

積雪期の空間線量率

—— 2つのシングルチャンネル波高分析器を用いた
自然変動成分の推定 ——

霜鳥 達雄・鈴木 修・阿部 智夫

Estimation of the Natural Variation of Exposure Rate by using double SCA Counting Rate in the Snow Season

Tatsuo Shimotori, Osamu Suzuki, Tomoo Abe

In this winter we tried to estimate the natural variation of the exposure rate at the Nishiyama monitoring station. The method³⁾ is called "2-SCA method" by us and it estimates natural component of the exposure rate using double SCA counting rate; these discrimination levels of SCA are set 1.65~2.0 MeV and 2.5~2.7 MeV respectively, the former is an index of rise in exposure rate with precipitation and the latter is an index of shielding effect of snowdrifts on stationary component of exposure rate.

The results of our test are that

- 1) 2-SCA method is an effective means to estimate natural component of exposure rate in the snow season. The maximum deviation between observation and estimation is $0.64 \mu\text{R/h}$ against the variation of exposure rate from $1.2 \mu\text{R/h}$ to $10.0 \mu\text{R/h}$. We think it can be decreased less than $0.5 \mu\text{R/h}$ by stabilization of measurement system and more appropriate setting of discrimination level of SCA.
- 2) If there were artificial irradiation, using 2-SCA method we can separate or detect the artificial component from observations. If low energy gamma ray it appears that observations are greater than estimations and deviations between them are artificial component. Containing high energy gamma ray, taking care of stationary component calculated by (2) we can detect artificial component.

1 はじめに

新潟県では昭和58年10月から、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所の周辺で、テレメータシステムを使用した空間線量率の測定を実施している。その結果、空間線量率の自然変動の特徴は、積雪期の長期的な低下と降水に伴う短時間の上昇であり、その変動は積雪のない頃の晴天時にくらべて、4分の1から3~4倍の範囲にわたっている¹⁾。

これらの自然変動を含む空間線量率の測定結果から、原子力施設からの寄与分を検出する試みとして、シングルチャンネル波高分析器(Single Channel pulse height Analyzer; 以下「SCA」という。)の計数を用いる方法²⁾が利用されている。これは、SCAのエネルギー下限レベルを検出対象のガンマ線エネルギーより高く設定し、そ

の計数と自然変動の空間線量率との関係を求めておくことにより施設寄与を推定するものである。

しかし、この方法では積雪期においてはよい結果が得られないので、著者らは積雪期の環境ガンマ線スペクトルの測定結果から、積雪期の自然変動を推定する方法(以下「2-SCA法」という。)を提案した³⁾。そこで、この推定法の有効性の評価および空間線量率の人工寄与分の分離評価の可能性を検討するため、積雪期間に西山局において2-SCA法を試みた。また、人為的に放射線を照射し実測値と推定値とを比較した。その結果、若干の知見が得られたので報告する。

2 測定方法

放射線の測定には、アロカ(製)温度補償型 $2''\phi \times 2''$ NaI(Tl)シンチレーション検出器を使用した。検出器

は地上 1.5 m に設置してあり、検出器周辺の温度は 35℃ で一定に保たれている。線量率変換は Discrimination Bias Modulation 方式である（以下空間線量率を「DBM」と略す）。SCA は 2 台設置してあり、そのエネルギー範囲は、それぞれ 1.65～2.0 MeV, 2.5～2.7 MeV に設定した（以下これらの計数率を「SCA1」, 「SCA2」という。）。降水の有無は、(株)小笠原計器製作所製電極面短絡電流方式の感雨計を使用した。

これらの測定は、計測時間を 10 分間として連続しておこなわれ、その結果はテレメータシステムで放射線監視センターに転送される。

3 2-SCA 法³⁾

空間線量率は、測定地点周辺での放射能の分布によって決まる。自然放射能の分布は、その位置や強度が時間的に変化しない恒常的なものと、時間的に大きく変動するものとに分類することができる。恒常的なもの（以下「恒常成分」という）は、大地や周囲の建物等に含まれているウラン系列、トリウム系列、⁴⁰K などの放射能であり、変動するもの（以下「変動成分」という）は、降水や大気に含まれているラドン娘核種などである。降水に含まれて地表に到達したラドン娘核種は、見かけの半減期約 30 分で減衰する。大気中のラドン娘核種の濃度は、気団の性質や大気安定度によって大きく変化するが線量率への寄与は小さい。

