

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。
無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

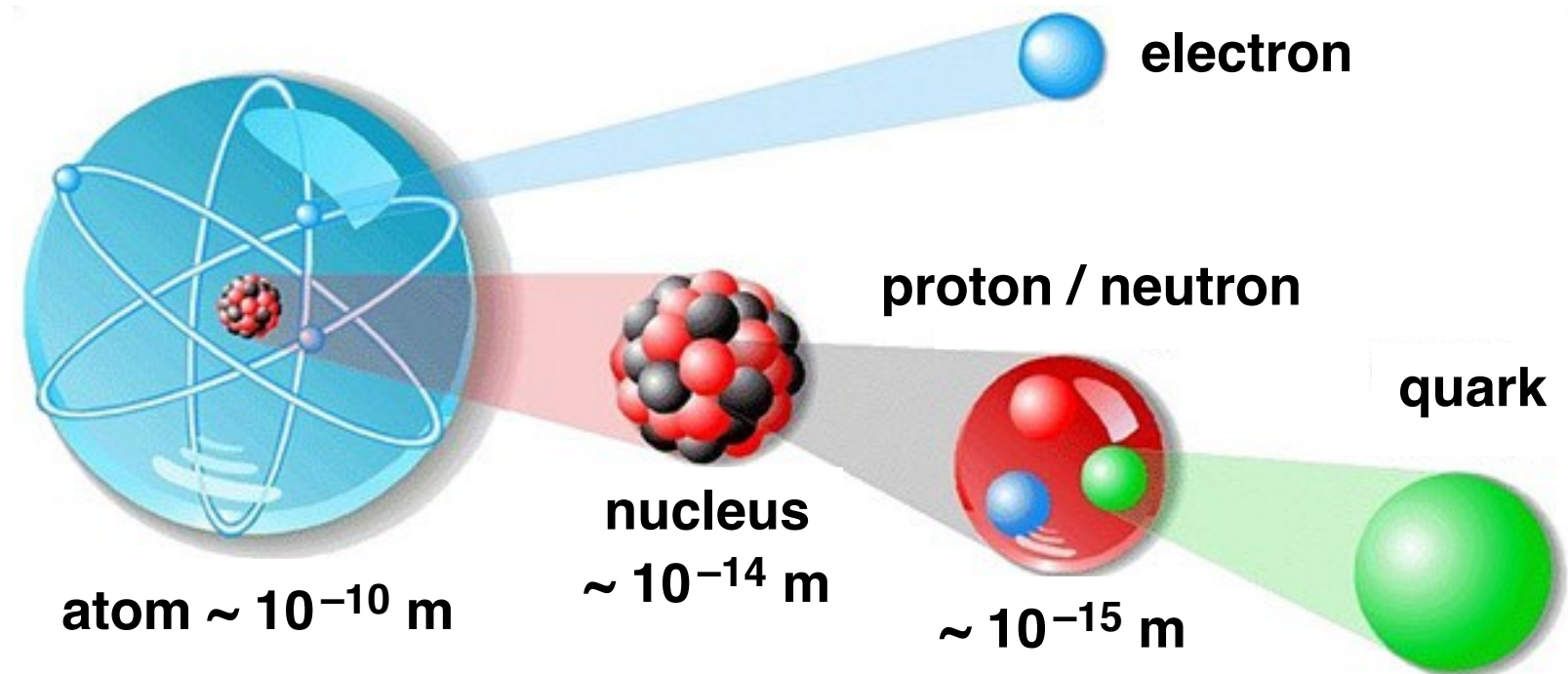
- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のクレジットを明記してください。

東京大学 Todai OCW 高校生のための金曜特別講座
Copyright 2011, 鳥居 寛之

放射線の科学

《放射線物理学》



東京大学 教養学部／大学院総合文化研究科
物理部会／広域科学専攻 相関基礎科学系

助教 鳥居 寛之

(粒子線物理学・素粒子原子物理学)

放射線の科学

《放射線物理学》

- 本日 (11/11) : 放射線物理学 (鳥居)
- 来週 (11/18) : 放射線生物学 & 環境放射化学
(渡邊先生) (小豆川先生)

東京大学 教養学部／大学院総合文化研究科
物理部会／広域科学専攻 相関基礎科学系

助教 鳥居 寛之
(粒子線物理学・素粒子原子物理学)

放射線の科学

《放射線物理学》

- 放射性物質、放射能と、放射線との区別
- 身の回りの自然放射線
- 放射線と物質との相互作用
- 放射線の単位・放射線防護の考え方

東京大学 教養学部／大学院総合文化研究科
物理部会／広域科学専攻 相関基礎科学系

助教 鳥居 寛之

(粒子線物理学・素粒子原子物理学)

「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や言葉遣いに注意し、思いやりを持って被災者の児童生徒に接するよう指導を求める通達を市立小中学校に出した。

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

放射線はうつらない

放射能と放射線を混同しない

放射線に対する正しい知識をもって
「正しく怖がる」ことが必要。

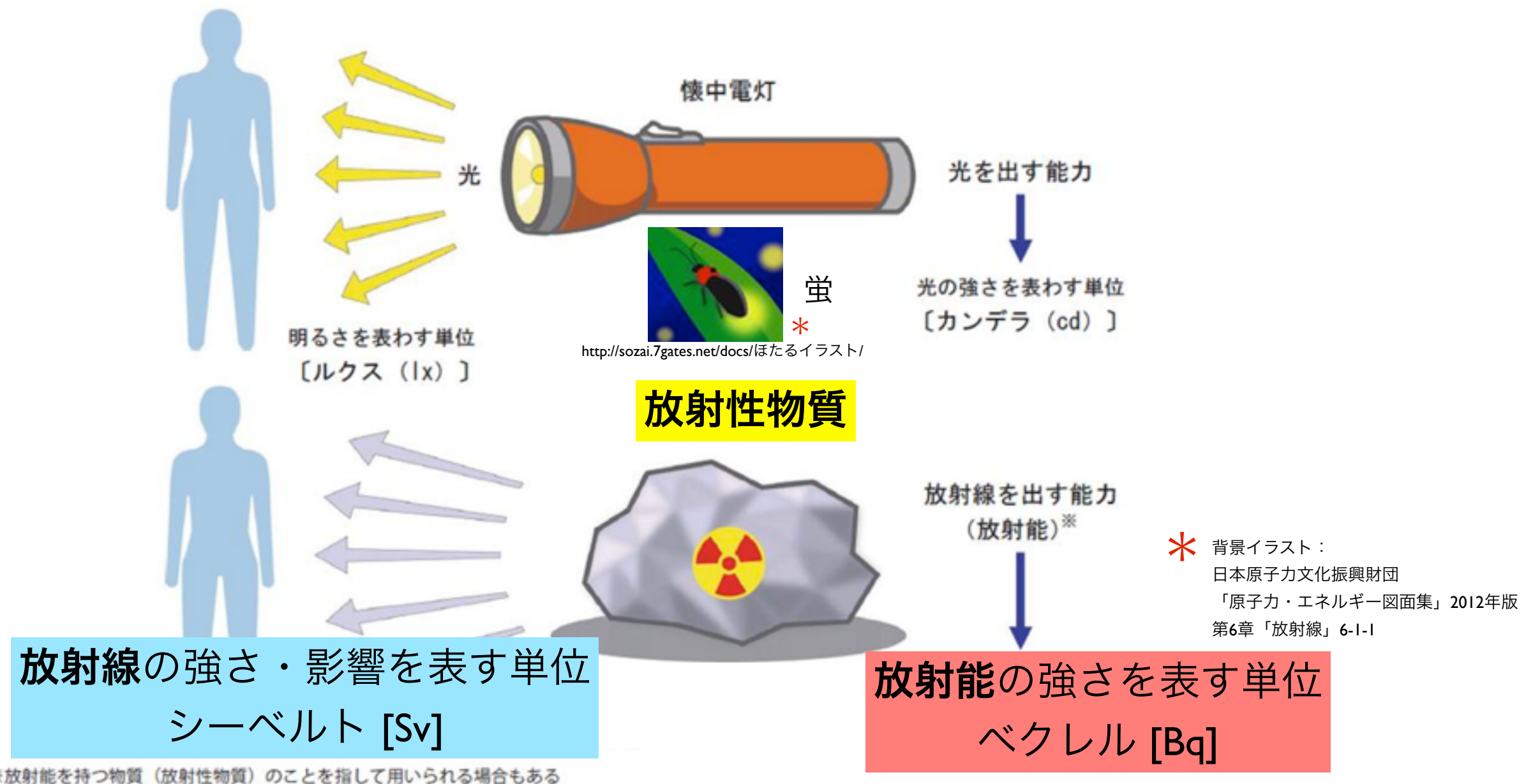
著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

日本経済新聞 2011年4月9日（夕刊1面）
「原発の放射性物質が及ぼす影響（イメージ）」

[http://www.nikkei.com/content/pic/
20110409/96958A9693819595E2EBE2E2EB8DE2EBE2E6E0E2E3E39F9FE2E2E2E0-
DSXDZO2643310009042011MM0001-PN1-7.jpg](http://www.nikkei.com/content/pic/20110409/96958A9693819595E2EBE2E2EB8DE2EBE2E6E0E2E3E39F9FE2E2E2E0-DSXDZO2643310009042011MM0001-PN1-7.jpg)

放射性物質が一部東京まで飛来。
放射線が直接東京に届いたのではない。

放射能と放射線



放射能 (radioactivity) の単位

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



Becquerel

decay/disintegration
per second

Curie

1 キュリー = 370億ベクレル



放射性物質とは？

火力発電と原子力発電の違い



背景イラスト：

日本原子力文化振興財団「原子力・エネルギー図面集」2012年版

第5章「原子力発電の安全性」

5-1-1「火力発電と原子力発電の違い」

火力

化学的燃烧

石油・石炭・ガス等の燃烧

原子核反応

原子力

$$E = mc^2$$

ウランの核分裂

蒸気

水

蒸気

タービン

変圧器

発電機

復水器

→ 放水路へ

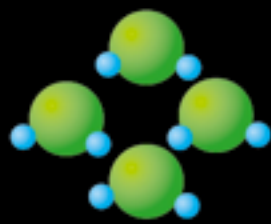
← 冷却水(海水)

