

電離箱のパルス放射線に対するイオン再結合損失

広島大学原爆放射能医学研究所障害基礎研究部門

安 徳 重 敏 砂 屋 敷 忠 竹 下 健 児

(昭和48年6月13日受付)

Ion Recombination in Ionization Chambers Exposed to Pulsed Radiations

Shigetoshi Antoku, Tadashi Sunayashiki and Kenji Takeshita

Department of Radiation Biology, Research Institute for Nuclear Medicine and Biology, Hiroshima University, Kasumi-cho, Hiroshima, 734, Japan

Research Code No.: 203

Key Words: Ion recombination, Ionization chamber, Pulsed radiation, Linac

The efficiencies of ion collection in ionization chambers exposed to pulsed radiations were measured using a Fricke dosimeter, and the results were compared with those obtained by theoretical calculation according to Boag.

The collection efficiencies experimentally determined for Ionex, and JAPM substandard dosimeters did not completely agree with those calculated theoretically unless an additional factor was introduced in the theoretical formula or the value of μ in the theoretical formula varied from 750 to 1000 $\text{V}\cdot\text{cm}\cdot\text{esu}^{-1}$ for charge densities ranging from 0.1 to 5.0 $\text{esu}\cdot\text{cm}^{-3}$ per pulse. These results were confirmed in the study of collection efficiency by varying the polarizing voltages of a JAPM dosimeter. As the charge density of pulsed radiations in medical use is generally lower than 1.0 $\text{esu}\cdot\text{cm}^{-3}$ per pulse, the value of 750 $\text{V}\cdot\text{cm}\cdot\text{esu}^{-1}$ was appropriate in the theoretical calculations. However, it was found that this theory could not be applied to the chambers of complex geometry, such as the Radocon 575-602 chamber.

緒 言

ベータートロンやリニア・アクセラレータによる高エネルギー放射線の線量測定には、種々の線量計が利用されているが、これらのうちで指頭型電離箱が便利でかつ再現性が良いことなどの理由で最も広く使用されている。高エネルギー放射線の線量の基準化においても主として電離箱が取り上げられている⁵⁾³⁾。しかしながら、パルス放射線の正確な線量測定には、電離箱のイオン再結

合による線量指示値の低下に対する補正は重要な因子の1つである。電離箱のイオン再結合についての理論的考察は Boag²⁾ によつて、また実験的には Ellis および Read³⁾⁴⁾ によつて報告されている。Ellis および Read は基準線量計として平行平板型の電離箱を用いているが、本研究では Fricke 線量計を基準として、一般に利用されている数種の指頭型電離箱のイオン捕集効率を実験的に測定し、理論的計算から得られる値と比較した。

材料および方法

放射線は、35 MeV リニア・アクセラレータ (NELAC-4030, 日本電気—Varian 製) の25MV X線を使用した。本装置の標準動作時における電子エネルギーは25 MeV, ピーク電流 320mA, パルス巾 3.3 μ sec である。パルス繰返しは1秒当り15, 60, 120の3段階となつてゐる¹²⁾。線量率の増減は主として、照射距離およびピーク電流を加減することによつて行なつた。照射野内の線量分布の不均一性については、随時 Fricke 線量計および電離箱で測定し、電離箱の位置における線量率が電離箱の両側に置かれた化学線量計の平均値となるようにした。

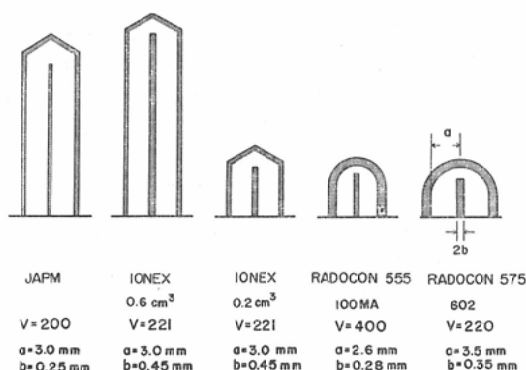


Fig. 1. Size and polarizing voltage of the chambers used.

V; Polarizing voltage, a: Inner radius of outer electrode, b: Radius of central electrode.

