

Ⅱ 測定の実際 (各測定の詳細)

1	空間放射線量率の測定	18
2	積算線量の測定	31
3	大気中浮遊塵の全 α ・全 β 放射能の測定	33
4	γ 線放出核種の測定	37
5	ストロンチウム 90 の測定	44
6	トリチウムの測定	48
7	プルトニウム 238, 239+240 の測定	51
8	排水の全計数率の測定	53
別記 1	測定値の表示方法	56
別記 2	測定目標値	57
別記 3	品質保証	58

1 空間放射線量率の測定

【測定法】

- **モニタリングステーション**に設置している **NaI シンチレーション検出器**により、空間放射線量率を24時間連続で測定している。データは2分間隔で取得し、**テレメータシステム**によって全てのデータが環境放射線監視センターに集約されている。
- 2分間隔で取得した2分間平均値5個から10分間平均値を、2分間平均値30個から1時間平均値を生成する。2007年（平成19年）度にテレメータシステムを更新してから2分間平均値の取得を開始した。
- NaI シンチレーション検出器は γ 線に対して高い感度を有するため、低い線量率レベルを測定するのに優れている。測定方法は、検出器に入射した放射線を光に変換し、その光を光電子増倍管で増幅し、光の強さに比例したパルス数を数える方式である。出力されるパルス信号には入射放射線のエネルギーとの比例関係があることから、 γ 線スペクトルを解析することによって定性等が可能となる。線量率の計算には、低エネルギー領域で過大応答を示す特性を補正するため、G(E)関数法が採用されている。（21ページ参照）
- 当該検出器には、放射線の種類を識別可能なスペクトロメータを備えている。静岡県のテレメータシステムは、スペクトロメータで解析した**スペクトル**をリアルタイムで収集し、人工放射性核種の影響を弁別することが可能であり、東電事故では放射性プルームの流入を精度良く捉えることができた。
- モニタリングステーションには、このNaI シンチレーション検出器のほかに、原子力災害時の高線量下でも対応可能な電離箱検出器を備えている。NaI シンチレーション検出器による測定範囲は、10nGy/h～10 μ Gy/hであるが、電離箱検出器は最大100mGy/hまで測定可能である。電離箱検出器は測定可能なエネルギー範囲が広く、宇宙線も測定するため、NaI シンチレーション検出器よりも、約30nGy/h程高い値となる。
- モニタリングステーション等の環境 γ 線連続モニタは、JIS規格上の性能が確保された機器を装備しており、測定範囲における相対基準誤差については $\pm 20\%$ となっている。（JIS Z 4325:2008）
- 原子力災害時用の測定器としては、シリコン半導体検出器やGM計数管検出器なども用いられる。本県では、避難の実施単位ごとに電子式線量計（シリコン半導体検出器）を配備しているほか、緊急時の追加測定用等として可搬型モニタリングポスト（NaI シンチレーション検出器＋シリコン半導体検出器）も所有している。これらは、停電時にはバッテリーで駆動する。

モニタリングステーション

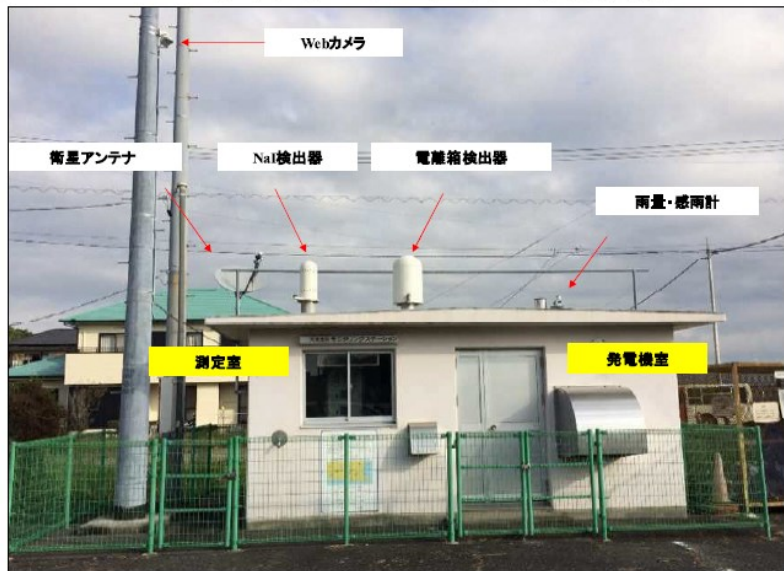
モニタリングステーションは、測定局舎内外に以下の機器を装備した施設である。併設している非常用自家発電機は、約5日分の燃料を保有している。

発電所10～30km圏内には、緊急事態への備えとして、東電事故後に「モニタリングポスト」を配備したが、呼び名が異なるだけで、装備や機能は同一である。

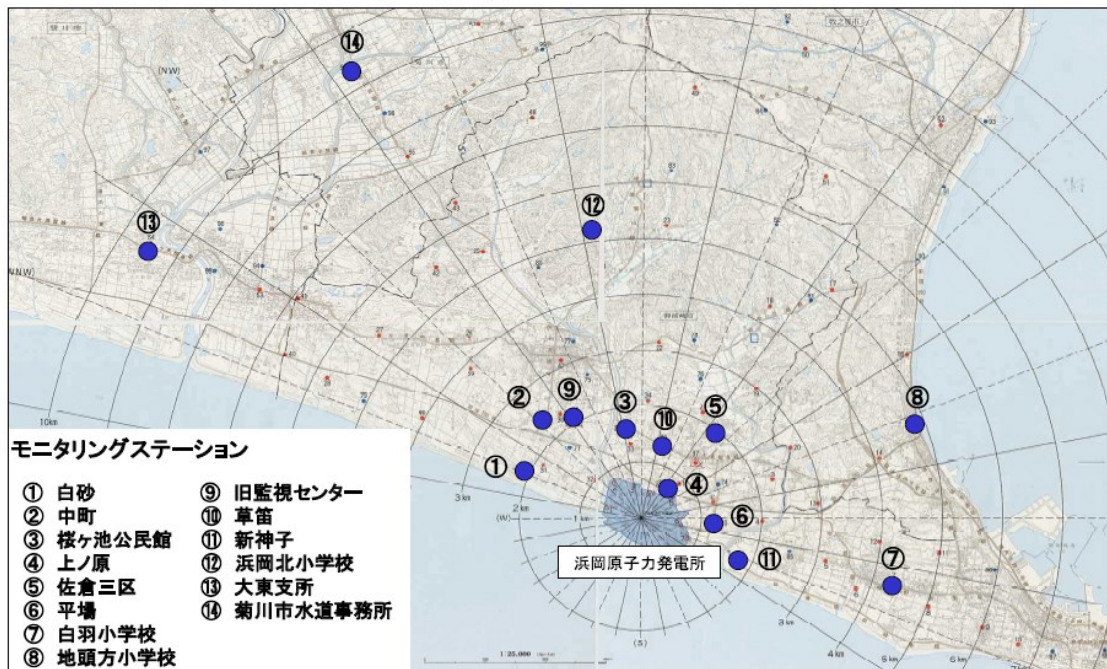
(装備機器)

- NaIシンチレーション検出器 (低線量率用)
- 電離箱検出器 (高線量率用)
- ダストモニタ (一部の局舎)
- 雨量計及び感雨計
- テレメータ装置
- 無停電電源装置
- 非常用自家発電機
- Webカメラ

モニタリングステーション (大東支所)



モニタリングステーションの位置



テレメータシステム

テレメータシステムとは、遠隔地で取得している測定地点のデータを、通信回線を利用して連続収集し、一元的に監視するための設備全体をいう。

モニタリングステーションなどで測定している線量率等のデータは、テレメータシステムにより環境放射線監視センターに集約され、ホームページや発電所周辺市町に設置しているデータ表示装置へ配信される。また、原子力規制庁の情報共有サーバにも送信し、緊急時における防護措置の判断にも活用される。また、緊急事態にはモニタリングカーや可搬型モニタリングポスト等を稼働させるが、そのデータも収集することができ、同時に監視することができる。

