

人体組織等価 2 次元熱蛍光線量計による線量評価

海上安全研究領域 * 近内亜紀子、大西世紀、小田野直光
高輝度光科学研究センター 成山展照
根本特殊化学(株) 小笹尚登、石川雄三

1. はじめに

現在放射線は、原子力発電施設のみでなく、加速器施設や医学利用現場、非破壊検査など、様々な場面で利用されている。このような放射線の利用形態の多様化に伴い、個人被ばく線量管理においても様々な被ばく状況を想定する必要性が高まってきているが、現行の小型ガラスバッジ線量計による方法ではその対応が困難である。局所的な被ばくや強度分布を持った放射線による被ばくを正確に評価するためには、広面積の線量計が必要である。しかも、個人被ばく線量管理を実施するという観点からは、線量計は軽量で作業に支障の出ないものであることが望ましい。また、放射線に対するエネルギー応答特性は物質によって異なるため、人体に対する被ばく線量を正確に測定するには、線量計が人体組織と等価なエネルギー応答特性を持つ元素で構成されている必要がある。

しかしながら、このような特徴を持つ線量計は未だ実現されていない。そこで我々は、人体軟組織と等価なエネルギー特性をもつ薄く柔らかい素材を用いたシート型の 2 次元型線量計の開発を進めている¹⁻⁵。線量計の材料はフッ化リチウムを主成分とした熱蛍光体 LiF:Mg,Cu,P と高分子のバインダー材料である。LiF:Mg,Cu,P 及び 2 次元線量計の特性、並びに 2 次元線量計内の蛍光体分布を評価した結果を報告する。

2. 2 次元線量測定システム

2. 1 2 次元熱蛍光線量計

熱蛍光線量計の原理を、図 1 に示す。放射線のエネルギーを吸収することにより一度電離した電子は、添加物のためにできた準安定状態に束縛される。この状態の熱蛍光体を加熱すると、電子状

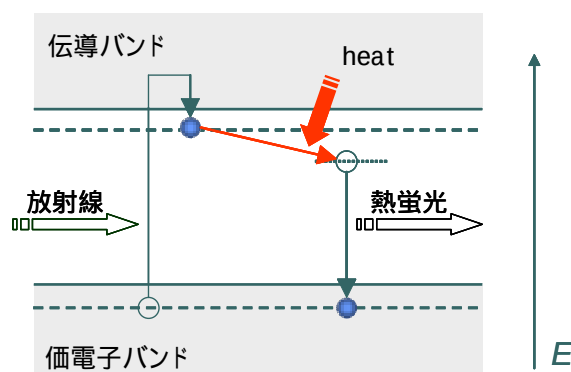


図 1 熱蛍光の原理

態が変化し脱励起する。脱励起光の強度は吸収した放射線のエネルギーに比例するため、脱励起光の強度を測定することにより、熱蛍光体による線量測定が可能となる。線量測定後の熱蛍光線量計は、再利用可能である。

熱蛍光体の製作は、発光中心や安定剤となる Mg、Cu、P を LiF 結晶に添加し、約 700 °C で焼結することによって行っている。2 次元線量計製作のためには大量の熱蛍光体が必要となるので、焼結温度はアルミナ容器で焼結可能な 700 °C に設定した。製作後酸で洗浄し粒径を約 50 μm に揃えた熱蛍光体を、2 次元線量計材料として用いている。我々の製作している LiF:Mg,Cu,P 熱蛍光体の感度は、現在線量測定において広く用いられている LiF:Mg,Ti 型の熱蛍光体に比べて 10 倍程度高い。また、グローブピークは 200 °C 付近に存在するので、熱蛍光線量計にたまった放射線量を測定する際には、240 °C 程度まで以上の加熱が必要となる。

蛍光体をシート成型するためのバインダー材料としては、一般にテフロンと呼ばれる材料の中でも融点が高いエチレン・テトラフルオロエチレンの共重合体(ETFE)を用いた。蛍光体 LiF:Mg,Cu,P

