

「陽子線治療施設における水吸収線量計測に関するアンケート」の結果報告

2020 年 9 月 23 日

日本医学物理学会 計測委員会

2016 年に発行された ICRU レポート 90[1]において、放射線量計測における重要なデータ (key data) が改訂され、各国で放射線量の値や不確かさの見直しが進んでおります。国際原子力機関 (IAEA) においても、外部放射線治療用の線量計測標準プロトコルである IAEA TRS-398[2]のアップデートが検討されております。

陽子線の水吸収線量につきましては、IAEA TRS-398 に準拠した標準計測法 12 (日本医学物理学会編) の線質変換係数に対し、電離箱の種類によっては 1 % 近くの修正が提案されており [1, 3]、水吸収線量計測の不確かさも現在の相対標準不確かさ 2 % よりも小さくなる見込みです。そのため、従来の測定では、吸収線量評価全体の不確かさに比べて寄与が小さいとされていた各種補正係数や固体ファントムなどの影響が無視できなくなり、アップデート後の標準計測法の内容によっては、不確かさの範囲を越えて、最大で 3 ~ 4 % 近く水吸収線量の評価結果に差が出るケースが懸念されます。

そこで、こうした状況に鑑み、計測委員会では、2019 年 10 月に陽子線治療施設間の線量比較の実施状況および水吸収線量計測の状況を把握するアンケート調査を実施し、国内の全ての陽子線治療施設、18 施設から回答を頂きました。御協力頂きました全ての陽子線治療施設の皆様にお礼申し上げるとともに、日本医学物理学会会員の皆様にアンケートの集計結果を報告いたします。

- [1] Key data for ionizing-radiation dosimetry: measurement standards and applications, ICRU Report 90, Oxford University Press, 2016.
- [2] ABSORBED DOSE DETERMINATION IN EXTERNAL BEAM RADIOTHERAPY An International Code of Practice for Dosimetry Based on Standards of Absorbed Dose to Water, TECHNICAL REPORTS SERIES No. 398, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2000.
- [3] C. Goma, E. Sterpin, Monte Carlo calculation of beam quality correction factors in proton beams using PENH, Phys. Med. Biol. 64, 185009. 2019.

アンケート結果の概要

1. 陽子線治療施設間の線量比較の実施状況について

施設間の線量比較については、18 施設中 13 施設が過去に何らかの形で他施設との線量比較を実施しており、13 施設中 3 施設が定期的な比較を実施している事が分かった。比較の方法は 1 施設に集合して実施する方法の他、訪問調査による比較も行われていた。また、固体線量計の郵送による出力線量評価を利用している施設もあった。過去に比較を実施していない施設には比較的新しい施設の他、遠隔地にある施設もあり、時間的あるいは交通費などのコスト負担が難しい施設が存在することも示唆される。

2. 定期的な陽子線治療施設の線量比較を実施することについて

18 施設中 16 施設が定期的な線量比較が必要と回答しており、臨床現場における線量比較のニーズを明確に示す結果となった。実施の頻度としては 1～2 年に 1 回と 3～4 年に 1 回が多く、公益社団法人日本放射線腫瘍学会 編「外部放射線治療における Quality Assurance (QA) システムガイドライン 2016 年版」で推奨されている 3 年に 1 回以上と同程度の頻度で実施が望ましいと考えている施設が多い。定期的な線量比較が必要ないと回答した施設でも、計算ミスなどを検出するために、1 回は比較をすることが必要という主旨のコメントをしており、線量比較自体の必要性を否定する意見はなかった。

比較の実施形態については郵送調査が一番多く、次に訪問調査が多かった。郵送調査と訪問調査、あるいは一斉比較を組み合わせる提案もあった。固体線量計の郵送による出力線量評価サービスについては、18 施設中 17 施設がサービスが開始されれば利用すると回答しており、関心が高いことが分かった。

3. 陽子線治療施設における線量計測の実施状況について

陽子線治療施設における線量計測の実施状況については、モニター線量計の校正を毎治療日に実施している施設が多かった。その他の施設でも、何らかの形で出力変動などを確認している施設が多かった。

線量計測は診療放射線技師あるいは医学物理士の資格保有者が実施している施設が多かった。線量計測法の学習については、実機を用いた講習会や他施設を訪問して学習している施設が多かったが、自施設でのみという施設が 4 施設あった。

ほとんどの施設が標準計測法 12 に基づいて線量計測を実施していることが分かった。標準計測法 12 に準拠していないと回答した施設についても、基準条件などは標準計測法 12 を参考にしつつ、最新の研究成果を参考に線量計測を行っており、線量の評価結果に大きな差が生じるような計測手順をとっている施設はなかった。

線量計測に用いる機器類については、標準計測法 12 では水ファントムを用いた線量計測を推奨しているが、3 施設で固体ファントムのみを用いていると回答があった。リファレンス線量計については、ファーマ型電離箱を用いている施設とショートファーマ形（セミフレックス）電離箱を用いている施設が多かった。複数の種類の電離箱を複数用意して線量計測に用いている施設が多く、各施設において慎重に線量評価が実施されている様子が伺えた。電位計については「放射線治療用線量計に用いられる電位計のガイドライン」において、重要な計測に用いる電位計の推奨性能要件が示されているが、治療装置のシステムと連携しているなどの理由で、放射線治療用線量計の国際標準規格 IEC 60731 および電位計ガイドラインの性能要件、勧告事項に適合していない電位計（Keithley 6517 等）をリファレンス線量計として用いている施設が 9 施設あった。治療装置のシステムに電位計が組み込まれていて変更が容易でない場合は、電位計ガイドラインに基づき、ユーザーが自ら不確かさや安全性の確認をして、施設の品質管理上、問題が無いことを確認のうえ、システムに組み込まれている電位計をフィールド線量計の電位計とし、電位計ガイドラインに準拠した電位計をリファレンス線量計の電位計とするとともに、フィールド線量計とリファレンス線量計の間で測定値を定期的に比較、検証することが望ましい。

4. 陽子線治療施設における線量計測の手順の詳細について

ほとんどの施設が標準計測法 12 に準拠しているものの、施設の事情に応じて照射野などの基準条件を変えた独自の計測手法を実施している施設が多いことが分かった。施設によって基準条件が異なるのは必ずしも好ましい状態ではないため、各施設で実施可能な照射野や校正深など、スキニング照射も含めた基準条件の再検討が標準計測法の改定に向けて必要であることが分かった。

留意すべき点として、陽子線治療施設の 8 施設が医療用リニアック装置の高エネルギー光子線などと同じパルス放射線の計算方法でイオン再結合補正係数

を導出していることが分かった。陽子線治療装置は医療用リニアック装置とはビーム発生方式が異なるため、標準計測法 12 で採用されている Weinhaus と Meli が提案した二点電圧法によるパルス放射線の一般再結合補正の導出条件を満たしていない。最終的な線量評価の結果に大きい影響を与えることはないが、イオン再結合補正係数の評価方法が妥当かどうか再確認しておくことが望ましい。線量決定の基準となるリファレンス線量計については、印加電圧の逆数および印加電圧の自乗の逆数に対する指示値の逆数の関係をプロットする Jaffe plot や、線量率に対する 2 点電圧法の指示値の比 (M_1/M_2) の関係をプロットすることで(Niatel の再結合補正法)、自施設におけるリファレンス線量計の特性を把握しておくが良い[1]。

水ファントムを使用している施設の中で、温度測定を照射室の壁面の室温計で実施している施設があった。水ファントムの場合、水の蒸発によって水温は徐々に低下し、最終的に室温より 1~2 °C 低くなるため、室温を水ファントムの水温と見なすのは望ましくない。水ファントムの場合は、水ファントム内の電離箱の有感部分と同じ深さに水温計を設置して温度測定を実施するのが望ましい。固体ファントムの場合においても、固体ファントム内に温度計を挿入するか、固体ファントムの周辺に温度計を設置できるようにしておくことが望ましい。

5. スキャニング(ビーム走査式)照射におけるモニター線量計の校正について

標準計測法 12 では記述されていなかったスキャニング照射におけるモニター線量計の校正について回答を得た。本件については 12 施設中 9 施設が dose-area-product の概念を導入していることが分かった。dose-area-product の決定手法について得た回答については、将来の標準計測法 12 の改定時に参考とすべきであろう。

全体の総括として、高エネルギー光子線で実施されている郵送調査や訪問調査による出力線量評価と同様のサービスを陽子線治療施設も求めていることが分かった。各施設の線量計測手順については、標準計測法に基づきつつも各施設の事情に応じて基準条件などを変えていることが分かった。線量の評価結果に大きな影響を与えるような変更を行っている施設はなかったが、各施設で実施可能な基準条件の再検討が必要であることが分かった。スキャニング照射を

実施している施設で dose-area-product の概念の導入が進んでいることが分かった。スキャニング照射の線量評価法については、IAEA から計測委員会に照会があり、今後の重要な検討課題の一つである。

最後に、一部の質問への各施設からの回答に対して計測委員会による注記をアンケート集計結果に加えたので、参考にして頂きたい。

参考文献

- [1] P. Andreo, D. T. Burns, A. E. Nahum, J. Seuntjens and H. Attix, “*Ion recombination*” in *Fundamentals of Ionization Radiation Dosimetry*, pp. 513-524, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., Germany, 2017.

