

電離箱の電離電流に関連する諸現象の解明

(Study on Phenomena Corresponding to Signal Currents from Ionization Chambers)

量子放射部

高田信久, 小山保二, 関口広美, 黒澤忠弘

Loss of signal charges in ionization chambers due to initial recombination, volume recombination, and back diffusion, have been investigated. Equations and data were proposed which can be used for the estimation of initial and volume recombination loss of ions in ionization chambers at various conditions of electric field strength and humidity. A method to calculate diffusion loss was derived which can be used for any type of ionization chamber and a result for a cylindrical ionization chamber was compared with experimental results. Effects of electric fields on ionization were studied for two different types of ionization chambers. Effects of scattered photons on exposure measurements in x- and γ -ray fields were also studied for standardization of exposure.

1. はじめに

電離箱を使用して照射線量の絶対測定を行う場合, 種々の補正が必要である。ここでは主として, 電離箱の信号電流測定に直接関連する現象について議論する。また, X線や γ 線の照射場における散乱線の照射線量測定に対する影響についても検討する。

2. イオン電荷損失

電離箱の信号電流 I はイオンの一部が再結合と拡散損失によって失われるため, 飽和電流 I_0 よりも小さな値となる。再結合には, 初期再結合と体積再結合の2種類がある。再結合や拡散による電荷損失が小さい時には, 電荷収集係数 $f = (I/I_0)$ は

$$f = f_i f_d f_v \quad (1)$$

と表すことができる。ここで, f_i , f_d , f_v はそれぞれ, 初期再結合, 拡散損失, 体積再結合に対する電荷収集係数である。

線量測定において最も問題となるのは体積再結合であり, これまでに多くの研究が行われてきた。平行平板型電離箱の場合 f_v は下記の式で表される。

$$f_v = 1 - f_v \xi^2 / 6 \quad (2)$$

$$\xi = md^2 q^{1/2} / U \quad (3)$$

$$m = (\alpha / eK_+K_-)^{1/2} \quad (4)$$

ここで d は電極間隔, q は電離箱中の単位体積当たり単位時間当たり生成されるイオン対の正または負の電荷, U は印加電圧, α はイオンの再結合係数, e は電気素量, K_+ と K_- は正負のイオンの移動度である^{1,2)}。

初期再結合は, δ 線等によって電離されたイオン間で発生するクラスター再結合と, 高エネルギーイオンによる電離の場合のような柱状再結合に分けることができるが, どちらの場合も信号電流の逆数と印加電圧の逆数が直線関係にあると考えられている。

しかし, 初期再結合も体積再結合も電離箱内の空気湿度に依存することが知られている。これは, イオンが水分子と結合するためと考えられ, 体積再結合のパラメーターである(4)式の m 値は, 湿度と共に, 電離箱内のイオンの寿命によっても変化することが明らかになっている³⁾。従来, 多くの人によって発表されてきた m 値の値は, 測定者によって食い違い, 広い範囲に分布しているが, この原因は, 一つは上記の拡散損失に対する補正がなされていない事であり, 他の一つは, この湿度による違いと考えられる。

平行平板型電離箱を⁶⁰Co γ 線によって照射し, 初期再結合と体積再結合による電荷損失を湿度と電界強度

の種々の条件について測定し、それらのデータから、条件の異なる電離箱に対して再結合損失を計算できる手法を開発した。

2.1 初期再結合

初期再結合は、各空間で局所的に発生する物理現象であり、湿度と各位置の電界強度によって決まる。電界強度が一樣な平行平板型電離箱を用いて、種々の湿度と電界強度について測定した結果から、初期再結合に対する電荷収集係数は次の実験式で近似できることが知られている。

$$f_i = 1 - a_i [\ln(1/E + b_i) - \ln(b_i)] \quad (5)$$

ここで E は電界強度であり、 a_i と b_i はフィッティングパラメータである。広範囲の湿度について各種の電界強度で測定して得たこれらパラメータの値を内挿することにより、任意の条件における電荷収集係数の値を得ることができる⁴⁾。円筒型電離箱や球形電離箱のように電界強度が位置によって変化する時は、各位置の電界強度における再結合損失を(5)式を用いて計算し、電離体積全体の平均値として得ることができる。

