

放射線の人体影響の基礎

東京大学農学部
農地環境放射線学／放射性同位元素施設
廣瀬 農

講義の流れ

放射線の基本的性質

～高いエネルギーで運動する粒子～

放射線とはどんなもの？

放射線と物質の相互作用：荷電粒子・非荷電粒子

放射線と物質の相互作用の可視化：コンピューターシミュレーション

放射線の発生

放射性核種の基本的性質

～不安定な原子核～

Bqという単位：核種の量を壊変数で表す

半減期という単位：核種の不安定さの指標

放射性核種の原子核はなぜ不安定？

陽子数と中性子数がアンバランス： β 壊変

陽子数と中性子数の合計が大きすぎる： α 壊変

壊変で放出されるエネルギーの分配

放射性核種の生成：原子核の融合・分裂・衝突

放射線測定の基礎

～相互作用を捉える～

電流を検出する：GM管・Ge半導体検出器

化学反応を検出する：霧箱・シンチレーション検出器
・イメージングプレート・CR-39

放射線の人体影響の基礎

～シーベルトの定義・計算法・活用法～

放射線の人体影響メカニズム

シーベルト (Sv) という単位：目的と計算法

2種類のシーベルト

シーベルト算出の実際

シーベルトとリスクの目安：相対評価

シーベルトとリスクの目安：絶対評価

リスク評価とトランスサイエンス

放射線の人体影響の基礎

～シーベルトの定義・計算法・活用法～



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギー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種（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。



細胞内の分子のほとんどは、化学反応で壊れてしまっても代わりが利くが…

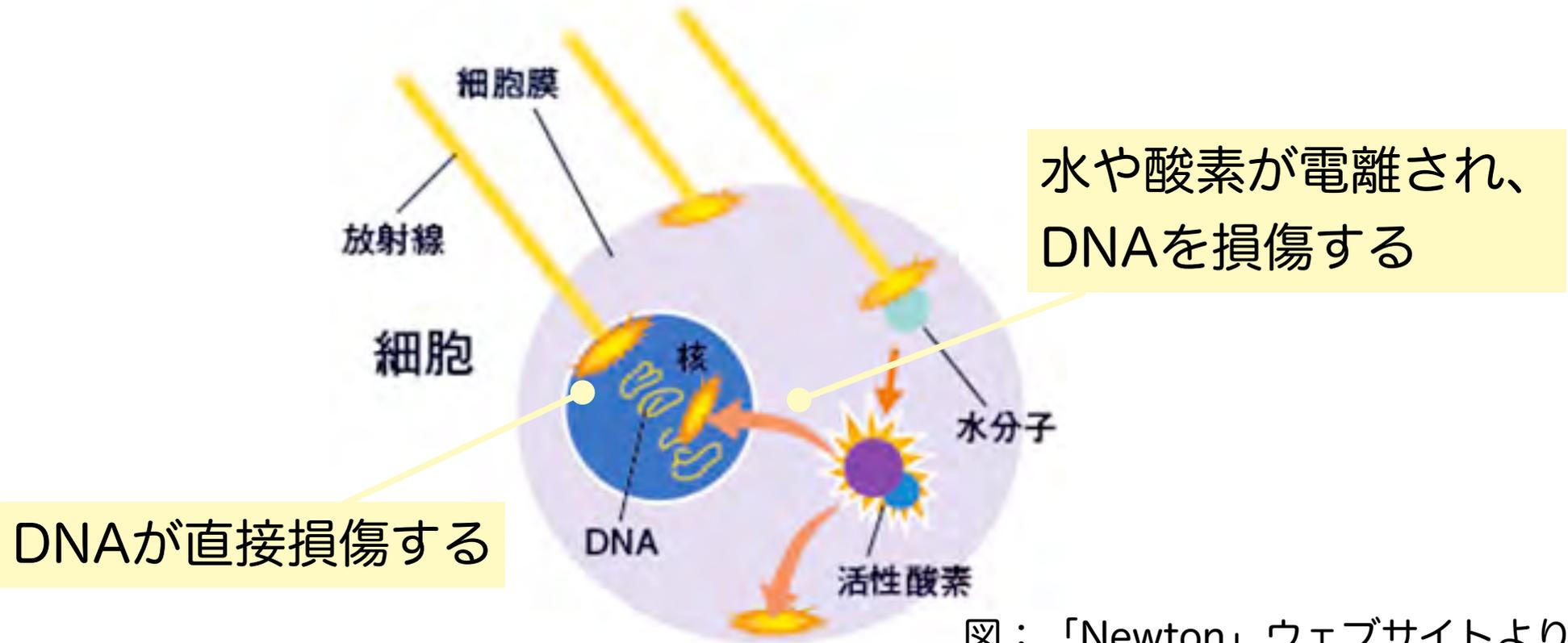
放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



図：「Newton」ウェブサイトより引用

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNA修復機構が働く



修復成功



修復失敗



細胞死

※少数なら問題無い

主に細胞死によって引き起こされる影響を「確定的影響」と呼ぶ。詳しくは独習用資料を参照のこと。

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNA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