循環水
ポンプ

給水ポンプ



分子
molecule

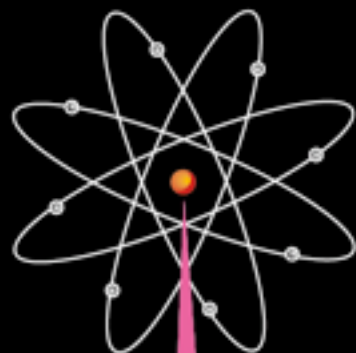


nm (10^{-9} m) 化学
ナノメートル

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

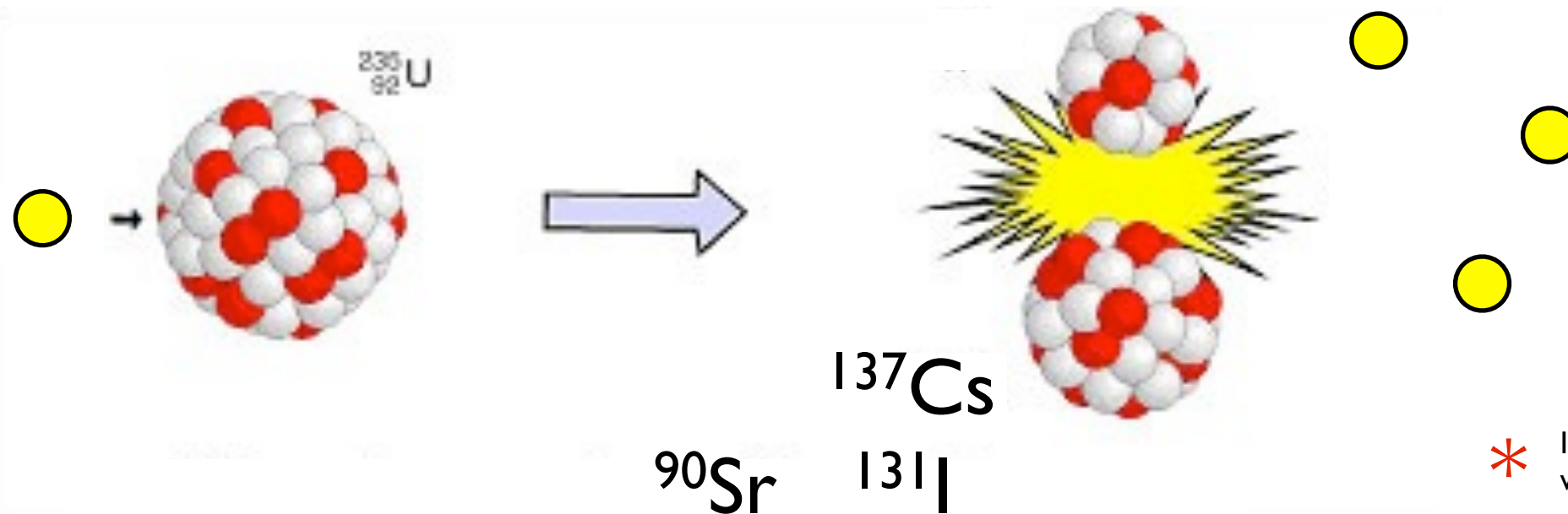


am (10^{-18} m)
アトメートル

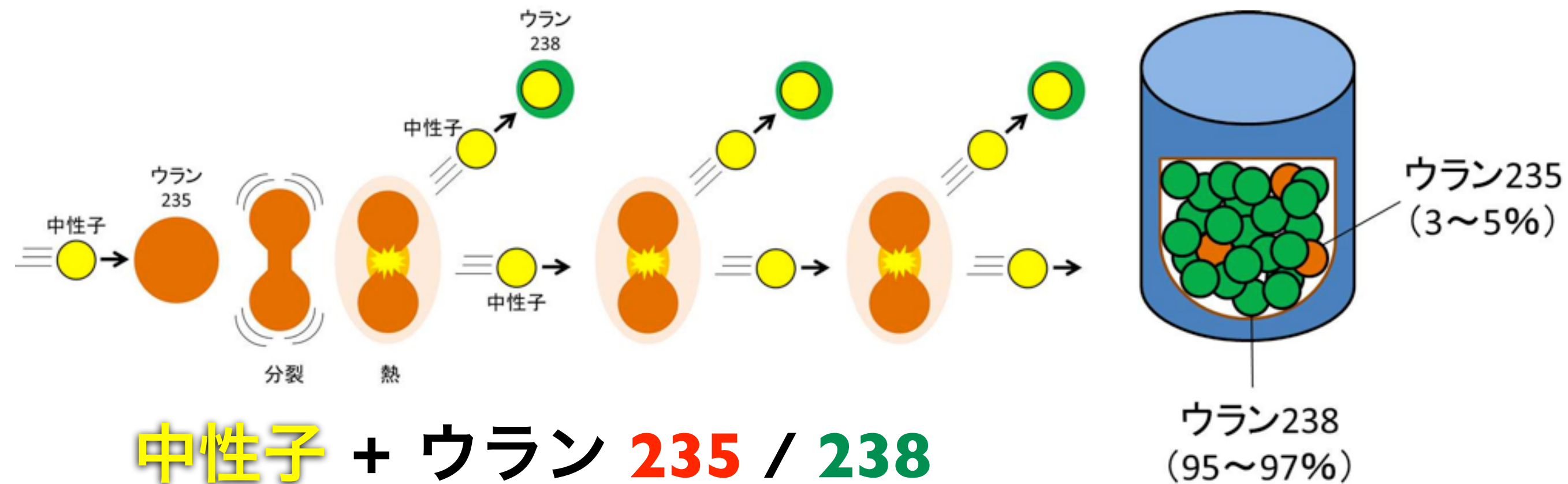
GeV
ギガ電子ボルト



原子核分裂反応



* Informationskreis KernEnergie, Berlin
www.kernenergie.de



放射性物質とは

放射性核種
= 放射性同位体
= 不安定原子核

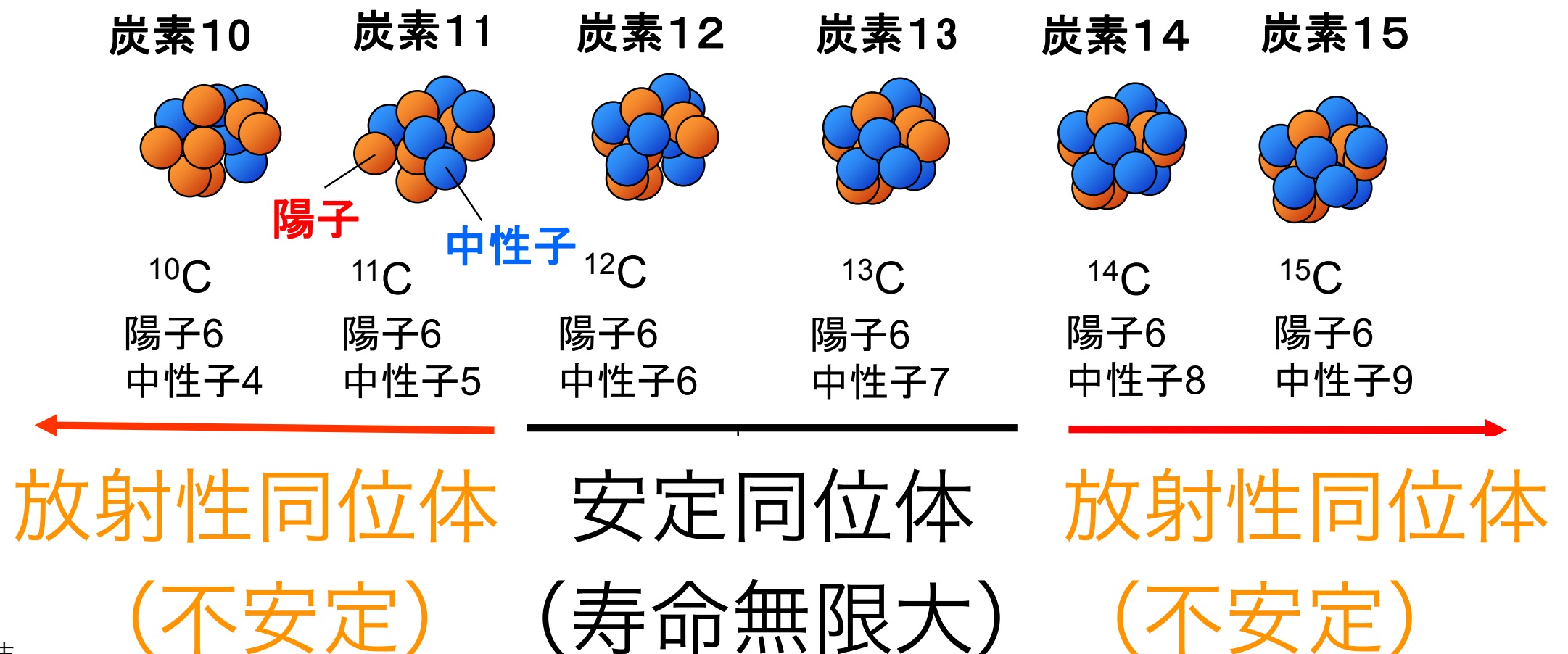
を含む原子からできている物質

$$\text{質量数 } A = Z + N$$

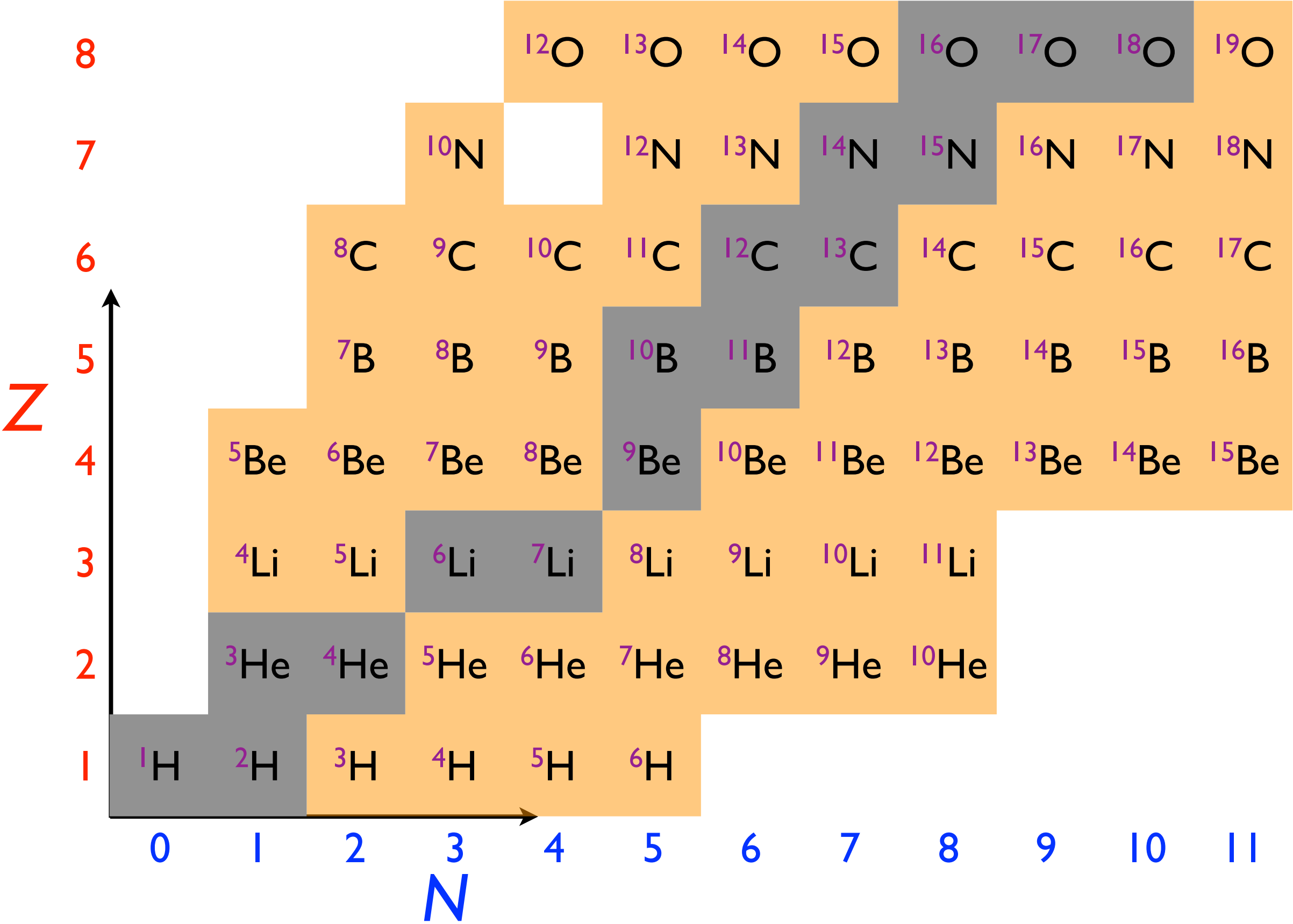


陽子数 Z が同じなら化学的には同じ元素
中性子数 N が違う原子核が多種存在する

炭素原子核の例



核图表



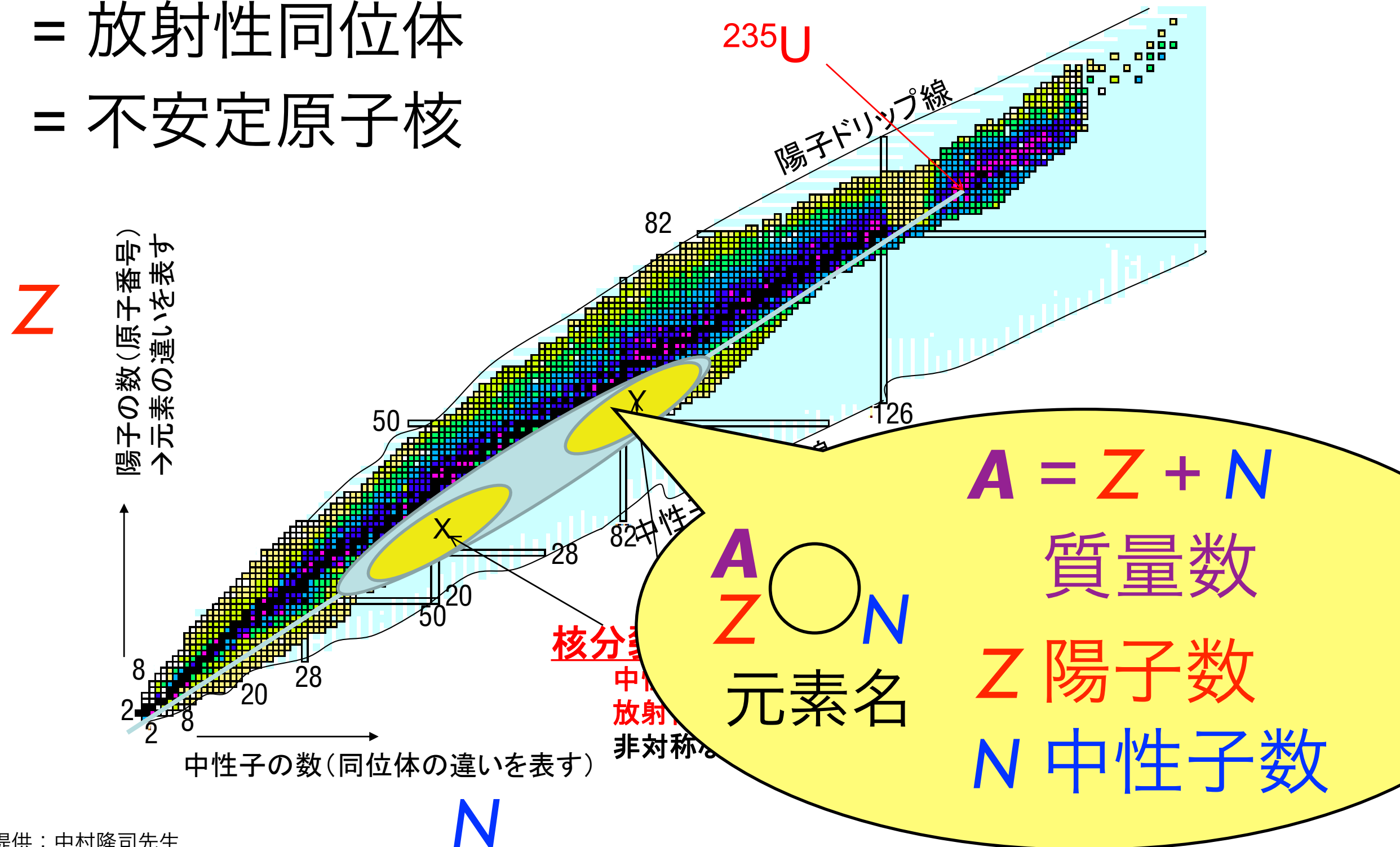
放射性物質とは

放射性核種

= 放射性同位体

= 不安定原子核

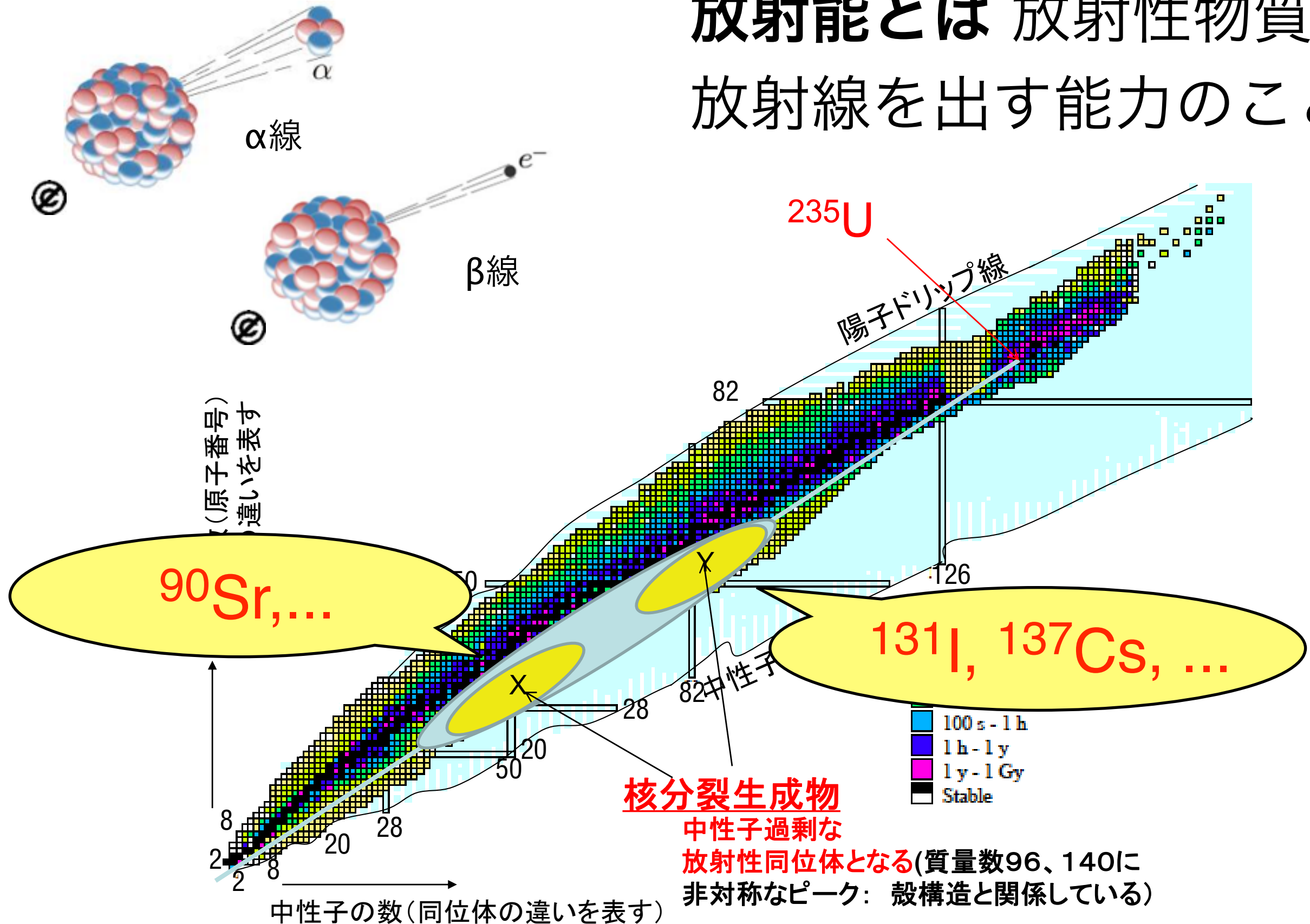
核図表



画像提供：中村隆司先生

(東京工業大学理工学研究科基礎物理学専攻)

