

ISSN 1881-7297

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ

Vol.1 No.1

人為的に高められた環境放射線専門研究会

2003年1月

日本保健物理学会

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ ISSN 1881-7297
Vol.1, No.1,人為的に高められた環境放射線専門研究会

2003年1月

発行者 日本保健物理学会企画委員会
発行所 日本保健物理学会
〒160-0023 東京都新宿区西新宿3-3-11 杉本ビル3F
NPO 事務センター内 日本保健物理学会事務局
TEL : 03-5339-7286
FAX : 03-5339-7285
E-mail : jhps@wwwsocnii.ac.jp
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jhps/index.html>

人為的に高められた環境放射線専門研究会報告

日本保健物理学会

2003年1月

目次

人為的に高められた自然放射線の概観と専門研究会活動の概要

- 1．はじめに
- 2．専門研究会活動
- 3．研究成果

航空機の利用によって高められる宇宙線被ばく

- 1．はじめに
- 2．二次宇宙線の種類・空間分布・時間変化
- 3．二次宇宙線による被ばく線量
- 4．二次宇宙線被ばくの影響・特に中性子について・
- 5．おわりに

放射線源としての消費財

- 1．はじめに
- 2．消費財
 - (1) 放射性発光製品
 - (2) 電子、電気機器
 - (3) 静電防止装置
 - (4) 煙感知器
 - (5) セラミック、ガラス製品、合金等
 - (6) 健康関連商品
- 3．NORM
 - (1) 代表的なリン鉱石中の放射能濃度
 - (2) リン鉱石産業の概要と環境への放射能放出
 - (3) リン鉱石産業にともなう線量
- 4．おわりに

人為的に高められた自然放射線源としてのラドン

- 1．はじめに
- 2．TENRの要因
 - (1) 換気率の実態
 - (2) 水中のラドン
- 3．ラドンの実態
 - (1) 一般環境
 - (2) 地下施設
 - (3) ラドン温泉
- 4．おわりに

人為的に高められた自然放射線の概観と専門研究会活動の概要

1. はじめに

放射線は自然放射線と人工放射線に大別される。国際放射線防護委員会 (ICRP) は、自然放射線の大部分は線源および被ばくを制御することが不可能かまたは困難であるため、規制の対象から除外してきた。これに該当するものとして、地上での宇宙線、体内の⁴⁰Kからの放射線などがある。ICRP Publ.60の勧告¹⁾では、自然放射線のなかでも被ばくが制御可能である場合には防護の対象となる場合があるという考え方を取り入れた。この考え方は、ICRP Publ.39²⁾に既に示されている。職業被ばくの規制対象となる場合の例として、次の4つの場合をあげている³⁾。

- (1) 規制当局がラドンに対する注意が必要であると明示し、指定した場所 (温泉、ウラン鉱山 (露天掘りを含む)、鉱山坑内、その他の地下作業場) における作業
- (2) 通常は放射性物質とみなされないが、規制当局によって特に指定された有意の量の天然放射性物質を含む物質の取扱い、貯蔵をする作業 (リン酸肥料、リン酸石膏など)
- (3) ジェット航空機業務 (旅行添乗員も含む)
- (4) 宇宙飛行

人間の活動空間は科学技術の進歩によって地下および海底から宇宙へと拡大し続けている。これまで我々が生活してきた地球表面環境とは全く異なるこれらの環境では、放射線のレベルや被ばく形態は変化する。放射線環境を高める可能性のある人間活動としては、以下の活動が挙げられる。航空機の利用は人の長距離移動を容易にし、世界の人々の交流を活発にする。しかし、飛行機の巡航高度は宇宙線強度が高くなる高度であり、搭乗員や旅行者の宇宙線被ばくを増大させる。宇宙空間への人類の進出は輝かしい未来を約束している反面、宇宙飛行士は高エネルギーの宇宙放射線にさらされる。地下空間への人間活動の広がりも、これまでの交通や商業等の浅度地下利用から、40mを超える深さの広大な領域が道路・鉄道・街路・商業エリア・公共施設等々に利用されていくと予想される。地下空間では周囲の岩石・土壌中に含まれる自然の放射性物質による外部被ばくを生じるだけでなく、地下空間に侵入してくる天然放射能のラドンが高濃度になる可能性がある。海底・海中への人類の進出はこれまでとは違った放射線環境となる。そのような放射線環境での健康影響を明らかにしておくことも重要である。一般の居住環境においても、エネルギー事情によって住宅構造の気密化が進み、屋内環境の放射線レベルを高めている可能性がある。さらに、モナザイト等の高レベル自然放射性物質や金属スクラップへの人工放射線源の混入等、いろいろな形で放射線被ばく源が生活環境に入り込んでくる可能性が増大している。人間活動によって高められる放射線環境をいかにして制御し、被ばくを低減していくかは今後重要な課題となる。

2. 専門研究会活動

「人為的に高められた環境放射線」専門研究会では、人間の活動領域の拡大に伴って高められる環境放射線に注目し、個々の研究者によって蓄積されてきた様々な環境での放射線レベル等に関するデータを整理するとともに、人間活動により高められる可能性のある放射線環境を調査し、それらの環境での活動による放射線被ばくを調査してきた。本研究会は2000年度と2001年度に5回の委員会を開催した。委員会で報告された内容はモナザイトのその後と自動車関連の商品紹介 (飯田)

UNSCEAR77年報告に見るTENR概観（藤高）

TENR(Technologically Enhanced Natural Radiation)の要因調査(換気率を中心に)（池田）

放射線源としての消費財について～UNSCEAR等の報告より～（飯本）

ガラパリ周辺の環境放射線調査（藤波）

水中ラドンと線量評価（安岡）

肥料とリン鉱石利用について（山西）

オフィスビルにおけるラドン・ラドン娘核種の挙動（床次）

航空機搭乗における宇宙線線量（古川）

人為的に高められた放射能 - 肥料と放射能 - （小村）

地下水および地下空間中のラドン濃度（田阪）

法令上の問題点（下）

である。

本専門研究会委員の構成は次の通りである。主査 飯田孝夫（名大）、幹事 床次眞司（放医研・放安セ）、飯本武志（東大・原総研）、池田耕一（保健医療科学院）、児島 紘（東京理科大）、小村和久（金沢大）、下 道国（放医研・現藤田保健衛生大）、高田真志（放医研・放安セ）、田阪茂樹（岐阜大）、藤高和信（放医研・放安セ）、藤波直人（京都保健環境研）、古川雅英（放医研・放安セ）、古田定昭（核燃料サイクル）、山崎敬三（京大炉）、山田裕司（放医研・放安セ）。オブザーバーとしての参加者には、山西弘城（核融合研）、安岡由美（神戸薬科大）。

3．研究成果

これらの専門研究会活動で得られた成果を以下の章にまとめる。分担執筆者は次の通りである。「航空機の利用によって高められる宇宙線被ばく」については放射線医学総合研究所の古川雅英、「放射線源としての消費財」については主に東京大学原子力研究総合センターの飯本武志、「人為的に高められた自然放射線源としてのラドン」については主に放射線医学総合研究所の床次眞司が執筆している。

参考文献

- 1) ICRP Publ.60; 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annuals of the ICRP, Vol.21, No.1-3 (1991).
- 2) ICRP Publ.39; Principles for Limiting Exposure of the Public to Natural Sources of Radiation. Annuals of the ICRP, Vol.14, No.1 (1984).
- 3) 草間朋子編, “ICRP1990年勧告 その要点と考え方”, 日刊工業新聞社, 東京(1991).

