

大気中放射性物質濃度測定における自然変動の影響について

友石松一郎 村上涼太 泉圭紀 稲井淳一 松本純子 浮田陽一

1. はじめに

原子力規制庁は、平成 30 年 4 月に策定した「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)」(以下「補足参考資料」という。)のなかで、原子力施設から予期しない放射性物質又は放射線の放出の早期検出を目的として、ダストモニタによる大気浮遊じんの連続採取及び連続測定を実施項目として定めた。¹⁾

発電用原子炉施設からの主な放出核種はセシウム-137(Cs-137)等のベータ線放出核種である²⁾ことから、当センターでは人工ベータ放射能濃度を測定するダストモニタを伊方発電所から半径 5km 圏内の 4 地点に新規整備し、令和 3 年度から測定を行っている。

本測定機器は、大気中の自然放射性物質の影響を計算により除外し、人工ベータ放射能濃度を測定する手法を採用していることから、除外過程において、測定した自然放射性核種が測定上の妨害要因となって

いる。これは、主な自然放射性核種であるラドン・トロン壊変生成物の量が大きく変動することによるものとされている。ラドン・トロン壊変生成物とは、希ガスのラドン(Rn-222)とトロン(Rn-220)が短半減期で放射性壊変を繰り返す核種の総称であり、絶えず地表面から一定割合で放出されているが、その濃度は大気の滞留により明け方は多く、日中は少ないといった日較差があることや、風向や感雨等といった気象条件に大きく依存していることが知られている。

本報告では、ラドン・トロン壊変生成物が、本測定に及ぼす影響について、これまで蓄積したデータから、考察を行った。

2. 機器仕様

外観を図 1 に、主な仕様を表 1 に示す。

表 1 ダストモニタの主な仕様

検出器	2重シリコン半導体検出器(25mmφ)
測定対象	アルファ線, ベータ線
測定間隔	10分毎(1時間値)
集じん方式	メンブレン長尺フィルタ
ろ紙交換	ろ紙の自動ステップ送り
ろ紙送り周期	8時間毎(3回/日)
流量	約40L/分
検出器効率	アルファ線: ²⁴¹ Am に対し 24%以上 ベータ線: ³⁶ Cl に対し 24%以上
測定範囲	5Bq/m ³ 以下~5000Bq/m ³ 以上(1時間値)
電源	AC100V, 60Hz, 700VA 以下
外形寸法	600 mm(W)×500 mm(D)×1200 mm(H)
吸気口位置	地表面(または床面)から 1.2m の高さ
動作温度・湿度範囲	動作温度: 5~40℃ 動作湿度: 30~80%RH (結露しないこと)
製造メーカー・型式	(株)千代田テクノル THC-P106 (検出部: キャンペラ CAM 450AM)



図 1 ダストモニタ外観

3. 測定方法

ダストモニタの測定原理を図2に示す。

本測定機器は二重シリコン半導体検出器を採用し、スペクトルの取得が可能であるため、スペクトルからアルファ線、ベータ線、ガンマ線を同時に測定している。これらの測定結果から2つの補正を実施しており、算出式を(1)に示す。

$$n_{\beta} = N_{\beta+\gamma} - N_{\gamma} \times K_{\gamma} - \Sigma N_{\alpha} \times K_{\beta} \quad (1)$$

