

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5643763号
(P5643763)

(45) 発行日 平成26年12月17日 (2014. 12. 17)

(24) 登録日 平成26年11月7日 (2014. 11. 7)

(51) Int. Cl. F I
G 2 1 K 4/00 (2006. 01) G 2 1 K 4/00 L

請求項の数 39 (全 26 頁)

(21) 出願番号	特願2011-533315 (P2011-533315)	(73) 特許権者	504214349 ランダウアー インコーポレイテッド アメリカ合衆国 イリノイ 60425-1586, グレンウッド, サイエンス ロード 2
(86) (22) 出願日	平成21年10月22日 (2009. 10. 22)	(74) 代理人	100163647 弁理士 進藤 卓也
(65) 公表番号	特表2012-507006 (P2012-507006A)	(72) 発明者	アクセルロッド, マーク エス. アメリカ合衆国 オクラホマ 74075, スティルウォーター, ウェッジウッド ドライブ 516
(43) 公表日	平成24年3月22日 (2012. 3. 22)	(72) 発明者	シーコラ, ガレット ジェイ. アメリカ合衆国 オクラホマ 74075, スティルウォーター, マリー ドライブ 204 イー.
(86) 国際出願番号	PCT/US2009/061587		
(87) 国際公開番号	W02010/048356		
(87) 国際公開日	平成22年4月29日 (2010. 4. 29)		
審査請求日	平成23年6月22日 (2011. 6. 22)		
(31) 優先権主張番号	12/258, 035		
(32) 優先日	平成20年10月24日 (2008. 10. 24)		
(33) 優先権主張国	米国 (US)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 混合放射線のルミネセンス固体線量計測法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

以下の工程：

(a) 1つ以上の放射線が照射されたルミネセンス材料について、1つ以上の各線量計測パラメータの1つ以上の各値を提供する工程；および

(b) 該1つ以上の各線量計測パラメータの該各値に基づいて、該1つ以上の放射線について吸収線量を決定する工程を含む方法であって、該1つ以上の各線量計測パラメータの該各値が、それぞれ該ルミネセンス材料の1つ以上の高空間分解能蛍光画像の空間周波数領域分析に基づくものであり、かつ該1つ以上の各線量計測値の少なくとも1つが、該ルミネセンス材料の該1つ以上の高空間分解能蛍光画像の1つの高空間分解能蛍光画像についてのパワースペクトルの積分値である、方法。

10

【請求項 2】

以下の工程：

(c) 前記ルミネセンス材料の前記1つ以上の高空間分解能蛍光画像の前記空間周波数領域分析に基づいて、前記1つ以上の各線量計測パラメータのそれぞれの該値を決定する工程、

をさらに含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 3】

以下の工程：

(d) 前記ルミネセンス材料を、1つ以上の放射線に曝露する工程、

20

(e) 工程 (d) の実施後、該ルミネセンス材料について、蛍光の 1 つ以上の空間分布を測定する工程、および

(f) 工程 (e) において測定された蛍光のそれぞれの空間分布に基づいて、該ルミネセンス材料の高空間分解能蛍光画像を形成する工程、
をさらに含む、請求項 2 に記載の方法。

【請求項 4】

前記工程 (d) が、種類、エネルギーおよび入射角が既知の粒子を用いて行われる、請求項 3 に記載の方法。

【請求項 5】

前記工程 (e) が、レーザー走査型共焦点蛍光顕微鏡法を用いて行われる、請求項 3 に記載の方法。

10

【請求項 6】

前記工程 (e) が、前記 1 つ以上の線量計測パラメータのそれぞれについての値を得ることによって予め較正された線量計測機器を用いて行われる、請求項 3 に記載の方法。

【請求項 7】

それぞれの高空間分解能蛍光画像が 2 次元である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 8】

それぞれの高空間分解能蛍光画像が 3 次元である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 9】

前記 1 つ以上の放射線が、低エネルギー光子、高エネルギー光子、高エネルギー電子、ベータ粒子、陽電子、高速中性子、減速中性子、熱外中性子、熱中性子、アルファ粒子、陽子、パイオン、重荷電粒子、および核断片からなる群のうち 1 つ以上を含む、請求項 1 に記載の方法。

20

【請求項 10】

前記 1 つ以上の放射線が、前記ルミネセンス材料の部分に覆うコンバータにおいて高速中性子によって生じる反跳陽子を含み、該コンバータが、水素含有材料を含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 11】

前記 1 つ以上の放射線が、前記ルミネセンス材料の部分に覆うコンバータと中性子との核反応によって生じるアルファ粒子および / またはトリチウムイオンを含み、該コンバータが、熱中性子、熱外中性子または減速中性子の捕獲断面積が高い同位元素を含む、請求項 1 に記載の方法。

30

【請求項 12】

前記ルミネセンス材料が無機である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 13】

前記ルミネセンス材料が無機ガラスを含む、請求項 12 に記載の方法。

【請求項 14】

前記ルミネセンス材料が、銀でドーブされたアルモリン酸 (alumophosphate) ガラスを含む、請求項 13 に記載の方法。

【請求項 15】

前記ルミネセンス材料が、結晶金属酸化物を含む、請求項 12 に記載の方法。

40

【請求項 16】

前記結晶金属酸化物が、1 つ以上の酸素空孔欠陥を含む、請求項 15 に記載の方法。

【請求項 17】

前記結晶金属酸化物が、 Al_2O_3 を含む、請求項 16 に記載の方法。

【請求項 18】

前記ルミネセンス材料が、マグネシウムをさらに含む、請求項 17 に記載の方法。

【請求項 19】

前記ルミネセンス材料が、炭素をさらに含む、請求項 18 に記載の方法。

【請求項 20】

50

励起された前記ルミネセンス材料からの蛍光が、 $750 \pm 60 \text{ nm}$ に中心がある波長を有する、請求項 19 に記載の方法。

【請求項 21】

前記ルミネセンス材料が有機である、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 22】

前記ルミネセンス材料の 1 つ以上の部分が、前記 1 つ以上の放射線による照射中、各コンバータによってそれぞれ覆われている、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 23】

前記 1 つ以上の放射線が、高エネルギー光子を含み、前記ルミネセンス材料の部分が、非水素含有材料を含むコンバータによって覆われている、請求項 22 に記載の方法。

10

【請求項 24】

前記コンバータが、ポリテトラフルオロエチレンを含む、請求項 23 に記載の方法。

【請求項 25】

前記 1 つ以上の放射線が、高速中性子を含み、前記ルミネセンス材料の部分が、水素含有材料を含むコンバータによって覆われている、請求項 22 に記載の方法。

【請求項 26】

前記コンバータが、高密度ポリエチレンを含む、請求項 25 に記載の方法。

【請求項 27】

前記 1 つ以上の放射線が、減速中性子を含み、前記ルミネセンス材料の部分が、 ${}^6\text{Li}$ 同位元素を含むコンバータによって覆われている、請求項 22 に記載の方法。

20

【請求項 28】

前記コンバータが、フッ化リチウムを含む、請求項 27 に記載の方法。

【請求項 29】

前記 1 つ以上の放射線が、減速中性子を含み、前記ルミネセンス材料の部分が、 ${}^{10}\text{B}$ 同位元素を含むコンバータによって覆われている、請求項 22 に記載の方法。

【請求項 30】

前記コンバータが、酸化ホウ素を担持したポリテトラフルオロエチレンを含む、請求項 29 に記載の方法。

【請求項 31】

以下の工程：

30

(a) 第 1 のコンバータによって覆われた、照射ルミネセンス材料の部分について、第 1 の種類の放射線についての第 1 の線量計測パラメータを提供する工程；

(b) 第 2 のコンバータによって覆われた、照射ルミネセンス材料の部分について、該第 1 の種類の放射線と第 2 の種類の放射線との組み合わせについての第 2 の線量計測パラメータを提供する工程；

(c) 該第 1 の線量計測パラメータの値に基づいて、該第 1 の種類の放射線の吸収線量を決定する工程；および

(d) 該第 1 の線量計測パラメータおよび該第 2 の線量計測パラメータの両方の値に基づいて、該第 2 の種類の放射線の吸収線量を決定する工程

を含み、

40

該ルミネセンス材料が、該工程 (a) および (b) の前に該第 1 の種類の放射線および該第 2 の種類の放射線で照射されたものであり；かつ

該第 1 の線量測定パラメータおよび該第 2 の線量測定パラメータがそれぞれ、該照射ルミネセンス材料の 1 つ以上の高空間分解能蛍光画像の高周波数領域分析に基づくものである、方法。

【請求項 32】

前記第 1 の種類の放射線が、高エネルギー光子を含み、前記第 1 のコンバータが、非水素含有材料を含む、請求項 31 に記載の方法。

【請求項 33】

前記第 2 の種類の放射線が、高速中性子を含み、前記第 2 のコンバータが、水素含有材

50

料を含む、請求項 3 1 に記載の方法。

【請求項 3 4】

前記第 2 の種類の放射線が、減速中性子を含み、前記第 2 のコンバータが、 ${}^6\text{Li}$ 同位元素を含む、請求項 3 1 に記載の方法。

【請求項 3 5】

前記第 2 の種類の放射線が、減速中性子を含み、前記第 2 のコンバータが、 ${}^{10}\text{B}$ 同位元素を含む、請求項 3 1 に記載の方法。

【請求項 3 6】

前記 1 つの高空間分解能蛍光画像に 1 つ以上の変換を適用する工程を含む、請求項 1 に記載の方法。

10

【請求項 3 7】

前記 1 つの高空間分解能蛍光画像にフーリエ変換を適用する工程を含む、請求項 3 6 に記載の方法。

【請求項 3 8】

以下の工程：

(d) 前記 1 つの高空間分解能蛍光画像に高速フーリエ変換を適用する工程、

(e) 該フーリエ変換のパワースペクトルを決定する工程、

(f) 選択された周波数範囲にわたって該 1 つの高空間分解能蛍光画像についての該パワースペクトルの積分を得ることによって該 1 つの高空間分解能蛍光画像についてのパワースペクトルの積分値を決定する工程、

20

を含む、請求項 3 7 に記載の方法。

【請求項 3 9】

前記線量計測パラメータのそれぞれが、周波数領域分析と空間領域分析との組み合わせに基づく、請求項 1 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本出願は、同時係属中の米国特許出願番号 12 / 258 , 035 号 (「METHOD OF LUMINESCENT SOLID STATE DOSIMETRY OF MIXED RADIATIONS (混合放射線のルミネセンス固体線量計測法)」との発明の名称で、2008年10月24日に提出された)を参照し、そ

