



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

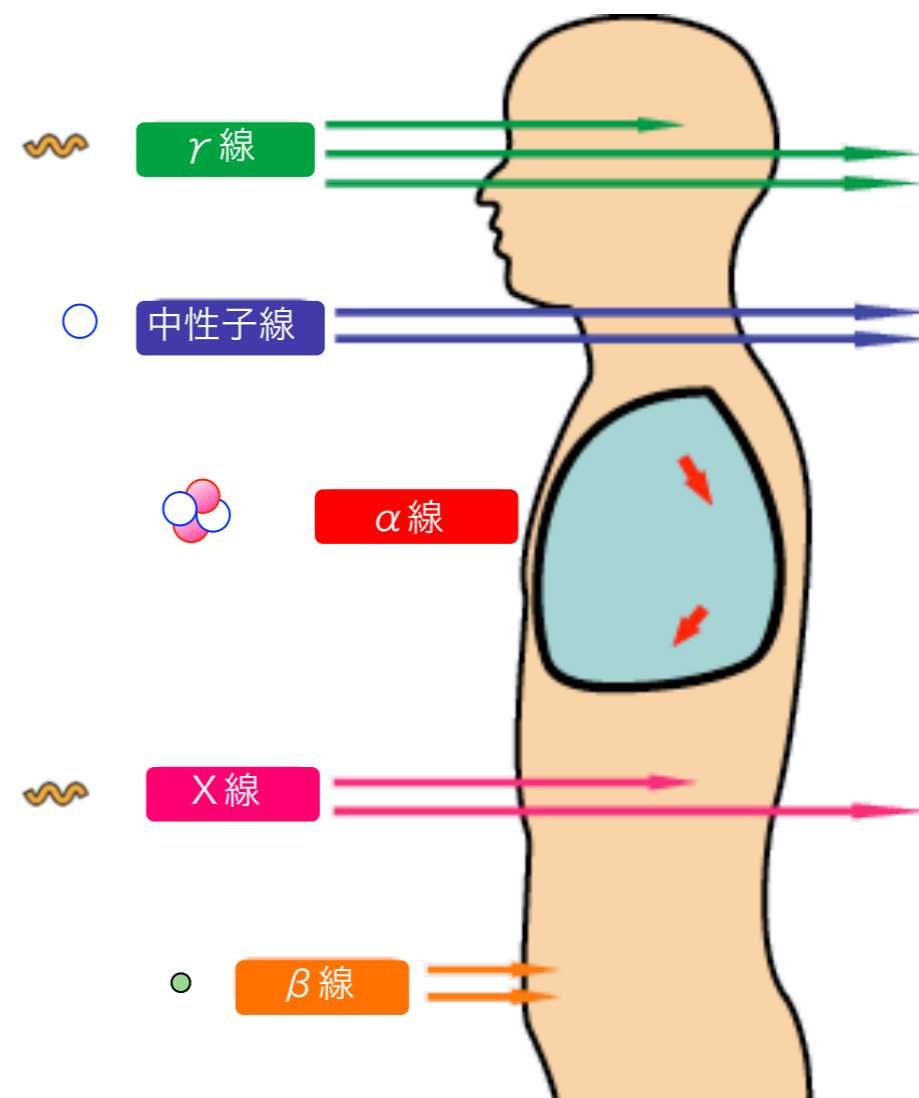
本体 2500円＋税

- 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。

東京地方裁判所 労働部講演会



2014 / 1 / 17 (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

東京地方裁判所 労働部講演会



- 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・放射線生物学
- 放射線の社会的リスク
 - 放射線防護学と法令
 - リスクコミュニケーション

2014 / 1 / 17 (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

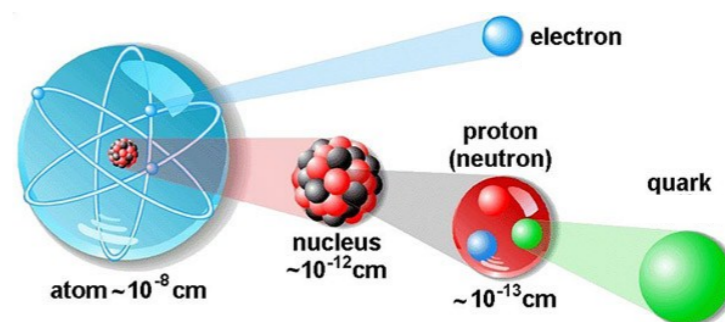
東京大学教養学部 放射線講義 スライドのご案内

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、どうぞご利用下さい。 <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



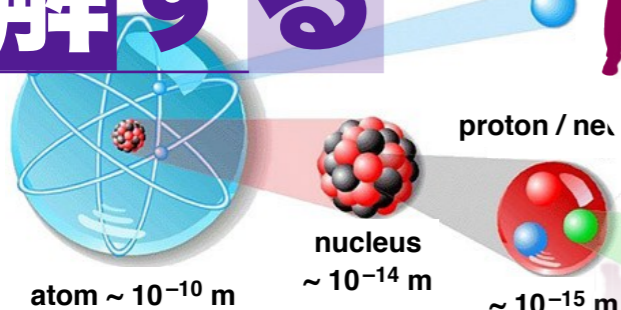
2011年度冬学期

主題科目テーマ講義

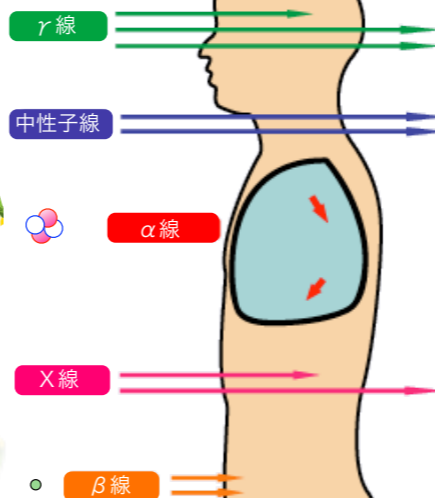
2012年度冬学期

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

放射線学



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。

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

《教養学部》

鳥居 寛之 《物理》
放射線物理学・原子核物理学

小豆川 勝見 《化学》
放射線計測学・環境放射化学

渡邊 雄一郎 《生命》
放射線生物学



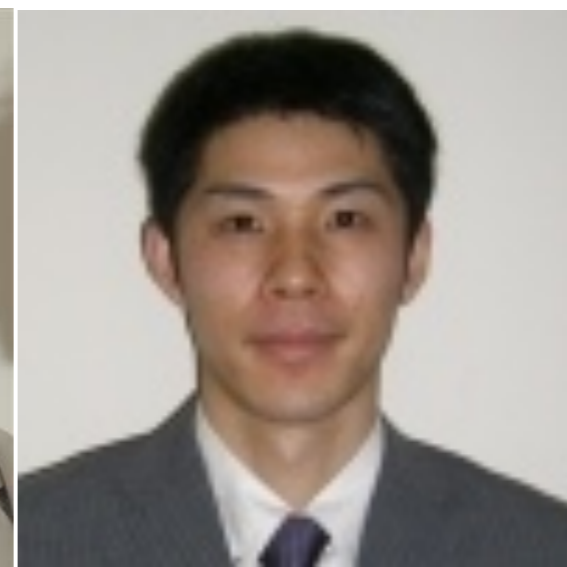
ゲスト講師

中川 恵一 《医学部》
放射線医学

石渡 祐樹 《原子力》
原子力工学

藤原 徹 《農学部》
植物栄養・土壌肥料学

【2011年度】



放射線を科学的に理解する

《教養学部》

鳥居 寛之 《物理》
放射線物理学・原子核物理学

小豆川 勝見 《化学》
放射線計測学・環境放射化学

渡邊 雄一郎 《生命》
放射線生物学

ゲスト講師

作美 明 《医病院》
放射線医療

森口 祐一 《都市工》
環境汚染・廃棄物問題

藤原 徹 《農学部》
放射性物質と農業

藤垣 裕子 《教養学部》
科学技術社会論



【2012年度】

放射線を科学的に理解する

《教養学部》

鳥居 寛之 《物理》
放射線物理学・原子核物理学

小豆川 勝見 《化学》
放射線計測学・環境放射化学

渡邊 雄一郎 《生命》
放射線生物学・放射線の利用



ゲスト講師

坪倉 正治 《医科研》
被曝調査・医療支援

飯本 武志 《環境本部》
放射線防護学

藤原 徹 《農学部》
放射性物質と農業



【2013年度】

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

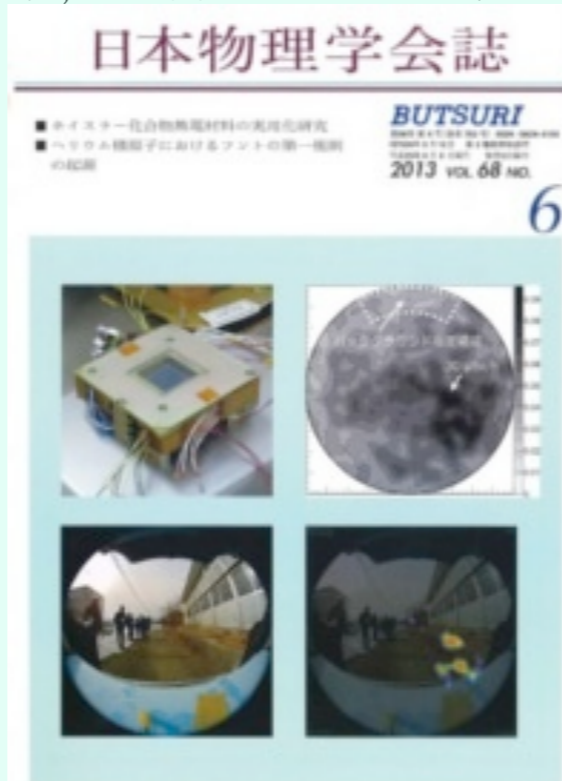


図1 放射線物理学のスライド例と講義風景。



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

大学 : 平成元年 東京大学理科1類入学

平成5年 理学部物理学科卒業

大学院 : 平成10年 東京大学大学院理学系研究科 博士(物理学)

現在 : 東京大学 教養学部・大学院総合文化研究科 助教

研究 : **CERN** 研究所で**反陽子原子・反水素合成の衝突・分光実験**

J-PARC (東海村) で**ミュオニウム原子の分光実験**

専門 : 粒子線物理学・素粒子原子物理学

家庭 : 2児の父 (小1の息子、3歳の娘) 東京在住

放射線関連

講義・講演 : 各地で放射線の講義や講演会

委員会 : 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

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

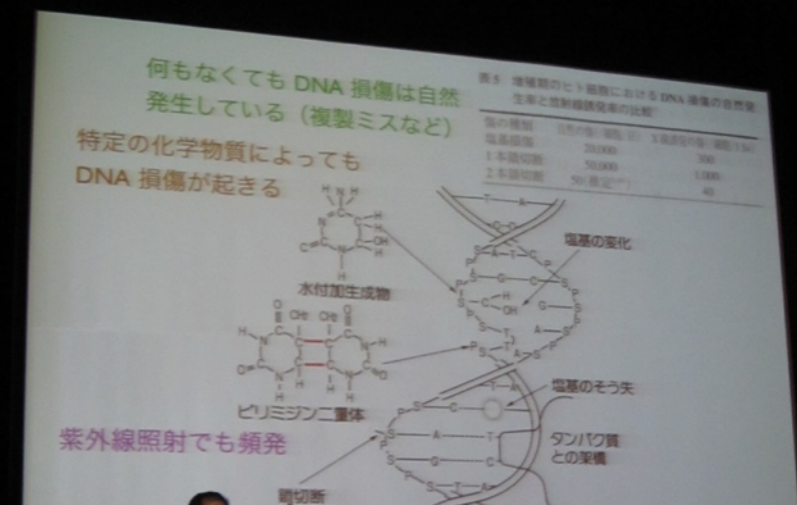


講義 1 時間

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？」

東京地方裁判所 労働部講演会



- 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・放射線生物学
- 放射線の社会的リスク
 - 放射線防護学と法令
 - 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

「放射能うつる」といじめ＝福島から避難の小学生に―千葉

2011年4月15日11時6分

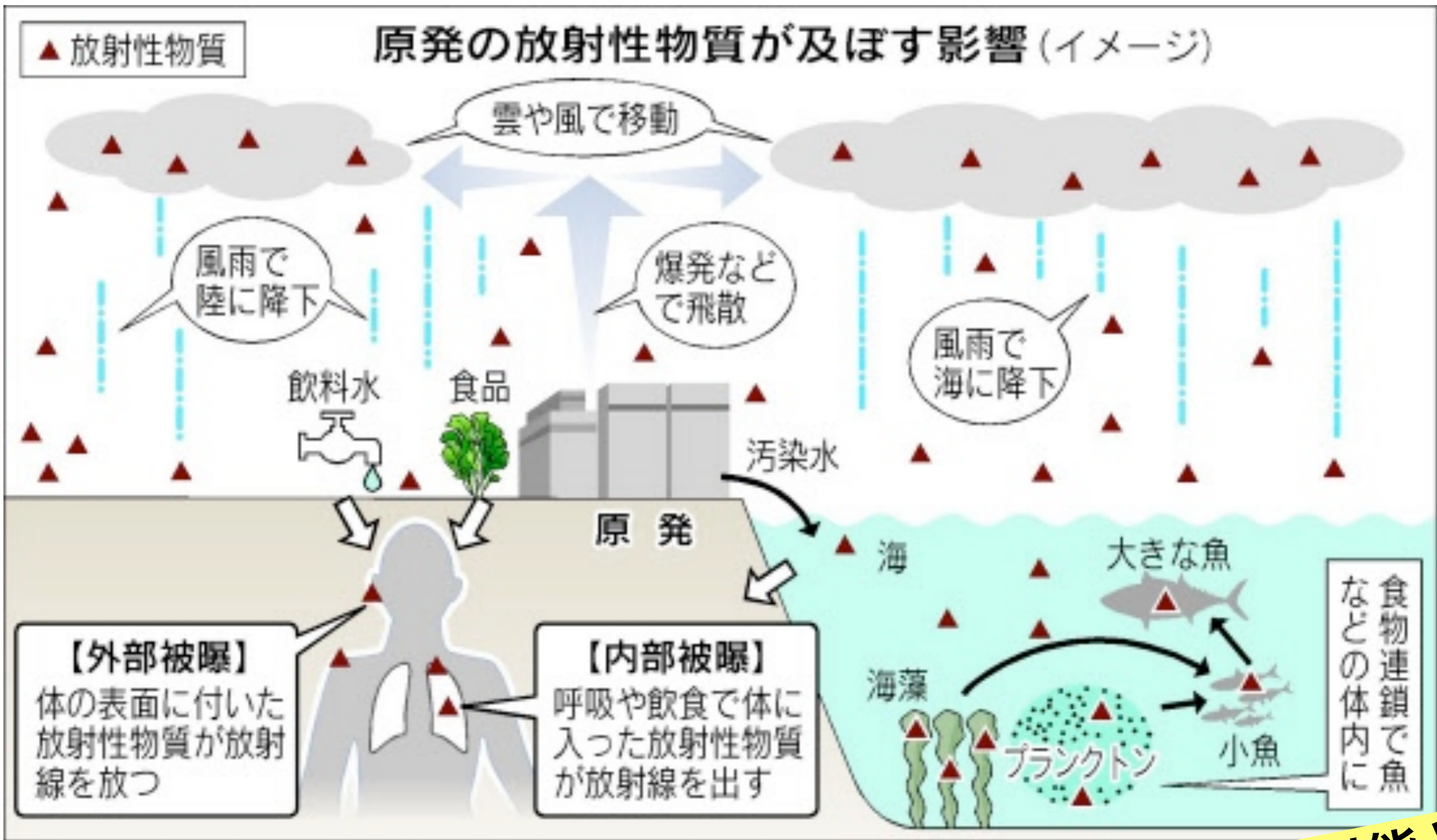
福島第1原発事故を受け、福島県から千葉県船橋市に避難した小学生の「**放射線がうつる**」といじめられたという訴えが市教育委員会の調査で明らかになった。市教委は同日までに、避難者の不安な気持ちを踏まえた言動に注意し、思いやりを持って被災者の児童生徒に接するよう指導を求める通達を市立小中学校に出した。

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「どこかへ逃げる」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

国際原子力事象評価尺度

7	深刻な事故	チェルノブイリ原発事故
6	大事故	
5	事業所外へリスクを伴う事故	スリーマイル島原発事故
4	事業所外への大きなリスクを伴わない事故	東海村臨界事故
3	重大な異常事象	
2	異常事象	
1	逸脱	

放射性物質の外部放出 (ヨウ素131等価)

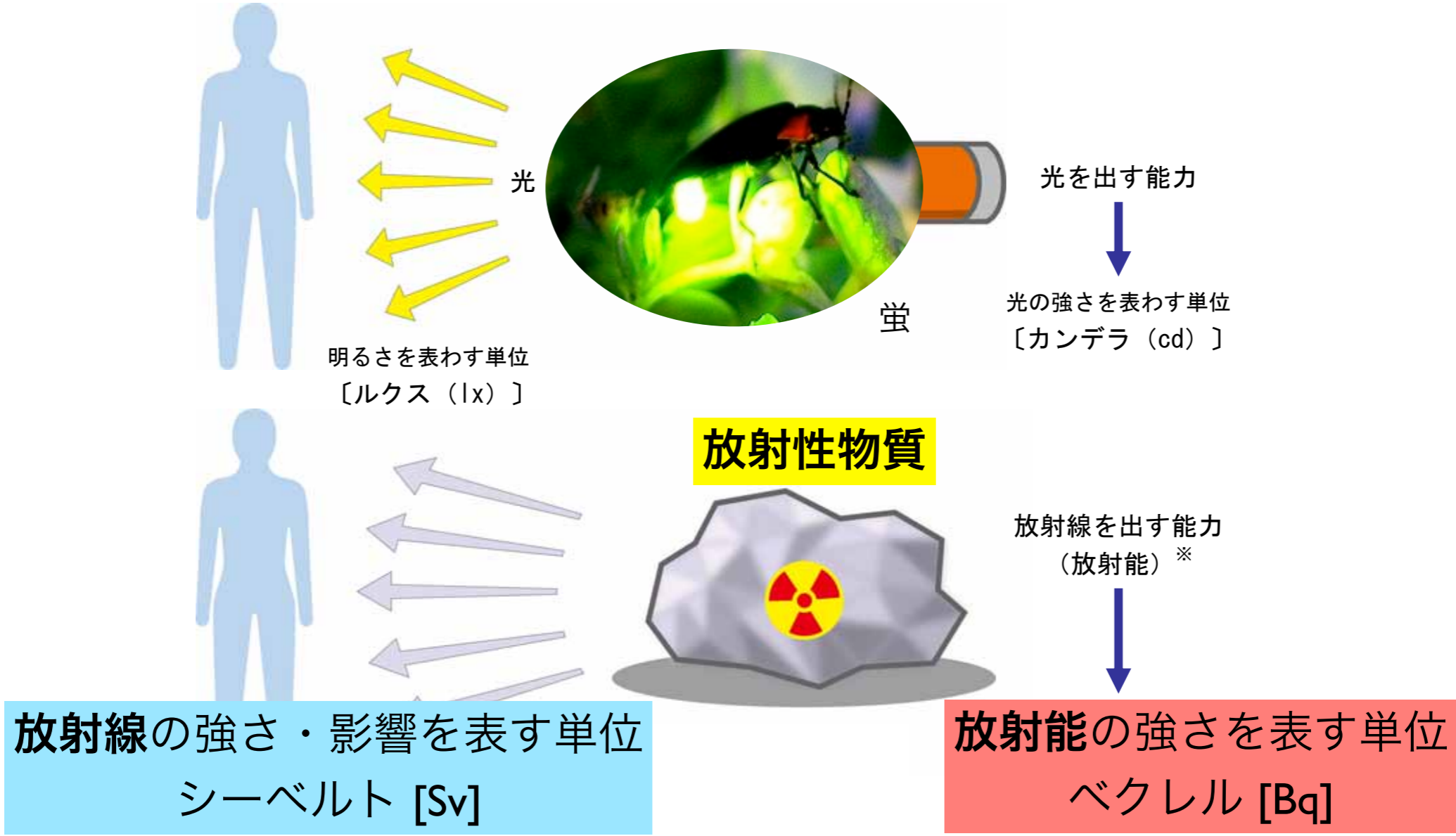
- 7 : 数万テラベクレル相当以上
- 6 : 数千～数万テラベクレル相当
- 5 : 数百～数千テラベクレル相当

“テラベクレル”の謎

<http://togetter.com/li/123327>

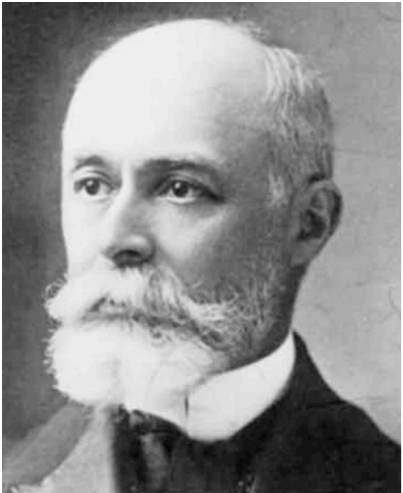
- ✿ ～**万テラベクレル**とかヨウ素とかマジわからん＼(^o^)/文系に逃げたツケがこんなことで来るとは思わなかったわ…
- ✿ NHK「37京ベクレル」で言われても分かりづらいw まだメガとかテラのほうが。つーか単位統一してくれればいいのに
- ✿ 『京』という単位、テレビで見たの初めてかも。テラとか京とか…もはや1ベクレルがなんなのか、全く想像つかない
- ✿ **ミリシーベルト**であんなに騒いでたのに1万テラベクレルってなんや
- ✿ 36万テラベクレルとか63万テラベクレルとか、想像もできない数値になってしまっている原発事故だけど、放射能が人体に影響を及ぼす尺度であるシーベルトに換算するとどれくらいになるのだろうか？

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



(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. ?)

[less than a minute ago](#) via [Echofon](#) ☆ [Favorite](#) ↻ [Retweet](#) ↩ [Reply](#)

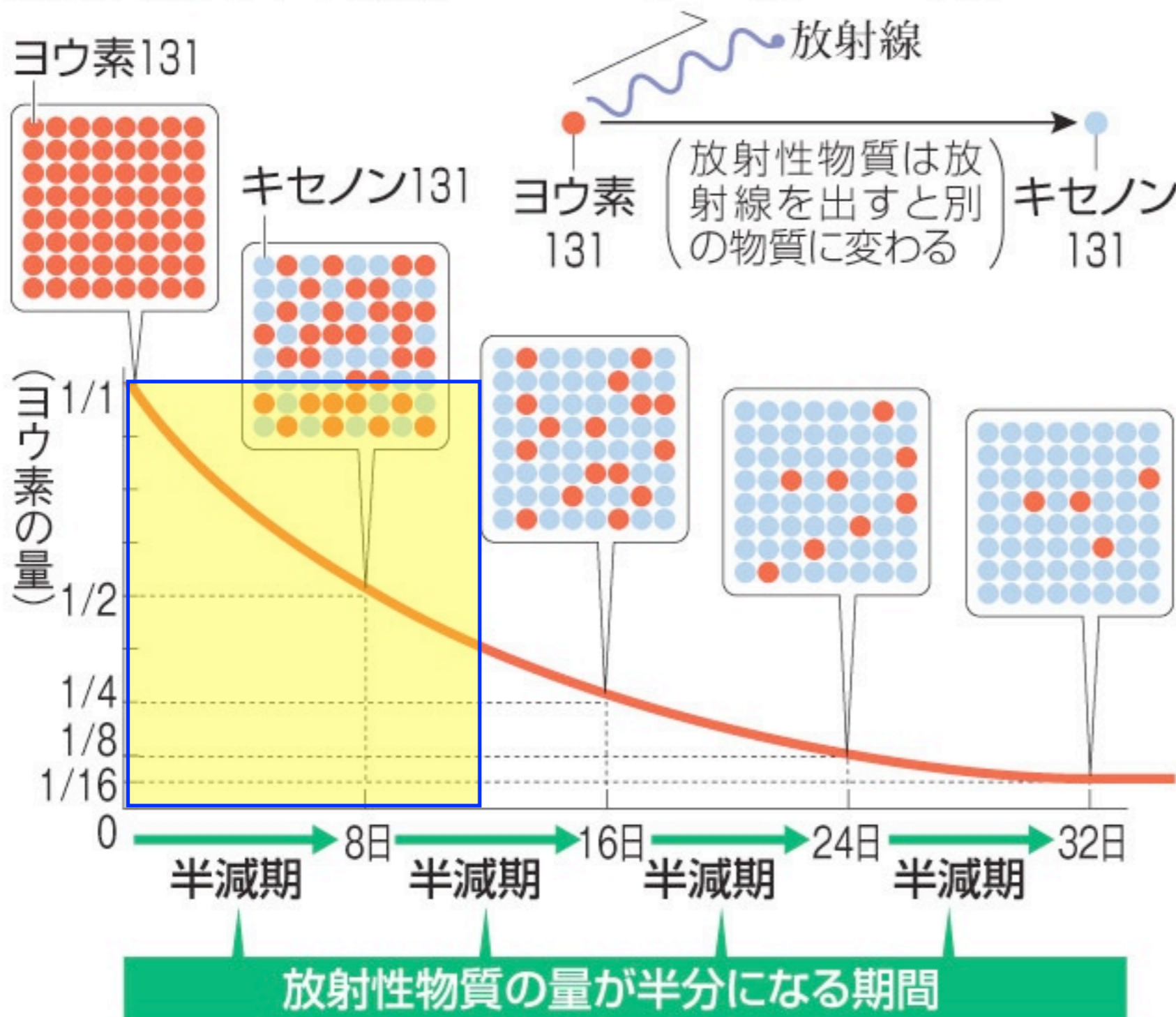


[ryugo hayano](#)
hayano

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。

(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)

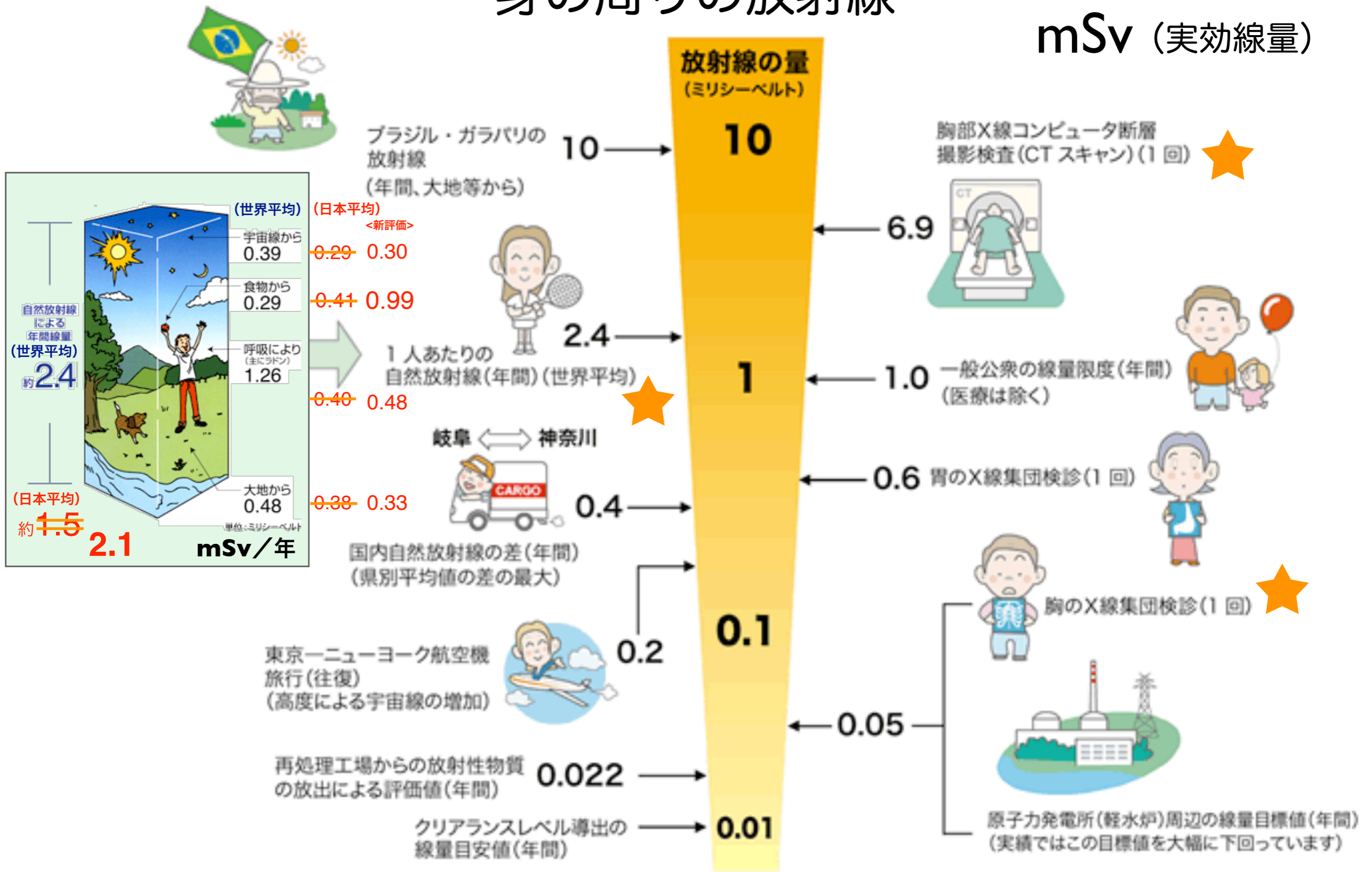


注：ヨウ素等価換算は、環境や人への影響を勘案して係数を決めている。ヨウ素以外の核種の質量を計算するには適していない。ヨウ素131については、15万テラベクレルの放出と言われているので、その質量は上の問いに対する計算値の4分の1となる。また、半減期の長いセシウム137などでは、同じベクレル数でも、モル数も質量もヨウ素に比べてずっと大きくなる。

自然放射線

身の周りの放射線

mSv (実効線量)

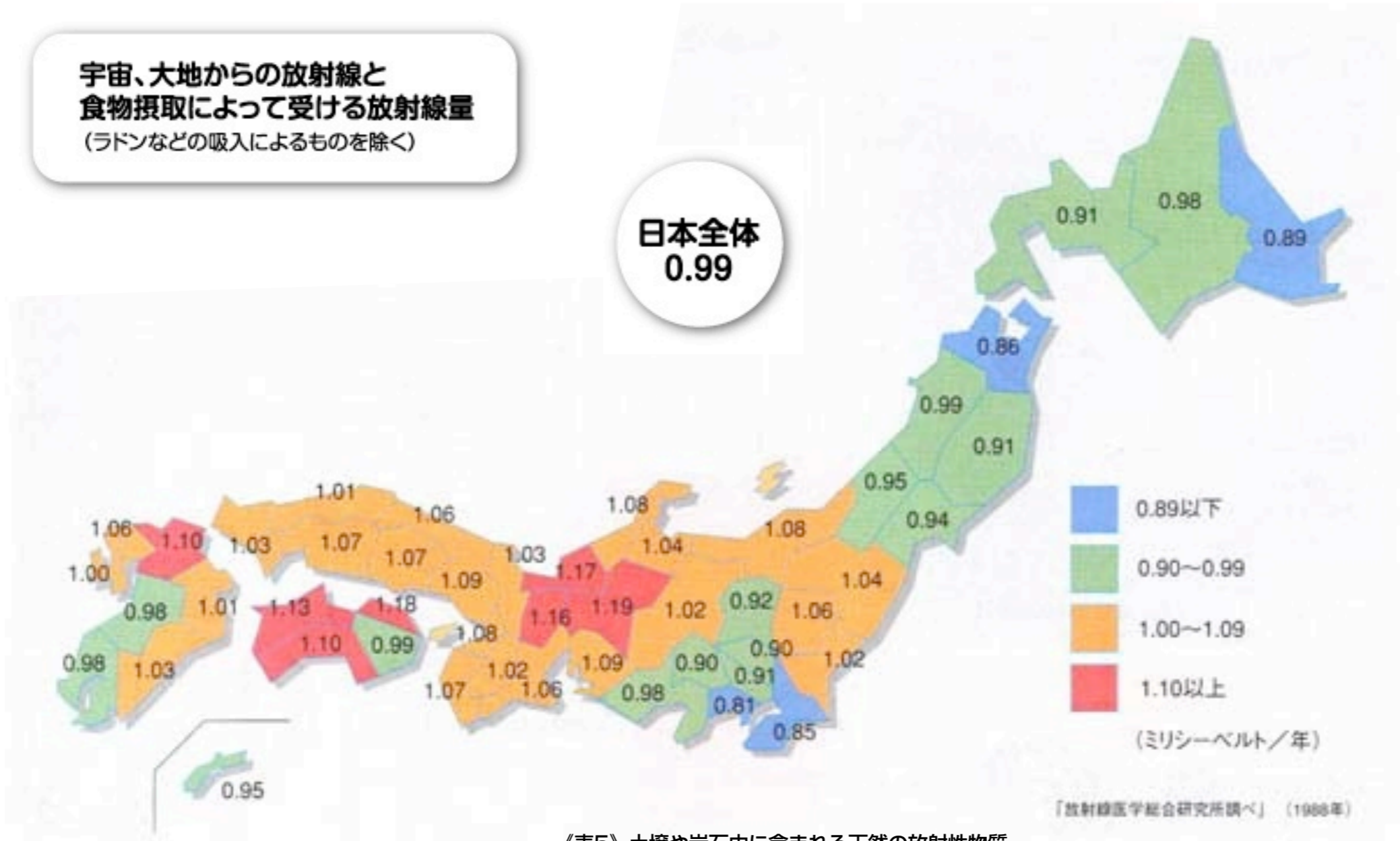


mSv/年

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

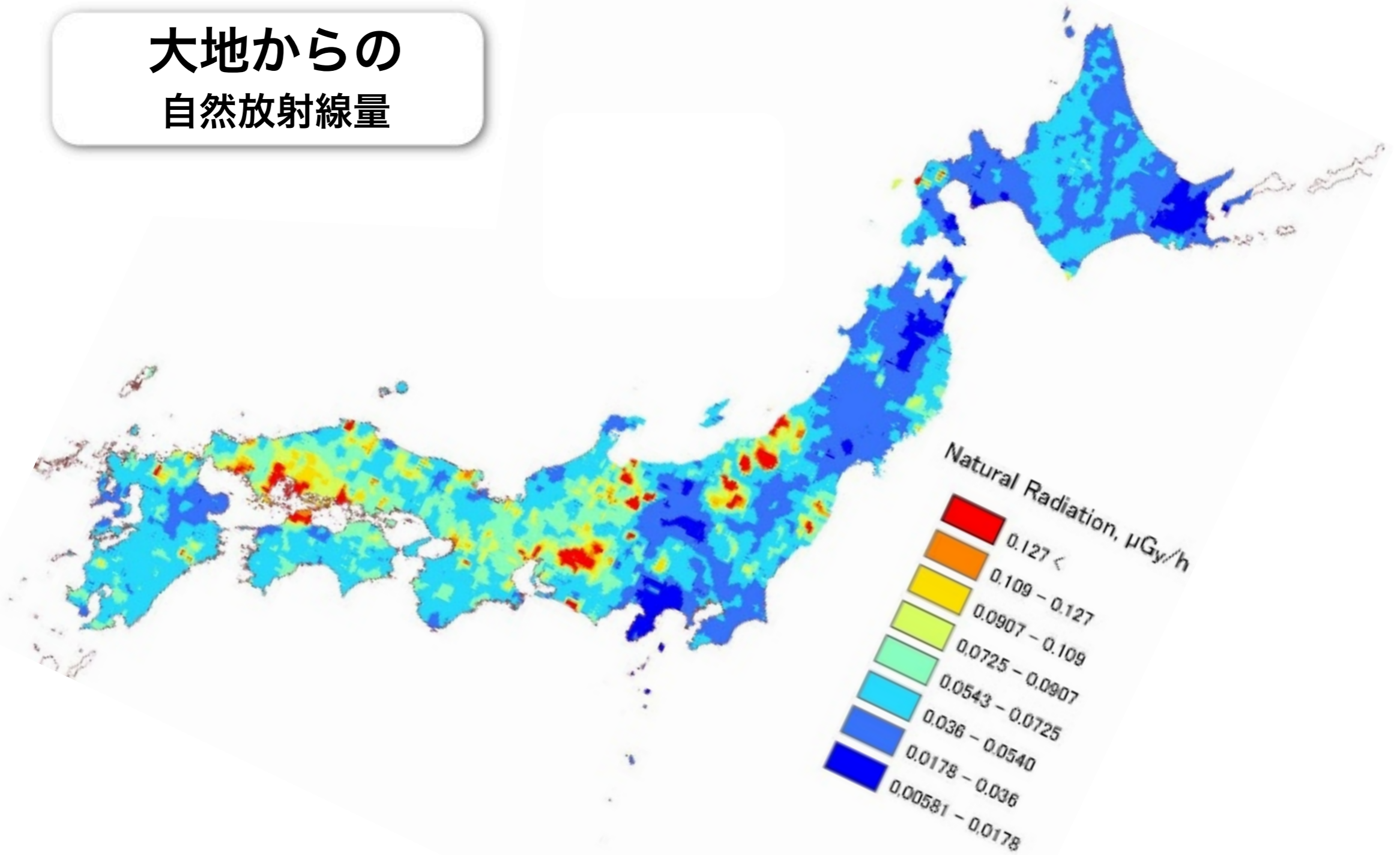
出典：国連放射線影響科学委員会報告 (1982) など

緑医学総合研究所調べ (1988年)

