

汎用リニアックに搭載された Flattening Filter Freeモード利用方法 の実態調査アンケート

日本医学物理学会
QA/QC委員会 (H30-31)

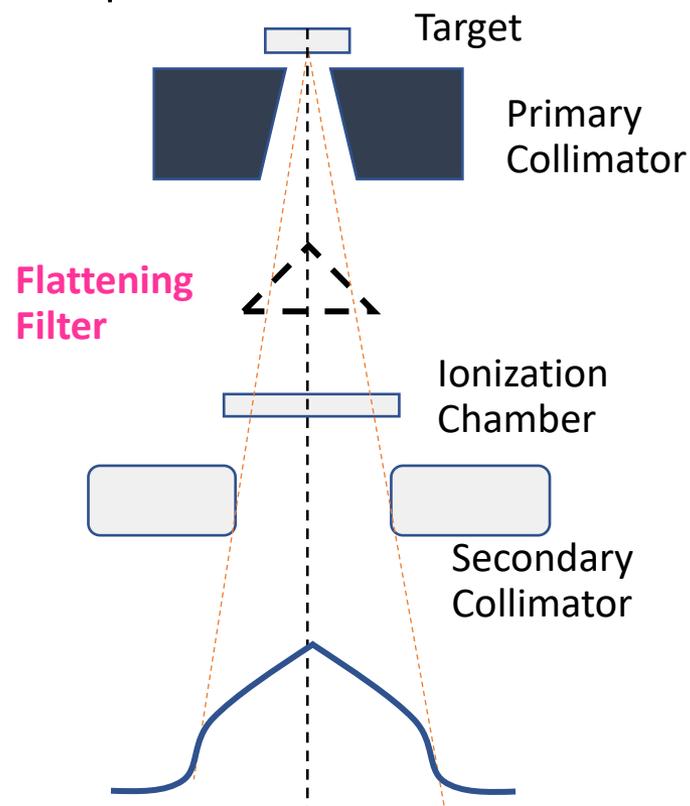
兒玉 匠，安井 啓祐，高倉 亨，
西岡 史絵，宮浦 和徳，中村 光宏

Flattening Filter Freeモードとは

- Flattening Filter Free (FFF) モードとは線量プロファイルを平坦にするための円錐型の金属であるFlattening Filterを除いたモード

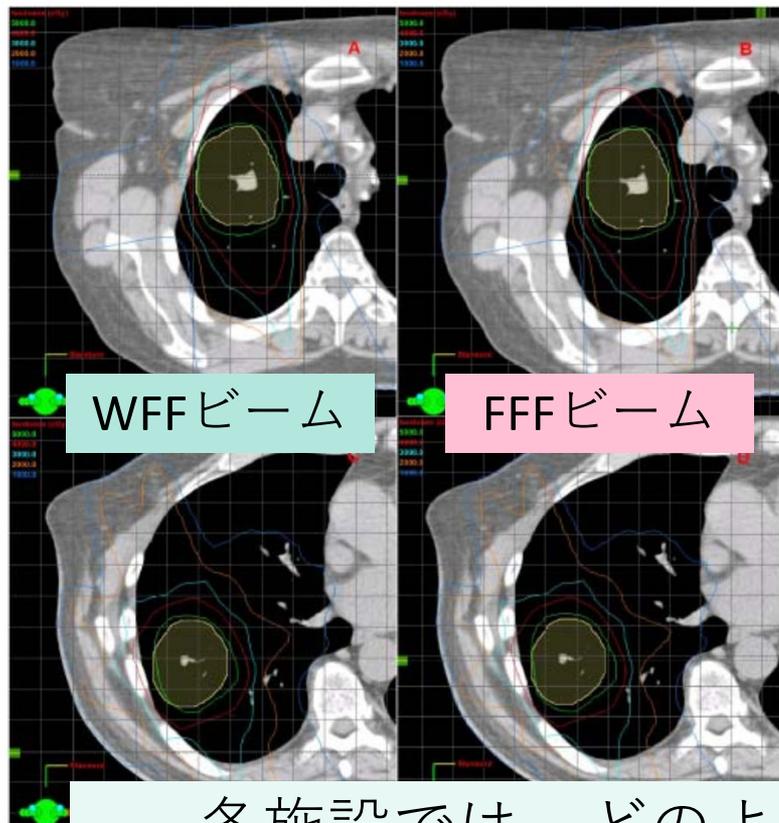
- Flattening Filterを除くことでFlattening Filterあり (With Flattening Filter: WFF) の約2~4倍の線量率で照射が可能

- 線量プロファイルが上に凸の形状となる



FFFビームへ期待される臨床利用

- WFFビームと同等の線量を短い時間で投与が可能



肺のSBRTにおけるBeam-on time
(1門あたりの中央値)

WFFビーム : 25秒

FFFビーム : 11秒

1回の息止めで1門の照射が現実的になる

各施設では、どのような症例にどのような方法で
FFFビームを利用しているのか

計測におけるWFFビームとの違い

- 線量プロファイルが平坦ではなくなるため、線量計の有感体積内で線量勾配が生じる(体積平均効果)
：線量を過小評価する可能性
- Flattening Filterによるビームハードニングが生じないため、線質が変化する
： $TPR_{20,10}$ を線質指標とした線質変換係数の算出へ影響
- 線量率(Dose per pulse: DPP)が上昇することにより、イオン収集効率が変化する
：ビームデータ測定へ影響

現状では標準計測法が完備されていないため、
施設ごとに工夫して行っている

アンケート調査の目的

- 国内のFFFビーム搭載リニアックの普及状況
- FFFビームの症例への利用状況
- FFFビームの計測、管理方法

**国内のFFFビームの普及状況と利用の実態を
明らかにする**

方法

- Google フォーム を利用したオンラインアンケート
(各関係団体などのメーリングリストにて依頼)
- 収集期間：2019年7月18日 ～ 9月18日
- 対象：FFFモードを搭載した汎用リニアック
(TomoTherapyやCyberKnifeなどは本アンケートの対象外)

アンケート項目

FFFビームを所有する 施設、リニアック情報

- 1-1 施設情報
 - 1-2 導入機種と $TPR_{20,10}$
-

臨床利用

- 2-1 治療実績
 - 2-2 適応症例と呼吸性移動対策
 - 2-3 臨床開始へ向けた検討
-

基準条件の 水吸収線量計測

- 3-1 計測に使用する検出器
 - 3-2 体積平均効果の評価
 - 3-3 線質変換係数の評価
-

ビームデータと 精度管理

- 4-1 ビームデータ測定と登録
- 4-2 精度管理

アンケート項目

FFFビームを所有する 施設、リニアック情報

- 1-1 施設情報
 - 1-2 導入機種と $TPR_{20,10}$
-

臨床利用

- 2-1 治療実績
 - 2-2 適応症例と呼吸性移動対策
 - 2-3 臨床開始へ向けた検討
-

基準条件の 水吸収線量計測

- 3-1 計測に使用する検出器
 - 3-2 体積平均効果の評価
 - 3-3 線質変換係数の評価
-

ビームデータと 精度管理

- 4-1 ビームデータ測定と登録
- 4-2 精度管理

1-1 地域別のFFFビーム所有施設数

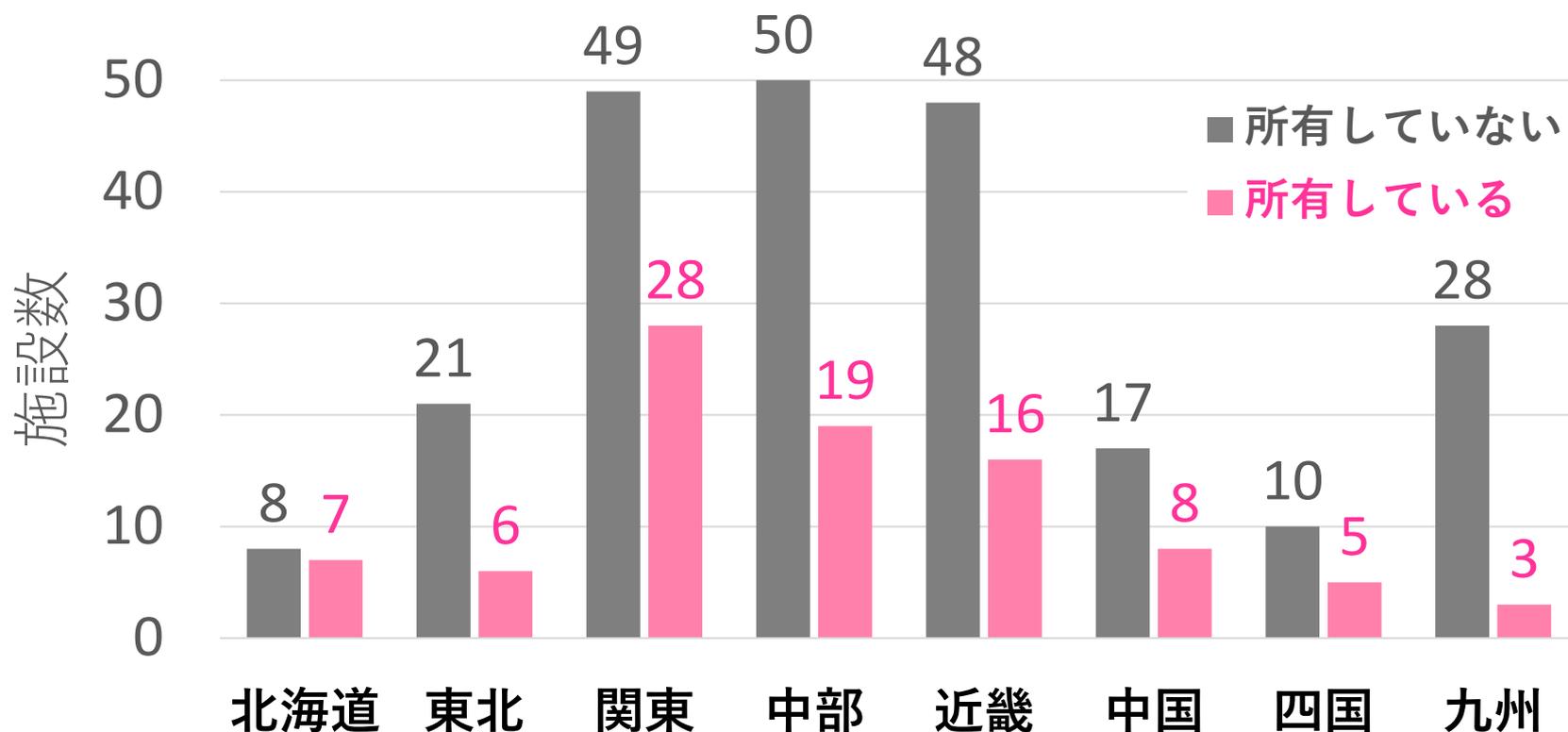
回答 **323**施設

放射線治療実施施設：846施設

(厚生労働省 医療施設調査 2017年10月)

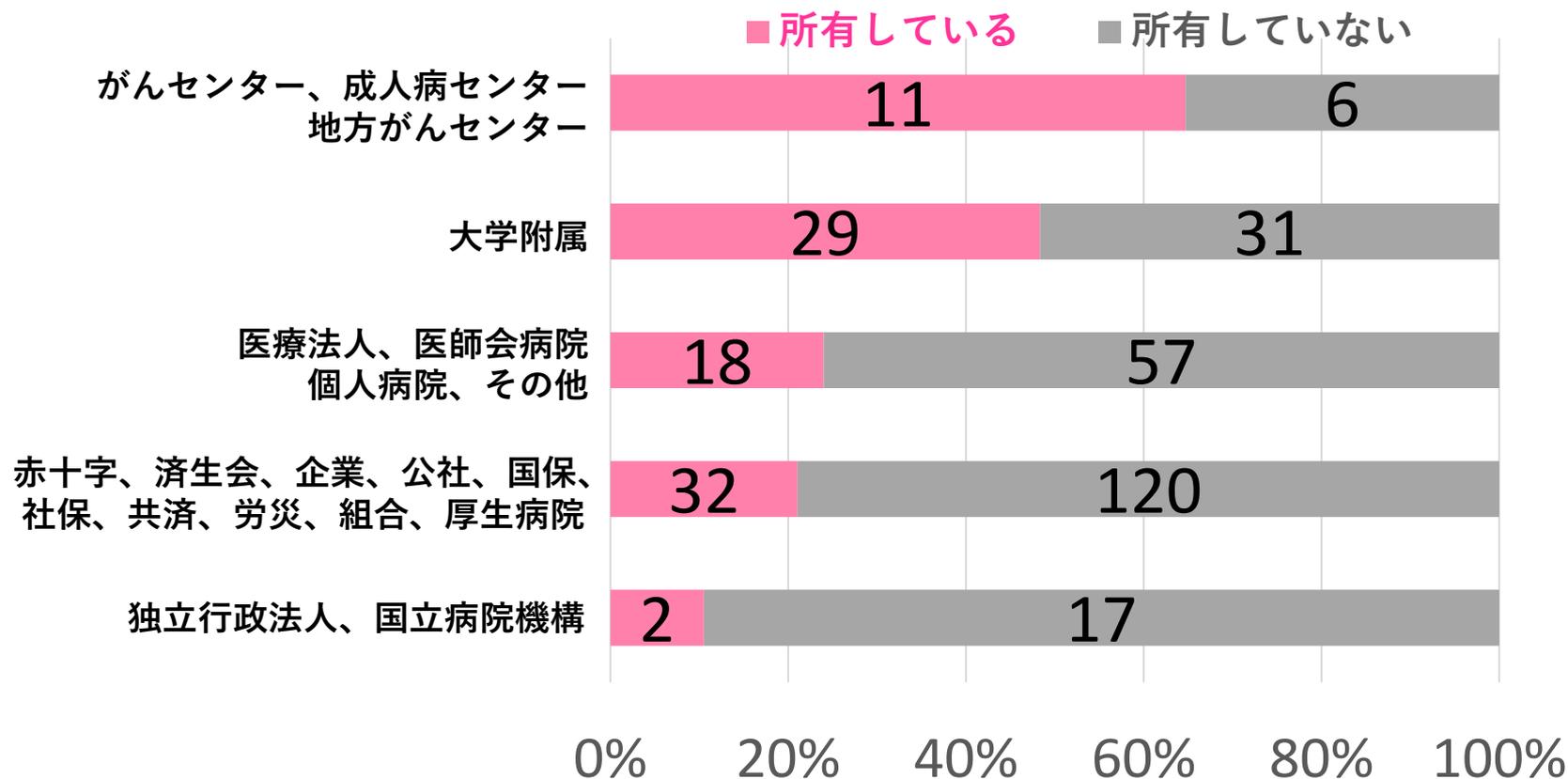
FFFあり **92**施設 (**28%**)

