

β線吸収線量標準の開発と設定に関する調査研究

加藤 昌弘*

(平成16年10月22日受理)

A survey on development and establishment of absorbed dose standards for beta radiation

Masahiro KATO

1. はじめに

β線は、X線・γ線・α線・中性子・イオンビームなどの電磁波・粒子線とともに、総称として放射線 (ionizing radiation) と呼ばれている。これら放射線は、産業界において新物質の開発や、半導体基盤加工などに、医療分野では治療・診断に、また基礎研究・応用研究分野においては励起源や分析法にと、幅広く用いられている。中でも、放射線の照射効果の解析や比較を行う場合には、放射線の線量をなるべく正確に知ることで、しばしばより詳細な議論が可能になる。また医療分野や、原子力発電所・原子力関連施設では、被曝線量の評価や安全管理のために、放射線線量測定が重要である。放射線の利用は近年拡大されつつあり、それに伴い放射線線量標準の必要性も高まってきている。

放射線にはさまざまな種類があるが、線種やエネルギーによってそれぞれ物質に対する相互作用は大きく異なる。そのため放射線標準と一口で言っても、線種ごとに、そしてそれぞれのエネルギー領域ごとに標準が求められている。さらに、たとえば環境放射線を測定する場合と治療に用いる線量を測定する場合は、その線量率はおよそ7桁以上違うので¹⁾、広い強度範囲における標準も要求される。

産業技術総合研究所 (産総研) では、電子技術総合研究所 (電総研) の時代から、国の一次標準機関として、放射線については、X線・γ線・中性子の標準の研究・標準供給の業務を行ってきた²⁾⁻⁵⁾。また現在は供給が途絶えているが、β線に関しても電総研の時代に供給を行っていた⁶⁾。本研究では、これら放射線標準のうち、放射線標準研究室で取り扱っているβ線・γ線・X線標準の

現状について調査し、報告する。特にβ線組織吸収線量標準に関しては、その標準を供給しているPTB (ドイツ物理工学研究所)⁷⁾における標準の設定・供給方法を引用しながら、今後産総研においてβ線標準を開発、設定していく上での課題について詳しく報告する。

2. 線量の単位

放射線線量測定では、照射線量・カーマ・吸収線量などのさまざまな「線量」が用いられており、それらの関係は非常に複雑である。産総研では現在、X線、γ線については空気カーマと空気カーマ率 (以下空気カーマ (率) と記す)、および照射線量と照射線量率 (以下照射線量 (率) と記す) を標準として供給している。また、β線については組織吸収線量標準を供給する準備を行っている。本章ではカーマ・照射線量、および吸収線量について、それぞれがどのような物理量であるかを説明し、またそれらの関係についても述べる (本章は文献8)-13) を参考に記述した)。

2.1 カーマ (kerma), カーマ率

kermaは、ICRU Report 60によると、kinetic energy released per unit mass の略である。やや詳しい表現としてはkinetic energy of charged particles released in material per unit massとなる。

カーマは、光子や中性子のような電荷を持たない間接電離放射線によって、物質の単位質量当たりから発生した電子やイオンなどの荷電粒子 (直接電離放射線) の、各発生時における運動エネルギーの総和に等しい量である。着目している微小領域を占める物質の質量を dm 、この領域内で発生した二次荷電粒子の初期運動エネルギーの総和を dE_{tr} とすると、

* 計測標準研究部門 量子放射科

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm} \quad (1)$$

で定義される。カーマは、非荷電粒子線に対して適用される量であるが、特にX線、 γ 線を対象とする場合は、エネルギー E の放射線のエネルギーフルエンス（単位断面積の球内に入射したエネルギー）を Ψ_E [$J \cdot m^{-2}$]、質量エネルギー転移係数を (μ_{tr}/ρ) [$m^2 \cdot kg^{-1}$]として次式のようにあらわすことができる。

$$K = \int \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \Psi_E dE \quad (2)$$

また、質量エネルギー吸収係数 (μ_{en}/ρ) [$m^2 \cdot kg^{-1}$] = $(1-g)$ (μ_{tr}/ρ) [$m^2 \cdot kg^{-1}$]を用いると、

$$K = \int \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \Psi_E dE + \int \left(\frac{g}{1-g} \right) \left(\frac{\mu_{tr}}{\rho} \right) \Psi_E dE \quad (3)$$

と表すことができる。式中の g は、制動放射などによって系外に散逸するエネルギーの割合であり、二次荷電粒子の初期運動エネルギー分布に依存する量である。(3)式右辺における第一項を衝突カーマ、第二項を放射カーマと呼ぶ。

