

群馬県立県民健康科学大学大学院
診療放射線学研究科 診療放射線学専攻
放射線治療学分野

博士論文

高エネルギー光子線の水吸収線量計測における至適計測回数を決定する
ための新しい統計的方法の構築に関する研究

**New Statistical Method for Determining the Optimum Number of
Measurements in Absorbed Dose-to-Water Measurement of High-Energy
Photon Beam**

令和 5 年 7 月

津野 隼人

Tsuno Hayato

治療に用いられる医療用直線加速器 (LINAC) からのビーム出力は LINAC ヘッド内に搭載されているモニタ線量計によって制御されている。モニタ線量計は電離電流を測定することにより Monitor Unit (MU) を決定している。放射線治療品質管理士は基準条件における水吸収線量を計測することにより、MU と水吸収線量の関連性を紐づけることができる。水吸収線量はファーマ形電離箱と電位計を用いた計測により決定される。このためには、高エネルギー光子線を基準条件下でファーマ形電離箱に照射し、得られた電荷量を電位計で読み取ることで水吸収線量を計測できる。この水吸収線量の計測における反復計測の精度を確保するために、計測結果のばらつきを 2σ (σ は不偏分散) よりも小さくする必要がある。電位計の有効桁が 4 桁の場合では反復計測 10 回の繰り返し計測をすることで 0.05% の再現性があることが、AAPM TG-142 で例に挙げられている。しかし、反復計測回数が 10 回となるデータや根拠は示されておらず、放射線治療の品質管理を実施する放射線治療品質管理士は収集された電荷量のばらつきを計算して、計測結果の精度を判断している。電荷量は LINAC 出力の変動、電離箱線量計や電位計のレスポンスによってばらつくため計測回数を増やすことによりばらつきを小さくする方法が一般的に用いられるが、反復計測を何回行う必要があるかは明らかでない。そこで、この研究では LINAC のビーム出力のばらつきから至適計測回数を計算するための統計的方法を考案した。

LINAC のビーム出力を管理するための水吸収線量計測はファーマ形電離箱と電位

計を用いて実施する必要がある，これらの電離箱線量計と電位計は適切な頻度で校正を受けることで校正定数が与えられる．放射線治療品質管理士は校正を受けない年の電位計の品質管理をする必要がある，ファーマ形電離箱に放射線を照射して得た電流を電流源として用いる方法が電位計ガイドラインに記載されている．この電離箱線量計に放射線を照射することにより得られる電流を電位計により読み取る方法では，得られた電荷量のばらつきがファーマ形電離箱と電位計のどちらに起因するものかを切り分けることができない．この問題を解決するために高価な高精度電流源を用いた報告はあるが，高価であるが故に多くの放射線治療施設で利用できないという問題がある．そこで，この研究では考案した統計的方法を用いて水吸収線量計測のための至適計測回数を計算し，さらに安価で高精度な電流源を開発することによって，放射線治療品質管理士が自施設で簡便に正確な電位計校正を実施することができるのではないかと考えた．

本研究の目的は統計的方法により施設が保有する LINAC と電離箱線量計および電位計の電荷量のばらつきに適した至適計測回数を求めるための統計的方法を考案することである。そして、新しく開発した電流源を用いて放射線治療施設によって電位計の校正ができる方法を構築することである。

方法

複数の LINAC のビームを用いて線量最大深水吸収線量を計測した。反復計測 10 回の電荷量の平均値を用いて計算した線量最大深水吸収線量を基準とした。比較対象は反復計測 1 回から 9 回までの電荷量の平均値である。反復計測回数を増やしたときの線量最大深水吸収線量の変化量が反復計測 10 回の変動係数よりも小さくなる回数を計算した。

これとは別に、開発電流源からの既知の電流値を電位計に通電し電荷量を複数回計測した。開発電流源から得た電荷量の精度を確認するために、電荷量のばらつき、電流源による電位計へのリーク、および校正機関によって校正定数を値付けされた電位計を基準にした相互校正により電位計校正定数を求めた。

結果

反復計測 10 回の結果の平均値を基準にした場合、計測回数を増やしても線量最大深水吸収線量の計算結果に変化がなかった回数を最適な計測回数として計算できた。この研究で用いたすべての LINAC の機種と公称エネルギーにおいて、反復計測 5 回

の電荷量の平均値は、反復計測 10 回の電荷量の平均値に代わることが示された。この方法を用いることで各放射線治療施設の使用機器ごとの最適な計測回数を計算できると考えられる。

また、電流源を用いた電荷量の測定結果のばらつきは変動係数が 0.05%未満であり、なおかつ電流源による電位計へのリークは無視できる程度であった。電位計校正定数は校正を受けた際に与えられた電位計校正定数の不確かさの範囲内で計算できた。放射線治療施設によっては放射線出力のばらつきがとても大きな LINAC があり、この場合には本方法を用いて LINAC 出力のばらつきに適した計測回数を決定できない可能性があること、電荷量の計測結果の偶然誤差を考慮できないことが研究限界である。また、開発電流源によって計算された電位計校正定数は、校正を受けた電位計を基準にした相対電荷量を用いているため、校正を受けた電位計に問題がある場合は評価ができないという課題がある。

結論

この研究では、水吸収線量計測において最適な計測回数を計算する統計的方法を考案し提示した。この新しい方法を用いることにより、計測精度に影響を与えることなく最小計測回数を知ることができる。この研究で使用した複数の LINAC と複数の公称エネルギーの組み合わせによっては、4 回以下の反復で計算した結果を 10 回の反復で得た結果と同等に扱うことが可能である。計測結果の安定性や再現性を許

容するための手順や基準は、各施設の LINAC のばらつきに沿って設定されるべきものである。この研究結果により計測回数を大きく増やさずとも、計測結果に起因する不確かさを小さくできる可能性があることを明らかにした。

また、本研究で新しく安価で高精度な電流源を開発した。この開発電流源を用いて校正を受けた電位計を基準として放射線治療品質管理士が自施設において校正結果相当の精度を担保した電位計の点検を実施可能であることを示した。この電流源を用いた放射線治療品質管理士による電位計校正定数を校正機関によりトレーザビリティが確保された電位計校正定数と比較して、不確かさの範囲内で一致することが確認された。

以上、この研究によって至適計測回数を計算するための新しい統計的方法と新しく開発した電流源を用いることにより、放射線治療施設において電位計の校正を正確かつ効率的に行うことができることを示した。

目次

| | |
|-------------------------------------------------------|----|
| 1 章 緒言 | 9 |
| 1. 1 放射線治療において必要とされる水吸収線量計測 | 9 |
| 1. 2 電離箱線量計による水吸収線量計測 | 12 |
| 1. 2. 1 温度気圧補正係数 | 13 |
| 1. 2. 2 イオン再結合補正係数 | 14 |
| 1. 2. 3 極性効果補正係数 | 15 |
| 1. 2. 4 電位計校正定数 | 16 |
| 1. 3 不偏分散と変動係数 | 17 |
| 1. 4 本論文の目的 | 20 |
| 2 章 高エネルギー光子線の水吸収線量計測における至適計測回数を決定するための統計的方法を用いた新しい方法 | 21 |
| 2. 1 研究の位置づけ | 21 |
| 2. 2 研究の目的 | 23 |
| 2. 3 研究の方法と使用機器 | 24 |
| 2. 3. 1 計測環境 | 33 |
| 2. 3. 2 水吸収線量の計算方法 | 37 |
| 2. 3. 3 至適計測回数の計算 | 39 |
| 2. 3. 4 至適計測回数の決定 | 44 |
| 2. 4 結果 | 48 |
| 2. 5 考察 | 58 |
| 2. 6 研究の限界 | 61 |
| 2. 7 結論 | 62 |
| 3 章 新たに開発した電流源を用いたユーザによる電位計点検の実施可能性についての検討 | 63 |
| 3. 1 開発電流源の主論文および社会的問題の位置づけ | 63 |
| 3. 2 開発の目的 | 66 |
| 3. 3 研究の方法 | 67 |
| 3. 3. 1 開発電流源の外観 | 68 |
| 3. 3. 2 開発電流源の特性 | 75 |
| 3. 3. 3 使用する電位計 | 78 |
| 3. 3. 4 電位計の点検 | 80 |
| 3. 3. 5 $k_{\text{elec,user}}$ の計算 | 83 |
| 3. 4 結果 | 85 |
| 3. 4. 1 電流値の測定結果 | 85 |

| | | |
|---------|----------------------------|-----|
| 3. 4. 2 | 電流源の特性結果 | 89 |
| 3. 4. 3 | 電荷漏れの測定結果 | 95 |
| 3. 4. 4 | $k_{\text{elec,user}}$ の結果 | 97 |
| 3. 5 | 考察 | 104 |
| 3. 6 | 開発の限界 | 108 |
| 3. 7 | 結論 | 109 |
| 4 章 | 総括 | 110 |
| 5 章 | 参考文献 | 112 |
| 6 章 | 研究業績リスト | 115 |
| 7 章 | 謝辞 | 118 |
| 付録 1 | 第 2 章の各リニアックのビームパラメータと補正係数 | 120 |
| 付録 2 | 第 2 章の各リニアックのビームデータ | 141 |
| 付録 3 | 第 2 章の $N > 3$ の測定データ | 176 |
| 付録 4 | 第 3 章のグラフの測定データ | 179 |

1 章 緒言

1. 1 放射線治療において必要とされる水吸収線量計測

患者に投与される放射線の処方線量は吸収線量で定義され、人体組織の約 7 割が占めていることから水吸収線量により評価される。Figure 1 に医療用直線加速器 (Linear accelerator: LINAC) の外観を示す。LINAC から放射線はパルス制御されており、モニタユニット値 (Monitor unit: MU) によってその出力を制御されている。この MU は、LINAC ヘッド (Figure 1 の赤枠部分) 内に設置されているモニタ線量計 (Figure 2) を放射線が透過するときに得られる電離電流を測定することにより決定される。放射線治療品質管理士は「外部放射線治療における水吸収線量の標準計測法」(以下、標準計測法 12) [1]に定められた基準条件における水吸収線量を計測することで、MU と水吸収線量を関連づけることができる。したがって、放射線治療においては基準条件における水吸収線量の計測が必要である。



Figure 1
Exterior of LINAC. The LINAC head with monitor dosimeter is highlighted with the red frame.

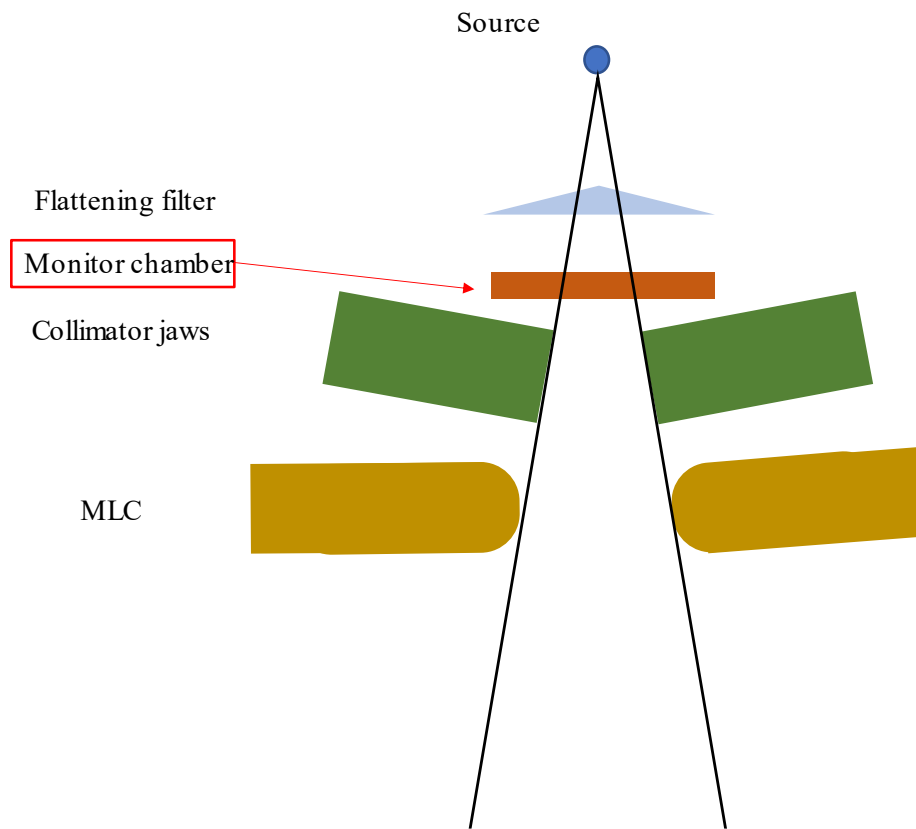


Figure 2

Geometry inside the LINAC head. The monitor chamber is installed directly below the flattening filter in the LINAC head (red arrow).

1. 2 電離箱線量計による水吸収線量計測

水吸収線量の計測は標準計測法 12 に示された方法により実施され，水吸収線量校正定数が与えられたファーマ形電離箱，および電位計校正定数が与えられた電位計を用いて計測が行われる．高エネルギー光子線をファーマ形電離箱に照射し電位計で読み取られた電荷量を用いて水吸収線量が得られる．線質 Q における水吸収線量 $D_{w,Q}$ は，基準線質 Q_0 における電離箱線量計の水吸収線量校正定数 N_{D,w,Q_0} と，校正点に設置されたファーマ形電離箱の表示値 M_Q を用いて式 1 から計算できる．

$$D_{w,Q} = M_Q N_{D,w,Q_0} k_{Q,Q_0} \quad 1$$

ここで， k_{Q,Q_0} は線質変換係数であり基準線質 Q_0 と異なる線質 Q における電離箱線量計のレスポンスの変化を補正するための係数であり，電離箱線量計の固体ごとに与えられている．また，表示値 M_Q は電位計表示値の平均値 \bar{M}_Q^{raw} に，温度気圧補正係数 k_{TP} ，電位計校正定数 k_{elec} ，極性効果補正係数 k_{pol} ，イオン再結合補正係数 k_s を乗じた値であり式 2 から計算できる．

$$M_Q = \bar{M}_Q^{\text{raw}} k_{TP} k_{\text{elec}} k_{\text{pol}} k_s \quad 2$$

1. 2. 1 温度気圧補正係数

ボイル・シャルルの法則は、一定温度において一定量の気体体積は圧力に反比例し、一定圧力において気体体積は絶対温度に比例するという法則である。電離箱線量計の電離空洞内の体積が一定であることから、空気の質量は大気圧に比例し温度に反比例する。標準計測に用いられる電離箱線量計は内部が気密構造ではなく通気型構造となっており、温度および気圧による電離体積内の空気質量の変化を補正するために温度気圧補正係数 k_{TP} が必要で、電離箱線量計の表示値に k_{TP} が乗じられる。温度気圧補正係数は式 3 から計算できる。

$$k_{TP} = \frac{(273.2+T)}{(273.2+T_0)} \cdot \frac{P_0}{P} \quad 3$$

ここで、 T と P はそれぞれ計測時の温度と気圧、 T_0 と P_0 はそれぞれ水吸収線量計測時の空気の基準状態における温度と気圧であり、 $T_0 = 22.0^{\circ}\text{C}$ 、 $P_0 = 101.33 \text{ kPa}$ である。

1. 2. 2 イオン再結合補正係数

電離箱線量計を用いた水吸収線量計測では、電離空洞内に発生した正負のイオンに再結合が起こるため、発生した全ての電荷を収集することはできない。電離空洞内で発生したイオンは、初期再結合と一般再結合の 2 つのプロセスにより再結合される。初期再結合は電離空洞内の電離密度すなわち線量率に影響されず、実務上小さいためパルス放射線では無視してもよいとされている[1, 2, 3]が、一般再結合はパルス放射線がパルス当たりの電離密度が大きいことから無視できない。標準計測法 12 では、パルス放射線に対しては 2 点電圧法によるイオン再結合補正係数を適用することが推奨されている[1]。イオン再結合補正係数は以下の式 4 から計算できる。

$$k_s = a_0 + a_1 \left(\frac{M_1}{M_2} \right) + a_2 \left(\frac{M_1}{M_2} \right)^2 \quad 4$$

ここで、定数 a_0 , a_1 , a_2 は V_1/V_2 に対応した値が標準計測法 12 の表 A.6.1 に与えられており、 M_1 は通常用いられる印加電圧 V_1 での表示値、 M_2 は V_1 の 2 分の 1 以下の印加電圧 V_2 での表示値である。

1. 2. 3 極性効果補正係数

印加電圧の極性の正負によって、電離箱線量計の表示値に差が生じることを極性効果と呼ぶ。極性効果の原因はコンプトン効果による電子の放出が主であり、集電極や絶縁体の体積に大きく影響され、二次電子平衡が成立しない領域ではこの効果が大きいと報告されている[4]。また、極性効果は内径 6 mm 以内のファーマ形電離箱においては一般的に小さく[4]、このことを計測により確認した後であれば、実用的に通常使用の一方の極性だけの計測だけでよいとされている[1]。確認のとれていない電離箱線量計においては印加電圧の極性を切り替えて得た各極性における電離量の平均値を真の電離量として取り扱う。極性効果補正係数は以下の式 5 から計算できる。

$$k_{\text{pol}} = \frac{|M_{\text{raw}}^+| + |M_{\text{raw}}^-|}{2 |M_{\text{raw}}|} \quad 5$$

ここで、 M_{raw}^+ は正電荷が収集されたときの表示値、 M_{raw}^- は負電荷が収集されたときの表示値、 M_{raw} (M_{raw}^+ または、 M_{raw}^- のいずれか) は k_{pol} を求めるための基準となる計測値で、電離箱線量計の校正時と同じ極性での表示値を用いる。

1. 2. 4 電位計校正定数 k_{elec}

電位計校正定数は電離箱線量計と電位計を校正した場合に，電位計の表示値を校正時の真値に校正するための定数である．電離箱線量計と電位計を一体で校正を受けた場合は 1.000 を用いる．2017 年 9 月より電離箱線量計と電位計をそれぞれ校正できる分離校正を受けることができるようになった．2023 年 4 月より，電離箱線量計と電位計の一体校正は終了し，分離校正によって放射線治療を実施している施設の電離箱線量計と電位計には，水吸収線量校正定数および電位計校正定数が与えられる．

1. 3 不偏分散と変動係数

変数 x のサンプルの値が $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ であるとき, このサンプルの平均値 \bar{x} は次の式 6 から計算できる.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 6$$

サンプル x_i を反復計測回数 n のとき, 不偏分散 $\sigma(x)$ は次の式 7 から計算できる.

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad 7$$

不偏分散を平均値で除した値を変動係数 (coefficient of variation : CV) と呼ぶ. CV は次の式 8 から計算できる.

$$CV = \frac{\sigma(x)}{\bar{x}} \times 100 \quad (\%) \quad 8$$

ここで, $\sigma(x)$ はサンプルの不偏分散を, CV はサンプルの相対的なばらつきを示す.

一般的に, 放射線計測においては計測結果の代表値として平均値が用いられ, 計測された複数のサンプル (電荷量) から平均値が計算される. サンプルのばらつきを確

認するために不偏分散と変動係数が計算される．これらの値は測定や計測のサンプルサイズに依存するため，信頼性の高いデータを取得するためには，サンプルサイズを増やすことによりばらつきを小さくすることが一般的である．

Figure 3 に測定に用いた統計用語の概念図を示す．母集団から抽出された標本は測定された電荷量に該当する．例えば，繰り返し 3 回測定の操作を 2 回反復した場合，サンプルサイズは 3 でサンプル数は 2 となる．

母集団は患者への投与線量を表す水吸収線量であり，水吸収線量を無限に計測することは現実的ではないため，サンプルされた電荷量の平均値から水吸収線量が計算される．サンプルのばらつきが不偏分散および変動係数である．サンプルサイズは測定回数で，サンプル数は一連の反復測定の繰り返し回数を示す．

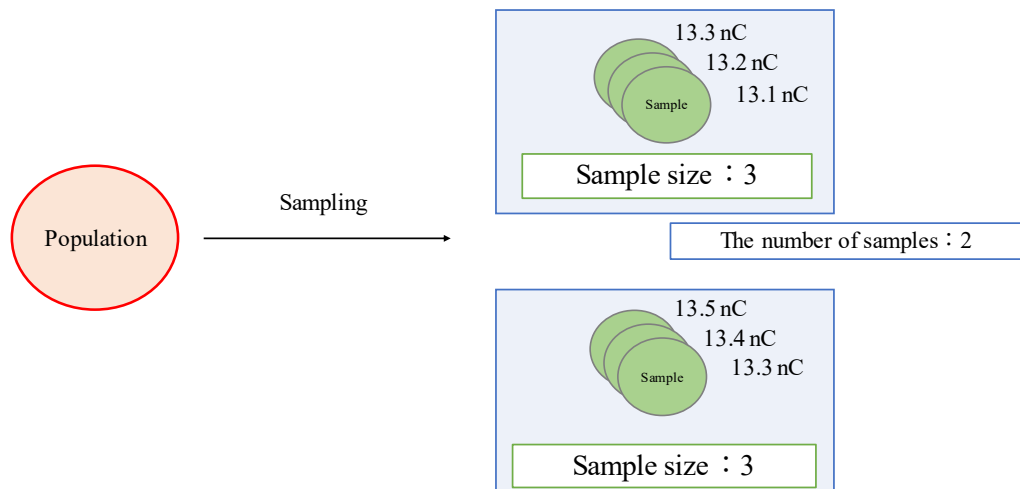


Figure 3

An explanation of statistical terms to illustrate the relationship between the number of measurements (sample size) and the number of samples.

The measured data (amount of charge) are samples collected from the population. In this example, there are two repetitions of 3 measurements; therefore, the sample size is 3, and the number of samples is 2.

