

軟X線標準場の概要と高品質化に関する調査研究

納富 昭弘*

(平成15年10月29日受理)

A Survey on Establishment of Exposure Standards for Low Energy X-Rays

Akihiro NOHTOMI

1. はじめに

X線の照射線量標準は、近年のX線利用の拡大に伴い、電子ビームを利用する機器により発生するX線の遮蔽および公衆被曝線量の評価、医療に於けるX線を用いた診断及び治療での線量管理、生物学・工学でのX線利用等々の分野で必要とされている重要なものである。

世界各国のX線照射線量の一次標準は、X線発生装置(X線管)と自由空気型電離箱により設定されているものが大部分である。日本でも、以前、産業技術総合研究所(産総研;旧電子技術総合研究所)に於いて、自由空気電離箱による軟X線及び中硬X線の照射線量標準の設定が行われた^{1),2)}。このうち、軟X線については、平成14年の自由空気電離箱の更新(応用技研製FA-103)やX線フィルター自動設定装置の導入等に伴い、軟X線照射線量標準場の再設定が必要となっている。この様な背景のもと、平成14年から、その再設定のための作業が行われてきている。

本報告では、軟X線標準場の実現に必要な要件、及び具体的な設定方法について調査を行った結果について報告する。また、現在(平成15年9月)までに行った標準設定作業について、その現状を述べる。

2. X線の照射線量

照射線量XはX線やγ線等の光子によって、単位質量あたりの空気から放出された全ての電子と陽電子が空気中で完全に止められるまでに生成されるイオン対の一方の符号の電荷の和として定義される。すなわち微小体積内の空気の質量を dm 、そこから発生した電子によるイオンの電荷を dQ とすると、

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

質量 dm の空気中で光子によって放出された電子は、 dm の外にも走行してそのエネルギーを失うまでに、多くのイオン

対を生成する。これらのイオン対の電荷を集めたものが dQ である。この照射線量を実際に測定する為には電子平衡条件を必要とする。電子平衡条件とは、この dm で発生した二次電子の内、この領域の外で作るイオン対数と、この領域以外で発生した二次電子がこの領域内で作るイオン対数が等しい状態を言う。

照射線量の単位は、クーロン毎キログラム(C/kg)であるが、以前使用された単位レントゲン(R)は、

$$1R = 2.58 \times 10^{-4} C/kg \quad (2)$$

であり、空気0.001293g(0°C, 1気圧における乾燥空気1cm³の質量に相当する)の空気と電荷1esuによって定義された。

通常のX線標準場では、その照射線量を自由空気電離箱(FAC: Free-air Ionization Chamber)を用いて評価することが行われている³⁾⁻⁵⁾。自由空気電離箱による標準の設定方法については、4節で述べる。

なお、最近ではX線、γ線等の光子線では、照射線量ではなく空気カーマ(kerma: Kinetic Energy Released per unit Mass)によって放射線場を表現する場が多くなってきている。カーマはある点においてX線や中性子などの非荷電粒子によって物質の単位質量あたりから放出される電子等の荷電粒子の初期運動エネルギーで定義されている。カーマの単位は[J/kg]または[Gy(グレイ)]であり、吸収線量と同じ単位を持つ。空気カーマ K_a について考える場合、照射線量Xとの間に以下の関係が成り立つ。

$$K_a = X \frac{(W/e)}{(1-g)} \quad (3)$$

ここに W/e は電子に対する空気のW値を電荷素量eで割ったものであり、 g はX線によって放出された二次電子が空気中において制動放射によって失うエネルギーの割合である。産総研では、 W/e の値としては 33.97 ± 0.05 [J/C]、X線に対する g の値としては、当面0を用いることになっている⁶⁾。

