

第61回総会学術大会シンポジウム

会期：2005年4月9日

会場：パシフィコ横浜会議センター

放射線治療における吸収線量測定法01の高度評価と問題点

座長集約

熊谷孝三

国立病院機構福岡東医療センター放射線科

1. 産業技術総合研究所における線量標準の設定、校正、今後の計画

高田信久・黒澤忠弘・納富昭弘

産業技術総合研究所計測標準研究部門放射線標準研究室

2. 高エネルギーX線治療における吸収線量の標準測定法01に基づく評価 保科正夫

群馬県立県民健康科学大学診療放射線学部

3. 高エネルギー電子線治療における吸収線量測定法の評価と問題点

国立病院機構福岡東医療センター放射線科 熊谷孝三

熊本大学医学部保健学科 島村正道

元九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻 的場 優

4. 放射線治療における吸収線量測定パラメータの評価と問題点

荒木不次男

熊本大学医学部保健学科

座長集約

Symposium

熊谷孝三

国立病院機構福岡東医療センター放射線科

放射線治療における吸収線量の測定プロトコルは、正確な吸収線量を投与するために必要である。したがって、がん患者に対する処方線量の計算、ビームデータの取得、照射精度の検証のために高精度で、かつ、実用性の高い方法が要求される。また、的確なプロトコルは、施設間や測定者自身による線量計算の違いを防ぎ、かつ投与線量の統一が可能となる。線量測定法は、最近の世界の動向として、AAPM TG51、IAEA TRS-381、TRS-398において水吸収線量校正係数を標準として用いる線量測定プロトコルが展開された。これに伴い、わが国では、2002年にJARPが線量測定プロトコル01を改定した。この改定の背景には、国際的な流れにそって水吸収線量を標準とした線量測定法を導入すること、水吸収線量校正定数を用いた測定法を採用すること、さらに平均制限衝突質量阻止能比などの新しい物理データの見直し、および新しい補正データを取り入れることなどがあった。また、欧米では、水吸収線量校正定数の決定には、臨床測定に用いる電離箱線量計に対して絶対測定が可能な水カロリメータを用いている。わが国では、一次標準において従来どおりの方法で空気中の照射線量校正定数を求め、理論計算によって水吸収線量に変換しなければならない。したがって、電離量の測定から人体に投与す

る吸収線量への変換までには複雑な計算処理が要求されるため、特に電子線において臨床現場の線量測定を複雑にしている。外部照射治療における吸収線量の標準測定法01は、X線測定法については臨床現場で採用されつつあるが、電子線測定法についてはほとんど採用されていない。また、水吸収線量測定法を採用するための根本となる線量標準場での線量計の校正方法は、過去において詳細に述べられていない。さらに、吸収線量の決定のために必要な電離箱の補正係数の不確かさも明らかにされていない。したがって、本シンポジウムでは、わが国が採用した標準測定法01において水吸収線量測定法の高度評価を行い、さまざまな問題点の解決を目指し、高精度かつ臨床現場で運用しやすい水吸収線量測定法の検討を行うと同時に、放射線治療の臨床現場に標準測定法01を確実に浸透させ、がん患者の放射線治療の精度向上を目指すことを目的とした。

産業技術総合研究所における線量標準の設定、校正、今後の計画(高田信久：産業技術総合研究所)では、わが国の線量標準場での線量計の校正方法を詳細に述べ、新しい知見を得ることができた。放射線治療における線量標準場の校正は、従来と全く変わらない照射線量で決定する方法であるが、産総研での物理

標準に関する整備計画では、2010年までに水力ロリーメータを用いた水吸收線量校正を目指したいと報告した。

高エネルギーX線治療における吸収線量の標準測定法01に基づく評価(保科正夫:群馬県立県民健康科学大学)では、X線における吸収線量を確かなレベルで確保していくための具体的な手順と注意点について実務的見地から考察した。まず、新旧プロトコルの吸収線量比を取り上げるとともに、特に北米における新測定プロトコルの導入時の誤差について述べ、北米でもかなりの誤差をきたした施設があったことを示唆した。また、新たな深部関数の測定、ファントム材の違い、測定深と電離箱の位置、電離箱の基本特性などの注意点を示し、標準測定法01の正確な採用により、種々の線量評価の精度も向上すると結論づけた。

高エネルギー電子線治療における吸収線量測定法の評価と問題点(熊谷孝三:国立病院機構福岡東医療センター)では、臨床現場になじみにくい電子線測定のさまざまな問題点を検討し、高精度で実用的な吸収線量測定法を高度評価した。特に、電子線測定で問題と

なる円筒形電離箱および平行平板形電離箱における電子線場の空洞補正係数を数式化し、市販電離箱43種類の線質変換係数、および測定プロトコルには示されていない校正定数比を計算し、日常測定における吸収線量計算を容易にしたことは特筆すべきことである。この方法により、支障をきたしている臨床現場での測定プロトコルの普及が期待され、患者への投与線量の精度が高まる。

放射線治療における吸収線量測定パラメータの評価と問題点(荒木不次男:熊本大学医学部保健学科)では、標準測定法01の吸収線量決定において必要な線量測定パラメータを実験値に基づく検証を行い、問題点を指摘した。特に、円筒形電離箱との比較校正から平行平板形電離箱の補正係数 k_{att} , k_m , P_{wall} の不確かさを明らかにした。また、電離箱線量計(三次標準器)とNRCC(カナダ)の電離箱線量計(二次標準器)との N_c と $N_{D,w}$ の国際比較を行い、わが国の線量校正是0.15~0.58%(電離箱4本)の誤差高精度であることを証明した。

1. 産業技術総合研究所における線量標準の設定、校正、今後の計画

高田信久・黒澤忠弘・納富昭弘

産業技術総合研究所計測標準研究部門放射線標準研究室

はじめに

産業技術総合研究所(以下、産総研)はX線と γ 線について空気カーマと照射線量の標準供給を行っている。しかし、放射線防護分野で使用されている量は線量当量であり、医療分野では水吸收線量が使用されている。線量当量や水吸收線量は、空気カーマや照射線量の標準供給を受けた者が、それぞれの手法に従った換算法によって求め使用しているのがわが国における現状である。医療分野では、日本医学物理学会が発表した外部放射線治療における吸収線量の標準測定法(標準測定法01)に準拠して水吸收線量に換算している。

ここでは、国家標準の相互比較、国内における標準のトレーサビリティ、産総研が供給している照射線量と空気カーマの標準設定と供給について記す。また、産総研の線量関連標準の今後の計画についても概観する。

1. 各国の標準と相互比較

ある測定器による測定結果が信頼でき、他の測定器による値と齊一性を保つためには、その測定器が、より高精度の測定器によって校正され、最終的に各国の

国家標準につながるトレーサビリティを持つことが求められている。

これに対して国家標準は、ISO/IEC 17025(試験所および校正機関の能力に関する一般要求事項)に従った組織や施設等が担保され、それぞれの量についての専門家による検査(peer review)を受けること、他の国家標準との関係を明らかにするために相互比較を行い、その校正能力(CMC: calibration and measurement capability)を示すことが要求されている。

相互比較では、各量の分野ごとに重要な量を基幹比較として定めている。線量関連では次の五つの量が基幹比較となっている。

K1: $^{60}\text{Co}\gamma$ 線空気カーマ

K2: 軟X線空気カーマ

K3: 中硬X線空気カーマ

K4: $^{60}\text{Co}\gamma$ 線水吸收線量

K5: $^{137}\text{Cs}\gamma$ 線空気カーマ

これらのほかに、 $^{60}\text{Co}\gamma$ 線グラファイト吸収線量、個人線量当量、 β 線吸収線量等が補完比較となっている。

量の定義に従った絶対測定によって設定された標準

は一次標準と呼ばれる。各国の一次標準と国際度量衡局(BIPM)との基幹比較はCIPM(国際度量衡委員会)基幹比較と呼ばれ、線量関連標準は、10年を越さない期間内に行なうことが合意されている。他の標準機関によって校正された測定器を国家標準器とする二次標準機関は、それぞれの国が所属するAPMP(アジア・太平洋), EUROMET(ヨーロッパ), SIM(南・北・中央アメリカ), COOMET(旧ソ連・東ヨーロッパ), MENAMET(中東・北アフリカ), SADCMET(アフリカ南部)の地域計量組織が主催する基幹比較等に参加することにより、その国の標準の状況を明らかにすることができます。このほかに、必要に応じて2国間での比較なども行われている(Fig. 1)。

産総研はBIPMと2001年にK1とK5基幹比較を^{2,3)}、2004年にK2基幹比較を行った。また、2001年にAPMP主催のK3基幹比較に参加した。現在、APMP主催によるK1基幹比較が進められている。

線量関連のBIPMとの比較結果は、BIPMの値を基準として表示することになっている。これは、BIPMの標準が長期間にわたってよく維持され、その特性や変更に関する記録が保管されていることによる。しかしBIPMとの比較によって、各国の一次標準機関がBIPMの値を基準として使用することはない。BIPMの一次標準器を基準として各国の国家標準を校正するのは、BIPMが保管している国際キログラム原器によって各国のキログラム原器を校正する質量標準の場合だけである。

2. 国内の現状

国内における計測のトレーサビリティを確保する制度として計量法校正事業者登録制度(従来は認定制度)(JCSS: Japan Calibration Service System)がある。これは校正事業者が、ISO/IEC 17025の要求事項に従い、それぞれの量ごとに定められた技術的要件を満たす特定二次標準器(X線、 γ 線の場合は電離箱)あるいは常用参考標準(特定二次標準器によって校正された γ 線用線量計、 γ 線源または γ 線照射装置)、施設、設備などを具備し、独立行政法人製品評価技術基盤機構の審査を受けて登録事業者となる制度である。現在は放射線防護に対応する線量(率)範囲が主で、2005年末の時点で5機関が登録(認定)事業者となっている。JCSS制度では、空気カーマや照射線量から線量当量や吸収線量など、他の量への換算方法について統一された手法は決まっていない。JCSS制度の普及と、この制度をより信頼されるものとするためには、産総研におけるこれらの量による校正と、JCSS制度の線量(率)範囲の拡大が急務である。JCSS制度の線量(率)範囲外や特定二次標準器以外の電離箱、その他

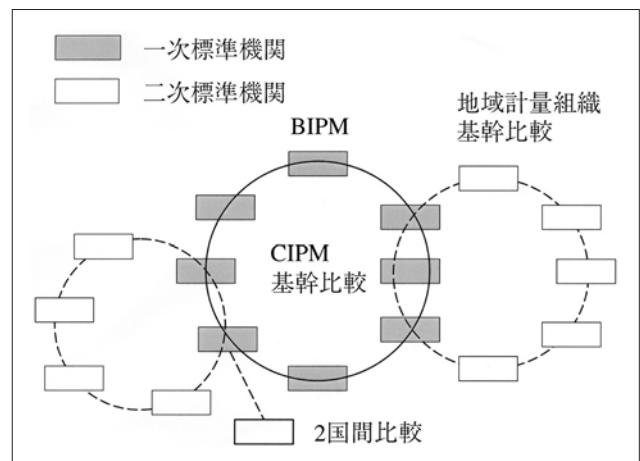


Fig. 1 國際的な相互比較の枠組み(実線の輪はCIPM(國際度量衡委員会)基幹比較を、破線の輪は、地域計量組織基幹比較を表す)

の測定器や測定素子について産総研は、依頼試験として校正や標準照射を行っている。

3. X線の照射線量標準場の設定

照射線量は、X線や γ 線によって単位質量当たりの空気から発生した二次電子が空気中で生成するイオンの正または負の電荷量として定義されている。X線管球によって発生するX線のエネルギー範囲では、照射線量の絶対測定は、自由空気電離箱が使用されている（Fig. 2）。産総研は、管電圧10kVから50kVまでの軟X線用と40kVから250kVまでの中硬X線用の大小2台の自由空気電離箱を用いて照射線量を測定してX線標準場を設定している。自由空気電離箱では、Fig. 2の破線で囲まれた電荷収集部で生成されたイオンの電荷を測定するが、照射線量の値が得られるのは、電離箱に入射するX線ビームの断面積を決定している入射孔の規定面における値である。

自由空気電離箱によって測定された電荷量を Q ，底面が入射孔の面積 S と同じで長さが電荷収集電極の長さ L と同じ円柱を想定し，その円柱と同じ体積の空気の質量を m とすると，照射線量 X は次式によって得られる。

$$m = \rho_0 \cdot S \cdot L \frac{273.15}{273.15 + T} \cdot \frac{P}{1013.25}$$

$\rho_0 : 0^{\circ}\text{C}, 1 \text{ 気圧における乾燥空気の密度}$
 (1.2930 kg/m^3)

S ：入射孔の面積(m^2)

L : 電荷収集電極の長さ(m)

T : 測定時の温度(°C)

P : 測定時の気圧(hPa)

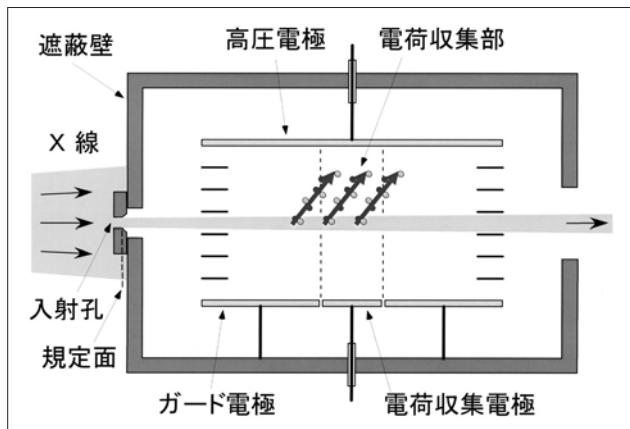


Fig. 2 自由空気電離箱(電荷収集部の矢印と丸印は二次電子とイオン対の一部を模式的に表す。測定された電荷量から、規定面における照射線量の値を得る)。

ここで 1 式の k_i は下記のような各項目の影響に対する補正係数である。

規定面から電荷収集部までの間の空気によるX線の減衰
電離箱内で散乱されたX線による電離
二次電子が電極等に衝突し、エネルギーの一部がイオン対生成に寄与しないこと
湿度によって生成されるイオン対の数が変化すること
イオンの再結合(初期再結合と体積再結合)による電荷損失
遮蔽壁面から入射したX線による電離
入射孔の端を透過したX線による電離
入射孔の表面で発生した特性X線や散乱線による電離
自由空気電離箱と被校正電離箱で散乱線に対する感度が異なること
被校正電離箱の有感体積内でX線強度が一様でないこと
これらの補正係数の大半は、以前から検討されてきたものである。しかし、 γ 線、 β 線、 α 線の補正係数は、モンテカルロ法による計算によって初めて正確な値が得られるようになった。一方、 γ 線に対する補正係数はこれまで議論されることが少なく、産総研は最近、補正值として取り入れた^{4, 5)}。中硬X線用自由空気電離箱における γ 線の補正係数の値(K_{sd})の入射X線のエネルギーによる変化の様子をFig. 3に示す⁴⁾。補正量(補正係数の 1 との差)は光子エネルギーとともに大きくなるが 70keV 付近で一旦変化が小さくなる。これは、光子エネルギーが入射孔用隔壁の材質であるタンゲステンのK殻吸収端エネルギーより高くなると、光電効果による吸収が大きくなり、レイリー散乱やコンプトン散乱が少なくなることによる。またFig.

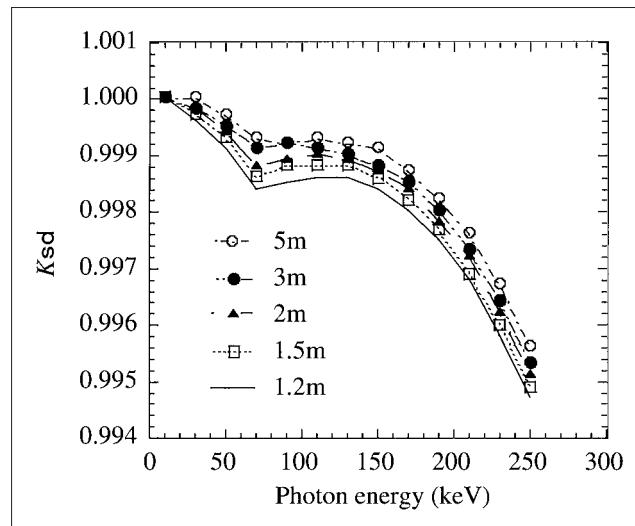


Fig. 3 中硬X線用自由空気電離箱における入射孔の表面からの散乱線に対する補正係数(K_{sd})。入射孔の直径は 10mm 。図中の値はX線源からの距離

3から、K殻吸収に続いて発生する特性X線の影響は小さいことが分かる。実際の補正值としては、それぞれの標準場におけるX線のエネルギースペクトルで加重した平均値が用いられる。

X線源のコリメータやフィルタ、照射室の壁や空気などによって散乱されたX線の一部は、大きな角度で自由空気電離箱にやってくる。Fig. 2から分かるように、これらのX線は、自由空気電離箱では入射孔用の隔壁等でさえぎられるため、測定されない。一方、同じ場に設置して校正される電離箱は一般に、大きな角度で入射するX線に対しても感度を有する。これは、このような散乱線に対する自由空気電離箱と被校正電離箱の感度の違いに対する補正である。産総研は軟X線について2004年からこの補正を取り入れて校正している⁵⁾。この補正係数の値は、X線源と電離箱の中間に直径 15mm の穴の開いた遮蔽板を置いたときと外したときにそれぞれの電離箱からの信号電流を測定し、遮蔽板を外したときの信号の増加分を散乱線による信号として求めた。Fig. 4は、自由空気電離箱(FAC)と、ある被校正電離箱(CLB)の、遮蔽板を置いたとき(I_{small})と外したとき(I_{large})の電流比を示す。校正における散乱線に対する補正係数は、 $(I_{large}/I_{small})_{CLB}/(I_{large}/I_{small})_{FAC}$ として得られる。Fig. 4から、散乱線に対する補正是、X線の実効エネルギーとともに大きくなることが分かる。

4. γ 線の照射線量標準場の設定

入射光子のエネルギーが高くなると二次電子の飛程が長くなり、前章に記した γ 線に対する補正が大きくなるので、これを避けるために自由空気電離箱を大き

くする必要がある。さらに高エネルギーになると、自由空気電離箱による正確な測定は困難になる。したがって、エネルギーの高い γ 線に対してはBragg-Grayの空洞理論を基にした空洞電離箱が用いられる。

エネルギーが E_γ の γ 線に対する空洞電離箱による測定電荷を Q 、空洞電離箱内の空気の質量を m とすると、この γ 線による照射線量 $X(E_\gamma)$ は次式で表される。

$$X(E_\gamma) = \frac{Q}{m} \frac{\bar{s}_{\text{gra}}}{\bar{s}_{\text{air}}} \frac{(\mu_{\text{en}}(E_\gamma)/\rho)_{\text{air}}}{(\mu_{\text{en}}(E_\gamma)/\rho)_{\text{gra}}} \prod k_j \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここで \bar{s} は電離箱の空洞を通過する二次電子に対する質量阻止能の平均値であり、 $(\mu_{\text{en}}(E_\gamma)/\rho)$ はエネルギー E_γ の γ 線に対する質量エネルギー吸収係数である。一般に一次標準設定用電離箱の壁材にはグラファイトが使用されており、サフィックスのairとgraはそれぞれ空気とグラファイトに対する値であることを示している。グラファイトが用いられる理由は、質量阻止能や質量エネルギー吸収係数の値が照射線量あるいは空気カーマの基準物質である空気の値に近いため、補正量が少なく、補正に起因する誤差を小さくできるからである。また、高純度で材質の明確な素材が得られることも理由の一つである。

(2式における k_j は下記のような項目に対する補正係数である。

電離箱壁による γ 線の減衰および電離箱壁で散乱された γ 線による電離の寄与

電離箱の空洞が有限の大きさであること

湿度によって生成されるイオン対の数が変化すること

イオンの再結合(初期再結合、体積再結合)による電荷損失

イオンが電荷と同じ極性の電極表面に拡散で衝突することによる電荷損失

電離箱のステムによる散乱線の寄与

散乱線による光子エネルギースペクトルの変化によって各補正係数の値が変わること

被校正電離箱の有感体積内で γ 線強度が一様でないこと

これらのうち、の補正について以前は、キャップの壁厚に対する信号電流の変化を測定し、外挿によって補正值を求めた。しかし壁厚と減衰や散乱の影響は必ずしも比例しないため、測定による方法では正しい値が得られないことが判明した。産総研は2001年からモンテカルロ法によって求めた補正值を使用している^{6,7)}。

の湿度に対する補正是、照射線量や空気カーマが乾燥空気によって定義されているために必要なものである。空洞電離箱の場合は、湿度によって空気のW値が変化することと、(2式における空気の質量エネルギー吸収係数と質量阻止能が変化することに対する補