カーマは放射線が作用する物質の種類に依存するので、対象とする物質が空気である場合は空気カーマ (air kerma)、生体組織である場合は組織カーマ (tissue kerma) などのように物質名を冠して表記する。カーマの単位記号は $[J \cdot kg^{-1}]$ だが、放射線に関する業績で著名な学者Grayにちなんで特別な単位記号Gy (グレイ) が用いられている。Gy (グレイ) は後述する吸収線量にも用いられることに注意が必要である。

カーマの単位時間当たりの増加量をカーマ率という。カーマ率の単位記号は $[J \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}]$ 、特別な単位記号は $[Gy \cdot s^{-1}]$ である。

2.2 照射線量 (exposure), 照射線量率

照射線量は、X線・ γ 線が、空気と与える電離作用に着目した線量である。照射線量 X は、質量 dm [kg]の空気と相互作用した光子が生成する二次電子が、完全に停止するまでに空气中で生成するイオン対の電荷のうち、一方の符号の電荷を合計した電荷量の絶対値 dQ [C]と、相互作用した空気の質量 dm [kg]の比

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (4)$$

で定義される。照射線量の単位記号は $[C \cdot kg^{-1}]$ である。X線や γ 線が単位質量の空気から発生させる二次電子の初期運動エネルギーの総和が空気カーマ K_{air} であるが、初期運動エネルギーの総和のうち、二次電子が空气中でイ

オン対を生成するのに費やすエネルギーは、空気衝突カーマに等しい。したがって、空气中にひとつのイオン対を生成するのに必要なエネルギー、つまり空気の W 値 (W_{air} [J/C]) と、電気素量 e (1.602×10^{-19} C) を用いると、照射線量 X は以下のように表すことができる (3)式参照)。

$$X = \frac{e}{W_{air}} \int \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right) \Psi_E dE \quad (5)$$

また、 g を用いると (3), (5)式参照),

$$K = X \frac{(W/e)}{(1-g)} \quad (6)$$

により照射線量 X と空気カーマ K を関連付けることができる。

照射線量の単位時間当たりの増加分を照射線量率といい、単位記号は $[C \cdot kg^{-1} \cdot s^{-1}]$ である。

2.3 吸収線量 (absorbed dose), 吸収線量率

放射線によって、質量 dm のある物質に、平均エネルギー $d\varepsilon$ が付与された場合、吸収線量 D [J/kg]は以下の式で定義される。

$$D = \frac{d\varepsilon}{dm} \quad (7)$$

吸収線量の単位記号は $[J \cdot kg^{-1}]$ で、特別な単位記号として[Gy]が用いられる。

質量 dm を占める領域内で生じた荷電粒子によって領域外で生成する(であろう)電荷量と、領域内に入射してくる荷電粒子によって領域内で生成する電荷量が等し

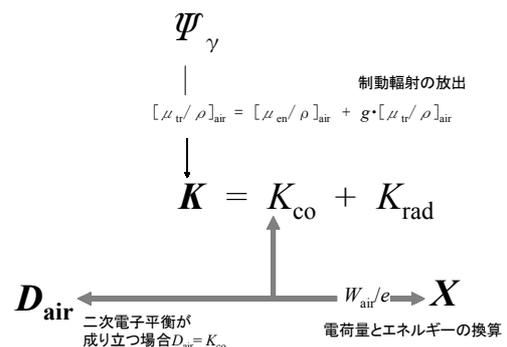


図1 単色光子の空気に関するカーマ K 、照射線量 X 、吸収線量 D の関係。 Ψ_γ は単色光子のエネルギーフルエンス、 (μ_{tr}/ρ) は質量エネルギー転移係数、 (μ_{en}/ρ) は質量エネルギー吸収係数、 K_{co} は衝突カーマ、 K_{rad} は放射カーマを示す (本文参照)。

い場合、荷電粒子平衡あるいは二次電子平衡が成り立っているという。この場合吸収線量は、衝突カーマに等しい値になる。このことから、荷電粒子平衡が成り立つ場合、空気の吸収線量 D_{air} と照射線量 X は、以下のように関連付けられる (3), (5)式参照)。

$$D_{\text{air}} = \frac{W_{\text{air}}}{e} \cdot X \quad (8)$$

図1に、単色光子を空気に照射した場合について、カーマ・照射線量・吸収線量の関係をまとめた。

3. 放射線標準の現状

この章では、β線・X線・γ線の標準について、現在産総研で供給されている標準や、供給が計画されている標準について述べる。

3.1 β線組織吸収線量標準

β線は医学的治療、ライフサイエンス分野でよく取り扱われおり、正確な線量評価のために線量標準の整備が求められている。また原子力関連施設では放射線被曝に対する安全管理の観点から、その標準へのニーズは大きい。産総研ではISO6980-2規格¹⁵⁾に準拠したβ線組織吸収線量標準を供給する計画であるが、ISO規格で着目しているのは、皮膚表面から0.07mm深度における吸収線量である。個人被曝線量の測定においては皮膚組織の被曝線量の評価が重要だが、皮膚の高感受性細胞は皮膚表面下0.05-0.1mmの間に存在すると考えられており、70μm線量当量 ($H_p(0.07)$) が皮膚の等価線量を評価するのに用いられる¹⁴⁾。線量当量は、吸収線量と線質係数の積で表されるので (β線の線質係数は1)、0.07mm深度における組織吸収線量の計測は、直接皮膚の等価線量の評価につながる。