1. 4 本論文の目的

電離箱線量計により計測された電荷量は LINAC のビーム出力の変動，電離箱線量計のレスポンス，電位計の感度特性によってばらつくため，計測回数を増やすことによりばらつきを小さくする方法が一般的に用いられてきた．しかし，反復計測を何回行う必要があるかについてはこれまでに明らかとなっていない．そこで，この研究では電荷量のばらつきから最適な計測回数を統計的方法から推定する方法を考案することを目的とした．この新しい方法を用いれば，水吸収線量の計測結果の精度に影響を与えずにデータ収集時間を短縮できることが期待される．

2 章 高エネルギー光子線の水吸収線量計測における至適計測回数を決定するための統計的方法を用いた新しい方法

2. 1 研究の位置づけ

放射線治療施設における LINAC の品質保証においては、ビーム出力の変化が許容値内であることを確認するために水吸収線量を計測しなければならない[5, 6]。水吸収線量の反復計測結果の精度を保証するためには、計測した電荷量のばらつきを示す不偏分散と変動係数を計算する必要がある。米国医学物理学会（American Association of Physicists in Medicine : AAPM）のタスクグループ（Task Group : TG）142 は、計測器の再現性は 3 回以上の反復計測の 2σ （ σ ：不偏分散）が許容値よりも小さいことを例示している。さらに、AAPM TG-142 は例示として、電位計のフルスケールが 4 桁の表示で 0.01% の精度があり、10 回の繰り返し計測の再現性は 0.05% であり、絶対線量の計測結果の不確かさは 1.5% であることを示している[7]。AAPM TG-51 および AAPM TG-51 補遺は、高エネルギー光子線の水吸収線量計測における計測回数と水吸収線量の計算結果のばらつきの関係に言及していない[5, 6]。水吸収線量の計測結果の不確かさを正確に評価し、最適な計測条件（ここでいう最適とは取得するサンプルサイズが必要最小限という意味である）を決定することは、データの信頼性を保証し、計測に必要な時間を短縮するために非常に重要である。

この研究では、高エネルギー光子線の水吸収線量計測における最適な計測条件を決定するために、電離箱線量計を用いて計測された電荷量の変動とこの電荷量を用いて計算された水吸収線量の変動との関係性を検討した。使用したデータは、複数の放射線治療施設の LINAC から収集したものである。計測のサンプルサイズを最適化するためには、水吸収線量の変化の許容値を設定することが必要である。AAPM TG-65 は、計測された水吸収線量の精度 1% とすることを目標としている [8]。Boyer らは、校正点における水吸収線量が 1% 変化すると、早期腫瘍制御率に 2% の影響を及ぼすと報告している [9]。そこで、本研究で水吸収線量の変化の許容値を 1% とした。

2. 2 研究の目的

この研究の目的は、高エネルギー光子線の出力を計測するために電離箱線量計を用いて計測した電荷量のばらつきを用いて、水吸収線量の最適なサンプルサイズ（計測回数）を決定する方法を新たに提案することである。

2. 3 研究の方法と使用機器

Table 1-1 から Table1-8 に、本研究で使用した LINAC，シリアル番号および光子線の公称エネルギーの関係をおよび各施設の使用機器について列挙する．電離箱，電位計，温度計，気圧計は事前に校正がされているものを使用した．電離箱，電位計の施設ごとのシリアル番号は付録 1 に掲載した．

Table 1-1

Types of linear accelerators and photon energies used in this study.

| Linac | Serial number | Nominal energy [MV] |
|----------------|---------------|------------------------|
| TrueBeam. A | 2993 | 4, 6, 10, 6FFF, 10FFF |
| TrueBeam. B | 2492 | 6, 10, 15, 6FFF, 10FFF |
| TrueBeam. C | 2491 | 4, 6, 10, 6FFF, 10FFF |
| Clinac 21EX. A | 3799 | 4, 10 |
| Clinac 21EX. B | 2901 | 6, 15 |
| UNIQUE | 2067 | 6 |
| Synergy. A | 152830 | 4, 6, 10 |
| Synergy. B | 153785 | 4, 6, 10 |
| Synergy. C | 151869 | 6, 10 |
| ARTISTE. A | 5642 | 6, 10 |
| ARTISTE. B | 5714 | 6, 10 |
| Novalis | 6166 | 6, 10, 6FFF |

Notes: A-C are used to identify the same type of Linac. FFF, flattening filter free beams.

Table 1-2

List of equipment used at facility 1.

| Equipment | Device name | Manufacturer |
|--------------|---------------------------|------------------------|
| LINAC | TrueBeam. A | Varian Medical Systems |
| | TrueBeam. B | |
| | TrueBeam. C | |
| Chamber | Clinac 21EX. B | PTW |
| | 30013 | |
| Electrometer | UNIDOS ^{webline} | PTW |
| | RAMTEC Duo | TOYO Medic |
| Thermometer | SK-250WP II -N #344844 | SATO KEIRYOKI |
| Barometer | T-68 #100800 | SANOH |
| Phantom | 1D Scanner | TOYO Medic |

Table 1-3

List of equipment used at facility 2.

| Equipment | Device name | Manufacturer |
|--------------|------------------|------------------------|
| LINAC | Clinac 21EX. A | Varian Medical Systems |
| | UNIQUE | |
| Chamber | 30013 | PTW |
| Electrometer | RAMTEC Smart | TOYO Medic |
| Thermometer | SA-270WP-K #0722 | SATO KEIRYOKI |
| Barometer | R-30JK #212648 | SANOH |
| Phantom | WP1D | IBA |

Table 1-4

List of equipment used at facility 3.

| Equipment | Device name | Manufacturer |
|--------------|--------------------------|---------------|
| LINAC | Synergy. A | ELEKTA |
| Chamber | 30013 | PTW |
| Electrometer | UNIDOS | PTW |
| | UNIDOS ^{weblne} | PTW |
| Thermometer | SK-1260 #6004869 | SATO KEIRYOKI |
| Barometer | PTB330 #2940011 | VAISALA |
| Phantom | T41032 | PTW |

Table 1-5

List of equipment used at facility 4.

| Equipment | Device name | Manufacturer |
|--------------|--------------------------|--------------|
| LINAC | Synergy. B | ELEKTA |
| Chamber | 30013 | PTW |
| Electrometer | RAMTEC Solo | TOYO Medic |
| | UNIDOS ^{weblne} | PTW |
| Thermometer | CTR2000-23 #016665 | SANOH |
| Barometer | T-68 #100698 | SANOH |
| Phantom | BluePhantom2 | IBA |

Table 1-6

List of equipment used at facility 5.

| Equipment | Device name | Manufacturer |
|--------------|--------------------------|------------------------|
| LINAC | Synergy. C | ELEKTA |
| | Novalis | Varian Medical Systems |
| Chamber | 30013 | PTW |
| Electrometer | UNIDOS T10001 | TOYO Medic |
| | UNIDOS ^{weblin} | PTW |
| Thermometer | 1523 #3266238 | FLUKE |
| Barometer | PTB330 #2230003 | VAISALA |
| Phantom | T41023 | PTW |

Table 1-7

List of equipment used at facility 6.

| Equipment | Device name | Manufacturer |
|--------------|--------------|---------------|
| LINAC | ARTISTE, A | SYMENSE |
| Chamber | 30013 | PTW |
| Electrometer | RAMTEC Smart | TOYO Medic |
| Thermometer | 1521 #77496 | FLUKE |
| Barometer | T-68 #2657 | SATO KEIRYOKI |
| Phantom | WP1D | IBA |

Table 1-8

List of equipment used at facility 7.

| Equipment | Device name | Manufacturer |
|--------------|--------------------------|---------------|
| LINAC | ARTISTE, B | SYMENSE |
| Chamber | 30013 | PTW |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | PTW |
| Thermometer | SK-250WP II -N #301290 | SATO KEIRYOKI |
| Barometer | T-68 #100795 | SANOH |
| Phantom | T41023 | PTW |

2. 3. 1 計測環境

水吸収線量の計測データは、7 つの放射線治療実施施設から収集した。12 台の LINAC で、3 台の TrueBeam (Varian Medical Systems, Palo Alto, CA) , 2 台の Clinac 21EX (Varian) , 1 台の UNIQUE (Varian) , 3 台の Synergy (Elekta, Stockholm, Sweden) , 2 台の ARTISTE Solution (Siemens Healthcare, Erlangen) , 1 台の Novalis (BrainLab, Munich, Germany) から得られたデータを使用した。

線源回転軸間距離 (source axis distance : SAD) 一定とした高エネルギー光子線の水吸収線量計測法は標準計測法 12 [1]の基準条件のもと、各施設で同じ方法で実施した。そして、MU あたりの水吸収線量を計算した。

ここから基準条件[1]の幾何学的配置について記載する (Figure 4, Table 2) 。電離箱線量計を水中 10 cm に設置した。照射野サイズは、SAD が 100 cm の点で $10 \times 10 \text{ cm}^2$ とした。電離箱線量計の基準点は幾何学的中心とした。これ以降、照射野サイズはこの基準照射野サイズである $10 \times 10 \text{ cm}^2$ で計測を実施している。電離箱線量計は各施設のファーマ形電離箱 30013 (PTW, Freiburg, Germany) を使用した。各施設の電離箱線量計と電位計は日本校正サービス (Japan Calibration Service System : JCSS) 認定の校正機関で校正されている[1]。この JCSS 校正機関は日本における二次標準校正機関である。つまり、水吸収線量校正定数 $N_{D,w}$ と電位計校正定数 k_{elec} は JCSS 校正機関により事前に与えられているものを使用した。電位計の電源投入後、電位計の安定のために 15 分

間を置いた。電離箱線量計に電位計を接続し、校正時と同じ印加電圧を投入した。印加電圧投入後に電圧の安定のために 15 分の時間を置いた。ヒステリシス現象の対策として 500 MU 以上の事前照射を実施し、各施設の LINAC の公称エネルギーにおいて電離量の計測回数を連続 10 回とした。この連続 10 回計測の間はビームの出力が安定していることを事前に確認している。各施設では 100 MU から 200 MU の間の MU 数を照射した（詳細は付録 2 参照）。得られた電離量に対して必要な補正を実施し水吸収線量を計算した。

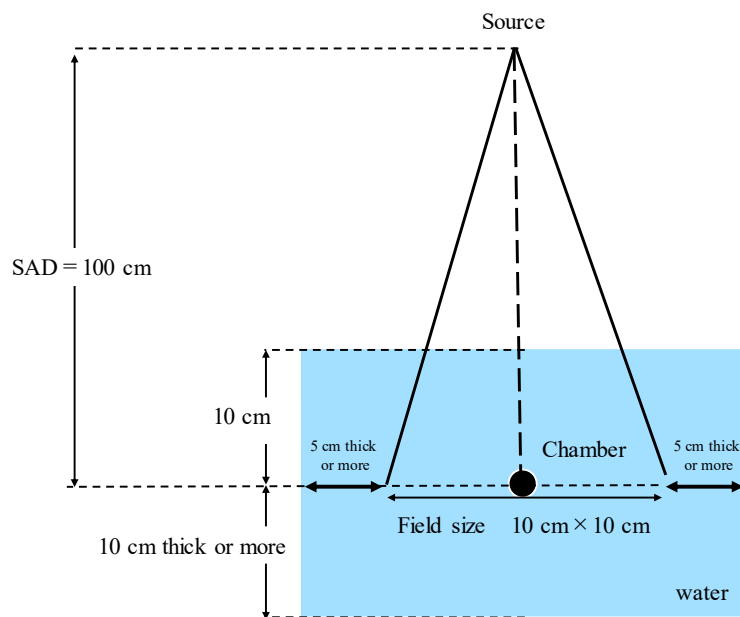


Figure 4

Geometry of measurement of absorbed dose-to-water under standard conditions in standard measurement method by the Japan Society of Medical Physics.

Table 2

Reference conditions for absorbed dose-to-water dosimetry of photon beam.

| Parameter | Condition |
|-------------------|-----------------------|
| Phantom | Water |
| Chamber type | Farmer |
| Calibration depth | 10 cm |
| Reference depth | Center of the chamber |
| SAD | 100 cm |
| Field size | 10 cm × 10 cm |

2. 3. 2 水吸収線量の計算方法

標準計測法 12 に示された基準条件に基づき，水吸収線量計測を実施した．水吸収線量は以下の式 9 から計算した．

$$D_w^Q(d_{\text{ref}}) = M_Q k_Q N_{D,w,Q_0} \text{ (Gy)} \quad 9$$

ここで， M_Q は必要な電位計の表示値に全ての補正係数を乗じたユーザ線質 Q における表示値である．つまり，イオン再結合補正係数 k_{pol} ，極性効果補正係数 k_s ，温度気圧補正係数 k_{TP} ，電位計校正定数 k_{elec} を乗じた結果である． N_{D,w,Q_0} は，基準線源の水吸収線量校正定数である． $D_w^Q(d_{\text{ref}})$ はユーザ線質 Q における基準深 d_{ref} の水吸収線量である． $D_w^Q(d_{\text{max}})$ は以下の式 10 から計算した，ユーザ線質 Q の最大深 d_{max} における水吸収線量である．

$$D_w^Q(d_{\text{max}}) = \frac{D_w^Q(d_{\text{ref}})}{TMR(10)} \text{ (Gy)} \quad 10$$

ここで，組織最大線量比（tissue maximum ration：TMR）はビーム中心軸上の d_{max} の水吸収線量に対する任意の深さの水吸収線量の相対比である． $TMR(10)$ は，水中 10 cm における TMR である．本研究は放射線治療を実施している施設による多施設研究であるため，水吸収線量を計測するために設定された MU 値は施設ごとに異なる．この MU 値は電荷量と直線性[7]が確保されていることを事前に確認された値である．また，電

離箱のヒステリシス現象や安定性について事前に確認している．MU あたりの線量最

大深水吸収線量（Dose monitor unit : DMU）は以下の式 11 から計算した．

$$DMU = \frac{D_w^Q(d_{\max})}{MU} \times 100 \text{ (cGy/MU)} \quad 11$$

これ以降，上記の式 11 で計算した DMU を用いて，水吸収線量の至適計測回数の決定方法について説明する．

2. 3. 3 至適計測回数の計算

DMU は、10 個の計測データから抽出した n 個のデータ (n は 1~10 まで変化) を用いて、 DMU を計算した。 DMU のばらつきを計算することで、最適な計測回数を推定した。本研究では、ばらつきが少なく安定していると考えられる 10 個の計測データの平均値を基準値として設定した。つまり、最適な計測回数とは、計測回数 10 回に置き換えることができる最小計測回数 n である。ここからは、計測回数 n を決定するための式について説明をする。基準値を 10 としたため、 n の最大値を 10 とした。Figure 5 に、本研究におけるデータ処理の考え方を示した。以下に、データ解析について概念を Figure 5 の記号を用いて説明する。

n : iterations

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| D_n | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | D_5 | D_6 | D_7 | D_8 | D_9 | D_{10} |

$$\overline{D}_1 = D_1$$

$$\overline{D}_2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 D_i$$

$$\overline{D}_6 = \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 D_i$$

Figure 5

Data processing concept of this study. n is the number of iterated observations. D_n is the absorbed dose-to-water after n iterations. \overline{D}_n is the absorbed dose-to-water calculated up to n iterations.

n 回の繰り返し計測の平均値から計算した水吸収線量を $D_{w,n}^Q(d_{\max})$ （以下、 D_n ）とする。 D_n は、以下の式 12 から計算した。

$$\bar{D}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D_i \text{ (Gy)} \quad 12$$

ここで、 D_i は i 回目までの電荷量の平均値から計算した水吸収線量である。 D_n の計測結果のばらつきを示す変動係数 CV は、以下の式 13 から計算した。

$$CV_n = \frac{\sigma_n}{\bar{D}_n} \times 100 \text{ (\%)} \quad 13$$

ここで、 CV_n は水吸収線量を n 回計測したときの CV である、 σ_n は \bar{D}_n の不偏分散である。 n の基準値である 10 回の反復計測を 1 回とカウントし、 N 回繰り返した。重要なのは、 n と N の定義の違いである。" n " は水吸収線量を計算するための反復計測回数を示すサンプルサイズで、" N " は 10 回の反復計測における繰り返し回数を示すサンプル数である。これ以降、この定義の違いを混同しないように n は反復計測回数、 N は繰り返し回数と表記する。Figure 6 に n と N の関係を示す。

N : repetitions

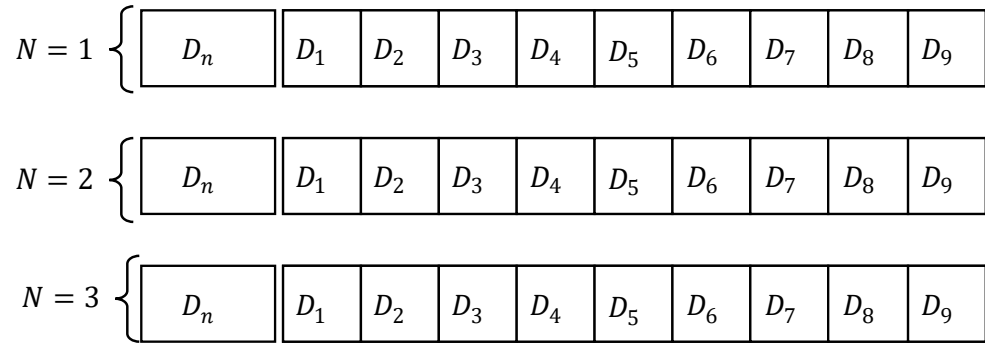


Figure 6

Concept showing the relationship between n and N . n is the number of iterated observations measured up to a maximum of 10. N is the number of repeats of 10 measurements.

Figure 6 の列では、 n 回目までの水吸収線量の累積線量を表している．行が複数縦に並んでいる場合は、10 回の反復計測を N 回繰り返したことを示している． N を 3 回以上としたパイロットスタディにおいて、至適計測回数の計算結果に差が出なかったため、この研究では N の最大値を 3 回とした．反復計測回数を n 回としたときの \bar{D}_n を用いた DMU_n を以下の式 14 から計算した．

$$DMU_n = \frac{\bar{D}_n}{MU} \times 100 \text{ (cGy/MU)} \quad 14$$

ここで、 \bar{D}_n は式 12 を用いて計算した、線量最大深における反復計測回数 n 回により計測した電荷量の平均値から計算した水吸収線量で、 MU は、各々の施設の計測時に設定された MU 値である．

2. 3. 4 至適計測回数の決定

ここから、反復計測回数を 10 回としたときの \bar{D}_{10} を用いて計算した DMU_{10} を基準と定義し、 DMU_{ref} と表記する。この章では、この DMU_{ref} を用いた最適な計測回数を求めるための手順について説明する。まず、 DMU_{ref} に対する DMU_n の相対誤差を計算し、その絶対値 $\varepsilon_{R,n}\%$ を計算する。 $\varepsilon_{R,n}$ は、以下の式 15 から計算した。

$$\varepsilon_{R,n} = \left| \frac{DMU_n - DMU_{\text{ref}}}{DMU_{\text{ref}}} \times 100 \right| (\%) \quad 15$$

次に、 DMU_{ref} に対する DMU_n の相対誤差の変化 $\varepsilon_{R,n}\%$ が CV_{ref} の変動の範囲内かどうかを調べるために、 CV_{ref} に対する $\varepsilon_{R,n}$ の絶対誤差 $\varepsilon_{A,n}$ を計算する。 $\varepsilon_{A,n}$ は、以下の式 16 から計算した。

$$\varepsilon_{A,n} = \varepsilon_{R,n} - CV_{\text{ref}} \quad 16$$

ここで、 $\varepsilon_{R,n}$ は式 15 を用いて計算した DMU_{ref} に対する DMU_n の相対誤差の絶対値である。 CV_{ref} は反復計測回数 10 回の変動係数である。

このように、 $\varepsilon_{A,n}$ が正の値となる場合、 $\varepsilon_{R,n}$ は CV_{ref} よりも大きくなる。つまり、 $\varepsilon_{R,n}$ が DMU_{ref} に対する DMU_n の相対誤差の絶対値であるため、 DMU_{ref} に対する DMU_n の変

化が CV_{ref} で示したばらつきの範囲外であることを示す．同様に， $\varepsilon_{A,n}$ が負の値となる場合について考える． $\varepsilon_{R,n}$ は CV_{ref} よりも小さく， DMU_{ref} に対する DMU_n の変化が CV_{ref} のばらつきの範囲内であることを示す．ここで強調したいことは， $\varepsilon_{A,n}$ が負の値となる $\varepsilon_{A,n}^{\text{negative}}$ を特定することにより，反復計測回数の基準値とした 10 回と同じばらつきとなる最小の反復計測回数 n を求めることができるということである．

そして，最小の反復計測回数 n を決定するために， $\varepsilon_{A,n}^{\text{negative}}$ が出現する確率を求めた．確率を求めるために， $\varepsilon_{A,n}^{\text{negative}}$ の数 $C_{\varepsilon_{A,n}^{\text{negative}}}$ を数え， CV_{ref} の変化が DMU_n の変化より大きいデータを特定した． N 回の繰り返し回数で $C_{\varepsilon_{A,n}^{\text{negative}}}$ が出現する確率 P_n は，以下の式 17 から計算した．

$$P_n = \frac{C_{\varepsilon_{A,n}^{\text{negative}}}}{N} \quad 17$$

$$P_{n_{\min}} = 1 \quad 18$$

ここで， n_{\min} は至適計測回数で，この章で求めたいパラメータである． $C_{\varepsilon_{A,n}^{\text{negative}}}$ は $\varepsilon_{A,n}^{\text{negative}}$ を数えた数である． $C_{\varepsilon_{A,n}^{\text{negative}}}$ の具体的な計算方法は Figure 6 を用いて後述する．ここまでに示した本研究による計算手順により，水吸収線量の変化が反復計測回数 10 回の電荷量を用いて計算した水吸収線量のばらつきよりも大きいか或いは小さいかどうかを調べることができる．そして， n_{\min} を決定することで， n_{\min} よりも多い反復計測が水吸収線量の変化に影響しないことがわかる．Figure 7 に N が 3 の場合の P_3 の計算例を示す．

| | | | | | | | | | | | | |
|---------|---|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| $N = 3$ | { | $\varepsilon_{A,n}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=1}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=2}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=3}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=4}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=5}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=6}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=7}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=8}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=9}^{N=1}$ | $\varepsilon_{A,n=10}^{N=1}$ |
| | | $\varepsilon_{A,n}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=1}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=2}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=3}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=4}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=5}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=6}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=7}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=8}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=9}^{N=2}$ | $\varepsilon_{A,n=10}^{N=2}$ |
| | | $\varepsilon_{A,n}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=1}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=2}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=3}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=4}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=5}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=6}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=7}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=8}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=9}^{N=3}$ | $\varepsilon_{A,n=10}^{N=3}$ |

| | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| $\varepsilon_{A,n=3}^{N=1} = 0.016$ | $\varepsilon_{A,n=3}^{N=2} = -0.010$ | $\varepsilon_{A,n=3}^{N=3} = -0.0073$ |
| $C_{\varepsilon_{A,n=3}}^{\text{negative}} = 2$ | | |
| $P_3 = \frac{C_{\varepsilon_{A,n=3}}^{\text{negative}}}{N} = \frac{2}{3} \doteq 0.67$ | | |

Figure 7

Calculation example of P_3 when N is 3. $\varepsilon_{A,n=3}^{N=1}$ is the calculation result of Equation (8) when N is 1, and n is 3. Repeat this calculation until N is 3. $C_{\varepsilon_{A,n=3}}^{\text{negative}}$ observed from $\varepsilon_{A,n=3}^{N=1}$ to $\varepsilon_{A,n=3}^{N=3}$ and counts if it is a negative value. In this case, $\varepsilon_{A,n=3}^{N=2}$ and $\varepsilon_{A,n=3}^{N=3}$ correspond, such that the count is 2. Consequently, P_3 is the result of dividing 2 by 3.

Figure 7内の黒い太枠で囲まれている $\varepsilon_{A,n=3}^{N=1}$ は繰り返し回数 N が 1, 反復計測回数 n が 3 の場合で, 式 16 を用いて計算した結果である. また, $\varepsilon_{A,n=3}^{N=2}$ は繰り返し回数 N が 2, 反復計測回数 n が 3 の場合で, 式 16 を用いて計算した結果である. この計算を 1 から 3 の N の範囲で計算をした結果である $\varepsilon_{A,n=3}^{N=1}$, $\varepsilon_{A,n=3}^{N=2}$, $\varepsilon_{A,n=3}^{N=3}$ がそれぞれ 0.016, -0.010, -0.0073 となった. この場合の最小の反復計測回数 n を決定するための過程を次に記述する.

