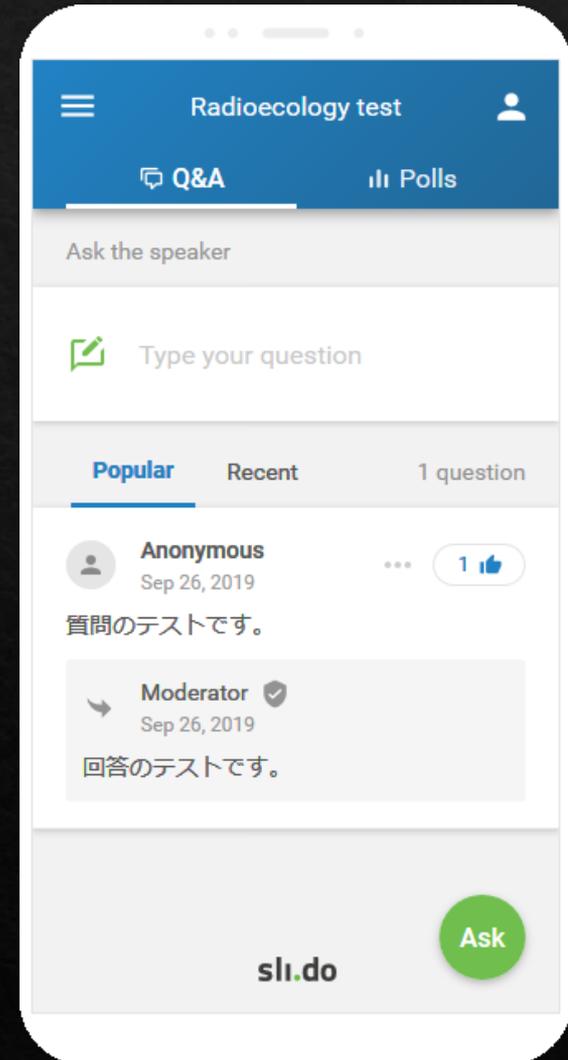


放射線の人体影響の基礎

アイソトープ農学教育研究施設／生産・環境生物学専攻
農地環境放射線学研究室
特任講師 廣瀬 農

sli.doについて

- 今回もsli.doを使用します。
- 今日はハッシュタグ（#）に「re1021」と入力してください



WebDAVサーバーについて

- 前回と同じフォルダに、今回の講義資料、前回講義のQ & A等を追加しました
- 今回講義のQ & Aは来週月曜日までに追加します

Web公開に際し、QRコード・URLを削除

ショートレポートについて

下記の課題のうち、少なくとも1つについて記載すること。複数書いても良い。

- 課題1：講義の感想、改善要望
- 課題2：講義の内容に関する質問
- 課題3：講義で触れられなかった放射線・放射性同位体関連トピックに関する質問

前回の復習

- (1分間) 前回学んだことを思い出してメモしてください
 - Bqは何を表す単位か？
 - 原発事故で問題となる放射性同位体の種類は？問題となる理由は？
- (2分間) 同じ机の人同士で、思い出したことを共有してください
 - 「話す・説明する」ことによって、記憶の定着と理解を促進する効果があります。
 - 初対面の場合、最初に軽く自己紹介（名前・所属など）をお願いします。

第3回講義の到達目標と概要

➤ 到達目標

- Sv（シーベルト）が何を表す単位なのか説明できる。
- ^{137}Cs が10,000Bq/kg含まれているキノコを100g食べた場合の健康リスクが、胸部レントゲン検査の約何回分に相当するかを推定できる。
- 放射線に関する規制値が、科学だけではなく倫理にも基づいている理由を説明できる。

➤ 講義概要

- 放射線が人体に影響を与えるメカニズム
- 放射線防護における科学的「事実」と「意見」の関係
- 放射線被ばくリスクの単位（Sv）
- Svを用いたリスク推定の基礎

放射線が人体に影響を与えるメカニズム



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

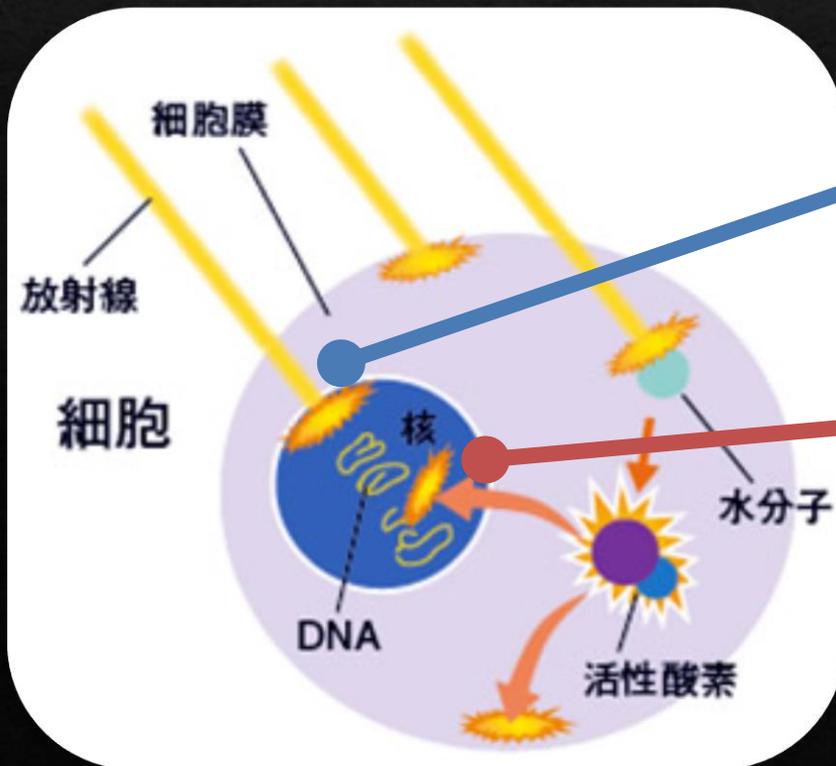
放射線が細胞に当たると…？

- 放射線によって細胞内で電離が起こる
- 電離で生じたイオンは不安定な化学形（ラジカル）であることが多く、周囲の分子と化学反応を起こす（≒分子を壊す）
- 細胞内の分子のほとんどは化学反応で壊れても代わりが利くが、利かないものもある。

放射線が細胞に当たると…？

- ▶ 細胞内の分子のほとんどは化学反応で壊れても代わりが利くが、利かないものもある。

DNA



放射線で直接電離されることによるDNAの損傷

電離された水や酸素との反応によるDNAの損傷

DNAの損傷・修復と人体影響

放射線によって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNAの修復機構が働く



修復成功



修復失敗

細胞死が多量になると出てくる影響を「組織反応」（確定的影響）と呼ぶ



細胞死

少量ならば問題無い（=しきい値がある）

組織反応について

組織反応には「しきい値」が存在する（右表参照）

右の表で最も小さいしきい値は0.15Gyで、この値は農作業・農林水産物による被ばく量と比較するとかなり大きい

このため、今回の講義では組織反応の詳細は割愛する

なお、福島第1原発事故では深刻な組織反応は報告されていないが、20年前の「JCO臨界事故」では組織反応による死者が出ている

臓器・組織	障害	急性被曝		慢性被曝	
		潜伏期	しきい値	潜伏期	しきい値
骨髄・造血器	造血能低下	3~7日	0.5 Gy		0.4 Sv/年
生殖腺	男性	一時的不妊	3~9週	0.15 Gy	0.4 Sv/年
		永久不妊	3週	3.5~6 Gy	2.0 Sv/年
	女性	一時的不妊	1週以内	0.65~1.5 Gy	
		永久不妊		2.5~7 Gy	0.2 Sv/年
皮膚	皮膚発赤	1~4週	2~6 Gy		
	皮膚熱傷	2~3週	5~10 Gy		
	一時的脱毛	2~3週	3 Gy		
眼の水晶体	水晶体混濁		0.5~2 Gy		5 Sv
	白内障		5 Gy	数年	8 Sv
腸	嘔気, 嘔吐, 全身倦怠	2~3時間	6~20 Gy		
	紅斑, 発熱, 下痢, 下血	数日			
	死亡 (100%)	1~2週			
中枢神経	嘔吐, 頭痛, 紅斑, 痙攣, 運動失調, 麻痺, 虚脱, 全身衰弱	直後	> 20 Gy		
	早期死 (100%)	数日以内			

DNAの損傷・修復と人体影響

放射線によって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNAの修復機構が働く



修復成功

誤った修復

修復失敗



誤りを含んだ細胞が増殖継続

→ がんの発生確率が上昇

DNAの損傷・修復と人体影響

放射線によって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



これを確率的影響と呼び、
そのリスク管理の目安が
Sv (シーベルト)