空間線量率も放射能分布と同様に

$$[\text{空間線量率}] = [\text{恒常成分}] + [\text{変動成分}] \quad (1)$$

のように表わすことができる。

晴天時の環境ガンマ線スペクトルの測定例を Fig. 1 に示した。図から ⁴⁰K (1.461 MeV) とトリウム系列の ²⁰⁸Tl (2.614 MeV) のピークが明らかである。積雪があると、エネルギー範囲全体で計数が低下するが、その割合はエネルギーによって少しずつ異なっている。また、降水時には低エネルギー側の計数が増加し、²¹⁴Bi (1.765 MeV) のピークが顕著となる。

晴天時の測定値は、ほとんどが恒常成分のものと考えられる。したがって、空間線量率と SCA2 および SCA1 と SCA2 の間には一定の関係を期待することができる。

$$DBM_F = f_1 (SCA2) \quad (2)$$

$$SCA1_F = f_2 (SCA2) \quad (3)$$

恒常成分の指標を ²⁰⁸Tl とし、SCA2 のエネルギー領域を 2.5～2.7 MeV に設定したのは、①測定に際しエネルギーが高いために、環境中のほかの核種の妨害を受けることが少ない、②降水によってもたらされる量がほか

のラドン娘核種に比べて微量だからである。

降水時のスペクトルは、恒常成分のスペクトルに降水に含まれている自然放射能の寄与が付加されたものである。ここで、降水成分のエネルギー分布が降水毎にあまり変化しないものとする、空間線量率の上昇分 (ΔDBM) と SCA1 の上昇分 ($\Delta SCA1$) との間には一定の関係があるものと考えられる。

$$\Delta DBM = f_3 (\Delta SCA1) \quad (4)$$

ここに

$$\Delta DBM = DBM_R - f_1 (SCA2_R)$$

$$\Delta SCA1 = SCA1_R - f_2 (SCA2_R)$$

以上のことから、関数 f_1 , f_2 および f_3 がわかれば、SCA1, SCA2 を用いて、空間線量率の自然変動成分 (DBM_E) を次式で計算することができる。

$$\begin{aligned} DBM_E &= f_1 (SCA2) + \Delta DBM \\ &= f_1 (SCA2) + f_3 (SCA1 - f_2 (SCA2)) \end{aligned} \quad (5)$$

4 結果と考察

4.1 2-SCA 法

昭和 60 年 12 月から昭和 61 年 3 月の測定結果に、計測時間を 1 時間として 2-SCA 法を適用した。12 月中旬には降雪があり、数回の寒波の到来とともに積雪は増加した。最高積雪は 2 月 10 日の 146 cm であった。また、消雪は 3 月 20 日過ぎであった。空間線量率は積雪とともに変化し、12 月初旬では 4.9 μ R/h であったが、2 月には約 25% の 1.2 μ R/h にまで低下した。降水に伴う上昇では 1

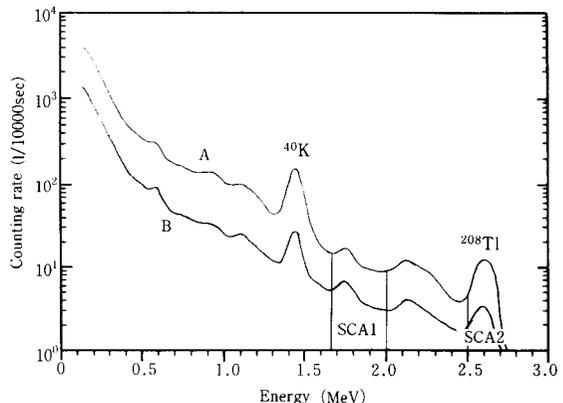


Fig. 1 Comparison of the environmental gamma ray spectrum on a fine day (A: without snow; B: snowdrifts equals to 150cm) and the discrimination level of the single channel pulse height analyzer.

