リニアック標準計測法24の解説

東京都立駒込病院 放射線科治療部 放射線物理室
安居 虹希

Outline

1. リニアック標準計測法24の概要
2. 水吸収線量校正に使用する機材
3. 光子線計測
4. 電子線計測
5. 相互校正

Outline

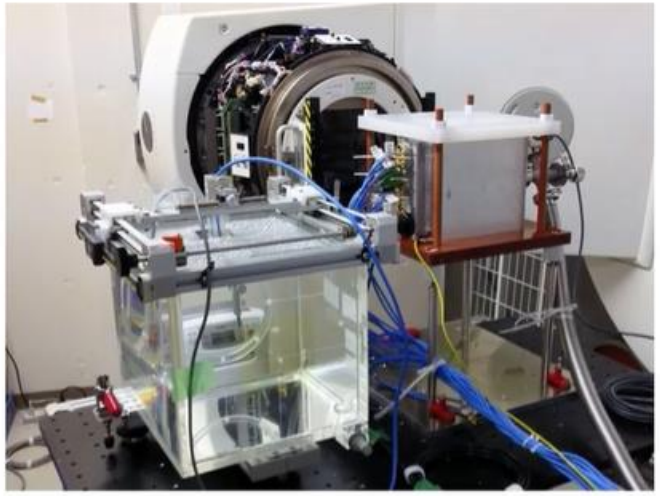
1. リニアック標準計測法24の概要
2. 水吸収線量校正に使用する機材
3. 光子線計測
4. 電子線計測
5. 相互校正

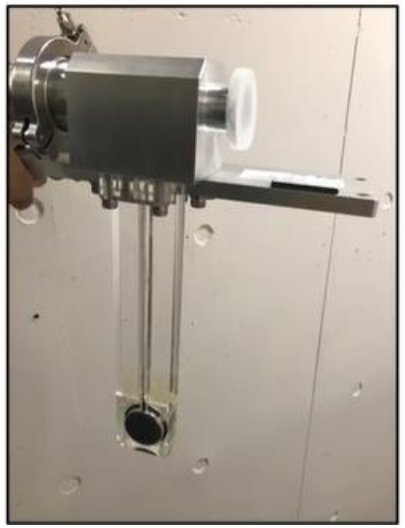
リニアック校正

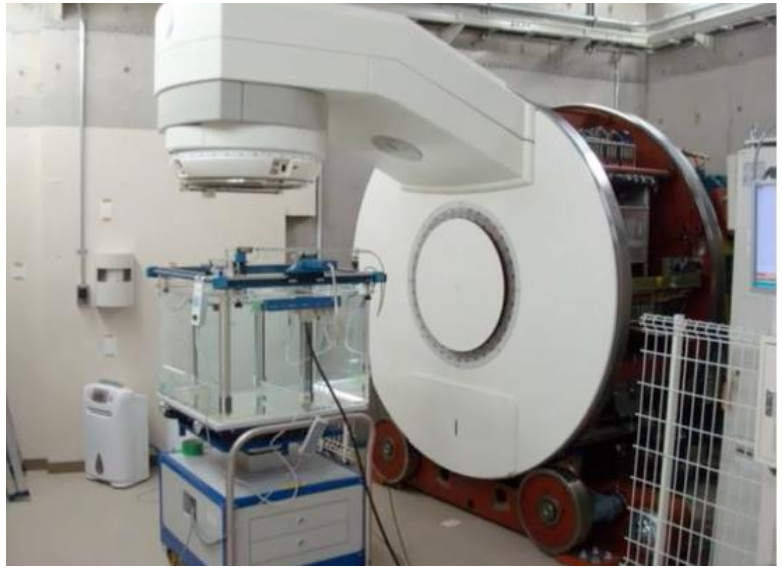
^{60}Coではなく産総研にあるリニアックにより電離箱を校正

これまで必要であった線質変換係数は不要となり

水吸収線量の不確かさは大幅に低減







線質変換係数の不確かさが最も大きい

表 3.4　^{60}Coγ 線で校正された電離箱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 (%)
ステップ 1：線量標準機関	
特定二次標準器の校正定数 $N_{D,w}$	0.40
特定二次標準器による基準 γ 線場の決定	0.18
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の測定値	0.27
ステップ 1 の合成不確かさ	0.52
ステップ 2：ユーザが使用する高エネルギー光子線	
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3
基準条件の設定	0.4
モニタ設定値に対する表示値 M_{raw}	0.6
補正係数 k_l	0.4
線質変換係数 k_Q（計算値）	1.0
ステップ 2 の合成不確かさ	1.4
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ（ステップ 1+2）	1.5
相対拡張標準不確かさ（包含係数 $k=2$ ）	2.9

水吸収線量計測において最も大きな不確かさを持つのが**線質変換係数**

k_Qを使用しなければ水吸収線量の不確かさはより低減できる

不確かさ低減に関する勧告

「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うえで，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」

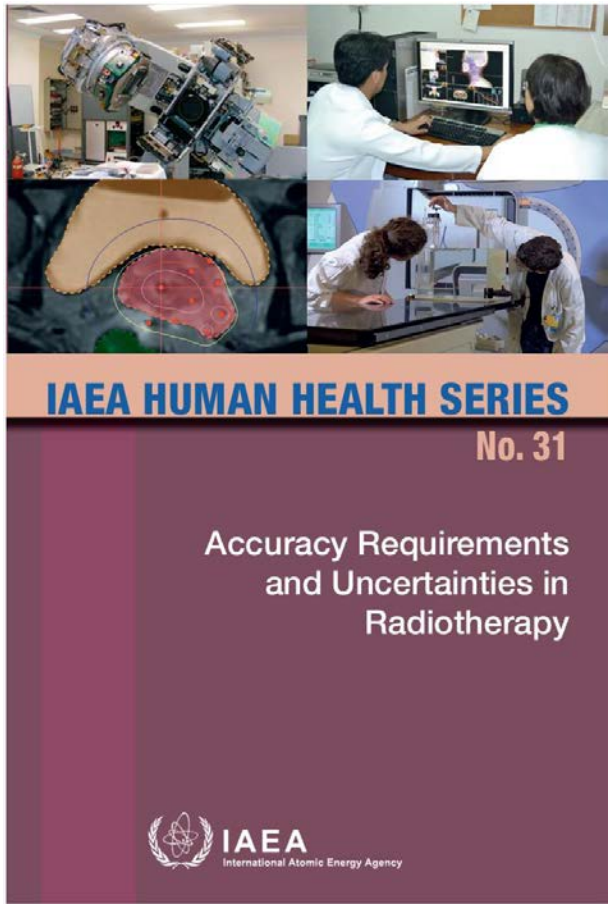
基準条件における水吸収線量計測の

不確かさを相対標準不確かさで**1%以内に**

Table 1. Estimates of Uncertainty (in terms of one standard deviation) in absolute dose in the patient for the complete treatment procedure using megavoltage photons, today and in the future.

Source of Uncertainties	Uncertainty at Present (%)	Uncertainty in Future (%)
Dose at the calibration point in water	2.5	1.0
Additional uncertainty for other points	0.6	0.3
Beam Monitor stability	1.0	0.5
Beam flatness	1.5	0.5
Patient data	1.5	1.0
Patient set up and organ motion	2.5	2.0
Overall (excluding dose calculation)	4.3	2.5
Dose calculation algorithm (multiple levels)	1.0 / 2.0 / 3.0 / 5.0	1.0 / 2.0 / 3.0
TOTAL	4.4 / 4.7 / 5.2 / 6.6	2.7 / 3.2 / 3.9

AAPM Report No.85



IAEA Human Health Series No.31

標準計測法12と大きく変わったところは？

線量決定式の変化

$$D_{\mathrm{w,Q}} = M_{\mathrm{Q}} \times N_{\mathrm{D,w,Q}}$$

線質変換係数$k_{\mathrm{Q,Q_0}}$が不要になった

測定点の変化

円筒形電離箱：光子線・電子線限らず**幾何学的中心**で測定

平行平板形電離箱：入射窓・防浸キャップは**水等価厚**に換算

基準線質の変化に伴う用語の変化

標準計測法12

基準線質：^{60}Co

どこで使用しても線質は
同じであるため$\boldsymbol{Q_0}$と記載

リニアック標準24

基準線質：リニアック

標準機関ごとに線質は
異なるため$\boldsymbol{Q_{\mathrm{SDL}}}$と表記
※SDL: Standard Dose Laboratory

^{60}CoについてはQ_{Co}と表記

Outline

1. リニアック標準計測法24の概要

2. 水吸収線量校正に使用する機材

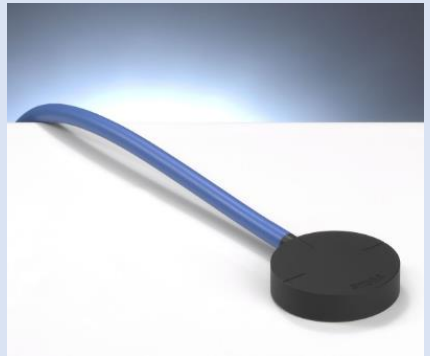
3. 光子線計測

4. 電子線計測

5. 相互校正

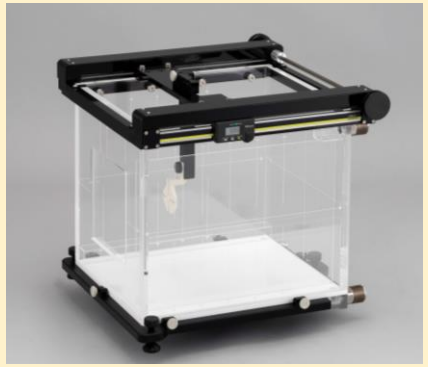
線量計測に使用する機材

電離箱



電位計

水ファントム



気温計・気圧計

電離箱を選定する基準

リファレンスクラスを満たす電離箱を使用すべき！

項目	Addendum for Photon	Addendum for Electron
電離箱の安定化	ビームオンから電離箱が安定するまでのMUあたりの読み取り値の変化が0.5%未満	
P_{leak}	読み取り値の0.1%未満 (0.999<P_{leak}<1.001)	
P_{pol}	補正が0.4%未満 (0.996<P_{pol}<1.004) エネルギーによる変化が0.5%未満	変化が2%未満
$P_{\mathrm{ion}} = 1 + C_{\mathrm{init}} + C_{\mathrm{gen}} D_{\mathrm{pp}}$		
一般	P_{ion}とdose per pulseの関係が線形	
初期	TG-51基準条件で初期再結合が0.2%未満, $C_{\mathrm{init}} < 0.002$	
極性依存	両極性の初期再結合補正の差が0.1%未満	
長期安定性	校正定数の変化が0.3%未満 (2年間)	円筒形：校正定数の変化が0.3%未満 (2年間) 平行平板形：円筒形と相互校正を実施，または使用時は安定性のモニタリングを実施