は高温加熱により感度低下を起こしてしまうので、シート成型時の加熱による感度低下を防ぐためである。最終的な 2 次元線量計の大きさは 20cm 角を想定しているが、現在は 10cm 角の線量計によって特性評価を行っている。

2. 2 熱蛍光量測定装置



図 2 熱蛍光量測定装置

熱蛍光量測定装置の外観を図 2 に示す。2 次元線量計を均一に加熱するための加熱プレートは、写真最下部である。加熱によるシートの変形を抑えるために、石英ガラスをシートの上に被せた状態で測定を行っている。熱線量計からの発光は光学レンズによってイメージ・インテンシファイアに集光され、2 次電子として信号が増倍される。2 次電子は蛍光板にあてられ、その発光を CCD カメラで読み取り、データは PC に転送される。1 回の測定に要する時間は、5 分程度である。

3. 実験

3. 1 熱蛍光体及び 2 次元線量計の特性評価

熱蛍光体及び 2 次元線量計の特性評価実験は、高輝度光科学研究センター SPring-8 放射光施設に

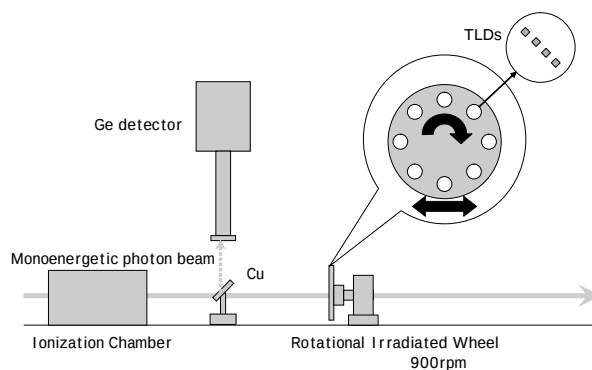


図 3 実験装置概略

において行った。実験の概略を図 3 に示す。高エネルギー用ビームライン BL38B1 において、10 ~ 150keV の放射光を線量計に照射した。放射光はシリコン結晶回折格子を用いて分光し、そのエネルギーは高純度ゲルマニウム検出器でエネルギー変更毎に確認した。放射光強度は高エネルギー用に開発した電離箱でモニターし、空気減衰も考慮して照射線量を算出した⁵。電離箱は、フォトダイオードとの比較で校正済みであり、3%以内の精度が保証されている。

放射光のビーム面積は通常 2mm × 3mm と細く絞っているので、均一に照射するために図 3 に示したような回転板に線量計を設置して照射した。熱蛍光体は粉末なのでポリエチレンの袋に入れてシールし、2 次元線量計は小片にして回転板に設置した。また、2 次元線量計に関しては、固定したまま数カ所に照射し、同一線量計内の線量応答及びエネルギー特性も調べた。

熱蛍光体及び 2 次元線量計小片からの熱蛍光量測定は、3500 型 TLD システム(Harshaw)を用いて行った。切断していない 2 次元線量計からの熱蛍光量測定は、前述した熱蛍光量測定装置を用いて行った。

3. 2 2 次元線量計内元素分布

線量計内の蛍光体分布を調べるため、放射線計測協会において ⁶⁰Co 線源によるガンマ線均一照射を行った。照射線量はそれぞれ 0.5、1.0、1.5Gy であった。前述した熱蛍光量測定装置を用いて測定した熱蛍光量分布から、線量計内における蛍光体の 2 次元分布を知ることができる。

4．結果

4．1 熱蛍光体及び 2 次元線量計の特性評価

図 4 に示したように、熱蛍光体 LiF:Mg,Cu,P は 60、80、100keV の放射光約 2Gy 程度までの照射線量に対して線形応答が得られたので、線量計として適切に働くことが確認された。