酸 (H₂SO₄): 0.4Mを溶解して作製した。

電離箱の両側に 1.5cm ϕ ×4 cmの硬質ガラスアンブル入り Fricke 線量計を並べ、4 cmのビルドアップを持つアクリライト製ファントム中で同時照射を行なつた。実験的捕集効率 f は化学線量計の線量値に対する電離箱の“R”値の比を求め、本実験で使用した最低の電荷密度(約 0.1esu $\cdot$ cm⁻³/パルス)に対する相対値として示した。絶対的捕集効率も計算できるが、アクリライトファントム中における電離箱の C λ および化学線量計の G 値の不正確さなどに起因する誤差を除くため相対値とした。

理論的捕集効率, f , は生じた電荷に対する捕集電荷の比として定義され, Boag²⁾ に従つて次式によつて計算される。

$$f = \frac{\nu}{e^2 - 1}, \quad \nu = p \cdot \mu \cdot \frac{(a-b)^2}{V} \cdot k^2,$$

$$k^2 = \left[\frac{(a/b + 1)}{(a/b - 1)} \cdot \frac{\ln a/b}{2} \right]$$

ここで μ は再結合効率およびイオンの移動度に関係した定数 (V $\cdot$ cm $\cdot$ esu⁻¹), p はパルス当り捕集されたイオン密度 (esu $\cdot$ cm⁻³), V は印加電圧, a および b はそれぞれ電離箱の空洞および中心電極の半径である。

J A P M線量計については主として印加電圧と捕集効率の関係を調べ、他の線量計については、一定電圧におけるイオン密度と捕集効率の関係を調べた。

結 果

Ionex 0.6 cm³ 電離箱について実験的および理論的計算によつて得られた捕集効率を第2図に示す。理論式の μ の値として色々な値¹⁻⁴⁾⁶⁾が報告されているが、図には $\mu = 750^6)$, $\mu = 1000^4)$ V $\cdot$ cm $\cdot$ esu⁻¹ についての値が実線で示されている。いずれも捕集効率は本実験で使用した最低の電荷密度(約 0.1esu $\cdot$ cm⁻³/パルス)に対する相対値で表されている。

25MV X線に対するアクリライト・ファントム中の電離箱の C λ 値として0.85¹⁰⁾および Fricke 線量計の G 値として15.7⁵⁾を使用して、両者の吸収線量の比から絶対的捕集効率を計算すると、

電離箱は Ionex 0.6 cm³ および 0.2 cm³ 電離箱 (Nuclear Enterprises 製), J A P M標準線量計 I 型 (応用技研製) ならびに Radocon 555, 100MA 電離箱 および Radocon 575, 602 電離箱 (Victoreen 製) の5種を使用した。本実験で使した J A P M線量計は中国地区の線量基準化⁷⁾のために本研究所に設備されたものである。これらの電離箱の幾何学的形状および印加電圧を第1図に示す。電離箱の大きさは、X線写真および他の研究者の資料¹¹⁾を参照して決定した。Fricke 線量計は、3回蒸留水にモル塩 (FeSO₄ $\cdot$ (NH₄)₂ SO₄) : 10⁻³M, 食塩 (NaCl) : 10⁻³M ならびに硫

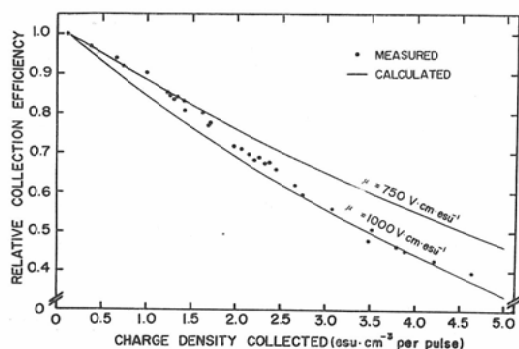


Fig. 2. Collection efficiency of an Ionex 0.6 cm³ chamber plotted against charge density collected. Collection efficiencies were normalized to that for 0.1 esu·cm⁻³ per pulse.