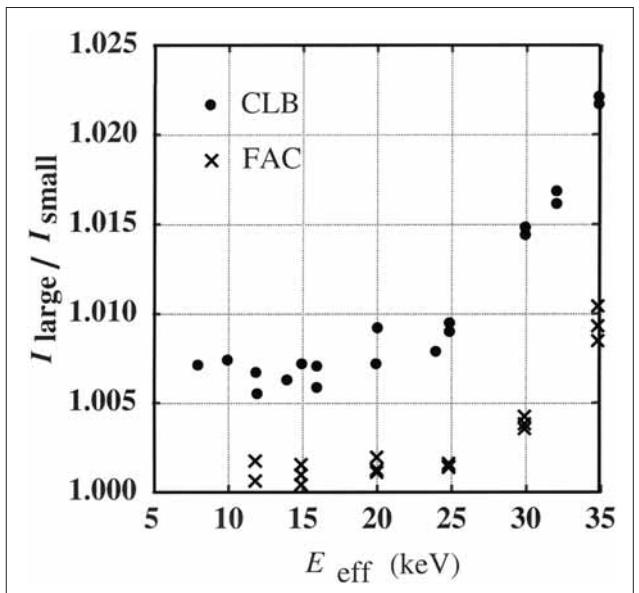


Fig. 4 フィルタや空気等からの散乱線に対する自由空気電離箱(FAC)と被校正電離箱(CLB)の感度の違い(直径15mmの穴の開いた遮蔽板をX線源と各電離箱の中間に置いたとき(I_{small})と外したとき(I_{large})の信号電流の比を示す)

正である。第3章で議論した自由空気電離箱の場合は、湿度に対する補正是、空気のW値の変化と質量エネルギー吸収係数の値の変化に対する補正である。実際の補正值は、空洞電離箱と自由空気電離箱それについて得られている相対湿度による信号電流の変化に関するデータ⁸⁾(Fig. 5)を用いて求めている。補正值は測定時の相対湿度における信号電流に対する乾燥空気での信号電流の比で、Fig. 5の逆数となる。

上記のように、照射線量や空気カーマの絶対測定では湿度に対する補正が必要であるが、電離箱の校正においては、出力電流に対する湿度の補正是行わない。これはFig. 5からも分かるように、一般に電離箱が使用されている相対湿度10%から80%の範囲においては、空洞電離箱の出力変化は0.1%以下と小さいからである。校正証明書には、校正測定時の温度、気圧、相対湿度を記載するが、校正定数は基準温度と気圧(一般に20°Cまたは22°C, 1013.25hPaまたは1013.3hPa)に対してだけ換算した値を記載している。

5. 照射線量から空気カーマへの換算

照射線量は、測定の観点から発達してきた量である。しかし空気カーマは、放射線の種々の効果に対する基本的な量である吸収線量と同様な組立単位[『]単位質量当たりのエネルギー[』]として表され、数値もその値に近いため、照射線量に代わって使用されるようになった。国際的な相互比較もK1, K2等に示すよう

に、空気カーマが用いられている。ここでは、産総研の標準場における照射線量の値を、どのようにして空気カーマに換算しているか示す。

空気カーマは、ある点において、光子によって単位質量当たりの空気から放出される荷電粒子(二次電子)の初期運動エネルギーとして定義されている。空気カーマを K_a 、照射線量を X とすると、両者は、

$$K_a = X \frac{(W/e)}{(1-g)} \quad \dots \dots \dots (3)$$

の関係式で表される。ここで(W/e)は電子に対する空気のW値を電気素量 e で割ったものである。 (W/e) については1985年の電離放射線諮問委員会において、 $W/e = 33.97 \pm 0.05 \text{ J/C}$ の値を使用することが合意されている^{9, 10}。

光子によって発生した二次電子の一部は空気との衝突による制動放射でエネルギーの一部を失う。制動X線は発生点から離れた場所で電離作用するので、その大半は電離箱では検出されない。このため、制動X線による電離は照射線量の定義に含まれていない。したがって、照射線量を空気カーマに変換するためには、この制動X線によって散逸したエネルギーに対する補正が必要である。式(3)の g は二次電子が空气中において制動放射によって失うエネルギーの割合である。 g の値についてはICRU Report 47(1992)と電離放射線諮問委員会で合意された値がある¹¹。ICRU Report 47では、 $(1-g)$ の値をすべて3桁表示としているため、光子エネルギー 1 MeV 以下では $(1-g)$ の値は1.00となっている。

産総研は、電離放射線諮問委員会において合意された g の値¹¹から、種々の条件における標準場の光子エネルギー分布と空気の質量エネルギー吸収係数の値¹²によって加重し、各標準場に対して $(1-g)$ の値を得た。それらの値の各照射条件での代表値として、それぞれ、下記の値を用いている¹³。

X線 : $(1-g) \approx 1$

^{137}Cs : $(1-g) \approx 0.9984 \pm 0.0001$

^{60}Co : $(1-g) \approx 0.9970 \pm 0.0002$

6. 産総研の線量標準計画

産総研の物理標準整備計画では2005年度までに β 線吸収線量標準の設定を、2010年度までにX線、 γ 線による水吸収線量の標準設定を行うことになっている(<http://www.nmij.jp/info/plan/docimgs/butsuri-h15.pdf>)。この β 線吸収線量標準は放射線防護用であり、 β 線源 ^{147}Pm (225 keV), ^{85}Kr (687 keV), ^{90}Sr - ^{90}Y (2.28 MeV)が準備されている(カッコ内の値は β 線の最大エネルギー)。これらの β 線場に対して外挿電離箱を用いて、方向性線量当量 $H(0.07, \Omega)$ や個人線量当量

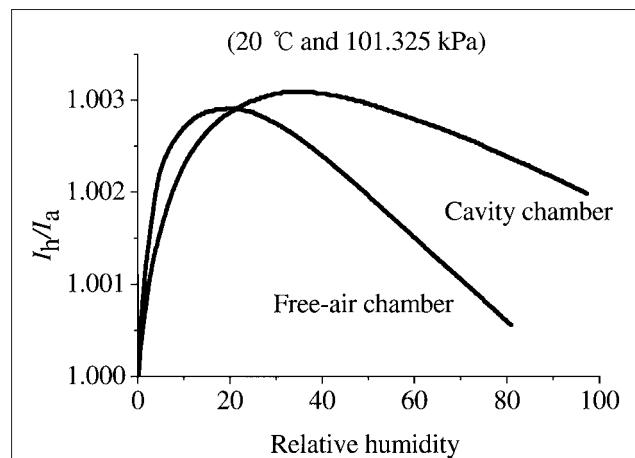


Fig. 5 相対湿度による自由空気電離箱と空洞電離箱からの信号電流の変化(乾燥空気における値(I_a)に対する比として示す(ICRU Report 31から))

$H(0.07)$ などの標準場の設定を目指す。

β 線場は同じ核種でも線源自体やフラッタリングフィルタ、線源からの距離等の条件によってエネルギースペクトルや方向特性が大きく異なることがある。このため、産総研の標準場における測定器の校正だけでなく、二次標準として使用される β 線場の特性の違いを把握することも重要な課題である。

水吸収線量標準は、主として医療分野でのX線、 γ 線あるいは電子線照射における吸収線量の基準となるものである。現在、産総研は放射線医学総合研究所が所有している電離箱を、 ^{60}Co 線の照射線量で依頼試験として校正している。これらの電離箱は、医用原子力技術研究振興財団が行っている国内の医療機関等の電離箱の校正に基準器として用いられている¹⁴。各医療機関は与えられたコバリート校正定数 N_c から標準測定法01¹¹に準拠して、電離箱の型式と照射条件に対応した校正定数比 $k_{D,X}$ や線質変換係数 k_Q を用いて水吸収線量に換算した値を使用している。

産総研が ^{60}Co 線による水吸収線量標準を供給するようになると、各電離箱に与えられる水吸収線量校正定数 $N_{D,W}$ から、 ^{60}Co 線による水吸収線量の値を直接得ることができる。したがって、照射線量から水吸収線量への変換係数である校正定数比 $k_{D,X}$ は不用になる。また、 ^{60}Co 線以外に、特定の線質指標のX線による水吸収線量についても標準を供給することになれば、実際の照射条件に近い線質に対する校正定数が得られるため、線質変換係数 k_{Q,Q_0} の不確かさを小さくすることが期待できる。

水吸収線量の標準場は、水ファントム中に設定されるため、位置による線量率の変化が大きい。また、散乱線成分が多いことも照射線量や空気カーマの標準場と異なる。これまで諸外国の水吸収線量の一次標準

は、電離箱、グラファイトカロリメータあるいは、水カロリメータを用いて設定されている。

6-1 電離箱による水吸収線量標準

電離箱を基準器として水吸収線量標準場を設定するには、電離箱を水ファントム中に設置して測定する。測定された照射線量の値に空気のW値(W/e)をかければ、空気の吸収線量となる。この値を、電離箱位置の水の吸収線量に換算するためには、空気と水の質量エネルギー吸収係数比をかけねばよい。したがって、(2)式から分かるように、水吸収線量を得るためにには、電離箱の壁物質であるグラファイトと水の質量エネルギー吸収係数比($(\mu_{en}/\rho)_{wat}/(\mu_{en}/\rho)_{gra}$)、空気のW値(W/e)、質量阻止能比(S_{gra}/S_{air})の各物理定数が必要である。このほかに、電離箱が水に置き換わる影響に対する補正も必要となる。高エネルギーX線による照射の場合は、水から発生した二次電子の一部も電離箱の電離体積を通過するので、これに対する補正も必要となる。そのほか、第4章に記した照射線量標準場の設定と共に通する幾つかの補正が必要である。それぞれの方法によって水吸収線量の値を得るために必要な物理定数をFig. 6に示す。

6-2 グラファイトカロリメータ

グラファイトカロリメータには、サーミスタが埋め込まれたコアと呼ばれるグラファイトの小さな円盤があり、このコアは、グラファイトのブロックで何重かに囲まれている。コアとブロックの間やブロック間の狭いすき間は真空になっていて断熱されている。放射線照射によるコアの上昇温度とグラファイトの比熱からグラファイトの吸収線量を得ることができる。したがって、グラファイトのブロック全体と形が同じで、コアと同じ位置に電離箱を挿入できるグラファイトファントムを同じ照射条件で照射すれば、電離箱をグラファイト吸収線量で校正することができる。

この電離箱を水ファントム中の特定の場所に設置し、グラファイトファントムと同じ照射条件で照射する。光子とグラファイトや水との相互作用をコンプトン効果だけと仮定し、それぞれの物質の電子密度比で長さを規格化すると、両ファントム中での参照位置における散乱線を含めた光子のエネルギースペクトルと方向分布は同じと考えることができる。したがって、水ファントム中の水の吸収線量は、グラファイト吸収線量に、それぞれのファントム中での電離箱の出力比と、グラファイトと水の質量エネルギー吸収係数の比をかけたものとなる。それぞれのファントム中での出力の比較に使用する電離箱の壁が二次電子の飛程に比べて薄く、電離箱を通過する二次電子がすべてグラ

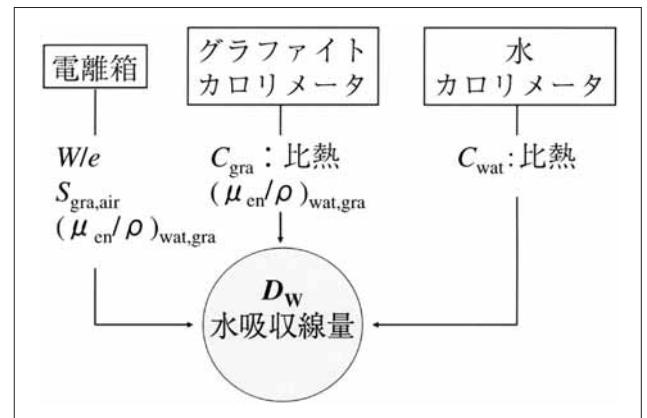


Fig. 6 それぞれの絶対測定手法による水吸収線量標準場の設定に必要な物理定数

ファイトあるいは水から発生した二次電子であると仮定できる場合は、グラファイトと水の質量エネルギー吸収係数比に代わって、質量阻止能比をかけることになる。以上の手順を経て、水ファントム中に校正すべき電離箱を設置して水吸収線量の値で校正することが可能となる。

6-3 水カロリメータ

水カロリメータは、照射による水の上昇温度から水吸収線量を求めるものである。水ファントム中に温度差が生じると対流が発生するので、局所的な吸収エネルギーを得ることは困難になる。このため、温度による水の密度変化が小さな4°C付近で照射したり、水ファントムを上部から照射したり、プラスチックの薄膜を水中に張って対流を防ぐなどの工夫がなされている。水カロリメータで大きな問題は、水にわずかでも不純物が含まれていると、照射によって発熱や吸熱の化学反応が起こることである。このため、不純物の影響を減らす手法が開発されている。以前は、ファントム全体の水を一体とする方式が採用されていたが、現在では、水ファントム中に薄いガラスの管を設置し、中の水を特に高純度にしてその水の上昇温度を測定する方式が採用されている。

終わりに

水吸収線量標準の設定と供給は産総研にとって、今後の線量標準開発のなかで、最も重要な課題である。水吸収線量標準のそれぞれの設定法には、取り組まなければならぬ多くの問題点がある。電離箱を用いる手法は、グラファイト電離箱の電離体積を 1cm^3 とすると、室温1気圧の場合 1Gy 当たり約 32nC の電荷信号となり、グラファイトカロリメータや水カロリメータ(それぞれ 1Gy 当たり 1.4mK と 0.24mK の温度上昇)に比べて感度は非常に高い。しかしFig. 6に示すよう

に、多くの物理定数や補正係数を必要とし、これらのなかには不確かさが大きなものもある。どのような手法によって標準を設定すべきか技術面での検討が急務である。

これまで、標準供給を受けていた、あるいは希望し

参考文献

- 1)日本医学物理学会編：外部放射線治療における吸収線量の標準測定法(標準測定法 01). 通商産業研究社，東京，(2003).
 - 2)Allisy-Roberts PJ, Burns DT, Takata N, et al.: Comparison of the standards for air kerma of the NMIIJ and the BIPM for ^{60}Co γ rays, Rapport BIPM-2004/11,(2004)
 - 3)Allisy-Roberts PJ, Burns DT, Takata N, et al.: Comparison of the standards for air kerma of the NMIIJ and the BIPM for ^{137}Cs γ rays, Rapport BIPM-2004/12,(2004)
 - 4)Kurosawa T, and Takata N: Correction factors for free-air ionization chambers for X-rays transmitted through a diaphragm edge and scattered from the surface of the diaphragm aperture, BIPM document CCRIC I Y05-27,(2005)
 - 5)Nohtomi A, Takata N, and Kasige C: A correction for scattered x-ray contribution in air kerma calibration, BIPM document CCRIC I Y05-29,(2005)
 - 6)Kurosawa T, Koyama Y, and Takata N: Ionization chamber wall correction factors for air kerma standards of gamma rays.
 - 医用標準線量, 6(2), 1-6,(2001)
 - 7)黒澤忠弘, 高田信久, 小山保二, 他: γ 線空気カーマ標準の設定. 産総研計量標準モノグラフ, 第7号,(2005).
 - 8)ICRU: Average energy required to produce an ion pair, ICRU Report 31,(1979)
 - 9)BIPM: Com Cons Etalons Mes Ray Ionisants, 11, R 157-158, (1985)
 - 10)高田信久 : 電子による空気のW値について . Isotope News , 10(496), 22-25 ,(1995).
 - 11)Boutillon M: \bar{g} values from Berger and Seltzer tables(1982), BIPM document CCEMRI Y85-18,(1985)
 - 12)Hubbell JH, and Seltzer SM: NIST IR 5632,(1995)
 - 13)高田信久, 小山保二, 黒澤忠弘: 照射線量と空気カーマによる測定器の校正. 医用標準線量 , 6(1), 1-7 ,(2001).
 - 14)佐方周防, 秋山芳久, 佐野正子, 他: 治療用線量計校正体制の変更および医用原子力技術研究振興財団による線量計校正 . 医用標準線量 , 10(1), 1-9 ,(2005).

2. 高エネルギーX線 01に基づく評価

1. 標準測定法 ①がわれわれに与えたもの

新たな世紀の始まりとともに2002年に公表された「外部放射線治療における吸収線量の標準測定法(標準測定法01)¹⁾」は、吸収線量評価に必要なパラメータに関して、これまでに世界で進められてきた改善結果を組み入れたものとなっている。その意味で、患者投与線量の精度の向上にかなうものである。また、各国の吸収線量評価プロトコルが北米のAAPM TG-51²⁾や欧洲のIAEA TRS 398³⁾という二大プロトコルと足並みを揃えるなかで、標準測定法01もこれらのプロトコルに準じた評価体系を構築するものである。したがって、わが国の放射線治療の品質を問われる昨今において、最も基本的な領域で整合が図られるに至ったといえる。

現在、わが国では約700の施設において放射線治療が行われている。これらの施設において放射線発生装置を臨床において取り扱うことができる技術者として診療放射線技師が張り付いている。確かな吸収線量を評価していくうえで標準測定法01を自家糞籠中の物

ている各分野の人達や組織との情報交換は限られていた。それぞれの分野との情報交換を行って、標準供給をどのような形で行うべきか議論したうえで標準の設定を考えることも重要である。

医用標準線量, 6(2), 1-6, (2001)

7) 黒澤忠弘, 高田信久, 小山保二, 他: γ 線空気カーマ標準の設定. 産総研計量標準モノグラフ, 第7号, (2005).

8)ICRU: Average energy required to produce an ion pair, ICRU Report 31(1979)

9)BIPM: Com Cons Etalons Mes Ray Ionisants, 11, R 157-158,
(1985)

10)高田信久：電子による空気のW値について。Isotope News, 10(496), 22-25 , (1995).

11)Boutillon M: g values from Berger and Seltzer tables(1982),
BIPM document CCEMRK I y85-18,(1985)

12)Hubbell JH, and Seltzer SM: NIST IR 5632(1995)

13)高田信久, 小山保二, 黒澤忠弘: 照射線量と空気カーマによる測定器の校正. 医用標準線量, 6(1), 1-7, (2001).

14)佐方周防, 秋山芳久, 佐野正子, 他: 治療用線量計校正体制の変更および医用原子力技術研究振興財団による線量計

校正 . 醫用標準線量 , 10(1) , 1-9 , (2005) .

