

エレクタリニアックの Flatteining Filter Free(FFF)と国内の状況

エレクタ株式会社アプリケーションフィジックス

1. はじめに

医療用リニアックでは、光子フルエンスを均一にする目的でフラットニングフィルタが使用されてきましたが、1990年代からフラットニングフィルタを除いたフラットニングフィルタフリービームについての研究が行われて来ました。このフラットニングフィルタを除く照射は、Flattening Filter Freeの頭文字をとって“FFF”と呼ばれています。

エレクタ製リニアックにおいても、2008年には既にその性能についての報告¹がなされ、現在では、FFFビームが標準装備になりつつあります。本資料では、エレクタリニアックのFFFの特性や関連した論文を紹介します。

2. エレクタ FFF のパフォーマンス

A. 線量率

FFFの線量率は、通常の2~4倍にも上ります。中心軸における最大線量率は以下の通りです。

6 FFF : 1400±10 % [MU/min]

10FFF : 2200±10 % [MU/min]

この線量率の増加はFFFの最大の利点と言えます。これにより、体動の減少や呼吸停止下の治療における可能性が広がります。

B. 実効エネルギー

エレクタでは、受け入れ試験時の基準として Percentage Depth Dose(PDD)の10 cm 深“PDD(10)”を用いており、FFとFFFで同一の指標を持っています。

6 FFF : 67.5±1.0 % [MU/min]

10FFF : 73.0±1.0 % [MU/min]

¹ Cashmore, Jason. "The characterization of unflattened photon beams from a 6 MV linear accelerator." *Physics in medicine and biology* vol. 53,7 (2008): 1933-46. doi:10.1088/0031-9155/53/7/009

これは、平均エネルギーを上昇させ、且つ Bending Magnet の電子エネルギー選択窓を調整することにより実現します²。この平均エネルギーの上昇によって、Elekta FFF では、通常の線質変換係数とさほど変わらない線質変換係数を得ることができます。

C. プロファイルの定義

設置時において、照射野はフラットの 6 MV で Agility Workflow³を通して決定し、FFF を含む他の照射野に対して特別な調整をすることはありません。受け入れ試験では 6FFF、10FFF のそれぞれで特定の測定点での線量がトレランス内にあることを確認し、プロファイルの形状を確認します。

中心軸上の公称相対線量とトレランス (6FFF)⁴

測定点 (中心軸からの距離 Half field width の%)	公称相対線量(%)	
	照射野 10×10 -cm	照射野 30×30 -cm
20 %	99.0	94.8
50 %	94.8	79.4
80 %	87.2	64.2
絶対公差(±%)	3	3

中心軸上の公称相対線量とトレランス (10FFF)⁴

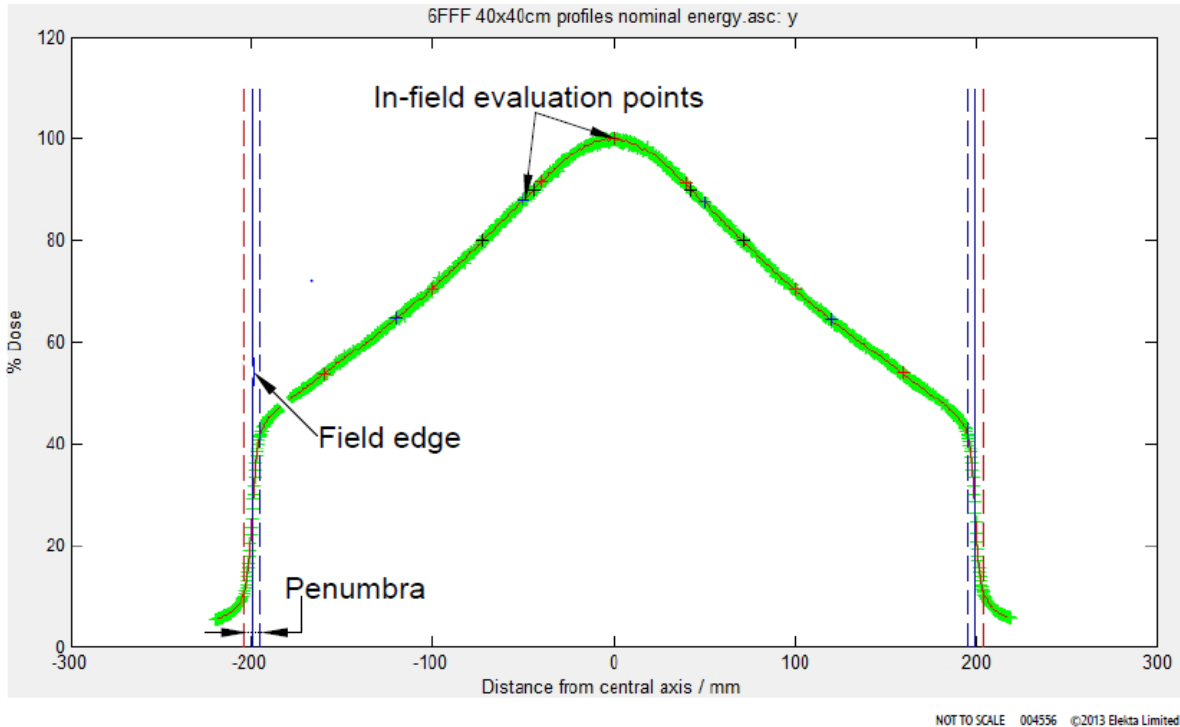
測定点 (中心軸からの距離 Half field width の%)	公称相対線量(%)	
	照射野 10×10 -cm	照射野 30×30 -cm
20 %	98.4	90.5
50 %	91.7	69.2
80 %	81.3	53.1
絶対公差(±%)	3	3