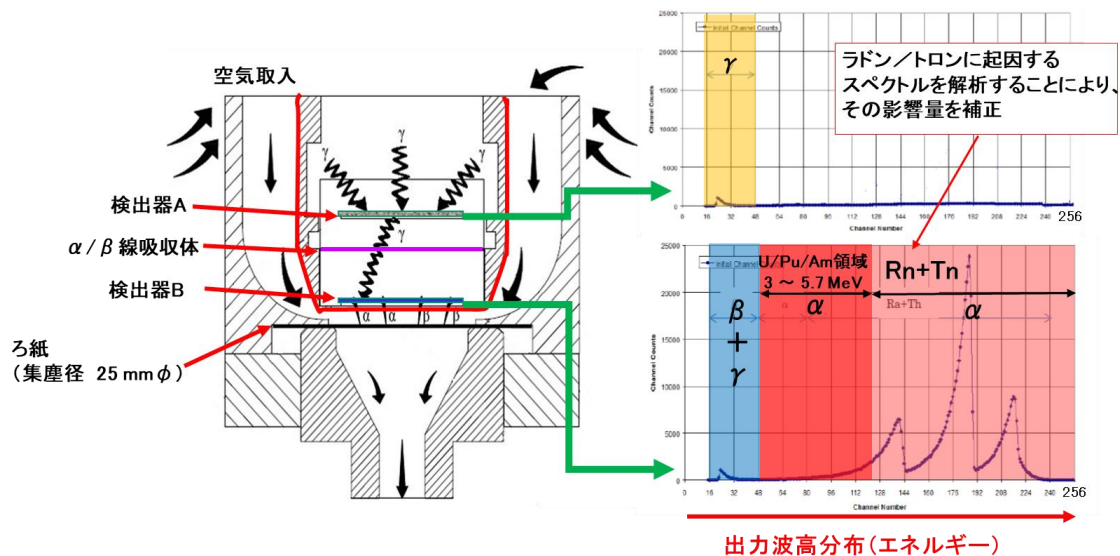
- n_{β} : 人工ベータ線計数率
- $N_{\beta+\gamma}$: 全ベータ線+ガンマ線計数率
- N_{γ} : ガンマ線計数率
- K_{γ} : ガンマ線補正係数
- N_{α} : 全アルファ線計数率
- K_{β} : 自然ベータ線寄与係数

まず、図2の検出器Bでは全放射線が検出され、検出器Bから得られるエネルギースペクトルでは、ベータ線とガンマ線が放射線のエネルギーの性質から同じエネルギー領域で計測される。一方、検出器Aでは真鍮を素材としたアルファ/ベータ線吸収体を設置することにより、放射線の透過力の差からガンマ線のみが検出される。これに、位置等の補正係数を加味し、2つの検出器の差をとることで、ガンマ線の影響を補正する。

次に、放射線のエネルギーの性質から発電所起因の人工放射性核種であるウラン等はアルファ線の中でも低エネルギー帯で計測され、ラドン・トロン壊変生成物は高エネルギー帯で計測されることから人工由来と自然由来の分離が可能となる。本測定機器はこの性質を利用し、ラドン・トロン壊変生成物のアルファ線から自然由来のベータ線を計算し、検出器Bの計数率から除外することで自然由来のベータ線の影響を補正している。(1)に示す式に加えて、検出効率や流量から人工ベータ放射能濃度を算出している。

つまり、環境中に人工放射性核種が放出されない限り、理論上の測定結果は0Bq/m³となるが、計算過程において、ラドン・トロン壊変生成物による誤差が測定結果に反映されるため、0Bq/m³を中心とした正規分布になると考えられる。

なお、8時間毎のろ紙送り直後の10分間は大気浮遊じんが十分に捕集されていないため、測定結果として採用していない。



(出典) 千代田テクノル技術資料より

図2 測定原理

表 2 運用開始以降の人工ベータ放射能濃度の測定結果(Bq/m³)

年度	四半期	モニタリングステーション (発電所から南に 1.1km)				湊浦局 (発電所から東に 4.2km)				伊方越局 (発電所から東北東に 2.8km)				加周局 (発電所から南西に 3.9km)			
		最大	最小	平均	標準偏差	最大	最小	平均	標準偏差	最大	最小	平均	標準偏差	最大	最小	平均	標準偏差
令和3	第1	2.11	-2.17	0.02	0.39	1.71	-2.31	0.03	0.40	2.00	-2.08	0.02	0.42	2.22	-1.98	0.03	0.40
	第2	1.92	-2.08	0.02	0.37	2.04	-1.86	0.03	0.40	2.49	-1.75	0.02	0.39	1.77	-2.32	0.03	0.39
	第3	1.90	-2.17	0.02	0.43	1.75	-2.30	0.03	0.42	2.37	-2.39	0.01	0.42	2.39	-2.12	0.03	0.42
	第4	1.81	-1.91	0.02	0.41	1.67	-1.85	0.03	0.42	1.68	-1.81	0.01	0.40	1.81	-1.97	0.02	0.41
令和4	第1	1.65	-2.18	0.01	0.39	1.72	-2.08	0.02	0.41	2.35	-2.18	0.02	0.42	2.10	-1.99	0.01	0.40
	第2	3.81	-3.35	0.02	0.42	2.08	-1.78	0.03	0.41	1.88	-2.59	0.03	0.42	1.84	-1.79	0.02	0.41
	第3	1.82	-1.85	0.02	0.41	1.94	-2.10	0.03	0.45	1.89	-2.02	0.02	0.42	2.17	-1.88	0.01	0.43
	第4	1.73	-2.10	0.02	0.41	2.47	-2.39	0.04	0.47	1.96	-1.91	0.02	0.41	2.04	-1.81	0.02	0.41
令和5	第1	1.50	-1.70	0.02	0.35	2.34	-2.96	0.03	0.46	2.12	-2.14	0.01	0.38	1.85	-1.78	0.02	0.38
	第2	2.03	-2.15	0.02	0.35	2.10	-2.29	0.03	0.45	2.32	-1.86	0.02	0.36	1.92	-2.04	0.02	0.35
	第3	1.58	-1.67	0.02	0.40	1.82	-2.42	0.04	0.48	1.87	-1.90	0.01	0.41	2.27	-1.79	0.02	0.43

