



Title	円筒型電離箱の再結合損失
Author(s)	川島, 勝弘; 平岡, 武; 星野, 一雄 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1977, 37(2), p. 185-191
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/19929
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

円筒型対電離箱の再結合損失

放射線医学総合研究所物理研究部

川島勝弘 平岡武
星野一雄 松沢秀夫

(昭和51年8月6日受付)

(昭和51年8月30日最終原稿受付)

Determination of Saturation Current in Cylindrical Paired
Ionization Chambers for Fast NeutronsKatsuhiro Kawashima, Takeshi Hiraoka, Kazuo Hoshino and
Hideo Matsuzawa

Division of Physics, National Institute of Radiological Sciences

Research Code No.: 203

Key Words: Initial recombination, Neutron dosimetry, Saturation curve, Paired chambers

A cylindrical tissue equivalent chamber, filled with tissue equivalent gas, and a cylindrical graphite or carbon mixed plastic chamber filled with carbon dioxide were used as paired chambers for the determination of neutron and gamma absorbed doses in tissue irradiated with neutrons produced by bombarding deuterons of 2.8 and 30 MeV on thick beryllium targets. Experimental and theoretical evidence is presented to show that initial rather than general recombination takes place in such chambers. The reciprocal of the current, i , in cylindrical chambers is plotted against the reciprocal of the polarizing voltage, V , the same as in parallel plate chamber, and extrapolated linearly to $1/V = 0$ to determine the saturation current. The simple demonstration for plotting $1/i$ against $1/V$ is also derived according to the Jaffe theory. This linear extrapolation is strictly only correct when the values of V at which the chambers are operated without multiplication of ions are more than 200 V for the chambers used. The correction for initial recombination for 2.8 MeV-n and 30 MeV-n to the reading i which is taken at 200 V is about 2% and 1-4% for tissue equivalent chambers and about 5% and 8-15% for graphite or carbon mixed plastic chambers, respectively.

I. 緒 言

サイクロトロンをはじめ、バンデグラーフ、中性子発生装置などから発生する速中性子線や、 ^{252}Cf の自発核分裂による速中性子が広く医学・生物学の分野でも利用されている昨今である。しかしこれら速中性子線は多少の差はあれγ線が付随して

いる。

こうした中性子とγ線との混在場中の組織の吸収線量の寄与分を別々に求める方法の一つとして対電離箱法が利用されている。著者らは対電離箱に関する検討を続けているが^{1)~4)}、いくつかの問題点のうち再結合損失の補正に関して興味ある知

見を得るに至つたので報告する。

速中性子線で電離箱を照射した場合、H, C, O, N などの反跳核や (n, α) 反応による α 線が荷電粒子として飛び出してくる。平岡ら³⁾も報告しているように、X, γ 線を照射したときとは異なり、一般再結合 (general or volume recombination) の他に初期再結合 (initial recombination) に対する補正も施す必要がある。Delafield ら⁶⁾は 15MeV, Kühn は 3.3MeV と 15MeV 中性子を平行平板型外挿電離箱に照射し、Jaffe の理論⁸⁾にもとずき、収集電離電流値 i と電極間電圧 V のそれぞれの逆数をプロットしたとき直線となることから補正值を求めたと述べている。しかし、補正の程度、直線性の成立する範囲などについては不明である。

我々はこれらの点に関し、30MeV および 2.8 MeV の重陽子を厚いベリリウムターゲットに衝突させたときに発生する中性子線を用い、平行平板型の代りに大きさなどの違う円筒型対電離箱について実験を行なつた。

II. 実験条件および対電離箱

重陽子加速は、30MeV の場合は AVF サイクロトロン (ターゲット電流 $I_d=20\mu A$)、2.8MeV の場合はバンデグラフ ($I_d=100\sim 150\mu A$) を用いて行なつた。Be ターゲットは、それぞれの重陽子の飛程に比べ十分厚いものを用いている。こうして Be(d, n) 反応により生じた連続エネルギースペクトルをもつ中性子線を、30MeV-n および 2.8MeV-n と呼ぶことにする。

