

放射線量の国家計量標準について

清水森人

産業技術総合研究所 計量標準総合センター 分析計測標準研究部門

【概要】

我が国で行われるあらゆる放射線計測の基準となる放射線量の国家計量標準について概説する。放射線を保管することは困難であるため、放射線量の計量標準は放射線量を高精度に計測できる計測器で校正される。計量標準は放射線計測の基礎を理解する上で最高の教材でもあり、ここでは空気カーマ標準である平行平板形自由空気電離箱およびグラフィイト壁空洞電離箱、水吸収線量標準であるグラフィイトカロリメータについて説明する。

1. 放射線量の国家計量標準

国家計量標準は、その国の国内で行われるあらゆる計量の基準（標準）となるものである。例えば、日常生活で用いられる「量り」や健康管理に用いる「体温計」、「体重計」などは、その製造過程において必ず校正されているが、その校正に用いられる標準器は必ず上位の標準器によって校正されており、これをたどっていくと必ずその国の国家計量標準につながるようになっている。これを「計量のトレーサビリティ」と呼ぶ。さらに、国家計量標準は、それぞれの国家が所有する国家計量標準との間で相互比較が行われ、同等性が確保されている。そのため、異なる国の異なるメーカーの測定器の間でも、同じ量を測定すればその測定値に大きな差が生じないようにしている。このように計量のトレーサビリティを整備することにより、商取引や医療などの現場において混乱が生じることを防ぎ、国民が不利益を受けないようにしているのである。

計量標準を構築していく上で重要なこととして、どのような定義で単位を表現し、標準として実現するかが重要となる。例えば、質量の単位であるキログラムは当初0℃の水1Lの質量で定義されたが、これは最も簡単に標準を実現することができたためである。しかし、放射線の量は質量のように簡単に実現することができない。放射線の場合、まず、放射線そのものを保管することが難しい。そのため、放射線源や放射線発生装置を用いて放射線場を構築し、その放射線場の基準点における放射線量を計測する計測器を計量標準とするしかない。

次に表現方法も問題となる。放射線が量子であることに着目して、放射線の量を数で表現することを真っ先に考えるかもしれない。実際に放射線の単位としてフルエンスという単位もある。しかし、実際にこれを実現するとなると非常に困難であることがすぐに分かる。X線

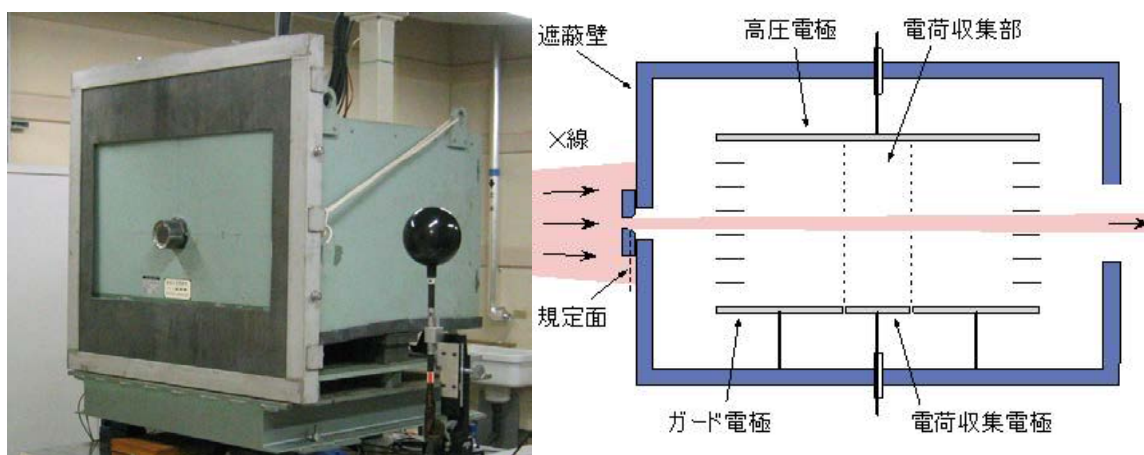


図1 平行平板形自由空気電離箱の外観(左)と概略(右)
(放射線標準研究グループのホームページより引用[1])

や γ 線を構成する光子は、電子としか相互作用しないため、直接的に測定することができないからである。我々は放射線がある物質中の電子と相互作用した結果を知ることはできず、放射線場の空間の基準点におけるX線や γ 線の数を一一つ定義通りにカウントすることはできないのである。したがって、フルエンスは放射線の量を表現する手法として全く実用的でなく、放射線量の単位として使われることはほとんど無い。

結局のところ、放射線の量を実用的に表現するには、放射線がある物質に引き起こした相互作用の量でもって行うしか無いため、実用的に用いられる放射線量の単位および標準は特定の物質に着目したものとなっている。我が国においては、放射線量の計量標準（以下、線量標準）は次の2つについて主に整備されている。

空気カーマ (Gy) : 非荷電粒子放射線によって単位質量あたりの空气中に生じた二次電子の運動エネルギーの総量

水吸収線量 (Gy) : 放射線によって単位質量あたりの液体の水が吸収したエネルギーの総量それぞれ、放射線が空気および水と相互作用した結果で表現される量であることが分かるはずである。そして、これらの線量標準は、これらの量をいかに正確に計測するかの特化した計測器となっている。

現在、線量標準は産業技術総合研究所（以下、産総研）において開発および維持、供給が行われており、産総研から直接、あるいは二次校正事業者などを通じて、ユーザーへと供給されている。以下では、産総研で管理している線量標準であるグラファイト壁空洞電離箱を用いた空気カーマ標準とグラファイトカロリメータを用いた水吸収線量標準について概説する。

2. 平行平板形自由空気電離箱（軟X線および中硬X線の空気カーマ標準）

線量標準として最も基本となるものが平行平板形自由空気電離箱であり、管電圧10～300 kVまでの軟X線および中硬X線の空気カーマ標準として用いられている。軟X線、中硬X線は診

