資 料

核融合科学研究所における松葉及び土壌中の
環境放射性物質のモニタリング中田 実希^{*1, #}, 田中 将裕^{*1, 2}, 赤田 尚史^{*3}, 加藤 明己^{*1}, 岩田 智恵^{*1}, 林 浩^{*1}

(2020 年 12 月 11 日受付)

(2021 年 3 月 17 日採択)

Monitoring of Environmental Radioactivity in Pine Needle and Soil at the Site of National Institute for Fusion Science

Miki NAKADA,^{*1, #} Masahiro TANAKA,^{*1, 2} Naofumi AKATA,^{*3} Akemi KATO,^{*1} Chie IWATA^{*1} and Hiroshi HAYASHI^{*1}

At National Institute for Fusion Science (NIFS), the environmental radioactivity in soil and pine needles were measured from 2014 to 2019 as a part of the monitoring activities for deuterium plasma experiments using Large Helical Device (LHD). Among the monitoring nuclides of ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁷Be and ⁴⁰K, the nuclides of ¹³⁷Cs, ⁷Be and ⁴⁰K were detected by a HPGe detector. The concentration of ⁴⁰K in soil ranged from 530 Bq/kg to 1,068 Bq/kg, which was the same level at the Tono area reported by Hosoda et al. In addition, the concentration of ⁴⁰K in pine needles ranged from 125 Bq/kg to 300 Bq/kg and a peak was observed in summer. The maximum concentrations of ⁷Be on soil and pine needles were 69.4 Bq/kg and 31.9 Bq/kg, respectively. The concentration of ⁷Be on pine needles became low in summer. Although the concentration of ¹³⁷Cs on pine needles was not almost detectable, that on soil ranged from 0.56 Bq/kg to 3.69 Bq/kg. The concentrations of these nuclides remain the same level after starting the deuterium plasma experiment in LHD.

KEY WORDS: soil, pine needle, ¹³⁷Cs, ⁷Be, ⁴⁰K, radioactivity, environmental monitoring, Toki, Gifu Prefecture.

I 緒 論

核融合科学研究所(岐阜県土岐市, 以下, NIFS)では, 核融合炉の実現を目指して大型ヘリカル装置によるプラズマ実験を行っている。研究の進展に伴い, 2017 年 3 月からプラズマ実験の動作ガスとして重水素(D₂)を

使用している(以下, 重水素実験)^{1, 2)}。重水素実験では, 極微量ではあるが放射線(中性子線, γ (X) 線)とトリチウムが発生する。放射線は 2 m 厚のコンクリート製の建屋壁で十分に遮蔽され³⁾, 発生したトリチウムは除去装置⁴⁾で回収される。NIFS では, 重水素実験による環境影響を監視するため, 「大型ヘリカル装置における重水素実験の安全管理計画(以下, 安全管理計画)」⁵⁾に基づき, 施設周辺の空間放射線量率や, 環境水中トリチウム濃度測定を実施している⁶⁻⁸⁾。この一環として, 線量測定とは別の手段で環境影響を確認するため, 重水素実験で生成される核種(グラファイト由来の¹⁴C, ⁷Be や, SUS316 由来の¹⁴C, ⁵¹Cr, ⁵³Mn, ⁵⁴Mn, ⁵⁵Fe, ⁵⁹Fe, ⁵⁶Co, ⁵⁷Co, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ⁵⁹Ni, ⁶³Ni, ⁹⁵Zr, ^{95m}Nb, ⁹⁴Nb, ⁹⁵Nb, ^{93m}Nb, ⁹³Mo, ⁹⁹Tc)のうち⁷Be, ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co と人工及び天然放射性核種の¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁴⁰Kを対象として観測を行った。それぞれの核種について, 定

*1 自然科学研究機構核融合科学研究所; 岐阜県土岐市下石町 322-6 (〒509-5292)

National Institute for Fusion Science, National Institutes of Natural Sciences; 322-6 Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu 509-5292, Japan.

*2 総合研究大学院大学; 岐阜県土岐市下石町 322-6 (〒509-5292)
The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI; 322-6 Oroshi-cho, Toki-shi, Gifu 509-5292, Japan.

*3 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.

