

## 診断用X線の線量計測標準及び高線量線量標準に関する調査研究

田中隆宏

(平成22年5月26日受理)

## A survey on dosimetry in diagnostic radiology and in radiation processing

Takahiro TANAKA

## 1. 緒言

放射線の利用は現在の我々の生活に欠かせないものとなっている。例えば、高分子や半導体加工、食品照射（本邦では馬鈴薯の発芽防止のみ）、医療器具の滅菌、放射線治療など、その例には枚挙に暇がない。このような放射線の利用法に共通していることは、放射線照射による物質の変化やその効果を巧みに利用している点である。

また、胸部撮影、CT (Computed Tomography)、マンモグラフィなどの放射線診断や、非破壊的に材料の欠陥などを測る分野においても放射線は利用されており、この場合は、物質のX線に対する透過率の違いによるコントラストを利用している。

以上のように放射線の利用は多岐にわたっており、利用分野によって使用する放射線の種類、エネルギー、線量などは様々である。

放射線照射した商品の国際的な取引における品質保証の手段として、線量計測は重要な意味を持つ。特に、医療器具の放射線滅菌や、食品加工においては、線量の上限值（と下限値）が定められている。そのため、線量の測定値に対する国家標準へのトレーサビリティが必要となる。一方、放射線診断においても、マンモグラフィを中心として、線量計測の重要性が広まりつつある。

産業技術総合研究所(以下、産総研)は、本邦の国家計量標準研究機関として、X線標準、 $\gamma$ 線標準、 $\beta$ 線標準などの放射線の線量標準の開発・供給を行っている。本報告では、より安全な放射線利用技術の確立のため、(マンモグラフィ)診断用放射線及び滅菌等で用いられる高線量領域の放射線標準に関する調査を行ったので報告する。

以下では、まず、放射線の単位について概説する。ただし、本調査で必要と思われる量のみ留めるので、こ

こで解説しない量については、他の参考文献に譲る<sup>1)-4)</sup>。

次に、診断領域で利用される放射線の線量計測の例として、マンモグラフィにおける線量評価について述べ、産総研で標準供給を行っているマンモグラフィ標準について解説する。次に、滅菌などを対象にした高線量照射における線量評価について述べ、最後に、これらの標準について産総研における展望を述べる。

2. 放射線の単位について<sup>5)</sup>

## 2.1 フルエンス

一般に線量という強度を思い浮かべるが、強度というのに最も適した量がフルエンスである。フルエンスは、単位断面積をもつ球内を通過する放射線の粒子数として定義される。これは球面フルエンスとも呼ばれる。一般に放射線は平行ビームであるとは限らないため、球面フルエンスが使われることが多い。また、平行ビームを議論する際には、光子ビームに対して垂直な単位断面積を通過する放射線の粒子数として定義される平面フルエンスという量を用いることがある。

## 2.2 エネルギーフルエンス

これは前項のフルエンスと密接な関係がある量であり、先程のフルエンスは放射線の粒子数に着目した量であったのに対し、エネルギーフルエンスは通過エネルギーに着目した量である。つまり、エネルギーフルエンスは、単位断面積を有する球内を通過する放射線のエネルギーとして、定義される。または、全領域で放射線のエネルギーに対するフルエンスの分布を積分した値と表現することもできる。

## 2.2 照射線量

照射線量は、放射線が空気を電離することに基づいた

\* 計測標準研究部門 量子放射科 放射線標準研究室

量であり、旧単位であるレントゲン(R)が広く知られていた。照射線量の定義は、X線やγ線などの光子によって単位質量の空気中からの放出電子と陽電子が、完全に停止するまでに生成する正または負の全ての電荷の絶対値、として定義されている。つまり、照射線量 $X(\text{C/kg})$ は、空気の質量 $dm$ と生成電荷 $dQ$ によって、

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (1)$$

と表わすことができる。なお、二次電子（二次陽電子）の制動放射によって空気中に生成されるイオンの電荷は照射線量の定義には含まれない。これはさらに高次の電子についても同様であり、照射線量では、あくまで入射光子によって空気中に生成された二次電子（二次陽電子）のみを考慮の対象にしている。