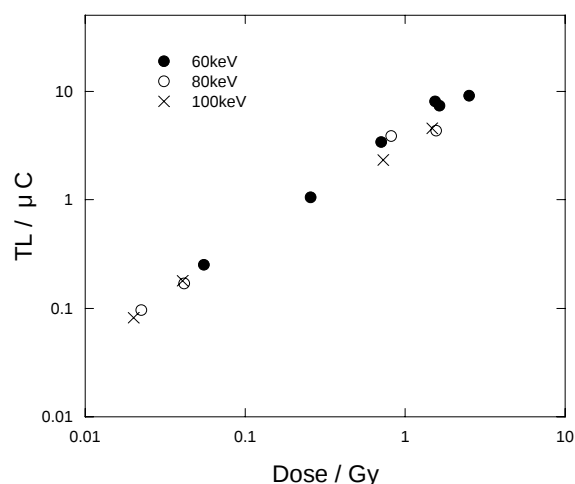


図 4 60、80、100keV に対する LiF:Mg,Cu,P の線量応答

また、熱蛍光体 LiF:Mg,Cu,P は、図 5 に示したように人体軟組織に近いエネルギー特性を持つことが明らかになった。

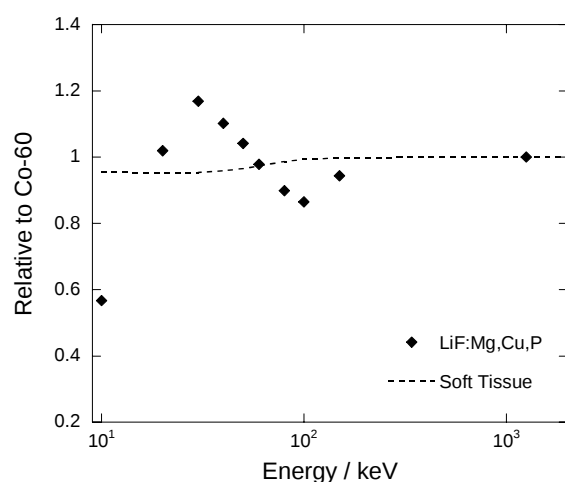


図 5 LiF:Mg,Cu,P 熱蛍光体のエネルギー特性

蛍光体に ETFE を加えてシート成型した後の 2 次元線量計も人体軟組織に近いエネルギー特性を持つことが確認された。重元素組成の熱蛍光体 BaSO₄ を用いた 2 次元線量計と比較したものを図 6 に示す。

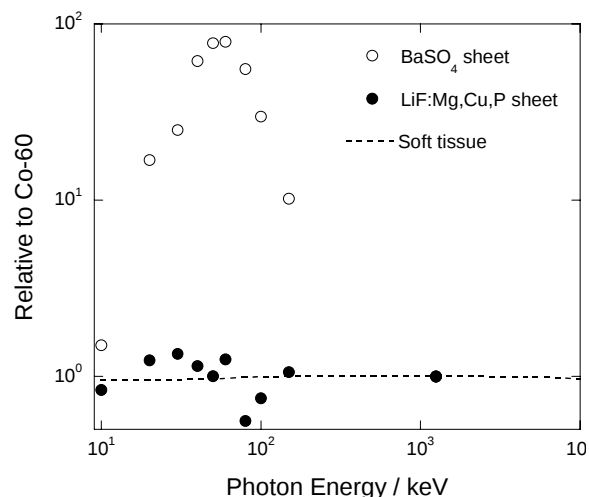


図 6 2 次元線量計及び重元素を用いた 2 次元線量計のエネルギー特性

エネルギー 30keV の放射光をそれぞれ 1.5、3.0、6.0Gy 照射した 2 次元線量計からの熱蛍光量を、図 7 に示す。図 7 下部は上の 2 次元図のうち選択部分を Y 軸方向に積算したものである。照射線量に応じた熱蛍光量が観測されたが、発光量は照射線量比からは外れており、2 次元線量計の中心部において発光量が照射線量比と比較して最も高くなった。

4．2 2 次元線量計内元素分布

⁶⁰Co 線源を用いて 2 次元線量計にガンマ線を 0.5、1.0、1.5Gy 照射したが、線量に対する熱蛍光量には線量計の個体差が現れた。1.5Gy 照射した 2 次元線量計からの熱蛍光量を測定した結果を、図 8 に示す。2 次元線量計の中心部において発光量が高くなっており、図 7 の結果と同傾向を示した。したがって現試作段階では 2 次元線量計内において蛍光体が中心部に偏って分布している可能性がある。また、他の原因としては、加熱プレート周辺部において放熱が起こりやすいため温度が低くな