断用 X 線を始め、医療や産業など様々な場面で利用されているため、最も身近で重要な線量標準と言える。

国家計量標準となっている平行平板形自由空気電離箱の外観と概略を図 1 に示す。平行平板形電離箱は遮蔽壁で覆われており、その内部に平行平板形の電極が配置されている。有感領域を規定するため、収集電極は平行平板形自由空気電離箱の動作原理は以下の通りである。まず、写真左側から入射した X 線が電離箱入り口に取り付けられた入射孔から電離箱内に導入される。電離箱の入射孔から、電離箱の有感領域である電荷収集部までは二次電子の飛程に対して十分な距離が確保されており、電離箱内に入射した X 線のみで荷電粒子平衡が電離箱内に形成される。そのため、有感領域で生じた電荷の総量 Q [C] から、有感領域で発生する二次電子のエネルギーの総量 E_{tot} [J] を次のように決定することができる。

$$E_{\text{tot}} = \left(\frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \right) \frac{Q}{1 - \bar{g}_{\text{air}}} \quad (1)$$

ここで、 \bar{W}_{air} [J] は空気を電離して 1 イオン対を生成するのに必要なエネルギーの平均、 e [C] は電気素量である。 \bar{g}_{air} は二次電子の運動エネルギーのうち、空気へのエネルギー付与では無く、放射損失で失われるエネルギーの割合である。空気カーマの定義は単位質量あたりの空気中に生じた二次電子の運動エネルギーの総量であるから、式(1)を有感領域の空気の質量 m_{air} [kg] で割れば、次のように平行平板形自由空気電離箱の入射孔における空気カーマの値を決めることができる。

$$K_{\text{air}} = \frac{E_{\text{tot}}}{m_{\text{air}}} \prod k_i = \left(\frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \right) \frac{1}{1 - \bar{g}_{\text{air}}} \frac{Q}{m_{\text{air}}} \prod k_i \quad (2)$$

ここで、 $\prod k_i$ は種々の補正係数を示しており、この補正には主に次のような物が含まれる。まず 1 つは「入射孔における X 線散乱の影響」に対する補正、2 つめは基準点が入射孔であるため、有感領域までの間に生じる「X 線の減衰の影響」、最後に有感領域で生じた「電荷の総量に二次電子が含まれていること」に対する補正である。最初の 2 つの補正については、かつては解析的な計算や測定によって補正が行われていたが、現在はモンテカルロシミュレーションによって補正されることが多くなってきている[2, 3, 4]。最後の 1 つである二次電子の影響については、空気カーマの定義に関わる話であるため、詳細をここで解説する。空気カーマの定義は質量辺りの空気中に生じる二次電子の運動エネルギーの総量であるから、X 線が単位質量厚さ [kg cm⁻²] の物質を透過する毎に生じる減弱、すなわち平均質量エネルギー転移係数 $\bar{\mu}_{\text{tr}}/\rho$ [cm² kg⁻¹] と測定の基準点における X 線のエネルギーフルエンス Ψ [J cm⁻²] の積によって空気カーマは表される。

$$K_{\text{air}} = \Psi \left[\frac{\bar{\mu}_{\text{tr}}}{\rho} \right]_{\text{air}} \quad (3)$$

ここで、 $\left[\frac{\bar{\mu}_{\text{tr}}}{\rho} \right]_{\text{air}}$ は空気の平均質量エネルギー転移係数である。このように、空気カーマの値は基準点における光子のエネルギーフルエンスと 1 対 1 で対応づけることができる。この点において、空気カーマは放射線の量を示す単位として理想的と言える。しかしながら、電離箱で測定される電荷は「二次電子の電荷」と「二次電子によって電離された空気から生じた電荷」を区別することができない。したがって、電離箱で収集された電荷から求めた空気カーマの値と実際の空気カーマの値には必ず二次電子の電荷の分だけ、乖離が生じるのである。式(2)において、 Q/m_{air}

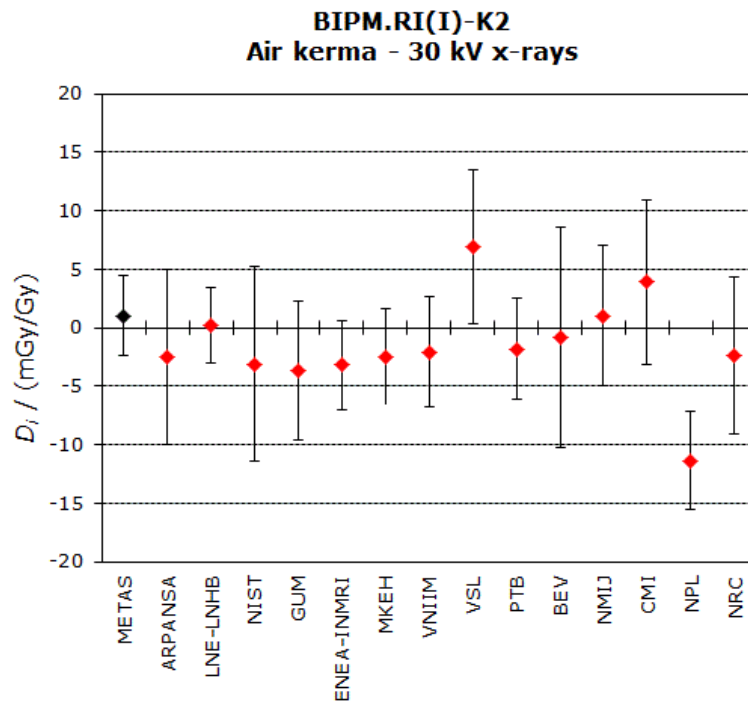


図 2 軟 X 線 30 kV の Key Comparison BIPM.RI(I)-K2 の結果

BIPM の標準器の値に対する相対差の千分率が示されている。エラーバーは相対拡張不確かさ（包含係数 $k=2$ ）を示している。日本は NMIJ で示されている。（Key Comparison DataBase: KCDB より引用[6]）

は単位質量あたりの空气中に生じた電荷を示す照射線量 X [$C\ kg^{-1}$]となるが、照射線量と空気カーマの関係は、

$$K_{air} \approx \left(\frac{\bar{W}_{air}}{e} \right) \frac{1}{1 - \bar{g}_{air}} X \quad (4)$$

であり、等号で結ばれることは決して無いのである。実際にこの影響は 100 keV の X 線において、0.1%存在し、エネルギーが低くなるほど影響が大きくなることが産総研の高田らによって報告されている[5]。この二次電子の電荷の問題は、空気カーマや照射線量、吸収線量の定義が微視的な領域を対象としているのに対し、実際の測定が有限の大きさを持った空間に対して行われることに起因する問題でもある。

