

3 β/α 比を用いる評価方法以外の評価方法の検討

3.1 基準化計数を用いる評価方法

測定法の解説 F.3 に記載されている基準化計数を用いた方法についても試算した。この評価方法の考え方と計算方法は解説 F.3 に詳細に記載されているので、ここでは計算過程等の記述を省略する。この計算によって得られる値を、解説 F.3 では「推定の人工全 β 放射能濃度」としているのので、以下はそのとおりに記載する。2021 年度の測定値をもとに飯子浜局における推定の人工全 β 放射能濃度を試算し、各時刻の年間最大値を求めたので、図 19 に示す。

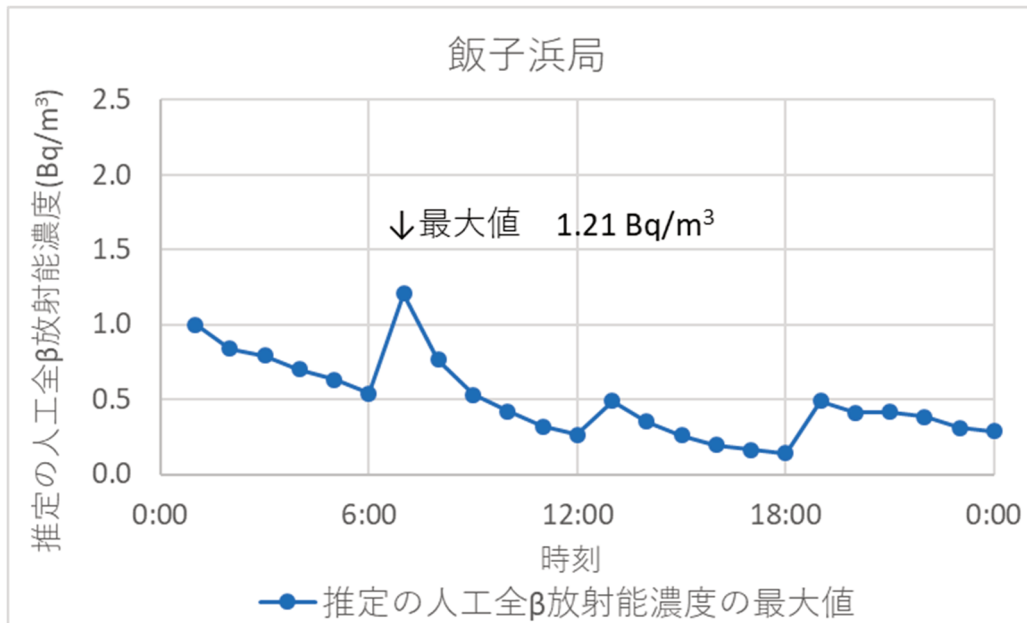


図 19 基準化計数法による推定の人工全 β 放射能濃度の各時刻における年間最大値

ろ紙送り直後の 1 時間は、計数が安定しないためばらつきが大きくなる傾向にある。この傾向は解説 F.3 に記載のとおりであった。この方法は本県でも採用可能ではあるが、計算方法は簡易である方が、異常値があった場合の原因究明もしやすいと考え、「2.1 β/α 比を用いる評価方法」を優先的に検討していくこととした。

3.2 平常の変動幅を設定する評価方法

表 2 のほか、ダストモニタにより測定している一部自治体では、平常の変動幅を設定し、その超過の有無によって監視する方法が行われている。測定法には、「平常の変動幅によるダストモニタの管理」として以下のように記載されている。

施設寄与弁別前のダストモニタ測定値は、自然放射性物質による寄与を含んだものであり、施設寄与がない場合でも変動する。これは、降雨や積雪、風の強さ、季節風の影響等の自然要因によって大気中のラドン・トロン壊変生成物の濃度が変化すること等に起因する。このため、平常の変動幅を把握し、これを超えた場合には機器に異常等がないか確認することが管理上有効である。また、必要に応じて自然変動による超過頻度を検討し、確認開始設定値を設定することにも活用することができる。

なお、平常の変動幅は、原子力施設の通常運転時かつ測定条件が適切に管理されている場合において、測定値の変動がおおむねある一定の幅の中に収まると考えられる幅のことである。

放射能濃度の平常の変動幅の算出方法については、測定法 p. 49 に記載があるため、それを参考に以下の2通りの算出方法を試すこととした。

- ① 放射能濃度の算術平均値 + 3 × 放射能濃度の算術標準偏差
- ② 放射能濃度の幾何平均値 + 3 × 放射能濃度の幾何標準偏差

①は放射能濃度の頻度分布を正規分布とみなすことができる場合に用いる方法であり、②は放射能濃度の頻度分布を対数正規分布とみなすことができる場合に用いる方法である。いずれも、放射能濃度の頻度分布が正規分布または対数正規分布に従う場合には、標準偏差の3倍の範囲内に全測定値の99.73%が含まれることから、平常の変動幅を超過する割合は $(1-0.9973)/2 = 0.00135$ であるため、1年間の1時間値のデータ数8,760個に対し約12回超過する計算となる。まず、①と②に関連して、2021年度の飯子浜局における放射能濃度の頻度分布を確認した。その結果を図20に示すが、本県においても放射能濃度の頻度分布は対数正規分布に近いものとなっていた。

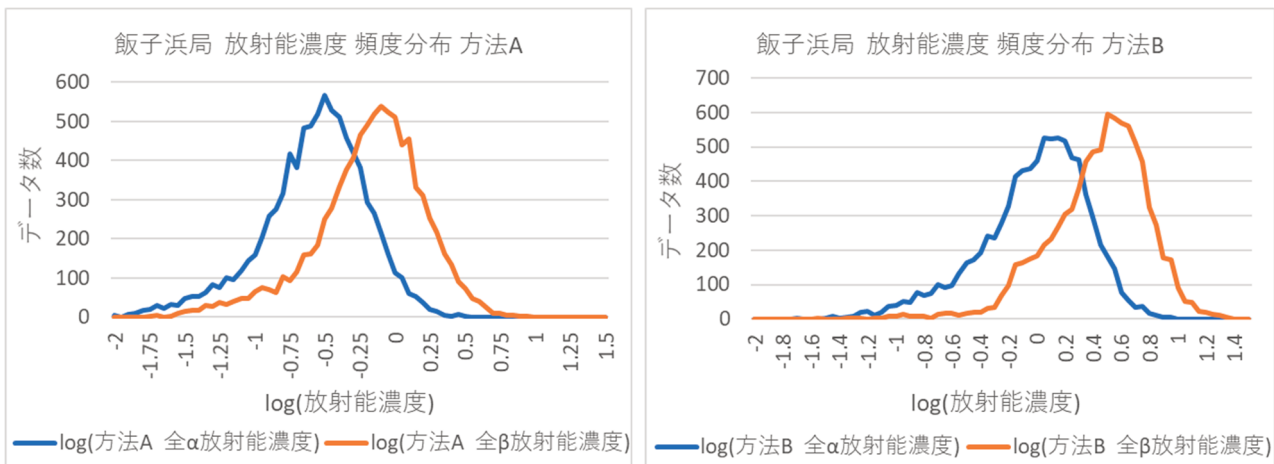


図20 2021年度の飯子浜局における方法Aと方法Bによる放射能濃度の頻度分布

次に、①について放射能濃度の算術平均値と算術標準偏差から、②について幾何平均値と幾何標準偏差から、それぞれ平常の変動幅を算出し、さらに平常の変動幅の超過数を調べた。その結果は表3及び表4のとおりであるが、②の算出方法の方が、①の算出方法に比べて、方法Bの全β放射能濃度は超過数が逆に多くなることが分かった。

