

## 産総研における軟 X 線空気カーマ標準の現状

納富昭弘

産業技術総合研究所 量子放射科 放射線標準研究室

はじめに

X 線空気カーマ標準は、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、医療における X 線を用いた診断及び治療での線量管理等の分野で必要とされている重要なものである。本稿で説明する軟 X 線は、管電圧 10kV~50kV 程度の X 線管(タングステン・ターゲット)から発生するものであり、その出力安定性は $\pm 0.1\%/h$ 程度である。この X 線管を用いて、自由空気電離箱(一次標準器)により、様々な X 線線質を実現するために必要な付加フィルターの厚さを決定し、それぞれ空気カーマ(率)の絶対値を測定して標準を設定している。国内では、連続 X 線の場合について、最大エネルギー $E_{max}$ に対する実効エネルギー $E_{eff}$ の割合である線質指標( $QI = E_{eff}/E_{max}$ )が使用されている。今回は、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  $2.5 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-2}$  Gy/s の場を設定したので報告する。

### 1. 自由空気電離箱を用いた X 線空気カーマ率の絶対測定

産総研では、電総研の時代から軟 X 線の標準を供給してきたが、装置の老朽化・更新・以前の設定から長時間が経過していること等の理由により、その信頼性が乏しくなっていた。そこで、2003年度の一年間をかけて、標準場の再設定を行った。

空気カーマの単位は[Gy(グレイ)=J/kg]であり、図 1 に示す様な自由空気電離箱による測定から、以下の式を用いて規程面位置での空気カーマ率  $K$  が求められる。

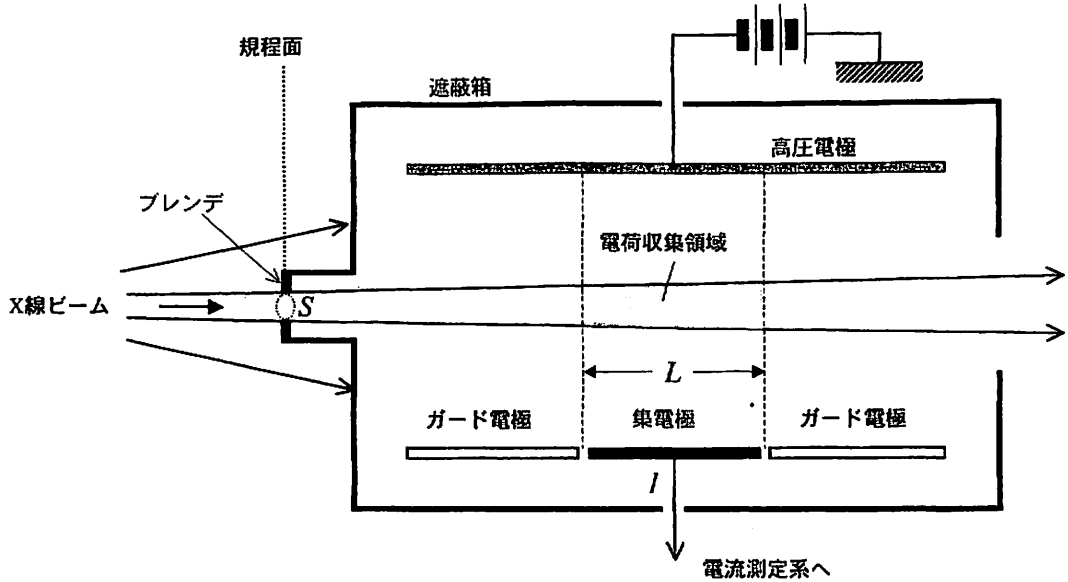


図1 自由空気電離箱による空気カーマ測定

$$\dot{K} = \frac{I}{\rho_{\text{air}} V} \frac{W_{\text{air}}}{e} \frac{1}{1 - g_{\text{air}}} \prod_i k_i$$

ここに、 $I$  は測定電流、 $\rho_{\text{air}} V$  は、ブレンデ(入射口)径と電荷収集電極の長さにより決まる電荷収集体積中の空気の質量(kg)、 $W_{\text{air}}/e$  は空気中に対のイオン対を生成するのに必要なエネルギー( $W$  値 J/C)、 $g_{\text{air}}$  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り失うエネルギーの割合である。産総研では、 $W_{\text{air}}/e$  の値としては国際的に合意されている  $33.97 \pm 0.05$  [J/C] を、X 線に対する  $g_{\text{air}}$  の値としては当面 0 を用いることとしている。 $k_i$  は各種の補正係数であり、再結合による電荷損失の補正、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、電極間隔が不十分のために生ずる二次電子の電離損失に対する補正などがあるが、大部分の場合、これらの補正量自身は 1% を超えることは少なく、無視はできないものの不確かさに及ぼす影響は比較的小さい。自由空気電離箱による軟 X 線の測定で一番影響の大きな補正は、規程面と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であり、管電圧が低いとこの補正量自身が 10% を超える場合もあるので、その評価については注意を要する。今回は各線質における空気の質量減弱係数を、X 線源と自由空気電離箱の距離を変化させることにより実験的に評価した値を用いた。

