

令和 2 年度加美町放射性物質に関する勉強会

日時：令和 2 年 1 1 月 2 8 日（土）

午後 1 時 3 0 分～

場所：加美町立小野田中学校視聴覚ホール

放射線の基礎知識と空間線量の計算について

大槻 憲四郎

2018/03/02 (金) 13:30～15:00
加美町議会での講演

で締め括りとして話したことの復習

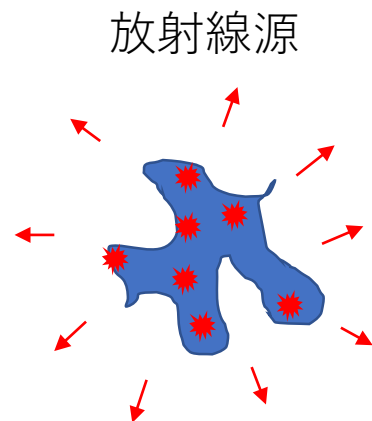
最後に 民主主義と地方自治を育てる

- ・ 指定廃棄物処理場建設の時は、撤回させるだけで良かった
今回は役場・町民 **自らが考えて実施** する ← 『地方自治力』 が試される・育てられる場
- ・ 指定廃棄物処理場建設の時は、**町民・役場** vs **環境省**
今回は、**すき込み地近隣住民** vs **役場・その他の町民** ← 下手すれば、**仲間内での対立に**
- ・ 国→県→町と順に知識もスキルもパワーも乏しくなる

廃棄物処分を成功裏に行うには

- ・ 一に勉強，二にも勉強 ← 専門家達の協力を橋渡しします
- ・ 情報の完全なる透明性 ← これは町長・役場の姿勢
- ・ 誤りは率直に受け止め，前向きに
- ・ 事前に全てを知ることは不可能．予想外の事が起きた時の対応を予め考えておく
- ・ 後に残す遺産は，自ら考え・協調し，決断する力．そして信頼

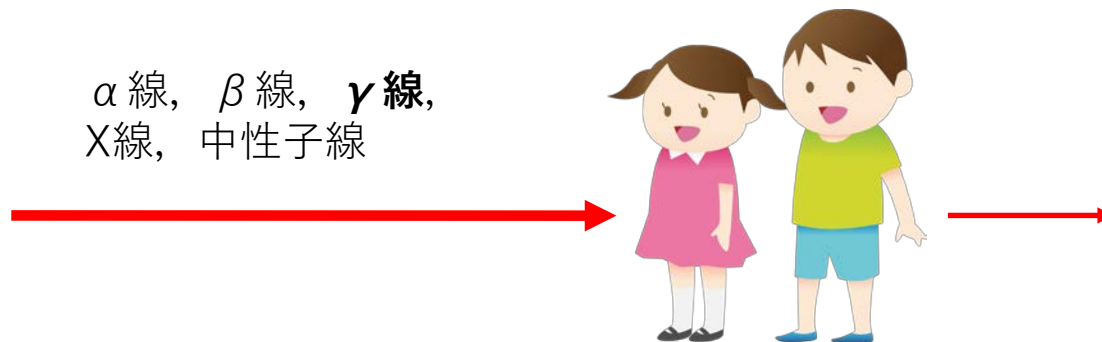
放射線の基礎知識



放射線源

α 線, β 線, γ 線,
X線, 中性子線

被曝するヒトやモノ



- 放射能の強さ
ベクレル(Bq): 放射性の原子が1秒間に崩壊する回数.
- 放射性元素を含んだ物質の単位質量や単位体積当たりの放射能の強さの表現法は, Bq/kgとかBq/m²とかBq/m³とか.

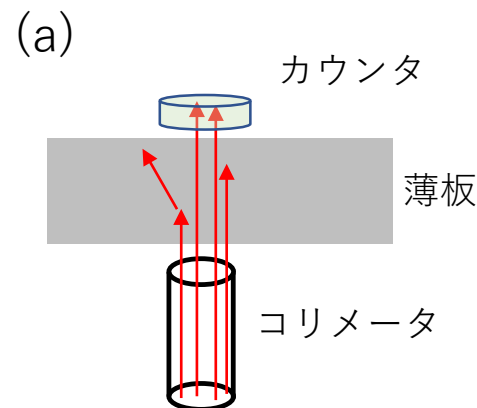
- 放射線は電離や励起を通じて物質にエネルギーを与える (が吸収される). 吸収された単位質量当たりのエネルギーが**吸収線量**. 単位は**グレイGy** (1Gy = 1J/kg)
- 放射線の種類による人体への影響の程度を表すのが**放射線荷重係数**. β 線・ γ 線を1としたときの相対値で, 中性子線は5~20, α 線20. 吸収線量×放射線荷重係数 = **等価線量**. 単位は**シーベルトSv**. γ 線の放射線荷重係数は1なので, 吸収線量の値にシーベルトの単位を付ければ, それが等価線量.
- 等価線量に臓器・組織ごとに**組織荷重係数**で重み付けして合計したものが**実効線量**

¹³⁷Cs (半減期30.07年) は、一回の崩壊で512keVの β 線と 662keV の強い γ 線光子を0.85個放射
¹³⁴Cs (半減期2.06年) は一回の崩壊で β 線と 605keV と 796keV のガンマ線光子を一個ずつ放射
福島第一原発事故から10年を経た今では, ¹³⁷Csだけが主要な核種.

