

測定では日頃参考にすることの多い「吸収線量の標準測定法」の 70 頁をみますと，“印加電圧の極性の正負によって，電離箱線量計の指示値に差が生じる．極性効果は，内径 6 mm 程度の円筒形電離箱では，少ないのでほとんど問題とならないが，平行平板形電離箱ではこれを考慮しなければならない．”とあります．また，極性効果の原因については“光子の場合，コンプトン効果により電子の放出又は流入が主な原因とされ，したがって，集電極や絶縁体の容積に大きく影響される．”また，“電子線の場合，入射電子が集電極又は絶縁物中で止められ，集電極又はその電氣的結線系に運ばれるのが主な原因と考えられている．”とあります．これらのことを，これまで公表された論文から考えてみましょう．

一般的に電子線における極性効果の大きさがどの程度のものなのか，Aget と Rosenwald の次の論文で調べてみます．

Polarity effect for various ionization chambers with multiple irradiation conditions in electron beams  
H. Aget and J. Rosenwald, Med. Phys. 18(1) 67-72 (1991)

概要 電離箱に供給する電圧の極性を反転するときの影響を，幾つかの電離箱のタイプと幾つかの照射条件において電子ビームで調べた．読み値の違いは平行平板形電離箱 (20%) だけでなく，円柱形電離箱 (約 10%) でも有意であることが分かった．極性効果は小さい照射野よりも大きい照射サイズで大きい．一般的にはそれには，ある程度のステムとケーブルに対する影響も含む．二つの極性での読み値の違いは，電子ビームのエネルギー分布に関係し，高エネルギー電子よりも低い電子エネルギーで大きい．極性効果と電離箱壁材内の電荷の付与 (deposit) は密接に関係していると思われる．収集された全電荷の比率として表されるこの電荷の付与 (deposit) は，二つの極性での測定値から直接導くことができる．吸収線量の決定において有意な誤差 (5%以上) を避けるためには，極性効果を注意して調べるべきである．

彼等が対象とした電離箱は，Table 1 に示すような円柱形と平行平板形の電離箱であり，我々にとって馴染みのある電離箱が入っています．

Table 1. Aget と Rosenwald が極性効果の研究に用いた種々の電離箱の特性

電離箱	有効体積 (cm <sup>3</sup> )	壁もしくは 前窓の材質	収集電極 の材質	ステム の材質	ケーブルと ステムの構造
円柱形電離箱					
NE Farmer 2505/3, 3B	0.6	Nylon 66	Al	Al	保護されたケーブル
NE Farmer 2571	0.6	Graphite	Al	Al	保護されたステム
NE Robust Farmer 2581	0.6	A-150	A-150	Al	保護されたステム
NE Farmer 2525/3	0.2	Nylon 66	Al	Al	保護されたケーブル
平行平板形電離箱					
PTW M23342	0.03	ポリスチレン	Graphite		
PTW Markus 23343	0.04	ポリスチレン +Graphite	ポリスチレン +Graphite		

Aget と Rosenwald は Therados RDM 2A の電位計を用い，±400V (±200V でも確認したが差はみられなかった) の印加電圧で，Saturne 25(CGR-MeV)の 4MeV から 25MeV,線量率 1,2,3,4Gy/min.

で極性効果を調べた。ただし、線量率は極性効果に影響がなかったので、通常 2Gy/min.を使用している。照射野サイズは距離 1m で 4 cm から 30 cm である。彼等は 2 台の加速器を用いているが、1 台の加速器は scattering foil beam, 他の 1 台は swept electron beam (scanned beam) である。

#### 測定方法

正の印加電圧のときの電位計の読み値を  $Q_+$ , 負の印加電圧のときの電位計の読み値を  $Q_-$  とした。電圧は電離箱の収集板ではなく電極側, すなわち平行平板形電離箱では前窓, 円柱形電離箱では外電極に加えた。

極性効果が存在しなければ,  $Q_+$  と  $Q_-$  の絶対値は同じとなるので, 極性を反転させたときの影響の大きさは  $Q_+/Q_-$  の比率で評価した。電離箱はそれがうまくはまるように加工した白色ポリスチレンファントム中で,  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  の照射野内に配置した。極性を反転させたときには, 電離箱が安定するように十分な時間をあけた。

#### 結果と検討

極性効果は低エネルギーで最大を示し, 15MeV 以上のエネルギーでは無視できた。そこで, 9MeV に関する研究に注目した。

極性反転時の安定を得る方法として, 他に 3~5Gy の事前照射もある。

##### A. 照射野サイズに対する極性効果

9MeV, 電離箱の測定実効点はファントム中の 2 cm 深部 (最大線量の深さに相当) とした。最大の極性効果を示したのは,  $0.03 \text{ cm}^3$  の平行平板電離箱 (PTW M23342) と  $0.2 \text{ cm}^3$  の円柱電離箱 (NE Farmer 2525/3) であった。この二つの電離箱は有効体積が小さく, 収集電極, 絶縁体およびケーブルの照射される部分の大きさが比較的大きい。結果は Fig.1 と 2 に示す。Scanned beam の方が scattered beam よりも極性効果は大きく, その差は 4% 程度である。この差の説明は明らかではない。照射野サイズが大きい方がいずれのビームでも極性効果は大きくなる。円柱電離箱よりも平行平板電離箱の方が極性効果は大きい。