表3 2021年度の飯子浜局における①の算出方法による平常の変動幅及び超過数

①	方法A		方法B	
	全α放射能濃度(Bq/m ³)	全β放射能濃度(Bq/m ³)	全α放射能濃度(Bq/m ³)	全β放射能濃度(Bq/m ³)
算術平均値	0.34	0.86	1.24	3.37
算術標準偏差	0.29	0.74	0.98	2.47
平常の変動幅	1.21	3.09	4.18	10.79
平常の変動幅の超過数(回)	161	157	146	143

表4 2021年度の飯子浜局における②の算出方法による平常の変動幅及び超過数

②	方法A		方法B	
	全α放射能濃度(Bq/m ³)	全β放射能濃度(Bq/m ³)	全α放射能濃度(Bq/m ³)	全β放射能濃度(Bq/m ³)
幾何平均値	0.25	0.61	0.90	2.57
幾何標準偏差	2.38	2.46	2.42	2.25
平常の変動幅	7.39	8.00	8.16	9.31
平常の変動幅の超過数(回)	0	2	5	214

測定法においては、平常の変動幅を設定する方法は、機器に異常等がないか確認し、ダストモニタを管理するための方法として記載されている。方法Aの場合は、②の算出方法を採用することによって、①の算出方法に比べて平常の変動幅の超過数が抑えられるため、ダストモニタの管理上有用であると考えられる。しかし、方法Bによって放射能濃度を算出する場合は、①の算出方法よりも②の算出方法の方が超過数が多くなることがあるため、ダストモニタの管理に用いる場合は注意が必要と考えられる。

Ⅲ 緊急時の放射能濃度算出方法と全α放射能濃度及び全β放射能濃度の試算

これまで、平常時用の濃度算出方法について検討してきたが、測定法には緊急時の放射能濃度算出方法も記載されている。詳細は測定法 p. 143 「第3章 大気モニタによる連続測定」に記載されているが、緊急時には、2018年度に本県が緊急時モニタリングについて（原子力災害対策指針補足参考資料）¹⁰⁾に基づいて導入した大気モニタと同様に、直近10分間の全β放射能濃度の平均濃度を評価することとされている。以下に、測定法 p. 147 に記載されている放射能濃度算出方法の内容を掲載する。

各正10分の時点の放射能濃度

放射能濃度 (Bq/m³)

$$= \frac{\text{現在の正10分の時点の計数率 (s}^{-1}\text{)} - \text{前の正10分の時点の計数率 (s}^{-1}\text{)}}{\text{機器効率} \times \text{10分間の積算流量 (m}^3\text{)}}$$

ただし、測定開始時又はろ紙送り後の最初の10分の時点の放射能濃度を評価する場合は、前の正10分の計数率を0 (s⁻¹) とする。

計数率の求め方に関する補足事項

本測定法では、集じんしながらの測定を基本としており、計数率は計数率計により測定することを基本とする。

抜粋：測定法 p. 147

しかし、先述のとおり、本県のダストモニタには計数率計が搭載されていないため、直前の10分間の積算計数から計数率及び放射能濃度を算出することとした。（以下「方法D」という）

この方法の概要を図21に、そして2021年度の飯子浜局における測定値をもとにして方法Dにより算出した放射能濃度の推移を図22に、2021年度中の全α放射能濃度と全β放射能濃度の相関図を図23に示す。図23を見ると、図4及び図5に比べると算出される放射能濃度の範囲が広がっていることが分かる。これは、10分毎に計数率を算出しているために、算出される計数率のばらつき

が大きくなるためと考えられる。

今後の参考として記すが、図 23 の相関図をもとにして、施設起因全β放射能濃度推定値を算出し、確認開始設定値 5 Bq/m³ の超過数を調べたところ、2021 年度の飯子浜局においては 306 回の超過となった。

$$CtD(\text{放射能濃度}) = \frac{\text{正味計数率}(s^{-1})}{\text{捕集効率} \times \text{機器効率} \times \text{線源効率} \times \text{積算流量}(m^3)} = \frac{Nt(\text{正味計数率})(s^{-1})}{0.990 \times \varepsilon(\text{機器効率})(\%) \times 0.5 \times \frac{Vt(\text{積算流量})(L) - Vt_{-10}(\text{積算流量})(L)}{1000}}$$
 ※下図の式で求める。
 捕集効率=0.990、線源効率=0.5 (α,β 共通) とする。

ε: 定数
(捕集効率, 機器効率, 線源効率)

$C10 = N10 / (\varepsilon \times V10)$ $C20 = N20 / (\varepsilon \times (V20 - V10))$ $C30 = N30 / (\varepsilon \times (V30 - V20))$ $C40 = N40 / (\varepsilon \times (V40 - V30))$ $C50 = N50 / (\varepsilon \times (V50 - V40))$

集じん開始	集じん10分間	集じん20分間	集じん30分間	集じん40分間	集じん50分間	集じん360分間(6時間) (ろ紙送り)
放射能濃度Ct	C10	C20	C30	C40	C50	C360
正味計数率Nt	N10	N20	N30	N40	N50	N360
積算流量Vt	V10	V20	V30	V40	V50	V360

以下の式で正味計数率Ntを求める。

集じん開始から10分後の正味計数率N10
正味計数率N10
 = 「集じん開始から10分間の積算計数」 ÷ 「600秒(10分間) - 43秒(ろ紙送り時間)」 - バックグラウンド計数率

集じん開始から20～360分後の正味計数率Nt (ただし、t = 20, 30, 40, 50, …, 360)
正味計数率Nt (ただし、t = 20, 30, 40, 50, …, 360)
 = (「集じん開始から測定時刻までの積算計数」 - 「集じん開始から10分前までの積算計数」) ÷ 600秒(10分間)

