

福島第一原発事故後の長野市の放射線量

奥村紀浩*¹・大西浩次*²・藤原勝幸*²

Radioactivity in Nagano City after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accidents

OKUMURA Norihiro, OHNISHI Kouji and FUJIWARA Katsuyuki

Radioactivity in air and soil were measured after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accidents. The radiation dosage level in the air rapidly increased after the accident. But it is gradually decreasing now. Some energy spectrums of gamma rays from soil, which was sampled at a sewage outlet at Nagano National College of Technology (NNCT), were taken from March 26 to May 8. These spectrums indicate there is an existence of relatively short-life radioactive nuclei such as ^{131}I . The facts suggest that radioactive materials were released from the nuclear plant and were carried airborne to Nagano.

キーワード：原発事故，放射線測定，放射線量，放射性物質，ヨウ素 131 (^{131}I)，セシウム 137 (^{137}Cs)

1. ま え が き

平成 22 年 3 月 11 日東北地方を中心に、地震と津波により未曾有の災害に見舞われた。それにともない、福島第一原子力発電所の原子炉 1, 2, 3 号機は、炉心冷却水の喪失によって起こった水素爆発、4 号機は炉心に燃料棒はなかったものの、燃料棒保存プール周辺で爆発が起こった。それらの結果、大量の放射性物質の放出が報告されている¹⁾(図 1)。この危機は、本紀要執筆時においても、収まる兆しは見えない。

放出された放射性物質は、放射線という形で空間、ほうれん草などの作物、水道水、土壌などから検出されている。一般に放射性物質は、その化学的性質により、ちりに付着したり水に溶けたりして空間中を様々な形で広がっていく。中でも広く汚染を広める原因として第一に挙げられるのが、風の流れである。また、風に流された物質は、降雨によって地面に落とされ、水の流れの集中する場所に放射性物質も集中する。

長野県と事故現場の福島県を考えると、大きな山

に阻まれているので、直接のやりとりは無いにしても、回り込みは無視できまい。その意味で、長野県内での環境放射線の継続的測定は事故の規模の推定や、県内への影響を考慮するのに役に立つ。

本稿では、長野高専の校内において放射線の空間線量を継続的に測定し、福島第一原発の水素爆発の後に、線量の一時的な増加が見られ、その後減少していく様子が観測できたことを示す。さらに、校内の土をサンプリングして、ガンマ線の測定を行なうと、ヨウ素 131 (^{131}I) などのように、ウラン 235 (^{235}U) 核分裂反応の生成物として知られている放射性物質が検出できたことを示す。

2. 空間線量の継続的測定

放射線の空間線量の測定には、ハンディタイプのサーベイメーターを用いた(アロカ(株)、シンチレーションサーベイメーター TCS-171B)。このサーベイメーターは NaI(Tl)シンチレーターを用いており、シンチレーション光が明るいので、比較的低エネルギーのガンマ線から検出することができる。

このサーベイメーターを管理棟屋上(屋上と略す)と、管理棟正面道路のアスファルト面(1F 校舎前)

