

## 論文

対電離箱を用いた中性子・ $\gamma$ 線混合場における線量測定の新しい手法について納富昭弘<sup>a</sup>、杉浦紳之<sup>a</sup>、伊藤哲夫<sup>a</sup>、榮 武二<sup>b</sup>、照沼利之<sup>b</sup>、藤淵俊王<sup>c</sup>An alternative method of neutron-gamma mixed-field dosimetry  
by using paired ionization chambersA. Nohtomi<sup>a</sup>, N. Sugiura<sup>a</sup>, T. Itoh<sup>a</sup>, T. Sakae<sup>b</sup>, T. Terunuma<sup>b</sup> and T. Fujibuchi<sup>c</sup>**Abstract**

In order to expand the available energy range of neutron dosimetry by the paired ionization chambers, an alternative method has been newly proposed. The method employs another TE-TE chamber with a gamma-ray attenuator instead of conventional C-CO<sub>2</sub> chamber. A rough comparison of uncertainty estimates between conventional method and newly-proposed one is carried out. The result indicates that the accuracy of the present method is far less-sensitive to the change of neutron energy and is evidently superior to that of the conventional method.

*KEYWORDS* : Paired ionization chamber, Neutron absorbed dose, Neutron-gamma mixed field, Relative sensitivity, Energy dependence

---

<sup>a</sup> 近畿大学原子力研究所

*Atomic Energy Research Institute, Kinki University*

<sup>b</sup> 筑波大学・陽子線医学利用研究センター

*Proton Medical Research Center (PMRC), University of Tsukuba*

<sup>c</sup> 茨城県立医療大学・保健医療学部

*Ibaraki Prefectural University of Health Science*

この論文は、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 614 (2010) 159–161に発表されたもので、その修正和文版を掲載するものである。

生体組織に対する中性子の吸収線量の評価は、医学や生物学などを含む様々な研究分野に深く関連した重要な課題である。このような測定が必要となるたいていの現場では、中性子のフルエンスは必ずガンマ線のフルエンスを伴っているものである。さらに、中性子ビームの線質も、状況に応じて刻々と変化することは決して珍しいことではない。そのような中性子線とガンマ線の混合場において、両者の吸収線量の値を分離して測定するための最も精度のよい方法として、対電離箱の使用が広く受け入れられてきた<sup>1)2)</sup>。従来の対電離箱法においては、組織等価ガスを充填した組織等価壁電離箱 (TE-TE chamber) が Type-T 電離箱として用いられ、炭酸ガスを充填した炭素壁電離箱 (C-CO<sub>2</sub> chamber) が Type-U 電離箱として用いられることが一般的であった。C-CO<sub>2</sub> chamber では、空洞や壁、周辺の構造物から全ての水素含有物を取り除くことにより、中性子の検出感度を低く抑えている。中性子とガンマ線の混合場において、それぞれの電離箱の応答を、基準のガンマ線に対する相対感度で除した値である  $R_T$  と  $R_U$  は、次の連立方程式で与えられる。

$$R_T = k_T D_N + h_T D_G \quad (1),$$

$$R_U = k_U D_N + h_U D_G \quad (2).$$

ここに、 $D_N$  と  $D_G$  は混合場中の中性子とガンマ線の生体組織吸収線量である。 $k_T$  と  $k_U$  はそれぞれの電離箱の校正に使用したコバルト60ガンマ線に対する感度に対する中性子相対感度、 $h_T$  と  $h_U$  はそれぞれの電離箱の校正に使用したコバルト60ガンマ線に対する感度に対するガンマ線相対感度であり、これらの値 ( $k_T$ ,  $k_U$ ,  $h_T$ ,  $h_U$ ) は、単に"相対感度"と呼ばれることが多い。