放射能とは 放射性物質が 放射線を出す能力のこと。



画像提供：中村隆司先生

(東京工業大学理工学研究科基礎物理学専攻)

放射線とは？



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）

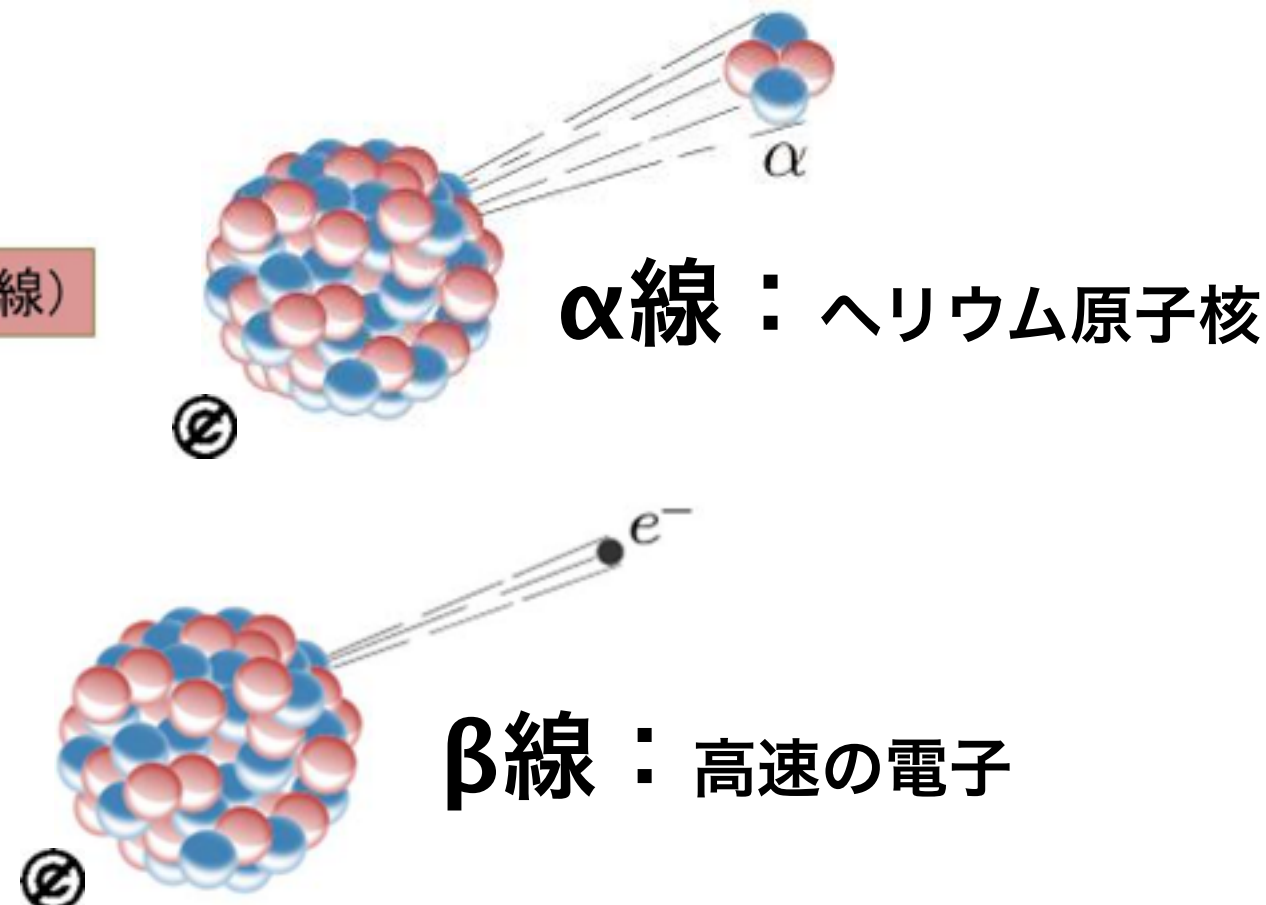
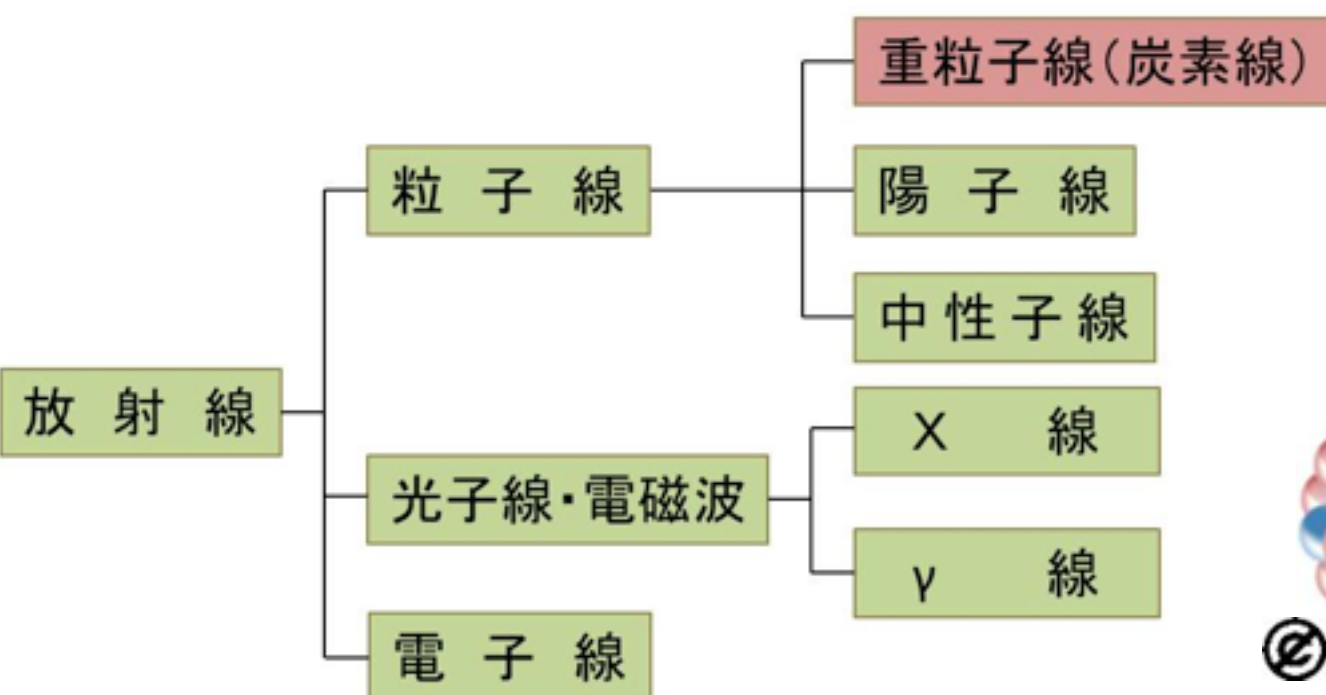
VIDEO

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)

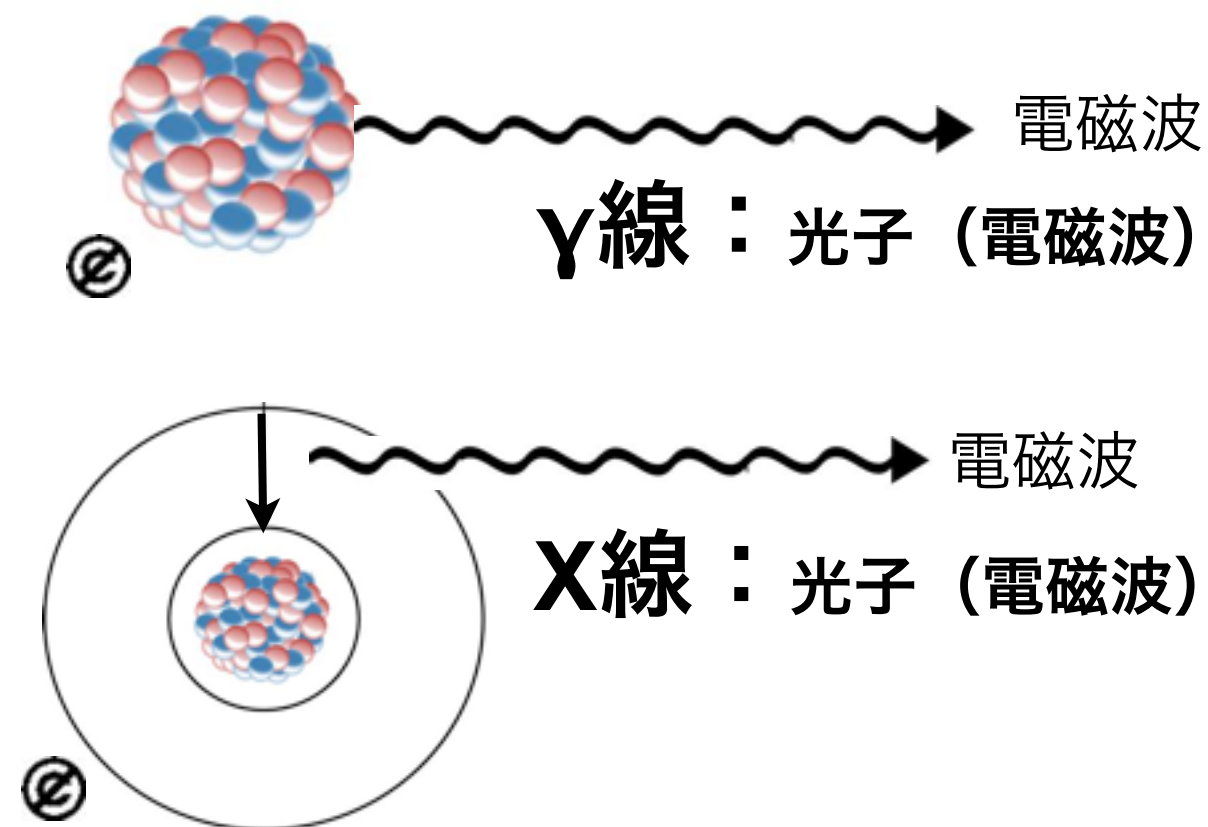


放射線のもつエネルギーは？

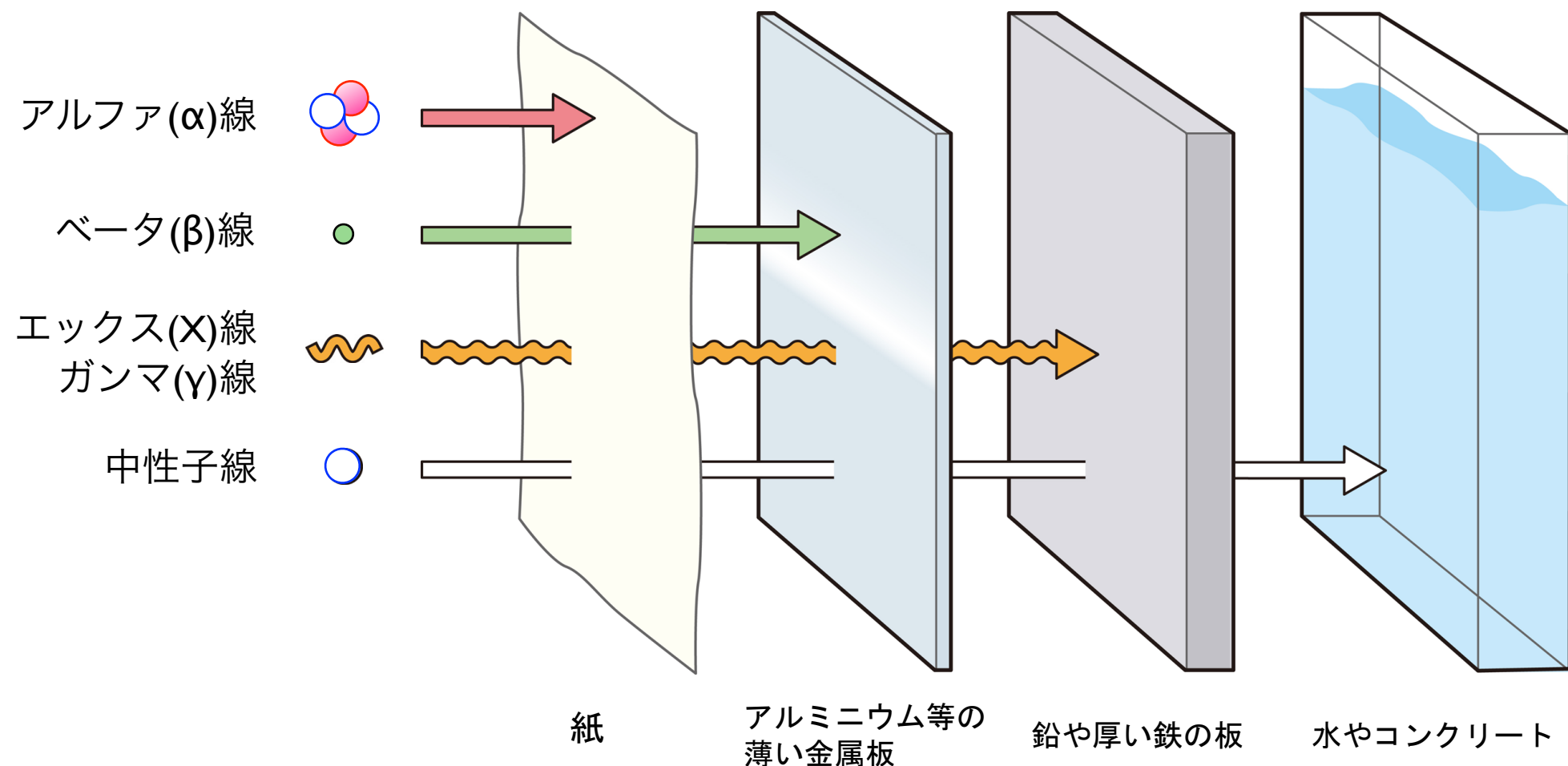
👉 **100 keV ~ MeV** (α, β, γ)

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

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



放射線の種類、透過力と遮蔽



* 日本原子力文化振興財団「原子力・エネルギー図面集」2012年版
第6章「放射線」6-1-6

阻止能

LET

(エネルギー損失) (線エネルギー付与)

