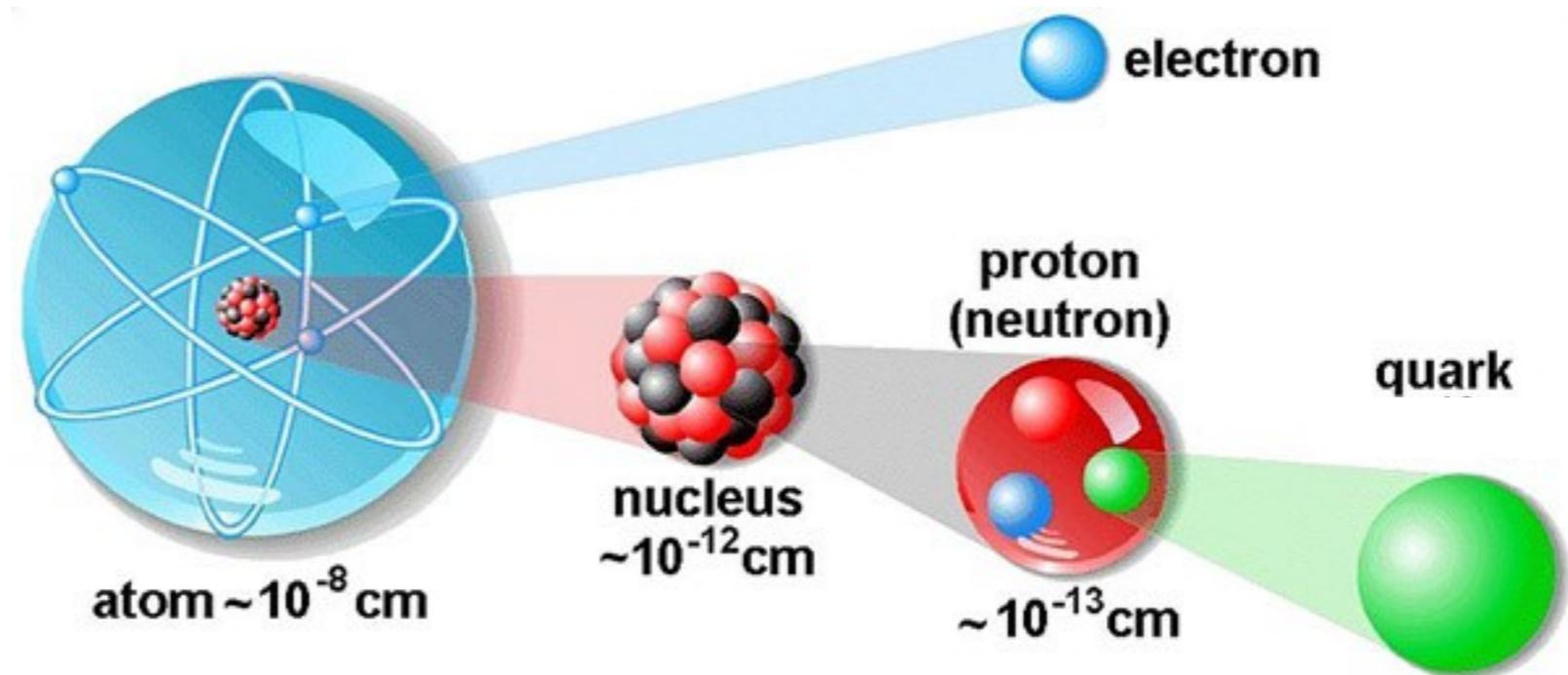


# 怖がらないための 放射線の基礎知識



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)

# 怖がらないための 放射線の基礎知識

- 放射性物質・放射能と、放射線との区別
- 身の周りの自然放射線はどこからどの程度受けているのか
- 放射線が停止するまでに物質に与える作用
- 放射線の生体への影響（細胞レベル、生体レベル）
- 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

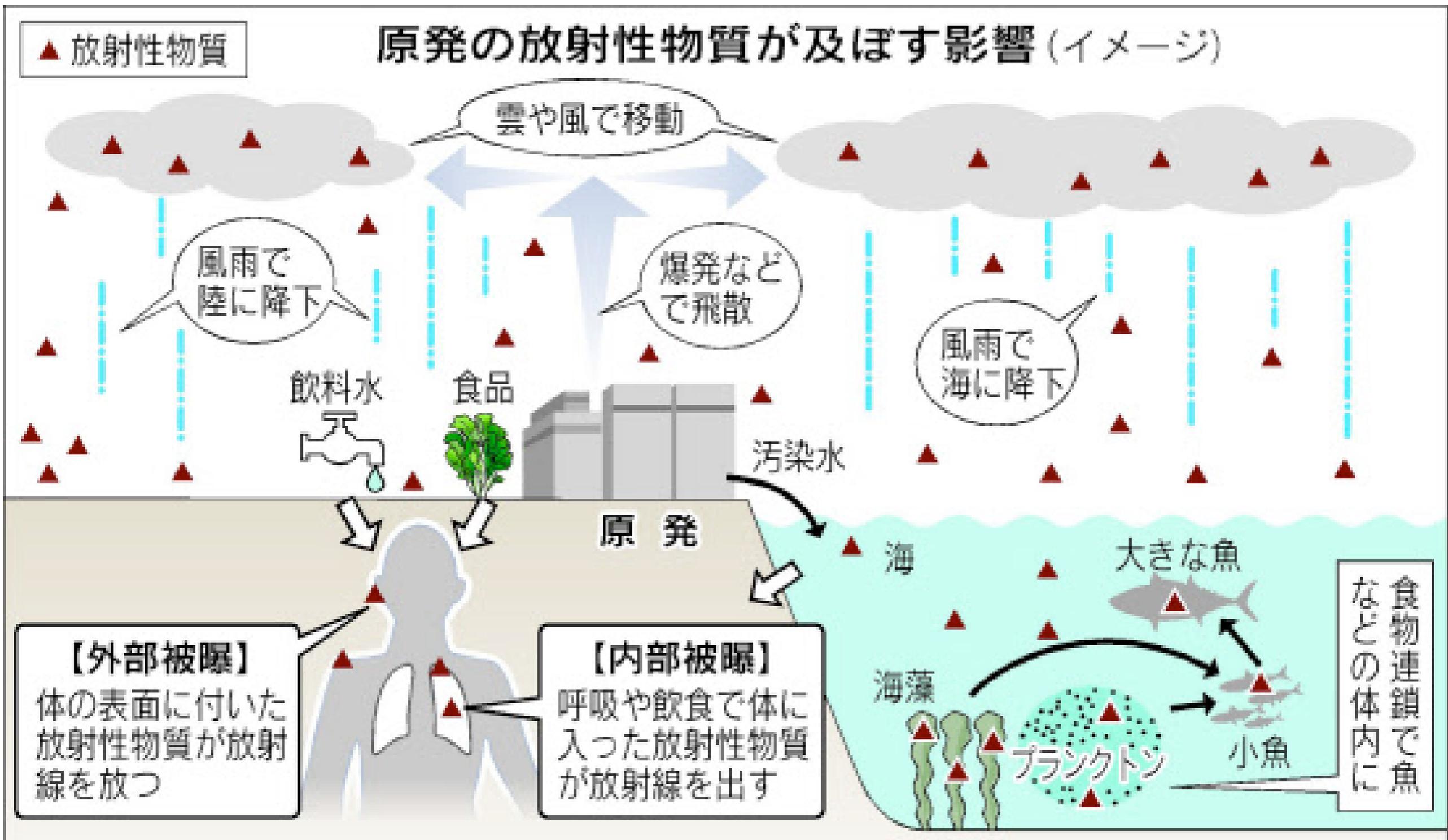


福島第1原発事故を受け、福島県から千葉県船橋市に避難した小学生の兄弟が、地元の子どもに「どこから来たの」と話しかけられた。兄弟が「福島」と答えると地元の子どもは「放射線がうつる」と言い、数人が一斉に逃げ出したという。

**放射線はうつらない**

**放射能と放射線を混同しない**

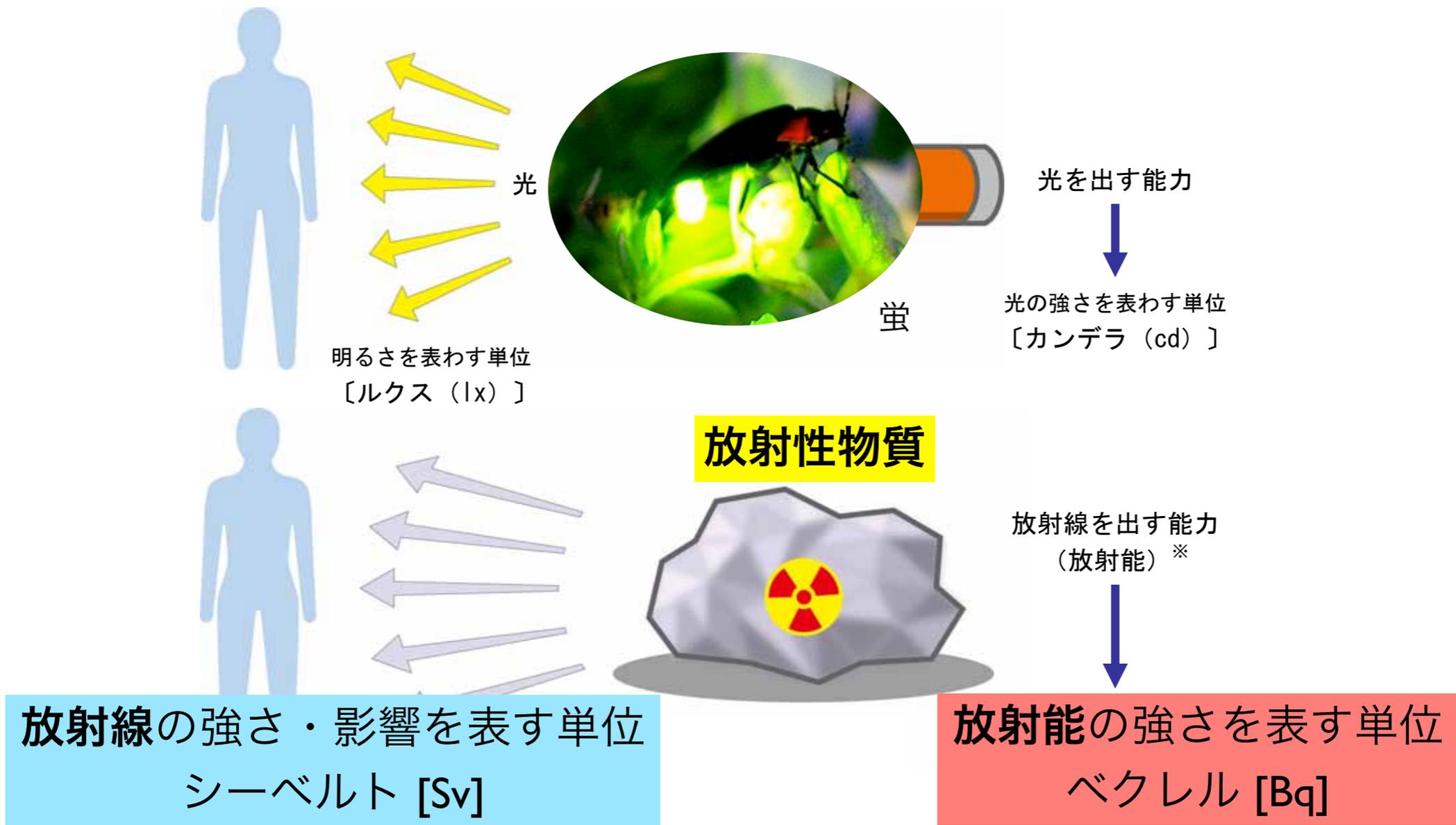
**放射線に対する正しい知識をもって  
「正しく怖がる」ことが必要。**



放射性物質が一部東京まで飛来。  
放射線が直接東京に届いたのではない。



# 放射能と放射線



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

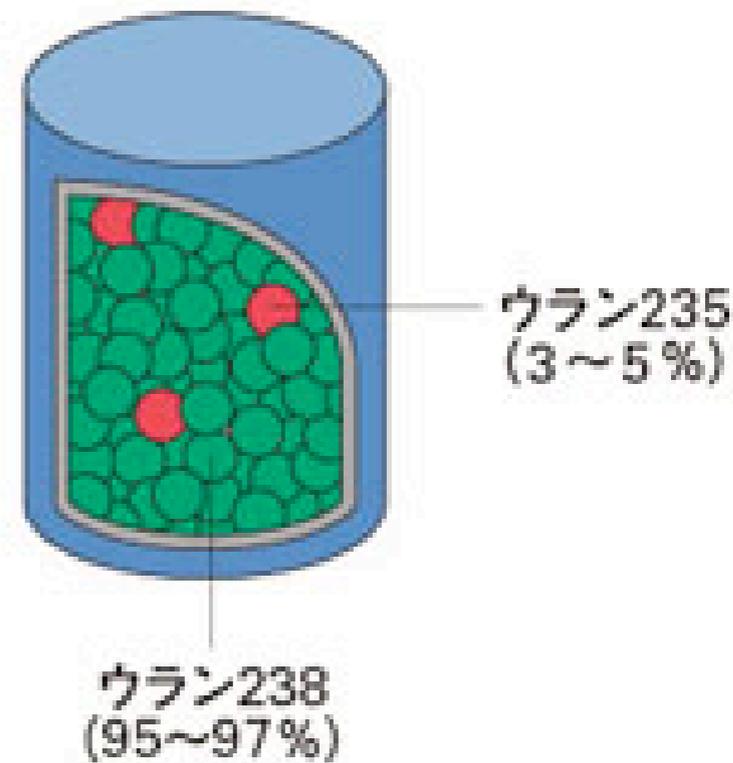
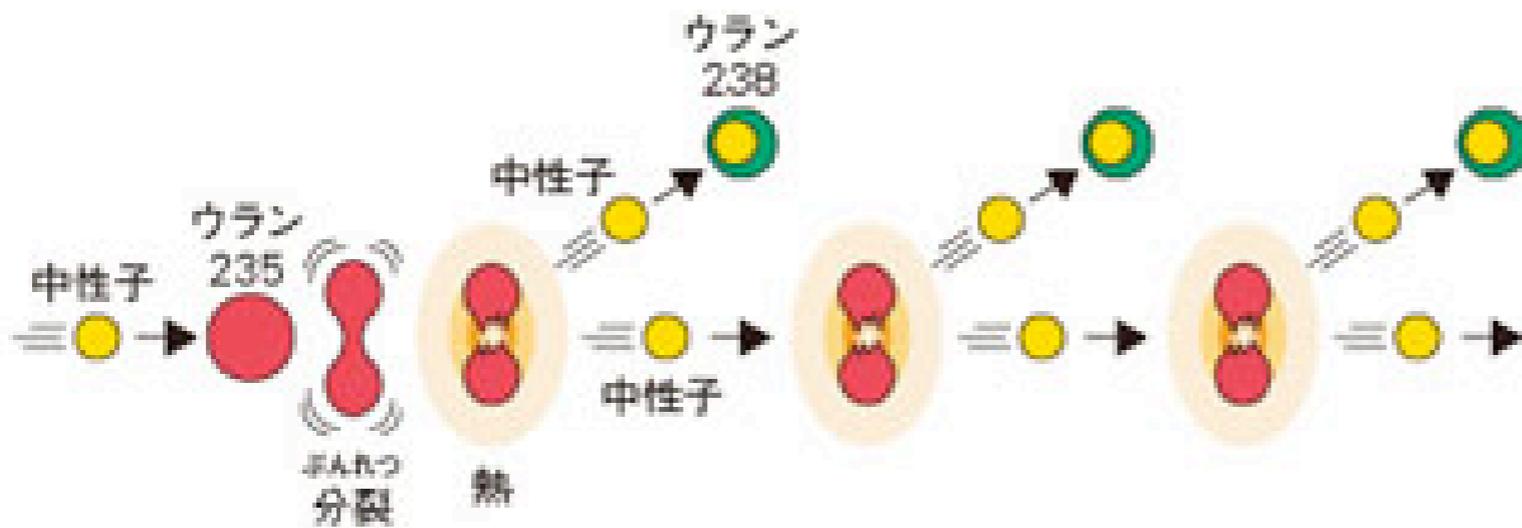
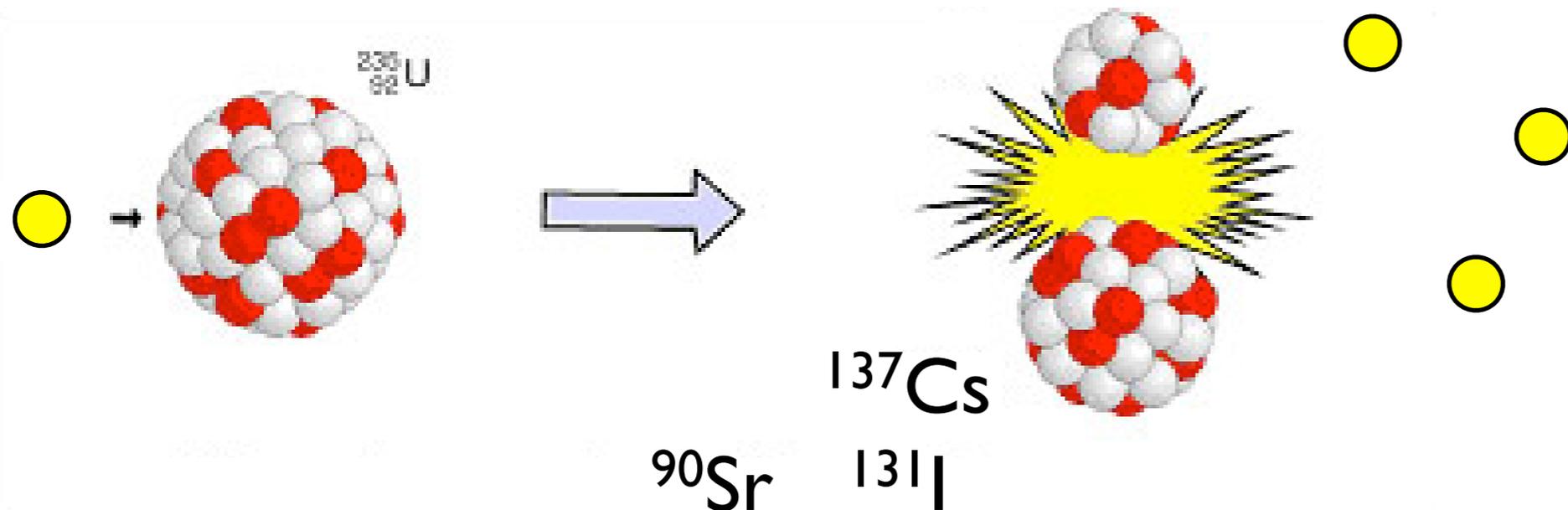
Becquerel

decay/disintegration  
per second

Curie



# 原子核分裂反応

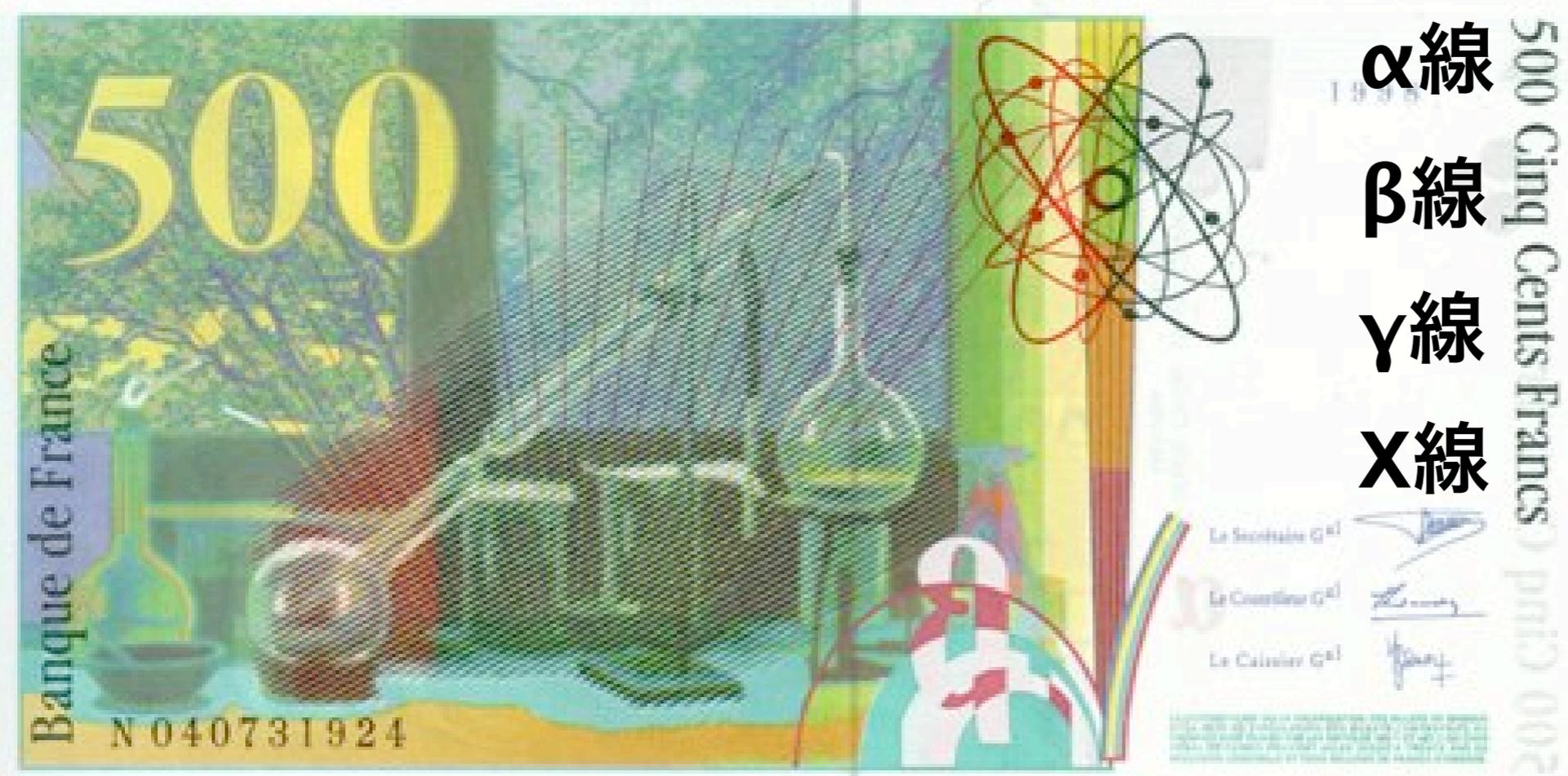


中性子 + ウラン 235 / 238

放射線とは？



Billet de 500 Francs Français en circulation: 1993–1999



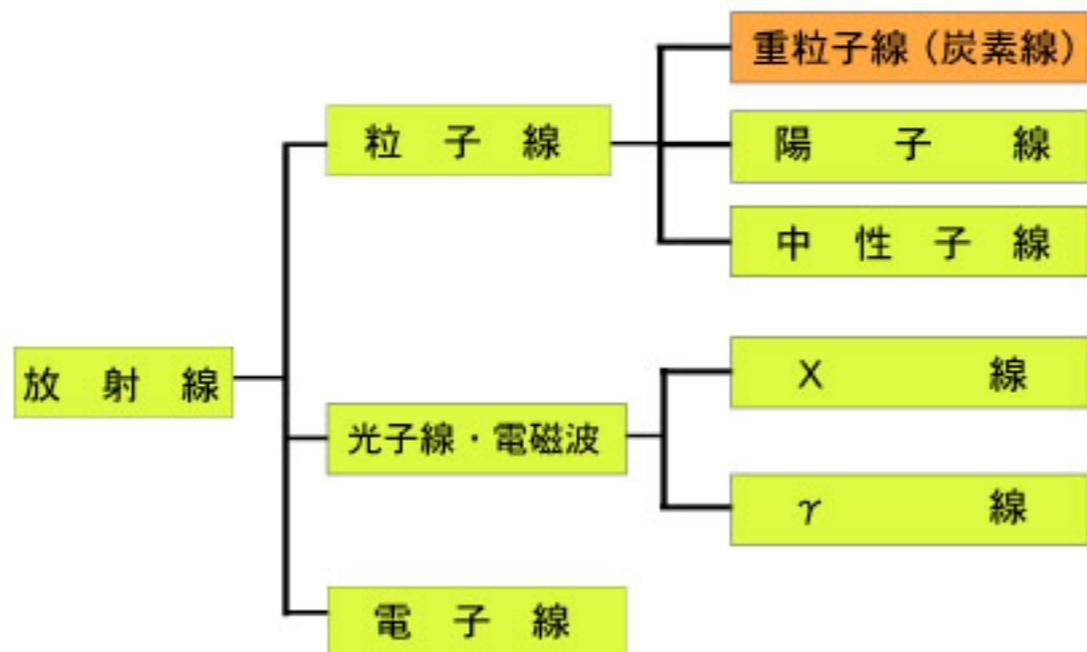
- $\alpha$ 線    ヘリウム原子核
- $\beta$ 線    高速の電子
- $\gamma$ 線    光子（電磁波）
- X線    光子（電磁波）

Le Trésorier G<sup>4</sup>  
 Le Contrôleur G<sup>4</sup>  
 Le Caissier G<sup>4</sup>

