

医療用リニアック装置によって校正された放射
線治療用線量計による水吸収線量の標準計測法
(リニアック標準計測法 24)

日本医学物理学会

2024年3月

日本医学物理学会 計測委員会

医療用リニアック装置によって校正された放射線治療用線量計による水吸収線量計測法
WG

代表

清水 森人 産業技術総合研究所

委員

石川 正純 北海道大学大学院
大平 新吾 大阪国際がんセンター
小口 宏 飯田市立病院
河内 徹 千葉県がんセンター
川村 慎二 帝京大学大学院
草野 陽介 神奈川県立がんセンター
佐藤 智春 東洋公衆衛生学院
田辺 悦章 岡山大学学術研究院
長畑 智政 大阪公立大学医学部附属病院
福村 明史 量子科学技術研究開発機構
藤田 幸男 駒澤大学
布施 拓 茨城県立医療大学
森下 雄一郎 産業技術総合研究所
山下 航 医用原子力技術研究振興財団
安井 啓祐 藤田医科大学
矢田 隆一 浜松医科大学

計測委員会委員長 歳藤 利行 名古屋市立大学附属西部医療センター

編集協力

小原 真琴 産業技術総合研究所

1. はじめに

外部放射線治療において、水吸収線量計測は投与線量の基準を決定する重要な作業である。投与線量の不確かさが治療成績に及ぼす影響については、2016年にIAEA Human Health Series No. 31において詳細な報告がなされ、「すべての放射線治療は、技術的および生物学的要因を考慮した上で、合理的に達成可能な範囲で正確に実施されるべきである」という勧告がなされた¹⁾。水吸収線量計測の不確かさは投与線量の不確かさ要因として全ての外部放射線治療に共通に含まれるものであり、不確かさを適切に評価し、合理的な範囲で可能な限り低減に努める必要がある。低減の一つの目標として、AAPM Report No. 85において基準条件における水吸収線量計測の不確かさを相対標準不確かさで1%以下に抑えることが掲げられており²⁾、この目標達成のため、放射線計測技術や放射線治療用線量計の校正技術の開発が各国で行われている。

2012年に標準計測法12が刊行され³⁾、⁶⁰Coガンマ線水吸収線量標準に基づいた水吸収線量計測が可能となった。この間に、電離箱と電位計の分離校正が行われた⁴⁾。また、高エネルギー光子線水吸収線量標準を既に確立している英国においては、世界に先駆けて医療用リニアック装置によって校正された放射線治療用線量計による線量計測プロトコルの整備が行われ、臨床での利用が始まっている⁵⁾。我が国においても、医療用リニアック装置を用いた放射線治療用線量計の校正サービスが一次線量標準機関である国立研究開発法人産業技術総合研究所から提供されてきたが、これまで線量計測プロトコルは整備されてこなかった。

そこで今回、医療用リニアック装置によって校正された放射線治療用線量計による水吸収線量計測法を定め、高エネルギー光子線・電子線水吸収線量標準にもとづいて校正された放射線治療用線量計を用いた水吸収線量計測を国内の放射線治療施設において実施できるようにした。このプロトコルは現行の線量計測プロトコルであるIAEA TRS-398⁶⁾および標準計測法12に準拠しており、⁶⁰Coガンマ線源を用いた校正サービスと医療用リニアック装置を用いた校正サービスを相補的に運用することで、国内の放射線治療用線量計の校正サービスの冗長性を高めることも目的としている。医療用リニアック装置を用いて校正された放射線治療用線量計による水吸収線量計測の不確かさは、従来の標準計測法12で想定される不確かさよりも改善されるため、医療用リニアック装置を用いた校正サービスは将来的にはJCSS校正事業者によって広く提供されることが見込まれる。本計測法によって、⁶⁰Coガンマ線源を用いた校正サービスから医療用リニアック装置を用いた校正サービスへの移行が円滑に行われ、国内の放射線治療の品質管理がより高精度に実施されることを期待する。

この線量計測法の略称を「リニアック標準計測法 24」とし、英語名は「JSMP guideline: a code of practice for dosimetry using a radiotherapy ionization chamber calibrated in a clinical linac (JSMP Linac Standard Dosimetry 24)」とする。

医療用リニアック装置によって校正された放射線治療用線量計を用いて水吸収線量計測を行う場合は、リニアック標準計測法 24 にしたがって水吸収線量計測を行うこと。従来の⁶⁰Co ガンマ線源による校正を受けた放射線治療用線量計を用いて水吸収線量計測を行う場合は、標準計測法 12 にしたがって水吸収線量計測を行うこと。

リニアック標準計測法 24 によって計測された水吸収線量は、標準計測法 12 に準拠した計測として扱う。今後、標準計測法 12 の改訂が行われる場合は、リニアック標準計測法 24 も標準計測法に統合・改訂される。

2. 用語

高エネルギー光子線および高エネルギー電子線の水吸収線量標準に基づいた線量計測法を記述するにあたり、標準計測法 12 の用語およびシンボルリストの定義では一部不足があるため、本書では次の様に用語およびシンボルを定義する。ここに記述の無いものについては、標準計測法 12 と同様とする。

2.1. 標準機関

日本国の一次線量標準機関である国立研究開発法人 産業技術総合研究所および JCSS (Japan Calibration Service System) 登録・認定校正事業者を指す。なお、MRA (Mutual Recognition Agreement, 国際相互承認) 認定を受けている日本国外の校正事業者の校正証明書は JCSS 登録・認定校正事業者の校正証明書と同じように扱われるが、校正の不確かさが日本国内の校正事業者と異なることがあるため、利用するには注意が必要である^{7) 8)}。

2.2. 標準機関の放射線の線質： Q_{SDL}

基準線質とは線量計の校正を行う線量標準機関 (SDL: Standard Dose Laboratory) の放射線標準場の線質を差し、標準計測法 12 では、国立研究開発法人 産業技術総合研究所の⁶⁰Co ガンマ線標準場の線質を基準線質とし、シンボルを Q_0 として用いてきた。

しかし実際には、線源の形状や組成、コリメーターの形状の違いによって標準機関毎に線質が異なるため、⁶⁰Co ガンマ線の線質は普遍的なものではなく、高エネルギー光子線および高エネルギー電子線水吸収線量標準の登場によって、現在では放射線標準場の線質が複数存在する状況となっている。そのため、基準線質という言葉で普遍的な一つの線質を共通認識することができなくなり、シンボル Q_0 を用いることが適当ではなくなった。

そこで、標準機関における放射線治療用線量計の校正に用いられる放射線標準場の線質を表すシンボルとして、新たに Q_{SDL} を定義する。

2.3. シンボルリスト

Q : 測定対象の放射線の線質

Q_{Co} : ⁶⁰Co ガンマ線の線質

Q_0 : 線質変換係数などを検討する際の基準の線質。 Q_{Co} であることが多い

Q_{SDL} : 放射線治療用線量計の校正を行う標準機関の線質

Q_{int} : 高エネルギー電子線における媒介線質 ($R_{50} = 7.5 \text{ g cm}^{-2}$)

k_{Q_2, Q_1} : 線質 Q_1 を基準の線質とした線質 Q_2 における線質変換係数

$k_{Q, Q_{Co}}$: ⁶⁰Co ガンマ線の線質を基準の線質とした線質 Q における線質変換係数。標準計測法 12 における k_{Q, Q_0} を k_Q のように基準となる線質の記載が省略された場合は、⁶⁰Co ガンマ線を基準の線質としていることとする。

$k_{Q_{SDL}}$: ⁶⁰Co ガンマ線の線質を基準の線質とした線質 Q_{SDL} における線質変換係数

- $k_{Q,Q_{int}}$: 媒介線質 Q_{int} を基準の線質とした線質 Q における線質変換係数
- $k_{Q_{SDL},Q_{int}}$: 媒介線質 Q_{int} を基準の線質とした線質 Q_{SDL} における線質変換係数
- $N_{D,w,Q}$: 線質 Q における水吸収線量校正定数
- $N_{D,w,Q_{Co}}$: ^{60}Co ガンマ線の線質における水吸収線量校正定数. 標準計測法 12 における N_{D,w,Q_0} とおなじ
- $N_{D,w,Q_{SDL}}$: 線質 Q_{SDL} における水吸収線量校正定数
- $N_{D,w,Q_{int}}$: 媒介線質 Q_{int} における水吸収線量校正定数

3. 水吸収線量計測に使用する機材

3.1. リファレンス線量計

放射線治療施設は施設の線量の基準（参照標準）となるリファレンス線量計として、リファレンス電離箱とリファレンス電位計の組み合わせを一組定め、標準機関による校正を定期的に受ける必要がある³⁾。リファレンス電位計の要件としては、「放射線治療用線量計に用いられる電位計のガイドライン」（電位計ガイドライン）が発行されており、リファレンス電位計はこの要件を満たす電位計から選定することが強く推奨される⁴⁾。

高エネルギー光子線および電子線のリファレンス電離箱としてはファーマ形電離箱（Farmer-type ionization chamber）が標準計測法 12 において想定されてきたが、高エネルギー光子線および電子線水吸収線量標準にもとづく校正ではより幅広い種類の電離箱の校正が可能となるため、ユーザーは測定対象や施設の状況に応じて十分な検討を行った上でリファレンス電離箱を選定することが重要である。リファレンス電離箱の性能要件としては、国際標準規格である IEC 60731:2011（International Electrotechnical Commission）において放射線治療用線量計が最低限満たすべき性能要件が定められており、これに加える形で、AAPM TG-51 Addendum において推奨性能要件が定められている^{9),10)}。日本特有の事情として、温度特性や湿度影響へも配慮しながらリファレンス電離箱を選定することが望ましい。

電離箱の出力が電荷であることから、水吸収線量校正定数の単位は Gy C^{-1} となる。実用面から、水吸収線量校正定数の単位として Gy nC^{-1} や mGy nC^{-1} 、 cGy nC^{-1} も用いられる。標準機関から提供される水吸収線量校正定数については、温度気圧および極性効果、イオン再結合について補正済であることを校正証明書で確認してから用いること。リファレンス線量計の使用前に必ず電位計の設定を確認し、表示単位や印加電圧などが校正証明書に記載されている条件とあっていることを確認してから測定に用いること。

3.2. 水ファントム

水吸収線量計測における測定深の表示は水等価厚（質量面密度、単位： g cm^{-2} ）とする。基準媒質は水とする。水槽（水ファントム）の横幅は最大照射野より各辺で 5 cm 以上のサイズが必要である。深さ方向については、高エネルギー光子線では測定深より 10 g cm^{-2} 以上、高エネルギー電子線では最大エネルギーの実用飛程より 5 g cm^{-2} 以上の深さが必要である。垂直ビームの場合、水の蒸発による水面(SSD)の変化に注意が必要である。水平ビームの場合、水ファントムの入射窓の材質はプラスチックで、厚さ t_{win} は 0.3 cm から 0.5 cm を推奨する。この入射窓厚を水等価厚 $\rho_{\text{pl}}t_{\text{win}}$ に換算し、水ファントム内壁からの深さに加えて測定深とする。 ρ_{pl} はプラスチックの密度であり、通常、窓材には PMMA（密度： 1.19 g cm^{-3} ）³⁾またはポリスチレン（密度： 1.06 g cm^{-3} ）が用いられる。温度変化による電離箱の応答変化の影響を避けるため、水ファントムの水温は $22 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲内となるように管理すること。

3.3. 電離箱の基準点

標準計測法 12 では測定対象となる放射線の種類によって電離箱の測定の有効点 (EPOM: Effective Point Of Measurement) の取扱いが異なった。これはリファレンス電離箱の水吸収線量校正定数の線質に対する変化を空洞理論に基づいて補正する上で必要な措置であった。

高エネルギー光子線および高エネルギー電子線水吸収線量標準に基づいた水吸収線量計測においては、リファレンス電離箱は単に水吸収線量標準の値をユーザーの施設へ移すための仲介標準器としての性格が強くなるため、ヒューマンエラーを避ける観点から、測定の有効点に対する補正は全て水吸収線量校正定数に含まれることとし、電離箱の基準点を水ファントム中の基準点に一致させることとする。以下に、円筒形電離箱および平行平板形電離箱の基準点及び防浸鞘、防水キャップ、電離箱の入射窓の取扱いをまとめる。

3.3.1. 円筒形電離箱

ファーマ形電離箱をはじめとした円筒形電離箱の基準点は電離空洞の幾何学的中心とする。電離箱壁や防浸鞘、収集電極、空洞による EPOM への影響については考慮せず、この影響に対する補正は水吸収線量校正定数に含まれることとする。

非防浸の円筒形電離箱では PMMA 製の防浸鞘を用い、厚さは 1.0 mm とすること。また防浸鞘と電離箱壁との隙間は 0.1 ~ 0.3 mm 以内の物を用いること。防浸鞘を用いて測定を行う場合は、電離箱校正時も防浸鞘をつけた状態で校正をうけ、測定に防浸鞘を用いない場合は、電離箱校正時も防浸鞘を用いないで校正をうけることが望ましい。

円筒形電離箱の測定深 d は次の式で決定される。

$$d = \rho_w d_w + \rho_{pt} t_{win} \quad (\text{円筒形電離箱の場合}) \quad (2.1)$$

ここで、 d_w はファントム入射窓内壁から電離箱幾何学的中心までの距離である。 ρ_w は水の密度である。 $\rho_{pt} t_{win}$ は水ファントムの入射窓の水等価厚さである。

3.3.2. 平行平板形電離箱

平行平板形電離箱の基準点は電離空洞前面の中心とする。電離箱壁および防浸キャップ、電離箱の入射窓の厚さは水等価厚さに換算し、深さに含める。平行平板形電離箱についても EPOM と基準点のずれの影響が存在するが、円筒形電離箱の場合と同じく、水吸収線量校正定数に補正が含まれることとする。

非防浸の平行平板形電離箱の防浸キャップは、壁材質と同じか PMMA 製で厚さは 1.0 mm 以下が望ましい。高エネルギー電子線水吸収線量標準に基づいた水吸収線量計測では、平行平板形電離箱の防浸キャップの厚さも水槽の入射窓と同様に水等価厚さに換算し、深さに加えて測定深とする。

平行平板形電離箱の場合，電離箱の入射窓および防浸キャップの厚さも考慮するため，測定深は

$$d = \rho_w d_w + \rho_{pl} t_{win} + \rho_{ch} t_{ch} + \rho_{cap} t_{cap} \quad (\text{平行平板形電離箱の場合}) \quad (2.2)$$

