

福島第一原発水素爆発後の γ 線スペクトル測定に基づく 土壌放射能調査

—中・低度汚染地域（半径 20-250 km 内）に於ける放射能レベル—

佐藤 行彦

東北大学大学院医学系研究科 保健学専攻 放射線技術科学コース

Soil Contamination Surveillance Study Based on NaI (Tl) Gamma-ray Spectroscopy

— After Fukushima First Nuclear Plant Explosion Disaster —

Yukihiko SATO

Course of Radiological Technology, Health Sciences, Tohoku University Graduate School of Medicine

Key words : fallout, nuclear contamination, nuclear plant accident, soil contamination

After the Megaquake and tidal wave on March 11th 2011 in the northeastern coastal area of Japan, which it caused explosion of the nuclear plant, radioactive materials had discharged around the areas near the plant. I obtained soil and other samples from the areas about 20 to 250 km away from the plant. These were measured using the well type NaI (Tl) gamma-ray scintillation counter system.

Through two-years of surveying of the gamma ray spectra, I examined the time sequence of γ -ray intensity, namely decay curve. I could estimate that these nucleides were ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs and possibly ^{131}Cs , ^{132}Cs , ^{136}Cs . In addition, I also made contamination map based on the concentration of radioactivity (the ratio of radioactivity to mass) ranged about 350 Bq/g at most. These data will provide knowledge for understanding the amount of discharged nuclear contamination level and the rate it is decreasing.

はじめに

2011年3月11日午後2時46分に発生した大地震（震源は東北地方太平洋沖 M 9.0）による大津波は、同日午後3時35分高さ14 m となって福島県浜通りにある福島第一原子力発電所も襲い、その6基ある原子炉建屋及びタービン建屋の地階・1階の配電盤等の多くが被水し、また5基では全電源を喪失するという事態に陥った¹⁾。そ

のため翌12日午後3時36分には1号炉建屋が水素爆発、14日午前11時1分には3号炉建屋が水素爆発、15日朝6時頃に2号炉の原子炉格納容器が一部破損に至った。更には、定期点検中のため原子炉压力容器中には核燃料は無かったものの、4号炉建屋も水素爆発したため（4、5、6号炉は定期点検中だった）、その燃料プールにあった大量の核燃料の冷却に支障が出かねない状態となった¹⁾。以上のようなことが原因で大量の放射

性物質がフォールアウト（放射性降下物）となって周辺の地域に飛散する結果に立ち至った。東京電力の試算によると推定で約 90 万兆ベクレル = 90 京ベクレルということである²⁾。この飛散量は 1986 年 4 月のチェルノブイリ事故（旧ソ連、現ウクライナ）の 6 分の 1 に相当するという。

本調査は、各地から採取した主に表層土壌の放射性物質（事故由来）を対象にし、原発爆発事故後の 2011 年 4 月 1 日から 2 年間に亘って行った。計測には井戸型 NaI (TI) シンチレーション計数装置を用い、この γ 線スペクトル測定を基に飛来した放射性核種をそのエネルギー値と半減期から判定して解析し、またその放射能の時間的な減衰の様子を定量的に追跡した。これらのサンプルは事故原発から 20 km ~ 250 km の範囲の地域で採取されたものが中心である。

方 法

試料は事故原発立地場所から 20 km 以上離れた 14 地域（表 4 に示す）にて、ポリエチレン容器（5 ~ 10 ml）により採取している。そしてこの試料から天秤にて 1 ~ 2 g を精度よく測り取って、小ガラス試験管（外径 1.2 cm ϕ 、内径 0.9 cm ϕ 、高さ 10.5 cm）に入れてゴムキャップをした。測定時間は概ね 6 時間または 12 時間として、NaI (Tl) シンチレーションカウンターシステムとこれを各エネルギーに対するガンマ線のカウント数で示す MCA [Multi Channel Analyzer] の波高分析モードにて測定した。測定系を以下に記す。

測定システム

NaI (Tl) 井戸型シンチレーションカウンターシステム：Aloka 社製 Model PS-201 型

NaI (Tl) シンチレータサイズ：3 inch ϕ × 3 inch
光電子増倍管への印加電圧：640 V（井戸型シンチレータの遮蔽円筒：直径 20 cm、内側の鉛遮蔽厚 3.5 cm + 外側の鉄遮蔽厚 2 cm）

MCA およびそのスペクトル解析用ソフトウェア：ラボラトリ・イクイPMENT 社製 PC98BX 型

天秤：島津製作所社製 Libror AEG-45SM 型 [精度 10 μ g]

