

今回は円筒形電離箱の中心電極の補正係数に関する Palm と Mattsson の論文を紹介します．中心電極補正は我々には馴染みの薄い係数です．現在の世界のプロトコルは Rogers らのグループや Ma と Nahum が行ったモンテカルロシミュレーションによる結果が採用されています．本来であれば，Ma と Nahum の論文を紹介したいのですが，頁数が 30 頁以上あるので要約が無難と思われます．それでは紹介の意味合いも薄れるので，今回は中心電極補正の実験報告である Palm と Mattsson の論文を紹介させていただきます．

この論文から，このような繊細な係数の実験の難しさが伺われます．日本でこのような実験ができる施設は非常に少ないでしょう．しかし，線量評価プロトコルを立案するということは，このような地道な研究が必須であるということが良く理解できる論文です．皆さん，よく御賞味下さい．

## Experimental study on the influence of the central electrode in Farmer-type ionization chambers

(Farmer 形電離箱の中心電極の影響に関する実験的研究)

A. Palm and O. Mattsson

Phys. Med. Biol. 44, 1299-1308, 1999.

**Abstract** IAEA TRS-381 プロトコルでは，空気カーマ電離箱校正とファントム中測定における中心電極擾乱を  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  で考慮する．これらの補正係数の値は主に，モンテカルロシミュレーションに基づく．今回の研究では，NE-2571 電離箱の  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  に関するグラファイト電極と比較した実験データを示す．その他，NE-2581 電離箱の直径 3 mm の A-150 製中心電極の相対的影響も調べる．1 mm のアルミニウム電極に対する実験より求めた  $k_{\text{cel}}$  の値は  $1.008 \pm 0.2\%$  である．また，光子と電子ビームにおける  $p_{\text{cel}}$  はそれぞれ  $0.993 \pm 0.2\%$ ， $0.997 \pm 0.2\%$  である．実験データとモンテカルロシミュレーションは 0.2% 以内で一致する．吸収線量算出において，A-150 中心電極の直径の有意な影響はない．

### 1. はじめに

電離箱線量評価は，測定した信号が電離箱の存在によって生じる擾乱に対して補正しなければならない定式に基づくものである．円筒形電離箱の中心電極は擾乱の原因の一つである．その影響はいろいろな方法で考慮される．NACP(1980)はグラファイトもしくは A-150 でできた均質な構造の基準検出器を勧告した．NACP プロトコルでは中心電極擾乱は無視できると仮定していたが，AAPM(1983)プロトコルでは影響を考慮しないことを選択した．IAEA プロトコル TRS-277 (IAEA 1987) では校正と実際の測定での中心電極の組み合わせた影響を，global 補正係数で考慮した．TRS-381 (IAEA 1997) では，二つの別の補正係数を用いる簡単な定式を採用した．その二つの係数は，空気カーマ電離箱校正に関係する  $k_{\text{cel}}$  とファントム中の測定に関係する  $p_{\text{cel}}$  である．この論文では後者の TRS-381 の記法を用いた．

中心電極補正係数はこれまで，実験 (Kristensen1983, Mattsson1984, Andreo ら 1992, Nyström と Karlsson1993, Leitner ら 1994, Kosumen ら 1994) とモンテカルロ法 (Nath と Schultz1981, Smyth と McEwan1984, McEwan と Smyth1984, Rogers ら 1985, Ma と Nahum1993) の両方で求められてきた．Kristensen(1983)は種々の直径のアルミニウム電極に対して， $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線において空中の  $k_{\text{cel}}$  を求めた．ファントム中の測定は Mattsson(1984)によって行われ，高エネルギー電子ビ

ームにおけるアルミニウム製電極の  $p_{\text{cel}}$  は 1 であると仮定することで, Farmer 形電離箱に対する  $p_{\text{cel}}$  が  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線と異なるエネルギーの X 線ビームで求められた. この仮定は後に, Andreo ら(1992) によって問題とされた. Mattsson と Johansson(1984)による  $k_m k_{\text{att}} k_{\text{cel}} p_{\text{cel}}$  の実験値は, 高エネルギー電子ビームにおける積  $k_{\text{cel}} p_{\text{cel}}$  を導くために用いられた (Anredo ら 1992). Nyström と Karlsson(1993) は, 高エネルギー電子ビームにおける NE-2571 電離箱の  $p_{\text{cel}}$  を  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線に対比させて求めた. 直径 2 mm のアルミニウム中心電極をもつ電離箱に対する中心電極補正の実験的研究が Leitner ら (1994)によって発表された. Kosunen ら(1994)は NE-2571 に対する  $p_{\text{cel}}$  の値を得た. しかし, 実験方法は詳しく述べられなかった. モンテカルロ法を用いて Ma と Nahum(1993)は, 種々のエネルギーの光子と電子ビームにおける  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  を計算した. この研究の中では, 中心電極の直径の影響も調べられた. Nath と Shultz(1981), Smyth と McEwan(1984), McEwan と Smyth(1984)および Rogers ら(1985)の初期のモンテカルロ研究では,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線における空中でのみの中心電極の影響を考えている.