*1 一般科准教授

*2 一般科教授

原稿受付 2011 年 5 月 20 日

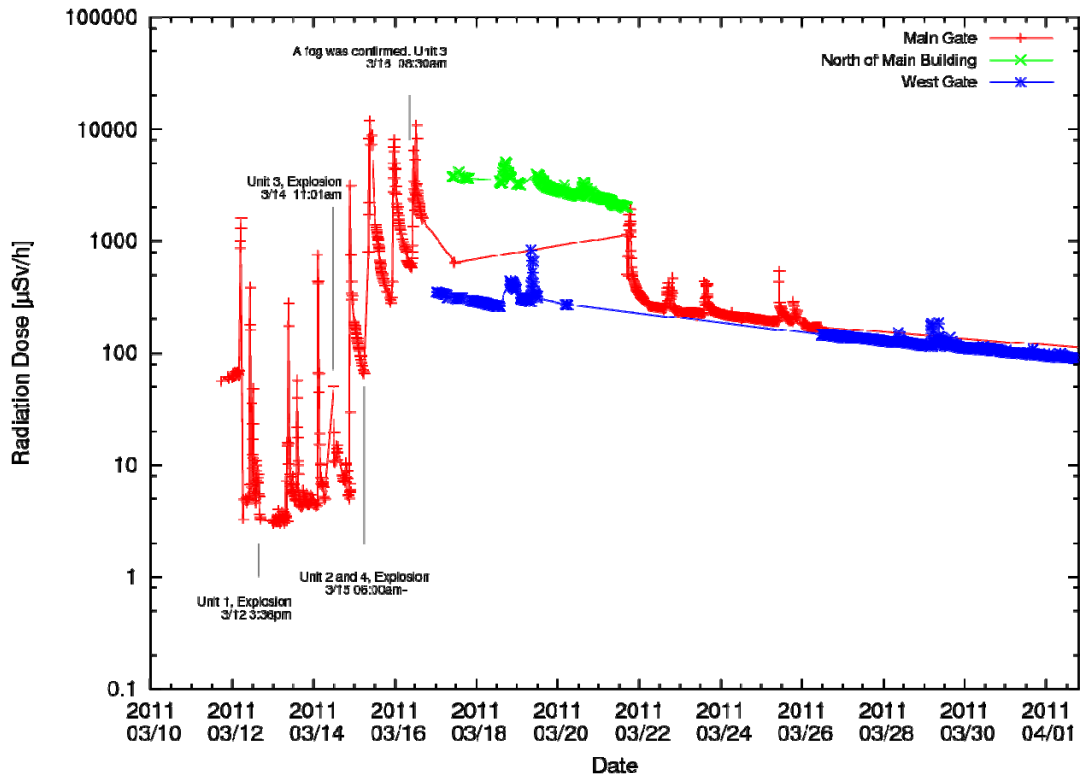


図1 福島第一原子力発電所内の放射線量（公開されているデータ¹⁾を利用）

と芝生の庭（1F 校舎芝庭）に持って行き、線量の測定を行なった（図2）。シンチレーターの高さは、屋上床面（地上からの高さ12m）から1m、あるいは地面から1m前後の高さであった。

こうした測定点で測定したガンマ線の空間線量の変化を図3に示す。3月15日の午前6時過ぎに福島第一原子力発電所の原子炉2号機が水素爆発し、図1のように所内の放射線量が急激に増加した。このことを受けて、サーベイメーターによる放射線モニターを始めた。市内では、3月15日の夕刻より空間線量は増加し、その後なだらかに下降していることがわかる。この急激な増加は、3月15日午後5時頃から翌朝にかけての長野市内での降雨（図4）に伴い、放射性物質の付着した塵が落下したためと考えられる。その後、降雪や降雨による空間線量の変動が見られるが、全体の傾向としては、減少傾向であり、3月15日以後の有意な放射性物質の効果は認められない。ただし、3月20日夜から21日朝にかけての降雨の際にも通常の降雨時よりやや大きな増加が見られるが、このデータのみでは、新たな放射性物質の供給があったか判らない。なお、3月16日夜から17日の急激な減少は10cm程度の積雪によるスクリーニング効果のためと思われる。

長野高専の校内での自然放射線レベルは、約0.04 μSv/hであり、図3(b)はこの補正をしたデータであ



図2 測定点と試料採取点（長野高専内）。緯度経度については、1F校舎芝庭（標高361m、地面から1m上）北緯36度40分43秒、東経138度14分0秒、1F校舎前（標高361m、地面から1m上）北緯36度40分42秒、東経138度14分0秒、校舎屋上（床面高さ12mから1m上）北緯36度40分41秒、東経138度14分2秒、試料採取点北緯36度40分42秒、東経138度13分59秒。

る。図5は、3月17日から20日間の自然放射線レベルを補正した空間線量の減少の様子を表示している。屋上と管理棟正面の芝生に覆われた庭（1F校舎芝庭）で測定した線量を指数関数でフィットすると、前者の半減期が約6.7日、後者が約9.2日であった。

