

|||||

論文

|||||

2011年福島第一原子力発電所事故後の成蹊学園での空間放射線率

宮下 敦*

要旨

2011年3月の東日本大震災によって発生した福島第一原子力発電所事故によって、東日本を中心に大量の放射性物質が大気中に放出・拡散され沈着した。成蹊学園では、事故直後から成蹊気象観測所において空間放射線量率をモニターし、学内および学外に情報提供を行った。事故から10年を経た状況も踏まえて、原発事故時に、人口密集地の学校現場で、どのようなデータを得ていたかを記録した。このような人災を二度と起こさないようにするためにも、事故によって何が起きるかを忘れないことが大切であると考えられる。
キーワード：2011年東日本大震災、福島第一原子力発電所事故、空間放射線量率、成蹊学園

I はじめに

2011年3月11日の東日本大震災時に起きた東京電力ホールディングス(株)福島第一原子力発電所事故により、炉内の放射性物質が大量に大気中に放出・拡散され、日本列島の各地に沈着した(堅田・茅野, 2017)。2022年時点でも、福島第一原子力発電所近傍には帰宅困難地域が残り、深刻な影響が続いている。

そもそも、20世紀に原子力利用は、原子爆弾開発のための国家プロジェクトとして科学技術を形成するという歴史的な事件によって開始された(山本, 2011)。原子核エネルギー、化学反応とは比較にならない巨大なエ

ネルギー源となる反面、核反応によって本来は地球上にはほとんど存在しなかった放射性核種を生み出すものであった。人体に及ぼす放射線の危険性が認識されるようになると、原子力が制御不能になることがないように、多重防護システムが構築され、これ自体がプラントの複雑性を増加させ、コントロールを難しくした。また、多重防護を怠って放射性物質が環境に放出された場合にどのようなことが起こるかについては、最初の核実験(トリニティ実験)の時点でケーススタディとなる事象が起こっていた。大気内核実験により、実験場から大気中に放出された放射性物質が移流・拡散して沈着し、広域的な放射能汚染を引き起こすことが、実際に観測されていたのである(Hansen and Rodgers, 1985)。また、地質学的時間の長さで隔離・保管が必要な高レベル放射性廃棄物処分の問題と併せて、制御不能となる危険を持った原子力技術を利用すべきかどうかについ

* 成蹊大学理工学部/成蹊学園サステナビリティ教育研究センター

ては、軽水炉の原理を提唱した A.Weinberg 自身によって、原子力発電の危険性は科学や技術だけでは解決できないトランスサイエンス問題であるという指摘 (Weinberg, 1974) がなされ、議論が続いている。人類に終末をもたらすことから、持続可能な社会の構築を阻む事象の典型である核兵器の扱いとともに、始めてしまった原子力利用は SDGs で解決しなくてはならない根本問題の一つと考えられる。

原子炉内で作られた人工放射性核種は、地球上には存在しなかったものであり、生命に対する影響については未知の部分が残されている。また、一度、環境中に放出されてしまうと、崩壊によって減少はするものの、原理的にはゼロにはならない。2011 年福島第一原子力発電所事故による放射性物質の拡散は、そのようなことが人口密集地の東日本で観測されるという実例として、忘れてはならないものである。

成蹊学園では、学園内の児童生徒および学生の安全や地域に住む方々を守る立場で、事故直後から空間放射線量率測定を行った。本稿では、このデータ記録を示し、原発事故の影響を後世に伝えることにしたい。

II 福島第一原子力発電所事故の概要

2011 年 3 月 11 日 2 時 46 分に三陸沖で発生した東北地方太平洋沖地震による東日本大震災は、東日本を中心に日本に未曾有の甚大な被害を与えた。福島県双葉郡大熊町にあった福島第一原子力発電所では、地震発生直後に稼働中の原子炉炉心に制御棒が挿入され緊急停止した。地震に引き続いて発生した津波は、地震発生から約 50 分後に発電所を襲い、臨海部に立地していた発電所の自家発電装置を含む電力供給系が水没して破壊され、発電所は全電源喪失 (ブラックアウト) の状態になった。発電所の 1～3 号機においては、全電源喪失によって原子炉冷却系が止まり、電源を必要としない非常用復水器も制御不能となって、燃料棒が高温にさらされ炉心溶融が起こった。炉心の加熱に起因する炉内圧力上昇を抑えるため、