### 2.3 カーマ

カーマは、Kinetic Energy Released per unit Massの頭文字をとったKermaを表わしている。カーマは照射線量とは異なり、光子のほかに中性子などの間接電離性の中性粒子線全てを対象にしている。カーマは相互作用物質に応じて定義することができるため、カーマには物質名が付記される。一般的には、空気を相互作用物質として用いることが多く、その場合は、空気カーマとなる。カーマは、間接電離性の中性粒子線が単位質量中の物質で生成した二次荷電粒子の初期運動エネルギーの総和、として定義されている。従って、単位は $\text{J/kg}(=\text{Gy})$ となる。照射線量・カーマともに放射線によって生成される二次電子に着目しており、両者の違いは、生成イオン電荷量か（二次電子の）エネルギーのどちらで表現するのかにある（ただし、二次電子による制動放射の扱いの違いがあるので、厳密には両者は一致しない）。

### 2.4 吸収線量

吸収線量は、全ての放射線、物質に対して定義することができる。吸収線量の定義は、単位質量の物質に沈積する放射線のエネルギーである。吸収線量もカーマと同様に、物質名を付記する必要がある。主に用いられるのは、水吸収線量である。吸収線量という時、暗に水吸収線量を指すことが多いが、厳密には物質名を付記しなければならない。単位は、カーマと同様に $\text{J/kg}(=\text{Gy})$ である。治療や滅菌など、放射線照射による効果を定量的に議論する際に、水吸収線量が用いられ、重要な役割を果たしている。

## 3. マンモグラフィ診断における線量評価

### 3.1 背景

マンモグラフィとは、X線による乳房のレントゲン撮影のことである。近年の本邦における乳癌の罹患者数の増加から、乳がんの早期発見を目的として、2000年に乳癌検診に導入された（それまでは視触診のみで行われていた）。図1に、視触診ならびにマンモグラフィ診断の受診者数の推移を示す。マンモグラフィ導入後、マンモグラフィ検診の受診者数は増加の一途を辿り、2007年度には約190万人が受診している<sup>6)</sup>。

マンモグラフィ装置は放射線を利用した医療機器であるため、その品質管理は、受診者の医療被曝の管理・低減に対して非常に重要な役割を果たす。

乳房は、主に乳腺組織、脂質組織、皮膚組織で構成され、これらの中では乳腺組織が放射線に対して最も脆弱であると一般的に仮定されている。そのため、乳腺組織による平均吸収線量が、発がんリスクを特徴づける量として最も広く受け入れられており、マンモグラフィにおける線量評価には、平均乳腺線量が用いられている。

この平均乳腺線量とは、均一に圧迫された乳房の乳腺組織に吸収された平均線量である。本邦のマンモグラフィにおける線量評価は、乳房撮影精度管理マニュアル<sup>7)</sup>に従って行われている。この評価法は、ACR(American College of Radiology)による評価法を参考にしている。本邦では、厚さ42 mmの乳房（脂肪組織50%、乳腺組織50%）に対する平均乳腺線量が3 mGy以下（2 mGy以下が望ましい）をガイダンスレベルとして設けている。

しかし、平均乳腺線量は直接の測定が不可能な量である。そこで、乳房表面での線量を計測し、変換係数によって平均乳腺線量に換算するという手法が用いられている。

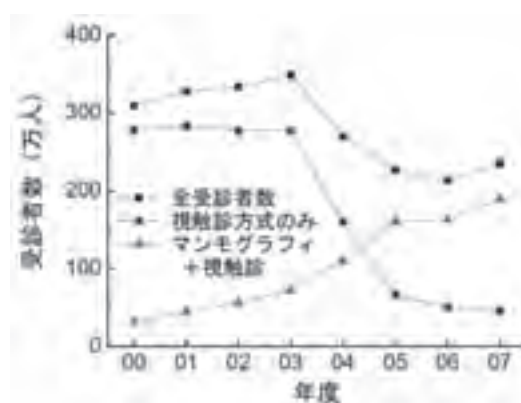


図1 マンモグラフィ受診者数の推移<sup>6)</sup>

$$AGD = Const \times R_{air}$$

AGD:平均乳腺線量(averaged glandular dose)

Const:換算係数

$R_{air}$ :入射空中線量

この換算係数は、圧迫乳房の断面を模擬した数学的モデルを用いてモンテカルロ法によって求められている。本邦のマンモグラフィ精度管理マニュアルでは、この変換係数は、半価層(透過率を50%にするフィルタの厚さであり、線質を表わす指標)と管電圧の組み合わせ毎の数値表として与えられている。一方、入射空中線量は乳房表面での照射線量(または、空気カーマ)であり、これは実測可能な量である。照射線量の測定には、一般に電離箱式か半導体式の線量計が用いられている。