1gの¹³⁷Csの放射能は 3.215×10^{12} Bq. 1 km²にわずか0.001gを散布しただけで, 2000~4000 Bq/m²になる!

α 線や β 線は紙やアルミニウム版などの軽い物質で遮蔽することができる.
 γ 線は強い透過性質を持ち、密度の大きい鉛や厚い鉄板でしか遮蔽することができない。

^{137}Cs は1回崩壊する毎に η 個（0.85個）の γ 線“光子”を放射する。
光子の流れに垂直な単位面積を単位時間に通過する光子の数を**流束 I** という。



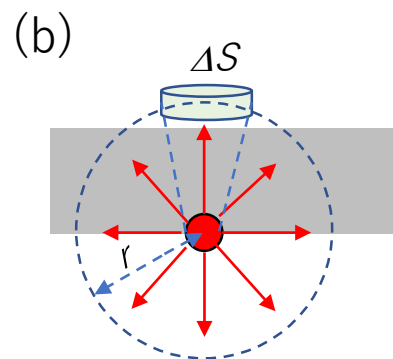
左図のように、コリメータで平行にした γ 線を薄板状の物体に照射する。板中を通過する間に、 γ 線は原子に衝突してエネルギーが吸収されたり、散乱されて弱まり、放射された γ 線の一部のみがカウンターに到達する。板に入射する γ 線の光子量を I_0 、板の厚さを x 、カウンターに到達した光子量を I とすると、

$$dI/dx = -\mu I \quad \text{が成り立ち、この解は} \quad I(x) = I_0 \exp(-\mu x). \quad \text{----- (1)}$$

μ を**線減衰係数**（次元は L^{-1} ）。

物質の密度が ρ であるとする、 μ/ρ を**質量減衰係数**（次元は L^2M^{-1} ）という。

ところで、実際には、カウンターに到達する γ 線には、直達するものの他に、散乱され、迂回して到達するものも含まれる。そこで、直達した γ 線の光子量に対する全到達光子量の比 B を**ビルドアップ係数**と呼んで、評価することになっている。



次に、薄板の片側に点線源を置き、コリメータや遮蔽物を一切設けない状態を考える。点線源からは γ 線が四方八方に放射される。線源からカウンターまでの距離を r 、 γ 線を取り込むカウンターの窓の面積を ΔS とすれば、取り込まれる γ 線の光子数は、半径 r の球面を通過する全光子数の $\Delta S/(4\pi r^2)$ である。

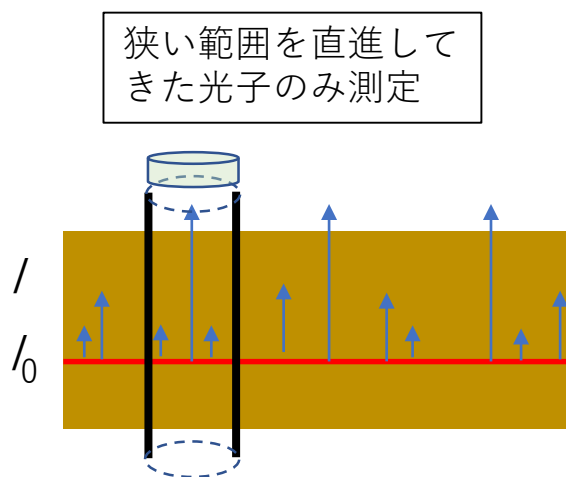
点線源の強度が hP だとすると、そこからは1秒間に hP 個の光子放射され、カウンターの窓口に向かって $hP \times \Delta S/(4\pi r^2)$ 個の光子が進むが、厚さ d の板を進む間に $1/\exp(\mu d)$ に減少してしまう。結局、カウンターの窓口には到達する光子の個数 I は

$$I(d) = \eta P \times \exp(-\mu d) \times \Delta S/(4\pi r^2) \quad \text{----- (2)}$$

となる。

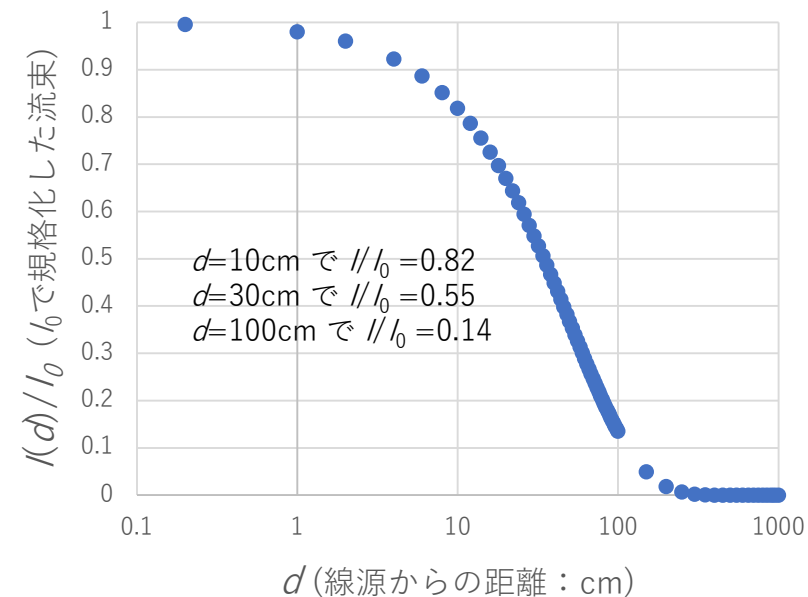
(a)のちょっと応用

^{137}Cs 汚染廃棄物を地下 d cmにすき込んだ。
 廃棄物からは上向きのみ光子の流束 I_0 が発生するように仕組んだ。
 地表での流束 $I(d)$ は？