航空機の利用によって高められる宇宙線被ばく

1. はじめに

航空機の利用に伴う宇宙線被ばくは、人為的あるいは技術的に高められる自然放射線被ばくの典型的かつ最も分かり易い例である。地球大気圏内の宇宙線は、主として陽子から成る一次宇宙線と大気との相互作用によって生じる二次宇宙線であり、その線量率は高度が高くなる（大気深度が浅くなる）につれて大きくなる¹⁾³⁾。したがって、航空機の利用に際しては、地表滞在時に比べて二次宇宙線による被ばく線量が大きくなる。簡単に言えば、これが航空機を利用することによって高められる宇宙線被ばくのカラクリである。

宇宙線は自然放射線であることから、従来は法的規制の対象外として扱われてきた。しかし、航空機利用に伴う宇宙線被ばくが看過できない線量であると判断した国際放射線防護委員会（ICRP）は、1990年に、航空機乗務員の宇宙線被ばくを職業被ばくとして扱うよう勧告した⁴⁾。また、頻繁に航空機を利用する旅行添乗員についても特別の配慮が必要であると指摘した。この勧告以降、規制値設定を視野に入れた宇宙線観測やモデル計算による線量推定が国際的に盛んに行われるようになり、すでに多くの実測結果等が取りまとめられている²⁾⁵⁾。ここでは、航空機飛行高度における宇宙線レベルやその特徴などについて概観する。

2. 二次宇宙線の種類・空間分布・時間変化

地球環境圏に到達する一次宇宙線は、超新星起源の銀河宇宙線と太陽フレア起源の太陽宇宙線である。ただし、地球磁場のシールドを突破して大気頂上に達するのは、主としてエネルギーの大きい銀河宇宙線（1 GeV以上）である¹⁾。この銀河宇宙線によって、大気中には中性子、電子、ミュオン粒子などの二次宇宙線が生じる。

比較的長距離を飛行する商業国際航空便の巡航飛行高度は概ね 9~12 km であり、この高度範囲における二次宇宙線線量率は約 5~8 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ である²⁾。ただし、この線量率範囲は主として中緯度域（30° ~ 50°）におけるものである。高緯度域（>55°）を通過する航空便では 10 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ 以上になる場合があり、一方で赤道域では 2~4 $\mu\text{Sv h}^{-1}$ 程度である。このように、二次宇宙線の線量率は、大気との相互作用（エネルギー減衰）による高度変化のみならず、地球磁場（特に水平分力）の強度分布とその荷電粒子に対する磁気偏向効果により、緯度によっても変化する¹⁾³⁾。

さらに二次宇宙線線量率は、主として太陽活動の変動によって時間的にも変化する。太陽は約11年周期で活動期と静穏期を繰り返しており、これに伴う太陽磁場の強弱により、活動期には地球圏への銀河宇宙線入射量が減少し、静穏期には逆に増加する¹⁾²⁾。これによって、大気圏内での二次宇宙線生成も増減する。つまり、飛行時期によっても宇宙線被ばく線量に増減が生じる。

なお、太陽活動が活発な時期（極大期）にはフレアに伴って太陽宇宙線が増加するが、一般にそのエネルギーは小さいため、地球磁場のシールドを破って大気頂上に達するものは稀である。ただし、巨大なフレアが生じた場合には、高エネルギー太陽宇宙線の増加により、高度20 km では二次宇宙線線量率が 1 mSv h^{-1} に達する可能性がある⁶⁾。

3. 二次宇宙線による被ばく線量

上述から明らかなように、特に高緯度地域を高々度で長時間飛行した場合に二次宇宙線の積

算線量は大きくなる。このような例として、東京 - ニューヨーク路線が挙げられる。実測とモデル計算のいずれもが、ニューヨーク発東京着便で飛行中の積算線量が最大になることを示している^{7),8)}。モデル計算の結果では、積算線量は平均約 $67 \mu\text{Sv}$ (飛行時間約13時間)であり、太陽活動、巡航飛行高度、および飛行時間の差異を考慮した積算線量の範囲は約 $48 \sim 78 \mu\text{Sv}$ である。

路線別あるいは便別の積算線量の他に、勤務実態(搭乗時間)に基づく乗務員の年間積算線量が航空会社等によって評価されている⁹⁾。例えばブリティッシュ・エアウェイズの場合、ロンドン - 日本(大阪もしくは東京)路線の乗務員の60%は年間積算線量が 6 mSv 以上である。またエール・フランスでは、パリ - 東京路線に700時間搭乗した場合、 5.9 mSv y^{-1} である。さらに米国では、ニューヨーク - 東京路線に950時間搭乗した場合、 7 mSv y^{-1} になると評価している。

ICRPは、職業被ばくに関わる放射線防護体系として、いかなる1年間にも 50 mSv を超えるべきではないという条件を付加した上で、5年間の平均値が年あたり 20 mSv (5年間で 100 mSv)という線量限度を勧告している⁴⁾。これを航空機乗務員にも適用すると、前述のように、最も積算線量が大きくなると考えられるニューヨーク・東京路線に950時間搭乗した場合であっても年間線量は 7 mSv 程度であることから、その他の路線も含めて上述の線量限度を超えることは無いと判断される。

ただし、原子炉作業者の年間被ばく線量が平均すれば 2 mSv に満たない現状であるのに対し²⁾、航空機乗務員ではこれより大きくなる可能性がある。また乗務員ではなくとも、例えばニューヨーク・東京間を航空機で1年間に6~10往復するだけで、ICRPが勧告している一般公衆に対する線量限度である 1 mSv y^{-1} を超えることになる。

なお、乗務員が1年間に搭乗勤務する時間は、一般には離陸前に駐機場を出発してから着陸後に駐機場に至るまでの時間(block hours)の年間合計であり、航空会社ごとに、および乗務員ごとに異なっている。年間搭乗時間は $300 \sim 900$ 時間であり、平均約 500 時間である²⁾。また、一般公衆の年間搭乗時間については、全く飛行機に乗らない(0時間)、時折乗る($3 \sim 50$ 時間・平均 10 時間)、頻繁に搭乗する旅行添乗員など($50 \sim 1200$ 時間・平均 100 時間)の概ね3群に分けられる²⁾。現在も世界人口の大半は0時間の群に属しているが、一方で頻繁に搭乗する群の一部は乗務員よりも多く飛行している場合がある。

4. 二次宇宙線被ばくの影響・特に中性子について・

二次宇宙線被ばくの影響を考究する際に特に問題となるのは、中性子の相対的生物効果比(RBE)が過小評価されてきたことである。航空機乗務員の宇宙線被ばくが近年国際的に注目の度合いを高めている理由として、ICRP1990年勧告に加えて、この中性子問題が挙げられる。

航空機乗務員の被ばくの特徴は、被ばく線量全体の $1/3 \sim 1/2$ が中性子に起因すると考えられる点である^{2),10)}。中性子による細胞への影響は、同じ線量であってもX線や γ 線とは異なっている。例えば 10 mGy の γ 線照射は1細胞あたり4個の飛跡を生成するのに対し、同一線量の中性子照射では20細胞あたり1個の飛跡しか生成しないが、生体組織に与えるダメージは中性子の方が大きい¹¹⁾。これは、中性子によって生じた細胞核内のDNA損傷が局所に集中することに起因すると考えられている。