電離箱ステムとケーブルの部分を遮蔽するためにファントム表面に鉛ブロックを置いて照射した。ブロックを置いたことによる線量の変化は有意ではなく, 測定点で 1% 以下の差であった。

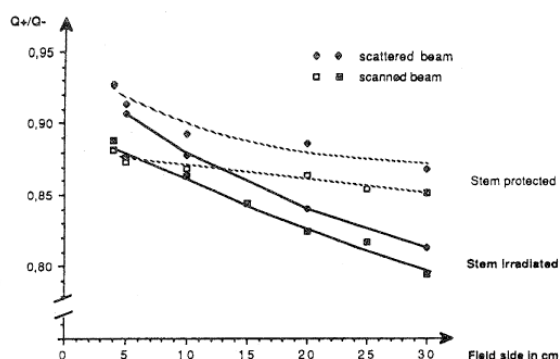


Fig.1.  $0.03 \text{ cm}^3$  平行平板形電離箱の照射野サイズに対する  $Q_+/Q_-$  の変化。公称電子エネルギーは 9MeV, 深さ 2 cm, SSD 100 cm である。実線はステムとケーブルを照射した場合, 破線はそれらを遮蔽した場合である。

ステムとケーブルを遮蔽すると極性効果の大きさは低下した。それは照射野サイズによる変化も低下した。このことより、ステムとケーブルの照射は極性効果にかなりの影響をもつと結論した。ステムの照射の有無による結果は Table II に示す。0.03 cm<sup>3</sup>の電離箱の極性効果のほぼ 1/3 はステムの照射によるものであろう。0.2 と 0.6 cm<sup>3</sup>の円柱形電離箱の場合、ステムを遮蔽したときの  $Q_+/Q_-$  は 1 に近いので、その極性効果はステム照射のみによると思われる。

Markus 電離箱の極性効果は、すべての条件で 3% 以下であった。

0.6 cm<sup>3</sup>の円柱形電離箱の場合、どの壁材においても極性効果は小さく 4% 以下である。

#### B. 深さとエネルギーに対する極性効果

極性効果が大きい 9MeV の 30×30 cm<sup>2</sup>の照射野サイズにおいて、電離箱のファントム内での深さの影響を調べた。

6 cm<sup>3</sup>円柱形電離箱と Markus の場合、極性効果はすべての深さで 4% 以下であった。0.03

Table II. 9MeV の走査形ビームと散乱箔形電子ビーム、深さ 2 cm, SSD 100 cm における種々の電離箱（円柱形と平行平板形）の 30×30 cm<sup>2</sup>（ステム照射）と 5×30 cm<sup>2</sup>（ステム保護）での極性効果  $Q_+/Q_-$ .

電離箱		ビームタイプ	ステム	
体積 (cm <sup>3</sup> )	壁材		照射	保護
円柱形			$Q_+/Q_-$	$Q_+/Q_-$
0.6	pure graphite	Scanned	0.983	0.997
		Scattering foil	0.993	0.998
0.6	nylon graphite	Scanned	0.961	0.998
		Scattering foil	0.978	0.995
0.6	組織等価	Scanned	0.973	0.995
		Scattering foil	0.992	0.998
0.2	nylon graphite	Scanned	0.888	1.000
		Scattering foil	0.933	0.992
平行平板形			$Q_+/Q_-$	$Q_+/Q_-$
0.04	Markus タイプ	Scanned	0.977	0.987
		Scattering foil	0.978	0.990
0.03	PTW タイプ	Scanned	0.793	0.871
		Scattering foil	0.817	0.885

cm<sup>3</sup>の平行平板形電離箱での二つの極性で得た標準化していない深部電離量曲線を Fig.3 に示す。一方の極性のみを用いると、相対表面線量、線量最大深 ( $R_{100}$ )、治療飛程 ( $R_{85}$ ) に大きな誤差が生じるだろう。

極性効果は表面から  $R_{85}$  までで、深さと共に増加する。Table III に結果を示す。

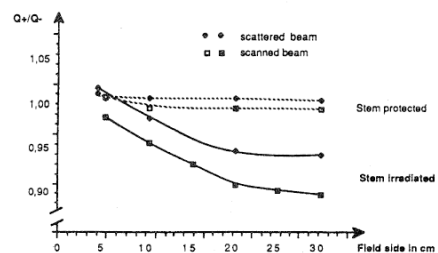


Fig.2 0.2cm<sup>3</sup> 円柱平板形電離箱の照射野サイズに対する  $Q_+/Q_-$  の変化。公称電子エネルギーは 9MeV、深さ 2cm, SSD 100 cm である。実線はステムとケーブルを照射した場合、破線はそれらを遮蔽した場合である。

他の研究者<sup>4</sup>が示したように、極性効果の深さによる増加は深さに伴う電離エネルギーの低下にほとんどよる。電子エネルギーの影響は二つの方法で確認した。

1) 公称入射エネルギーを4MeVから19MeVまで変えて、表面測定 ( $z=0$ ) を行った。

2) 同じ公称エネルギーで、測定深  $z$  を変えた。

このときの深部の平均エネルギーは、

$\bar{E}_z = \bar{E}_0(1 - z/R_p)$  で計算した。ただし、 $\bar{E}_0 = 2.33R_{50}$ 、 $R_p$  は外挿飛程、 $R_{50}$  は深部線量曲線の50%深である。公称エネルギーは9MeVと19MeVの二つを用いた。

すべての場合で、 $Q_+/Q_-$  の比率を深部  $z$  における平均エネルギー  $\bar{E}_z$  に対してプロットした。結果を Fig.4 に示す。5MeV 以上では、上記の二つの方法で得た曲線は8%以内で良好に一

Table III.  $30 \times 30 \text{ cm}^2$ , SSD 100 cm の 9MeV の走査形と散乱箔形電子ビームにおける深さの違いによる極性効果  $Q_+/Q_-$ .

