

称号及び氏名	博士（工学） 下邨 広元
学位授与の日付	2015年3月31日
論文名	「物質界面における2次元放射線線量分布の測定」
論文審査委員	主査 奥田 修一 副査 河村 裕一 副査 谷口 良一

論文要旨

放射線によって固液界面に誘起される反応は、特に原子炉工学分野で重要な意味を持ち、放射線誘起表面活性（Radiation Induced Surface Activation, RISA）と呼ばれているがその機構は明らかでない。RISAの機構を解明するために、照射実験において局所的な吸収線量を評価し、放射線種依存性についての知見を得ることが非常に重要である。

本研究の目的は、照射場における固体等の界面で観測される放射線誘起反応を分析し考察することである。熱ルミネッセンス線量計（熱蛍光線量計、Thermo Luminescence Dosimeter 以下ではTLDと記す。）とイメージングプレート（Imaging Plate 以下IPと記す。）の二種類の放射線線量計を用いて応答特性を調べることで、照射場界面における局所的な吸収線量を評価し放射線種依存性についての知見を得る。更に微弱電子線照射場の2次元測定に応用として、IPによる電子線ラジオグラフィの基本特性測定を行う。

本研究の特色は、大阪府立大学の電子線形加速器（LINAC）によって作られた超微弱電子線照射場を活用して、TLDとIPの二種類の放射線線量計を用いて局所線量評価を行うことである。IPの性質として時間の経過と温度に依存して記録された情報が減少していくフェーディング特性がある。画像を得る目的では精度に関係しないが、線量計として用いる場合は問題となる。よって高精度な超微弱電子線の測定を行うために、IPのX線、 γ 線、超微弱電子線に対するフェーディング特性について測定を行う。また、X線や γ 線照射の条件をさまざまに変えることができる照射環境を活用し、照射場の評価精度を向上させて高精度での実験を行い超微弱電子線の実験結果と比較検討する。

本論文は7つの章から構成されており各章の概要は以下の通りである。

第1章は、序論として、本研究の意義、先行研究の経緯、本研究の特色と目的、本研究の結果概要を述べた。

第2章は、原理として、放射線と TLD の相互作用、放射線と IP の相互作用、ラジオグラフィの原理を述べた。

TLD とは、検知器の内部の結晶が加熱されたときにそこから放射される可視光の量を測定することにより、放射線の被曝量を測定するための小型放射線計測器である。熱蛍光物質が放射線の照射を受けると物質内で電子及び正孔が励起され、ほとんどはすぐに結晶と再結合するが、励起された電子及び正孔の一部は不純物(多くはマンガン)や格子欠陥による捕獲中心に捕らえられ、加熱されるまでそこに留まる。これが放射線のエネルギーを電氣的に蓄えることになる。これらの捕獲中心が、放射線量に比例する。

TLD 中のエレメントを構成する熱蛍光物質を 200-400°C の高温や強い光に晒すと、捕えられた電子は十分なエネルギーを得て解放され、格子中の正孔と再結合して観測可能な特定周波数の光(熱蛍光)を放出する。これが熱蛍光反応である。放出される光はトラップされた電子の量に比例し、さらに累積された被曝量に関する。

IP とは輝尽発光現象を示す輝尽性蛍光体(BaFX:Eu^{2+} , $\text{X}=\text{Cl, Br, I}$)をプラスチックの支持板上に塗布した極めて感度の高い放射線 2 次元検出器である。輝尽発光(Photo-Stimulated Luminescence 以下 PSL と記す)とは、放射線照射後に 500-700 nm の波長域の刺激光を照射した際に、約 390 nm に強度のピークを持つ発光をすることである。この発光強度に比例する値として定義されたものが PSL 値である。PSL 値は、管電圧 80 kV、照射線量 0.15 mR の X 線を照射した IP に対し、読み取り機の PSL 検出信号の値を 100 PSL/mm² と定義している。PSL 値は、読み取り機から 2 次元のデータとして取り出すことができる。

