

人体中のポロニウム—210

秋田大学名誉教授 / 医療法人財団青葉会 ホスピア玉川 施設長

滝澤 行雄*

はじめに

最近、自然放射線の一つである放射性ポロニウムが人々の話題になったのは、ロシア連邦保安局（FSB）元情報局員 Alexander Litvinenko 氏が亡命先の英国ロンドンで 2006 年に毒殺され、その原因がホテルで出された紅茶に高濃度のポロニウム—210 (^{210}Po) が混ぜられたとされることにある¹⁾。

さらに、これと前後して、2004 年に 75 歳で死去したパレスチナ解放機構 (PLO) の故 Yaser Arafat 前議長の衣服と歯ブラシから高濃度の ^{210}Po が検出され、毒殺の疑いがもたれたことである。スイス・ローザンヌ大学の放射線物理研究所は ^{210}Po の検出を認め、たうえで「アラファト氏の病状はポロニウムが起こす症状と一致しない」とし、死亡と直接結びつけることを避けた。一方、パレスチナ当局が 2005 年に行った調査では、がんやエイズ (HIV/AIDS) とともに毒殺の可能性は除外されたものの、結論には至っていない²⁾。

ところで、 ^{210}Po は口や鼻、傷口を通して体内に取り込まれた場合にのみ、人体に健康影響を与えることがある。身体の外に存在する場合には、その放出される α 線が皮膚の表面で遮られ、細胞を障害することがないため、人体に影響をもたらすことはない¹⁾。ロンドンで発生した ^{210}Po による被ばくはきわめて稀な被ばく事件である。

ひるがえって、1960 年代に喫煙集団や地衣類を飼料とするトナカイを主食とする地域集団における人体内 ^{210}Po 蓄積分布に関心が集まり、数多くの報告がなされた。 ^{210}Po は自然環境中に少量存在し、おもに魚類、野菜に含まれ、人体に取り込まれる ^{210}Po の主要経路が食品摂取であることが明かにされた。国連科学委員会 1977 年報告によれば、普通の食品摂取地域における年間 ^{210}Po 摂取量は 40Bq に達している³⁾。

ここでは 1960 年代に欧米で検討された人体中 ^{210}Po の蓄積分布を鳥瞰し、その後秋田大学で行われた日本人の体内 ^{210}Po 量の現況を摘録して参考に供したい。

* 〒 174-0064 東京都板橋区中台 2 丁目 34-9

210Po とその体内代謝

自然放射線から一般公衆が受けている線量の中でラドンやトロンおよびその娘核種からの内部被ばく線量がかなり大きな割合を占めていると推定されている。これらの線量は主として α 粒子によるもので、吸入による人体に取り込まれる ^{238}U 系列の短寿命ポロニウム同位体 ^{218}Po 、 ^{214}Po と、おもに食物により人体に取り込まれる長寿命同位体 ^{210}Po のうち、半減期138日の ^{210}Po （いわゆるポロニウム）の寄与が重視される。

^{210}Po は ^{222}Rn の長寿命壊変生成物として、大地からの ^{222}Rn 散逸がおもな発生源である。地表大気の ^{210}Po の環境から人体への移行は、経口摂取が主であるが、体内に取り込まれる ^{210}Po は、ほかの天然 α 放射体と異なって、骨親和性を持たず、摂取後はむしろ軟組織中に分布しやすい。したがって、骨中の ^{210}Po の放射能はほとんどが骨に沈着している長寿命の親核種 ^{210}Pb の壊変による。

人体試料では、 ^{210}Po の測定はこの ^{210}Pb と放射平衡にあるかどうかを知るため、 ^{210}Pb の測定と対で行われる。 ^{210}Pb は半減期22年の β 放射体であり、半減期5日の ^{210}Bi を経て ^{210}Po になる。 $^{210}\text{Pb}/^{210}\text{Po}$ 比は一般に、 ^{210}Pb の組織内滞留時間と ^{210}Po の化学的あるいは生物学的作用による排出に左右される。 ^{210}Pb は半減期がながいため体外に排出されることなく、体内に滞留して ^{210}Po を生成する。 ^{210}Po は肝、腎および脾などの軟組織に沈着する。また ^{210}Po は血液中に存在し、とくに赤血球の表面に結合する。