電離箱			深さ (cm)		
体積 ( $\text{cm}^3$ )	壁材	ビームタイプ	1.5	2.0	3.0
0.2	Nylon graphite	Scanned	$Q_+/Q_-$	$Q_+/Q_-$	$Q_+/Q_-$
		Scattering foil	0.93	0.89	0.86
0.03	PTW タイプ	Scanned	0.95	0.93	0.88
		Scattering foil	0.82	0.79	0.70
			0.86	0.82	0.77

致する。これより、極性効果は測定点の電子エネルギーにほとんど関連することが分かる。低エネルギーで食い違いが大きくなり、最大極性効果は2MeV程度のエネルギーでみられる。 $E_z$  が下がったときの  $Q_+/Q_-$  の低下は、 $\bar{E}_0 = 19 \text{ MeV}$  よりも  $\bar{E}_0 = 9 \text{ MeV}$  で急激である。Fig.4 は  $0.03 \text{ cm}^3$  平行平板形電離箱によるものであるが、 $0.2 \text{ cm}^3$  の円柱形電離箱で行った  $30 \times 30 \text{ cm}^2$  の scanned beam の9MeVと25MeVでもみられた。

### C. 検討

Fig.4 より、極性効果は測定点での平均エネルギー  $\bar{E}_z$  にほとんど関係することが明らかである。しかし、異なる  $\bar{E}_0$  と深さの組み合わせから得た同じ  $\bar{E}_z$  の場合、電子の角度分布とエネルギー分布も考慮すべきであるということを示す違いも観察される。

更に、極性効果と電離箱材内の電荷の付与 (deposit) の関係を調べた。

先に述べたように、最大の極性効果は約2MeVのエネルギーの深さでみられた。これは入射

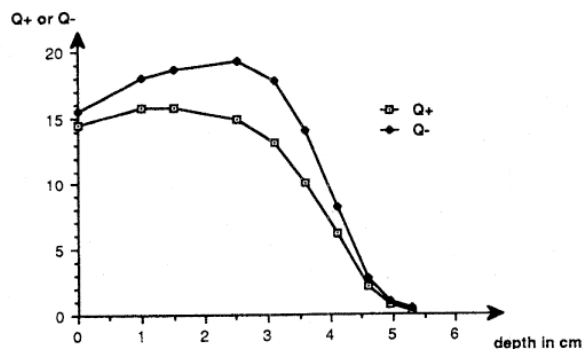


Fig.3.  $0.03 \text{ cm}^3$  平行平板形電離箱を用いた9MeV,  $30 \times 30 \text{ cm}^2$ , SSD 100 cmでの正負の極性における深さに対する電離量曲線。

エネルギーが低いほど大きい． $30 \times 30 \text{ cm}^2$ の照射野で $\bar{E}_0=3.5\text{MeV}$ では $Q_+/Q_-=0.66$ ， $\bar{E}_0=9\text{MeV}$ では $Q_+/Q_-=0.73$ ， $\bar{E}_0=19\text{MeV}$ では $Q_+/Q_-=0.77$ である．このような知見は， $9\text{MeV}$ と $20\text{MeV}$ の間のエネルギーにおける電荷の付与を直接測定した Van Dyk と MacDonald<sup>8</sup>のデータと一致する．彼等によると，入射エネルギーが低いほど電荷付与の最大は大きくなり，電荷付与の最大は局所の平均電子エネルギーが $2\text{MeV}$ と $3\text{MeV}$ の間にある深さで生じる．このような電荷付与は照射される物質内で電子が静止するのと飛び出てくることのバランスに寄与し，その結果生じる電荷は負となる．

電離箱材，すなわち平行平板形電離箱の厚い後方の電極<sup>4</sup>，絶縁体，ステムおよびケーブル内での電荷の付与を考えると，極性効果の説明ができる．付与された電荷は二つの極性で同じであると考えられる．それは空洞空气中で発生した電荷に加算されるか差し引かれるかのいずれかである．それにより，二つの極性で異なる読み値 $Q_+$ と $Q_-$ となり，比率 $Q_+/Q_-$ は1と異なることになる．そこで，電離箱材が多くて空洞の小さい場合には，この影響は大きくなる．

