

Deposition of fission and activation products after the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident

福島原発事故後の核分裂と活性化生成物の堆積

Katsumi Shozugawa^{a,*}, Norio Nogawa^b, Motoyuki Matsuo^a

^a Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan

^b Radioisotope Center, The University of Tokyo, 2-11-16 Yayoi, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032, Japan

Abstract

The Great Eastern Japan Earthquake on March 11, 2011, damaged reactor cooling systems at Fukushima Dai-ichi nuclear power plant. The subsequent venting operation and hydrogen explosion resulted in a large radioactive nuclide emission from reactor containers into the environment. Here, we collected environmental samples such as soil, plant species, and water on April 10, 2011, in front of the power plant main gate as well as 35 km away in Iitate village, and observed gamma-rays with a Ge(Li) semiconductor detector. We observed activation products (^{239}Np and ^{59}Fe) and fission products (^{131}I , ^{134}Cs (^{133}Cs), ^{137}Cs , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (^{109}Ag), ^{132}Te , ^{132}I , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{91}Sr , ^{91}Y , ^{95}Zr , and ^{95}Nb). ^{239}Np is the parent nuclide of ^{239}Pu ; ^{59}Fe are presumably activation products of ^{58}Fe obtained by corrosion of cooling pipes. The results show that these activation and fission products, diffused within a month of the accident.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved

概要

2011年3月11日の東日本大震災は福島第一原子力発電所の冷却システムにダメージを与えた。続いて穴をあける操作と水素爆発は結果、環境中に原子炉容器から多量の放射性核種が放射された。ここで、我々は飯館村の35 kmの方向と同等な原子炉のメインゲート(正門)の土壌、植物種、そして水を2011年4月10日に環境試料を収集し、そしてGe(Li)半導体検出器を使用してγ線を観測した。我々は活性化生じた生成物(^{239}Np and ^{59}Fe)と核分裂生成物(^{131}I , ^{134}Cs (^{133}Cs), ^{137}Cs , $^{110\text{m}}\text{Ag}$ (^{109}Ag), ^{132}Te , ^{132}I , ^{140}Ba , ^{140}La , ^{91}Sr , ^{91}Y , ^{95}Zr , and ^{95}Nb)を観測した。 ^{239}Np は ^{239}Pu の親核種で、 ^{59}Fe は多分冷却パイプの腐食によって得られた ^{58}Fe の活性化生成物である。結果は事故の後1ヶ月以内に撒き散らされた活性化と核分裂による生成物と示す。

1. Introduction

The Great East Japan Earthquake and the subsequent Tsunami on March 11, 2011, caused the cooling systems of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant to break down. The cooling of some of the nuclear reactors thus became impossible, and the pressure in the nuclear reactor container rose because of hydrogen buildup. Despite the venting operation performed for reactor No. 1 on March 12, the building was damaged by a hydrogen explosion. Immediately thereafter, ^{137}Cs was detected from dust collected within the premises of the power plant. Although a venting operation was performed for reactor No. 3 on March 13, a large-scale hydrogen explosion occurred the

following day. On the other hand, dry venting was performed for reactor No. 2 without a hydrogen explosion, and a hydrogen explosion occurred in reactor No. 4 on March 15. For these reasons, the nuclear-reactor fuel rods and container underwent damage between March 12 and 15, and a large amount of radioactive nuclides was emitted into the environment. As of April 12, it was confirmed that the cores for the No.1 to No. 3 reactors were damaged and that the fuel pellet had melted. In light of this, the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant accident was elevated to a level 7 event on the International Nuclear Event Scale (INES) (Releases, 2011). The radioactive contamination in the environment is become a great concern in Japan for our survival.

