

こわたり むねひこ

氏名	古渡 意彦
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成 13 年 3 月 26 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)量子エネルギー工学専攻
学位論文題目	蓄光体発光機構の解明と放射線画像素子への応用に関する研究
指導教官	東北大学教授 内田 俊介
論文審査委員	主査東北大学教授 内田 俊介 東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 北村 正晴 東北大学助教授 飯沼 恒一

## 博士論文要旨

本研究では新しい蛍光体である  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+},\text{Dy}^{3+}$  を用いた放射線検出に注目した。この蓄光性蛍光体(蓄光体)は従来の夜光塗料の代替品として開発されたもので、紫外線刺激に対して高輝度・長残光を示す蛍光体であり、放射線検出器として利用した場合、他の検出器にはない特性を持つと考えられる。この蓄光体を放射線検出器として用いることによりその場で放射線量を視覚的に捉えることが可能となり、容易に放射線の有無を知ることが可能となる。この時放射線分布を一度に取得する CCD(Charge Coupled Device)等によって蓄光体の発光分布の視覚化を行う、2次元放射線画像素子への応用が考えられる。

第1章において、本研究の目的を述べる。本研究の目的は、簡易デジタルラジオグラフィを実現する候補として、蓄光体を放射線画像素子として応用する事である。蓄光体を簡易デジタルラジオグラフィのための放射線画像素子への応用を検討するにあたり必要であるのが、放射線に対する検出特性を明確に把握することであり、さらにはその基礎的情報となる発光メカニズムについての情報である。よって本研究は、蓄光体を放射線検出器として応用するための基礎的研究として、検出特性の一つである蓄光体発光の温度依存性と放射線に対する検出感度について考察し、且つ、それを手掛かりとして蓄光体に記憶された情報の復元を試みる。同時にそこで得られた基礎的な情報を元に、蓄光体を用いる放射線画像素子の試作して簡易デジタルラジオグラフィを行い、蓄光体による放射線画像素子の性能を評価する。

第二章において、本研究で注目したデジタルラジオグラフィの現状と課題、現在までに普及している蓄光体についての概説、また蓄光体をデジタルラジオグラフィに応用する上での利害得失を述べる。ラジオグラフィとは放射線の物質透過強度差を利用して、物質内部構造を評価する非破壊検査法の一つであり、前述の通り医療現場での臨床診断に大きく貢献している検査法である。従来、得られた透過像は写真フィルムに記録され、診断に用いられていたが透過像に対し、画質の改善や画像からより多くの情報を取得する目的から、得られた透過像をデジタル化し画像処理を施す事が行われてきた。これがデジタルラジオグラフィという技術である。ここで得られる画像は、二次元的な放射線透過像であり、この透過像は深さ方向に対する情報がほとんど得られない。そこで、線源と検出器の位置を移動させ、一次元の放射線透過像を複数枚撮影し、得られた像に対して画層処理を施して画像を再構築、深さ方向の密度分布情報である断面図の取得を可能としたものが CT(Computed

Tomography)である。またこのように得られた断層像について高さ方向に重ね合わせる画像処理を施したものが3次元CTである。CTでは断層写真を再構成する際に画像処理を施すためには放射線情報をデジタル化された状態で取得することが前提となっている。CTを行うためにはまず二次元であれ二次元であれ放射線透過像をデジタル化して取得することが重要である。特に産業界の要求として老朽化の進む橋梁や高架道路などの橋脚といった大規模構造物に対する非破壊検査が必要となっている。蓄光体を用いて、大規模構造物の検査のための簡易デジタルラジオグラフィを実施する場合、射線分布がその場でわかるため、画像の評価を迅速に行うことも可能であるが、もっとも良いのはCCDと組み合わせて画像処理も併せて行うような測定・表示系によって画像を取得しデジタル化を容易に行う事が可能である。デジタル化を行うことにより、データの保存性、情報量、可搬性、および判定の明瞭さが格段に向上する。

第三章において、蓄光体発光機構解明のため蓄光体発光の温度依存性および線量・線質依存性の実験および考察を行い、発光の時間変化の補正式についての決定した。また放射線に関する感度として、発光量の直線応答性と検出感度についての評価を行った。

