

光の強度を測る I —電離箱とフィルム—

成山展照 勸高輝度光科学研究センター
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1
E-mail : nariyama@spring8.or.jp

1. はじめに

放射光施設において光の強度を測る必要がある場合とは、いったいどのような場合でしょうか。

- ① モノクロメータ等を調節して、ビームの強度を最大に合わせたい(強弱)
- ② XAFS 測定等において、2カ所の光強度の比を正確に測りたい(比例)
- ③ 何個光子が当たっているかを知りたい(個数)
- ④ 何 Gy (グレイ) 当たっているかを知りたい(吸収線量)

大きくはこの4つでしょう。ここでは、③と④の場合を念頭に置き、それぞれ2.と3.で解説します。2.ではかなり原理的なところから説明しますが、3.は、比較的簡単な準備でできるため、実際面に重きを置いて説明します。①②に該当する方も、2.3と2.5はぜひお読み下さい。特に、Fig. 4は最も重要な箇所です。

強度はどのようにして測るのでしょうか。放射光の強度が非常に強いのは、もう周知のことと思います。アンジュレータ光で毎秒 10^{13} 個に達するそのような相手を1個2個と数えるわけにはいきません。ある一定時間、吸収されたエネルギーを測り、検出器応答の逆演算により、光子数に変換します。では、その吸収エネルギーはどうやって測るのでしょうか。

もし光をすべて受け止め、そのエネルギーを検出できれば、それが最もシンプルに光子数に変換できる方法です。しかし、硬X線(ここでは10 keV以上を対象とします)を全吸収させようとする受け手も大きくなり、その中の吸収エネルギーを正確に測ることはそう簡単なことではありません。

そこで、全部吸収させるのではなく、部分吸収させる方法(透過型)を用います。ここで重要な点は、硬X線が「間接電離放射線」だということです。光子は、コンプトン効果や光電効果により原子から電子を放出させますので、確かに電離作用を持ちます。しかし、そこから「かなりの」エネルギーを与えられて放出される電子は、電荷を持っているので遙かに多くの電離を行います。したがって、直接エネルギーを与えるのに主要な役割を果たすのは、光子によって放出される電子です。その電子のエネルギーを発生



Fig. 1 市販されている放射光用イオンチェンバー。信号、高圧印加用コネクタとガス出入口が見える。窓にはカプトンが貼られている。

場所で積分するのか、吸収場所で積分するのかで透過型は2種類に大別されます。

前者は、ある長さ内のビームから放出されるすべての電子エネルギーを積分します。すなわちカーマ(kerma)を測定し、全光子数算出にビーム面積は不要です。後者は、ビーム内の吸収線量を測定するため、全光子数算出にビーム面積が必要です。その代わりに位置情報が得られます。前者の代表として、空気カーマを測る自由空気電離箱(イオンチェンバー)があります(Fig. 1)。絶対測定ができ、堅牢、安定、ビーム非破壊、安価という点で、最も理想的な強度モニターです。中の空気が閉じ込められていないため、「自由空気(free air)」と呼ばれます。後者の一つとしては、ガフクロミック(GafChromic)フィルムがあります。SPring-8をはじめ放射線施設で広く利用されている線量計です。今回は、この2つを、光の強度を測る代表選手として説明したいと思います。

2. 自由空気電離箱

2.1 測定原理

放射光と空気との相互作用(コンプトン効果, 光電効果)により発生した電子は、次々と空気を構成する分子、原子を電離します。その結果生じた電子, 正イオンおよび付着

Table 1 電子の W 値 (eV)^{4,5)}

Ar	Kr	Xe	N ₂	Air
26.4	24.4	22.1	34.8	33.97

Table 2 空気中における電子の CSDA 飛程¹⁾ (20°C, 1 気圧)