3. X線のエネルギーおよび線質

X線は、そのエネルギーに応じて、管電圧が50kV程度以下

*計量標準研究部門 量子放射科

のものを軟 X 線, 50kV 程度～数百 kV のものを中硬 X 線と呼ぶのが通例になっている。管電圧が数百 kV を越えるものについては, 硬 X 線という言葉を使うこともあるが, 通常, このエネルギー領域の光子線の標準場は, γ 線源によって設定されることが多いので, 一般的には硬 X 線という言い方はあまりされていない様である。

標準場に用いられる X 線発生装置は, 電子を加速してタングステンなどの電極に衝突する際に発生する制動 X 線を用いるのが通常のやりかたである (原理的には, 放射光等を用いて単色のエネルギーの X 線を発生させることも可能だが, 標準場での使用は一般的ではない)。つまり, X 線発生装置から得られる X 線のエネルギースペクトルは, 特性 X 線を除けば加速電圧(管電圧)で決まる最大エネルギーを有する連続分布となる。この分布の形状により, 当該 X 線の全体としての線質が決まることになる。加速電圧が同じでもこの形状が異なれば, 放射線場としての特性は違うことになる。

このような X 線の線質を表示するのに, 国内では Quality Index (QI) という指標が用いられている。すなわち,

$$QI = \frac{E_{\text{eff}}}{E_{\text{max}}} \quad (4)$$

であり, ここに実効エネルギー E_{eff} は連続 X 線の半価層 (X 線の強度が 1/2 になるフィルターの厚さ) と同じ半価層を持つ単色 X 線のエネルギー, E_{max} は連続 X 線の最大エネルギーである。実効エネルギーを算出する際には, Hubbell and Seltzer⁷⁾ が求めた質量減弱係数 μ/ρ を用いるのが一般的である。また, 線質を表すために特定の物質の半価層を示すことがあるが, これは, QI を指定することと等価である。

線質を変えるために, 付加フィルターが挿入される。付加フィルターが厚いほど, 連続 X 線のスペクトルは硬くなり, QI が大きくなる。標準場を整備するには, 使用する QI での線質(半価層)を前もって決定しておく必要がある。実際に使用する QI の値は, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7 とし, そのエネルギー範囲としては管電圧 10kV から 50kV とする。

4. 自由空気電離箱による照射線量測定

既に述べた様に, X 線の照射線量は, 原理的には相互作用を起こす空気質量 m とそこから発生する電離電荷 Q [C] が分かれば求められるが, 実測値から絶対照射線量を決定するには種々の補正が必要となる。図 1 に自由空気電離箱による照射線量測定概念図を示す。左側の X 線管で発生した X 線は, 規定面の入射絞りによってコリメートされて一部分が電離箱内に入射し, 電離箱収集電極部の有感領域中の空気(斜線部)を電離する。この電離によって生じた電荷を収集し, コンデンサに蓄積させて読み出して, 照射線量を求める。この場合, 絶対照射線量 X は以下のように表される。

$$X = \frac{Q}{m} \prod k_i \quad (5)$$

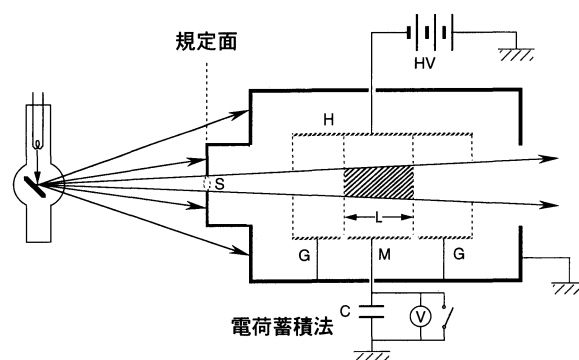


図 1 自由空気電離箱による照射線量測定概念図。S は電離箱規定面の入射絞りの面積, H は高圧印加電極, M は電荷収集電極, G はガード電極, L は電荷収集電極の長さ, C は電荷蓄積法に用いる外部コンデンサを示している。

$$m = \rho_0 SL \frac{273.15}{273.15 + T} \frac{P}{1013.25} \quad (6)$$

ただし

ρ_0 ; 0°C, 1 気圧における 1 cm³ の乾燥空気質量 [kg]