バックグラウンド計数率
 飯子浜局 全α計数率 0.0 s⁻¹ 全β計数率 0.6 s⁻¹ 鮫浦局 全α計数率 0.0 s⁻¹ 全β計数率 0.7 s⁻¹

図 21 放射能濃度算出方法 (方法 D)

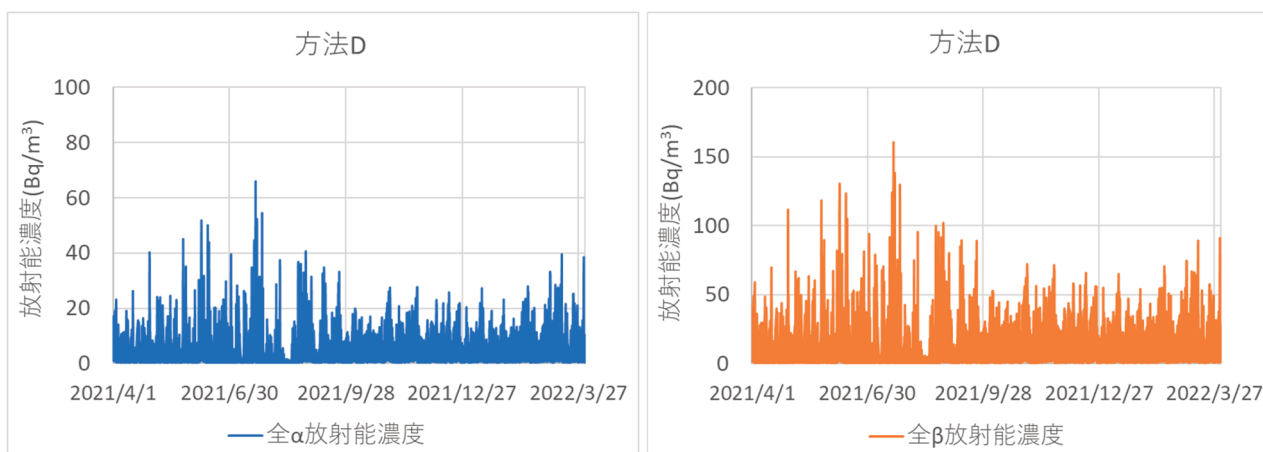


図 22 2021 年度の飯子浜局における方法 D による放射能濃度計算結果 (時系列図)

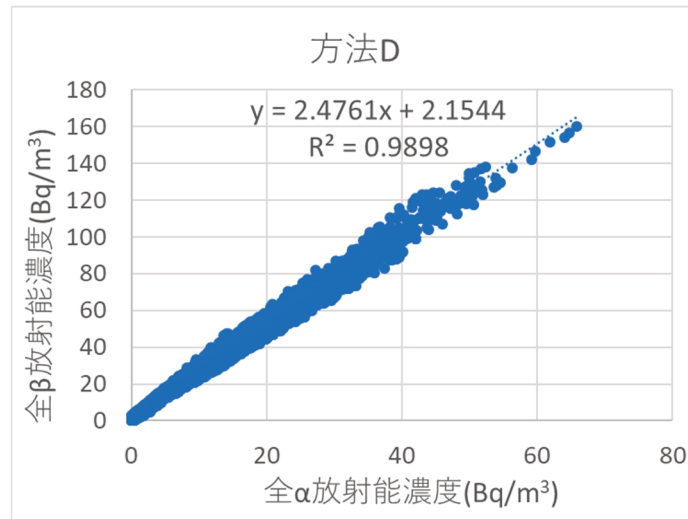


図 23 2021 年度の飯子浜局における方法 D による放射能濃度計算結果（相関図）

IV ダストモニタによる測定値の特徴を把握するための調査

1 大気中ラドン濃度との相関

2021 年度の予備調査と図 9 の結果から、放射能濃度の日変動に大気中ラドン子孫核種の日変動が影響している可能性が考えられる。女川局ではラドンモニタ（セイコー・イージーアンドジー株式会社製 Alpha GUARD PQ2000PRO）により、大気中ラドン濃度を測定している。このデータを用いて、飯子浜局と鮫浦局の放射能濃度の変動を評価できるか検討した。2021 年度の女川局のラドン濃度と飯子浜局のダストモニタにおける方法 A と方法 B の放射能濃度の相関を図 24 に示す。

