

臨床技術講座

産総研軟X線標準の現状と関連する諸問題

納富昭弘

日本放射線技術学会雑誌第62巻第8号所載

別刷

2006. 8. 20

日本放射線技術学会



産総研軟X線標準の現状と関連する諸問題

納富昭弘(産業技術総合研究所・量子放射科)

はじめに

本学会誌の読者の皆様には、「軟X線標準場」にどれくらい馴染みがおありでしょうか。ここでいう軟X線とは管電圧10kVから50kVのX線管から発生するX線を示している。産業技術総合研究所(以下、産総研)では軟X線について、空気カーマ(kerma: kinetic energy released per unit mass)と照射線量の標準供給を行っている。これは、国内の軟X線の一次標準であり、国内のすべての軟X線測定装置が、二次あるいは三次標準等を介して、この標準場とトレーサビリティがとられていることが必要である。使用されるX線管の管電圧は、一般の診断に用いられている管電圧より低いが、近年のX線を用いたさまざまな機器の普及に伴い、X線や電子ビームを利用する機器や医療用等の乳房検査(マンモグラフィ)の際の患者の被曝線量を評価するのに必要とされている重要な量である。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、産総研(当時の電総研)において、自由空気電離箱による軟X線および中硬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、2004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た。このような背景のもと、2004年から、その再設定を行った。本稿では、産総研における軟X線標準場の照射線量と空気カーマの設定と、標準設定および標準供給の現状について述べる。

1. X線の照射線量

照射線量 X はX線や γ 線等の光子線によって、単位質量(dm)の空気の体積要素内の、自由になったすべての電子と陽イオンが完全に空気中で止められるときに生じる一方の符号の電荷の和(dQ)を dm で除した商として定義される。すなわち

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

領域 dm の空気中で光子によって電離された電子

は、そのエネルギーを失うまでに、多くの二次電子を生成するが、その二次電子は当然領域 dm の外にも生じる。これらの二次電子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ためには電子平衡条件を必要とする。ここで、電子平衡条件とは、この領域 dm で発生した二次電子のうち、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いう。

照射線量の単位は、クーロン毎キログラム(C/kg)であるが、従来から使用されている特別単位レントゲン(R)がある。すなわち

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

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)についての電荷1esuに相当する。

通常の軟X線標準場では、その絶対照射線量を自由空気電離箱(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、3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によって放射線場を表現する場面が多くなってきている⁶⁾。カーマはある点においてX線などの非荷電粒子によって物質の単位質量当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ある。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 Ka 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。

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

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。 W/e と g の値については、国際的に使用すべき推奨値が与えられている^{7, 8)}。

2. 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を超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、一般的ではないようである。

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標的に照射する際に発生する制動X線を用いるのが通常のやり方である(原理的には、放射光等を用いて単色のエネルギーのX線を利用することも可能だが、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。このエネルギースペクトルの形状により、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エネルギースペクトルが異なれば、放射線場としての特性は違うということになる。

このようなX線線質の表示の指標に線質係数(quality index: QI)という量がしばしば用いられる。すなわち、

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

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)と等価な半価層を持つ単色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 Seltzer⁹⁾が求めた質量エネルギー吸収係数 μ_{en}/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, 0.8とし、X線の管電圧は、10, 15, 20, 30, 40, 50kVとした。

3. 自由空気電離箱による照射線量測定

既に述べたように、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。

Fig. 1に自由空気電離箱による照射線量率測定概念図を示す。左側のX線管で発生したX線は、規定面の

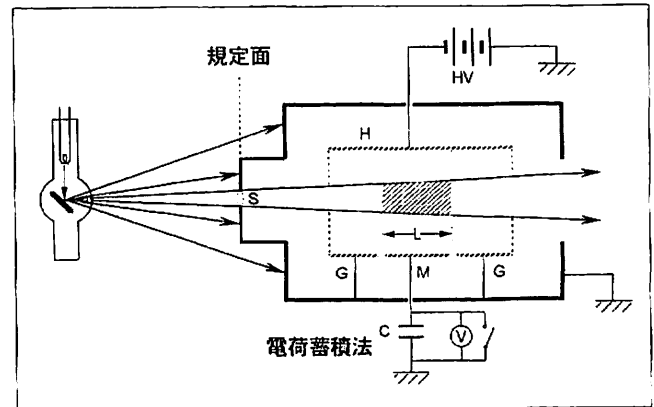


Fig. 1 自由空気電離箱による照射線量率測定概念図
Sは電離箱規定面の入射絞りの面積、Hは高圧印加電極、Mは電荷収集電極、Gはガード電極、Lは電荷収集領域の長さ、Cは電荷蓄積法に用いる外部コンデンサを示している。