中性子のRBEは、細胞死でみた場合には $2 \sim 8$ 、染色体異常だと $40 \sim 50$ 、発ガンだと $3 \sim 200$ という値が実験的に得られている¹²⁾。また、中性子の効果はそのエネルギーに依存しており、

一般に0.1~2.0 MeVで最大となる¹⁾。さらに、同じエネルギーの中性子であっても、RBEは線量域によって異なり、線量が小さくなるほどRBEは大きくなる。具体例を挙げれば、SDラットに0.43 MeVの中性子を照射すると、良性腫瘍が1 mGyでも有意に増加することが報告されている¹³⁾。これらの動物実験から予想される中性子のRBEを低線量域では100以上であるとする¹⁾と、1 mGyの中性子被ばくは100 mSv以上に相当することになる¹⁾。

5. おわりに

以上に簡単ではあるが、航空機の利用に伴う宇宙線被ばくについて概説した。規制値(線量限度)の設定を念頭においた今後の課題として、以下の諸点が挙げられる。

低線量・低線量率の中性子による生物影響の解明：これに加えて、航空機飛行高度における二次宇宙線被ばくが中性子とその他の電離放射線(ミュオン粒子や電子)との複合的な被ばくであることや、航空機特有の環境条件(低気圧、空気乾燥、時差の発生)などにも十分留意すべきであると考えられる。

中性子のエネルギースペクトルとその時空間分布の把握：実測やモデル計算ならびに測定器開発が進められているが、これら中性子に関する情報の蓄積は不十分であると考えられる。

太陽活動モニタリングの充実：亜音速旅客機の高性能化に伴い、従来よりも高々度(13 km以上)を飛行することが可能になっている。また、さらに高空を飛行する超音速旅客機の利用も今後増加する可能性がある。つまり、フレアによる太陽宇宙線の影響を受ける機会が増加していると考えられる。特に巨大フレア時には高度を下げて飛行すべきであり、運行に際しては太陽活動に関する正確な情報が不可欠である。ちなみに、超音速旅客機にはすでに線量計が搭載されている。また、通信総合研究所による「太陽地球環境予報」など、太陽活動とこれに関連した現象に関する情報配信が行われている。長期的には、地球磁場強度の減少傾向にも注意を払うべきである³⁾。

個人被ばく線量の計測：職業被ばくのカテゴリーで規制値(線量限度)が設定されれば、乗務員個々の被ばく管理が行われることになるであろう。したがって、線質が異なる様々な二次宇宙線(離陸前と着陸後の地表移動時は地殻線を含む)による被ばく線量を航空機内において有効かつ簡便に計測する個人線量計の開発が必要である。また、規制値設定に先立ち、個人単位での被ばく線量データを蓄積し、実態をより詳細に把握しておくことも必要であると考えられる。航空機利用に際しての個人モニタリングを予察的に行っている例もあるが^{3),10),14)}、従来の調査研究の中では少数派である。

航空機の運航状況や利用者に関する統計データの整備：路線、便、利用者のいずれもが増加の傾向にある。例えば、様々な航空関係の統計情報を取りまとめた文献15に基づけば、日本国内線の旅客総数は1975年~1995年の20年間で約3倍に増加し、外国航空会社の日本への乗り入れ便数は昭和63年が636.5便/週であったのに対して平成8年には約2倍の1241便/週に増加した。乗務員のみならず、一般利用者への二次宇宙線の影響を考究する上で、さらに種々の関連統計データの整備・集約が必要であると考えられる。

参考文献

1) 小玉正弘；西村純編著“宇宙放射線”，実験物理学講座 25, p. 474-492 (1986), 共立出版, 東京。

- 2) UNSCEAR; "Sources and Effects of Ionizing Radiation", p. 84-89 (2000), United Nations, New York.
- 3) 古川雅英; 地球規模の自然放射線 (2) - 二次宇宙放射線強度の空間分布 - , 月刊地球, 号外 22, p. 55-62 (1998), 海洋出版, 東京.
- 4) ICRP; Pub. 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annuals of the ICRP, Vol.21, No.1-3 (1991).
- 5) M. Kelly, H. G. Menzel, T. Ryan and K. Schnuer, Eds.; Proceedings of an International Conference on Cosmic Radiation and Aircrew Exposure, *Radiat. Protec. Dosim.*, Vol. **86**, No. 4 (1999).
- 6) T. W. Armstrong, R. G. Alsmiller and J. Barish; Calculation of the Radiation Hazard at Supersonic Aircraft Altitudes Produced by an Energetic Solar Flare, *Nucl. Sci. Eng.*, **37**, 337-342 (1969).
- 7) 古川雅英; 民間航空機における宇宙線線量のポケット線量計による測定 (II) : 国際線の結果, *Radioisotopes*, **50**, 282-288 (2001).
- 8) W. Freidberg, K. Copeland, F. E. Duke, K. O'Brien and E. B. Darden Jr.; Guidelines and Technical Information Provided by the US Federal Aviation Administration to Promote Radiation Safety for Air Carrier Crew Members, *Radiat. Protec. Dosim.*, **86**, 323-327 (1999).
- 9) J. C. Balouet; Ionising Radiation and Cabin Crew Concerns, *Radiat. Protec. Dosim.*, **86**, 319-322 (1999).
- 10) 古川雅英; 民間航空機における宇宙線線量のポケット線量計による測定: 日本国内線の結果, *Radioisotopes*, **49**, 152-158 (2000).
- 11) 島田義也, 久保歩, 柿沼志津子, 西村まゆみ, 荻生俊昭, 藤高和信; 航空機乗務員の発がんリスクに関する考察, *放射線科学*, **44**, 178-183 (2001).
- 12) W. K. Sinclair; Experimental RBE Values of High LET Radiations at Low Doses and the Implications for Quality Factor Assignment, *Radiat. Protec. Dosim.*, **13**, 319-326 (1985).
- 13) C. J. Shellabarger, D. Chmelevsky and A. M. Kellerer; Induction of Mammary Neoplasms in the Sprague-Dawley Rat by 430-keV Neutrons and X-Rays, *J. Natl. Cancer Inst.*, **64**, 821-833 (1980).
- 14) 古川雅英; 民間航空機における宇宙線線量のポケット線量計による測定 (III) : 中国およびブラジル国内線の結果, *Radioisotopes*, **50**, 591-596 (2001).
- 15) 義村利秋, 線量推定に必要な統計データ, 国民線量推定のための基礎調査, **XXII**, 1-19 (1999) 放射線影響協会, 東京.