陽子線治療施設における水吸収線量計測に関するアンケート 結果報告

アンケート調査期間：2019 年 10 月～12 月

回答施設数：18 施設中 18 施設回答

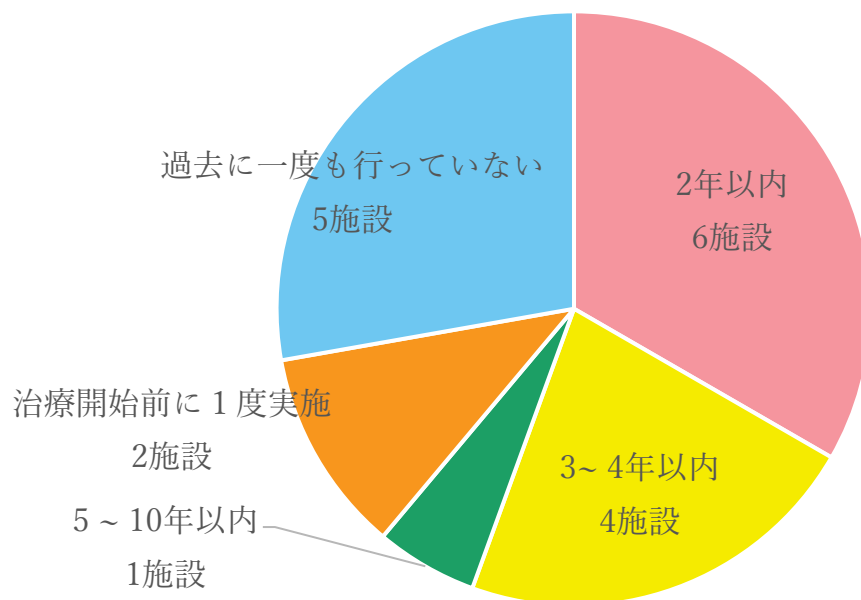
1. 陽子線治療施設間の線量比較の実施状況について

1.1. 線量比較を定期的に行っていますか

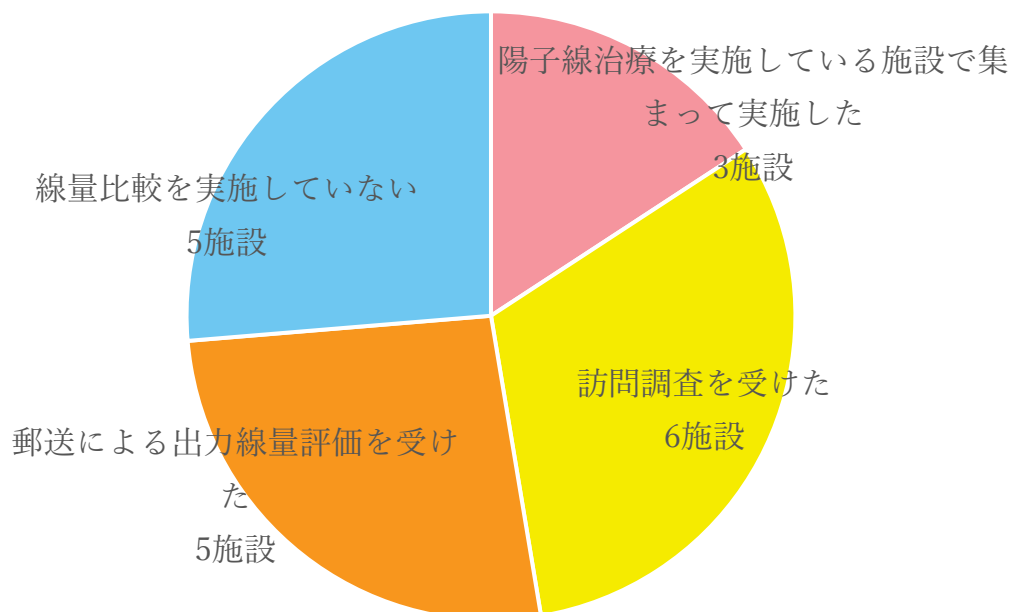
実施している：3 施設

実施していない：15 施設

1.2. 線量比較を過去何年以内に実施しましたか



1.3. 過去にどのような形で線量比較を実施しましたか（重複有り）



施設に集合して実施した例

- ① 2008年に静岡がんセンターで6~7施設が参加して実施（放射線医学総合研究所鎌田班主催）

訪問調査の例

- ① JCOG1315C に向けた訪問調査[Nishio et al., Radiotherapy and Oncology 140、 98-104 (2019)]
- ② 北海道大学による移動標的に対するスキャニング照射法の安全性評価に関する施設間調査
- ③ 産業技術総合研究所（一次線量標準機関）との直接比較

郵送による出力線量評価

- ① 大阪大学によるガラス線量計による郵送調査
参考文献: 山形梨華, 「蛍光ガラス線量計を用いた陽子線の郵送線量調査に関する研究」, 平成30年度 卒業論文, 大阪大学.
- ② Imaging and Radiation Oncology Core (IROC)、Houston の TLD による郵送出力線量評価

2. 定期的な陽子線治療施設の線量比較を実施することについて

2.1. 定期的な線量比較が必要だと思いますか

必要：16 施設

必要ない：2 施設

必要と回答した施設のコメント

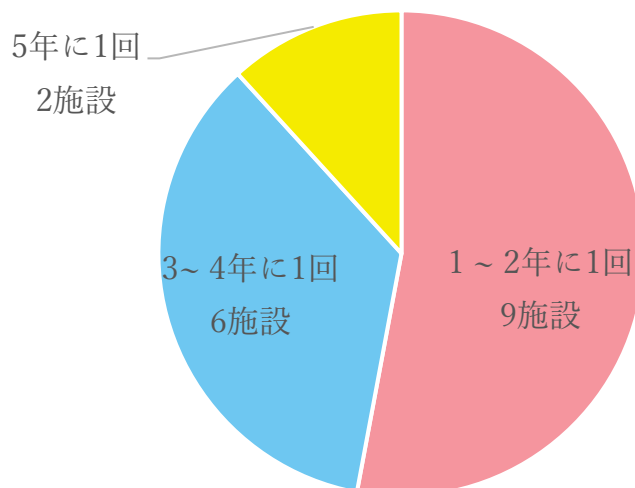
- ① 処方線量を規定する重要な要素である一方、煩雑なパラメータの管理を必要とし人的エラーが起こり得ます。必須とまでは思いませんが、実施できれば望ましいと思います。
- ② JCSS 校正の結果を治療線量までトレースする過程の検証を、JCSS 校正とは別途実施することが必要である。
- ③ 陽子線治療施設数の増加、線量計測法と校正定数の多様化、線量校正センターの値変動があるため。
- ④ メーカーや装置固有の特徴があるので、施設間のばらつきの把握は重要。
- ⑤ より客観的線量測定 of 精度確認を実施するために必要であると考える。
- ⑥ 出力線量を継続的に担保するため。
- ⑦ 標準化された線量の確認。
- ⑧ 施設によっては間違った線量を患者に投与してしまう危険をはらんでいるから。
- ⑨ スキャニング法の普及により、従来法よりも線量投与の自由度が高くなるため、陽子線治療自体の信用を獲得するためにも、各施設での測定が正確に行われているかどうかの検証が必要であると考える。
- ⑩ 施設間の線量評価の違いが臨床成績へ影響を与えないように、また線量評価に関する情報のアップデートなどを施設間で共有するために必要であると感じています。
- ⑪ 放射線（高エネルギー光子線など）治療で実施されているような出力線量の比較事業が公的に存在していないため。
- ⑫ 他施設のデータとの線量合算などを行う場合もあると思うので自施設と他施設の線量の一致性を知ることは必要であると思うため。