D
↓

修復成功

修復失敗



誤りを含んだ細胞が増殖継続
→ **がんの発生確率が上昇**

※正確には遺伝影響リスクも含む

放射線防護における 科学的な「事実」と「意見」の関係

これから説明するSvという単位は（特に理系にとって）モヤモヤする単位です

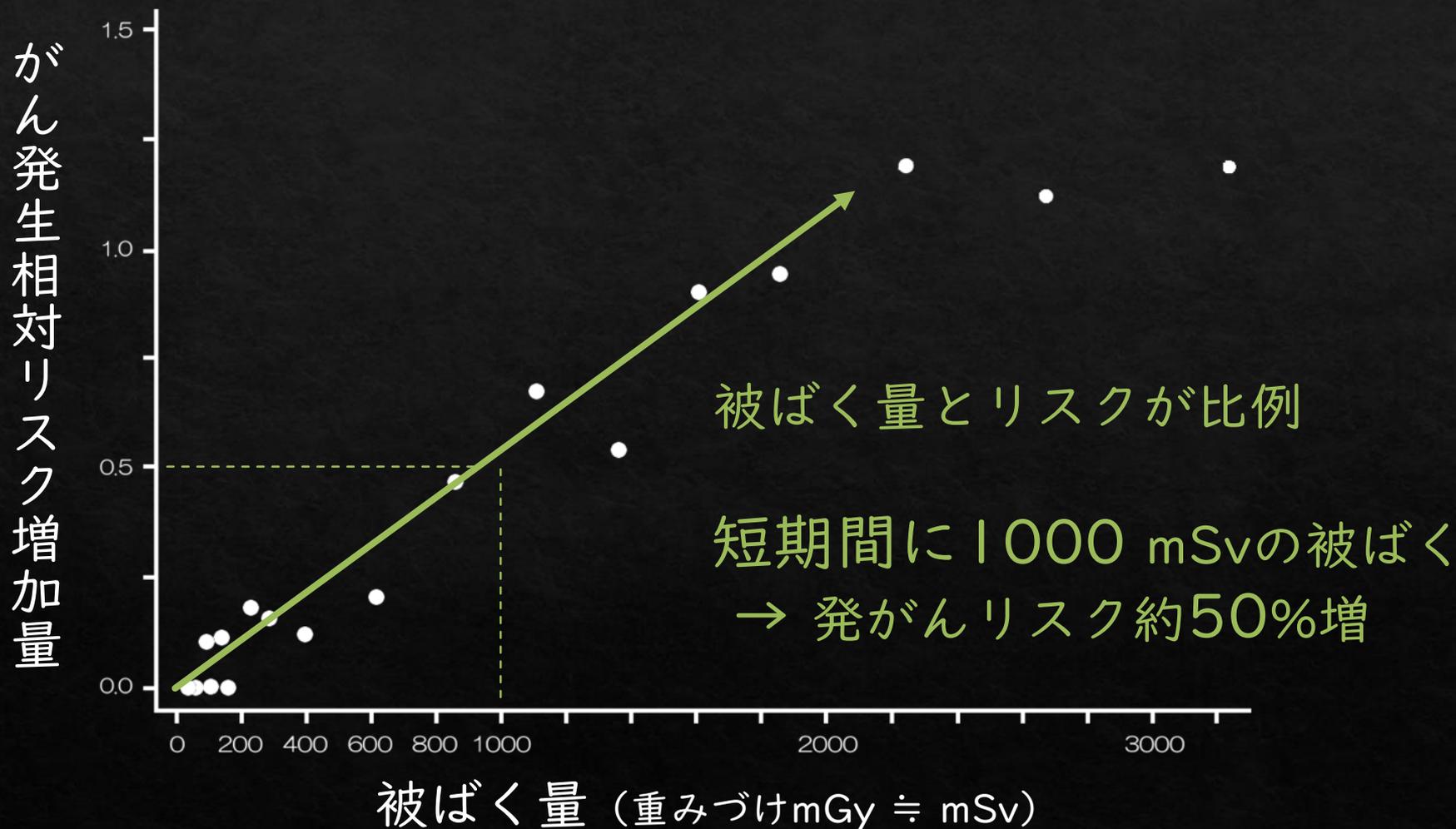
モヤモヤする理由と、それでもなぜ必要とされるのかを理解してもらうため、Svに関する説明の前に、科学に関する事実と意見について講義します

科学が答えられない質問

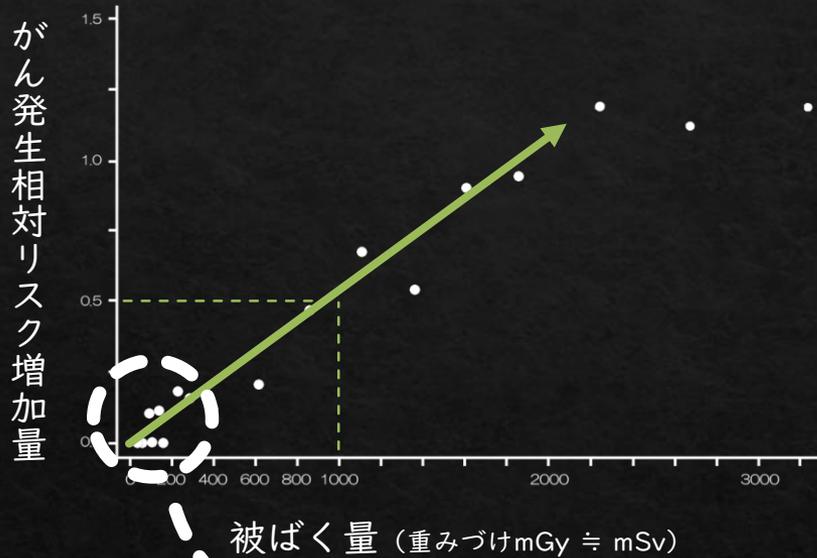
	答えられる質問	答えられない質問
質問	1,000 mSvの急性被ばくは健康影響を生じさせるか？	年間20 mSvの被ばくは健康影響を生じさせるか？
科学的回答	1,000 mSvの急性被ばくは健康影響を生じさせる	年間20 mSvの被ばくは健康影響を生じさせるとは <u>断言できない</u>

