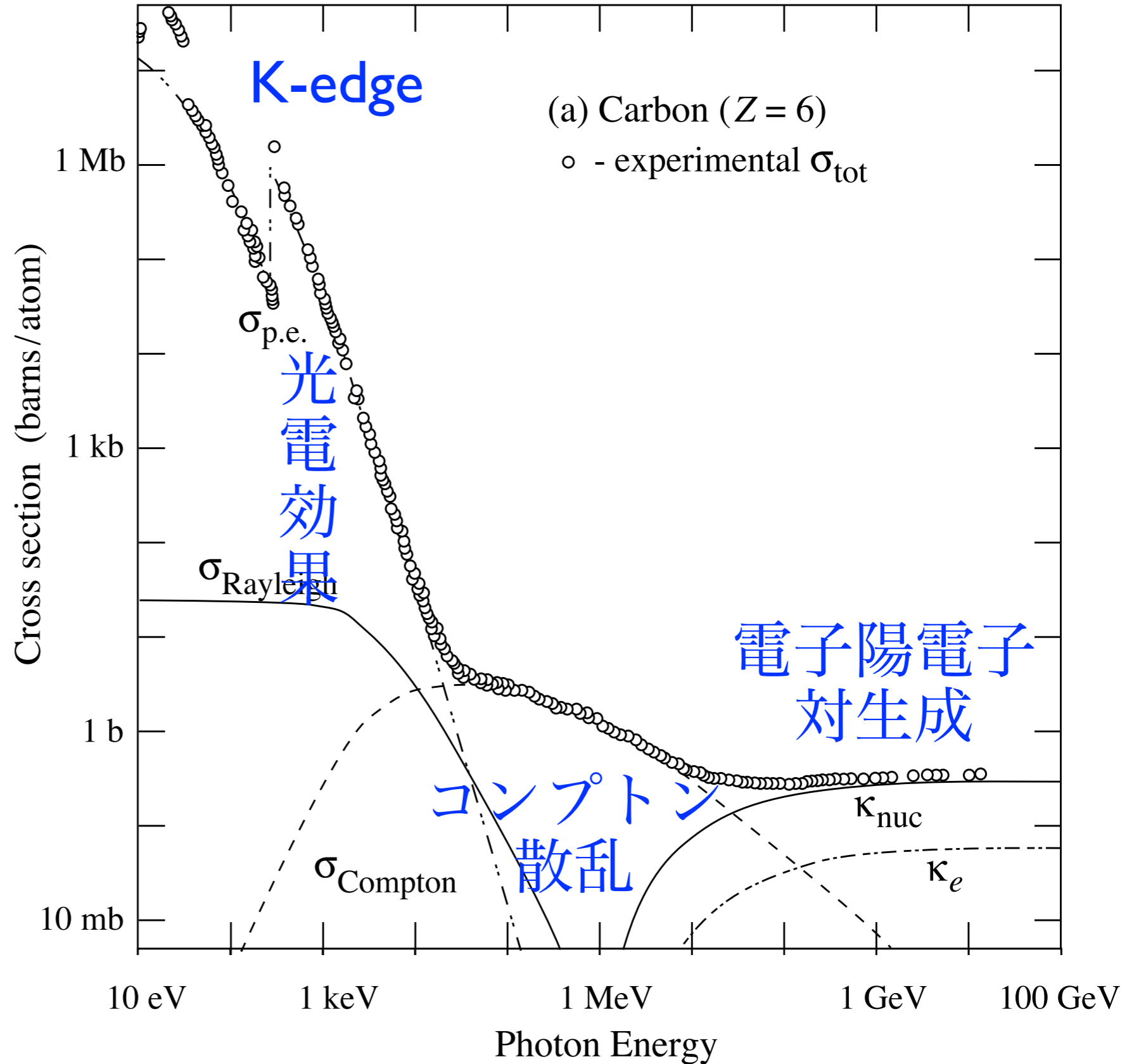
線

γ

線

## 反応断面積

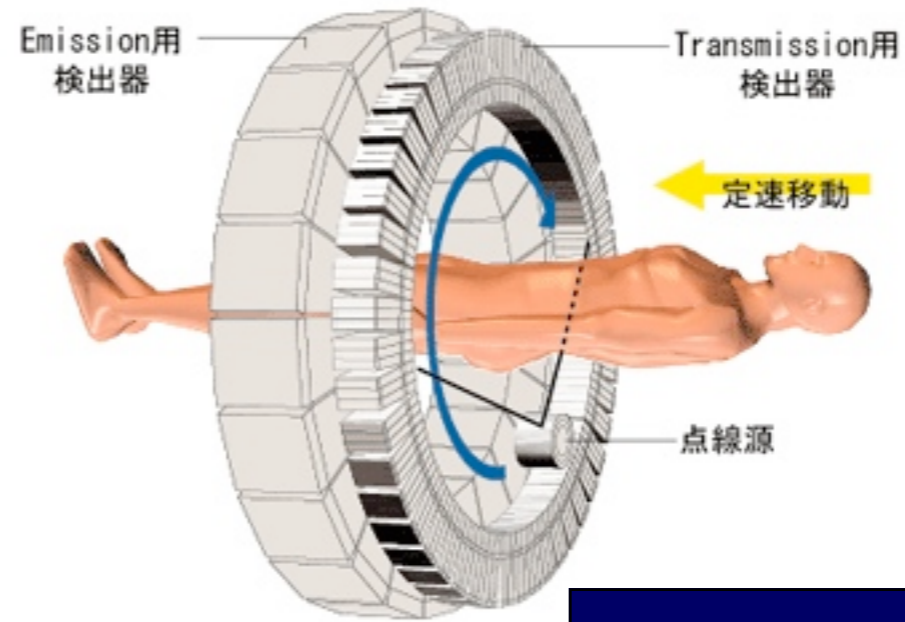
1 barn  
=  $10^{-28} \text{ m}^2$   
=  $100 \text{ fm}^2$



## 胸部単純X線撮影

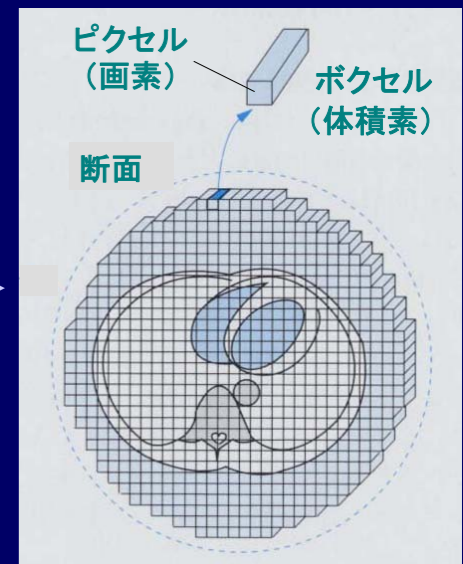
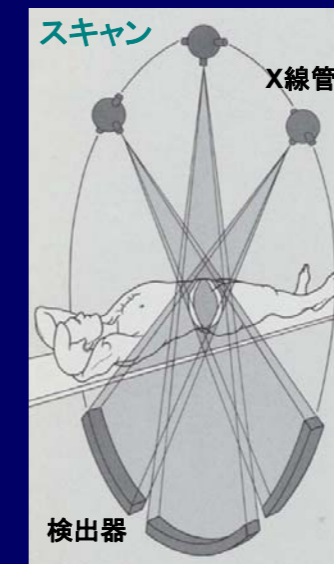
### 胸部正面像

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



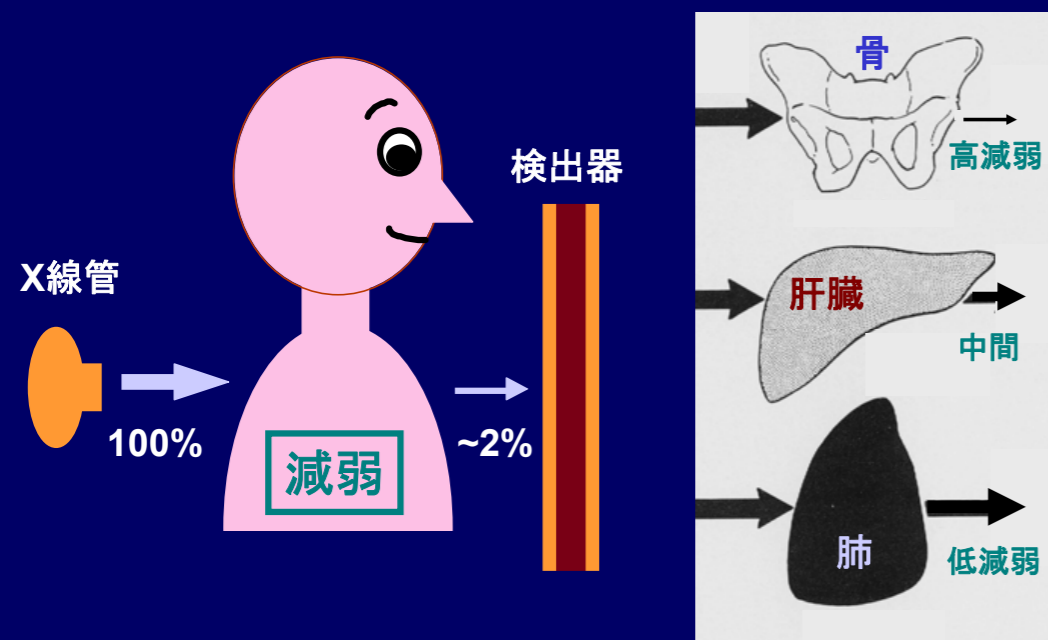
# X線 CT

## X線コンピュータ断層撮影法：CT



# レントゲン(X線)撮影

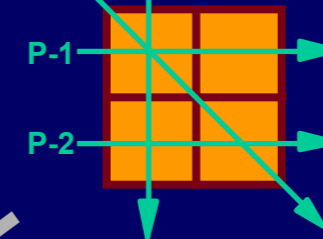
国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用



### 未知の線減弱係数

$\mu_1$	$\mu_2$
$\mu_3$	$\mu_4$

### X線投影



### 連立方程式

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

### 解答

1	7
5	4

## 逆問題

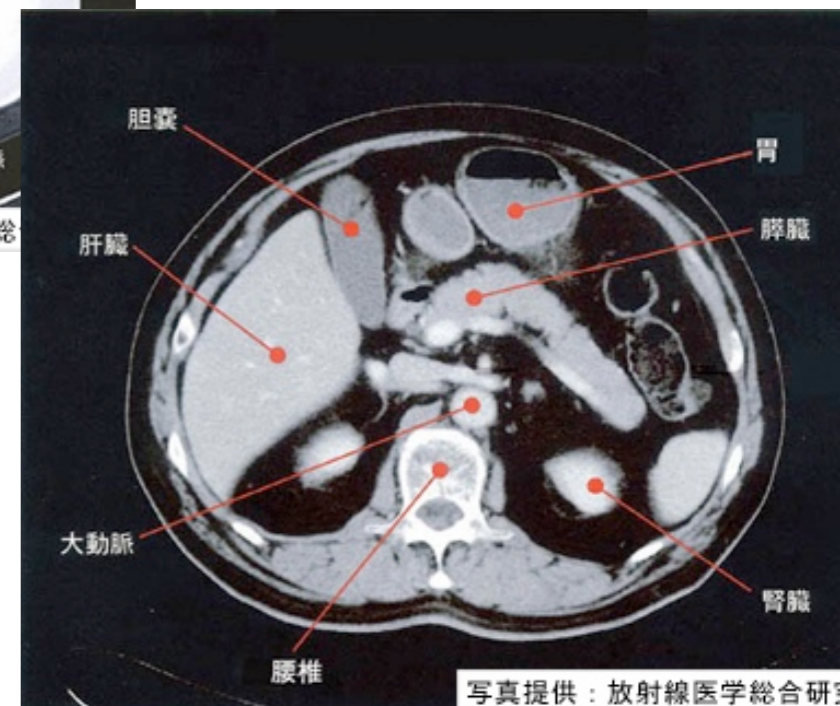
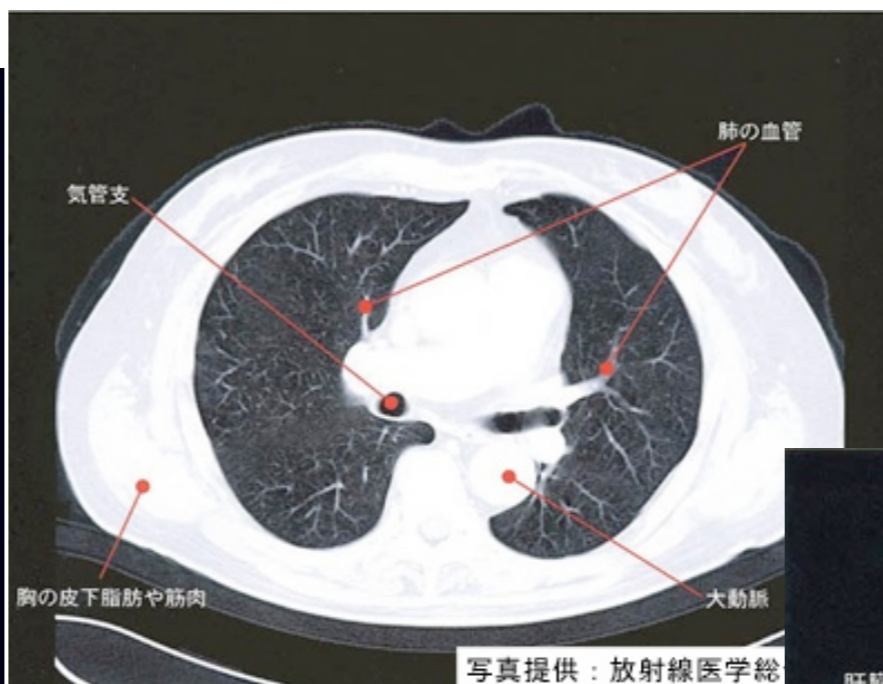
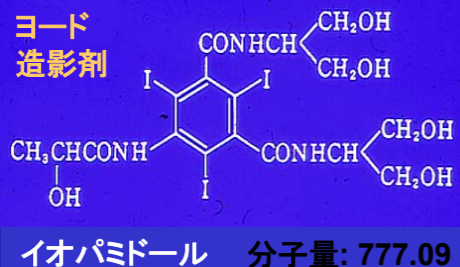
# X線検査用造影剤

## \* 陽性造影剤

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

## \* 陰性造影剤

- ・気体: 空気, 酸素, 炭酸ガス...
- ・オリーブ油(膀胱CT)

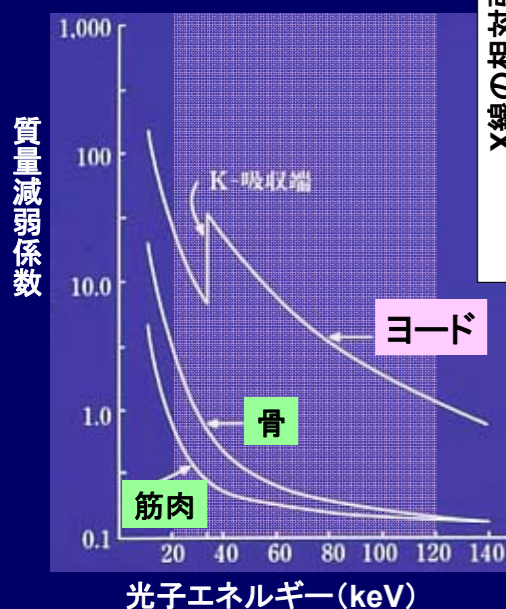
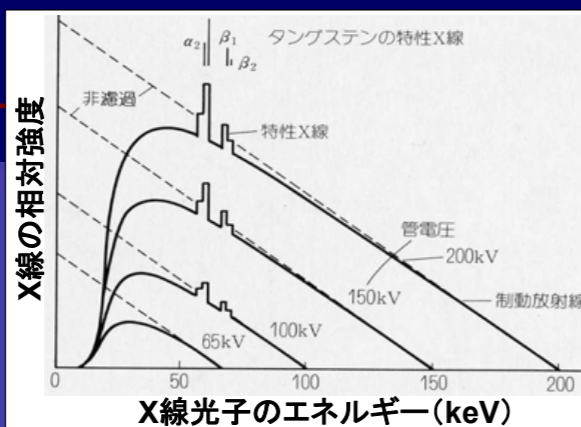


(減弱)

造影剤 (I, Ba, Xe) : Z 大 = 減衰係数 大

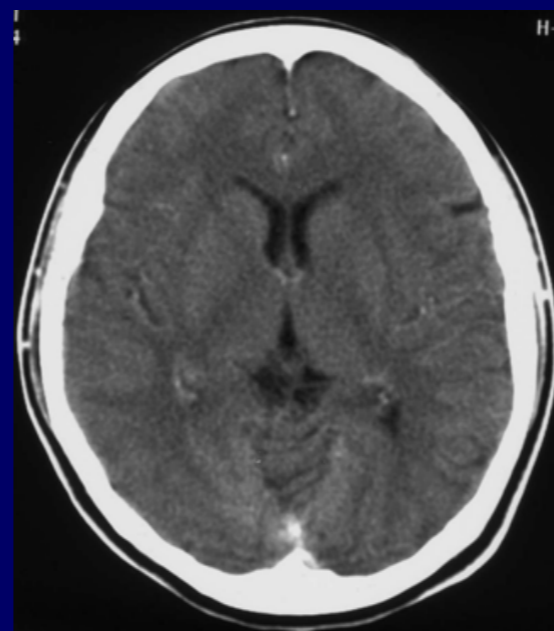
国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

# X線の発生と減弱

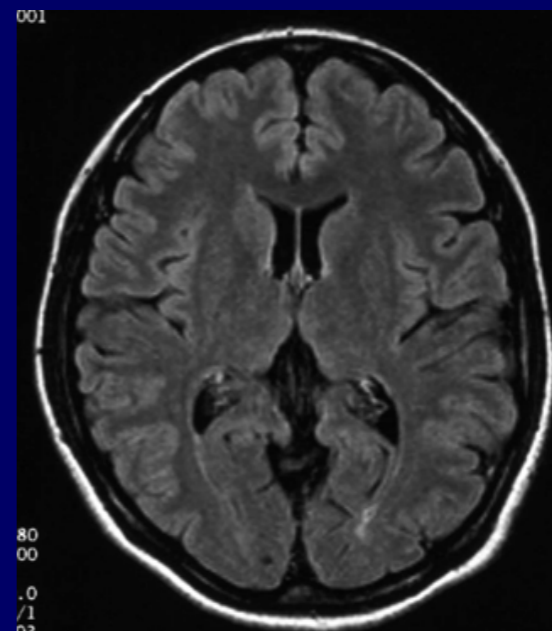


- \* 光電効果: 光電吸収
- ・元素のK吸収端 (keV): H 0.0136, C 0.283, O 0.531
- \* コンプトン散乱: 非弾性散乱

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



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





放射線

科学的に

理解する

東大教養の講義から

- 放射線入門
- 放射能と放射線の物理学
  - 原子核物理学・放射線物理学
- 環境汚染の放射線計測
  - 放射線計測学・環境放射化学
- 放射線の人体への影響
  - 放射線の単位・放射線化学
  - 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3話

# 環境汚染の放射線計測

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 放射線計測学



# 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

$\gamma$



CsI (Tl)

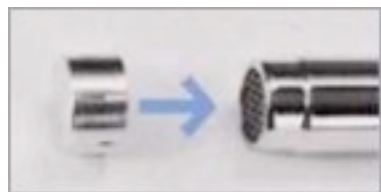


NaI (Tl)



$\beta$  ( $\gamma$ )

【表面汚染検査】



$\gamma$

$\beta$  ( $\gamma$ )



GM管

$\alpha$



ZnS (Ag)



# 放射線の測定

## 半導体検出器

(Semiconductor detectors)

例：Si(Li) 検出器 (X線)

Ge 検出器 (高エネルギー分解能)

( $\gamma$ 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)**

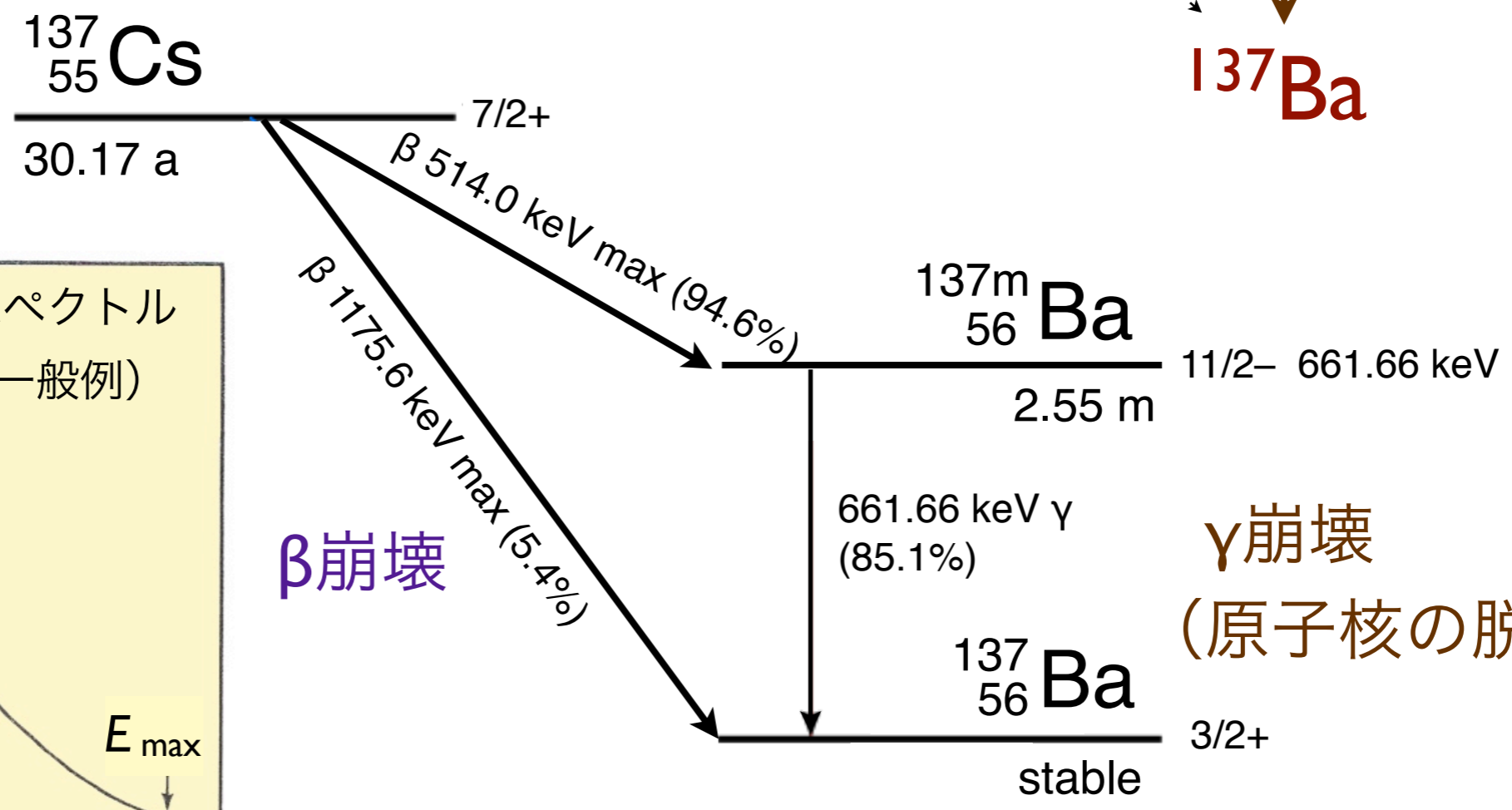
## 試料測定

$\gamma$  ゲルマニウム検出器 (Ge detector)