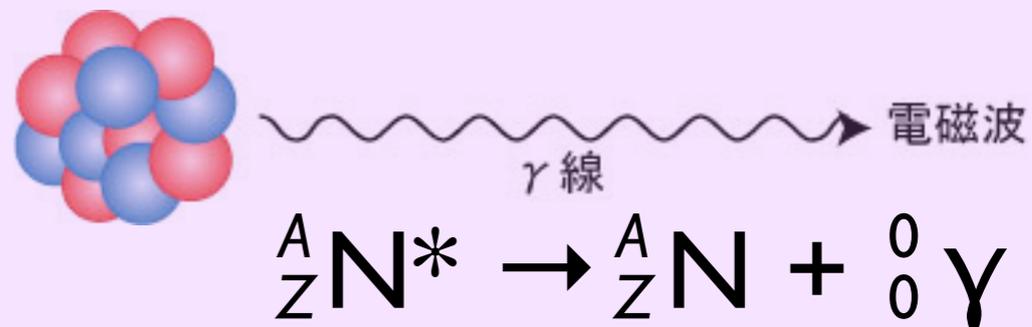
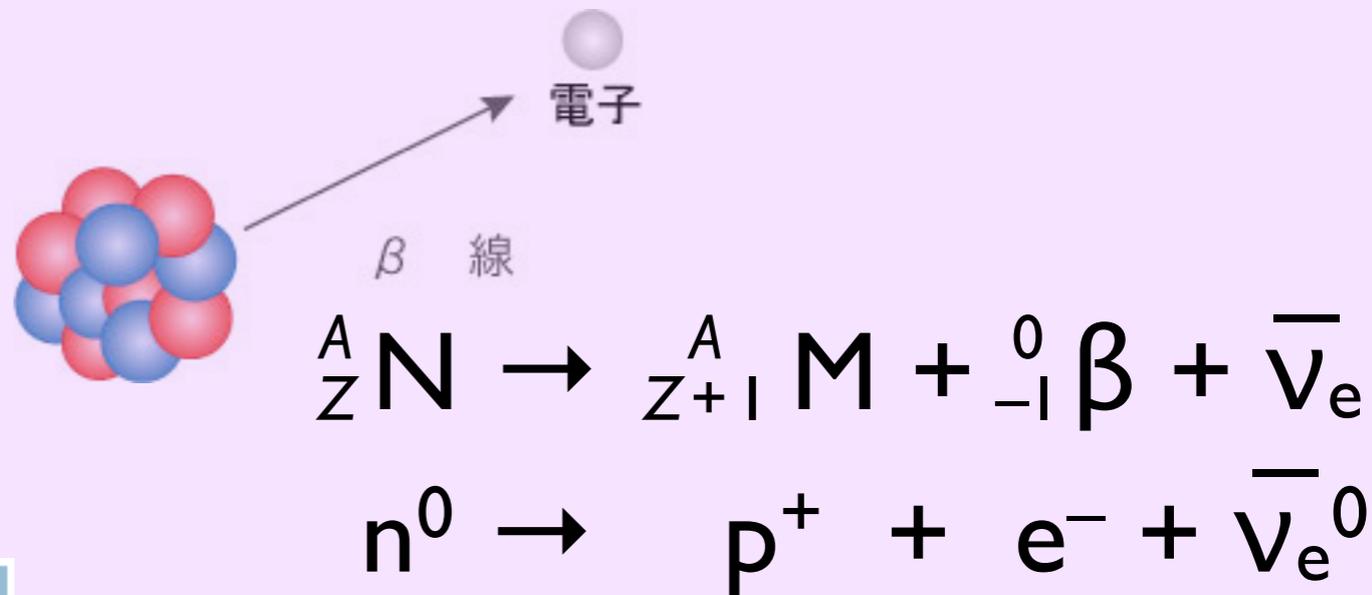
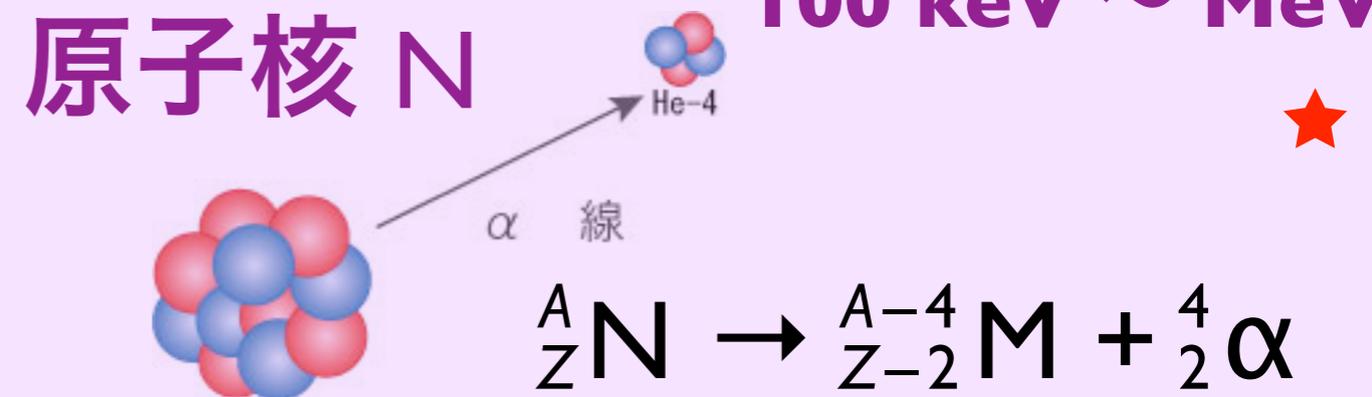
**VIDEO**

**放射線とは**

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 100 keV ~ MeV



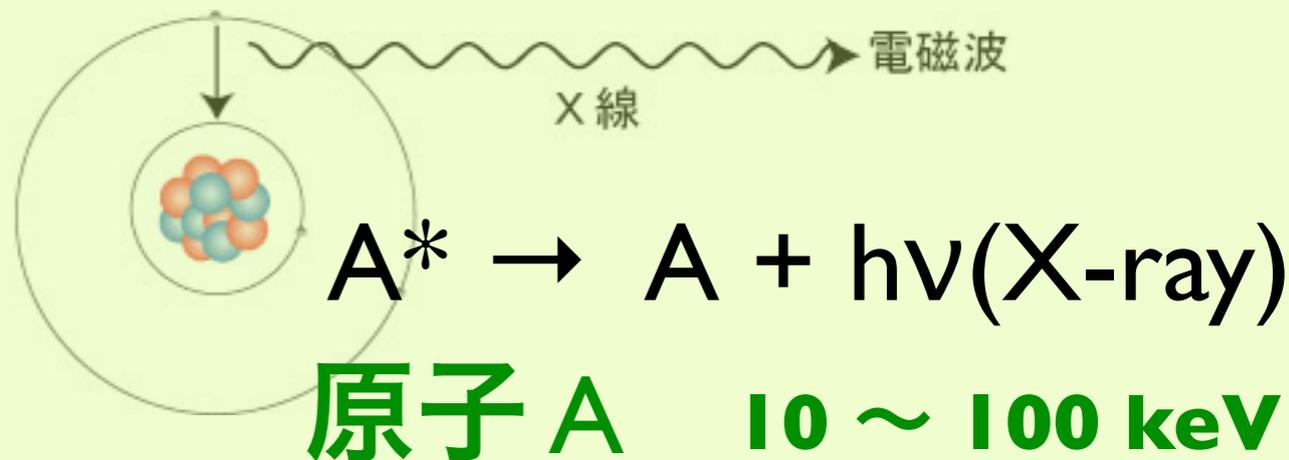
放射線のもつエネルギーは？

☞ 100 keV ~ MeV for α/β/γ

Cf. 原子の束縛エネルギーは？

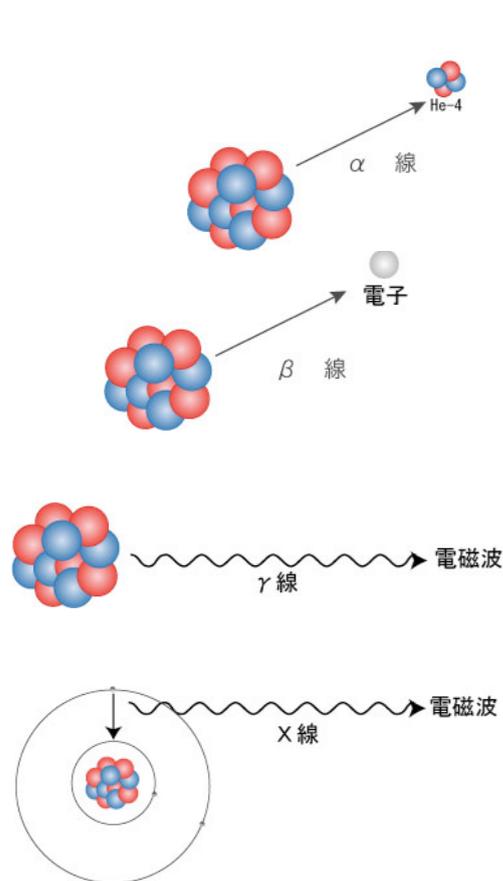
☞ 最外殻電子で 10 eV 程度

荷電粒子の質量は？



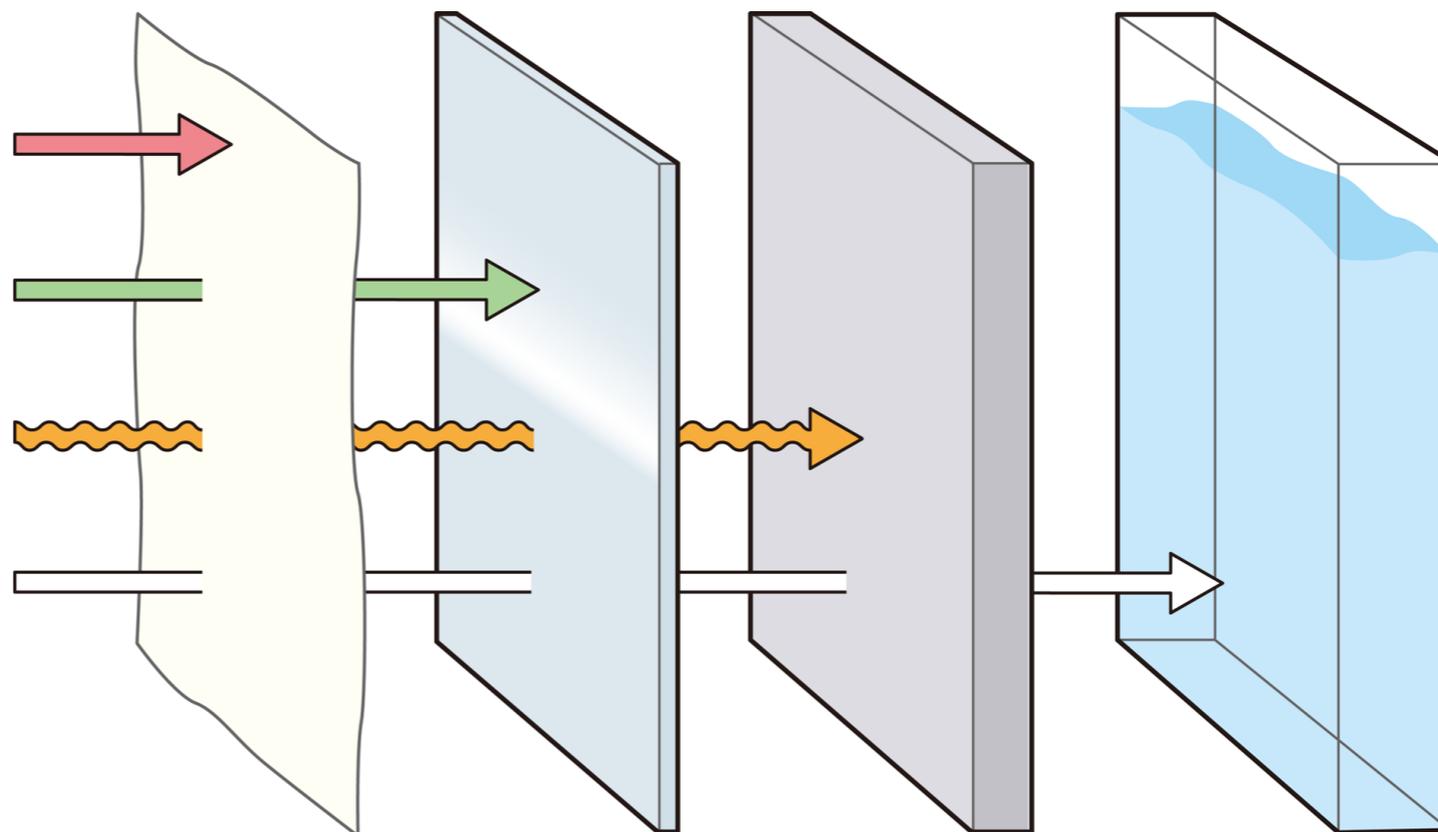
# 放射線の種類、透過力と遮蔽

透過力が強い =  
なかなか反応しない



- アルファ ( $\alpha$ ) 線 
- ベータ ( $\beta$ ) 線 
- ガンマ ( $\gamma$ ) 線 
- エックス (X) 線 
- 中性子線 

$\alpha$ 線を止める  $\beta$ 線を止める  $\gamma$ 線、X線を止める 中性子線を止める



紙      アルミニウム等の薄い金属板      鉛や厚い鉄の板      水やコンクリート

## 阻止能

## LET

(エネルギー損失)      (線エネルギー付与)

## 飛程

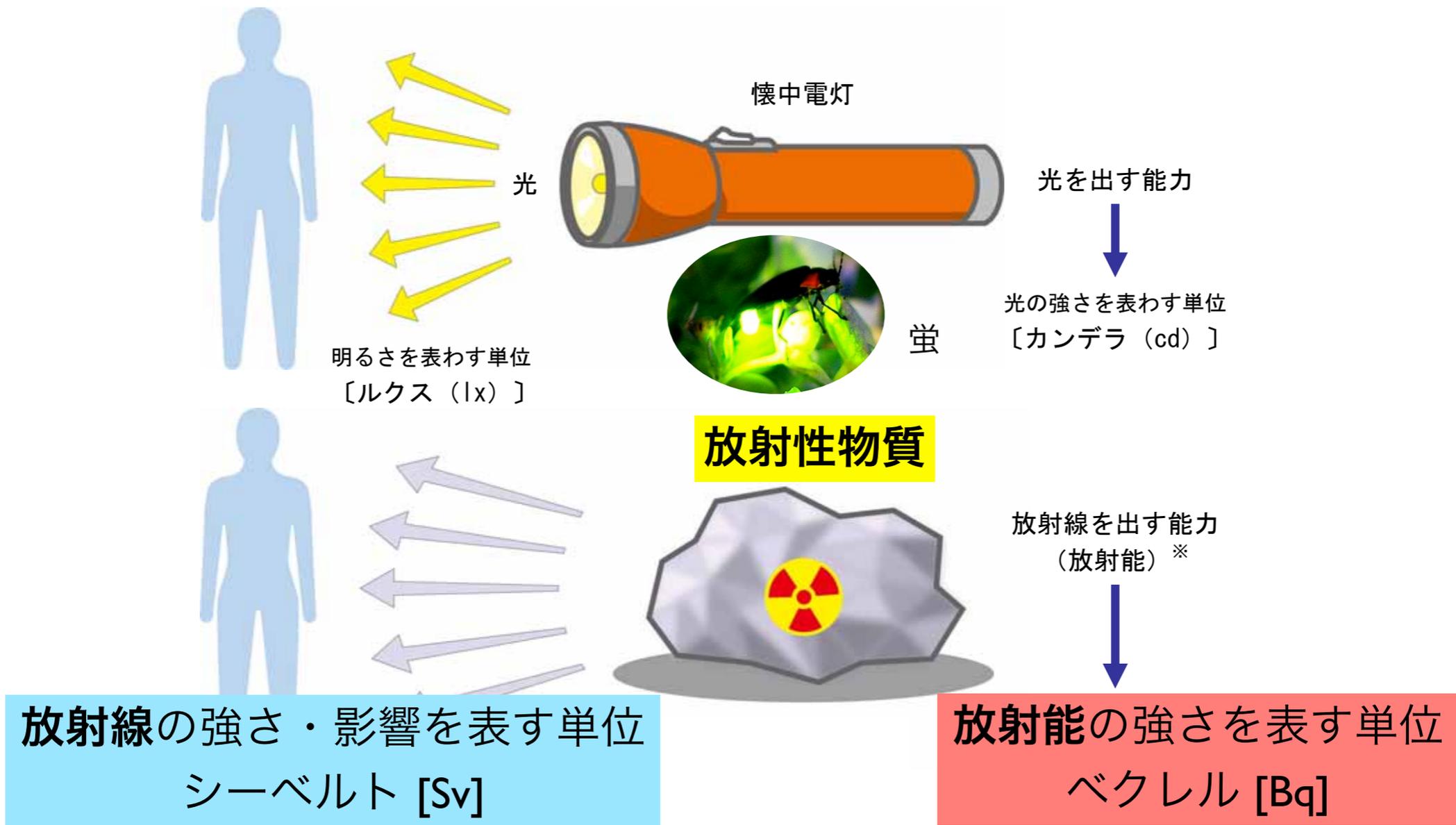
**陽子線(p) /  $\alpha$ 線 / 重粒子線**：短い飛程。高LET。  
外部被曝に対して遮蔽は容易。内部被曝は要注意。

**中性子線(n)**：電子と相互作用しないので遠くまで飛ぶ。  
陽子を叩き出せば一気に減速するが、核子同士なので反応断面積が小さい（反応確率が小さい）。  
短い飛程。高LET。水素原子を含む物質で遮蔽。

**電子( $\beta$ )線**：p,  $\alpha$ , 重粒子線に比べて長めの飛程。低LET。  
軽いので散乱されやすい（相手も電子）。ジグザグ軌道も。

**光子 (X線,  $\gamma$ 線)**：物質中の電子を弾き出す。低LET。

# 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



# 放射線量 (radiation dose) の単位

Gray



吸収線量 absorbed dose  $D [J / kg] = [Gy]$

等価線量 equivalent dose  $H_T [J / kg] = [Sv]$

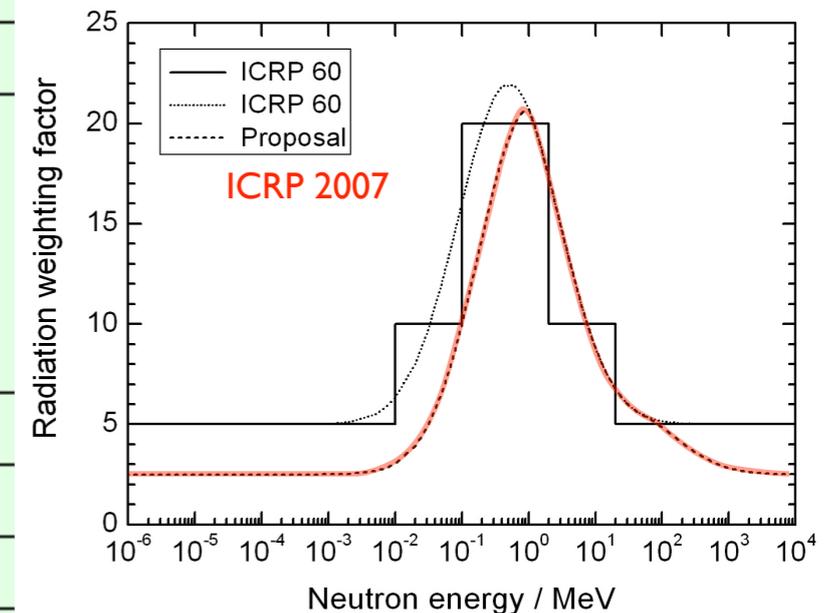
実効線量 effective dose  $E [J / kg] = [Sv]$

Sievert



表 1 放射線荷重係数

放射線の種類・エネルギーの範囲	放射線荷重係数: $W_R$	
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	see graph
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

# 身の周りの放射線



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

Sv (E)

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



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

胃のX線集団検診(1回) 0.6



国内自然放射線の差(年間)  
(県別平均値の差の最大)

0.1

胸のX線集団検診(1回) 0.05



Sv (E)

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

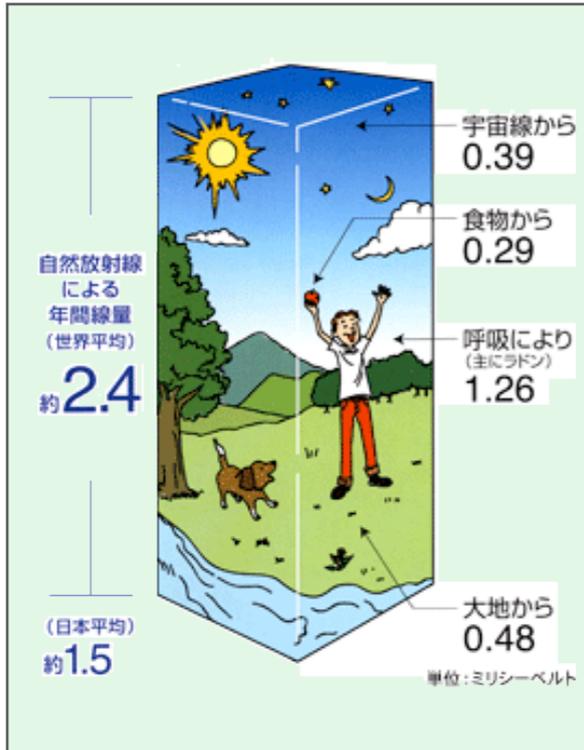


再処理工場からの放射性物質  
の放出による評価値(年間) 0.022

クリアランスレベル導出の  
線量目安値(年間) 0.01

0.01

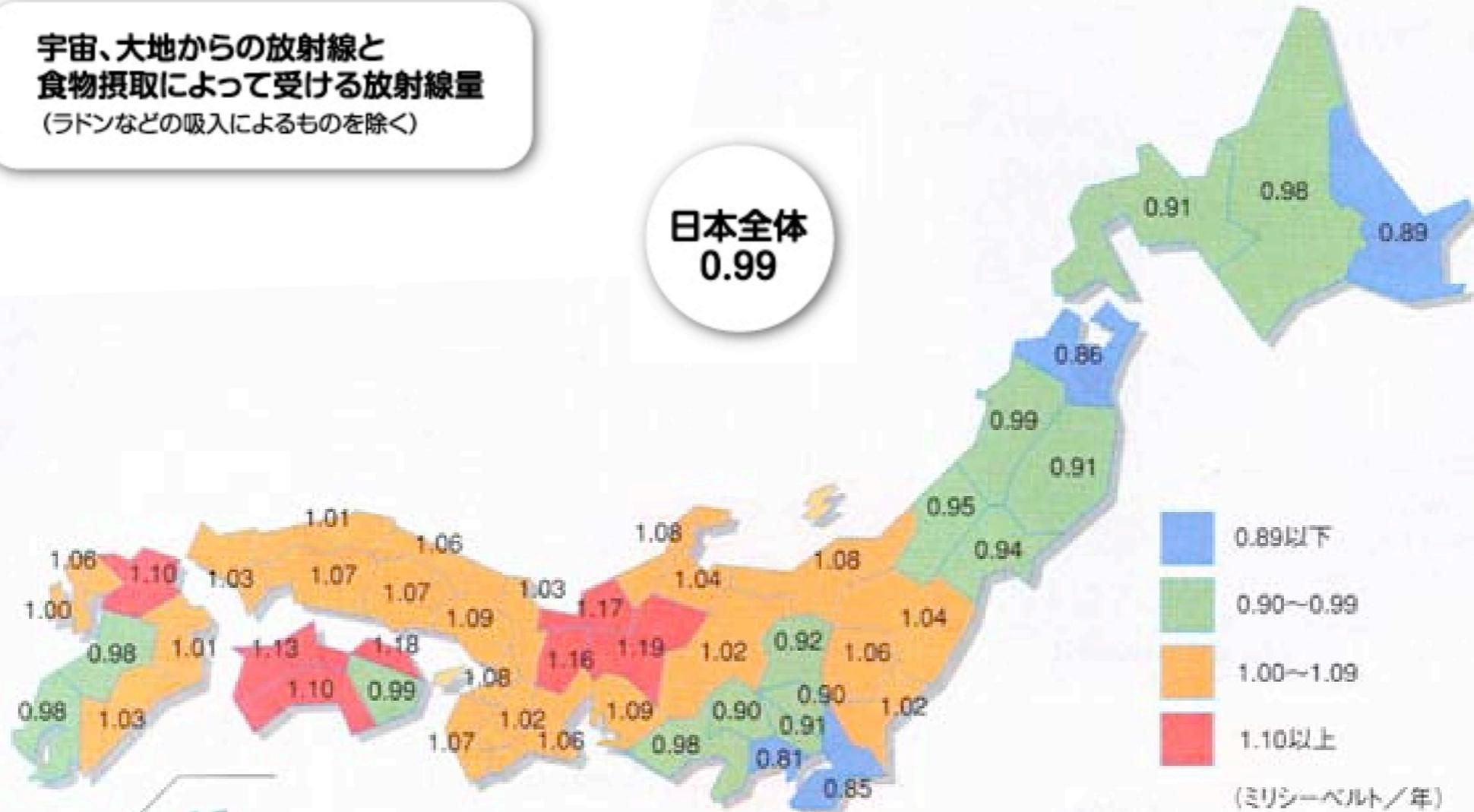
原子力発電所(軽水炉)周辺の線量目標値(年間)  
(実績ではこの目標値を大幅に下回っています)



## 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



〔放射線医学総合研究所調べ〕 (1988年)

《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

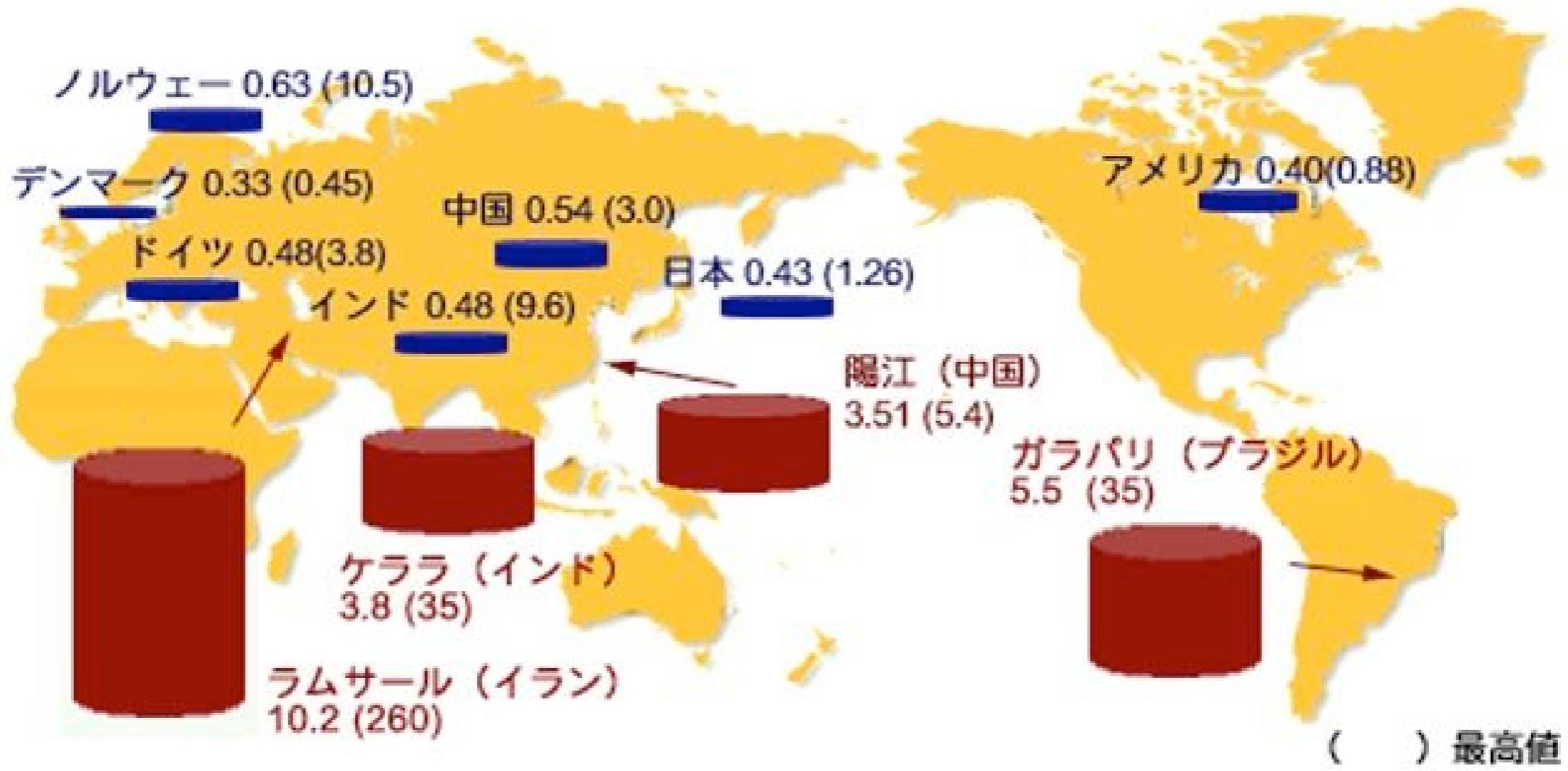


図2 陽江市・恩平県放射線環境調査実施地域

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<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