TRS-277(IAEA1987)が発行されたときには, 電離箱の校正は主に空気カーマに基づいており, 中心電極の global 補正の利用が許された. 水吸収線量による校正が一般的である現在では, ファントム中の測定のみとなる. この場合, 異なる線質における  $p_{\text{cel}}$  のみが必要となる. Ma と Nahum(1993)による研究では,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線での自由空間 ( $k_{\text{cel}}$ ) と種々のエネルギーの高エネルギー光子と電子ビームでのファントム中 ( $p_{\text{cel}}$ ) という別々の中心電極擾乱係数が求められた. 現在, このような計算値を検証する実験データが不足している.

治療の線量測定で用いられる円筒形電離箱の大半は, 1 mm 直径の中心電極をもつ. しかし, NE-2581 は A-150 組織等価プラスチックで作られた 3 mm 直径の電極をもつ. 現在の線量評価プロトコルでは電極直径に依存しない吸収線量決定を考えている. すなわち, アルミニウムに対する場合を除くと, 測定実効点も中心電極擾乱に対する補正のいずれも直径によっては変わらない. 我々の知る限り, NE-2581 電離箱の電極直径による線量評価への起こりうる影響については, これまで調べられていない.

今回の研究の目的は, 直径 1 mm のアルミニウム製中心電極をもつ NE-2571 電離箱の種々の線質における  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  の実験データを提供し, Ma と Nahum(1993)によるモンテカルロ計算値と比較することにある. この研究はまた, NE-2581 電離箱の 3 mm 直径の A-150 中心電極の相対的影響に関して, IAEA の実務規約を調べることも目的にしている.

## 2. 定式

IAEA TRS-381(IAEA1997)では, 電離箱の線質  $Q$  のカーマで校正された電離箱を用いた水吸収線量は,

$$D_{w,Q}(P_{\text{eff}}) = M_Q \cdot N_{D,\text{air}} \cdot (s_{w,\text{air}})_Q \cdot p_Q \quad (1)$$

ただし,

$$N_{D,\text{air}} = N_K \cdot (1 - g) \cdot k_{\text{att}} \cdot k_m \cdot k_{\text{cel}} \quad (2)$$

$$p_Q = [p_{\text{wall}} \cdot p_{\text{cav}} \cdot p_{\text{cel}}]_Q \quad (3)$$

である。  $M_Q$  は線質  $Q$  における電位計の読み値で、温度気圧 ( $p_{\text{TP}}$ )、再結合 ( $p_s$ )、極性効果と漏れ電流の補正をしてある。  $N_{D,\text{air}}$  は空気に対する吸収線量電離箱係数、  $s_{w,\text{air}}$  は空気に対する水の Spencer-Attix 阻止能比、  $p_Q$  は全擾乱係数である。  $N_K$  は空気カーマ校正定数、  $g$  は制動放射により失われるエネルギー割合であり、  $k_{\text{att}}$  と  $k_m$  はそれぞれ電離箱壁の減弱と電離箱壁の空気不等価を考慮している。  $p_{\text{wall}}$  は壁材の媒質との等価性の欠如、  $p_{\text{cav}}$  は空洞の挿入による擾乱を補正する。  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  はそれぞれ、  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線による空中校正と高エネルギー光子と電子ビームにおけるファントム中測定での中心電極の存在によって生じるすべての影響を考慮している<sup>†</sup>。  $p_Q$  を因子に分解しているのは、個々の擾乱係数が小さく、独立しているという仮定に基づいている。

### 3. 器具

#### 3. 1. 電離箱

Nuclear Enterprise の Farmer 形である NE-2571 を 2 本、NE Robust Farmer 2581 を 3 本用いた。NE-2571 の 1 本は中心電極材を変えた。また NE-2571 の 1 本は 1 mm の中心電極に変更した (Table 1 参照)。

Table 1. Specification of ionization chambers (C. el. = central electrode).