S; 電離箱規定面の入射絞りの面積 [cm²]

L; 電荷収集電極の長さ [cm]

T; 電離箱内の空気の温度 [°C]

P; 電離箱内の空気圧力 [hPa]

k_i は種々の補正係数であり, 主に以下のものがあげられる。

k_{loss} ; 再結合と拡散による電荷損失の補正係数

k_{att} ; 入射孔絞り(規定面)と収集電極中心間での空気による X 線強度の減衰に対する補正係数

k_{h} ; 湿度に対する補正係数

k_{sc} ; 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

k_e ; 電極間隔が不十分なために生ずる二次電子の電離損失に対する補正係数

k_p ; 遮蔽箱の前面を透過してくる X 線に対する補正係数

k_L ; 入射孔のふちを透過する X 線に対する補正係数

このうち, k_{loss} , k_{att} , k_p , k_L については測定により評価が可能である。 k_{sc} , k_e については, モンテカルロ計算により求めることが必要である。 k_h は自由空気電離箱の信号出力の湿度依存の測定データから求めることとする⁸⁾。

5. 産総研の軟 X 線標準場の現状

現在, 産総研の軟 X 線標準場に用いられている X 線源は, 英国 Pantak 社製の MXR-160 型 X 線発生装置であり, 1988 年に納入された。管電圧は ~160kV, 管電流は ~75mA, 最大出力 3kW という仕様になっている。X 線フィルターは, 以前は手で装着していたが, 昨年パソコン制御で設定できるようになっている。

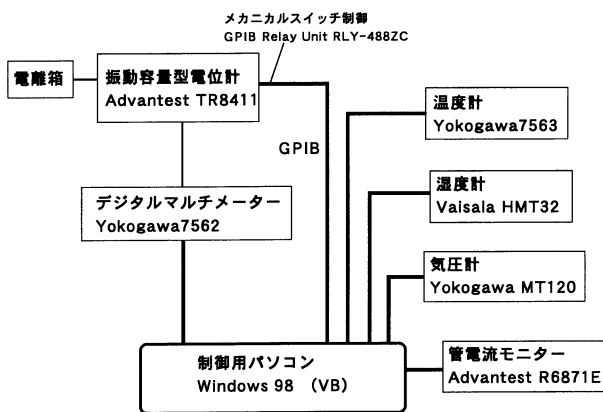


図2 パソコンを用いた電離箱からの信号電流の測定系。電離箱からの信号電流は振動容量型電位計で電荷蓄積法により測定されデジタルマルチメータで読み出されてから GPIB インターフェースを介してパソコンに取り込まれる。また、やはり GPIB インターフェースにより電離箱部分の温度、気圧、湿度等の情報がリアルタイムでパソコンに取り込まれる。

5.1 信号電流測定系の安定性

図2に採用している信号電流の測定系を示す。電荷蓄積法により、コンデンサに生ずる電圧を振動容量型電位計で測定する。デジタルマルチメータのサンプリング機能により、5秒間のサンプリングを20回行って、照射線量率を求めている。サンプリングタイマーの設定精度は1msである。各測定機器は GPIB により、パソコンで制御され、電流が算出される。温度、気圧、湿度の変化については、自動的にリアルタイムで補正を行う様になっている。

X線発生装置からのX線を自由空気電離箱で測定する前に、この測定系の固有の安定性を確認するために、パンケーキ型電離箱(SX-30)と²⁴¹Am線源を用いて、測定系の長時間安定性を調べた。図3に結果を示す。約13時間の測定中の信号電流変動は、約±0.1%程度であった。得られた信号電流は、 10^{-11} Aのオーダーであり、実際にX線発生装置からのX線を自由空気電離箱で測定する典型的な場合と、ほぼ等しいかやや小さい値である。この時、信号電流のバックグラウンドは 10^{-16} A程度であった。以上のことから、用いている測定系固有の安定度は最高で約±0.1%程度であることが確かめられた。この変動の原因としては、空調に伴う局所的な温度変化により、電離箱内の空気温度と温度測定位置での空気温度が異なることなどが考えられる。

