ノート

市販の大気中放射性エアロゾル捕集用フィルタの
表面捕集効率及び流量の安定性の評価玉熊 佑紀^{*1}, 山田 棕平^{*1, †}, 岩岡 和輝^{*2}, 細田 正洋^{*1, 2}, 床次 眞司^{*2, #}

(2018 年 7 月 20 日受付)

(2018 年 12 月 25 日採択)

Evaluation of a Surface Collection Efficiency and a Stability of Flow Rate for the Commercially Available Filters Used
for Ambient Radioactive AerosolsYuki TAMAKUMA,^{*1} Ryohei YAMADA,^{*1, †} Kazuki IWAOKA,^{*2} Masahiro HOSODA^{*1, 2} and Shinji TOKONAMI^{*2, #}

Airborne radioactivity measurements are necessary to know the contamination level and internal doses for residents after a nuclear accident. In addition, measurements of radon progenies in air, which are the risk factor of lung cancer, are also important to evaluate lung dose. In these measurements, a filter sampling is used to collect radioactive aerosols. However, it is well known that results of the measurement using a filter are strongly dependent on characteristics of the used filter. Selection of a suitable filter is important to achieve the high-resolution and long-term measurement. “Surface collection efficiency (SCE)” and “stability of air flow rate” were examined for six types of filter that are commercially available in Japan. In Japan, cellulose-glass fiber filter paper (HE-40T) is used for an environmental monitoring in Japan. In this study, it was found that the SCE of HE-40T was lower than that of mixed cellulose ester type membrane filter by Merck Millipore (DAWP02500). Attenuation ratio of flow rate for DAWP02500 was evaluated to be 2.9% which was lowest in six filters. The results suggest that the DAWP02500 is the most suitable for collecting radioactive aerosols for a long term.

KEY WORDS: membrane filter, performance test, surface collection efficiency, radon progeny, aerosol filtration, environmental monitoring.

I はじめに

東京電力福島第一原子力発電所事故が発生し、大量の放射性核種が大気中に放出され、多くの近隣住民が避難を余儀なくされた。当時の対策指針では緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI) により予測された値を利用して避難等の行政判断を行うとして

いたが、実際にはうまく活用されなかったと言われている¹⁾。その後、原子力規制委員会は SPEEDI を用いずに放射線測定器による実測値を行政判断に用いることを決定した²⁾。そこで、飛散してくる放射性物質を検知するモニタ (放射性プルーム検知モニタ) の開発が求められている³⁾。放射性プルーム検知モニタは、ポンプを用いてフィルタ上に大気中の放射性物質を連続的に捕集し

^{*1} 弘前大学大学院保健学研究科；青森県弘前市本町 66-1 (〒036-8564)

Hirosaki University Graduate School of Health Sciences; 66-1 Hon-cho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8564, Japan.

^{*2} 弘前大学被ばく医療総合研究所；青森県弘前市本町 66-1 (〒036-8564)

Institute of Radiation Emergency Medicine, Hirosaki University;

66-1 Hon-cho, Hirosaki-shi, Aomori 036-8564, Japan.

[†] (国研) 日本原子力研究開発機構核燃料サイクル工学研究所放射線管理部；茨城県那珂郡東海村村松 4-33 (〒319-1194) Radiation Protection Department, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Japan Atomic Energy Agency; 4-33 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1194, Japan.

[#] Corresponding author; E-mail: tokonami@hirosaki-u.ac.jp

ながら、捕集した放射性物質が放出する放射線を測定する⁴⁾。一方、観光用洞窟や金属鉱山等の洞窟内は閉鎖的な空間で換気が少ないため、ラドンの放射能濃度が高くなる傾向にある⁵⁻⁷⁾。ラドンは放射性希ガスであり、煙草に次ぐ肺がんのリスク要因として国際的に広く知られている。近年、世界保健機関（WHO）や国際放射線防護委員会（ICRP）では、これらの被ばくに関する規制や勧告レベルについて報告している^{8,9)}。実際にはラドンによる内部被ばくの大部分はその子孫核種である²¹⁸Po 及び ²¹⁴Po が放出する α 線によるものであり⁹⁾、これらによる吸入被ばく線量を評価するために、ラドン子孫核種濃度の測定が重要となる。そこで、このような環境ではラドン子孫核種濃度が測定されており、その測定にはフィルタ上に子孫核種を集塵する方法が用いられている¹⁰⁻¹²⁾。これらのシステムでは、フィルタ上に捕集された放射性物質から放出される放射線のエネルギースペクトルが測定される。特に、アルファスペクトロメトリにおいては、得られるスペクトルの形状がフィルタの種類によって大きく変化する。したがって、高分解能のスペクトルを得るためには、使用するフィルタには高い表面捕集効率（SCE）が求められる¹³⁾。さらに、実際のシステム運用には長期間の測定が伴うため、フィルタ上には大量の大気中浮遊じんが捕集され、フィルタの目詰まりが発生すると予想される。目詰まりによりフィルタでの圧力損失が大きくなると、大気浮遊じん中放射性核種濃度の過小評価やポンプに負荷がかかり故障の原因につながるため、使用されるフィルタの捕集流量の安定性も重要となる。