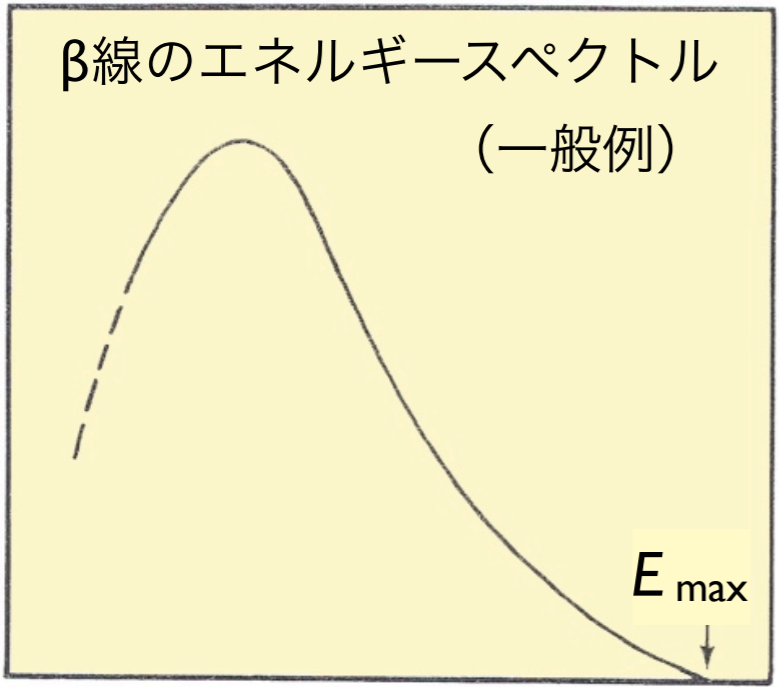
食品検査用ゲルマニウム検出器





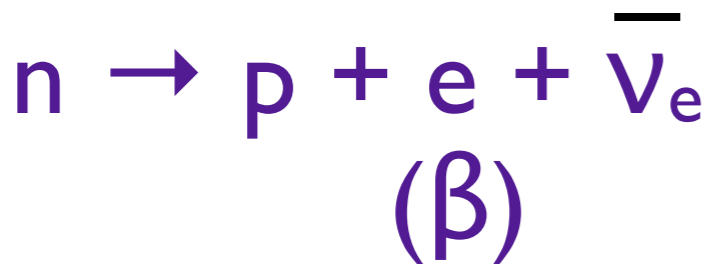
$\gamma$ 崩壊  
 (原子核の脱励起)

粒子数の分布



エネルギー  $E_\beta$

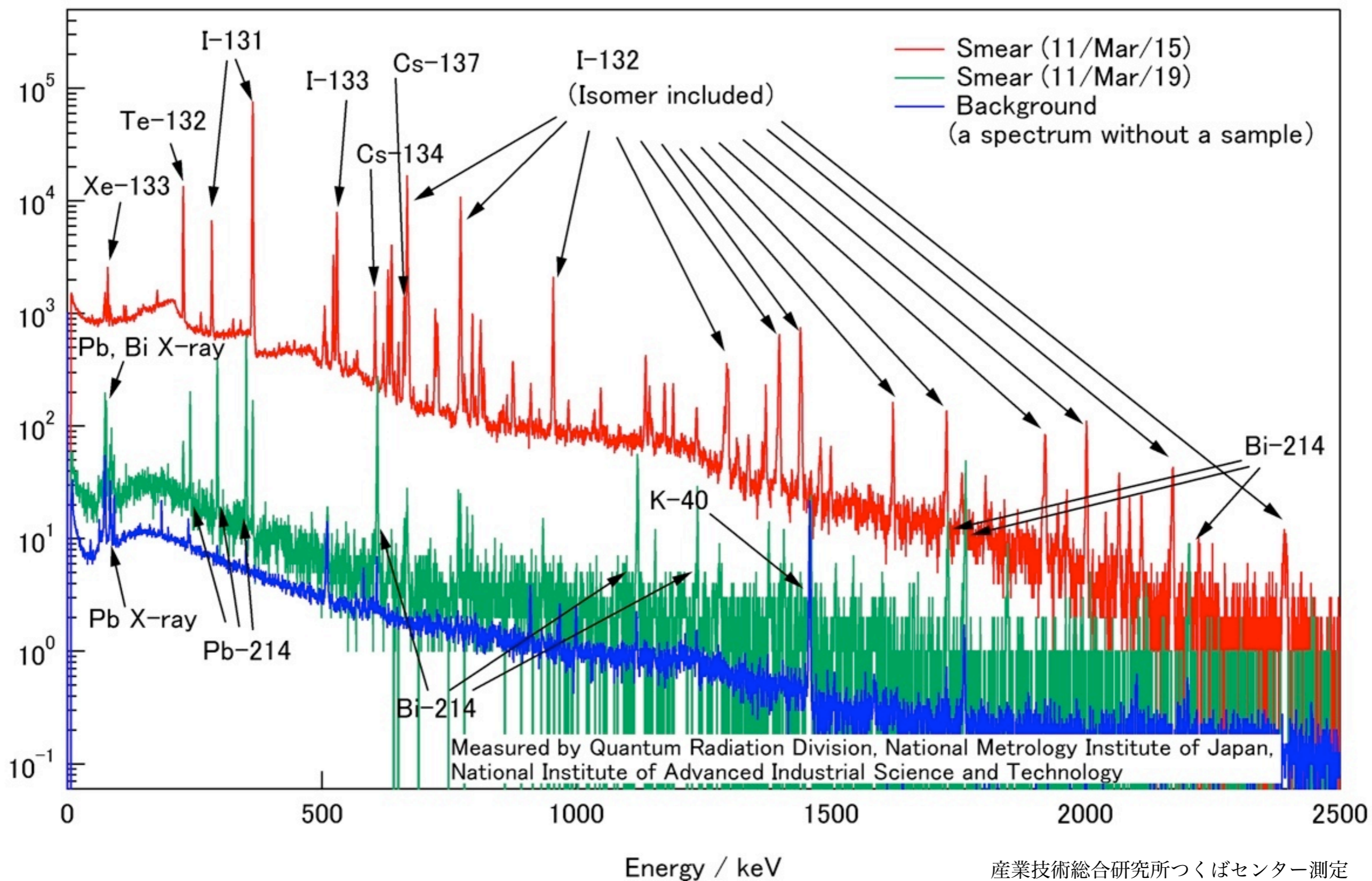
$\beta$ 線 (連続スペクトル)



$\gamma$ 線 (定まったエネルギー)

# エネルギー分析 (核種同定)

## ガンマ線スペクトル (ゲルマニウム検出器)



# どうやって測っている？ (I)

100 Bq/kg = 10 Bq / 100 g

検出効率は 1% 程度

(立体角・Ge結晶による検出効率)

$^{134}\text{Cs}$  と  $^{137}\text{Cs}$  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**

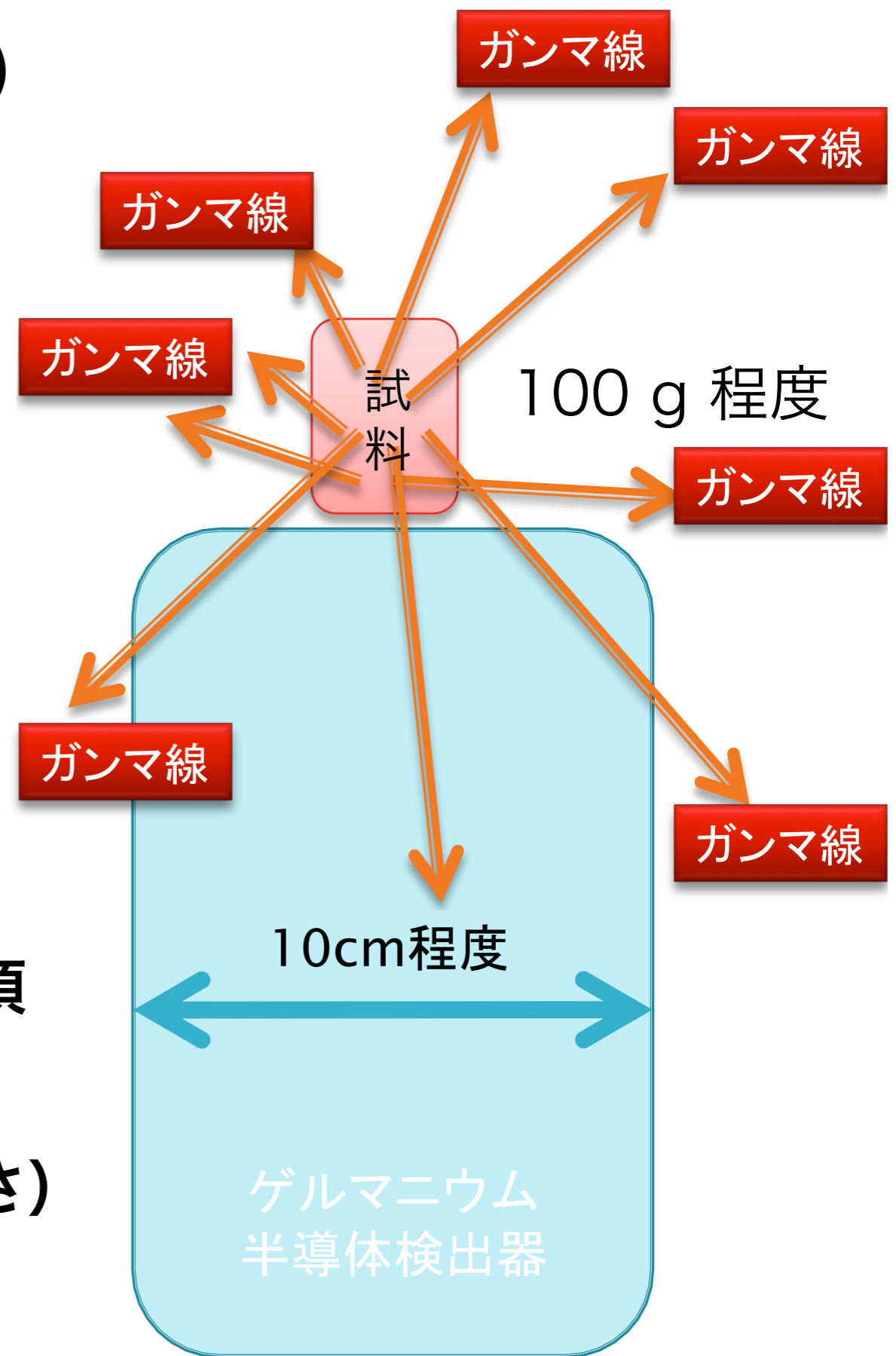
(環境放射線の遮蔽)

**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)



# 10試料の測定結果(良くない表記)

No.	試料	採取場所	$^{134}\text{Cs}$ (Bq/kg)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
1	畑の土	練馬区内	ND	14.1
2	ジャガイモ	練馬区内	4.58	7.16
3	培養土	練馬区内	5.95	9.35
4	梅	練馬区内	ND	ND
5	干し椎茸	群馬産	ND	ND
6	路傍の土	練馬区内	4110	6330
7	生椎茸	富山産	ND	ND
8	カツオ	?	ND	ND
9	田圃の土	練馬区内	185	298
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42	ND

# 10試料の測定結果(ちょっと良い)

No.	試料	採取場所	$^{134}\text{Cs}$ (Bq/kg)	$^{137}\text{Cs}$ (Bq/kg)
1	畑の土	練馬区内	ND	14.1±2.17
2	ジャガイモ	練馬区内	4.58±0.55	7.16±0.86
3	培養土	練馬区内	5.95±1.43	9.35±1.89
4	梅	練馬区内	ND	ND
5	干し椎茸	群馬産	ND	ND
6	路傍の土	練馬区内	4110±20.9	6330±38.7
7	生椎茸	富山産	ND	ND
8	カツオ	?	ND	ND
9	田圃の土	練馬区内	185±11.6	298±19.4
10	ブルーベリー	練馬区内	1.42±0.29	ND

# 10試料の測定結果(詳細)

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



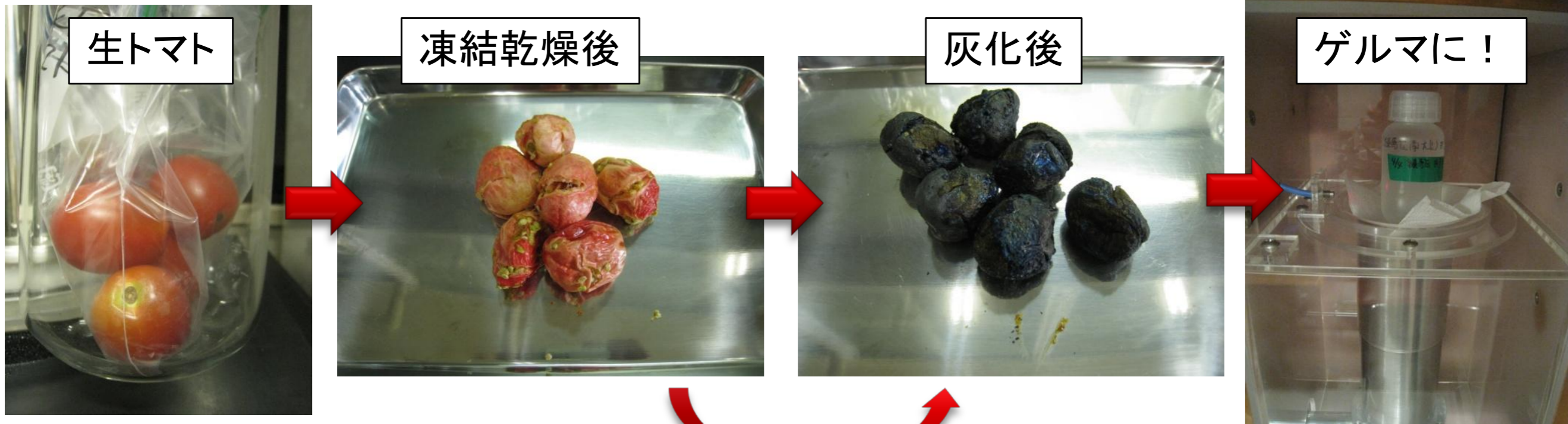
# 食品に含まれる放射性物質の測り方

- ▶ 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

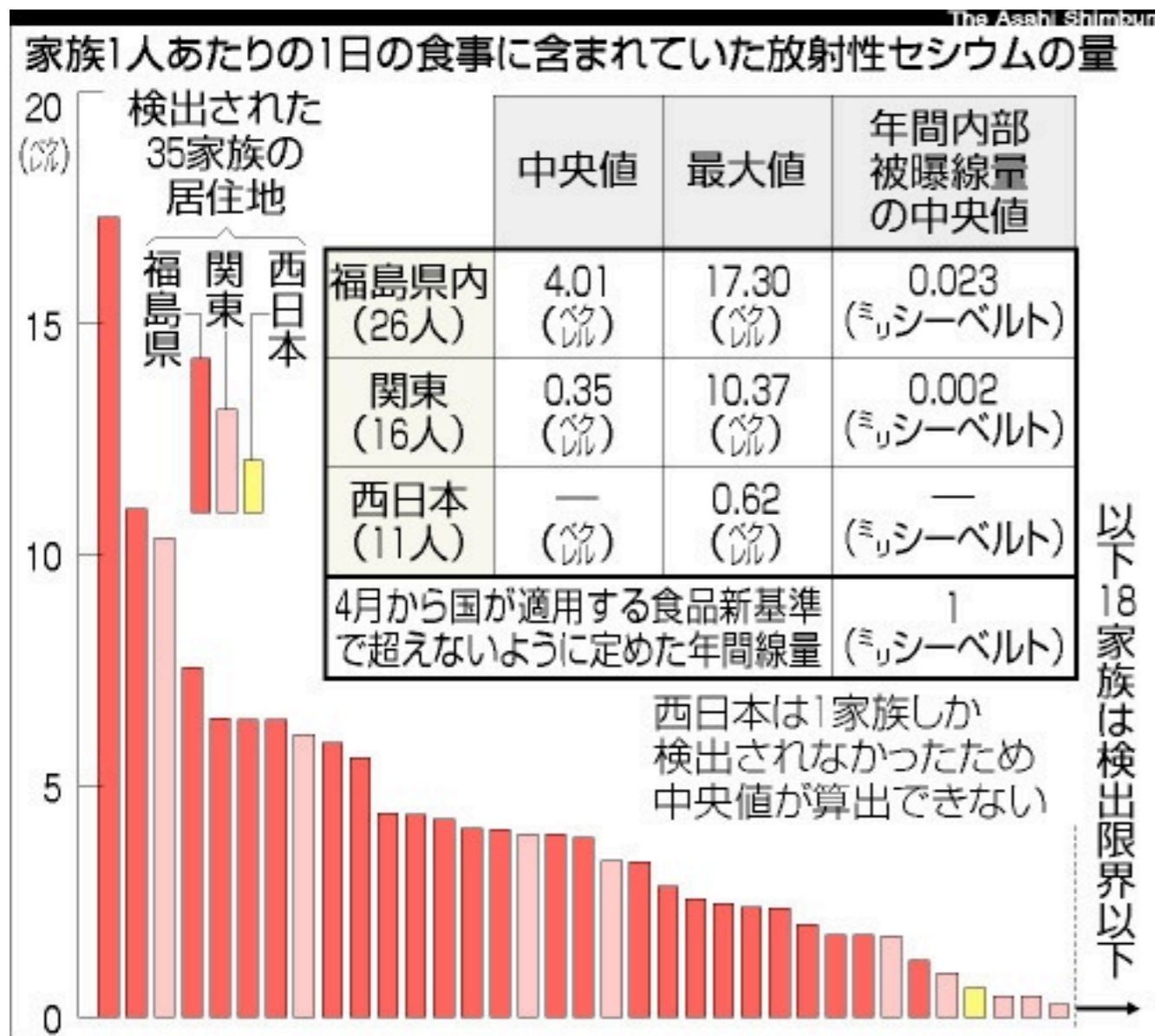


飛灰を発生させないように炭状にする

## 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( $^{131}\text{I}$ )	300	
放射性セシウム ( $^{134+137}\text{Cs}$ )	飲用水	10
	一般食品	100

# セシウムによる内部被曝について



2012/1/18 朝日新聞：京都大医学研究科 小泉昭夫教授らの調査

最近の調査結果をみれば、ひとまず安心。

自然の内部被曝に比べ一割以下  
(いろいろ批判されてきたが)  
食品規制が奏効しているようだ。

## ■放射性セシウムの基準

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

(1kgあたり)

事故前から体内に存在する放射性物質による自然放射線の内部被曝量 (体重 60 kg の人)

カリウム40、炭素14などあわせて 7200 ベクレル：0.3 ミリシーベルト／年間

うち、カリウム40 が 4100 ベクレル：0.2 ミリシーベルト／年間

# 内部被曝の評価

## WBC による体内放射能の測定

ホールボディーカウンター



# 線量計 (個人線量計、環境放射線測定)

フリック線量計

熱ルミネッセンス線量計

ガラス線量計



光刺激ルミネッセンス線量計

蛍光ガラス線量計  $Ag^+ \rightarrow Ag^0, Ag^{++}$

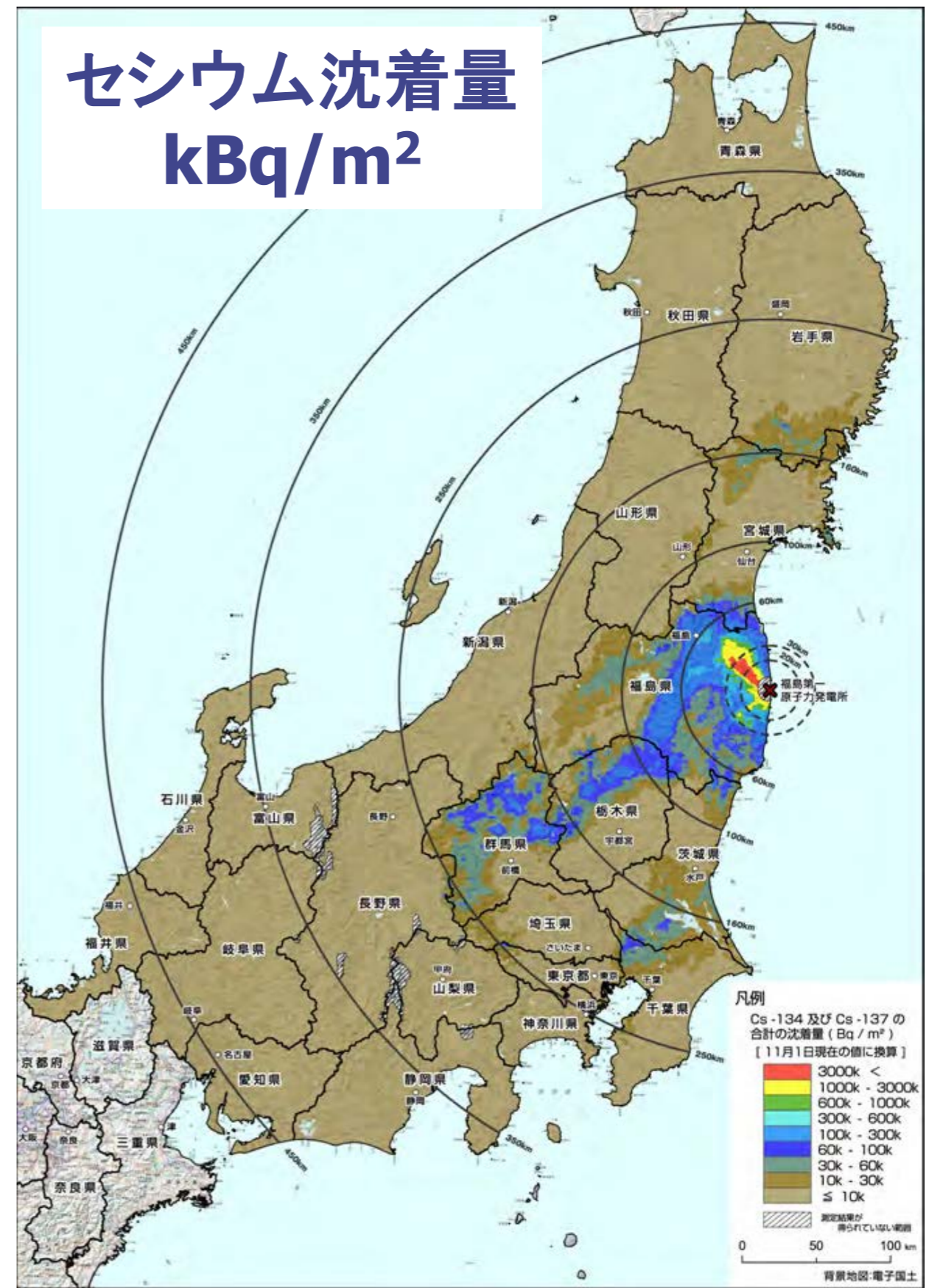
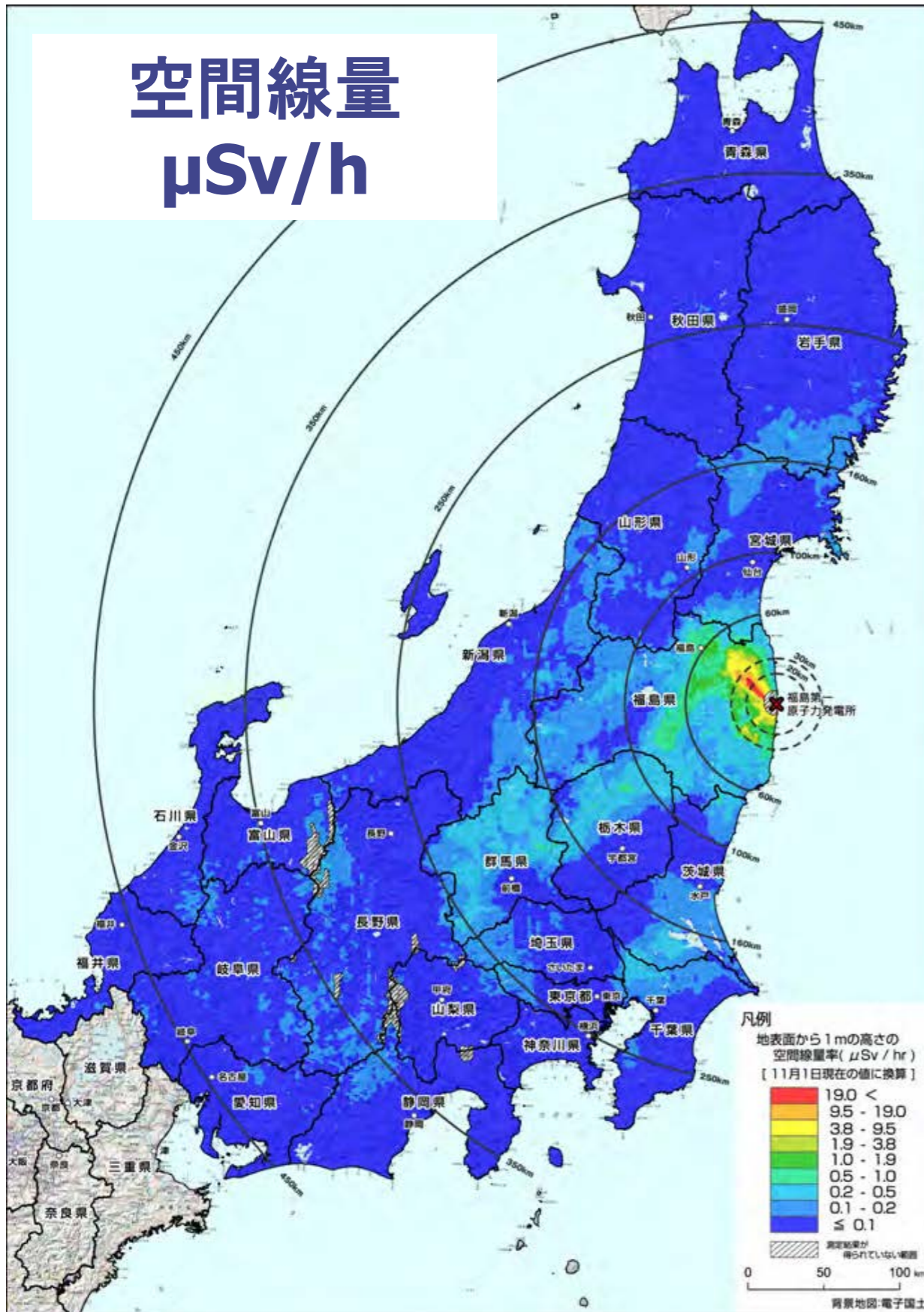
ポケット線量計：電離箱、半導体検出器