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



mSv/年

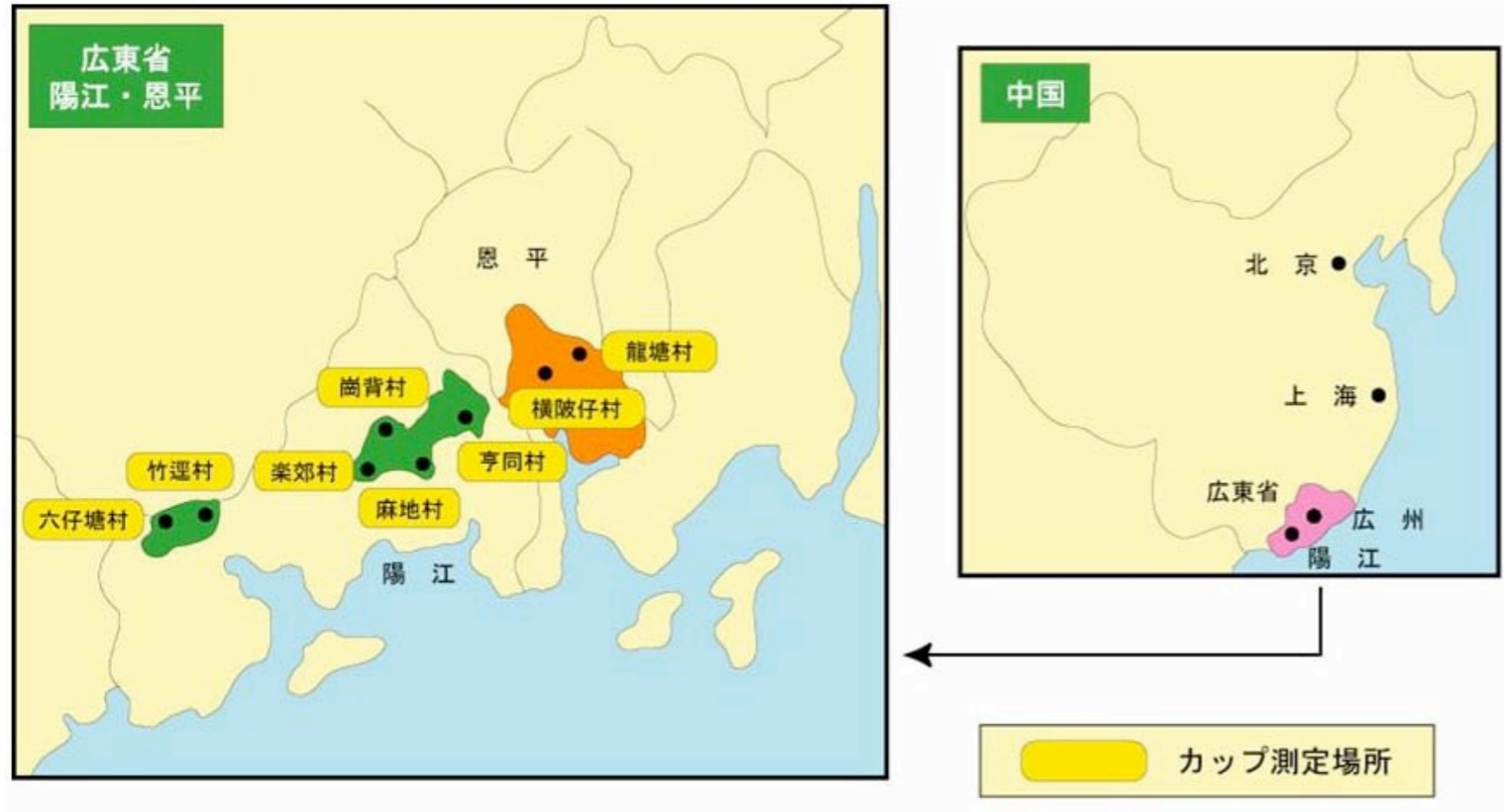
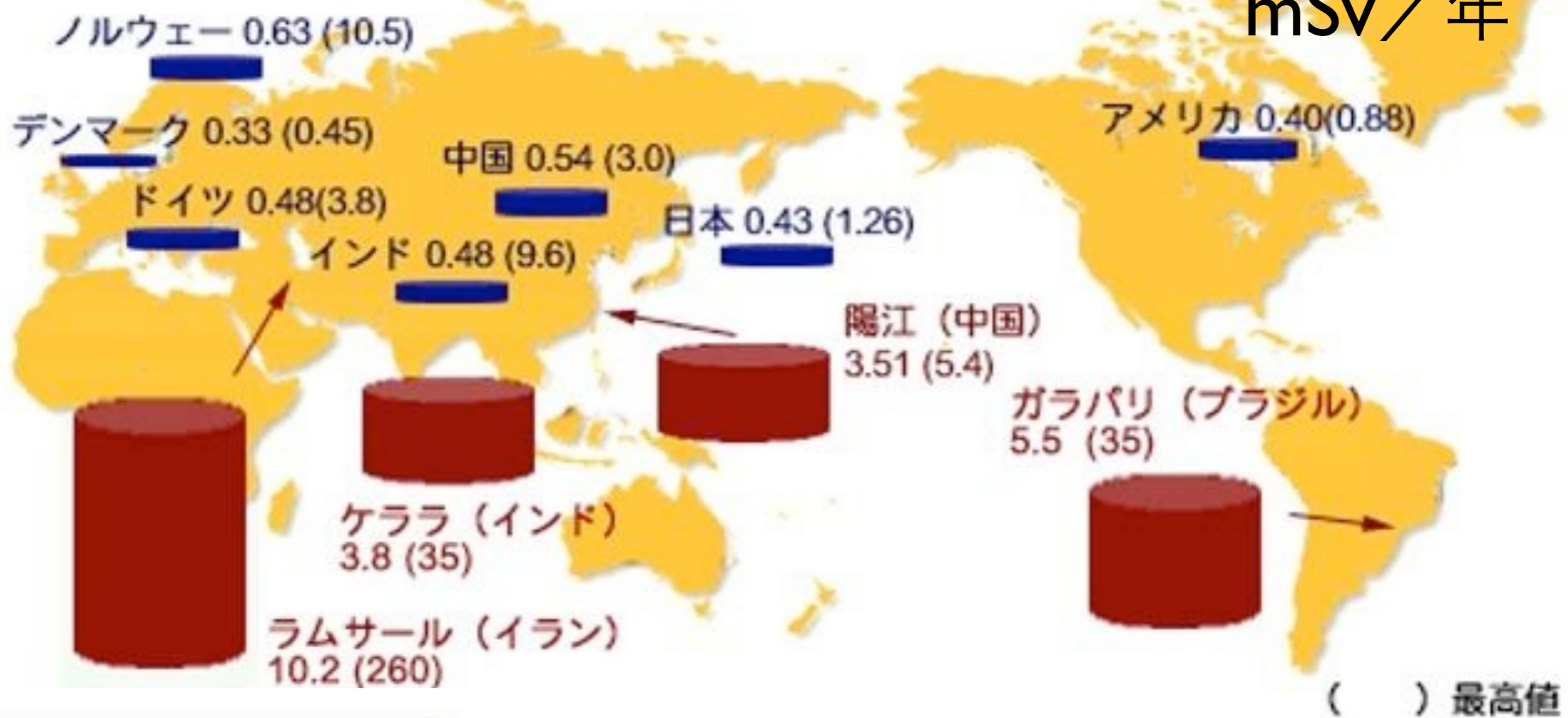
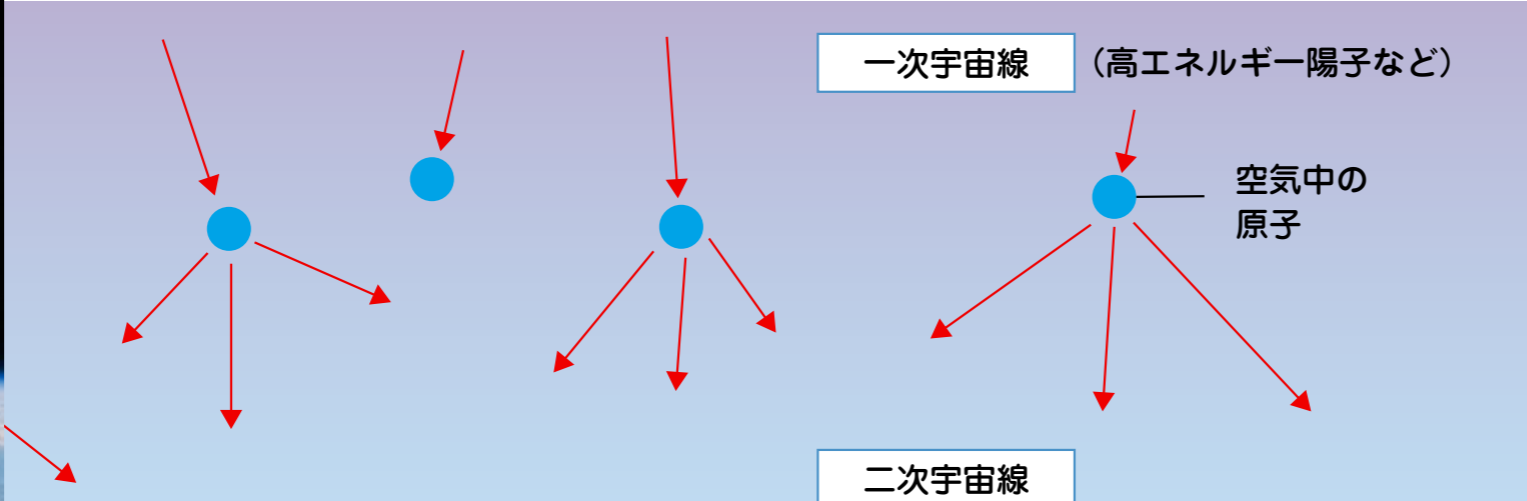


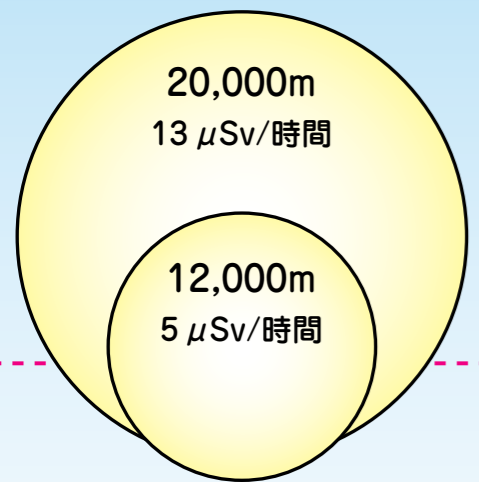
表1 高自然放射線地区と対照地区におけるがん死亡率の比較^{7,8)}

	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



※○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 μ Sv/時間

2,000m ○ 0.1 μ Sv/時間

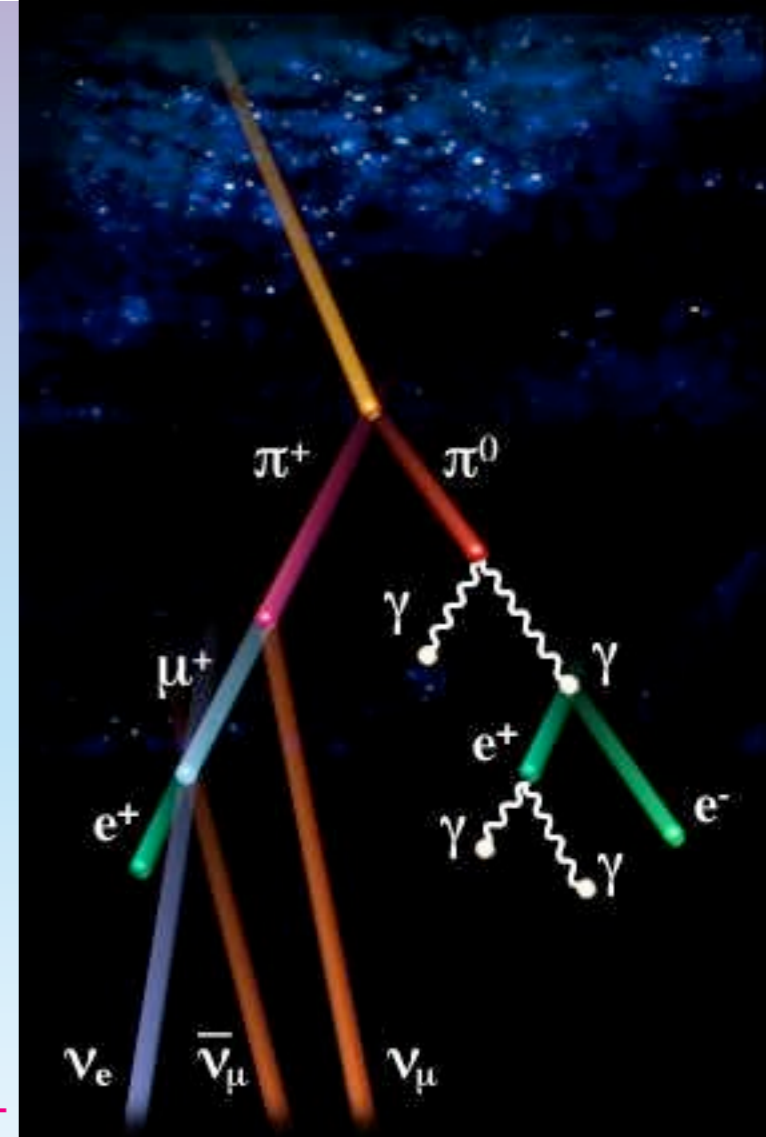
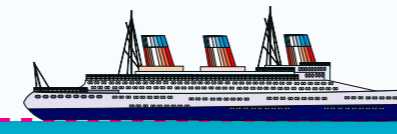
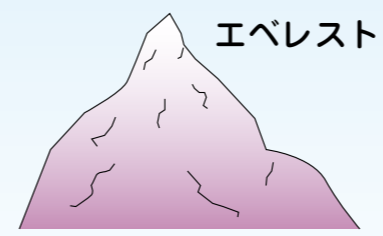
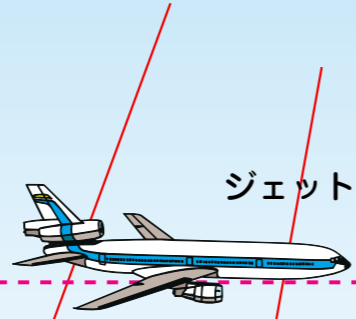
海面 ○ 0.03 μ Sv/時間

μ Sv = マイクロシーベルト

100km

10km

1km



東京～NY 往復
200 μ Sv (max)

《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 (μ 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

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

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。

東京地方裁判所 労働部講演会



- 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・放射線生物学
- 放射線の社会的リスク
 - 放射線防護学と法令
 - 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

火力発電と原子力発電の違い

火力

化学的燃焼

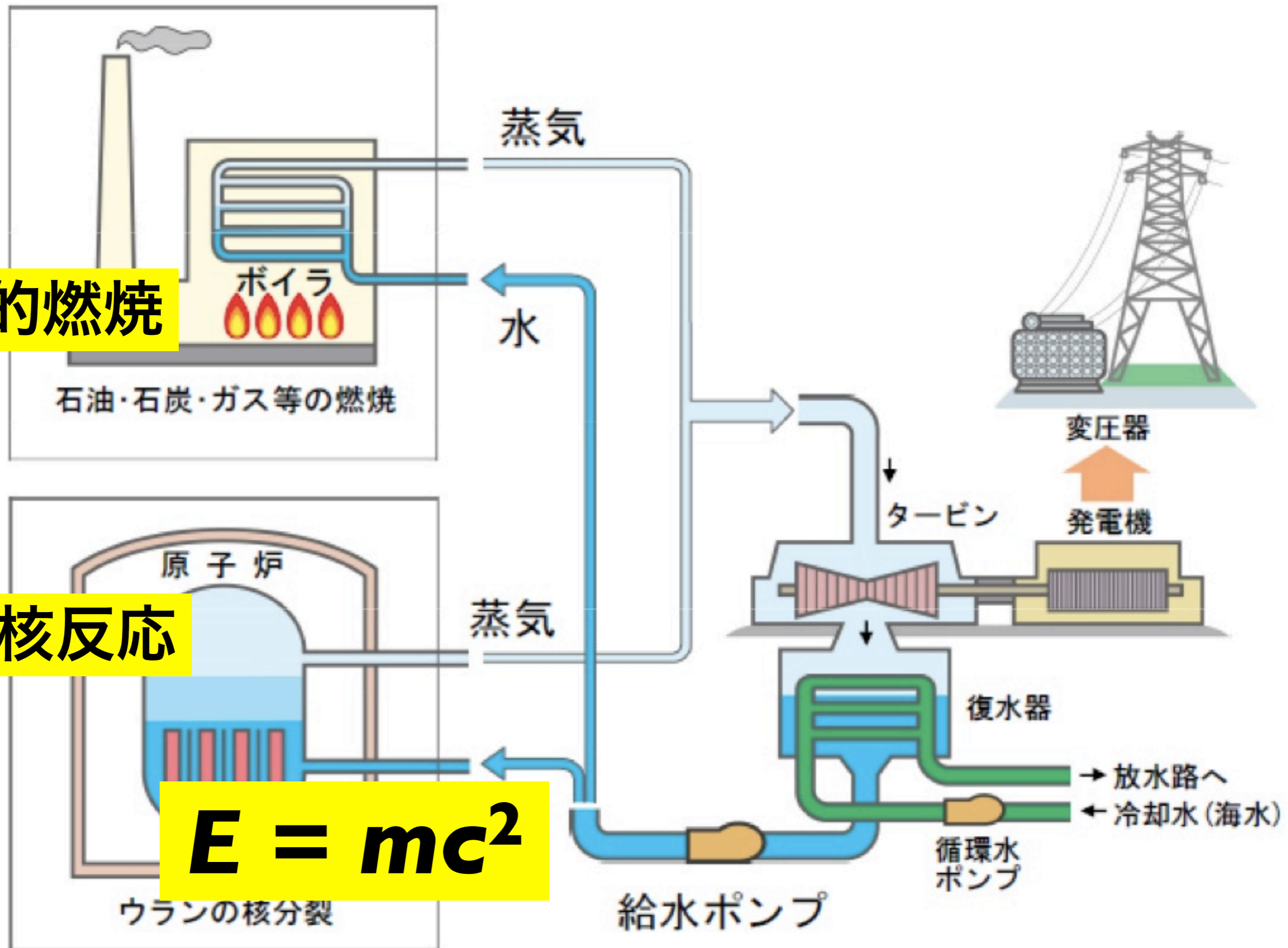
石油・石炭・ガス等の燃焼

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



クォーク
quark

am (10^{-18} m)
アトメートル

GeV
ギガ電子ボルト

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

放射性物質とは

放射性核種
= 放射性同位体
= 不安定原子核

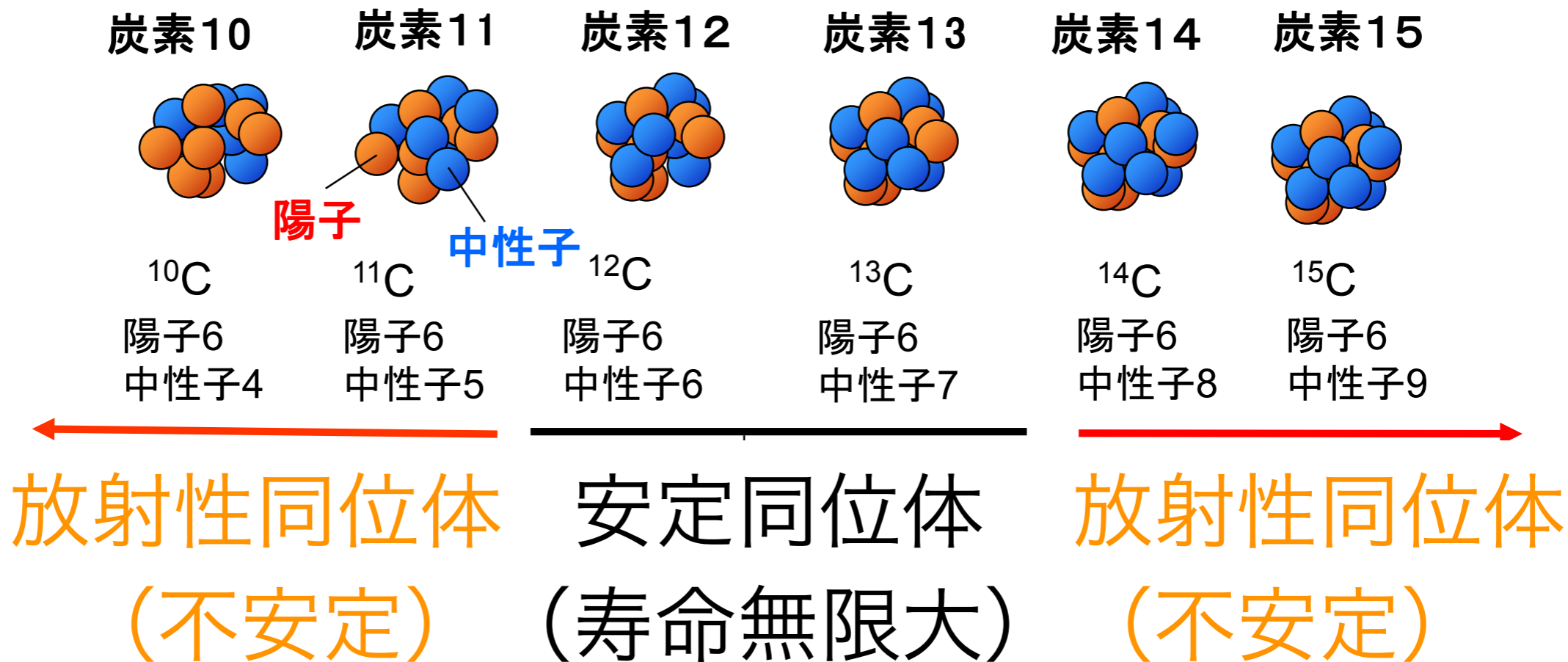
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$

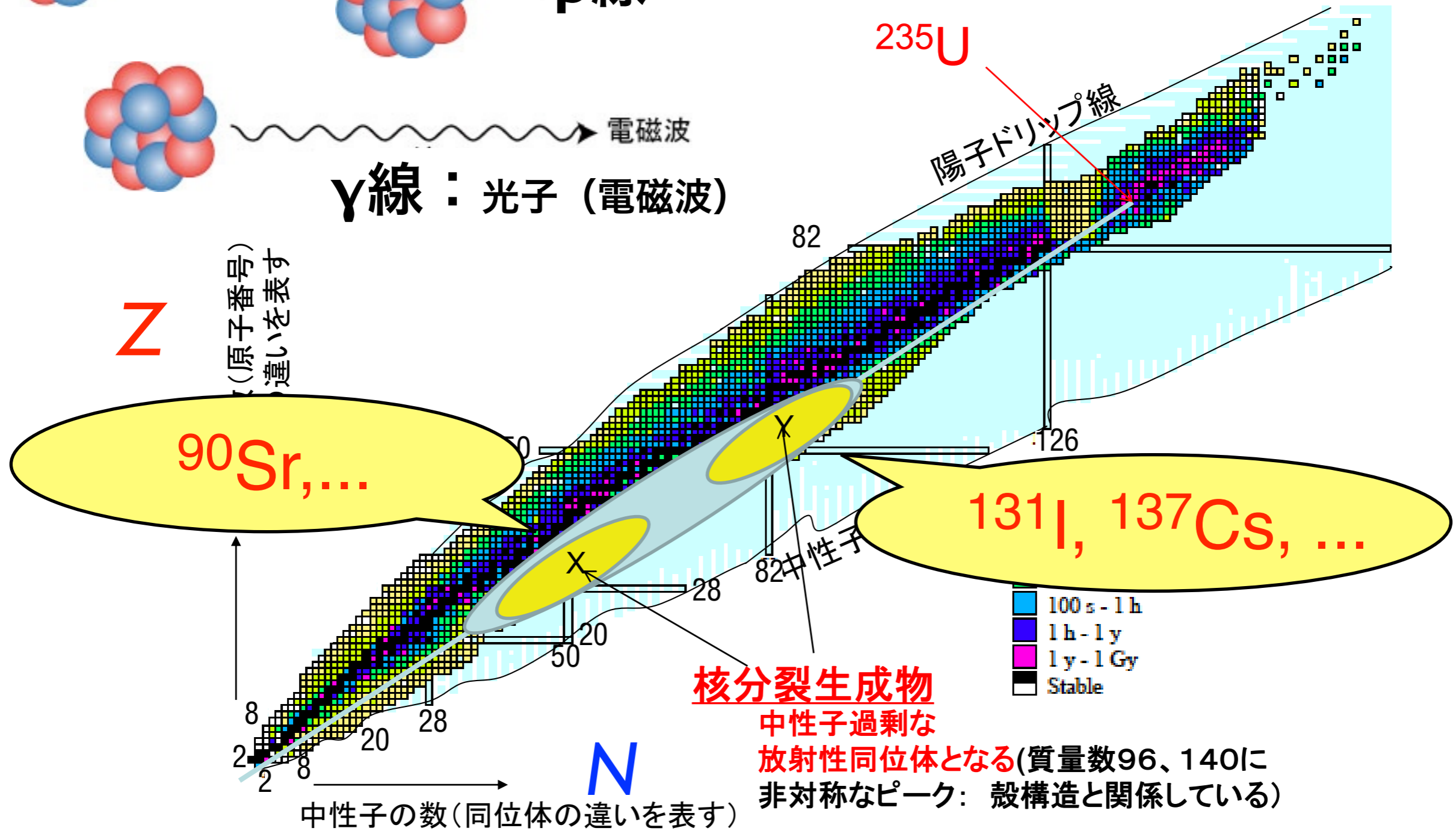
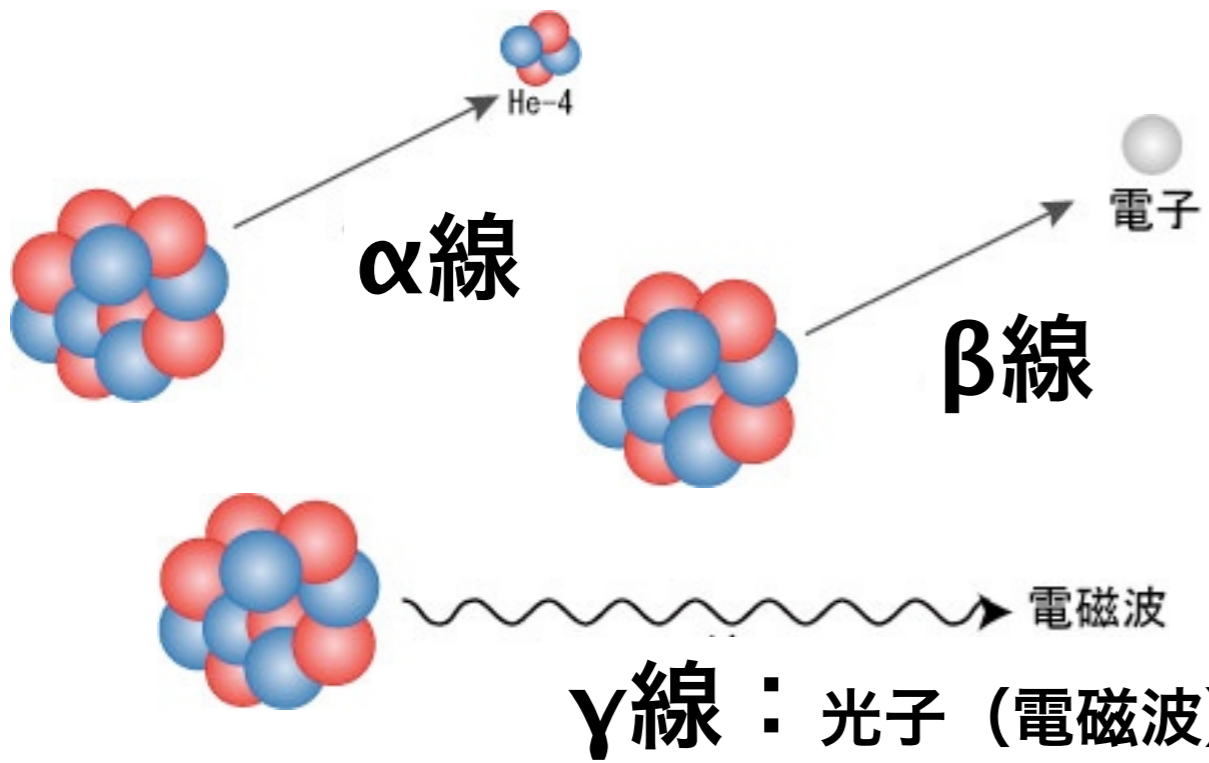


陽子数 Z が同じなら化学的には同じ元素
中性子数 N が違う原子核が多種存在する

炭素原子核の例

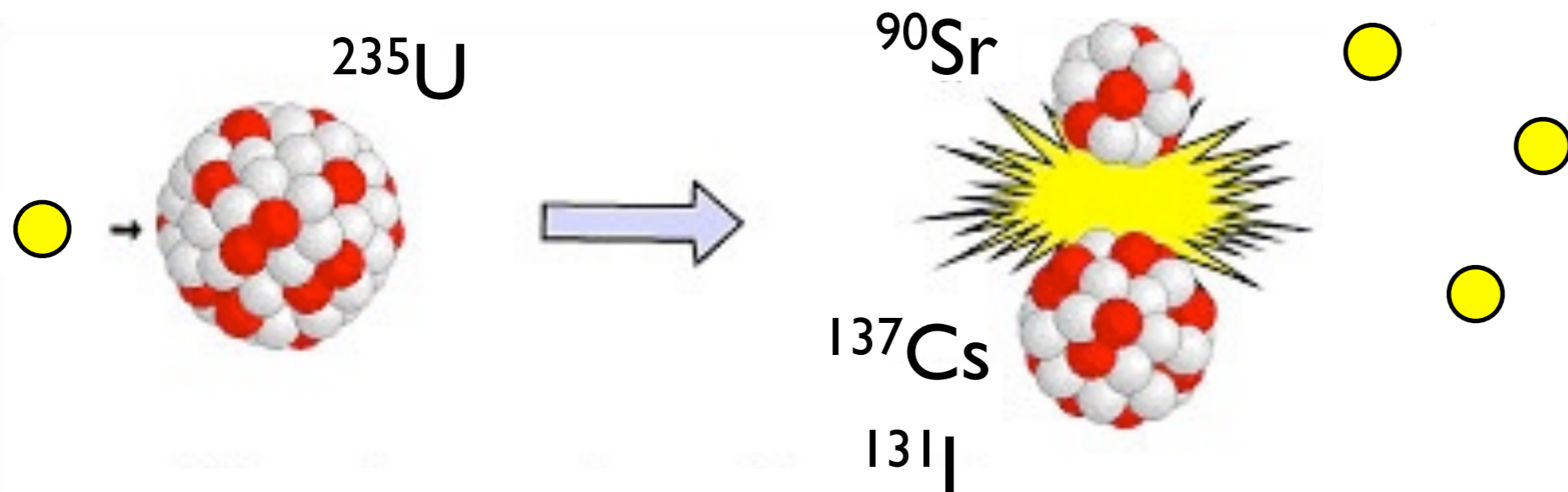


放射能とは 放射性物質が放射線を出す能力のこと。



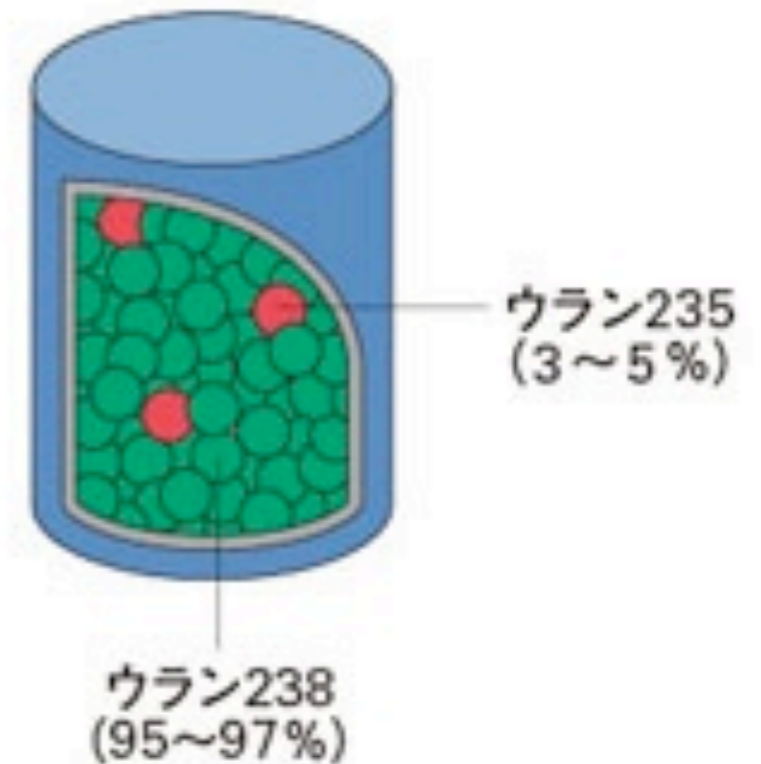
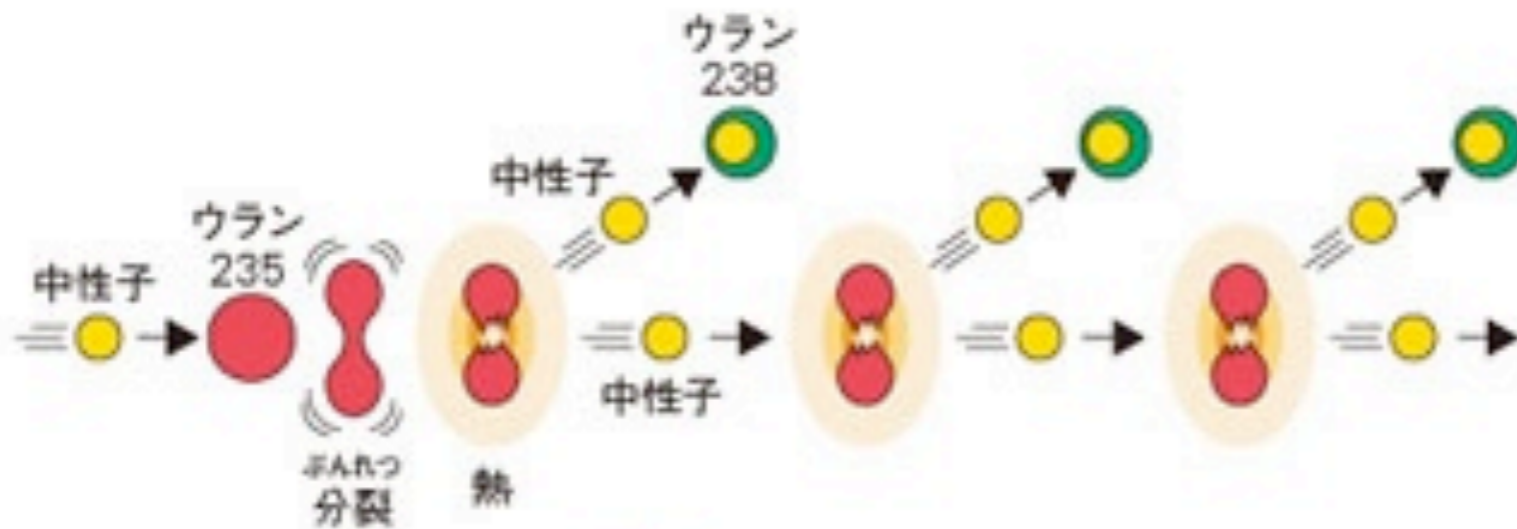
Nuclear Chart 核図表