2.2 体積再結合

平行平板型電離箱を用いて種々の湿度で測定した m 値を、Fig.1 に示す。横軸は電極間隔 d の二乗を印加電圧 U で割った値に、大気圧に対する水蒸気圧の割合、

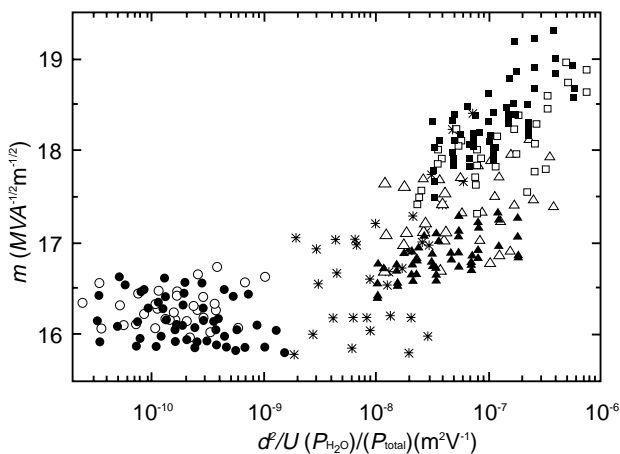


Fig.1 Values of m obtained for air with humidity of ○, 0.10%; ●, 0.11%; *, 5-10%; ▲, 23%; △, 39%; ■, 73%; and □, 81%. The value of the abscissa, $d^2/U(P_{H_2O}/P_{total})$ is proportional to the probability of ions to collide with water molecules in their lifetime drifting in the ionization chamber.

P_{H_2O}/P_{total} を掛けたものである。 d^2/U の値は、電離箱中におけるイオンの寿命に比例する量であるから、横軸は、電離箱中でイオンが、水分子と衝突する確率に比例する量と考えることができる。図は、 m 値がイオンの寿命によって変化することを明確に示している。また、横軸が $10^{-7} m^2/V$ 以上の範囲における測定結果は、横軸が同じ値でも、水蒸気圧が異なれば m 値も異なることを示している。これは、大気中の水分子が、それぞれ独立して存在するのではなく、湿度に依存して、幾つかが結合しており、その大きさによってイオンとの付着係数が変化することを示していると考えられる⁴⁾。

Fig.1 に示した各湿度での m 値のデータを d^2/U の関数として表し、それぞれのデータに対して関数をフィッティングした。これによって、任意の印加電圧での m 値を推定することができる。また測定データの無い湿度での値は、内挿によって得ることができる。この様にして得た m 値と(2), (3), (4)式を用いれば、種々の条件での平行平板型電離箱内における体積再結合損失の量を計算できる。

円筒や球形の電離箱における体積再結合損失については、(3)式に補正係数を加えた式が提案されている¹⁾。これらの式を用いる時、イオンの寿命による m 値の変化はどのように取り入れたら良いであろうか。正負イオンの移動速度が同じであると仮定し、また、再結合損失が少ないと仮定して、平行平板型、円筒型、球形の各電離箱の中で体積再結合によって失われるイオンの平均寿命を表す式を導出した。円筒型と球形のそれぞれの電離箱中で再結合によって失われるイオンの平均寿命が、平行平板型電離箱中で再結合によって失われるイオンの平均寿命と同じ時の m 値を使用すれば良いと仮定して、円筒型電離箱と平行平板型電離箱での平均寿命が同じになる時の、それぞれの電離箱の印加電圧の関係式を導出した⁴⁾。

