

論文の内容の要旨

論文題目 個人線量計を用いた外部被曝線量評価の不確実性に関する研究

氏名 嶋田 和真

放射線防護において被曝線量限度を定める“防護量”として、ICRP の 1990 年勧告で定義された実効線量が現在の国内法令に取り入れられている。一方、実効線量の基となる各組織や器官の平均線量が実測不可能であることから、実効線量を近似できる実測可能な量を“実用量”として管理に用いてきた。γ線や中性子線などの透過力の強い放射線に対しては、1cm 線量当量と呼ばれる ICRU が定めるファントム内の深さ 1cm の一点の線量を用いて評価し、線量計のエネルギー応答は 1cm 線量当量に合わせるように設計されている。しかし、1cm 線量当量が実効線量の近似値として成立する条件は限定的である。特に緊急時作業では、作業場における放射線入射方向などの情報が不足する事が想定され、個人線量計で測られた値の不確実性は大きいと考えられる。さらに、近年の人間活動の拡大により、高エネルギー放射線に被曝する機会が増加している。大型加速器施設における放射線作業員、航空機乗務員や国際宇宙ステーションに搭乗する宇宙飛行士などが対象として挙げられる。これらの高エネルギー放射線場では、1cm 線量当量が実効線量を過小評価することが知られている。以上の問題を解決し、放射線作業員の安全を担保するために、個人線量計を用いた外部被曝線量評価の不確実性に関する研究を行った。研究内容大きく二つに分かれる。一つ目は、放射線の入射方向の不確実性を考慮し、個人線量計の値から実効線量に相当する全身線量を確率論的に推定する手法を開発し、合理的な外部被曝管理手法を検討する。二つ目は、固体飛跡検出器を用いた中性子個人線量計の高度化を行い、高エネルギー中性子線量評価に伴う不確実性の低減を行う。

個人線量計はそれ自体の検出効率だけではなく、作業員+線量計としてのエネルギー、方向依存性を考慮する必要がある。そこで、実効線量に相当する全身線量 D を新たに定義し、個人線量計の値 f_n から、システム全体としての個人線量計方向依存性 α と、全身線量方向依存性 b_n を用いて全身線量を求める式を $n=4$ の場合に対して(1)式に示す。

$$D = (b_1 \cdots b_4) \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{41} & \cdots & \alpha_{44} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_4 \end{pmatrix} \quad (1)$$

現在の放射線管理において、特殊な場合を除き、線量計は体表面の一方所に着用されている。これは、(1)式において $f_1 \cdots f_4$ のうちただ一つの値を得ていることを示している。つまり、 f_i 以外の値が不明であることから、 D の推定には不確実性が伴う。そこで、放射線量 g_n が非負であるという制約条件を課す。

$$\begin{cases} g_1 = \alpha_{11}f_1 + \alpha_{12}f_2 + \alpha_{13}f_3 + \alpha_{14}f_4 \geq 0 \\ g_2 = \alpha_{21}f_1 + \alpha_{22}f_2 + \alpha_{23}f_3 + \alpha_{24}f_4 \geq 0 \\ g_3 = \alpha_{31}f_1 + \alpha_{32}f_2 + \alpha_{33}f_3 + \alpha_{34}f_4 \geq 0 \\ g_4 = \alpha_{41}f_1 + \alpha_{42}f_2 + \alpha_{43}f_3 + \alpha_{44}f_4 \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

制約条件(2)式は、3次元空間におけるある領域を規定する。この領域は、(2)式において $g_1=0, g_2=0, g_3=0, g_4=0$ とおいて得られる4個の方程式群について、3個の解の集合によって生成される凸集合 F となる。いま、 f_1 が観測されたとき、全身線量 D がある設定値 d_0 を超える事を示す不等式を考える。

$$D \geq d_0 \quad (3)$$

$D=d_0$ によって与えられる3次元超平面を D_0 とすれば、(3)式は D_0 の上方半空間 D を表す。すなわち、 f_1 が得られたとき、残りの3の f のとりうる領域は凸集合 F に限定される。さらに、全身線量 D が設定値 d_0 を超えたという条件を追加すると、 f_1 の取りうる領域は F と D の共通部分 $F \cap D$ に限定される。(図1)したがって、凸集合 F の内部の点を等しい確率で取るとすれば、 f_1 を得たとき全身線量 D が d_0 を超える確率 $P(D \geq d_0)$ は次式で与えられる。

$$P(D \geq d_0) = \frac{V_{FD}}{V_F} \quad (4)$$

ここで、 V_F は凸集合 F の体積を示し、 V_{FD} は凸集合 F と、超平面 D_0 の上方半空間 D との共通部分 $F \cap D$ の体積を表す。逆に、

$$P = (D < d_0) = \frac{V_F - V_{FD}}{V_F} \quad (4)$$

が言え、(3)または(4)式を計算することによって、線量計の値から全身線量がある値を超えたか超えないかの累積分布確率(CDF)を計算することができる。これらを求める計算コードを、MATLABを用いて作成した。