1. はじめに

2011年3月11日の東日本大震災と2次の津波が福島第一原子力発電所の冷却システムを破壊した。原子炉の幾つかの冷却はつまり不可能になり、そして原子炉容器内の圧力は水素増進のため上昇した。3月12日に1号機の原子炉は穴を開ける操作(ベント)を実行したにもかかわらず、建屋は水素爆発して崩壊した。その後直ちに、原子炉建屋内で収集された塵から ^{137}Cs が検出された。ベント操作は3月13日に3号機に実行されたが、次の日に大規模な水素爆発が起きた。一方、乾燥ベントは2号機で水素爆発せず実施され、そして3月15日に4号機で水素爆発した。これらの理由のため、原子炉燃料棒(fuel rods)と容器は3月12-15日の間ダメージを受け、そして多量の放射性核種が環境中に放射された。4月12日に、1号機と3号機の原子炉コアがダメージを受け、燃料の小球が溶けていることがわかった。この観点から、福島第一原発事故は国際原子力事象評価尺度(INES)でレベル7と評価された(2011公表)。環境中の放射能汚染は我々が生存している日本にとって大きな重要事項になった。

In this study, environmental samples of soil, plant species, and water were collected on April 10-about one month after the accident-in front of the main gate of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant and 35 km away at Iitate village in Fukushima prefecture. Doses of radioactive nuclides were then measured by a Ge(Li) semiconductor detector without any chemical modification of the samples in order to comprehensively identify the nuclides that diffused into the environment.

この研究では、4月10日から事故後約1ヶ月に福島県飯館村の35 kmの距離と福島第一原子力発電所の正門前で土壌、

植物種、そして水の環境試料が収集された。放射性核種の船長はその後Ge(Li)半導体検出器によって測定した。ただし環境に撒き散らされた核種の包括的な同定のために、幾つかの化学修飾は除いている。

2. Methods

Soil, plant species, and water in the environment were collected on April 10, 2011 in front of the main gate of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant (located at Okuma-machi, Futaba-gun) and at Iitate village, Soma-gun, Fukushima prefecture, shown in Table 1. From paddy and thicket soils, 30-80 g of soils from the surface (0-10 cm) was collected after removing plant species. From pine and straw leaves, ca. 10 g of plant were collected while ensuring the absence of attached soil. From paddy fields and puddles, we collected ca. 100 ml of water per sample using a 50-ml syringe. The skies were clear and there was hardly any wind on the sampling day. The sampling sites and spatial radiation dose at each site are shown in Fig. 4. The latter was measured by an ion-chamber-type gamma-ray detector and GM counter.

環境中の土壌、植物の種、そして水は2011年4月10日に表1に示す福島第一原子力発電所(双葉郡大熊町)の正門前と飯館村、相馬郡、そして福島市で採取された。水田と茂み(雑木林)の土壌から表面(0-10 cm)から30-80 gが植物の種を取り除いて採取された。松と藁の葉、直物の約10 gが収集された。ちなみに土壌が付着していないことは保証する。水田領域と水たまりから、50 mlの注射器を使用してサンプルの水を100 ml収集した。天候は晴れで、風がありサンプリングは大変だった。サンプリングした敷地とそれぞれの敷地での空間線量図4に示す。あとはイオン電離箱型γ線検出器とGM検出器によって測定された。

Gamma-rays from collected samples were measured using a Ge(Li) semiconductor detector (Princeton Gamma-Tec). The device, located at the Radioisotope Center in the University of Tokyo, has a relative efficiency of 34.4% at 1332 keV, and FWHM of 1.78 keV on the 1332 keV ^{60}Co g-line and 743 eV on the 122 keV ^{57}Co g-line. Measurements were performed on April 14 and April 22. The sample was sealed in a 100 ml vial made of polyethylene and subjected to measurement without chemical modification. The measurement time was 3000-3600 s. Spectrum navigator (SEIKO E&G Co., Ltd.) and a

nuclide library generation program (NucLib ver 1.12) were used as the gamma-ray libraries for nuclide identification, together with the IAEA Handbook of Nuclear Data for Safeguards. A nuclide was identified when two or more clear and independent peaks greater than 3 s above baseline were present in the spectrum. The half-life correction of each nuclide was made assuming a sampling time of 0 s of the elapsed time.

