

氏 名(本籍)	佐藤 優樹 (東京都)		
学位の種類	博士 (保健衛生学)		
学位記番号	博保甲第8号		
学位授与の日付	令和5年3月20日		
学位授与の要件	学位規程第5条第1項該当		
学位論文題目	放射線治療領域エネルギーにおける電子に対する空気の水値に関する研究		
論文審査員	主査 駒澤大学教授	博士 (理学)	金子 順一
	副査 駒澤大学教授		佐藤 昌憲
	副査 駒澤大学准教授	博士 (放射線学)	藤田 幸男
	副査 駒澤大学講師	博士 (医学)	中島祐二郎
	副査 産業技術総合研究所 主任研究員	博士 (工学)	清水 森人

論文内容の要旨

[背景・目的]

現在、放射線は医療分野において診断および治療に利用されているが、我が国における医療被ばくは世界各国と比較して大きいことが指摘されている。そのため、病院では放射線を利用した検査や治療を安全に患者へ提供するために、放射線量の測定を通じて被ばく線量の管理や装置の品質管理を行っている。ユーザーが放射線を正しく計測できるように、我が国では産業技術総合研究所（以下、産総研）が、放射線の種類やエネルギーに合わせた様々な標準の開発、維持および供給を行っている。その中で放射線防護に関する標準として、X線および γ 線における空気カーマ標準が整備されている。空気カーマは国家計量標準器である自由空気電離箱やグラフィート壁空洞電離箱を用いて決定され、その際に空気中に一つのイオン対を生成するために必要な平均エネルギーとして定義される電子に対する空気の水値という物理量が必要となる。また空気水値は、放射線治療で使用される高エネルギー放射線にも関連する物理量である。放射線治療では電離箱線量計（以下、電離箱）を用いた水吸収線量フォーマリズムによって水吸収線量が決定されており、このフォーマリズム中の線質変換係数を算出する際に空気の水値が用いられている。このように空気の水値は、放射線を正しく計測するために非常に重要な物理量である。

放射線治療における放射線計測には、測定が容易であることや長期安定性の点から自由空気式電離箱が用いられる。電離箱からの出力信号に対しては、温度や気圧などの様々な補正が行われ、その中で湿度に対する補正も重要な補正の一つである。現在の線量計測プロトコルでは、電離箱を用いた測定が常に相対湿度 20 % から 80 % の範囲で行われていると仮定されており、この範囲において電離

箱の湿度影響を無視した時に生じる水吸収線量の不確かさは0.15 %としている。これは湿潤空気のW値が放射線の線質に依存しないと仮定した上で、モンテカルロシミュレーションを行い、過去50 kVX線線で測定された湿度補正係数が高エネルギー光子線および電子線においても使用できることを示したデータに基づいている。しかし、これはあくまでシミュレーションによる研究であり、放射線治療領域のエネルギーに対して湿度補正係数を適用するためには、実際に高エネルギー放射線を用いて湿度補正係数を測定し、湿潤空気のW値のエネルギー性について調査を行う必要がある。

10 keV以上のエネルギーにおいて空気のW値はエネルギーに対して独立しており、33.97 eVの一定値と見なされている。しかし、10 keV以上のエネルギーではほとんどの測定が $^{60}\text{Co}\gamma$ 線を用いて行われていること、高エネルギー電子線におけるデータではエネルギー依存を示唆する報告がされているなど、空気のW値のエネルギー依存性に関する問題は完全に解決されていないのが現状である。また、2014年に発行されたICRU Report90により空気のW値の標準不確かさが0.05 eVから0.15 eVへ増加したことから、空気のW値に関する調査に注目が集まっている。推奨値の不確かさを低減すべく、より低い不確かさで決定された空気のW値のデータが求められている。