Corresponding author; E-mail: nakada.miki@nifs.ac.jp

量に使用した γ 線のエネルギー，半減期，生成過程⁹⁾をTable 1にまとめる。

本報では，2014年4月から2019年12月までの期間，NIFSの敷地内で採取した松葉及び土壌試料に含まれる上記8核種のモニタリング結果を報告する。

II 試料の採取及び作成方法と測定

1. 試料の採取

本モニタリングでは，松葉と表層土壌を対象とした。NIFSの立地及び敷地内の土壌及び松葉試料の採取地点をFig. 1に示す。松葉及び土壌試料は，大型ヘリカル実験棟南西部の保存林周辺（排気筒（放出高さ約50 m）から60～100 m離れた場所）で採取した。試料は，放射能測定法シリーズ環境試料採取法¹⁰⁾を参考にして，一部の作業を簡略化し，採取した。

松葉は，指標植物として多くの施設で利用されていると共に，NIFS敷地内に多く生育している。NIFSでは，これまでに松葉中トリチウム測定を行っており¹¹⁾，本報告でも松葉を試料植物として用いた。松葉は一年葉を対象とし，採取量は，180 gを超える量とした。松葉について，2014年5月から2019年2月までは，四半期ごとに採取及び測定を行った。松葉は一年葉の生育状況を考慮して，四半期の起点を5月とした。2019年以降は，

重水素実験期間中と重水素実験期間外の年2回の採取及び測定とした。

土壌試料の採取場所は，芝が生えた草地で，およそ60 m×20 mの範囲である。試料の採取は，直径5 cm，高さ5 cmの土塊を採取できる採土器（ダイキ理化学工業，DIK-1630）を用いた。Fig. 1に示した採取地点で，土塊を3つ採取した。合計の採取面積は，0.00589 m²である。土壌について，2014年4月から2016年8月までは，NIFS敷地内の土壌の基礎データを集めるために，毎月採取及び測定を行った。その後，2017年3月に重水素実験が開始されたことに伴い，2016年11月から2019年2月までは，5月を起点とした四半期ごとの採取及び測定に変更した。さらに，2019年以降は，松葉試料と同様に重水素実験期間中と重水素実験期間外の年2回の採取及び測定とした。

2. 松葉試料の作成

採取した松葉の重さを測定したのち，約80℃の恒温槽で乾燥させた。乾燥した松葉試料をミルサー（Iwatani，FM-620DG）で粉碎し，均一に混合した。この試料をU-8容器に高さ約5 cmになるよう，震とうさせながら手で押し込んで充填した。測定試料の重さは平均53 g，密度は平均0.49 g/cm³であった。

Table 1 Summary of gamma-ray energy, half-life, and generation process used for quantification.⁹⁾

Nuclear	⁷ Be	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
Energy [MeV]	0.478	0.835	1.099	0.811	1.332	0.605	0.662	1.461
Half-life	53.22 d	312.03 d	44.495 d	70.86 d	5.2713 y	2.0648 y	30.1671 y	1.251 × 10 ⁹ y
Generation process	¹² C(p,3p3n) ⁷ Be	⁵⁴ Fe(n,p) ⁵⁴ Mn	⁵⁸ Fe(n, γ) ⁵⁹ Fe	⁵⁸ Ni(n,p) ⁵⁸ Co	⁵⁹ Co(n, γ) ⁶⁰ Co	¹³³ Cs(n, γ) ¹³⁴ Cs	U(n,f) ¹³⁷ Cs	Natural abundance (0.0117%)

d:day, y:year

Fig. 1 Location of NIFS and sampling point in NIFS site (35°19'N, 137°10'E).

3. 土壌試料の作成

採取した土壌は、0–2 cm の範囲を表層試料、2–5 cm の範囲を内層試料とした。採取した土壌の重さを測定し、約 80°C の恒温槽で乾燥させ、乾燥後の重さを測定した。

2014 年 4 月から 2016 年 8 月までの期間は、試料を表層試料と内層試料に分けて測定した。表層試料は、乾燥した 3 つの表層試料を重ねて U-8 容器に詰めた。測定試料の重さは、平均 43 g であった。内層試料は、土壌をふるいにかけた後、乳鉢で粉碎し、均一に混合した。この試料を U-8 容器に高さ約 5 cm になるよう、震とうさせながら手で押し込んで充填した。試料の重さは平均 126 g であった。

2016 年 11 月以降は、表層試料と内層試料を区別せず、乾燥させた土壌を粉碎後、U-8 容器に充填して 0–5 cm の試料とした。2016 年 11 月以降の試料の重さは平均

118 g、密度は平均 1.16 g/cm³ であった。

4. 試料の測定

測定は、HPGe（高純度ゲルマニウム半導体検出器、GX3518-CP5-PLUS-U-ULB-iPA-10、ミリオンテクノロジー・キャンベラ（株）、相対効率 41%、もしくは GX3018、ミリオンテクノロジー・キャンベラ（株）、相対効率 35%）を用いて、測定時間は 8 万秒とした。測定結果の一例として、2018 年 5 月に採取した松葉及び土壌試料の γ 線スペクトルを Fig. 2 (a), (b) に示す。どちらの測定でもウラン系列及びトリウム系列のピークが多数検出された。松葉及び土壌の試料について対象核種の検出下限値を Table 2 にまとめる。検出下限値は、ミリオンテクノロジー・キャンベラ（株）が提供するソフトウェア「ガンマエクスプローラ」を用いて、Cooper

Fig. 2 An example of gamma-ray energy spectrum measured by an HPGe detector: (a) soil, (b) pine needles (sample collected in May, 2018).