必要ないと回答した施設のコメント

校正係数の計算ミス等を防ぐために陽子線治療開始前に一度行うなどの頻

度で実施するのが好ましいのではと考えます。

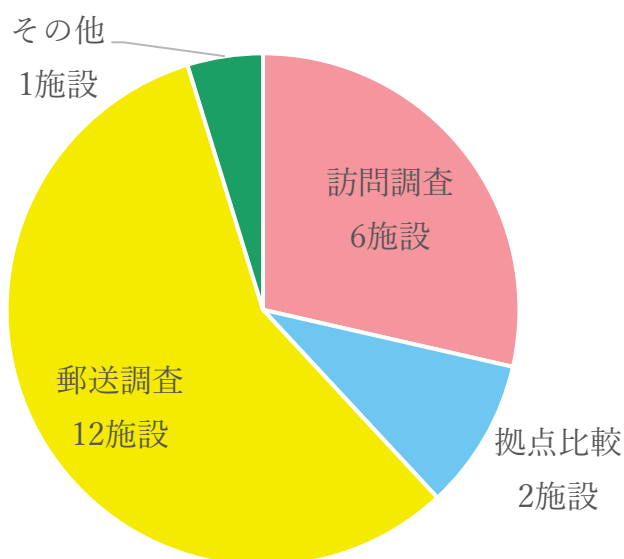
2.2. どの程度の頻度で線量比較を行うのが望ましいと思いますか（重複有り）



施設のコメント

- ① 郵送等で簡便にできるのであれば毎年が忘れにくいと思います。
- ② 自施設で継続的な変化をモニターしていれば大きな誤差が生じるとは考えにくいので、実質的には5年に1度で問題ないと思います。
- ③ 年1回のJCSS校正より頻繁に行う必要はない。頻度は実施形態にもより、郵送調査を併用する形がよいのではないかと思います。
- ④ 訪問調査、拠点比較、一斉比較の場合は5年に1回。郵送調査なら1～2年に1回。
- ⑤ 線量計の校正頻度と同程度が妥当と思う
- ⑥ 計測システムの更新時
- ⑦ リファレンス線量計の校正頻度と同等であるため
- ⑧ 線量定常性の確認
- ⑨ 陽子線治療施設間で実施となれば全国各地の施設に訪問して実施しなければならないため、頻繁には難しいと思ったから。
- ⑩ 最初の間隔は短いほうが良いが、1～2年が適度な期間だと思うから。
- ⑪ 各施設の1年点検など大きなイベント後にできるとよいと思う。

2.3. 線量比較を行う実施形態はどれがふさわしいと思いますか（重複有り）



訪問調査：標準機関が各施設を巡回することによる比較

拠点比較：地域毎に拠点施設を決め、拠点施設に集まって比較

一斉比較：全施設が中核施設に集まって比較

郵送調査：固体線量計の郵送による出力線量調査

その他：複数の方法の併用

一斉比較と回答した施設は無かった。

施設のコメント

- ① 5年に1回程度「一斉比較」もしくは「拠点比較」を行い、それとは別に2年に1回程度「郵送調査」を行う。
- ② 郵送による出力線量調査を実施し、許容値外であれば訪問調査を実施する方法がリーズナブルで良いと考えます。
- ③ （郵送による出力線量評価が）実施にあたり、マンパワーや費用面で最も現実的。
- ④ （郵送による出力線量評価は）照射のタイミングを自由に選択できるため。
- ⑤ （訪問調査によって）標準線量を1箇所からの確認が必要
- ⑥ 今後の普及を前に、施設間での品質差を解消するために人材交流も含め施設訪問が望ましいと考える。ただし、簡易調査として頻回に固体

線量計の郵送調査を実施することには反対しない。

- ⑦ 費用面や手間を考えると郵送による出力線量評価が一番妥当だと思います。
- ⑧ （郵送による出力線量評価は）時間を要しないし、楽だから。
- ⑨ 同一の線量計で行った方が不確かさの原因がひとつ減ると思う。

2.4. 固体線量計の郵送による出力線量調査のサービスを開始した場合利用されますか

利用したい：17 施設

利用しない：1 施設

利用したいと回答した施設のコメント

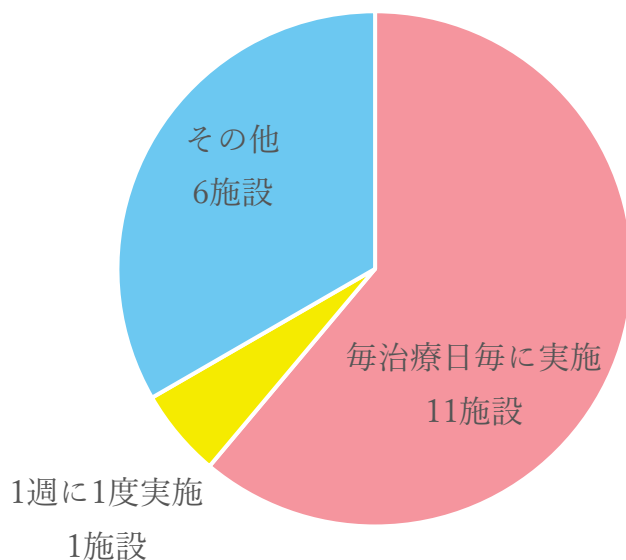
- ① 電離箱でもいいと思います。
- ② このサービスで異常値が出た場合に訪問調査を行うなどの仕組みがあればよいと思います
- ③ 但し IROC Houston TLD Service と比べ、費用と精度で勝る場合
- ④ JASTRO 認定施設制度において、上記は必須条件となっている。
- ⑤ 照射のタイミングを自由に選択できるため
- ⑥ 標準線量を 1 箇所からの確認が必要
- ⑦ 訪問調査のみでは頻度が少なくなるため、定期的に出力調査として実施したい。また、データの蓄積という観点からも実施して欲しい。
- ⑧ 費用による
- ⑨ 測定精度が担保されていれば、より客観的な評価ができる可能性があると思ったため、また自施設のスケジュールに合わせやすいと思ったため、本回答とさせていただきました。

利用しないと回答した施設のコメント

- ① 粒子線の場合に固体線量計の計測値から線量に焼き直すのが難しそうに感じるため（LET 依存性など）

3. 陽子線治療施設における線量計測の実施状況について

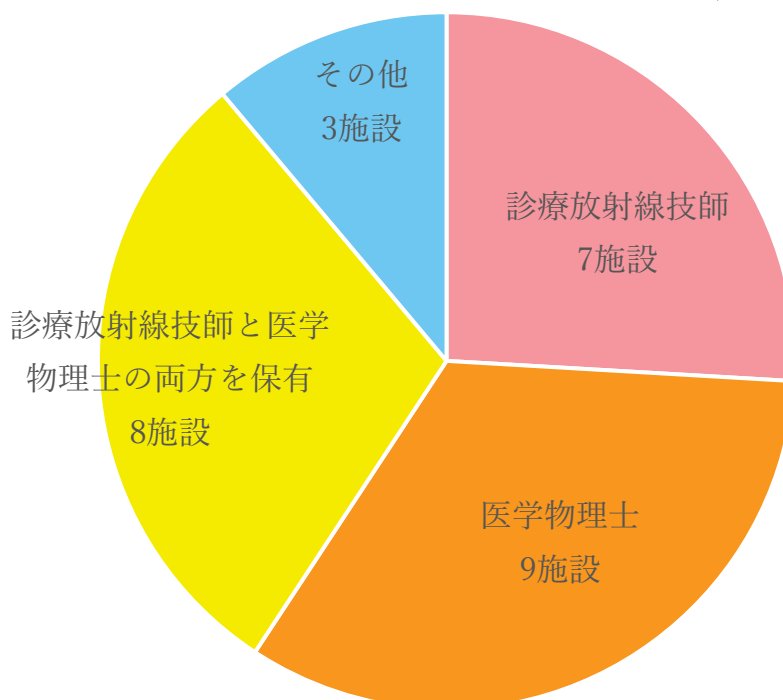
3.1. モニター線量計の校正頻度について教えてください



その他の回答

- ① 3 治療室中 1 室は毎月、2 室は年に 1 回確認をして必要ならば校正
- ② 年に一度、リファレンス線量計の JCSS 校正が完了したタイミングで、標準照射野で確認している。これまで pulse/MU 値に再設定が必要だったことは無い。
- ③ 毎朝モニター線量計の確認測定はしているが、校正については適時許容値を確認し行っている。
- ④ スキャニングビームはコミッショニング時に取得した校正値を使用しており校正は実施せず、出力の確認のみを行っている。
- ⑤ 日々の出力の変動を観察して校正するかを判断している。
- ⑥ していない

