

White paper

医療施設で使用される放射線サーベイメーター： 技術、課題、新しいアプローチ

本文書は、主に医療施設での幅広い用途に対応する Unfors RaySafe 社製サーベイメーター RaySafe 452 を紹介するもので、内容は以下の通りです。

- 医療施設でのサーベイメーターの必要性
- 一般的なサーベイメーターで採用されている技術の可能性と限界
- サーベイメーターによる測定を行う際、測定が困難な例
- 測定困難な用途への RaySafe 452 の対応

1. なぜ医療施設で放射線サーベイメーターが必要なのでしょう

電離放射線は人間の目には見えません。匂いや音もなく、感じることもできません。忙しい医療施設において、患者様や医療従事者が必要以上に電離放射線被曝をしていないことをどのように確認できるでしょうか。

医療施設において電離放射線は複数の目的で利用されており、主に、診断用撮像、放射性医薬品、放射線治療の 3 つの分野で使用されています。電離放射線を医療に利用することで多くの命が救われている一方で、電離放射線への被曝は人体に有害となり得るという事

実があります。医療施設内の不要な環境放射線量をモニタリングし、管理し、低減する業務にあたるのが医学物理士や放射線安全管理者です。放射線による望ましくない影響が生じるリスクを減らすには、患者様および医療従事者の不要な放射線被曝を最小限に抑える必要があります。放射線被曝に対する適切な対策は、エネルギー帯域、線量率、放射線の種類など、放射線の特性を把握した上で講じなければならず、そのため放射線を測定するサーベイメーターが必要となります。

放射線測定が必要となる状況を図 1 に示します。医療施設の測定ニーズは多岐に渡ります。医療施設でのサーベイメーターの主な適用範囲の概要、放射線量、単位、代表的なエネルギー帯域を表 1 に示します。

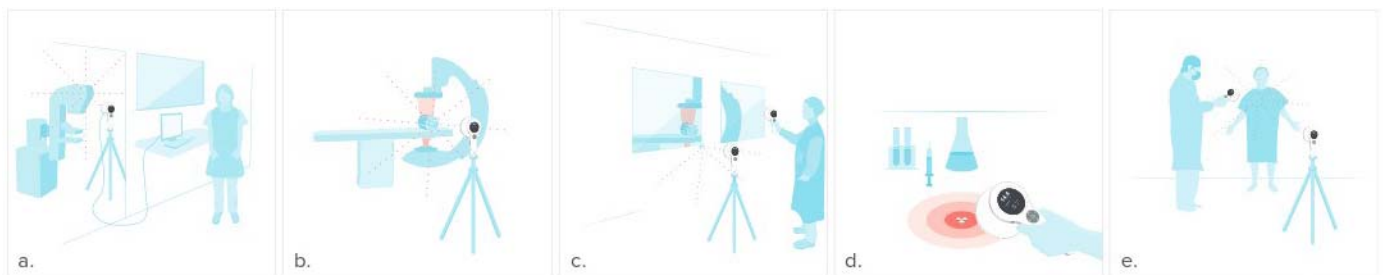


図 1：医療施設での放射線サーベイメーターの適用範囲例 a) X線管周囲の漏洩線測定、b) 散乱線測定、c) 遮蔽壁からの漏洩線測定、d) 放射性医薬品による表面汚染測定、e) 放射性医薬品投与患者様の放射線の管理