炉心内の気体を大気中に排出するベントが行われたほか、炉心で発生した水素が爆発したことにより原子炉本体 - 格納容器 - 建屋という多重バリアーが全て損傷し、放射性物質が大気中に漏出した。4 号機は震災時に冷温停止中であったが、3 号機から流入した水素によって爆発が起こり、同様に施設が損傷した。冷温停止のために引き抜かれて保管されていた燃料棒の冷却系も止まり、貯蔵されていた冷却プールの温度上昇が起こった。このような状態は、3 月 12 日から 3 月 15 日までの間に進展した (東京電力福島原子力発電所事故調査委員会, 2012)。

原発事故によって環境中に排出されたり、漏出したりした放射性物質は、気体やエアロゾルの状態で周辺に移流・拡散し、沈着した。これが、東北地方を中心に北海道から中部地方に至る広域の放射能汚染を引き起こした。排出されたり、漏出したりした放射性物質の種類や総量についての定量的な見積もりは不明とされている (堅田・茅野, 2017)。

放射性物質放出のイベントは複数回あるが、発電所から 200km 以上はなれた成蹊学園のある東京都を含む関東地方南部に影響が大きかったのは、3 月 14 日昼～15 日にかけての 3 号機水素爆発に伴うブルームによる乾性沈着および雲水沈着と、3 月 21 日の 1 号機と 3 号機の再溶融による放出と推定されているブルームが引き起こした湿性沈着と考えられる (堅田・茅野, 2017)。

III 成蹊学園における空間線量率測定

1. 事故後初期の測定

成蹊学園付属成蹊気象観測所では、毎日午前 9 時に気温などを含めた気象観測を行っている。これは震災発生時を含めて毎日継続していた。原発事故の報道を受けて、どの程度の放射性物質が飛来するかを、気象観測とあわせて測定しようと考えた。

成蹊中学高等学校地学科では、地球の熱源としての放射性物質や、放射性鉱物について演示実験を行うために、堀場製作所(株)製ヨウ化セシウム



図1 空間放射線量率測定装置

[a]: 堀場製作所㈱, PA-100, [b]: ㈱テクノエービー, TS100.

(CsI) サーベイメーター・PA-100 (図1 [a], 板谷と青山 1991) を所有していた。PA-100 は、固体シンチレーターとフォトダイオードを用いたシンチレーションカウンター方式の小型サーベイメーターで、ヨウ化ナトリウム (NaI) を用いたサーベイメーターよりも携帯性に優れている。成蹊気象観測所では、この機材を利用して原発事故直後から空間放射線量率測定をスタートさせることができた。

残念ながら、原発事故以前に、同じ機材を用いた学園内で空間放射線量率の測定は行っていないので、事故の影響がない平常時の空間放射線量率について、この機材を使ったデータはない。原子力規制庁が公開している環境放射線データベース (<https://www.kankyo-hoshano.go.jp/data/database/>) で、1976年～2009年までのサーベイメーター測定値を平均すると、東京都の値は 51.03 nGy/h (標準偏差: 12.03) で、これは $0.041 \mu\text{Sv/h}$ (標準偏差 0.010) に相当する。本稿では、これを原発事故前の自然放射線量率として扱うことにする。

2. 初期の測定結果

原発事故後、2011年3月15日から約3か月程度にわたって、気象観測時および授業の合間などに、視程目標観測地点である成蹊中学高等学校中央館屋上 (地上高約 30 m) において、空間線量率測定を行った。線量率測定は、前述のPA-100を用い、10秒毎に10回測定し、その平均を測定値

とした。地上高の高いところで測定したのは、建物などによる放射線の掩蔽や、地上付近の放射性物質の沈着の不均質による偏りをならして、校内の平均的なデータを得るためである。測定データの経日変化を図2に示す。

測定値は観測を開始した3月15日14時15分のものが最も高く、 $0.108 \mu\text{Sv/h}$ を示した。事故後の最大値は、事故前の東京の自然放射線量率の2倍以上の値になる。空間放射線量率は、その後、少しずつ減少したが、3月21日には事故後初の降水があり、この際に再び $0.083 \mu\text{Sv/h}$ まで上昇がみられた。3月中の空間放射線量率の減少は、放射性ヨウ素 ^{131}I (半減期約 8.02 日) の減少曲線にフィットすることから、事故直後の放射線量率は ^{131}I が主な放射線源と考えられる。4月以降に関しては、 ^{131}I の減衰曲線からのずれが大きくなった。これは、放射線源として ^{131}I と同様に放出量が多かったセシウム ^{134}Cs (半減期約 2.07 年)、セシウム ^{137}Cs (半減期約 30.1 年) による放射線量率の影響が相対的に増加したためと考えられる。ほぼ毎日の測定は5月いっぱい行い、それ以降は減少傾向が小さくなってきたこと、および東日本大震災の影響から学校の教育活動を取り戻すために、定期的な測定ではなくなったが、1学期の終了する7月いっぱいまで継続した。原発事故直後は、放射線測定器を所持して測定している機関や個人は少なかったため、公的な測定値を補完する意味で、随時 SNS を