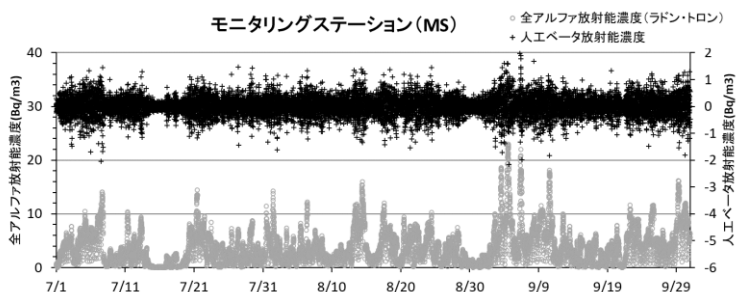


図 3 トレンド(令和 5 年度第 2・四半期)

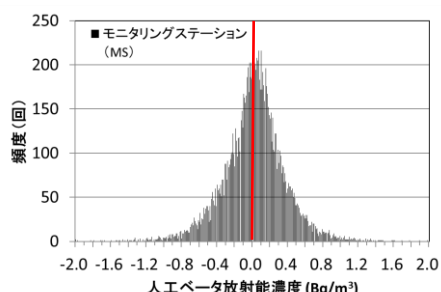


図 4 頻度分布
(令和 5 年度第 2・四半期)

4. 測定結果及び考察

4.1. 確認開始設定値

表 2 に運用開始以降の人工ベータ放射能濃度の測定結果をとりまとめた。

補足参考資料では、確認開始設定値を現在の技術水準に照らして 5Bq/m³程度を最大として、各測定機器の個別の変動や過去の最大値を考慮し設定することとしており、本県では、令和 3 年度及び令和 4 年度は 5Bq/m³、令和 5 年度は令和 3 年度の伊方越局の最大値である 2.5Bq/m³を確認開始設定値としたが、運用開始以降、本設定値を超過した実績はない。

4.2. 人工ベータ放射能濃度の挙動

伊方発電所から最寄りの観測局であるモニタリングステーション(以下、「MS」という。)の全アルファ放射能濃度と人工ベータ放射能濃度のトレンドを図 3 に、頻度分布を図 4

に示す。

トレンドに関しては、人工ベータ放射能濃度は 0Bq/m³を中心にばらつきが確認できるが、そのばらつきは、ラドン・トロン壊変生成物を主とする全アルファ放射能濃度の測定値が高いときはばらつきが大きく、全アルファ放射能濃度の測定値が低いときはばらつきが小さい傾向にあることを確認した。これにより、本ダストモニタはラドン・トロン壊変生成物の影響を強く受けると考えられる。

頻度分布に関しても、人工ベータ放射能濃度は 0Bq/m³を中心にばらつきが確認できるが、データ数がやや正に偏る傾向がみられた。これは、表 2 の各観測局の平均値からも読み取れる。

モニタリングステーション (MS)

