

日本人の自然放射線被曝の 『公称値』が増えた所以

京都大学複合原子力研究所 今中哲二

気が付かれている方もあるだろうが、自然放射線による日本人の平均被曝量の『公称値』が、2011年の福島原発事故の後、それまでの年間1.5mSv(ミリシーベルト、以下すべて実効線量)から年間2.1mSvに引き上げられた。公称値という意味は、お役所のホームページなどで引用されているといった意味合いである^[1]。当時、公称値が大きくなった理由をチェックすると、「それまで計算に入らなかった海産物からのPo210(ポロニウム210)摂取を考慮したから」とのことだった^[2]。「何やら変だな」と私が感じた理由は、それ以前に『日本人のPb210(鉛210)とPo210の摂取量』というタイトルの山本論文^[3]を手伝ったときに、Po210による被曝はさほど大きくなかった、という記憶があったからだった。被曝量が増えた理由を辿ってみると、従来値の年間1.5mSvにおいてもPo210の摂取は考慮されていた。内部被曝が大きくなった要因は、Po210の摂取量データならびに被曝量の計算方法、とりわけICRPによるPo210の内部被曝換算係数が大きくなったことにある。Po210摂取にともなう内部被曝量評価と、「そもそも自然放射線とは」、について紹介しておく。

「生活環境放射線」の新版と旧版

年2.1mSvの出所は、原子力安全研究協会編「新版生活環境放射線(国民線量の算定)」(2011年12

月)である。原子力安全研究協会とは、私に言わせてもらうと、原発推進のシンクタンクみたいなところである。従来値の年1.5mSvは「生活環境放射線」の旧版(1992年8月)からの値である。表1に自然放射線被曝の内訳を新旧で比較してみた。

『宇宙から』、『大地から』、『吸入から』(補足参照)については、新旧に大きな違いはないが、『食物から』が年0.41mSvから年0.98mSvへと0.57mSvほど増えており、これが新旧公称値の主な違いと考えていいだろう。そこで、『食物から』の内訳を比べてみたものが表2である。Po210摂取にともなう被曝が、年0.082mSvから年0.73mSvへと0.65mSv増えており、ここが「日本人の自然放射線被曝の公称値が増えた所以」であることが分かる。

Po210(元素番号84)は半減期138日のアルファ核種で、半減期45億年のU238(ウラン238、元素番号92)という「親核種」から始まり、「子孫核種」がアルファ崩壊とベータ崩壊を繰り返しながら最終的に安定同位体Pb206(鉛206、元素番号82)に至る、「ウラン系列」の最後の放射性同位体である。(ウランと子孫が地下深くに安定した状態で長く同じところであれば、親と子孫の毎秒崩壊数、つまり放射能Bq値は同じになり、いわゆる「放射平衡」が成り立つ。しかし、ウランを掘り出したり精錬したりすると平衡が崩れる。海水には約0.04Bq/LのU238が含まれ

表1. 日本人の平均自然放射線被曝量：新版と旧版 単位：mSv/年.

	宇宙から	大地から	吸入から	食物から	合計
新版 (2011年)	0.30	0.33	0.48	0.98	2.09
旧版 (1992年)	0.29	0.38	0.40*	0.41*	1.48

* ;旧版では、吸入と食物を合わせて、「体内線源からの被曝 0.81mSv/年」になっている。今中が、「吸入から」(Rn222 から Po214 まで、Rn220 から Tl208 まで)と「食物から」(吸入以外の核種)に振り分けた。

1. 原子力文化振興財団HP <https://www.jaero.or.jp/sogo/detail/cat-03-06.html>

2. 量子科学技術研究開発機構HP <https://www.qst.go.jp/site/qms/39813.html#tab1>

3. Yamamoto et al, J Radio Nucl Chem (2009) <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s10967-007-7198-8.pdf>

表2. 食物からの被曝：新版と旧版 mSv/年

核種	新版	旧版
Po210	0.73	0.082
Pb210	0.058	0.073
カリウム 40 (K40)	0.18	0.20
その他 (Ra226 など)	0.02	0.05
合計	0.98	0.41