Chamber type	Wall material	C. el. material	C. el. diameter
NE 0.6cm <sup>3</sup> Farmer 2571 No.599	C	Al/C	1mm/0.9mm
NE 0.6cm <sup>3</sup> Farmer 2571 No.802	C	Al	1mm
NE 0.6cm <sup>3</sup> Robust Farmer 2581 No.199	A-150	A-150	1mm
NE 0.6cm <sup>3</sup> Robust Farmer 2581 No.750	A-150	A-150	3mm
NE 0.6cm <sup>3</sup> Robust Farmer 2581 No.961	A-150	A-150	3mm

#### 3. 2. 電位計

電離箱は Janus AC 電位計 (Precitron AB, Sweden) に接続した。通常の動作バイアス電圧は - 400V であった。再結合補正係数を決定するために、- 100V も用いた。

#### 3. 3. 照射機器

$^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線照射は、測定点での線量率が約 0.2Gymin<sup>-1</sup> の TEM Mobaltron 治療装置を用いて行った。自由空間中の測定は線源空洞中心間距離 100 cm の 10×10 cm の照射野サイズで行った。ファントム

<sup>†</sup> IAEA TRS-277 (IAEA1987) では、積  $k_{\text{cel}}p_{\text{cel}}$  を  $p_{\text{cel}}$  と表した。しかし、それが global 補正係数であるということを明らかにするために  $p_{\text{cel-gbl}}$  という名称にした (IAEA1997)。

ム中測定では，線源表面間距離 100 cm で 10×10 cm の照射野サイズを用いた．

4MV の光子照射では Varian Clinac 600C 直線加速器を用いた．その他の測定はすべて Varian Clinac 2300CD 直線加速器を用いて行った．線源表面間距離 100 cm, 10×10 cm の照射野を用いた．ただし，電子ビームの  $p_{\text{cel}}$  の決定では 13×13 cm の照射野を用いた．照射における線量率はほぼ 3Gymin<sup>-1</sup> であった．線質の明細は Table 2 を参照．

#### 4. 方法

##### 4. 1. NE-2571 電離箱に対する $k_{\text{cel}}$ の決定

Kristensen(1983)はグラファイトで特別に設計した電離箱のアルミニウム電極を置き換えることにより，グラファイト壁電離箱 NE-2505 に対する  $k_{\text{cel}}$  を推定する方法を導入した．今回の研究では同じ手法を採用した．ただし，代わりに通常のグラファイト壁の電離箱である NE-2571 を用いた．グラファイト電極に対する  $k_{\text{cel}}$  を 1 と仮定して，アルミニウム電極の  $k_{\text{cel}}$  を求めた．

この実験方法は電極材を交換するとき，電離箱を分解し再び組み上げることが必要であった．この作業によって電離箱体積に変化が生じないことを確認するために，交換の前後で電離箱の恒常性を確認した．この工程は何回か繰返した．恒常性の確認は全壁厚が約 0.5gcm<sup>-2</sup> となるようにグラファイトビルドアップキャップを用い，<sup>60</sup>Co  $\gamma$  線による自由空間中で行った．

$k_{\text{cel}}$  を求めるために，<sup>60</sup>Co  $\gamma$  線で自由空間中の測定を行った．グラファイトを用いる測定から始め，測定の設定の再現性を推定するために，三つの群の測定を電極材を交換する前に行った．同じ手順をアルミニウム電極でも繰返し，電極を交換した後でも繰返した．グラファイトビルドアップキャップを用いた．アルミニウムとグラファイトでそれぞれ 1.00 mm と 0.90 mm という電極直径の若干の相違による体積の変化は考慮した．これは異なる電極を用いるときの電離箱体積を知る必要がある．空気吸収線量電離箱係数より，グラファイト電極を用いたときの体積は <sup>60</sup>Co の自由空間測定による  $N_K$  と IAEA TRS-381(IAEA 1997)による  $k_{\text{att}}k_m=0.992$  と  $k_{\text{cel}}=1$  を用い，次式より得た．

$$V_{\text{cav}}^{\text{C}} = \frac{1}{N_D^{\text{C}} \rho_{\text{air}}} \frac{W_{\text{air}}}{e} = \frac{1}{N_K^{\text{C}} (1-g) k_{\text{att}} k_m k_{\text{cel}}^{\text{C}} \rho_{\text{air}}} \frac{W_{\text{air}}}{e} \quad (4)$$