表 1. NaI (Tl) シンチレータの各エネルギー値に対するピーク半値幅 ΔE とそのエネルギー E に対する比

光電ピークエネルギー値: E [keV]	ピーク半値幅: ΔE [keV]	$\Delta E/E$
32	9	0.32
75	15	0.20
365	38	0.10
662	41	0.062
795	48	0.062
1,460	98	0.067

γ 線の計数効率、井戸型シンチレータの幾何学的計数効率 $\eta_1 = 0.863$ 、更にその方向への γ 線の吸収効率 $\eta_2 = 0.559$ (^{131}I 365 keV, 640 keV が主要 γ 線の光電ピークを用いて求めた)、全体の計数効率 $\eta = \eta_1 \times \eta_2 = 0.48$ である。また表 1 に各エネルギー値に対する光電ピークのエネルギー E 、半値幅 ΔE およびその比を記した。

各サンプルの測定値は次のようにして求めた。

まず井戸型シンチレーションカウンターでのほぼ全エネルギー範囲（13 keV ~ 1,554 keV: 130 channel ~ 1,000 channel）の全カウント数を本 MCA 解析ソフトにて各測定終了後に読み取った。各測定スペクトルは後日も時系列的にスペクトル解析できるように、測定時期毎にフォルダを設け、またどのデータなのかわかりやすいように適切なファイル名をつけて保存した。測定ノートへも記載し、且つ MS-Excel にて数表化した。そして数表上で各計数データ値を測定時間（6 時間 = 21,600 秒または 12 時間 = 43,200 秒）で割り、また同様にして求めたバックグラウンド値を引いた。バックグラウンド値は長期間中に度々測定（6 時間ずつ計 8 回）したものの平均値を用いている。この試料から得たの真の計数値（cps 値）を計数効率 η で割って壊変率（Bq 値）を得、更にこの値を試料の質量で割って比放射能値（単位：Bq/g）を得た。

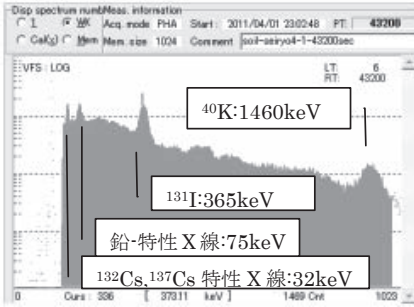
各試料の時系列データはこの数表から読み出して並べた。また事故後のある時点、たとえば事故

福島第一原発水素爆発後のγ線スペクトル測定に基づく土壌放射能調査

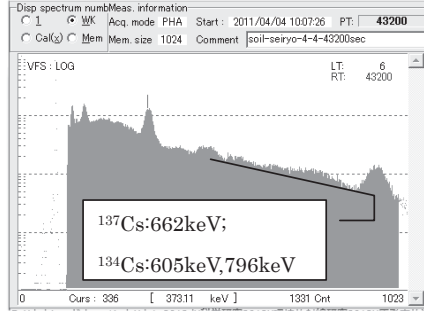
後丸2年後での比放射能(表4)は、その各時間変化曲線の狭い期間範囲における2次曲線での最小二乗法による内挿で得た。

井戸型シンチレーション計数装置による計数値は、バックグラウンドとしては⁴⁰Kからのγ線(光電ピーク 1,460 keV)と遮蔽体である鉛に由来す

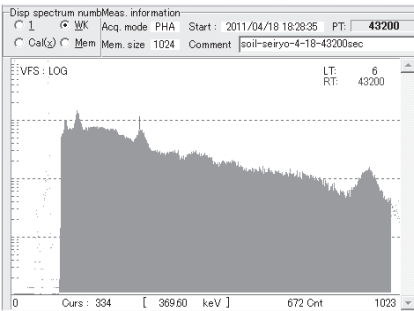
大震災・原発事故から21日後(2011/4/1)



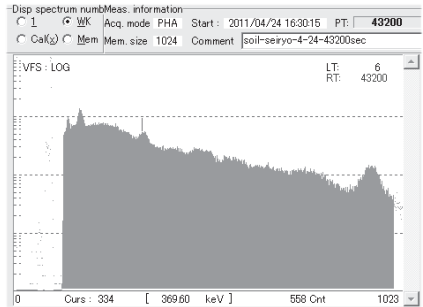
24日後(2011/4/4)



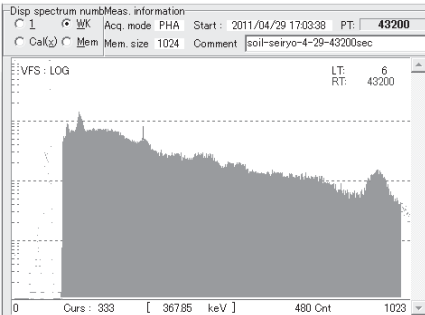
38日後(2011/4/18)