まず, $C_{\varepsilon_{A,n=3}}^{\text{negative}}$ を計算した. $C_{\varepsilon_{A,n=3}}^{\text{negative}}$ は繰り返し回数 3 回のうちで, $\varepsilon_{A,n=3}$ が負の値となる $\varepsilon_{A,n=3}^{\text{negative}}$ の個数である. この例で, $\varepsilon_{A,n=3}^{\text{negative}}$ は $\varepsilon_{A,n=3}^{N=2}$ (= -0.010) と $\varepsilon_{A,n=3}^{N=3}$ (= -0.0073) が該当する. すなわち, $C_{\varepsilon_{A,n=3}}^{\text{negative}}$ は 2 となる. P_3 は式 17 を用いて $C_{\varepsilon_{A,n=3}}^{\text{negative}}$ (=2) を N (=3) で割った結果である.

$$P_3 = \frac{2}{3} \approx 0.67 \quad 19$$

$n=3$ のとき, P_3 は 1 にならなかったなので, さらに P_4 を計算する必要がある. そして, P_n が初めて 1 となる最小値 n を計算した. P_4 を計算した結果 1 となれば, 最小値 n : n_{\min} は 4 と決定した.

$$P_4 = 1$$

$$n_{\min} = 4$$

P_4 の値が 1 とならなかった場合, さらに P_5 が計算される. これを P_n が 1 になるまで繰り返し計算を行った. 反復計測回数 n の最大値は 10 なので, P_{10} までの計算した. P_{10} が 1 にならなかった場合, n は 10 と決定した.

2. 4 結果

Figure 8 に、この研究で得られた DMU のヒストグラムを示す。横軸は DMU で、縦軸は頻度を示す。7 施設 12 台の LINAC のビームのサンプル数は 1050 であった。平均値、 2σ 、中央値はそれぞれ 1.003 cGy/MU, 0.013 cGy/MU, 1.003 cGy/MU であった。全ての DMU は許容値として設定した 1%未満であった。この研究で使用した LINAC のサンプルの CV_{ref} は 0.01%から 0.07%であった。

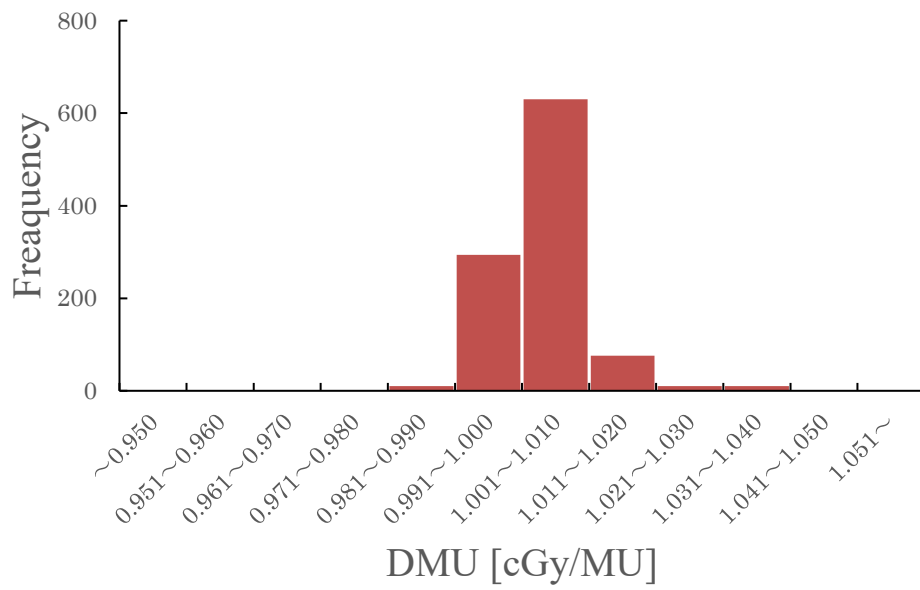


Figure 8

Histogram of the data sampled in this study. The horizontal axis is dose per MU (DMU) [cGy/MU]. The vertical axis is frequency.

Figure 9 に，反復計測回数と式 15 を用いて計算した DMU_{ref} に対する DMU_n の相対誤差の変化 $\varepsilon_{R,n}$ の関係の一例を示す．横軸は反復計測回数，縦軸は $\varepsilon_{R,n}$ を示している．凡例は繰り返し回数 N を示し，反復計測 10 回が 3 回繰り返された．このグラフから $\varepsilon_{R,n}$ は， $n \geq 3$ において 0.1% より小さくなった．このとき， $\varepsilon_{R,n}$ の最大値は 0.04% で， $n = 3$ で 0.05% 以下であった． $\varepsilon_{R,n}$ は n が徐々に 10 に近づくにつれて減少する傾向となった．

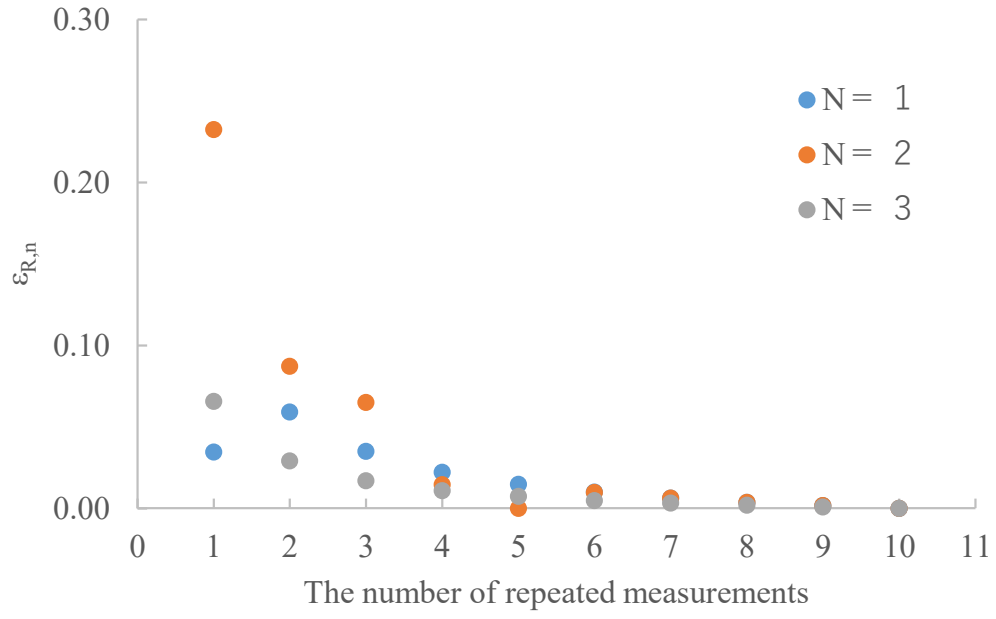


Figure 9

Example of the result for the number of iterations and changes in $\varepsilon_{R,n}$. The horizontal axis is the number of iterated measurements. The vertical axis is $\varepsilon_{R,n}$. $\varepsilon_{R,n}$ depicts the absolute values of the relative error of DMU_n with respect to the DMU_{ref} calculated using Equation (15). N is the number of repeats of 10 measurements.

Figure 10 に、反復計測回数と式 16 を用いて計算した CV_{ref} に対する $\varepsilon_{R,n}$ の絶対誤差 $\varepsilon_{A,n}$ の関係を示す。横軸は反復計測回数で、縦軸は $\varepsilon_{A,n}$ を示している。Figure 9 内に示す赤い点線は、 $\varepsilon_{A,n}$ がゼロであることを示している。反復計測回数が増えるにつれて $\varepsilon_{A,n}$ の値が小さくなる傾向となった。 $\varepsilon_{A,n}$ は、 $n \geq 4$ において、すべての繰り返し回数 N で負の値となった。

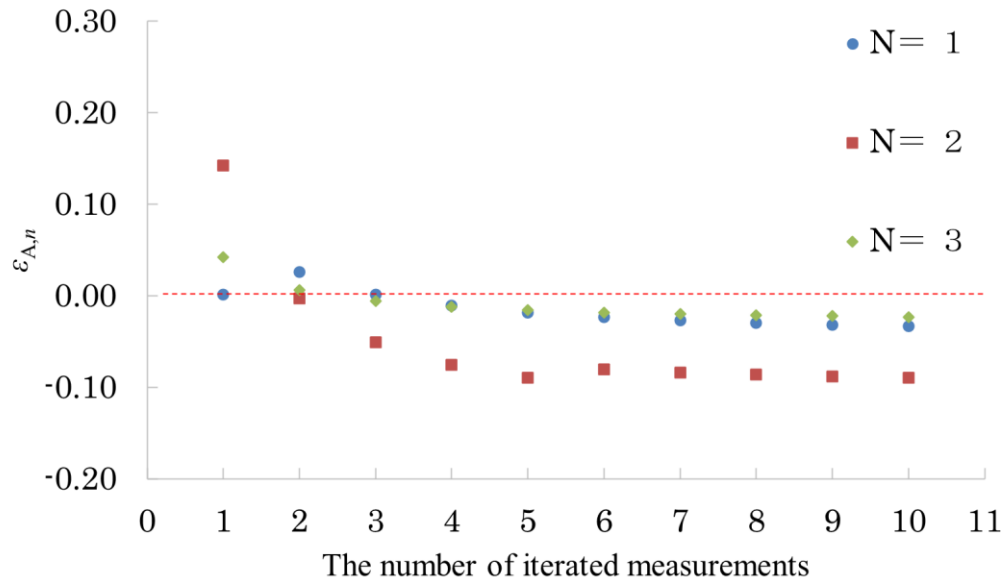


Figure 10

Example of the result for the number of iterations and changes in $\varepsilon_{A,n}$. The horizontal axis is the number of iterated measurements. The vertical axis is $\varepsilon_{A,n}$. These results were calculated with $\varepsilon_{R,n}$ shown in Fig. 5 and using Equation (16). The red dotted line indicates that $\varepsilon_{A,n}$ is 0.

Figure 11 に、反復計測回数と P_n の関係を示す。Figure 10 に示す a, b, c は LINAC のメーカーでそれぞれ Varian Medical Systems, Elekta, SIEMENS である。 P_n は、式 17 を用いて計算した N 回の繰り返し回数で $C_{\varepsilon_{A,n}}^{\text{negative}}$ が出現する確率で、水吸収線量の計算結果の変化が計測の変動範囲よりも小さくなる確率である。 n が 5 以上で、すべての LINAC, 公称エネルギー、繰り返し回数 N で、 $P_n=1$ となった。つまり、これらのデータから、最適な計測回数 n は 5 と決定できた。しかし、LINAC と公称エネルギーの組み合わせによって、 $n<5$ において、 $P_n=1$ となる場合があった。

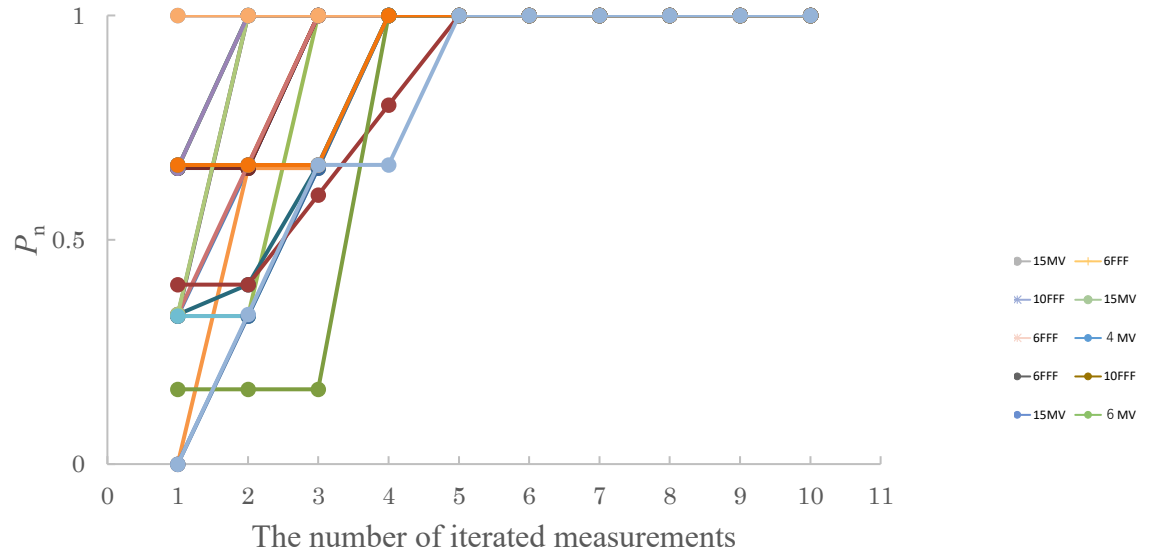


Figure 11-(a)
Relationship between the number of iterated measurements and P_n in different linac models. Linac manufacturer: (a) Varian Medical Systems, (b) Elekta, and (c) SIEMENS. The legend for the varian machines is not shown because of the large sample size of the energies; the Novaris machines were tabulated as Varian machines.

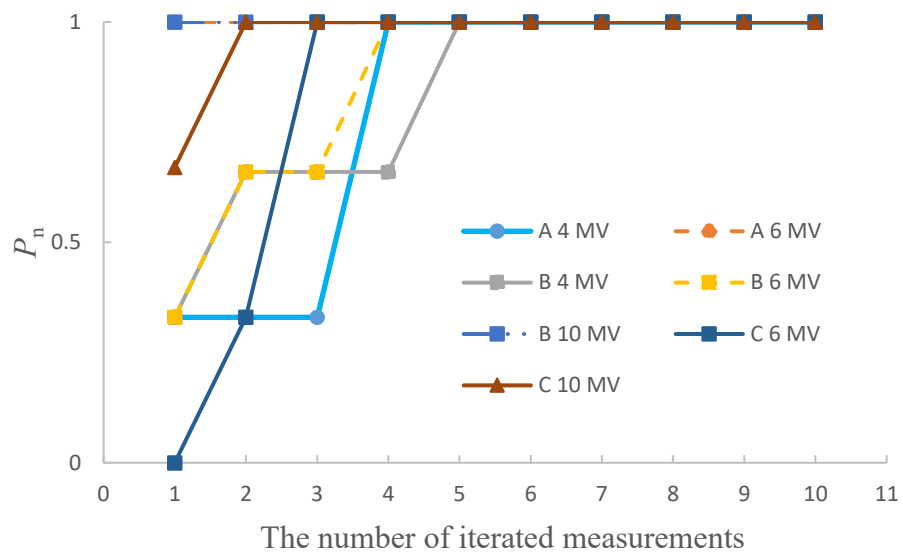


Figure 11-(b)
Relationship between the number of iterated measurements and P_n in different linac models. Linac manufacturer: (a) Varian Medical Systems, (b) Elekta, and (c) SIEMENS. The legend for the varian machines is not shown because of the large sample size of the energies; the Novaris machines were tabulated as Varian machines.

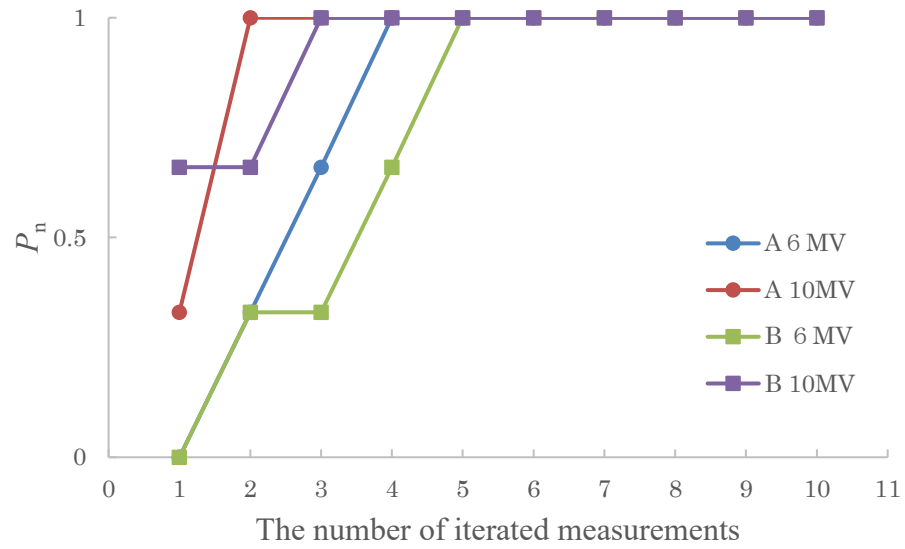


Figure 11-(c)
Relationship between the number of iterated measurements and P_n in different linac models. Linac manufacturer: (a) Varian Medical Systems, (b) Elekta, and (c) SIEMENS. The legend for the varian machines is not shown because of the large sample size of the energies; the Novaris machines were tabulated as Varian machines.

2. 5 考察

Figure 8 から、この研究は多施設研究であるため、収集したデータ数が十分に足りているかどうかを評価すると、この研究で用いられたサンプルのヒストグラムの形状は正規分布に従っていることから十分に足りていると判断できる。この研究で使用した LINAC の CV_{ref} の結果が 0.01% から 0.07% であったことから、現在、国内で使用しているほとんどの LINAC の機種の変動係数は 0.1% 以下となることが予想される。

Figure 9 の DMU_n と DMU_{ref} の関係に注目すると、 DMU_{ref} に対する DMU_n の相対誤差の絶対値である $\varepsilon_{R,n}$ は、 n が 10 に近づくと徐々に減少し、 $n \geq 5$ で、 $\varepsilon_{R,n} < 0.05$ と見なすことができる。したがって、 DMU_n の変化は 0.05% 以下の変化を示すと考える。つまり、この LINAC を用いて水吸収線量の計測結果の不確かさを 0.05% 以内で評価できると言える。AAPM TG-51 補遺[7]によると、リファレンスクラスの電離箱線量計の安定性に起因する計測結果の不確かさは 0.05% で、LINAC の出力の安定性に起因する計測結果の不確かさは 0.05% とされている。先ほど示したように、 $n \geq 5$ における DMU_n の変化が 0.05% 以下の場合は、電離箱線量計や電位計の安定性および LINAC の出力の安定性に起因する不確かさの範囲内の変動と考えられる。したがって、0.05% 未満の不確かさの要因を断定的に評価することはできないと考えられる。

AAPM TG-65[8]では、校正点における水吸収線量の精度の目標値は 1% で、その他の点の不確かさとして 0.3% を加算している。Boyer ら[9]は、早期腫瘍制御率と吸収線

量の不確かさとの関係性について述べており、吸収線量の精度が 1%向上すると制御率が 2%向上すると結論付けている。以上のことから、この研究で用いた LINAC のビームから計算された水吸収線量の変動は、外部放射線治療を実施するための不確かさの範囲内であることが示された。

$\varepsilon_{A,n}$ は、 CV_{ref} に対する $\varepsilon_{R,n}$ の絶対誤差を計算した結果で、 $n \geq 4$ のときに負の値であった。これは、 N が 1 から 3 でも同様であったため、10 回の反復計測回数を 3 回繰り返すことで同様の結果が得られると考えた。

Figure 11 より、反復計測回数が 5 回以上の場合、 P_n が 1 であったため、5 回以上の繰り返しで得られた水吸収線量の計測結果は、この研究で基準とした反復計測回数 10 回の水吸収線量の計測結果と同等であるといえる。加えて、LINAC やエネルギーの組み合わせに関係しないことがわかった。また、LINAC とエネルギーの組み合わせによっては、水吸収線量は反復計測回数 4 回以下と 10 回の繰り返しで差がないといえる。

この最適な計測回数を推定する新しい考え方は、水ファントム中に電離箱線量計を設置した品質管理、つまり絶対線量計測、MU 校正、直線性の確認などの作業時間の効率性の観点から役に立つ。電離箱線量計は電位計と組み合わせることで水吸収線量を計測できる。通常、電位計のウォームアップは、10～15 分程度を要することが知られている[10]。このウォームアップの時間に加えて、AAPM TG-198 の線量計測 QA における「各光子線におけるビームの出力不変性」に要する時間は 45～60 分と見積もら

れている[11]. 絶対線量計測は通常 10 回の反復計測が繰り返され、1 回の計測に要する時間は約 60 秒に充電・電流放電のための数秒を加えたものと見積もることが一般的である. したがって、反復計測回数を 10 回から 5 回に減らすことで、1 ビームエネルギーあたり約 7 分の正味の計測時間が短縮できることが期待できる.

加えて、光子ビームの Dose/MU を独立検証するための 19 個のベンチマーク項目が例として示されており[12]、計測回数を削減することで、時間がかかるコミッションングの総時間を短縮できることが考えられる.

本研究で使用した LINAC とエネルギーの組み合わせにおいては、水吸収線量は反復計測回数 4 回以下と 10 回の繰り返しで差がないことが示された. 確かに、本研究の対象とならなかった LINAC においてはビーム出力のばらつきが大きいものもあるかもしれないが、提案した統計的方法により最小限の計測回数によって精度の高い水吸収線量の計測結果を得ることができることは非常に有益である.