収線量の標準測定法 Symposium

保科正夫

群馬県立県民健康科学大学診療放射線学部

とするための幾つかのヒントを述べる。

2. 校正された電離箱による吸収線量の決定

標準測定法 01における前提条件は、国家標準における(1)基準放射線は ^{60}Co γ線であることと、(2)基準線量は照射線量であるという2点である。この前提条件のもとに測定量と水吸收線量との関係を表す水吸收線量校正定数を導き、治療施設で用いる高エネルギーX線と電子線の水吸收線量を国家標準量を要として施設間で整合を図ることが吸収線量評価プロトコルの大きな目的である。

照射線量 X_{air} の定義は、質量が d_m の空気体積内で入射光子によって生成した陰陽すべての電子が、空气中で完全に静止するまでに発生した片方の符号のイオンの全電荷の絶対値 dO とすると、

$$X_{\text{air}} = \frac{dQ}{dm} \left[\frac{\text{C}}{\text{kg}} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

である。

一方、空気カーマ K_{air} は、質量が d_m の空气中で非荷

電粒子によって放出された荷電粒子の初期運動エネルギーの総和を dE_{tr} とすると、

$$K_{air} = \frac{dE_{tr}}{dm} \left[\frac{J}{kg} \right] \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

である。荷電粒子に付与された初期運動エネルギーは局所的な物質へのエネルギー付与でみたときは必ずしもすべてが付与(吸收)されるわけではない。すなわち、一部は制動放射として非荷電粒子である光子の形で再放出が発生する。吸収線量を評価する場合、局所的なエネルギーの吸収を問題にしているのであるから、制動放射成分を除いた空気衝突カーマ ${}_{col}K_{air}$ で評価することになる。空気カーマと空気衝突カーマの関係は、

$${}_{col}K_{air} = K_{air}(1 - g) \quad \dots \dots \dots \quad (3)$$

である。ここで、 g は荷電粒子の初期運動エネルギーに対する制動放射損失の割合で、高エネルギーX線の場合には $g=0.003$ である。

以上のことより、校正場における量がカロリーメトリックな手法等により直接的に吸収線量が与えられていなければ、空洞気体電離箱を用いて吸収線量を評価するためには空気衝突カーマを用いた展開をしなければならないことが分かるであろう。それでは、われわれに与えられている照射線量から、まず空気衝突カーマに展開してみよう。

照射線量により、非荷電粒子 荷電粒子 電離(イオン対)というエネルギー転移のなかで、エネルギー保存則に基づけば、1イオン対を発生するのに必要なエネルギー(W 値)が分かれれば、非荷電粒子から荷電粒子に転移したエネルギーである空気衝突カーマを知ることができる。すなわち、

$${}_{col}K_{air} = X_{air} \frac{\bar{W}_{air}}{e} \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

という関係によって、吸収線量の“生みの親”である空気衝突カーマが得られるのである。

ちなみに、 $1eV = 1.60217733 \times 10^{-19} J$ であるので、

$$\frac{\bar{W}_{air}}{e} = \frac{33.97[eV]}{1.60217733 \times 10^{-19}[C]} = \frac{33.97[eV] \times 1.60217733 \times 10^{-19}[J/eV]}{1.60217733 \times 10^{-19}[C]} = 33.97[J/C]$$

となり、 X_{air} はC単位で測定されるので、 ${}_{col}K_{air}$ はカーマのエネルギー単位であるJとなる。この辺のことをもう少し具体的に展開すれば、次のようになる。

W 値がeVで与えられているとすると、

$$\begin{aligned} {}_{col}K_{air} &= X_{air} \frac{\bar{W}_{air}}{e} \\ &= \frac{X_{air}[C]}{e[C]} \bar{W}_{air}[eV/ion pair] \\ &= \frac{X_{air}}{e} [ion pair] \bar{W}_{air}[eV/ion pair] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{X_{air}}{e} \bar{W}_{air}[eV] \\ &= \frac{X_{air}}{e} \bar{W}_{air}[eV] \times 1.60217733 \times 10^{-19} \left[\frac{J}{eV} \right] \\ &= 1.60217733 \times 10^{-19} \frac{X_{air}}{e} \bar{W}_{air}[J] \end{aligned}$$

ということである。以上のことから、結論的に $\bar{W}_{air}/e = 33.97 [J/C]$ として、C単位の X_{air} の値を乗じればよいのである。

一方、標準場 X_{air} において個々の電離箱の測定量 M に対して次式に示すコバルト校正定数 N_c を得る。

$$N_c = \frac{X_{air}}{M} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

これより、空中の空気衝突カーマ $({}_{col}K_{air})_{air}$ を標準場と関連づけられる。

$${}_{col}K_{air} = X_{air} \frac{\bar{W}_{air}}{e} = MN_c \frac{\bar{W}_{air}}{e} \quad \dots \dots \dots \quad (6)$$

ここで、測定点が荷電粒子平衡を満たすものであれば、 $({}_{col}K_{air})_{air}$ は空洞気体の吸収線量 D_{air} に等しい。しかし、残念ながら電離箱として機能を果たすために、電離箱は媒質と材質の異なる壁を持ち、空洞気体と異なる中心電極を持つ。これらのことから補正するために、Attixの電離箱モデルを適用することで、電離箱壁とビルドアップキャップによる ${}^{60}Co\gamma$ 線(基準放射線)の空気と異なる減弱に対する補正(k_{att})、 γ 線によって発生した空洞気体で電離を起こす荷電粒子は電離箱壁とビルドアップキャップ内で発生しているのであるから、すべてが空気の場合と異なるので壁とビルドアップキャップの空気不等価性に対する補正(k_m)、および電離箱空洞内の空気と異なる中心電極に対する補正(k_{cel})を加える必要がある。

$$\begin{aligned} D_{air} &= ({}_{col}K_{air})_{air} \\ &= {}_{col}K_{air} \cdot k_{att} \cdot k_m \cdot k_{cel} \\ &= M \cdot N_c \cdot \frac{\bar{W}_{air}}{e} \cdot k_{att} \cdot k_m \cdot k_{cel} \quad \dots \dots \dots \quad (7) \end{aligned}$$

ここまでくれば、後は空気の吸収線量である D_{air} からわれわれが知りたい水中の吸収線量 D_w を求めればよい。 D_{air} から D_w への変換には、Bragg-Grayの関係式である次のような吸収線量と阻止能(水と空気の阻止能をそれぞれ、 s_w と s_{air})との関係を用いればよい。

$$\frac{D_w}{D_{air}} = \frac{s_w}{s_{air}} \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

この関係式は、Bragg-Grayの空洞に関する基本条件が成立する場合に適用される。Bragg-Grayの空洞基本条件とは、

(a) 空洞は空洞に入射する荷電粒子の飛程と比較して小さくなければならない。したがって、空洞の存在は媒質中の荷電粒子のフルエンスを乱さない。

(b) 空洞内の吸収線量は空洞を横切る荷電粒子のみによって付与される(すなわち, 空洞内での光子の相互作用は無視できると仮定され, 無視する). 実際にわれわれが測定に用いる電離箱の場合, Bragg-Grayの空洞条件は完全に満たされるものではない. このような乖離は通常, 擾乱係数として知られている複数の補正係数(P)を吸収線量の式のなかに導入することで処理される. このすべての係数は四つの擾乱係数の積で書かれことが多い. それぞれの係数は異なる効果を考慮するものであり, 互いに独立すると仮定される. すなわち, 線質 ϱ における擾乱補正係数 P_{ϱ} は,

$$P_{\varrho} = (P_{\text{dis}} P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{cel}}) \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここで,

P_{dis} : 水を電離箱空洞で置き換えることによる影響を考慮する係数(円筒形電離箱)

P_{wall} : 電離箱壁と防水鞘の物質の水非等価に対する電離箱の応答を補正する係数

P_{cel} : ファントム中の測定で中心電極の影響に対して電離箱の応答を補正する係数

P_{cav} : 空洞に関係する影響, 主にそれは空洞内の電子フルエンスを空洞が存在しない水中の電子フルエンスと異なるものにする電子のin-scattering効果に対する電離箱の応答を補正する係数

また, 阻止能についても実際の電離箱の空洞サイズを考慮したSpencer-Attixの空洞理論より荷電粒子のエネルギーを考慮した阻止能 L/ρ が使われる.

われわれが評価する水中の吸収線量は, 過渡荷電粒子平衡状態にあり, 光子が荷電粒子にエネルギーを転移した位置と荷電粒子がそのエネルギーを媒質に付与する位置は, 荷電粒子の有限な飛程によって異なる. したがって,

$$\beta = \frac{D_w}{\text{col } K_w} \quad \dots \dots \dots (10)$$

なる平行関係が吸収線量と衝突カーマとの間にある. この比例定数 β は, 先に述べた補正係数 k_{att} に含まれる.

以上のことより, 媒質である水の吸収線量 D_w は,

$$D_w = N_c \cdot M \cdot \frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \cdot k_{\text{att}} \cdot k_m \cdot k_{\text{cel}} \left[\left(\frac{L}{\rho} \right)_{w,\text{air}} \cdot P_{\text{wall}} \cdot P_{\text{cav}} \cdot P_{\text{dis}} \cdot P_{\text{cell}} \right]_{^{60}\text{Co}} \quad \dots \dots \dots (11)$$

これにより, 各々の電離箱のレスポンスは国家標準に対してトレーサビリティが確保される.

しかし, 上式は物理定数や電離箱に固有の係数を含んだ式であるので, もう少し簡便にできるであろう. また, もっと基本的なこととして, 標準場が照射線量

として与えられているとして展開してきたが, 標準場が吸収線量 D_w として与えられているとする

$$N_{D,w,^{60}\text{Co}} = \frac{D_w}{M} \quad \dots \dots \dots (12)$$

と $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する水吸収線量校正定数 $N_{D,w,^{60}\text{Co}}$ を定義できる. また, この $N_{D,w,^{60}\text{Co}}$ を用いると式(12)は次のように展開できる.

$$\frac{D_w}{M} = N_{D,w,^{60}\text{Co}} = N_c \cdot \frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \cdot k_{\text{att}} \cdot k_m \cdot k_{\text{cel}} \left[\left(\frac{L}{\rho} \right)_{w,\text{air}} \cdot P_{\text{wall}} \cdot P_{\text{cav}} \cdot P_{\text{dis}} \cdot P_{\text{cell}} \right]_{^{60}\text{Co}} \quad \dots \dots \dots (13)$$

この式は, 線質が $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する物理的定数と電離箱固有の補正係数と擾乱補正係数によって, $N_{D,w,^{60}\text{Co}}$ と N_c の比が定まるることを意味している. そこで,

$$\frac{N_{D,w,^{60}\text{Co}}}{N_c} = k_{D,X} = \frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \cdot k_{\text{att}} \cdot k_m \cdot k_{\text{cel}} \left[\left(\frac{L}{\rho} \right)_{w,\text{air}} \cdot P_{\text{wall}} \cdot P_{\text{cav}} \cdot P_{\text{dis}} \cdot P_{\text{cell}} \right]_{^{60}\text{Co}} \quad \dots \dots \dots (14)$$

と校正定数比 $k_{D,X}$ を定義することで, 現在標準場として利用している $^{60}\text{Co}\gamma$ 線において, 上式の右辺は電離箱が定まれば計算によって求められる量となる. その結果, 照射線量から導かれる N_c の値から水吸収線量校正定数が得られるのである. この水吸収線量校正定数を用いることで吸収線量の評価は,

$$D_{w,^{60}\text{Co}} = M \cdot N_{D,w,^{60}\text{Co}} \quad \dots \dots \dots (15)$$

という簡単な評価式を利用できることになる. まさにこれが実務規約としての本質である.

臨床で用いるビームは $^{60}\text{Co}\gamma$ 線とは異なるエネルギーを有するX線, あるいはモダリティの異なる電子線である. したがって, $^{60}\text{Co}\gamma$ 線で求めた水吸収線量校正定数 $N_{D,w,^{60}\text{Co}}$ を臨床のビーム ϱ に対する校正定数 $N_{D,w,\varrho}$ に変換する必要がある. ここで, 式(7)に戻って $^{60}\text{Co}\gamma$ 線における校正を意味を考えてみよう.

式(7)において D_{air} とは, 電離箱空洞における吸収線量, すなわち空洞空気の質量に対して吸収されたエネルギーであるから, 式(7)は次式のように書き改めることができる.

$$D_{\text{air}} = M \frac{1}{m_{\text{air}}} \frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} = M \frac{1}{\rho_{\text{air}} V_{\text{eff}}} \frac{\bar{W}_{\text{air}}}{e} \quad \dots \dots \dots (16)$$

式(16)と式(7)を比較すると, 校正(すなわち, N_c を得る)とは標準場における校正とは電離箱の空洞体積の絶対質量(形式的に質量の逆数となっているが)を求めることであるといえる. したがって, この量は線質によって不变なのである. 線質によって変わるのは, 式(14)のカギカッコの中の阻止能比と擾乱補正係数となる. ゆえに, 線質変換係数 k_{Q,Q_0} は次のように定義され

るのである。

$$k_{Q,Q_0} = k_{Q,{}^{60}\text{Co}} = \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,\text{air}} P_{\text{wall}} \cdot P_{\text{cav}} \cdot P_{\text{dis}} \cdot P_{\text{cel}} \right]_Q}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,\text{air}} P_{\text{wall}} \cdot P_{\text{cav}} \cdot P_{\text{dis}} \cdot P_{\text{cel}} \right]_{{}^{60}\text{Co}}} \quad (17)$$

以上より、臨床ビームでの吸収線量の評価は次式を用いて行える。

$$D_w = M \cdot N_{D,w,Q} = M \cdot N_{D,w,Q_0} \cdot k_{Q,Q_0} \quad (18)$$

3. 線量評価における実務的対応

先にみたように、われわれは患者の吸収線量を精度良く評価するための手法を手に入れることができた。これは世界の線量評価体系ともトレーサビリティが確保された手法である。現在、測定器材の準備が整わず古い評価法を続けている施設もまだあるが、早急な対応を図るべきである。

線量評価の精度を確保するためにユーザーに課せられているのは、大きく分けて(1)電離箱の基本特性値の決定と、(2)線質の評価の2点である。

3-1 電離箱の基本特性値の決定

電離箱を用いて測定をする場合に、電位計による指示値 M_{raw} を真の測定値 M とするために必要な種々の補正係数が必要となる。温度気圧補正係数 k_{TP} 、極性効果補正係数 k_{pol} 、イオン再結合補正係数 k_s 、および電位計校正定数 k_{elec} が必要になる。

医療用線量標準センターにおける校正に際して、日本では電離箱と電位計を合わせて持ち込むことがほとんどであるので、 N_c は k_{elec} の値を含むとみなされ、 $k_{\text{elec}}=1$ となる。電離箱のみを校正に出す場合には、電位計を補正するための標準電流が必要となる。電位計のみの校正は現在、国内では行われていない。

日常の測定で用いる正負いずれかの極性と印加電圧は事前に決めておかなければならない。それらは、電離箱の校正時にも適用されるので、電位計が設定可能な電圧と電離箱の許容電圧を考慮して決定することになる。

イオン再結合補正係数は放射線発生時のパルス数にも依存するので、臨床で使用するパルス数に対する k_s を確実に把握しておく。

k_{pol} と k_s の決定においては電離箱の動作条件(極性と印加電圧)を変えて測定することになる。このような動作条件の変更時には電離箱は不安定になりやすい。動作条件を変えたときには、500MU程度の照射を行い、15分程度待機したうえで測定に入るべきである。

3-2 線質の評価

X線の線質指標は照射野サイズ10cm×10cmの水中10cmの線量に対する深さ20cmの線量の比率である組織ファントム線量比 $TPR_{20,10}$ が用いられる。この $TPR_{20,10}$ により用いるX線の線質変換係数 k_{Q,Q_0} が決まる。 $TPR_{20,10}$ に対する k_{Q,Q_0} の変化は緩やかであるので、 $TPR_{20,10}$ 測定時の誤差はそれほど大きな影響を持たない。 $TPR_{20,10}$ の測定時の注意点は、測定値を吸収線量にまで変換したうえで $TPR_{20,10}$ を求める場合には、電離箱空洞の幾何学的中心に測定深を合わせる。一方、測定電荷量の比率を $TPR_{20,10}$ とする場合には、電離箱の測定実効深を測定深に合わせる。

$TPR_{20,10}$ の値は、次式からも明らかのように TMR の値から導くこともできる。

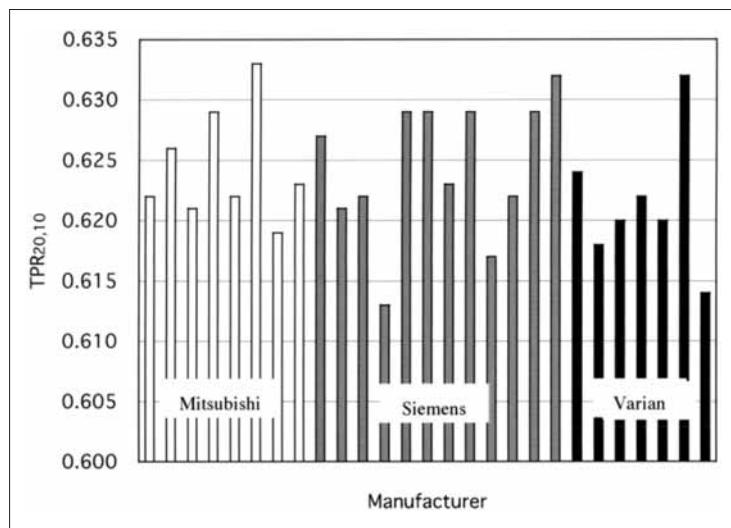
$$TPR_{20,10} = \frac{D(10 \times 10, 20)}{D(10 \times 10, 10)} = \frac{D(10 \times 10, 20) / D(10 \times 10, d_{\max})}{D(10 \times 10, 10) / D(10 \times 10, d_{\max})} = \frac{TMR(10 \times 10, 20)}{TMR(10 \times 10, 10)}$$

このときに注意すべきは、 TMR が旧標準測定法で許容されていた水等価固体ファントムで測定されたものである場合には、特に低エネルギー(4MVや6MV)のX線では水ファントムと異なる値を示す場合があるという点である。ファントムによる TMR の相違の有無を確認しておくべきである。

先に $TPR_{20,10}$ に対する k_{Q,Q_0} の変化は緩やかであると述べたが、4MVのX線に関して幾つかの施設の $TPR_{20,10}$ の相違をFig. 1に示す。各機種の平均値は、三菱が 0.624 ± 0.005 、Siemensが 0.624 ± 0.006 、Varianが 0.621 ± 0.006 とほとんど違いはみられない。しかし、施設間の最小値(0.613)と最大値(0.632)の間には3.3%の相違がある。このことによる k_{Q,Q_0} への影響は、例えばPTW30006電離箱では0.1%に過ぎない。しかし、これらの $TPR_{20,10}$ が仮に TMR から求めたものであるとすると、加速器の出力校正深である10cmの TMR 値に3%程度の相違があれば、出力評価そのものに同程度の相違が生じることになる。すなわち、 $TPR_{20,10}$ においては問題が少ないとても、そのベースになっているデータが TMR の場合、その差が妥当なものでなければ加速器の出力校正において誤差として直接伝播することになる。

4. 臨床における吸収線量の評価

放射線治療の品質管理の面から、モニタ単位数(MU値)の検証の必要性が強いてられている。MU値の検証手段としては、独立計算による場合が一般的であるが、実測による場合もある。ここで、注意すべきは独立計算において最も重要な役割を果たす深部線量関数(例えば、 TMR)である。先にも述べたがこれらは水中で測定した値を用いるべきである。近年、治療計画シ

Fig. 1 4MVのX線の施設間、装置間のTPR_{20,10}の分布

システム(TPS)の運用が進んでいることもあって、TPSに入力された実測データに基づきTPSが作成したTMR値を利用することも多い。TPSは入力された照射野サイズ以外のTMR値は線形内挿によって近似して得た値であるということに留意しなければならない。極端な例をFig. 2に示す。通常、深部線量関数は個々の照射野サイズにおいて深さ方向の変化をみるが、この図では、特定の深さにおいて照射野サイズに対するTPRの変化をみている。本来TPRの照射野サイズに対する変化は、Fig. 2にみられるような周期性のうねりはない。したがって、Fig. 2のデータは、TPSに入力された測定データの変動が、TPSの区間内挿によって反映したうねりとしてとらえることができる。このことより、測定値に対して十分な解析吟味をしたうえでデータを取り扱うことの重要性をFig. 2は示しているといえる。

最後に

新たな吸収線量評価法が導入されて何年か経過した。正しい運用を図るうえで、プロトコルを理解することは当然必要なことである。放射線治療の臨床を預かる診療放射線技師としては、治療専門技師としての

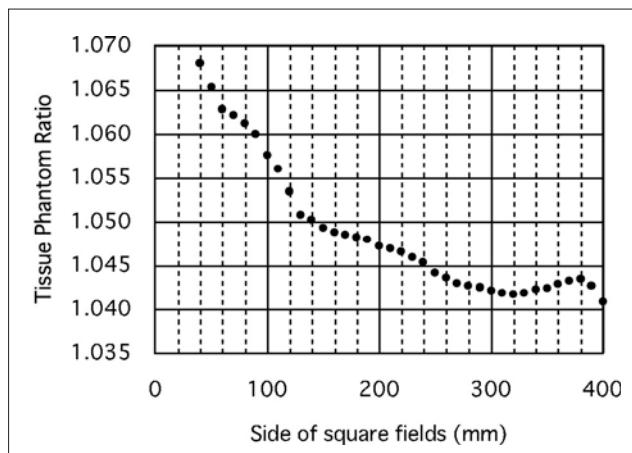


Fig. 2 登録されたデータに基づき治療計画システムが計算した深さ8cmの正方形照射野の辺の長さに対するTPRの変化。このTPRは10MVのX線に対するもので、基準深は10cmである。

技量を高めていくことが要求されている。そのとき、臨床という視点を決して忘れてはならない。そこで、この報告では放射線物理的な視点だけでなく、治療専門技師としての視点も意識した展開で標準測定法01を述べた。

参考文献

- 1)日本医学物理学会編：外部放射線治療における吸収線量の標準測定法(標準測定法01)，通商産業研究社，(2002)。
- 2)AAPM Task Group Report 51, Protocol for Clinical Dosimetry of high-Energy Photon and Electron Beams, Radiation Therapy Committee Task Group #51(1999)

- 3)IAEA Technical Reports Series No. 398, Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy(An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water)(2000)

