

<総説>

Review

自然放射線と天然放射性核種および福島原発事故によって
放出された人工放射性核種からの被ばく線量

¹⁾ 弘前大学大学院保健学研究科医療生命科学領域放射線生命科学分野

²⁾ 弘前大学被ばく医療総合研究所放射線物理学分野

³⁾ 琉球大学理学部物質地球科学科

細田正洋¹⁾ *、床次真司²⁾、古川雅英³⁾

(2012年2月23日掲載決定)

Dose assessment on natural radiation, natural radionuclide, and artificial
radionuclide released by Fukushima nuclear accident

¹⁾ Department of Radiological Life Sciences, Graduate School of Health Sciences, Hirosaki University

²⁾ Department of Radiation Physics, Institute of Radiation Emergency Medicine, Hirosaki University

³⁾ Department of Earth sciences, Faculty of Science, University of the Ryukyus

Masahiro Hosoda¹⁾ *, Shinji Tokonami²⁾, Masahide Furukawa³⁾

(Accepted for publication 23 February 2012)

自然界には多くの放射性核種が存在しており、われわれは常に自然放射線による被ばくを受けている。原子放射線の影響に関する国連科学委員会の2008年の報告書では、自然放射線による被ばく源を大地ガンマ線、ラドン、宇宙線および食物摂取に分類しており、ラドンによる被ばくが全体の約50%を占めている。しかしながら一般にはそのことが理解されておらず、平成23年3月11日に勃発した福島第一原子力発電所事故以降、国民の放射線被ばくに対する意識は一気に高まってきている。本稿では、主として大地ガンマ線やラドンに対するわが国の調査結果とそれによって評価された被ばく線量について概説し、さらに福島第一原子力発電所事故による外部被ばく線量の調査結果を報告する。

キーワード：大地ガンマ線、ラドン、宇宙線、食物摂取、福島第一原子力発電所事故

*〒036-8564 青森県弘前市本町66-1

66-1 Hon-cho, Hirosaki 036-8564, Japan

TEL : +81-172-39-5962, e-mail : m_hosoda@cc.hirosaki-u.ac.jp

Various radionuclides are distributed in environmental materials such as soil, rock, and water. People are exposed every day to natural radiation. According to the UNSCEAR 2008 report, Sources of Ionizing Radiation, natural radiation sources are categorized as terrestrial gamma-rays, radon, cosmic rays and food. The effective dose from radon, thoron and its decay products is about 50% of all natural radiation exposure. Consciousness of the Japanese public toward radiation exposure has significantly increased since the start of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident. In this paper, the nationwide survey and dose estimation for terrestrial gamma-rays and radon are summarized. External dose from artificial radionuclides released by the Fukushima accident are also reported.

Key words: Terrestrial gamma-ray, Radon, Cosmic ray, Food, Fukushima Daiichi Nuclear Power Station accident

1. はじめに

平成23年3月11日に起こった、東日本大震災にともなう巨大津波により発生した東京電力・福島第一原子力発電所事故によって、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs などの多くの放射性核種がわれわれの生活環境中に放出された。毎日のように各地域での空間線量率が新聞やテレビで報道され、国民の放射線に対する関心は一気に高まった。そもそも、われわれの生活環境中には事故の有無にかかわらず、さまざまな自然放射線・放射能が存在している。原子放射線の影響に関する国連科学委員会 (UNSCEAR) の2008年の報告書によれば、自然放射線源は大地ガンマ線、大気中のラドン (^{222}Rn)・トロン (^{220}Rn) 及びそれらの壊変生成核種、宇宙線、食品中に含まれる ^{40}K 等に分類されている (1)。そして、大地ガンマ線や宇宙線からの外部被ばく、ラドンや食物中の ^{40}K 等による内部被ばくによる年実効線量の世界平均値はそれぞれ、0.48 mSv、0.39 mSv、1.26 mSvおよび0.29 mSvであり、ラドンによる被ばくが全体 (2.4 mSv) の約50%を占めている。

本稿では大規模な全国調査が実施されている大地ガンマ線とラドンに焦点を当て、線量率・濃度分布の概要を示し、著者らが実施した東京電力・福島第一原子力発電所事故 (以降、福島第一原発事故) の調査結果についても概要を示す。宇宙線、食品中に含まれる ^{40}K 等に関しては概略のみとした。またわが国ではトロンによる線量寄与が比較的高いが (2)、全国的な調査が実施されていないため本論では省略する。さらに1945年から1980年にかけて行われた大気圏核実験、1986年4月26日に旧ソ連で起こったチェルノブイリ原子力発電所事故で放出された人工放射性核種による線量寄与は、現在では天然由来の線量と比べても非常に小さいため省略する。

2. 大地ガンマ線

地球に存在する天然放射性核種は、環境中の全ての物質中に様々な濃度で含まれている。特に、岩石や土壌中には、主として ^{40}K や ^{238}U 系列、 ^{235}U 系列、 ^{232}Th 系列が存在しており、この濃度は一

般に基盤地質に依存するといわれている。人体に対する外部被ばくは、これらの核種に起因するガンマ線によって生じている。この大地ガンマ線による空気吸収線量率は、一般に土壌中の核種濃度に依存しており、地域差が認められている。一般に、地表1 mの高さで評価される空気吸収線量率は、二次宇宙線の寄与を除けば、地表から30 cmの深さまでに分布する天然放射性核種の壊変で生じたガンマ線によるものである (3)。それよりも深い場合は、土壌や岩石自身による遮蔽効果によって、ガンマ線はほとんど地表まで到達しない。

わが国における大地ガンマ線の分布に関する最初の調査は、Yamagataらによって行われた (4)。この調査では、主要道路沿いの土壌を採取し、その土壌中の²³⁸U系列、²³²Th系列および⁴⁰K濃度を定量し、それらの濃度から線量率が算出された。その後、放射線医学総合研究所 (放医研) によって、国民全体に対する自然放射線からの外部被ばく線量を評価するための全国調査が1967年から1977年にかけて実施された (5, 6)。また、放医研による全国データの公開後に、自治体の研究機関や大学において詳細な調査が実施された。近年では、基盤地質と空気吸収線量率の関係をj得る事を目的とした裸地上での全国調査 (文献調査も含む) も実施され、空気吸収線量率の詳細分布図が公開されている (7)。

なお、線量評価の観点からは、屋外における大地ガンマ線の線量率だけではなく、屋内の線量率も重要である。Abeらは、山梨県と鳥根県の木造家屋 (77軒) と鹿児島県と沖縄県の様々な構造形式の家屋 (58軒：うち木造家屋はそれぞれ16軒および15軒) の屋内外の空間線量率の測定を行った (8)。その結果、山梨県、鳥根県、鹿児島県および沖縄県の木造家屋の屋外の空間線量率に対する屋内の空間線量率の比は、それぞれ1.01、0.97、1.08および1.10と報告している。さらに、その算術平均値は1.02 (全135データ) であった。一方、松田らは、名古屋市内のモデルハウスを利用して家屋の構造や建築工法ごとに屋内外の線量率の評価を行った (9)。その結果、鉄筋コンクリート家屋は防火木造家屋より約40%、軽量鉄骨家屋より約60%、防火木造家屋は軽量鉄骨家屋より約10%高く、建築工法による大きな差はなかったと報告している。また、屋外の空間線量率に対する屋内の空間線量率の比は、鉄筋コンクリート家屋、防火木造家屋および軽量鉄骨家屋では、それぞれ 0.95 ± 0.15 、 0.77 ± 0.10 および 0.72 ± 0.13 であった。しかし、屋内線量率に関するデータはまだ少ないのが現状である。屋内での滞在時間が比較的多い事を考えると、屋内線量率のデータの充実が望まれる。

本項以降は、以降では、わが国における屋外での線量率の調査報告についてまとめる。これらは福島第一原発事故による人工放射性核種の環境への影響を評価するための貴重なバックグラウンドデータである。

2.1 放医研による調査結果

放医研による大地ガンマ線の第1次調査 (1967年-1977年) は、全国の屋外 (主に校庭) で行

われた。この調査では、大地ガンマ線の分布を得るために全国を一辺20 kmの碁盤目状に切り、その中に最低でも一測定点が含まれるように測定点が選定された(6)。さらに、国民線量算定用として都市部の人口集中域においては人口10万人あたり1地点となるよう選定されている。また、地質の分布状態によっては測定地点が追加されている。測定には、空気等価壁電離箱の値を基準としたNaI(Tl)シンチレーションサーベイメータが主に用いられた。空気等価壁電離箱の再現性は事前に⁶⁰Co標準線源を用いて確認され、シンチレーションサーベイメータの読み取り値は校正済みの空気等価壁電離箱の値に換算された。さらに、シンチレーションサーベイメータの値の確認は、現地において標準線源を用いて行われた。この測定により、都道府県別、地方および日本全国の平均値が求められた。また、これらの単純平均値は、人口の重み付けをした平均とほとんど変わらないと報告されている。離島など未測定地域に対しては、1991年まで同一手法による調査(第2次調査)が実施され、データが追加された。なお、これらのデータは放医研のホームページ上で閲覧が可能である(10)。文献5および6では、測定結果が照射線量率($\mu\text{R h}^{-1}$)で記載されているが、放医研のホームページでは、地表から1 mの高さにおける空気の吸収線量率(nGy h^{-1})に換算されている。換算方法は公開されていないが、一般に、照射線量率($\mu\text{R h}^{-1}$)に8.7を乗じることで空気吸収線量率(nGy h^{-1})に換算することができる。