2. 6 研究の限界

この研究には次の限界がある．10 回以上の反復計測回数は実施されておらず，本研究では考慮していない．ファーマ形電離箱 30013 (PTW) に限定しており，その他のタイプの電離箱線量計のデータは考慮していない．この統計的方法による理論は，この研究で用いた LINAC と公称エネルギーに限定され，尚且つビーム出力が安定した LINAC に適用できる．ビーム出力が不安定で反復計測回数 10 回で電荷量の計測結果が偶然誤差としてドリフトし，これを無視できない場合は，事前に電荷量のドリフトを確認しておく必要がある．その場合，計測開始後の 2～3 回の線量計測データをデータ処理から除く必要がある．

2. 7 結論

この研究では、高エネルギー光子線における電離箱線量計の計測結果のばらつきを用いて水吸収線量計測に必要な最適な計測回数を計算する新しい統計的方法を示した。この新しい方法は計測結果に影響を与えずに水吸収線量を計測するために必要な反復計測回数の最小値を求めることができることを示した。この方法は水吸収線量の計測回数を求めるために役に立ち、この研究で用いた LINAC の機種とエネルギーの組み合わせによっては、4 回以下の反復計測回数は 10 回の反復計測回数と同じ精度であることが言えた。しかし、施設によってはビーム出力のばらつきが大きい LINAC がある。この場合は、本方法によって各 LINAC のばらつきに適した最適な計測回数を決定することはできない。このような場合には、測定や計測結果の安定性を事前に確認する必要がある、各施設で確認するための手順や基準を設定しておく必要がある。この研究の結果は、計測結果の不確かさの観点から、計測回数を増やすことが有効であるかどうかを明らかにするために有益である。そして、最適な計測回数を決定するための新しい方法は高エネルギー光子線の水吸収線量計測において、計測作業効率に貢献できる。

3 章 新たに開発した電流源を用いたユーザによる電位計点検の実施可能性についての検討

3. 1 開発電流源の主論文との関連性と社会的な問題の位置づけ

2 章において、同じ電離箱線量計を用いた水吸収線量計測結果の精度に影響を与えないで且つ作業時間の効率化が期待できる統計的方法について述べた。この方法により、水吸収線量のばらつきに適したサンプルサイズ（計測回数）を求めた。水吸収線量計測においては、電離箱線量計と電位計がセットで使用されるため、水吸収線量の計測結果の不確かさはビーム出力のばらつき、電離箱線量計のレスポンス、電位計の感度特性の複合と考えることができる。標準計測法 12 [1]には、水吸収線量校正定数を与えられたファーマ形電離箱、および電位計校正定数を与えられた電位計を用いて計測を行うことが記載されている。水吸収線量校正定数は、電離箱線量計および電位計を一体として値付けされる場合と、電位計とは分離して値付けされる場合がある。2017 年に「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」（以下、電位計ガイドライン）[13]が発行され、電位計に関する品質管理方法およびその運用方法が詳細に示された。電位計ガイドラインは 2018 年に改定されている。この電位計ガイドラインには、高エネルギー光子線を電離箱線量計に照射したときに得られる電流を電流源として用いる方法が記載されている。標準計測法 12 に示された基準条件に沿って電離箱線量計と電位計を設置し、これに加えて LINAC のビーム出力のばらつきを監視するた

めに別の電離箱線量計と電位計の組を使用することが推奨されている．電離箱線量計を用いた電位計の相互校正方法に関しては，電位計校正定数を求める方法の運用や簡素化についての報告 [14, 15]がある．これらの方法では電離箱線量計に照射されたことで得られる電流が電位計に入力される．したがって，電流のばらつきが電離箱線量計と電位計のどちらに起因するものなのかの切り分けができない問題がある．加えて電離箱線量計と電位計が最低 2 セット必要となるため，電位計を 1 台しか保有していない施設では実施できないことが問題である．2018 年から公益財団法人医用原子力技術研究振興財団（以下，医用原子力財団）によって電離箱線量計と電位計とをそれぞれ個別に校正する方法（以下，分離校正）が開始された[16]．分離校正は計量法校正事業者登録校正サービス制度（Japan Calibration Service System : JCSS）の認証を受けた医用原子力財団などが実施している．この論文では JCSS 認証を受けた機関の校正を受けたという意味で JCSS 校正と表記する．電位計の分離校正では，標準電位計で校正された電流源からの電流が用いられている．畑中ら[17]は放射線が照射された電離箱線量計からの電流を用いない方法として，高精度な電流源を用いて電位計校正定数を求めている．また，電位計に電流源を内蔵した電位計[18]も利用可能であり，利用者であるユーザはこの電流源を用いれば電位計の点検を実施できる．しかし，これまでに供給されている電流源は一般的に高価であることから，多くの放射線治療施設におい

て使用が難しいことが問題点として挙げられる．これに対応するため，この研究では
ユーザが自施設で精度の高い電位計点検を実施できる電流源を開発した．

3. 2 開発の目的

本研究の目的は、JCSS校正を受けた電位計を基準にJCSS の精度を担保可能な電位計の相互校正を実施可能とする電流源を開発することである。

3. 3 研究の方法と使用機器

この研究で使用した機器について，以下の通り列挙する．

Table3

List of equipment used in Chapter 3.

| Equipment | Device name | Manufacturer |
|----------------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| Current source | New current source | Kawaguchi Electric Work |
| Dry cell | LR1XJ (N battery) | Panasonic |
| | ※unused item | |
| Reference electrometer | RAMTEC Solo #319 | TOYO Medic |
| Electrometer under test | UNIDOS ^{webl ine} #121 | PTW |
| Electrometer under test | SuperMAX#181272 | Standard Imaging |
| Constant temperature thermostats | LH43-W14P #1292 | Nagano Science |
| Current-voltage meter | 6430 #4121793 | Keithley |

3. 3. 1 開発電流源の外観

Figure 12にこの研究で開発した電流源の外観を示す．大きさは82 mm×94 mm×24 mm（横×縦×高さ）で，質量は約230 gである．外壁は金属ケースで覆われており，材質はアルミニウムである．Figure 13に回路図のシェーマを示す．内部に乾電池を設置できる空間と抵抗器，およびマイクロコンピュータを配置した．乾電池はアルカリ電池で，種類は単5である．この実験では未使用の乾電池を使用した．乾電池の電位差に対して内部抵抗を変化させることにより出力される電流値を変更することが可能である．マイクロコンピュータは電流量のリレー制御を行っている．Figure 14のようにトライアキシャルのコネクタが金属ケースから突出しており，ここから電流が出力される．その隣にはUniversal Serial Bus Type-C（以下，USB）を接続することが可能である．マイクロコンピュータはこのUSB から電源供給を受け，パーソナルコンピュータ（以下，パソコン）に接続することで専用のアプリケーション（以下，アプリ）を用いた操作が可能である．開発した電流源はアプリで設定した時間を通電させる仕様である．

Figure 15のようにレバースイッチを2カ所に設けた．左側のレバースイッチはOFF，+，-，の3種類が選択可能である．これらを選択することで，通電されないモード，正の荷が通電される正電流モード，負の電荷が通電される負電流モードが選択できる．また，右側のレバースイッチによりそれぞれ高電流モード（H）と低電流モード（L）が選択可能である．電位計に電流を流す手順を示す．まず電位計に電源を投入し，次に

トライアキシャルケーブルを用いて電位計と開発電流源を接続する (Figure 16) . そして、電位計に電圧を印加せずに測定状態とし、開発電流源のレバースイッチを操作することによって目的とする条件の電流が電位計に流れる. アプリを用いる場合には、パソコンと電位計の電源を投入し、トライアキシャルケーブルを用いて電位計と開発電流源を接続した後、USB 端子にパソコンを接続する. そして、パソコン内のアプリの立ち上げと接続操作を行った後、アプリを用いて電流出力を操作することで選択したモードの電流が電位計に流れる.



Figure 12

Overview of the new current source. The dimensions of the body are 82 mm×94 mm×24 mm (width × length × height), the outer wall is made of aluminum, and the weight is about 230 g. A photograph of the JIS standard ruler is shown beside it for comparison.

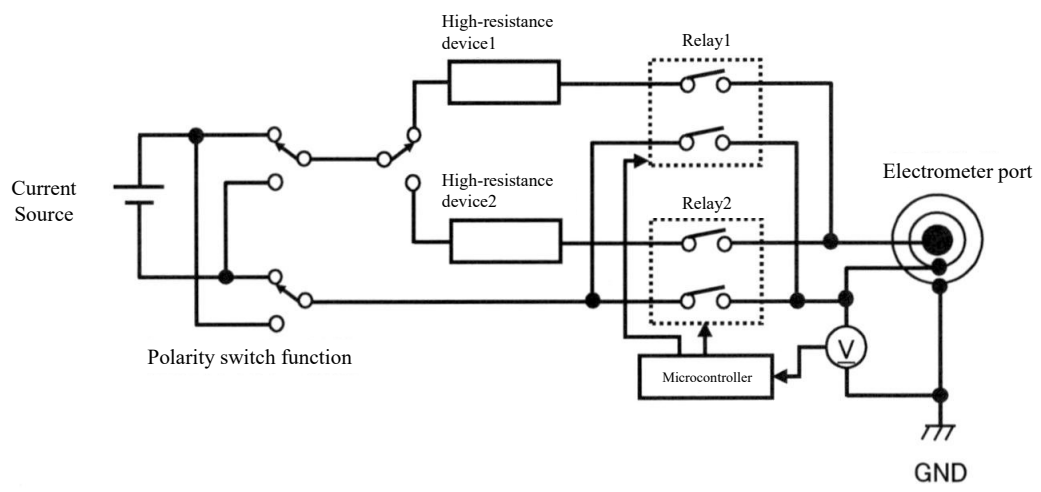


Figure 13
Circuit diagram of current source.



Figure 14

Front side of the current source. The current source is equipped with a triaxial cable and USB terminals.



Figure 15

Rear side of the current source. The current polarity and the magnitude of the current measurement range can be switched by two toggle switches.

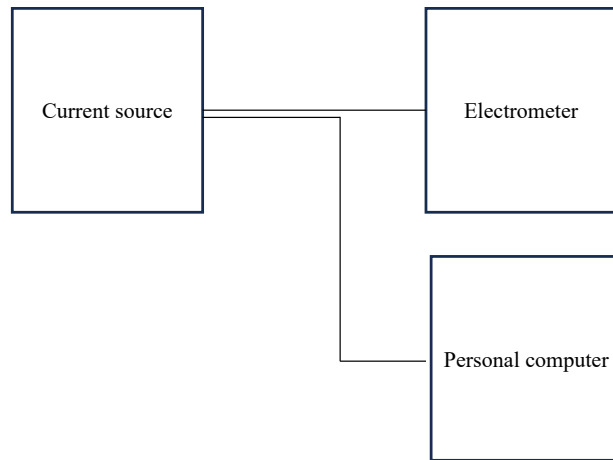


Figure 16

Method for current source connected with personal computer and electrometer.

3. 3. 2 開発電流源の特性

開発電流源の特性について、1) 電池電圧による電流値への影響、2) 長時間稼働による電流値への影響、3) 温度変化による電流値への影響を検討した。

1) 電池電圧による電流値への影響

電池電圧による電流値への影響を調べた。本開発電流源では乾電池を使用しているため、電池電圧の低下が電流値へ与える影響について検討した。電池の電圧が低化した場合を想定して事前に放電し電圧 V_{leak} となった乾電池を開発電流源にセットした。開発電流源を電位計に接続し、電流値を測定することで V_{leak} と電流値の関係を調べた。

2) 長時間稼働による電流値への影響

長時間稼働による開発電流源の長時間稼働特性を評価するために、電流計に接続して電流を流し続け、経過時間が5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 分における電流値を読み取り記録した。

3) 温度変化による電流値への影響

開発電流源を恒温槽の中央に置いて放置し、24 時間後に電流計に接続して電流を流し電流値の温度特性を調べた (Figure17)。恒温槽はLH43-W14P (ナガノサイエンス) で、大きさは600 mm×800 mm×850 mm (横×縦×高さ) である。内部の温度を一定に保つように内扉と外扉があり、内部から外部へケーブルの配線ができるように導通孔が設置されている。この導通孔は内部の空気が外気に触れないようにゴムでシールドさ

れている。電位計ガイドラインに沿って恒温槽温度を15°C, 18°C, 23°C, 35°C に設定し、23°C での電流値に対する各温度の相対電流値を測定した。外気温はガイドラインの標準試験条件である18°Cから28°Cの間の23°Cであることを確認した。その他の試験条件は標準試験条件に準じていることを確認した。

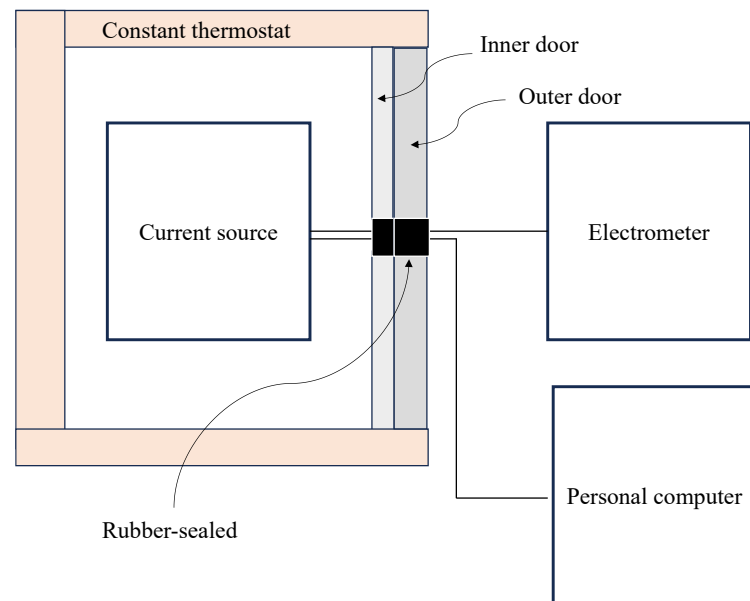


Figure 17

Current source was set inside the constant thermostat. The thermostat is rubber-shielded to maintain a constant temperature, so that the current source inside the thermostat can be connected to a PC and a potentiometer outside the electrometer, respectively.

3. 3. 3 使用する電位計

この研究では、電位計ガイドラインに沿ってJCSS 校正を受けてから3カ月以上経過していない電位計（以下、リファレンス電位計）の電位計校正定数（以下、 $k_{\text{elec, JCSS}}$ ）を基準とした。他の試験対象とする電位計（以下、試験電位計）を相互校正することにより、電位計校正定数（以下、 $k_{\text{elec, user}}$ ）を計算した。実際には試験電位計はJCSS校正を受けているので、ここでは試験電位計がJCSS校正を実施していないものとして、 $k_{\text{elec, JCSS}}$ と $k_{\text{elec, user}}$ を比較した。この研究で使用した電位計はUNIDOS^{weblne}（PTW, Freiburg, Germany）、RAMTEC Solo（Toyo Medic, Tokyo）、SuperMAX Electrometer（以下、SuperMAX；StandardImaging, Middleton, WI, USA）の3台である。この研究の中では、リファレンス電位計をRAMTEC Soloとし、その他の電位計を試験電位計とした。RAMTEC Soloは電荷蓄積型電位計で、UNIDOS^{weblne}とSuperMAX は電流積算型電位計である。また、SuperMAXには二つの計測回路が独立して存在する。本論文ではJCSS校正を受けているほうの計測回路を試験対象とした。試験中は、気温、気圧、および湿度が電位計ガイドラインの使用環境に沿っていることを確認した。Table 4に、実験に使用した電位計の性能比較を示す。 Q_{\min} と Q_{\max} はそれぞれ最小入力電荷と最大入力電荷である。これらは校正事業者のホームページ[19]で確認した。

Table 4

Specifications of the electrometer used in the study.

| | UNIDOS ^{weblne} | RAMTEC Solo | SuperMAX |
|-----------------|--------------------------|-------------|----------|
| serial number | #319 | #121 | #181272 |
| Type | Current | Charge | Current |
| range | M | M | High |
| Q_{\min} [nC] | 5 | 5 | 5 |
| Q_{\max} [nC] | 200 | 200 | 200 |

Q_{\min} and Q_{\max} denote the minimum input charge and the maximum input charge, respectively.

3. 3. 4 電位計の点検

電位計に電源を投入し、十分なウォームアップを行った後、トライアキシャルケーブルと USB ケーブルを用いて開発電流源を電位計とパソコンに接続した。接続した後、電位計を積算モードにしてゼロ点調整を実施し、電荷量 q [nC]を測定した。開発電流源を 60 秒間通電し、これを 10 回繰り返した。10 回の平均値を平均電荷量 \bar{q} とし、式 20 により電流値 I を求めた。また、式 21 を用いて不偏分散 σ (Standard Deviation, SD) と \bar{q} から変動係数 CV (Coefficient of Validation) を計算した。

$$I = \frac{\bar{q}}{60} \quad (\text{C/sec}) \quad 20$$

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{q}} \times 100 \quad (\%) \quad 21$$

この研究では、3. 3. 3 で述べた通り電荷蓄積型電位計の RAMTEC Solo をリファレンス電位計として試験電位計の点検を実施した。電荷漏れによる電流積算型電位計の点検結果に影響がある場合は補正をしなければならないため、電荷漏れの測定も実施した。この電荷漏れの評価は、電荷蓄積型および自動放電型の機種のみが対象である[13].

電位計表示フルスケールの 30%の電荷量を確保するために、開発電流源を用いて、100 秒間電位計に通電した。電位計を測定状態のままとし、入力コネクタからトライアキシャルケーブルを抜くことで外部リーク経路を取り外した。その後、金属製のキャップを入力コネクタに装着した。キャップをしてから 30 秒後の表示値 $M_{30\text{sec}}^{\text{w/o}}$ 、および $M_{30\text{sec}}^{\text{w/o}}$ を記録してから 50 秒後の表示値 $M_{50\text{sec}}^{\text{w/o}}$ を記録した。 $M_{30\text{sec}}^{\text{w/o}}$ と $M_{50\text{sec}}^{\text{w/o}}$ の相対比 $L^{\text{w/o}}$ を計算し、この $L^{\text{w/o}}$ を電位計がトライアキシャルケーブルに接続されていない状態の電荷漏れの測定結果と定義した。 $L^{\text{w/o}}$ を計算するための式を 22 に示す。

$$L^{\text{w/o}} = \left(\frac{M_{50\text{sec}}^{\text{w/o}}}{M_{30\text{sec}}^{\text{w/o}}} - 1 \right) \times 100 \quad (\%) \quad 22$$

また，開発電流源を電位計に接続したままで同じ手順を実施し，通電終了してから 30 秒後の表示値 $M_{30\text{sec}}^{\text{with}}$ ，および $M_{30\text{sec}}^{\text{with}}$ を記録してから 50 秒後の表示値 $M_{50\text{sec}}^{\text{with}}$ を記録した． L^{with} は電位計がトライアキシャルケーブルに接続された状態の電荷漏れで，計算するための式を 23 に示す．

$$L^{\text{with}} = \left(\frac{M_{50\text{sec}}^{\text{with}}}{M_{30\text{sec}}^{\text{with}}} - 1 \right) \times 100 \text{ (\%)} \quad 23$$

さらに，開発電流源の高電流モードと低電流モードのそれぞれを選択したときの $L^{\text{w/o}}$ と L^{with} を測定した．

3. 3. 5 $k_{\text{elec,user}}$ の計算

実際には、この研究で対象としたすべての電位計は JCSS 校正を受け、 $k_{\text{elec,JCSS}}$ を与えられている。 $k_{\text{elec,user}}$ が $k_{\text{elec,JCSS}}$ に代わりに用いることができるかどうかを確認するための方法を次に示す。

対象電位計の最小入力電荷 Q_{\min} 、最大入力電荷 Q_{\max} を校正事業者のホームページなどで確認し、 Q_{\max} の半値を $Q_{0.5}$ と定義した。式 20 で計算した電流値 I を用いて、 Q_{\min} 、 Q_{\max} および $Q_{0.5}$ を電位計で測定するための通電時間 t_{\min} 、 t_{\max} 、 $t_{0.5}$ を式 24 から計算した。

$$t_i = \frac{Q_i}{I} \text{ (sec)} \quad (i = \min, \max, 0.5) \quad 24$$

ここで、 t_i は Q_i の電荷が電位計表示されるまでの通電時間で、 t_i の間に入力される電荷 Q_i が最小入力電荷と最大入力電荷に対して $\pm 10\%$ 以内であれば許容される²⁾ため小数桁を切り捨て整数とした。この 3 つの通電時間をリファレンス電位計に対して計算し、 $t_{\text{ref,min}}$ 、 $t_{\text{ref,max}}$ 、 $t_{\text{ref,0.5}}$ と定義した。さらに、開発電流源を用いて、リファレンス電位計に $t_{\text{ref,min}}$ 、 $t_{\text{ref,max}}$ 、 $t_{\text{ref,0.5}}$ の時間を通電して読み取った電荷量をそれぞれ $q_{\text{ref,min}}$ 、 $q_{\text{ref,max}}$ 、 $q_{\text{ref,0.5}}$ と定義した。同様に、試験電位計に対しても 3 つの通電時間を求めて $t_{\text{EUT,min}}$ 、 $t_{\text{EUT,max}}$ 、 $t_{\text{EUT,0.5}}$ と定義し、これらの時間を通電して読み取った電荷量をそれぞれ $q_{\text{EUT,min}}$ 、 $q_{\text{EUT,max}}$ 、 $q_{\text{EUT,0.5}}$ と定義した。

試験電位計の電荷量 $q_{\text{EUT,min}}$, $q_{\text{EUT,max}}$, $q_{\text{EUT},0.5}$ に対するリファレンス電位計の電荷量 $q_{\text{ref,min}}$, $q_{\text{ref,max}}$, $q_{\text{ref},0.5}$ の変化をそれぞれ $r_{\text{elec,min}}$, $r_{\text{elec,max}}$, $r_{\text{elec},0.5}$ と定義し、式 25 により求めた。

$$r_{\text{elec},i} = \frac{q_{\text{ref},i}}{q_{\text{EUT},i}} \quad (i = \text{min}, \text{max}, 0.5) \quad 25$$

この試験電位計の $r_{\text{elec},i}$ と次の式 26 から $k_{\text{elec,user}}$ を計算した。

$$k_{\text{elec,user}} = \bar{r}_{\text{elec}} \times k_{\text{elec,JCSS},i}^{\text{ref}} \quad (i = \text{min}, \text{max}, 0.5) \quad 26$$

ここで、 \bar{r}_{elec} は各試験電位計の $r_{\text{elec,min}}$, $r_{\text{elec,max}}$, $r_{\text{elec},0.5}$ のそれぞれの平均値である。

$k_{\text{elec,JCSS},i}^{\text{ref}}$ は、リファレンス線量計として使用した RAMTEC Solo の JCSS 校正結果から得られた $k_{\text{elec,JCSS,min}}$, $k_{\text{elec,JCSS,max}}$ および $k_{\text{elec,JCSS},0.5}$ である。

開発電流源を用いて計算した試験電位計の電位計校正定数 $k_{\text{elec,user}}$ の精度を確認するために JCSS 校正による電位計校正定数 $k_{\text{elec,JCSS}}$ に対する $k_{\text{elec,user}}$ の相対誤差 d を式 27 から計算した。

$$d = \left(\frac{k_{\text{elec,user}}}{k_{\text{elec,JCSS}}} - 1 \right) \times 100 \quad (\%) \quad 27$$

3. 4 結果

3. 4. 1 電流値の測定結果

開発電流源で高電流モードを選択し，電位計に 60 秒間 10 回繰り返し通電したときの \bar{q} , CV , I の結果を Table 5 に示す.

CV は，UNIDOS^{webl ine}，SuperMAX それぞれに正電流モードで通電した場合に最大となり，0.0055%であった． I は開発電流源を用いて UNIDOS^{webl ine} に正電流モードと負電流モードで通電した場合，それぞれ 1.567 nA，-1.566 nA であった．また，RAMTEC Solo に正電流モードと負電流モードで通電した場合，それぞれ 1.564 nA，-1.564 nA であった．さらに，SuperMAX に正電流モードと負電流モードで通電した場合，それぞれ 1.569 nA，-1.568 nA であった．

Table 5

Measurement results of \bar{q} , CV , and I when the high current mode of the current source was selected and the electrometer was repeatedly energized 10 times for 60 s.

| UNIDOS ^{webl ine} | | | RAMTEC Solo | | SuperMAX | |
|----------------------------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|
| Serial number | #319 | | #121 | | #181272 | |
| Range | M | | M | | High | |
| Polarity | positive | negative | positive | negative | positive | negative |
| \bar{q} [nC] | 93.99 | -93.98 | 93.862 | -93.844 | 94.14 | -94.08 |
| σ [nC] | 0.0052 | 0.0032 | 0.0046 | 0.0046 | 0.0052 | 0.0042 |
| CV [%] | 0.0055 | 0.0034 | 0.0049 | 0.0049 | 0.0055 | 0.0045 |
| I [nA] | 1.567 | -1.566 | 1.564 | -1.564 | 1.569 | -1.568 |

Table 6 に開発電流源で低電流モードを選択し，電位計に 60 秒間 10 回繰り返し通電したときの \bar{q} , CV , I の結果を示す.

CV は，SuperMAX に正電流モードで通電した場合に最大となり，0.0073%であった.

低電流モードの I は高電流モードに対して約 10 分の 1 の値となった.