フィルムバッジ：銀塩写真フィルム  $AgBr$



# 環境放射化学

# 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



# 原発北西方向の汚染と「ホットスポット」



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



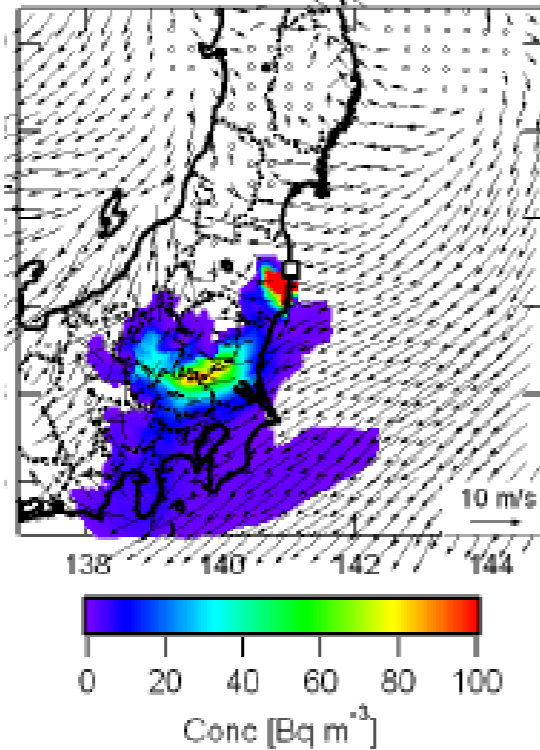
三訂版7月26日(初版4月21日)  
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/  
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)  
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),  
Source: @nnistar  
地図製図: 萩原佐知子  
背景地図には電子国土ポータル (portal.cyberjapan.jp) の地図を使用しました。



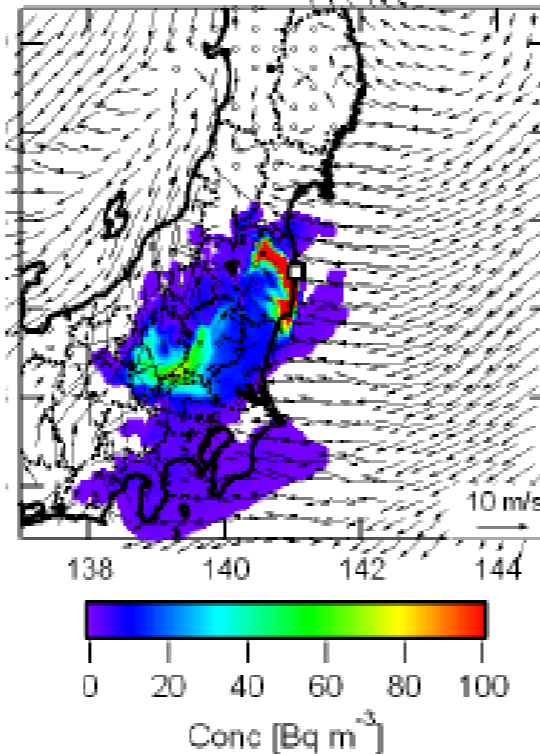
# ホットスポットの生成メカニズム

大気濃度

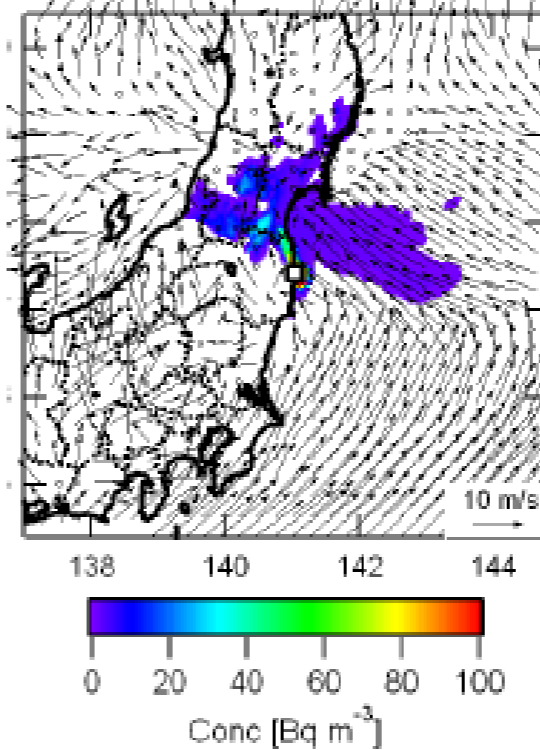
3/15の15時



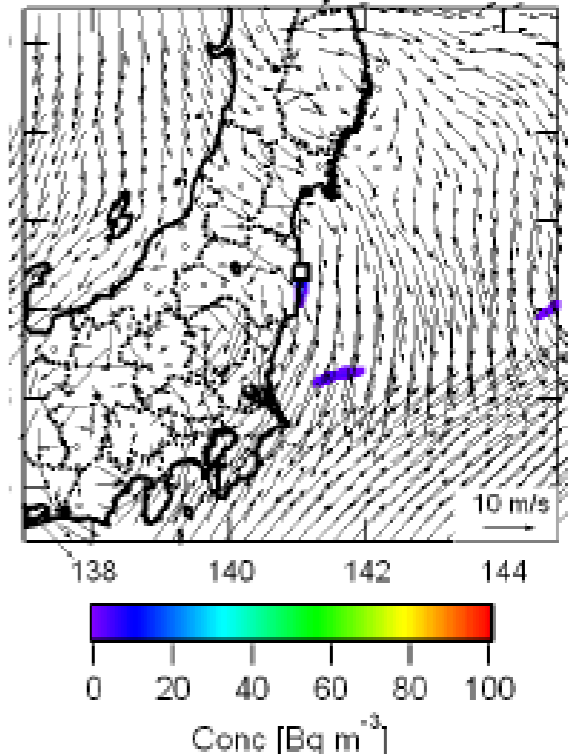
3/15の19時



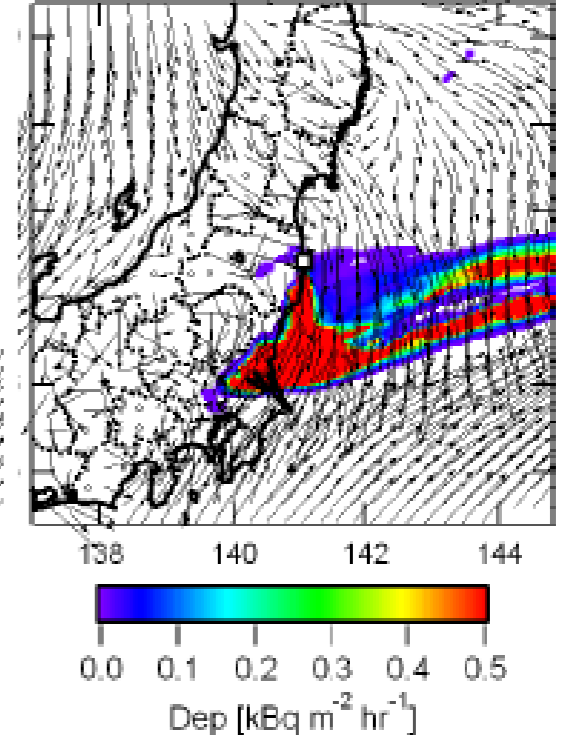
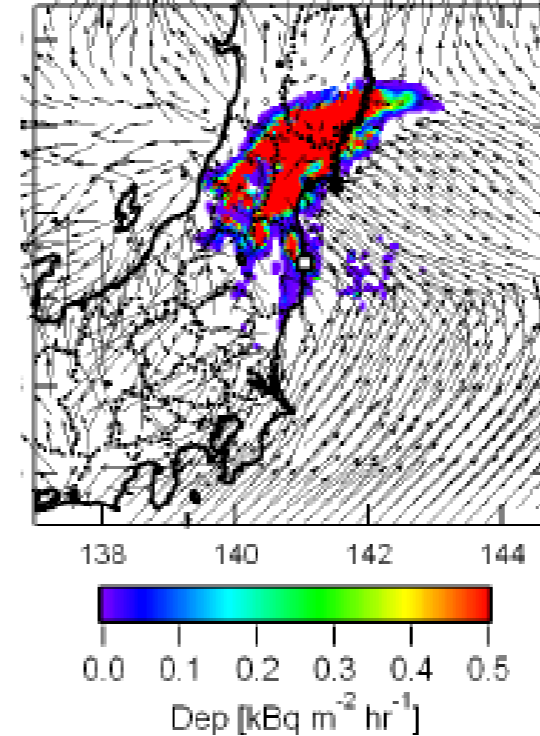
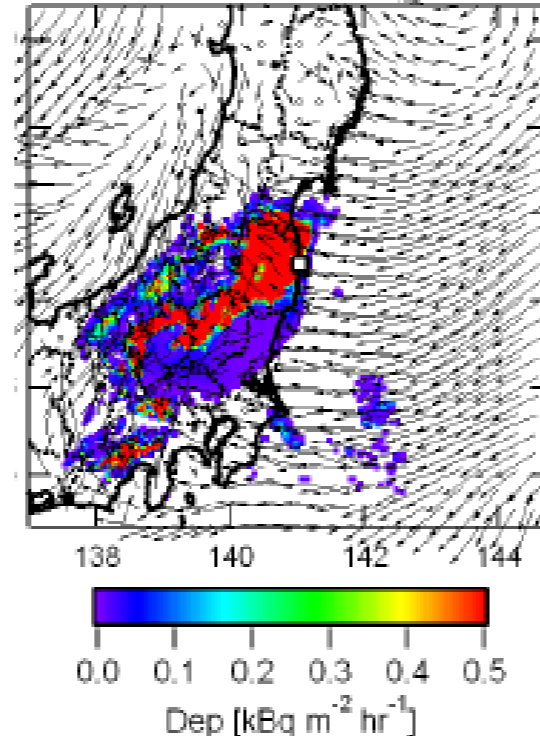
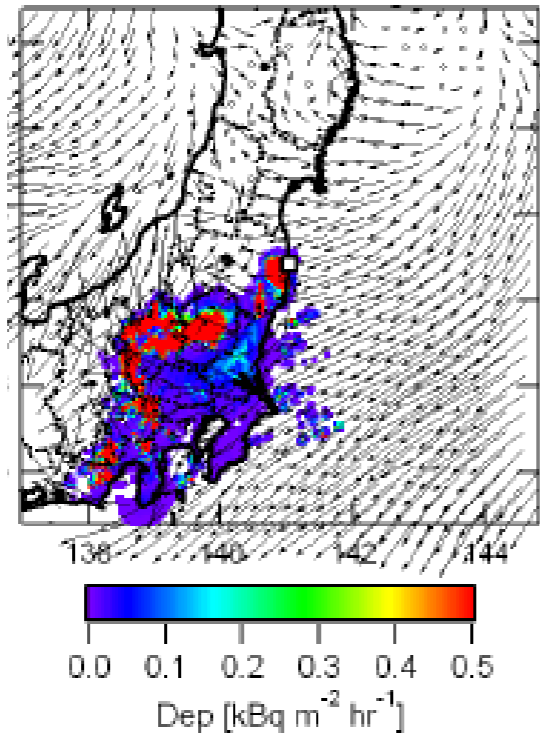
3/20の18時



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

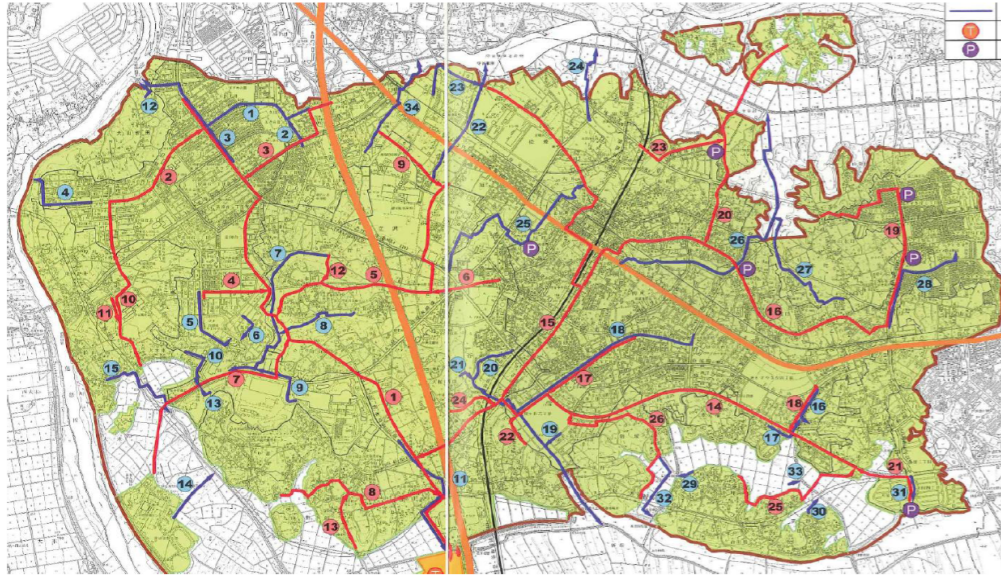


# 濃縮の顕著な例 - 茨城県守谷市

## 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

### 住宅地からの雨水の処理



### 公園は雨天時の調整池として活用



雨天時



### ホットスポット・ホットエリアの形成

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

# 除染

Cs 元素：土壤表層

土壤の引き剥がし、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



# 放射線

科学的に

理解する

東大教養の講義から

- 放射線入門
- 放射能と放射線の物理学
  - 原子核物理学・放射線物理学
- 環境汚染の放射線計測
  - 放射線計測学・環境放射化学
- 放射線の人体への影響
  - 放射線の単位・放射線化学
  - 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4話

## 放射線の人体への影響

鳥居 寛之

東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

# 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

radiation dose

- 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

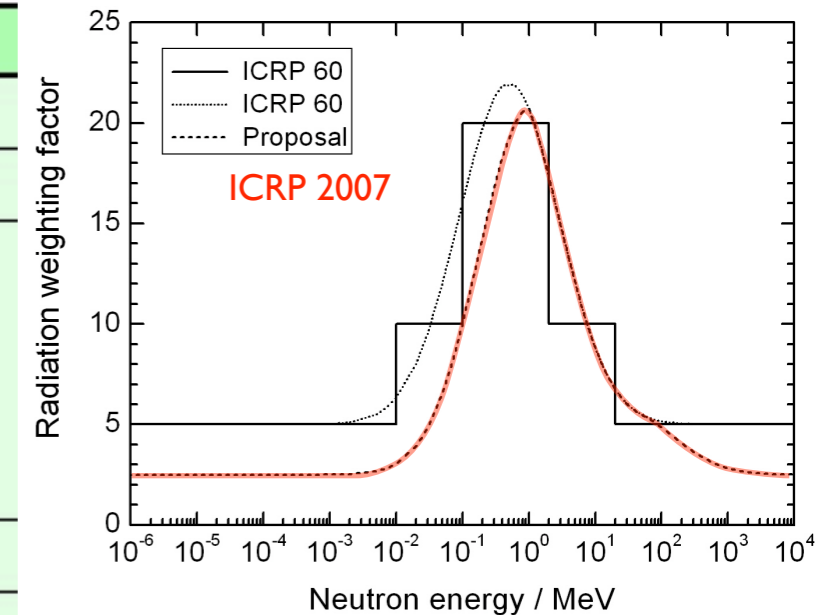


- 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

等価線量  $H_T [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

## 放射線加重係数

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（臓器ごとに加重係数をかけて合算）

実効線量  $E [J / kg] = [Sv]$  シーベルト

Sievert



# 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 <sup>※2</sup>	0.05	0.12
合計(全身)	1.00	1.00

左欄黒字 ICRP 1990

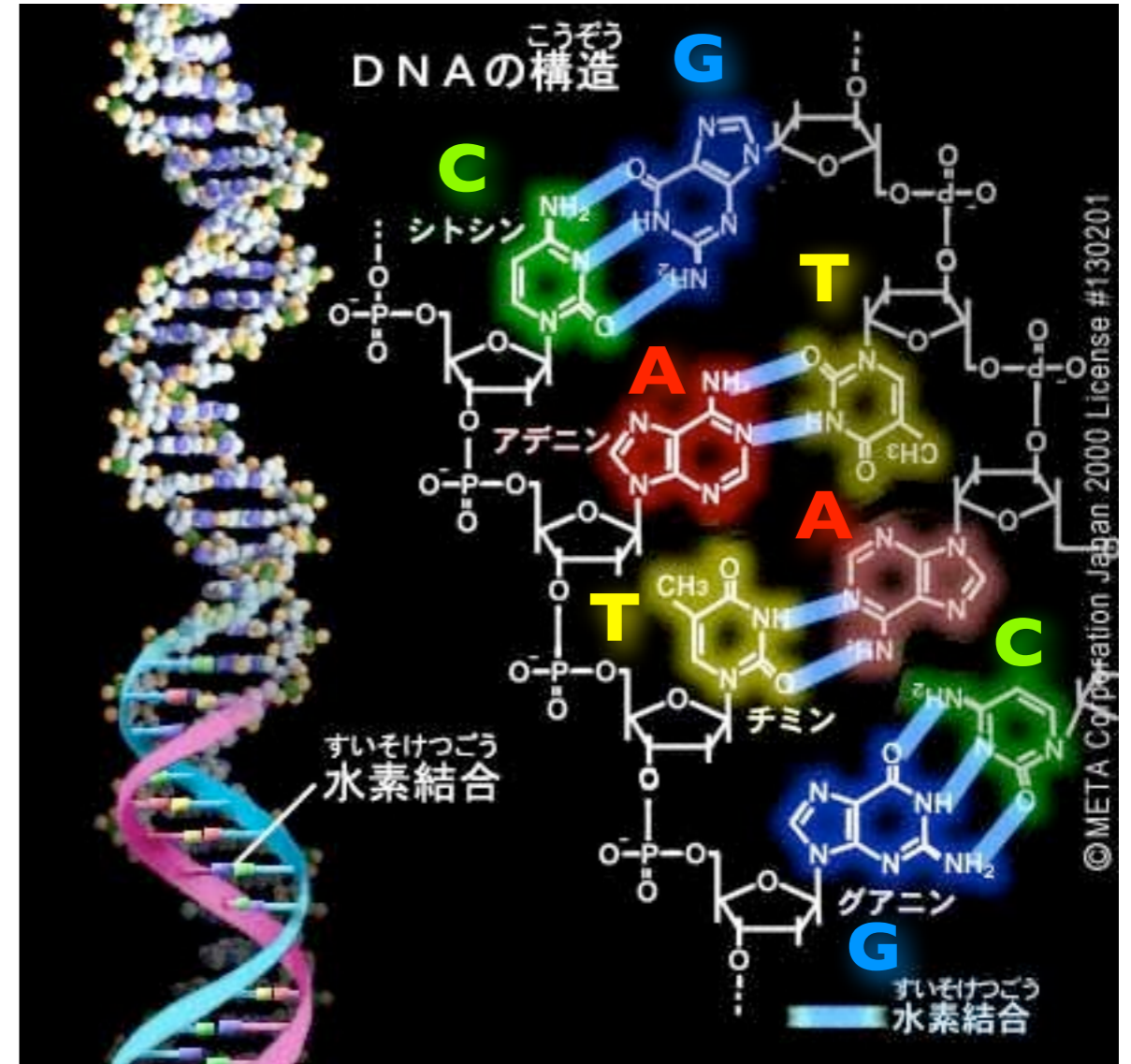
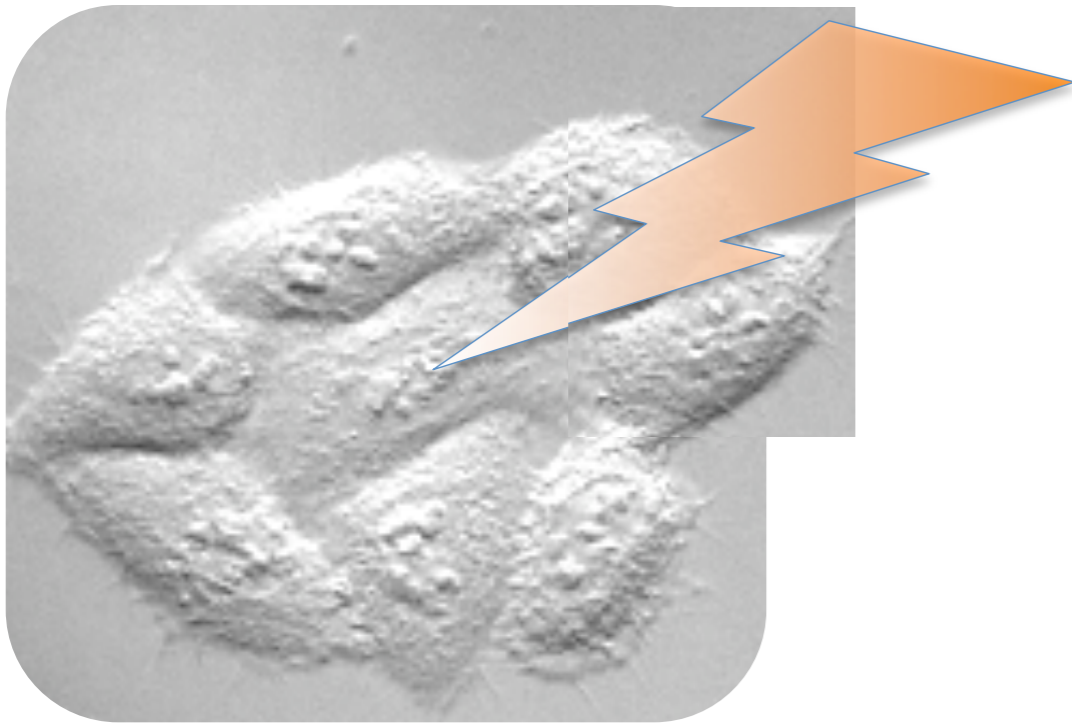
右欄赤字 ICRP 2007