となる．ここで， d_w はファントム入射窓内壁から電離箱の入射窓または防浸キャップ外側までの距離である． ρ_{ch} および ρ_{cap} は電離箱の入射窓および防浸キャップの密度であり， t_{ch} および t_{cap} は電離箱の入射窓および防浸キャップの厚さである．それぞれの値は取扱説明書やカタログなどで確認すること．水等価厚さとして入射窓および防浸キャップの値が示されている場合は，それぞれの値を $\rho_{ch} t_{ch}$ および $\rho_{cap} t_{cap}$ の値としても良い．

3.4. 温度計

温度測定に用いる温度計には表示分解能が 0.1 °C以下のものを使用すること．温度計は気象測器検定合格¹¹⁾または JCSS 校正を受けたものであることが望ましい．定期的に他の温度計と比較を行うなどして，表示に異常が無いことを確認すること．

3.5. 気圧計

気圧測定に用いる気圧計には，表示分解能が 0.01 kPa 以下のものを使用すること．気圧計は気象測器検定合格¹¹⁾または JCSS 校正を受けたものであることが望ましい．定期的に他の気圧計と比較を行うなどして，表示に異常が無いことを確認すること．

4. 高エネルギー光子線の水吸収線量計測法

本章では、日本の高エネルギー光子線水吸収線量標準によって校正された電離箱線量計を用いた基準条件における校正深での水吸収線量計測法について述べる。なお、本章における光子線とは、医療用加速器において平坦化フィルタなどにより平坦化された公称加速電圧が4 MV から 15 MV ($0.6 < TPR_{20,10} < 0.78$) までの光子線を指す。

高エネルギー光子線水吸収線量標準で校正された電離箱線量計を用いて水吸収線量計測を行った際の水の水吸収線量 $D_{w,Q}$ (単位: Gy) は線質Qにおける水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q}$ を用いて次式で表される。

$$D_{w,Q} = M_Q N_{D,w,Q} \quad (4.1)$$

ここで、 M_Q は校正深 d_c ($= 10 \text{ g cm}^{-2}$)に置かれた電離箱線量計の基準点での指示値 (温度気圧補正係数 k_{TP} , イオン再結合補正係数 k_s , 極性効果補正係数 k_{pol} , 電位計校正定数 k_{elec} で補正済みの値) である。

4.1. 電離箱線量計

光子線の水吸収線量計測にはファーマ形電離箱などの円筒形電離箱を用いるのが一般的である。電離箱は標準機関による高エネルギー光子線水吸収線量校正を受けたリファレンスクラスの電離箱を用いるか、前述の校正を受けたファーマ形電離箱を介して相互校正された電離箱を用いること。

4.2. 線質の決定

放射線治療装置からの光子線の線質Qの表示には、線質指標として組織ファントム比 $TPR_{20,10}$ を用いる。決定の手順は標準計測法 12 第3章の「3.3 線質の決定」を参照すること³⁾。線質指標の値は、装置毎に事前に決定してから、測定に用いること。

4.3. 基準条件

水吸収線量計測における基準条件を表 4.1 に示す。高エネルギー光子線の水吸収線量計測の基準条件は標準計測法 12 から大きな変更はない。

表 4.1 光子線の水吸収線量計測の基準条件

項目	基準値あるいは基準条件
ファントム材質	水
水温	基準温度：22 °C 測定条件：22 °C ± 4 °Cの範囲内
電離箱	円筒形
校正深 d_c	10 g cm ⁻²
電離箱の基準点	電離空洞の幾何学的中心
電離箱の基準点の位置	校正深 d_c ^a
SCD/SSD	100 cm ^b
照射野	10 cm × 10 cm ^c

- a 電離箱壁および空洞，中心電極による変位は考慮しない。
 b SCD または SSD は臨床で使用しているセットアップ値とする。
 c 照射野サイズは，SSD セットアップではファントム表面，SAD (STD) セットアップでは校正深での大きさとする。

4.4. 水吸収線量校正定数の決定

測定対象の高エネルギー光子線の線質Qにおける水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q}$ は校正証明書に記載された各エネルギーの高エネルギー光子線に対する水吸収線量校正定数から読み取って用いる。

校正証明書に記載された標準機関の高エネルギー光子線の $TPR_{20,10}$ が測定対象の高エネルギー光子線の $TPR_{20,10}$ と±0.005 以内で一致する場合，校正証明書に記載された水吸収線量校正定数をそのまま用いても大きな影響はない。 $TPR_{20,10}$ の差が大きい場合は，次に述べる方法によって校正証明書に記載された水吸収線量校正定数の値を $TPR_{20,10}$ に対して内挿あるいは外挿することによって， $N_{D,w,Q}$ の値を求める。

4.4.1. 内挿によって水吸収線量校正定数を求める方法

校正定数が4点以上与えられている場合は，校正結果に対して $TPR_{20,10}$ の近似曲線を求める。

$$N_{D,w,Q} = a + b(TPR_{20,10}) + c(TPR_{20,10})^2 \quad (4.2)$$

ここで， a および b ， c は近似曲線の係数である。この係数の値は校正証明書の添付資料として標準機関より提供される。得られた近似曲線に，自施設の高エネルギー光子線の線質指標 $TPR_{20,10}$ の値を代入し，線質Qにおける水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q}$ を求める。近似曲線を求める際は有効桁数を5桁以上とること。

校正点が2点または3点しか無い場合は，表に与えられた校正定数を $TPR_{20,10}$ について直

線近似で内挿することで、 $N_{D,w,Q}$ を導出することができる。

4.4.2. 外挿によって水吸収線量校正定数を求める方法

測定対象の高エネルギー光子線の $TPR_{20,10}$ の値が校正証明書に記載された $TPR_{20,10}$ の範囲外の場合、および校正定数が1点しか与えられていない場合は、測定対象の高エネルギー光子線の $TPR_{20,10}$ の値に最も近い線質の水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{SDL}}$ を校正証明書から読み取り、標準計測法12の表3.3に与えられた線質変換係数を用いて、次の式で $N_{D,w,Q}$ を導出する。

$$N_{D,w,Q} = N_{D,w,Q_{SDL}} \frac{k_Q}{k_{Q_{SDL}}} \quad (4.3)$$

ここで Q_{SDL} は校正証明書に記載された標準機関の高エネルギー光子線の線質である。 $k_{Q_{SDL}}$ は Q_{SDL} における電離箱の線質変換係数であり、 k_Q は自施設の線質Qにおける電離箱の線質変換係数である。 k_Q および $k_{Q_{SDL}}$ は標準計測法12の手続きと同じく、標準計測法12の表3.3から、電離箱型式の行と、線質指標 $TPR_{20,10}$ の列の交点からQと Q_{SDL} それぞれの線質変換係数の値を読み取る。

高エネルギー光子線水吸収線量校正定数の決定の例

標準機関に高エネルギー光子線水吸収線量の校正を依頼すると、下記の表の例のように、校正を行った高エネルギー光子線の線質指標 $TPR_{20,10}$ および水吸収線量校正定数の表が校正証明書に記載される。ユーザーはこの表から自施設の線質Qにおける水吸収線量校正定数を求めて、測定に用いる。

表 4.2 高エネルギー光子線の水吸収線量校正結果の例

線源または 公称加速電圧	線質指標 $TPR_{20,10}$	水吸収線量校正定数 (mGy/nC)	相対拡張 不確かさ (%)
^{60}Co	0.569	48.38	1.0
6 MV	0.685	47.82	1.0
10 MV	0.735	47.39	1.0
15 MV	0.760	46.98	1.0

相対拡張不確かさの包含係数は $k = 2$ であり、約 95 %の信頼の水準に相当する。なお、この値は参考値であり、実際の計測には用いてはならない。

①近似曲線で内挿する場合

表 4.2 の値から $TPR_{20,10}$ に対する水吸収線量校正定数の近似曲線を求め、水吸収線量校正定数を決定する。表 4.2 の例では、近似曲線は

$$N_{D,w,Q} = 37.600 + 38.466(TPR_{20,10}) - 34.318(TPR_{20,10})^2$$

となる。測定対象の高エネルギー光子線の $TPR_{20,10}$ の値が 0.73 の場合は、水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q} = 47.39 \text{ mGy nC}^{-1}$ となる。

②直線近似で内挿する場合

校正点が 2 点または 3 点しか与えられない場合は直線近似で内挿を行う。例の場合、6 MV から 15 MV の高エネルギー光子線水吸収線量校正定数について直線近似を求めると、

$$N_{D,w,Q} = 55.265 - 10.829(TPR_{20,10})$$

となる。測定対象の高エネルギー光子線の $TPR_{20,10}$ の値が 0.73 の場合は、 $N_{D,w,Q} = 47.36 \text{ mGy nC}^{-1}$ となる。

③線質変換係数を用いて外挿する場合

校正点が 1 点しか与えられない場合、または測定対象の高エネルギー光子線の $TPR_{20,10}$

の値が校正証明書に記載された $TPR_{20,10}$ の範囲外の場合は、線質変換係数を用いて外挿する。

校正証明書に記載された 6 MV の高エネルギー光子線における水吸収線量校正定数から、測定対象の 4 MV の高エネルギー光子線 ($TPR_{20,10} = 0.62$) における水吸収線量校正定数を求める場合を例として考える。標準計測法 12 の表 3.3 から高エネルギー光子線に対する電離箱の線質変換係数を読み取ったとき、 $TPR_{20,10} = 0.685$ における電離箱の線質変換係数の値が $k_{Q_{SDL}} = 0.993$ 、測定対象の 4 MV 高エネルギー光子線の線質変換係数の値が $k_Q = 0.999$ であった場合、

$$N_{D,w,Q} = N_{D,w,Q_{SDL}} \frac{k_Q}{k_{Q_{SDL}}} = 47.82 \text{ mGy nC}^{-1} \frac{0.999}{0.993} = 48.11 \text{ mGy nC}^{-1}$$

となり、水吸収線量校正定数の値は $48.11 \text{ mGy nC}^{-1}$ となる。

4.5. 水吸収線量の決定

ユーザーの施設における高エネルギー光子線の線質Qにおける校正深 d_c での水吸収線量 $D_{w,Q}(d_c)$ は次式によって与えられる。

$$D_{w,Q}(d_c) = M_Q N_{D,w,Q} \quad (4.5)$$

ここで、 M_Q は表 4.1 の基準条件にしたがって、校正深 d_c に置かれた電離箱線量計の指示値である。 M_Q には温度気圧補正係数 k_{TP} 、イオン再結合補正係数 k_s 、極性効果補正係数 k_{pol} 、電位計校正定数 k_{elec} が含まれている。

4.6. 線量最大深と基準深の水吸収線量

この手続きは標準計測法 12 第 3 章の「3.4.3 線量最大深と基準深の水吸収線量」と同じである³⁾。線量最大深と基準深における水吸収線量 $D(d_{max}, A)$ と $D(d_r, A)$ は、SSD セットアップではPDD、SAD セットアップではTMRまたはTPRから次式で求める。

$$D(d_{max}, A_0) = 100 \frac{D_{w,Q}(d_c, A_0)}{PDD(d_c, A_0)} \quad (4.6)$$

$$D(d_{max}, A) = \frac{D_{w,Q}(d_c, A)}{TMR(d_c, A)} \quad (4.7)$$

$$D(d_r, A) = \frac{D_{w,Q}(d_c, A)}{TPR(d_c, A)} \quad (4.8)$$

4.7. 基準条件における水吸収線量の不確かさ

高エネルギー光子線の水吸収線量計測における不確かさの見積りを表 4.3 に示す。リファ

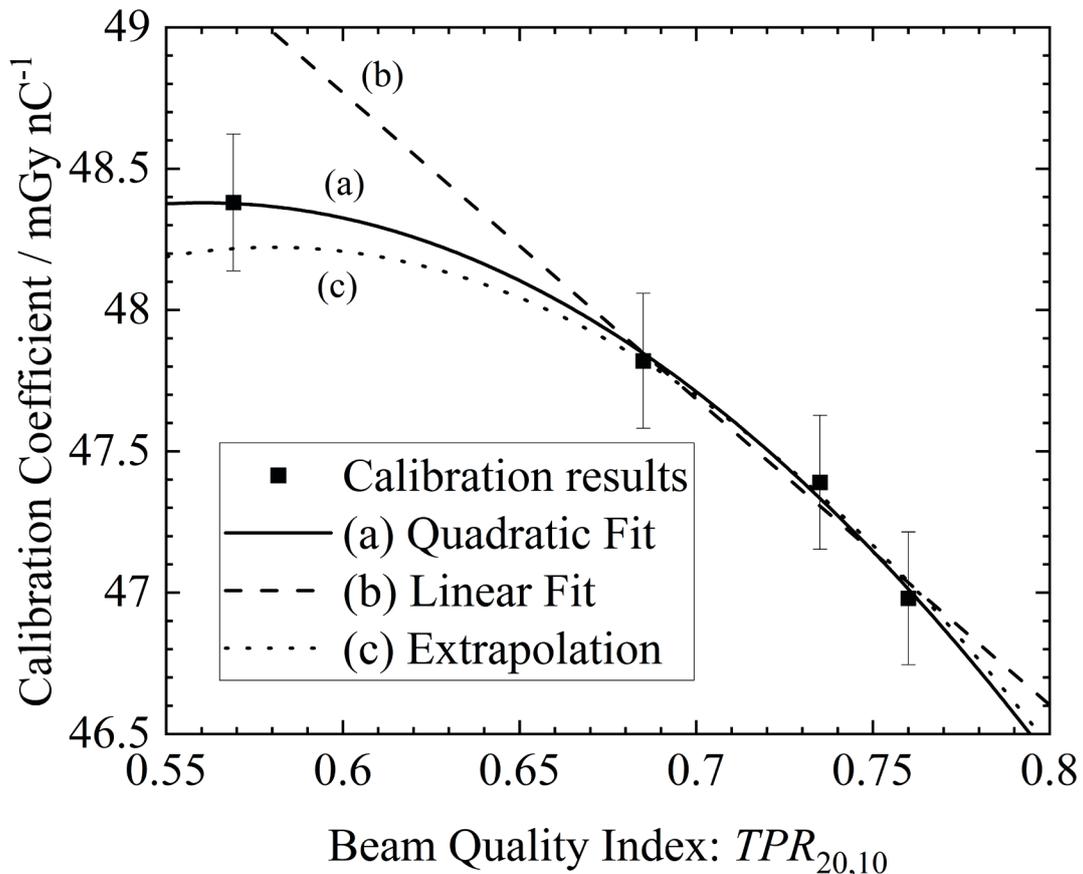


図 4.1 高エネルギー光子線水吸収線量校正定数の例

実線が(a)曲線近似, 破線が(b)直線近似, 点線が(c)線質変換係数による外挿を示す。線質変換係数による外挿は6 MVの水吸収線量校正定数を基準としている。

レンズ電離箱の校正不確かさについては、相対標準不確かさ0.5%とした。

水吸収線量校正定数の内挿による不確かさは相対標準不確かさ0.3%とした。この不確かさの検討の詳細は付録 A. 13 に示す。この不確かさには線質指標による近似の不確かさの他、線質指標による水吸収線量校正定数の推定の不確かさも含まれる^{12), 13)}。 $TPR_{20,10}$ の値が一致する場合に、校正証明書に記載された水吸収線量校正定数をそのまま用いた際の影響も相対標準不確かさ0.3%の範囲内に収まる。