線源・電離箱間距離 SCD および照射野 A は、30MeV-n, 2.8MeV-n に対しそれぞれ SCD=200 cm, $A=11.4\times 11.4\text{cm}^2$ および SCD=32cm, A: オープンである。全組織吸収線量率は 27rad/min および 3.2~4.8rad/min である。

電離箱は Table 1 に示すように A, B, C, D の4つのタイプのものを用いたがいずれも円筒型である。タイプD以外はガスフロー型である。タイプDは封じ切り型でかつ先端部も他の平端型に対し半球型をしている⁹⁾。壁物質とガスとの組み合わせは、組織等価プラスチック⁹⁾と組織等価ガス

(以後 TE-TEG と略記) のものと、グラフアイト (タイプ B と D) もしくは 80% テフロンと 20% カーボンの混合プラスチック (タイプ A と C) と炭酸ガスの組み合わせ (どちらも以後 C-CO₂ と略記) の2種類を対として用いている。

なお Table 1 には円筒型を平行平板型と比較するために、等価ギャップ幅 e.g.l., $(a-b) K_{cyl}$, も示した。ただし

$$K_{cyl} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{a+b}{a-b} \right) \ln(a/b)} \quad (1)$$

2a は電離箱の内径、2b は集電極の太さを表わす。

なお、印加電圧 V をかけたとき集電極表面での電場 X は、

$$X = V / [b \ln(a/b)] \quad (2)$$

従つて、Boag によれば $b \ln(a/b)$ は飽和特性を検討する上での1つの目安となる⁸⁾のでこれも Table 1 に示した。

III. 一般再結合と初期再結合

連続的に放射している放射線に対する一般再結合 (線量率に依存する) は、飽和電離電流値を i_s とすると次のように表わせる⁸⁾。

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{i_s} + \frac{\text{const}}{V^2} \quad (3)$$

従つて $1/i$ を $1/V^2$ に対してプロットすれば直線となる。

一方、線量率には無関係な初期再結合の場合、 $1/i$ を $1/V$ に対してプロットすれば直線となることが報告されている¹⁰⁾。

Jaffe によれば初期再結合は次のように表わすことができる。

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{i_s} + \frac{g \cdot f(x)}{i_s} \quad (4)$$

ここで g は荷電粒子の飛跡に沿つてのイオン密度、イオンの拡散定数や再結合定数に関係した定数であり、変数 x は V^2 に比例した関数で、さらに $f(x)$ は Hankel 関数を内蔵した関数である。

しかしこの $f(x)$ は、 $x > 10$ に対しては、

$$f(x) \sim \sqrt{\frac{\pi}{2x}} \quad (5)$$

と近似できるといわれている⁸⁾。

従つて (5) 式は次のように変形できることになる。

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{i_s} + \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{g}{i_s} \cdot \frac{1}{V} \quad (6)$$

すなわち

$$\frac{1}{i} = \frac{1}{i_s} + \frac{\text{const}}{V} \quad (7)$$

このように初期再結合は $1/i-1/V$ プロットで直線となることがわかる。

IV. 実験結果

比較のため、医療用標準線量計用円筒型電離箱の一般再結合を Fig. 1 に示した。実線Aは20～1,000ボルトにわたり Boag の理論通りに直線となつている。一方、実線Bは直線とはならず、Boag の理論に合わない欠かん電離箱ということになる。実線AとBとの差は単に集電極の長さが異なるだけである。

従つて、使用しようとする対電離箱が、まず低LET放射線に対して、 $1/i-1/V^2$ プロットをしたとき直線となることを確認する必要がある。また同時に、直線の範囲特にイオン増幅の起らない印加電圧Vの上限を知る必要がある。これに関しタイプDについて示したのが Fig. 2 の実線である。

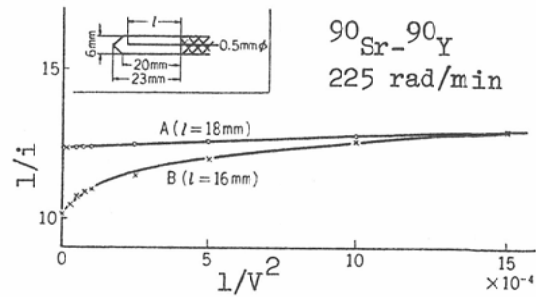


Fig. 1. Saturation curves of JAPM sub-standard dosimeter. The curves are normalized at $15 \times 10^{-4} \text{ V}^{-2}$. The diagram of the ionization chamber is inserted in the graph.