30

してその優先日を主張する。その開示および内容の全体は、参照として本明細書に援用される。

【0002】

本発明は、一般に、線量計測技術に関する。

【背景技術】

【0003】

中性子および重荷電粒子 (HCP) の測定は、いまだに放射線量計測における最も困難な課題の 1 つである。最も広く研究され、用いられている受動検出技術の中には、CR-39 プラスチックおよびその誘導体に基づくプラスチック飛跡検出器 (plastic nuclear track detectors: PNTD)、アルベド構成の ${}^6\text{LiF}$ および ${}^7\text{LiF}$ 対熱ルミネセンス線量計 (TLD) および過熱バブル線量計 (superheated bubble detectors: SBD) である。Bentonら、「Proton Recoil Neutron Dosimeter for Personnel Monitoring」、Health Phys., 40、801-809頁 (1981); Pieschら、「Albedo Dosimetry System for Routine Personnel Monitoring」、Radiat. Prot. Dosim., 23(1/4)、117-120頁 (1988); d'Errico、「Radiation Dosimetry and Spectrometry with Superheated Emulsions」、Nuclear Instr. Meth. B、184、229-254頁 (2001)を参照のこと。

40

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

TLDは、強い中性子エネルギー依存、ならびに低LET (線エネルギー付与)放射線

50

と高線LET放射線との識別における困難性を有する。PNTDは中性子/ガンマを十分に識別するが、労力を要する湿式化学処理が必要であり、飽和フルエンス(saturation fluence)が低い。SBDは、中性子に対して非常に感受性であるが、嵩高く、環境的に不安定である。これらのすべての困難性は、新たな取り組みの探索を促進した。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明の第1の広い局面によれば、以下の工程：(a)1つ以上の放射線が照射されたルミネセンス材料について、1つ以上の各線量計測パラメータの1つ以上の各値を提供する工程；および(b)該1つ以上の各線量計測パラメータの該各値に基づいて、該1つ以上の放射線についての吸収線量を決定する工程、を含む方法が提供され、該1つ以上の線量計測パラメータは、それぞれ該ルミネセンス材料の1つ以上の高空間分解能蛍光画像の空間周波数領域分析に基づく。

10

【0006】

本発明の第2の広い局面によれば、以下の工程：(a)1つ以上のコンバータによって覆われたルミネセンス材料の表面下の異なる深さにおける1つ以上の高空間分解能蛍光画像の測定に基づいて、1つ以上の放射線のための1つ以上の線量計測パラメータの深さプロファイルを提供する工程、および(b)該深さプロファイル分析に基づいて、1つ以上の放射線のエネルギー中央値を決定する工程、を含む方法が提供される。

【0007】

本発明の第3の広い局面によれば、以下の工程：(a)第1の線量計測パラメータの第1の値および第2の線量計測パラメータの第2の値を提供する工程、および(b)該第1の値と該第2の値との比率に基づいて、放射線照射野における中性子のエネルギー中央値を決定する工程、を含む方法が提供され、該第1の線量計測パラメータの該第1の値は、第1のコンバータによって覆われたルミネセンス材料について得られ、そして該第2の線量計測パラメータの該第2の値は、第2のコンバータによって覆われたルミネセンス材料について得られ、そして該第1および第2の線量計測パラメータは、それぞれ該ルミネセンス材料の1つ以上の高空間分解能蛍光画像の分析に基づく。

20

【0008】

本発明の第4の広い局面によれば、以下の工程：(a)1つ以上の放射線誘導性蛍光シグナルを与えるルミネセンス材料を提供する工程、および(b)該ルミネセンス材料に、多光子吸収および光イオン化のために十分な出力密度でレーザー光を照射することによって、該ルミネセンス材料から該1つ以上の放射線誘導性蛍光シグナルを除去する工程、を含む方法が提供される。

30

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】約7MeVのエネルギー中央値を有する中性子が照射された、本発明の1つの実施態様による線量計構成の概略図である。

【図2】約1MeVのエネルギー中央値を有する中性子が照射された、図1の線量計構成の概略図である。

【図3】約60keVのエネルギー中央値を有する中性子が照射された、図1の線量計構成の概略図である。

40

【図4】中性子およびガンマ線照射検出器の蛍光画像を得るために、本発明で用いられる共焦点レーザー走査型読み出し装置の概略図である。

【図5】60mSvのAmBe高速中性子による照射後のAl₂O₃:C, Mg単結晶検出器の共焦点蛍光画像である。

【図6】30mGyの¹³⁷Csガンマ放射線による照射後のAl₂O₃:C, Mg単結晶検出器の共焦点蛍光画像である。

【図7】水素含有コンバータによって覆われそしてAmBe源から0.3Svの高速中性子が照射されたAl₂O₃:C, Mg単結晶検出器から得られた高分解能蛍光画像の高速フーリエ変換によって得られた3次元パワースペクトルである。

50

【図 8】円柱座標で 2 次元パワースペクトルを積分することによって得られた、非照射ならびにおよび 30、100 および 1000 mSv の AmBe 高速中性子が照射された $Al_2O_3 : C$ 、Mg 検出器の蛍光画像から得られた空間周波数のパワースペクトルである。

【図 9】10、30、100 および 300 mGy の ^{137}Cs ガンマ放射線が照射された $Al_2O_3 : C$ 、Mg 検出器の蛍光画像から得られた空間周波数のパワースペクトルである。

【図 10】2 つの線量決定方法についての線量依存を示すグラフである：飛跡計数モード（黒四角形）およびパワースペクトルモード（三角形および円形）。

【図 11】 $^{90}Sr / ^{90}Y$ および ^{85}Kr 源から放出されたベータ粒子が照射された $Al_2O_3 : C$ 、Mg 検出器についてのパワースペクトル積分の線量依存を示すグラフである。

10

【図 12】ポリエチレンの裏側に照射された $Al_2O_3 : C$ 、Mg 検出器についてのパワースペクトル積分の正規化された光子エネルギー応答を示すグラフである。応答は、208 keV の X 線での送達された線量に対して正規化され、1 mm のポリエチレンコンバータにおける吸収について補正される。

【図 13】 ^{137}Cs ガンマ放射線が照射された $Al_2O_3 : C$ 、Mg 検出器についての深さの関数としての一定のパワースペクトル積分を示すグラフである。

【図 14】準単一エネルギー中性子が照射された $Al_2O_3 : C$ 、Mg 検出器についてのパワースペクトル積分の正規化された深さプロファイルを示すグラフであり、提案された方法の分光能力を説明する。パワースペクトル積分は、照射中ポリエチレンコンバータによって覆われた検出器の表面下の異なる深さで検出器の共焦点蛍光イメージングおよび高速フーリエ変換 (FFT) 処理によって得られる。

20

【図 15】準単一エネルギー中性子が照射された $Al_2O_3 : C$ 、Mg 検出器における反跳陽子飛跡密度の正規化された深さプロファイルを示すグラフであり、提案された方法の分光能力を説明する。飛跡密度は、照射中ポリエチレンコンバータによって覆われた検出器の表面下の異なる深さで検出器をイメージングすることによって得られる。

【図 16】検量線および検出器表面で飛跡密度またはパワースペクトル積分がその $1/e$ まで減少する結晶深さをを用いることによって中性子場のエネルギー中央値を決定する方法を示すグラフである。

【図 17】水素含有コンバータ（高密度ポリエチレン (HDPE) (白記号) および 6Li 含有コンバータ (6Li が天然に存在する LiF) (黒記号)) によって覆われた $Al_2O_3 : C$ 、Mg 検出器についてのエネルギー依存を示すグラフである。照射は、単一エネルギー広いスペクトルの中性子で行われ、測定は、飛跡計数モードで行われる。

30

【図 18】同じ検出器の 2 つの領域を覆った 2 つのコンバータ (HDPE および LiF) の裏側で得られた飛跡密度の比率のエネルギー依存を示すグラフである。

【図 19】本発明の 1 つの実施態様による高速中性子とガンマ線量との識別の結果をまとめた表である。

【図 20】全て同じ検出器で行われた照射、読み出し、光学消去、および消去 (erase) 後の読み出しの制御の 6 反復によって実証された、放射線誘導性蛍光シグナルを消去する能力、および $Al_2O_3 : C$ 、Mg 検出器を再利用する能力を示すグラフである。

40

【発明を実施するための形態】

【0010】

添付の図面（本明細書に組み込まれ、そして本明細書の一部を構成する）は、本発明の典型的な実施態様を示し、そして、上記の一般的な記載および下記の詳細な記載と共に、本発明の特徴を説明するのに役立つ。

【0011】

本発明を説明する前に、いくつかの用語を定義することが好都合である。本出願を通して以下の定義が用いられることが理解されるべきである。

【0012】

定義

50

用語の定義が、その用語が一般的に用いられる意味から逸脱する場合には、特に示さない限り、出願人は以下に提供される定義を利用することを意図する。

【0013】

本発明の目的のために、「上面」、「下面」、「上方」、「下方」、「上」、「下」、「左」、「右」、「水平の」、「垂直の」、「上向き」、「下向き」などのような方向の用語は、本発明の種々の実施態様の説明において、単に便宜上用いられる。

【0014】

本発明の目的のために、値または性質は、その値、性質または他の要因を用いて数学的算出または論理的決定を行うことによってその値が誘導されれば、特定値、性質、条件の充足または他の要因に「基づく」。例えば、本発明の方法で用いられる線量検出デバイスは、そのデバイスが、種類、エネルギーおよび入射角が既知の重荷電粒子に曝露したルミネセンス物質の蛍光を測定するために用いられたときにデバイスによって測定された蛍光の空間分布に基づいて較正され得る。

10

【0015】

本発明の目的のために、用語「覆う」とは、コンバータ材料がルミネセンス材料またはルミネセンス材料の一部に隣接するか、またはルミネセンス材料またはルミネセンス材料の一部からわずかに間隔をあけて配置されることをいう。

【0016】

本発明の目的のために、用語「入射角」とは、粒子軌道の方向と検出器表面に対する垂線との間の角度をいう。

20

【0017】

本発明の目的のために、用語「近接」とは、特定の媒体における重荷電粒子の透過距離に相当する距離をいう。

【0018】

本発明の目的のために、用語「色中心」とは、用語「色中心」の従来の意味、すなわち、結晶中で光吸収を生じて光励起時にルミネセンスの光子を生成する、結晶格子における点欠陥をいう。結晶質材料における色中心、不純物、または内在性の欠陥は、不安定種を生じる。この不安定種または欠陥に局在する電子は、光の光子を吸収することによって励起された状態への量子遷移を行い、そしてルミネセンスの光子を放出することによって基底状態にもどる量子遷移を行う。

30

【0019】

本発明の目的のために、用語「共焦点検出」とは、一般に、焦点面（被検査物）およびその上下に位置する面から放出された光の后者が二色性ビームスプリッタまたはミラーに到達したところでの蛍光のデスクャン検出（descanned detection）をいう。この二色性ビームスプリッタ/ミラーは励起光から蛍光を分離し、蛍光は引き続き、焦点面と共役な面に正確に配置された絞り（共焦点絞り/ピンホール）に焦点を合わせられる。顕微鏡の光学分解能は、絞りの大きさを変更することによって調整され得る。励起放射線を再度抑制する別の二色性ブロッキングフィルタが、絞りの前方または後方に配置される。蛍光は、このブロッキングフィルタを通過した後、光検出器で測定される。典型的な共焦点方式は、光検出器の前方に小開口が取り付けられた走査型共焦点顕微鏡をイメージングシステムの第二焦点の位置に配置し、そこで媒体から反射したレーザービームまたは媒体からのレーザー誘起蛍光が対物レンズによって集光され、そして二色性ビームスプリッタまたはミラーを用いて開口上に結像される。