5.2 X線発生装置の電流安定性

5.1で述べた測定系を用いて、自由空気電離箱のX線に対する信号を測定して、その長時間にわたる安定性を調べた。具体的には、X線発生装置の設定値を、管電圧30kV、管電流5mAとし、自由空気電離箱の印加電圧を+2500Vとして、電流測定を連続して多数回行った。

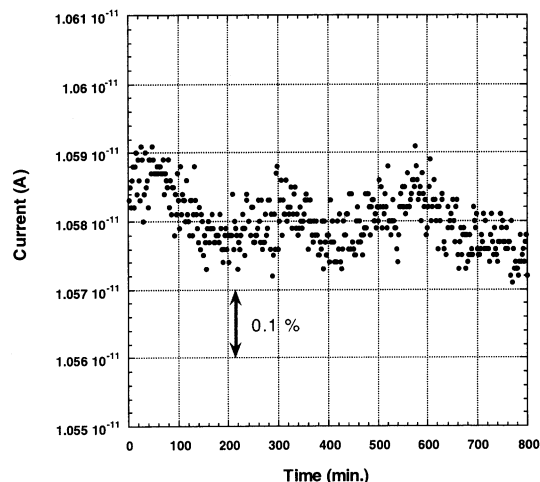


図3 測定系固有の安定性を評価するために図2の測定系を用いてパンケーキ型の電離箱 SX-30の信号電流を読み出した結果。使用した線源は²⁴¹Amである。

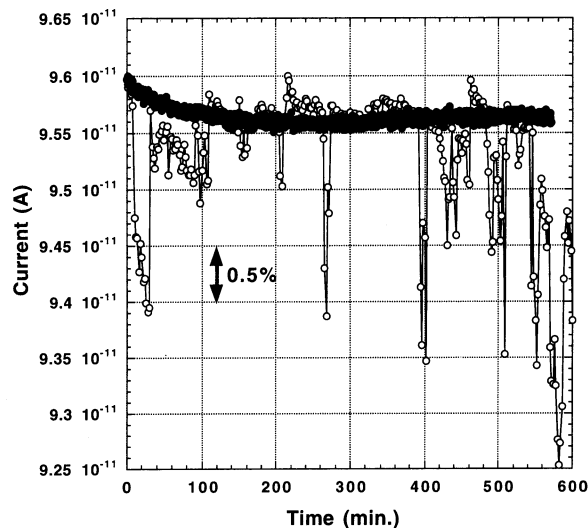


図4 自由空気電離箱により測定したX線信号電流の長時間安定性。横軸は照射を開始した時点からの経過時間である。X線源の条件は、管電圧30kV、管電流5mA、電離箱への印加電圧は+2500Vである。○は電流制御系の改良前、●は改良後のデータを示す。

結果の一例を図4に示す。図中、○で示すように、当初、測定されたX線の信号電流の安定性は非常に悪く、局所的に数%の変動が見られた。数回にわたり同様の測定を試みたが、脈絡無く電流値が変動する傾向はよくならなかった。これを改善するために調査を行った。X線発生装置の各電源部品、回路のパーツをチェックしたが、不良箇所は見つからなかった。しかし、電流制御部の基板を新品に取り換えたところ、状況が大きく変化した。図4に●で示す様に、測定開始後信号電流は、約1時間程度にわたって0.5%程度減少した後±0.1~0.15%の範囲で安定する様になった。この変動は、図3