0.1 esu·cm³/パルスで0.98という値が得られた。それ故に絶対的捕集効率は図に示されている値より約2%低い値が期待される。

実験的に得られた捕集効率は、電荷密度が1.6 esu·cm⁻³/パルス以下では $\mu = 750 \text{ V} \cdot \text{cm} \cdot \text{esu}^{-1}$ 、それ以上は $\mu = 1000$ として計算した理論値と実用上一致した。しかし厳密には μ の値がみかけ上電荷密度の函数として変化すると仮定しないと、実験値を理論で説明できない現象がみられた。

第3図に Ionex 0.2 cm³ 電離箱の捕集効率を示す。実験的に得られた捕集効率は 0.6 cm³ のそれに比べて、わずかに低い値が得られた。これは後述するごとく、電離箱の先端の円錐部分の割合が 0.6 cm³ の電離箱に比べて大きいことで説明できる。

2種の Radocon 線量計の捕集効率は、Ionex 0.6 cm³ 電離箱との比較によつて求めた。第1表に Radocon 555, 100MA 電離箱について得

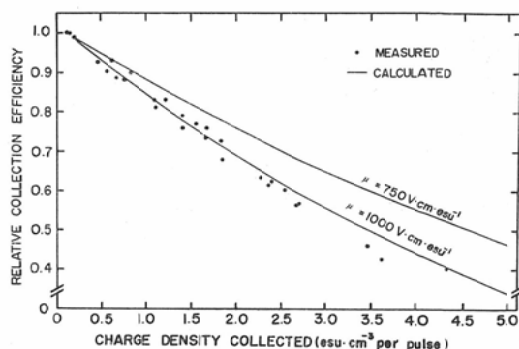


Fig. 3. Collection efficiency of an Ionex 0.2 cm³ chamber plotted against charge density collected. Collection efficiencies were normalized to that for 0.1 esu·cm⁻³ per pulse.

られた結果を示す。再結合損失に対する補正を行わない場合は、Ionex に対する Radocon の比は電荷密度と共に大きくなる。しかし $\mu = 750 \text{ V} \cdot \text{cm} \cdot \text{esu}^{-1}$ としてイオン再結合損失に対する補正を行えば、電荷密度に関係なく両者の比は一定

Table 2 Collection efficiency of a Radocon 575—602 chamber by comparison with an Ionex 0.6 cm³ chamber

Charge density collected (esu·cm ⁻³ per pulse)		Charge density corrected for recombination ($\mu = 750 \text{ V} \cdot \text{cm} \cdot \text{esu}^{-1}$)		
Ionex	Radocon	Ionex	Radocon	
			Cylindrical	Spherical
0.101	0.093	0.103	0.095	0.103
0.143	0.131	0.146	0.134	0.148
0.566	0.477	0.612	0.533	0.792
0.657	0.512	0.720	0.579	0.888
1.13	0.819	1.33	0.998	2.04

Table 1 Collection efficiency of a Radocon 555—100 MA chamber by comparison with an Ionex 0.6 cm³ chamber

Charge density collected (esu·cm ⁻³ per pulse)			Calculated collection efficiency (μ = 750 V·cm·esu ⁻¹)		Radocon/Ionex Corrected for recombination
Ionex	Radocon	Radocon/Ionex	Ionex	Radocon	
0.516	0.529	1.03	0.95	0.97	1.00
0.704	0.722	1.03	0.92	0.96	0.99
0.901	0.940	1.04	0.89	0.94	0.99
1.21	1.31	1.08	0.85	0.92	1.00

となる。これは Radocon 100MA 電離箱の印加電圧が高いため、捕集効率が Ionex 電離箱に比べ大きいことに起因する。他方 Radocon 575, 602 電離箱について得られた値は第2表に示す如く、電離箱を円筒型または球型として計算したいづれの理論値とも一致しなかつた。これは電離箱の幾何学的形状が半球型に近いとと考えられる。

JAPM 線量計の印加電圧を 50 V から 800 V まで変化させて得られた捕集効率を第3表に示す。この値は C_2 , G 値など先述の数値を用いて得ら

Table 3 Collection efficiency of a JAPM dosimeter by polarizing voltage and charge density

Polarizing voltage (V)	Charge density liberated (esu·cm ⁻³ per pulse)			
	0.35	0.74	1.67	3.62
50	0.72	—	0.40	0.26
203	0.93	0.86	0.72	0.56
404	0.96	0.93	0.85	0.73
600	0.98	0.95	0.90	0.82
800	0.99	0.97	0.93	0.87

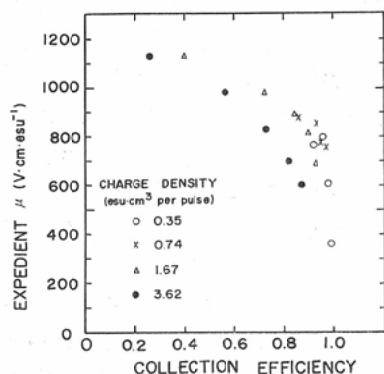


Fig. 4. Value of μ calculated according to experimental data, plotted against collection efficiency-JAPM dosimeter