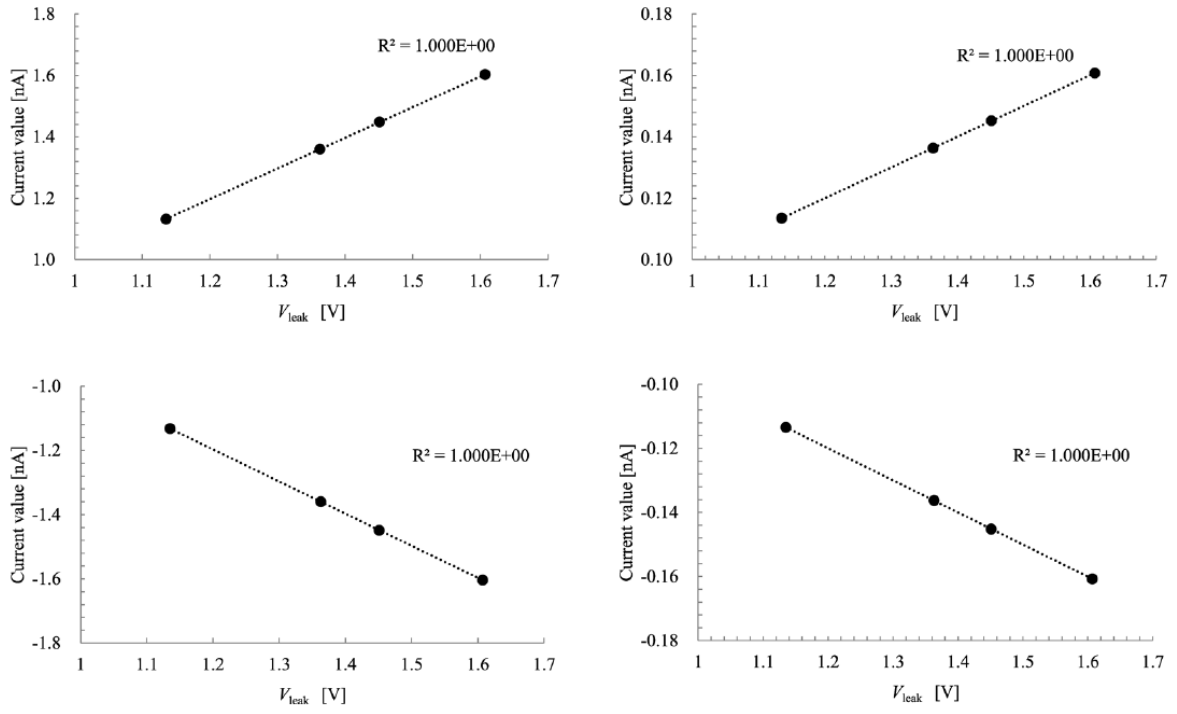
Table 6

Measurement results of \bar{q} , CV , and I when the low current mode of the current source was selected and the electrometer was repeatedly energized 10 times for 60 s.

| UNIDOS ^{webl ine} | | | RAMTEC Solo | | SuperMAX | |
|----------------------------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|
| Serial number | #319 | | #121 | | #181272 | |
| Range | M | | M | | High | |
| Polarity | Positive | Negative | Positive | Negative | Positive | Negative |
| \bar{q} [nC] | 9.478 | -9.477 | 9.474 | -9.474 | 9.575 | -9.573 |
| σ [nC] | 0.00067 | 0.00052 | 0.00052 | 0.00057 | 0.00070 | 0.00048 |
| CV [%] | 0.0071 | 0.0054 | 0.0055 | 0.0060 | 0.0073 | 0.0050 |
| I [nA] | 0.1580 | -0.1579 | 0.1579 | -0.1579 | 0.1596 | -0.1596 |

3. 4. 2 電流源の特性結果

電池電圧 V_{leak} と開発電流源の電流値の関係を Figure 18 に示す．正電流モードと負電流モードのそれぞれに対して，高電流モードと低電流モードで実施した結果のすべてにおいて決定係数 R^2 は 1.00 であった．したがって，電池電圧と電流値には高い直線性があることが確認された．



| | |
|---|---|
| a | b |
| c | d |

Figure 18

Relationship between the pre-discharged battery voltage V_{leak} and the current value of the current source. The energization mode of the current source was set as follows: (a) high positive current mode, (b) low positive current mode, (c) high negative current mode, (d) low negative current mode.

長期稼働時間と開発電流源の電流値の関係を Figure 19 に示す．正電流モードと負電流モードのそれぞれに高電流モードと低電流モードを組み合わせた 4 つのデータにおいて，経過時間 60 分での電流値に顕著な変化は見られなかった．60 分経過時の電流値の変化は正電流・高電流モードのときに最大で -2.838×10^{-6} nA であった (Figure 16 の c)．また，経過時間 60 分での相対電流値の変化は最大 -0.056% であった．この結果から 60 分の稼働時間中の電池電圧の変化は非常に小さいことが確認された．

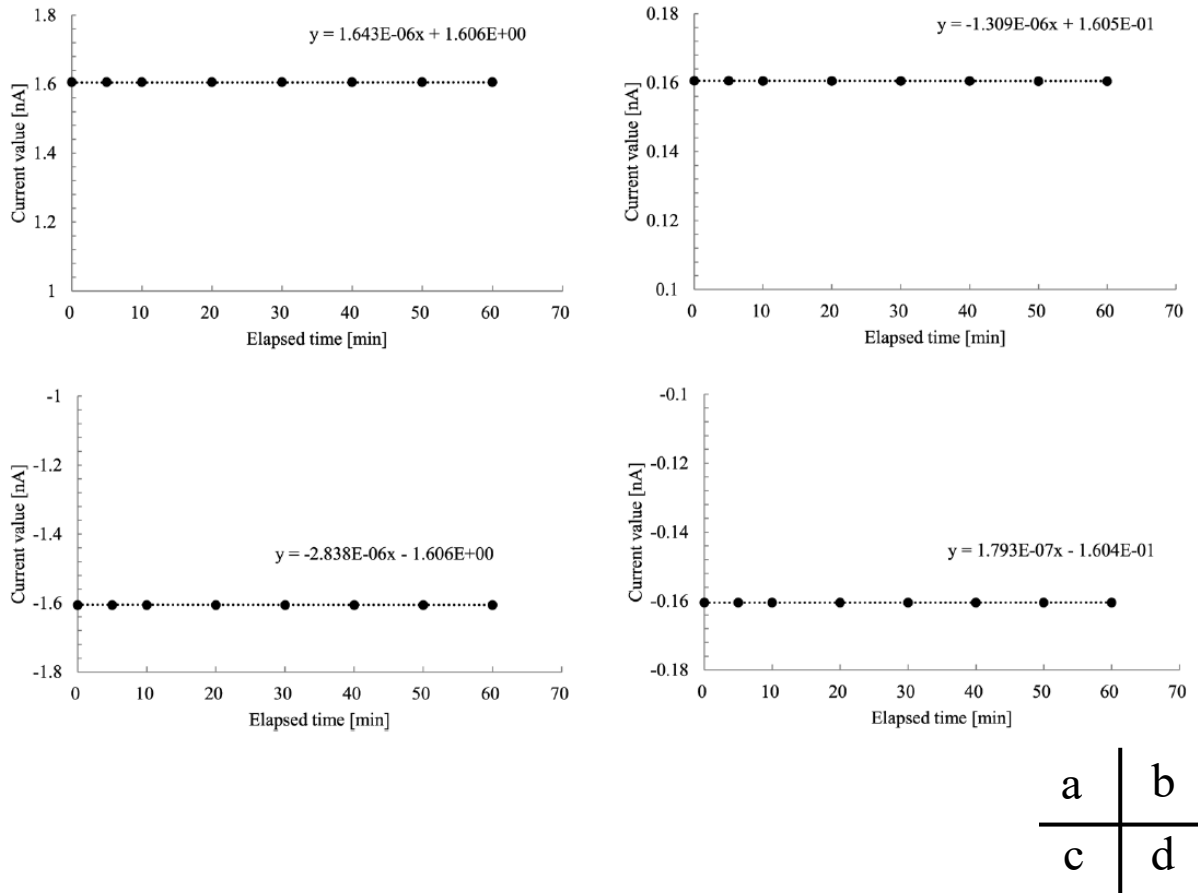
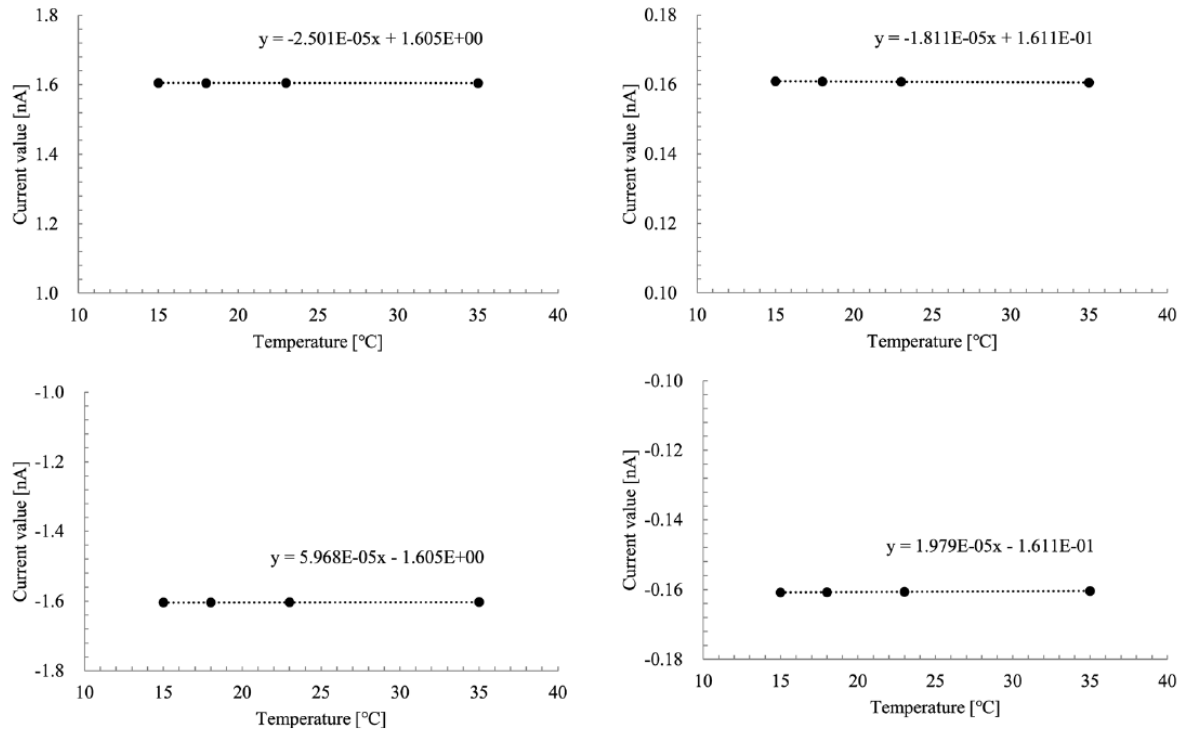


Figure 19

Relationship between the elapsed time of current flow and the current value of the current source. The energization mode of the current source was set as follows: (a) high positive current mode, (b) low positive current mode, (c) high negative current mode, (d) low negative current mode.

開発電流源の温度特性を Figure 20 に示す．経過時間特性と同様に全ての電流モードの組み合わせで顕著な電流値の変化は確認できなかった．温度特性による電流値の変化は最大で 5.968×10^{-5} nA であった (Figure 20 の c)．1°Cの変化に対する相対電流値の変化は最大 0.013%であった．



| | |
|---|---|
| a | b |
| c | d |

Figure 20

Relationship between the temperature and the current value of the current source. The energization mode of the current source was set as follows: (a) high positive current mode, (b) low positive current mode, (c) high negative current mode, (d) low negative current mode.

3. 4. 3 電荷漏れの測定結果

Table 7 に電荷漏れ $L^{w/o}$ と L^{with} を示す. $L^{w/o}$ は高電流モードで-0.0064%, 低電流モードで 0.0064%であった. L^{with} は高電流モードで-0.0058%, 低電流モードで 0.0063%であった. これらは, 電位計ガイドラインに記されている電荷漏れ性能要件 $\pm 0.1\%$ と比べて十分に小さい結果であった.

Table 7

Comparison of charge leakage when the RAMTEC Solo electrometer used as a reference electrometer was connected to and not connected to the current source.

| RAMTEC Solo | | | | |
|-----------------|---------|--------|---------|--------|
| Connected to DC | w/o | | with | |
| Mode | High | Low | High | Low |
| M_{30s} [nC] | 156.313 | 15.728 | 156.412 | 15.797 |
| M_{50s} [nC] | 156.303 | 15.729 | 156.403 | 15.798 |
| L [%] | -0.0064 | 0.0064 | -0.0058 | 0.0063 |

3. 4. 4 $k_{\text{elec,user}}$ の結果

Table 8にリファレンス電位計における $k_{\text{elec,user}}$ を計算するための各パラメータと計算結果を示す. $t_{\text{ref,min}}$, $t_{\text{ref,0.5}}$ 及び $t_{\text{ref,max}}$ は, それぞれ3 sec, 65 sec, 128 secであった. $q_{\text{ref,min}}$ と $q_{\text{ref,0.5}}$ および $q_{\text{ref,max}}$ は, 正電流モードでそれぞれ4.697 nC, 101.697 nC, 200.260 nCであり, 負電流モードでそれぞれ-4.697 nC, -101.703 nC, -200.256 nCであった. また, RAMTEC SoloのJCSS校正結果は, $k_{\text{elec,JCSS}}$ は1.0002であった.

Table 8

The parameters and results for $k_{\text{elec,user}}$ calculations on the RAMTEC Solo electrometer used as a reference electrometer.

| Parameters | RAMTEC Solo | |
|-----------------------------------------|-------------|----------|
| | Positive | Negative |
| $t_{\text{ref,min}}$ [sec] | 3 | |
| $t_{\text{ref,0.5}}$ [sec] | 65 | |
| $t_{\text{ref,max}}$ [sec] | 128 | |
| $q_{\text{ref,min}}$ [nC] | 4.697 | -4.697 |
| $q_{\text{ref,0.5}}$ [nC] | 101.697 | -101.703 |
| $q_{\text{ref,max}}$ [nC] | 200.260 | -200.256 |
| $k_{\text{elec,JCSS,min}}^{\text{ref}}$ | 1.0002 | |
| $k_{\text{elec,JCSS,0.5}}^{\text{ref}}$ | 1.0002 | |
| $k_{\text{elec,JCSS,max}}^{\text{ref}}$ | 1.0002 | |

$t_{\text{ref,min}}$: Energization time required to measure the minimum input charge of the reference electrometer.

$t_{\text{ref,0.5}}$: Energization time required to measure the average of the average the minimum input charge and the maximum input charge of the reference electrometer.

$t_{\text{ref,max}}$: Energization time required to measure the maximum input charge of the reference electrometer.

$q_{\text{ref,min}}$: Charge amount when the reference electrometer is energized for $t_{\text{ref,min}}$ second.

$q_{\text{ref,0.5}}$: Charge amount when the reference electrometer is energized for $t_{\text{ref,0.5}}$ second.

$q_{\text{ref,max}}$: Charge amount when the reference electrometer is energized for $t_{\text{ref,max}}$ second.

$k_{\text{elec,JCSS,min}}^{\text{ref}}$, $k_{\text{elec,JCSS,0.5}}^{\text{ref}}$, and $k_{\text{elec,JCSS,max}}^{\text{ref}}$ are the three electrometer calibration factors reported on the calibration certificate for the reference electrometer.

Table 9に試験電位計における $k_{\text{elec,user}}$ を計算するために求めた各パラメータを示す.

Table 8のリファレンス電位計の結果と同様に, $t_{\text{ref,min}}$, $t_{\text{ref,0.5}}$ 及び $t_{\text{ref,max}}$ は, UNIDOS^{webl}ineとSupreMAXでそれぞれ3 sec, 65 sec, 128 secであった. この結果はリファレンス電位計と同じ時間であった.

次に, UNIDOS^{webl}ineにおける結果を示す. $q_{\text{ref,min}}$ と $q_{\text{ref,0.5}}$ および $q_{\text{ref,max}}$ は, 正電流モードでそれぞれ4.702 nC, 101.8 nC, 200.5 nCであり, 負電流モードではそれぞれ-4.702 nC, -101.8 nC, -200.5 nCであった. $\bar{r}_{\text{elec},i}$ は正電流モード, 負電流モードいずれでも同じ結果で, 0.9989であった.

このUNIDOS^{webl}ineの \bar{r}_{elec} 値0.989とTable 8に示された $k_{\text{elec,JCSS},i}^{\text{ref}}$ 値1.0002を式26に代入すると,

$$\begin{aligned} k_{\text{elec,user}}(\text{UNIDOS}^{\text{webl}}\text{ine}) &= 0.989 \times 1.0002 \\ &= 0.9991 \end{aligned} \quad 28$$

のように, ここでUNIDOS^{webl}ineの $k_{\text{elec,user}}$ が計算できる. このように, 開発電流源を用いてJCSS校正を事前に受けたRAMTEC Soloを基準に相互校正を実施した結果, $k_{\text{elec,user}}$ は0.9991となった. UNIDOS^{webl}ineのJCSS校正による $k_{\text{elec,JCSS}}$ は0.9998であったことから, $k_{\text{elec,JCSS}}$ に対する $k_{\text{elec,user}}$ の相対誤差 d は-0.070%であった.

SuperMAXにおける結果を次に示す. $q_{\text{ref,min}}$ と $q_{\text{ref,0.5}}$ および $q_{\text{ref,max}}$ は, 正電流モードでそれぞれ4.707 nC, 101.9 nC, 200.7 nCであった. 負電流モードでそれぞれ-4.706 nC,

-101.9 nC, -200.7 nCであった． $\bar{r}_{\text{elec},i}$ は正電流モード，負電流モードでそれぞれ0.9979, 0.9980であった．したがって，UNIDOS^{weblne}と同様の手順で，開発電流源を用いて JCSS校正を事前に受けたRAMTEC Soloを基準に相互校正を実施した結果， $k_{\text{elec},\text{user}}$ は 0.9982となった．SuperMAXのJCSS校正による $k_{\text{elec},\text{JCSS}}$ は0.9987であった． $k_{\text{elec},\text{JCSS}}$ に対する $k_{\text{elec},\text{user}}$ の相対誤差 d は -0.050%であった．

Table 9

The parameters and results for $k_{\text{elec,user}}$ calculations on the EUT (Electrometer under test) .

| Parameters | UNIDOS ^{webl ine} | | SuperMAX | |
|----------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|
| | Positive | Negative | Positive | Negative |
| $t_{\text{EUT,min}}$ [sec] | 3 | | 3 | |
| $t_{\text{EUT,0.5}}$ [sec] | 65 | | 65 | |
| $t_{\text{EUT,max}}$ [sec] | 128 | | 128 | |
| $q_{\text{EUT,min}}$ [nC] | 4.702 | -4.702 | 4.707 | -4.706 |
| $q_{\text{EUT,0.5}}$ [nC] | 101.8 | -101.8 | 101.9 | -101.9 |
| $q_{\text{EUT,max}}$ [nC] | 200.5 | -200.5 | 200.7 | -200.7 |
| \bar{r}_{elec} | 0.9989 | 0.9989 | 0.9979 | 0.9980 |
| $k_{\text{elec,user}}$ | 0.9991 | | 0.9982 | |
| $k_{\text{elec,JCSS}}$ | 0.9998 | | 0.9987 | |
| d [%] | -0.070 | | -0.050 | |

$t_{\text{EUT,min}}$: Energization time required to measure the minimum input charge of the EUT.

$t_{\text{EUT,0.5}}$: Energization time required to measure the average of the average the minimum input charge and the maximum input charge of the EUT.

$t_{\text{EUT,max}}$: Energization time required to measure the maximum input charge of the EUT.

$q_{\text{EUT,min}}$: Charge amount when the EUT is energized for $t_{\text{ref,min}}$ second.

$q_{\text{EUT,0.5}}$: Charge amount when the EUT is energized for $t_{\text{ref,0.5}}$ second.

$q_{\text{EUT,max}}$: Charge amount when the EUT is energized for $t_{\text{ref,max}}$ second.

\bar{r}_{elec} : Change in the charge amount of $q_{\text{EUT},i}$ with respect to $q_{\text{ref},i}$.

Table 10 に EUT の $k_{\text{elec,user}}$ を計算するための相対標準不確かさを見積もったバジエット表[20]を示す. $k_{\text{elec,JCSS}}$ はリファレンス電位計が JCSS 校正を受けたときに与えられた電位計校正定数の相対標準不確かさで, 0.080%であった. $k_{\text{elec,user}}$ の合成標準不確かさは 0.18%で, 包含係数 $k=2$ の拡張不確かさは 0.36%であった.

Table 10

Estimate of the relative standard uncertainty associated with calculation of $k_{\text{elec,user}}$ on the EUT
(Electrometer under test) .

| Performance characteristics | Relative standard uncertainty [%] |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| Display resolution | 0.058 |
| Zero drift | 0.058 |
| Stabilization time | 0.12 |
| Temperature response | 0.044 |
| Temperature zero drift | 0.018 |
| Mains voltage (Static) | 0.039 |
| Mains voltage (Variation) | 0.015 |
| q_{ref} | 0.0052 |
| q_{EUT} | 0.027 |
| k_{elec} | 0.080 |
| $u_c(k_{\text{elec,user}})$ | 0.18 |
| $U(k_{\text{elec,user}}) \quad k = 2$ | 0.36 |

Display resolution : full scale in use.

Zero drift : residual leakage after zeroing.

Stabilization time : change in response per year.

Temperature response : change response per °C.

Temperature zero drift : change in zero drift ± 2 °C change after zeroing.

Mains voltage (Static) : assume change supply voltage diurnal variation.

Mains voltage (Variation) : assume change supply voltage during measurement.