44日後(2011/4/24)



49日後(2011/4/29)



Background

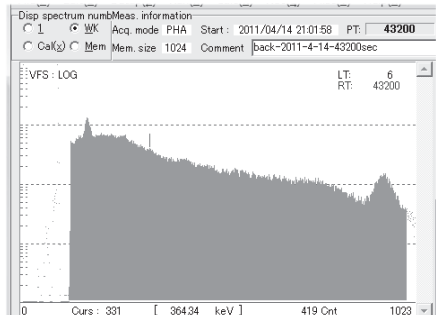


図1-A. 東北大学医学部キャンパス(仙台市街)の土壌のγ線スペクトルの経時変化
震災・原発事故から21, 24, 38, 44, 49日目のスペクトルの変化を示す。¹³¹Iの365 keV γ線の光電ピークの高さの減少の様子が見て取れる。これに比べ¹³⁴Cs, ¹³⁷Csからのγ線光電ピークの高さは変化していないことも見て取れる。またCs特性X線のピークも見える。

る特性 X 線（光電ピーク 75 keV）が主体である。各試料の比放射能の算出に当たってはこれを十分考慮して差し引いた後の値で示した。²⁰⁸Tl (²³²Th に始まる壊変系列の最終段の放射性核種で、 γ 線エネルギー 2,615 keV) からのバックグラウンドとしての寄与は ⁴⁰K より更にずっと少ない（高々その 1% 以下）ことを確認しており、今回は考慮から外している。なお鉛の特性 X 線は、0.3 mm 厚の銅板で NaI シンチレータを遮蔽するとそのピーク計数値が激減することから確認している。

結 果

測定した各試料の γ 線スペクトル等を説明を付けて順次提示する。

① 短半減期核種：まずはじめに事故後 20 日～50 日に顕著な光電ピークを示した半減期が短いヨウ素の放射性核種 (¹³¹I: 365 keV) に関して見てみる。

2011 年 4 月 1 日採取の東北大学医学系研究科 [星陵地区キャンパス] 内の表層土壌の経時的スペクトル変化（試料のスペクトル 5 枚とバックグラウンド：事故後 21, 24, 38, 44, 49 日）を図 1-A に示す。

また MS-Excel を用いてデータ整理したピークカウント数 [¹³¹I の 365 keV ピーク及び Cs 由来の 32 keV 特性 X 線] の時間変化の数表（表-2）とグラフ（図 1-B）を示す。半減期を求める際のピークのカウント数は連続スペクトル部分を差し引いた値である。これらから ¹³¹I の 365 keV 光電ピークが時間とともに顕著に減少していることが見て取れる。これからこの核種の半減期は 8.42 日を得たが（図 1-B）、この値は Table of Isotopes^{3,5)}（Table 値と呼ぶことにする）による半減期 = 8.02 日に近い値であった。この土壌中の放射性核種は γ 線のエネルギー値と半減期の両者から ¹³¹I であることが確認できた。

またスペクトルを見ると、原発の水素爆発後 2 カ月程度までは、¹³¹I の γ 線からの寄与が顕著であった。そしてその後長く残った ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs の光電ピーク（後に説明する 605, 662, 796 keV）はこの時点ではそれほど顕著ではなかった。なお

表 2. ¹³¹I γ 線および ¹³²Cs, ¹³⁷Cs 特性 X 線の減衰曲線に基く半減期の読み出し（ピークの γ 線数の時間変化）

2011 年 3 月 12 日午前 0 時を起点とした時間

日時	時間 [hr]	365 keV ピーク	32 keV ピーク
4 月 1 日	503	24,651	3,177
4 月 4 日	609.1	21,244	1,386
4 月 15 日	929.3	6,100	1,011
4 月 24 日	1,071.5	3,773	305
4 月 29 日	1,168	2,794	—

土壌(仙台市街)の放射能減衰曲線
: ¹³¹I[365keV Photo Peak]

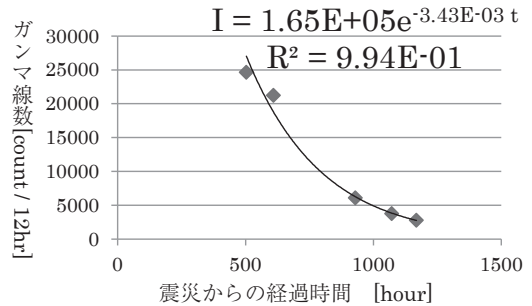


図 1-B.