癌の発生要因の一つ



細胞死

※少数なら問題無い

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる

ポイント1

α 線は、 β 線や γ 線よりも
誤った修復を起しやすい。

DNAが損傷

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

⋮

癌の発生要因の一つ

細胞死

※少数なら問題無い

放射線の人体影響メカニズム

～DNAの損傷・修復・修復ミス～

放射線のエネルギーによって細胞内で電離が起こる



DNAが損傷



DNA修復機構が働く



ポイント2
癌になりやすさ、癌の重大さは組織によって違う。

た修復



誤りを言んだ細胞が増殖継続



癌の発生要因の一つ

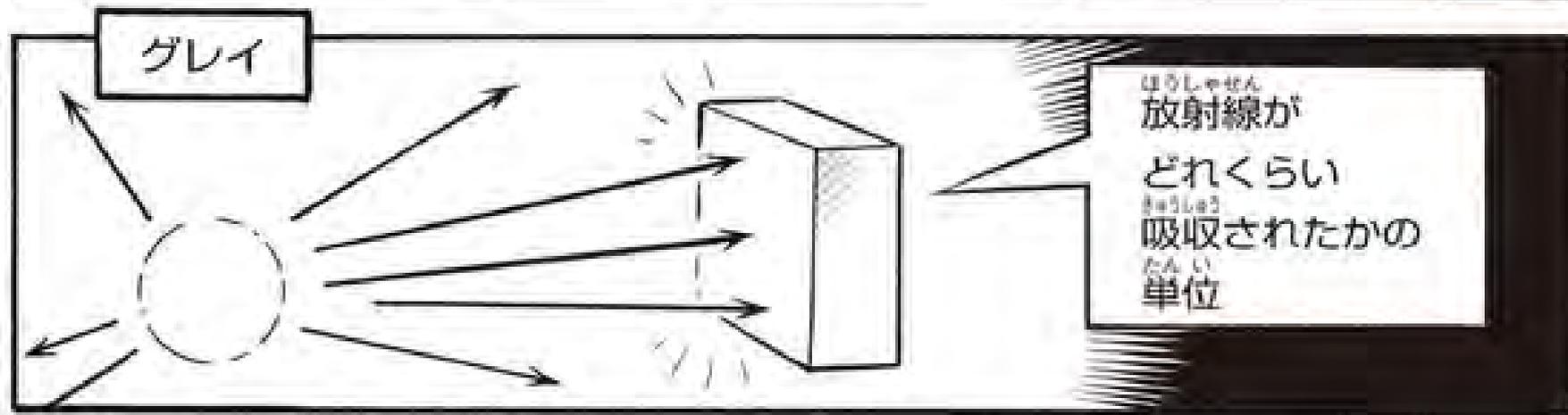
修復失敗



細胞死

※少数なら問題無い

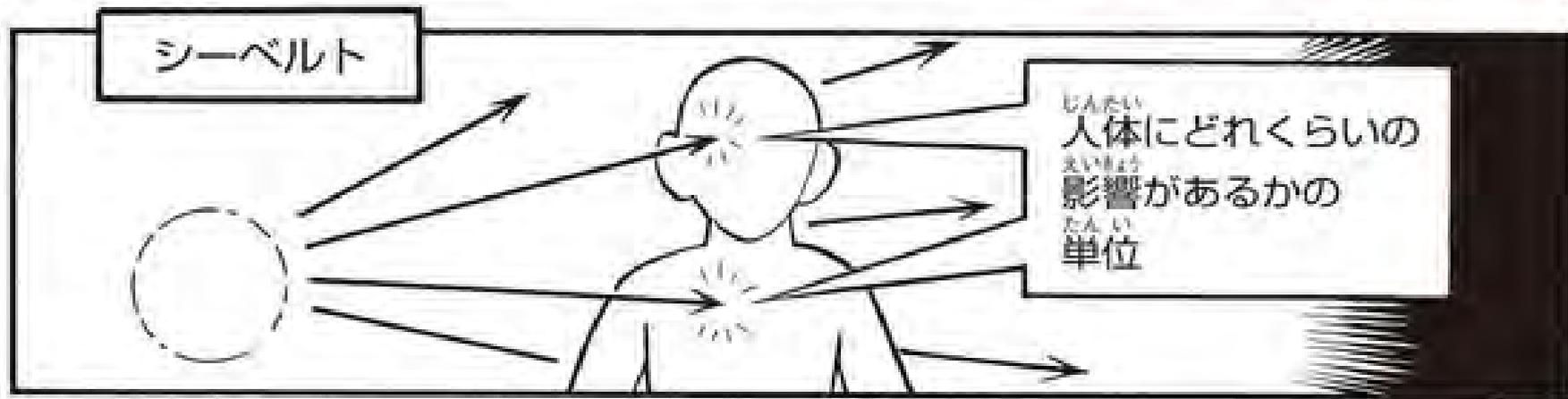
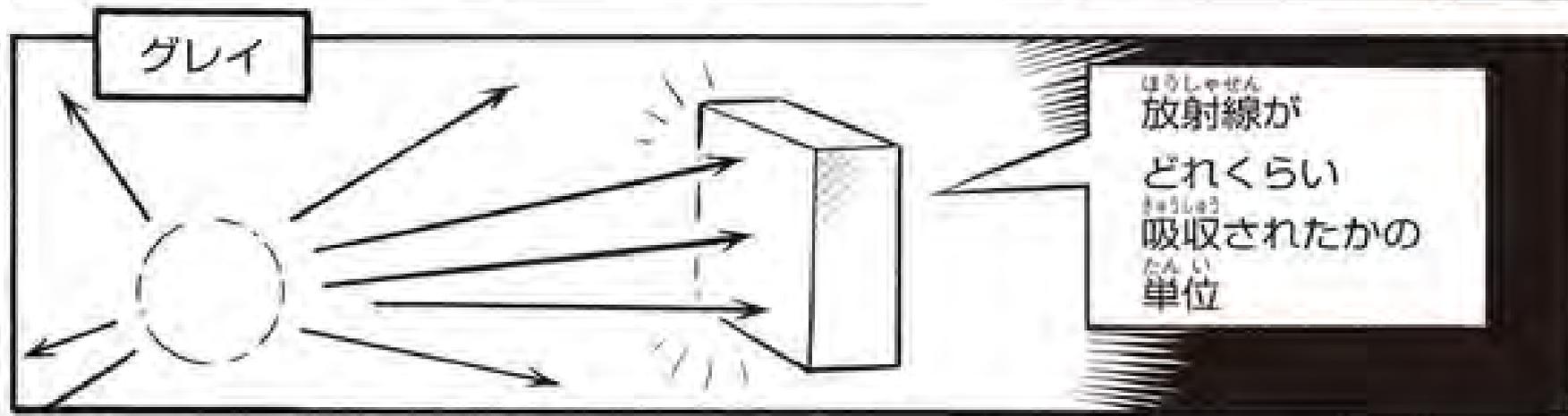
シーベルトという単位



$$\text{Gy (グレイ)} = \text{J/kg}$$

質量 (kg) あたり、どれだけのエネルギー (J) を吸収したか

シーベルトという単位



あさりよしとお「放射線ってナニモノ？」

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} \times \text{組織加重係数} = \text{Sv (シーベルト)}$$

誤った修復を起しやすい放射線で大きい

致命的な癌になりやすい組織で大きい

Svの算出に用いられる係数

放射線タイプ

放射線荷重係数

光子	1
電子、ミュー粒子（ミューオン）	1
陽子、荷電パイ中間子	2
α 粒子、重イオン、核分裂片	20
中性子	※

※：エネルギーによって異なり、約2.5～21の値を取る。

^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I は光子と電子のみを放出するので、放射線荷重係数は1、つまり $\text{Gy}=\text{Sv}$ となる。また、外部被ばくの大部分は光子・電子・ミューオンなので、 $\text{Gy}=\text{Sv}$ と見なせる場合が多い。

※ PHITSによるシミュレーションで見たとおり、光子によるエネルギー付与は、実際には光子からエネルギーを受け取った電子によるエネルギー付与である。このことを考えると光子と電子の放射線荷重係数が等しいことが理解しやすい。

臓器・組織名

組織荷重係数

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

Svの算出に用いられる係数

放射線タイプ

放射線荷重係数

光子	1
電子、ミュー粒子（ミューオン）	1
陽子、荷電パイ中間子	2
α 粒子、重イオン、核分裂片	20
中性子	※

※：エネルギーによって異なり、約2.5～21の値を取る。

^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、 ^{131}I は光子と電子のみを放出するので、放射線荷重係数は1、つまり $\text{Gy}=\text{Sv}$ となる。また、外部被ばくの大部分は光子・電子・ミューオンなので、 $\text{Gy}=\text{Sv}$ と見なせる場合が多い。

^{210}Po 、 ^{220}Rn 、 ^{222}Rn 等による内部被ばくは主に α 線。

臓器・組織名

組織荷重係数

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

※これらの表の値はICRPの2007年勧告から引用していることに注意。1990年勧告とは数値が若干異なる。

2種類のSv

※ 細かく言えばもっと沢山あります。
興味がある方は「実用量と防護量」などをキーワードに調べてみて下さい。

実効線量

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} \times \text{組織加重係数} = \text{Sv (シーベルト)}$$

誤った修復を起しやすい放射線で大きい

致命的な癌になりやすい組織で大きい

等価線量

$$\text{Gy} \times \text{放射線加重係数} = \text{Sv (シーベルト)}$$

誤った修復を起しやすい放射線で大きい

等価線量と実効線量

等価線量は、特定の組織に集まる性質のある核種による内部被ばくや、 β 線による体表面（皮膚や眼球）の外部被ばくの評価の際に使われることが多い。

例：成人が甲状腺に β 線と γ 線を合計100mGy吸収した場合、 β 線（電子）と γ 線（光子）の放射線荷重係数は両方とも1、甲状腺の組織荷重係数は0.04なので…

$$\text{甲状腺の等価線量} = 100 \times 1 = 100 \text{ (mSv)}$$

$$\text{実効線量} = 100 \times 1 \times 0.04 = 4 \text{ (mSv)}$$

となる。

Svの計算法

外部被ばく + 内部被ばく = 全被ばく量

外部被ばくの場合 → 空間線量率 (Sv/h) × 滞在時間 (h)

各種の測定器で測定可能

測定器は、放射線のエネルギーと入射数から、その場に人体があったらどの程度放射線を吸収するか？を計算してSv/hに換算している。
もしくは特定の放射線（例えば¹³⁷Csのγ線）を想定し、入射数からSv/hを推定している。

内部被ばくの場合 → 摂取量 (Bq) × 実効線量係数 (Sv/Bq)

核種ごとに係数が公表されている

¹³⁴Cs : 0.019 μSv/Bq

¹³⁷Cs : 0.013 μSv/Bq

ICRP Publication 119より引用

内部被ばくの計算例



このコップ1杯の牛乳に、放射性核種である ^{137}Cs が100Bq含まれているとする。

この1杯を飲むことによる内部被ばくを実効線量で示せ。

内部被ばくの計算例



このコップ1杯の牛乳に、放射性核種である ^{137}Cs が100Bq含まれているとする。

この1杯を飲むことによる内部被ばくを実効線量で示せ。

$$\begin{aligned}\text{実効線量} &= 100 \text{ Bq} \times 0.013 \mu\text{Sv/Bq} \\ &= 1.3 \mu\text{Sv}\end{aligned}$$

実効線量係数とは？

核種、化学形、摂取形態に応じて、1Bqの摂取によって、摂取後50年間（子供は70歳まで）の積算で何Svの被ばくになるのか（※）を示す係数。

- 1) 摂取された放射性核種が、摂取後一定時間経過後に、体内のどこに移動するか？
- 2) 体内のある場所に存在する放射性核種から出た放射線が、どの組織・臓器にどの程度吸収されるか？

50年間分の積算値をシミュレーションして、実効線量係数を算出する。

※：この積算値を預託実効線量という。被ばく総量が等しい場合、短期間にまとめて被ばくした方がリスクが高いと考えられている。したがって最大のリスクを考慮するために、内部被ばくの場合は預託実効線量の全量（実際には摂取直後から最大50年間に渡って被ばくする線量）を、摂取した瞬間に受けたと見なして線量管理を行う。

実効線量係数の調べ方

ICRP Database of Dose Coefficients

※ Windows用のデータベースアプリ

ICRP Free CD



実効線量係数の調べ方

ICRP Database of Dose Coefficients



INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION

Home

News

Consultations

Publications

Downloads

ICRP Symposia

ICRP Activities

Downloads

You are here: [Download](#) > Free Educational CD Downloads

Free Educational CD Downloads

The following files are downloadable installation files for CDs of dose coefficients available here at no cost. They can be used by teachers, students, and those interested radiological protection together with their parent ICRP Publications. Please note that while we encourage you to download and use these CDs, ICRP retains copyright and you must not edit or attempt to repackage these materials for sale.

These downloads replace ICRP [CD1](#), [CD2](#) and [CD3](#) which are now out of print. These free downloads are for Windows operating systems, including Win 7, on 32 and 64 bit machines.

ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public; Ver. 3.0

Available as a Windows setup file named [ICRPDOSE_setup.exe](#).

