

標準計測法 12 の概要

名古屋大学大学院医学系研究科 小口 宏

始めに

国の計量法においてグラフアイトカロリメータおよびグラフアイト壁空洞電離箱が、平成 24 年 7 月 15 日の官報告示によって水吸収線量の特定標準器として指定された。これを受けて日本医学物理学会では「外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法(標準計測法 12)」を平成 24 年 9 月 10 日に発刊した。これは ^{60}Co γ 線による水吸収線量を標準とした校正によって水吸収線量校正定数 $N_{0,w}$ が直接与えられた電離箱を使用し、外部放射線による水吸収線量を計測する計測法である。

2002 年に発刊された「外部放射線治療における水吸収線量の標準測定法(標準測定法 01)」では既に水吸収線量校正定数 $N_{0,w}$ が導入されており、基本的な公式に修正はない。一部の用語やシンボルの変更はあるが、線質の評価 ($TPR_{20,10}$, R_{50}) や計測の幾何学的条件 (校正深、電離箱の測定点など)、計測器材 (電離箱、ファントムなど) も修正はない。したがって、基本的には以前のプロトコルである標準測定法 01 に準拠して実施している施設は、特に計測プロセス、幾何学的セットアップ方法に変更点はない。

今回の改訂で最も重要となるのは線質変換係数の見直しである。ここ 10 年あまりの間に電離箱の擾乱係数に関する新しいデータが発表され、今まで与えられていた値と大きく異なる知見が報告されてきた。このような背景により、標準計測法 12 ではもっとも新しく、もっとも信頼性があるデータを採用することとなった。以前までのプロトコルは海外の各組織や学会が発表したデータを利用して国内のプロトコルを整備されてきたが、今回は世界に先駆けて線質変換係数の見直しを行った点で、画期的である。では具体的な変更点を見てみたい。

光子線の線質変換係数

光子線では 3 つの擾乱補正係数の見直しを行った。

1. 円筒形電離箱の変位補正係数 P_{dis} の修正
2. 円筒形電離箱の中心電極補正係数 P_{cel} の修正
3. 円筒形電離箱の壁補正係数 P_{wall} の修正 (防水鞘の有無)

変位補正係数 P_{dis} は ^{60}Co γ 線では Jphansson らの値 0.992 を用いていたが、Wang らの 0.996 とした。また、光子線における P_{dis} の計算式も Wang らの式を用いることとした。これにより ^{60}Co γ 線に体する線質 Q での変位補正係数 P_{dis} の比、エネルギーが高いほど標準計測法 01 より小さ

な値となる。

中心電極補正係数 P_{cel} はプラスチックおよびグラファイト製中心電極の値は 1.0 であるが、高原子番号の中心電極の場合 Muri らのデータを数値化し、アルミニウム、スチールおよび Silver-plate copper covered steel:SPC、IBA CC01 と Exradin A16 それぞれに補正式を作成した。

標準測定法 01 では防水鞘の有無により 3 種類の線質変換係数が用いられていたが、標準計測法 12 では防水鞘なしと PMMA 1mm の防水鞘ありの P_{wall} を計算し、その平均の値 (0.3 mm 厚相当) を採用した。したがって、標準計測法 12 では線質変換係数の値は 1 つだけ与えられ、これによる不確かさは 0.2% と見積もった。図 1 に標準測定法 01 に対する標準計測法 12 の k_0 の差 (%) を示す。標準計測法 12 では標準測定法 01 の kQ に較べエネルギーが大きいほど小さい値をとることとなった。空洞半径 3 mm の円筒形電離箱では、10 MV ($TPR_{20,10}=0.74$) では約 -0.35 である。

光子線のまとめ

1. 最近の物理データを取り入れ、 k_0 を再評価した
2. 基準線質の P_{dis} を変更したため全ての値が見直された
3. 光子において一部の電離箱の P_{cel} を変更した
4. 防浸鞘補正 (P_{wall}) は 0.3 mm PMMA 厚の値にまとめた
5. 新プロトコルの線質変換係数はエネルギーが高いほど旧プロトコルより小さな値とった (10 MV で -0.4 %)