# 放射線化学

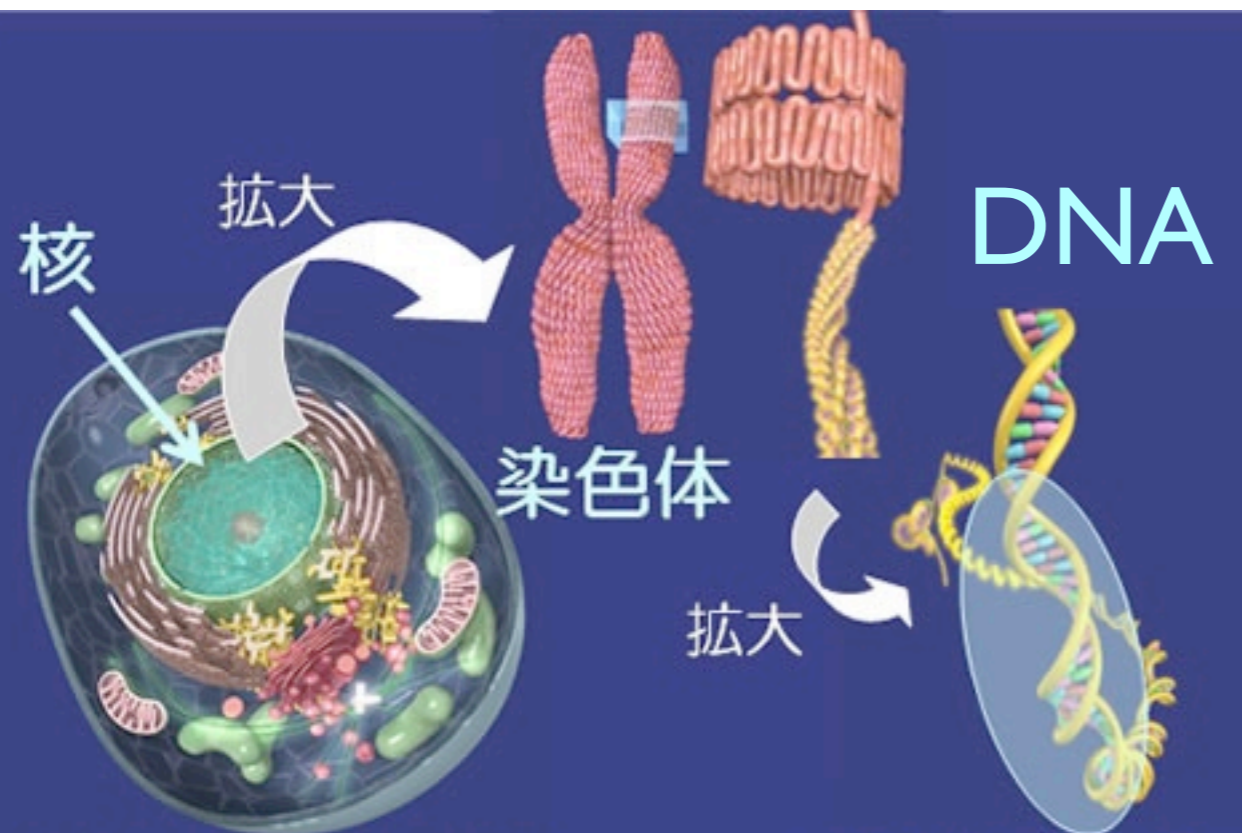


# 細胞の核に放射線が照射

## DNA



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

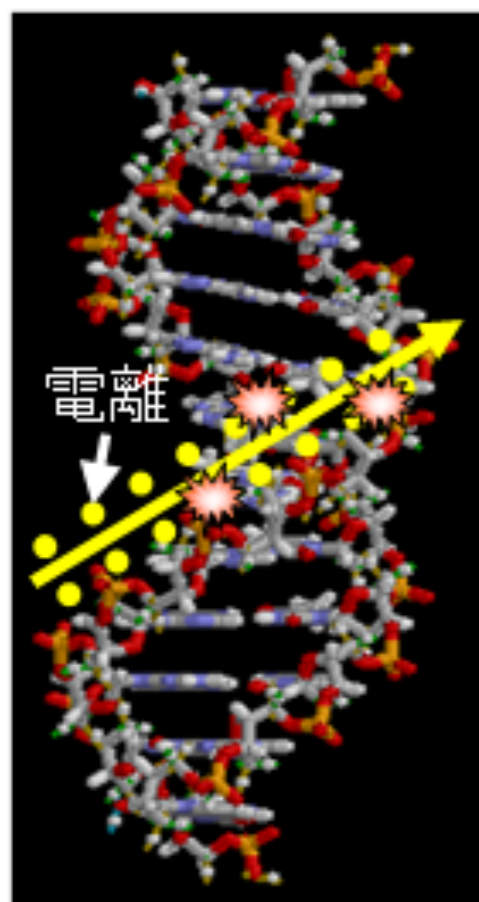


細胞(60兆個)

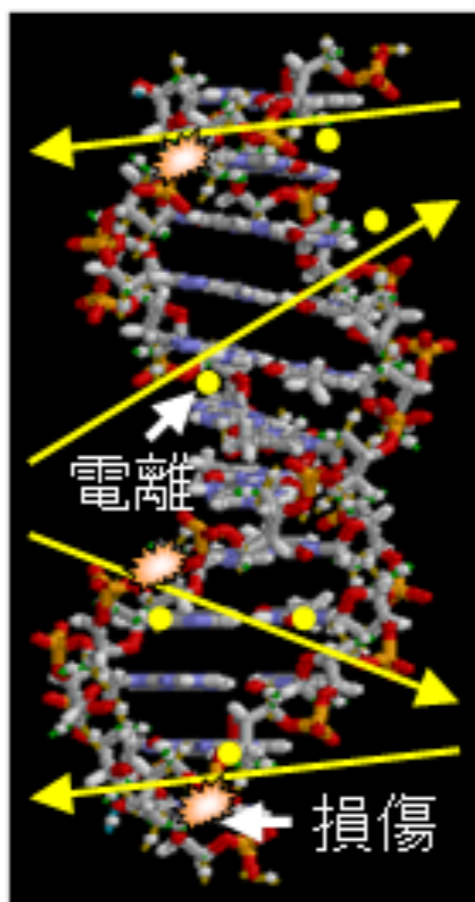
一部が遺伝子

図1 核、染色体、遺伝子

# 放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

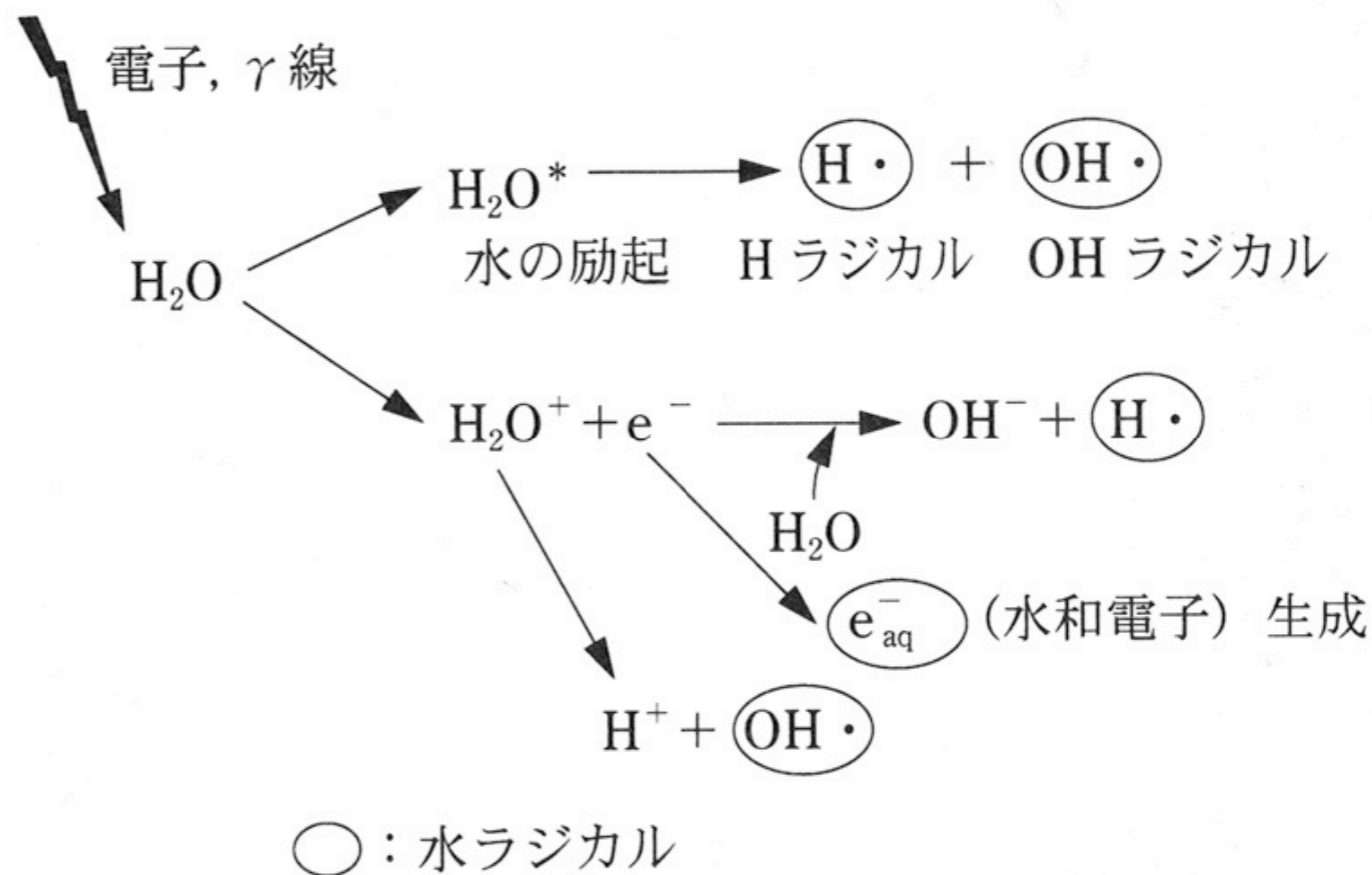


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

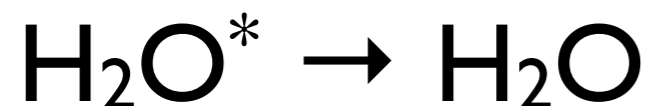
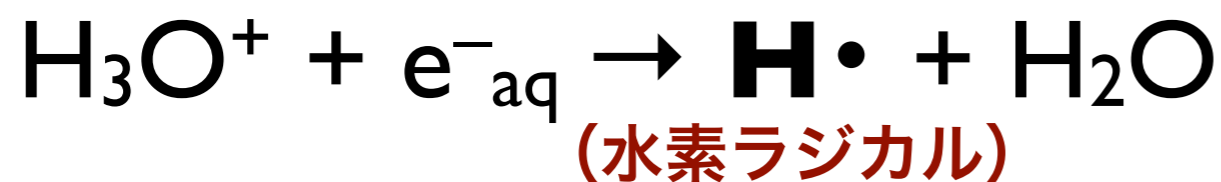
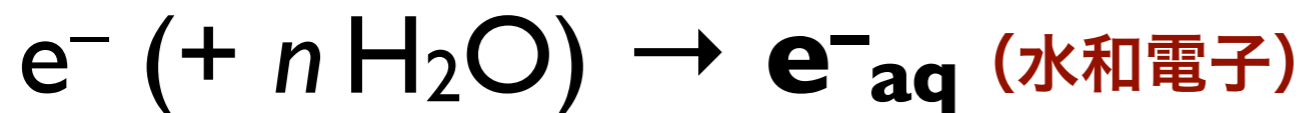
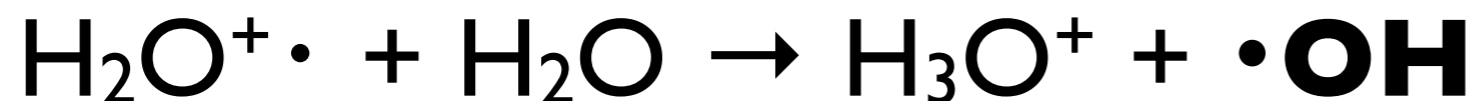
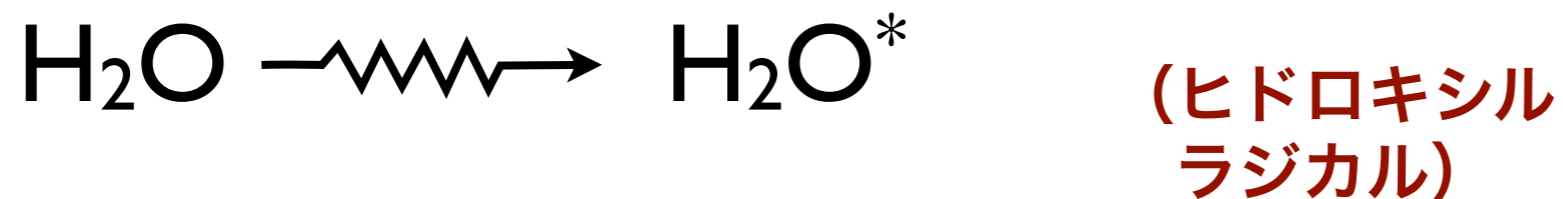
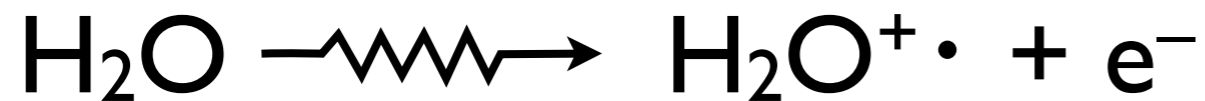
## LET：線エネルギー付与

放射線の直接作用：荷電粒子が直接 DNA 分子を叩く **高 LET 放射線**  
 $\alpha$ 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**  
 $\beta$ 線,  $\gamma$ 線

# 水中での反応



$$G(\bullet\text{OH}) = 2.7$$

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

$$G(\text{H}\bullet) = 0.55$$

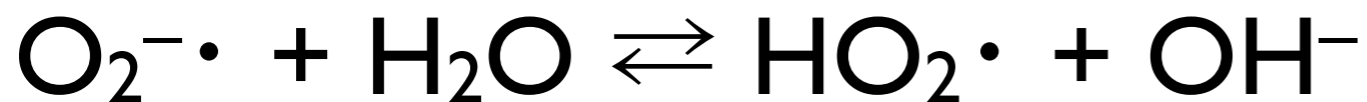
$$G(\text{H}_2) = 0.45$$

$$G(\text{H}_2\text{O}_2) = 0.7$$

γ線照射による  
放射線化学収率  
(G値)

# 酸素効果

(活性酸素)



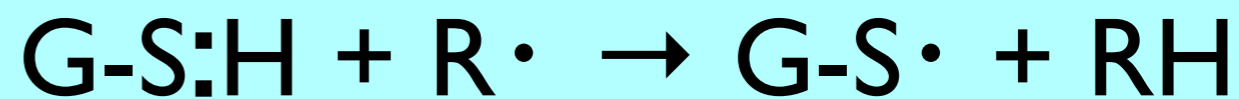
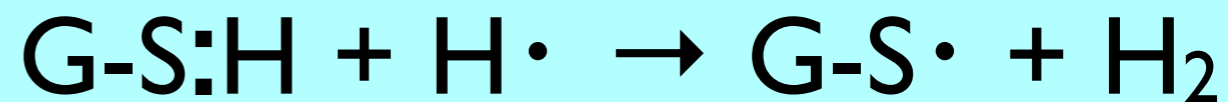
## 放射線防護剤

(ラジカルスカベンジャー)

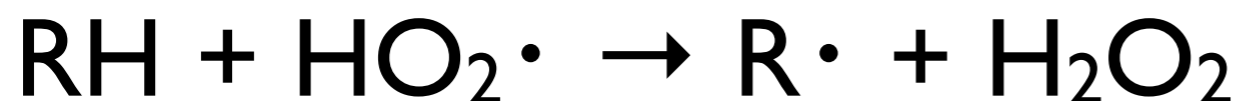
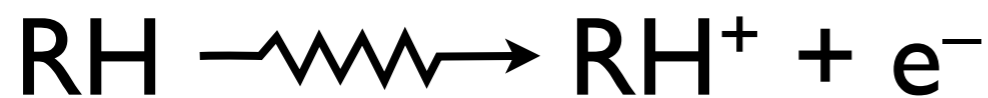
SH基, S-S 結合

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



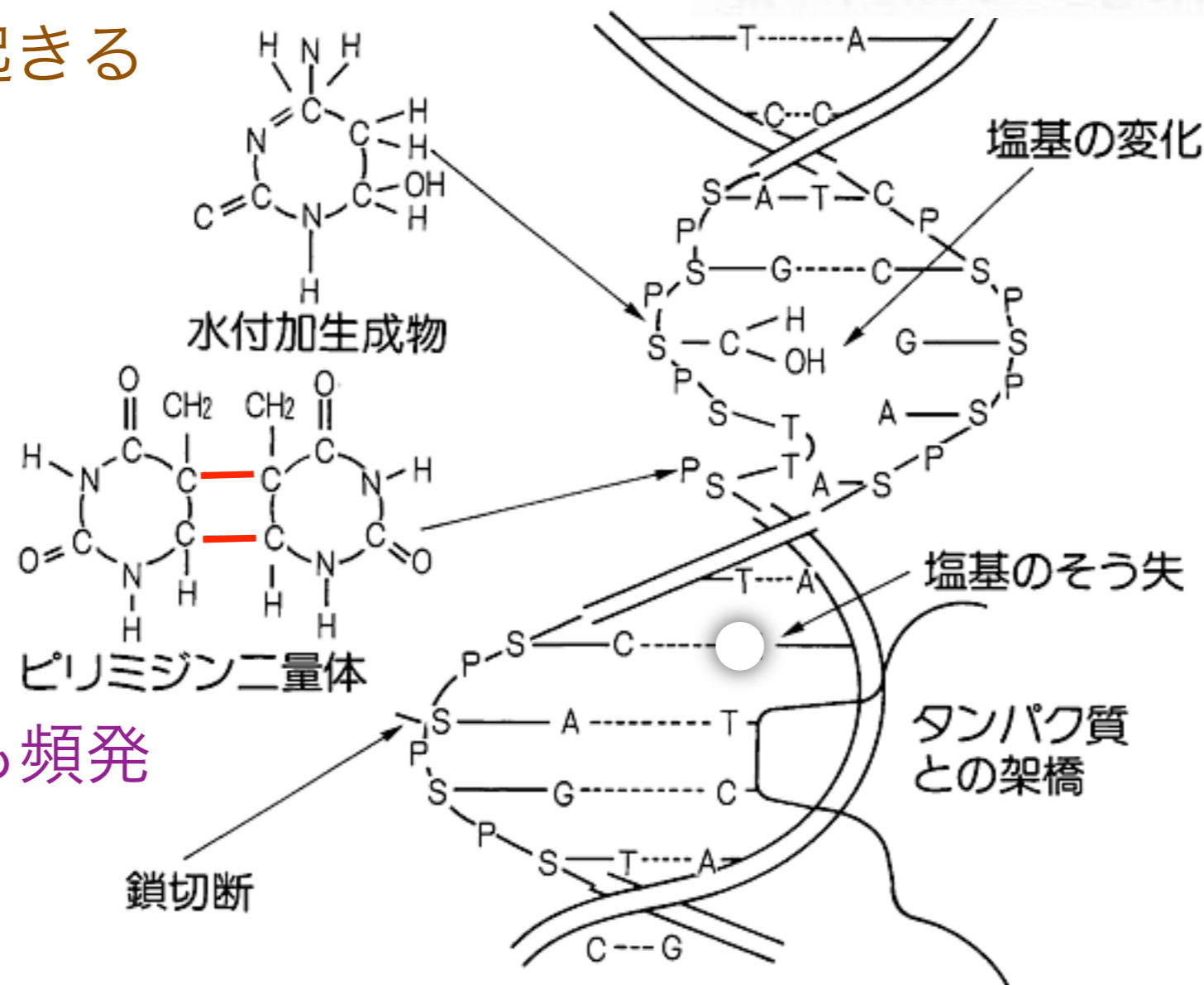
# 放射線生物学

何もなくても DNA 損傷は自然発生している（複製ミスなど）

特定の化学物質によっても DNA 損傷が起きる

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<sup>7)</sup>

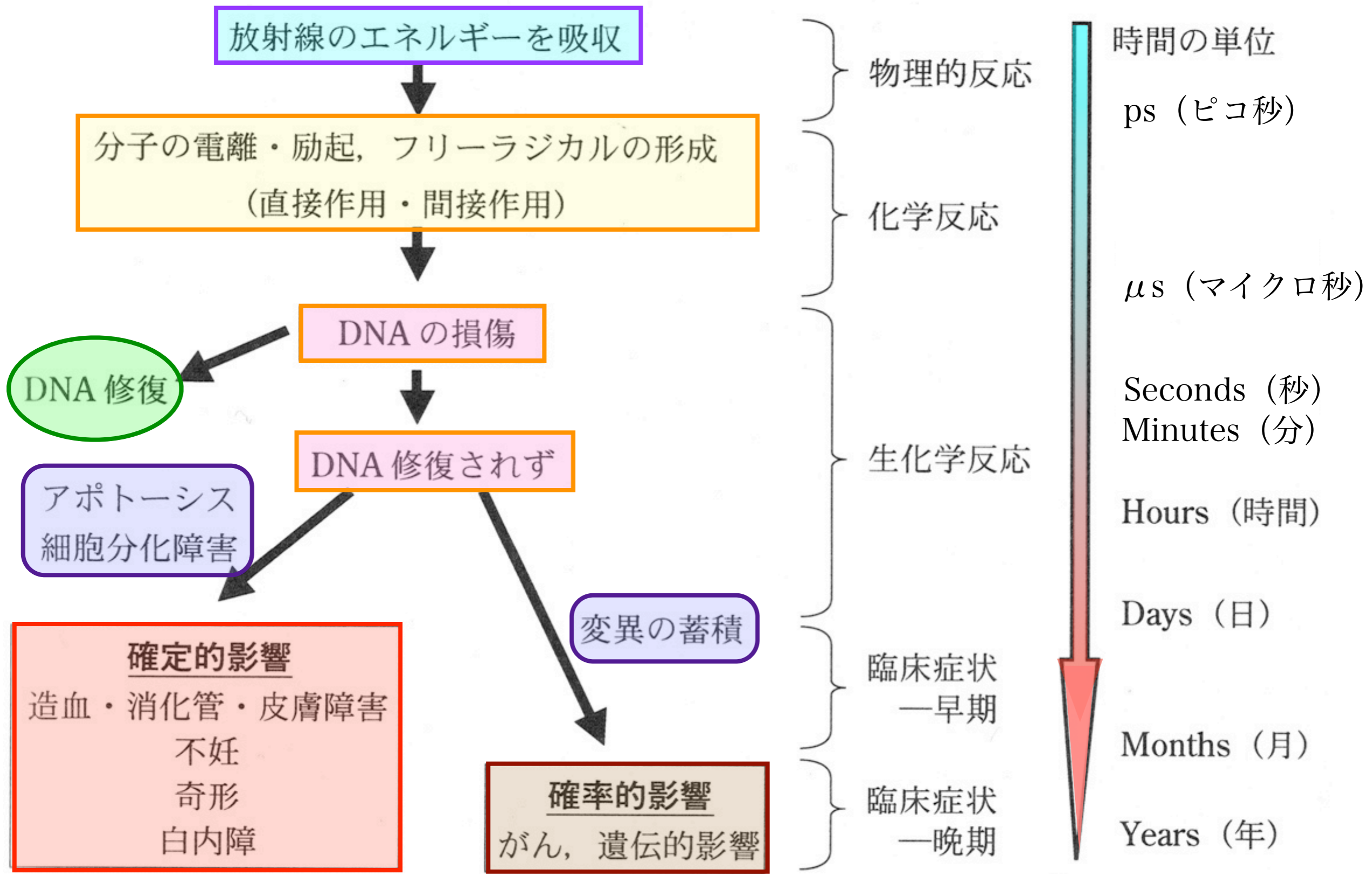
傷の種類	自然の傷(/細胞/日)	X線誘発の傷(/細胞/1 Sv)
塩基損傷	20,000	300
1本鎖切断	50,000	1,000
2本鎖切断	50(推定 <sup>2,19)</sup> )	40