Free Summary Recommendations

ICRP Annual Reports

Free ICRP Posters: Paediatric radiology

Free Guides and Explanatory Notes

Free Educational Downloads

Free Educational CD Downloads

実効線量係数の調べ方

ICRP Database of Dose Coefficients: Workers and Members of the Public

File General Info ICRP 68 ICRP 72 Biokinetics Help

INTAKE

Radionuclides
Radionuclide (eg Co-60): Cs-137

Z	Element	Symbol	A	Half-life
55	Caesium	Cs	132	6.475d
55	Caesium	Cs	134	2.062y
55	Caesium	Cs	134m	2.90h
55	Caesium	Cs	135	2.3E6y
55	Caesium	Cs	135m	53m
55	Caesium	Cs	136	13.1d
55	Caesium	Cs	137	30.0y

Subject(s)
Ages at intake: Adult
 Adult Worker
 Public

Intake Route(s)
Aerosol size (AMAD): 0.3 microns
 Ingestion
 Inhalation

OUTPUT

Number of Periods: All (selected), Five, Custom
Organs / Tissues: All, with wT, Custom (selected)
1 day, 7 days, 30 days, 1 year
Thyroid, Uterus, Remainder, Effective dose

Batch File: Load Save Delete Command Line: Add Remove

Strontium [Sr-90], NINHL INGT ENVI AGE(A) TEN
Iodine [I-131], NINHL INGT ENVI AGE(A) TEN
Caesium [Cs-134], NINHL INGT ENVI AGE(A) TEN
Caesium [Cs-137], NINHL INGT ENVI AGE(A) TEN

Run
Status: Finished

Dose Coefficients (Sv/Bq) - Viewer

File Help

I-131, adult member of the public
Ingestion: f1 = 1.0
Highest committed equivalent dose coefficient: Thyroid, 4.3E-07 Sv/Bq
Remainder formulation: default

Time after intake	1 day	7 days	30 days	1 year	5 years	1
Effective dose	1.3E-09	1.0E-08	2.0E-08	2.2E-08	2.2E-08	2

Result 2 of 4
Print Save Close

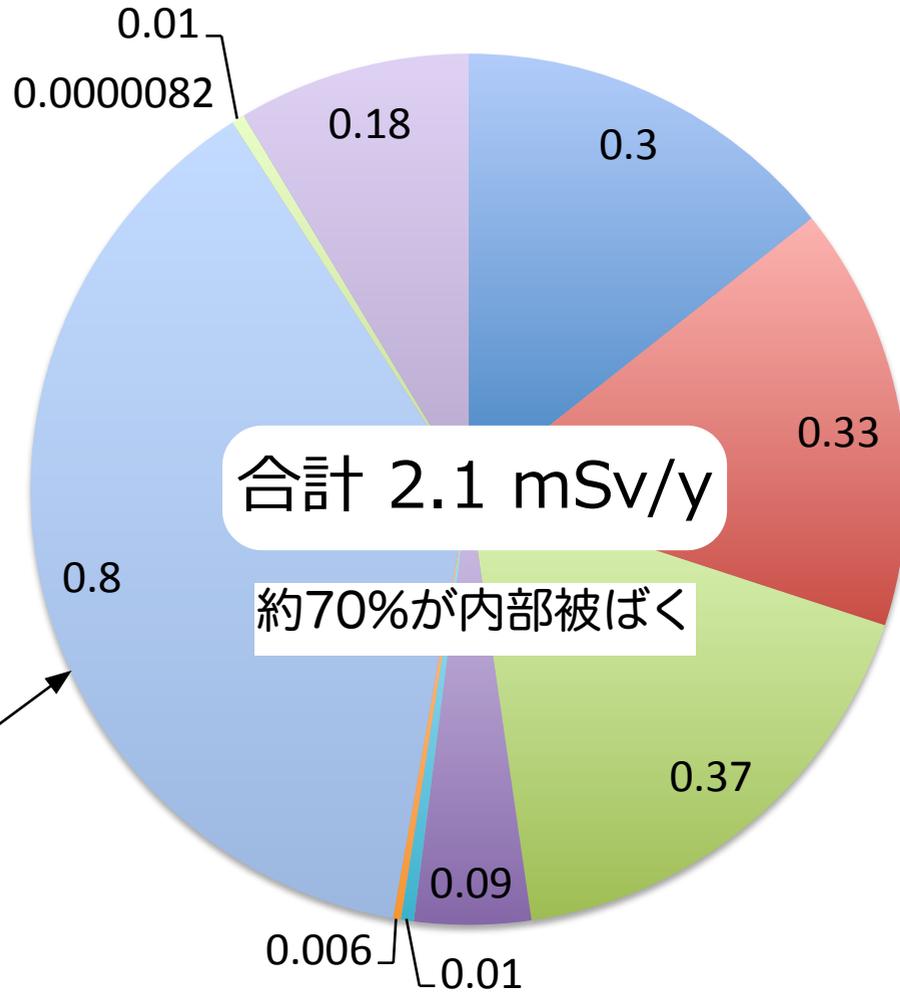
条件を設定して「Run」をクリック → 実効線量係数が表示される

Svとリスクの目安

相対的な評価 → 自然被ばくとの比較

絶対的な評価 → がんリスク上昇

平均的な日本人の自然被ばくの内訳

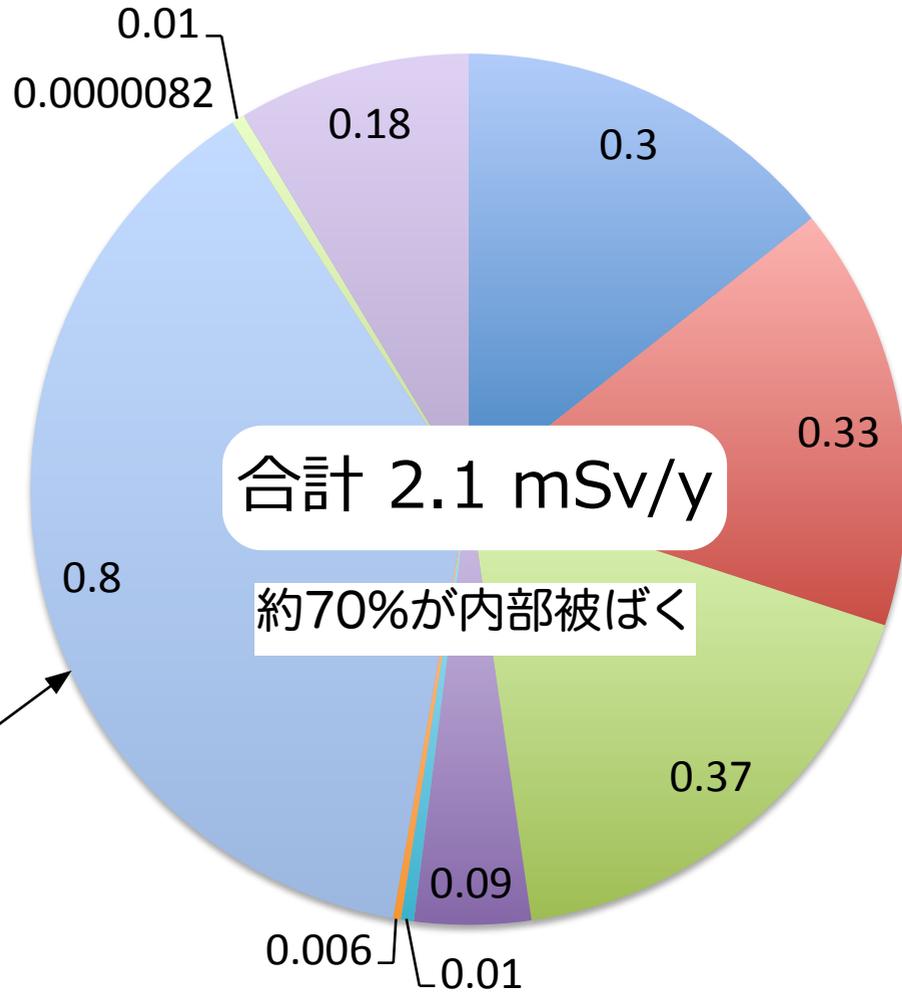


- 外部被ばく 宇宙線 — 霧箱
- 外部被ばく 大地放射線
- 吸入摂取 Rn-222 — GM管
- 吸入摂取 Rn-220 — Ge半導体検出器
- 吸入摂取 喫煙 (Po-210, Pb-210, etc.)
- 吸入摂取 その他 (U-238, etc.)
- 経口摂取 Po-210, Pb-210, etc. — CR-39
- 経口摂取 H-3
- 経口摂取 C-14
- 経口摂取 K-40 — GM管