《表6》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 花崗岩と頁岩
日本	{ 0.23~0.37 0.79~1.19	関東ローム 花崗岩と地域
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 花崗岩地域
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

出典：主として「放射線化学1971-6月」(放射線医学総合研究所編)

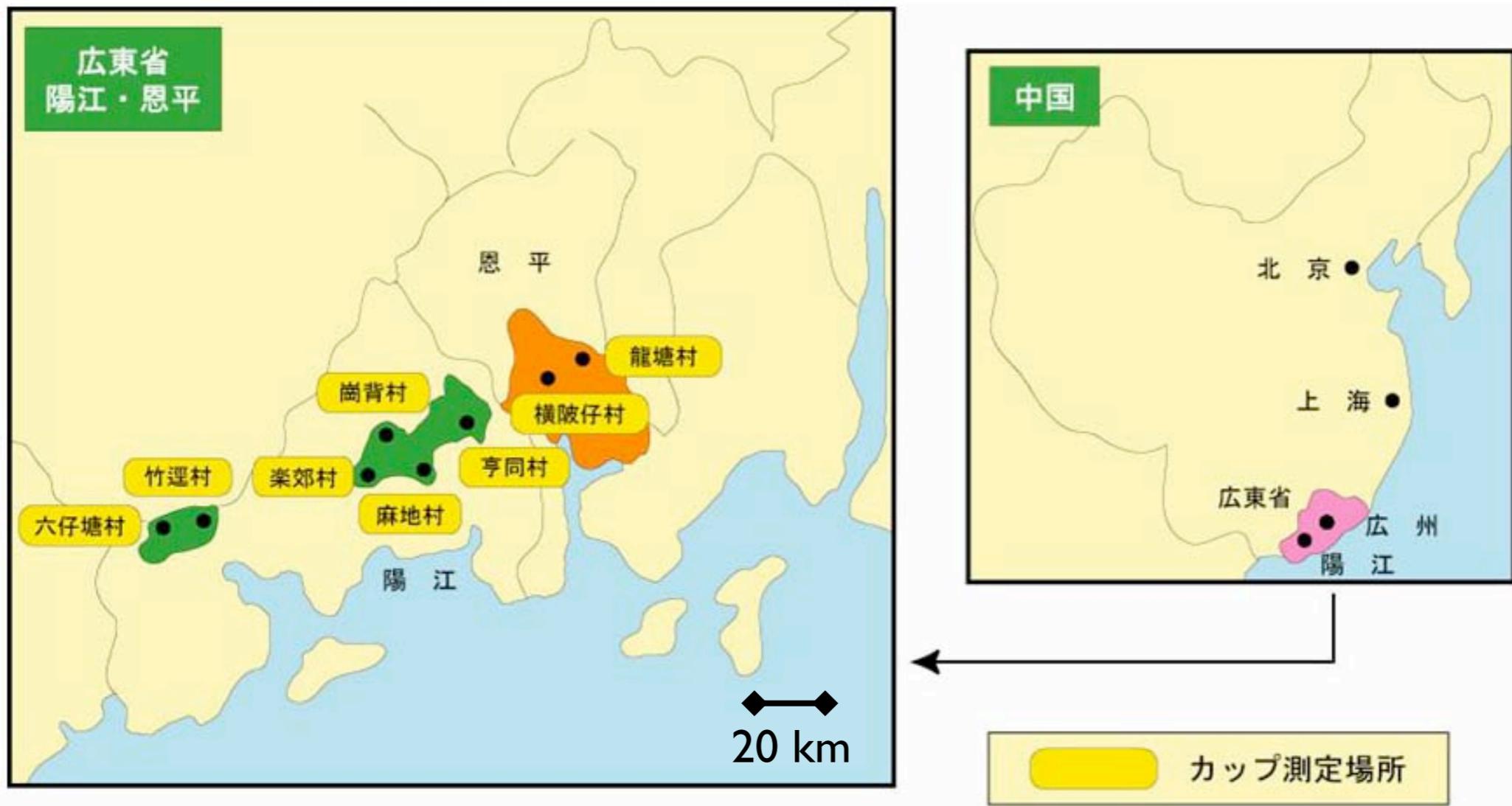


図2 陽江市・恩平県放射線環境調査実施地域

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<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

一次宇宙線 (高エネルギー陽子など)

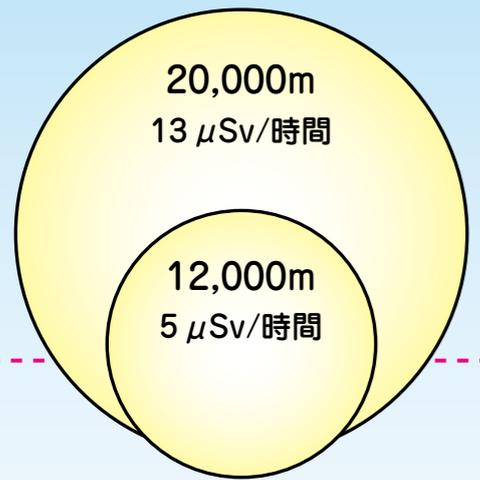
空気中の原子

二次宇宙線

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

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

※○の大きさは、放射線を受ける量をあらわしている。



4,000m ○ 0.2 μSv/時間

2,000m ○ 0.1 μSv/時間

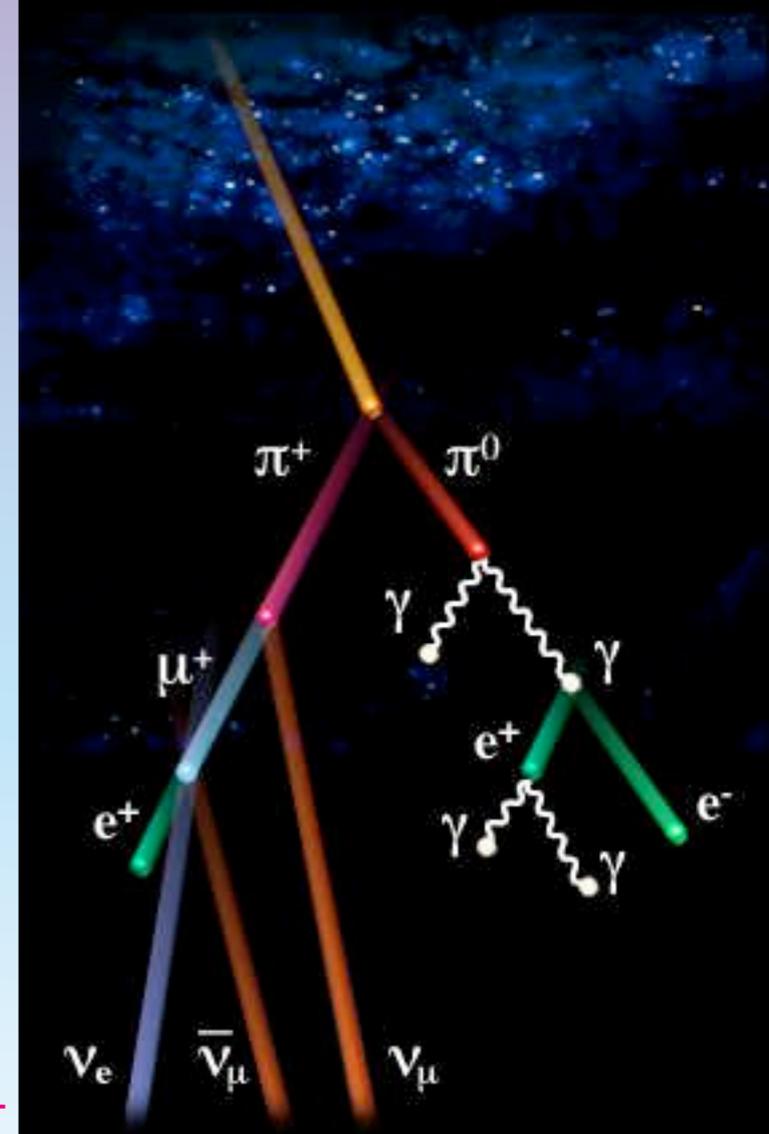
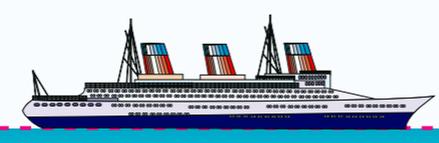
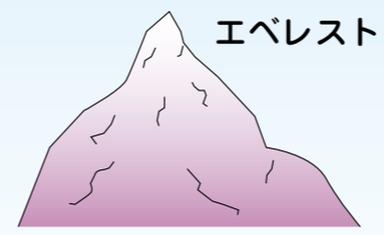
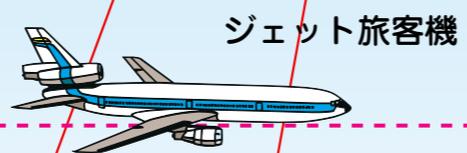
海面 ○ 0.03 μSv/時間

μSv = マイクロシーベルト

100km

10km

1km



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

出典：国連放射線影響科学委員会報告 (1993)

# 体内、食物中の自然放射性物質

## ●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)



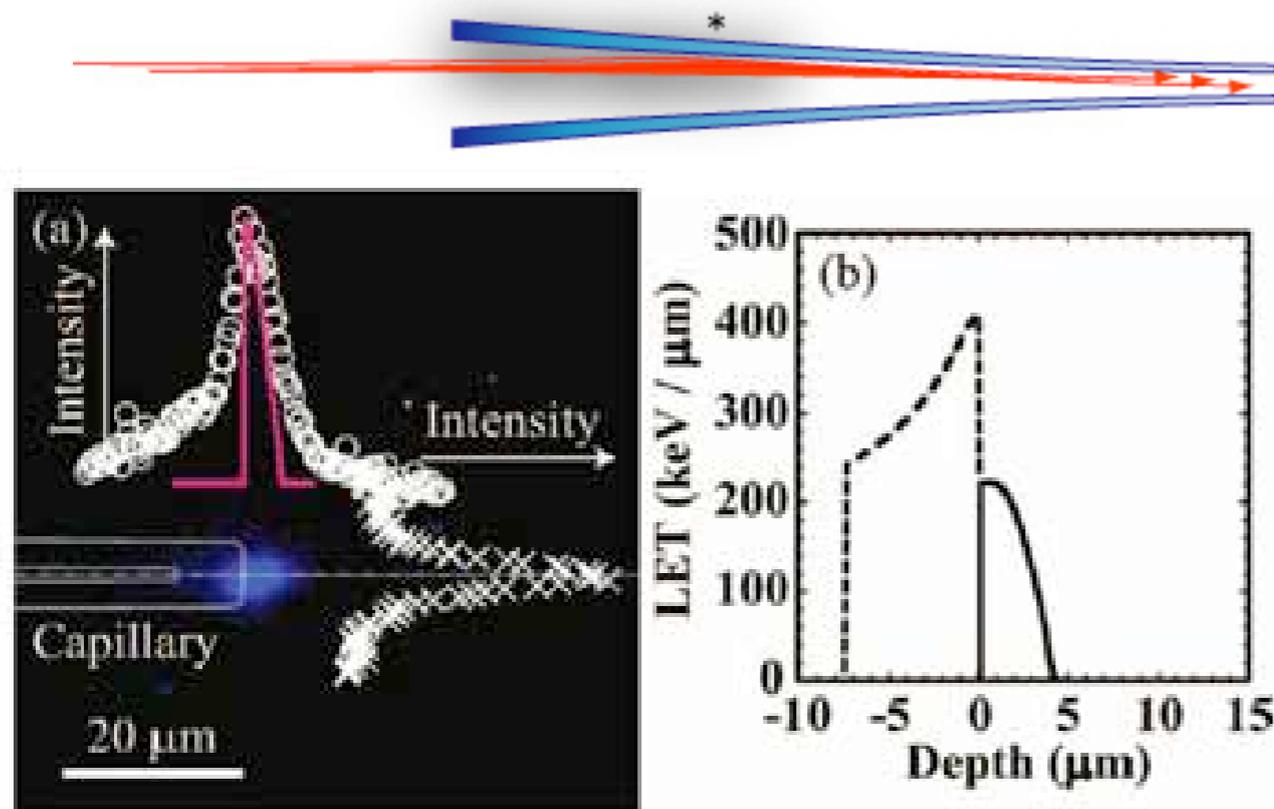
$^{40}\text{K}$   
 同位体比 0.012%  
 寿命 13億年

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

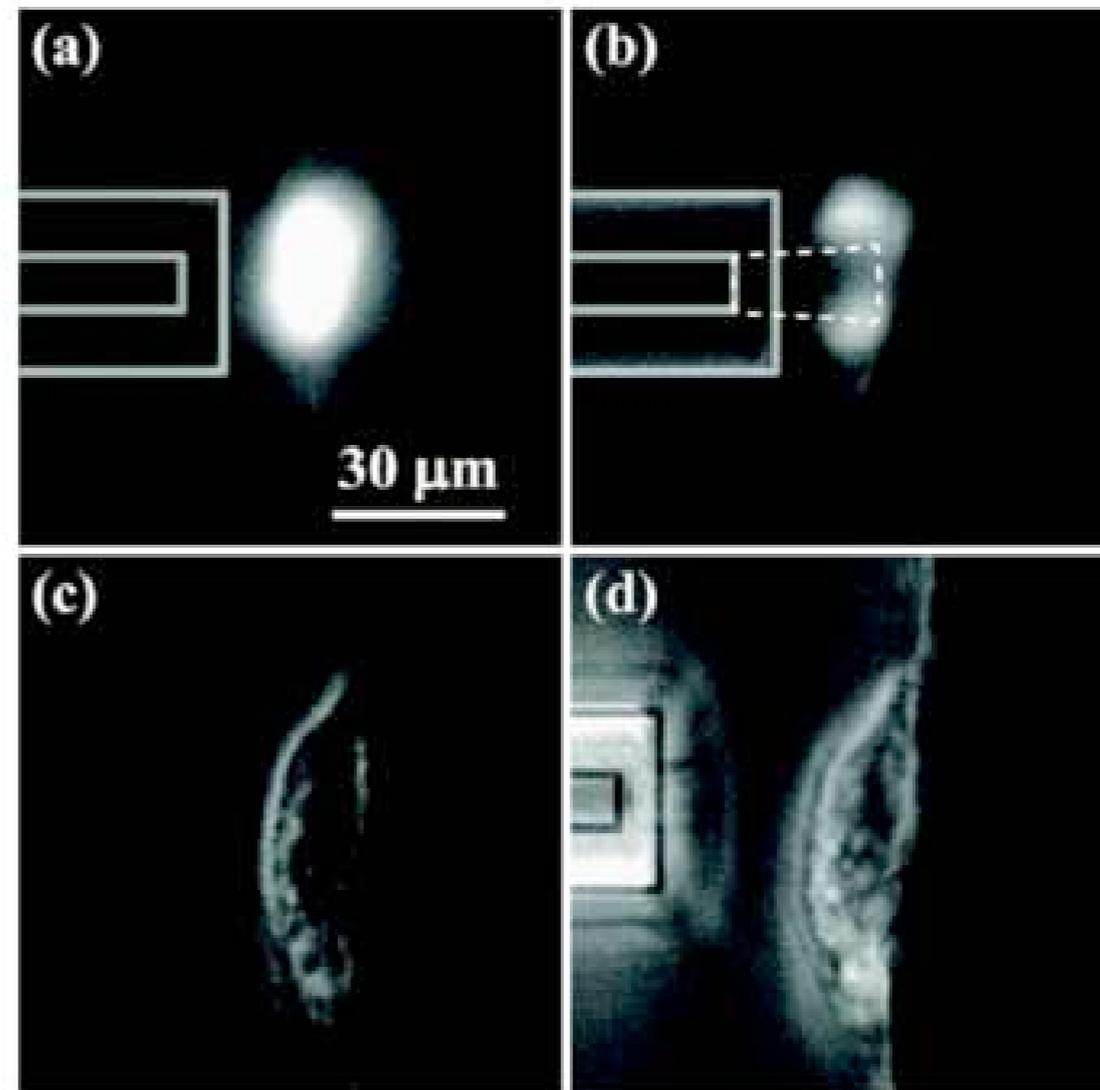
# 放射線生物学

# イオンマイクロビームの 細胞照射

理研 山崎原子物理研  
高知工科大



Y.Iwai *et al.* APL 92, 023509 (2008).



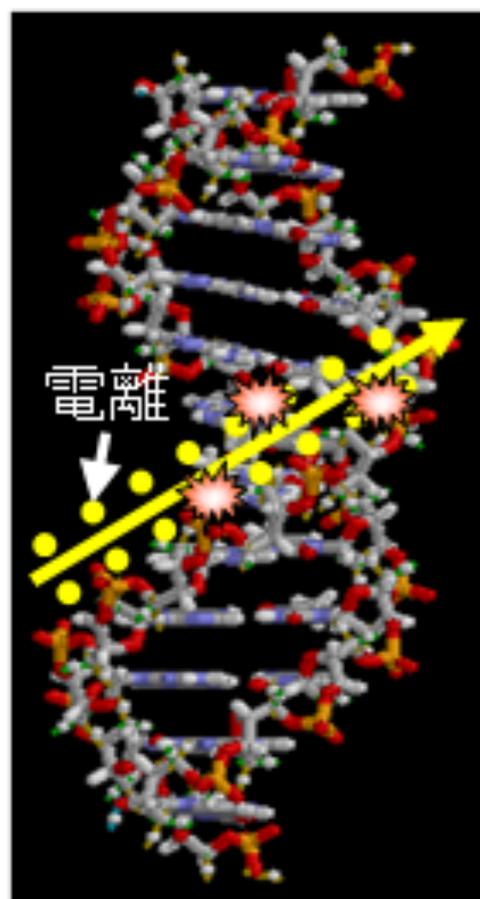
Y.Iwai *et al.* APL 92, 023509 (2008).

実際の細胞内の標的に照射した実験を紹介する。  
標的はHeLa細胞の核で、核内にあるヒストン  
(H2B) と、蛍光タンパク質 (green  
fluorescent protein : GFP) との融合タンパク質  
で核がラベルされ、楕円形に光っている：図(a)。

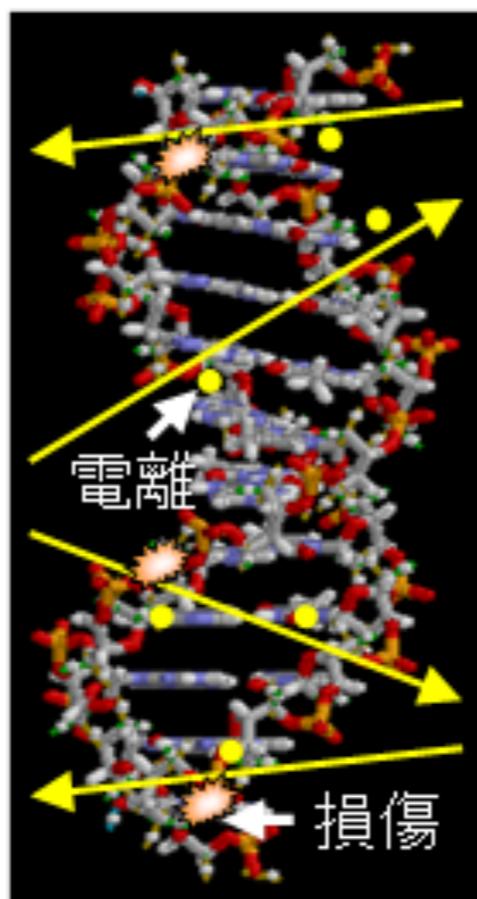
図：ヒストンとGFPの融合タンパク質でラベルされた核をもつHeLa細胞への  
照射前と後の写真：蛍光イメージによる照射前 (a) と 4 MeV He 2+ イオンマ  
イクロビーム照射後 (b) 、および位相差顕微鏡でのイメージによる照射前 (c) と  
照射後 (d) : (d) では、照射が終了してガラスキャピラリー先端を細胞から離  
したところ。また、(b) の点線領域はSRIM-2006によるシミュレーションで予  
測した被照射領域。

図(b) は照射を始めてから約7秒後の蛍光イメージ。光っていた領域の内部に暗い領域が現われたが、これは  
GFP分子内の蛍光を担っている部分がダメージを受けて被照射領域のみが退色したものと考えられ、核内の選  
択的照射が行われたことを示している。

