

面的除染効果の推定方法（KEK方式）

2013年1月7日

高エネルギー加速器研究機構

平山 英夫

1. はじめに

放射性核種からの被ばくを少なくする方法としてよく知られて3原則は

- (1) 距離
- (2) 時間
- (3) 遮蔽

である。点状の放射性核種から放出される放射線は、どの方向にも同じ割合で放出されるために、距離の2乗で単位面積当たりに到達する放射線の数が減少する。例えば、10cmの位置での線量率と100cmの線量率を比較すると、100cmの位置では、10cmの位置の1/100になる。これが(1)の距離である。被ばく線量は、単位時間当たりの線量（線量率）にそこでの滞在時間を掛けたものである。これが(2)の時間である。距離、時間でも必要な減少を達成できない場合には、線源との間に放射線を減らす物質（遮蔽材）を設置する。これが(3)に遮蔽である。面的除染とホットスポット除染を理解するには、(1)と(2)の観点から見る必要がある。

2. ホットスポット¹とは

福島をはじめとして様々な場所（例えば、雨樋の下や、雨水がたまりやすい場所）で、地面近くで周辺より遙かに線量率が高い、いわゆる「ホットスポット」が検出されている。線量率の値が大きいことから、その影響を心配する声が聞かれる。ホットスポットが見つかった場合の対応については、後で述べるが、その前に「ホットスポット」による被ばくについて理解しておく必要がある。ホットスポットは、地面等近くで、周辺より明らかに線量率が高いために、地面近くの測定により比較的容易に見つけることができる。一方、地面から離れた高い場所での測定で見つけることは難しい。逆に言うと、ホットスポットは、その名前からも判るように放射性核種の濃度が高い相対的に狭い領域であり、その影響はホットスポットの近くに限定される。線量率が高いホットスポット近辺に長時間滞在することは、実際上考えにくく、(2)の観点から被ばくという点では、ホットスポットの影響は相対的に小さいと考えられる。

ホットスポットからの距離による線量率の変化は、ホットスポットの広さにより異なる。

¹ 周辺の領域より線量率の高い地域もホットスポットと言われている場合があるが、このような場合は、「ホットエリア」という方が適切と思われる。

第1図に、Cs-134とCs-137のホットスポットの大きさ(半径, cm)と5cm高さでの線量率と100cm高さでの線量率の比の関係を示す。土壌中への分布は、土壌中鉛直分布を示すパラメータ β^2 を現在の平均的な値とされている $1(\text{g}/\text{cm}^2)$ の場合と、雨樋の下などの様にほぼ一様に表面から5cmの領域に放射性核種が分布している場合を示している。ここで示している結果は、ホットスポットからの寄与のみを考えているので、5cm及び100cmでの線量率は、ホットスポットから十分離れたホットスポットからの影響が無い位置での同じ高さの線量率を差し引いたものである。第1図の結果を使えば、ホットスポットが見つかった場合に、除染の対象となるホットスポットの大きさを推定することができる。

3. 面的汚染の影響

線量評価の基準となっている地表面から1m高さでの線量率の主要な要因は、汚染が樹木や建物といった地表面より高い場所にはない場合には、ホットスポットに比べると遙かに放射性核種の濃度は低くても周辺に広く分布している汚染によるものである。低い濃度であっても広く汚染がある場合には、1m高さでの線量率が高くなることは、以下の様に考えると理解できる。広い領域の汚染が広がっている場合、評価点からの水平距離を $r(\text{cm})$ とすると、そこからの線量率への寄与は、 $1/(4\pi r^2)$ になるが、同じ距離にある半径1cm幅のリング状の領域の面積が πr^2 になるため距離による減少は相殺され、どんなに遠方でも一定の寄与があることになり、汚染の領域が広いほど線量率が高くなる。現実には、空気があるために、遠方からの γ 線は、空気によって散乱・吸収されることから、遠方ほど寄与が減る。

基準となる1m高さでの線量率の主要な寄与が面的汚染であることを考えると、線量率を下げするためには、面的な除染が必要であると言える。

4. 面的除染の効果を事前に推定する方法 (KEK方式)

