

人間活動で変えられた自然放射線被ばく

藤 元 憲 三
放射線医学総合研究所

Natural Radiation Exposure Modified by Human Activities

Kenzo Fujimoto

Safety Analysis Unit, National Institute of Radiological Sciences

9-1, Anagawa 4, Inage-ku, Chiba 263 Japan

ABSTRACT - We are now living in the radiation environment modified by our technology. It is usually called "Technologically Enhanced Natural Radiation" and have been discussed in the UNSCEAR Reports as an important source of exposure. The terrestrial radionuclide concentrations as well as the intensity of cosmic rays are considered to have been constant after our ancestors came down from trees and started walking on their two feet. However, we have been changing our environment to be more comfortable for our life and consequently ambient radiation levels are no more what used to be. In this paper exposures due to natural radiation modified by our following activities are discussed: housing, balneology, cave excursion, mountain climbing, skiing, swimming, smoking and usage of mineral water, well water, coal, natural gas, phosphate rocks and minerals.

In the ICRP Publication No. 39, it is clearly mentioned that even natural radiation should be controlled as far as it is controllable. We have to pay more attention to our activities not to enhance the exposure due to unnecessary, avoidable radiation.

I. 緒 言

我々は好むと好まざるとに係わらず、絶えず自然放射線にさらされている。その自然放射線からの被ばく線量が我々の様々な活動にともなって変化する場合が存在する。大半の場合、活動に伴って被ばく線量が増加することをわれわれは意識していない。ここでは放射線被ばくの観点から人間活動を見直してみる。

表題では、よく使われる言葉、「人間活動で高められた」という言葉を用いず、「人間活動で変えられた」としている。なぜならば、人間活動によって被ばく線量が減少する場合もあるからである。ここでは人間活動によって増加したり、減少したりする自然放射線被ばくを議論する。具体的な例としては、飛行機を利用した旅行、天然ガスの使用、石炭火力発電所からのフライアッシュ、燐酸石膏の建材への利用等がある。これらは“技術的な進歩によって増大した自然放射線”(Technologically Enhanced

Natural Radiation: TENR)¹⁾ と呼ばれ、国連科学委員会の報告書^{2), 3)} においても重要な課題として取り上げられてきている。上述の例の他にもラドン娘核種による肺への被ばくがこの範疇に属する重要な問題である。現実には、放射能の高い建材や屋内換気率の低さから平均値よりも100倍以上高い場所が見いだされている。さらには、1973、1979年の二度にわたる石油危機に伴って、暖房、冷房のエネルギー節約のため建物の換気率が抑えられ、ラドン娘核種からの被ばく量が増大する傾向にある。

このように技術的な進歩によって増大した自然放射線からの被ばくを放射線防護・管理の対象外に置くのは放射線防護・管理を全体的にとらえた場合、片手落ちである。人工放射線は、放射線防護・管理のもとで厳しく管理され、現実の人工放射線からの被ばく線量は多量に被ばくしている職業人の場合でも自然放射線からの線量程度となっている。ましてや、人工放射線による一般公衆の被ばく量は微々たるものである。それに比べて、我々の活動の結果に伴って変化する自然放射線による被ばく線量の増加量は公衆に対する線量限度を超える場合も存在する程に大きい。従って、人工放射線のみならず自然放射線をも制御可能なものは放射線管理の対象とすべきである。国際放射線防護委員会 (ICRP) は Publ. 39 (1983)⁴⁾ の勧告までは自然放射線被ばくに対する具体的な指針を何も示してこなかったが、Publ. 39において、自然放射線からの線量の平均的な推定値と人間活動にともなって変化する線量幅とその線源の制御可能について示し、制御可能な自然放射線を放射線防護・管理の対象とすべきであるという姿勢をはっきりと示した。その中で特に被ばく線量のレンジが大きく、しかも制御の可能性があると判断されているものは原始放射性核種からの屋内における体外被曝と屋内におけるラドン娘核種の吸入である。航空機利用に伴う宇宙線被ばくを除けばこの二つが自然放射線に対する防護を考える上で重要な対象となるものである。以下にまず、放射線成分ごとに、次いで被ばく線量の変化を伴う人間活動に付いて述べる。