E ₀ (keV)	10	15	20	30	40	60	80	100
R (cm)	0.24	0.49	0.81	1.7	2.8	5.6	9.2	13

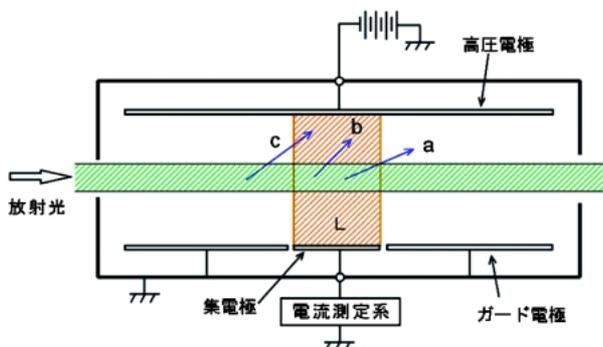


Fig. 2 自由空気電離箱の断面。緑部がビーム領域、オレンジ部がイオン収集領域。青矢印は発生電子の飛跡を示す。a による電離は一部しか測定されないが、c により補填される。Fig. 1 の電離箱には、ガード電極の代わりに「グラウンドバー」があり、筐体および高圧コネクタと信号コネクタのシールドと等電位になっている。

電子による負イオンを電場をかけて収集し、電荷量を測定するのが電離箱です。しかし、なぜ電荷を測ることにより空気に吸収されたエネルギーがわかるのでしょうか。それは1イオン対を生成するのに必要なエネルギー、すなわちW値がわかっているからです (Table 1)。空気のW値は33.97 eVです。電荷量を電子の電荷で割るとイオン対数が算出され、それにW値をかけるとエネルギー量がわかります。そのため、発生電子の初期エネルギーを測るには、電子のもつエネルギーはすべて空気中で消費させることが必要であり、もし、エネルギーを持ったまま電子が電極に到達した場合、その分の運動エネルギーは電荷量に変換されないこととなります。そこで、ビーム軸・電極間の距離は、発生電子の飛程以上に取ります。しかし、あまり長くなると電場が弱くなるため、いったん生じた陽イオンが再び電子と結合してしまう現象（イオン再結合）が有意に増えてしまいますので、この距離をいくりにするかというのが非常に重要となります。

ビーム軸方向には、ある長さの範囲で電荷を収集します。結局、収集体積は Fig. 2 のオレンジ色のような直方体になります。しかし、ここで疑問を持たれる方もおられるかと思いますが。この領域内で発生しても外に出て行く電子 (a) は数え落としになるのではないかとその通りです。その分は数え落としになります。しかし、外で発生した電子でこの収集体積内に入ってくるものもあり (c)、その分は余分になります。自由空気電離箱では、この数え落とし分が余剰分に等しくなるように設計され、結果的にそのオレンジ直方体の中で発生した電子による電離を測っていることと等価になっています。その状態を「2次電子平衡」状

態といい、あとで述べる線量測定にとっても重要な概念です。この状態を達成するには、収集体積前後の空気層長さを十分な厚さ、すなわち発生する電子数が飽和に達する厚さにすることが必要です。目安としては、発生電子の最大エネルギーに対応する電子飛程 (Table 2) が必要です。ただ、集電極が十分に長い場合や、窓材からの電子によって補填される場合は、これほどの厚さを取らなくても大きな影響はありません。

収集体積の前後に設けるガード電極は、この2次電子平衡を達成する役割の他に、漏れ電流が収集電極に入らないようにすることや、収集領域を厳密に直方体にする役割があります。もしガード電極がないと、電気力線は外側に膨らみ、有感体積を正確に決められません。ただ、集電極が長い場合には、影響は小さくなります。

2.2 電離箱選択法

放射光の大きな特徴として、①大強度で低エネルギー②指向性③偏光④短パルスといった点が挙げられますが、このすべてが電離箱測定に効いてきます。①は狭い電極間隔を要求します。②はコリメータや絞りが不要なこと、③は電極間隔や向き、④は再結合特性に影響を与えます。

まず最も重要な電極間隔です。電子がフルストップする距離は、発生する電子の最大エネルギー、すなわち光子エネルギーにほぼ等しいエネルギーを持つ電子の飛程が目安ですので、電極間隔はその2倍—ビームは真ん中に通しますので—にすれば大丈夫です。しかし、あまりに広げ過ぎますとイオン再結合が大きくなり、電流値が過小になってしまいます。この電子損失と再結合をうまくバランスさせることが必要です。この再結合の計算方法については2.3で説明します。