AAPM TG-51 Addendum (Med. Phys 2014)
AAPM WGTG51 Report 385 (Med. Phys 2024)

リファレンスクラスをみたす円筒形電離箱

Farmer	Scanning	micro
NE2571	PTW233642	IBA CC01
NE2581	PTW31010	Exradin A14SL
NE2611	PTW31013	Exradin A16
Exradin A12	IBA CC25	PTW31014
Exradin A12S	IBA CC13	PTW31016
Exradin A19	IBA CC08	
PTW30001	IBA CC04	
PTW30010	Exradin A1SL	
PTW30012	Exradin A18	
PTW30013		
IBA FC-65G		
IBA FC-65P		
IBA FC-23C		
Capintec PR-06C		

リファレンスとして**適**・**不適**

McEwen (Med. Phys 2010)

不適となった理由

NE2581…A150壁の湿度の影響

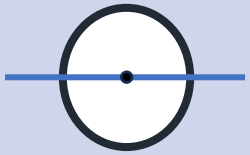
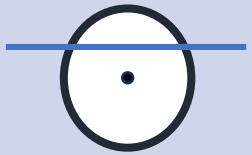
PTW30001…設計の問題

その他…極性・再結合・漏れ・安定化

電離箱基準点の変化

リニアック標準計測法では放射線の種類によらず**測定点を統一**

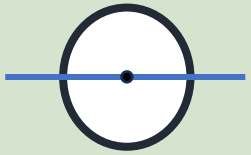
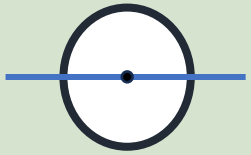
標準計測法12

	X線	電子線
円筒形	 幾何学的中心	 幾何学的中心から $0.5r_{\mathrm{cav}}$線源側へシフト
平行平板形	―	電離空洞前面中心※

r_{cav}：空洞半径

※入射窓の取り扱いは電離箱タイプにより異なる

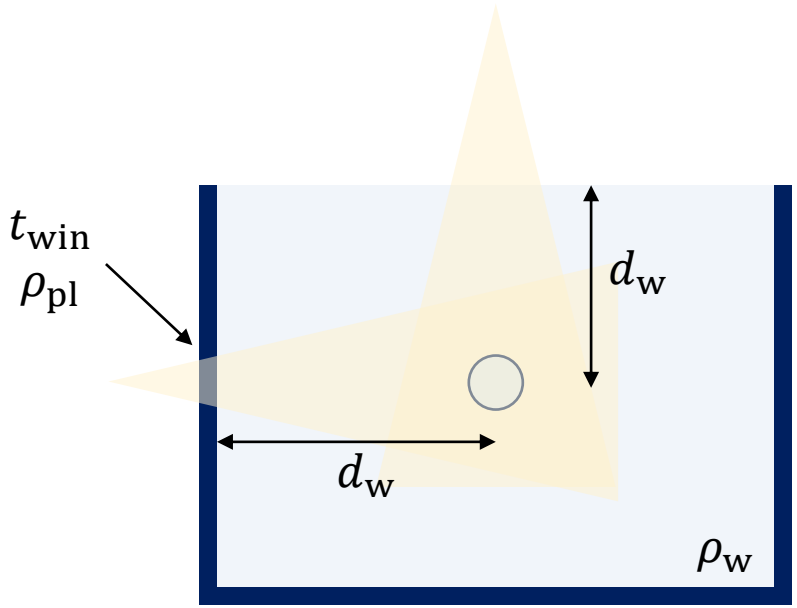
リニアック標準計測法24

	X線	電子線
円筒形	 幾何学的中心	 幾何学的中心
平行平板形	―	電離空洞前面中心 (入射窓は水等価厚)

ファントム内での配置

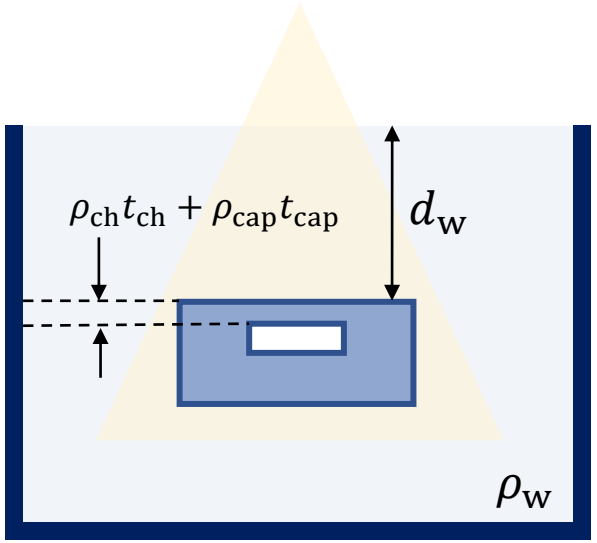
円筒形電離箱

測定深 $d = \rho_{\mathrm{w}} d_{\mathrm{w}} \ (+\rho_{\mathrm{pl}} t_{\mathrm{win}})$



平行平板形電離箱

測定深 $d = \rho_{\mathrm{w}} d_{\mathrm{w}} \ (+\rho_{\mathrm{pl}} t_{\mathrm{win}}) + \rho_{\mathrm{ch}} t_{\mathrm{ch}} + \rho_{\mathrm{cap}} t_{\mathrm{cap}}$

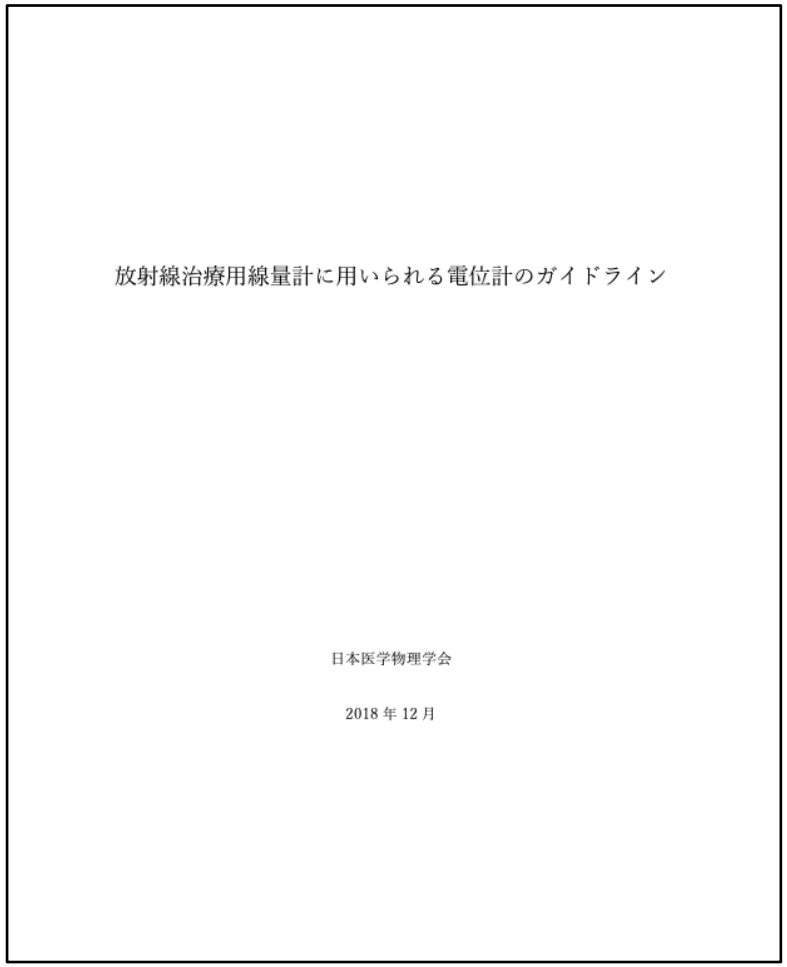


ρ_{w}：水の密度 [g cm^{-3}]
d_{w}：水表面（入射窓内面）から幾何学的中心（電離箱表面）まで [cm]
ρ_{pl}：ファントム壁の密度 [g cm^{-3}]
t_{win}：ファントム入射窓の厚さ [cm]
ρ_{ch}：電離箱の入射窓の密度 [g cm^{-3}]
t_{ch}：電離箱の入射窓の厚さ [cm]
ρ_{cap}：電離箱の防浸キャップの密度 [g cm^{-3}]
t_{cap}：電離箱の防浸キャップの厚さ [cm]