40

【0020】

本発明の目的のために、用語「放射線のコンバータ」または単に「コンバータ」とは、ある種類の放射線を別のものに変換するために用いられる材料の層をいう。例えば、ポリエチレンのような水素含有材料が、非イオン化中性子放射線を、蛍光検出器材料中でイオン化を行うことができる反跳陽子またはノックアウト陽子に変換するために用いられる。放射線のコンバータの他の例は、 ${}^6\text{Li}$ を元来を含むフッ化リチウム（ LiF ）である。 ${}^6\text{Li}$ は、減速した熱中性子について高い捕獲断面積を有し、核反応生成物としてのアル

50

ファ粒子およびトリチウムイオンが検出器材料をイオン化し蛍光飛跡を生じる。さらに他の周知の種類の中性子コンバータは、酸化ホウ素および炭化ホウ素のような ^{10}B の同位元素を含む任意の材料である。中性子に対して識別しながらX線またはガンマ光子を検出する場合に電子平衡を維持するために、コンバータは、フッ素化プラスチック（ポリテトラフルオロエチレン - テフロン（登録商標））のような非水素含有材料で形成される。

【0021】

本発明の目的のために、用語「結晶質材料」とは、用語「結晶質材料」の従来の意味、すなわち、その構造中に規則的または周期的な原子配置を有する任意の材料をいう。

【0022】

本発明の目的のために、用語「欠陥」とは、結晶の格子に関する用語「欠陥」の従来の意味、すなわち、結晶の格子における空格子、格子間原子、不純物原子、または任意の他の不完全性をいう。

10

【0023】

本発明の目的のために、用語「検出線量」とは、バックグラウンドノイズレベルを超えて検出、測定などが可能な重荷電粒子、中性子、ガンマ放射線などの線量、量、レベルなどをいう。

【0024】

本発明の目的のために、用語「直接電離放射線」とは、以下のようなエネルギー荷電粒子をいう：高速電子/ベータ粒子、ヘリウムイオン/アルファ粒子、水素イオン/陽子、重イオンなど。

20

【0025】

本発明の目的のために、用語「線量計測パラメータ」とは、照射されたルミネセンス材料の蛍光画像の処理から決定された値または数をいい、検出器によって吸収された放射線量に直接関連する。

【0026】

本発明の目的のために、用語「高速中性子」とは、用語「高速中性子」の従来の意味をいい、 10keV を上回るエネルギーを有する中性子を意味する。

【0027】

本発明の目的のために、用語「蛍光」とは、用語「蛍光」の従来の意味、すなわち、原子、分子などが高電子状態から低電子状態まで量子遷移する間に可視光を発するルミネセンスの一種をいい、エネルギーの吸収と放出の間の時間間隔が、典型的に非常に短い（例えば、 10^{-9} から 10^{-3} 秒間）。

30

【0028】

本発明の目的のために、用語「蛍光色中心」とは、光の刺激によって蛍光を発することができる色中心をいう。

【0029】

本発明の目的のために、用語「F型中心」とは、以下の中心のいずれか1つをいう：F中心、 F^+ 中心、 F_2^+ 中心、 F_2^{2+} 中心、 $F_2^+(2Mg)$ 中心、 $F_2^{2+}(2Mg)$ 中心など。

【0030】

本発明の目的のために、用語「重荷電粒子(HCP)」とは、例えば、放射性核崩壊、宇宙、加速器などから生じる核またはイオンをいう。重荷電粒子のいくつかの代表的な、しかし限定されない例として、以下のものが挙げられる：アルファ粒子、トリチウムイオン、陽子、反跳陽子など。

40

【0031】

本発明の目的のために、用語「中性子捕獲断面積」とは、原子核が中性子を吸収し、ガンマ光子、電子、重電荷粒子の放出を生じ得る核反応を受ける効率を特徴付けるパラメータをいう。このパラメータは、中性子経路長の単位あたりの原子によって捕獲される中性子の確率を特徴付け、面積の単位を有する。

【0032】

50

本発明の目的のために、用語「高エネルギー光子」とは、30 keVを上回るエネルギーを有する光子をいう。Al₂O₃検出器から得られる高光子エネルギー蛍光パラメータは、イメージングの深さによって著しく変化しない。

【0033】

本発明の目的のために、用語「高空間分解能イメージング」とは、励起光の波長の大きさに相当する小さな物体を分解することができるイメージングをいう。

【0034】

本発明の目的のために、用語「高透過性放射線」とは、検出器または吸収材の厚みに相当するかまたはそれよりも大きい透過距離を有する放射線をいう。高透過性放射線の例は、ガンマおよびX線光子、中性子、高エネルギーベータ粒子などである。

【0035】

本発明の目的のために、用語「画像領域(imaged field)」とは、実験的に取得された単一画像をいう。

【0036】

本発明の目的のために、用語「間接電離放射線」とは、X線、ガンマ光子、または中性子をいう。

【0037】

本発明の目的のために、用語「電離放射線」とは、原子をイオンおよび電子に解離することができる粒子または電磁放射線をいう。本発明は、直接電離放射線および間接電離放射線の両方の線量を決定するために用いられ得る。

【0038】

本発明の目的のために、用語「照射」とは、用語「照射」の従来の意味、すなわち、高エネルギー荷電粒子、例えば、電子、光子、アルファ粒子などへの曝露、または、可視光、例えばガンマ線、X線、紫外線などの波長よりも短い波長の電磁放射をいう。

【0039】

本発明の目的のために、用語「線エネルギー付与(LET)」とは、特定のエネルギーの放射線が短い特定の距離を透過する際に媒体に付与する平均エネルギーをいう。

【0040】

本発明の目的のために、用語「低透過性放射線」とは、検出器または吸収材の厚みよりも著しく小さい透過距離を有する重荷電粒子からの放射線をいう。低透過性放射線の例は、以下のとおりである：アルファ粒子、反跳陽子など。

【0041】

本発明の目的のために、用語「ルミネセンス」とは、用語「ルミネセンス」の従来の意味、すなわち、固体、液体および気体(エミッター)によって生じる可視または不可視の電磁放射をいう。ルミネセンスは、エミッターの高温を伴わないが、光子、荷電粒子、化学的相互作用などの形態での励起エネルギーの吸収の結果である。

【0042】

本発明の目的のために、用語「ルミネセンス材料」とは、ルミネセンスを呈する任意の材料、組成物、化合物などをいう。

【0043】

本発明の目的のために、用語「最大透過距離」または「透過距離」とは、重荷電粒子が停止して静止する媒体中の距離をいう。

【0044】

本発明の目的のために、用語「減速中性子」とは、水素または重水素を含む減速材によって高速中性子を減速することによって生じた中性子をいい、0.025 eVから10 keVのエネルギー範囲の低エネルギー中性子の大きな寄与をする。

【0045】

本発明の目的のために、用語「核断片」とは、天然と人工の両方の、種々のプロセスを生じる核の1つ以上の断片をいう。例えば、核断片は、加速器、原子炉によって作製され、放射性同位元素から放出され、核反応によって生成され、太陽活動または銀河宇宙線に

10

20

30

40

50

よって生じ得る。

【0046】

本発明の目的のために、用語「光刺激ルミネセンス(OSL)」とは、照射された材料の光刺激(照明)によって発生するルミネセンスをいう。ルミネセンスの波長は、通常、刺激光の波長と異なる。

【0047】

本発明の目的のために、用語「酸素空孔欠陥」とは、結晶質材料の格子における酸素空格子によって生じる欠陥をいう。酸素空孔欠陥は、単一の酸素空孔欠陥、2重の酸素空孔欠陥、3重の酸素空孔欠陥、または3重より多い酸素空孔欠陥であり得る。酸素空孔欠陥は、1以上の不純物原子に関連し得るか、または誤入格子間酸素原子のような格子間原子の内在性の欠陥に関連し得る。2電子による酸素空孔の占領によって、中性F中心を生じるが、1電子による任意の酸素空孔の占領によって、 F^+ 中心を形成する。 F^+ 中心は、格子に対して正の電荷を有する。2重酸素空孔によって形成された酸素空孔欠陥のクラスターは、 F_2 型中心という。2つの F^+ 中心によって形成されそして2つのMg不純物原子によって電荷補償された酸素空孔欠陥のクラスターは、 $F_2^{2+}(2Mg)$ 中心という。

10

【0048】

本発明の目的のために、用語「受動検出」とは、いかなる能動電子回路および電力の供給も必要としない検出技術をいう。

【0049】

本発明の目的のために、用語「透過光子放射線」とは、宇宙からの、または荷電粒子の加速または減速(例えばX線機器または加速器内の)によって生成された、放射性核崩壊から生じる短波長電磁放射をいう。

20

【0050】

本発明の目的のために、用語「透過ベータ放射線」とは、宇宙からの、原子の放射線誘導イオン化によってまたは電場での加速によって生成された、放射性核崩壊から生じる高エネルギー電子をいう。

【0051】

本発明の目的のために、用語「部分」とは、物体または材料の任意の部分を行い、物体および材料の全体を含む。例えば、ルミネセンス材料の「部分」を覆うコンバータは、ルミネセンス材料の1つ以上の表面の一部または全部を覆い得る。

30

【0052】

本発明の目的のために、用語「放射線量計測」とは、用語「放射線量計測」の従来の意味、すなわち、材料、物体または個体の身体に送達された放射線量の量の測定をいう。

【0053】

本発明の目的のために、用語「ラジオクロミック材料」とは、放射線に曝露されたときに色、光吸収または蛍光特性が変化する材料をいう。色中心および蛍光色中心は、放射線への曝露の前に存在し得るか、または材料が放射線に曝露されたときに活性化され得る。

【0054】

本発明の目的のために、用語「反跳陽子」とは、水素原子源、例えばポリエチレンを含むコンバータを用いて中性子の衝突によって発生する陽子をいう。

40

【0055】

本発明の目的のために、用語「熱ルミネセンス(TL)」とは、用語「TL」の従来の意味、すなわち、熱刺激下で(例えば、加熱中)照射された固体から生じるルミネセンスをいう。

【0056】

本発明の目的のために、用語「飛跡」とは、媒体を透過する粒子軌道の潜像または可視画像をいう。

【0057】

本発明の目的のために、用語「変換」とは、用語「変換」の従来の数学的な意味をいう

50

。数学において、変換は、1つ以上の操作を簡素化するために関数に付与され得る作用素である。そのような変換の例としては、以下のものが挙げられる：フーリエ (Fourier) 変換、ハンケル (Hankel) (フーリエ - ベッセル : Fourier-Bessel) 変換、ハートリー (Hartly) 変換、ヒルベルト (Hilbert) 変換、ラプラス (Laplace) 変換、ウェーブレット (Wavelet) 変換、Z 変換など。

【 0 0 5 8 】

本発明の目的のために、用語「トラップ」とは、電子トラップまたは正孔トラップをいう。トラップは、局在化した電子状態を生じることができそして結晶質材料の伝導帯または価電子帯からの遊離の電子または正孔を捕獲し得る、結晶格子における構造欠陥である。