電極体積は電極の大きさをマイクロメータを用い注意深く測定して得た．直径は電極の軸に沿っ

**Table 2.** 線質明細．光子ビームは線源検出器間距離一定の電離箱平面で 10 cm×10 cm の照射野における 20 cm と 10 cm の深さの吸収線量に比率  $\text{TPR}_{10}^{20}$  で規定している．電子ビームの場合には，ファントム中の深部における平均エネルギー  $\bar{E}_z$  を，TRS-277 の表のデータより  $\bar{E}_0$  を用いて IAEA TRS-381(IAEA 1997)に従って求めている．

Nominal energy	Beam quality	
Photons:		
<sup>60</sup> Co radiation	$\gamma$	<sup>60</sup> Co
4 MV		$\text{TPR}_{10}^{20} = 0.62$
6 MV		$\text{TPR}_{10}^{20} = 0.68$
15 MV		$\text{TPR}_{10}^{20} = 0.76$
Electrons:		
6 MeV		$\bar{E}_z = 2.4 \text{ MeV}$
10 MeV		$\bar{E}_z = 4.0 \text{ MeV}$
12 MeV		$\bar{E}_z = 5.0 \text{ MeV}$
15 MeV		$\bar{E}_z = 7.9 \text{ MeV}$
20 MeV		$\bar{E}_z = 14.2 \text{ MeV}$

た3点で測定した。測定の分解能は0.01 mmであった。

中心電極材のみが異なる二つの同じ電離箱に対する空気吸収線量電離箱係数は、定義より等しい。体積の相違に対する補正を用い、以下の関係が得られる。

$$N_D^{Al} = \frac{V_{cav}^C}{V_{cav}^{Al}} N_D^C \quad (5)$$

ここで、AlとCは電離箱の中心電極の材料、すなわちアルミニウムとグラファイトである。

式(2)と(5)より、

$$N_K^{Al}(1-g)k_{att}k_mk_{cel}^{Al} = \frac{V_{cav}^C}{V_{cav}^{Al}} N_K^C(1-g)k_{att}k_mk_{cel}^C \quad (6)$$

$k_{cel}^C = 1$ と仮定することにより、 $k_{cel}^{Al}$ は次式より求められる。

$$k_{cel}^{Al} = \frac{N_K^C V_{cav}^C}{N_K^{Al} V_{cav}^{Al}} = \frac{M_Q^{Al} V_{cav}^C}{M_Q^C V_{cav}^{Al}} \quad (7)$$

#### 4. 2. NE-2571 電離箱の $p_{cel}$ の決定

$p_{cel}$  の“絶対的”決定は上記で述べたものと同じ方法を用いて行った。この方法は、アルミニウム電極で生じる擾乱をグラファイト電極そのものに対して求めるという意味で“絶対的”である。これにより、特定の線質におけるアルミニウムの  $p_{cel}$  に関する仮定を避けることができる。

測定は水ファントム中の基準深に電離箱の測定実効点を配置して行った。一つの NE-2571 電離箱は各測定の前後で基準検出器として用い、標準化に用いた。 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線、4, 6, および 15MV の光子ビーム、6, 10 および 20MeV の電子ビームでの繰返し測定は、まずグラファイト電離箱の電離箱で行った。次に、これをアルミニウム電極に交換し、同じ測定を繰返した。最後に、グラファイト電極をこの電離箱に戻し、測定を再び繰返した。毎回、電離箱は同じ吸収線量を照射した。全照射は水平ビーム配置で行った。各測定群における加速器の出力は非常に安定していることが分かった。そこで外部モニタ電離箱は用いなかった。 $k_{cel}$  の場合、電位計の読み値は温度気圧を同じ気圧計と温度計を用いて補正した。極性効果と漏れ電流は無視できた。再結合効果はいずれの場合も同じであることが分かったので、消去される。空洞サイズの相違に対する補正は、上記で述べたように行った。

アルミニウムあるいはグラファイト電極を用いて求めた吸収線量を等しいと置くことにより、

$$D_{w,Q}(P_{eff}) = M_Q^{Al} N_{D,air}^{Al} (s_{w,air})_Q [p_{wall} p_{cav} p_{cel}^{Al}]_Q = M_Q^C N_{D,air}^C (s_{w,air})_Q [p_{wall} p_{cav} p_{cel}^C]_Q \quad (8)$$