ガンマ線相対感度 ( $h_T$ ,  $h_U$ ) は一般的に充分により精度で知られており、通常は1に近い値である。

0.2~10 MeVのガンマ線に対して組織等価電離箱の  $h_T$  は0.97~1.00の値をとり、炭素壁電離箱の  $h_U$  は0.98~1.00の値をとる<sup>3)</sup>。組織等価電離箱の中性子相対感度  $k_T$  も良い精度で計算することができて、その値は1に近い。事実上、問題となるのはC-CO<sub>2</sub> chamberの中性子相対感度  $k_U$  である。なぜなら、この値はあまり精度良く計算でもとめることができないからである。更に、C-CO<sub>2</sub> chamberの  $k_U$  は Waterman 等 (Fig.1) が報告しているように、中性子のエネルギーに著しく依存することが知られている<sup>4)</sup>。Fig.1の結果は、Waterman 等が自分たちの測定結果をもとにして評価したものである。以上のような事情により、対電離箱による中性子吸収線量評価結果は混合場に存在する中性子のエネルギー範囲に大きく依存することが理解できる。つまり、中性子のエネルギースペクトルが精密にわかっていないと、正確な線量評価は難しいということとなる。しかしながら、中性子エネルギースペクトルの測定は一般的に実行が困難で時間のかかる作業であることを気に留めて置くべきである。Hoshi等<sup>5)</sup> は、対電離箱をカリホルニウム252の線量測定に用いた。この場合、カリホルニウム252の中性子エネルギー分布はよく知られておりその最大エネルギーは10MeV程度である。彼らは  $k_U$  の値としてNIRSの研究者が求めた0.08を採用した<sup>6)</sup>。この  $k_U$  の値は、研究用原子炉で発生する核分裂中性子の線量測定にも使用されて成功をおさめている<sup>7)</sup>。この原子炉照射場においても中性子の最大エネルギーは約10MeV程度であり、そこに存在する中性子のエネルギー範囲において  $k_U$  の値は20%の精度で一定値と仮定されている<sup>8)</sup>。しかしながら、中性子エネルギースペクトルの上端が10MeVを超えてしまう状況では、このような粗い近似はもはや成立しないと考えられる。

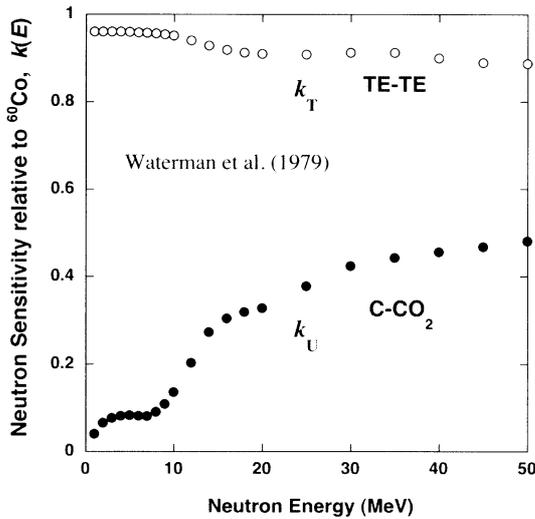


Fig. 1. Neutron sensitivities for C-CO<sub>2</sub> chamber ( $k_U$ ) and for TE-TE chamber ( $k_T$ ) relative to the sensitivity to <sup>60</sup>Co gamma-rays <sup>4)</sup>.

本論文では、上に述べた中性子エネルギー範囲に関連する対電離箱法適用の限界を克服するひとつの手法について提案する。基本的なコンセプトは、式(1)(2)の連立方程式を幾分風変わりなやり方で解くためにC-CO<sub>2</sub> chamberのかわりに、もうひとつのTE-TE chamber (Type-T' と呼ぶことにする)を使おうというものである。この電離箱自身は、Type-T'に用いられているものと全く同じものであるけれど、適切なガンマ線減衰機構(遮蔽材)を付加することにより、ガンマ線相対感度を $h_T$ から $\gamma h_T$ に落としてある。ここで、" $\gamma$ "は遮蔽材によるガンマ線の減弱率である。このような比較的薄いガンマ線遮蔽材に対して、中性子線の減弱はほぼ無視できるほど小さいであろう。であるから、 $k_T$ の値はほとんど変化しないと考えてさしつかえない。そこで、式(2)の代わりに次の式を使うことにする。