3 . 高エネルギー電子線治療における吸収線量測定法の評価と問題点

熊谷孝三・島村正道¹⁾・的場 優²⁾

国立病院機構福岡東医療センター放射線科

1)熊本大学医学部保健学科

2)元九州大学大学院工学府エネルギー量子工学専攻

緒 言

現在の放射線治療における吸収線量測定は、Bragg-Grayの空洞理論に基づいて行われる^{1~4)}。わが国において1974年に放射線治療における高エネルギー電子線の吸収線量の標準測定法('74)が初めて作成された⁵⁾。1980年代には、線量測定技術の向上を反映して米国医学物理学会(AAPM)、英国病院物理学会(HPA)、北欧医学物理学会(NACP)などの吸収線量測定法に関するプロトコルが次々と改訂され⁶⁾、1986年に日本医学放射線物理部会(JARP)が線量測定法の新しいプロトコル('86)を発表した⁷⁾。2000年前後になると、世界の動向はSpencer-Attixの空洞理論を採用しAAPMではTG-51⁸⁾、国際原子力機関(IAEA)ではTRS-381⁹⁾、TRS-389¹⁰⁾において水吸収線量校正定数を標準として用いる測定プロトコルが展開された。これは、一次標準において電離箱線量計の空中による照射線量校正定数の代わりにカロリメータによって電離箱線量計の水吸収線量校正定数を直接決定する方法である。わが国においてもJARPが水吸収線量校正定数の取り入れを図るとともに、データの見直しを行い、さらに標準測定法01¹¹⁾を改定した。ところが、わが国には標準線量のための線量校正用のカロリメータが整備されていない。現在は、従来どおり、電離箱線量計の相対比較による空中照射線量校正定数の測定から吸収線量に変換するための必要な定数を決定している。また、電子線照射では、人体組織に対するエネルギー付与のメカニズムがX線照射と大きく異なるため、線量測定の運用に当たってはさまざまな注意が必要であり、問題点も多い。したがって、水吸収線量校正定数の概念を取り入れたために、臨床現場における電子線の線量測定の手法が極めて複雑になっている。電子線の電離量の測定から人体に投与する吸収線量への変換までには複雑な計算処理が要求され、実際的に電子線における線量測定プロトコル01を臨床現場で使用することは非常に受け容れ難い。そこで、水吸収線量校正定数などの高度評価を行い、問題点を解決し、高精度かつ臨床現場で運用しやすい水吸収線量測定法を新たに提案する必要がある。本報では、高エネルギー電子線の吸収線量測定について系統的に研究を進め、実用的な電子線測定法について検討を行うとともに電子線における吸収線量測定法01の高度評価と問題点について検討したので報告する。

1 . 吸収線量の不確定度

臨床での線量測定の最終目的は、患者体内の明記した点に処方した吸収線量を正確に投与することが重要である。がんの原発病巣を根治しようとすれば、腫瘍線量としての照射線量は5.0%の精度が要求される¹²⁾。実際的に、この腫瘍線量を±5.0%以内に毎日の照射で維持することは難しい。線量評価の不確定度は最適化の状態で2.3%、最大で約5.0%が見積もられている。したがって、線量測定の不確定度2.3%を達成するためには、臨床現場において高精度、かつ実用性の高い線量測定プロトコルが必要であり、その果たす役割は大きい。放射線治療における吸収線量測定プロトコルの作成は、施設間や測定者自身による線量計算の違いを防ぎ、かつ投与線量の統一が可能となる。また、処方線量の計算ミスによる過剰線量照射などの医療事故防止につながる。特に、線量測定を行なう際の物理定数や補正值は正確に評価し、統一されたものをプロトコルに準拠して用いるならば、見かけ上の系統誤差は減少することになる。したがって、施設間の誤差は、主にランダム誤差や再現性による誤差と考えることができる。また、線量測定法に関して技術的に未熟であり、理解が不十分の測定者においても一定した測定結果を導きだすことができる。この点からも臨床現場における線量測定精度を維持し、運用しやすい線量測定プロトコルの必要性が強調される。

2 . 実務的見地からの測定プロトコルの提案

臨床測定において、欧米諸国と同様に水吸収線量を標準とした測定法の導入に基づき、実務的見地から見て次のことに電子線の測定プロトコルのねらいを定める。

(1) JARPプロトコル01は、難解かつ煩雑であり、臨床現場になじみにくいのでプロトコルの原則は変更せずに使いやすい手法を導入し、簡略化する。

(2) 使用する電離箱線量計は、JARPプロトコル01では平行平板形電離箱に限定されているが、従来どおり円筒形電離箱を含め、両方の電離箱を使用できるようにする。このためには、問題となる電子フルエンスによる電離箱の空洞補正係数を評価する方法を検討する。

(3) 電離箱線量計の任意の深さの測定値をそのまま水吸収線量に変換できる手法を検討する。そのため

に、線質変換係数のほかに校正定数比の概念を導入し、各エネルギー指標(深部電離量半価深、深部線量半価深、平均入射エネルギー)および深さにおいてそれらの値を求める。線量計算はJARPプロトコル01に準拠し、線量計算パラメータは理論式あるいは実験値を用いて計算する。

(4) 実用的な測定プロトコルの確立を目指し、臨床測定において実務マニュアルとして十分に活用できるようにする。

(5) 原理的にすぐれた水吸収線量を標準としたJARPプロトコル01を確実に運用できるようにする。そして、それを個々の施設に確実に普及させ、全国的な統一基準のもとで投与線量の評価が図られるようにする。

3. 水吸収線量校正定数を用いた線量評価体系

3-1 電離箱線量計による水吸収線量計算の一般定式

水ファントム中で測定された電離量(線量計の測定値)から水の吸収線量を求める一般定式は次のとおりである。標準条件下において線質 Q のビーム中に配置された電離箱の水に対する吸収線量校正定数 $N_{D,W,Q}$ (Gy/C)が与えられると、電離箱のある測定点における水に対する吸収線量 $D_{W,Q}$ は次式で示される。

$$D_{W,Q} = MN_{D,W,Q} \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 M はすべての補正を施した電位計の測定値(C)である。

3-2 電離箱線量計による水吸収線量決定法

電子線の水吸収線量の測定においてJARPプロトコル01を適用する。電離箱は円筒形電離箱の適用は考慮されておらず、使用は電子フルエンスの擾乱による空洞補正を必要としない平行平板形電離箱だけに限定されている。線量測定の度に非常に煩雑な計算が要求されると同時に、実際の線量測定では平行平板形電離箱を使用するため膨大な測定時間がかかる。したがって、測定プロトコル01に準拠して測定精度を落とすことなく、運用しやすい測定プロトコルが必要になる。電離箱の指示値を吸収線量に変換するためには、電子線の線質変換係数($K_Q)_E$ 、および新しく導入する校正定数比($K_{D,X}$)を用いる。

3-2-1 線質変換係数による方法

式(1)の電子線吸収線量の一般定式は、線質変換係数($K_Q)_E$ を用いれば、次式で示される。ここで、 N_c :コバルト校正定数、 M_{raw} :電離箱の読み値、 k_{TP} :温度気圧補正係数、 k_{pol} :極性効果補正係数、 k_s :イオン再結合補正係数、 k_{elec} :電位計校正定数、 \bar{W}_{air} :空気中で1イオン対を生成するのに要する平均エネルギー、

k_{att} :電離箱材質による $^{60}\text{Co}\gamma$ 線の吸収および散乱の補正係数、 k_m :電離箱壁およびビルドアップキャップの空気に対する不等価性の補正係数、 k_{cell} :円筒形電離箱中心の空気不等価性の補正係数(空気中)、 $\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{w,air}$:物質w/空気airの平均制限質量衝突阻止能比、 P_{wall} :電離箱壁および防水材質の $^{60}\text{Co}\gamma$ 線に対する媒質と水との不等価性補正係数、 P_{cav} :媒質と空気の相違による電子フルエンス空洞補正係数、 P_{dis} :変位係数、 P_{cell} :円筒形電離箱中心の空気不等価性の補正係数(水中)である。

$$D_w = MN_c(K_{D,X})_{^{60}\text{Co}}(K_Q)_E \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$= M_{raw}k_{TP}k_{pol}k_s k_{elec}N_c(K_{D,X})_{^{60}\text{Co}}(K_Q)_E \quad \dots \dots \dots (3)$$

$$= M_{raw}k_{TP}k_{pol}k_s k_{elec}N_c \frac{\bar{W}_{air}}{e} k_{att}k_m k_{cell} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,air} P_{wall}P_{cav}P_{dis}P_{cell} \right]_{^{60}\text{Co}} \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,air} P_{wall}P_{cav}P_{dis}P_{cell} \right]_E}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,air} P_{wall}P_{cav}P_{d}P_{cell} \right]_{^{60}\text{Co}}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 $M = M_{raw}k_{TP}k_{pol}k_s k_{elec}$

$$(K_{D,X})_{^{60}\text{Co}} = \frac{\bar{W}_{air}}{e} k_{att}k_m k_{cell} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,air} P_{wall}P_{cav}P_dP_{cell} \right]_{^{60}\text{Co}}$$

$$(K_Q)_E = \frac{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,air} P_{wall}P_{cav}P_dP_{cell} \right]_E}{\left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,air} P_{wall}P_{cav}P_dP_{cell} \right]_{^{60}\text{Co}}} \quad \dots \dots \dots (5)$$

3-2-2 校正定数比による方法

式(1)の電子線吸収線量の一般定式は、校正定数比($K_{D,X}$)を用いれば、次式で示される。この校正定数比($K_{D,X}$)は測定プロトコル('86)の吸収線量変換係数 C_E に相当する。

$$D_w = MN_c(K_{D,X})_E \quad \dots \dots \dots (6)$$

$$= M_{raw}k_{TP}k_{pol}k_s k_{elec}N_c(K_{D,X})_E \quad \dots \dots \dots (7)$$

$$= M_{raw}k_{TP}k_{pol}k_s k_{elec}N_c \frac{\bar{W}_{air}}{e} k_{att}k_m k_{cell} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,air} P_{wall}P_{cav}P_{dis}P_{cell} \right]_E \quad \dots \dots \dots (8)$$

ここで、

$$(K_{D,X})_E = \frac{\bar{W}_{air}}{e} k_{att}k_m k_{cell} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{w,air} P_{wall}P_{cav}P_{dis}P_{cell} \right]_E \quad \dots \dots \dots (9)$$

4. 水吸収線量測定法の新たな提案による測定プロトコル

4-1 簡略化した手法による水吸収線量の計算式

上式(4)および(8)に示す各測定パラメータの値を電離箱ごとに求めて、電子線の各エネルギーと各深さに

対する吸収線量計算を行うのは実用的ではない。また、JARP01では電子線の線質変換係数が校正深だけに与えられ、任意の深さへの適用はできない。上式(4)および(8)は次式で簡単に表すことができる。

$$D_W = M_{raw} K_I N_c K_{\Pi} \quad \dots \dots \dots (10)$$

上式(10)は、線量計の指示値 M_{raw} とコバルト校正定数 N_c を除いて二つの区分に分けられる。第一の区分に属するものは、 K_I のように測定の環境条件や加速器の照射条件で変わり、その都度計算が必要なパラメータである。この K_I は測定の度に変動するが、比較的簡単に求めることができ、第二の区分は K_{Π} のように複雑な理論式により決定することになるが、それぞれの電離箱についてあらかじめ計算してしまえば臨床測定が非常に簡単に実施できるパラメータである。したがって、 K_{Π} を各種の電離箱ごと電子線エネルギーと深さの関数としてあらかじめ計算を行い、作表として利用すれば、測定が非常に簡略化できる。この K_{Π} は線質変換係数(K_Q)_E、または校正定数比($K_{D,X}$)_Eに相当する。結果的に、任意の深さの吸収線量は、電離箱の測定値に照射線量校正定数とこれらの係数をかけばよい。上記の計算パラメータの意味は測定プロトコル01^{2,12)}を参照のこと。

4-2 線量計算パラメータの評価

線量計算パラメータの決定法およびそれに必要な物理データはJARP01、AAPM TG-51、IAEA TRS-381およびTRS-389に与えられている。電離箱の吸収線量測定で特に問題になるのは、各種電離箱(内径: r)の P_{cav} である。また、この値を個々の電離箱について各エネルギー指標と任意の深さの関数として求めるためには、平均エネルギー \bar{E}_z が必要であり、そのエネルギーを決定しなければならない。そこで、両者について評価を行い、問題点の解決を図る必要がある。前者の評価は、Johanssonらのデータ¹²⁾を用いて最小二乗法で処理すると P_{cav} は次式で示される。

$$\begin{aligned} P_{cav} &= A_0 + A_1 (\bar{E}_z) + A_2 (\bar{E}_z)^2 \\ A_0 &= +1.01017 - 2.80952 \times 10^{-2}r + 2.05671 \times 10^{-3}r^2 \\ A_1 &= -1.34389 \times 10^{-3} + 2.89394 \times 10^{-3}r - 2.51638 \times 10^{-4}r^2 \\ A_2 &= +5.13489 \times 10^{-5} + 8.59929 \times 10^{-5}r - 9.14902 \times 10^{-6}r^2 \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (11)$$

この式は、4~20MeV、 r が1.5~3.5mmの範囲内で原データと±0.2%以内で一致する。また、 \bar{E}_z が2~4MeVおよび r が3.5~4mmの範囲の P_{cav} は、多項式近似式により回帰させ外挿して求めた。平行平板形電離箱(Markus, Capintec)についても同様な方法で求めればよい。また、上記の空洞補正係数を評価するために電

子線の平均入射エネルギー \bar{E}_0 に対するそれぞれの深さの平均エネルギー \bar{E}_z を求めなければならない。平均エネルギー \bar{E}_z は水中の深さが深くなれば散乱の寄与によって低い値を示す。著者は、川島らと同様な方法によって電子線のエネルギー損失を示す水/空気の平均制限衝突質量阻止能比から平均エネルギー \bar{E}_z を評価した^{13,14)}(Table 1)。また、一例として電離箱NE2581の P_{cav} をTable 2に示す。

4-3 線質変換係数および校正定数比の決定

4-3-1 線質変換係数

線量計算パラメータを決定し、式(5)よりエネルギー指標に対する各深さの線質変換係数を決定する。一例として計算した円筒形電離箱NE2581(防水鞘なし)の線質変換係数(K_Q)_EをTable 3に示す。同様にして、防水鞘を用いない場合、使用する防水鞘の厚さが0.5mmの場合、また、防水鞘が1.0mmの場合の線質変換係数を計算する。また同様にして市販の電離箱43種類の電子線の線質変換係数(K_Q)_Eを求める。

4-3-2 校正定数比

線量計算パラメータを決定し、式(9)よりエネルギー指標に対する各深さの校正定数比を決定する。一例として、計算した円筒形電離箱NE2581(防水鞘なし)の校正定数比($K_{D,X}$)_EをTable 4に示す。同様にして、防水鞘を用いない場合および使用する防水鞘の厚さが0.5mmの場合、および防水鞘が1.0mmの場合の校正定数比を計算する。また、同様にして市販の電離箱43種類の電子線の校正定数比($K_{D,X}$)_Eを求める。

5. 水ファントムによる電子線のエネルギー指標の評価

電子線測定において吸収線量を決定するためには、エネルギー指標を決定しなければならない。電子線のエネルギー指標には、深部電離量半価深 I_{50} 、深部線量半価深 R_{50} 、平均入射エネルギー \bar{E}_0 がある^{8~10,12)}。吸収線量の決定のための線質変換係数や校正定数比を求めるためにはいずれのエネルギー指標を適宜使用しても差し支えない。電子線のエネルギーの指標の決定には、水ファントムを用い、SSD=100cm、照射野 $A_0 \times 10 = 10\text{cm}^2$ 以上のビームで測定した深部電離量百分率、または深部線量百分率を用いる。以下に、電子線のエネルギー指標の決定方法について示す。

5-1 深部電離量半価深 I_{50} の評価

水中の深部電離量百分率を測定して最大深部電離量の50%の値になる深さを求める。それを深部電離量半価深 I_{50} とする。測定には、水ファントムを用い、SSD=100cm、照射野 $A_0 \times 10 = 10\text{cm}^2$ 以上のビームで行う。

Table 1 平均入射エネルギーと平均エネルギーの関係

E_0 (MeV)	2.00	2.33	3.00	3.26	4.00	4.66	5.00	5.83	6.00	7.00	8.00	8.16	9.00	9.32	10.00	10.49	
R_{50} (cm)	0.86	1.00	1.29	1.40	1.72	2.00	2.15	2.50	2.58	3.00	3.43	3.50	3.86	4.00	4.29	4.50	
I_{50} (cm)	0.89	1.03	1.31	1.42	1.73	2.00	2.15	2.49	2.57	2.97	3.39	3.46	3.81	3.95	4.23	4.60	
d (cm)																	
0.0	2.00	2.33	3.00	3.26	4.00	4.66	5.00	5.83	6.00	7.00	8.00	8.16	9.00	9.32	10.00	10.49	
0.1	1.80	2.17	2.72	3.01	3.70	4.42	4.72	5.53	5.69	6.74	7.78	7.96	8.65	8.95	9.62	10.11	
0.2	1.68	2.04	2.49	2.77	3.45	4.17	4.49	5.33	5.48	6.39	7.36	7.53	8.31	8.64	9.38	9.94	
0.3	1.56	1.86	2.29	2.55	3.21	3.93	4.23	5.04	5.19	6.16	7.10	7.25	8.12	8.49	9.12	9.60	
0.4	1.45	1.71	2.14	2.36	2.98	3.70	3.99	4.77	4.91	5.84	6.99	6.99	7.88	8.20	8.81	9.27	
0.5	1.33	1.55	2.02	2.17	2.71	3.41	3.71	4.50	4.66	5.63	6.59	6.74	7.60	7.96	8.50	8.95	
0.6	1.24	1.41	1.87	2.06	2.53	3.20	3.49	4.25	4.40	5.33	6.33	6.50	7.32	7.67	8.21	8.64	
0.8	1.05	1.15	1.59	1.80	2.19	2.77	3.05	3.85	3.99	4.86	5.78	5.94	6.68	6.99	7.71	8.20	
1.0	0.88	0.94	1.33	1.53	2.00	2.40	2.64	3.34	3.49	4.42	5.28	5.43	6.19	6.50	7.16	7.67	
1.2	0.73	0.74	1.11	1.30	1.70	2.11	2.29	2.94	3.08	4.01	4.89	5.04	5.76	6.05	6.66	7.12	
1.4					1.08	1.45	1.89	2.06	2.60	2.72	3.55	4.44	4.59	5.26	5.53	6.14	6.62
1.6					0.90	1.24	1.66	1.83	2.28	2.38	3.14	3.95	4.09	4.83	5.14	5.71	6.16
1.8						1.45	1.62	2.06	2.12	2.77	3.56	3.70	4.39	4.68	5.27	5.73	
2.0							1.25	1.41	1.86	2.00	2.45	3.20	3.34	3.98	4.25	4.80	5.23
2.5								1.34	1.41	1.92	2.39	2.50	3.08	3.34	3.85	4.25	
3.0								0.94	1.00	1.43	1.88	2.00	2.30	2.50	2.96	3.34	
3.5									1.04	1.43	1.50	1.86	2.03	2.27	2.55		
4.0										1.12	1.43	1.58	1.86	2.06			
4.5											1.19	1.43	1.63				
5.0											0.88	1.09	1.25				
5.5												0.94					
6.0																	
7.0																	
8.0																	
9.0																	
E_0 (MeV)	11.00	11.65	12.00	12.82	13.00	13.98	14.00	15.00	16.00	16.31	18.00	18.64	20.00				
R_{50} (cm)	4.72	5.00	5.15	5.50	5.58	6.00	6.01	6.44	6.87	7.00	7.73	8.00	8.58				
I_{50} (cm)	4.81	5.07	5.21	5.40	5.62	6.02	6.02	6.43	6.84	6.96	7.65	7.90	8.45				
d (cm)																	
0.0	11.00	11.65	12.00	12.82	13.00	13.98	14.00	15.00	16.00	16.31	18.00	18.64	20.00				
0.1	10.66	11.38	11.71	12.52	12.67	13.61	13.63	14.63	15.70	16.04	17.63	18.28	19.65				
0.2	10.41	11.01	11.34	12.13	12.32	13.39	13.41	14.27	15.22	15.52	17.30	18.06	19.35				
0.3	10.13	10.82	11.15	11.94	12.09	12.91	12.93	13.93	14.94	15.27	17.01	17.75	19.12				
0.4	9.78	10.46	10.79	11.56	11.75	12.71	12.73	13.70	14.70	15.02	16.53	17.15	18.51				
0.5	9.45	10.11	10.48	11.38	11.53	12.32	12.34	13.34	14.42	14.77	16.25	16.87	18.19				
0.6	9.19	9.94	10.25	11.01	11.19	12.13	12.15	12.99	14.00	14.30	15.91	16.58	17.87				
0.8	8.65	9.27	9.62	10.46	10.64	11.56	11.58	12.48	13.50	13.84	15.39	16.04	17.27				
1.0	8.12	8.79	9.12	9.94	10.11	11.01	11.02	11.90	12.81	13.17	14.85	15.52	16.70				
1.2	7.60	8.20	8.50	9.27	9.45	10.46	10.48	11.34	12.23	12.52	14.13	14.77	15.96				
1.4	7.06	7.67	8.01	8.79	8.96	9.94	9.96	10.88	11.83	12.13	13.68	14.30	16.62				
1.6	6.62	7.25	7.54	8.26	8.38	9.43	9.45	10.34	11.26	11.56	13.10	13.84	15.02				
1.8	6.16	6.74	7.05	7.81	7.97	8.79	8.81	9.72	10.70	11.01	12.52	13.17	14.37				
2.0	5.67	6.27	6.55	7.25	7.43	8.34	8.36	9.22	10.16	10.46	12.08	12.71	13.91				
2.5	4.67	5.23	5.50	6.16	6.31	7.12	7.14	8.00	8.95	9.27	10.77	11.38	12.48				
3.0	3.72	4.25	4.50	5.14	5.27	6.05	6.06	6.87	7.77	8.05	9.63	10.29	11.39				
3.5	2.87	3.34	3.60	4.25	4.38	5.14	5.15	5.88	6.71	7.04	8.47	9.11	10.18				
4.0	2.25	2.60	2.82	3.41	3.53	4.25	4.27	4.98	5.78	6.05	7.38	7.92	9.00				
4.5	1.83	2.09	2.21	2.65	2.76	3.41	3.42	4.10	4.88	5.14	6.42	6.99	8.00				
5.0	1.43	1.69	1.82	2.14	2.21	2.71	2.72	3.35	4.08	4.33	5.54	6.05	7.06				
5.5	1.09	1.32	1.44	1.77	1.84	2.17	2.18	2.65	3.32	3.55	4.72	5.23	6.14				
6.0		1.03	1.12	1.38	1.45	1.83	1.84	2.16	2.68	2.88	3.95	4.42	5.26				
7.0						1.15	1.16	1.45	1.82	2.00	2.61	3.01	3.78				
8.0										1.30	1.85	2.09	2.57				
9.0											1.45	1.85					