入射絞りによってコリメートされ、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率を求める。この場合、絶対照射線量 X は以下のように表される。

$$X = \frac{Q}{m} \prod ki \dots\dots\dots (5)$$

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

ただし

ρ_0 ; 0°C, 1気圧における1cm³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; 電荷収集電極の幅[cm]

T; 電離箱内の空気の温度[°C]

P; 電離箱内の空気圧力[hPa]

ki は種々の補正係数であり、主に以下のものが挙げられる。

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じ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、kloss, katt, kp, kLについては測定により評価が可能である。ksc, ke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。kh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¹⁰⁾。

4. 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 ~ 160 kV、管電流は ~ 75 mA、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、2004年からパソコン制御で設定できるようにした。

4-1 信号電流測定系の安定性

Fig. 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、コンデンサに生じ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インターフェースにより、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ようになっている。

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、パンケーキ型電離箱(SX-30)と ^{241}Am 線源を用いて、測定系の長時間安定性を調べた。Fig. 3に結果を示す。約13時間の測定中の信号電流変動は、約 $\pm 0.1\%$ 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。このとき、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 $\pm 0.1\%$ 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。

4-2 X線発生装置の電流安定性

4-1で述べた測定系を用いて、自由空気電離箱によりX線発生装置からのX線を測定して、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、自由空気電離箱への印加電圧を+2500kVとして、同条件の電流測定を連続して多数回行った。

結果の一例をFig. 4に示す。図中、○で示すよう

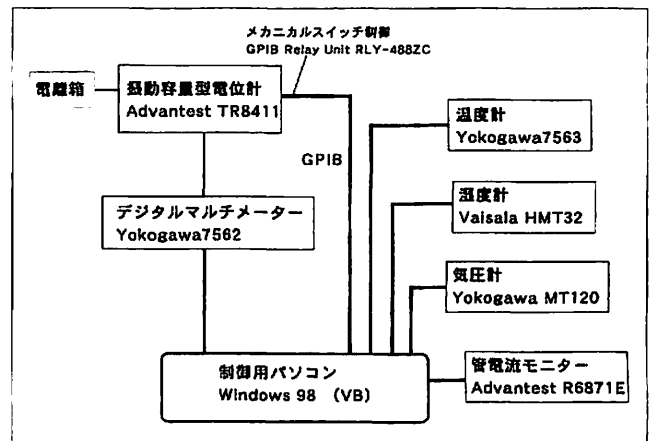


Fig. 2 パソコンを用いた電離箱からの信号電流の測定系
電離箱からの信号電流は振動容量型の電位計で電荷蓄積法により測定され、デジタルマルチメーターで読み出されてからGPIBインターフェースを介してパソコンに取り込まれる。また、やはりGPIBインターフェースにより電離箱部分の温度、気圧、湿度等の情報がリアルタイムでパソコンに取り込まれる。

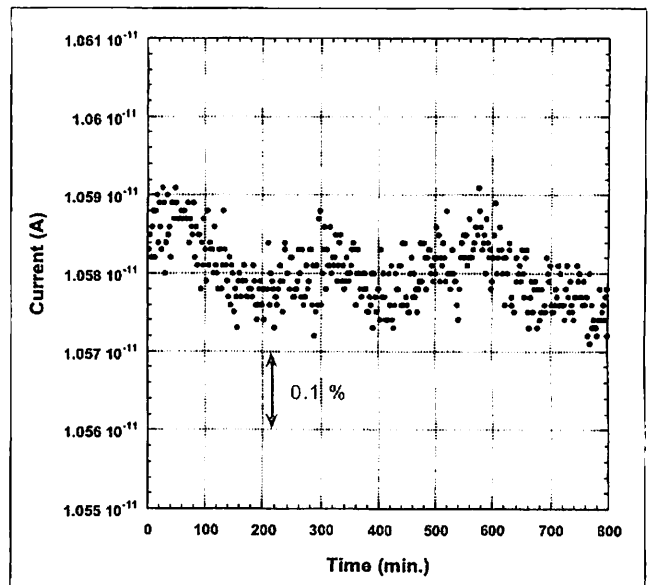


Fig. 3 測定系固有の安定性を評価するために、Fig. 2の測定系を用いてパンケーキ型の電離箱SX-30の信号電流を読み出した結果
使用した線源は ^{241}Am である。