月5日の10.0 $\mu\text{R}/\text{h}$ が最高値であった。

4.1.1 関数 f_1, f_2, f_3 の推定

晴天時の DBM_F と SCA2_F および SCA1_F と SCA2_F との関数 f_1, f_2 を推定するため散布図を作成した。結果を Fig. 2.1 および Fig. 2.2 に示す。図から、関数 f_1, f_2 は1次式で表わしてよいと考えられる。これらの係数は最小二乗法を用いて決定した。本来、最小二乗法は独立変数には誤差を含まないことを前提とした方法であるので、 SCA2 のような統計誤差 ($\sqrt{n}/n : 0.04 \sim 0.09$) を含むものに対しては適当な方法とはいえない。しかし、ほかに適切な方法がないことから最小二乗法を採用した。

関数 f_3 を推定するために降水時の ΔDBM と ΔSCA1 の散布図を作成した。結果を Fig. 2.3 に示す。図から、関数 f_3 は1次式で表わしてよいと考えられる。係数は f_1, f_2 と同様に最小二乗法で決定した。

「晴天」は計測時間内の感雨計出力が「無」のときとしている。しかし、Fig. 2.1 や Fig. 2.2 にみられるように数は少ないが DBM_F や SCA1_F が上方にはずれているものがある。これは、直前の降水の影響が残っていたためである。

4.1.2 関数 f_1, f_2, f_3 について

関数 f_1, f_2, f_3 はともに1次式で表わされるものと考えられた。

エネルギーが $\text{SCA1}, \text{SCA2}$ 領域のガンマ線に対する積雪の線減衰係数は、積雪の密度を0.4とすると、 $\mu_{1.75\text{MeV}} \sim 0.0214 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{2.5\text{MeV}} \sim 0.0446 \text{ cm}^{-1}$ である⁴⁾。したがって減衰効果の比 ($\exp(-\mu_{1.75\text{MeV}})/\exp(-\mu_{2.5\text{MeV}})$) は1.02となり、これらのガンマ線はほとんど同じ程度の減衰を受けることになる。これは、 f_1 において SCA1 と SCA2 が比例することを示すものと考えられる。

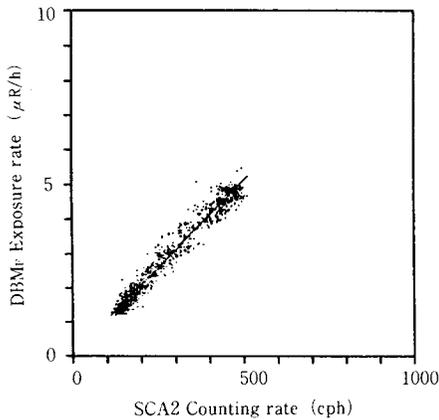


Fig. 2.1 Relationship between DBM_F exposure rate and SCA2_F counting rate on a fine time.

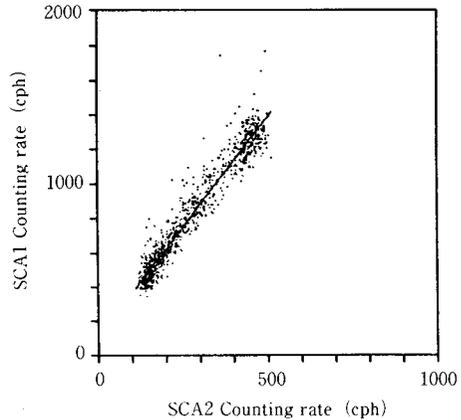


Fig. 2.2 Relationship between SCA1 counting rate and SCA2 counting rate on a fine time.

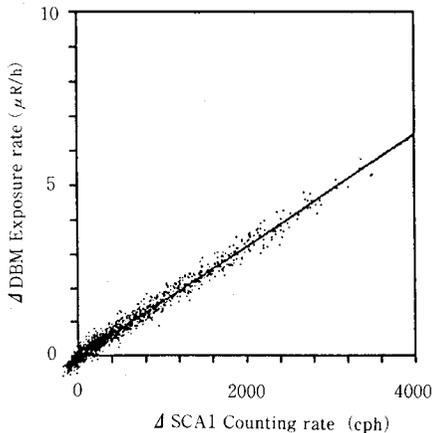


Fig. 2.3 Relationship between ΔDBM exposure rate and ΔSCA1 counting rate on a rainy time.

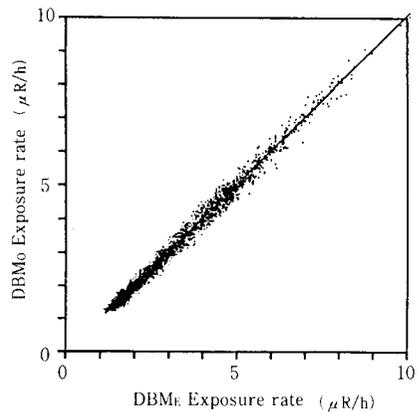


Fig. 2.4 Relationship between DBM_O and DBM_F . DBM_O stands for observation; DBM_F stands for estimation calculated by (5).