これまでの報告から、エアロゾルがフィルタに捕集される機構としてブラウン拡散、慣性衝突及びさえぎり効果等が挙げられる¹⁴⁾。また、これらの機構による捕集効率及び全体の捕集効率はフィルタの孔径やエアロゾルの性状、粒子径等により変化するとされており¹⁵⁾、ニュークレポアメンブレンフィルタについては理論的または実験的に捕集効率の変化について報告されているものの¹⁵⁻¹⁸⁾、他のフィルタや SCE に焦点を当てた報告は少

なく、さらに流量の安定性等の実用面を考慮した報告も少ない。

そこで本研究では、市販されている 6 種類の大気中放射性エアロゾル捕集用フィルタの SCE 及び捕集流量の安定性を評価し、システムの運用を考慮した上で最適なフィルタについて検討した。

II 方 法

1. 評価対象としたフィルタ

評価対象としたフィルタの詳細を **Table 1** に示す^{19,20)}。本研究では、5 種類のメンブレンフィルタ（DAWP02500, AAWP02500, A065A025A, A080A025A, Y020A025A）及びダストモニタ用濾紙（HE-40T）の合計 6 種類のフィルタについて評価した。以降、これらのフィルタはそれぞれ DA, AA, A065, A080, CMF 及び HE-40T と記す。以下に示すラドン子孫核種の捕集には表面捕集効率の評価に用いた α 線源の有効径が 13 mm であるため、直径が 25 mm のフィルタを用いた。一方、捕集流量の安定性評価にはポンプに大きな負担をかけずに長期間の試験を実施するため、直径が 47 mm のフィルタを用いた。孔径は DA 及び A065 がいずれも 0.65 μm 、AA 及び A080 がいずれも 0.8 μm 、CMF が 2.0 μm であり、HE-40T は孔径がメーカーによって公表されていない。現在、日本国内では、HE-40T が原子力施設内及びその周辺環境放射線モニタリングに用いられている²¹⁾。

2. ラドン子孫核種の曝露とエネルギースペクトルの測定方法

弘前大学被ばく医療総合研究所に設置されたラドンチャンバー²²⁾を用いて、ラドン子孫核種をフィルタ上に捕集した。使用したラドンチャンバーを **Fig. 1** に示す。ラドンチャンバーは体積が 150 L のステンレス製タンクで作られており、ラドン発生源には岩石標本を用いている。本ラドンチャンバーによるラドン子孫核種の曝露方法を以下にまとめる。岩石標本から放出されるラドンガス及びその壊変により生成されたラドン子孫核種を混合

Table 1 Evaluated filters and their characteristics.

Filter name	Model number	Manufacture	Thickness (μm)	Pore size (μm)
Mixed cellulose ester type membrane filter (DA)	DAWP02500	Merck Millipore	150	0.65
Mixed cellulose ester type membrane filter (AA)	AAWP02500	Merck Millipore	150	0.8
Mixed cellulose ester type membrane filter (A065)	A065A025A	ADVANTEC	150	0.65
Mixed cellulose ester type membrane filter (A080)	A080A025A	ADVANTEC	150	0.8
Coated type filter (CMF)	Y020A025A	ADVANTEC	95	2.0
Cellulose-glass fiber filter (HE-40T)	HE-40T	ADVANTEC	410	—

Fig. 1 A schematic diagram of experimental setting. The aerosol of sodium chloride was generated by an aerosol atomizer and dried by a diffusion dryer. Radon gas was generated from a rock sample and its progeny was provided to radon chamber by a pump for mixing aerosols and radon progeny.