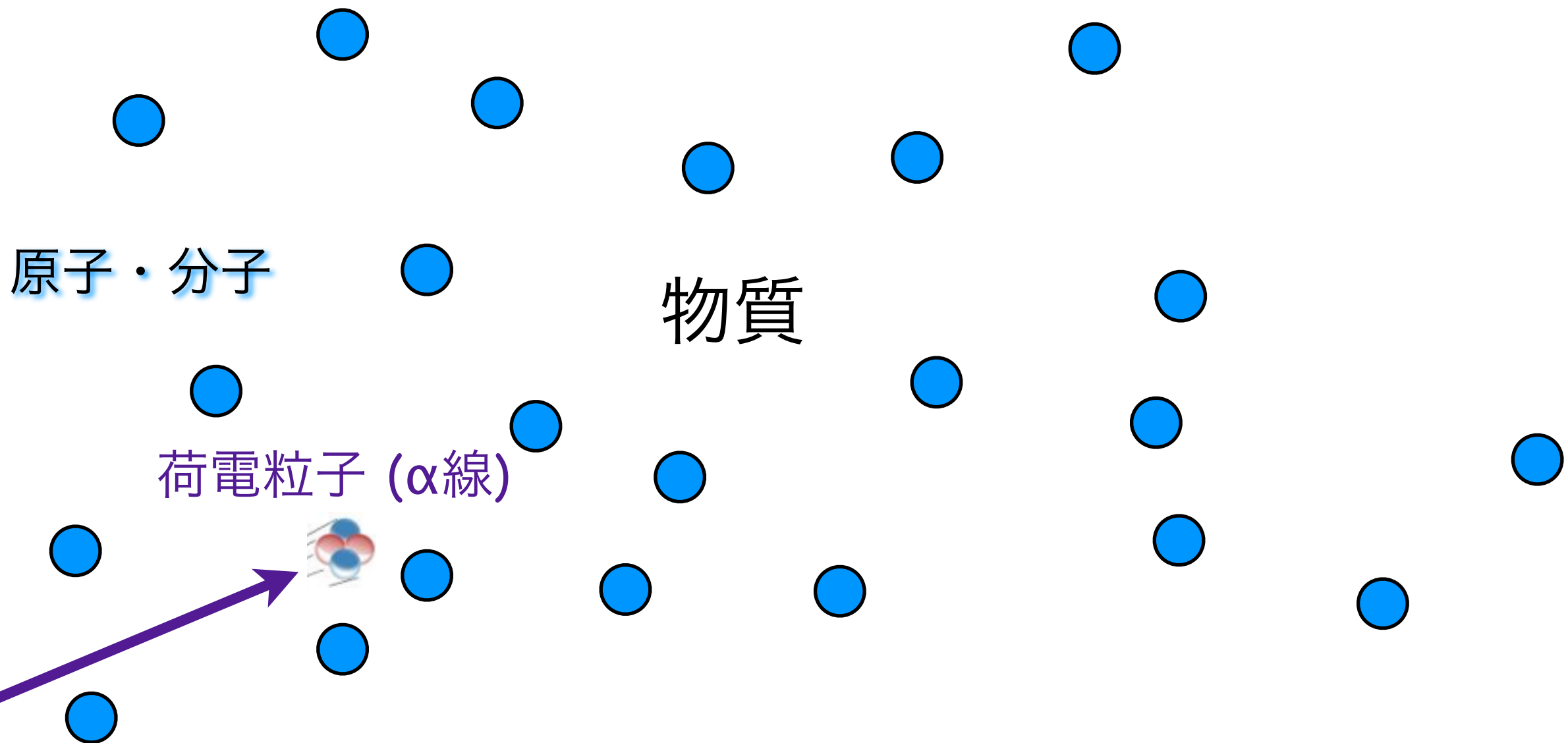
飛程

透過力が強い = なかなか反応しない

荷電放射線 (α, β) と物質との相互作用

荷電粒子：
クーロン力

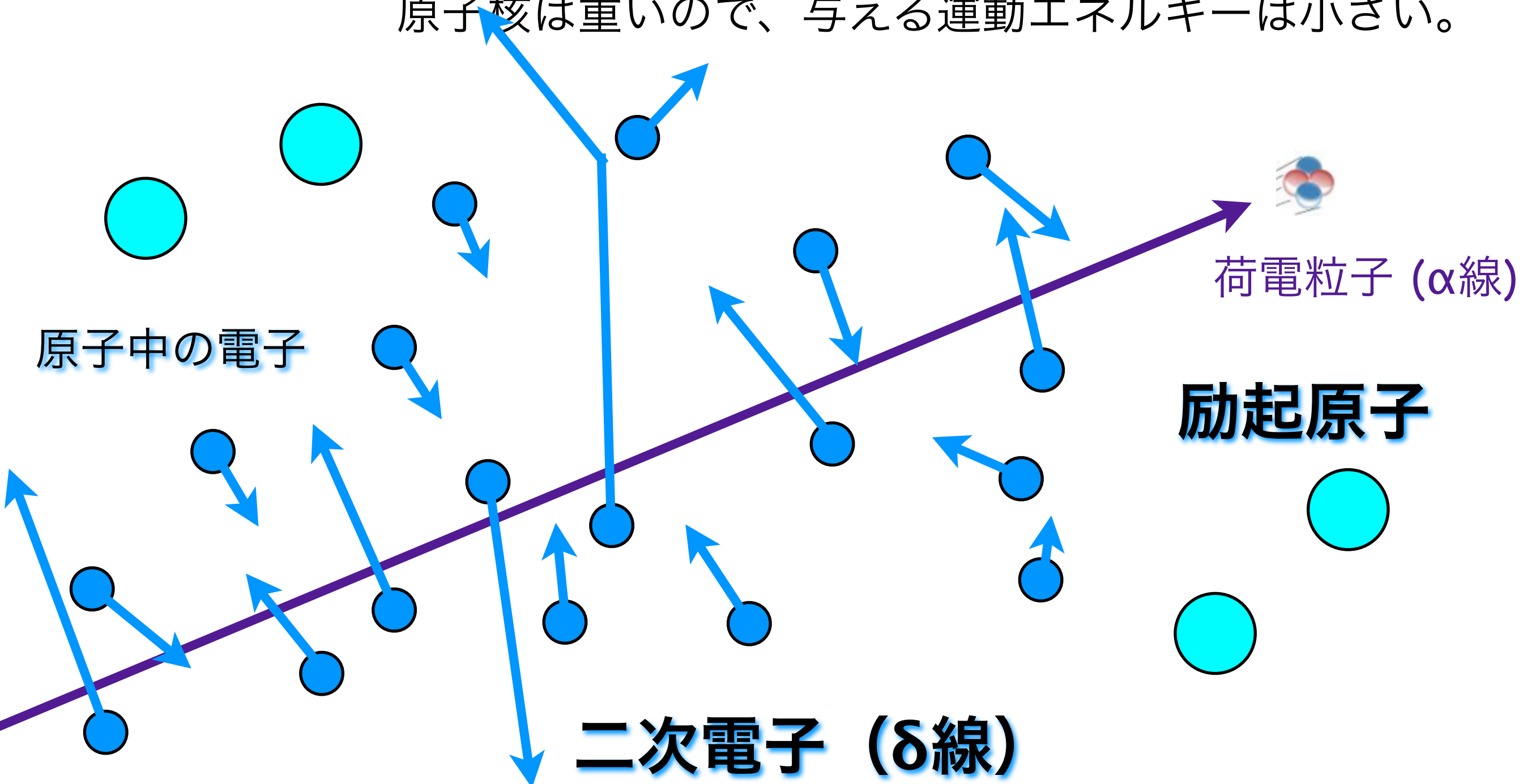
物質中の原子を電離・励起して電子に運動エネルギーを受け渡し、その分だけ減速される（電子衝突阻止能）。
原子核は重いので、与える運動エネルギーは小さい。