$p_{cel}^C = 1$ と仮定すると、線質  $Q$  における  $p_{cel}^{Al}$  は次式から求められる。

$$[p_{cel}^{Al}]_Q = \frac{M_Q^C N_{D,air}^C}{M_Q^{Al} N_{D,air}^{Al}} = \frac{M_Q^C V_{cav}^{Al}}{M_Q^{Al} V_{cav}^C} \quad (9)$$

#### 4. 3. NE-2581 電離箱における中心電極直径の相対的影響

電極直径の吸収線量決定への影響の可能性について、IAEA 実務規約を調べた。直径 1 mm と 3 mm

の A-150 中心電極のその他は同じ電離箱を用いた水中で求めた  $D_w$  の相対値を調べた．2 節で示した定式より，

$$\frac{D_{w,Q}^{\text{ch1}}}{D_{w,Q}^{\text{ch2}}} = \frac{[M_Q N_K k_{\text{cel}} p_{\text{cel}}]^{\text{ch1}}}{[M_Q N_K k_{\text{cel}} p_{\text{cel}}]^{\text{ch2}}} \quad (10)$$

を得る．この確認では均質な A-150 電離箱 NE-2581 を用いた．この電離箱の中で 2 本は通常のものであるが，1 本は 3.0 mm 直径の中心電極の代わりに 1 mm の電極をもつ (Table 1 参照)．

測定は高エネルギーの光子と電子ビームで，水ファントム中の基準深に測定実効点を配置して行った．測定は設定の再現性を推定するために，全く別に三回繰返した．測定条件は 4.2 で述べた条件と同じであった．

式(10)の  $D_w$  の比を異なる線質で計算した．各電離箱の  $N_K$  は 2581 用のビルドアップキャップ (PMMA) を付けた電離箱を  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線の自由空間中で校正することで求めた．TRS-381(IAEA 1997)に従い，A-150 に対する  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  は 1 であると仮定した．2 本の市販の電離箱の平均値 ( $\bar{D}_w^{3\text{mm}}$ ) を，電極を変えた電離箱との比較に用いた．

## 5. 結果

### 5. 1. NE-2571 電離箱の $k_{\text{cel}}$ と $p_{\text{cel}}$ の決定

電極交換前後の恒常性確認より，レスポンスに影響がなく 0.1% 以内であることが分かった．よって，電離箱体積は電極交換後に再現されていると結論される．

グラファイトとアルミニウム電極の場合の空洞体積は  $0.4 \pm 0.1\%$  異なる．誤差は 1 標準誤差であり，それは長さの測定によって生じるタイプ B の標準誤差が主である．それは測定の分解能の半分，0.005 mm とした．

実験によって求めた 1 mm アルミニウム中心電極の 0.9 mm 直径のグラファイト電極に対する  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  を Table 3 に示す．推定誤差は電位計の読み値のタイプ A の誤差 (通常は 0.02% 以下で，20 MeV で最大 0.08%) と設定の再現性の誤差 (0.1%) と空洞体積の相違に対する補正の結合

である．温度気圧補正の誤差は比率の中で消去されると考えられる．

**Table 3.** 直径 1 mm のアルミニウム中心電極の 0.9 mm グラファイト電極に対する  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  の実験による値．相対的結合誤差 (%) は 1 標準偏差である．

Nominal energy	$k_{\text{cel}}$	$p_{\text{cel}}$
Photons:		
$^{60}\text{Co}$	$1.008 \pm 0.2\%$	$0.992 \pm 0.2\%$
4 MV		$0.993 \pm 0.2\%$
6 MV		$0.993 \pm 0.2\%$
15 MV		$0.993 \pm 0.2\%$
Electrons:		
6 MeV		$0.998 \pm 0.2\%$
10 MeV		$0.997 \pm 0.2\%$
20 MeV		$0.997 \pm 0.3\%$

**Table 4.** 同じ材質 (A-150) の直径 1 mm の電極に変更した NE-2581 電離箱に対する通常の NE-2581 電離箱で求めた水吸収線量． $D_w^{3\text{mm}} / D_w^{3\text{mm}'}$  は 2 本の通常の NE-2581 電離箱に関するものである．相対的結合誤差 (%) は 1 標準偏差である．

