# 放射線被ばくの影響と防護

§０　放射線の影響ー表層と深層ー
§１　放射線の影響をめぐる最近の動向
§２　放射線とは何か、どんな種類があるか
§３　放射線を被曝（ばく）するとどうなるか
§４　「低線量」被ばくの影響評価の意見の分岐
§５　物理的半減期、生物的半減期と有効半減期
§６　放射線感受性の個人差
§７　「**放射線量**」と「積算線量」
§８　外部被曝と内部被曝

filename＝radiation-effects-protection20191203.ppt,
made by R. Okamoto, Emeritus Prof., Kyushu Int. of Tech.

# §０. 放射線の影響―表層と深層―

## 関係する研究分野および周辺

物理学（原子核物理学，放射線物理学）
生物学（放射線生物学）
医学(放射線医学）
放射線防護学（「学」？）

## 関連する組織・機関・グループ

国内：放射線影響研究所
↕
原子力資料情報室
原子力市民委員会

国際：国際放射線防護委員会（ICRP ）←国際原子力機関(IAEA)
↕
欧州放射線リスク委員会（ECRP ）

## 評価における中立性・客観性・独立性の保持はどうか？

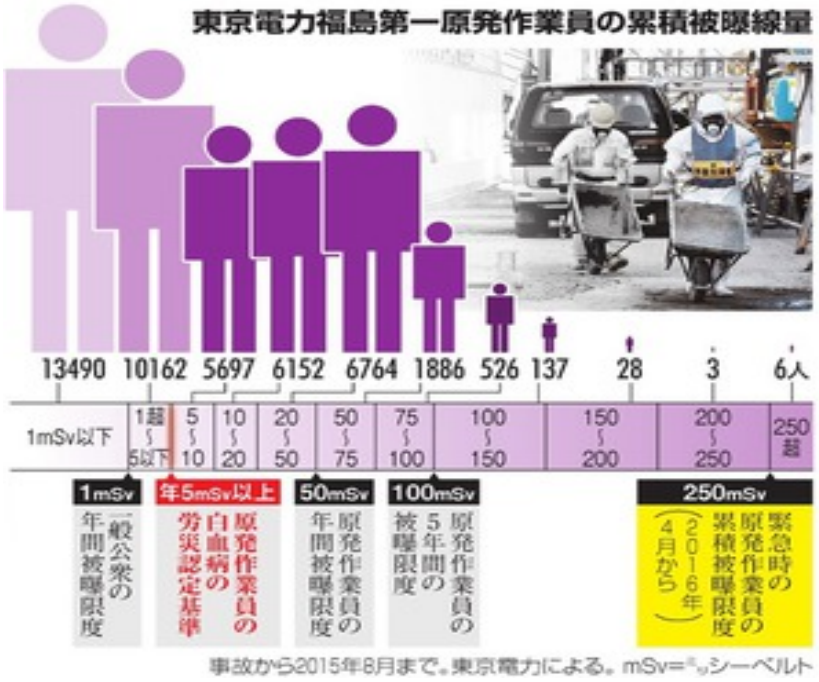
利益相反の可能性―意識的または無意識的バイアス―
自主・民主・公開の原則が場合により

一ノ瀬正樹他「低線量被曝のモラル」河出書房新社，
日野行介「福島原発事故　県民健康管理調査の　闇」岩波書店，他

# §1. 放射線の影響をめぐる最近の動向

## 被曝労災、不安なお　福島第一、累積5ミリシーベルト超2万人

2015年10月21日




## 低線量でもがん死リスク増

被曝100ミリシーベルト未満　欧米で30万人調査

2015年10月23日,朝日新聞

# §２　放射線とは何か、どんな種類があるか

| | |
|---|---|
| アルファ線（α線） | **ヘリウム原子核の高速の流れ。プラスに帯電。** |
| ベータ線（β線） | 電子の高速の流れ。マイナスに帯電。 |
| エックス線（X線）、ガンマ線（γ線） | 高エネルギーの電磁波。波長の短い光。 |
| 中性子線 | 中性子の高速の流れ。電気的に中性。 |