以上のように、プロトコルに準じた平均乳腺線量の評価の精度は、照射線量の精度に依存している。一般ユーザーの線量計は、線量の相対計測のみを行っているので、標準場における校正が重要となってくる。

### 3.2 電離箱式の線量計の校正について

マンモグラフィでは、胸部撮影など他の診断で使われるX線(40 keV程度)よりも低いエネルギー(15 keV程度)のX線が利用されている。X線のエネルギーが低いほど透過力が弱くなるため、マンモグラフィ用のX線の線量計測には薄膜窓式線量計(シャロー型線量計)が用いられる。図2にシャロー型線量計の模式図を示す。

この線量計は、ポリスチレンなどの軽元素からなる薄膜(数10 $\mu$ m)をX線の入射窓にしている。外部からの誘導を抑えるため、この薄膜には黒鉛などの導電性の物質が塗布されている。しかし、この薄膜によってX線の吸収が起こるため、マンモグラフィのような低エネルギー領域では、線量計の感度がX線のエネルギーに対して大きく変わることが多い。国内外を問わずシャロー型の線量計は数多くあるが、マンモグラフィのエネルギー領域の感度は特に大きく変化し、その変化の仕方も、さまざまである。図3は、当所で管理しているシャロー型線量

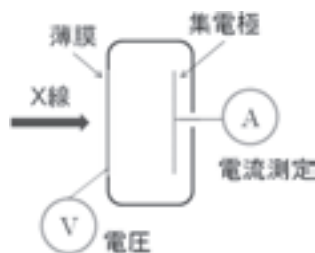


図2 シャロー型線量計の模式図

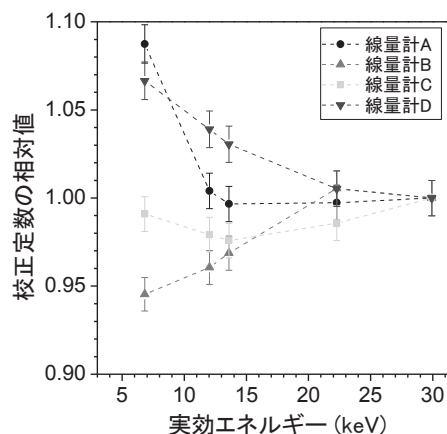


図3 シャロー型線量計の校正の例

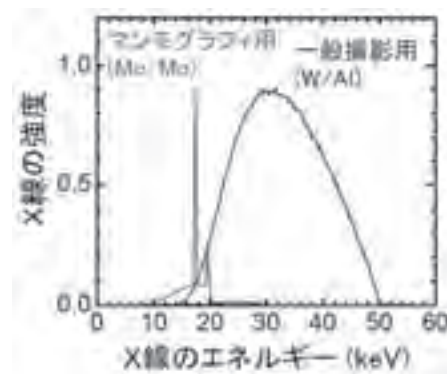


図4 一般撮影とマンモグラフィ用のX線スペクトルの例

計の校正定数を、実効エネルギー 30 keVの結果を1として相対値で示した図である。

図3の横軸の実効エネルギーとは、対象の連続X線と同じ大きさの半価層を持つ単色X線のエネルギーのことである。このように、低エネルギー用の高精度の線量計であるシャロー型線量計においても、マンモグラフィのエネルギー領域である15 keV程度では感度の著しい変化が生じてしまう。そのため、マンモグラフィで使用されるX線の実効エネルギーに合わせて校正することが重要となる。

一方、マンモグラフィで使用されるX線のスペクトルは、胸部等の一般撮影とは大きく異なる。図4は、胸部撮影とマンモグラフィ用のX線のスペクトルの例を示す。

マンモグラフィでは、X線管球の陽極材と付加フィルタの組み合わせが、ともにMoである(以下、X線管球の陽極材/付加フィルタ)ことが多いのに対して、一般撮影ではW/AIが用いられる。そのため、マンモグラフィのX線を、実効エネルギー(または半価層)に近い一般撮影用の線質で代用して校正しても、正しく校正され