一様な密度でCs-134が広く分布している場合に、どのような角度の光子(Cs-134から放出されその後散乱や吸収を受けなかった「直接線」と空気や土壌で散乱された後、評価点に達する散乱線を総称して「光子」という。)が線量率に寄与しているかということを第2図に示す。角度 θ は、第3図に示すように、0度が地表面から上部、180度が上部から地表面に対応している。0度が90度以上の角度は、空気中での散乱により上方から評価点に達するいわゆる「スカイシャイン成分」であるが、Cs-134が地表に分布している場合には、その割合は1割程度であり、90度以下の角度で入射する光子を除くと、完全な除染ができた場合の線量率を推定することができる。

(1) 90度以下の角度で入射する光子の寄与を除く方法

Cs-134あるいはCs-137からの γ 線及びそれらが地表面に分布している場合の光子の平行ビームが垂直に鉛に入射したときの減衰率を第4図に示す。図から判るように、3cmの鉛で1/10に、5cmの鉛で1/100以下の線量率になることが判る。従って、線量計の下面及び側

² β は、地表面から見た土壌中の放射能濃度が指数関数的に減少するとした時の減弱距離である。土壌の密度を $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ とすると、 $t(\text{cm}) * \rho(\text{g}/\text{cm}^3) = \beta(\text{g}/\text{cm}^2)$ の深さ $t(\text{cm})$ での濃度は、表面($t=0\text{cm}$)の $1/e$ となる。

面に最低 3cm、可能であれば 5cm の鉛を設置すれことにより、地面からの寄与を実質的に除くことができる。このようなシステムを例えば、50cm あるいは 100cm の高さに設置して、鉛が無い場合と比較すれば、地表面より高い場所に線源がある場合には、そこからの寄与は除外できないので鉛遮蔽内に線量計をおいても減る割合が少なくなる。測定位置が低いと近くにホットスポットがあるとその影響を受けやすい。高いと鉛遮蔽の設置が大変なので、50cm 又は 1m 程度が適切と考えられる。

(2) 除染領域の広さの考慮

(1) の様なシステムで測定した場合には、地面からの寄与はスカイシャイン成分以外は 100%除外されるが、実際には除染する領域は限られている。第 5 図に、地表から 50cm の位置での無限に広がった汚染領域からの線量率に対する半径 $R(m)$ の汚染の領域からの寄与を示す。(1) で得られた地面全域を 100%除染した場合の効果に、対象となる除染領域の実効半径に対応した第 5 図の係数を掛けることにより、おおよその除染の効果を推定することができる。

(3) 除染後の確認

上記の方法で、除染の効果を推定していれば、除染後の測定との対応で、除染が計画通りに行われたことを確認することができると考えられる。

(4) KEK 方式の検証

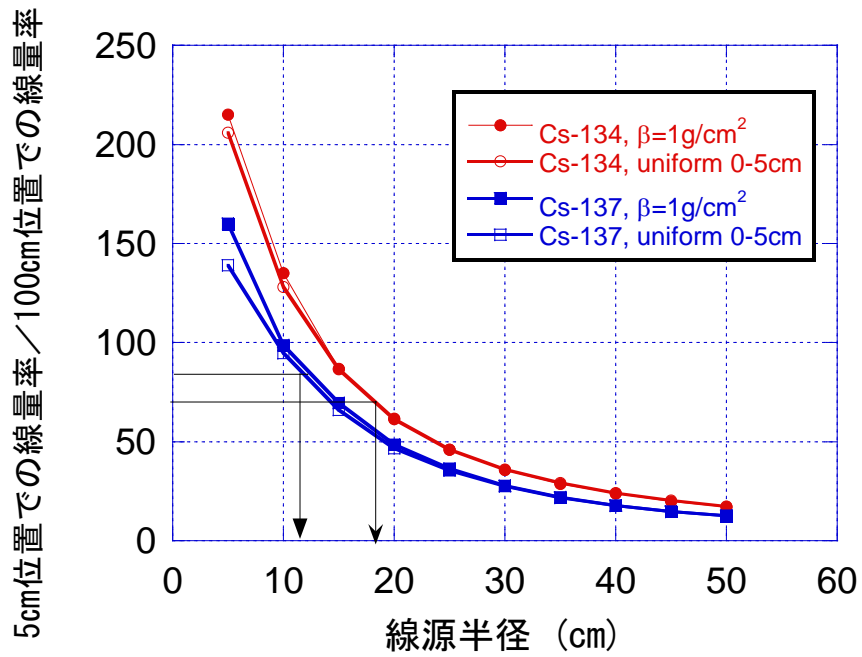
5cm 厚の鉛容器を使用して福島等で行った試験的な測定により、地表以外に樹木などの汚染がない地域では、線量計を容器に入れた場合には、線量率が十数%となり、スカイシャイン成分の寄与に対応する値になることが確認されている。