高速，高エネルギーとは？

原子分子の結合エネルギーなどは高々数電子ボルトである。

アルファ線：一般には相当多数のアルファ粒子（ヘリウム4原子核）の流れである。
1個のアルファ粒子のエネルギーは約500万電子ボルトである。

## 放射線と物質の物理的相互作用

放射線と物質粒子（電子、原子、分子などミクロな粒子）との相互作用

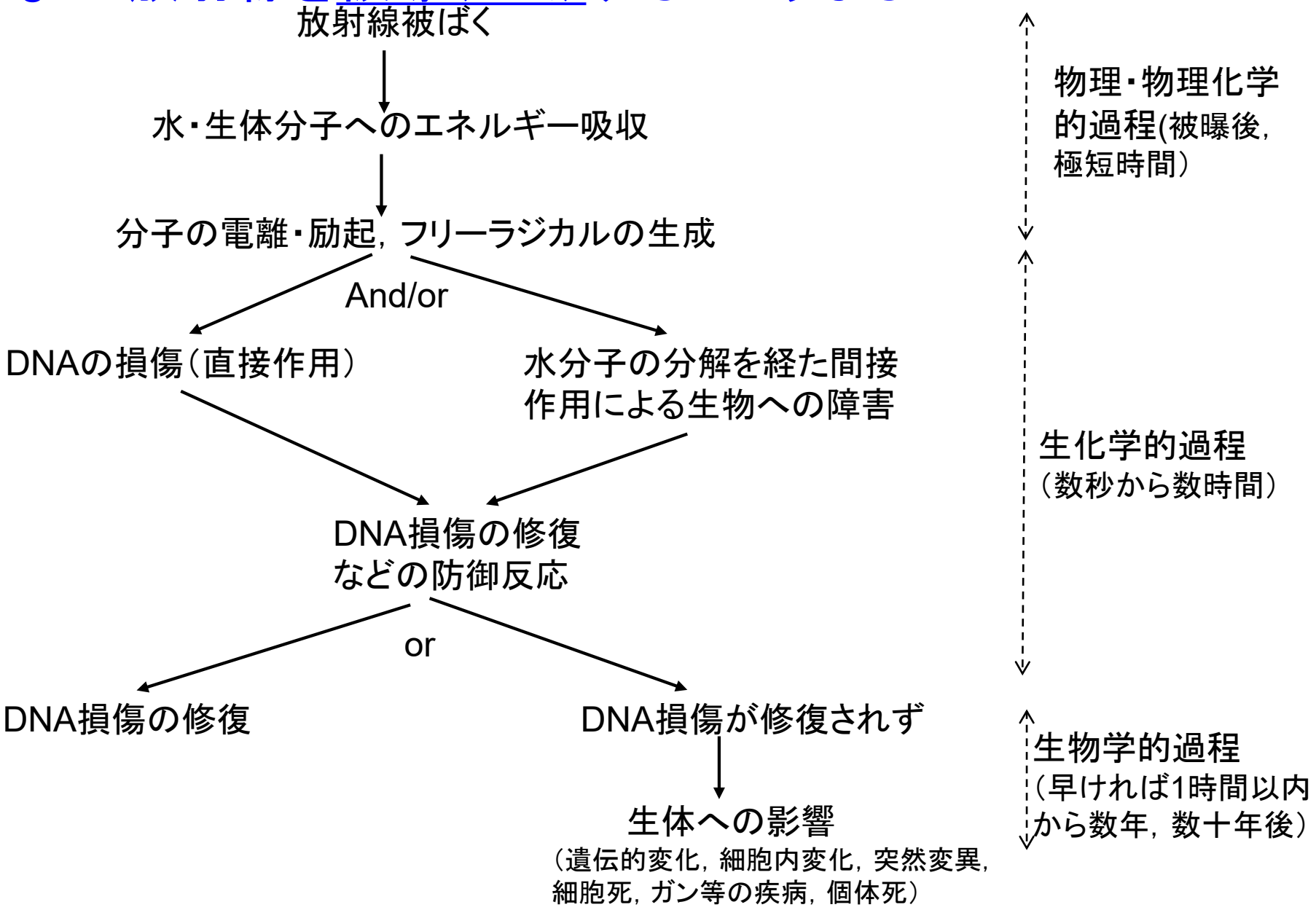
放射線のマクロな物質への集積効果

## 放射線の生体への影響（傷害）

生物は分子システムであり、微視的影響を拡大する機構（しくみ）を持つ

生体の種々の傷に対する修復機構と放射線の作用のせめぎ合い

# §３　放射線を被曝（ばく）するとどうなるか



- 身体的影響
  - 急性傷害
    - 前駆症状（嘔吐、下痢、頭痛、意識喪失、高熱）
    - リンパ球の減少、皮膚紅紋、脱毛
  - 晩発性傷害
    - 白内障
    - ガン（白血病を含む）
- 遺伝的影響

1）動物実験、植物実験では観察されている。
2）人間の場合、広島、長崎の原爆被災者の被爆二世の調査では、これまでのところ発症の事例は見つかっていない。
（館野之男「放射線と健康」、岩波新書、2001年、p. 139.

コメント：
原爆による被ばくは非常に強い放射線を短時間に1回受ける。
しかし、原発事故により拡散・付着・吸収される放射線の場合には、
弱い放射線を長期にわたり継続的に被ばくするという違いがあるので、
障害の現れ方は同じではない可能性がある。