3.2. 陽子線の水吸収線量計測を行っている方の資格保有状況（重複有り）



施設のコメント

- ① 日常的には診療放射線技師、年に1度医学物理士
- ② 測定は診療放射線技師、確認は医学物理士

その他と回答した施設のコメント

- ① その他（「大学教員」）から「診療放射線技師と医学物理士の両方を所有」へ移行中
- ② 測定は、運転保守員が実施しています。水吸収線量計測の定数は、診療放射線技師と医学物理士の有資格者が管理しています。
- ③ 患者校正定数の測定は技師、モニター線量計の校正は現地常駐の運転技術者（メーカー）、特別なケースは医学物理士が行う事もある。

3.3. 水吸収線量計測に用いている線量計測プロトコル

標準計測法 12：17 施設

その他：1 施設

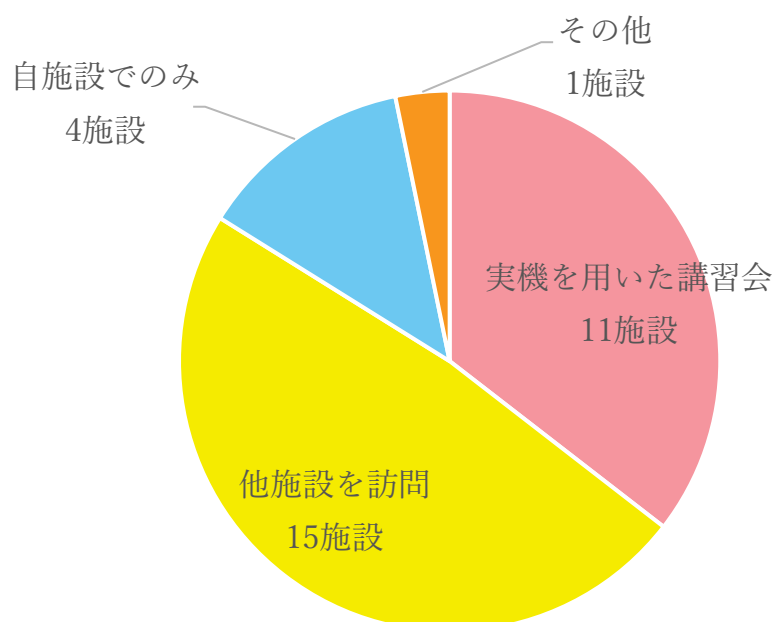
施設のコメント

- ① 当センターの陽子線治療システムは、ペンシルビームスキャンニング照

射のみ対応しており、拡大ビーム照射法を水吸収線量計測に用いることができません。標準計測法 12 や TRS-398 で一般的に記載されている内容に沿っていないと思い、陽子線治療システムベンダより推奨された測定法および治療計画装置で必要とされる水吸収線量の測定を考慮して線量計測をおこなっています。Palmans らの測定方法に沿っているような測定プロトコルになっているかと思います。

② kQ の Rres 依存性はシステム上、導入できていない

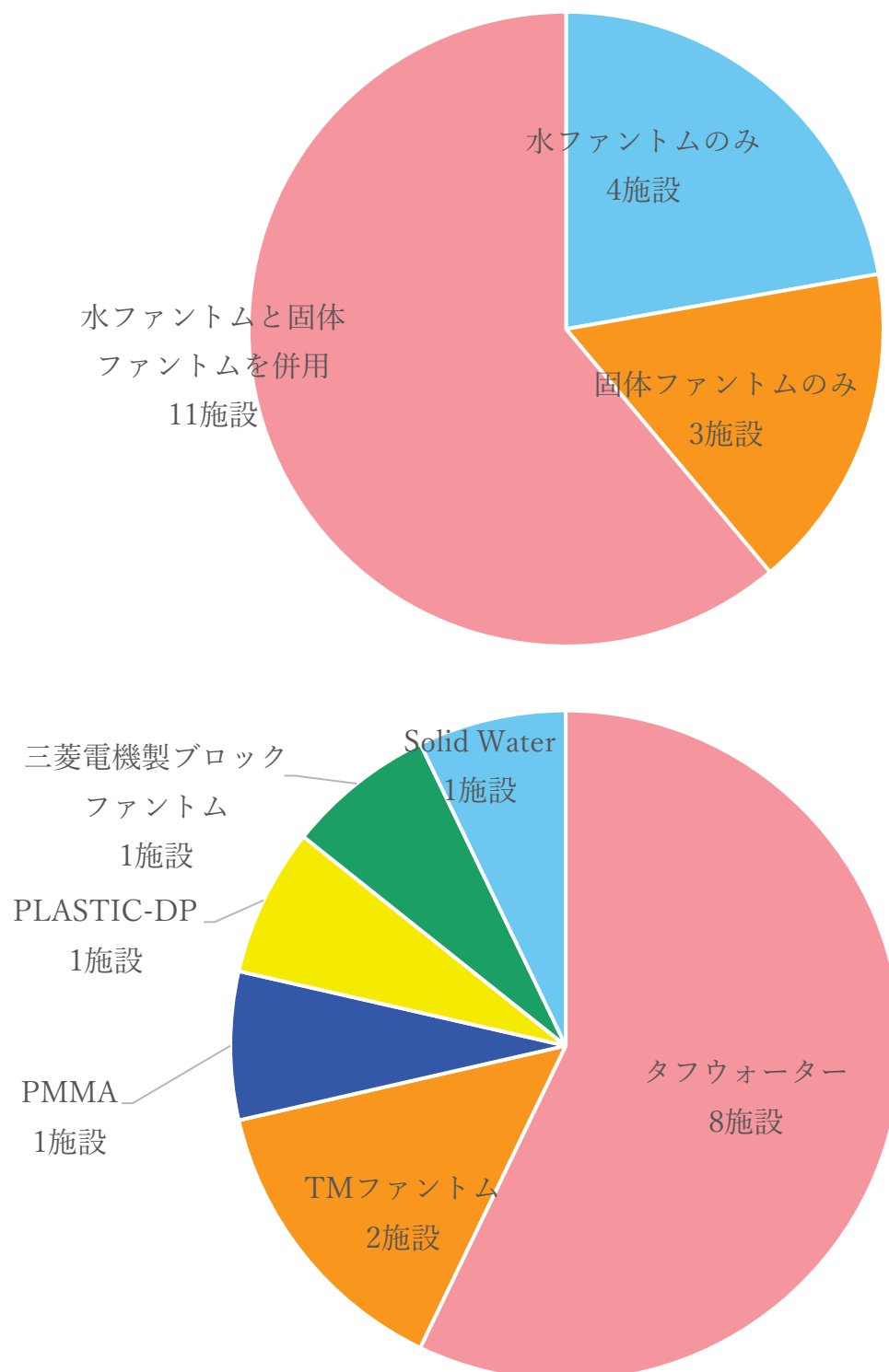
3.4. 陽子線の水吸収線量計測を行っている方の線量計測法の学習状況について（重複有り）