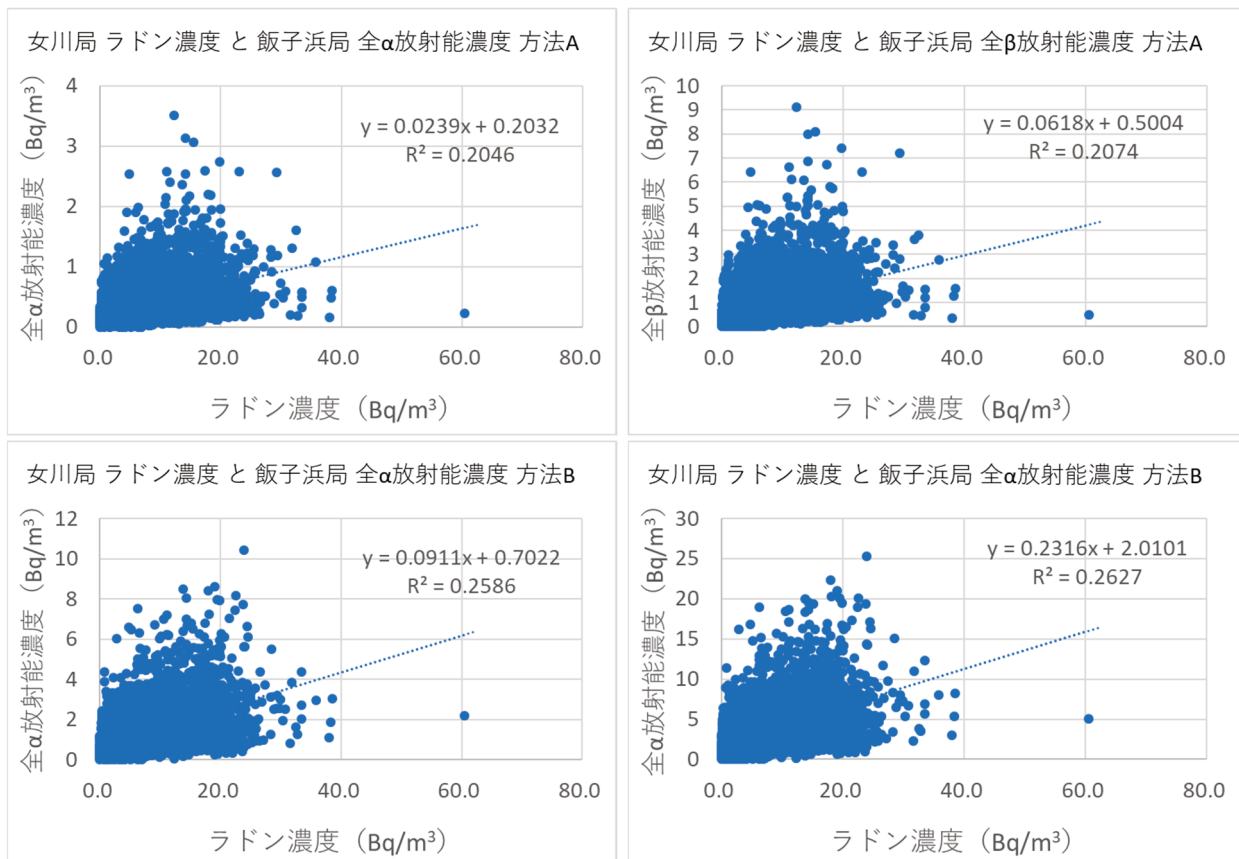


図 24 2021 年度の女川局のラドン濃度と飯子浜局のダストモニタにおける放射能濃度との相関

調査の結果、女川局のラドン濃度と飯子浜局のダストモニタにおける方法Aと方法Bで算出された放射能濃度には良い相関は認められなかった。女川局と飯子浜局が離れた場所に設置されており、両局の大気中ラドン濃度が異なる可能性が高いこと、過去に報告⁹⁾されているとおり局舎周辺の地形等が異なるとラドン子孫核種の成長の程度が異なることが原因と考えられる。

この他、放射能濃度の測定値に影響を与える要因として、大気安定度も考えられるが、大気安定度は飯子浜局や鮫浦局では測定していないことから、検討を省略した。

2 放射能濃度の季節変動等

一般的に、冬期は大陸由来の気団が日本に到達することから大気中のラドン濃度とその子孫核種の濃度が上昇することが知られている^{11, 12)}。本県においても、過去の調査で冬期は降雨中に含まれるラドン子孫核種の量も多くなることが明らかになっている¹³⁾。

そこで、放射能濃度の季節変動があるかを調べるために、図25のとおり方法A及び方法Bで算出した2021年度の飯子浜局における放射能濃度について時系列図を作成するとともに、図26のとおり放射能濃度の月平均値を求めた。さらに、図27のとおり施設寄与全β放射能濃度推定値についても、時系列図を作成した。