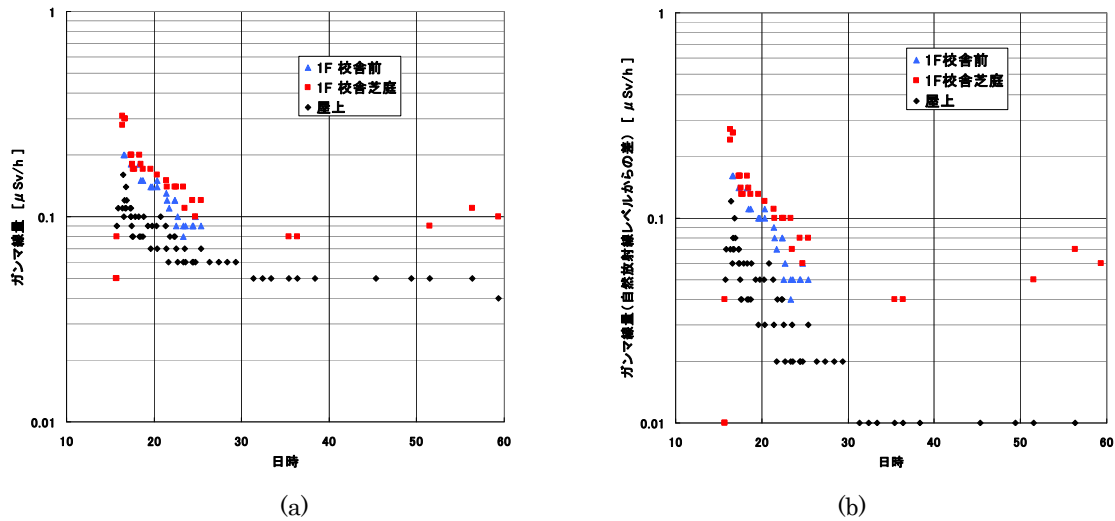


図3 放射線モニター (a) ガンマ線量の時間変化, (b) 自然放射線レベルを引いたガンマ線量の時間変化. 横軸の日時は3月1日を1日目として取っている. 縦軸はLogスケールで, 単位は1時間当たりの放射線量($\mu\text{Sv/h}$)である.

屋上での半減期が1F校舎芝庭より早いのは, 大気の流れにより放射性物質の付着した塵が早く拡散したためであろう. 一方, 1F校舎芝庭での半減期の値は, ^{131}I の半減期の8.0日に比較的近く, これらの放射線が, 降雨時に落下した原子炉由来の ^{131}I などの放射性物質によるものと推定できる. なお, 同じグラウンドレベルでも, 管理棟正面のアスファルト面(1F校舎前)の半減期は, 約4.5日と1F校舎芝庭の約半分であるが, これは降雨により, 放射性物質の付着した塵が側溝などに流れたことや, アスファルト面上の放射性物質の付いた塵が風などで飛散しやすいためと考えられる. 図3で判るように, 屋上の空間線量は, 2, 3週間, ほぼ自然放射線レベルに近づいたが, 1F校舎芝庭での空間線量は, やや高いレベルのまま, ほぼ一定の値で留まっている. これらは例えば ^{134}Cs などの原子炉由来の比較的半減期が長い放射性物質によるものと考えられる. このように, 地表面付近の線量は, 降雨などにより土壤に落下した放射性物質に由来し, 通常報告されているモニタリングポストなど, 高い位置で測定している空間線量(空气中に浮遊する放射性物質による線量)より大きく, 減衰率も小さいことに注意しないとけない. また, このように測定地点の高さや環境の違いが, 放射線量の値に大きな影響を及ぼすため, 全国各地で報告されている放射線量の値を比較する場合には, 細心の注意が必要なことが判る.

最近, 福島第一原子力発電所の事故に伴う放射性物質の拡散予測シミュレーションの計算結果³⁾が, 国外の気象局, 企業, 日本の気象局, 緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPEEDI)など

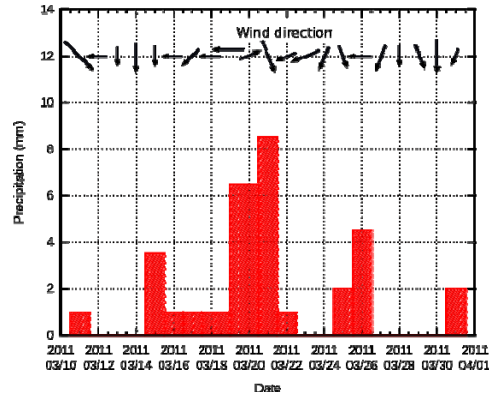


図4 原発事故以降の長野市の降水量(棒グラフ)と最大の風速・風向(矢印)²⁾. 矢印の長さは風速に比例する. 風向はグラフ上から下が北からの風を表す. 2011/03/16は降雪のため, 降水量は不確かな値である.

から幾つも発表されている. これらのデータをみると, 3月15日の早朝に放出された放射性物質が, 当日, 東風に乗って, 福島第一原子力発電所から西側に向かって拡散し, 夕方に長野県まで拡散している様子がシミュレーションされている. 長野市内では, ちょうど, この放射性物質が拡散してきた時間帯に降雨があり(図4), 放射線量が上がったと考えられる.