表1に代表的なβ線放出核種をそのエネルギー・寿命とともに示す¹⁶⁾が、ドイツのPTBでは、国家標準としてPm-147, Kr-85, Sr-90/Y-90 (平衡) 線源 (最大エネルギーはそれぞれ0.225, 0.687, 2.28 MeV) について組織吸収線量標準を供給している⁷⁾。わが国では、電総研時代にPm-147, Tl-204, Sr-90/Y-90線源についてβ線組織吸収線量の標準場を設定し、さらにPTBと間接相互比較を行って良好な整合性を得た⁶⁾。また前後して校正の業務も行われていた。産総研では、2005年度に供給を再開する計画のもと準備が進められているが、β線組織吸収線量標準の設定・供給に関しては第4章においてさらに詳しい報告を行う。

表1 代表的なβ線源

核種	最大エネルギー (MeV)	半減期 (年)
¹⁴ C	0.16	5700
¹⁴⁷ Pm	0.225	2.7
⁸⁵ Kr	0.687	10.73
²⁰⁴ Tl	0.76	3.81
⁹⁰ Sr/ ⁹⁰ Y	2.28	29
¹⁰⁶ Ru/ ¹⁰⁶ Rh	3.54	1.02

3.2 X線空気カーマ標準・照射線量標準

産総研では現在、管電圧250kV以下のX線 (軟X線:10-50 kV, および中硬X線:40-250kV) について、空気カーマ (率)・照射線量 (率) の標準供給、校正の業務を行っている^{2), 3), 5), 16)}。中硬X線については、2000-2003年にかけてAPMP (アジア太平洋計量計画)による11研究所との国際比較が行われており、産総研の値は、比較を行った全てのX線エネルギー (管電圧100kV, 135kV, 180kV, 250kV) において、参加国の平均値の±2σの中に入っている¹⁷⁾。また、BIPMの値との一致もよく、国際的な整合性が認められている¹⁷⁾。さらに本年度中にピアレビューを受けて品質マニュアルが完成される見通しである。産総研では2010年度までに、供給するX線照射線量標準・空気カーマ標準のエネルギーの範囲を、硬X線領域 (管電圧200-450 kV) まで広げることを検討している。

図2に中硬X線の照射線量の絶対測定を求めるために用いられている、平行平板式自由空気電離箱の概略図を示す^{2), 3)}。X線発生装置からのX線ビームは、入射窓を通り電離箱内の空気に照射される。図2に示すように、集電極は保護電極の間に配置されており、集電極と保護電極の間の電界は均一である。そのため、入射X線と相互作用する空気の体積は、入射窓の面積 S と集電極の長さ l の積から $S \cdot l$ であると求められる³⁾。この体積から相互作用する空気の質量 m を求めることができる。生成された空気構成分子のイオンは、集電極で検出され、電荷量が得られる。測定する電荷量が小さいため、小さい電荷量を測定するのに適した振動容量電位計を用いている。このようにして測定した電荷量 Q は、荷電粒子平衡が成り立っている場合、照射線量の定義 (2.2節参照) であるところの、「空気と相互作用した光子が生成する二次電子が、完全に停止するまでに空気中で生成するイオン対の電荷のうち、一方の符号の電荷を合計した電荷量の絶対値」に等しくなる。以上のように求められた m と Q の比で

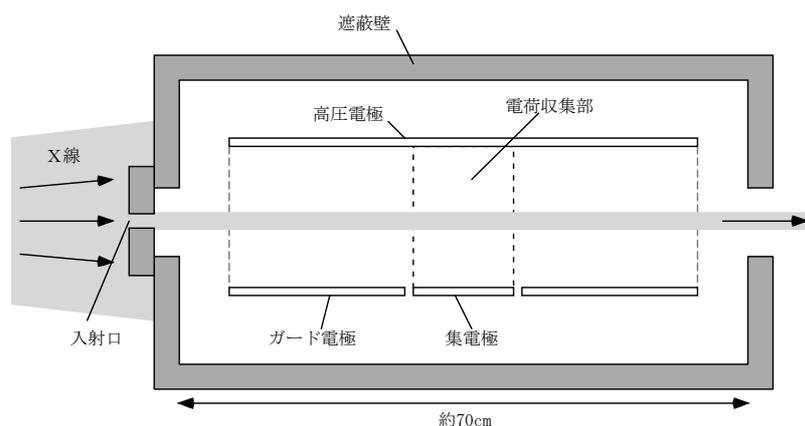


図2 平行平板式自由空気電離箱の概略図.