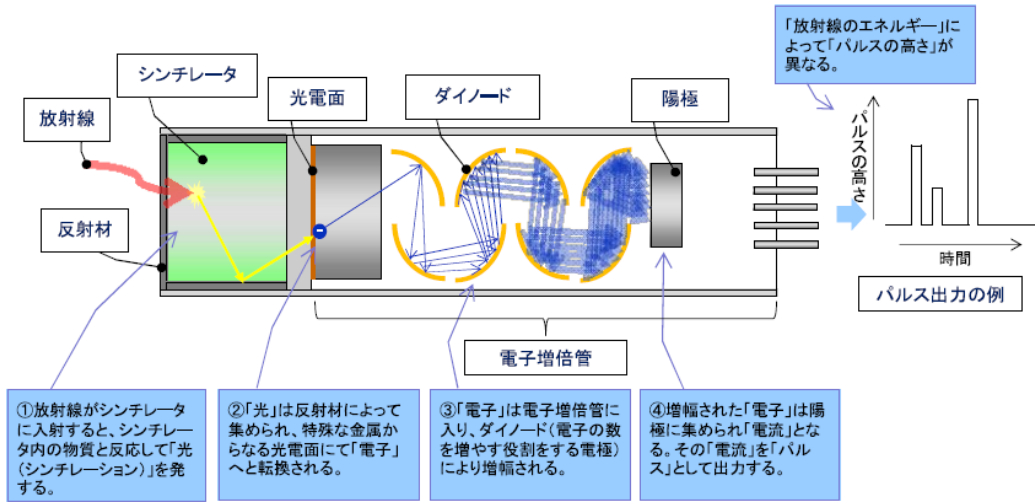
東電事故時、福島県の監視機関では、停電や通信回線の途絶などにより測定局のデータを収集することができず、住民等へ十分な情報発信ができなかったばかりか、福島第一原子力発電所から約 5km の位置にあったため、緊急時モニタリングの活動拠点としての機能を喪失する事態となった。

この教訓から、本県では次の対策を講じている。

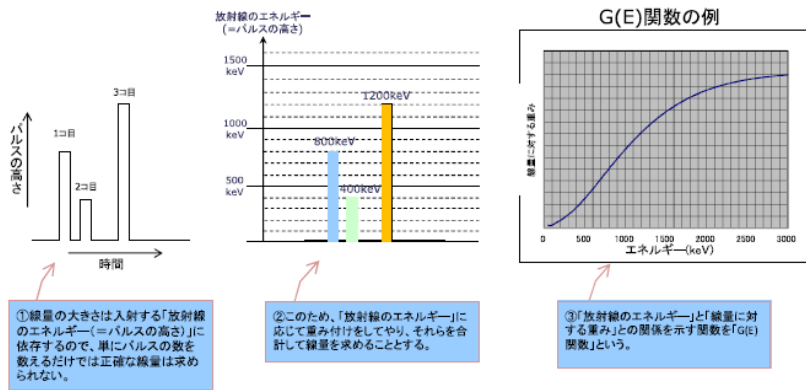
- ① 環境放射線監視センターの移転（原子力防災センターの設置）※
- ② 収集サーバ及び測定機器の耐震性の向上
- ③ 収集サーバの 2 重化（監視センター及び民間データセンター）
- ④ 通信回線の 3 重化（有線（光）、携帯及び衛星回線）
- ⑤ 監視機能の 2 拠点化（県庁に監視端末を設置）

※ 2016 年（平成 28 年）度に浜岡原子力発電所から約 20km 離れた富士山静岡空港隣接地に、オフサイトセンターと一体化した「原子力防災センター」を建設した。（免震構造 平成 28 年 3 月竣工）

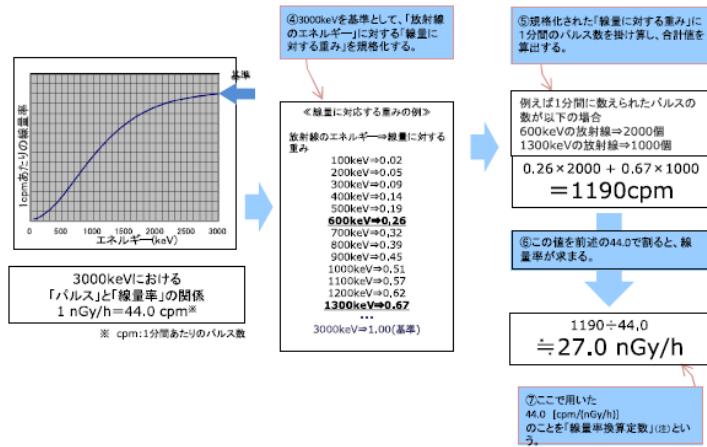
NaI シンチレーション検出器



線量率の計算方法①



線量率の計算方法②



(注)線量率換算定数は、検出器の仕様により異なり、本県では、通常型検出器では44.0cpm/(nGy/h)を、方向特定可能型検出器では40.4cpm/(nGy/h)を用いている。

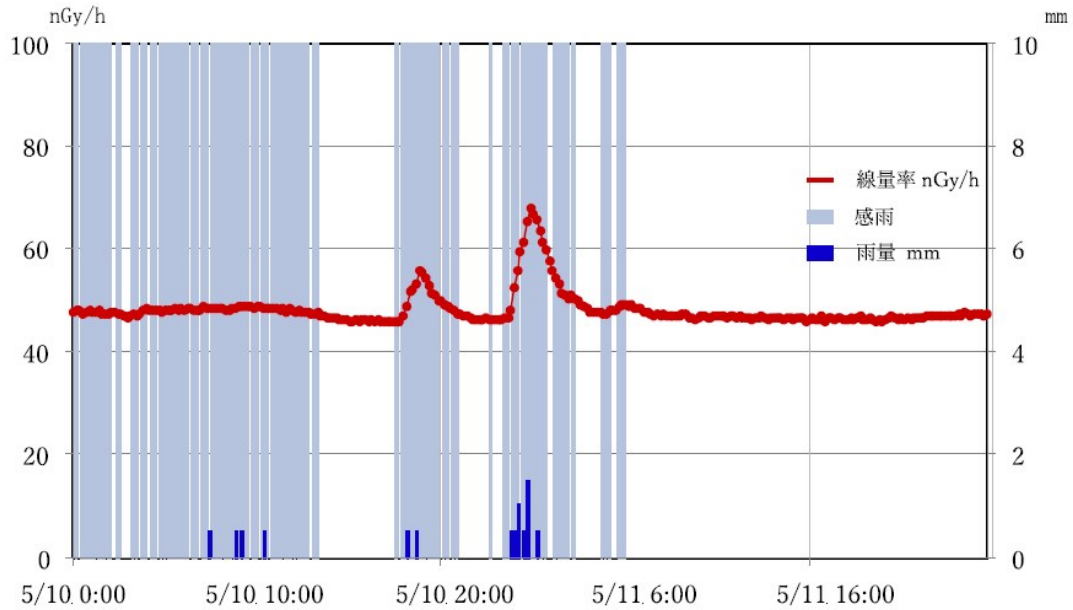
スペクトル解析

スペクトロメータでは、線量率を自然放射性核種寄与分と人工放射性核種寄与分とに弁別することが可能である。(ゲルマニウム半導体検出器のように高分解能ではないため、核種ごとの定量はできない。)

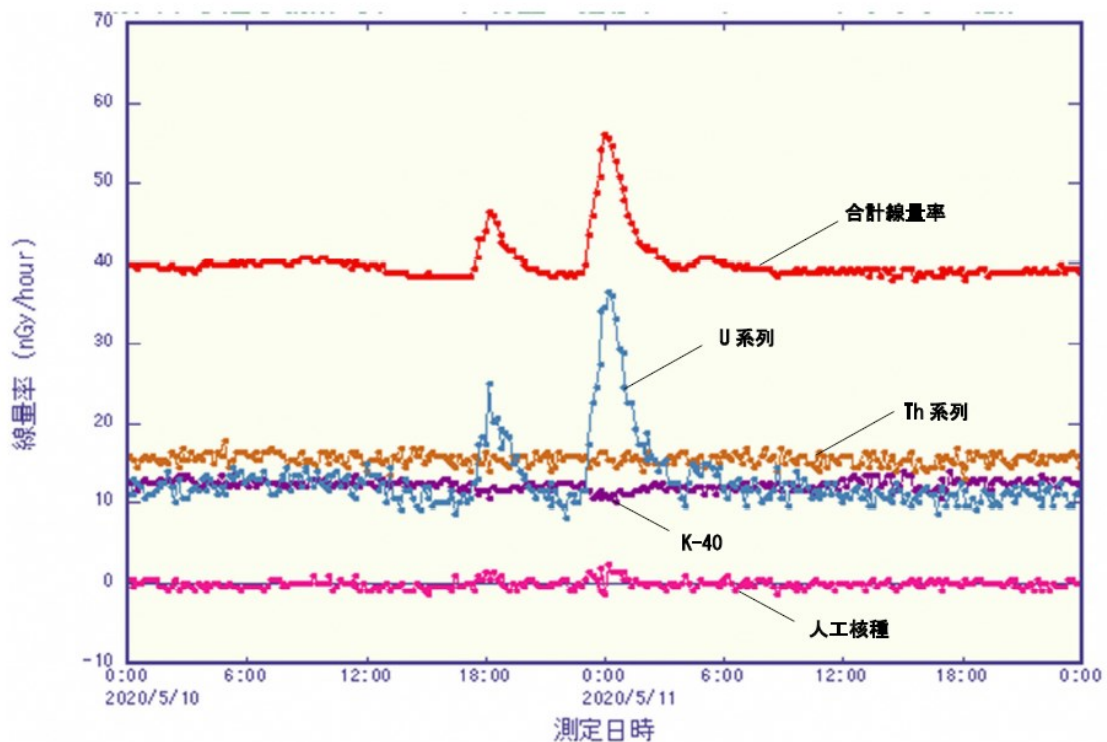
自然放射性核種の線量率については、更に、ウラン (U) 系列、トリウム (Th) 系列及びカリウム 40 (K-40) の3成分に分けることができる。