電位計の選択

電位計ガイドラインを参照すべき！

- IEC60731の性能要件を補強
- 電位計の取り扱い法，点検に加え電荷測定の不確かさ評価法も言及
- 分離校正に関する記載


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

日本医学物理学会

2018 年 12 月

電位計の点検

電位計は**1年に1回以上点検を行うこと**

表 8.3　点検項目および JCSS 校正項目

	項目	頻度
点検	繰返し性，感度変化，非直線性 ※1	1 年に 1 回以上
	ゼロ点ドリフト	1 年に 1 回以上
	ゼロ点シフト	1 年に 1 回以上
	電荷漏れ	1 年に 1 回以上

判定基準を満たしていない電位計は，使用を中止し製造業者への点検整備を依頼，その後校正を受ける

電離箱・電位計の校正頻度

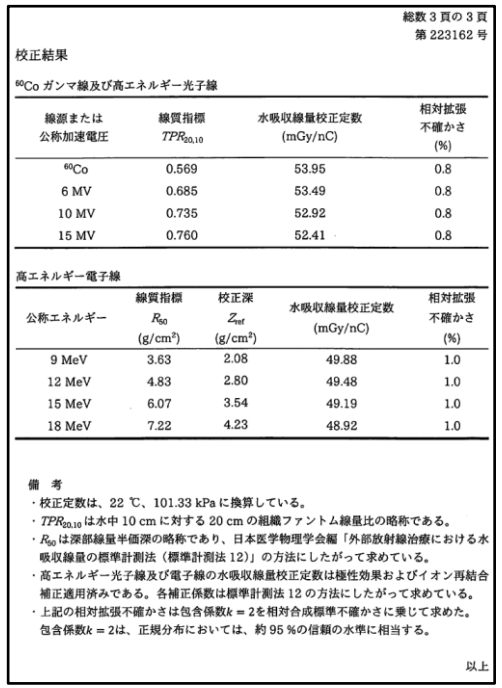
電離箱の校正頻度は**1年ごとに**

電位計の校正頻度は**3年ごとに**

※分離校正の場合

線量校正を実施する際の注意点

- 電離箱校正時の印加電圧の大きさと極性
- 電位計の示す単位やレンジ



総数 3 頁の 3 頁
第 223162 号

校正結果

^{60}Co ガンマ線及び高エネルギー光子線

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	53.95	0.8
6 MV	0.685	53.49	0.8
10 MV	0.735	52.92	0.8
15 MV	0.760	52.41	0.8

高エネルギー電子線

公称エネルギー	線質指標 R_{50} (g/cm²)	校正深 Z_{ref} (g/cm²)	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	49.88	1.0
12 MeV	4.83	2.80	49.48	1.0
15 MeV	6.07	3.54	49.19	1.0
18 MeV	7.22	4.23	48.92	1.0

備　考
・校正定数は、22 ℃、101.33 kPa に換算している。
・$TPR_{20,10}$ は水中 10 cm に対する 20 cm の組織ファントム線量比の略称である。
・R_{50} は深部線量半価深の略称であり、日本医学物理学会編「外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法（標準計測法 12）」の方法にしたがって求めている。
・高エネルギー光子線及び電子線の水吸収線量校正定数は極性効果およびイオン再結合補正適用済みである。各補正係数は標準計測法 12 の方法にしたがって求めている。
・上記の相対拡張不確かさは包含係数k = 2を相対合成標準不確かさに乗じて求めた。包含係数k = 2は、正規分布においては、約 95 %の信頼の水準に相当する。

以上

2023年8月7日
公益財団法人医用原子力技術研究振興財団
線量校正センター

校正証明書(E230074)に係る参考資料

校正結果をもとに算出される被校正電位計の校正定数は、下記のとおりです。
電位計校正定数k_{elec}は、電位計の「クーロン単位の表示値」に対してご使用ください。

被校正電位計の型式および製造番号	UNIDOS Tango	192228

設定	表示値 [rdg]	電位計校正定数 k_{elec}	k_{elec}の不確かさ
Range: LOW	+5.005 nC | +11.01 nC, −5.004 nC | −11.01 nC	0.9991 nC/rdg	0.16 % (0.029 %)
Range: MEDIUM	+5.005 nC | +200.1 nC, −5.005 nC | −200.2 nC	0.9993 nC/rdg	0.17 % (0.057 %)

校正定数の不確かさは、包含係数k=2とした相対拡張不確かさで、信頼の水準は約95 %です。

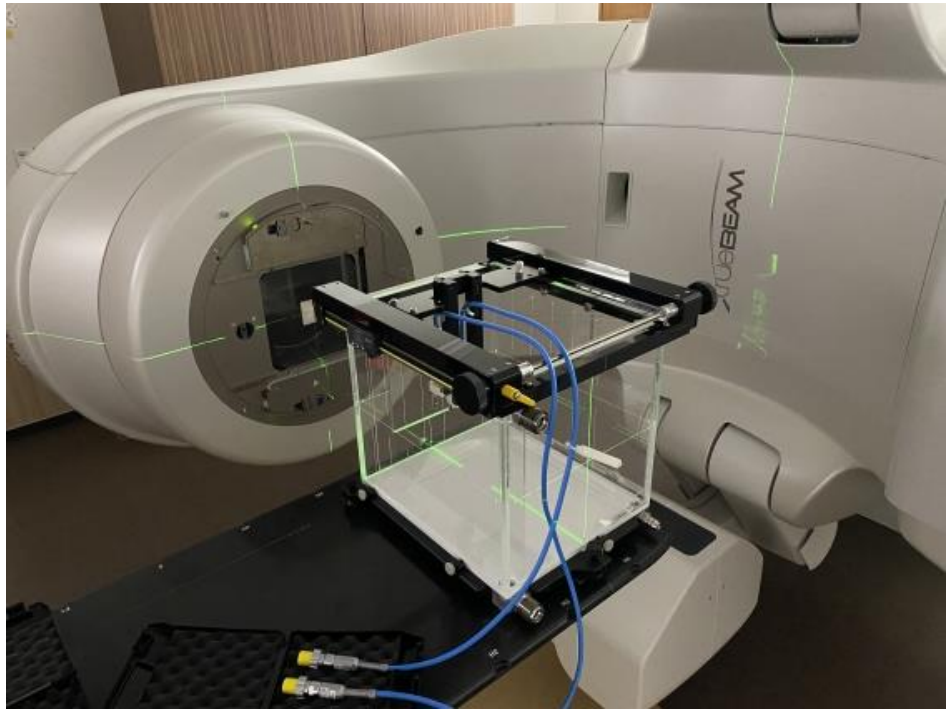
本校正は、日本医学物理学会 標準計測法12および電位計ガイドラインを参考にしています。
電位計校正定数およびその不確かさは、同ガイドライン 8.5.1項の手順で算出しています。
不確かさに併記された括弧内は、校正定数の算出手順に起因する不確かさで、
校正定数の不確かさに含んでいます。

以上

水ファントムの取り扱い

深さは**水等価厚（質量面密度, g cm^{-2}）**で表記

平行ビームファントムでは入射窓を
水等価厚に換算して考慮



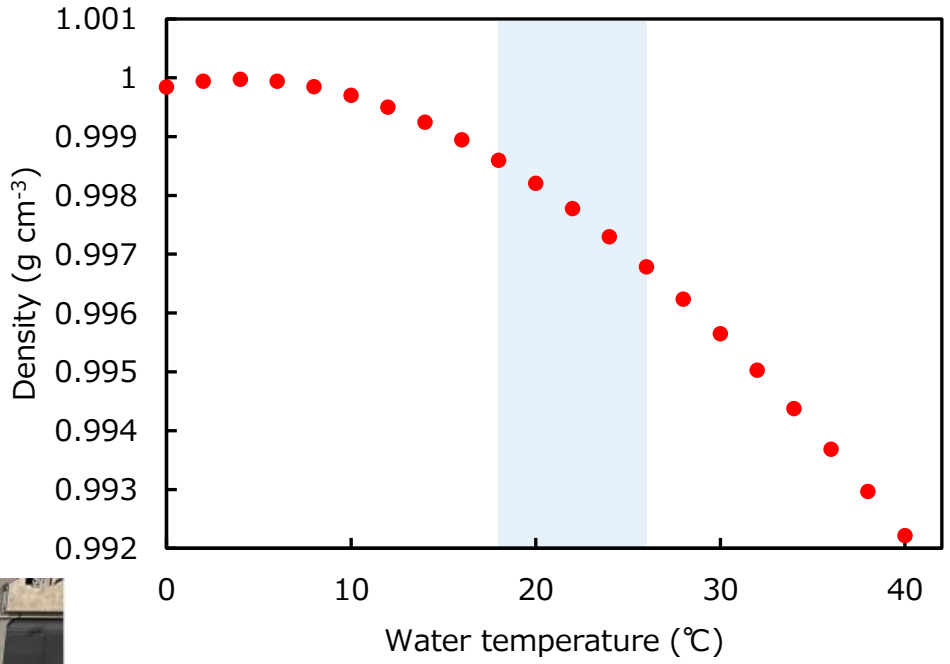
散乱線が考慮可能なサイズが望ましい

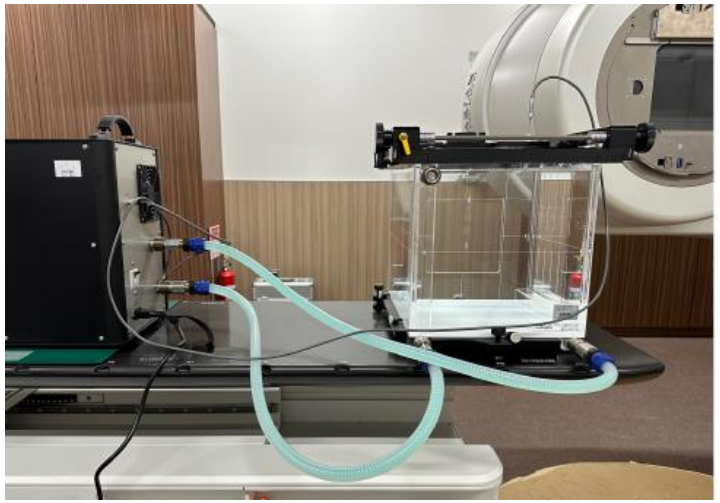
横幅：最大照射野より5 cm以上
深さ：光子線…測定深より10 g cm^{-2}以上
　　電子線…実用飛程より5 g cm^{-2}以上