注1：新版では「主にPb210とPo210で0.80mSv/年」と記載されているが、引用元の太田論文に戻って核種ごとに割り振った。新版のK40の値は、杉山論文からの引用。

注2；その他には、Ra226以外に、炭素14、トリチウム、U238、Th232などが含まれる。

ているが、放射平衡にはない。)Po210は海水から魚介類への濃縮係数が大きく、人が海産物を摂取すると肝臓や腎臓に蓄積する。半減期22年のPb210は、ウラン系列でPo210の2世代前に位置し、ベータ崩壊が2回起きるとBi210(元素番号83)を経由してPo210に変わる。

新版と旧版では、内部被曝にともなう実効線量の計算方法が異なっている。

旧版では、人体臓器に存在する放射性物質濃度を文献データから採用し、その濃度が続いているとして、ICRP第30報(1978)の補遺で示されているパラメータを使いながら込み入った計算をして年間の実効線量を求めている。詳細は省くが、興味ある方は今中メモ⁴⁾を参照頂きたい。

新版の被曝量値は、食品の測定データから年間の

経口摂取量を求めてICRP72報(1995)の換算係数を用いて預託実効線量を求めている、太田論文⁵⁾ならびに杉山論文⁶⁾からの引用である。杉山論文からはK40の値のみが採用されている。

Po210摂取にともなう被曝量の比較

Po210の経口摂取被曝について、新版で引用されている太田論文、K40のみ採用されている杉山論文、今中も共著者となっている山本論文、ならびに旧版の4つの値を比較してみたものが表3である。3論文の概要を以下に述べておく。

- 太田論文(2009)⁵⁾：1989年から2005年にかけて、11都道府県から137種類の市販食材の放射能濃度を測定(サンプル数2000以上)。分析対象核種は、Sr90、Cs137、Pu239+240、U238、Th232、Ra226、Pb210、Po210で文科省マニュアルに従って測定。食材は17群に分類して平均的濃度を求め、厚労省が発表している各群の摂取量とICRP第72報の換算係数から大人に対する年間預託実効線量を求めている。

- 杉山論文(2009)⁶⁾：2007年から2008年にかけて日本の7つの都市のスーパーで13群の食材を購入(各都市での購入数は153~174サンプル)。飲料水も合わせてサンプリング。測定対象はPo210(Si測定)とK40(Ge測定)。13群の食材はボイルしたり揚げたりしてまず調理。各都市での食材消費を考慮して13群を混合しPo210測定サンプルを作成(横浜市については13群別々にもPo210測定)。Ge測定は、7

表3. 食物からのPo210摂取にともなう年間実効線量評価値の比較

	太田論文 食材積上げ方式	杉山論文 調理モデル方式	山本論文 陰膳方式	旧版* (腎臓中濃度)
年間摂取量 Bq/y	610	241	223	(164)
換算係数 mSv/Bq	1.2×10^{-3}	1.2×10^{-3}	2.4×10^{-4}	(5×10^{-4})
年間実効線量, mSv/y	0.73	0.29	0.053	0.082

*；旧版の年間摂取量は、第30報の換算係数を用いて実効線量に相当する摂取量を逆算した。

4. 今中哲二(2020年7月) <http://www.mi.kyoto-u.ac.jp/NSRG/temp/2020/natural-intake-dose20-7-4.pdf>

5. T. Ota et al, Jpn J Health Phys (2009) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jhps/44/1/44_1_80/_pdf/-char/ja

6. H. Sugiyama et al, J Toxicol Sci (2009) https://www.jstage.jst.go.jp/article/jts/34/4/34_4_417/_pdf/-char/en

都市全部で13群別に測定。都市毎の年間摂取量を基に、ICRP 第72報の換算係数で大人に対する預託実効線量を算出している。

●山本論文(2009)³⁾：1990年から1992年までの3年間、石川県の海岸集落と新興集落それぞれ20人を対象に、年に2度、1日分の陰膳サンプルを調達(合計240サンプル)。陰膳中のPo210をSi検出器で測定し、Pb210量は、2回測定の間Po210量変化で推定。Pb210とPo210の年間摂取量を求めICRP 第68報の換算係数で預託実効線量を評価。