日本人の特徴として、魚介類に含まれる²¹⁰Po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

平均的な日本人の自然被ばくの内訳



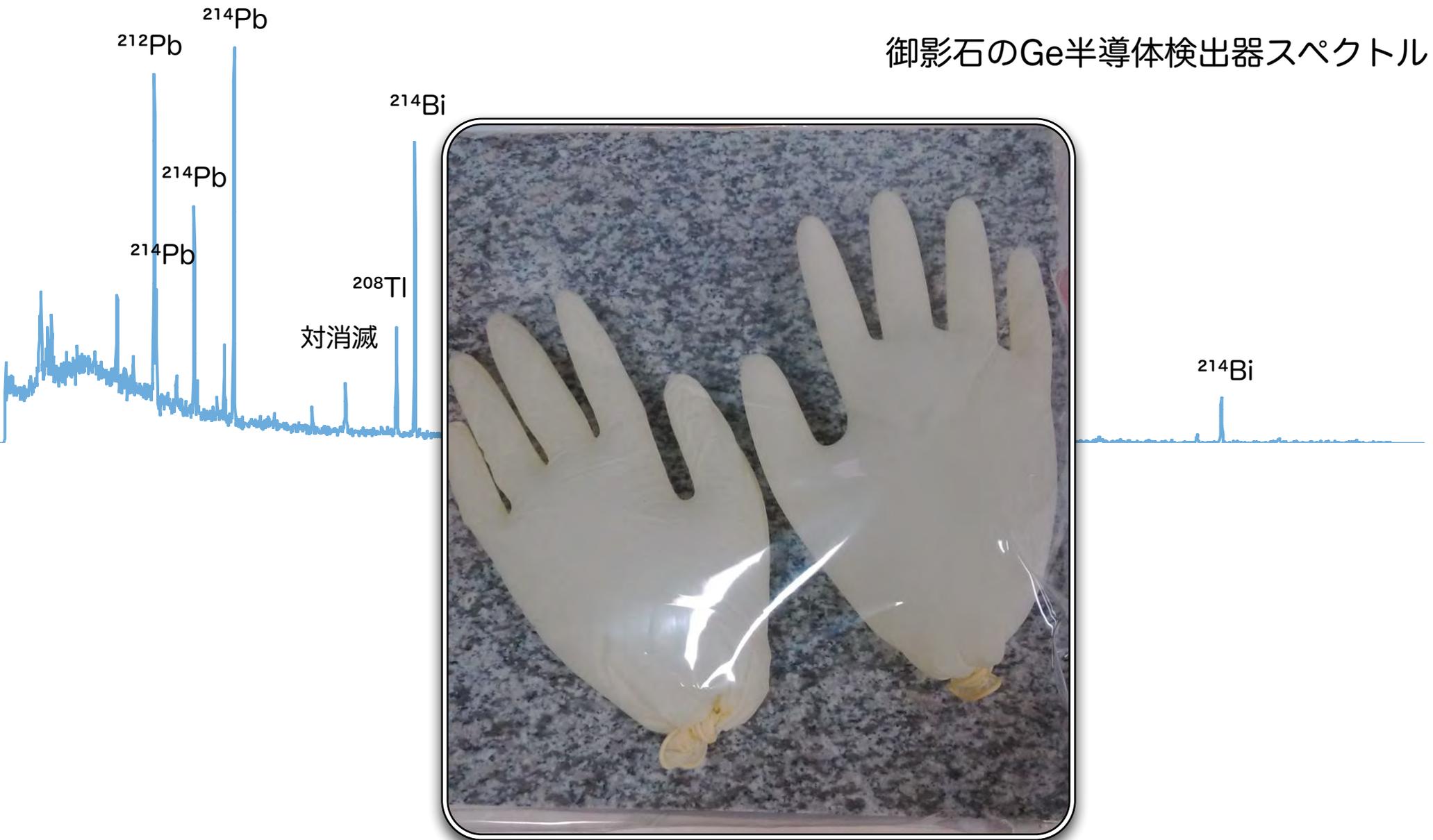
- 外部被ばく 宇宙線
- 外部被ばく 大地放射線
- 吸入摂取 Rn-222
- 吸入摂取 Rn-220
- 吸入摂取 喫煙 (Po-210, Pb-210, etc.)
- 吸入摂取 その他 (U-238, etc.)
- 経口摂取 Po-210, Pb-210, etc.
- 経口摂取 H-3
- 経口摂取 C-14
- 経口摂取 K-40