$$Q_+ = Q - \Delta Q \quad (1)$$

$$Q_- = Q + \Delta Q \quad (2)$$

ここで， $Q=(Q_++Q_-)/2$ は空洞で発生した電荷， $\Delta Q$ は電離箱材で収集された電荷である．式(1)と(2)を組み合わせると，

$$\Delta Q / Q = (1 - Q_+ / Q_-) / (1 + Q_+ / Q_-) \quad (3)$$

となる．この理論の確認を極性効果がステムとケーブル内での電荷の付与のみである円柱形電離箱で行った．

電離箱 a : 空洞体積  $V_a$ ，電離箱 b : 空洞体積  $V_b$

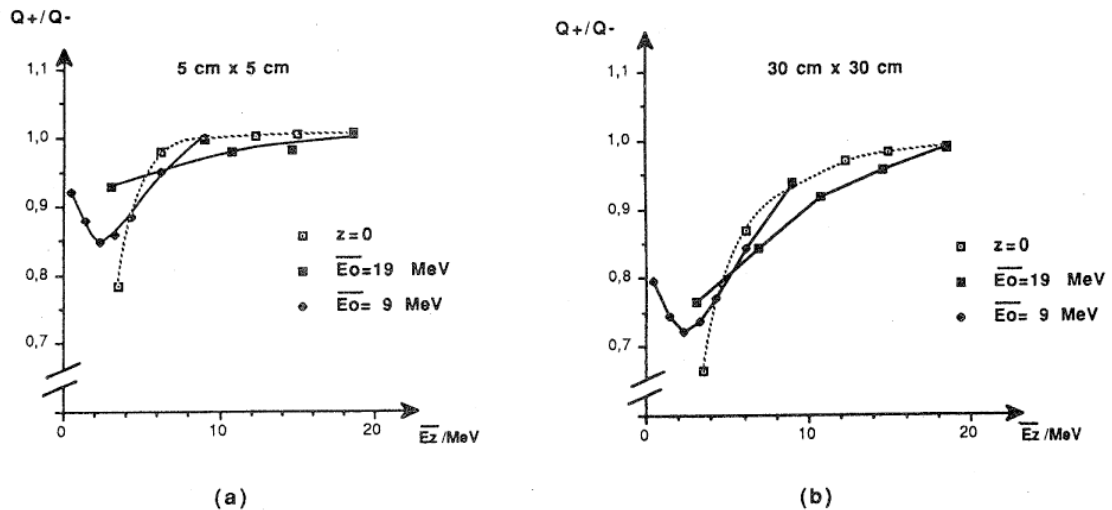


Fig.4.  $\bar{E}_0$  に対する  $Q_+/Q_-$  の比．実線は公称平均入射エネルギー  $\bar{E}_0$  を変えた表面の測定．破線は入射エネルギー  $9\text{MeV}$  と  $19\text{MeV}$  の種々の深さでの測定．データはすべて散乱箔形ビームで  $0.03 \text{ cm}^3$  平行平板形電離箱を用いた．

ステム構造は a, b 共同じとすると,  $\Delta Q = \Delta Q_a = \Delta Q_b$  で同じとなる. そこで,

$$(\Delta Q / Q)_b / (\Delta Q / Q)_a = Q_a / Q_b \quad (4)$$

ここで,  $\Delta Q / Q$  は式(3)から計算できる.

この比率は, 高エネルギー電子ビームを照射した電離箱 a と b の読み値の比率から評価した空洞体積の比率  $V_a / V_b$  と比較できる. というのは,  $Q$  は空洞体積  $V$  に比例するので,

$$Q_a / Q_b = V_a / V_b \quad (5)$$

であると考えられる. この方法をナイロン壁のステム構造が同じ 0.2 と 0.6 cm<sup>3</sup> の Ionex に応用した. その結果を TableIV に示す.  $V_a / V_b$  の実験値と  $Q_a / Q_b$  の比率から計算した値は 5% 以内で一致する. これより,  $\Delta Q$  はこれら二つの電離箱で, また二つの極性で同じであるという仮定が正しいことが分かる. 任意の場合,  $Q$  は  $(Q_+ + Q_-) / 2$  と書くことができる.

TableIV. 高エネルギー電子ビームで直接測定した空洞体積の比率とナイロン 0.6 cm<sup>3</sup> と 0.2 cm<sup>3</sup> の円柱形電離箱における  $Q_+ / Q_- (Q_a / Q_b)$  から計算した収集電荷の比率の比較

電離箱 体積	Scanned beam		Scattering foil beam	
	a	b	a	b
	0.6 cm <sup>3</sup>	0.2 cm <sup>3</sup>	0.6 cm <sup>3</sup>	0.2 cm <sup>3</sup>
$Q_+ / Q_-$	0.961	0.888	0.978	0.933
$\Delta Q / Q$	0.040	0.119	0.022	0.069
$Q_a / Q_b$	2.98		3.11	
$V_a / V_b$	2.85		3.24	

以上のことより, 極性効果は

- 1) 照射野サイズに依存→本質的な原因はステムとケーブルの部分の照射に依存する.
  - 2) 平行平板形電離箱の場合には, ステムとケーブル以外の集電極の後方の絶縁体への電荷の付与も関係する.
  - 3) 大半の加速器で採用されている散乱箔を介した電子線 (scattered beam) に限定すると, 円柱形電離箱でも壁材によっては 3% から 4% の極性効果がみられる. これは平行平板形電離箱と同程度である. 一般的には, 電離空洞の有効体積が小さいほど, 極性効果は大きい.
  - 4) 極性効果の大きさは, 深部の平均エネルギー ( $\bar{E}_z$ ) によってうまく説明できる.
- ということが分かる.

この論文でも指摘されているように, 極性効果は電離箱線量計の測定におけるノイズといえる. したがって, これは偽信号であり, 空洞気体の電離による本来の信号の大きさが十分であれば問題とならない. 電子の場合には電離箱構造物への電荷の付与によって, この疑信号の発生があるが, 光子の場合には前述した JARP でも指摘されているように, 集電極や絶縁体とのコンプトン効果による疑似電流によるものである. これは, Johns 等により空洞を真空にした電離箱に <sup>60</sup>Co γ 線を照射することで確認されている (Wickman と Holmström の論文の Ref.11).