DBM方式の空間線量率は、

$$DBM_o = \int_{E_{min}}^{E_{max}} G(E) \cdot N(E) dE \quad (6)$$

と表わされる⁹⁾。ここに、

- N(E) : スペクトル分布
- G(E) : スペクトルを線量へ変換するための荷重関数。検出器の形状や寸法で決定される。
- E_{min}, E_{max} : エネルギー測定範囲。E_{min} ≈ 0.05 MeV, E_{max} = 3.0 MeV。

積雪期のスペクトル分布 N(E) は Fig.1 に示したように、計数は小さくなるがその形状はほとんど変化していない。したがって、(6)式で G(E) は既知であることから空間線量率も SCA2 と近似的に 1 次式で表わされることになるものと考えられる。

降水時の ΔDBM と ΔSCA1 の関係も 1 次式で表わされた。これは、スペクトルの変化の形状が降水毎で相似していること、すなわち、降水に含まれる放射能の組成に大きな変化がないことを示すものと考えられる。

4.1.3 空間線量率の推定値と偏差

関数 f₁, f₂, f₃ を用いて(5)式により空間線量率の推定値を計算した。実測値(DBM_o)と推定値(DBM_E)の関係を図2.4に示す。これらは、DBM_o = -0.019 + 1.01 × DBM_E, 相関係数 0.995 とよく一致している。

Fig. 3.1 には、昭和61年1月1日から20日の時系列変化を示した。上段には偏差(DBM_o - DBM_E)が示して

ある。また、Fig.3.2には同じ期間の降水量と積雪量とを示した。SCA2は晴天が続いても小さな変動をしている。これは、統計変動によるものと思われるが、この変動はDBM_Eにあまり影響していない。これは、2-SCA法に「復元力」— SCA2が大きめに測定された場合は、(5)式の第1項(f₁(SCA2))は増加するが、第2項f₃(SCA1-f₂(SCA2))は、逆に小さな値となる—があるためと考えられる。

偏差は0を中心とした左右対称の分布をしており、最大偏差は0.64 μR/hであった。Fig. 3.1の時系列変化を見ると、1月の前半には正の偏差が連続して現われている。そこで、対象期間の前半と後半で偏差の分布を調べその結果を図4.1に示した。図から、分布の形は同じであるが中心が異なっていることがわかる。これは、時間によって関数 f₁, f₂, f₃ の係数が違うことを示唆するものである。

期間を分割してひと月毎に2-SCA法を適用し、関数を比較した。関数 f₁, f₂ を Fig.4.2 に示す。なお、関数 f₃ は区別不可能なほど一致していた。また、この場合の最大偏差は0.48 μR/hであった。f₁, f₂ は、12月と3月で平行ではあるが切片が違っている。1月はこれらの中間にある。2月の直線がほかの月と大きく異なっているが、積雪の状態に変化が少なく測定値の変動値が小さいためにこのような結果となったものと考えられる。

係数が異なる理由としては、環境ガンマ線場の変化および測定系の経時変化のことが考えられる。環境ガンマ線場の変化は、検出器周辺での建築物の増改築、盛土

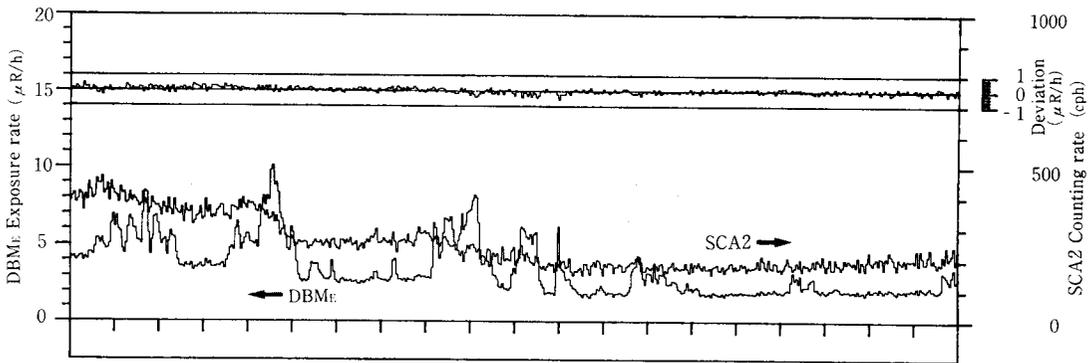


Fig.3.1 Time serial data of SCA2 counting rate, DBM_E exposure rate and deviation (DBM_o - DBM_E) from Jan. 1, 1986 to Jan. 20.