土壌(仙台市街)からの減衰曲線
特性X線[32keV Photo Peak]

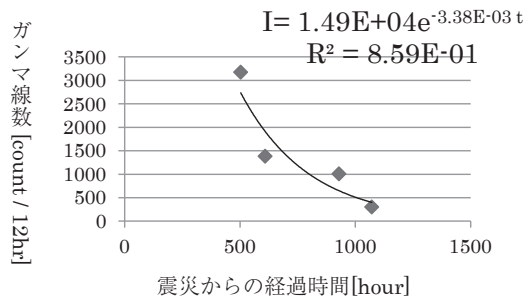


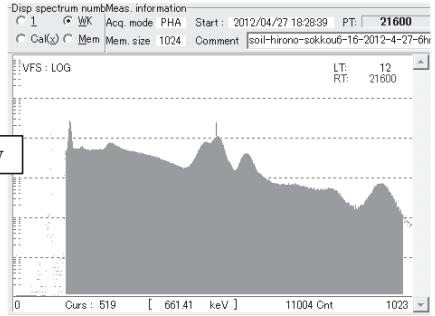
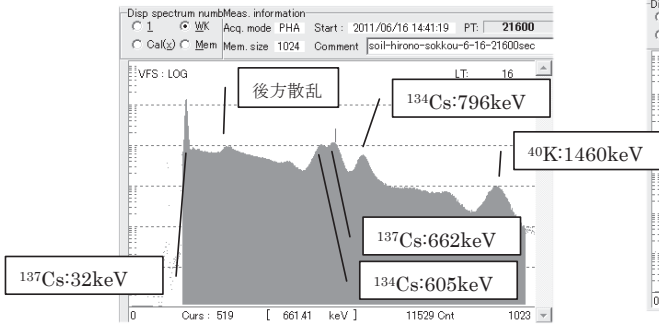
図 1-C.

エネルギーが 32 keV の特性 X 線は、¹³¹Cs (EC 100%, 半減期 9.7 日)・¹³²Cs (EC 98%, 668 keV, 半減期 6.5 日)・¹³⁶Cs (91% 存在する β^- 線由来の

福島第一原発水素爆発後の γ 線スペクトル測定に基づく土壌放射能調査

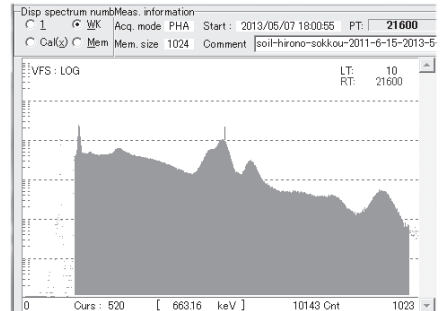
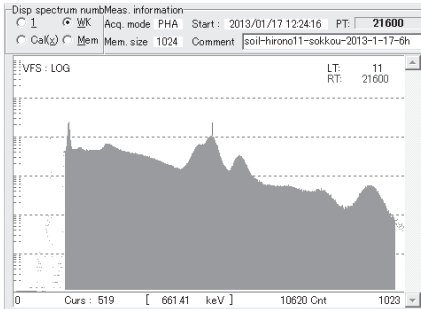
事故後 98 日(2011/6/16)

事故後 413 日(2012/4/27)



事故後 678 日(2013/1/17)

事故後 788 日(2013/5/7)



Background

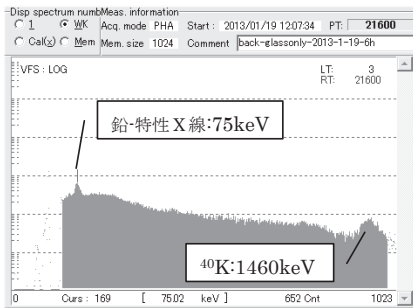


図 2-A. 福島県広野町の側溝の泥土 (1.09 g) の γ 線スペクトル [各 6 時間計測]
 ^{134}Cs [605 keV, 796 keV] の光電ピークが ^{137}Cs [662 keV] の光電ピーク (縦線カーソル印が付いている) の高さ [計数値] に比べて僅かだが小さく変化していつているのが見てとれる。