放射線源としての消費財

1. はじめに

人間活動により、自然あるいは人工の放射性核種を含んだ物質から受ける放射線被ばくが、付加的に高められることがある。そのような物質は大きく3つに分類される。(1)放射性同位元素を意図的に添加したもの、(2)天然の放射性同位元素を利用しているもの、(3)天然の放射性同位元素を比較的多量に含む原料及び材料、である。その代表的な例として挙げられるのが、コンシューマー・プロダクト(消費財)である。その中には煙探知器やグロースターターに代表される一般公衆の生活に強く密着した物品が数多く存在する。また、天然の放射性同位元素を多量に含む物質、いわゆるNORM(Naturally Occurring Radioactive Material)と呼ばれる物質は、産業活動を通して被ばく線量を高めるひとつの要因であることが知られている。これらを産む代表的な産業としては、リン酸塩処理、金属鉱石処理、ウラン採掘、ジルコン砂産業などが挙げられる。

ここでは、国連科学委員会(UNSCEAR)の報告(1977年、1982年、1988年、1992年及び2000年)¹⁾⁵⁾を中心的な参考資料として、消費財の流通状況及びそれらから受ける被ばくの現状等を整理した。またNORMの代表例として、リン鉱石産業に着目し、鉱石の利用による被ばく線量等を具体的に検討し、整理した。

2. 消費財

(1) 放射性発光製品

自発光性塗料として、 ^{226}Ra 、 ^{147}Pm 、 ^3H などが利用されている。その発光原理はシンチレーターによる光変換であり、主に時計の文字盤の蛍光用として用いられている。発光塗料としての使用期間を3年としたとき、相対的に同じ明るさを得るために必要な放射能は、上記3核種の順に、例えば37kBq、300TBq、10TBqと評価されている。このうち ^{226}Ra は発光作用に関係のないガンマ線、ベータ線による放射線が強いため、使用の頻度は減る傾向にある。今でも使用されている製品は、1950年～1960年代初期の製造分がほとんどである。現在は多数の国で、 ^{226}Ra を発光塗料として用いる製品の製造が禁止されている。 ^{147}Pm 及び ^3H は低エネルギーベータ線の放出体なので、関連する被ばく線量は ^{226}Ra に比べて低い。

線量については以下のとおり概算されている。 ^{226}Ra を含有する腕時計の場合、1個あたり3.7kBqのものを1日あたり16時間着用すると、生殖腺線量として約 $40\mu\text{Sv y}^{-1}$ となる。 ^{226}Ra の目覚時計の場合は、1個あたり5.5kBq、1日8時間、2m離れた地点での使用を仮定すると、生殖腺線量として約 $1\mu\text{Sv y}^{-1}$ と評価されている。以下同様に、 ^3H 腕時計の場合は1個あたり40MBqで約 $0.3\mu\text{Sv y}^{-1}$ 、 ^3H 目覚時計の場合1個あたり40MBqで約 $0.1\mu\text{Sv y}^{-1}$ 、 ^{147}Pm 腕時計の場合、制動放射線による被ばくを考え1個あたり1.5MBqで約 $2\mu\text{Sv y}^{-1}$ である。

放射性の発光塗料を利用した時計に関しては、デジタル時計の普及により、ガス状の ^3H 光源が広く用いられる傾向にある。この場合、時計1個あたりに使用される放射能は従来に比べて2桁ほど増えると見積もられているが、使用者の被ばく線量としては従来のトリチウム時計の場合とほとんど変わらないと考えられている。また日本国内における放射性夜光時計の生産量は激減しており(1992年60TBq→1995年34TBq)、海外での生産量も減産の方向と伝えられている。

(2) 電子、電気機器

蛍光灯のグロースターターや過電圧保護装置などに、 ^{85}Kr 、 ^{147}Pm 、 ^{241}Am 、 ^{232}Th などが使用されている。グロースターターには、 $2\sim 5\text{kBq}$ の ^{147}Pm や 3kBq 程度の ^{85}Kr が封入されているが、近年は放射性同位元素を使用しない製品も開発され、放射性の製品の生産量は減少傾向にあるようである。また、主に通信機器などに装備される過電圧保護装置には、 ^{147}Pm が $19\sim 37\text{kBq}$ 封入されている。その他、ネオンランプの表示管(カメラのフラッシュの充電完了表示管など)、レーダーの受信部、体育館の照明機器やグラウンドの夜間照明、液晶プロジェクタの光源など高輝度が要求される光源にも、上記の同位元素が利用されている。

いずれも年実効線量は $2\times 10^{-4}\mu\text{Sv}$ 程度で、使用者の被ばく線量としては無視できるレベルにあるが、事故または装置の廃棄によって、当該装置が破壊されたときに有意な線量が生じるため注意が必要である。

(3) 静電防止装置

静電防止装置では、放射線の電離作用を応用し、荷電物質周辺の空気を電離することで物質自体の電荷を中和している。主にレコード、写真用ネガ、スライド、レンズ等の埃除去用の静電防止装置として利用され、一般的には、 20MBq 程度の ^{210}Po がエポキシ地に結合した微小球体あるいは金属ホイル線源の形状に加工され利用されている。

使用者が受ける ^{210}Po のガンマ線による年間実効線量は約 $0.01\mu\text{Sv}$ と見積もられており、通常は無視できるレベルにある。加えて、これらの製品の使用を禁止している国もあり、現状では公衆を対象にした利用機会は多くなさそうで、被ばくが問題となるケースは少ない。

(4) 煙感知器

煙探知機では、主にアルファ線により電極間の空気を電離し、低電位中で定常的に電流を流しているところに、燃焼生成物が侵入すると、イオンに付着し電流値が減少する。その結果、電極間電位が上昇し、警報が鳴る仕組みになっている。一般建物、工場に限らず、航空機、大型コンピューターの自動火災報知器の設備としても利用されている。

OECD/NEAの勧告により工業用では 0.74MBq 以下、家庭用では 37kBq 以下に放射能の使用が規制されている。煙感知機に使用される主な核種は、 ^{241}Am 、 ^{226}Ra 、 ^{238}Pu 、 ^{35}Kr 、 ^{63}Ni で、例えば、 ^{241}Am の場合は一製品あたり $1\sim 37\text{kBq}$ が封入される。アメリカでは、1978年までに総計1400万個の製品、総放射能として 1.5TBq の ^{241}Am の販売実績がある。しかし近年は放射性同位元素を使用しない煙探知機が開発され、99%以上がそれに代わり、放射性同位元素を用いたものはほとんど生産されていないのが現状である。

OECD/NEAの報告によれば線量の大半は使用中の体外照射によるもので、実効線量として年間 $0.1\mu\text{Sv}$ 以下、したがって被ばく線量としてはきわめて小さい。

(5) セラミック、ガラス製品、合金等

一部のセラミック、ガラス、合金には、ウランやトリウムが添加されている。ウランを添加する目的は、顔料として、またはウランの重い比重を利用することにある。特に、歯科用磁器にウラン化合物が用いられることがあるが、これは天然の歯に近い光沢を得るために、歯のポーセリンに蛍光発光を与えるのが目的である。白熱ガスマントルの場合、1個当たり 0.5g 以下の微量なトリウムを添加するが、その目的は炎により熱せられたとき白色光を発生させるため

である。

光学レンズにウランやトリウム化合物が添加されることがあるが、これは、レンズのもつ光学的特性を変えるためである。さらに、反射を減少させ、または眼鏡に着色するための表面コーティング用としても用いられる。

いくつかの代表例で線量が見積もられており、例えば18W%のトリウムレンズ表面の空気吸収線量率は 10^{-5}Gy h^{-1} となっている。アメリカ光学機器製造業者協会は、眼の水晶に対する被ばくを考慮して、眼鏡レンズに関する自主基準を設けている。角膜胚細胞層に対する最大5mSvの年間線量に相当する放射能濃度としての基準量は、 ^{228}Ac 、 ^{212}Pb 、 ^{214}Pb について 0.5Bq g^{-1} である。その他、口腔上皮に対する線量を考慮し、歯科用磁器の濃度の法令限度として、旧西ドイツでは0.1W%（平均値は0.03W%程度）、アメリカでは0.05W%を採用している。主にキャンプなどで使用されるガスマントルについては、実効線量は無視できる程度であるが、装着時など直接手に触れる場合に注意が必要との報告がある。