II. 宇宙線による被ばく

宇宙線は主として電離成分と中性子成分とからなり、高度及び緯度によってその線量率が変化する。従って、ジェット機に乗ったり、登山をするとその線量率は増加する。例えば、2000mの高度では電離成分が海面上の2倍に、中性子成分は7倍に、富士山頂上では電離成分は5倍に、中性子成分は30倍と増加する。また、宇宙線からの線量率は重量構造建築物内では、宇宙線の軟成分の減衰により低くなる。ある12階建

Table 1. Absorbed Dose Rates in Air Derived from Exposure Rate Measurements in the Center of a 12-storey Building⁵⁾

Level	Dose rate (nGy h ⁻¹)	Transmission factor
Roof	31.4	1
12	20.2	0.64
10	20.0	0.64
8	18.1	0.58
5	17.4	0.55
4	13.7	0.44
2	11.5	0.37
Basement	8.6	0.27

ての建物内の測定例を Table 1 に示す。但し、我国においては80%以上の家屋が木造であることから、国民線量の観点から考えると、宇宙線の建物による遮蔽効果は無視できる程度となる。世界的な平均で考えると電離成分が20%程度減少すると推定されている²⁾。

次に日本国内の場所による宇宙線線量率の変化を考える。高度による線量率の変化は上述の通りである。我国の場所による地磁気緯度の差異は約 $\pm 10^\circ$ であり。線量率の差異を平均値の回りの変化として表すと 30 ± 1 nGy/h となる。

Ⅲ. 地球起源の放射線による被ばく

1. ガンマ線による被ばく

考慮すべき地球起源の放射線源はウラン系列、トリウム系列、カリウムである。地球の創世期の約46億年前にはカリウムは現在の12倍、ウランは2.1倍、トリウムは1.3倍とそれぞれ現在より多く、その量に比例して線量率は高かったと考えられる。しかし、現在の人類（ホモサピエンス）が地上に現れた時期（数万年前）から今日までの期間を考えると、その変化は無視できる程度に小さくなる。また、宇宙線線量率の変化もその間無かったと推定されている。したがって、人類が自然に何ら手を加えること無く、同じ場所に住んでいたとすれば、これまで自然放射線からの被ばく線量には変化がなかったと言える。しかし、人類は様々な活動によって、環境を作り替え、その結果自然放射線からの被ばく線量も変化してきた。

まず、我国の場所による線量率の差異を検討する。大地からの線量率は土壌に含まれるウラン系列、トリウム系列、カリウムの量によって変化する。その線量率は我国では一般的に花崗岩が露出している西日本で高く、東日本で低い。従って、場所によって線量率が30%程度異なる。次に、屋内の線量率について考える。野外に homeless として住んでいれば被爆もしなくても済む自然放射線を屋内に住むことにより我々はあびることとなる。家屋を作りそこに住むのも人間活動の一つである。屋内線量率のモデル計算によれば標準的なコンクリート家屋の場合、窓から遠ざかれば野外の線量率の約1.8倍まで上昇する。当然、屋内での線量率は壁厚と壁に含まれる放射能に依存する。屋内と屋外の線量率の実測例によると一般に屋内の方が線量率が高い³⁾。但し、日本人の測定結果によれば、屋内と屋外の差異は無く⁶⁾、家屋内居住という人間活動の影響は顕著ではない。