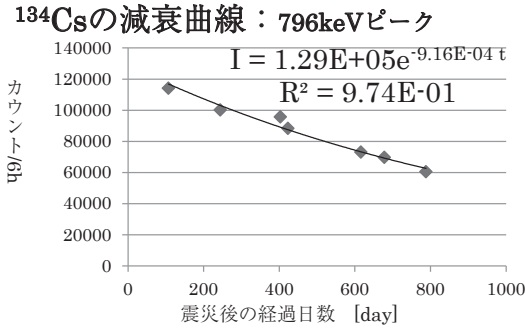


図 2-B. ¹³⁴Cs の減衰曲線および半減期

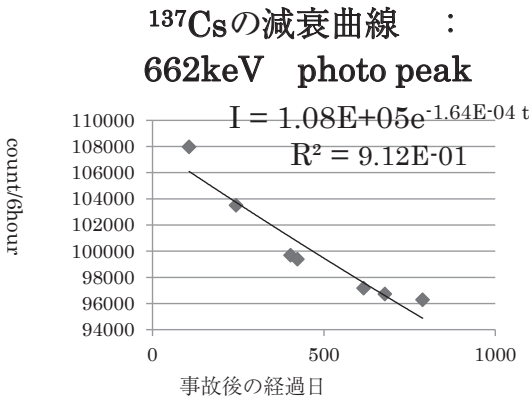


図 2-C. ¹³⁷Cs の減衰曲線および半減期

表 2B. (2011 年 3 月 12 日午前 0 時を起点とした日数)

年月日	日数 [day]	796 keV ピーク
2011/ 6/16	107	114,154
2011/10/31	244	100,192
2012/ 4/ 7	403	95,728
2012/ 4/27	423	88,373
2012/11/16	616	73,139
2013/ 1/17	678	69,737
2013/ 5/ 7	788	60,521

半減期 [年]: 2.073

表 2C. 全 7 点からは半減期 = 11.6 年 (初めの 2 点からは半減期 6.2 年, 最後の 3 点からは半減期 36.6 年と読み出せた)

peak 中心の 9 ch 分のカウント数の時間変化

日数 [day]	gross count
107	107,971
244	103,506
403	99,690
423	99,388
616	97,175
678	96,728
788	96,288

176 keV γ 線に続く特性 X 線, 半減期 13 日)・¹³⁷Cs など原子番号 53~55 に由来する核種の特性 X 線からの寄与が混じっていると考えられる⁵⁾。事故後 60 日ほどでは NaI (Tl) 検出器では分解能が低く, 1 本の光電ピークとなってしまう, 特性 X 線ピークから算出した半減期(図 1-C)は 8.54 日であった。これは ¹³¹Cs, ¹³²Cs, ¹³⁶Cs の半減期に近いともいえる。

② 長半減期核種: 次に爆発事故後 80 日以降の飛散放射能である ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs について見てみる。

スペクトルは原発南方 20 km 地点 [福島県広野町] の側溝の泥土 1 g のスペクトルの事故後 97 日から 788 日までのスペクトルの経時的変化であ

る (図 2-A)。¹³⁴Cs の 796 keV ピークの経時的変化から半減期 2.07 年と出た (Table 値は 2.06 年)³⁾。このことから ¹³⁴Cs が存在していることが, その γ 線エネルギーからも半減期からも確認できた (図 2-B, 表 2-B)。¹³⁷Cs の 662 keV ピークについては半減期計測は Table 値より短く, 全体としては 11.6 年とかなり短めに出た (Table 値は 30.0 年)。ただ初めの 2 つのデータ点だけでは 6.16 年, 終わりの 3 データ点だけでは 36.7 年を得た。これは NaI (Tl) シンチレーションカウンターではエネルギー分解能が低いために, ¹³⁷Cs の 662 keV 光電ピークと ¹³⁴Cs の 605 keV 光電ピークからの寄与の重なりが避けきれないことによると考えられる (図 2-C, 表 2-C)。

土壌・水・草（仙台市街）の比放射能の経時変化

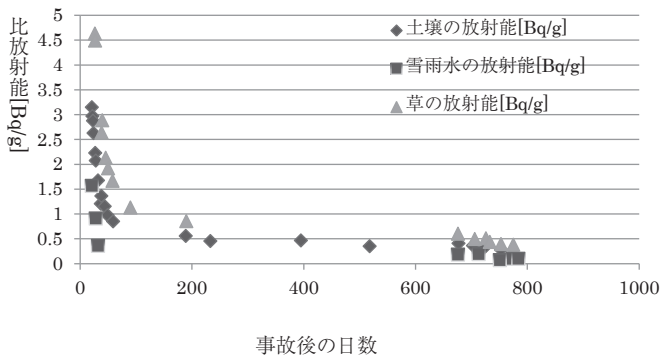


図 3-A.