施設のコメント

文献や同じ陽子線治療システムを使用している先行施設へのメール等により情報収集をしています。

3.5. 測定を行うファントムには何を用いていますか



施設のコメント

- ① 日常的には固体ファントム、年に1度水ファントム

- ② PMMA（モニター校正用）、タフウォーター（患者校正用）
- ③ 日々の簡易的な標準測定では、固体ファントムを使用し、患者測定では、水ファントムを使用しています。
- ④ モニタ線量計の校正時のみ固体を使用、患者校正深や分布測定時は全て水
- ⑤ 日毎の線量モニター校正（相対値）は、固体ファントムを利用し、患者校正深測定による線量モニター校正や水吸収線量測定は水ファントムを原則利用している。

計測委員会注記

モニター線量計校正では、水ファントムを使用することを標準計測法 12 では推奨している。固体ファントムを使用する場合は、水ファントムを用いた場合と比較し、必要があれば補正などを行って線量計測を実施することが望ましい。

- 3.6. 防水靴や固体ファントムを測定に用いている場合、0.1 ~0.3 mm 以上の空隙が生じないように、電離箱や半導体検出器の形状にあった加工が防水靴や固体ファントムになされていますか

されている：15 施設

されていない：1 施設

その他：1 施設

施設のコメント

- ① モニター校正用固体ファントム（PMMA）では、保護キャップを使用しているため 2.25 mm の空隙がある。患者校正用固体ファントム（タフウォーター）では、電離箱形状にあった加工がなされているが、0.25 ~0.5 mm の空隙が生じ得る設計である。陽子線では 2 次電子の線量への寄与は大きくないため、生じる誤差は許容されると判断し上記固体ファントムを使用してきた。しかし、今後は計測値の正確度がより求められるため、できるだけ空隙を生じないような設計を行う予定である。

② 固体ファントムを使用していない

3.7. リファレンス線量計（施設の線量管理の基準に用いている線量計）の電離箱の製造元および型式、購入年を教えてください

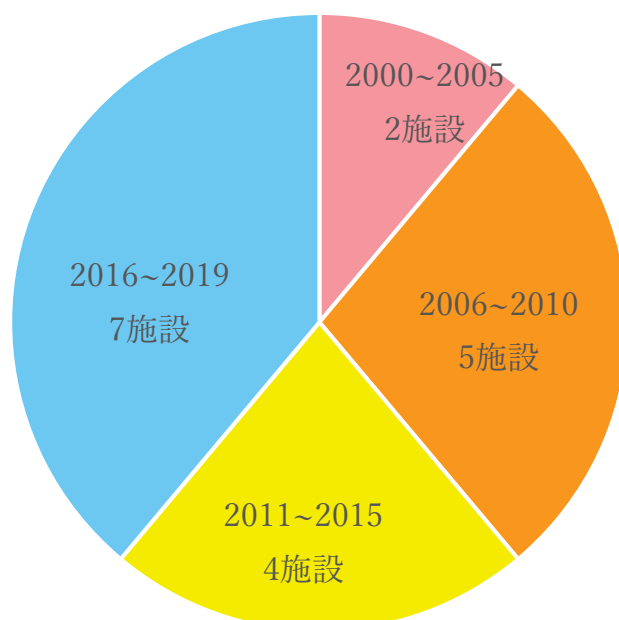
ファーマ形電離箱：8 施設

ショートファーマ・セミフレックス形電離箱 0.2 mL 以上：7 施設

セミフレックス形電離箱 0.2 mL 未満：1 施設

マーカス形電離箱：2 施設

購入年



施設のコメント

（ファーマ型電離箱）

- ① 標準的な電離箱のひとつとみなされていて、有感体積も大きく測定値が安定するためです。
- ② 線量計サイズと測定精度が良く、一般的な線量計だったから。
- ③ 標準計測法 12 のリファレンスとされているから。
- ④ ファーマ形電離箱を選んだ理由は標準計測法で推奨されているから。
製造元、形式は線量計測機器一式も含めて購入した治療装置メーカーが

決定した。

- ⑤ 基本のファーマ型電離箱であるから
- ⑥ 一般に広く使われており、特性もよく知られている電離箱だから。

(ショートファーマ形・セミフレックス形電離箱 0.2 mL 以上)

- ⑦ 購入当時は国内の電離箱を発展させようという気運が高かったのが最大の理由である。なお、当院でも広く使われているファーマ型電離箱への移行作業を行っている。(※計測委員会で一部回答を編集)
- ⑧ 専用水ファントムへ装着できるサイズのため。
- ⑨ 防水、陽子線対応、照射野サイズが、運用に適している。
- ⑩ 治療装置付属品と同機種
- ⑪ 治療開始前に研修に行った先行施設が使用しており、同じものを採用したため。
- ⑫ 先行施設で採用されている電離箱であり、陽子線のリファレンス線量計としての要件を満たしているため。
- ⑬ 世界的に使われていて信頼性が高いため

(セミフレックス形電離箱 0.2 mL 未満)

- ⑭ 使用頻度が全くないため (ファーマ型電離箱だと毎朝の線量測定で使っているため)

(マーカス形電離箱)

- ⑮ 陽子線治療システムベンダからの推奨 (指定)
- ⑯ 当センターはスキヤニングのみであるため平行平板がよいこととわが国ではじめての導入装置であったことから海外の先行施設の導入実績を取り入れた結果この検出器となった。
- ⑰

計測委員会注記

陽子線治療における電離箱については、TRS398 において長期安定性の観点からグラフィイト壁の指頭形電離箱をリファレンス線量計とすることが推奨されている。その他の条件については、高エネルギー光子線や電子線に用いられる電離箱と同様である。

3.8. 測定に用いている電離箱または半導体検出器等はどの程度の数、種類を用意していますか

1 種類を 1 個：0 施設

1 種類を複数：0 施設

複数の種類を 1 個ずつ用意して使い分け：3 施設

複数の種類を複数用意：15 施設

詳細

① 毎朝測定：PTW30013、患者治療計画線量検証：PTW34045

② PTW Semiflex、Pinpoint、OCTAVIUS を使用している

3.9. 電離箱または半導体検出器等の特性を確認してから、使用していますか

実際に測定して特性を確認してから使用している：5 施設

論文調査を行い、特性を把握してから使用している：2 施設

1)と 2)の両方を行ってから使用している：11 施設

特に確認せずに使用している：0 施設

3.10. リファレンス線量計に用いている測定装置（電位計など）の製造元および型式、購入年を教えてください

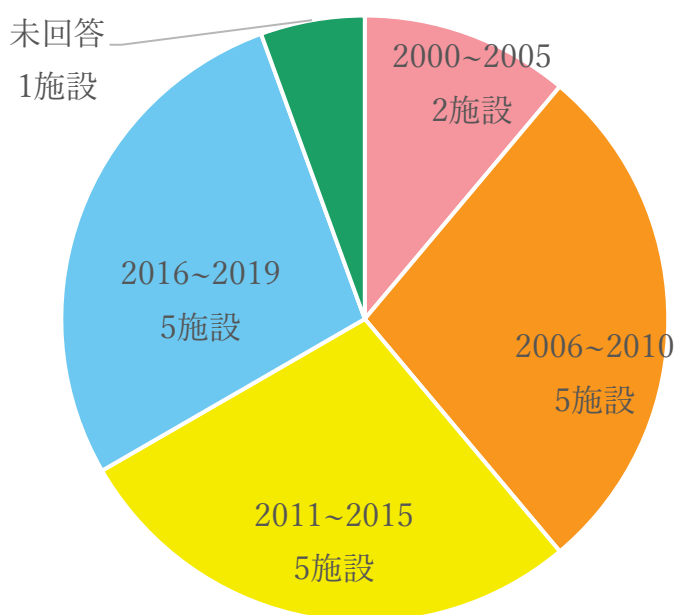
Keithley 6517/A/B：8 施設

PTW Freiburg Unidos weblinex：5 施設

Ramtec 1000plus：1 施設

Ramtec Solo/Duo：2 施設

IBA DOSE1：2 施設



施設のコメント

- ① 測定精度、安定性から
- ② 購入当時、他の電位計は高電圧印加用と信号用の 2 本のケーブルが必要であったが、当該電位計は 1 本のケーブルで接続できたため。
なお、現在、リファレンス線量計の変更に伴い電位計も変更し、電位計ガイドラインに準拠した電位計への移行作業を行っている。移行予定の電位計はメーカーがリファレンスクラスと称する高い精度と安定性を実現させており、防水、陽子線対応、照射野サイズが、運用に適している。（※計測委員会で一部編集）
- ③ プログラマブルと極小線量測定が可能。
- ④ 高精度で一般的な電位計だったから
- ⑤ 治療装置メーカーのシステムの一部とされていた。
- ⑥ 陽子線治療装置に付随しており、選択肢は無かった
- ⑦ 治療装置付属品と同機種
- ⑧ 線量計測機器一式も含めて購入した治療装置メーカーが決定した。
- ⑨ 他の粒子線治療施設で実績があったため
- ⑩ 予算の関係上
- ⑪ 装置購入時にパッケージ化されていた。
- ⑫ 先行施設で採用されている電位計であり、要件を満たしているため。