都市環境は周囲に様々な建物等が存在し、純然たる野外とは異なる環境を形成している。周囲の建物の影響を評価するためモデル計算を用いると、測定点から25m以内に建物が存在して周囲を取り囲んでいると屋内の線量とほとんど同じ値となることが分かる。このことは高層建築が立ち並ぶ都市部に置いては屋外の線量率は屋内の線量率と似通った状況を生み出していることを示している。但し、周囲の建物はそれ自身が線源となると共に遮蔽材ともなるため、それに含まれる放射能濃度が高ければ線量率が野外よりも高くなり、逆に遮蔽効果の方が大きければ線量率が低くなる。測定例が少なくこの影響がどの程度であるか推定することは難しい。

2. ラドンによる被ばく

ラドンによる被ばく線量は通常の状態に置いても一般公衆が受ける自然放射線からの線量の半分以上を担う重要な被ばく源である。その線量が我々の活動に伴って大きく変動する。ICRP の Publ. No. 39 においては高い場合には800mSv/y にも増加すると推定している。一般的に屋内に置いては屋外よりも高いラドン濃度が見いだされるが、これは主として、屋内への換気率が低く、屋内へ侵入してくるラドンがたま

るためである。同じ条件下でも窓やドアを閉じた状態で数日間放置しておくとならば室内のラドン濃度は容易に当初の濃度の10倍程度に増加する。また、地下水を利用すれば、そこに溶解しているラドンが室内に持ち込まれ、室内ラドン濃度が高まる。特に、地下水を利用したシャワーを浴びると急激に室内濃度が数十倍に高まることが観測されている³⁾。

室内のラドンの発生源は主として家屋下の土壌であり、土壌中のウラン濃度の影響を大きく受ける。様々な国に置いて室内ラドン濃度の広域調査が行なわれているが、一般的な屋外ラドン濃度(5 Bq/m³)と比べると数倍から数十倍高くなっている。我国においても室内濃度は約20Bq/m³と屋外よりもかなり高くなっている。また、室内ラドン濃度の地域的な変化はガンマ線による線量率と同じように西日本で高く東日本で低い傾向を示している⁷⁾。

以上をまとめると、屋内に居住することにより体内被ばくは約70%増加する。一方、体外被曝は日本においては変化は認められないが、世界的な平均では宇宙線の電離成分が約20%減少し、逆に大地放射線の影響は約35%増加すると推定されている。国内で引っ越しにより住む場所を移動すると、宇宙線の線量は約3%、大地放射線は30%、ラドンによる体内被ばくは約30%変化することとなる。

IV. 被ばく線量変化を伴う個人の活動

1. 地下水の利用

ラドンによる被ばくの項で地下水について若干触れたがここでは経口摂取、吸入についても考慮する。平均的な地下水のラドン濃度を10,000Bq/m³とし、年間100リットルを冷水のまま使用するとすると、経口摂取による付加実効線量は約10 μ Sv/yとなる。また、この水をシャワーとして用いるとその線量は約20 μ Sv/yと推定される。

2. ミネラル水の飲用

様々なミネラル水が存在するが、国連科学委員会の1993年報告⁸⁾によると、若干ふつうの水よりもラジウム濃度が高いと報告されている。このミネラル水を年間100リットル経口摂取すると仮定すると数 μ Sv/y増加することとなる。飲料水に限らず、一般のものよりも放射能の高いものを摂取すればその分線量が増えることとなる。我国においても食用に供する野菜、果物の中にはウランやラジウムを選択的に取り込む種があり、例えば、ワラビ、ゼンマイ等のシダ植物ではラジウムや鉛の濃度が高いと報告されている⁹⁾。従ってこれらの野菜を摂取すれば線量は増加することになるが、消費量も少なく線量増加は無視できるレベルである。

3. 温泉療法

国連科学委員会1982年報告書にはオーストリアのバードガシュタインでの温泉療法の被ばく線量推定が報告されている⁹⁾。治療の標準は2週間コースで、総被ばく時間は4時間、施設内の最大ラドン濃度は10⁵Bq/m³であり、付加実効線量は1,000 μ Sv/yと推定されている。日本では増富温泉における線量推定がなされている⁹⁾。水中平均ラドン濃度は1,700Bq/m³であり、この浴室に毎日1時間滞在し、30分間入浴すると仮定すると一年間の体外、体内被ばく線量はそれぞれ200, 270 μ Svとなる。これらの推定値は通常のラドン濃度からの年間被ばく線量に匹敵する量である。