日本人の特徴として、魚介類に含まれる²¹⁰Po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

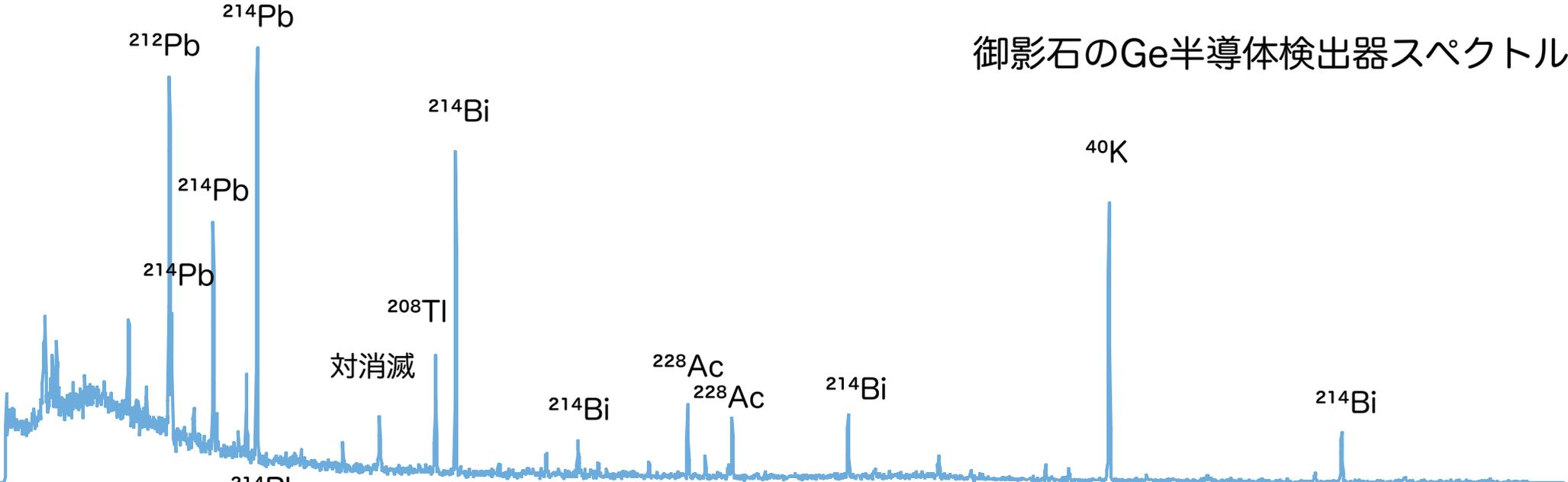
Rnの捕集と検出

御影石のGe半導体検出器スペクトル

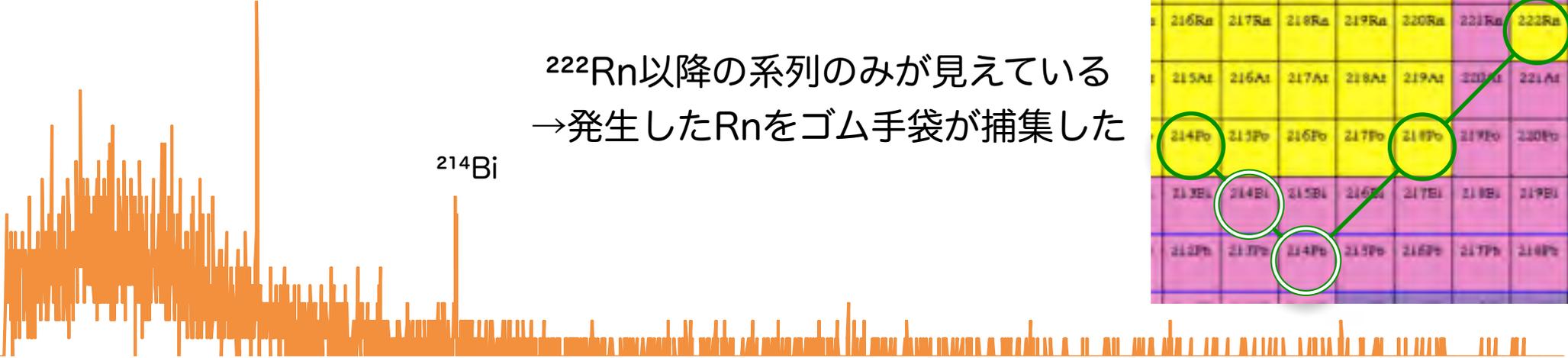


Rnの捕集と検出

御影石のGe半導体検出器スペクトル



222Rn以降の系列のみが見えている
 →発生したRnをゴム手袋が捕集した



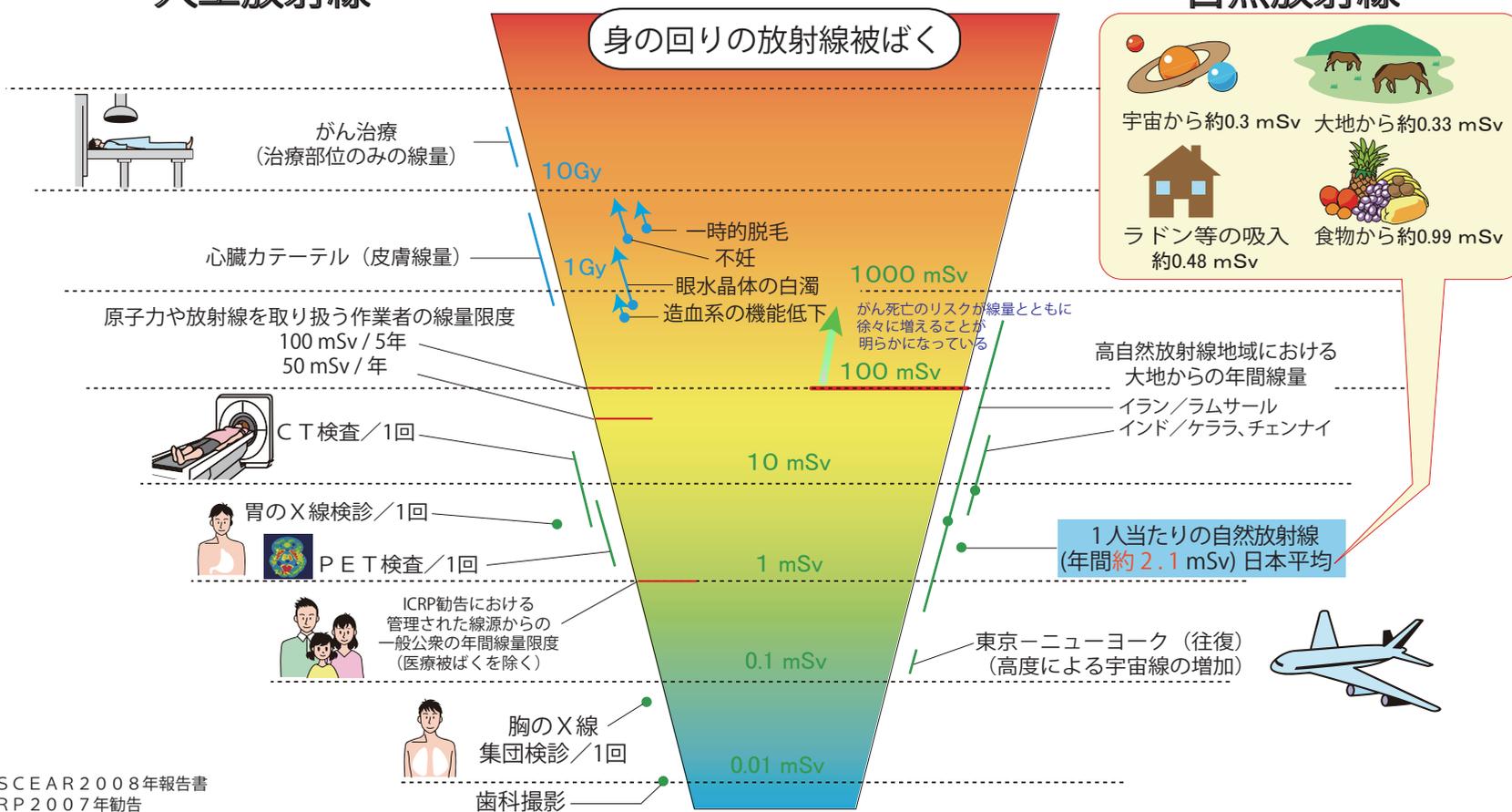
御影石から発生した気体のスペクトル

医療被ばくを含む各種被ばくの比較

放射線被ばくの早見図

人工放射線

自然放射線



- ・ UNSCEAR 2008年報告書
 - ・ 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。

【線量の単位】

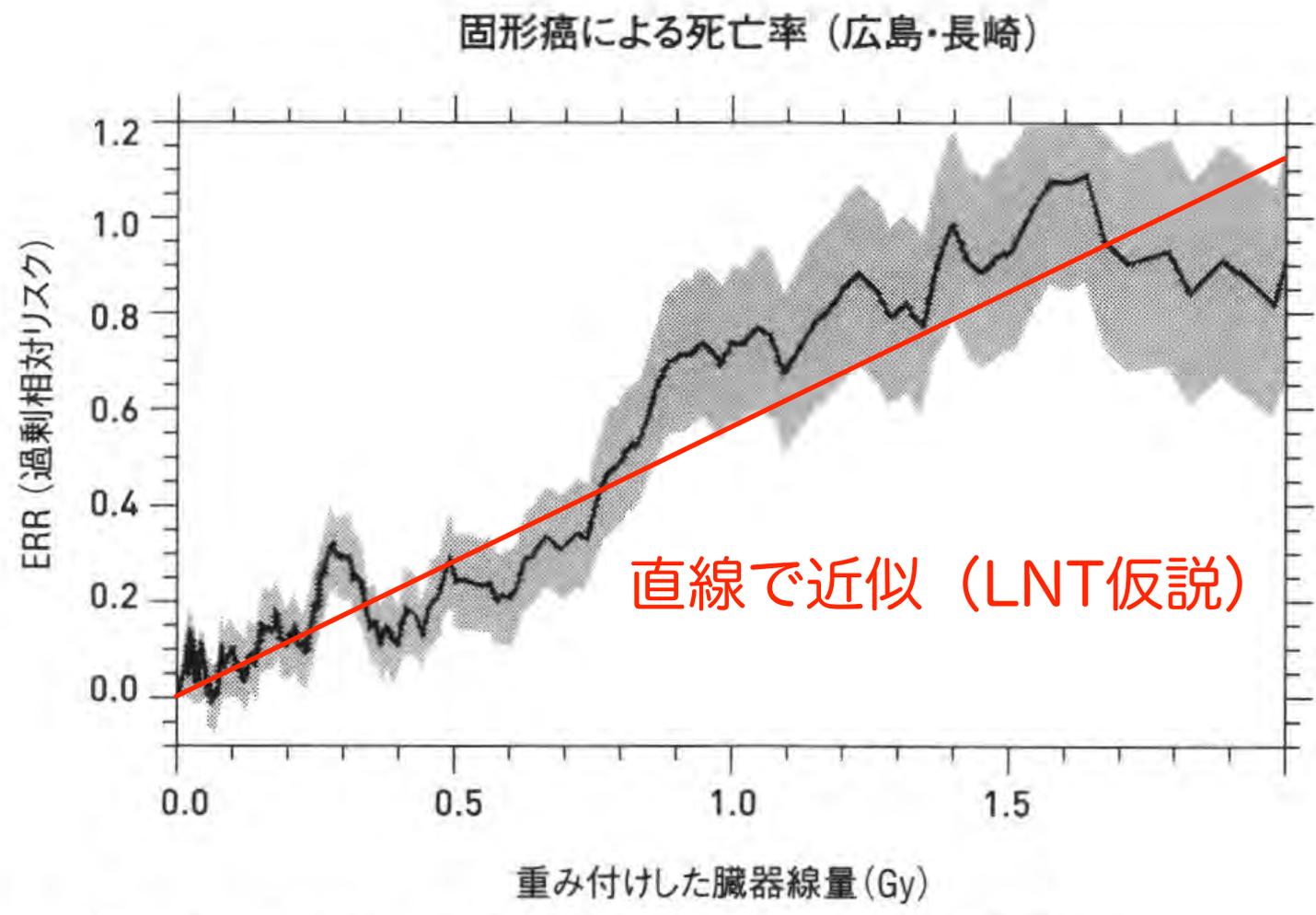
各臓器・組織における吸収線量: Gy (グレイ)
放射線から臓器・組織の各部位において単位重量あたりにどれくらいエネルギーを受けたのかを表す物理的定量。

実効線量: mSv (ミリシーベルト)
臓器・組織の各部位で受けた線量を、がんや遺伝性影響の感受性について重み付けをして全身で足し合わせた量で、放射線防護に用いる線量。

各部位に均等に、ガンマ線 1 Gy の吸収線量を全身に受けた場合、実効線量で1000 mSvに相当する。

独立行政法人 **NIRS**
放射線医学総合研究所
<http://www.nirs.go.jp>

リスクの絶対評価



Svの数値とリスクの目安

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



これがどういう意味か？

図：放医研ウェブ
サイトより引用

都道府県別75歳未満がん年齢調整死亡率 (2009年)

Age-adjusted Cancer Mortality Rate under Age 75 by Prefectures (2009)

(1) 全がん All Cancers

癌の死亡率には様々な変動要因がある。例えば都道府県単位で見ても相対的に10%以上（死亡率30%に対して**3%以上**）異なる。

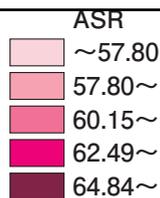
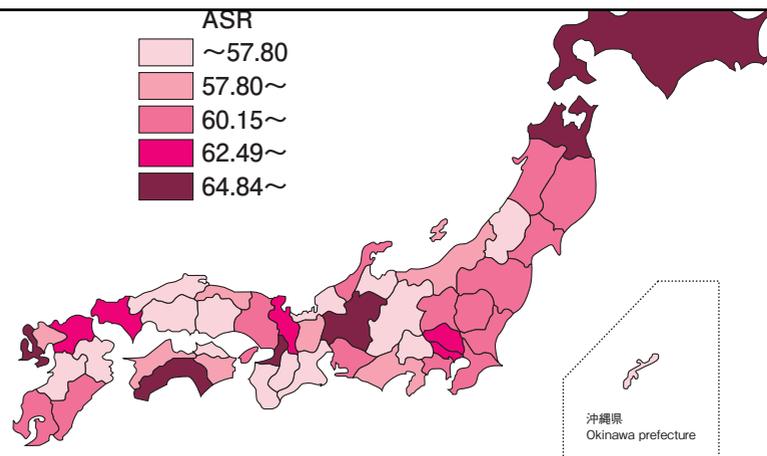
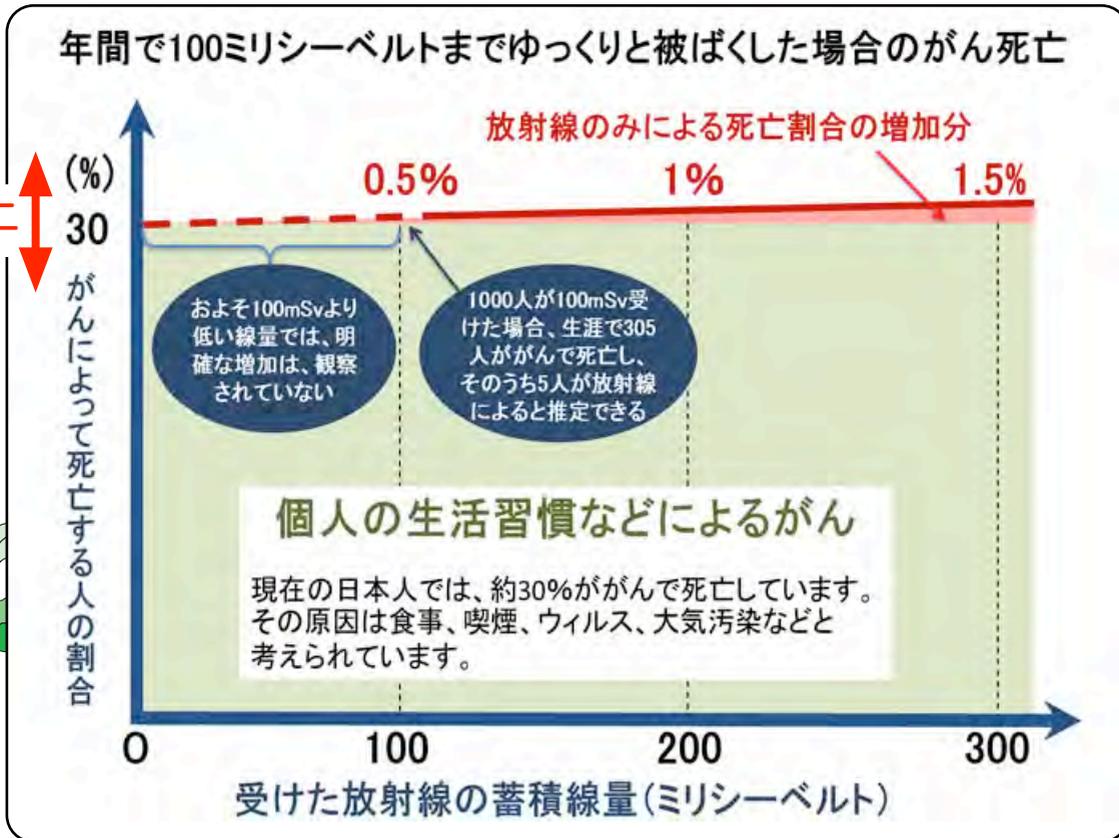
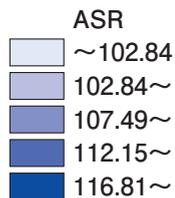