Table 2 Detection limits in ⁷Be, ⁵⁴Mn, ⁵⁹Fe, ⁵⁸Co, ⁶⁰Co, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs and ⁴⁰K.

Nuclear	⁷ Be	⁵⁴ Mn	⁵⁹ Fe	⁵⁸ Co	⁶⁰ Co	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁴⁰ K
Detection limits of pine needles [Bq/kg]	5.70–19.5	0.63–1.15	1.50–2.46	0.67–1.30	0.87–1.41	0.74–1.29	0.63–1.74	8.83–18.0
Detection limits of soil [Bq/kg]	2.78–13.3	0.37–1.25	0.83–3.64	0.35–1.42	0.42–1.20	0.34–0.97	0.38–2.46	4.08–10.7

の式で算出した。測定誤差は、計数誤差を標準偏差により算出した。

III 測定結果

1. 松葉の測定結果

対象核種のうち、これまでに検出された核種は、 ^{40}K 、 ^7Be 、 ^{137}Cs である。それぞれの放射性物質濃度、計数誤差、検出下限値 (LLD) を Tables 3, 4, 及び 5 に示す。

^{40}K の放射性物質濃度は 125 Bq/kg 乾から 300 Bq/kg 乾の範囲にあった。 ^{40}K 濃度の変動を Fig. 3 に示す。季節ごとの平均濃度は、5 月または 6 月が 170 Bq/kg 乾、8 月が 276 Bq/kg 乾、11 月または 12 月が 193 Bq/kg 乾、2 月が 159 Bq/kg 乾であった。 ^{40}K 濃度は、夏に高くなる傾向を示し、天然放射性核種のためこの傾向は重水素実験の実施前と後で変化しない。松葉は春から夏にかけて成長する。これに伴い、松葉の構成元素としてのカリウムの割合も夏にかけて大きくなる。そのため、カリウム中に含まれる天然放射性核種である ^{40}K の量も比例して増加したと考えられる。

^7Be の放射性物質濃度は検出下限値以下 (ND) から 31.9 Bq/kg 乾の範囲にあった。放射性物質濃度は、重水素実験の実施前と後で変化しておらず、環境の変動範囲内と考えられる。 ^7Be は大気上層で宇宙線が大気中の窒素や酸素などに当たって起こる核破砕反応によって生成され、エアロゾルとして松葉表面に沈着する。松葉に沈着した ^7Be が検出されたと考えられる。

梶崎ら^{12, 13)}は、松葉の ^7Be が夏に低い濃度を示すことを報告しており、降水による洗浄効果について議論している。また、NIFS 敷地内で大気中浮遊物の測定も行っており、 ^7Be 濃度が春と秋に高くなる傾向を確認している^{14, 15)}。これらから、夏季に松葉の ^7Be が検出下限値以下となるのは、 ^7Be の浮遊量が少ないことに加え、夏季には降水量が比較的多くなることから、降水による洗浄効果により松葉表面上の ^7Be が洗い流されたためと考えられる。

^{137}Cs は、2014 年 11 月に検出されたのみであった。2014 年 11 月の ^{137}Cs の放射性物質濃度は、1.24 Bq/kg 乾で、検出下限値とほぼ同水準であった。

2. 土壌の測定結果

対象核種のうち、検出された核種は、 ^{40}K 、 ^7Be 、 ^{137}Cs の 3 つである。それぞれの放射性物質濃度、誤差、検出下限値 (LLD) を Tables 3, 4, 及び 5 に示す。

^{40}K のデータについては、2016 年 8 月までは内層試料、

2016 年 11 月以降は 0–5 cm 試料の測定結果を示す。 ^7Be 及び ^{137}Cs の濃度は、2016 年 8 月までは表層試料、2016 年 11 月以降は 0–5 cm 試料の測定結果を示す。

