

学 位 論 文 題 名

放射線の実効線量評価と防護最適化に関する研究

学位論文内容の要旨

近年、放射線が工学、医学、産業などの幅広い分野で利用されることに伴い、放射線作業員数が増加し被曝の機会が増えてきたことから、放射線防護管理にはより一層の厳しさが要求されている。原子力および放射線を有効に利用するためには、放射線防護に万全を期することが重要であり、国際放射線防護委員会（ICRP）が勧告している放射線防護に関する基本体系（すなわち、防護の最適化と個人線量限度制限のための実効線量の評価）の遵守が必要である。

実効線量の評価に関しては、計算機能力向上に伴い多くの被曝条件に対する計算的評価が可能になってきたが、防護管理上問題となる高線量被曝の照射条件に対する評価と測定可能な実用線量との関係づけに関してはまだ解決すべき課題が多いことが現状である。また、ICRPの新勧告においてその重要性が強調されている防護に関する最適化および意思決定に対する実践的研究は十分ではなかった。

そこで、本研究はICRPの防護体系を具体的に実施するにあたって、理論的かつ実験的研究から基本限度量を表す実効線量の適切な評価法と、現実的防護問題に対する効果的な意思決定手法の確立を試みたものである。

本論文は、次の6章からなる。

第1章は序論であり、ICRPの防護基本体系および1990年新勧告の概要を述べた後、本研究の意義、目的について述べる。

第2章では、高レベルの放射線作業区域において重要な人体の上下方照射ジオメトリに対する人体模擬ファントムの照射実験方法と評価結果について詳述した。人体の上下方ジオメトリの臓器線量分布は、人体の体軸垂直の照射ジオメトリにおける臓器線量当量分布とは随分異なる傾向を示した。特に、下方照射ジオメトリについては、両足のある条件と両足のない条件で評価を行い、実験エネルギー域で両条件における実効線量の差は約20%であることが明らかになった。本実験の評価結果は、同一の照射条件に対しモンテカルロ法で計算された理論値と比較され、実験値が平均約20%の範囲内で計算値と一致することが確認された。新勧告による実効線量の実験的評価は本研究で初めて行ったものであり、実効線量は従来の実効線量当量にくらべすべての照射

条件において量的に小さい値であることが明らかになった。

第3章では、複雑な算出過程を経て求められる臓器線量ならびに実効線量を1つの簡単な式で評価できる簡易評価法について述べた。外部被曝に対し臓器線量の変化に大きく影響する支配的因子を導くことにより、身体表面から臓器中心までの深さ変数を用いる簡易評価式を作成した。評価の目的とする実効線量は、光子のエネルギーだけでなく被曝者の身体条件、すなわち体格やよび線源に対する向きなどに依存性をもつ量であり、簡易評価式ではこのような依存性を適切に表現している。この簡易評価式の妥当性を検証するために、得られた様々な臓器線量および実効線量の近似値と人体数学モデルに対するモンテカルロ計算値とを比較した。簡易評価式は、側方放射ジオメトリにおける睾丸と甲状腺を除けば、胴体の深部にある大部分の臓器の線量に約20%の範囲でよい近似値を与える。様々な臓器深さから組織荷重係数を媒介にして求めた実効深さを用いて同一式から求めた実効線量の近似値を、モンテカルロ法で計算された新勧告による実効線量との比較においても約15%の範囲内で一致した。

第4章では簡易評価式から導出した実効深さを用い、実効線量の特定点を標準人胴体中の1点で同定し、その特定点を別の計算的方法と実験的方法で検討した内容について述べた。実効線量に関する計算的確認として、半無限平板軟組織材に対する深さ線量のモンテカルロ計算値から、光子の注目するエネルギーに対し実効線量に定量的に近い深さを決定した。その結果、標準人胴体の前表面から8cm、後表面からは12cm、および側面から18cmの深さが決められ、この特定深さは簡易評価式における実効深さとほぼ一致するものであった。また、実験的検討のために、組織等価のTLD素子をもつ個人線量計をその内部の特定深さに置くことができる個人線量計校正用四角ファントムを製作し、実験的に評価した特定深さの線量当量は、低エネルギー点の過小評価の場合を除けば、平均約20%範囲で実効線量の近似値を示した。不均質な人体模擬のランドファントムの特定深さにTLD素子を入れた照射実験では、特定深さの1点評価による線量当量が実効線量に定量的に近いことが確認された。実効深さの概念は、日常モニタリングの測定量を評価目的の実効線量に直接関係づけるものであり、また被曝状況の再現のために実効線量を実験的に求める場合、実効線量の簡単な実験的評価法としての本アプローチの採用も可能である。

第5章ではICRPの新勧告で重要視されている放射線防護の最適化問題に対し、多目標意思決定手法として有用な目標計画法を応用して、被曝管理を含む作業計画問題を事例研究として取り上げた。放射線防護に関する従来の手法では解決が困難な作業段階の放射線作業配置計画問題を分析し、その定式化過程を示した。

常に被曝を伴う作業段階における意思決定問題の特徴は、被曝要因に関連した複数の細部目標を同時に考慮する必要がある、意思決定の状況を識別しその条件を明確にすることが重要である