なぜこうなるのか、実際のデータを見てみましょう

原爆での被ばく量とがん発生リスク

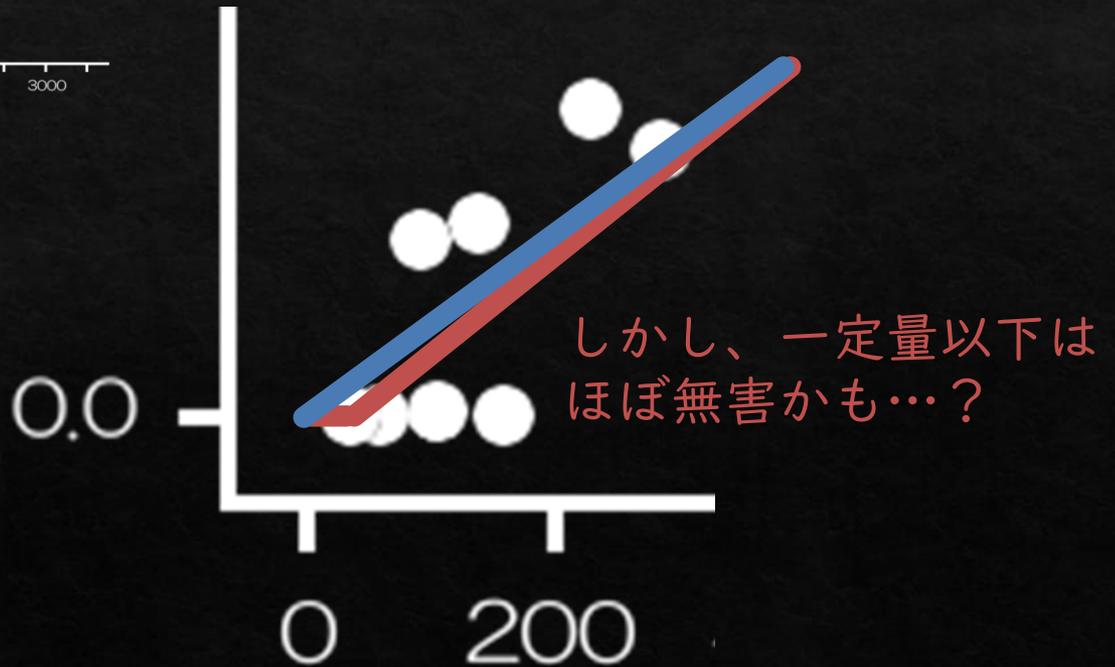


低線量域のグラフの形は…？

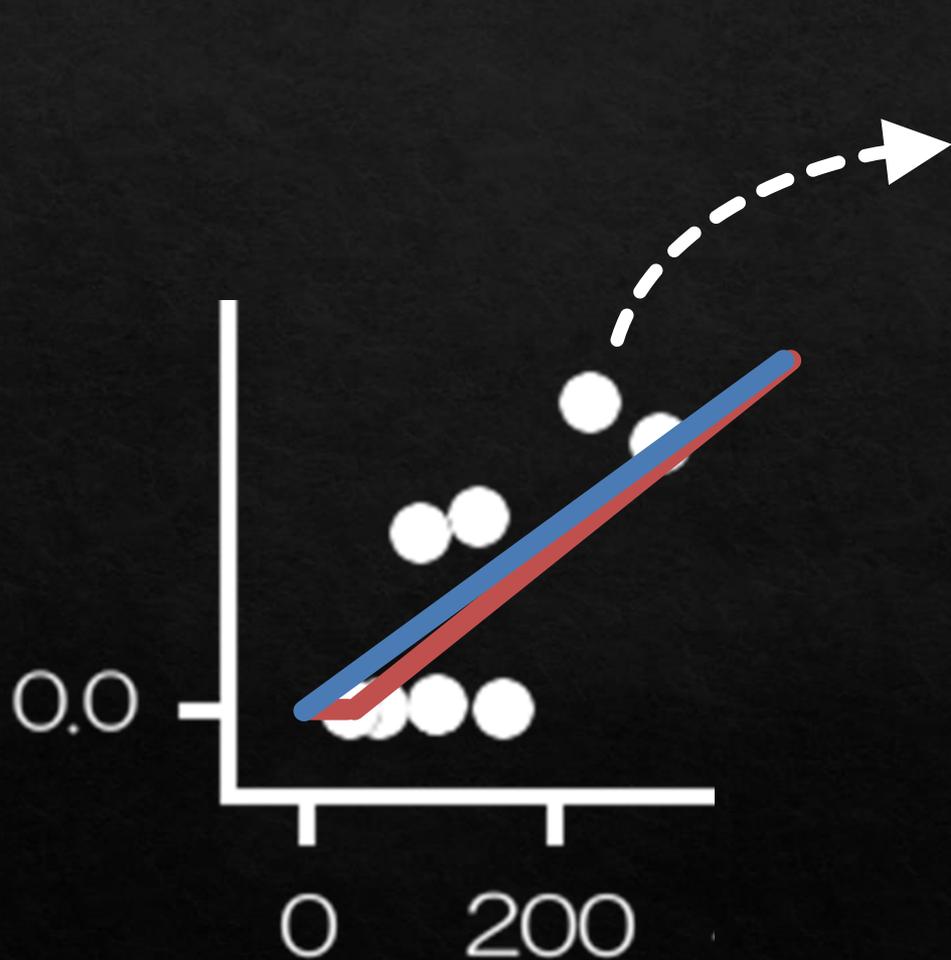


被ばくとリスクが完全比例
→ 低線量でも線量に比例した
リスク増加はある

拡大



科学の限界

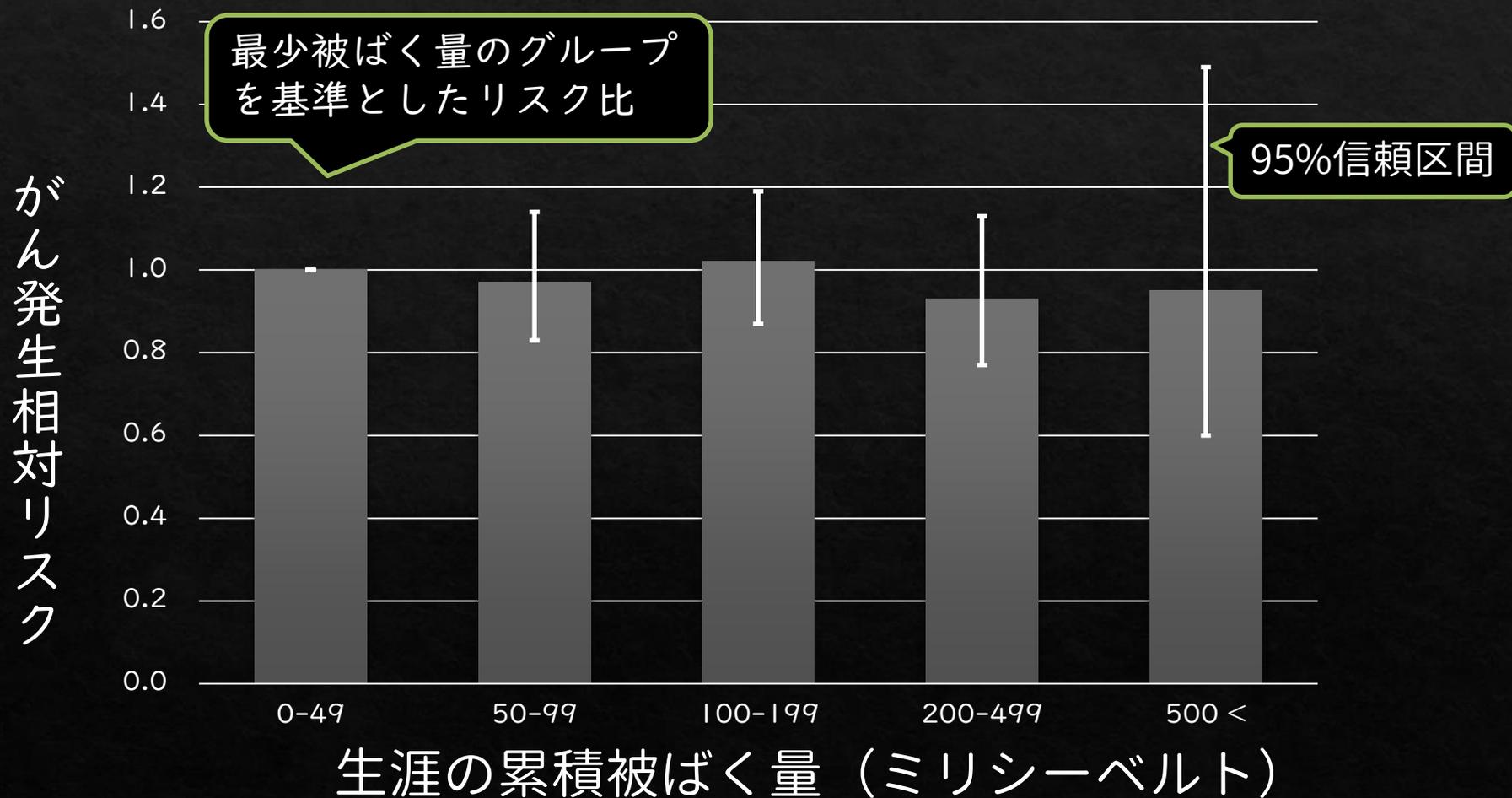


データ数がもっと多ければ、統計的ばらつきが減り、どちらが正しいのか判別できる

しかし、広島・長崎の10万人以上の追跡データを超えるデータ数を得るのは、現実的に不可能

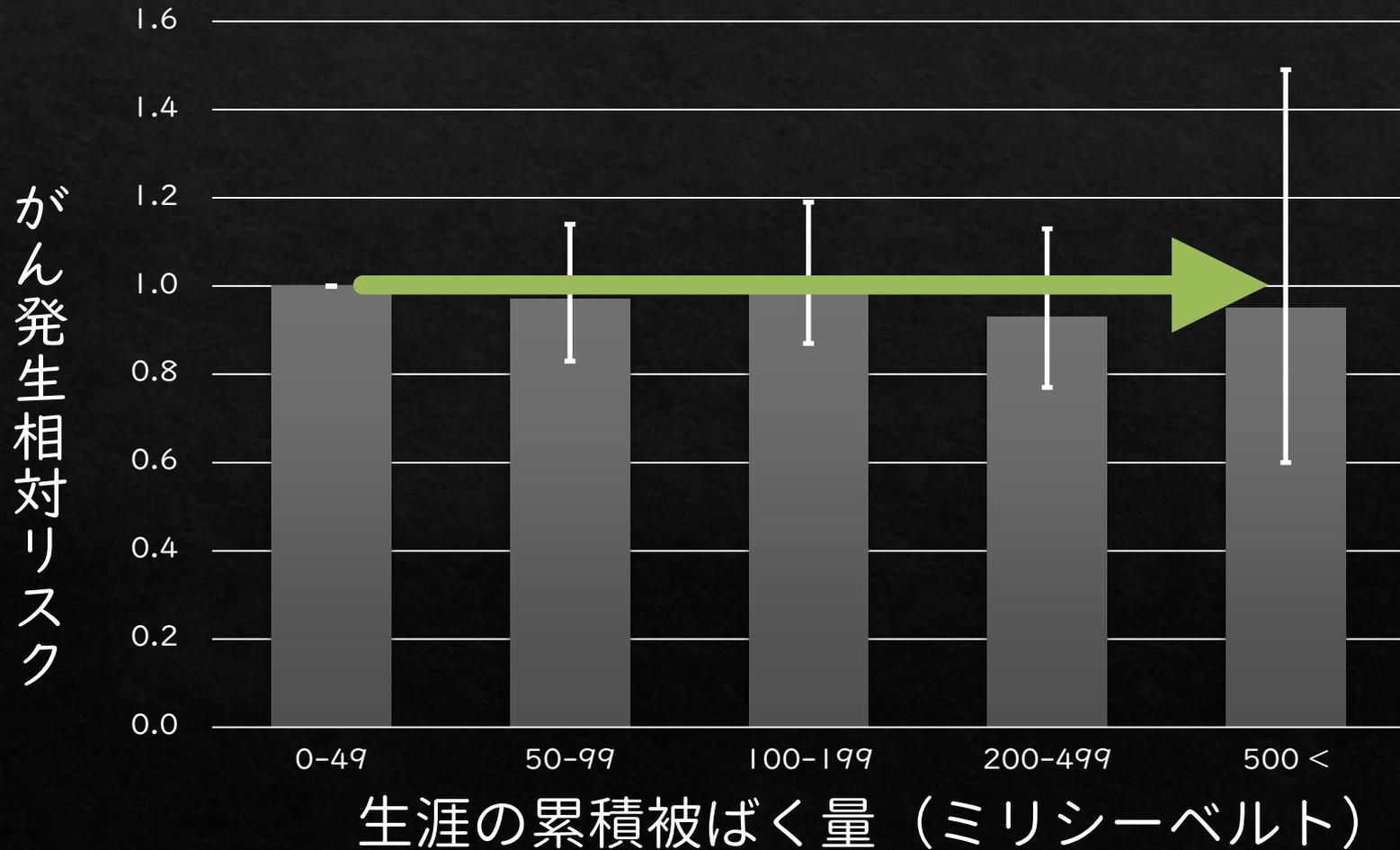
長期累積被ばくとがん発生リスク

年間10 mSv程度の自然被ばくがあるインドのケララ州での調査（7万人・15年間）



長期累積被ばくとがん発生リスク

累積500mSv以上被ばくしても、
リスク増加が無いかもしれない



科学の限界＝科学者の限界？

質問 年間20mSvの被ばくが予想される地域から
住民を避難させるべきか？

回答 年間20mSvの被ばくが予想される地域からは
住民を避難させるべきとは断言できない

あなたが質問した側だとすると、この回答に満足しますか？

満足する／しない理由はなんでしょう？

各自で考えた後、同じ机の人と意見を共有して下さい

1分間

2分間

科学の限界 ≠ 科学者の限界

科学者は、科学的・客観的な**事実**を提供できない質問に対しても、どうすべきかという**意見**の提供は可能な場合がある。

科学的な**事実**だけが知りたい人

→ 先ほどの回答で満足

専門家としての**意見**も欲しい人

→ 先ほどの回答は不満

UNSCEARとICRP

原子放射線の影響に関する国連科学委員会

国際放射線防護委員会



UNSCEARは、放射線に関する科学的な**事実**を収集・精査



ICRPは、UNSCEARのデータを基に、放射線防護に関する**意見**を提供

ICRPの提案の例

- ごく少量の被ばくは、リスクが有るか無いか断言できないので、あると見なして管理する
- 被ばく量の目標は、合理的に達成可能な範囲の最小値とする

平常時： 年間1mSv
緊急時： 20-100mSv
復旧期： 年間1-20mSv

平常時に1mSvなのは、それ以上が危険だからではなく、合理的に達成できる下限だから

ICRPの提案の例

- ごく少量の被ばくは、リスクが有るか無いか断言できないので、あると見なして管理する
- 被ばく量の目標は、合理的に達成可能な範囲の最小値とする

平常時： 年間1mSv

緊急時： 20-100mSv

復旧期： 年間1-20mSv

緊急時・復旧時の値が高く、かつ弾力があるのは、あると断言できない被ばくリスクを避けるために、避難生活等の健康リスクを無条件に強いるのは不合理だから

事実と意見の違いを理解する意味

平常時の年間1mSvと、復旧時の年間20mSvを…

科学的に明らか**な事実**に基づいて設定された数値

だと受取ると、どちらの数値を信じるか？ という硬直した思考になってしまう

あくまでも、専門家としての**意見**にすぎない

ことを理解していれば、柔軟な意思決定に活用できる

この後説明するSv算出に用いる各種の係数は、ICRPの提案に基づく

「意見」を含むものであることを意識しながら聞いてください

放射線被ばくリスクの単位 (Sv)

- Sv (実効線量) という単位の説明
- 様々なSv
- Svと内部被ばく・外部被ばくの比較
- 外部被ばくの算出法
- 内部被ばくの算出法
- 放射性同位体のBqを知る方法

DNAの損傷・修復と人体影響

放射線によって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



これを確率的影響と呼び、
そのリスク管理の目安が
Sv (シーベルト)