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%の変動がみられた。しかしこれを改善するために調査を行い、X線発生装置の電流制御部の基板を取り換えたところ、●で示すように、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 $\pm 0.1\sim 0.15\%$ の範囲で安定するようになった。この変動は、Fig. 3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時間程度待ってから測定を行えばよいことが分かった。このような現象は、BIPMでも観測されており、測定

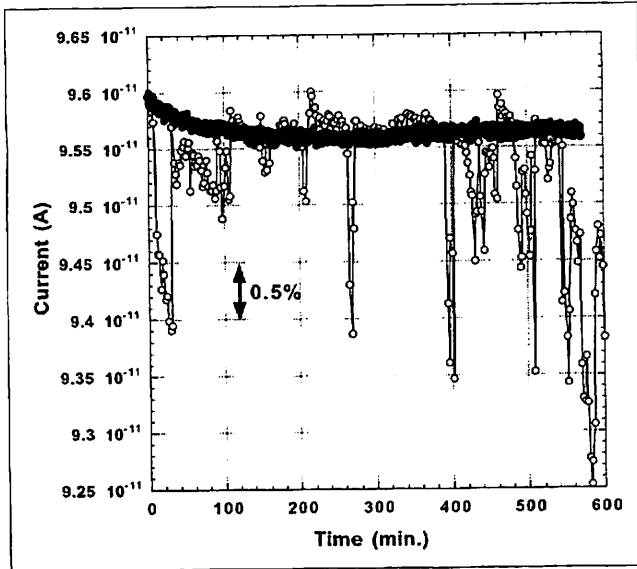


Fig. 4 自由空気電離箱により測定したX線信号電流の長時間安定性
横軸は照射を開始した時点からの経過時間である。X線管の条件は、管電圧30kV、管電流 5mA、電離箱への印加電圧は+2500Vである。○は電流制御系の改善前、●は改良後のデータを示す。

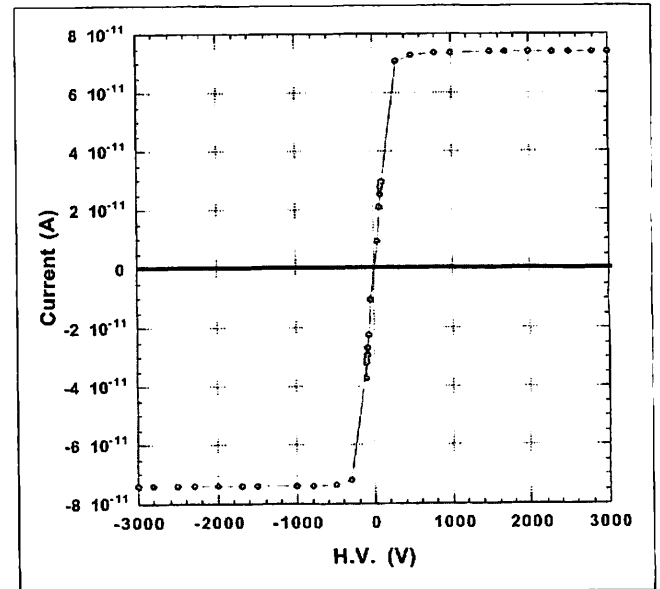


Fig. 5 自由空気電離箱の飽和曲線
X線管の条件は管電圧30kV、管電流 5mAである。横軸は電離箱へ印加する高電圧の値を示す。

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。

4-3 飽和曲線・極性効果

Fig. 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。

Fig. 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で比較した結果がFig. 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、陰イオン電流より陽イオン電流のほうが小さくなっている。この原因は不明だが、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いえる。

4-4 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、再結合の補正が必要となる。再結合効果は初期(柱状)再結合と一般(体積)再結合に分類される。初期再結合は、単一の初期電離飛跡中で発生するもので、線量率に依存しない。一般再結合は異なる電離飛跡間に起こる再結合であり、線量率が高くな