ているか確証がない。

そこで産総研では、従来のW / Alの軟X線標準場に加えて、Mo / Moの組み合わせのマンモグラフィ用のX線標準場を新たに設定した。

### 3.3 産総研におけるマンモグラフィX線標準

放射線標準研究室では、X線については照射線量と空気カーマの標準供給を行っている。当所には、管電圧が10～50 kVまでの軟X線用と30～300 kVまでの中硬X線用の大小2台の自由空気電離箱がある<sup>3)</sup>。この自由空気電離箱によって照射線量を測定し、線量標準の供給を行っている。軟X線用として用いている自由空気電離箱の概略図を図5に示す。

自由空気電離箱では、コリメータと集電極で規定される電離体積( $V$ )内で生成されたイオンの電荷を測定し、照射線量を求めている。電離体積内の空気の質量を $m$ とすると、照射線量率は次の式によって得られる。

$$\dot{X} = \frac{I}{m} \prod_i k_i \quad (2)$$

ここで、式(2)の $I$ はX線による電離電流、 $k$ は下記のような各項目の影響に対する補正係数である。

- (1)再結合と拡散による電荷損失に対する補正係数
- (2)湿度による電離量の変化に対する補正係数
- (3)規定面—集電極中心間での空気によるX線の減衰に対する補正係数
- (4)電離箱の電荷収集電界の歪みに対する補正係数
- (5)高圧電極に印加する電圧の極性効果に対する補正係数
- (6)電離箱の遮蔽壁前面を透過したX線の影響に対する補正係数

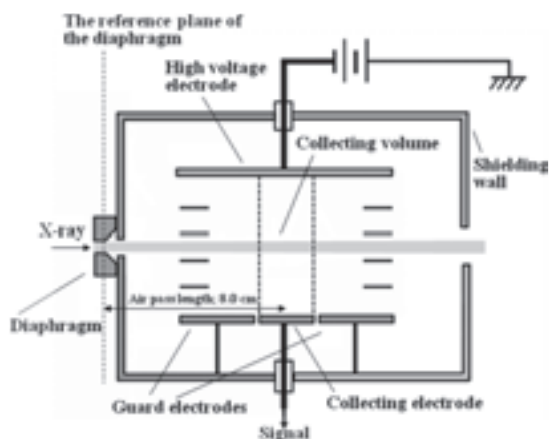


図5 軟X線用自由空気電離箱

(7)電離箱内で散乱されたX線による電離電荷に対する補正係数

(8)二次電子が電極に衝突し、エネルギーの一部が電離電荷生成に寄与しないことに対する補正係数

(9)ブレンド(X線入射開口部)で散乱されたX線の影響に対する補正係数

(10)ブレンドの縁を透過したX線の影響に対する補正係数

これらの補正係数のうち、(1)～(6)は実験により求めているが、(7)～(10)については測定が困難であるため、モンテカルロシミュレーションにより評価している。軟X線ではこれらの補正係数のうち、空気によるX線の減衰に対する補正が3%程度と最も大きく、その他に散乱線の影響が少しあるのみで、他の補正係数に関してはかなり小さい。

当所の照射施設の概略図を図6に示す。W陽極のX線管球の隣に、Mo陽極のX線管球が設置されている。国家標準器である自由空気電離箱はXYステージ上に設置した遮蔽箱中にあり、WとMo管球の切り替えに応じて移動できるようになっている。X線管球の焦点からの距離が、測定器の基準面と自由空気電離箱の規定面とで同じになるように、測定器を自由空気電離箱の隣に設置する。そして交互にX線を照射し、両者の出力の比から校正定数を導出している(置換校正法)。

校正距離(焦点—規定面間距離)は、従来の軟X線標準(W/Al)では1 mとしていたが、マンモグラフィ標準では、60 cmで設定している。これは、実際のマンモグラフィ装置の照射距離(焦点—乳房間距離)の多くが60 cmであることに基づいている。前述の通り、マンモグラフィ用のX線は空気による吸収が他の診断X線と比べて大きいため、校正距離によるスペクトル(線質)の変化が大きく、距離の設定は重要となる。また、実際の乳房撮影では圧迫板を透過したX線が乳房に照射されるため、圧迫板(3.07 mm厚のポリカーボネート板)を設置した線質での標準供給も行っている。

