原 著

レーストラックマイクロトロンにおける電子線の深部線量特性

佐藤智春

論文受付
2001年2月14日論文受理
2001年9月28日

Code No. 853

国立がんセンター中央病院放射線治療部
(現 国立病院東京医療センター放射線科)

緒 言

スウェーデンのScanditronix社マイクロトロンMM50(以下, MM50)は, 1984年12月, 世界で初めて同国のウメオ大学に設置された。その後, 米国に2台, スウェーデンにもう1台, オランダに1台設置され, 1999年3月, 世界で6台目が当センターに設置された。MM50は, 現在医療用の電子を加速する装置としては, 最大エネルギーである50MeVの電子線および50MVのX線を取り出すことができる, レーストラック形のマイクロトロンである。当センターのMM50は2ガントリ方式で, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 40, 50MeVの計8種類の電子線及び10, 20,

25, 50MVの計4種類のX線を使用することができる。Fig. 1にマイクロトロン本体, ビームトランスポートシステム, スキャンビームシステム, 照射ヘッドからなるMM50のシステム構成を示す。これらすべてがコンピュータ制御されており, 多種多様なインターロック機構により, 高い安全性を保つことができる。また治療パラメータにおいても, エネルギーの選択, 投与線量, ガントリ角度, コリメータ角度のみならず, 寝台位置の認識および移動についてもコンピュータによって制御されており, 高度な照射方法を可能にしている。

Depth Dose Characteristics of Electron Beams Released from a Scanning Type Racetrack Microtron Treatment Machine

TOMOHARU SATO

Radiation Oncology Division, The National Cancer Center Hospital
(Present address: Department of Radiology, National Tokyo Medical Center)

Received Feb. 14 2001; Revision accepted Sept. 28, 2001; Code No. 853

Summary

The Racetrack Microtron MM50 capable of taking out x-rays and electron beams having a high energy of up to 50 MeV was evaluated by a dosimetry of electron beams in comparison with Microtron MM22. The MM50 flattens the intensity of electron beams by using the beam scanning method while the MM22 utilizes the flattening-filter method. A percentage depth dose (PDD) curve was obtained through the dosimetry of electron beams using a water phantom. As compared with the MM22, the MM50 emits an electron beam that has an energy much closer to the nominal one, that is less contaminated by x-rays, and whose intensity decreases steeply down to near zero on the PDD curve. The MM50 has an electron beam dose distribution that is practically useful since the dose tends to be concentrated on the target volume.

Key words: Radiotherapy, Dosimetry, Electron beam characteristics, Racetrack microtron, Beam scanning別刷資料請求先: 〒105-0021 東京都目黒区東が丘2-5-1
国立病院東京医療センター 放射線科 佐藤智春 宛

Fig. 1 A schematic view of the MM50 system.

The electron beam is deflected by a main deflection magnet and accelerated after re-incidence into a linear accelerator. At the same time, the electron beam is extracted by using a beam extracting electromagnet. The electron beam is then transported by a beam transport system comprising a switching magnet, a quadrupole electromagnet, and a bending magnet.

1. MM50の基本構成

1-1 マイクロトロン本体

MM50は、電子銃から供給された電子が、マイクロトロン本体に内蔵されている5MeVのリニアックによって加速され、両側に置かれた偏向電磁石(main magnet)によってレーストラック状の軌道を取り、再びリニアックに入射して電子が加速される再循環加速構造となっている。そのエネルギーは5MeVの倍数で増え、最大50MeVまで加速される。そして、取り出したいエネルギーの軌道上にあるビーム取り出し用電磁石(extraction magnet)の磁場を強くすることで、それまでmain magnet以外の場所では直進していた電子の軌道が偏向して、ビームを取り出すことができる(Fig. 1)。

1-2 ビームトランスポートシステム

マイクロトロン本体から取り出された電子は、スイッチングマグネット(switching magnet)によりどちらか片方の治療室にビームが振り分けられ、電子の拡散を抑え収束させるための四極子電磁石、ビームの進行方向を曲げるためのベンディングマグネット(bending magnet)を含むbeam transport systemにより治療用ガントリへ輸送される(Fig. 1)。

1-3 スキャンビーム方式

MM50はビームの平坦化に、フラットニングフィルタではなく、スキャンビーム方式を採用している。このスキャンビーム方式は、2台の走査用電磁石

Fig. 2 An explanatory diagram of scan patterns for x-rays and electron beams.