ある Q/m に対して、空気によるX線の減衰、電界分布の歪み、イオンと電子の再結合、散乱線の寄与、電子の損失、湿度の影響などの補正を行い^{5), 18)}、照射線量 X を得ている。さらに、ひとたび照射線量が得られれば、(6)式を用いて空気カーマを求めることができる。(6)式における空気の W 値は、協定値を用いる、また g は照射X線のエネルギースペクトルから求めることができる。

3.3 放射光軟X線フルエンス標準

1keV以下の軟X線は、空気による吸収が大きすぎて、3.2節で述べたような照射線量標準を設定することはできない。そこでエネルギー範囲0.1-1.1 keVの軟X線については、単位面積あたりに通過する粒子数を表すフルエンスを標準として確立するべく研究が進められている^{2), 3), 19), 20)}。標準光源としては、産総研の蓄積リングTERASからの放射光軟X線を斜入射回折格子分光器で単色化して用いる²¹⁾。すでにNIST²²⁾やPTB²³⁾⁻²⁵⁾では、放射光を標準線源として使い、検出器の校正が行われている。フルエンスの絶対測定には極低温放射計および多段電極型電離箱を用いる。実用検出器の校正試験を今年度内に終え、一般供給を開始する予定である。またPTBとの国際比較についても準備を進めている。

3.4 放射光単色X線照射線量標準

軟X線のうち、3.2節で述べた10keV以上の光子エネルギーの領域と、3.3節で述べた1keV以下の領域をつなぐ領域にあたる、光子エネルギー範囲2-20keVの軟X線について、2010年までに、放射光を用いて単色光の照射線量標準を確立し、供給するように準備を進めている。このエネルギー範囲では空気による光子の吸収能が大きく変わるので、標準として設定するにあたり照射線量という単

位を用いるのが適当であるのか考慮する必要がある²⁰⁾。また1keV以下のフルエンス標準・20keV以上の照射線量標準との連続性を検討することも課題である。

3.5 γ 線空気カーマ標準、照射線量標準

現在産総研では、Co-60 γ 線・Cs-137 γ 線について、空気カーマ(率)および照射線量(率)の標準供給、校正の業務を行っている^{2), 3), 16)}。 γ 線標準については、2001年にBIPM(国際度量衡局)と空気カーマの基幹比較を行い、国際的整合性が認められた²⁶⁾。また昨年ピアレビューを受け、品質マニュアルがすでに完成している。

測定・校正を行っている γ 線のエネルギーは0.662 MeV (Cs-137), 1.173, 1.333 MeV (Co-60)²⁷⁾であり、3.2節で述べたX線のエネルギー(250keV以下)よりはるかに大きい。そのため生じる二次電子のエネルギー分布は、より高エネルギー側に分布の最大値を持つようになる。したがって二次電子の最大飛程が長くなり(例えば、1MeVの電子であれば最大飛程は約3.3m²⁷⁾)、X線の照射線量測定と同様の装置で測定しようとする、荷電粒子平衡を成り立たせるためには自由電離箱の大きさが非常に大きくなってしまふ。これは空間的に現実的ではないので、X線と同様の装置による絶対測定法を使うことができない。そこで、図3に示したグラファイト壁空洞電離箱を用いて、 γ 線の照射線量測定が行われている^{2), 3), 28)}。荷電粒子平衡を実現するための空気の厚さを、グラファイトの壁厚に置き換えて装置を小型化しているわけである。照射線量および空気カーマは、自由空気平行平板電離箱と同様に、検出した電荷量と空気の質量の比に基づいて求める。模擬空気であるグラファイトと真の空気の違いは、補正係数として考慮している。産総研では一次標準として2種類の大きさのグラファイト壁空洞電離箱