最後に、X 線の空気カーマ標準に関する Key Comparison の結果の一例を図 2 に示す。Key Comparison とは、前述した各国の標準機関が管理する国家計量標準の相互比較のことであり、BIPM（国際度量衡局）が管理する標準器を介して実施されている。日本は日本の計量標準機関を意味する NMIJ（National Metrology Institute of Japan）で標記される。図から分かるように、概ね各国の値は相互に一致していることが分かるはずである。

3. グラファイト空洞電離箱（ガンマ線の空気カーマ標準）

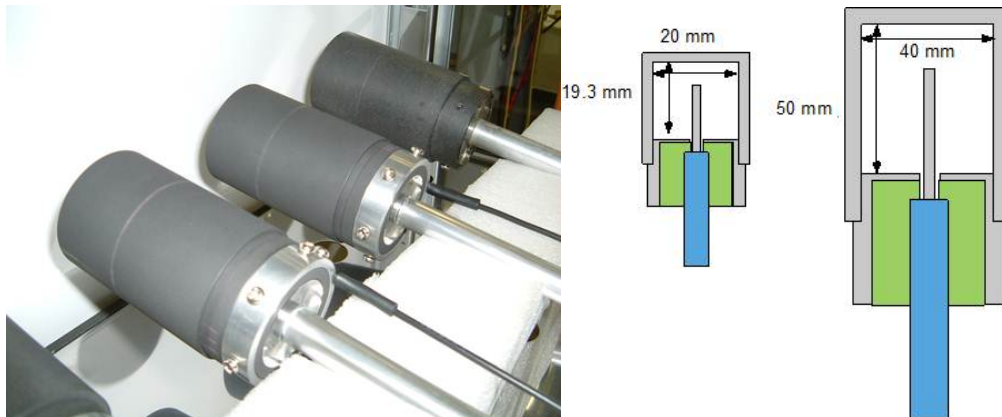


図3 グラファイト壁空洞電離箱の写真(左)と概略図(右)
(放射線標準研究グループのホームページより引用[1])

平行平板形自由空気電離箱で計測可能な X 線の管電圧の上限は 300 ~ 450 kV 程度となっている。これは、X 線によって発生する二次電子の運動エネルギーが上昇するにつれて電子の飛程が長くなり、平行平板形自由空気電離箱内で荷電粒子平衡を成立させることが困難となるためである。そのため、より二次電子の運動エネルギーの高くなる γ 線の空気カーマを決定するには、より大きな平行平板形自由空気電離箱が必要となってしまう。例えば、 ^{60}Co γ 線のエネルギーは 1.3 MeV 程度であるが、概算としてこの γ 線から出る二次電子の運動エネルギーを 1 MeV とすれば、二次電子の空気中の飛程は約 5 m となる。これに対応する平行平板形自由空気電離箱の大きさは 10 m を越えるため、とても現実的ではない。そこで考え出されたのが、空気よりも密度が高い物質中で荷電粒子平衡状態を作り出し、その物質中の空洞内で生じた電荷の総量から、空洞理論によって空気カーマを決定する手法である。こうすれば、荷電粒子平衡状態を作り出すために長大な電離箱を用意する必要が無く、容易に γ 線の空気カーマを決定する事ができる。

これを実際に形にした物が γ 線の空気カーマ標準に用いられているグラファイト壁空洞電離箱である。図 3 に国家計量標準となっているグラファイト壁空洞電離箱の写真と概略図を示す。グラファイト壁空洞電離箱はその名の通りグラファイトを電離箱壁とした電離箱である。壁材にグラファイトを用いるのは、原子番号が比較的空氣に近く、長期安定性に優れるためである。壁材のグラファイトの厚さは測定対象の γ 線から生じる二次電子の飛程に対して十分な厚さを持つように調整可能になっており、 Co γ 線測定時で 5 mm 程度となっている。

実際にグラファイト壁空洞電離箱の測定原理を説明する。 γ 線を照射した際に電離箱空洞内に生じた電荷の総量を Q [C] とし、電離箱空洞内の空氣の質量を m_{air} [kg] とすると、電離箱空洞内の空氣の吸収線量 D_{air} [Gy] は、

$$D_{\text{air}} = \left(\frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \right) \frac{Q}{m_{\text{air}}} \quad (5)$$

となる。先ほどと同様に、 \bar{W}_{air} [J] および e [C] は、空氣を電離して 1 イオン対を生成するのに

必要なエネルギーの平均および素電荷である。グラファイト壁空洞電離箱の空洞周辺では荷電粒子平衡が成立しているため、Spencer-Attix の空洞理論からグラファイトの吸収線量は、

$$D_g = D_{\text{air}} \left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{g,\text{air}} \quad (6)$$

となる。ここで、 $(\bar{L}/\rho)_{g,\text{air}}$ は空気に対するグラファイトの平均制限質量衝突阻止能比である。

さらに、グラファイトの吸収線量はグラファイトのカーマへと次のように変換できる。

$$K_g = \frac{D_g}{1 - \bar{g}_g} \quad (7)$$

ここで、 \bar{g}_g はグラファイトのカーマのうち、放射損失で失われるエネルギーの割合である。式(3)にあるようにカーマはある基準点における光子のエネルギーフルエンスと質量エネルギー転移係数の積であるから、十分に均一な光子線場において、グラファイトによってエネルギーフルエンスが変化しないとすれば、グラファイトのカーマに対する空気カーマの比は、次のようにグラファイトに対する空気の質量エネルギー転移係数の比となる。

$$\frac{K_{\text{air}}}{K_g} = \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{tr}}}{\rho} \right)_{\text{air},g} \quad (8)$$

上の式は Spencer-Attix の空洞理論と良く似た式となっており、「空洞が電子の飛程に対して十分に厚い場合の空洞理論」として知られている。

以上の式(5)から式(8)をまとめると、次のように整理される。

$$K_{\text{air}} = \left(\frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \right) \frac{Q}{m_{\text{air}}} \left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{g,\text{air}} \frac{1}{1 - \bar{g}_g} \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{tr}}}{\rho} \right)_{\text{air},g} \quad (9)$$