原子核分裂反応



熱中性子

減速

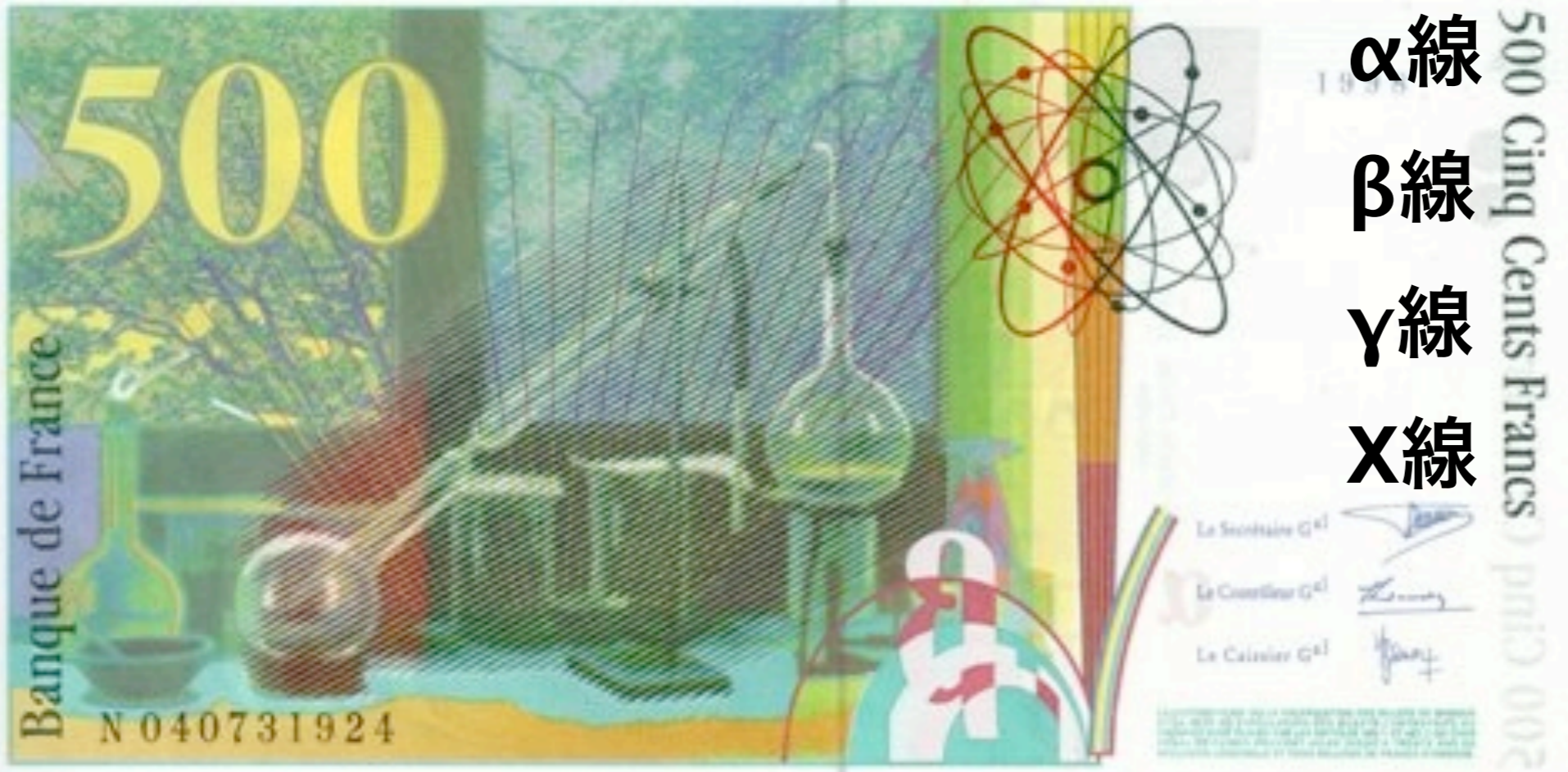


中性子 + ウラン 235 / 238

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

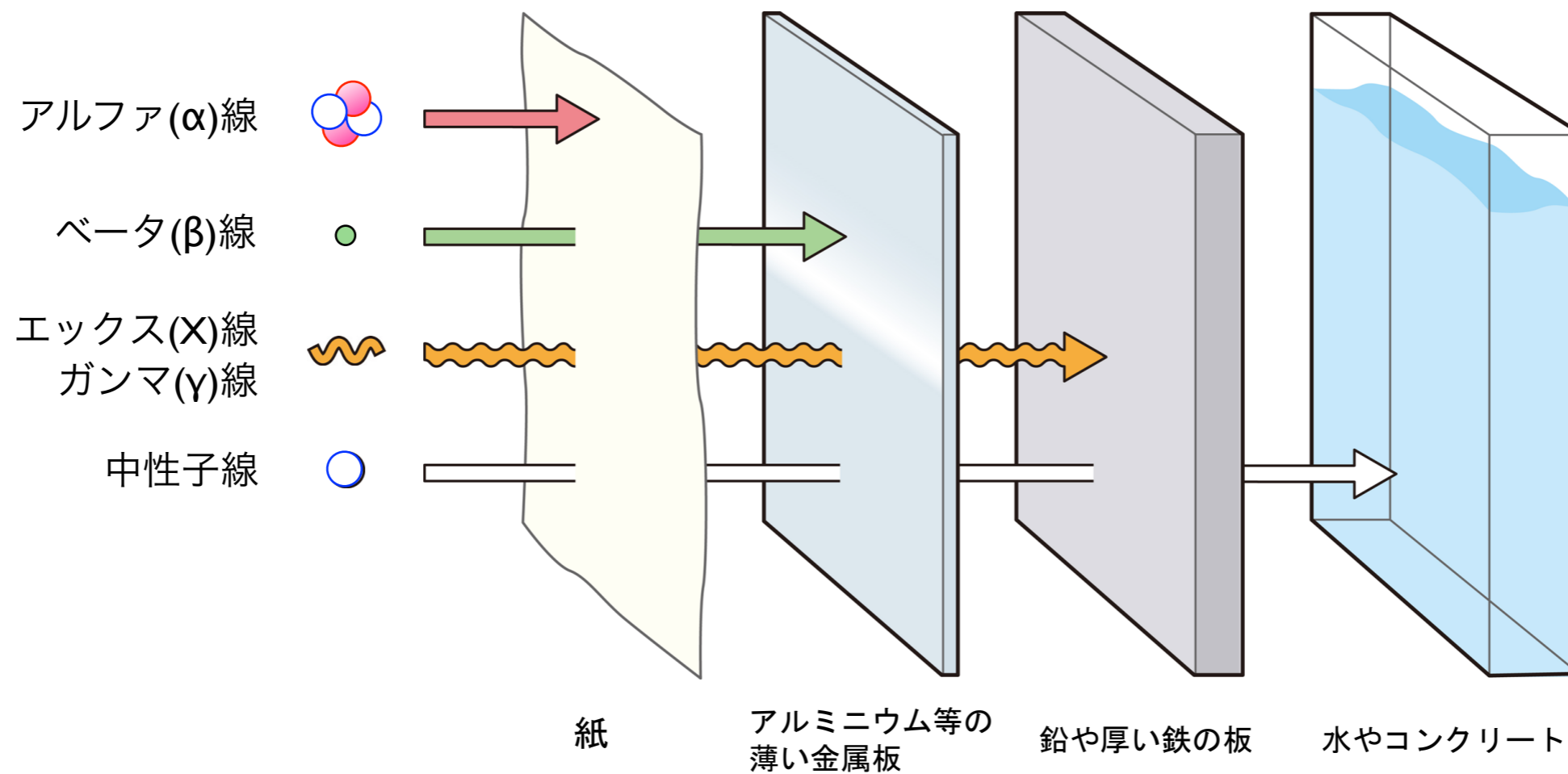
放射線とは

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/>

放射線と物質との相互作用

放射線の種類と透過力



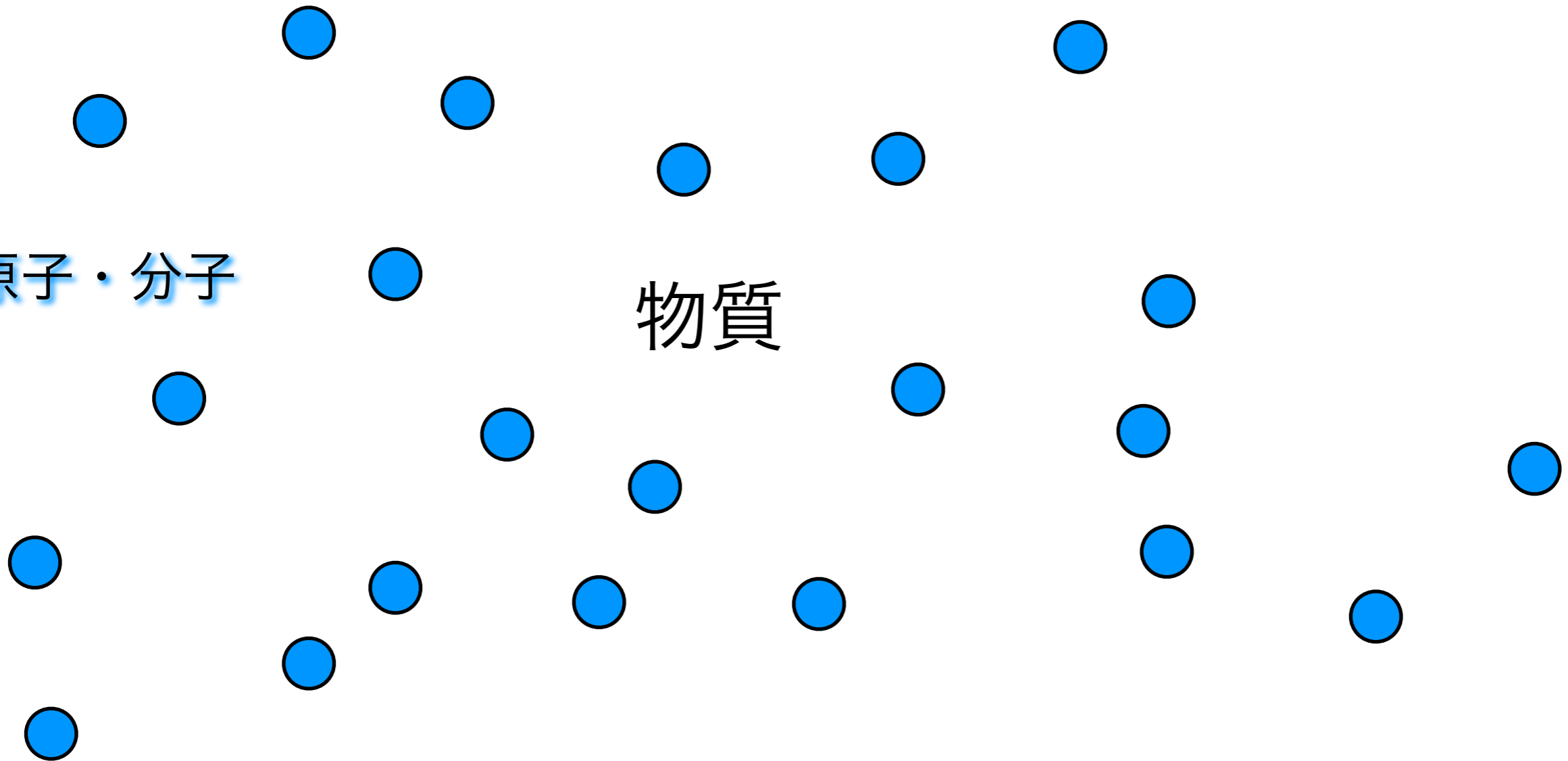
荷電粒子のエネルギー損失過程

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

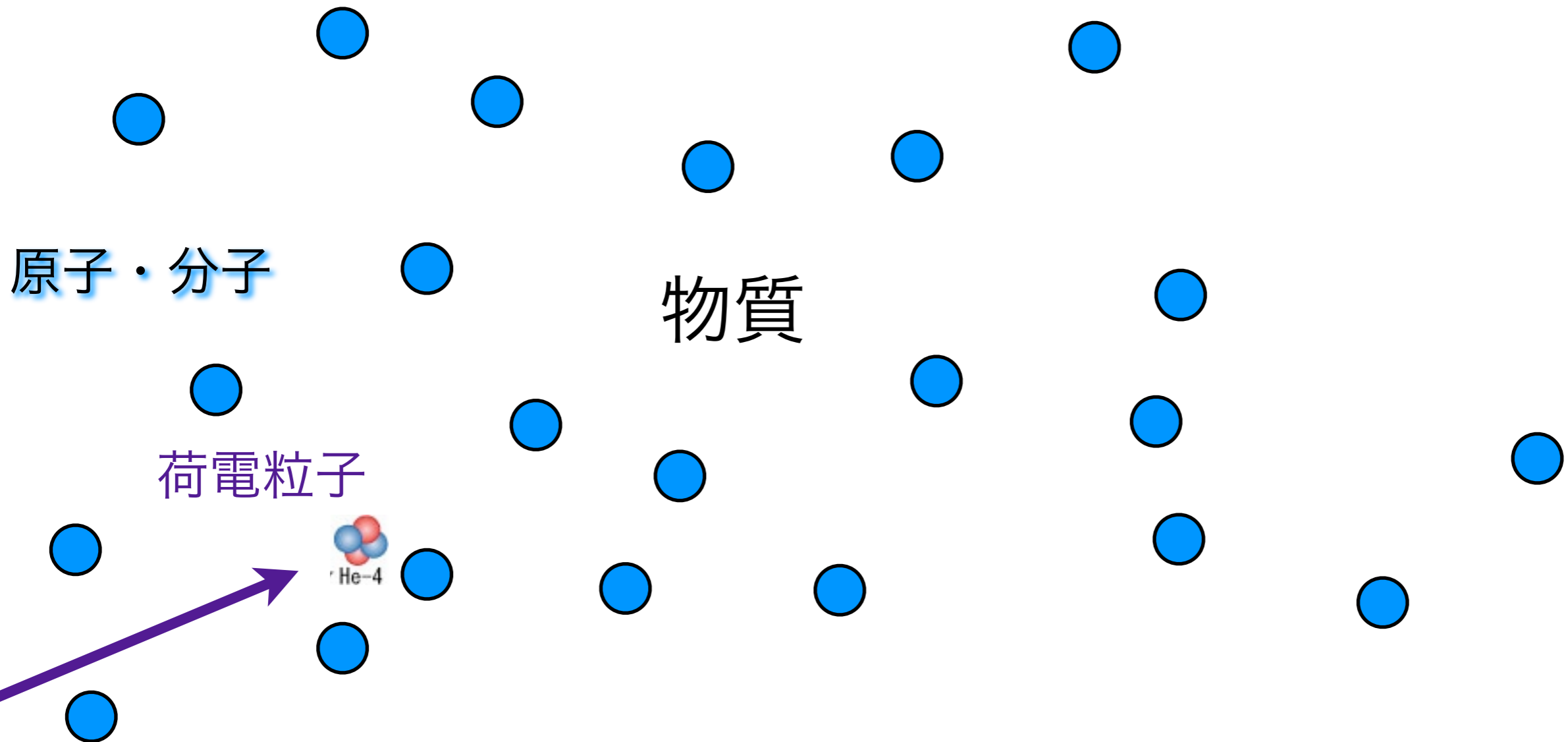
物質



荷電粒子のエネルギー損失過程

荷電粒子：
クーロン力

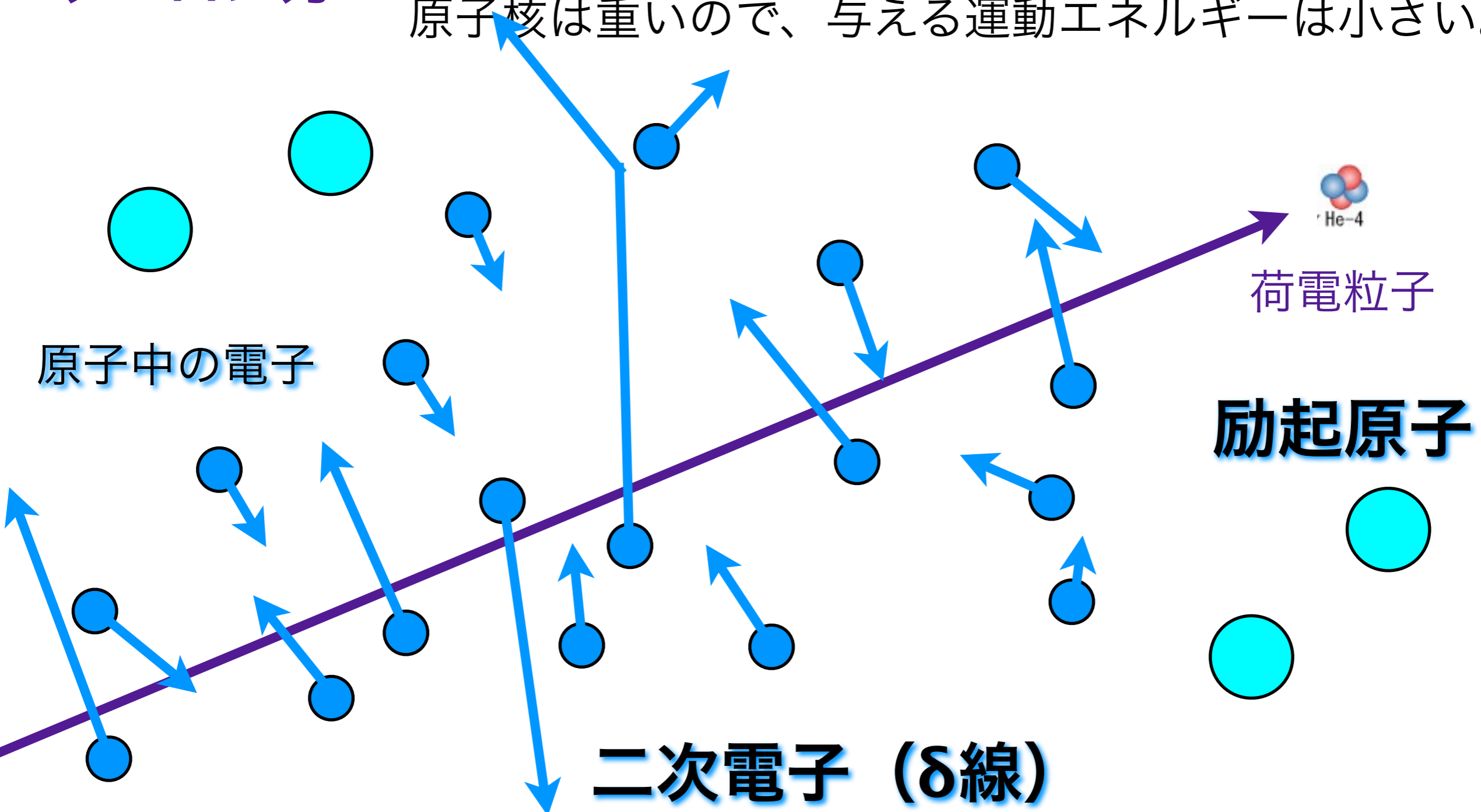
物質中の原子を電離・励起して電子に運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。
原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。



荷電粒子のエネルギー損失過程

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：
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

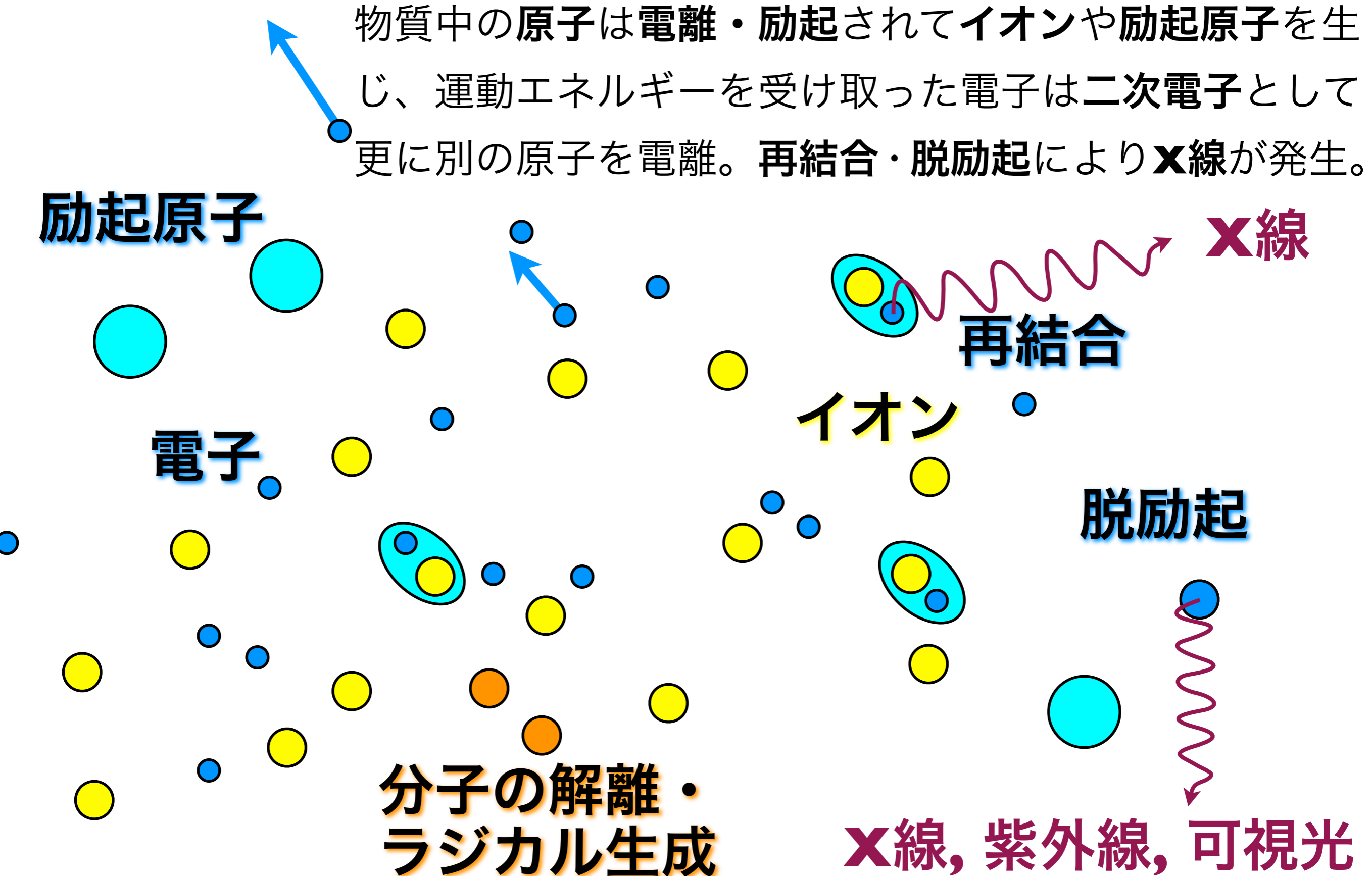
イオン

再結合

脱励起

分子の解離・ラジカル生成

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

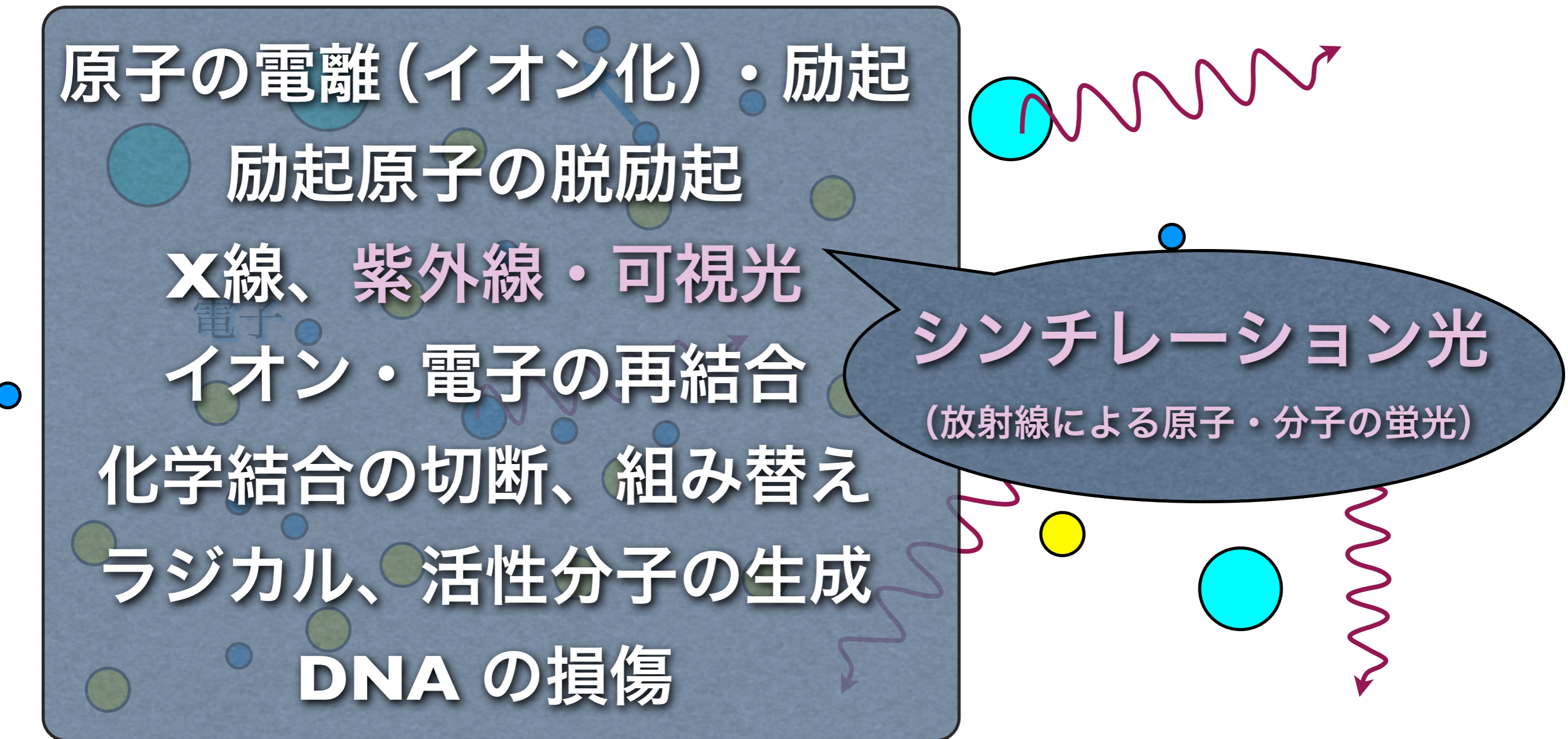
化学結合の切断、組み替え

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)



放射線の透過力・線量計算

- **α 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。
- **β 線も外部被曝では皮膚への影響を**考える（ **β 線熱傷**）。
- **α 線も β 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。
- **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。**

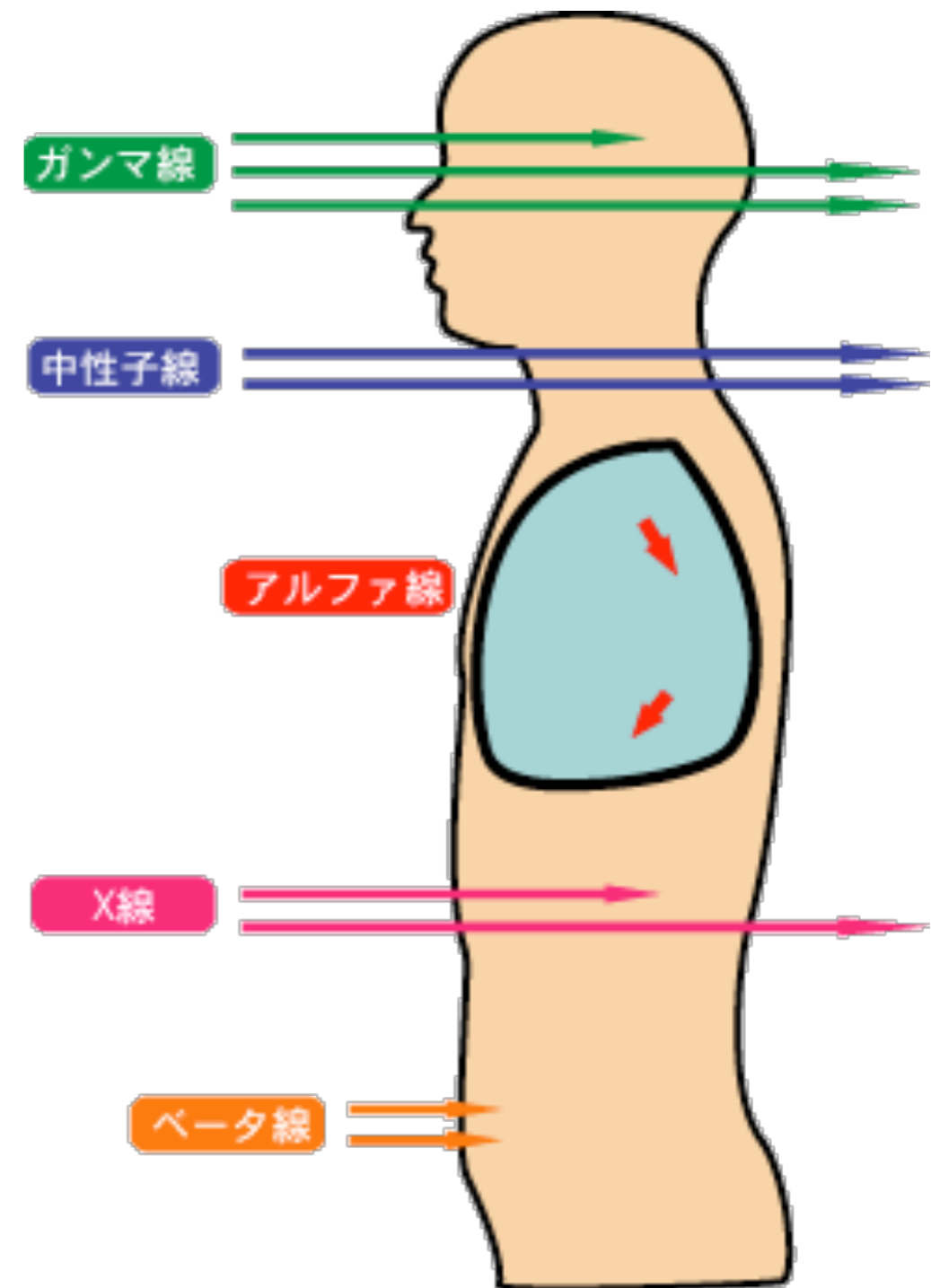
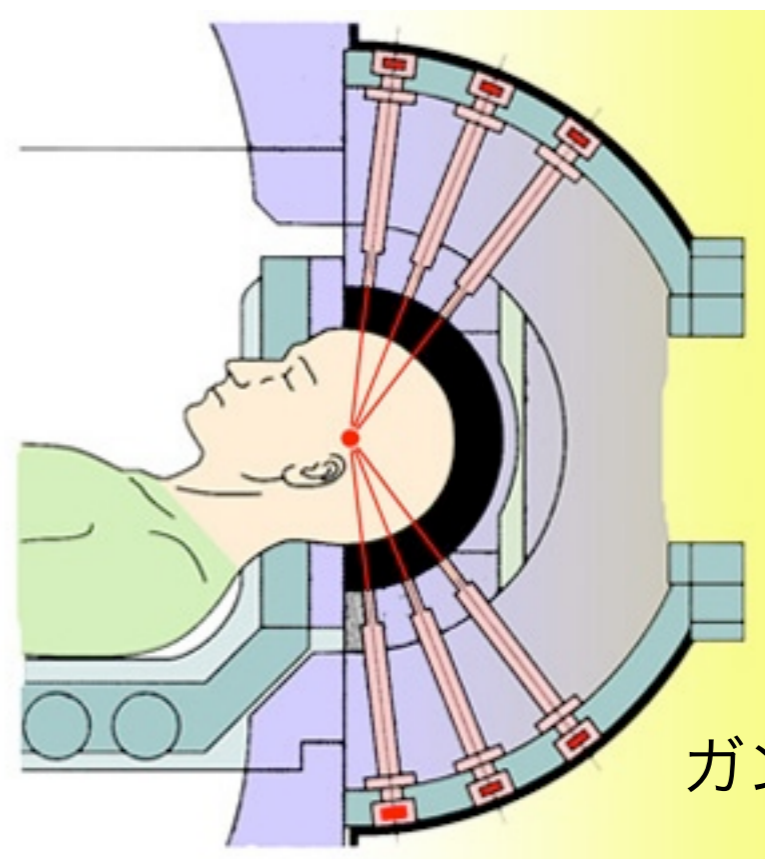
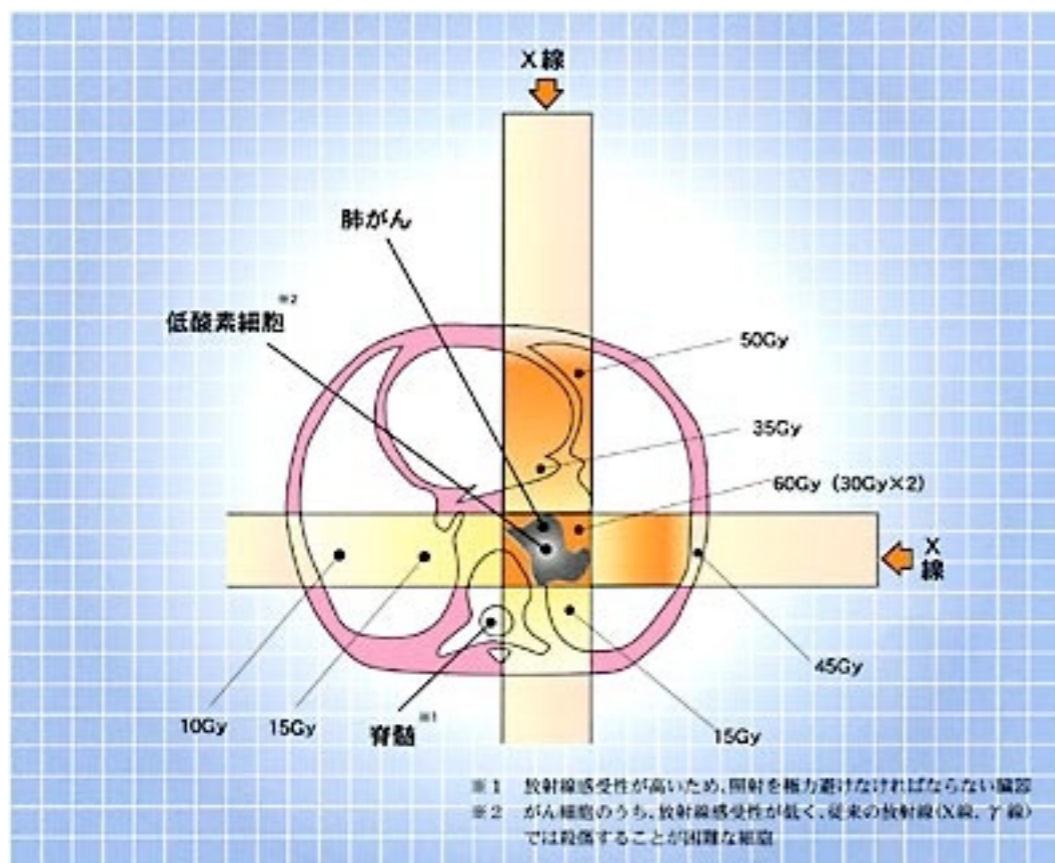


図3 人体を透過する放射線

放射線 がん治療

数 Gy を数十回

X線 外部照射



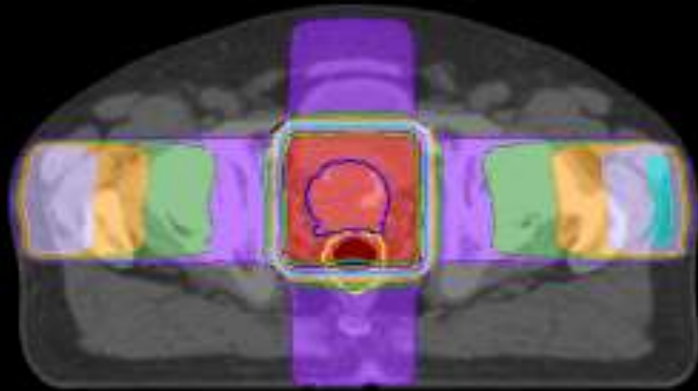
医療技術：ガンマナイフ (γ線)
サイバーナイフ (X線)



サイバーナイフ

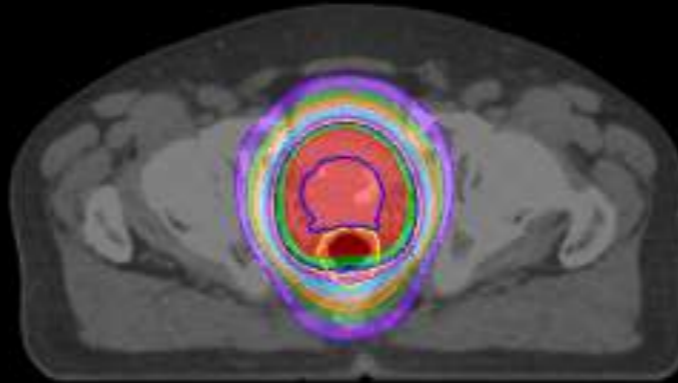
前立腺がんの例

前後左右4門照射



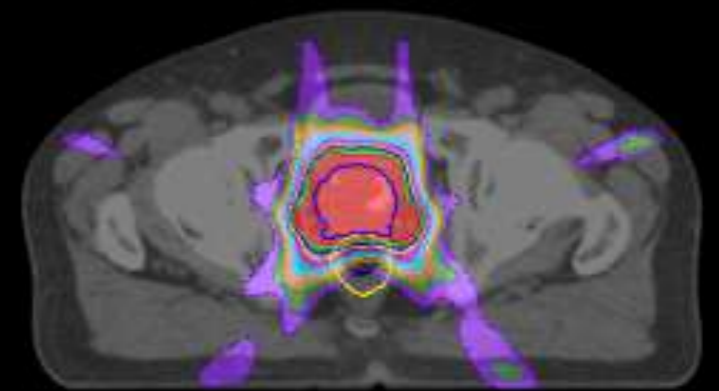
- 前立腺の他に、膀胱や直腸が高線量域に含まれる
- 70Gyが限界（難治性の晩期粘膜障害の発現を許容範囲に抑えるためには、実際には60～66Gy程度が限界となる）