## 4. 医療器具の放射線滅菌における線量評価

### 4.1 背景

放射線診断では数mGy程度、放射線治療では数Gy程度の吸収線量が利用される。一方、医療器具の滅菌、食品加工、架橋、半導体加工などの目的では、kGyオーダーのいわゆる高線量領域の放射線が利用される(なお、ここでの吸収線量は、水吸収線量を指す)。このような高線量領域での放射線照射によって物質に生じる変化

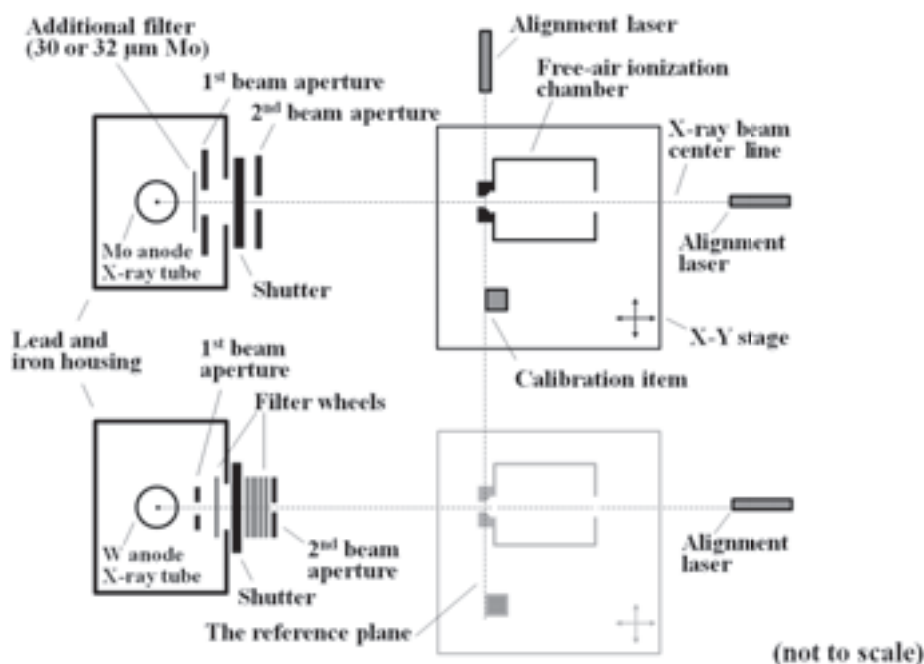


図6 産総研の軟X線とマンモグラフィ用X線標準の照射施設の概略図

は、吸収線量を基にして評価されることが多い。そのため、正確な吸収線量の評価が品質保証において重要となる。これらの中で、線量管理が特に重要視されるのは、被照射物が人体の健康に直接影響を及ぼす可能性のある医療器具の滅菌と食品加工の放射線照射である。

工業用の放射線照射では、主に<sup>60</sup>Coからのγ線と電子線が用いられる。その他にも、X線や<sup>137</sup>Csからのγ線が利用されることがある。医療器具の滅菌および食品加工で使用される電子線とX線については、照射によって被照射物が誘導放射能を持つことが無いように、ICRUレポート<sup>8)</sup>では、電子線は10 MeV、X線は5 MeVをエネルギーの上限値としている。

使い捨ての医療器具の約半数は放射線による滅菌がなされている<sup>8)</sup>。医療器具の滅菌方法としては、酸化エチレンガス滅菌や蒸気を使った方法（蒸気滅菌、国際的には湿熱滅菌という）もあるが、近年の医療器具は熱に弱いプラスチックが使われることや、酸化エチレンガスは環境や人体に悪影響を及ぼす等の観点から、放射線滅菌が多くなりつつある。医療器具の放射線滅菌では、主に<sup>60</sup>Coからのγ線が利用されている（吸収線量は25 kGyが多い）。また、近年は10 MeVまでのエネルギーの電子線を使った滅菌も着実に増えている。5 MeVまでのX線を使う施設も少数ではあるが存在する。

放射線滅菌の妥当性や日常の工程管理は線量計測によってなされている。医療器具の滅菌に必要な吸収線量は

10～30 kGyである。ただし、一度照射したものに対する取り扱いには注意しなければならない。つまり、照射工程において、照射済みのものは必ず再照射されないように厳重な管理が必要である。また、滅菌に必要な最低限の線量を照射することも重要である。もし線量計測が正しく行われておらず、滅菌に必要な線量に達していない場合は、滅菌は不十分となり、器具が使用される人体に対して多大なる影響を及ぼす可能性がある。そのような観点から、放射線滅菌工程は厳しく管理しなければならない（ISO 11137-1）。