上の式(9)には一つ困ったことがある。それは、グラファイトのカーマのうち、放射損失で失われるエネルギーの割合を示す \bar{g}_g が含まれていることである。このままでは、空気カーマを決定するために、まずグラファイトのカーマを決定し、さらに放射損失で失われるエネルギーを評価したデータが必要となってしまう。これは実用的にはあまりに不便である。そこで、質量エネルギー転移係数と質量エネルギー吸収係数の次の関係を用いて、

$$\left(\frac{\bar{\mu}_{\text{tr}}}{\rho} \right)_{\text{air},g} = \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{air},g} \frac{1 - \bar{g}_g}{1 - \bar{g}_{\text{air}}} \quad (10)$$

式(9)を空気カーマのうち放射損失で失われるエネルギーの割合を示す \bar{g}_{air} を用いた形に書き換えることができる。

$$K_{\text{air}} = \left(\frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \right) \frac{Q}{m_{\text{air}}} \left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{g,\text{air}} \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{air},g} \frac{1}{1 - \bar{g}_{\text{air}}} \prod k_i \quad (11)$$

最後に追加した各種補正係数を示す $\prod k_i$ には、光子線場の不均一性やグラファイト壁による吸収や散乱などの影響に対する補正が含まれる[7, 8]。

γ 線の空気カーマ標準は放射線防護領域における基準として非常に重要であり、国内では ^{60}Co γ 線や ^{137}Cs γ 線の空気カーマ標準の供給が行われている。また、グラファイト壁空洞電離箱は、 ^{60}Co γ 線水吸収線量の決定にも用いることができ、一部の標準機関では水吸収線量標

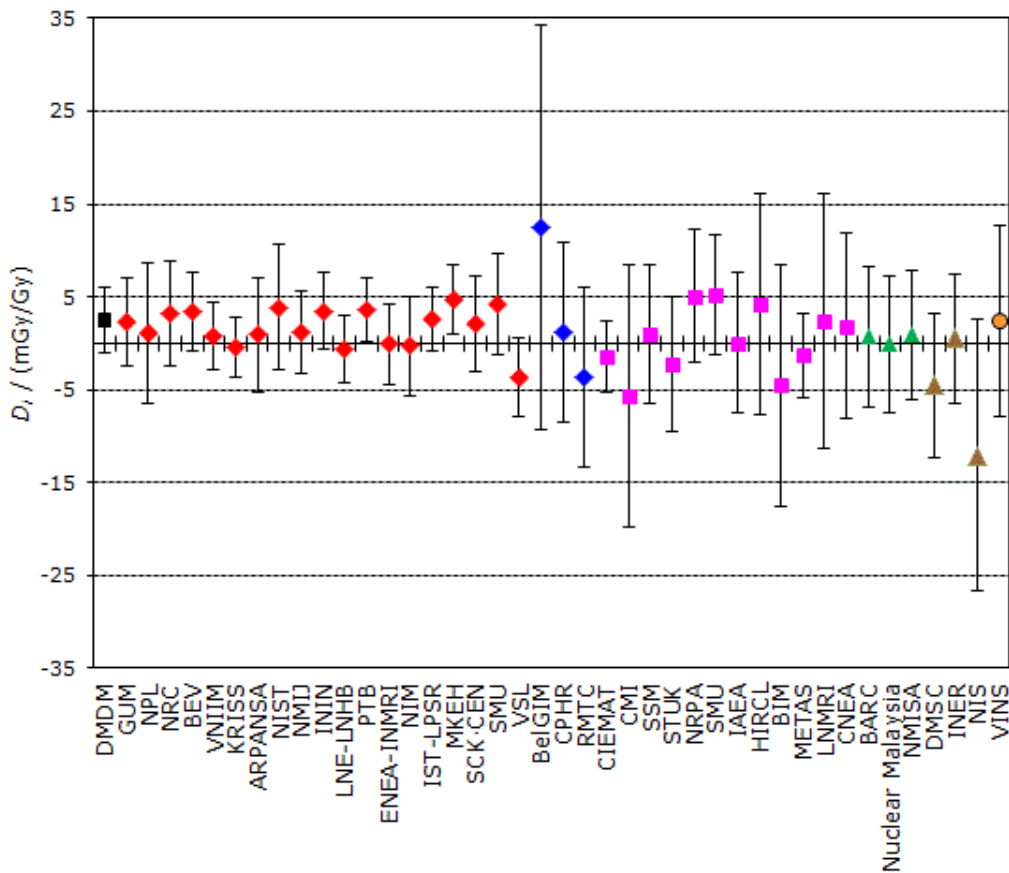


図4 ガンマ線の空気カーマの Key Comparison BIPM.RI(I)-K1 の結果

BIPM の標準器の値に対する相対差の千分率が示されている。エラーバーは相対拡張不確かさ (包含係数 $k=2$) を示している。日本は NMIJ で示されている。(KCDB より引用[6])

準として現在も採用されている。

最後に $Co\gamma$ 線の空気カーマ標準の Key Comparison の結果を図 4 に示す。図 2 に示された軟 X 線の Key Comparison よりも参加国が多く感じるかもしれない。これは、図の右側に示された青やピンク、緑色などで示された国は各経済圏内で行われた国際比較の結果も含まれているためであるが、いずれにせよ、 $Co\gamma$ 線の空気カーマ標準が多くの国で整備されていることがよく分かる図である。

4. グラファイトカロリメータ (水吸収線量標準)

ここまで述べてきた空気カーマは、光子線場のある点における光子のエネルギーフルエンスに紐付けられた量であり、放射線防護などにおいては、その点における放射線の量を示すことができるため非常に実用的であった。しかし、放射線を使って物を加工したりする場合、あるいは放射線治療においてがん腫瘍などに放射線を照射したりする場合など、放射線の使

用目的によっては、その点における放射線の量よりも、放射線から受けた相互作用の総量が重要となるケースがある。そこで、放射線から物質が受け取った、すなわち吸収したエネルギーに着目した線量の定義が吸収線量である。吸収線量の標準としては、細胞の大半を占める液体の水に着目して、水吸収線量標準が整備されている。