Table 2 電離箱NE2581の P_{cav}

$r = 3.2\text{mm}$															
$E_0(\text{MeV})$	2.00	2.33	3.00	3.26	4.00	4.66	5.00	5.83	6.00	7.00	8.00	8.16	9.00	9.32	10.00
$R_{50}(\text{cm})$	0.86	1.00	1.29	1.40	1.72	2.00	2.15	2.50	2.58	3.00	3.43	3.50	3.86	4.00	4.29
$I_{50}(\text{cm})$	0.89	1.03	1.31	1.42	1.73	2.00	2.15	2.49	2.57	2.97	3.39	3.46	3.81	3.95	4.23
$d(\text{cm})$															
0.0	0.9515	0.9531	0.9562	0.9574	0.9606	0.9634	0.9648	0.9680	0.9687	0.9723	0.9757	0.9762	0.9788	0.9798	0.9817
0.1	0.9505	0.9523	0.9549	0.9562	0.9593	0.9624	0.9636	0.9669	0.9675	0.9714	0.9750	0.9756	0.9778	0.9787	0.9807
0.2	0.9449	0.9517	0.9538	0.9551	0.9582	0.9613	0.9627	0.9661	0.9667	0.9701	0.9736	0.9742	0.9767	0.9778	0.9800
0.3	0.9493	0.9508	0.9529	0.9541	0.9571	0.9603	0.9616	0.9649	0.9655	0.9693	0.9727	0.9732	0.9761	0.9773	0.9792
0.4	0.9488	0.9501	0.9522	0.9532	0.9561	0.9593	0.9606	0.9638	0.9644	0.9681	0.9723	0.9723	0.9753	0.9764	0.9783
0.5	0.9482	0.9493	0.9516	0.9523	0.9548	0.9580	0.9593	0.9627	0.9634	0.9673	0.9709	0.9714	0.9744	0.9756	0.9773
0.6	0.9477	0.9486	0.9509	0.9518	0.9540	0.9571	0.9584	0.9617	0.9623	0.9661	0.9699	0.9705	0.9734	0.9746	0.9764
0.8	0.9468	0.9473	0.9495	0.9505	0.9524	0.9551	0.9564	0.9600	0.9606	0.9642	0.9678	0.9685	0.9712	0.9723	0.9748
1.0	0.9459	0.9462	0.9482	0.9492	0.9515	0.9534	0.9545	0.9577	0.9584	0.9624	0.9659	0.9665	0.9694	0.9705	0.9729
1.2	0.9452	0.9452	0.9471	0.9480	0.9500	0.9520	0.9529	0.9559	0.9565	0.9606	0.9643	0.9649	0.9678	0.9689	0.9711
1.4				0.9469	0.9488	0.9510	0.9518	0.9543	0.9549	0.9586	0.9625	0.9631	0.9658	0.9669	0.9692
1.6				0.9460	0.9477	0.9498	0.9507	0.9528	0.9533	0.9568	0.9604	0.9610	0.9641	0.9653	0.9676
1.8					0.9488	0.9496	0.9518	0.9521	0.9551	0.9587	0.9593	0.9623	0.9635	0.9659	
2.0					0.9478	0.9486	0.9508	0.9515	0.9536	0.9571	0.9577	0.9605	0.9617	0.9640	
2.5						0.9482	0.9486	0.9511	0.9533	0.9539	0.9565	0.9577	0.9600		
3.0						0.9462	0.9465	0.9487	0.9509	0.9515	0.9529	0.9539	0.9560		
3.5							0.9467	0.9487	0.9490	0.9508	0.9516	0.9528			
4.0								0.9471	0.9487	0.9494	0.9508				
4.5									0.9475	0.9487					
5.0										0.9459	0.9470				
5.5															
6.0															
$E_0(\text{MeV})$	10.49	11.00	11.65	12.00	12.82	13.00	13.98	14.00	15.00	16.00	16.31	18.00	18.64	20.00	
$R_{50}(\text{cm})$	4.50	4.72	5.00	5.15	5.50	5.58	6.00	6.01	6.44	6.87	7.00	7.73	8.00	8.58	
$I_{50}(\text{cm})$	4.60	4.81	5.07	5.21	5.40	5.62	6.02	6.02	6.43	6.84	6.96	7.65	7.90	8.45	
$d(\text{cm})$															
0.0	0.9830	0.9843	0.9859	0.9867	0.9884	0.9888	0.9905	0.9906	0.9921	0.9935	0.9938	0.9953	0.9956	0.9961	
0.1	0.9820	0.9835	0.9852	0.9860	0.9878	0.9881	0.9899	0.9899	0.9916	0.9931	0.9935	0.9950	0.9955	0.9960	
0.2	0.9815	0.9828	0.9843	0.9851	0.9870	0.9874	0.9895	0.9895	0.9910	0.9925	0.9929	0.9948	0.9953	0.9959	
0.3	0.9806	0.9821	0.9839	0.9847	0.9865	0.9869	0.9886	0.9886	0.9905	0.9921	0.9925	0.9945	0.9951	0.9959	
0.4	0.9796	0.9811	0.9829	0.9838	0.9857	0.9861	0.9882	0.9882	0.9901	0.9917	0.9922	0.9940	0.9946	0.9956	
0.5	0.9787	0.9802	0.9820	0.9830	0.9852	0.9856	0.9874	0.9874	0.9894	0.9913	0.9918	0.9937	0.9944	0.9954	
0.6	0.9778	0.9794	0.9815	0.9824	0.9843	0.9848	0.9870	0.9870	0.9887	0.9906	0.9911	0.9933	0.9941	0.9952	
0.8	0.9764	0.9778	0.9796	0.9807	0.9829	0.9834	0.9857	0.9857	0.9877	0.9897	0.9903	0.9927	0.9935	0.9947	
1.0	0.9746	0.9761	0.9782	0.9792	0.9815	0.9820	0.9843	0.9844	0.9864	0.9884	0.9891	0.9919	0.9929	0.9942	
1.2	0.9728	0.9744	0.9764	0.9773	0.9796	0.9802	0.9829	0.9830	0.9851	0.9872	0.9878	0.9908	0.9918	0.9934	
1.4	0.9710	0.9725	0.9746	0.9758	0.9782	0.9787	0.9815	0.9816	0.9840	0.9863	0.9870	0.9900	0.9911	0.9941	
1.6	0.9693	0.9710	0.9732	0.9742	0.9766	0.9769	0.9801	0.9802	0.9826	0.9850	0.9857	0.9889	0.9903	0.9922	
1.8	0.9677	0.9693	0.9714	0.9725	0.9751	0.9756	0.9782	0.9783	0.9809	0.9836	0.9843	0.9878	0.9891	0.9912	
2.0	0.9657	0.9674	0.9697	0.9707	0.9732	0.9738	0.9768	0.9769	0.9795	0.9821	0.9829	0.9868	0.9882	0.9904	
2.5	0.9617	0.9634	0.9657	0.9668	0.9693	0.9698	0.9728	0.9728	0.9757	0.9787	0.9796	0.9837	0.9852	0.9877	
3.0	0.9577	0.9594	0.9617	0.9627	0.9653	0.9659	0.9689	0.9689	0.9719	0.9750	0.9759	0.9807	0.9825	0.9853	
3.5	0.9541	0.9556	0.9577	0.9589	0.9617	0.9622	0.9653	0.9654	0.9682	0.9713	0.9725	0.9772	0.9792	0.9822	
4.0	0.9518	0.9527	0.9543	0.9554	0.9580	0.9586	0.9617	0.9618	0.9647	0.9678	0.9689	0.9736	0.9755	0.9788	
4.5	0.9497	0.9507	0.9519	0.9525	0.9546	0.9551	0.9580	0.9581	0.9610	0.9643	0.9653	0.9702	0.9723	0.9757	
5.0	0.9478	0.9487	0.9500	0.9506	0.9522	0.9525	0.9548	0.9549	0.9578	0.9609	0.9620	0.9669	0.9689	0.9725	
5.5	0.9462	0.9470	0.9481	0.9487	0.9504	0.9507	0.9523	0.9524	0.9546	0.9576	0.9586	0.9636	0.9657	0.9692	
6.0		0.9467	0.9471	0.9484	0.9488	0.9507	0.9507	0.9523	0.9547	0.9556	0.9604	0.9624	0.9658		
7.0					0.9473	0.9473	0.9488	0.9506	0.9515	0.9544	0.9562	0.9597			
8.0									0.9480	0.9508	0.9519	0.9542			
9.0										0.9488	0.9508				

Table 3 円筒形電離箱NE2581における電子線の線質変換係数(K_Q) (防水鞘なし)

NE2581 Farmer(PMMA cap)
(K_Q)_E

E_0 (MeV)	2.00	2.33	3.00	3.26	4.00	4.66	5.00	5.83	6.00	7.00	8.00	8.16	9.00	9.32	10.00
R_{50} (cm)	0.86	1.00	1.29	1.40	1.72	2.00	2.15	2.50	2.58	3.00	3.43	3.50	3.86	4.00	4.29
l_{50} (cm)	0.89	1.03	1.31	1.42	1.73	2.00	2.14	2.49	2.56	2.98	3.40	3.46	3.81	3.95	4.23
d (cm)															
0.0	0.920	0.910	0.903	0.900	0.895	0.891	0.889	0.885	0.884	0.880	0.877	0.876	0.873	0.873	0.871
0.1	0.923	0.913	0.906	0.903	0.897	0.892	0.890	0.886	0.885	0.881	0.877	0.877	0.874	0.874	0.872
0.2	0.926	0.917	0.908	0.905	0.899	0.894	0.892	0.887	0.886	0.882	0.879	0.878	0.875	0.874	0.872
0.3	0.929	0.921	0.911	0.908	0.901	0.896	0.893	0.889	0.888	0.883	0.880	0.879	0.876	0.875	0.873
0.4	0.932	0.925	0.914	0.910	0.903	0.897	0.895	0.890	0.889	0.885	0.881	0.880	0.877	0.876	0.874
0.5	0.936	0.929	0.918	0.913	0.906	0.899	0.897	0.892	0.891	0.886	0.881	0.881	0.878	0.877	0.875
0.6	0.939	0.933	0.921	0.916	0.908	0.901	0.899	0.893	0.892	0.887	0.883	0.882	0.879	0.878	0.876
0.8	0.947	0.942	0.928	0.923	0.913	0.905	0.902	0.896	0.895	0.890	0.885	0.884	0.881	0.880	0.878
1.0	0.954	0.951	0.936	0.930	0.919	0.909	0.906	0.900	0.899	0.892	0.887	0.887	0.883	0.882	0.879
1.2	0.963	0.962	0.944	0.937	0.925	0.915	0.911	0.903	0.902	0.895	0.890	0.889	0.885	0.884	0.881
1.4				0.945	0.932	0.921	0.916	0.907	0.906	0.898	0.892	0.891	0.888	0.886	0.883
1.6				0.954	0.939	0.926	0.922	0.911	0.910	0.902	0.895	0.894	0.890	0.888	0.885
1.8					0.932	0.927	0.916	0.914	0.905	0.898	0.897	0.892	0.891	0.887	
2.0					0.939	0.933	0.921	0.920	0.909	0.901	0.900	0.895	0.893	0.890	
2.5						0.936	0.933	0.920	0.910	0.908	0.902	0.900	0.896		
3.0						0.951	0.948	0.933	0.921	0.919	0.911	0.908	0.903		
3.5							0.947	0.933	0.931	0.921	0.918	0.912			
4.0								0.944	0.933	0.928	0.921				
4.5												0.941	0.933		
5.0												0.954	0.945		
5.5															
6.0															
7.0															
8.0															
9.0															
E_0 (MeV)	10.49	11.00	11.65	12.00	12.82	13.00	13.98	14.00	15.00	16.00	16.31	18.00	18.64	20.00	
R_{50} (cm)	4.50	4.72	5.00	5.15	5.50	5.58	6.00	6.01	6.44	6.87	7.00	7.73	8.00	8.58	
l_{50} (cm)	4.43	4.65	4.92	5.06	5.40	5.48	5.89	5.90	6.32	6.73	6.86	7.57	7.83	8.40	
d (cm)															
0.0	0.870	0.868	0.867	0.866	0.864	0.863	0.861	0.861	0.858	0.856	0.855	0.851	0.850	0.847	
0.1	0.870	0.869	0.867	0.866	0.864	0.864	0.862	0.862	0.859	0.857	0.856	0.852	0.851	0.848	
0.2	0.871	0.870	0.868	0.867	0.865	0.865	0.862	0.862	0.860	0.858	0.857	0.853	0.851	0.848	
0.3	0.872	0.870	0.869	0.868	0.866	0.865	0.863	0.863	0.861	0.858	0.858	0.854	0.852	0.849	
0.4	0.873	0.871	0.869	0.869	0.867	0.866	0.864	0.864	0.861	0.859	0.858	0.855	0.853	0.850	
0.5	0.874	0.872	0.870	0.869	0.867	0.867	0.865	0.865	0.862	0.860	0.859	0.855	0.854	0.851	
0.6	0.874	0.873	0.871	0.870	0.868	0.868	0.865	0.865	0.863	0.861	0.860	0.856	0.855	0.852	
0.8	0.876	0.874	0.873	0.872	0.869	0.869	0.867	0.867	0.864	0.862	0.861	0.857	0.856	0.853	
1.0	0.878	0.876	0.874	0.873	0.871	0.870	0.868	0.868	0.866	0.863	0.863	0.859	0.857	0.854	
1.2	0.879	0.878	0.876	0.875	0.873	0.872	0.869	0.869	0.867	0.865	0.864	0.860	0.859	0.856	
1.4	0.881	0.880	0.878	0.877	0.874	0.873	0.871	0.871	0.868	0.866	0.865	0.861	0.860	0.858	
1.6	0.883	0.881	0.879	0.878	0.876	0.875	0.872	0.872	0.870	0.867	0.867	0.862	0.861	0.858	
1.8	0.885	0.883	0.881	0.880	0.877	0.877	0.874	0.874	0.871	0.869	0.868	0.864	0.863	0.860	
2.0	0.888	0.885	0.883	0.882	0.879	0.878	0.875	0.875	0.873	0.870	0.869	0.865	0.864	0.861	
2.5	0.893	0.891	0.888	0.886	0.883	0.883	0.879	0.879	0.876	0.874	0.873	0.869	0.867	0.864	
3.0	0.900	0.897	0.893	0.892	0.888	0.887	0.884	0.884	0.880	0.877	0.876	0.872	0.870	0.867	
3.5	0.908	0.904	0.900	0.898	0.893	0.893	0.888	0.888	0.884	0.881	0.880	0.875	0.873	0.870	
4.0	0.916	0.912	0.907	0.905	0.899	0.898	0.893	0.893	0.889	0.885	0.884	0.879	0.877	0.873	
4.5	0.927	0.922	0.916	0.913	0.906	0.905	0.899	0.899	0.894	0.890	0.888	0.882	0.880	0.876	
5.0	0.939	0.933	0.926	0.922	0.914	0.913	0.906	0.906	0.900	0.894	0.893	0.886	0.884	0.880	
5.5	0.951	0.945	0.936	0.932	0.923	0.922	0.913	0.913	0.906	0.900	0.898	0.890	0.888	0.883	
6.0		0.948	0.943	0.934	0.932	0.922	0.922	0.914	0.906	0.904	0.895	0.892	0.888		
7.0						0.942	0.942	0.932	0.922	0.919	0.907	0.903	0.897		
8.0										0.937	0.921	0.916	0.907		
9.0											0.932	0.921			

Table 4 円筒形電離箱NE2581における電子線の校正定数比($K_{D,X}$)(防水鞘なし)

NE2581 Farmer(PMMA cap) ($K_{D,X}$) \times (Gy(C/kg)) $^{-1}$																		
E_0 (MeV)	2.00	2.33	3.00	3.26	4.00	4.66	5.00	5.83	6.00	7.00	8.00	8.16	9.00	9.32	10.00			
R_{50} (cm)	0.86	1.00	1.29	1.40	1.72	2.00	2.15	2.50	2.58	3.00	3.43	3.50	3.86	4.00	4.29			
I_{50} (cm)	0.89	1.03	1.31	1.42	1.73	2.00	2.14	2.49	2.56	2.98	3.40	3.46	3.81	3.95	4.23			
d (cm)																		
0.0	33.96	33.59	33.34	33.24	33.06	32.88	32.82	32.66	32.64	32.49	32.36	32.33	32.24	32.22	32.14			
0.1	34.06	33.72	33.43	33.33	33.12	32.94	32.88	32.72	32.69	32.52	32.39	32.37	32.28	32.25	32.18			
0.2	34.18	33.86	33.53	33.42	33.19	33.00	32.93	32.75	32.73	32.57	32.44	32.42	32.32	32.28	32.21			
0.3	34.29	34.01	33.64	33.51	33.26	33.06	32.99	32.81	32.78	32.61	32.47	32.45	32.34	32.30	32.23			
0.4	34.41	34.14	33.75	33.60	33.34	33.12	33.05	32.87	32.84	32.66	32.53	32.49	32.38	32.33	32.27			
0.5	34.55	34.30	33.89	33.72	33.43	33.20	33.12	32.92	32.89	32.70	32.54	32.52	32.41	32.37	32.30			
0.6	34.67	34.46	34.01	33.83	33.51	33.27	33.18	32.98	32.95	32.75	32.58	32.56	32.45	32.41	32.33			
0.8	34.95	34.79	34.27	34.07	33.71	33.42	33.31	33.08	33.05	32.85	32.67	32.64	32.53	32.49	32.40			
1.0	35.23	35.12	34.55	34.33	33.93	33.57	33.47	33.22	33.18	32.94	32.76	32.74	32.60	32.56	32.47			
1.2	35.54	35.52	34.85	34.60	34.16	33.78	33.64	33.35	33.30	33.04	32.84	32.81	32.68	32.63	32.53			
1.4						34.90	34.41	33.99	33.84	33.48	33.43	33.16	32.94	32.91	32.77	32.72	32.61	
1.6						35.21	34.67	34.20	34.04	33.65	33.59	33.29	33.06	33.02	32.85	32.79	32.68	
1.8							34.41	34.24	33.83	33.76	33.42	33.16	33.12	32.95	32.89	32.77		
2.0							34.65	34.46	34.01	33.95	33.55	33.27	33.22	33.05	32.98	32.86		
2.5								34.54	34.45	33.96	33.58	33.53	33.30	33.22	33.08			
3.0								35.12	35.02	34.44	34.00	33.94	33.63	33.53	33.35			
3.5									34.95	34.44	34.36	34.01	33.89	33.65				
4.0										34.85	34.43	34.28	34.02					
4.5											34.73	34.43						
5.0											35.23	34.89						
5.5																		
6.0																		
7.0																		
8.0																		
9.0																		
E_0 (MeV)	10.49	11.00	11.65	12.00	12.82	13.00	13.98	14.00	15.00	16.00	16.31	18.00	18.64	20.00				
R_{50} (cm)	4.50	4.72	5.00	5.15	5.50	5.58	6.00	6.01	6.44	6.87	7.00	7.73	8.00	8.58				
I_{50} (cm)	4.43	4.65	4.92	5.06	5.40	5.48	5.89	5.90	6.32	6.73	6.86	7.57	7.83	8.40				
d (cm)																		
0.0	32.10	32.05	32.00	31.95	31.89	31.86	31.80	31.78	31.69	31.60	31.58	31.44	31.37	31.26				
0.1	32.14	32.08	32.01	31.98	31.90	31.89	31.81	31.81	31.72	31.63	31.60	31.46	31.41	31.30				
0.2	32.15	32.11	32.05	32.02	31.94	31.92	31.83	31.83	31.75	31.67	31.64	31.49	31.43	31.32				
0.3	32.19	32.13	32.07	32.04	31.96	31.94	31.86	31.86	31.78	31.69	31.67	31.52	31.45	31.34				
0.4	32.22	32.17	32.10	32.07	32.00	31.98	31.88	31.88	31.80	31.71	31.69	31.56	31.50	31.39				
0.5	32.25	32.20	32.14	32.10	32.01	32.00	31.92	31.92	31.83	31.74	31.71	31.58	31.53	31.42				
0.6	32.28	32.23	32.15	32.12	32.05	32.03	31.94	31.94	31.86	31.78	31.75	31.61	31.55	31.44				
0.8	32.33	32.28	32.22	32.18	32.10	32.08	32.00	31.99	31.91	31.82	31.79	31.65	31.60	31.49				
1.0	32.41	32.34	32.27	32.23	32.15	32.14	32.05	32.05	31.96	31.87	31.85	31.70	31.64	31.54				
1.2	32.47	32.41	32.33	32.30	32.22	32.20	32.10	32.10	32.02	31.93	31.90	31.76	31.71	31.61				
1.4	32.54	32.48	32.41	32.37	32.27	32.25	32.15	32.15	32.06	31.97	31.94	31.80	31.75	31.68				
1.6	32.61	32.54	32.45	32.42	32.34	32.31	32.20	32.20	32.11	32.02	32.00	31.84	31.79	31.69				
1.8	32.68	32.61	32.52	32.48	32.39	32.37	32.27	32.27	32.17	32.08	32.05	31.90	31.85	31.74				
2.0	32.77	32.69	32.59	32.55	32.45	32.43	32.32	32.32	32.22	32.13	32.10	31.95	31.88	31.78				
2.5	32.98	32.89	32.77	32.72	32.61	32.59	32.47	32.47	32.36	32.25	32.22	32.07	32.01	31.91				
3.0	33.22	33.12	32.98	32.92	32.79	32.77	32.63	32.62	32.50	32.39	32.35	32.18	32.12	32.01				
3.5	33.51	33.38	33.22	33.15	32.98	32.95	32.79	32.79	32.66	32.53	32.49	32.30	32.24	32.13				
4.0	33.83	33.67	33.48	33.40	33.20	33.17	32.98	32.98	32.82	32.67	32.63	32.44	32.37	32.25				
4.5	34.22	34.04	33.80	33.69	33.46	33.42	33.20	33.20	33.02	32.85	32.79	32.57	32.49	32.36				
5.0	34.65	34.44	34.17	34.04	33.75	33.70	33.44	33.43	33.22	33.02	32.96	32.72	32.63	32.49				
5.5	35.12	34.88	34.57	34.43	34.09	34.04	33.72	33.72	33.46	33.23	33.16	32.88	32.77	32.61				
6.0						34.98	34.83	34.49	34.42	34.04	34.04	33.73	33.45	33.37	33.06	32.94	32.77	
7.0									34.79	34.78	34.41	34.05	33.94	33.48	33.33	33.10		
8.0												34.60	34.02	33.80	33.49			
9.0													34.41	34.02				