3. 5 考察

電位計ガイドラインの性能要件における入力電流の範囲は20 pAから1 μ Aである．開発電流源から得られた電流値は約1.56 nAであり，この範囲内であったことから適切な電流値であると言える．この開発電流源はJCSS校正を受けたリファレンス電位計を基準に試験電位計を点検することを目的としているので絶対電流値ではなく相対電流値を用いている．第2. 1章で述べたように，AAPM TG-142には電離箱線量計を用いた計測の再現性は10回の繰り返し計測で0.05%であることが例にあげられており[7]，電位計ガイドラインは変動係数が0.05%以下になるまで複数回計測を繰り返すことを複数の項目に対して推奨している[13]．開発電流源の高電流モードと低電流モードそれぞれにおけるCVの最大値は0.0055%と0.0073%であり，0.05%に比べて小さいことから，開発電流源を用いることによってばらつきの小さい電荷を電位計に入力することが可能であることがわかった．

CVの最大値が0.0073%であったことから， $L^{w/o}$ と L^{with} の電流モードの違いに依存した結果の相違は，電荷量のばらつきの範囲内であると言える． $L^{w/o}$ と L^{with} は，製造販売業者が実施した電荷漏れの点検結果と0.1%以内で一致する結果であり，電荷漏れの点検が実施できたことになる．また，電位計ガイドラインは，製造販売業者およびユーザーに対してリスク要因が電荷測定に与える影響が $\pm 0.2\%$ を超えないように努めることを推奨しており，開発電流源によるリークは0.1%以下であったためリスク要因ではない．

したがって、ユーザは開発電流源によるリークを無視して電位計に電荷を入力して良いと言える。

乾電池の電圧低化による開発電流源の電流値変化には直線性が確保されていることが確認され、稼働後60分以内であれば経過時間による影響は無視できると考えられる。未使用の乾電池を用いて60分以内に測定を実施すれば電池電圧劣化と稼働時間の影響を考慮する必要はないと言える。また、開発電流源の温度特性による変化も0.1 pA以下であるため、無視してよいと考える。ここまで、開発電流源が電位計のための電流源として使用可能であることを述べた。

次に、開発電流源を用いた電位計の点検が実施可能であるかどうかについてJCSS校正の結果と比較して考察する。JCSS校正によって電位計に付与される電位計校正定数 $k_{\text{elec},\text{JCSS}}$ の拡張不確かさは0.16%である。これは包含係数2で信頼の水準が95.4%であるので、相対標準不確かさは0.16%を2で除して0.080%と考えることができる。この研究では、開発電流源を用いてRAMTEC Soloを基準にした試験電位計の相互校正を実施し電位計校正定数 $k_{\text{elec},\text{user}}$ を計算した。この $k_{\text{elec},\text{user}}$ は試験電位計がJCSS校正を受けていないとして計算したが、実際にはJCSS校正を受けており $k_{\text{elec},\text{JCSS}}$ が与えられていた。この $k_{\text{elec},\text{JCSS}}$ に対する $k_{\text{elec},\text{user}}$ の相対誤差は最大-0.070%であり、先ほど述べた校正証明書の相対標準不確かさ0.08%よりも小さい。このことから、開発電流源を用いた相互校正では、JCSS校正を受けたリファレンス電位計を基準にすることによって試験電位計の電位計

校正定数を計算可能であると考えられる．この論文では，リファレンス電位計の電位計校正定数を基準に $k_{\text{elec,user}}$ を計算しているため，相対誤差-0.070%の要因がリファレンス電位計，試験電位計のいずれに由来するのかを切り分けることはできない．同様に開発電流源を用いて相互校正をした結果が電位計ガイドラインで示されている感度変化 $\pm 0.2\%$ を超えた場合，その要因がJCSS校正を受けたリファレンス電位計にあるのか，あるいは点検した試験電位計にあるのかを判別することはできない．ここで注意しなければならないのは，上記のように要因の切り分けができないことはこの研究結果に限らず，電位計ガイドラインや過去の報告[15]に示されている電離箱線量計を用いた方法でも同様であることである．つまり，判定基準を満たさないデータが検出された場合には，モニタ線量計校正等の重要なデータに影響を及ぼす可能性があるため，ユーザはすぐにこの電位計の使用を中止し，メーカーに点検および修理を依頼すべきである[21]．しかし，この研究の研究結果は電離箱線量計を用いた方法と比べて，放射線出力や電離箱線量計に起因する電位計への入力電荷量のばらつきを排除できる利点がある．加えて，リファレンス電位計に由来する系統誤差と試験電位計に由来する偶然誤差を含めたとしても校正証明書の相対標準不確かさ0.080%や感度変化 $\pm 0.2\%$ よりも $k_{\text{elec,JCSS}}$ に対する $k_{\text{elec,user}}$ の相対誤差は小さいため，この研究で示した新たな方法は実施可能であると考えられる．また，これまで普及している高精度な電流源[17]や電位計と電流源が一体となった電位計[18]を用いなくとも，開発電流源を用いることにより

JCSS校正の不確かさの範囲内で一致する結果が得られることが示された。この研究の拡張不確かさ ($k=2$) は0.36%で、電位計ガイドラインで表記された電位計校正定数の不確かさと比較しても大きな差はないと考えられる。以上のことより、開発電流源を用いた各施設での電位計点検は実施可能で有効である。

電位計ガイドラインがユーザに示している電位計の点検方法は、2台以上の電離箱線量計と電位計を用いた方法のため、電位計を2台保有していない多くの施設で実施できないことが考えられる。開発電流源を用いて電位計を点検する方法は、電離箱線量計による計測が不要となる利点があり、多くの施設で実施可能である。分離校正では、電位計は3年に1回校正を受け、1年に1回ユーザまたは製造販売業者による点検を行わなければならない。清水[14]はリファレンス電離箱に接続する電位計はJCSS校正が行われている必要があり、その他の電位計の校正についてはユーザの判断であることを指摘したうえで、ユーザによる相互校正や点検の必要性を述べている。

3. 6 開発の限界

本研究の限界は、この電流源自体は校正を受けていないため電位計に表示された電流値はトレーサビリティが確保された絶対値ではなくJCSS 校正を受けた電位計を基準にした相対電流値で評価している。このため、JCSS 校正を受けた電位計に狂いが生じた場合は評価ができないことに注意する必要がある。この研究は、JIS規格[22]に適合した市販の一次乾電池を利用しており、これ以外の乾電池については調査していない。また、乾電池の電圧が低下した場合の電流値の経過時間特性と温度特性を調査していないので、この研究で示したデータは方法で示した通り、未使用品の乾電池を開発電流源に使用した場合に限られる。開発したばかりなので、開発電流源の長期安定性に関するデータをこれから入手することが今後の課題である。

3. 7 結論

本研究は、JCSS校正を受けた電位計を基準にJCSS の精度を担保可能な電位計の相互校正を実施可能とする電流源を開発した。この新しい開発電流源を用いることで、JCSS 校正を受けた電位計を基準にしてユーザが自施設においてJCSSでの校正相当の精度を担保した電位計の点検を実施可能であることが示された。開発電流源はJCSS 校正を受けた電位計を基準にした相対電流値でJCSS 校正を受けた電位計に問題がある場合は評価できない課題がある。この電流源を用いたユーザによる電位計校正定数をJCSS による電位計校正定数と比較し、JCSS 校正結果の不確かさの範囲内で一致することが確認された。

4 章 総括

この研究では、サンプルサイズ（計測回数）とばらつきから、最適なサンプルサイズを計算できる統計的方法を構築した。この統計的方法はすべての放射線治療施設が実施する必要がある品質保証において、高エネルギー光子線の水吸収線量計測時のサンプルサイズ（計測回数）を最適化することに利用できる。また、水吸収線量計測に必須となる電位計の品質管理において、リニアックの出力や電離箱線量計のレスポンスのばらつきを排除して実施可能な方法を開発した。

第1章では、水吸収線量計測に関する基礎的な事項について記載した。水吸収線量は複数回計測された電荷量から計算され、この計測のばらつきを評価するために、不偏分散と変動係数が必要であるため、これらの算出方法を示した。

第2章では、高エネルギー光子線における電荷量のばらつきを用いて水吸収線量計測において最適な計測回数を計算する新しい統計的方法を示した。この統計的方法により、本研究で用いたLINACの機種と公称エネルギーの組み合わせによって、反復計測回数が4回以下の計測回数で得られた電荷量から計算した水吸収線量と、反復計測回数10回で得られた電荷量から計算した水吸収線量とが同じ精度であることを示した。この至適計測回数を決定するための新しい統計的方法は、測定した電荷量のばらつきから最適な計測回数を推定でき、計測作業の効率化にも寄与できることから有益である。

第3章では、電位計の品質管理に用いる簡易電流源の開発について記載した。簡易電

流源は次の2つの問題点から必要である。1つ目は、電位計ガイドライン[13]に示されている電位計の品質管理方法では、(a)LINACのビーム出力のばらつき、(b)電離箱線量計のレスポンスのばらつき、(c)電位計の感度特性の複合的な不確かさしかわからないため、結果のばらつきの原因を断定できないことである。これを解決するためには電流源を用いた電位計の品質管理が必要であり、この方法により (a)LINACのビーム出力のばらつき、(b)電離箱線量計のレスポンスのばらつきを排除することができる。しかし、普及している電流源は高額であるため、簡単に放射線治療施設で利用できないということが2つ目の問題点である。2つ目の問題点を解決するために、精度が高く安価な簡易電流源が必要であったためこれを開発した。この簡易電流源を用いることによって、放射線治療品質管理士は自施設においてJCSS 校正を受けた電位計を基準として、JCSS 校正相当の精度を担保した電位計の点検を実施でき、その有効性を示した。

この研究により、電離箱線量計と電位計を用いた水吸収線量計測における電荷量のばらつきに対応した至適計測回数を把握することが可能となり、品質管理作業の効率化に有効性が高いといえる。加えて、この研究で開発した簡易電流源を用いることによって、LINACビーム出力のばらつきや電離箱線量計のレスポンスのばらつきを排除した電位計の品質管理を、すべての放射線治療施設においてJCSS校正相当の精度で行うことが可能となったことは特筆すべきことである。

5 章 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水吸収線量の標準計測法（標準計測法 12）. 通商産業究社，東京，2012 日本医学物理学会.
2. Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy. TECHNICAL REPORTS SERIES No.398 IAEA, 2000.
3. 保科正夫他：放射線治療技術の標準，日本放射線治療専門技師認定機構，2007
4. Svensson H, Petterson C and Hettinger G: Commercial thimble chambers for absorbed dose measurements at high energy electron radiation, Acta Radiol Ther Phys Biol 1971; 10: 504-512.
5. Almond P, Biggs P, Coursey B, et al. AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon and electron beams. Med. Phys 1999; 26(9): 1847-1870.
6. McEwen M, DeWerd L, Ibbott G, et al. Addendum to the AAPM's TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon beams. Med. Phys 2014; 41(4): 041501-20.
7. Klein EE, Hanley J, Bayouth J, et al. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators. Med Phys 2009; 38(9): 4197-4212.
8. Papanikolaou N, Battista J, Boyer A, et al. Tissue inhomogeneity corrections for megavoltage photon beams. Med. Phys 2004; Publishing, Madison AAPM Report No. 85.

9. Boyer A and Schultheiss T. Effects of dosimetric and clinical uncertainty on complication-free local tumor control. *Radiat Oncol J* 1988; 11(1): 65-71.
10. Chao KSC, Apisarnthanarax S, Ozyigit G. *Practical Essentials of Intensity Modulated Radiation Therapy*. 2nd edn. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins; 2005.
11. Hanley J, Dresser S, Simon W. et al. AAPM Task Group 198 Report: An implementation guide for TG 142 quality assurance of medical accelerators. *Med. Phys* 2021; 48(10): e830-e885.
12. Zhu TC, Stathakis S, Clark JR, et al. Report of AAPM Task Group 219 on independent calculation-based dose/MU verification for IMRT. *Med. Phys* 2021; 48(10): 48e808-e829.
13. 日本医学物理学会. 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. 2018.
14. 清水森人. 分離校正におけるリファレンス線量計の運用について. *日放線治療専門放線技認定機構誌* 2019; 13(1): 132-137.
15. 津野隼人, 佐々木浩二, 清水森人, 他. 電位計相互校正における電位計校正定数計測法の簡素化. *医物理 Sup* 2018; 38(3): 43.
16. 高瀬信宏. 分離校正サービスに関する進捗と留意点. *医用原子力技術研究振興財団線量校正センターニュース* 2016; 6: 18-20.
17. 畑中星吾, 藤崎達也, 明上山温, 他. ユーザビームによる相対電位計校正定数の検討. *医物理* 2008; 27(3): 129-135.

18. EMF ジャパンホームページ. <https://www.emf-japan.com/emf/emf521r.html> (アクセス日 : 2021.6.8) .
19. 医用原子力技術研究振興財団ホームページ. よくある質問 Q14. https://www.antm.or.jp/03_activities/pdf/list_002.pdf (アクセス日 : 2021.6.9) .
20. Evaluation of measurement data-Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100 : 2008
21. 清水森人. 放射線治療用線量計の分離校正の意義. 日放技学誌 2018; 74(5): 483–490.
22. JIS C8500 : 2017 一次電池通則

6 章 研究業績

論文

- **Hayato Tsuno, Koji Sasaki**, Fumiyasu Matsubayashi, Tomio Koyama, Akitane Oosaka, Masataka Sakamoto, Kazunori Hosoki, Hidekazu Suzuki, and Emiko Okano.

「New Idea for Determining the Optimal Number of Measurements in Absorbed Dose-to-Water Measurement of High-Energy Photon Beam」 Radiat Prot Dosimetry. 2022 Dec 24; ncac262. doi:10.1093/rpd/ncac262.
- **津野隼人**, 松林史泰, **佐々木浩二**, ほか「新たに開発した電流源を用いたユーザによる電位計点検の実施可能性についての検討」, 日本放射線技術学会雑誌, 第79号, 2巻, 166-176, Feb. 2023.

学会発表

- **Hayato Tsuno, Koji Sasaki**, Fumiyasu Matsubayashi, Tomio Koyama, Akitane Oosaka, Masataka Sakamoto, Kazunori Hosoki, Hidekazu Suzuki, and Emiko Okano. 「The Multicenter Study on the Optimum Measurement Frequency Estimation Method Using the Variation and the Uncertainty of the Amount of Charge in the Water Absorbed Dose Measurement of High Energy Photon Beams」 The 77th Annual Meeting of the JSRT Apr. 2021,
- 第 77 回日本放射線技術学会総会学術大会における上記の発表に対して Bronze Award を受賞した

特許

- 発明者，津野隼人，松林史泰，松本圭二，酒井孝志，竹内 清

6989834「電位計の精度管理用電流発生装置、精度管理システム、及び校正方法」

7 章 謝辞

本論文は、著者が群馬県立県民健康科学大学大学院，診療放射線学研究科，放射線治療学専攻，博士後期課程在籍中にまとめたものである。本論文を終えるにあたり，御指導，御閲覧をいただきました同大学院 原孝光 教授に深く感謝いたします。また，詳細な御助言を賜りました同大学院 上原真澄 教授，大野由美子 准教授に感謝いたします。また，元名古屋大学 大学院医学系研究科 総合保健学専攻 バイオメディカルイメージング情報科学 准教授 小口宏 先生に感謝いたします。

著者は学士，修士，博士の学位を授与するために群馬県立県民健康科学大学を卒業した。同大学院同専攻 佐々木浩二 教授には主指導教員として研究の機会を与えて下さり，このすべての課程において指導教員を引き受けてくださいました。これまで，膨大な年月を要して御指導と御助言をいただきました。加えて，私のこれからの研究者人生に必要な多くの重要なこととして，研究者としてのモチベーションの維持方法や心構えについてご教示いただき大変感謝いたします。本当にありがとうございました。

本論文のデータは筆者が過去に所属していた公益財団法人がん研究会有明病院放射線治療部が所有する装置を用いたものである。研究実施にあたり御協力いただきました松林史泰 副技師長に感謝いたします。快く放射線計測に関連した資源供給いただいた株式会社川口電機製作所の酒井孝志様，松本圭二様および竹内清様に感謝いたします。

さらに，研究室で日常の議論を通して多くの経験とデータやアイデアを御助言いただきました研究室の院生，学部生の皆様に感謝を致します．また，診療放射線技師または医学物理士として病院で活躍をされている研究室の卒業生の皆様に研究協力と御助言をいただきましたことに深く感謝いたします．

最後に，社会人院生として研究を遂行することを温かく見守り，いつも応援と協力をしてくれた家族に深く感謝します．ありがとうございました．

付録1 第2章の各リニアックのビームパラメータと補正係数（式9に使用）。

Appendix 1 Beam parameters and correction factors of the linac used.

Appendix 1-1 TrueBeam. A measurement conditions and correction factors with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | 4 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 250 | 250 | 250 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 320 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.996 | 0.996 | 0.996 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.001 | 1.001 | 1.001 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.728 | 0.73 | 0.73 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-2 TrueBeam. A measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | Water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 320 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.991 | 0.991 | 0.991 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.768 | 0.77 | 0.77 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-3 TrueBeam. A measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 320 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.977 | 0.977 | 0.977 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.842 | 0.842 | 0.842 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-4 TrueBeam. A measurement conditions and correction factors with 6FFF.

| Nominal energy [MV] | 6FFF | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 1400 | 1400 | 1400 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 320 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.995 | 0.995 | 0.995 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.006 | 1.007 | 1.006 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.733 | 0.733 | 0.736 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-5 TrueBeam. A measurement conditions and correction factors with 10FFF.

| Nominal energy [MV] | 10FFF | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 2400 | 2400 | 2400 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 320 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.984 | 0.984 | 0.875 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.011 | 1.011 | 1.011 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.809 | 0.808 | 0.812 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0539 | 0.0536 |

Appendix 1-6 TrueBeam. B measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{webl ine} | UNIDOS ^{webl ine} | UNIDOS ^{webl ine} |
| Serial number of electrometer | 320 | 319 | 319 |
| k_Q | 0.991 | 0.991 | 0.991 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.769 | 0.767 | 0.767 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0539 | 0.0536 |

Appendix 1-7 TrueBeam. B measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 8840 |
| Electrometer | UNIDOS ^{webl ine} | UNIDOS ^{webl ine} | UNIDOS ^{webl ine} |
| Serial number of electrometer | 320 | 320 | 319 |
| k_Q | 0.977 | 0.977 | 0.977 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.001 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.841 | 0.839 | 0.839 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0539 | 0.0536 |

Appendix 1-8 TrueBeam. B measurement conditions and correction factors with 15 MV.

| Nominal energy [MV] | 15 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 8840 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 320 | 319 | 319 |
| k_Q | 0.970 | 0.970 | 0.970 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.005 | 1.006 | 1.005 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.871 | 0.870 | 0.870 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0539 | 0.0536 |

Appendix 1-9 TrueBeam. B measurement conditions and correction factors with 6FFF.

| Nominal energy [MV] | 6FFF | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 1400 | 1400 | 1400 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 8840 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 320 | 320 | 319 |
| k_Q | 0.995 | 0.995 | 0.995 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.005 | 1.007 | 1.006 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.733 | 0.733 | 0.733 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0539 | 0.0536 |

Appendix 1-10 TrueBeam. B measurement conditions and correction factors with 10FFF.

| Nominal energy [MV] | 10FFF | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 2400 | 2400 | 2400 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9710 | 9710 | 8840 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 320 | 320 | 319 |
| k_Q | 0.984 | 0.984 | 0.984 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.011 | 1.011 | 1.011 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.809 | 0.808 | 0.808 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0539 | 0.0536 |

Appendix 1-11 TrueBeam. C measurement conditions and correction factors with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | 4 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 250 | 250 | 250 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 8840 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 319 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.996 | 0.991 | 0.996 |
| k_{elec} | 0.9997 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.002 | 1.001 | 1.001 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.727 | 0.729 | 0.729 |
| $N_{D,w}$ | 0.0542 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-12 TrueBeam. C measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 8840 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 319 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.991 | 0.991 | 0.991 |
| k_{elec} | 0.9997 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.769 | 0.771 | 0.771 |
| $N_{D,w}$ | 0.0542 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-13 TrueBeam. C measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN 30013 | TN 30013 | TN 30013 |
| Serial number of chamber | 8840 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 319 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.977 | 0.977 | 0.977 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.840 | 0.840 | 0.840 |
| $N_{D,w}$ | 0.0542 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-14 TrueBeam. C measurement conditions and correction factors with 6FFF.

| Nominal energy [MV] | 6FFF | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 1400 | 1400 | 1400 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 8840 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 319 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.995 | 0.995 | 0.995 |
| k_{elec} | 0.9997 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.007 | 1.007 | 1.006 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.734 | 0.733 | 0.733 |
| $N_{D,w}$ | 0.0542 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-15 TrueBeam. C measurement conditions and correction factors with 10FFF.

| Nominal energy [MV] | 10FFF | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 2400 | 2400 | 2400 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 8840 | 9710 | 9710 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 319 | 320 | 320 |
| k_Q | 0.984 | 0.984 | 0.984 |
| k_{elec} | 0.9997 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.011 | 1.011 | 1.011 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.809 | 0.807 | 0.807 |
| $N_{D,w}$ | 0.0542 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-16 Clinac 21EX. A measurement conditions and correction factors with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | 4 MV | | |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Dose rate [MU/min] | 250 | 250 | 250 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 6694 | 6694 | 6694 |
| Electrometer | RAMTEC Smart | RAMTEC Smart | RAMTEC Smart |
| Serial number of electrometer | 65 | 65 | 65 |
| k_Q | 0.996156 | 0.996237 | 0.996229 |
| k_{elec} | 1.002 | 1.002 | 1.000 |
| k_{pol} | 0.999 | 0.998 | 1.000 |
| k_s | 1.002 | 1.002 | 1.001 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.725 | 0.725 | 0.725 |
| $N_{D,w}$ | 0.0536 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-17 Clinac 21EX. A measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 6694 | 6694 | 6694 |
| Electrometer | RAMTEC Smart | RAMTEC Smart | RAMTEC Smart |
| Serial number of electrometer | 65 | 65 | 65 |
| k_Q | 0.976471 | 0.977024 | 0.976951 |
| k_{elec} | 1.002 | 1.002 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 0.999 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.004 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.837 | 0.837 | 0.837 |
| $N_{D,w}$ | 0.0536 | 0.0536 | 0.0536 |

Appendix 1-18 Clinac 21EX. B measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 1939 | 1938 | 1938 |
| Electrometer | RAMTECDuo | RAMTECDuo | RAMTECDuo |
| Serial number of electrometer | 121 | 119 | 119 |
| k_Q | 0.991 | 0.991 | 0.991 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.004 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.773 | 0.773 | 0.773 |
| $N_{D,w}$ | 0.0540 | 0.0539 | 0.0535 |

Appendix 1-19 Clinac 21EX. B measurement conditions and correction factors with 15 MV.

| Nominal energy [MV] | 15 MV | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 1938 | 1938 | 1938 |
| Electrometer | RAMTECDuo | RAMTECDuo | RAMTECDuo |
| Serial number of electrometer | 119 | 119 | 119 |
| k_Q | 0.971 | 0.971 | 0.971 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.006 | 1.006 | 1.007 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.870 | 0.870 | 0.870 |
| $N_{D,w}$ | 0.0539 | 0.0539 | 0.0535 |

Appendix 1-20 UNIQUE measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 6695 | 6695 | 6695 |
| Electrometer | RAMTEC Smart | RAMTEC Smart | RAMTEC Smart |
| Serial number of electrometer | 401 | 401 | 401 |
| k_Q | 0.991 | 0.991 | 0.991 |
| k_{elec} | 1.001 | 1.001 | 1.012 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 0.999 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.774 | 0.774 | 0.774 |
| $N_{D,w}$ | 0.05396 | 0.05396 | 0.0540 |

Appendix 1-21 Novalis measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TM 30013 | TM 30013 | TM 30013 |
| Serial number of chamber | 6953 | 3675 | 3675 |
| Electrometer | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 |
| Serial number of electrometer | 11744 | 11744 | 11744 |
| k_Q | 0.991 | 0.991 | 0.991 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.002 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.778 | 0.778 | 0.778 |
| $N_{D,w}$ | 0.0541 | 0.0537 | 0.0538 |

Appendix 1-22 Novalis measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TM 30013 | TM 30013 | TM 30013 |
| Serial number of chamber | 6953 | 3675 | 3675 |
| Electrometer | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 |
| Serial number of electrometer | 11744 | 11744 | 11744 |
| k_Q | 0.977 | 0.977 | 0.977 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.002 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.845 | 0.845 | 0.845 |
| $N_{D,w}$ | 0.0541 | 0.0537 | 0.0538 |

Appendix 1-23 Novalis measurement conditions and correction factors with 6FFF.

| Nominal energy [MV] | 6FFF | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Dose rate [MU/min] | 1000 | 1000 | 1000 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TM 30013 | TM 30013 | TM 30013 |
| Serial number of chamber | 6953 | 3675 | 3675 |
| Electrometer | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 |
| Serial number of electrometer | 11744 | 11744 | 11744 |
| k_Q | 0.992 | 0.992 | 0.992 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.004 | 1.004 | 1.004 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.773 | 0.773 | 0.773 |
| $N_{D,w}$ | 0.0541 | 0.0537 | 0.0538 |

Appendix 1-24 Synergy. A measurement conditions and correction factors with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | 4 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|---------|---------|
| Dose rate [MU/min] | 250 | 250 | 250 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 6047 | 6047 | 6047 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS | UNIDOS |
| Serial number of electrometer | 653 | 10931 | 10931 |
| k_Q | 0.9943 | 0.9943 | 0.9943 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.005 | 1.002 | 1.002 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.743 | 0.743 | 0.743 |
| $N_{D,w}$ | 0.054 | 0.0532 | 0.0532 |