Nominal energy	$D_w^{3\text{mm}} / D_w^{1\text{mm}}$	$D_w^{3\text{mm}} / D_w^{3\text{mm}'}$
Photons:		
6 MV	$1.002 \pm 0.3\%$	$1.001 \pm 0.3\%$
15 MV	$1.003 \pm 0.3\%$	$1.002 \pm 0.3\%$
Electrons:		
12 MeV	$1.000 \pm 0.3\%$	$1.002 \pm 0.3\%$
15 MeV	$1.002 \pm 0.3\%$	$1.002 \pm 0.3\%$
20 MeV	$1.002 \pm 0.3\%$	$1.002 \pm 0.3\%$

## 5. 2. NE-2581 電離箱の中心電極直径の相対的影響

Table 4 に A-150 中心電極の直径の相対的影響の結果を示す. 各結果は 3 群の測定の平均である.  $D_w$  に含まれる個々の係数の誤差は推定によるものであり (Table 5 参照), それを結合することで  $D_w$  の比で 0.3%(1 s.d.)の誤差となる. また, 温度気圧補正の誤差は比率の中で消去されと考える.

Table 5. 推定誤差. 値は 1 標準偏差である.

	Type A (%)	Type B (%)
$M_u$	0.06 †	
$p_s$		0.1
$N_K$	0.1 ‡	
Set-up		0.1
Combined	0.2	

† 最大

‡ 複数の校正の統計誤差

## 6. 検討

IAEA TRS-277(OAEA 1987)によると, global 補正值 1.008 は高エネルギー電子ビームにおける直径 1 mm のアルミニウム中心電極をもつ円筒形電離箱を用いる場合に適用される. 勧告された  $p_{\text{cel-global}}$  係数は Rogers ら(1985)によるモンテカルロ計算した  $k_{\text{cel}}$  係数と Mattsson と Johansson(1984) と Mattsson(1984)による  $p_{\text{cel}}$  の実験結果から導かれた. 実験は電子ビームにおけるアルミニウム電極に対する  $p_{\text{cel}}$  は 1 であり, 直径 1 mm のグラファイト電極は空気等価とみなせるという二つの仮定に基づいたものであった. その他に,  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線の自由空間中とファントム中で線質の有意な差がないという仮定が, Rogers らの  $k_{\text{cel}}$  を  $p_{\text{cel-global}}$  係数(Nyström 1993)として用いるときには必要であった. 最初の仮定は Andreo ら(1992)によって疑問視された. Andreo らは実験より, 電子ビームにおける積  $k_{\text{att}}k_m k_{\text{cel}}p_{\text{cel}}$  を求め, 理論による  $k_{\text{att}}k_m$  係数の値を用いたときのこの積を比較した. そして, 勧告されたアルミニウム中心電極に対する global 補正係数 1.008 は大きすぎるだろうと指摘した. Ma と Nahum(1993)によるモンテカルロシミュレーションは, この結論を指示した. Table 6 に再掲した Ma と Nahum のモンテカルロデータに基づき, TRS-381(IAEA 1997)は電子ビームにおける global 補正係数に対応する中心電極補正を 1.004 と勧告した. 今回の研究ではこれに対応する補正として 1.005 を得ている (Table 6).

Table 6 では,  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  は別々にも示している. モンテカルロ法を用いれば, 理想的な電離箱すなわち空気電極の電離箱に対する補正係数を得ることができる. 実験データは 1 mm 直径のグラファイト電極に対する  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  を 1.0 と仮定して (これは光子ビームにおいて確定された(Ma と Nahum 1993)), グラファイトに対して導いている. しかし, ファントム中での電子ビームにおける電極の影響の試験からは, 1 mm のグラファイト電極は一般的に最大線量深において幾分電離

箱のレスポンスを下げることを示されている (Ma と Nahum 1993). その影響は入射電子エネルギーが非常に高ければ無視できるようになる. 10MeV での実験で求めた  $p_{\text{cel}}$  係数への影響は, 約 0.1-0.2% の低下であろう. しかし, 6MeV ではさらに大きいであろう. 比較のために, Table 6 にグラフィットを基準にしたモンテカルロの結果を示す. 実験で求めた  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  係数とモンテカルロデータは, 標準誤差以内で一致する (後者に対しては通常 0.1%). 測定と計算に用いた光子ビームの線質は同じである. しかし, 加速器からの電子ビームの線質は Ma と Nahum のシミュレーションで用いたより理想的な電子スペクトルと異なる. これは重要なことと考えられ, それは Ma と Nahum が電子ビームのエネルギーと角度分布が擾乱効果に影響するとした事実によって示される.