紫外線照射でも頻発

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



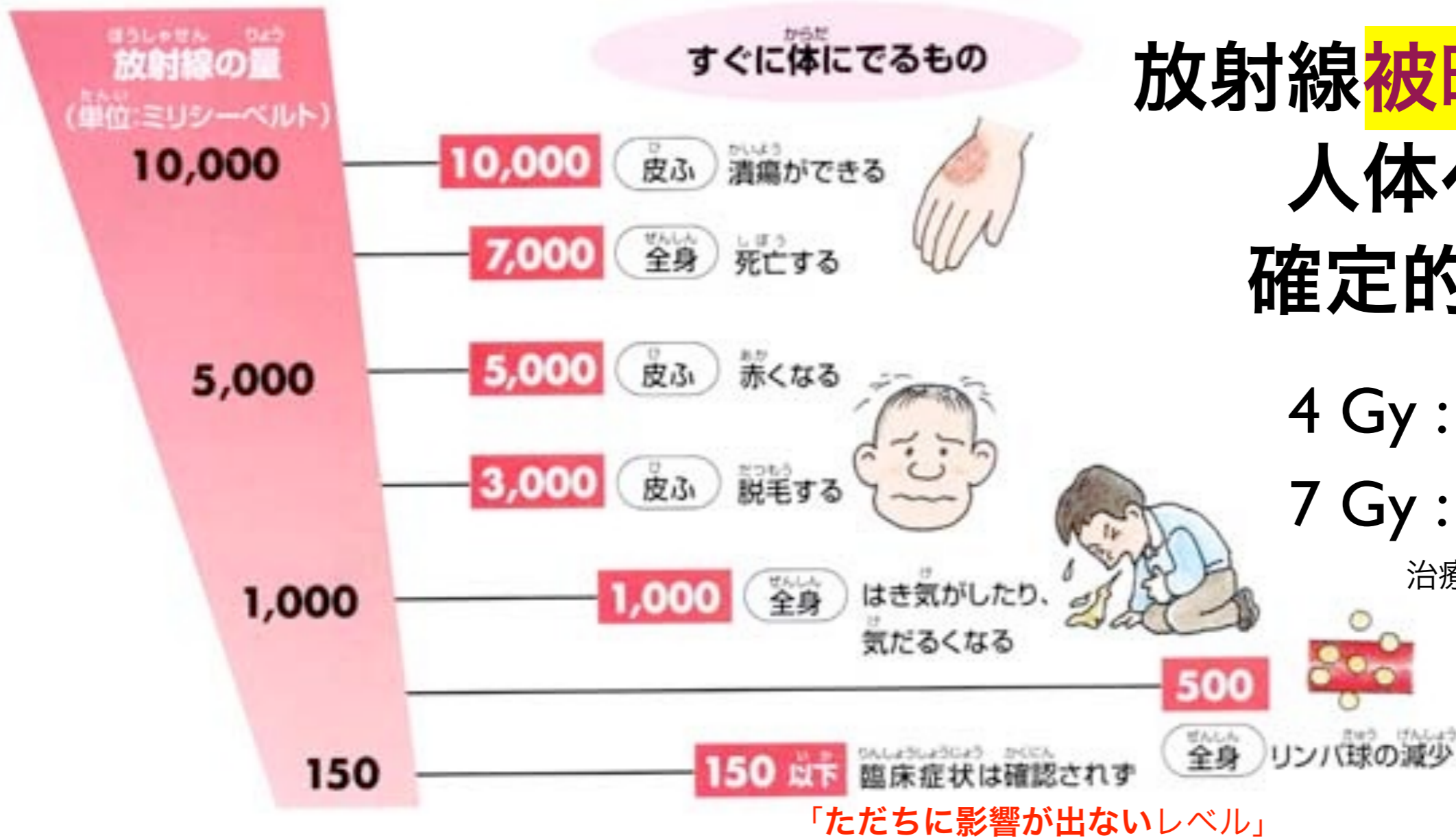
放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

# 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



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



# 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	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

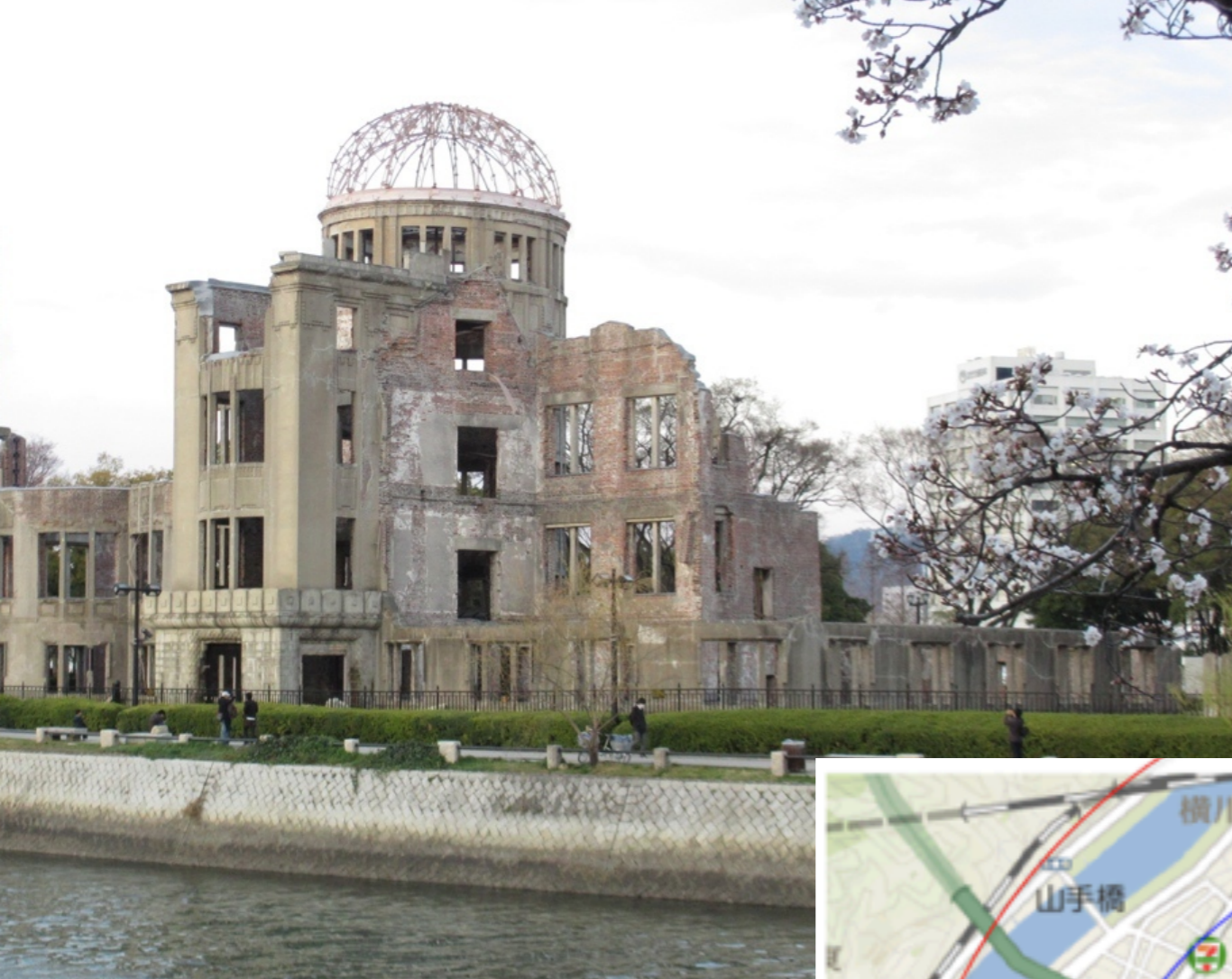
図1 細胞再生系

(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)

# 広島 原爆ドーム





# 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)



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3人に1人はがんで死亡する。)

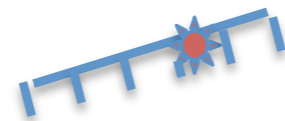
**疫学調査**の結果から結論を導きだすのは**統計学的**に困難。



塩基の損傷(異常な塩基対)



DNA一本鎖の切断(不連続な鎖の状態)



周辺配列の除去



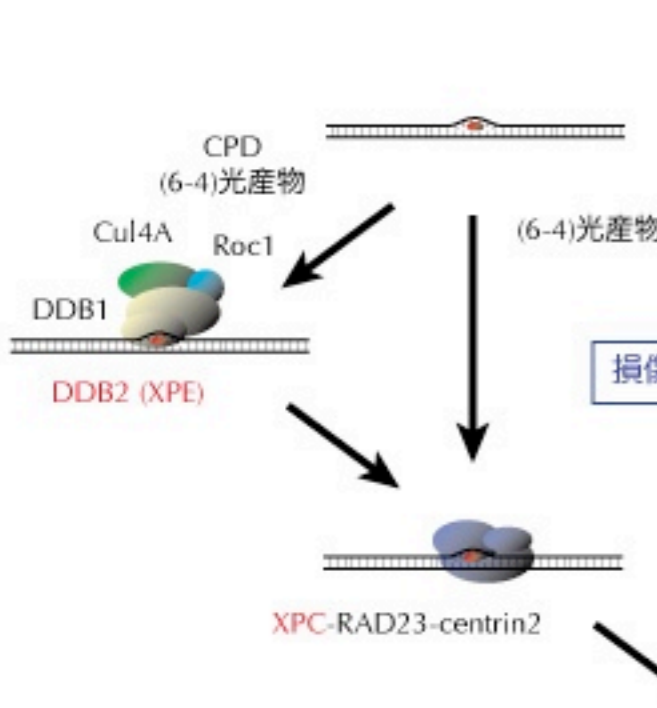
DNA修復合成



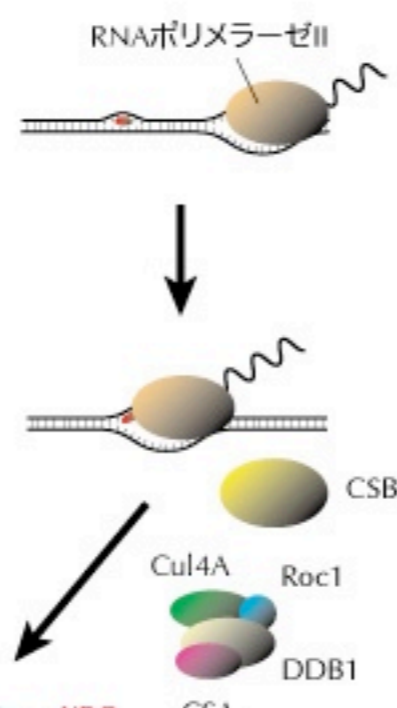
前後のDNA間の結合



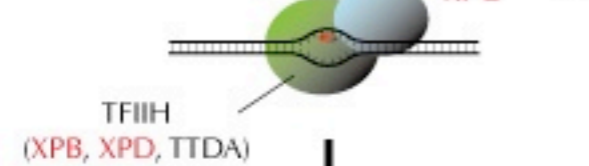
## ゲノム全体を対象とする修復 (GGR)



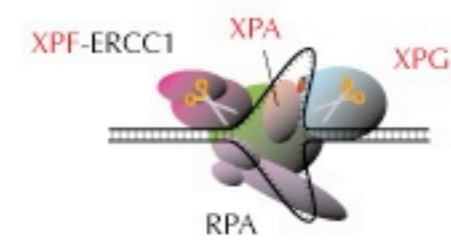
## 転写と共役した修復 (TCR)