The scan pattern of x-rays is a circular orbit, while the beam intensity is flattened by raster scanning for electron beams.

(scanning magnet)によりビームの偏向を行い、照射ヘッドから射出したペンシル状のビームをフィールド内である決まったスキャンパターンで走査し、1スキャン(1サイクル)終了時にトータルで平坦な照射野が得られる仕組みになっている。Fig. 2にX線および電子線のスキャンパターンを示す。X線はサークル状に走査し、半値幅10~30cm程度の比較的大きなビームスポットで、1サイクル当たり50~65ビームパルス(ポイント)で走査する。また、1サイクル(1スキャン)に要する時間は0.2~0.4秒である。一方、電子線はテレビの走査線のようなラスタ状に走査し、半値幅5~7cm程度の小さなビームスポットで、1サイクル当たり500~800ビームパルス(ポイント)で走査する。また、1サイクル(1スキャン)に要する時間は3~4秒である。なお、電子線の12MeVは15MeVの電子線をグラファイトで減速して取り出している。そのスキャンパターンは、サークル状でビームスポットの半値幅20cm、1サイクル当たり156ビームパルス(ポイント)と他の電子線とは傾向が異なり、むしろX線に近いスキャンビーム方式となっている。

1-4 照射ヘッドの構造

MM50は、スキャンビーム方式により照射野の平坦度を保っているため、理論的には散乱箔および平坦化フィルタは不要である。これら散乱箔および平坦化フィルタを使用せずに、照射ヘッドから射出したビームスポットの半値幅は10MeVで5.8cm⁸⁾であるが、エネルギーが高くなるほど半値幅は小さくなり、15~50MeVでは3.5~1.1cm⁸⁾となる。そこで、これらを実用的な幅に広げるために、非常に薄い散乱箔(15~25MeVは真鍮箔0.025mm、30~50MeVは金箔0.025mm)を使用してビームスポットを半値幅

7.0~4.3cm⁸⁾に拡散させている。

また、照射ヘッド内すべてがヘリウムガスで充たされていて、空気による多重散乱により、スキャンビームが横方向に拡がることを抑制している。なお、Mastersonら⁸⁾の報告によると、10~50MeV電子線のビームスポットの半値幅は、空気に対してヘリウムガスでは約60%小さくなる。

以上述べてきたようにMM50は、リニアックとレーストラック状の軌道を作るための2台のmain magnetを組み合わせた特殊な加速構造により、最大で50MeVの電子線を取り出すことが可能である。また照射野の平坦化にスキャンビーム方式を取り入れるなど、他の加速器とは異なる点が多い。とくに、散乱箔および平坦化フィルタが不要であること、および照射ヘッド内がヘリウムガスで充たされていることなど、特徴ある照射ヘッド内の構造により、良好な線質特性を有する電子線が得られる⁶⁾とされている。そこでMM50の電子線について、深部量百分率(percentage depth dose, PDD)曲線等を測定し、そのパラメータを求めることで、ビーム中心軸上における深部特性について評価した。

2. 方 法

2-1 実験器材

PDD曲線の測定には三次元走査式水ファントムScanditronix社RFA300Plus Ver5.2(以下、RFA)、フィールド線量計RKチェンバ(容積0.12cm³)およびNACP02チェンバ(容積0.16cm³, 窓厚0.5mm)を使用した。平坦化フィルタ方式の加速器では、基準検出器により加速器の出力変動の影響を補正しているが、スキャンビーム方式であるMM50は、加速器の出力変動の補正に、加速器内部のモニタ線量計の電離電流を利用している。また、スキャンビーム方式の場合、1スキャンが完全に終了した時点で平坦な照射野が得られるため、整数倍のスキャン数で線量測定を行う必要がある。RFAは、フィールド線量計の位置制御をスキャンビームと同期させて行っている。それゆえに、スキャンビーム方式では測定回数およびポイント数のわりには、非常に測定時間がかかる(Table)。

また、表面線量の評価において、水ファントムでは表面張力により正確な測定が困難であることから、RMI社Solid Water457およびMix-Dpを使用した。なお、この固体ファントムに使用可能な当センターの線量計はPTW社23343Markusチェンバ(容積0.055cm³, 膜厚0.03mm)、電位差計はNE社FARMERDO SEMETER2570/1であり、これらを使用した。