$$R_T' = k_T D_N + \gamma h_T D_G \tag{3}$$

式(1)と式(3)を連立させて方程式を解くことにより、 $D_N$ と $D_G$ は以下のように得られる。

$$D_N = \frac{R_T' - \gamma R_T}{k_T (1 - \gamma)} \tag{4}$$

$$D_G = \frac{R_T - R_T'}{h_T (1 - \gamma)} \tag{5}$$

ここで、 $h_T$ と $\gamma$ は中性子エネルギーに殆ど依存せず、またFig.1に示されているようにTE-TE chamberの $k_T$ はC-CO<sub>2</sub> chamberの $k_U$ に比べて中性子エネルギーに敏感ではないことに注意して欲しい。このような理由で、新しく提案した方法は中性子エネルギーが10MeVを超えるような状況でも適切な精度を保ったまま適用可能であると期待される。ガンマ線の減弱率( $\gamma$ )は、関心領域の近くに配置した適当なガンマ線スペクトロメータの測定結果を用いて精度良く評価できるであろう。この方法は、ふたつの電離箱のガンマ線に対する感度差を利用している。つまり、ガンマ線の割合がある程度より高い混合場に適用可能である。一方、従来の方法は中性子が主となる混合場のみ適用できるのであり、中性子線の割合が低い場においては適用が困難と考えられる。

次に、従来の方法と新しく提案された方法で評価される中性子線量の精度について考察してみよう。従来の対電離箱法で得られる中性子吸収線量 $D_N$ の精度に関しては、 $k_U$ の不確かさとの関連でICRU 26<sup>1)</sup>で議論されている。それによると、 $D_N$ の不確かさは以下の式で表される。

$$\frac{\Delta D_N}{D_N} = \frac{\Delta k_U / k_U}{(1 / k_U - 1)} \tag{6} *$$

上の式(6)は、 $k_U$ の値とその不確かさ( $\Delta k_U$ )が最終的に評価される $D_N$ の不確かさへ与える影響のみに注目した簡単な仮定に基づいたものであり、他の因子は全く無視されている。そこで、ここでは一般的な誤差の伝播則<sup>10)</sup>にしたがい従来の方法と新しく提案された方法の両方について、 $\Delta D_N^2$ の厳密な表現式を導出した。すなわち、

$$\Delta D_N^2 = \left[ \frac{h_U D_N}{h_U k_T - h_T k_U} \right]^2 \Delta k_T^2 + \left[ \frac{h_T D_N}{h_U k_T - h_T k_U} \right]^2 \Delta k_U^2 + \left[ \frac{R_U - k_U D_N}{h_U k_T - h_T k_U} \right]^2 \Delta h_T^2 + \left[ \frac{R_T - k_T D_N}{h_U k_T - h_T k_U} \right]^2 \Delta h_U^2 \quad \text{conventional method (7),}$$

$$\Delta D_N^2 = \left[ \frac{D_N}{k_T} \right]^2 \Delta k_T^2 + \frac{1}{k_T^2 (1-\gamma)^2} \left[ R_T - \frac{R_U - \gamma R_T}{1-\gamma} \right]^2 \Delta \gamma^2 \quad \text{newly-proposed method (8).}$$

式(7)で、 $h_T = h_U = k_T = 1$  and  $h_T = h_U = k_T = 0$ とおくことにより、式(7)が式(6)と一致することが確認できる。ここで、具体的なケースについて従来の方法と新しく提案された方法の線量評価精度の大雑把な比較を行う目的で、Fig. 1に示された中性子相対感度 [ TE-TE chamberの $k_T$ とC-CO<sub>2</sub> chamberの $k_U$ ]をもちいて、式(7), (8)により評価される中性子線量精度( $\Delta D_N / D_N$ )を計算してみよう。Fig. 1に示された $k_T$ と $k_U$ の数値データは文献4)に掲載されているので、それを利用する。まず、 $D_N / D_G$ 比がちょうど1である中性子線・ガンマ線混合場を想定する。各電離箱のコバルト校正定数は、文献5)で使用されている値を参考にして、TE-TE chamberについては33.1 [nC/Gy]、C-CO<sub>2</sub> chamberについては115.6 [nC/Gy]と選ぶ。そして、各電離箱のガンマ線に対する相対感度とガンマ線減弱率( $\gamma$ )、および対応するそれらの不確かさは、tentativeに次の様に設定する。

$$\begin{cases} h_T = 1, \Delta h_T / h_T = 0.05 \\ h_U = 1, \Delta h_U / h_U = 0.05 \end{cases} \quad \text{for gamma-rays (9),}$$

$$\gamma = 0.8, \Delta \gamma / \gamma = 0.05 \quad \text{for attenuation of gamma-rays (10).}$$