電子線の線質変換係数

電子線では 2 つの擾乱補正係数の見直しをおこなった。また、信頼できる擾乱補正係数のデータを持つ平行平板形電離箱 3 つのタイプ (Classic Markus, Roos, NACP-02) についてのみ線質変換係数を与え、それ以外の平行平板形電離箱は相互校正によって水吸収線量校正定数をユーザーが値づけることとした。また上記 3 タイプの電離箱においても、ユーザーにおける相互校正での値い付けが望ましいとした。

1. 円筒形電離箱の空洞補正係数 P_{cav} の修正
2. 平行平板形電離箱の壁補正係数 P_{wal} の修正

空洞補正係数は Wang らの近似式を採用し、空洞長 1.0 cm 以上の円筒形電離箱に限定した。これは空洞長が 0.5 cm から 3 cm まで変化すると P_{cav} は約 0.6% 変化するため、空洞長による不確かさを小さく見積もるための制限である。

^{60}Co γ 線および電子線に対する平行平板形電離箱の壁補正係数 P_{wall} は、それぞれMainegra-Hingら、荒木らのモンテカルロ計算値を用いた。JSMP01では壁補正係数 P_{wall} は ^{60}Co γ 線、電子線ともに1とし、不確かさをそれぞれ0.5%、1.5%としたが、大幅に値が見直されることとなった。 P_{wall} は以前より様々な値が報告され、かなりの幅があったため、 $P_{\text{wall}}=1.0$ として不確かさで納める方法がとられてきた。しかし、近年になりほぼ一致した値が報告されてきたため、他の組織や国に先駆けて新しい物理データを採用することとした。平行平板形電離箱の壁補正係数を図2に示す。

図3に円筒形電離箱のTRS-398と標準計測法12の電子線に対する k_0 の差を、図4に平行平板形電離箱のTRS-398と標準計測法12の電子線に対する k_0 の差を示す。いずれも低エネルギーで差が大きくなり、 $R_{50}=4\text{ g cm}^{-2}$ において円筒型では0.8%の違いとなり、平行平板型電離箱では $R_{50}=3\text{ g cm}^{-2}$ において2.5%近い差となっている。光子線と比べ、電子線の線質変換係数は標準測定法01より大幅に変更されることとなった。

従来の平行平板形電離箱の電子線の線質変換係数は、 P_{cav} を除いて他の擾乱補正係数は全て1.0として取り扱われ、その分不確かさが大きく見積られてきた。特に P_{wall} は低エネルギーにおいて1%を越える補正が必要とする報告が有る。そのため、標準計測法12では平行平板形電離箱は相互校正により水吸収線量校正定数を値付け、線質変換係数は相互校正の値を用いることを推奨した。

電子線のまとめ

1. 平行平板形電離箱の P_{wall} 、 P_{cav} などの擾乱補正係数や個体差などは低エネルギーで1%を越える補正が必要
2. 相互校正 (cross-calibration) を推奨
3. 最新の信頼できるデータを採用し、円筒形電離箱の P_{cav} と平行平板形電離箱の P_{wall} 、 $P_{\text{cav}} \times P_{\text{dis}}$ を変更した。
4. 平行平板形電離箱の k_0 は十分なデータのあるNACP-01、Roos、Classic Markusのみに与える

円筒形電子箱	+0.2%から低エネルギーで+0.8%
--------	---------------------

平行平板形電離箱	+1%から低エネルギーで+2.5%
----------	-------------------

ユーザーの対応

標準測定法01を実施している施設では特に作業の変更はない。 k_0 は新たに算出しなければならないが、新しい校正値を持つだけで表1、2に示すように絶対線量の不確かさが改善される。標準計測法12で指定された電離箱を所有しない施設では相互校正によって M_{w} を値付けることとなる。相互校正が実施で

きない施設では、指定された電離箱を新たに購入するか、標準計測法12の導入を見送るかの選択となる。
なお、新しく値付けされた水吸収線量校正定数を標準測定法01で使用することに問題はない。

相互校正は標準計測法12内に独立した章として取り扱われている。相互校正自体は電離箱の感度比較であるため難しい作業ではないが、幾何学的な位置の厳密さや高度な測定スキルが求められる。実施にあたっては独立した反覆測定を行い十分な検討を加え、ユーザーの責任において真値に近い値であると判断しなければならない。標準計測法12のインパクトはこの相互校正にある。

