



会期：2006年4月8日
会場：パシフィコ横浜会議センター

モンテカルロ計算を用いた小照射野光子ビームの線量評価

荒木不次男

熊本大学医学部保健学科

Monte Carlo Study on Photon Beams with Small Fields

Fujio Araki

Kumamoto University School of Health Sciences

緒言

近年、定位放射線照射STK(定位手術的照射SRSおよび定位放射線治療SRT)や強度変調放射線治療(IMRT)が高精度放射線治療として普及してきている。これらの高精度照射においては、しばしば側方電子平衡が成立しないような小照射野の光子ビームが用いられる。特に、肺のような低密度の不均質部では二次電子の飛程が長くなり、側方電子平衡が成立しにくくなり、線量プロファイルにおいて平坦な領域が狭くなる。この影響は光子エネルギーの増大にともなって大きくなり、固体検出器による小照射野光子ビームの線量測定を困難にする。

本報告では、高エネルギー加速装置からの光子、電子(陽電子を含む)の物質中での挙動(相互作用)を忠実に表現できるモンテカルロシミュレーション(EGSnrcMP^{1,2}/BEAMnrc^{3,4})コードを用いた小照射野の光子ビームの高精度な線量評価について報告する。特に、モンテカルロ計算は、測定が困難な非電子平衡領域の線量評価、また光子ビームの物理的特性(エネルギースペクトル、フルエンス分布など)や平均制限質量衝突阻止能比などの評価に有用である。

本報告では、小照射野の光子ビームについて以下の項目を言及する。

1. 深部量百分率(PDD)、線量プロファイル(OAR)、出力係数(OPF)の検証
2. 衝突カーマと吸収線量の比較
3. 光子・電子のエネルギースペクトルの変化
4. 水/空気の平均制限質量衝突阻止能比(SPR)の変化

1. 深部量百分率(PDD)、線量プロファイル(OAR)、出力係数(OPF)の検証

本報告で使用したモンテカルロ計算のユーザーコードは、National Research Council in Canada(NRCC)で開発されたEGSnrcMP(DOSRZnrc, SPRRZnrc, FLURZnrc)^{1,2}、BEAMnrc^{3,4}、DOSXYZnrc⁵で、

NRCCのホームページ(<http://www.irs.inms.nrc.ca/BEAM/beamhome.html>)からダウンロード(現在は無料)できる。これらのコードをLinux(Fedora Core 3)OSを用いてインストールし、Pentium IV 3.2GHzのCPUで計算した。

最初に、リニアック[ここでは、Varian Clinac 2100C加速器(Varian Medical Systems, Palo Alto, CA)]のヘッド構造をBEAMnrcコードでシミュレーションした。シミュレーションにおいて重要な因子は、加速器ヘッド内の個々のコンポーネントの実際の幾何学的寸法とその材質である。Varian Clinac 2100CのX線モードにおけるコンポーネントモジュールは、Fig. 1に示すようにターゲット、一次コリメータ、真空窓、平坦度フィルター、モニタ電離箱、ミラー、二次コリメータ、防護窓からなる。ターゲット前面と水ファントム表面の距離(source-to-surface distance, SSD)は100cmである。

BEAMnrcコードでは、各粒子(光子、電子、陽電子)の位置、角度、電荷や重み付けのすべての粒子情報を含んだphase space file³が作成される。本報告では、phase space planeを水ファントム表面に設定した(Fig. 1)。PDDとOARは、作成されたphase space fileを用いてDOSXYZnrcコードで計算される。測定と計算のPDDとOARのコミッシュニングにおいては、両者の差が2%以内で一致するようにターゲットに入射する電子のエネルギーと強度分布を調整した。ターゲットに入射する電子のエネルギー分布(平均エネルギーとその分布幅)と放射状の強度分布については、最も大きな照射野(40×40cm²)においてモンテカルロ計算と測定のPDDとOARが一致するように調整した。これは、大照射野のOARが平坦度フィルターの形状を最も反映し、さらに入射電子の放射状の強度分布の影響を最も受けやすいためである。一方、PDDは入射電子の平均エネルギーに強く依存し、その分布幅にはあまり依存しない⁶⁾。

Fig. 2に, BEAMnrcによるVarian Clinac 2100Cのヘッドの構造と, DOSXYZnrcによる水中での光子の相互作用のシミュレーションを示す. Fig. 3とFig. 4は, 4MVと10MV-X線における計算と測定PDDとOARの比較である⁷⁾. 測定は円筒形電離箱 0.1cm^3 で行った. 計算値は深さ10cmにおいて測定PDD値と一致するようにスケール化した. PDDと各深さでのOARの計算値は, 測定値と2%以内で一致している. 最終的に決定した4MV-X線における入射電子の平均エネルギーとその分布幅は, それぞれ4.2MeVと3%の半値幅 (full-width half-maximum, FWHM) を持ったガウス分布で, 放射状の強度分布はFWHM=1.2mmのガウス分布であった. 一方, 10MV-X線ではそれぞれ10.3MeVとFWHM=3%のガウス分布で, 強度分布はFWHM=1.5mmのガウス分布であった. ターゲットへの入射電子数は, 4MV-X線の照射野 $40\times 40\text{cm}^2$ で 4×10^7 個, 10MV-X線で 1×10^7 個であった. PDDとOARのモンテカルロ計算値の標準偏差は0.5%以内であった.