5. ホットスポット除染の必要性

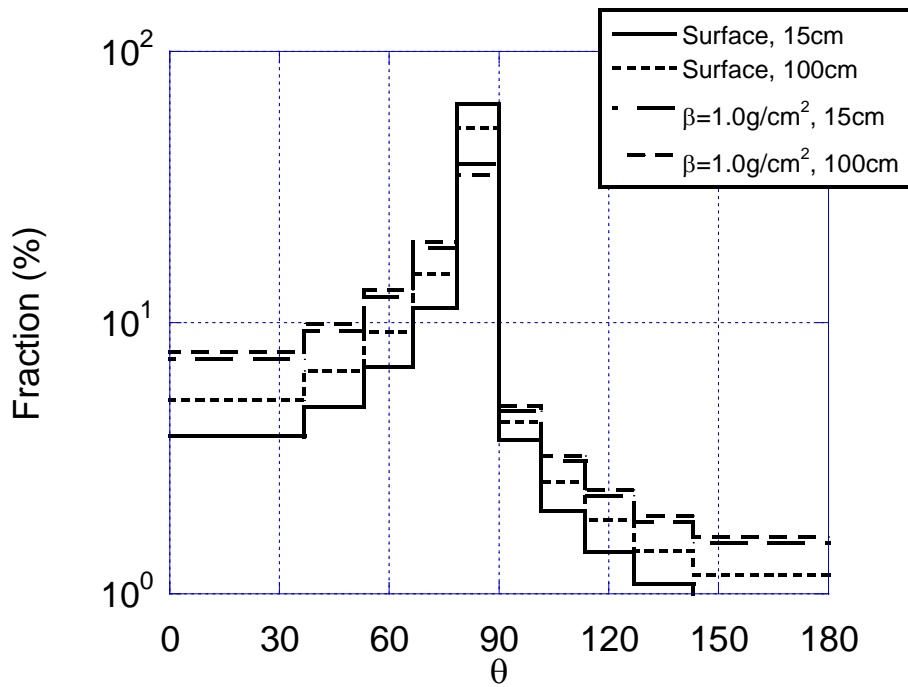
線量評価の基準となる線量率を下げることへの寄与は小さいが、ホットスポットの除染は、環境中の放射性核種を広がりやすい状況から除去するという点で重要な意味を持っている。多くのホットスポットが、雨水その他により特定の箇所に集まったために形成されたとすると、そのまま放置すれば、別の場所に広がる可能性も考えられる。従って、面的除染と同様に、ホットスポットの除染を行う事も必要である。

注：この資料で紹介した計算結果は、電子・光子モンテカルロ計算コード EGS5¹⁾に、面等方線源と単位球検出器を点等方線源と面検出器に置き換える手法²⁾を用いて求めたものである。

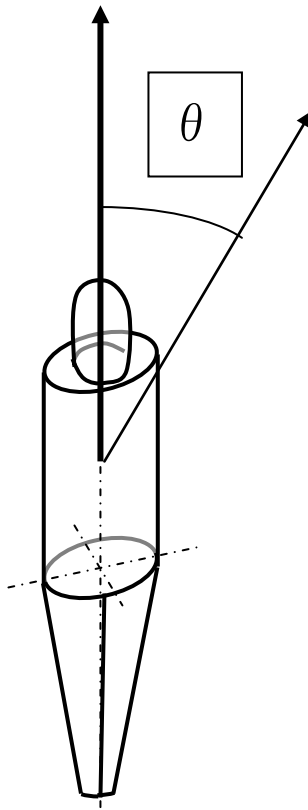
- 1) H. Hirayama, Y. Namito, A.F. Bielajew, S.J. Wilderman, and W.R. Nelson, The EGS5 Code System, KEK Report 2005-8, SLAC-R-730, High Energy Accelerator Research Organization (KEK), Stanford Linear Accelerator Center (SLAC), 2005. number 2004-5 (2005).
- 2) Y.Namito, H.Nakamura, A.Toyoda, K.Iijima, H.Iwase, S.Ban and H. Hirayama, Transformation of a system consisting of plane isotropic source and unit sphere detector into a system consisting of point isotropic source and plane detector in Monte Carlo radiation transport calculation, J. Nucl. Sci. Technol, 49, 167-172 (2012)