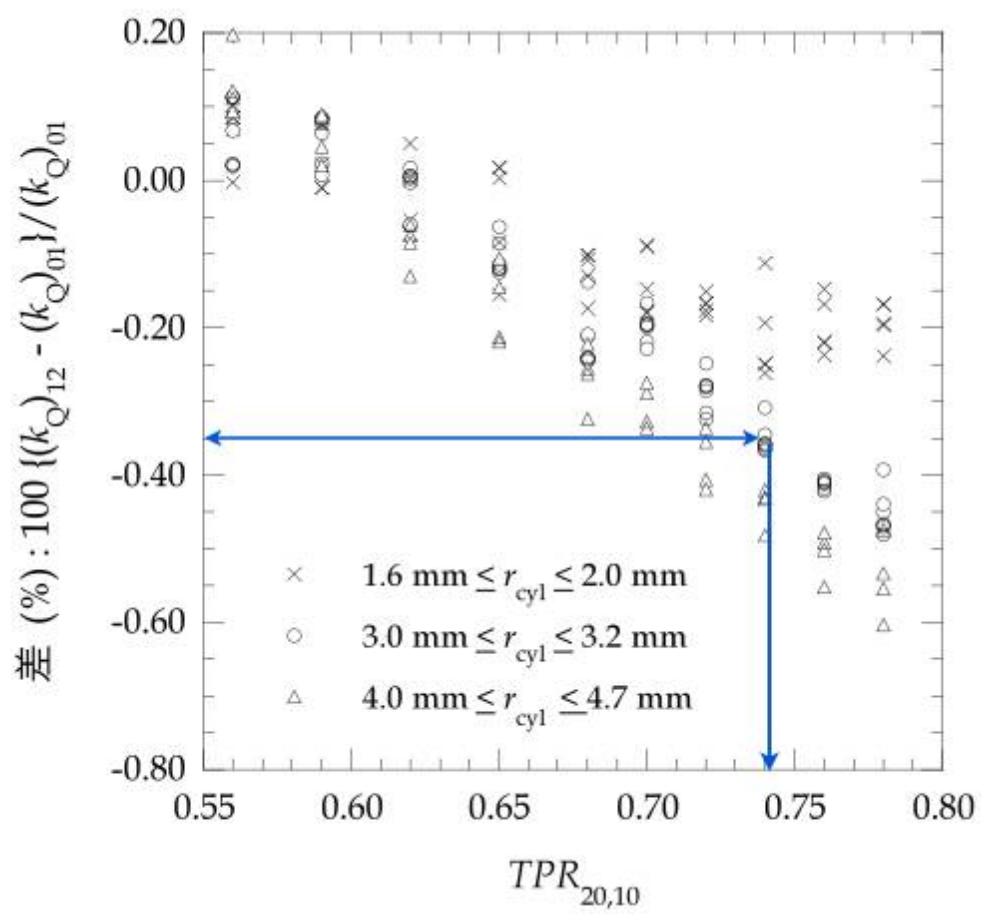


図 1 JSMP01とJSMP12の光子に対する k_0 の差

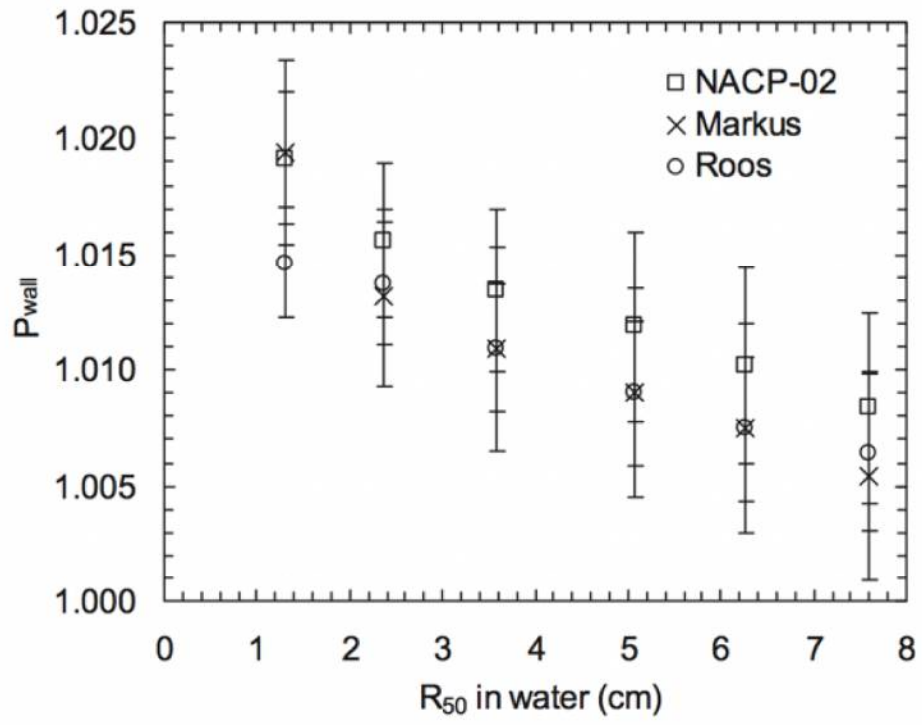


FIG. 6. Calculated P_{wall} at a reference depth as a function of R_{50} for NACP-02, Markus, and Roos chambers in a water phantom.