水温にも注意

水温は**22 ℃ ± 4 ℃**となるように管理

- 水温による密度の変化
- 電離箱の感度変化に対応するため





水温管理システム

MWTP200（MU-lab社）

温度計と気圧計

- 校正を受けた温度計・気圧計の使用を推奨
  （気象測器検定合格 or JCSS校正）
- 定期的に他の計器やメーカー点検などで
  表示値に異常がないか点検

表示分解能には規定あり

- 温度計：0.1 ℃以下
- 気圧計：0.01 kPa以下

Outline

1. リニアック標準計測法24の概要

2. 水吸収線量校正に使用する機材

3. 光子線計測

4. 電子線計測

5. 相互校正

高エネルギー光子線水吸収線量計測の概要

対象：平坦化された4 ～ 15 MV（0.6 < $TPR_{20,10}$ < 0.78）のビーム

$$D_{w,Q} = M_Q \times N_{D,w,Q}$$

- M_Qは$k_{TP}, k_s, k_{pol}, k_{elec}$を補正
- $TPR_{20,10}$は標準計測法12と同様の方法により取得

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 ℃ 測定条件：22 ℃ ± 4 ℃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．

標準機関ではSSD＝100 cmにて校正

極性効果の取り扱いについて

^{60}Co校正

校　正　結　果（TM30013　#13401）	
収集電荷の極性	正(極性効果補正無し)
集電極の電圧	-400 V
水吸収線量校正定数	5.399×10^{-2} Gy/nC
校正の不確かさ	1.0 %

円筒形は**極性効果補正無し**で校正

線量校正時に同じ極性を使用すれば

$k_{\mathrm{pol}} = 1$とすることが可能

リニアック校正

備　考

・校正定数は、22 ℃、101.33 kPa に換算している。

・$TPR_{20,10}$ は水中 10 cm に対する 20 cm の組織ファントム線量比の略称である。

・R_{50} は深部線量半価深の略称であり、日本医学物理学会編「外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法（標準計測法 12)」の方法にしたがって求めている。

・高エネルギー光子線及び電子線の水吸収線量校正定数は極性効果およびイオン再結合補正適用済みである。各補正係数は標準計測法 12 の方法にしたがって求めている。

・上記の相対拡張不確かさは包含係数$k = 2$を相対合成標準不確かさに乗じて求めた。包含係数$k = 2$は、正規分布においては、約 95 %の信頼の水準に相当する。

円筒形でも**極性効果を補正**

自施設における線量計測においても

k_{pol}の補正が必要となる

水吸収線量校正定数$N_{D,w,Q}$の決定法

- 測定線質と校正線質が近い場合

  $TPR_{20,10} \pm 0.005$であれば

  校正証明書の値をそのまま使用可能

- 校正点が4点以上の場合

  二次曲線により内挿

- 校正点が2点 or 3点の場合

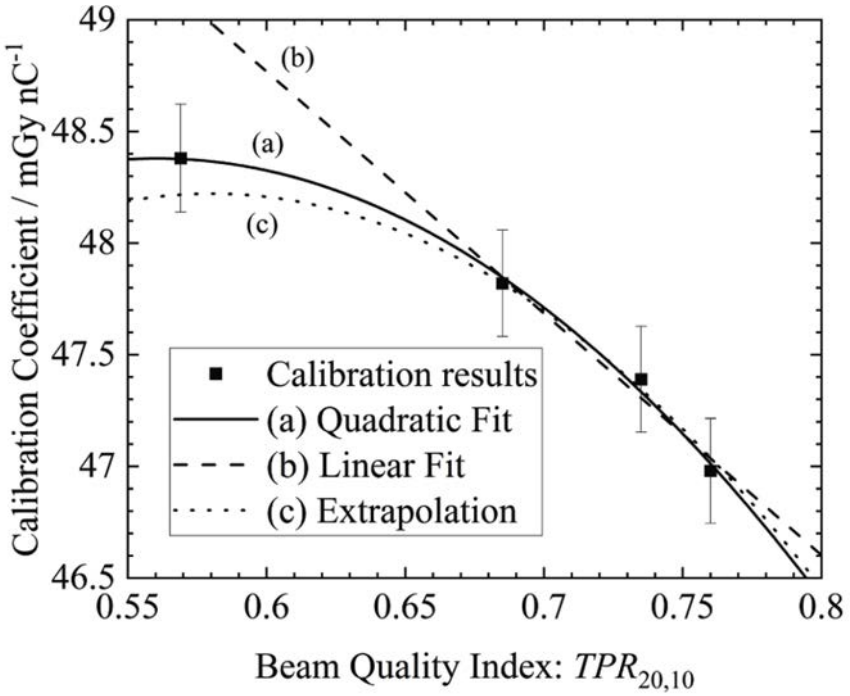
  一次直線により内挿

- 校正点が1点 or 外挿の場合

  標準計測法12の線質変換係数を使用する

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



外挿による$N_{\mathrm{D,w,Q}}$の決定例 －光子線－

例：6・10・15 MVの3点校正を行った検出器で4 MV（$TPR_{20,10} = 0.62$）を校正したい（PTW30013の使用を想定）

$$N_{\mathrm{D,w,Q}} = N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}} \frac{k_{\mathrm{Q}}}{k_{\mathrm{Q_{SDL}}}}$$

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

$N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}}$：最も測定線質に近い6 MVの値

$TPR_{20,10}$	0.62	0.68	0.70
k_{Q}	0.996	0.989	0.985

PTW30013のk_{Q}は標準計測法12（表3.3）より抜粋

$$N_{\mathrm{D,w,Q}} = 47.82 \times \frac{0.996}{0.988} = 48.21\ \mathrm{mGy/nC}$$

対象としていないFFFビームは？

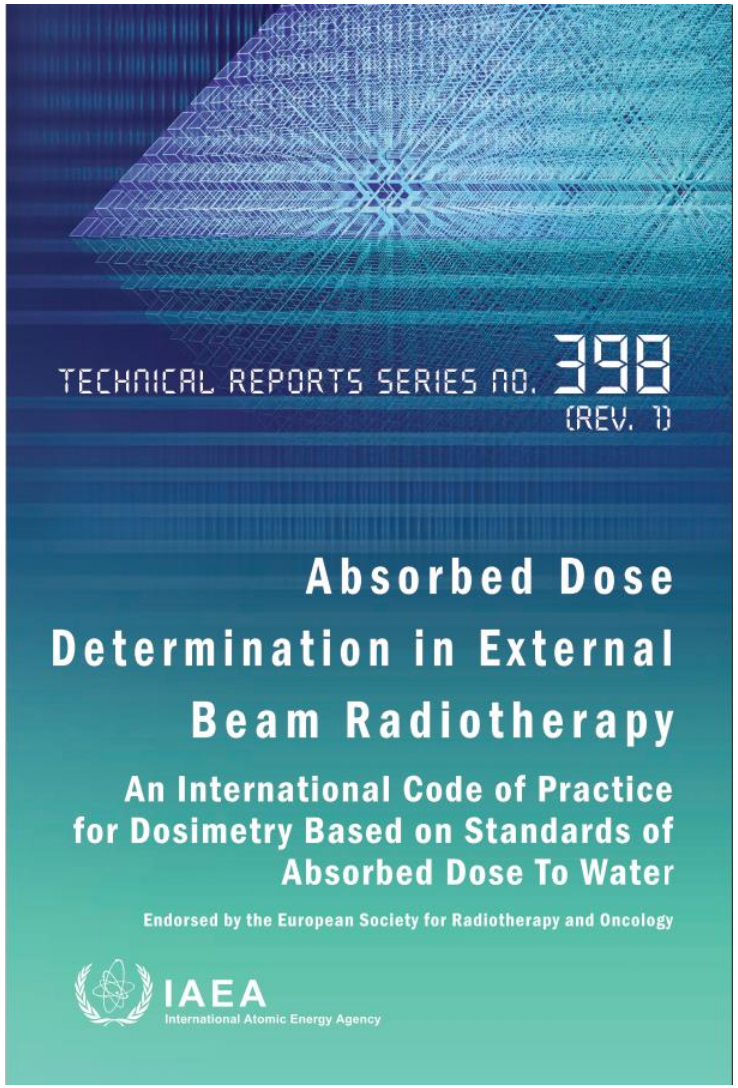
TRS-398 Rev.1を参考すべき

- **FFFでも$TPR_{20,10}$を使用**
- **体積平均効果を補正**

$$k_{\mathrm{vol}} = 1 + \left(0.0062 \times TPR_{20,10} - 0.0036\right) \times \left(\frac{100}{SDD}\right)^2 \times L^2$$