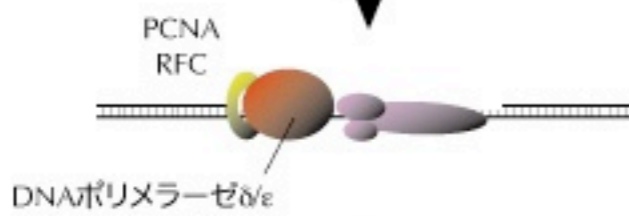
TFIIHによるDNA二重鎖の巻き戻し



損傷両側における一本鎖切断



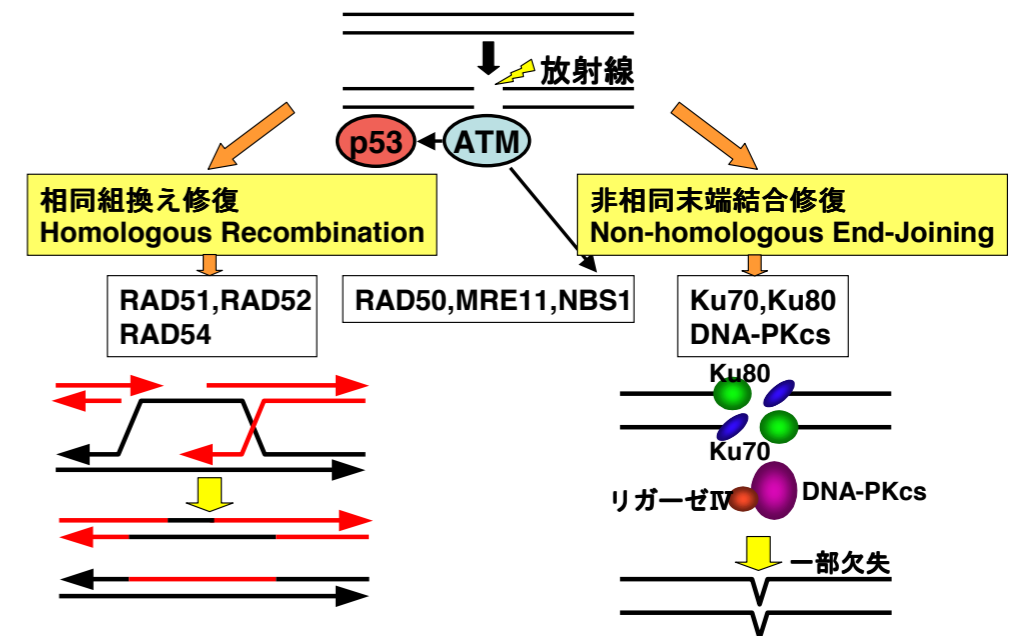
DNA修復合成



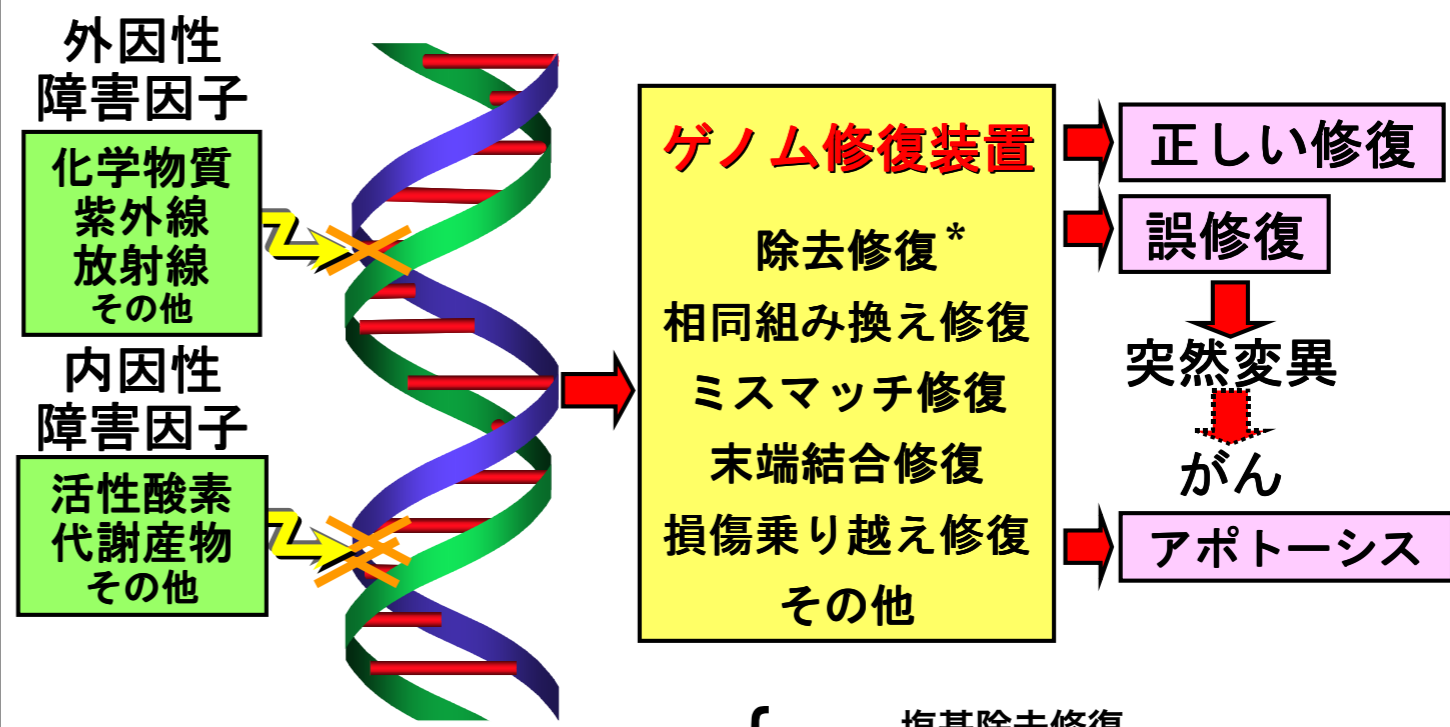
DNA鎖の再連結



## DNA二本鎖切断の修復経路

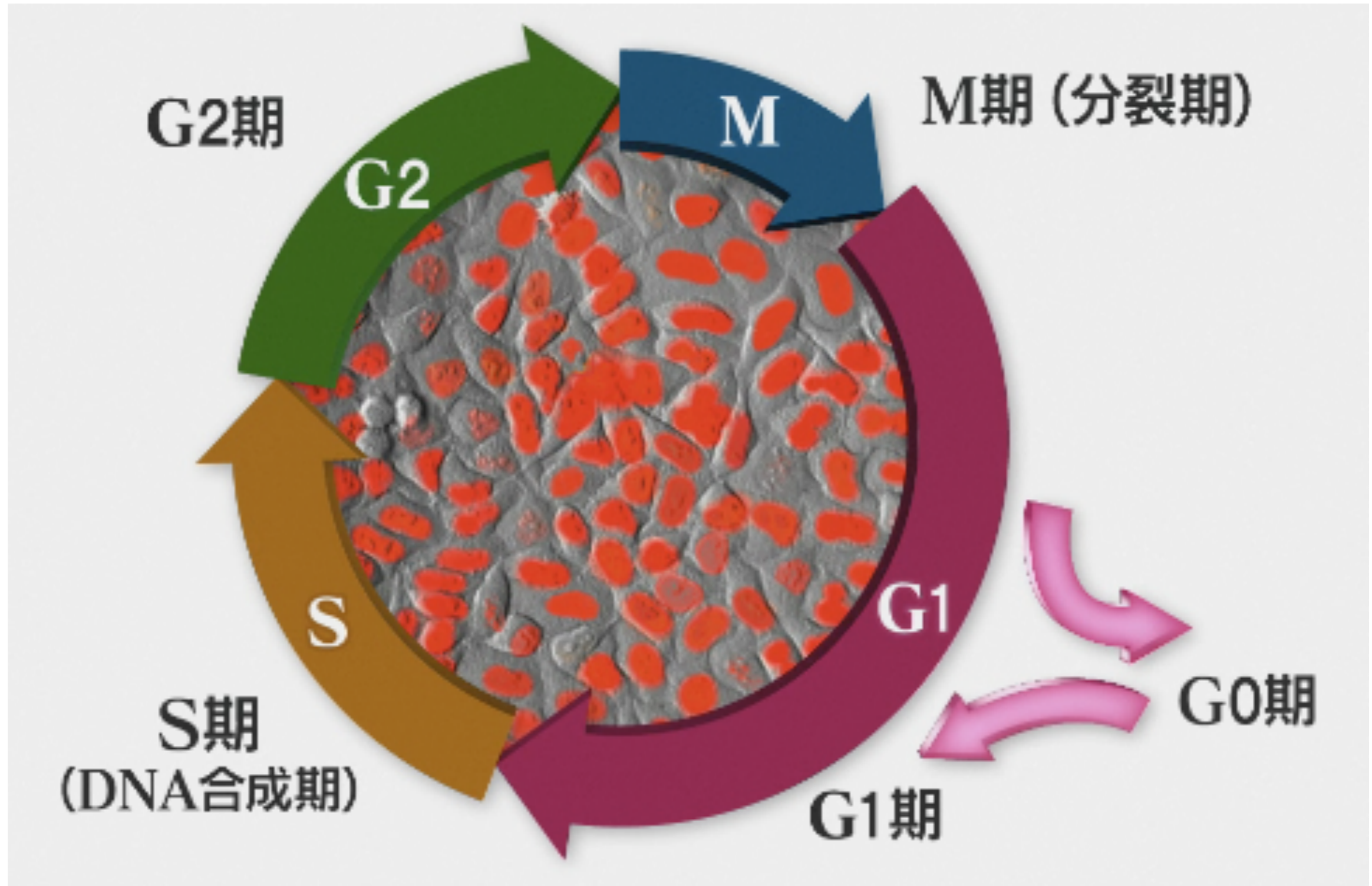


## ゲノムのキズを修復するシステム

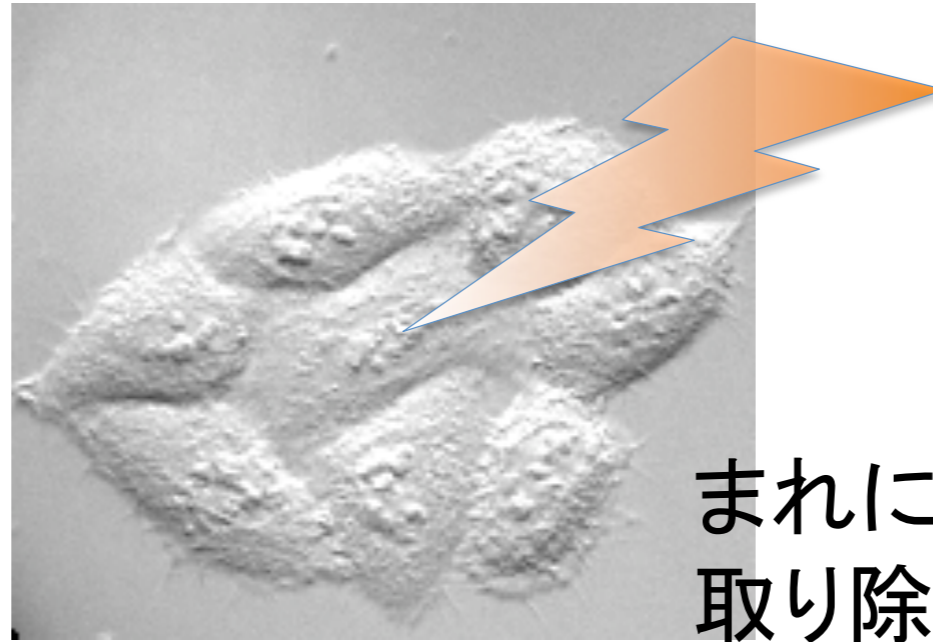


(\*) { 塩基除去修復  
ヌクレオチド除去修復

# 細胞周期と放射線感受性



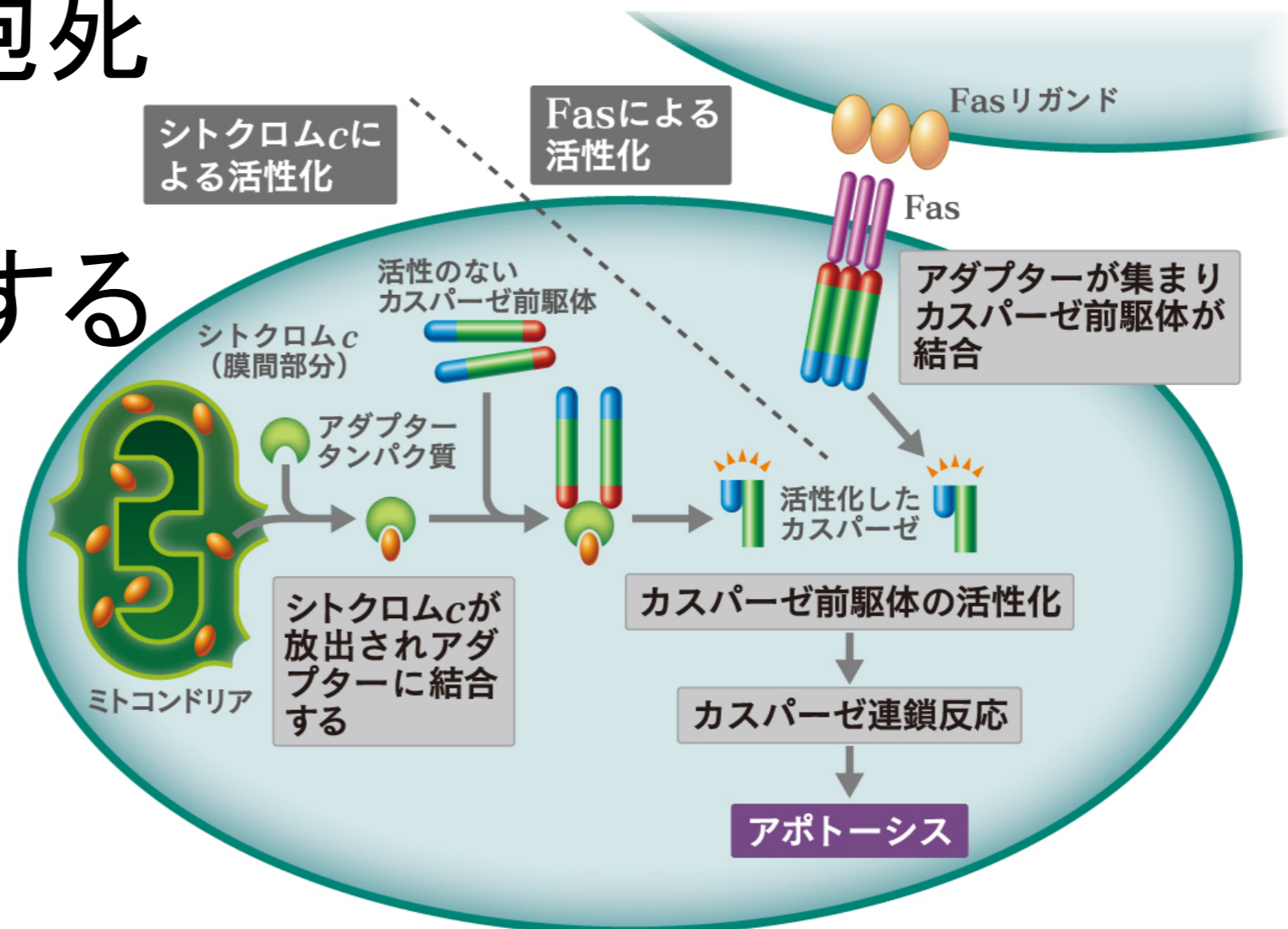
チェックポイント機構



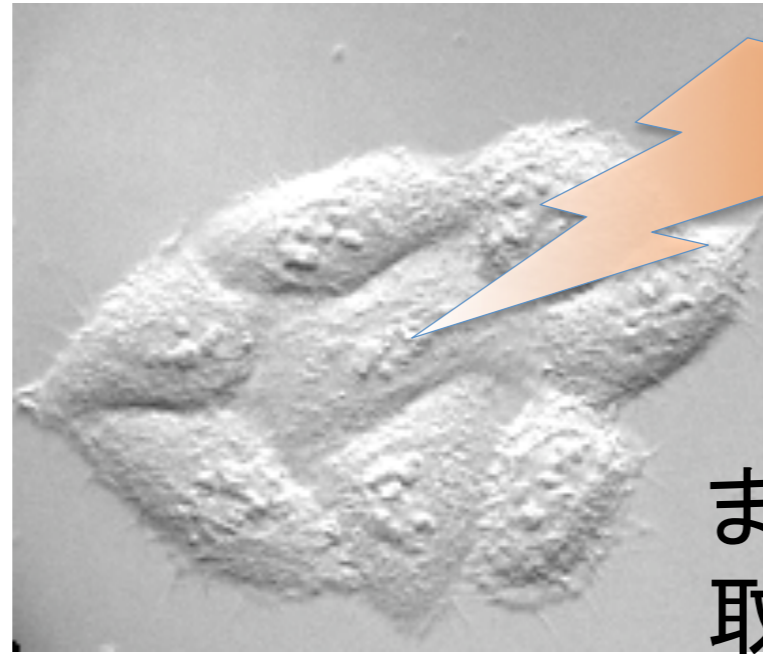
まれにDNA分子の傷が  
取り除けずに残ってしまう

# プログラム細胞死

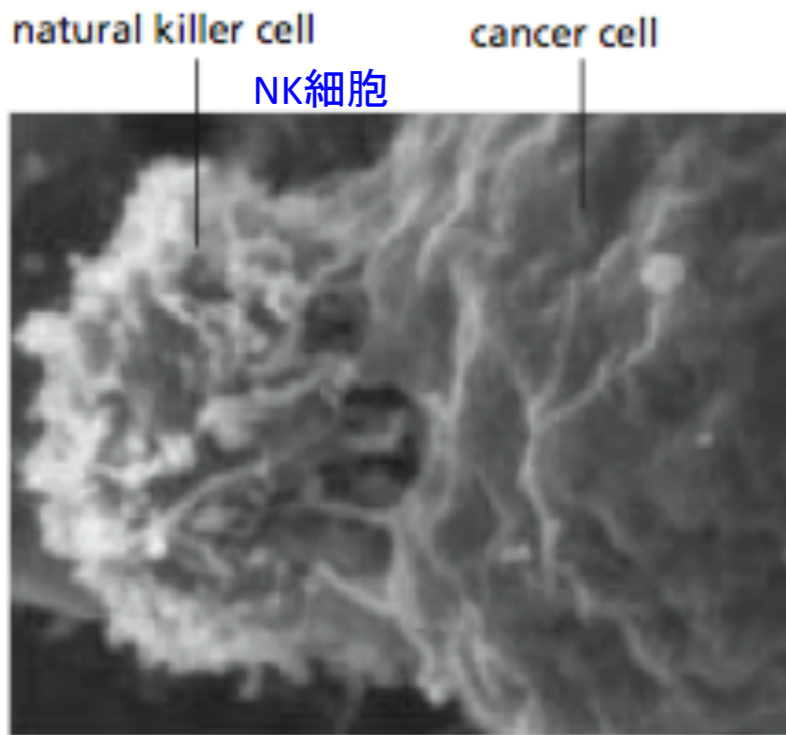
## 細胞が自爆する







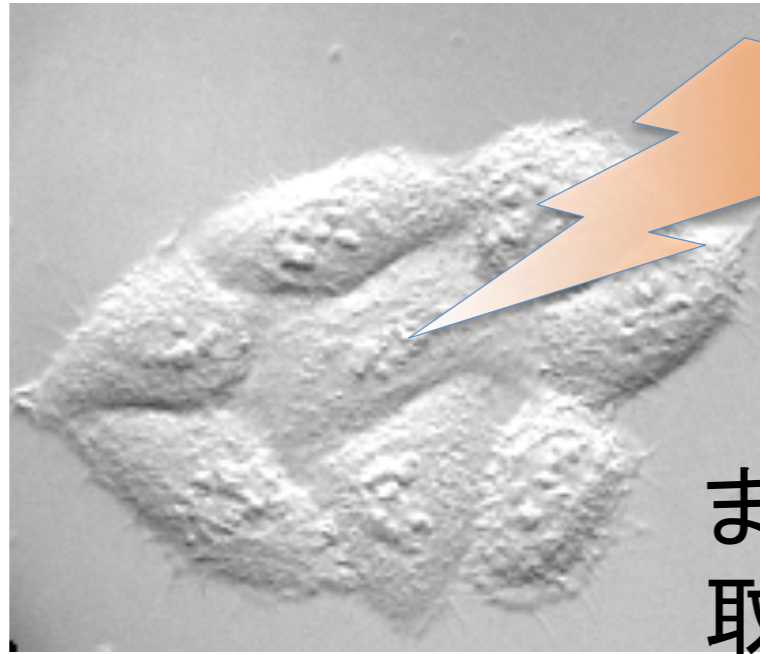
まれにDNA分子の傷が  
取り除けずに残ってしまう



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

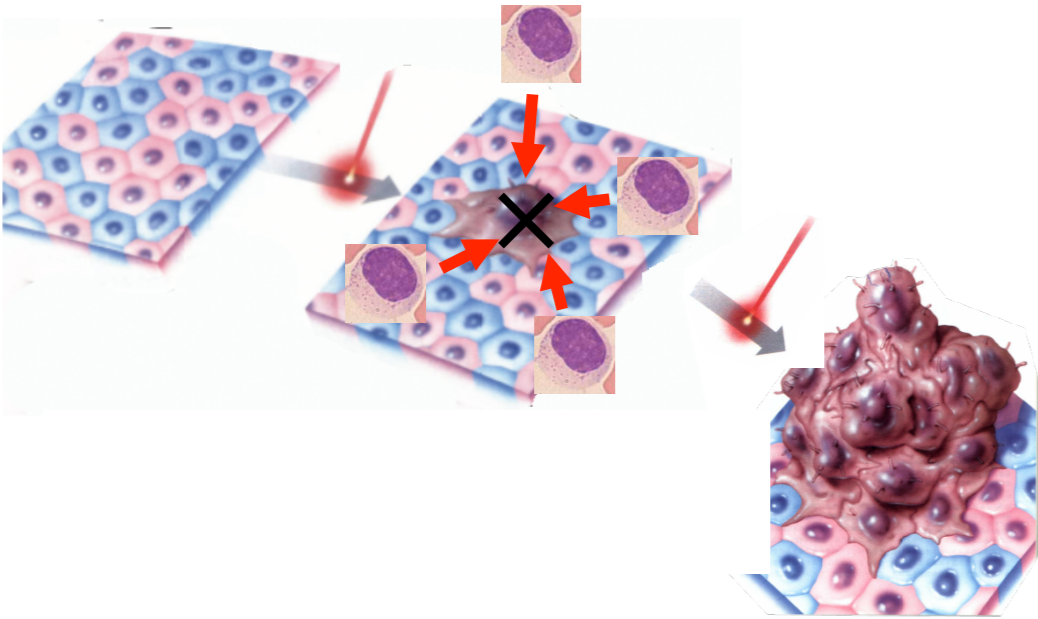


まれにDNA分子の傷が  
取り除けずに残ってしまう

修復の失敗

細胞死も起こらない

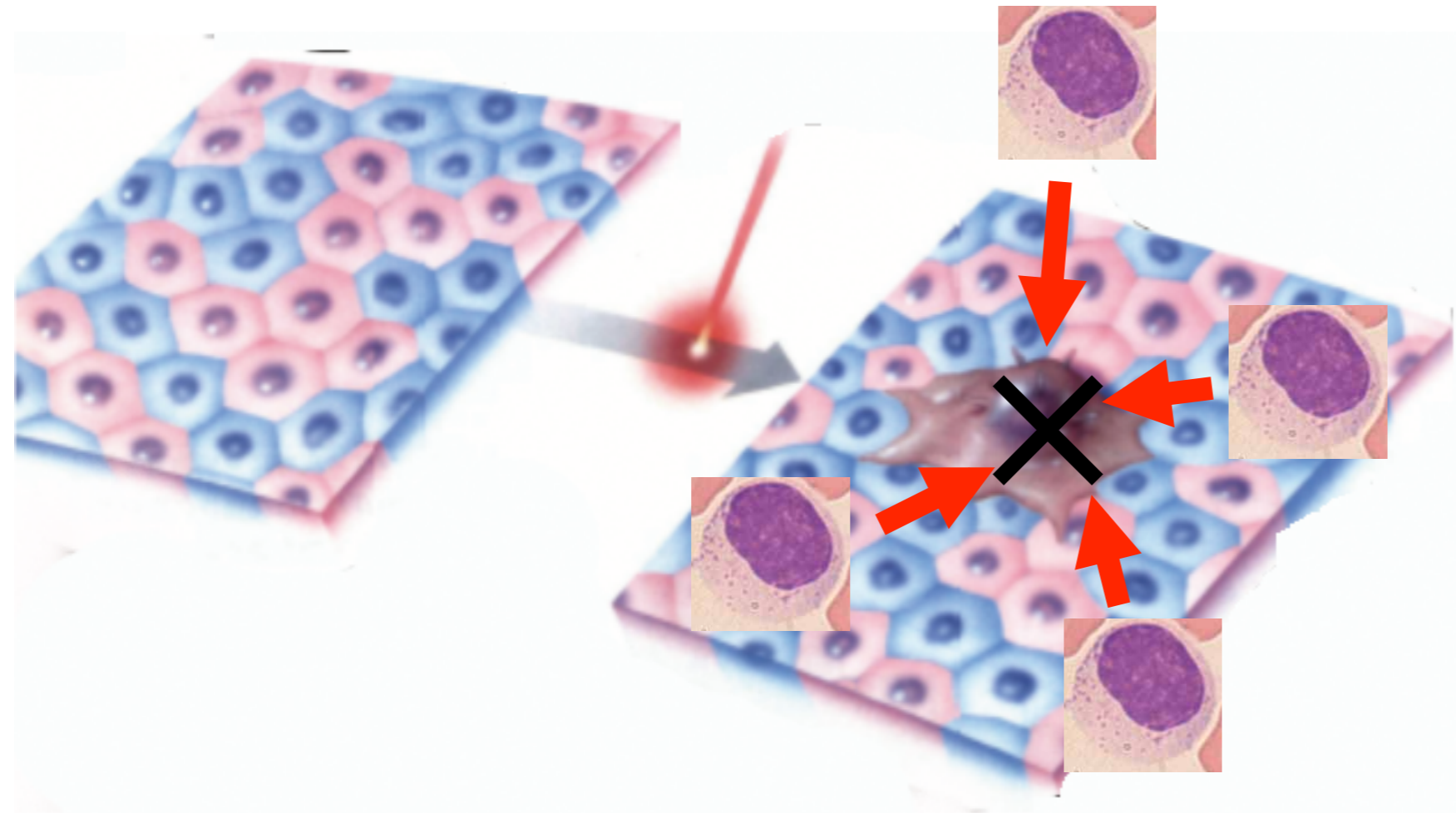
NK細胞も取り逃がした



がん細胞が残ってしまう 良性／悪性  
浸潤性

# がん、とは？

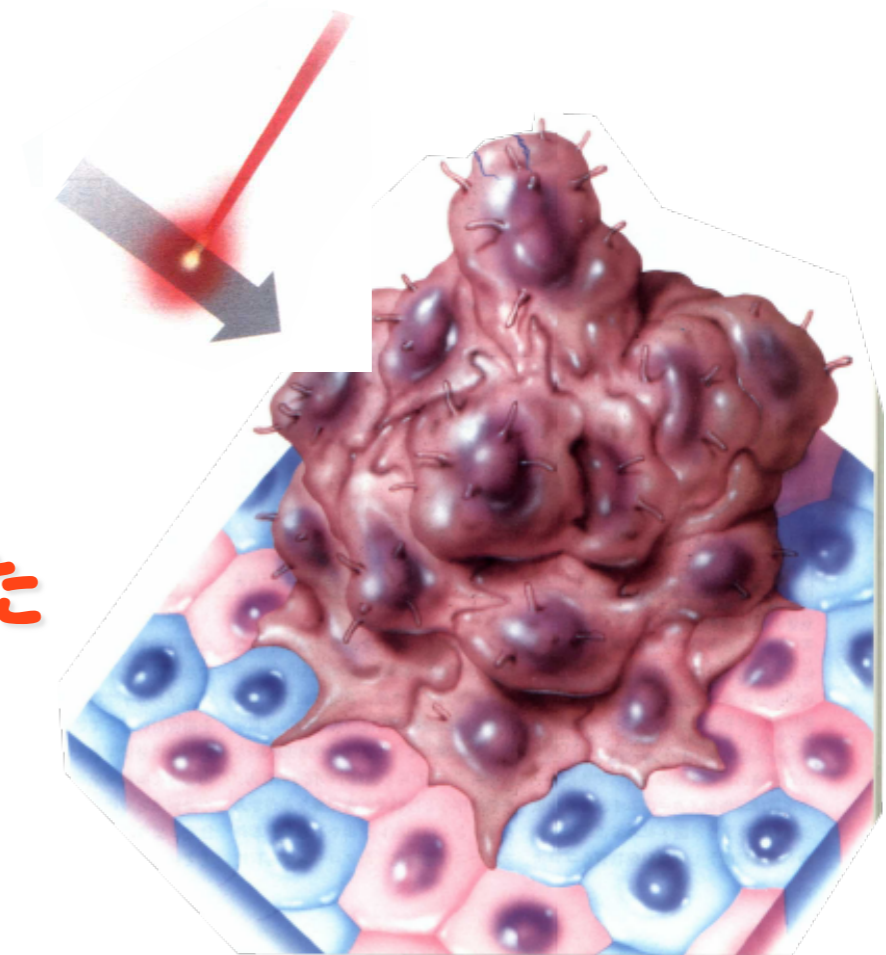