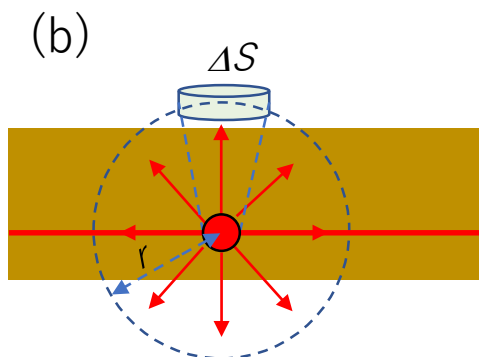


$$I(d)/I(0) = \exp[-\mu_{\text{soil}} d]$$

^{137}Cs の0.662MeVの γ 線で
 密度0.5~0.8 g/cm³の土壌
 試料の線減衰係数
 $\mu_{\text{soil}} = 0.02/\text{cm}$ とすると→ 右図
 例えば, $d=30\text{cm}$ で $I/I_0=0.55$



(b)の場合を計算すれば



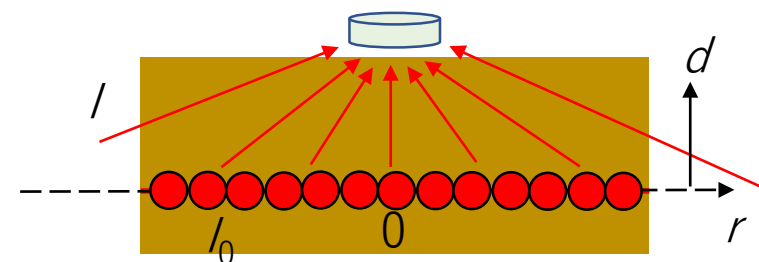
前ページの式(2)の $\eta P \equiv I_0$,
 $\Delta S = 1\text{cm}^2$ とすれば,

$$I(d)/I_0 = \exp(-\mu_{\text{soil}} d) \times 1/(4\pi r^2)$$

となつて, $d = r = 30\text{cm}$ とすれば,

$I(d)/I_0$ は(a)の場合の
 ($d=30\text{cm}$ で $I/I_0=0.55$) の
 $1/(4\pi r^2) = 1/11,310$ になる

(c)実際は下の図を三次元にした状態で,
 隙間なく敷き詰めた点線源からの
 光子の総和を求めることになる



次ページ以降に詳しく述べる

すき込み地の空間線量の計算

モデル化

1) すき込んだ ^{137}Cs 汚染物質は、地表下 d にごく薄い層として一様無限に広がっていて、放射能の強さは $P \text{ Bq/m}^2$.

^{137}Cs が1回崩壊する毎に η 個の γ 線光子を放出する.

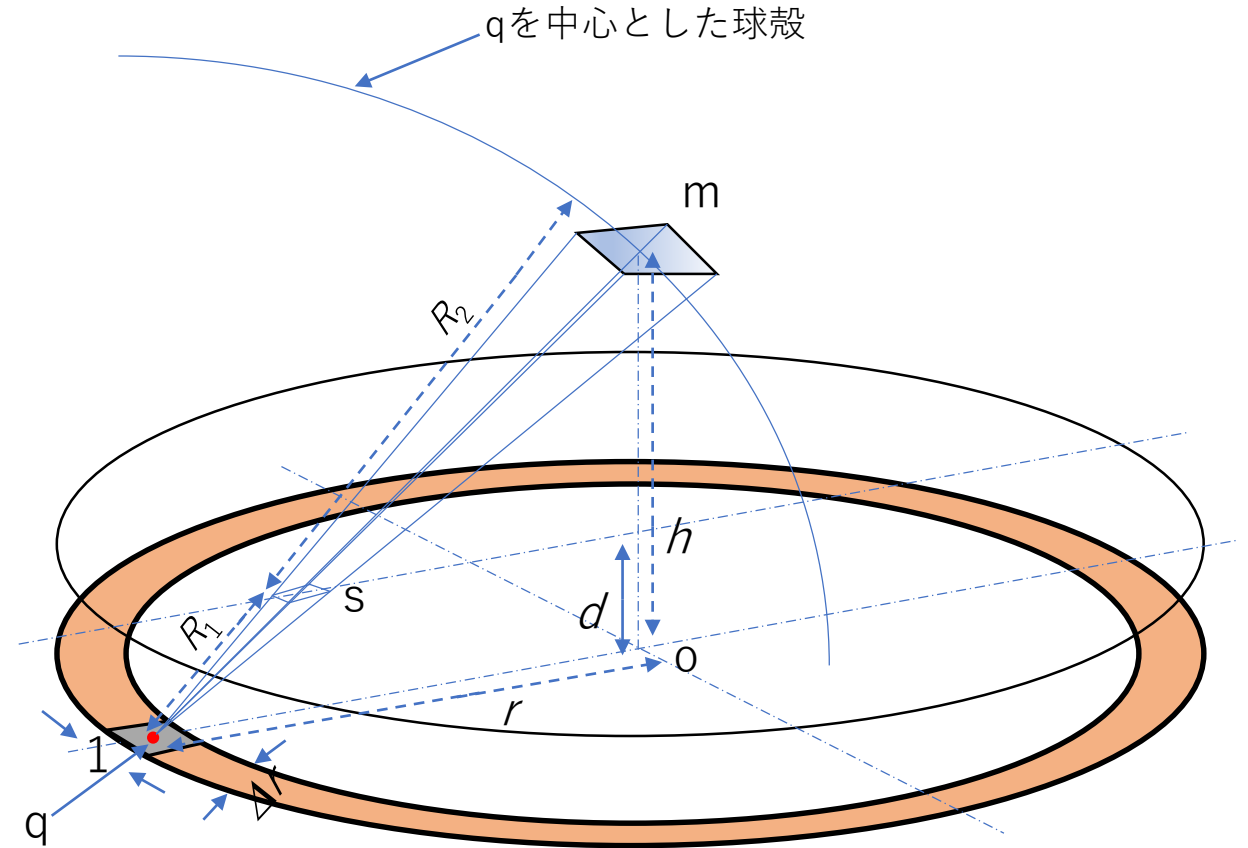
2) 汚染物質層上の任意の点 o を中心とする半径 r で幅 Δr のドーナツ状の輪を想定し、その中に $\Delta r \times 1$ の微小領域を考える. その中心の点 q を放射能強度 $P\Delta r$ の点線源とみなす.