図2 電子線の平行平板形電離箱の壁補正係数 P_{wall}

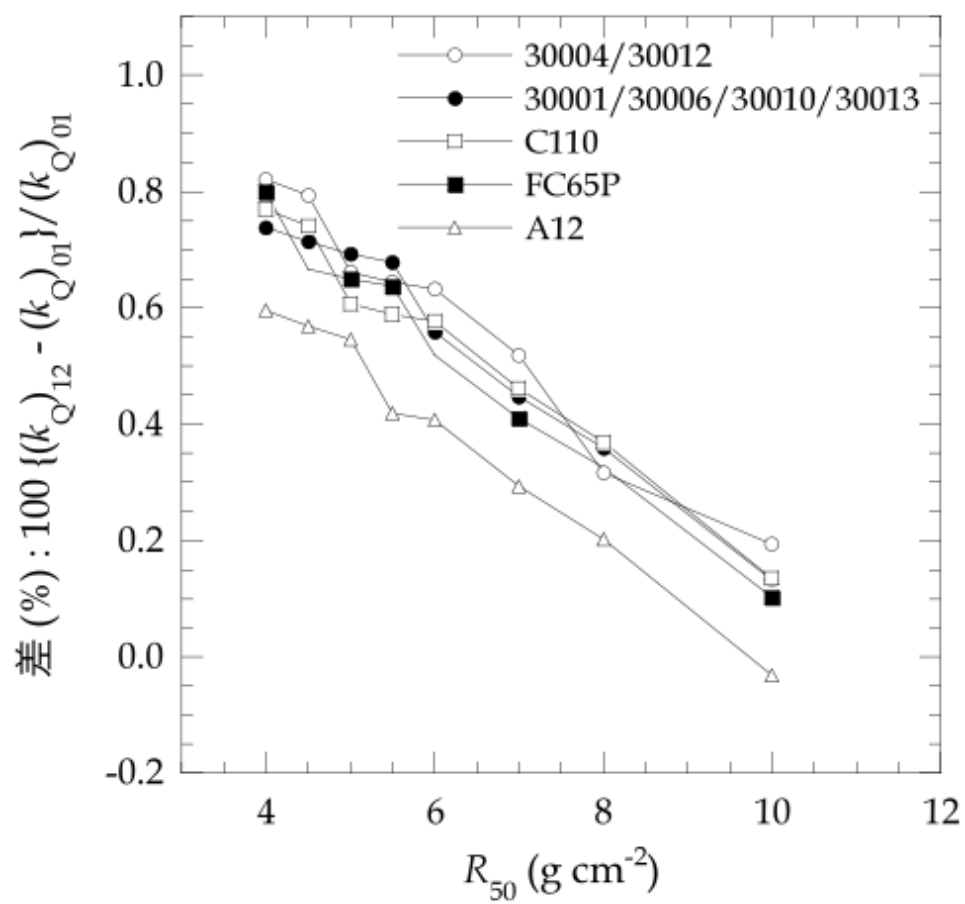


図3 円筒形電離箱のTRS-398と標準計測法12の電子線に対する k_0 の差

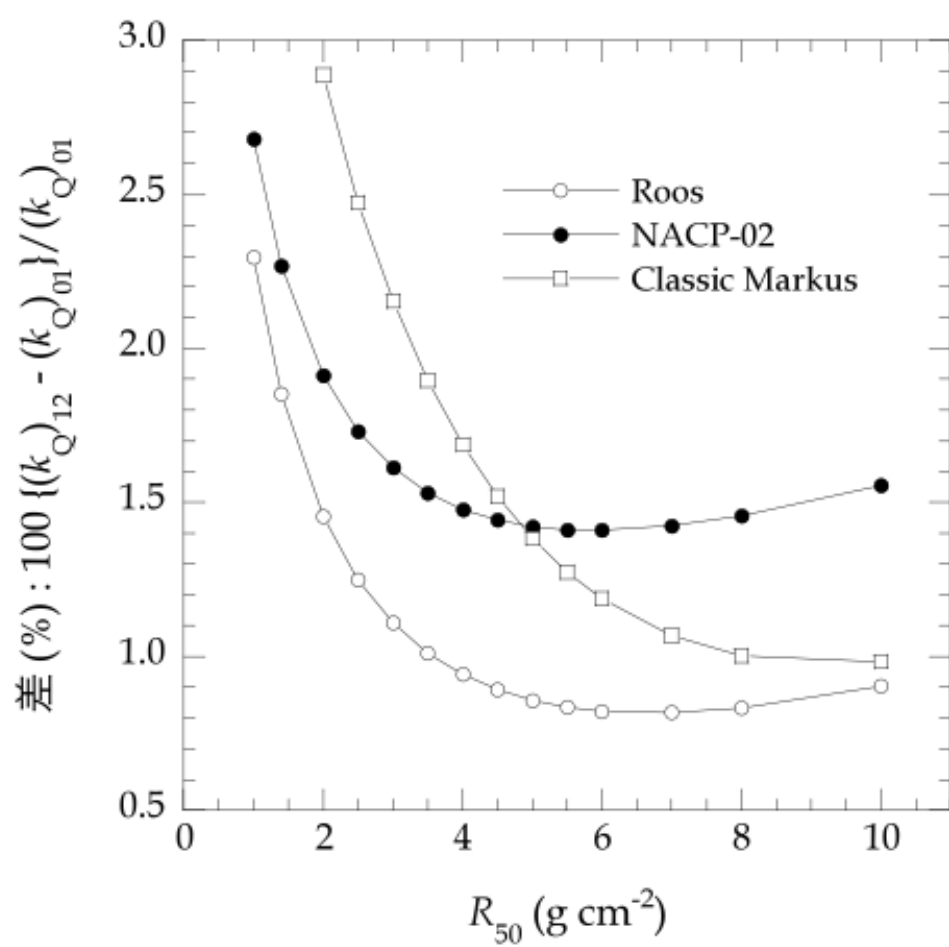


図4 平行平板形電離箱のTRS-398と標準計測法12の電子線に対する k_0 の差

表 1 高エネルギー光子の水吸収線量評価の不確かさ (%)

物理量または手順	相対標準不確かさ (%)	
	標準測定法01	標準計測法12
ステップ1：線量標準機関		
一次線量標準機関における二次特定標準器の N_C 校正	0.74	-
一次線量標準機関における二次特定標準器の $N_{D,w}$ 校正	-	0.39
二次特定標準器の長期安定性	-	0.1
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の $N_{D,w}$ 校正	-	0.4
校正定数比	1.3	-
ステップ1の合成不確かさ	1.5	0.54
ステップ2：ユーザが使用する高エネルギー光子線		
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3	0.3
基準条件の設定	0.4	0.4
モニタ設定値に対する表示値 $M_{D,w}$	0.6	0.6
補正係数 k_f	0.4	0.4
線質変換係数 k_Q （計算値）	1.0	1.0
ステップ2の合成不確かさ	1.4	1.4
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ（ステップ1+2）	2.0	1.5
相対拡張標準不確かさ（包含係数 $k = 2$ ）	4.0	3.0

表 2 電子線線質変換係数の標準不確かさ (%)

構成要素	円筒形電離箱	平行平板電離箱
	^{60}Co +電子線	^{60}Co +電子線
$^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する相対 $(L/\rho)_{\text{w,a}}$	0.5	0.5
線質に対する $(L/\rho)_{\text{w,a}}$ に起因	0.2	0.2
$^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する相対 W_{air}/e	0.5	0.5
P_{cav}	0.5 / 0.3	0.1 / 0.5
P_{dis}	0.4 / 0.3	0.3 / 0.1
P_{wall}	0.7 / 0.5	1.5 / 0.8
P_{cel}	0.2 / 0.3	-
JSMP01 / JSMP12	1.2 / 1.0	1.7 / 1.2