る等、加熱プレートに温度分布ができ線量計が均一に加熱されていない可能性も考えられる。

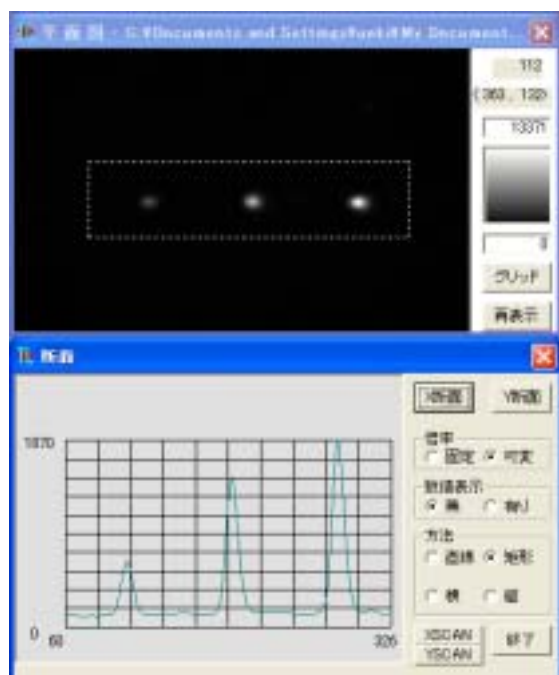


図7 30keV 放射光を 1.5、3.0、6.0Gy 照射した
2次元線量計からの熱蛍光量



図8 ガンマ線均一照射(1.5Gy)した
2次元線量計からの熱蛍光量

5. まとめ

以上の実験から、熱蛍光体 LiF:Mg,Cu,P は優れた感度を持ち、線量応答も線量計として適切で、人体と近いエネルギー特性を持つことが確認された。この蛍光体を用いて製作した2次元線量計も人体等価なエネルギー特性を持ち、現在汎用されている主成分に重元素が含まれる蛍光体 $\text{BaSO}_4\text{:Eu}$ を用いた2次元線量計等よりも人体の線量測定に適していることが確認された。

しかしながら、線量計内での蛍光体分布に偏りがあるか、線量計を加熱する際のプレートに温度分布があることに起因する2次元線量計による線量測定における不確かさが残っている。また、シート成型する際に個体差ができてしまうことも、解決すべき課題である。

今後の計画としては、シート製作方法を改善し均一な元素分布を持つ2次元線量計の安定な製作方法を確認すること、また、2次元線量計を均一に加熱できるシステムを構築することを目指す。一方、走査型電子顕微鏡やX線回折措置等の分析装置を用いて、熱蛍光体 LiF:Mg,Cu,P で現在確認されている高温加熱による感度低下の原因を明らかにし、高温加熱によっても感度低下しない熱蛍光体の開発も実施する予定である。

謝辞

本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

参考文献

1. Akiko Konnai *et al.*: “Energy Response of a Two-dimensional Sheet-type LiF:Mg,Cu,P TL Dosimeter to Photons” *Radiat. Protect. Dosim.* (2004), to be published.
2. Akiko Konnai *et al.*: “Neutron Dosimetry with ^6LiF -rich Tissue-equivalent TL Sheet” *Radiat. Protect. Dosim.* (2004), to be published.
3. 成山他、「人体組織等価2次元線量計システムの開発」、原子力学会2004年春の年会要旨集.
4. 近内他、「」、
5. N. Nariyama *et al.*: “Tissue-equivalent TL sheet dosimetry system for gamma-ray spatial dose distribution measurement” *Radiat. Protect. Dosim.* (2003), to be published.
6. N. Nariyama *et al.*: “Development of a portable free-air ionization chamber as an absolute intensity monitor for high-energy synchrotron radiation up to 150 keV” *Nucl. Instr. Meth. A* **524** (2004) 324-331.