^{40}K の放射性物質濃度は 530 Bq/kg 乾から 1,068 Bq/kg 乾の範囲にあった。 ^{40}K 濃度の変動を Fig. 4 に示す。NIFS の測定結果を、環境放射能水準調査¹⁶⁾で報告されている結果のうち、NIFS と同じく草地の土壌であり、NIFS に近い採取場所である、愛知県田原市及び石川県金沢市の測定結果と比較する。比較に使用するデータは、環境試料採取法に基づき、2014 年から 2018 年の夏季に採取された草地の土壌を測定したものである。田原市の測定結果は、310 Bq/kg から 370 Bq/kg の範囲、金沢市の測定結果は、400 Bq/kg から 520 Bq/kg の範囲にあった。一方で、NIFS の測定結果は、これらの測定結果のおおよそ 2 倍であった。細田ら¹⁷⁾の in-situ 測定によると、岐阜県東濃地域の ^{40}K 濃度は、543 Bq/kg から 1,014 Bq/kg の範囲にある。NIFS における測定結果は、測定の方法は異なるが、細田らの測定結果とよく一致しており、東濃地域の土壌の性質を表している。

^7Be の放射性物質濃度は、検出下限値以下から 69.4 Bq/kg 乾の範囲で、季節変動は確認されなかった。検出回数は、混合試料となった 2016 年 11 月以降に減少した。前述したように、 ^7Be は宇宙線生成核種なので、エアロゾルとして地表面に降下する。2016 年以降の試料作成時に土壌の表層試料と内層試料を混合したことで試料の体積がおおよそ 2.5 倍となった。そのため、土壌の表層に降下した ^7Be は希釈され、検出下限値以下の値

Fig. 3 Variation of ^{40}K concentration in pine needles.

Table 3 Measurement data of ^{40}K concentration in soil and pine needles.

Sampling date [year/month]	Soil (0–2 cm)				Soil (2–5 cm)				Pine needles			
	Measurement data ^{※1}		LLD ^{※2}		Measurement data ^{※1}		LLD ^{※2}		Measurement data ^{※1}		LLD ^{※2}	
	[Bq/kg (dry)]		[Bq/kg]		[Bq/kg (dry)]		[Bq/kg]		[Bq/kg (dry)]		[Bq/kg]	
2014	Apr	6.95E+02	±	14.13	14.94	9.37E+02	±	10.86	9.49			
	May	8.20E+02	±	17.30	23.76	8.99E+02	±	10.83	9.46	1.25E+02	±	7.38
	Jun	7.16E+02	±	18.09	27.58	9.68E+02	±	11.04	8.57			
	Jul	8.96E+02	±	26.00	41.28	8.10E+02	±	10.58	9.36			
	Aug	7.08E+02	±	16.94	24.02	7.84E+02	±	9.73	8.08	2.84E+02	±	11.50
	Sep	1.03E+03	±	18.21	18.09	9.28E+02	±	10.94	8.47			
	Oct	7.83E+02	±	19.56	24.93	9.37E+02	±	11.07	9.00			
	Nov	7.78E+02	±	15.25	16.55	1.07E+03	±	12.25	9.59	2.04E+02	±	9.45
	Dec	7.34E+02	±	15.71	21.87	9.11E+02	±	10.54	8.37			
2015	Jan	7.68E+02	±	18.10	25.79	1.02E+03	±	11.38	8.88			
	Feb	8.66E+02	±	15.33	15.93	1.01E+03	±	11.88	9.54	1.54E+02	±	8.24
	Mar	8.81E+02	±	14.18	16.48	9.14E+02	±	10.81	8.36			
	Apr	7.62E+02	±	14.85	18.81	9.81E+02	±	11.10	9.18			