本研究では、初めに高エネルギー光子線および電子線に対する電離箱の湿度影響を調査するために、ファーマ型電離箱を用いて高エネルギー光子線に対する湿度補正係数の測定を行った。また湿度補正係数の測定結果とモンテカルロシミュレーションによって算出された電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与を用いて、湿潤空気のW値のエネルギー依存性について評価を行った。さらに、将来的に空気のW値のエネルギー依存性の問題を解明するため、空気のW値の絶対測定システムの開発を行った。このシステムは、空気のW値をこれまでに報告されている不確かさよりも低い不確かさで決定可能なシステム開発を目的としている。

[方法]

湿潤空気のW値のエネルギー依存性は、湿潤空気中でファーマ型電離箱を用いて測定された電離電流比（湿度補正係数）とEGS5によるモンテカルロシミュレーションを用いて計算された電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与を組み合わせることで評価された。実験は産総研に設置されている医療用リニアック（Elekta AB, Precise Treatment System）を用いて行われ、電離箱空洞内の温度および湿度を一定に保つためにシールドボックスが開発された。ボックスは空調機と接続し、ボックス内部の温度は22℃一定、相対湿度は30%から70%の範囲で制御された。またボックス内にシリカゲルを設置することで相対湿度10%での測定を行った。使用されたファーマ型電離箱はPTW 30013およびExradin A19であり、これらの電離箱はボックス内に設置され、医療用リニアックからの6、10および15 MV高エネルギー光子線が照射された。測定は空中で行われたため、それぞれの電離箱にはビルドアップキャップが装着された。EGS 5によるモンテカルロシミュレーションは実測と同じジオメトリによってPTW 30013を用いて行われ、電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与が算出された。電離箱空洞内の湿潤空気の密度は、ICRU Report 37に記載されている乾燥空気および水蒸気の組成データを用いて計算した。

空気の W 値の絶対測定システムは、グラファイトカロリメータによる熱量測定とグラファイト壁空洞電離箱による電離電流測定の比較に基づいており、空気への吸収線量率を算出するためにモンテカルロシミュレーションが用いられた。実験は、産総研に設置されている ^{60}Co 線源発生装置を用いて行われた。グラファイトカロリメータおよびグラファイト壁空洞電離箱は $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ の水ファントム内に配置され、線源-検出器間距離 100 cm の水中 5 g cm^{-2} に各検出器の基準点を配置した。グラファイトカロリメータを用いてグラファイトコアへの吸収線量率、グラファイト壁空洞電離箱を用いて有感体積の空気質量あたりの電離電流を測定した。モンテカルロシミュレーションは実験と同じジオメトリーにおいて行われ、グラファイトコアへの吸収線量率を空気への吸収線量率に変換する線量変換係数を算出した。

【結果・考察】

高エネルギー光子線において測定された湿度補正係数は、TG-21 において Rogers がモンテカルロシミュレーションによって算出した湿度補正係数と相対湿度 10 % から 70 % の範囲で同様の挙動を示し、相対標準不確かさ 0.18 % ($k=2$) で一致した。このことから、モンテカルロシミュレーションによって算出された湿度補正係数が、高エネルギー光子線や電子線に対しても使用できることが示唆された。またモンテカルロシミュレーションによって計算された高エネルギー光子線における電離箱空洞内の湿潤空気へのエネルギー付与は、相対湿度の増加に伴い直線的に減少した。これらの結果より決定された高エネルギー光子線における湿潤空気の W 値は、Niatel によって 50 kVX 線を用いて測定された湿潤空気の W 値と相対湿度 10 % から 70 % の範囲で相対標準不確かさ 0.18 % ($k=2$) で一致した。この比較より、湿潤空気の W 値のエネルギー依存性は確認されなかった。

本研究において開発された空気の W 値の絶対測定システムによって得られた空気の W 値は 33.91 eV であり、相対標準不確かさは 0.08 eV ($k=1$) であった。この値は ^{60}Co γ 線を用いた先行研究の値と相対標準不確かさ内で一致し、さらに ICRU Report 90 の推奨値 (33.97 eV) ともよく一致した。また相対標準不確かさにおいては、これまでに空気の W 値を決定した中で最も不確かさが低い Burns et al. (2014) による研究 (0.21 %) と同等であったことから、より高精度に空気の W 値を決定することができた。