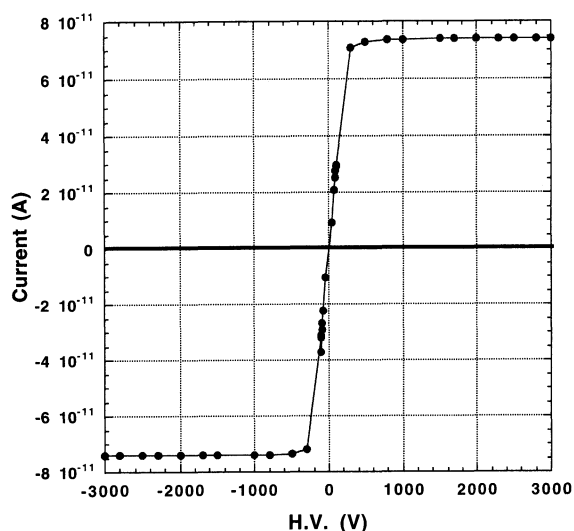


図5 自由空気電離箱の飽和曲線。X線源の条件は管電圧30kV，管電流5mAである。横軸は電離箱へ印加する高電圧の値を示す。

の測定系固有の安定性と、ほぼ一致する。数回同様の測定を行ったが、この傾向は再現した。このことより、X線照射開始から約1時間程度待つてから測定を行えばよいことが分かった。この様な現象は、BIPMでも観測されており、測定をする前に電離箱に高電圧を印加したまま、少なくとも30分の前照射を行っているそうである⁴⁾。これ以降の測定はすべて、X線照射開始から1時間以上経過後に行った。

5.3 飽和曲線・極性効果

図5に、自由空気電離箱への印加電圧を-3000Vから+3000Vまで変化させた場合の飽和曲線を示す。印加電圧が+1000V以上、または-1000V以下では、ほぼ一定の飽和電流に達しており、電離箱モードで検出器が動作していることが分かる。

図5のデータを、印加電圧が正の場合と負の場合で信号電流の絶対値を比較した結果が図6である。同一の印加電圧でもその符号が異なる場合に、信号電流の絶対値が異なる現象を極性効果と呼ぶ。この測定の場合、印加電圧の絶対値が1500Vよりも低い領域では信号電流の絶対値は、負電圧を印加したときより、正電圧を印加した時のほうが小さくなっている。この原因は不明だが、正電圧を印加した場合には陽イオンのみを収集するのに対し、負電圧を印加した場合には、電子、または負イオンを収集するので、両者に差が生じるのではないかと推測される。実際上、印加電圧を+2000V以上、または-2000V以下とすれば、極性効果は無視できると言える。

5.4 再結合補正

X線により電離箱中に発生した、陽イオン・陰イオンの一部はその電荷収集過程で再結合を起こすため、飽和電流を得るためには、再結合に対する補正が必要となる。再結合効果は初期再結合と一般(体積)再結合に分類される。初期再結合

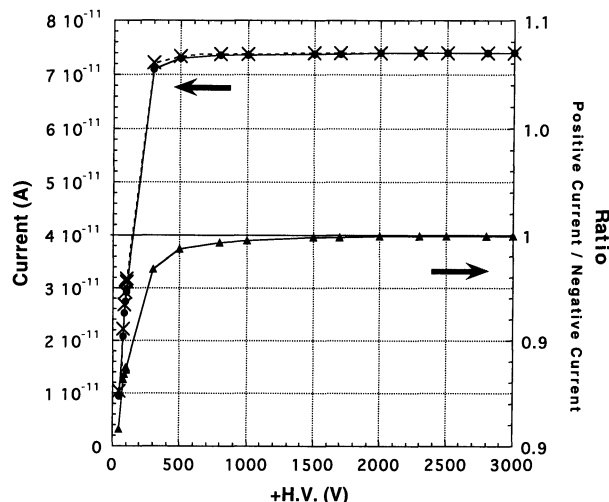


図6 自由空気電離箱の極性効果。X線源の条件は管電圧30kV，管電流5mAである。図5で得られた結果を、印加電圧が正の場合と負の場合で、印加電圧および信号電流を絶対値で示したものが左側の縦軸である。●は正電圧を印加した場合、×は負電圧を印加した場合に相当する。両者の比をとったものが▲(右側の縦軸)である。