荷電放射線 (α, β) と物質との相互作用

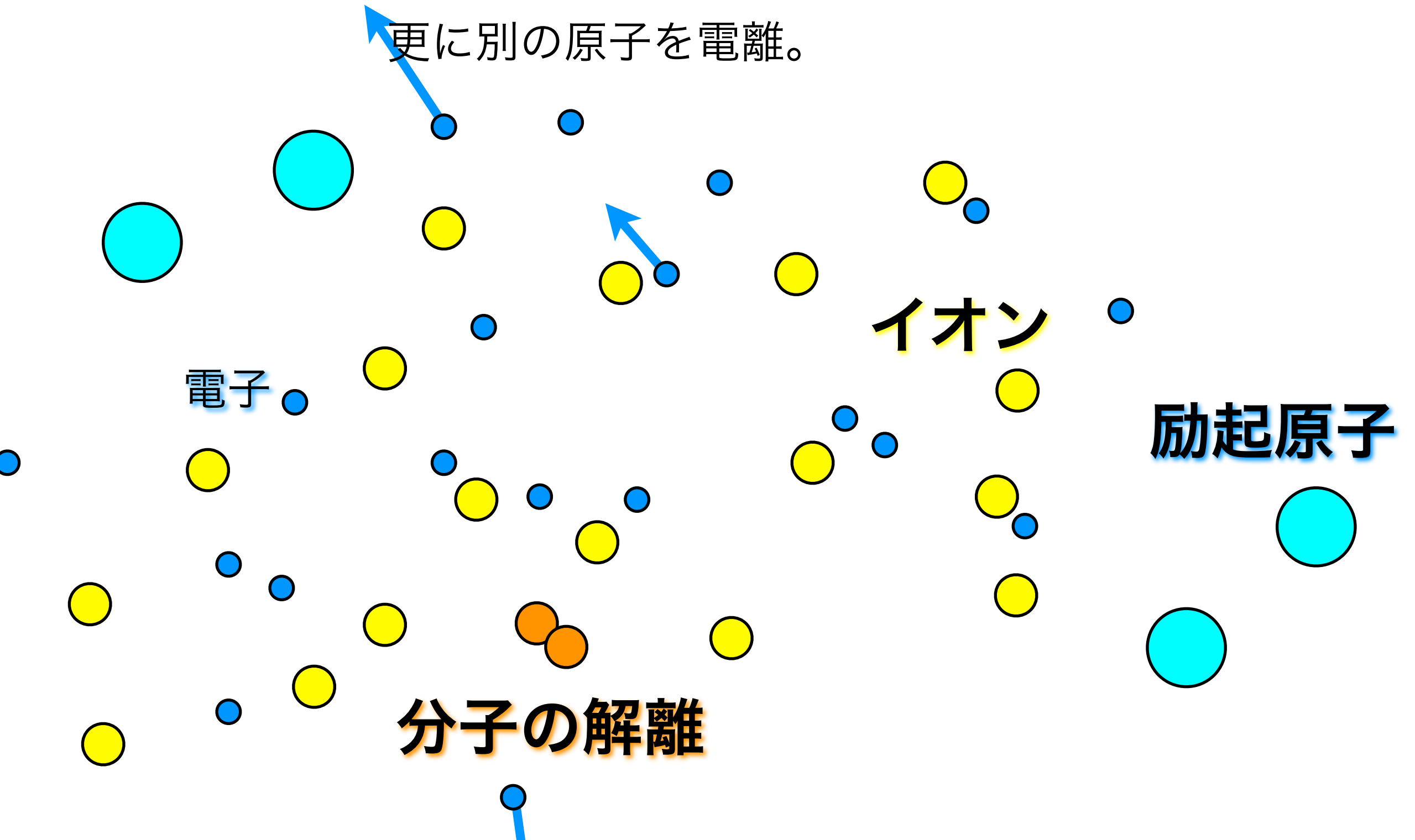
荷電粒子：
クーロン力

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。



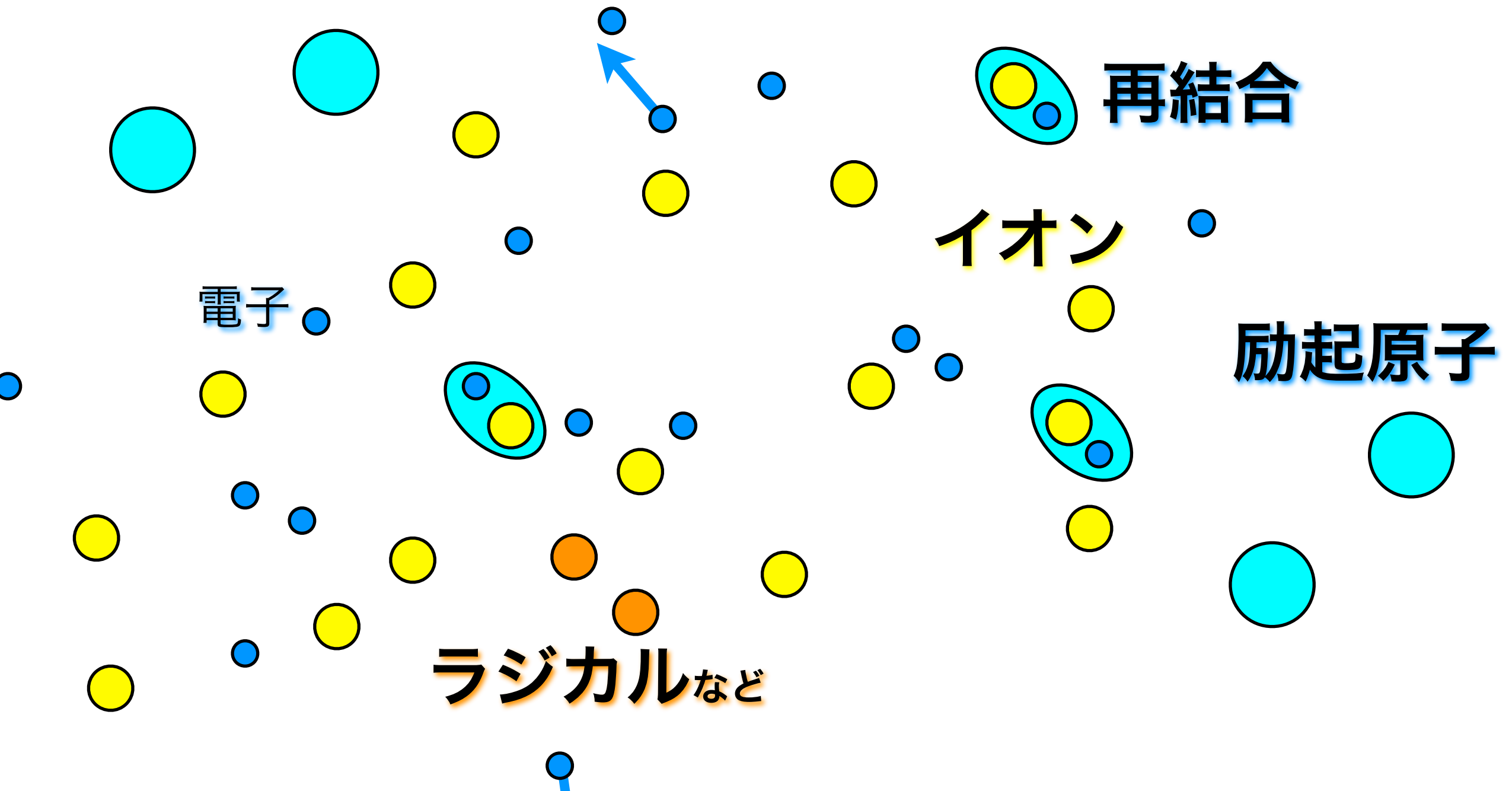
放射線通過後の軌跡近傍の様子

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。



放射線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。また再結合によりX線が発生。



放射線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

電子線

紫外線
可視光

イオン

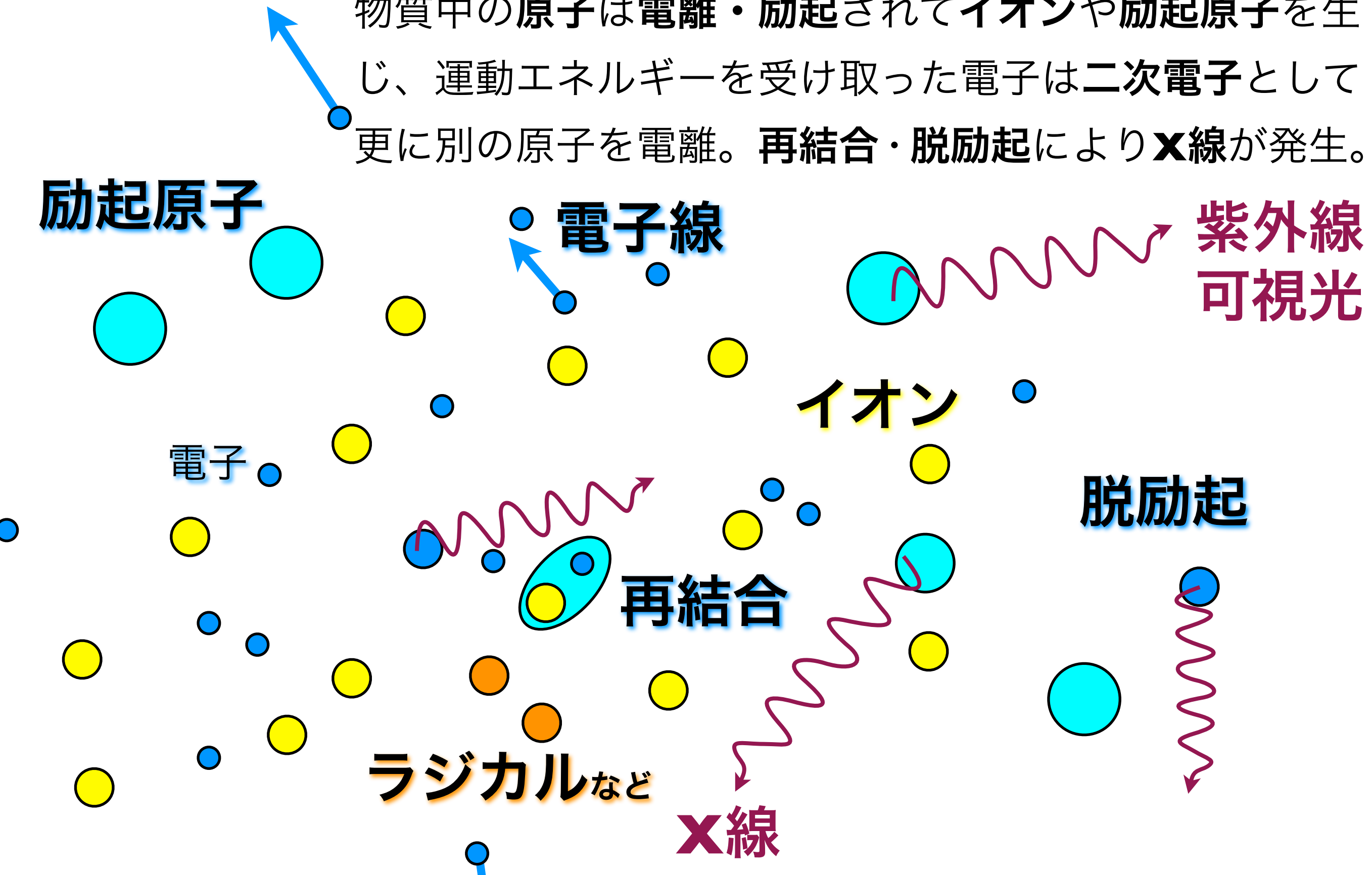
電子

脱励起

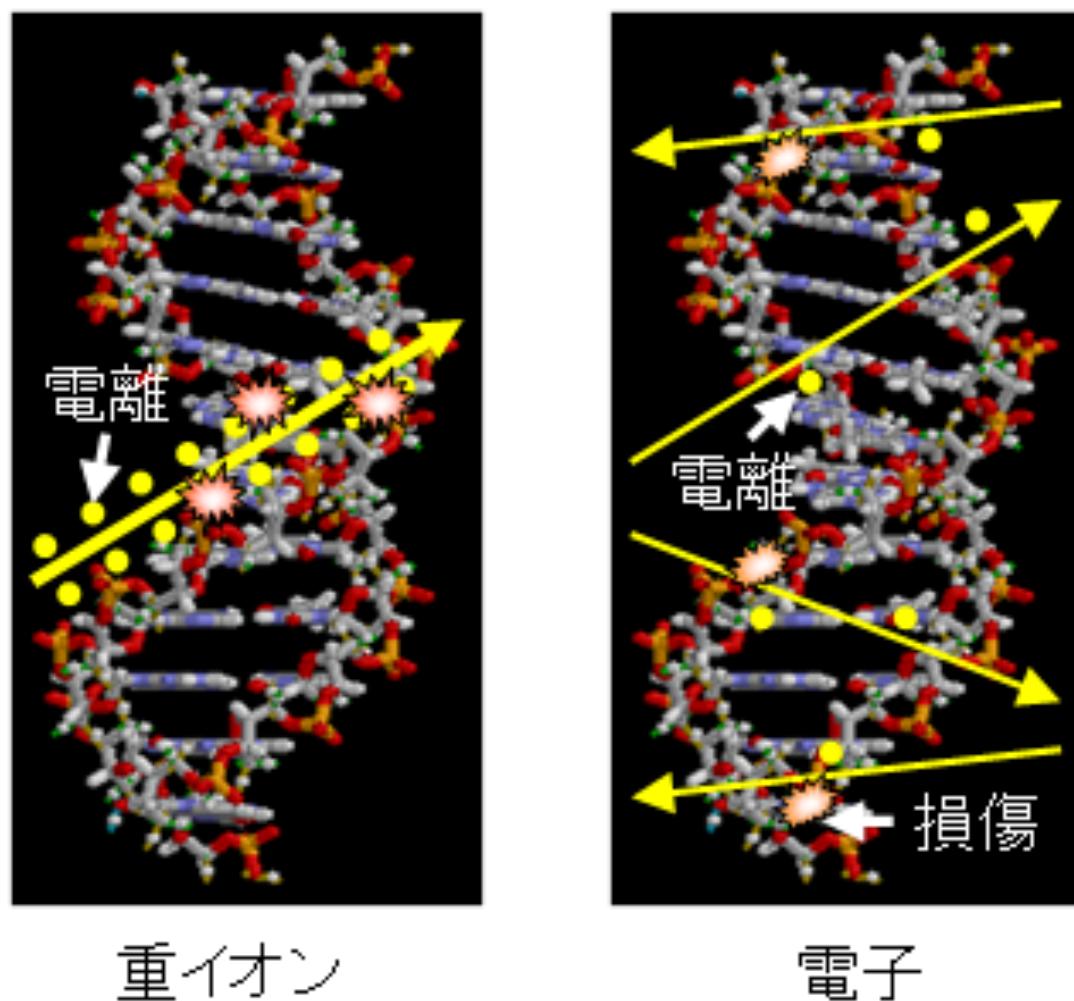
再結合

ラジカルなど

X線



放射線による DNA 損傷



提供：独立行政法人日本原子力研究開発機構

* 図I「重イオンと電子が引き起こすDNA損傷のイメージ」

<http://rphpwww.jaea.go.jp/radiation-protection/Heavy-Ion.htm>

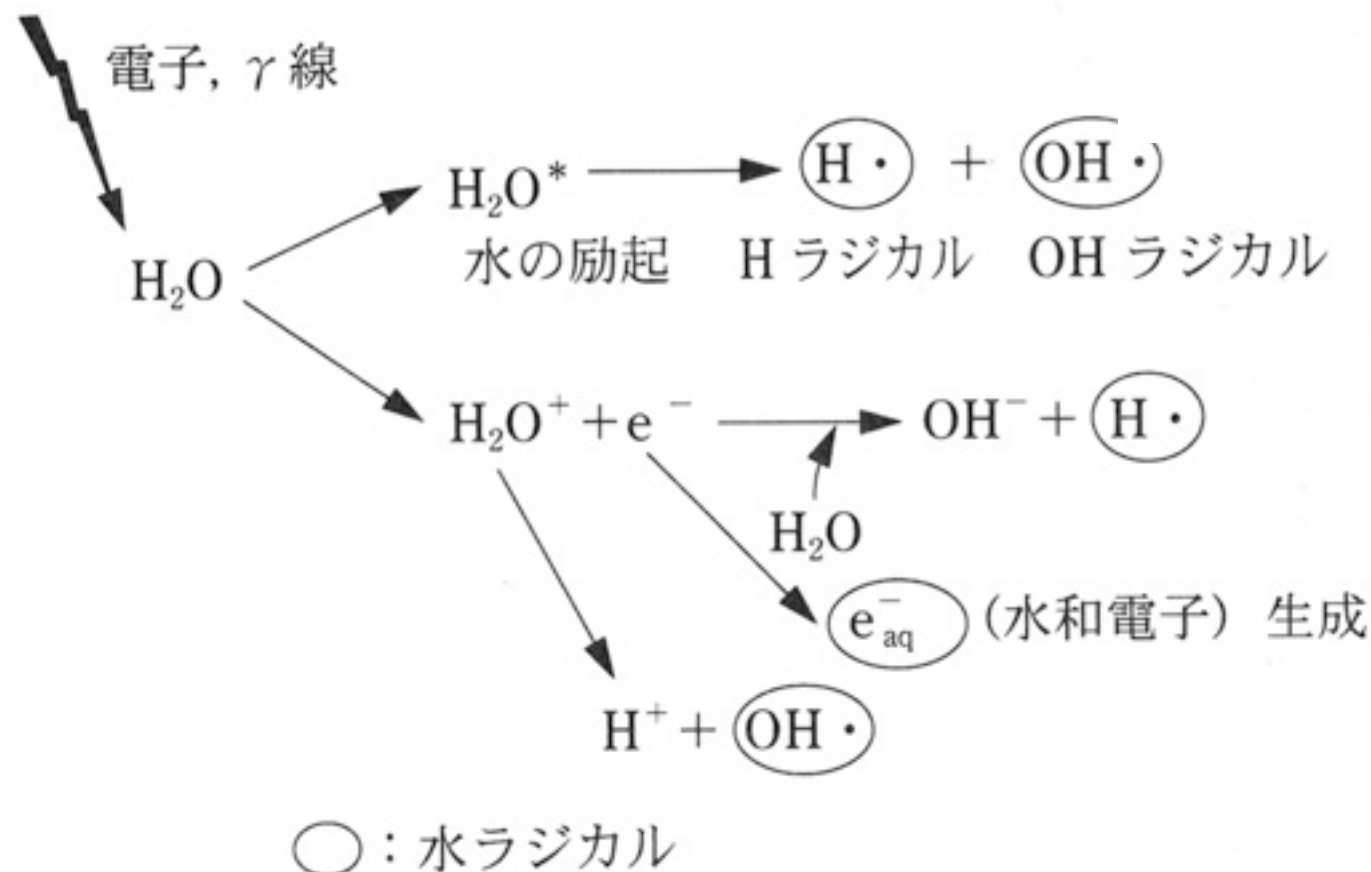


図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

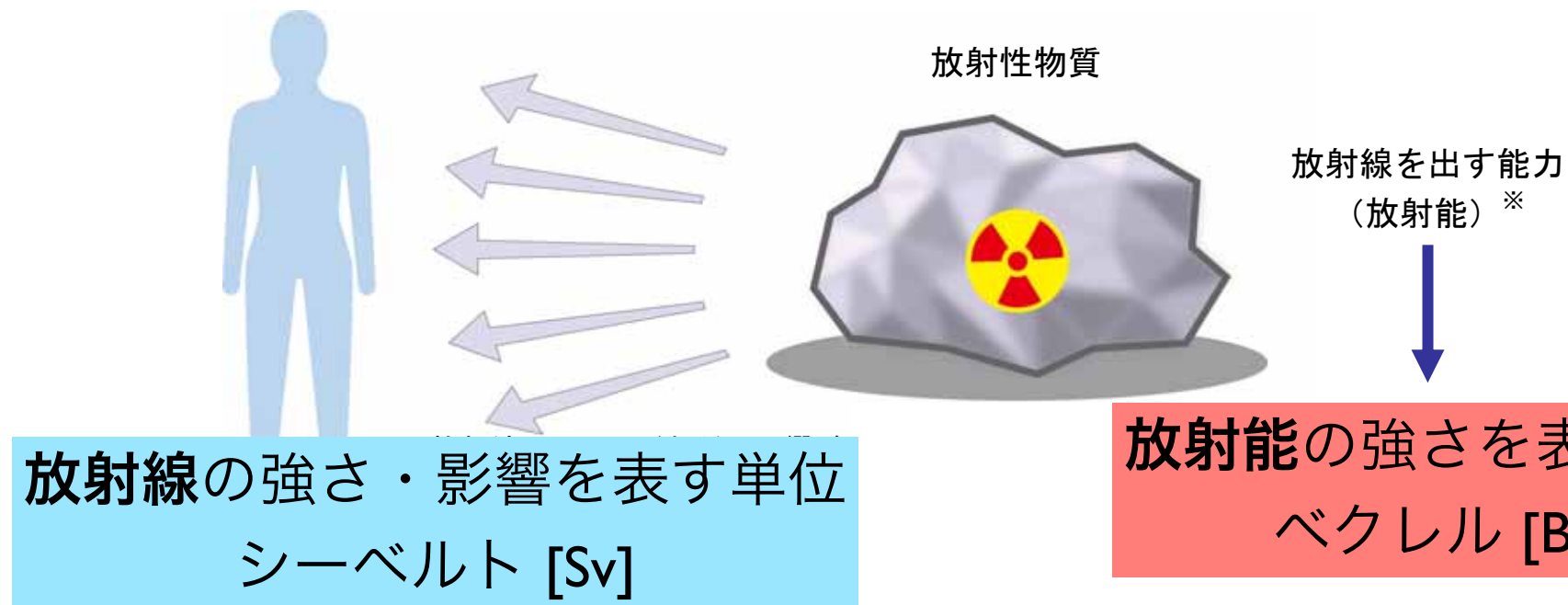
*

放射線取扱者教育研究会編『図解 放射性同位元素等 取扱者必携』オーム社、2007年
p.108 の図6-5

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



※ 日本原子力文化振興財団
「原子力・エネルギー図面集」2012年版
第6章「放射線」6-1-1

放射線量の単位

グレイ

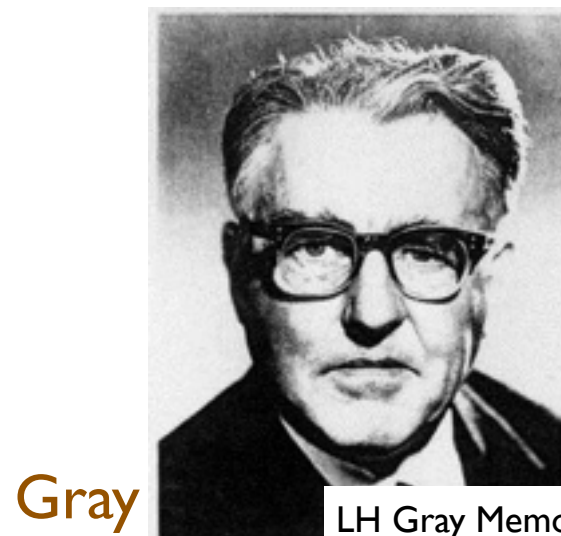
吸収線量 $D [J / kg] = [Gy]$

等価線量 $H_T [J / kg] = [Sv]$ シーベルト

実効線量 $E [J / kg] = [Sv]$ シーベルト

放射能の単位

放射能の強さ $[Bq]$
ベクレル



Gray

LH Gray Memorial Trust

※



Sievert



Becquerel

放射線量の単位

- 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

- 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~20MeV	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