降雨があると、ウラン系列の線量率が上昇する。

降雨による空間放射線量率の変動 (菊川市水道事務所 令和2年5月10日~11日)



スペクトル解析



【調査のポイント】

- 発電所周辺 10km 圏内には、空間放射線量率を常時測定しているモニタリングステーションが 14 地点あり、**予期しない放射性物質の放出を早期に検出**できるよう、発電所に近い位置を中心に、各方位それぞれに配置している。
- 発電所から放射性物質の放出があった場合には、線量率の測定結果をもって、**住民等の外部被ばく実効線量を推定・評価**する。
- 線量率の値は地点ごとに異なるが、通常時の降雨がない条件下で約 40~60nGy/h の範囲である。現在の測定値は、**東電事故の影響を検出できないレベル**になっている。

- ~~14 地点の測定局舎のうち、次のとおり 8 か所が県所有、6 か所が中部電力所有となっている。~~

県：白砂、平場、旧監視センター、草笛、新神子、浜岡北小、大東支所及び菊川市水道事務所
中電：中町、桜ヶ池公民館、上ノ原、佐倉三区、白羽小及び地頭方小

- 技術会の報告値は、10 分間平均値と 1 時間平均値だが、それらは 2 分間平均値から生成される。2 分間平均値は、10 分間平均値及び 1 時間平均値に異常があった場合の分析に用いるほか、緊急時では、放射線量の変動が激しくなるため、2 分間平均値で監視を行うことになる。
- 線量率が測定地点によって違う値を示すのは、**地質の違い（土壌中のウラン (U) 系列、トリウム (Th) 系列及びカリウム 40 (K-40) の構成比の違い）**や周辺に存在する建物等の有無などが主な原因である。
- 線量率は常に一定ではなく、日変動及び季節変動がある。その主な要因は、**大気中を浮遊するラドンの崩壊生成物（自然放射性核種）の濃度が変化するため**である。
- 1 日の変化（日変動）としては、朝方に高く、日中に低くなる変動を示す。この理由は、朝方に大気逆転層が地表面近くまで降りてきて、地中から発生するラドンが大気逆転層で抑えられ、地表面近くに溜まるためである。線量率への影響は 2~3nGy/h 程度である。
- 1 年の変化（季節変動）としては、秋~冬に高く、春~夏に低い傾向がある（冬場と夏場の差は、2~3nGy/h 程度）。冬場に高い理由は、ユーラシア大陸で発生したラドンやその崩壊生成物が、北西の季節風によって日本に吹き込むためである。夏場に低い理由は、南よりの季節風が吹くことが多く、南よりの風はラドンが発生しない海上を通過してくるためである。
- 日常の変化では、**降雨によって線量率が一時的に上昇**する。これは、雨粒とともに大気中のラドンの崩壊生成物が地表面付近に落ちてきて溜まるためである。（50nGy/h 以上上昇することもある）。なお、降雨量と線量率の上昇幅に相関関係はなく、台風の接近・通過があっても、必ず線量率が大きく上昇するというわけではない。
- 逆に、降雨によって雨水が測定地点周辺の広い範囲で溜まり続けることにより線量率が下がることもある。これは、地中のラドンの崩壊生成物からの放射線が雨水によって遮蔽されるからである。同様に、大型の車両が測定局舎付近に駐車している場合も、車両が遮蔽体となって線量率が下がることもある。（変化量は、数 nGy/h 程度である。）
- **東電事故による影響**は、人工放射性核種寄与分として最大で 20 数 nGy/h の上昇が見られた。（降雨による自然放射性核種の増加分を加味すると約 40Gy/h の上昇）その後、人工放射性核種の物理減衰以上に、ウェザリング効果（風雨等の自然要因に

よる放射性物質濃度の減衰)等により、1年とは経たない間に、NaIシンチレーション検出器によるスペクトル解析では検出できないレベルとなった。また、可搬型ゲルマニウム半導体検出器による精密測定でも、1nGy/h以下になっていることを確認している。

- 現在、東電事故による人工放射性核種は、土壌の測定では検出されているように、なくなっているわけではないが、線量率への寄与はほぼ認められず、**観測される測定値は自然放射線由来と考えてよい**。令和元年度の測定結果から、自然放射線による外部被ばく線量は、年間約0.29mSvと推定される。(建物による線量の低減は考慮していない。)(日本平均約0.33mSv, 世界平均約0.48mSv)
- 浜岡原子力発電所周辺においては、東電事故以外にも過去に自然変動(自然放射性核種の変動)以外の要因で線量率が上昇したことがある。測定局舎近隣の工場で行われたX線非破壊検査、放射性医薬品を投与された患者の接近などがその例としてあり、数百nGy/h上昇したこともある。これらは、前述のスペクトロメータによって自然変動と区別することが可能である。

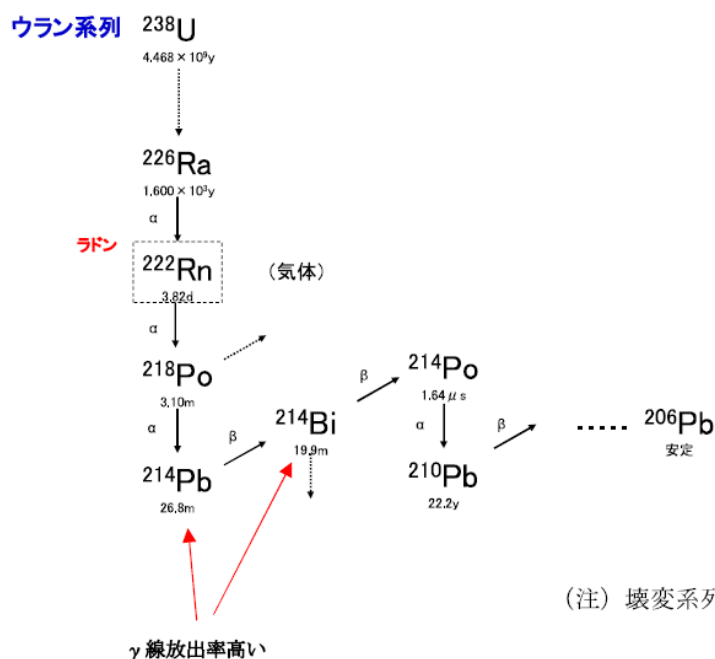
ラドンの崩壊生成物

地球誕生から現在まで壊変しつづき存在するウラン238 (^{238}U)は、決まった壊変系列にしたがって次々と崩壊する。これを親元素の名前をとってウラン系列と呼ぶ。

これらの崩壊は、土壌中で起こるが、途中で気体の核種であるラドン222 (^{222}Rn)が生成し、その一部が大気中へ散逸する。

ラドンは、トリウム系列に属するラドン220 (^{220}Rn)、アクチニウム系列に属するラドン219 (^{219}Rn)も大気中に存在するが、ラドン222が最も線量率への寄与が大きい。

ラドン222は、ポロニウム、鉛、ビスマスなどの粒子状物質に変化し、大気中の微細なちりに付着して浮遊しているが、その中で、鉛214 (^{214}Pb)やビスマス214 (^{214}Bi)などが線量率の上昇に寄与する。