3次元原体照射



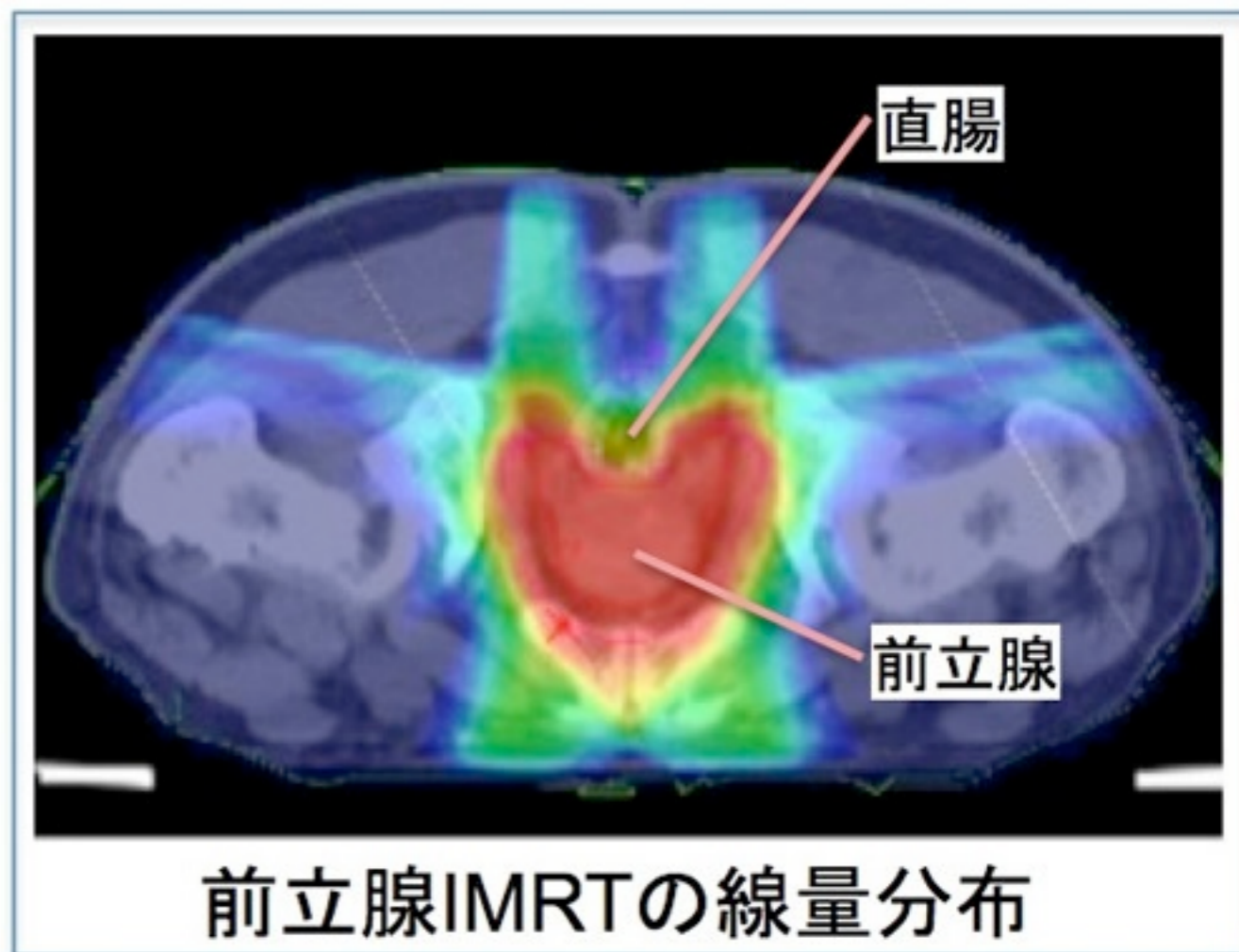
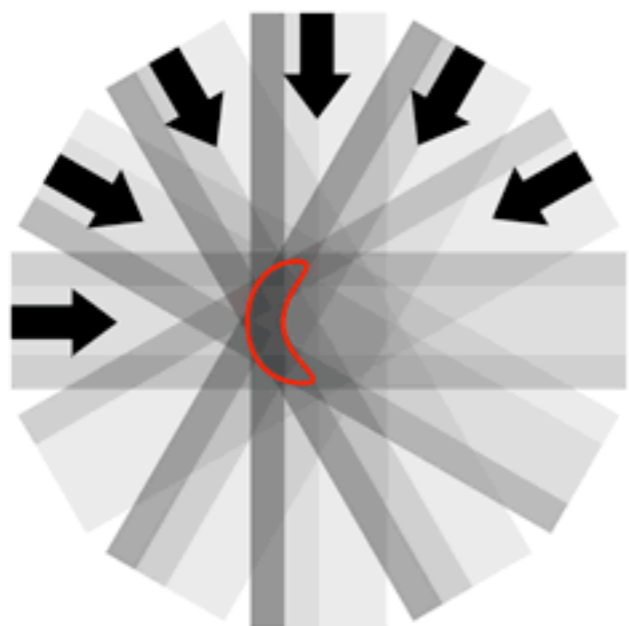
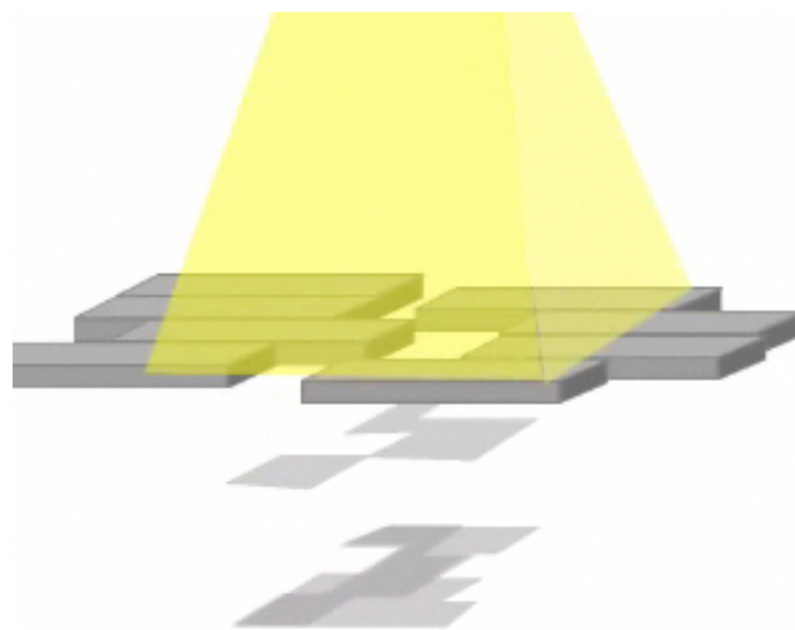
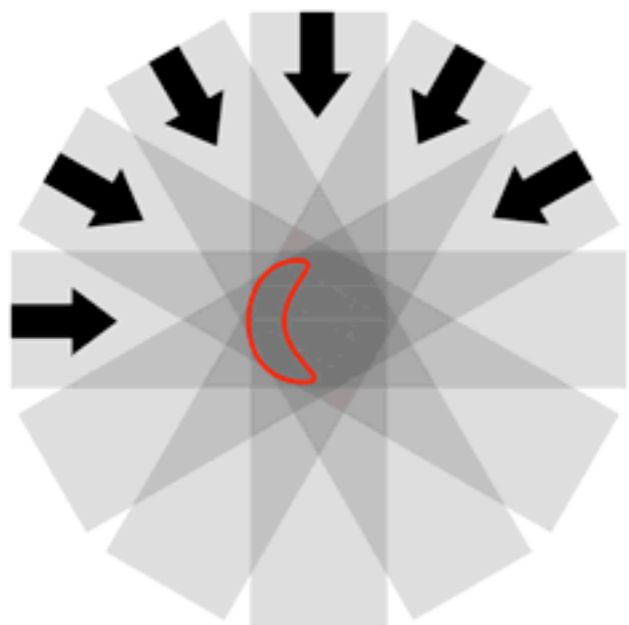
- 前立腺に線量が集中し、膀胱や直腸への線量が低く抑えられる
- 70Gy以上の投与が可能であるが、線量の集中に限界があり、線量増加に伴う副作用の増加が懸念される

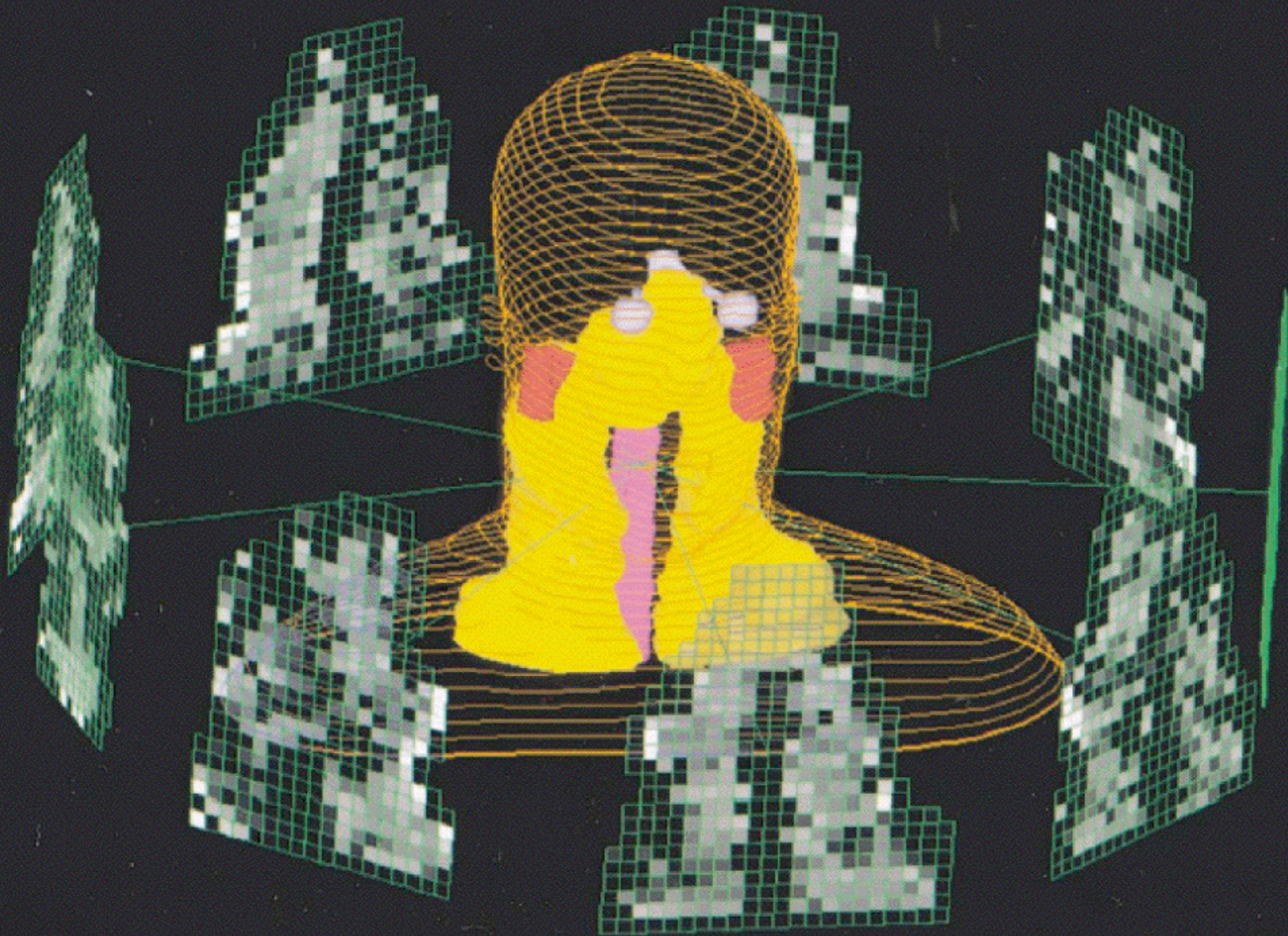
強度変調放射線治療



- 前立腺への集中性がさらに強化
- IGRTを併用することで、3次元原体照射を超える高線量を安全に投与することが可能

外照射法の進歩を背景に、前立腺癌に対する線量増加効果が積極的に検討されている。

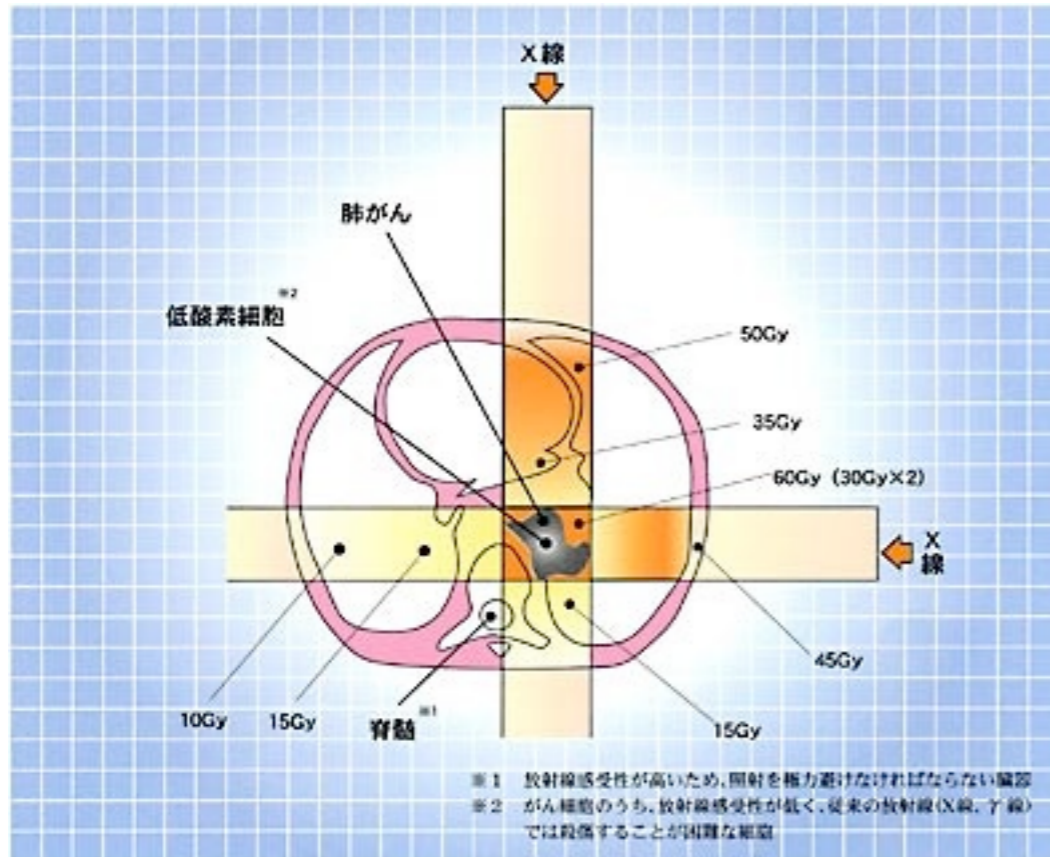




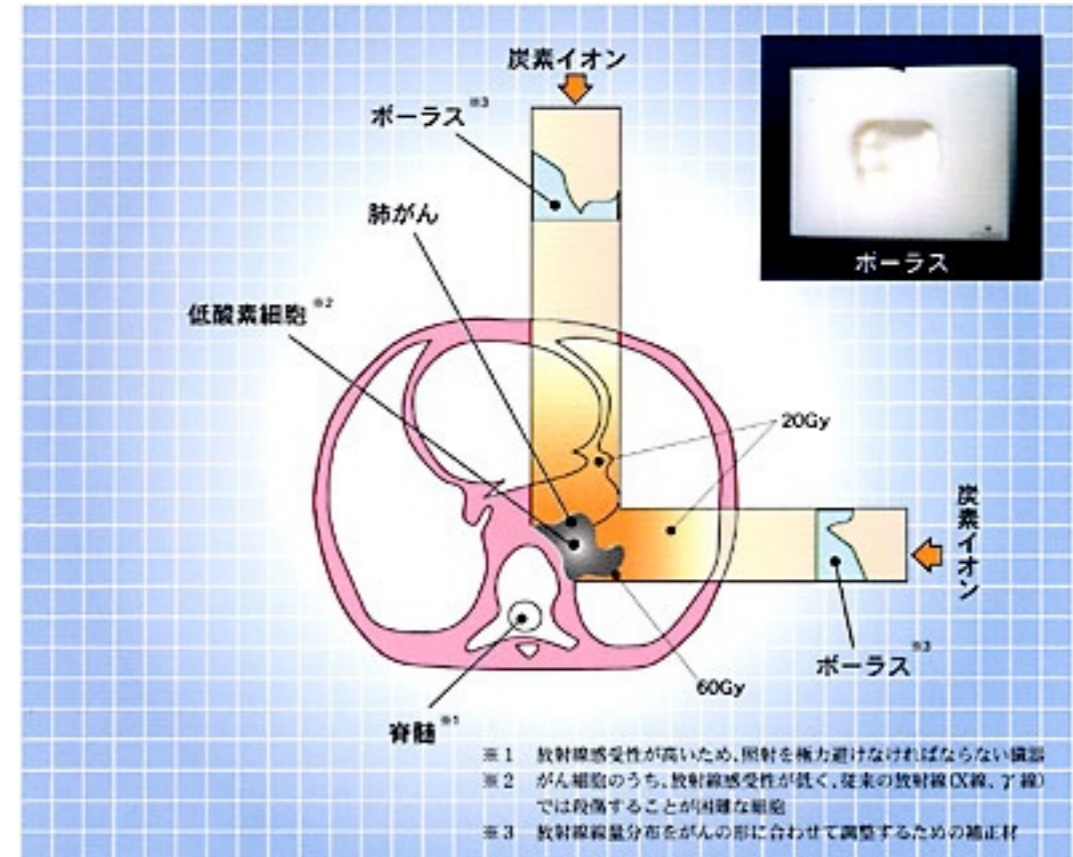
放射線医療：がん治療

数 Gy を複数回

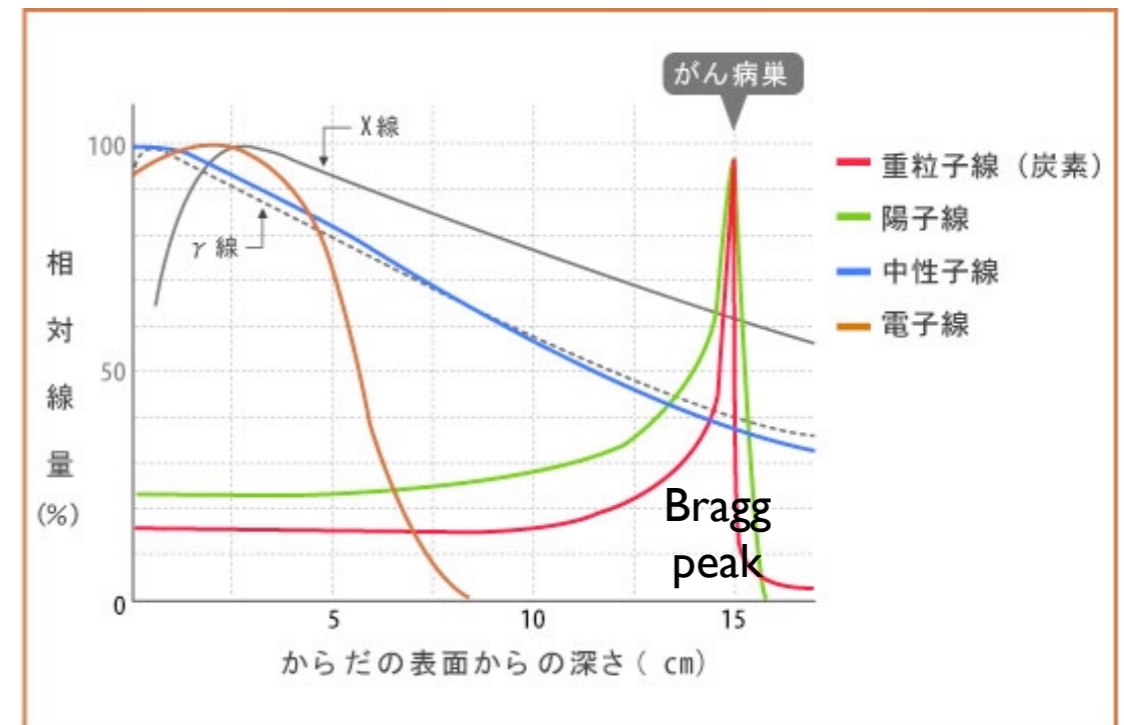
X線



重粒子線 (炭素イオン)



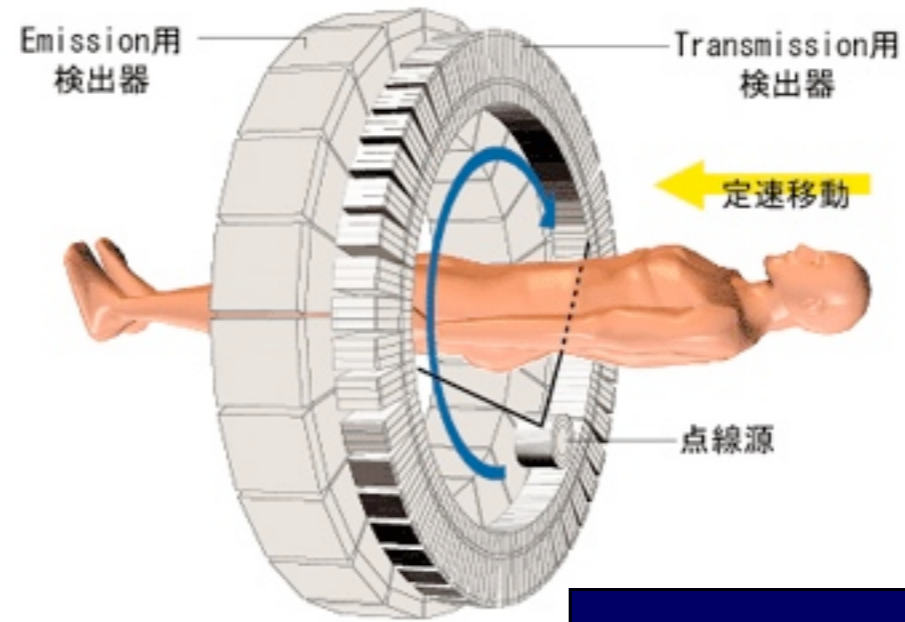
他には：ガンマナイフ、
陽子線、パイ中間子
研究中：反陽子



胸部単純X線撮影

胸部正面像

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

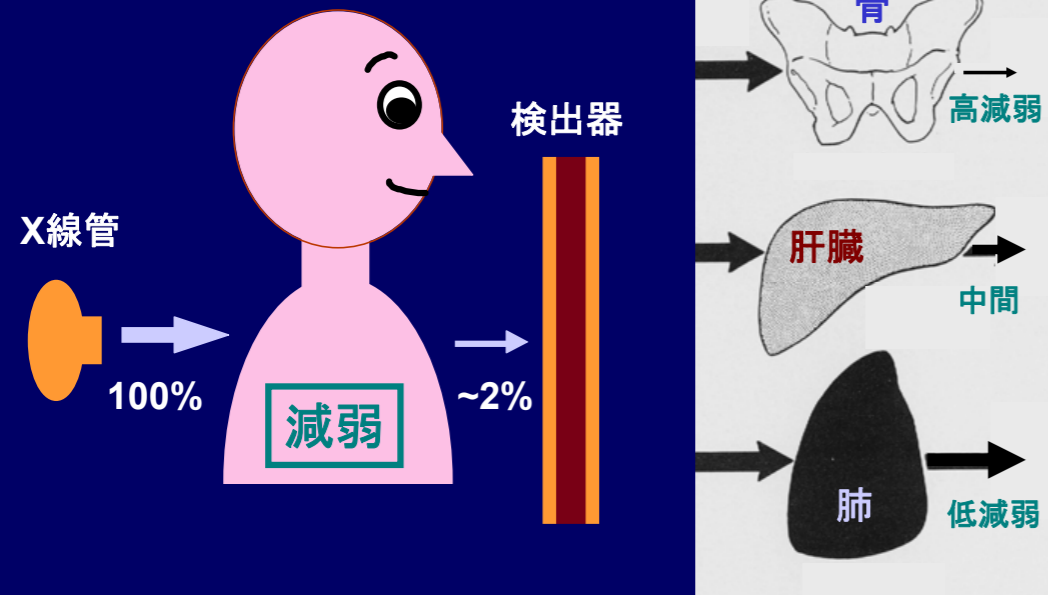
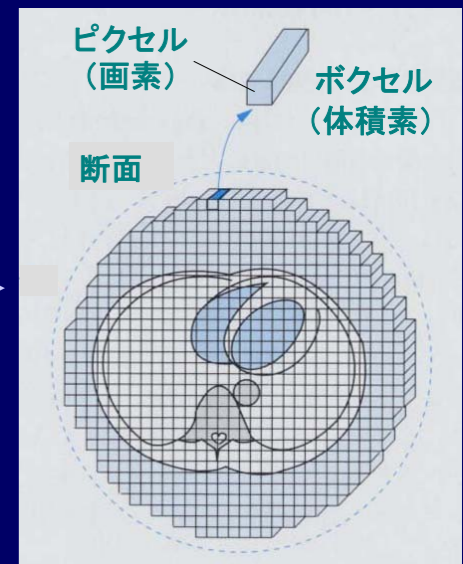
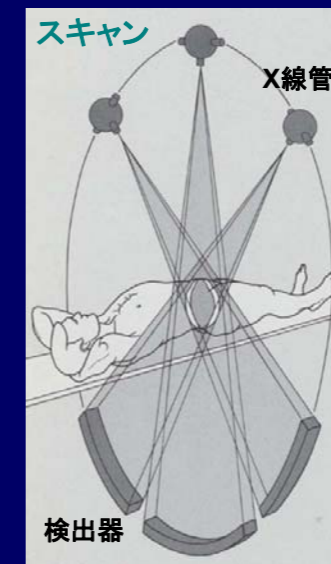


X線 CT

レントゲン(X線)撮影

国立循環器病センター 内藤博昭先生のスライドより借用

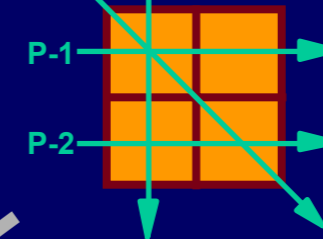
X線コンピュータ断層撮影法:CT



未知の線減弱係数

μ_1	μ_2
μ_3	μ_4

X線投影



連立方程式

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

解答

1	7
5	4

逆問題

東京地方裁判所 労働部講演会



- 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・放射線生物学
- 放射線の社会的リスク
 - 放射線防護学と法令
 - 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

空間線量率測定

放射線の測定

試料測定



β (γ)



γ

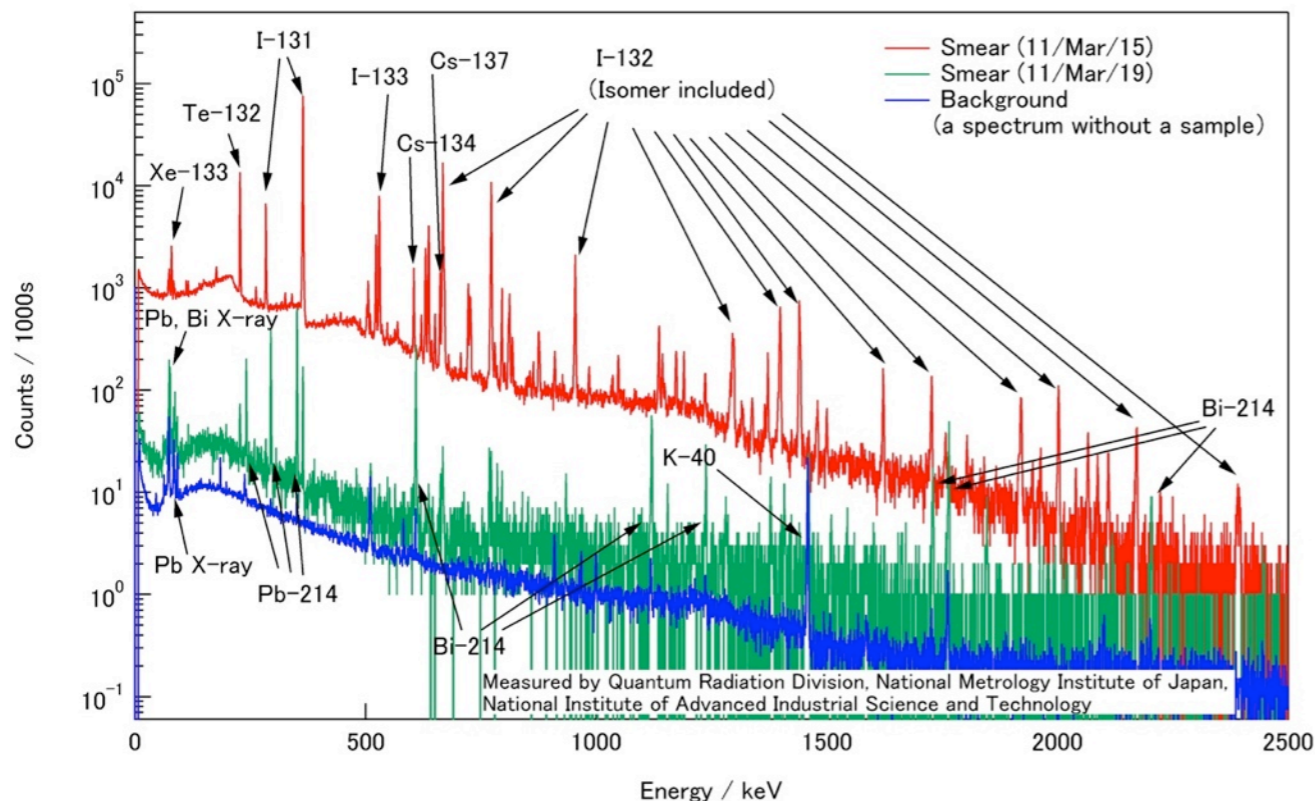
γ ゲルマニウム検出器 (Ge detector)

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)



食品検査用ゲルマニウム検出器



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		新基準案	
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)

The Asahi Shimbun

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

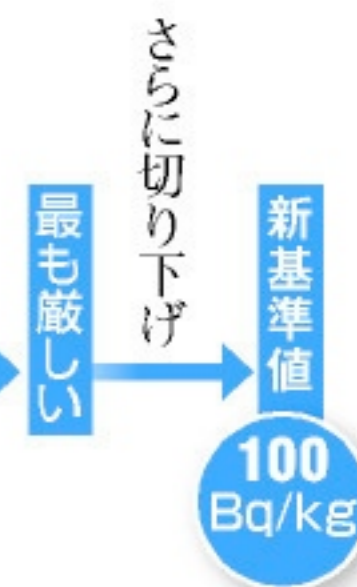
一般食品に割り当てる分

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



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

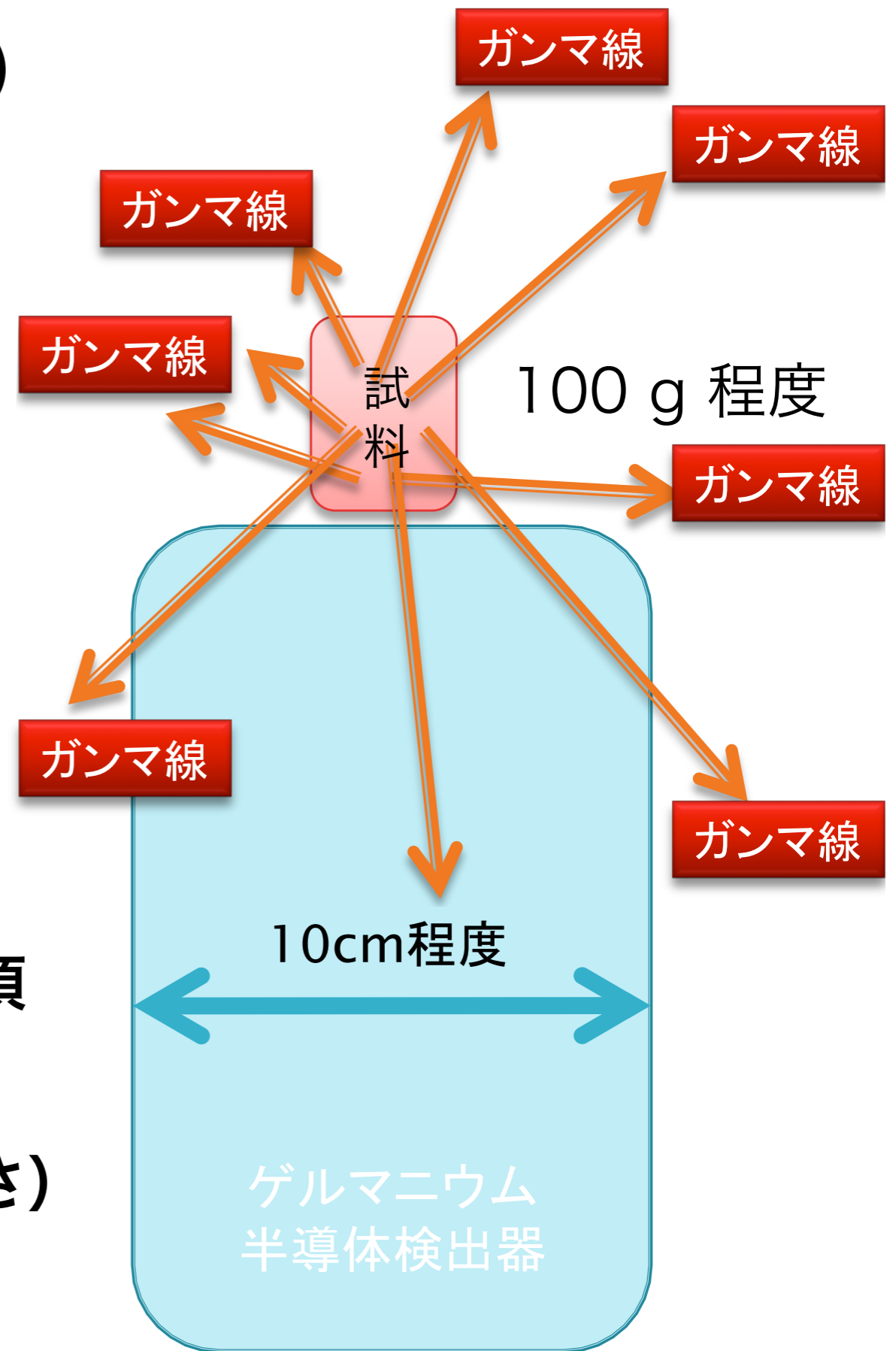
(環境放射線の遮蔽)

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)



10試料の測定結果(良くない表記)

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

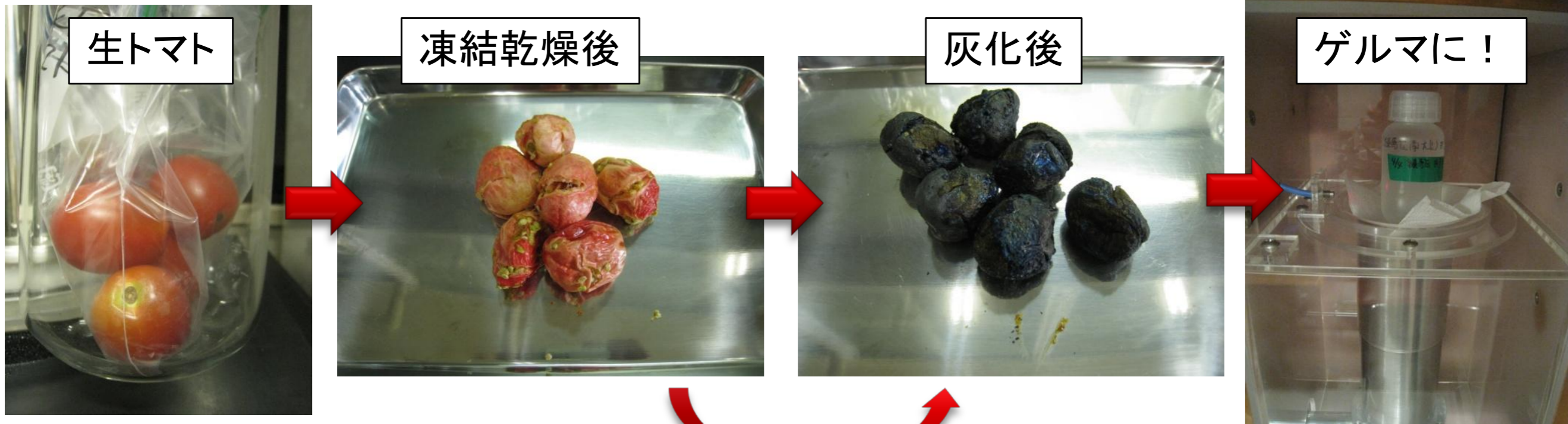
食品に含まれる放射性物質の測り方

- ▶ 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

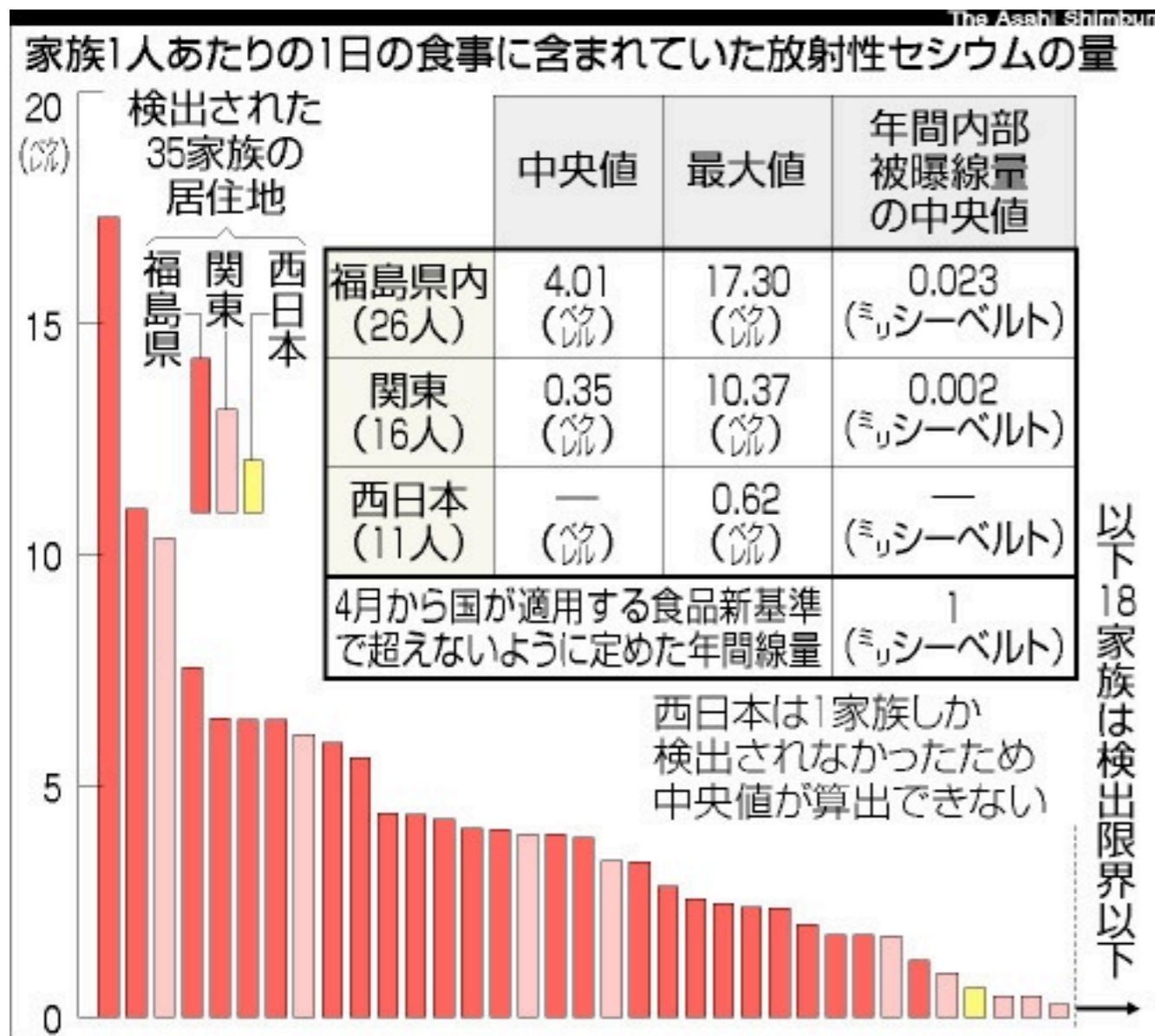


飛灰を発生させないように炭状にする

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

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 $Ag^+ \rightarrow Ag^0, Ag^{++}$