² Paynter, D et al. "Beam characteristics of energy-matched flattening filter free beams." *Medical physics* vol. 41,5 (2014): 052103. doi:10.1118/1.4871615

³ リーフバンクの位置や光照射野と放射線照射野のキャリブレーション、MLC のキャリブレーションといった Agility の一連のセットアップを指します。

⁴ Elekta Medical Linear Accelerator Customer Acceptance Tests, Document ID: 1503568 04, 2014

以下に、FFF のビームプロファイルの例を示します。



D. 表面線量

FFF ではフラットニングフィルタを使用しないため、フラットニングフィルタによるビームハードニングが起こりません。そのため、低エネルギー成分の増加による表面線量の増加が懸念されます。

Elekta 製リニアックの FFF ビームの表面線量を FF ビームおよび Valian 製リニアックと比較した論文⁵によると、Elekta 製リニアックの表面線量は Valian 社製リニアックの表面線量よりもかなり小さいことが示され、FF ビームとの線量差も少ないことが分かりました。

E. 中性子線

10MV を超える高エネルギーを使用する場合、不要な中性子の生成が懸念されます。「B.実効エネルギー」で示したように、エレクトリニアックの FFF ビームは FF ビームの深部線量特性に合わせるように調整されるため、最大エネルギーは FF ビームよりも高くなります。そのため、理

⁵ Imae, Toshikazu et al. "Surface and build-up dose comparison between Elekta 6 MV flattening filter and flattening-filter-free beams using an advanced Markus ionization chamber and a solid water-equivalent phantom." Journal of applied clinical medical physics vol. 21,12 (2020): 334-339. doi:10.1002/acm2.13094

論的には中性子の生成が多くなります。一方で、FFF ビームは中性子の発生源となるフラットニングフィルターが使用されないため、この点での中性子の生成は少なくなります。このトレンドに焦点を当てた論文⁶では、Versa HD の FFF ビームにおける MU 当たりの中性子線量は、FF ビームの 60%~80%程度であることを示しました。

3. 線量校正についての関連論文

国内では FFF に関する計測法はまだ確立されていませんが、2016 年に FF と FFF の違いを補正する方法の提案がありました。

Katayose, Tetsurou et al. Igaku butsuri : Nihon Igaku Butsuri Gakkai kikanshi = Japanese journal of medical physics : an official journal of Japan Society of Medical Physics vol. 36,2 (2016): 79-84. doi:10.11323/jjimp.36.2_79

米国では、すでに FFF を考慮したプロトコルが出ており、2017 年には和訳も出ています。

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. doi:10.1118/1.4866223

関連して、FFF ビームに関する AAPM のレポートをご紹介します。メーカーごとのリニアックにおける FFF の仕組みから、受け入れ試験、コミッショニングについて書かれています。

Xiao Y, Kry SF, Popple R, et al. Flattening filter-free accelerators: a report from the AAPM Therapy Emerging Technology Assessment Work Group. J Appl Clin Med Phys. 2015;16(3):5219. Published 2015 May 8. doi:10.1120/jacmp.v16i3.5219

上記レポートでは、FFF のコミッショニングにおいて考慮すべき点として以下の項目を上げています。

- (1) 線質：従来の $TPR_{20,10}$ で評価した場合 k_Q を過大評価する可能性がある。
- (2) dose per pulse (DPP) : DPP の増加により、イオンの再結合が増加するためイオン再結合補正係数 P_{ion} が大きくなる可能性がある。

⁶ Delany, Richard, and G. Samuel J. Tudor. "A relative comparison of neutron production between conventional and energy-matched flattening-filter-free (FFF) 10MV modes for an Elekta linear accelerator." Biomedical Physics & Engineering Express 5.4 (2019): 047006.

(3) プロファイルの形状：体積平均効果により、中心軸上の線量を過小評価する可能性がある。小型の電離箱を推奨する。

4. 国内の状況

2019年7月18日～9月18日に、医学物理学会にて「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」が行われました。このアンケート結果⁷によると、FFFビームを有する施設のうち73%の施設がFFFを臨床使用しており、症例に限らず定位照射野で選択されていることが分かります。

基準条件の水吸収測定においては、72%の施設が0.6 cc前後の電離箱線量計を使用し、うち62%が体積平均効果の確認を行ったとのことでした。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ようです。国内での標準化に注目したいです。

⁷ 兒玉匠, 安井啓祐, 高倉亨, 西岡史絵, 宮浦和徳, 中村光宏. 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), https://www.jsmp.org/wp-content/uploads/FFF_Survey_QAQC.pdf