Jackson と Dolphin⁴⁾は、取り込まれた人体（全身）中ポロニウム残存量を次のような関数式で示した。

$$R(t) = e^{-0.683t} / 58$$

そして、ポロニウムは肝臓、腎臓および脾臓に0.1、そのほかの組織に0.7がそれぞれ移行し、各組織における生物学的半減期は50日と報告している。

環境中 ^{210}Po の人体への移行

人体に対する外部被ばくは、おもに ^{238}U 系列、 ^{232}Th 系列および ^{40}K に起因する γ 線によって生じている。これらの放射性核種は体内にも存在し、 γ 線と同様に α 線および β 線によってさまざまな臓器が被ばくしている。この系列の放射性ラドンである ^{222}Rn の半減期は数日であるが、線量評価において重要となる比較的寿命の長い ^{210}Pb と ^{210}Po の二つの壊変生成物を生じる。要するに、 ^{210}Po を除く天然同位体は寿命が短く、より長い長寿命の親核種 ^{210}Pb にささえられて、これと放射平衡に近い状態にあることが多い。

国連科学委員会1977年報告では、人体に取り込まれる ^{210}Po の主要経路は食品摂取としている。食品に含まれるウランおよびトリウム系列放射性核種の年間取り込み量の分布をみると、 ^{210}Pb 、 ^{210}Po が最高濃度を示し、かつ、両核種

はほぼ同濃度となっている。以後、 ^{210}Po にしぼり、生活環境における濃度分布をみることにする。

大気中 ^{210}Po 濃度は北アメリカで $10\sim 40$ 、ドイツが $12\sim 80\ \mu\text{Bq}/\text{m}^3$ (、UNSCEARの参考値は $50\ \mu\text{Bq}/\text{m}^3$)、食物・飲料水中の ^{210}Po 濃度は $15\text{mBq}/\text{kg}$ 、また食品中の年摂取量は 58Bq と報告されている⁵⁾。

北方地方に居住する住民の主食はトナカイ肉であり、肉中 ^{210}Po のレベルは通常高くないが、大量に摂取する住民の ^{210}Po 量は高値となっている。Ramzaevら⁶⁾は、ソ連共和国の北方住民をトナカイ肉の摂取量から ①1日当り 1kg 以上食べる群、②1日 $0.2\sim 0.5\text{kg}$ 食べる群、③時々食べる群に3区分して北方人の ^{210}Po 摂取量を求めている。これによると、 ^{210}Po 摂取量は $1,110\sim 12,728\text{Bq}/\text{日}$ 、平均 $4,144\text{Bq}/\text{日}$ であり、この値は、トナカイ肉を食べない群の10倍強となっている。もとより、体内 ^{210}Po 摂取量は肉の量に依存し、住民の体内からは ^{210}Po が大量に排出されている。なお、トナカイ(雄)の ^{210}Po 排泄量は1日当り $740\sim 7,400\text{Bq}$ となっている。

一方、海洋生物の食物連鎖による放射能濃縮はきわめて大きく、遠洋を泳ぐビンナガマグロの中には、消化器の一部の放射線被ばく線量が年間 190rem ($1,900\text{mSv}$) にのぼっている⁷⁾。この放射線の源は、 ^{210}Po で、1トンの海水中に 25pCi (0.93Bq) と濃度は低いが、食物連鎖によって高濃度に濃縮される。Aarkrogによると、 ^{210}Po の代表的な値として、魚が $2,400\text{mBq}/\text{kg}$ 、甲殻類 $6,000\text{mBq}/\text{kg}$ 、軟体動物 $15,000\text{mBq}/\text{kg}$ であり、海洋生物による ^{210}Po の蓄積は高く、無脊椎動物は魚類に比べて1桁程度高い⁸⁾。日本人は魚介類を多食する習慣があるので、食品群別では魚介類からの寄与が大きく⁹⁾、国民線量の算定では、 ^{210}Po の実効線量は 0.73mSv と評価されている¹⁰⁾。

つぎに、たばこ煙中 ^{210}Po の体内への吸収について、自動喫煙機を使用して喫煙モデルの結果が滝澤らにより報告されている^{11,12)}。国際標準喫煙条件下(たばこ1本当たり $8\sim 9$ 回吸入させ、1吸入に要する時間を2秒、吸入量を 35ml と設定)、9つの銘柄(市販)について ^{210}Po 含量を求めている。測定結果を表1に示したが、 ^{210}Po 含量は銘柄により多少の差があるが、平均 11.6mBq となっている。ところで、主流煙、副流煙、灰、吸殻の各部分別 ^{210}Po 含量をみると、主流煙に比べ副流煙の方がかなり高く、副流煙に40%、主流煙に10%、灰に20%で、煙中にはほぼ50%が移行している。なお、フィルターが付いた状態とはずした状態で比べてみると、たばこ中の ^{210}Po 量は、銘柄ごとによる差が大きい。

ここで、たばこ中 ^{210}Po による被ばく線量について、たばこ煙の肺吸収率を100%、たばこ1本当たり ^{210}Po 含量を 11.6mBq 、主流煙への移行を10%、また1日20本吸うと仮定し、推定した結果では、肺への ^{210}Po 吸入量は1日 24mBq 、1年間で 8.8Bq に達する。