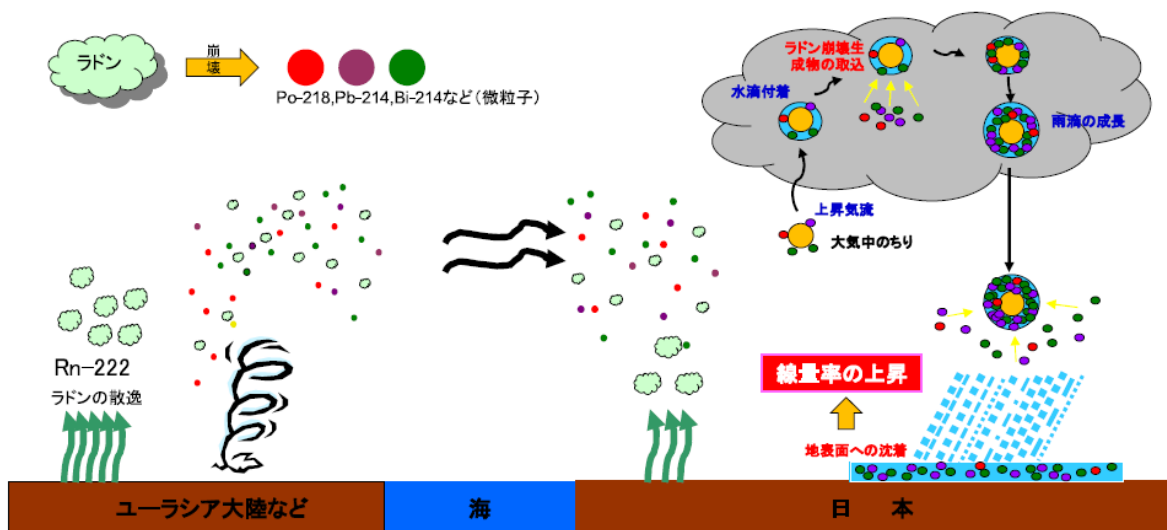
(注) 壊変系列の一部を省略して記載している。

降雨によって線量率が上昇する仕組み

地中から散逸したラドンは、崩壊し、 γ 線を放出する鉛やビスマスに変化する。これらは空気中の塵などに付着して浮遊しているが、上空に積乱雲があると、上昇気流に乗って雲中に取り込まれ、雨滴の核となってラドンの崩壊生成物を更に取り込みながら成長する。

降雨によりこれら雲中及び大気中のラドンの崩壊生成物が地表に降下・沈着することで線量率が上昇する。

ラドンの崩壊生成物の半減期は短いため、雨が収まると、程なくして元の値に戻る。



偏西風に乗って日本に飛来

【参考】 降雨による線量率上昇例（地域差が大きく現れた例）

発電所から10～30km圏内には、10km圏内と同様の固定型測定局（モニタリングポスト）を12箇所に設置している。

降雨によって線量率が上昇するのはよくあることだが、観測圏内で地点差が大きく現れた例というのはあまり多くはない。

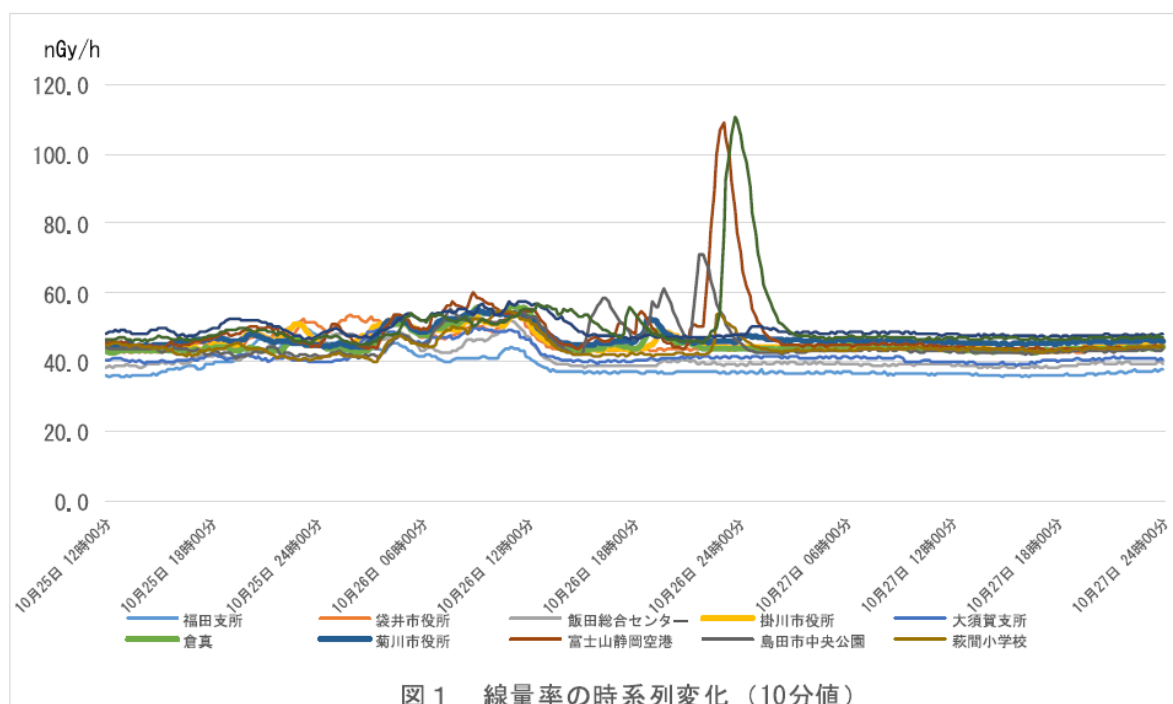
2013年（平成25年）10月26日21時から24時頃にかけて、10～30km圏内に設置している富士山静岡空港局、島田市中心公園局及び焼津市大井川庁舎北局において、線量率が25～60nGy/h上昇したが、10km圏内を含む他の測定局ではほとんど線量率に変化が見られないという事象があった。（表1及び図1参照）

当該時間帯のスペクトル（図2）及びその解析結果（図3～5）、後方流跡線解析結果（図6）並びに降雨量の時系列変化（図7）から、線量率が上昇した原因は、大陸由来のラドンとその崩壊生成物濃度が高い空気塊が北西方向から流入し、当該3局を含む地域にもたらされた雨によって、ラドン崩壊生成物が地表面に沈着し、線量率の上昇につながったものと考えられる。

このように、線量率の変動を広域で見た場合には、気象条件の変化による違いが大きく現れることがある。

表1 各測定局の線量率（10分値）の最大値（平成25年10月26日21時～24時）

測定局	時刻	最大値(nGy/h)	測定局	時刻	最大値(nGy/h)
福田支所	21:30, 22:30, 23:40	37.5	菊川市役所	24:00	47.2
袋井市役所	21:40, 22:20	43.9	富士山静岡空港	23:00	109.0
森町飯田総合センター	21:00	40.7	島田市中心公園	21:40	71.3
掛川市役所	21:20	46.1	萩間小学校	22:50	54.2
掛川市大須賀支所	21:20	41.8	吉田町役場	23:40	48.1
掛川市倉真	21:00	45.5	焼津市大井川庁舎北	23:40	110.6
10km圏内14局	21:00-24:00	(各測定局の最大値の範囲)		39.5 ～ 57.0	



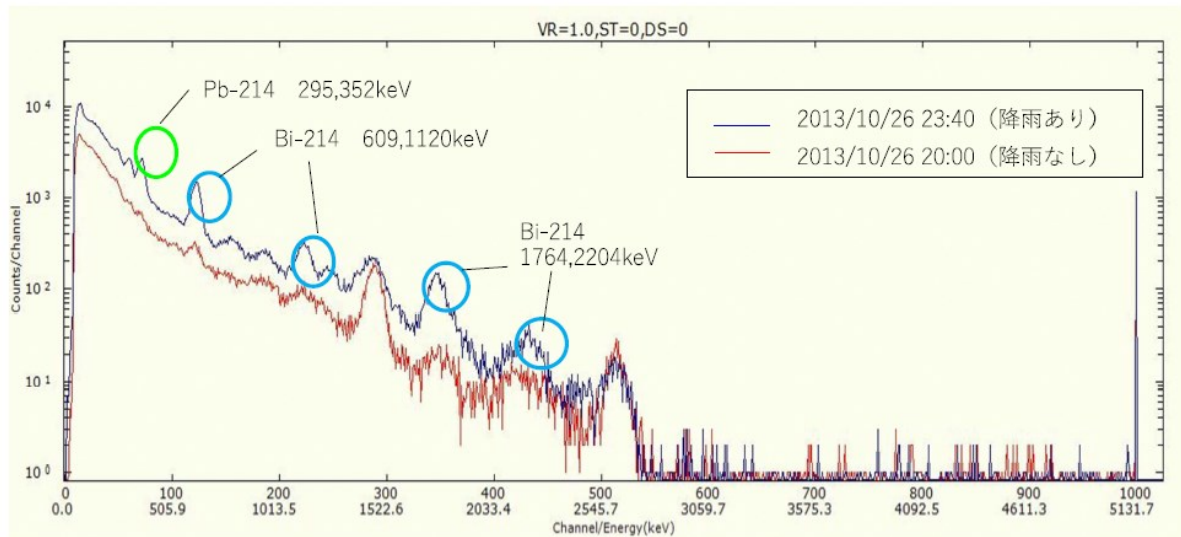


図2 スペクトルデータの比較
(焼津市大井川庁舎北局)