# 確定的影響と確率的影響

確定的影響：急性傷害、白内症（晩発性傷害）など

1）強い放射線（高い線量）を受けた場合、必ず発症する傷害　2）影響（症状）が現われる最低線量（しきい値）が存在する。

病気の種類にもよるが、

被曝線量（後述）で100ミリシーベルト（100mSv）以上。

3）線量が増大するほど、影響（症状）が重くなる。

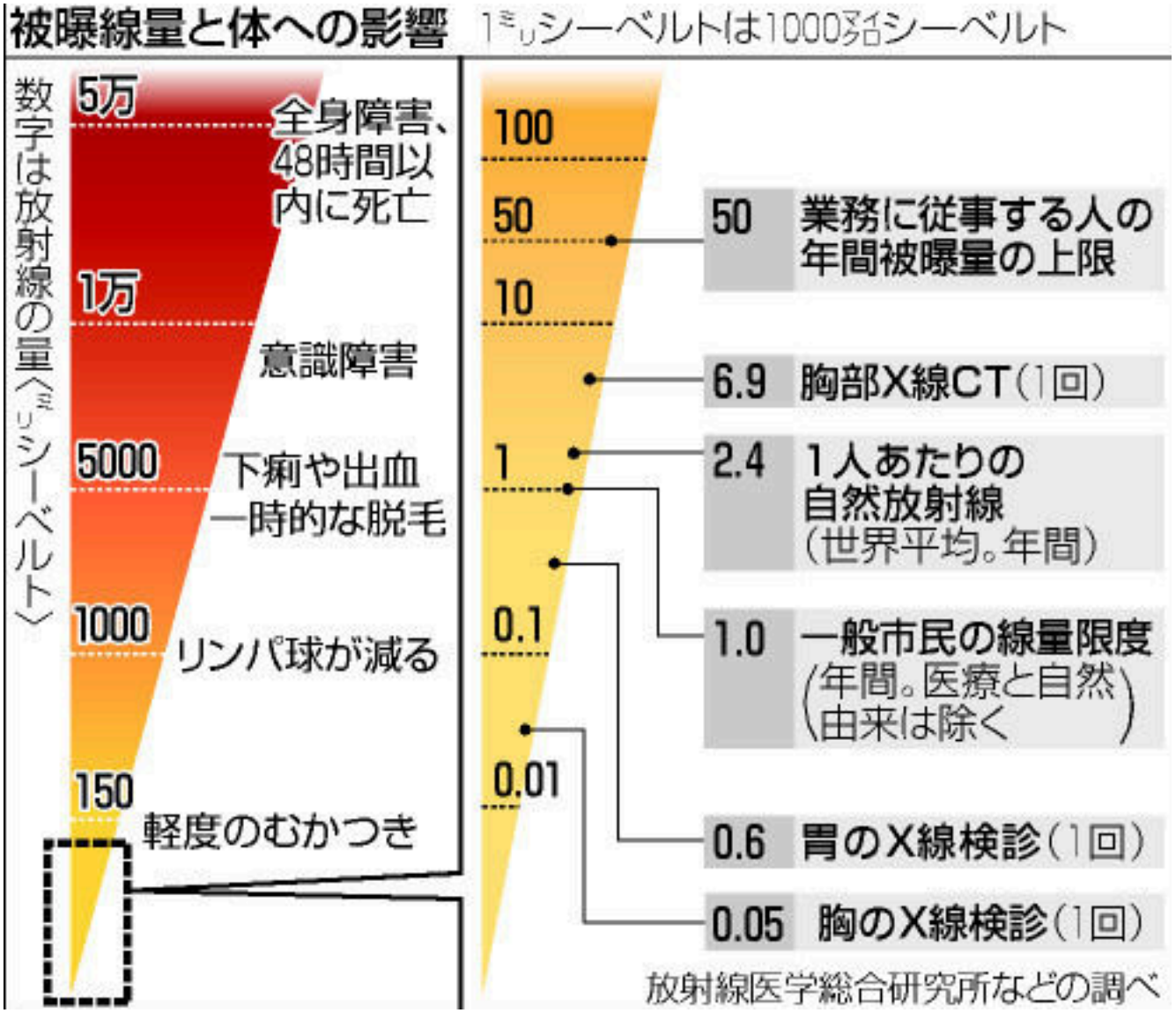
確率的影響：ガン（晩発性傷害），遺伝的影響

1）弱い放射線（低い線量）を受けた場合、発症するかもしれない傷害

2）影響（症状）の発現する確率が受けた放射線量に比例する。

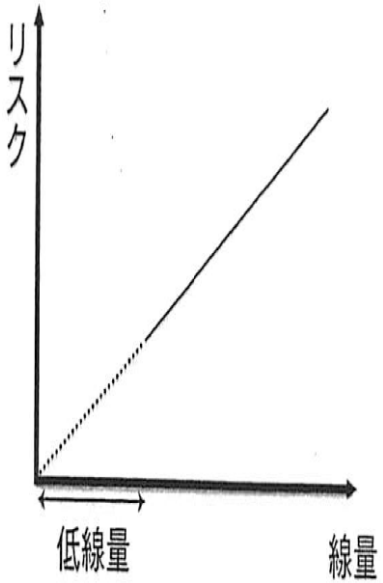
マイナスの宝くじ。

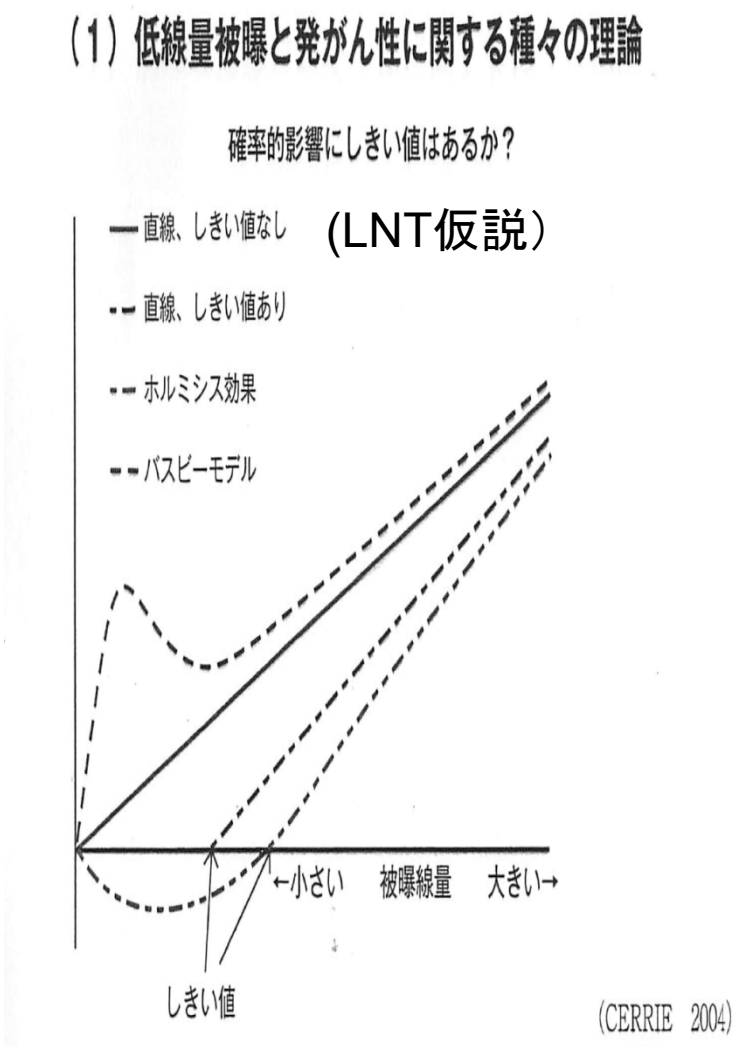
3）最低線量（しきい値）は存在しないというのが国際的に主流の見解であるが、非常に低い線量の影響については専門家の間で見解が分かれている。


被曝線量と体への影響
1ミリシーベルトは1000マイクロシーベルト
数字は放射線の量〈ミリシーベルト〉
5万
全身障害、48時間以内に死亡
1万
意識障害
5000
下痢や出血 一時的な脱毛
1000
リンパ球が減る
150
軽度のむかつき
100
50
10
1
0.1
0.01
50 業務に従事する人の年間被曝量の上限
6.9 胸部X線CT(1回)
2.4 1人あたりの自然放射線(世界平均。年間)
1.0 一般市民の線量限度(年間。医療と自然由来は除く)
0.6 胃のX線検診(1回)
0.05 胸のX線検診(1回)
放射線医学総合研究所などの調べ

# §４ 「低線量」被ばくの影響評価の意見の分岐

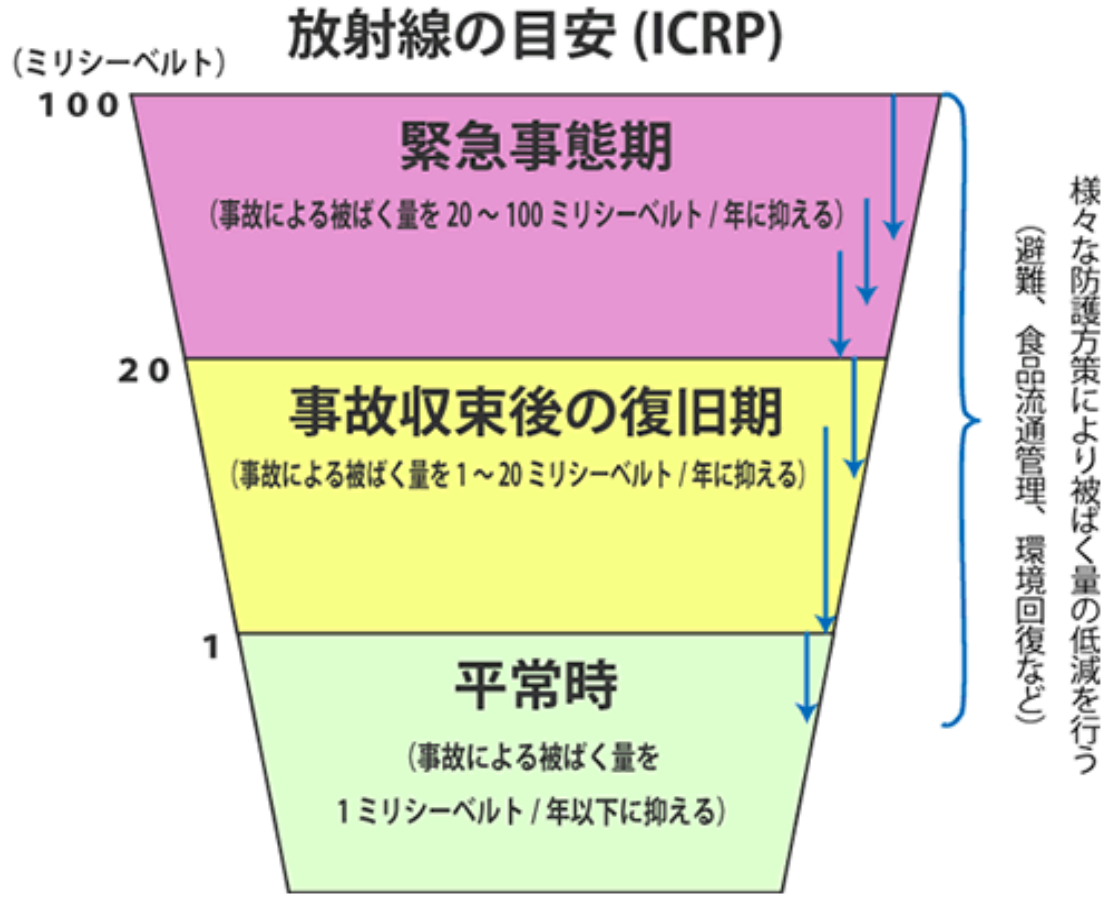
(LNT仮説）
しきい値なし直線モデル




医療問題研究会編「低線量・内部被曝の危険性」（耕文社，2011年）

# ICRP(国際放射線防護委員会)の主な勧告



# 参考：ICRP(国際放射線防護委員会)の基本的勧告についての複数の見方

「低線量被ばくは健康に良い」などと、ICRPの考え方に異論を唱える研究者（専門家）も存在する。

例えば、近藤宗平「人は放射線になぜ弱いか一第3版」（講談社ブルーバックス、1998年）。

一方、ICRPの基準は

「・・・核・原子力開発のためにヒバクを強制する側が、それを強制される側に、ヒバクがやむをえないもので、我慢して受忍すべきと思わせるために、科学的装いを凝らして作った社会的規準であり、原子力開発の推進朔を政治的に支える手段である」という見方もある。

例えば、中川保雄「(増補）放射線被曝の歴史」、明石書店、2011年。

# §５　物理的半減期、生物的半減期と有効半減期

物理的半減期：

放射性物質に含まれる、不安定な原子核の個数が半分に減る時間で、その原子核（元素）の種類に特有の値。

生物学的半減期：

放射性物質が飲食物の一部として身体（組織、臓器）内に摂取された場合、代謝・排出などにより、対外に排出されて、はじめ存在していた放射性物質の量が半分に減る時間

有効半減期：　原子核物理的な崩壊（壊変）と排出など生物学的過程の両方によって、放射性物質の量が半分になる時間

$$\text{有効半減期}=\frac{\text{物理的半減期}\times\text{生物学的半減期}}{\text{物理的半減期}+\text{生物学的半減期}}$$