採取されたサンプルからのγ線はGe(Li)半導体検出器(Princeton Gamma-Tec)を使用して測定された。この装置は東京大学ラジオアイソトープセンターにあり、1332 keVに対して34.4%の相対感度とFWHM 1.78 keV (0.13%)の分解能(^{60}Co -γ線)と122 keVに対してFWHM 743 eV (0.61%)の分解能(^{57}Co -γ線)をもつ。4月14と22日に測定が実施された。サンプルはポリスチレン製の100 mlの小瓶に封入され、化学的修飾なしに測定にかけられた。測定時間は3000-3600秒。スペクトルナビゲーション(SEIKO E&G株式会社)と原子核ライブラリ生成プログラム(NucLib ver. 1.12)が原子核同定のためのγ線情報として保護のための原子核データのIAEAハンドブックと一緒に使用された。核種はスペクトラムでベースラインの上に3σより大きい独立で2倍以上明らかなピークが現れた時に同定される。それぞれの核種の半減期補正は経過した時刻をサンプル時刻0秒と仮定する。

The doses of identified nuclides in soil, plant species, and water samples collected in front of the power plant and at Iitate village are shown in Figs. 1 and 2. The fission products are listed in Fig. 1, and the activation products are listed in Fig. 2. The doses of nuclides in the surface soil collected on April 7 within the premises of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant, which were reported by Tokyo Electric Power Company; TEPCO (three fixed observation points within the plant; point A, playground; point B, in the woods; point C, disposal site), are also included in both Figures.

飯館村と原発前で収集された土壌、種、水サンプルの同定した核種の線量は図1、2に示される。核分裂生成物は図1に表にされ、活性化生成物は図2に表にされる。4月7日に福島原発の構内で採取された土壌表面の原子核の線量は東京電力株式会社(TEPCO)によって報告され(3つの場所: A. 運動場; B. 木の中; C. 廃棄処理施設)、どちらの図も含んでいる。

Table 1
Sampling sites and spatial dose of radiation.

Sample		Place	Distance from the main gate (km)	Dose of radiation ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	
s1	Soil	Paddy	Around the nuclear plant	1.5	75
s2		Paddy	Near Kumagawa river	4.1	43
s3		Garden plant	In front of the main gate	0.0	100
s4		Paddy	Nagadoro, Iitate village	35.0	17
s5	Plant species	Paddy	Komiya, Iitate village	35.0	11
p1		Straw	Around the nuclear plant	1.5	75
p2		Leaf of pine	In front of the main gate	0.0	100
p3		Leaf of pine	In front of the main gate	0.0	100
p4	Water	Straw	Komiya, Iitate village	35.0	11
w5		Puddle	Around the nuclear plant	1.0	67
w6		Paddy	Around the nuclear plant	1.5	75

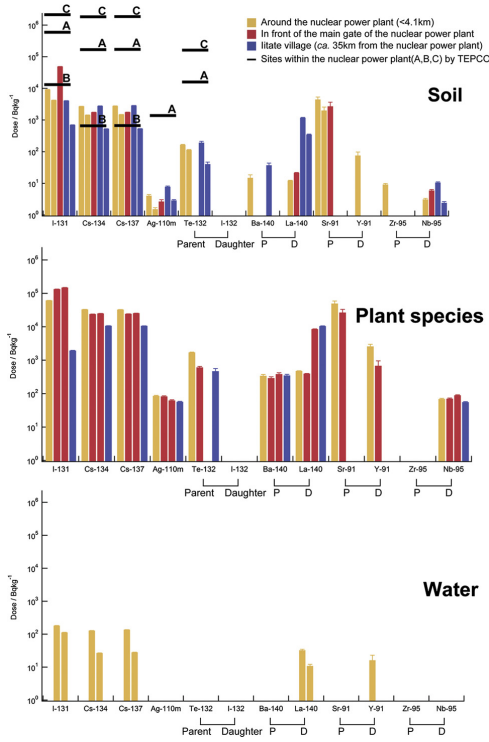


Fig. 1. Fission products (Bq kg⁻¹) in samples collected around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant and at Iitate village.