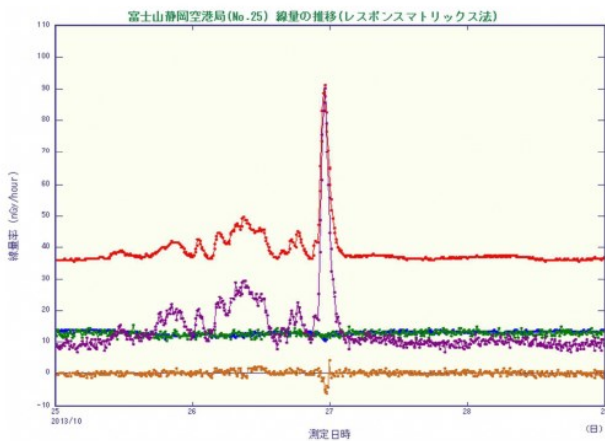


図3 スペクトル解析結果
(富士山静岡空港局)

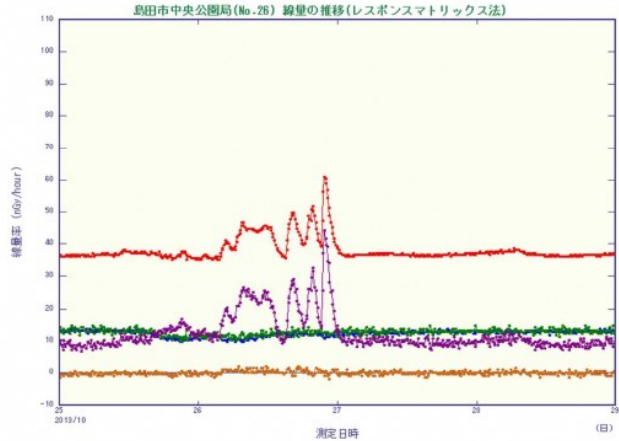


図4 スペクトル解析結果
(島田市中央公園局)

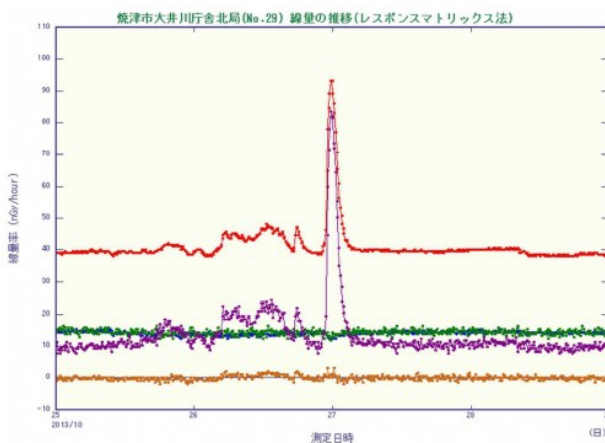
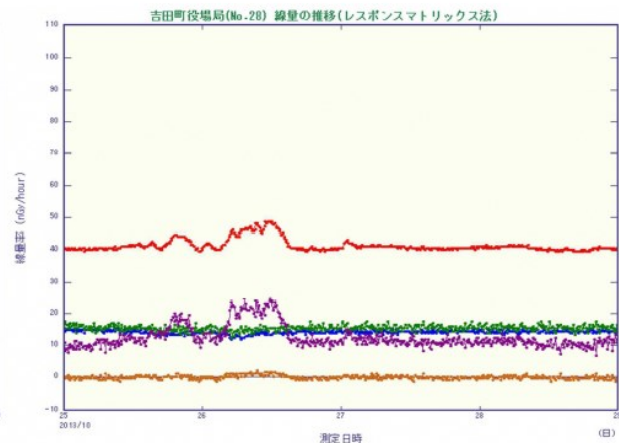


図5 スペクトル解析結果
(焼津市大井川庁舎北局)

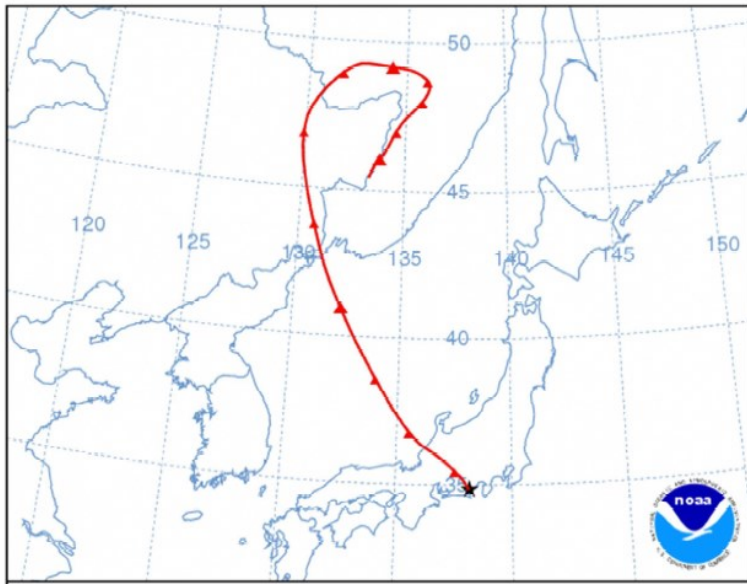


(参考) スペクトル解析結果
(吉田町役場局)

— 合計線量 — U 系列*1 — Th 系列*2 — K — 人工核種

※1 U (ウラン) 系列: ^{238}U から ^{222}Rn (希ガス) を経て ^{206}Pb (安定) に至る自然放射性核種の崩壊系列

※2 Th (トリウム) 系列: ^{232}Th から ^{220}Rn (希ガス) を経て ^{208}Pb (安定) に至る自然放射性核種の崩壊系列



※ 2013年(平成25年)10月26日
 21時に島田市中央公園局の地点に
 到達した大気がどのような経路を
 通ってきたかを、米国海洋大気庁
 のHYSPLIT Modelを用いて解析
 した。左図は、72時間前からの軌
 跡を示したものである。

図6 後方流跡線解析

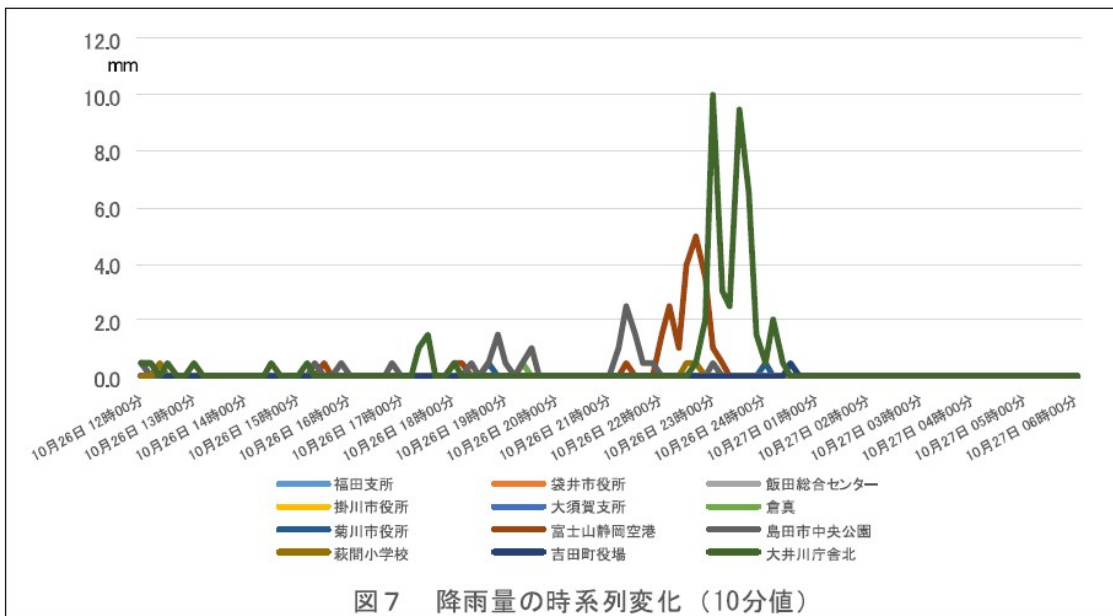
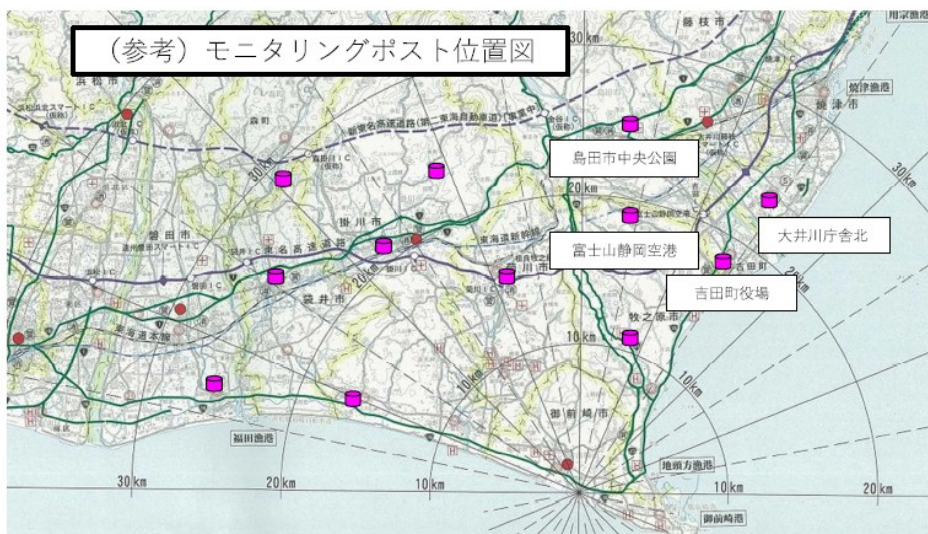


