技術資料

福島第一原発事故に因る家屋内放射線量率の測定例

伊藤 邦夫^{1,*}

Measurement Example of Radiation Dose Rate in Private Premises Contaminated by the Fukushima Nuclear Power Plant Accident

Kunio ITO^{1,*}

Skilled Veterans Corps for Fukushima, 1-21-7 Kanda-awajicho, Chiyoda-ku, Tokyo 101-0063, Japan

(Received April 13, 2017; accepted in revised form August 22, 2017; published online January 31, 2018)

Indoor as well as outdoor ambient dose rates of 24 private premises with Japanese style wooden houses, which had been decontaminated in advance, were measured by a NaI(Tl) γ ray survey meter in Naraha city, Fukushima prefecture from October 2013 through July 2015. Four of the target premises were also measured before decontamination. The rates were corrected for attenuation by consideration of the radioactive half-lives of ^{134}Cs and ^{137}Cs to compensate the time gap between the surveyed dates. Measuring points were categorized by an index of a pair of indoor positions and the height from the floor as well as outdoor positions and the height from the ground. The observed differences among the dose rates under this categorization, for example, the rate on the second floor is lower than that of the ceiling of the first floor, qualitatively agree with the reported results of simulations, suggesting that some assumptions used by the simulations coincide reasonably well with actual conditions. The observed ratio of the doses inside and outside of wooden houses also essentially agrees with the reported ratio measured by different methods in different cities. The ratio has been confirmed to decrease with increasing open air dose rate when the open air dose rate is less than $0.5 \mu\text{Sv/h}$.

KEYWORDS: *open air dose rate, ambient dose rate, Fukushima nuclear accident, private premises, private house, spatial dose rate*

I. はじめに

福島第一原発事故のあとにいくつかの行政区域に出された避難指示の解除が行われている福島県では、行政当局による道路などの公共空間の空間線量の情報公開は行われている¹⁾。しかし、個人の住宅の内部における空間線量の分布に関する公開された情報は少ない²⁾。

本報告は、2015年9月5日に避難指示解除準備区域が解除された檜葉町において、筆者の所属する公益法人が町との覚え書きの下に、町民の承諾を受けて2013年10月から2015年7月に公益事業としてこの種の調査における倫理的な配慮に注意して行った空間線量率測定プロジェクトのまとめである。

II. 測定およびデータ整理の方法

以下に示される結果はすべて木造一戸建て家屋に関する

ものである。測定地(字)の位置を地図(Fig. 1)上に示す。図中の線量率分布は檜葉町の発表による¹⁾。本報告の測定は2013年10月から2014年7月までに33軒、2015年7月に2軒行われた。同一の屋敷を複数回に分けて測定した例もあるので測定された合計軒数(Table 1参照)と時期別の合計軒数は一致しない。家屋と敷地(庭)を含めて1軒の屋敷という(Fig. 2)。

線量率は1年以内に校正されたNaI(Tl)シンチレーションサーベイメーター(日立アロカメディカルTCS-172B)を用いて、1cm周辺線量等量率として測定した。1cm周辺線量等量率と実効線量率との関係については原子力学会の説明がある³⁾。

1軒の屋敷について測定された地点を6種に分類した。屋内の1階内側(Fig. 2に10で示された位置、以下位置に対応するFig. 2の数字をカッコ内に示す)、1階外側(11)、2階内側(20)、2階外側(21)および屋外の“家の際”(30)、庭(31)である。

屋内の“外側(Fig. 2の11,21)”は窓や壁からおおよそ1m以内を意味して、屋外の“家の際(Fig. 2の30)”も

¹⁾ (公社)福島原発行動隊

* Corresponding author, ito_e-prof@material.t.u-tokyo.ac.jp

家の窓や壁からおよそ 1 m 以内を意味する。2 階建ての家の 1 階について Fig. 2 では上に 2 階のある部分(灰色の部分)とない部分(白色の部分)を区別しているが、最終的には両者を区別せず同等に扱った。

Fig. 1 Location of measurement points plotted in a distribution map of ambient dose equivalent rate in the Naraha city

屋内においては 1 つの地点で測定プローブが床にほぼ接する高さ(**Fig. 3** などでの height 0 に対応), 床から 1 m の高さ(height 1 に対応)およびプローブが天井にほぼ接する高さ(height 3 に対応)で測定した。屋外では地面にほぼ接する高さおよび 1 m の高さで測定した。これらのプローブの高さによって 6 種の測定地点を 16 のカテゴリーに細分した(Table 1)。