予測回答率 約**38%**



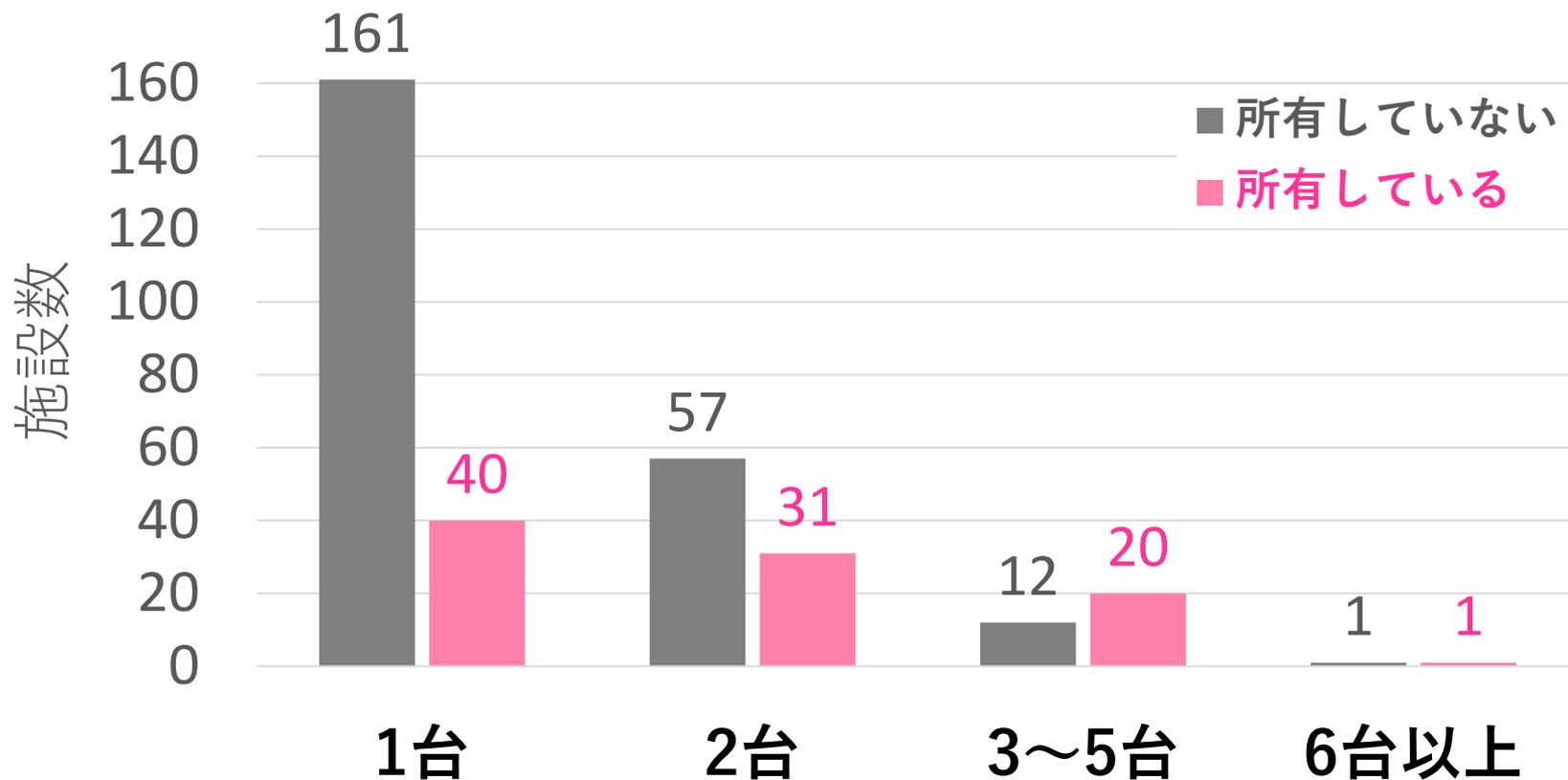
1-1 病院カテゴリ別のFFFビーム所有施設数

グラフ内の数字は施設数



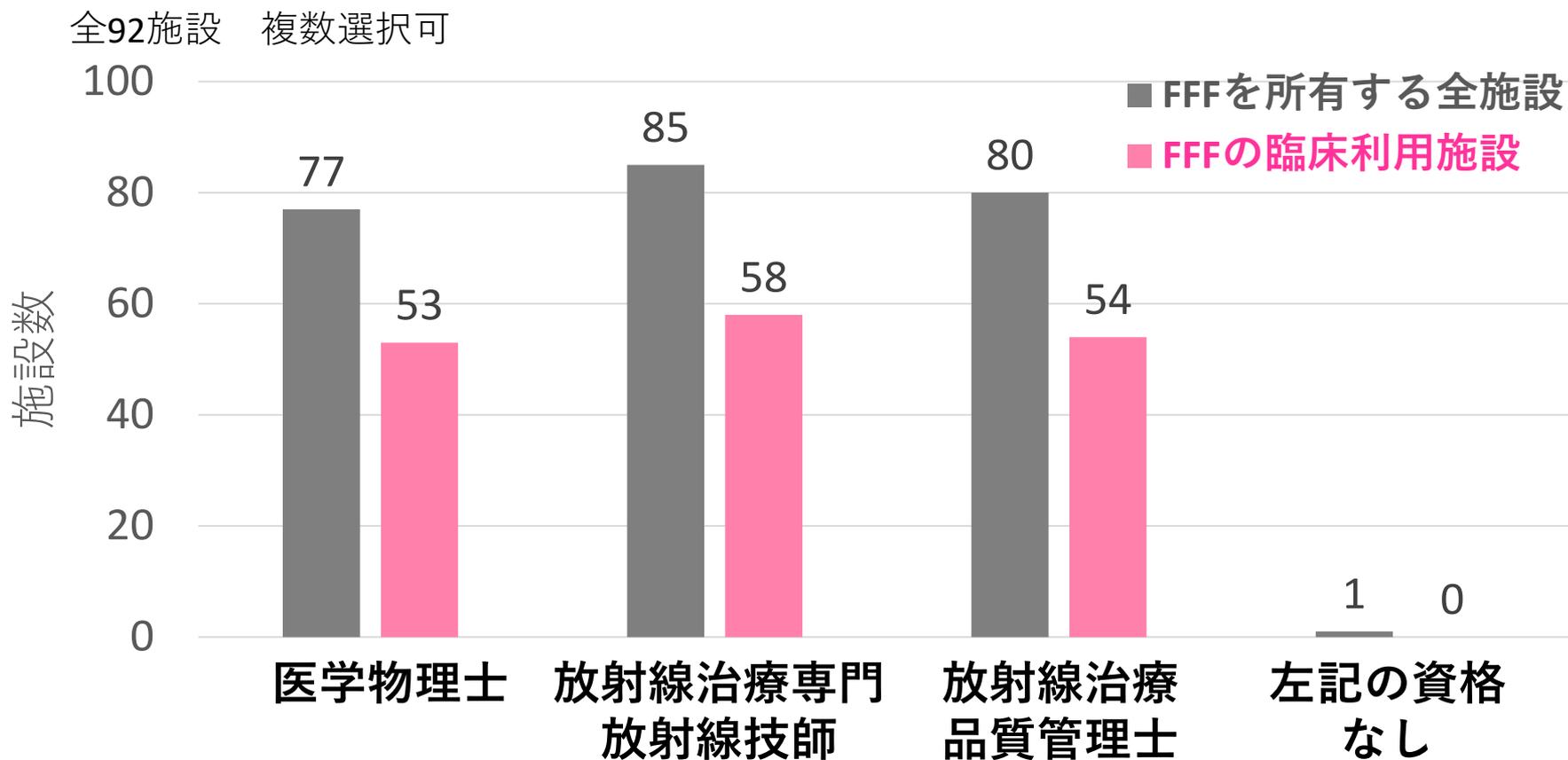
センター病院、大学附属病院で導入施設が多い

1-1 総リニアック数別のFFFビーム所有施設数



所有するリニアック数が多い施設で導入が進む

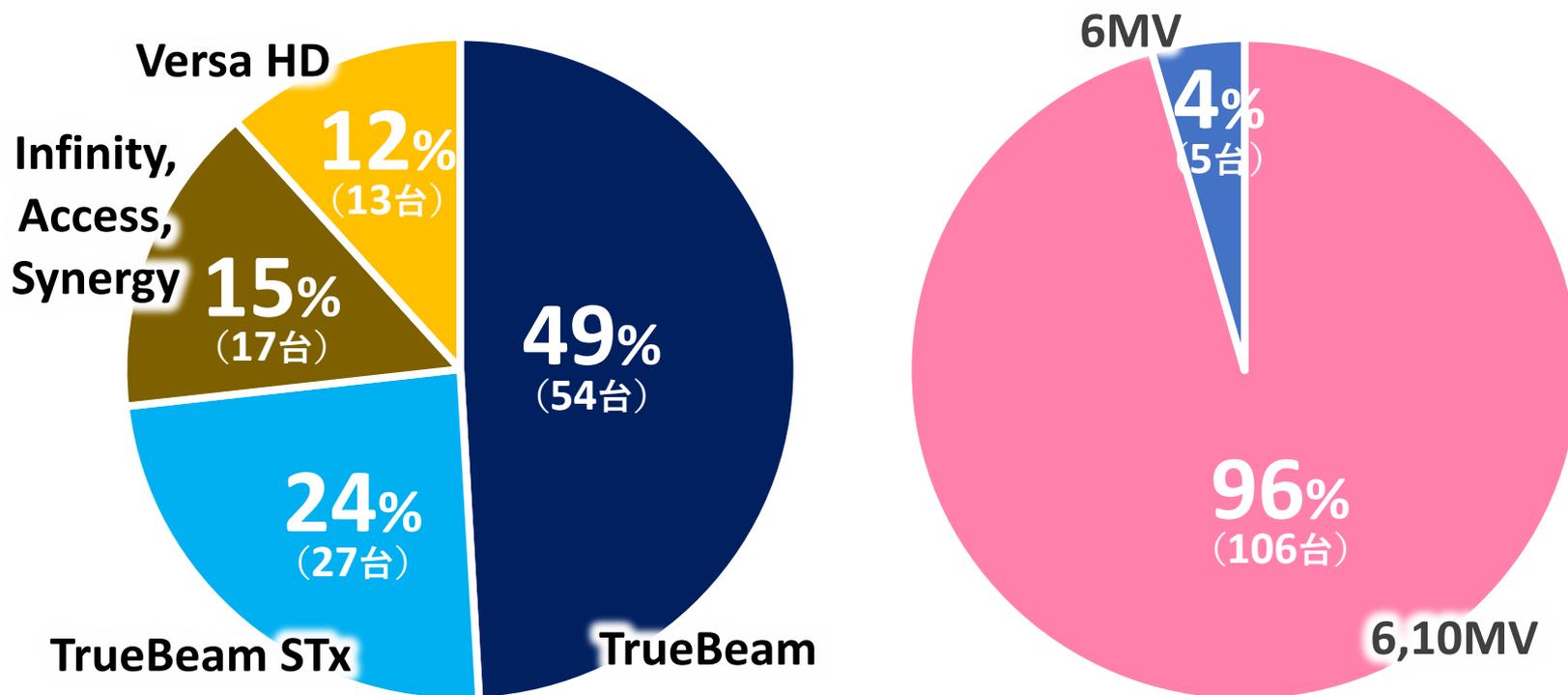
1-1 FFFビーム所有施設の有資格者在籍状況



所有する92施設のうち91施設に資格所有者が在籍する

1-2 FFFビーム搭載機種とエネルギー

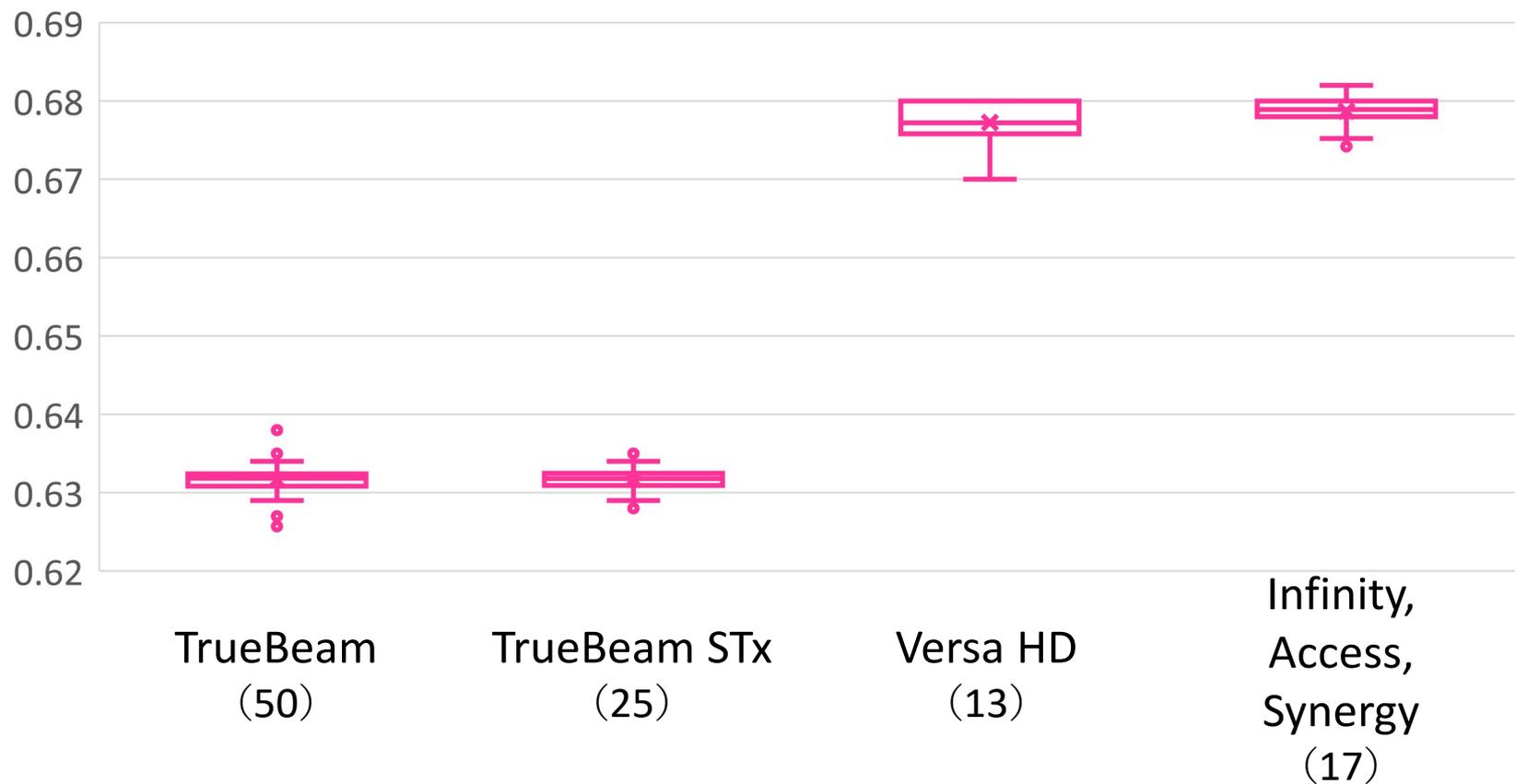
全111装置



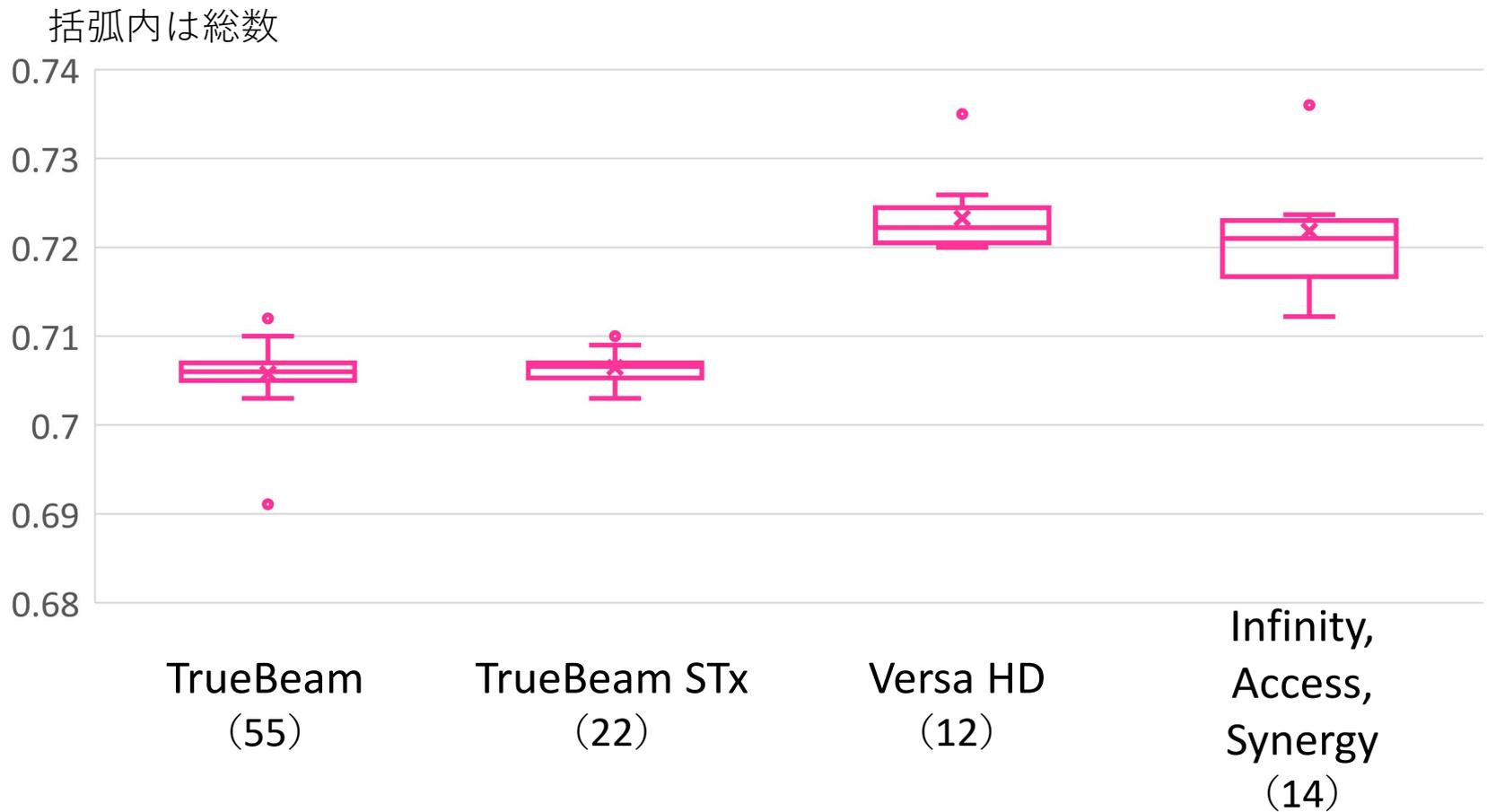
- TrueBeamが最も多く、約半数を占める
- 多くの装置が6と10 MVの2つのエネルギーを搭載

1-2 FFFビームの $TPR_{20,10}$ | 6 MV

括弧内は総数



1-2 FFFビームの $TPR_{20,10}$ | 10 MV



- 同じ名目エネルギーでも $TPR_{20,10}$ はメーカーで大きく異なる

アンケート項目

FFFビームを所有する 施設、リニアック情報

- 1-1 施設情報
 - 1-2 導入機種と $TPR_{20,10}$
-

臨床利用

- 2-1 治療実績
 - 2-2 適応症例と呼吸性移動対策
 - 2-3 臨床開始へ向けた検討
-

基準条件の 水吸収線量計測

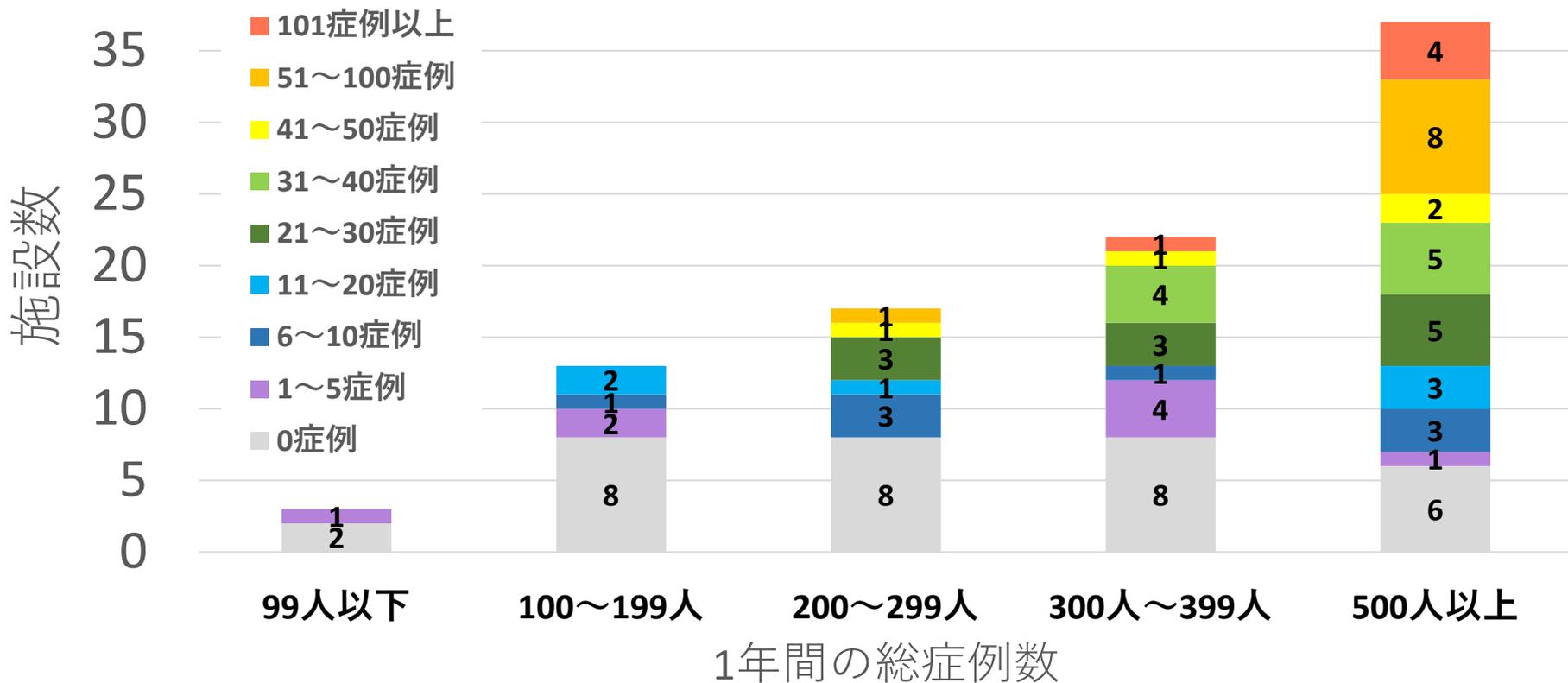
- 3-1 計測に使用する検出器
 - 3-2 体積平均効果の評価
 - 3-3 線質変換係数の評価
-