図7 降雨量の時系列変化(10分値)



東電事故の影響

東電事故では、浜岡原子力発電所周辺地域において、2011年3月15日と3月21日から22日にかけての2回のプルームの流入があったことがスペクトロメータで確認できた。

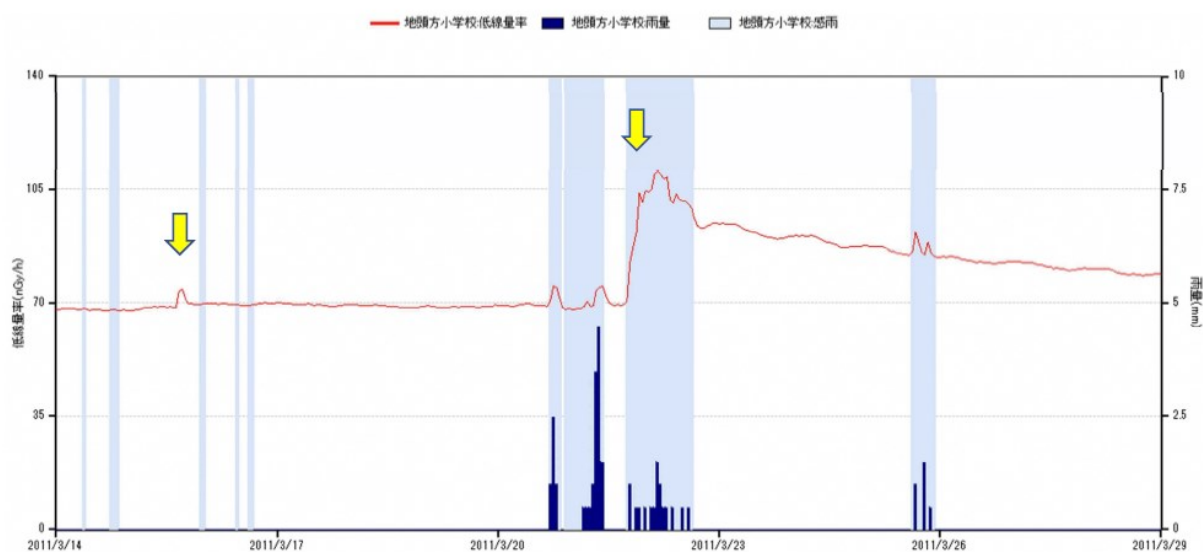
最初のプルームは、降雨がなかったため、通過しただけで線量率は一時的に数 nGy/h 程度上昇したに過ぎなかったが、2回目は降雨により、自然放射性核種とともに、人工放射性核種が降下、地表面に沈着し、トータルの線量率では最大約 40nGy/h 上昇した。

次ページのスペクトル解析の結果、人工放射性核種寄与分としては 20 数 nGy/h であったことを確認した。

線量率は、その後、短半減期核種の減衰により、徐々に減少した。

当時の気象データから、2回目のプルームは北東方向から流入したと推定され、各局舎の測定値からも東に位置する局舎の方が上昇幅は大きかった。

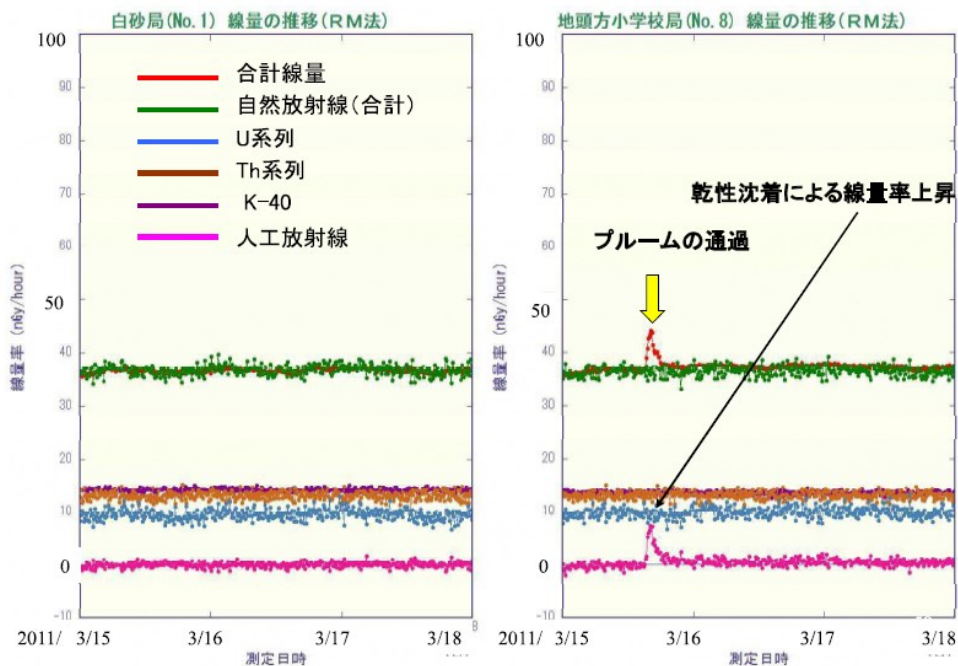
東電事故後の線量率の推移（地頭方小学校局）



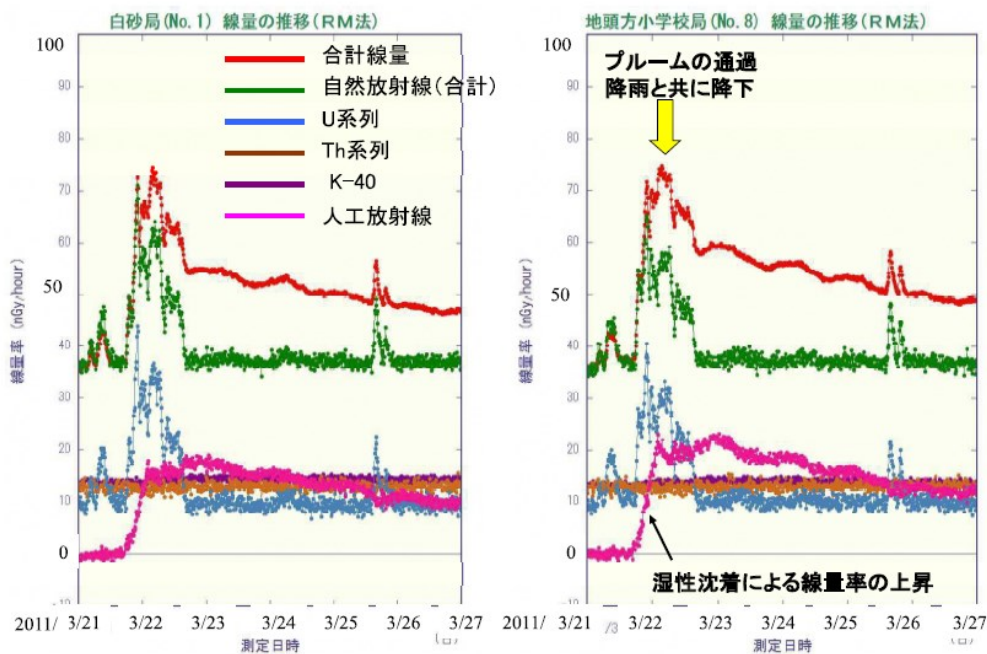
↓ プルームの流入による線量率の上昇

(注) 線量率の測定値には、宇宙線寄与分として 28nGy/h が加算されている。
平成 23 年度の測定から、この加算を廃止した。

スペクトル解析結果 (3/15~17 白砂局及び地頭方小学校局)



スペクトル解析結果 (3/21~26 白砂局及び地頭方小学校局)