3. 土壌からの放射線測定

3-1 測定系とサンプルの採取

土壌からの放射線測定は, CsI(Tl)のシンチレータにPINフォトダイオードを接着した検出器モジュール(クリアパルス(株)579/CsI型 検出器内

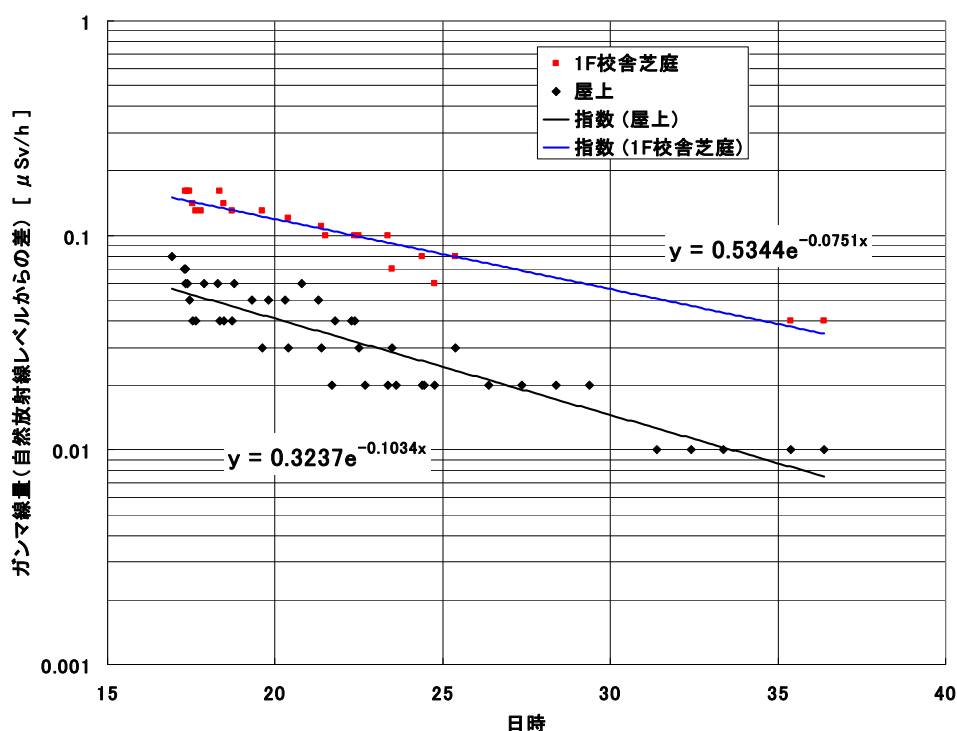


図5 1F校舎芝庭と屋上での空間線量の減少率。横軸の日時は3月1日を1日目として取っている。

蔵前置増幅器)を用いた。フォトダイオードには、プリアンプを通してバイアス電圧(30V)をかけ、信号はそのプリアンプから取り出した。この信号はシェイピングアンプを使って増幅し、ウイルキンソン式のADCに入力した。このADCの出力は、ADCコントローラを通じてノートパソコンに取り出される(図6)。

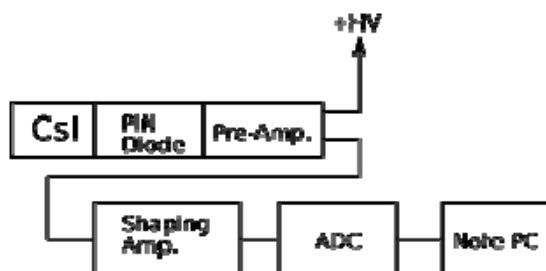


図6 測定回路

図7には¹³⁷Cs標準線源からのガンマ線を、このシステムで測定したときのエネルギースペクトルを示す。¹³⁷Csがベータ崩壊して生じた¹³⁷Baの準安定状態から放出される662keVのガンマ線が観測できる⁴⁾(図8)。この検出器の662keVガンマ線に対する相対的な分解能は6.5%程度であった。

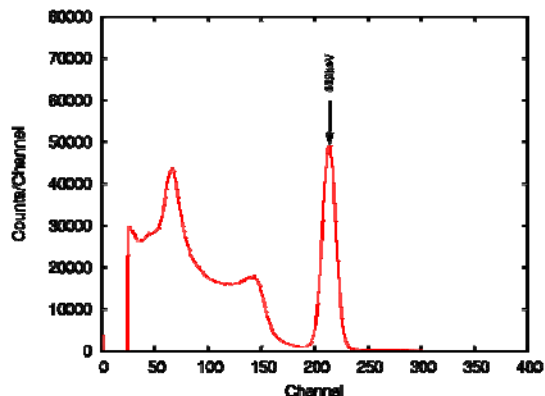


図7 ¹³⁷Cs標準線源のエネルギースペクトル。662keVのガンマ線によるコンプトンエッジの他、後方散乱が観測できる。

このスペクトルには662keVのガンマ線のコンプトンエッジと後方散乱が見える。後方散乱の多さを見ると、検出器の配置に再考が必要であるようだ。

スペクトルのピーク部と標準線源の製造年月日から、本システムの検出効率を見積もると、 1.45×10^{-3} 程度であった。この値は、検出器の幾何学的な配置や構造も加味してあることに注意すべきである。しかし、線源が点光源と仮定して文献値⁵⁾から検出効率を概算すると、 2×10^{-2} ほどなので、検出器系のどこかで数え落としがあるようだ。