- **$k_{\mathrm{Q,Q_0}}$はFFビームと同じ値を使用**

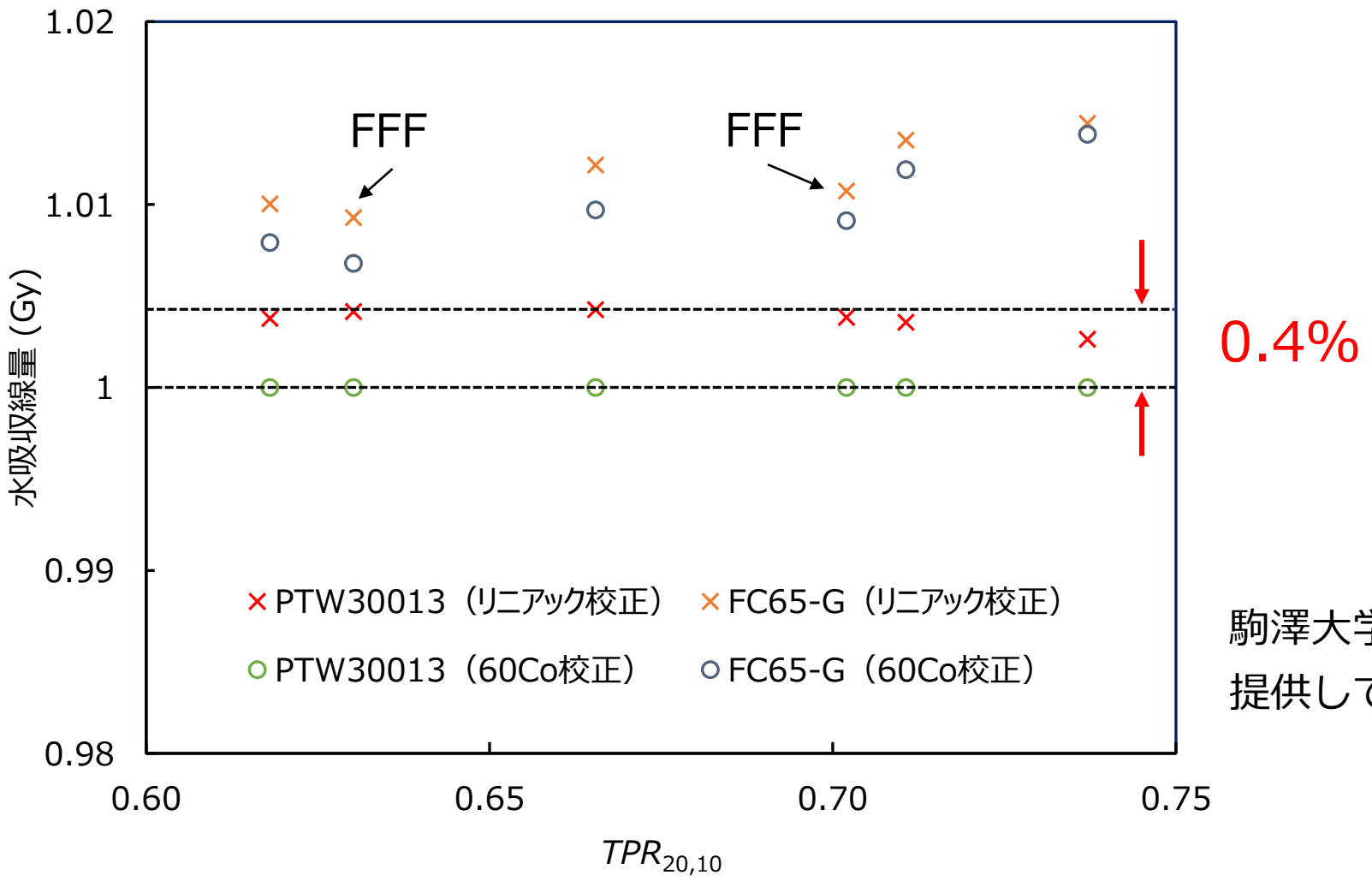
$$k_{\mathrm{Q}}\left(TPR_{20,10}\right) = \frac{1 + \exp\left(\frac{a - 0.57}{b}\right)}{1 + \exp\left(\frac{a - TPR_{20,10}}{b}\right)}$$



TRS-398 Rev.1 (IAEA 2024)

標準計測法12 vs リニアック標準計測24

^{60}Co校正された電離箱とリニアック校正の差は小さい



駒澤大学 藤田先生より
提供していただきました

基準条件における水吸収線量の不確かさ

標準計測法12

表 3.4　^{60}Coγ 線で校正された電離箱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 (%)
ステップ 1：線量標準機関	
特定二次標準器の校正定数 $N_{D,w}$	0.40
特定二次標準器による基準 γ 線場の決定	0.18
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の測定値	0.27
ステップ 1 の合成不確かさ	0.52
ステップ 2：ユーザが使用する高エネルギー光子線	
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3
基準条件の設定	0.4
モニタ設定値に対する表示値 M_{raw}	0.6
補正係数 k_l	0.4
線質変換係数 k_Q（計算値）	1.0
ステップ 2 の合成不確かさ	1.4
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ（ステップ 1+2）	1.5
相対拡張標準不確かさ（包含係数 $k=2$ ）	2.9

リニアック標準24

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

線質変換係数が不要となることで

不確かさは大幅に低減

Outline

1. リニアック標準計測法24の概要
2. 水吸収線量校正に使用する機材
3. 光子線計測
4. **電子線計測**
5. 相互校正

高エネルギー電子線水吸収線量計測の概要

対象：散乱箔で平坦化された4 ～ 22 MeVのビーム

$$D_{\mathrm{w,Q}} = M_{\mathrm{Q}} \times N_{\mathrm{D,w,Q}}$$

- M_{Q}は$k_{\mathrm{TP}}, k_{\mathrm{s}}, k_{\mathrm{pol}}, k_{\mathrm{elec}}$を補正
- R_{50}は標準計測法12と同様の方法により取得

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 ℃ 測定条件：22 ℃ ± 4 ℃の範囲内
電離箱	円筒形（校正点が与えられているR_{50}の範囲内） 平行平板形
校正深	$d_{\mathrm{c}} = 0.6R_{50} - 0.1\ \mathrm{g\ cm^{-2}}$
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

ファーマ形のみをリニアック校正の対象としている（2024年8月時点）

平行平板形電離箱を使用するには**^{60}Co校正** or **相互校正**を実施

水吸収線量校正定数$N_{\mathrm{D,w,Q}}$の決定法

- <u>測定線質と校正線質が近い場合</u>

  $\boldsymbol{R_{50} \pm 0.04\ \mathrm{g\ cm^{-2}}}$であれば

  校正証明書の値をそのまま使用可能

- <u>校正点が4点以上の場合</u>

  曲線近似により内挿

  $N_{\mathrm{D,w,Q}} = a + b(R_{50})^c$　　円筒形

  $N_{\mathrm{D,w,Q}} = a + b\exp\left(-\frac{R_{50}}{c}\right)$　　平行平板形

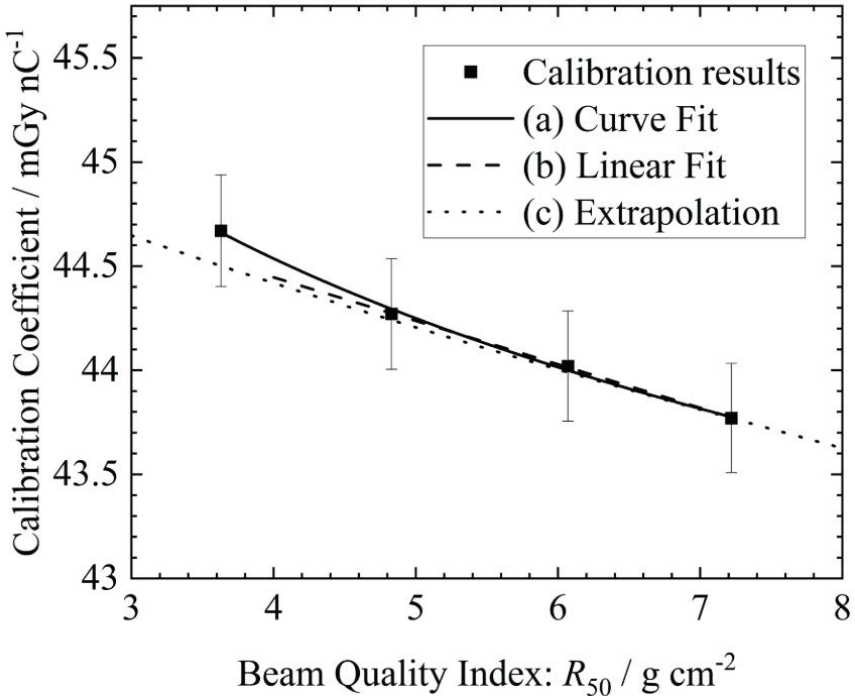
  a, b, c：近似曲線の係数（標準機関より提供）

- <u>校正点が2点 or 3点の場合</u>

  一次直線により内挿

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/cm²)	校正深 d_c (g/cm²)	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



水吸収線量校正定数$N_{\mathrm{D,w,Q}}$の決定法

- 校正点が1点 or 外挿の場合

媒介線質Q_{int} ($R_{50} = 7.5\ \mathrm{g\ cm^{-2}}$)に対する線質変換係数$k_{\mathrm{Q,Q_{int}}}$を使用

$$N_{\mathrm{D,w,Q}} = N_{\mathrm{D,w,Q_{int}}} k_{\mathrm{Q,Q_{int}}}$$

$$N_{\mathrm{D,w,Q_{int}}} = N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}} \frac{1}{k_{\mathrm{Q_{SDL},Q_{int}}}}$$