表1 大地ガンマ線による空気吸収線量率と年間実効線量(全国および都道府県別)

地方	都道府県名	空気吸収線量率 (nGy h^{-1})	実効線量率 (mSv y^{-1})	測定市 町村数	測定地 点数	測定 点数	地方	都道府県名	空気吸収線量率 (nGy h^{-1})	実効線量率 (mSv y^{-1})	測定市 町村数	測定地 点数	測定 点数	
北海道	北海道	39.5	0.26	57	89	439		滋賀県	73.8	0.48	7	8	46	
東北地方	青森県	26.4	0.17	16	23	111		京都府	52.6	0.34	10	20	108	
	岩手県	37.2	0.24	13	18	89		大阪府	60.8	0.40	17	35	197	
	宮城県	47.2	0.31	11	17	84		兵庫県	59.2	0.39	26	43	233	
	秋田県	47.8	0.31	10	15	76		奈良県	52.5	0.34	9	11	55	
	山形県	45.2	0.30	13	22	110		和歌山県	59.5	0.39	10	11	56	
関東地方	福島県	52.7	0.35	20	28	135	中国地方	鳥取県	58.3	0.38	9	11	57	
	茨城県	52.9	0.35	19	22	111		島根県	36.0	0.24	16	22	94	
	栃木県	55.4	0.36	12	14	71		岡山県	59.4	0.39	12	17	85	
	群馬県	37.1	0.24	14	16	80		広島県	58.9	0.39	16	25	127	
	埼玉県	34.5	0.23	24	26	135		山口県	51.5	0.34	16	24	117	
	千葉県	27.9	0.18	26	44	230	四国地方	徳島県	53.1	0.35	11	17	76	
	東京都	32.5	0.21	22	69	350		香川県	70.3	0.46	8	12	28	
	神奈川県	18.5	0.12	17	37	192		愛媛県	52.3	0.34	16	32	112	
	中部地方	新潟県	59.7	0.39	34	53	265		高知県	62.5	0.41	9	10	41
		富山県	54.8	0.36	10	14	70	九州地方	福岡県	61.7	0.40	17	22	109
石川県		57.5	0.38	12	17	82		佐賀県	60.2	0.39	6	9	41	
福井県		69.7	0.46	9	14	75		長崎県	45.8	0.30	18	19	63	
山梨県		33.5	0.22	8	10	50		熊本県	45.4	0.30	16	19	94	
長野県		50.1	0.33	22	25	126		大分県	52.8	0.35	13	17	85	
岐阜県		79.5	0.52	19	24	123		宮崎県	54.2	0.36	15	20	98	
静岡県		45.4	0.30	26	35	181		鹿児島県	42.8	0.28	35	48	197	
近畿地方	愛知県	64.6	0.42	30	61	313		沖縄県	43.0	0.28	27	45	208	
	三重県	57.6	0.38	17	20	109	全国		50.9	0.33	800	1210	5934	

* これらの結果は放医研が公開している生データをもとに各都道府県の平均値を計算してまとめたものである。

表1に都道府県別のガンマ線の空気吸収線量率を示す。なお、この値には大地からのガンマ線の他に、大気中のラドン壊変生成核種からのガンマ線による寄与も含まれている。表中で示したように、放医研の調査によって得られた全国平均値は51 nGy h⁻¹であるが、都道府県別平均値の最大値は岐阜県の80 nGy h⁻¹、最小値は神奈川県に19 nGy h⁻¹であり、地域差が認められる。このような大地ガンマ線の地域差を生じる大きな要因として特に地質が注目され、糸魚川-静岡構造線を境として線量率が西高東低であり、西南日本の比較的高い線量率が深成岩（主に花崗岩）の分布に、東北日本の比較的低い線量率が火山岩（主に安山岩と玄武岩）の分布に対応していることなどが指摘された（5, 6）。

古川は、放医研で得られたデータを用いて日本列島の空気吸収線量率の分布図を作成し、地質

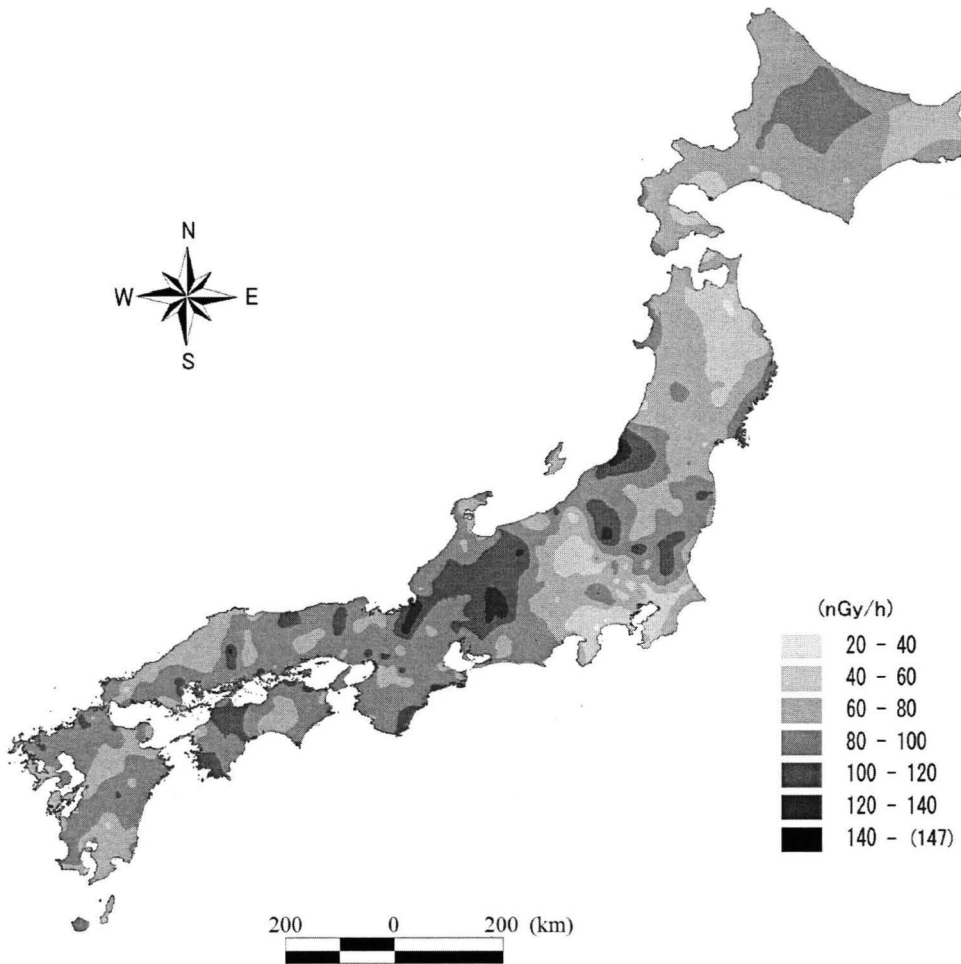


図1 大地ガンマ線レベル（地表から1 mの高さにおける空気吸収線量率）の空間分布。
Furukawa and Shingaki (2012) の図を改変・簡略化したものである。

および土壌分布との詳細な検討を行った(図1)(11, 12)。なお、この分布図では、地形、地質、人口密度などの要素は考慮されておらず、単純内挿によって20 nGy h⁻¹間隔で等値線が引かれている。

UNSCEARの2000年の報告書では、空気吸収線量率(Gy)から実効線量(Sv)への換算係数として0.7 Sv/Gyを用いている(13)。この換算係数は、エネルギーが0.5 MeVのガンマ線に相当するものであり、環境中のガンマ線エネルギー(数10 keV-2.614 MeV)に適用した場合、若干低めに見積もられる可能性がある。したがって、ここでは森内らによって評価された実効線量換算係数(0.748 Sv/Gy)(14)を用いた結果、実効線量の全国平均値は0.33 mSv y⁻¹と評価される(表1)。

なお、原子力安全委員会が報告している環境放射線モニタリング指針によれば、平常時における外部被ばく線量の実効線量換算係数は0.8 Sv/Gy、緊急時では1.0 Sv/Gyを用いる事となっている(15)。