チャンネルとエネルギーの対応関係の確認は¹³⁷Cs標準線源のほかに、⁶⁰Coからのガンマ線のエ

エネルギーを用いて行なっている(図9)。この図から、今回の測定範囲において、チャンネルとエネルギーの直線性は保証されている。

サンプルは2011年3月26日に、長野高専電子情報科棟入り口前の雨水用格子蓋周辺で採取し(図2 試料採取点)、ジップロック式のビニール袋に入れた。この周辺での高さ1mの空間線量は0.08 μ Sv/hであった。サンプルの入った袋は鉛のシールドの中に置き、検出器のシンチレーター面をビニールに接触させた。収量を稼ぐために、コリメートは特にしていない。

3-2 サンプルの測定

土壌サンプルから放出されるガンマ線のエネルギースペクトルを図10に示す。図9のように、標準線源からスペクトルのチャンネルとエネルギーに対応がついているので、図10にはピークのエネルギーを記載した。

サンプルを採取した直後のスペクトルと、ある程度時間が経過したあとのスペクトルでは、対応するピークの収量が減衰していることがわかる。これは、数日程度の比較的短寿命の核種の存在を示唆する。だから福島原発の事故による飛来物と解釈するのが妥当と考えることができる。

原子炉の運転中は、 ^{235}U の中性子による核分裂反応が継続的に起こる。そして長時間の運転の結果、様々な核分裂生成物が生じる。表1にはその核分裂生成物の累積の結果の代表的なものを載せてある^{6,7)}。また、生成された核種は主にベータ崩壊の後、いくつかのガンマ線を放出する。これらのエネルギーについても載せておいた。

地震の直後に制御棒が挿入され、核分裂反応が止まっていたとするなら、爆発事故による放射性物質の放出によって、こういった核分裂生成物が検出されるはずである。もっとも、核種の質量といった物理的性質、また、水に溶けやすいなどの化学的性質で飛来の仕方が異なる。したがって、表1に載せた核種がすべて検出できるわけではない。

さらに、本検出器系の標準線源に対する分解能から、43keV程度の差は区別できない。だから、もし表1に記載の生成物が飛来していたとしても、一つに同定することは不可能である。ただ、一部の核種からのガンマ線、たとえば、 ^{131}I の364keVは他から孤立しているので、見極めることが可能である。

図10のスペクトルでは、3月26日の時点で、351keVのあたりにピークが立つ。これが ^{131}I からのガンマ線と見られる。その収量を継続的に観測す

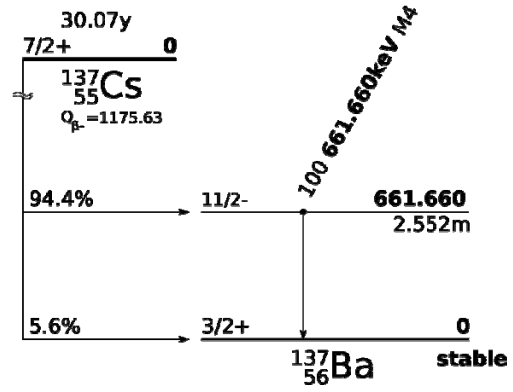


図8 ^{137}Cs のレベルスキーム⁴⁾。 ^{137}Cs は半減期30年でベータ崩壊し、94%の確率で ^{137}Ba の励起状態となり、そこから安定状態となるために662keVのガンマ線を放出する。