Fig. 2 Schematic of target premises to show measuring points under the positional category

Table 1 Categories of measuring points and numbers of houses and points measured to calculate Fig. 5 and Fig. 8

Category No.	Location No. in Fig. 2	Height No. in Figs 3, 4, 5, 8, 9	Number of measured points for Fig. 5				For Fig. 8	
			Description of location in Figs 3, 4, 5, 8, 9			One-story house		One-story house
			Floor	Side	In/out door	Number of houses	Number of points	
1		0				8	169	16
2	10	1		Inner side		8	169	16
3		3				8	49	16
4		0	1st floor			8	109	16
5	11	1		Outer side		8	126	16
6		3				3	6	12
7		0			Indoor			16
8	20	1		Inner side				16
9		3						16
10		0	2nd floor					16
11	21	1		Outer side				16
12		3						9
13		0				8	115	16
14	30	1		Near house		8	106	16
15		0			Outdoor	5	132	14
16	31	1		Garden		5	128	14

Height No. 0, 1, and 3 indicate height of probe; on floor/ground, 1 meter above floor/ground, and on the ceiling surface, respectively.

測定の実行時には、時定数は10 sに設定、ある地点のある高さにプローブを水平にして30 s保った後数値の読み取りを開始し、10 sごとに3回読み取りそれらの平均値をそのときの線量率の値とした。プローブの方角は不規則であった。したがって、Fig. 4, Fig. 5などに示される測定値はプローブの方角に関しては平均化されていることになる。

線量率の時間経過に伴う減少については放射性セシウムの半減期による減衰のみ考慮して(1)-(5)式で計算した。 $^{134}\text{Cs}(t)$, $^{137}\text{Cs}(t)$ は事故後時間 t 経過後の ^{134}Cs , ^{137}Cs 由来の空間線量率である。 ^{134}T , ^{137}T は ^{134}Cs , ^{137}Cs の半減期である。

$$^{\text{Cs}}I(t) = ^{134}\text{Cs}(t) + ^{137}\text{Cs}(t) \quad (1)$$

$$^{134}\text{Cs}(t) = ^{134}\text{Cs}(0) \exp(-0.693t/^{134}\text{T}) \quad (2)$$

$$^{137}\text{Cs}(t) = ^{137}\text{Cs}(0) \exp(-0.693t/^{137}\text{T}) \quad (3)$$

$$^{134}\text{Cs}(0)/^{137}\text{Cs}(0) = 1 \times 2.7 \quad (4)$$

(4)式の定数1は事故によって放出されたセシウムに関する $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比(Bq数の比)である。数値1は小森他⁴⁾による。定数2.7は放射性同位元素1崩壊当たりに放出されるガンマ線の個数に線量換算係数を掛けて出てくる数値の比、または、線量率定数(1 cm線量当量)の比で表されるものである。数値2.7はアイストープ手帳⁵⁾による(文献⁶⁾参照)。

測定される線量率はバックグラウンド($=I_B$) + $^{\text{Cs}}I(t)$ とする。測定された日の線量率を I (測定日)、2015年9月に換算した値を $I(2015.09)$ とすると、

$$\begin{aligned} & (I(2015.09) - I_B) / (I(\text{測定日}) - I_B) \\ & = ^{\text{Cs}}I(2015.09) / ^{\text{Cs}}I(\text{測定日}) \end{aligned} \quad (5)$$

となる。これにより、測定値を檜葉町の避難指示解除準備区域が解除された2015年9月時点に減衰補正した。なお、檜葉町では $I_B = 0.04 \mu\text{Sv/h}$ とした⁷⁾。

以下特に断らない限り、図の縦軸は $I(2015.09)$ に相当して、横軸は測定点のカテゴリー番号に対応している。

III. 測定結果とその検討

1. 除染後の測定値の屋敷内の位置による違い

最初に除染後に測定された値について述べる。1軒の屋敷について測定されたデータの例をFig. 3に示す。同一の屋敷の同一のカテゴリー内での測定場所の違いによる測定値の揺らぎの程度を示している。Fig. 4には、同一の屋敷におけるカテゴリーごとの平均(Fig. 3における mean of category)を測定された全屋敷について集めてある。測定された屋敷の立地環境による測定値の揺らぎの程度を示している。以下、この個別の屋敷におけるカテゴリー n の平均値を“個(n)”と表記する。Table 1のカテゴリーごとの測定された屋敷および計測点の数が示すように、すべての屋敷ですべてのカテゴリーのデータが得られた訳ではない。したがって、Fig. 3およびFig. 4などにおいては、カテゴリーによってプロット点の数に違いがある。