例：ヨウ素131の物理的半減期＝約8日、生物学的半減期＝約138日
→有効半減期＝約7.6日

例：ストロンチウム90の物理的半減期＝約29年、生物学的半減期（骨）＝約50年
→有効半減期＝約18年

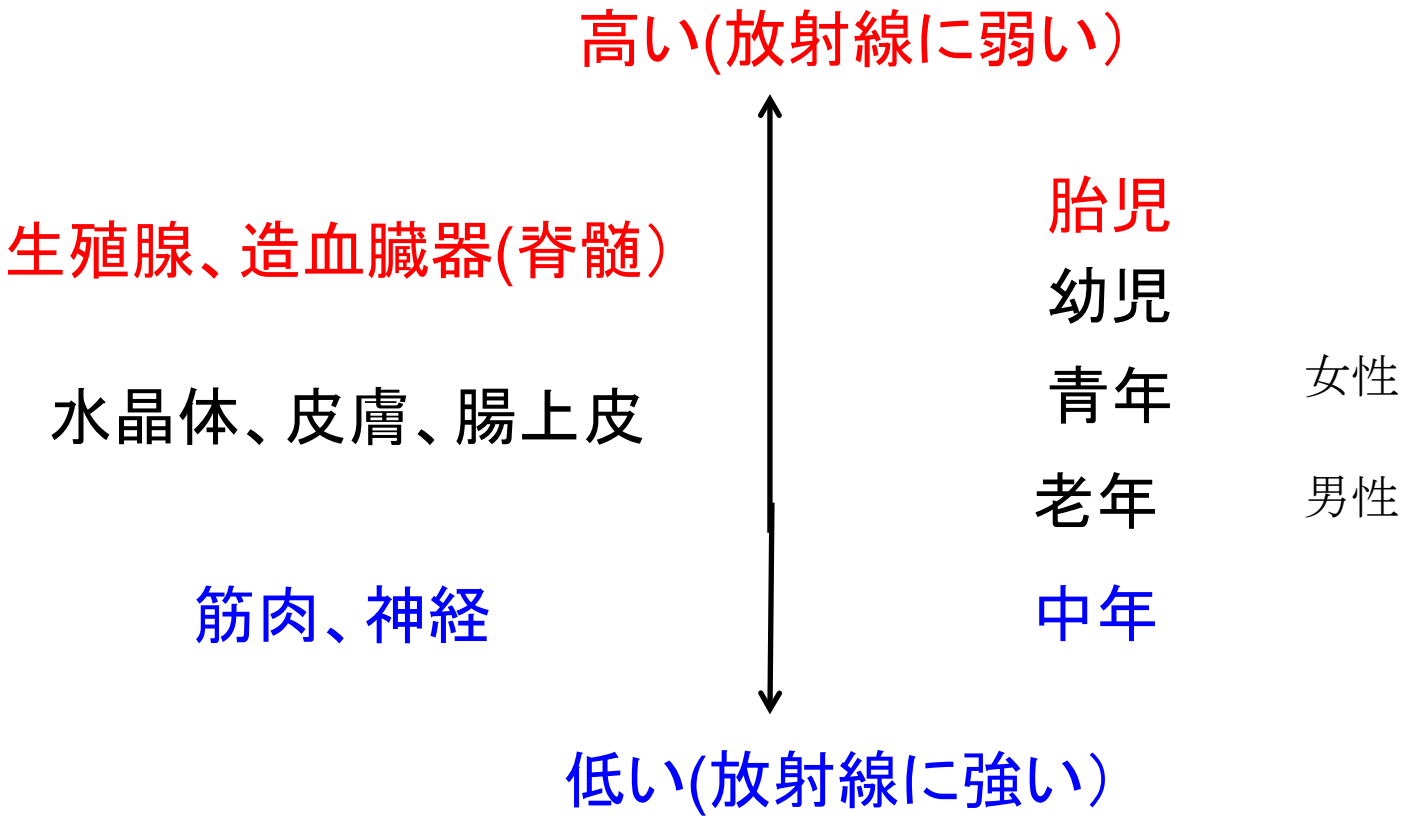
「平均値」----------> 生物学的半減期の長さには個人差が大きい

表② 放射性核種の種類と特徴

| 放射性核種 | 物理的半減期 | 生物学的半減期 | 有効半減期 | 主な器官 | |
|---|---|---|---|---|---|
| プルトニウム 239 | 24400 年 | 200 年 | 198 年 | 骨 | |
| | | 500 日 | 500 日 | 肺 | |
| ストロンチウム 90 | 29 年 | 50 年 | 18 年 | 骨 | |
| | | 49 年 | 18 年 | 全身 | |
| セシウム 137 | 30 年 | 70 日 | 70 日 | 全身 | ← 中長期に重要 |
| ヨウ素 131 | 8日 | 138 日 | 7.6 日 | 甲状腺 | ← 初期に重要 |
| コバルト 60 | 5.3 年 | 9.5 日 | 9.5 日 | 全身 | |
| イットリウム 90 | 64 時間 | 38 年 | 64 時間 | 全身 | |
| | | 49 年 | 64 時間 | 骨 | |

# §６　放射線感受性の個人差

## 放射線に対する感受性の差異



# 放射線感受性の個人差

・同じものを食べても、食中毒になる人とならない人がいるのは、なぜか.

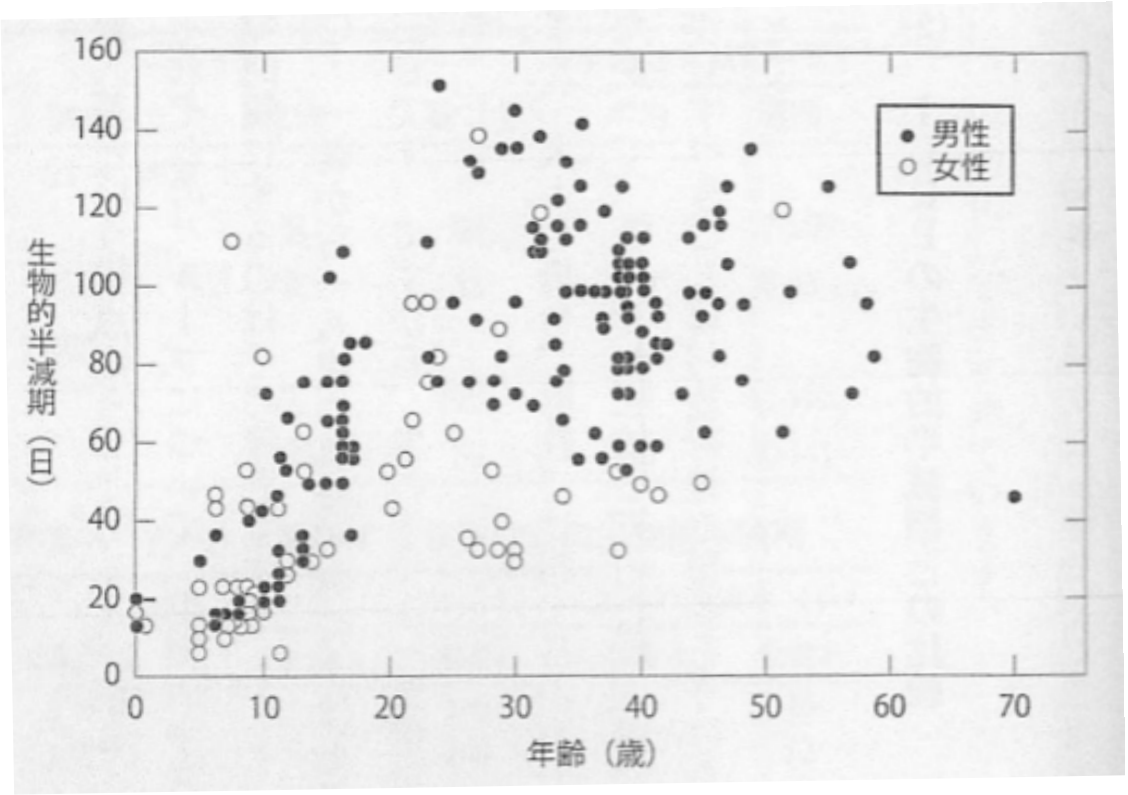
・薬物による感受性は人によって大変に異なることが昔から知られており，その原因として，環境的な要素，遺伝的な要素の2つがあることが分かっている．実は，放射線を被曝したときの反応も人によって大きく異なる．例えば，ガン治療の1つとして放射線治療があるが，放射線治療の効果の大きさや，放射線治療に伴う副作用(有害事情)の現れ方は，患者によって大きく異なることが臨床現場では昔から知られていた.