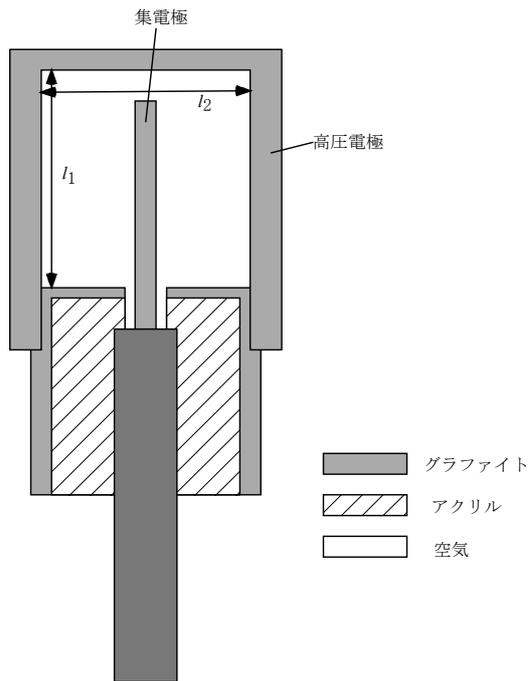


図3 円筒形グラファイト壁空洞電離箱の断面図。
 l_1 は空洞の深さ、 l_2 は空洞の内径を示す。

を使っており、その大きさは $l_1=50\text{mm}$ 、 $l_2=40\text{mm}$ 、および $l_1=19.3\text{mm}$ 、 $l_2=20\text{mm}$ である。ここで $l_1 \cdot l_2$ は、電離箱の空洞の深さおよび内径である（図3参照）。

3.6 X線・γ線の水吸収線量標準

放射線治療施設のリファレンス線量計の校正は、IAEA（国際原子力機関）をはじめ国際的には、Co-60 γ線の照射線量を基準とした校正から、水吸収線量を基準とした校正に移行している。すでにNIST（米国標準技術局）、PTB、NRC（カナダ国立計量標準研究所）など12カ国は、BIPMによる水吸収線量の絶対測定の国際比較に参加し、世界的斉一性を確認して国家標準として供給している²⁹⁾。産総研ではこうした背景のもと、2010年までに水吸収線量標準を供給するという整備計画が立てられている。国際比較に参加した各研究所が水吸収線量を測定する際に用いた測定器には、グラファイト熱量計、水熱量計、フリッケ線量計の3種類が存在する²⁹⁾。その中で直接水吸収線量を測定できる方法は、水熱量計を用いる方法である。NIST、NRC、METAS（スイス度量衡局）、LSDG（ベルギー：ゲント線量標準研究所）では、すでにこの方法で水吸収線量標準を確立している³⁰⁾。産総研でも水熱量計を用いる方向で標準の開発を行う。

4. β線組織吸収線量標準の設定・供給に向けて

この章では現在計画されているβ線組織吸収線量標準の設定・供給方法について、すでに標準を確立しているPTBにおける設定・供給方法を引用しつつ報告する。

4.1 β線源および照射装置

3.1節でも述べたとおり、PTBではPm-147、Kr-85、Sr-90/Y-90の3種類の線源を、標準場設定のために用いている⁷⁾。β線源は、通常ビームフラットニングフィルター（beam flattening filter）と共に用いる。ビームフラットニングフィルターはISO 6980:1996³¹⁾で定められたものを用いるが、同規格によればこれを用いることで、校正を行う距離において、直径15cm以内の領域に均一な場を作り出すことができる。校正を行っている吸収線量率の範囲は、 $1\text{nGy} \cdot \text{s}^{-1}$ – $1\text{mGy} \cdot \text{s}^{-1}$ である⁷⁾。産総研で用いる線源は、当面PTBと同じ3種類の予定である。PTBではβ線照射装置はBSS2（AEA TECHNOLOGY社製）を用いているが、産総研でもこれを購入し、用いる予定である。図4に産総研で現在準備中の、β線組織吸収線量測定のための装置の概略図を示す。β線照射装置は図4の右側に示した。線源はスタンドにマウントされる。シャッターはパーソナルコンピュータ（PC-No.1）で制御されており、ビームフラットニングフィルターおよび測定距離の設定が線源の種類に対応していない限り、開かないようになっている。つまり間違った設定による不要な照射をできるだけ減らすように設計されている。また空気の密度や検出器付近でのβ線のエネルギースペクトルは圧力・温度・湿度によって変化するため、β線照射の際に、圧力・温度・湿度を測定して、PCに取り込む。

4.2 外挿電離箱による絶対測定

4.2.1 外挿電離箱

図4の左側に、産総研で本年度中に測定を開始するべく設計中の、外挿電離箱の電荷収集部周辺の概要を示す。現在PTBでは、図4と同様の外挿電離箱を使って組織吸収線量測定を行っている、また旧電総研でも同様のを使っていた。外挿電離箱は円筒型をしており、図4はその断面図を示している。

β線は図中右側の照射装置から照射される（4.1節参照）。PET入射窓には、薄膜の表面にグラファイト処理を施し、電離箱の高圧電極を兼ねる。電総研で使われていた電離箱において、PET膜の質量厚は $7\text{mg}/\text{cm}^2$ であった。