10

【 0 0 5 9 】

説明

中性子の測定には、特別な問題が存在する。中性子放射線は、直接イオン化する種類の放射線ではなく、検出器媒体のイオン化に基づいて検出器によって検出できる電離放射線 (例えば、電子または重荷電粒子) への変換または転換を必要とする。熱中性子の検出は、大きな熱中性子捕獲断面積を有する同位元素 (例えば ${}^6\text{Li}$ または ${}^{10}\text{B}$) との核反応および転換を必要とする。高濃度の水素を含むプラスチックコンバータを用いる高速中性子の検出が、最も効果的である。陽子は、中性子と同じ質量を有し、正面衝突における中性子の運動エネルギーの大部分を受けることができる。次いで、これらの衝突によって発生した高エネルギー反跳陽子が、検出器媒体中でイオン化を引き起こすことができる。次いで、能動検出器または受動検出器から増幅された信号が処理されて、そして放射線照射野についての線量計測情報または分光情報を提供する。

20

【 0 0 6 0 】

光刺激ルミネセンス、熱ルミネセンス、および他のルミネセンスおよび蛍光技術に基づいて中性子および重荷電粒子を検出するための線量計および方法は、当該分野において記載されている。例えば、光刺激ルミネセンス高速中性子センサーおよび線量計は、Justusらの米国特許第6,140,651号 (2000年10月31日発行) に記載されている。記載の高速中性子センサーおよび線量計は、ZnS : Cuを含むNdドープガラスのようなドープガラスを備えた陽子ラジエータを含み、ガラスのレーザー加熱または赤外線刺激のいずれかによって、あるいは直接シンチレーションによって、読み取られ得る。銀ドープガラスを含む他の種類の無機ドープガラスが、本発明の線量計で用いられ得る。

30

【 0 0 6 1 】

熱ルミネセンス放射線を読み取るための熱ルミネセンス線量計および方法もまた、Braunlichらの米国特許第4,638,163号 (1987年1月20日発行) ; Braunlichらの米国特許第4,825,084号 (1989年4月25日発行) ; Braunlichらの米国特許第4,839,518号 (1989年6月13日発行) ; およびBraunlichらの米国特許第5,015,855号 (1991年5月14日発行) に記載されている。記載の線量計および方法は、例えば、米国特許第4,825,084号 (Braunlichら) に記載されるような基板に熱接着された薄層の熱ルミネセンス蛍光体材料および無機バインダーを用いて、蛍光体のレーザー加熱および熱ルミネセンスによって、放射性材料および他の重荷電粒子放射線源から放出された電離放射線、特に重荷電粒子を測定する。

40

【 0 0 6 2 】

放射線量を読み取るための蛍光ガラス線量計もまた、Burgkhardtらの米国特許第5,057,693号 (1991年10月15日発行) に記載されている。記載の線量計は、蛍光ガラス素子からの放射線量を読み取り、この放射線量は、ガラス素子の検出面から放出される蛍光の強度から決定される。蛍光絞り配置は、ガラス素子検出面に重層するように備えられ、蛍光検出領域を変更するためにその上で動かすことができ、そして、蛍光強度読み取りデバイスは、蛍光強度分布およびガラス素子検出面を決定するために備えられる。

【 0 0 6 3 】

中性子放射線量計測法、線量計およびシステムもまた、Moscovitchの米国特許第5,319,

50

210号(1994年6月7日発行)および米国特許5,498,876号(Moscovitch)(1996年3月12日)に記載されている。記載の方法、線量計およびシステムは、光記憶素子の中性子放射線に曝露することによって変化する3次元蛍光光記憶素子に情報を記憶し、線量計測情報は、その後、レーザーシステムでの変化したデータの読み出しによって読み出され、分析される。1つの記載された光記憶素子は、スピロベンゾピランのような感光性化学物質でドーブされた大量の透明ポリマーを含む3次元光ランダムアクセスメモリ(ORAM)であり、これはまた、Moscovitchら、「Radiation Dosimetry Using Three-Dimensional Optical Random Access Memories」、Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. Vol. 184、2001年、pp. 207-18にもまた記載されている。

【0064】

残念なことに、検出効率の低さおよび重電荷粒子によって誘導される吸収線量とガンマ放射線によって誘導される吸収線量との識別の不良は、従来の線量計および方法による中性子の線量計測に対する障害として残っている。従来の線量計および方法は、空間分解能を限定し得、イメージングおよび/または分光能力またはシステムが提供されないことがあり、強い透過光子およびベータ放射線の検出のみが可能であり得、重荷電粒子の個々の飛跡を検出および結像できない場合がある。特に、積算型熱ルミネセンスおよび光刺激ルミネセンス検出器では、粒子飛跡の中で生じた少量の非常に強い蛍光は、光子および電子の相互作用の結果として著しく大きい体積の結晶から生じるルミネセンスによってマスクされ得る。また、熱ルミネセンス検出器および方法は、入射する全ての重荷電粒子を検出することができず、非常に低い検出効率を有し得る。さらに、熱ルミネセンス方法は非常に時間がかかり、1データポイント毎に数十ミリ秒を必要とする。3次元ORAMのような有機記憶材料に基づく線量計および方法は、記憶媒体に記憶された事前に記録済みの光学データを必要とし、放射線の影響を受けるためにいくつかの空間的に分布したビットを必要とし、そして重荷電粒子の個々の飛跡をイメージングするために必要な感受性および空間分解能を有していない場合がある。

【0065】

共焦点レーザー走査型蛍光イメージングおよび飛跡計数を用いる中性子線量計測法は、Akselrodらの米国特許第7,141,804号、「Detection of neutrons and heavy charged particles」に記載され、そしてこの特許の開示および内容の全体は、参照として本明細書に援用される。この方法は、反跳陽子および他の重荷電粒子によって生じる個々の飛跡を検出するための新たなルミネセンス材料および新たな光学システムを提供するが、それは、有意なガンマ光子寄与のない、比較的純度の高い中性子場に限られる。

【0066】

種々の実施態様において、本発明は、以下の特徴の1つ以上を付与する線量計測検出器、ルミネセンス材料および方法を提供する：(1)ガンマ放射線の検出；(2)中性子放射線の検出；(3)ガンマ放射線と中性子放射線との識別；(3)放射線照射野、例えばガンマ-中性子混合野の高空間分解能蛍光イメージング；(4)吸収線量に比例する線量計測パラメータを得るための、高空間分解能蛍光イメージングの処理；(5)水素含有コンバータ材料によって覆われたルミネセンス材料からの蛍光シグナルの深さプロファイルを測定することによる中性子放射線のエネルギー中央値の評価；(6)放射線の2つのコンバータの裏側の検出器から得られた蛍光シグナルの比率を提供することによる中性子放射線のエネルギー中央値の評価および(7)放射線誘導性蛍光シグナルの消去/除去および検出器のバックグラウンドシグナルレベルへのリセット。

【0067】

1つの実施態様では、本発明は、放射されたルミネセンス材料から得られた少なくとも1つの画像内での蛍光強度の変調の評価を介して放射線線量を決定するための新たな取り組みを提供する。蛍光強度の変調は、中性子によって発生する反跳陽子、またはガンマ光子によって発生するデルタ電子のいずれかによって生じるイオン化の不均一分布によって生じる。蛍光強度変調の定量的評価は、例えば、吸収線量に正比例しているように見える空間周波数パワースペクトル積分を算出することによって決定される。

10

20

30

40

50

【0068】

本発明の方法は、個々の蛍光飛跡の検出および計数を必要としないが、照射されたルミネセンス材料の高空間分解能を用いる。1つの実施態様では、本発明の方法は、照射されたルミネセンス材料の高分解能蛍光画像の空間周波数領域分析に由来する新たなアナログパラメータを用いてガンマおよび中性子放射線の両方の線量を測定および算出する方法を提供する。この文脈において高分解能イメージングとは、 $0.6 / NA$ とほぼ等しい光学顕微鏡検査の回折限界によって決定されるイメージングシステムの光学分解能をいう。ここで、 λ は蛍光発光光の波長であり、そして NA は、対物レンズの開口数である。反跳陽子飛跡またはデルタ電子飛跡の実際の直径はナノメートル範囲であるが、光学システムによって結像される実際の特徴はミクロンの数分の1(割合)かの範囲内である。対応して、本発明の方法の1つの特定の実施に従った有用な空間周波数の範囲は、 750 nm と等しい $Al_2O_3 : C, Mg$ の放出波長および対物レンズの $0.95 NA$ によって決定される。本発明の実証において用いられる空間周波数範囲の1つの特定の例は、理論的および経験的に正当化され、画像取得および画像処理の両方について最も好ましいパラメータが決定される。高空間周波数($1.5\ \mu\text{m}^{-1}$ を上回る)は、放射線に関する多くの情報を含まず、イメージングシステムの機械的ノイズ、光学ノイズおよび電子ノイズを構成する。また、低空間周波数($0.01\ \mu\text{m}^{-1}$ を下回る)は、放射線曝露の効果と関連せず、大部分がルミネセンス材料特性の不均一性に関する。高いまたは低い光学分解能に対応する異なる範囲の空間周波数が、他のルミネセンス材料およびイメージングシステムのために用いられ得る。例えば、近視野光学顕微鏡が著しく高い分解能を達成し得、本発明の実施に用いられ得る。この空間周波数の範囲内で算出されるパワースペクトル積分の値は、中性子およびガンマ放射線の両方について吸収線量と比例していることが見出されたいくつかの新しいパラメータのうち1つを提供する。吸収線量に比例する他の見出されそして試験されたアナログパラメータは、パワースペクトルの最も低い周波数の振幅である。

10

20

【0069】

放射線に対して感受性の他のルミネセンス材料が、本発明の方法の種々の実施態様で用いられ得る。まず第1に、これらの材料はラジオクロミックでなければならない。これは、これらが、照射の結果として光学(ルミネセンスを含む)特性の変換を受けるという意味である。第2に、線量計測を目的とするこれらのルミネセンス材料は、照射前後に比較的安定した光学特性を示さなければならない。これは、例えば、放射線誘導性ルミネセンスが、室温または高温にて、経時的に弱まって(または減衰して)はならないという意味である。本発明の方法で用いられ得るルミネセンス材料としては、金属の酸化物、硫化物、ハロゲン化物、窒化物および炭化物のような誘電性無機結晶、有機および無機ガラス、有機ポリマーおよび染料が挙げられるが、これらに限定されない。放射線によって生じるラジオクロミック変換は、電子的および構造的の両方であり得る。前者の場合、原子と材料構造との間の距離の変化は最小限で電子遷移のみが生じるが、後者の場合、大きな構造変換および化学結合の切断が生じ得る。

30

【0070】

本発明の1つの実施態様では、線量計測情報の記憶は、結晶マトリクス中のイオン化、自由電子および正孔の発生、その後、トラップおよび色中心による電子および正孔の捕獲に基づく。