表3を眺めると、新版でPo210被曝量が大きくなったのは、年間摂取量と被曝量換算係数のどちらも大きい太田論文の値を採用したことに由来することがわかる。

ICRPの経口摂取換算係数

山本論文が使っている換算係数の出典である第68報のタイトルは、「作業員による放射性核種の摂取についての線量係数：ICRP第61報に置き換わるもの」で、太田論文と杉山論文の第72報は、「放射性物質取込みにともなう公衆の年齢別被曝量 その5：経口と吸入」である。第68報は放射線作業従事者に対する値で、第72報では一般公衆に対する値が6つの年齢区分別に与えられている。表4に、大人に対する預託実効線量換算係数を比べてみた。ついでに、古い第30報と新しい第137報の値も示しておいた。

第72報の換算係数値は第68報の5倍である。つまり、同じ量のPo210を経口摂取しても、第72報の値を使うと第68報の場合の5倍の被曝量になる。第68報と第72報の換算係数の違いは、f1値に由来している。f1値とは、経口摂取した放射性物質が胃腸管から体内に吸収される割合で、第30報や第68報ではPo210に対して0.1であるが、第67報や第72報では0.5となり、換算係数も丁度5倍になっている。第30報では、人体実験1例やラット動物実験に基づいて0.1というf1値が採用されていた。ICRP第67報によると、その後1993年に6人のボランティアを使った論文が発表され、Po210を多く含むロブス

表4. Po210 に対する ICRP の経口摂取換算係数

	胃腸吸収率 f1 値	換算係数 mSv/Bq	対象集団
第30報 (1978)	0.1	5×10^{-4}	労働者
第67報 (1993)	0.5	1.2×10^{-3}	一般公衆
第68報 (1994)	0.1	2.4×10^{-4}	労働者
第72報 (1995)	0.5	1.2×10^{-3}	一般公衆
第137報 (2017)	0.1	1.8×10^{-4}	労働者

ターを食べさせる実験を行ったところ、f1値は平均0.76(0.60~0.94)だったそうだ。この論文を基に、一般公衆に対する経口摂取のf1値は0.5となったようだ。一方、放射線作業中に普通食事はしないので、第137報のように、作業員に対するf1値は0.1のまま残されている。

山本論文を手伝った頃の私は不勉強で、大人に対する経口摂取の換算係数が作業員と一般公衆で違った値になっていることを知らなかったが、一般公衆の被曝量評価としては、第72報の値を使った方がベターと言えよう。第72報を使うと、山本論文でのPo210摂取による被曝は年0.265mSvとなり、杉山論文(0.29mSv)とほぼ一致する。

まとめ

日本人の自然放射線被曝量『公称値』が年1.5mSvから年2.1mSvに増えた理由は、『海産物からのPo210摂取を新たに考慮したから』というより、『基になっている論文と計算方法が変わったから』と言った方がいいであろう。Po210摂取量については、大田論文、杉山論文、山本論文と3つの値が報告されている。Po210摂取以外の被曝は同じとして、日本人の平均自然放射線被曝を見積もると、大田論文を使うと2.09mSv、杉山論文で1.66mSv、山本論文で1.63mSvとなる。