	May	7.43E+02	±	17.46	21.06	9.83E+02	±	11.05	8.85	1.29E+02	±	7.13
	Jun	7.61E+02	±	12.03	11.54	9.88E+02	±	10.94	9.35			
	Jul	9.79E+02	±	13.18	11.24	1.04E+03	±	11.13	8.76			
	Aug	8.26E+02	±	11.86	12.63	8.98E+02	±	11.20	8.61	2.79E+02	±	10.53
	Sep	8.17E+02	±	12.58	12.12	9.14E+02	±	10.39	8.40			
	Oct	6.45E+02	±	11.38	11.48	8.64E+02	±	10.13	8.21			
	Nov	5.95E+02	±	11.62	12.92	9.03E+02	±	10.35	8.35	1.85E+02	±	8.33
	Dec	7.76E+02	±	12.23	12.16	9.30E+02	±	10.22	7.97			
2016	Jan	8.12E+02	±	12.30	14.05	9.55E+02	±	10.40	8.63			
	Feb	8.22E+02	±	11.52	10.68	8.66E+02	±	9.75	8.14	1.59E+02	±	7.79
	Mar	7.81E+02	±	11.24	12.09	7.95E+02	±	9.25	7.62			
	Apr	7.27E+02	±	11.62	10.61	9.33E+02	±	10.53	7.81			
	May	7.98E+02	±	12.24	11.25	8.99E+02	±	9.89	7.94	1.32E+02	±	7.19
	Jun	7.83E+02	±	13.51	15.51	9.31E+02	±	10.45	8.16			
	Jul	8.58E+02	±	12.80	13.51	1.00E+03	±	10.64	8.54			
	Aug	7.10E+02	±	13.18	13.76	8.98E+02	±	11.20	9.75	2.59E+02	±	9.42
	Ave.	7.88E+02	±	14.63	17.12	9.30E+02	±	10.71	8.67			
	Min.	5.95E+02	±	11.24	10.61	7.84E+02	±	9.25	7.62			
	Max.	1.03E+03	±	26.00	41.28	1.07E+03	±	12.25	9.75			
Soil (0–5 cm)				Pine needles								
2016	Nov	8.78E+02	±	10.68	8.94					1.85E+02	±	9.49
	Feb	9.01E+02	±	11.03	10.68					1.54E+02	±	6.68
2017	May	8.67E+02	±	10.47	10.14					1.33E+02	±	6.71
	Aug	7.71E+02	±	10.75	9.72					2.84E+02	±	10.63
	Nov	1.02E+03	±	11.26	8.56					2.03E+02	±	7.66
2018	Feb	9.67E+02	±	10.47	7.96					1.56E+02	±	6.84
	May	8.30E+02	±	9.40	7.02					2.03E+02	±	7.66
	Aug	1.00E+03	±	9.59	6.42					2.75E+02	±	7.85
	Nov	9.08E+02	±	9.15	6.54					1.70E+02	±	6.84
2019	Feb	9.55E+02	±	10.49	8.18					1.74E+02	±	7.29
	Jun	5.30E+02	±	5.40	4.08					3.00E+02	±	8.53
	Dec	8.97E+02	±	9.21	7.53					2.09E+02	±	6.78
	Ave.	8.77E+02	±	9.83	7.98					1.98E+02	±	8.18
	Min.	5.30E+02	±	5.40	4.08					1.25E+02	±	6.68
	Max.	1.02E+03	±	11.26	10.68					3.00E+02	±	11.50