# 放射線による DNA 損傷



重イオン



電子

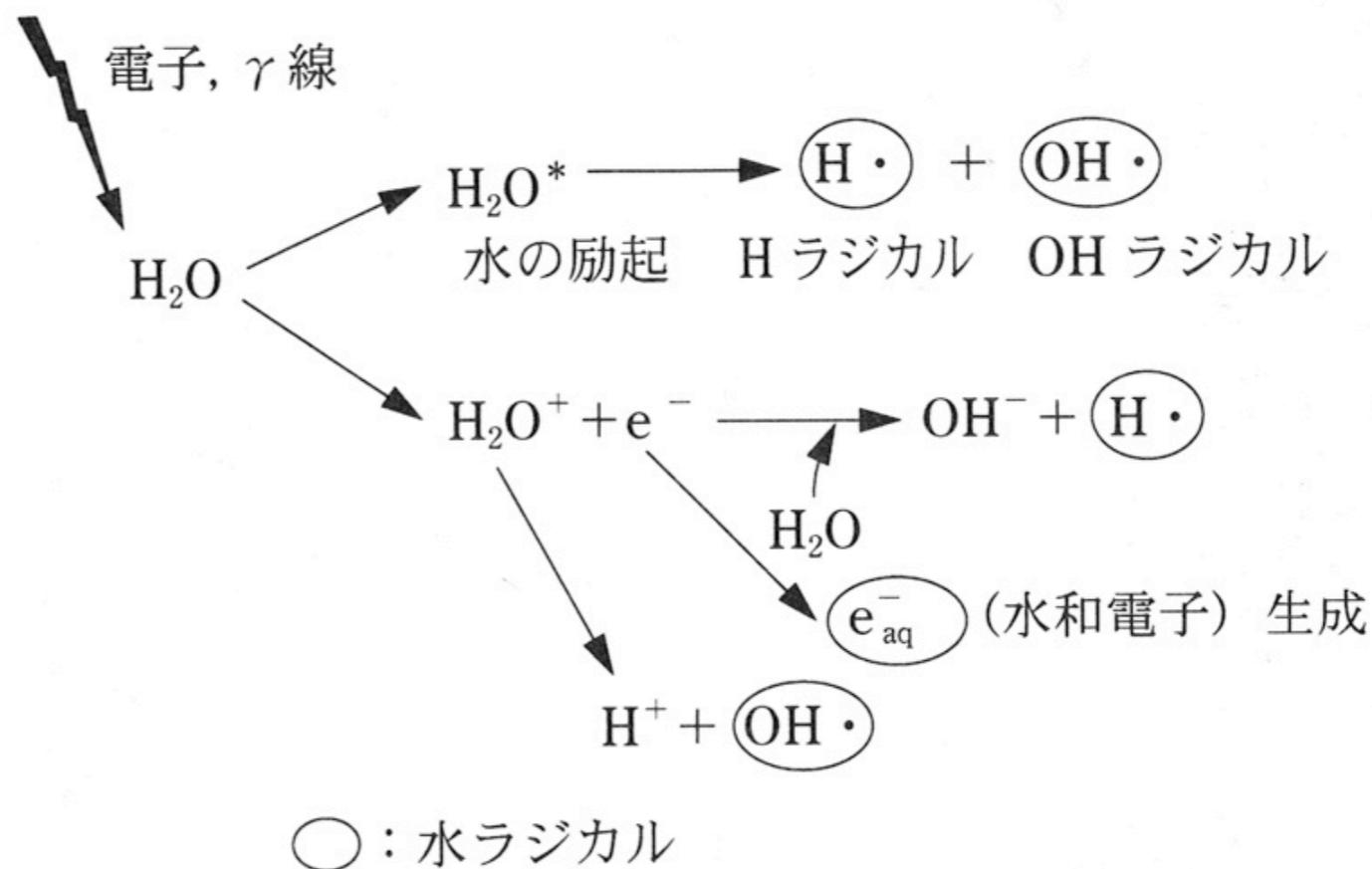


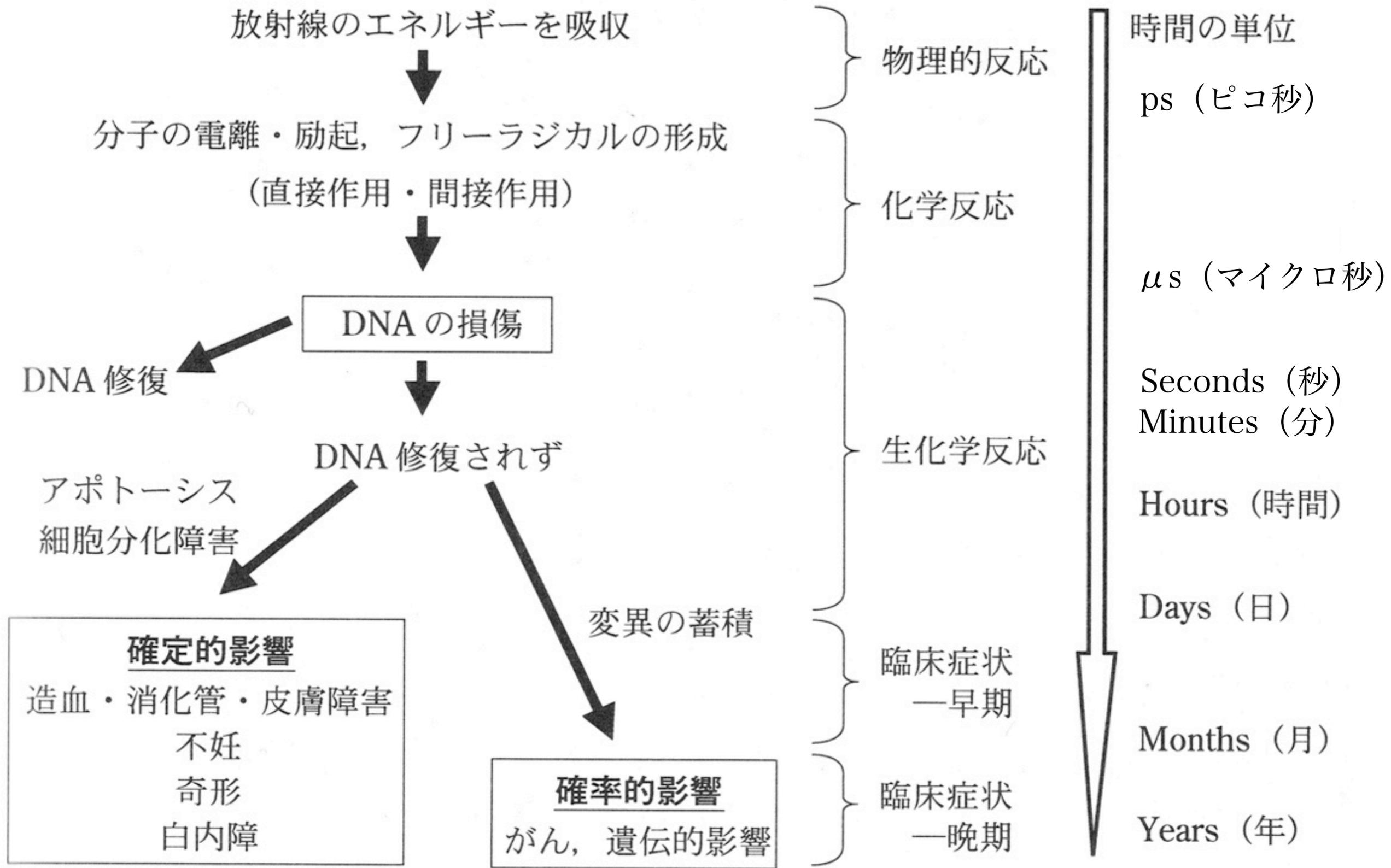
図 6・5 電離放射線による水分子の電離と励起の概略

## 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**

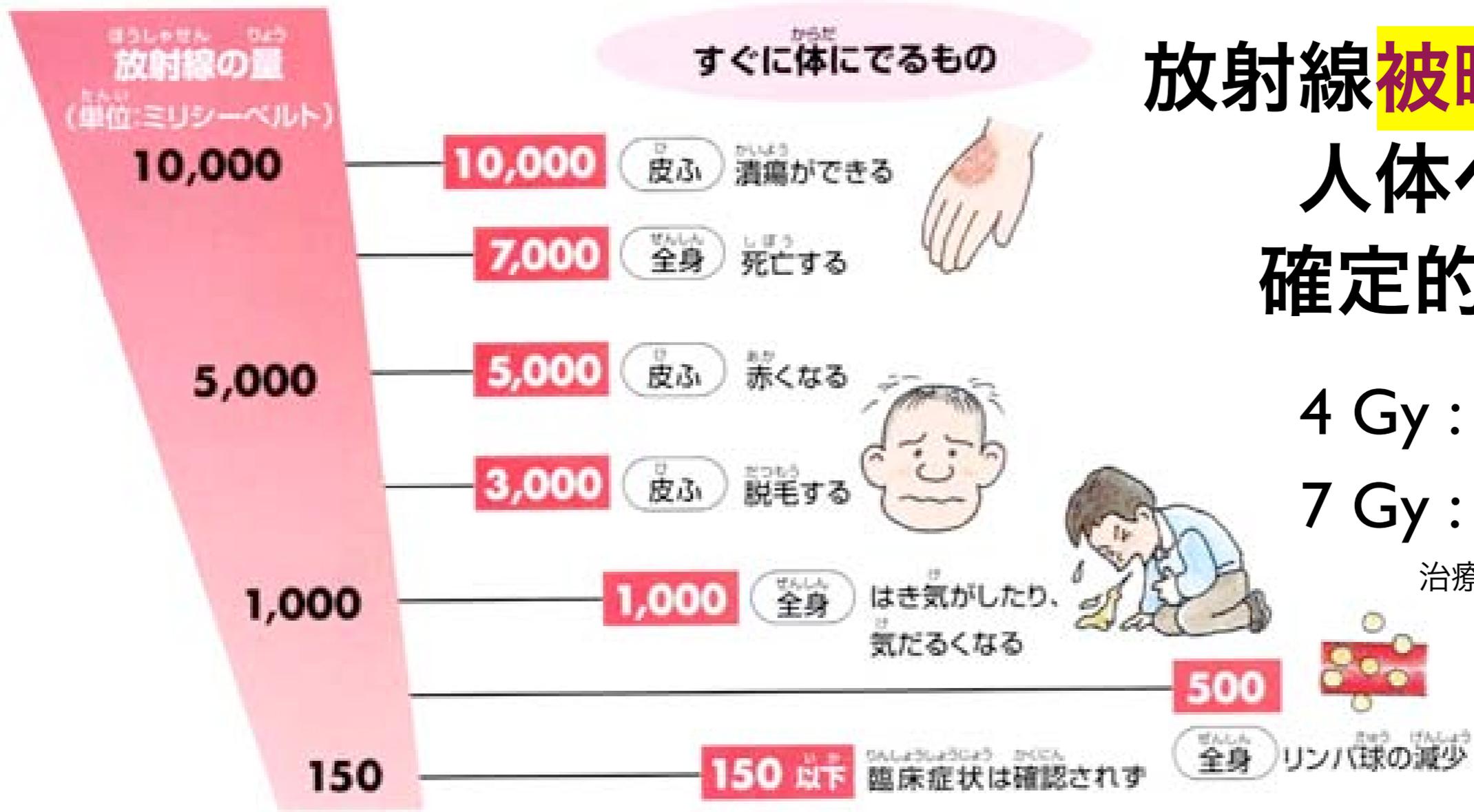
と間接作用 : 水の電離で生じるラジカルが DNA 分子に作用

**低 LET 放射線**



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。

## 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



# 確定的影響

幹細胞の損傷による組織細胞の欠如、  
造血器障害（☞ 骨髄移植）、不妊

影響は即座ではない。

表1 確定的影響(放射線症と半致死線量LD<sub>50/60</sub>)

放射線障害	被ばくと障害	線量 (Gy)	被ばく後の障害発症時間	出典
造血器症候群	急性被ばく			
造血能低下	発症閾値	0.5	1週間以内	(1)、(2)
白血球減少	50%発症	1-2	約48時間	(2)
造血器障害(医療なし/不十分)	50%死亡	約2.5	60日	(2)
同上(十分な医療)	同上	約5	同上	(2)
同上(骨髄移植成功の場合)	同上	~9	同上	(2)
消化管症候群	急性被ばく			
嘔吐	50%発症	約2	約3時間	(2)
消化管障害	死亡	約5-15	10-20日	(1)
神経症候群	急性被ばく			
神経障害	死亡	>15	1-5日	(1)
その他				
精巣(一時的不妊)	急性被ばく	0.15	-	(1)
同上	慢性被ばく	0.4 Gy/年	-	(1)
卵巢(不妊)	急性被ばく	2.5-6 Gy/年	-	(1)
同上	慢性被ばく	>0.2 Gy/年	-	(1)

注: (1) …ICRP 1990年勧告 (2) …UNSCEAR 1988年報告書

下記の出典をもとに作成した。

[出典](1)(社)日本アイソトープ協会:国際放射線防護委員会の1990年勧告(1991年11月)、p.122、p.124

(2)放射線医学総合研究所(監訳):放射線の線源・影響およびリスク、(株)実業広報社(1990年4月)、p.653、p.655



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。

# 低線量・低線量率の被曝とガン死亡★

表3 航空パイロットと一般人のがん死亡率の比較<sup>2,16)</sup>

累積線量 (mSv)	0~4.9	5.0~14.9	15.0~24.9	25.0+
全がん死観察数 (O)	116	79	98	72
全がん死期待数 (E)	128	117	138	120
全がん死のSMR (O/E)	0.91	0.67	0.71	0.6
(95% 信頼限界)	(0.72~1.1)	(0.53~0.87)	(0.58~0.91)	(0.45~0.77)

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

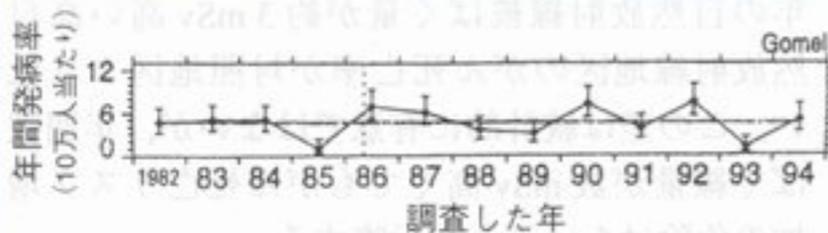


図2 ゴメリの小児白血病の年間発病率(●)の年次変化男子の場合。チェルノブイリ事故は1986年に発生。(E. P. Ivanov, et al.: *Radiat. Environ. Biophys.*, 35: 75-80 (1996) より)

表6 がん死の相対比と放射線の少線量被ばく量やDNA修復不全との関連\*

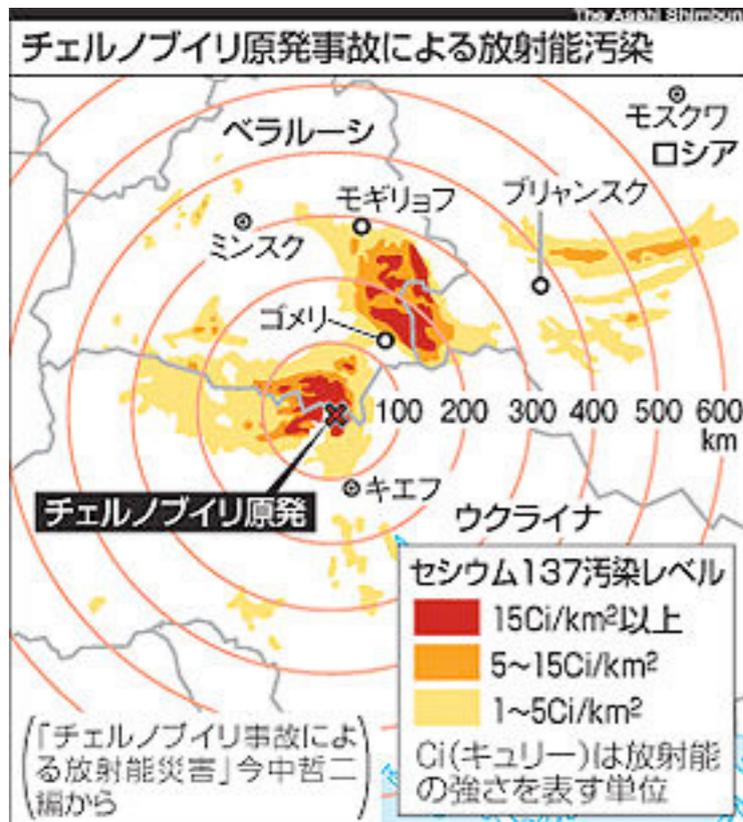
少線量被ばくなどの調査集団	がん死の相対比	被ばく量(被ばく期間) ; 遺伝的不全
1) ベラルーシ国ゴメリの子供	1.00	150 mSv (5年間)
2) 中国の高自然放射線地区住民	0.95	330 mSv (60年間)
3) 米国の原子力船修理造船工	0.85	35 mSv (10数年間)
4) 英国の放射線科医	0.71	100 mSv (20年間)
5) 欧州の航空機パイロット	0.68	20 mSv (約10年)
6) 原爆放射線被ばく者	1.08	200 mSv (~数マイクロ秒)
7) ナイミーヘン切断症候群患者	600	DNA修復不全

\*1) は図2より; 2) は表1より; 3) は表4より; 4) は表2より; 5) は表3より; 6) は式(1)より; 7) は「ナイミーヘン切断症候群」のセクションより。

原爆では放射線の全線量が瞬時に照射されたから、200 mSvの被ばくでも放射線の危険性がつきまとった。他方、放射線の少しずつの慢性被ばくでは、DNA損傷が少しずつ時間をおいてできるので、放射線による傷はDNA修復で完全治癒される時間的余裕がある。DNA 2本鎖切断の修復不全症であるナイミーヘン切断症候群患者のがん死の相対比は600と異常に大きい。

人体の細胞では核内のDNAが最も重要な分子である。DNAには毎日たくさんの傷が自然に発生している(表5)が、正常人の細胞はこれらのDNAの傷を修復する防御機能を持っている。正常人の身体は、少しずつ浴びる放射線にはびくともしない。これは、正常人の場合、放射線によるDNA損傷を、自然のDNA損傷と同様に、DNA修復が見事に治癒してくれるからである。

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 2007/4  
「人は放射線になぜ弱いのか(第3版)」講談社、ブルーバックス B-1238 (1998)



# 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

$^{131}\text{I}$  (ヨウ素 $^{131}\text{I}$ ) total **2 EBq** <sup>200 京ベクレル</sup>  
( $2 \times 10^{18}$  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)

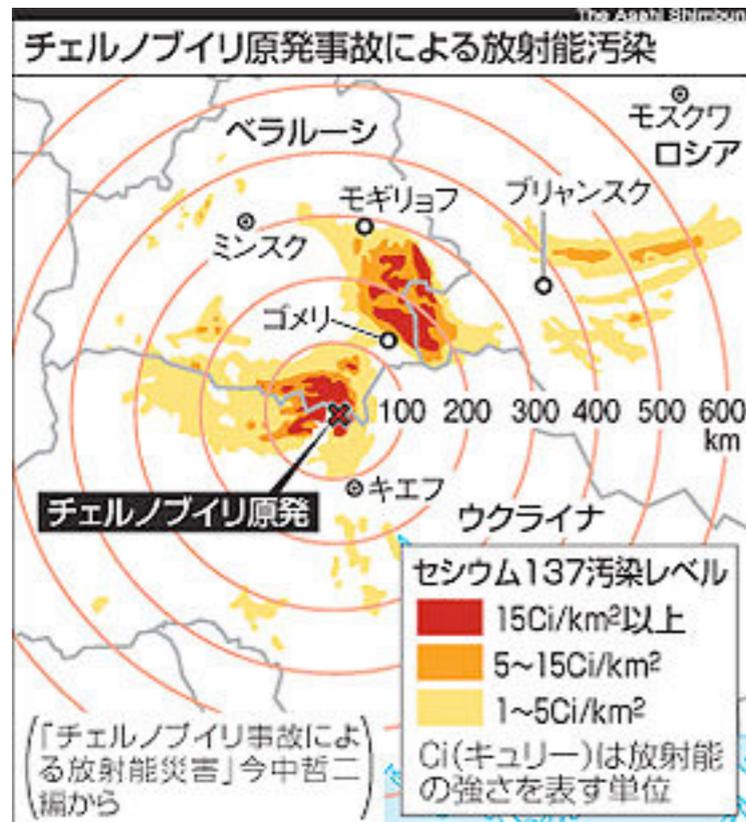
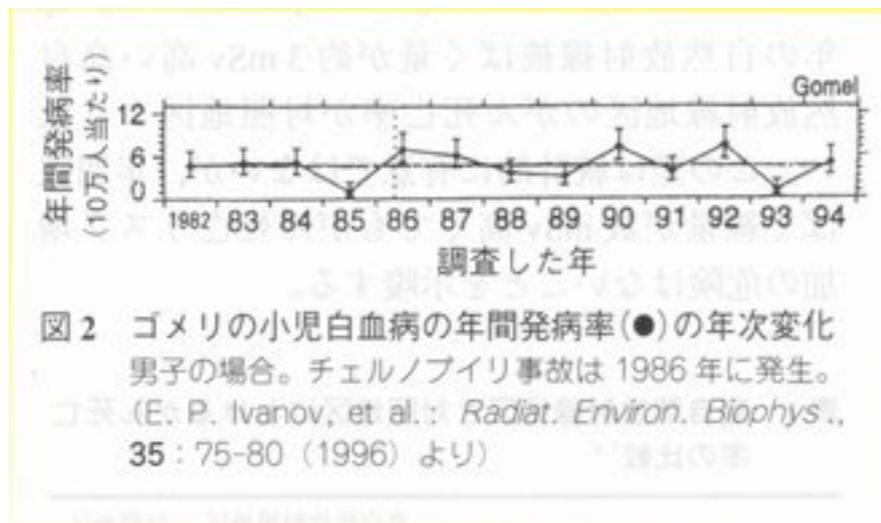
30 km 圏内の牛乳の摂取規制がなされず。

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)

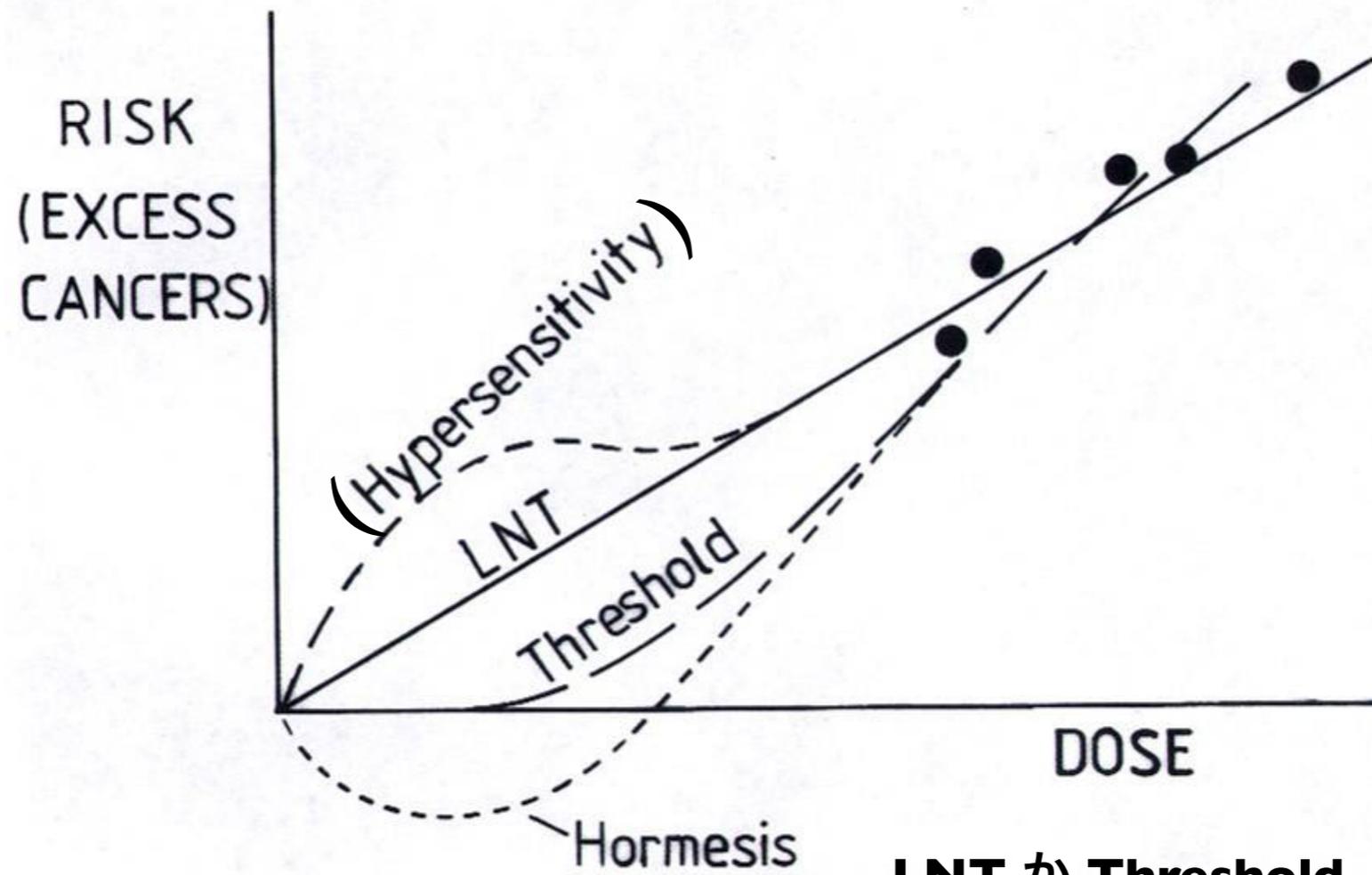
甲状腺平均被曝量 2 Gy !!

と、ずっと大きいストレスによる失調



# 低線量におけるリスク評価

(0 – 100 mGy)



**LNT** か **Threshold** (閾値あり) かは疫学調査から統計学的に判断がつかず、議論が分かれている。

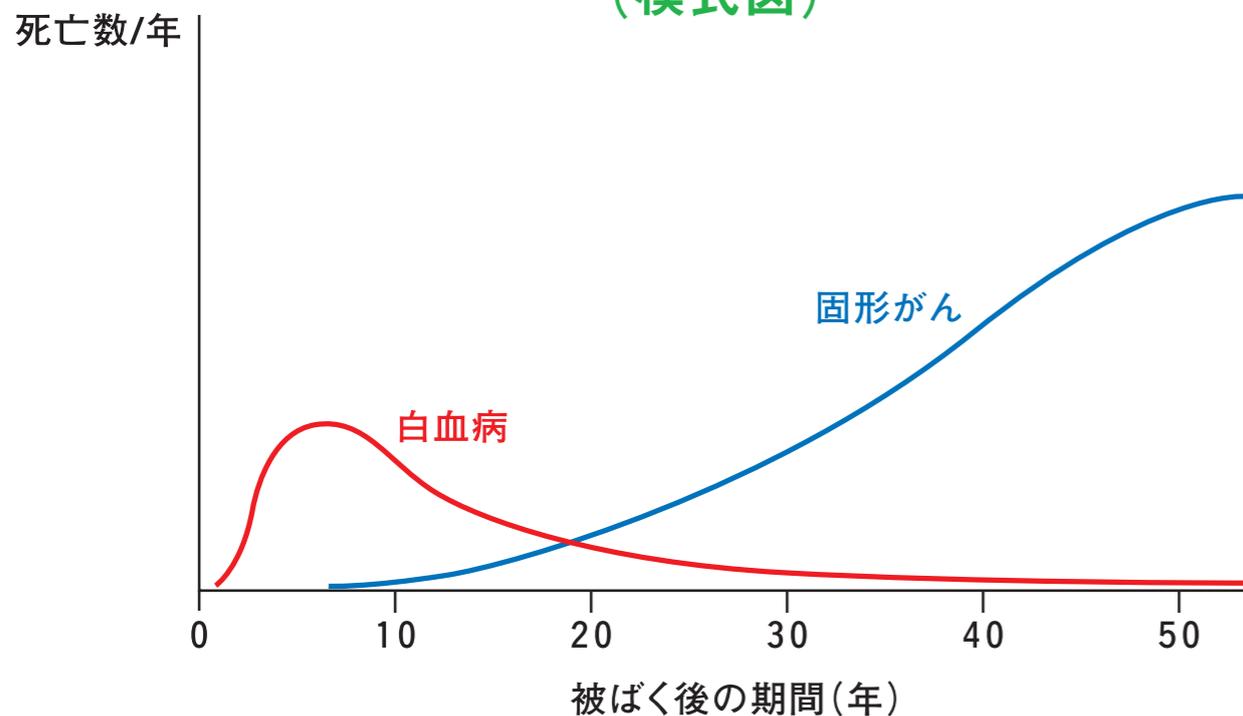
国際放射線防護委員会 (**ICRP**) は安全サイドに立って **LNT** (Linear Non-Threshold = 線形閾値なし) 仮説を採用。



# 広島・長崎の原爆生存者に対する 放射線被曝による影響の疫学調査

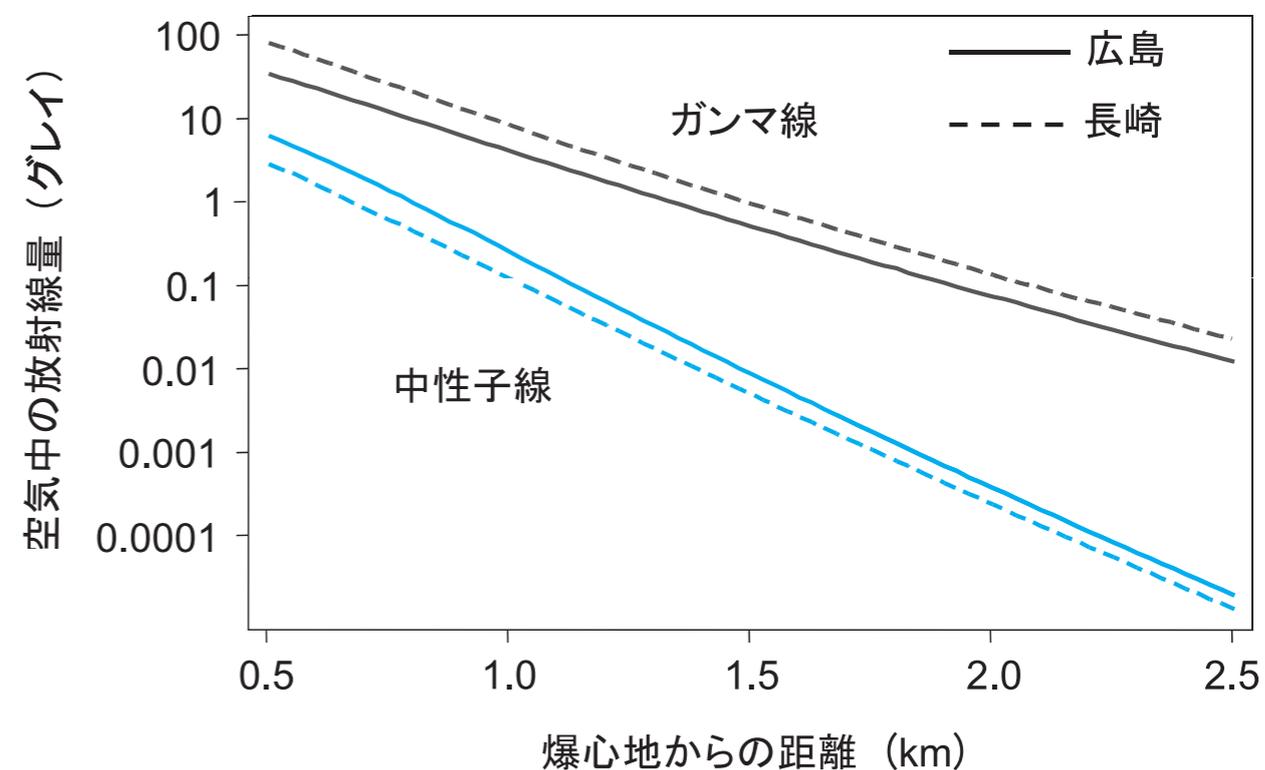
対象 8 万人 + 対照 4 万人

原爆放射線に関連する死亡数の時間的経過  
(模式図)