D
↓

修復成功

修復失敗



誤りを含んだ細胞が増殖継続
→ **がんの発生確率が上昇**

※正確には遺伝影響リスクも含む

DNAの損傷・修復と人体影響

放射線によって細胞内で電離が起こる

ポイント1

誤った修復が起こる可能性は放射線によって異なる

例： α 線 \gg β 線 = γ 線

損傷

機構が働く

修復成功

誤った修復

修復失敗

誤りを含んだ細胞が増殖継続
→ がんの発生確率が上昇

DNAの損傷・修復と人体影響

放射線によって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNAの修復



修復成功

誤った修復



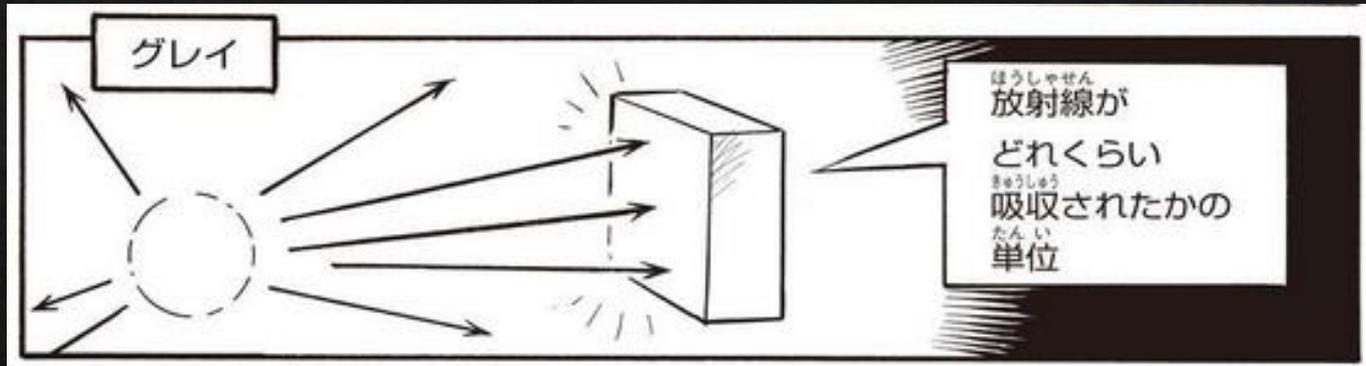
誤りを含んだ細胞が増殖継続
→ **がんの発生確率が上昇**

ポイント 2

がんになりやすさ、生存率への影響は組織によって異なる

例：結腸・肺 > 甲状腺・皮膚

Svという単位…の前にGy

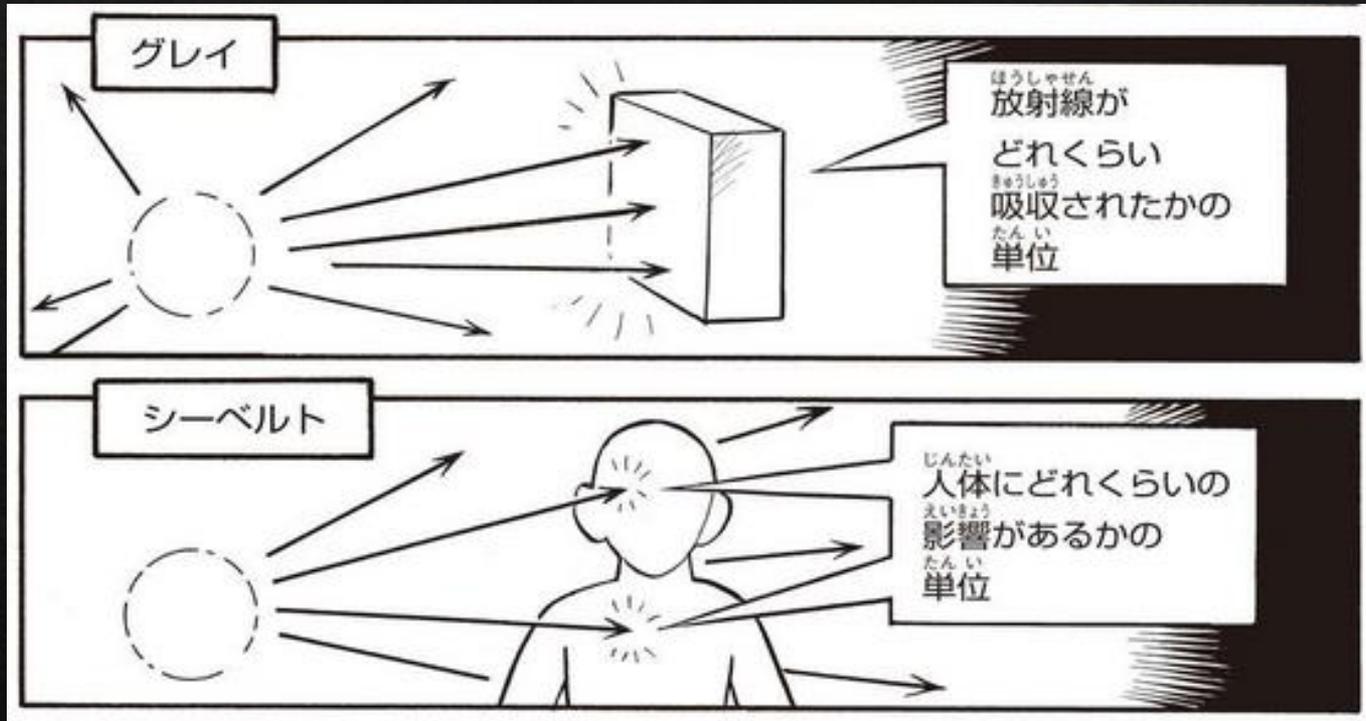


$$\text{Gy (グレイ)} = \text{J/kg}$$

質量 (kg) あたり、どれだけの放射線の
エネルギー (J) を吸収したかという単位

Svと異なり、純粹な物理量

Svという単位



$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} \times \text{組織加重係数} = \text{Sv}$$

誤り修復を起こしやすい
放射線で大きい

致命的ながんになりやすい
組織で大きい

Svという単位

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} \times \text{組織加重係数} = \text{Sv}$$

誤り修復を起こしやすい
放射線で大きい

致命的ながんになりやすい
組織で大きい

放射線の粒子	係数
光子	1
電子、ミューオン	1
陽子など	2
原子核（ α 線など）	20
中性子	2.5~21※

※エネルギー依存

臓器・組織名	係数
肺、胃、結腸、骨髄、乳房、 残りの組織・臓器	0.12
生殖腺	0.08
甲状腺、食道、膀胱、肝臓	0.04
骨表面、皮膚、脳、唾液腺	0.01

数値は「ICRPの2007年勧告」より引用

様々なSv (I)

※ 暗記不要です

紛らわしいことに、Svという単位で表される数値には複数の種類がある

パターン1：対象範囲の違い

実効線量 → 全身の被ばくリスクの総和

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} \times \text{組織加重係数}$$

等価線量 → 個別組織のリスク

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重}$$

甲状腺、皮膚、眼などでよく用いられる

等価線量には組織加重係数がかからない分、同一の被ばくに対する数値は大きい点に注意。甲状腺の等価線量100mSvは、実効線量では $100 \times 0.04 = 4\text{mSv}$ 。

様々なSv (2)

※ 暗記不要です

パターン2：直接測定できるか否か

防護量 → 直接測定するのは不可能

実効線量・等価線量は防護量

線量当量と呼ぶ

実用量 → 各種の測定器で測れる数値

ある空間の放射線の種類と量をセンサーで測定し、その空間に人間がいた場合の被ばく量を推定した値

実際の被ばく量は放射線が来る方向や、体表面からの深さで変化するので、最も被ばく量が高い条件で推定する

∴ 同一被ばく条件では **実用量** \geq **防護量**

様々なSv (まとめ)

➤ 実効線量

➤ 等価線量

➤ 周辺線量当量

センサーが示す、いわゆる空間線量

➤ 個人線量当量

バッジ等を身に付けて測定

➤ etc.

これら全てが「Sv」

大雑把な理解として、

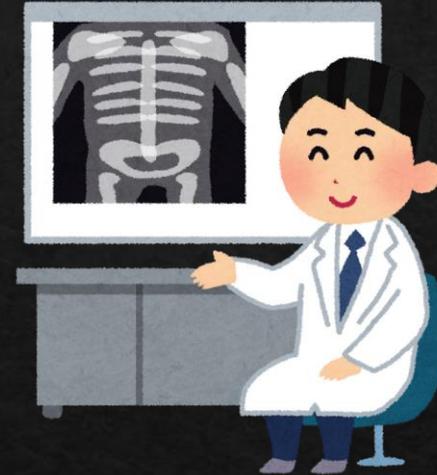
- ほとんどの場合、Svは全身の被ばくリスク
- 測定器の数字は安全マージンを含む

と覚えておき、必要になったら
厳密な定義を確認するのも一案

Svの用途



^{137}Cs が10,000Bq/kg
含まれているキノコを
100g食べた場合の健康
リスク



胸部レントゲン検査を
1回受けた場合の健康
リスク

どうすれば比較できる？ → Sv

内部被ばくと外部被ばく

内部被ばく



外部被ばく



なぜ同列に比較できるのか？

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} \times \text{組織加重係数} = \text{Sv}$$

誤り修復を起こしやすい
放射線で大きい

致命的ながんになりやすい
組織で大きい

重要なのは、どんな放射線がどの組織に吸収されたかで、
その放射線が**身体の外から来たか、内から来たかは無関係**

外部被ばくの算出法

各種のセンサーで測定した数値を使う (※)