極性効果の大きい平行平板形電離箱は、電離空洞の厚さが薄いことからビルドアップ領域の測定や線量勾配の強い領域の測定に適した器具である。すなわち、空間分解能の高い検出器であるがために空洞体積が小さい。したがって、本来の信号量も小さく、その結果極性効果が大きい測定器となっている。また、上記の領域では、一般に極性効果が大きいという相容れない結果となる。これを改善するために、平行平板形電離箱の改善が図られ、現在 NACP 02 や Roos といった新たな平行平板形電離箱が市販されるようになった。

平行平板形電離箱における極性効果の主たる要因である S/N 比の低さを改善するために、空洞気体の代わりに絶縁液を封入した平行平板形電離箱の試みも Wickman と Holmström によって報告されている。その概要は次の通りである。

Polarity effect in plane-parallel ionization chambers using air  
or a dielectric liquid as ionization medium

(電離媒質として空気もしくは絶縁液を用いた平行平板形電離箱の極性効果)

Göran Wickman and Thord Holmström, Med. Phys. 19(3) 637-640 (1992)

概要 有効体積  $2 \text{ mm}^3$  の空気の代わりに有感媒質として絶縁液である tetramethylsilane を用いた平行平板形電離箱について述べる。電離箱の設計で、ケーブル、ステムもしくは電離箱の絶縁体中の不要な電流を引き起こす因子について十分な注意を払った。通常の平行平板形電離箱がよく問題となる放射線照射野の領域での極性効果に関して、この電離箱を調べた。このような領域は光子照射野でのビルドアップ領域、および電子非平衡が有意となる電子線の实用飛程の近傍の領域である。実験結果より、液体電離箱の電離体積は極端に小さいにもかかわらず、放射線治療照射野の測定用に設計された空間分解能の小さいよく知られた市販されている電離箱では 5% から 30% の極性効果を示す照射野位置で 10 分の数% を超えることがないことが分かる。見かけ上の電流の原因と液体もしくは気体の充填された電離箱の設計においてそれらをどのように最小にするかについて検討する。

この液体電離箱では空洞に tetramethylsilane を充填することにより、本来の電離電流信号を空気に比較して数百倍にすることができ、極性効果の影響を最小にしている。

電離箱絶縁体と同軸ケーブルとの接続部における保護の乱れについて、分かりやすい説明がなされているので、その部分の説明とこの論文の Fig.4 を以下に引用する。

“しかし、見かけ上の電流は“疑似 false”電荷  $\Delta Q$  に寄与する。このような電流は種々の原因があり、不正確さの原因となる。不要な電流のあるものは電子非平衡による電荷の付与 (deposit) によって作られる。収集電極や収集電極につながる伝導体中、またこれらの周囲の保護されていない絶縁体内で付与 (deposit) された電荷は、測定した電荷に寄与するであろう。このようなことから、このような部分の大きさを可能なかぎり小さくしなければならないことになる<sup>11,12</sup>。電離箱の中で弱点となる部分は接続ケーブルと電離箱の間の部分である。電離箱に保護リングが用いられているように、ケーブルは同軸である。しかし、結合部ではこのジオメトリは Fig.4 に示すようにくずされる。そこで、かなりの量の絶縁体が収集電極もしくはその伝導体にさらされる。保護されていない絶縁体中に捕獲された電荷の約半分は、絶縁体中の漏れ電流もし

くは伝導体部分で誘導された電荷のいずれかにより測定した電荷に寄与するであろう。”

JARP では極性効果の補正は正負の極性電圧で測定し平均を取るという指示で,すべての測定でこのような処理をすることを提示している. また, 米国 AAPM TG 25 の勧告 (治療分科会誌 Vol.12, No.2 と Vol.13, No.1 で内容を紹介した.) では, 極性効果の補正を行う条件として “1%の極性効果” を提示している. いずれにしても, 実務的には測定時間などで厄介なことである. 実務面から, このような問題に対処する方法が最近以下の二つの論文で発表された.

- 1) Janelle A. Williams and Suresh K. Agarwal, “Energy-dependent polarity correction factors for four commercial ionization chambers used in electron dosimetry”, Med. Phys. 24 (5) 785-790 (1997)
- 2) Chester R. Ramsey, Kelly M. Spence, and Adrian L. Oliver, “Ionization chambers, electrometer, linear accelerator, field size, and energy dependence of the polarity effect in electron dosimetry”, Med. Phys. 26(2), 214-219 (1999)

上記 1) の論文は, 初めに紹介した Aget と Rosenwald が報告した極性効果の深部平均電子エネルギーへの依存を利用するものです.

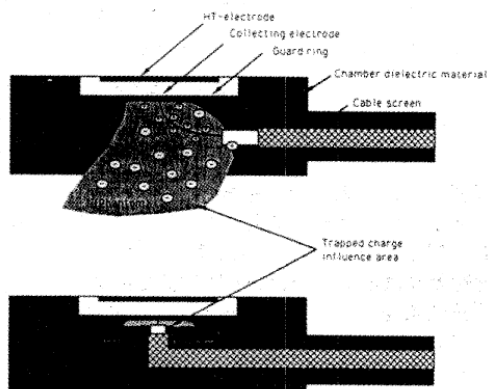


Fig.4. 上下の図は収集電極, 保護リングおよび接続ケーブルの配置の二つの方法を示している. このような二つの配置では, 保護されていない絶縁体の体積の違いが強調される. 灰色の領域で捕獲された電荷は収集電極もしくはその伝導ケーブルに対する静電容量として測定される. 電離箱が照射中に絶縁体, すなわちポリスチレンやルサイトに埋め込まれている場合には, ファントムの灰色の領域に捕獲された電荷も測定電荷に影響するであろう.