4. 洞窟観光

様々な洞窟が観光として開発され、多数の観光客を集めている。しかし、一般的に洞窟では換気率が低く、ラドン濃度が高いと予想される。従って、洞窟内を観光目的で見て回る間に比較的高い線量を受けることとなる。具体的な実測例として、ハンガリーや米国の洞窟においてラドン濃度が0.4、0.3~1 WLであったと報告されている⁹⁾。一方我国においても秋吉台の測定例があり、内部の典型的なラドン濃度は0.8 WLであった¹⁰⁾。ここに、2時間滞在していると仮定すると、付加実効線量は $20\mu\text{Sv}$ となる。

5. 登山

典型的な例として、富士登山を考えてみた。5合目までバスで行き、そこから登山を開始し、8合目で一泊し、頂上で御来光を拝みその日の内に下山すると仮定する。前述のそれぞれの高度での宇宙線の電離成分と中性子成分からの線量率と滞在時間を勘案すると、1回の富士登山による付加実効線量は $4\mu\text{Sv}$ と推定される。その他に宇宙線の線量率が増加する可能性のあるスポーツとして、スカイダイビング、ハングライダー、パラグライダー、気球による飛行が考えられる。これらのスポーツは比較的時間が短いあるいは低高度での活動であるため、宇宙線からの寄与の増加や、大地放射線からの寄与の減少はあるもののその変化分はほとんど無視できる程度となる。次に、スキーに付いて考察をする。一週間高度1,000 mの場所に宿泊し、一日5時間のスキーを楽しむと仮定する。高度1,000 mの場所での宇宙線からの線量は海面上の50%増であり、一方、雪による大地放射線の減少分は60%となる。この結果、差し引き約 $2\mu\text{Sv}$ の線量増となる。この計算に用いた大地からの線量率の高度による変化²⁾、積雪による大地放射線の減少割合¹¹⁾はそれぞれの文献に示されている。

6. 水遊び

水の40cm層の遮蔽によって大地放射線は1/10に減衰する。従って、プールにおける水泳でもかなりの量の放射線が遮蔽されることとなり、被ばく線量は減少する。海水浴、スノーケリング、スキューバダイビング等によっても同じように大地放射線は減少するが水に浸かっている時間が短いためその影響は無視できる程度となる。一方、最近の流行であるフィットネスクラブに通い毎週1時間水泳をしていると考えると年間で約50時間遮蔽材としての水の中に浸かっていることとなり、 $2\mu\text{Sv}$ の減少となる。

サーフィン、ウィンドサーフィン、ヨット、ボート遊び、水上スキー、屋外のアイススケート等では直接水の中に浸かっているわけではないが、陸から離れるため大地放射線が減少する。海岸線より10m離れると大地放射線は1/5に減少する¹²⁾。しかし、それらの活動に関係している時間が短いためその影響は無視できる程度と考えられる。

これらに反して、漁師や水上生活者は海上にいる時間が長く、その分大地放射線からの線量は大幅に減少する。数カ月から半年も海の上にている場合を想定するとその減少分は年間 $100\sim 200\mu\text{Sv}$ となる。

7. 喫煙

喫煙は肺癌だけでなく、高血圧やその他の様々な病気の原因になっているといわれているが、放射線被ばくに関してもほんの少し、線量を与える。毎日10本のたばこをのむと仮定すると、 ^{210}Po による体内被ばくによって年間 $0.35\mu\text{Sv}$ 線量が増加する²⁾。

