京都工芸繊維大学

氏　　名	わぁ　ふぉん　ふー VO PHONG PHU
学位(専攻分野)	博　士（工学）
学位記番号	博甲第 1042 号
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　物質・材料化学専攻
学位論文題目	X-ray Visualization and Quantification Using Fibrous Color Dosimeter （繊維状線量計を用いたエックス線の可視化と定量化）
審査委員	(主査)准教授　木梨憲司 准教授　坂井　亙 教授　山雄健史

論文内容の要旨

X 線は、非破壊検査、結晶学、放射線療法など、科学や産業において多くの用途がある。しかし、X 線は高エネルギーの電磁波であるため人体が被ばくした場合、正常組織が損傷するといった側面も持っている。特に、宇宙空間や廃炉現場のような放射線漏洩地域といった作業環境では、高線量の放射線があらゆる方向から降り注いでいるため、作業員は被ばく線量を個人単位で正確に測定・管理する必要がある。電離放射線量を監視するための検出器としては、ガイガーミュラーカウンター、半導体検出器、個人線量計などがあり、その中でも個人線量計は、放射線区域に立ち入る作業者が携帯し、作業中の被ばく線量を記録することができる。現在使用されている個人線量計には、電子式線量計、熱ルミネセンス線量計、フィルムバッジ、ガフクロミックフィルム線量計、蛍光ガラス線量計など様々な種類があり、状況に応じて適宜使用されている。しかし、電子式を除くこれらの個人線量計のほとんどは、被ばく線量の値を知るために、別途読み出し装置が必要であるという欠点がある。そのため、身に着けているのが気にならないくらい小型かつ軽量で、且つ、電力を必要とせず、被ばく線量を視覚的、直感的に確認することができる個人線量計が必要とされている。本研究は、既存の個人線量計の欠点を克服した「視覚的、直感的に被ばく線量を色変化で認識できるウェアラブルな個人線量計（カラー線量計)」の開発を目標とし、材料工学と繊維工学の視点から検討を行った。

本論文は、５章から構成され、各章の要旨は次のとおりである。

第一章では、研究動機、既往の研究、研究目的、各章と主論文の関係について解説し、最後に参考文献を記載している。

第二章では、放射線の発生原理、放射線と物質との相互作用、各種線量計の原理、熱不安定型と熱安定型カラー線量計の原理と計測法と研究例、遠心紡糸法の原理と計測法ついて解説し、最後に参考文献を記載している。先行研究の熱不安定型カラー線量計について、色素、無機シンチレータ、母材としての高分子樹脂の３成分の役割、変色メカニズム、結果と考察の解説を行い、そして熱不安定型カラー線量計の問題点を指摘している。また、本研究課題の熱安定型カラー線量計についても、用いた色素の分類と各分類に関する詳細、そして発色機構の詳細も解説している。

第三章では、ロイコ色素のハロクロミック反応をベースとした熱安定型カラー線量計の材料、紡糸条件の最適化、繊維形状評価、放射線感度評価と実施例の紹介について解説し、最後に参考文献を記載している。先行研究のハロクロミック色素、光酸発生剤、無機シンチレータ、高分子樹脂を用いた熱安定型カラー線量計は、エックス線に対して 20 Gy から黄色→黒色に色調変化したが、固体粉末の無機シンチレータを用いているためフィルム形状が基本であり、繊維状に加工しても柔軟性が悪くウェアラブル性に欠ける欠点があることを指摘している。そこで、光酸発生剤とハロクロミック色素のみを用いて、柔軟性を高めた繊維状カラー線量計を提案している。先行研究と比較すると無機シンチレータがなく、繊維形状であるため材料密度が低く放射線に対する感度が著しく低下したが、反応速度論の観点から材料の最適化を行い、さらに紡糸条件の最適化も行うことで柔軟性を有した不織布の作製に成功した。最適化した繊維状カラー線量計は、放射線感度が 15 Gy まで向上し、60 ℃の環境下でも機能することを明らかにした。
第四章では、ジアセチレンの固相重合をベースとした熱安定型カラー線量計の材料、紡糸条件の最適化、繊維形状評価、放射線感度評価と実施例について解説し、最後に参考文献を記載している。ジアセチレン誘導体は、エックス線照射下で 1,4-付加反応により重合し、交互に並んだ高分子鎖を形成する。重合したポリジアセチレンは、680 nm 付近に特徴的な吸収ピークを持ち青色を呈する。ジアセチレンをポリ乳酸に分散した高分子溶液を遠心紡糸法を用いて不織布状に加工し、放射線感度を評価した。ジアセチレンとポリ乳酸の最適な混合比は、繊維形状と放射線感度の相関から決定した。最適化した不織布状の熱安定型カラー線量計は、エックス線に対して 2 Gy から白色→青色に色調変化し、これまでの報告例と比較して最も感度が高く、さらに熱安定性も向上し 60 ℃の環境下で 50 時間機能することを明らかにした。この結果は、放射線治療における線量に相当し熱安定型カラー線量計の有用性が示している。
第五章では、第 2 章から第 4 章までの結論をまとめるとともに、本研究における今後の展望を述べ、本論文の結びとしている。