がん細胞は毎日5000個もできている！！



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」



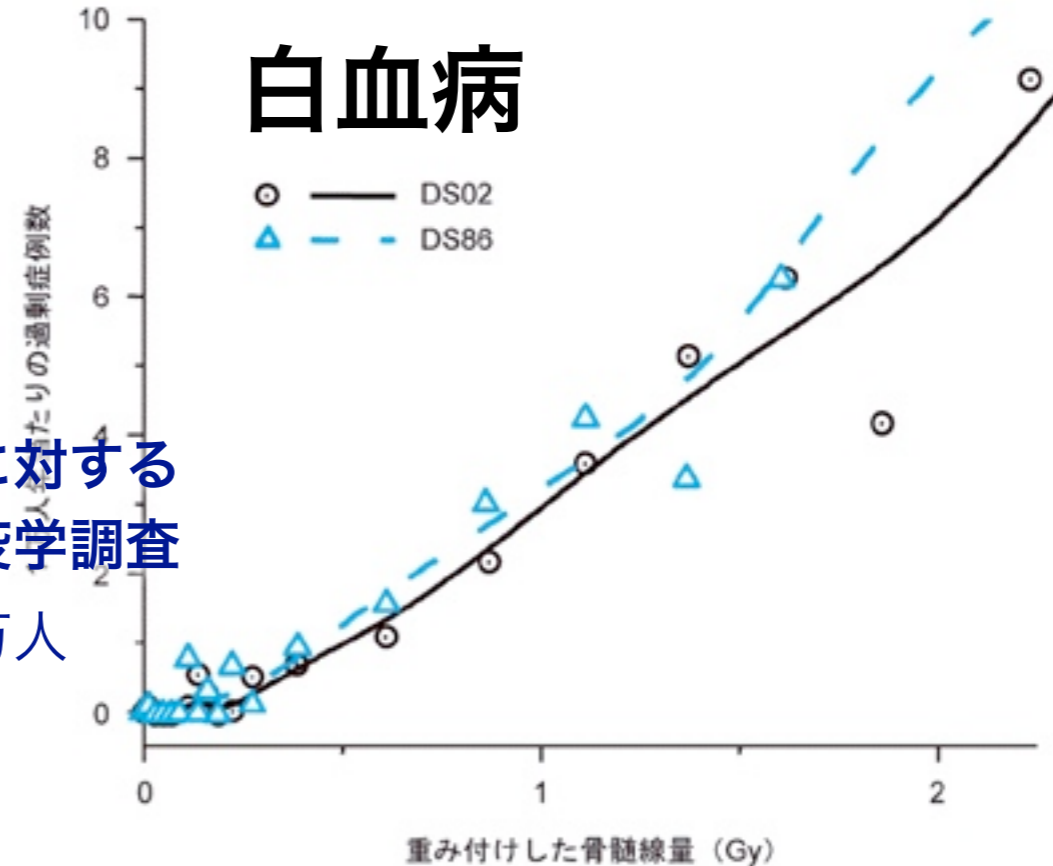
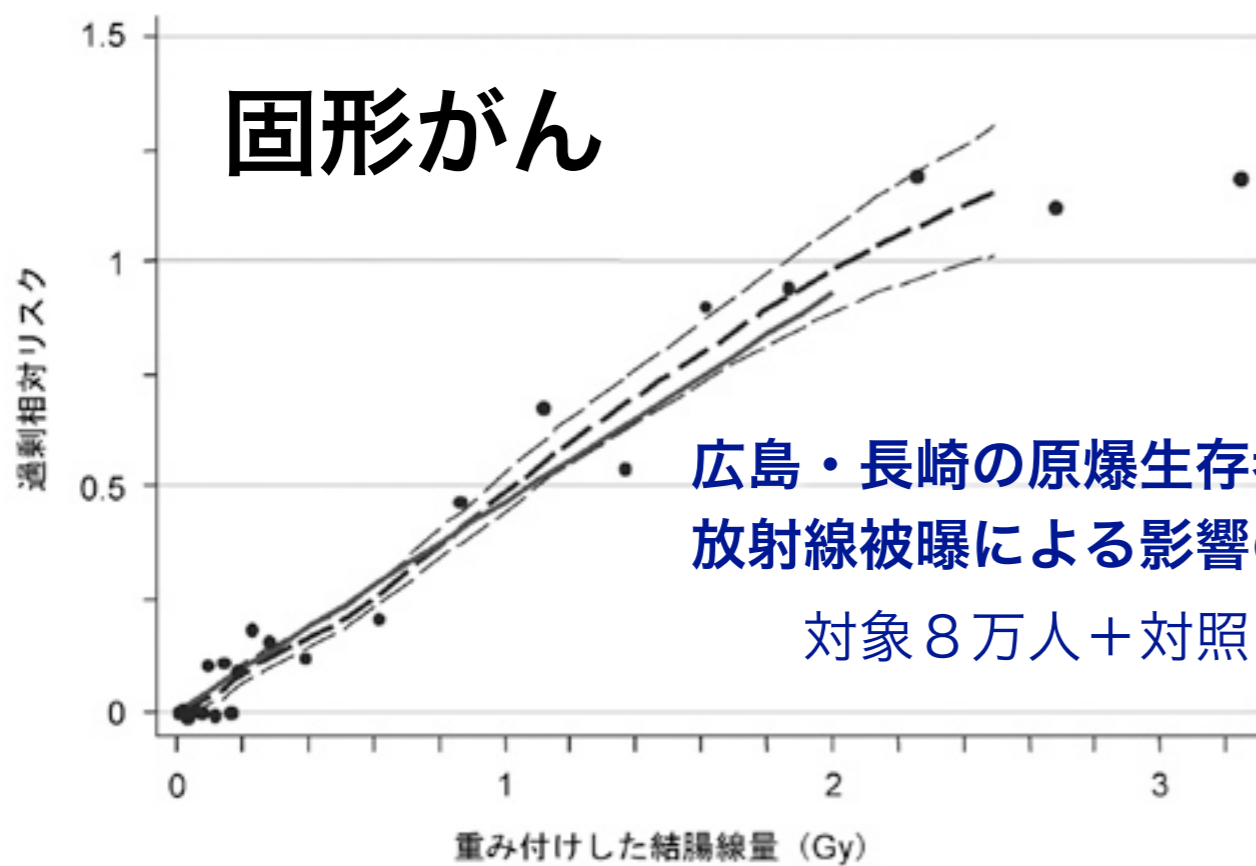


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被爆時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

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。**

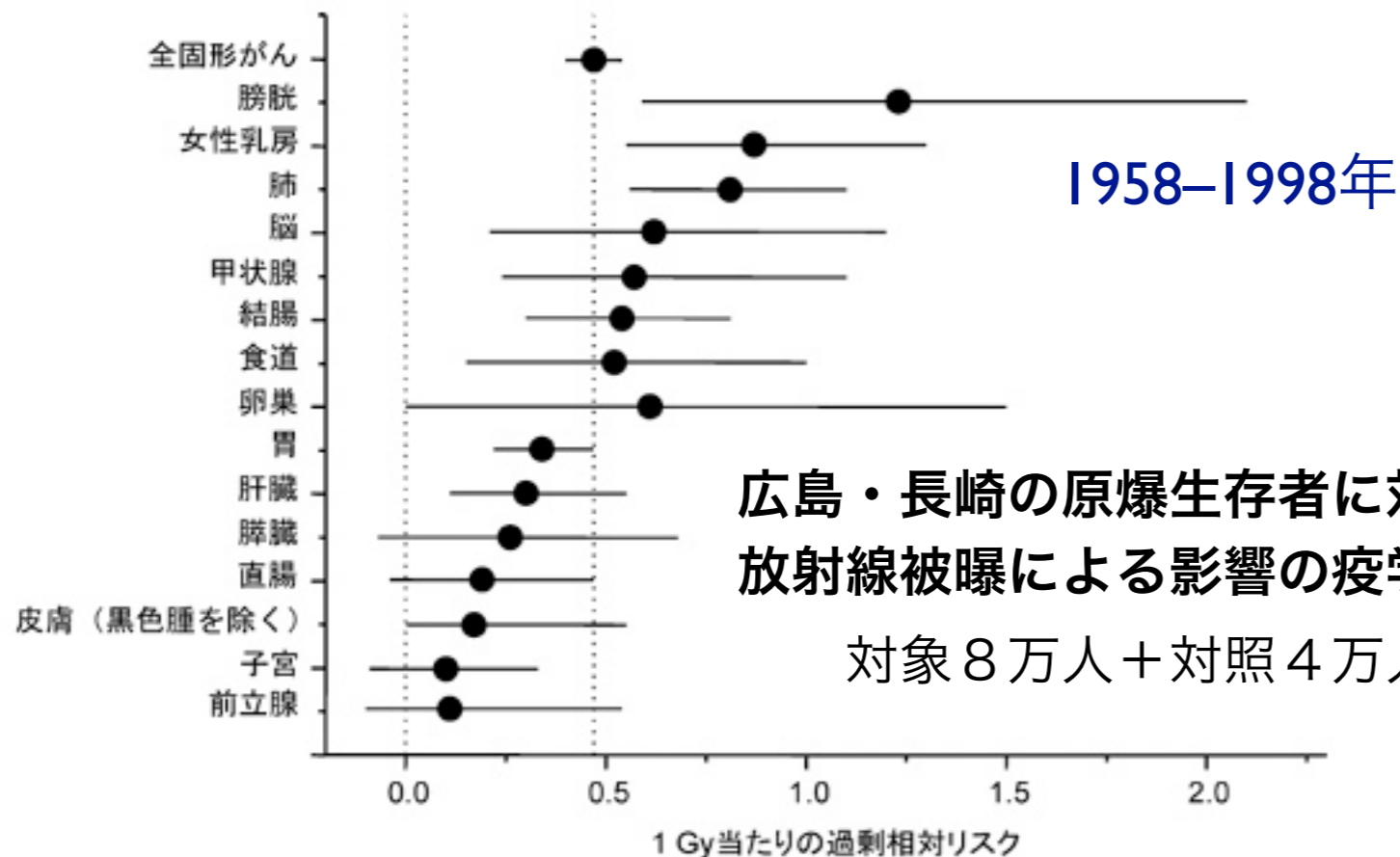
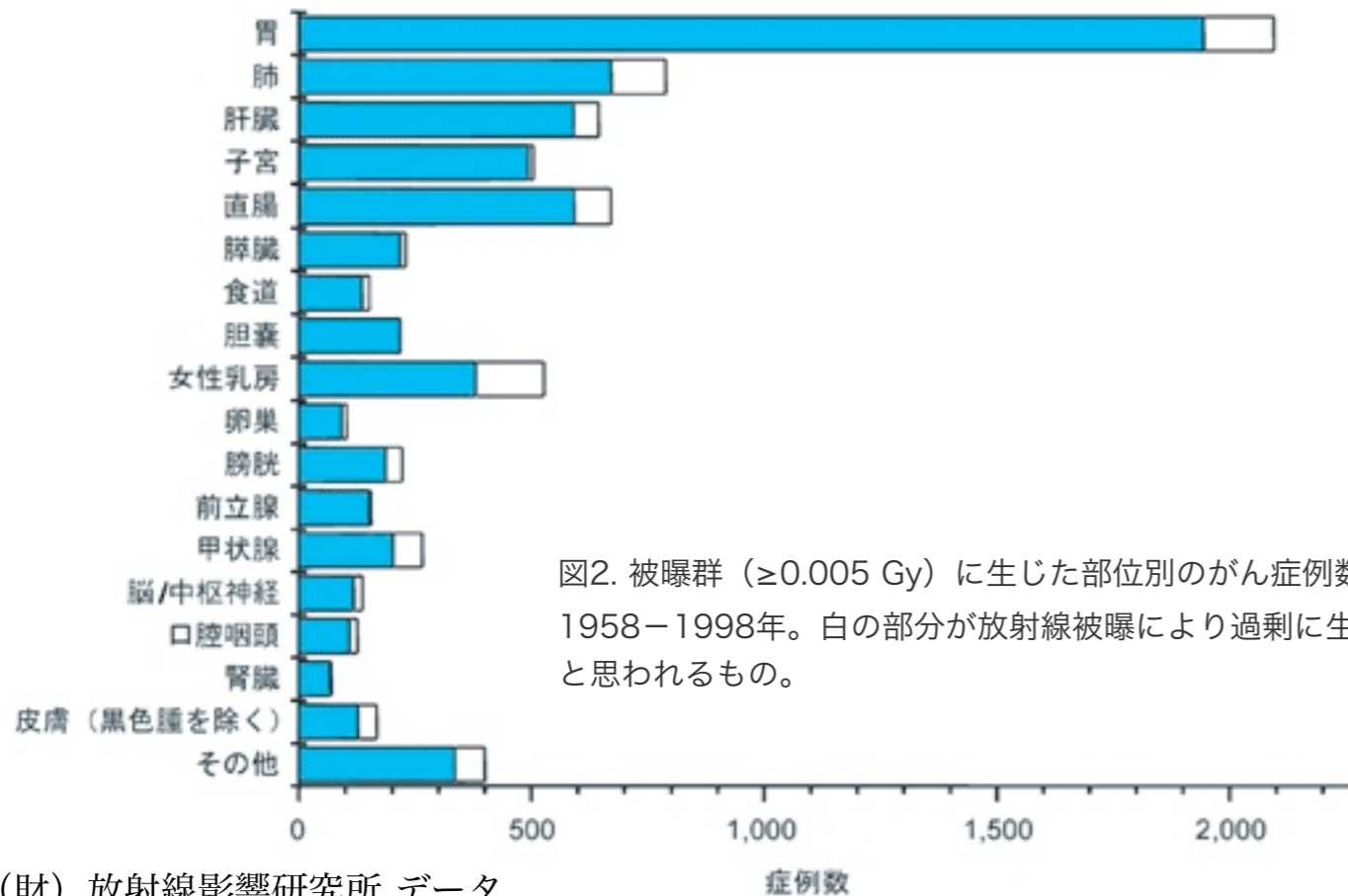
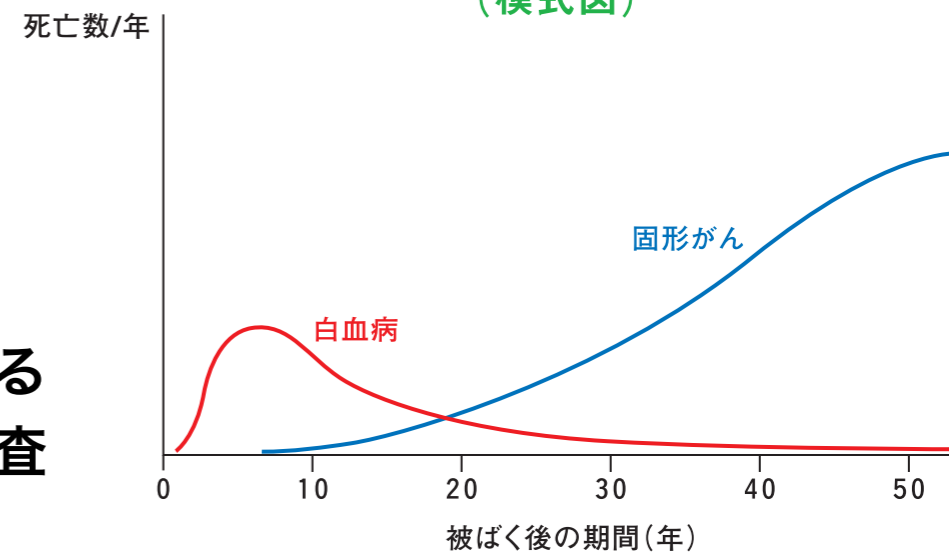


図1. LSS集団における被曝時年齢30歳（男女平均）の人が、70歳に達した時の1 Gy 当たりの部位別がん発生率の過剰相対リスク。横線は90%信頼区間を示す。

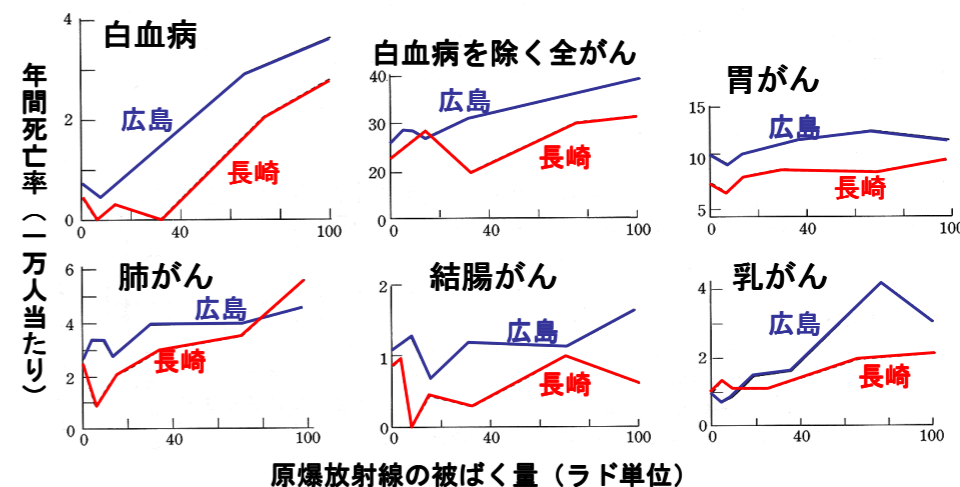


(財)放射線影響研究所 データ

原爆放射線に関連する死亡数の時間的経過 (模式図)

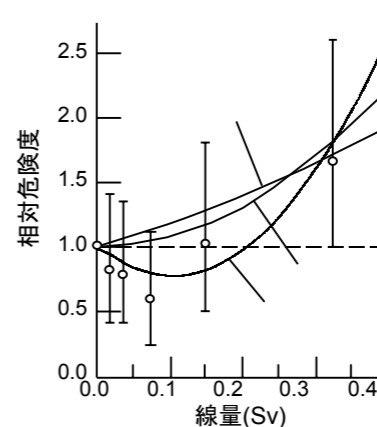


5種類のがん死亡率 (1950-1986間の平均値) と 低レベル原爆放射線被ばく量の関係

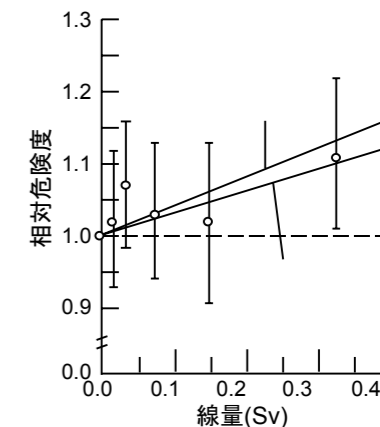


清水由紀子ほか (1987)

白血病

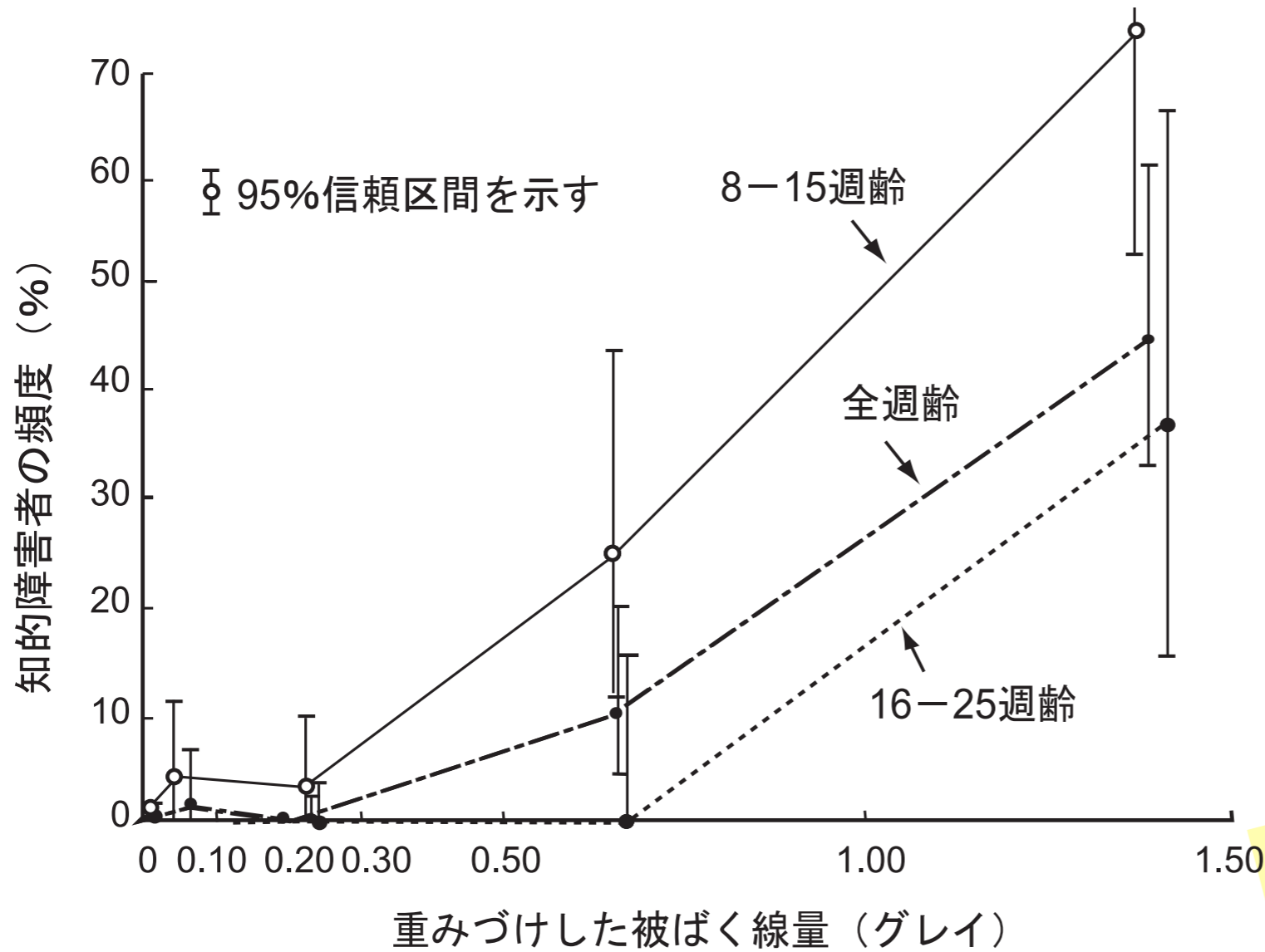


白血病以外の全がん



Shimizu, Y., et al.: RERF Update RERF News 1992.