Appendix 1-25 Synergy. A measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|---------|---------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 6047 | 6047 | 6047 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS | UNIDOS |
| Serial number of electrometer | 653 | 10931 | 10931 |
| k_Q | 0.989 | 0.9891 | 0.9891 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.002 | 1.002 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.782 | 0.782 | 0.782 |
| $N_{D,w}$ | 0.054 | 0.0532 | 0.0532 |

Appendix 1-26 Synergy. A measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|---------|---------|
| Dose rate [MU/min] | 600 | 600 | 600 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 6047 | 6047 | 6047 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS | UNIDOS |
| Serial number of electrometer | 653 | 10931 | 10931 |
| k_Q | 0.978 | 0.978 | 0.978 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.836 | 0.836 | 0.836 |
| $N_{D,w}$ | 0.054 | 0.0532 | 0.0532 |

Appendix 1-27 Synergy. B measurement conditions and correction factors with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | 4 MV | | |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
| Dose rate [MU/min] | 300 | 300 | 300 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9013 | 9013 | 9013 |
| Electrometer | RAMTECsolo | RAMTECsolo | RAMTECsolo |
| Serial number of electrometer | 63 | 63 | 63 |
| k_Q | 0.995 | 0.995 | 0.995 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 0.999 | 0.999 | 0.999 |
| k_s | 1.002 | 1.003 | 1.001 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.739 | 0.739 | 0.739 |
| $N_{D,w}$ | 0.05367 | 0.05372 | 0.05369 |

Appendix 1-28 Synergy. B measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
| Dose rate [MU/min] | 500 | 500 | 500 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9013 | 9013 | 9013 |
| Electrometer | RAMTECsolo | RAMTECsolo | RAMTECsolo |
| Serial number of electrometer | 63 | 63 | 63 |
| k_Q | 0.989 | 0.989 | 0.989 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 0.999 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.003 | 1.003 | 1.001 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.782 | 0.782 | 0.782 |
| $N_{D,w}$ | 0.05367 | 0.05372 | 0.05369 |

Appendix 1-29 Synergy. B measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|-------------------------------|------------|------------|------------|
| Dose rate [MU/min] | 500 | 500 | 500 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 9013 | 9013 | 9013 |
| Electrometer | RAMTECsolo | RAMTECsolo | RAMTECsolo |
| Serial number of electrometer | 63 | 63 | 63 |
| k_Q | 0.978 | 0.978 | 0.978 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 0.999 | 0.999 | 0.999 |
| k_s | 1.005 | 1.005 | 1.004 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.835 | 0.835 | 0.835 |
| $N_{D,w}$ | 0.05367 | 0.05372 | 0.05369 |

Appendix 1-30 Synergy. C measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Dose rate [MU/min] | 500 | 500 | 500 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TM 30013 | TM 30013 | TM 30013 |
| Serial number of chamber | 6953 | 3675 | 3675 |
| Electrometer | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 |
| Serial number of electrometer | 11744 | 11744 | 11744 |
| k_Q | 0.989 | 0.989 | 0.989 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.002 | 1.002 | 1.002 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.785 | 0.785 | 0.785 |
| $N_{D,w}$ | 0.0541 | 0.0537 | 0.0537 |

Appendix 1-31 Synergy. C measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| Dose rate [MU/min] | 500 | 500 | 500 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TM 30013 | TM 30013 | TM 30013 |
| Serial number of chamber | 6953 | 3675 | 3675 |
| Electrometer | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 | UNIDOS T10001 |
| Serial number of electrometer | 11744 | 11744 | 11744 |
| k_Q | 0.978 | 0.978 | 0.978 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.004 | 1.004 | 1.004 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.845 | 0.845 | 0.845 |
| $N_{D,w}$ | 0.0541 | 0.0537 | 0.0537 |

Appendix 1-32 ARTISTE. A measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | | 6 MV | |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Dose rate [MU/min] | 300 | 300 | 300 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 2825 | 4402 | 4402 |
| Electrometer | RAMTEC smart | RAMTEC smart | RAMTEC smart |
| Serial number of electrometer | 51 | 209 | 209 |
| k_Q | 0.99 | 0.99 | 0.99 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 0.999 | 0.999 |
| k_s | 1.002 | 1.001 | 1.001 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.778 | 0.778 | 0.778 |
| $N_{D,w}$ | 0.05385 | 0.0538 | 0.05348 |

Appendix 1-33 ARTISTE. A measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | | 10 MV | |
|-------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Dose rate [MU/min] | 500 | 500 | 500 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 2825 | 4402 | 4402 |
| Electrometer | RAMTEC smart | RAMTEC smart | RAMTEC smart |
| Serial number of electrometer | 51 | 209 | 209 |
| k_Q | 0.975 | 0.975 | 0.975 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.004 | 1.001 | 1.001 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.845 | 0.845 | 0.845 |
| $N_{D,w}$ | 0.05385 | 0.0538 | 0.05348 |

Appendix 1-34 ARTISTE. B measurement conditions and correction factors with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 300 | 300 | 300 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 4953 | 4954 | 4954 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 479 | 479 | 479 |
| k_Q | 0.989 | 0.989 | 0.989 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.002 | 1.002 | 1.002 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.779 | 0.779 | 0.779 |
| $N_{D,w}$ | 0.05363 | 0.05359 | 0.0534 |

Appendix 1-35 ARTISTE. B measurement conditions and correction factors with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Dose rate [MU/min] | 500 | 500 | 500 |
| Phantom | water | water | water |
| Field size [cm ²] | 10 × 10 | 10 × 10 | 10 × 10 |
| d_c [cm] | 10 | 10 | 10 |
| Chamber | TN30013 | TN30013 | TN30013 |
| Serial number of chamber | 4954 | 4954 | 4954 |
| Electrometer | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} | UNIDOS ^{weblne} |
| Serial number of electrometer | 479 | 479 | 479 |
| k_Q | 0.974 | 0.974 | 0.974 |
| k_{elec} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_{pol} | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| k_s | 1.002 | 1.002 | 1.003 |
| $TMR(10, 10 \times 10)$ | 0.844 | 0.844 | 0.844 |
| $N_{D,w}$ | 0.05363 | 0.05359 | 0.0534 |

付録2 第2章の各リニアックのビームデータ（式2の \bar{M}_Q^{raw} で、式19まで使用）。

Appendix 2 Measurement data of the linac used.

Appendix 2-1 Measurement data of TrueBeam. A with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | | 4 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| N [times] | 1 | 2 | 3 | |
| set MU [MU] | 100 | 100 | 100 | |
| Temperature [°C] | 24.5 | 22.9 | 22.5 | |
| Pressure [kPa] | 101.992 | 101.164 | 100.59 | |
| k_{TP} | 1.002 | 1.005 | 1.009 | |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | |
| 1 | 13.54 | 13.67 | 13.53 | |
| 2 | 13.53 | 13.67 | 13.54 | |
| 3 | 13.53 | 13.67 | 13.53 | |
| 4 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 5 | 13.53 | 13.67 | 13.53 | |
| 6 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 7 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 8 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 9 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 10 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |

Appendix 2-2 Measurement data of TrueBeam. A with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 24.4 | 24.4 | 22.5 |
| Pressure [kPa] | 101.987 | 101.987 | 100.609 |
| k_{TP} | 1.002 | 1.002 | 1.009 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 14.34 | 14.34 | 14.33 |
| 2 | 14.34 | 14.34 | 14.33 |
| 3 | 14.34 | 14.34 | 14.33 |
| 4 | 14.34 | 14.34 | 14.33 |
| 5 | 14.34 | 14.34 | 14.34 |
| 6 | 14.34 | 14.34 | 14.33 |
| 7 | 14.33 | 14.33 | 14.33 |
| 8 | 14.34 | 14.34 | 14.34 |
| 9 | 14.34 | 14.34 | 14.33 |
| 10 | 14.34 | 14.34 | 14.34 |

Appendix 2-3 Measurement data of TrueBeam. A with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | | 10 MV | | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| N [times] | 1 | 2 | 3 | |
| set MU [MU] | 100 | 100 | 100 | |
| Temperature [°C] | 24.3 | 22.8 | 22.5 | |
| Pressure [kPa] | 101.97 | 101.13 | 100.59 | |
| k_{TP} | 1.001 | 1.005 | 1.009 | |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | |
| 1 | 15.91 | 16.09 | 15.89 | |
| 2 | 15.93 | 16.09 | 15.89 | |
| 3 | 15.92 | 16.09 | 15.89 | |
| 4 | 15.91 | 16.09 | 15.90 | |
| 5 | 15.92 | 16.09 | 15.90 | |
| 6 | 15.91 | 16.09 | 15.89 | |
| 7 | 15.91 | 16.09 | 15.90 | |
| 8 | 15.91 | 16.09 | 15.90 | |
| 9 | 15.91 | 16.09 | 15.90 | |
| 10 | 15.91 | 16.09 | 15.89 | |

Appendix 2-4 Measurement data of TrueBeam. A with 6FFF.

| Nominal energy [MV] | | 6FFF | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 24.2 | 22.8 | 22.6 |
| Pressure [kPa] | 101.944 | 101.141 | 101.167 |
| k_{TP} | 1.001 | 1.005 | 1.004 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 13.56 | 13.69 | 13.57 |
| 2 | 13.55 | 13.68 | 13.55 |
| 3 | 13.54 | 13.69 | 13.55 |
| 4 | 13.56 | 13.68 | 13.55 |
| 5 | 13.55 | 13.69 | 13.55 |
| 6 | 13.56 | 13.69 | 13.53 |
| 7 | 13.55 | 13.69 | 13.55 |
| 8 | 13.55 | 13.69 | 13.54 |
| 9 | 13.55 | 13.69 | 13.54 |
| 10 | 13.56 | 13.69 | 13.54 |

Appendix 2-5 Measurement data of TrueBeam. A with 10FFF.

| Nominal energy [MV] | | 10FFF | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 24.1 | 22.8 | 22.6 |
| Pressure [kPa] | 101.944 | 101.137 | 101.108 |
| k_{TP} | 1.001 | 1.005 | 1.004 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 14.99 | 15.17 | 17.05 |
| 2 | 15 | 15.16 | 17.06 |
| 3 | 15 | 15.17 | 17.07 |
| 4 | 14.99 | 15.17 | 17.07 |
| 5 | 14.99 | 15.16 | 17.07 |
| 6 | 14.98 | 15.16 | 17.07 |
| 7 | 14.99 | 15.17 | 17.06 |
| 8 | 14.98 | 15.16 | 17.05 |
| 9 | 15.00 | 15.16 | 17.06 |
| 10 | 14.99 | 15.16 | 17.06 |

Appendix 2-6 Measurement data of TrueBeam. B with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22 | 22.1 | 22.8 |
| Pressure [kPa] | 102.45 | 102.44 | 101.286 |
| k_{TP} | 0.989 | 0.989 | 1.003 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 14.61 | 14.52 | 14.44 |
| 2 | 14.62 | 14.52 | 14.43 |
| 3 | 14.62 | 14.52 | 14.43 |
| 4 | 14.62 | 14.52 | 14.44 |
| 5 | 14.62 | 14.53 | 14.43 |
| 6 | 14.63 | 14.52 | 14.43 |
| 7 | 14.62 | 14.53 | 14.43 |
| 8 | 14.62 | 14.52 | 14.44 |
| 9 | 14.62 | 14.53 | 14.43 |
| 10 | 14.62 | 14.53 | 14.44 |

Appendix 2-7 Measurement data of TrueBeam. B with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.4 | 23.2 | 22.7 |
| Pressure [kPa] | 101.055 | 101.786 | 101.354 |
| k_{TP} | 1.004 | 1.000 | 1.002 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 15.87 | 16.02 | 16.03 |
| 2 | 15.87 | 16.02 | 16.03 |
| 3 | 15.87 | 16.02 | 16.04 |
| 4 | 15.87 | 16.02 | 16.03 |
| 5 | 15.87 | 16.01 | 16.03 |
| 6 | 15.87 | 16.02 | 16.03 |
| 7 | 15.87 | 16.01 | 16.03 |
| 8 | 15.87 | 16.01 | 16.03 |
| 9 | 15.87 | 16.02 | 16.03 |
| 10 | 15.87 | 16.01 | 16.03 |

Appendix 2-8 Measurement data of TrueBeam. B with 15 MV.

| Nominal energy [MV] | 15 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.3 | 23.1 | 22.7 |
| Pressure [kPa] | 101.149 | 101.855 | 101.401 |
| k_{TP} | 1.003 | 0.999 | 1.002 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 16.6 | 16.77 | 16.75 |
| 2 | 16.58 | 16.76 | 16.76 |
| 3 | 16.59 | 16.77 | 16.76 |
| 4 | 16.59 | 16.76 | 16.77 |
| 5 | 16.59 | 16.76 | 16.76 |
| 6 | 16.59 | 16.75 | 16.76 |
| 7 | 16.59 | 16.76 | 16.76 |
| 8 | 16.58 | 16.76 | 16.76 |
| 9 | 16.58 | 16.77 | 16.76 |
| 10 | 16.58 | 16.76 | 16.76 |

Appendix 2-9 Measurement data of TrueBeam. B with 6FFF.

| Nominal energy [MV] | | 6FFF | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.3 | 23.1 | 22.6 |
| Pressure [kPa] | 101.2 | 101.90 | 101.167 |
| k_{TP} | 1.002 | 0.998 | 1.004 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 13.51 | 13.65 | 13.57 |
| 2 | 13.51 | 13.65 | 13.55 |
| 3 | 13.51 | 13.65 | 13.55 |
| 4 | 13.52 | 13.65 | 13.55 |
| 5 | 13.51 | 13.65 | 13.55 |
| 6 | 13.51 | 13.65 | 13.53 |
| 7 | 13.52 | 13.65 | 13.55 |
| 8 | 13.52 | 13.65 | 13.54 |
| 9 | 13.51 | 13.65 | 13.54 |
| 10 | 13.52 | 13.65 | 13.54 |

Appendix 2-10 Measurement data of TrueBeam. B with 10FFF.

| Nominal energy [MV] | | 10FFF | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.2 | 23.1 | 22.7 |
| Pressure [kPa] | 101.23 | 101.952 | 101.0499 |
| k_{TP} | 1.002 | 0.998 | 1.005 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 14.97 | 15.12 | 15.11 |
| 2 | 14.96 | 15.10 | 15.09 |
| 3 | 14.97 | 15.10 | 15.11 |
| 4 | 14.96 | 15.11 | 15.12 |
| 5 | 14.97 | 15.09 | 15.10 |
| 6 | 14.97 | 15.10 | 15.10 |
| 7 | 14.96 | 15.09 | 15.09 |
| 8 | 14.96 | 15.10 | 15.09 |
| 9 | 14.95 | 15.09 | 15.10 |
| 10 | 14.95 | 15.10 | 15.10 |

Appendix 2-11 Measurement data of TrueBeam. C with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | 4 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 150 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.7 | 22.1 | 22.3 |
| Pressure [kPa] | 101.28 | 102.11 | 101.62 |
| k_{TP} | 1.003 | 0.993 | 0.998 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 20.27 | 13.8 | 13.71 |
| 2 | 20.26 | 13.76 | 13.72 |
| 3 | 20.28 | 13.76 | 13.72 |
| 4 | 20.28 | 13.76 | 13.72 |
| 5 | 20.28 | 13.76 | 13.72 |
| 6 | 20.28 | 13.76 | 13.72 |
| 7 | 20.28 | 13.77 | 13.72 |
| 8 | 20.28 | 13.77 | 13.72 |
| 9 | 20.28 | 13.77 | 13.72 |
| 10 | 20.28 | 13.77 | 13.72 |

Appendix 2-12 Measurement data of TrueBeam. C with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 150 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.8 | 22.0 | 22.4 |
| Pressure [kPa] | 101.28 | 102.45 | 101.53 |
| k_{TP} | 1.003 | 0.989 | 0.999 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 21.52 | 14.61 | 14.56 |
| 2 | 21.51 | 14.62 | 14.57 |
| 3 | 21.52 | 14.62 | 14.56 |
| 4 | 21.51 | 14.62 | 14.57 |
| 5 | 21.52 | 14.62 | 14.56 |
| 6 | 21.52 | 14.63 | 14.57 |
| 7 | 21.52 | 14.62 | 14.56 |
| 8 | 21.52 | 14.62 | 14.56 |
| 9 | 21.52 | 14.62 | 14.57 |
| 10 | 21.52 | 14.62 | 14.56 |

Appendix 2-13 Measurement data of TrueBeam. C with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | | 10 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 150 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.6 | 21.9 | 22.1 |
| Pressure [kPa] | 101.32 | 102.022 | 101.67 |
| k_{TP} | 1.002 | 0.993 | 0.997 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 23.89 | 16.18 | 16.12 |
| 2 | 23.87 | 16.18 | 16.11 |
| 3 | 23.87 | 16.17 | 16.12 |
| 4 | 23.87 | 16.17 | 16.12 |
| 5 | 23.87 | 16.17 | 16.12 |
| 6 | 23.87 | 16.17 | 16.11 |
| 7 | 23.87 | 16.17 | 16.11 |
| 8 | 23.87 | 16.17 | 16.11 |
| 9 | 23.87 | 16.18 | 16.11 |
| 10 | 23.87 | 16.18 | 16.12 |

Appendix 2-14 Measurement data of TrueBeam. C with 6FFF.

| Nominal energy [MV] | | 6FFF | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 150 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.6 | 21.8 | 22 |
| Pressure [kPa] | 101.34 | 102.01 | 101.68 |
| k_{TP} | 1.002 | 0.993 | 0.997 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 20.34 | 13.75 | 13.70 |
| 2 | 20.35 | 13.74 | 13.70 |
| 3 | 20.34 | 13.74 | 13.69 |
| 4 | 20.34 | 13.74 | 13.70 |
| 5 | 20.33 | 13.74 | 13.70 |
| 6 | 20.33 | 13.73 | 13.69 |
| 7 | 20.34 | 13.73 | 13.70 |
| 8 | 20.34 | 13.75 | 13.71 |
| 9 | 20.33 | 13.74 | 13.70 |
| 10 | 20.34 | 13.74 | 13.70 |

Appendix 2-15 Measurement data of TrueBeam. C with 10FFF.

| Nominal energy [MV] | | 10FFF | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 150 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.6 | 21.8 | 22 |
| Pressure [kPa] | 101.33 | 101.94 | 101.71 |
| k_{TP} | 1.002 | 0.993 | 0.996 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 22.52 | 15.18 | 15.16 |
| 2 | 22.51 | 15.19 | 15.16 |
| 3 | 22.51 | 15.18 | 15.15 |
| 4 | 22.5 | 15.19 | 15.16 |
| 5 | 22.51 | 15.17 | 15.16 |
| 6 | 22.51 | 15.18 | 15.15 |
| 7 | 22.51 | 15.18 | 15.16 |
| 8 | 22.52 | 15.18 | 15.16 |
| 9 | 22.50 | 15.18 | 15.16 |
| 10 | 22.52 | 15.18 | 15.15 |

Appendix 2-16 Measurement data of Clinac 21EX. A with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | 4 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 |
| Temperature [°C] | 24.2 | 24.7 | 22.4 |
| Pressure [kPa] | 101.920 | 102.137 | 101.931 |
| k_{TP} | 1.002 | 1.001 | 0.995 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 26.916 | 26.943 | 27.356 |
| 2 | 26.93 | 26.943 | 27.361 |
| 3 | 26.935 | 26.942 | 27.373 |
| 4 | 26.934 | 26.951 | 27.368 |
| 5 | 26.932 | 26.957 | 27.375 |
| 6 | 26.926 | 26.956 | 27.377 |
| 7 | 26.929 | 26.959 | 27.387 |
| 8 | 26.937 | 26.964 | 27.387 |
| 9 | 26.936 | 26.965 | 27.387 |
| 10 | 26.940 | 26.973 | 27.393 |

Appendix 2-17 Measurement data of Clinac 21EX. A with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | | 10 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| N [times] | 1 | 2 | 3 | |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 | |
| Temperature [°C] | 24.2 | 24.4 | 22.4 | |
| Pressure [kPa] | 101.896 | 102.370 | 101.979 | |
| k_{TP} | 1.002 | 0.998 | 0.995 | |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | |
| 1 | 31.765 | 31.946 | 32.108 | |
| 2 | 31.774 | 31.936 | 32.116 | |
| 3 | 31.793 | 31.941 | 32.127 | |
| 4 | 31.804 | 31.942 | 32.127 | |
| 5 | 31.805 | 31.939 | 32.132 | |
| 6 | 31.809 | 31.945 | 32.138 | |
| 7 | 31.81 | 31.939 | 32.145 | |
| 8 | 31.822 | 31.936 | 32.145 | |
| 9 | 31.828 | 31.943 | 32.143 | |
| 10 | 31.838 | 31.943 | 32.148 | |

Appendix 2-18 Measurement data of Clinac 21EX. B with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 150 | 150 | 150 |
| Temperature [°C] | 23.2 | 23.5 | 23.4 |
| Pressure [kPa] | 102.173 | 102.138 | 102.366 |
| k_{TP} | 0.996 | 0.997 | 0.995 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 21.844 | 21.642 | 21.881 |
| 2 | 21.873 | 21.622 | 21.881 |
| 3 | 21.902 | 21.667 | 21.866 |
| 4 | 21.865 | 21.614 | 21.874 |
| 5 | 21.873 | 21.665 | 21.861 |
| 6 | 21.851 | 21.65 | 21.867 |
| 7 | 21.889 | 21.687 | 21.886 |
| 8 | 21.900 | 21.637 | 21.875 |
| 9 | 21.922 | 21.664 | 21.875 |
| 10 | 21.915 | 21.697 | 21.879 |

Appendix 2-19 Measurement data of Clinac 21EX. B with 15 MV.

| Nominal energy [MV] | 15 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 150 | 150 | 150 |
| Temperature [°C] | 23.2 | 23.4 | 23.4 |
| Pressure [kPa] | 102.177 | 102.183 | 102.37 |
| k_{TP} | 0.996 | 0.996 | 0.995 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 25.147 | 24.859 | 25.097 |
| 2 | 25.153 | 24.86 | 25.101 |
| 3 | 25.156 | 24.864 | 25.100 |
| 4 | 25.162 | 24.875 | 25.097 |
| 5 | 25.158 | 24.876 | 25.096 |
| 6 | 25.153 | 24.867 | 25.093 |
| 7 | 25.155 | 24.872 | 25.095 |
| 8 | 25.159 | 24.867 | 25.100 |
| 9 | 25.167 | 24.876 | 25.102 |
| 10 | 25.158 | 24.879 | 25.098 |

Appendix 2-20 Measurement data of UNIQUE with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | | 6 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 |
| Temperature [°C] | 24.4 | 24.5 | 25.5 |
| Pressure [kPa] | 100.9 | 102.04 | 102.11 |
| k_{TP} | 1.012 | 1.001 | 1.004 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 28.364 | 28.666 | 28.924 |
| 2 | 28.361 | 28.663 | 28.908 |
| 3 | 28.367 | 28.666 | 28.910 |
| 4 | 28.375 | 28.684 | 28.904 |
| 5 | 28.368 | 28.670 | 28.902 |
| 6 | 28.373 | 28.669 | 28.905 |
| 7 | 28.369 | 28.680 | 28.903 |
| 8 | 28.368 | 28.676 | 28.897 |
| 9 | 28.373 | 28.674 | 28.906 |
| 10 | 28.371 | 28.670 | 28.895 |