(財) 放射線影響研究所 パンフレット「わかりやすい放射線と健康の科学」

図4. 爆心地からの距離と空中線量 (無遮蔽)  
DS02 (2002年線量推定方式)\* による



(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」

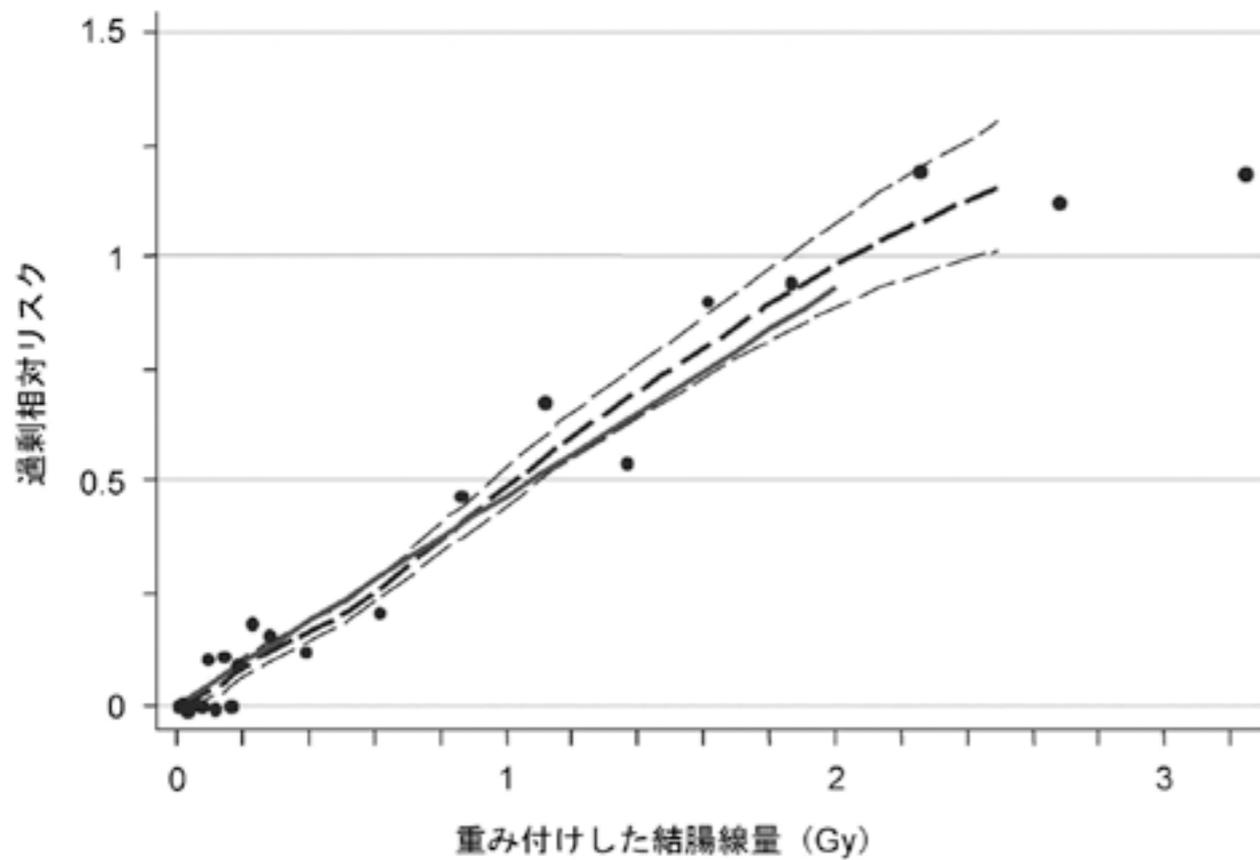


図 LSS集団における固形がん発生の過剰相対リスク（線量別）、1958－1998年。  
太い実線は、被爆時年齢30歳の人70歳に達した場合に当てはめた、男女平均過剰相対リスク（ERR）の線形線量反応を示す。太い破線は、線量区別リスクを平滑化したノンパラメトリックな推定値であり、細い破線はこの平滑化推定値の上下1標準誤差を示す。

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%

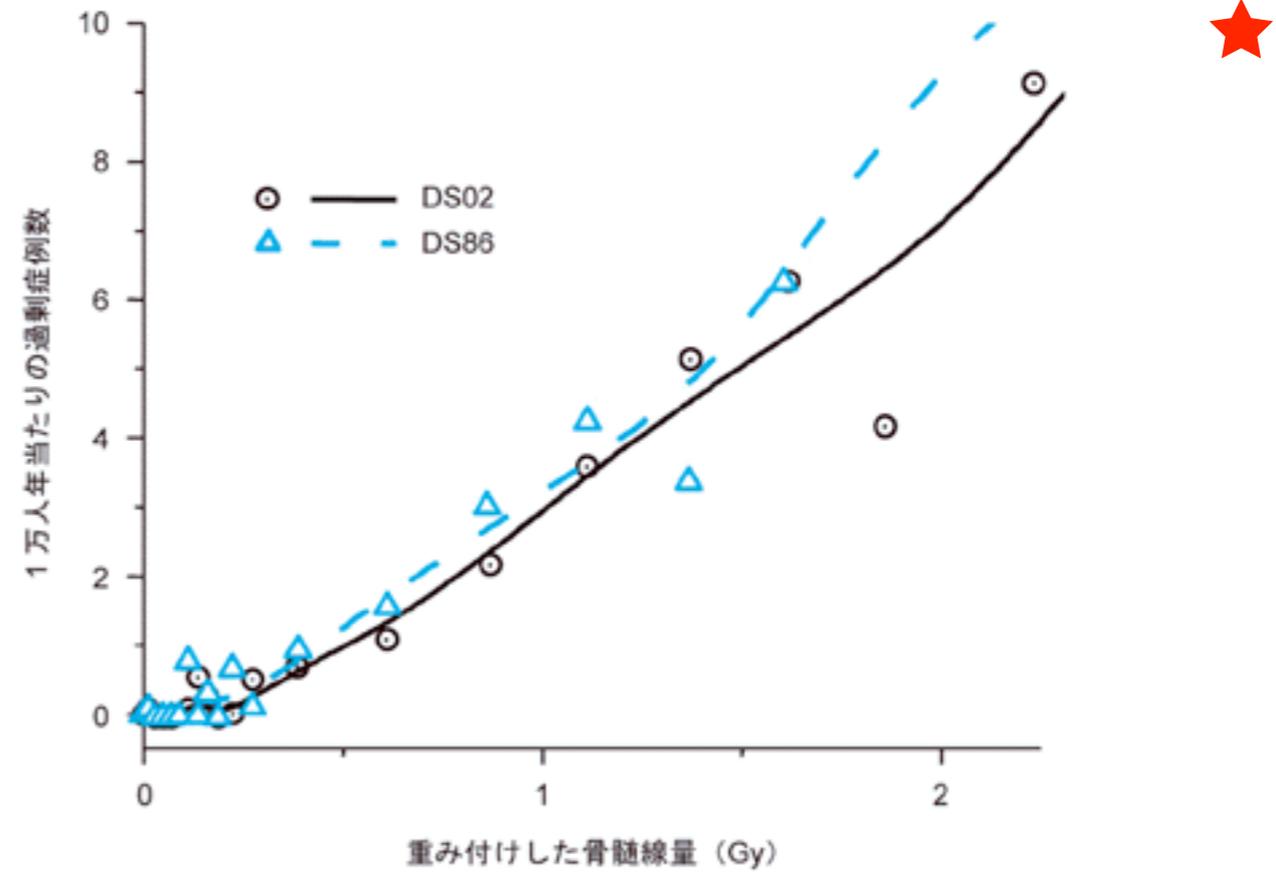


図. DS02とDS86による白血病のノンパラメトリックな線量反応、1950－2000年。  
被爆時年齢20－39歳の人70歳に達した場合の1970年における男女平均リスク。

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%

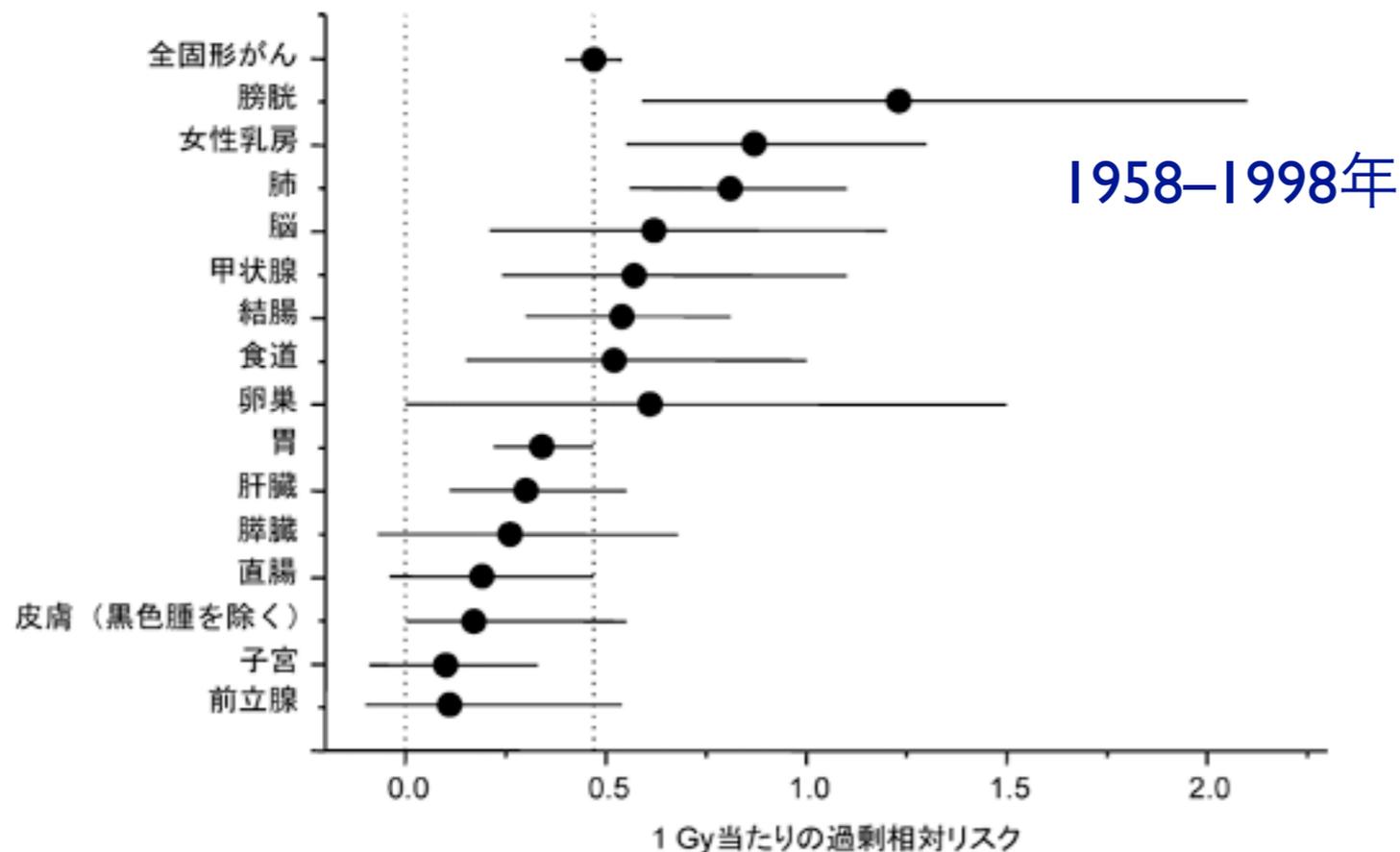


図1. LSS集団における被爆時年齢30歳（男女平均）の人が、70歳に達した時の1 Gy 当たりの部位別がん発生率の過剰相対リスク。横線は90%信頼区間を示す。

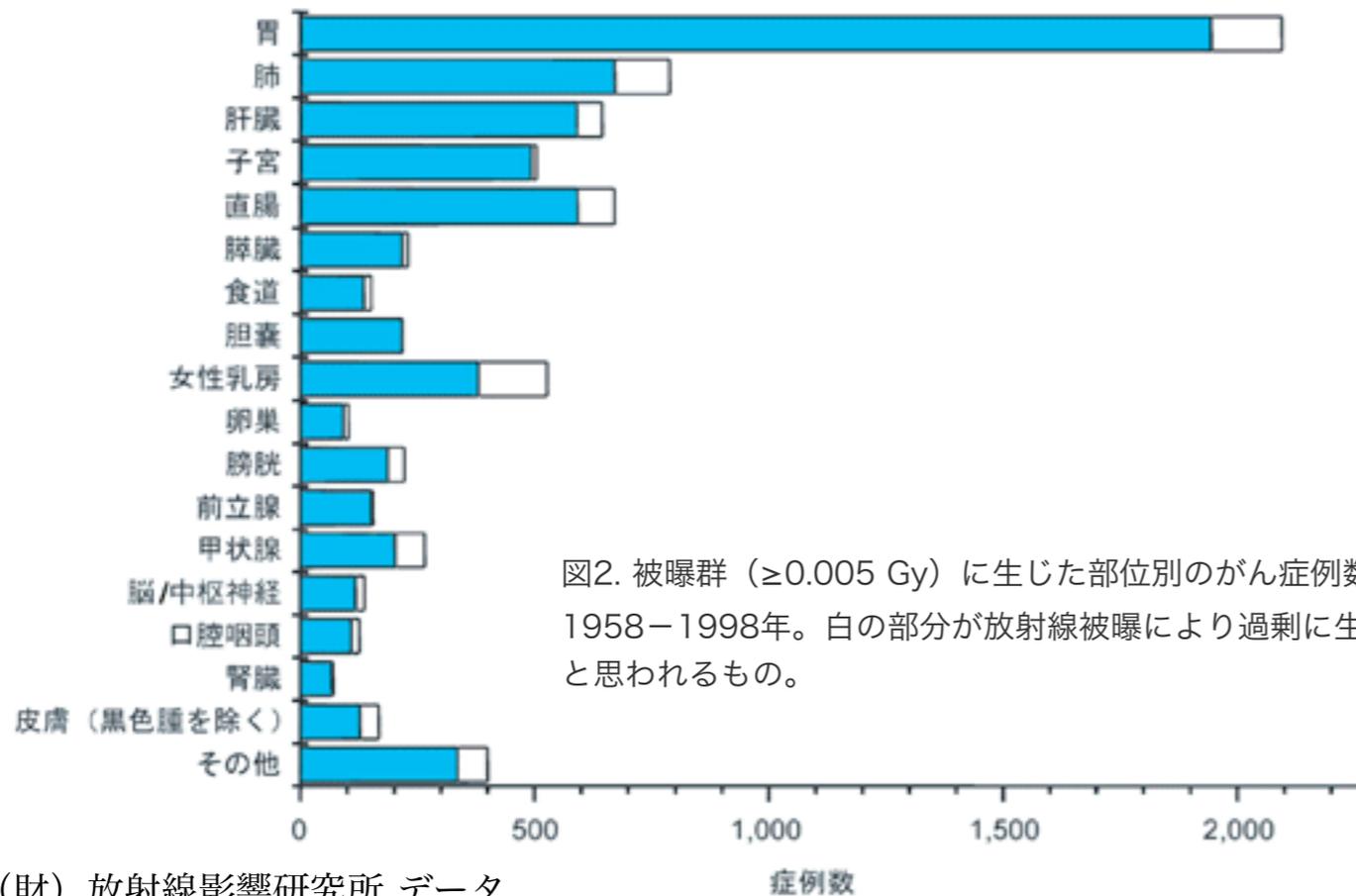
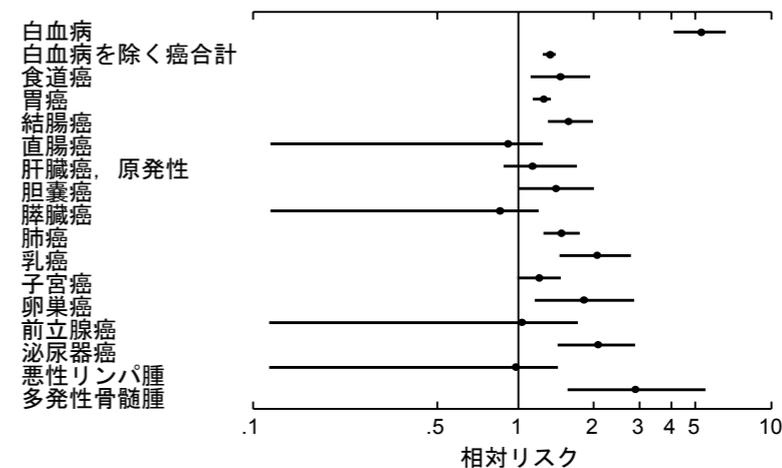


図2. 被曝群 (≥0.005 Gy) に生じた部位別のがん症例数、1958-1998年。白の部分が放射線被曝により過剰に生じたと思われるもの。

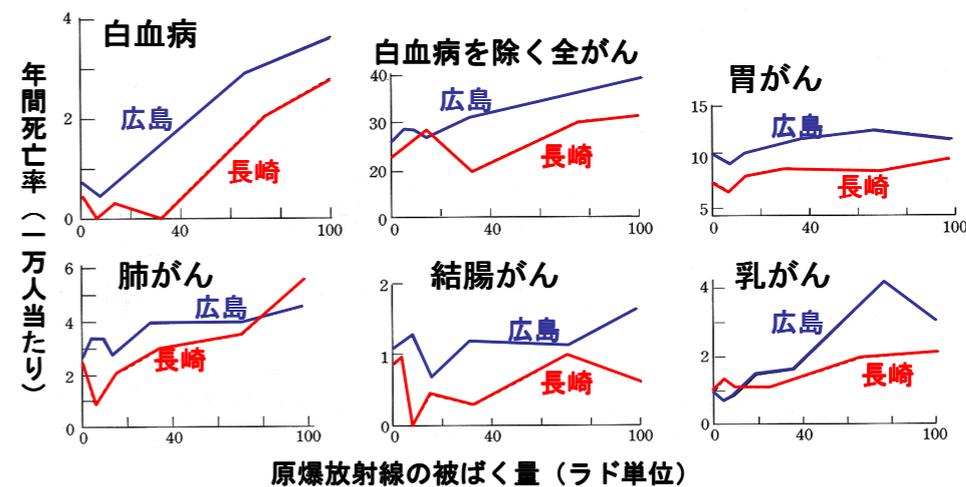
(財)放射線影響研究所 データ

部位別癌死亡の1Gy (遮蔽カーマ線量) における相対リスクおよび90%信頼区間, 1950-1985年



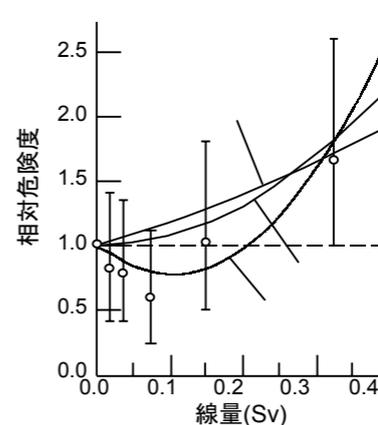
加藤寛夫、清水由紀子 他：原爆放射線の人体影響1992、文光

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

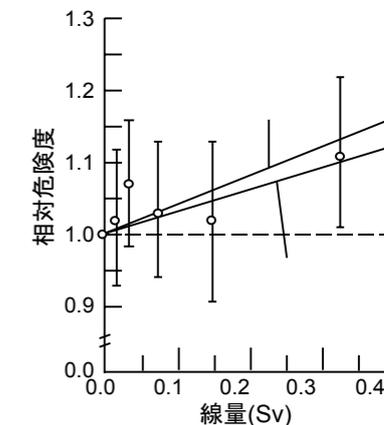


清水由紀子ほか (1987)

白血病

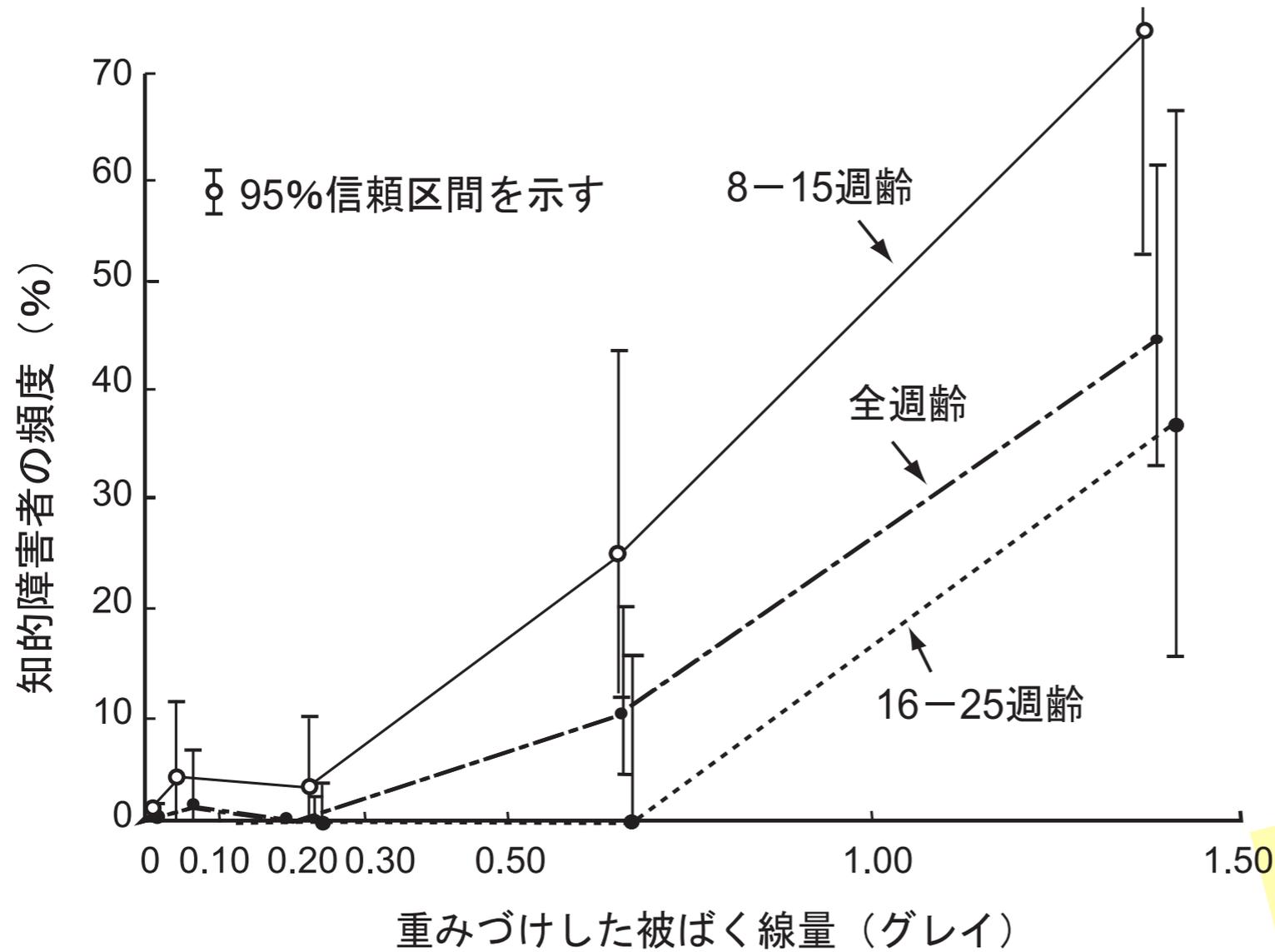


白血病以外の全がん



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。

表2 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(ICRP1990)

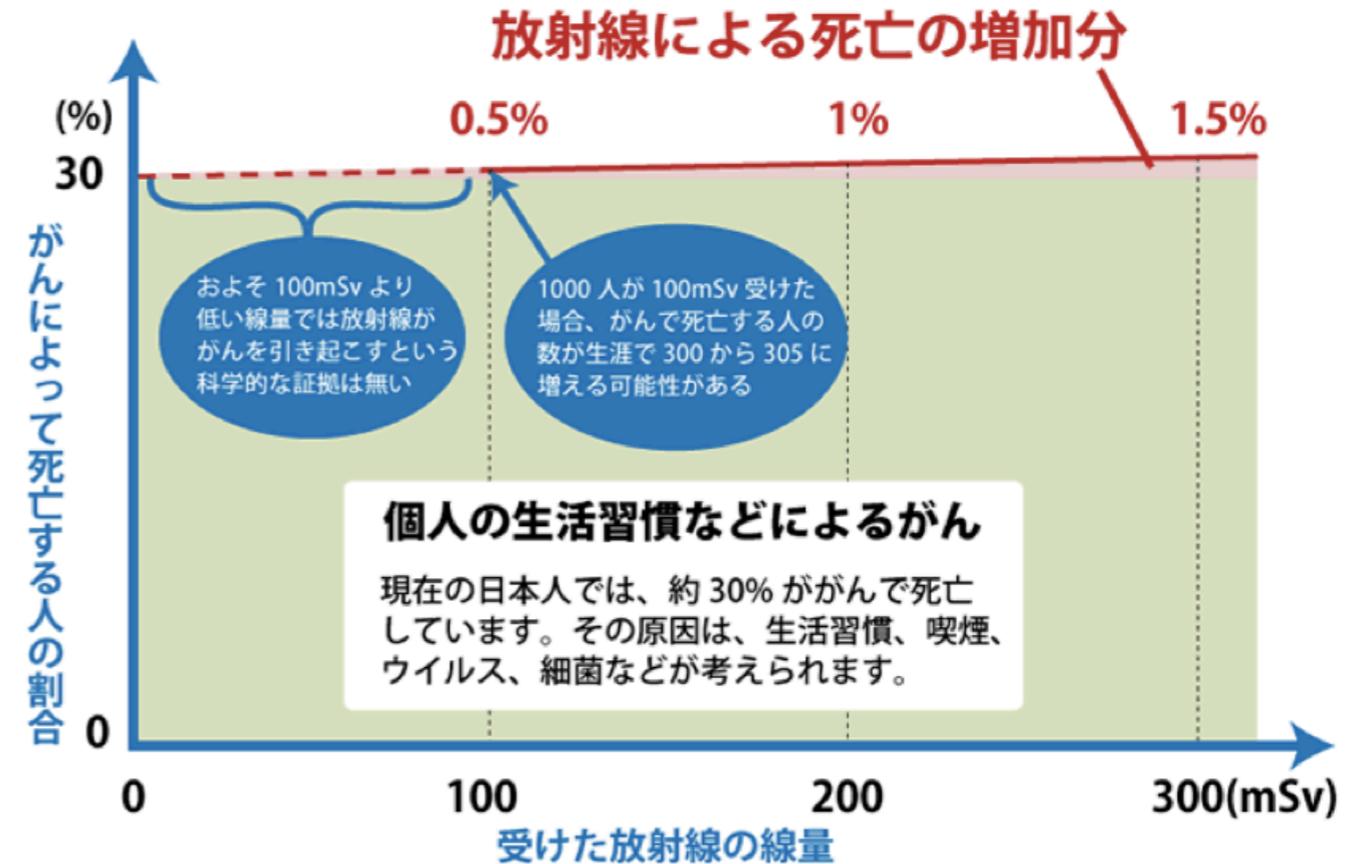
(10,000人当り、全年齢平均、1Sv当り過剰死亡数)

	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

[出典](社)日本アイソトープ協会:国際放射線防護委員会の1990年勧告(1991年11月)、p.157

# 低線量・低線量率の被曝

## 放射線によるがん・白血病の増加



## 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)

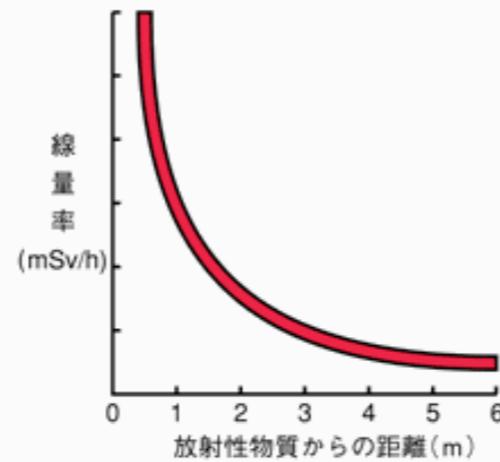
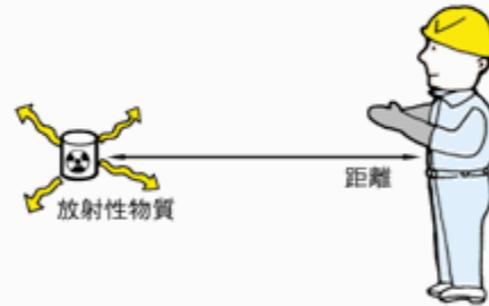
喫煙によるリスクより遥かに小さい。