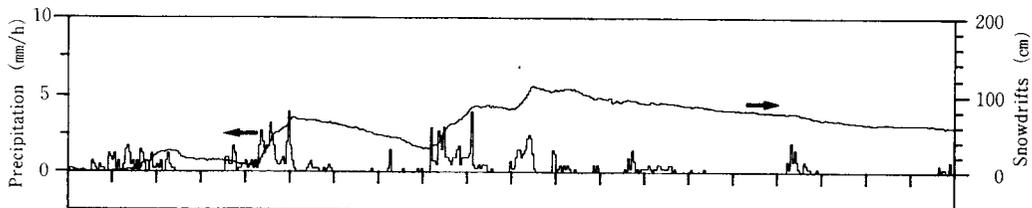


Fig.3.2 Time serial data of precipitation and snowdrifts.

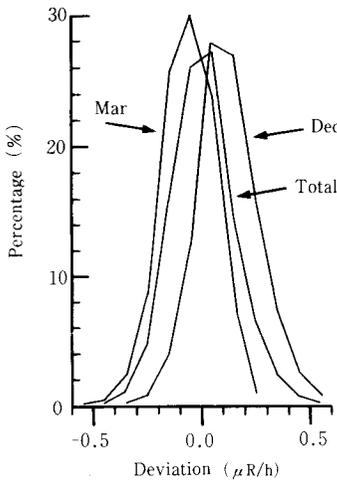


Fig. 4.1 Comparison of the distribution of deviation.

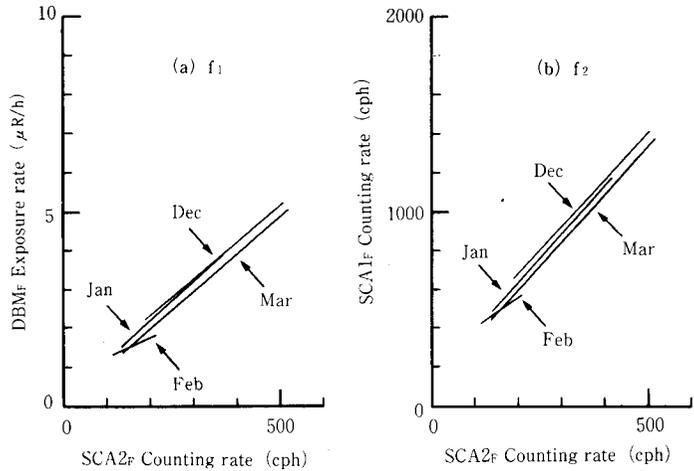


Fig. 4.2 Comparison of the function f_1 and f_2 when 2-SCA Method is applied to Dec., Jan., Feb. and Mar. respectively. (a): function f_1 ; (b): function f_2 .

や舗装などによって引き起こされるが、西山局ではこのようなことはまったくなかった。測定系の経時変化はスペクトル測定の際に、ピークチャンネルの移動がみられたこともあり十分考えられることである。実際、11月下旬と4月上旬の積雪がまったくない期間で晴天時のSCA2を比較すると、4月上旬の方が約10 cph大きくなっている。したがって、測定系のゲインなどのドリフトによってSCAのエネルギー範囲が変化し、その結果 f_1 , f_2 の切片の違いを生じたものと考えられる。

偏差が大きいきの測定値をみると、いずれもSCA2の値が前後の値に比べて大きく変化している。これは、放射線測定に特有な統計変動と思われる。この影響を小さくするには測定計数を大きくすればよく、①検出器の効率を大きくする②計測時間を長くする③SCAの範囲を広げることが考えられる。しかし、①は測定系の更新の際に考えるべきことであり②は放射線監視のうえからは望ましいことではない。③が最も実用的な方法であるが、計数のもつ「恒常成分」、「変動成分」という意味を失わないように最小限にとどめるべきであろう。

4.2 照射試験

人工的な放射線が入射したとき、これらは自然変動成分に付加されて測定される。このとき、自然変動成分を推定することができれば、人工寄与分を分離することが可能である。2-SCA法では、SCA1およびSCA2のエネルギー情報を利用して自然変動成分を推定しているので、入射放射線のエネルギー分布によって実測値と推定値には次のような違いが現われることが推測できる。