40

【0071】

1つの実施態様では、本発明は、Axelrodの米国特許第6,846,434号およびAxelrodらの米国特許第7,098,470号(それらの内容および開示の全体は、参照として本明細書に援用される)に記載されるような、炭素およびマグネシウムでドーブされそして複数の酸素空孔欠陥を含む酸化アルミニウム結晶($Al_2O_3 : C, Mg$)を含むルミネセンス材料を利用する。本発明の場合、その目的のための重要な特性を $Al_2O_3 : C, Mg$ 結晶が有する。 $Al_2O_3 : C, Mg$ 結晶は発光性であり、電氣的性質を有するラジオクロミック変換を受け、そして、 $Al_2O_3 : C, Mg$ 結晶は、変換状態において、時間的にそして温度的に安定である。蛍光酸化アルミニウム材料は、照射前または照射後可視光に対

50

して感受性でなく、複数回非破壊的に読み取られ得る。酸化アルミニウム結晶の他の重要な有利点は、この材料の結晶成長、切断および研磨の技術が十分に確立されていることである。

【0072】

$Al_2O_3 : C, Mg$ の単結晶は、結晶の可視緑色の着色を担う青色吸収帯を含む、いくつかの光学吸収 (OA) 帯によって特徴付けられる。これらの結晶は、近くの Mg 不純物原子により電荷補償された中性の F 中心ならびに F^+ および F_2^{2+} 中心の形態における高濃度の単一および二重の酸素空孔を有する。2つの局在化電子とともに2つの酸素空孔および2つの Mg 不純物原子から構成される集合欠陥 (aggregate defect) は、本明細書において $F_2^{2+} (2Mg)$ と示され、そして 520 nm に中心がある緑色蛍光を生成する 435 nm の青色吸収 - 励起帯を担い、そして 9 ± 3 ns の短い蛍光寿命を有する。他の色中心 (3電子 $F_2^+ (2Mg)$ 中心であると考えられる) は、電子が他の $F_2^{2+} (2Mg)$ 中心によって捕獲されたときの放射線誘導性転換の結果として得られる。 $F_2^+ (2Mg)$ 中心は、335 nm および 620 nm の少なくとも2つの吸収 / 励起帯を有し、そして 750 nm で蛍光発光を生じ、 75 ± 5 ns 寿命を有する。

10

【0073】

非照射 Al_2O_3 結晶は、435 nm での青色吸収帯および 520 nm での発光を担う高濃度の I 型色中心 (おそらく $F_2^{2+} (2Mg)$ 中心) ならびに 335 nm および 620 nm の吸収帯および 750 nm の発光帯を担う高濃度の II 型色中心 (おそらく $F_2^+ (2Mg)$ 中心) を含む。電離放射線への曝露後、I 型色中心の濃度は減少し、II 型色中心の濃度は増加する。吸収線量は、I 型中心 (520 nm) または II 型色中心 (750 nm) のいずれかの蛍光強度によって決定される。典型的な測定実行方法は、赤色レーザー光 (例えば、635 nm または 650 nm の波長を有するレーザーダイオード) を $Al_2O_3 : C, Mg$ 結晶に照射し、そして 750 nm 蛍光強度を測定することである。

20

【0074】

金属酸化物に加えて、本発明のいくつかの実施態様において、本発明のルミネセンス材料は、色中心を有し、光刺激下で蛍光を生成することができる有機材料であり得る。例えば、Parthenopoulos らは、D. A. Parthenopoulos および P.M. Rentzepis、Three-Dimensional Optical Storage Memory、Science、Vol. 245、843-845 ページ、1989年8月 (その内容および開示の全体は、参照として本明細書に援用される) において、本発明のいくつかの実施態様において用いられ得る有機ルミネセンス材料を記載する。Moscovitch の米国特許第 5,319,210 号 (1994年6月7日発行) および Moscovitch の米国特許第 5,498,876 号 (1996年3月12日発行) もまた、本発明のいくつかの実施態様において用いられ得る有機ルミネセンス材料を記載し、それらの内容および開示の全体は、参照として本明細書に援用される。

30

【0075】

本発明の種々の実施態様で用いられ得る $Al_2O_3 : C, Mg$ 結晶を含むルミネセンス材料は、高濃度のトラップおよび色中心を有し、照射の間に発生する遊離の電子および正孔を捕獲し得、そして光励起下で蛍光を生成し得る。本発明の方法の1つの実施態様によれば、発生する蛍光強度の変調は、通常、放射線の吸収線量と比例する。線量計測情報を得るために、この蛍光の検出は、蛍光の高空間分解能を可能にする共焦点検出スキームを用いて行われ得る。共焦点蛍光顕微鏡検査の原理は、周知である (例えば、Confocal and two-photon microscopy : Foundations, applications, and advances、A. Diaspro 編集、Wiley-Liss New-York、19-38 頁、2002年 (その内容および開示の全体は、参照として本明細書に援用される) を参照のこと)。共焦点検出スキームは、レーザー光の励起の空間的に局在した焦点スポットからのみ蛍光を検出することを可能とする。

40

【0076】

放射線量計測における最も困難な課題の1つは、異なる放射線、特に中性子の識別である。中性子は間接電離放射線であるため、電離効果に頼るこれらのドーブされた Al_2O_3 結晶のような受動積算型放射線検出器は、中性子に対してあまり感受性ではない。した

50

がって、そのような結晶によって検出されるために、中性子はアルファ粒子、エネルギー光子などの直接電離放射線への転換を必要とする。熱中性子の場合は、中性子のアルファ粒子への転換は、大きな熱核捕獲断面積を有する ${}^6\text{Li}$ および ${}^{10}\text{B}$ のような放射性元素との核反応によって達成される。高速中性子の線量計測のために、ポリエチレンのような水素が豊富なプラスチックから反跳陽子が発生する。中性子のこれらのコンバータは、ルミネセンス材料と結合、付着、または別の様式で接触し得るか、ルミネセンス材料と混合または統合され得るか、あるいはルミネセンス材料の一部でさえあるかまたはルミネセンス材料に組み込まれ得る。放射性核種または加速器施設から生じるアルファおよびベータ粒子および光子、ならびに宇宙線の重荷電粒子は、通常、いかなる転換も必要としないが、検出感度は、それらのそれぞれの原子番号およびエネルギーに強く依存する。

10

【0077】

1つの実施態様では、本発明はまた中性子放射線のための線量計測法を提供する。中性子放射線の検出は、本発明に従って、このルミネセンス材料を少なくとも1つのコンバータの中性子照射の近接に配置することによって達成され得る。このコンバータが間接電離中性子放射線を電離放射線（例えば、アルファ粒子、トリチウム粒子、反跳陽子などの重荷電粒子）に変換または転換し、次いでルミネセンス材料に照射される。

【0078】

1つの実施態様では、本発明は、ルミネセンス材料の前方にいくつかのコンバータを配置することによって、高エネルギー光子（ガンマ線およびX線）の線量と中性子放射線の線量とを識別する方法を提供する。これらのコンバータの1つは、水素含有材料（例えば、高密度ポリエチレン）でなり、そしてそれに接触する検出器の領域が、高速中性子およびガンマ光子の両方の線量を決定するための情報を提供する。他のコンバータは、大きな熱中性子捕獲断面積（例えば、 ${}^6\text{LiF}$ ）を有する同位元素を含む材料でなり、減速中性子およびガンマ光子の線量を提供する。第3のコンバータは、非水素含有材料でなり、そしてその裏側の検出器はガンマ放射線の線量を提供する。高速中性子および減速中性子の線量は、水素含有コンバータおよび ${}^6\text{Li}$ 含有コンバータの裏側で得られた最初の2つのシグナルからガンマ線によって誘導されたシグナルを減算した後に決定される。

20

【0079】

本発明は、蛍光共焦点検出技術を用いてレーザービームで検出器を走査することによって、そして水素含有コンバータ材料と接触して配置される検出器で蛍光シグナルの深さ分布を測定することによって、高速中性子場のエネルギー中央値を決定するための方法もまた提供する。比較的低いエネルギーの中性子で発生する反跳陽子は、ルミネセンス材料への最も小さい透過距離を有し、深さプロファイルは深さとともに速い減衰を示す。高エネルギー中性子はより長い距離の陽子を生成し、蛍光シグナルは蛍光イメージングの深さとともにゆっくりと減少する。エネルギー決定技術は、同じイメージング技術を用い、しかし、2つの画像処理方法（飛跡密度計数または空間周波数パワースペクトル積分）のいずれをも用い得る。前者は高速中性子の低線量で好ましいが、後者は減速および高線量のために好ましい。較正測定の後、中性子エネルギー中央値を決定するために、これらのパラメータの1つが材料の表面におけるパラメータの値/レベルの数分の1（割合）かである選択された値/レベルへと減少された深さが用いられる。例えば、選択された値/レベルは、表面の値/レベルの $1/e$ または $1/2$ であり得る。

30

40

【0080】

本発明さらに他の実施態様では、例えば、水素含有材料および ${}^6\text{Li}$ 含有材料でなる2つの異なるコンバータの裏側で得られる2つの線量計測パラメータ間の比率を算出することによって、中性子のエネルギー中央値を決定する方法が、提供される。

【0081】

図1、2および3は、中性子-ガンマ混合場で中性子が照射される本発明の1つの実施態様による線量計100を示す。図1、2および3において、線量計100は、3つの異なるコンバータ（水素含有プラスチックコンバータ110、非水素含有プラスチックコンバータ112およびリチウム含有コンバータ114）によって覆われたルミネセンス材料

50

でなる放射線感受性検出器 108 を含む。図 1 は、約 7 MeV のエネルギー中央値を有する中性子 122 が照射された結果を定性的に表し、イメージング 128 の深さで荷電粒子飛跡 124 および 126 を生成している。図 1 において、線量計 100 は、中性子 122 と混合された光子 130 の放射線量にもまた曝露される。図 1 において、荷電粒子飛跡 124 の平均透過距離および数は、荷電粒子飛跡 126 の平均透過距離および数を大きく上回る。図 2 は、約 1 MeV のエネルギー中央値を有する中性子 222 が照射された結果を定性的に表し、イメージング 228 の深さで荷電粒子飛跡 224 および 226 を生成している。図 2 において、線量計 100 は、中性子 222 と混合された光子 230 の放射線量にもまた曝露される。図 2 において、荷電粒子飛跡 226 の数は、荷電粒子飛跡 224 の距離および数をわずかに上回る。図 3 は、約 60 keV のエネルギー中央値（低エネルギー）を有する中性子 322 が照射された結果を定性的に表し、イメージング 328 の深さで荷電粒子飛跡 324 および 326 を生成している。図 3 において、線量計 100 は、中性子 322 と混合された光子 330 の放射線量にもまた曝露される。図 3 において、荷電粒子飛跡 326 の平均透過距離および数は、荷電粒子飛跡 324 の平均透過距離および数を大きく上回る。

10

【0082】

入射中性子のエネルギーに依存して、線量計におけるイメージングの深さの荷電粒子飛跡の数が変動し、この事実は、本発明の 1 つの実施態様による入射中性子のエネルギー中央値を推測することを可能とする。非水素含有プラスチックコンバータの裏側で測定される線量計測蛍光パラメータは、光子線量、および他の 2 つのコンバータ（すなわち、水素含有プラスチックコンバータおよびリチウム含有コンバータ）の裏側で得られたデータからのこの光子線量の減算を決定することを可能にする。