Radioactive elements, which were ¹³¹I, ¹³⁴Cs (¹³³Cs), ¹³⁷Cs, ^{110m}Ag (¹⁰⁹Ag), ¹³²Te, ¹³²I, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La, ⁹¹Sr, ⁹¹Y, ⁹⁵Zr, and ⁹⁵Nb were identified from each environmental sample. The nuclear data for these radionuclides are shown in Table 2. In the case of ¹³²I, which has a short half-life, its parent nuclide ¹³²Te was used to estimate the half-life based on the radiation equilibrium. In the cases of ¹⁴⁰Ba-La, ⁹¹Sr-Y, and ⁹⁵Zr-Nb, the doses for both nuclides are listed in Fig. 1 because the differences between them were small. For all nuclides, the doses in plant species were about 10 times higher than those in soil, which in turn were higher than those in water. In the case of ¹³¹I, which is one of the main fission products, the dose was 49 kBq kg⁻¹ in the soil collected in front of the main gate of the power plant, and 150 kBq kg⁻¹ in plant species. On the other hand, the dose of ¹³¹I in the soil at Iitate village (s4) was 4.1 kBq kg⁻¹, and of the same grade to that in the soil sample (s2) collected in a paddy field 4.1 km away from the nuclear power plant (4.3 kBq kg⁻¹). In the soil collected within the premises of the nuclear power plant site, the maximum observed dose was 2.3 MBq kg⁻¹ reported by TEPCO on April 22.

それぞれの環境中の試料から ¹³¹I, ¹³⁴Cs (¹³³Cs), ¹³⁷Cs, ^{110m}Ag (¹⁰⁹Ag), ¹³²Te, ¹³²I, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La, ⁹¹Sr, ⁹¹Y, ⁹⁵Zr, and ⁹⁵Nb の放射性核種が同定された。表 2 にこれら放射性核種のデータを示す。¹³²I の場合、半減期が短く、放射平衡状態

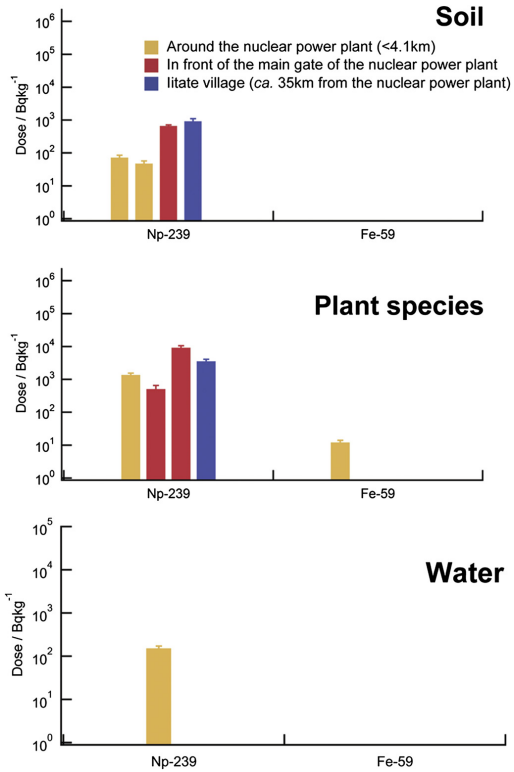


Fig. 2. Activation products (Bq kg⁻¹) in samples collected around the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant and at Iitate village.

をもとに親核の ¹³²Te の半減期を使用した。¹⁴⁰Ba-La と ⁹¹Sr-Y、そして ⁹⁵Zr-Nb の場合、どの核種の線量も図 1 に示されている。なぜなら、これらの間が小さいからである (半減期の事?)。すべての核種において、植物種の線量は土壌より約 10 倍高く、水のそれよりも高い。核分裂生成物の主な一つとして ¹³¹I の場合、原子炉の正門前で採取した土壌の線量は 49 kBq/kg で、そして植物種では 150 kBq/kg であった。一方、飯館村の土壌(s4)の ¹³¹I の線量は 4.1 kBq/kg で原子炉から 4.1 km 離れた水田領域で取れた土壌(s2)と同じ大きさ (4.3 kBq/kg) であった。福島原発敷地構内で採取された土壌で、最大 2.3 MBq/kg の線量が観測されたことが 4 月 22 日に TEPCO によって報告された。

Table 2 Nuclear data for radionuclides by Evaluated Nuclear Data File, IAEA, in the environmental samples around Fukushima Dai-ichi nuclear power plant.