Table 6. モンテカルロを用いて Ma と Nahum(1993)が計算した中心電極補正係数と今回の研究で実験により求めた  $k_{\text{cel}}$  と  $p_{\text{cel}}$  係数の比較. この結果は 1 mm 直径のアルミニウム中心電極をもつ NE-2571 電離箱に対するものである. Ma と Nahum のデータは空気に対するものとグラフィットに対するものである. 実験データはグラフィットに対するものである.

Nominal energy	Depth in water (cm)	Ma and Nahum				Present work	
		Rel. air		Rel. C		Rel. C	
		$p_{\text{cel}}$	$k_{\text{cel}}p_{\text{cel}}$	$p_{\text{cel}}$	$k_{\text{cel}}p_{\text{cel}}$	$p_{\text{cel}}$	$k_{\text{cel}}p_{\text{cel}}$
$^{60}\text{Co}$	In air	1.006( $k_{\text{cel}}$ )		1.006( $k_{\text{cel}}$ )		1.008( $k_{\text{cel}}$ )	
Photons:							
$^{60}\text{Co}$	5	0.993	0.999	0.993	0.999	0.992	1.000
4 MV	5	0.994	1.000	0.994	1.000	0.993	1.001
6 MV	5	0.993	0.999	0.994	0.999	0.993	1.001
15 MV	5	0.996	1.002	0.995	1.001	0.993	1.001
Electrons:							
5 MeV	1	1.001	1.007	0.999	1.005		
6 MeV	1.5					0.998	1.006
10 MeV	2.5					0.997	1.005
13 MeV	3	1.000	1.006	0.998	1.004		
20 MeV	3	0.998	1.004	0.999	1.004	0.997	1.005

Table 7 では今回の研究の結果を, これまでの実験的研究と比較している. NE-2571 電離箱内の 1 mm 直径のアルミニウム電極に対する  $k_{\text{cel}}$  の決定では 1.008 を得た. これは Kristensen(1983)が似た電離箱である NE-2505 に対して得た値と一致する. Mattsson と Johansson(1984)による測定値は Andreo ら(1992)によって  $k_{\text{att}}k_m$  に対して補正され, 1 mm 直径のアルミニウム電極に対する  $k_{\text{cel}}p_{\text{cel}}$  は 1.004 とされた. 今回の研究におけるこれに対応する値は 1.005 であり, 良好な一致である. Mattsson(1984)の研究では, 種々の光子ビームの線質における  $p_{\text{cel}}$  は, 20MeV の電子ビームに対して標準化された. Mattsson のデータの誤差が述べられていない. しかし, 今回の研究と同じであると仮定すると, これらは実験誤差以内で一致する. 基準として Fricke と均質なグラフィット電離箱を用いた Nyström と Karlsson(1993)は, 電子ビームにおける 1 mm 直径のアルミニウム電極に対する  $p_{\text{cel}}$  を  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$  線を基準として求めた. その結果は 0.5% の増であるが, 今回の研究



で得た値に一致する.

A-150 電極の直径の吸収線量に対する影響は, Table 4 に示す  $D_w$  の比率 (式(10)) における 1.0 からの偏差として示される. しかし, 異なる電極直径 (3 mm と 1 mm) をもつ電離箱における偏差は, 通常の 2 本の電離箱における偏差よりも大きくない. また, 推定誤差よりも小さいことが分かる. さらに, この比率は線質によって変わらない. したがって, 今回の研究より A-150 中心電極の直径の吸収線量決定への影響は有意でないことが分かったと結論できる.

Table 7. 今回の研究で実験によって求めた中心電極擾乱係数と他の研究者 (Kritensen 1983, Mattsson と Johansson 1984, Nyström と Karlsson 1993) がこれまで求めたものとの比較. この結果は直径 1 mm のアルミニウム中心電極をもつグラフアイト壁の円筒形電離箱に対するものである. 示した誤差は 1 標準偏差である.