水平面内に直線偏光していると（過半数のビームラインがそうです）、発生する光電子は水平面内に放出されやすくなります (Fig. 3)。電子は多重散乱により向きが大きく変わるため、それほど初期方向は影響しないのですが、それでも影響がありますので、上下に電極をセットすることにより、いくらか再結合を減らすことができます。逆に、コンプトン電子は垂直方向に放出されやすいですが、エネルギーが低く飛程が短いため、問題になりません。

収集電極のビーム方向長さは感度に効いてきます。もちろん長いほど感度が上がりますが、空気による減衰が大きくなります。電極の横幅は、電子飛程の2倍以上あればよいでしょう（ビームを真ん中に通しますので）。このように、集電極間隔、横幅、ガード電極長さに必要な電子飛程ですが、あくまで最大値ですので、大多数の電子はそれ

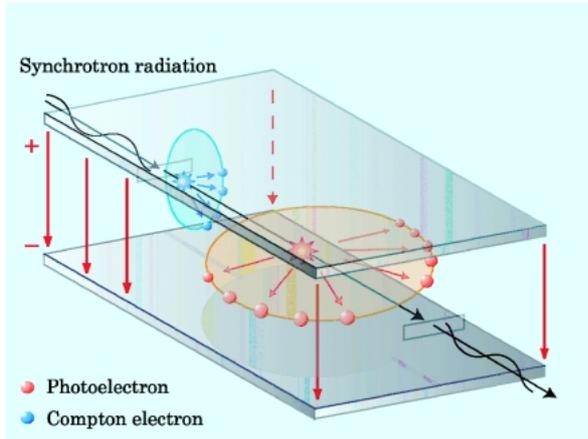


Fig. 3 直線偏光時（電場面は水平面内に偏っている）の電子放出の様子。光電子（赤丸）は水平前側方向に、コンプトン電子（青丸）は垂直前方向に放出されやすい。コンプトン電子のエネルギーはずっと小さい。

以内の距離で止まります。したがって、多少短くても急激に値が小さくなるわけではありません。もしどれくらいになるか見積もりたい場合は、光子・電子モンテカルロシミュレーションが有用です。公開されている汎用コードがいくつかあります(EGS, Geant4, MCNP, PENELOPE等)。

材料の選定も放射光の場合、重要です。電極材料としてはステンレスが耐腐食性に適していますが、金メッキも使われます。銅だけでも数年は大丈夫なようです。

電離箱の耐電圧は、使用前に必ず調べておきます。信号ケーブルはかなり長くなりますので、ローノイズケーブルを使用した方が暗電流は少なく無難です。高電圧と微小電流を扱いますので、アースは、安全と測定の両方の理由から重要です。Fig. 1の電離箱は、リーク電流を集めるために「グランドバー」という電極を持ち、Fig. 2のガード電極のように筐体導通しています。高圧印加用コネクタと信号コネクタも筐体に導通していますので、高圧電源かエレクトロメータ1カ所のアースで対応できます。精密測定用の電離箱には、高圧印加用コネクタや信号コネクタを筐体と絶縁させたものや、ガード電極をフローティングさせたものもあります。

2.3 イオン再結合

電離イオンの再結合が有意に起きていると、電圧 V を上げるに連れて電流値 I も上がります。光の強度が大きいほど再結合の割合は増えますので、この場合、比例性が出ません。電流値が一定になる、すなわち、飽和電流値が得られる電圧領域で使うことが必要です (Fig. 4)。飽和電流値が得られない場合には、X 軸を $1/V^2$ 、Y 軸を $1/I$ にプロットし、Y 切片の値の逆数を飽和電流値とする方法もあります。