	Nuclide	Gamma (keV)	Abundance (%)	Half life (y: year) (d: day)(h: hour)
Fission	¹³¹ I	364.48	81.0	8.04(d)
	¹³⁴ Cs(¹³³ Cs)	604.66	97.6	2.06(y)
	¹³⁷ Cs	661.64	85.0	30.2(y)
	^{110m} Ag(¹⁰⁹ Ag)	884.67	72.8	252(d)
	¹³² Te	228.16	88.0	78.2(h)
	¹³² I	667.69	98.7	2.28(h)
	¹⁴⁰ Ba	537.27	23.6	12.8(d)
	¹⁴⁰ La	1596.49	95.5	40.3(h)
	⁹¹ Sr	555.57	61.0	9.48(h)
	⁹¹ Y	1208.00	0.3	58.5(d)
	⁹⁵ Zr	756.72	54.6	64.0(d)
⁹⁵ Nb	765.79	99.8	35.0(d)	
Activation	²³⁹ Np	106.14	27.8	2.35(d)
	⁵⁹ Fe	1099.22	56.5	44.6(d)

These observations as of April 10 suggest that the dose of ^{131}I depended on the distance from the nuclear power plant. However, ^{134}Cs and ^{137}Cs , which have long half-lives, did not depend on the sampling point, as the dose ranges were $0.53\text{--}2.8\text{ kBq kg}^{-1}$ and $0.54\text{--}2.9\text{ kBq kg}^{-1}$, respectively. ^{134}Cs is produced by neutron activation of ^{133}Cs , a stable fission product, whereas ^{137}Cs is produced directly from fission (Lin and Skarpelos, 1997). The $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ ratio was ca. 1 at each sampling point. In particular, the highest dose was observed in a soil sample collected at Nagadoro in Iitate village. Based on a consideration of these measurements and half-life, we suggest that there was a very large but temporary diffusion of these radioactive nuclides. The same tendency is also observed for $^{110\text{m}}\text{Ag}$. The production of $^{110\text{m}}\text{Ag}$ is confirmed by the ^{109}Ag (n, γ) to $^{110\text{m}}\text{Ag}$ reaction in the more mobile fission products of the Dragon gas-cooled reactor at Winfrith, UK (Flowers, 1986). After the Chernobyl accident, the dose of $^{110\text{m}}\text{Ag}$ in the soil was raised from 4.5 to 46.1 Bq kg^{-1} (average 14.3 Bq kg^{-1}) in Greece eight weeks (Papastefanou et al., 1988). Like typical fission products, this nuclide is characterized by fast diffusion.

これらの 4/10 の観測は 13II の線量が福島原発からの距離に依存していることを指摘する。しかし、比較的半減期が長い ^{134}Cs と ^{137}Cs はサンプリング位置に依存せず、それぞれ $0.53\text{--}2.8\text{ kBq/kg}$ と $0.54\text{--}2.9\text{ kBq/kg}$ であった。 ^{134}Cs は核分裂安定核種 ^{133}Cs の中性子活性によって生成され、 ^{137}Cs は直接核分裂生成される (Lin and Skarpelos, 1997)。それぞれのサンプリング位置で $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$ の比は約 1 であった。特に飯館村の長泥地区で採取された土壤に高い線量が観測された。これらの測定と半減期の考察に基づいて、これらはとても大きい、放射性核種の一時の拡散であると指摘する。同じ傾向が $^{110\text{m}}\text{Ag}$ でも観測された。 $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の生成は Winfrith UK でドラゴン気体冷却反応のほとんどの可動性核分裂生成の ^{109}Ag (n, γ) to $^{110\text{m}}\text{Ag}$ 反応によって確認されている (Flowers, 1986)。チェルノブイリ事故の後、土壤の $^{110\text{m}}\text{Ag}$ の線量が 4.5 から 46.1 Bq/kg へ上昇した、平均 14.3 Bq/kg で、ギリシア、8 週間で (Papastefanou et al., 1988)。典型的な核分裂のように、この核種は最初の拡散によって特徴付けられる。

Fig. 3 shows the spatial dose continuously observed in front of the nuclear power plant, as reported by TEPCO. Observations at the main gate were not conducted from March 17 to March 20. However, it is seen that the spatial dose rose dramatically several times before March 14. We assume that each nuclide spread during these events.