図 4.1 に表 4.2 の校正結果の例について(a)二次曲線近似および(b)直線近似, (c)線質変換係数を用いた外挿を行った結果を示す。比較のため、(b)直線近似は6, 10, 15 MVの高エネルギー光子線水吸収線量校正定数のみが与えられた場合を想定した。(c)線質変換係数を用いた外挿は6 MVの校正結果を用いて外挿を行った場合を想定した。図から $TPR_{20,10}$ の値が0.65から0.8付近までは大きな差が見られないことが分かるが、4 MV高エネルギー光子線の線質である $TPR_{20,10} = 0.62$ 付近となると、直線近似の外挿が最も正確と想定される二次曲線の値から0.3%以上乖離することが分かる。一方で、線質変換係数を用いた外挿では、二

次曲線に対する乖離は 0.2 % 以内に収まる。このことから、外挿の不確かさについても、相対標準不確かさ 0.3 % とした。この不確かさは $0.6 < TPR_{20,10} < 0.78$ の範囲の高エネルギー光子線を想定したものであり、この範囲を超える外挿を行う場合は外挿による不確かさが大きくなるため、注意が必要である。

以上から、測定対象の高エネルギー光子線の $TPR_{20,10}$ が $0.6 < TPR_{20,10} < 0.78$ の範囲内に収まる場合、水吸収線量校正 $D_{w,Q}$ の相対標準不確かさは 0.96 % と見積もられる。

表 4.3 高エネルギー光子線で校正されたリファレンス線量計による高エネルギー光子線の校正深における水吸収線量 $D_{w,Q}$ 計測値の相対標準不確かさの見積もり

物理量または手順	相対標準不確かさ / %
水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{SDL}}$	0.5
リファレンス線量計の長期安定性	0.2
基準条件の設定	0.4
モニタ設定値に対する指示値 M_{raw}	0.4
補正係数 k_i	0.4
水吸収線量校正定数の内挿あるいは外挿	0.3
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ	0.96
相対拡張不確かさ ($k = 2$)	1.9

5. 高エネルギー電子線の水吸収線量計測法

本章では、高エネルギー電子線水吸収線量標準によって校正された電離箱線量計を用いた基準条件における校正深での電子線による水吸収線量計測法について述べる。なお、本章における電子線とは、医療用加速器において散乱箔により平坦化された公称エネルギーが 4 MeV から 22 MeV までの電子線を指す。

5.1. 電離箱線量計

高エネルギー電子線の計測には円筒形電離箱または十分な保護電極の幅¹を持った平行平板形電離箱を用いることができる⁶⁾。

電離箱は標準機関によって高エネルギー電子線水吸収線量校正定数が与えられたリファレンスクラスの電離箱を用いる。あるいは、標準機関による校正を受けた電離箱を介して相互校正された平行平板形電離箱を用いることもできる。なお、円筒形電離箱については校正定数が与えられている R_{50} の範囲内ではしか用いることができないので、注意が必要である。

円筒形電離箱の場合、標準計測法 12 とは異なり、高エネルギー電子線の水吸収線量計測においても高エネルギー光子線の場合と同様に、円筒形電離箱の電離空洞の幾何学的中心が校正深に一致するように設置する。

5.2. 高エネルギー電子線の線質指標

高エネルギー電子線の線質を表示する線質指標には標準計測法 12 と同じく、線量半価深 R_{50} (単位: g cm^{-2}) を用いる。決定方法については標準計測法 12 第 4 章の「4.3 線質の決定」を参照すること³⁾。

5.3. 基準条件

高エネルギー電子線の水吸収線量計測の基準条件を表 5.1 に示す。一般に出力係数の基準となるファントム表面における照射野 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ を基準照射野とする。もし、施設によって他の照射野を出力係数の基準としている場合はその照射野を基準照射野とする。

校正深 d_c の決定は、標準計測法 12 と同様に R_{50} から次式で決定する³⁾。

$$d_c = 0.6R_{50} - 0.1 \text{ g cm}^{-2} \quad (5.1)$$

¹ 電離空洞の厚さが 2 mm 以内であり、保護電極の幅が電離空洞の厚さの 1.5 倍以上あること。

表 5.1 電子線の水吸収線量計測の基準条件

項目	基準値または基準特性
ファントム材質	水
水温	基準温度：22 °C 測定条件：22 °C ± 4 °Cの範囲内
電離箱	円筒形（校正点を与えられている R_{50} の範囲内） 平行平板形
校正深	$d_c = 0.6R_{50} - 0.1 \text{ g cm}^{-2}$
電離箱の基準点	円筒形：電離空洞の幾何学的中心 ^a 平行平板形：電離空洞内前面の中心
SSD	100 cm
照射野	10 cm × 10 cm ^b

a 電離箱壁および空洞，中心電極による変位は考慮しない

b または出力係数の基準とする照射野

5.4. 水吸収線量校正定数の決定

高エネルギー電子線水吸収線量標準に基づく放射線治療用電離箱の校正結果の例を表5.2および表5.3に示す。高エネルギー電子線の場合，標準機関の高エネルギー電子線の線質毎の水吸収線量校正定数が与えられる。ユーザーはこの表から測定対象の高エネルギー電子線の線質Qにおける水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q}$ の値を次に述べる方法によって求め，水吸収線量計測に用いる。

5.4.1. 曲線近似による内挿で水吸収線量校正定数を求める方法

校正証明書に水吸収線量校正定数が4点以上与えられている場合， R_{50} について水吸収線量校正定数の曲線近似を行い，内挿することで測定対象の線質における水吸収線量校正定数を求める。曲線の関数は円筒形電離箱と平行平板形電離箱について，それぞれ次の式が提案されている¹⁴⁾。

$$N_{D,w,Q} = a + b(R_{50})^c : \text{円筒形電離箱} \quad (5.2)$$

$$N_{D,w,Q} = a + b \exp\left(-\frac{R_{50}}{c}\right) : \text{平行平板形電離箱} \quad (5.3)$$

ここで， a および b ， c は近似曲線の係数である。各係数の値は校正証明書の添付資料として標準機関より提供される²⁾。得られた曲線に測定対象の高エネルギー電子線の R_{50} の値を代

²⁾ 標準機関では直交距離回帰を用いて近似曲線を導出する。

入し、測定対象の高エネルギー電子線における水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q}$ を求める。ユーザーは提供された係数を用いて、校正定数が正しく求められることを確認してから用いること。なお、校正証明書に記載された R_{50} の値に対して、測定対象の高エネルギー電子線の R_{50} の値が $\pm 0.04 \text{ g cm}^{-2}$ の範囲内で一致している場合は、校正証明書に記載された水吸収線量校正定数をそのまま用いても大きな影響はない。校正点が4点以上与えられた場合に限り、式(5.2)または式(5.3)を用いて外挿することで、校正範囲よりも高エネルギー側の水吸収線量校正定数を求めることができる。

校正点が2点または3点しか無い場合は、与えられた校正定数を R_{50} について内挿することで、自施設の高エネルギー電子線の線質の $N_{D,w,Q}$ を導出することができる。

5.4.2. 媒介線質を用いた外挿によって水吸収線量校正定数を求める方法

平行平板形電離箱に限り、媒介線質を基準とした線質変換係数を介して、校正証明書に記載された R_{50} の範囲外に水吸収線量校正定数の外挿を行うことができる。外挿を行う場合は、はじめに媒介線質 Q_{int} ($R_{50} = 7.5 \text{ g cm}^{-2}$)における水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{\text{int}}}$ を求め、これに媒介線質を基準線質とした線質変換係数 $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ を乗じて、線質 Q における水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q}$ を求める。なお、 $N_{D,w,Q_{\text{int}}}$ の値については、次の式にもとづいて決定された値が校正証明書の添付資料として標準機関より提供される。

$$N_{D,w,Q_{\text{int}}} = N_{D,w,Q_{\text{SDL}}} \frac{1}{k_{Q_{\text{SDL}},Q_{\text{int}}}} \quad (5.4)$$

ここで、 $N_{D,w,Q_{\text{SDL}}}$ は校正証明書に記載された線質 Q_{SDL} における水吸収線量校正定数であり、 $k_{Q_{\text{SDL}},Q_{\text{int}}}$ は媒介線質を基準とした線質 Q_{SDL} における線質変換係数である。

$N_{D,w,Q_{\text{int}}}$ に測定対象の線質 Q における線質変換係数 $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ を乗じ、線質 Q における水吸収線量校正定数を $N_{D,w,Q}$ を求める。

$$N_{D,w,Q} = N_{D,w,Q_{\text{int}}} k_{Q,Q_{\text{int}}} = N_{D,w,Q_{\text{SDL}}} \frac{k_{Q,Q_{\text{int}}}}{k_{Q_{\text{SDL}},Q_{\text{int}}}} \quad (5.5)$$

$k_{Q,Q_{\text{int}}}$ および $k_{Q_{\text{SDL}},Q_{\text{int}}}$ は全ての平行平板形電離箱において、次の線量半価深 R_{50} の関数で求めることができる¹⁵⁾。

$$k_{Q,Q_{\text{int}}} = \frac{(\bar{L}/\rho)_{w,\text{air},Q}}{(\bar{L}/\rho)_{w,\text{air},Q_{\text{int}}}} = \frac{1.2534 - 0.1487(R_{50})^{0.2144}}{1.0244} = 1.2236 - 0.1452(R_{50})^{0.2144} \quad (5.6)$$

ここで、 R_{50} は対象の線質 Q または Q_{SDL} における線量半価深の値（単位： g cm^{-2} ）である³⁾。

³⁾ 標準計測法 12 において、一部の平行平板形電離箱をのぞき、 $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ は阻止能比によってのみ決定されている。

高エネルギー電子線水吸収線量校正定数の決定の例

標準機関に高エネルギー電子線水吸収線量の校正を依頼すると、下記の表 5.2 および表 5.3 の例のように、校正を行った高エネルギー電子線の線質指標 R_{50} および水吸収線量校正定数の表が校正証明書に記載される。ユーザーはこの表から自施設の線質 Q における水吸収線量校正定数を求めて測定に用いる。

表 5.2 円筒形電離箱の校正結果の例

公称エネルギー	線質指標 R_{50} (g/cm ²)	校正深 d_c (g/cm ²)	水吸収線量校正定数 (mGy/nC)	相対拡張 不確かさ (%)
9 MeV	3.63	2.08	44.67	1.2
12 MeV	4.83	2.80	44.27	1.2
15 MeV	6.07	3.54	44.02	1.2
18 MeV	7.22	4.23	43.77	1.2

相対拡張不確かさの包含係数は $k = 2$ であり、約 95 %の信頼の水準に相当する。なお、この値は参考値であり、実際の計測には用いてはならない。

①近似曲線で内挿する場合

表 5.2 に対して直交距離回帰によって近似曲線を求めた結果の一例を示す。

$$N_{D,w,Q} = 182.50 - 136.19(R_{50})^{9.3122 \times 10^{-3}}$$

測定対象が $R_{50} = 4.8 \text{ g cm}^{-2}$ の 12 MeV の高エネルギー電子線の場合、水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q}$ は 44.30 mGy nC⁻¹となる。

②直線近似で内挿する場合

校正点の数が 2 点または 3 点の場合、直線近似による内挿で水吸収線量校正定数を求める。表 5.2 の 12 MeV から 18 MeV の結果に対して直線近似を求めると、

$$N_{D,w,Q} = 45.283 - 0.20911(R_{50})$$

となる。 $R_{50} = 6.2 \text{ g cm}^{-2}$ の 15 MeV 高エネルギー電子線の場合、水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q}$ は 43.99 mGy nC⁻¹となる。

③平行平板形電離箱の場合に線質変換係数を用いて外挿する場合

平行平板形電離箱では、校正結果を低エネルギー側に外挿して水吸収線量校正定数を決定する事ができる。下の表に平行平板形電離箱の校正結果の例を示す。

表 5.3 平行平板形電離箱の校正結果の例

公称エネルギー	線質指標 R_{50} (g/cm ²)	校正深 (g/cm ²)	水吸収線量校正定数 (mGy/nC)	相対拡張 不確かさ (%)
9 MeV	3.63	2.08	79.63	1.2
12 MeV	4.83	2.80	78.73	1.2
15 MeV	6.07	3.54	78.05	1.2
18 MeV	7.22	4.23	77.33	1.2

相対拡張不確かさの包含係数は $k = 2$ であり、約 95 % の信頼の水準に相当する。なお、この値は参考値であり、実際の計測には用いてはならない。

表の例の場合、最も低いエネルギーの 9 MeV の高エネルギー電子線の水吸収線量校正定数を用いて、媒介線質 Q_{int} における水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{int}}$ を求める。 $R_{50} = 3.63$ g cm⁻²における $k_{Q_{SDL},Q_{int}}$ の値は式(5.6)より、 $k_{Q_{SDL},Q_{int}} = 1.0322$ となるので、 $N_{D,w,Q_{int}}$ は、

$$N_{D,w,Q_{int}} = N_{D,w,Q_{SDL}} \frac{1}{k_{Q_{SDL},Q_{int}}} = 79.63 \frac{1}{1.0322} = 77.15 \text{ mGy nC}^{-1}$$

となる。測定対象の線質 Q が $R_{50} = 2.3$ g cm⁻²の 6 MeV 高エネルギー電子線の場合、 $k_{Q,Q_{int}} = 1.0500$ となるので、線質 Q における水吸収線量校正定数は、

$$N_{D,w,Q} = N_{D,w,Q_{int}} k_{Q,Q_{int}} = 77.15 \text{ mGy nC}^{-1} \times 1.05 = 81.01 \text{ mGy nC}^{-1}$$