は、単一の電離によるイオン対の間で発生するもので、線量率に依存しない。一般再結合は異なる電離によるイオン間で起こる再結合であり、線量率が高くなるほどその効果は大きくなる。

再結合の補正係数は Boutillon が与えている方法⁹⁾を参考にして、次式によって導いた。

$$\frac{1}{I_v} = \frac{1}{I_s} + \frac{A}{V} + \frac{B}{V^2} \quad (7)$$

$$k_{\text{loss}} = \frac{I_v}{I_s} \quad (8)$$

ただし

I_v ; 印加電圧 V の時の信号電流

I_s ; 飽和電離電流

V ; 印加電圧

k_{loss} ; 再結合補正係数

A, B ; A は初期再結合と拡散損失に関連し、 B は体積再結合に関する電離箱に固有の定数

つまり、 $1/I_v$ を $1/V$ の関数としてプロットし、それを二次の多項式でフィッティングして、 $V \rightarrow \infty$ すなわち $1/V \rightarrow 0$ への外挿値を求めれば、その逆数として飽和電離電流 I_s を決定することができる。この時、印加電圧 V での信号電流 I_v から(8)式により再結合補正係数 k_{loss} が得られる。

X線発生装置の管電圧を30kV、管電流を5mAとした時の測定値を(7)式でフィッティングした結果を図7に示す。外挿による y 切片の値は、 $1.3521 \times 10^{10} (\text{A}^{-1})$ であり飽和電離電流 I_s は $7.3959 \times 10^{-11} (\text{A})$ 、印加電圧 V が2500Vの時の再結合補正係数 k_{loss} は1.0002と評価される。

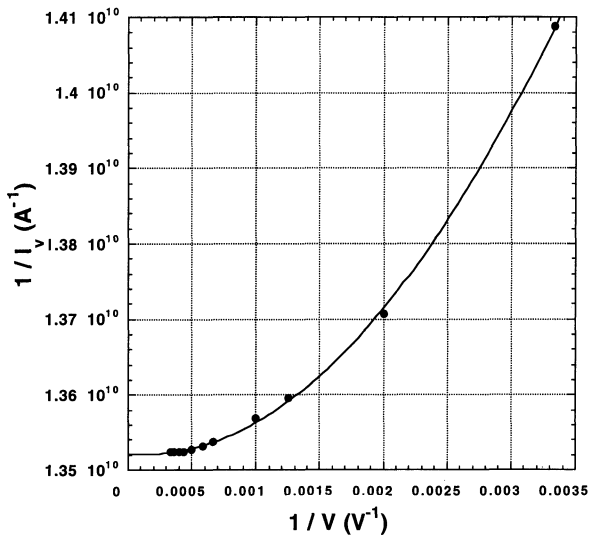


図7 再結合補正係数をもとめるために図5で得られた電流の逆数を、電圧の逆数としてプロットした図。

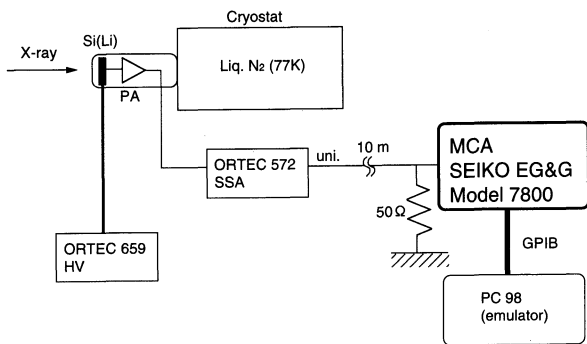


図8 Si(Li)検出器を用いたX線のエネルギースペクトル測定系。Si(Li)検出器への印加電圧は-1500V、スペクトロスコピーアンプ(SSA)のshaping timeは6マイクロ秒である。