れた絶対的捕集効率である。この測定値と理論値を一致させるためには Boag の理論式に補正項が必要である。この補正項を μ に含ませた、みかけ上の μ 値を計算し捕集効率に対してプロットしたのが第4図である。実験値に多少の変動はみられるが、いずれの電荷密度においても、捕集効率の

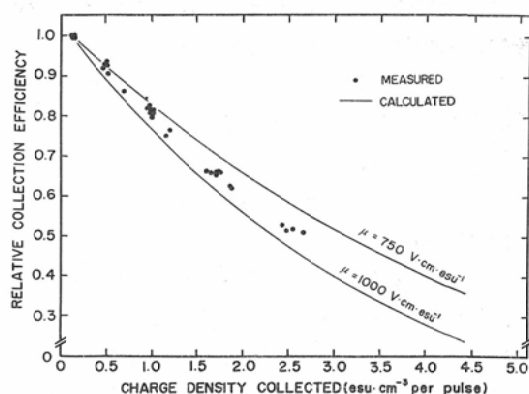


Fig. 5. Collection efficiency of a JAPM standard dosimeter plotted against charge density collected. Collection efficiencies were normalized to that for 0.1 esu·cm⁻³ per pulse.

Table 4 Effect of pulse repetition rate on recombination in an Ionex 0.6 cm³ chamber

Pulse repetition rate (pulse per second)	Charge density (esu·cm ⁻³ per pulse)	Average exposure rate ("R"/min)	Ratio of collection efficiency
15	0.12	110	1.00
15	0.64	580	0.93
15	1.33	1200	0.84
60	0.64	2310	0.93
60	1.33	4790	0.84

Table 5 Effect of pulse width and beam current on recombination in an Ionex 0.6 cm³ chamber

Pulse width (μ sec)	Beam current (mA)	Charge density collected (esu·cm ⁻³ per pulse)	Relative collection efficiency	
			Measured	Calculated
1.0	320	0.48	0.98	0.99
1.6	160	0.40	1.00	1.00
3.3	80	0.46	0.99	0.99
1.6	320	0.77	0.95	0.95
3.3	160	0.81	0.94	0.94
3.3	320	1.48	0.83	0.83

低下と共にみかけ上の μ 値は増加する傾向が示されている。JAPM の規定電圧である 200 V における電荷密度と捕集効率は、他の線量計と同じような傾向で、大差はみられなかつた (第5図)。

パルス繰返し、ビーム巾、ビーム電流による実験値と理論値の違いは認められなかつた(第4, 5表). イオン再結合に関係するのはパルス当りの電荷密度であることは Boag²⁾ によつて理論的に指摘されている.

考 按

McGowan⁶⁾ は通常の実験室における非乾燥空気に対する μ 値として $750\text{V}\cdot\text{cm}\cdot\text{esu}^{-1}$ を得ている. Ionex, JAPM および Radocon 555線量計について実験的に得られた値は, 比較的低い電荷密度では McGowan によつて報告された値と良い一致を示した. Ellis および Read⁴⁾ は Farmer 電離箱について $1\sim 50\text{esu}\cdot\text{cm}^{-3}$ の電荷密度で μ 値を1000とすると実験値を理論で説明できることを報告している. Farmer 電離箱と本実験で使用した Ionex および J A P M 電離箱と幾何学的型状が類似しているが, Ellis および Read が研究した電荷密度の範囲では, 本研究の結果も $\mu = 1000\text{V}\cdot\text{cm}\cdot\text{esu}^{-1}$ を支持する値が得られた. Ellis および Read は μ が $750\text{V}\cdot\text{cm}\cdot\text{esu}^{-1}$ と一致しない理由として Farmer 電離箱の円錐型尖端の影響の他に寿命の短いイオンについての理論的考察の必要性を挙げている. Ionex 0.6cm^3 および 0.2cm^3 の円錐型尖端の容積に占める割合は, それぞれ3%および9%である. 球型と仮定して計算した円錐型尖端の捕集効率に及ぼす影響は 0.6cm^3 の電離箱では1%以下, 0.2cm^3 では約3%となる. Ionex 0.2cm^3 電離箱の捕集効率が 0.6cm^3 のそれに比べてやや低いのはこのためであると考えられる.