**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。

# 放射線防護

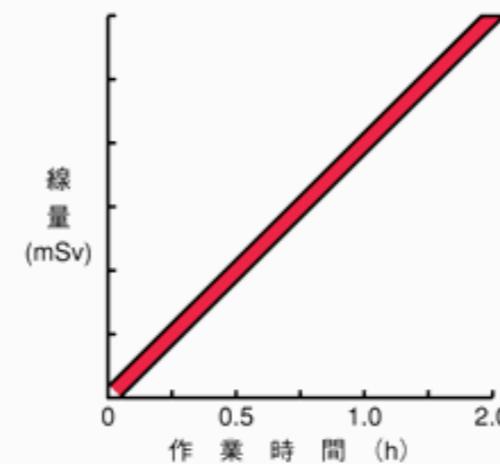
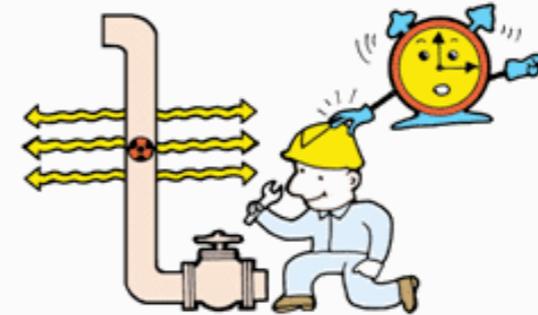
## ● 距離による防護

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



## ● 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

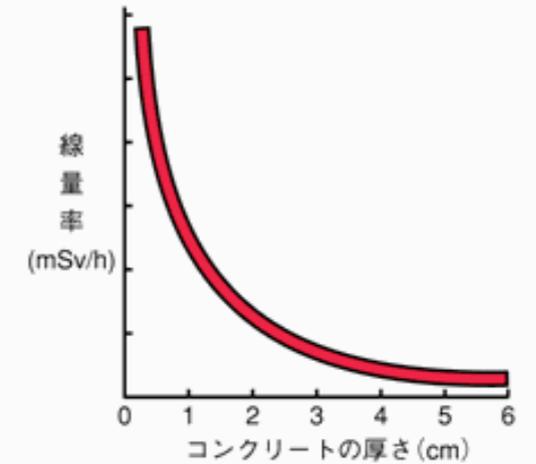
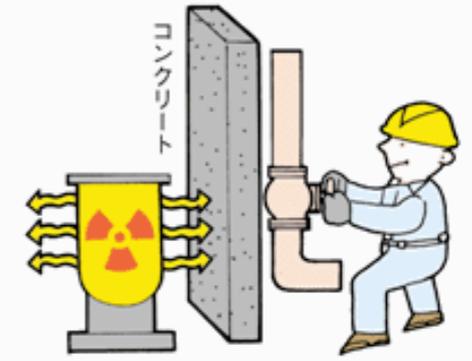


図1 遮へい3原則の図

[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 皮膚 妊娠中の女子の 腹部表面	150 mSv / 年 500 mSv / 年 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。

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）

### 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。

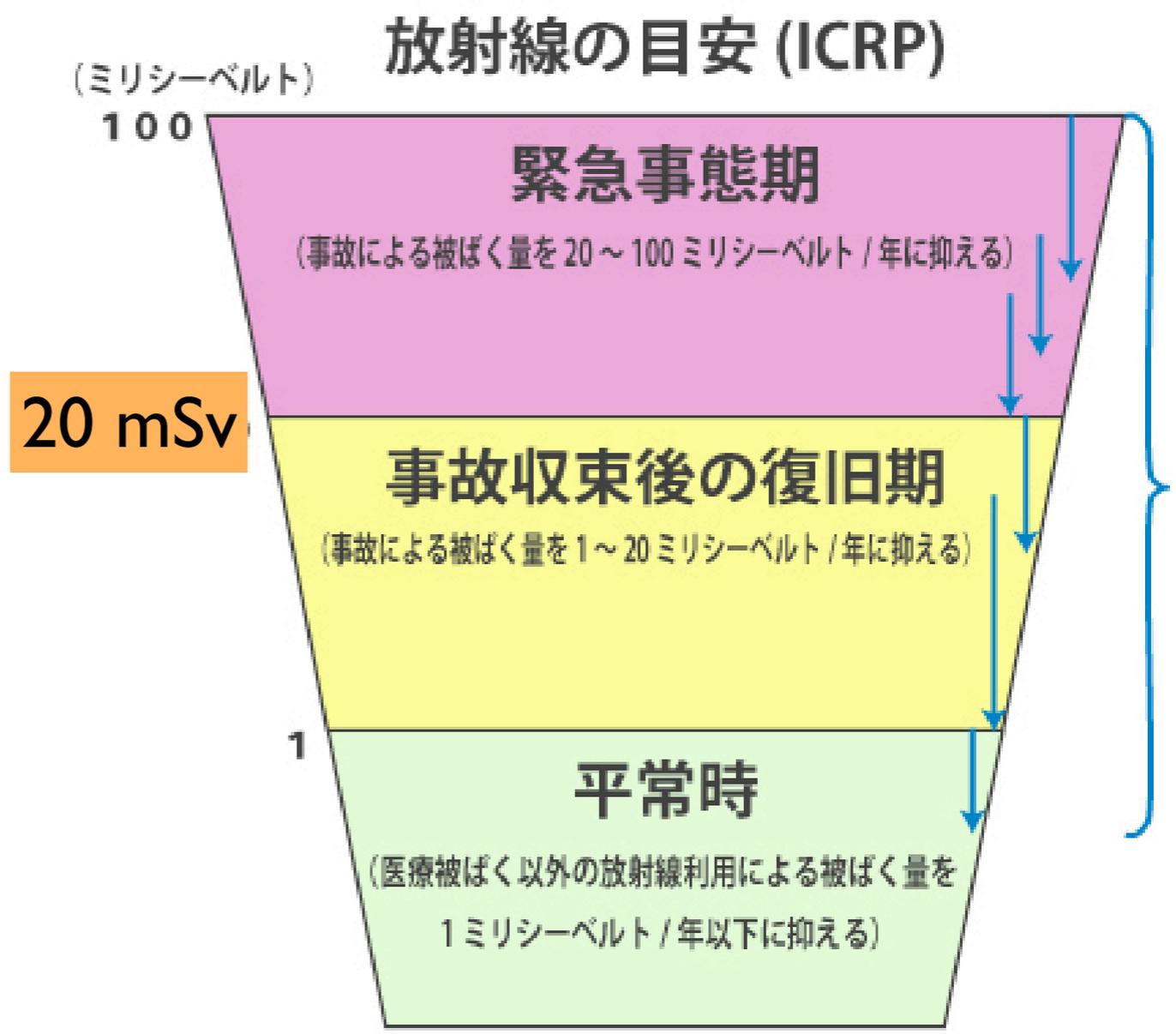
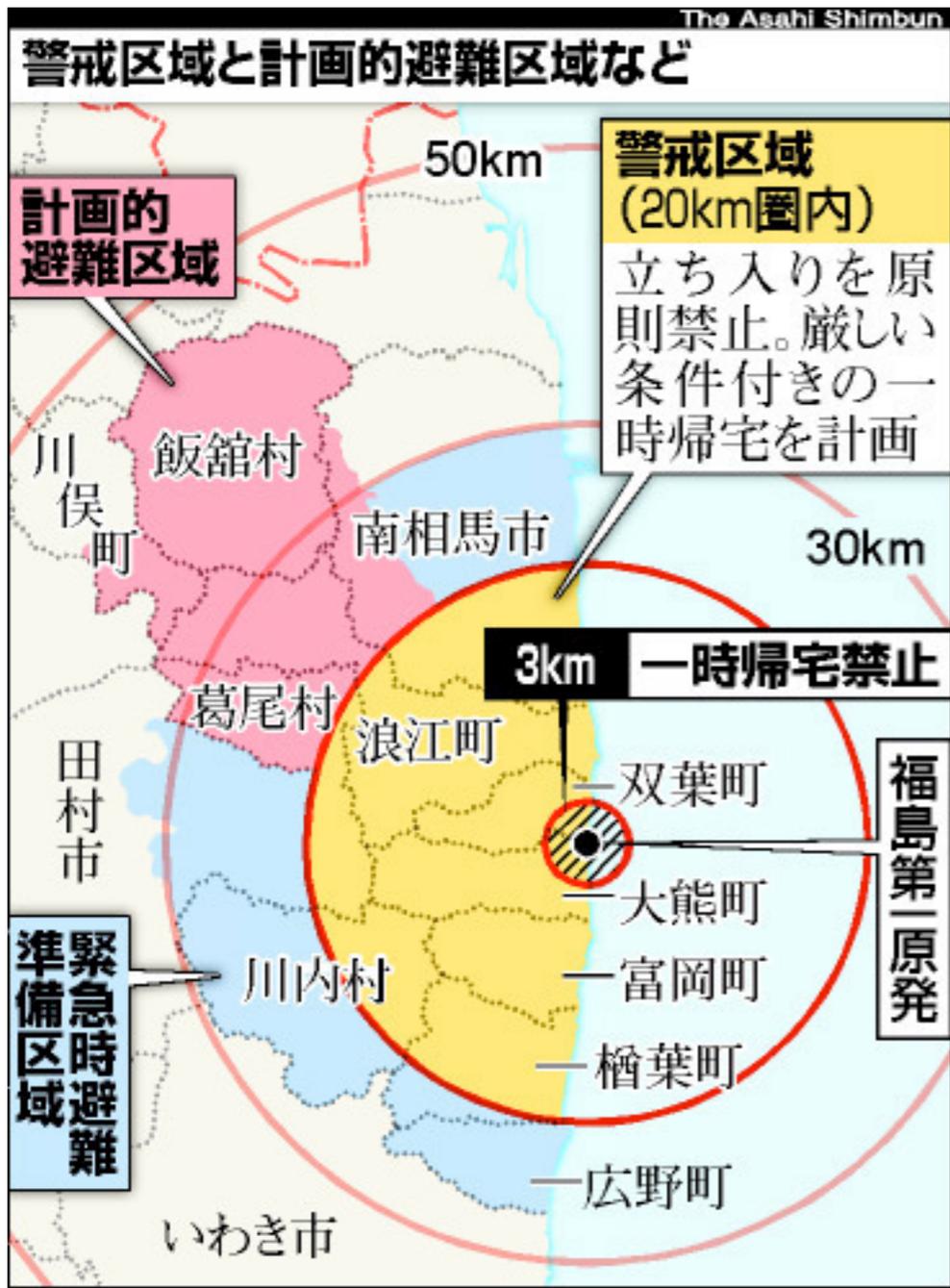
3) 被ばく部位に関係なく、深さ7 mg/cm<sup>2</sup>、面積1 cm<sup>2</sup>の皮膚についての平均線量に適用される。

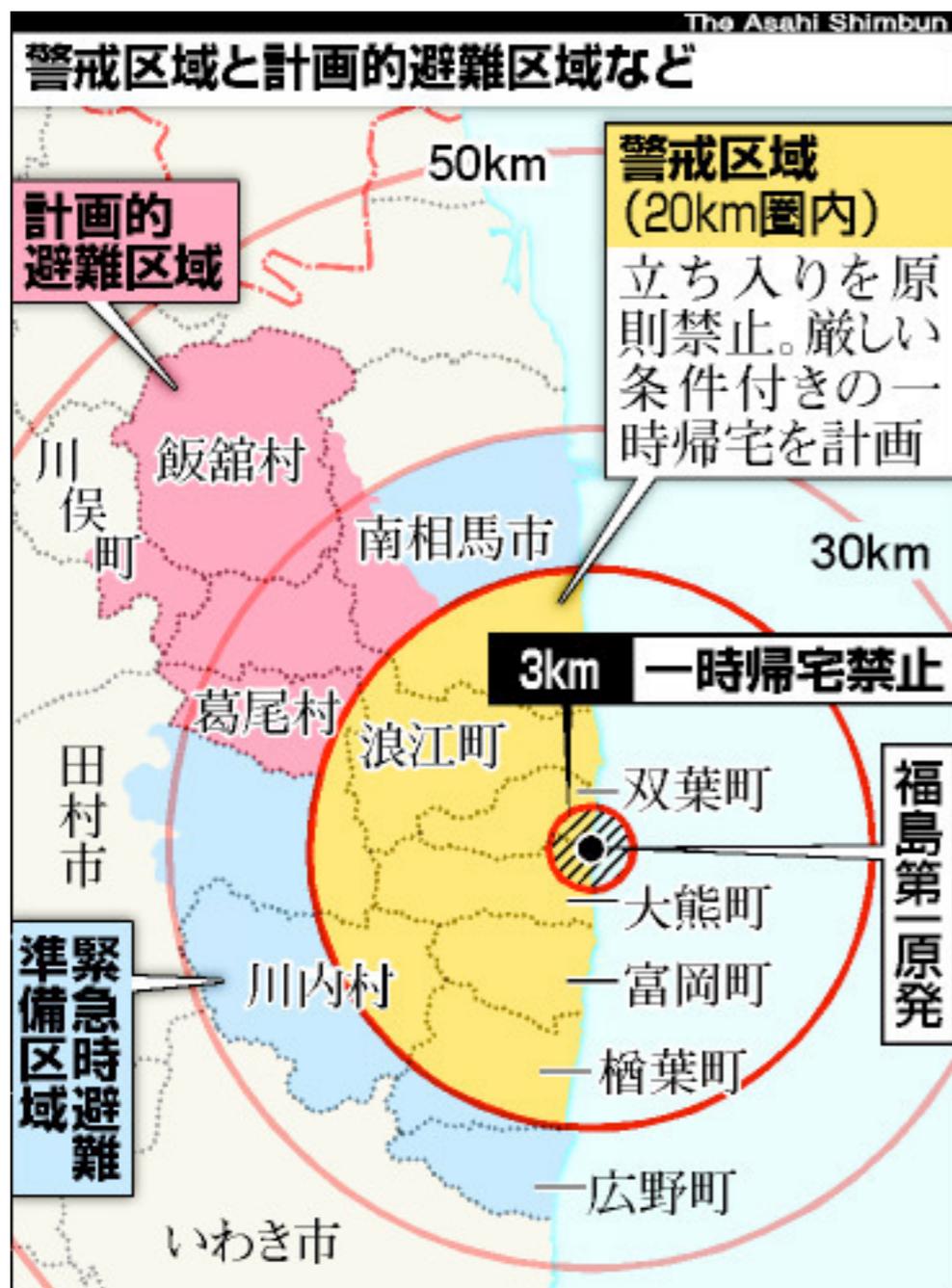
ICRP 勧告

〔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





飯舘村の住民のリスクは？

住み続けるリスク

放射線の影響？

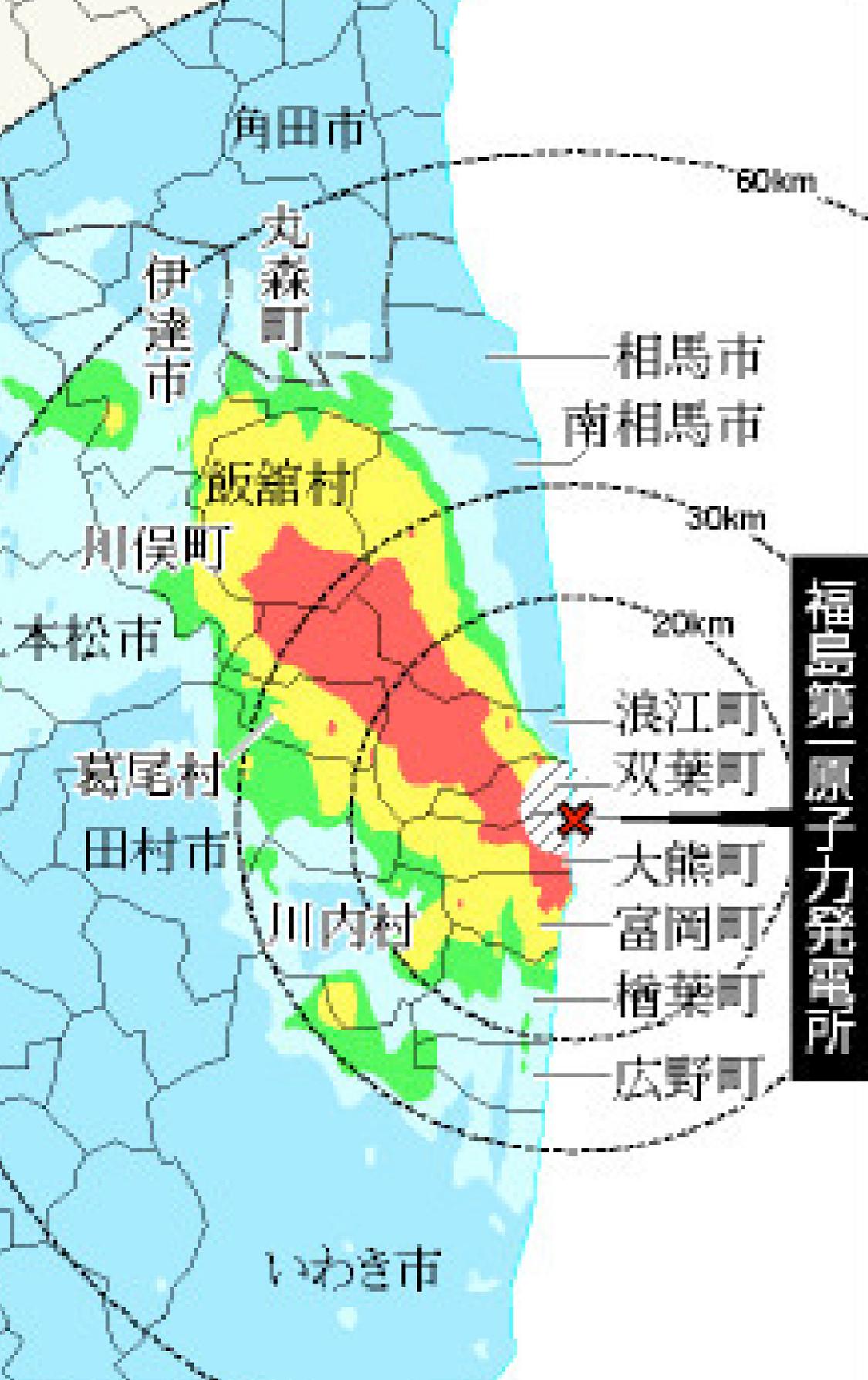
日常サービスの低下／欠如

避難生活でのリスク

非日常の集団生活ストレス

生業・収入の損失

年齢、家族構成、職業



単位は1平方メートルあたりのベクレル  
 300万~3000万 100万~300万 60万~100万  
 30万~60万 30万以下 測定結果が得られていない範囲  
 4月29日現在で換算。文部科学省及び米エネルギー省による航空機モニタリングの結果から

# 飯舘村の住民のリスクは？

住み続けるリスク

放射線の影響？

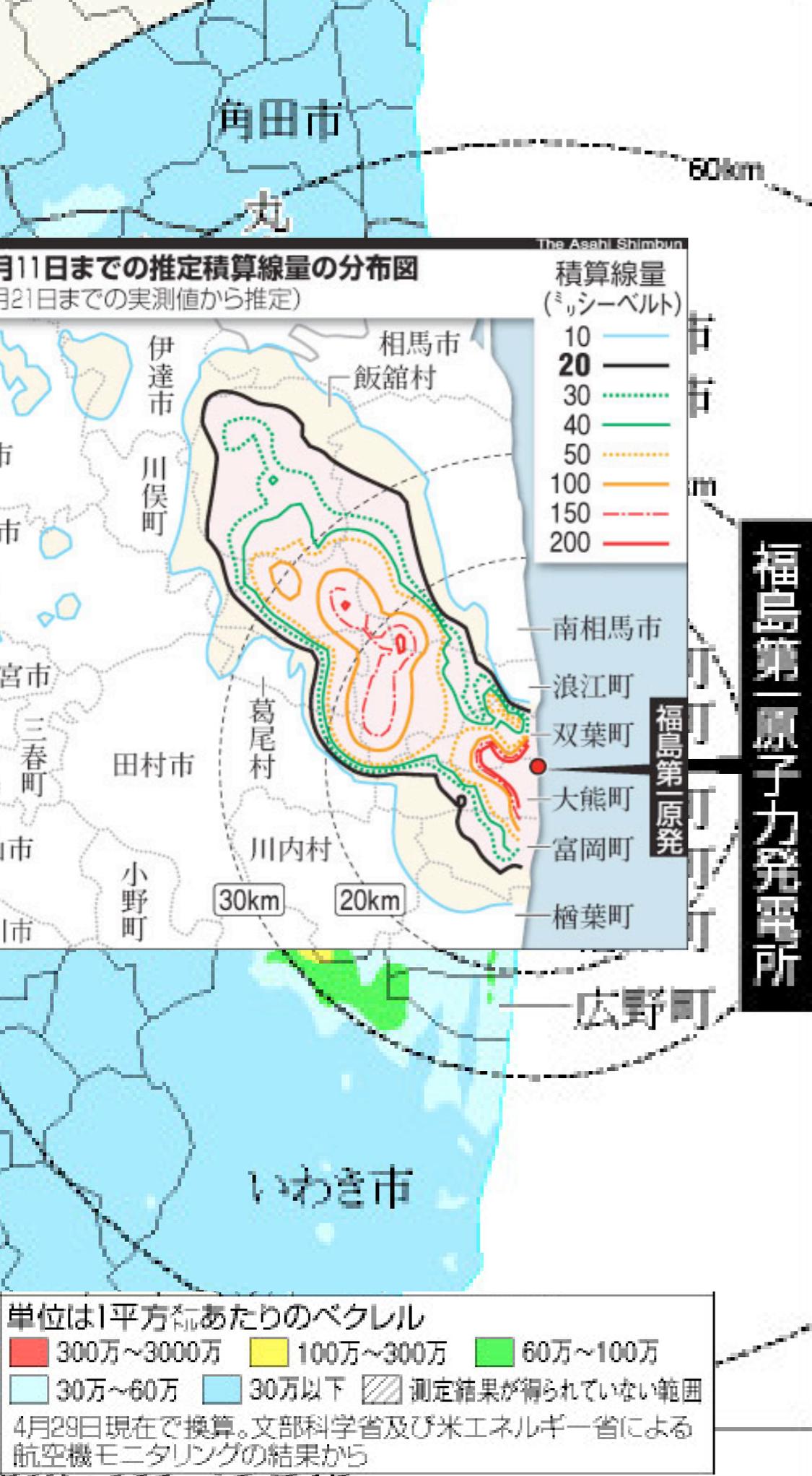
日常サービスの低下／欠如

避難生活でのリスク

非日常の集団生活ストレス

生業・収入の損失

年齢、家族構成、職業



# 飯舘村の住民のリスクは？

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

非日常の集団生活ストレス

生業・収入の損失

年齢、家族構成、職業

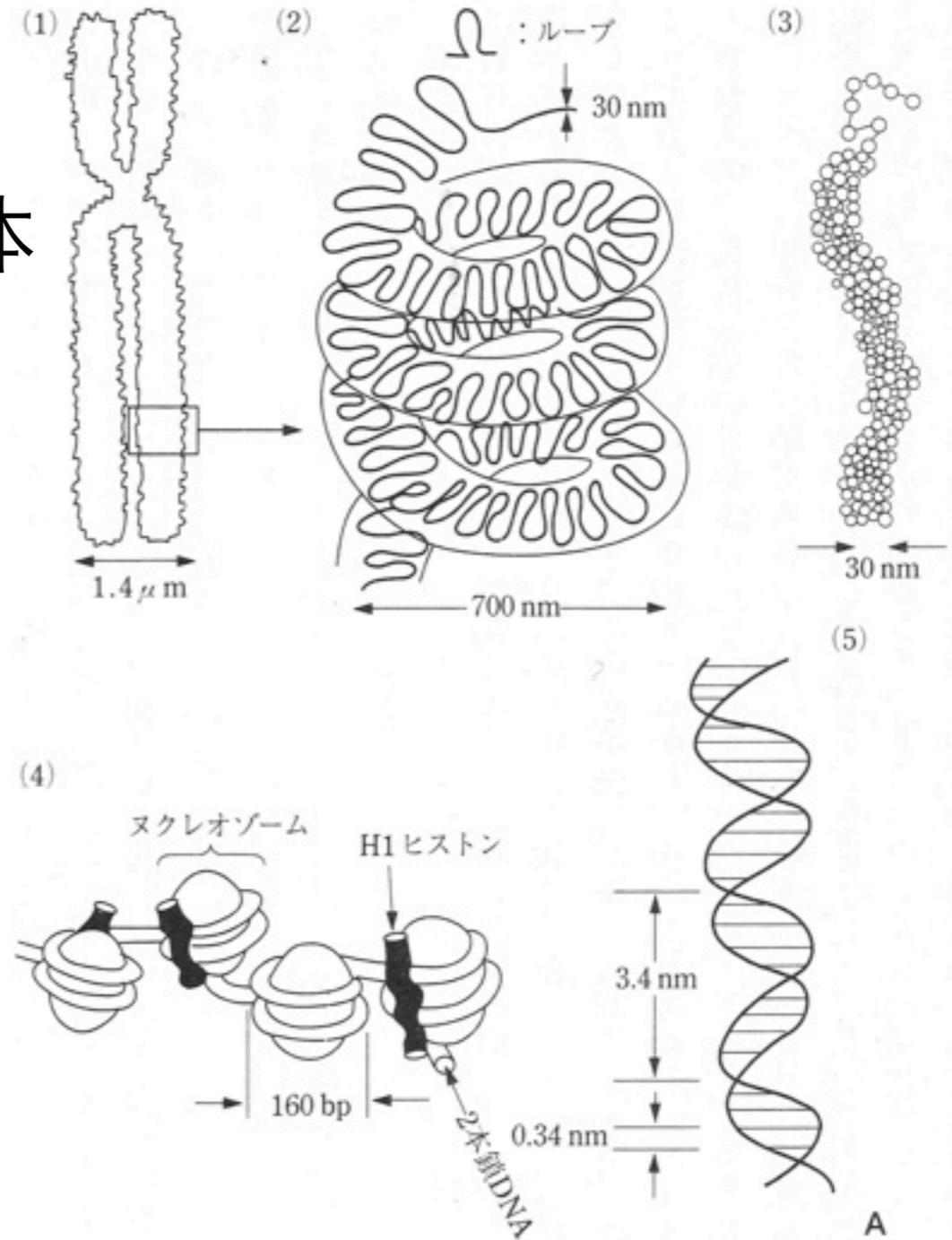
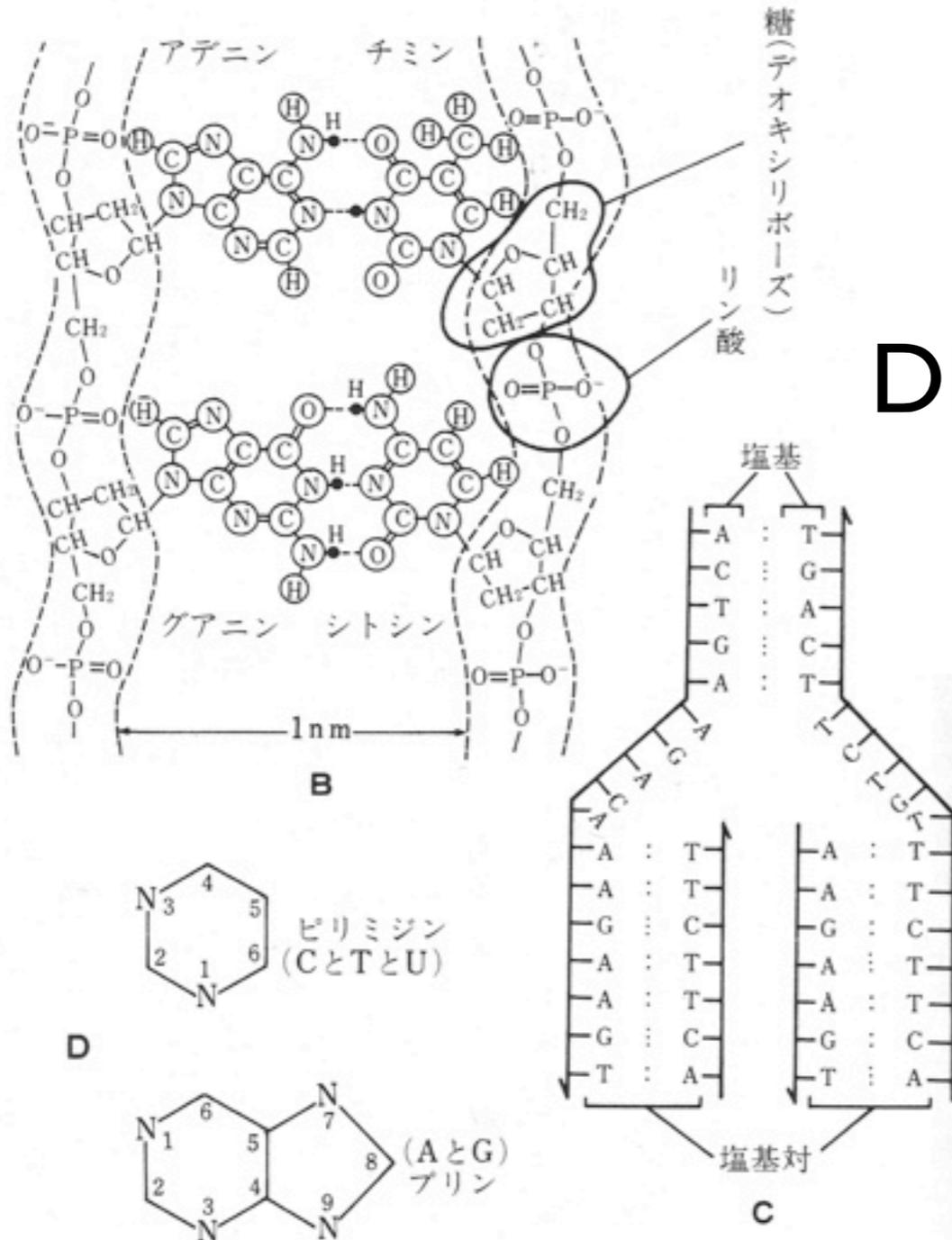
# 放射線生物学