2.3 拡散損失

電離箱において、正負のイオンの一部は、それぞれ正負の電極に拡散によって衝突し、そこで電荷を失う。平行平板型電離箱におけるこの拡散による電流の損失を δI とすると、

$$\frac{\delta I}{I_0} = \frac{2kT}{eU} - \frac{2}{e^{eU/kT} - 1} \quad (6)$$

で表される⁵⁾。ここで k はボルツマン定数、 T は気体の絶対温度である。同様に拡散方程式から、円筒と球形における拡散損失の式を導出した⁶⁻⁸⁾。(6)式の U の値は kT/e に比べて一般に大きいので、第2項は無視でき、

$$\frac{\delta I}{I_0} = \frac{2kT}{eU} \quad (7)$$

と表すことができる。この式が平行平板型電離箱における拡散損失の実験値と良く一致することは既に確認されている³⁾。また、この拡散損失は、湿度に依存しない。

(7)式は、それぞれの電極から、 kT/eU より近くで生成された正負の各イオンは、電離信号として寄与しない事を示唆している。即ち電極との電位差が kT/e より小さな空間で生成された正負のイオンは、拡散によってそれぞれの電極と衝突し、電荷を失うことを意味する。この事から、円筒と球形の電離体積内における拡散損失を表す近似式を、円筒と球形の体積内における電位の計算式から導出した⁶⁻⁸⁾。

上記の拡散損失に対する仮定は、理想的な円筒や球形をしていなくても、何らかの方法によって電離体積内の電位分布を知ることができれば、拡散損失を得ることができることを示している⁹⁻¹¹⁾。電総研で使用されている円筒型電離箱と球形電離箱について、電界強度分布を計算し、拡散損失の値を得た⁸⁾。Fig.2の実線は、電総研の円筒型電離箱(電離体積の外径40mm、長さ50mm、電荷収集電極の外径2mm、長さ40mm)について計算した拡散損失の値を示している。記号の●と○は

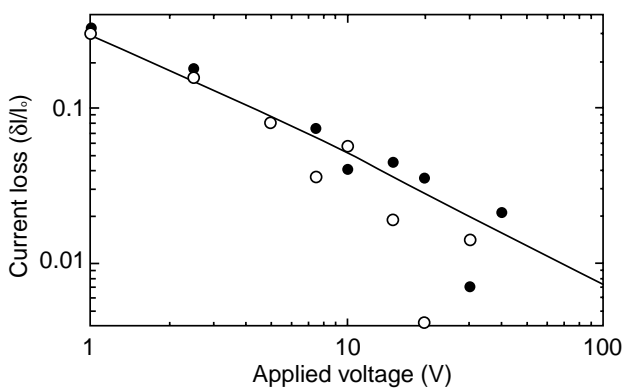


Fig.2 Decrease in output current for the ETL cylindrical ionization chamber. Solid line: estimated from the distribution of electrostatic potentials, ●: experimental results for positive applied voltage, ○: experimental results for negative applied voltage.

それぞれ正負の電圧を印加した時の測定結果を示している。印加電圧が大きい所では、拡散損失の量が小さいため測定誤差が大きい。電界分布から計算した推定値は実験結果と良く一致していることが知られる。

3. 電界効果

3.1 平行平板型電離箱

平行平板型電離箱を γ 線で照射した場合、電離体積に入る二次電子の大半は線源側の電極から放出されたものである。この電極に負電圧を印加すると二次電子は加速されるので、無電界の時よりも、空気の阻止能が小さくなり、電離量は減少する。正電圧を印加すると二次電子は減速され、阻止能が大きくなり、電離量は増加する^{12,13)}。二次電子がこの加速、あるいは減速によって得るエネルギーは、大略的には電極間の印加電圧によって決まり、電極間隔にはよらないと考えられる。グラファイト電極の平行平板型電離箱を⁶⁰Co γ 線で照射した場合、印加電圧 U による電離量の変化 I/I_0 は下記の式で表される⁴⁾。

$$I/I_0 = 1 + gU \quad (8)$$

ここで g は負電圧印加の時はほとんど一定で、 $1.84 \times 10^{-6} \text{ 1/V}$ であった。しかし、正電圧印加の時は、電極間隔によって異なり、