この場合 ^{60}Co γ 線の線量率 (5 rad/min) を線源として用いている。また、2.8MeV-n を照射した時の $1/i-1/V^2$ プロットを比較のため点線で示した。この点線を初期再結合用に $1/i-1/V$ プロットになおしたのが Fig. 3 の実線である。この他 Fig. 3 にはタイプCについて 2.8MeV-n を実線、30MeV-n に関する結果を点線で示してある。これから中性子線の線質による差がわかる。

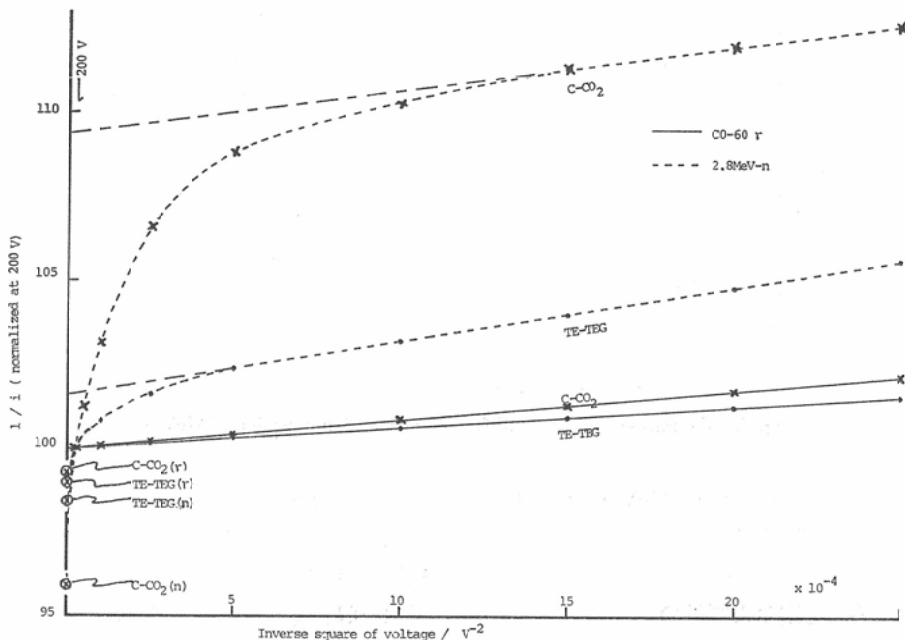


Fig. 2. Saturation curves of type-D chambers. The solid lines are the curves for ^{60}Co γ -rays and the dotted lines for 2.8MeV-n. The broken lines are the curves extrapolated into the linear portion of the dotted lines to V_∞ . \otimes means the values of $1/i$ at 1000V.

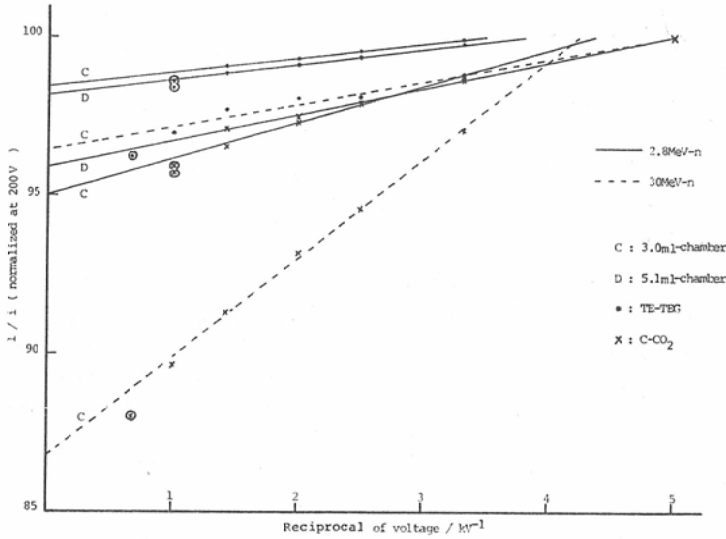


Fig. 3 Saturation curves of the paired chambers for different neutron energies. The experimental points marked by open circle are the values out of linearity.