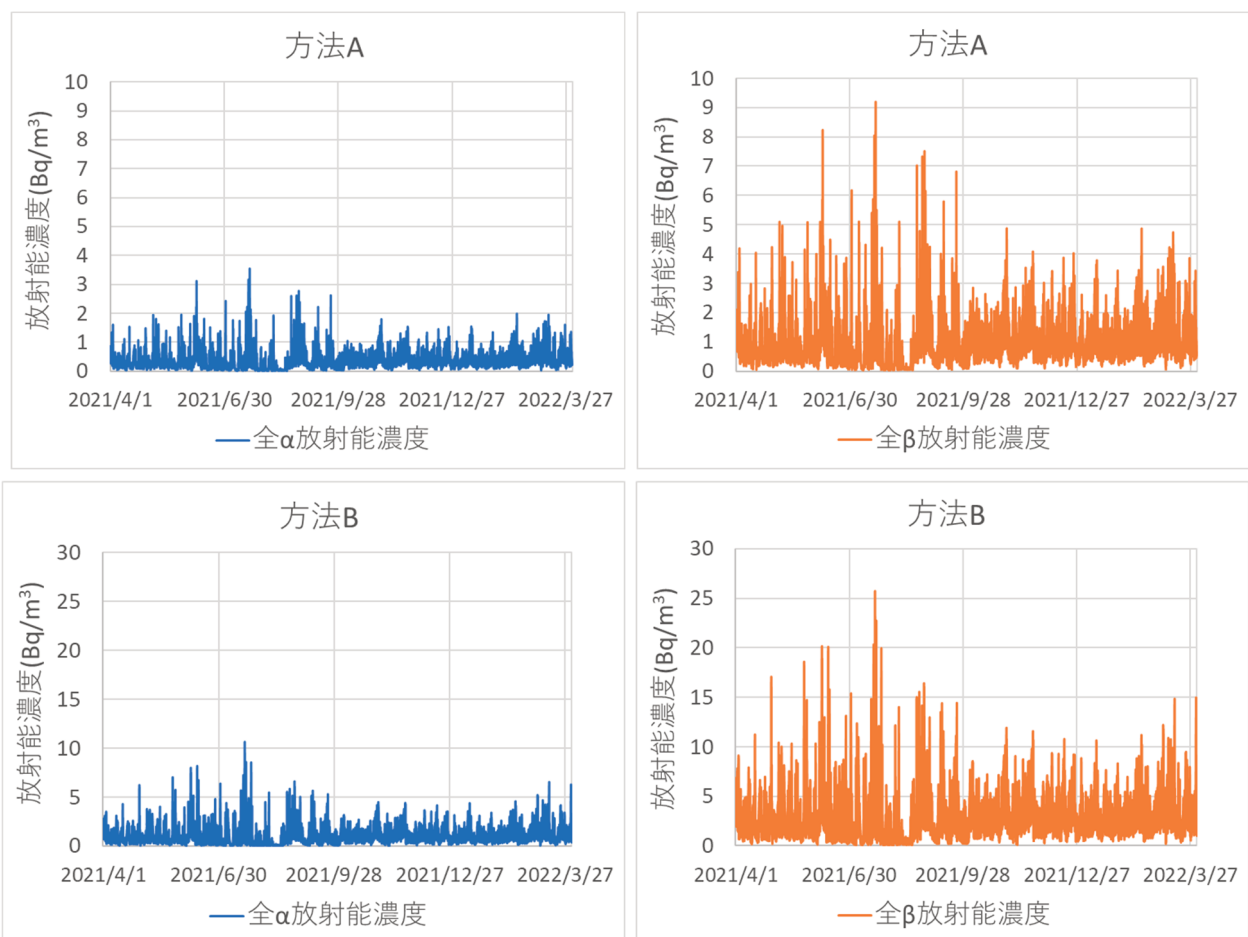


図25 2021年度の飯子浜局における全α放射能濃度と全β放射能濃度の時系列図

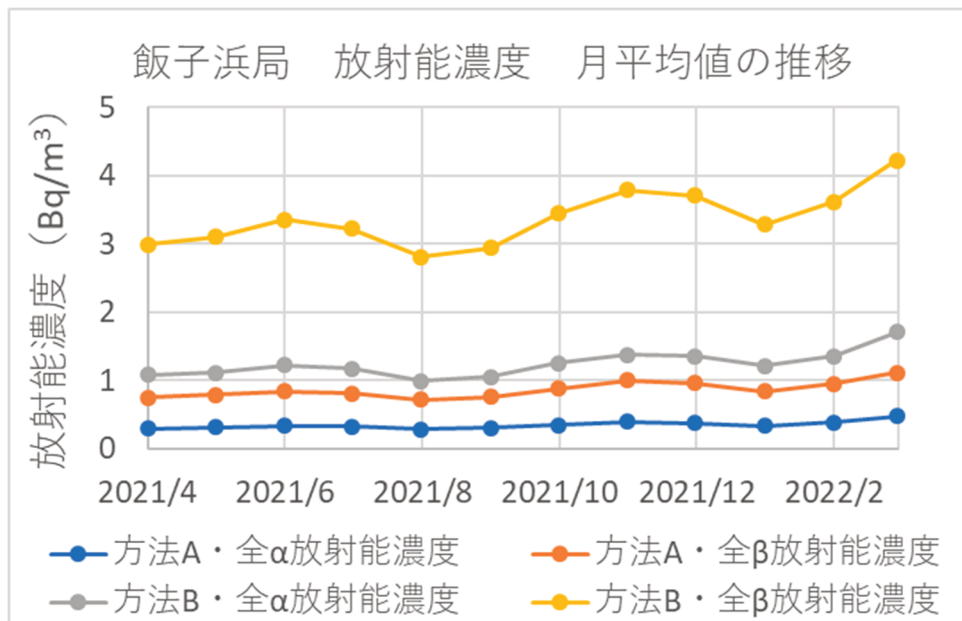


図 26 2021 年度の飯子浜局における全 α 放射能濃度と全 β 放射能濃度の月平均値の推移

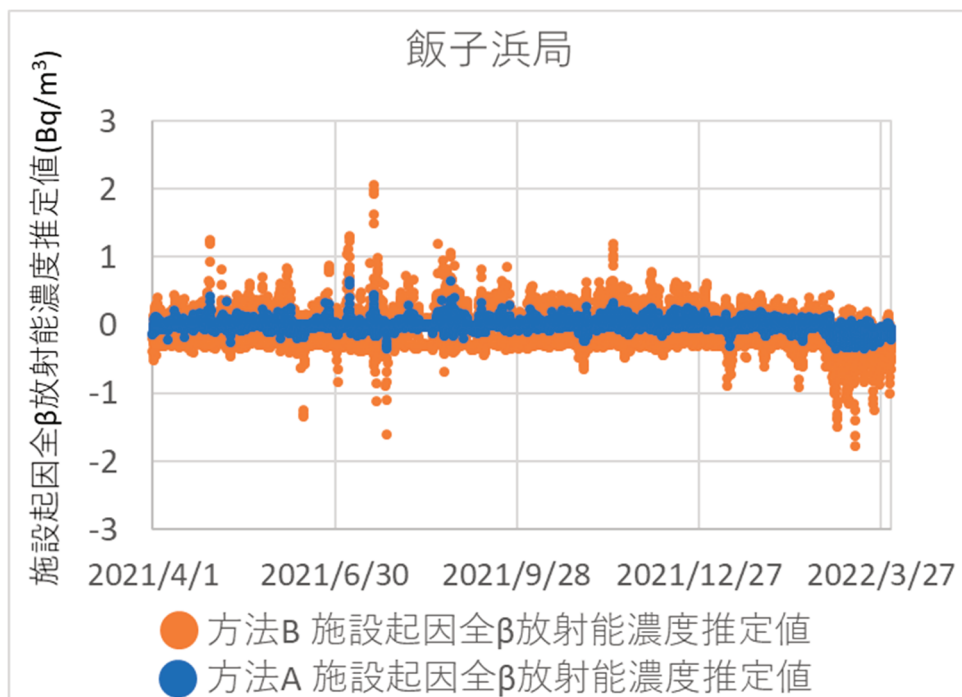


図 27 飯子浜局における施設寄与全 β 放射能濃度推定値の時系列図

まず、図 25 で放射能濃度の最大値に注目すると、冬期よりも夏期の方が大きく上昇していることが分かる。この原因は、夏期は夜間から朝方にかけては大気安定するため、地中から湧出したラドンが地表面に滞留し、地表面付近で大気中のラドン濃度が上昇していること¹⁴⁾が関係していると考えられる。このことが、図 27 のとおり施設起因全 β 放射能濃度推定値が夏季に大きく上昇することの原因になっている可能性が考えられる。一方で、図 26 の放射能濃度の時系列図を見ると、夏期に比べて冬期は放射能濃度が若干高めな値で推移していることが分かる。これらの季節変動は、ダストモニタによる測定値の特徴を理解する上で重要な事項であるため、今後も注視していきたい。

3 放射能濃度計算に用いる各種パラメータ

3.1 捕集効率と線源効率

放射能濃度計算に用いる各種パラメータの概要については、II.2 に記載のとおりである。このうち捕集効率と線源効率については、 β/α 比の考察に関係する事項であるので、さらに検討を行った。

まず、ダストモニタの測定には主にラドン子孫核種が関係していることから、参考のため、ウラン系列のうち Rn-222 以降の壊変系列を測定法から引用して図 28 に示す。