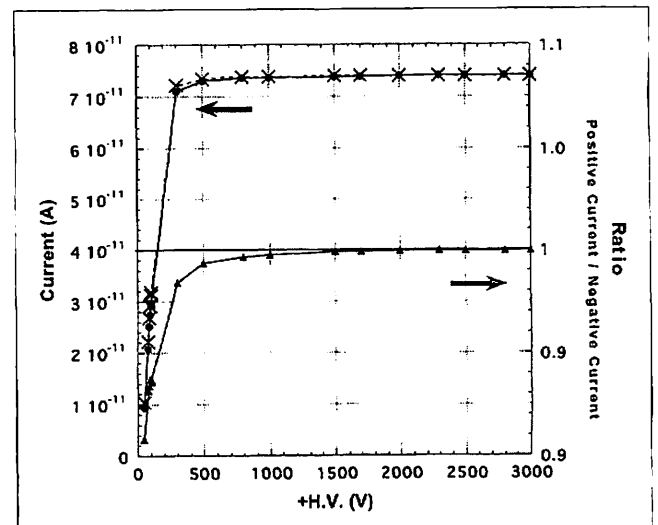


Fig. 6 自由空気電離箱の極性効果
X線管の条件は、管電圧30kV、管電流 5mAである。Fig. 5で得られた結果を、印加電圧が正の場合と負の場合で、印加電圧および信号電流を絶対値で示したものが左側の縦軸である。●は正電圧を印加した場合、×は負電圧を印加した場合に相当する。両者の比をとったものが▲(右側の縦軸)である。

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¹¹⁾を参考に、次式によって決定する。

$$\frac{1}{I_V} = \frac{1}{I_S} + \frac{a}{V} + \frac{b}{V^2} \dots\dots\dots(7)$$

$$k_{loss} = \frac{I_S}{I_V} \dots\dots\dots(8)$$

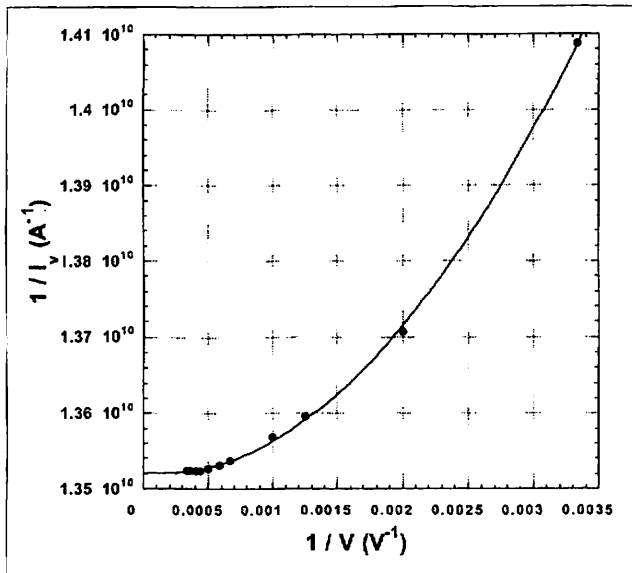


Fig. 7 再結合補正係数を求めるためにFig. 5で得られた電流の逆数を、電圧の逆数としてプロットした図

ただし

I_V ; 印加電圧 V のときの信号電流

I_S ; 飽和電流

V ; 印加電圧

k_{loss} ; 再結合補正係数

a, b ; それぞれ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、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流 I_S を決定することができる。このとき、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30kV、管電流5mAの場合の測定値を(7)式でフィッティングした結果をFig. 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、飽和電流 I_S は $7.3959 \times 10^{-11} (\text{A})$ 、印加電圧 V が2500V以上のときの再結合補正係数 k_{loss} は1.0002と評価される。

4-5 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。このため、発生するX線のエネルギースペクトルを測定してX線管最大電圧の実際の値を評価しておく必要がある。そこで、Si(Li)半導体検出器を用いて、X線のエネルギースペクトルを測定し、管電圧の校正を行った。

Fig. 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過してスペク

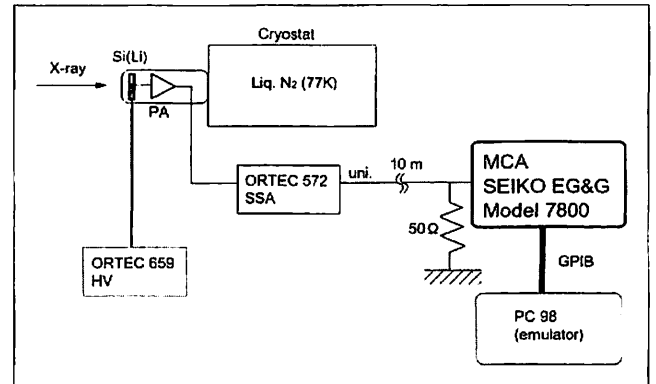


Fig. 8 Si(Li)半導体検出器を用いたX線のエネルギースペクトル測定系
検出器への印加電圧は-1500V、スペクトロスコピーアンプ(SSA)のshaping timeは $6\mu\text{s}$ である。