例えば、混合場に存在するガンマ線の平均エネルギーが数MeVの場合、厚さ5mmのマグネシウム合金の球形カバーでTE-TE chamberの外壁を覆うこ

とにより、ガンマ線の感度は約5%下がることが期待され、つまり $\gamma = 0.95$ となる。異なる幾何学的形状に対する $\gamma$ の値は、モンテカルロ法による計算でより詳細に評価することが可能である。また、中性子相対感度の不確かさについては、エネルギーに依存しない一定の値を用いて単純に次のように仮定してみる。

$$\begin{cases} \Delta k_T / k_T = 0.1 \\ \Delta k_U / k_U = 0.3 \end{cases} \quad \text{for neutrons (11).}$$

最終的に得られた $\Delta D_N / D_N$ の評価結果を、中性子エネルギーの関数としてFig. 2にプロットした。この計算では、電離電流測定に付随する不確かさは考慮されていない。Fig. 2では我々が予測したとおり、新しく提案された方法により評価した中性子線量の不確かさは、最高50MeV程度までの中性子エネルギーの変化に対して敏感に変化しないことが示されている。一方、従来の方法により評価した中性子線量の不確かさは、中性子のエネルギーが増加するにつれて明らかに大きくなるという結果となっている。

以上をまとめると、我々はこの論文で、対電離箱法において従来とは異なるTE-TE chamberの使用方法を採用することにより、対電離箱法が適用できる中性子エネルギーの範囲を拡張することが原理的に可能であることを示した。このやり方は、医療用加速器の周辺に発生する中性子の簡便な確認のための有用な手法となることが期待される<sup>11)</sup>。近い将来、上で述べた原理を確かめるための実験を行うことを計画している。最後に、このコンセプトは対電離箱以外の測定器、例えばFricke線量計<sup>12)</sup>やプラスチックシンチレータ<sup>13)</sup>などにもその応用が広がる可

\* 文献1)のEq.(2.7-7)に示されているこの式のオリジナルは、どうやら間違っており、それに関連する同文献1)のFig.2.6もおそらく疑わしいと考えられる。これについては、NISTのSeltzerも同意見である<sup>9)</sup>。

能性があることを指摘しておきたい。

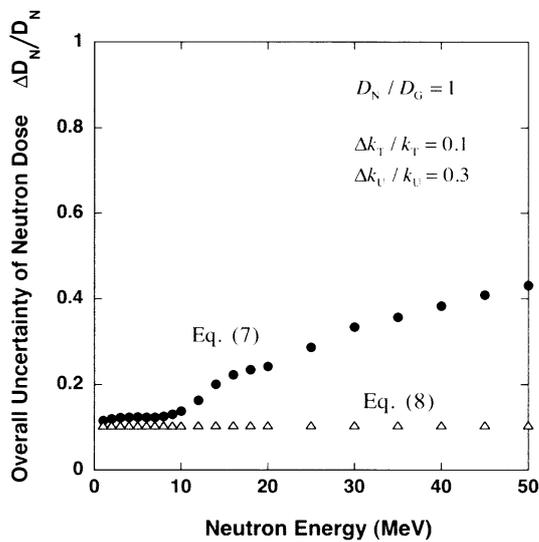


Fig. 2. An example of overall uncertainties of neutron dose estimated by Eq. (7) for the conventional method and by Eq. (8) for the newly-proposed one by using the data of Fig.1.

#### 参考文献

- 1) ICRU REPORT 26 (International Commission on Radiation Units and Measurement, 1977)
- 2) ICRU REPORT 27 (International Commission on Radiation Units and Measurement, 1978)
- 3) F. M. Waterman et al., Phys. Med. Biol., Vol.24, No.4 (1979) pp.721
- 4) M. Hoshi et al., Phys. Med. Biol., Vol.33, No.4 (1988) pp.473
- 5) Hiraoka et al., Stralenterapie, Vol.141 (1971) pp.64
- 6) S. Endo et al., J. Radiat. Res., Vol.43 (2002) pp.381
- 7) S. Endo et al., Phys. Med. Biol., Vol.41 (1996) pp.1037

- 8) S. M. Seltzer, NIST, 私信 (09Aug26)
- 9) G. F. Knoll, "Radiation Detection and Measurement. Third Edition", John Wiley & Sons, Inc. (2000) pp.87
- 10) たとえば J. Becker et al., Phys. Med. Biol., Vol.52 (2007) pp.6375
- 11) M. Himmit et al., J. Radiat. Res., Vol.37 (1996) pp.97
- 12) A. Nohtomi et al., Proceedings of the 22nd Workshop on Radiation Detectors and Their Uses [KEK], (2009) pp.11.