2-2 測定方法

RFAにRKチェンバを使用し、電子線のエネルギー10, 12, 15, 20, 30, 40, 50MeV、照射野10×10cm²にてPDD曲線を測定した。なお、測定は通常の使用状態で行った。つまり、10, 12, 15MeVは可変アプリケーションを装着、20, 30, 40, 50MeVについてはアプリケーションを装着せず、照射ヘッド内のブロックコリメータおよびマルチリーフコリメータ(MLC)により照射野を形成し測定した。

比較のため当センターの円形マイクロトロン、Scanditronix社MM22の電子線3, 5, 7, 9, 11, 13, 16, 18, 20, 22MeVについて、可変アプリケーションを装着し照射野10×10cm²にて、PDD曲線を測定した。なお、チェンバの選択は、「放射線治療における高エネルギーX線および電子線の吸収線量の標準測定法」¹⁾に従い、平均入射エネルギー10MeV以下についてはNACP02チェンバ、10MeVを超える場合はRKチェンバを使用した。

固体ファントムとMarkusチェンバを使用し、表面および最大線量深で測定し、PDDで表面線量を評価した。チェンバの極性効果を考慮して¹⁰⁾、正負両方の印加電圧で測定し、その平均値を測定値とした。

2-3 PDDパラメータの算出

PDDの比較評価をするうえで、いくつかのパラメータが考えられるが、RFAが有する解析機能を利用し、AAPM TG25⁷⁾等で示されている以下のパラメータを用いた。Fig. 3にPDD曲線とそのパラメータの関係を示す。

Table Measurement conditions of PDD curves for electron beams from MM50 by using RFA300Plus.

Energy (MeV)	10	12	15	20	30	40	50
Time per scan (s)	3.87	0.78	3.87	3.87	3.87	3.87	2.59
Number of sampling per point	3	5	3	3	3	3	3
Number of point	65	82	95	60	58	80	94
Time (m)	16.8	6.4	24.5	15.5	15.0	20.6	16.2
Interval (mm)	1	1	1	2	3	3	3

- (1) E_{p0} : 表面における最頻エネルギー (MeV) (ICRU Report35⁴⁾ から引用).

$$E_{p0} = 0.22 + 1.98R_p + 0.0025R_p$$

R_p (実用飛程) は線量下降部における変曲点

Fig. 3 A percentage depth dose (PDD) curve with each parameters for electron beams.

D_x : Photon background; R_p : Practical range; R_q : Maximum range; R_{90} : Depth at a 90% level of the maximum dose (therapeutic range); G_0 : Gradient at the decreasing part of dose curve.

の接線が, D_x を通る横軸に平行な直線と交差する点の深さ.

- (2) D_x : フォトンバックグラウンド (%).
最後の測定点での PDD 値.
(3) G_0 : 線量下降部の勾配.

$$G_0 = R_p / (R_p - R_q)$$

R_q (最大飛程) は線量下降部における変曲点の接線と, $D_{\max}$ を通る横軸に平行な直線との交点における深さ. なお, $D_{\max}$ は最大線量深での PDD 値 (100%).

- (4) R_{90} : 90% 線量レベル深 (mm) (治療飛程).

3. 結果

2-2により得たMM50およびMM22の電子線のPDD曲線をFig.4に示す.

3-1 表面における最頻エネルギー (E_{p0})

Fig. 5に公称エネルギーと E_{p0} の差を示す. MM50はその差0.20~8.68%, 平均2.11%, MM22は1.41~24.62%, 平均6.10%であり, MM50はMM22と比較して明らかに差が小さかった. 特に10MeVにおいてその差は0.20%であり, E_{p0} は公称エネルギーに非常に近い値を示した.

Fig. 4 PDD curves of electron beams for MM50 and MM22.

The curves were obtained through measurements in normal operating conditions that are, with a variable applicator installed both for MM22 in the entire energy range and for MM50 in the range of 10 to 15 MeV and with a multileaf collimator (MLC) installed inside the treatment head instead of an applicator for MM50 in the range of 20 to 50 MeV. The measurements were made on a water phantom by using the NACP02 chamber for a mean energy at the phantom surface not higher than 10 MeV and by using the RK chamber for a mean energy at the phantom surface higher than 10 MeV.