5-2 深部線量半価深 R_{50} の評価

深部線量半価深 R_{50} は水中の深部電離量半価深 I_{50} (g/cm^2)から次式によって決定する。

$$R_{50}=1.029I_{50}-0.06 \quad (I_{50} < 10 \text{ g}/\text{cm}^2) \quad \dots \dots \dots (12)$$

$$R_{50}=1.059I_{50}-0.37 \quad (I_{50} > 10 \text{ g}/\text{cm}^2) \quad \dots \dots \dots (13)$$

5-3 平均入射エネルギーの評価

平均入射エネルギーは、通常、水中の深部線量半価深 R_{50} を(g/cm^2)用いて次式で求める。

$$\bar{E}_0=2.33R_{50} \quad (R_{50} : \text{g}/\text{cm}^2) \quad \dots \dots \dots (14)$$

$$\bar{E}_0=0.656+2.059R_{50}+0.022R_{50}^2 \quad (R_{50} : \text{g}/\text{cm}^2) \\ \dots \dots \dots (15)$$

また、 \bar{E}_0 は水中の深部電離量半価深 I_{50} から次式によって直接決定することができる。

$$\bar{E}_0=0.36274+0.22000I_{50}+0.0001654I_{50}^2 \quad (I_{50} : \text{mm}) \\ \dots \dots \dots (16)$$

$$\bar{E}_0=0.818+1.935I_{50}+0.040I_{50}^2 \quad (I_{50} : \text{g}/\text{cm}^2) \\ \dots \dots \dots (17)$$

6. 提案する測定プロトコルの実際

この方法の特徴は、各種の電離箱に対して水ファントムの任意の深さのすべての線質変換係数(K_Q)_E、および校正定数比($K_{D,X}$)_EをあらかじめJARPの測定プロトコル01に厳密に従って計算し、作表にして利用することである。電離箱は平行平板形と円筒電離箱の両方に使用できるのも特徴である。測定の実際では、電離箱は変位法を採用する。また、加速器からの電子線のエネルギー指標はあらかじめ大きなアプリケータを用いて決定しておく。この I_{50} は深部電離量百分率から直接求められるが、必要に応じて R_{50} 、 \bar{E}_0 は計算式を使用して I_{50} から直接決定する。測定時の電子線の公称エネルギーが同じであるならば、アプリケータの大きさが異なっても同じ線質変換係数(K_Q)_Eまたは校正定数比($K_{D,X}$)_Eを使用する。さらに、ファントム中の電離箱の指示値(M_{raw})に各種の補正を施し、電離量(M)を求める。各深さの電離量から深部電離量百分率を測定し、エネルギー指標(I_{50} 、 R_{50} 、 \bar{E}_0)のいずれかを決定する。エネルギー指標が決定されれば、線質変換係数(K_Q)_Eまたは校正定数比($K_{D,X}$)_Eを作表から求め、電離量にかけてやれば吸收線量が決定される(式2および式6参照)。

7. 考 察

わが国では、欧米の測定法の変更に伴い、過去、1974年(プロトコル74)、1986年(プロトコル86)、2001(プロトコル01)と新しく改定を加えてきた。本報では、新しく提案する測定プロトコルは、JARPプロトコル01の臨床測定の煩雑性を解決し、測定精度を維持しながら実用性の高い測定法を示した。この測定プロトコルの原則は、プロトコル01を厳密に適用し、各エネルギー指標と深さに対して線質変換係数、または校正定数比を吸収線量計算に用いることである。また、使用できる電離箱は平行平板形電離箱に限定することなく、円筒形電離箱を使用できるようにした。そのためには、第一に電子線のエネルギーと深さで変化する電子フルエンスの擾乱による電離箱の空洞補正(空洞補正係数)の問題点の解決を行い、この空洞補正を各電子線エネルギー指標に対応してそれぞれの深さ方向まで適用できる方法を示した。第二に空洞補正係数 P_{cav} の決定には、電子線の平均エネルギー \bar{E}_c が必要になり、この値を求める方法を検討した。そして、電離箱について水吸収線量の変換に必要な線質変換係数、および校正定数比を作表化し、これにより、臨床測定が高精度で非常に容易に実施できるようになった。また、ここでは市販43種類の電離箱について計算した線質変換係数および校正定数比の作表は誌面の都合で省略した。

8. 結 語

Spencer-Attixの空洞理論を用いた医療用加速器の電子線における吸収線量測定法を新たに提案した。この方法は、吸収線量に変換するための係数である線質変換係数(K_Q)_Eおよび校正定数比($K_{D,X}$)_Eの作表化を行い、吸収線量計算を簡単にしたものである。また、JARPプロトコル01を厳密に適用し、円筒形電離箱と平行平板形電離箱の両方を線量測定に使用できるようにした。使用できる電離箱は市販の43種類の電離箱である。さらに、測定精度も測定プロトコル01と同等の精度であり、臨床測定において実用上、有用な方法である。この新たな線量測定プロトコルの提案により、全国的に水吸収線量測定法が急速に導入され、患者への投与線量の精度が高まる。また、本測定プロトコルにより、現在社会的な問題となっている過剰照射や過小照射などの誤照射事故防止が可能になる¹⁵⁾。

参考文献

- 1)Attix FH, and Roeshu WC: Radiation Dosimetry Volume I Fundamentals. Academic Press, 340-392, New York(1968)
- 2)Attix FH: Introduction to radiological physics and radiation dosimetry, 231-263, A Wiley - Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, New York, USA(1986)
- 3)Kase KR, Bjarngard BE, and Attix FH: ACADEMIC PRESS, INC. New York, USA(1987)
- 4)Khan FM: The physics of radiation therapy, WILLIAMS & WILKINS, USA(1984)
- 5)日本医学物理学会：放射線治療における高エネルギー電子線の吸収線量の標準測定法 . 通商産業研究社 , 東京 , (1974).
- 6)川島勝弘 : 放射線治療のための線量測定 , その 1 光子エネルギーの決定法 . 放治システム研究 , 2 , 17-23 , (1985).
- 7)日本医学物理学会 : 外部放射線治療における高エネルギー X 線および電子線の吸収線量の標準測定法 . 通商産業研究社 , 東京 , (1986).
- 8)Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, et al.: AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. Med Phys, 26(9) 1847-1870(1999)
- 9)IAEA: The use of plane-parallel ionization chambers in high-energy electron and photon beams, An international code of practicee for dosimetry, TRS 381, IAEA Vienna(1997)
- 10)IAEA: Absorbed dose determination in external beams radiotherapy: An international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water, TRS 398, IAEA Vienna(2001)
- 11)日本医学物理学会編 : 外部放射線治療における吸収線量の標準測定法(標準測定法 01). 通商産業研究社 , 東京 , (2002).
- 12)ICRU Report 24: Determination of absorbed dose in a patient irradiated by beams of X or Gamma rays in radiotherapy Procedures. International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, D.C. U.S.A(1976)
- 13)川島勝弘 , 星野一雄 , 平岡 武 : 放射線治療のための線量測定 , その 3 空洞電離箱による吸収線量の測定 , 放治システム研究 , 3 , 27-36 , (1986).
- 14)熊谷孝三 , 石松健二 , 大塚辰也 , 他 : 高エネルギー電子線治療の線量測定マニュアル . 日放技学誌 , 47(9), 1670-1680 , (1991).
- 15)熊谷孝三 : 医療用電子線の吸収線量評価の高度化に関する研究 . 原子核研究 , 49(1), 65-75 , (2004).

4 . 放射線治療における吸収線量測定パラメータの評価と問題点

posium

荒木不次男

熊本大学医学部保健学科

緒 言

新しい吸収線量測定プロトコルとして、「外部放射線治療における吸収線量の標準測定法(標準測定法 01 (JSMP-01))」¹⁾が、2002年 9 月に日本医学物理学会から刊行された。JSMP-01は標準測定法86(JARP-86)²⁾を大幅に改訂したものであり、国際原子力機関International Atomic Energy Agency(IAEA)Technical Report Series No.39(TRS-398)³⁾に準拠している。JARP-86との大きな相違は、新しくコバルト吸収線量校正定数 $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ を導入した点である。このほかに、乾燥空気に対する \bar{W}_{air}/e 値の採用、光子および電子線における線質表示の変更、質量衝突阻止能比などの物理定数の見直しや新しく線質変換係数 k_Q を導入した。しかしながら、わが国においては $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ の国家標準の供給が未だ確立されておらず、当分の間は暫定的にコバルト照射線量校正定数 N_c から $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ を計算しなければならない。したがって、基本的にはJARP-86と同様に照射線量校正によるもので、吸収線量への変換に必要なビルドアップキャップに対する補正係数や質量衝突阻止能比などの多くの物理データの不確定度を伴う。

JSMP-01では、 $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ を算出するためにいろいろな電離箱について校正定数比 $k_{D,X}$ を与えている。光子の線量測定においては、水ファントムに限定されているこ

とを除けばJARP-86に比べて煩雑さは幾分軽減されている。一方、電子線の線量測定では、低エネルギー領域(線量半価深 $R_{50} < 4.0\text{cm}$)で平行平板形電離箱の使用に限定しており、JARP-86に比べて煩雑である。このような理由で、各施設で十分に普及していないのが現状である。

本報告では、最初にJSMP-01で見直された質量衝突阻止能比と \bar{W}_{air}/e 値に關係する線量測定上の精度(不確かさ)について言及する。次に、平行平板形電離箱の補正係数 $k_{att} \times k_m$ と $P_{wal}(^{60}\text{Co})$ に対するJSMP-01の推奨値を検証する。米国医学物理学会American Association of Physicists in Medicine(AAPM)Task Group 51(TG-51)⁴⁾ やIAEA TRS-398では、これらの補正係数の不確定度が大きいことからコバルト照射線量校正でなく、高エネルギー電子線による円筒形電離箱との比較校正を推奨している。本報告では、円筒形電離箱との比較校正から平行平板形電離箱の $k_{att} \times k_m$ と $P_{wal}(^{60}\text{Co})$ を実験的に評価し、JSMP-01の推奨値と比較する。最後に、わが国の三次線量標準機関であった旧医療用線量標準九州地区センターと、国際的に線量トレーサビリティを持ったカナダの一次線量標準機関であるNRCC(National Research Council Canada)との N_c と $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ の国際比較⁵⁾について言及する。

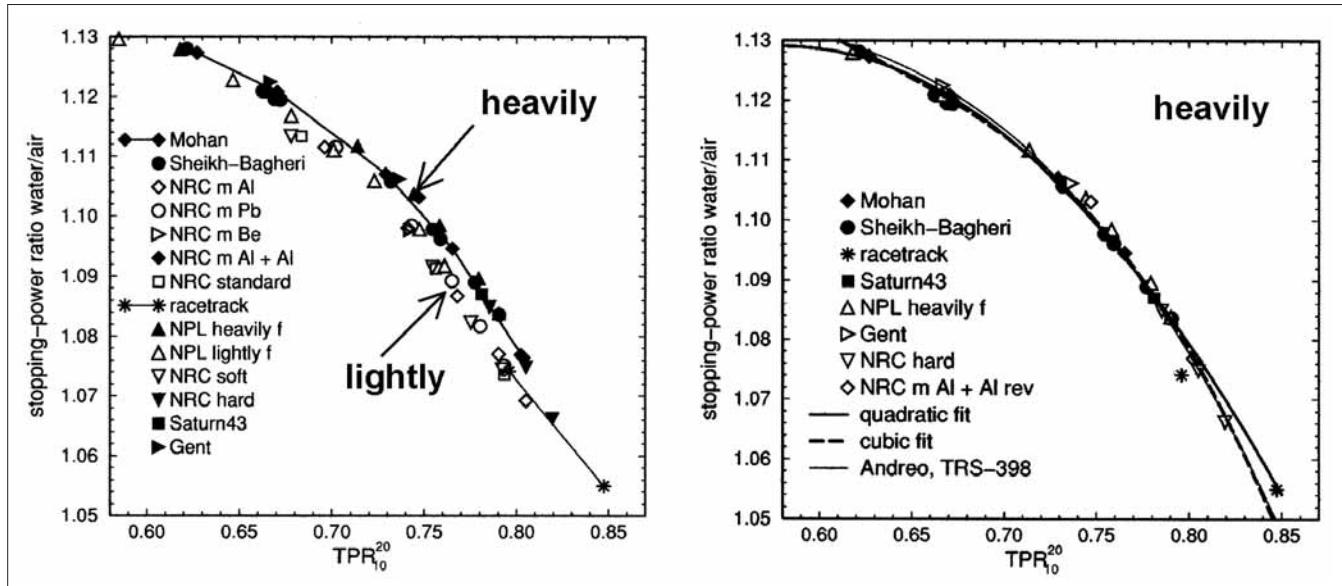


Fig. 1 $TPR_{20,10}$ と阻止能比の関係(Ref. 6)(a)厚いフィルタあるいは薄いフィルタを用いた加速器,(b)厚いフィルタを用いた加速器)

a b

1. 平均制限質量衝突阻止能比 (Mean restricted collision mass stopping power ratios or Spencer-Attix stopping power ratios)

ここでは、空気に対する水の平均制限質量衝突阻止能比を簡略的に“阻止能比”として表現する。

1-1 光子線における阻止能比

JSMP-01では水吸収線量および線質変換係数は次式で与えられている。

$$D_w^Q = M_Q k_Q N_{D,w}^{^{60}\text{Co}} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$k_Q(TPR_{20,10}) = \frac{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}}]_{TPR_{20,10}}}{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w P_{\text{wall}} P_{\text{cav}} P_{\text{dis}} P_{\text{cel}}]_{\text{Co}}} \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 D_w^Q は線質 Q の基準気圧・温度条件(22°C , 1 atm)での水吸収線量(Gy)で、 M_Q はすべての補正係数を含んだ測定電荷(C)である。 k_Q において、 $(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w$, P_{wall} , P_{cav} , P_{dis} , P_{cel} はそれぞれ空気に対する水の平均制限質量阻止能比、電離箱壁材の水との不等価性に対する補正係数、電子フルエンス擾乱補正係数(空洞補正係数), 变位補正係数, 中心電極の空気不等価に対する補正係数を表す。

k_Q の算出で最も重要なものは阻止能比であり、大部分はこれに依存する。IAEA TRS-398とJSMP-01では、 k_Q の算出に線質指標として水の深さ20cmと10cmの組織ファントム線量比(tissue-phantom ratio, TPR)の比($TPR_{20,10}$)を採用している。一方、AAPM TG-51では加速器ヘッドからの混入電子を除いた光子のみによる深さ10cmの深部量百分率(%dd(10))を線質指標としている。Fig. 1(a)(b)にいろいろな光子線に対する $TPR_{20,10}$ と阻止能比の関係⁶⁾を示す。 $TPR_{20,10}$ と阻止能

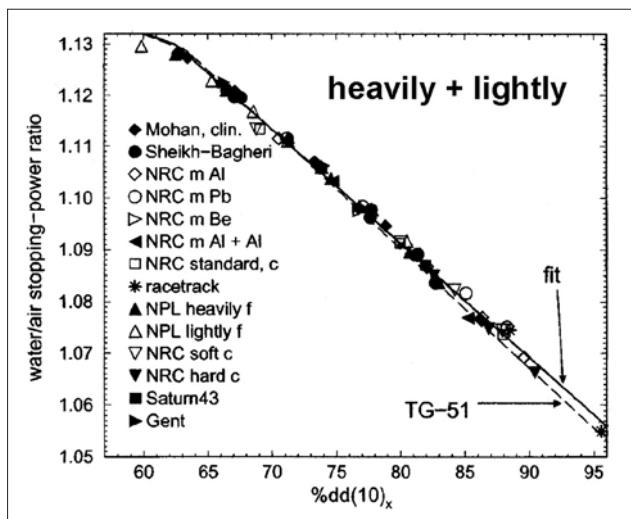


Fig. 2 %dd(10)と阻止能比の関係(Ref. 6)

比はモンテカルロ計算から得られている。Fig. 1(a)は厚いフィルタ(heavily)と薄いフィルタ(lightly)を用いた場合の阻止能比の違いを示す。ここで、厚いフィルタは臨床で使用される加速器の平坦度フィルタに相当する。同一 $TPR_{20,10}$ において、薄いフィルタでは厚い場合に比べて約0.5~1%阻止能比が小さい。すなわち、 $TPR_{20,10}$ の線質指標を用いた場合は、フィルタ厚によって阻止能比に約0.5~1%の違いを生じる。Fig. 1(b)は厚いフィルタについて示しており、この場合は $TPR_{20,10}$ と阻止能比は良い相関関係を示す。次に、AAPM TG-51で採用している%dd(10)と阻止能比の関係⁶⁾をFig. 2に示す。%dd(10)と阻止能比はモンテカルロ計算から得られている。%dd(10)では、フィルタ厚に関係なく阻止能比と良い相関を示している。