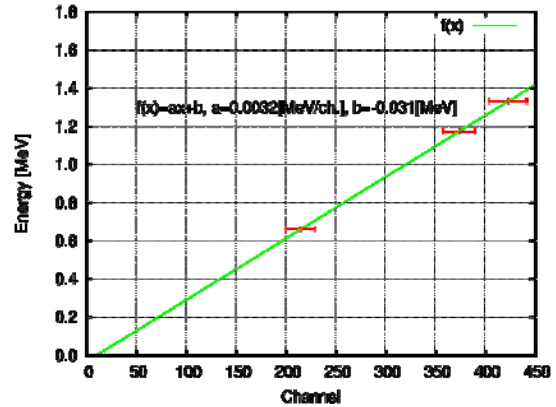


図9 エネルギー校正図。エネルギー校正是 ^{137}Cs と ^{60}Co からのガンマ線を利用した。横方向の誤差棒は半値幅を示す。

表1 ^{235}U の累積核分裂収率^{6,7)}

半減期が比較的長く(1日以上)、ガンマ線のエネルギーが本検出器の検出範囲に近いもののみ抜き出した(収率は200%に規格化されている)。

核分裂生成物	Half life	収率(%)	主な光子のエネルギーと放出割合
90Sr	28.74y	5.8	-
95Zr	64.02d	6.5	0.756MeV(54.5%)
99Mo	65.94h	6.1	0.739MeV(12.1%) 0.228MeV(88.0%)
132Te	3.204d	4.3	0.116MeV(2.0%) 0.364MeV(89.9%)
131I	8.021d	2.9	0.637MeV(7.27%) 0.723MeV(2.10%)
133Xe	5.243d	6.6	0.081MeV(38%)
137Cs	30.04y	6.2	0.662MeV(85.1%)
140Ba	12.75d	6.3	0.537MeV(24.4%)
140La	1.678d	6.3	0.816MeV(23.3%)
141Ce	32.50d	5.9	0.145MeV(48.2%)
144Ce	284.9d	5.5	0.134MeV(11.1%)
147Nb	10.98d	5.5	0.531MeV(13.1%)

h:hours, d:days, y:years

ると、明らかに時間とともに減衰している(図 11)。この収量を得るために他からのバックグラウンドを引き算している。そのバックグラウンドは時間によらずほぼ一定なので、ピークが小さくなるにつれて桁落ちが生じてしまう。図 11 の誤差棒は、統計誤差の他にそういったバックグラウンドを差し引く際に生じる誤差も加味してある。

減衰の様子は、崩壊による核種の減少と見られるので、指数関数でフィットすると崩壊定数は $1.08 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 程度。半減期に直すと 7.4 日程度となる。誤差は 5% 程度である。この崩壊定数は、収量の誤差の非常に大きい領域までフィットした結果であり、誤差でフィットにウエイトをかけているとは言え、その影響を無視できなかった。誤差の少ない適当な領域まででフィットすると、半減期は 9 日前後とな

る。したがって、半減期としては 7 日から 9 日の間となる。

エネルギースペクトルのエネルギー校正値と、時間依存性の解析の両面から、このスペクトル上 351keV のピークは ^{131}I からのガンマ線と考えられる。 ^{131}I は原子炉からしか作られないから、福島第一原子力発電所の事故による影響が長野にまで及んでいると断定できる。

本検出器の検出効率を考慮して、飛んできた放射能の強さは、測定の開始時点で ^{131}I に対して 2.8kBq/kg 程度である。思ったよりも多いという印象を受けている。今回の土壌サンプルは、雨水の流入口という、地表を流れる水の集まるところであり、放射性物質が濃縮されやすいところから採取している。飛散した放射性物質が広く分散したと考えると、