・広島、長崎の原爆被爆者についての疫学調査などでは、100 mSv以下の低線量放射線被ばくによる発がんの増加は不明であった.

・しかし，放射線への感受性，特に低線量被ばくの影響には個人差もかなり大きいことが近年，明らかになりつつある.

1) 年令：若いほど感受性が高い.
2) 遺伝子の異常の存否.
3) 遺伝子損傷の修復能力には個人差がある.
4) 生物学的半減期の長さには個人差がある
5) 免疫力には個人差がある.

# セシウム（Cs）の生物学的半減期とその個人差，




出典；長山淳哉「胎児と乳児の内部被ばく」緑風出版，2013年．特に，p.67.

# §７ 「放射線量」と「積算線量」

吸収線量：

物質が吸収する放射線のエネルギー

物質1キログラムあたり1ジュールの場合には1グレイ（Gy）という。

被曝[ひばく]線量=（**吸収線量**）×（**放射線の違いを考慮する係数**）

放射線の種類による生体への影響の違いを考慮した放射線の量。

単位：1 マイクロシーベルト [1 μSv]

1 ミリシーベルト [1 mSv] = 1 マイクロシーベルトの千倍

1 シーベルト [1 Sv] = 1 ミリシーベルトの千倍

報道で使われる「**放射線量**」＝1時間当たりの被曝線量

単位:毎時マイクロシーベルト [ 1 μSv/h]

報道で使われる「積算線量」＝被曝[ひばく]線量；

「**放射線量**」×（被ばくする時間）＝「積算線量」

参考： 被ばく線量を意味する専門用語は「線量当量」である。

実例：毎時1マイクロシーベルトを1年間、継続して被曝する場合の
「積算線量」（被ばく線量）

$$\frac{1\text{マイクロシーベルト}}{\text{時間}} \times 24 \times 365\text{時間}$$

$$=8760\text{マイクロシーベルト}$$

$$=8.76\text{ミリシーベルト}$$

実例：
25 μSv/h (毎時マイクロシーベルト) の被ばくを2時間にわたって受けると、被曝の総量は 50 μSv (マイクロシーベルト) になる。

実例：
毎時 400 ミリシーベルト (400 mSv/h) の被曝を15分間受けると、被曝量は 100 mSv (ミリシーベルト) になる。

# 被曝線量の新旧単位

## シーベルト(新単位)とレム（旧単位）

SI単位系に切り換わる以前はレム (rem) が使われており、次のとおりに換算できる。

1 Sv = 100 rem
= 100,000 mrem (ミリレム)

# 放射能の強さから被ばく線量の計算

1．実効線量係数の定義と変換式

**被ばく線量＝（実効線量係数）×（放射能の強さ）**
**Sv**　　Sv / Bq　　Bq

実効線量係数（Effective Dose Coefficient）の本来の単位はSv/Bq（1ベクレルあたり1シーベルト）である。しかし、実際的な場合の便宜を考えて、μSv/Bq=$10^{-6}$ Sv/Bq（1ベクレルあたり1マイクロシーベルト）が用いられることもある。

2．放射能濃度が与えられる場合の被爆線量の計算式

2．1放射能濃度が単位体積当たりで与えられる場合

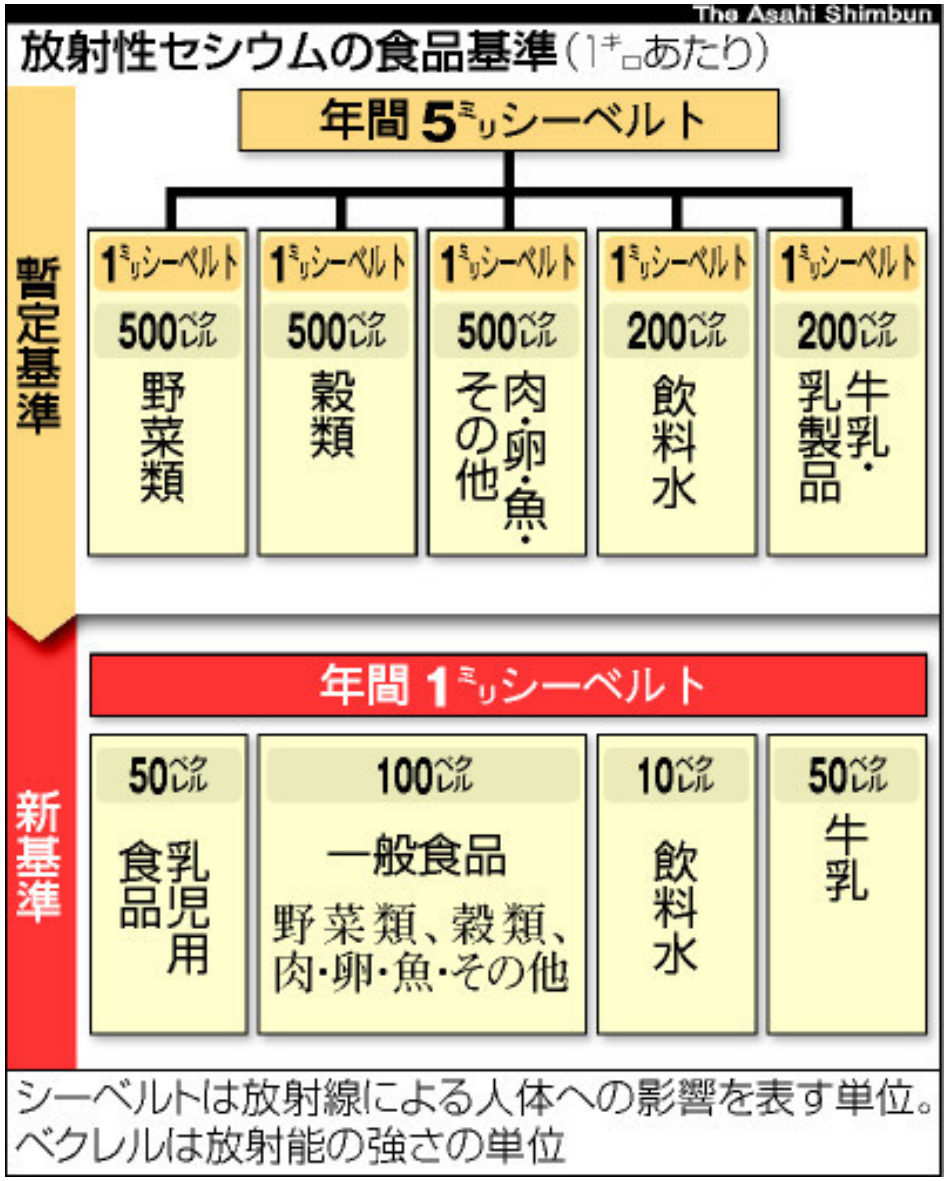
**被ばく線量＝（実効線量係数）×（放射能濃度）×(体積)**
**Sv**　　Sv / Bq　　$Bq/m^3$　　$m^3$