20

【0083】

本発明の 1 つの実施態様では、放射線感受性検出器は、蛍光原子核飛跡検出器（fluorescent nuclear track detector：FNTD）であり得る。

【0084】

本発明の 1 つの実施態様では、水素含有プラスチックコンバータは、高密度ポリエチレン（HDPE）でなる。

【0085】

1 つの実施態様では、非水素含有プラスチックコンバータは、テフロン（登録商標）の商品名でデュポン社によって製造されるポリテトラフルオロエチレン（PTFE）からなる。

30

【0086】

1 つの実施態様では、リチウム含有コンバータは、⁶Li 同位元素を含む LiF チップからなる。

【0087】

図 4 は、本発明の実施態様の 1 つによる方法を実行するための装置 400 を示す。ファイバ光学結合した平行なレーザーダイオード 402 は、レーザー光 404 を生成し、そして電子シャッター 406 によって制御される。長波長通過二色性ミラー 408 は、励起レーザー光 404 を反射し、ビーム 410 で示される蛍光を送信するために用いられる。2 軸検流計ミラー 412 は、2 次元（XY）走査のために用いられるが、中継レンズ 414 および 416 は、検流計ミラーと対物レンズ 418 の背面開口の間のイメージング条件を提供する。表面下の異なる深さにおける蛍光検出器の走査のための球面収差補正（SAC）は、平行移動ステージ 420 を用いてシステムの光軸に沿ってレンズ 416 を動かすことによって達成される。検出器結晶 422 における走査の深さを決定する対物レンズ焦点の軸の（Z）位置は、圧電アクチュエータステージ 424 によって提供される。複数の領域をイメージングするために、検出器は 2 次元線形平行移動ステージ 426 を用いて動かされる。レーザー光 402 によって励起された蛍光は、同じ対物レンズ 418 によって集光され、検流計ミラー上の中継レンズ 416 および 414 によって戻って結像され、そしてそれらによってデスキャンされる。蛍光は、二色性ミラー 408 を通してさらに送られ

40

50

、共焦レンズ430によって共焦ピンホール428上に結像され、そしてピンホールの裏側に取り付けられたシリコンアバランシェフォトダイオード(APD)432によって検出される。APDの前方のさらなる光学フィルタ434は、残りのレーザー光を排除する。

【0088】

共焦ピンホールは空間フィルタであり、対物レンズの焦点スポットの外側からのすべての蛍光を遮断し、回折限界空間識別を提供する。画像は、光検出器からデータ収集ボードによって得られた電圧のレイとして形成される。共焦点検出スキームは、さらに刺激光の焦点スポットに隣接した結晶の領域もまた蛍光を生じる場合であっても、1光子吸収の条件下で、高い空間および深さ分解能を可能にする。

10

【0089】

本発明の1つの実施態様では、レーザーダイオードは639nmの波長を有する15mWレーザー光を生じる。

【0090】

結晶表面の位置は、研磨された検出器表面からのレーザービームのピーク反射を見出すことによって決定される。200 μm^2 当たり200までの視野を有する画像は、200nmの増加を伴う1000走査によって生じる。刺激レーザービームは、結晶表面下の異なる深さで集束され、次いで連続した層ごとのイメージングがなされる。次いで、各層からのデータが、本発明の方法を用いて処理される。すべてのシステムコンポーネントの制御、ならびにデータおよび画像の処理は、National InstrumentsハードウェアおよびLabViewTMプログラムによって行われる。

20

【0091】

図5は、高線量中性子(300mSv)の後に得られる $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$, Mg検出器からの蛍光イメージを示す。このレベルの線量での反跳陽子の飛跡は重複し、このことが物体認識および飛跡計数方法を用いた画像の処理を困難にする。1つの実施態様では、本発明の方法は、蛍光強度変調(例えば、空間周波数パワースペクトル積分)のパラメータを提供し、そして高中性子線量および混合ガンマ-中性子場のための放射線誘導性画像の処理を可能にする。

【0092】

図6は、30mGyの ^{137}Cs ガンマ光子が照射された検出器から得られた蛍光画像の例である。検出器は、照射中、非水素含有コンバータ材料(PTFE)によって覆われる。蛍光強度の変調は、デルタ電子の重複によって引き起こされ、そして混合中性子-ガンマ放射線の場合、光子によって引き起こされる蛍光強度の変調は、中性子誘導性反跳陽子の飛跡計数を行うことを困難にする。1つの実施態様では、本発明の方法は、中性子およびガンマ放射線の吸収線量の合計に比例する蛍光強度変調のパラメータを提供する。水素含有コンバータおよび非水素含有コンバータの2つのコンバータとともに線量計を有することは、中性子線量およびガンマ線量を識別および測定することを可能にする。

30

【0093】

図7は、水素含有コンバータによって覆われ、AmBe源から0.3Svの高速中性子が照射された $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$, Mgの単結晶検出器の2次元高分解能蛍光画像の高速フーリエ変換によって得られる空間周波数パワースペクトルの3次元表現の例を示す。放射線によって誘導される最も高いスペクトルパワー密度は、常に、低い側の空間周波数(従来の光学的表現に従ってグラフの中心部にプロットされる)にある。

40

【0094】

本発明の方法の最も重要な特徴は、放射線誘導性パワースペクトルの強度およびその積分が、中性子放射線およびガンマ放射線の両方の線量とともに変化することである。図8は、図7に示されたものと同様の2次元パワースペクトルの円柱座標で積分することによって得られた非照射のFNTD検出器ならびに30、100および1000mSvのAmBe高速中性子が照射されたもののパワースペクトルを示す。図9は、10、30、100および300mGyの ^{137}Cs ガンマ放射線が照射された検出器についての同様の結

50

果を示す。2次元パワースペクトルの積分は、円柱座標でなされる。

【0095】

線量計測パラメータ「空間周波数パワースペクトル積分」は、放射線の吸収線量に比例する。図10は、以下の2つの線量決定方法についての線形線量依存を示す：飛跡計数モード（黒四角形）およびパワースペクトルモード（三角形および円形）。照射は、高速中性子（三角形）およびガンマ線（円形）によってなされる。中性子およびガンマ放射線の両方の線量の広いダイナミックレンジにおける線量依存の線形は、提案された方法を実用化のために魅力的なものにする。

【0096】

図11は、 ^{90}Sr / ^{90}Y および ^{85}Kr 源から放出されたベータ粒子が照射されたベアFNTD検出器についてのパワースペクトル積分の線量依存を示し、ベータ放射線の線量へのその適用性を説明する。低線量での線量依存の非線形は、蓄積されたバックグラウンド線量によって引き起こされる。

【0097】

図12は、1mmのポリエチレンコンバータの裏側に照射された酸化アルミニウム結晶についてのパワースペクトル積分の正規化された光子エネルギー応答を説明する。照射は、NSタイプのX線で行われる。応答は、208keVの光子で送達された線量測定に対して正規化され、1mmのポリエチレンコンバータにおける吸収について補正される。

【0098】

図13、14および15は、本発明の1つの実施態様による、水素含有コンバータ材料と接触して配置される検出器における蛍光シグナルの深さ分布を測定することによって、中性子のエネルギー中央値を決定するための方法を説明する。図14において、パワースペクトル積分は、照射中ポリエチレンコンバータによって覆われた検出器の表面下の異なる深さでの検出器の共焦点蛍光イメージングおよびFFT処理によって得られる。図15において、飛跡密度は、照射中ポリエチレンコンバータによって覆われた検出器の表面下の異なる深さでの検出器の蛍光イメージングおよび飛跡計数によって得られる。

【0099】

比較的低いエネルギーの中性子によって発生する反跳陽子は、ルミネセンス材料への最も小さい透過距離を有し、深さプロファイルは深さとともに速い減衰を示す。高エネルギー中性子はより長い距離の反跳を生成し、蛍光シグナルは蛍光イメージングの深さとともにゆっくりと減少する。エネルギー決定技術は、同じイメージング技術を用い、しかし、2つの画像処理方法のいずれをも用い得る：(1)飛跡密度の計数(図13)または(2)FFTの実行および空間周波数パワースペクトル積分の算出(図14)。第1のイメージング処理方法は高速中性子の低線量で好ましいが、第2のイメージング処理方法は減速および高線量のために好ましいものであり得る。較正測定の後、中間中性子エネルギーを決定するために、これらのパラメータの1つが材料の表面におけるパラメータの値/レベルの数分の1(割合)かである選択された値/レベルへと減少された深さが用いられる(図15)。例えば、選択された値/レベルは、表面の値/レベルの $1/e$ または $1/2$ であり得る。

【0100】

中性子によってHDPEコンバータにおいて発生した反跳陽子と比較すると、ガンマ放射線は、比較的小さい線形吸収係数を有し、検出器表面近傍に電子平衡がある場合に、深さの関数としてパワースペクトル積分の一定値を提供する。一時的な荷電粒子平衡は、検出器をコンバータの層(例えば、PTFEまたはHDPE)で覆うことによって提供される。図16は、非照射検出器および10、30および300mGyの ^{137}Cs ガンマ光子が照射された検出器について得られた深さプロファイルについての4セットのデータを示す。測定されたパラメータの値は、線量と共に増加するが、深さによっては一定のままであり、電離密度の均一分布を示す。図16に示された結果は、高エネルギー光子に特徴的である。図4に示される、上記実験で用いられる装置は、球面収差を補償し、80ミクロンまでの比較的低い深さで蛍光画像を得ることができるが、当業者はこれらの測定の範

10

20

30

40

50

囲をさらに広げ、低エネルギー光子が線量の関数として測定可能な減衰を提供することができる。

【0101】

本発明の方法による中性子エネルギー中央値を測定する他の方法は、図17に示す結果によって説明される。ここでは、測定が飛跡計数モードで行われる。この実験セットでは、酸化アルミニウム蛍光原子核飛跡検出器に単一エネルギーおよび広域スペクトルの中性子を照射するが、これらの検出器は、2種類のコンバータ(HDPEおよび⁶Li同位元素が天然に多く存在するLiFチップ)に近接している。40keVから4.5MeVまでのエネルギー範囲の単一エネルギー中性子は、トリチウムおよび重水素標的にバンデグラフ型(Van-de-Graff)加速器によって発生した高エネルギー陽子の核反応で生成される。検出器のイメージングは、両方の種類のコンバータについて3μmの単一の深さで行われ、測定された飛跡密度は、報告された中性子エネルギーの関数としてプロットされる。HDPEコンバータの裏側の検出器は、中性子エネルギーの増加とともに飛跡密度の増加を示すが、LiFコンバータの裏側の検出器は、飛跡密度の減少を示す(図17参照)。同様の結果が、パワースペクトルモードについても予想される。ベアおよび減速²⁵²Cf源によって、ならびにベアAmBe源によって発生する広域スペクトル中性子が提供する結果は、単一エネルギー中性子について得られた結果と必ずしも合致するわけではない。