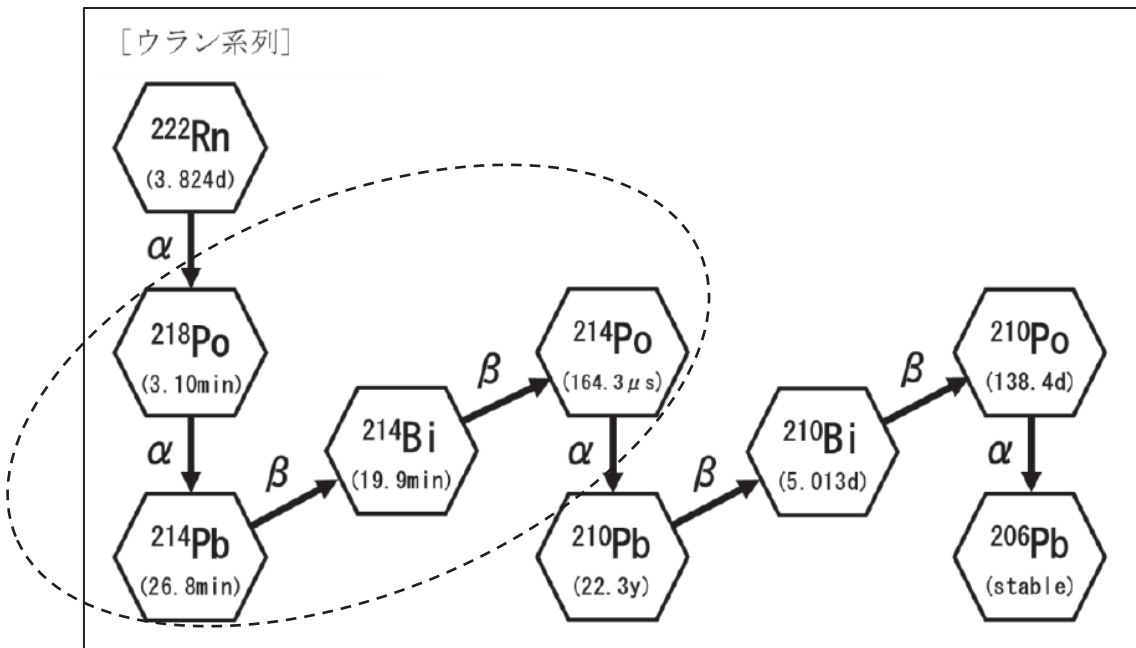


図 28 ウラン系列の壊変系列 (Rn-222 以降)

抜粋：測定法 p. 110

このうち、ダストモニタの測定に特に寄与すると考えられるのが、Po-218、Pb-214、Bi-214、Po-214 である (図 28 破線内)。Rn-222 の半減期はいずれの子孫核種の半減期よりも長いので、独立した系の中では放射平衡に達し、それぞれの放射能濃度が等しくなる。この場合、 α 線放出核種が 2 種類、 β 線放出核種が 2 種類、つまり「 α 線放出核種： β 線放出核種 = 1:1」であるため、 β/α 比が 1 になる。

しかし、図 4、図 5 の相関図を見ると、 β/α 比 (近似直線の傾き) が 2.5 程度となっており、1 からは離れた値となっている。ただし、ラドン子孫核種の成長具合によって大気中における各ラドン子孫核種の濃度の割合が変わることや、ダストモニタの校正に用いている線源が Am-241 と C1-36 であって、ラドン子孫核種とはエネルギーが異なることを踏まえれば、必ずしも 1 にならないというものではない。

この原因を考察するにあたって、ろ紙の表面捕集効率と線源効率が重要となる。

大気中放射性物質のモニタリングに関する技術参考資料 (2003 年文部科学省作成) に記載されているとおり、HE-40T は表面捕集効率が低く、特に粒子径 0.1 μ m 以下の捕集効率が必ずしも十分でないことが指摘されている。このため、0.1 μ m 以下の粒子が支配的な環境において大気浮遊じんを採取する場合には、注意が必要である。

一方で、Rn-222 から生まれた直後の Po-218 はフリー原子であるが、時間の経過とともに付着原子になる。その娘核種 Pb-214 は、生まれたときから大部分が付着原子である。このようにフリー成

分の割合が核種で違うことが報告されている¹⁵⁾。

上記のことから、以下の図 29 のような事象が起こっていることが考えられる。大気中放射性物質が HE-40T に捕集される際、HE-40T の表面捕集効率が低いいため、放射性物質がろ紙の内部にまで入り込む。こうすると、試料に含まれる放射性物質から放出された放射線の一部が、ろ紙を通過する間に吸収されて、検出器に届かなくなる事象（自己吸収）が起こっている可能性が高いと考えられる。一方で、β線の自己吸収はα線ほど顕著ではない。また、機器校正はα線放出核種(Am-214)やβ線放出核種(Ci-136)が表面に塗布された標準線源を用いて行うために自己吸収がほとんどない条件での校正となることから、α線が自己吸収された分だけ、全α放射能濃度が過小評価され、β/α比が1よりも高い値となっていると考えられる。

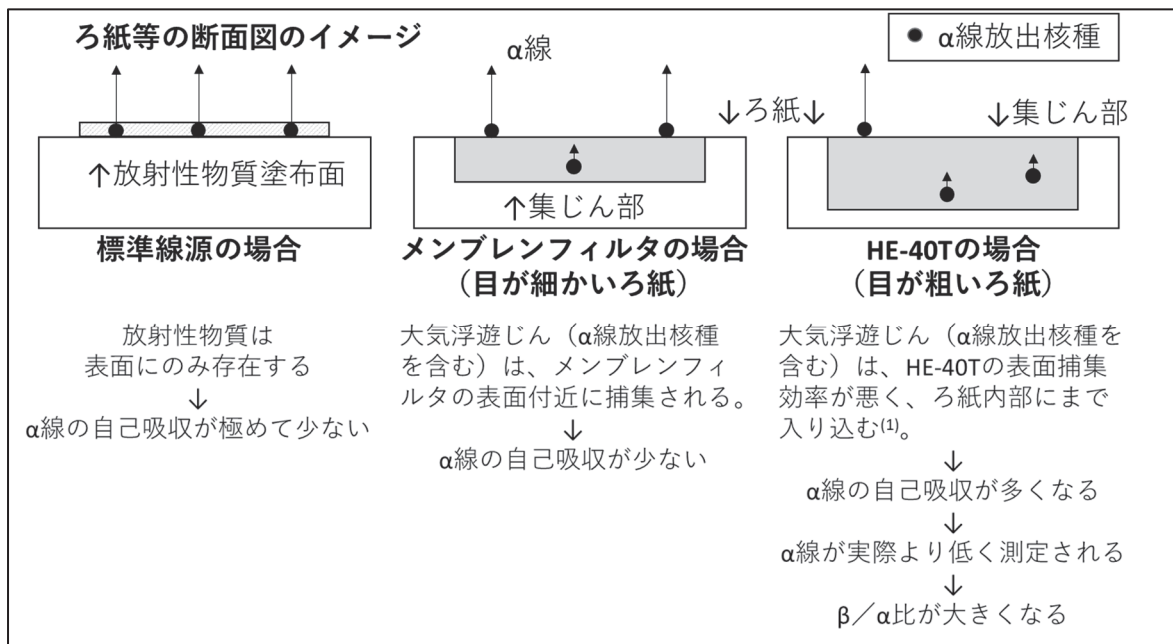


図 29 α線自己吸収のイメージ（検出器は試料の上側）

このため、全α放射能濃度を評価するにあたって、本来であれば、表面捕集効率、自己吸収を考慮すべきところであるが、その場合は集じん中の面速度や粒径分布も考慮しなければならず、測定値を補正することは非常に困難である。

表面捕集効率を上げるために面速度約 85 cm/s (100 L/min として計算) から低下させることも検討したが、測定法の検出下限値の基準を満たすためには、容易に流量率を低下させることはできないと判断した。

HE-40T よりも表面捕集効率が良いメンブレンフィルタを用いることも検討した。製造業者にメンブレンフィルタの使用の可否を確認したところ、本県が導入したダストモニタでは HE-40T 以外のろ紙の使用を想定していないためメンブレンフィルタの使用は不可であるとの回答があり、メンブレンフィルタを用いることは断念した。