水吸収線量を計測する手法としては、前述のグラファイト壁空洞電離箱を用いる手法があるが、現在はカロリーメータを用いて計測する手法が主流となっている。これは次のような理由からである。グラファイト壁空洞電離箱で収集した電荷から水吸収線量を決定する場合、次のような式で水吸収線量を求めることになる。

$$D_w = \left(\frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \right) \frac{Q}{m_{\text{air}}} \left(\frac{L}{\rho} \right)_{\text{g,air}} \left(\frac{\bar{\mu}_{\text{en}}}{\rho} \right)_{\text{w,g}} \frac{\beta_w}{\beta_g} \Psi_{\text{w,g}} \prod k_i \quad (12)$$

ここで、 β_w および β_g はそれぞれ水およびグラファイトのカーマに対する吸収線量の比を示しており、 $\Psi_{\text{w,g}}$ はグラファイトによる光子のエネルギーフルエンスの変化に対する補正を示している。最後に追加した各種補正係数を示す $\prod k_i$ には、式(11)と同じく光子線場の不均一性やグラファイト壁による吸収や散乱などの影響に対する補正が含まれる。この式(12)において問題となるのは、空気に対するグラファイトの平均制限質量衝突阻止能比が含まれるところにある。平均制限質量衝突阻止能比が含まれるのは、Spencer-Attixの空洞理論によって空気の吸収線量からグラファイトの吸収線量へと変換する為であるが、これにはグラファイト壁空洞電離箱の電離箱壁が電子の飛程に対して十分に厚くなくてはならない。グラファイト壁空洞電離箱は ^{60}Co γ 線では十分に機能するが、放射線治療で用いられる4~25 MVの高エネルギー光子線や4~22 MeVの高エネルギー電子線ではグラファイト中の電子の飛程が数cm以上にもなるため、電離箱壁がその分厚くなり、電離箱壁内における減衰も大きくなってしまう。このため、グラファイト壁空洞電離箱で水吸収線量を決定できる実用上の限界は Co γ 線のエネルギーまでとなっている。

もう一つの問題点は平均制限質量衝突阻止能比である。図5(左)に電子の運動エネルギーに対するグラファイトおよび水、空気間の制限質量衝突阻止能比を示すが、電子の運動エネルギー1 MeV付近から30 MeV付近にかけて、空気に対するグラファイトの制限質量衝突阻止能比が急激に変化していることが分かる。空気と水の間でも同様であるが、この変化は空気に対して水やグラファイトの密度が1000倍も大きいために生じているものである。この急激な変化が存在する以上、計算などによって ^{60}Co γ 線や高エネルギー光子線、電子線の二次電子の平均制限質量衝突阻止能比を求めようとしても、その不確かさを小さくすることは難しい。一方で、図3からはグラファイトに対する水の制限質量衝突阻止能比は二次電子の運動エネルギーに対してそれほど変化していないことが分かる。つまり、グラファイト吸収線量を直接測定することが可能であれば、精度良く水吸収線量へと変換することが可能であることを示している。実際には、式(12)の平均制限質量衝突阻止能比までの3項はグラファイト吸収線量に対応しており、質量エネルギー吸収係数の比によってグラファイト吸収線量を水吸収線量へと変換している。そこで、図5(右)に光子のエネルギーに対するグラファイトおよび水、空気間の質量エネルギー吸収係数の比を示す。図から分かる様に、質量エネルギー

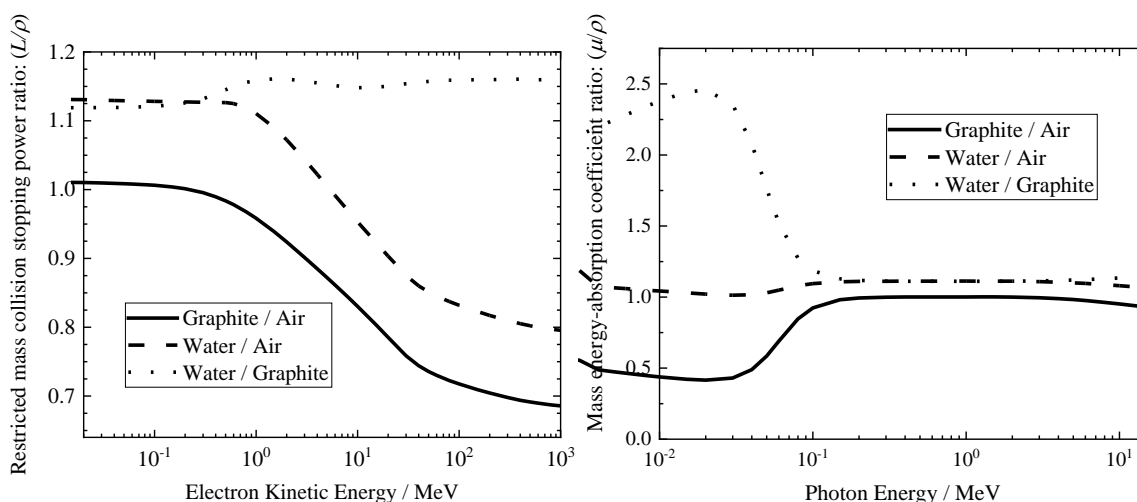


図5 グラファイトおよび水、空気間の制限質量衝突阻止能比(左)と質量エネルギー吸収係数の比(右)

吸収係数比はいずれの物質間でも 200 keV 以上の領域で一定となる。このことから、ある程度の密度を持った物質の吸収線量を直接計測し、水吸収線量へと質量エネルギー吸収係数を用いて変換した方が精度を向上させやすいことが分かる。

以上の理由から、物質が放射線から吸収したエネルギーを直接計測するカロリメータを各国の標準機関は水吸収線量標準として整備している。カロリメータの動作原理は非常にシンプルである。今、ある物質に放射線を照射したとき、物質内の基準点に生じた温度上昇を ΔT [K]、物質の比熱を c_p [J kg⁻¹ K⁻¹] とすれば、物質の吸収線量 D [Gy] は、

$$D = c_p \Delta T \quad (13)$$

となる。この式が意味するところは、精度の良い温度計を測定したい物質に差し込めば、温度上昇から物質の吸収線量を決定できるということである。そのため、カロリメータの応用範囲は広く、水の吸収線量を測定する水カロリメータやグラファイトの吸収線量を測定するグラファイトカロリメータの他にも、プラスチックの吸収線量を測定するプラスチックカロリメータも開発されている。