ビームデータと 精度管理

- 4-1 ビームデータ測定と登録
- 4-2 精度管理

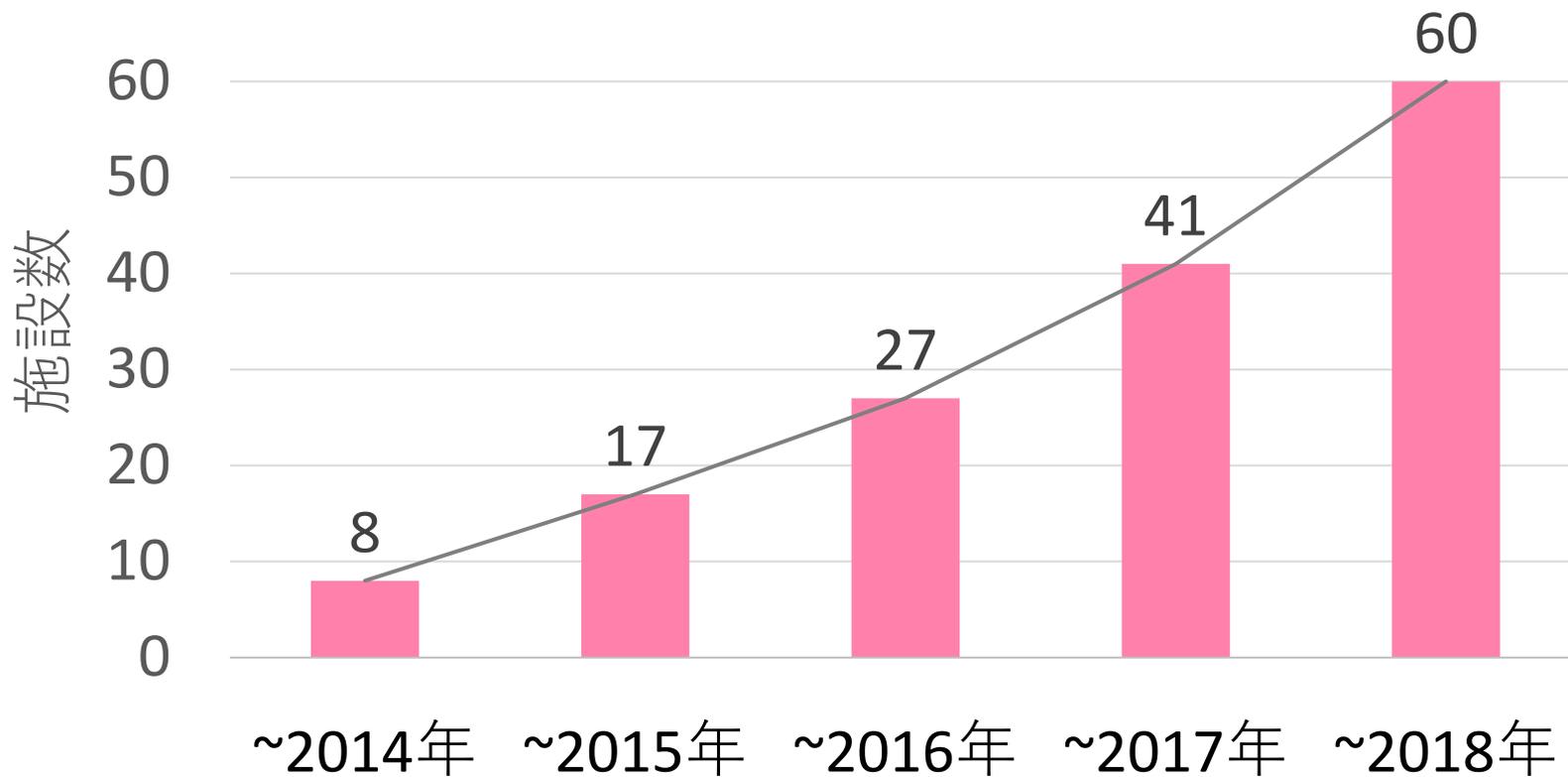
2-1 総症例数別のFFFビーム使用症例数

対象期間：2018年1月～12月



施設の規模に関わらずFFF使用症例数は大きく異なる

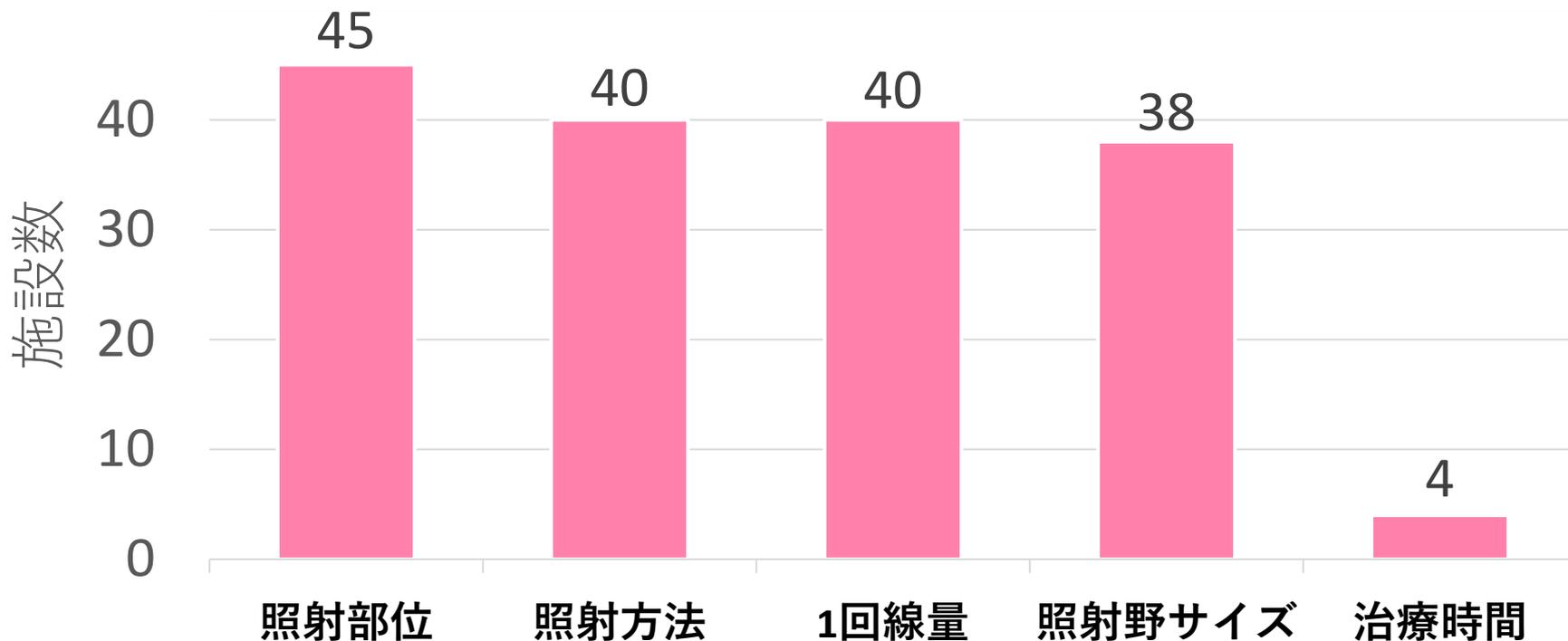
2-1 臨床で使用する施設数の推移



- 臨床使用を開始する施設が急速に増加してきている
- アンケート収集時点で**66**施設(73%)が臨床使用

2-2 FFFビームの選択条件

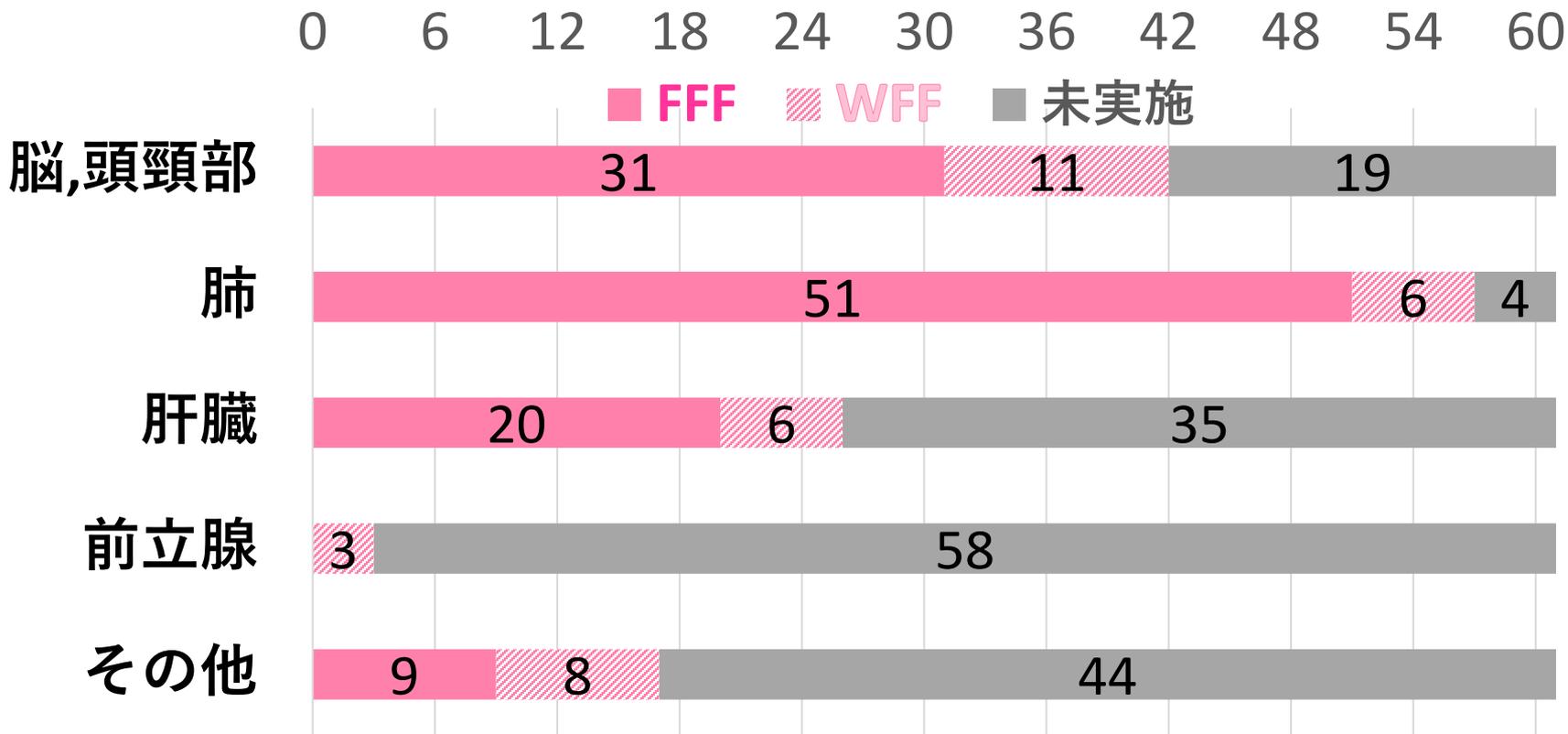
臨床使用している62施設 複数回答可



55施設が複数の項目を考慮し選択している

2-2 定位照射に使用するビーム | 6 MV

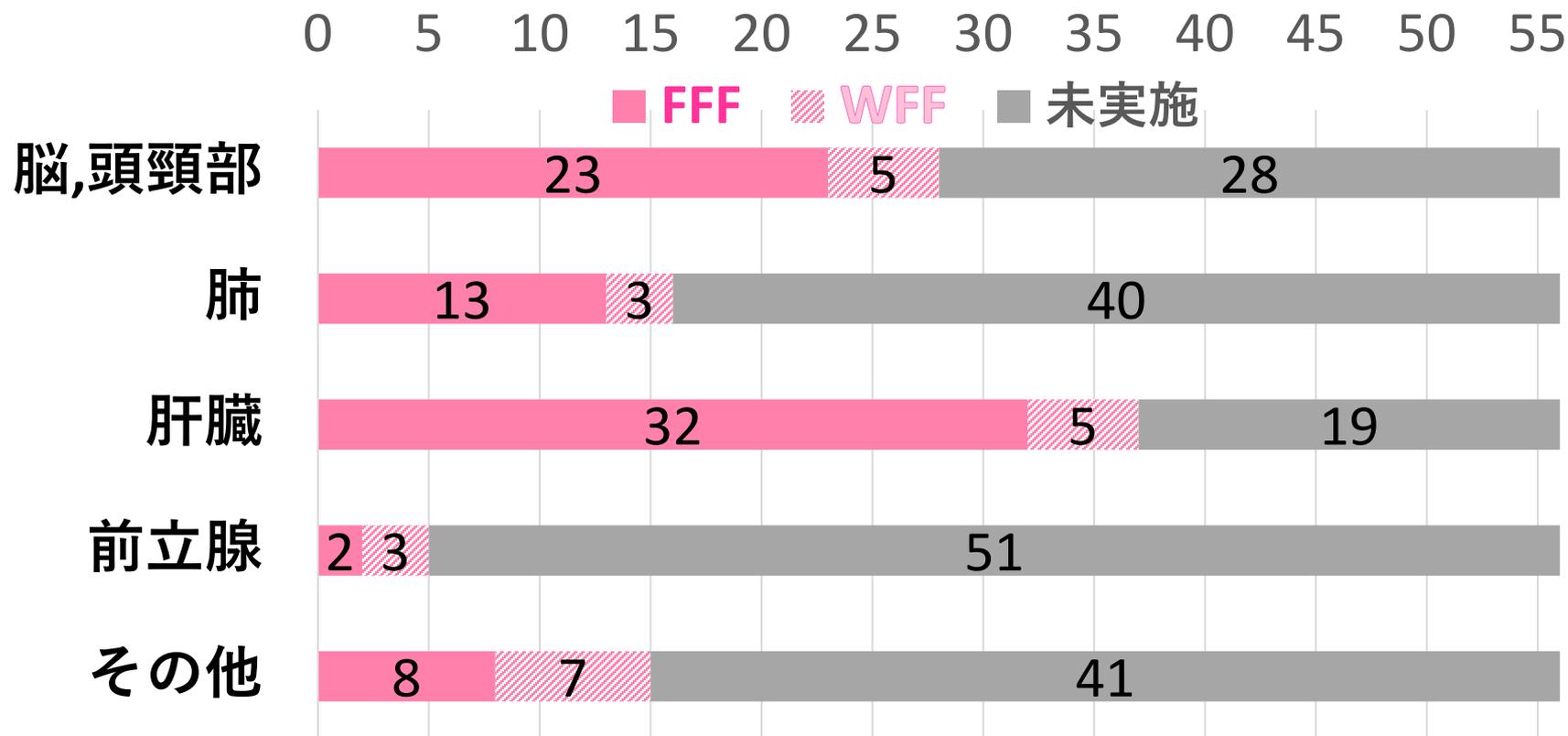
主に使用しているビームを選択 61施設が回答



- 症例に限らず多くの施設がFFFを選択している
- 特に肺定位を6 MVのFFFで照射している施設が多い

2-2 定位照射に使用するビーム | 10 MV

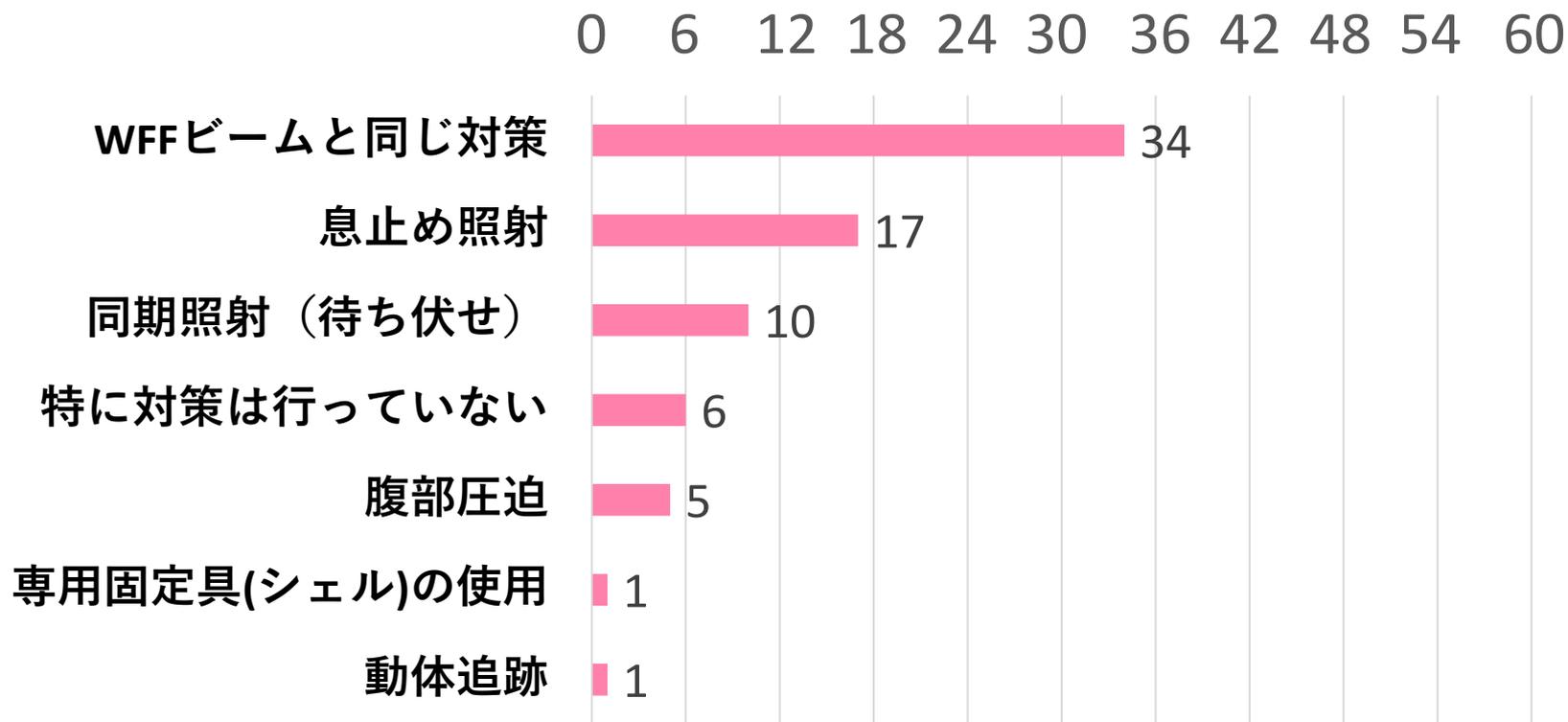
主に使用しているビームを選択 56施設が回答



- 症例に限らず多くの施設がFFFを選択している
- 特に肝定位を10 MVのFFFで照射している施設が多い

2-2 呼吸性移動対策

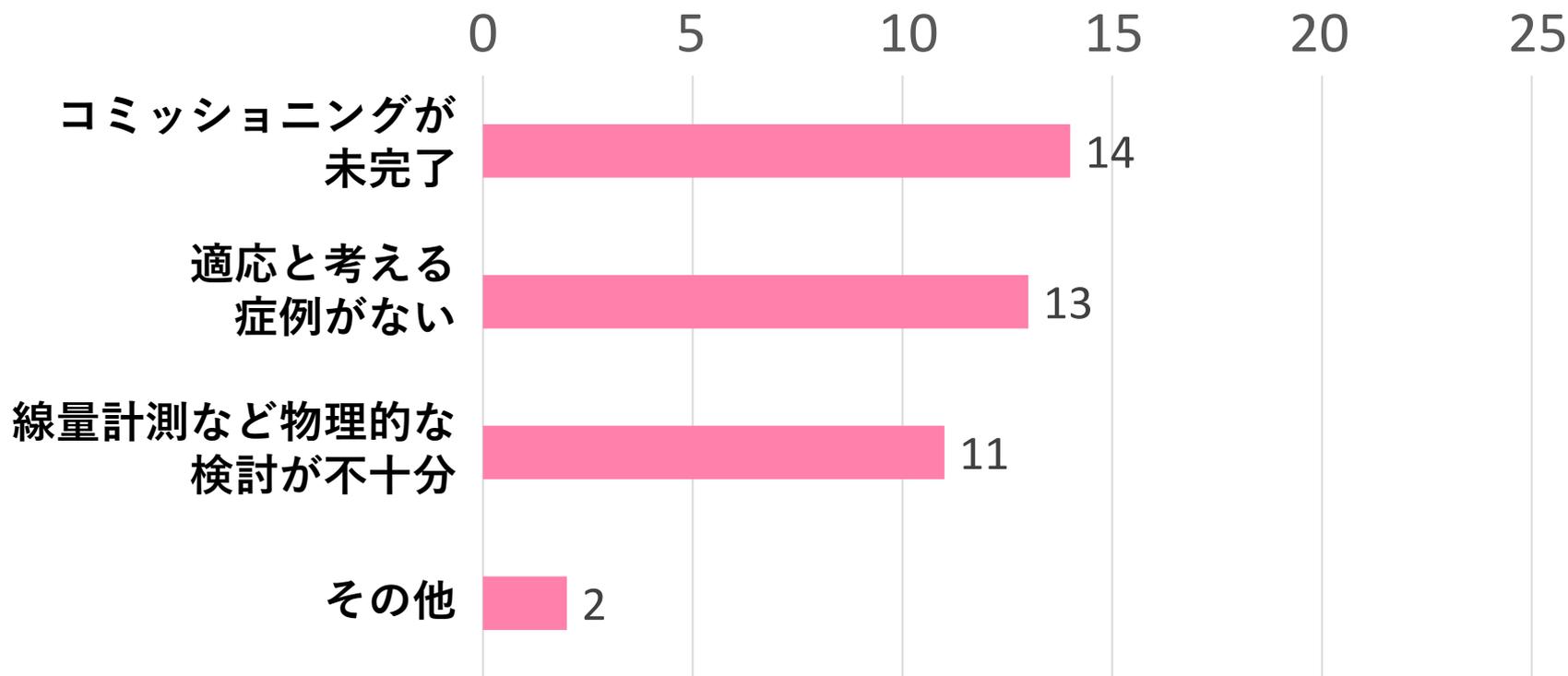