このような規格の中ではいずれも、線量計測は国家標準に対してトレーサブルであること、不確かさを評価することならびに文書化することが共通の要求事項として挙げられている。滅菌工程の有効な管理に対しては、線量の不確かさは拡張不確かさ（ $k=2$ ）で5～10%より小さいことが必要であるといわれている<sup>8)</sup>。

食品照射は、本邦では馬鈴薯の発芽防止のみ認められているが、世界では香辛料をはじめとする様々な食品に放射線照射がなされている。食品への放射線照射は、保存期間の延長や病原性微生物による汚染の低減などに利用される。放射線照射による食品加工については、コーデックス委員会（国際食品規格委員会）が、放射線のエネルギーならびに線量について厳格な規定を定めている。電子線については10 MeV、X線については5 MeVがエネルギーの上限値として定められている。線量につ

いては、原則 10 kGy までとなっている。このような厳格なガイダンスレベルが照射食品に対しては設けられており、正確な線量評価が重要となる。

高分子材などへの放射線照射による架橋技術については、線量よりは効果の有無によって判断がされることが多い。吸収線量の幅は非常に広く、大きいものだと 500 kGy を超えることもある。主に使われる放射線は、0.1 ~ 10 MeV の電子線や<sup>60</sup>Co の $\gamma$ 線である。

特に医療器具の滅菌と、食品照射については、線量の規制が非常に厳しく管理されている。高線量用に特化した一次標準を有している国は少なく、放射線治療領域の線量での一次標準にトレーサブルな標準を使用している国が多い。照射工程の安全性のみならず、円滑な国際取引のためにも（特に医療器具の放射線滅菌については、線量の測定結果に基づいて品質保証がなされるドシメトリックリリースにより、線量の保証が不可欠である）、高線量の放射線の線量計測のトレーサビリティの構築は必要である。以下では、放射線滅菌を対象にした線量計測に的を絞って議論する。

#### 4.2 実際の工業用照射施設での線量計測における課題

産総研では、治療用の線量計測を対象にした、水吸収線量標準の供給を行っているが、実際の工業用照射施設では線量（または線量率）が高いという以外に、温度や湿度などの環境が大きく異なるという特徴がある。特に、工業用の照射施設では、照射装置、線源、配置等が施設によって様々であり、放射線治療のように標準的な条件というものが確立されていない。そのため、実際の照射施設での線量計測（評価）が必要不可欠となる。

一般に、工業用照射施設での $\gamma$ 線や電子線は、治療用とは異なり、コリメートされていない。これは、コストパフォーマンスの観点から、線源からの放射線を有効に活用するためである。工業用照射での照射は、線源を中心として被照射物をコンベアで移動させ、積算線量値が規定値に達するように行うことが多い。そのため、照射行程での線量率は場所によって異なり、また温度等も大きく異なる。

実際に工業用の照射施設での照射の一工程での線量率と温度の変化の測定例<sup>9)</sup>によると、線量率は 7 ~ 41 kGy/h の範囲で、温度は 20 ~ 40 °C の範囲で変化することが調べられている。この例では、一工程は約 3 分であり、線量計の応答速度を考えると、非常に短い時間で温度と線量率に変化しているといえる。ほとんどの線量計は温度に依存するため、温度は一定であることが望ましい。一般に線量計は、線量率や温度などの環境の変化に応じ

て線量の指示値が変わるため、補正が必要になることが多い。しかし、このように行程中での環境の変化が大きいため、実際の工業用照射施設での線量評価が難しい。

そこで、工業用照射施設での線量評価には、線量率や温度などの環境の変化に対する特性が評価されている線量計が用いられる。つまり、国家標準研究所のような理想的な環境と、プラントの照射環境の両方で使える線量計により、工業用照射施設での線量評価を行う。

高線量の線量領域では、NPL（イギリス）、RISO（デンマーク）、NIST（アメリカ）などでは早くから標準供給を行っており、日本では主に NPL で校正された線量計が用いられている。以下で、高線量のトレーサビリティについて NPL の電子線を中心に述べる（他国の国家標準、 $\gamma$ 線についても基本的には同じ考え方である）。