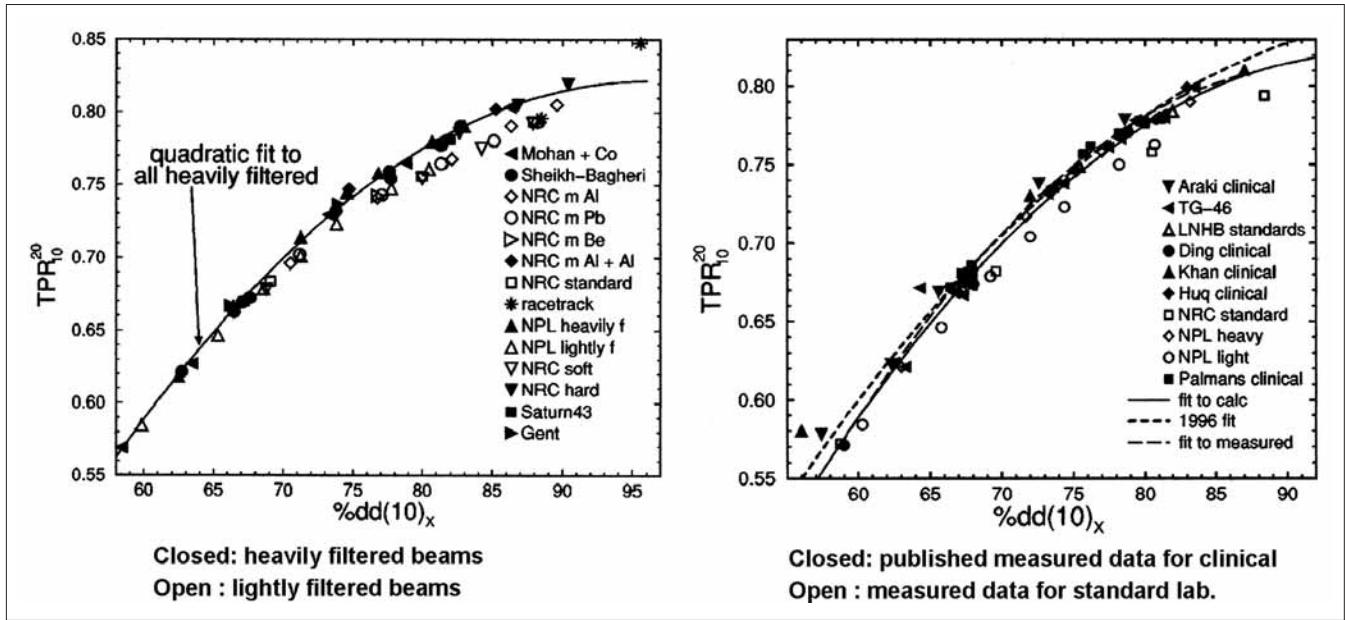


Fig. 3 $TPR_{20,10}$ と $\%dd(10)$ の関係(Ref. 6) (a) Fig. 1 , 2 をもとに同一阻止能比に対してプロット ,(b) $TPR_{20,10}$ と $\%dd(10)$ の測定値をもとにプロット)

a | b

Fig. 3(a) は Fig. 1, 2 をもとに、同一阻止能比に対してプロットされた $TPR_{20,10}$ と $\%dd(10)$ の関係⁶⁾ を示す。一方、Fig. 3(b) は $TPR_{20,10}$ と $\%dd(10)$ の測定値をもとにプロットされている⁶⁾。Fig. 3(a)において、厚いフィルタを持つ光子線では $TPR_{20,10}$ と $\%dd(10)$ にはほぼ相関関係にある。同様に、Fig. 3(b)においても $TPR_{20,10}$ と $\%dd(10)$ は相関関係にあるが、Fig. 3(a)と比べてバラツキが大きい。この理由が、測定によるバラツキかは明らかでない。計算と測定による $TPR_{20,10}$ と $\%dd(10)$ の関係(Fig. 3b)は、厚いフィルタでは光子エネルギーが低い場合と高い場合で違いがみられるが、その間ではほぼ一致する。一方、薄いフィルタでは Fig. 3(a)(b) の厚いフィルタに対する近似曲線から大きく外れる。

Fig. 4(a)(b) は、水ファントム内での光子および電子の平均エネルギーと $TPR_{20,10}$ および $\%dd(10)$ の関係⁶⁾ を示す。興味あることに、 $TPR_{20,10}$ は平均光子エネルギーと、 $\%dd(10)$ では平均電子エネルギーと良い相関を示している。すなわち、水ファントム内の電子線スペクトルは阻止能比と密接に関係しており、阻止能比の決定においては $\%dd(10)$ が $TPR_{20,10}$ よりも線量指標として適しているといえる。通常の加速器では、平坦度フィルタを所有しているため $TPR_{20,10}$ と $\%dd(10)$ のどちらを用いても臨床的には問題にならないが、平坦度フィルタがないものや薄いフィルタをもった加速器では $\%dd(10)$ の使用が望ましい。

Fig. 5 は Varian Clinac 2100C の 4MV と 10MV-X 線において、モンテカルロ計算と JSMP-01 に従って求めた阻止能比の比較⁷⁾ を示す。照射野サイズや深さによる

阻止能比の変化はわずかであり、ビルドアップ領域を除けば JSMP-01 による阻止能比と約 1% 以内で一致する。したがって、光子の阻止能比は、基準照射野 $10 \times 10\text{cm}^2$ で水の深さ 10cm における値を代表値として用いることができる。

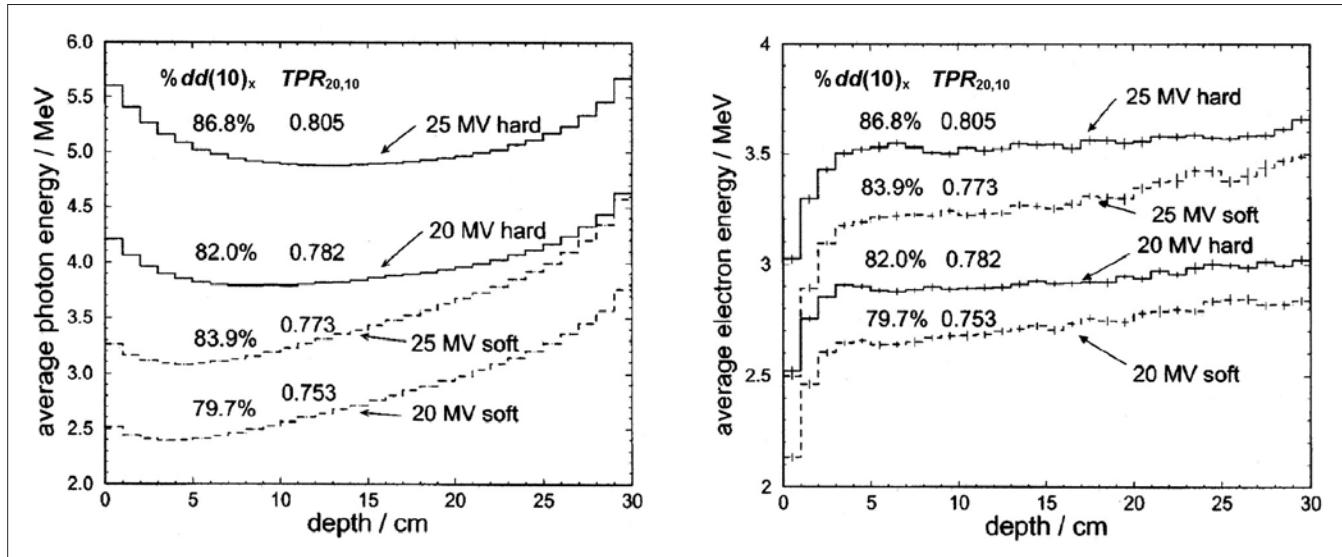
1-2 電子線における阻止能比

吸収線量プロトコルにおける電子線の阻止能比は、飽和散乱が成立するような大きな照射野(broad beam)でモンテカルロ計算から得られている^{8, 9)}。JSMP-01 では校正点の吸収線量は、 $R_{50} \leq 7.0\text{cm}$ で照射野 $10 \times 10\text{cm}^2$ が推奨されている。したがって、これ以下の小さな照射野(narrow beam)においては、プロトコルにおける阻止能比との差を検証しておく必要がある。

Fig. 6 は 6MeV と 13MeV 電子線において、照射野 $10 \times 10\text{cm}^2$ と $2 \times 2\text{cm}^2$ の深部量百分率($\%dd$)曲線¹⁰⁾ を示したものである。6MeV に比べて 13MeV では照射野サイズに依存して $\%dd$ の違いが顕著である。すなわち、照射野 $2 \times 2\text{cm}^2$ では散乱成分(低エネルギー電子線)が少なく、水ファントム内での平均電子線エネルギーが増加していると考えられる。Fig. 7 は水ファントム内における阻止能比¹⁰⁾ を示す。照射野サイズによる阻止能比の差は、 R_{50} 前後で大きくなるが、約 1% 以内である。

以上の結果から、 $\%dd$ 測定においては次式を用いることができる。

$$\begin{aligned} \%dd(d, s_0, f) &= 100 \cdot \frac{D(d, s_0)}{D_r(s_0)} \\ &= 100 \cdot \frac{[M]_d}{[M]_{d_{max}}} \cdot \frac{[(\bar{L}/\rho)_{air}^w]_{d, s_0}}{[(\bar{L}/\rho)_{air}^w]_{d_{max}, s_0}} \approx 100 \cdot \frac{[M]_d}{[M]_{d_{max}}} \cdot \frac{[(\bar{L}/\rho)_{air}^w]_{d_{max}, s_0=10}}{[(\bar{L}/\rho)_{air}^w]_{d_{max}, s_0=10}} \end{aligned} \quad (3)$$

Fig. 4 光子および電子の平均エネルギーとTPR_{20,10}および%dd(10)_xの関係(Ref. 6)

a b

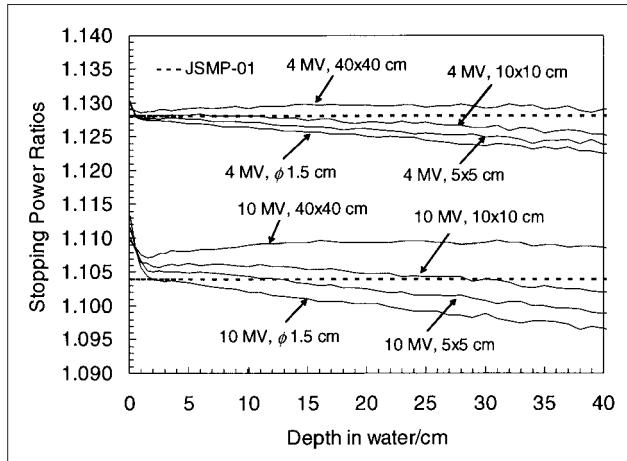
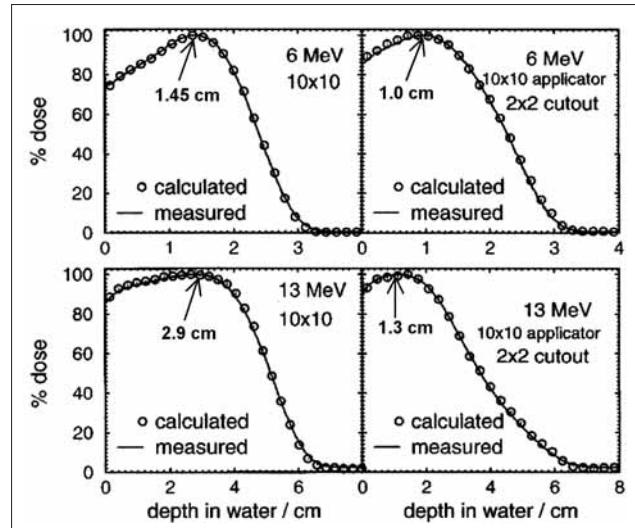
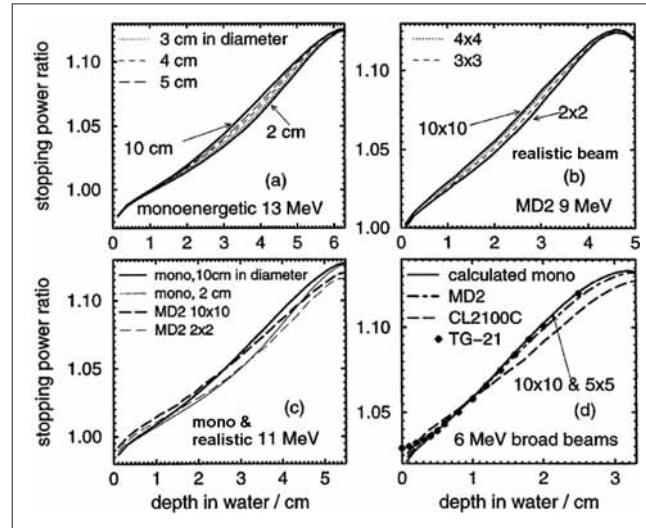
Fig. 5 モンテカルロ計算から求めた4MVと10MV-X線($SSD=100\text{cm}$)の阻止能比(Ref. 7)Fig. 6 6MeVと13MeV電子線における照射野 $10 \times 10\text{cm}^2$ と $2 \times 2\text{cm}^2$ の深部量百分率(%dd)曲線(Ref. 10)

Fig. 7 電子線における水ファンタム内の阻止能比(Ref. 10)

ここで, d と d_{\max} は任意の深さと線量最大深, s_0 と $s_0=10$ は任意の照射野サイズと照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$, f は線源 - ファントム表面間距離である。Narrow beamにおける阻止能比には, 照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$ のものが使用できる。

一方, 出力係数(*OPF*)は次式で得られる。

$$\begin{aligned} OPF(d_{\max}, s_0) &= \frac{D(d_{\max}, s_0)}{D(d_{\max,10}, s_0 = 10)} \\ &= \frac{[M]_{d_{\max}, s_0}}{[M]_{d_{\max,10}, s_0 = 10}} \cdot \frac{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w P_{\text{cav}}]_{d_{\max}, s_0}}{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w P_{\text{cav}}]_{d_{\max,10}, s_0 = 10}} \approx \frac{[M]_{d_{\max}, s_0}}{[M]_{d_{\max,10}, s_0 = 10}} \cdot \frac{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w]_{d_{\max}, s_0 = 10}}{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w]_{d_{\max,10}, s_0 = 10}} \end{aligned} \quad \dots \quad (4)$$

ここで, $d_{\max,10}, s_0$ は基準照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$ の線量最大深である。 d_{\max}, s_0 は任意の照射野の線量最大深で, 阻止能比の評価において照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$ ということを表す。すなわち, 小照射野の*OPF*測定においても, 照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$ の阻止能比が使用できる。Table 1は6MeVと13MeV電子線において, 照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$ (broad)とNarrow beam(f.s.)の阻止能比をそれぞれ用いて, 次式で評価した補正係数の比較¹⁰⁾を示す。

$$f_{\text{broad}} = \frac{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w]_{d_{\max}, s_0 = 10}}{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w]_{d_{\max,10}, s_0 = 10}} \quad \dots \quad (5)$$

$$f_{\text{f.s.}} = \frac{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w]_{d_{\max}, s_0}}{[(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^w]_{d_{\max,10}, s_0 = 10}} \quad \dots \quad (6)$$

照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$ とNarrow beamにおける補正係数の違いは0.5%以内である。したがって, *OPF*測定において照射野 $10 \times 10 \text{cm}^2$ との阻止能比を用いても臨床的には問題にならない。

2. \bar{W}_{air}/e (電子線)と湿度補正

\bar{W}_{air}/e 値の変遷をTable 2に示す。 \bar{W}_{air}/e と湿度補正係数 k_h の関係は次式で表される¹¹⁾。

$$k_h = \frac{m_{\text{air}}}{m_{\text{gas}}} \left(\frac{\bar{W}}{e} \right)_{\text{air}}^{\text{gas}} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{gas}}^{\text{air}} \right]_Q = \left(\frac{\bar{W}}{e} \right)_{\text{air}}^{\text{gas}} \left[(\bar{L})_{\text{gas}}^{\text{air}} \right]_Q \quad \dots \quad (7)$$

ここで, gasは湿潤空気, airは乾燥空気を表す。わが国の国家標準線量は産業総合研究所(産総研)で与えられているが, 産総研におけるコバルト校正では湿度補正が行われていない。したがって, ユーザーに提供されるコバルト校正定数は次式で表される。

$$N_{\text{c,gas}} = X_{\text{air}} / M_{\text{gas}}^{\text{c}} \quad \dots \quad (8)$$

また, 湿度補正を行った場合のコバルト校正定数は次式となる。

$$N_{\text{c,air}} = X_{\text{air}} / (M_{\text{gas}}^{\text{c}} k_h^{\text{c}}) \quad \dots \quad (9)$$

式(8)と(9)から次式が得られる。

$$N_{\text{c,air}} = N_{\text{c,gas}} / k_h^{\text{c}} \quad \dots \quad (10)$$

Table 1 6MeVと13MeV電子線のNarrow beam(f.s.)における阻止能比の補正係数(Ref. 10)

field size/cm ²	13MeV				
	2×2	3×3	4×4	5×5	10×10
d_{\max}/cm	1.3	2.0	2.5	2.7	2.9
f_{broad}	0.970	0.983	0.992	0.996	-
$f_{\text{f.s.}}$	0.967	0.979	0.989	0.994	-

field size/cm ²	6MeV				
	2×2	3×3	4×4	5×5	10×10
d_{\max}/cm	1.0	1.25	1.4	-	1.45
f_{broad}	0.983	0.992	0.998	-	-
$f_{\text{f.s.}}$	0.978	0.989	0.998	-	-

Table 2 \bar{W}_{air}/e 値の変遷

1977 : CCEMRI(電離放射線諮詢委員会)の諮詢案 gas(wet air) : $\bar{W}_{\text{air}}/e = 33.73 \text{J/C}$
1979 : ICRU Report 31の勧告値 dry air : $\bar{W}_{\text{air}}/e = 33.85 \pm 0.15 \text{J/C}$
1984 : ICRU Report 37で阻止能の改訂
1985 : CCEMRIの改訂 dry air : $\bar{W}_{\text{air}}/e = 33.97 \pm 0.05 \text{J/C}$
1986 : 標準測定法86で採用 gas(wet air) : $\bar{W}_{\text{air}}/e = 33.73 \text{J/C}$
2002 : 標準測定法 01で採用 dry air : $\bar{W}_{\text{air}}/e = 33.97 \pm 0.05 \text{J/C}$

一方, ユーザー側の線量測定において吸収線量は次式で求める。

$$D_w^Q = M_{\text{gas}}^Q k_h^Q N_{\text{c,air}} k_{\text{att}} k_m k_{\text{cel}} \left(\frac{\bar{W}}{e} \right)_{\text{air}} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}}^w \prod_i P_i \right]_Q \quad \dots \quad (11)$$

式(10)と(11)から次式が得られる。

$$D_w^Q = M_{\text{gas}}^Q N_{\text{c,gas}} k_{\text{att}} k_m k_{\text{cel}} \left(\frac{k_h^Q}{k_h^c} \right) \cdot \left(\frac{\bar{W}}{e} \right)_{\text{air}} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}}^w \prod_i P_i \right]_Q \quad \dots \quad (12)$$

ここで, k_h は相対湿度10~90%(22°C, 1 atm)において0.9968~0.9985¹¹⁾であり, $k_h^Q/k_h^c = 0.9982 \sim 1.0018$ となる。したがって, この大気条件では k_h^Q/k_h^c は0.18%以下の誤差となり, 式(12)は次式に示すように湿度補正を省略しても問題ない。

$$D_w^Q = M_{\text{gas}}^Q N_{\text{c,gas}} k_{\text{att}} k_m k_{\text{cel}} \left(\frac{\bar{W}}{e} \right)_{\text{air}} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{\text{air}}^w \prod_i P_i \right]_Q \quad \dots \quad (13)$$

3. 平行平板形電離箱のコバルト校正時の擾乱補正係数($k_{\text{att}} \times k_m, P_{\text{wall}}$)

コバルト校正定数による平行平板形電離箱の吸収線量測定では, $k_{\text{att}} \times k_m$ と P_{wall} の不確定度が問題になる。

Table 3 実験的に評価した平行平板形電離箱の $k_{D,X}$ とJSMP-01およびMainegra-Hingら¹³⁾による $k_{D,X}$ の比較(Ref. 12)

Chamber type	JSMP-01	Mainegra-Hing	Measured	Measured	Measured
				JSMP-01	Mainegra-Hing
NACP02-No.1	38.43	38.33	38.16	0.993	0.996
NACP02-No.2	38.43	38.33	38.12	0.992	0.994
Markus-No.1	38.25	38.10	38.05	0.995	0.999
Markus-No.2	38.25	38.10	38.00	0.993	0.997
Advanced Markus-No.1		38.30	38.06		0.994
Advanced Markus-No.2		38.30	38.07		0.994
Exradin A10		37.26			
Roos-No.1		37.89	37.74		0.996
Roos-No.2		37.89	37.81		0.998
PPC40-No.1		37.89	37.55		0.991
PPC40-No.2		37.89	37.58		0.992
Exradin P11	38.12	38.61	38.14	1.000	0.988

これらの補正係数は、次式に示すように $k_{D,X}$ のなかに含まれている。

$$k_{D,X} = k_{att} \cdot k_m \cdot \left(\frac{\bar{W}}{e} \right)_{air} \left[\left(\frac{\bar{L}}{\rho} \right)_{air}^w P_{wall} \right]_{^{60}Co} \quad \dots \dots \dots \quad (14)$$

本報告では、代表的な7種類12個の平行平板形電離箱について、JSMP-01で推奨されている $k_{D,X}$ を実験的に次式から評価した¹²⁾。

$$[k_{D,X}]^{pp} = \frac{[N_c k_{D,X}]^{ref} [M]_{Co}^{ref}}{[N_c]^{pp} M_{Co}^{pp}} \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

ppは平行平板形電離箱、refはJARP標準線量計を表す。Table 3に実験的に求めた $k_{D,X}$ と、JSMP-01およびMainegra-Hingら¹³⁾のモンテカルロ計算による $k_{att} \times k_m$ と P_{wall} から計算した $k_{D,X}$ の比較を示す¹²⁾。実験的に求めた $k_{D,X}$ は、JSMP-01とMainegra-Hingらの値に比べて約1%まで低くなる。各電離箱のシリアル番号による差はほとんどない。