さらに ^{210}Po の吸収線量率は $15\ \mu\text{Gy}/\text{年}$ 、また線量当量は $150\ \mu\text{Sv}/\text{年}$ と試算されたことから、喫煙者が 1 日 1 箱 30 年間喫煙を継続した蓄積線量当量は 4.5mSv と推定される。 ^{210}Po による肺臓がん死亡リスクは $9 \times 10^{-6}/\text{Sv}$ と試算され、実際の日本人のがんリスクと比べ低く、無視し得る値ではあった¹²⁾。

^{210}Po の体内蓄積分布

^{210}Po の線量—生物学的効果の関係は複雑であって、その線量評価を科学的に知ることは極めてむづかしい問題である。しかし、 ^{210}Po による線量効果の前提として、ともかく人体のいかなる臓器に、どれほど蓄積ないし移行しているかを知ることは、自然放射線を論ずるうえで意義が大きい。

人体の主要臓器中 ^{210}Po 含量は 1961 年の Black の報告を契機にその後 10 年間に数多くの測定がなされている。それらの結果を整理すると、表 2 のようになる。表 3 には各臓器中の $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比が示されている。

まず、臓器別にみると、肺臓中 ^{210}Po は筋肉や血液のそれと比べ全体に高値を示し、平均値で $207\text{Bq}/\text{kg}$ 、また $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比は約 1.3 となっている。Hill は気管支と肺胞における ^{210}Po 量の比率がほぼ 0.75 と報告している¹³⁾。Little らによると、気管支上肢の ^{210}Po 量は肺実質部の約 100 倍となっている¹⁴⁾が、Rajewsky と Stahlhofen は喫煙者の場合、この比が 10 倍になると報告している¹⁵⁾。しかも、肺実質部および気管支の ^{210}Po 量は喫煙者と非喫煙者との間で差がなく、ほぼ同レベルと報告している。つぎに、肝臓中 ^{210}Po 量は $629\text{Bq}/\text{kg}$ 、 $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比は 2.3、また、腎中のそれらは $537/\text{kg}$ 、3.5 となっている。なお、腎皮質の ^{210}Po 量は腎髄質の 1.8~3.6 倍を示した。

造血臓器である脾臓については、 ^{210}Po が赤血球に親和性を示し、食作用で脾臓に入りやすい。そのため ^{210}Po の被ばく量は大きいときは、脾臓は放射性核種の沈着として重要な標識器官となるはずである。しかし、自然摂取の例では、脾臓中 ^{210}Po 量はほとんど観察されていない。自然環境では ^{210}Po は人体に有機型で取り込まれて結合し、直ちに溶解しやすい型に変換されるためである。つまり、脾臓を初めとする細網内皮系に沈着した ^{210}Po 画分が除去されるのである。脾臓中 ^{210}Po の平均値は $126\text{Bq}/\text{kg}$ 、また $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比は 1.2 となっている。Hill¹³⁾ は、 ^{210}Pb が SH 酵素に親和性をもち、脾臓のインシュリン産出機能に関係していることを報告している。

筋肉は身体全体の重量の 43% に相当するため、軟組織中の ^{210}Po の寄与は無視できない。表 1 から明らかなように、骨格筋中の ^{210}Po 量は $78\text{Bq}/\text{kg}$ 、 $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比は 0.8 であり、両筋肉の濃度は類似している。

骨組織（骨格）中の ^{210}Po 量は臓器中で最も大きく、平均 $1,388\text{Bq}/\text{kg}$ となっている。Kozlova らは、歯組織中 ^{210}Po 量が $6,290 \pm 2,220\text{Bq}/\text{kg}$ と報告し、

これは骨格中 ^{210}Po 量の約 1/2 量である¹⁶⁾。骨組織中の ^{210}Po は前述したように同組織に沈着した ^{210}Pb から生成されるもので、 $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比は平均 0.7 (範囲 0.4~0.94) となっている。また骨髄中の ^{210}Po は赤色骨髄が高く、Baratta と Ferri によると、男子(4例)で $962 \pm 107\text{Bq/kg}$ 、女子(8例)では $777 \pm 111\text{Bq/kg}$ となっている¹⁷⁾。この ^{210}Po 量は骨組織に見出されるレベルであるが、Ladinskaya らは、このような高含量は認められず、24例の平均が 141Bq/kg 、 $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比のそれが 0.8 ± 0.1 であった¹⁸⁾。