$$g = (19 \times 10^{-6} + 0.71 \times 10^{-3} d) / (1 + 732d) \quad (9)$$

によって表される値を示した。ここで d はm単位で表した電極間隔である。正電圧印加の時だけ、電離量の変化が電極間隔によって異なる理由は明らかでない。

3.2 自由空気電離箱

3.2.1 平行平板型自由空気電離箱

自由空気電離箱中で発生した二次電子は、電荷収集のためにX線ビームに直角に印加されている電界によって加速あるいは減速を受ける。自由空気電離箱中で発生した二次電子は空気中で停止するため、発生位置(X線ビーム位置)と停止位置の電位差に相当するエネルギーの増減を受ける。Fig.3は、EGS4によって求めた平行平板型電離箱に各エネルギーの光子が入射した時、電界によって加速される方向に放出された電子と減速される方向に放出された電子による空気への付与

エネルギーの増減分を、全ての電子による空気への付与エネルギーに対する割合として示したものである¹⁴⁾。従って、平行平板自由空気電離箱の信号電流に対する電界の影響は、図に示した同じ電界強度に対する正負の値の和である。電総研の自由空気電離箱で一般に使用している電界強度は20kV/mであり、この時の信号電流に対する電界の影響をFig.4に点線で示す。このわずかな影響は、加速される側に放出された電子の飛程は、加速された分だけ長くなり、その分より多くのエネルギーを電界から得るのに反し、減速される側に放

出された電子の飛程は、減速分だけ飛程が短くなり、失うエネルギーもその分だけ少なくなるため、エネルギーの得失の大きさに差が生ずることによる。なお、Fig.3において電界効果が40keV付近のエネルギーの光子に対して極大値となっているのは、光子エネルギーが増加するに従って、光電効果からコンプトン効果が主体となるため、発生する二次電子の平均エネルギーが一時的に減少することによる。

3.2.2 円筒型自由空気電離箱

X線の線量標準を担当している国外の研究所には、円筒型自由空気電離箱を使用している所が何ヶ所かある。円筒型自由空気電離箱では、円筒形の外電極の中心軸に沿ってX線ビームが入射され、電荷収集電極は、その軸から離れた場所にある。従って、X線ビームの回りの電界強度は、方向によって大きく異なるため、加速と減速の効果が打ち消し合う割合は小さくなると予想される。円筒型電離箱における電界効果の計算においては、各位置毎に電界強度が異なるため、直接EGS4で電界効果を計算せず、各エネルギーの光子によって放出される光電子とコンプトン電子の各1000個の二次電子について、無電界中における、発生位置から停止位置までの距離を計算した。これらの電子が、X線ビームの回りに1度ごとの各角度に放出されたとし、X線ビーム位置と停止位置の電位差に相当するエネルギーを、それぞれの二次電子が電界から受ける、あるいは電界によって失うとした。Fig.4に2つの異なる円筒型電離箱における信号電流に対する電界の影響を実線と破線で示した¹⁴⁾。2つの電離箱の外側の電極と電荷収集電極の半径は共にそれぞれ、15cmと0.5cmである。それぞれの電極の中心間の距離と印加電圧は、5cmと2kV(実線)、7.5cmと5kV(破線)である。予測したよりも信号電流に対する電界の影響が小さいが、これは、電荷収集電極の方向に放出され、強い電界によって大きな減速の影響を受ける放出角度は狭く、反対に、小さな加速の影響を受ける放出角度が広いため、全体として加減速の影響が打ち消しあうことによる。

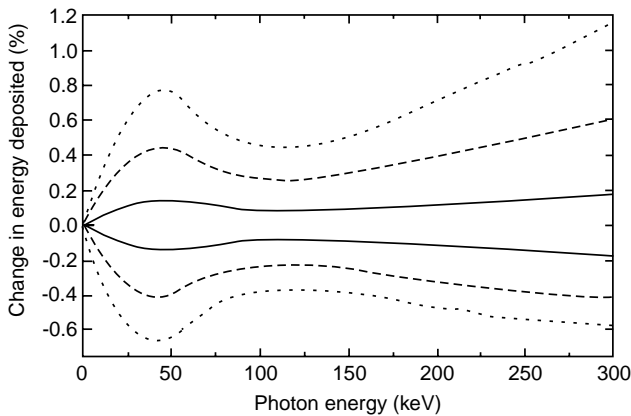


Fig.3 Increase and decrease in energy deposited by electrons due to electric fields in a parallel-plate free-air ionization chamber, shown as a ratio to total energy deposited by all accelerated and decelerated electrons. Solid lines indicate results for electric field of 20 kV/m, broken lines for 60 kV/m, and dotted lines for 100 kV/m.