得られた結果は次の通りである。

#### 1) 発光機構

本研究において遂行された実験および解析により次のようなことが確認された。

(1) 本研究で行った蓄光体の試料温度範囲において、発光に寄与するトラップは4成分存在する。これは、紫外線における刺激による発光に際し複数の減衰成分の存在が予想されており、放射線の刺激においても同様に確認された。成分のトラップからの離脱率 $\lambda$ には温度依存性があり、室温付近での時定数は数秒〜数万秒である。また、各トラップでの活性化エネルギーは0.025~0.35[eV]である。各トラップにおける活性化エネルギーは報告と異なっているが、放射線のエネルギーにより、紫外線の照射においては発現しないような捕獲中心に捕らえられている可能性が考えられる。

(2) 正孔の捕獲率 $r$ の成分比 $f(i)$ は $\beta$ 線照射において、時定数の長い成分から順に、slow : intermediate : fast : ultra-fast = 0.18 : 0.16 : 0.31 : 0.35となる。

#### 2) 発光の温度依存性

(1) 全発光量は、正孔の離脱率 $\lambda$ と非放射遷移過程の温度依存性に支配され、線種によらず室温付近にpeakを持つ曲線となる。また、 $\alpha$ 線と $\beta$ 線で曲線の形が異なるのは捕獲率 $r$ と平均初期電離密度の違いによるものと考えられ、 $\gamma$ 線は $\beta$ 線とほぼ同じ変化を示す。

(2) 同一の放射線による刺激について、発光率の時間プロファイルが温度によって大きく変化する。これは減衰成分のそれぞれの $\lambda$ に温度依存性があるためである。またこの場合においても捕獲率 $r$ に温度依存性があるためである。

(2) 低温領域で発光に寄与しない正孔は、その試料温度においてはトラップに保存され続け、加熱することにより凍結発光量として発現する。

#### 3) 検出感度

(1) すべての線種に対し、吸収エネルギー量に対し直線的に発光量が増加する。これにより、放射線画像素子として応用する際に広い範囲での直線応答が期待できる。

(2) 本研究において、放射線に対する蓄光体の検出感度を $W_p$ 値によって評価し、その結果、 $\beta$ および $\gamma$ 線について18eV、 $\alpha$ 線について480eVと見積もられる。特に $\gamma$ 線 $\beta$ 線については、従来のシンチレーション検出器に使用されるシンチレーターと同程度の感度を有していることを確認した。

(3) また蓄光体の発光に結晶内における電子/正孔対の初期再結合が大きく影響を与え、初期電離

密度の大きなものは発光効率が減少する事を確認した。

第四章では、これまで本研究において遂行された実験および考察によって得られた蓄光体発光機構に関する情報を利用して、蓄光体を用いる放射線検出への応用を行う。そこで、蓄光体による放射線画像素子を試作して簡易デジタルラジオグラフィを行う。そのとき蓄光体による放射線画像素子の性能も併せて評価する。ラジオグラフィにおいて要求される性能には、空間分解能と分離できるコントラスト比が挙げられる。本章においては、線源には $\gamma$ 線およびX線を使用してこれらの性能を評価する。

そこで得られた知見を次に示す。

- (1)  $\gamma$ 線ラジオグラフィにおける蓄光体による放射線画像素子の分解能を評価し、分解能は 3.1mm であることを確認した。
- (2)  $\gamma$ 線の照射により放射線透過像を取得した。
- (3) X線ラジオグラフィにおける蓄光体による放射線画像素子の分解能を評価し、分解能は 0.42mm であることを確認した。
- (4) X線ラジオグラフィにおいて、Cu 厚で 0.5mm 差を判別することが可能であることを確認した。