分野	適用範囲	放射線の種類	測定量 (単位)	エネルギー帯域の目安 (最小～最大)
診断用撮像	X線管周囲の漏洩・X線装置から発生する散乱線の測定	X線	<ul style="list-style-type: none"> 空気カーマ、K_{air} [Gy] 照射線量、X [R] 空気吸収線量、D_{air} [rad, Gy] 周辺線量当量、$H^*(d)$ [Sv, rem] 方向性線量当量、$H'(d)$ [Sv, rem] 	10-150 keV
放射性医薬品	放射性医薬品汚染の測定 放射性医薬品投与患者様の管理	α 、 β 、 γ 線	<ul style="list-style-type: none"> カウント [cps, cpm] 放射能 [Bq/cm²] 方向性線量当量 (β)、$H'(d)$ [Sv, rem] 	α 線 : 5-8 MeV β 線 : 30 keV-3 MeV γ 線 : 30 keV-1.25 MeV
放射線治療	医療用リニアックから発生する漏洩・散乱線測定	X線 (中性子線)	<ul style="list-style-type: none"> 空気カーマ、K_{air} [Gy] 照射線量、X [R] 空気吸収線量、D_{air} [rad, Gy] 周辺線量当量、$H^*(d)$ [Sv, rem] 方向性線量当量、$H'(d)$ [Sv, rem] 	100 keV-24 MeV

表 1 : 医療施設での放射線サーベイメーターの適用範囲例、放射線量、単位、エネルギー帯域の目安
エネルギー帯域は、散乱線のエネルギーから X 線装置の最大設定エネルギーの範囲を含みます。

2. 放射線サーベイメーターの技術

このセクションでは、サーベイメーターで一般的に使用されている技術（電離箱、ガイガーミュラー計数管、半導体ダイオード、シンチレーター）を紹介します。

電離放射線はどのように測定され、測定にはどのような限界があるのでしょうか。放射線サーベイメーターは、放射線の電離作用により変化する検出器内の物質の電子状態を検出および定量します。このような測定原理のため、サーベイメーターの可能性と限界は、検出器内の物質の物理的特性に依存します。

電離箱は、放射線による気体の電離作用を利用した測定器です。電離箱は、気体（通常は空気）で満たされた箱で、箱に配した電極板は電気回路の一部を構成しています。2枚の電極板には電場を発生させるため、電圧が印加されています。放射線がこの箱を通過すると、気体分子が電離し、電子と正電荷をもつイオンから成るイオン対が生成されます。電子はプラスの電極板に、陽イ

オンはマイナスの電極板に向かって移動します。このとき発生する電流は電離の数に比例し、したがって空気中の線量にも比例します。

電離箱は、内部の空気が内外で行き来できるもの（通気型）とできないもの（気密型）があります。一部のモデルには、裏側に薄い壁材の付いたハッチが付属しており、 β 線が測定できます。通気型の電離箱は、平坦なエネルギー応答が得られますが、周囲の温度と気圧に応じた補正が必要となります。気密型の電離箱は、放射線が電離箱の壁に当たり減衰するため、通常 50-100 keV 以下で感度（空気カーマ）が低下します。

分子の数が多いほど電離が起こる可能性が高まるため、電離箱の容積が大きいほど感度は高まります。また、電離箱内の気体を加圧することで封入する分子の数を増やすこともできます。しかし、加圧には電離箱の壁を厚くする必要がありますため、低エネルギーの光子がさらに減衰する上、サーベイメーターが危険物とみなされてしまう可能性があります。

ガイガーミュー管 (GM 管) も気体で満たされた円筒を配する構造ですが、電離箱に比べ印加電圧が高く、封入する気体の化学組成も異なります。電離放射線が筒内に入射すると、壁材との相互作用により二次電子が生成されます。大きな電位差が生じるため、電子は陽極に向かって加速され、筒中の気体分子を電離させるほどの運動エネルギーに達します。その結果、荷電粒子の雪崩が起き、 μ 秒の時間スケールで陽極周囲の気体が完全に電離されます。この電離による放電回数が、GM 管式サーベイメーターでの 1 カウントに対応します。

GM 管は円筒型か、表面汚染測定に最適化されたパンケーキ型が一般的です。 α 、 β 、 γ 線の検出が可能な設計の GM 管もあります。GM 管は強い信号が得られる高感度で安価な検出器です。低い光子エネルギー領域ではエネルギー依存性が高くなりますが、フィルターでエネルギーを補正できるため、線量率の測定に使用されます。しかしながら、GM 管はエネルギーではなく放電回数 (カウント) を測定するため、スペクトルに関する情報は得られません。