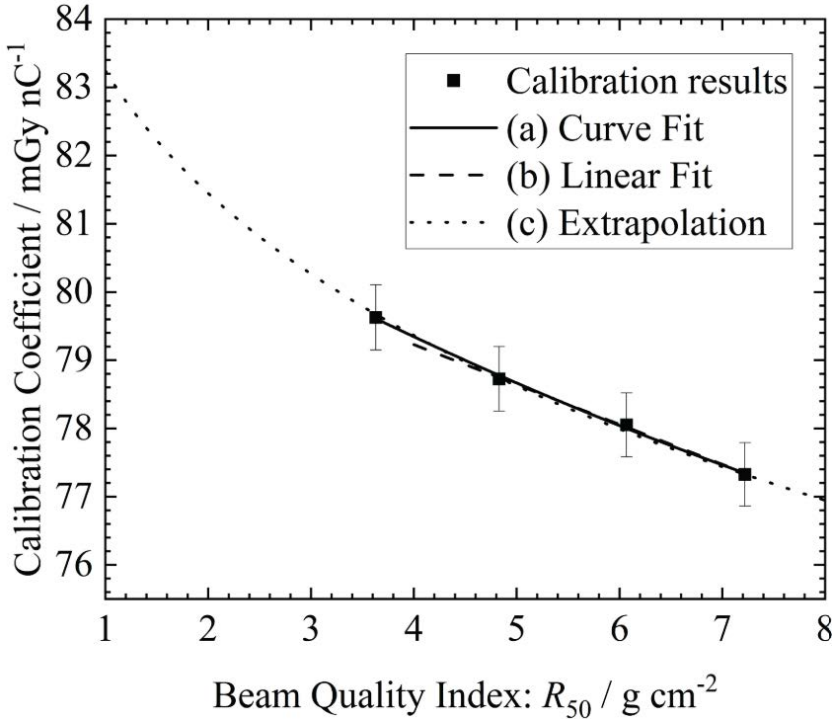
$$k_{\mathrm{Q,Q_{int}}} = \frac{(\bar{L}/\rho)_{\mathrm{w,air,Q}}}{(\bar{L}/\rho)_{\mathrm{w,air,Q_{int}}}} = 1.2236 - 0.1452(R_{50})^{0.2144}$$

ただしこの処理は

平行平板形電離箱のみ

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/cm²)	校正深 (g/cm²)	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



外挿による$N_{\mathrm{D,w,Q}}$の決定例 －電子線－

例：9・12・15・18 MeVの4点校正を行った検出器で
6 MeV（$R_{50} = 2.3\ \mathrm{g\ cm^{-2}}$）を校正したい

$$N_{\mathrm{D,w,Q_{int}}} = N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}} \frac{1}{k_{\mathrm{Q_{SDL},Q_{int}}}}$$

$N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}}$：最も測定線質に近い9 MeVの値

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/cm²)	校正深 (g/cm²)	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

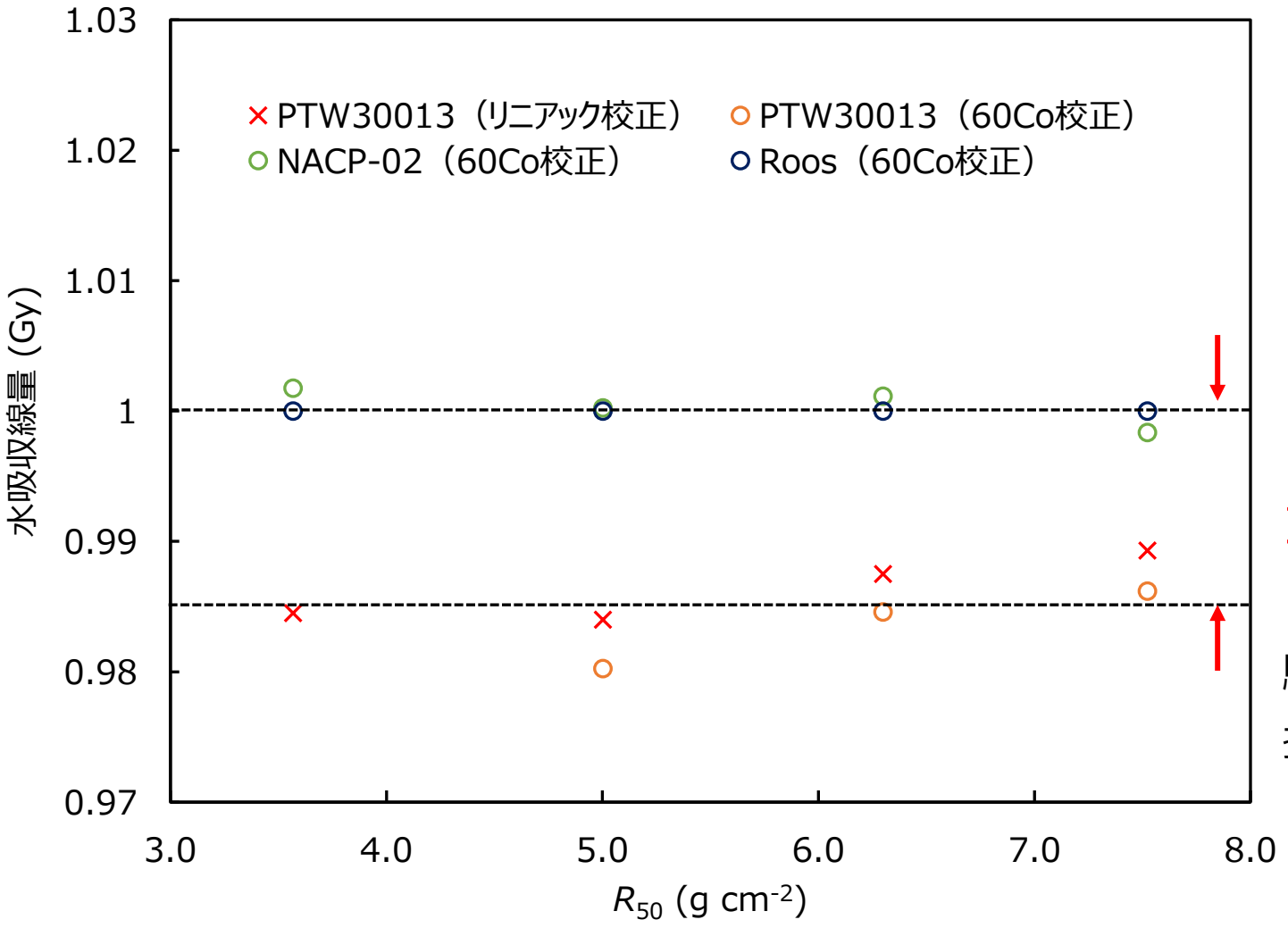
$$k_{\mathrm{Q,Q_{int}}} = \frac{(\bar{L}/\rho)_{\mathrm{w,air,Q}}}{(\bar{L}/\rho)_{\mathrm{w,air,Q_{int}}}} = 1.2236 - 0.1452(R_{50})^{0.2144}$$

タイプ依存なし

$$N_{\mathrm{D,w,Q}} = N_{\mathrm{D,w,Q_{int}}} k_{\mathrm{Q,Q_{int}}} = 79.63 \times \frac{1}{1.0322} \times 1.0500 = 81.01\mathrm{mGy/nC}$$

標準計測法12 vs リニアック標準計測24

平行平板形（^{60}Co校正）と円筒形（リニアック校正）では差が生じる



1.5%

駒澤大学 藤田先生より
提供していただきました

基準条件における水吸収線量の不確かさ

標準計測法12

表 4.4 ^{60}Coγ 線で校正された電離箱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 $D_{w,Q}$ 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 (%) ファーマ形 $R_{50} \geq 4\,\mathrm{g\,cm^{-2}}$	相対標準不確かさ (%) 平行平板形 $R_{50} \geq 1\,\mathrm{g\,cm^{-2}}$
ステップ 1：線量標準機関		
特定二次標準器の校正定数 $N_{D,w}$	0.40	0.40
特定二次標準器による基準 γ 線場の決定	0.18	0.18
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の測定値	0.27	0.27
ステップ 1 の合成不確かさ	0.52	0.52
ステップ 2：ユーザが使用する高エネルギー電子線		
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3	0.4
基準条件の設定	0.4	0.6
モニタ設定値に対する表示値 M_{raw}	0.6	0.6
補正係数 k_i	0.4	0.5
線質変換係数 k_Q（計算値）	1.0	1.2
ステップ 2 の合成不確かさ	1.4	1.6
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ（ステップ 1+2）	1.5	1.7
相対拡張標準不確かさ（包含係数 $k=2$）	2.9	3.4

リニアック標準24

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	相対標準不確かさ / % 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 $k_{Q,Q_{int}}$	–	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

電子線においても

不確かさは大幅に低減

実施可能なエネルギー

- 医療用リニアック高エネルギー光子線水吸収線量（6 MV, 10MV, 15 MV）
- 医療用リニアック高エネルギー電子線水吸収線量（9 MeV, 12MeV, 15 MeV, 18 MeV）←New!!