(6) 健康関連商品

トルマリンなど、健康に関するマイナスイオン効果の大流行を背景に、トリウム系鉱物（モナザイトサンドなど）を日常生活品等に混入した商品が市場に多数出まわっている。布団、枕、プレスレット、ネックレス、肌着、衣類、腹巻、リストバンド、サポーター、空気清浄機、家庭用温泉用品、飲料水改質剤など、例を挙げればきりが無い。科学的な効能は不明で、生産や流通の実態も不透明、販売に継続性のないものも多い。放射性物質としての含有量を系統的に実測した例はほとんどなく、これら健康グッズに関する現状は未だ明らかにされていない。仕様書や宣伝、チラシ等で放射性物質（「マイナスイオン発生物質」または「温浴効果物質」「アルファ発生物質」等の表現を用いているケースが多いが、説明の内容からそのほとんどがトリウム系鉱物であると判断される）を使用していると明に暗に謳っているものの、数少ない国内の実測例によれば、実際には放射性物質をほとんど含んでいない商品も見受けられる。一方、中には数～数 $10\mu\text{Sv h}^{-1}$ レベルの比較的高い表面線量率を示す商品が存在することも事実で、今後すべき最初のステップとして、市場における流通の規模や公衆の使用の実態に関する早急な調査が望まれる。

3. NORM

(1) 代表的なリン鉱石中の放射能濃度

1977年の国連科学委員会の報告¹⁾によれば、世界のリン鉱石産出量は年間約 $1.3\times 10^{11}\text{kg}$ とされている。リン鉱石は次の2種類に大きく分類される。フロリダ州やモロッコが代表的な産地となる「堆積性リン鉱石」と、旧ソ連コラが代表産地の「火成岩性リン鉱石」である⁶⁾⁻⁸⁾。前者の含有放射能濃度は ^{238}U で 1500Bq kg^{-1} 、 ^{238}U とその娘核種は放射平衡状態にあり、 ^{232}Th や ^{40}K の濃度は普通の土壌程度と評価されている。後者の ^{238}U 濃度は 70Bq kg^{-1} 程度である。

(2) リン鉱石産業の概要と環境への放射能放出

リン鉱石処理作業

リン鉱石処理作業は、1)露天採鉱、2)選鉱、2)乾燥、4)粉碎の4工程により構成される。この間に放射能は粉末の形態で大気中へ放出される。例えば、フロリダの施設からの大気放出量は、 ^{238}U で年間 250MBq （リン鉱石1トンあたり約 90Bq ）程度であり、これを基に鉱石の処理工場が

ら約400m地点での大気中放射能濃度を見積もると、 ^{238}U 、 ^{226}Ra 及び ^{230}Th の平均濃度として約 $200\mu\text{Bq m}^{-3}$ が得られる。(この地域のバックグラウンド濃度は約 $15\mu\text{Bq m}^{-3}$ である。)

リン酸工場での作業

リン酸塩処理産業では、湿式工程と熱処理工程の2工程のうちのいずれかが採用される⁹⁾¹⁰⁾。湿式工程では、 ^{226}Ra は石膏と共沈し除去され、 ^{238}U と ^{230}Th はリンとともに酸の中に残存する。熱処理工程では、リン鉱石に最初に含まれていた放射能のうち少量がリン酸塩に残存するが、大部分はケイ酸カルシウムスラッグに移行し除去される。

このような工場付近の大気中放射能濃度の例として、以下が報告されている。2ヶ所の湿式工場から1000m離れた地点で、 ^{238}U 、 ^{226}Ra 及び ^{230}Th の平均濃度として約 $30\mu\text{Bq m}^{-3}$ 、湿式工場と熱処理工場とが隣接しているケースでの風下約800mの地点での大気中の全アルファ放射能濃度(大部分は ^{210}Po)の年間平均値として、約 $700\mu\text{Bq m}^{-3}$ が得られている。

ウラン回収作業

リン鉱石からウランを回収する際、リン酸からウランを溶媒抽出する手法が採用される。この作業に伴う大気中への放射能放出量は、ウラン生産量が年間50トン程度である場合、 ^{238}U として約400MBqと見積もられている。

(3) リン鉱石産業にともなう線量

リン酸製品

採掘されたリン鉱石あるいは天然産出リン化合物(大陸リン鉱(動物遺体が石灰岩と作用したもの)や島しょリン鉱(海鳥ふんがたい積したもの))の半分~4分の3が、リン酸肥料の生産に使われている。世界のリン酸肥料の生産高は、1977年のデータによれば年間約 $3\times 10^{10}\text{kg}$ (P_2O_5)である。

リン酸肥料の生産、流通、及び使用時における被ばく線量について、旧西ドイツの例が報告されている。リン酸肥料の散布により、農地の空気吸収線量率(バックグラウンドを除く)は、約 $8\times 10^{-4}\mu\text{Gy h}^{-1}$ と見積もられている(^{238}U ; 17Bq m^{-2} 、 ^{226}Ra ; 11Bq m^{-2} 、 ^{232}Th ; 7.4Bq m^{-2})。肥料の輸送と積み込み作業にともなう平均空気吸収線量率は $0.02\sim 0.23\mu\text{Gy h}^{-1}$ 、最大値として $0.8\mu\text{Gy h}^{-1}$ が実測されている。農業用倉庫におけるバックグラウンドを除く平均空気吸収線量率は、例えば $0.09\mu\text{Gy h}^{-1}$ と評価されているが、作業中に肥料粉塵を吸入することによって受ける内部被ばくも考慮する必要があり、実際にはもっと高い線量となるケースも想定される。その一方で、肥料使用量の大小による作物中の放射能の濃度差は認められていない。これは、肥料中の ^{226}Ra の土壌への寄与が小さいことが主たる要因と考えられている。

リン酸製品を家畜飼料に使用することもある。家畜飼料添加物中の ^{226}Ra 濃度は $7\sim 1600\text{Bq kg}^{-1}$ の範囲と見積もられているが、その時に生産される牛乳中のラジウム濃度は最大値で約 25Bq m^{-3} (平常時は約 $3\sim 10\text{Bq m}^{-3}$)である。

副産物と廃棄物

先にも述べたが、リン鉱石に含まれている ^{226}Ra は、湿式工程で大部分がリン石膏に移行する。主に建築材料として利用されるリン石膏中の ^{226}Ra の平均濃度は、例えば約 900Bq kg^{-1} である。一家屋あたり4.2トンのリン石膏を利用すると、新たに付加される空気吸収線量率は $0.07\mu\text{Gy h}^{-1}$ である。この住居の換気率を1回/hとすると、バックグラウンドを除く屋内ラドン濃度は約 10Bq m^{-3} と見積もられる。リン鉱石1トンから生産したリン石膏を建築材料に用いた住居で、4人で50年間生活した場合、集団線量預託は外部被ばくで約 0.02man Gy 、ラドンとその

娘核種による内部被ばくで約0.02man Svと見積もられている。

ケイ酸カルシウムスラッグの ^{238}U 濃度は、リン鉱石とほぼ同レベルである(^{238}U ; 1000Bq kg⁻¹、 ^{226}Ra ; 1300 ~ 1500Bq kg⁻¹、 ^{230}Th ; 740Bq kg⁻¹程度)。このスラッグを含むアスファルト表面の付加線量率は約0.08 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ で、最大値として約0.3 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ が報告されている。また、このスラッグ43W%を含むコンクリート家屋における付加線量率は約0.3 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ と計算されている。ただし、スラッグを用いた家屋24軒の線量実測値0.12 \pm 0.04 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ (0.07 ~ 0.21 $\mu\text{Gy h}^{-1}$)、スラッグを用いない家屋54軒の線量実測値0.09 \pm 0.02 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ (0.05 ~ 1.5 $\mu\text{Gy h}^{-1}$)も報告されているが、両者に統計的な有意差は認められていない。ケイ酸カルシウムスラッグは、道路舗装用の砂利、鉄道の下敷き用物質、家屋の屋根ふき材料などにも利用されている。