2.2 他の研究機関による調査結果

湊は、日本列島における大地ガンマ線の空気吸収線量率分布の詳細な地図を提示すること、および基盤岩石別に線量率の統計値をまとめることを目的として調査を行った(7)。この調査は、既に大学や地方自治体の研究機関が調査を実施した23道府県以外の都府県(沖縄県を除く)を対象地域として、2002年から2005年までの期間で実施され、既報のデータも含めて4372地点のデータがまとめられた。放医研の調査と大きく異なるのは、測定場所が校庭ではなく、客土などの影響が少ない神社の境内や空き地の裸地上で行われた点にある。一部の道府県については文献データを使用しているため、測定手法の統一性に欠ける。しかし、産業技術総合研究所地質調査総合センター(以下、地調)で得られた河川堆積物のウラン、トリウム、カリウム濃度から計算された線量率と湊によってまとめられたデータが比較されたが、両者の結果はよく一致した。さらに、同一手法で得られた放医研の結果とも比較的よく一致している。さらに、詳細な基盤岩石分類に基づいた結果から、火成岩では花崗岩類や流紋岩が分布する地域の線量率は、安山岩や玄武岩の分布する地域の線量率よりも高い事が認められている。堆積岩では、漸新世以降の堆積岩の線量率はそれ以前よりも有意に低い傾向にある。

大学等の研究機関により、地域単位での測定も実施されており、いずれの調査においても詳細な線量率分布図が作成されている(16, 17)。地域単位でも、ガンマ線の高低分布の主要因として基盤地質が挙げられている。県単位では、主に大学や地方自治体の研究機関によって詳細なデータが得られている(18-23)。さらに、市町村単位のような狭い領域でも、基本的にガンマ線の高低分布は基盤地質に依存する傾向にある(24-26)。放医研の全国調査において欠測であった島嶼や、比較的線量率が高かった島嶼での詳細調査がいくつかの研究機関において実施さ

れた (27-31)。

2.3 地下生活環境

自然放射線からの線量は地域や生活環境によって異なる。特に東京などの大都市圏では、地下鉄や地下街などが発達しており、地下環境下に滞在することも多い。東京都では、通勤にかかる時間が国内でも最も長く、通勤手段として電車の利用率が高い (32)。さらに、東京都内旅客鉄道 (JR東日本、私鉄、東京メトロ、都営地下鉄、都電) の総営業距離の約25%は地下鉄 (東京メトロおよび都営地下鉄) (33) である事からも、地下鉄の利用率が高い事は推測される。

東京都の地下鉄でのガンマ線の空気吸収線量率は、北原らや長岡らによって、それぞれ1990年前後に調査された (34-36)。その後、都内の地下鉄環境は路線が増えたり、区間延長などがあったりと変化してきた。最近では、小川らによって都内12路線 (2008年に開通した13号線副都心線を除く) のガンマ線の調査が実施されている (37)。図2に都内地下鉄線内のガンマ線の空気吸収線量率の変化の一例を示す。この図中の●印は地上のデータである。この図からも分かるように、平常時の地下での線量率は地上での線量率よりも高い傾向 (約1.4倍) にある。これは、地上では主に車体の下方から入射してくるガンマ線が線量率に寄与するが、地下空間では、下方に加えて上方や左右方向からも入射してくるためである。また、河川上を走行している際の線量率は、地上を走行しているときよりも低い。これは、河川土壌から放射するガンマ線が河川水により遮蔽されるためである。表2に都内地下鉄12路線内のガンマ線の空気吸収線量率 (平均値) を示す。表中に示したように、全路線のガンマ線の空気吸収線量率の平均値は29 nGy h⁻¹であった。ここで、

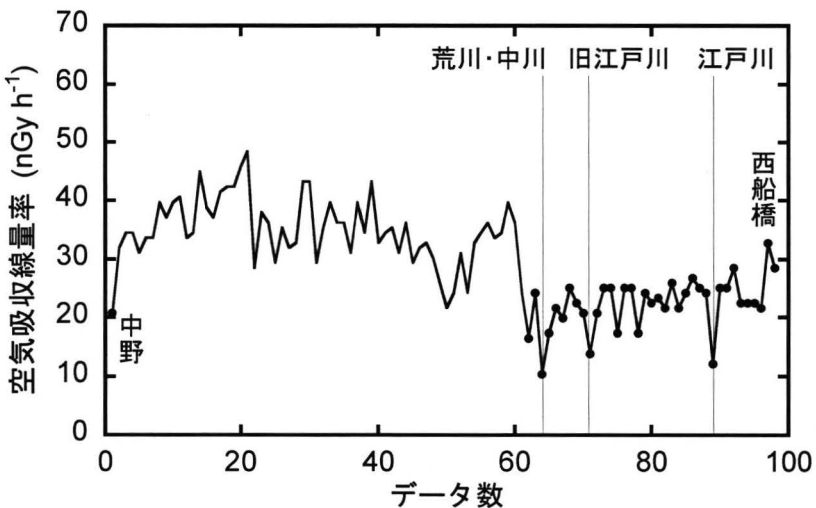


図2 地下鉄線内のガンマ線の空気吸収線量率の変化 (東西線の例) (文献37)

表2 都内地下鉄12路線内の空気吸収線量率の平均値（文献37）

路線名	測定区間	データ数	空気吸収線量率 (nGy h ⁻¹)
銀座線	浅草 ~ 渋谷	67	29.1 ± 4.4
丸ノ内線	池袋 ~ 荻窪	95	30.2 ± 4.7
浅草線	西馬込 ~ 押上	71	33.4 ± 5.0
日比谷線	北千住 ~ 中目黒	85	27.9 ± 5.9
東西線	中野 ~ 西船橋	98	30.1 ± 8.1
三田線	目黒 ~ 西高島平	102	28.1 ± 8.2
千代田線	綾瀬 ~ 代々木上原	79	36.5 ± 8.0
有楽町線	和光市 ~ 新木場	103	30.5 ± 5.9
半蔵門線	渋谷 ~ 押上	69	28.6 ± 9.3
新宿線	新宿 ~ 本八幡	89	30.5 ± 6.4
南北線	目黒 ~ 赤羽岩淵	82	26.8 ± 9.0
大江戸線	光が丘 ~ 都庁前	163	23.3 ± 5.9
全路線		1103	29.1 ± 7.6

地下鉄に毎日1時間乗車するとして、年間の利用日数を230日としたとき、その実効線量率は約5.0 $\mu\text{Sv y}^{-1}$ である。なお、空気吸収線量 (Gy) から実効線量 (Sv) への換算係数には0.748 (Sv/Gy) を用いた (12)。また、ホーム上の線量率は車内よりも約1.3倍高い。つまり、電車の車体によってガンマ線の線量率は30%程度遮蔽される。車体による遮蔽率は、松田による名古屋市営地下鉄での調査においても同様であった (38)。

松田は、名古屋市営地下鉄5路線においてガンマ線の空気吸収線量率の測定を行った結果、その平均値は36.3 nGy h⁻¹であったと報告している (37)。同様の条件で実効線量率に換算すると、約6.2 $\mu\text{Sv y}^{-1}$ である。このように、名古屋市内の地下鉄の平均値は東京都内の平均値と比べると1.2倍程度高い。これは、トンネル内の建設材料中の自然放射性核種濃度や測定手法の違いに起因すると思われる。さらに、名古屋市の栄と名古屋駅周辺の地下街のガンマ線の空気吸収線量率も調査されており、その平均値は56.1 nGy h⁻¹であった。この地下街で1日8時間、勤務日数を230日と仮定したとき、従業員の実効線量率は約9.7 $\mu\text{Sv y}^{-1}$ となる。

3. ラドン

最初に述べたように、ラドンは自然放射線源からの被ばく線量全体の約50%を占めている。ラドンは自然環境中ありとあらゆるところに存在し、われわれは絶えずラドンに曝されている。ラドンは主に土壌、岩石、建材の中に含まれる²²⁶Raが α 壊変する事により発生し、様々な過程を経て大気中に散逸する (39-43)。ラドンは3.82日の物理学的半減期を持つ放射性希ガスであり、化学的に不活性である。ラドンは半減期に従って、壊変生成核種が生成され、大気中に浮遊しているエアロゾルに付着する事により、放射性エアロゾルとなる。このラドン壊変生成核種を呼吸

によって体内に取り込む事で呼吸器系の内部被ばくを引き起こす。その結果、肺がんを誘発する事が知られており、欧米ではタバコに次ぐ危険因子として考えられている (44)。Darbyらによる欧州での13の屋内ラドン濃度の疫学調査の結果、 100 Bq m^{-3} であっても、16% (ラドン測定値の不確実性を補正した結果)の肺がんリスクの増加を示した(45)。近年の生活環境の変化に伴い、一般の住宅内で高ラドン濃度がしばしば観測され、最近では通常家屋の平均の10倍ほどの濃度であっても、発がんの可能性を無視できないとして認識されつつある (46)。

3.1 国際機関の動向

1) 国際放射線防護委員会 (ICRP)

ICRPは、重要な現存被ばく原因である住居や職場環境における屋内ラドン濃度について、1994年にPublication 65として具体的な勧告を行った (47)。この中で住居の対策レベルとして、 $200-600 \text{ Bq m}^{-3}$ を勧告した。なお、この濃度を年間実効線量に換算すると $3-10 \text{ mSv}$ に相当する。それ以降、欧州、中国及び北米で行われた住居内での症例-対照研究でも、ラドン誘発肺がんによる死亡リスクと屋内ラドン被ばくと間に有意な相関がプール解析によって示された (45, 48, 49)。これらの成果を受け、2007年勧告 (Publication 103) では、国の規制当局は、ラドン被ばくに対する防護の最適化を助けるために国の参考レベルを設定する必要があるとしている (50)。そのレベルは、国の経済的・社会的情勢により設定するが、上限値は 600 Bq m^{-3} とした。その後、第1専門委員会にラドン問題に関するタスクグループを立ち上げ、検討した結果を受けて、2009年11月に主委員会はラドンに関する声明を公表した。これは、ICRPが報告書「Lung Cancer Risk from Radon and Progeny」で従来のラドンのリスクを修正したためである。この報告書はPublication 115として最近刊行された (51)。