測定された全屋敷についてデータをカテゴリーごとにプールして、平均値と t -分布を仮定して95%信頼区間を求めた(Fig. 5)。Fig. 5は除染後の屋敷の内部における空間線量率の分布に関する測定されたデータの全体的な傾向を示している。以下、この全屋敷についてプールした値のカテゴリー n の平均値を“全(n)”と表記する。

Figure 6の縦軸は、「平屋における個(5)/個(2)の比

Fig. 3 An example of a set of dose rates measured in a premise

The abscissa corresponds to the categorical numbers for measuring points explained in Table 1. The dose rates obtained after decontamination work were modified as of September 2015. “Mean of category” indicates the mean of measured values under each category.

Fig. 4 Plots of “mean of category” shown in Fig. 2 obtained from all premises measured after decontamination

Fig. 5 Mean (marks) and its 95% confidence interval (vertical bars) for dose rates measured after decontamination
All dose rates were pooled into category groups and statistical calculations were made per category. One-story and two-story houses were distinguished.

(○)」、[「2階建てにおける個(5)/個(2)の比(●)」、[「2階建てにおける個(11)/個(8)の比(▲)』であり、横軸は個(14)である。この図における「個(5)/個(2)の比の平均>1」はFig. 5における「全(5)は全(2)より大きい」に対応し、「個(11)/個(8)の比の平均>1」はFig. 5における「全(11)は全(8)より大きい」に対応している。

なお、屋外の家際の1mの線量率(個(14))と屋内の外側1mの線量率(個(5))との間には予想されるように比較的強い相関(相関係数=0.81)がみられた。1階における屋

内の外側の線量率/内側の線量率の比(=個(5)/個(2))、●と○を1つにプール)では個(14)との間に弱い正の相関(相関係数=0.53)がみられた。2階における屋内の外側1mの線量率(個(11))と屋外の家際の1mの線量率(個(14))との間では相関係数=0.66であり、屋内の外側/内側の比(=個(11)/個(8))と個(14)の間では相関は認められなかった(相関係数=-0.25)。

そこに住む人の受ける累積被ばく量の観点でいえば、

Fig. 6 Ratio of dose rate at outer side to dose rate at inner side of house plotted against outdoor dose rate, measured after decontamination
▲, ●, and ○ represent respectively ratio compared at the second floor of two-story houses, ratio compared at the first floor of two-story houses, and ratio compared at the first floor of one-story houses.

累積被ばく量 = $\sum_{\text{カテゴリー}} (\text{カテゴリーの“平均線量率”} \times \text{カテゴリーでの滞在時間})$

で推定するのが合理的である。すなわち、累積被ばく量の観点からは、カテゴリーごとの平均線量率の違いにはバイアスとしての意味があると考えられる。

除染後の空間線量率の屋敷内での位置に関する分布について、Fig. 5の全(n)のカテゴリーnによる違いを比較しながらその傾向を以下に述べる。傾向として“全(n)は全(m)より大きい”として取り上げた場合はFig. 6が例示するように、Fig. 5において“全(n)と全(m)の差”がそれらの信頼区間と比べて十分大きくなくても、“個(n)/個(m)の比の平均”としては1より大きい。

傾向1) 1階でも2階でも床面と1m高さの違いは小さい(全(1)を全(2)と、全(4)を全(5)と、全(7)を全(8)と、全(10)を全(11)と比較)。

傾向2) 1階でも2階でも天井の値は床面および1m高さの値よりも高い(全(1)および全(2)を全(3)と、全(4)および全(5)を全(6)と、全(7)および全(8)を全(9)と、全(10)および全(11)を全(12)と比較)。

傾向3) 1階でも2階でも外側の方が内側よりも高い(全(1)を全(4)と、全(2)を全(5)と、全(7)を全(10)と、全(8)を全(11)と比較)。前述したように、傾向3)はFig. 6でも読み取れる。

傾向4) 2階建ての家においては、2階の方が1階よりも高い(全(1)を全(7)と、全(2)を全(8)と、全(3)を全(9)と)のように対応するカテゴリーどうしを比較、後出のFig. 7も参照)。