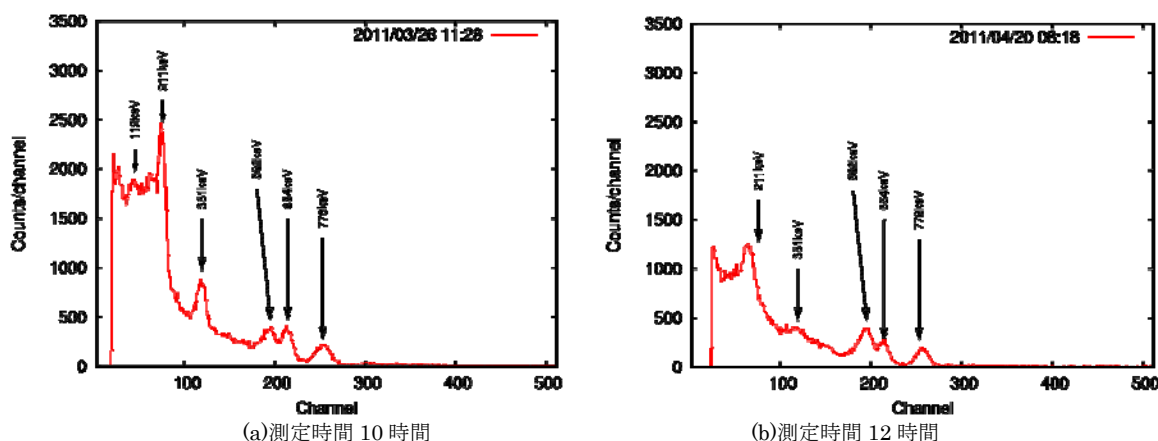


図 10 土壌からのガンマ線のエネルギースペクトル。(a)は 2011 年 3 月 26 日測定、(b)は同年 4 月 20 日測定。

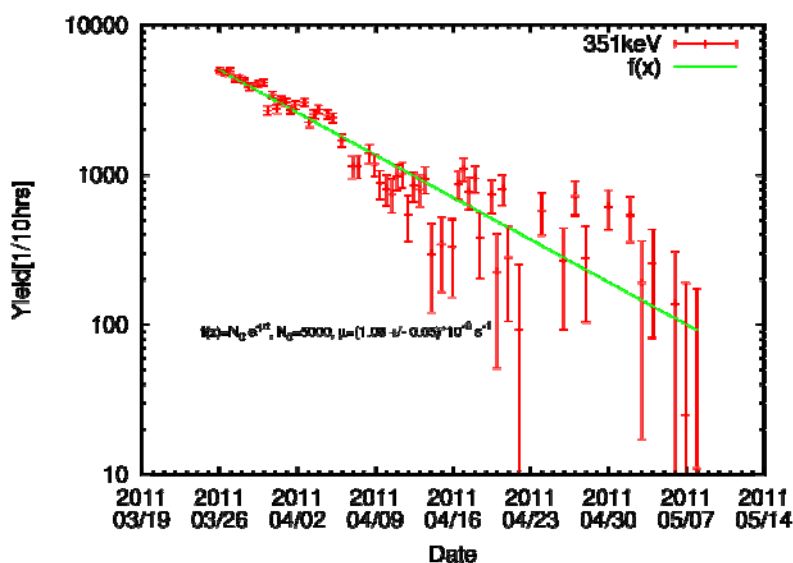


図 11 351keV ピーク収量の時間依存性。直線は適当な時刻を原点に、指数関数でフィットしたもの。

畑などの土はこれよりも少ない値を示すことが予想される。

^{131}I の結果から、図10のエネルギー校正値が実際と10keV程度のずれと見込むならば、図10(a)の112keVや211keVのピークは、 ^{132}Te からのものではないかと考えることができる。これらのピークは1ヶ月弱(図10(b))で、急激に減少している。 ^{131}I のように、時間依存性の解析は高いエネルギーのガンマ線によるコンプトンエッジの領域と重なっているため、ピークの分離が難しく、あきらめた。

654keVは主に ^{137}Cs を示していると考えられるが、図10のスペクトルの時間変化をみると、それだけではないようだ。 ^{131}I には637keVのガンマ線があり、これが ^{137}Cs のガンマ線とほぼ同じ位置にピークを作る。 ^{131}I の半減期が ^{137}Cs のそれに比べて圧倒的に短いため、ピークの形状に変化が見られると推測できる。

報道によると、 ^{134}Cs のガンマ線もいたるところで検出されているようだ。しかし ^{134}Cs は表1には載っていない。陽子数と中性子数がそれぞれ奇数の核であるから、核分裂の結果で生じにくいのである。 ^{134}Cs が存在するならば、これは ^{133}Cs の中性子捕獲で生じたと考えられる。 ^{133}Cs は熱中性子に対する捕獲断面積が比較的高いことが知られているからだ。そのため ^{134}Cs の検出は、福島第一原子力発電所の原子炉からの可能性が非常に高い。 ^{137}Cs は過去に行なわれた核兵器の実験で生じたものとも言え、福島起源でない可能性も捨てきれない。一方、 ^{134}Cs 生成にはまず ^{133}Cs が生成し、さらに中性子捕獲反応が必要なため、核実験による瞬間的な核爆発では

その生成の説明ができないからだ。

図10の592, 778keVのガンマ線は ^{134}Cs のレベルスキーム(図12)を見ると、放出されやすいガンマ線のエネルギーの605keV, 795keVに近いので、本測定でも、その存在が示唆される。我々の検出が事実であるならば、福島から来たとする傍証がさらに得られたことになる。

ただし分解能の悪さから、他の核種からのガンマ線の可能性や、いくつかの核種からの混合である可能性も否定できない。たとえば、778keVのピークは他から比較的分離しているため、時間依存性の解析を行なうことができる(図13)。プロットは減衰の割合が異なるいくつかの傾斜が見られる。図13では2種類の傾斜があるとして、フィットしてみた