10

【0102】

本発明の1つの実施態様に従って、他の中性子エネルギー中央値決定のための他の方法が提案される。図18は、2つの異なるコンバータ(HDPEおよびLiF:2つの異なる検出器または同じ検出器の2つの領域を覆う)の裏側で得られた2つの蛍光飛跡密度の算出された比率のエネルギー依存を示す。グラフは、さらに、入射中性子場のエネルギー中央値を決定する提案された方法の能力を説明する。単一エネルギーおよび広域スペクトル中性子の両方についてのデータポイントはすべて、適合曲線の非常に近くに位置し、減速²⁵²Cf源の最も困難なスペクトルについての試験結果は、600keVの正確な中性子エネルギー中央値を提供する。

20

【0103】

中性子線量計測および混合ガンマ-中性子線量計測の他の方法と比較して、本発明の方法は、いくつかの重要な有利点を有する。それはすべて光学的であり、いかなる湿式化学処理をも必要としない。それは、画像取得と並行した簡易なそして迅速な自動画像処理を可能にする。両方法-飛跡計数、ならびにFFTでの画像処理および空間周波数パワースペクトル積分、は、同時に行われ得る。本方法で用いられる検出器は、照射前、照射中および照射後の周辺室内光に対して感受性でなく、複数回の非破壊イメージングを可能にする。関与する短い蛍光寿命は、高速レーザー走査および高生産性イメージングを可能にする。飛跡の大きさが小さいため、蛍光の飽和および吸収線量の飽和は、エッチングタイプのプラスチック飛跡検出器のためのものよりも高いことが多い。新たなパワースペクトル積分パラメータは、線量測定のためのこのダイナミックレンジを100Gyまでの著しく高い線量まで広げ、これは、飛跡計数モードとの組み合わせにおいて、60年もの線量依存直線性を提供する。そして最後に、本発明は、そうでなければ複雑な能動中性子分光計を必要とする、受動積算型検出器を用いて中性子エネルギー中央値の決定の比較的単純で速い方法を提供する。

30

40

【0104】

本発明を、以下に記載の特定の実施例を通してさらに説明する。以下に記載の実施例は、上記の材料および手順の例示を意味するが、本発明の限定的な説明と見なされるべきではない。

【実施例】

【0105】

実施例1

検出器のガンマ放射線に対する感受性の較正。4mm×6mm×0.5mmの寸法のプ

50

レート状のルミネセンス $Al_2O_3 : C, Mg$ 結晶でなる検出器を、光学 c 軸に沿って切断し、大きい側の対向側面を研磨して、光学的に透明な表面を得た。結晶検出器は、 13 cm^{-1} の吸収係数を有する 435 nm の光学吸収帯のために緑色の着色を有する。線量計構成は、図 1、2 および 3 の構成と同様であり、ルミネセンス結晶検出器および 2 つのコンバータ（ガンマ線および高速中性子測定のための HDPE コンバータ、ならびにガンマ線量測定のための PTFE コンバータ）を提供する。

【0106】

1 セットの $Al_2O_3 : C, Mg$ ルミネセンス検出器に、 ^{137}Cs 源から 3 mGy から 10 Gy の範囲の既知の組織内吸収線量でガンマ光子を照射した。次いで、検出器を、図 4 に概略的に示されるレーザー走査共焦点システムを用いて、HDPE コンバータと接触する側から開始し次いで PTFE コンバータと接触する側で読み取る。得られた画像を、高速フーリエ変換を行うことによって処理する。FFT の大きさを算出して二乗し、図 7 と同様の 3 次元パワースペクトル画像を得る。次いで、パワースペクトルを最も低い有用空間周波数 ($0.01\text{ }\mu\text{m}^{-1}$) から最も高い有用空間周波数 ($1.5\text{ }\mu\text{m}^{-1}$) まで連続して円柱座標で積分し、図 9 と同様の $0.01\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ から $1.5\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ の範囲の画像内周波数のパワーの振幅 (1 次元パワースペクトル) を生じる。この 1 次元パワースペクトルを積分し、パワースペクトル積分として知られるパラメータを提供する。パワースペクトル積分を PTFE および PTFE の両コンバータによって覆われた検出領域からのすべての画像について平均化し、測定における不安定さを減少させる。

【0107】

この工程を、すべての検出器およびすべての線量について繰り返す。次いで、平均パワースペクトル積分をガンマ線の送達線量に対してプロットする (図 10 の白丸で示されるとおり)。このプロットは線形回帰とフィットさせ、依存の傾斜を得る。傾斜は、 ^{137}Cs からのガンマ放射線に対する検出器の感受性である。

【0108】

実施例 2

検出器の高速中性子放射線に対する感受性の較正。PTFE および HDPE の両コンバータを有する $Al_2O_3 : C, Mg$ 検出器の他のセットに、 185 MBq の活性を有する $^{241}AmBe$ 源から既知の線量範囲 (例えば、組織内に 1 mSv から 1000 mSv まで) で中性子を照射する。次いで、プレートを、HDPE コンバータと接触する側から開始し次いで PTFE コンバータと接触する側で読み取る。得られた画像を、高速フーリエ変換を行うことによって処理する。FFT の大きさを算出して二乗し、図 7 と同様の 3 次元パワースペクトル画像を得る。次いで、パワースペクトルを最も低い有用空間周波数 ($0.01\text{ }\mu\text{m}^{-1}$) から最も高い有用空間周波数 ($1.5\text{ }\mu\text{m}^{-1}$) まで連続して円柱座標で積分し、図 9 と同様の $0.01\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ から $1.5\text{ }\mu\text{m}^{-1}$ の範囲の画像内周波数のパワーの振幅 (1 次元パワースペクトル) を生じる。次いで、この 1 次元パワースペクトルを積分し、低周波数でのパワースペクトル積分または関数の振幅を提供する。このパワースペクトル積分を HDPE コンバータによって覆われた検出領域からのすべての画像について平均化し、測定における不安定さを減少させる。

【0109】

次いで、PTFE により照射中覆われた検出器の領域を同様に処理し、全線量のガンマ成分を得る。次いで、PTFE の裏側で得られた平均パワースペクトル積分を、HDPE の裏側で得られた平均パワースペクトル積分から差し引き、ガンマ線寄与を排除する。次いで、得られた差分を、送達された高速中性子線量に対してプロットし、結果を、図 10 に白三角形で示す。このプロットを線形回帰とフィットさせ、依存の傾斜を得る。傾斜は、すべての線量計算において用いられる $^{241}AmBe$ からの高速中性子に対する検出器の感受性である。

【0110】

実施例 3

PE およびポリテトラフルオロエチレンコンバータを用いる中性子およびガンマ線の識

別。線量計構成は図1、2および3の構成と同様であり、ルミネセンス結晶検出器および2つのコンバータ（ガンマ線および高速中性子測定のためのHDPEコンバータ、ならびにガンマ線量測定のためのPTFEコンバータ）を提供する。

【0111】

単結晶検出器の照射は、 1.85 MBq の活性を有する $^{241}\text{AmBe}$ 源から200 mmの距離で高速中性子を用いて行う。中性子照射に加えて同じ検出器のガンマ照射を ^{137}Cs 源から行い、混合中性子-ガンマ線場を模倣する。中性子およびガンマ線量を異なる比率で線量計に送達し、図19の表1に列挙する。表1は、混合中性子-ガンマ線照射の処理のまとめである。組織内の全線量当量は、 $^{241}\text{AmBe}$ 照射からのガンマ線成分を含む。プレートを実施例1および2と同じ方法で処理し、PTFEコンバータおよびHDPEコンバータの裏側のパワースペクトル積分を得る。以下のアプローチを用いて、中性子-ガンマ線識別を達成する：ガンマ線量 D_γ を、校正の間に得られた、PTFEの裏側のパワースペクトル積分の値である $Q(\gamma)$ および感受性因子 $A(\gamma)$ を用いて計算する。

【0112】

【数1】

$$D_\gamma = \frac{Q(\gamma)}{A(\gamma)}$$

【0113】

中性子線量 D_n を、校正の間に得られた、HDPEの裏側のシグナルである $Q(n + \gamma)$ とPTFEの裏側のシグナルである $Q(\gamma)$ との間の差分ならびに高速中性子感受性因子 $B(n)$ から計算する。

【0114】

【数2】

$$D_n = \frac{Q(n + \gamma) - Q(\gamma)}{B(n)}$$

【0115】

全線量を、ガンマ線量および中性子線量の合計を用いて計算する。

【0116】

実施例4

2つのパラメータの比率を用いた AmBe 中性子のエネルギー中央値の決定。HDPEによって覆われた酸化アルミニウム蛍光原子核飛跡検出器を、まず、校正のために単一エネルギー中性子場で照射した。結晶内の異なる深さでの蛍光画像の獲得を、図4に概略的に示し、本願の上に記載した読み出し装置を用いて行う。FFTおよび線量計測パラメータ（パワースペクトル積分）を、各中性子エネルギーおよび各走査深さについて計算する。パワースペクトル積分の深さプロファイルのプロットし、パラメータが e 倍減少する深さを計算する。次いで、この深さパラメータを、中性子エネルギーの関数としてプロットし（図16）、得られた依存を検量線として用いる。

【0117】

ポリエチレンコンバータを備えた同様の酸化アルミニウム検出器に、 AmBe 源から広域スペクトルの高速中性子を照射し、パワースペクトル積分の深さプロファイルおよび $1/e$ の深さを得る。 AmBe 照射について得られた図16の検量線および $1/e$ の深さをを用いて、 AmBe 中性子のエネルギー中央値を推測する。図16からのデータによれば、それは 4.3 MeV に等しい。 AmBe 場の実際のエネルギー中央値は 4.5 MeV であり、この記載された方法の十分な性能を示している。

【0118】

10

20

30

40

50

本出願で引用したすべての文献、特許、学術論文、および他の材料は、参照により本明細書に援用される。

【0119】

本発明は、添付の図面を参照してそのいくつかの実施態様とともに十分に記載したが、種々の変更および改変が当業者に明らかであることが理解されるべきである。このような変更および改変は、添付の請求項から逸脱しない限り、添付の請求項により定義されるような本発明の範囲内に含まれるものとして理解されるべきである。

【0120】

本発明は、本出願において、本明細書に記載の特定の材料および技術的工程の詳細に限定されないことを強調することが重要である。本発明は、他の実施態様で可能であり、そして種々の方法で実行されそして行われ得る。本明細書で用いられる語句および用語は、説明を目的とし限定を目的としないことが理解されるべきである。

10

【0121】

本発明を特定の実施態様を参照して記載したが、添付の請求項において定義するように、本発明の領域および範囲から逸脱することなく、多くの改変、修正および変更が可能である。したがって、本発明は、記載された実施態様に限定されず、以下の請求項の用語によって定義される全範囲およびその等価物を含むことを意図する。