なお、2階建ての1階と平屋の比較では、松田など⁸⁾のデータでは平屋の線量率の方が高い(文献⁸⁾のFig. 6参照)。Fig. 5でもカテゴリー2ではこの傾向がみられる。

傾向5) 2階の床面は1階の天井よりも低い(全(3)を全(7)と、全(6)を全(10)と比較)。

傾向1)については、古田、高橋のシミュレーション⁶⁾では床面より高くなると線量率が増加する。松田、斎藤²⁾もこの傾向を報告している。床面より高くなると線量率が増加する傾向は今回の測定では1階の外側(全(4)と全(5)の比較)にのみわずかに認められた。測定に携わった者(2~3人)の身体によるプローブへの遮蔽効果は、1m高さの測定では相対的に高く、床面と天井の測定では低いと考えられる。このことが今回の測定では1m高さの値と床面の値の差が小さかった原因となっている可能性はある。

傾向3)は、松田、斎藤²⁾によっても報告されていて(文献²⁾01-appendix4-2.pdfの図25)、古田、高橋が行ったシミュレーション—文献⁶⁾の図7右；線源は地中に侵入した一様分布の¹³⁷Cs、建物は福島県の代表的木造家屋—の結果とも一致する。

なお前に述べたように、2階建ての家の1階の天井については、上に2階のある部分(Fig. 2 1階の灰色の部分)とない部分(Fig. 2 1階の白色の部分)で違いはみられなかった。すなわち、平均値と95%信頼区間で示すと、内側の天井では、2階のない部分 0.236 ± 0.140 ある部分 0.212 ± 0.098 、外側の天井では、2階のない部分 0.231 ± 0.109 ある部分 $0.226 \pm 0.108 \mu\text{Sv/h}$ であった。

屋外では、

傾向6) 地面の方が1m高さよりも高い(全(13)を全(14)と、全(15)を全(16)と比較)。

傾向7) 家から離れた庭の方が家の際よりも高い(全(14)を全(16)と比較)。

檜葉町がまとめた除染作業後の宅地の1m高さ空間線量率¹⁾はFig. 1に示されている。今回測定したカテゴリー16の値との間に食い違いはない。

2. 除染後の家屋減少係数

Figure 7は家屋減少係数((6)式で定義した House reduction factor)を示す。

$$\text{House reduction factor} = I_{\text{階内側1m}} / I_{\text{屋外庭1m}} \quad (6)$$

屋外の線量率として庭1m高さの値(Fig. 4に示されている個(16)に相当)を取ってこれをxとして、屋内の線量率として1階内側1m高さの値(Fig. 4における個(2)に相当)および2階内側1m高さの値(Fig. 4における個(8)に相当)を取ってこれをyとして、測定された屋敷の数だけのxとyの組について、松田他⁸⁾ 吉田他⁹⁾と同様に、

Fig. 7 Correlation between house reduction factor and outdoor dose rate measured after decontamination
House reduction factor was defined as y/x , where x and y respectively correspond to mean of category number 16 and mean of category number 2 or 8. Thin and thick lines were drawn after linear regression between x and y for 2nd floor data and 1st floor data of two-story houses, respectively.

(7)式によって直線回帰した。ただし、Fig. 7では同一日の測定なので時間経過の換算は行っていない

$$y = ax + b \quad (7)$$

事故による放射性降下物に由来する線量率を I 、事故に由来しないバックグラウンド線量率を I_{out}^B および I_{in}^B として、 x および y を (8)、(9)式で表すと(10)式が得られる。

$$x = K^{out}I + I_{out}^B \quad (8)$$

$$y = K^{in}I + I_{in}^B \quad (9)$$

$$y = (K^{in}/K^{out})x + I_{in}^B - (K^{in}/K^{out})I_{out}^B \quad (10)$$

たしかに、(7)式の勾配 a は、バックグラウンド線量率が存在しない仮想的な世界での家屋による線量率の減少係数という、物理的には明瞭な意味をもっている。

しかし、本報告では屋外での被ばくと屋内での被ばくという現実的世界での家屋減少係数として定義(6)式を採用した。(6)式は(7)式によって(6)'式と変形される。

$$\text{House reduction factor} = a + b/x \quad (6)'$$

Figure 7 中のプロット点は屋敷ごとに得られた家屋減少係数を表し、2本の曲線は回帰結果に基づいて(6)'式で計算したものである。2階建て家の1階(濃い曲線)に対しては、 $a=0.30$, $b=0.087$, $R^2=0.654$, 2階建て家の2階(薄い曲線)に対しては、 $a=0.44$, $b=0.072$, $R^2=0.725$ である。この図において横軸がほぼ同じときの縦軸の位置の違いとしてみると、2階のプロット点が1階の