となる。

5.5. 水吸収線量の決定

線質 Q の電子線に対する水吸収線量 $D_{w,Q}(d_c, A_0)$ は次の式で求められる。

$$D_{w,Q}(d_c, A_0) = M_Q N_{D,w,Q} \quad (5.7)$$

ここで、 M_Q は表 5.1 の基準条件にしたがって、校正深 d_c に置かれた電離箱線量計の指示値である。 M_Q には温度気圧補正係数 k_{TP} 、イオン再結合補正係数 k_s 、極性効果補正係数 k_{pol} 、電位計校正定数 k_{elec} が含まれている。 $N_{D,w,Q}$ は 5.4 で得られた線質 Q における高エネルギー電子線の水吸収線量校正定数である。

5.6. 線量最大深の水吸収線量

電子線では一般に線量最大深を基準とする。この手続きは標準計測法 12 の 4.4.3 と同様である³⁾。校正深水吸収線量 $D_{w,Q}(d_c, A_0)$ から線量最大深水吸収線量 $D_{w,Q}(d_{max}, A_0)$ は、深部量百分率 $PDD(d_c, A_0)$ を用いて次式で計算する。

$$D_{w,Q}(d_{max}, A_0) = 100 \times \frac{D_{w,Q}(d_c, A_0)}{PDD(d_c, A_0)} \quad (5.8)$$

なお、深部量百分率の測定方法は標準計測法 12 の付録 14 に示されている。

5.7. 基準条件における水吸収線量の不確かさ

高エネルギー電子線の水吸収線量計測における不確かさの見積りを表 5.4 に示す。リファレンス線量計の校正不確かさについては、相対標準不確かさ 0.6 % と仮定した³⁾。

図 5.1 および図 5.2 に円筒形電離箱および平行平板形電離箱の校正結果の例について(a) 曲線近似および(b)直線近似、(c)線質変換係数を用いた外挿を行った結果を示す。比較のため、(b)直線近似は 12, 15, 18 MeV の高エネルギー電子線水吸収線量校正定数のみが与えられた場合を想定した。(c)線質変換係数を用いた外挿については、相互校正で媒介線質における水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{int}}$ が与えられる場合を想定し、18 MeV の校正結果を用いて外挿を行った場合を想定した。

円筒形電離箱の場合、低エネルギー側において(a)曲線近似と(b)直線近似および(c)線質変換係数を用いた外挿との間に大きな乖離があることが分かる。これは、電離箱の基準点が電離空洞幾何学的中心へと変更されたことにより、標準計測法 12 では半径変位法によって補正されていた、電離空洞による測定の実効点の変位の影響が現れているためである。したがって、円筒形電離箱については、校正証明書に記載された線質の範囲外へ校正定数を外挿して用いるべきでない。平行平板形電離箱の場合、十分な保護電極幅を持った平行平板形電離箱であれば擾乱の影響が最小限に抑えられるため、(a)曲線近似と(c)線質変換係数を用いた外挿によって得られる水吸収線量校正定数の値は外挿となる範囲でも良好な一致を示すことから、線質変換係数を用いた外挿によって実際の校正によって得られる水吸収線量校正定数をよく再現できる事が分かる。

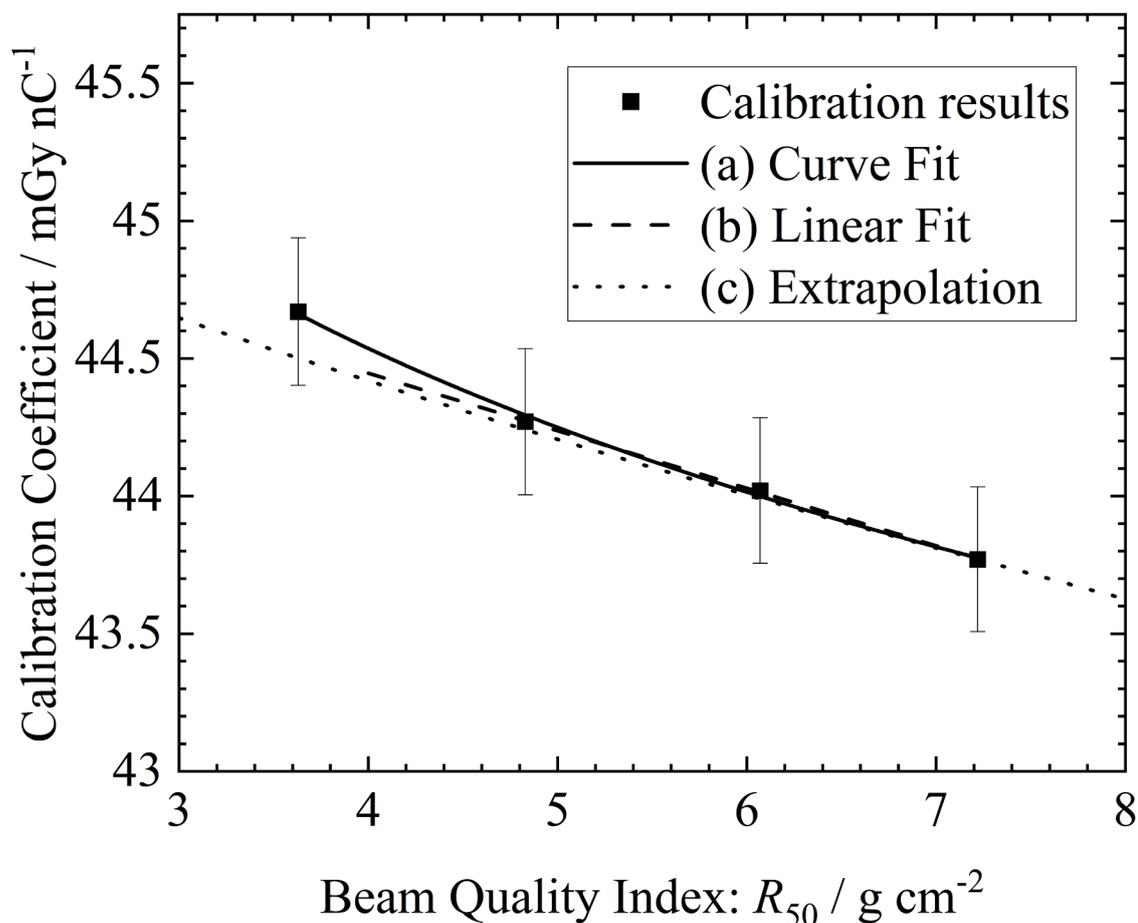


図 5.1 円筒形電離箱の水吸収線量校正定数の内挿および外挿の例

横軸は線質指標 R_{50} ，縦軸は水吸収線量校正定数を示す．実線が(a)曲線近似による内挿，破線が(b)直線近似による内挿，点線が(c)線質変換係数を用いた外挿を示す．外挿は 18 MeV の高エネルギー電子線水吸収線量校正定数の校正結果を基準に，標準計測法 12 に記載された媒介線質を基準とした線質変換係数 $k_{Q,Q_{int}}$ を用いて行った．高エネルギー電子線水吸収線量標準に基づいた円筒形電離箱の校正では，変位補正を実施しないため，低エネルギー領域 ($R_{50} < 4.0 \text{ g cm}^{-2}$) において，外挿によって水吸収線量校正定数を求めた場合と曲線近似による内挿によって水吸収線量校正定数を求めた場合とで，結果に乖離が生じる．

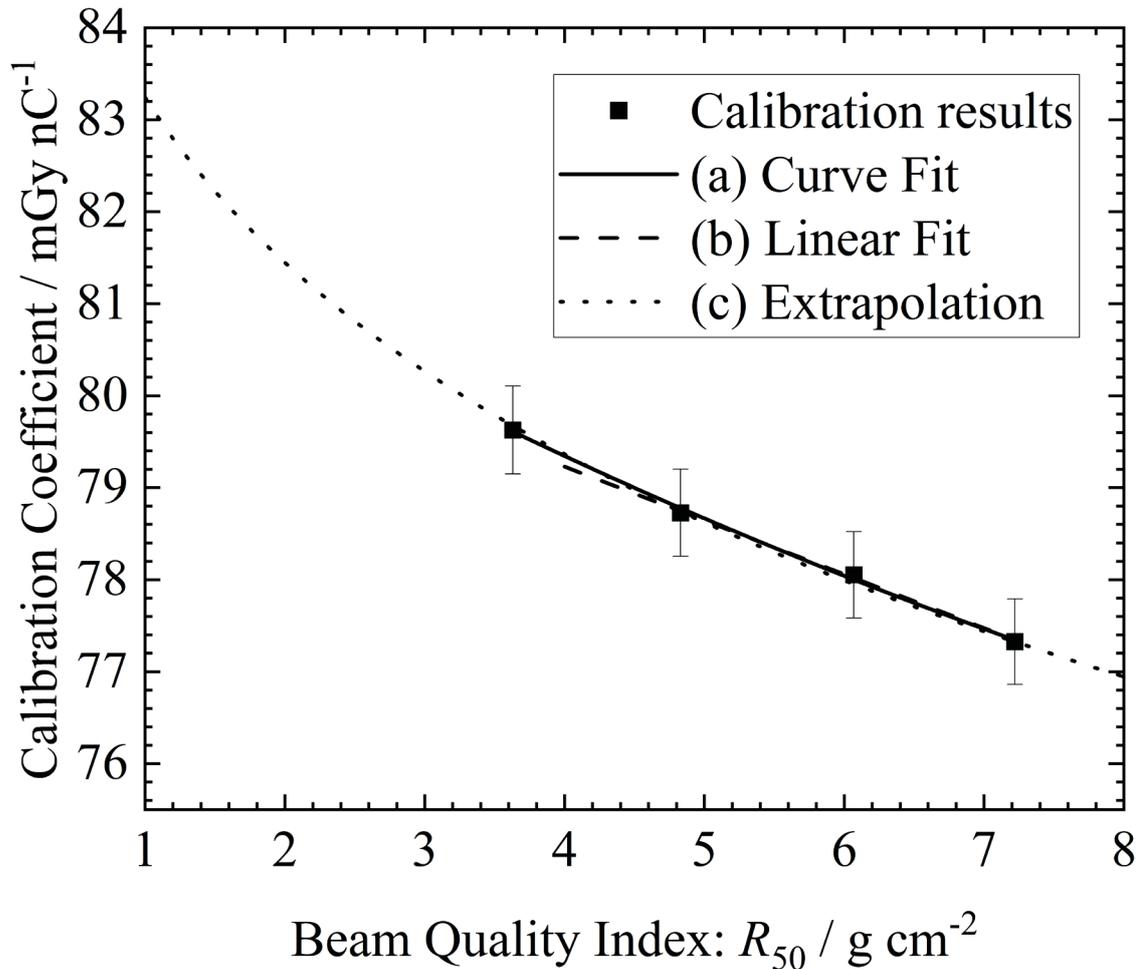


図 5.2 平行平板形電離箱の水吸収線量校正定数の内挿および外挿の例

横軸は線質指標 R_{50} ，縦軸は水吸収線量校正定数を示す．実線が(a)曲線近似による内挿，破線が(b)直線近似による内挿，点線が(c)線質変換係数を用いた外挿を示す．外挿は 18MeV の高エネルギー電子線水吸収線量校正定数の校正結果を基準に，媒介線質 Q_{int} を基準とした線質変換係数 $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ を式(5.6)から求めて行った．

以上から，水吸収線量校正定数の内挿による不確かさは相対標準不確かさ 0.1 %とした．校正証明書で与えられた R_{50} の範囲外において，媒介線質を基準とした線質変換係数 $k_{Q,Q_{\text{int}}}$ を用いて外挿を行う場合の不確かさは，標準計測法 12 の線質変換係数の不確かさから相対標準不確かさ 0.6 %と見積もった．ただし，図 5.1 および図 5.2 から明らかなように，この不確かさは標準計測法 12 で想定される R_{50} の範囲全域で外挿を行った場合の不確かさであり，例のように 18 MeV の校正結果から 9 MeV の校正結果を外挿で求めた場合の乖離は平行平板形電離箱のケースで 0.2 %未満である．

最終的に，校正証明書に記載された高エネルギー電子線の水吸収線量校正定数から内挿によって水吸収線量校正定数を求めた場合， $D_{w,Q}$ の相対標準不確かさは 0.97 %と見積もら

れる。線質変換係数を用いて水吸収線量校正定数を外挿した場合は、線質変換係数の不確かさの影響を最大に見積もった場合でも、 $D_{w,Q}$ の相対標準不確かさは1.2%となる。

表 5.4 高エネルギー電子線の水吸収線量計測の不確かさ

物理量または手順	相対標準不確かさ / %	
	内挿の場合	外挿の場合
水吸収線量校正定数	0.6	
長期安定性	0.3	
基準条件の設定	0.4	
電荷測定 M_{raw}	0.4	
補正係数 k_i	0.4	
線質変換係数 $k_{Q,Q_{\text{int}}}$	–	0.6
水吸収線量校正定数の内挿	0.1	–
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ	0.97	1.2
相対拡張不確かさ ($k = 2$)	2.0	2.3

6. フィールド線量計の相互校正

本章では、標準機関によって高エネルギー光子線および高エネルギー電子線水吸収線量校正定数が与えられたファーマ形電離箱をリファレンス線量計として、ユーザーの円筒形電離箱または平行平板形電離箱を校正する方法について述べる。相互校正では、基準照射野 (A, A_0) 、水中の校正深 d_c での水吸収線量 $D_{w,Q}(d_c, A_0)$ をリファレンス線量計で決定し、そこに校正対象となるフィールド線量計を設置してその出力を測定することで、フィールド線量計の水吸収線量校正定数を決定する。

6.1. リファレンス線量計とフィールド線量計

リファレンス線量計については 3.1 および 4.1, 5.1 の記述にしたがい、高エネルギー光子線および電子線の計測に適した電離箱および電位計を用いること。

フィールド線量計とは相互校正において校正対象となる線量計のことである。フィールド線量計に用いる電離箱はリファレンス線量計の性能要件に準じた円筒形電離箱または平行平板形電離箱を用いることが望ましい。分離校正として電離箱単体を校正する場合は、リファレンス線量計の電位計にフィールド線量計の電離箱を接続して校正を行う。一体校正としてフィールド線量計とする電離箱と電位計の校正を行う場合は、リファレンス線量計の要件に準じた電位計を用いることが望ましい。

6.2. 相互校正の方法

高エネルギー光子線(表 4.1)または電子線(表 5.1)の基準条件にリファレンス線量計と校正されるフィールド線量計を水中の校正深 d_c に交互に設置して比較測定を行う。なお、高エネルギー電子線の場合において、媒介線質における水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{int}}^{field}$ を求める場合は、施設の最大のエネルギーの高エネルギー電子線において相互校正を実施すること。これはファーマ形電離箱の空洞の影響 P_{cav} を抑えるためであり、 $R_{50} = 7.0 \text{ g cm}^{-2}$ 以上が強く推奨される。