論文審査の結果の要旨

放射線は見えない、聞こえない、匂いもなく五感で感知できない性質を持ち、また大量に被ばくすると甚大な健康被害をもたらす非常に危険な物質粒子と電磁波である。特に、宇宙空間や廃炉現場のような放射線漏洩地域といった作業環境では、高線量の放射線があらゆる方向から降り注いでいるため、その現場の宇宙飛行士や作業員は常に危険に晒されている。そのため、このような現場では、被ばく線量を計測し、個人単位で管理することが重要になる。被ばく線量を計測する機器は、様々な種類が用いられているが、長時間の過酷環境下では身に着けているのが気にならないくらい小型かつ軽量で、電力を要しない個人線量計が必要である。これらの必要条件を満たし現在最も普及している線量計は、蛍光ガラス線量計である。しかし、蛍光ガラス線量計は、被爆線量を知るには専用の読み取り装置が必要であり、即時に被爆線量を知ることができないという大きな欠点がある。これらの問題を解決するため、被ばく線量の評価が直感的に確認できる新しい線量計の開発が必要である。
先行研究の熱不安定型カラー線量計は、フォトクロミック色素と無機シンチレータ用いたカラー

線量計である。この変色機構は放射線が無機シンチレータに吸収され、吸収エネルギーの一部を紫外線発光に変換することでフォトクロミック反応を間接的に誘起し色調変化を起こす。つまり、結果として照射領域に被ばく線量に応じた変色が起こる。しかし、この変色領域は熱的に不安定なため室温で数分～数時間で元の無色に退色してしまう欠点がある。
申請者は、これまでの問題点を材料工学と繊維工学の視点から考察し、多くの問題を踏まえた上で、変色状態が熱的に安定な繊維状のカラー線量計を提案した。材料工学の視点からハロクロミック色素またはポリジアセチレンに注目し、熱力学的評価を行うことで最適化を行い、系中の反応メカニズムを明らかにした。また、ウェアラブル化を行うため、遠心紡糸法に注目し、繊維工学的評価を行うことで柔軟性と線量計としての機能を維持した最適な素材の作製に成功した。最後に服状に加工し、目標としていた「視覚的、直感的に被ばく線量を色変化で認識できるウェアラブルな個人線量計（カラー線量計）」のデモンストレーションを行い、その結果を報告した。
以上の申請者により実施された、熱安定型ウェアラブル・カラー線量計の作製と応用に関する研究は、放射線や放射性物質のリスクマネジメントに対して貢献でき、さらに世界の掲げる SDGs（Sustainable Development Goals：持続可能な開発目標）の「都市と人間の居住地を包摂的、安全、強靭かつ持続可能にする」に対しても貢献可能な取り組みであり学術的、産業的、社会的に高く評価できる。

本学位論文の基礎となった学術論文 2 編は、査読制度の確立した学術雑誌に掲載されており、いずれも申請者が筆頭著者である。また、参考論文として学術雑誌に掲載済みの学術論文（査読あり・筆頭著者） 1 編があり、本論文に関連した内容が記述されている。

[主論文]
1. Phu Phong Vo, Hoan Ngoc Doan, Kenji Kinashi, Wataru Sakai, Naoto Tsutsumi, Dai Phu Huynh, “X-ray visualization and quantification using fibrous color dosimeter based on leuco dye”, Applied Sciences, 10(11), 3798 (2020).
DOI: 10.3390/app10113798.
2. Phu Phong Vo, Hoan Ngoc Doan, Kenji Kinashi, Wataru Sakai, Naoto Tsutsumi, “X-ray composite fibrous color dosimeter based on 10,12-pentacosadiynoic acid”, Dyes and Pigments, 191, 109356, (2021).
DOI: 10.1016/j.dyepig.2021.109356
[参考論文]
3. Phu Phong Vo, Hoan Ngoc Doan, Kenji Kinashi, Wataru Sakai, Naoto Tsutsumi, Dai Phu Huynh, “Centrifugally Spun Recycled PET: Processing and Characterization”, Polymers, 10(6), 680, (2018).
DOI: 10.3390/polym10060680