槽へ流した。さらに、エアロゾル生成器 (Model 9302, TSI) 及び質量パーセント濃度が 0.1% の NaCl 水溶液を用いてエアロゾルを発生させ、乾燥器 (Diffusion Dryer Model 3062, TSI) を通すことでエアロゾルの水分を吸収した後に、ラドンガスの場合と同様に混合槽へ流した。その後、混合槽内でファンを用いて両者が均一になるよう混合し、定流量ポンプ (MP-Σ500N II, SIBATA) を用いて混合槽からラドン子孫核種を捕集した。ポンプによるラドンチャンバーへの負荷及びエアロゾルの供給と捕集のバランスを考慮し、流量は 5 L min^{-1} に設定した。その際の流速及びフィルタ直径はそれぞれ $8.3 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 及び 25 mm であるので、面速度は 0.17 m s^{-1} と評価される。ラドン子孫核種を捕集したフィルタは真空容器とプレナーシリコン半導体検出器 (SPD-900-35-100AM, CANBERRA Industries Inc.) を用いて、ラドン子孫核種から放出される α 線のエネルギースペクトルを測定した。ラドン子孫核種を 40 分間捕集し、 ^{218}Po の影響が無視できるまで 30 分間待機した後、 ^{214}Po からの α 線エネルギーを 30 分間測定した。その際、型紙を用いてフィルタ捕集面を表面捕集効率の評価に用いた α 線源の有効径と一致させ、 α 線の斜入射を防ぐためアルミニウムのコリメータによって線束を制御した。

3. 表面捕集効率の評価方法

(a) ^{241}Am 線源と比較する方法

^{241}Am 線源を用いて SCE を算出するための概念図を Fig. 2a に示す。 ^{241}Am 線源の α 線エネルギースペクトルを同様に測定し、 ^{241}Am 線源のスペクトルを ^{214}Po の単独スペクトルのピークに合わせて重ね合わせ、重なった部分の SCE を 100% として評価した。ここで、 ^{214}Po 及び ^{241}Am 線源からの α 線による計数値をそれぞれ S_0 , S_1 とすると、SCE は (1) 式で表される。

$$SCE = \frac{S_1}{S_0} \quad (1)$$

(b) フィルタのエネルギースペクトルのみから算出する方法

フィルタのエネルギースペクトルのみから SCE を算出するための概念図を Fig. 2b に示す。一般に、 α 線エネルギースペクトルの形状は検出器のエネルギー分解能に依存し、正規分布で近似することができる。したがって、フィルタの計測で得られたエネルギースペクトルは正規分布で近似することができ、そのピークの中心を軸として折り返したエネルギースペクトルを SCE が 100% であると仮定した。 ^{214}Po による単独エネルギースペクトル及び正規分布で近似したエネルギースペクトルの計数値をそれぞれ S_0 , S_1 とすると、SCE は同様に (1) 式を用いて評価することができる。

(c) 先行研究による方法

IMOTO らはラドン子孫核種濃度の測定に適するフィルタについて検討するため、日本国内で使用されている主要なフィルタの特性について報告した²³⁾。本方法により SCE を算出するための概念図を Fig. 2c に示す。IMOTO らの報告によると、エネルギースペクトルの 2.00–6.68 MeV を A 領域、6.68–8.50 MeV を B 領域として、A 領域と B 領域の計数値の和に対する B 領域の計数値との比を SCE とした。この手法による SCE は (2) 式より評価することができる。

$$SCE = \frac{A}{A+B} \quad (2)$$

4. 捕集流量の安定性の評価方法

実験に用いた器具の配置を Fig. 3 に示す。評価するフィルタをフィルタホルダに配置し、実験室の窓から連続的に約 10 日間大気中のエアロゾルをフィルタ上に捕集し続けた。また、捕集期間中の流量の変化を測定するため、大気中のエアロゾルの捕集に用いたポンプ (SIP-32I, 柴田科学 (株)) にそれぞれ小型の質量流量計 (MF-

Fig. 2 The spectrum on each method. (a) The spectrum of ^{214}Po is compared with that of ^{241}Am which is assumed that SCE is 100%. SCE is calculated by formula (1). (b) The spectrum wrapped at the peak of ^{214}Po is assumed that SCE is 100%. SCE is also calculated by formula (1). (c) SCE is determined as the count ratio between B and (A + B) areas.