放射光はパルス幅が数十ピコ秒のパルス X 線ですが、パルス間隔も数ナノ秒と短いので（マルチバンチの場

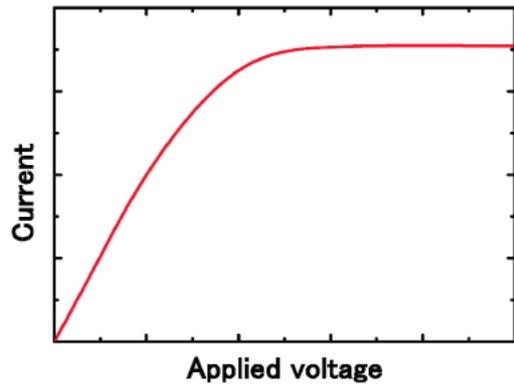


Fig. 4 飽和曲線（電圧印加時の電離電流値の変化）。電流値が一定になった時（イオン再結合が十分小さい）の電圧を測定に用いる。

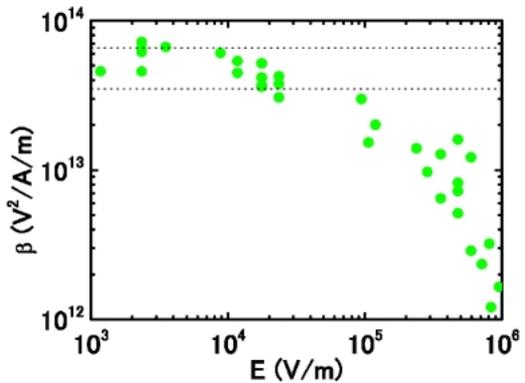


Fig. 5 SPring-8 での β 測定値³⁾。ガスは空気である。横軸は電場を示すが、光強度に対応する。すなわち、 β 値はアンジュレータ光のような大強度 X 線に対して小さくなる。点線は、X 線発生装置により得られた文献値の範囲を示す。

合)、電離箱からは連続 X 線と見なされます。連続 X 線に対する飽和付近の再結合は、

$$\frac{I_s - I}{I_s} = \frac{\alpha}{2\pi e k_1 k_2} \frac{I_s}{DE^2} \quad (1)$$

と表されます²⁹⁾。ここで、 I_s, I は飽和、測定電流値 (A)、 e は電子電荷 (C)、 k_1, k_2 は正、負イオン移動度 ($m^2/s/V$)、 α はイオン再結合係数 (m^3/s)、 D は集電極ビーム方向長さ (m)、 E は印加電場 (V/m) を表します。ここで、定数部分は

$$\beta = \frac{\alpha}{2\pi e k_1 k_2} \quad (2)$$

と置き換えられ、 β の値は空気の場合 $3.5 \times 10^{13} \sim 6.6 \times 10^{13} V^2/A/m$ が実験的に得られています。しかし、SPring-8 アンジュレータ放射光のように強度が非常に強くなると、 β の値は減少していくことが観察されています

(Fig. 5)³⁾。

ここまで、ガスは空気を使うことを前提に話してきましたが、ビームラインでは窒素などのガスをフローさせて使うことも多いかと思えます。この場合も、電圧を変化させて β の値を実測しておけば、(1)式を用いて計算することができます。窒素やアルゴンは電子付着が少ないので、空気よりは再結合が起こりにくいと考えられます。クリプトンやキセノンを使えば、電子飛程が短くなるので、電離箱がコンパクトになります。しかし、非常に精密に測定したい場合は、やはりフローしない方が安定して測れると思います。

2.4 光子数を求める

結局、光子数 N (photons/s) は次の式から求められます。

$$N = \frac{1}{f} \frac{I_s W_{air}}{1.602 \times 10^{-19}} \frac{1}{E_0 \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} \rho_{air} L} \quad (3)$$

$(\mu_{en}/\rho)_{air} \rho_{air} L$ は、 $1 - \exp(-\mu_{en}/\rho)_{air} \rho_{air} L$ と表現されることがありますが、 L が十分大きい場合には、(3)式で近似できます。また、前後に前述の空気層があり、2次電子平衡が達成されている時には(3)式で表現します。 f は収集効率 (電子がエネルギーを持ったまま電極に当たる分を除いた割合, 2.5参照), I_s は飽和電流 (A), 1.602×10^{-19} は電子の電荷 (C), E_0 は光子エネルギー (eV), $(\mu_{en}/\rho)_{air}$ は空気の質量エネルギー吸収係数 (cm^2/g)¹⁾, ρ_{air} は空気密度 (g/cm^3), L は収集電極のビーム方向長さ (cm), W_{air} は空気の W 値 (eV) を表しています。質量エネルギー吸収係数と似た定数に質量減弱係数というのがありますので、混同しないようにします。ここで、 ρ_{air} は

$$\rho_{air} = \rho_0 \frac{273}{273 + T} \frac{P}{1.01325 \times 10^5} \quad (4)$$