q からは、毎秒 $\eta P\Delta r$ 個の γ 線光子が放射状に放射される.

3) 点 o の真上 h に点 m を設け、 q を中心とし、 m を通る球殻を想定する. m で球殻に接する単位面積の平面を想定する.

q の点線源から放射された光子は図の細長い四角錐内を通り、点 m に置かれた単位面積の平面に垂直に当たる.

4) 点 q から放射される光子数は、土壤中で減衰しつつ地表面 s に到達し、さらに大気中で減衰しつつ m に到達する.



定式化

- 1) mに向かって放射される光子の数は，球殻全体に向かって放射される光子数の $4\pi(R_1+R_2)^2$ 分の1である．
- 2) qから放射された光子の個数は，線減衰係数 μ_{soil} の土壤中をsまでの距離 R_1 を飛ぶ間に $1/\exp(\mu_{\text{soil}}R_1)$ に減少する．
- 3) その後，線減衰係数 μ_{air} の大気中をmまでの距離 R_2 を飛ぶ間に，光子数はさらに $1/\exp(\mu_{\text{air}}R_2)$ に減少する．
- 4) mに想定した面積1 m²の四角を1秒間に通過する光子の数が流束 I. mに置いた1kgの水に1秒間に吸収されるエネルギーが線量率 ε_{abs} で， $\varepsilon_{\text{abs}} = \hbar\omega\zeta_{\text{en}}^{\text{water}} I$.
 $\hbar$ は換算プランク定数， ω は γ 線の角周波数， $\zeta_{\text{en}}^{\text{water}}$ は水の質量エネルギー吸収係数．