第3章は、実験装置と方法として、TLD、IP の使用法、 γ 線施設、X 線装置、電子線発生方法、実験の方法を述べた。

筆者は、市販の X 線撮影用の IP (CR SR-VI、富士フィルム製) と画像読み取り機 (AC-7/ST、富士フィルム製) を使用した。IP の画像は、通常ピクト画像である。これは、PSL 値を正規化、10-8 bit 処理、コントラスト自動調整をしたものである。線量評価に必要な PSL 値は、画像読み取り機の通常設定では取得できない。PSL 値を取得するには、画像読み取り機を起動した後、読み取りを行う前に 12 bit 配送に設定する。

工業用ラジオグラフィ(放射線透過試験 (Radiography、または RT Radiographic Testing)) は、X 線、 γ 線、中性子線などの放射線の物質透過強度の差を利用して、放射線を材料に照射し材料内部を透過させて、それが材料背後にある写真用フィルムや蛍光板に感光し投影することにより物質の内部構造を調べる非破壊検査法の一つである。現在では、写真用フィルムや蛍光板に変わって IP を用いる。IP を用いる利点は、画像呼び出しと画像消去が素早く簡単にできて、繰返し用いることができるからである。

第4章は、 γ 線の遮蔽との関係、 γ 線の線量測定について述べた。IP は、遮光をしないと PSL 値を保持できない。 γ 線を照射室の電源を切って遮光した状態でカセットから取出し、

IP の照射面に銅板をつけて照射した。その結果は、銅板のない所は IP からの応答がなく、銅板のある所は応答があった。この結果を踏まえて、IP をカセットに入れて厚さの異なる銅板をつけて照射した。その結果、PSL 値は銅板のない所に比べて銅板の厚みが増すと減少していた。この結果より、カセットを用いた際に γ 線に対して電子平衡が成り立っていると考えられる。

コバルト 60 からの γ 線は、さまざまな分野で照射利用が行われている。特に放射線治療や滅菌、放射線プロセスでは、2次元の線量分布を高感度に測定することは重要な意味を持つ。ただ、この γ 線照射では、幅広いエネルギー広がりを持つコンプトン電子による照射と考えることができ、その応答を調べることは困難である。

本研究では、IP に関するこれまでの研究結果を踏まえ、電子線照射の結果と比較しながら γ 線に対する IP の応答を調べ、照射の際の物質中での線量分布の評価に利用することを目的とした。大阪府立大学のコバルト 60 γ 線照射施設を利用して、IP の応答およびフェーディング特性を調べ、2次元線量分布測定の方法を明らかにし、モデル試料に対する γ 線照射における照射線量分布の測定とその評価を試みた。この結果 IP の PSL 値と γ 線の照射線量の間に関係が得られた。IP のフェーディング特性の結果から、照射後測定までの時間を考慮することにより、 γ 線の 2次元照射線量分布が IP を用いて比較的高い精度で得られることが明らかになった。これらの結果は、既に明らかにされている X 線や高エネルギー電子線の結果と比較された。また照射試料内部の局所的な照射線量分布の測定に利用する方法が、模擬的な試料に適用された。この結果、電子線の照射に特有の試料内の非均質に基づく非均一照射の可能性が明らかになった。

第 5 章は、超微弱電子線照射場での実験結果について述べた。超微弱電子線の IP を用いた測定、超微弱電子線照射場における 2次元線量分布の IP による測定本研究では、電子線の 2次元照射線量計としての IP の応答を調べた。大阪府立大学放射線研究センターのコバルト 60 の γ 線照射施設、16 MeV の S バンド電子線ライナックを実験に使用した。 γ 線照射実験では、IP の感度の均一性による誤差は 1%以内であることが分かった。 γ 線の照射と、IP の出力 PSL 信号との間の直線関係を得た。超微弱電子線照射の実験において、電子線のエネルギーが 8 MeV、電荷量は 10-100 pC であった。電子の電荷と IP の出力 PSL 信号との間に直線関係を得た。これらの結果は、超微弱電子線 2次元線量分布が IP を用いて比較的高い精度で得られることを示した。これらの結果を基に、IP を 2次元線量計として用いるための知見、微弱電子線照射場の 2次元測定の実用としての IP による電子線ラジオグラフィの基本特性を得た。

