

触媒懇談会ニュース

触媒学会シニア懇談会

福島原発事故-7

ベクレルとシーベルト

出口 隆

8月1日号の本紙で高橋先生がベクレルと放射性物質の量との関係に焦点を当てられましたが、まったく同じ問題意識から、私もベクレルやシーベルトの「化学的」理解を試みていました。また9月1日号ではベクレルとシーベルトの関係について解説していただきましたので、私の方ではできるだけ重複を避けて、私なりに勉強したことを述べさせていただきたいと思います。

福島原発事故放出放射性物質の量

ところで日本原子力研究開発機構は8月22日、福島原発事故で大気中に放出された放射性物質の総量は57万テラ(10^{12})Bqで、セシウム137とヨウ素131がそれぞれ44万、13万テラBqであると報告しました。高橋先生の報告のとおりセシウムが1京(10^{16})Bq当たり3.12kg、同様にヨウ素が4.58gなので、放出総量はそれぞれ137kg、59gということになります。揮発性のセシウムが意外に多く、ヨウ素が重量的には微量であることに驚きます。

人体の被爆の大きさを表わすシーベルト

シーベルト(Sv)は、生体の被曝の大きさの単位であり、基本的には重量当たりの吸収放射線のエネルギー量を意味しますが、

話は簡単ではありません。ベクレルは原子核一つ一つに対応しますが、放射性物質によって放射線の種類とエネルギーが異なります。Svはそれらを総合して人体に対する影響を定量化した放射線量の単位であり、通常の物理量とは趣を異にします。物理学的には吸収線量の単位はグレイ($\text{Gy} = \text{J/kg}$)ですが、Svは(1)式の通りこれに法令で定められた表1に示す係数(放射線荷重係数)を掛けて計算されます^[1]。

$$\text{Sv} = (\text{放射線荷重係数}) \times \text{Gy} (\text{J/kg}) \quad (1)$$

外部被曝量の評価

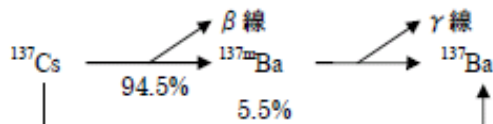
高橋先生が内部被ばくにおけるBqとSvの関係を紹介されたので、次に外部被ばくにおける換算について考えます。大気中など環境の放射線量は通常 $\mu\text{Sv/h}$ などで表わされますが、危険性の評価のためにはそれで十分であるとしても、その原因となっている放射性物質の量との関係がわかりません。

放射性物質がどれ程のSv値を与えるかを計算するためには、出てくる放射線の種類とエネルギーを知る必要があります。まず ^{137}Cs ですが、これは94.5%が β 崩壊(0.512MeV)して準安定な $^{137\text{m}}\text{Ba}$ となり、このものは半減期2.55minで γ 線

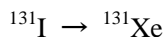
(0.662MeV)を放出して安定な¹³⁷Baになります。残りの5.5%はβ線(1.174MeV)を放出して直接¹³⁷Baになります。いずれにしても合計放射エネルギーは1.174MeV、また1 MeV = 0.160×10⁻¹² Jですから1Bq、1h 当たりの放射エネルギーは 1.174 × 0.160×10⁻¹²×60×60 = 6.8×10⁻¹⁰ Jとなります。これを体重 50kg の人がすべて吸収したとすれば吸収線量は 6.8×10⁻¹⁰/50 = 1.4×10⁻¹¹ Gy/h となり、表 1 から放射線荷重係数はβ線、γ線とも1ですからそのまま Sv/h となります。1000Bq で 0.014 μSv/h です。

表 1. 放射線荷重係数 (国際放射線防護委員会 1990 年勧告による)

放射線の種類	係数
X線、γ線などの光子	1
β線(電子)、ミューオンなど	1
中性子 10 keV 以下	5
中性子 10 - 100 keV	10
中性子 100 - 2,000 keV	20
中性子 2,000 - 20,000 keV	10
中性子 20,000 keV 以上	5