以上のことから， ε_{abs} は以下のように書ける．

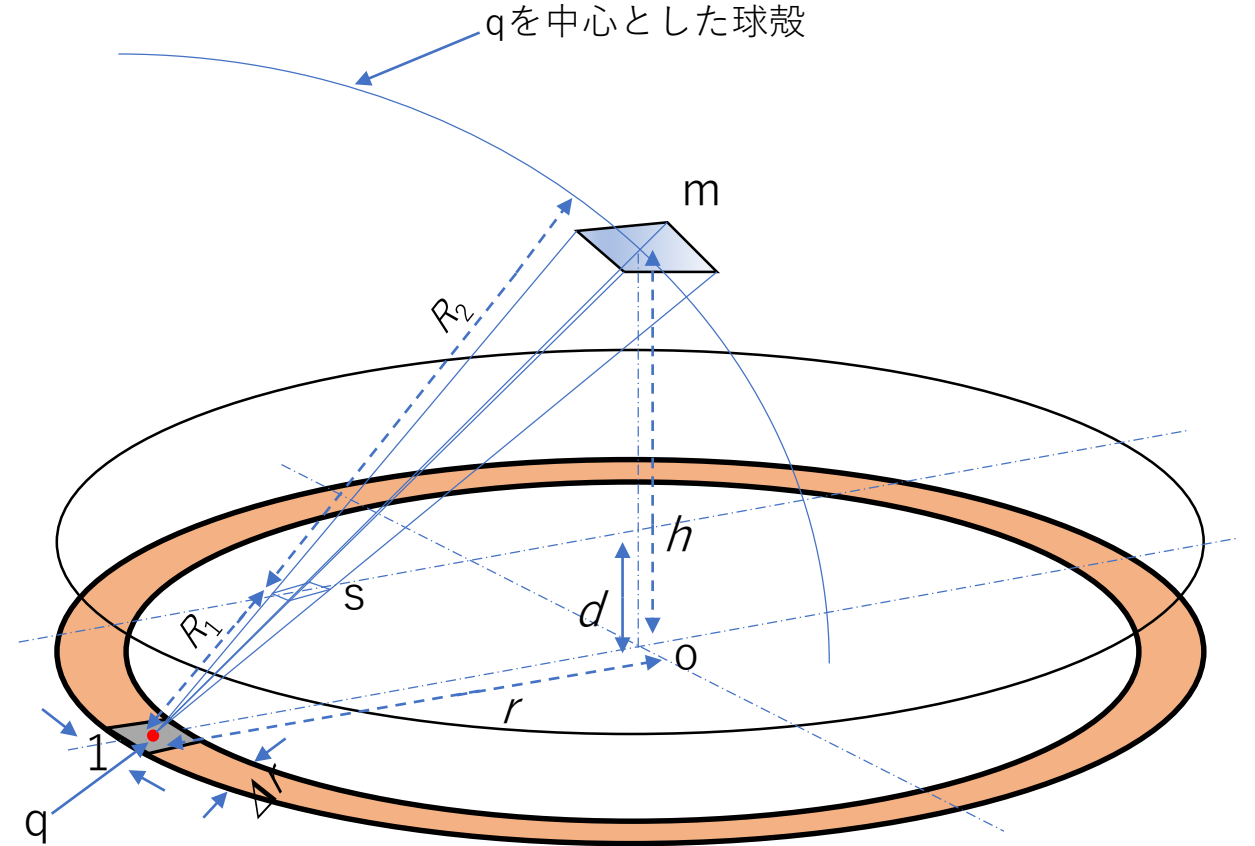
$$\varepsilon_{\text{abs}} = [\eta P \Delta r / (4\pi(R_1+R_2)^2)] \times \exp(-\mu_{\text{soil}}R_1) \times \exp(-\mu_{\text{air}}R_2) \times \hbar\omega\zeta_{\text{en}}^{\text{water}} \quad \text{----- (3)}$$

1) qからmに向けて放射される1秒当たりの光子数

2) 土壤中を通過する間の減衰

3) 大気中を通過する間の減衰

4) 1秒の間の水によるエネルギー吸収



5) 線源が先のドーナツ状の輪全体に広がっているときの線量率は、式(3)に $2\pi r$ を掛けたもので、整理すると、

$$\varepsilon_{\text{abs}} = [\eta P / (2(R_1 + R_2)^2)] \times \exp(-\mu_{\text{soil}} R_1) \times \exp(-\mu_{\text{air}} R_2) \times \hbar \omega \zeta_{\text{en}}^{\text{water}} \times r \Delta r \quad \text{----- (4)}$$

なお、右の図から分かるように、

$$R_1 = (r^2 + h^2)^{1/2} \times d/h, \quad R_2 = (r^2 + h^2)^{1/2} \times (h-d)/h$$

6) 汚染物質の層が水平に無限に広がっている場合の線量率は、式(4)の Δr を dr として $r=0$ から無限大まで積分すればよい。しかし、式(4)は解析的には積分できないので、数値積分する。