2) 世界保健機関 (WHO)

WHOは、2005年にラドンプロジェクトを立ち上げ、同年1月には第1回の会合を開催し、19カ国から約40名が参加した (52, 53)。このプロジェクトでは、6つの作業グループを設置し、合計3回の会合の後、2009年には屋内ラドンに関するハンドブックが発行された (54)。このハンドブックの中で、屋内ラドン濃度の参考レベルを 100 Bq m^{-3} とし、これが不可能な場合には 300 Bq m^{-3} を越えないように設定するべきとしている。なお、この 300 Bq m^{-3} のラドン濃度を年間実効線量に換算すると 10 mSv に相当する。これは、名目リスク係数が $2.8 \times 10^{-4} \text{ per WLM}$ (ICRP Publication 65) から $5 \times 10^{-4} \text{ per WLM}$ (ICRP Publication 115) に変更になったためである。

3) その他の国際機関

UNSCEARは、2006年報告書において「住居及び職場環境におけるラドンに関する線源から影響評価まで」をまとめた (55)。この報告書では、線量学的評価と疫学的評価についてまとめられているが、疫学的評価に重点が置かれている。また、国際放射線単位・測定委員会 (ICRU)

では、2011年3月にラドン・トロンおよびそれらの壊変生成核種の計測技術、線量評価、計測における不確実性などをまとめた報告書を作成すべくタスクグループを立ち上げた。数年間の活動の後、報告書が発刊される予定である（56）。

3.2 屋内ラドン濃度の全国調査結果の概要

1) 放医研による調査結果

わが国における最初の屋内ラドン濃度の全国調査は、放医研の小林らのグループと阿部らのグループによって実施された。小林らのグループは、ドイツのカールスルーエ原子力センターで開発されたパッシブ型（ラドンの捕集に動力源を用いない手法）のラドン測定器を用いて、1985年に調査を開始した（57）。この測定器を7000軒以上の家屋に6カ月間設置し、2回の測定を実施する事で1年間の平均ラドン濃度を評価した。異常データを削除した合計5717軒分のデータから評価された屋内ラドン濃度の全国算術平均値は、 $20.8 \pm 18.8 \text{ Bq m}^{-3}$ であった。このラドン濃度から求められた年間の平均実効線量は0.59 mSv（屋内：0.52 mSv、屋外：0.07 mSv。ただし、屋外ラドン濃度を 5 Bq m^{-3} とした場合）であった。なお、最も高かったのは花崗岩が広く分布している広島県（1.33 mSv）であり、屋内ラドン濃度も大地ガンマ線と同様に基盤地質の影響を受ける事が報告された。この調査で使用した測定器はラドンの同位体であるトロンの影響を受け、中間報告では 28 Bq m^{-3} とされUNSCEARの報告書に引用されたが、トロンの影響を再評価して最終的に 20.8 Bq m^{-3} となった。各種パッシブ型ラドン測定器を用いたラドン測定に対するトロンの妨害については、近年Tokonamiによって詳しく議論されている（58）。

小林らの調査開始とほぼ同時期に阿部らによる調査が実施された。阿部らのグループは、名古屋大学で開発された静電捕集法を用いた積分型ラドン測定器を用いた（59）。ラドンの捕集に静電捕集法を用いた場合、湿度の影響を受けて測定値が低めに見積もられるため、この調査では除湿剤として五酸化リンが用いられた。1回当たりの測定期間を2ヶ月間として1か所当たり1年半の調査が実施された。この調査は測定器の数の問題から北海道、秋田県、宮城県、新潟県、千葉県、大坂県、鳥根県、広島県、愛媛県、佐賀県、鹿児島県、沖縄県で実施され、各道府県に30-40台の測定器が設置され、合計250軒の調査が行われた。測定軒数は少ないものの、地域ごとの季節変動、屋内外比などのデータが得られた。この調査で得られた屋内外ラドン濃度はそれぞれ、 10 Bq m^{-3} および 5 Bq m^{-3} であり、年間の平均実効線量は0.45 mSvと評価された。

2) 日本分析センターによる調査結果

小林らの調査結果にはトロンの影響が含まれると考えられること、国内において高トロン濃度の住宅が検出されたこと（60, 61）などから、日本分析センターは科学技術庁（当時）の委託により1992年から1996年までの5年間にわたり屋内ラドン濃度の全国調査を実施した（62）。調査には放医研のDoiらによって開発されたパッシブ型ラドン・トロン弁別測定器（検出部：ポリカー

ボネイドフィルム) が用いられた (63)。測定器は1都道府県当たり20家屋設置され、測定器は3ヶ月ごとに交換され、季節変動も評価された。測定値の信頼性を担保するために、英国放射線防護庁 (NRPB) および米国環境測定研究所 (EML) においてラドン濃度の校正実験も実施された。5年間で940家屋の調査が実施され、地方別ラドン濃度や家屋構造別ラドン濃度などが検討された。最終的に1年間を通じて測定ができた899家屋で得られたラドン濃度の算術平均値は $15.5 \pm 12.7 \text{ Bq m}^{-3}$ であった。この値を用いて評価された年間の平均実効線量は0.45 mSv (屋外ラドン濃度を 5 Bq m^{-3} としている) であった。その後、日本分析センターは同様の測定器を用いて1997年から1999年にかけて全国705地点での屋外ラドン濃度の調査を実施し、その算術平均値として 6.1 Bq m^{-3} (696地点) を得ている (64)。この値を用いた場合の年間の平均実効線量は0.47 mSvである。さらに、2000年から2003年にかけて事務所 (287ヶ所)、工場 (178ヶ所)、学校 (185ヶ所) および病院 (50ヶ所) の屋内ラドン濃度の調査を実施した。その結果、それぞれの平均ラドン濃度は $22.6 \pm 17.0 \text{ Bq m}^{-3}$ 、 $10.1 \pm 8.3 \text{ Bq m}^{-3}$ 、 $28.4 \pm 24.5 \text{ Bq m}^{-3}$ および $19.8 \pm 24.4 \text{ Bq m}^{-3}$ であり、全700ヶ所の平均値は $20.8 \pm 19.5 \text{ Bq m}^{-3}$ であった (65)。さらに、各職場での所在係数を0.17 (約4時間/1日) とした場合の年間実効線量は、それぞれ0.12 mSv、0.054 mSv、0.15 mSvおよび0.11 mSvとなり、既に報告されている住居内および屋外ラドン濃度を加味すると概ね0.42–0.52 mSvと評価されている。

3) 国立保健医療科学院による調査結果

放医研および日本分析センターによる調査では、コンクリート家屋のラドン濃度は木造家屋よりも高く、1970年代の中頃以降に建築された家屋が高い傾向を示した。国立保健医療科学院ではラドン濃度の増加傾向が継続しているのかを確認するために、2007年から2010年までの期間、屋内ラドン濃度の全国調査を実施した (66)。調査には、放医研とハンガリーのRadsys社とで共同開発されたパッシブ型ラドン・トロン測定器 (通称Raduet) が用いられた (67)。Raduetは3900軒の家屋に設置され、半年ごと (春夏期と秋冬期) に測定器を取り換える事でラドン濃度を評価した。この調査では、各都道府県別および家屋構造別のラドン濃度も評価された。最終的に、3461データから求められた屋内ラドン濃度の算術平均値は、 $15.2 \pm 17.0 \text{ Bq m}^{-3}$ であり、日本分析センターの結果とほとんど差が認められなかった。また、季節変動の補正と人口で重み付をした場合の算術平均値はそれぞれ、 $14.3 \pm 14.7 \text{ Bq m}^{-3}$ および $13.7 \pm 12.3 \text{ Bq m}^{-3}$ であった。さらに、1980年代中頃に建築された家屋のラドン濃度が最も高く、それ以降に建築された家屋のラドン濃度は減少傾向にある事も報告された。