低線量被ばくによる**0.5%未満**の差を検出するのは**統計的に困難**。

3%以上



男性 Males

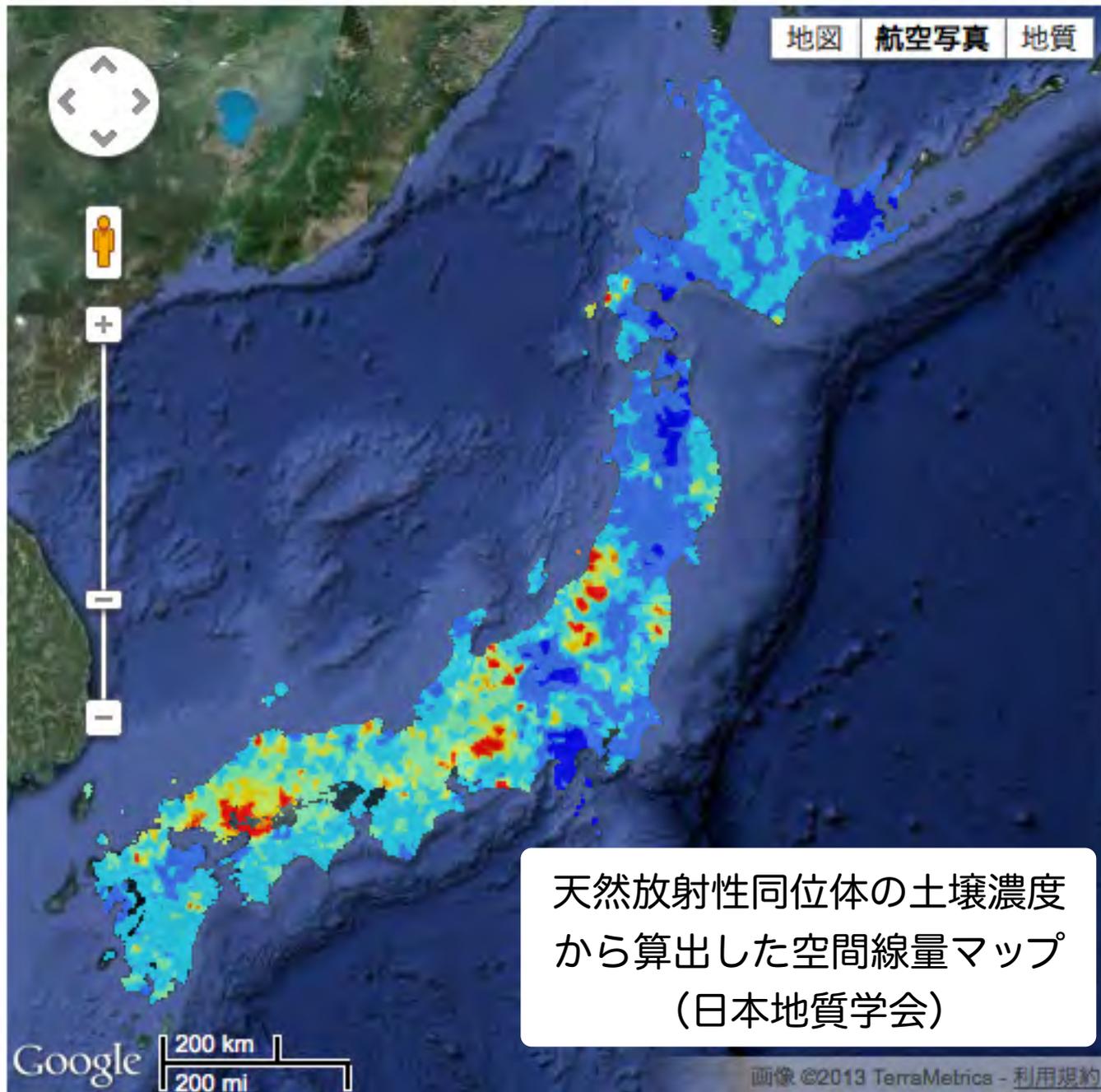


図：がん研究振興財団のウェブサイトより引用

自然被ばく量も全国均一ではないため、個人の線量（先ほどのグラフの横軸）を正確に算出することにも困難が伴う。



※ r 線による全身均一被ばくの場合
は $\text{Gy}=\text{Sv}$



天然放射性同位体の土壌濃度から算出した空間線量マップ
(日本地質学会)

自然被ばく量も全国均一ではないため、個人の線量（先ほどのグラフの横軸）を正確に算出することにも困難が伴う。

左：屋内ラドン濃度マップ
 右：宇宙線線量率マップ
 共に放医研ニュースNo.92より引用

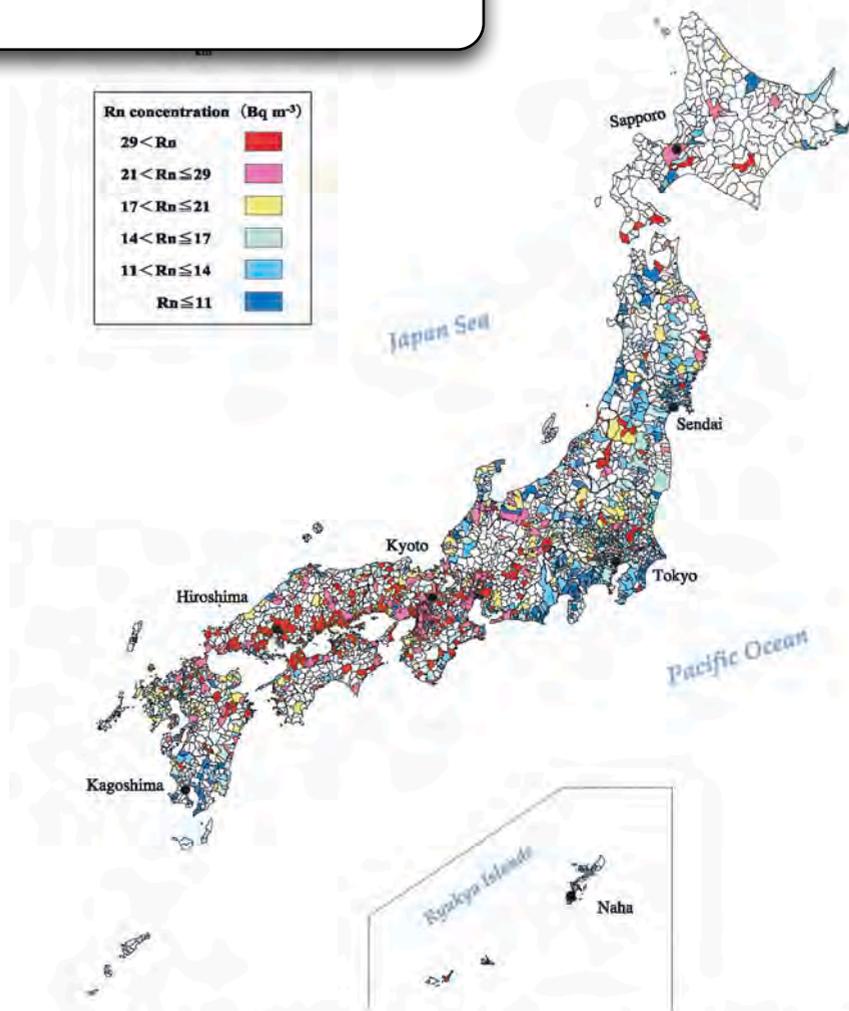
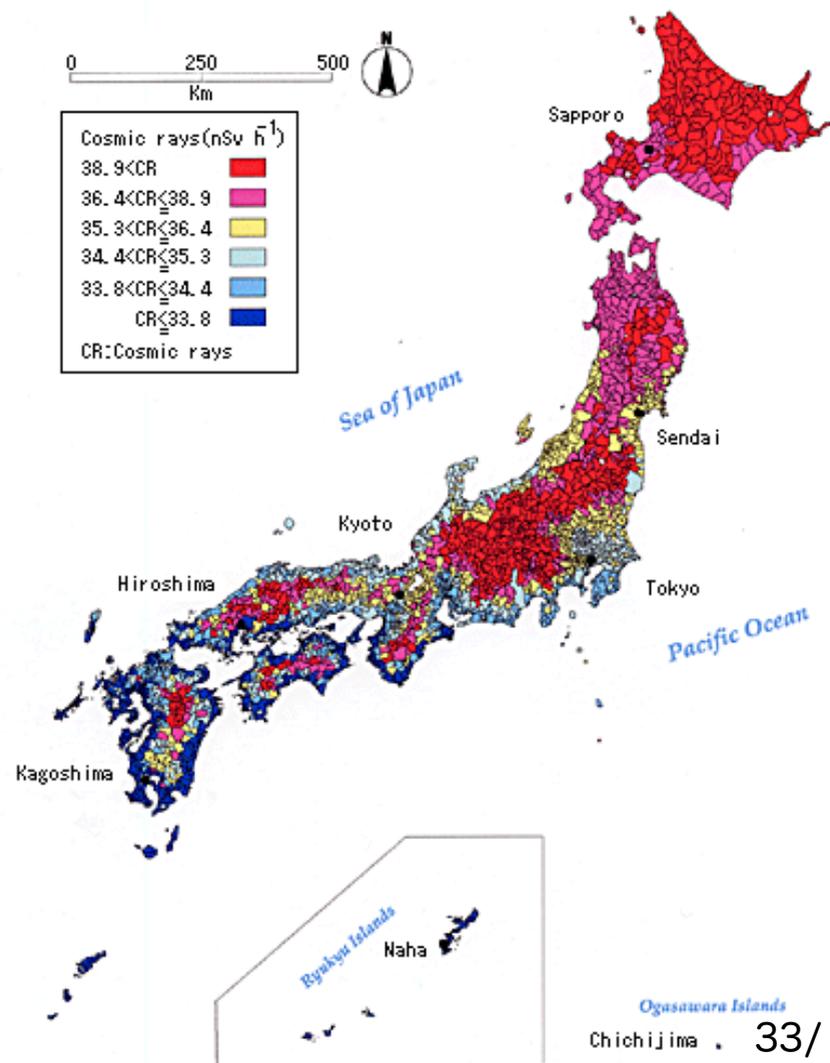