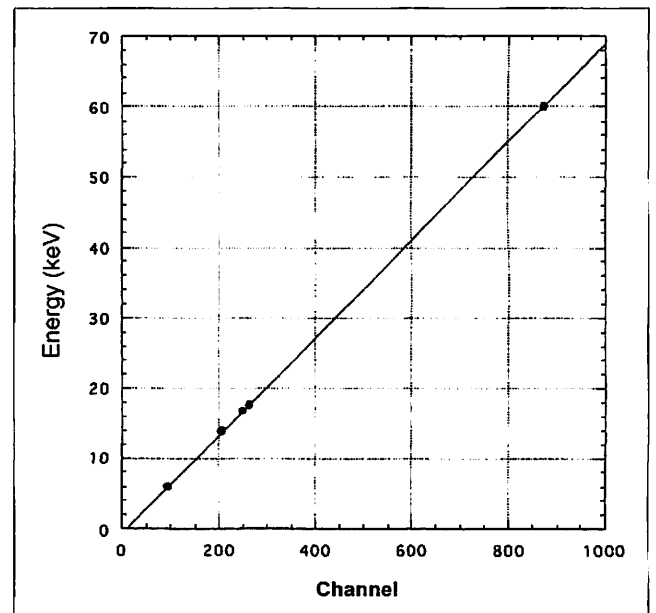


Fig. 9 Si(Li)半導体検出器のエネルギー校正曲線。横軸はマルチチャンネルアナライザのチャンネル数、縦軸は対応する光子のエネルギーである。放射線源としては、 ^{241}Am と ^{55}Fe を用いた。

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 ^{241}Am 、 ^{55}Fe より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(Fig. 9)。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を行い、その最大エネルギーを得た。その結果、2~20mA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

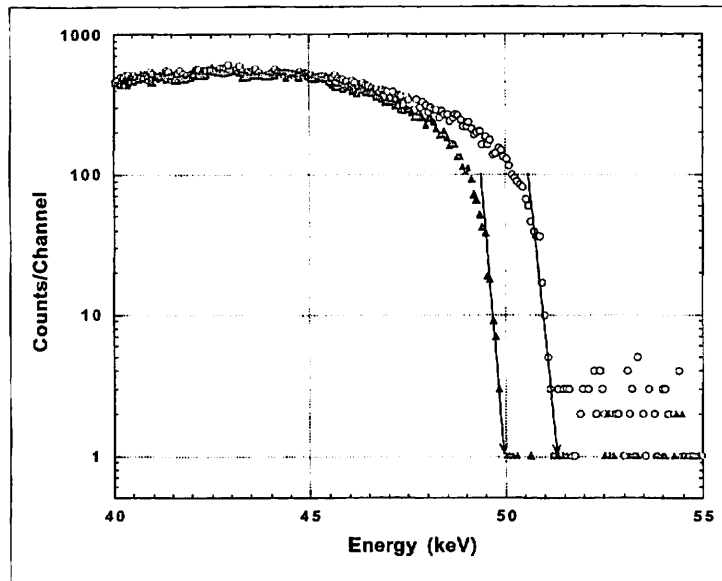


Fig. 10 管電圧の校正結果の一例
○は設定管電圧50kVでの出力スペクトル、▲は設定管電圧48.7kVでの出力スペクトル。管電流はともに20mA。

Table 1 今回設定した標準場の線質に対するAl半価層の厚み(mm)

管電圧(kV) \ QI	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
10	***	***	***	***	0.0506
15	***	***	0.0727	0.1139	0.1668
20	***	0.0982	0.1668	0.2632	0.3831
30	0.1668	0.3240	0.5380	0.8285	1.1649
40	0.3831	0.7455	1.1649	1.8006	2.5807
50	0.7455	1.3255	2.2783	3.0776	***

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という傾向があることが分かった。Fig. 10に例を示すように、設定管電圧を50kVにすると、最大電圧は約51.3kVとなった。これを50kVに合わせるためには、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。このような校正を他の電圧についても行って校正曲線を得た。