※1 Concentration ± standard deviation.

※2 Lower Limit Detection.

になったと考えられる。 ^{40}K と同様に、NIFSの測定結果を、愛知県田原市及び石川県金沢市の測定結果と比較する。田原市の測定結果は、検出下限値以下から13 Bq/kgの範囲、金沢市の測定結果は、検出下限値以下から13 Bq/kgの範囲にあった。NIFSの測定結果は、これらの測定結果と比較するとおおそ5倍である。環境放射能水準調査の土壌は表層から20 cmを採取しており、

NIFSの2016年以降の測定結果と同様に ^7Be が希釈されていると考えられる。また、土壌表層の ^7Be 濃度は降下物の量に影響される。そこで、NIFSで降下物として観測された ^7Be 濃度を、環境放射能水準調査で報告されている降下物の結果のうち、NIFS（土岐市）に近い愛知県名古屋市及び静岡県静岡市の結果と比較する。比較のために、NIFSの測定結果を単位面積当たりに変換す

Table 4 Measurement data of ^7Be concentration in soil and pine needles.

Sampling date [year/month]		Soil (0 ~2 cm)				Soil (2 ~5 cm)				Pine needles			
		Measurement data ※ ¹		LLD ※ ²	Measurement data ※ ¹		LLD ※ ²	Measurement data ※ ¹		LLD ※ ²			
		[Bq/kg (dry)]			[Bq/kg]			[Bq/kg (dry)]			[Bq/kg]		
2014	Apr	32.62	±	3.15	12.16	ND ※ ³		6.99	18.36	±	2.36	10.15	
	May	41.91	±	3.29	12.92	ND		6.94					
	Jun	45.70	±	4.27	12.66	ND		6.28					
	Jul	46.16	±	5.11	19.85	ND		5.89					
	Aug	53.47	±	3.77	11.36	ND		5.55	ND			10.72	
	Sep	43.96	±	3.49	12.59	6.92	± 1.87	5.97					
	Oct	60.11	±	4.81	16.97	ND		6.24					
	Nov	28.81	±	3.00	11.83	ND		6.07	22.76	±	2.64	9.07	
	Dec	53.12	±	3.48	11.38	ND		6.05					
2015	Jan	57.76	±	4.37	14.36	ND		6.76					
	Feb	30.01	±	2.79	9.12	ND		6.73	27.69	±	2.98	10.54	
	Mar	29.64	±	2.57	9.61	ND		6.34					
	Apr	28.94	±	3.08	12.35	ND		7.29					
	May	69.38	±	5.70	18.89	ND		9.34	19.63	±	2.41	8.59	
	Jun	25.26	±	2.56	8.65	ND		6.65					
	Jul	22.55	±	2.25	8.70	ND		7.06					
	Aug	19.83	±	2.12	7.62	ND		6.51	ND			10.04	
	Sep	29.29	±	2.53	9.34	ND		6.04					
	Oct	22.13	±	2.37	9.25	ND		5.33					
	Nov	37.64	±	2.50	8.45	ND		7.30	15.42	±	2.43	9.30	
	Dec	21.15	±	3.35	13.29	ND		10.30					
2016	Jan	19.11	±	2.25	8.01	ND		6.37					
	Feb	12.52	±	1.97	7.77	ND		6.57	13.53	±	2.03	8.67	
	Mar	17.99	±	1.82	6.86	ND		5.87					
	Apr	18.79	±	1.87	7.72	ND		5.86					
	May	22.70	±	2.02	7.77	ND		5.68	24.68	±	2.47	8.92	
	Jun	34.17	±	2.65	8.82	ND		6.16					
	Jul	26.19	±	2.12	7.89	ND		5.95					
	Aug	38.06	±	2.77	8.73	ND		6.51	ND			8.82	
	Ave.	34.10	±	3.04	10.86	6.92	± 1.87	6.57					
	Min.	12.52	±	1.82	6.86	6.92	± 1.87	5.33					
	Max.	69.38	±	5.70	19.85	6.92	± 1.87	10.30					
Soil (0 ~ 5 cm)													
2016	Nov	ND		5.95					Pine needles				
		ND		5.95					ND		11.33		
2017	Feb	ND		5.74					11.30	±	1.63	7.12	
	May	ND		6.06					20.82	±	2.18	7.68	
	Aug	7.53	± 1.75	7.17					ND		9.86		
	Nov	ND		6.16					31.93	±	2.37	7.37	
2018	Feb	ND		6.13					11.30	±	1.63	7.12	
	May	8.33	± 1.29	4.94					13.30	±	1.76	5.95	
	Aug	ND		5.23					ND		6.31		
	Nov	ND		5.02					17.65	±	1.86	6.30	
2019	Feb	ND		10.43					ND		19.45		
	Jun	ND		2.78					10.13	±	1.42	6.06	
	Dec	ND		5.42					26.91	±	1.95	5.70	
		Ave.	7.93	± 1.52	5.92					19.03	±	2.14	8.87
	Min.	7.53	± 1.29	2.78					10.13	±	1.42	5.70	
	Max.	8.33	± 1.75	10.43					31.93	±	2.98	19.45	

※1 Concentration ± standard deviation.

※2 Lower Limit Detection.

※3 Not Detected.

ると、 ^7Be 濃度は検出下限値以下から 409 Bq/m² である。名古屋市の測定結果は検出下限値以下から 190 Bq/m²、静岡市の測定結果は検出下限値以下から 580 Bq/m² であった。NIFS における測定結果は、近隣で測定された濃度範囲内であった。このことは NIFS で観測された ^7Be が環境変動の範囲内であることを示唆している。

^{137}Cs の放射性物質濃度は、検出下限値以下から

3.69 Bq/kg 乾の範囲で、季節変動は確認されなかった。NIFS の測定結果を、環境放射能水準調査で報告されている岐阜県岐阜市の測定結果と比較する。比較に使用するデータは、環境資料採取法に基づき、2014 年から 2018 年までの夏季に採取された未耕地の土壌を測定したものである。岐阜市の結果は、2.7 Bq/kg から 5.3 Bq/kg の範囲にあった。NIFS の測定結果は、岐阜市の測定

Table 5 Measurement data of ^{137}Cs concentration in soil and pine needles.