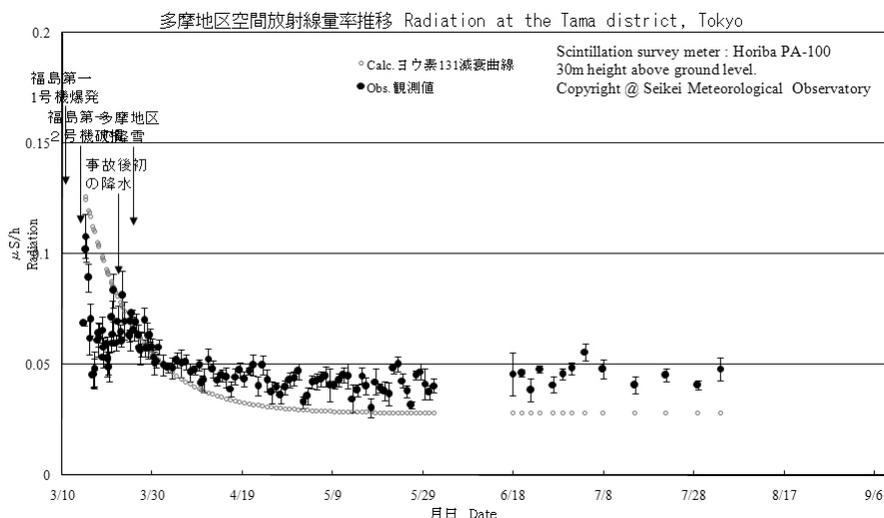


図2 成蹊中高中央館屋上で測定した空間放射線量率の経日変化
 降水に含まれていた主な放射性核種は、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs であることが分かる。

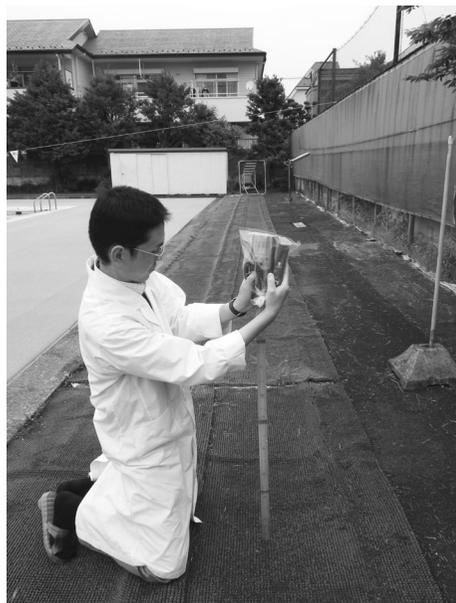


図3 PA-100を用いた地上高1mの空間放射線量率測定の様子

2011年6月1日に成蹊学園北プールサイド。人物は、高校地学科講師だった新井宏嘉先生。

通じて測定結果グラフを公表した。

原発事故直後に降下した放射性物質は、降水や風によって移動し、雨どい下や排水溝などの降水が集まりやすいところで放射線量率が高くなる現象が認められ、「ホットスポット」と呼ばれるようになった。このため、2011年6月～7月にかけて、成蹊学園敷地内の各所で、地上高1mの高さで空間放射線量率測定を行った(図3)。この時の測定は、移動しながらではなく、ある一定の状態の場所(例えばグラウンド)の中央付近で地上高1mの高さで10秒毎に10回測定して平均を求めた。また、小中高の体育で使用する学園プールについては、排水溝部分も含めてより詳細な測定を行った(図4, 表1)。

2011年7月の時点では、弱い降水の入り込みにくい林園(雑木林)林床や、水で洗浄が繰り返されているプールサイドなどでは $0.04 \mu\text{Sv/h}$ 前後で低く、多孔質の透水性舗装が施されている場所や人工芝のグラウンドなどが $0.07 \mu\text{Sv/h}$ 以上のやや高めな空間線量率を示した。地表に何らかの人工的な被覆がある場合、そこに放射性物質が



図4 成蹊学園内において、2011年6月～7月にかけて測定した地上高1mでの空間放射線率分布 (μ S/h).