線量率 (Sv/h) が表示される場合

→ 滞在時間 (h) をかける

積算値 (Sv) が表示される場合

→ そのままの値を使う

※ 前述の通り、実効線量より高めの値が出る

内部被ばくの算出法



^{137}Cs が10,000Bq/kg
含まれているキノコを
100g食べた場合の健康
リスク

^{137}Cs の摂取量

$$10,000 \text{ Bq/kg} \times 0.1 \text{ kg} \\ = 1,000 \text{ Bq}$$

^{137}Cs の実効線量係数

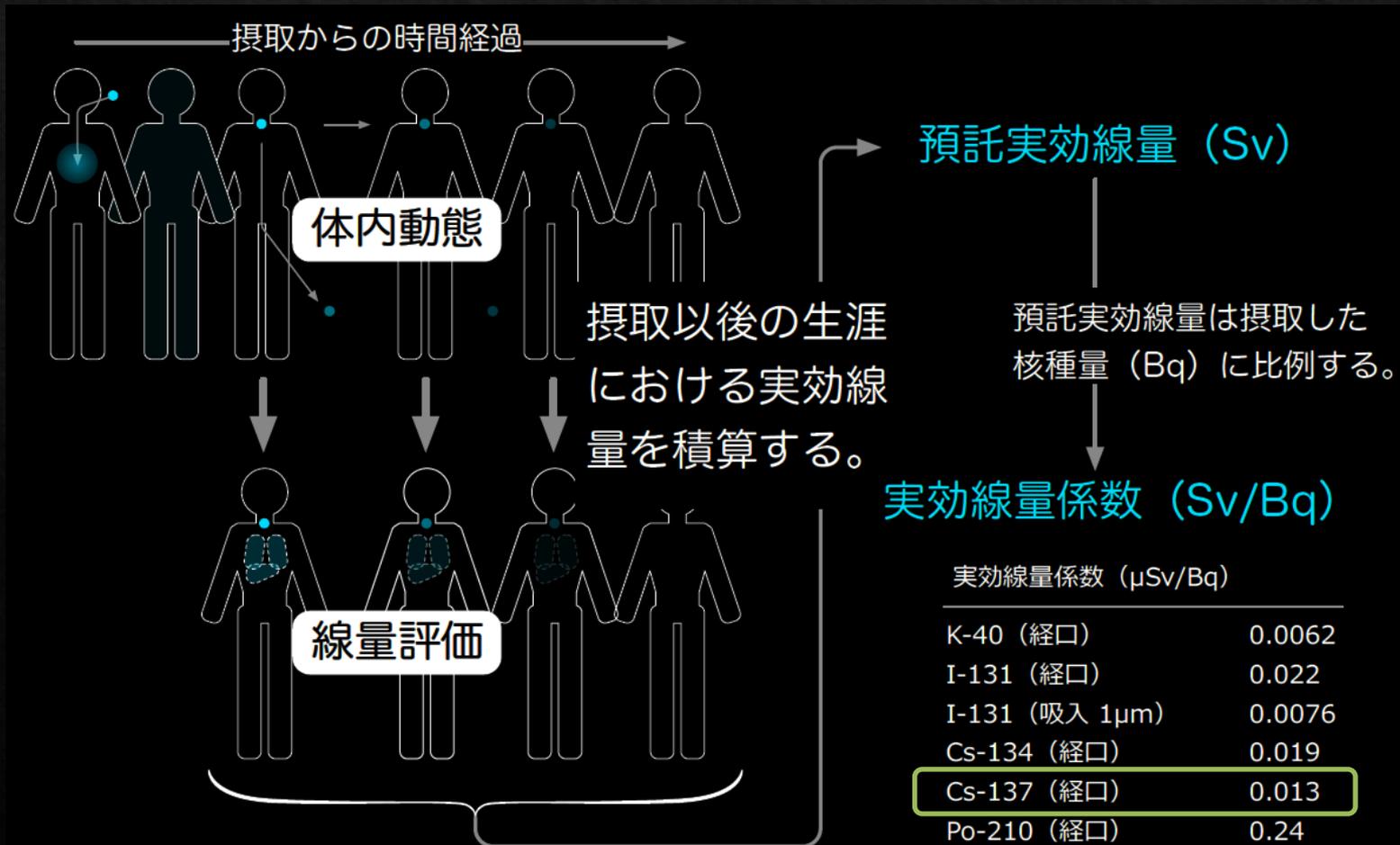
$$0.013 \mu\text{Sv/Bq}$$

実効線量 (預託実効線量)

$$\text{摂取量} \times \text{実効線量係数} \\ = 1,000 \text{ Bq} \times 0.013 \mu\text{Sv/Bq} \\ = 13 \mu\text{Sv}$$

実効線量係数とは？

ある放射性同位体が摂取後に体内でどう動くか、動いた先で出す放射線が体内のどこに吸収されるのかをシミュレーションして得られた係数



余談：実効線量係数の調べ方



線量測定と計算		実効線量への換算係数				
預託実効線量係数 ($\mu\text{Sv}/\text{Bq}$) (経口摂取の場合)		ヨウ素 131	セシウム 134	セシウム 137	ストロンチウム 90	プルトニウム 239
3か月児	0.48	0.026	0.011	0.13	5.2	
1歳児	0.18	0.016	0.012	0.073	0.42	
5歳児	0.10	0.013	0.0096	0.047	0.33	
10歳児	0.052	0.014	0.01	0.06	0.27	
15歳児	0.034	0.019	0.013	0.08	0.24	
成人	0.022	0.019	0.013	0.028	0.25	

$\mu\text{Sv}/\text{Bq}$: マイクロシーベルト/ベクレル

出典：国際放射線防護委員会 (ICRP), ICRP Publication 119, Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60, 2012

預託実効線量とは？

放射性同位体摂取後の、生涯積算の実効線量

被ばく管理においては「摂取した瞬間に預託実効線量の全量を被ばくした」とみなす

キノコの例では、食べた瞬間に $13\mu\text{Sv}$ を被ばくしたとみなすということ

放射線管理を容易にしつつ、リスクの過小評価を避ける（※）ための「意見」と考えると理解しやすい

※ 放射線は総量が同じなら、複数回に分けるより一度に浴びた方がリスクが大きいいため、一度に被ばくしたと見なすことで常に過大評価となる

放射性同位体のBqを知る方法

内部被ばくを算出するには、放射性同位体の種類と量 (Bq) を測定する必要がある

放射性同位体の種類を特定するには、どんな放射線が出ているかを調べれば良い

しかし、 α 線と β 線は試料自体に吸収されてしまい、複雑な前処理をしないと測定できない

γ 線はかなりの割合で試料の外まで到達し、しかも核種ごとに固有のエネルギーを持っている

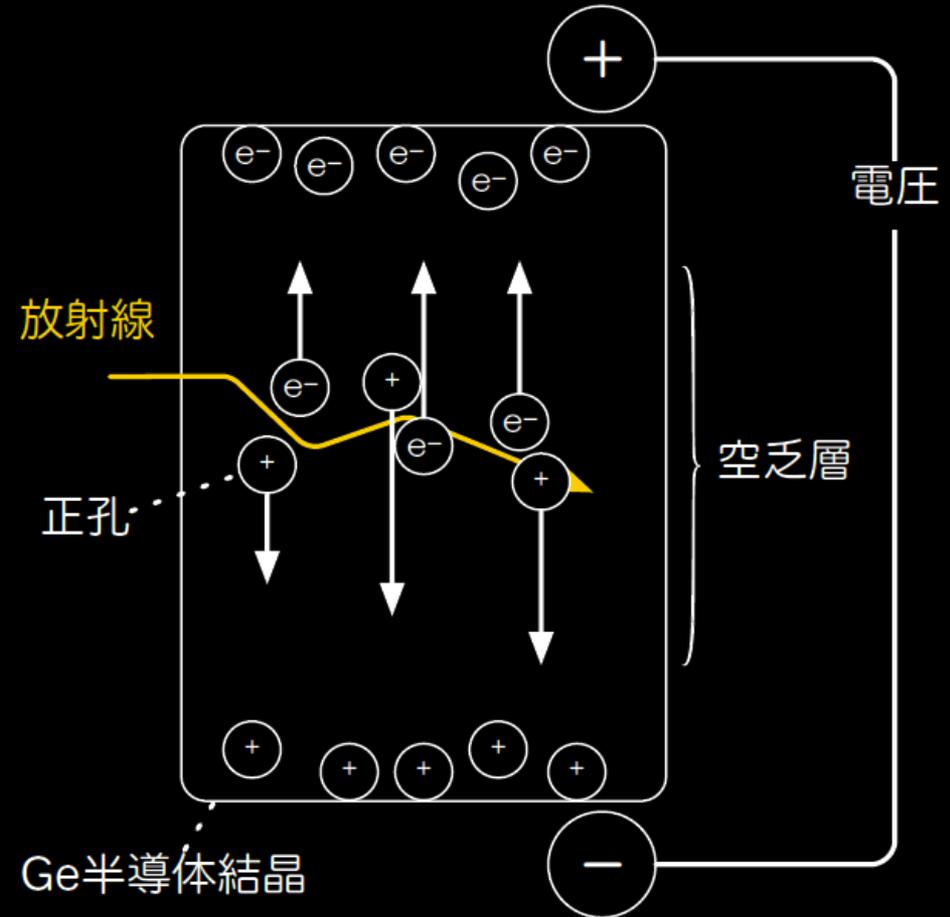
→ γ 線を出す核種は簡易な前処理で測定できる

ゲルマニウム半導体検出器

Ge半導体結晶に逆電圧をかけることで、結晶内に空乏層を形成する。

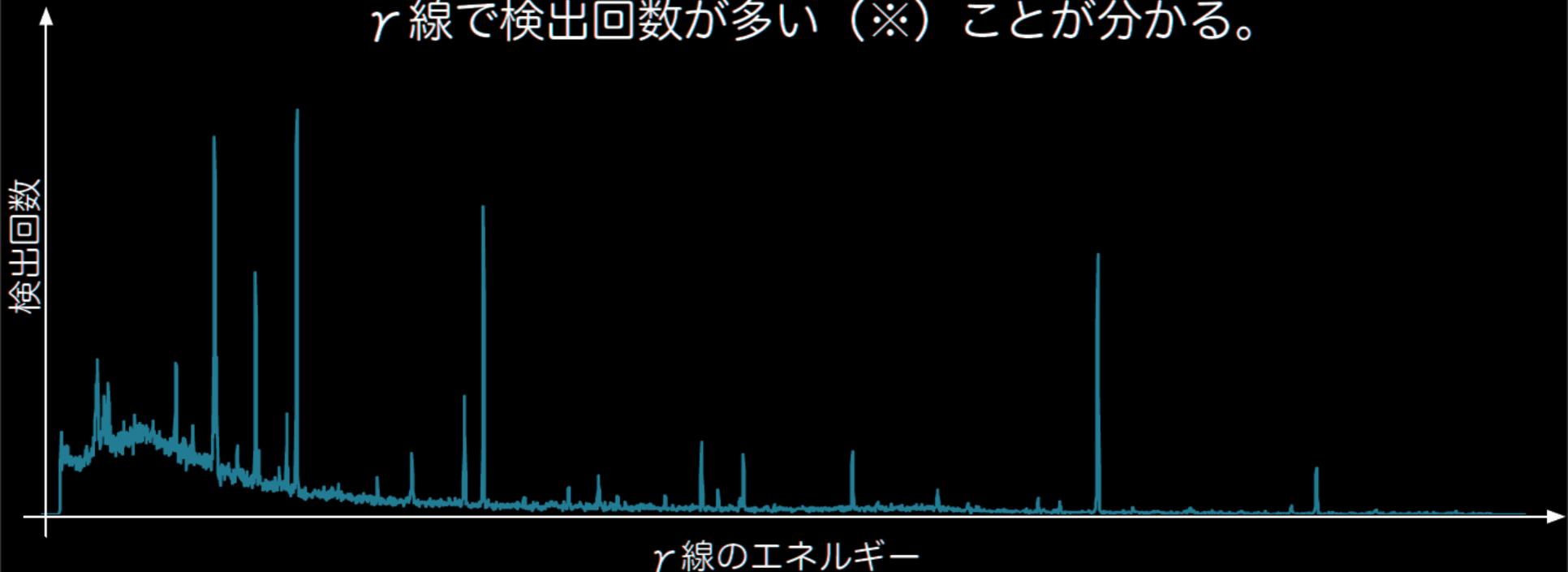
空乏層に入射した放射線は、電離作用によって結晶内部に電子と正孔を発生させるため、パルス電流が生じる。この電流を測定することで放射線のエネルギーを測定できる。