ため、個人線量および集団線量の制限、計画被曝の設定、作業目標の達成、熟練者と非熟練者の作業場所別構成など、多数の対立する防護目標が考慮された。また、防護代替案の決定手法として、ICRP 報告書のウラン鉱山の防護データを用い、防護費用、集団線量および換気の不快感の防護要因を分析する防護代替案の選択問題を取りあげ、防護代替案を決定する方法を示した。目標計画法を応用した放射線防護の最適化手法は、特に原子力発電所のような大型運転施設の防護管理現場において、その状況に適する様々な目標の設定により現実的な防護問題に適用できることを示した。

第6章は結論であり、得られた結論をまとめて述べた。

以上、ICRPの放射線防護の基本体系を実施するさいに重要な実効線量の適正評価法と最適化技法に関する研究検討を行い、防護管理の実務適用上有用な結果と知見を得た。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 成 田 正 邦

副 査 教 授 山 崎 初 男

副 査 教 授 大 橋 弘 士

副 査 教 授 大 西 俊 之 (アイソトープ総合センター)

電離放射線の防護にあたって、我が国を含め各国は、国際放射線防護委員会 (ICRP) の勧告を尊重することになっている。1990年、ICRP は、新しい勧告を採択し、放射線防護に用いられる計測量の概念の変更、新しい放射線防護体系を勧告している。特に、実効線量当量の定義を新たにし実効線量と名称を変更した。また放射線防護体系では、行為に正当化、防護の最適化、線量限度の遵守が義務づけられている。

本研究は、1990年勧告を具体的に実施するために、必要な光子 (X線, γ 線) の実効線量の評価法と、防護の最適化に新しい方法を導入したもので6章から構成されている。

第1章は序論であり、ICRP の防護体系および1990年勧告の概要を述べたあと、本研究の意義、目的を述べている。

第2章では、放射線作業現場における重要な照射配置に着目して、人体の上下方向からの外部照射に対する体内線量分布の実験研究とその評価結果について述べてある。実験は人体模擬ファントムの一つであるランドファントムを使って、光子エネルギーは100keV 近傍を中心に数

MeV 領域までを測定している。その結果は、人体上下方向からの照射が体軸垂直照射と異なる傾向を示した。本実験結果はモンテカルロ法による計算結果と比較され、モンテカルロ法の計算で線量分布が十分計算できることを実証している。

上下方向照射実験および新勧告による実効線量評価は、著者がはじめて行ったものであり、現在行われている実効線量当量は、本実験範囲では、実測値より過大に評価することが明らかになった。

第3章は、臓器の等価線量と実効線量の簡易評価法について述べている。実効線量は臓器線量の重みつき平均線量で、人体内へ測定器を挿入できないため、実際上は測定できない量である。この量を人体の置かれる場所の照射線量率から推定するために、簡単な評価式を提案している。この式は、人体臓器の代表深さだけで、臓器等価線量を評価するもので、直接、実効線量の定義から実効線量を決定できる。また適当な実効深さをとると、同じ式から直接に実効線量を評価できる。

この評価式の妥当性を検証するために、人体数学モデルに対するモンテカルロ法の計算結果と比較して、特別の照射条件と睪丸および甲状腺を除けば20%以内で、臓器の等価線量を評価できることを示している。実効線量の場合も、15%以内で評価できることがわかった。この結果は、現在、実効線量当量の代わりに使われている1 cm線量当量よりも実効線量を直接評価できる点で優れた方法であると認められる。

第4章では、実効線量の評価において著者が導入した評価式に現れる実効深さの検討を行っている。実効深さは、ICRP が定義した実効線量計算用の重み、すなわち組織荷重係数を重みとした臓器深さの平均として定義したものが、適切であることを、モンテカルロ法の計算と実験から示している。このことから実効深さが、体形の異なる個人ごとに決定可能であり、子供とおとなのように体重、臓器位置の違いがあってもこの評価式が使えることを意味しており、標準人以外にも本評価式が適用できることを示した点で有用である。

第5章では、ICRP 勧告で重要視されている防護の最適化問題に目標計画法を提案している。最適化についてICRP は、単なる防護費用と放射線による損害額の二つの比較による費用－便益分析ばかりではなく、多くの目的を含む最適化に考え方を変えてきている。本章の研究はこれに沿ったもので、多くの要因を同時に満足させる放射線防護の最適化として、2つの例に目標計画法を適用している。一つは放射線作業時間の配分問題であり、他の一つはICRP の例題となっている選択肢問題である。いずれの場合にも、目標計画法が、十分よい結果をもたらすことが示されている。目標計画法はICRP の提案しているいくつかの方法と比べても遜色なく、かつ簡単である。このことから、今後この方法は放射線防護の最適化に広く使われるものと期待される。

，第6章は結論をまとめたものである。

以上のように，著者は，放射線防護に必要な臓器の等価線量と実効線量の新しい評価法を開発し，防護の最適化に，はじめて目標計画法を適用しており，放射線管理学の進歩に寄与すること大である。

よって著者は，博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。