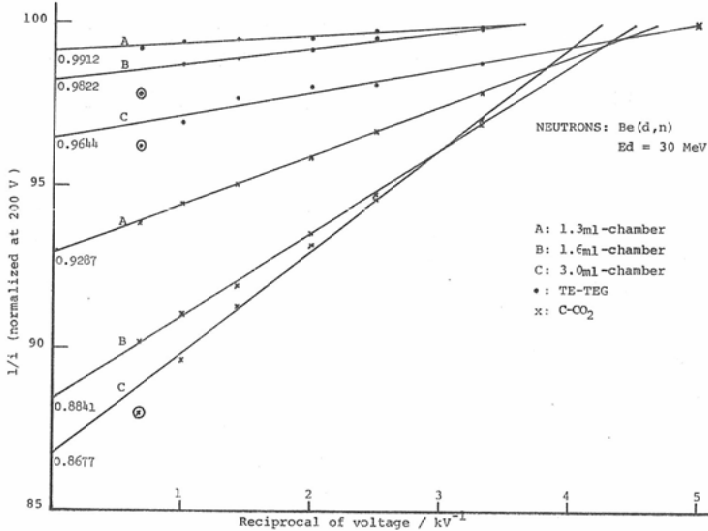


Fig. 4. Saturation curves of different paired chambers for 30MeV-n.

Fig. 4はタイプA, B, Cを30MeV-nで照射した場合の結果を $1/i-1/V$ プロットしたものである。

V. 考察および結論

X, γ 線や電子線, β 線のような低 LET 放射線の場合, Scott ら¹¹⁾の実験からも明らかなように, 1気圧前後のガス圧で用いている場合にはイ

オンの初期再結合による損失は数分の1パーセント以下と推定される。従つて速中性子測定に對電離箱を用いようとするときには, まず低 LET 放射線に飽和特性を調べ, Boag の理論に從つて動作する電離箱であることを確かめ, イオン増幅が問題とならない印加電圧の上限を知ることが先決である。

この上限の印加電圧について言及すれば、Fig. 2に⊗印で示した如く、タイプDは1,000ボルトではこの上限を越えてしまっている。Fig. 3やFig. 4からも判る如くタイプAは1,500ボルト、タイプB, Cは1,000ボルトまで $1/i-1/V$ プロットでも直線性を有している。この上限に関しては、TE-TEGとC-CO₂との差はタイプB以外では見られなかつた。なお、Figs. 2, 3, 4には、この上限を越えているものには○印をつけて示した。つまり直線からはずれてしまっている。

次に $1/i-1/V$ プロットで直線の成立する範囲であるが、TE-TEGとC-CO₂とで本質的な差はないと思われる。ただし初期再結合が観測されだす点には差がある。中性子エネルギーによる差は2.8MeV-nと30MeV-nで比べる限り顕著な差はないと思われる(Fig. 3)。

TE-TEGとC-CO₂との初期再結合損失が観測されだす点の差は、二次荷電粒子の差に起因するものと考えられる。C-CO₂の場合、一次の荷電粒子としては反跳によるC, O, (F)と(n, α)によるα粒子が主と考えられる。従つてすべて重荷電粒子であり、初期再結合が問題となる粒子で占められている。一方、TE-TEGの場合、主たる一次の荷電粒子は反跳陽子である。2MeVの陽子が空气中、100V/cmの電場で初期再結合により失なうイオンの損失は、計算では0.6%程度である⁸⁾。この値は、一般再結合損失と比べたとき、必ずしも観測しやすいものとはいえないであろう。

これに比べ、重荷電粒子で占められ、初期再結合が再結合損失の主因となつているC-CO₂の場

合には印加電圧の低いうちから観測されることになる、こうした初期再結合と一般再結合との競合の様子は、Fig. 2の点線と鎖線との差から判断できる。一般再結合が優位を占めているTE-TEGの場合には、直線部分がC-CO₂よりも可成り広範囲にまで延びている。