シミュレーションにおけるパラメータは, $AE=ECUT=0.7\text{MeV}$, $AP=PCUT=0.01\text{MeV}$ である. AEは電子に対する物質データの下限エネルギー(静止エネルギーを含む), ECUTは電子のカットオフエネルギー, APは光子に対する物質データの下限エネルギー(静止エネルギーを含む), PCUTは光子のカットオフエネルギーである. photon interaction forcing³⁾とレーリ散乱については考慮しなかった. シミュレーションのスピードアップのためにvariance reduction technique³⁾を使用した. そのなかで, electron range rejection³⁾で用いたパラメータは, 4MV-X線においてターゲットでESAVE=0.7MeV, 他のコンポネントモジュールではESAVE=1.0MeVであった. 一方, 10MV-X線ではターゲットでESAVE=1.0MeV, 他のコンポネントモジュールではESAVE=2.0MeVであった. ESAVEは制動放射線に対する電子の下限エネルギーである. selective bremsstrahlung splitting (SBS)⁴⁾と呼ばれるvariance reduction techniqueも使用した. SBSにおける最小と最大のsplitting factorは $N_{\min}=10$ と $N_{\max}=100$ であった. 二次電子におけるRussian roulette⁴⁾は使用しなかった.

次に, 小照射野におけるシミュレーションを示す. 小照射野においては, Fig. 1の二次コリメータの下でphase space file 1を作成し, これを各サイズの円形コリメータのシミュレーションに繰り返し使用した. そして, 水ファントムの表面でphase space file 2を作成し, PDDとOARの計算に使用した. Fig. 5とFig. 6は, $9\text{mm}\phi$ と $15\text{mm}\phi$ の円形コリメータにおける4MVと10MV-X線のPDDを示す⁸⁾. 計算値と測定値は2%以

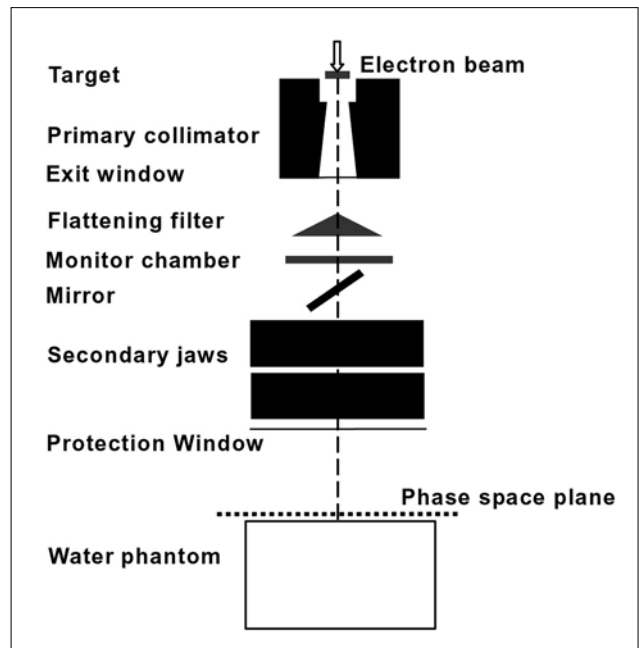


Fig. 1 Illustration of the treatment head and the component modules used in the BEAMnrc simulation for a Varian Clinac machine operated in photon mode. The phase space plane is taken at the surface of a water phantom (Ref. 7)

内で一致している. 測定は円筒形電離箱 0.125cm^3 とSi半導体検出器 (stereotactic field detector, SFD)で行った. Fig. 7は, コリメータサイズ2, 5, 9, $15\text{mm}\phi$ の深さ5cmにおけるOARの比較を示す⁸⁾. 測定はガフクロミックフィルムXRで行った. いずれの照射野においても計算値と測定値はよく一致している. 特に10MV-X線では, 4MV-X線に比べ側方電子平衡が成立していない様子が分かる.