もし、少しでも実態に近いと思われる β/α 比とするためには、捕集効率ではなく、自己吸収を前提として線源効率を、JIS Z 4316「放射性ダストモニタ」に記載されている 0.5 ではなく、JIS Z 4504:2008「放射性表面汚染の測定方法-β線放出核種(最大エネルギー0.15 MeV 以上)及びα線放出核種」を準用し、α線の線源効率は 0.25、β線の線源効率は 0.5 とする方法が考えられる。

仮に、α線の線源効率を 0.25、β線の線源効率を 0.5 とした場合であるが、算出される全α放射能濃度が、図 4 及び図 5 で示した値の 2 倍となるため、β/α比(近似曲線の傾き)が 2 分の 1 とな

る。ただし、以下の理由から、施設寄与全β放射能濃度推定値には影響を与えることはない。

まず、Ⅱ2.1の式(1)を再掲する。

$$\beta e = \beta o - (\alpha o \times r + i) \quad (1)$$

ここで、

βe : 施設起因全β放射能濃度推定値(Bq/m³)

βo : 全β放射能濃度の実測値(Bq/m³)

αo : 全α放射能濃度の実測値(Bq/m³)

r : 全α放射能濃度と全β放射能濃度の相関図から求めた近似曲線の傾き (β/α比)

i : 近似曲線の切片(Bq/m³)

ここで、α線の線源効率を0.5から0.25にすると、全α放射能濃度が2倍になる一方で、β/α比(近似曲線の傾き)が2分の1となる。

$$\beta e = \beta o - ((\alpha o \times 2) \times (r/2) + i) = \beta o - (\alpha o \times r + i)$$

このように、α線の線源効率を0.5から0.25に変更しても、式(1)と同じ式で、施設寄与全β放射能濃度推定値を求めることとなる。したがって、施設寄与全β放射能濃度推定値の評価結果は、Ⅱ2.4の結果から変わらない。

α線の線源効率と機器効率に関しては、α線の平均飛程およびフィルタ内の自己吸収を考慮に入れて、フィルタの有効面(捕集面)全体についてシミュレーション計算を行った結果が11.60%だったという報告¹⁶⁾がある。当該報告を参考にすれば、本県のダストモニタの機器効率は0.5であるため、α線の線源効率は0.25として、線源効率と機器効率を合わせて0.125とすることが適切と考えられる。他自治体等や専門機関等から情報収集するなどして適切な値を選択したい。

3.2 バックグラウンド計数率

バックグラウンド計数率については、製造業者が求めた値を用いている。さらに、ろ紙送り時間及びろ紙交換時に係るデータの取り扱いをⅡ2.2のとおり定めた。今後の参考のため、飯子浜局の方法Aを例として、これらを考慮しなかった場合の全α放射能濃度と全β放射能濃度の相関図を図30、図31に示す。

バックグラウンドの要因は、図32に示すように①機器本体に含まれる放射性物質に由来するバックグラウンド、②ろ紙に含まれる放射性物質に由来するバックグラウンド、③外部環境等に由来するバックグラウンドが考えられる。今後、全α放射能濃度と全β放射能濃度の相関が、図30や図31のように悪くなることがあった場合は、原因を調査する際にバックグラウンド計数率も調査の対象にした方が良いと考える。

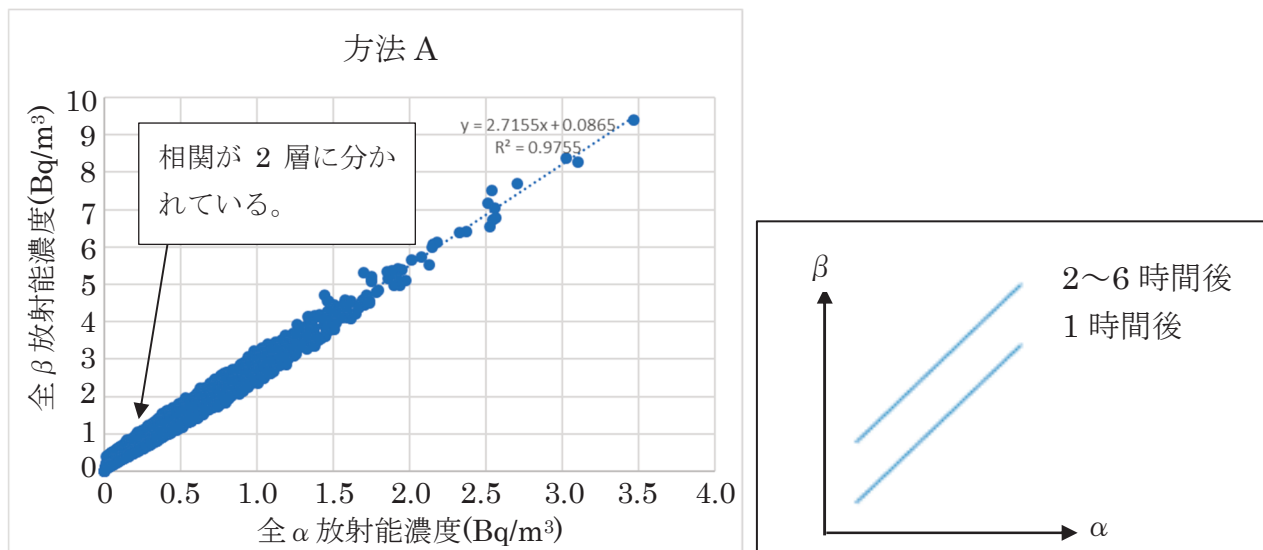


図 30 バックグラウンド計数率とろ紙送り時間及びろ紙交換時を考慮しなかった場合の全α放射能濃度と全β放射能濃度の相関図

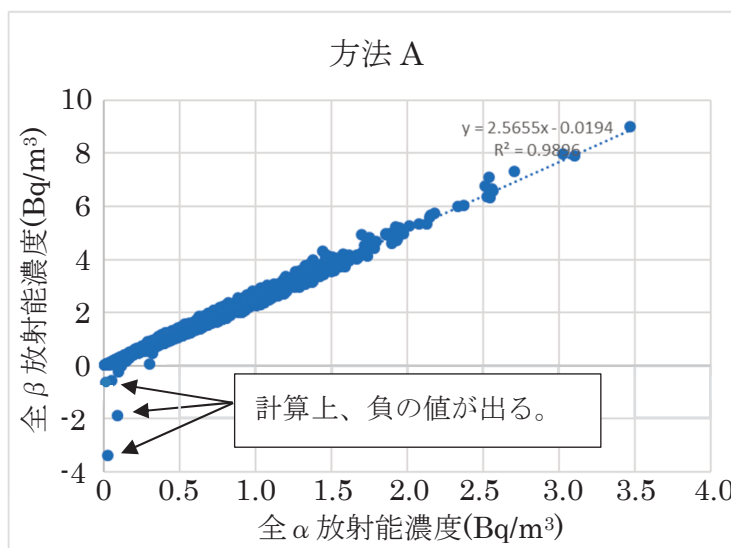


図 31 ろ紙送り時間及びろ紙交換時を考慮しなかった場合の全α放射能濃度と全β放射能濃度の相関図 ※図 30 からバックグラウンド計数率のみを考慮した場合の相関図