線質 Q_{cross} で校正されたフィールド線量計の水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{cross}}^{field}$ は次式で与えられる。

$$N_{D,w,Q_{cross}}^{field} = \frac{D_{w,Q_{cross}}(d_c, A_0)}{M_{Q_{cross}}^{field}} = \frac{N_{D,w,Q_{cross}}^{ref} \bar{M}_{Q_{cross}}^{ref} k_{rn}^{ref}}{M_{Q_{cross}}^{field} k_{rn}^{field}} \quad (6.1)$$

ここで、 $\bar{M}_{Q_{cross}}^{ref}$ および $M_{Q_{cross}}^{field}$ はそれぞれリファレンス線量計およびフィールド線量計の指示値であり、温度気圧補正係数 k_{TP} 、イオン再結合補正係数 k_s 、極性効果補正係数 k_{pol} 、電位計校正定数 k_{elec} が含まれている。 k_{rn}^{ref} および k_{rn}^{field} はそれぞれリファレンス線量計およびフィールド線量計の動径方向不均一補正⁴である。動径方向不均一補正とは、ビーム軸の動径方向の線量分布について、線量計の有感領域の平均線量をビーム軸上の基準点の線量に補正す

⁴ 電離箱の有感体積に着目して体積平均効果補正係数とも呼ぶ。

のものである。線質 Q_{cross} における $N_{D,w,Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}$ の値は4.4または5.4に記述された高エネルギー光子線および高エネルギー電子線の水吸収線量校正定数の決定方法にしたがって求める。

相互校正中の放射線発生装置の変動の影響を排除するため、フィールド線量計の測定の前後にリファレンス線量計の測定を行い、その平均値を $\bar{M}_{Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}$ とする。

$$\bar{M}_{Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} = \frac{M_{\text{before},Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} + M_{\text{after},Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}}{2} \quad (6.2)$$

フィールド線量計測定の前後のリファレンス線量計の指示値の変動が0.2%を超える場合は再測定を行うことが望ましい。

放射線発生装置の出力や温度気圧の変動の影響をより確実に排除する方法として、標準計測法12で推奨されている外部モニタ電離箱を用いる方法も有効である。外部モニタ電離箱を用いる場合は、外部モニタ電離箱としてファーマ形電離箱を用意し、必ず電離箱と同程度の深さに外部モニタ電離箱を設置すること。測定対象の電離箱壁と外部モニタ電離箱の電離箱壁との間隔を2.5 cm以上とること。測定中、外部モニタ電離箱の位置が動かないようにすること。外部モニタ電離箱を用いる場合は、それぞれの電離箱の指示値 $M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{field}}$ および

$M_{\text{before},Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}$ 、 $M_{\text{after},Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}$ と外部モニタ電離箱の指示値 $M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{exm}}$ の比を式(6.1)および式(6.2)

におけるリファレンス線量計およびフィールド線量計の指示値とすること。すなわち、

$$\begin{aligned} M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{field}} &\Rightarrow M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{field}} / M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{exm}} \\ M_{\text{before},Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} &\Rightarrow M_{\text{before},Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} / M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{exm}} \\ M_{\text{after},Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} &\Rightarrow M_{\text{after},Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} / M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{exm}} \end{aligned}$$

となる。なお、外部モニタ電離箱の表示値に対して温度気圧補正やイオン再結合補正、極性効果補正、電位計校正定数などの各種補正は不要である。また、外部モニタ電離箱を用いる場合、外部モニタ電離箱に対する各線量計の指示値の比において、温度気圧補正係数は相殺されるため、各線量計の表示値に対しても温度気圧補正を行う必要は無い。

$k_{\text{rn}}^{\text{ref}}$ および $k_{\text{rn}}^{\text{field}}$ は、校正深において動径方向に平坦な線量分布を持つ高エネルギー光子線または電子線で相互校正を行う場合は1とすることができる。ファーマ形電離箱間の相互校正の場合など、リファレンス線量計とフィールド線量計の有感領域の形状が近い場合は、線量分布が平坦でなくても $k_{\text{rn}}^{\text{ref}} = k_{\text{rn}}^{\text{field}}$ として、この補正を無視することができる。ファーマ形電離箱の有感領域内における軸外線量比OARの変化が0.5%を超えるような、動径方向に不均一な線量分布を持つ高エネルギー光子線または電子線において、ファーマ形電離箱とピンポイント電離箱など、空洞の形状が大きく異なる電離箱との間で相互校正を行う場合は、それぞれ $k_{\text{rn}}^{\text{ref}}$ および $k_{\text{rn}}^{\text{field}}$ の評価が必要となる。

円筒形電離箱の場合は、電離箱長軸の軸外線量比OARの平均から、次の式で円筒形電離箱の動径方向不均一補正 $k_{\text{rn}}^{\text{cyl}}$ を導出する。

$$k_{\text{rn}}^{\text{cyl}} = \frac{L}{\int_{-L/2}^{L/2} OAR(x) dx} \quad (6.3)$$

ここで、 L は電離箱の長軸方向の長さであり、 $OAR(x)$ はビーム軸から x の位置における軸外線量比である。

平行平板形電離箱の場合は、平行平板形電離箱の有感領域の OAR の平均から次の式で平行平板形電離箱の動径方向不均一補正 k_{rn}^{para} を求める。

$$k_{rn}^{para} = \frac{\pi R^2}{\int_0^R OAR(r) 2\pi r dr} \quad (6.4)$$

ここで R は平行平板形電離箱の有感領域の半径である。

6.3. 高エネルギー電子線の媒介線質における水吸収線量校正定数の導出

平行平板形電離箱の場合、高エネルギー電子線の媒介線質 $Q_{int}(R_{50} = 7.5 \text{ g cm}^{-2})$ における水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{int}}^{field}$ を導出しておくことで、6 MeV 以下の高エネルギー電子線の水吸収線量計測にフィールド線量計を用いることができる。 $N_{D,w,Q_{int}}^{field}$ は次の式で導出する。

$$N_{D,w,Q_{int}}^{field} = \frac{N_{D,w,Q_{cross}}^{field}}{k_{Q_{cross},Q_{int}}^{field}} \quad (6.5)$$

ここで、 $k_{Q_{cross},Q_{int}}^{field}$ はフィールド線量計の媒介線質 Q_{int} に対する線質 Q_{cross} の線質変換係数である。 $k_{Q_{cross},Q_{int}}^{field}$ は式(6.6)から求める¹⁵⁾。

$$k_{Q_{cross},Q_{int}}^{field} = \frac{(\bar{L}/\rho)_{w,air,Q}}{(\bar{L}/\rho)_{w,air,Q_{int}}} = \frac{1.2534 - 0.1487(R_{50})^{0.2144}}{1.0244} = 1.2236 - 0.1452(R_{50})^{0.2144} \quad (6.6)$$

ここで、 R_{50} は Q_{cross} における線量半価深の値である。なお、この式は式(5.6)で述べた $k_{Q,Q_{int}}$ の式と同じものである。

6.4. 相互校正されたフィールド線量計による水吸収線量計測

相互校正されたフィールド線量計においても、高エネルギー光子線および高エネルギー電子線の水吸収線量計測の手順はそれぞれ「4 高エネルギー光子線の水吸収線量計測法」および「5 高エネルギー電子線の水吸収線量計測法」と同様である。

6.5. 相互校正されたフィールド線量計によって計測された基準点の水吸収線量の不確かさ

相互校正されたフィールド線量計を用いて水吸収線量計測を行う場合、相互校正に伴う測定の不確かさを水吸収線量の不確かさに考慮する必要がある。標準機関相当の測定能力を有する施設と一般的な治療施設における不確かさの見積もり例を表 6.1 に示す。一般的な治療施設の不確かさは、国内の施設の状況などを元に、保守的に見積もった値である。不確かさの検討の詳細は付録 A に示す。

相互校正を実施してフィールド線量計の水吸収線量校正定数を決定し、水吸収線量計測に用いる場合は、表 6.1 の内容を参考に施設毎にフィールド線量計の水吸収線量校正定数の不確かさを評価しておくことが望ましい。

高エネルギー電子線におけるフィールド線量計の相互校正において、媒介線質 Q_{int} における水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{int}}^{field}$ を導出するが、この手順で発生する不確かさは、その後の高エネルギー電子線の水吸収線量計測の手順においてキャンセルされるため、不確かさとして考慮しなくて良い。

表 6.1 相互校正の不確かさ。(光子線の場合/電子線の場合)

物理量または手順	相対標準不確かさ / %	
	標準機関	一般施設 ^a
リファレンス電離箱の水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{cross}}^{ref}$ ^b	0.5 / 0.6	
リファレンス線量計の指示値	0.05	
リファレンス線量計の深さ	0.03	0.15
フィールド線量計の測定	0.05	
フィールド線量計の深さ	0.03	0.15
水槽の設置	0.012	0.16
温度気圧補正係数: k_{TP}	0.022	0.12
イオン再結合補正係数: k_s	0.034	
極性効果補正係数: k_{pol}	0.036	
動径方向不均一補正 $k_{rn}^{ref}/k_{rn}^{field}$	0.1	0.3
ビームモニターの安定性	0.1	0.06
リファレンス電離箱の長期安定性	0.2	
水吸収線量校正定数の内挿の不確かさ	0.1 / 0.1	0.3 / 0.1
$N_{D,w,Q_{cross}}^{field}$ および $N_{D,w,Q_{int}}^{field}$ の合成相対標準不確かさ	0.57 / 0.66	0.70 / 0.77
$N_{D,w,Q_{cross}}^{field}$ および $N_{D,w,Q_{int}}^{field}$ の相対拡張不確かさ ($k = 2$)	1.2 / 1.3	1.4 / 1.5

a 国内の施設の状況から保守的に見積もった不確かさ

b 高エネルギー光子線の場合は 0.5 %，高エネルギー電子線の場合は 0.6 % とした。

相互校正されたフィールド線量計による水吸収線量計測の不確かさは高エネルギー光子線および高エネルギー電子線の水吸収線量校正定数の不確かさを相互校正されたフィールド線量計の合成相対標準不確かさに置き換えることで決定することができる。標準機関相当の測定能力を有する施設の場合、相互校正されたフィールド線量計を用いた高エネルギー光子線の水吸収線量の相対標準不確かさは 1.0 % となる。高エネルギー電子線については、 $N_{D,w,Q_{cross}}^{field}$ を用いた場合で水吸収線量の相対標準不確かさは 1.0 %， $N_{D,w,Q_{int}}^{field}$ を用いた場合で水吸収線量の相対標準不確かさは 1.1 % となり、実質的な不確かさの影響はない。一般的な治療施設で相互校正されたフィールド線量計の場合、高エネルギー光子線の水吸収線量の相対標準不確かさは 1.1 % となる。高エネルギー電子線の $N_{D,w,Q_{cross}}^{field}$ および $N_{D,w,Q_{int}}^{field}$ を用いた場合で、水吸収線量の相対標準不確かさはそれぞれ 1.1 % および 1.2 % となり、一般

的な治療施設でフィールド線量計の相互校正を行った場合でも不確かさの増加は 0.1 %にとどまる。

7. 終わりに

高エネルギー光子線および電子線水吸収線量標準にもとづいて校正された放射線治療用線量計を用いた水吸収線量計測法についてまとめた。 ^{60}Co ガンマ線水吸収線量校正サービスの相補的な運用として、高エネルギー光子線水吸収線量校正定数から ^{60}Co ガンマ線水吸収線量校正定数を求めることもできる。この方法については、付録 B にまとめたので参照するとよい。

この線量計測法は標準計測法 12 に準拠する形でまとめたために記載していないが、FFF 高エネルギー光子線の水吸収線量計測法については英国の線量計測プロトコルにおいて、従来の平坦化された高エネルギー光子線の水吸収線量校正定数を基準として線量計測を行う方法がまとめられているので、緊急時には参考にすることができる⁵⁾。

線量計測法は使用する側が特に意識しなくても問題なく計測を行えることが本来望ましいが、現在の手順は基準条件や細かなユーザーの手技で結果に影響を与える要因が存在している。欧米のプロトコルを十分に理解した上で、我が国の事情に適した使いやすい標準計測法をまとめるには、ユーザーが日頃の線量計測の手順をよく理解し、どのような改善方法が可能か気軽に議論できる環境作りが非常に重要である。この線量計測法がその端緒となることを願ってまとめとする。

付録A フィールド線量計の相互校正における不確かさ

ここではフィールド線量計の相互校正における不確かさの検討について詳細を述べる。相互校正の不確かさは同じ基準位置に設置されたリファレンス線量計およびフィールド線量計それぞれの測定における各不確かさ要因の標準不確かさおよび感度係数を評価し、各不確かさ要因のフィールド線量計の水吸収線量校正定数における相対標準不確かさ $u(x_i)$ [%]を導出する。最後にそれぞれの相対標準不確かさ合成不確かさとしてフィールド線量計の水吸収線量校正定数の相対標準不確かさ $u(N_{D,w,Q_{cross}}^{field})$ を求める。なお、各不確かさ要因の説明において特に記載の無い場合は感度係数を1とする。

A.1 リファレンス電離箱の水吸収線量校正定数の不確かさ： $u(N_{D,w,Q_{cross}}^{ref})$

フィールド線量計の相互校正における不確かさの最大要因はリファレンス電離箱の水吸収線量校正定数である。2022年3月現在で一次標準機関の国立研究開発法人 産業技術総合研究所から供給される高エネルギー光子線水吸収線量校正定数の相対標準不確かさは0.4%であり、高エネルギー電子線の水吸収線量校正定数の相対標準不確かさは0.5%である¹⁶⁾。JCSS校正事業者を介して校正を受ける場合は、この不確かさに0.3%をさらに合成することとなるので、高エネルギー光子線および高エネルギー電子線の水吸収線量校正定数の相対標準不確かさをそれぞれ0.5%および0.6%とした。

相互校正を行う線質 Q_{cross} に対する内挿あるいは外挿に伴う不確かさについては、フィールド線量計とリファレンス線量計の間で相互に相殺されるため、ここでは考慮しないこととした。

A.2 フィールド線量計の指示値： $u(M_{Q_{cross}}^{field})$

フィールド線量計の指示値の不確かさは統計不確かさ（タイプA不確かさ）として求める。 n 回の測定で指示値が $M_1, M_2, M_3, \dots, M_{n-1}, M_n$ [nC]となる時、指示値の平均値 \bar{M} （単位：nC）および相対標準偏差（変動係数） $\sigma(M)$ （単位：%）、相対標準不確かさ $u(M)$ （単位：%）はそれぞれ次のようになる。

$$\bar{M} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n M_i \quad (A.1)$$

$$\sigma(M) = \frac{100}{\bar{M}} \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2 \quad (A.2)$$

$$u(M) = \frac{1}{n} \sigma(M) \quad (A.3)$$

なお、外部モニタ電離箱を用いる場合はそれぞれの線量計の指示値に対する外部モニタ電離箱の指示値の比 $M_{Q_{cross}}^{field} / M_{Q_{cross}}^{exm}$ の統計不確かさとなる。測定回数 n はそれぞれ5回以上、相対標準不確かさが0.05%以下になっていることが確認できるまで行うことが望ましい。