# 胎内被爆者における放射線の影響



(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」

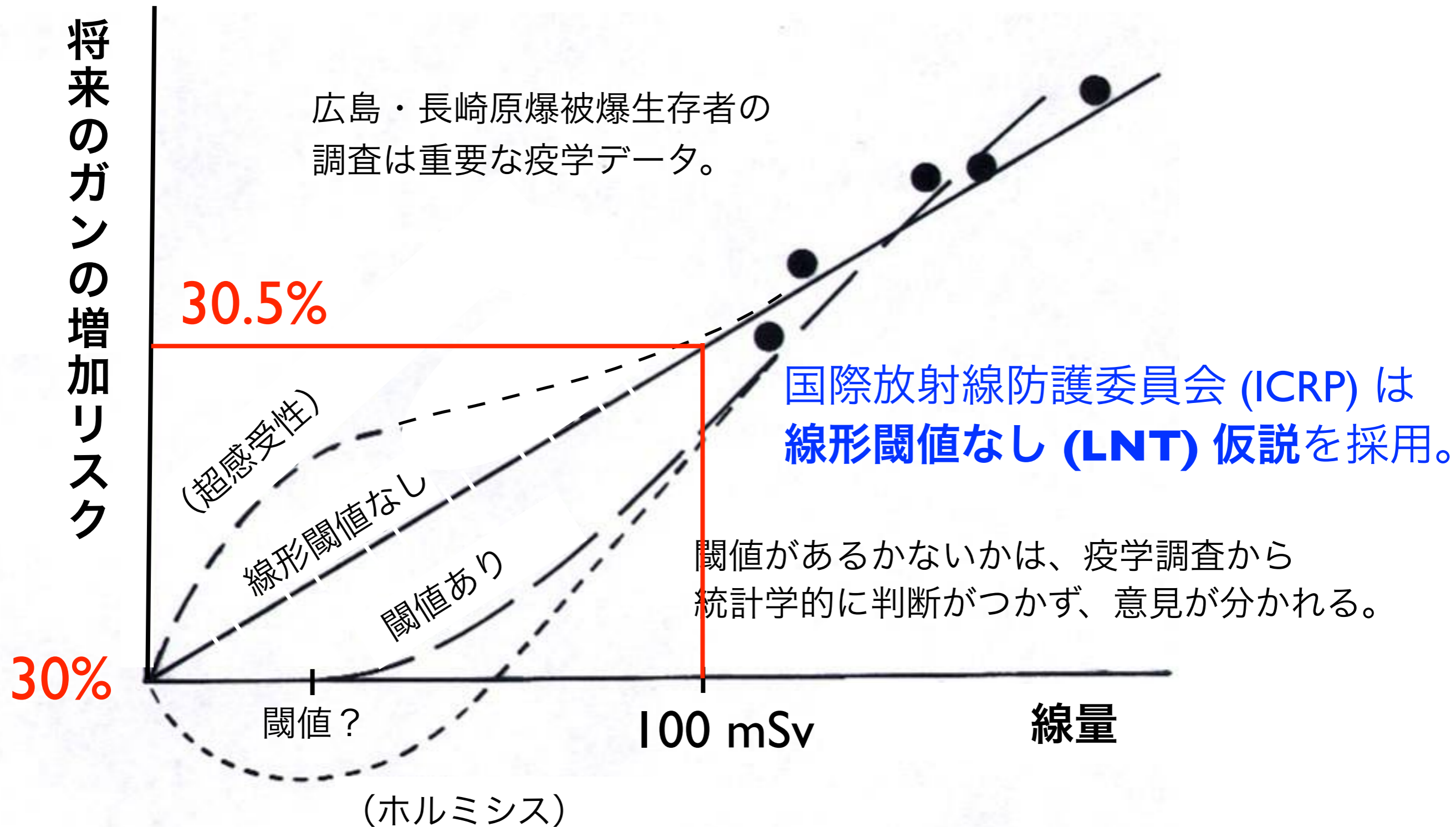
チェルノブイリ事故の後、ヨーロッパ全土で不必要な堕胎が数万人以上だったともいわれる。(風評・過度の心配による犠牲)

## 放射線による遺伝的影響は認められず

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

# 放射線防護学

# 低線量におけるリスク評価



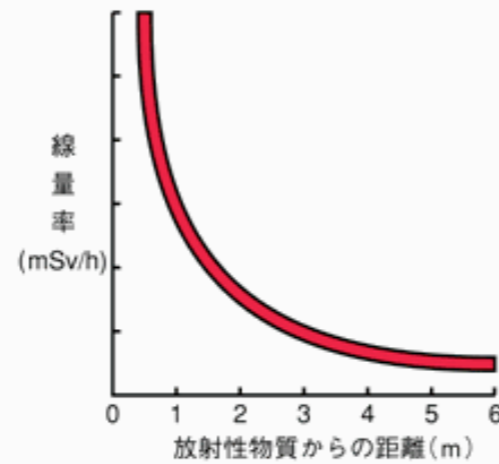
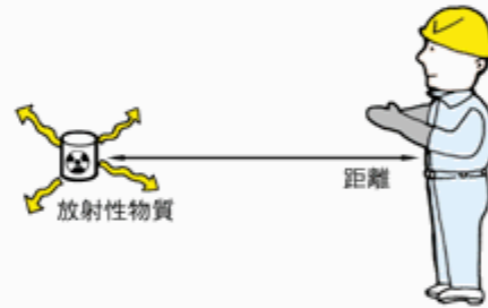
線量・線量率効果係数 **DDREF = 2**



# 放射線防護

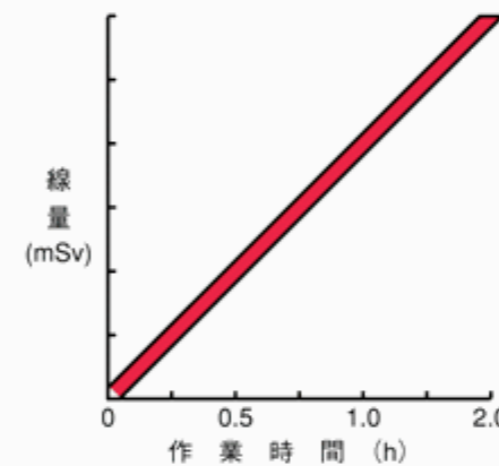
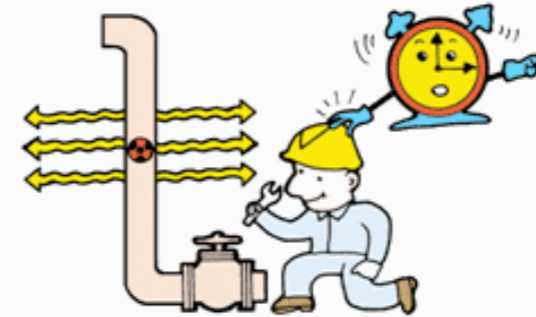
## ● 距離による防護

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



## ● 時間による防護

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



## ● 遮へいによる防護

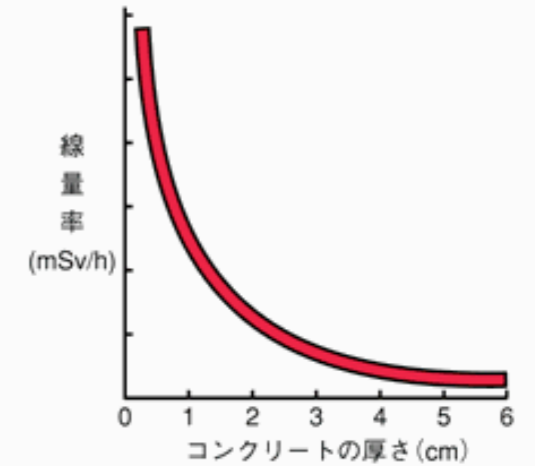
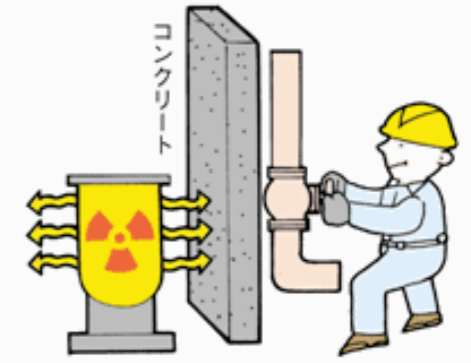


図1 遮へい3原則の図

[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
等価線量	
水晶体	150 mSv / 年
皮膚	500 mSv / 年
妊娠中の女子の 腹部表面	2 mSv / 年

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

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

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

## 線量限度の一覧表（一般公衆）

### 公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量	
水晶体	—
皮膚	—

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

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

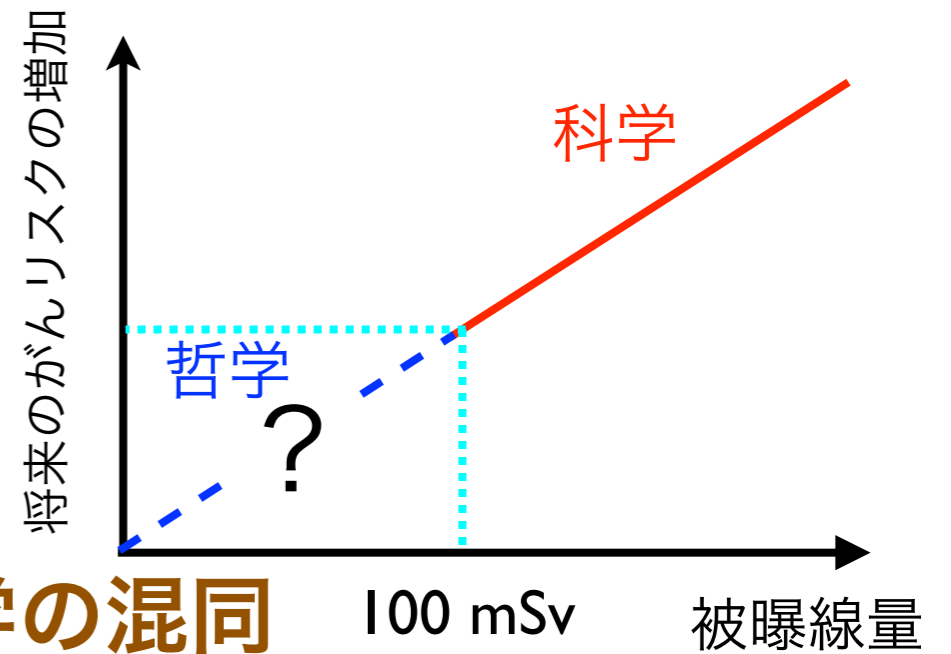
# 放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

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 スクリーニング効果・別の要因

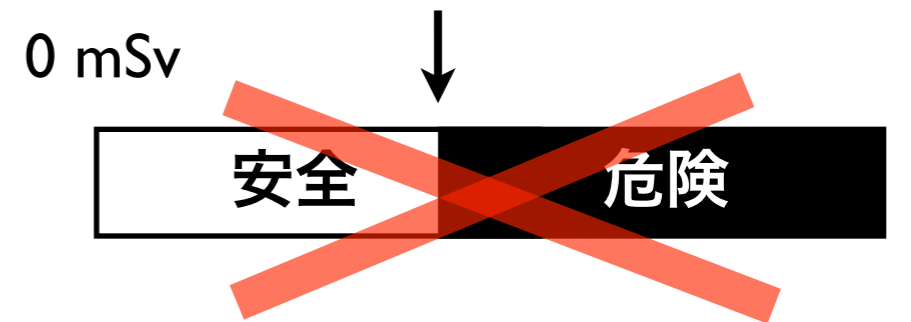


科学的知見と防護学(安全管理学)の哲学の混同

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



リスクは相対的

基準値

(社会が決める)

放射線のリスク

「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、  
根拠のない恐れや不安もまた問題。

☞ JCO の事故

☞ パニック、風評、健康被害。

# 放射線の影響に対して異なった意見があるのはなぜか

## 福島住民のリスクは？

住み続けるリスク

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

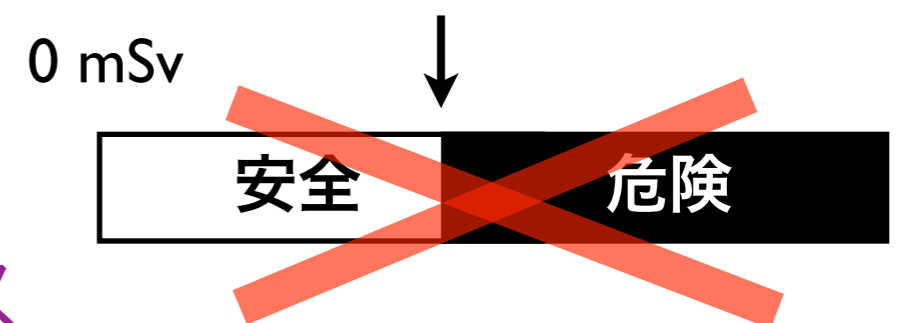
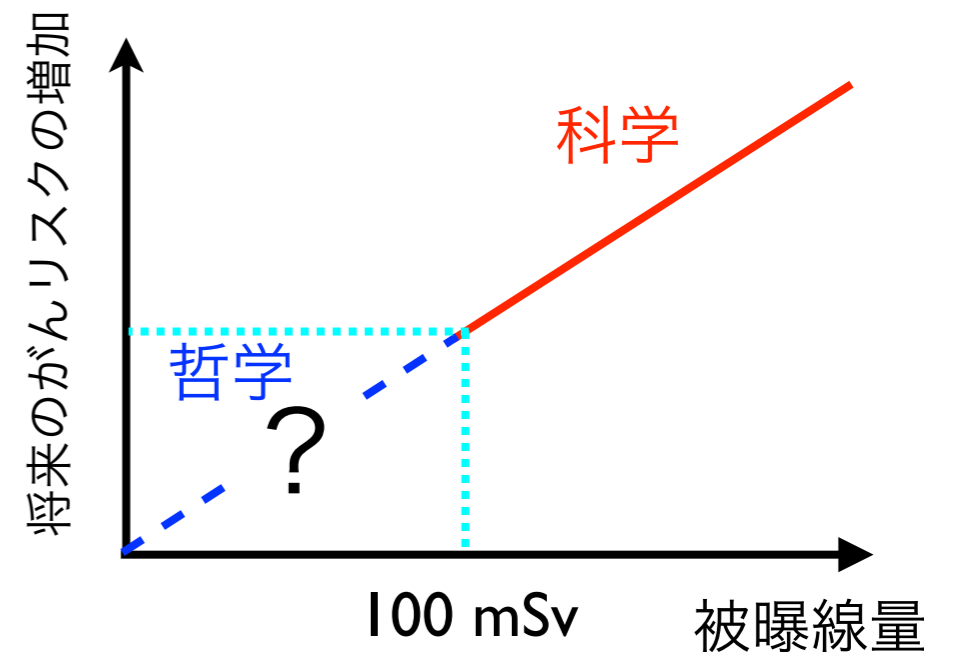
慣れない土地での生活ストレス

生業・収入の損失

年齢、家族構成、職業

リスクのトレードオフは人それぞれに違う。

どう判断すべきか、自分で考えるしかない。



リスクは相対的

基準値

(社会が決める)

放射線のリスク

# 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

$^{131}\text{I}$  (ヨウ素 $^{131}\text{I}$ ) 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)

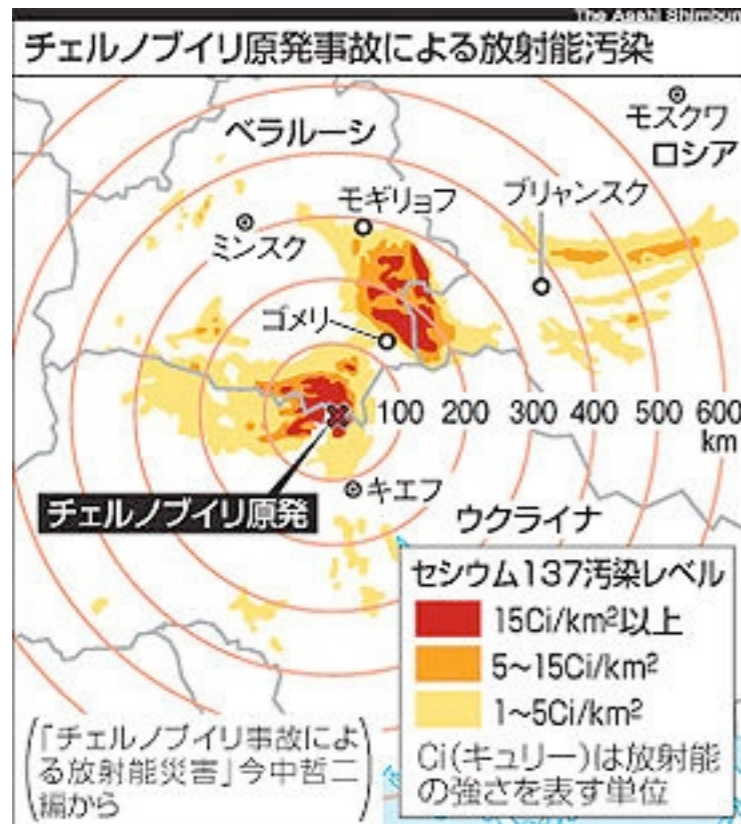
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

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

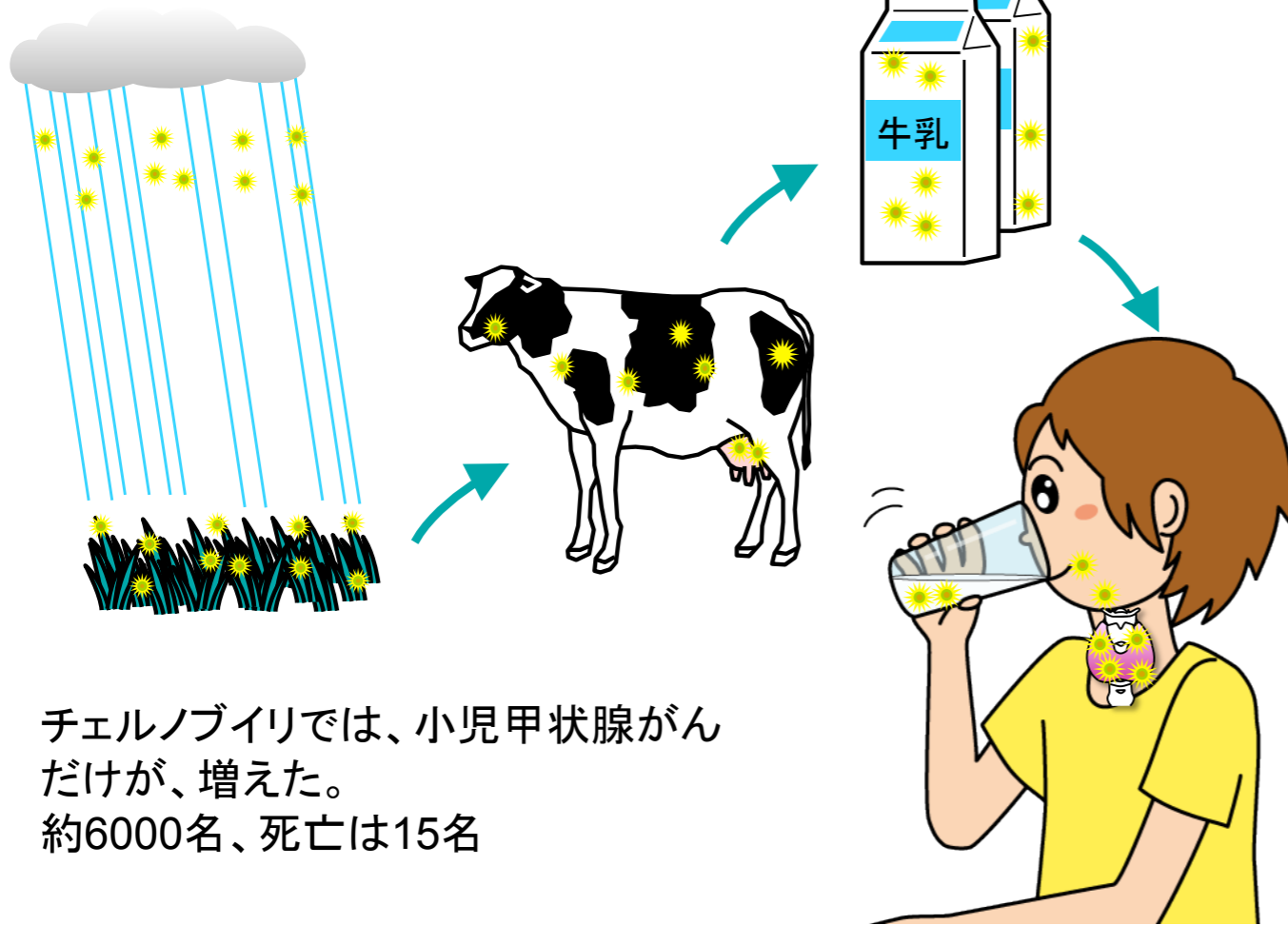


ロシア語  
Чернобыль / Чорнобиль



## チェルノブイリ原発事故

$^{131}\text{I}$  (ヨウ素 $^{131}\text{I}$ ) 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  
こどもの甲状腺がんの増加のみ。  
(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

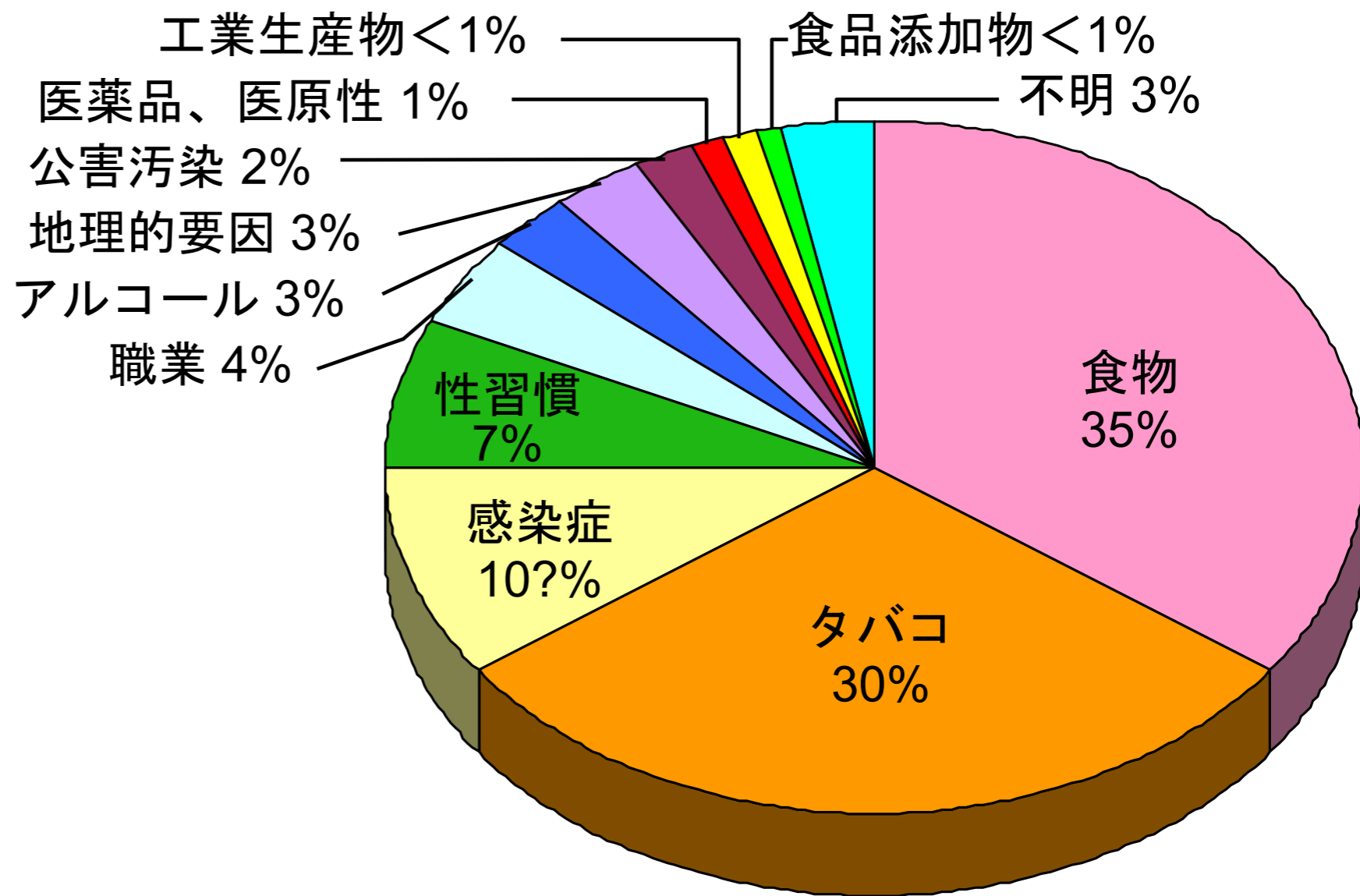
## 放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

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	
毎日3合以上の飲酒	1.8倍
1000~2000ミリシーベルトを浴びる	

※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。)

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

寺田 寅彦 (1935年)

**被曝を**

**怖れすぎても、怖れなさすぎても**

**健康被害が出る。**

(東大病院 放射線科 中川恵一先生)



**病は気から = 精神失調、免疫力低下などに注意**



# 放射線リスクコミュニケーション



# 震災がれき処理問題

東京大学 × 博報堂 × 時事通信社

# 放射線に対する強い恐怖心をもっている人たちがいる

あるウェブページのコメント欄より (2011/11~12)

まったく汚染されていない瓦礫などありません。

「私たちにできることは、被災地の苦しみ、痛み、悲しみを分かち合う、寄り添うことだ」とおっしゃっていますが、瓦礫受け入れによって、その苦しみや痛み、悲しみを市民に与えることになるとは思われないのでしょうか？瓦礫を受け入れることによってもたらされる影響を熟考され、適切な判断をされることを望みます。

大反対です！今回の瓦礫受け入れは、**放射線に関する科学的知識の欠如、**  
被災地の隣、**科学者の社会への情報発信の失敗、**  
物ばかりです。**行政に対する不信感、が問題。**  
をかけてでも、**行政に言う「大丈夫」を、一般国民の何人が心から信じますか？**  
この期に及んで、近隣都県の食べ物を高くても、手間

市長さんの今回の決定に不安を感じます。皆さんが仰る通り、**正直風評被害が一番怖い**です。私の大事な故郷が悪く言われるのは耐えられません。被災地の方を少しでも助けたいとゆう思いは、私も溢れそうなくらいあります。本当に今回の件を遂行されたいのなら**反対する市民、日本国民をどうか納得させて下さい。**

Fine.

Grazie per vostra attenzione.

Merci de votre attention.

Thank you for your attention.

Спасибо за внимание.

경청해 주셔서 감사합니다.

ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A.TORII