#### 4.3 高線量領域の線量標準のトレーサビリティについて

高線量領域の線量標準のトレーサビリティの体系の代表例を図 7 に示す。

吸収線量の一次標準は、カロリメータによって供給されることが多い。カロリメータとは、物質の放射線吸収による温度上昇を利用した線量計である。水吸収線量を計測するためには、水を吸収体にした水カロリメータが理想的である。しかし、水は吸収した放射線のエネルギーを全て熱に変換せず、その一部を化学反応に費やす（熱欠損）ため、補正が必要となるが、その評価は難しい。また、放射線吸収体である水の対流防止のため精密な温度コントロールが必要など、技術的に極めて高いレベルが要求される。そこで、水と同じような放射線に対する特性を有するグラファイトを吸収体にしたグラファイトカロリメータが多くで国で水吸収線量の標準供給に用いられている（グラファイトの物理的な特性が詳細に評価されていることや、熱欠損が無視できるくら

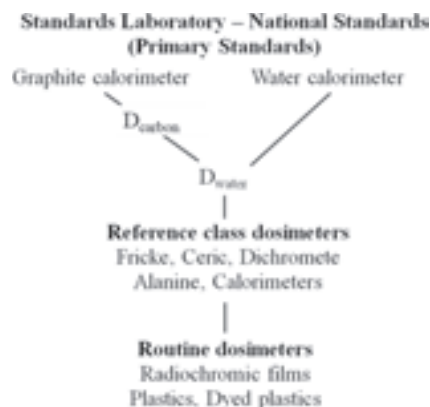


図7 高線量の線量標準のトレーサビリティ<sup>8)</sup>

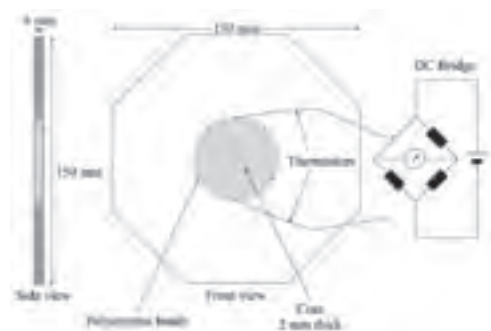


図8 NPLの電子線のグラファイトカロリメータの本体<sup>10)</sup>

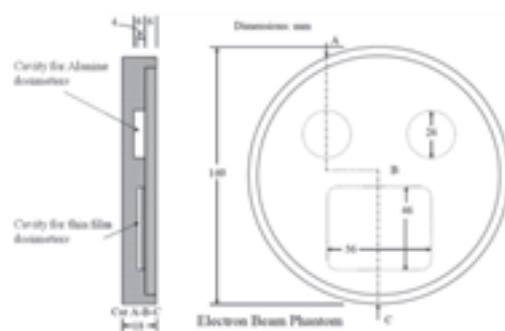


図9 アラニン線量計との同時照射による線量計の校正用のファントム（電子線用）の一例<sup>8)</sup>

小さいこと、比熱容量が水の約1/6であることなども、多くの国で採用されている理由である。

図8にNPLの電子線用のグラファイトカロリメータの本体を示す。

このカロリメータは、治療領域（数Gy）から加工領域（数10 kGy）まで広い線量範囲の電子線に対して有効である。

コアと呼ばれる吸収体（グラファイト）の周りをグラファイトで覆うという非常にシンプルな構造になっている。この本体部を発泡スチロールなどの密度の小さい断熱材で覆うことにより断熱性を高めている。カロリメータでは、放射線照射の前後での吸収体の温度上昇と、吸収体の比熱容量を用いることにより、吸収線量を算出することができる。ただし、このとき得られるのはグラファイト吸収線量であるため、水吸収線量への変換を行う必要がある。

しかし、この一次標準器による実際の工業用照射施設での線量評価は、線量率や温度などの環境が場所によって大きく異なるため、非常に難しい。そのため、このような環境の違いによる変化が少なく、詳細な特性評価がなされている線量計として、アラニン線量計が参照線量計として現在広く普及している。アラニン線量計は、放射線によってアラニン素子中に生成されるラジカル量が、線量に比例することを利用した線量計である。放射線照射によりアラニン素子中に生成されるラジカル量は電子スピン共鳴（electron spin resonance: ESR）法を用いて測定される。アラニン線量計は、線量の測定範囲が1～10<sup>5</sup> Gyと非常に広いこと、線量率やエネルギー依存性が少ないこと、また、これらの特性が詳細に評価されているなどの理由から、高線量領域の参照線量計として広く普及している。