WFFビームと異なる場合は該当する対策を選択 61施設が回答 複数回答可



- WFFビームと同じ対策を行っている施設が最も多い
- 導入にあたり息止めや同期照射とした施設が多い

2-3 臨床で使用していない理由

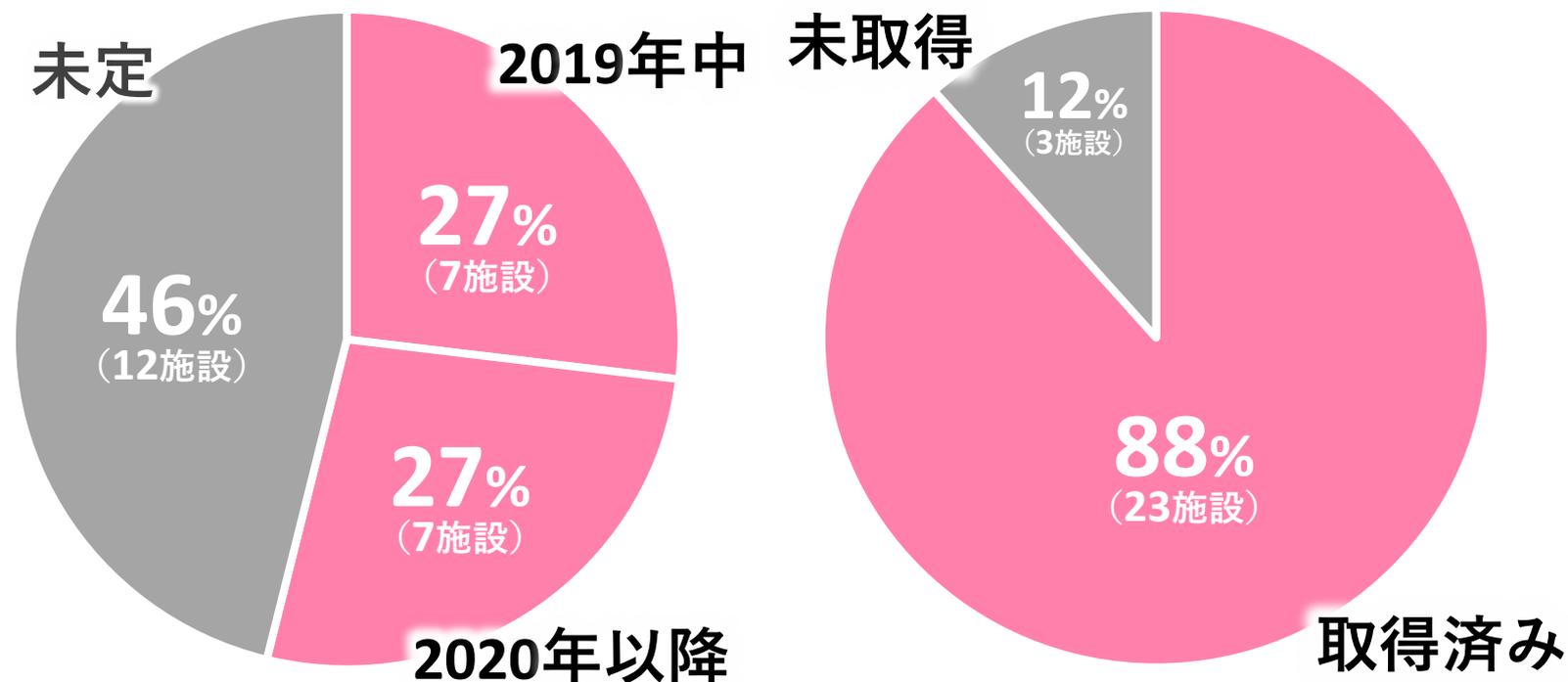
アンケート回答時点で臨床使用していない理由を選択 複数選択可
32施設中6施設は2019年1月からアンケート実施までに使用開始



- 臨床で未使用の施設は92施設のうち**26**施設 (28%)
- 物理的な検討を理由とした施設は**11**施設

2-3 臨床開始予定とビームデータ取得状況

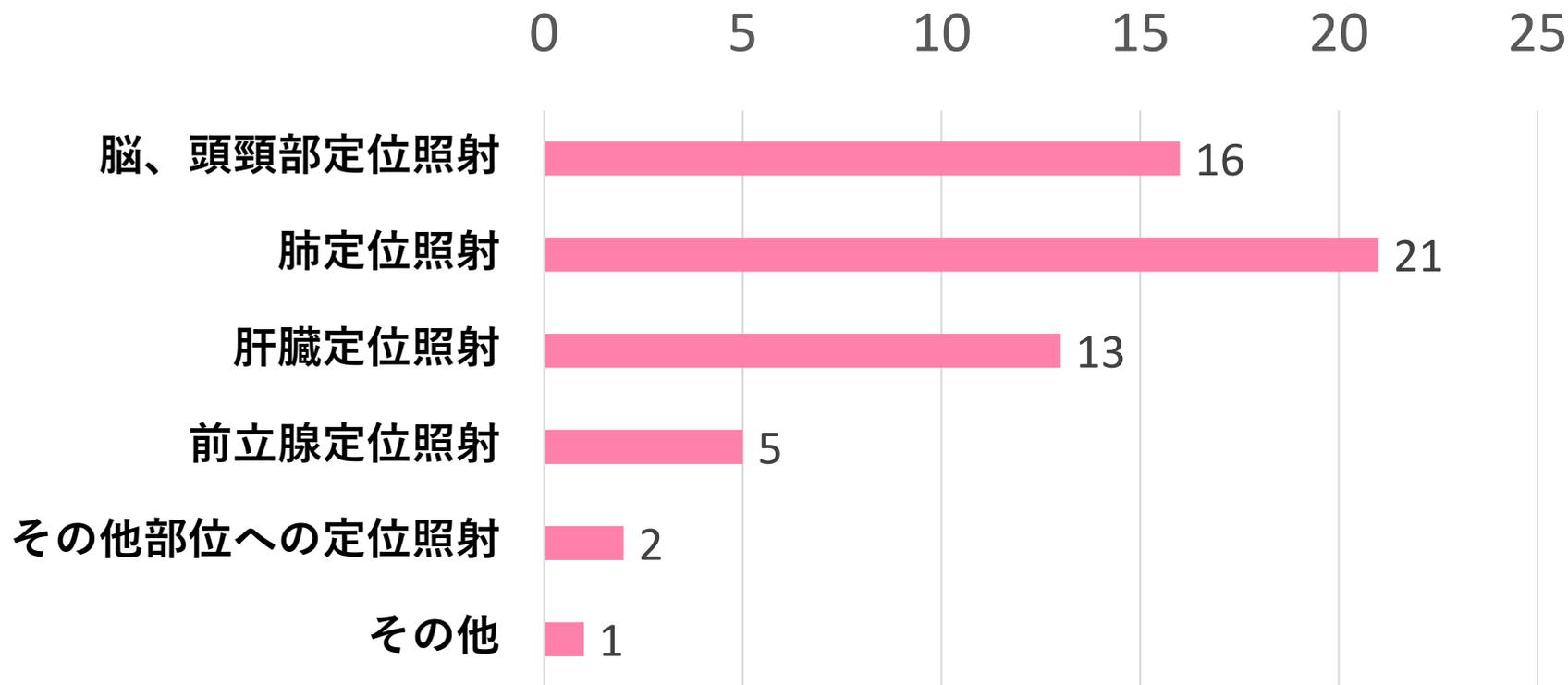
全26施設



- 約半数の14施設が臨床で開始する予定がある
- 多くの施設でビームデータは取得済み

2-3 適応と考えている症例

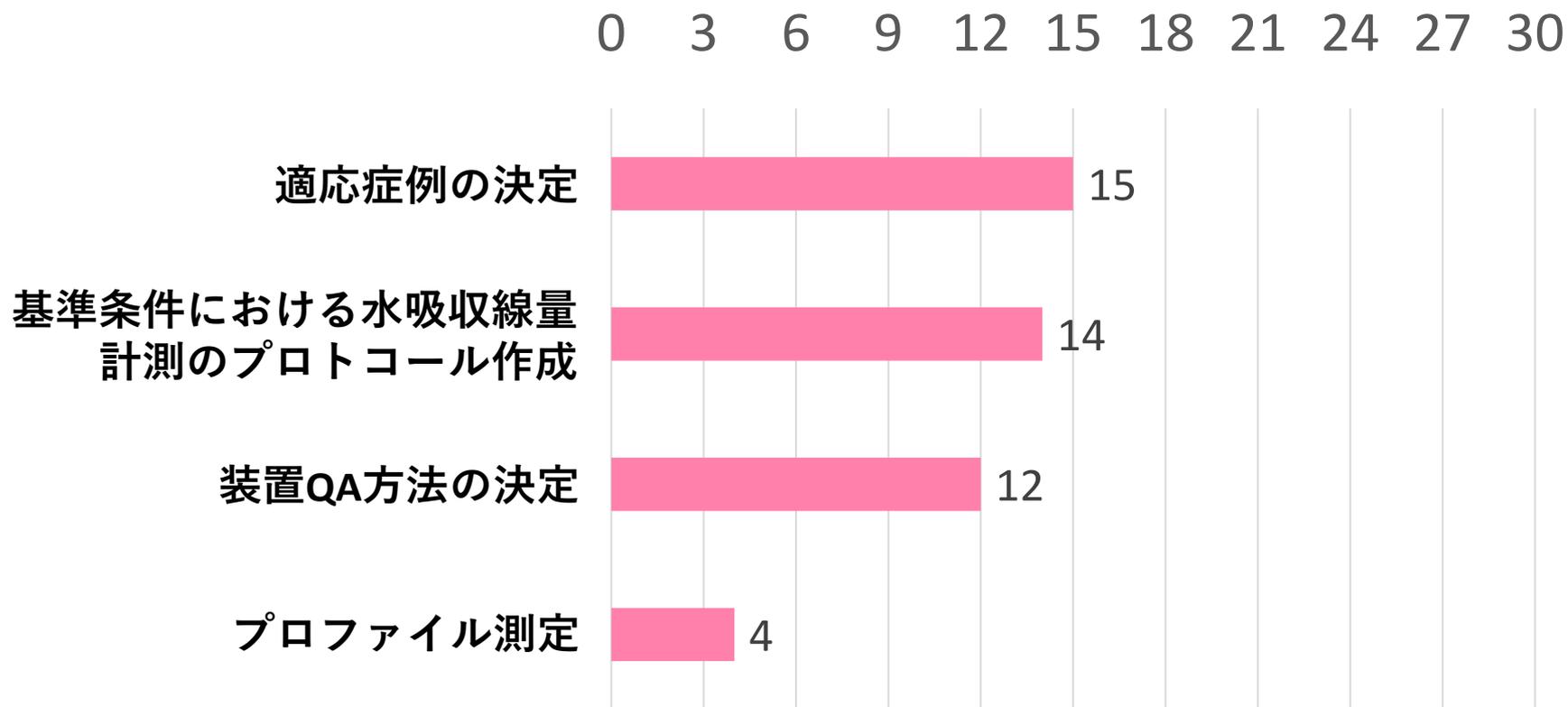
全26施設 複数選択可



- 肺の定位照射を考えている施設が最も多い
- 脳、頭頸部や肝臓も半数以上が適応と考えている

2-3 臨床導入へ向けた課題

全32施設 複数選択可



症例の選択や線量計測に対して課題だと感じている

小括 1

- 回答を得た施設のうち3割以上の施設が導入しており、臨床を開始する施設が急速に増加してきている
- 同じ名目エネルギーでも $TPR_{20,10}$ はメーカーごとに異なる
- 症例数は施設の方針により大きく異なる
- 定位照射を実施している施設では多くの施設がFFFビームを利用している