から計算されます。 ρ_0 は $0.001293 \text{ g}/\text{cm}^3$, T は摂氏温度 ($^{\circ}\text{C}$), P は大気圧 (Pa) です。温度はあまり効かず、大気圧に比例します。ですから、気圧は測るべきです。空気以外のガスを使う場合は、質量エネルギー吸収係数、 W 値および密度は各ガスの値を用います。

(3)式の1, 2番目の分数の積が、 L 長さの空気層から放出された電子のエネルギーを表します。3番目の分数の分母は、光子1個が L 長さの空気に与えるエネルギーです。また、(3)式を用いますと、逆に光子エネルギーと光子数から飽和電流値が求まり、(1)式の再結合の計算に必要な I_s が得られます。

2.5 応用

では、実際のビームラインに適した電離箱はどういった

サイズになるのでしょうか。市販されている電離箱 S-1194B1 の電極間隔は 12.5 mm , 収集電極の長さは 140 mm , S-1329A の電極間隔は 14 mm , 収集電極の長さは 33 mm です。モンテカルロシミュレーションによると、絶対値を得るには、すなわち $f=1$ にするには、 $15, 20, 30 \text{ keV}$ に対して各々 $8, 14, 26 \text{ mm}$ の電極間隔が必要です (空気の場合)。したがって、絶対値の測定は、S-1194B が 15 keV まで、S-1329A が 20 keV までとなります。一方、再結合は、S-1329A を $N=10^{13}/\text{s}$ の 15 keV 光子に対して用いた場合、(3)から $I_s=3.7 \mu\text{A}$ となり、 -2 kV 印加した場合、 $\beta=2 \times 10^{13} \text{ V}^2/\text{A}/\text{m}$ として(1)から計算をすると、 10% ほど再結合が起こることになります。一方、 $N=10^9/\text{s}$ に対しては十分小さくなります。つまり、SPRING-8 の偏向電磁石ビームラインでは飽和しますが、アンジュレータ放射光では飽和電流の9割の値しか得られないこととなります。

60 keV 以上の高エネルギーになると、Table 2 が示すように電子飛程通りに作ると、電離箱が非常に大きくなります。しかし、 85 mm の電極間隔で 150 keV まで測れることを確認しました⁶⁾。ただし、 200 keV 以上では、電極衝突による電子損失が急速に増えるため、自由空気電離箱では極めて困難です。

絶対値は要らない、相対値のみで良いという場合は、電極間隔をなるべく小さくして高電圧をかけ飽和を達成できれば、比例性は確保できます。高エネルギー電子による一部の電離は無視して測定していることとなります。そのため、X線のスペクトルが変化すると、比例性は保証されません。

3. フィルム線量計

3.1 なぜガフクロミックフィルムか

フィルムは手軽に使えるため、昔からX線線量の測定に広く利用されています。X線の強度を測るという点では、X線フィルムが古くから用いられてきました。臭化銀微結晶のゼラチンゲルを樹脂に塗布したもので、電離により銀原子が固まりとして析出し、潜像を形成します。これを現像処理するのですが、銀という重い元素を使っているため、 100 keV 以下で過大応答になります。そこで、金属フィルターを用いてそれを補正したのが最近まで広く用いられていたフィルムバッジ線量計です。また、乳剤を厚くしたものは、原子核乾板として現在も使用されています。

ラドカラーという緑の紙も昔ありました。アニリンブルー、メチルイエロー等の色素が含まれ、照射により塩化ビニルから遊離した塩化水素が色素を変色させます。線量に応じ、緑、黄、オレンジ、赤と変色していきます⁷⁾。

リナグラフは放射光施設ではお馴染みだと思いますが、コダック製のピンク色をしたロール紙で、ダイレクトプリントペーパーと称され、タングステン、キセノンまたは水銀

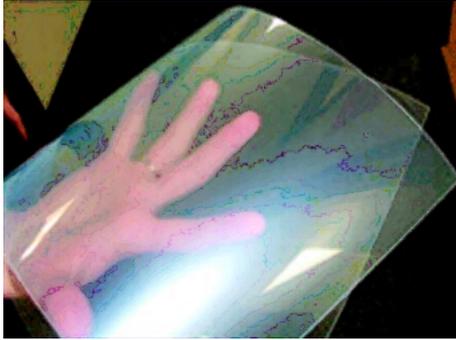


Fig. 6 照射前のHD-810。ポリエステルがベースなのでほとんど透明に近いが、X線を照射すると中の感光剤が青く変色する。

ランプを備えた直記式電磁オシログラフの記録紙として販売されていました⁸⁾。ピンク色の面に乳剤が塗布されており、光現像により、高濃度の青色画像がすぐに現れます。X線照射後は、ライトで照らすと同じように濃い青に変色します。現在は製造、販売されていませんが、ビームの位置を確認するのにまだ頻繁に使われています。線量測定には使えません。重い元素も、極微量ですが入っているという指摘があります。