他方 ¹³¹I は一つの原子核が分裂して安定な ¹³¹Xe に変化しますが、このとき出る放射線の種類とエネルギーは次のとおりかなり複雑です。



β線 : 0.248 MeV (2.1%), 0.334 MeV (7.27%), 0.606 MeV (89.9%), 他

γ線 : 0.284 MeV (6.14%), 0.365 MeV (81.7%), 0.637 MeV(7.17%), 他

計算を簡単にするためにβ線は 0.606 MeV が 100%、γ線は 0.365 MeV が 100%

とします。1 Bq の ¹³¹I から 1 h に出る放射線のエネルギーは、(0.606 + 0.365)×0.160 × 10⁻¹²×60×60 = 5.6×10⁻¹⁰ J であり、これを体重 50kg の人を仮定すると 5.6 × 10⁻¹⁰/50 = 1.1×10⁻¹¹ Gy/h となります。表 1 から放射線荷重係数はβ線、γ線とも 1 なのでやはりそのまま Sv/h となります。すなわち 1 Bq は 1.1×10⁻¹¹ Sv/h、1000 Bq は 0.011 μSv/h に対応します。

外部被ばく量の評価の基準となっているのは国際放射線単位測定委員会(ICRU)が勧告している ICRU 球の利用^[2]で、これは人体組織を模擬した密度 1 g/cm³、直径 30 cm の球体モデルです。このものを環境中に置いたとき、球表面から深さ 1cm の位置での線量が 1cm 線量当量というように定義されています。フィルムバッジや放射線管理用のサーベイメータ等はこの量を表示するよう調整されているそうです。これは人体の深い位置にある臓器に影響を及ぼすγ線や中性子線など、電荷を持たず計測の方向性がない放射線を主な対象としています。これに対してβ線など電荷をもつ放射線は測定の方角性があり到達深度も浅いので、例えば皮膚を対象として 70 μm 線量当量のように表わされます。通常発表される放射線量は前者を基準としたものだそうです。

環境中の放射線は主として汚染された地表から来ると考えられます。地表の放射性物質の量は土壌 1 kg 当たりのベクレル数で発表される例が多いのですが、これでは地表が全体としてどれほど汚染されているか分かりません。土壌採取の基準はあるよう(深さ 5 cm まで; 農地ではその下 30 cm)ですが、面積当たりの汚染量が明示されないからです。今、深さ 5 cm の土で 1000 Bq/kg の放射能があったとすると、土の見かけ比重を仮に 2 とすれば深さ 5 cm、面積 1 m² の土の重量は 100 kg ですから面

積当たりのベクレル数は 10^5 Bq/m^2 となります。これがすべて ^{137}Cs であり、これから出た γ 線(線量の 53% で、残りは β 線)が ICRU 球の断面積に比例してすべて深さ 1cm に達すると仮定すると、その放射線量は $10^5 \times \pi(0.3/2)^2 \times 6.8 \times 10^{-10} \times 0.53 = 2.5 \times 10^{-6} \text{ J/h}$ となり、これを ICRU 球の重量 14.1kg で割ると $0.18 \mu\text{ Sv/h}$ となります。図は MEXT が報告している土壤中の ^{137}Cs の濃度と空間線量率($\mu\text{ Sv/h}$)の関係^[3]ですがこの計算結果とよく一致しています。いろいろな仮定による誤差が相殺した結果でしょうが、おおよその考え方はこのような整理法でよさそうです。

シーベルトと健康に対する影響の関係

最大の関心事は放射線の健康に対する影響です。100 mSv で健康に対する影響が出る危険が高まり、7 Sv で 100 % の人が死亡するといえます。Sv は重量当たりのエネルギー(J/kg)ですが、これらは具体的にどれほどのエネルギーなのでしょう？ 50 kg の人が 100 mSv (0.1 J/kg) の放射線を受けたとすれば、そのエネルギーの大きさは、 $0.1 \times 50 = 5 \text{ J}$ (1.2 cal) にしかありません。7 Sv でも 350 J (84 cal) です。健康に影響を与える放射線の量は、エネルギーとして見るとまことに微々たるものであることに驚きます。

放射線は細胞中の DNA に損傷を与えることが健康被害の主な原因で、放射線が直接 DNA を傷つける場合(1/3)と、細胞の大半を占める水(H_2O)分子を分解してラジカル化し、それが DNA を損傷する場合(2/3)があるそうです^[4]。簡単のために H_2O の