2．1放射能濃度が単位重量(質量）当たりで与えられる場合

**被ばく線量＝（実効線量係数）×（放射能濃度）×(重量)**
**Sv**　　Sv / Bq　　Bq/kg　　kg

# 放射性セシウムの食品基準

新基準は2012.4. 1より実施



# §８　外部被曝と内部被曝

放射線により、物体を透過する能力には大きな違いがある。

**外部被曝**:　体外にある放射性物質による被曝

１）X線、ガンマ線が主体：　透過力が強いX線･ガンマ線、中性子線による被曝が

２）アルファ線など重い荷電粒子は空気または衣服などによる遮蔽（しゃへい）される。

３）作用の一時性：放射性物質を隔離できれば、その作用は一時的（瞬間的である。

４）作用の分散性：生体全体に平均的に、分散的に作用する。

**内部被曝**:　呼吸または飲料を通じて体内に取り込まれた放射性微粒子による被曝

１）すべての種類の放射線が作用：X線･ガンマ線、中性子線、アルファ線など
　　重い荷電粒子や、ベータ線も作用する。

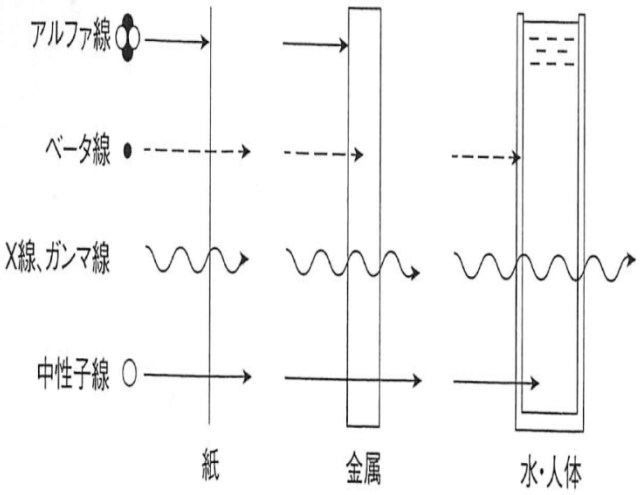
２）作用の継続性：半減期の長さに応じて、継続的に照射される。

３）作用の局所集中性：：放射性微粒子が付着した部位の周辺の細胞に集中的に
　　作用する。

注意：いわゆる防護服は内部被ばくを防ぐが、
　　ベータ線、ガンマなどの外部被曝を防ぐことはできない。

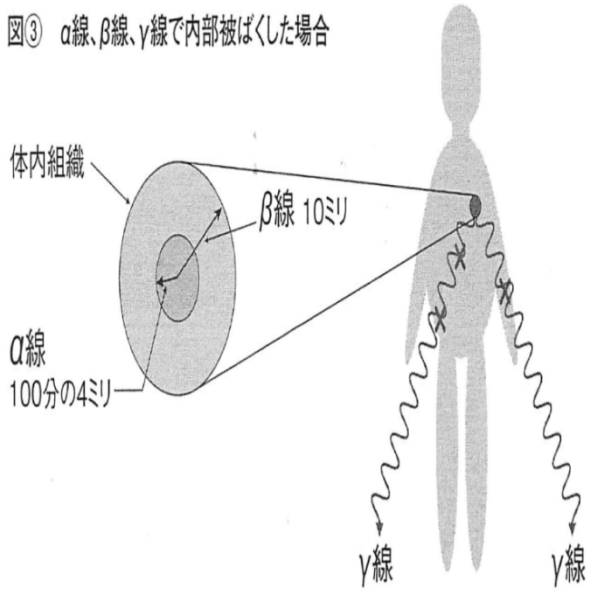
(体外から放射線を受けた場合）

図②　放射線の透過･吸収




(体内で放射線を受けた場合）

図③　α線、β線、γ線で内部被ばくした場合




「隠された被ばく」（矢ヶ崎克馬、新日本出版社、2010年）より作成

# 内部被ばくの特徴とその従来評価の問題点

外部被ばく(体外被ばく)の場合の放射線の飛程

α線：数センチ程度

ベータ線：数メートル程度

ガンマ線：(エネルギーに依存するが)貫通力は高い

内部被ばくの**空間的局所集中性**

→ アルファ線の影響の相対危険度が飛躍的に強化

内部被曝ばくの**時間的継続性**

→ 被ばく線量の増加

原爆症認定裁判における，
残留放射線の影響を
めぐる論争点

内部被ばくへの**対応措置の困難性**

物理的に起こる可能性をある過程(仕組み)を
具体的な根拠なく無視した評価は科学的と言えるか？

# 放射能から被ばく線量への変換(計算)

## 1. 放射能(の強さ)から被ばく線量への変換(計算)

放射能　　:放射性壊変(崩壊)の速さ　[単位はベクレル、Bq]
被ばく線量　:生体への影響の大きさ　[単位はシーベルト、Sv]

被ばく線量＝実効線量当量×放射能

注意:実効線量当量は核種や経口摂取か吸入摂取かなどにより異なる。

## 2. 放射能濃度から被ばく線量への変換(計算)

放射能濃度:放射能÷重量

例:ヨウ素131が 1kg あたり15020 Bq 含まれているホウレン草を
毎日20gずつ1年間食べる場合。

$$15020\ \mathrm{Bq} \times \frac{20\ \mathrm{g}}{1000\ \mathrm{g}} \times \left( 0.000022\ \frac{\mathrm{mSv}}{\mathrm{Bq}} \right) \times 365 \simeq 2.4\ \mathrm{mSv}$$