7) 各種定数は以下の通り

$$h = 1 \text{ m}$$

$$d = 0.3 \text{ m (すき込みの際の覆土の厚さ)}$$

$$\eta = 0.85 \text{ (}^{137}\text{Csの場合)}$$

$$P = 800 \text{ Bq/m}^2$$

(容積 1.53 m^3 のフレコンバッグに詰めた汚染

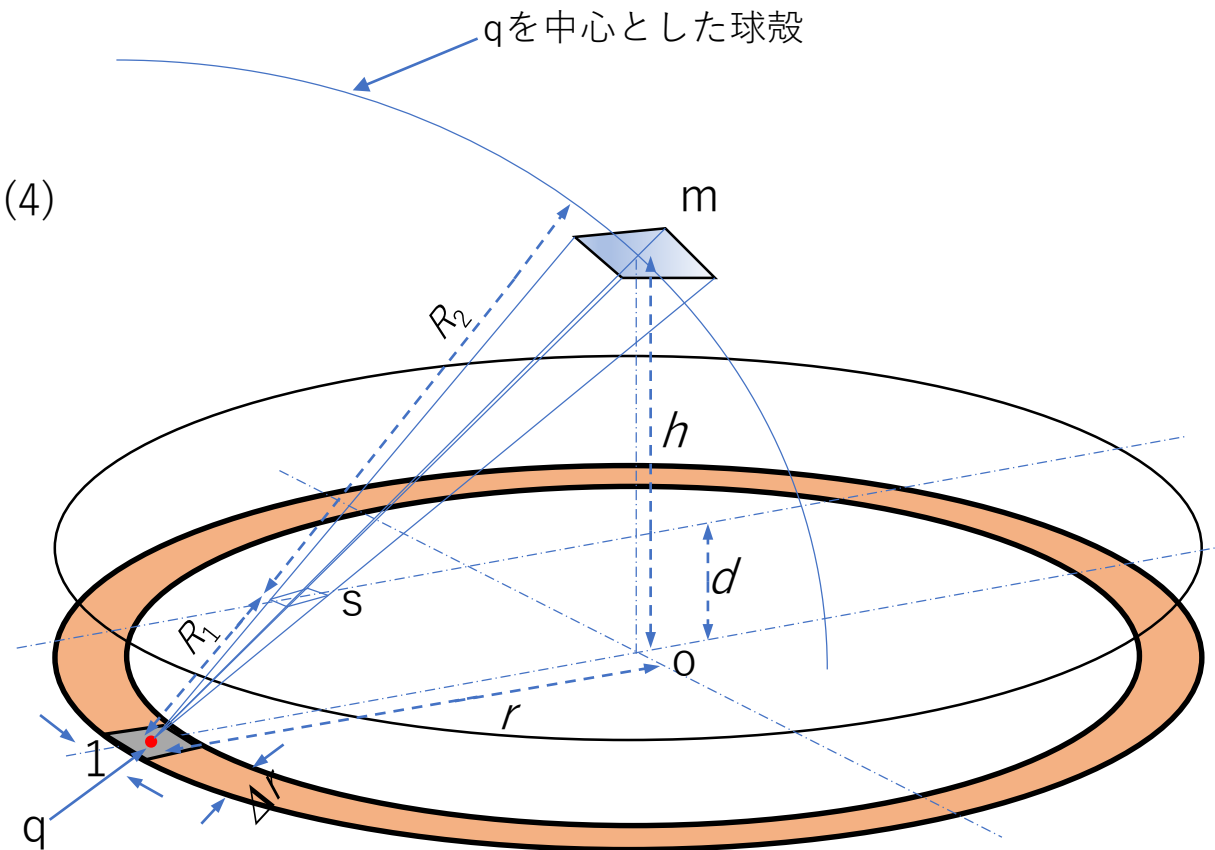
廃棄物の重量は約 300 kg なので、密度は 200 kg/m^3 。

1 m^2 につき 2 kg すき込む。安全側に立って、最高

汚染度の 400 Bq/kg のものを仮定すれば、 800 Bq/m^2 。

厚さは 0.1 m になるが、土で覆えば、 0.01 m ほどに

薄くなるので、厚さを無視する)



以下の定数は 0.662 MeV の γ 線の場合で、

$$\mu_{\text{soil}} \doteq 2/\text{m (土の密度は} 500 \sim 800 \text{ kg/m}^3)$$

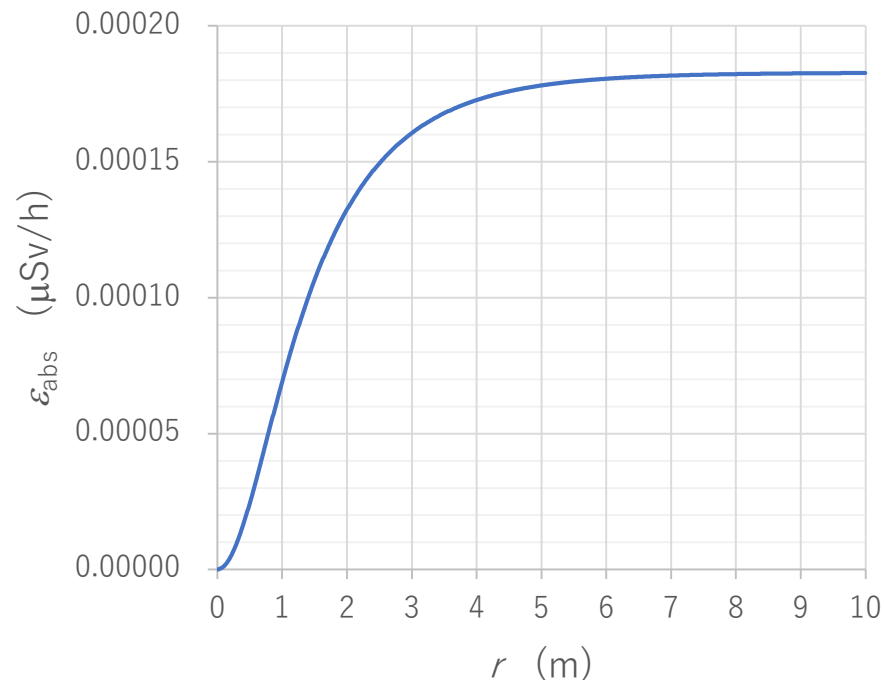
$$\mu_{\text{air}} \doteq 0.01/\text{m}, \quad \hbar \omega \doteq 0.66 \text{ MeV} \doteq 1 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$\zeta_{\text{en}}^{\text{water}} = 3.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{kg}$$