【まとめ】

初めに本研究では、高エネルギー光子線を用いて湿度補正係数の測定を行い、湿度補正係数の測定結果とモンテカルロシミュレーションによって算出された湿潤空気へのエネルギー付与を用いて湿潤空気の W 値のエネルギー依存性の評価を行った。ファーマ型電離箱を用いて実測された高エネルギー光子線における湿度補正係数は、モンテカルロシミュレーションによって算出された湿度補正係数と相対湿度 10 % から 70 % の範囲で相対標準不確かさ 0.18 % ($k=2$) で一致した。また高エネルギー光子線における湿潤空気の W 値は、Niatel が 50 kVX 線を用いて測定した湿潤空気の W 値と相対湿度 10 % から 70 % の範囲で相対標準不確かさ 0.18 % ($k=2$) で一致した。これらの比較より、モンテカルロシミュレーションによって算出された湿度補正係数は高エネルギー光子線や電子線に対し

でも適用することができ、湿潤空気の W 値はエネルギー依存性が確認されなかった。

次に本研究では、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線を用いて空気の W 値の絶対測定システムの開発を行った。このシステムを用いて得られた空気の W 値は 33.91 eV であり、相対標準不確かさは 0.08 eV ($k=1$) であった。この値は、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線を用いて決定された先行研究の値および ICRU Report 90 の推奨値と相対標準不確かさ内で一致した。また、不確かさについても、空気の W 値を決定した研究で最も不確かさが低い Burns et al. (2014) と同等であった。したがって、このシステムを使用することで精度高く空気の W 値を決定することができ、空気の W 値のエネルギー性に関する調査に使用できることが示唆された。

論文審査結果の要旨

1. 論文の概要

本論文は、放射線治療に用いられるエネルギー領域における電子線に対する空気の W 値の精密決定を主要な目的としている。内容としては、湿潤空気に対する空気の W 値のエネルギー依存性に対する評価と、空気の W 値の絶対測定を行うシステム構築およびそれによる空気の W 値の精密測定の大きく二つのテーマが扱われている。

第 1 章の序論では、本論文の研究背景と目的が記載されている。空気の W 値は気体電離を測定原理とするあらゆる放射線線量測定装置で必要不可欠であり、その精度は線量測定の精度に直接影響を及ぼす。序論においては、空気の W 値の持つ線量測定の決定過程への重要性が説明されている。1950 年代に遡り先行研究が詳細に検討され、大きな課題としてエネルギー依存性の不確かさおよび $^{60}\text{Co}\gamma$ 線以外の W 値の実測データの不足が提示されている。本論文ではこれらの課題について主に取り扱われている。

第 2 章においては、空気の W 値測定の原理と理論的背景について扱われている。本論文では第 4 章において、グラフアイトカロリメータと空洞電離箱を用いて W 値の精密測定が行われている。ここでは、その測定法に対する理論的背景が与えられている。

第 3 章、第 4 章が本論文の主要部分となる。第 3 章では湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性を実測データに基づき明らかにしている。用いた放射線は医療用加速器から発生する X 線である。加速電圧を 6 MV から 15 MV の範囲で変化させることで、湿潤空気の W 値におけるエネルギー依存性を実測している。使用した電離箱は、世界的に広く用いられている PTW 30013 及び Exradin A19 である。実測により得られた W 値は、加速電圧に依らず不定性の範囲で一致し、この範囲のエネルギー領域においてエネルギー依存性が見られないことが実証された。さらに、Bragg の加算則と Jesse 効果を考慮し、湿度補正係数の半経験式を提案している。