Ge半導体検出器は、放射線のエネルギーを正確に測定できる。このため核種弁別能力が高いことが最大の利点。ただし、高価であるため台数を揃えることが難しい。



ゲルマニウム半導体検出器

御影石（花崗岩）から出る γ 線を測定すると、特定のエネルギーの γ 線で検出回数が多い（※）ことが分かる。



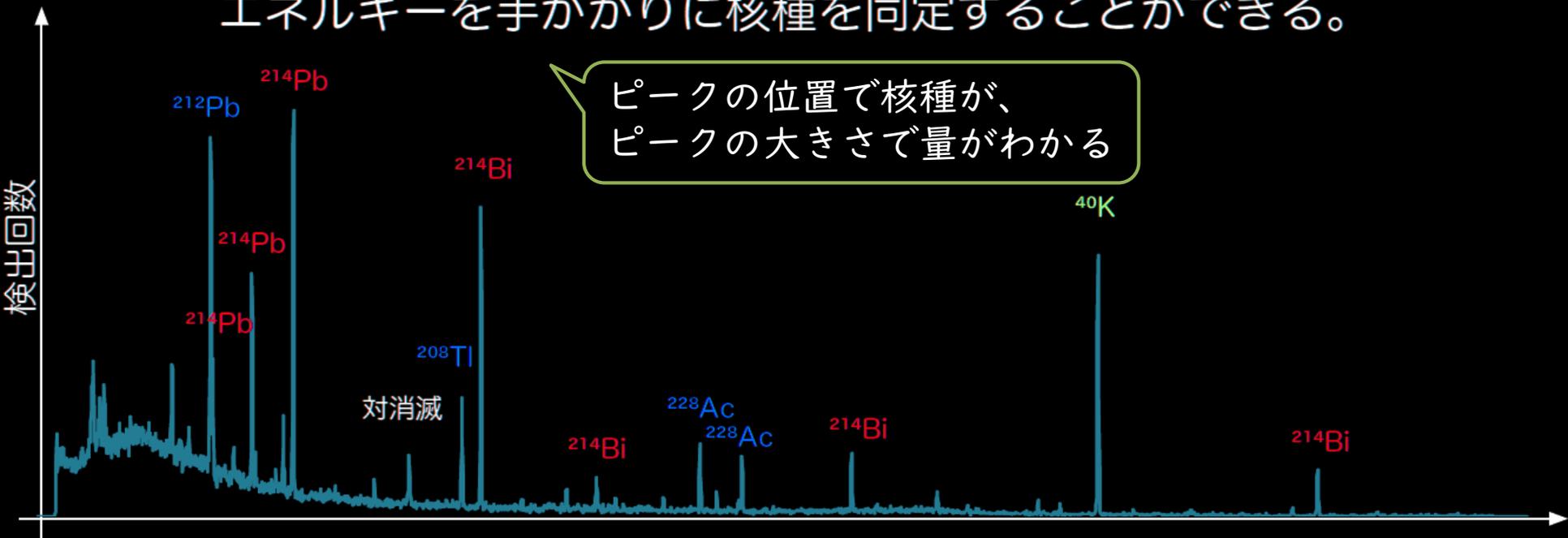
※このような図を「スペクトル」と言い、検出回数の多い場所を「ピーク」という

シン・ゴジラ (2016 東宝) より、
γ線スペクトルの登場シーンを紹介

Web公開に際し画像削除

ゲルマニウム半導体検出器

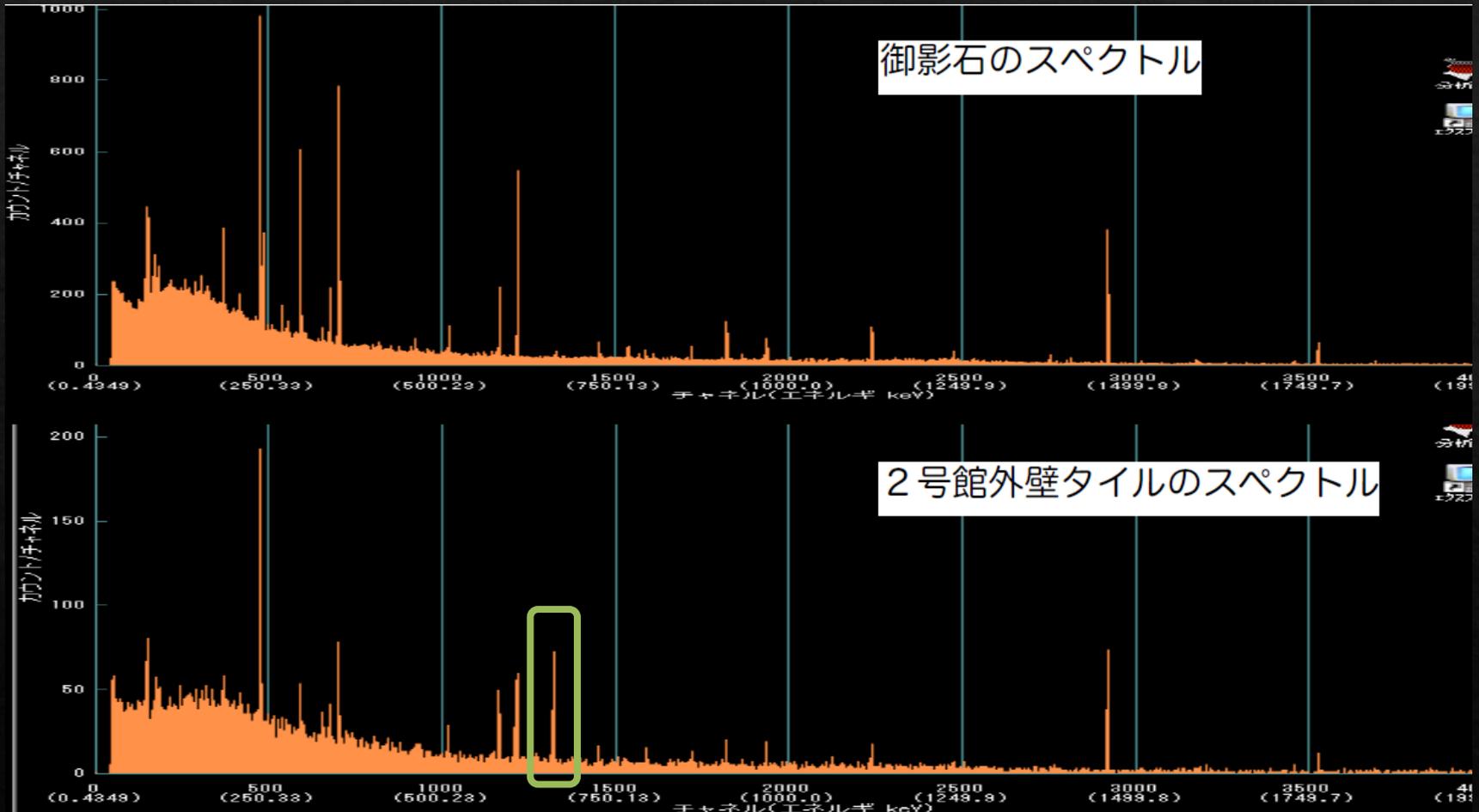
核種ごとの γ 線のエネルギーはデータベース化されているため、エネルギーを手がかりに核種を同定することができる。



^{214}Pb ^{214}Bi ▶ ^{238}U の子孫核種
 ^{228}Ac ^{212}Pb ^{208}Tl ..▶ ^{232}Th の子孫核種
 ^{40}K

^{214}Bi や ^{214}Pb は半減期が数十分しかない。これらが存在するということは、もっと半減期が長く、 ^{214}Bi のもとになっている先祖核種 (^{238}U) が存在することを示している。つまりこのスペクトルから、御影石には ^{238}U 、 ^{232}Th 、 ^{40}K が含まれていることが推定される。

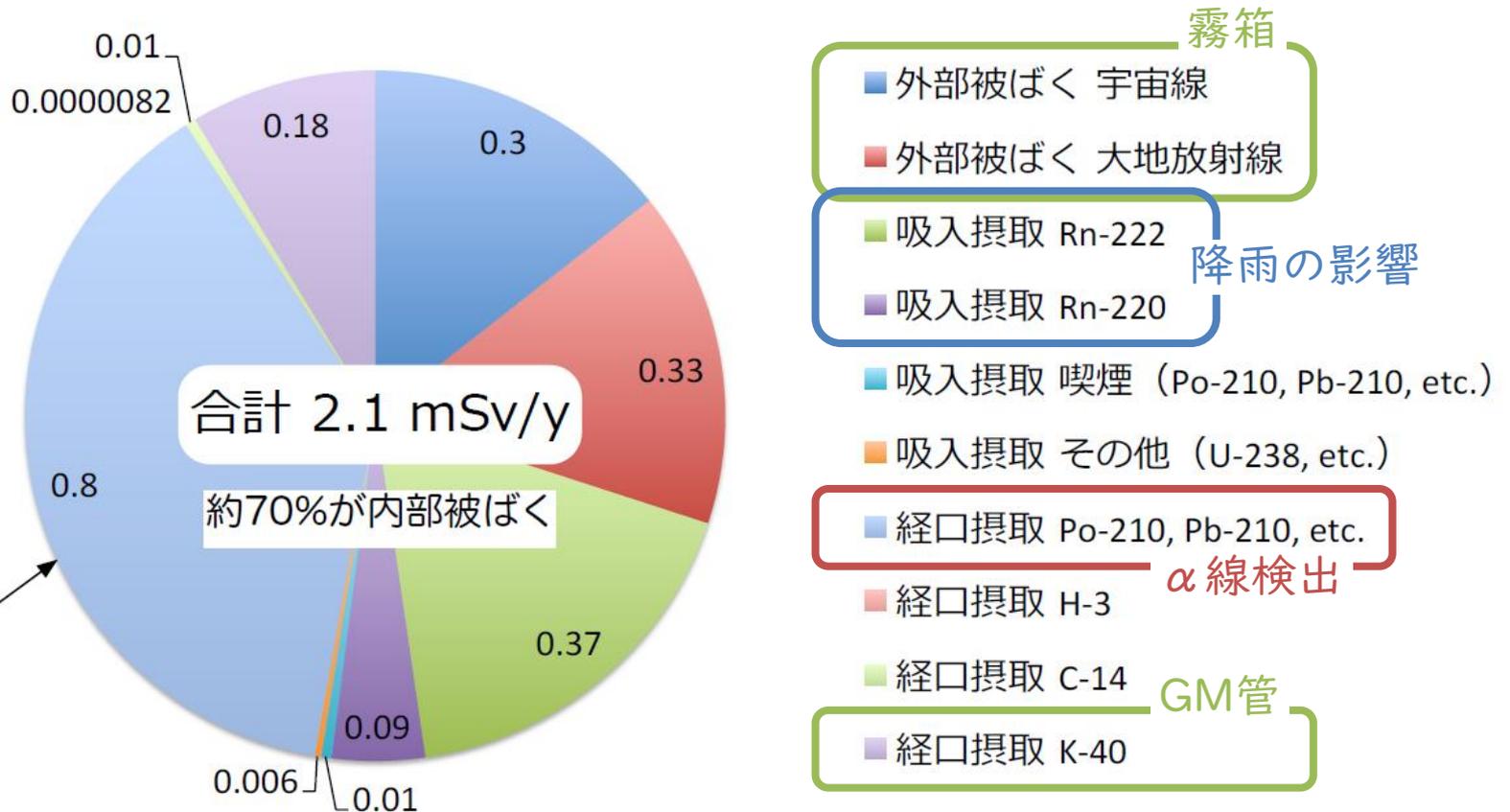
御影石と2号館外壁タイルの測定



Svを用いたリスク推定の基礎

- 自然被ばくとの比較
- 医療被ばくとの比較
- 食品中放射性Csとレントゲン検査
- 大気中核実験との比較
- リスクの直接推定とその難しさ
- トランス・サイエンスという概念