Fig. 5 The difference between the nominal energy and the most probable energy at the phantom surface for electron beams from MM50 and MM22. The 12 MeV electron beam from MM50 was obtained by decelerating a 15 MeV electron beam by using a graphite. MLC (Multileaf collimator).

3-2 フォトンバックグラウンド(D_x)

Fig. 6に D_x と電子線エネルギーとの関係を示す。MM50の D_x は0.7~3.2%, MM22は0.9~5.8%となり、ともにエネルギーが高くなると D_x は大きくなる。また、MM50はMM22と比較して有意に D_x が小さく、制動放射線による汚染が非常に少ない。

3-3 表面線量(D_s)

Fig. 7に表面線量(D_s)とエネルギーとの関係を示す。MM50の D_s は82.70~92.81%, MM22は74.36~94.11%であった。可変アプリケーションを装着した状態、つまりMM22すべてのエネルギーとMM50の10~15MeV(82.70~92.23%)はエネルギーが高くなるにつれて D_s は大きくなった。一方、アプリケーションを装着せず、照射ヘッド内のMLCで照射野を形成したMM50の20~50MeVにおいては92.13~92.81%であり、大きな変化はなかった。

3-4 90%線量深(R_{90})

Fig. 8に治療飛程である R_{90} を示す。 R_{90} についてMM50は33.0~107.2mm, MM22は10.1~60.7mmであり、より高いエネルギーの電子線を出すことができるMM50はMM22と比較して、かなり深部にまで治療領域が及んでいた。

3-5 線量下降部の勾配(G_0)

Fig. 9にPDD曲線における線量下降部の勾配(G_0)を示す。同じエネルギー付近にて比較するとMM50(10MeV 3.05, 15MeV 3.23, 20MeV 3.15), MM22(9MeV, 2.73, 16MeV, 3.06, 20MeV, 2.66)とな

Fig. 6 The comparison of the photon background by the PDD for electron beams from MM50 and MM22. The 12 MeV electron beam from MM50 was obtained by decelerating a 15 MeV electron beam by using a graphite. MLC (Multileaf collimator).

り、明らかにMM50のほうが G_0 は大きく、線量の低下が急激であった。

3-6 12MeVの電子線

MM50の12MeV電子線は、15MeVの電子線をグラフファイトで減速して取り出している。12MeVについて公称エネルギーと E_{p0} との差は8.68%, D_x は1.5%, D_s は91.73%, G_0 は2.69となった。Fig. 5~9において、MM50の同一エネルギー付近(10, 15MeV)と比較した場合、公称エネルギーと E_{p0} との差は大きく、 G_0 は小さくなり、MM50の他エネルギーの電子線とは傾向が違っていた。

4. 考 察

4-1 表面における最頻エネルギー(E_{p0})

公称エネルギーと E_{p0} の差について、MM50はMM22と比較して、明らかに差が小さかった。MM22は加速構造上、エネルギーの単色性に優れた電子線を取り出すことができる。マイクロトロン本体で加速された直後の電子線について、具体的にエネルギースペクトルの半値幅で表すとMM50は300keV²⁾, MM22は35keV¹⁾であり、この段階ではMM22のほうがエネルギースペクトルの半値幅は小さい。しかし、その後MM22の電子線は散乱箔および平坦化フィルタを通過して照射ヘッドから射出する。一方MM50は、スキャンビーム方式の採用により10MeVの電子線はダイレクトに、15MeV以上の電子線は非常に薄い散乱箔のみを通過して照射ヘッドから射出する。そのために、エネルギー分布の広がる要素が少ないことが、MM50の電子線について公称エネルギーと E_{p0} の差がMM22よりも小

Fig. 7 The comparison of the surface dose by the PDD for electron beams from MM50 and MM22. The surface dose was measured by using a water-equivalent solid phantom and a Markus chamber. The 12 MeV electron beam from MM50 was obtained by decelerating a 15 MeV electron beam by using a graphite. MLC (Multileaf collimator).

Fig. 8 The comparison of R_{90} for electron beams from MM50 and MM22. The 12 MeV electron beam from MM50 was obtained by decelerating a 15 MeV electron beam by using a graphite. MLC (Multileaf collimator).

Fig. 9 The comparison of G_0 for electron beams from MM50 and MM22. The 12 MeV electron beam from MM50 was obtained by decelerating a 15 MeV electron beam by using a graphite. MLC (Multileaf collimator).