A.3 リファレンス線量計の指示値： $u(M_{Q_{cross}}^{ref})$

電離箱の測定の不確かさはリファレンス線量計の2回の測定における指示値 $M_{before, Q_{cross}}^{ref}$ および $M_{after, Q_{cross}}^{ref}$ の統計不確かさとの合成となる。

$$u(M_{Q_{cross}}^{ref}) = \sqrt{u^2(M_{before, Q_{cross}}^{ref}) + u^2(M_{after, Q_{cross}}^{ref})} \quad (A.4)$$

なお、外部モニタ電離箱を用いる場合はそれぞれの線量計の指示値に対する外部モニタ電離箱の指示値の比 $M_{before, Q_{cross}}^{ref}/M_{Q_{cross}}^{exm}$ 、 $M_{after, Q_{cross}}^{ref}/M_{Q_{cross}}^{exm}$ の統計不確かさとなる。

フィールド線量計の場合と同じく、各測定はそれぞれ5回以上、相対標準不確かさが0.05%以下になっていることが確認できるまで行うことが望ましい。

A.4 線量計の深さ： $u(d_c^{ref})$, $u(d_c^{field})$

フィールド線量計およびリファレンス線量計の深さの不確かさは、ユーザーの手技によって深さを決定する際の不確かさと電離箱や水ファントムに起因する深さのばらつきが要因として想定される。このうち、電離箱の個体差に起因する不確かさについては、そもそも水吸収線量校正定数に含める物として考慮しない。リファレンス線量計についてはフィールド線量計の測定に前後して2回の測定が行われるが、この時の再現性の不確かさは後述べるビームモニターの安定性の不確かさに含まれるのでここでは考慮しない。

ユーザーの手技や水ファントムによる線量計の深さについては木下らが詳細な報告を行っている¹⁷⁾。それによると、ユーザーの手技による深さ決定の標準不確かさは0.13 mmから0.24 mmであり、ファントム固有の標準不確かさは0.12 mmから0.28 mmである。これらを合成すると、深さの標準不確かさは0.18 mmから0.37 mmである。

フィールド線量計の水吸収線量校正定数の相対標準不確かさへの寄与を示す感度係数は、高エネルギー光子線および電子線の校正深付近の線量勾配が相当する。高エネルギー光子線および18 MeVの高エネルギー電子線であれば線量勾配は概ね $0.4\% \text{ mm}^{-1}$ であるので、相対標準不確かさは0.07%から0.15%と見積もられる。

産業技術総合研究所では、校正専用の水平ビーム用水ファントムとして窓厚5 mm、窓サイズ11 cm×11 cmの水ファントムやゲージブロック、寸法公差を厳密に設定した固定治具を用いることで、相対標準不確かさを0.03%に抑えている。

A.5 水槽の設置位置： $u(k_L)$

この不確かさ要因は式(6.1)には直接示されず、特にフィールド線量計の相互校正の場合は互いに相殺されるため無視しても良いが、作業中に変動があった場合を考慮して、不確かさとして見積もる。設置位置の不確かさは設置方法の違いによる不確かさと垂直ビーム用水ファントムの場合の水面のばらつき、水平ビーム用水ファントムの窓の変形による不確かさが不確かさ要因として想定される。それぞれの基準距離の不確かさ

設置方法の違いによる不確かさは、設置の基準に用いる位置決めレーザーの幅やフロントポインターの目盛の間隔によって決まる。位置決めレーザーの場合はレーザーの幅の半幅を、フロントポインターの場合は最小目盛の10分の1を分解能 w_1 （単位：mm）とし、ばらつきの分布を $\pm w$ の矩形分布と仮定して、設置位置の標準不確かさは次の式で決定される。

$$\text{設置方法の違いによる不確かさ} : \frac{w_1}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.5})$$

フロントポインターの分解能が0.1 mmの場合、標準不確かさは0.1 mmとなり、レーザーの幅が2 mmの場合の標準不確かさは0.6 mmとなる。

垂直ビーム用水ファントムの水面の変動の不確かさについては、水面管理の許容範囲が $\pm w_2$ （単位：mm）の時、矩形分布を仮定して、

$$\text{水面の変動による不確かさ} : \frac{w_2}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.6})$$

となる。水面管理の許容範囲が ± 0.5 mmの時、水面の変動による標準不確かさは0.29 mmとなる。

水平ビーム用水ファントムの入射窓の水圧による歪みは、木下らの報告によると窓厚さが3 mmの場合に0.3 mm、窓厚さが5 mmの場合で0.05 mmとなる¹⁸⁾。この差は、系統的なずれとして現れるので、そのまま設置位置の不確かさとなる。

最終的に設置位置の合成不確かさは0.11 mmから0.67 mmとなる。線量への寄与を示す感度係数は点線源を仮定した場合、線量が基準距離 L （単位：mm）の自乗に反比例することから、

$$\text{設置位置の感度係数} / \% \text{ mm}^{-1} = 2 \times \frac{100}{L} \quad (\text{A.7})$$

となる。高エネルギー光子線の場合、基準距離（SCDまたはSSD）は通常1000 mmである。この場合、設置位置による線量の相対標準不確かさ $u(k_L)$ は0.03%から0.14%となる。

高エネルギー電子線の場合はビーム発生方式が異なるので、点線源を仮定した場合の基準距離が1000 mmよりも短くなることが知られており、設置位置による不確かさは大きくなる。仮に基準距離が900 mmの場合は、相対標準不確かさは0.04%から0.16%となる。

基準距離を評価することが難しい場合は、設置位置を ± 1 mm変動させた際の電離箱指示値の変化から感度係数を決定する。

$$\text{設置位置の感度係数} / \% \text{ mm}^{-1} = \frac{M(+1 \text{ mm}) - M(-1 \text{ mm})}{2 \text{ mm}} \frac{100}{M(0 \text{ mm})} \quad (\text{A.8})$$

ここで、 $M(+1 \text{ mm})$ および $M(-1 \text{ mm})$ 、 $M(0 \text{ mm})$ はそれぞれ基準距離に対して+1 mm、-1 mm、0 mm水槽の設置位置を変動させた場合の電離箱の指示値である。

産業技術総合研究所では校正専用の水ファントムとして、入射窓のサイズが11 cm×11 cm、窓厚さを5 mmとして、入射窓の歪みを最小限に抑えるとともに、デジタルフロント

ポインターを基準距離の測定に用いることで、水槽の設置位置による相対標準不確かさを 0.012 % に抑えている。

A.6 温度気圧補正の不確かさ： $u(k_{TP})$

温度気圧補正の不確かさは短時間の測定あれば通常相殺されるため、無視しても良いが、測定中の大気条件の変化が大きい場合を想定して不確かさに見積もる。なお、外部モニタ電離箱を水槽内に設置して用いる場合は、外部モニタ電離箱に対する測定対象の電離箱の指示値の比において、温度気圧補正係数は相殺されるため、温度気圧補正を行う必要は無く、温度気圧補正による不確かさを考慮する必要もない。

通常、測定は基準条件の温度や大気圧の近傍で行われるため、温度測定に起因する相対標準不確かさと気圧測定に起因する相対標準不確かさを独立して合成することで温度気圧補正の相対標準不確かさを見積もることができる。そこで、温度気圧補正を温度補正 k_T および気圧補正 k_P に分けて不確かさの検討を行う。

標準計測法 12 では気象測器検定合格品を温度計および気圧計に用いることを推奨しており³⁾、その合格基準から不確かさを推定することができる¹¹⁾。温度の場合、器差の許容範囲が $\pm\Delta T$ （単位： $^{\circ}\text{C}$ ）の場合、温度測定の標準不確かさは

$$\text{温度測定の標準不確かさ} : \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.9})$$

となる。電気式温度計の器差の許容範囲が $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ であり、ガラス製温度計で一目盛の表示量が 0.2°C より大きい温度計の器差の許容範囲は $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ とされている。矩形分布を仮定すると温度の標準不確かさは、電気式温度計とガラス製温度計でそれぞれ 0.29°C 、 0.18°C となる。なお、カタログやマニュアルなどで温度測定の確度が与えられている場合は、その値を ΔT として標準不確かさを求めてもよい。温度の感度係数は $100/295 = 0.34\% \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ であるから、電気式温度計の場合の温度補正の相対標準不確かさ $u(k_T)$ は 0.1% 、ガラス製温度計の場合は 0.06% となる。標準機関では4線式白金測温抵抗体を用いたデジタル指示計器付き温度計を使用するのが一般的であり、JCSS校正済みの温度計による温度補正の相対標準不確かさは 0.016% となる。

気圧計の場合も温度計と同じく、器差の許容範囲を ΔP （単位： hPa ）として、

$$\text{気圧測定の標準不確かさ} : \frac{\Delta P}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.10})$$

で気圧測定の標準不確かさを見積もることができる。気象測器検定における器差の許容範囲は $\pm 0.7 \text{ hPa}$ であり、標準不確かさは 0.41 hPa となる。なお、カタログやマニュアルなどで気圧測定の確度が与えられている場合は、その値を ΔP としてよい。感度係数は $100/1013.3 = 0.099\% \text{ hPa}^{-1}$ であるから、気圧補正の相対標準不確かさ $u(k_P)$ は 0.041% となる。標準機関ではJCSS校正済みのデジタル圧力計を用いるのが一般的であり、気圧補正の相対標準不確かさは 0.015% となる。

最後に温度補正の相対標準不確かさおよび気圧補正の相対標準不確かさを合成して、ユーザー施設における温度気圧補正の相対標準不確かさは 0.1 %から 0.15 %となる。標準機関の場合は JCSS 校正済みのデジタル指示計器付き温度計およびデジタル圧力計を用いることで 0.022 %となる。

A.7 イオン再結合補正係数： $u(k_s^{\text{ref}}), u(k_s^{\text{field}})$

イオン再結合補正係数の不確かさ要因としては、電圧比 V_1/V_2 における線量計の指示値の比 M_1/M_2 の不確かさとイオン再結合補正係数の導出方法が持つ不確かさの二つの要因が想定される。ここではイオン再結合補正係数の導出式によって導き出されるイオン再結合補正係数を協定値として取り扱い、同一の放射線を計測して校正を行う相互校正では系統的に生じる不確かさについては相殺されるものとして取り扱うものとする。

指示値の比 M_1/M_2 の相対標準不確かさ $u(M_1/M_2)$ [%]は、A.2 で述べた指示値の相対標準不確かさの計算方法を用いて、それぞれの印加電圧における指示値の相対標準不確かさを合成することで求められる。

$$u(M_1/M_2) = \sqrt{u^2(M_1) + u^2(M_2)} \quad (\text{A.11})$$

となる。感度係数 $c(M_1/M_2)$ は Weinhaus と Meli のパルス放射線に対するイオン再結合補正係数の式¹⁹⁾を M_1/M_2 を変数として微分し、

$$c(M_1/M_2) = a_1 + 2a_2 \frac{M_1}{M_2} \quad (\text{A.12})$$

から求めることができる。通常、 M_1/M_2 は 1 近傍の値となるから、実用的には次の表 A.1 に示した電圧比ごとの感度係数の概算値を用いて良い。

表 A.1 各電圧比におけるイオン再結合補正係数の感度係数の概算

電圧比： V_1/V_2	感度係数： $c(M_1/M_2)$
2.0	0.962
2.5	0.641
3.0	0.479
3.5	0.384
4.0	0.319
5.0	0.240

最終的にイオン再結合補正係数の相対標準不確かさは、

$$u(k_s) = c(M_1/M_2)u(M_1/M_2) \quad (\text{A.13})$$

となる。電圧比 $V_1/V_2 = 3$ 、各指示値の相対標準不確かさを 0.05 %とすると、イオン再結合補正係数の相対標準不確かさは 0.034 %となる。表 A.1 から分かるように電圧比が大きいほど感度係数が小さくなるため、測定の不確かさを小さくするには電圧比を大きくとること

が有効であるが、常用電圧を超えた電圧を電離箱に印加すると電離箱領域では想定されない電子の収集が占める割合が次第に増加しはじめ、比例領域へと至ることになる。また、過剰な高電圧を印加すると電離箱や電位計を破損する恐れもあり避けるべきである。逆に低い印加電圧では電離箱領域に至らず、電荷の収集効率が悪くなるため、正確にイオン再結合補正係数の導出式を評価することはできない。したがって、 V_1/V_2 は電離箱の取扱説明書やカタログから常用電圧の範囲を読み取り、その範囲の中でとることが可能な最大の値で設定することが望ましい。

なお、標準計測法 12 の Weinhaus と Meli のイオン再結合補正係数の導出式は一般的再結合と初期再結合を区別して補正できないほか、各電圧比における近似式の導出精度が悪く、電圧比によっては $M_1/M_2=1$ においてイオン再結合補正係数が 1.001 となることが知られている¹⁹⁾。このことから、Weinhaus と Meli のイオン再結合補正係数の導出式がもつ不確かさも加えて考慮したい場合は、0.1%を保守的に見積もって式(A.13)で得られる不確かさに合成すると良い。

A.8 極性効果補正係数： $u(k_{\text{pol}}^{\text{ref}}), u(k_{\text{pol}}^{\text{field}})$

極性効果補正係数の測定は印加電圧の極性を反転させて測定を行うため、電離箱の出力が十分に安定してから実施することが望ましい。一部の平行平板形電離箱は電圧を印加してから安定するまでに極端に時間がかかることが報告されており、十分な注意が必要である^{20),21)}。ここでは、電離箱の出力が十分に安定した状態で測定が行われていることとして、指示値に起因する不確かさのみに基づいて極性効果補正係数の不確かさを見積もる。

簡便のため、極性効果補正係数の導出式を整理すると、

$$k_{\text{pol}} = \frac{|M_{\text{raw}}^+| + |M_{\text{raw}}^-|}{2|M_{\text{raw}}|} = \frac{1}{2} + \frac{|M_{\text{raw}}^-|}{2|M_{\text{raw}}^+|} \quad \text{または} \quad \frac{1}{2} + \frac{|M_{\text{raw}}^+|}{2|M_{\text{raw}}^-|} \quad (\text{A.14})$$