リン鉱造成地の利用

米国フロリダのリン鉱跡地600km²のうちの200km²が宅地として利用され、既に4000世帯が実際に生活をしており、このうち672軒で線量等が実測されている。屋外における平均線量率は0.092 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ 、最大値は0.35 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ (対照地区は0.05 $\mu\text{Gy h}^{-1}$)、屋内では床の遮蔽効果の差により線量率に大きなばらつきが見られるが、中には0.17 $\mu\text{Gy h}^{-1}$ をこえる高線量率の家屋も存在している。平衡等価ラドン濃度は4 ~ 500Bq m⁻³、その荷重平均値は約40Bq m⁻³で、近隣の対照家屋の濃度よりも26Bq m⁻³高い結果が得られている。付加線量は年間約1.6mSvと見積もられている。

4. おわりに

ここでは、煙探知器やグロースターターに代表される一般公衆の生活に強く密着した「消費財」、及び、天然の放射性同位元素を多量に含む物質、いわゆる「NORM (Naturally Occurring Radioactive Material) 」について、国連科学委員会の報告等を基に現状の流通状況、予想される濃度、被ばく線量を整理した。

いずれも個人を対象とした場合の線量はそれほど大きくはないため、健康影響が問題になるような状況は考えられないが、中には流通量が多い製品もあり、その場合には集団線量として考慮すべき対象となり得る。現状のデータが不足している健康関連製品は、実態の調査を急がなくてはならないであろう。また、NORMの項で中心的に扱ったリン酸を原料とした肥料については、日本は肥料消費大国であり、肥料生産のために多くのリン鉱石を輸入し、リン酸肥料やその副産物であるリン石膏を生産している事実を鑑みると、こちらも更なる詳細な実態調査が望まれる。リン石膏の利用による線量は大きく、特に建材への利用の際には屋内ラドンの問題と強くリンクすることに注意が必要である。その他、リン酸肥料製造や輸送、使用に常時携わる職業人の線量の評価も必要と考える。

参考文献

- 1)放射線の線源と影響、原子放射線の影響に関する国連科学委員会総会への1977年報告書上巻, p.111-131, アイ・エス・ユー株式会社, 東京
- 2)放射線とその人間への影響、原子放射線の影響に関する国連科学委員会総会への1982年報告書, p.173-226, NIC, 東京
- 3)放射線の線源、影響及びリスク、原子放射線の影響に関する国連科学委員会総会への1988年報告書附属書A, p.215-245, 実業公報社, 東京
- 4)放射線の線源と影響、原子放射線の影響に関する国連科学委員会総会への1993年報告書,

p.65-68, 実業公報社, 東京

5)放射線の線源と影響、原子放射線の影響に関する国連科学委員会総会への2000年報告書, p. 133-135, 実業公報社, 東京

6)“世界科学大事典 15巻”, p.222-226, (1977), 講談社, 東京.

7)“ブリタニカ国際大百科事典 17巻”, p.11-18 (1988), ティビーエス・ブリタニカ, 東京.

8)“農学大事典”(1975), 養賢堂, 東京.

9)“体系 農業百科事典 第1巻”, p.406-409 (1966), 農政調査委員会, 東京.

10)“肥料年鑑 平成12年版”, p.95-101 (2000), 肥料協会新聞部, 東京.

人為的に高められた自然放射線源としてのラドン

1. はじめに

ラドンによる被ばくは、人間にとって地球上で生活している限り避けることのできないものである。土壌や建材中に含まれるウランやトリウムが放射性壊変することによってラドンが生成されるが、一連の壊変系列ではラドンのみが気体として存在するため、土壌などから容易に放出され大気中に移行する。その結果、人体にも取り込まれやすく、その被ばく線量の寄与は他のものに比べて大きい。屋内環境はある程度密閉された空間であり、ラドンがその空間に移行することにより放射能濃度が高められる場合がある。北欧では厳しい気候のため住宅の気密性が高いこと、地質学的にウランやトリウムの天然放射能濃度が高い状況にあることなどの条件が揃っているため、一般住宅のラドン濃度とはいえ、ウラン鉱山や地下作業場などの濃度レベルに匹敵することもあればそれ以上に及ぶ場合がある。先に述べたように、ラドンは被ばくを避けることのできない線源であり、屋内のラドンは、人為的に高められた自然放射線 (Technologically Enhanced Natural Radiation: TENR) の被ばく源として位置づけることができよう。欧米では、屋内ラドンに対して対策レベルを設定し規制している。ラドンを避けることのできない放射線源ではあるが、被ばくを低減することは不可能ではない。わが国でもそのような「介入」を検討すべき時期に来ていると考えられる。

本章では、人為的に高められた放射線源としてのラドンに注目し、その視点からの最近の研究成果を中心に纏めてみた。

2. TENRの要因

(1) 換気率の実態¹⁾

換気は、ラドンや揮発性有機化合物(VOC)をはじめとする室内空気汚染物質による健康問題を考える上で重要な汚染防止策の一つである。中央で空調が制御されるような比較的大規模な建物では、設計上は換気量が精密に計算されているものの、実際の居住状態では、居住者の住まい方によって換気量がゼロという状態も起こりかねない状況にある。さらに一般の住宅では設計時に換気量の検討などほとんど行われておらず、その実態も皆目見当がつかない状況にある。

1921年以降発表された換気測定に関する文献調査によると、わが国の住宅の場合、欧米に比べて換気率の下限値が高い傾向が見られている。下限値はほとんどの場合において窓を閉め切った状態に得られたデータであり、数量的には1時間当たり0.1回以下が高気密性であるといわれる。これによりわが国の住宅は欧米に比べて気密性が悪いことになる。

わが国の一般的な住宅を見ると3つの特徴を挙げることができる。

気候が温暖であるため気密化による省エネ効果が欧米ほど顕著でなく、住宅の気密性能は高くない。

中央制御の空調機を備えているのは稀である。

ほとんどの家が換気口を備えた床下空間を有している。

わが国の換気率の実測例が欧米に比べて少なかったのは、これらの特徴であるがためであるといえる。わが国では、オイルショック以前は省エネ問題に関連した換気率の実態把握はそれほど差し迫った問題とは考えられていなかった。また、室内や床下の換気率が元々高かったため、室内や土壌を発生源とする空気汚染はあまり問題視されなかった。さらに家屋内の居室、

廊下、台所などの空間ごとの換気率が異なるため、ここの空間ごとの把握は勿論のこと家全体としての把握もかなり難しいものとなっていた。しかしながら、オイルショック以降、欧米ほど効率的ではないにしろ気密化による省エネ効果が評価され、わが国でも欧米並の気密性能を備えたものも出始めている。また、居住空間の効率的な使用を目指して、地下空間の居室化も一部では進んでおり、室内汚染の状況はますます欧米に近づきつつあると言える。但し、わが国の相当数の住宅はオイルショック以前の状態にあり、一部では欧米化した住宅数も増加の傾向が見られているが、現在はその過渡的状況にある。そのため、住宅の種類も多種多様で換気率の実態把握の必要性も高まっている。