# 100ミリシーベルト以下は安全か？

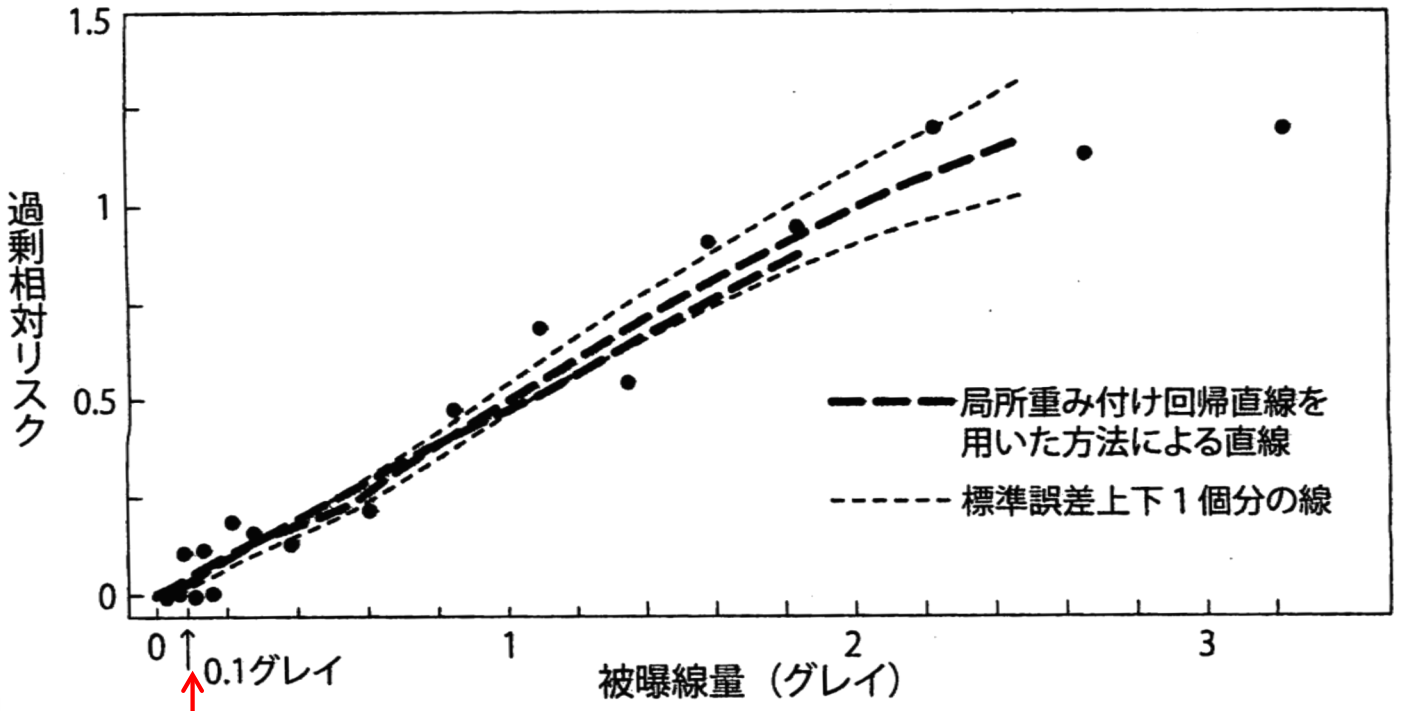



**図1　広島・長崎の固形ガン罹患リスク**

出典：Preston et al.（2007）

注：グレイ：吸収線量。γ線は生物効果比は1。中性子線は効果比が10（23頁＊1参照）。横軸の数値は、γ線＋10×中性子線の吸収線量として重み付けされた値、従って1グレイは1シーベルトと考えてよい。

**100ミリシーベルト**

中川保雄「(増補）放射線被曝の歴史」、明石書店、2011年

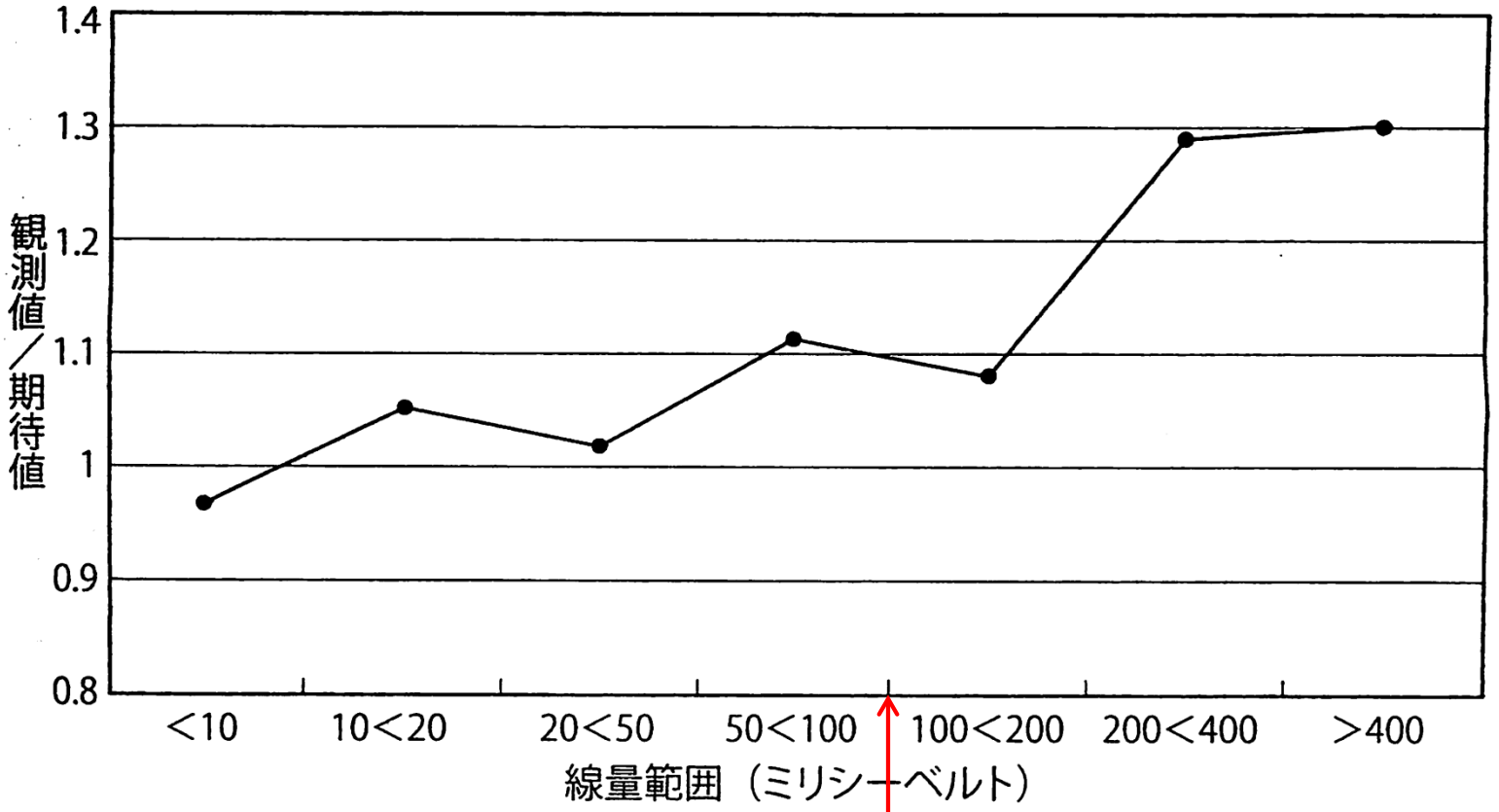



**図2　英国核施設労働者の循環器系疾患による死亡**

出典：McGeoghegan et al.（2008）

注：調査集団；4万2426人、平均追跡期間；29.22年、平均被曝累積線量：53.0ミリシーベルト、総被曝線量；2248人・シーベルト **100ミリシーベルト**