Fig. 3 A schematic diagram of experimental setting for measuring flow rate. The experiment was carried out on the 6th floor of the building. Three filters were installed at an interval of 1.7 m and a position of 5 cm from a wall surface.

FP10NH06-200-AI-ANV, (株)堀場製作所)を接続し、流量を測定した。測定されるデータは電圧信号として出力されるため、電圧ロガー (LR5042, 日置電機 (株)) に測定値を記録した。フィルタホルダは地表面から 25 m の高さに位置する大学の 6 階の窓の外へ一定間隔でフィルタ捕集面が壁面から 5 cm の位置になるように設置した。ポンプに過度な負荷を与えずに多くのエアロゾルを捕集するために、初期流量は較正済みの質量流量計を用

いて 10 L min^{-1} に設定し、初期流量から測定終了時における流量の低下率から安定性を評価した。この際の流速及びフィルタ直径はそれぞれ $1.7 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 及び 47 mm であるので、面速度は $9.6 \times 10^{-2} \text{ m s}^{-1}$ と評価される。初期流量及び測定終了時の流量をそれぞれ v_0 及び v_e とすると、流量の低下率 D は以下の (3) 式より評価した。

$$D = \frac{v_0 - v_e}{v_0} \times 100 \quad (3)$$

III 結果と考察

1. 表面捕集効率

DA と HE-40T に対応するエネルギースペクトルをそれぞれ Fig. 4 (a) 及び (b) に示す。また、本研究で評価した SCE の値及び先行研究により得られた値を Table 2 に示す。メンブレンフィルタでは、フィルタの孔径が小さいほど SCE が高い傾向が認められた。また、DA, AA,

Fig. 4 An alpha energy spectrum of ^{214}Po by (a) DA and (b) HE-40T

Table 2 Results of evaluation of SCE.

Filter name	Surface collection efficiency (%)			Previous report
	(A)	(B)	(C)	
DA	79.9	49.4	92.6	—
AA	64.9	42.7	92.9	99.9
HE-40T	28.7	22.4	57.1	53.4
CMF	53.9	31.2	90.8	—
A065	83.1	62.1	91.9	—
A080	72.4	53.3	92.1	—

(A) the method comparing the spectrum of ^{214}Po with that of ^{241}Am .

(B) the method assuming the spectrum wrapping at a higher part of the peak channel of the spectrum of ^{214}Po is 100% of SCE.

(C) the method reported by Imoto et al. 1994.²³⁾

“Previous report” is Imoto et al. 1994.²³⁾

CMF, A065 及び A080 の SCE が従来より環境放射能モニタリングや施設の放射線管理に使用されている HE-40T より相対的に高い結果となった。方法 (c) で得られた AA 及び HE-40T の SCE を先行研究で得られた値と比較すると、AA では先行研究より低い値、HE-40T では高い値を示した。この要因は本研究で設定したサンプリング流量やフィルタ上に捕集したエアロゾルの粒径等の実験条件が既報とは異なることに起因すると考えられる。しかしながら、Imoto らの報告では、サンプリング流量やエアロゾルの粒径に関する詳述が無いためこれらの値を単純に比較することはできない。われわれの推測ではその流量が Imoto らよりも高流量だった場合、面速度が高くなるため、フィルタ内部にエアロゾルが沈着しやすくなり、SCE が低く評価される可能性があると考えている。また、エアロゾルの粒径が小さい場合も同様にフィルタ内部に沈着しやすくなると予想されるため SCE が低く評価される可能性がある。いずれにしてもさまざまな条件下でデータを積み上げていく必要がある。

2. 流量の安定性

各種フィルタに大気中のエアロゾルを捕集したときの流量の経時変化を Fig. 5 に示す。捕集開始後、時間の経過に伴い全体的に捕集流量が減少傾向を示し、特に A065 及び A080 では大きな減少傾向を示した。測定開始時から終了時までの流量の低下率及び変動係数を Table 3 に示す。流量の低下率が低い順に DA (2.9%), CMF (4.2%), HE-40T (6.1%), AA (7.4%), A080 (7.7%), A065 (11.0%) であった。変動係数についても流量の低下率とおおむね同様の傾向を示し、DA (0.007), CMF (0.010), AA (0.010), HE-40T (0.012), A080 (0.013), A065 (0.022) の順に低い値を示した。流量低下率とフィルタ孔径の間には全体的な傾向として負の相関関係が示唆された。しかし、最も流量低下率が大きかった A065 と同じ孔径を有する DA の流量低下率は最も小さい値を示した。両者はどちらもセルロース混合エステルが材質に用いられているため、材質による影響はないと考えられる。したがって、得られた結果では DA が比較したフィルタの中で流量低下率が最も小さく流量が安定しており、大気エアロゾル捕集に用いるフィルタとして適していると考えられる。しかし、フィルタ間の流量安定性の変動要因については今後検討する必要がある。

Fig. 5 A stability of flow rate. Relative flow rate shows an air flow rate standardized by the average air flow rate of the first 1 min.