## 2. 標準場の線質と設定

連続 X 線の線質は、半価層(挿入した場合に X 線の強度が半分になるフィルター物質の厚さ:Half-value layer)で表すことが一般的である。今回は Al フィルターを用いた。表 1 に種々の管電圧と  $QI$  の組み合わせについて設定した半価層の値を示した。管電圧は、Si(Li)検出器によるスペクトル測定を行いその最大エネルギーを求めて、X 線制御装置の設定値を校正した。表 1 に示すように、ここでは  $QI$  と管電圧の全ての組み合わせについて標準場が設定されているわけではない。この理由は、表 1 の左上の部分(\*\*\*で示してある)については、規程面位置での一様な照射野(約 150mm  $\phi$ )を確保するために、X 線管のターゲット焦点から規程面までの距離が約 1m と設定されているので、空気による固有濾過が大きく、付加フィルター無し状態で既に半価層厚さの Al を挿入した場合としない場合の比が 0.5 を超えてしまうからである。また、表の右下部分の  $QI$  と管電圧が共に大きな組み合わせについては、挿入するフィルターの全厚さが大きくなりすぎる為に信号電流が小さくなって S/N 比が悪くなり、事実上測定が出来なくなるという理由による。

表 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)

$QI$ 管電圧 (kV)	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	***

この様な自由空気電離箱を用いた測定方法は、かなり以前にはほぼ確立されており、現在まで装置の改良・高精度化が進められてきたものの原理的には異なるものとはなっていない。しかし、モンテカルロシミュレーション技術の発展と共に、計測と計算の両面

から補正係数の精密化が近年、急速に図られてきている。

### 3. 国際度量衡局(BIPM)との国際比較

2004 年度には、技術マニュアルの整備を行うと共に、国際度量衡局(BIPM)において国際比較を実施し標準場設定方法の妥当性を確認した。すなわち、日本の一次標準器を BIPM の標準場に持ち込み直接比較を行った(写真、表 2)。また、同年度 2 月には、外国の標準研の専門家を招いてピアレビュー(技術的な妥当性の検証)を受けている。

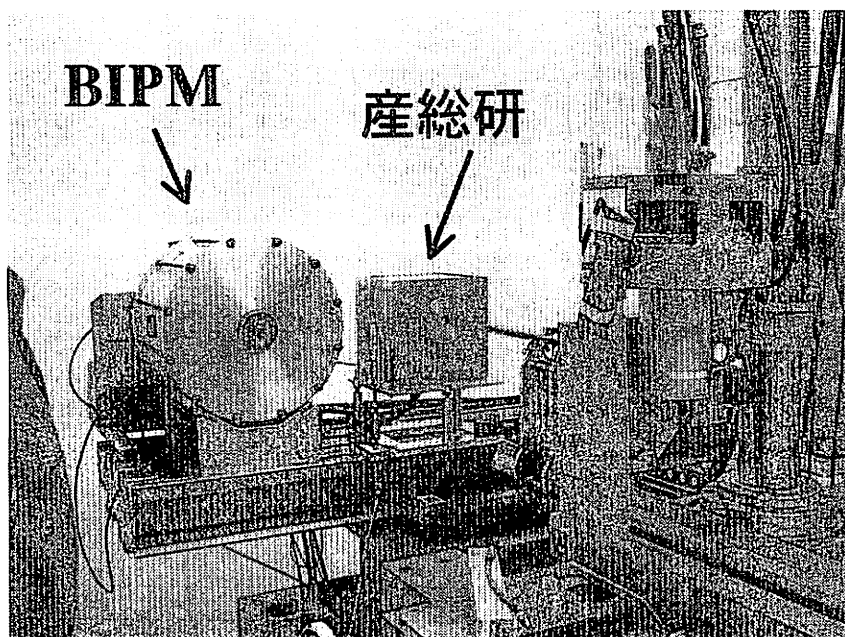


写真 BIPM での国際比較の様子

表2 BIPM との国際比較結果(線質は BIPM 特有のもので、 $Qf$  が 0.4 に近い)

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

\* 線質が異なる。

#### 4. 測定器の校正の実際

放射性同位元素を用いた  $\gamma$  線の場合は、一度標準場を設定しておけば半減期補正さえすればよくて、校正の度に絶対値測定を行う必要がない。しかし X 線管からは放射性同位元素の様に安定した放射線を得られないので、軟 X 線の場合は、電離箱等の校正を行うたびに空気カーマ率の絶対値を測定する必要がある。すなわち、被校正器物で X 線強度の測定を行い、その前後に自由空気電離箱で測定した空気カーマ率の平均と比較することによって校正定数を算出している。

#### 5. 課題と今後の展望

産総研では 2004 年度より新たに設定した標準場を使用して軟 X 線の標準供給を行っており、今のところ大きなトラブルもなく校正業務を続けている。

一方、最近、乳癌の早期発見の為にマンモグラフィを導入しようとする動きが盛んである。マンモグラフィ装置では、ターゲットやフィルターにタングステンではなくモリブデンを用いており、そのエネルギーは軟 X 線の領域である。今後、モリブデンを用いたマンモグラフィ用の標準設定を行う必要がある。

注)本稿は、産総研 TODAY 2005-09 pp.30 の記事に加筆、修正したものである。