アンケート項目

FFFビームを所有する 施設、リニアック情報

- 1-1 施設情報
 - 1-2 導入機種と $TPR_{20,10}$
-

臨床利用

- 2-1 治療実績
 - 2-2 適応症例と呼吸性移動対策
 - 2-3 臨床開始へ向けた検討
-

基準条件の 水吸収線量計測

- 3-1 計測に使用する検出器
 - 3-2 体積平均効果の評価
 - 3-3 線質変換係数の評価
-

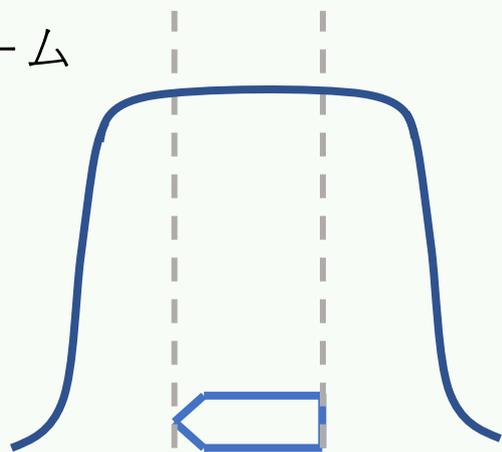
ビームデータと 精度管理

- 4-1 ビームデータ測定と登録
- 4-2 精度管理

3-1 FFFビームの体積平均効果

検出器の指示値は有感体積内の平均値となる

WFFビーム

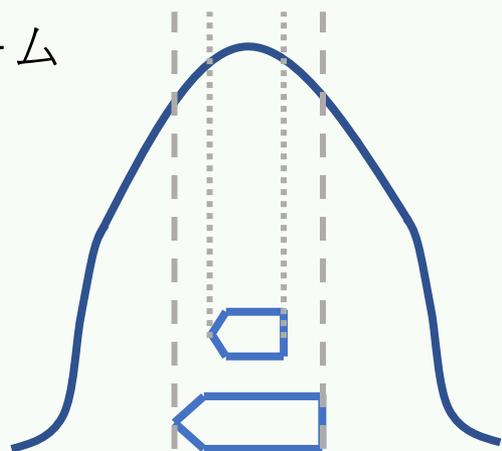


有感体積内の
平均線量

=

幾何学中心
の線量

FFFビーム



有感体積内の
平均線量

≠

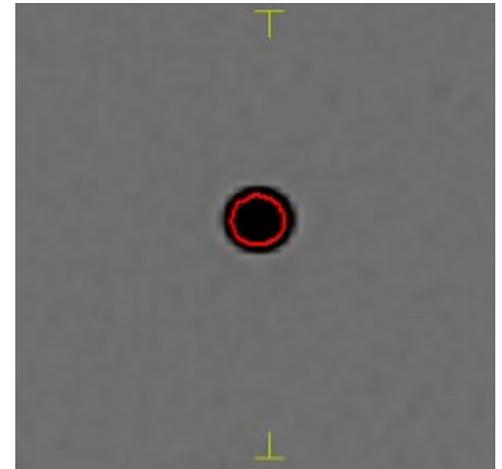
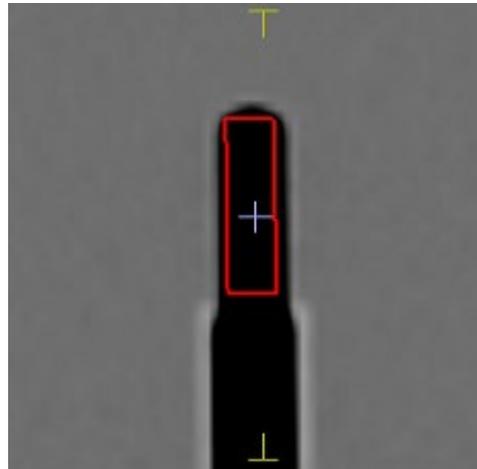
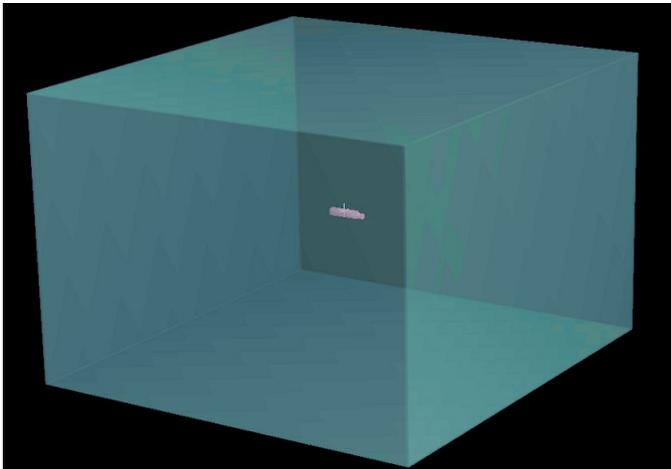
幾何学中心
の線量

体積平均効果

3-1 体積平均効果の補正方法

1. 計画装置を利用して求める方法

- a. 計画装置上に線量計の有感体積を再現
- b. 有感体積のROIに対する平均線量と点線量を比較

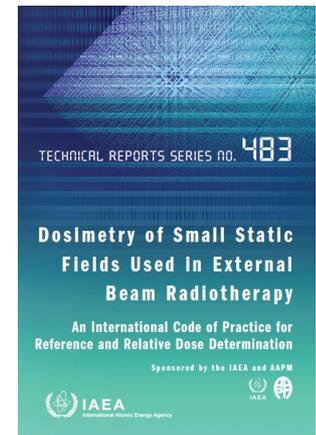


3-1 体積平均効果の補正方法

2. TRS483の式を利用して求める方法

● IAEA発刊のTechnical Reports Series No.483

“Dosimetry of Small Static Fields Used In External Beam Radiotherapy”



体積平均効果の補正係数の算出式が提供されている※

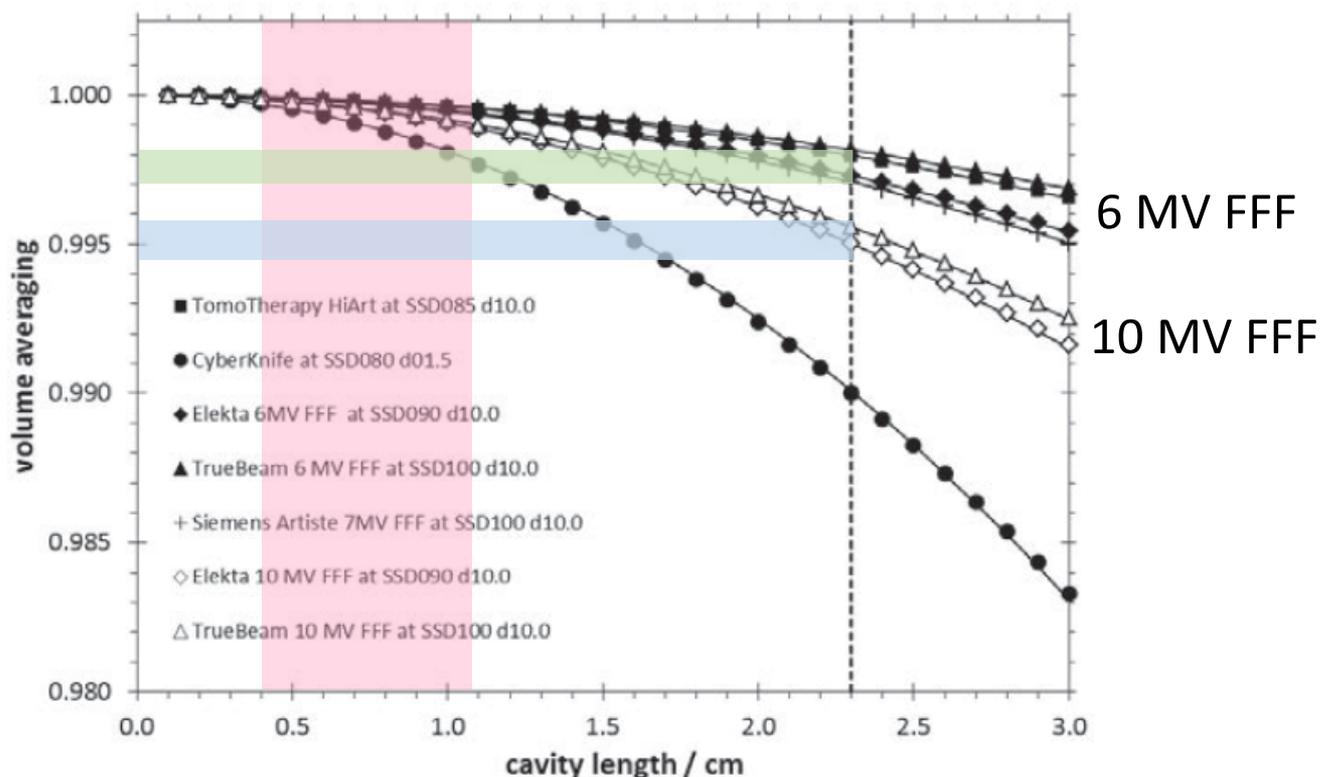
$$(k_{\text{vol}})_Q^{f_{\text{ref}}} = 1 + (6.2 \times 10^{-3} \cdot TPR_{20,10}(10) - 3.57 \times 10^{-3}) \cdot \left(\frac{100}{SDD}\right)^2 \cdot L^2$$

- a. $TPR_{20,10}$ は等価正方形照射野サイズ
FFFの $TPR_{20,10}(S)$ からWFFの $TPR_{20,10}(10)$ へ変換が必要
- b. L は有感体積の長さ [cm]

3-1 体積平均効果の補正方法

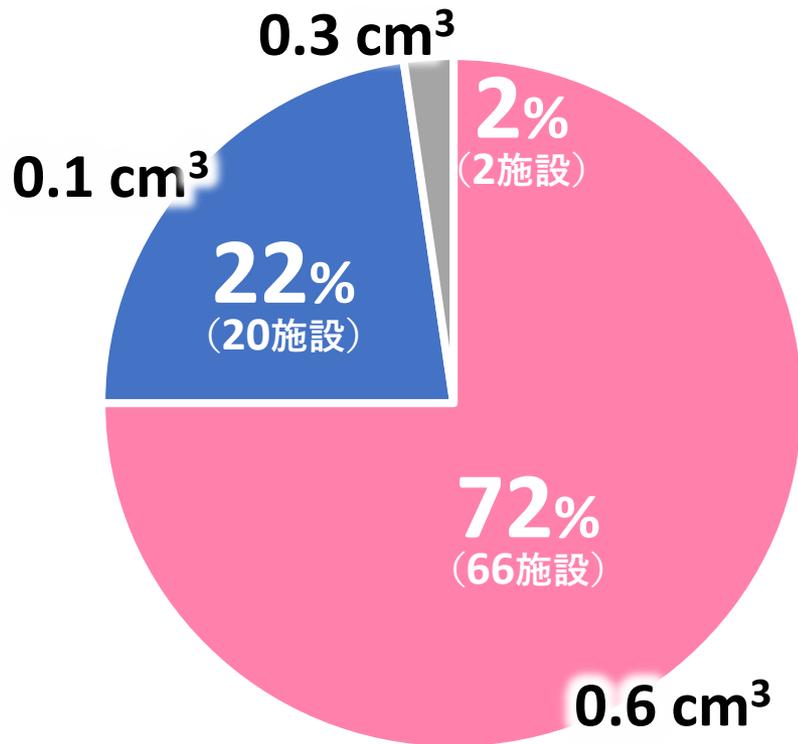
3. 小さい電離箱線量計と比較する方法

電離空洞が短いほど体積平均効果は小さい

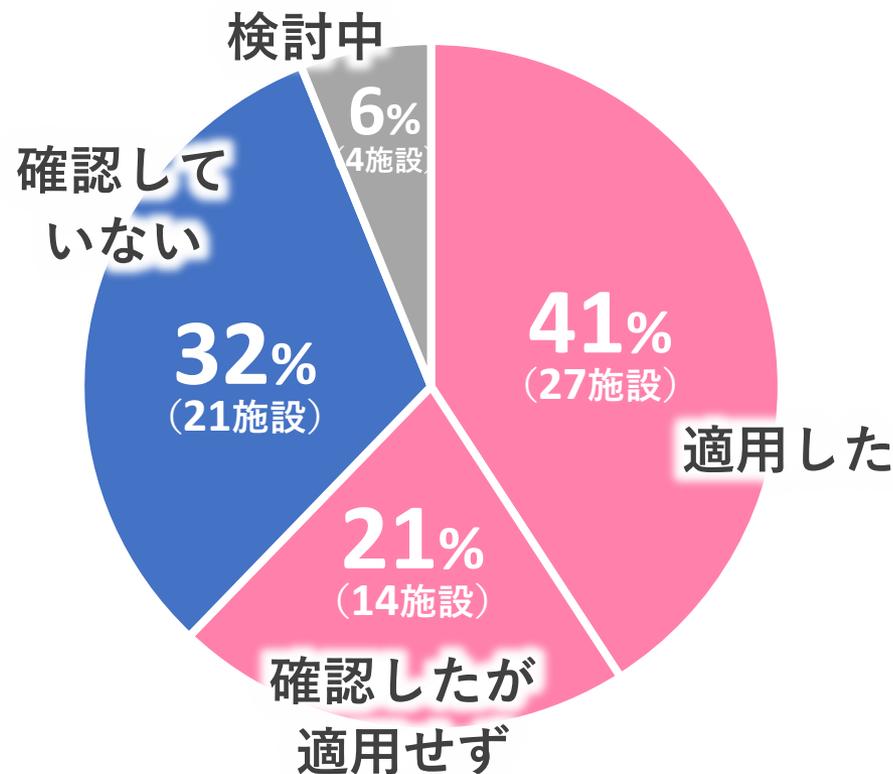


3-1 基準条件の水吸収線量計測に用いる線量計サイズと体積平均効果の確認

全88施設



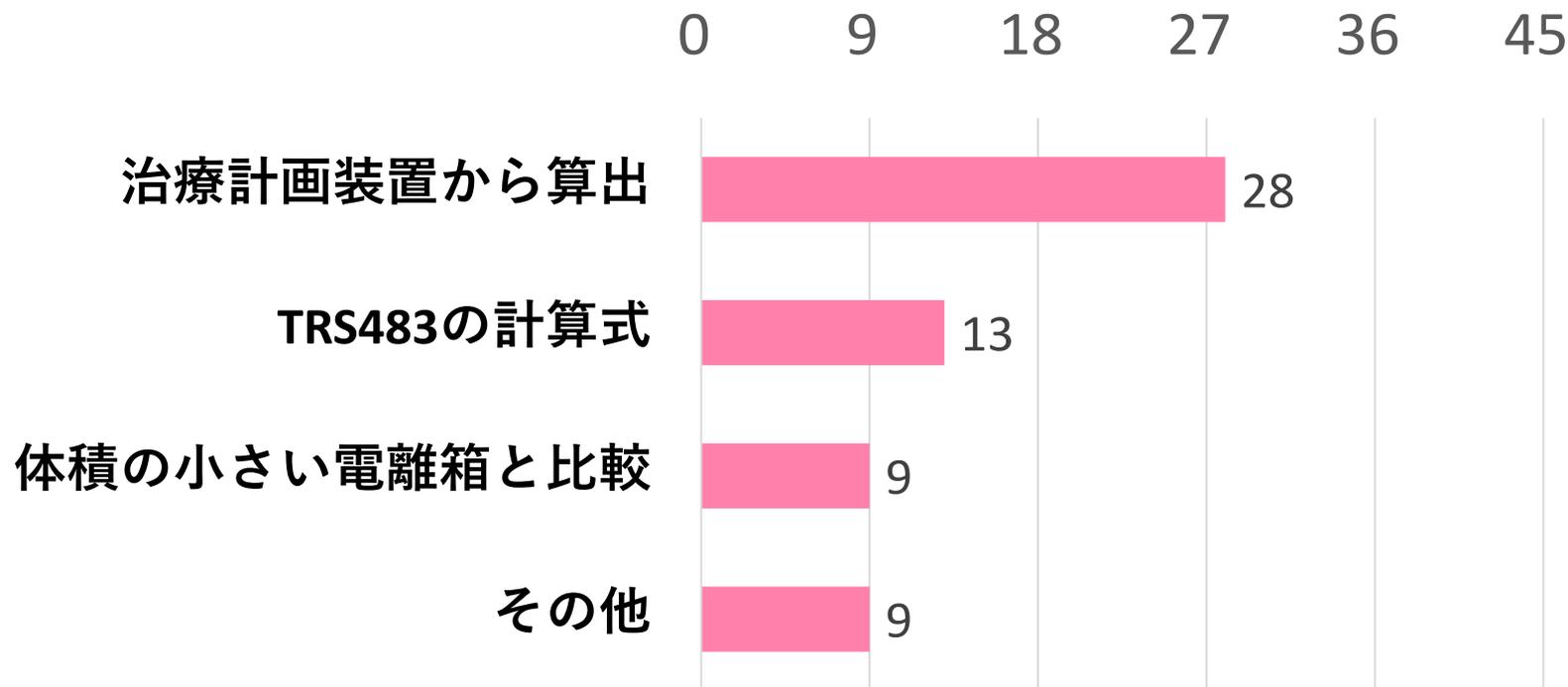
0.6 cm³前後の電離箱線量計を使用した全66施設



- 72%の施設が0.6 cm³前後の電離箱線量計を使用
- うち41施設(62%)が体積平均効果の確認を行った

3-2 体積平均効果の算出方法

体積平均効果を確認した全44施設 複数回答可



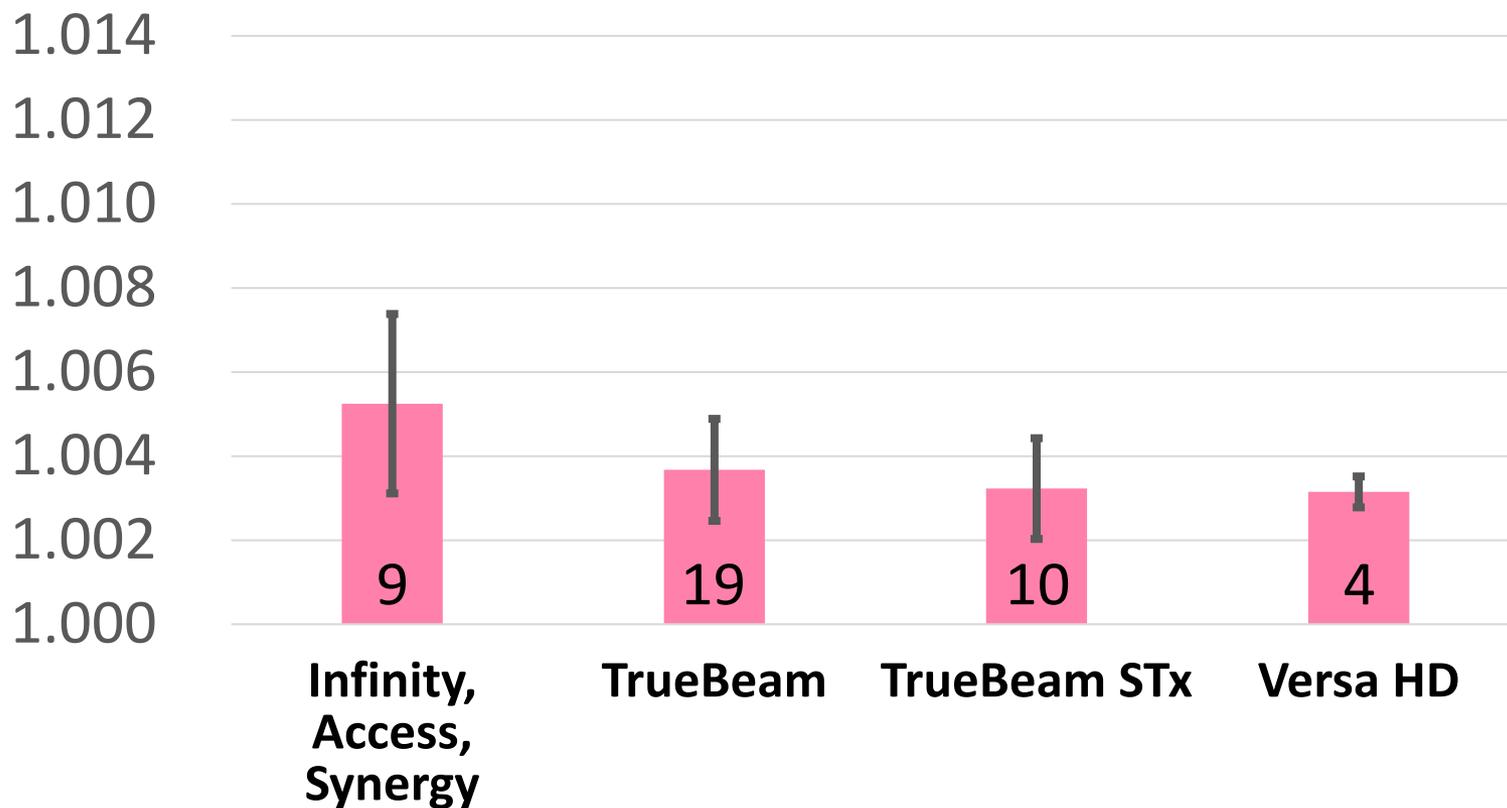
その他：

片寄哲朗 Jpn. J. Med. Phys. Vol. 36 No.2: 79-84 (2016)の論文の値を利用 - 5施設
MicroDiamond Detector等でプロファイルを取得し体積平均効果を算出 - 2施設