これは組織の $7\text{mg}/\text{cm}^2$ 深度（密度が $1\text{mg}/\text{cm}^3$ の軟組織であれば 0.07mm 深度と等価）の組織吸収線量を求めるためである。PTBでは膜厚の不確かさを低減するため、質量厚 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ の前後数点の厚さについて測定を行い、内挿法により質量厚 $7\text{mg}/\text{cm}^2$ についての組織吸収線量率を求めている。集電極と保護電極からなる可動電極は、アクリル樹脂（PMMA）製とする。それぞれの電極は、グラファイト処理を施し、表面に導電性を持たせる。絶対測定に当たっては極板間の距離を正確に測る必要があるため、可動部分の移動距離は、高精度接触式デジタル変位センサ（AT-010V, キーエンス）を用いて測定、表示する。またパーソナルコンピュータ（PC-No.2）を用いて、変位センサの指示値を参照しながら、可動電極の位置をリモートで制御する機構を組上げる予定である。 β 線を照射することによって電荷収集部に生成した電子あるいはイオンは、集電極で検出し、振動容量型電位計を用いてその電流値を測定する。振動容量型電位計を用いた電流値測定は、X線や γ 線の空気カーマ、照射線量を測定する場合にも用いられており（3.2, 3.5節参照）、微小電流を測定するのに適した方法である。

4.2.2 β 線組織吸収線量率の決定

外挿電離箱の電荷収集部（図4参照）には空気が入っているが、集電極と保護電極の部分可動なので、その領域の空気の体積を変化させることができる。つまり外

挿電離箱を用いた測定では、空気の質量 m_{air} を変化させながら、その領域内空気が発生した電荷の量（単位時間当たりであれば電流値）を測定することができる。さて、吸収線量の測定の対象となる物質の中に存在する空洞空气中で電子のフルエンスが変化しないこと、および空洞中で光子と空気の反応が無視できることの2つが成り立つとき、Bragg-Grayの条件が成立しているというが、Bragg-Gray条件下で $(\Delta I / \Delta m_{\text{air}})_{\text{BGC}}$ を、集電極で検出された電流値の増加量と領域内空気質量の増加量の比とすると、 β 線組織吸収線量率 \dot{D}_i は以下の式から決定される¹⁴⁾。

$$\dot{D}_i = S_{t,a} \frac{\overline{W}_0}{e} \left(\frac{\Delta I}{\Delta m_{\text{air}}} \right)_{\text{BGC}} \quad (9)$$

(\overline{W}_0/e) は標準状態（絶対温度 293.15 K 、圧力 101.3 kPa 、相対湿度 0.65 ）における空気の平均の W 値であり、 $(33.83 \pm 0.06) [\text{J} \cdot \text{C}^{-1}]$ を用いるように勧告されている¹⁴⁾。また $S_{t,a}$ は組織（ t ）と空気（ a ）の平均質量阻止能比であり、次の(10)式により表される。

$$S_{t,a} = \frac{\int_0^{E_{\text{max}}} (\Phi_E)_t (S_{el}/\rho)_t dE}{\int_0^{E_{\text{max}}} (\Phi_E)_a (S_{el}/\rho)_a dE} \quad (10)$$

$(\Phi_E)_t$ は、外挿電離箱の参照点（図4参照）での電子のフルエンスのエネルギー分布、 $(S_{el}/\rho)_t$ と $(S_{el}/\rho)_a$ は、それぞれ組織等価物質および空気における、運動エネルギー E を持つ電子の質量電子阻止能（SI系での単位は $\text{J} \cdot$