(社)日本アイソトープ協会編『国際放射線防護委員会の1990年勧告』丸善、1991年、p.7 を元に作成。

赤字は ICRP 2007 のデータ。

- 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）

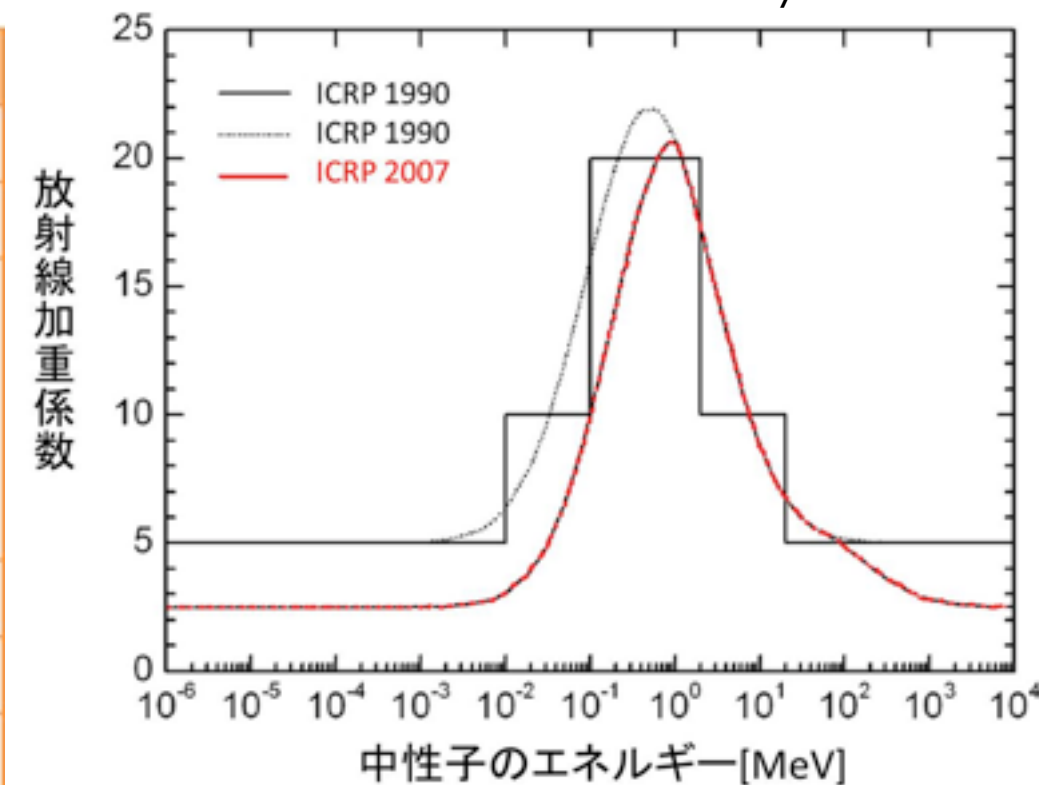
実効線量 $E [J / kg] = [Sv]$ シーベルト

Gray



*

LH Gray Memorial Trust

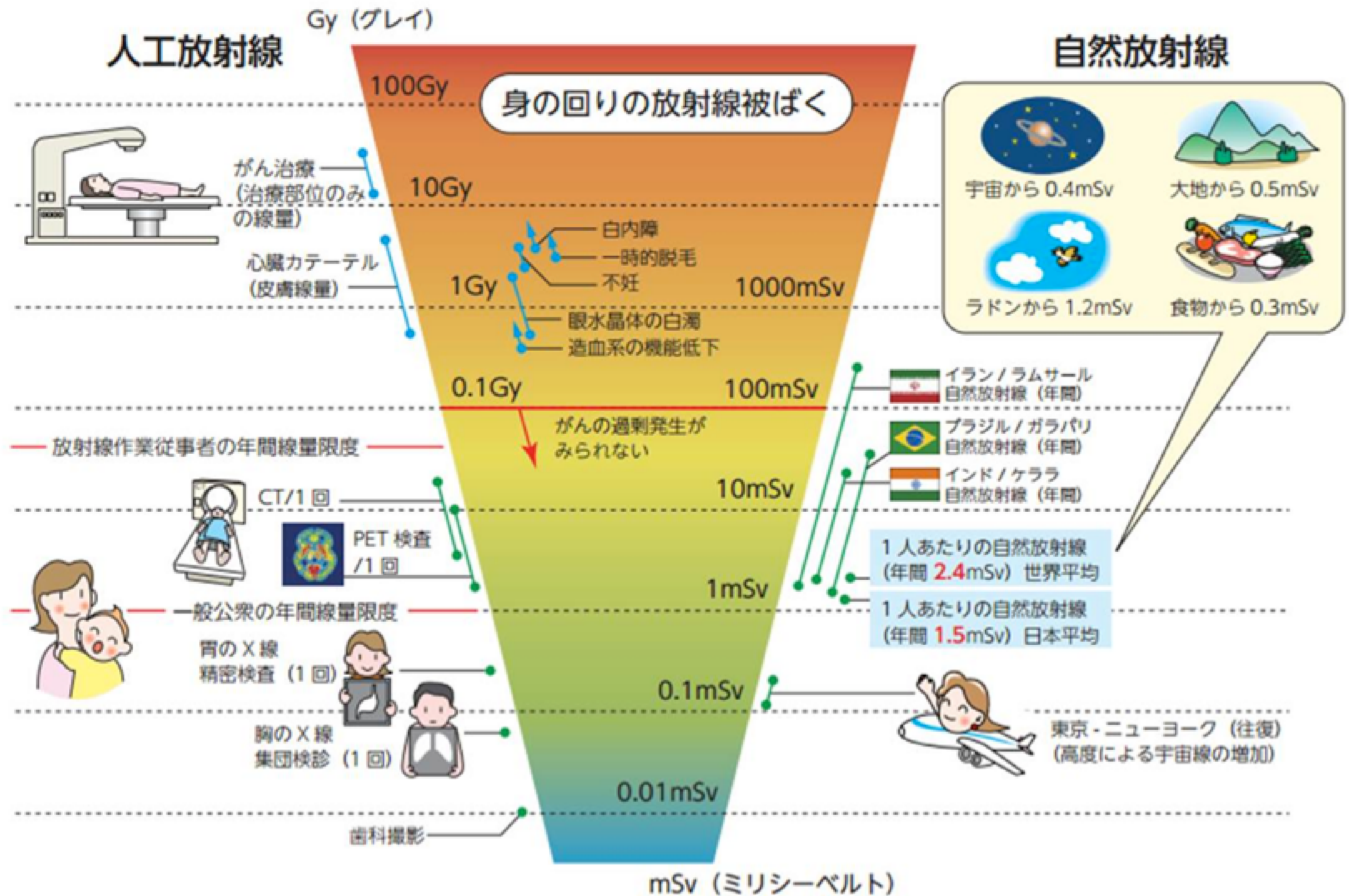


Sievert



身の周りの放射線

mSv (実効線量)



(注) 数値は有効数字などを考慮した概数
目盛 (点線) は対数表示のため、ひとつ上がる度に10倍上がる



日本原子力文化振興財団「原子力・エネルギー図面集」2012年版
第6章「放射線」6-2-1

全国の自然放射線量

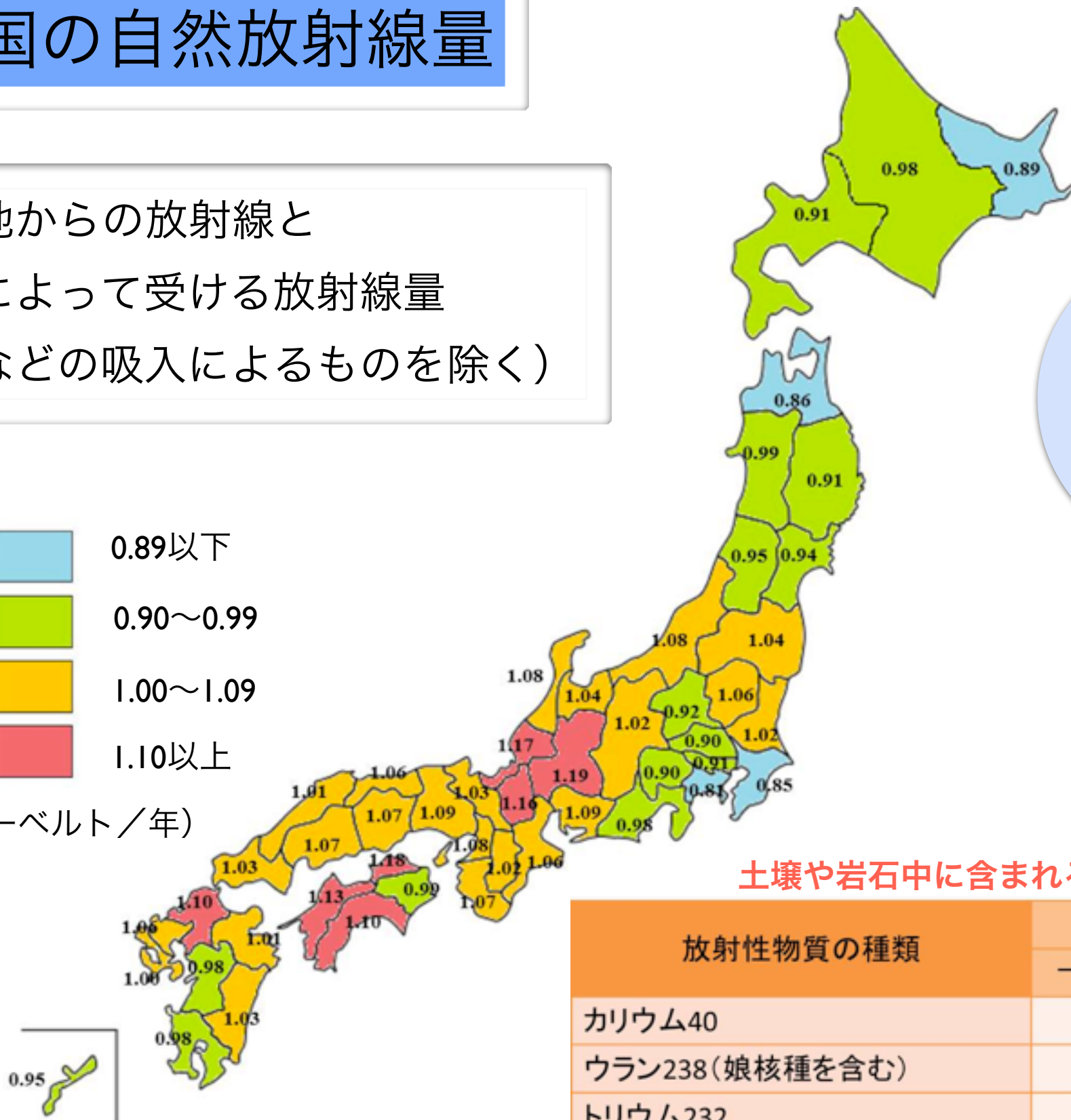
mSv／年

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



(ミリシーベルト／年)

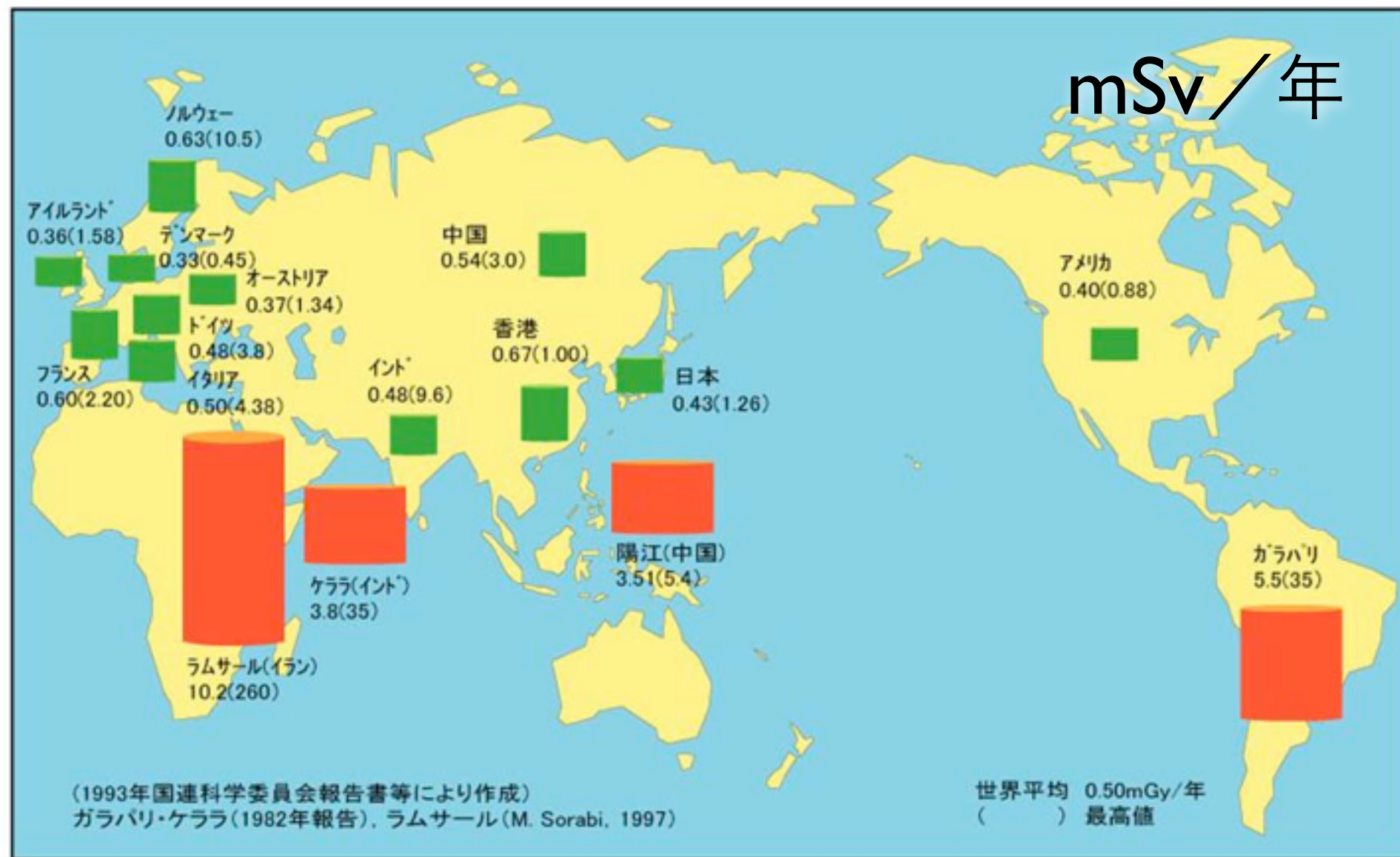


土壌や岩石中に含まれる天然の放射性物質

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

データ) 放射線医学総合研究所編『身近な放射線の知識』
丸善、2006年、p.41 図2-4を元に作成。

データ) 国連放射線影響科学委員会報告(1982)などを元に作成。



* 公益財団法人
人体質研究会
図1「世界各地の大地から受ける年間自然放射線量」
<http://www.taishitsu.or.jp/genshiryoku/gen-1/1-ko-shizen-2.html>