どちらの極性を基準としても、極性効果補正係数は正負の印加電圧における指示値の比の関数となることが分かる。例として、負電圧を基準とした場合を考える。 $|M_{\text{raw}}^+|/|M_{\text{raw}}^-|$ の相対標準不確かさ $u(|M_{\text{raw}}^+|/|M_{\text{raw}}^-|)$ [%]は、A.2 で述べた指示値の相対標準不確かさの計算方法を用いて、それぞれの印加電圧における指示値の相対標準不確かさを合成することで求められる。

$$u(|M_{\text{raw}}^+|/|M_{\text{raw}}^-|) = \sqrt{u^2(|M_{\text{raw}}^+|) + u^2(|M_{\text{raw}}^-|)} \quad (\text{A.15})$$

感度係数は式(A.14)を指示値の比を変数として微分することで簡単に求められ、

$$c(|M_{\text{raw}}^+|/|M_{\text{raw}}^-|) = \frac{1}{2} \quad (\text{A.16})$$

条件によらず、感度係数は 0.5 となる。最終的に極性効果補正係数の相対標準不確かさは、

$$u(k_{\text{pol}}) = c \left(\frac{|M_{\text{raw}}^+|}{|M_{\text{raw}}^-|} \right) u \left(\frac{|M_{\text{raw}}^+|}{|M_{\text{raw}}^-|} \right) = \frac{1}{2} \sqrt{u^2(|M_{\text{raw}}^+|) + u^2(|M_{\text{raw}}^-|)} \quad (\text{A.17})$$

となる。なお、正電圧を基準とする場合は、式(A.15)と式(A.17)における $|M_{\text{raw}}^+|$ と $|M_{\text{raw}}^-|$ の

位置が入れ替わるだけである。正負の印加電圧それぞれにおける指示値の相対標準不確かさを 0.05 % とすると、極性効果補正係数の相対標準不確かさは 0.036 % となる。

A.9 動径方向不均一補正係数： $u(k_{rn}^{ref}/k_{rn}^{field})$

動径方向不均一補正係数（体積平均効果補正係数）は式(6.3)および式(6.4)で示された電離箱の有感領域内における平均線量を軸外線量比 OAR から導出する過程において生じる不確かさがある。このときの不確かさ要因としては式(6.3)および式(6.4)が潜在的に持つ不確かさと導出に用いる OAR の測定データ自体が持つ不確かさ、 OAR から求められた平均線量の統計不確かさが想定される。

動径方向不均一補正の導出式は電離箱の形状や感度分布などを考慮した厳密なものなど、様々なものが提案されており、TRS-483 において詳細な解説がなされている²²⁾。厳密な動径方向不均一補正の導出式は次のように表される。

$$k_{rn} = \frac{\iint_A w(x,y) dx dy}{\iint_A w(x,y) OAR(x,y) dx dy} \quad (A.18)$$

ここで、 A は電離箱の有感領域を示し、 $w(x,y)$ は有感領域内の任意の点 (x,y) における電離空洞の形状などによる感度についての重み付けを示す。十分な保護電極幅を持つ平行平板形電離箱であれば、収集電場が均一に生成され、有感領域内において $w(x,y)$ は均一に分布すると仮定することができる。これに対し、円筒形電離箱の有感領域内の感度分布をユーザーが厳密に評価することは難しく、式(A.18)によってユーザーが動径方向不均一補正係数を決定することは実用的ではない。実用的には、円筒形電離箱の短軸方向の線量不均一性は長軸方向に比べて十分に小さいことから、長軸方向の OAR のみを考慮して平均線量を求める式(6.3)を用いる手法が実用的である。FFF(Flattening Filter Free)高エネルギー光子線におけるファーマ形電離箱について、式(6.3)で導出した k_{rn} と式(A.18)に基づいて $w(x,y)$ を評価した上で求められた k_{rn} の差はわずか 0.03 % に過ぎず、その差は十分に許容されるものである²²⁾。

k_{rn} の導出に用いる OAR の測定データの不確かさは式(A.18)において、リファレンス線量計とフィールド線量計のそれぞれに対する k_{rn} が分子と分母にあるため、互いに相殺され、無視できる。

式(6.3)および式(6.4)は電離箱有感領域内における OAR の平均値 \overline{OAR}_A の逆数を動径方向不均一補正としており、

$$k_{rn} = \frac{1}{\overline{OAR}_A} \quad (A.19)$$

有感領域の大きさの不確かさが k_{rn} に与える影響は無視できるほど小さいので、 \overline{OAR}_A の相対標準不確かさがそのまま動径方向不均一補正の相対標準不確かさ $u(k_{rn})$ となる。電離箱有感領域内における OAR の測定点の数が n 、相対標準偏差が $\sigma(\overline{OAR}_A)$ のとき、 \overline{OAR}_A の相対標準不

確かさ $u(\overline{OAR}_A)$ は

$$u(k_{rn}) = u(\overline{OAR}_A) = \frac{1}{n} \sigma(\overline{OAR}_A) \quad (\text{A.20})$$

となる。例としてファーマ形電離箱の場合、 OAR の測定間隔が3 mmであれば、測定点の数は7点となり、相対標準偏差が0.5%であれば、相対標準不確かさは0.2%となる。測定データが密であるほど、不確かさを小さく抑えることができるため、相互校正の実施を行う施設では±3 cm程度の範囲で OAR の測定間隔を小さくしておくといよい。フィルム線量計などを用いると高精度に k_{rn} を評価することができる。最終的にリファレンス線量計とフィールド線量計それぞれの動径方向不均一補正の不確かさの合成がフィールド線量計の水吸収線量校正定数の相対標準不確かさに起用するので、

$$u(k_{rn}^{\text{ref}}/k_{rn}^{\text{field}}) = \sqrt{u^2(k_{rn}^{\text{ref}}) + u^2(k_{rn}^{\text{field}})} \quad (\text{A.21})$$

となり、リファレンス線量計とフィールド線量計の動径方向不均一補正の相対標準不確かさが0.2%の場合、 $u(k_{rn}^{\text{ref}}/k_{rn}^{\text{field}})$ は0.3%となる。

動径方向不均一補正を行わない場合の不確かさは、動径方向不均一補正を行わない場合の結果の差がそのまま相対標準不確かさとなる。すなわち、

$$u(k_{rn}) = 1 - \frac{k_{rn}^{\text{ref}}}{k_{rn}^{\text{field}}} \quad (k_{rn} \text{無しの場合}) \quad (\text{A.22})$$

となる。平坦化された高エネルギー光子線や高エネルギー電子線でもリニアック装置によっては不均一な動径方向の線量分布を示す場合があり、十分な注意が必要である。電離箱有感領域内の OAR が十分に平坦である場合は、保守的な不確かさの見積もりとして、電離箱有感領域内における OAR の最大差を相対標準不確かさとするといよい。

A.10 ビームモニターの安定性： $u(k_{\text{exm}})$

式には直接現れないが、医療用リニアック装置または外部モニタ電離箱の安定性の不確かさも考慮に含める必要がある。この不確かさは、便宜上「ビームモニターの安定性」と表記するが、リニアック装置の出力の安定性や測定中のわずかな条件の変化など、測定の再現性による不確かさも含まれた形で評価される。

この不確かさは測定の前後で実施するリファレンス線量計の測定の指示値 $M_{\text{before}, Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}$ と $M_{\text{after}, Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}$ の指示値の差から、矩形分布を仮定した相対標準偏差を求め、これをビームモニターの安定性の相対標準不確かさとする。

$$u(k_{\text{exm}}) = \frac{1}{M_{Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}} \frac{M_{\text{before}, Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} - M_{\text{after}, Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}}{2\sqrt{3}} = \frac{M_{\text{before}, Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} - M_{\text{after}, Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}}}{\sqrt{3}(M_{\text{before}, Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}} + M_{\text{after}, Q_{\text{cross}}}^{\text{ref}})} \quad (\text{A.23})$$

例として、測定の前後のリファレンス線量計の指示値の差が0.2%の場合、ビームモニターの安定性の相対標準不確かさは0.06%となる。

外部モニタ電離箱を水中に設置する方法は、外気などの影響をより受けにくくなり、温度

気圧補正が不要となるため、より高精度な相互校正が可能となる点において優れている。標準機関では外部モニタ電離箱による擾乱の影響を避けるため、外部モニタ電離箱をリニアック装置のビーム出口付近に設置して標準場の一部としている。そのため、外気の影響を受けやすく、ビームモニターの安定性の不確かさについてはユーザー施設に比べて悪くなっている。

A.11 リファレンス電離箱の長期安定性： $u(k_{\text{stb}})$

この不確かさも式には直接現れないが、相互校正の基準となるリファレンス電離箱の長期安定性の不確かさとして考慮する必要がある。リファレンス電離箱の性能要件では年間の校正定数の変動が0.3%以内であることを要件としており、矩形分布を仮定して長期安定性の不確かさを0.2%とする。

リファレンス電離箱は温度係数や耐放射線性などの観点からグラファイトを壁材料とした電離箱がTRS-398では推奨されている。同時に、グラファイトは落下や衝突などによって破損する懸念があるため、日常的に使用する電離箱としては、プラスチック材料を電離箱壁とした電離箱を使用することも方法として述べられている⁶⁾。ユーザーは施設の実状に合わせて、リファレンス線量計として用いる電離箱とフィールド線量計として用いる電離箱を選定することが重要である。

A.12 電位計校正定数の不確かさ： $u(k_{\text{elec}})$

フィールド線量計の相互校正において、分離校正の場合は同一の電位計を、一体校正の場合はフィールド線量計の電離箱と電位計を一体に校正する。前者の場合、フィールド線量計とリファレンス線量計の指示値に含まれる電位計校正定数は式(6.1)において互いに相殺されるため、校正定数の値には直接影響しない。また、一体校正の場合は電位計校正定数を含めて水吸収線量校正定数を決定するため、こちらも電位計校正定数の値そのものが影響を与えることはない。しかしながら、電位計ガイドラインで述べられているように電位計の指示値に影響を与える不確かさ要因は様々なものがあり、高エネルギー光子線および電子線の水吸収線量計測の不確かさでは、電位計による電荷測定の前相対標準不確かさとして0.4%を見積もっている⁴⁾。

フィールド線量計の相互校正においては、十分に安定した条件に電位計が設置され、測定自体も数時間のうちに終わることを想定している。この場合、電位計ガイドラインで与えられた不確かさ要因の多くが互いに相殺され、その不確かさは無視できるほど小さいと想定できる。そのため、相互校正で得られるフィールド線量計の水吸収線量校正定数の不確かさに電位計校正定数の不確かさは考慮しないこととした。十分に安定した環境条件であること確認するため、測定中の電位計の設置箇所の温度変動が ± 1 °C以内であることを、主電源電圧の変動が ± 1 V以内であることを確認すること。主電源電圧の測定を行う場合はテスターなどを用いて行うとよい。感電防止のため、保護手袋や治具を用意し、2人以上の人員で安

全に留意して実施すること。市販の無停電源装置 (UPS) や交流安定化電源を用いるとより簡便に主電源電圧の変動などの電磁的ノイズを避けることができる。なお、十分に安定した環境に電位計を設置できない場合は、電位計校正定数の相対標準不確かさとして 0.4 % を表 6.1 にあげられた不確かさ要因に加えて、合成すると良い。

A.13 線質に対する補正の不確かさ： $u(k_Q)$

校正証明書に記載されたリファレンス線量計の水吸収線量校正定数を線質 Q_{cross} に内挿などによって補正する際の不確かさについては、線質指標の不確かさが補正に及ぼす影響と、標準機関が校正を行っている高エネルギー光子線および電子線の線質とユーザーが測定を行っている線質について、線質指標による補正だけでは補正しきれない要因によって生じる影響の 2 つが主な不確かさ要因となる。

前者の水吸収線量校正定数を線質指標によって補正する場合の不確かさは、線質変換係数の値を線質指標について内挿する際の不確かさと同様に考えることができ、AAPM TG-51 Addendum では精度が良いケースとして 0.1 % を採用している²³⁾。

線質指標による補正によって補正できない要因については、近年の医療リニアック装置はビーム発生部の基本構造がほぼ同一であり、同一の線質指標の高エネルギー光子線および電子線の場合であれば線質変換係数や水吸収線量校正定数に差が生じないとされている。F. Erazo らは、メーカーの異なる医療用リニアック装置毎にモンテカルロシミュレーション計算によって高エネルギー光子線の線質変換係数を評価したところ、一部のリニアック装置の線質変換係数の値が、同じ線質指標の高エネルギー光子線におけるその他のメーカーの医療用リニアック装置の線質変換係数の値に対して最大で 0.4 % 程度異なると報告しており、同様の結果をカナダ NRC グループの Muir らも報告している^{12),13)}。なお、この原因は製造メーカーが提供している高エネルギー光子線のスペクトル情報が誤っていたことにより、擾乱補正係数の評価結果に差が生じた可能性が指摘されている。この報告は、線質指標がたとえ同じ値であっても、校正定数や線質変換係数の値が異なってしまうケースとして想定される差の情報として有用である。

以上の不確かさ要因から、一般施設における高エネルギー光子線の水吸収線量校正定数を線質に対して補正する際の相対標準不確かさ 0.3 % とした。高エネルギー電子線については、擾乱補正係数の影響が十分に小さい領域で相互校正を行うこととして、相対標準不確かさ 0.1 % とした。標準機関クラスでは一次標準機関である産業技術総合研究所の医療用リニアック装置と同じ特性であることが確認された医療用リニアック装置を使用することを前提として、いずれも相対標準不確かさ 0.1 % とした。

A.14 その他の不確かさ要因

最後に、ここまで述べてきたフィールド線量計の相互校正における主な不確かさ要因では考慮していない不確かさ要因について述べる。フィールド線量計の相互校正はリファレ

ンス線量計およびフィールド線量計，医療用リニアック装置が十分に安定した状態で測定が行われることを前提としている。したがって，予期しない変動などの影響があることが明らかである場合，ユーザーはその影響を補正あるいは除去するよう努めるか，その影響を不確かさとして考慮しなくてはならない。参考のため，標準機関で把握している変動の要因についてここで紹介する。

例 1：印加電圧変更及び事前照射に伴う出力変動

IEC 60731 では電離箱に電圧を印可すると同時に放射線の照射を開始した際の 15 分後から 2 時間後までの出力変動を 1 %以内に抑えるという性能要件が定められている。実際に市販されているリファレンスクラスの電離箱の多くは 10 分以内に出力が安定する電離箱が多く，ファーマ形電離箱については電圧を印加した直後から安定した出力を示すものが多い。これに対し，3D ファントムなどで用いる電離空洞の容積が小さい電離箱は電離空洞内の空気から生じる信号電流以外のノイズ成分が相対的に大きくなるため，電圧を印加してから信号電流が安定するまでの時間が長くなることが報告されている^{20), 21)}。当然，このような電離箱をリファレンス線量計として用いることはできないが，フィールド線量計として用いる場合にも十分な注意が必要である。