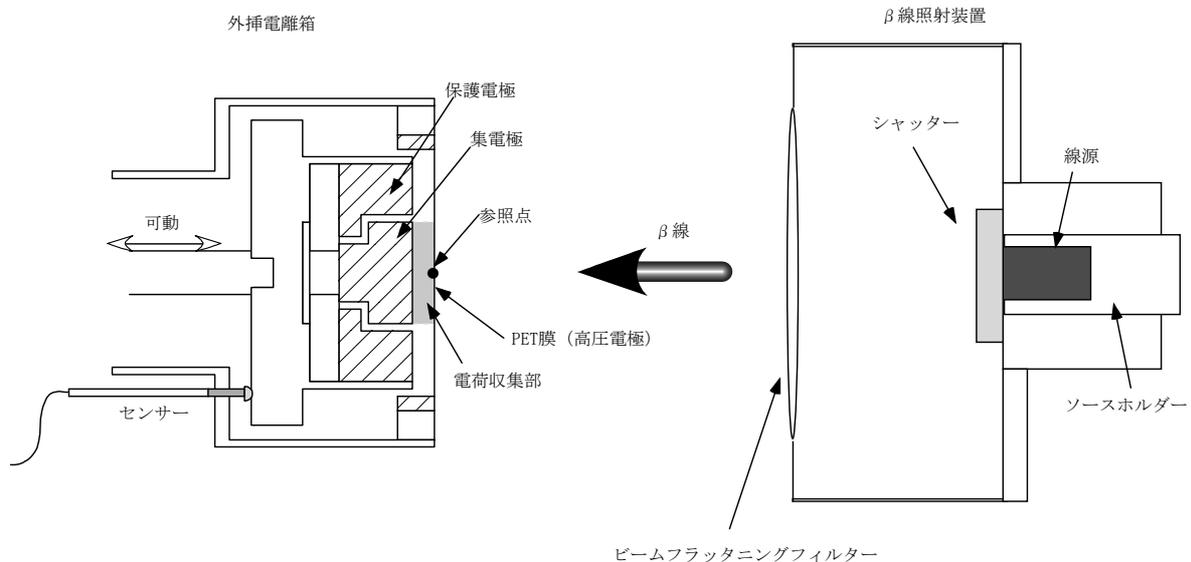


図4 製作中の β 線組織吸収線量測定のための装置の概略図。
外挿電離箱は円筒形をしている。集電極の直径は 3cm である。 β 線照射装置は市販品を導入する。

$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$), E_{max} は用いているβ線源の最大エネルギーである. PTBでは $(\Phi_E)_i$ は線源ごとに測定を行って求め, また $(S_{ei}/\rho)_i$ と $(S_{ei}/\rho)_a$ はSeltzerによって測定された値³²⁾を用いて, $S_{i,a}$ を求めている⁷⁾.

さてBragg-Grayの条件は, 吸収線量の測定の対象となる物質の中の空気の領域の大きさが, 電子の飛程に比べて十分に小さいときに成立するので, $m_{\text{air}} \rightarrow 0$ の極限においては, Bragg-Gray条件からの逸脱が最も小さいと考えられる. つまり外挿型電離箱は, Bragg-Grayの条件に可能な限り近い条件の下で, イオン化電流値の増加 ΔI と, 電荷収集領域の空気の質量の増加量 Δm_{air} の比を求められるように設計されているのである.

(9)式において, 標準状態の空気の密度を ρ_{a0} , 極板間距離を l , 集電極の有効面積を a とすると, 標準状態における照射β線のみ起因する組織吸収線量率 $\dot{D}_{R\beta}$ は,

$$\dot{D}_{R\beta} = \frac{(\overline{W}_0/e) S_{i,a}}{\rho_{a0} a} \left[\frac{d}{dl} k \kappa I(l) \right]_{l=0} \quad (11)$$

から求められる. ここで k は極板間距離と共に変化する補正係数であり, κ は極板間距離に独立な補正係数である. (11)式から, k および κ で補正を施した電流値を, 電極間距離に対してプロットし, その傾きが $l \rightarrow 0$ でどのような値をとるかを求めることにより, $\dot{D}_{R\beta}$ が得られることがわかる. (11)式における補正係数 k および κ は, さらにいくつもの要素からなるが, 以下に各補正係数の概要を記す. また括弧内にそのおよその値を示す.

・ k 極板間距離と共に変化する補正係数

k_{abs} : β線源から収集領域までの減衰や散乱が, 標準状態

□

面シミュレーション計算を行う予定である。

供給を行う標準としては、放射能と平均エネルギーの値付けが行われた β 線源を、特定のビームフラッタニングフィルターと組み合わせて用いたときの、特定の距離における吸収線量率となると想定している。つまり「線源+フィルター」と距離の関数としての吸収線量率を供給するわけである。 β 線の最大残留エネルギーを変えたいときには「線源+フィルター」を変化させ、線量率を変えたいときは距離を変化させることになる。(ただし「線源+フィルター」を変えた場合にも線量率は変わってしまうことに注意すべきである。同様に距離を変えたときは最大残留エネルギーも変わってしまう)。PTBで現在供給されている標準の不確かさは、1-2%であるが、産総研でも当面はPTBと同等の1-2%程度を目指す。しかしながら医療分野の現場で要求される不確かさは、X線・ γ 線空気カーマ(率)は測定値でおよそ1-3%であるので、将来的には供給する β 線吸収線量標準もX線・ γ 線空気カーマ(率)標準と同程度、1%以内の不確かさを実現すべきであろう。

放射線防護用個人線量計のエネルギー特性の校正では、Pm-147・Kr-85・Sr-90/Y-90の三核種によるエネルギー点だけでは不十分で、さらに多くのエネルギー点が必要になると考えられる。1992年当時電総研において、 β 線照射容器の β 線射出口部にアクリル樹脂板を装着し、Sr-90/Y-90およびTl-204線源について、最大残留エネルギーを変化させた場合の β 線場の基準化が試みられた。しかしアクリル樹脂を透過した β 線場は、線量率が小さく外挿電離箱で測定するのが困難であった⁶⁾。さまざまなエネルギー点における β 線標準場の開発は、早急に達成すべき課題のひとつである。さまざまなエネルギー点を実現するためには、上記の三核種以外の線源を用いて標準場を設定する方法も考えられる。