4. 宇宙線および食物摂取

4.1 宇宙線

宇宙線 (地球大気圏外の一次宇宙線) は、大きく銀河宇宙線と太陽宇宙線に分類される (68)。

前者は超新星の爆発、後者は太陽フレアなどによって生じる高エネルギー粒子（陽子、 α 粒子、電子など）である。地球大気圏に到達した一次宇宙線は大気成分（窒素や酸素など）と相互作用する事により、二次宇宙線が生じる。二次宇宙線は、主に μ 粒子から成る電離成分と中性子成分とに分類される。二次宇宙線による被ばく線量は海拔高度や地磁気緯度によって異なる（68）。古川によれば、海拔高度の電離成分による空気吸収線量率は約30 nGy h⁻¹であり、富士山頂付近では約120 nGy h⁻¹と4倍程度の高くなる（69）。一方、中性子成分による空気吸収線量率は概ね一桁程度小さい。古川が実施した東京湾からインド洋南西部（シンガポール経由）の洋上観測の結果によれば、電離成分による空気吸収線量率は赤道近辺で最小値（約24 nGy h⁻¹）を示し、南北に離れるにつれてその値は大きくなっている（69）。藤元らは、O'Brienの計算コードを用いてわが国の全市町村（3372市町村）の二次宇宙線の線量率を推定した（70）。都道府県別の平均値でみると、最大値を示したのは長野県であり、電離成分と中性子成分の線量率はそれぞれ33.9 nSv h⁻¹および10.1 nSv h⁻¹であった。一方、最小値を示したのは沖縄県であり、それぞれ25.6 nSv h⁻¹および5.7 nSv h⁻¹であった。これらの結果は標高や地磁気緯度が反映されたものと考えられる。また、わが国の人口荷重平均値は電離成分が29.2 nSv h⁻¹、中性成分が6.1 nSv h⁻¹であり、これらを年間線量に換算するとそれぞれ、0.21 mSvおよび0.045 mSvであった。

4.2 食物摂取

日本人のラドンを除く自然放射線源からの内部被ばくの寄与は⁴⁰Kが最も多く、これに²¹⁰Pbおよび²¹⁰Poを加えると全体の約85%を占めている（71）。ほとんどの食物中にはカリウムが存在しており、その0.0117%の天然存在比で⁴⁰Kが存在する（72）。さらに体内のカリウムは恒常性によって常に一定量を維持しているため（71）、体内中の⁴⁰Kも同様に一定値を維持している事になる。一般にカリウムは脂肪組織に含まれないため、年齢とともに体内中のカリウム濃度は減少傾向を示す報告がある（73）。日本人の成人男子の⁴⁰Kによる年間実効線量は約0.2 mSvと報告されている（70）。日本分析センターによって食品中の放射能調査が実施され、その結果より評価された日本人の預託実効線量は0.80 mSvであった（74）。その概要は以下の通りである。日本分析センターは、1989年から2004年までの期間に約240の食品中の⁹⁰Sr、¹³⁷Cs、²³⁹⁺²⁴⁰Pu、²³⁸U、²³²Th、²²⁶Ra、²¹⁰Pbおよび²¹⁰Poの放射能濃度を得た（この中に⁴⁰Kは含まれていない）。特に日本人が多く摂取している137の食品に絞り、それぞれの核種による預託実効線量を計算している。²¹⁰Poによる線量寄与が非常に大きく、その値は0.73 mSvと全体の91%を占めていた。この要因として、日本人が好んで摂取している魚介類中に²¹⁰Poが多く蓄積しているためであるとしている。

5. 福島第一原発事故

2011年東日本大震災にともなう巨大津波により発生した福島第一原発事故の概要に関しては多

くの報告や書籍がある (75, 76)。さらに、本誌の第46巻第2号においても「東日本大震災特集」として、多くの研究者によって放出された放射能、食品汚染、リスクコミュニケーションなど視点から報告されている (77) ので、ここでは著者らの調査結果に基づく線量評価を中心として概要を示す。

5.1 福島第一原発事故による放射性核種の放出と空間線量率

この事故によって原発建屋から一般環境中に多くの人工放射性核種が放出された。村松らは、事故直後の2011年3月15日から17日および4月8日に福島県内の高速道路上でNaI (TI) およびLaBr₃シンチレーション検出器を用いて波高分析を行った (78)。3月15日の福島県郡山市での波高分布では¹³³Xe、¹³²Te、¹³²I、¹³¹I、¹³⁴Csおよび¹³⁶Csが検出されている。また、この時点では¹³²Iの668 keVの全エネルギー吸収ピークが障害となり、¹³⁷Cs (662 keV) の解析が出来なかった事を報告している。4月8日の観測では短半減期核種である¹³²Teと¹³²Iおよび希ガスである¹³³Xe は検出されず、¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁶Csおよび¹³⁷Cs が検出された。さらに、村松らは3月15日の放射性核種沈着直後の空間線量率は、ほとんど¹³²Teとその壊変生成核種である¹³²I からのガンマ線によるものであったと結論付けている。この結論は、反町らによる調査結果とも一致している (79)。なお、これらの核種は国内のみではなく、欧米各国でも検出されている (80-85)。著者らは、青森県弘前市から福島県福島市までの高速道路上において走行サーベイを行い、空間線量率の経時変化を評価した (86)。測定は、2011年3月16日、4月11日および4月25日に1インチのNaI (TI) サーベイメータを用いて実施された。3月16日の調査では低かった地域 (岩手県南部) での空間線量率の上昇が4月11日の調査では認められた。これは、3月16日から4月11日までの期間に、放射性ブルームがこの地域を通過した事を示唆している。なお、この調査は現在も継続的に実施されている。

福島第一原発事故以来、東日本の各地で空間線量率の上昇が認められており、多くの自治体で継続的なモニタリングが実施されている。表3に福島第一原発事故前後の東京都内における空間線量率の比較結果を示す。事故前のデータは、著者らが2003年8月25日、27日、29日および9月1日から2日に実施した走行サーベイの結果である。この調査では都内全市町村区の空間線量率 (空気吸収線量率) が測定され、その結果から23区内よりも多摩地区の空間線量率が高い傾向を示す事が明らかになった。事故後のデータは、東京都が6月に実施し、ホームページ上に公開している「都内100箇所の空間放射線量の測定結果について (第7報)」を用いた (87)。より詳細なデータは各市町村区のホームページ上で公開されている。福島第一原発事故後の墨田区、葛飾区、江戸川区、足立区など23区北部では事故前と比べて2から3倍程度上昇している。現在存在する核種は¹³⁷Cs (物理学的半減期: 約30年) および¹³⁴Cs (物理学的半減期: 約2年) であり、それぞれの濃度がほぼ1対1で存在しているとする (88)。ICRUのReport 53によれば、¹³⁷Csと¹³⁴Csの線量換算係数はそれぞれ、 $0.00268 (\mu\text{Sv h}^{-1}) / (\text{kBq m}^{-2})$ および $0.00685 (\mu\text{Sv h}^{-1}) / (\text{kBq m}^{-2})$ であ

表3 福島第一原発事故前後の東京都内の空間線量率の比較

市町村区名	人口 ^{*1} (人)	事故前の 有効データ数	事故前の 空間線量率 (nGy h ⁻¹)	事故後の 空間線量率 ^{*3} (nGy h ⁻¹)	線量率の増加比 (事故後/事故前)
千代田区	47,740	10 (5)	47	70	1.5
中央区	126,496	18 (4)	45	60	1.3
港区	207,049	11 (7)	48	60	1.3
新宿区	325,262	16 (5)	48	60	1.3
文京区	208,833	18 (2)	48	70	1.5
台東区	177,920	15 (5)	47	90	1.9
墨田区	247,833	13 (3)	47	105	2.2
江東区	465,733	11 (1)	44	73	1.7
品川区	367,667	15 (2)	46	45	1.0
目黒区	268,962	12 (9)	52	50	1.0
大田区	694,668	17 (2)	46	56	1.2
世田谷区	881,231	16	49	44	0.9
渋谷区	206,687	14 (9)	49	40	0.8
中野区	312,732	11 (1)	55	50	0.9
杉並区	549,211	14 (5)	54	50	0.9
豊島区	286,483	9	50	60	1.2
北区	333,739	18 (2)	48	95	2.0
荒川区	204,521	19	44	80	1.8
板橋区	535,222	24 (1)	47	60	1.3
練馬区	716,439	18 (4)	50	60	1.2
足立区	684,531	16	46	100	2.2
葛飾区	442,118	18	40	125	3.1
江戸川区	677,835	15 (2)	40	110	2.7
八王子市	581,670	31 (1)	50	44	0.9
立川市	179,848	15	51	45	0.9
武蔵野市	138,675	7 (1)	53	40	0.7
三鷹市	186,159	8 (3)	54	50	0.9
青梅市	139,183	12	49	45	0.9
府中市	255,686	9	51	50	1.0
昭島市	112,286	9 (1)	52	40	0.8
調布市	224,415	18	50	45	0.9
町田市	427,531	23	46	40	0.9
小金井市	119,596	9 (2)	53	50	0.9
小平市	187,124	7	50	45	0.9
日野市	180,796	13	50	45	0.9
東村山市	153,609	6	51	60	1.2
国分寺市	119,948	11 (2)	56	50	0.9
国立市	75,468	8	52	50	1.0
西東京市	199,149	11 (1)	49	40	0.8
福生市	59,159	8	53	70	1.3
狛江市	78,488	6	50	40	0.8
東大和市	83,684	6	51	50	1.0
清瀬市	74,250	7	51	40	0.8
東久留米市	116,035	7	47	60	1.3
武蔵村山市	70,363	13	50	60	1.2
多摩市	146,587	6	49	50	1.0
稲城市	85,707	8	46	50	1.1
羽村市	56,835	6	49	50	1.0
あきる野市	81,071	6	55	60	1.1
瑞穂町	33,305	8 (1)	50	40	0.8
日の出町	16,847	9	52	50	1.0
檜原村	2,473	10 (6)	55	70	1.3
奥多摩町	5,873	22 (18)	61	50	0.8
合計もしくは 平均値	13,160,732	665 (105) ^{*2}	50 ± 4	58 ± 20	1.2