【0122】

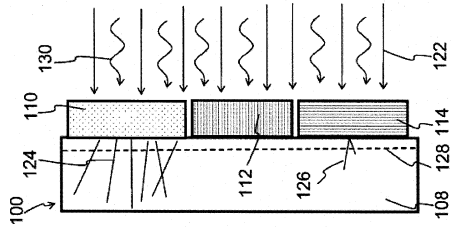
実施例 5

酸化アルミニウム原子核飛跡検出器からの放射線誘導性蛍光の光学消去。蛍光原子核飛跡検出器に、まず²⁴¹Am源から5.1 MeVのアルファ粒子を照射する。光空間分解能蛍光画像を、図4に示し、上に記載する読み出し装置を用いて獲得する。画像処理を行い、飛跡を計数し、放射線誘導性飛跡およびバックグラウンド蛍光シグナルからの平均蛍光振幅を得る。次いで、酸化アルミニウム蛍光原子核飛跡検出器を、光学パラメトリック発振器によって発生したパルス型325 nmレーザー光を用いて光学消去する。照射、画像取得、光学消去および消去後制御イメージングの手順を、6回繰り返す。照射後および光学消去後の飛跡、蛍光飛跡振幅およびバックグラウンド蛍光シグナルの記録数を、実行された手順の反復数の関数として図20にプロットする。各光学消去後、検出器を走査したところ、測定可能な蛍光飛跡は検出されない一方、放射線誘導性飛跡の振幅は、測定の統計的不確実性の範囲内で再現可能である。この結果は、提案された方法が検出器を完全

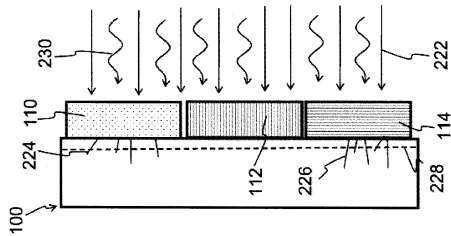
20

30

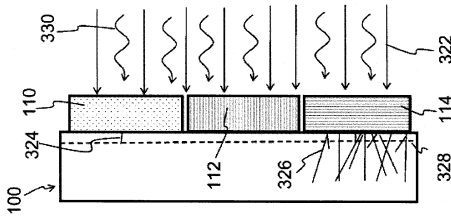
【 図 1 】



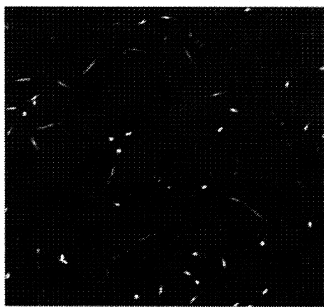
【 図 2 】



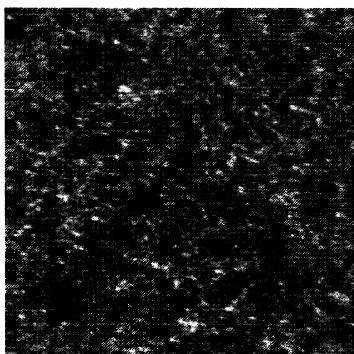
【 図 3 】



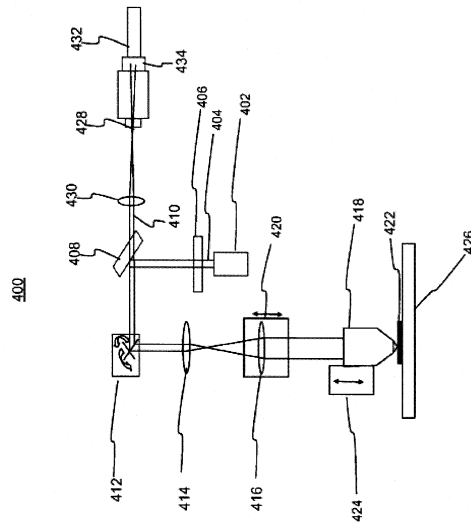
【 図 5 】



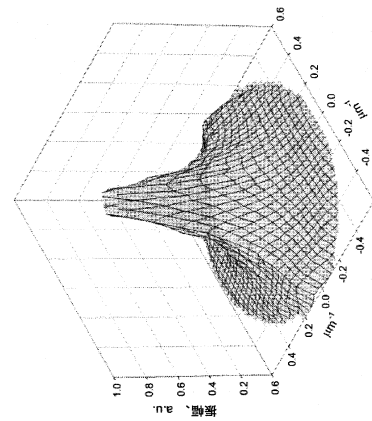
【 図 6 】



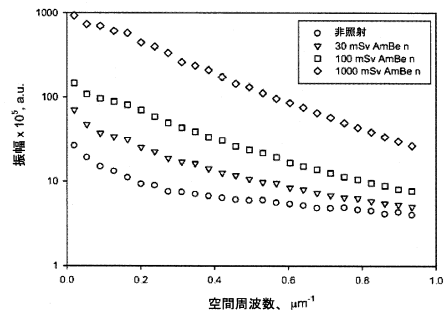
【 図 4 】



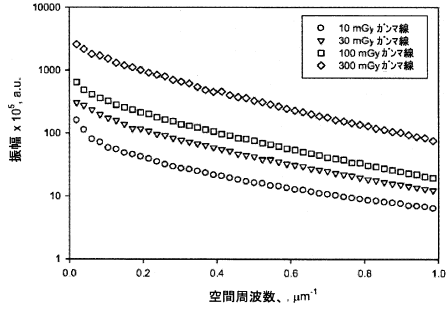
【 図 7 】



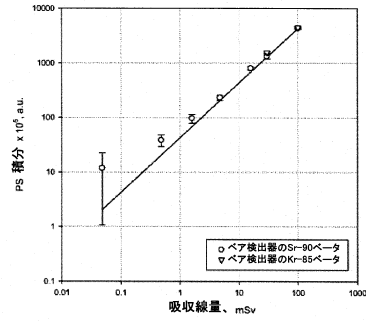
【 図 8 】



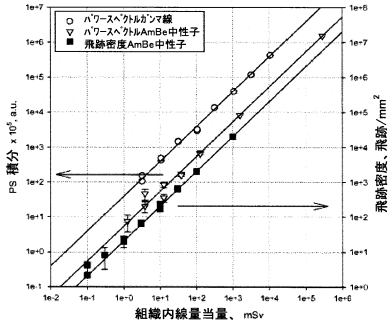
【図9】



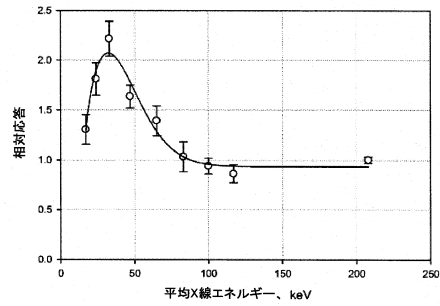
【図11】



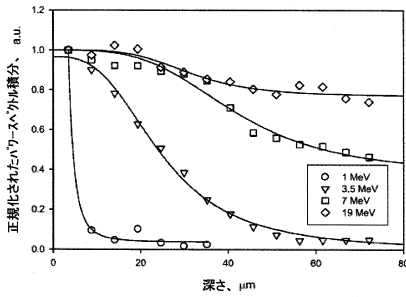
【図10】



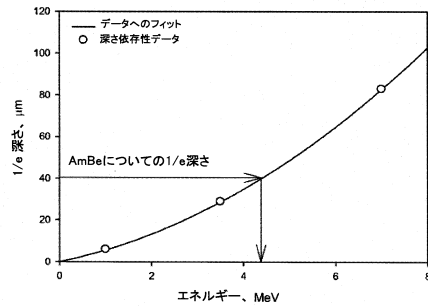
【図12】



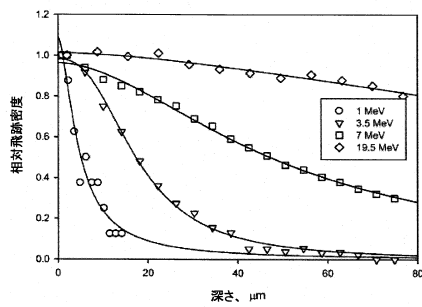
【図13】



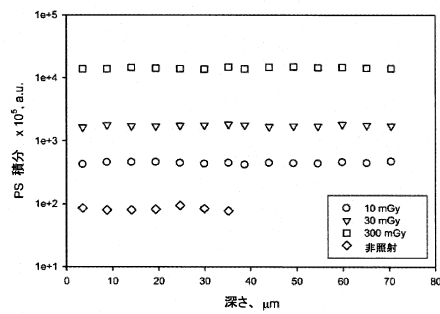
【図15】



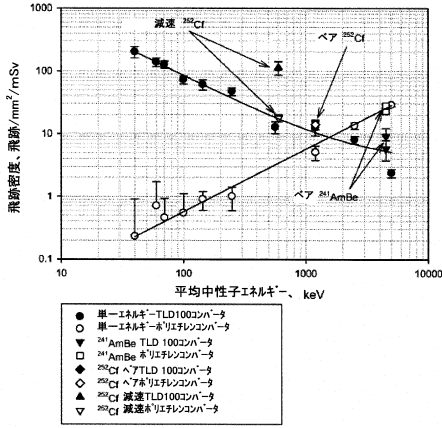
【図14】



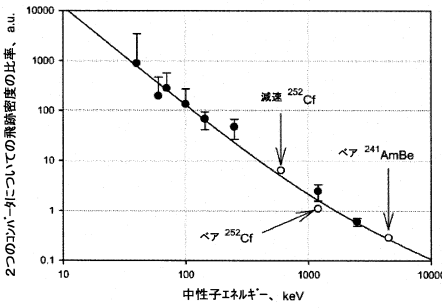
【図16】



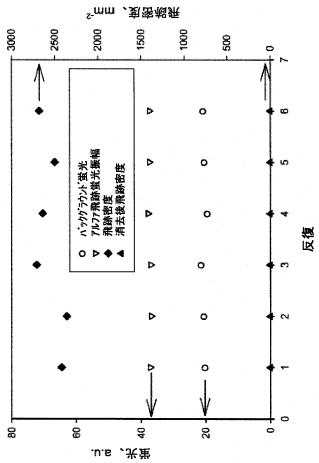
【図 17】



【図 18】



【図 20】



【図 19】

表 1

透過組 中性子 量, mSv	透過組 線量当 量, mSv	組織内全 線量当 量, mSv	本邦邦外 e/gナル a.u.	子アロシ ナル a.u.	差分 s(0), a.u.	報告組織 内中性子 量, mSv	全報告組 線内線 量, mSv
100	33	136.025	2356.99	1824.61	532.38	101	138.84
100	110	213.025	6132.38	5222.62	899.76	63	110.35
30	11	41.9075	947.72	280.2095	667.5105	32	48.17
30	33	63.9075	1791.08	1578.324	212.746	40	32.78
30	33	63.9075	1856.88	1719.924	136.966	25	35.75
30	110	140.9075	5262.23	4910.667	351.563	66	167.97

フロントページの続き

審査官 林 靖

(56)参考文献 米国特許第07141804(US, B1)
特開2008-256622(JP, A)
特開昭56-110067(JP, A)
特開平03-102283(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01T 1/00 - 7/12
G21K 4/00