GM 管について考慮すべきもう一つの点は不感時間 (デッドタイム) です。荷電粒子の雪崩が起きると、一時的に回路内の電極が電気的に中和されるため、GM 管は一定時間、入射する放射線に反応しなくなります。この間 (デッドタイム) は放射線が記録されません。線量率が高い場合、デッドタイムと感度により GM 管が飽和する可能性があります。

電離箱と GM 管が気体を利用するのに対し、**半導体ダイオード**は固体物質です。その名が示すように、半導体ダイオードは導体でも絶縁体でもなく、その中間的な抵抗率を持つ物質です。半導体ダイオードは一般的に結晶シリコン製で、結晶構造に電子を余分に生じさせるリンなどの原子が添加されています。これらの余剰電子により、結晶の価電子帯から伝導帯までのバンドギャップが狭まります。言い換えれば、ダイオードは少量のエネルギー吸収で導体として動作します。電離放射線がダイオードに入射すると、結晶物質との相互作用により自由電子が生成されます。結晶構造中を移動するこれらの電子の運動エネルギーにより、結晶中の他の電子が伝導帯に励起さ

れ、電子-正孔対が形成されます。通常、固体物質の密度は気体の数百倍から千倍にもなるため、半導体ダイオードは電離箱や GM 管に比べ小型で強固です。密度が高く、バンドギャップが狭い半導体ダイオードの感度は、最大で同じ体積の電離箱の 100 万倍です。しかしながら、感度は温度に依存するため、温度が少し上昇するだけで一定数の電子が伝導帯に励起されます。また、半導体性ダイオードの感度は、入射する光子エネルギーに依存するため、低エネルギー成分を除去してエネルギー依存性を改善することを目的として、ダイオード前方にフィルターを追加する必要があります。

シンチレーターは、放射線との相互作用で光を発する物質です。電離放射線はシンチレーター内の分子を高エネルギーに励起します。この状態はエネルギーが余剰なため、分子は速やかに余剰なエネルギーを光子 (光) の形で放出し、基底状態に戻ります。このときの発光量を電離放射線の測定値として用います。光から電気信号への変換には、光電子増倍管 (PMT) やフォトダイオードなどの光センサーが必要です。

シンチレーターは、有機、無機、結晶、液体、プラスチックなどで多くの種類があるため、これらの特性をここで論じることにはしませんが、全般的なシンチレーターの考慮事項として、温度および湿度の影響を受けることと、シンチレーターの発光減衰時間が挙げられます。発光減衰時間が長いと、シンチレーターのアフターグローが生じ、それに対応して測定に時間を要します。

サーベイメーターとその特性の詳細については、F.H. Attix 著『Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry』(Wiley, 2007 年) などの優れた参考書を参照することができます。

3. なぜ新しいサーベイメーターが必要なのでしょう

このセクションでは、医療施設で放射線サーベイメーターを使用する際に実際に遭遇する問題を紹介します。RaySafe 452 はこれらの問題に対処する目的で開発されました。

エネルギー依存性

放射線環境を代表的な値で示すには、光子の大部分が存在するエネルギー領域で平坦なエネルギー応答が得られなければなりません。しかしいずれのサーベイメーターも、測定器の種類や応用技術に特性や限界があるため、測定範囲内の**エネルギー応答にばらつきがでます**。表 1 に示すように、医療施設で使用される放射線装置から発生する光子エネルギーは、10 keV から数 MeV に達します。

平坦なエネルギー応答が得られないサーベイメーターには、仕様書に**補正係数**が記載されていますが、補正係数を使いこなすのは困難です。第一に、通常、エネルギー応答は狭いスペクトル幅で作成されています。しかし実際は、X 線装置（および医療用リニアック）から発生する電離放射線は、サーベイメーターに入射する前に装置内外の様々な濾過材と相互作用するため、光子のエネルギースペクトルは広がっています。したがって、特定のエネルギーにおける単一の狭いスペクトル幅では、X 線装置から発生する光子エネルギーの分布を近似するには精度が低く（図 2）、対応する補正係数が適用できない場合があります。