放射線照射により発色する物質が添加されたプラスチックフィルムは、ラジオクロミックフィルムと総称され、吸光度から線量がわかります。数社が異なる製品を出しており、その中で今、最も用いられているのがガフクロミックフィルムです (Fig. 6)。広範に利用されている大きな理由として、感度とエネルギー応答特性が優れているという点が挙げられます。この両者を兼ね備えたフィルムは今までありませんでした。ハサミで自由にカットでき、現像が必要なく、汎用のスキャナーを使えば手軽に2次元の線量分布が得られるのも特長です。

3.2 エネルギー応答

ここで、エネルギー応答について少し説明をします。電離箱ではエネルギーを吸収させる物質は空気でしたが、フィルムの場合は上記のように様々な材料があります。色々あるとお互いに比較する時に困りますので、電離箱が初期に使われたということもあり、空気を代表によく使います (ちなみに医療照射では、水を代表にします)。その場合、エネルギー応答値はフィルム吸光度/空気線量と定義できますが (フィルム吸光度はフィルム線量と読み替えても良い)、この値はエネルギーによらず一定であるのが理想です。なぜなら、散乱するとエネルギーは減少してきますし、常に対象とするエネルギーで校正できるとは限らないからです。しかし、重い元素だと、光電効果が支配的になる低エネルギーになるほどこの値は大きくなり、過大評価につながります。そのため、たとえ微量でも重い元素が入っていないフィルムが望ましいということになります。し

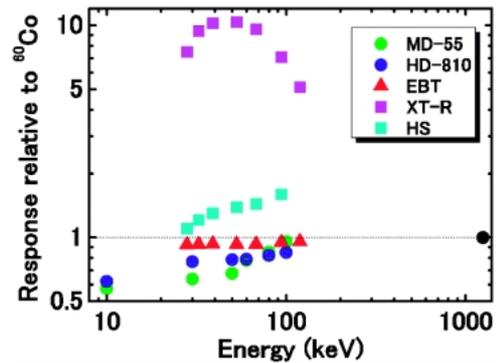


Fig. 7 MD-55, HD-810, EBT, HS, XT-Rの空気中でのエネルギー応答^{10,11)}。⁶⁰Coガンマ線照射時の応答で規格化している。校正に用いたエネルギーの応答値と、測定したいX線エネルギーの応答値が等しいのが理想。

かし、感度を上げるには逆に重い元素を入れた方が良いので、ここでイメージング用か線量測定用に放射線用フィルムが分化されていくことになります。イメージングプレートは前者の代表格です。

それでは、空気の線量を他の線量に変換することは可能でしょうか。詳しい説明は省きますが、X線のエネルギー情報がわかれば、たいてい可能です。放射光のようにエネルギーが低いと、空気とその材料の質量エネルギー吸収係数の比になります。したがって、ゴムや樹脂などは空気の線量とそれほど違いはありませんが、シリコンやアルミ等の場合はかなり違ってくることになります。

3.3 発色原理および材質、構造

ガフクロミックフィルムの感光物質については、長鎖脂肪酸で、ジアセチレンの一種という情報しか明らかにされていません。ほぼ無色透明です。放射線により炭素鎖に沿った重合が起き、青色に着色します⁹⁾。着色は照射後すぐに起きますが、色が安定するまでに2日ほど要します。紫外線に感じますので、光が当たらないよう遮光して、その間保存をします。30℃以上の温度は着色に影響を与え、特に高温下に曝されると赤色になります。冷蔵庫で保管することは可能です。