*1 「東京都の人口(推計)」の概要（平成23年12月1日現在）より

<http://www.toukei.metro.tokyo.jp/jsuikai/2011/js110f0000.pdf>

*2 ()内の数値は、有効データ数のうち、崖・トンネル・建物のデータ数を示す。

*3 都内100箇所の空間放射線量の測定結果について（第7報）より

るため (89)、それぞれの線量寄与率は概ね0.25および0.75となる。これらの値は、われわれの福島県内における野外調査結果とも一致している (86)。例えば、この結果を考慮して葛飾区の平均値 (125 nGy h^{-1}) から10年後の空間線量率を推定すると、 59 nGy h^{-1} となる。なお、葛飾区の空間線量率に関しては別途詳細な報告がされている (90)。

5.2 福島県内の高線量率地域での外部被ばく線量評価

著者らは、2011年4月11日から15日までの5日間で高レベル汚染地域における線量評価を実施した (86)。空間線量率の測定は走行サーベイによって実施し、特に空間線量率が高い飯館村および浪江町では詳細に測定した。文部科学省と米国エネルギー庁による航空機サーベイによって得られた空間線量率マップと同様に原発から北西方向 (浪江町および飯館村) の空間線量率が高い傾向を示した。この調査によって見出された最大汚染地点に2011年3月12日から2012年3月11日までの1年間居住し続けた場合の累積外部被ばく線量は、幾つかの仮定が含まれているが約194 mSvと推定された。その一方、福島市、郡山市および二本松市に避難したとした場合の住民の累積外部被ばく線量は、最大でも68 mSv程度であると見積もられ、今回の避難は放射線防護学的観点から正当化されるであろう。

一方、今回の福島第一原発事故によって多くの大学・研究機関が避難住民のスクリーニング検査などに参加している。著者らが所属する弘前大学も文部科学省の要請により3月15日以降、1チーム当たり4日程度の滞在期間で多くの教職員が派遣された。Monzenらは、福島県滞在期間中の派遣職員の外部被ばく線量を測定した (91)。この結果より、ボランティアの1回参加あたりの累積外部被ばく線量は最大でも $100 \mu\text{Sv}$ 程度 (ただし、3月15日からの参加者) であり、3月下旬以降は $20 \mu\text{Sv}$ 以下であった。

5.3 環境試料の汚染分布の画像化

福島第一原発事故に伴う環境試料中の放射能濃度の報告はいくつかみられる (92, 93)。高純度Ge半導体検出器は優れたエネルギー分解能をもっているため、事故直後の多くの核種が存在するような場合の核種分析に適している。しかし、対象物の汚染分布の評価には適さず、このような場合にはイメージングプレートを用いたオートラジオグラフィが有用である。イメージングプレートは環境試料の核種分析はできないものの、汚染分布を視覚的に評価する事が可能であり、除染計画を立てるのに有効的な手段の一つである (94)。図3にイメージングプレートの実用例を示す。左の図は、ドクダミ、ツバキの古葉および新葉とそのイメージングプレートによる画像、右の図はヒノキおよびスギの葉とそのイメージングプレート画像である。例えば、ツバキの古葉では放射性核種による汚染が明瞭であるが、新葉では汚染が認められず、フォールアウトの影響を受けていない事が視覚的にわかる。

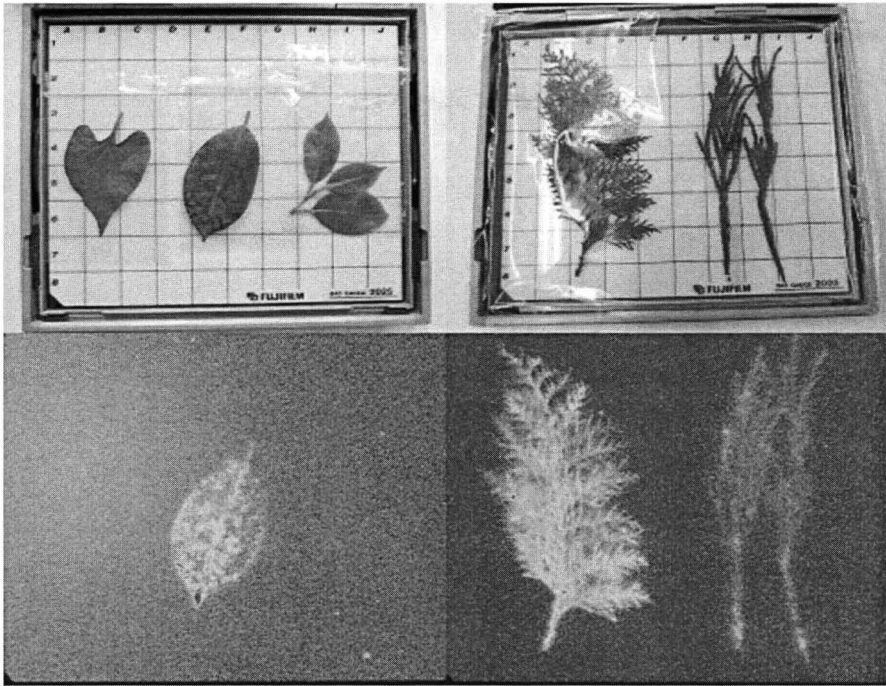


図3 イメージングプレートの実用例（画像提供：首都大学東京 福士政広教授）。
左上：ドクダミ、ツバキ古葉、ツバキ新葉（左から）。左下：そのイメージングプレート画像。
右上：ヒノキとスギの葉（左から）。右下：そのイメージングプレート画像。

6. おわりに

福島第一原発事故以前より、われわれは自然環境中に存在する種々の放射性核種からの放射線による被ばくを受けている。残念ながら、自然放射線による被ばくの実態に対する国民の関心はそれほど高くなかったように思う。今回の事故を受け、大地ガンマ線やラドンといった自然放射線および放射性核種の空間分布や被ばくの実態を整理し、その情報発信し、日本国民が共有する事が放射線被ばくを理解する上で極めて重要であることを改めて実感した。現在、福島県民の外部被ばく線量については明らかになりつつある。被災地の復興とともに、限られた情報から放射性ヨウ素による内部被ばく線量を調査し、評価することが今後の重要な課題である。

謝辞

本総説の執筆にあたり、藤田保健衛生大学の下道國客員教授には文献を提供して頂くとともに多くの助言を頂きました。首都大学東京大学院人間健康科学研究科の福士政広教授には、各種IP画像を提供して頂きました。本稿の一部は財団法人原子力安全研究協会の許可を得て、出版予定

である生活環境放射線（国民線量の算定）の原稿を加筆・転載しました。最後に、本稿執筆の機会を与えて頂いた、弘前大学大学院保健学研究科の柏倉幾郎教授に感謝致します。

参考文献

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly, with scientific annexes Volume I: Report to the General Assembly, Scientific Annexes B Sources and effects of ionizing radiation. p. 223-463, United Nations, New York, 2008.
2. 下道國. 福島第一原発事故の環境影響速報－エアロゾル状放射能の健康影響－. 環境技術. 40: 232-233, 2011.
3. Beck, H. L. The physics of environmental gamma radiation fields. *The Natural Radiation Environment II*. 101-134, 1972.
4. Yamagata, N., and Iwashima K. Terrestrial background radiation in Japan. *Health Phys.* 13: 1145-1148, 1967.
5. Abe, S., Fujimoto, K., Abe, M., and Fujitaka, K. Extensive field survey of natural radiation in Japan. *J. Nucl. Sci. Technol.* 18: 21-45, 1981.
6. 阿部史朗. わが国における自然の空間放射線分布の測定. 保健物理. 17: 169-193, 1982.
7. 湊進. 日本における地表 γ 線の線量率分布. 地学雑誌. 115: 87-95, 2006.
8. Abe, A., Fujimoto, K., and Fujitaka, K. Relationship between indoor and outdoor gamma ray exposure in wooden houses. *Radiat. Prot. Dosim.* 7: 267-269, 1984.
9. 松田秀晴, 深谷光春, 湊進. モデルハウスの屋内・外自然空間放射線線量率の測定. 保健物理. 25: 385-390, 1990.
10. 放射線医学総合研究所ホームページ. 全国空気吸収線量率データベース, <http://www.nirs.go.jp/db/anzendb/ERLABE/ErlabeDB.php>, 2010年9月9日閲覧可.
11. 古川雅英. 日本列島の自然放射線レベル. 地学雑誌. 102: 868-877, 1993.
12. Furukawa, M., and Shingaki, R. Terrestrial gamma radiation dose rate in Japan estimated before the 2011 Great East Japan Earthquake. *Radiat. Emer. Med.* 1: 11-16, 2012.
13. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources and effects of ionizing radiation UNSCEAR 2000 report to the general assembly with scientific annexes Volume I Sources. p.89-93, United Nations, New York, 2000.
14. 森内茂, 堤正博, 齊藤公明. 自然放射線における空気吸収線量から実効線量当量への換算係数の評価. 保健物理. 25: 121-128, 1990.
15. 原子力安全委員会. 環境放射線モニタリング指針 平成20年3月(平成22年4月一部改定). http://www.nsc.go.jp/shinsajokyo/pdf/100327_kankyo_monita.pdf, 2011年12月26日閲覧可.
16. 下道國, 湊進, 杉野雅人. 東海3県の環境放射線のレベル調査. 日本原子力学会誌. 41: 954-964, 1999.