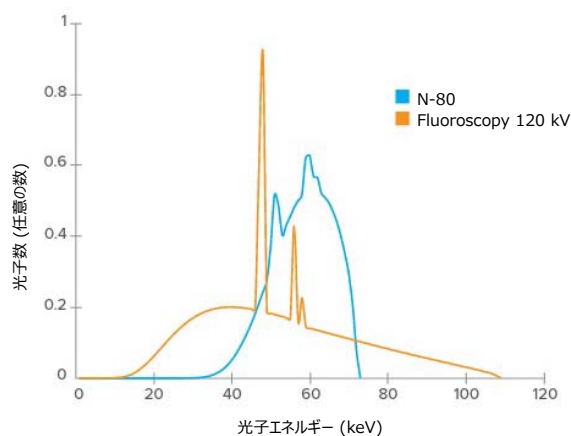


図 2 : N-80 および電圧 120 kV（濾過 0.3 mm Cu）の X 線透視装置の光子エネルギー分布の目安。これらのスペクトルは SpekCalc GUI [Poludniowsky, et al., Physics in Medicine & Biology, (2009) 54(19)] で計算し、積分値で規格化しました。2 つのスペクトルの平均エネルギーは、63.4 keV および 65.2 keV と近いですが、N-80 のスペクトルは透視装置のスペクトルほどエネルギーが広く分布していません。

第二に、多くの測定器は、例えば Cs-137 の光子エネルギーなどの単一のエネルギーのみで校正されます。しかし、この放射線源は医療施設ではほとんど使用されないことに加え、X 線装置や医療用リニアックからの散乱線を持つ複雑なエネルギー分布が反映されていません。

測定が困難な例

パルス照射 X 線透視装置や医療用リニアックなどのパルス照射放射線発生装置の散乱線の測定は困難です。パルス照射 X 線透視装置のパルス幅の代表値は 2–20 ms、パルスレートは 1–30 Hz です。医療用リニアックのパルス幅はわずか数 μ s で、パルスレートは約 100 Hz と高いです。

ほとんどのサーベイメーターは、医療用リニアックで設定できる最大エネルギーと同等の高エネルギー領域の測定には使用できません。また、医療用リニアックでは 24 MV という高いエネルギーが設定できますが、散乱線の光子エネルギーはこの設定値よりもかなり低く、スペクトル幅は広がります（図 3）。医療用リニアックの X 線測定で他に考慮すべき点として、パルス幅が短いときのパルスレートが非常に高いため、シンチレーターや GM 管が飽和する可能性もあります。医療用リニアックの X 線測定は複雑ですが、測定時の反応が十分に理解されているサーベイメーターは多くありません。

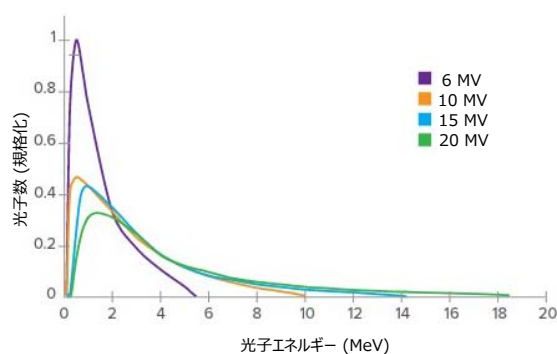


図 3 : 医療用リニアック (Varian) の 6、10、15、20 MV 設定時の光子エネルギー分布の目安。図はモンテカルロシミュレーションにより作成 [Brualla, et al., Radiation Oncology. (2019) 14:6]。