0.07 μ S/h を超える部分は、地表が透水性舗装もしくは人工芝になっているところと一致している。

トラップされている傾向がみられた。また、プールサイドは、全体的には空間放射線量は低いが、排水溝付近では0.204 μ Sv/hと、周辺よりも3倍程度高い値を示す部分が発見された。

この頃、成蹊小学校で測定したとする空間放射線量が、筆者らの測定値よりも有意に高い値で週刊誌記事として流布され（週刊新潮、2011）、保護者の不安を煽ったことに対応する必要がある。

表1 2011年6月1日に実施した、成蹊学園プールサイドでの1m高および10cm高の空間放射線量率測定結果(μS/h)

・北プールサイド		
場所	1 m高	10 cm高
A 南側ラバー上	0.039	0.042
B 東側ラバー上	0.034	0.035
C 東側人口芝上	0.054	0.078
・南プールサイド		
場所	1 m高	10 cm高
A 南側ラバー上	0.036	0.057
B 東側ラバー上	0.041	0.055
・排水口		
場 所	測定値	
北プール南西	0.049	
北プール北西	0.204	
北プール北	0.139	
南プール消毒	0.069	
南プール南西	0.101	
北プール	0.096	
・成蹊学園内の平均的な値		
場 所	測定値	
本館前芝生	0.062	
小学校トンネル山グラウンド	0.047	
蹊グラウンド西	0.076	

た。そのため、この測定結果は、後述する空間線量率の高いホットスポットの探索などの結果とともに、2011年7月の成蹊中学高等学校職員会議と成蹊中学校保護者会で報告して学内に周知した。ホットスポットを作らない対策として、放射線防護に注意しながら雨どい下や排水口などの清掃を徹底することを提案した。

3. 降水試料 γ （ガンマ）線スペクトル測定

成蹊気象観測所では、1991年から降水pH測定を実施している(宮下・山崎, 2022)。このために採取した原発事故後に最初の降水となった2011年3月21日の1日分の試料を、テフロン製容器に密封して保管した。これを成蹊大学理工学部の河田 燕先生に依頼して γ 線スペクトルを測定して頂いた。測定は、2011年4月12日に、Ge検出器を用いて積分時間5000秒で実施された。

測定結果を図5に示す。

この3月21日の降水では、含まれていたものは ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs が主な放射性核種であり、前述の空間線量率の経時変化の原因推定を裏づける。

なお、この降水は、2022年の時点で成蹊気象観測所において凍結・保管されている。

4. スペクトロメーターによる移動測定

PA-100サーベイメーターによる測定では、2011年8月以降、空間放射線量率変化は下げ止まったが、その分、得られた値が自然放射線によるものか、原発事故由来の放射線源によるものか区別しにくくなった。また、成蹊小学校や成蹊中学高等学校では、校内でとれた野菜や落ち葉を教材(例えば、家庭科などの食材)として利用しており、微量であっても人工的な放射線物質による

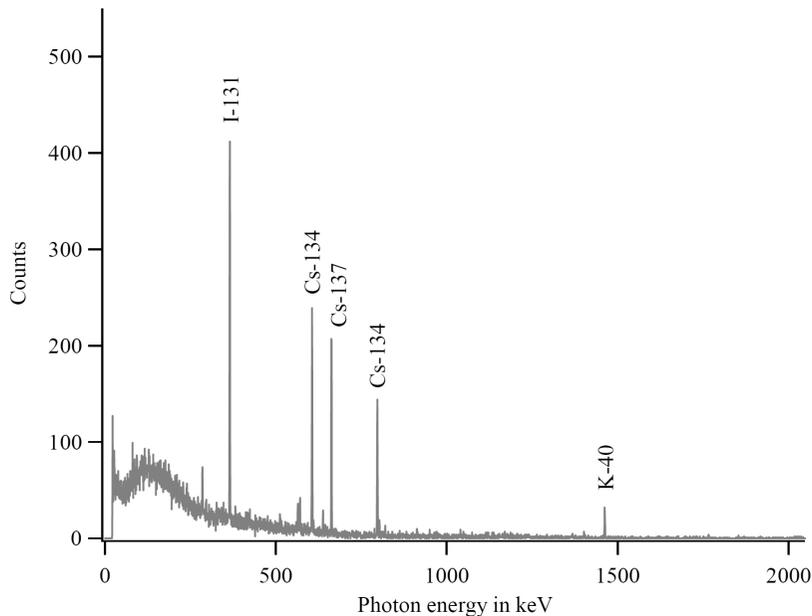
γ 線スペクトル (Ge 検出器 (相対効率 20%) 5000s 測定)