組織吸収線量標準の供給方法としては、ユーザーの線源を介して供給する方法と、検出器を介する方法が考えられる。要求される不確かさと校正の簡便さなどの要素を考慮しながらよりよい供給方法を実現したい。

5. まとめ

産総研の放射線標準、 β 線・X線・ γ 線について調査した。それぞれの標準の供給状況や、今後数年間の計画・課題について報告した。 β 線組織吸収線量標準については、産総研で標準を設定するにあたっての具体的な課題についても報告した。本調査研究で得た知識を基にして、 β 線組織吸収線量標準の確立をはじめとして、各種放射

線標準の高品質化を目指した開発研究、それらを基にした標準の設定、および国際斉一性の確認業務ならびに一般ユーザーの要望を満足させられるような供給形態の開発に取り組みたい。

参考文献

- 1) 鈴木功, 日医放物理会誌, **12** (1992) 41
- 2) 鈴木功, *O plus E*, **22** (2000) 723
- 3) 工藤勝久, 計測と制御, **40**, 821 (2001)
- 4) 原野英樹, 産総研計量標準報告, **2** (2004) 587
- 5) 納富昭弘, 産総研計量標準報告, **2** (2004) 627
- 6) 松本健, 崎原克彦, 小山保二, 電子技術総合研究所彙報, **56** (1992) 73
- 7) J. Böhm: *Report PTR-Dos-13*, ISSN 0172-7095 (1986)
- 8) ICRU Report 60: *Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation* (1998)
- 9) ICRU Report 33: *Radiation Quantities and Units* (1980)
- 10) 多田順一郎: わかりやすい放射線物理学 (オーム社, 1997)
- 11) 高田信久, 黒澤忠弘, 放射線, **26** (2000) 59
- 12) 日本放射線技術学会: 放射線計測学 (オーム社, 2003)
- 13) 辻本忠: 放射線管理 (日刊工業新聞社, 1983)
- 14) ISO/FDIS6980-2:2004, *Nuclear energy - Reference beta-particle radiations - Part2: Calibration fundamentals related to basic quantities characterizing the radiation field*
- 15) IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.3
- 16) 高田信久, 小山保二, 黒澤忠弘, 産総研計量標準報告, **1** (2002) 439
- 17) J. H. Lee, W. S. Hwang, L. H. Kotler, D. V. Webb, L. Büermann, M. Takeyeddin, N. Takata, V. V. Shaha, J. Mostert, S. Srimanoroth, A. Meghzifene, S. H. Hah, K. J. Chun, T. B. Kadni: APMP RI(I)-K3 comparison report
- 18) 高田信久, 小山保二, 関口広美, 黒澤忠弘, 電子技術総合研究所彙報 **64** (2000) 77
- 19) 齋藤則生, 鈴木功, 電子技術総合研究所彙報, **63** (1999) 55
- 20) 鈴木功, 齋藤則生, 小池正記, 電子技術総合研究所彙報, **64** (2000) 83
- 21) I. H. Suzuki and N. Saito, *Jap. J. Appl. Phys.*, **25** (1986) 130
- 22) R. P. Madden, D. L. Ederer and A. C. Parr, *NUcl. Instr. Meth.*, **B10/11** (1985) 289
- 23) M. Krumerey and E. Tegeler, *Rev. Sci. Instr.*, **63** (1991)

- 797
- 24) H. Rabus, V. Persch and G. Ulm, *Appl. Opt.*, **36** (1997) 5421
- 25) M. Richter and G. Ulm, *J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom.*, **101-103** (1999) 1013
- 26) P. J. Allisy-Roberts, D. T. Burns, N. Tanaka, Y. Koyama and T. Kurosawa, Rapport BIPM-2004/11 (2004) 12
- 27) 村上悠紀雄, 團野皓文, 小林昌俊: 放射線データベース (地人書館, 1982)
- 28) 加藤朗, 山地磐, 電子技術総合研究所彙報, **47** (1983) 846
- 29) P. J. Allisy-Roberts, D. T. Burns and I. Csete, Rapport BIPM-2003/08, (2003) 11
- 30) P. J. Allisy-Roberts, D. T. Burns and G. Stucki, Rapport BIPM-2003/02, (2003) 11
- 31) ISO 6980:1996, *Reference beta radiations for calibrating doseimeters and dose-rate meters and for determining response as a function of beta-radiation energy* (1996)
- 32) ICRU Report 56: *Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection* (1997)
- 33) J. Böhm, *J. Phys. Med. Biol.*, **25** (1980) 65