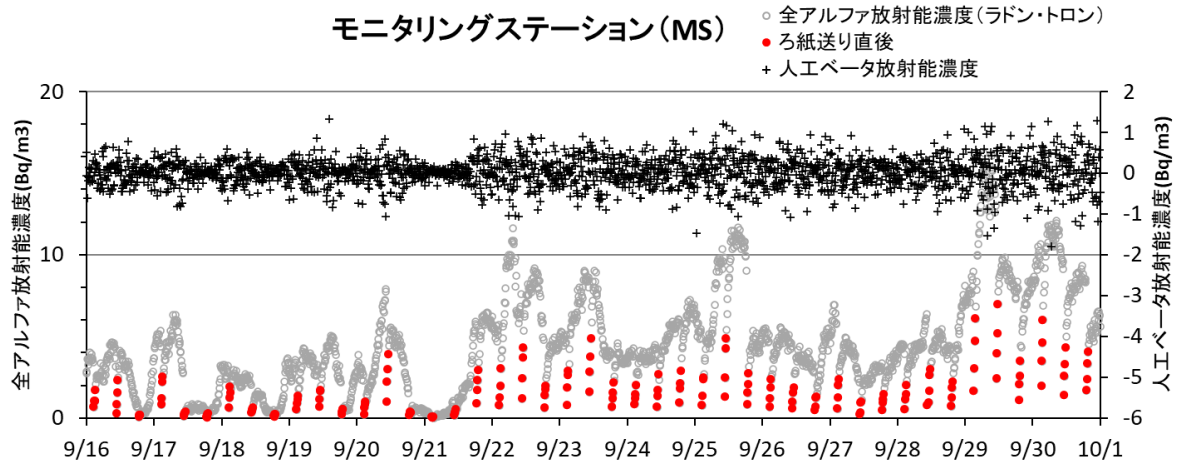


図 5 MSにおけるトレンド(令和5年9月16日～9月30日)

表 3 1集塵あたりの正と負のデータ数の差(個)

	九町越局	湊浦局	伊方越局	加周局
令和4年第4・四半期	3.7	4.2	3.6	3.6
令和5年第1・四半期	4.0	4.7	3.1	4.2
令和5年第2・四半期	4.4	4.1	3.8	4.0
令和5年第3・四半期	3.5	4.9	3.1	2.9
平均	3.9	4.5	3.4	3.6

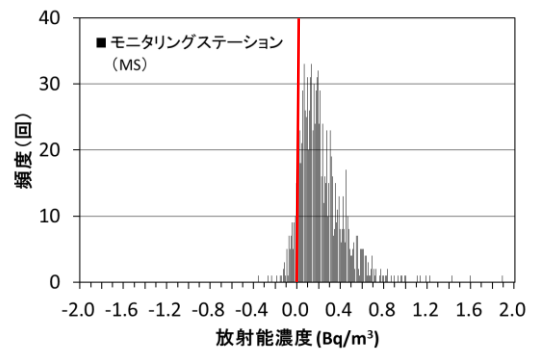


図 6 MSにおける頻度分布 ※ろ紙送り直後を抽出

4.3. ばらつきの要因

4.3.1. 構造的な要因

4.2.に記載した頻度分布の結果を受け、直近1年間の各四半期における人工ベータ放射能濃度の正と負のデータ数の差を確認したところ、表3のとおりすべての局で正のデータ数が1集塵(8時間集塵:全48データ)あたり約3~4個多い状況であった。

また、MSの令和5年9月後半の全アルファ放射能濃度と人工ベータ放射能濃度のトレンドを図5に示し、全アルファ放射能濃度のうち、ろ紙送り直後の4データ(20分後から50分後)をマーキングした。ろ紙送り直後は、全アルファ放射能濃度がろ紙送り直前の濃度に到達するまで時間を要しており、かつ濃度が上昇し続けていることから、ろ紙送り機構がばらつきに影響を及ぼしている可能性が示唆された。そこで、ろ紙送り直後の4データ(20分後から50分後)を抽出

し、図6のとおり頻度分布を作成したところ、正のデータ数が約90%を占めることが判明した。

4.3.2. 環境的な要因

4.2.に記載したトレンドの結果を受け、主な全アルファ放射能濃度であるラドン・トリウム壊変生成物は、気象条件により変動することが知られていることから、風向、風速、感雨の3条件で全アルファ放射能濃度と人工ベータ放射能濃度の関係を考察した。

図7にMSにおける風向との関係を示す。風向が北寄り(北西、北北西、北)の場合、全アルファ放射能濃度の測定値が上昇する傾向にあることが分かった。これは、地表面からのラドン・トリウム壊変生成物の放出に加え、中国大陸からのラドン・