感度やエネルギー応答により、現在、数種類が市販されています。1箱に数枚入って数万円ほどです。Fig. 7のエネルギー応答からすると、MD-55, HD-810, EBTが放射光には適しています。HD-810の有感物質の組成は、H56%, C31%, N5%, O8% (原子数%) です⁹⁾。EBTには微量のClが添加されており、これがFig. 7のように低エネルギー域においてエネルギー応答を持ち上げる働きをしています。

Fig. 8は各フィルムの吸光スペクトルです。MD-55とHD-810のピーク位置は610 nmと670 nm、EBTのピーク位置は585 nmと636 nmです。線量が増すと、各ピークは少しずつ短波長側にシフトしていきます。ポリエステル

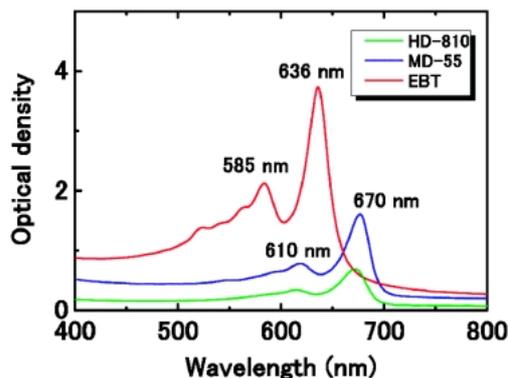


Fig. 8 HD-810, MD-55, EBT の吸光スペクトル。吸光度計を用いる場合、HD-810には610 nm か670 nm 付近の波長を使用する。

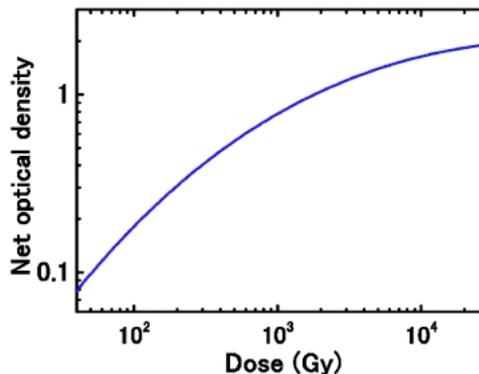


Fig. 9 HD-810の校正曲線の一例（スキャナー使用）。単色光で測定した場合、これが傾きの急な直線になる。精度は上がるが、測定線量域が狭くなる。

がベースになっており、MD-55とEBTの感受層は2層になっているのに対し、HD-810の感受層は1層で、表面には非常に薄い層があるだけです。感度はMD-55が1 Gyから、HD-810が5 Gyほどから（高線量用）、EBTが0.01 Gyからあります（低線量用）。サイズは20×25 cmあり、MD-55だけが12.6×12.6 cmです。

3.4 使用方法

照射方法で気をつける点はいくつかあります。さきほどガフクロミックフィルムはエネルギー応答に優れていると述べましたが、それはその低い原子番号に一つは起因しています。したがって、アルミ箔で挟んだり、鉄柱や鉛の表面に貼ったりすると、せっかくのエネルギー応答が悪化してしまいます。ゴムなど高分子材料の表面や空間に浮かせるといいと思います。また、どれも紫外線に感じますので、1日以上長時間セットする場合は、遮光が必要ですが、短時間では必要ありません。

光学吸光度の読み取り装置は、2次元分布が得られるスキャナーが便利です。パソコン用のカラーでも白黒でも良く、透過モードで用います。EBTフィルムはスキャンする向きにより感度が変わります。これは、粒子が整列していることによる影響です⁹⁾。

そうして読み込んだ画像は電子ファイルとして保存し、ImageProのような画像ソフトで輝度の測定をします。吸光度 (optical density) は $\log_{10}(I_0/I)$ から計算できます。 I_0 は未照射フィルム、 I は照射フィルムの輝度です。

線量を知るには、必ず校正を行う必要があります。既知の線量を照射したフィルムの輝度も同様に測定し、校正曲線（線量対吸光度曲線）を用意しておきます（Fig. 9）。単色光を読み取りに使うとこれが直線になりますが、ダイナミックレンジは狭くなります。対象とするエネルギーに近いエネルギーが理想ですが、どうしても無理な場合は、いくつかの施設が⁶⁰Coガンマ線を用いた照射を有料で行ってくれます。エネルギーが1.173, 1.333 MeV と高いのに