Energy-dependent polarity correction factors  
for four commercial ionization chambers used in electron dosimetry  
Janelle A. Williams and Suresh K. Agarwal, Med. Phys. 24 (5) 785-790 (1997)

**概要** 四つの市販の電離箱の極性効果の特性を調べ, 深部の平均エネルギーに対する補正係数を表形式で求めた. この中には Farmer 形電離箱, 二つの平行平板形電離箱および走査形水ファントム線量測定システムで用いられる円柱形電離箱が含まれる. 極性効果は 6, 9, 12, 16MeV および 20MeV の深部線量曲線上の代表的な深さで測定した. “極性誤差” という用語を導入し, それを極性効果を無視したときに生じる誤差として定義する. 調べた四つの電離箱の極性誤差は, 深部の平均エネルギーが増すと単調に減少することが分かった. また, 入射電子ビームのエネルギーには大部分は依存しなかった. かなり低いエネルギーでのみ, すなわち, 実用飛程の終端のごく近傍でのみ, 種々の入射エネルギーのビームに対する補正係数は拡散した. 調べた四つの電離箱のうち三つは照射野サイズに独立した  $\pm 1/2\%$  以内の補正係数であった. 一つの電離箱は照射野サイズの増加と共に補正係数の増加がみられ, それは主に, ステムとケーブルの照射によるものであることが分かった.



Williams と Agarwal は一方の印加電圧での測定値と正負の印加電圧での測定値の間の誤差百分率である“極性誤差”を次式のように定義し，導入した．

$$\text{極性誤差} = \frac{|Q_+| - (|Q_+| + |Q_-|)/2}{(|Q_+| + |Q_-|)/2} \times 100$$

この極性誤差は極性効果を見逃した場合に生じる誤差の直接的な指標となる．

また，彼等が対象とした電離箱の種類を Table I に示すが，水ファントムスキャンシステムで用いられる電離箱も含まれている．

Table I . Williams と Agarwal が極性効果の実験に用いた電離箱の物理的仕様

電離箱	構造	壁材mm (材質)	電極間隔(e.s.), 外 公称有効体 径(o.d.)(mm)	積 (cm <sup>3</sup> )
Farmer (Capintec PR-06C)	円柱形	0.25 (空気等価プラスチック)	7.0(o.d.)	0.65
Holt (Memorial-Holt)	平行平板形	4.0 (ポリスチレン)	2.0(e.s.)	1.0
PS-033 (Capintec PS-033)	平行平板形	0.0036 (PET-A1)	2.4(e.s.)	0.5
Scanning (Multi-Data)	指頭形	0.75 (アクリル)	7.0(o.d.)	0.125

## 器材と方法

四つの市販されている電離箱は特徴をもっており，その物理的特徴の幾つかを Table I に示す．これらは Capintec model PR-06C 円柱形電離箱（“Farmer 電離箱”），Memorial-Holt 平行平板形電離箱（“Holt 電離箱”），Capintec model PS-033 平行平板形電離箱（“PS-033 電離箱”）および Multi-Data 走査形水ファントム指頭形電離箱（“走査形電離箱”）である．

Capintec model 192 電位計を，すべてにおいて累積電荷を測定するために用いた．上記の初めの三つの電離箱を用いた測定は 26 cm×26 cm のポリスチレンファントム中で，後方散乱を確保するために測定点の後方に 5 cm の深さをもたせて行った．走査形電離箱を用いた深部測定は水ファントム中で行い，この電離箱での照射野サイズの測定は上記のポリスチレンファントム中で，空隙を満たすために組織等価なパテを用いて行った．6,9,12,16MeV および 20MeV の公称エネルギーの電子ビームを Varian 2300C/D 直線加速器で発生した．

以下で示す大半のデータは極性を一方に固定し，他のパラメータ（例えば，入射エネルギー）を変化させて取得した．次に，反転した極性で測定を繰り返した．極性を反転した後の安定した読み値は，電離箱を飽和させて（典型的には，500-900 モニタ単位照射することで）達成した．

極性効果は各公称入射電子エネルギーで，100%，80%および 50%の電離レベルと実用飛程の終端近傍にほぼ対応する深さで測定した．印加電圧は正と負の 300V で反転させた．任意の深さ

において、すべての公称入射電子エネルギーに対する読み値は一つの極性で取得し、次に極性を反転させ、安定した読み値になるまで電離箱を飽和させ、測定を繰り返した。15 cm×15 cmのオープンコン照射野サイズの SSD100 cmを用い、電離箱のステムとケーブルは遮蔽しなかった。円柱形電離箱の測定点は TG25<sup>1</sup> の勧告する 1/2 半径補正により電離箱中心から上側にあると考えた。また、二つの平行平板形電離箱の場合には、近位電極の内側表面にあるとした。