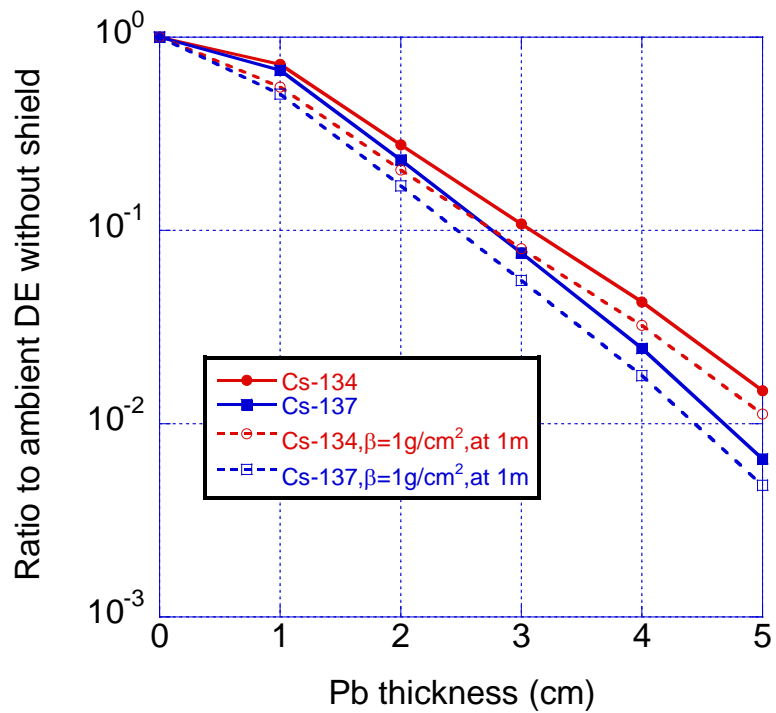
第1図 線量比と線源領域の広さ (cm)



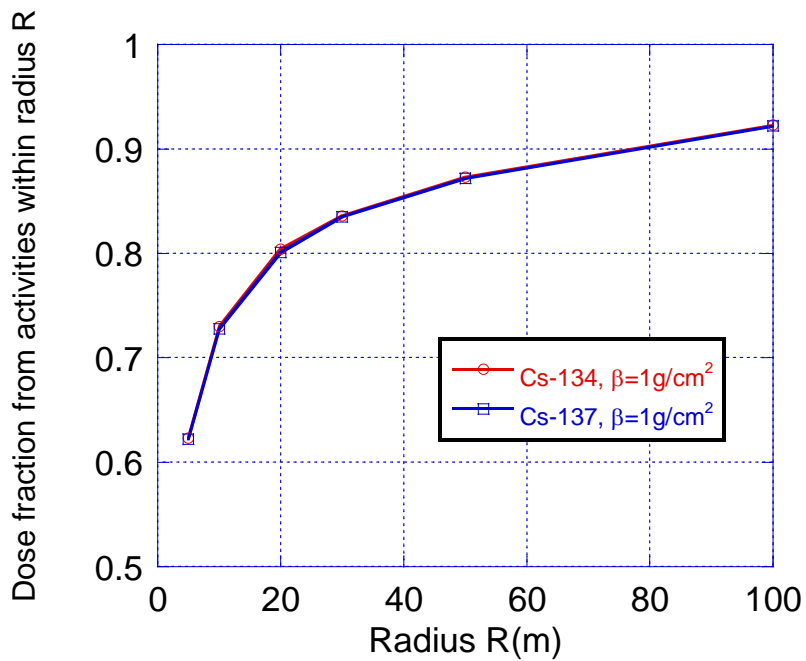
第2図 広く分布したCs-134による
周辺線量当量への各角度区分の寄与率



第3図 ファントムと光子の角度 θ の関係



第4図 Cs-134及びCs-137からの光子に対する鉛の遮蔽効果



第5図 半径R(m)内の放射性核種からの線量寄与率