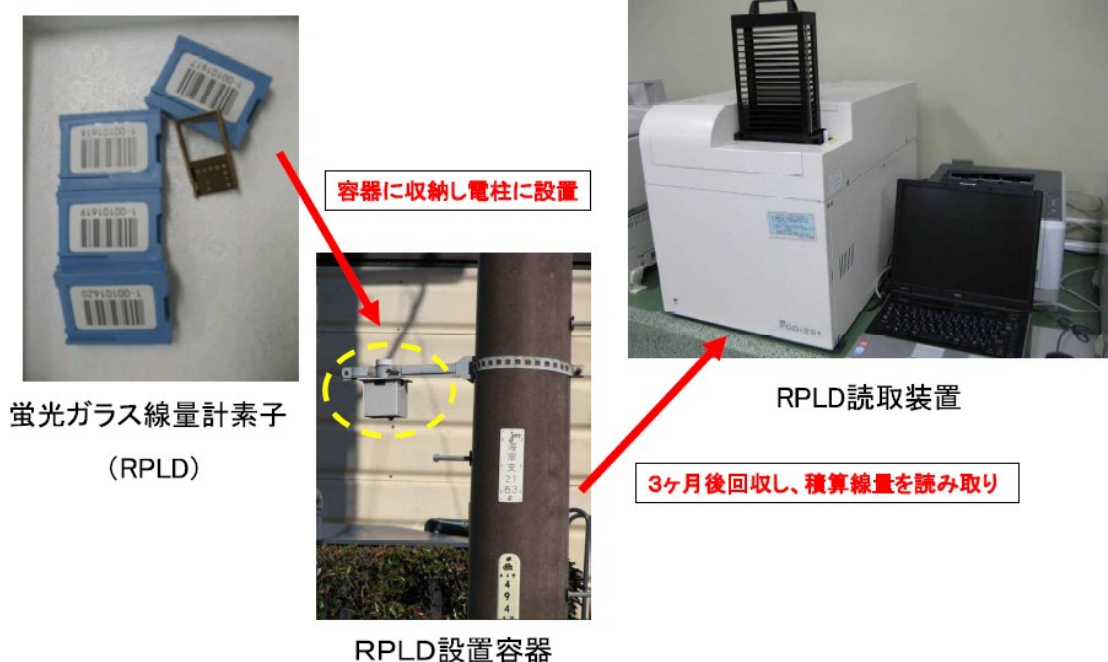


2 積算線量の測定

【測定法】

- 積算線量の測定は、**蛍光ガラス線量計**（RPL:Radiophoto**l**uminescence glass **D**osimeter）により3か月間の累積線量を測っている。
- 蛍光ガラス線量計は、銀活性リン酸塩ガラスを用いた測定素子からなり、電離放射線により蛍光中心を生じ、これを紫外線で刺激すると、オレンジ色の蛍光を発する。蛍光の強さは線量に比例することから、蛍光の強さを計測することにより、長期間にわたる線量の積算値を測定することができる。
- 測定素子は、ウレタンケースに入れ、防湿袋で密封した上で、測定地点（電柱）に設置する。3か月後、素子を回収し、次の回の素子を取り付けるということを繰り返す。
- 電源を必要としないため自然災害の影響を受けにくい、リアルタイムで測定値を確認することはできない。 μGy オーダーの変化がある場合に適している。
- 蛍光ガラス線量計を採用したのは、平成14年度からで、それまでは熱ルミネッセンス線量計（TLD:Thermophoto**l**uminescence **D**osimeter）を使用していた。蛍光ガラス線量計は、繰り返し読取りができることとフェーディング（蛍光中心の一部が常温で自然に消滅してしまう現象）がほとんどないという点で熱ルミネッセンス線量計よりも優れている。

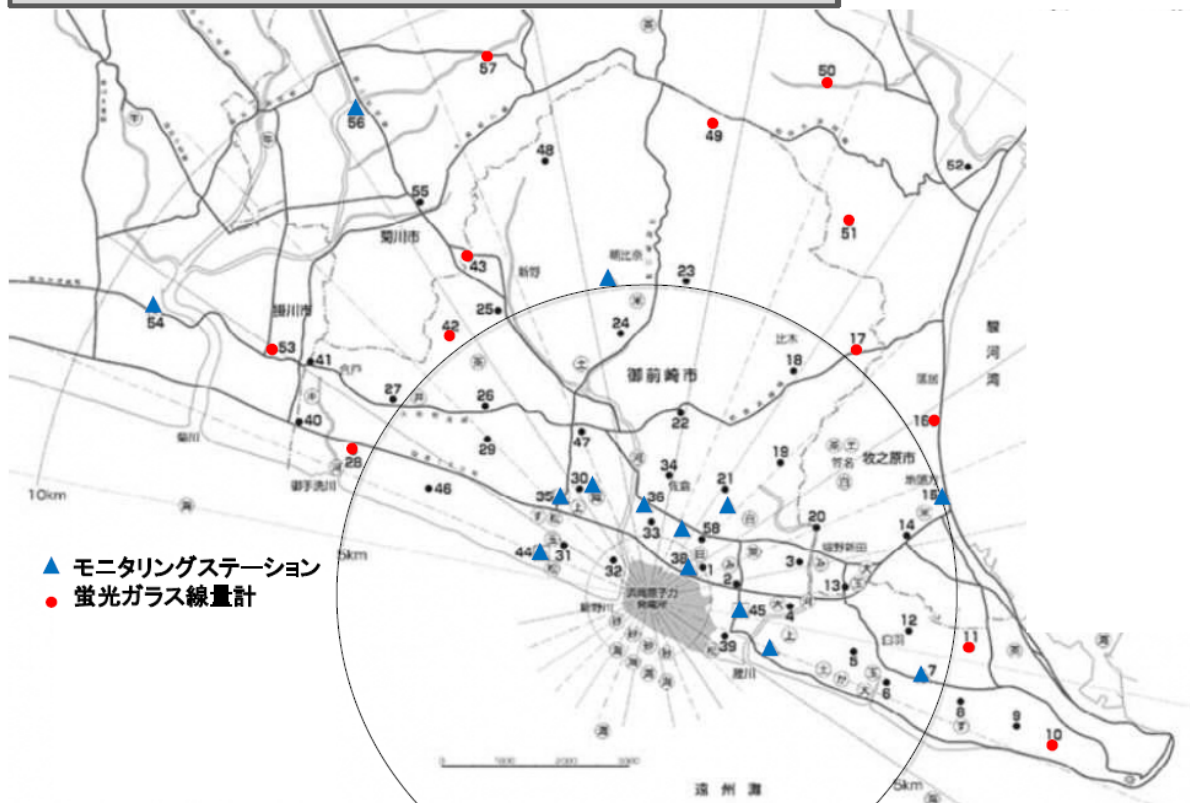
蛍光ガラス線量計による測定



【調査のポイント】

- 発電所周辺 10km 圏内には、蛍光ガラス線量計を設置している**モニタリングポイント**が 12 地点あり、各方位それぞれに配置している。(モニタリングステーションと重ならないように配置している。)
 - 平常時における 90 日間の積算線量は、概ね 0.12~0.17mGy の範囲である。現在の測定値は、**東電事故の影響を検出できないレベル**になっている。
 - 積算線量の測定結果は、**線量率により外部被ばく線量を推定・評価する際の参考**として用いる。
-
- 令和 2 年度から、**線量率による外部被ばく線量を推定・評価する際の参考**と位置づけ、測定地点を減らし、12 地点とした。(従来は 57 地点)
 - 測定地点による測定値の違いは、空間放射線量率と同様に、**地質の違いや周囲に存在する建物等の有無などが原因**である。
 - 3 か月ごとに、設置した蛍光ガラス線量計を回収するが、測定の作業工程上、設置日数を統一することができないため、90 日間の値に換算して、四半期ごとの比較ができるようにしている。
 - 最近の測定で平常の変動幅を上回ることがあったが、東電事故以降、継続して上回っているわけではないことから、人工放射性核種が蓄積しているということではない。また、空間放射線量率で確認しているとおり、新たに人工放射性核種が供給されたということではないことから、**主として自然変動（自然放射性核種の変動）によるものである**。(有効数字 2 桁にするとときの四捨五入の結果という要素が加わる場合もある。)