8. 身体活動

我々が単に体を動かすだけでも被ばく線量は変化する。例えば、走れば呼吸量が平常時の約 $0.75\text{m}^3/\text{h}$ から約 $1.2\text{m}^3/\text{h}$ と増え、ラドンによる被ばく線量がその間約60%増加する。しかし、時間的に短いためその影響は無視可能である。また、睡眠をとると逆に呼吸量は約 $0.45\text{m}^3/\text{h}$ と減少し、ラドンによる被ばく線量が約40%減少する。睡眠の場合は時間的にも長く、その減少割合は大きなものであるが、通常のラドンからの線量見積りの過程で既に考慮されている。

9. 満員電車、寿司詰め教室

日本特有の面白い環境として、満員電車や寿司詰め教室がある。そこでは人間の身体が遮蔽材として働き、大地放射線が約20%減少する。満員電車による通勤時間を1時間とし一日1往復、毎月20日通い続けると、年間で $3\mu\text{Sv}$ の減少となる。寿司詰め教室に一日5時間、年間200日居ると仮定すると $30\mu\text{Sv}$ の減少となる。

V. 被ばく線量変化を伴う産業活動

上記までの線量推定はそれらの行為を行う本人が受ける線量に付いて行ったものである。次に示すものはこれらと異なり、ある産業活動を行った場合に世界の人々がどの程度の線量を受けることになるか推定したものである。以下の推定は国連科学委員会の1988年と1993年の報告書^{2, 3)}から抜粋したものであるが、大変誤差の大きなモデル計算であることに留意されたい。

1. 石炭の利用

石炭を採掘することにより、環境中にラドンが放出される。その影響による年間実効線量増加分は $0.0001\sim 0.002\mu\text{Sv}$ と推定される。石炭火力発電に伴う線量推定においてはフライアッシュを取り除く除塵装置の性能によってその放出量は大きく異なる。線量推定に当たっては新旧両方の発電所を考えると共に中国の発電所からの放出量に付いても勘案している。この結果、70%は煙の通過時の吸入による被ばくで、30%は地表降下物からの体外被ばくと食物摂取による被ばくであり、それらの合計は年間一人当たり $2\mu\text{Sv}$ の増加量となる。また、家庭内において暖房、調理に石炭が用いられているが、この場合には煙突に当然のこととして除塵装置はなく、しかも人口密度の高い地域で利用されているためその影響は大きく、年間一人当たり $0.4\sim 8\mu\text{Sv}$ の線量増となる。石炭利用の最後の段階としてフライアッシュの利用が考えられる。フライアッシュの一部はセメントやコンクリート、肥料などに利用されている。これらの利用の結果として体外被ばくが生じ年間一人当たり $5\mu\text{Sv}$ の線量増となる。

2. 石油、天然ガス、地熱発電

石油は灰の成分も少なく、一般的には効率のよい除塵装置を設置していない。線量推定に当たっては効率のよい除塵装置を付けている石炭火力発電所と同じと考えられている。その結果一人当たりの年間線量増加分は $0.01\mu\text{Sv}$ と推定された。天然ガスを用いた発電も灰の放出はなくクリーンなものであるが、ラドンの放出が考えられる。このラドンの放出にともなう線量増過分は年間 $0.001\mu\text{Sv}$ と少ない。地熱発電においては利用する温水中にウラン系列も含まれ、環境中に放出されることになるが、影響の大きなものはラドンの放出である。但し、世界で利用されている地熱発電の総量も少なく、一人当たりの年間線量へ