～ 損傷修復 ～



# 染色体

# DNA



図III-16 ヒト染色体からDNAまで。

A. 染色体の構造。(1) ヒトの染色体。(2) クロマチンの高次構造（模式図）クロマチンはループ状になり、それがさらに高次の折りたたみ構造をとってコンパクトになる。(3) クロマチンの凝縮した線維構造とほどけた状態（先端部，○印はヌクレオゾーム）。(4) クロマチンの微細構造の模型：ヌクレオゾーム（ヒストンタンパク質に巻きついたDNA鎖）が単位となり，その相互作用で連帯的会合体の線維構造をつくる。(5) DNAの二重らせん型の構造。（文献5より改写）

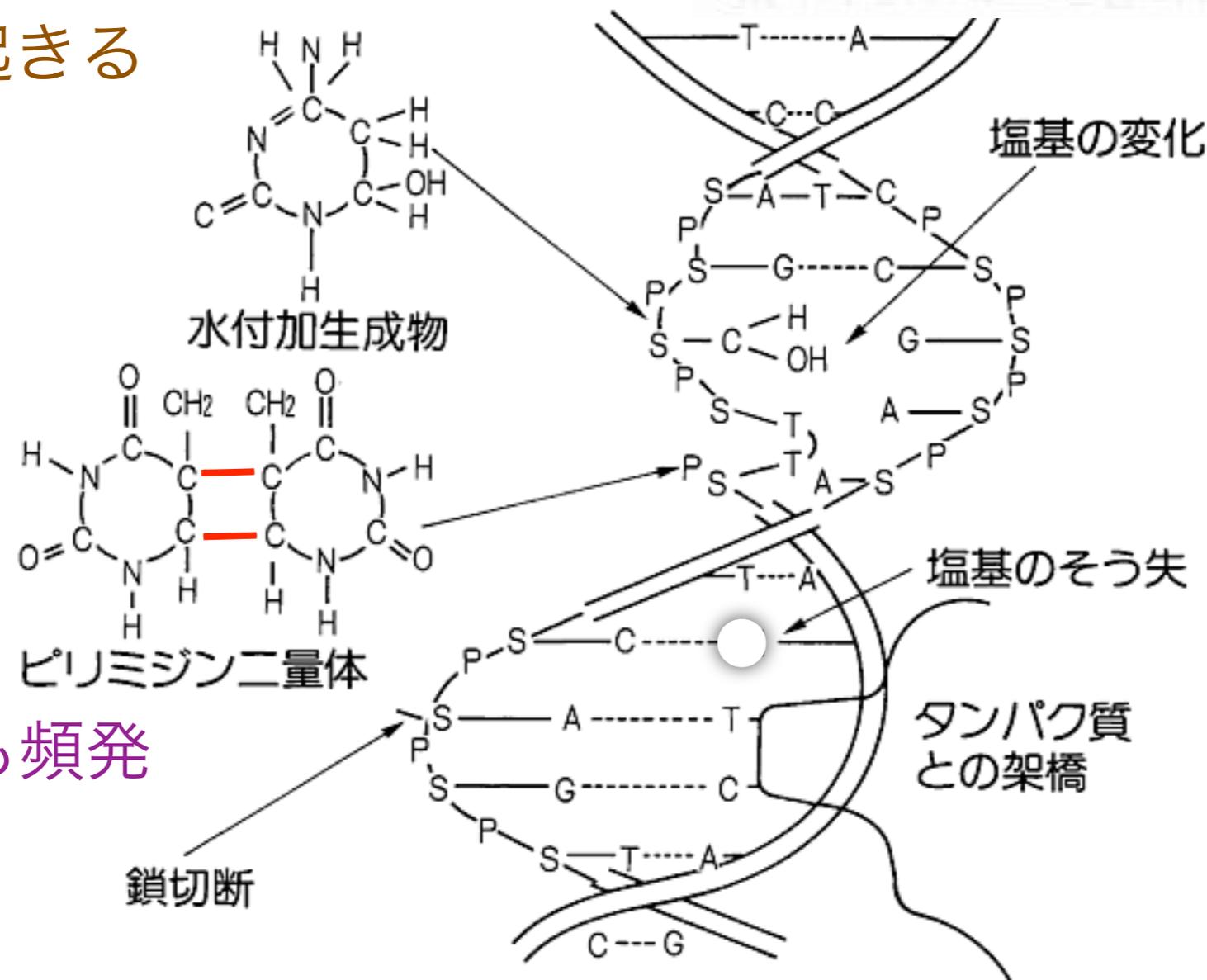
図III-16(つづき) DNAの化学構造と複製の模式図。  
 B. DNAの化学構造。  
 C. DNA複製の模式図。  
 D. 塩基内の炭素または窒素の位置を示す番号によるよび名。

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

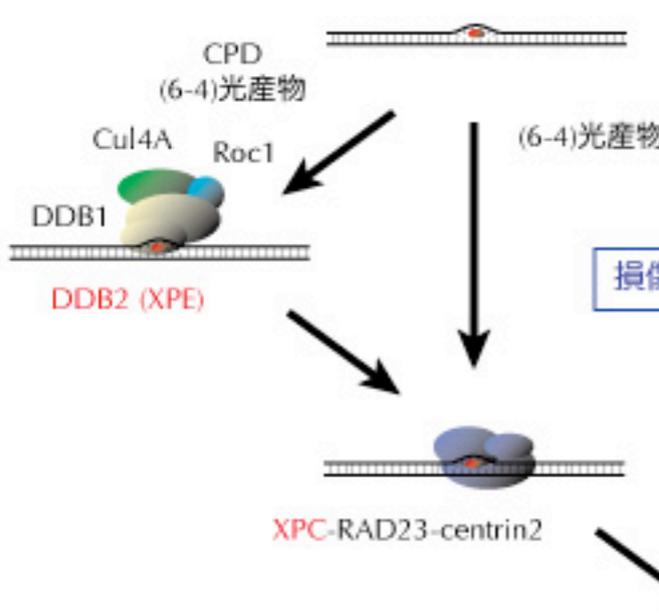


紫外線照射でも頻発

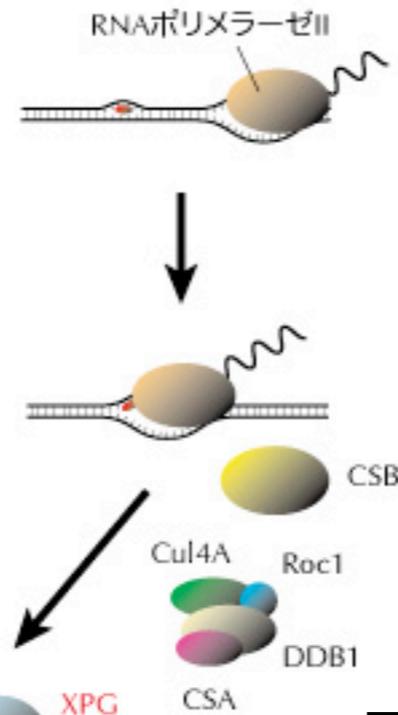
図2 放射線照射を受けた細胞から抽出された DNAに見られる種々の損傷

[出典] 江上信雄：生き物と放射線、東京大学出版会、1975

## ゲノム全体を対象とする修復 (GGR)

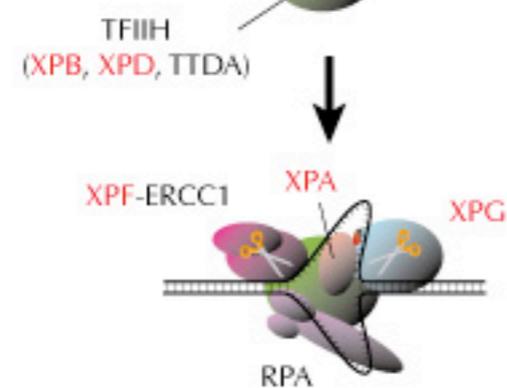


## 転写と共役した修復 (TCR)

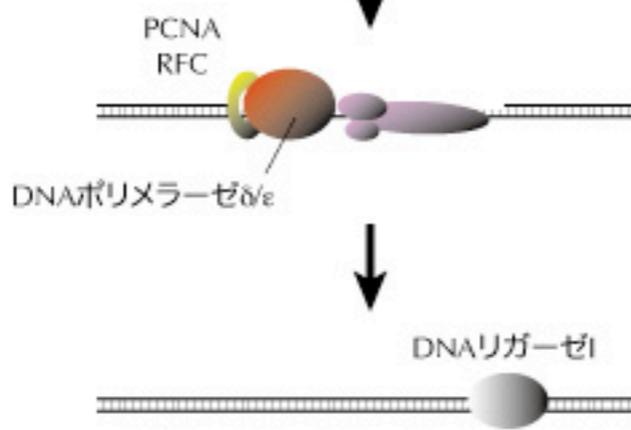


損傷の認識

TFIIHによるDNA二重鎖の巻き戻し



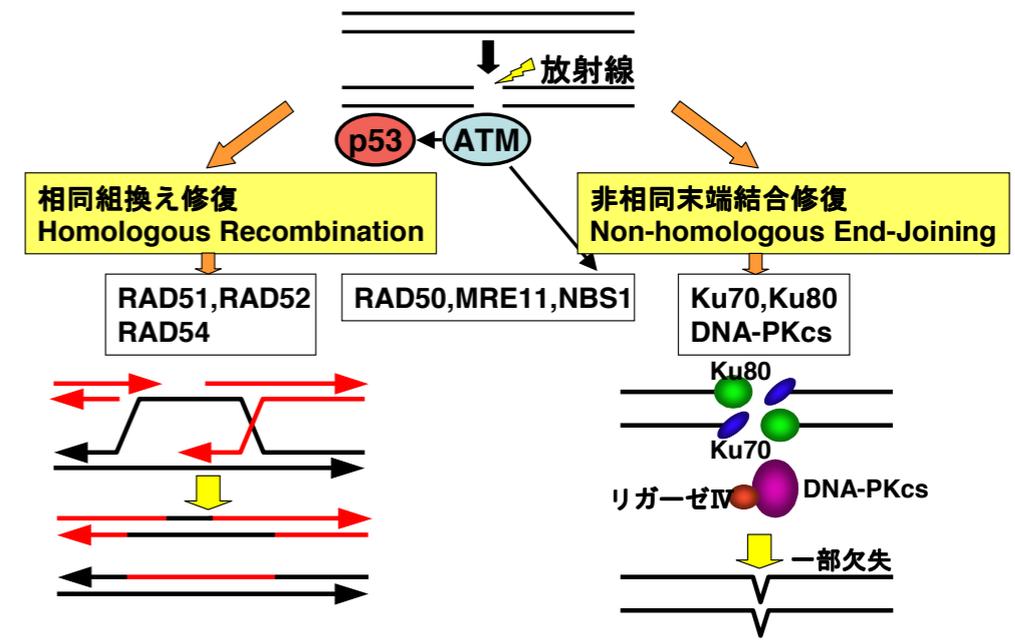
損傷両側における一本鎖切断



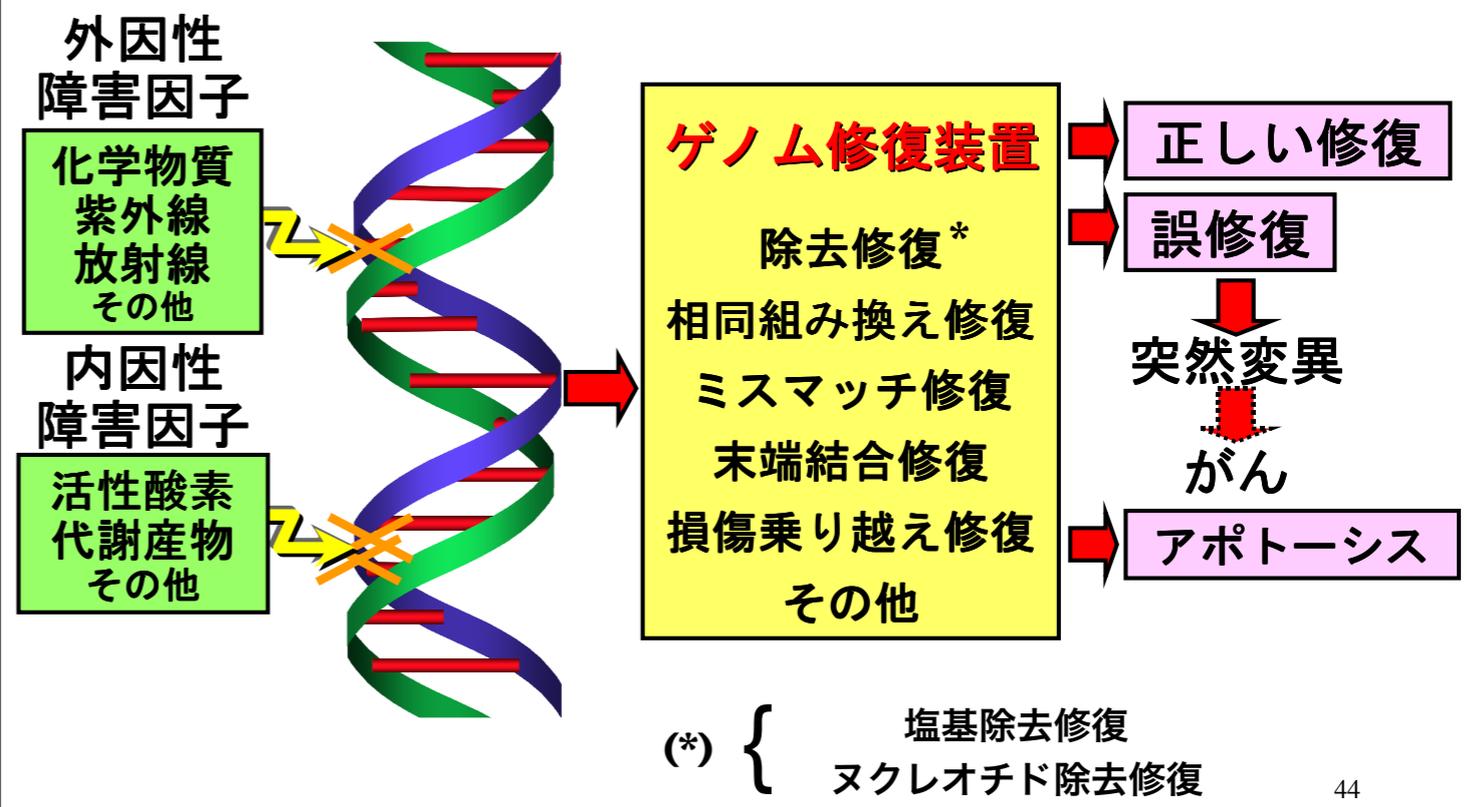
DNA修復合成

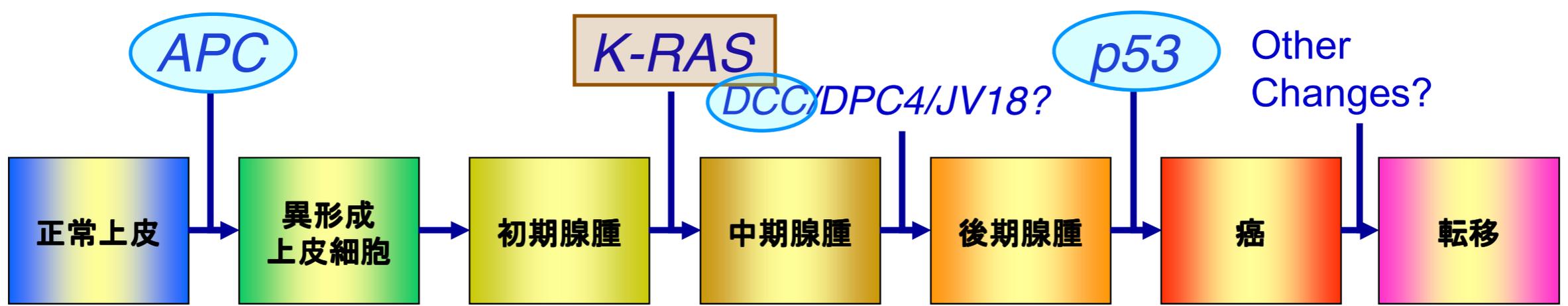
DNA鎖の再連結

## 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





## 多段階発がん仮説

がん = 細胞の異常増加

がん遺伝子

がん抑制遺伝子

ミスマッチ  
修復の欠陥

ゲノム不安定性の誘導

- 放射線による直接電離、および水のイオン化で生じるラジカルはたしかに DNA に損傷を与える（おそらく線量に比例）。なかでも二本鎖切断が特に問題となる（高LETを与えるα線、中性子線は生物学的効果が大い）。
- しかしそもそも DNA 損傷は化学物質など放射線以外の要因によっても、また普段の DNA 複製の際の複製エラーでも生じている。
- ヒトを含む生物の細胞には、DNA 損傷に対する多種多様な修復機能が備わっている。
- それら DNA 修復遺伝子自体が損傷を受けると修復機能が低下するが、DNA 損傷が残ってもすぐガンになるのではなく、細胞がガン化するのは多段階のガン遺伝子（アポトーシス(細胞死)に関与する p53 ガン抑制遺伝子を含む）に次々に突然変異が生じた場合。
- 一方で、DNA 修復遺伝子に異常のある病気の人、通常の人よりはるかにガンにかかりやすい。（色素性乾皮症、運動失調性毛細管拡張症、ナイミーヘン切断症候群など）

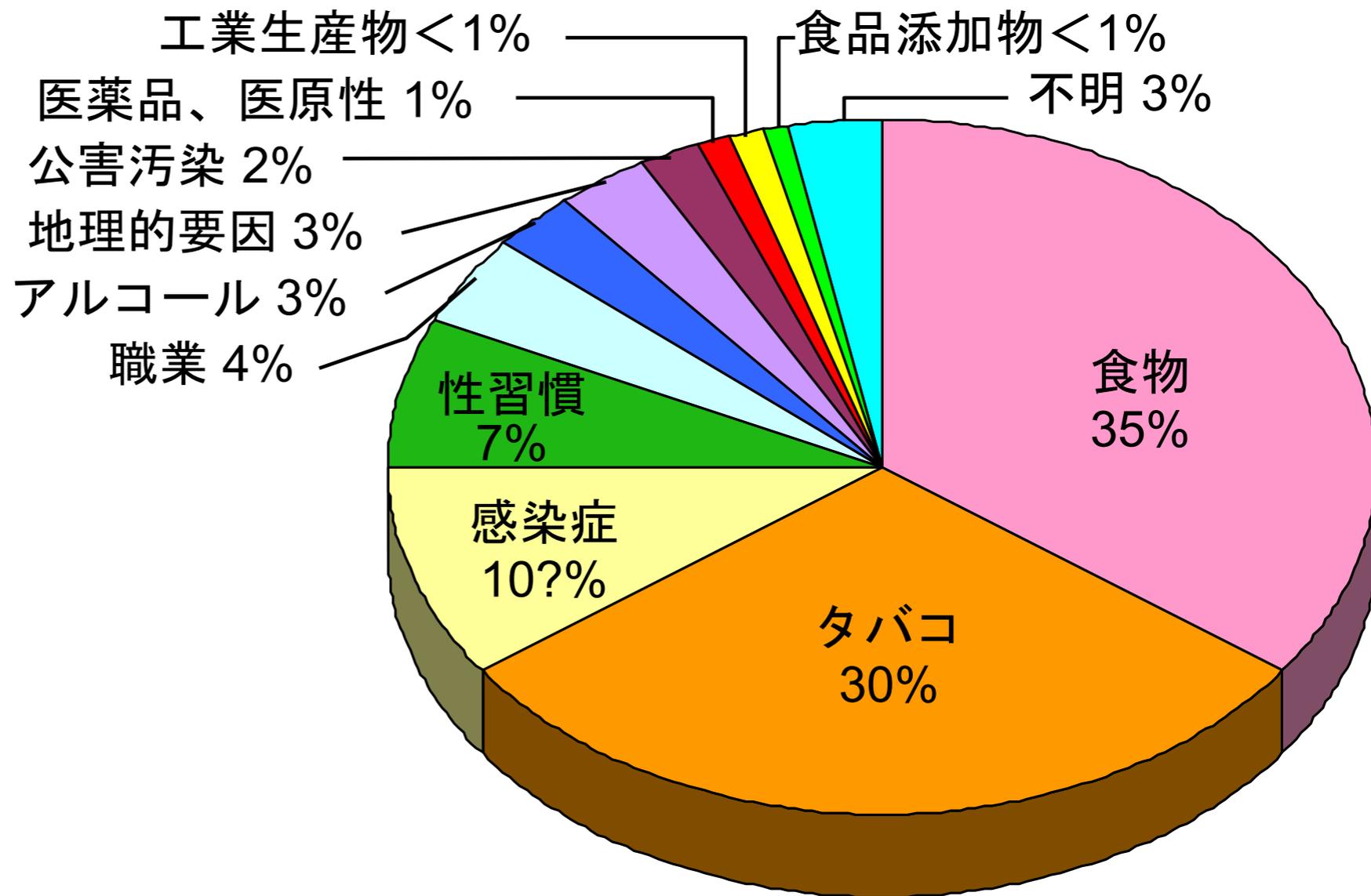
## 放射線と生活習慣の発がんの相対リスク比較

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
200~500ミリシーベルトを浴びる	1.16倍
運動不足	1.15~1.19倍
肥満	1.22倍
1000~2000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
2000ミリシーベルト以上浴びる	
喫煙	
毎日3合以上の飲酒	

※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)