次に、 $k_{att} \times k_m$ と P_{wall} の実験的評価においては、最初に18 MeV電子線による比較校正から $[N_{D,w}]_{8E}$ を次式で求めた。

$$[N_{D,w}(d_c)]_{18E}^{pp} = \frac{[N_c k_{D,X}]^{ref} [Mk_{Co}]_{18E}^{ref}}{M_{18E}^{pp}} \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

そして、 $[N_{D,w}]_{8E}$ から次式で空気吸収線量校正定数 $N_{D,air}$ ^{3, 14)}を求めた。

$$[N_{D,air}]^{pp} = \frac{[N_{D,w}(d_c)]_{18E}^{pp}}{[(\bar{L}/\rho)_{air}^w(d_c)P_{cav}]_{18E}^{pp}} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

最終的に、 $k_{att} \times k_m$ は⁶⁰Coγ線の照射線量校正における $N_{D,air}$ と N_c の関係式、 P_{wall} は⁶⁰Coγ線のJARP線量計との比較校正における $N_{D,air}$ を用いた関係式からそれぞれ次式で評価した¹²⁾。

$$[k_{att} k_m]^{pp} = \frac{[N_{D,air}]^{pp}}{[N_c(\bar{W}_{air}/e)]^{pp}} \quad \dots \dots \dots \quad (18)$$

$$[P_{wall}]_{Co}^{pp} = \frac{[N_c k_{D,X}]^{ref} [M]_{Co}^{ref}}{[N_{D,air}]^{pp} [(\bar{L}/\rho)_{air}^w]_{Co} [M]_{Co}^{pp}} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

Table 4と5に式(18)と(19)から実験的に求めた $k_{att} \times k_m$ と P_{wall} を、JSMP-01およびMainegra-Hingら¹³⁾の計算値との比較で示す¹²⁾。実験的に求めた $k_{att} \times k_m$ は、JSMP-01のNACP02、Markus、Exradin P11との比較において0.2~1.8%低い、平均で $0.990 \pm 0.62\%$ である。NACP02とExradin P11では1%以内であるが、Markusでは平均で1.6%低い。Mainegra-Hingらの計算値との比較においては、本実験値との比は平均で $0.989 \pm 0.53\%$ である。NACP02とAdvanced Markusではシリアル番号によっても1.3%の違いがある。

一方、 P_{wall} はNACP02以外では実験値がJSMP-01に比べ0.5~1%高い。Mainegra-Hingらの比較においても傾向は同じである。NACP02とExradin P11では良く一致するが、Exradin A10では3%も高くなる。Advanced Markusではシリアル番号によって1.3%の相違がある。本実験で求めたNACP02、Roos、PPC40の P_{wall} 値は、Palmら¹⁵⁾とStewartら¹⁶⁾の実験値とほぼ一致する。MarkusではDingら¹⁷⁾の実験値に近い。

以上のように、平行平板形電離箱の $k_{D,X}$ は実験的な分析からJSMP-01やMainegra-Hingらのモンテカルロ計算値と1%以内で一致するが、 $k_{att} \times k_m$ と P_{wall} はJSMP-01、Mainegra-Hingら、TRS-398の推奨値と必ずしも一致しない。また、電離箱によってはシリアル番号による違いがみられる。これらの不一致は平行平板形電離箱の $k_{att} \times k_m$ と P_{wall} 値の不確かさに起因する。

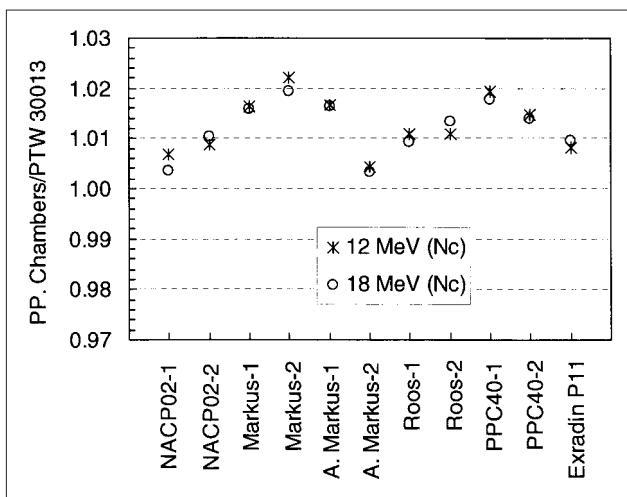
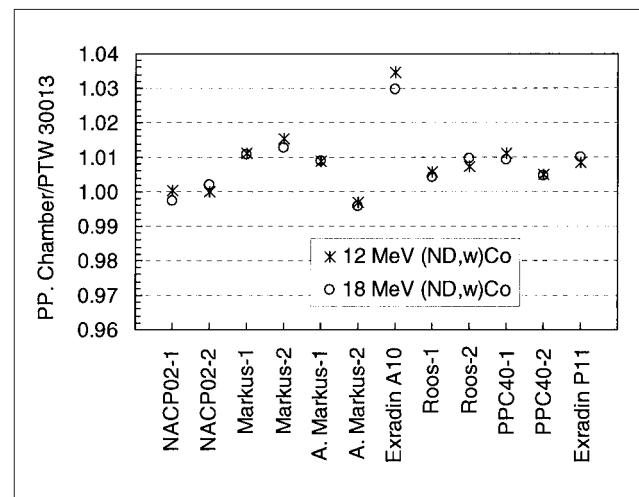
Fig. 8~10はそれぞれ平行平板形電離箱における

Table 4 実験的に評価した平行平板形電離箱の $k_{att} \times k_m$ とJSMP-01およびMainegra-Hingら¹³⁾による $k_{att} \times k_m$ の比較(Ref. 12)

Chamber type	JSMP-01	Mainegra-Hing	Measured	Measured	Measured
				JSMP-01	Mainegra-Hing
NACP02-No.1	0.975	0.976	0.973	0.998	0.997
NACP02-No.2	0.975	0.976	0.966	0.991	0.991
Markus-No.1	0.985	0.985	0.971	0.985	0.985
Markus-No.2	0.985	0.985	0.967	0.982	0.982
Advanced Markus-No.1		0.987	0.972		0.985
Advanced Markus-No.2		0.987	0.985		0.998
Exradin A10		1.006			
Roos-No.1		0.976	0.968		0.992
Roos-No.2		0.976	0.964		0.988
PPC40-No.1		0.976	0.960		0.983
PPC40-No.2		0.976	0.963		0.987
Exradin P11	0.973	0.976	0.965	0.991	0.989

Table 5 実験的に評価した平行平板形電離箱の P_{wall} とJSMP-01およびMainegra-Hingら¹³⁾, Dingら¹⁷⁾, Stewartら¹⁶⁾による P_{wall} の比較(Ref. 12)

Chamber type	JSMP-01	Mainegra-Hing	Measured	Stewart et al.	Ding et al.
NACP02-No.1	1.024	1.021	1.019	1.020(1.024)	(1.028)(1.031)
NACP02-No.2	1.024	1.021	1.025		
Markus-No.1	1.009	1.005	1.019	1.010(1.013)	(1.016)(1.021)
Markus-No.2	1.009	1.005	1.021		
Advanced Markus-No.1		1.008	1.018		
Advanced Markus-No.2		1.008	1.005		
Exradin A10		0.962	0.990		
Roos-No.1	1.010	1.009	1.014	1.016(1.019)	
Roos-No.2	1.010	1.009	1.019		
PPC40-No.1	1.010	1.009	1.017		
PPC40-No.2	1.010	1.009	1.014		
Exradin P11	1.018	1.028	1.027		

Fig. 8 PTW30013電離箱と N_c から求めた平行平板形電離箱の電子線吸収線量の比較(Ref. 12)Fig. 9 PTW30013電離箱と $[N_{D,W}]_o$ から求めた平行平板形電離箱の電子線吸収線量の比較(Ref. 12)

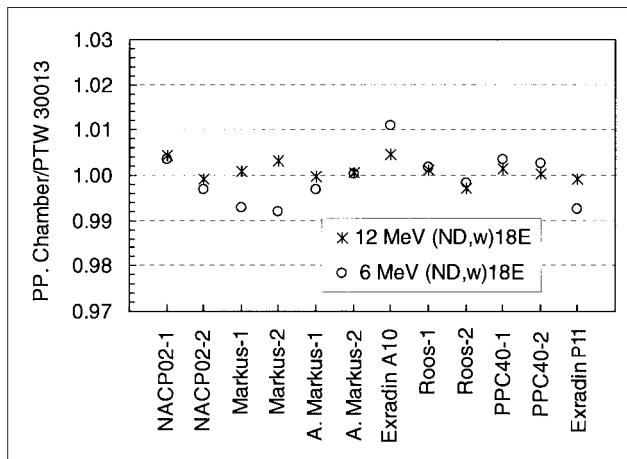


Fig. 10 PTW30013電離箱と $[N_{D,w}]_{8E}$ から求めた平行平板形電離箱の電子線吸収線量の比較(Ref. 12)

N_c , $[N_{D,w}]_b$, $[N_{D,w}]_{8E}$ から求めた電子線の吸収線量で, PTW30013電離箱との比較を示す¹²⁾. 図から明らかなように, N_c から求めた吸収線量は平行平板と円筒形電離箱で2%の違いが見られ, $[N_{D,w}]_{8E}$ では1%以内である. したがって, 平行平板形電離箱の校正は, AAPM TG-51やIAEA TRS-398で推奨している電子線を用いたファーマ型電離箱との比較校正が望まれる.

4. 線量校正定数 N_c , $N_{D,w}^{60\text{Co}}$, $k_{D,X}$ の国際比較

旧医療用線量標準九州地区センター(I)と(II)の三次標準線量計を, 国際的に線量トレーサビリティを持つたカナダの一次線量標準機関であるNRCCに郵送し, 一次線量標準器で校正された一次線量標準コバルト線源で照射線量と水吸収線量の校正を受けた⁵⁾. 三次標準線量計の内訳は, 九州地区センター(I)の応用技研のAE-132電位計(S/N: 1102009)とC-110電離箱2本(S/N: 607, 986), 九州地区センター(II)の応用技研のAE-132電位計(S/N: 1302019)とC-110電離箱1本(S/N: 550)である. 校正に依頼した3本の電離箱の N_c の精度は, 放射線医学総合研究所(放医研)との毎年の相互比較において0.3%(1 σ)以内で維持されている.

Table 6は九州地区センターとNRCCの N_c の比較を示す. 3本の電離箱は0.6%以内の一致であり, 平均値は 0.9965 ± 0.0023 であった. 九州地区センターの N_c はNRCCに比べて0.4%だけ小さい. 同様に, $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ の比較をTable 7に示す. 九州地区センターの $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ は, JSMP-01に従って N_c から計算して求めた値であり, NRCCの値と0.2%以内で一致した. 3本の電離箱の平均値は 0.9991 ± 0.0013 であった. NRCCでの線量計校正における N_c と $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ に対する不確定度(1 σ)は, それぞれ0.5%¹⁸⁾, 同様に放医研の校正における N_c は0.75%¹⁹⁾である. したがって, 九州地区センターとNRCCの N_c と $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ は, それぞれ不確定度以内で一致する.

Table 6 九州地区センターとNRCCの N_c の比較(N_c の不確定度 $1\sigma=0.5\%$ (Ref. 5)) 'm.u.' indicates meter units

Ion Chamber	S/N	N_c Kyushu R/m.u.	N_c NRCC R/m.u.	Kyushu/NRCC N_c
C-110	550	1.110	1.116	0.9945
C-110	607	1.054	1.055	0.9989
C-110	986	1.096	1.100	0.9960

NRCC : National Research Council Canada

Table 7 九州地区センターとNRCCの $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ の比較($N_{D,w}^{60\text{Co}}$ の不確定度 $1\sigma=0.5\%$ (Ref. 5)) 'm.u.' indicates meter units

Ion Chamber	S/N	$N_{D,w}^{60\text{Co}}$ Kyushu Gy/m.u.	$N_{D,w}^{60\text{Co}}$ NRCC Gy/m.u.	Kyushu/NRCC $N_{D,w}^{60\text{Co}}$
C-110	550	1.060E-02	1.062E-02	0.9979
C-110	607	1.006E-02	1.006E-02	1.0005
C-110	986	1.047E-02	1.048E-02	0.9989

NRCC : National Research Council Canada

Table 8 九州地区センターとNRCCの $k_{D,X}=N_{D,w}^{60\text{Co}}/N_c$ の比較(Ref. 5) 'm.u.' indicates meter units

Ion Chamber	S/N	$k_{D,X}$ Kyushu Gy/Ckg ⁻¹	$k_{D,X}$ NRCC Gy/Ckg ⁻¹	Kyushu/NRCC $k_{D,X}$
C-110	550	37.02	36.89	1.0035
C-110	607	37.02	36.96	1.0015
C-110	986	37.02	36.91	1.0029

NRCC : National Research Council Canada

次に, $k_{D,X}$ の比較をTable 8に示す. 九州地区センターの $k_{D,X}$ は, JSMP-01に従って計算した値である. 九州地区センターとNRCCの $k_{D,X}$ は0.4%以内の一一致であり, 3本の電離箱の平均値は 1.0026 ± 0.0010 であった.

最近, 高橋ら²⁰⁾は医療用線量標準東京地区センターの三次標準線量計と, AAPMから認定を受けた二次線量標準校正センター(ADCL)であるウィンスコンシン大学(UWRCL: University of Wisconsin, Radiation Calibration Laboratory)との N_c と $N_{D,w}^{60\text{Co}}$ の校正結果を報告している. 彼らの三次標準線量計は, 放医研で毎年校正を受けており, 九州地区センターの N_c と同様な精度で維持されている. さらに, 東京地区センターと九州地区センターの電離箱は同種のJARP線量計であり, JSMP-01では同じ $k_{D,X}$ となる. したがって, 本研究では東京地区センターとUWRCLの比較, および九州地区センターとNRCCの比較から間接的にUWRCLとNRCCの N_c , $N_{D,w}^{60\text{Co}}$, $k_{D,X}$ の比較を行った. Table 9にUWRCLとNRCCにおける N_c , $N_{D,w}^{60\text{Co}}$, $k_{D,X}$ の比較を示す. 九州地区センターとNRCCの比較は, 3本の電離箱の平均値である. NRCCに対するUWRCLの N_c , $N_{D,w}^{60\text{Co}}$, $k_{D,X}$ の比は, それぞれ0.9995, 1.0045, 1.0051

であった。NRCCとUWRCLの線量計校正における不確定度(1σ)は、それぞれ0.5%と0.6%²¹⁾であり、いずれも不確定度以内で一致する。

以上の結果から、水吸収線量の国家標準が確立されていないわが国においても、JSMP-01の暫定的な理論計算による $N_{D,w}^{^{60}\text{Co}}$ を用いて問題ないことが確認された。

5.まとめ

- (1)光子線の阻止能比評価には、%dd(10)による線質表示が望ましいが、厚いフィルタを持った光子線では $TPR_{20,10}$ でも問題はない。
- (2)光子線の阻止能比は、照射野と深さで変化するが通常の使用範囲では約1%以下である。
- (3)電子線の阻止能比は、照射野サイズに依存して変化するが、%ddやOPFの評価においてはBroad beamで評価された阻止能比を用いても誤差は小さい。
- (4)産総研とユーザーでの測定における湿度補正に伴う誤差は0.18%以下(22°C, 1 atm)である。

参考文献

- 1)日本医学物理学会編：外部放射線治療における吸収線量の標準測定法。通商産業研究社、東京、(2002)
- 2)日本医学放射線学会物理部会編：放射線治療における高エネルギーX線および電子線の吸収線量の標準測定法。通商産業研究社、東京、(1986)
- 3)IAEA, International Atomic Energy Agency: Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy: An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water, Technical Report Series No. 398, IAEA, Vienna, (2000)
- 4)Almond PR, Biggs PJ, Coursey BM, et al.: AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. Med Phys, 26(9), 1847-1870, (1999)
- 5)荒木不次男, 熊谷孝三：医療用標準線量の国際比較 - 九州地区センターとカナダ(NRCC)の相互比較 - . 日放腫会誌, 17(3), 155-159, (2005).
- 6)Kalach NI, and Rogers DW: Which accelerator photon beams are "clinic-like" for reference dosimetry purposes? Med Phys, 30(7), 1546-1555, (2003)
- 7)荒木不次男：医用加速器Varian Clinac 2100Cのモンテカルロシミュレーション - 4 MVと10 MV-X線の線量分布、エネルギースペクトル、角度分布、フルエンス分布、平均エネルギー分布の分析 - . 日放腫会誌, 17(2), 53-63, (2005).
- 8)Burns DT, Ding GX, and Rogers DW: R_{50} as a beam quality specifier for selecting stopping-power ratios and reference depths for electron dosimetry. Med Phys, 23(3), 383-388, (1996)
- 9)Ding GX, Rogers DW, and Mackie TR: Calculation of stopping power ratios using realistic clinical electron beams. Med Phys, 22(5), 489-501, (1995)
- 10)Zhang GG, Rogers DW, Cygler JE, et al.: Effects of changes in stopping-power ratios with field size on electron beam relative output factors. Med Phys, 25(9), 1711-1716, (1998)
- 11)Rogers DW, and Ross CK: The role of humidity and other correction factors in the AAPM TG-21 dosimetry protocol. Med Phys, 15(1), 40-48, (1988)
- 12)荒木不次男, 熊谷孝三, 吉浦隆雄, 他：標準測定法01による平行平板形電離箱の校正点吸収線量の評価。日本医学物理学会誌, 25(3), 114-123, (2005).
- 13)Mainegra-Hing E, Kawrakow I, and Rogers DW: Calculations for plane-parallel ion chambers in ^{60}Co beams using the EGSnrc Monte Carlo code. Med Phys, 30(2), 179-189, (2003)
- 14)IAEA, International Atomic Energy Agency: The use of plane parallel ionization chambers in high energy electron and photon beams: An International Code of Practice for Dosimetry, Technical Report Series No. 381, IAEA, Vienna, (1997)
- 15)Palm A, Mattsson O, and Andreo P: Calibration of plane-parallel chambers and determination of P_{wall} for the NACP and Roos chambers for ^{60}Co -ray beams. Phys Med Biol, 45(4), 971-981, (2000)
- 16)Stewart KJ, and Seuntjens JP: Comparing calibration methods of electron beams using plane-parallel chambers with absorbed-dose to water based protocols. Med Phys, 29(3), 284-289, (2002)
- 17)Ding GX, and Cygler JE: Measurement of P_{repl} P_{wall} factors in electron beams and in a ^{60}Co beam for plane-parallel chambers. Med Phys, 25(8), 1453-1457, (1998)
- 18)NRC Calibration Report for an AE-132 electrometer and a C-110 ionization chamber, NRC, Ottawa, Canada, (2004)
- 19)福村明史, 遠藤真広, 金井達明, 他：新しい線量計校正トレーサビリティシステムとその不確かさの評価, 日放腫会誌, 16, 99, (2004). (抄録)
- 20)高橋 豊, 伊藤 彰, 保科正夫：医療用標準線量の国際比較, 1. 米国(ウィスコンシン大学)との相互比較. 日本医学物理学会大会報文集, 24, Sup.2, 200-201, (2004).
- 21)UWRCL Calibration Report for an AE-132 electrometer and a C-110 ionization chamber, UWRCL, Wisconsin, USA, (2004)

Table 9 UWRCLとNRCCの N_c , $N_{D,w}^{^{60}\text{Co}}$, $k_{D,X}$ の比較(Ref. 5)

	N_c	$N_{D,w}^{^{60}\text{Co}}$	$k_{D,X}$
Kyushu/NRCC	0.9965	0.9991	1.0026
Tokyo ^a /UWRCL	0.9970	0.9946	0.9976
UWRCL/NRCC	0.9995	1.0045	1.0051

NRCC : National Research Council Canada

UWRCL : University of Wisconsin, Radiation Calibration Laboratory

^aData of Takahashi et al(Ref.20)

- (5)平行平板形電離箱の $k_{D,X}$ は、実験値がJSMP-01に比べ平均で0.6%低く、 $k_{att} \times k_m$ は実験値がJSMP-01に比べ0.2~1.8%低い。 P_{wall} では実験値がJSMP-01に比べ約1%高い。したがって、平行平板形電離箱の校正是電子線による比較校正が推奨される。
- (6)日医療用線量標準九州地区センターの三次線量標準と、カナダの一次線量標準機関であるNRCCとの N_c , $N_{D,w}^{^{60}\text{Co}}$, $k_{D,X}$ の比は不確定度(1σ)内で一致した。