17. 杉野雅人, 細田正洋, 古川雅英, 福士政広, 下道國. 関東地方の地表ガンマ線分布. *Radioisotopes*. 56: 315-320, 2005.
18. 平井英治, 玉利俊哉, 佐伯國男, 岡村正紀, 松岡信明, 高島良正, 松田広継, 広陽二, 大林誠. 電離箱検出器およびNaI (Tl) シンチレーション検出器を用いた福岡県の自然放射線量測定. *Radioisotopes*. 44: 864-855, 1995.
19. 長門徹, 丹治辰男, 沖野典夫, 蛭田陽一, 望月定. 車を利用した北海道における環境 γ 線測定. *保健物理*. 32: 295-304, 1997.
20. Iyogi, T., Ueda, S., Hisamatsu, S., Kondo, K., Haruta, H., Katagiri, H., Kurabayashi, M., Nakamura, Y., and Tsuji, N. Environmental gamma-ray dose rate in Aomori Prefecture, Japan. *Health Phys*. 82: 521-526, 2002.
21. 湊進, 池田正, 柴山元彦, 平賀章三. 奈良県の地表ガンマ線量率調査. *Radioisotopes*. 52: 42-51, 2002.
22. 杉野雅人, 下道國. 群馬県における環境放射線および天然放射性核種の分布調査. *Radioisotopes*. 51: 543-555, 2002.
23. 輪嶋隆博, 細川洋一郎, 竹腰光男, 藤田智, 金子昌幸, 安河内太郎. ポータブル型 γ -スペクトロサーバイメータを用いた北海道の環境 γ 線量の調査. *Radioisotopes*. 46: 291-297, 1997.
24. 細田正洋, 反町篤行, 石川徹夫, 中村裕也, 床次真司. 屋内ラドンの高濃度化の要因調査-熊本市の場合. *保健物理*. 43: 349-353, 2008.
25. 益田和, 向真希, 外間智規, 本村大, 謝花達磨, 床次真司, 古川雅英. 沖縄県読谷村の空間 γ 線線量率と地質との関係. *Radioisotopes*. 58: 187-193, 2009.
26. 本村大, 益田和, 向真希, 外間智規, 古川雅英. 沖縄県那覇市における空間 γ 線線量率の分布. *琉球大学理学部紀要*. 87: 69-76, 2009.
27. 古川雅英, 床次真司. 沖縄県宮古島における空間 γ 線線量率の分布. *保健物理*. 36: 195-206, 2001.
28. 吉岡勝廣, 湊進. 隠岐島の地表 γ 線強度分布と表層地質分布の関係. *Radioisotopes*. 53: 427-433, 2004.
29. 古川雅英, 床次真司, 赤田尚史. 大東諸島の自然放射線レベルとその地質学的解釈. *Radioisotopes*. 54: 213-224, 2005.
30. 細田正洋, 福士政広, 杉野雅人, 古川雅英, 下道國. 三宅島の環境放射線(能). *保健物理*. 40: 365-371, 2005.
31. 福士政広, 細田正洋, 杉野雅人, 南一幸, 古川雅英, 下道國. 2006年小笠原群島の父島・母島における環境放射線および放射能の調査. *首都大学東京小笠原研究年報*. 31: 59-64, 2008.
32. 鳥羽賢. 日本人の平均値. *生活情報センター*, 東京都, pp.64, 2005.

33. 東京都環境局. 東京都環境白書2004 環境データ集, 東京の交通. pp.20, 2004.
34. 北原明治, 猪越幸雄, 鈴木隆司, 杉浦城春, 進藤幸太郎, 千坂治雄. 東京都内の電車における環境放射線. 東京都立アイソトープ総合研究所研究報告. 5: 33-53, 1988.
35. 長岡鋭, 坂本隆一, 堤正博, 斉藤公明, 森内茂. 住居環境における放射線場の特性, (II) 東京都内電車路線での γ 線および宇宙線の線量率分布. 日本原子力学会誌. 32: 507-513, 1990.
36. 長岡鋭, 森内茂. 生活環境中における γ 線および宇宙線線量率分布とその特徴. 保健物理. 26: 129-137, 1991.
37. 小川雅之, 細田正洋, 福士政広, 小柏進. 東京都内地下鉄線の空間 γ 線線量率. *Radioisotopes*. 57: 313-320, 2008.
38. 松田秀晴. 種々の生活環境における自然空間放射線線量率の測定 第4報 地下鉄路線及び地下街. 名古屋工業技術試験所報告. 42: 190-201, 1993.
39. Hosoda, M., Shimo, M., Sugino, M., Furukawa, M., and Fukushi, M. Effect of soil moisture content on radon and thoron exhalation. *J. Nucl. Sci. Technol.* 44: 664-672, 2007.
40. Hosoda, M., Sorimachi, A., Yasuoka, Y., Ishikawa, T., Sahoo, S. K., Furukawa, M., Hassan, N. M., Tokonami, S., and Uchida, S. Simultaneous measurements of radon and thoron exhalation rates and comparison with values calculated by UNSCEAR equation. *J. Radiat. Res.* 50: 333-343, 2009.
41. Hosoda, M., Tokonami, S., Sorimachi, A., Ishikawa, T., Sahoo, S. K., Furukawa, M., Shiroma, Y., Yasuoka, Y., Janik, M., Kavasi, N., Uchida, S., and Shimo, M. Influence of soil environmental parameters on thoron exhalation rate. *Radiat. Prot. Dosim.* 141: 420-423, 2010.
42. Hassan, N. M., Hosoda, M., Iwaoka, K., Sorimachi, A., Janik, M., Kranrod, C., Sahoo, S. K., Ishikawa, T., Yonehara, H., Fukushi, M., and Tokonami, S. Simultaneous measurement of radon and thoron released from building materials used in Japan. *Prog. Nucl. Sci. Technol.* 1: 404-407, 2011.
43. Hassan, N. M., Ishikawa, T., Hosoda, M., Iwaoka, K., Sorimachi, A., Sahoo, S. K., Janik, M., Kranrod, C., Yonehara, H., Fukushi, M., and Tokonami, S. The effect of water content on the radon emanation coefficient for some building materials used in Japan. *Radiat. Meas.* 46: 232-237, 2011.
44. 床次眞司. 環境中における放射性物質の動態と被ばく線量評価. 空気清浄. 49: 19-26, 2011.
45. Darby, S., Hill, D., Auvinen, A., Barros-Dios, J. M., Baysson, H., Bochicchio, F., Deo, H., Falk, R., Forastiere, F., Hakama, M., Heid, I., Kreienbrock, L., Kreuzer, M., Lagarde, F., Mäkeläinen, I., Muirhead, C., Oberaigner, W., Pershagen, G., Ruano-Ravina, A., Ruosteenoja, E., Rosario, A. S., Tirmarche, M., Tomásek, L., Whitley, E., Wichmann, H. E., and Doll, R. Radon in homes

- and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *BMJ*. 330:223, 2005.
46. 下道國. 原子力リスクが期待する環境放射線研究. 応用物理. 79: 605-609, 2010.
 47. International Commission on Radiological Protection. Protection Against Radon-222 at Home and at Work. ICRP Publication 65, 1994.
 48. Lubin, J. H., Wang, Z. Y., Jr. Boice, J. D., Xu, Z. Y., Blot, W. J., Wang, D. L., and Kleinerman, R. A. Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies. *Int. J. Cancer*. 109: 132-137, 2004.
 49. Krewski, D., Lubin, J. H., Zielinski, J. M., Alavanja, M., Catalan, V. S., Field, R. W., Klotz, J. B., Letourneau, E. G., Lynch, C. F., Lyon, J. I., Sandler, D. P., Schoenberg, J. B., Steck, D. J., Stolwijk, J. A., Weinberg, C., and Wilcox, H.B. Residential radon and risk of lung cancer. A combined analysis of 7 North American case-control studies. *Epidemiology*. 16: 137-145, 2005.
 50. International Commission on Radiological Protection. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103, 2007.
 51. International Commission on Radiological Protection. Lung Cancer Risk from Radon and Progeny. ICRP Publication 115. pp.68, 2011.
 52. 米原英典. ラドン被ばくの防護に関する最新動向. *FBNews*. 401: 5-9, 2010.
 53. The World Health Organization. WHO Handbook on Indoor Radon. ISBN 978-92-4-154767-3, pp.94, 2009. (http://whqlibdoc.who.int/publications/2009/9789241547673_eng.pdf)
 54. 床次眞司. 放射能測定法に関する国際標準化の最新動向. *ISOTOPE NEWS*. 687: 18-20, 2011.
 55. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2006 Report: Effects of ionizing radiation. Annex E Sources-to-effects assessment for radon in homes and workplaces. p. 201-334, United Nations, New York, 2008.
 56. 床次眞司. 私信.
 57. 藤元憲三, 小林定喜, 内山正史, 土居雅広, 中村裕二. 屋内ラドン濃度全国調査. 保健物理. 32: 41-51, 1997.
 58. Tokonami, S. Why is ^{220}Rn (Thoron) measurement important?. *Radiat. Prot. Dosim.* 141: 335-339, 2010.
 59. 阿部史郎, 阿部道子, 池辺幸正, 飯田孝夫. Rn-222の日本全国規模測定とそれによる被曝線量寄与. 環境ラドン. 下道國, 辻本忠 編, 538-551, 1992.
 60. Doi, M., Fujimoto, K., Kobayashi, S., and Yonehara, H. Spatial distribution of thoron and radon concentrations in the ambient air of a traditional Japanese wooden house. *Health*