Sampling date [year/month]		Soil (0–2 cm)				Soil (2–5 cm)				Pine needles			
		Measurement data ※ ¹		LLD ※ ²		Measurement data ※ ¹		LLD ※ ²		Measurement data ※ ¹		LLD ※ ²	
		[Bq/kg (dry)]		[Bq/kg]		[Bq/kg (dry)]		[Bq/kg]		[Bq/kg (dry)]		[Bq/kg]	
2014	Apr	ND ※ ³		1.36		ND		1.31		ND		1.74	
	May	ND		2.28		ND		0.84					
	Jun	1.84	±	0.37	1.67	1.00	±	0.21	0.74				
	Jul	3.69	±	0.59	2.46	2.07	±	0.23	0.72				
	Aug	ND		1.35		ND		0.74		ND		1.19	
	Sep	1.53	±	0.46	1.38	ND		0.82					
	Oct	ND		1.83		ND		0.81					
	Nov	1.81	±	0.32	1.23	ND		0.75		1.24	±	0.26	1.12
	Dec	ND		1.34		ND		0.70					
2015	Jan	1.86	±	0.69	1.45	ND		0.74					
	Feb	1.25	±	0.38	1.15	ND		0.81		ND		1.07	
	Mar	1.33	±	0.26	1.20	ND		0.74					
	Apr	ND		1.27		ND		0.83					
	May	ND		1.50		ND		0.75		ND		0.87	
	Jun	ND		0.89		ND		1.11					
	Jul	1.22	±	0.30	0.99	ND		0.76					
	Aug	1.40	±	0.22	0.76	ND		0.77		ND		1.15	
	Sep	ND		1.07		ND		0.74					
	Oct	1.18	±	0.25	1.01	0.77	±	0.16	0.70				
	Nov	1.15	±	0.23	0.94	ND		0.79		ND		1.07	
	Dec	ND		1.01		ND		0.78					
2016	Jan	ND		0.88		ND		0.76					
	Feb	1.24	±	0.24	0.89	ND		0.65		ND		0.95	
	Mar	0.99	±	0.20	0.87	0.67	±	0.16	0.65				
	Apr	ND		0.87		0.88	±	0.19	0.70				
	May	ND		1.47		ND		0.67		ND		0.90	
	Jun	1.19	±	0.23	1.00	ND		0.81					
	Jul	ND		0.96		ND		0.72					
	Aug	ND		1.55		ND		0.77		ND		0.88	
Ave.		1.55	±	0.34	1.26	1.08	±	0.19	0.78				
Min.		0.99	±	0.20	0.76	0.67	±	0.16	0.65				
Max.		3.69	±	0.69	2.46	2.07	±	0.23	1.31				
		Soil (0–5 cm)								Pine needles			
2016	Nov	ND		0.76						ND		1.15	
2017	Feb	ND		0.86						ND		0.84	
	May	ND		0.77						ND		0.83	
	Aug	ND		0.77						ND		1.05	
	Nov	ND		0.75						ND		0.76	
2018	Feb	ND		0.68						ND		0.84	
	May	0.69	±	0.19	0.66					ND		0.74	
	Aug	ND		0.61						ND		0.71	
	Nov	0.56	±	0.14	0.54					ND		0.75	
2019	Feb	ND		0.67						ND		0.73	
	Jun	ND		0.38						ND		0.80	
	Dec	ND		0.61						ND		0.63	
Ave.		0.63	±	0.17	0.67					1.24	±	0.26	0.94
Min.		0.56	±	0.14	0.38					1.24	±	0.26	0.63
Max.		0.69	±	0.19	0.86					1.24	±	0.26	1.74

※1 Concentration ± standard deviation.

※2 Lower Limit Detection.

※3 Not Detected.

結果と同水準であった。検出された ^{137}Cs は主に 1950 年代から 1960 年代に行われた大気圏内核実験で放出された物質のフォールアウトに起因すると考えられる。

IV 結 論

2014 年 4 月から 2019 年 12 月まで核融合科学研究所

(岐阜県土岐市) の敷地内で採取した松葉及び土壌の測定結果についてまとめた。対象核種のうち, ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{58}Co , ^{60}Co , ^{134}Cs の 5 核種は, 検出下限値以下であった。 ^{40}K は, 松葉では 125 Bq/kg 乾から 300 Bq/kg 乾の範囲, 土壌では 530 Bq/kg 乾から 1,068 Bq/kg 乾の範囲にあった。 ^{40}K は松葉において, 夏に濃度が高くなる

Fig. 4 Variation of ^{40}K concentration in soil.

傾向が観測された。 ^7Be は、松葉では検出下限値以下から 31.9 Bq/kg 乾の範囲、土壌では検出下限値以下から 69.4 Bq/kg 乾の範囲であった。 ^7Be は松葉において、夏に濃度が低くなる傾向が観測された。 ^{40}K は、天然の放射性核種であり、土壌試料に観測されたデータは、環境放射能水準調査の結果より高いが、東濃地域の測定結果とほぼ同じレベルであった。観測された ^7Be 濃度は、環境の変動範囲内であり、重水素実験による影響は観測されなかった。人工放射性核種である ^{137}Cs は、主に大気圏内核実験で放出されたフォールアウトに起因すると考えられ、検出下限値付近であった。

謝 辞

本研究は、NIFS 経費 UPSX001 により実施された。測定結果のまとめ方や一部の作業については、核融合科学研究所の西村清彦教授、磯部光孝教授、佐瀬卓也准教授、小川国大准教授、小林真助教、三宅均氏、小淵隆氏にご協力頂いた。また、初期の測定結果については、大谷久子氏、山本雪絵氏の協力を得た。