そのほか、生殖腺については、放射線感受性臓器として ^{210}Po 含量は比較的に大きく、肝臓や腎臓に次ぐレベルにある。すなわち、睾丸では 229Bq/kg 、卵巣では 241Bq/kg 、また $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比はそれぞれ 1.3 と 1.4 となっており、両臓器の分布量はよく合致している。

血液中の ^{210}Po 量は平均 78Bq/kg であるが、その変動の範囲が大きい。たとえば、食事後の血中 ^{210}Po 量は食前のそれと比べ 1.5 倍も高くなる。血中の $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比は軟組織のそれとは違って約 0.4 となっている。

リンパ節の ^{210}Po 含量では、喫煙者の 407Bq/kg は非喫煙者の 233Bq/kg より明らかに高く、両者に差がみられた。気管支部位のリンパ腺中の ^{210}Po は約 1000Bq/kg ときわめて高い値を示している。

最新の人体組織中 ^{210}Pb および ^{210}Po 濃度

北日本地域居住者で 1986~1988 年に剖検された人体組織中 ^{210}Po 、 ^{210}Pb および $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比が Takizawa らにより表 4 のように報告されている^{19,20)}。これによると、最近の日本人の体内 ^{210}Po 量は、1960 年代に世界各国で測定された分布量と大差がなく、 $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比でみると、ほぼ類似した値となっている。

UNSCEAR1993 年報告では、世界各国のデータから取りまとめた人体組織中 ^{210}Pb 量は肺臓 200、肝 200、腎 200、筋肉 100、骨 1000mBq/kg 、また ^{210}Po のそれは肺臓 200、肝臓 600、腎臓 600、筋肉 100、骨 2400mBq/kg となっている⁵⁾。これらの値と滝澤らの報告値を比べてみると、筋肉中 ^{210}Pb 、 ^{210}Po を除き、ほとんどの臓器中 ^{210}Pb 、 ^{210}Po 量は、日本人のほうが約 2 倍の高値である。このことは、わが国では欧米諸国と比べて ^{210}Po が比較的多い魚介類の大量摂取を反映している。

文献

1. 英国・健康保護庁 (HPA) ウェブサイト。英国で発生したポロニウム 210 事件に関する情報、放医研・緊急被ばく医療研究センター、平成 18 年 12 月 4 日掲載。
2. アラファト議長、放射性物質ポロニウムで毒殺？アルジャジーラ。

<http://www.afpbb.com/article/disaster-accidents-crime/crime/2887883/9215376>

3. 放射線の線源と影響：UNSCEAR 1977 年報告、放射線医学総合研究所
4. Jackson S. and G.W. Dolphin : . The estimation of internal radiation dose from metabolic and urinary excretion data for a number of important radionuclides, Health Physics, 12(4), 1966.
5. 放射線の線源と影響：UNSCEAR 2008 年報告、放射線医学総合研究所、2011 年 9 月。
6. Ramzeav
7. 木村健一；海洋生物への放射性物質の移行、32,263-266、1989。
8. Aakborg, TW., Baxter, M.S. et al., : A comparison of doses from ^{137}Cs and ^{210}Po in marine food; a major international study. J. Environ. Radioact., 34, 69 - 90、1997.
9. 農林水産省：農林水産省ホームページ、
http://www.maff.go.jp/j/syounan/tikusui/gyokai/g_kenko/tokucyo/index.html.
10. 新版 生活環境放射線（国民線量の算定）。原子力安全研究協会、平成 23 年 12 月。
11. 滝澤行雄：たばこ煙の経気道吸収について。Smoking Health, 創刊号 (No.1) 17-18.,1992.
12. Takizawa, Y, Zhao, L. et al. : Determination of Pb-210 and Po-210 in human tissues of Japanese. J. Radioanal. Nucl. Chem, 138 : 145-15,1990.
13. Hill, C.R. : Polonium-210 in man, Nature, 208:423,1965.
14. Litter J.B.and Radford, E.P: Polonium-210 in bronchial epithelium of cigarette smokers. Science, 155(762):606-607, 1967.
15. Rajewsky, B. and W.Stahlhofen : Poronium-210 activity in the lungs of cigarette smokers. Nature 209:1312,1966.
16. Kozlova
17. Baratta & Ferri
18. Ladinskaya L.A., Parfenov et al. : Lead-210 and polonium-210 content in air, water, foodstuffs and the human body. Arch. Environ. Health, 27:254-258, 1973.
19. Takizawa, Y., Zhang, L. and L.Zhao. ^{210}Pb and ^{210}Po in tobacco —With a special focus on estimating the doses of ^{210}Po to man. J. Radioanal. Nucl. Chem, Articles, 182:119-125, 1994.
20. Takizawa, Y. Fallout radionuclides in Japanese tissyes, Radiation

Protection. Dosimetry, 62:59-62, 1995.