Table 3 Attenuation ratio of flow rate and a coefficient of variation for flow rate.

Filter name	Attenuation ratio (%)	Coefficient of variation
DA	2.9	0.007
AA	7.4	0.010
HE-40T	6.1	0.012
CMF	4.2	0.010
A065	11.0	0.022
A080	7.7	0.013

Attenuation ratio of flow rate is defined as the ratio of the decrease in flow rate at the end of measurement to the flow rate at the start.

IV ま と め

通常重要とされるフィルタの捕集効率については、過去に多くの研究者により報告されているが、高分解能測定や長期間測定の場合に重要となる表面捕集効率や流量の安定性については報告が少ない。本研究では、市販されているフィルタ 6 種類の表面捕集効率 (SCE) 及び流量の安定性を評価した。過去の報告に基づき評価した方法では DA, AA, CMF, A065 及び A080 の SCE は 90% 以上となり比較的高い値を示したが、従来環境モニタリングで使用されてきた HE-40T は約 57% と低く、 α 線の測定には適さない可能性が示唆された。また、流量低下率は DA が最も低く、A065 で最も高くなった。これらの結果から、現時点では放射性ブルーム検知モニタやラドン子孫核種モニタに用いるフィルタとして DA が適すると考えられる。ただし、CMF は SCE が高く、流量の低下率も少ない上、価格も他のフィルタと比較して低いことから実用面を考慮したうえで最適なフィルタを検

討する必要がある。今後は、エアロゾルの粒径による SCE の変化について評価することが求められる。

謝 辞

表面捕集効率評価の実験において Chanis PORNNUMPA 博士 (現・Kasetsart 大学) にご協力いただいた。ここに感謝する。また本研究に関して、開示すべき利益相反状態はない。

参 考 文 献

- 1) Nuclear Regulation Authority in Japan; Kinkyuuji monitoringu ni tsuite (Gensiryoku saigai taisaku shishin hosoku sankou shiryou) [A complementary note for guideline against a nuclear accident] (in Japanese), Nuclear Regulation Authority in Japan Website, Available at: <http://www.nsr.go.jp/data/000027739.pdf>, Accessed 30 April 2018.
- 2) Nuclear Regulation Authority in Japan; Gensiryoku saigai