さい要因と考えられる。これは、散乱箔を通過せずダイレクトにビームが取り出される10MeVの電子線について、公称エネルギーと E_{p0} の差が0.20%と、MM50の他エネルギーの電子線と比較して、約10分の1しかないことから明らかである。

4-2 フォトンバックグラウンド(D_x)

電子線は、エネルギーが高くなるほど制動放射によるX線の割合が増すため、 D_x は大きくなる。装置別にみると、MM50、MM22ともに、この傾向が表れている。

MM22は、散乱箔により電子ビームを拡散し、フラ

ットニングフィルタにより照射野の平坦化を行う2重フォイルシステムを採用している。しかし、2重フォイルシステムは20MeV以上の電子線における高い制動放射の割合が指摘されている⁹⁾。一方、MM50はスキャンビーム方式の採用により、2重フォイルシステムが不要である。今回の実験でもMM22はMM50よりも D_x は大きく、20MeVにおける制動放射によるX線の割合は、MM22が5.5%であるのに対し、MM50では1.0%と非常に小さい値を示した。

4-3 表面線量(D_s)

D_s について、可変アプリーケータを装着した場合、エネルギーが高くなるに従い、アプリーケータにより散乱された電子線が増大し、 D_s の増加に寄与しているものと思われる。また、MM50は20MeV以上の電子線において、通常、照射ヘッド内のMLCのみで照射野を形成する。Fig. 7に示すように、20MeV以上の電子線においては、エネルギーが高くなっても D_s の変化がほとんどなく、照射ヘッド内のMLCは、エネルギーの増加によって表面線量に影響しないことが分かる。

4-4 90%線量深(R_{90})

R_{90} はAAPM TG25⁷⁾において、電子線の深部線量プロファイルの臨床における有用な尺度として定義されている。MM50の30, 40, 50MeVについて R_{90} は、それぞれ、86, 97, 107mmとなり、深部にビームを十分到達させることができるため、これらの電子線による体幹部中心に対する照射が可能であると思われる。

Fig. 10 PDD curves for electron beams from MM50 (10 MeV) and MM22 (9 MeV and 11 MeV). The measurements were made with variable applicators attached for both MM50 and MM22.

Fig. 11 PDD curves for electron beams from MM50 and MM22 at the same energy of 20 MeV. The measurements were made with a variable applicator installed for MM22 and with a multileaf collimator (MLC) installed inside the treatment head instead of an applicator for MM50.

4-5 線量下降部の勾配 (G_0)

散乱箔がPDD曲線に与える影響については「放射線治療における高エネルギーX線および電子線の吸収線量の標準測定法」¹¹⁾等に述べられている。散乱箔の厚さが増すと、電子線のエネルギー拡散と角度散乱が増すので、線量下降部の勾配が緩やかになる。MM50は、10MeVの電子線では散乱箔がなく、また、15MeV以上の電子線においても非常に薄い散乱箔を使用しているため、線量下降部の勾配が急峻である。したがって、放射線感受性の高い正常器官の近傍での照射が可能で、標的体積へ集中して線量を投与することができると思われる。

4-6 可変アプリケーション装着時の10MeV付近におけるMM50およびMM22のPDD曲線

Fig. 10に可変アプリケーションを装着したときの、MM50およびMM22の電子線について同一エネルギー付近のPDD曲線を示す。MM50の10MeVとMM22の9および11MeVにて、それぞれ、 D_x は0.7%, 1.4%, 2.4%, G_0 は3.05, 2.73, 2.80, R_{90} は33.0mm, 28.2mm, 36.1mmとなった。これらの結果から、10MeV付近におけるMM50の電子線はMM22と比較して、明らかに制動放射線による汚染は小さく、線量下降部の低下が急峻である。これらの要因として、MM50の10MeV電子線は、散乱箔および平坦化フィルタを通過せずに、ビームはダイレクトに照射ヘッドから射出するため、これらの物質による制動放射およびエネルギーの拡がりによる影響がないことが考えられる。なお、治療飛程 R_{90} は、10MeV付近においてMM50とMM22の間

に、有意な差は認められなかった。また、固体ファントムにより測定した表面線量 D_s は、MM50の10MeVとMM22の9および11MeVについて、82.70%, 81.48%, 86.11%となった。これらの結果は、MM50とMM22の間に有意な差は認められず、両者ともに、可変アプリケーションからの散乱電子等の影響を同様に受けているためと思われる。