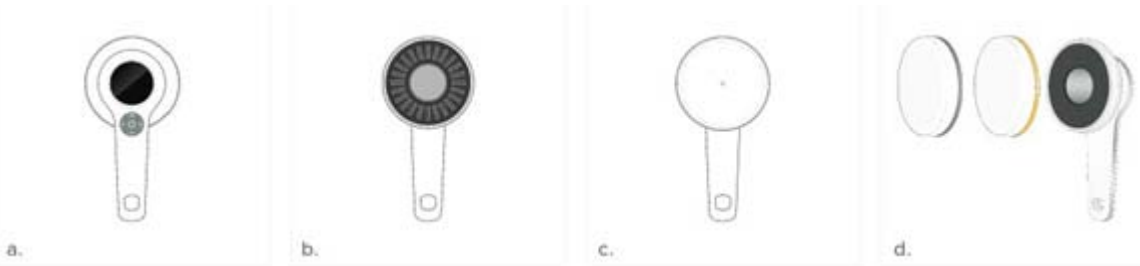


図 4 : a) RaySafe 452 の概観。b) RaySafe 452 のセンサー領域。パンケーキ型 GM 管（灰色）を半導体センサー（黒い表面上に表示）が囲んだ形状。c) リッドを取り付けたときのセンサー領域の概観。d) RaySafe 452 と 2 枚のリッド [空気カーマ (Air kerma) リッド（灰色）、周辺線量当量 (Ambient) リッド（黄色）] の側面図

遮蔽壁からの漏洩線測定は医療施設で日常的に行われており、多くの場合、高速応答が可能で高感度な測定器が必要となります。しかし一般的にサーベイメーターはバックグラウンドレベルに近い低線量率では動作が不安定で、積分時間が長くなるため応答も遅くなります。線量率の表示値がばらつく場合、高線量の放射線が存在するかどうかを判断することは困難です。また、測定器の応答が遅いと、エリアモニタによる空間線量測定時の突発的な高線量放射線に反応できない可能性があります。

実務上の考慮事項

表 1 に示す幅広い測定に対応するには、放射線安全管理者は通常、異なる技術を応用した**複数の測定器**を使用する必要があります。その結果多くの測定器を持ち歩く必要があり、多くの測定器（およびソフトウェア）を購入して、使用方法を習得し、他のスタッフを教育し、機器の保守、校正、修理、保管も必要になります。

電離箱は、エネルギー応答が平坦で、エネルギー帯域が広く、感度が高いためサーベイメーターのゴールドスタンダードとみなされることが多いですが、広範囲のエネルギーに対し平坦な応答を得るには、通気型で大容量の電離箱が必要となります。このようなサーベイメーターは機械的衝撃に弱く、気圧と温度に応じた補正が必要となります。気密型の電離箱は機械的に強く、加圧することもできます。加圧することにより電離箱の感度は向上しますが、壁面を厚くする必要があり、低エネルギー光子が減衰します。また、加圧型電離箱が**危険物**とみなされ、空輸や配送が制限される可能性があります。使用者が移動しない場合でも、校正や修理のために配送が必要となる場合があります。

4. RaySafe 452

このセクションでは、放射線サーベイメーター RaySafe 452 の測定対象、測定方法、およびセクション 3 で指摘した課題への対処方法を紹介します。

設計と全般的特徴

従来型のサーベイメーターは、採用されている技術に応じて使用可能な範囲が決まります。電離箱は主に漏洩・散乱線測定に使用され、GM 管は放射性医薬品やその他の放射性物質による表面汚染の測定に使用されます。RaySafe 452 は従来型の検出器とは異なり、1 台の測定器の中に、半導体ダイオード、シンチレーター、パンケーキ型 GM 管を搭載しています。RaySafe 452 は多種多様な放射線およびエネルギーを同時測定でき、IEC 60846-1 の加算性の要件を満たしています。

図 4 に RaySafe 452 の概観と測定対象を示します。鋼製グリッドの背面に、パンケーキ型 GM 管が付属し、それを炭素繊維カバで覆われた半導体センサーが囲んだ形状の有効なセンサー領域が搭載されています。また、RaySafe 452 には、周辺線量当量 (Ambient) と空気カーマ (Air kerma) 測定用の交換可能な 2 枚のリッドが付属しています¹。いずれかのリッドを取り付けると、周辺線量当量と周辺線量当量率が測定できます。リッドなしの場合、 α 、 β 、 γ 線のカウントが測定できます。