- taisaku shishin [Guideline against a nuclear accident] (in Japanese), Nuclear Regulation Authority in Japan Website, Available at: <https://www.nsr.go.jp/data/000024441.pdf>, Accessed 16 March 2018.
- 3) Nuclear Regulation Authority in Japan; Heisei 28 nendo senryoukeitsuki taiki monita no kounyuu ni kakaru ippan kyousou nyuusatsu setsumeisho [Guideline for a general competitive bid of a dust monitor with a dosimeter] (in Japanese), Nuclear Regulation Authority in Japan Website, Available at: <https://www.nsr.go.jp/data/000168535.pdf>, Accessed 16 March 2018.
 - 4) R. YAMADA, Y. TAMAKUMA, K. IWAOKA, M. HOSODA and Y. SHIROMA, et al.; Measurement system for alpha and beta emitters with continuous air sampling under different exposure situations, *Appl. Radiat. Isot.*, **126**, 79–82 (2017).
 - 5) L. FIJALKOWSKA-LICHWA and T. A. PRZYLIBSKI; First radon measurements and occupational exposure assessments in underground geodynamic laboratory the Polish Academy of Sciences Space Research Centre in Książ Castle (SW Poland), *J. Environ. Radioact.*, **165**, 253–269 (2015).
 - 6) O. A. DUMITRU, B. P. ONAC, J. J. FORNÓS, C. COSMA and A. GINÉS, et al.; Radon survey in caves from Mallorca Island, Spain, *Sci. Total Environ.*, **526**, 196–203 (2015).
 - 7) D. E. TCHORZ-TRZECIAKIEWICZ and T. PARKITMY; Radon as a tracer of daily, seasonal and spatial air movements in the underground tourist route “coal mine” (SW Poland), *J. Environ. Radioact.*, **149**, 90–98 (2015).
 - 8) WHO; WHO handbook on indoor radon (2009), World Health Organization, Geneva Switzerland.
 - 9) ICRP; Lung Cancer Risk from Radon and Progeny and Statement on Radon, ICRP Publication 115, *Ann. ICRP*, **40** (1) (2010).
 - 10) N. KÁVÁSI, T. VIGH, T. KOVÁCS, J. VAUPOTIČ and V. JOBBÁGY, et al.; Dose estimation and radon action level problems due to nanosized radon progeny aerosols in underground manganese ore mine, *J. Environ. Radioact.*, **102**, 806–812 (2011).
 - 11) A. SHAHROKHI, T. VIGH, C. NÉMETH, A. CSORDÁS and T. KOVÁCS; Radon measurements and dose estimate of workers in a manganese ore mine, *Appl. Radiat. Isot.*, **124**, 32–37 (2017).
 - 12) S. TOKONAMI, T. ICHII, T. IIMOTO and R. KUROSAWA; Calculation procedure of potential alpha energy concentration with continuous sampling, *Health Phys.*, **71**, 937–943 (1996).
 - 13) N. KINOCHI, T. OISHI, H. NOGUCHI, S. KATO and M. ISHIZAWA; Selection of filter media used for monitoring airborne alpha-emitting particles in a radiological emergency, *RADIOISOTOPES*, **50**, 403–407 (2001).
 - 14) K. R. SPURNY; On the history of air filters and aerosol filtration, *J. Aerosol Sci.*, **28**, 391–392 (1997).
 - 15) K. R. SPURNY, J. P. LODGE, Jr., E. R. FRANK and D. C. SHEESLEY; Aerosol filtration by means of Nuclepore filters: structural and filtration properties, *Environ. Sci. Technol.*, **3**, 453–463 (1969).
 - 16) K. R. SPURNY, J. P. LODGE, Jr., E. R. FRANK and D. C. SHEESLEY; Aerosol filtration by means of Nuclepore filters: aerosol sampling and measurement, *Environ. Sci. Technol.*, **3**, 464–468 (1969).
 - 17) M. J. MANTON; The impact of aerosols on a nuclepore filter, *Atmos. Environ.*, **12**, 1669–1675 (1978).
 - 18) M. J. MANTON; Brownian diffusion of aerosols to the face of a Nuclepore filter, *Atmos. Environ.*, **13**, 525–531 (1978).
 - 19) Merck Millipore; Meruku firutā katarogu 2017 [A filter catalog in 2017] (in Japanese), Merck Millipore Website [online], Available at: https://www.merckmillipore.com/JP/ja/20140619_104322, Accessed 16 March 2018.
 - 20) Toyo roshi kaisha, Ltd.; 2017–2018 Laboratory equipment & Instruments Filtration Media & Filtration Systems (in Japanese), Toyo roshi kaisha, Ltd. Website [online], Available at: http://saas2.startialab.com/acti_books/1045173776/13429/, Accessed 1 June 2018.
 - 21) Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology; Taiki hoshasei busshitsu no monitaringu ni kansuru gijutsu sankou shiryō [A technical note on monitoring of radionuclides in the air] (in Japanese), Japan Chemical Analysis Center Website [online], Available at: <http://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/RM1.pdf>, Accessed 30 April 2018.
 - 22) C. PORNUMPA, Y. OYAMA, K. IWAOKA, M. HOSODA and S. TOKONAMI; Development of radon and thoron exposure systems at Hirosaki University, *Radiat. Environ. Med.*, **7** (1), 13–20 (2018).
 - 23) T. IIMOTO, K. FUJIMOTO, S. TOKONAMI and R. KUROSAWA; Characteristics of major filters used for ^{222}Rn progeny measurements, *Radiat. Meas.*, **29**, 161–164 (1998).

玉熊 佑紀 (たまくま ゆうき)

1994 年青森県出身。国立大学法人弘前大学大学院保健学研究科放射線技術科学領域博士前期課程 2 年。現在は、汎用型環境放射線・放射能測定器の開発や弘前大学におけるラドン・トロン校正場の構築に携わっている。

E-mail: h17gg204@hirosaki-u.ac.jp