図5 2011年3月21日降水の γ 線スペクトル測定結果
 降水中に含まれていた主な放射性核種は、 ^{131}I 、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs であることが分かる。

ものの影響が懸念された。このため、成蹊学園では、核種の判別ができるスペクトロサーベイメーターの導入を決定し、2011年(株)テクノエーピー製 TS100 を購入した(図1[b])。TS100は、放射線検出部にランタンブロマイド(LaBr₃)結晶を用いる高感度スペクトロメーターで、時間分解能が高いため、車載で放射線のエネルギースペクトルを取りながら移動測定も可能であった。TS100は出荷時に標準放射線源による校正が行われているが、以前から使用しているPA-100と同時測定を行った結果では、両者の測定値は誤差範囲内で一致した。PA-100は標準線源による校正は行われていなかったが、測定値は校正したものと同様に扱えることが分かった。

最初の学園内の徒歩での移動観測は2011年12月29日に行った。位置測定はガーミン社製GPSレシーバーを携行し、2つの機器の時刻合わせをした上で、2011年7月と同様の方法でセンサー

部分を地上高1mに保持して実施した。測定位置と空間放射線量率は同時刻のものとした。測定結果を図6に示す。移動測定による学内の空間放射線量率測定値の平均は、 $0.079 \mu\text{Sv/h}$ (標準偏差: 0.024)で、事故後約8カ月の時点で、原発事故以前の東京の自然放射線量の約2倍の値を示していた。地上高1mの空間放射線量率の分布について、全体の状況は2011年夏のものと同じだが、より詳細な空間放射線量率の分布をつかむことができた。また、後述のように堆積物などの γ 線スペクトル測定により高い値の原因になっている放射性核種が決定できた。学園史料館前の空間放射線量率がやや高い部分では、主な放射性核種はカリウム40(^{40}K , 半減期約13億年)で、これは史料館建物の花こう岩石材による自然放射線源であることが分かった。