なお、式(4)の ε_{abs} を $\mu\text{Sv/h}$ で表すには

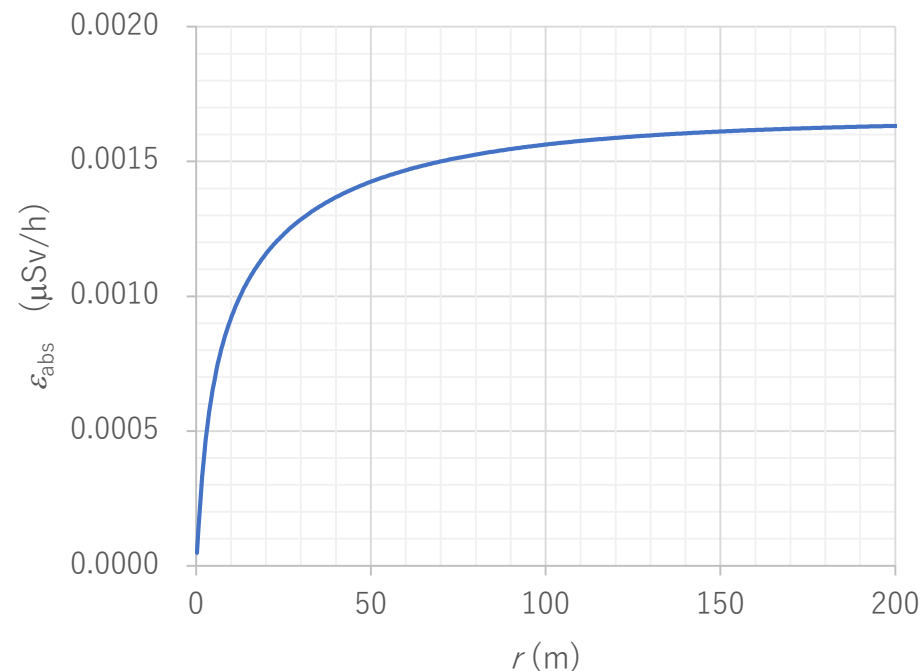
$10^6 \times 60 \times 60 = 3.6 \times 10^9$ を掛ければよい。

30cm下にすき込みしたときの 空間線量率の計算結果



前ページの定数を用いて式(4)を数値積分して得られた r と線量率 ε_{abs} との関係. r の刻み幅は0.01m. r が8mほどで早くも頭打ちになり, ε_{abs} は**約0.00018 $\mu\text{Sv/h}$** . この値はとても小さい. EMF211型 γ 線スペクトロメータ(EMFジャパン社製, CeBr3検出器, 分解能0.0001 $\mu\text{Sv/h}$)でかろうじて計測可.

土の覆いがなかったときの空間線量率の計算結果



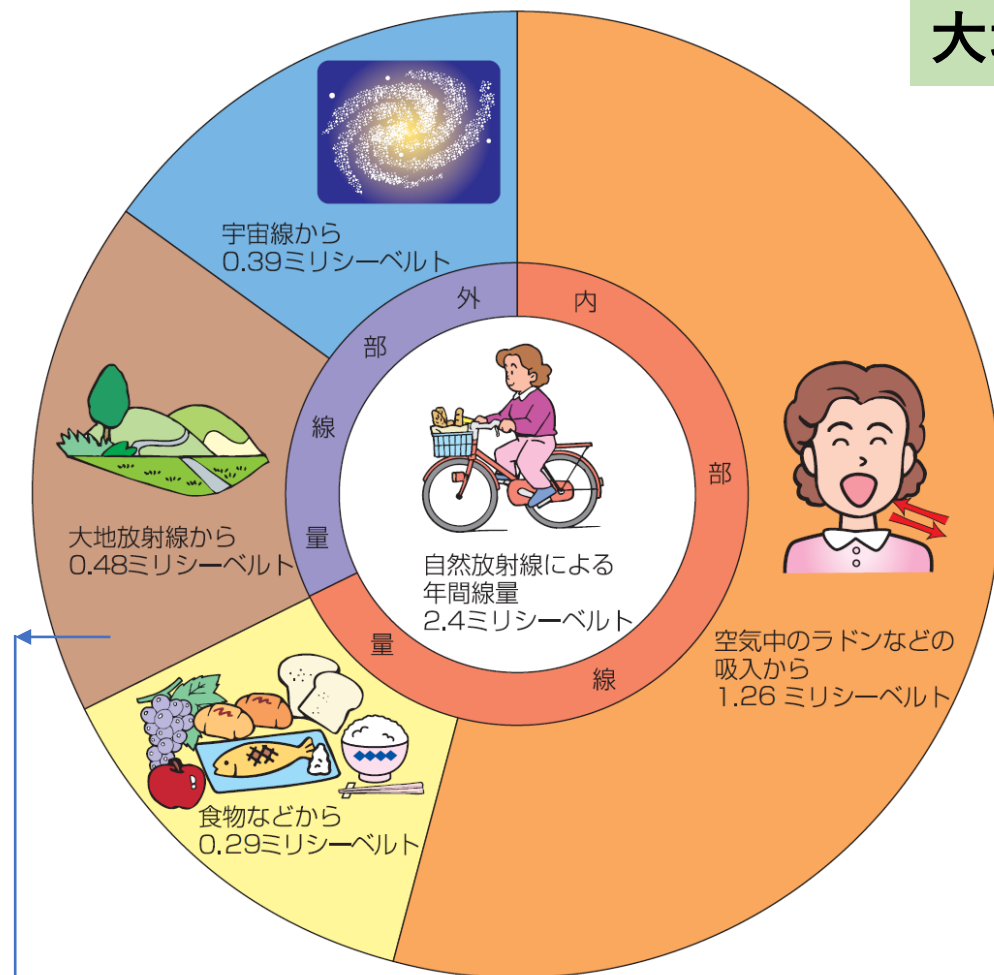
左と同様だが, $d=0$ として覆土が無い場合. r の刻み幅は0.5m. 線量率 ε_{abs} は r が150mほどで頭打ちになり, **約0.0016 $\mu\text{Sv/h}$** . この値も小さい. 原子力委員会の経験式

$$\varepsilon_{\text{abs}} (\mu\text{Sv/h}) = 3.55 \times 10^{-6} P (\text{Bq/m}^2)$$

による計算値 0.00284 $\mu\text{Sv/h}$ とも近い.