第5章に結論を示す。本研究において遂行された実験および考察により次のようなことが明らかとなった。

- (1) 室温 (300K) における蓄光体からの発光率の補正式を決定した。これを用いることにより照射時間および照射開始あるいは終了時からの時刻を把握することで、発光率の時間変化を再現できる。
- (2) 蓄光体を用いる放射線画像素子を試作しX線および $\gamma$ 線による簡易デジタルラジオグラフィを実施した。この時に得られた分解能はX線で約 0.4mm である。従来のものと比較して、数倍～10倍程度大きいのが、医療用の場合 1mm の病巣を判断できれば十分実用に差し支えないのが現状である。その点に於いて、十分実用に適応できる性能であるといえる。これは今回対象とする大規模構造物の柱や橋脚についても十分であるといえる。

# 論文審査結果の要旨

高架道路、橋梁の支柱など大型構造物の劣化診断に、将来の断層像撮像も含め、放射線デジタルラジオグラフィの適用が期待されている。大型構造材のデジタルラジオグラフィでは、屋外でも適用可能な簡便かつ高精度な2次元放射線分布測定が不可欠で、しかも複数の透過像を重ねあわせることのできる絶対線量率測定が必要となる。著者は、元来夜光塗料として用いられていた蓄光体が室温で可視スペクトルに近い蛍光をゆっくりと発することに着目し、蓄光体の発光機構を解明し、蓄光体を用いた絶対線量率測定を可能として、2次元放射線分布測定素子を開発することにより、蓄光体を用いた2次元デジタルラジオグラフィの可能性を明らかにした。本論文はこの成果についてまとめたもので、全文7章よりなる。

第1章は、序論であり、本研究の背景及び目的を述べている。

第2章では、大型構造物の非破壊検査におけるラジオグラフィの位置付けと蓄光体を適用した場合の特徴と技術課題を示した。蓄光体として、発光率が高く、室温でのエネルギー損失が小さく、また発光が視覚スペクトルに近いという優れた残光特性を持つ  $\text{SrAl}_2\text{O}_4:\text{Eu}^{2+}, \text{Dy}^{3+}$  を選定した。発光の温度、時間依存性を定量化することにより、2次元放射線分布の絶対測定が可能であることを明らかにした。

第3章では、蓄光体の発光機構を解明した結果を示した。蓄光体の発光が、 $\text{Eu}^{2+}$ などの電子捕獲帯からの電子放出過程、 $\text{Dy}^{3+}$ などのホール捕獲帯からのホール放出過程、電子とホールの再結合過程などが律速過程となり、4種の発光成分に分離されることを明らかにし、発光の温度依存性の測定により各成分のエネルギー放出確率を実験的に求めた。また、発光量の線質及び線量率依存性を測定し、 $\gamma$ 線及び $\beta$ 線について広い線量率範囲で検出感度に直線性のあることを実証した。この結果より、蓄光体を用いることにより、照射時間、照射後の経過時間及び保管温度を定量的に把握しておくだけで、蓄光体からの発光量を測定することにより、蓄光体設置位置での絶対線量率も求めることができることを明らかにした。

第4章では、本蓄光体を用いたデジタルラジオグラフィ用2次元放射線画像素子を試作し、その有効性を実証した結果を示した。粒径  $60\ \mu\text{m}$  の蓄光体微粒子をアルミ板とアクリル樹脂板で挟んでフィルムに加工して、2次元画像素子を製作し、放射線照射後の発光量を2次元 CCD カメラでデジタル発光分布として測定した。40-159keV の X線あるいは  $^{60}\text{Co}$  からの 1.17 および 1.33MeV の  $\gamma$  線を用いてファントムの2次元透過像を撮影し、空間分解能 0.4mm (蓄光体粒子径の約10倍) となることを示した。分解能は主として透過線量率の散乱成分によるものと蓄光体粒子による散乱によるものであることを明らかにした。

第5章は、結論である。

以上、要するに本論文では、蓄光体の発光機構解明の結果に基づき、イメージングプレートより簡便に、CCD カメラでの直接撮影より小型で、X線フィルムより高感度、高精度で、デジタルラジオグラフィが取得可能な蓄光体を用いた2次元画像素子を開発し、その有効性を実証したものであり、放射線を用いた大型構造物の非破壊検査法としてのデジタルラジオグラフィの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。