確率分布を用いた外部被曝線量管理の検討として、全身線量推定確率分布を用いた外部被曝線量管理の概要を図2に示す。放射線場の情報及び装着時の線量計の各種応答を基に全身線量推定確率分布を得る事により、信頼区間を用いて線量限度を合理的に担保することが可能になる。原子力発電所における緊急時作業において、 ^{137}Cs からの662keVの γ 線に被曝する想定での計算を行った。図3に個人線量計値 d が100~250 mSvに増加した場合の全身線量 CDFを示す。例えば、片側95パーセントイル値の信頼区間を採用した場合、実効線量限度250mSvを担保するための線量計値は約130mSvに設定する必要があることが分かる。大型加速器施設における計画被ばく状況において、高エネルギー中性子に被曝する想定での計算を行った。図4に全身線量 PDF と中性子エネルギーの関係を示す。作業場の中性子スペクトルを規格化して図のPDFに乗ずる事により、作業場毎の全身線量推定確率分布を求める事が出来る。実効線量限度年50mSvに対して信頼区間片側95%マイル値を採用すると、線量計限度値は25mSvに設定する必要がある事が分かる。

速中性子用個人線量計として用いた固体飛跡検出器の感度向上に関する検討を行った。現在使用されている積算型中性子個人線量計には、プラスチックの一種であるCR-39が固体飛跡検出器として用いられている。固体飛跡検出器は、ポリエチレンを陽子ラジエーターとして組み合わせる事により数MeVの中性子に対して感度を増加させたが、10MeV以上の中性子に対して感度が低下することが課題となっている。この課題を改善するために二つのアプローチから研究を行った。一つ目は、エッチングの前処理として、二酸化炭素吸蔵効果(CO₂プレエッチング)に着目した。イオン照射後のCR-39に二酸化炭素を吸蔵させることでエッチピット生成感度が上昇する。しかし、陽子照射に対するCO₂プレエッチングの検証は例が少なく、中性子計測の感度向上へ応用するには調査すべき点が多い。二つ目は、陽子ラジエーターの改良である。本研究では、水素化物と金属の多層ラジエーターを考案し、計算と実験により10MeV以上の中性子に対してのラジエーターによる増感効果(ラジエーター効果)を検討した。さらに、中性子エネルギーレスポンスの制御のために多層ラジエーターの設計を行った。

本研究では東京大学のタンデム型加速器を使用し、代表的なCR-39である、BARYOTRAKに対して陽子照射実験を行った。陽子を適量照射後、CO₂プレエッチングの有無によるエッチピット形成の違いを観察した。観測されたエッチピットのサイズから入射陽子のエネルギー及びCO₂プレエッチングの有無による臨界角を計算し、陽子エネルギーと臨界角の関係を求めた。(図5)臨界角を設定することにより、CR-39の中性子に対する検出効率を理論的に求めることが可能になる。厚さ1mmのポリエチレン(PE1)のラジエーター効果を、PHITSを用いて計算した。計算値を評価するために、単色中性子照射実験をJAEA 東海放射線標準場にて行った。図6にCO₂プレエッチングの有無によるPE1ラジエーター効果の実験値と計算値の比較を示す。CO₂プレエッチングにより約250%の増感効果を得る事を示した。

速中性子用個人線量計として用いた固体飛跡検出器の高エネルギー領域への拡張に関する検討を行った。図6よりPE1では10MeV以上の中性子に対して感度が低下する事が分かる。しかし、水素化物だけで高エネルギー中性子測定するために厚さを大きくする必要がある。そ

ここで本研究では、金属を挿入し、陽子を減速させることにより、10 MeV 以上の中性子に対する感度を向上させることを考案し、ラジエーターの厚さを低減することを試みた。水素化物と金属の多層ラジエーターを用いて 10MeV 以上の高エネルギー中性子検出を検討した。図 7 に 45MeV 中性子に対する PE1+鉄のラジエーター効果と鉄層厚の関係の計算結果を示す。これより、鉄層厚が約 3mm 付近で極大値を持つことが分かる。この結果より、厚さが 1cm 以内で数十 MeV の中性子に対応した個人線量計の設計が可能になる事が示唆された。数 10MeV 中性子に対するラジエーター効果を実験で検証するために、JAEA の TIARA における準単色中性子場で照射実験を行った。準単色中性子のピーク領域以下の低エネルギー中性子の影響を考慮する為に、三層ラジエーターを用いた。さらに、ラジエーターから発生する重粒子による影響とラジエーター以外から発生する陽子の影響を考慮した。図 8 に 65MeV 準単色中性子照射による実験値と計算値を示す。図より極値を取る鉄層厚はほぼ一致していることが示された。この結果より、数 mm 厚の金属層を用いることにより数十 MeV の中性子の検出効率を向上させることを実験と計算の両方により示すことができた。

実際の作業場における幅広い中性子スペクトルに対応する為に、ポリエチレンと金属を多層に組み合わせた「多層ラジエーター」を考案した。ラジエーター中での反跳陽子の飛程を考慮して各層の厚さを設定した。厚さ 5mm で従来型よりも数 10MeV の領域では一桁高く、数 MeV の領域ではほぼ同等の五層ラジエーターを開発した。さらに、ラジエーターの中性子エネルギーレスポンスの変動を押さえる為に、改良型多層ラジエーターを開発した。図 9 に PHITS を用いて計算した各ラジエーター効果を示す。5層目のポリエチレンをポリアミドに変更した改良型多層ラジエーターにより、エネルギーレスポンスの変動を従来型の PE1 よりも約半分に低減する事を示した。