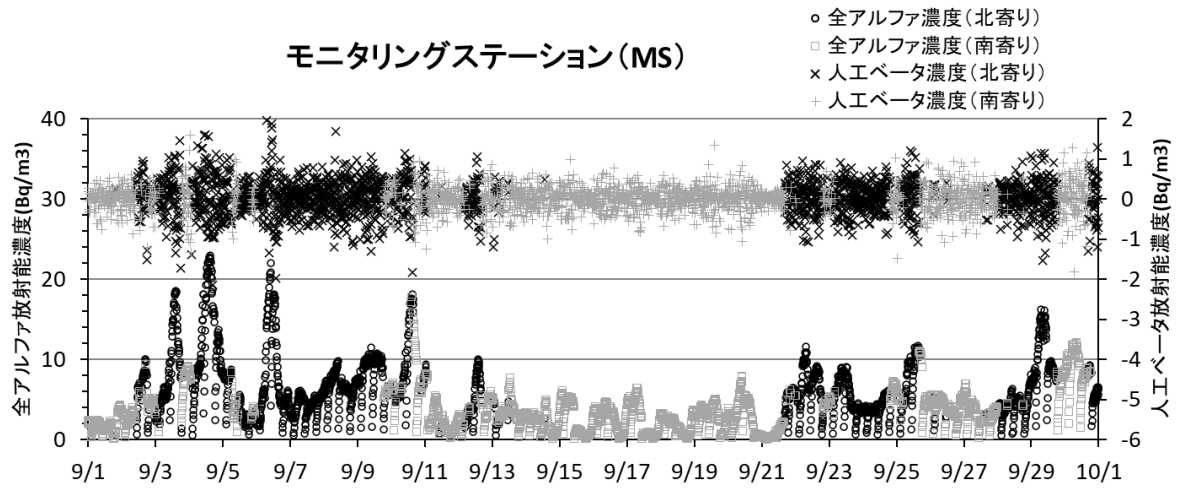


図7 MSにおける風向トレンド(令和5年9月)

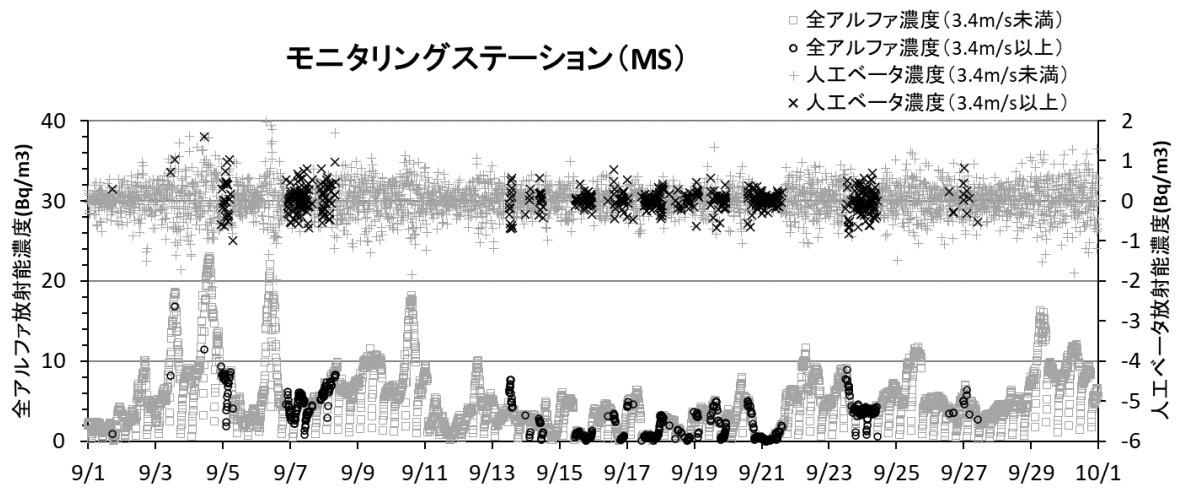


図8 MSにおける風速トレンド(令和5年9月)