第 4 章では、空気の W 値の絶対測定システムの構築およびそれより得られた空気の W 値について評価検討が行われている。本論文で構築されたシステムは、光子線のみならず電子線等の放射線に対しても W 値の絶対測定を行うことを目的としている。用いた主な放射線測定器はグラフアイトカロリメータとグラフアイト壁空洞電離箱であり、これらを水ファントム中に設置することで、非常に

高精度に関心領域の設定を可能としている。使用した放射線は $^{60}\text{Co}\gamma$ 線である。空気のW値を決定するためには、イオン再結合等、算出過程で様々な不定性を考慮する必要がある。本論文では様々な不定性について評価が行われている。最終的な空気のW値の算出結果として、相対標準不確かさ0.23%で $W_{air}=33.91$ eVの値を得た。この結果は過去に行われた先行研究の報告値やICRU Report 90の推奨値と不確かさの範囲内で一致している。これにより、本論文で構築された空気のW値の絶対測定システムの信頼性が確認された。今後は $^{60}\text{Co}\gamma$ 線以外の放射線についても、高精度で空気のW値を決定することが期待できる。

第5章は本論文の総括であり、主要な結果である第3章、第4章について要約されている。さらに今後の展望として電子線や $^{137}\text{Cs}\gamma$ 線での測定について計画が示されている。

2. 論文の評価

本論文では、湿潤空気に対する空気のW値について加速電圧6 MVから15 MVの光子エネルギー範囲で高精度な実測値を与えている。これまでに得られている湿潤空気に対する空気のW値の実測値は加速電圧50 kVの光子エネルギーにおける値であり、それ以外のエネルギーについては基本的には実測値ではなくモンテカルロ法に基づく数値計算結果のみが知られている。放射線治療等で多用される光子エネルギー領域における実測値が与えられたことは非常に大きな意義を持つ。また得られた結果より、湿潤空気に対する空気のW値のエネルギー依存性について、このエネルギー範囲においてはほぼないことが実証された。過去に行われてきた様々な研究においては、エネルギー依存性がないことを仮定して評価が行われてきた。本論文により実測値が与えられたことにより、その仮定の正当性が担保されることになる。このことは、線量測定の信頼性向上に大きく寄与する。さらに、本論文で提案された湿潤空気に対する補正式により、線量測定のさらなる精度向上についても期待される。

また、本論文で構築された空気のW値の精密測定システムは、高精度に種々の放射線種に対する空気のW値の絶対測定が可能なるものであり、現状においては世界的に他にほとんど例を見ないものである。測定精度で本論文のシステムと比肩する研究はBurns (2014)らのものがあるが、これは基本的に高エネルギー光子線にのみ対応するものであり、本論文で構築されたシステムのように種々の放射線に対して測定を行うことは不可能である。それ以前になされた研究による実測値と比較して本論文で達成された精度は非常に高く、信頼性の高い測定値が与えられている。このように、本論文で構築された空気のW値の精密測定システムが有する価値については異論のないところである。その一方で、本論文で示された空気のW値の絶対測定の結果は $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対するもののみであり、Burnsらの過去の研究成果と比較して本論文の優位性については、必ずしも明らかとはなっていない。この点については、本論文の総括でもすでに記述がなされているが、学位論文の題名にもある通り電子線や $^{60}\text{Co}\gamma$ 線以外の高エネルギー光子線についての測定が実施されることが望まれる。必要となる測定感度の向上等、今後も継続して研究が成され、その結果が報告されることを強く期待する。

本論文の主要部分については、題名「Experimental study of humidity effect on charge measurement of reference ionization chambers in clinical high-energy photon beams」として英文誌 Medical Physics (2019 Sep;46 (9) :4177-4183) および題名「Development of absolute measurement system for W_{air} in ^{60}Co gamma rays」として英文誌 Radiation Protection Dosimetry (2022;, nrac280) に掲載されていることから、主査及び副査のすべての審査委員は博士の学位に値する英語力が十分であると判断した。

上記の評価を踏まえ、主査及び副査のすべての審査委員は、博士（保健衛生学）の学位に値するものであると判断した。