- ⑬ 世界的に使われていて信頼性が高いため
- ⑭ 陽子線治療システムベンダからの推奨（指定）
- ⑮ 業者が選定したため
- ⑯ 当院のリニアックで以前より使用していた電位計が同社製の電位計であり、使用に慣れていることや、故障時などの場合の代替として使用できるから。
- ⑰ 線量計の導入とほぼ同じ理由で、わが国ではじめての導入装置であったことから海外の先行施設の導入実績を取り入れた結果。（※計測委員会で一部編集）

計測委員会注記

電位計については「放射線治療用線量計に用いられる電位計のガイドライン」が刊行されており、モニター線量計校正などの重要な計測に用いる電位計はガイドラインに準拠した電位計を用いることが望ましい。

3.11. リファレンス線量計の JCSS 校正はどの程度の頻度で行っていますか

- 半年以内に 1 回：0 施設
- 1 年以内に 1 回：17 施設
- 2 年以内 1 回：0 施設
- 3～4 年以内に 1 回：1 施設
- 5 年以内に 1 回：0 施設

3.12. JCSS 校正の校正結果はどの様に計測手順に反映させていますか

- 校正定数をそのまま手順に反映：15 施設
- 過去数年分の校正定数を平均して手順に反映：1 施設
- 校正定数の変動が不確かさの範囲内であれば、過去の校正定数を使用：2 施設
- その他：1 施設

その他の施設の回答

自施設で実施している各電離箱線量計の比較データを参考にして決定して

います。

3.13. 電離箱や半導体検出器の更新のタイミングはどのように判断していますか

1) 暗電流および極性効果、イオン再結合、安定化時間などで判断

4 施設

2) 積算線量（例: 10 kGy 以内）で判断

0 施設

3) 使用年数で判断

1 施設

4) 校正定数の長期安定性（例: ± 0.5 %/年以内）で判断

8 施設

5) 施設の更新にあわせて

2 施設

6) 物理的に破損するまで

6 施設

7) その他

① モニター校正のトレンド（長期データの平均値）、長期安定性、短期再現性（連続した 3～10 回測定の σ ）から判断しています。今後は「1) 暗電流および極性効果、イオン再結合、安定化時間」、「2) 積算線量」、「3) 使用年数」も含めて総合的に判断する予定です

② 現在問題なく使用しているので、今後どのように対応するか検討中

③ 検討中

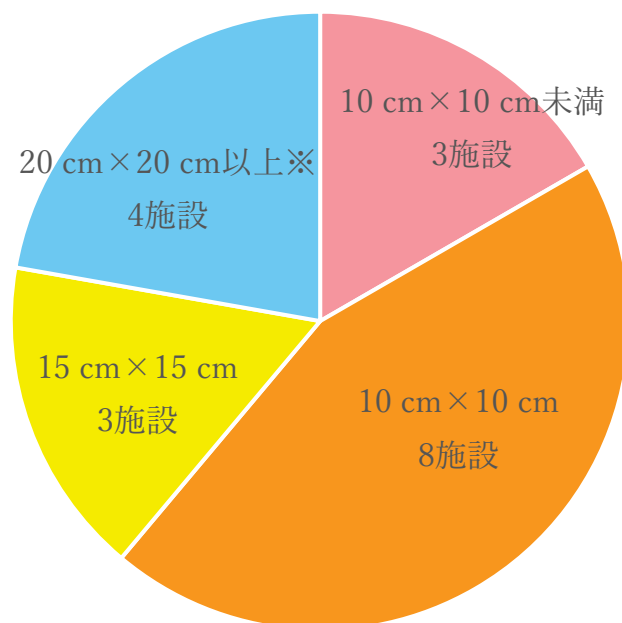
計測委員会注記

あらゆる計測器は故障あるいは破損するリスクが存在するため、定期的に点検や校正を行い、どのような状態になった場合に、修理または更新するか、あらかじめ定めておくことが望ましい。

4. 陽子線治療施設における線量計測の手順の詳細について

4.1. 基準条件について教えてください

4.1.1. 照射野（複数回答あり）

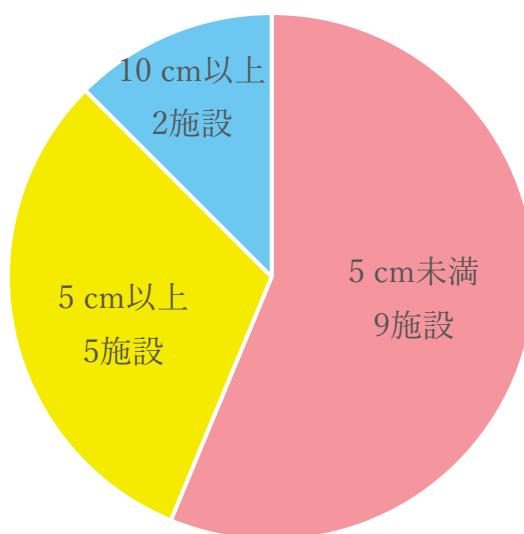


※オープンビーム含む

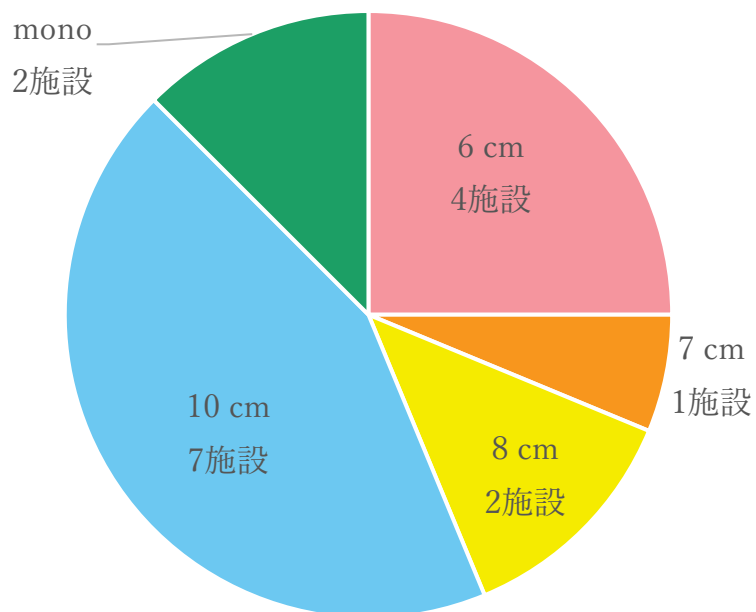
計測委員会注記

標準計測法 12 では「照射野 10 cm × 10 cm または出力係数の基準とする照射野」を基準条件としている。

4.1.2. 残余飛程（複数回答あり）



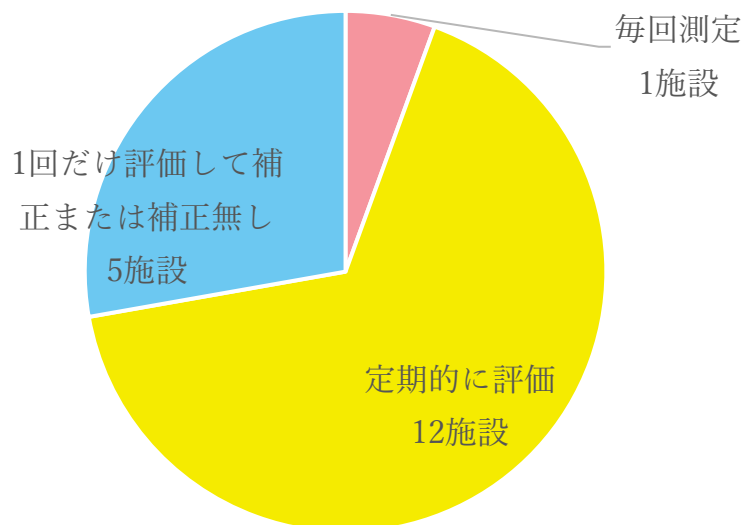
4.1.3. SOBP 幅(複数回答あり)