理論式における μ 値は電荷密度によつて変る性質のものではない. しかし理論式に電荷密度と共に変化する新たな補正項を導入するか, また μ 値が変化することがなければ実験値を説明できないという現象がみられた. 実験的に考えられる誤差としては, 照射野内の線量分布の不均一性が挙げられる. この影響は極力小さくする様に実験的に努めた. J A P M 線量計について, 一定の電荷密度で印加電圧を変えた結果でも同じ傾向がみられることは, この現象が実験誤差に基づくものでは

なく, イオン再結合に本質的に附随するものであることを示唆している.

考えられうる原因の1つとして, 電離箱内の空気の化学組成の変化が挙げられる. 組成の変化についての実験的追求は行なわなかつたが, オゾンの発生および微量成分の放射線による分解などが考えられる. 空気の化学変化によつてイオン再結合効率が電荷密度および線質によつて変化することは Sayer⁹⁾ によつて報告されている. また McGowan⁶⁾ は, 再結合効率が実験日によつて約20%の違いがみられ, 実験誤差をはるかに超えた経日の変動を認めている. これも空気中の微量成分の変化がその原因とされている. 今後の課題としては, 本研究で使用した以外の電離箱についての実験的研究および短半減期のイオンの μ 値に関する理論的考察が必要であろう.

要 約

パルス放射線に対する円筒型電離箱のイオン捕集効率を化学線量計との比較によつて求め, 理論的計算値と比較した.

実験的に得られた Ionex および J A P M 線量計の捕集効率は, 理論式に新たな補正項を導入するかまたは μ 値が変化すると仮定しないと理論的計算値と完全には一致しなかつた. 電荷密度が 0.1 から $5.0\text{esu}/\text{パルス}$ の範囲で, μ 値が 750 から $1000\text{V}\cdot\text{cm}\cdot\text{esu}^{-1}$ に変化すると仮定すると理論と実験値が一致した. この傾向は J A P M 線量計について, 印加電圧の増減による捕集効率についても認められた. 放射線治療に使用されているパルス放射線の電荷密度は一般に $1.0\text{esu}\cdot\text{cm}^{-3}/\text{パルス}$ 以下であるので計算によつて捕集効率を求める場合は, μ 値として $750\text{V}\cdot\text{cm}\cdot\text{esu}^{-1}$ が適当である. しかし Radocon 575—602電離箱のような複雑な幾何学的型状をもつものには, 理論的計算は適用できないことが示された.

謝辞 本研究を通して技術的援助を賜つた竹岡清二, 加藤和司ならびに安田キミ子の諸氏に感謝の意を表する.

(本研究の一部は文部省科学研究費の援助により行なわれた.)

文 献

- 1) Boag, J.W.: Brit. J. Radiol., 25, (1952), 649—650.
 - 2) Boag, J.W.: Ionization Chamber. In Radiation Dosimetry II, 2nd edition, edited by F.H. Attix and W.C. Roesch. pp. 1—72. Academic Press, New York and London, 1966.
 - 3) Ellis, R.E. and READ, L.R.: Phys. Med. Biol., 14 (1969), 293—304.
 - 4) Ellis, R.E. and READ, L.R.: Phys. Med. Biol., 14 (1969), 411—416.
 - 5) ICRU: Report 14. Radiation Dosimetry: X-rays and gamma rays with maximum photon energies between 0.6 and 50 MeV. ICRU Publications, Washington D.C., 1969.
 - 6) Mc Gowan, S.: Phys. Med. Biol., 10 (1965), 25—40.
 - 7) 日本医学放射線学会物理部会：日本医放会誌, 31 (1971), 723—772.
 - 8) HOSPITAL PHYSICISTS ASSOCIATION: Phys. Med. Biol., 14 (1969), 1—8.
 - 9) Sayers, J.: Proc. Roy. Soc. A., 169 (1938), 83—101.
 - 10) Chulzi R.J.: Phys. Med. Biol., 15 (1970), 563—565.
 - 11) 高久祐治：日本医放会誌, 30 (1970), 730—733.
 - 12) 竹下健児, 安德重敏, 砂屋敷忠, 大谷四郎, 上総中童：日本医放会誌, 30 (1970), 687—697.
-