極性誤差の照射野サイズ依存は、今回の研究で対象とした四つの電離箱の各々で測定した。データは 6MeV の入射エネルギーのビームを用い 1.6 cm の深さで取得した。この深さでは 3MeV の平均深部エネルギーに相当する。この深さは臨床上に一般的な深さであり、極性誤差が有意となる深さであることから選択した。データはポリスチレンファントム中の正方形照射野の中心軸上で取得した。

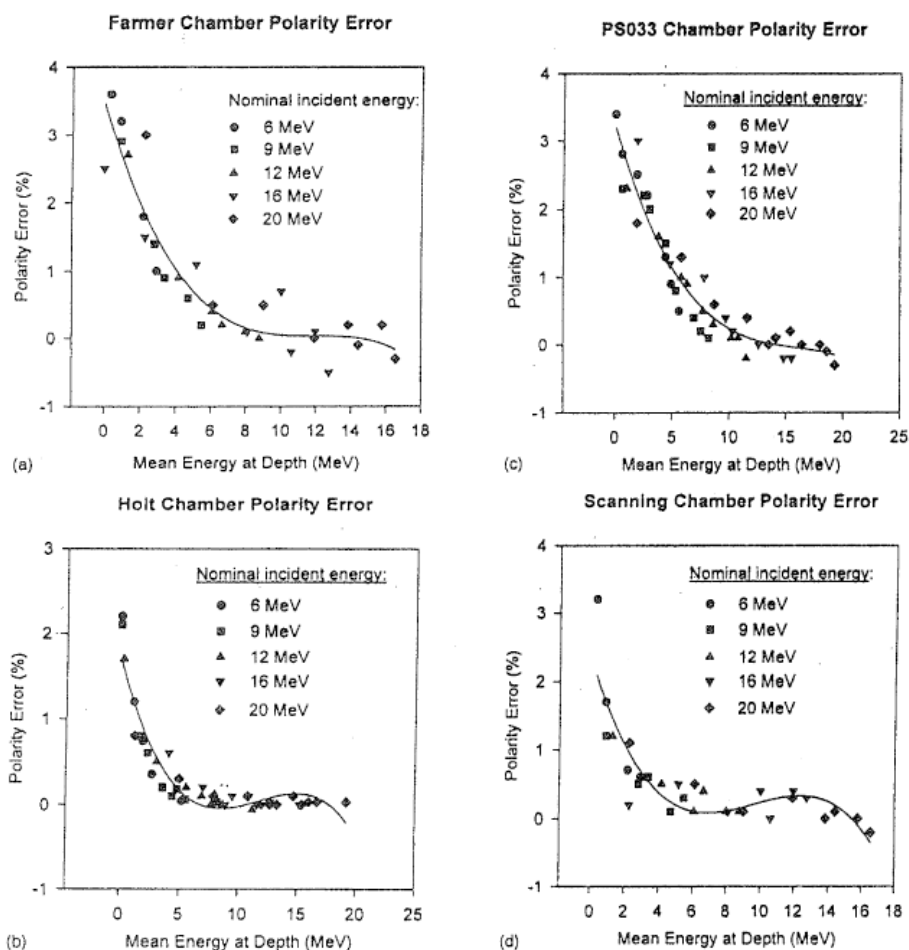


Fig.2. Williams と Agarwal によって求められた深部平均エネルギーに対する極性誤差。走査形電離箱は水ファントム中で 15×15 cmの照射野を用い、その他の電離箱はポリスチレンファントム中で同じ照射野サイズを用いて取得した。

彼等は電離箱の位置を照射野内で変えることにより、ステムやケーブルへの照射の影響も調べているが割愛する。彼等が得た平均深部エネルギーに対する極性誤差の関係を Fig.2 に示す。電離箱の種類による極性誤差の大きさを無視すると、極性誤差の回帰曲線は概ねすべての電離箱で相似である。極性誤差が有意に大きくなるのは、平均深部エネルギーが約 2MeV の付近であることも明瞭に示されている。得られた極性誤差曲線が変曲点をもつのは、彼等も述べているように、回帰式として三次多項式を用いたことによるものである。彼等は低エネルギー領域での回帰を良好なものとするために、三次多項式を用いた。したがって、変曲点に対する物理的要因が絡んでいるものではないだろう。

#### 参考文献

##### <Aget と Rosenwald の論文>

1. B. J. Gerbi and F. M. Khan, "The polarity effect for commercially available plane-parallel ionization chambers," Med. Phys. 14, 210-215 (1987).
2. ICRU Report 35, Radiation dosimetry: Electron beams with energies between 1 and 50 MeV (1986).
3. H. E. Johns, N. Aspin, and R. G. Baker, "Currents induced in the dielectrics of ionization chambers through the action of high energy radiation," Radiat. Res. 9, 573-588 (1958).
4. G. Marinello, A. M. Barrie, and A. M. Mandin, "Incidence du sens de la tension appliquee aux chambers d'ionisation sur l'evaluation des doses cutanees," J. Eur. Radiother. 2, 37-47 (1981).
5. L. O. Mattsson, K. A. Johansso, and H. Svensson, "Calibration and use of plane-parallel ionization chambers for the determination of absorbed dose in electron beams," Acta Radiol. Oncol. 20, 385-399 (1981).
6. J. E. Richardson, "Effect of chamber voltage on electron build-up measurements," Radiology 62, 584-588 (1954).
7. J. J. Spokas and R. D. Meeker, "Investigation of cables for ionization chambers," Med. Phys. 7, 135-149 (1980).
8. J. Van Dyk and J. C. F. MacDonald, "Charge deposition from high energy electron beams," Radiat. Res. 50, 20-31 (1972).
9. J. Van Dyk and J. C. F. MacDonald, "Penetration of high energy electrons in water," Phys. Med. Biol. 17, 52-55 (1972).