著者らは日常の測定では、印加電圧は一様に200ボルトをかけて使用しているが、Fig. 2の実線および鎖線から判る如く、 $V=200$ ボルトと V_{∞} との $1/i$ の差は0.1%程度であり、従つて、TE-TEG, C-CO₂両電離箱について、著者らが用いた線量率では、一般再結合に対する補正は、 $V=200$ ボルトでの i に施す必要はなく、初期再結合に対する補正だけを施せば良いことになる。

初期再結合の程度は、Fig. 3およびFig. 4から判る如く、TE-TEGとC-CO₂とでは大きく異なる。これは上述の如く一次荷電粒子の差によるものであり、荷電粒子を発生させられる物質側の問題である。と同時に、発生させる側の線源の線質が変つても初期再結合の程度には差が生じることになる。その差も、TE-TEGよりもC-CO₂で大きいことが判る。また、Table 1のe.g.l.や $\ln(a/b)$ から予想されるように電離箱の構造によつても可成り $1/i$ に差が生じている。しかしながらこれは横軸の取り方を、構造に無関係に単に印加電圧の逆数としているための見掛け上の差ともいえる。

そこで、一般再結合の場合にならつて、横軸を $V/e.g.l.$ の逆数になおしてプロットしたのがFig. 5の実線である。さらに飽和電離電流 i_s を100

Table 1. Characteristics of cylindrical paired ionization chambers

Type	Volume (ml)	Inner diameter 2a (cm)	Outer diameter of collecting electrode 2b (cm)	Equivalent gap length (cm)	b ln(a/b)	Material of collecting electrode
A	1.3	1.0	0.4	0.310	0.1833	TE or Teflon + C
B	1.6	1.0	0.2	0.440	0.1609	TE or C
C	3.0	1.2	0.16	0.597	0.1612	Al
D	5.1	1.4	0.45	0.499	0.2554	TE or C

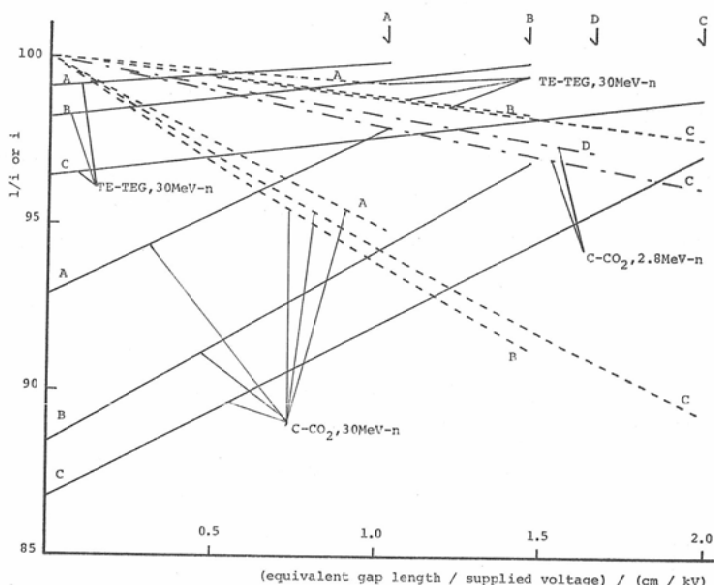


Fig. 5. Saturation curves plotting $1/i$ or i against equivalent gap length by supplied voltage. $1/i$ for 30MeV-n is shown by the solid lines. i 's for 30MeV-n and 2.8MeV-n are indicated by the dotted lines and the broken lines, respectively. The curves of the dotted and broken lines are normalized to 100 at V_{∞} . The arrow corresponds to the point for each type of chamber operated at 300V.