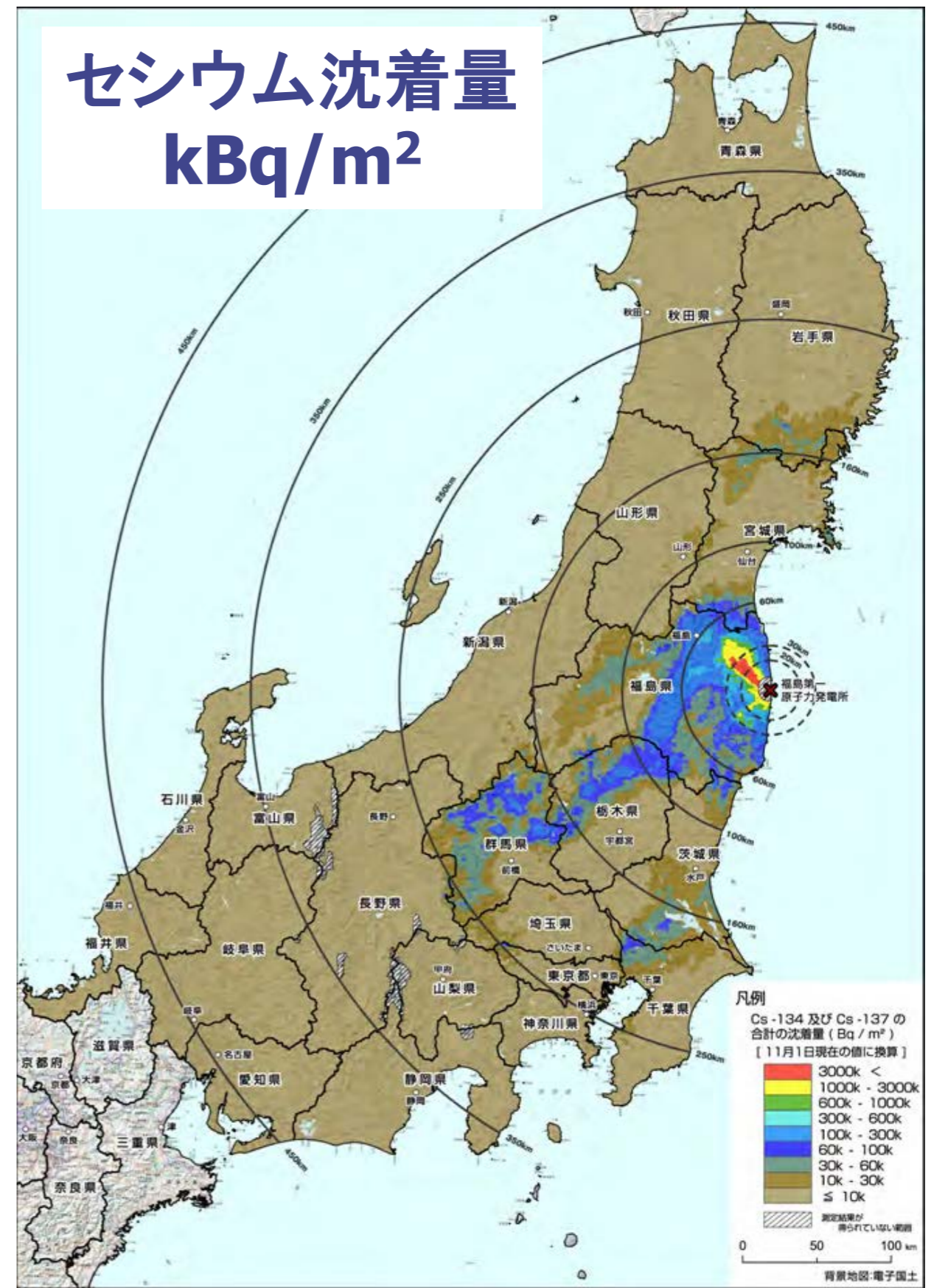
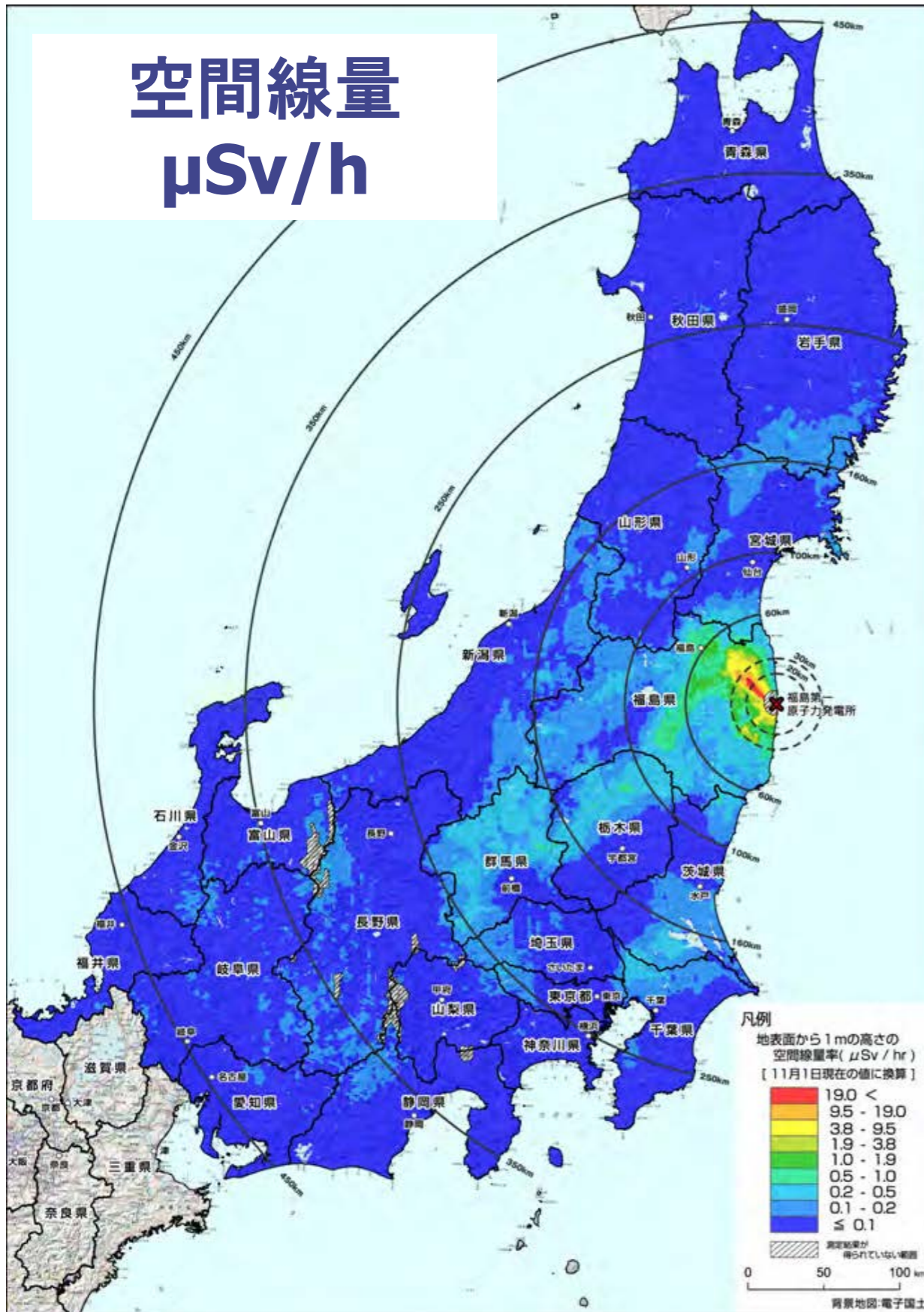
ポケット線量計：電離箱、半導体検出器

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」

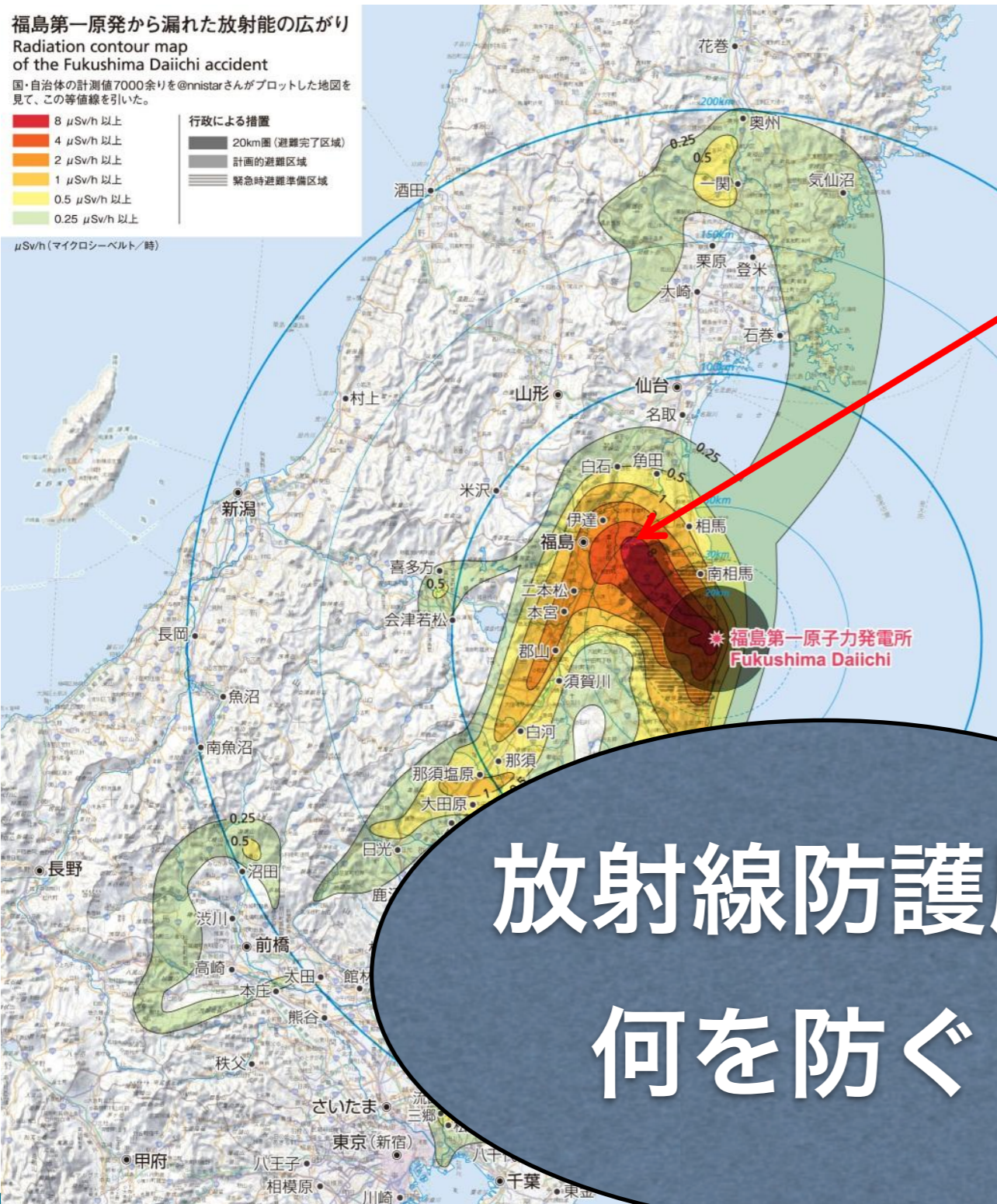
福島第一原発から漏れた放射能の広がり
Radiation contour map
of the Fukushima Daiichi accident

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。

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



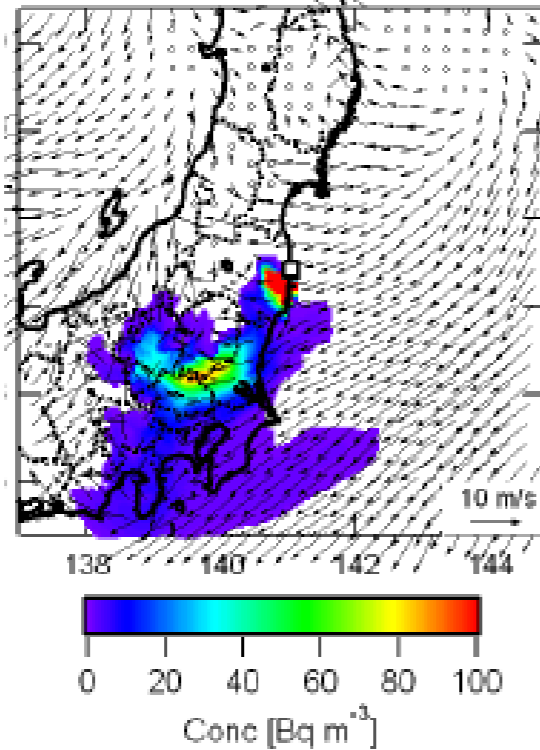
三訂版7月26日(初版4月21日)
等値線作成: 早川由紀夫(群馬大学) (kipuka.blog70.fc2.com/)
@nnistarさんの地図 (www.nnistar.com/gmap/fukushima.html)
Contour lines drawn by Yukio Hayakawa (Gunma Univ.),
Source: @nnistar
地図製図: 萩原佐知子
背景地図には電子国土ポータル (portal.cyberjapan.jp) の地図を使用しました。



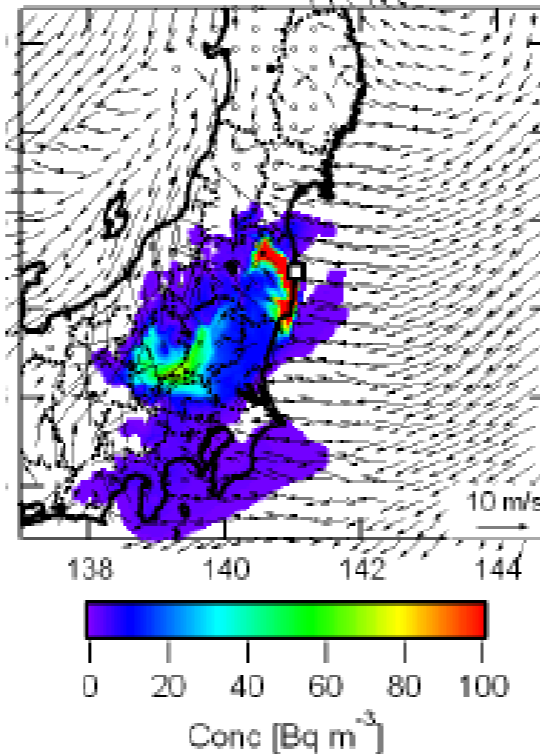
ホットスポットの生成メカニズム

大気濃度

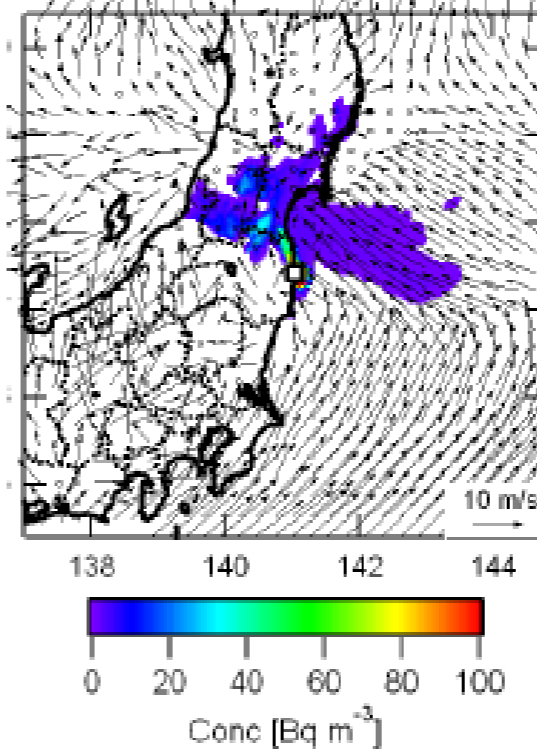
3/15の15時



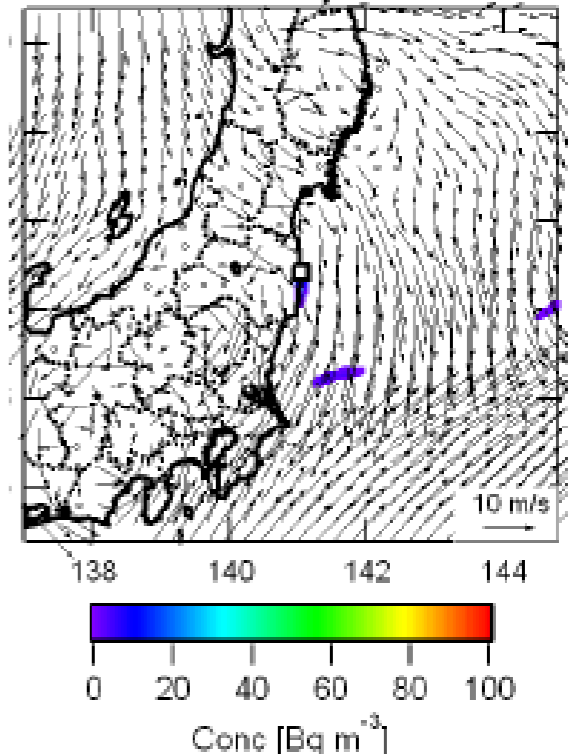
3/15の19時



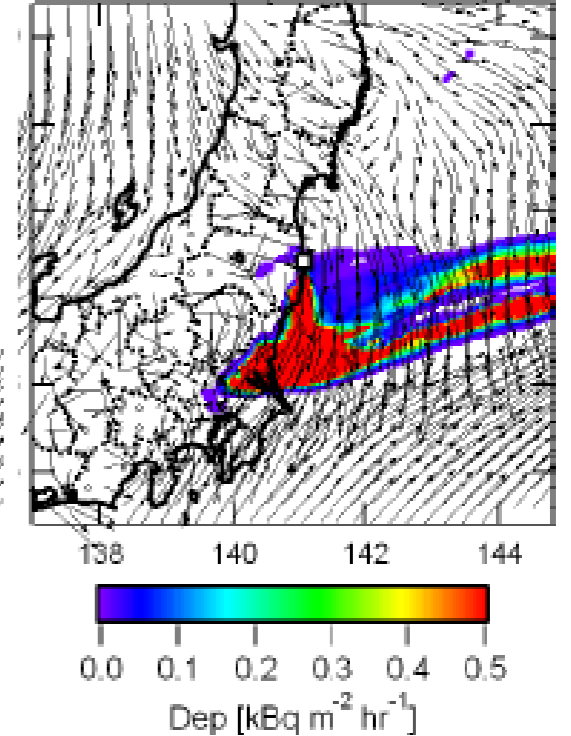
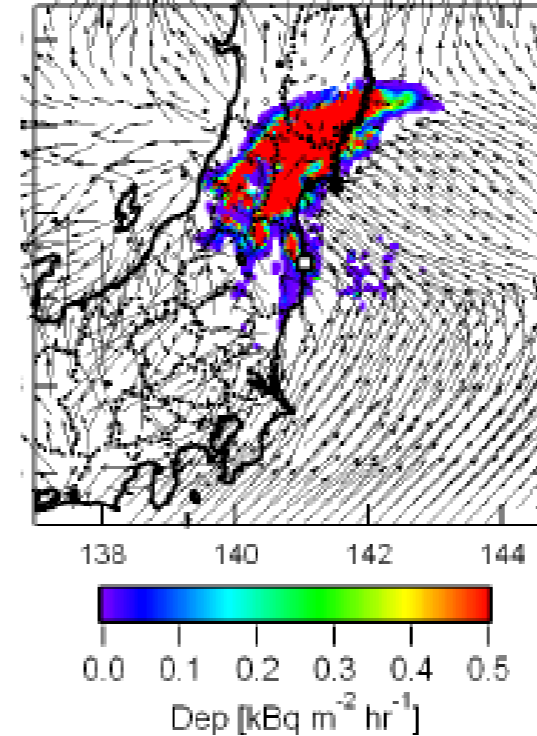
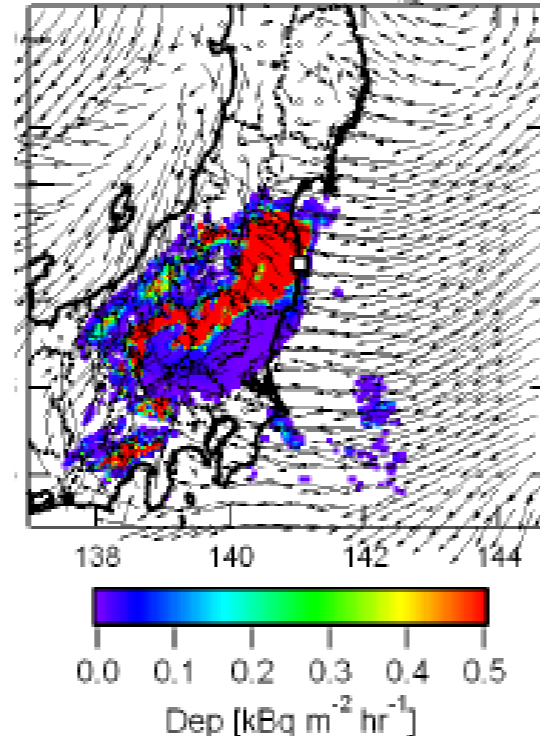
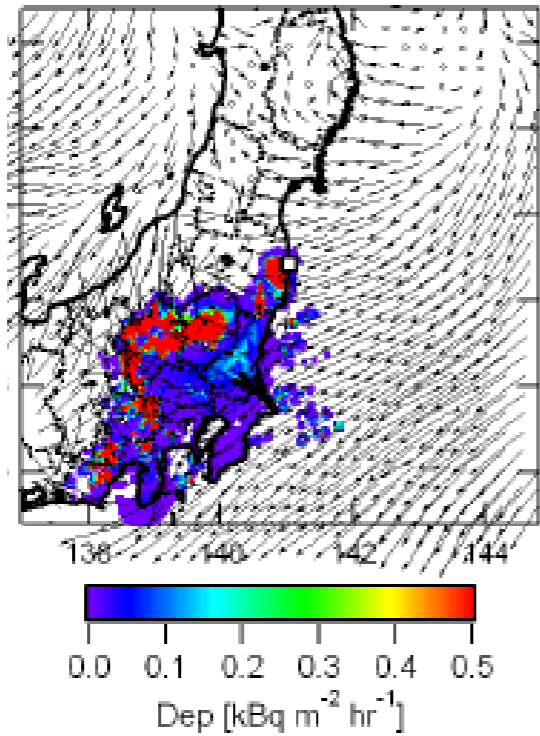
3/20の18時



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



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

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

東京地方裁判所 労働部講演会



- 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・放射線生物学
- 放射線の社会的リスク
 - 放射線防護学と法令
 - 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

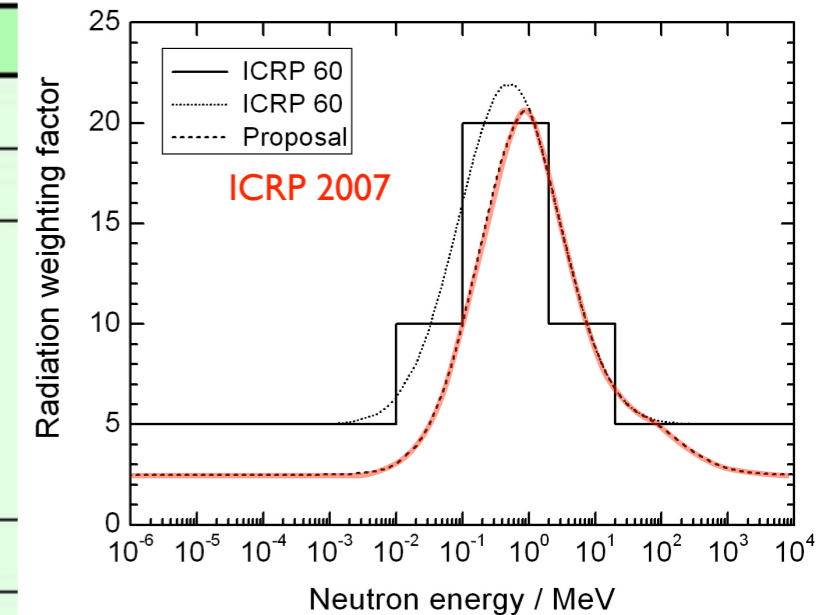


- 放射線の種類による生物学的影響の違いを考慮

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]

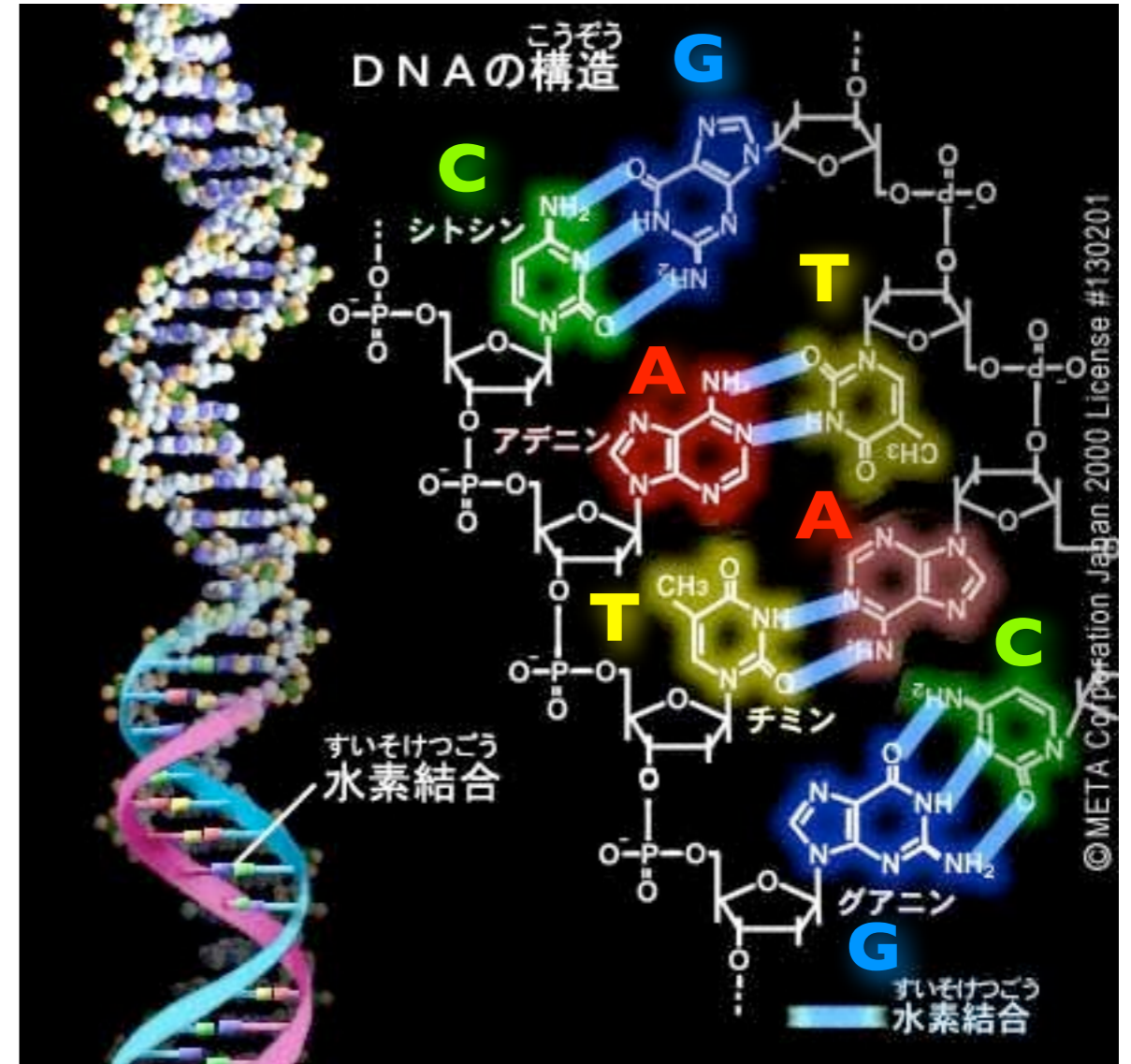
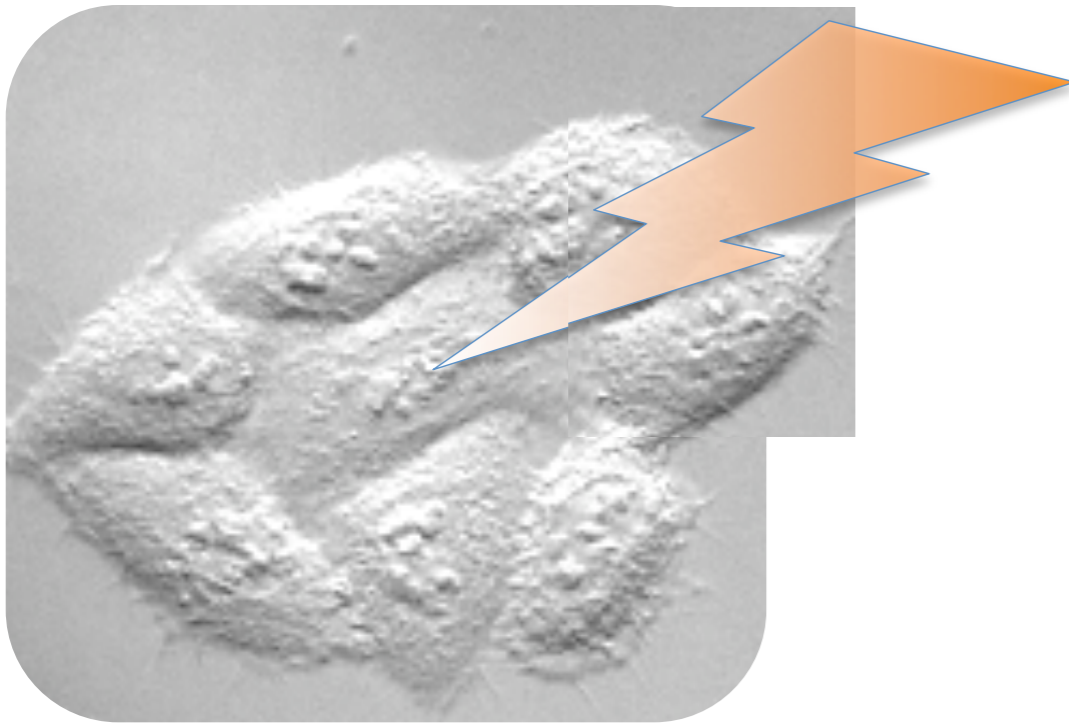
器官・組織	組織加重係数: w_T	
生殖腺	0.20	0.08
骨髄(赤色)	0.12	0.12
結腸	0.12	0.12
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
膀胱	0.05	0.04
乳房	0.05	0.12
肝臓	0.05	0.04
食道	0.05	0.04
甲状腺	0.05	0.04
皮膚	0.01	0.01
骨表面	0.01	0.01
脳		0.01
唾液腺		0.01
残りの器官・組織 ^{※2}	0.05	0.12
合計(全身)	1.00	1.00

左欄黒字 ICRP 1990

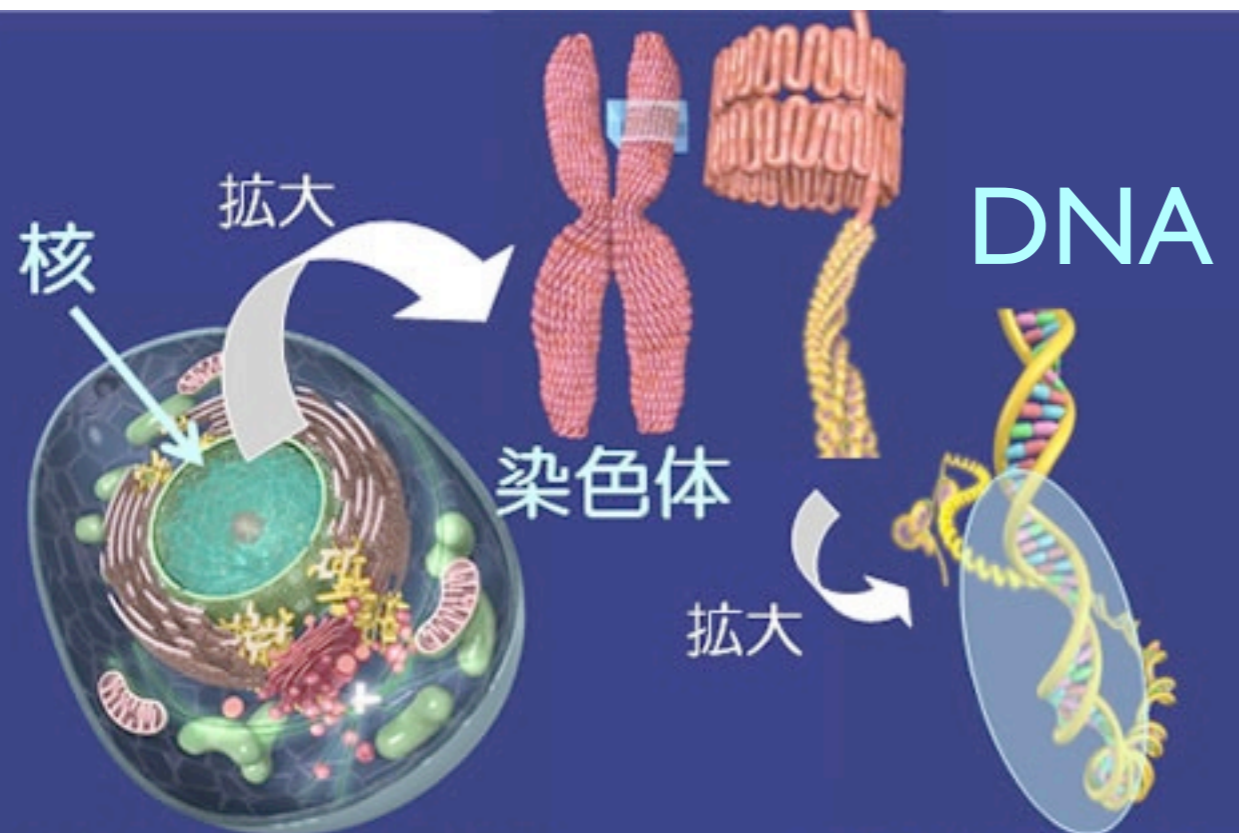
右欄赤字 ICRP 2007

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/>



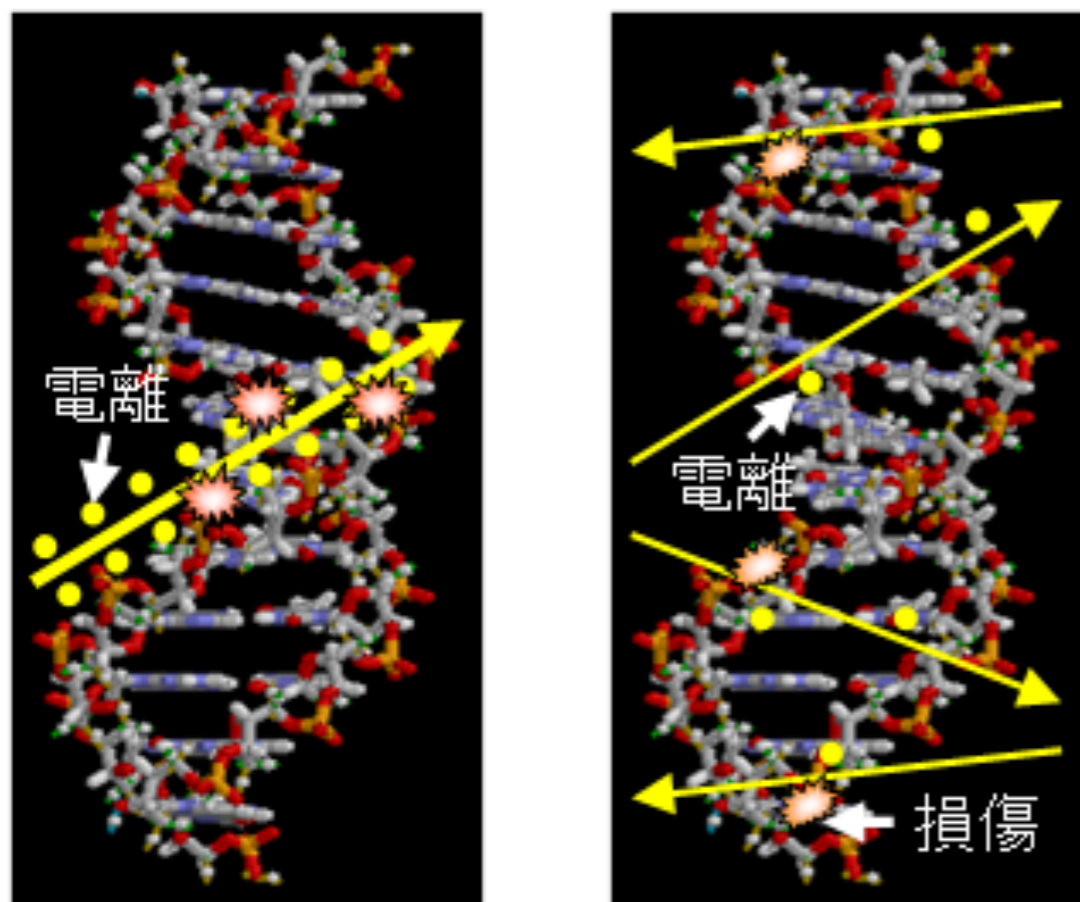
細胞(60兆個)