図2 陽江市・恩平県放射線環境調査実施地域

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

	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

* 近藤宗平「放射線の功罪-放射線の危険性に対する防御-」

『Isotope News』2007年4月号、14-19、p.15

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」

世界各地における年間積算線量の例（ラドンを除く）

国名	空間線量のみ (ミリシーベルト/年)	備考
オーストリア	0.47～0.56	
フランス	0.45～0.9 1.8～3.5	石灰岩 花こう岩と頁岩
日本	0.23～0.37 0.79～1.19	関東ローマ 花こう岩と地域
スウェーデン	0.7～1.0 0.6～1.2 0.5	ストックホルム街路 火成岩 粘土
イギリス	0.18～0.61 0.77～1.55	堆積岩または粘土 花こう岩地域
アメリカ	0.45～1.3	23州での測定
インド	1.31～28.14	ケララ地方
ブラジル	～12.0	ミナミ地方

データ) 主として放射線医学総合研究所編『放射線化学1971-6月』などを元にして作成。

*

公益財団法人
人体質研究会

図2「陽江市・恩平県放射線環境調査実施地域」

<http://www.taishitsu.or.jp/genshiryoku/gen-1/1-ko-shizen-2.html>

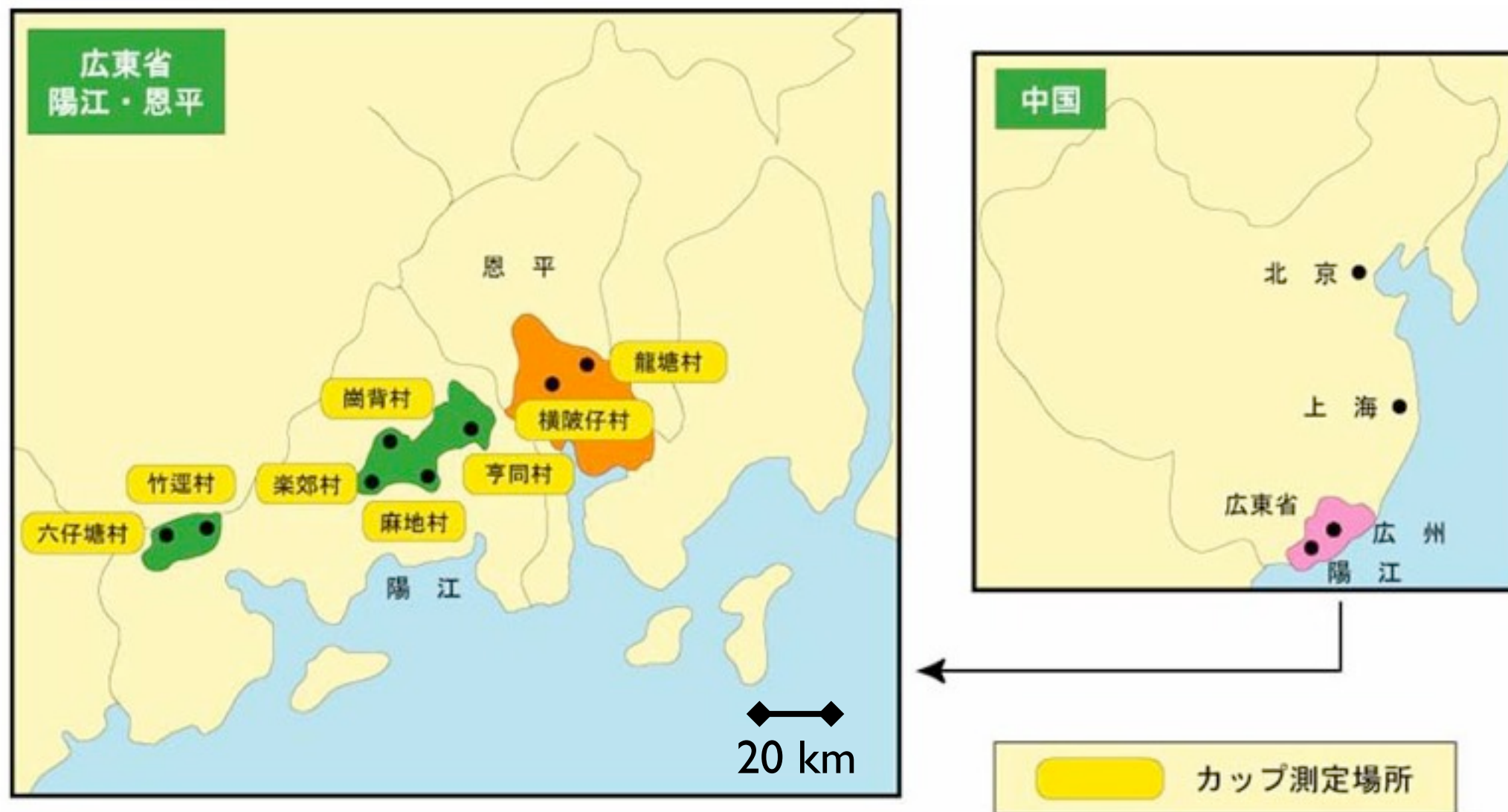


図2 陽江市・恩平県放射線環境調査実施地域

* 公益財団法人体質研究会
図2「陽江市・恩平県放射線環境調査実施地域」
<http://www.taishitsu.or.jp/genshiryoku/gen-1/1-ko-shizen-2.html>

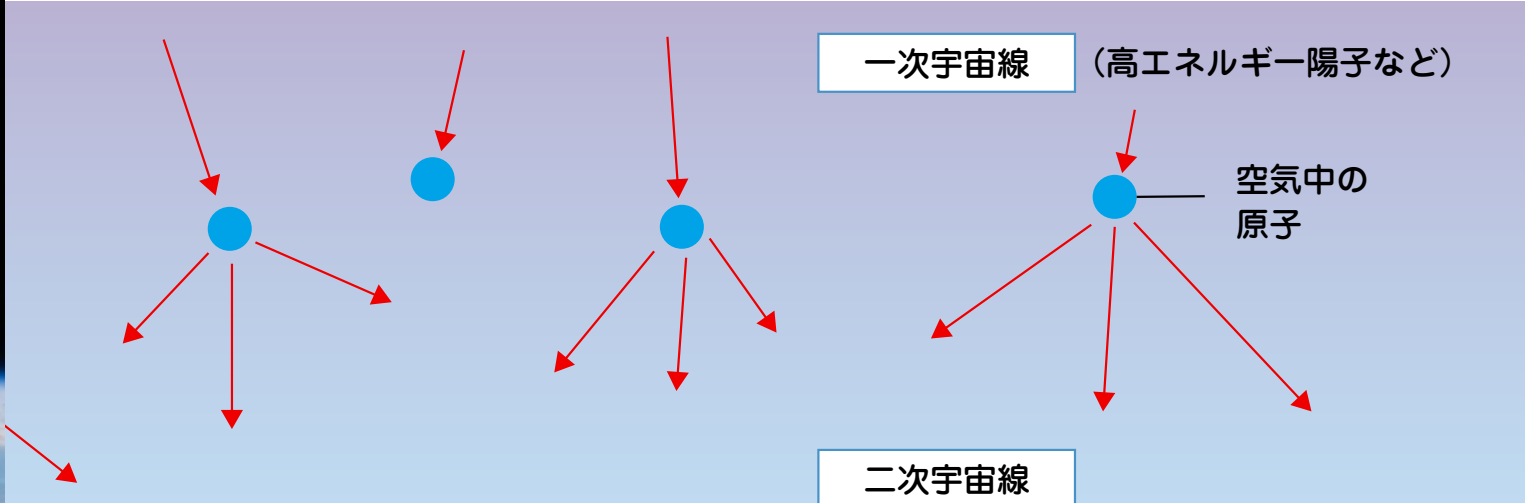
表1 高自然放射線地区と対照地区におけるがん死亡率の比較^{7,8)}

	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

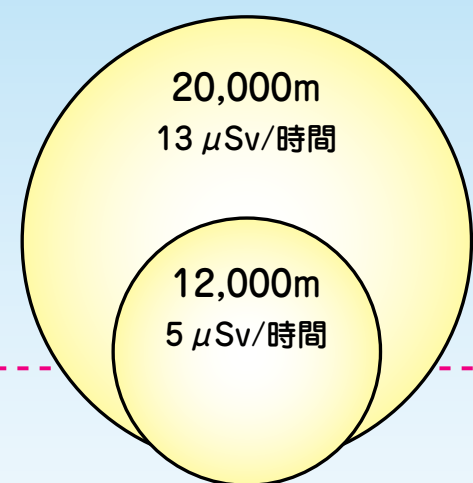
* 近藤宗平「放射線の功罪-放射線の危険性に対する防御-」『Isotope News』2007年4月号、14-19、
p.15 表1「高自然放射線地区と対照地区におけるがん死亡率の比較」



* NASA



※○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 $\mu\text{Sv}/\text{時間}$

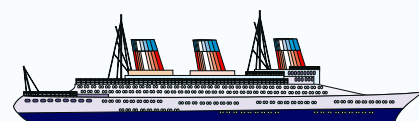
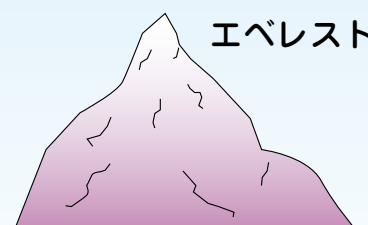
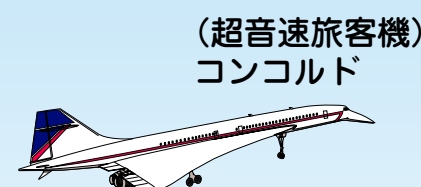
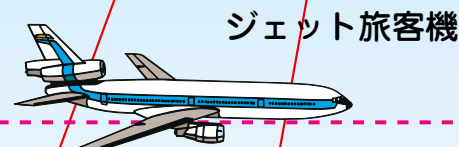
2,000m ○ 0.1 $\mu\text{Sv}/\text{時間}$

海面 ○ 0.03 $\mu\text{Sv}/\text{時間}$

100km

10km

1km



東京～NY 往復
200 μSv (max)

* CERN

宇宙線による年平均実効線量

地域 (高高度地域)	人口 (百万人)	高度 (m)	年実効線量(μSv)		
			電離成分	中性子	合計
ラバス(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

μSv = マイクロシーベルト

体内、食物中の自然放射性物質

体内の放射性物質の量

	Bq / kg	Bq (60 kg)
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）

Bq / kg

干しこんぶ	2,000	牛肉	100
干ししいたけ	700	牛乳	50
ポテトチップ	400	食パン	30
生わかめ	200	米	30
ほうれん草	200	ビール	10
魚	100		

^{40}K

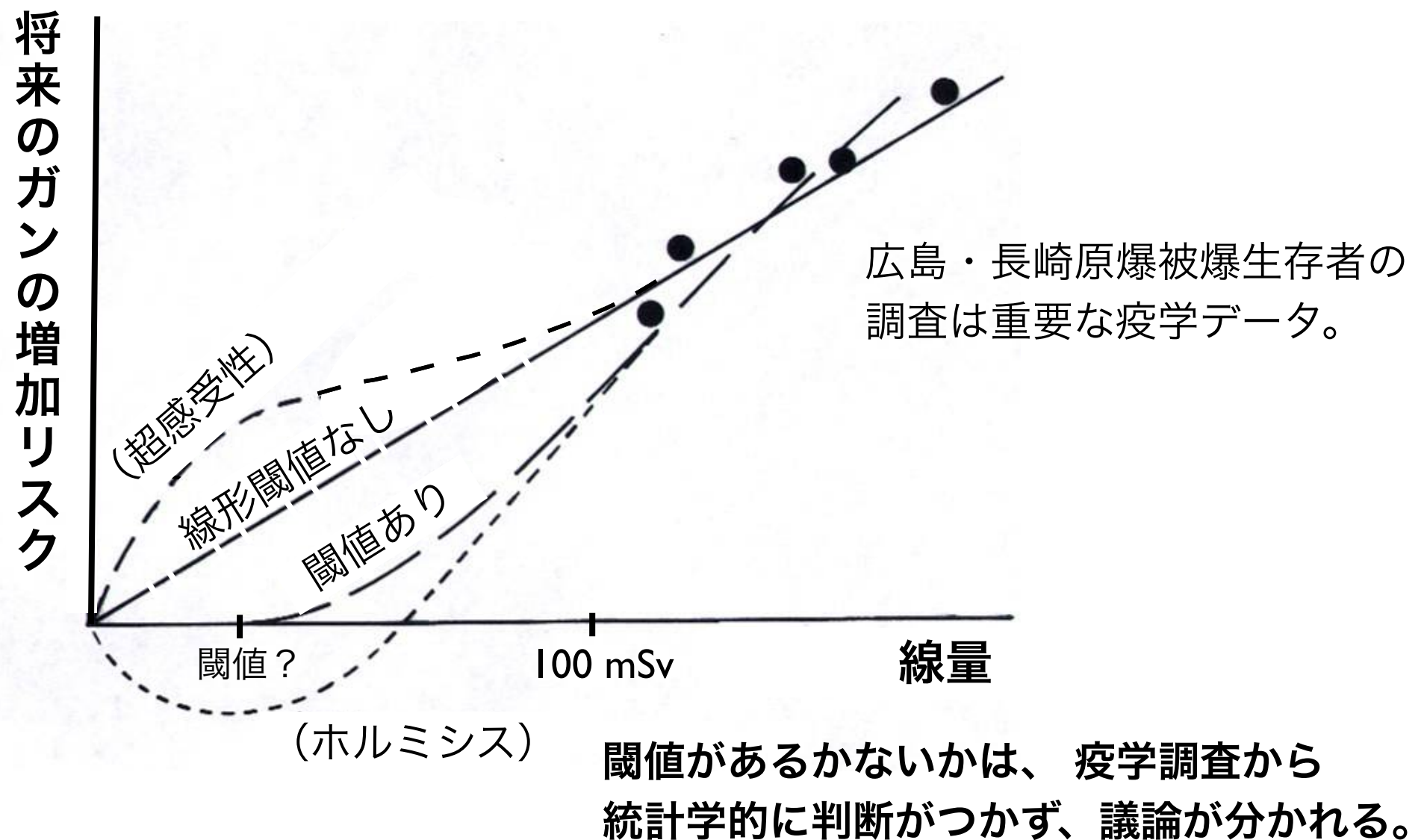
同位体比 0.012%

半減期 13億年

$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar} (\text{EC}\gamma) 11\%$