- Phys.* 66: 43-49, 1994.
61. Yonehara, H., Aoyama, T., Radford, E. P., Kato, H., and Sakanoue, M. Radon concentrations in residential housing in Hiroshima and Nagasaki. *Health Phys.* 68: 683-688, 1995.
 62. Sanada, T., Fujimoto, K., Miyano, K., Doi, M., Tokonami, S., Uesugi, M., and Takata, Y. Measurement of nationwide indoor Rn concentration in Japan. *J. Environ. Radioact.* 45: 129-137, 1999.
 63. Doi, M., and Kobayashi, S. The Passive Radon-Thoron Discriminative Dosimeter for Practical Use. *Jpn. J. Health Phys.* 29: 155-166, 1994.
 64. Oikawa, S., Kanno, N., Sanada, T., Ohashi, N., Uesugi, M., Sato, K., Abukawa, J., and Higuchi, H. A nationwide survey of outdoor radon concentration in Japan. *J. Environ. Radioact.* 65: 203-213, 2003.
 65. Oikawa, S., Kanno, N., Sanada, T., Abukawa, J., and Higuchi, H. A survey of indoor workplace radon concentration in Japan. *J. Environ. Radioact.* 87: 239-245, 2006.
 66. Suzuki, G., Yamaguchi, I., Ogata, H., Sugiyama, H., Yonehara, H., Kasagi, F., Fujiwara, S., Tatsukawa, Y., Mori, I., and Kimura, S. A nation-wide survey on indoor radon from 2007 to 2010 in Japan. *J. Radiat. Res.* 51:683-689, 2010.
 67. Tokonami, S., Takahashi, H., Kobayashi, Y., Zhuo, W., and Hulber, E. Up-to-date radon-thoron discriminative detector for a large scale survey. *Rev. Sci. Instrum.* 76: 113505, 2005.
 68. 古川雅英. 地球規模の自然放射線 (2) - 二次宇宙線強度の空間分布 -. 月刊地球. 号外 No.22: 55-62, 1998.
 69. Furukawa, M. Preliminary Cruise Report, R/V Hakuohmaru KH93-3 Research Cruise, Ocean Res. Inst., Univ. of Tokyo, 162-164, 1995.
 70. 藤元憲三, O'Braien, K. 我が国における宇宙線からの線量評価. 保健物理, 37: 325-334, 2002.
 71. 白石久二雄. 食生活と内部被ばく. 丸山隆司編. 放医研環境セミナーシリーズ No. 22. 生活と放射線. 61-73, 1995.
 72. 社団法人日本アイソトープ協会. アイソトープ手帳 第11版. 丸善株式会社, 2011.
 73. Ishikawa, T. Long-term changes in body potassium concentration and dose from ^{40}K for a Japanese adult male group. *Health Phys.* 78: 420-433, 2000.
 74. 太田智子. 「わが国における環境放射能水準調査の現状と今後の展開」 (5) - 食品試料の放射能調査 -. *FBNews.* 364: 1-5, 2007.
 75. Butler, C. Radioactivity spreads in Japan. *Nature.* 471: 555-556, 2011.
 76. Brumfiel, G. Fallout forensics hike radiation toll. *Nature.* 478: 435-436, 2011.
 77. 放射線生物研究会. 放射線生物研究. 46: 83-139, 2011.

78. 松村宏, 斎藤究, 石岡純, 上菘義朋. 高速道路上のガンマ線測定により得られた福島第一原子力発電所から飛散した放射性物質の拡散状況. 日本原子力学会和文論文誌. 10: 152-162, 2011.
79. 反町篤行, 細田正洋, 床次眞司, 山田正俊, 門前暁, 小山内暢, 柏倉幾郎, 浅利靖. 福島県における空間放射線線量率と放射性核種の線量寄与率. 日本保健物理学会第44回研究発表会 講演要旨集. 107, 2011.
80. Bowyer, T. W., Biegalski, S. R., Cooper, M., Eslinger, P. W., Haas, D., Hayes, J. C., Miley, H. S., Strom, D. J., and Woods, V. Elevated radionuclides detected remotely following the Fukushima nuclear accident. *J. Environ. Radioact.* 102: 681-687, 2011.
81. Sinclair, L. E., Seywerd, H. C. J., Fortin, R., Carson, J. M., Saull, P. R. B., Coyle, M. J., Van Brabant, R. A., Buckle, J. L., Desjardins, S. M., and Hall, R. M. Aerial measurement of radionuclide concentration off the west coast of Vancouver Island following the Fukushima reactor accident. *J. Environ. Radioact.* 102: 1018-1023, 2011.
82. Bolsunovsky, A., and Dementyev, D. Evidence of the radioactive fallout in the center of Asia (Russia) following the Fukushima nuclear accident. *J. Environ. Radioact.* 102: 1062-1064, 2011.
83. Manolopoulou, M., Vagena, E., Stoulos, S., Ioannidou, A., and Papastefanou, C. Radioiodine and radiocesium in Thessaloniki, northern Greece due to the Fukushima nuclear accident. *J. Environ. Radioact.* 102: 796-797, 2011.
84. Lozano, R. L., Hernández-Ceballos, M. A., Adame, J. A., Casas-Ruiz, M., Sorribas, M., San Miguel, E. G., and Bolívar, J. P. Radioactive impact of Fukushima accident on the Iberian Peninsula: Evolution and plume previous pathway. *Environ. Int.* 37: 1259-1264, 2011.
85. Pittauerová, D., Hettwig, B., and Fischer, H. W. Fukushima fallout in northwest German environmental media. *J. Environ. Radioact.* 102: 877-880, 2011.
86. Hosoda, M., Tokonami, S., Sorimachi, A., Monzen, S., Osanai, M., Yamada, M., Kashiwakura, I., and Akiba, S. The time variation of dose rate artificially increased by the Fukushima nuclear crisis. *Sci. Rep.* 1: 87, 2011. doi: 10.1038/srep00087.
87. 東京都庁ホームページ. 都内100箇所の空間放射線量の測定結果について (第7報). <http://www.metro.tokyo.jp/INET/OSHIRASE/2011/06/2016o801.htm>, 2011年12月29日閲覧可.
88. 文部科学省ホームページ. 東京電力株式会社福島第1及び第2原子力発電所周辺のダストサンプリング, 環境試料及び土壌モニタリングの測定結果. http://www.mext.go.jp/component/a_menu/other/detail/_icsFiles/afeldfile/2011/07/10/1306615_071010d.pdf, 2011年7月10日閲覧可.
89. International Commission on Radiation Units and Measurements, ICRU Report 53, Gamma-

ray spectrometry in the environment, 7910 Woodmont Avenue Bethesda, Maryland, USA (1994).

90. 細田正洋, 福士政広, 床次真司, 下道國. 東京電力・福島第一原子力発電所事故以前の東京都葛飾区の空間線量率. *RESL Rep.* SCS-0077: 1-12, 2011.
91. Monzen, S., Hosoda, M., Tokonami, S., Osanai, M., Yoshino, H., Hosokawa, Y., Yoshida, M., Yamada, M., Asari, Y., Satoh, K., and Kashiwakura, I. Individual radiation exposure dose due to support activities at safe shelters in Fukushima prefecture. *PLoS ONE*. 6; e27761, 2011. doi:10.1371/journal.pone.0027761.
92. Tagami, K., Uchida, S., Uchihori, Y., Ishii, N., Kitamura, H., and Shirakawa, Y. Specific activity and activity ratios of radionuclides in soil collected about 20 km from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: Radionuclide release to the south and southwest. *Sci. Tot. Environ.* 409: 4885-4888, 2011.
93. Hosoda, M., Fukushi, M., Shimizu, H., and Tokonami, S. Visualization of radiocesium distribution in contaminated soil from Kashiwa City, Chiba, Japan. *Radiat. Emerg. Med.* 1: 117-120, 2012.
94. 坂本文徳, 大貫敏彦, 香西直文, 五十嵐翔祐, 山崎信哉, 吉田善行, 田中俊一. オートラジオグラフィを用いた福島第一原子力発電所起源の放射性降下物の局所的な分布解析. 日本原子力学会和文論文誌. 2012. doi:10.3327/taesj.J11.027.