その他

- ① 基準条件はビームライン機器によって変更している
- ② フィールド線量計の校正は SOBP 中心で行い、モニター校正は別の条件で行う。
- ③ スキャニングビームなので 1 辺 10 cm の立方体標的に対して均一線量を照射してその中心で測定している。

4.2. 極性効果補正を行っていますか

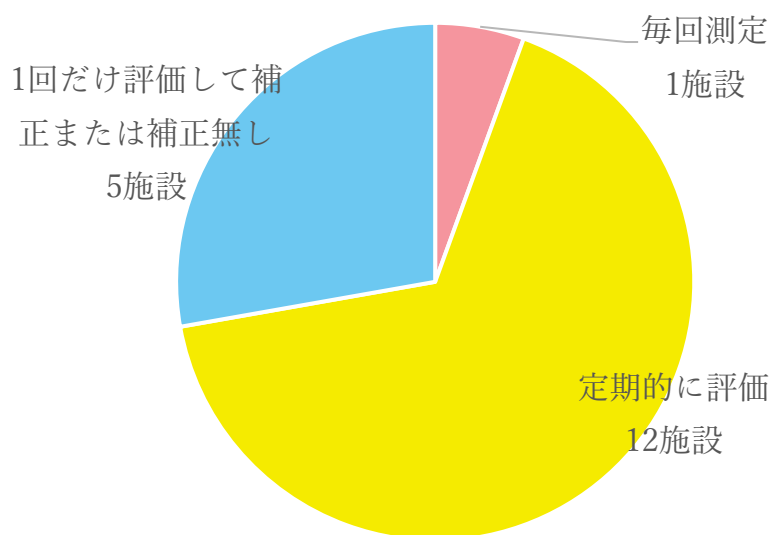


- 1) 毎回測定して補正：1 施設
- 2) 定期的に評価した値で毎回補正：12 施設
- 3) 行っていない(初回、コミッショニング時の値を使用も含む)：5 施設

施設のコメント

- ① 当初の測定で不要と判断してきたが、今後は行う予定
- ② 経験的に変化が少ないので4年に1度程度測定した係数で補正
- ③ 初年度は測定したが補正量が少ないため測定を行わなくなった
- ④ 毎回測定は業務の負担になるため定期的に評価を実施している
- ⑤ コミッショニング時に実施した極性効果補正係数の値を使用
- ⑥ 1度評価した値を使っている
- ⑦ 複数回測定した結果を踏まえ、測定の効率化のために定期的な評価としています。
- ⑧ コミッショニング時に測定を行い、ほぼ 1.0 であったために 1 としている。

4.3. イオン再結合補正を行っていますか

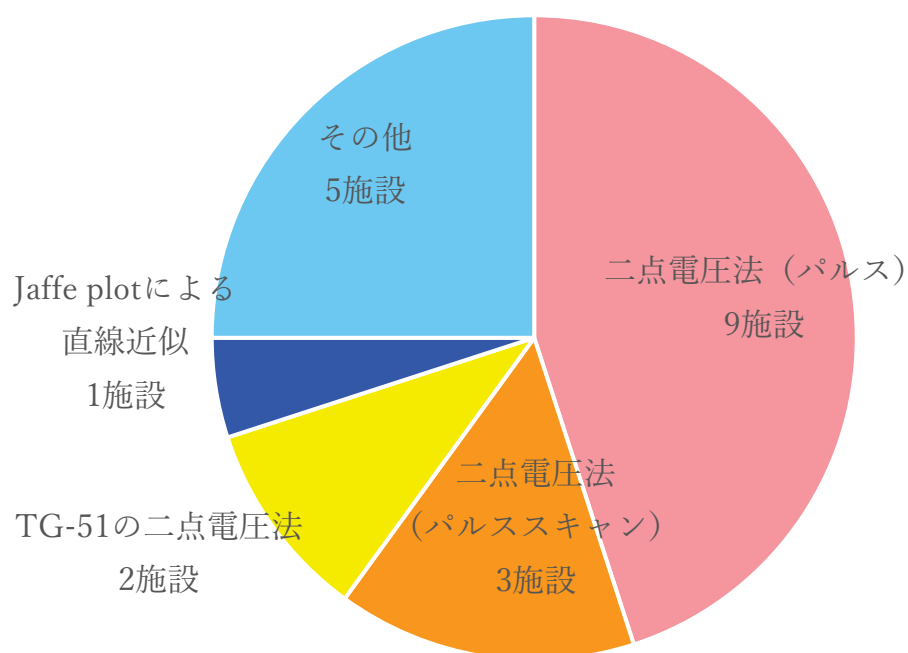


- 1) 毎回測定して補正：1 施設
- 2) 定期的に評価した値で毎回補正：12 施設
- 3) 行っていない(初回、コミッショニング時の値を使用も含む)：5 施設

施設のコメント

- ① 当初の測定で不要と判断してきたが、今後は行う予定
- ② 経験的に変化が少ないので4年に1度程度測定した係数で補正
- ③ 初年度は測定したが補正量が少ないため測定を行わなくなった
- ④ 毎回測定は業務の負担になるため定期的に評価を実施している
- ⑤ コミッショニング時に実施した極性効果補正係数の値を使用
- ⑥ 1度評価した値を使っている
- ⑦ 複数回測定した結果を踏まえ、測定の効率化のために定期的な評価としています。
- ⑧ コミッショニング時に測定を行い、ほぼ 1.0 であったために 1 としている。

4.4. イオン再結合補正を行っている場合、次のどの方法で補正係数を決定していますか（複数回答あり）



- 1) 標準計測法 12 の 2 点電圧法(パルス): 9 施設
- 2) 標準計測法 12 の 2 点電圧法(パルススキャン):3 施設
- 3) TG-51 の 2 点電圧法: 2 施設
- 4) Jaffe plot による直線近似: 1 施設
- 5) その他: 5 施設

その他、コメント

- ① 現在はイオン再結合補正を行っていないがTG-51の2点電圧法を基本とし、詳細な検討を行う場合にはJaffe plotによる直線または二次曲線フィットも行う。
- ② ブロードビーム法では1)、スキャニング法では標準計測法12の連続放射線の式(A6.3)を使用。
- ③ 標準計測法12の連続放射線の式を使用。ICRU Report 78にサイクロトロンの場合は連続放射線として扱うべきと記載があるため。
- ④ ICRU Report 78の156ページにおける連続放射線として計算している。
- ⑤ 2点電圧法（連続放射線）
- ⑥ 標準計測法12の連続放射線に対する式(A6.3)

計測委員会注記

陽子線治療装置のビーム発生方式は高エネルギー光子線や電子線とは異なるため、標準計測法12の2点電圧法のパルス放射線のイオン再結合補正の計算式は用いるべきではない。

Jaffe Plotなどを用いて特性を確認し、パルススキャンや連続放射線など、どのイオン再結合補正の評価方法が良いか検討することが望ましい。

4.5. リファレンス電離箱の印加電圧と収集電荷の極性を教えてください

4.5.1. 印加電圧

300 V: 5 施設

400 V: 11 施設

500 V: 2 施設

4.5.2. 収集電荷の極性

正：11 施設

負：7 施設

4.6. 温度気圧補正をおこなっていますか

1) 行っている: 18 施設

2) 行っていない: 0 施設

施設のコメント

線量測定 (Gy)の時には温度気圧補正を行っていますが、モニタ校正 (Gy/count) 時には行っていません。(モニタ：大気開放型)

4.7. 温度気圧補正を行っている場合、気圧計の測定点の位置は次のどれですか

- 1) 照射室に対して気密されていない室内、測定位置と同じ高さ: 10 施設
- 2) 照射室に対して気密されていない室内、測定位置と高さが違う: 8 施設
- 3) 照射室に対して気密されている部屋: 0 施設