- 半数以上の施設が治療計画装置から算出した
- 20施設が複数の手法を用いて体積平均効果を検証した

3-2 体積平均効果 | 6 MV

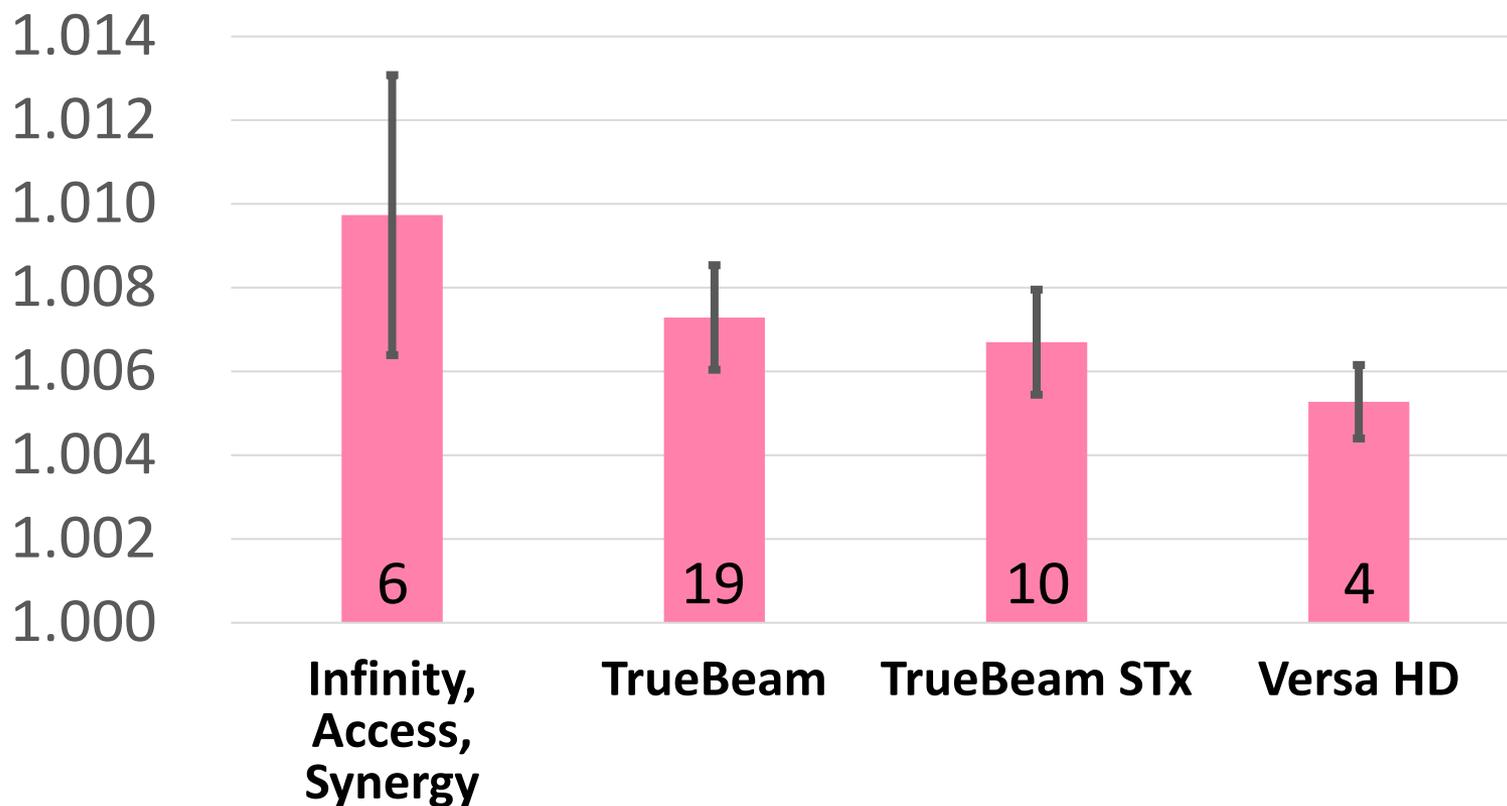
0.6 cm³前後の電離箱線量計に対して算出した体積平均効果 棒内の数字は装置数



TrueBeamシリーズとVersa HDでは約1.002~1.005となった

3-2 体積平均効果 | 10 MV

0.6 cm³前後の電離箱線量計に対して算出した体積平均効果 棒内の数字は装置数



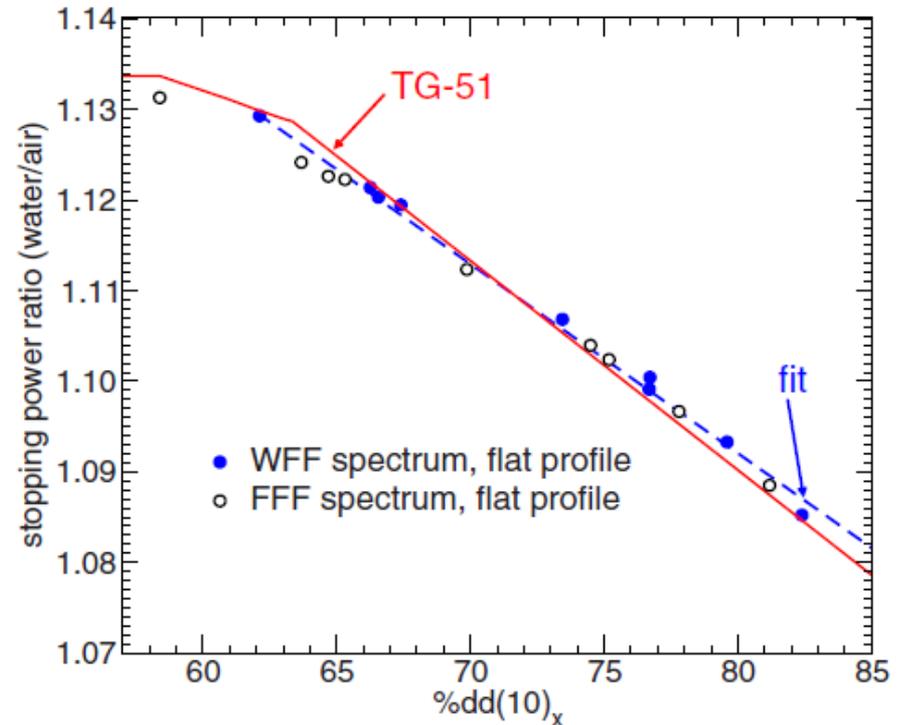
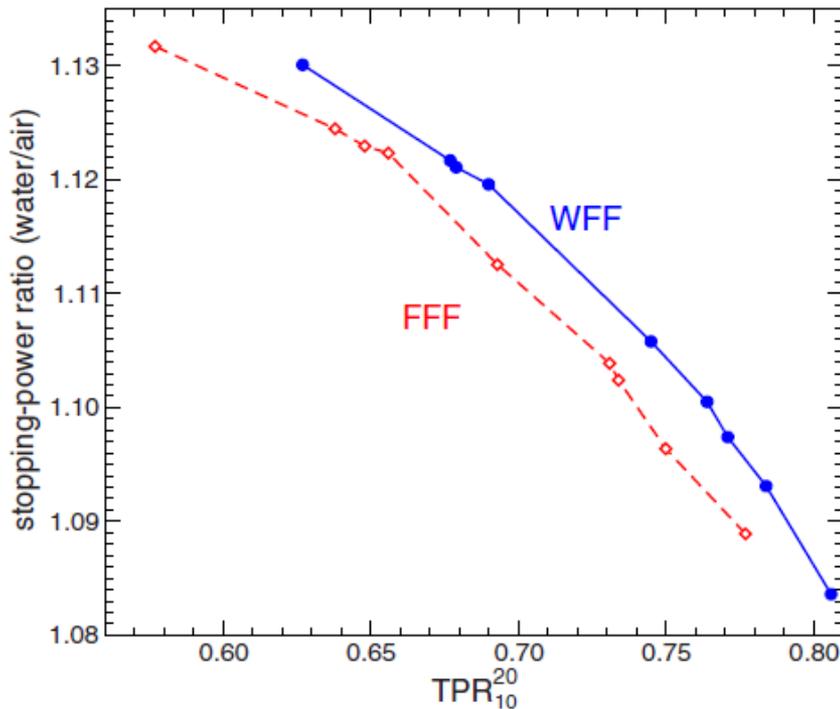
TrueBeamシリーズとVersa HDでは約1.004~1.009となった

3-3 FFFビームの線質変換係数

$TPR_{20,10}$ を指標としたWFFビームに対する k_Q の利用

：平均制限質量衝突阻止能比が0.4~1.0%程度変化する

% $dd(10)_x$ を指標とした算出では変化が小さい



3-3 線質変換係数の算出方法

1. 論文の値を参考に (\bar{L}/ρ) を修正する方法

- Xiongら^{*}は0.4~1.0%ほど変化することを示したFFFではWFFの k_Q に0.995を乗じた k_Q の使用を提案

$$k_Q^{\text{FFF}} = k_Q^{\text{WFF}} \times 0.995$$

- Dalarydら^{**}はMonte CarloシミュレーションよりTPRからFFFの $(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^{\text{wataer}}$ を求める近似式を提案

$$(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^{\text{water}} = 1.0325 - 0.4317(\text{TPR}_{20,10}) + 0.4466(\text{TPR}_{10,5})$$

標準計測法12で求めた $(\bar{L}/\rho)_{\text{air}}^{\text{wataer}}$ との比で k_Q を補正

^{*} Xiong G et al. Med. Phys. 2008;35:2104-2009

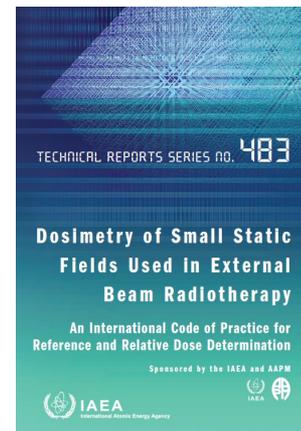
^{**} Dalaryd M et al. Med. Phys. 2014;41:111716

3-3 線質変換係数の算出方法

2. TRS483から k_Q を求める方法

- IAEA発行のTechnical Reports Series No.483

“Dosimetry of Small Static Fields Used In External Beam Radiotherapy”



$TPR_{20,10}$ を指標としたFFFの k_Q が提供されている

- a. 阻止能比の変化と体積平均効果の双方の補正を含む
- b. 表中の照射野サイズは等価正方形照射野サイズ
FFFの $TPR_{20,10}(S)$ からWFFの $TPR_{20,10}(10)$ へ変換が必要

3-3 線質変換係数の算出方法

3. TG51 Addendumから k_Q を求める方法

- AAPM発刊のTask Group 51 Addendum

“Addendum to the AAPM’s TG-51 protocol for clinical reference dosimetry of high-energy photon beams”

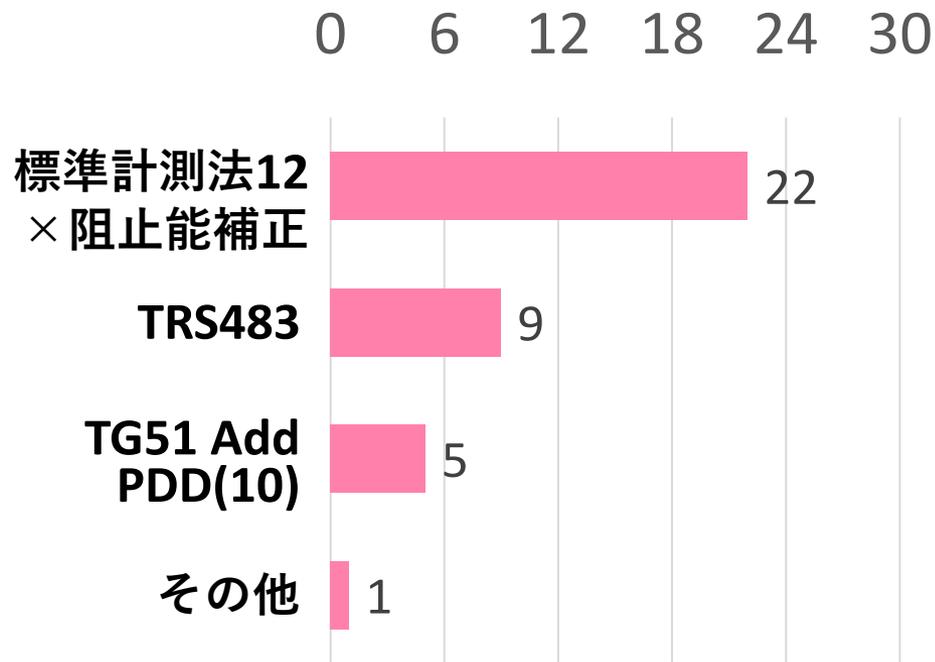
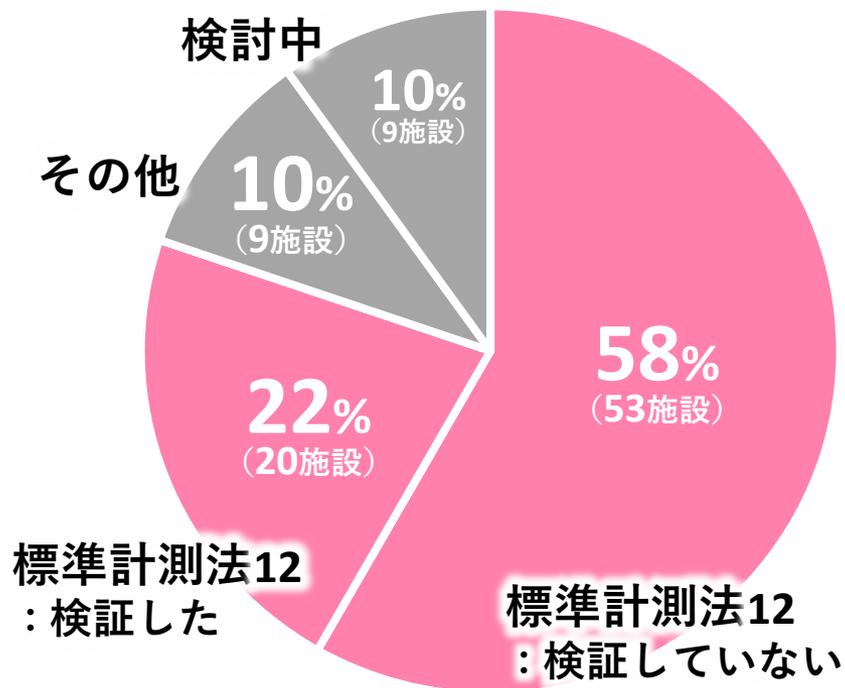
FFFビームでも $\%dd(10)_x$ が指標に適切である

- FFFビームの $\%dd(10)_x$ の計測には1 mm鉛箔を使用
- フィルタの有無に関わらず同じテーブルを参照可能

3-3 線質変換係数の算出方法

全92施設

検証した、その他を合わせた全29施設 複数回答可



- 73施設 (80%) の施設が標準計測法12に則り算出した
- 29施設 (32%) が複数の方法によって検証した

アンケート項目

FFFビームを所有する 施設、リニアック情報

- 1-1 施設情報
 - 1-2 導入機種と $TPR_{20,10}$
-

臨床利用

- 2-1 治療実績
 - 2-2 適応症例と呼吸性移動対策
 - 2-3 臨床開始へ向けた検討
-

基準条件の 水吸収線量計測

- 3-1 計測に使用する検出器
 - 3-2 体積平均効果の評価
 - 3-3 線質変換係数の評価
-

ビームデータと 精度管理

- 4-1 ビームデータ測定と登録
- 4-2 精度管理

4-1 FFFビームのPRFとDPP

- FFFビームはPulse Repetition Frequency (PRF)ではなくDose per pulse (DPP)が上昇している

例) TrueBeam※

| Beam | Dose rate range (10x10) [Gy min ⁻¹] | Time between two pulses [ms] | DPP in d_{max} [mGy] |
|-------|---|------------------------------|------------------------|
| 10FFF | 4.0 – 24.0 | 16.7 – 2.8 | 1.7 |
| 6FFF | 4.0 – 14.0 | 9.7 – 2.8 | 1.1 |
| 10WFF | 1.0 – 6.0 | 16.7 – 2.8 | 0.4 |
| 6WFF | 1.0 – 6.0 | 16.7 – 2.8 | 0.4 |