¹ RaySafe 452 には 3 つのモデルがあります。本文書では、周辺線量当量、空気カーマ、カウントが測定可能な最上位モデルの RaySafe 452 を前提とします。他のモデル (RaySafe 452 Ambient および RaySafe 452 Air Kerma) の詳細は、RaySafe 452 のユーザーマニュアルをご参照ください。

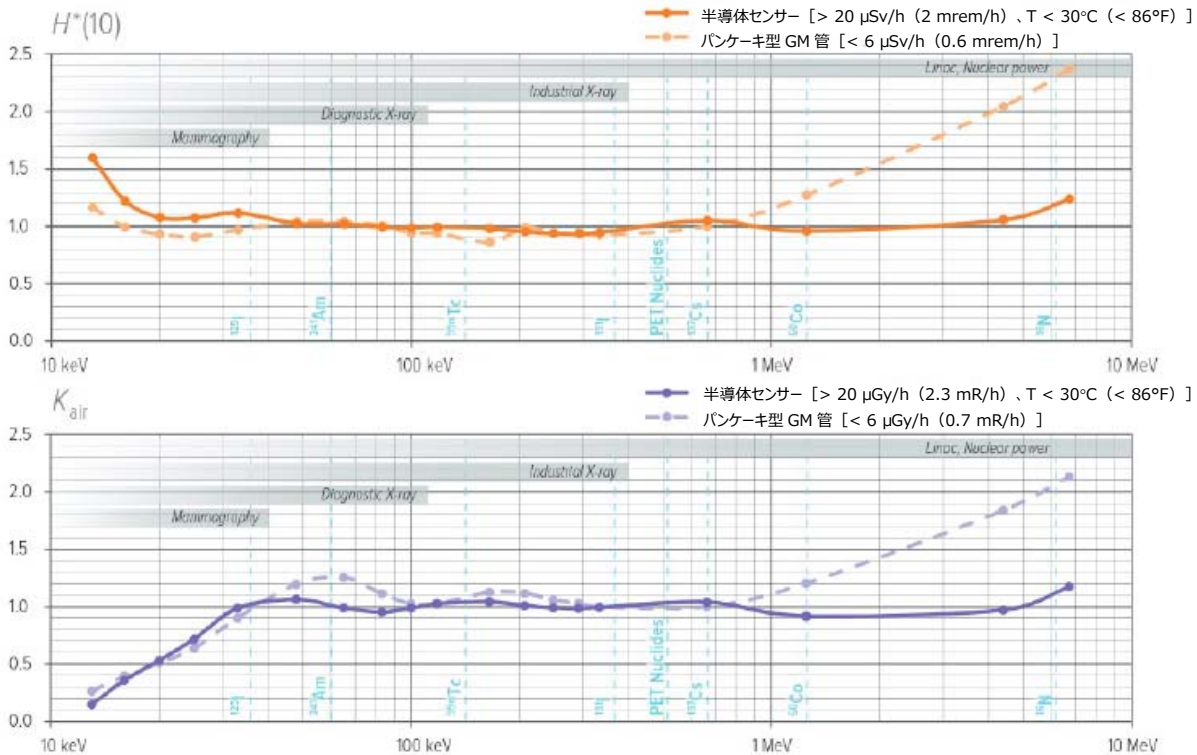


図 5：エネルギー帯域が狭い N-15 から N-400、および S-Cs、S-Co、R-C、R-F に対する RaySafe 452 の代表的なエネルギー応答。上段：周辺線量当量、 $H^*(10)$ 。下段：空気カーマ、 K_{air} 。グラフ上部の灰色のマーキングは一般的な用途でのエネルギー帯域の目安で、青い破線は一般的な放射性核種の壊変エネルギーを示しています。2つの異なる技術を組み合わせることで、それぞれの長所と短所のバランスを取ることができます。高速応答が可能で高感度なパンケーキ型 GM 管は、半導体センサーでは熱雑音の影響を受けやすい低線量率の測定で使用されます。パンケーキ型 GM 管では頻繁にデッドタイム補正が行われており、非常に短いパルス幅の放射線に対しても平坦な応答となります（詳細は「パルス照射」のセクションをご参照ください）。半導体センサーは、パンケーキ型 GM 管が飽和する高線量率の測定に使用されます。

線量と線量率

付属の交換可能なリッドにより、GM 管前方のフィルター構成を変えることができるとともに、半導体センサーのエネルギー応答が切り替わります。リッドを取り付けた状態では、有効なセンサー領域はリッドの平面部の面積と一致します（図 4c）。黄色のリッドを取り付けた場合、RaySafe 452 は周辺線量当量 [$H^*(10)$] を測定し、灰色のリッドを取り付けた場合は空気カーマ (K_{air}) を測定します。RaySafe 452 の半導体センサーは、いくつかのチャンネルと呼ばれるグループに分割されており、それぞれ異なるフィルターが前方にあって、各チャンネルは特定のエネルギー帯域の測定に使用されます。それぞれのフィルターは、対応するエネルギー帯域で、特定の光子エネルギーを減衰させたり強調させたりして、平坦なエネルギー