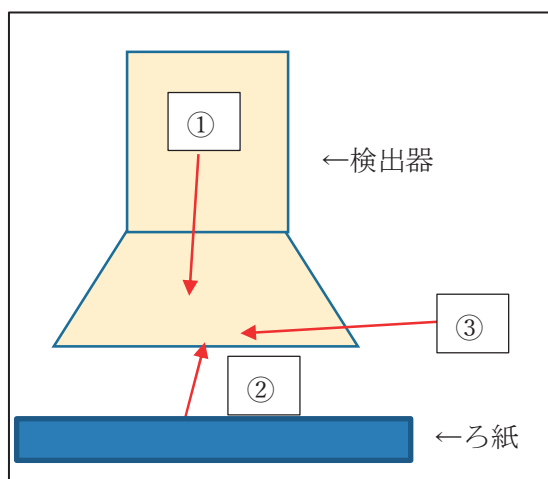


図 32 バックグラウンドの要因のイメージ

V 今後の検討課題

1 平常時の放射能濃度の算出方法

放射能濃度の算出方法については、測定法の記載内容、試運転期間中の測定値、放射性物質が飛来した場合の応答性に関するシミュレーションを踏まえてさらなる検討を行う必要がある。

2 施設寄与全 β 放射能濃度推定値の設定値を超過した場合の対応

大気中放射性物質濃度の連続測定結果における施設寄与（施設寄与である可能性を否定できない場合を含む）を弁別するために、測定法 p. 43 を参考に対応フローチャートを検討する。併せて、ろ紙を回収してゲルマニウム半導体検出器で詳細に核種分析を行う場合に備えて、ろ紙の前処理方法と、ろ紙自体のバックグラウンドを調査する。

3 測定結果の報告方法

ダストモニタによる測定結果を公表する際にどのような報告内容とすべきかを、他県の事例を参考に検討する。

4 ダストモニタの測定に関する線源効率の検討

IV3.1 に記載したとおり、線源効率の検討が必要である。

5 ダストモニタによる測定結果の分析と確認開始設定値の検討

測定法 p. 44 にダストモニタによる測定値の評価に用いる確認開始設定値を求める際は、過去 3～5 年間程度の 1 時間測定値を使用することが記載されている。本県においては、全 α 放射能濃度と全 β 放射能濃度による監視は初の試みであるため、本県におけるダストモニタの測定値を蓄積し、測定値の特徴を十分に理解した上で、確認開始設定値を求める必要がある。ただし、測定値の蓄積には年数を要するため、確認開始設定値には、当面の間は上限値である 5 Bq/m³を用いるのが適切と考える。

VI まとめ

2021 年度の測定結果をもとに、監視手法の検討と測定値の変動に関する定性分析を行った。まだ、検討すべき課題があるため、さらなる検討を重ねて、本県におけるダストモニタによる監視手法を構築したい。

VII 参考文献

- 1) 原子力規制庁監視情報課、平常時モニタリングについて（原子力災害対策指針補足参考資料）、2018 年 4 月 4 日制定（2021 年 12 月 21 日 一部改訂）、
URL: <https://www.nra.go.jp/activity/monitoring/heijouji.html>
- 2) 木村幸由、木村昭裕、中村朋之、佐藤健一、ダストモニタの導入及び可搬型モニタリングポストの更新について、宮城県環境放射線監視センター年報、第 6 巻、p. 15-20、2020、

URL: <https://www.pref.miyagi.jp/soshiki/kankyoho/intro.html>

- 3) 石川陽一、木村幸由、連続式全アルファ・全ベータ線ダストモニタで観測される計数率変動と主な寄与放射性核種、宮城県環境放射線監視センター年報、第7巻、p.19-30、2021、URL: 2)に同じ
- 4) 原子力規制庁、放射能測定法シリーズ No.36 大気中放射性物質測定法、2022年6月制定、
URL: <https://www.kankyo-hoshano.go.jp/library/series/>
- 5) 株式会社日立製作所、可搬型ダストモニタ完成図書、図書番号CA-102-19、2021年2月5日作成
- 6) 文部科学省科学技術・学術政策局原子力安全課防災環境対策室、大気中放射性物質のモニタリングに関する技術参考資料、2003年7月制定
- 7) 日本産業規格 JIS Z 4316 : 2013「放射性ダストモニタ」
- 8) 日本産業規格 JIS Z 4504 : 2008「放射性表面汚染の測定方法-β線放出核種(最大エネルギー0.15 MeV以上)及びα線放出核種」
- 9) 石川陽一、木村昭裕、高橋正人、三浦英美、牡鹿半島における大気中ラドン濃度とγ線線量率の関係、宮城県原子力センター年報、第26巻、p.5-12、2008、URL: 2)に同じ
- 10) 原子力規制庁監視情報課、緊急時モニタリングについて(原子力災害対策指針補足参考資料)、2014年1月29日制定(2021年12月21日一部改訂)、
URL: <https://www.nra.go.jp/activity/monitoring/monitoring6-1.html>
- 11) 藤波直人、江阪忍、舞鶴市における大気中のラドン娘核種濃度の季節変動、保健物理、42(1)、p.53-62、2007
- 12) 吉岡勝廣、飯田孝夫、大気中ラドン濃度の周期性長期変動の主要な影響因子—海洋と陸地の違い—、保健物理、42(1)、p.53-62、2007
- 13) 今野達矢、石川陽一、大庭和彦、降水中のラドン娘核種濃度と空間γ線線量率の関係、宮城県原子力センター年報、第17巻、p.15-32、1998、URL: 2)に同じ
- 14) 木立博、今野達矢、石川陽一、加賀谷秀樹、牡鹿半島における空間ガンマ線線量率とラドン濃度の関係について、宮城県原子力センター年報、第19巻、p.5-9、2001、URL: 2)に同じ
- 15) 下道國、山崎敬三、ラドンエアロゾル、エアロゾル研究、Vol.4 No.1、1989
- 16) 黒澤龍平、床次眞司、αとβ線計数法によるラドン娘核種濃度測定法に関する研究、保健物理、26、p.319-330、1991