対し、フィルムは薄いので、2次電子平衡（2.1参照）を達成するために、厚さ3~4 mmのテフロンなど樹脂でフィルムをサンドイッチして照射します。Fig. 7を見てわかりますように、⁶⁰Coガンマ線で校正して30 keV光子を測った場合、XT-Rは空気線量より10倍高い線量を示しますが、EBTだとほぼ同じ線量が得られます。つまり、EBTを用いれば、空気の線量を知るのに対象X線のエネルギー情報は要らないことを意味しています。

3.5 応用

ガフクロミックフィルムは簡便な線量計としてSPring-8では広く使われています。特に、放射線レベルが高く、機器損傷が起きうる蓄積リング収納部内では、HD-810が多く使われています。機器が複雑に配置され、物の影になっているかどうかで線量が大きく変わるため、こうしたフィルム線量計は有用です。

ビームラインでは、単にビーム形状の測定を行うのにも利用可能です。にじみがなく、長く像が変化しない点がリナグラフより優れています。最近では、マイクロビームの線量分布を測定するのに、HD-810が使われています。読み取りに光学顕微鏡を用いることにより、 μm レベルの分解能が確認されています。

単色光の場合、2次電子平衡成立時の空気線量率 D_{air} (Gy/s) から光子束 ϕ (photons/cm²/s) への換算は、

$$\phi = \frac{D_{air}}{1.602 \times 10^{-16} E_0 \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}} \quad (6)$$

からできます。 E_0 と $(\mu_{en}/\rho)_{air}$ は、(3)と同じです。

4. 終わりに

電離箱の検出方法は非常に原理的ですが、放射光のよう

な強力な光に対する特性は、本当はまだ十分に解明されているとはいえません。しかし、飽和特性を押さえ、エネルギー範囲を理解し、ルールを守って使用すれば、十分使える、他に替え難い検出器です。敷居が低いのも電離箱の良さであります。

ガフクロミックフィルムは、米国で開発された商品ですが、最近も新しい製品が追加されており、今後もさらなる高感度化が図られ、応用分野を広げていくものと思われます。これも手軽に使えるのが魅力です。

最後に、もっと広く深く勉強したい方のために、参考文献^{12,13)}を挙げておきます。

利用情報

1. 自由空気電離箱
 応用光研工業株式会社 (<http://www.oken.co.jp/>)
 株式会社応用技研 (<http://www.o-yo-giken.co.jp/>)
2. ガフクロミックフィルム
 International Specialty Products 社
 (<http://www.ispcorp.com/>)
 アールテック株式会社 (<http://www.r-tech-japan.com/>)
3. ⁶⁰Coγ線照射
 株式会社日本アイソトープ協会甲賀研究所
 (<http://www.jrias.or.jp/>)

大阪ニュークリアサイエンス協会

(<http://homepage2.nifty.com/onsa/>)

放射線計測協会 (<http://www.irm.or.jp/>)

参考文献

- 1) National Institute of Standards and Technology
 (<http://physics.nist.gov/PhysRefData/contents.html>)
- 2) P. B. Scott and J. R. Greening: Br. J. Radiol. **34**, 791 (1961).
- 3) N. Nariyama: Phys. Med. Biol. **51**, 5199 (2006).
- 4) International Commission on Radiation Units and Measurements, Average energy required to produce an ion pair, ICRU Report 31 (1979).
- 5) M. Boutillon and A. M. Perroche-Roux: Phys. Med. Biol. **32**, 213 (1987).
- 6) N. Nariyama, N. Kishi and S. Ohnishi: Nucl. Instru. Meth. A **524**, 324 (2004).
- 7) 藤村亮一郎, 山下忠興: 放射線による固体現象と線量測定 (養賢堂, 1985).
- 8) コダック株式会社: コダックデータシート No. 135.
- 9) The American Association of Physicists in Medicine, Radiochromic film dosimetry, AAPM Report No. 63 (1998).
- 10) N. Nariyama: Appl. Radiat. Isot. **62**, 693 (2005).
- 11) M. J. Butson, Tsang Cheung and P. K. N. Yu: Appl. Radiat. Isot. **64**, 60 (2006).
- 12) J. R. Greening: 放射線量計測の基礎 (地人書館, 1988).
- 13) F. H. Attix: Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry (John Wiley & Sons, Inc. 1986).