図 3 は TEPCO による報告として原子炉の前の連続して観測した空間線量を示す。正門での観測は 3 月 17 から 20 日に実行された。しかし、3 月 14 日以前の数時間に空間線量が劇的に上昇したように思える。これらの事象の間それぞれ核種は拡散したと仮定した。

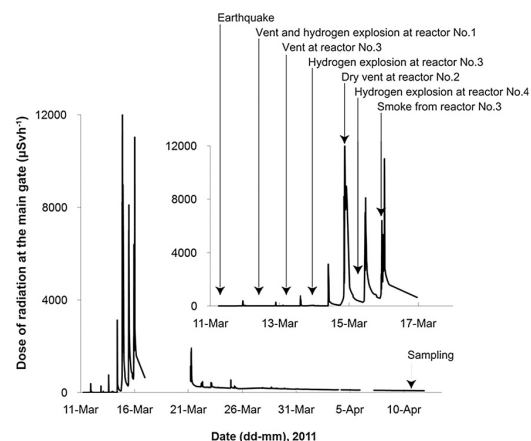


Fig. 3. Time series of the spatial dose of radiation at the main gate of the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant.

The activation products, ^{239}Np and ^{59}Fe were identified from each environmental sample. As in the fission products, the doses in plant species were high. Naturally, ^{239}Np does not normally exist because of its short half-life. ^{237}Np , which is a daughter nuclide of ^{241}Am , is distributed throughout the world in very slight amounts (Kelley et al., 1999). However, ^{239}Np is known to have spread at least 1500 km only two weeks after the Chernobyl accident (Henriksen and Saxebol, 1988).

活性化生成核 ^{239}Np と ^{59}Fe はそれぞれの環境サンプルから同定された。核分裂生成物として、植物種の線量は高かった。当然、 ^{239}Np は半減期が短いため普通存在しない。 ^{241}Am の娘核の ^{237}Np はとてもわずかな量世界のいたるところに散布された (Kelley, 1999)。しかし、 ^{239}Np はチェルノブイリ事故の後 2 週間のみ少なくとも 1500 km は広がったことが知られている (Henriksen and Saxebol, 1988)。

^{239}Np was identified by each of the following peaks: 106.14 keV (27.8% of emission rate), 277.60 keV (14.5%), and 120.60 keV (2.77%) by Evaluated Nuclear Data File, IAEA, all of which show clear separation in the spectrum. The peaks at 117.26 and 228.20 keV were not used for identification because they are interfered by ^{132}Te . Given that ^{239}Np has a short half-life of 2.3 days, the gamma-ray spectrum was measured again nine days after the first measurement. By this time, all of the peaks decreased below the minimum limit of detection. ^{239}Np is a beta decay nuclide of ^{239}U , and ^{239}U is generated in large quantities by the neutron capture of ^{238}U in a nuclear reactor, as in the reaction $^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta} \text{Np} \xrightarrow{\beta} ^{239}\text{Pu}$. Although it is unknown whether this nuclide spread between March 12 and March 15, it spread at least to Iitate village on April 10 the time of sample collection. In particular, a 3.6 kBq kg^{-1} dose of ^{239}Np was detected in the straw sample collected at the Komiya area in Iitate village. This dose was one third of that in the pine leaves in front of the main gate (9.2 kBq kg^{-1}). As the daughter nuclide of ^{239}Np is ^{239}Pu , diffusion of the former may cause serious contamination. From 1945 to 1980, 6500 TBq of ^{239}Pu was

emitted in a global fallout, whereas the fallout from Chernobyl was 30 TBq (Beasley et al., 1998; Radiation, 2000). Although ^{239}Np emission from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant cannot be presumed at present, it is expected that ^{239}Pu will be detected at high doses around the power plant in the future. In addition, ^{59}Fe is the activation product from fuel cladding and impurities in structural materials (Thind, 2001). ^{59}Fe are presumed to be the activation products of ^{58}Fe obtained by the corrosion of cooling pipes. These nuclides spread into the environment by the venting operation or hydrogen explosion. ^{59}Fe , which is a typical neutron-induced nuclide, was also detected in the soil near the site of the critical accident at Tokai-mura, Japan, in 1999 (Nakanishi et al., 2000). This constitutes circumstantial evidence of ^{59}Fe being generated by neutron activation. At present, it is difficult to identify the nuclear reactor from which these nuclides were emitted. As MOX fuel is used in reactor No. 3, the quantification of Pu may yield information on this issue. However, as this is a time-consuming process, we do not address this here.