(2) 水中のラドン

屋内ラドンを高める要因として、屋内における地下水(井戸水)の利用が考えられる。アメリカの環境保護庁(Environmental Protection Agency: EPA)では、水中のラドンに起因する被ばくのリスクを評価した。この計算によると米国では年間168人のがん死亡者をもたらし、そのうち89%は水中から大気中へ移行したラドンを吸入することによって肺がんが引き起こされ、11%は水中のラドンを飲用することによって胃がんが引き起こされるというものである。その結果として、EPAは飲料水中のラドンに対して基準を設けている。それは2段階に設定されており、最大汚染基準値(Maximum Contaminant Level: MCL)は 11 Bq L^{-1} と 148 Bq L^{-1} となる。その指針では、 11 Bq L^{-1} 以下の場合介入は不要、 $11 \sim 148 \text{ Bq L}^{-1}$ の間では何らかの介入が必要、 148 Bq L^{-1} 以上では、水中のラドンを低減するように勧告している。わが国の状況を見渡すと、飲料水中のラドン濃度測定は数多く行われており、その結果の多くがEPAの基準を超えていることが判明しているが²⁾、規制するまでには至っていない。

EPAでは、水中ラドン濃度 10000 Bq m^{-3} (10 Bq L^{-1})から大気中ラドン濃度 1 Bq m^{-3} が生み出されると推定している。すなわち、水中から大気中への移行係数は 1×10^{-4} として与えられ、この係数を用いたリスク評価によって先に述べた基準値設定の根拠になっている。ただし、この係数の妥当性については環境条件によって異なる可能性があり、今後実験的な検討を進める必要がある。

神戸薬大による測定³⁾では、表1にあるように、 $3 \sim 77 \text{ Bq L}^{-1}$ の水中ラドン濃度を有する井戸水を飲料水として利用していると報告されている。飲用による被ばく線量を試算しているが、年間 $3 \sim 88 \mu\text{Sv}$ 程度である。この他、いくつかの地域でも飲料水中のラドン濃度調査が実施されているが、生活用水として利用している家屋を対象として大気中ラドン濃度を並行して実施している例は見当たらない。今後、飲料水中のラドンに対する規制を考えていく上で、系統立てた調査の実施とデータの整理が待たれるところである。

最近の報道によると、井戸水をくみ上げ簡易上水道として30年近く周辺住民が利用してきた地域が存在していたそうである。この地域一帯は花崗岩地帯であり、その上水道中には高濃度のラドンが含まれていることが判明した。ラドン濃度の高い水を生活用水として利用する場合、それが屋内ラドンの発生源となることは容易に予想される。このような地域は他にも存在している可能性が高く、今後長期的な慢性被ばくの実態調査や疫学的な検討によって、放射線による人体への影響に関する興味深い情報が得られると考えられる。

3. ラドンの実態

(1) 一般環境

東京都新宿駅周辺にある5箇所のオフィスビルにおいて、4年間にわたってラドン濃度を調査した例を示す⁴⁾。2ヶ月毎の測定にはパッシブ型ラドン測定器の一つである静電捕集式積分型ラドン測定器を使用した。さらに線量評価パラメータの傾向をつかむため詳細調査を実施し、2軒のオフィスではラドン濃度および平衡等価ラドン濃度の時間変動測定を短期間ではあったが行った。ラドン濃度測定にはドイツ製のパルス型電離箱(AlphaGUARD)を、平衡等価ラドン濃度測定にはカナダ製の連続捕集型WLメータ(Pylon AB-5&AEP-47)を使用した。表2に示すとおり、ラドン濃度は4年間を通じてほぼ一定で季節変動は見出されていなかった。一方、短期間の測定では、中央で空調が制御されるオフィスを中心に測定を行っていることから、就労パターンを示すラドン・平衡等価ラドン濃度の周期的な変動が見受けられている。就業時間帯の平均ラドン濃度と終日の平均ラドン濃度を比べると、その濃度差が大きい。例えば、図1に示すとおり、昼間のラドン濃度が10 Bq m⁻³程度に対して、夜間になると120 Bq m⁻³まで上昇する例が見られた。また週末には空調が停止するため濃度は上昇していくが、平日になると同様のパターンで濃度の変動が見られている。表3にあるように、終日の濃度に比べて就業時間帯の濃度は半分以下となっている。平衡等価ラドン濃度に至っては、1/3～1/4程度まで減少している。それ故、濃度が周期的かつダイナミックに変動している環境において線量評価を目的とした調査を実施する場合、濃度の時間変動を十分考慮すべきであろう。今回、中央空調制御方式のオフィスビルを対象としたラドン濃度調査を実施したが、建築物の高層化や高气密化などを考えると、将来に向けて、このような建造物が増加し、ラドン濃度が高められる可能性は否定できない。

岐阜県の教育機関にある施設内のラドン濃度の変動例(1999年8月～2001年6月まで測定)を図2に示す⁵⁾。地下室を有する施設であるため、地中の平均ラドン濃度で8900 Bq m⁻³、地下室で平均810 Bq m⁻³となっており、地上1階にある居室のラドン濃度は平均でも580 Bq m⁻³に及んでいる。地下室が介在することによって屋内ラドンが高められる様相は、欧米の一般住宅に見られる傾向である。

(2) 地下施設

地下空間を利用した学術施設として有名なものは、岐阜県にあるスーパーカミオカンデ(宇宙素粒子観測装置)である。そこではニュートリノの検出が行われているが、その過程で純水中のラドンが検出の妨害になっており、その低減のための努力がなされている。今後、このような学術目的の施設のみならず、一般的な施設が地下空間へ進出する可能性も高まり、そのような空間でのラドンの低減化研究はますます重要になってくると思われる。

(3) ラドン温泉

ラドン温泉にある浴室は、当然のことながらラドン濃度の高い環境になる可能性が高い。天然に存在するラドン温泉は勿論のこと、温泉を嗜好する日本人は人工的にラドン温泉を作ることもある。ラドン温泉器には、モナザイトがしばしば利用され比較的高濃度のトリウムが含まれる場合がある。入浴する人は、例えば治療目的のためまたは何らかの利益のため、その高ラドン濃度環境に曝されることになるが、そこで働く人にとっては無用の被ばくを受けることになり、「職業被ばく」が生じることになる。このような職場環境における被曝の実態把握は重要であり、わが国のラドンに関する問題は広い観点でかつ慎重な検討が要求される。

4. おわりに

ラドンを人為的に高められる放射線源として捉え、その視点からラドンの変動要因と、最近の報告に基づいてその実態について述べた。換気率については、実態は十分に把握されていないこと、多種多様な住宅様式があるためその実態調査が困難であるが、少なくとも欧米化が進んでいることも事実であり、早急な対応が必要となるであろう。水中ラドンについては、井戸水を生活用水として利用している例は多く、水中ラドン濃度レベルは米国の基準値を上回ることもしばしば見受けられる。しかしながら、水中ラドン濃度測定と大気中ラドン濃度測定を同時に行った例はなく、今後ラドンへの「介入」を考慮する上で、系統立てた調査の実施とデータの集約が必要である。ラドンの実態については、オフィスビルのラドン濃度・平衡等価ラドン濃度の観測、教育施設での高ラドン濃度環境、地下施設におけるラドン、ラドン温泉におけるラドンについて簡潔に述べた。線量評価上の問題、将来に向けての住宅構造の気密化に伴う屋内ラドンの高濃度化は勿論のこと、ラドンの低減化、職業被ばくとしてのラドンという視点での検討がますます重要になってくると考えられる。

参考文献

- 1) 池田耕一；我国住宅の換気量の実態値の推定，人間と生活環境，2(1)，82-91(1995).
- 2) Y. Yasuoka and M. Shinogi: Determination of radon concentrations in natural water in the Rokko area (Japan) and evaluation of its effective dose, Radioisotopes, 49, 551-557(2000).
- 3) 福井正美、堀内公子編；「天然水中ラドン」専門研究会報告書，KURRI-KR-6，京都大学原子炉実験所(1997).
- 4) S. Tokonami, T. Sanada, Y. Yamada, M. Furukawa and H. Yonehara; Radon and its progeny in office buildings, Proceedings of Healthy Buildings 2000, 3, 81-84(2000).
- 5) 田阪茂樹、吉田 均、村瀬由美子、車戸憲二；岐阜大学RI共同研究施設におけるラドンの発生とその原因調査，第1回岐阜大学技術研究・活動報告集，22-25(2000).

