

報告番号	※ 甲 第 11060号
------	--------------

主 論 文 の 要 旨

論文題目 モニタリングステーション測定値を用いた
核種同定および放射能濃度推定法の開発

氏 名 廣内 淳

論 文 内 容 の 要 旨

原子力発電所からの放射性物質の大気放出を伴う事故時には、公衆の内部被ばく及び周辺の汚染状況を評価するために、人工放射性核種の大気中及び地面上放射能濃度の情報が必要である。しかし福島第一原子力発電所事故（以下、福島原発事故）時には、放射能濃度は限られた場所でしか測定されず、特に事故初期の測定値が少ない。緊急時環境線量情報予測システムによって被ばく線量分布が予測されたものの、放出源情報と大気中放射能濃度を入力・反映することができず、濃度・線量の絶対値は予測できなかった。一方、放射性物質の監視を目的として原子力施設周辺に展開されているモニタリングステーション（以下、MS）では、NaI(Tl)検出器を用いて空間 γ 線線量率及び波高分布（以下、MS測定値）が常時測定され、これら測定値はオンラインで取得できる。福島原発事故時にも周辺の複数のMSでこれらの測定値が得られており、これらの測定値からプルーム中放射能濃度を推定できる可能性がある。しかし今までに行われたMS測定値を用いた放射能濃度推定は、放射性物質が無限平面上に一様に存在する現実とは異なる仮定を用いたものであり、その仮定により生じる不確かさが評価されていない。実際には、放射性物質は大気と地面の両方に存在する可能性があること、さらにMS周囲に建物及び土地の起伏などの幾何学的構造があり、地面に沈着した放射性物質は雨水とともに影響範囲外へ流出するとともに、土壤中へ浸透する可能性がある。これらの影響を考慮した濃度推定を行わなければ、推定値と真の値に差異が生じる。NaI波高分布を用いた濃度推定の他の問題点として、NaI検出器のエネルギー分解能の低さと事故時に放出される核種の種類の多さが挙げられる。これらの問題点により、現在までのNaI波高分布を用いた濃度推定の大半が、他核種からの γ 線の影響をほとんど受けない ^{131}I のみの推定である。そこで本研究では、これらの問題点を解決し、常時測定されているMS測定値を用いて放射能濃度を核種別に推定する手法を開発することを目的とした。この目的のため、① γ 線の伝達及び放射性物質の浸透・流出は自然放射性核種と人工放射性核種間で類似していることを利用し、平常時のMS測定値を用いた浸透・流出特性の評価可能性の検討、さらに幾何学的構造及び浸透・流出の考慮が濃度推定値に与える影響の大きさの評価可能性の検討と、②事故時に測定された波高分布から放射能濃度を核種別に推定するためのエネルギー範囲の設定法及び核種の存在位置の決定法の検討を行った。

始めに、平常時のMS測定値の変動要因を現地での実測を基に定量的に解析・把握(第2章)した後、放射能濃度推定のために必要な浸透・流出特性を平常時のMS測定値を用いて予め評価可能かを検討した(第3章)。測定される線量率は各核種からの線量率寄与の合

計値であり、その線量率寄与は γ 線の物質中での減衰・散乱の大きさを決定する γ 線エネルギー及び線源—検出器間に存在する物質の厚さ・密度に依存するため、MS周囲の地形、建物等の幾何学的構造を考慮し、任意の放射能分布の線量率を計算する必要性が示された。また、降雨後の線量率上昇値の時間変化をラドン壊変生成物である ^{214}Pb と ^{214}Bi の壊変式のみで表記できることに着目し、線量率の時間変化から ^{214}Pb と ^{214}Bi の地面上放射能濃度を核種別に推定する手法を考案した。この手法を静岡県内の隣接するMS間で ^{214}Pb と ^{214}Bi の降下量が同じと見なせる降雨後に測定された線量率変動に適用し、放射性物質の浸透・流出がないと仮定して推定した濃度のMS間の一致度を検討した。その結果、周辺にコンクリートなどの舗装面が多いMSほど、濃度と $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ 濃度比がより小さく計算され、この傾向はMS周囲の浸透・流出特性を反映した結果であると考察した。

この考察と地面上濃度推定値のMS間の差異を利用して、各MSの浸透・流出特性の推定可能性を検討した。 γ 線の減弱の大きさは γ 線エネルギーに依存するため、線量率変動から推定した $^{214}\text{Bi}/^{214}\text{Pb}$ 濃度比が浸透深さ（浸透特性）に応じて異なることを利用して、各MSの浸透深さを推定する手法を考案した。雨水の残存割合は地表面の凹凸等に依存するため、地表面形態毎の放射性物質の残存割合（流出特性）に応じた線量率上昇値のMS間の差異から、地表面形態毎に残存割合を推定する手法を考案した。本研究の対象としたMS周囲の土壌が砂質で類似していたことにより推定した浸透深さのMS間の差は小さく、雨水の流れやすい凹凸の少ない面の残存割合は小さく評価されたことから、本手法で推定した浸透・流出特性はMS周辺環境と矛盾しないと結論づけられた。濃度推定値を浸透・流出特性の考慮の有無で比較し、放射性物質の流出及び浸透が濃度推定値に与える影響の大きさを評価した結果、本研究で対象としたMSでは、濃度推定値は流出を考慮しなければ最大で約40%、浸透を考慮しなければ最大で約30%小さく計算されることを示した。