4-7 同一エネルギー(20MeV)におけるMM50およびMM22のPDD曲線

Fig. 11に同一エネルギー(20MeV)におけるMM50およびMM22の電子線のPDD曲線を示す。なお、MM50はMLCで照射野を形成し、MM22は可変アプリケーションを装着した、実務的な状態における比較である。MM50とMM22についてそれぞれ、 D_x は1.0%, 5.5%, G_0 は3.15, 2.66, R_{90} は66.0mm, 58.1mmとなった。これらの結果から、20MeVにおけるMM50の電子線はMM22と比較して、明らかに制動放射線による汚染は小さく、線量下降部の低下が急峻であり、治療領域はより深部に達していた。これらの要因として、MM50の20MeV電子線は、非常に薄い散乱箔のみを通過して照射ヘッドから射出するため、MM22のような平坦化フィルタおよび散乱箔の厚さによる影響がないことが考えられる。また、固体ファントムにより測定した表面線量 D_s は、92.81%, 93.13%となり、若干MM22のほうが高い値を示し、アプリケーション装着による散乱電子の影響が、表面線量を多くしている要因ではないかと思われる。

4-8 12MeV電子線の特性

MM50の12MeV電子線は15MeVの電子線をグラフアイトで減速して取り出しており、PDD曲線から得られたパラメータの比較において、MM50の他エネルギーの電子線とは傾向が違っていた。特に G_0 は2.69となり10MeV, 3.05, 15MeV, 3.23と比較しても明らかにPDD曲線の線量下降部の勾配が緩やかであることが分かる。また、ビームスポットの半値幅について、MM50の他エネルギーの電子線が5~7cmであるのに対し電子線12MeVにおいては20cmあり、幅広いビームスポットとなっている。これは、グラフアイトにより電子線のエネルギー拡散と角度散乱が増加したことによるものと思われる。

5. 結 語

レーストラックマイクロトロンMM50による電子線は、エネルギー分布の広がりが小さく、フォトンバックグラウンドは低く、PDD曲線の線量下降部の勾配は急峻で治療領域は深部にまで行き渡っている。これらの要因として、スキャンビーム方式の採用によりMM50の照射ヘッドには平坦化フィルタ及び散乱箔がない(15MeV以上では非常に薄い散乱箔を使用)こと、またヘッド内での散乱線を軽減するため照射ヘッド内がヘリウムガスで充たされていることが考えられる。MM50の電子線はPDD曲線において急勾配に減少して

ゼロ付近に達し、その線量分布は標的体積に集中するため有用であると思われる。この臨牀的に有意な線質特性を生かした、標的体積への線量の集中性を向上させる照射技術の開発が今後の課題である。最も実用化に近いところでは、照射ヘッド内のマルチリーフコリメータ(MLC)のみで照射が可能な20MeV以上の電子線とX線の併用による、強度変調を加えた照射方法⁵⁾がある。また将来的な構想として、電子線を主体としたスキャンビームの位置制御およびMLCのダイナミックな動きの連動によるIMRT等がある。今後、MM50電子線の線質特性を生かした照射技術の開発を早急に手掛けなければならない。

謝 辞

稿を終えるにあたり、本稿についてご指導をいただいた当院放射線治療部徳植公一医長、当センター放射線治療部技師の皆様、レーストラックマイクロトロンのシステムに関する技術的なご助言をいただいた株式会社日立メディコの杉山勝也氏、三次元走査式水ファントムによるスキャンビーム方式の測定についてご助言をいただいた東洋メディック株式会社の荒木教行氏に深く感謝いたします。