中川保雄「(増補）放射線被曝の歴史」、明石書店、2011年

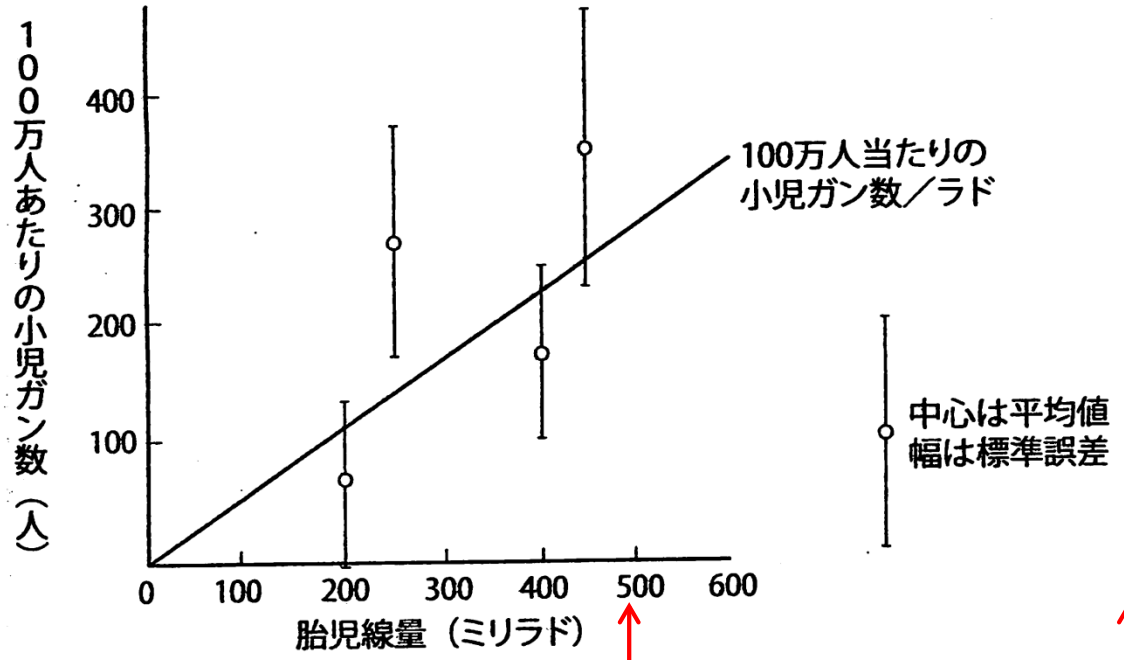



**図3　妊婦の被曝による小児ガン**

出典：A. Stewart（1971）

注：ミリラド；吸収線量で、X線の場合は生物効果比が1なので、ミリレムに等しい。1ミリシーベルトは100ミリレムである。

5ミリシーベルト　　10ミリシーベルト

中川保雄「(増補）放射線被曝の歴史」、明石書店、2011年

# エネルギーの大きさ（量）と高低（質）

生物的効果の根拠となる、物理的効果を生じる要素的過程(微視的過程)の種類は、放射線の粒子（量子的粒子）1個ずつが運ぶエネルギーの大きさ（＝エネルギーの高さ）で決まる。

高エネルギー粒子：大きいエネルギーを受け渡す粒子

低エネルギー粒子：小さいエネルギーを受け渡す粒子

（エネルギーの大きさ）＝（1個の粒子のエネルギーの高さ）×（粒子の個数）

巨視的には、エネルギーが小さい場合でも、

粒子のエネルギーが高ければ、すなわち高エネルギー粒子が関与すれば、

要素的過程(微視的過程)には、低エネルギー粒子が引き起こす効果と異質の効果をもたらす可能性がある！

放射線の影響(傷害)が現れる仕組み

## わずかなエネルギー・大きな効果(影響)

X線・ガンマ線によるヒトの致死線量:8－10グレイ(Gray)

1グレイ＝1キログラムの被照射対象への1ジュールのエネルギー付与

1ジュール＝0.24 cal→　10 グレイ＝2.4 cal

水1グラムの温度を1度だけ高める熱量が 1 cal.

→10グレイで1キログラムの水の温度上昇はわずか0.0024℃

致死線量の10グレイで細胞を構成する全分子のどれだけが影響を受けるか

1グレイの吸収線量によって、1立方ミクロンの細胞体積中に生成する

イオン対の数＝約200個

1個の細胞の容積を500立方ミクロンとすれば、1個の細胞全体の生成イオン対数

＝1グレイにつき10万個，10グレイで100万個。

1個の細胞中の分子数を$10^{12}$個とすれば、細胞全体のわずか100万分の1だけ

傷つけられるにすぎない

参考:
受ける放射線量(マイクロシーベルト)
＝実効線量係数(下の表の値)×放射能濃度(ベクレル/kg)
　×飲食した量(kg)

実効線量係数※(マイクロシーベルト/ベクレル)

| | ヨウ素-131 | セシウム-137 | セシウム-134 |
|---|---|---|---|
| 乳児(3ヶ月) | 0.18 | 0.020 | 0.026 |
| 幼児(1-2歳) | 0.18 | 0.012 | 0.016 |
| 子供(3-7歳) | 0.10 | 0.0096 | 0.013 |
| 成人 | 0.022 | 0.013 | 0.019 |

http://www.nirs.go.jp/information/info.php?i14

水1kgあたりに、ヨウ素-131が8.59Bq(ベクレル)、セシウム-137が0.45Bq、セシウム-134が0.28Bq含まれていると仮定※し、その水を成人が1日1.65リットル、29日間飲んだ場合、それぞれの放射性物質から受ける放射線量は以下のとおりになります。

ヨウ素-131：0.022 x 8.59 x 1.65 x 29 = 9.0マイクロシーベルト・・・(1)
セシウム-137：0.013 x 0.45 x 1.65 x 29 = 0.28マイクロシーベルト・・・(2)
セシウム-134：0.019 x 0.28 x 1.65 x 29 = 0.25マイクロシーベルト・・・(3)

受ける放射線量 ＝ (1) ＋ (2) ＋ (3) ＝ 9.53 ≒ 10マイクロシーベルト

http://www.nirs.go.jp/information/info.php?i14

## 2）吸収線量

単位質量の物質が吸収するエネルギーを吸収線量（absorbed dose）といい、ここでは*D*と記す。

吸収線量*D* の単位

$$[D]=\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{Kg}}\equiv \mathrm{G}(\text{グレイ})$$

放射線のエネルギーはMeV（百万電子ボルト）単位で与えられることが多い：

$1\,\mathrm{cal}\cong 4.18\,\mathrm{J}$

$1\,\mathrm{Kcal}=1000\,\mathrm{cal}$

$1\,\mathrm{eV}\cong 1.6\times 10^{-19}\ \mathrm{J}$

$1\,\mathrm{KeV}=1000\,\mathrm{eV}=10^{3}\ \mathrm{eV}$

$1\,\mathrm{MeV}=1000\ \ \mathrm{eV}=10^{6}\ \mathrm{eV}$

## 3）被曝線量または線量当量

### 被ばく線量*H*＝吸収線量*D*x線質係数QF

被ばく線量*H*は線量当量（Dose equivalent mammel, DE）とも呼ばれる。

線質係数（放射線荷重係数）QFは修正係数と呼ばれることもある。

X線、ガンマ線、ベータ線は 1、陽子線は 5、アルファ線は 20、中性子線はエネルギーにより 5 から 20 までの値をとる。
これらの係数は無次元量（単位がない）なので、
シーベルトはグレイと同じ J/kgでも書ける。

被ばく線量Hの単位

$$[H] = \mathrm{Sv} = \mathrm{G} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{Kg}}$$

1Sv(シーベルト)
1ミリシーベルト＝1000分の1シーベルト　1mSv＝$10^{-3}$Sv
1マイクロシーベルト＝ 1000分の1ミリシーベルト　1μSv = $10^{-3}$ mSv
=百万分の1シーベルト　= $10^{-6}$ Sv

# 4)放射能の強さと被曝(ばく)線量の関係(1)

放射能の強さ(radio activity, A) ; 不安定な原子核が放射線を放出して
単位時間に別の原子核に壊変する回数

Aの単位＝ベクレル(Bq)

100万ベクレル　1 MBq=1,000,000Bq=$10^6$ Bq

テラベクレル＝1兆ベクレル　1TBq=$10^{12}$Bq

放射能が強くなると(増えると)、被ばく線量も増える。

被ばく線量H=換算係数x放射能A

換算係数はμSv/Bq またはmSv/Bq単位で与えられるので桁数に注意。

参考:

# 被曝線量の計算式が複雑である理由

1）放射線と巨視的物質を構成する原子・分子と相互作用と巨大な数の原子分子からなる生体組織へのマクロな障害の関連が複雑であること.

「アイソトープ便覧（改訂3版）」丸善，1984年．15.8節等.

2）原子力開発推進と規制防護のせめぎ合いが歴史的に複雑であるためであろう。

中川保雄「(増補）放射線被曝の歴史」、明石書店、2011年.

J.W.ゴフマン「新装版 人間と放射線―医療用X線から原発まで―」，明石書店，2011年.

J.M.グールド「低線量内部被曝の脅威」、緑風出版、2011年.