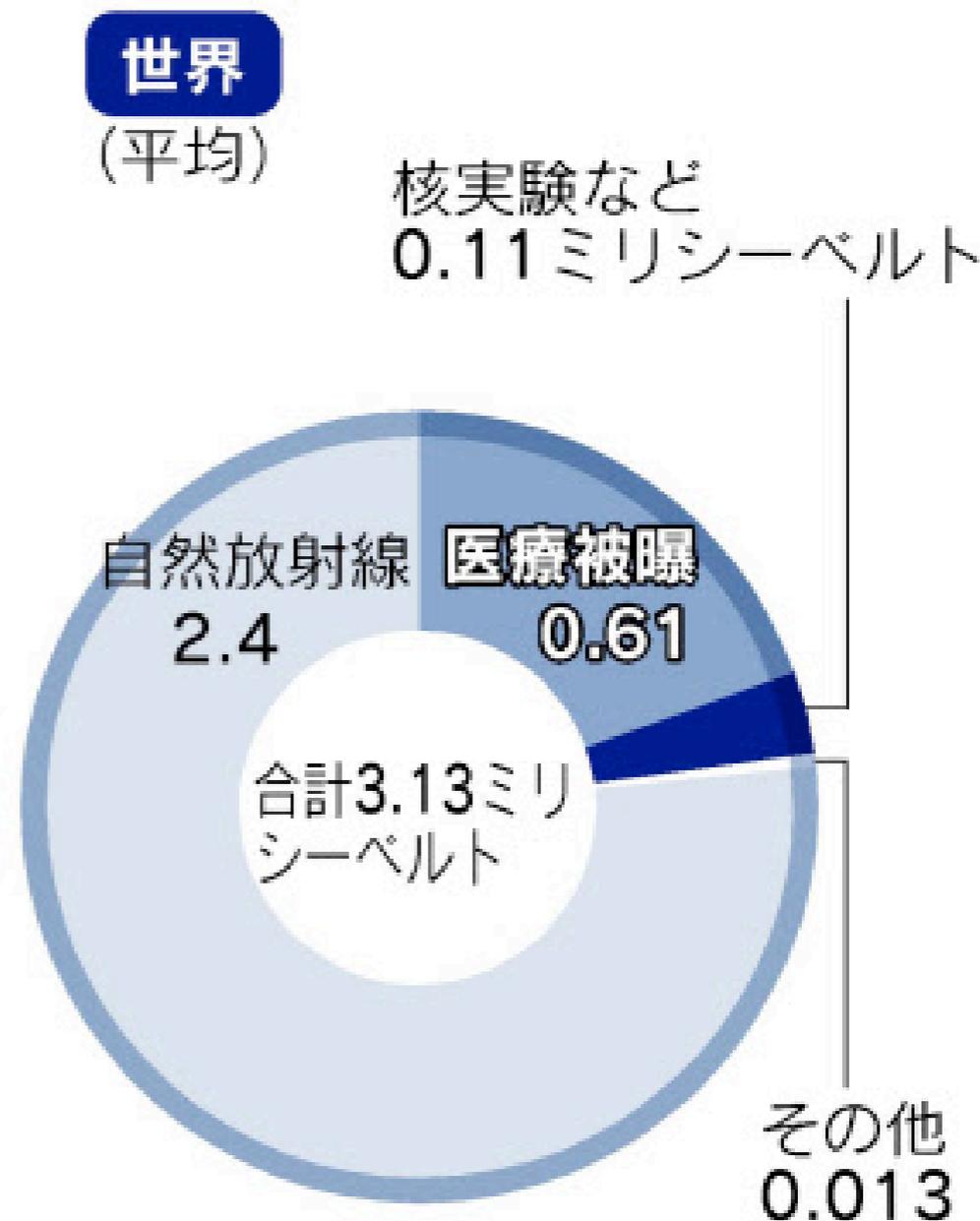
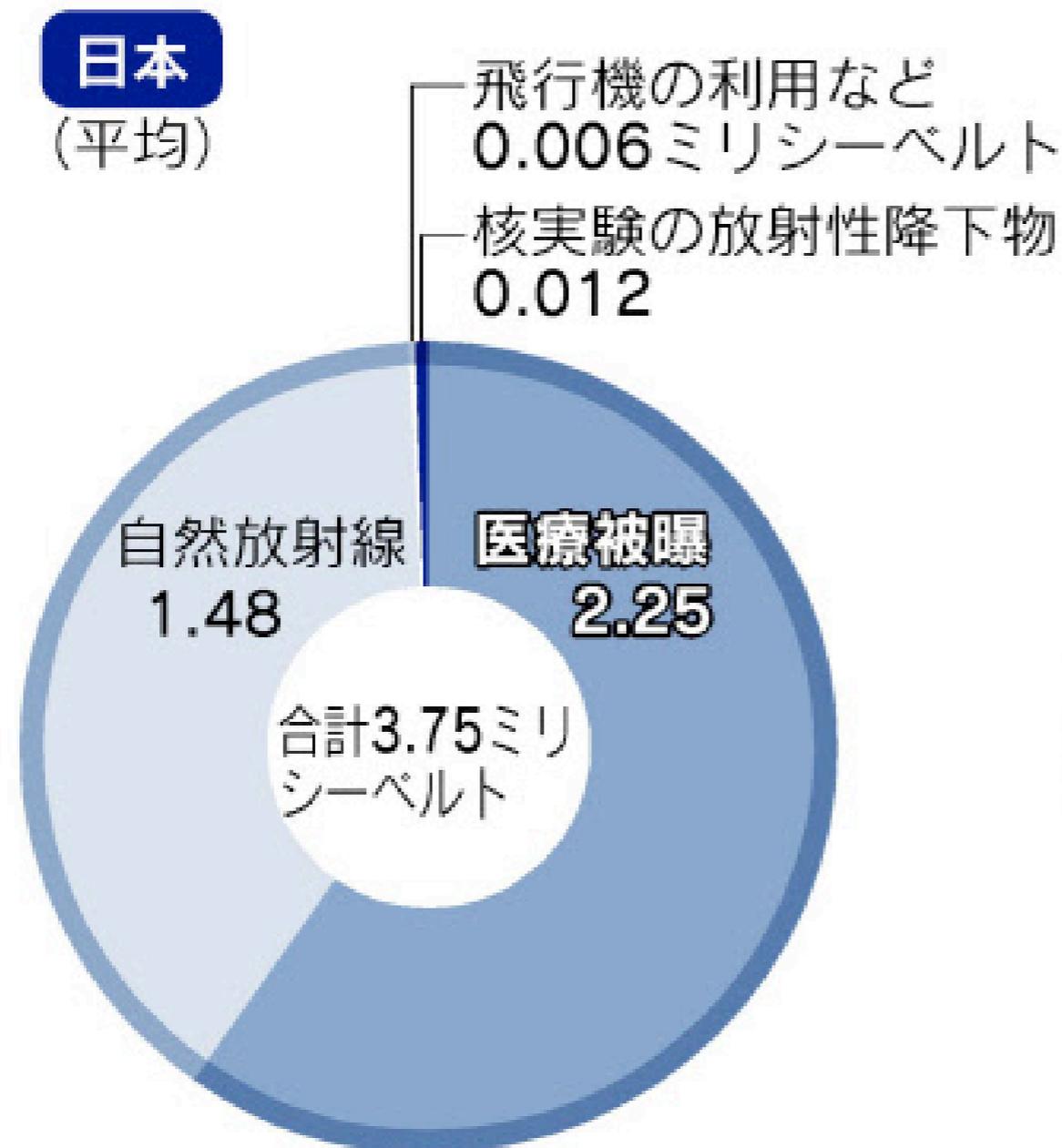
表の値は短時間での被曝の場合。

(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。)

がん死中にしめる各因子の割合 (%)

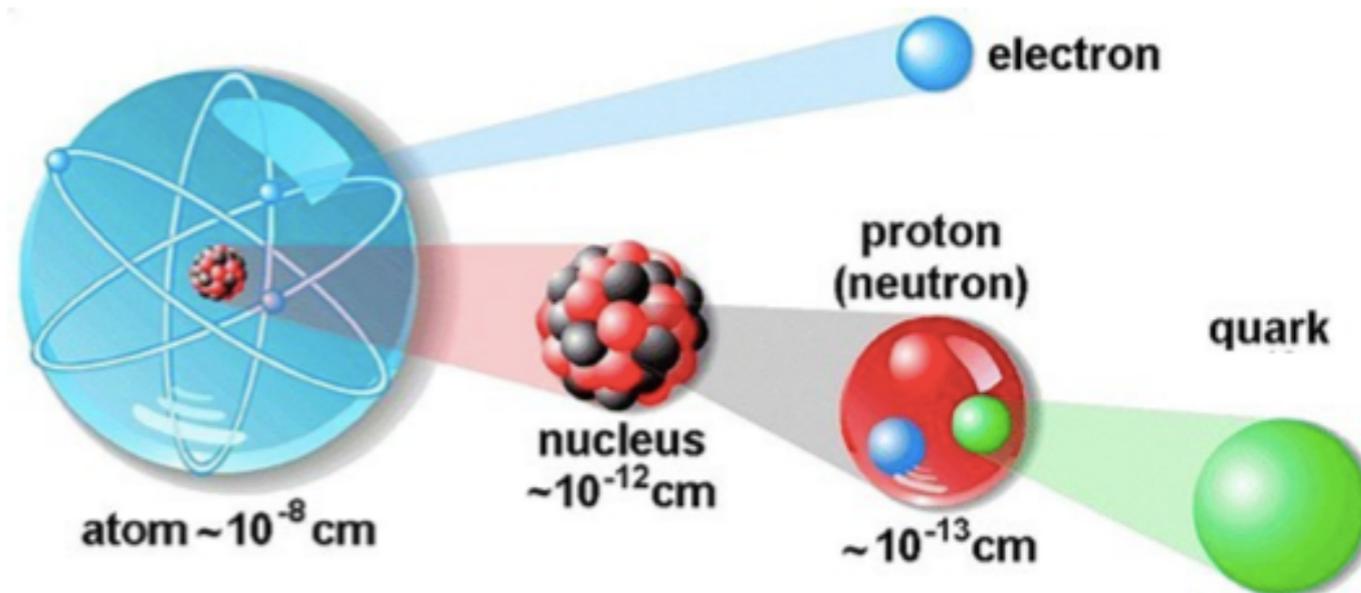


# 1人が1年間に浴びる放射線量



(注) ICRPが定める一般人が浴びてもさしつかえないとする限度1ミリシーベルトは医療被曝と自然放射線は除く。「原子力・エネルギー図面集 2011年版より」

# 怖がらないための 放射線の 基礎知識



## 講演スライド・関連文書

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

## 連絡先

[torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp](mailto:torii-radio@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp)

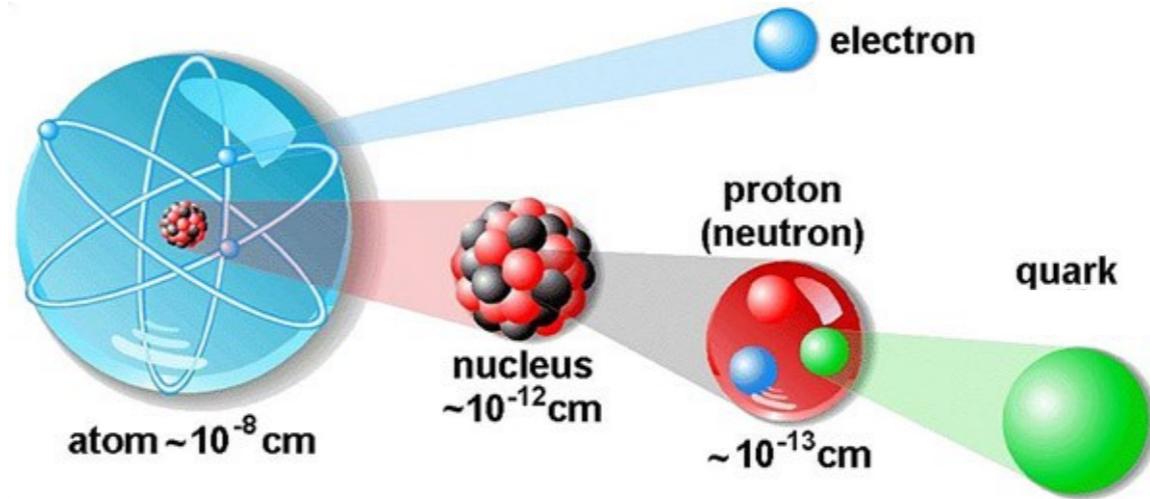
担当：鳥居 寛之

原子力発電所の事故が連日トップニュースで報じられ、世界中が放射能汚染に対しヒステリックなまでに反応している現在、我々には放射線に対する正しい科学的リテラシーが求められています。一方で、放射線に関する学問は多分野にわたり、今回の一連の事故の中にも、原子工学・放射線生物学・放射線防護学・食品衛生学・大気／海洋科学と様々な専門家が登場しました。今日は短い時間ですが、放射線に対する必要最小限の基礎知識についてお伝えします。

放射線は目に見えないものだけに必要以上の不安と混乱を招いてしまいがちです。確かに、原爆やチェルノブイリ原発事故、東海村の核燃料加工会社JCOで起きた臨界事故のように、現場で大量被曝をしてしまった人の悲惨な状況のイメージがつきまといますが、周辺地域など低線量での被曝ではそうした確定的影響は現れません。今回の事故で一般公衆に対して問題となるレベルになるリスクが増えるかどうかという確率的影響ですが、放射線量が少なければその分だけリスクも小さくなるので、合理的に可能な範囲で被曝を最小限に抑える努力が求められます。

普段から我々は自然放射線や人工放射線から被曝を受けています。肺は大気中のラドンによって内部被曝を受けていますし、体内にも放射性物質のカリウムが食品から取り込まれて常に存在しています。ヒトを含む生物の細胞の遺伝情報を担うDNAは、たしかに放射線によって損傷を受けますが、生物にはDNAの傷を修復し細胞ががん化するのを防御するための機構が何重にも働いています。低線量の放射線によるがんへの影響についてはまだ分かっていないことも多いのですが、細菌や実験動物を使った生物学的研究、また人の被曝の疫学的調査などによってある程度のデータは揃っています。

# 自主講義 放射線学



## 放射線を学ぶ

原子力発電所の事故が連日トップニュースで報じられ、世界中が放射能汚染に対しヒステリックなまでに反応している現在、我々には放射線に対する正しい科学的リテラシーが求められています。

一方で、放射線に関する学問は多分野にわたり、大学などで系統立って教えられる機会は非常に限られています。放射線に対する知識不足が、必要以上の不安と混乱を引き起こしている現状があります。

そこで今回、教養学部物理部会に所属して粒子線物理学を専門とする鳥居助教が講師となって、自主講義を企画することにしました。急遽の講義開催決定により正規の授業として組み込むことができなかったため、受講しても単位は出ませんが、意欲ある皆さんの参加を期待します。

## 講義内容

放射線とは？

放射線と放射能の単位(シーベルト、ベクレルなど)

放射線と物質との相互作用《放射線物理学》

放射線の測定《放射線計測学》

放射線の生体への作用と影響《放射線生物学》

原子核の壊変《原子核物理学》と核分裂反応《原子力工学》

放射線の利用(放射線診断・治療、分析、年代測定)

高エネルギー・素粒子物理学《加速器科学》

講師 鳥居 寛之 教養学部物理部会 助教

## 講義日程

火曜5限 開講

11号館 1101教室

6/ 7 放射線の利用・医療

6/14 放射線計測学・  
加速器科学

## 対象

主に1, 2年の理系が対象ですが、意欲のある文科生や3年生以降も歓迎します。

Fine.

Grazie per la vostra attenzione.

Merci de votre attention.

Thank you for your attention.

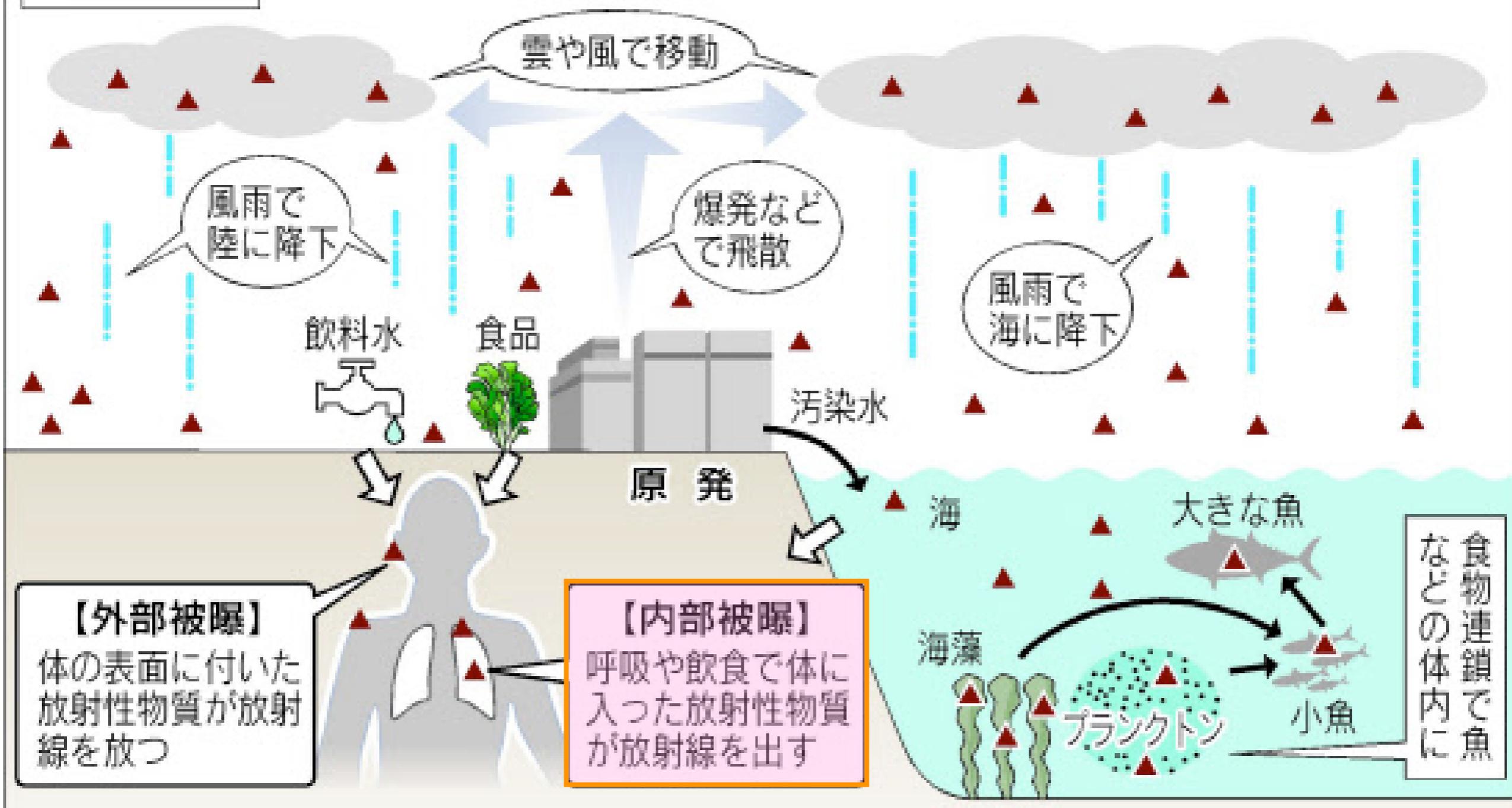
ご清聴ありがとうございました。

鳥居 寛之

Hiroyuki A.TORII

▲ 放射性物質

原発の放射性物質が及ぼす影響 (イメージ)



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。



# 放射線防護のための線量 protection quantity

## 預託線量 committed dose (内部被曝) [Sv]

預託等価線量

預託実効線量

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

### 実効線量係数 (成人)

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

経口摂取	乳児 (3ヶ月)	幼児 (1歳)	子供 (2-7歳)	成人
I-131	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.8 \times 10^{-7}$	$1.0 \times 10^{-7}$	$2.2 \times 10^{-8}$



$^{131}_{53}$  8 days  $7/2+$   $\beta$  248 keV max (2.1%)

$\beta$ 線の最大エネルギーの平均値  
0.574 MeV ( $= 9.2 \times 10^{-14}$  J)

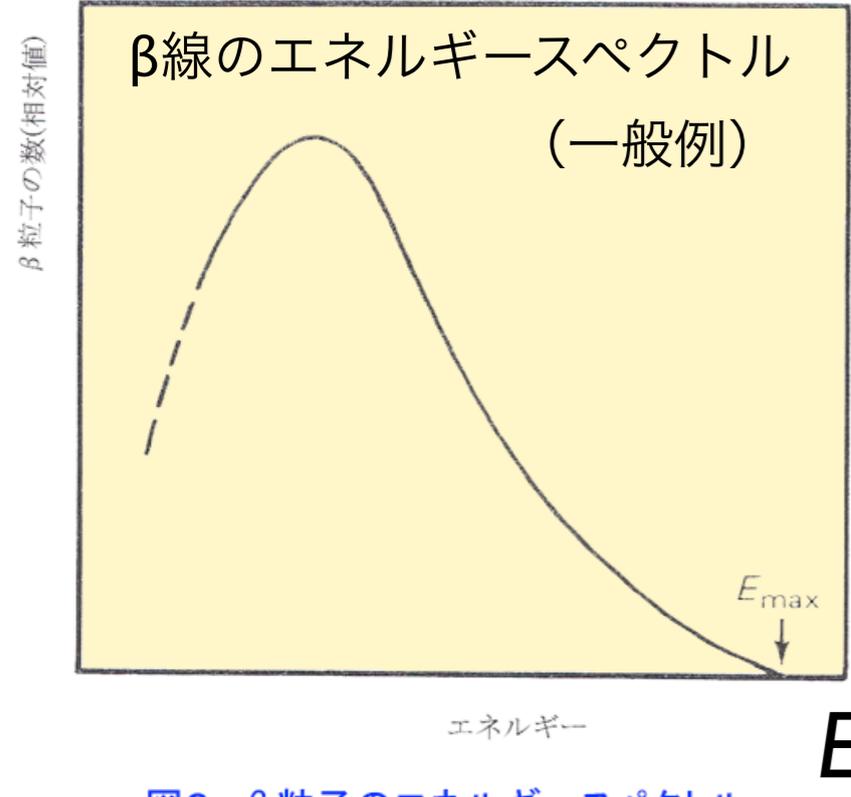
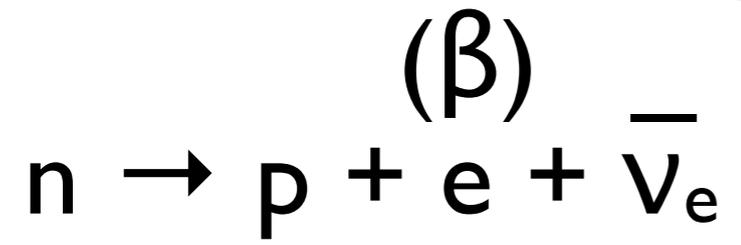
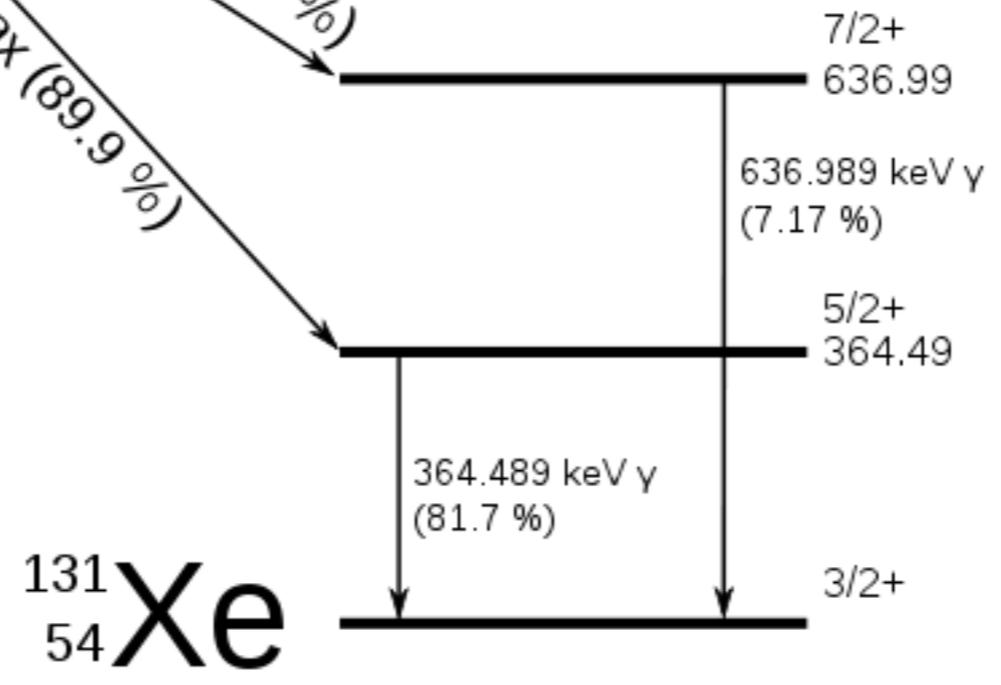
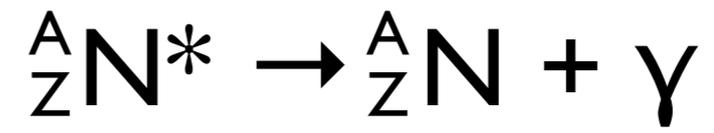


図2  $\beta$ 粒子のエネルギースペクトル  
[出典]石川友清(編):初級放射線、通商産業研究社、p.37

$\beta$  333.8 keV max (7.27%)  
 $\beta$  606.3 keV max (89.9%)

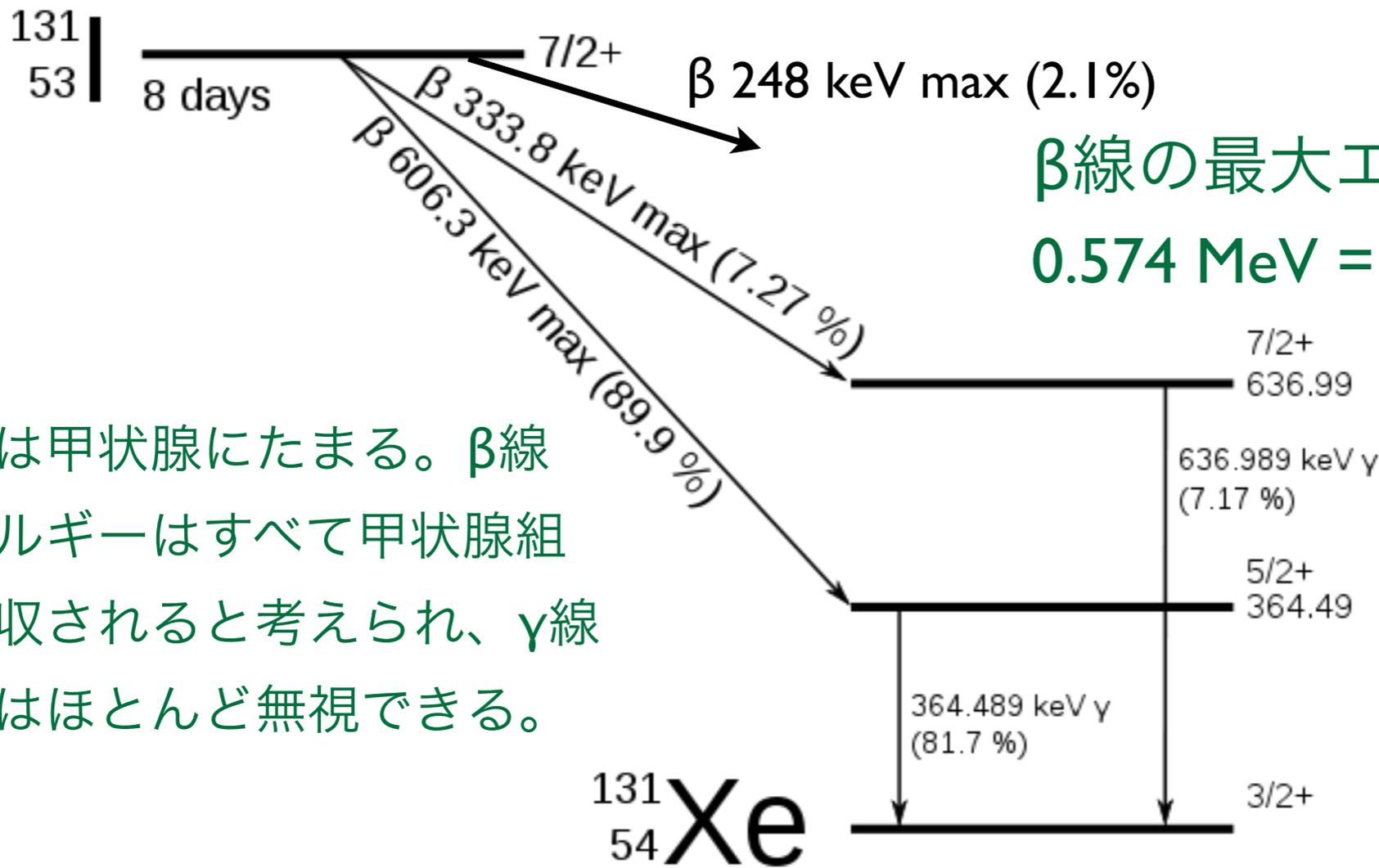


$\gamma$ 線：原子核の脱励起



$\gamma$ 線 (定まったエネルギー)

$\beta$ 線 (連続スペクトル)  
エネルギーの平均値  $\sim 0.3$  MeV



β線の最大エネルギーの平均値  
 $0.574 \text{ MeV} = 9.2 \times 10^{-14} \text{ J}$

β線のエネルギー  
 スペクトルの平均値  
 $\sim 5 \times 10^{-14} \text{ J}$

ヨウ素は甲状腺にたまる。β線のエネルギーはすべて甲状腺組織に吸収されると考えられ、γ線の効果はほとんど無視できる。

1 Bq あたり  $8.04 \text{ d} \times 86400 \text{ s/d} / \ln 2 = 1,000,000 \text{ decays}$

$5 \times 10^{-14} \text{ J} \times 1,000,000 / \text{Bq} = 5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq}$

成人の場合

成人の場合

これのうち 20% が甲状腺に取り込まれる（残りは排泄）と見積もると、20 g の甲状腺の

吸収線量 = 等価線量は  $5 \times 10^{-8} \text{ J/Bq} \times 0.2 / 0.02 \text{ kg} = 0.5 \mu\text{Sv/Bq}$

甲状腺は組織荷重係数が 0.05 なので、全身被曝量としての実効線量は

$0.5 \times 0.05 = 0.025 \mu\text{Sv/Bq}$ 。表の値  $2.2 \times 10^{-8} \text{ Sv/Bq}$  とほぼ一致。