本論文の要旨は第41回秋季学術大会(2000年10月、千葉)において発表した。

参考文献

- 1) Brahme A and Svensson H: Radiation beam characteristics of a 22MeV microtron. *Acta Radiol Oncol*, 18, 244-272, (1979).
- 2) Green MA, Rowe EM, Trzeciak WS, et al.: Design and operation of the 100 MeV Aladdin microtron injector. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 28, 2074-2076, (1981).
- 3) Greening JR: 森内和之, 高田信久訳: 放射線量計測の基礎. 地人書館, 東京, (1990).
- 4) ICRU Report 35, Radiation dosimetry: Electron beams with energies between 1 and 50MeV. International Commission on Radiation Units and Measurements, Bethesda, MD, (1984).
- 5) Karlsson M and Zackrisson B: Exploration of new treatment modalities offered by high energy (up to 50MeV) electrons and photons. *Radiother Oncol*, 43, 303-309, (1997).
- 6) Karlsson M, Nystrom H, and Svensson H: Electron beam characteristics of the MM50 racetrack microtron. *Med Phys*, 19, 307-315, (1991).
- 7) Khan FM, Doppke KP, Hogstrom KR, et al.: Clinical electron beam dosimetry. Report of AAPM Radiation Therapy Committee Task Group No. 25. *Med Phys*, 18, 73-109, (1991).
- 8) Masterson ME, Chui CS, Febo R, et al.: Beam characteristics of a new generation 50-MeV racetrack microtron. *Med Phys*, 22, 781-792, (1995).
- 9) Scharf W: 稲田哲雄監: 遠藤有聲訳: 医生物学用加速器総論. 医療科学社, 東京, (1998).
- 10) 保科正夫, 小川仁司, 笹森浩司, 他: 放射線治療ビームにおける電離箱線量計のヒステリシス現象. *日放技学誌*, 56 (11), 1348-1355, (2000).
- 11) 日本医学放射線学会物理部会編: 放射線治療における高エネルギーX線及び電子線の吸収線量の標準測定法. 通商産業研究社, 東京, (1989).

図表の説明

- Fig. 1 MM50システムの概略図.
電子線は偏向主電磁石の磁力を受けて回転し、リニアックに再入射して加速される。また、ビーム取り出し用電磁石によって外部に電子線を取り出す。その後、電子線はスイッチングマグネット、四極子電磁石、ベンディングマグネットからなるビームトランスポートシステムによって輸送される。
- Fig. 2 X線および電子線のスキャンパターンについての説明図。
X線のスキャンパターンは円軌道、一方電子線はラスタ状にスキャンしてビーム強度を均一にしている。
- Fig. 3 電子線の深部量百分率(PDD)曲線と各パラメータ。
 D_x : フォトンバックグラウンド。 R_p : 実用飛程。 R_q : 最大飛程。 R_{90} : 最大線量の90%レベルの深さ(治療飛程)。 G_0 : 線量下降部の勾配。
- Fig. 4 MM50およびMM22の電子線のPDD曲線。
MM22すべてのエネルギーおよびMM50の10~15MeVは可変アプリケーションを装着し、MM50の20~50MeVについてはアプリケーションを装着せず照射ヘッド内のマルチリーフコリメータ(MLC)により測定した(通常の使用状態)。平均入射エネルギー10MeV以下はNACP02チェンバ、10MeVを超える場合はRKチェンバを使用し、水ファントムで測定した。
- Fig. 5 MM50とMM22の電子線について、公称エネルギーと表面における最頻エネルギーの差。
MM50 12MeVの電子線は15MeVの電子線をグラフィイトで減速して取り出している。MLC(マルチリーフコリメータ)。
- Fig. 6 MM50とMM22の電子線について、PDDによるフォトンバックグラウンドの比較。
MM50 12MeVの電子線は15MeVの電子線をグラフィイトで減速して取り出している。MLC(マルチリーフコリメータ)。
- Fig. 7 MM50とMM22の電子線について、PDDによる表面線量の比較。
水等価固体ファントムとMarkusチェンバを使用して表面線量を測定した。MM50 12MeVの電子線は15MeVの電子線をグラフィイトで減速して取り出している。MLC(マルチリーフコリメータ)。
- Fig. 8 MM50とMM22の電子線について R_{90} の比較。
MM50 12MeVの電子線は15MeVの電子線をグラフィイトで減速して取り出している。MLC(マルチリーフコリメータ)。
- Fig. 9 MM50とMM22の電子線について G_0 の比較。
MM50 12MeVの電子線は15MeVの電子線をグラフィイトで減速して取り出している。MLC(マルチリーフコリメータ)。
- Fig. 10 MM50(10MeV)およびMM22(9MeV, 11MeV)についての電子線のPDD曲線。
MM50, MM22ともに可変アプリケーションを装着して測定した。
- Fig. 11 同一エネルギー(20MeV)におけるMM50とMM22の電子線のPDD曲線。
MM22は可変アプリケーションを装着し、MM50はアプリケーションを装着せず照射ヘッド内のマルチリーフコリメータ(MLC)により測定した。
- Table RFA300PlusによるMM50電子線のPDD曲線の測定条件。