モニタリングポイント（蛍光ガラス線量計）の配置

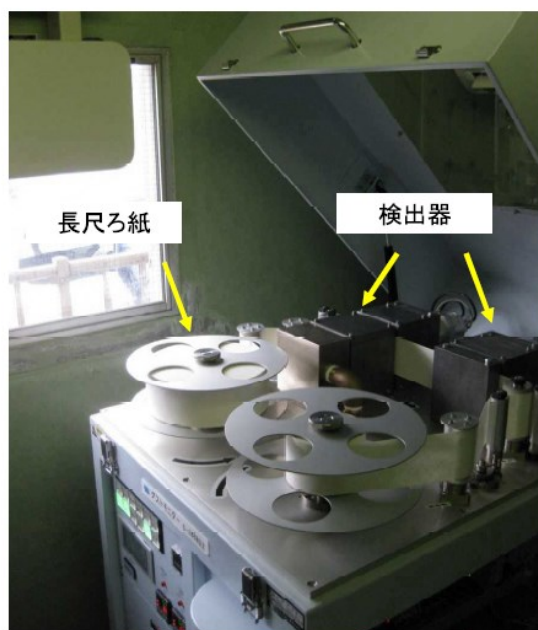


③ 大気中浮遊塵の全 α ・全 β 放射能の測定

【測定法】

- 次の検出器を備えた**ダストモニタ**により、大気中浮遊塵の全 α 放射能及び全 β 放射能を測定している。
 - ・全 α 放射能検出器：ZnS シンチレーション検出器
 - ・全 β 放射能検出器：プラスチックシンチレーション検出器
- 大気中に浮遊している塵には、粒子状の放射性物質が付着している。ダストモニタは、大気中の塵を連続でろ紙上に捕集しながら、 α 線と β 線の放射能をそれぞれ同時に測定している。ろ紙は6時間間隔で自動的に送られ、集塵終了6時間後の β 線も測定している。これは、ラドンの崩壊生成物を減衰させた状態で測定するためである。
- 人工放射性核種の多くが β 線を放出するため、 β 線の変化を捉えるための測定法である。測定値は、①集塵中の全 α 放射能・全 β 放射能比、②集塵中の全 β 放射能及び③集塵終了6時間後の全 β 放射能の3つを2分間隔で取得している。各局舎のデータはテレメータシステムで環境放射線監視センターに集約している。
- 放射性物質に対する感度の高い測定がリアルタイムで可能であり、空間放射線量率と同様に、放射性物質の放出の早期検出に有効である。ダストモニタは、2000年（平成12年）度に整備し、試験運用後、2002年度から正式に測定を開始した。

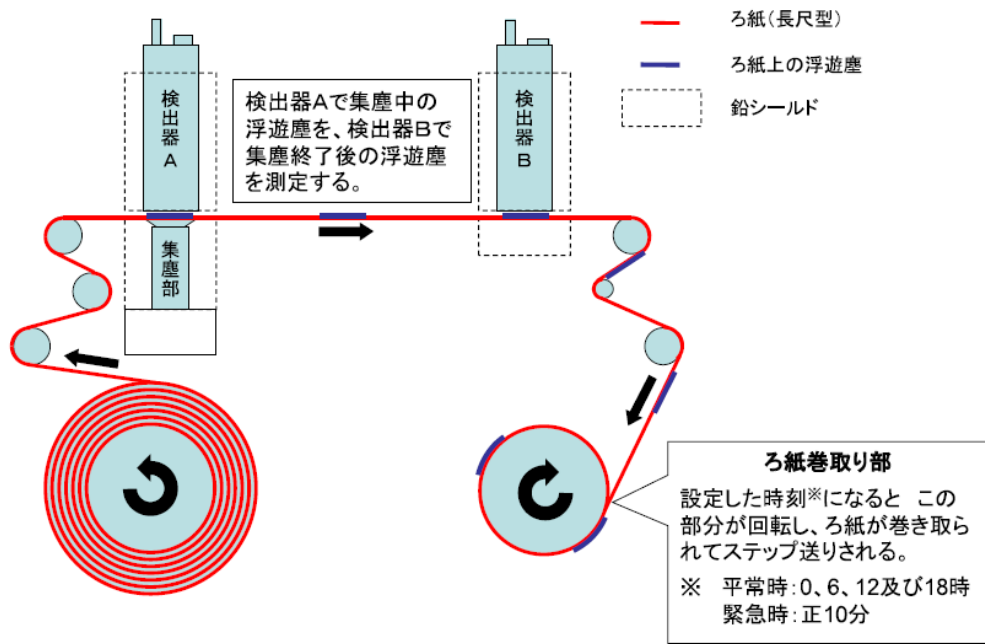
ダストモニタ



サンブラ部・検出部



測定部



内部機構

【調査のポイント】

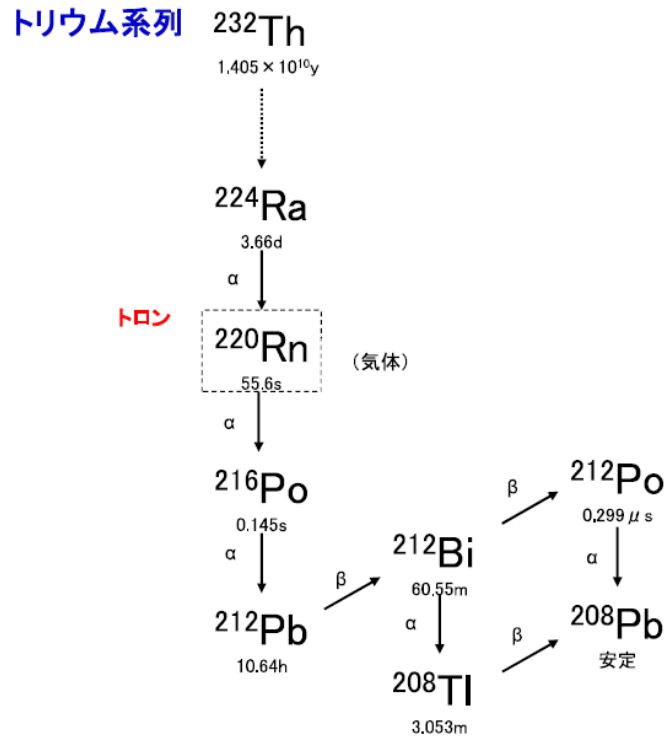
- 発電所からの予期しない放射性物質の放出の早期検出を目的に、発電所周辺 10km 圏内の 14 か所のモニタリングステーションのうち、5 か所にダストモニタを設置し測定を行っている。
 - 平常時の測定値は、おおよそ次のとおりである。現在の測定値は、東電事故の影響を検出できないレベルになっている。
 - ① 集塵中の全 α 放射能・全 β 放射能比 2~4 前後
 - ② 集塵中の全 β 放射能 30Bq/m³ 以下
 - ③ 集塵終了 6 時間後の全 β 放射能（参考） 1Bq/m³ 以下
 - 集塵したろ紙は、1 か月分まとめて回収し、 γ 線の核種分析も行っている。
-
- 5 か所のうち、県が測定を行っているのが 2 か所（白砂及び平場）、中部電力が測定を行っているのが 3 か所（中町、白羽小学校及び地頭方小学校）である。
 - 人工放射性核種の多くが β 線を放出する。自然放射性核種も β 線を放出するが、自然放射性核種が増えた場合は、全 α 放射能と全 β 放射能がほぼ同じ割合で増えるので、放射能比（全 β 放射能/全 α 放射能）は大きく変わらない。一方、人工放射性核種が増えた場合には、全 β 放射能が大きく増えるので、放射能比が大きくなる。
 - つまり、人工放射性核種の放出があった場合には、① 集塵中の全 α 放射能・全 β 放射能比と② 集塵中の全 β 放射能の測定値が同時に大きくなる。
 - 一方、自然放射性核種が減少するときは、量的に少ない全 α 放射能の方が割合として大きく減る場合があり、そのときは比が大きくなることがある。
 - この例として、関東の東の海上に太平洋高気圧が停滞する夏場において、ラドンの崩壊生成物濃度が低い海洋性の空気塊が継続的に流入することにより、特に全 α 放射能が低下し、放射能比が上昇することがある。
 - 空気中の自然放射性核種であるラドンとその崩壊生成物は、見かけ上の半減期が約 30 分なので、集塵終了 6 時間後には、約 1/4000 まで減衰することになる。一方、主要な人工放射性核種は 6 時間ではほとんど減衰しないため、③ 集塵終了 6 時間後の全 β 放射能の値が、② 集塵中の全 β 放射能の値からそれほど減らないこととなる。
 - ③ 集塵終了 6 時間後の全 β 放射能は、① 集塵中の全 α 放射能・全 β 放射能比と② 集塵中の全 β 放射能が同時に大きく変化した場合の参考として確認する。
 - 人工放射性核種の影響がない平常時においては、集塵中の全 α 放射能及び全 β 放射能の値は、ラドンの崩壊生成物からの放射線が主たるものである。
 - また、集塵終了 6 時間後の全 β 放射能については、見かけ上の半減期が約 11 時間であるトロンの崩壊生成物からの放射線が主たるものである。

トロンの崩壊生成物

地球誕生から現在まで壊変しつづき存在するトリウム 232 (^{232}Th) は、決まった壊変系列にしたがって次々と崩壊する。これを親核種の名前をとってトリウム系列と呼ぶ。

これらの崩壊は、土壤中で起こるが、途中で気体の核種であるトロン (^{220}Rn) が生成し、その一部が大気中へ散逸する。

トロンは崩壊し、ポロニウム、鉛、ビスマスなどの粒子状物質に変化する。



(注) 壊変系列の一部を省略して記載している。