利益相反の開示

開示すべき利益相反状態はない。

参 考 文 献

- 1) M. OSAKABE, Y. TAKEIRI, T. MORISAKI, G. MOTOJIMA, K. OGAWA, et al.; Current status of Large Helical Device and its prospect for deuterium experiment, *Fusion Sci. Technol.*, **72**, 199–210 (2017).
- 2) M. OSAKABE, M. ISOBE, M. TANAKA, G. MOTOJIMA, K. TSUMORI, et al.; Preparation and commissioning for the LHD deuterium experiment, *IEEE Trans. Plasma Sci.*, **46**, 2324–2331 (2018).
- 3) M. KOBAYASHI, T. SAZE, H. MIYAKE, K. OGAWA, M. ISOBE, et al.; Radiation control in LHD and radiation shielding capability of the torus hall during first campaign of deuterium experiment, *Fusion Eng. Des.*, **143**, 180–187 (2019).
- 4) M. TANAKA, N. SUZUKI, H. KATO, T. KONDO, M. YOKOSAWA, et al.; Design and commissioning of the exhaust detritiation system for the Large Helical Device, *Fusion Eng. Des.*, **127**, 275–283 (2018).
- 5) National Institute for Fusion Science, National Institutes of Natural Sciences; Oogata herikaru souchi ni okeru jusuiso jikken no anzenkanrikeikaku (2017) [Safety management plan for LHD deuterium plasma experiment (2017)] (in Japanese). Available at: https://www.nifs.ac.jp/j_plan/pamph_030.pdf, Accessed 9 March 2021.
- 6) Y. SHIROMA, S. HIRAO, N. AKATA, M. FURUKAWA, H. MIYAKE, et al.; Measurement of absorbed dose rate in air at NIFS site after the first deuterium plasma experiment in LHD, *Plasma Fusion Res.*, 1305130 (2019).
- 7) N. AKATA, M. TANAKA, H. KATO, H. YAMANISHI, H. KAKIUCHI, et al.; Long-term monitoring of tritium concentration in environmental water samples collected at Tono area, Japan, *Plasma Fusion Res.*, 1305032 (2016).
- 8) National Institute for Fusion Science; Kakuyugou kagaku kennkyuujo kankyou kannshi jouhou [National Institute for Fusion Science, Environmental monitoring information] (in Japanese). Available at: <https://sewhite.nifs.ac.jp/index.html>, Accessed 9 March 2021.
- 9) Japan Radioisotope Association; “Radioisotope Pocket Data Book, 11th edition 2 printing”, p. 22, 24, 26–28, 63–64 (2011), Maruzen Publishing Co., Ltd., Japan (in Japanese).
- 10) MEXT; Houshano sokuteihou sirizu 16 kankyo shiryuu saisyuhou [Radioactivity measurement series 16 environmental sampling method] (in Japanese). Available at: <https://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/lib/No16.pdf>, Accessed 5 March 2021.
- 11) T. UDA, M. TANAKA, T. TAMARI, H. KAKIUCHI, N. MOMOSHIMA; The background levels of atmospheric

- tritium and OBT at NIFS Toki site of Japan, *Fusion Sci. Technol.*, **60**, 1244–1247 (2011).
- 12) Y. NARAZAKI and Y. KARUBE; Capturing characteristics of beryllium-7 in selected tree species, *Jpn. J. Health Phys.*, **32**, 25–31 (1997) (in Japanese).
- 13) Y. NARAZAKI and T. TAKAHASHI; Evaluation on capture and removal of fallout ^7Be on tree leaves, *Jpn. J. Health Phys.*, **38**, 38–44 (2003) (in Japanese).
- 14) N. AKATA, Y. SHIROMA, N. IKEMOTO, A. KATO, M. Hegedüs et al.; Atmospheric concentration and deposition flux of cosmogenic beryllium-7 at Toki, central part of Japan, *Radiat. Environ. Med.*, **7**, 47–52 (2018).
- 15) M. NAKADA, N. AKATA, M. KOBAYASHI, A. KATO, C. IWATA, et al.; Characteristics of atmospheric concentration and deposition flux of ^7Be at Toki, Japan, Proceedings of the 20th Workshop on Environmental Radioactivity (2019) (in Japanese).
- 16) Japan Chemical Analysis Center; Environmental radioactivity and radiation in Japan. Available at: <https://search.kankyo-hoshano.go.jp>, Accessed 9 March 2021.
- 17) M. HOSODA, N. AKATA, M. SHIMO, M. FURUKAWA, K. IWAOKA, et al.; Investigation of environmental radiation at Tono area in Gifu prefecture, Japan, *RADIOISOTOPES*, **64**, 465–474 (2015) (in Japanese).

中田 実希（なかだ みき）

岐阜県生まれ。2018年に自然科学研究機構核融合科学研究所に入所。技術部職員として、放射線管理に関わる放射線測定業務に従事している。

Email: nakada.miki@nifs.ac.jp