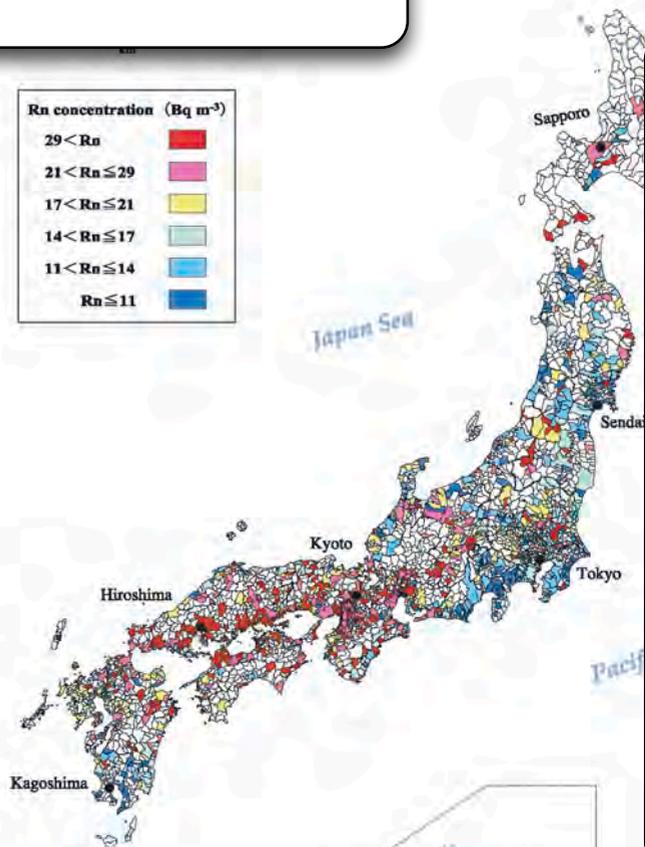
Fig. 4. Graphical expression of annual average indoor radon concentrations in each municipality: Whole nation



自然被ばく量も全国均一ではないため、個人の線量（先ほどのグラフの横軸）を正確に算出することにも困難が伴う。

左：屋内ラドン濃度マップ
 右：宇宙線線量率マップ
 共に放医研ニュースNo.92より引用

Rn concentration (Bq m ⁻³)	
29 < Rn	Red
21 < Rn ≤ 29	Pink
17 < Rn ≤ 21	Yellow
14 < Rn ≤ 17	Light Green
11 < Rn ≤ 14	Light Blue
Rn ≤ 11	Dark Blue



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

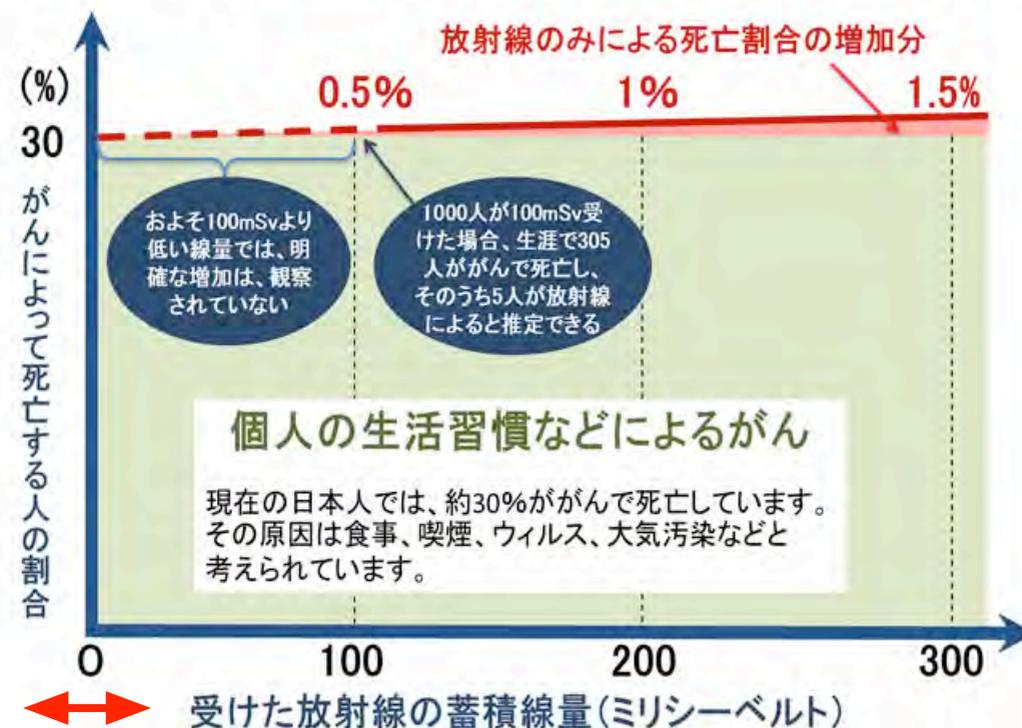
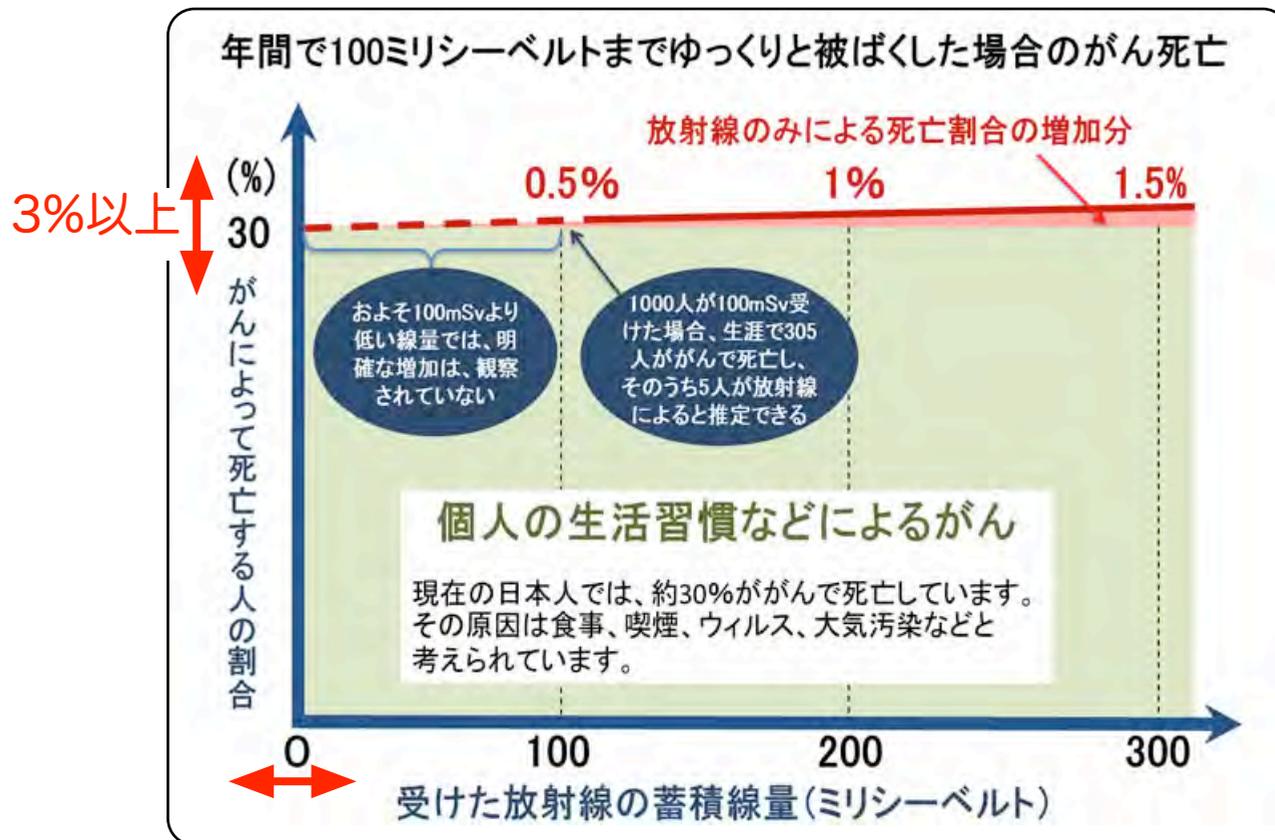