産総研HPより

光子線

^{60}Co校正($TPR_{20,10} = 0.569$) も可能であり，4 MV ($TPR_{20,10} \fallingdotseq 0.63$)は内挿により対応

電子線

- リニアック校正はファーマ形のみ
- ファーマ形は校正点が与えられている範囲でしか使用できない

⇒ 4 & 6 MeVは平行平板形の**相互校正**により対応

Outline

1. リニアック標準計測法24の概要

2. 水吸収線量校正に使用する機材

3. 光子線計測

4. 電子線計測

5. 相互校正

日本の計測プロトコルにおける相互校正

標準計測法12 平行平板形電離箱の相互校正を推奨

リニアック標準24 現状は平行平板形を使用するために相互校正が必要
(リニアック校正を開始したら不必要？)

電離箱	k_{Q,Q_0}
IBA NACP-02	○
IBA PPC40 Roos	○
PTW 34001 Roos	○
PTW 23343 Classic Markus	○
PTW 34045 Advanced Markus	
Exradin P11	
Exradin A10	

電離箱	$k_{Q,Q_{cross}}$
IBA NACP-02	○
IBA PPC40 Roos	○
PTW 34001 Roos	○
PTW 23343 Classic Markus	○
PTW 34045 Advanced Markus	○
Exradin P11	○
Exradin A10	○

相互校正を実施するための注意点

- リファレンス線量計は**円筒形電離箱**で

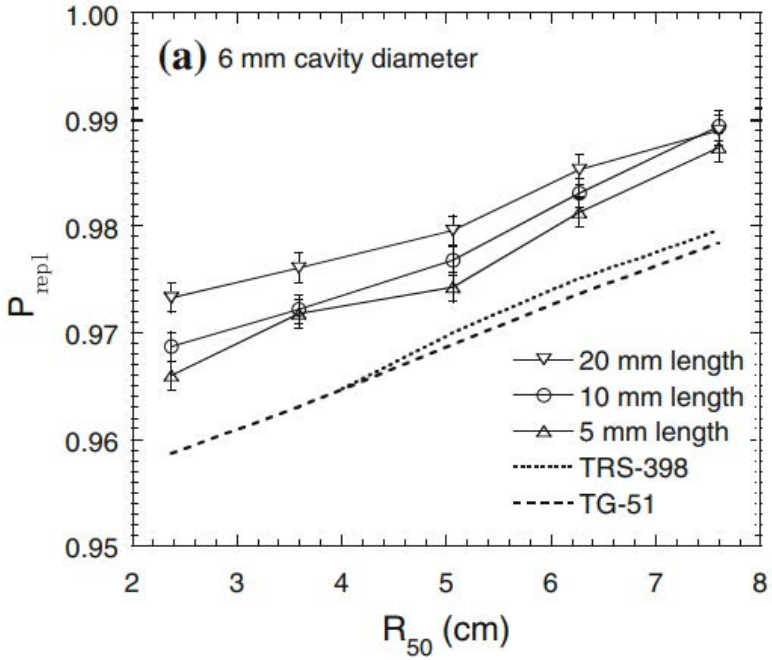
  P_{wall}の不確かさ

  平行平板形電離箱 ＞ 円筒形電離箱

- 相互校正線質Q_{cross}は**最大エネルギー**で

  ファーマ形電離箱のP_{cav}の影響を小さくするため

  $\boldsymbol{R_{50} > 7.0\ \mathrm{g\ cm^{-2}}}$を強く推奨

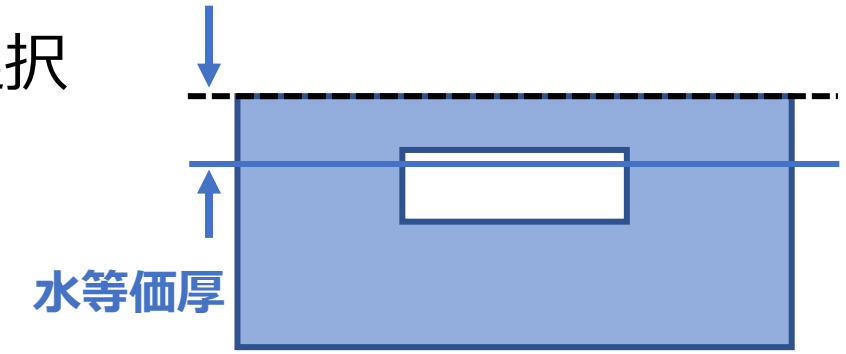


Araki (RPT 2012)

相互校正を実施するための注意点

- 平行平板形電離箱の入射窓は**水等価厚**を選択

  $k_{\mathrm{Q,Q_{int}}}$は阻止能比のみで決定されているため



- 加速器出力の変動をモニタリング

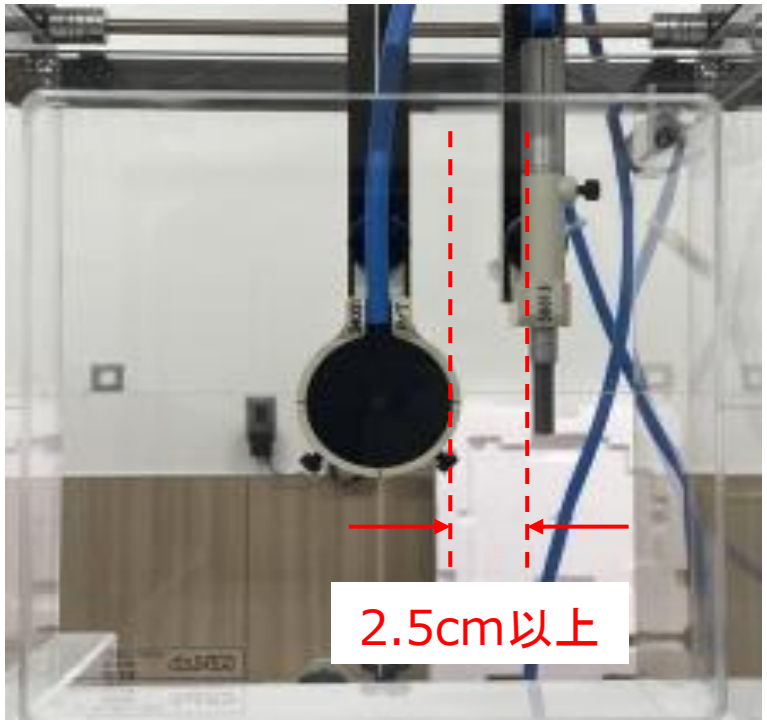
  ① 計測の測定手順

  リファレンス → フィールド → リファレンス

  リファレンスの結果は2回測定の平均値を使用

  ② 外部モニタ

  線量計の壁から2.5 cm以上離す



相互校正の実施手順 1

相互校正線質における水吸収線量校正定数$N_{\mathrm{D,w,Q_{cross}}}^{\mathrm{field}}$を決定

$$N_{\mathrm{D,w,Q_{cross}}}^{\mathrm{field}} = \frac{D_{\mathrm{w,Q_{cross}}}^{\mathrm{ref}}}{M_{\mathrm{Q_{cross}}}^{\mathrm{field}}} \times \frac{k_{\mathrm{rn}}^{\mathrm{ref}}}{k_{\mathrm{rn}}^{\mathrm{field}}}$$

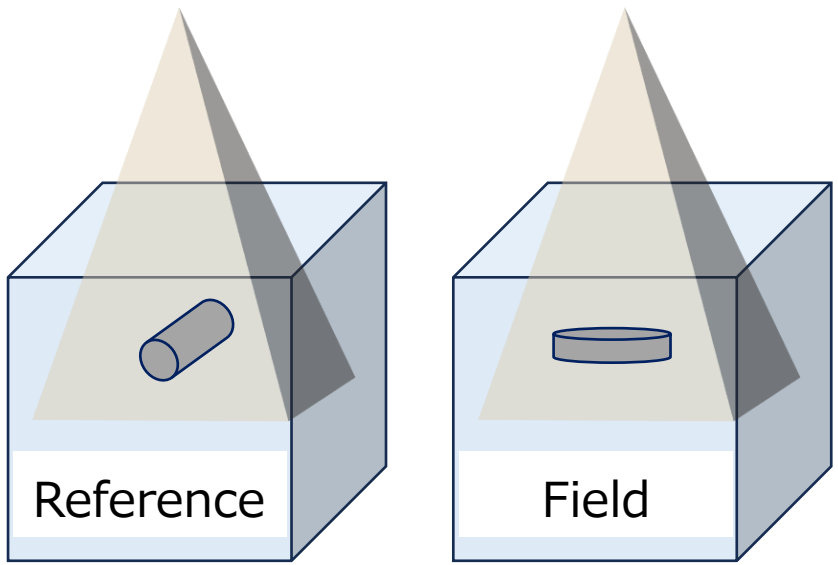
k_{rn}：動径方向不均一補正（体積平均効果補正係数）
FFビームや電子線では1となる
FFFビームで有意な値となる

標準計測法12 **$0.5r_{\mathrm{cav}}$線源側**

$$D_{\mathrm{w,Q_{cross}}}^{\mathrm{ref}} = M_{\mathrm{Q_{cross}}}^{\mathrm{ref}} \times N_{\mathrm{D,w,Q_0}}^{\mathrm{ref}} \times k_{\mathrm{Q_{cross},Q_0}}^{\mathrm{ref}}$$

リニアック標準24 **幾何学的中心**

$$D_{\mathrm{w,Q_{cross}}}^{\mathrm{ref}} = M_{\mathrm{Q_{cross}}}^{\mathrm{ref}} \times N_{\mathrm{D,w,Q_{cross}}}^{\mathrm{ref}}$$



相互校正の実施手順 2

標準計測法12

相互校正線質Q_{cross}を基準とする線質変換係数$k_{\mathrm{Q,Q_{cross}}}$を作成
(※$k_{\mathrm{Q,Q_0}}$ではなく$k_{\mathrm{Q,Q_{int}}}$の表の値をスケール)

$$k^{\mathrm{field}}_{\mathrm{Q,Q_{cross}}} = \frac{k^{\mathrm{field}}_{\mathrm{Q,Q_{int}}}}{k^{\mathrm{field}}_{\mathrm{Q_{cross},Q_{int}}}}$$

$$D_{\mathrm{w,Q}} = M^{\mathrm{field}}_{\mathrm{Q}} \times N^{\mathrm{field}}_{\mathrm{D,w,Q_{cross}}} \times k^{\mathrm{field}}_{\mathrm{Q,Q_{cross}}}$$

リニアック標準24

媒介線質Q_{int}における水吸収線量校正定数$N^{\mathrm{field}}_{\mathrm{D,w,Q_{int}}}$を決定

$$N^{\mathrm{field}}_{\mathrm{D,w,Q_{int}}} = \frac{N^{\mathrm{field}}_{\mathrm{D,w,Q_{cross}}}}{k^{\mathrm{field}}_{\mathrm{Q_{cross},Q_{int}}}}$$

$$D_{\mathrm{w,Q}} = M^{\mathrm{field}}_{\mathrm{Q}} \times N^{\mathrm{field}}_{\mathrm{D,w,Q_{int}}} \times k^{\mathrm{field}}_{\mathrm{Q,Q_{int}}}$$