に規格化，縦軸を i でプロットしなおしてみたのが点線である．このように再プロットしてみるとタイプの差にもかかわらず可成り一致性のある曲線群が得られる．横軸を $V/[\ln(a/b)]$ の逆数で再プロットしたのではこのような一致性はみられない．すなわち，円筒型電離箱の飽和特性を比較する場合，一般再結合と同様，初期再結合に対しても $V/e.g.l.$ が有用であるといえよう．

さて，Fig. 4 から一見して，どのタイプの電離箱も直線領域は 300ボルト以上では成立している．この 300ボルトに対応する $V/e.g.l.$ の位置を Fig. 5 に矢印で示した．また，理論的に直線領域の成立するための条件 $x > 10$ について調べてみると，平行平板型電離箱の炭酸ガス (19°C, 764 mmHg) 中に α 線 (イオン密度: 6.04×10^4 イオン/cm) が入射した場合には，電場が 352V/cm 以上で $x > 10$ となる．そこで， $352 = V/e.g.l.$ から V を求めてみると，タイプ A, B, C, D の各々に対し，109, 155, 210 および 176ボルトと

なる．従つて，実験で得た直線領域はこれらの値よりも高いところで成立していることになる．また，上記条件で，1,000V/cm の場合の i/i_0 を求めてみると 0.987 となる．これを Fig. 5 の $V/e.g.l.$ 1,000V/cm の値と比べてみると 30MeV-n の場合，イオン密度の相当に高い粒子が主流を占めていることがわかる．

ともあれ，印加電圧 200ボルトの場合，TE-TEG では 1.5~2% および 1~3.5%，C-CO₂ では 4~5% および 8~15% の初期再結合損失に対する補正が，2.8MeV-n および 30MeV-n を照射した場合に必要であつた．

これらの数値は補正值としては大きなものであり，初期再結合の補正の程度とその精度が測定の最終結果に大きく影響し，施設間の速中性子線量の相互比較などの場合，数%の差が容易に生じやすいことを示唆している．

本研究のために御協力いただいたサイクロトロンおよびバンデグラフの運転担当諸氏に感謝いたします．

なお、本研究は厚生省がん研究（田崎班）および文部省がん特別研究（津屋班）の援助を受けた。

文 献

- 1) 平岡 武, 川島勝弘, 松沢秀夫: 対電離箱の検討. 日本医放会誌, 36: 442, 1976.
- 2) 川島勝弘, 平岡 武, 星野一雄, 松沢秀夫: 対電離箱の中性子感度, k の考察. 日本医放会誌, 36: 449—450, 1976.
- 3) 平岡 武, 川島勝弘, 星野一雄, 松沢秀夫: 対電離箱の飽和特性, その1 平行平板型. 日本医放会誌, 36: 450, 1976.
- 4) 川島勝弘: 対電離箱法による速中性子の吸収線量の測定. *Radioisotopes*, 24: 1515, 1975.
- 5) 川島勝弘, 星野一雄, 平岡 武, 丸山隆司, 松沢秀夫: ^{252}Cf 線源のカーマ率の測定. *Radioisotopes*. 24: 225—231, 1975.
- 6) Delafield, H.J., Chuang, L.S. and Holt, P.D.: Comparison of measured and computed values for the ionization in various gases irradiated with 15 MeV neutrons. *Proc. 2nd Sympo. Neutron Dosimetry in Biol. & Med.* 144—162, 1974.
- 7) Kühn, H.: Characteristics of different ionization chambers for fast neutron dosimetry. *Proc. 2nd Sympo. Neutron Dosimetry in Biol. & Med.* 241—261, 1974.
- 8) Boag, J.W.: Ionization chambers. (In) Attix, F.H., Roesch, W., Tochilin, E., ed: *Radiation Dosimetry Vol. II.* pp. 1—72. 1966, Academic Press, New York.
- 9) 平岡 武, 川島勝弘, 星野一雄, 松沢秀夫: 中性子線用組織等価物質の試作. 日本医放会誌, 36: 420—424, 1976.
- 10) Kara-Michailova, E. and Lea, D.E.: The interpretation of ionization measurements in gases at high pressures. *Proc. Camb. Phil. Soc.* 36: 101—126, 1940.
- 11) Scott, P.B. and Greening, J.R.: The determination of saturation currents in free-air ionization chambers by extrapolation methods. *Phys. Med. Biol.* 8: 51—57, 1963.