TLD と IP を用いた放射線測定実験を示した。大阪府立大学放射線研究センターの 16 MeV の S バンド電子線ライナックを使用し、エネルギー約 8 MeV の電子線に対する 2次元照射線量計としての IP の利用可能性を調べた。照射線量は TLD を用いた測定結果から評価された。IP の PSL 値と電子の照射線量の間に関係が得られた。この線形性は、管電圧 60 kV の X 線に対しても得られ、両者の結果が比較された。X 線では、TLD で評価された同じ照

射線量に対して、電子線より 2 桁以上高い感度が示された。IP のフェーディング特性をあらかじめ調べておくことにより、照射後の測定までの時間に影響されずに、測定された PSL 値から照射線量を評価することができ、この結果、IP を比較的高いエネルギーの電子に対する 2 次元線量計として用いることができると考えられる。PSL 値と、線量の対応は TLD で求めた。

第 6 章は、電子線ラジオグラフィについて述べた。電子ビームは、電子の飛程付近で急激に減衰する特徴がある。その結果、試料の厚さとエネルギーに敏感で高いコントラストを持った電子線ラジオグラフィの像を撮像することが可能になる。電子線ラジオグラフィの特徴について述べる。これはライナックによる超微弱放射線照射場が確立されて初めて可能となった手法である。電子線は空気中での直進性と、拡散させても平行性を保つ性質がある。この特性と、表面や表面近くの僅かな傷に対して敏感に散乱挙動を示す特性から、傷を探すことを目的とした非破壊検査の線種に適していると考えられる。

散乱挙動については、試料の縁の部分に最も大きいコントラストが発生する。内部損傷がある場合、電子ビームが損傷によって、僅かに 曲げられ散乱が発生する。その結果、損傷を発見する事ができる。本研究で、この基礎が確立された。

第 7 章は、結言として IP を用いた放射線線量測定とラジオグラフィのまとめを示した。

審査結果の要旨

本論文は、放射線が物質界面に誘起する反応を調べるために、2次元放射線線量分布を測定できる新たな方法の基礎を確立した成果をまとめると共に、その新しい応用を提案するものである。放射線透過画像を高感度に得るためのイメージングプレート (IP) の放射線に対する応答を調べ、本学の特徴ある放射線施設を活用して、次のような研究成果を得ている。

(1) IP の、X 線、 γ 線、加速器電子線に対する応答を調べ、それぞれ照射線量に対して線形性を示すことを確認した。またこの結果、 γ 線および電子線に対する感度がほぼ等しく、X 線に対する感度がそれらより 2 桁ほど高いことが明らかになった。そのほか温度変化やフェーディングについての結果から、IP がこれらの放射線に対して 2 次元線量計として利用できることが明らかになり、新たな高感度放射線線量計開発の基礎が確立された。特に加速器電子線では、本学で独自に開発された超微弱電子線を利用し、これまでに得られなかった特性について詳細なデータを取得した。

(2) 本研究の成果をもとに、現在重要な課題である、セシウム 137 γ 線に対する遮蔽の能力を、IP を用いて測定する方法を提案し、モデル試料についての測定結果を得た、今後広くこの方法が活用できると期待される。

(3) IP と高エネルギー電子線の相互作用についての基礎的な知見を得た。今後この結果を解析することにより、放射線と線量計を構成する物質との相互作用において、放射線の種類によって異なる新しい現象が明らかになることが期待される。

(4) IP と高エネルギー電子線を用いた新しいラジオグラフィを提案し、その基礎特性を明らかにした。物質の端部での散乱挙動を利用するもので、新たな分野への応用が期待される。

以上の研究成果は、新しい高感度 2 次元放射線線量計の基礎を確立したものであり、そのいくつかの応用研究も提案された。この結果は、放射線の利用分野における、学術・産業応用に関する発展に大きく貢献するものである。また、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士 (工学) の学位を授与することを適当と認める。