これだけを聞けば、誰でも水吸収線量標準を確立できると思うはずである。しかし、実際に放射線による温度上昇から吸収線量を決定するのは容易ではない。実際に式(13)から計算して見れば分かるが、水の比熱は約 4.2 kJ kg⁻¹ K⁻¹ であるため、1 Gy の吸収線量に対する温度上昇は 0.24 mK に過ぎない。1 kGy といった大線量領域であれば、少し高価な市販の白金抵抗温度計で十分に測定できるが、外部放射線治療などで重要となる数 Gy から数十 Gy の吸収線量に対応する温度上昇を計測するには高精度の温度計が必要となることが分かるはずである。カロリメータの原理は放射線の黎明期から提案されていたが、実際に計測器として形になり出したのは、温度計測技術が進歩した最近の話である。

1 Gy から数百 Gy までの水吸収線量の標準として整備されているカロリメータには水カロリメータとグラファイトカロリメータの 2 種類が存在する。水カロリメータはその

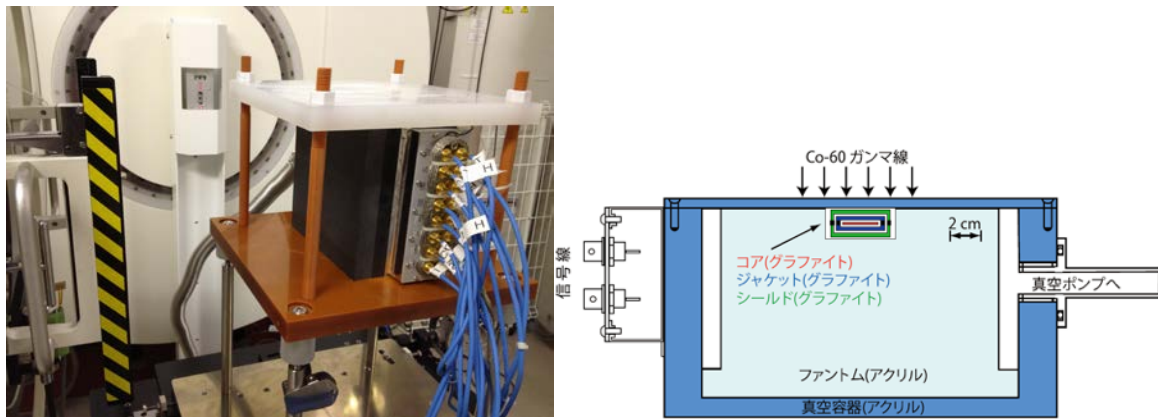


図6 グラファイトカロリメータの写真(左)と概略図(右)

名の通り液体の水の温度上昇から水吸収線量を決定するものである。これに対し、グラファイトカロリメータはグラファイトの温度上昇からグラファイト吸収線量を測定するもので、測定したグラファイト吸収線量を水吸収線量に変換することで、水吸収線量を決定している。水吸収線量の定義により近い測定を行う水カロリメータの方が不確かさを小さくしやすいが、標準機関の中ではグラファイトカロリメータを採用するケースが多い。これは、グラファイトの比熱が水に比べて小さく、同じ吸収線量に対する温度上昇の幅が大きいため測定が用意であることや、放射線から吸収したエネルギーが放射化学反応によって消費される割合が相対標準不確かさ 0.1%で無視できること[9]、固体であるため取扱いが容易で小型にできること、液体の水のような対流による熱拡散などを考慮しなくて良いことなど、グラファイトカロリメータの方が測定器として有利な特性を多く持つためである。他にも、水カロリメータは水温 4℃ に保つ必要があるため、装置が全体に大きくなり、冷却装置など周辺機器にかかる費用が高いことも、水カロリメータが採用されにくい理由の一つとなっている。我が国でも、以上の理由からグラファイトカロリメータを水吸収線量の標準器として採用している。

図6に国家計量標準となっているグラファイトカロリメータの写真と概略図を示す。グラファイトカロリメータは検出素子にあたるグラファイト素子と素子を格納するカロリメータファントムからなる。我が国の国家計量標準となっているグラファイトカロリメータは素子部分のみをグラファイトとし、ファントム部分にはアクリルを用いている。グラファイト素子の周辺は断熱および放射化学反応を抑えるために真空排気されている。写真にあるように、入射面側にグラファイトブロックを設置することで、深さを調整できるようにしている。グラファイト素子は中心からコア、ジャケット、シールドの三重構造となっており、それぞれに温度センサーとヒーターが取り付けられ、コンピュータ制御により温度を 10^{-6} K オーダーの分解能で制御している。グラファイトカロリメータは素子の温度制御の方法で2通りの測定方法をとることができる。1つめは、グラファイト素子の温度をコア>ジャケット>シールド>室温の関係で温度が一定となるように制御し、放射線を照射した際のヒーター出力の変化から放射線の「吸収線量率」を決定する「等温測定法」である。この場合、グラ

ファイトカロリメータのコアの吸収線量率 \dot{D}_c [Gy s^{-1}]は、放射線が照射されていない時のヒーターの出力 P_{OFF} [W]と照射されているときのヒーターの出力 P_{ON} [W]の差であるから、

$$\dot{D}_c = \frac{P_{\text{OFF}} - P_{\text{ON}}}{M_c} \quad (14)$$

となる。ここで、 M_c [kg]はコアの質量である。この方法は放射線の出力がほぼ一定と見なすことができる場合に採用できる手法で、 $\text{Co}\gamma$ 線の水吸収線量標準で採用されている[4]。この手法の利点は、ヒーター出力の変化を見るため、コアの断熱状態が少々悪くてもその影響を受けにくいこと、式(13)で必要だった比熱の評価が不要であることが挙げられる。2つめ方法は「準断熱測定法」と呼ばれる測定方法である。これは、シールド>室温となるようにシールドの温度を一定に制御するまでは等温測定法と同じであるが、準断熱測定法では、コアの温度制御は一切行わず、ジャケットの温度が常にコアと同じ温度となるように制御する。こうすることで、コアとジャケットの間で熱平衡を成立させ、コアを準断熱状態に置くのである。この時、放射線を照射すると、コアから外部へ熱の移動が発生しないので、放射線から吸収したエネルギーに相当した温度上昇がコアに生じることになり、この温度上昇からコアの「吸収線量」を決定できる。コアに生じた温度上昇が ΔT [K]とした場合、コアの吸収線量 D_c [Gy]は次のように決定される。

$$D_c = \frac{C_p \Delta T}{M_c} \quad (15)$$

ここで、 C_p [J K^{-1}]はコアの比熱容量である。コアの比熱容量はコアに取り付けられた温度センサーやヒーターなどの不純物を考慮して決定することもできるが、正確に決定する事は困難であるため、通常はヒーターによる加熱によって、電氣的に決定される。準断熱測定法は積算線量を計測する為、ヒーター出力が不安定な医療用リニアック装置などの機械式放射線発生源からの放射線を計測する際に有用である。また、グラファイト素子間の断熱が十分にできていれば、微弱な放射線源からの放射線であっても、測定時間を長く取ることで、精度良く吸収線量を決定できる。