自然被ばくとの比較



日本人の特徴として、魚介類に含まれる ^{210}Po の寄与が大きい。

図の数値は「やっかいな放射線と向き合って暮らしていくための基礎知識」(田崎 晴明 2013.1.17版)より引用

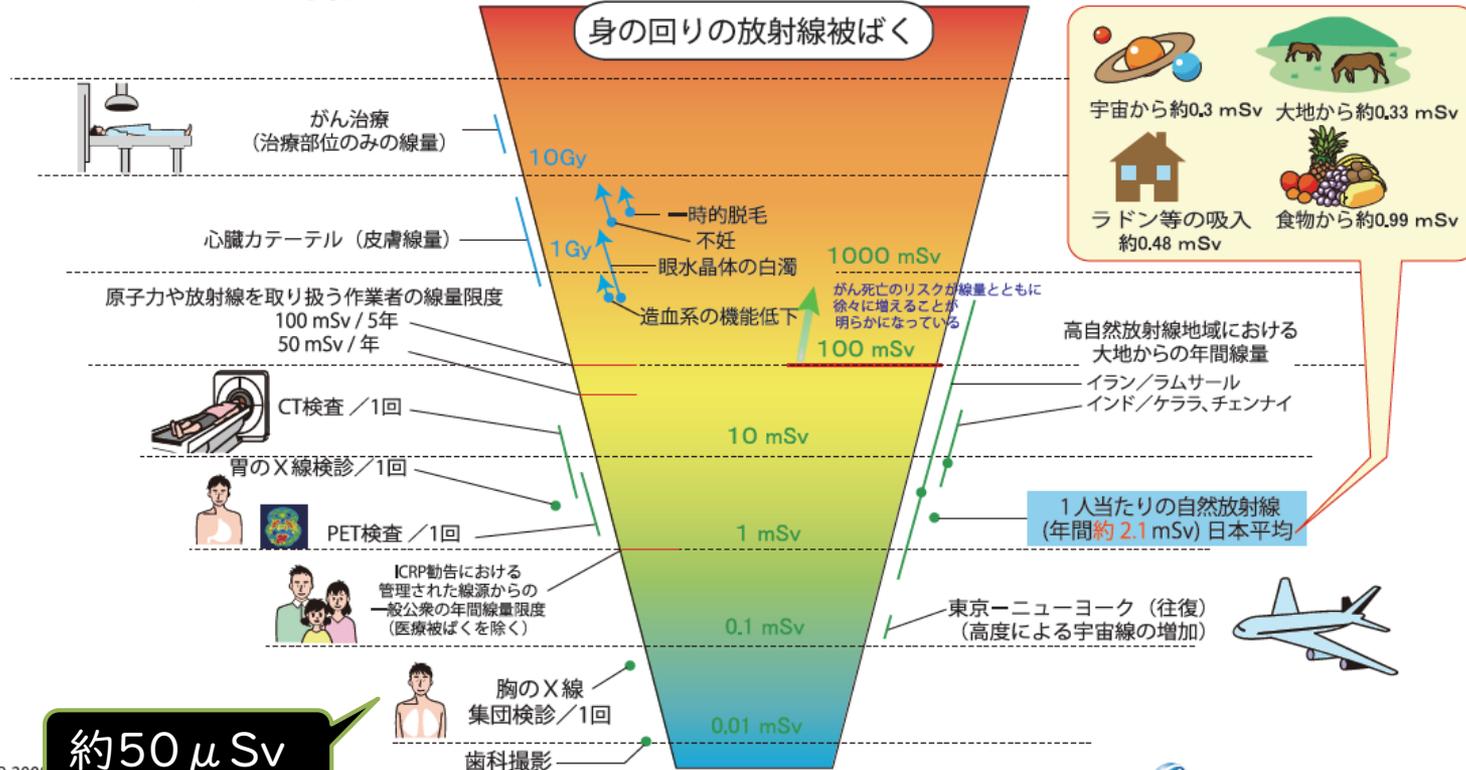
宇宙線や ^{40}K の放射線は前回までの講義で存在を示しました
 ^{222}Rn や ^{210}Po の存在確認については追加資料3で紹介しています

医療被ばくとの比較

放射線被ばくの早見図

人工放射線

自然放射線



約50 μ Sv

- ・ UNSCEAR 2004
- ・ ICRP 2007年勧告
- ・ 日本放射線技師会医療被ばくガイドライン
- ・ 新版 生活環境放射線 (国民線量の算定)
- ・ などにより、放医研が作成 (2013年5月)

【ご注意】

- 1) 数値は有効数字などを考慮した概数です。
- 2) 目盛 (点線) は対数表示になっています。目盛がひとつ上がる度に10倍となります。
- 3) この図は、引用している情報が更新された場合変更される場合があります。