表 3-B1. 土壌汚染：仙台市（市街地）

地震後の日数	放射能 [Bq/g]
21	3.148
22	2.97
23	2.877
24	2.628
27	2.228
28	2.074
32	1.675
37	1.206
38	1.362
44	1.153
49	0.976
59	0.85
189	0.557
233	0.454
395	0.466
518	0.35
677	0.408
703	0.361
725	0.343
753	0.280
773	0.245

表 3-B2. 雨水：仙台市（市街地）

地震後の日数	放射能 [Bq/g]
21	1.564
28	0.907
32	0.357
676	0.18
713	0.191
751	0.069
774	0.095
784	0.096

③ 原発から 100 km 地点 [仙台市] の土壌・雨水・植物：仙台市における土壌、雨水、植物（スイバ）の葉の事故後約 800 日間の比放射能の時間変化のグラフを示す（図 3-A, 表 3-B1, 表 3-B2, 表 3-B3）。これを見ると、事故後 50 日ほどで ^{131}I （半減期 8.02 日）は急激に減少し、その後は半減期の長い ^{134}Cs と ^{137}Cs がゆっくりと減少していることが見て取れる。

④ 側溝の土壌放射能：図 4 に主として福島県の各地の側溝の土壌のスペクトル全体のカウンタ数を基にした比放射能の時間的推移を示す。側溝の土壌は、多くは水流とともにセシウムを土壌粒子に吸着しながら流れたと考えられ、その比放射能は一般に各地での最大値に近いと思われる。尚、

表 3-B3. 草(スイバ)：仙台市(市街地)

地震後の日数	放射能 [Bq/g]
26.44	4.632
26.79	4.491
38.44	2.638
39.56	2.886
45.73	2.131
50	1.919
58	1.667
90	1.129
190	0.855
676	0.602
706	0.494
726	0.509
733	0.436
753	0.393
775	0.380

福島市では側溝の土：110 Bq/g；表層の砂土：1.1 Bq/g [2011年11月]，広野町では側溝の土：183 Bq/g；表層の砂土：18.7 Bq/g [2013年4月]という結果も得ていることを加えておく。つまり側溝では高めの比放射能となっているといえる。これらで見ると、各地とも時間とともに比放射能がゆっくりと減少していった様子が見て取れる。同様の測定をしたものをまとめて表4に示し、またこれを比較すべく地図的な分布としてグラフ化したものを図5に示す(縦軸は常用対数値)。福島市、同県広野町ではかなり比放射能が高いことが、また宮城県・山形県・首都圏でもある程度原発事故により汚染していることが見て取れる。

考 察

以上みてきたように、原発事故世界標準評価尺度“レベル7”の原発事故により、広範囲に微弱ながらも揮発性の高いヨウ素・セシウムの放射性

核種が放出されたことを検知できた。同じく揮発性のテルルの放射性核種は半減期が短いものが多く、事故後20日以降での我が観測からはみつからなかった。

次に各結果について考察を加える。

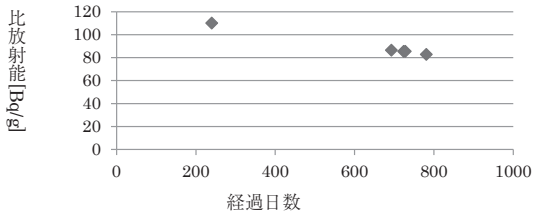
① 短半減期核種：事故後の2カ月間では ^{131}I による汚染がNaI(Tl)シンチレーション検出器による測定で確認できた。 ^{131}Cs 、 ^{132}Cs 、 ^{136}Cs については、特性X線(^{131}Xe 、 ^{132}Xe によるものは28 keV、 ^{136m}Ba によるものは32 keV)のみによる半減期からの推測なので存在の確認度はやや弱い。

他研究者の報告によると、爆発から2~3週間までは γ 線スペクトル中に ^{132}Te と ^{132}I (β^- 放射体。これらは半減期3時間と5日の過渡平衡)の光電ピークが非常に強く表れるというが⁴⁾、本測定は爆発後20日目以降のものであり、それらは既になんか減衰して、半減期が7日以下の極く半減期の短い核種は、エネルギーピークの半値幅が数十keV(エネルギーが1 MeVで見て)ほどであるNaIシンチレータを用いて測定したスペクトル中には見つからなかった。尚エネルギー分解能の高いGe検出器での測定であればピークの半値幅が高エネルギー部でも数keVのため、その検出は可能であろう。