5.5 管電圧の校正

X線の管電圧は、管電流によって変化する可能性がある。また実際の電圧が設定電圧と一致しているとは限らない。この為、発生するX線のエネルギースペクトルを測定してX線の最大エネルギーから管電圧の実際の値を評価した。X線のエネルギースペクトルは、Si(Li)半導体検出器を用いて測定され、得られた最大エネルギーから管電圧の校正を行った。

図8にエネルギースペクトルの測定系を示す。Si(Li)半導体の出力は内蔵のプリアンプを通してスペクトロスコピーアンプ(SSA)に入力され整形された後、マルチチャンネルアナライザ(MCA)で波高分析される。まず、チャンネル数とエネルギーの関係を求めるために放射性同位元素である²⁴¹Am, ⁵⁵Feから発生するエネルギー既知の光子の測定を行い、結果を最小自乗法でフィッティングすることでエネルギー校正曲線を得た(図9)。すなわち

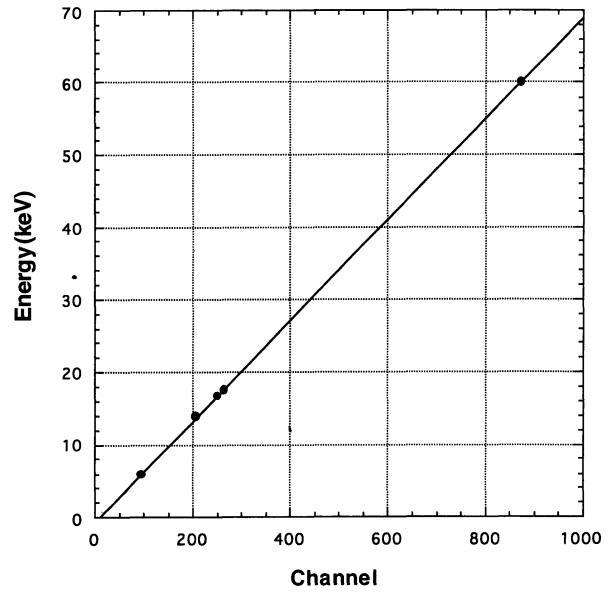


図9 Si(Li)検出器のエネルギー校正曲線。横軸は、マルチチャンネルアナライザのチャンネル数、縦軸は対応する光子のエネルギーである。放射線源としては、²⁴¹Amと⁵⁵Feを用いた。

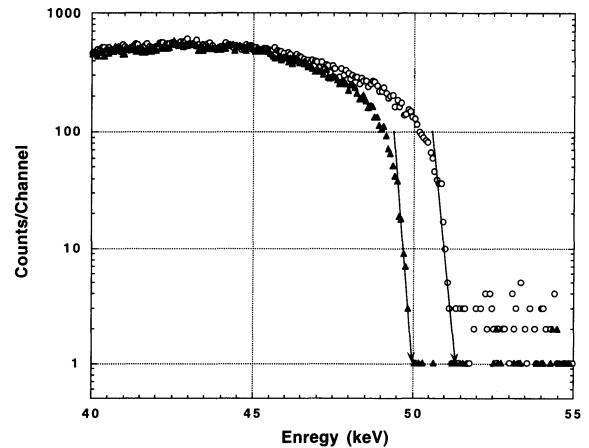


図10 管電圧の校正結果の一例。○は設定管電圧50kVでの出力スペクトル。▲は設定管電圧48.7kVでの出力スペクトル。管電流は共に20mA。

$$E = 0.06940 \times ch - 0.4852 \quad (9)$$

であり、ここに E は光子線のエネルギー (keV) を、 ch は MCA のチャンネル数を表す。測定点は²⁴¹Amの γ 線 (60.0keV), ²⁴¹Amが α 崩壊して生ずる²³⁷Npの特性X線 (13.95keV, 16.84keV, 17.75keV) および⁵⁵FeのX線 (5.9keV) である。これにより、およそ60keVまでの直線性が確認された。次に、管電圧を10, 15, 20, 30, 50kV, 管電流を2, 5, 10, 20mAと変化させてそれぞれの組み合わせで、エネルギースペクトルの測定