Fig. 4. Graphical expression of annual average indoor radon concentrations in each municipality: Whole nation



現在得られているデータからは、100mSv以下の低線量被ばくによる健康影響があるか否か、統計的に断言することはできない。ただし、その影響は他の様々な要因（例えば県による違い）に紛れて識別できない程度には小さいと考えられる。

トランスサイエンス

現在得られているデータからは、100mSv以下の低線量被ばくによる健康影響があるか否か、統計的に断言することはできない。ただし、その影響は他の様々な要因（例えば県による違い）に紛れて識別できない程度には小さいと考えられる。

ここまでは、科学的に議論できる。
(反論がある場合でも、データの取り方が正しいか？と
いった科学的な議論が成立する)

トランスサイエンス

現在得られているデータからは、100mSv以下の低線量被ばくによる健康影響があるか否か、統計的に断言することはできない。ただし、その影響は他の様々な要因（例えば県による違い）に紛れて識別できない程度には小さいと考えられる。

ここまでは、科学的に議論できる。
(反論がある場合でも、データの取り方が正しいか？と
いった科学的な議論が成立する)

たとえわずかな確率であっても、がんという重大な結果をまねく以上、追加の被ばくは避けるべきではないか？

他のリスクと同等であれば、被災地の復興のためにある程度の被ばくは許容できるのではないか？

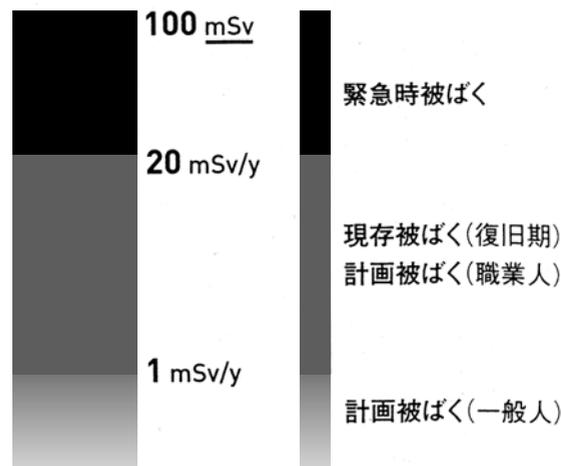
これは、科学的だけでは結論を出せない。

▼
「トランスサイエンス」

緊急時の線量管理に関するICRP勧告のポイント

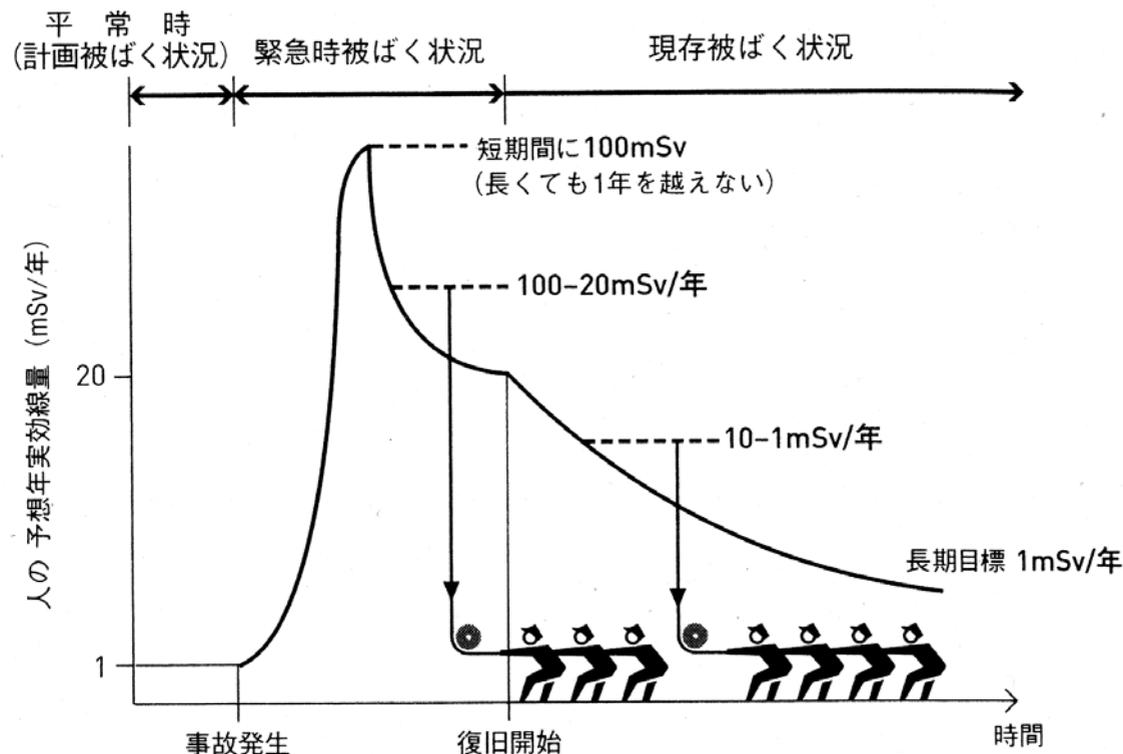
※ ICRP勧告103、109、111は、日本アイソトープ協会のサイトで日本語版が無償公開されている
 下図は「語りあうためのICRP 111 -ふるさとの暮らしと放射線防護-」より引用

- 緊急時
 短期間（長くて1年以内）で考える。そのため、100 mSv/y ではない
- 事故後の復旧期
 1年の単位で考えるが毎年同じではない。回復につれ、状況に応じより低い参考レベルを選択していく



ICRP（国際放射線防護委員会）はチェルノブイリ事故からの回復の経験を踏まえ、ICRP Publ. 111を作成した。

その中で示されている20mSv/yという値は、緊急時被ばくと復旧期の被ばくの境界線である。右図が示すとおり「一旦設定した線量目標が達成されたら、より低い目標を設定し、最終的には1mSv/yを目指すべき」というのがICRPが勧告する内容。



- 参考レベルは
- 被ばく状況の改善を進める目安とする目標値
 - 目標設定 → 達成 → さらに改善する目標に → 達成
 全体の状況を見ながら、これを繰り返す

「被ばくが参考レベルよりも下に低減されたという事実は、最適化プロセスに従って被ばくをさらに低減できる余地がある限り防護対策を打ち切るための十分条件とはならない。」 (ICRP Publ. 111 (53))

食品の基準値の設定

基準値のもととなる1人当たりの年間線量の上限值
1 ミリシーベルト

水

約 0.1 ミリ
シーベルト

食品

約 0.9 ミリシーベルト (0.88~0.92)

放射性セシウム

放射性
セシウム以外

飲料水の基準値
(10ベクレル/kg) の水を
1年飲んだ場合に
相当する線量を割当て

セシウム以外の放射性物質による
影響を考慮

(例：19才以上では、多めに見積もって食品からの
線量の約12%)

※ストロンチウム90、プルトニウム、ルテニウム106

食品の基準値の設定

放射性セシウムからの
年間の線量を

食品 1 kg
あたりの
量に換算

- ※年齢区分別の摂取量と換算係数(実効線量係数)を用いて算出
- ※流通する食品の半分が基準値上限の放射性物質を含むと仮定

年齢区分	摂取量	限度値(ベクレル/kg)
1歳未満	男女平均	460
1歳～6歳	男	310
	女	320
7歳～12歳	男	190
	女	210
13歳～18歳	男	120
	女	150
19歳以上	男	130
	女	160
妊婦	女	160
最小値		120

各年齢区分のうち
最も厳しい(小さい)値をもとに

基準値
100ベクレル/kg

ショートレポート課題



このコップ1杯の牛乳に、放射性核種である ^{137}Cs が100Bq、 ^{134}Cs が20Bq含まれているとする。

この1杯を飲むことによる被ばくリスクを計算し、そのリスクの大きさを自然・医療被ばくとの比較、またはLNT仮説に基づいて論ぜよ。