のその影響は0.001 μ Sv と小さい。

3. リン鉱石の利用

リン鉱石の生産過程において気体中や表層水へ放射性核種が放出される。しかし、川への放出による影響の方が気体中への放出よりも大きい。その中で主な線量寄与をもたらすものは ^{210}Po であり、年間一人当たりの線量増は0.04 μ Sv と推定されている。磷酸肥料中の濃度がリン鉱石の産地に大きく依存するため磷酸肥料の利用に伴う線量寄与もまた産地により大きく異なる。被ばく経路は化学肥料が施された畑での空気吸収線量率の増加とその畑から取れた作物の経口摂取によるものである。現在と同じ割合で長期間磷酸肥料の使用を続けると仮定すると、一人当たりの年間の線量増加は約2 μ Sv となる。磷酸肥料を製造した過程で副産物として生成される磷酸石膏はセメントや壁材、漆喰の製造に天然石膏の代用品として利用されている。これらの利用が過去50年間同じ割合で続いていたと仮定すると、一人当たりの年間線量増加は約10 μ Sv となる。このうちの2/3 はラドンの吸入による体内被ばくである。

4. その他の鉱物資源利用

亜鉛採掘・処理、耐火粘土の採掘・製造、アルミニウム鉱石処理、銅鉱石採掘・処理、鉛鉱石処理等に関する被ばく線量評価がなされている³⁾。主な被ばく経路は採掘・処理の過程で環境中に放出される自然放射性核種からの被ばくである。放出される主な核種はラドンであり、そのほかに ^{210}Pb 、 ^{210}Po が存在する。これらの鉱物資源利用に伴う線量寄与は少なく、全体で一人当たりの年間線量増加は約0.3 μ Sv と推定されている。

VI. まとめ

Table 2 にここで議論した線量評価結果をまとめて示した。線量寄与の大きいものから逆にマイナスの線量寄与を与えるものまでを順に並べた。但し、星印を付けた屋内居住、磷酸石膏の建材への利用、石炭灰の利用、石炭火力発電、磷酸肥料の利用、石炭の家庭内利用はこれらの行為に伴って平均的に世界の人々が受ける線量増加分を見積もったものである。それ以外の項目はそれらの行為を選んだ個人が受ける線量増加分を表している。その中で温泉療法、洞窟観光、富士登山、スキーは一年間の線量変化を示したのではなく、その一回あるいは一連の行為に伴う線量変化分を示したものであ

Table 2. Exposure due to Natural Radiation Modified by Human Activities

Activity	Effective Dose (μ Sv a ⁻¹)
Balneology	1000**
* Indoor(Radon)	500
Well water drinking	330
* Indoor (Terrestrial Radiation)	80
Well water (Radon)	30
Cave excursion	20**
* Building materials (Phosphate gypsum)	10
Mineral water	8
* Fly-ash	5
Mountain climbing (Mt. Fuji)	4**
Ski (one week)	2**
* Coal-fired power plant	2
* Phosphate fertilizer	2
* Domestic use of coal	0.4~8
Smoking (10 cigarettes a day)	0.4
Swimming (one hour a week)	-2
Rush hour train	-3
Crowded class	-30
* Indoor (cosmic rays)	-40
Fisherman	-200

* Annual per caput effective dose

** Effective dose per action

る。

文 献

- 1) T. F. Gesell and M. P. Howard: *Health Phys.*, 28, 361-366 (1975).
- 2) UNSCEAR 1993 Report (1993).
- 3) UNSCEAR 1988 Report (1988).
- 4) ICRP Publ. 39 (1983).
- 5) K. L. Miller and H. L. Beck: *Radiat. Prot. Dosim.*, 7, 185-189 (1984).
- 6) S. Abe, K. Fujimoto and K. Fujitaka: *Radiat. Prot. Dosim.*, 7, 267-269 (1984).
- 7) K. Fujimoto et. al.: Proc. of 5th IRPA in Vienna (1996).
- 8) 原子力安全協会「生活環境放射線」(1992)
- 9) UNSCEAR 1982 Report (1982).
- 10) T. Miki and M. Ikeya: *Health Phys.*, 39, 351-354 (1980).
- 11) 藤元憲三：保健物理 21、3-8 (1986).
- 12) K. Fujimoto ar. S. Kobayashi: Radiation Protection Practice, ed. by Australian Radiation Protection Society (1988).