両者の差はビルドアップ効果を考慮しているか否かの違いによるのかも・・・

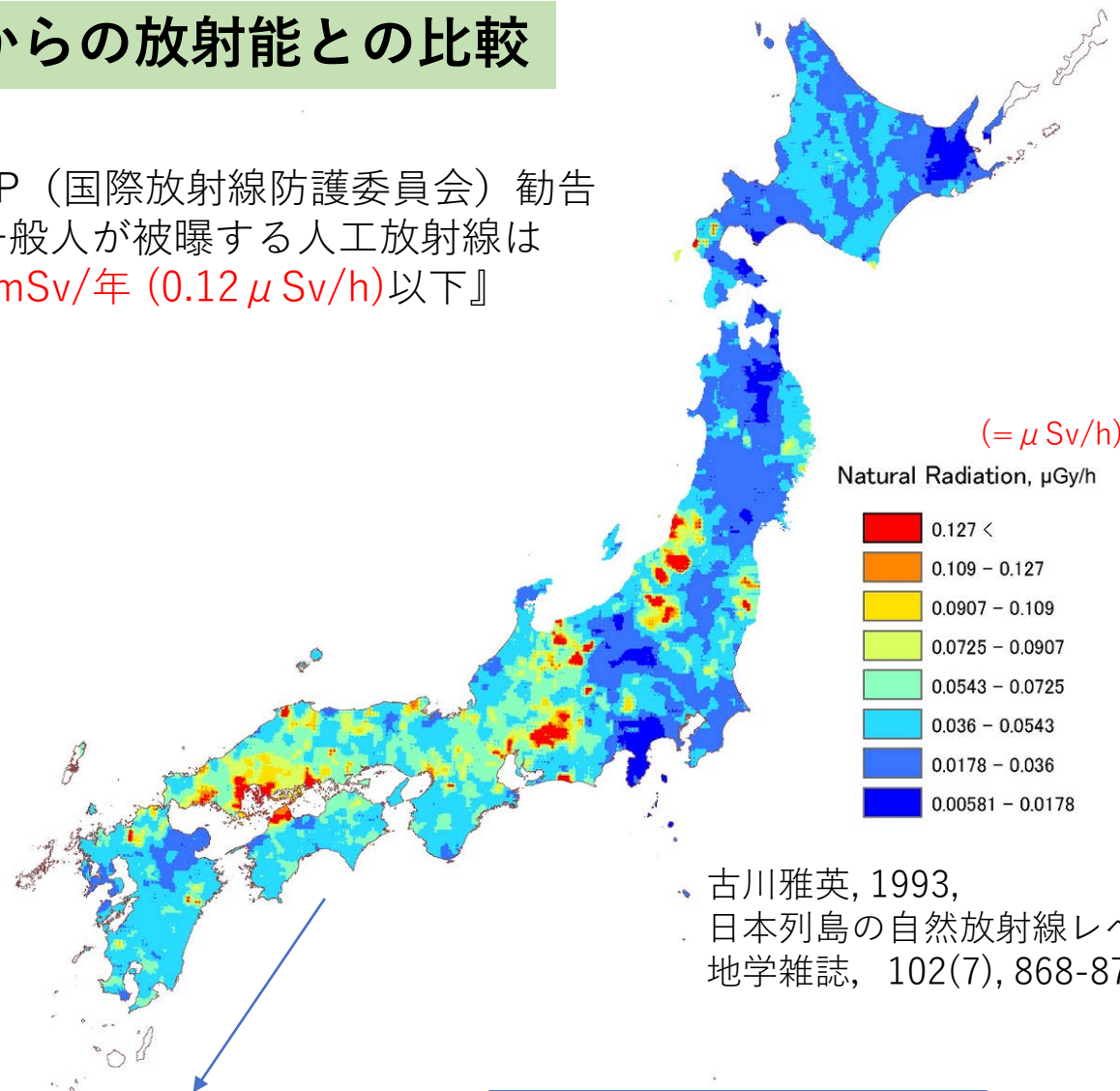
大地からの放射能との比較



自然放射線の内訳 (全世界平均)
(2008年国連科学委員会報告)

全世界平均の大地放射能
0.48 mSv/年 (20%)
(= 0.058 μ Sv/h)

ICRP (国際放射線防護委員会) 勧告
『一般人が被曝する人工放射線は
1mSv/年 (0.12 μ Sv/h) 以下』



古川雅英, 1993,
日本列島の自然放射線レベル,
地学雑誌, 102(7), 868-877

日本国内
高めの所 : 0.0725~0.109 μ Sv/h
加美町 : 0.0178~0.036 μ Sv/h

すき込みによる増加分は
高く見積もっても
0.00018 μ Sv/h