5. 線質の設定と国際比較

以上のことを踏まえて、種々の管電圧におけるX線について、 $QI=0.4\sim 0.8$ 、空気カーマ率 $2.5\times 10^{-6}\sim 1.0\times 10^{-2}\text{Gy/s}$ の場を不確かさ1~2%で設定した。結果をTable 1に示す。表中、***で表した線質については、エネルギーが低く、空気の固有濾過が大きいこと、および信号対雑音比が悪いことなどの理由により設定していない。

設定した標準場の妥当性を検証するために2004年11月にパリの国際度量衡局(BIPM)に、産総研の一次標準器である自由空気電離箱を持参し、BIPMの標準場

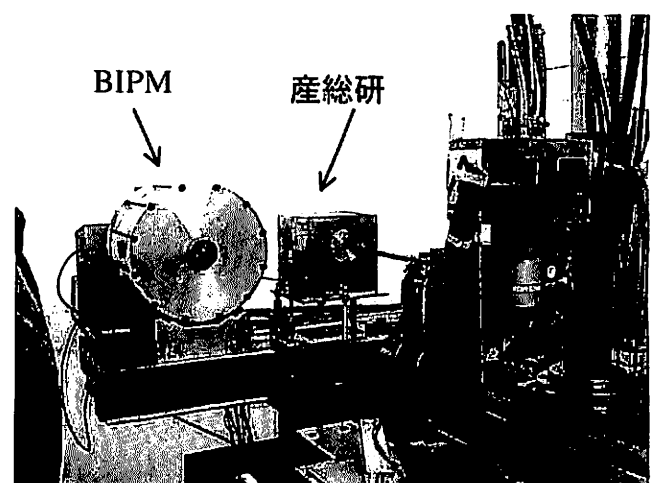


Fig. 11 BIPMでの国際相互比較の様子
向かって左側の円筒形のチェンバーがBIPMの自由空気電離箱、右側の立方体状のチェンバーが産総研から持参した自由空気電離箱。右側手前にはむき出しのX線管が見える。

に持ち込んで国際基幹比較を行った(Fig. 11)。使用した線質はBIPM独自の線質である。比較結果はTable 2に示すように、両者は0.2%程度で一致していた。

Table 2 国際基幹比較結果. 線質はBIPM特有のもので, QI が0.4に近い.

管電圧	10 kV	30 kV	25 kV	50kVb*	50kVa*
K_{NMIJ}/K_{BIPM}	0.9991	0.9985	1.0010	1.0020	1.0023
$\Delta(\%)$	-0.09	-0.15	+0.10	+0.20	+0.23

*線質が異なる

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について述べた。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線標準場の設定を行った(極性効果, 再結合補正, 管電圧の校正

等)。今後、標準場としての設定精度を向上させるために、まだ決定されていない補正係数の値を、測定および計算¹²⁾により評価することが必要である。また、モリブデン透過フィルターを用いた、マンモグラフィ用の標準場を立ち上げることも急務である。

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, 38(6, 7), 277, (1974).
- 2) 松本 健, 直井次郎: 中硬X線照射線量標準の再設定. 電子技術総合研究所彙報, 47(9, 10), 822-845, (1983).
- 3) Grimbergen TW, van Dijk E, and de Vries W: Correction factors for the NMi free-air ionization chamber for medium-energy x-rays calculated with the Monte Carlo method. *Phys Med Biol*, 43, 3207-3224, (1998).
- 4) Boutillon M, Allisy-Roberts PJ, and Burns DT: Measuring Conditions Used for the Calibration of Ionization Chamber at the BIPM. Report BIPM-01/04, (2001).
- 5) Lamperti PJ, and O'Brien M: NIST Measurement Services: Calibration of X-Ray and Gamma-Ray Measuring Instruments. NIST Special Publication, 250-258, (2001).
- 6) 高田信久, 小山保二, 黒澤忠弘: 空気カーマ標準の設定. 産総研計量標準報告, 1(2), 439, (2002).
- 7) CCEMRI 1985 BIPM: Com Cons Etalons Mes Ray Ionisants, 11, R157-158, (1985).
- 8) CCEMRI (I)/85-18
- 9) Hubbell JH, and Seltzer SM: 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, NISTIR, 5632, (1995).
- 10) ICRU report No.31: Average Energy Required to Produce an Ion Pair (Int Comm Radiat Units Meas, Bethesda, 1979).
- 11) Boutillon M: Volume recombination parameter in ionization chambers. *Phys Med Biol*, 43, 2061-2072, (1998).
- 12) Nelson WR, Hirayama H, and Rogers DWO: The EGS4 Code System, SLAC-265, (1985).