##### <Wickman と Holmström の論文>

1. IAEA Technical Report 277, Absorbed Dose Determination in Photon and Electron Beams. An International Code of Practice (IAEA, Vienna, 1987).
2. ICRU Report 35, Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies between 1 and 50 MeV (International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD. 1984).
3. American Association of Physicists in Medicine (AAPM), "A protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams," Med. Phys. 10, 741-771 (1983).
4. B. J. Gerbi and F. M. Khan, "The polarity effect for commercially available plane-parallel ionization chambers," Med. Phys. 14, 210-215 (1987).
5. H. Aget and J. C. Rosenwald, "Polarity effect for various ionization chambers with multiple irradiation conditions in electron beams," Med. Phys. 18, 67-72 (1991).
6. J. Bohm, K. Hohlfield, and H. Reich, "A primary standard for the determination of absorbed dose in a phantom for x-rays generated at potentials of 7.5 to 30 kV," PTB-Mitteilungen 89, 163-172 (1979).
7. J. J. Spokas and R. D. Meeker, "Investigation of cables for ionization chambers," Med. Phys. 7,

- 135-149 (1980).
8. O. Mattsson, H. Svensson, G. Wickman, S. R. Domen, J. S. Pruitt, and R. Loevinger, "Absorbed dose in water, Comparison of several methods using a liquid ionization chamber," *Acta Oncol.* 29, 235-240 (1990).
  9. G. Wickman, "Liquid ionization chambers. On their design, Physical properties and practical application," Ph. D. thesis, University of Umea Medical Dissertations New Series No. 314, ISSN 0346-6612, Umea, Sweden, 1991.
  10. L. O. Mattsson, K. A. Johansson, and H. Svensson, "Calibration and use of plane-parallel ionization chambers for the determination of absorbed dose in electron beams," *Acta Radiol. Oncol.* 20, 385-399 (1981).
  11. H. E. Johns, N. Aspin, and R. G. Baker, "Currents induced in the dielectrics of ionization chambers through the action of high energy radiation," *Radiat. Res.* 9, 573-588 (1958).
  12. J. Van Dyk and J. C. F. MacDonald, "Charge deposition from high energy electron beams," *Radiat. Res.* 50, 20-31 (1972).
  13. D. M. Galbraith, J. A. Rawlinson, and P. Munro, "Dose errors to charge storage in electron irradiated plastic phantom," *Med. Phys.* 11, 197-203 (1984).
  14. L. O. Mattsson and H. Svensson, "Charge build-up effects in insulating phantom materials," *Acta Radiol. Oncol.* 23, 393-399 (1984).
- <Williams と Agarwal の論文>
1. AAPM, American Association of Physicists in Medicine, Task Group No.25, Radiation Therapy Committee, "Clinical electron beam dosimetry: Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No.25, *Med. Phys.* 18, 73-109 (1991).
  2. H. Aget and J. C. Rosenwald, "Polarity effect for various ionization chambers with multiple irradiation conditions in electron beams," *Med. Phys.* 18, 67-72 (1991).
  3. B. J. Gerbi and F. M. Khan, "The polarity effect for commercially available plane-parallel ionization chambers," *Med. Phys.* 14, 210-215 (1987).
  4. C. S. Reft and F. T. Kuchnir, "Measurement of the replacement correction factor for parallel-plate chambers in electron fields," *Med. Phys.* 18, 1237-1243 (1991).
  5. L. O. Mattsson, K. A. Johansson, and H. Svensson, "Calibration and use of plane-parallel ionization chambers for the determination of absorbed dose in electron beams," *Acta Radiol. Oncol.* 20, 385-399 (1981).
  6. J. Van Dyk and J. C. F. MacDonald, "Charge deposition from high energy electron beams," *Radiat. Res.* 50, 20-31 (1972).
  7. J. Van Dyk and J. C. F. MacDonald, "Penetration of high energy electrons in water," *Phys. Med. Biol.* 17, 52-55 (1972).
  8. G. Wickman and T. Holmstrom, "Polarity effect in plate-parallel ionization chambers using air or a dielectric liquid as ionization medium," *Med. Phys.* 19, 637-640 (1992).
  9. H. Kubo, "Evaluation of two solid water parallel plate chambers in high energy photon and electron beams," *Med. Phys.* 20, 341-345 (1993).
  10. B. Gerbi, "The response characteristics of a newly designed plane-parallel ionization chamber in high energy photon and electron beams," *Med. Phys.* 20, 1411-1415 (1993).
  11. S. C. Klevenhagen, *Physics of Electron Beam Therapy*, Medical Physics Handbooks 13 (Hilger, Accord, MA, 1985).
  12. J. W. Boag, "Ionization Chambers" in *Radiation Dosimetry*, 2<sup>nd</sup> ed., edited by F. H. Attix and W. Roesch (Academic, New York, 1966), Vol. II.
  13. D. E. Mellenberg, R. A. Dahl, and C. Robert Blackwell, "Acceptance testing of an automated scanning water phantom," *Med. Phys.* 17, 311-314 (1990).