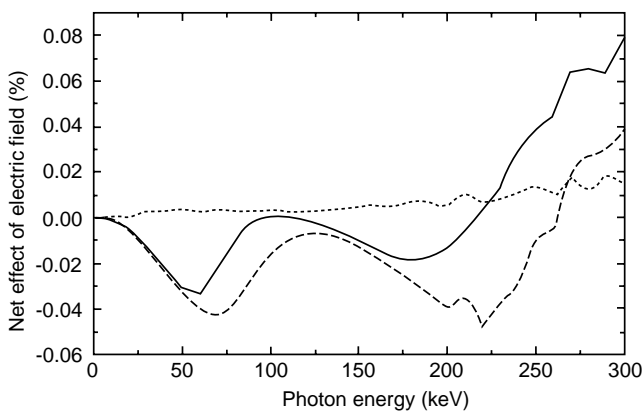


Fig.4 The net effect of electric field on signal currents from 2 different cylindrical free-air ionization chambers (solid and broken lines). The chambers have electrodes with same radiuses of 0.5 and 15 cm but the distances between centers of inner and outer electrodes and applied voltages are 5 cm and 2 kV (solid line) and 7.5 cm and 5 kV (broken line). Dotted line shows the net effect of electric field for parallel plate ionization chambers with the applied electric field of 20 kV/m.

4. 照射場

X線・γ線の校正を行うための照射場は、線量の絶対値が高精度で確定されていなければならない事は当

然であるが、場の特性についても十分解明されていないなければならない。線量測定器の感度は一般に、低エネルギー側で急激に変化する物が多いため、散乱線に関する検討は特に重要である。X線・ γ 線の線量標準場としての照射場における散乱線の影響について検討を開始した。

4.1 X線照射場

電総研の中硬X線源は平成7年に更新され、現在、管電圧50kVから250kVまでの各電圧について $QI=0.7$ の場が設定されている。この他に、国際的に使用されているフィルター条件での管電圧4点での場が測定されている。X線の照射場では直径の異なる幾つかのコリメーターが準備されているが、これらコリメーターの他に、付加フィルターからも散乱線が発生する。これらの散乱線による線量は、条件によっては数%に達する。自由空気電離箱はX線の入射口で絞られるため、X線ビーム軸に対して角度をなして入射した散乱線は自由空気電離では測定されない。従って、直径が大きなコリメーターを使用した場合は散乱線の割合が多くなると同時に、これらの散乱線は自由空気電離箱では測定されないことになる。広い照射野を必要とする時、これら散乱線を含めた線量の値の確定と共に、エネルギー分布に対する知見を得ることが重要な課題である。

4.2 γ 線照射場

γ 線照射場における散乱線については従来、電離箱のシステムによる散乱線の寄与について測定が行われ、補正が行われてきた。 γ 線の照射線量測定に使用される空洞電離箱では、空気と電離箱壁物質の質量エネルギー吸収係数比や質量阻止能比、電離箱壁による γ 線の減衰などの値が必要であるが、これらの値は、光子エネルギーに依存する値である。従って、散乱線が多い時には、散乱線を考慮したこれらの値を用いなければならない。現在、 γ 線照射装置のコリメーター等による散乱線成分について検討を進めている。

Fig.5に、電総研の ^{60}Co 大線源照射場において、線源を原点に置いた時に、線源から1mの位置での散乱線のエネルギー分布(—)と、同じ位置において、線源を原点から60cm突き出した時の散乱線のエネルギー分布(⋯)の計算結果を示す。どちらの分布も、直接到達す