応答特性を実現します（図 5）。

線量と線量率の測定では、パンケーキ型 GM 管と半導体センサーの両方の出力が使用されます。どちらのシステムも連続測定を行い、エネルギー応答が平坦なため、一回の測定で両方の出力を使用することができます。パンケーキ型 GM 管の出力は低線量率の測定で使用され、半導体センサーの出力は高線量率の測定で使用されます（図 6）。中間の線量率の場合、測定時の線量率や周囲温度に応じて、使用する出力が自動的に選択されます。前述のように、パンケーキ型 GM 管内の放電は通常 μs の時間スケールで起こり、一定のデッドタイムが生じます。この不感時間を補償するため、RaySafe 452 では 1 ms ごとにデッドタイム補正が行われます。

平均光子エネルギー

RaySafe 452 は、ISO 4037-1:2019 に定義される方法で平均光子エネルギーを測定します。平均光子エネルギーは、半導体センサーの各チャンネルからの出力に基づいて算出されます。各チャンネルのエネルギー応答は既知なため、これらの出力からサーベイメーターに入射した放射線のエネルギー分布を求めることができます。GM 管はスペクトルに関する情報が得られないため、平均光子エネルギーの測定には使用されません。

パルス照射

RaySafe 452 は短いパルス幅や高いパルスレートに対応しており、パルス照射 X 線透視装置や医療用リニアックの X 線測定が可能な設計となっています（図 6）。パルス照射の線量率の測定では平均線量率が表示されます。1 秒以上の線量率を平均し、表示は 1 秒ごとに更新されます。そのため、1 パルスの線量率を正しく表示するには、パルス幅は 2 秒以上である必要があります。ただし、パルス幅が既知の場合は、より短いパルス幅でも 1 パルスの線量率が算出されます。これは図 6 に示すように、RaySafe 452 は短いパルス幅でも線量率測定の精度が高いためです。

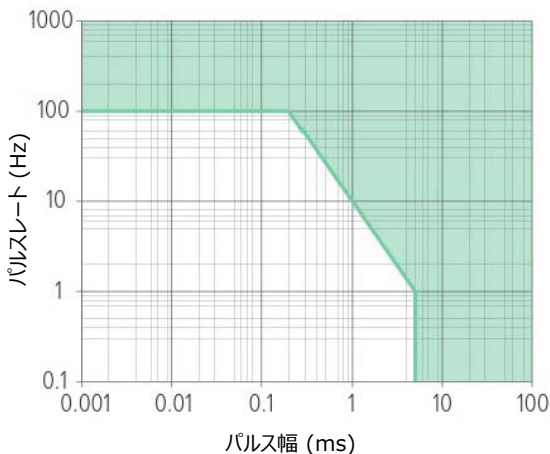


図 6：30°C 以下の温度における RaySafe 452 のパルス照射時の測定性能。緑色の領域では、すべての線量率で、対応する連続照射時の応答の±20%以内となっています。