条件の違いの補正方法

- ① 気圧計が 5 m低い位置にあるがこれまで補正は行っていなかった。結果には 0.05 %ほど寄与するので、補正を検討する
- ② 照射室隣のカントリー室にある気圧計を使っている。高低差は 1 m で 0.1 hPa 程度なので補正していない。
- ③ 気圧計の方が 50 cm 高い。高度の違いによる補正は行っていない。

4.8. 温度気圧補正を行っている場合、温度計の測定点の位置は次のどれですか

- 1) ファントム内: 6 施設
- 2) ファントムの壁など: 0 施設
- 3) 照射室の壁面など: 10 施設
このうち、3.5 で水ファントムを使用と回答: 8 施設
- 4) その他: 2 施設

その他、コメントの記述

- ① ノズル内温度と、照射室内温度の両方における温度を評価対象としている
- ② 水ファントムに関してはファントム内水温 1))。固体ファントムに関しては照射室の壁面の気温計の温度 3))。
- ③ ガントリの裏に設置された温度計

計測委員会注記

原則として、温度気圧補正に用いるファントムの温度はファントム内で測定する事が望ましい。固体ファントムなどでファントム内に温度計を挿入することが難しい場合は、ファントムの周辺で温度を測定することが望ましい。

4.9. 測定に固体ファントムを用いている場合、スケーリング補正を行っていますか

- 1) 水ファントムとの比較測定でスケーリング補正: 14 施設
- 2) Bragg 則から実効原子番号を決定してスケーリング補正: 0 施設
- 3) モンテカルロ計算などでスケーリング補正: 0 施設
- 4) その他: 3 施設

その他、コメント

- ① 水ファントムとの比較測定でスケーリング補正は不要と判断した。しかし、今後は再度、スケーリング補正の必要性を検討する予定である
- ② 日々の相対的なモニタ感度補正の目的で使用しているため、正確な絶対線量測定は不要
- ③ 絶対値測定を行う場合は scaling を考慮するが、日毎の線量モニター校正のための相対測定では、scaling を考慮しない。
- ④ モンテカルロ計算を使って水ファントムと固体ファントムの阻止能比を計算し、深さ方向のスケーリングを行う。この深さスケーリングを用いて固体ファントムの測定深を決定し、その深さで水ファントムと固体ファントムの絶対線量比較を行い、その比をフルエンススケーリング補正係数としている。

5. スキャニング(ビーム走査式)照射におけるモニター線量計の校正について
※スキャニング照射実施施設のみ回答

スキャニング照射においてはエネルギー毎に MU 値と粒子数を関連付ける
必要があり、そのために線量を面積分した dose-area-product を使った手法
が提案されています。

参考文献 H. Palmans et. al., Med. Phys. 43, 5835 (2016)

5.1. dose-area-product を決定するためにどのような測定を行っていますか

- 1) 単一エネルギーのビームを十分に広い面積で水ファントムに 2 次元的に照射し、プラトー領域において電離箱で測定する: 4 施設
- 2) 単一エネルギーのビームを水ファントムにスポット的に照射し、プラトー領域においてビーム径に対して十分に広い面積をもつ平行平板形電離箱で測定する: 5 施設
- 3) 不明: 0 施設
- 4) その他、または dose-area-product の概念は用いていない: 3 施設

その他、コメント

拡大ビーム法と同様の基準ビーム形状(20 cm×20 cm×8 cm)を作り、
ターゲット中心で校正を行っている。

5.2. 5.1 にて 1)または 2)を選択された方のみご回答ください。使用した電離箱
の形式、その校正の方法、水等価深、また様々な補正を行った場合にはそ
の内容についてご記入ください。

・ケース 1 (1 と回答)

電離箱: PTW Semiflex Chamber 31013

校正方法: 照射野サイズ 102 cm × 102 cm でスポット間隔 3 mm として
同一 MU のビームを照射。

水等価深: 25 mm

補正: なし

・ケース 2(1 と回答)

電離箱: PTW Semiflex Ionization Chamber 31013

校正方法: 固体ファントム (タフウォータ) に対して垂直照射 (ガントリアングル 0 度)、SID: 25 mm、Gy/MU を算出 ※Gy: Gy(RBE), MU: Total count

・ケース 3(1 と回答)

電離箱: PTW TN31013

校正深: 25 mm

補正: 温度気圧補正、イオン再結合補正、極性効果補正

・ケース 4(1 と回答)

電離箱: IBA parallel-plane chamber PPC05

校正方法: 照射野は、10 cm×10 cm とし、スポット間隔は、2.5 mm とした。1 スポットあたり 1 MU、計 1681 MU の照射。水ファントム表面をアイソセンタ高とし、測定深は、最小エネルギー(99 MeV)の 2 cm 深、最大エネルギー(226.5 MeV)の 8 cm 深までエネルギーに応じて可変としておこなった(陽子線治療システムベンダおよび治療計画装置ベンダの推奨)。

補正: 水吸収線量の算出において、電位計の読み値に対し、温度気圧補正係数、イオン再結合補正係数、極性効果補正係数を乗じ、さらに水吸収線量校正定数および線質変換係数を乗じた。線質変換係数の算出では、Gomàらの論文(Phys. Med. Biol. 61, 2389–2406 (2016))などを参考にした。

・ケース 5(2 と回答)

電離箱: PTW Bragg Peak Chamber 34073。ブロードビーム SOBP 中心および平坦領域でファーマ型電離箱に対して相互校正を実施。

ビーム条件: 単一エネルギーのペンシルビーム。走査無し。MU 値一定。全エネルギーについて評価を行った。

補正：半径 30 cm の仮想的な Bragg Peak Chamber による測定値を推定するためにモンテカルロシミュレーションを用いて補正した。

・ケース 6(2 と回答)

電離箱：PTW Bragg Peak Chamber 34073

校正方法：

1. TPS に基礎データとして入力する単一エネルギービームの IDD を相対線量分布として測定した。
2. プラトー領域に電離箱を設置してスポットビームを照射して Gy/MU を算出し、IDD を Gy/MU に変換した。
3. 2 で算出した Gy/MU に電離箱の有感面積を乗じて、IDD を $\text{Gy} \cdot \text{mm}^2/\text{MU}$ に変換した。
4. 3 の IDD を TPS に入力した。

・ケース 7(2 と回答)

電離箱：PTW Bragg Peak Chamber 34073

深さ：水ファントム 2 cm 深さ

・ケース 8(2 と回答)

当施設では治療計画装置として Eclipse を使用しており、スキャニング照射における MU 値と線量の関連付けは深部線量 Integral Depth Dose (IDD) にて以下の手順で行っている。これは、dose-area-product の概念と同等の手法である。

電離箱：IBA Stingray chamber、PTW Roos、PTW 30013

1. 単一エネルギーのビームを水ファントムにスポット的に照射し、Stingray を用いて IDD を測定する（エネルギーは 70-230MeV の 10MeV 間隔、電位計は水ファントムに付随する CCU を使用）。
2. Stingray の径を覆うほど広い照射野を持つワブラービームを用いて、Stingray と PTW30013 との間のクロスキャリブレーションを行う（エネルギーは 190MeV、電位計は Ramtec Duo および CCU の双方を使用）。

3. ワブラービームの線量分布の非平坦性を補正するため、Stingray の検出器径を埋め尽くすように、Roos を用いて Stingray の検出器面の各位置において線量測定を行う。Roos により、ワブラービームの中心軸上の線量と各位置での線量の平均値との比を、線量分布の非平坦性の補正係数として使用した。

・ケース 9(2 と回答)

電離箱: PTW Advanced Markus TN34045、 IBA StingRay

校正方法: 大型平行平板型電離箱に対して、単一エネルギーのペンシルビームを水ファントムに照射した。低エネルギー (70 MeV) であっても深部線量分布が比較的平坦な水等価深 20 mm で線量測定を実施し、照射 MU と測定線量との校正を行った。

修正履歴

2021 年 7 月 11 日

23 ページ 計測委員会注記

(修正前)

標準計測法 12 では照射野 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ を基準条件としている。

(修正後)

標準計測法 12 では「照射野 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ または出力係数の基準とする照射野」を基準条件としている。