表1 管電圧の校正結果(各実効電圧を得るための設定電圧)

設定電圧	実効電圧
9.53kV	10kV
14.4kV	15kV
19.3kV	20kV
29.1kV	30kV
48.7kV	50kV

を行って、その最大エネルギーを得た。その結果、2mA~20mAの範囲では、管電圧は管電流にほとんど依存しないことが分かった。これは、X線発生装置の電圧降下の自動補正機能が働いているためと考えられる。一方、評価された管電圧は、X線発生装置で設定した電圧より若干大きい傾向があることが分かった。図10に例を示すように、設定電圧を50kVにすると、最大電圧は約51.3kVとなった。これを50kVにあわせるためには、設定電圧を低めにする必要がある。この場合、48.7kVに設定すると実効最大電圧がちょうど50kVになった。この様な校正を他の電圧についても行い、表1の結果を得た。

6. まとめ

軟X線標準場設定に必要な要件やその実現方法の調査を行った。産総研所有の軟X線発生装置の電流安定化を実現し、自由空気電離箱による軟X線標準場設定のための作業をいくつか行った(極性効果、再結合補正、管電圧の校正)。今後、標準場としての設定精度を向上させる為に、まだ決定されていないいくつかの補正係数の値を、測定及び計算により評価することが必要である。また、特定の線質を持つX線を得るための付加フィルターの設定条件を半価層測定により求めておく必要もある。

謝 辞

本調査研究を行うにあたり、親切に御指導、御助言いただきました。高田信久主任研究員に心より感謝致します。実際の実験を行う際には、装置の取り扱い方から、測定の準備まで、松本健博士より豊富な経験に基づく数々の助言をいただ

きました。ここに、感謝致します。原稿の添削をして頂いた鈴木功科長に感謝します。また、Si(Li)半導体検出器によるエネルギー測定の際に、液体窒素の手配等お手伝いいただいた、佐藤泰研究員にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 崎原克彦, 加藤朗「軟 X 線照射線量絶対測定」電子技術総合研究所彙報, 第38巻 第6,7号 277 (1974)
- 2) 松本健, 直井次郎「中軟 X 線照射線量標準の再設定」電子技術総合研究所彙報, 第47巻 第9,10号 822 (1983)
- 3) T W M Grimbergen, E van Dijk and W de Vries, "Correction factors for the NMI free-air ionization chamber for medium-energy x-rays calculated with the Monte Carlo method" Phys. Med. Biol. 43, 3207 (1998)
- 4) M. Boutillon, P. J. Allisy-Roberts and D. T. Burns, "Measuring Conditions Used for the Calibration of Ionization Chamber at the BIPM", Report BIPM-01/04 (2001)
- 5) Paul J. Lamperti and Michelle O'Brien, "NIST Measurement Services: Calibration of X-Ray and Gamma-Ray Measuring Instruments", NIST Special Publication 250-58 (2001)
- 6) 高田信久, 小山保二, 黒澤忠広「空気カーマ標準の設定」産総研計量標準報告 Vol.1, No.2, 439 (2002)
- 7) J.H. Hubbell and S.M. Seltzer, NISTIR 5632, "Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z=1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest" (1995)
- 8) ICRU report No.31, "Average Energy Required to Produce an Ion Pair" (Int. Comm. Radiat. Units Meas., Bethesda, 1979)
- 9) M. Boutillon, "Volume recombination parameter in ionization chambers", Phys. Med. Biol. 43, 2061 (1998)