グラファイトカロリメータ等の一次標準で校正したアラニン線量計を、実際の工業用照射施設での線量評価

に用いる。このとき、線量率や温度などについては補正する必要がある。

また、実際の工業用照射施設で日常的に使用されている線量計（ルーチン線量計）はアラニン線量計のように環境の変化に対して特性が分かっていることは稀であり、環境変化に対する線量計の応答は複雑であることが多い。そのため、ルーチン線量計を環境量に対して補正するのではなく、アラニン線量計と同時に照射する校正法が最適である。ただし、両者に同じ線量が照射されるように、特殊なファントム内に線量計を入れる必要がある。図9に電子線用のファントムの一例を示す。

ファントム物質は、線量計の密度に近く、放射線吸収特性が近いものが選ばれる。大きさは、互いの線量計同士で遮蔽しないような程度に大きく、また、照射野の不均一性による不確かさが気にならない程度に小さくする必要もある。

以上のように、実際の工業用照射施設での線量評価には、一次標準器以外に、参照線量計（アラニン線量計及びファントム）が必要となることが分かる。

## 5. まとめと展望

### 5.1 マンモグラフィ用X線標準

新たに産総研で設定したマンモグラフィ用のX線標準場について概説した。今回標準供給を開始したMo/Moの線質以外に、マンモグラフィではMo/RhやRh/Rhなどの線質が利用されている。このような標準場の設定についても検討していく必要がある。産総研のマンモグラフィX線標準場の信頼性を高めるためにも国際比較を行っていきたいと考えている。

今後も医療技術の進歩に伴い、様々な診断技術が登場することが予想される。実状に柔軟に対応した標準の開発・供給を行っていく必要があると考えている。

## 5.2 高線量の線量標準について

高線量の標準については、当所ではそのような照射施設がないので、高線量の照射施設を借りて校正業務を行う必要がある。しかし、まずはNPLのように治療から滅菌にわたる広い範囲をカバーできる一次標準を開発することが急務である。幸い、2009年度に医療用の電子線加速器が導入されたので、治療領域での電子線用のグラフアイトカロリメータの開発を行っていきたいと考えている。

### 謝辞

本調査研究をまとめるにあたり、計測標準研究部門 檜野良穂 副部門長、量子放射科 放射線標準研究室 齋藤則生 室長から貴重なご教授をいただきました。ここに深く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 納富昭弘「軟X線標準場の概要と高品質化に関する調査研究」産総研計量標準報告 Vol.2, No.4 (2004) 627.
- 2) 加藤昌弘「β線吸収線量標準の開発と設定に関する

- 調査研究」産総研計量標準報告 Vol.3, No.4 (2005) 633.
- 3) 森下雄一郎「周辺および個人線量当量標準の設定に向けた調査研究」産総研計量標準報告 Vol.6, No.4 (2007) 215.
- 4) 齋藤則生, 黒澤忠弘, 森下雄一郎, 加藤昌弘, 「放射線標準の現状と展望」計測標準と計量管理 Vol.57, No.3 (2007) 22.
- 5) ICRU report No.60, Fundamental quantities and units for ionizing radiation (1998).
- 6) 政府統計の総合窓口 e-Stat, <http://www.e-stat.go.jp>
- 7) (社) 日本放射線技術学会放射線撮影分科会: 放射線医療技術学叢書 (14-3), 乳房撮影精度管理マニュアル (改訂版) (1999).
- 8) ICRU report No.80, Dosimetry systems for use in radiation processing.
- 9) P.H.G.Sharpe, J.P.Sephton, R.D.Chu 「Real time dosimetry measurements at an industrial irradiation plant」Radiation Physics and Chemistry 57 (2000) 687.
- 10) M R McEwen and A R DuSautoy 「Primary standards of absorbed dose for electron beams」Metrologia 46 (2009) S59.

### 注釈)

p.110 段組み 右 下から9行目、

「米国放射線専門委員会 (American College of Rheumatology: ACR)」を「ACR(American College of Radiology)」に、訂正した。(2016年11月22日訂正)