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

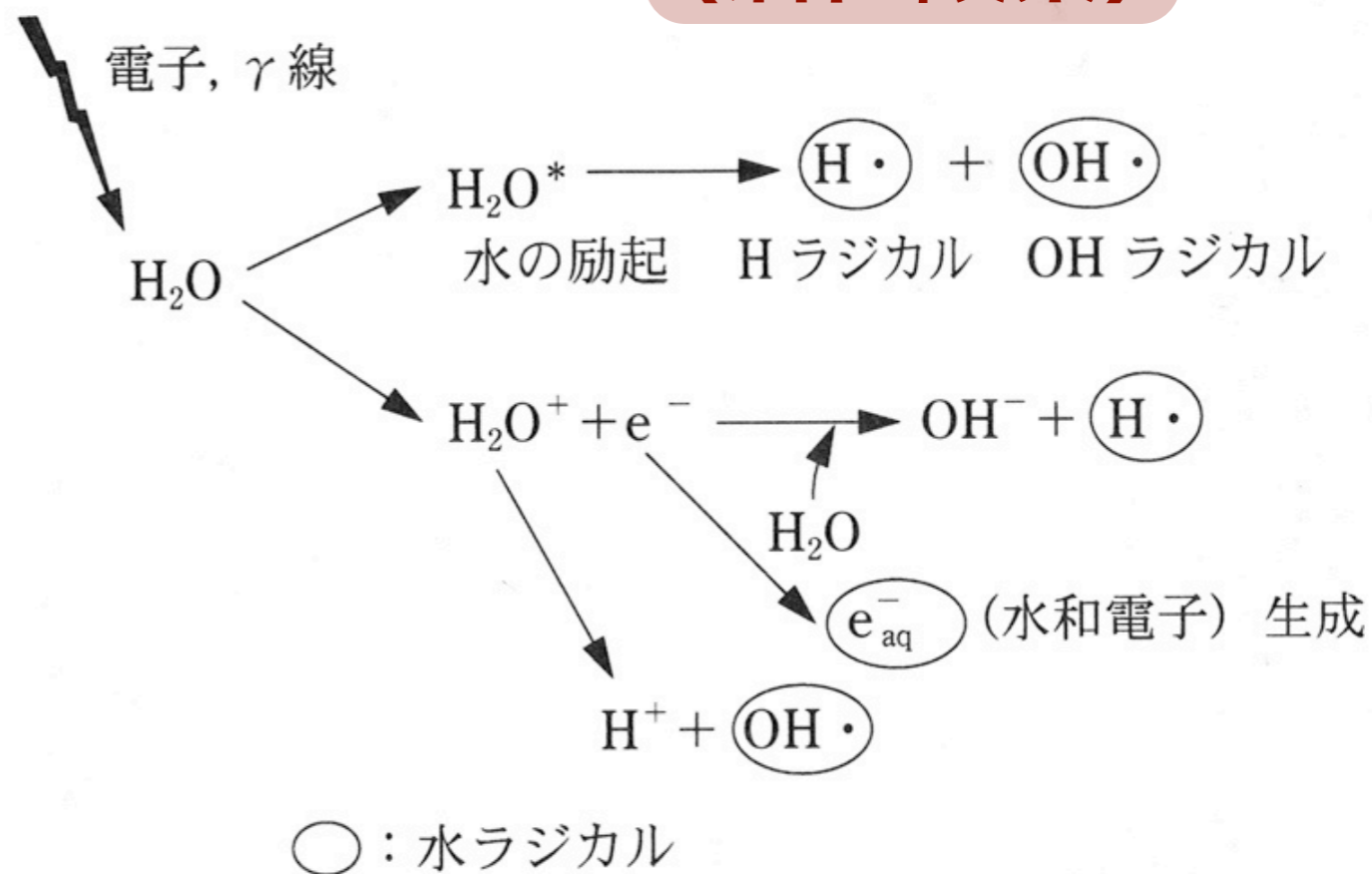


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

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

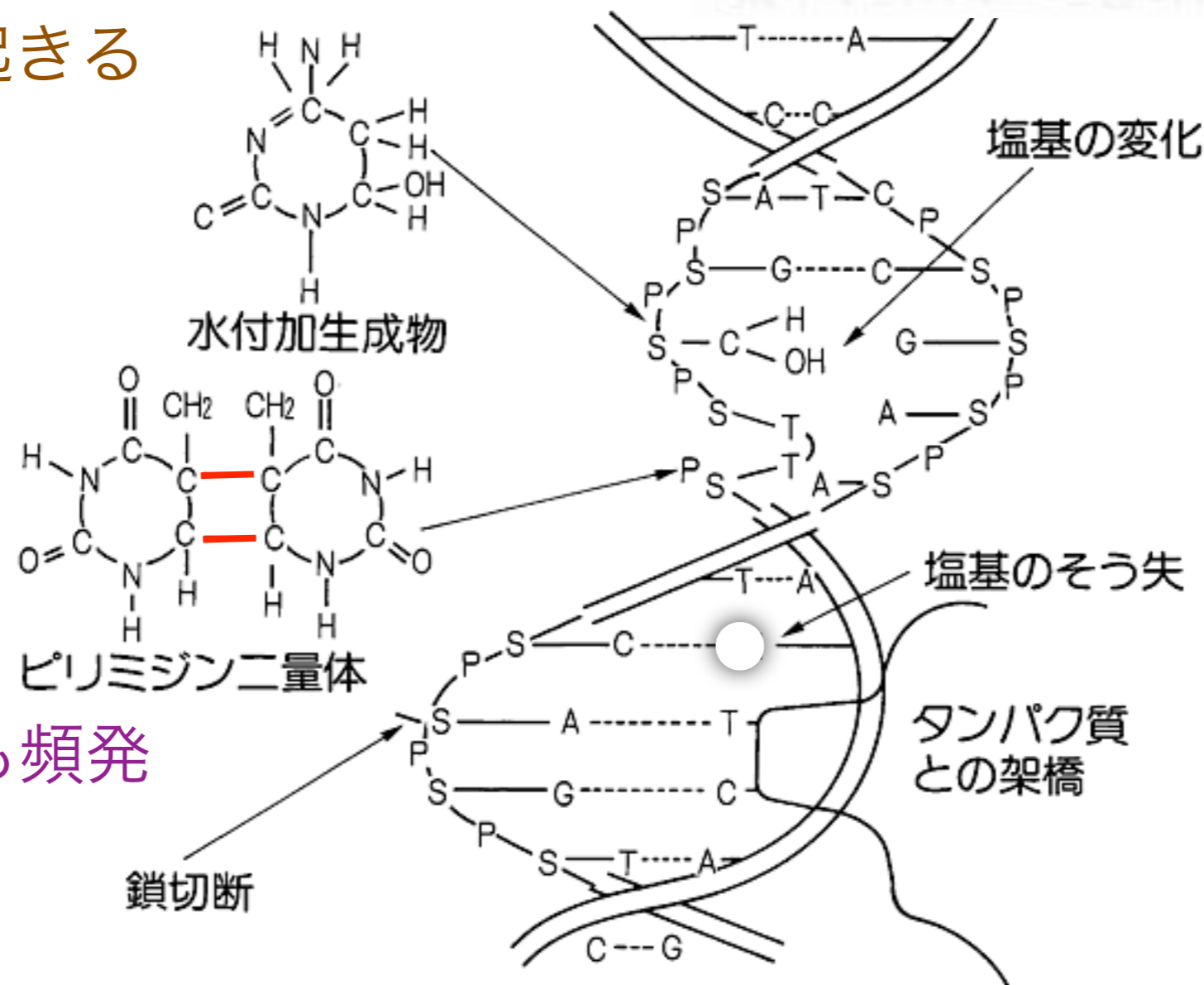
放射線生物学

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⁷⁾

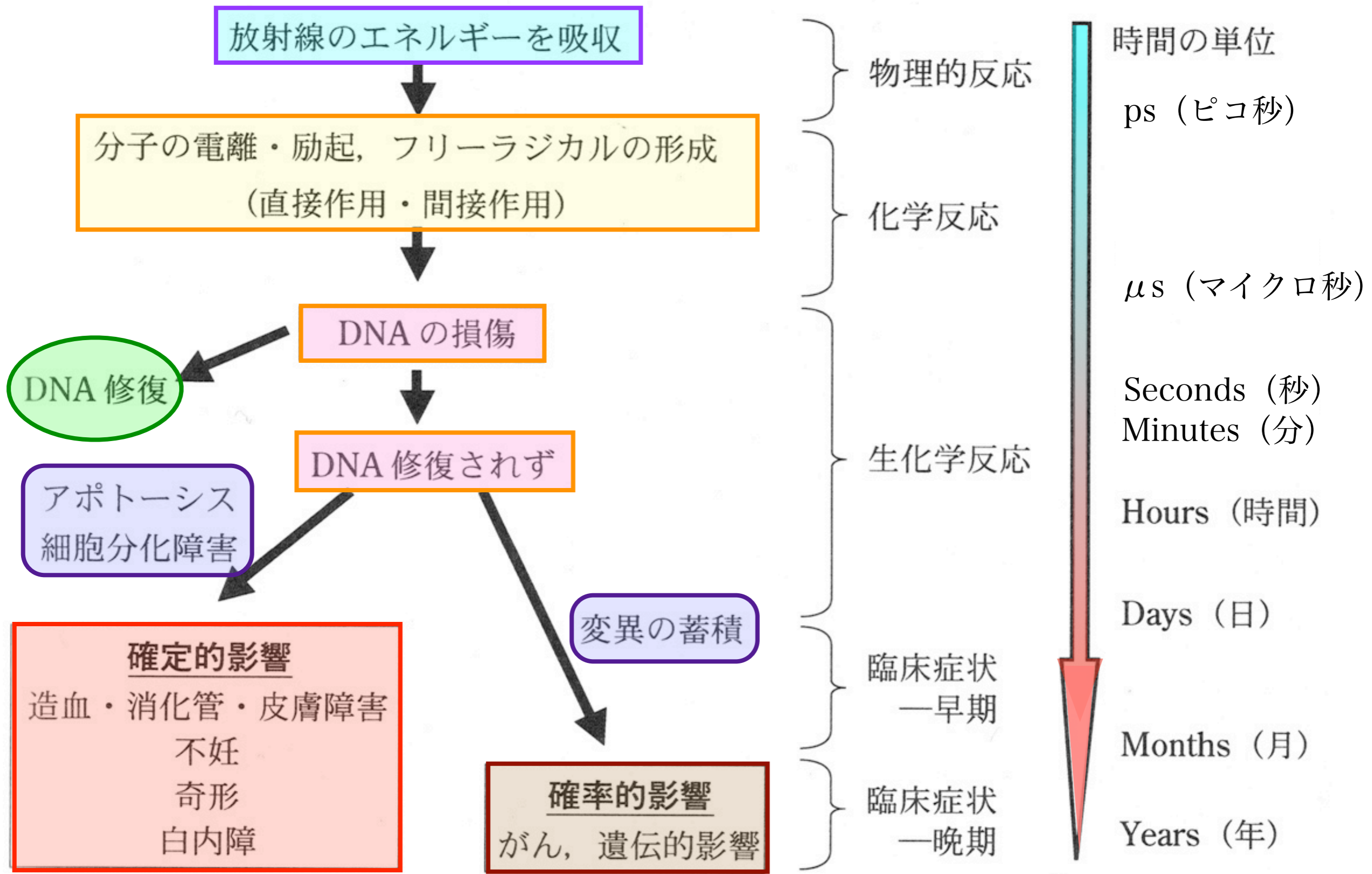
傷の種類	自然の傷(/細胞/日)	X線誘発の傷(/細胞/1 Sv)
塩基損傷	20,000	300
1本鎖切断	50,000	1,000
2本鎖切断	50(推定 ^{2,19)})	40



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



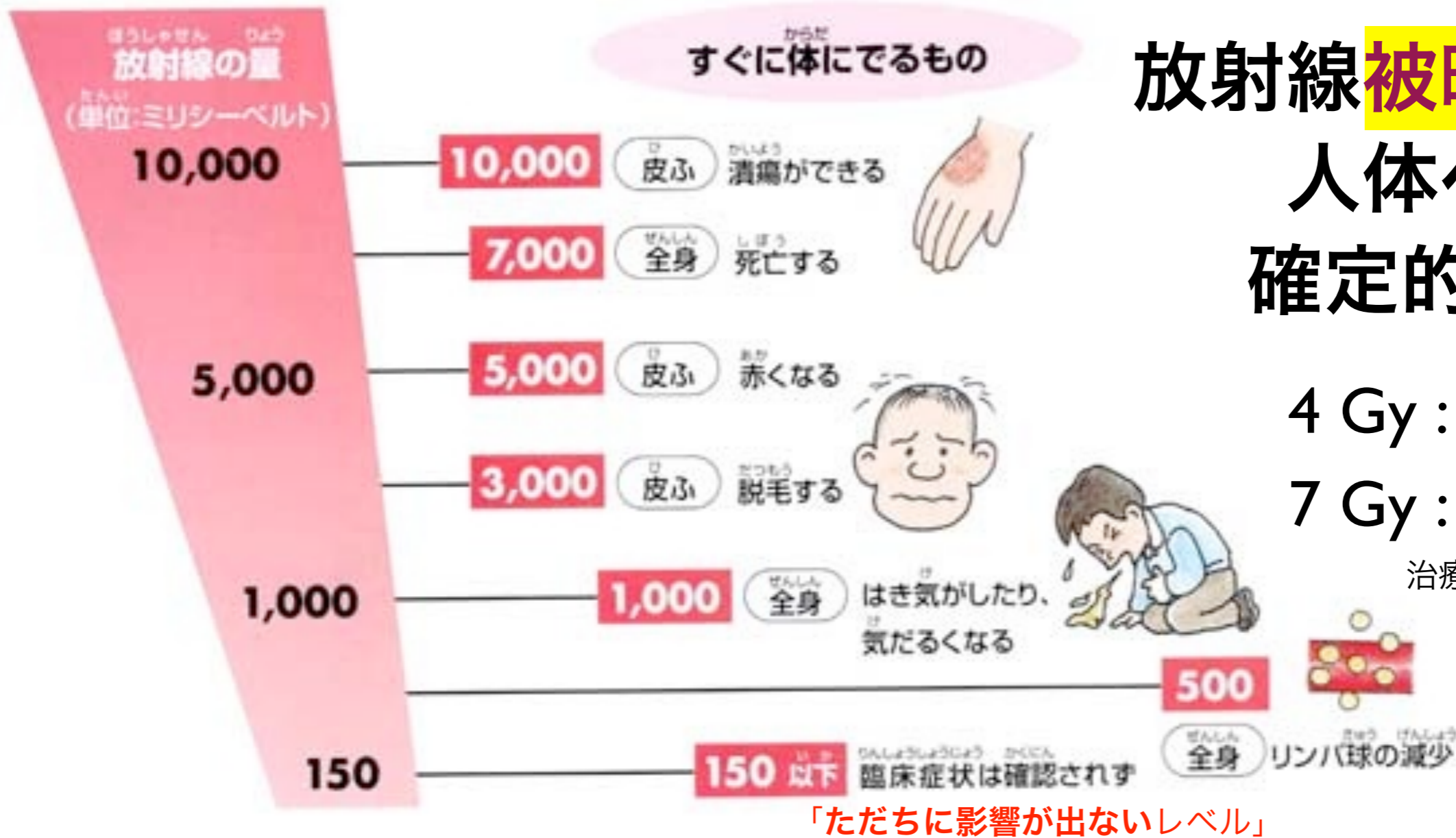
放射線被ばく後に起こる生体反応の経時的変化

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 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		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

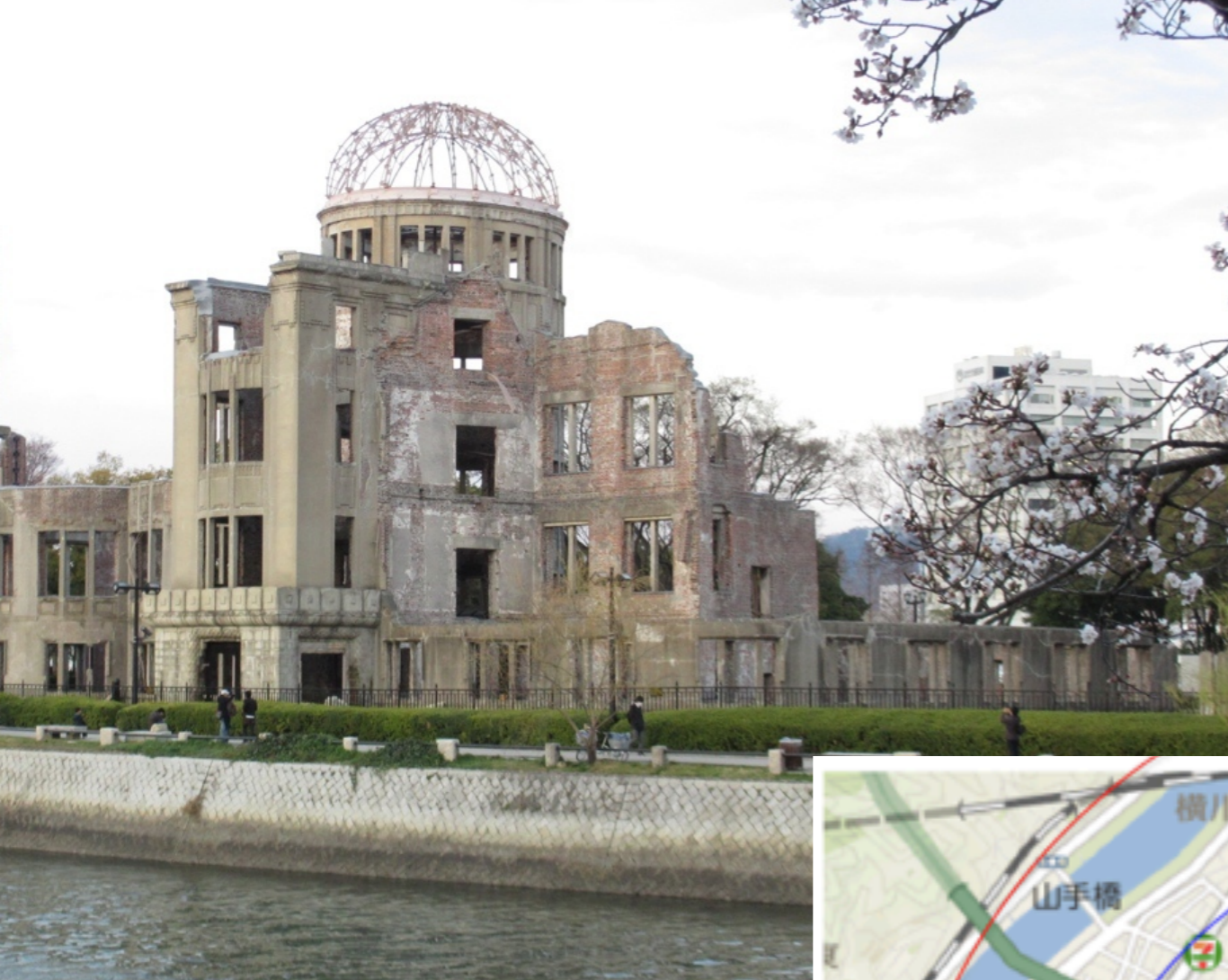
図1 細胞再生系

(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。



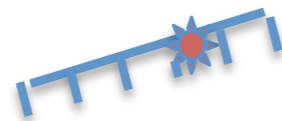
塩基の損傷(異常な塩基対)



DNA一本鎖の切断(不連続な鎖の状態)



周辺配列の除去

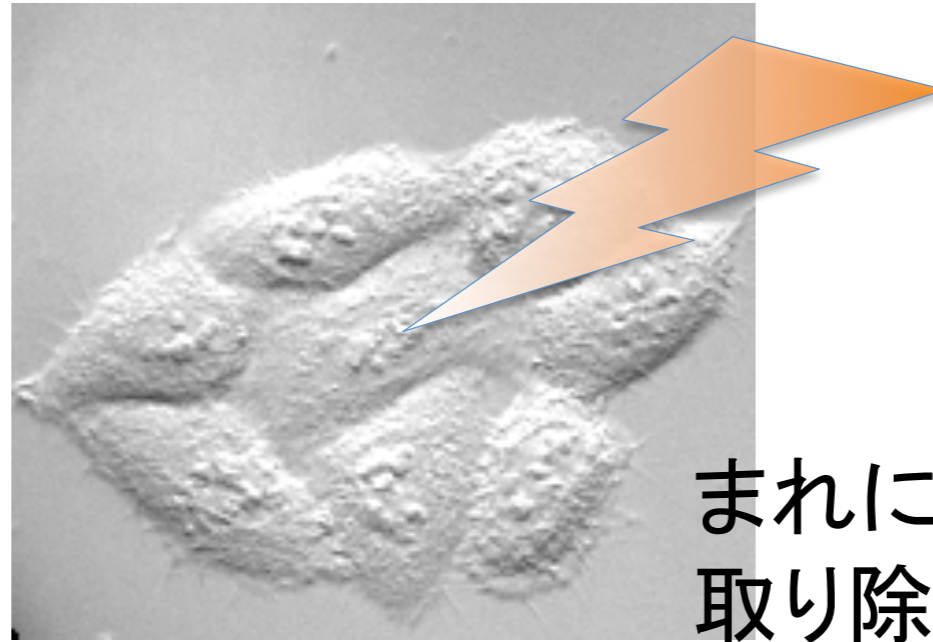


DNA修復合成



前後のDNA間の結合

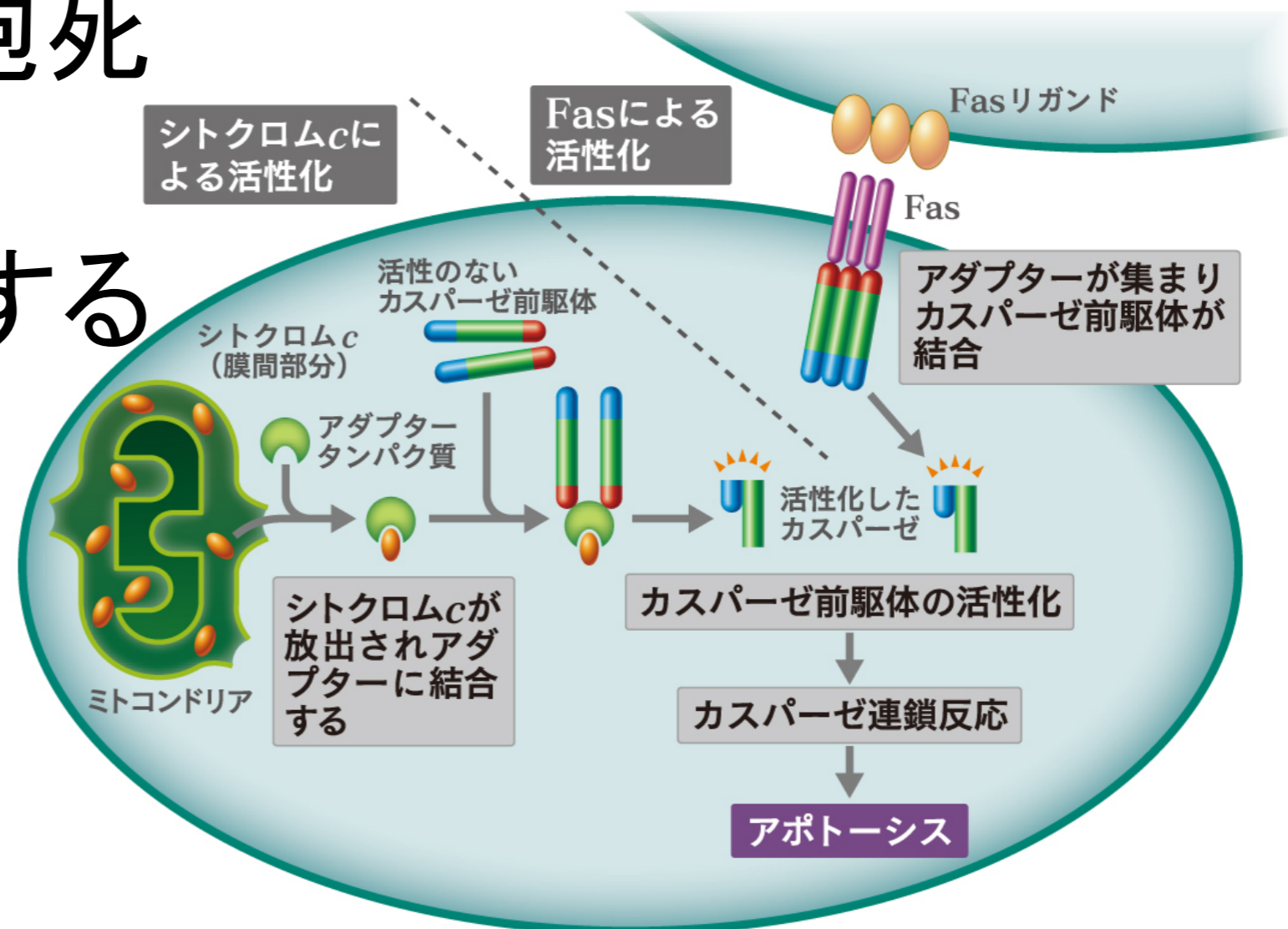


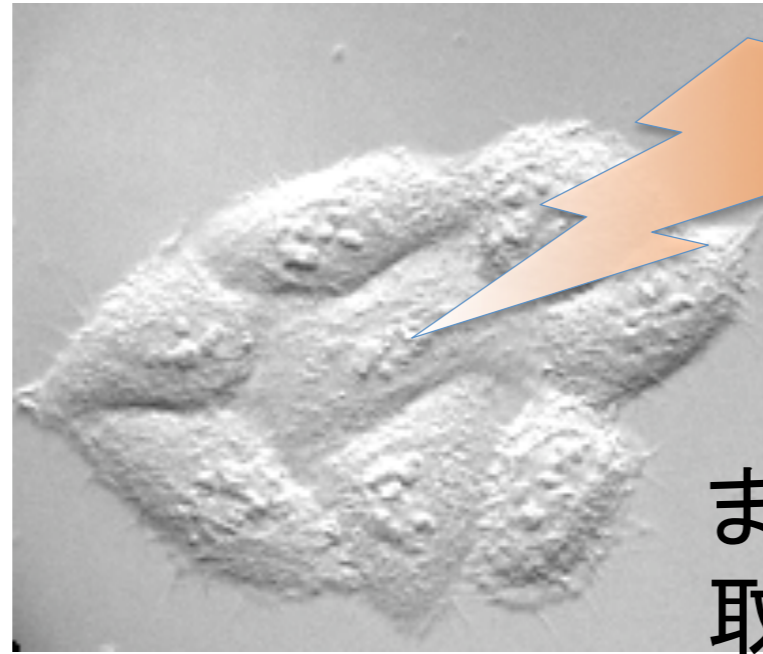


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

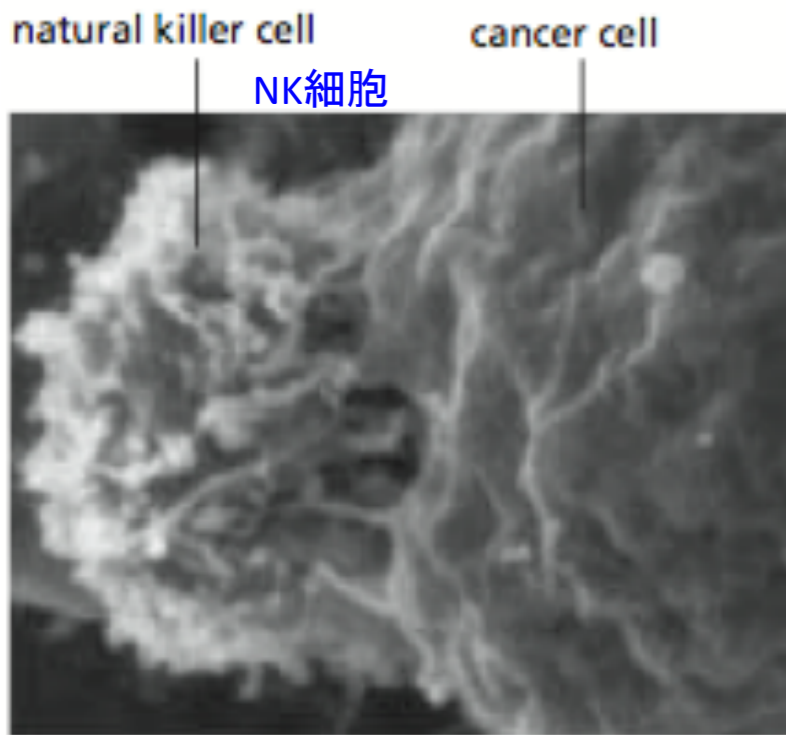
プログラム細胞死

細胞が自爆する





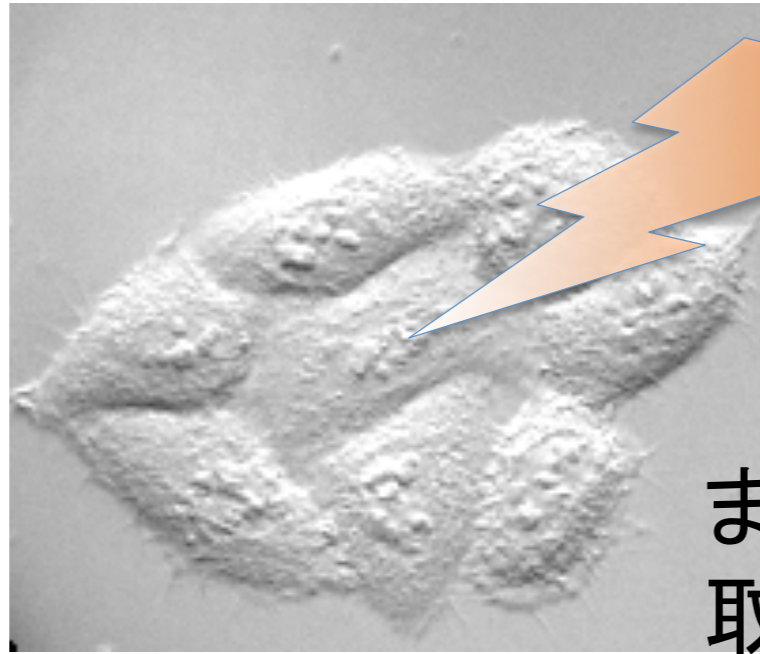
まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう



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

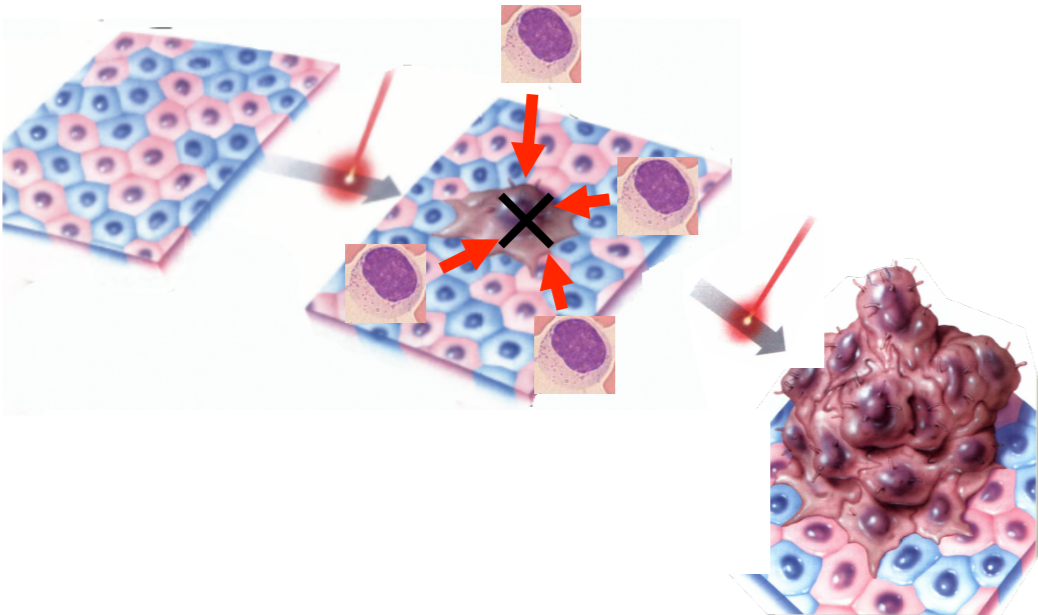


まれにDNA分子の傷が
取り除けずに残ってしまう

修復の失敗

細胞死も起こらない

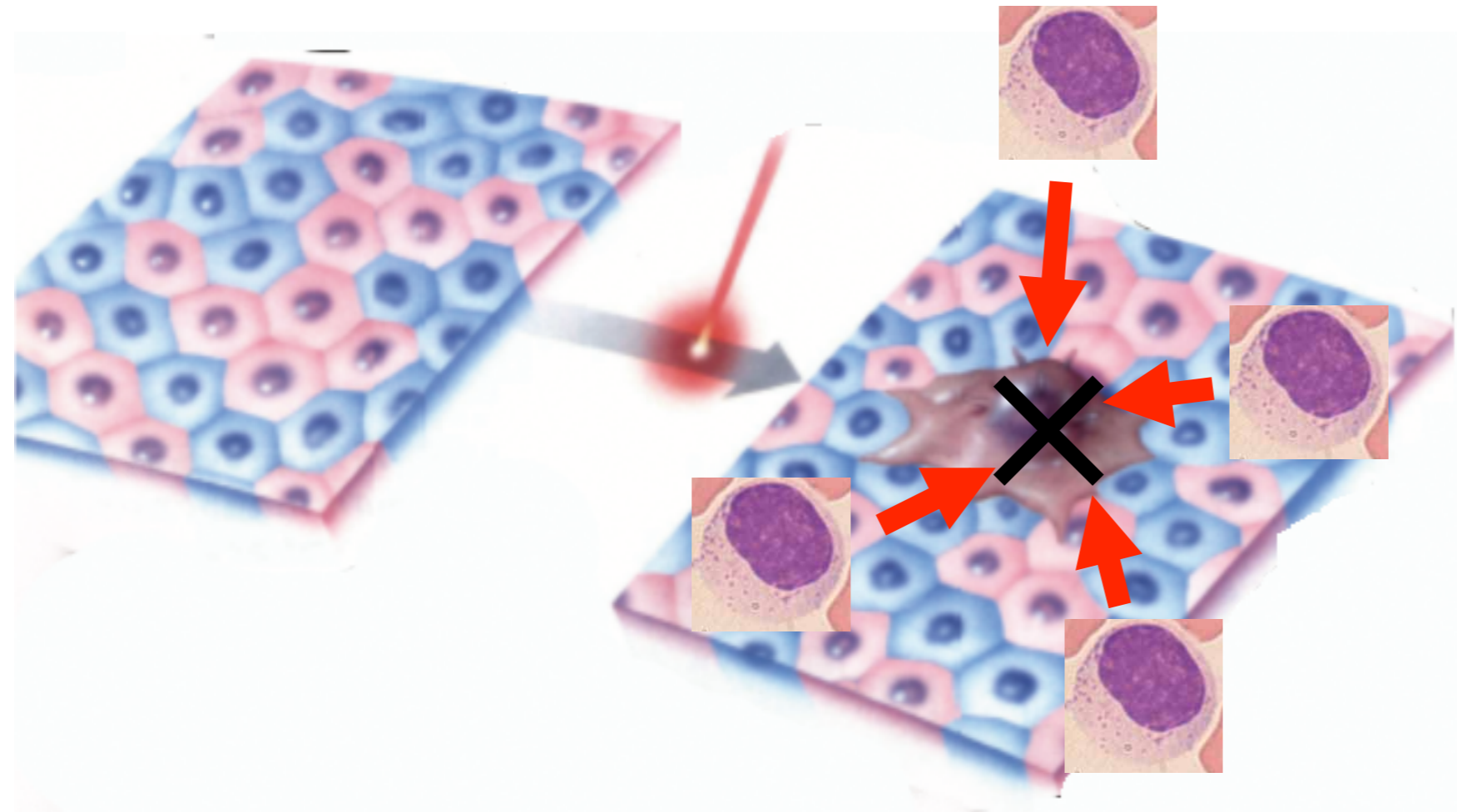
NK細胞も取り逃がした
(自然免疫系)



がん細胞が残ってしまう 良性／悪性
浸潤性

がん、とは？

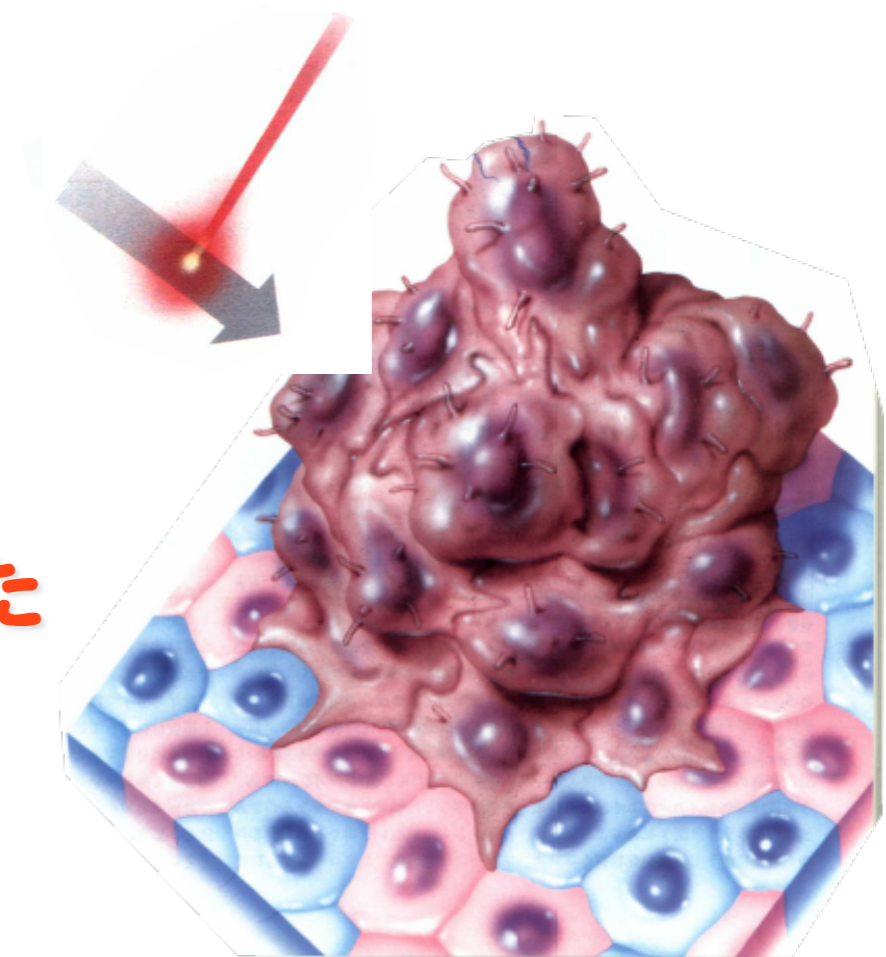
がん細胞は毎日5000個もできている！！



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」



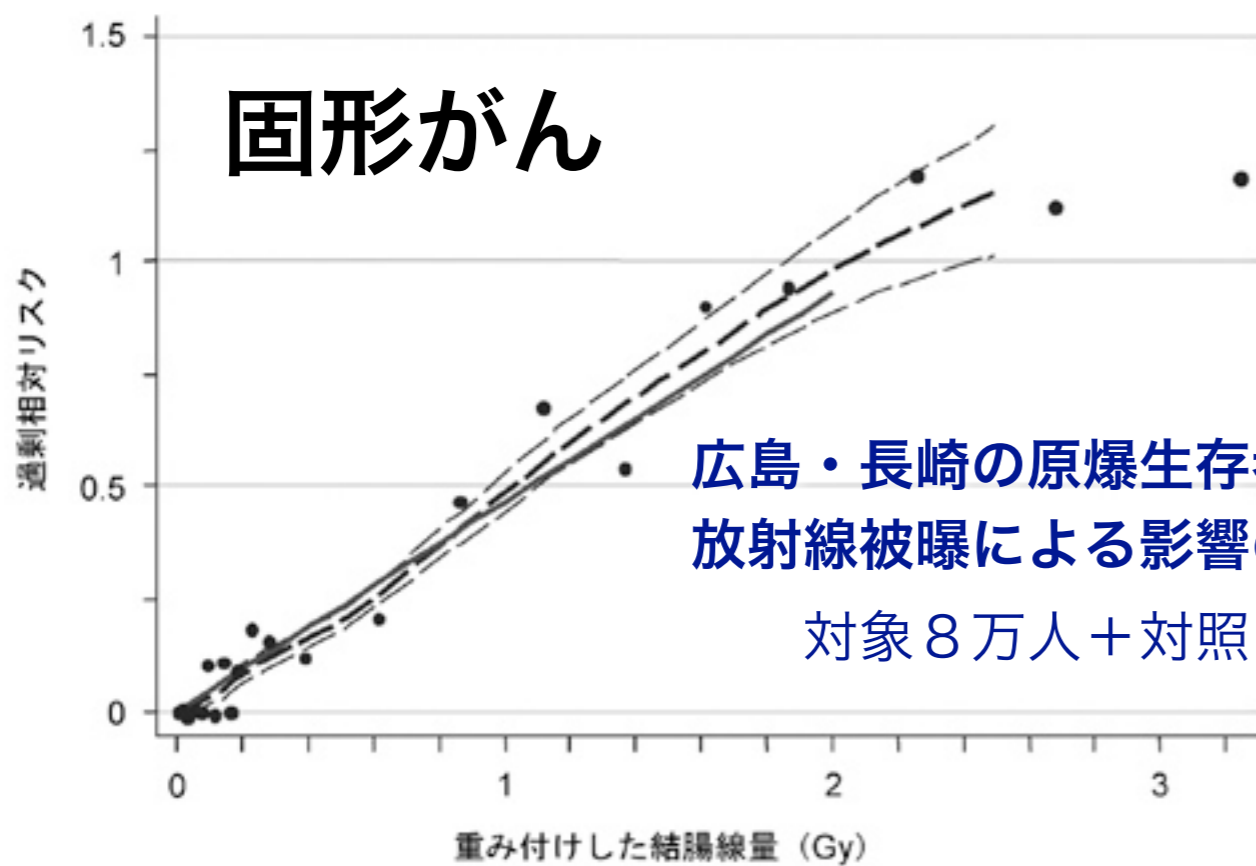


図 LSS (寿命調査) 集団における固形がん発生の過剰相対リスク (線量別) 1958-1998年。太い実線は、被曝時年齢30歳の人が70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク (ERR) の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区分別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