^{239}Nb はスペクトラムで明らかな区別ができる IAEA の原子核評価データファイルによる 106.14 keV (放射率: 27.8%), 277.60 keV (14.5%), 120.60 keV (2.77%) の各ピークによって同定された。117.26 と 228.20 keV のピークは ^{132}Te によって妨げられるため、同定には仕様されなかった。2.3 日という短い半減期を持つ ^{239}Nb を取得するために、 γ 線スペクトラムは最初の測定の 9 日後に再度測定した。このときまで、ピークのすべては最小の検出限界以下に減少した。 ^{239}Nb は

^{239}U の β 崩壊核種で、 ^{239}U は原子炉内の ^{238}U の中性子捕獲 (反応: $^{238}\text{U}(n, \gamma)^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta} \text{Np} \xrightarrow{\beta} ^{239}\text{Pu}$) によって大量に生成される。この核種が 3/12-15 の間に広がったかどうかは不明だが、4/10 の飯館村でのサンプル採集した時には少なくとも広がっていた。特に ^{239}Nb の線量 3.6 kBq/kg は飯館村の小宮エリアで採集したわらで検出された。この線量は正門前の松の水準(9.2 kBq/kg)の 1/3 だ。 ^{239}Nb の娘核は ^{239}Pu であるとして、以前の拡散は重大な(ゆゆしき)汚染を引き起こすだろう。1945 から 1980 年、 ^{239}Pu の 6,500 TBq が世界中に放射された。チェルノブイリからの死の灰(放射性降下物)は 30 TBq であった (Beasley et al., 1998; Radiation, 2000)。現在は福島第一原発から ^{239}Nb が放出したことは仮定できないが、将来原子炉周りの高い線量で ^{239}Pu が検出されると予期している。加えて ^{59}Fe は構造上の物質で燃料と不純物からの活性化生成物である (Thind, 2001)。 ^{59}Fe は冷却パイプの腐食によって得られた ^{59}Fe の活性化生成物と仮定された。これら核種は水素爆発のベント操作によって環境中に広がった。 ^{59}Fe は典型的な中性子捕獲生成物で、1999 年の東海村の臨界事故があった現場に近い土壌で検出された (Nakanishi et al., 2000)。これは中性子活性によって生成される ^{59}Fe の状況証拠を構成する。現在、これら核種が放出したものから原子炉を同定することは困難である。3号機は MOX 燃料を使用しているとして、Pu の量はこの問題において情報を与える。しかし、これが時間消費過程であるとして、我々はここでこれについては扱えない。

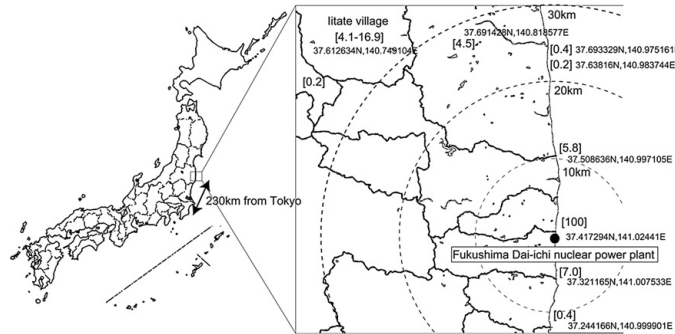


Fig. 4. Sampling sites and spatial dose of radiation. The value in square brackets, such as [100], is the value of the spatial dose of radiation ($\mu\text{Sv h}^{-1}$) 1 m above ground on the day of sampling (April 10, 2011).