プロット点よりも上にある。すなわち、この図からも傾向4)が読み取れる。

Figure 7によると家屋減少係数は、屋外の線量率が0.1–0.5 $\mu\text{Sv/h}$ の範囲では、屋外の線量率の減少とともに増大する。(8)、(9)、(10)式が示すように、(6)式で定義した家屋減少係数の屋外の線量率による変化は線量中にバックグラウンド成分が存在することの結果である。

松田他⁸⁾はOSL線量計による屋内線量測定と京都大学のKURAMA-IIを用いた屋外の歩行線量測定をいわき、郡山、白川、田村、川内、広野において2013年11月から2014年2月に行った。この地域は屋外線量率0.5 $\mu\text{Sv/h}$ 未満の低汚染地であった。彼らも木造あるいは軽量鉄骨構造の家屋を測定して、屋内線量率と屋外線量率とを直線回帰した。彼らの値(文献⁸⁾のFig. 5)は、1階に対しては、 $a=0.38$, $b=0.04$, 2階に対しては、 $a=0.49$, $b=0.02$ であった。これらの数値は今回の測定値とほぼ一致する。彼らによれば鉄筋コンクリート作りでは屋内の線量率は屋外の線量率に依存しない。

吉田他⁹⁾による飯館、南相馬一小高の0.5–5 $\mu\text{Sv/h}$ の高汚染地域の2012年12月から2013年12月での木造家屋に関する測定によれば $a=0.44$ (文献⁹⁾のFig. 2)であった。彼らによると平均的な家屋減少係数は1階では0.41, 2階では0.45であった(文献⁹⁾のTable 1)。

古田、高橋のシミュレーションで得た建物の線量低減係数“=建物内線量/十分離れた屋外での線量”は(文献⁶⁾の図11 h j 1)木造家屋の1階で0.59, 2階で0.61程度であった。これらの値はFig. 7の家屋減少係数と、1階と2階の差を含めて、おおむね一致している。

3. 除染前後で測定された例

次に除染前に測定された値について述べる。4軒の屋敷について、Fig. 5を作成したときと同様に計算した結果をFig. 8に示す。ただし、Fig. 8では95%信頼区間ではなく、“±標準偏差”によって則定値の揺らぎの程度を示している。この図の縦軸は $I(2013.11)$ に相当する。2013.11は除染前測定の最後の日である。除染前の測定では屋敷数が少なく、全カテゴリーについては測定値をまとめることはできなかった。しかし、傾向1), 2), 3), 6)は除染前にも認められた(Fig. 8)。

Figure 9は除染前と除染後で測定された4軒に関する除染減少係数(Decontamination Reduction factor)を示す。ここでは、

$$\begin{aligned} & (I(\text{除染後測定日}) - I_B) / (I(\text{除染前測定日}) - I_B) \\ & = {}^{137}\text{Cs}(I(\text{除染後測定日}) / I(\text{除染前測定日})) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \text{Decontamination Reduction factor} \\ & = I(\text{除染後測定}) / I(\text{除染後測定日}) \end{aligned} \quad (12)$$

とした。ここに、 $I(\text{除染前測定日})$ および $I(\text{除染後測定})$ は当該の個(n)(Fig. 4参照)に相当する。 $I(\text{除染前測定日})$ は除染作業前の“除染前測定日”に測定された値であり、

Fig. 8 Mean and interval of mean $\pm$ standard deviation for dose rates measured in 4 premises before decontamination
The dose rates were corrected as of November 2013.

I (除染後測定)は除染作業後の“除染後測定日”に測定された値である。 I (除染後測定日)は除染前に測定された線量率(I (除染前測定日))を除染後の測定日の線量率に(11)式で換算した値である。Fig. 9におけるカテゴリーごとの4点は4軒に対応している。“mean of category”はカテゴリーごとの4軒の平均を表す。

Figure 9からは、測定された木造家屋において、

傾向8) 除染による空間線量率の減少効果は屋外の方が屋内よりも大きいという傾向が読み取れる。

III. まとめ

福島県の檜葉町において、2013年10月から2015年7月に測定した木造一戸建て個人住宅の屋内・屋外の空間線量率をまとめた。

データの整理においては、測定位置をその性格によっていくつかのカテゴリーに分類して、1軒の屋敷についてのカテゴリーごとの平均を求めた。さらに、全測定データをカテゴリーごとにプールして、カテゴリーごとの平均値とその95%信頼区間を求めて、屋敷内における測定位置による線量率の違いの全体的傾向を調べた。線量率の時間経過に伴う減少については放射性セシウムの半減期による減衰のみ考慮した。