私としてはPo210問題に関係なく以前から『日本

人の自然放射線被曝は、場所によって結構違うが、
『だいたい年1mSvくらいです』と言っている。

●補足1. 宇宙からの放射線被曝：宇宙線には、太陽からの太陽宇宙線と銀河系起源の銀河宇宙線がある。太陽からの放射線は、比較的エネルギーが小さく地球磁場がバリアとなって地表にはほとんど届かない。一方、銀河宇宙線の主な成分は非常に大きなエネルギーを持つ陽子で、地球磁場を通り抜けて大気上空で窒素や酸素の原子核と衝突して核破碎反応を起こして破砕片が出来る。と同時に、中性子、パイオン、ミュオンなどといった2次宇宙線粒子を発生し、エネルギーの大きな2次粒子が連続シャワーのように次々と核反応を起こす。地表での宇宙線由来の放射線の中心はミュオンで、その他に中性子、ガンマ線、電子も若干含まれる。ミュオンは、 -1 か $+1$ の電荷を持っている、エネルギーが大きくて透過力の大きい粒子である。宇宙線の強さは緯度や高度によって変わり、北に位置する北海道は沖縄に比べ3割程度大きい。富士山頂の宇宙線強度は地表に比べ約4倍で、中性子の寄与が大きくなる。透過力の大きなミュオンは、エジプトのピラミッドの内部を調べたり、福島原発事故でメルトダウンした原子炉容器内のデブリ量の透視調査にも使われた。ついでながら、身の回りの放射線量の測定に通常用いられるシンチレーション式サーベメータでは宇宙線はうまく測れない。

●補足2. 大地からの放射線被曝：地表の岩石や土壌には、ウラン、トリウム(Th232、半減期140億年、元素番号90)やK40(カリウム40、半減期13億年)といった、地球が出来たときからの放射性物質が含まれている。それらの土壌中濃度は、場所によってかなり違うが、沖縄から北海道まで折に触れてサンプリングした私の経験から大ざっぱに言うと、ウラン系列で10~20Bq/kg、トリウム系列で20~30Bq/kg、K40で300~800Bq/kgと、結構な量が含まれている。本文でも述べたように、“系列”というのは、たとえばウラン系列でいうと、大元の親、半減期45億年のU238がアルファ崩壊して子のトリウム234(Th234、半減期24日)に変身し、次にTh234がベータ

線を出してプルトアクチニウム234(Pa234、半減期6.7時間、元素番号91番)になり…(と続いて)最後にPo210がアルファ線を出してPb206という安定同位体になるまで、放射性崩壊が続くことをいう。シンチレーション式サーベメータで測っている放射線は、通常大地からの放射線で、日本では、低いところで毎時0.03 μ Sv、高いところで毎時0.08 μ Sv程度である。

●補足3. 吸入からの放射線被曝：ウラン系列の途中に半減期1600年でアルファ崩壊するRa226(元素番号88)がある。アルファ崩壊では、陽子2つと中性子2つの塊であるアルファ粒子が原子核から飛び出す。元素番号を決めているのは原子核に含まれている陽子の数で、226というのは陽子と中性子を合わせた数で質量数と呼ばれている。Ra226原子核はアルファ崩壊にともなって、元素番号86質量数222のRn222(ラドン222)に変身する。Rn222は半減期3.8日でアルファ崩壊するが、ラドンという元素は化学的には「希ガス」とよばれる種類に属し気体である。つまり、土壌や物質の表面近くにRa226があると大気中にRn222がわき出し始める。大気中にあるRn222からは、半減期3分のPo214、半減期27分のPb214、半減期20分のBi214…といった一連の半減期が比較的短い核種(ラドン娘核種)が発生し空気を漂い、吸入にともなって肺などの呼吸器系が被曝する。トリウム系列ではRn220(トロンと呼ばれる)が発生するが、半減期が56秒と短いので、Rn222に比べて被曝は小さい。

空気中Rn222濃度も場所によって異なるが、日本の平均では野外で5Bq/m³、屋内で10Bq/m³程度と言われている。石造りの家が多い欧米ではラドンと娘の吸入被曝が大きくなる。

注：「元素番号」というのは今中が作ったコトバで、教科書的には「原子番号」である。

●補足4. 世界と日本の自然放射線被曝の比較^[1]

合計 mSv/年	宇宙から	大地から	ラドンなどの吸入	食物から
2.4(世界)	0.39	0.48	1.26	0.29
2.1(日本)	0.30	0.33	0.48	0.99