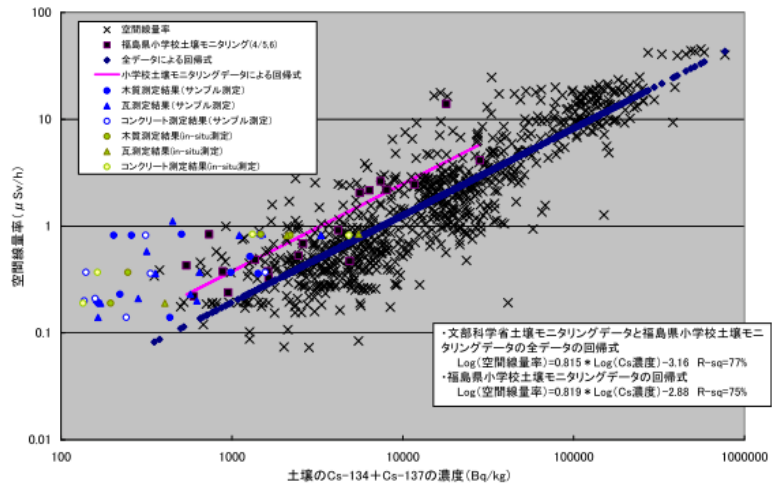


図. 土壌の Cs 放射能濃度と空間線量率の関係 (MEXT)

分解を考えてみましょう。 H_2O の H と OH への開裂エネルギーは 493 kJ/mol ですから、1 個の H_2O 分子を分解するために必要なエネルギーは、 $493 \times 10^3 / (6.0 \times 10^{23}) = 8.2 \times 10^{-19} \text{ J}$ となり、5 J のエネルギーが分解できる H_2O 分子の数は、 $5 / (8.2 \times 10^{-19}) = 6.1 \times 10^{18}$ 個です。人には 60 兆個 (6×10^{13}) の細胞があるといえますから細胞当たりになると $(6.1 \times 10^{18}) / (6 \times 10^{13}) = 10$ 万個の H_2O 分子を分解することになる。実際には放射線化学では G 値という指標があり、これは吸収放射線 100 eV 当たりの変化または生成分子数をいいます。 γ 線で H_2O が分解して OH ラジカルが生成する場合の G 値は 2.8 であり、これから計算すると 5 J の γ 線で生成する OH ラジカルの数は細胞当たり 15,000 個となります。100 mSv を 1 年間で受ける場合 ($11 \mu\text{ Sv/h}$, 0.27 mSv/日)、細胞 1 個、1 日当たりの OH 発生量は 40 個となります。これがある確率で DNA を傷つけることとなります。

ところが表 2 に示す通り、DNA は放射線がなくても自然の中で活性酸素などによりかなりのスピードで損傷を受けているそうです^[5](そういえば OH も活性酸素)。これが通常問題にならないのは DNA の修復速度がそれなりに大きいためです。表 2

によると1日に1 mSv (1時間に40 μ Sv、年間365mSv)の放射線を受けてもDNA損傷の程度は自然におこる損傷の1%以下(2本鎖切断)です。年間100mSvを健康に影響が出る可能性が高まるレベルとされ、さらに20mSvを避難区域の目安とするのは安全へのゆとりを見ても妥当なものと考えられます。

表2. 細胞中のDNA損傷

	自然の傷 (/細胞/日)	放射線による傷* (/細胞/1mSv)
塩基損傷	20,000	0.3
1本鎖切断	50,000	1
2本鎖切断	10(推定)	0.03

* 原著の表から比例換算

安全と安心

これこれの理由で安全であるということが納得できれば人は安心できますが、安全であるとは証明できていないと言われれば不安になります。幼い子を持つお母さんたちの多くがこのような不安を持っていると思われます。一方、大文字の送り火に陸前高田市の松を使うことが中止されたとか、福島産の花火の打ち上げが中止されたとか悲しいニュースがあります。しかしながらどれだけ少なくとも危険は危険という説が正しいならこれらの中止は正しいということになります。私はこのような言説は罪深いと思います。健康に害を与える放射線量の閾値の有無が問題になっているようですが、仮に閾値がない場合でも例えば年に何Sv以下なら自然に癌になる確率の何%以下であり、何%であれば自然変動の誤差の範囲であるというような数字を出すべきであると思うのですがいかがでしょうか？

[1] シーベルトーWikipedia

- [2] 原子力百科事典 ATOMICA,
<http://www.rist.or.jp/atomica/index.html>,
 (09-04-02-06)
- [3] 災害廃棄物の放射能濃度の推定方法
 について 平成23年6月19日 原子力安全
 基盤機構 廃棄物燃料輸送安全部
- [4] 原子力百科事典 ATOMICA,
<http://www.rist.or.jp/atomica/index.html>,
 (09-02-02-06)
- [5] 近藤宗平「人は放射線になぜ弱い
 か」(講談社ブルーバックス) pp. 238.