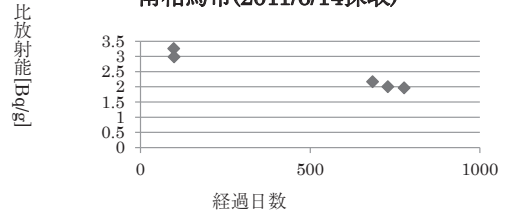
② 長半減期核種：事故後80日以降から800日までの約2年間の特に土壌の汚染についてみてみた。ここでは比放射能値は異なるにしても、 ^{134}Cs と ^{137}Cs が徐々に減少していった様子が減衰曲線から見て取れる(図4の各図)。汚染地図を作るとほぼ原発から北西方向へ向かって比放射能が高くなっている(図5)。これは事故2年後現在の地表高1mで比べてみての空間線量率が高めである福島県北西部の帰還困難区域・居住制限区域の汚染分布の方向と一致している⁶⁾。また道路の側溝の泥土ではほぼその地域での最大値に近い値になっているといえよう。

③ 原発から100 km地点[仙台市]の土壌・雨水・植物：仙台市に於ける土壌・雨水・植物の放射性物質量は、事故後20~25日に採取して測定されたもの(雪・雨水はその間に貯まったもの)

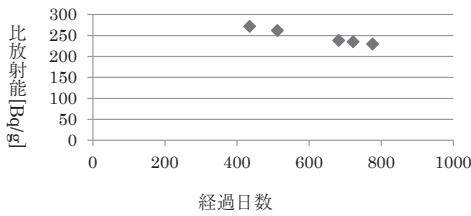
A. 土壌の比放射能[Bq/g]：
福島市街・北部(2011/11/5採取)



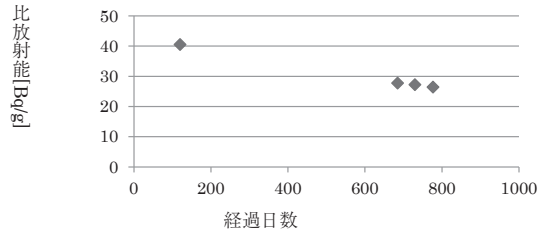
B. 土壌の比放射能[Bq/g]：
南相馬市(2011/6/14採取)



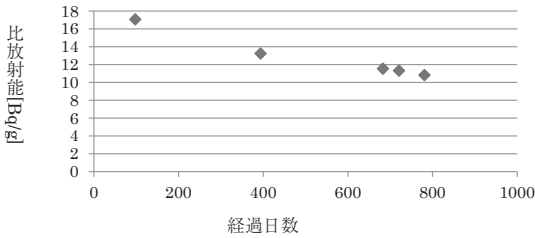
C. 土壌の比放射能[Bq/g]：
福島市・駅通り側溝(2012/5/12採取)



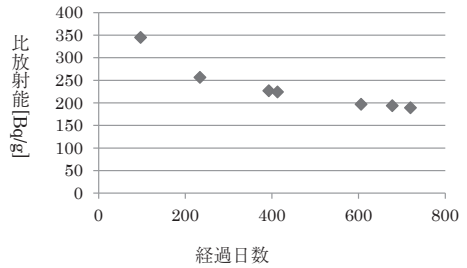
D. 土壌の比放射能[Bq/g]：
南相馬市(2011/7/2採取)



E. 土壌の比放射能[Bq/g]：
福島市・中心部(2011/6/14採取)



F. 土壌の比放射能[Bq/g]：
福島県広野町(2011/6/15採取)



G. 土壌の比放射能[Bq/g]：
会津若松市(2011/6/12採取)

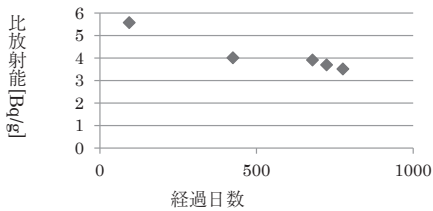


図 4.

表 4. 福島第一原発事故 2 年後 [731 日後] の各地の表面土壌の放射性物質の比放射能値

場所	原発からの直線距離 [km]	角度 [度] (東からの)	x 値 [km]	y 値 [km]	比放射能 [Bq/g]	比放射能 (常用対数値)
仙台市街 (側溝)	96.5	99	-15	95	5.17	0.713
山形県山寺町	114	118	-54	100	2.4	0.380
山形市街 (側溝)	108	122	-57	92	7.2	0.857
遠刈田温泉街 (側溝)	88	116	-39	79	1.9	0.279
蔵王山 (標高 1,500 m 地点)	96	122	-51	81	10.4	1.017
米沢市街	98	148	-83	52	0.43	-0.367
福島市駅西口・(側溝)	63	142	-50	39	233.7	2.369
福島市北部 (側溝)	63	142	-50	41	85.2	1.930
南相馬市	26	104	-6	25	27.2	1.435
会津若松市	99	175	-99	9	3.7	0.568
広野町 (側溝)	23	-98	-3	-23	188.2	2.275
さいたま市 (側溝)	208	-120	-104	-180	3.2	0.505
東京都文京区 (側溝)	225	-117	-102	-200	8.7	0.940
横浜市街	261	-116	-114	-235	1.2	0.079