グラファイトカロリメータで測定した吸収線量はグラファイトカロリメータ内のコアの吸収線量であるため、水ファントム中の基準点における水吸収線量へと変換する必要がある。これにはカロリメータのグラファイト素子と同じ形状をしたグラファイト壁空洞電離箱とグラファイトカロリメータのコアの部分にグラファイト壁空洞電離箱を挿入できるようにしたカロリメータファントムを用いる。グラファイト壁空洞電離箱を用いる理由は、空洞理論によってグラファイトカロリメータ中の基準点におけるグラファイト吸収線量 D_c^{CV} [Gy]および水ファントム中の基準点における水吸収線量 D_w^{CV} [Gy]を決定し、次の式のように、その比によってグラファイトカロリメータで計測したコアの吸収線量を水吸収線量に変換する為である。

$$D_w = D_c \frac{D_w^{\text{CV}}}{D_c^{\text{CV}}} \quad (16)$$

この方法は、カロリメータとグラファイト空洞電離箱を組み合わせたハイブリッド法と呼ばれ、グラファイトカロリメータを標準器とする多くの国で採用されている。ただし、空

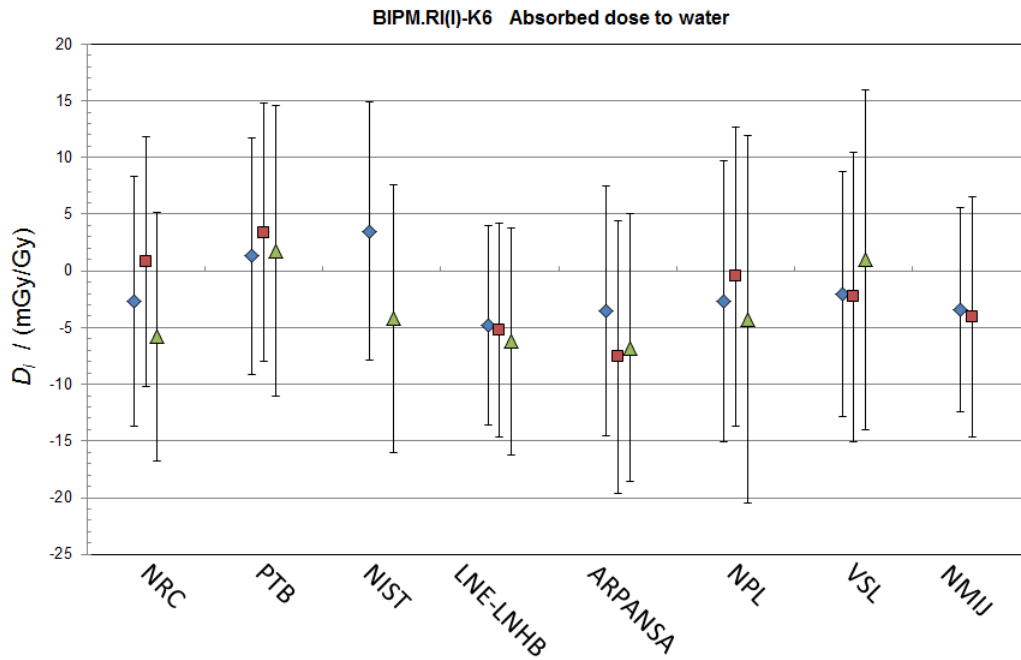


図7 高エネルギー光子線の水吸収線量の Key Comparison BIPM.RI(I)-K6 の結果
BIPM の標準器の値に対する相対差の千分率が示されている。エラーバーは相対拡張不確かさ (包含係数 $k=2$) を示している。青点が 4, 6 MV、赤点が 10, 15 MV、緑点が 18, 25 MV の結果を示す。日本は NMIJ で示されており、18, 25 MV は比較を行っていないので、点が無い。(KCDB より引用[3])

洞理論によってコアおよび水の吸収線量を求めることは $\text{Co}\gamma$ 線よりもエネルギーの高い高エネルギー光子線などでは難しいため、そのような放射線に対してはモンテカルロシミュレーションによって、グラフィット壁空洞電離箱のグラフィット吸収線量校正定数 $N_{D,c}$ [Gy C^{-1}] および水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ [Gy C^{-1}] を計算し、その結果と実際の測定結果を用いて次のように水吸収線量へと変換している。

$$D_w = D_c \frac{N_{D,w} Q_w}{N_{D,c} Q_c} \quad (17)$$

ここで、 Q_w および Q_c はそれぞれ水ファントム中の基準点およびグラフィットカロリメータ中の基準点に設置されたグラフィット壁空洞電離箱に、同条件で放射線を照射した際に測定される電荷である。

モンテカルロシミュレーションによって電離箱の校正定数を求める場合、計算内でコアと水の吸収線量と、電離箱内の空気へのエネルギー付与を計算する。そのため、式(17)は次のように書き下すことができる。

$$D_w = D_c \left(\frac{Q_w}{Q_c} \right)_{\text{EXP}} \left(\frac{D_w/Q_w}{D_c/Q_c} \right)_{\text{MC}} = D_c \left(\frac{Q_w}{Q_c} \right)_{\text{EXP}} \left(\frac{D_w/D_c}{Q_w/Q_c} \right)_{\text{MC}} = D_c \left(\frac{D_w}{D_c} \right)_{\text{MC}} \frac{(Q_w/Q_c)_{\text{EXP}}}{(Q_w/Q_c)_{\text{MC}}} \quad (18)$$