$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} (\beta^-) 89\%$

低線量におけるリスク評価



国際放射線防護委員会 (**ICRP**) は安全サイドに立って
LNT (Linear Non-Threshold = 線形閾値なし) 仮説を採用。

低線量、低線量率放射線被ばくに伴う
がん死亡の生涯リスク（ICRP 1990）

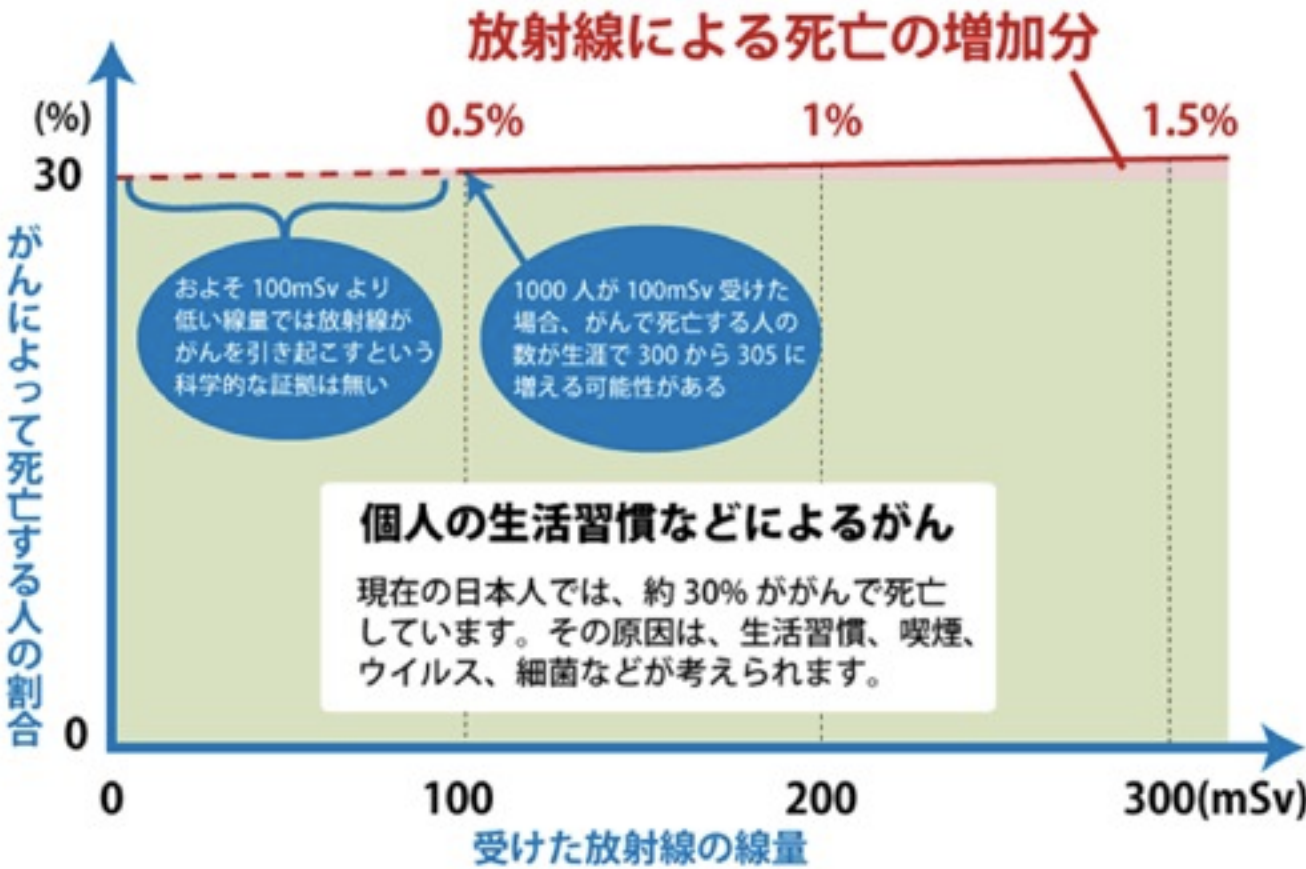
（10,000人当り、全年齢平均、1Sv当り過剰死亡数）

	ICRP 1977年勧告	ICRP 1990年勧告
赤色骨髄	20	50
骨表面	5	5
膀胱		30
乳房	25	20
結腸		85
肝臓		15
肺	20	85
食道		30
卵巣		10
皮膚		2
胃		110
甲状腺	5	8
その他	50	50
合計	125	500

（社）日本アイソトープ協会編『国際放射線防護委員会の1990年勧告』
丸善、1991年、p.157 を元に作成。

低線量・低線量率の被曝

放射線によるがん・白血病の増加



＊ 画像提供：（独）放射線医学総合研究所
「放射線被ばくに関する基礎知識 サマリー
版 第1号（Ver1.1）の公表について」
図「放射線によるがん・白血病の増加」
<http://www.nirs.go.jp/information/info.php?il3>

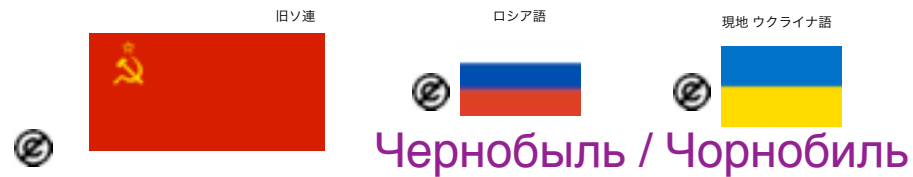
ICRP 1990 の勧告値

100 mSv の被曝で人口あたり 0.5% の増加（LNT仮説）

喫煙によるリスクより遥かに小さい。

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。

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

^{131}I (ヨウ素 ^{131}I) **total 2 EBq** ^{200 京ベクレル (2 x 10¹⁸ Bq)} !!

初期消火に当たった消防隊員らが
致死・亜致死量の被曝。28人死亡。

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

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

著作権の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました。

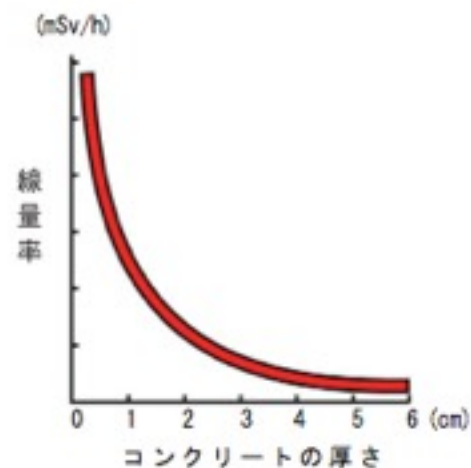
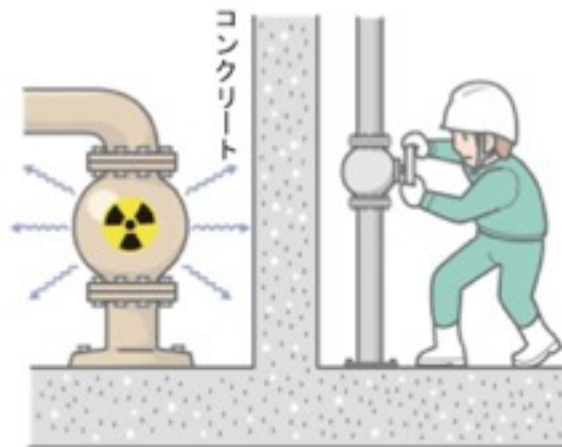
朝日新聞 2011年3月15日 (夕刊)

「<原子力発電所と事故の基本情報>チェル
ノブイリ原発事故による放射能汚染」

[http://www.asahi.com/photonews/gallery/
infographics/schema002.html](http://www.asahi.com/photonews/gallery/infographics/schema002.html)

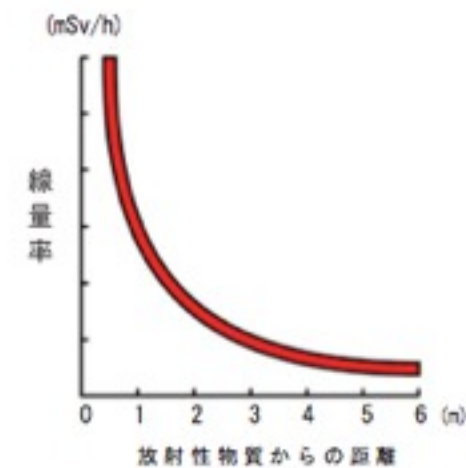
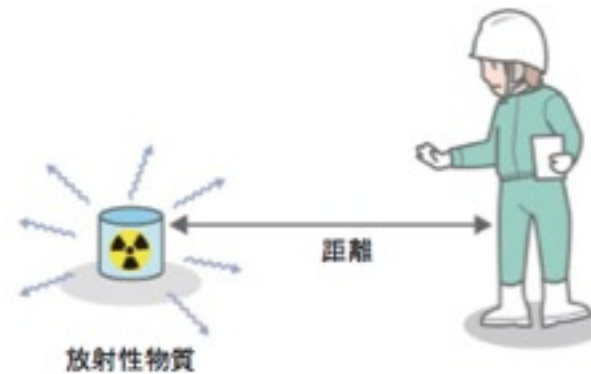
放射線防護

1. 遮へいによる防護



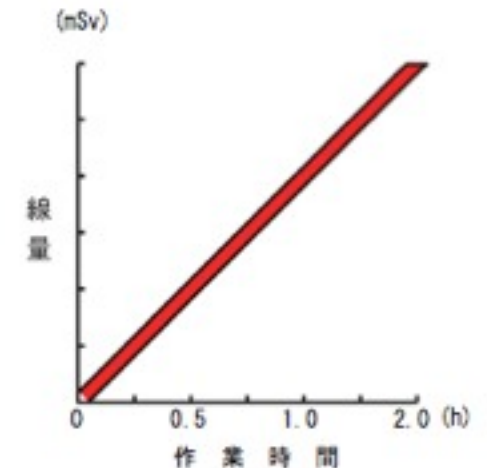
2. 距離による防護

(線量率) = 距離の二乗に反比例



3. 時間による防護

(線量) = (作業場所の線量率) × (作業時間)



日本原子力文化振興財団
「原子力・エネルギー図面集」2012年版
第6章「放射線」6-3-1

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

(ALARA の原則 = As Low As Reasonably Achievable)

個人被曝の線量限度

職業被曝（作業者^{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 皮膚 妊娠中の女子の 腹部表面	150 mSv / 年 500 mSv / 年 2 mSv / 年

公衆被曝（一般公衆）

実効線量	1 mSv / 年
等価線量 水晶体 皮膚	— —

国内法令による防護基準

線量限度の一覧表（作業者）

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

1) 被ばく部位に関係なく、深さ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。

2) 1989年のブライトン声明で300mSv/年から150mSv/年に下げた。
3) 1978年のストックホルム声明で追加された。

年リスク千分の1

線量限度の一覧表（一般公衆）

	1990 勧告	1977 勧告
実効線量	1 mSv/年	5 mSv/年 ¹⁾ , 1 mSv/年（生涯の平均）
水晶体等価線量	15 mSv/年	50 mSv/年
皮膚等価線量	50 mSv/年 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5mSv/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。

3) 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。

ICRP 勧告

*

草間朋子編『ICRP1990年勧告—その要点と考え方—』日刊工業新聞社、1991年、p.50。

表4-1「1990年勧告の線量限度（作業者）」

表4-2「1990年勧告の線量限度（一般公衆）」

放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

(データ：国立がん研究センター)

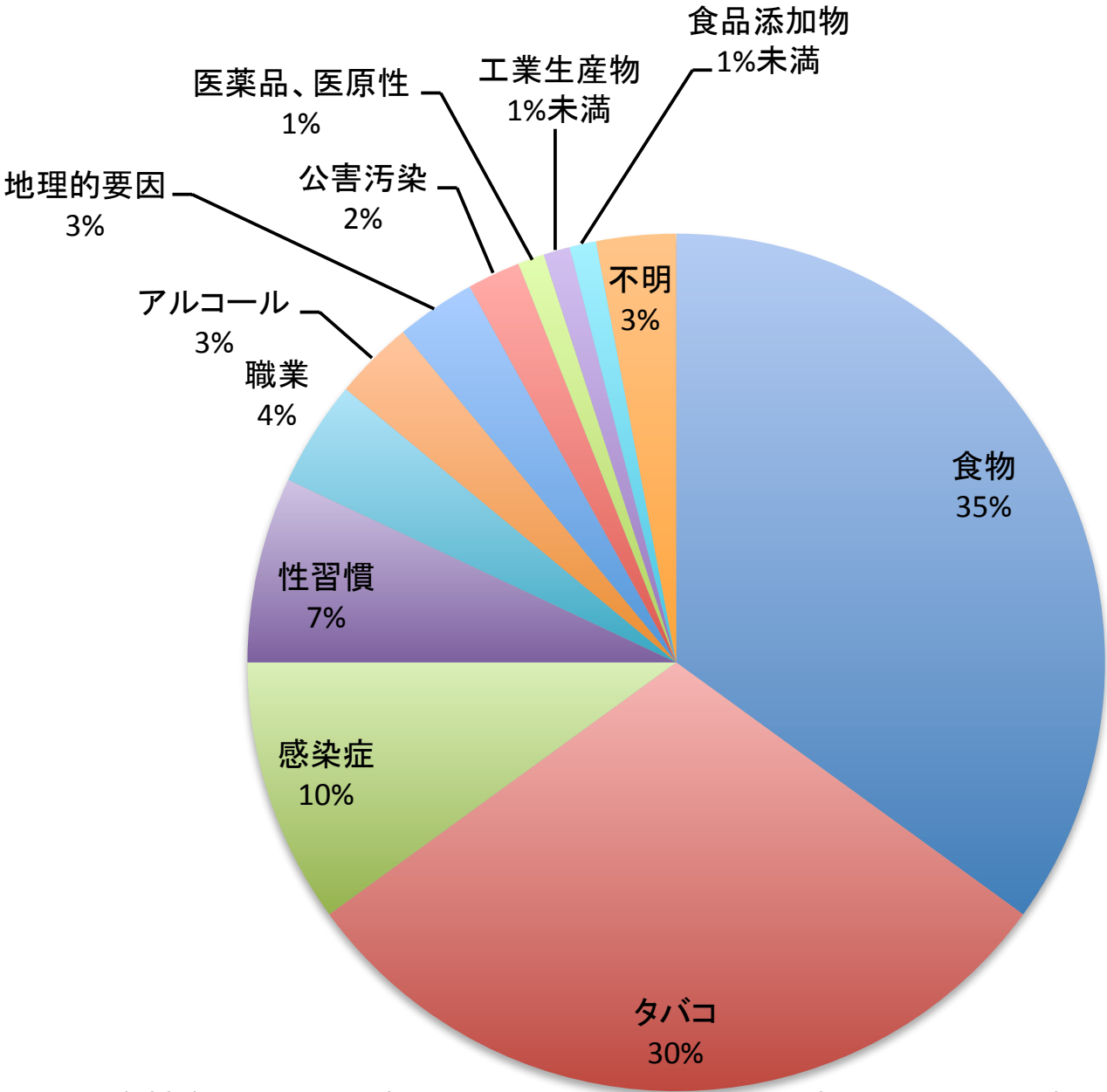
受動喫煙の女性	1.02～ 1.03倍
野菜不足	1.06倍
100～200ミリシーベルトを浴 びる	1.08倍
塩分の取りすぎ	1.11～ 1.15倍
運動不足	1.15～ 1.19倍
200～500ミリシーベルトを浴 びる	1.19倍
肥満	1.22倍
500～1000ミリシーベルトを 浴びる	1.4倍
毎日2合以上の飲酒	1.4倍
喫煙	1.6倍
毎日3合以上の飲酒	
1000～2000ミリシーベルトを 浴びる	1.8倍

※網かけは放射線
(注) 相対リスクは、例えば喫煙者と非喫煙者のがんの頻度を比較した数字

表の値は短時間での被曝の場合。

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

ヒトのがんの原因と関連のある因子



Doll R. and Peto R.(1981) The causes of cancer: quantitative estimates of avoidable risks of cancer in the United States today. *Journal of the National Cancer Institute* 66(6):1191-1308. より作成。

がん死中にしめる各因子の割合 (%)

「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)

(寺田寅彦『天災と国防』講談社、2011年、p.86より引用。)

Fine.

Grazie per vostra attenzione.

Merci pour 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