応答時間

サーベイメーターの応答速度は様々な数値で表すことが

できます。RaySafe 452 の起動時間は 5 秒です。代表的な応答時間は約 2 秒ですが、線量率により若干異なります。安定化までの時間は、高線量率の 2 秒から、最大でバックグラウンドレベルの線量率の 60 秒まで²、これは IEC 60846-1:2009 が定める応答時間に適合します。

カウント

リッドを外した状態では、パンケーキ型 GM 管のみが使用され、有効なセンサー領域は図 4b の灰色エリアに相当します。このモードでは、α、β、γ 線がカウントされ³、放射性物質による汚染を確認することができます。RaySafe 452 では放射性核種を同定することはできませんが、放射性核種が既知の場合は、測定されたカウント率からおおよその放射能を算出できます。代表的な放射性核種のカウント率と放射能への換算係数表は、ユーザーマニュアルに記載されています。

測定例

セクション 1 の図 1 の測定例を用いて RaySafe 452 の汎用性を説明します。

- X 線管周囲の漏洩線を Gy（または rad、R）単位で測定する場合は、Air kerma リッドを取り付け、RaySafe 452 を管球焦点から適切な距離に配置します。RaySafe 452 のハンドルには三脚を取り付けるためのねじ穴があります。
- 散乱線を測定する場合は、Ambient リッドに交換します。自動的に単位が Sv（または rem）に切り替わるため、再設定する必要はありません。
- 遮蔽壁からの漏洩線を測定する場合は、RaySafe 452 をゆっくりと移動させながら測定範囲全体を測定します。ゲイン設定は不要です。
- 汚染を測定する場合は、リッドを外し、パンケーキ型 GM 管のセンサー領域をゆっくり移動させながら測定範囲全体を測定します。自動的に単位がカウント（cps または cpm）に切り替わります。

² 詳細は RaySafe 452 のユーザーマニュアルをご参照ください。

³ RaySafe 452 は中性子線には感応しません。

- e) 放射性医薬品投与患者様の放射線量を確認する場合は、Ambient リッドを取り付け、Sv（または rem）単位で線量率を測定します。または、リッドを外して cps（または cpm）単位でカウントを測定します。

測定結果はすべて自動的に RaySafe 452 に保存され、RaySafe View（ソフトウェア）を使用してコンピューターに転送できます。

まとめ

最後に、セクション 3 で指摘した課題に対し RaySafe 452 がどのように対応しているかを示します。

RaySafe 452 の特徴：

- エネルギー応答が平坦で、補正係数が不要
- 短いパルス幅や高いパルスレートに対応するため、パルス照射 X 線透視装置や医療用リニアックの X 線測定が可能
- バックグラウンド放射線を測定し、遮蔽壁からの漏洩線測定に対応
- 加圧されていないため、危険物の対象外
- 診断用撮像、放射性医薬品、放射線治療分野の測定環境に 1 台で対応
- すべての測定結果を自動的に保存

RaySafe 452 の詳細情報は

flukebiomedical.com/452 をご参照ください。

Fluke Biomedical.

Trusted for the measurements that matter.

Fluke Biomedical

6920 Seaway Blvd, Everett, WA 98203 U.S.A.

For more information, contact us at:

(800) 850-4608 or Fax (440) 349-2307

Email: sales@flukebiomedical.com

Web access: www.flukebiomedical.com

©2019 Fluke Biomedical. Specifications subject to change without notice. Printed in U.S.A.
6/2019 6011931b-en

Modification of this document is not permitted without written permission from Fluke Corporation.