ここで添え字の EXP は実際の測定による値であること、MC はモンテカルロシミュレーション

ンによる計算値であることを示す。この式から分かることは、直接計測して比較できるグラフィット壁空洞電離箱の出力について計算を行い、その計算結果と実際の測定結果の比を用いて、水吸収線量とグラフィット吸収線量の比の計算結果を補正していることである。これは、モンテカルロシミュレーションが考慮できない実際の物体が持つ、わずかな隙間やゆがみなどに起因する基準点におけるフルエンスの変化を補正することを意味しており、モンテカルロシミュレーションで導出される各種補正係数の信頼性を担保する方法として極めて有用である。

以上から、我が国の $\text{Co}\gamma$ 線水吸収線量率標準および高エネルギー光子線水吸収線量標準はそれぞれ次の式で決定される。

$$\dot{D}_w = \frac{P_{\text{OFF}} - P_{\text{ON}}}{M_c} \left(\frac{Q_w}{Q_c} \right)_{\text{EXP}} \left(\frac{D_w/D_c}{Q_w/Q_c} \right)_{\text{MC}} \prod k_i \quad (19)$$

$$D_w = \frac{C_p \Delta T}{M_c} \left(\frac{Q_w}{Q_c} \right)_{\text{EXP}} \left(\frac{D_w/D_c}{Q_w/Q_c} \right)_{\text{MC}} \prod k_i \quad (20)$$

ここで、 k_i は各種補正係数を表し、放射化学反応による熱欠損に対する補正などが含まれる[9, 10]。

最後に、水吸収線量の Key Comparison の結果を示す。高エネルギー光子線の水吸収線量標準は整備されている国がまだ少ないが、各国で整備が進められており、今後、参加国が増えていくはずである。

5. 線量標準の今後の展望

ここまで、我が国で整備されている主な放射線量の国家計量標準について概説した。水吸収線量標準を皮切りに、放射線の計量標準は医療向けの整備が進んでおり、ここで述べた以外にも β 線組織吸収線量標準やマンモグラフィ X 線空気カーマ標準、医療用 β 線水吸収線量標準などが整備されている。

放射線量の計量標準で現在重視されているのは、計算への依存性を減らし、測定だけによって標準を確率することである。これには次のような経緯がある。2016年に ICRU Report 90 [11]が発刊され、放射線の計測に関わる基礎データ、すなわち $\overline{W}_{\text{air}}$ や水、グラフィットの平均励起エネルギーなどの値や不確かさを見直すことが勧告され、我が国でも関連する放射線量の計量標準の値の見直しが実施された[12]。本来、計量標準は自然物を基準とすることが原則となっており、人間が決めた協定値によって左右されるべきでは無いのは自明のことである。したがって、物理データに依存する空洞理論やモンテカルロシミュレーションなどの計算は計量標準の構築の重要な部分に用いることは可能な限り避けるべきである。その手始めとして、産総研では水カロリーメータを用いた水吸収線量標準の構築に取り組んでいる。水カロリーメータは水の吸収線量を直接計測するため、モンテカルロシミュレーションを必要としないことから、人の都合によって変化しない、真の意味での計量標準と言える。

計量標準の分野でもう一つ課題となっているのは、放射線量の定義に起因する問題である。放射線が量子であることから、放射線量の定義は全て微視的に記述されている。しかし、実

際の線量計測は有限の大きさを持った検出器で放射線を計測し、平均値を評価しており、巨視的に単位を実現している。空気カーマと照射線量の関係の問題のように、巨視的領域と微視的領域との境界において明らかになる問題は今後も生じるはずである。これに関して、2019年5月20日より、質量および電流、温度、物質量の定義が改定され、それとあわせてプランク定数および電気素量、ボルツマン定数、アボガドロ定数が定義値、すなわち不確かさのない定数となった。無論、この改定は放射線計測の分野へ直ちに影響することは無い。しかし、放射線量の単位を当初の定義通り光子や電子1つ1つについて実現することが可能となったことをこの改定は意味しており、放射線計測学の発展の方向性の一つを指し示すものとして、非常に重要な改定である。

放射線の線量標準の開発は、放射線計測学の基礎研究と応用研究の境界に位置しており、非常に奥深い領域である。読者諸君は概ね放射線を利用し、品質管理を目的として計測する立場の方が多いと思うが、放射線を正確に計測するには結局の所、基礎的な部分を知らねば難しい部分が多い。線量標準に関するこの記事が、放射線計測学の理解の一助になれば幸いである。

(参考文献)

- [1] 放射線標準研究グループ、<https://unit.aist.go.jp/rima/ioniz-rad/>.
- [2] A. Nohtomi, N. Takata and T. Sakae, Journal of Nuclear Science and Technology 44 (2), 109 – 113, 2007.
- [3] N. Takata, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 619, 216 – 220, 2010.
- [4] T. Kurosawa, N. Takata and N. Saito, Radiation Protection Dosimetry 146 (1-3), 195 - 197, 2011.
- [5] N. Takata and A. Begum, Radiation Protection Dosimetry 130 (4), 410 – 418, 2008.
- [6] The BIPM key comparison database (KCDB), <https://kcdb.bipm.org/>.
- [7] T. Kurosawa, N. Takata and Y. Koyama, Applied Radiation and Isotopes 62 (5), 805-808, 2005.
- [8] N. Takata, T. Kurosawa, A. Begum and T. Sugita, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 580 (1), 346 – 349, 2007.
- [9] Y. Morishita, M. Kato, N. Takata, T. Kurosawa, T. Tanaka and N. Saito, Radiation Protection Dosimetry 154 (3), 331 – 339, 2012.
- [10] M. Shimizu, Y. Morishita, M. Kato, T. Tanaka, T. Kurosawa, N. Takata, N. Saito, G. Ramanathan, P. D. Harty, C. Oliver, T. Wright and D. J. Butler, Radiation Protection Dosimetry 164 (3), 181 - 186, 2014.
- [11] ICRU, “Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications”, ICRU Report No. 90, 2016.
- [12] 産業技術総合研究所 計量標準総合センター, “ICRU Report90 に対応した空気カーマ (率) 標準への変更について”, <https://www.nmij.jp/news/2018/>.