屋外の線量率の結果は町で公表している屋外の線量率とおおむね一致した。線量率の屋内/屋外の比が屋外の線量率の減少とともに増大するという結果は他の方法で測定された汚染度が同程度の地域の結果と、屋外の線量率と屋内の線量率との間の関係((7)式)がほぼ等しいという意味

Fig. 9 Decontamination effect observed in the measured 4 premises

Decontamination reduction factor was defined as dose rate after decontamination / dose rate before decontamination and calculated for categories of measuring points. The dose rates before decontamination were corrected to date of measurement after decontamination. “Mean of category” in this figure represents mean of the 4 premises.

で、基本的に一致した。

家屋内の位置による線量率の違い、例えば2階の床面の線量率は1階の天井の線量率より低い、に関しては、発表されているシミュレーション結果の中に測定された傾向と一致するものがあった。

他の報告との比較から、家屋内の床面からの高さによる線量率変化は屋外の線量率(および屋外における線源の地中深さ)に影響されることが示唆された。今後はこの点に注目した測定データの整理およびシミュレーションの実施が必要であると考えられる。

報告のもととなった測定プロジェクトは塩谷亘弘前(公社)福島原発行動隊代表理事の主唱のもと福島原発行動隊の関係者およそ延べ120名のボランティア参加によって実行された。

本報告をまとめるに当たり、国立環境研究所の田中 敦氏より貴重な情報と助言を頂きました。日本原子力研究開発機構の松田規宏氏からも文献ファイルの提供とコメントを頂きました。査読者の1人からも文献情報を頂きました。

英文表記については、室岡喜一郎氏および原子力資料情

報室のスタッフの協力を頂きました。

感謝の意を表します。

— 参考文献 —

- 1) 檜葉町の放射線量の現状等について，檜葉町放射線対策課(避難指示解除準備区域の指定解除に関する住民説明会での配布資料)，2015.06.22.
- 2) 平成 23 年度「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」成果報告書，日本原子力研究開発機構(2012)の中の
 - 5 放射線量等分布状況調査(空間線量率，土壤濃度マップの作成)に関連した研究
 - 5.3 居住環境における空間線量率等の測定，
Appendix 4.2：居住環境における空間線量率の測定
に相当する著者松田 規宏，斎藤 公明の以下のファイル
http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/10000/9735/30/1-4_housesurvey.pdf,
<http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf05/01-appendix4-2.pdf>
- 3) 測定値(空气中放射線量)と実効線量，日本原子力学会，
http://www.aesj.or.jp/~rst/fukushima/120726_01.pdf
- 4) 小森昌史，小豆川勝美，野川憲夫，松尾基之， $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ 放射能比を指標とした福島第一原子力発電所事故に由来する放射性核種の放出原子炉別汚染評価，” *Bunseki Kagaku*, **62**, 475-483 (2013).
- 5) (公社)日本アイソトープ協会，アイソトープ手帳 11 版(2011).
- 6) 古田琢哉，高橋史朗，環境に沈着した事故由来の放射性セシウムからのガンマ線に対する建物内の遮蔽効果及び線量低減効果の解析，JAEA-Research 2014-003，日本原子力研究開発機構(2014)，<http://www.jaea.go.jp>
- 7) 下 道國，真田哲也，高橋和信，湊 進，“日本の自然放射線による線量，”(公社)日本アイソトープ協会 発行 *Isotope News* 2013 年 2 月号，**706**, 23-36.
- 8) N. Matsuda, S. Mikami, T. Sato, K. Saito, “Measurements of air dose rates in and around houses in the Fukushima Prefecture in Japan after the Fukushima accident,” *J. Environ. Radioact.*, (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.03.012>
- 9) H. Yoshida-Ohuchi, M. Hosoda, T. Kanagami, M. Uegaki, H. Tashima, “Reduction factors for wooden houses due to external γ -radiation based on *in situ* measurements after the Fukushima nuclear accident,” *Sci. Rep.*, | 4 : 7541 | DOI:10.1038/srep07541 (2014), <http://www.nature.com/articles/srep07541>