ケースⅠ SCA1領域より小さい場合

推定値は、自然変動成分を正しく予測するが、実測値は低エネルギー成分の寄与によって上昇する。

したがって 実測値 > 推定値 となって現われる。原子力発電所の場合、通常運転で放出される可能性があるのは、 ^{131}I および Xe などの希ガスである。これらのガンマ線エネルギーは、ほとんどがSCA1領域より小さいのでこのケースに含まれることになる。

ケースⅡ SCA1領域を含みSCA2領域より小さい場合

推定値は式(3)をつうじて大きくなるが、式(2)で計算される恒常成分は変化しない。実測値との差は、エネルギー分布が降水放射能の分布とどのように違うかで決まる。

ケースⅢ SCA2領域を含む場合

式(2)で計算される恒常成分が大きくなる。推定値と実測値との差は低エネルギー側のスペクトルが環境ガンマ線スペクトルとどのように違うかで決まる。

そこで、ケースⅠ～Ⅲに対する検討を行うため、昭和61年2月12日に照射試験を行った。照射線源はケースⅠ～Ⅲに対して ^{137}Cs と ^{60}Co 、 ^{226}Ra 、酸化トリウムを使用した。照射試験中には降雪があり、空間線量率はわずかながら変動していた。ここでは10分間計測値で比較したが、関数 f_1 , f_2 , f_3 の係数は計測時間を1時間として求めたものをそのまま使用した。測定結果をFig. 5に示した。

ケースⅠに対応する ^{137}Cs , ^{60}Co の場合は、実測値 > 推定値となり人工寄与分をよく分離できた。ケースⅡの ^{226}Ra の場合は、実測値と推定値はほとんど一致した。これは、降水放射能と ^{226}Ra のエネルギー分布が似ているためと考えられる。ケースⅢの酸化トリウムの場合には、

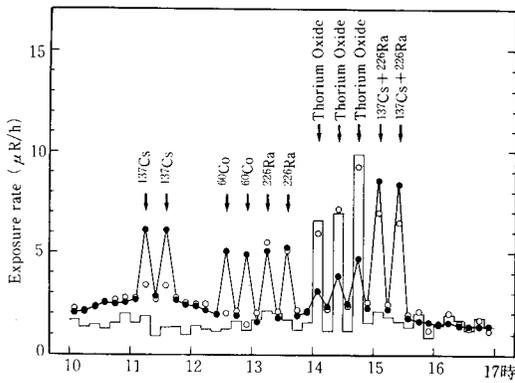


Fig. 5 Time serial data of exposure rate during artificial irradiation. (61/2/12)
 (● : observation ; ○ : estimation ; □ : stationary component calculated by (2))

恒常成分が大きく増加している。推定値 $>$ 実測値となるのは、関数 f_1 は SCA2 と恒常成分（トリウム系列 + ウラン系列 + ^{40}K ）との関係を表わしているのに対し、照射はトリウム系列のみであり、低エネルギー成分が恒常成分に比べて少ないからである。 ^{137}Cs と ^{226}Ra を同時に照射したときの实測値と推定値の差は、 ^{137}Cs による上昇分であった。これは、空間線量率の変動の激しい降水時にケース I に相当する人工放射線の入射があっても正しく分離できることを示している。

5 ま と め

昭和61年の積雪期に西山局において2-SCA法を試み次の知見が得られた。

(1) 2-SCA法は積雪期の空間線量率の自然変動成分を推定するのに有効である。最大偏差は1.2~10.0 $\mu\text{R}/\text{h}$ の自然変動に対して0.64 $\mu\text{R}/\text{h}$ であった。偏差は、測定系の経時変化や計数測定の際の統計変動によって大きくなるが、測定器の安定化をはかりSCA2領域を適切に設定することにより最大偏差を0.5 $\mu\text{h}/\text{h}$ 以下にすることができると考えられる。

(2) 人工的な放射線の入射に対しては、低エネルギーの場合には実測値 $>$ 推定値となり、人工寄与分を分離することができる。高エネルギー成分を含む場合でも、恒常成分をみることにより人工放射線を検出することが可能である。なお、これらは降水で空間線量率が変化しているときでも同様である。

参 考 文 献

- 1) 新潟県, 東京電力株式会社: 柏崎・刈羽原子力発電所周辺環境放射線監視調査結果報告書(昭和59年度)
- 2) 森内茂: *Radioisotopes*, **28**, 48 (1979).
- 3) 鈴木修: 新潟県公害研究所研究報告, **10**, 31 (1985).
- 4) 例えばアイソトープ手帳, 107 (1980).
- 5) 森内茂: *JAERI 1209* (1971).