Versa HD ※※

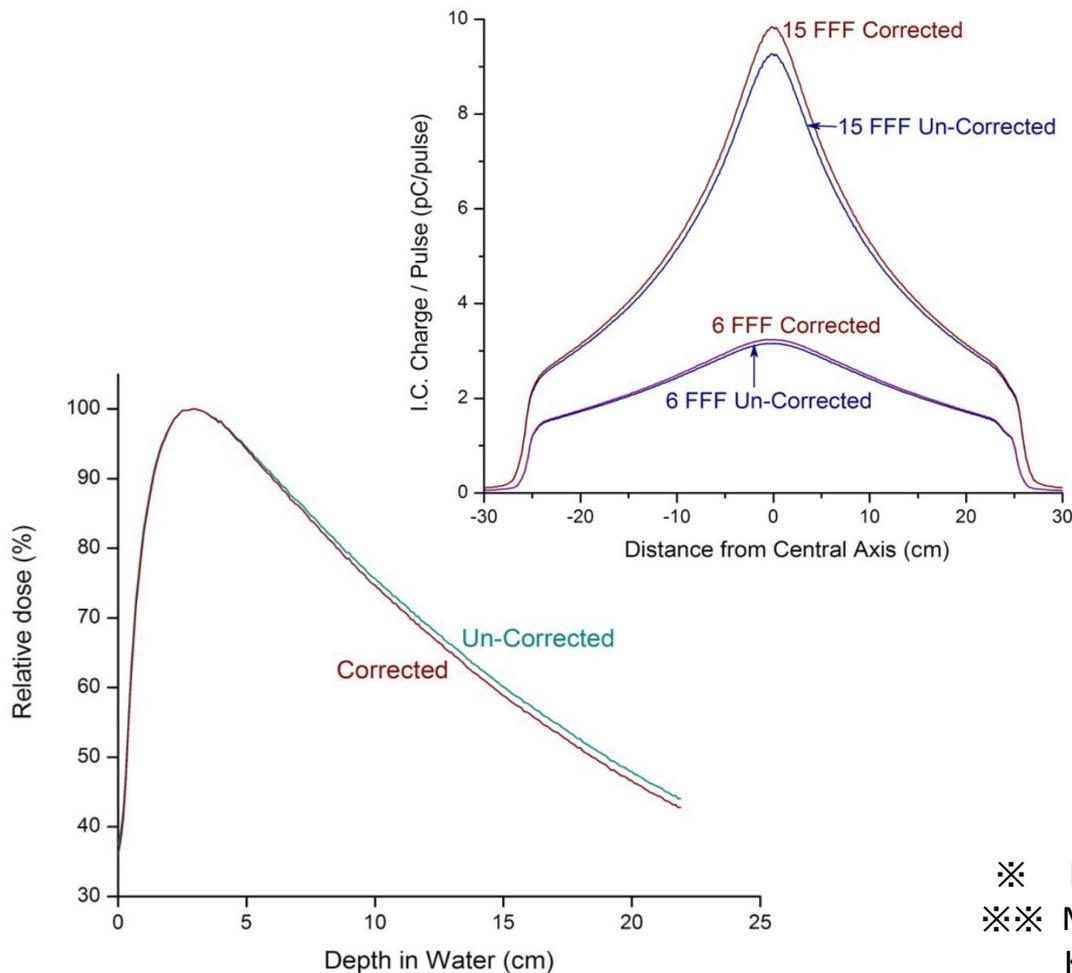
| Beam | Nominal dose rate [MU min ⁻¹] | Measured Pluse Repeat Frequency [Hz] | DPP in d_{max} [mGy] |
|-------|---|--------------------------------------|------------------------|
| 10FFF | 2000 | 303 | 1.21 |
| 6FFF | 1200 | 400 | 0.63 |
| 10WFF | 390 | 200 | 0.35 |
| 6WFF | 470 | 400 | 0.23 |

※ Lang S et al. Phys. Med. Biol. 2012;57:2819-2827

※※ Martin GM et al. Phys.Med. 2019;67:176-184

4-1 FFFビームのビームデータ測定

- 高いDPPにより、イオン収集効率が変化する



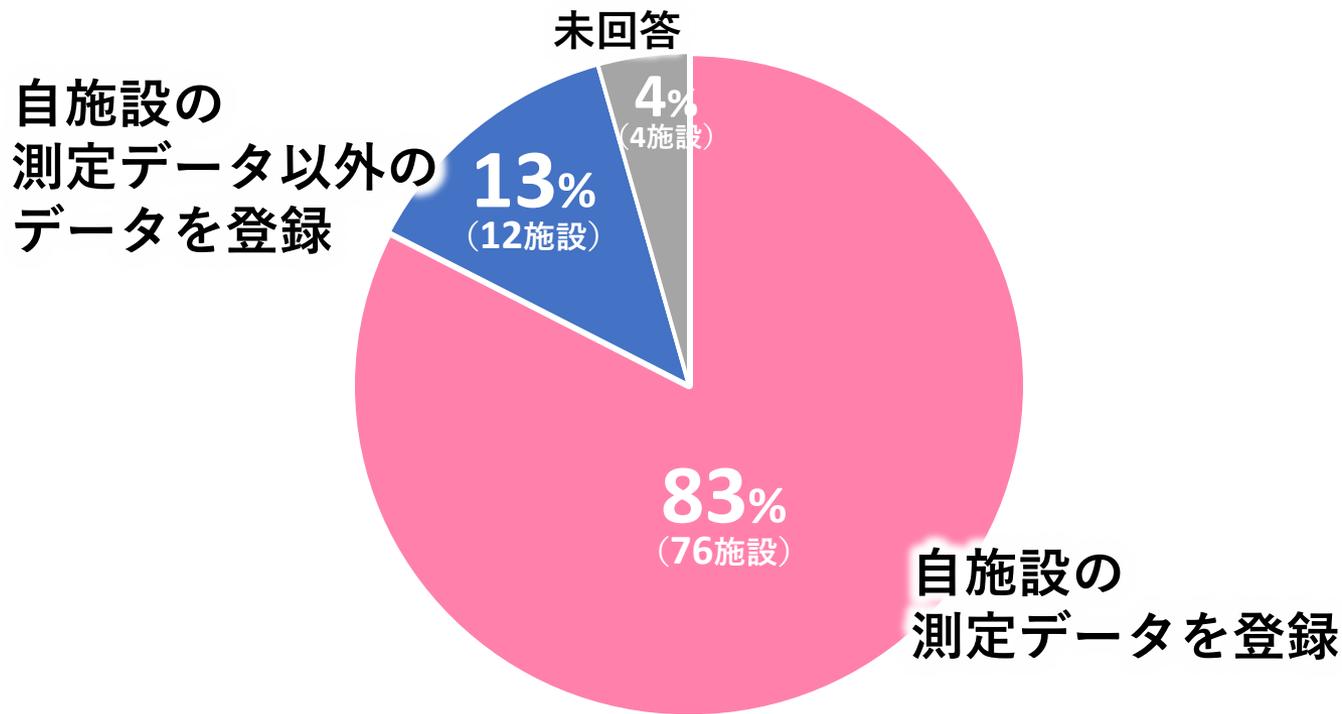
- FFFビームにおいても2点電圧法が利用できる※
- その他DPPを指標とした補正方法などが提案されている**

S. Johnsen et al. Ion Chamber Collection Efficiency Considerations for Un-Flattened X-ray Beams. 2008

※ Kry SF et al. J. Appl. Clin. Med. Phys. 2012;13:318-25
※※ McEwen MR et al. Med. Phys. 2010;37:2179-93
Kim S et al. J. Radiat. Prot. 2009;34:435-43
El-Hafez et al. J. Am. Sci. 2011;7:206-13