同様の測定は、2012年7月、2013年8月にも実施した。空間放射線量率の分布傾向は、2011

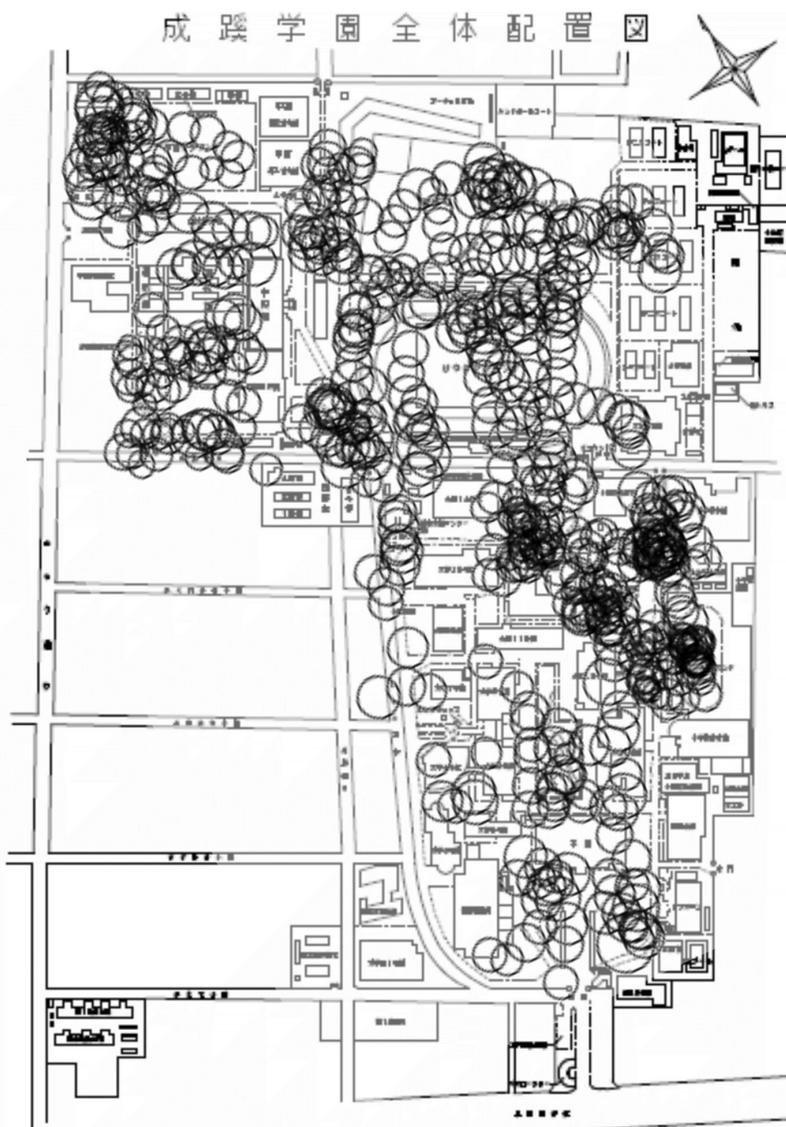


図6 2011年12月29日測定の成蹊学園キャンパス内の地上高1m空間放射線量率測定結果
円の直径0.8mmが $0.1 \mu\text{Sv/h}$ を表す。地面が土の場合は低く、人工芝や透水性舗装の部分ではやや高くなっている。

年12月のものとほぼ同じだが、2012年7月の平均値は $0.064 \mu\text{Sv/h}$ （標準偏差：0.026）、2013年8月は $0.061 \mu\text{Sv/h}$ （標準偏差：0.028）と低下傾向にあった。

東日本大震災から10年後の2021年3月11日に、同じ方法で測定を行った（図7）。空間放射線量

率の平均値は、 $0.056 \mu\text{Sv/h}$ （標準偏差：0.024）であり、原発事故前の東京都の自然放射線量率 $0.041 \mu\text{Sv/h}$ よりも若干高いが、石材などの局所的な自然線量率が高い部分の影響も考えると、全体的に見れば、ほぼ原発事故前の状態に戻ったと考えられる。10年前に高めの測定値が出てい

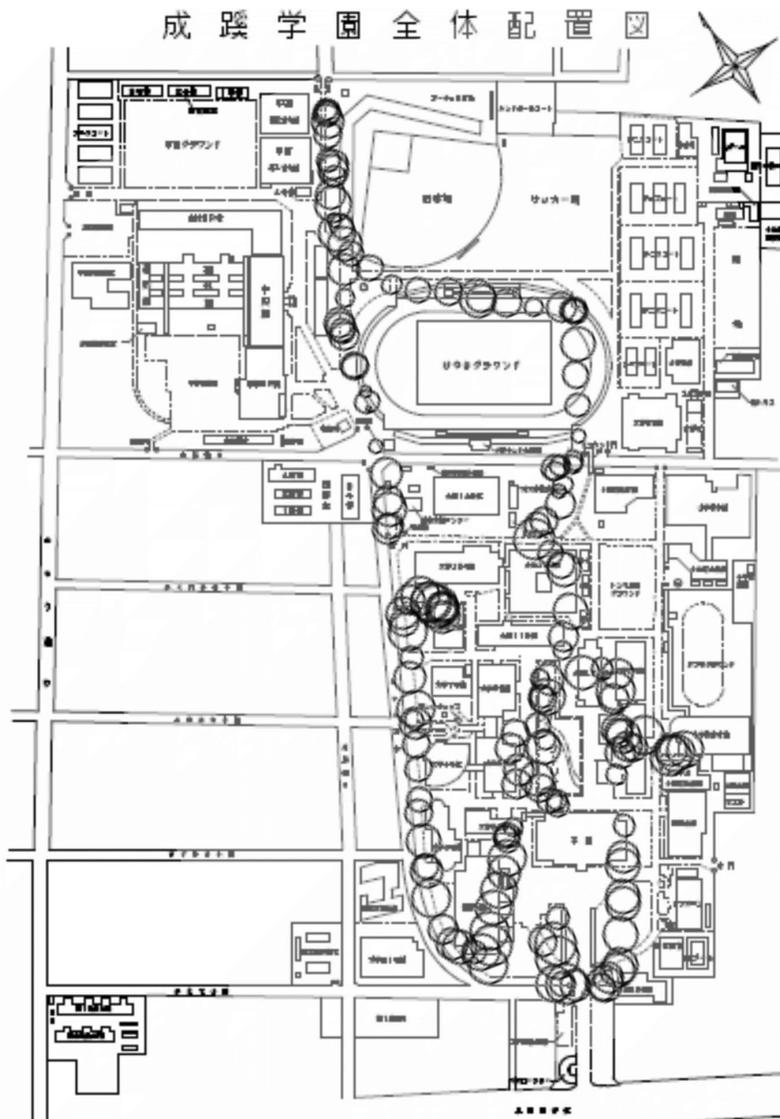


図7 東日本大震災から10年後の2021年3月11日に測定した成蹊学園キャンパス内の地上高1 m空間放射線量率測定結果

円の直径0.8 mmが $0.1 \mu\text{Sv/h}$ を表す。10年前と同じ機器と測位方法で観測している。COVID19 流行対策のため、小中高の校舎周辺は測定ができていない。