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%

(財) 放射線影響研究所 データ

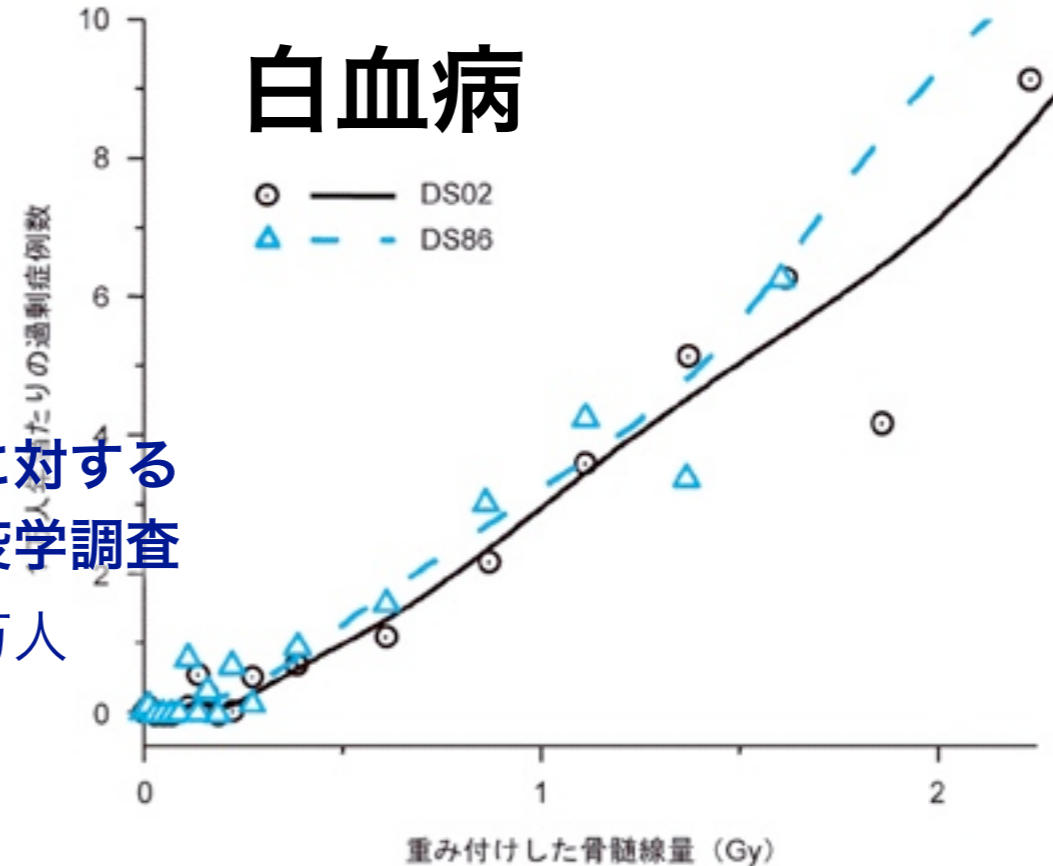


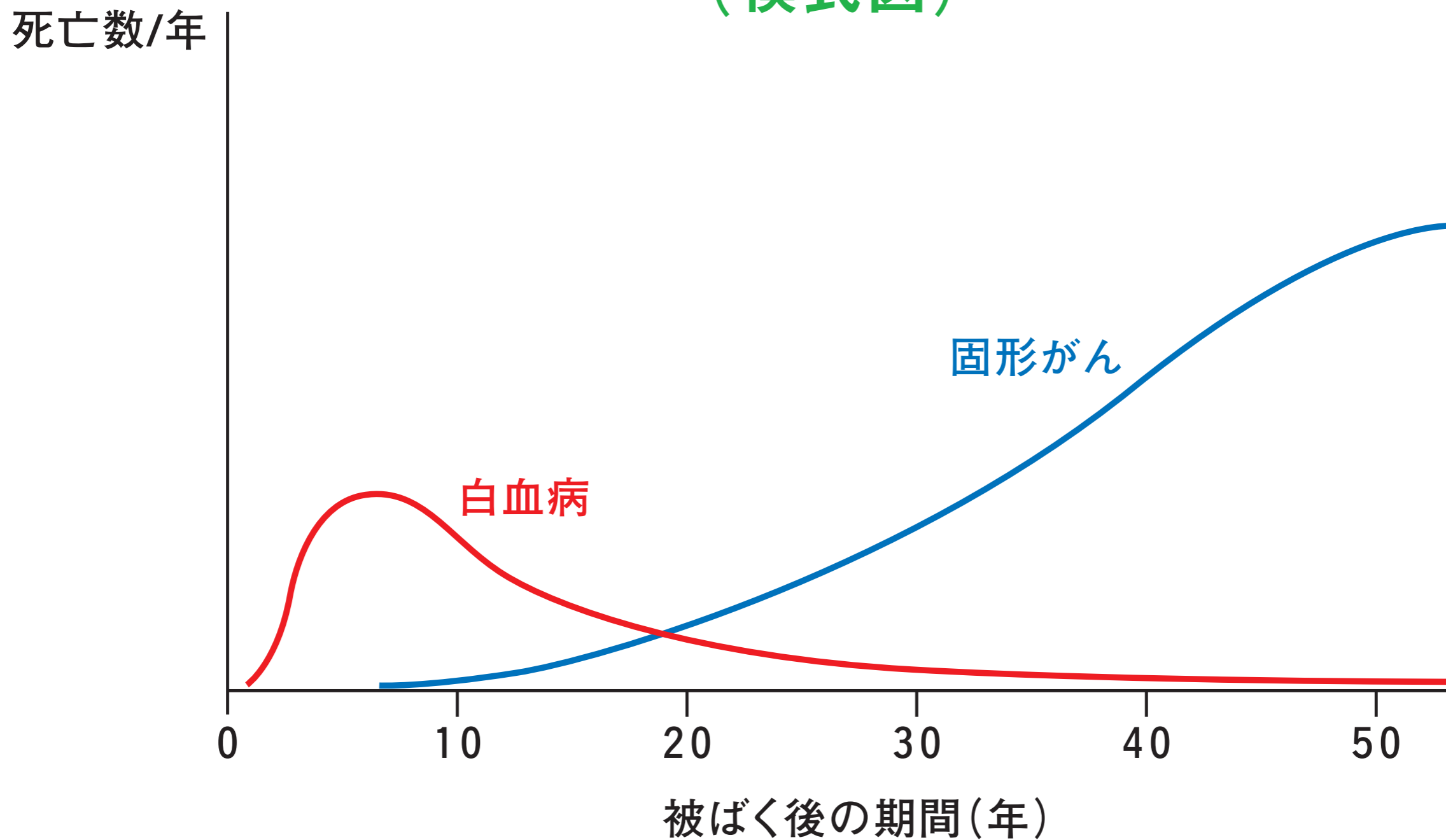
図. DS02とDS86による白血病のノンパラメトリックな線量反応、1950-2000年。被曝時年齢20-39歳の人の1970年における男女平均リスク。

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

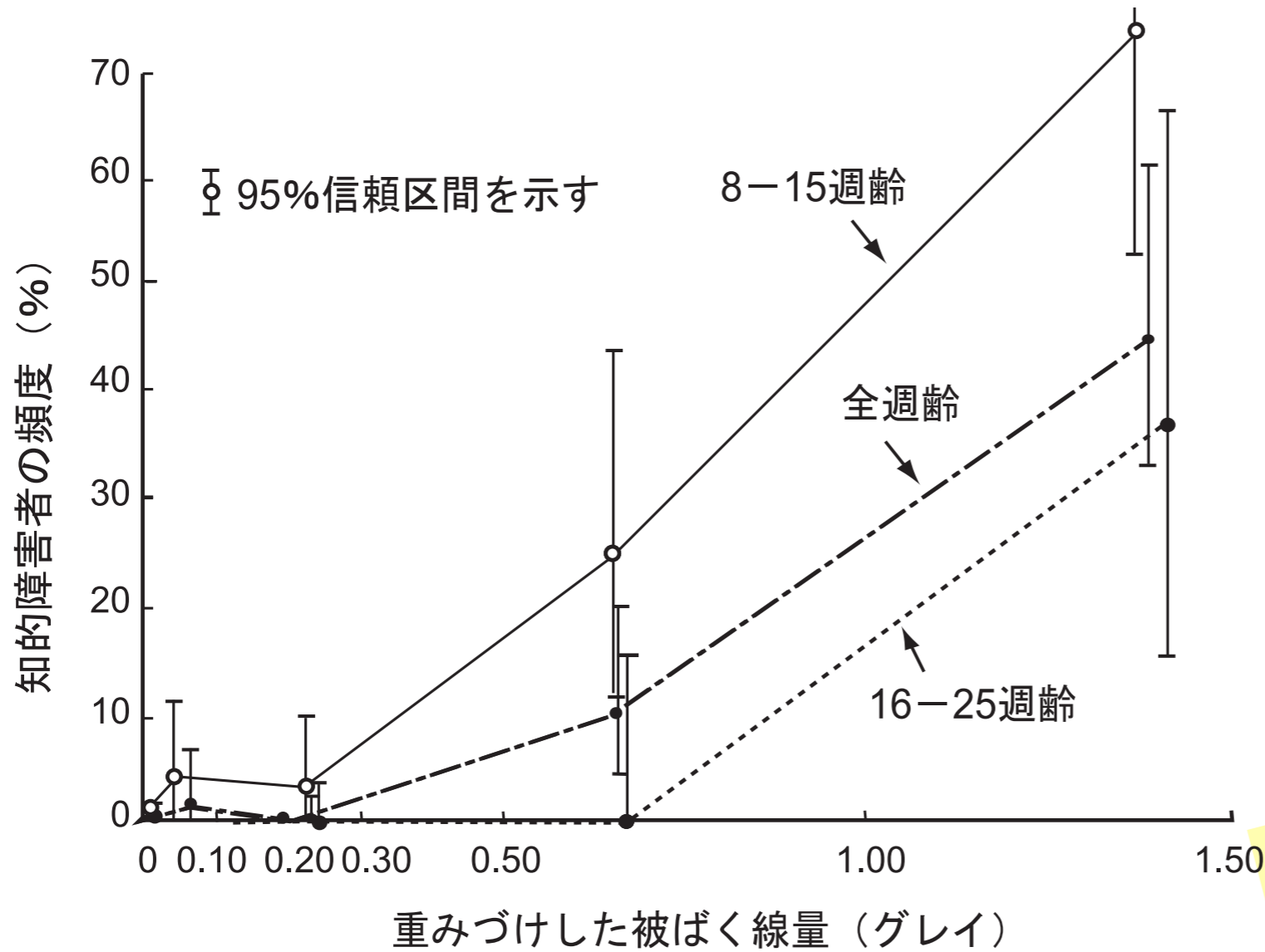
重み付けした骨髄線量 (Gy)	対象者数	死亡		寄与率
		観察数	推定過剰数	
0.005 - 0.1	30,387	69	4	6%
0.1 - 0.2	5,841	14	5	36%
0.2 - 0.5	6,304	27	10	37%
0.5 - 1.0	3,963	30	19	63%
1.0 - 2.0	1,972	39	28	72%
>2.0	737	25	28	100%
合計	49,204	204	94	46%

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



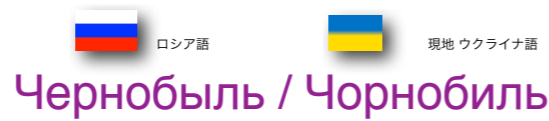
(財)放射線影響研究所 パンフレット「放射線影響研究所のご案内」

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)

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。

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)

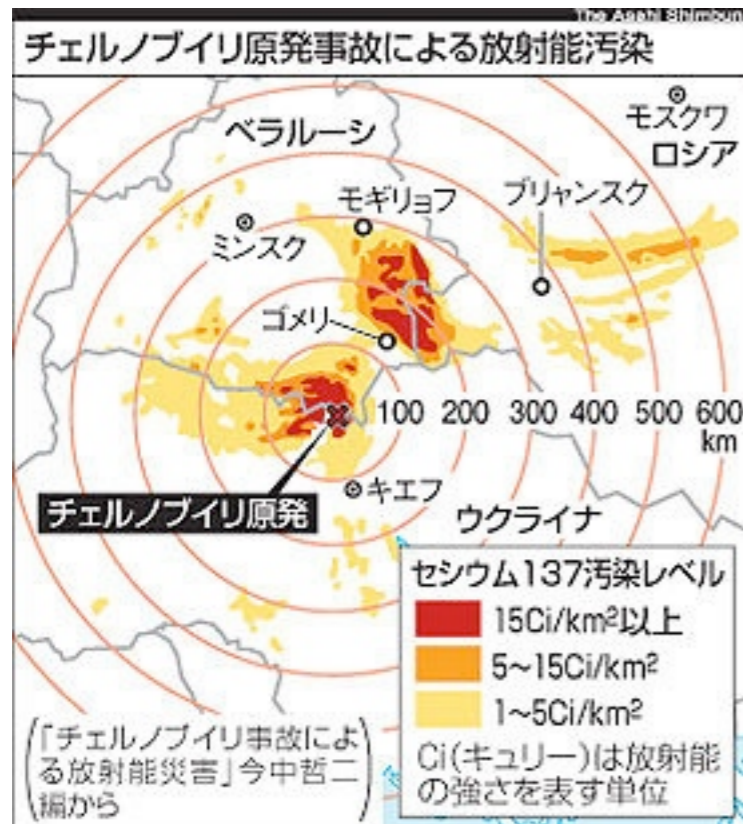
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

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

東京地方裁判所 労働部講演会



- 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・放射線生物学
- 放射線の社会的リスク
 - 放射線防護学と法令
 - リスクコミュニケーション

第5話

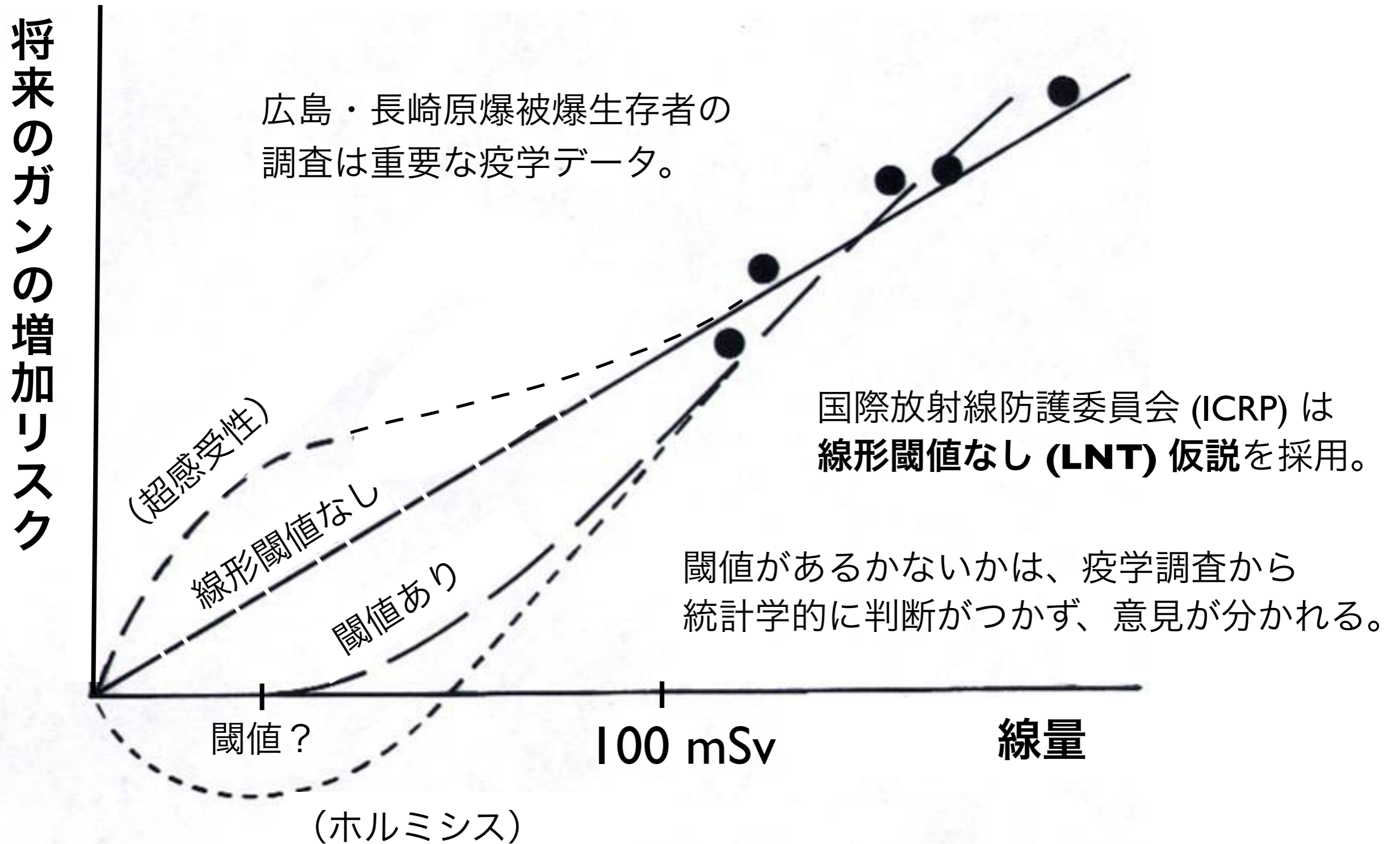
放射線の社会的リスク

鳥居 寛之

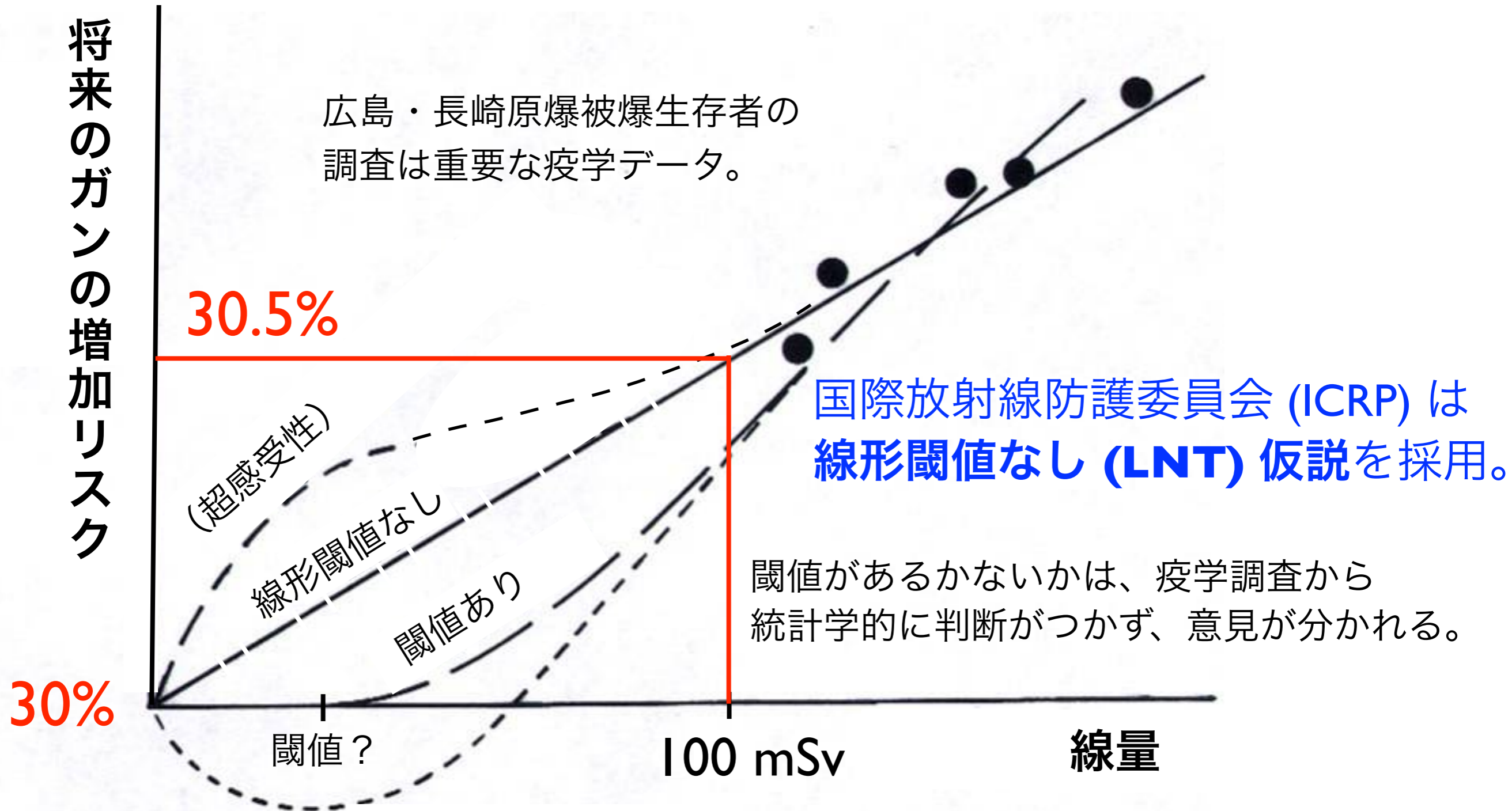
東京大学 教養学部 / 大学院総合文化研究科

放射線防護学と法令

低線量におけるリスク評価



低線量におけるリスク評価



(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**

コメント

LNT（線形閾値なし）仮説はあくまでも放射線あるいは環境化学物質に対する基準の策定に必要な防護の具体的数値を算出するための仮説として提出されたもので、メカニズムの面からは必ずしも支持されるわけではない。

佐渡敏彦ほか「放射線および環境化学物質による発がん：本当に微量でも危険なのか？」（医療科学社）

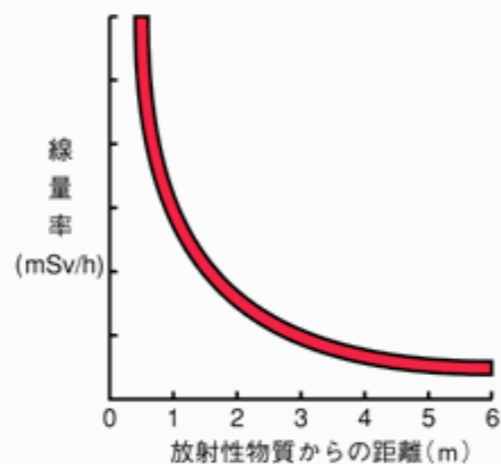
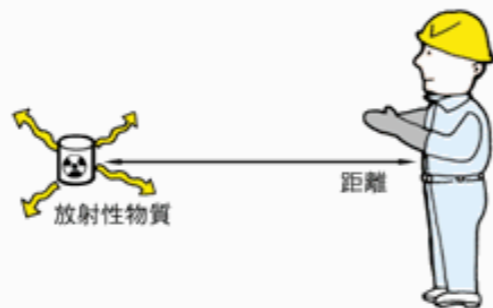
等価線量も実効線量も、放射線防護の目的にのみ使用できる量である。つまり、放射線を利用する計画に伴う将来のリスクを予測評価するための目安であって、すでに受けてしまった放射線曝露から個人が受けるリスク（たとえば、将来がんを誘発する可能性）を評価するために用いるべきではない。

多田順一郎「わかりやすい放射線物理学 改訂2判」オーム社

放射線防護

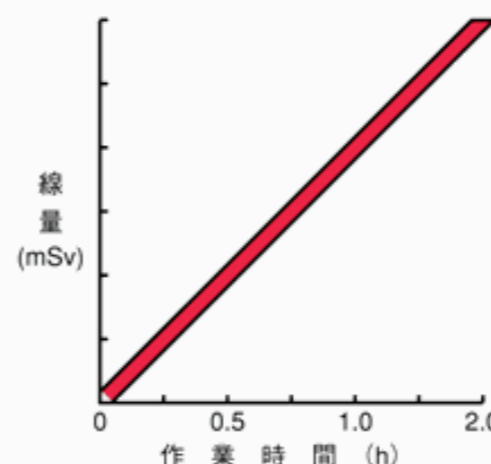
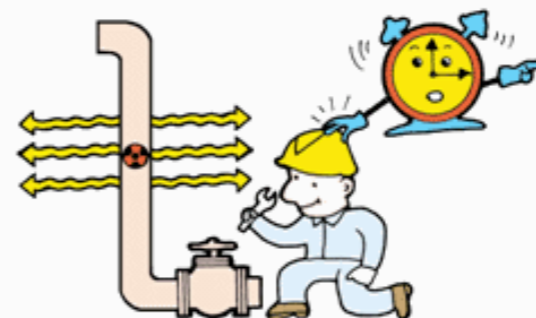
● 距離による防護

[線量率] = [距離]²に反比例



● 時間による防護

[線量] = [作業場所の線量率] × [作業時間]



● 遮へいによる防護

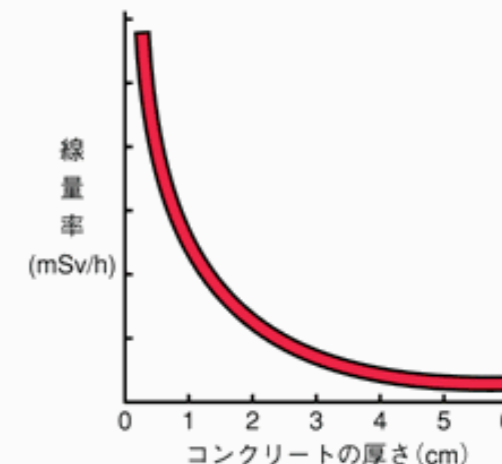
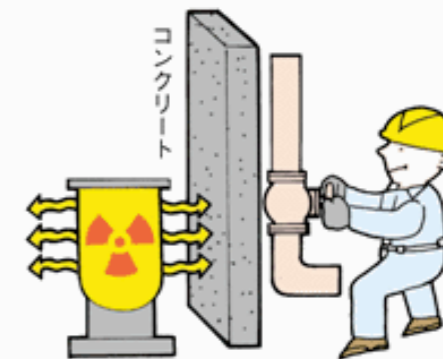


図1 遮へい3原則の図

[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 / 期間中
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 / 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。

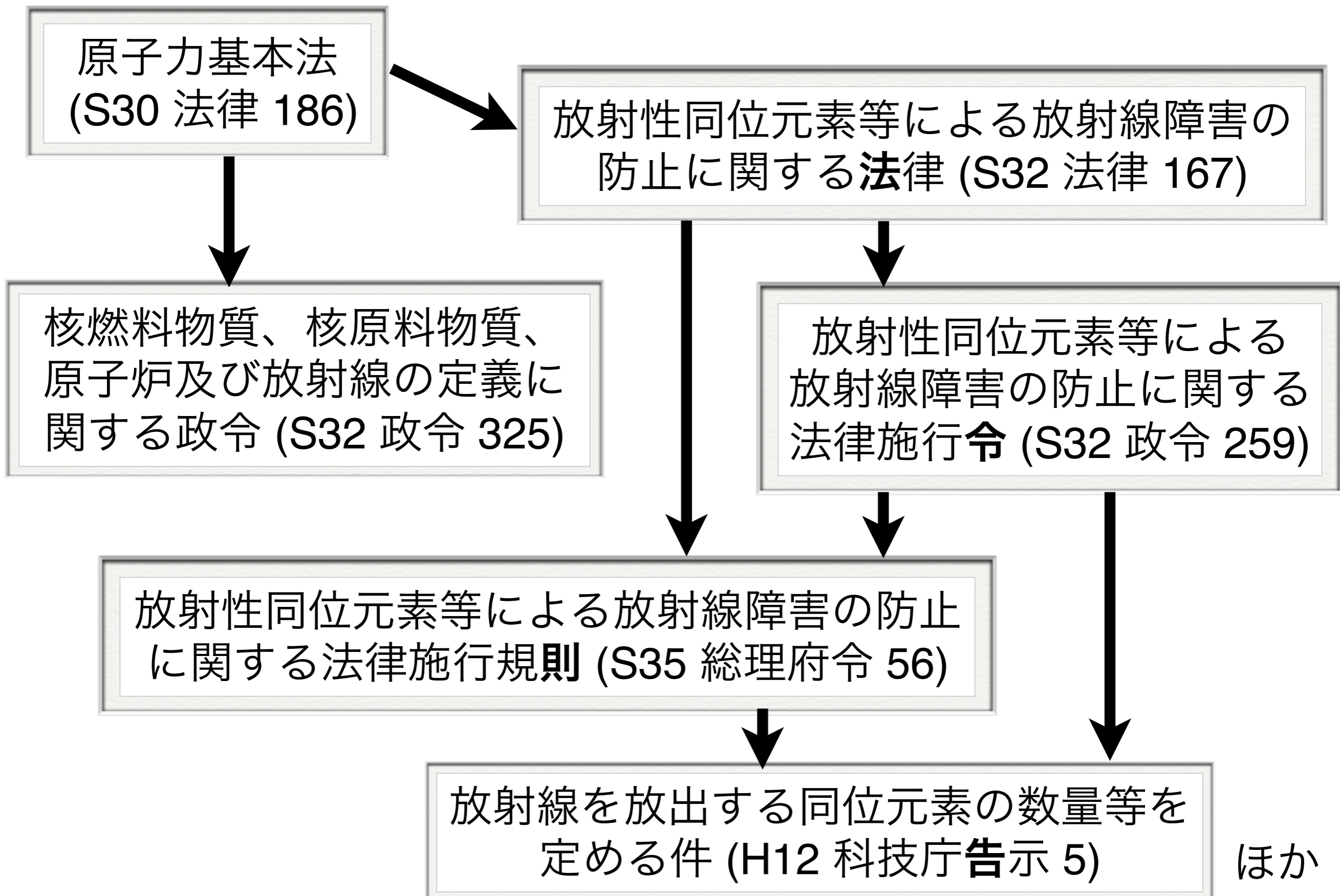
年リスク1万分の1 (毎年被曝の場合、65歳までの最大値) **ICRP 勧告**

〔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）

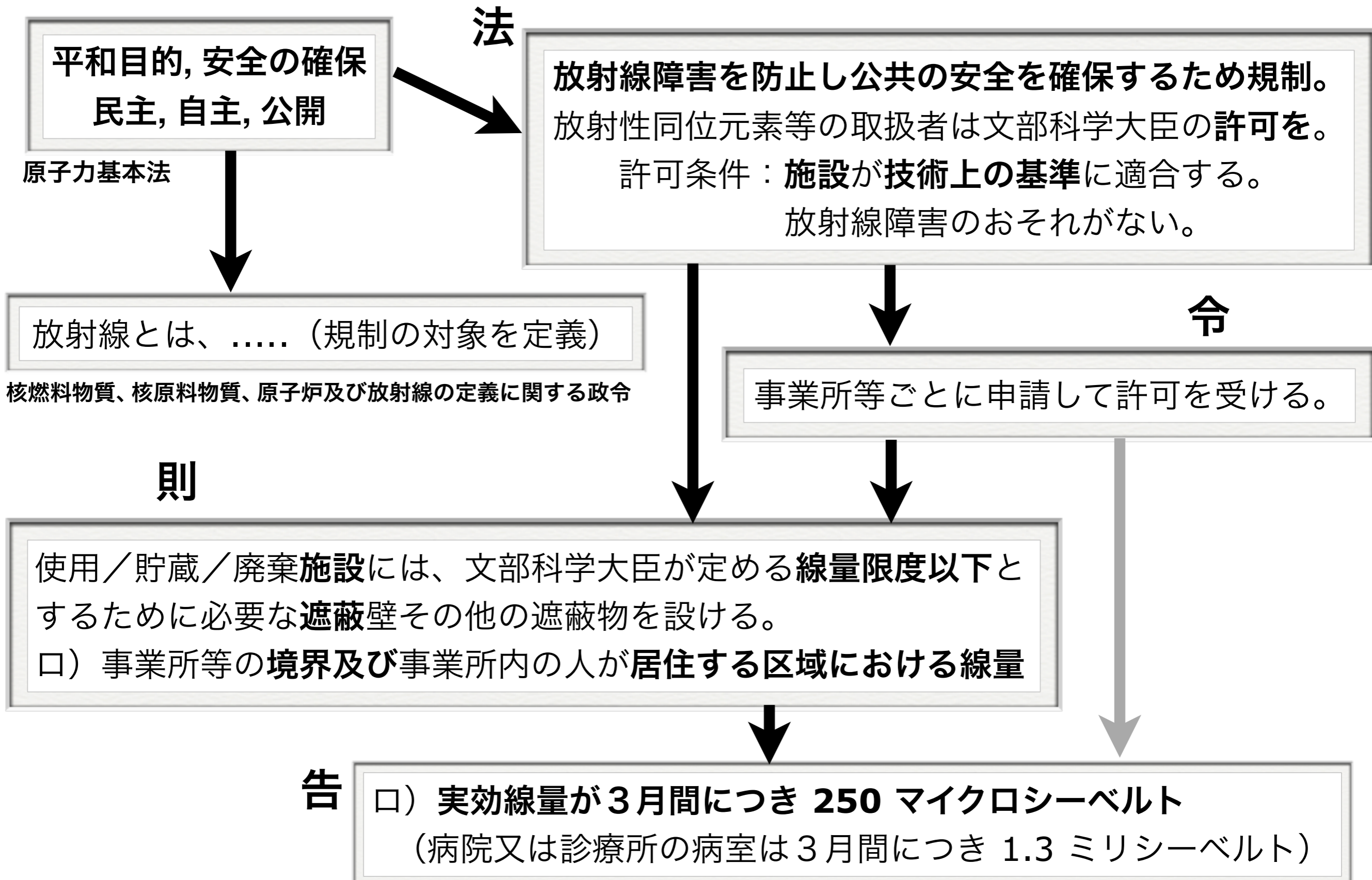
〔「ICRP1990年勧告-その要点と考え方-」、草間朋子編、日刊工業新聞社、50ページ〕

国内法令による防護基準

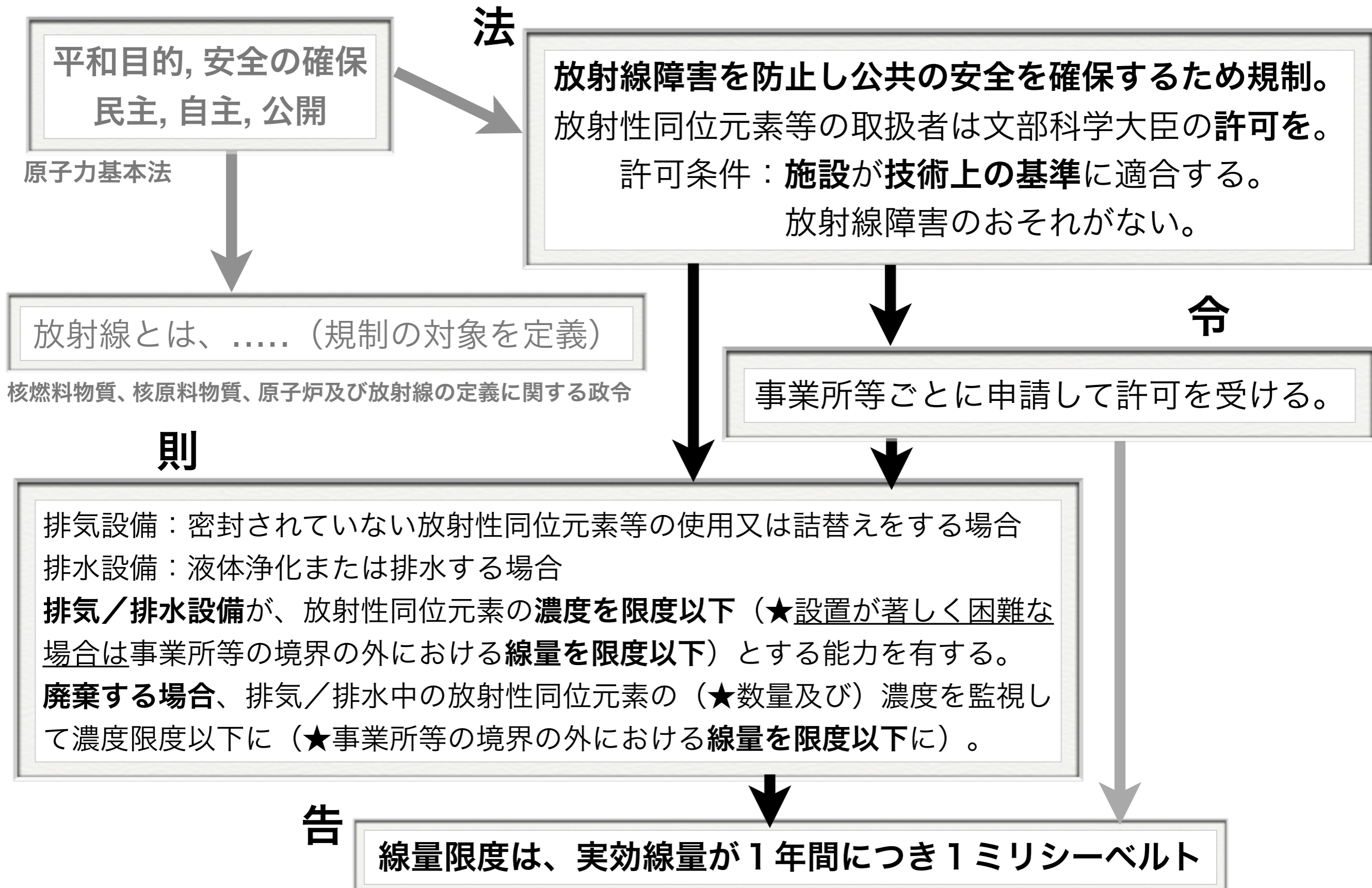
放射性同位元素等による放射線障害防止の法体系



公衆の追加線量限度が 1 mSv である法的根拠 (1)