4-1 計画装置へのビームデータ登録

全92施設

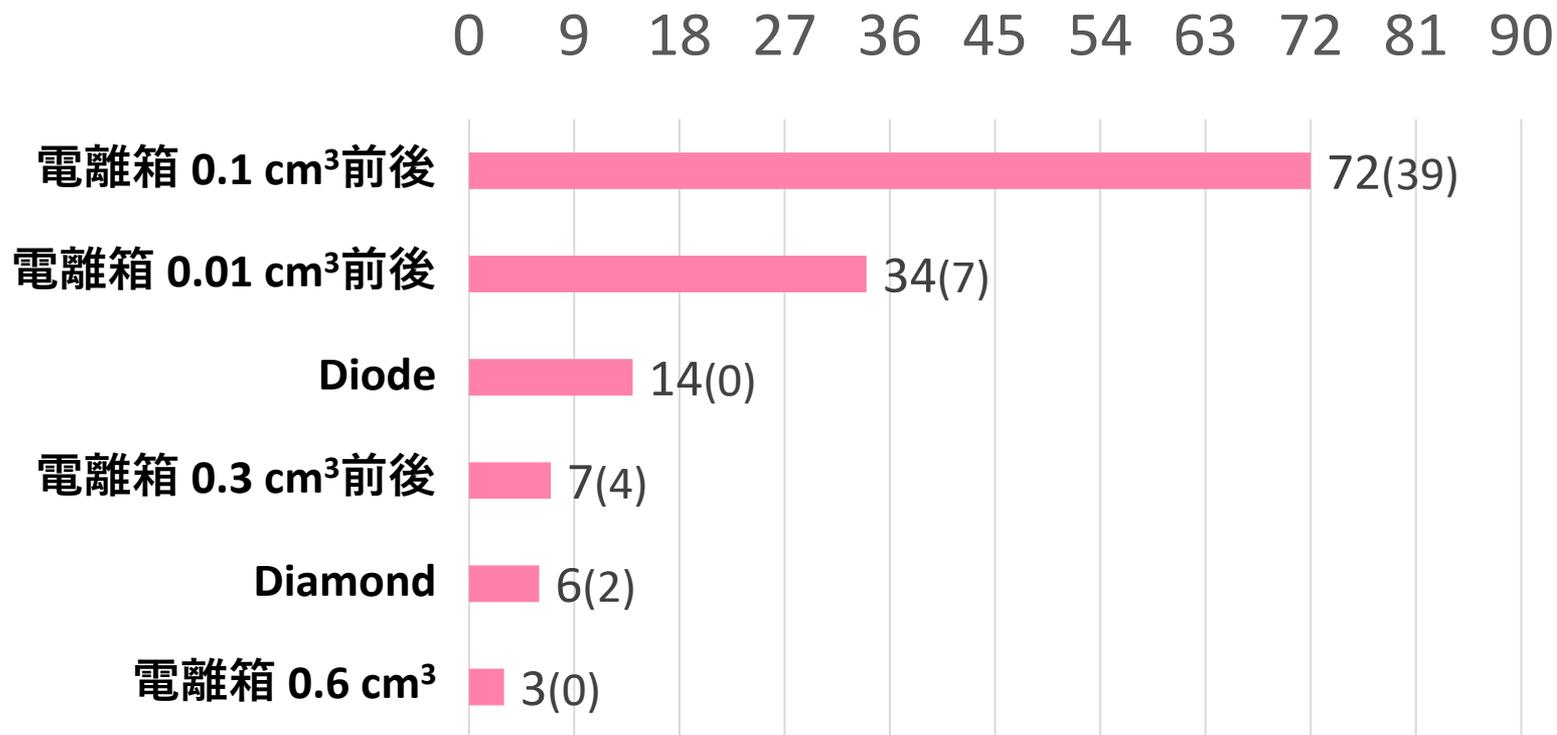


多くの施設が測定データを計画装置へ登録

4-1 PDD測定に使用した検出器

全88施設 複数選択可

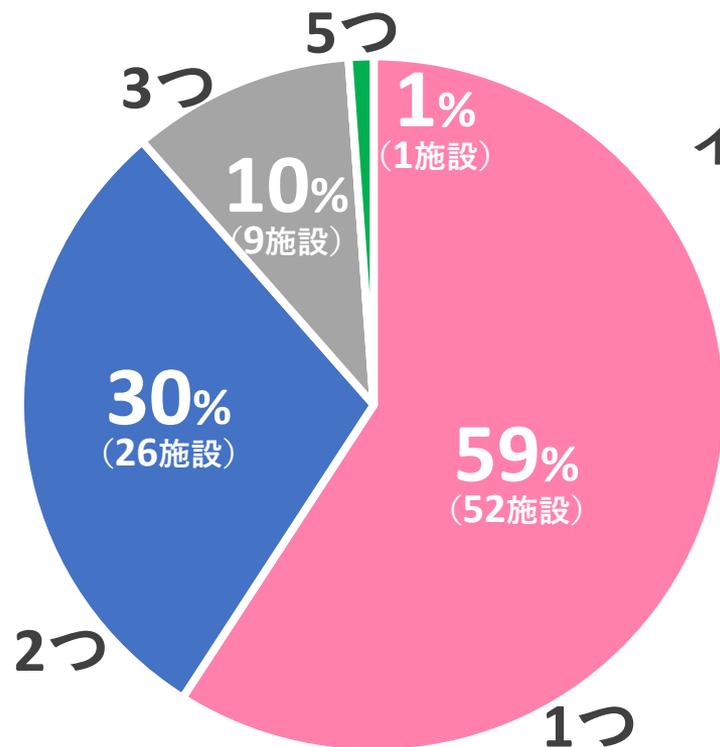
括弧内の数字はその検出器のみを使用した施設数



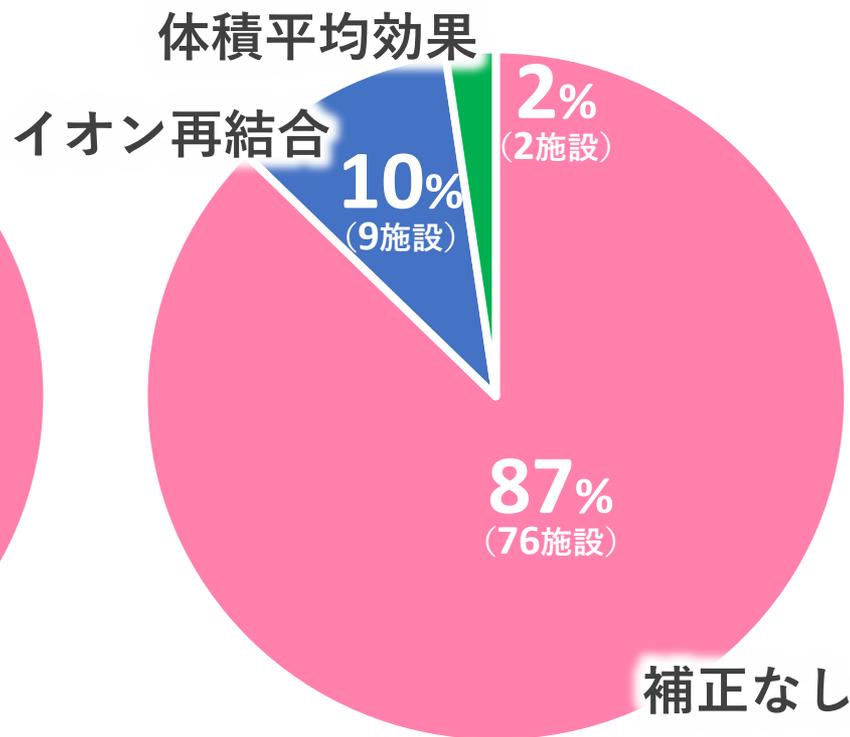
0.1 cm³前後や0.01 cm³前後の小さい電離箱線量計が多い

4-1 PDD測定に使用した検出器数と補正

全88施設



電離箱線量計を使用した全86施設 複数回答可



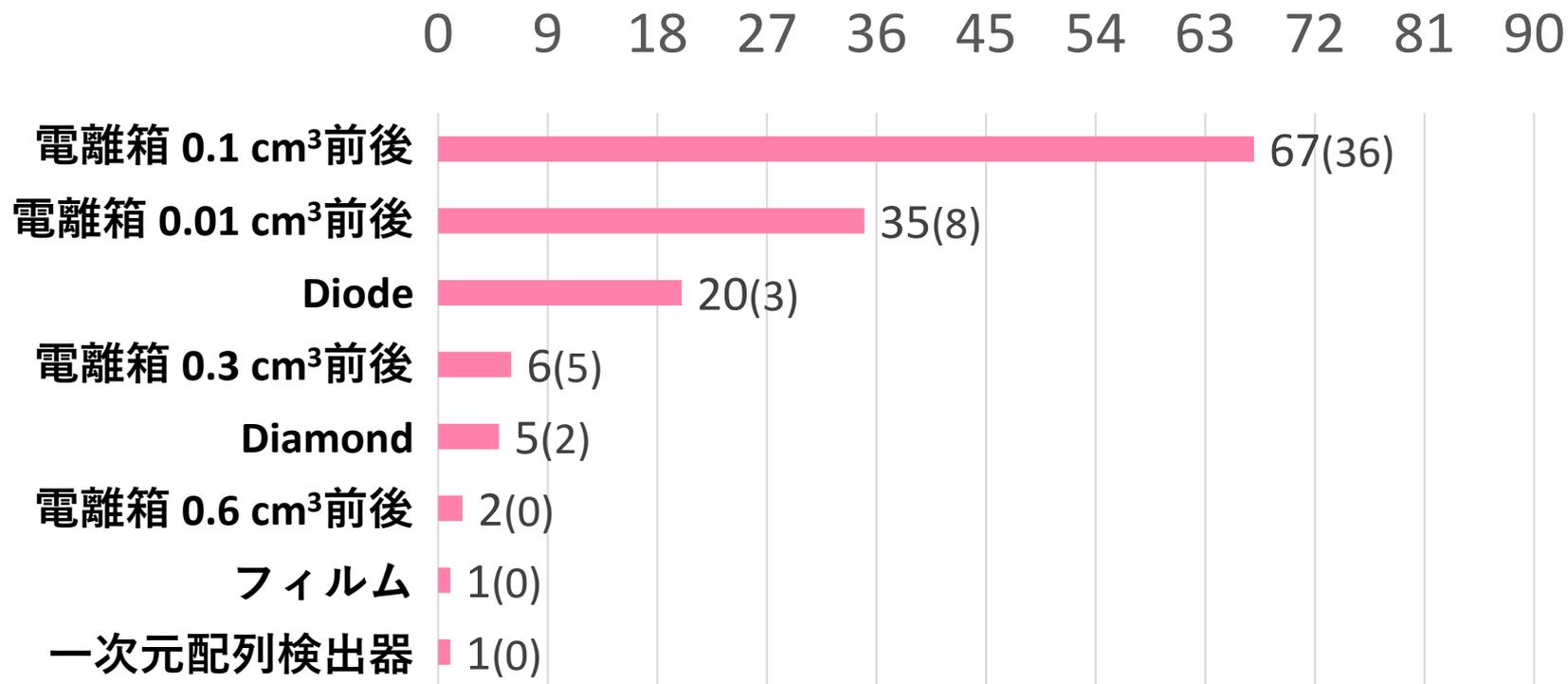
※ 1施設のみ両方の補正を行った

- 約40%の施設が複数の検出器を使用した
- 2施設を除いて電離箱線量計を使用していたが、多くの施設は補正を行わなかった

4-1 OCR測定に使用した検出器

全88施設 複数選択可

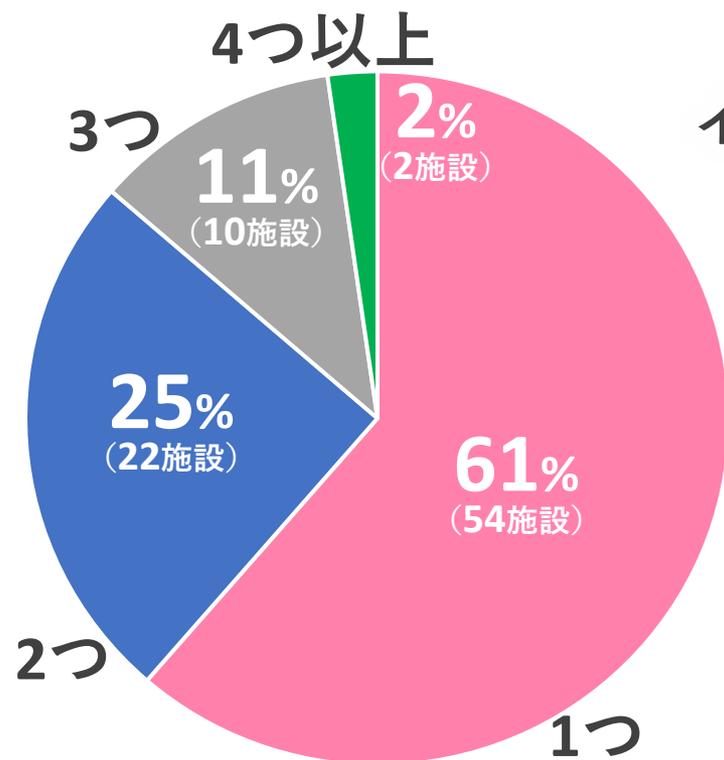
括弧内の数字はその検出器のみを使用した施設数



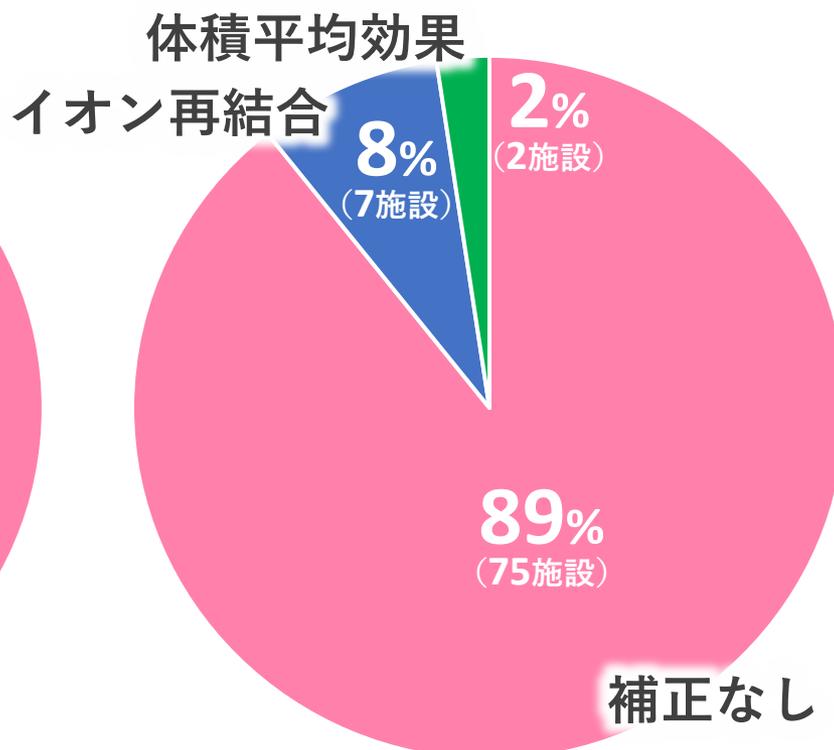
- 0.1 cm³前後や0.01 cm³前後の小さい電離箱線量計が多い
- 多くの施設がPDD測定と同じ検出器を使用

4-1 OCR測定に使用した検出器数と補正

全88施設



電離箱線量計を使用した全83施設 複数回答可

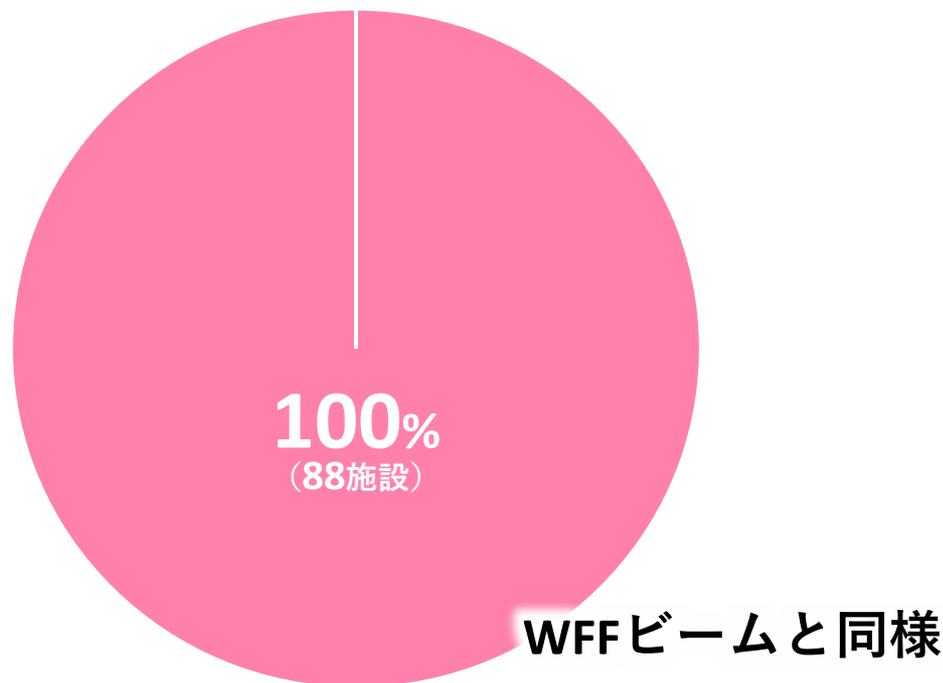


※ 1施設のみ両方の補正を行った

- 約40%の施設が複数の検出器を使用した
- 5施設を除いて電離箱線量計を使用していたが、多くの施設で補正は行わなかった

4-1 コミッショニング項目と許容値

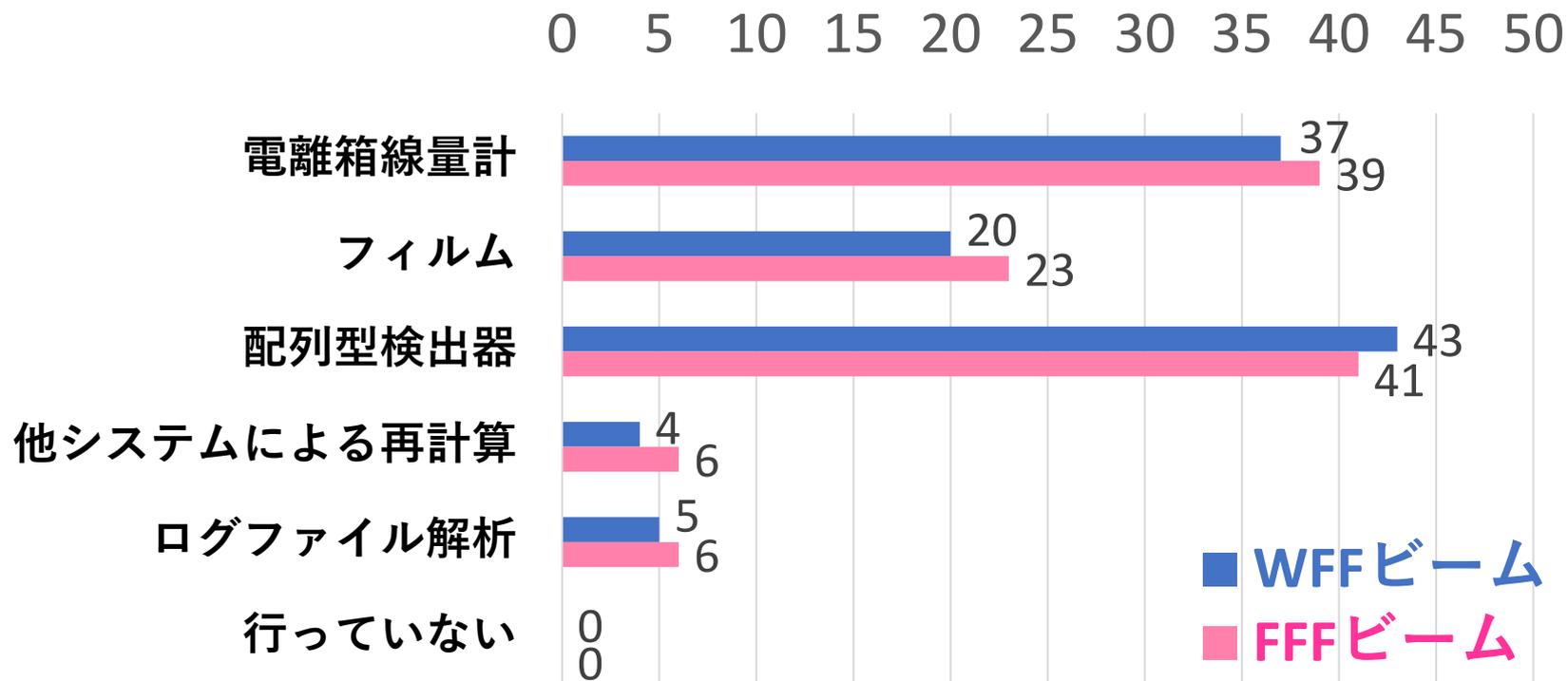
全88施設



すべての施設がWFFビームと同様の項目、許容値を設定し
コミッショニングを行った

4-2 Patient Dosimetric QA | IMRT

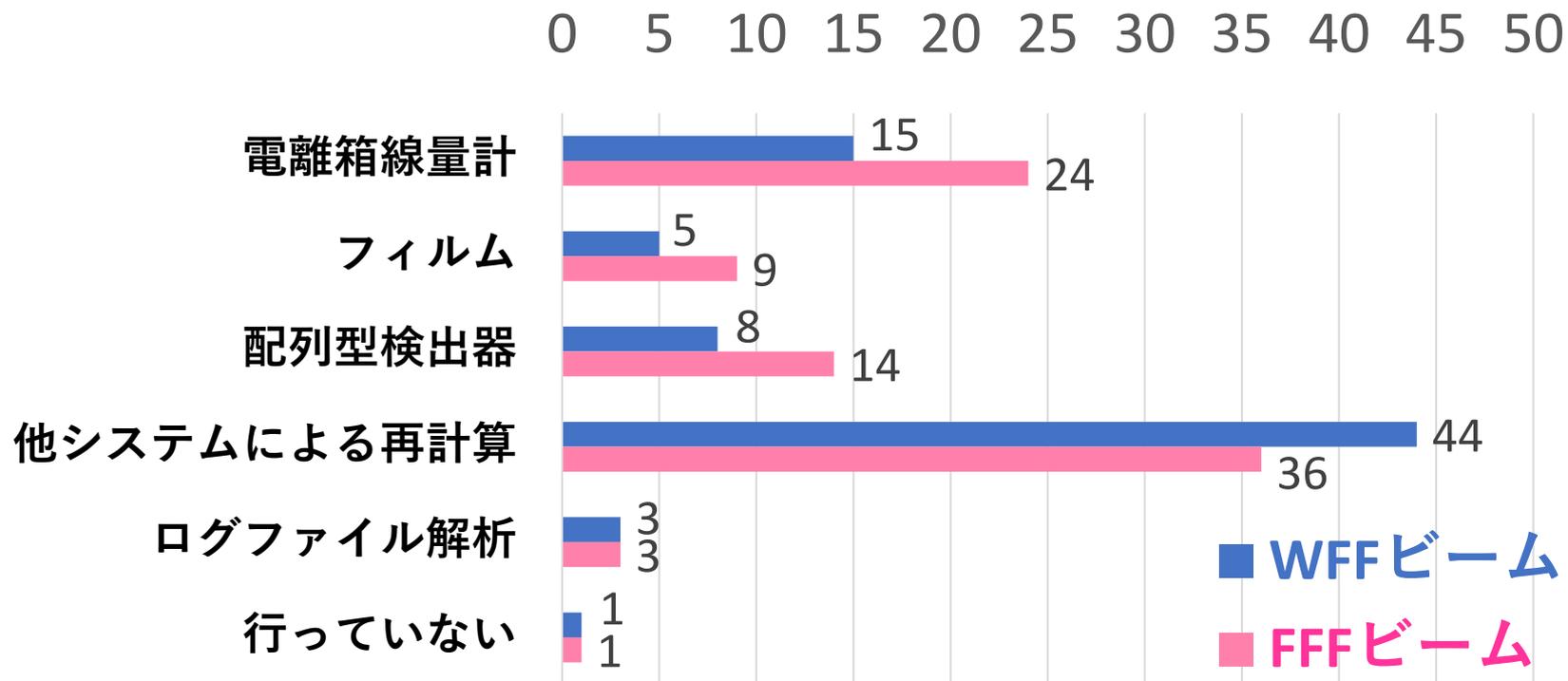
臨床使用していない、検討中の施設を除いた全46施設 複数選択可



多くの施設がWFFビームで行っている検証方法と同様の方法で検証している

4-2 Patient Dosimetric QA | IMRT以外

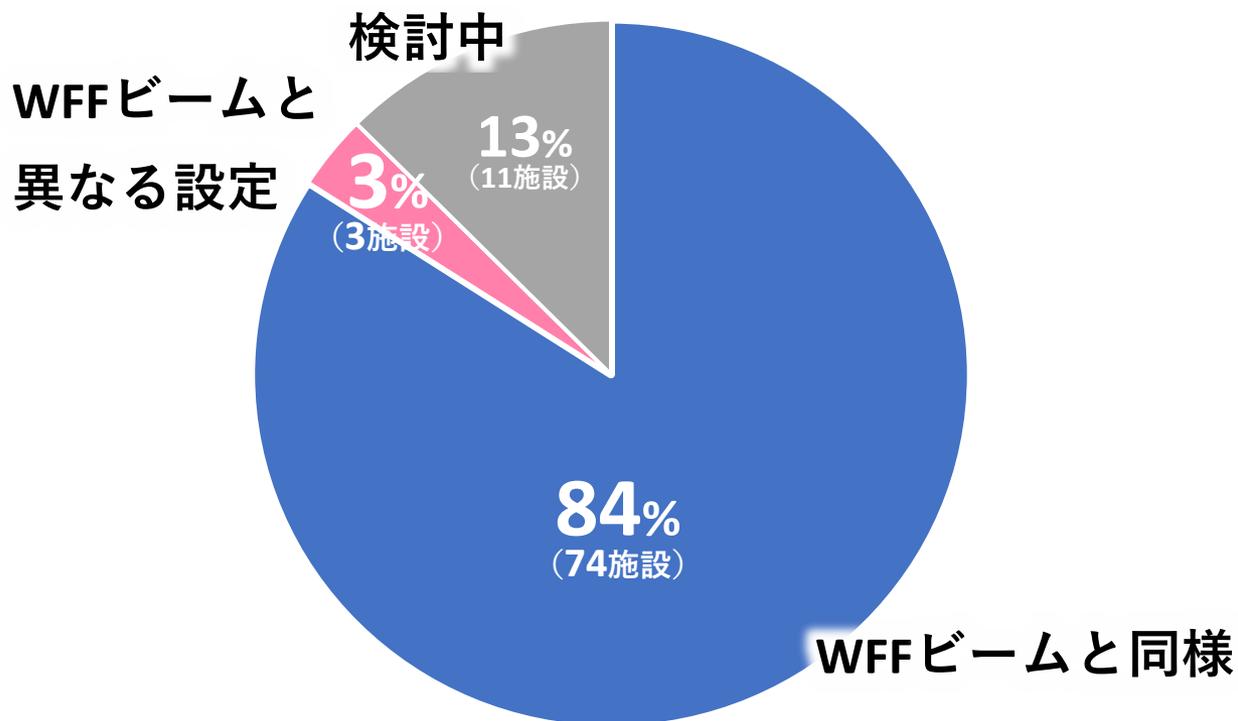
臨床使用していない、検討中の施設を除いた全53施設 複数選択可



WFFビームと同様の検証方法に加え、実測による検証を追加している施設が多い

4-2 精度管理の項目と許容値

全88施設



- 多くの施設はWFFビームと同様に管理している
- 線量プロファイルの解析に、ピーク位置と傾きの項目を追加した施設もあった

小括 2

- 水吸収線量計測には0.6 cm³前後の電離箱線量計を使用している施設が多い
- 標準計測法12に準拠して線質変換係数を算出している施設が多い
- コミッショニングやPatient Dosimetric QA、精度管理は従来のWFFビームと同様としている施設が多い

結論

- 本アンケートの集計結果より、FFFモードを搭載した汎用リニアックの利用状況が把握された
 - ✓ 導入施設の急速な増加
 - ✓ 定位照射への利用
 - ✓ 標準計測法12に準拠した計測法
- 今後もしリニアックの更新が進むにつれ導入施設が増加することが予想され、定期的に状況を把握することが重要である

謝辞

アンケートにご協力いただいた各施設の担当者様

メールによる広報を快く承諾いただいた各研究会の皆様

計測法などご助言いただいた千葉県がんセンター 片寄哲朗様

心より感謝申し上げます