例 2：乾燥条件から電離箱を取り出した際の出力変動

デシケータ内などの乾燥状態から室内に電離箱を取り出した際に，電離空洞内の空気が徐々に置換されるまでの間，主に湿度影響によって電離空洞の出力が変動することが知られている^{24), 25)}。1 時間程度でほぼ平衡状態に達するが，安全のため 3 時間程度は照射室内の空気になじませてから電離箱の測定を開始することが望ましい。

例 3：電離箱の膨張収縮による出力変動

電離箱の温度や気圧，湿度などの環境条件による出力は温度気圧補正，湿度補正によって補正されている。しかし，温度気圧補正は別名として空気密度補正と呼ばれるように，あくまで電離空洞内の空気の密度を基準条件に補正しているに過ぎない。同様に，湿度補正も基準条件の湿度に補正しているだけであり，環境条件の変化による電離空洞の膨張や収縮などによる出力変化の補正は行われていない。

IEC 60731 では電離箱の温度係数として $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ の範囲で $\pm 1\%$ 以内としており，実際に McEwen らはプラスチックを電離箱壁に用いた電離箱で $0.05\text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ の温度係数があることを報告している²⁵⁾。このような電離箱は校正条件と測定時の水温が大きく乖離しないよう，管理することが必要である。

産総研の森下らは保管時の湿度によって出力が変化する電離箱について報告している²⁶⁾。吸湿によって電離空洞の体積が変化することが原因と考えられ，電離箱を乾燥条件から室内に取り出しても短時間では平衡状態に達しないため，この様な電離箱については乾燥条

件での保管を避け、照射室内の空気と同じ雰囲気の中で保管することが望ましい。

A.15 水吸収線量計測の不確かさ

フィールド線量計の相互校正で得られた水吸収線量校正定数を用いて水吸収線量計測を行った場合の不確かさは表 4.3 および表 5.4 のステップ 1 の不確かさをフィールド線量計の相互校正で得られた水吸収線量校正定数の不確かさに置き換えることで求めることができる。

表 B.2 に相互校正されたフィールド線量計を用いて高エネルギー光子線の水吸収線量を計測した場合の不確かさの見積もりを示す。水吸収線量校正定数を内挿によって補正する不確かさについては、一つの施設内で極端に特性が異なる装置を使用することは想定されないため、相対標準不確かさ 0.1%とした。最終的なフィールド線量計を用いた場合の水吸収線量計測の相対拡張不確かさ($k = 2$)は校正証明書に与えられた線質指標 $TPR_{20,10}$ の範囲内で標準機関クラスの測定能力を有する施設で 1.9%、一般施設で 2.0%となる。

表 B.2 相互校正されたフィールド線量計による高エネルギー光子線の校正深における水吸収線量 $D_{w,Q}$ 計測値の相対標準不確かさの見積もり

物理量または手順	相対標準不確かさ / %	
	標準機関	一般施設
水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{cross}}$	0.58	0.76
リファレンス線量計の長期安定性		0.2
基準条件の設定		0.4
モニタ設定値に対する指示値 M_{raw}		0.4
補正係数 k_i		0.4
$N_{D,w,Q_{cross}}$ の内挿の不確かさ		0.1
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ	1.0	1.0
相対拡張不確かさ ($k = 2$)	1.9	2.0

表 B.3 に相互校正されたフィールド線量計を用いて高エネルギー電子線の水吸収線量計測を行った場合の不確かさの見積もりを示す。高エネルギー電子線の場合、相互校正によって各エネルギーの電子線の線質で $N_{D,w,Q_{cross}}$ を決定して用いる場合と、媒介線質 Q_{int} における水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{int}}$ を決定して用いる場合の 2 通りが想定される。 $N_{D,w,Q_{cross}}$ を用いる場合の相対拡張不確かさ($k = 2$)は標準機関クラスで 2.0%、一般施設で 2.1%となる。 $N_{D,w,Q_{int}}$ を用いる場合は、標準機関クラスで 2.3%、一般施設で 2.4%となる。

表 B.3 相互校正されたフィールド線量計による高エネルギー電子線の校正深における水

吸収線量 $D_{w,Q}(d_c, A_0)$ 計測値の相対標準不確かさの見積もり (標準機関 / 一般施設)

物理量または手順	相対標準不確かさ / %	
	$N_{D,w,Q_{cross}}$ を用いる場合	$N_{D,w,Q_{int}}$ を用いる場合
水吸収線量校正定数	0.7 / 0.8	
長期安定性	0.2	
基準条件の設定	0.4	
電荷測定 M_{raw}	0.4	
補正係数 k_i	0.4	
線質変換係数 $k_{Q,Q_{int}}$	–	0.6
$N_{D,w,Q}$ の内挿	0.1	–
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ	1.0 / 1.1	1.2 / 1.2
相対拡張不確かさ($k = 2$)	2.0 / 2.1	2.3 / 2.4

高エネルギー光子線および高エネルギー電子線のいずれでも線質変換係数を用いない場合は相対拡張不確かさ 2 %前後で水吸収線量計測を確認できることが分かる。線質変換係数を用いた場合は、若干の不確かさの増加が見られる。これは標準計測法 12 の線質変換係数が 2012 年時点の知見を元に検討されているためであり、2016 年に ICRU レポート 90²⁷⁾ で報告された新しい放射線計測に関する物理データに基づいた線質変換係数の検討が進められており²⁸⁾、今後、改善される予定である。

付録B ^{60}Co ガンマ線水吸収線量校正定数の推定

ここでは、 ^{60}Co ガンマ線水吸収線量校正サービスの供給がやむを得ない理由によって停止した場合などに備え、高エネルギー光子線水吸収線量校正サービスを相補的に運用できるようにするため、標準計測法 12 における ^{60}Co ガンマ線水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{\text{Co}}}$ (N_{D,w,Q_0}) を高エネルギー光子線水吸収線量校正定数から導出し、陽子線や炭素線などの水吸収線量計測に用いる方法を解説する。

B.1 ^{60}Co ガンマ線水吸収線量校正定数の導出

高エネルギー光子線を基準に ^{60}Co ガンマ線水吸収線量校正定数を求める場合、リファレンス電離箱には高エネルギー光子線のリファレンスクラスに準拠した円筒形電離箱を用いる。校正証明書に記載された円筒形電離箱の高エネルギー光子線水吸収線量校正定数のうち、最も ^{60}Co ガンマ線の線質 ($TPR_{20,10} = 0.57$) に近い線質 Q_{SDL} の高エネルギー光子線水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{\text{SDL}}}$ について、標準計測法 12 の表 3.3 より、円筒形電離箱の型式に該当する線質 Q_{SDL} の $TPR_{20,10}$ における高エネルギー光子線の線質変換係数 $k_{Q_{\text{SDL}}}$ を読み取る。

$N_{D,w,Q_{\text{Co}}}$ および $N_{D,w,Q_{\text{SDL}}}$ 、 $k_{Q_{\text{SDL}}}$ の関係から、

$$N_{D,w,Q_{\text{Co}}} = \frac{N_{D,w,Q_{\text{SDL}}}}{k_{Q_{\text{SDL}}}} \quad (\text{B.1})$$

と標準計測法 12 における ^{60}Co ガンマ線水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q_{\text{Co}}}$ を導出することができる。

得られた ^{60}Co ガンマ線水吸収線量校正定数を用いて、標準計測法 12 に定められた手順に従った水吸収線量計測を行うことができる。線質 Q の放射線におけるリファレンス電離箱の水吸収線量校正定数 $N_{D,w,Q}$ と $N_{D,w,Q_{\text{SDL}}}$ 、 $N_{D,w,Q_{\text{Co}}}$ の関係は、次のようになる。

$$N_{D,w,Q} = k_Q N_{D,w,Q_{\text{Co}}} = \frac{k_Q}{k_{Q_{\text{SDL}}}} N_{D,w,Q_{\text{SDL}}} = k_{Q,Q_{\text{SDL}}} N_{D,w,Q_{\text{SDL}}} \quad (\text{B.2})$$

ここで、 $k_{Q,Q_{\text{SDL}}}$ は線質 Q_{SDL} を基準とした場合の線質変換係数である。

高エネルギー光子線を基準線質とした場合の陽子線や炭素線の線質変換係数の不確かさについては詳細な議論がされていないため、保守的な不確かさの見積もりとして、標準計測法 12 の高エネルギー光子線の線質変換係数の相対標準不確かさ 1.0% を陽子線および炭素線それぞれの線質変換係数の不確かさに合成することとする。高エネルギー光子線を基準線質とした場合の陽子線および炭素線の相対標準不確かさの例を B.1 に示す。

なお、 ^{60}Co ガンマ線あるいは高エネルギー光子線のどちらを基準線質としたかによらず、放射線治療施設は標準計測法 12 を参考に水吸収線量計測の不確かさを必ず推定してから、計測した水吸収線量の値を治療に用いることが重要である。

表 B.1 高エネルギー光子線を基準の線質とした陽子線および炭素線の線質変換係数 $k_{Q,Q_{SDL}}$ の相対標準不確かさ

線種	円筒形電離箱
陽子線	2.0 %
炭素線	3.0 %

利益相反の開示

清水森人と森下雄一郎およびその所属グループは次の企業及び団体と共同研究契約および受託研究契約、技術コンサルティング契約を過去3年以内に結び、資金提供を受けている。

EMF ジャパン株式会社

株式会社川口電機製作所

株式会社千代田テクノル

東洋メディック株式会社

ユーロメディテック株式会社

小口 宏は東洋メディック株式会社とアドバイザー契約を結んでいる。

参考文献

- 1) Accuracy Requirements and Uncertainties in Radiotherapy, 2016, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna
- 2) Papanikolaou Nikos, Battista J, Jerry, Boyer L, Arthur, 他: AAPM Report No. 85: TISSUE INHOMOGENEITY CORRECTIONS FOR MEGAVOLTAGE PHOTON BEAMS, 2004, Report of Task Group No. 65 of the Radiation Therapy Committee of the American Association of Physicists in Medicine
- 3) 日本医学物理学会編: 外部放射線治療のための水吸収線量の標準計測法 (標準計測法 12), 2012, 通商産業研究社
- 4) 放射線治療用線量計に用いられる電位計のガイドライン, 2017, 日本医学物理学会
- 5) Eaton D. J., Bass G., Booker P., 他: IPEM code of practice for high-energy photon therapy dosimetry based on the NPL absorbed dose calibration service. Phys Med Biol. 65: 195006, 2020
- 6) Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy, 2001, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna
- 7) ISO/IEC: ISO/IEC 17025:2017 General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, 2017
- 8) 独立行政法人 製品評価技術基盤機構 認定センター: ILAC 相互承認取決め, <https://www.nite.go.jp/iajapan/aboutus/kokusai/mra.html>.
- 9) IEC: IEC 60731:2011 Medical electrical equipment-Dosimeters with ionization chambers as used in radiotherapy, 2011
- 10) McEwen M., DeWerd L., Ibbott G., 他: Addendum to the AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon beams. Medical Physics. 41: 20, 2014
- 11) 国土交通省令第二十五号 気象測器検定規則, 2019
- 12) Muir B. R., McEwen M. R., Rogers D. W. O.: Measured and Monte Carlo calculated $k(Q)$ factors: Accuracy and comparison. Medical Physics. 38: 4600-4609, 2011
- 13) Erazo F., Lallena A. M.: Calculation of beam quality correction factors for various thimble ionization chambers using the Monte Carlo code PENELOPE. Physica Medica-European Journal of Medical Physics. 29: 163-170, 2013
- 14) Muir B. R., Rogers D. W. O.: Monte Carlo calculations of electron beam quality conversion factors for several ion chamber types. Medical Physics. 41, 2014
- 15) Burns D. T., Ding G. X., Rogers D. W. O.: $R(50)$ as a beam quality specifier for selecting stopping-power ratios and reference depths for electron dosimetry. Medical Physics. 23: 383-388, 1996
- 16) Shimizu M.: [Radiotherapy Dosimeter Calibration for Absorbed Dose to Water Using Medical Accelerators]. Igaku Butsuri. 41: 134-142, 2021

- 17) Kinoshita N., Oguchi H., Nishimoto Y., 他: Uncertainty in Positioning Ion Chamber at Reference Depth for Various Water Phantoms. *Medical Physics*. 44: 2932-2932, 2017
- 18) Kinoshita N., Kohno R., Oguchi H.: Technical Note: Influence of entrance window deformation on reference dosimetry measurement in various beam modalities. *Medical Physics*. 46: 1037-1043, 2019
- 19) Weinhaus M. S., Meli J. A.: DETERMINING PION, THE CORRECTION FACTOR FOR RECOMBINATION LOSSES IN AN IONIZATION-CHAMBER. *Medical Physics*. 11: 382-382, 1984
- 20) Pearce Julia, Thomas Russell, DuSautoy Alan: The characterization of the Advanced Markus ionization chamber for use in reference electron dosimetry in the UK. *Physics in Medicine and Biology*. 51: 473-483, 2006
- 21) Pearce J A D: Characterisation of two new ionisation chamber types for use in reference electron dosimetry in the UK, 2004
- 22) Dosimetry of Small Static Fields Used in External Beam Radiotherapy, 2017, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Vienna
- 23) McEwen Malcolm, DeWerd Larry, Ibbott Geoffrey, 他: Addendum to the AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon beams. *Med. Phys.* 41: 041501, 2014
- 24) Sato Y., Shimizu M., Morishita Y., 他: Experimental study of humidity effect on charge measurement of reference ionization chambers in clinical high-energy photon beams. *Medical Physics*. 46: 4177-4183, 2019
- 25) McEwen M. R., Taank J.: Examining the influence of humidity on reference ionization chamber performance. *Medical Physics*. 44: 694-702, 2017
- 26) Morishita Y., Shimizu M., Takase N., 他: The impact of storage humidity on the response of reference-class ionization chambers. *Medical Physics*. 49: 2725-2731, 2022
- 27) Seltzer SM, Fernandez-Varea JM, Andreo P, 他: ICRU Report 90, Key Data for Ionizing-Radiation Dosimetry: Measurement Standards and Applications. *Journal of the ICRU*. 14, 2016
- 28) Andreo P., Burns D. T., Kapsch R. P., 他: Determination of consensus $k(Q)$ values for megavoltage photon beams for the update of IAEA TRS-398. *Physics in Medicine and Biology*. 65, 2020