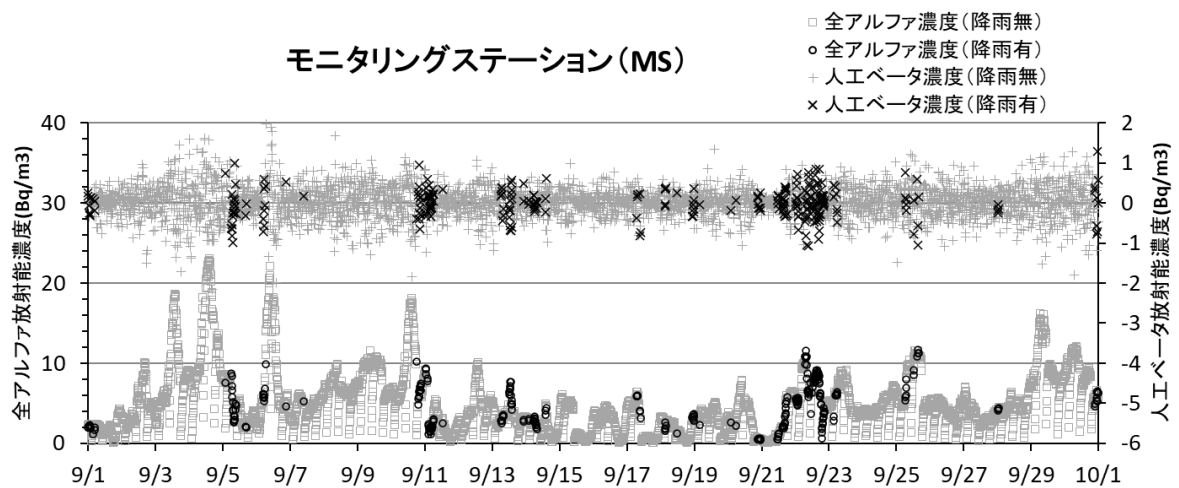


図9 MSにおける感雨トレンド(令和5年9月)

トロン壊変生成物の飛来によるものと考えられる。これに伴い、人工ベータ放射能濃度のばらつきが大きくなると考えられた。

また、末光らの報告³⁾では、伊方地域では年間を通じて、北寄りの風(北西, 北北西, 北)が約6割, 南寄りの風(南東, 南南東, 南)が約3割を占めており、人工放射性核種の弁別に当たっては気象条件を考慮して判断する必要がある。

次に、図8にMSにおける風速との関係を示す。ビューフォート風力階級において弱風とされる風速3.4m/s未満の時、全アルファ放射能濃度の測定値が上昇する傾向にあることが分かった。これは、大気拡散が抑制され、ラドン・トロン壊変生成物が地表面付近に滞留しているものと考えられた。

対称的に、風速3.4m/s以上では、大気拡散が促進され、全アルファ放射能濃度の測定値が低下する傾向にあることが分かった。これに伴い、人工ベータ放射能濃度のばらつきが小さくなったものと考えられた。

図9にMSにおける感雨との関係を示す。感雨有の時、全アルファ放射能濃度の増加が抑制される傾向にあることが分かった。これは、大気浮遊じんが雨粒と共に降下することによる洗い流し効果により、大気浮遊じんの量が減少することで、全アルファ放射能濃度の測定値が低下するものと考えられた。

6. まとめ

ダストモニタによる大気浮遊じん測定の結果を基に、人工ベータ放射能濃度がばらつく要因を検討した結果、測定機器の構造的な要因と環境的な要因が明らかになった。前者はろ紙送り機構によりやや正のデータに偏った頻度分布になること、後者は表4のとおり風向、風速、感雨の各気象条件に伴い、ばらつきに特徴がみられることが確認できた。なお、各条件が複合的に絡み合うため、総合的にばらつきの要因を判断する必要がある。

平常時モニタリングの際は、今回得られた知見を踏まえて、人工放射性核種の弁別を適切に実施し、伊方発電所の異常の早期発見に努めたい。

7. 参考文献

- 1) 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), 原子力規制庁監視情報課, 2018
- 2) 放射線による健康影響等に関する統一的な基礎資料, 令和3年度版, 環境省, 2021
- 3) 末光篤, 田邊宗一郎, 和氣誠, 宇高真行, 青木平八郎, 安永章二, 愛媛県原子力センター所報, 3(2014)1

表4 各気象条件における環境的な要因

	気象条件	人工ベータ放射能濃度のばらつき
風向	北寄りの風(北西, 北北西, 北)	ばらつき大
風速	3.4m/s 未満(弱風)	ばらつき大
感雨	感雨あり	ばらつき小