公衆の追加線量限度が 1 mSv である法的根拠 (2)



放射線規制に関するそのほかの法令・規則

電離放射線障害防止規則 労働安全衛生法・同施行令

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

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

医療法施行規則 医療法・同施行令

- ◆ 医療および医薬品は、放射線障害防止法施行規則の適用外

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

-  **実効線量が3月間につき250マイクロシーベルトを超えない**

核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律・同施行令

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

年間1ミリシーベルトの規制は 国が事業所に求める規制値

(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

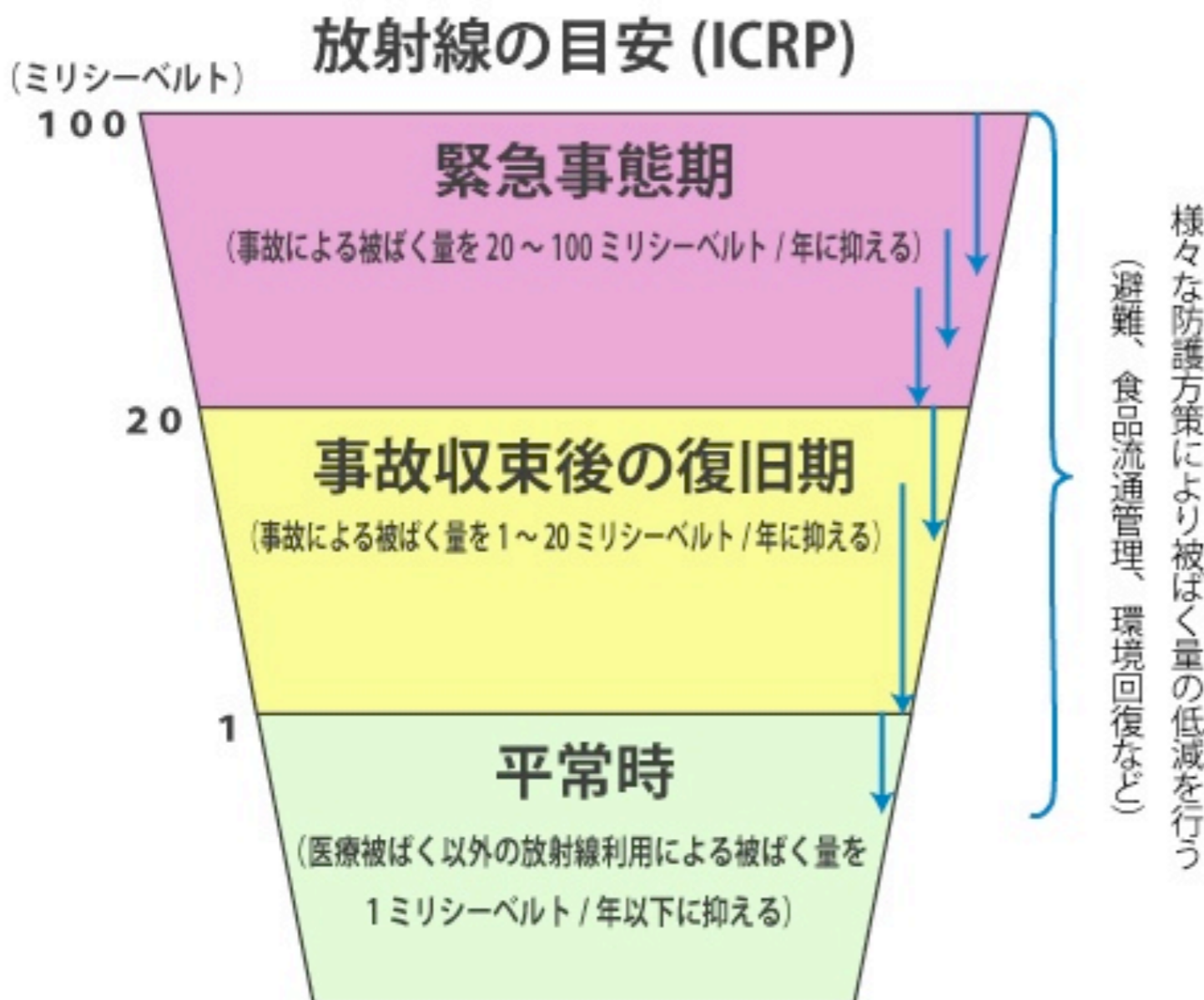
Q. 政府が計画的避難地域を指定しましたが、基準になっている20ミリシーベルトの意味について教えてください。

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。

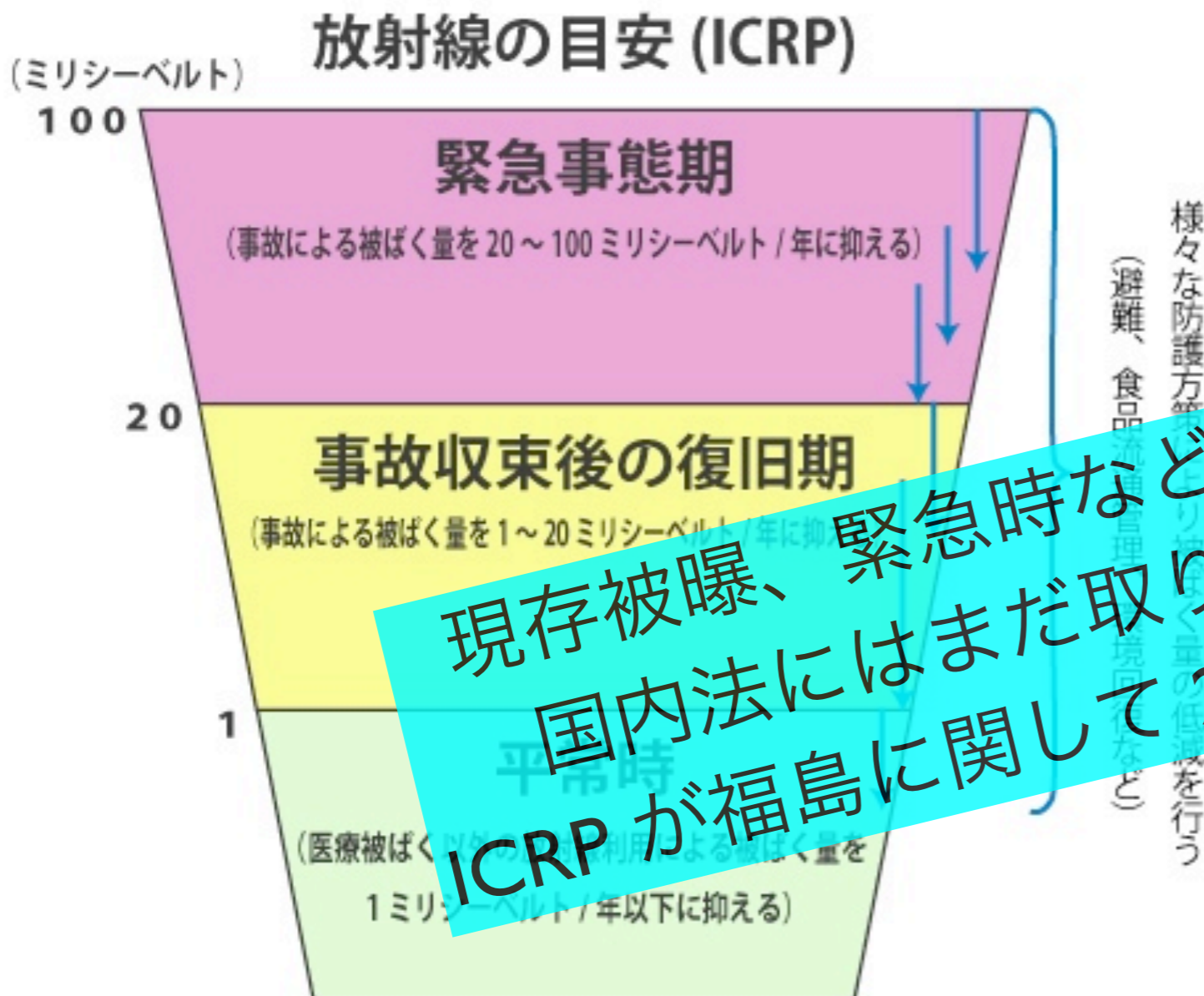


Q. 政府が計画的避難地域を指定しましたが、基準になっている20ミリシーベルトの意味について教えてください。

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值にあたるもので、福島原発周辺の方々の被ばくが、事故による被ばくの総量が100ミリシーベルトを超えることがないような対応をしつつ、将来的には年間1ミリシーベルト以下まで戻すための防護策を講ずることを意味していると思われます。



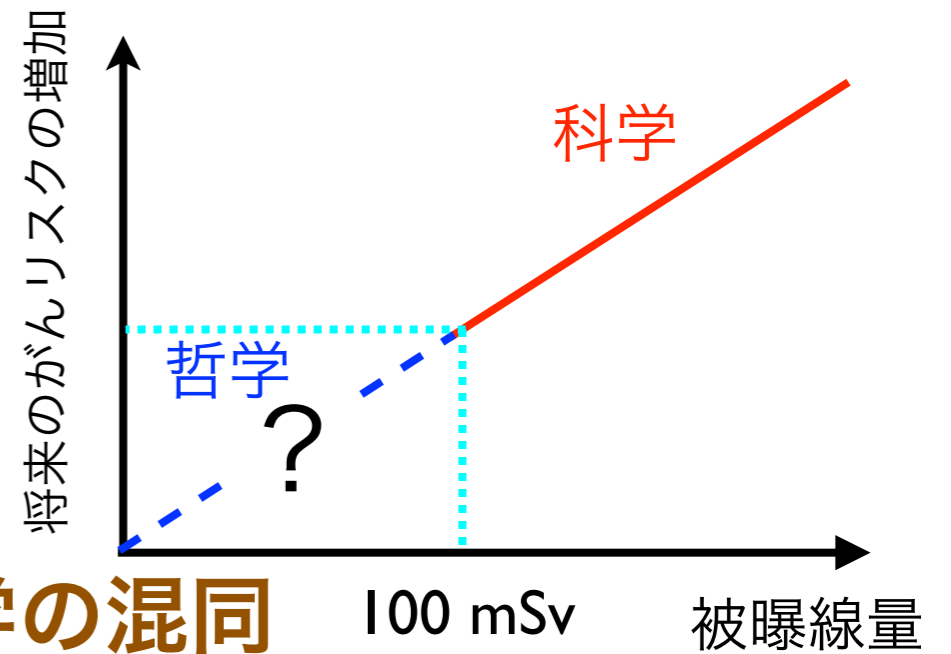
放射線の影響に関して異なった意見があるのはなぜか

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

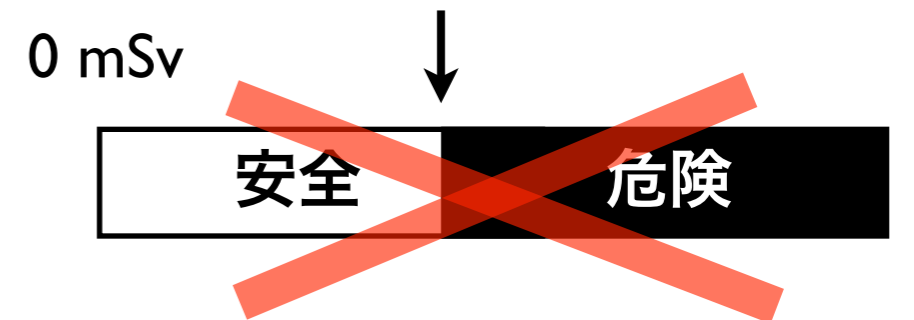


科学的知見と防護学(安全管理学)の哲学の混同

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

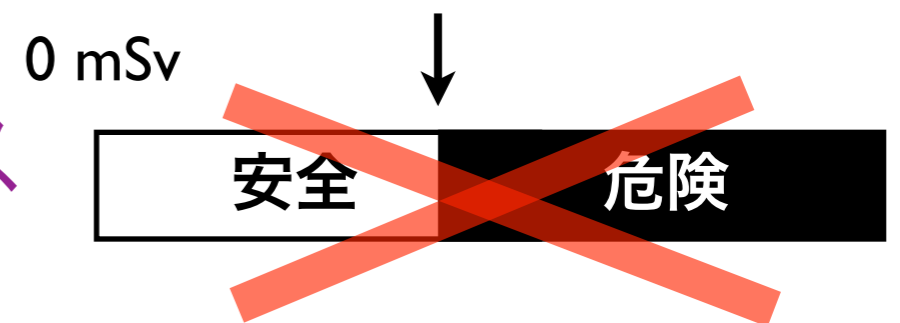
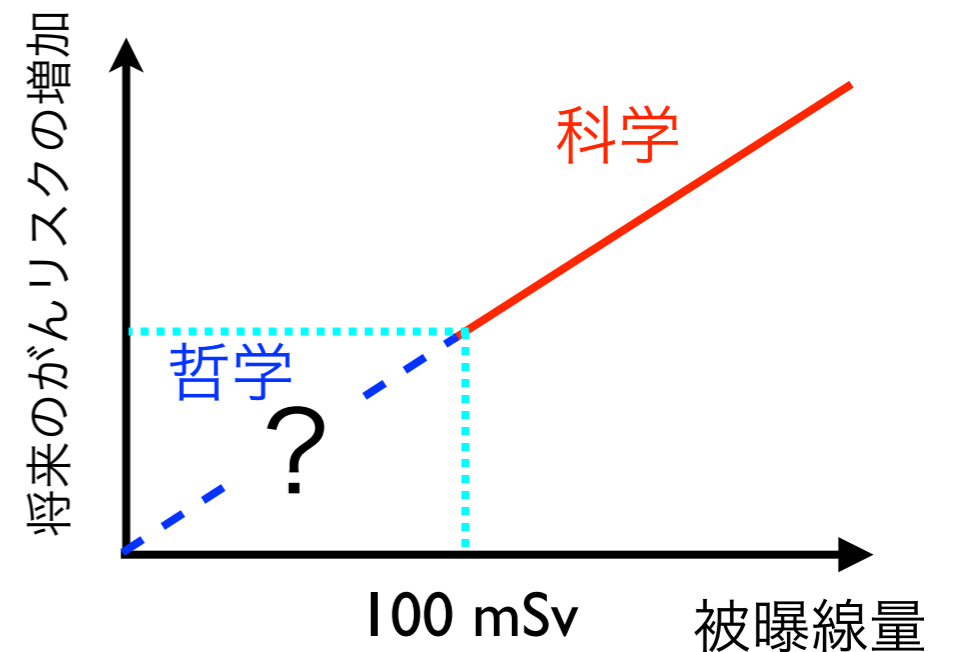
年齢、家族構成、職業

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。

原発作業員のリスクは？



リスクは相対的

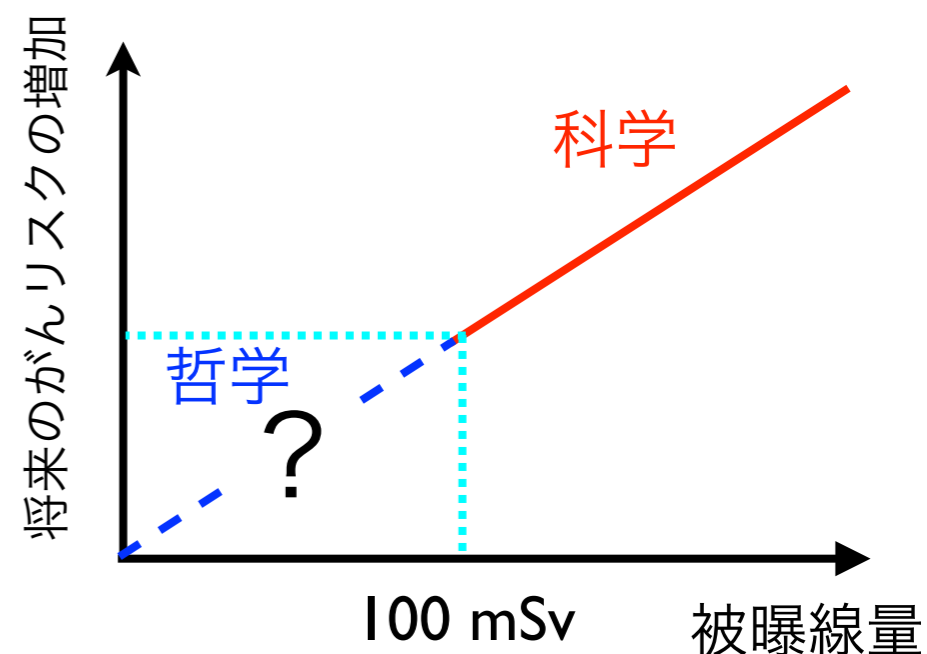
基準値
(社会が決める)

放射線のリスク

科学的「確率」をどう理解するか。

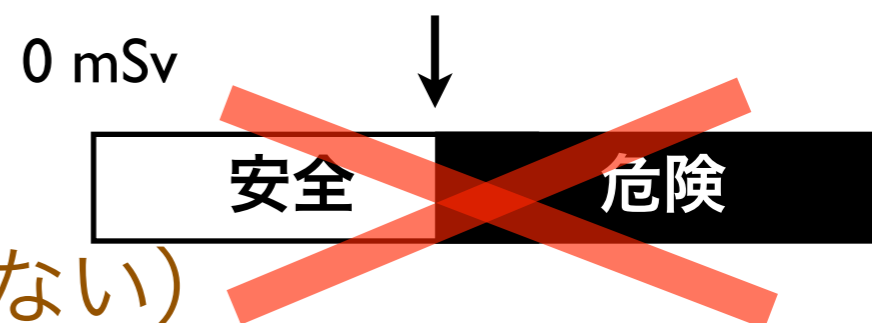
がんの影響は「確率的」に現れる

どんな影響がありうるかが定義され、その確率が求めれば、科学的問題としては決着したことになる。



個別の事象との因果関係は分からない

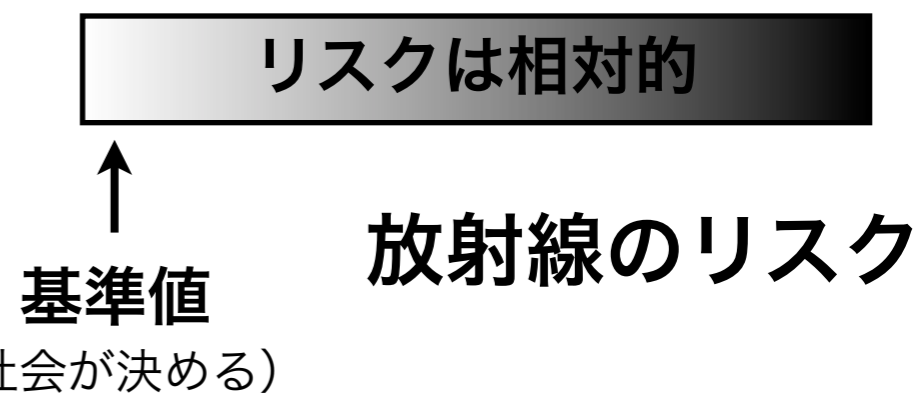
放射線によるがんは特徴がないのが特徴
(ほかの要因によるがんと全く区別がつかない)



この人のがんが放射線の影響によるものかわからない。

しかし、10000人の原告のうち
確実に10人は放射線の影響だと言えるかもしれない。
(どの10人かは「原理的に」分からない。)

立証主義の裁判ではこの10人を救うことができない。



科学的「確率」をどう裁判に取り入れるか。

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

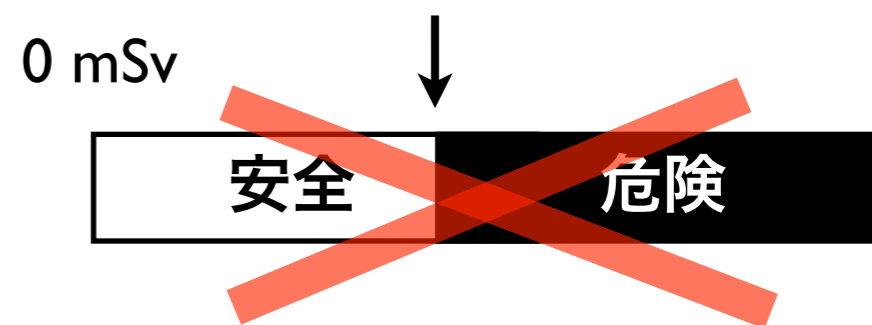
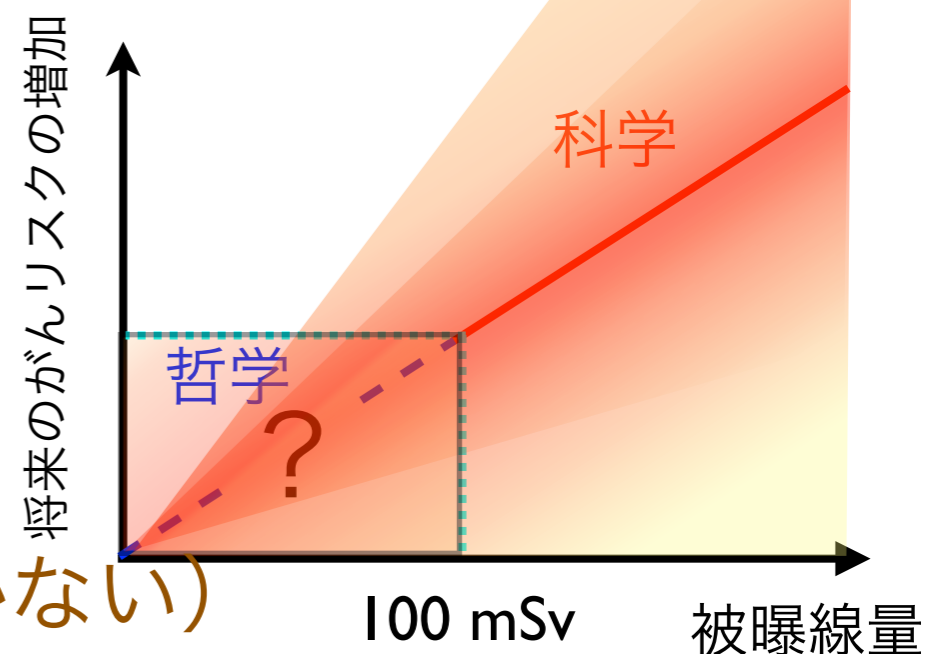
トランスサイエンス

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

補償についてどう考えるべきか。

救済措置のために広く影響を認定すべきか。

例：原爆訴訟、水俣病裁判



リスクは相対的

基準値
(社会が決める)

放射線のリスク

よりよい科学裁判の制度設計のために

法律家と科学者の間の、文化の違いからくる違和感を解消するために、科学のもつ不確実さ、裁判のもつ不確実さへの相互理解が必要。

「法と科学のハンドブック」

法学者と科学者が組んで科学技術振興機構からの
科学研究費を利用して、共同研究としてまとめたもの。

プロジェクト 「不確実な科学的状況での法的意思決定」

<http://www.law-science.org/top.html>

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願っています。**

大反対です！今回の瓦礫受け入れは、賢明とはとても思えません！

被災地の隣、**茨城県からの頼みの綱は、九州なのです。**こちらでは今、近隣都県の食べ物ばかりです。子供に食べさせる気にはとてもなりません。**九州の物を高くても、手間をかけてでも取り寄せている現状です。**

この期に及んで、**行政の言う「大丈夫」を、一般国民の何人が心から信じますか？**

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。**

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**

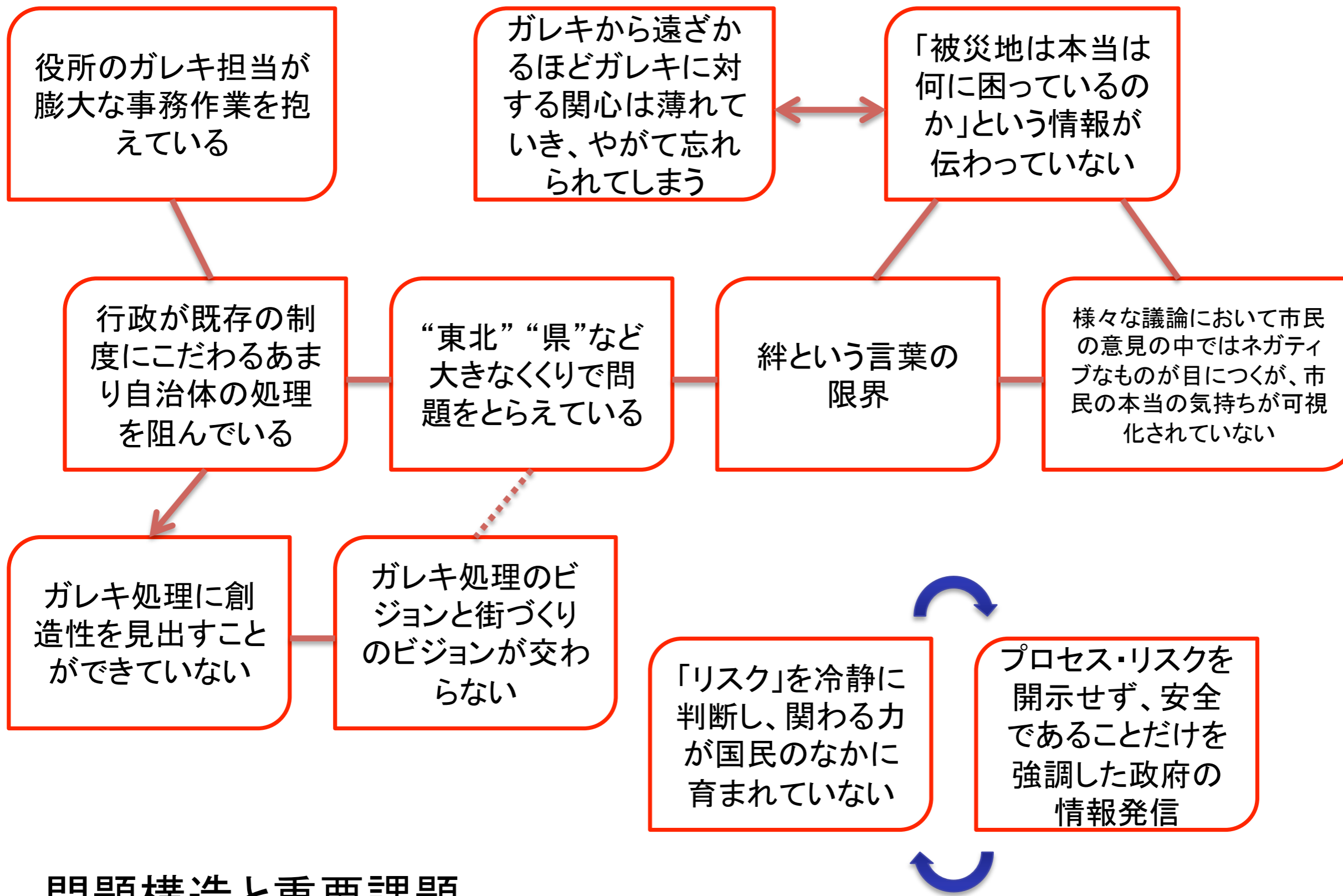
市長さんの今回の決定に不安を感じます。皆さんが仰る通り、**正直風評被害が一番怖い**です。私の大事な故郷が悪く言われるのは耐えられません。被災地の方を少しでも助けたいとゆう思いは、私も溢れそうなくらいあります。本当に今回の件を遂行されたいのなら**反対する市民、日本国民をどうか納得させて下さい。**

「絆」の限界？

● 誤解

- 宮城・岩手のがれきを広域処理要請
- 福島のがれきは対象外
- 地理の知識不足
 - 福島からの距離は、岩手県宮古市は東京より遠い。
- 放射線に関する知識不足・悪いイメージ
- 「絶対反対」の意見の人をどうするか。
- 脅迫、受け入れ地に対する風評被害

京都五山送り火と陸前高田の松



問題構造と重要課題



リスクのトレードオフ、リスクとベネフィット(利益)

- 福島市的人是避難すべきか
- 福島の子どもは外で遊ばない方がいいのか
- 東京の人が西日本に避難するのは合理的か
- 海外に子どもを預けた親もいる

- 東日本の食品は危険か
- 北海道や九州から食材を取り寄せる人がいる
- 食品安全で気をつけるのは放射性物質だけか
- 化学物質：米・ひじき中のヒ素。おこげ。

安全と安心

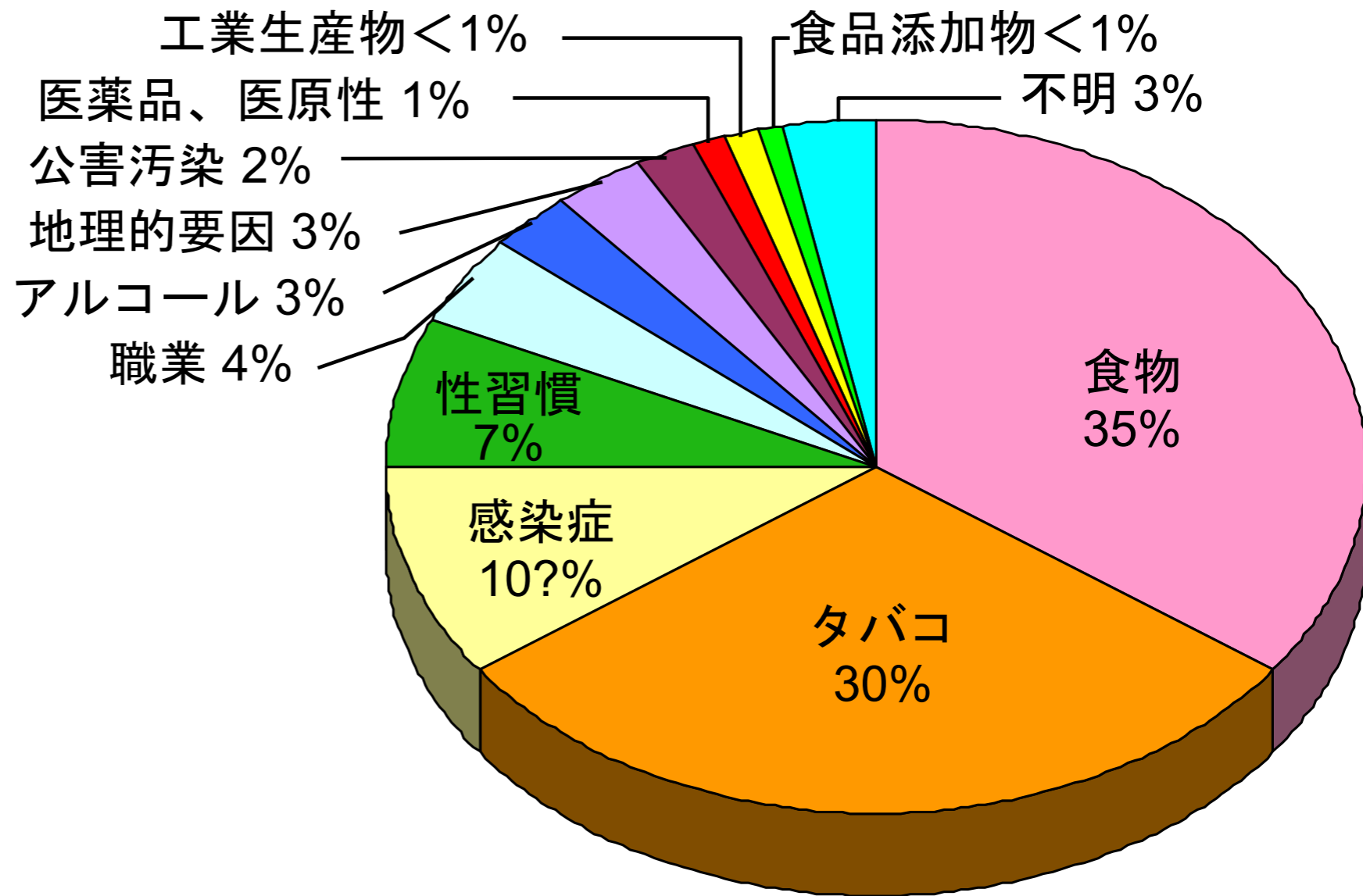
放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

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



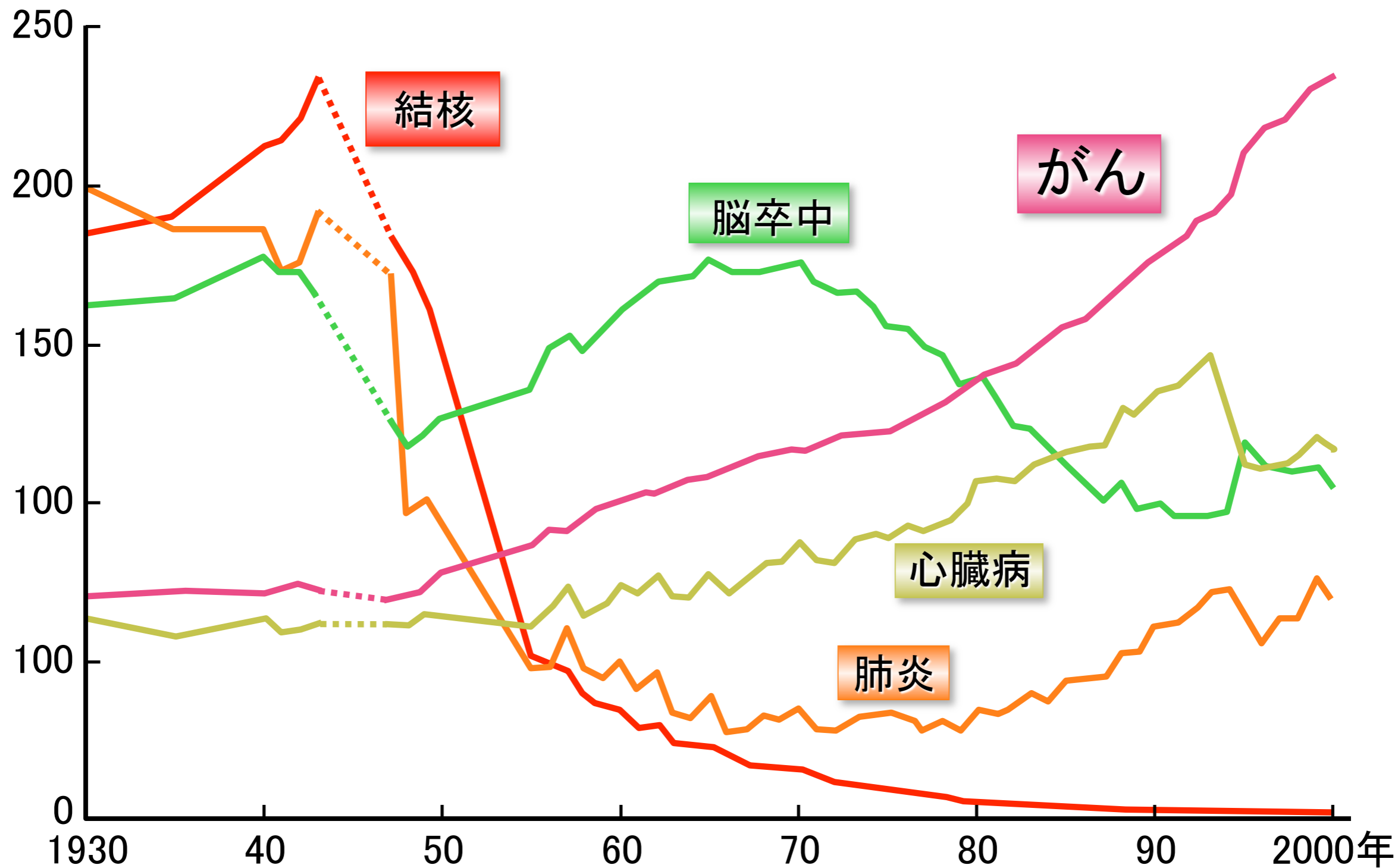
(R.Dool and R.Peto, 1981)

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。)

日本人の2人に1人が、がんになり、3人に1人が、がんで死んでいる



がんで死なないためには、

👉 がんにならないのが一番

+ なくても、早期発見で完治させる

早期発見 = がん検診

(症状に気づいてからでは遅い)

がんにならない生活習慣

- タバコは吸わない
- 酒はひかえめ (赤くなる人は特に)
- 肉と塩分はひかえめ
- 野菜を十分に
- 運動

東大医学部附属病院

中川 恵一 先生



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

寺田 寅彦 (1935年)

被曝を

怖れすぎても、怖れなさすぎても

健康被害が出る。

(東大病院 放射線科 中川恵一先生)

病は気から = 精神失調、免疫力低下などに注意

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。

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？）

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