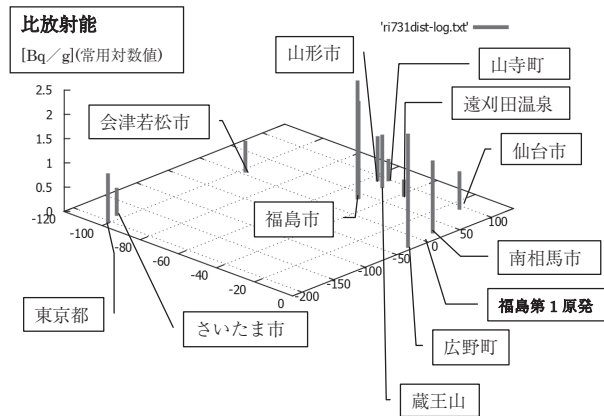


図 5. 事故後 2 年 = 731 日の飛散放射性物質の分布図 (表 4 の米沢市街と横浜市街を除いて表示):
 - 120 km ~ 0 km [横軸は西から東へ], - 250 km ~ 100 km [縦軸は南から北へ]
 垂直軸は比放射能 [Bq/g] を常用対数値で表している。
 福島第一原発は (0 km, 0 km) にある。

で、初めに ^{131}I , 続いてゆっくりと $^{134}\text{Cs} \cdot ^{137}\text{Cs}$ が減少していっている様子が見て取れる (図 3-A, 表 3-B1, B2, B3)。雪や雨水への放射性物質の混

入は、事故直後にはあったと考えられる。ここではその後の変化について極く簡単に雨水についてのみ調べた。植物への混入は事故 20 日後に採取

した試料について調べた。土壤についてはセシウムは水流などを介して土の粒子に強く吸着をしたものと考えられる⁶⁾。

④ 側溝の土壤放射能：福島県のいくつかの地域の長期間に亘る ^{134}Cs ・ ^{137}Cs の経時的变化のグラフでは、ゆっくりではあるが土壤の比放射能が減少していつている様子が見て取れる(図4の各図)。側溝の土はその地域の他の試料と比べるとほぼ最大値であり、同じ地域でも表面が砂地の土の場合は側溝の土の1割程度あるいはもっと少ないところも多かった。

結 語

本報告では、放射性物質による汚染が住民の集団移転を余儀なくされている地域(原発から北西方向へ数10 kmほどまでなど)からはある程度離れた地域からの試料を主な対象とした。核種の同定は、その特有のピークエネルギー値と半減期から行った。また2年間に亘り同一試料の比放射能やその経時的变化を追跡した。これらは自然放射能とそれほど変わらない低い比放射能値のものから、確かに放射性物質の存在していることがわかる程度の比放射能値のやや高い範囲にまで亘る。その値は居住地から避難せざるを得なかった地域に比べれば少ない比放射能値である。そしてこうした地域がどの位の汚染となったか、またどの程度に減りつつあるかを知ることができた。以上のようにして原子炉の水素爆発事故による放射性物質の飛散状況を調べた。低エネルギー分解能であるとはいえ計数効率の高い井戸型NaI(Tl)シン

チレーションカウンタシステムを用いて比較的容易にまた精度よく、ガンマ線強度から放射性物質による汚染状況を定量的に把握することができた。

謝 辞

本研究に関しては、飛散放射性物質の計測について理解いただき、測定結果へのコメントを頂くなど多くの援護をしていただいた保健学専攻放射線技術科学コースの千田浩一・志田原美保両先生に、また福島県で行われた事故後まもなくの避難住民の汚染スクリーニングへの参画の機会を利用するなどして、各地からのサンプル採取等に協力いただいた細貝良行、小倉隆英、小山内実の各本専攻の諸先生方に、深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 福島原発事故独立検証委員会：福島原発事故独立検証委員会調査・検証報告書、ディスカヴァー・トゥエンティワン、東京、2012、37-38
- 2) 岡本孝司：証言班目春樹 原子力安全委員会は何を間違えたのか？、新潮社、東京、2012
- 3) 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、東京、2009
- 4) 大学等放射線施設協議会：大学等放射線施設協議会会報(第16号)2011年版、2011、43-44
- 5) Lederer, C.M., Hollander, J.M., Perlman, I.: Table of Isotopes 6th Edition, John Wiley & Sons Inc, New York, 1967
- 6) 畑村洋太郎、安部誠治、淵上正朗：福島原発事故はなぜ起こったか 政府事故調核心解説、講談社、東京、2013、170