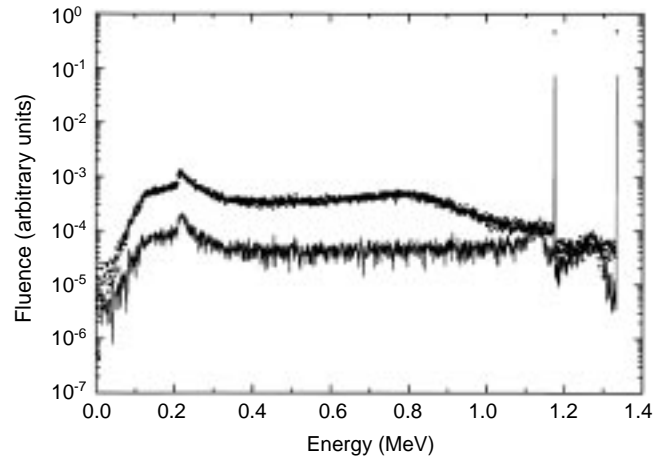


Fig.5 Energy spectra of γ rays at 1m from the normal place of ETL 148 TBq ^{60}Co γ ray source.
— : γ ray source is at the normal position,
⋯ : γ ray source is moved 60 cm forward

る γ 線の量で規格化してある。 γ 線源の位置によって散乱線成分が大きく異なることが知られる。また、この照射場において、コリメーターに、タンゲステンのディスクを入れて γ 線を吸収させ、低線量率の場を設定しているが、ディスクによる吸収は、散乱線成分の方が大きいため、ディスクを用いた時の方が、散乱線の割合が少ない場が設定できることが確認されている。

5. おわりに

種々の形式の電離箱が線量計測に用いられている。それらの電離箱による信号電流測定に関連するさまざまな現象について検討した。また、形式の異なる電離箱に対して共通して、それらの現象による影響を推定するのに用いる事ができる手法を開発した。これらの研究によって、電離箱に対する理解が一段と深まることを期待する。

現在、X線、 γ 線の線量標準の早急な再設定が求められている。種々の校正に対する要求に対応できる様にするためにも、標準場として使用されるX線、 γ 線照射場の特性を明確にし、より信頼性の高い標準確立を目指してゆきたい。

参考文献

- 1) J. W. Boag, "Ionization chambers", in Radiation Dosimetry, Vol. 2, F. H. Attix and W. C. Roesch, Ed., 2nd ed., (Academic,

New York: 1966) p.1

- 2) J. W. Boag, "Ionization Chambers", in The Dosimetry of Ionizing Radiation, Vol. II, K. R. Kase, B. E. Bjarngard, and F. H. Attix Ed., (Academic, New York: 1987) p.169
- 3) N. Takata, Phys. Med. Biol., **39** (1994) 1037
- 4) N. Takata, Zaizhe Yin, and Aiwu Li, IEEE Trans. Nucl. Sci., **NS-46** (1999) 326
- 5) P. Langevin, Le Radium, **10** (1913) 113
- 6) N. Takata, N. Takeda, and Z. Yin, Radiat. Prot. Dosim., **71** (1997) 309
- 7) N. Takata, N. Takeda, and Zaizhe Yin, ETL Technical Report, **TR-97-12** (1997)
- 8) N. Takata and Z. Yin, The Second Regional Mediterranean Congress on Radiation Protection, (Tel-Aviv 1997) p.16
- 9) N. Takata, N. Takeda, and Z. Yin, KEK Proc., **97-8** (1997) 201.
- 10) N. Takata, N. Takeda, and Zaizhe Yin, Proc. '97, International Conference on Radiation Dosimetry and Safety, (Taipei 1997) p. 50
- 11) N. Takata and Z. Yin, Radiat. Prot. Dosim., **81** (1999) 229
- 12) N. Takata and T. Matsumoto, Nucl. Instr. and Meth., **A320** (1991) 327
- 13) N. Takata, Radiat. Prot. Dosim., **61** (1995) 253
- 14) N. Takata and T. Sugita, KEK Proc., **2000-14** (2000) p.32

関連ラボ

放射線標準ラボ

(Ionizing Radiation Standard Lab.)

研究項目及び研究期間

照射線量計に関する研究

(平成12年度)