た400 mグラウンドや中高テニスコートの人工芝部分は張替えされた。また、透水性舗装部分にトラップされていた放射性物質は、雨水の浸透により、より深い部分に移動したものと考えられる。

5. スペクトロメーターによる試料測定例

前述のように空間放射線量率測定だけでは、放射線を出している核種が原発事故由来のものか、石材などにもともと含まれている ^{40}K 等によるものか区別ができない。このため、移動測定時に線量率が高かった地面からの採取物や、小学校畑など

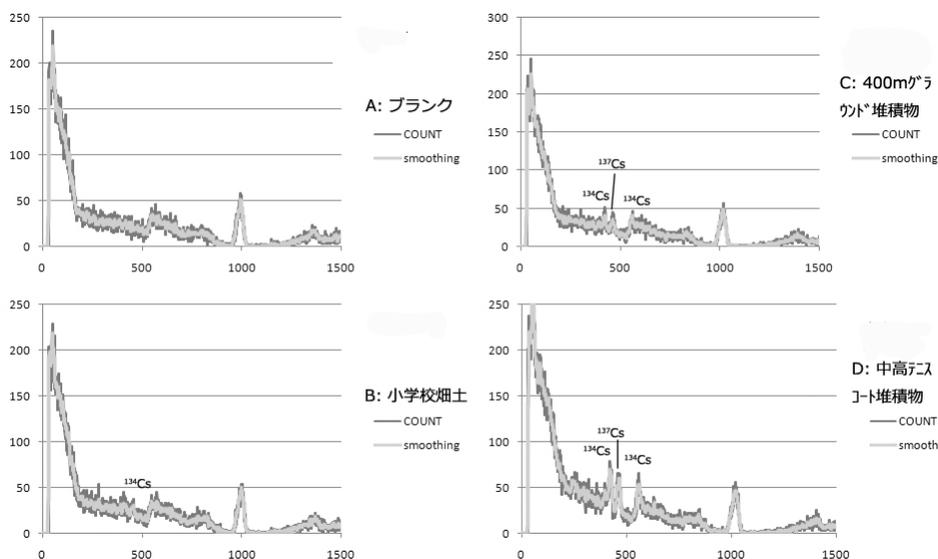


図8 2012年2月3日に成蹊学園内の各所から集めたγ線スペクトル測定結果の例
 地上高1mの空間線量率が高い人工芝部分を持つ400mグラウンドと中高テニスコートでは、
 主な核種は¹³⁴Csと¹³⁷Csであることが分かる。

児童・生徒が近づく可能性のある部分の土などについて試料を採取し、TS100を用いてγ線スペクトルを測定した。

試料はポリスチレン製U8容器に充填し、これを1cm鉛板箱（一辺約20cmの立方体）に充填した鉛粒中に埋め、TS100の検出部を容器に密着させ、積分時間60分でスペクトルを測定した。測定結果の例を図8に示す。2012年2月3日の測定では、移動観測で地上高1mの空間線量率が高い人工芝部分の堆積物（砂やラバーコンパウンド）では、¹³⁴Csと¹³⁷Csのピークが見られ、原発事故後約10ヵ月を経過した後でも、原発由来の放射性物質がTS100で検出可能な量で残存していたことが分かる。

IV おわりに

2011年の東日本大震災と、これによって引き起こされた福島第一原子力発電所事故によって、原子力発電所から200km以上離れた東京都武蔵野市でも、原子炉内部で生成された¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Csな

どの核種が飛来・沈着し、空間放射線量率の上昇で示される汚染を引き起こしていた。発生から10年を経過し、成蹊学園内での空間放射線量率は、ほぼ原発事故前に近い水準に戻っていると考えられる。これは、東京都がモニタリングポストを用いている観測（東京都健康安全研究センター、環境放射線測定結果 <https://monitoring.tmiph.metro.tokyo.lg.jp/>）でも同様の結果が得られている。また、教育機関で行われた研究例（桐山, 2021）でも、調和的な結果が得られている。

成蹊学園で、原発事故後の早い段階から空間放射線量率測定が開始できたのは、理科実験用としてシンチレーションカウンターを所持していたことと、気象観測業務というルーチンワークに組みこめたことの2つが大きい。筆者は成蹊学園着任前に、高レベル放射性廃棄物地層処分についての調査研究に従事したことがあり、原子炉の基本構造や実際の環境放射能測定を学んだ経験があった。原子炉が多重バリアーで守られていることが、その内部の放射性物質が環境中に漏出した場合の危険の大きさの裏返しであることも理解してい