相互校正の実施手順 2

標準計測法12

相互校正線質Q_{cross}を基準とする線質変換係数$k_{\mathrm{Q,Q_{cross}}}$を作成
(※$k_{\mathrm{Q,Q_0}}$ではなく$k_{\mathrm{Q,Q_{int}}}$の表の値をスケール)

$$k_{\mathrm{Q,Q_{cross}}}^{\mathrm{field}} = \frac{k_{\mathrm{Q,Q_{int}}}^{\mathrm{field}}}{k_{\mathrm{Q_{cross},Q_{int}}}^{\mathrm{field}}}$$

$$D_{\mathrm{w,Q}} = M_{\mathrm{Q}}^{\mathrm{field}} \times N_{\mathrm{D,w,Q_{cross}}}^{\mathrm{field}} \times k_{\mathrm{Q,Q_{cross}}}^{\mathrm{field}}$$

例：相互校正を$R_{50} = 8.23$ g/cm^{2}で実施した場合（Advanced Markus使用）

R_{50}	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	7.5	8.0	8.23	10.0
$k_{\mathrm{Q,Q_{int}}}$	1.078	1.055	1.040	1.028	1.019	1.010	1.003	**1.000**	0.997	0.996	0.986
$k_{\mathrm{Q,Q_{cross}}}$	1.082	1.059	1.044	1.032	1.023	1.014	1.007	1.004	1.001	**1.000**	0.990

相互校正の実施手順 2

リニアック標準24　媒介線質Q_{int}における水吸収線量校正定数$N_{\mathrm{D,w,Q_{int}}}^{\mathrm{field}}$を決定

$$N_{\mathrm{D,w,Q_{int}}}^{\mathrm{field}} = \frac{N_{\mathrm{D,w,Q_{cross}}}^{\mathrm{field}}}{k_{\mathrm{Q_{cross},Q_{int}}}^{\mathrm{field}}}$$

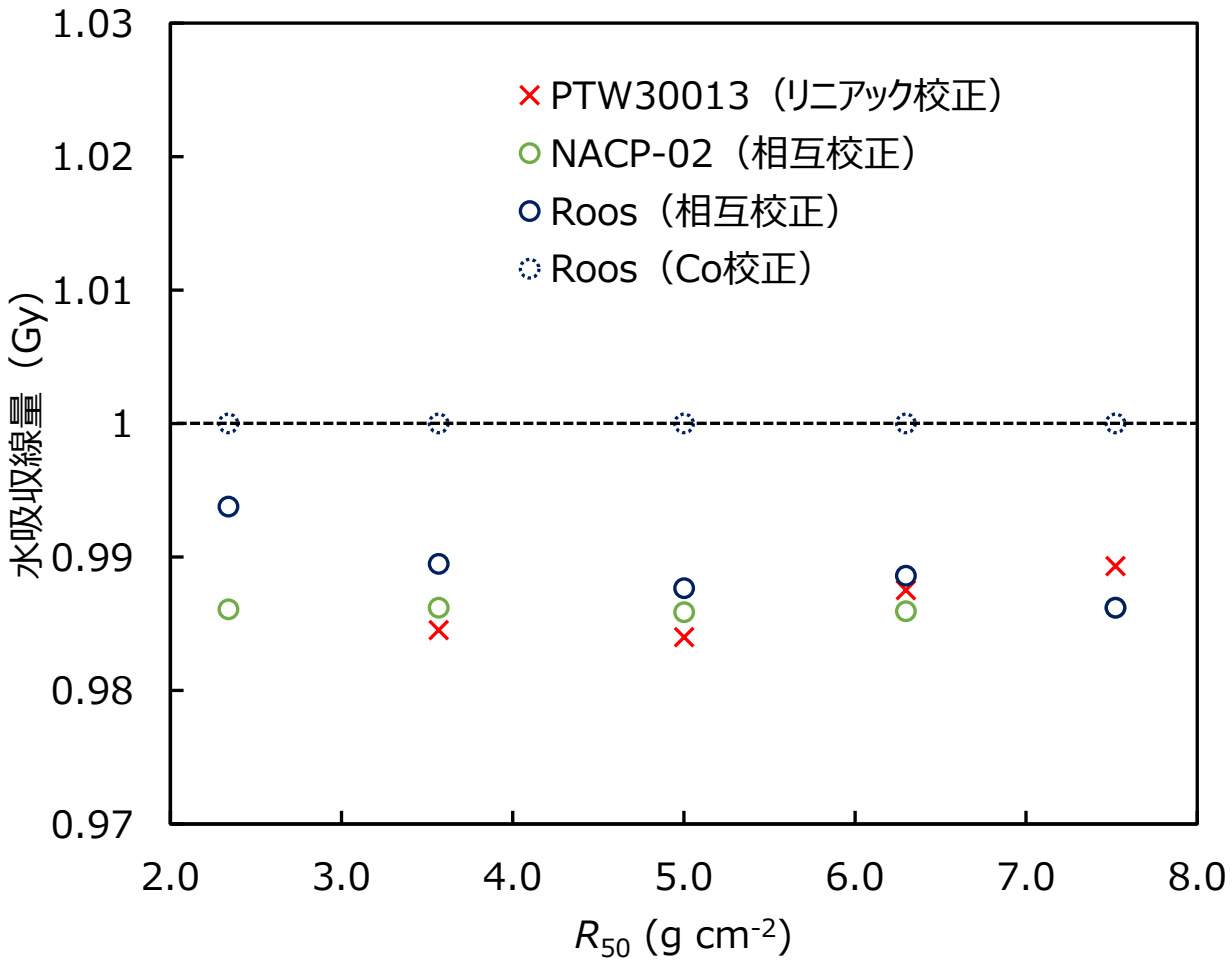
$$D_{\mathrm{w,Q}} = M_{\mathrm{Q}}^{\mathrm{field}} \times N_{\mathrm{D,w,Q_{int}}}^{\mathrm{field}} \times k_{\mathrm{Q,Q_{int}}}^{\mathrm{field}}$$

例：相互校正を$R_{50} = 8.23$ g/cm^{2}で実施した場合

$k_{\mathrm{Q,Q_{int}}}^{\mathrm{field}} = 1.2236 - 0.1452(R_{50})^{0.2144}$より (リニアック標準24に記載)

$$N_{\mathrm{D,w,Q_{int}}}^{\mathrm{field}} = \frac{N_{\mathrm{D,w,Q_{cross}}}^{\mathrm{field}}}{0.995}$$

相互校正による水吸収線量の変化



^{60}Co校正されたファーマ形との相互校正を実施

リニアック校正を受けたPTW30013と**0.5%以内**で一致

相互校正の実施は線量計測の不確かさを低減させる

相互校正を用いた場合の不確かさ

標準計測法12 (相互校正ナシ)

表 4.4　^{60}Coγ 線で校正された電離箱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 $D_{w,Q}$ 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 (%) ファーマ形 $R_{50} \geq 4\,\mathrm{g\,cm^{-2}}$	相対標準不確かさ (%) 平行平板形 $R_{50} \geq 1\,\mathrm{g\,cm^{-2}}$
ステップ 1：線量標準機関		
特定二次標準器の校正定数 $N_{D,w}$	0.40	0.40
特定二次標準器による基準 γ 線場の決定	0.18	0.18
二次線量標準機関におけるユーザ電離箱線量計の測定値	0.27	0.27
ステップ 1 の合成不確かさ	0.52	0.52
ステップ 2：ユーザが使用する高エネルギー電子線		
ユーザ電離箱線量計の長期安定性	0.3	0.4
基準条件の設定	0.4	0.6
モニタ設定値に対する表示値 M_{raw}	0.6	0.6
補正係数 k_i	0.4	0.5
線質変換係数 k_Q（計算値）	1.0	1.2
ステップ 2 の合成不確かさ	1.4	1.6
$D_{w,Q}$ の相対合成標準不確かさ（ステップ 1+2）	1.5	1.7
相対拡張標準不確かさ（包含係数 $k=2$ ）	2.9	3.4

リニアック標準の普及で
相互校正は不要になる？

リニアック標準24 (相互校正**ナシ**)

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	相対標準不確かさ / % 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 $k_{Q,Q_{int}}$	–	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

リニアック標準24 (相互校正**アリ**)

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	相対標準不確かさ / % $N_{D,w,Q_{int}}$ 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

おまけ：^{60}Coγ線水吸収線量校正定数の導出

もしも^{60}Coの提供が停止してしまった場合…

- 最も^{60}Coγ線に近い線質Q_{SDL}の$N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}}$
- 標準計測法12の表3.3より$k_{\mathrm{Q_{SDL}}}$を決定

$$N_{\mathrm{D,w,Q_{co}}} = \frac{N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}}}{k_{\mathrm{Q_{SDL}}}}$$

ユーザー線質Qにおける$N_{\mathrm{D,w,Q}}$と標準機関の線質Q_{SDL}における$N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}}$および^{60}Coγ線における$N_{\mathrm{D,w,Q_{co}}}$には以下の関係がある

$$N_{\mathrm{D,w,Q}} = k_{\mathrm{Q}} N_{\mathrm{D,w,Q_{co}}} = \frac{k_{\mathrm{Q}}}{k_{\mathrm{Q_{SDL}}}} N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}} = k_{\mathrm{Q,Q_{SDL}}} N_{\mathrm{D,w,Q_{SDL}}}$$

まとめ

- リニアック標準計測について解説を行った
- $k_{\mathrm{Q,Q_0}}$が不要になったことで，**水吸収線量の不確かさは低減**
- 電子線では線量計測を実施する**測定点の変化に注意**
- リニアック校正が普及されると，相互校正は不要になる可能性もある
- 今後，リニアック校正の内容が充実していくことに期待！