QST 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

放射線医学総合研究所

<http://www.qst.go.jp>



Ver 180516

例題のキノコはレントゲン何回分？



^{137}Cs が10,000Bq/kg
含まれているキノコを
100g食べた場合の健康
リスク

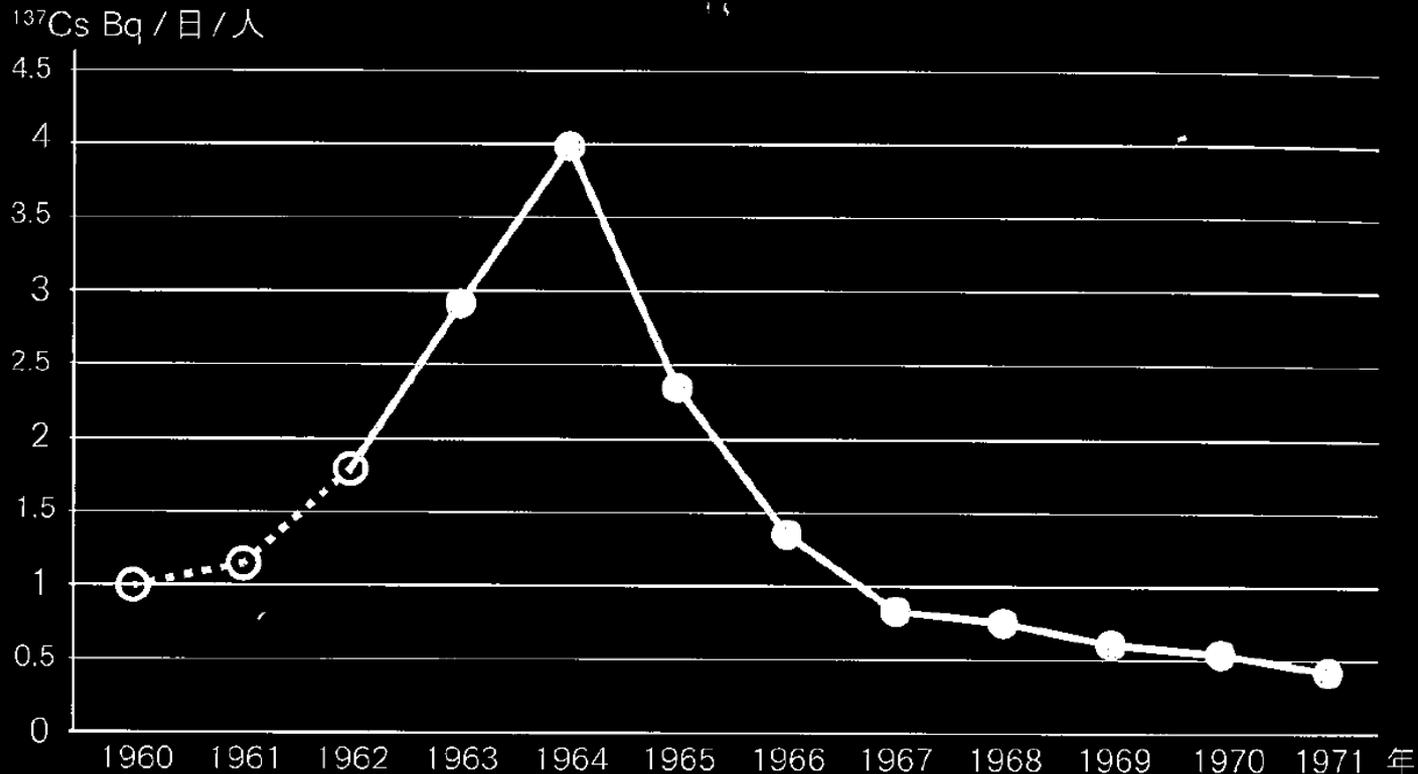
13 μSv

胸部レントゲン検査を
1回受けた場合の健康
リスク

約50 μSv

∴ 約1/4回分のリスク

大気中核実験の影響との比較



日常食中セシウム137の経年変化。文献[2]の図を引用

「放射線必須データ32」より引用

最も影響が大きかった時期は

$365 \times 4 \times 0.013 \div 19 \mu\text{Sv}/\text{年}$ の内部被ばく

Svによるリスクの直接推定

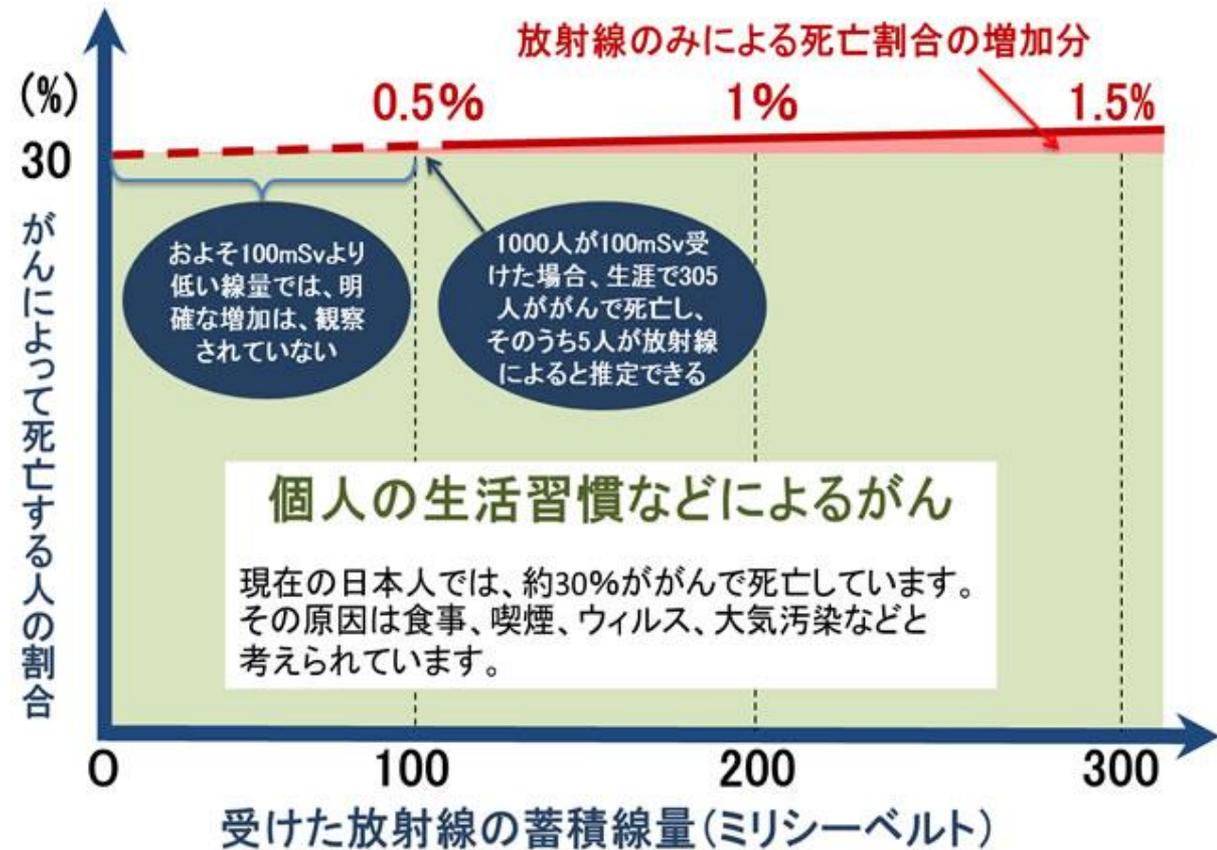
がん死亡率は都道府県で3%程度異なることもある

がん死亡率も天然被ばく量も地域差が大きい

さらに医療被ばくの個人差もある

胃がん検診1回で天然被ばく2年分

年間で100ミリシーベルトまでゆっくりと被ばくした場合のがん死亡



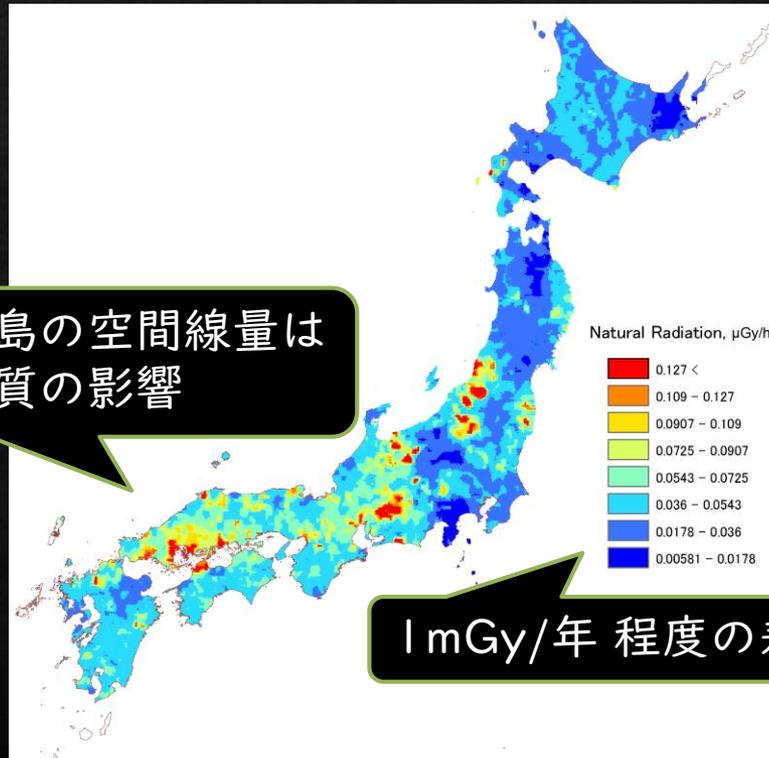
次のスライドで

放医研 WEBサイトより引用

<https://www.nirs.qst.go.jp/information/qa/qa.php>

自然被ばくの地域差

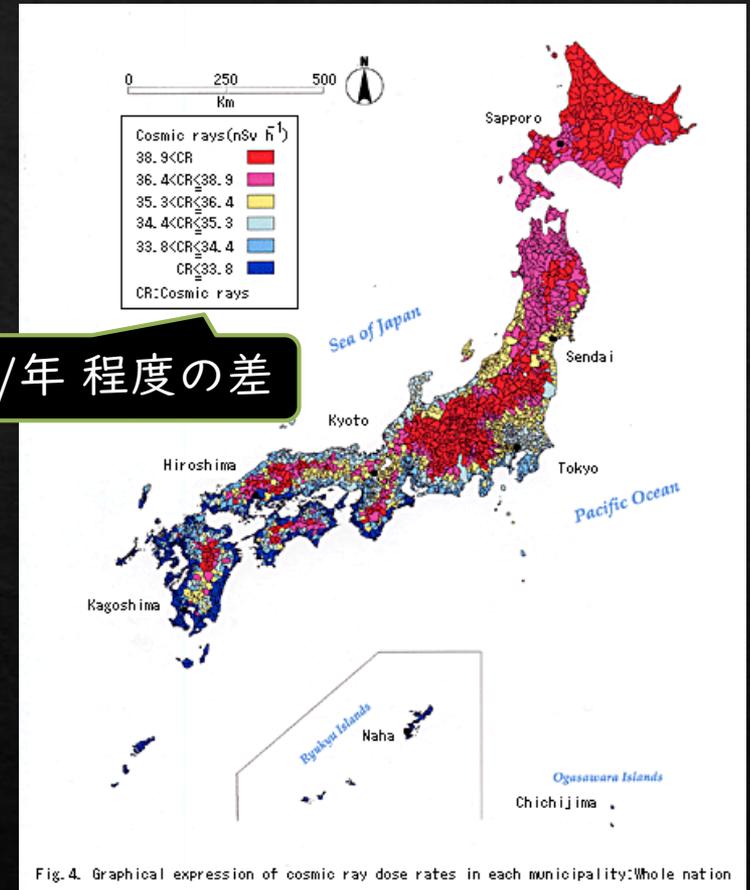
大地放射線 (鉱物組成から推定)



左：日本地質学会
<http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html>

右：放医研ニュース No.92

宇宙線

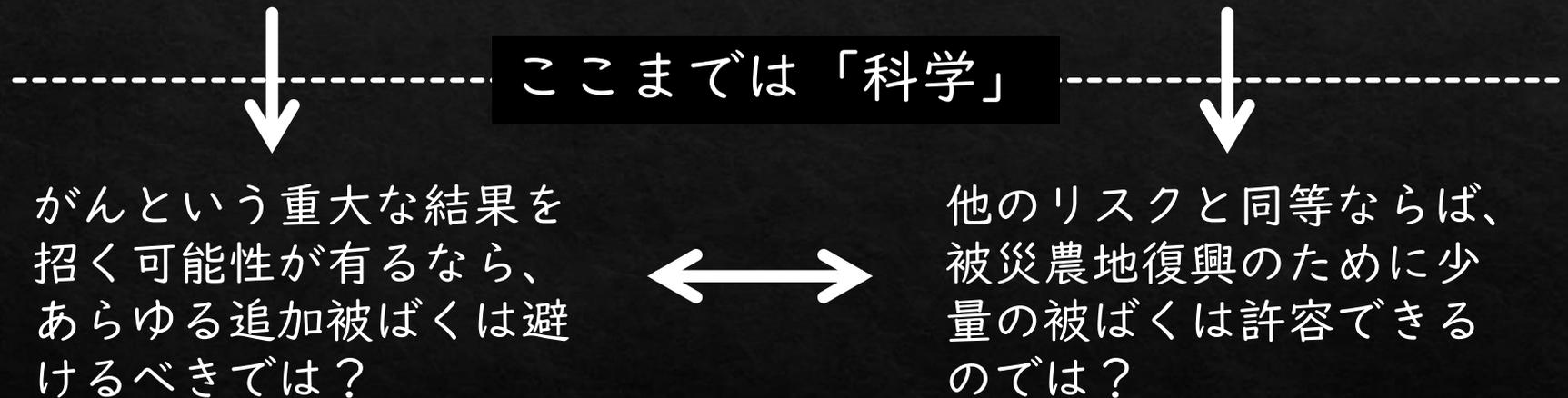


大地放射線と大気中Rn濃度は花崗岩等が露出している地域で高く、宇宙線は標高と緯度が高い地域が多い

トランス・サイエンスという概念

既存のデータからは100mSv未満の低線量被ばくの影響の有無について断言することは難しい

ただし、仮に影響があったとしても、他の様々な要因に紛れてしまう程度の大きさの影響であると考えられる



科学だけでは結論を出せない
政治的・倫理的要素が含まれる問い

ICRPの提案も
この一例

トランス・サイエンス

Weinberg (1972)
Science and Trans-Science

まとめ

- (2分間) 今回学んだことを思い出してメモしてください
 - Sv (シーベルト) が何を表す単位なのか
 - ^{137}Cs が10,000Bq/kg含まれているキノコを100g食べた場合の健康リスクが、胸部レントゲン検査の約何回分に相当するかを推定する方法
 - 放射線に関する規制値が、科学だけではなく倫理にも基づいている理由
- (3分間) 同じ机の人同士で、思い出したことを共有してください