次に、平常時に測定されるNaI波高分布を用いて、各MSの浸透特性の推定可能性を検討し、MS周囲の地形、建物等の幾何学的構造及び浸透の考慮が濃度推定値に与える影響の大きさを検討した。測定されるNaI波高分布は、線源—検出器間に存在する物質の厚さ・密度に応じてMS毎に異なる。本研究では、 γ 線の伝達過程及び検出器応答を光子輸送計算モデルEGS5を用いて計算し、 ^{214}Pb と ^{214}Bi の光電ピーク部の計数率の実測値と計算値を比較することにより、NaI波高分布から放射能濃度を核種別に推定する手法を考案した。幾何学的構造を考慮することにより、建物による γ 線の遮蔽により光電ピーク部の計数率は無限平面仮定時よりも小さく計算され、本研究の対象としたMSでは、濃度は最大で約30%大きく推定されることを示した。周囲に未舗装面が存在するMSでは浸透を考慮しなければ、推定した濃度とEGS5を用いて再構築した波高分布の200 keV以下の光電ピークを含まないエネルギー範囲（以下、散乱部）の計数率は実測値よりも低くなることが明らかとなった。この点を利用して散乱部の計数率の実測値と計算値を一致させることで、MS毎に浸透深さを決定する手法を考案した。NaI波高分布を用いて推定した浸透深さと線量率を用いて推定した浸透深さは異なった推定原理であるにもかかわらずほぼ同じ値であり、両者ともに合理的に浸透深さを評価できたと結論づけられた。また、NaI波高分布のみからでは浸透・流出特性を区別して評価できないことを指摘するとともに、この問題解決法の一つとして、濃度推定値のMS間の差異を利用できることを示した。

次に、事故時に測定されたNaI波高分布を用いた地面上及び大気中放射能濃度の推定手法を考案し、静岡県と茨城県のMSで福島原発事故後に測定されたNaI波高分布に本手法を適用し、本手法の妥当性、推定限度、及び特徴の評価を行った(第4章)。放射能濃度推定に使用する波高分布のエネルギー範囲(BIN)に含まれる光電ピークを可能な限り一つにし、散乱線のみで構成される範囲を含まないようにBINを設定することにより、推定誤差を低減できることを示した。設定した各BINの計数率の実測値とEGS5で計算した計数率を比較することで、NaI波高分布から計10核種の放射能濃度を推定する手法を考案した。

福島原発事故後のほとんどの期間で、静岡県のMS測定値は地面上に存在する放射性物質からの寄与であると見なせることから、同測定値を対象にNaI波高分布を用いた地面上放射能濃度の推定精度を検討した。 ^{131}I 、 ^{132}I 、及び ^{132}Te の地面上濃度推定値は概ね物理学的半減期に従った減少傾向を示し、実測値との差は約30%であり、さらに ^{134}Cs と ^{137}Cs の推定値と実測値の差も約30%であ

り、本手法で推定した濃度は合理的であると判断された。但し、人工放射性核種の計数率への寄与が自然放射性核種の寄与と同程度の場合、 ^{214}Pb と ^{214}Bi の濃度変動が人工放射性核種の濃度推定値に誤差を生じさせることが明らかとなったものの、人工放射性核種からの寄与が大きい事故時には ^{214}Pb と ^{214}Bi の濃度変動による影響は小さいと結論づけた。

MSで測定されるNaI波高分布は大気中と地面上に存在する放射性物質の両方からの寄与の合計値であるため、大気中と地面上濃度を分別して評価することは通常は困難である。大気中に存在する放射性物質と検出器間の空気の厚さは地面上のものと比較して厚く、放射性物質が大気中に存在する方が散乱部と光電ピーク部の計数率比（散乱部/光電ピーク部）が大きいことをEGS5の計算により明らかとした。この特徴を利用し、NaI波高分布の散乱部と光電ピーク部の計数率の比から放射性物質の大気中と地面上の存在割合を評価し、大気中と地面上放射能濃度を同時に推定する手法を考案した。本手法をプルーム通過による計数率の上昇が複数回見られた茨城県のMSで測定されたNaI波高分布に適用し、本手法の妥当性を検討した。地面上放射能濃度推定値と実測値の差はファクター2程度であり、大気中放射能濃度ではファクター3程度であり、本手法により事故初期時の防護対策の実施を判断するために必要な情報を提供できることを示した。また、本研究では大気中に存在する人工放射性核種（希ガス除く）は同じ割合で地面に沈着すると仮定しており、沈着核種からの寄与により推定精度が低下したと考えられ、核種の特性の違いによる沈着過程の検討により、推定精度の向上が期待できることを指摘した。

本研究では、先ず、本来は現地測定により求めなければならなかった浸透・流出特性を全てのMSで得られる平常時のMS測定値を用いて評価できることを示すとともに、幾何学的構造及び浸透・流出の考慮が濃度推定値に与える影響の大きさを予め評価できることを示した。次に、事故時にMSで測定されたNaI波高分布を用いて大気中及び地面上放射能濃度を同時に推定する手法を開発した。本研究の成果は、全国に展開されているMSの測定値を用いた放射能濃度推定法の基礎となり、防護対策に対して実効性のある事故時に放出された放射性物質のプルーム中と地面上放射能濃度及びその核種組成比を多数の地点について現在よりも迅速に提供できる新たな技術である。