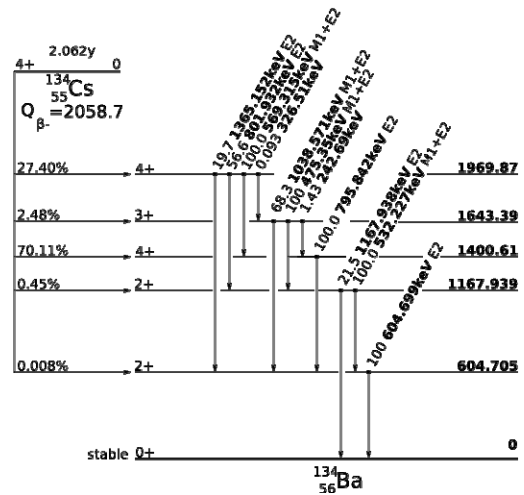


図12 ^{134}Cs の準位図。必要な部分だけ取り出した³⁾。

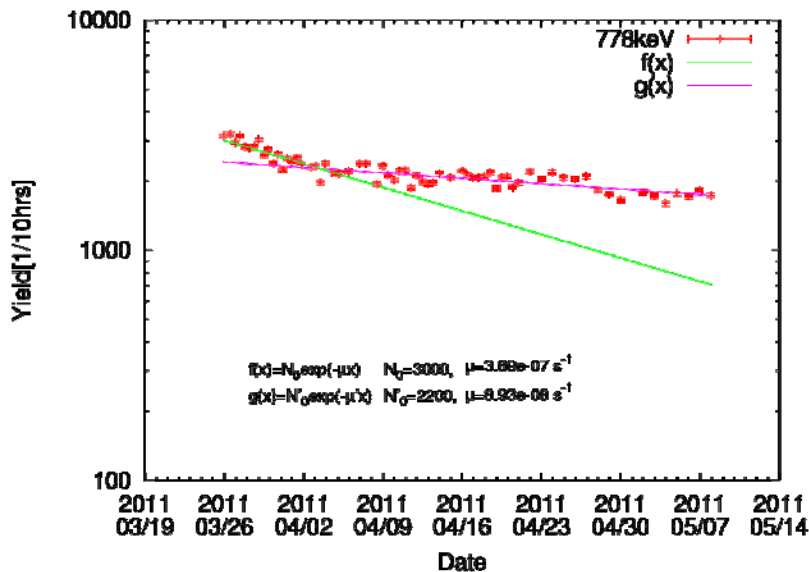


図13 778keVピーク収量の時間依存性。直線は適当な時刻をスタートにして、指数関数でフィットしたもの。

が、半減期が一致するような核種は見当たらない。より分解能の優れた検出器を用いるか、継続的な観測を行なって、短寿命の核種を減らしてから確認するべきであろう。

5. まとめ

福島第一原子力発電所の事故の後、長野高専内での空間線量や、土壌に含まれる放射性物質からのガンマ線を測定した。これらの測定により、長野市に飛来した放射性物質についての見当を付けることが出来る。

空間線量の測定では、福島原発の事故のあと、急激な線量率の増加が見られ、その後減少している。はじめの1週間程度の減少率は、半減期の短い核種による放射線が支配的で、2, 3週間以降は、半減期の長い核種の放射線による自然放射線レベルの2~3倍の放射線量が測定できている。この状況は現在でも続いている。

土壌のガンマ線を調べてみると、 ^{131}I からのガンマ線にエネルギー的に近いものが得られ、その収量は時間とともに減少している。その半減期は、 ^{131}I の半減期とほぼ一致している。

また、エネルギーだけの判断では、 ^{132}Te , 134 , ^{137}Cs からのガンマ線に相当する検出があり、それらの収量は相応に減少している。

こうした結果から、福島第一原子力発電所で放出された放射性物質の一部は、長野市まで達し、土壌を汚染していると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 東京電力: 福島第一原子力発電所構内での計測 (<http://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/index-j.html>)
- 2) 気象庁: 気象統計情報 過去の気象データ検索 (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>) における長野県長野市のデータ (2011年3月)
- 3) 放射性物質の拡散予測シミュレーション
 - ・ フランス放射線防護原子力安全研究所 (IRSN): 大気中に放出された放射性物質の拡散 (http://www.irsn.fr/FR/popup/Pages/animation_dispersion_rejets_22mars.aspx),
 - ・ オーストリア気象地球力学研究所 (ZAMG): (<http://www.zamg.ac.at/wetter/fukushima/>),
 - ・ ドイツ気象庁(DWD): (<http://www.dwd.de/>)
 - ・ ノルウェー気象研究所: (<http://transport.nilu.no/products/fukushima>)
 - ・ 気象庁環境緊急対応 (EER) 地区特別気象センター (RSM): (http://www.jma.go.jp/jma/kokusai/kokusai_eer.html)
 - ・ 日本緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPEEDI): (<http://www.bousai.ne.jp/vis/torikumi/index0301.html>)
 - ・ Visible Information Center, Inc.: (<http://www.vic.jp/fukushima/index.html>) 3月15日のシミュレーション: (<http://www.vic.jp/fukushima/r2011031500.html>)
- 4) Richard B. Firestone et al. Table of Isotope 8th edition, Wiley Interscience
- 5) Glenn F. Knoll: Radiation Detection and Measurement 3rd edition, pp.335-341, John Wiley & Sons, Inc.
- 6) A. L. Nichols, D. L. Aldama and M. Verpelli: Handbook of Nuclear Data for Safeguards: Database Extensions, August 2008, pp.105-106(2008, 8), IAEA, International Nuclear Data Committee
- 7) 社団法人 日本アイソトープ協会: アイソトープ手帳 第10版