Appendix 2-21 Measurement data of Novalis with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | 6 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 25.87 | 24.80 | 25.80 |
| Pressure [kPa] | 97.47 | 97.92 | 97.01 |
| k_{TP} | 1.053 | 1.045 | 1.058 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 13.81 | 14.01 | 13.76 |
| 2 | 13.81 | 14.01 | 13.76 |
| 3 | 13.81 | 14.01 | 13.76 |
| 4 | 13.82 | 14.01 | 13.76 |
| 5 | 13.82 | 14.01 | 13.76 |
| 6 | 13.82 | 14.01 | 13.76 |
| 7 | 13.82 | 14.02 | 13.75 |
| 8 | 13.82 | 14.02 | 13.75 |
| 9 | 13.82 | 14.03 | 13.76 |
| 10 | 13.82 | 14.03 | 13.75 |

Appendix 2-22 Measurement data of Novalis with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | | 10 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 25.84 | 24.80 | 25.80 |
| Pressure [kPa] | 97.46 | 97.92 | 96.98 |
| k_{TP} | 1.053 | 1.045 | 1.058 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 15.19 | 15.36 | 15.17 |
| 2 | 15.19 | 15.36 | 15.17 |
| 3 | 15.20 | 15.36 | 15.17 |
| 4 | 15.20 | 15.36 | 15.17 |
| 5 | 15.20 | 15.36 | 15.17 |
| 6 | 15.20 | 15.36 | 15.17 |
| 7 | 15.20 | 15.36 | 15.17 |
| 8 | 15.20 | 15.36 | 15.17 |
| 9 | 15.20 | 15.36 | 15.17 |
| 10 | 15.20 | 15.36 | 15.17 |

Appendix 2-23 Measurement data of Novalis with 6 FFF.

| Nominal energy [MV] | | 6FFF | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 25.82 | 24.80 | 25.80 |
| Pressure [kPa] | 97.44 | 97.92 | 96.96 |
| k_{TP} | 1.053 | 1.045 | 1.059 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 13.67 | 13.82 | 13.67 |
| 2 | 13.67 | 13.83 | 13.67 |
| 3 | 13.67 | 13.81 | 13.66 |
| 4 | 13.67 | 13.80 | 13.66 |
| 5 | 13.68 | 13.81 | 13.66 |
| 6 | 13.68 | 13.81 | 13.67 |
| 7 | 13.68 | 13.81 | 13.67 |
| 8 | 13.68 | 13.81 | 13.66 |
| 9 | 13.68 | 13.82 | 13.66 |
| 10 | 13.68 | 13.81 | 13.66 |

Appendix 2-24 Measurement data of Synergy. A with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | | 4 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 200 | 200.00 | 200 |
| Temperature [°C] | 21.7 | 27.7 | 26.3 |
| Pressure [kPa] | 99.04 | 98.67 | 98.96 |
| k_{TP} | 1.022 | 1.047 | 1.039 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 27.21 | 26.80 | 27.00 |
| 2 | 27.14 | 26.81 | 27.02 |
| 3 | 27.15 | 26.82 | 27.03 |
| 4 | 27.15 | 26.80 | 27.03 |
| 5 | 27.14 | 26.81 | 27.02 |
| 6 | 27.15 | 26.81 | 27.03 |
| 7 | 27.15 | 26.80 | 27.03 |
| 8 | 27.14 | 26.81 | 27.03 |
| 9 | 27.15 | 26.81 | 27.03 |
| 10 | 27.15 | 26.81 | 27.03 |

Appendix 2-25 Measurement data of Synergy. A with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | | 6 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| N [times] | 1 | 2 | 3 | |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 | |
| Temperature [°C] | 22.5 | 27.6 | 25.6 | |
| Pressure [kPa] | 98.95 | 98.66 | 98.97 | |
| k_{TP} | 1.026 | 1.047 | 1.036 | |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | |
| 1 | 28.75 | 28.25 | 28.60 | |
| 2 | 28.76 | 28.25 | 28.62 | |
| 3 | 28.75 | 28.25 | 28.61 | |
| 4 | 28.76 | 28.26 | 28.62 | |
| 5 | 28.75 | 28.25 | 28.61 | |
| 6 | 28.75 | 28.25 | 28.62 | |
| 7 | 28.76 | 28.26 | 28.61 | |
| 8 | 28.75 | 28.25 | 28.61 | |
| 9 | 28.75 | 28.25 | 28.61 | |
| 10 | 28.75 | 28.25 | 28.61 | |

Appendix 2-26 Measurement data of Synergy. A with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | | 10 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 |
| Temperature [°C] | 22.5 | 27.5 | 25.5 |
| Pressure [kPa] | 98.96 | 98.66 | 98.97 |
| k_{TP} | 1.026 | 1.046 | 1.036 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 31.06 | 30.65 | 30.96 |
| 2 | 31.06 | 30.65 | 30.99 |
| 3 | 31.05 | 30.67 | 30.99 |
| 4 | 31.06 | 30.66 | 30.98 |
| 5 | 31.06 | 30.66 | 30.99 |
| 6 | 31.05 | 30.67 | 30.99 |
| 7 | 31.06 | 30.66 | 30.98 |
| 8 | 31.06 | 30.66 | 30.99 |
| 9 | 31.06 | 30.67 | 30.99 |
| 10 | 31.06 | 30.66 | 30.98 |

Appendix 2-27 Measurement data of Synergy. B with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | | 4 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 |
| Temperature [°C] | 22.0 | 23.4 | 22.2 |
| Pressure [kPa] | 101.16 | 101.60 | 101.20 |
| k_{TP} | 1.002 | 1.002 | 1.002 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 27.738 | 27.317 | 27.850 |
| 2 | 27.760 | 27.329 | 27.897 |
| 3 | 27.768 | 27.338 | 27.863 |
| 4 | 27.758 | 27.321 | 27.880 |
| 5 | 27.756 | 27.342 | 27.857 |
| 6 | 27.760 | 27.331 | 27.863 |
| 7 | 27.758 | 27.350 | 27.869 |
| 8 | 27.764 | 27.352 | 27.874 |
| 9 | 27.769 | 27.358 | 27.867 |
| 10 | 27.769 | 27.350 | 27.879 |

Appendix 2-28 Measurement data of Synergy. B with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | | 6 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| N [times] | 1 | 2 | 3 | |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 | |
| Temperature [°C] | 22.0 | 23.4 | 22.2 | |
| Pressure [kPa] | 101.16 | 101.60 | 101.20 | |
| k_{TP} | 1.002 | 1.002 | 1.002 | |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | |
| 1 | 29.272 | 29.168 | 29.621 | |
| 2 | 29.269 | 29.187 | 29.615 | |
| 3 | 29.275 | 29.167 | 29.624 | |
| 4 | 29.290 | 29.175 | 29.622 | |
| 5 | 29.299 | 29.178 | 29.633 | |
| 6 | 29.29 | 29.198 | 29.637 | |
| 7 | 29.296 | 29.186 | 29.635 | |
| 8 | 29.304 | 29.179 | 29.625 | |
| 9 | 29.298 | 29.181 | 29.621 | |
| 10 | 29.304 | 29.195 | 29.651 | |

Appendix 2-29 Measurement data of Synergy. B with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | 10 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 |
| Temperature [°C] | 22.0 | 23.4 | 22.2 |
| Pressure [kPa] | 101.16 | 101.60 | 101.20 |
| k_{TP} | 1.002 | 1.002 | 1.002 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 31.709 | 31.391 | 31.831 |
| 2 | 31.723 | 31.397 | 31.848 |
| 3 | 31.725 | 31.385 | 31.834 |
| 4 | 31.730 | 31.396 | 31.859 |
| 5 | 31.738 | 31.395 | 31.856 |
| 6 | 31.719 | 31.397 | 31.830 |
| 7 | 31.734 | 31.407 | 31.830 |
| 8 | 31.741 | 31.409 | 31.845 |
| 9 | 31.734 | 31.414 | 31.851 |
| 10 | 31.741 | 31.419 | 31.866 |

Appendix 2-30 Measurement data of Synergy. C with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | | 6 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| N [times] | 1 | 2 | 3 | |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 | |
| Temperature [°C] | 23.73 | 23.02 | 22.86 | |
| Pressure [kPa] | 97.3 | 97.27 | 96.66 | |
| k_{TP} | 1.048 | 1.045 | 1.051 | |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | |
| 1 | 13.98 | 14.16 | 13.87 | |
| 2 | 13.98 | 14.17 | 13.88 | |
| 3 | 13.98 | 14.17 | 13.89 | |
| 4 | 13.99 | 14.18 | 13.89 | |
| 5 | 13.99 | 14.18 | 13.89 | |
| 6 | 13.99 | 14.17 | 13.90 | |
| 7 | 14.00 | 14.18 | 13.89 | |
| 8 | 14.00 | 14.18 | 13.90 | |
| 9 | 14.00 | 14.18 | 13.89 | |
| 10 | 13.99 | 14.18 | 13.90 | |

Appendix 2-31 Measurement data of Synergy. C with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | | 10 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 23.73 | 22.91 | 24.9 |
| Pressure [kPa] | 97.29 | 97.17 | 97.49 |
| k_{TP} | 1.048 | 1.046 | 1.050 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 15.24 | 15.25 | 15.31 |
| 2 | 15.25 | 15.25 | 15.31 |
| 3 | 15.24 | 15.25 | 15.31 |
| 4 | 15.24 | 15.26 | 15.31 |
| 5 | 15.24 | 15.25 | 15.32 |
| 6 | 15.24 | 15.25 | 15.31 |
| 7 | 15.24 | 15.25 | 15.30 |
| 8 | 15.24 | 15.26 | 15.31 |
| 9 | 15.25 | 15.25 | 15.31 |
| 10 | 15.24 | 15.26 | 15.31 |

Appendix 2-32 Measurement data of ARTISTE. A with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | | 6 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 |
| Temperature [°C] | 21.6 | 22.6 | 22.0 |
| Pressure [kPa] | 101.08 | 101.26 | 101.71 |
| k_{TP} | 1.001 | 1.003 | 1.000 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 29.348 | 29.408 | 29.420 |
| 2 | 29.323 | 29.391 | 29.405 |
| 3 | 29.328 | 29.362 | 29.395 |
| 4 | 29.328 | 29.359 | 29.402 |
| 5 | 29.327 | 29.355 | 29.405 |
| 6 | 29.326 | 29.361 | 29.409 |
| 7 | 29.330 | 29.354 | 29.401 |
| 8 | 29.318 | 29.353 | 29.402 |
| 9 | 29.313 | 29.360 | 29.405 |
| 10 | 29.330 | 29.360 | 29.405 |

Appendix 2-33 Measurement data of ARTISTE. A with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | | 10 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 200 | 200 | 200 |
| Temperature [°C] | 21.6 | 22.6 | 23.0 |
| Pressure [kPa] | 101.10 | 101.25 | 101.72 |
| k_{TP} | 1.001 | 1.003 | 1.000 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 31.816 | 31.964 | 32.250 |
| 2 | 31.821 | 31.976 | 32.235 |
| 3 | 31.829 | 31.969 | 32.248 |
| 4 | 31.822 | 31.981 | 32.233 |
| 5 | 31.825 | 31.966 | 32.240 |
| 6 | 31.821 | 31.965 | 32.245 |
| 7 | 31.819 | 31.977 | 32.233 |
| 8 | 31.815 | 31.977 | 32.241 |
| 9 | 31.822 | 31.965 | 32.249 |
| 10 | 31.819 | 31.960 | 32.252 |

Appendix 2-34 Measurement data of ARTISTE. B with 6 MV.

| Nominal energy [MV] | | 6 MV | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.8 | 23.5 | 22.7 |
| Pressure [kPa] | 91.710 | 92.270 | 91.120 |
| k_{TP} | 1.108 | 1.104 | 1.115 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 13.29 | 13.32 | 13.25 |
| 2 | 13.29 | 13.33 | 13.25 |
| 3 | 13.29 | 13.33 | 13.25 |
| 4 | 13.29 | 13.32 | 13.25 |
| 5 | 13.30 | 13.33 | 13.26 |
| 6 | 13.30 | 13.34 | 13.26 |
| 7 | 13.29 | 13.34 | 13.26 |
| 8 | 13.30 | 13.34 | 13.26 |
| 9 | 13.30 | 13.34 | 13.26 |
| 10 | 13.30 | 13.35 | 13.26 |

Appendix 2-35 Measurement data of ARTISTE. B with 10 MV.

| Nominal energy [MV] | | 10 MV | |
|---------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| N [times] | 1 | 2 | 3 |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 |
| Temperature [°C] | 22.8 | 23.5 | 22.7 |
| Pressure [kPa] | 91.718 | 92.280 | 91.260 |
| k_{TP} | 1.108 | 1.104 | 1.113 |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] |
| 1 | 14.63 | 14.65 | 14.63 |
| 2 | 14.62 | 14.64 | 14.64 |
| 3 | 14.62 | 14.66 | 14.64 |
| 4 | 14.62 | 14.64 | 14.64 |
| 5 | 14.62 | 14.65 | 14.63 |
| 6 | 14.62 | 14.64 | 14.63 |
| 7 | 14.62 | 14.66 | 14.63 |
| 8 | 14.61 | 14.66 | 14.63 |
| 9 | 14.61 | 14.66 | 14.64 |
| 10 | 14.62 | 14.66 | 14.61 |

付録3 第2章の $N > 3$ の測定データ

Appendix 3 Measurement data of TrueBeam. A with 4 MV.

| Nominal energy [MV] | | 4 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| N [times] | 1 | 2 | 3 | |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 | |
| Temperature [°C] | 24.5 | 22.9 | 22.5 | |
| Pressure [kPa] | 101.992 | 101.164 | 100.59 | |
| k_{TP} | 1.002 | 1.005 | 1.009 | |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | |
| 1 | 13.54 | 13.67 | 13.53 | |
| 2 | 13.53 | 13.67 | 13.54 | |
| 3 | 13.53 | 13.67 | 13.53 | |
| 4 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 5 | 13.53 | 13.67 | 13.53 | |
| 6 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 7 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 8 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 9 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |
| 10 | 13.53 | 13.68 | 13.53 | |

Appendix 3 Measurement data of TrueBeam. A with 4 MV (cont.) .

| Nominal energy [MV] | | 4 MV | | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| N [times] | 4 | 5 | 6 | |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | 100 | |
| Temperature [°C] | 24.5 | 22.9 | 24.5 | |
| Pressure [kPa] | 101.992 | 101.164 | 101.992 | |
| k_{TP} | 1.002 | 1.005 | 1.002 | |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | |
| 1 | 20.27 | 13.80 | 13.71 | |
| 2 | 20.26 | 13.76 | 13.72 | |
| 3 | 20.28 | 13.76 | 13.72 | |
| 4 | 20.28 | 13.76 | 13.72 | |
| 5 | 20.28 | 13.76 | 13.72 | |
| 6 | 20.28 | 13.76 | 13.72 | |
| 7 | 20.28 | 13.77 | 13.72 | |
| 8 | 20.28 | 13.77 | 13.72 | |
| 9 | 20.28 | 13.77 | 13.72 | |
| 10 | 20.28 | 13.77 | 13.72 | |

Appendix 3 Measurement data of TrueBeam. A with 4 MV (cont.) .

| Nominal energy [MV] | | 4 MV | |
|---------------------|-----------------------|-----------------------|--|
| N [times] | 7 | 8 | |
| Set MU [MU] | 100 | 100 | |
| Temperature [°C] | 22.9 | 22.5 | |
| Pressure [kPa] | 101.164 | 100.59 | |
| k_{TP} | 1.005 | 1.009 | |
| n | Amount of charge [nC] | Amount of charge [nC] | |
| 1 | 13.73 | 20.54 | |
| 2 | 13.69 | 20.52 | |
| 3 | 13.69 | 20.52 | |
| 4 | 13.69 | 20.53 | |
| 5 | 13.70 | 20.54 | |
| 6 | 13.69 | 20.53 | |
| 7 | 13.70 | 20.52 | |
| 8 | 13.70 | 20.54 | |
| 9 | 13.70 | 20.54 | |
| 10 | 13.70 | 20.54 | |

付録4 第3章のグラフの測定データ.

Appendix 4 Caractaristics of current value (nA) in Capter 3.

Appendix 4-1 Current value (nA) of a dry cell battery when discharged to voltage of 1.135 V
in Figure 18.

| Sample size | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1.1315 | 0.1136 | -1.1324 | -0.1137 |
| 2 | 1.1314 | 0.1136 | -1.1324 | -0.1136 |
| 3 | 1.1315 | 0.1136 | -1.1323 | -0.1137 |
| 4 | 1.1315 | 0.1136 | -1.1324 | -0.1136 |
| 5 | 1.1315 | 0.1136 | -1.1324 | -0.1137 |
| Average | 1.1315 | 0.1136 | -1.1323 | -0.1136 |
| SD | 0.000036 | 0.000019 | 0.000053 | 0.000011 |
| <i>CV</i> | 0.0032 | 0.017 | -0.0047 | -0.010 |

Appendix 4-2 Current value (nA) of a dry cell battery when discharged to voltage of 1.361 V

in Figure 18.

| Sample size | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------|----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1.3597 | 0.1362 | -1.3583 | -0.1364 |
| 2 | 1.3596 | 0.1364 | -1.3584 | -0.1364 |
| 3 | 1.3595 | 0.1364 | -1.3583 | -0.1364 |
| 4 | 1.3596 | 0.1364 | -1.3583 | -0.1364 |
| 5 | 1.3596 | 0.1363 | -1.3585 | -0.1364 |
| Average | 1.3596 | 0.1363 | -1.3584 | -0.1364 |
| SD | 0.000053 | 0.000058 | 0.000068 | 0.000015 |
| <i>CV</i> | 0.0039 | 0.0425 | -0.0050 | -0.0109 |

Appendix 4-3 Current value (nA) of a dry cell battery when discharged to voltage of 1.450 V

in Figure 18.

| Sample size | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------|----------|----------|---------|----------|
| 1 | 1.4497 | 0.1455 | -1.4491 | -0.1454 |
| 2 | 1.4497 | 0.1455 | -1.4491 | -0.1454 |
| 3 | 1.4497 | 0.1455 | -1.4490 | -0.1454 |
| 4 | 1.4497 | 0.1455 | -1.4494 | -0.1454 |
| 5 | 1.4498 | 0.1455 | -1.4493 | -0.1454 |
| Average | 1.4497 | 0.1455 | -1.4492 | -0.1454 |
| SD | 0.000063 | 0.000022 | 0.00015 | 0.000011 |
| <i>CV</i> | 0.0044 | 0.015 | -0.010 | -0.0075 |

Appendix 4-4 Current value (nA) of a dry cell battery when discharged to voltage of 1.607 V

in Figure 18.

| Sample size | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 1.6032 | 0.1610 | -1.6040 | -0.1610 |
| 2 | 1.6030 | 0.1609 | -1.6042 | -0.1610 |
| 3 | 1.6032 | 0.1609 | -1.6041 | -0.1610 |
| 4 | 1.6031 | 0.1609 | -1.6041 | -0.1610 |
| 5 | 1.6032 | 0.1609 | -1.6040 | -0.1610 |
| Average | 1.6032 | 0.1609 | -1.6041 | -0.1610 |
| SD | 0.00011 | 0.000018 | 0.000063 | 0.000013 |
| <i>CV</i> | 0.0068 | 0.011 | -0.0040 | -0.0083 |

Appendix 4-5 Elapsed time characteristics of current values in Figure 19.

| Elapsed time[sec] | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------------|--------|---------|---------|----------|
| 0 | 1.6055 | 0.16055 | -1.6058 | -0.16045 |
| 5 | 1.6055 | 0.16052 | -1.6058 | -0.16044 |
| 10 | 1.6057 | 0.16050 | -1.6059 | -0.16044 |
| 20 | 1.6056 | 0.16048 | -1.6059 | -0.16044 |
| 30 | 1.6056 | 0.16047 | -1.6059 | -0.16044 |
| 40 | 1.6056 | 0.16047 | -1.6060 | -0.16044 |
| 50 | 1.6057 | 0.16046 | -1.6059 | -0.16044 |
| 60 | 1.6056 | 0.16046 | -1.6060 | -0.16043 |

Appendix 4-6 Temperature characteristics of the current value at a temperature of 15 °C in

Figure.20

| Sample size | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 1.6052 | 0.1611 | -1.6049 | -0.1611 |
| 2 | 1.6052 | 0.1611 | -1.6054 | -0.1610 |
| 3 | 1.6052 | 0.1611 | -1.6052 | -0.1611 |
| 4 | 1.6054 | 0.1611 | -1.6052 | -0.1610 |
| 5 | 1.6052 | 0.1611 | -1.6052 | -0.1610 |
| Average | 1.6052 | 0.1611 | -1.6052 | -0.1610 |
| SD | 0.00010 | 0.000036 | 0.000166 | 0.000024 |
| <i>CV</i> | 0.0062 | 0.022 | -0.010 | -0.015 |

Appendix 4-7 Temperature characteristics of the current value at a temperature of 18 °C in

Figure.20

| Sample size | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 1.6051 | 0.1611 | -1.6051 | -0.1610 |
| 2 | 1.6052 | 0.1610 | -1.6050 | -0.1610 |
| 3 | 1.6052 | 0.1611 | -1.6047 | -0.1610 |
| 4 | 1.6052 | 0.1611 | -1.6052 | -0.1610 |
| 5 | 1.6053 | 0.1610 | -1.6049 | -0.1610 |
| Average | 1.6052 | 0.1610 | -1.6050 | -0.1610 |
| SD | 0.00009 | 0.000026 | 0.000183 | 0.000012 |
| <i>CV</i> | 0.0055 | 0.016 | -0.011 | -0.0076 |

Appendix 4-8 Temperature characteristics of the current value at a temperature of 23 °C in

Figure.20

| Sample size | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 1.6053 | 0.1610 | -1.6043 | -0.1609 |
| 2 | 1.6052 | 0.1609 | -1.6047 | -0.1609 |
| 3 | 1.6051 | 0.1610 | -1.6046 | -0.1609 |
| 4 | 1.6052 | 0.1609 | -1.6046 | -0.1609 |
| 5 | 1.6051 | 0.1609 | -1.6046 | -0.1609 |
| Average | 1.6052 | 0.1610 | -1.6045 | -0.1609 |
| SD | 0.00006 | 0.000043 | 0.000176 | 0.000020 |
| <i>CV</i> | 0.0040 | 0.027 | -0.011 | -0.012 |

Appendix 4-9 Temperature characteristics of the current value at a temperature of 28 °C in

Figure.20

| Sample size | (a) | (b) | (c) | (d) |
|-------------|---------|----------|----------|----------|
| 1 | 1.6046 | 0.1607 | -1.6040 | -0.1607 |
| 2 | 1.6048 | 0.1607 | -1.6040 | -0.1607 |
| 3 | 1.6049 | 0.1607 | -1.6040 | -0.1607 |
| 4 | 1.6047 | 0.1607 | -1.6042 | -0.1607 |
| 5 | 1.6046 | 0.1607 | -1.6040 | -0.1606 |
| Average | 1.6047 | 0.1607 | -1.6040 | -0.1607 |
| SD | 0.00010 | 0.000017 | 0.000094 | 0.000018 |
| <i>CV</i> | 0.0063 | 0.010 | -0.0059 | -0.011 |