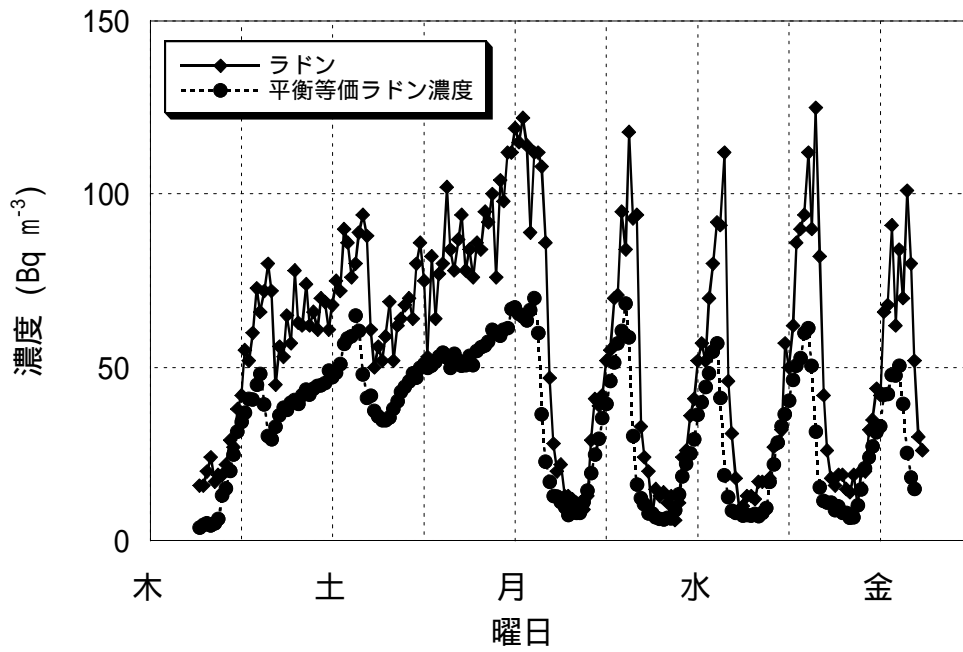


図1 1週間のラドンおよび平衡等価ラドン濃度の時間変動例

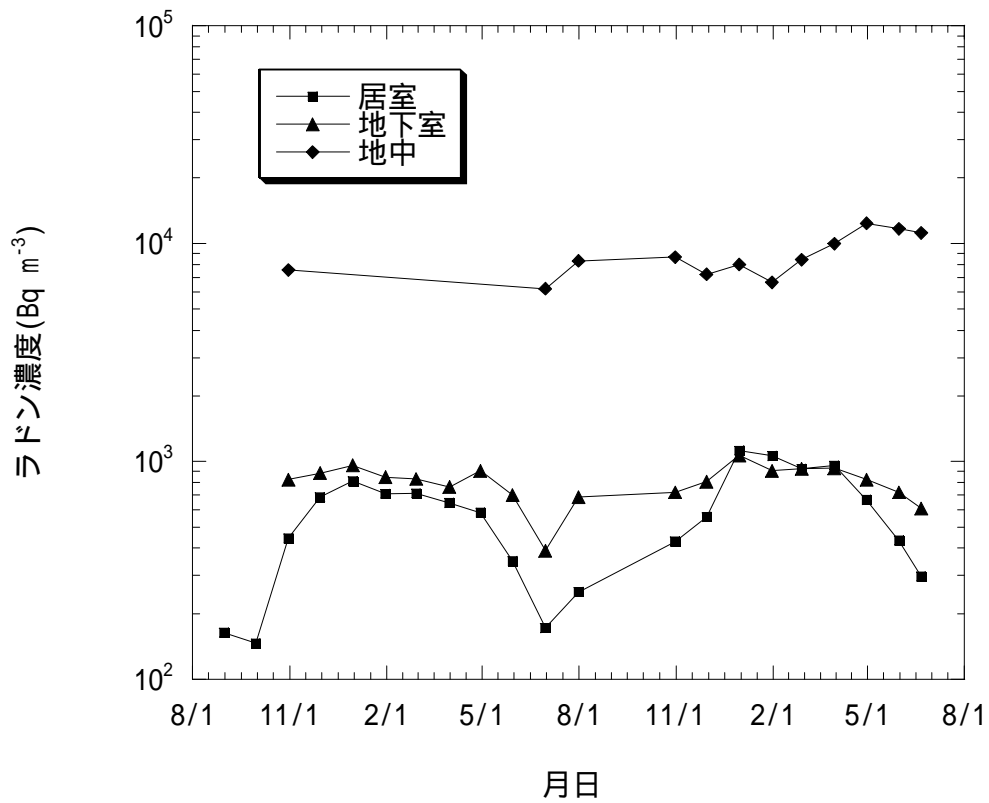


図2 教育施設の各測定点におけるラドン濃度の長期間観測結果の一例

表1 六甲地域における飲用井戸水中のラドン濃度

番号	測定地点	ラドン濃度 (Bq L ⁻¹)	井戸の深さ (m)
1	西宮	2.6	4
2	西宮	3.7	5
3	西宮	4.4	4
4	西宮	6.5	4
5	芦屋	16.7	10
6	神戸 東灘区	35.8	10
7	神戸 灘区	41.1	100
8	神戸 東灘区	41.2	14
9	神戸 東灘区	49.0	60
10	芦屋	50.5	7.5
11	神戸 中央区	69.3	200
12	神戸 中央区	73.9	200
13	神戸 東灘区	78.6	25

表2 オフィスにおける年間平均ラドン濃度

年	1995	1996	1997	1998	備考
オフィスA	59.2	60.7	69.8	59.0	6階
オフィスB	22.6	25.7	29.6	30.4	10階
オフィスC	28.4	31.8	35.0	31.9	1階
オフィスD	19.9	19.3	23.5	18.8	2階
オフィスE	37.3	44.1	50.1	37.3	10階

unit: Bq m⁻³

表3 2つのオフィスにおける線量評価パラメータの実測例

	終日 ラドン濃 度(平均)	就業時間帯 ラドン濃度 (平均)	終日 平衡等価 ラドン濃度 (平均)	就業時間帯 平衡等価 ラドン濃度 (平均)	終日 平衡ファク タ(平均)	就業時間帯 平衡ファク タ(平均)
オフィスA	59.6	30.7	44.5	16.2	0.75	0.60
オフィスB	32.9	10.4	15.6	4.4	0.47	0.42

unit: Bq m⁻³