Nominal energy	Kristensen	Mattsson and Johansson	Mattsson	Nyström and Karksson	Present work
$^{60}\text{Co}$	$k_{\text{cel}}$ 1.008 0.2%	±			$k_{\text{cel}}$ 1.008 0.2%
Photons: $^{60}\text{Co}$			$p_{\text{cel}} / p_{\text{cel}}^{20\text{MeV}}$ 0.991		$p_{\text{cel}} / p_{\text{cel}}^{20\text{MeV}}$ 0.995 0.3%
4 MV			0.991		0.996 0.3%
6 MV					0.996 0.3%
11 MV			0.994		
15 MV					0.996 0.3%
16 MV			0.995		
Electrons: 20 MeV		$k_{\text{cel}}p_{\text{cel}}$ 1.004 0.4%	±		$k_{\text{cel}}p_{\text{cel}}$ 1.005 0.3%
20 MeV					$p_{\text{cel}} / p_{\text{cel}}^{\text{Co}}$ 1.005 0.3%
21 MeV				$p_{\text{cel}} / p_{\text{cel}}^{\text{Co}}$ 1.005 0.3%	±

#### 参考文献

- AAPM 1983 Task Group 21: protocol for the determination of absorbed dose from high-energy photon and electron beams *Med. Phys.* 10 741-71
- Andreo P, Rodrigues L N, Lindborg L and Kracpelien T 1992 On the calibration of plane parallel ionization chambers for electron beam dosimetry *Phys. Med. Biol.* 37 1147-65
- IAEA (International Atomic Energy Agency) 1987 Absorbed dose determination in photon and electron beams: an international code of practice *Technical Reports Series* 277 (Vienna: IAEA)
- 1997 The use of plane parallel ionization chambers in high energy electron and photon beams: An international code of practice *Technical Reports Series* 381 (Vienna: IAEA)
- Kosunen A, Järvinen H and Sipilä P 1994 Optimum calibration of NACP type plane parallel ionization

- chambers for absorbed dose determination in low energy electron beams *Measurements Assurance in Dosimetry. Proc. IAEA Symp. (Vienna, 1993)* (Vienna: IAEA) pp 505-13
- Kristensen M 1983 Measured influence of the central electrode diameter and material on the response of a graphite ionization chamber to cobalt-60 gamma rays *Phys. Med. Biol.* 28 1269-78
- Leitner A, Tiefenböck W and Witzani J 1994 Investigation of some aspects of the IAEA code of practice for absorbed dose determination in photon and electron beams *Measurement Assurance in Dosimetry. Proc. IAEA Symp. (Vienna, 1993)* (Vienna: IAEA) pp 411-18
- Ma C-m and Nahum A E 1993 Effect of size and composition of the central electrode on the response of cylindrical ionization chambers in high-energy photon and electron beams *Phys. Med. Biol.* 38 267-90
- Mattsson L O 1984 Application of the water calorimeter, Fricke dosimeter and ionization chamber in clinical dosimetry: an evaluation of correction factors and interaction coefficients *PhD Thesis* Göteborg University, Sweden
- Mattsson L O and Johansson K-A 1984 Experimentally determined wall correction factors,  $k_m$  and  $k_{att}$ , for cylindrical ionization chambers used in high energy photon and electron beam dosimetry *Report RADFYS 84:04* (Göteborg, Sweden: Department of Radiation Physics, Göteborg University)
- McEwan A C and Smyth V G 1984 Comments on 'Calculated response and wall correction factors for ionization chambers exposed to  $^{60}\text{Co}$  gamma-rays' *Med. Phys.* 11 216-18
- NACP (Nordic Association of Clinical Physics) 1980 Procedures in external radiation therapy dosimetry with electron and photon beams with maximum energies between 1 and 50 MeV *Acta Radiol. Oncol.* 19 55-79
- Nath R and Schulz R J 1981 Calculated response and wall correction factors for ionization chambers exposed to  $^{60}\text{Co}$  gamma-rays *Med. Phys.* 8 85-93
- Nyström H 1993 Radiation quality dependent factors in dosimetry and their correction to photon and electron beam characteristics *PhD Thesis* University of Umea, Sweden
- Nyström H and Karlsson M 1993 Correction factors applied to plane-parallel ionization chambers *Phys. Med. Biol.* 38 311-22
- Rogers D W O, Bielajew A F and Nahum A E 1985 Ion chamber response and  $A_{wall}$  correction factors in a  $^{60}\text{Co}$  beam by Monte Carlo simulation *Phys. Med. Biol.* 30 429-43
- Smyth V G and McEwan A C 1984 Verification of a result of Kristensen by Monte Carlo modeling *Phys. Med. Biol.* 29 1279-80