た。人口密集地の東京で、原発由来のプルームによる空間放射線量率上昇や、 ^{131}I 、 ^{134}Cs や ^{137}Cs といった炉内生成核種が検出される事態を目の当たりにして戦慄を覚えた。地震災害や津波災害の救助や、原子力発電所事故の報道を見ながら、学校や地域の方たちを守るために、放射性物質に拡散に対してどのように対応するのがよいのかという問題が常に頭にあった。そのためには、公的機関から出る情報だけでなく、自分たちの手で測定した確かなデータを得ることが必要だと考えた。

また、その記録は、児童・生徒・学生が生活する身近な場所において、実際に放射性物質による汚染が起こる実例として、若い人たちに伝えてゆかねばならないものと考えられる。残念なことに、市民の基礎知識となるべき中学校理科教科書には原発事故についての記述はない。本稿を書いている2022年時点で、中学生にとって2011年の原発事故で何が起きたかは、幼少時の体験でほとんど記憶に残っていないかもしれない。これからも起こる可能性がある原子力発電所事故に対応したり、高エネルギー放射性廃棄物処理についての市民として判断をしたりするためには、歴史としての扱いとともに、自然科学面からの学習も重要となることは指摘しておきたい。

空間放射線量率測定に関しては、成蹊中学高等学校をはじめとし成蹊学園関係者にお世話になった。特に、理工学部の河田 燕先生と伊藤郁夫先生には、実際の測定や測定方法のご指導を頂いた。また、成蹊学園の岡田かおる氏と成蹊中高地学科非常勤講師の新井宏嘉先生（現・早稲田大学本庄高等学院教諭）には、実際の測定の補助をして頂いた。記して感謝いたします。

文 献

- 板谷紀雄・青山剛士（1991）：ヨウ化セシウムを使った放射線サーベイメーター（PA-100），Readout, 3 : pp. 91-99.
- 堅田元喜・茅野政道（2017）：福島第一原子力発電所事故における放射性核種の大気放出・拡散・沈着，エアロゾル研究, 32 : pp. 237-243.
- 桐山信一（2021）：大学構内における空間線量率比較（2012～2020）—福島第1原発事故の影響は8年でどのように変化したか—，創価大学教育学論集, 73 : pp. 337-350.
- 原子力規制庁：日本の環境放射能と放射線，環境放射線データベース。 <https://www.kankyo-hoshano.go.jp/data/database/>（最終閲覧：2022/8/29）
- 国会事故調・東京電力福島原子力発電所事故調査委員会（2012）：『調査報告書』641頁。
- 週刊新潮（2011）：子供の尿からセシウムで騒然！首都圏名門校校門前を計測！「国立私立小・中学校」放射線量全調査，週間新潮, 56(27) : pp. 154-157.
- 東京都健康安全研究センター：環境放射線測定結果。 <https://monitoring.tmph.metro.tokyo.lg.jp/>（最終閲覧：2022/8/29）
- 宮下 敦・山崎 悠（2022）：成蹊中学高等学校の気象教育—学校気象観測所を中心として—，気象研究ノート, 245 : pp. 39-41.
- 山本義隆（2011）：『福島原発事故をめぐる一いっつか学び考えたこと』みすず書房, 114頁。
- Hansen, R., W. and Rodgers R., J.(1985): *Radiological Survey and Evaluation of the Fallout Area from the Trinity Test: Chupadera Mesa and White Sands Missile Range*, New Mexico, LA-10258-MS.
- Weinberg, A., (1974): *Science and Trans-Science*, *Minerva*, 10: pp.209-222.

The air dose rate at the Seikei Family of Schools after the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident

Atsushi MIYASHITA*

The Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident caused by the Great East Japan Earthquake in March 2011 resulted in atmospheric dispersion and deposition of radionuclides mainly around eastern Japan. The Seikei Meteorological Observatory monitored the air dose rate immediately after the accident, and provided information to the public. In this paper, the author recorded what kind of data including the present state was obtained at the school after the disaster in Musashino-shi, Tokyo. In order to such accidents never again, it is considered important to remember what happens as a result of nuclear power plant disaster

keywords: The 2011 Great East Japan Earthquake, The Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident, air dose rate, The Seikei Family of Schools

* Seikei Education and Research Center for Sustainable Development / Seikei University, Faculty of Science and Technology