Fig. 8は深さ5cmにおける出力係数の比較を示す⁸⁾. 測定はSFDの値である. 10MV-X線の $2\text{mm}\phi$ を除けば, 測定値と計算値は2%以内で一致している. 同様に, Fig. 9はサイバーナイフ装置における深さ1.5cmでの出力係数を示す⁹⁾. 測定は円筒形電離箱 0.125cm^3 とSFDの値である. コリメータサイズは, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50, $60\text{mm}\phi$ の12種類である. Fig. 9(a)において, SFDと計算値は $5\text{mm}\phi$ と $7.5\text{mm}\phi$ 以外でよく一致しているが, 電離箱では $15\text{mm}\phi$ 以下でその電量容積の大きさのために出力係数が急激に低下する. SFDは $5\text{mm}\phi$ と $7.5\text{mm}\phi$ において, 計算値に比べ出力係数が高い. Fig. 9(b)は検出器領域をSFDと同じSiに置き換えて計算した出力係数を示す. SFD値と計算値は $5\text{mm}\phi$ と $7.5\text{mm}\phi$ においてもよく一致している. Fig. 10は水とSi検出器の線量におけるレスポンスの違いを示す⁹⁾. $5\text{mm}\phi$ では $10\text{mm}\phi$ に比べてSiが水より側方非電子平衡による線量低下の割

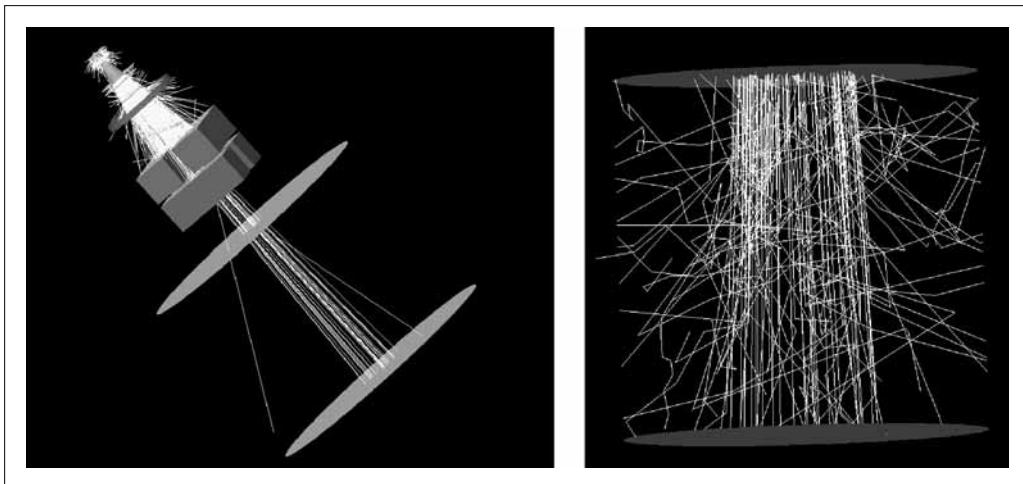


Fig. 2 Head configurations simulated with BEAMnrc and interactions with water by 4 MV photon beams calculated with DOSXYZnrc.

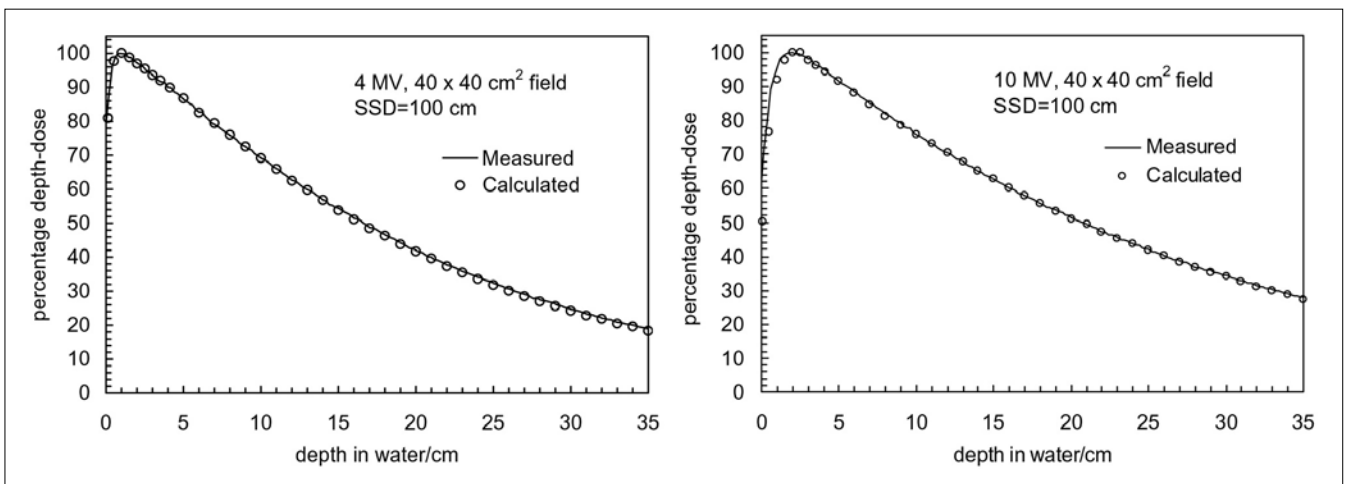


Fig. 3 Comparison of measured and Monte Carlo calculated central axis depth-dose curves for a 40x40 cm² field at 4 MV and 10 MV(SSD=100 cm)(Ref. 7)

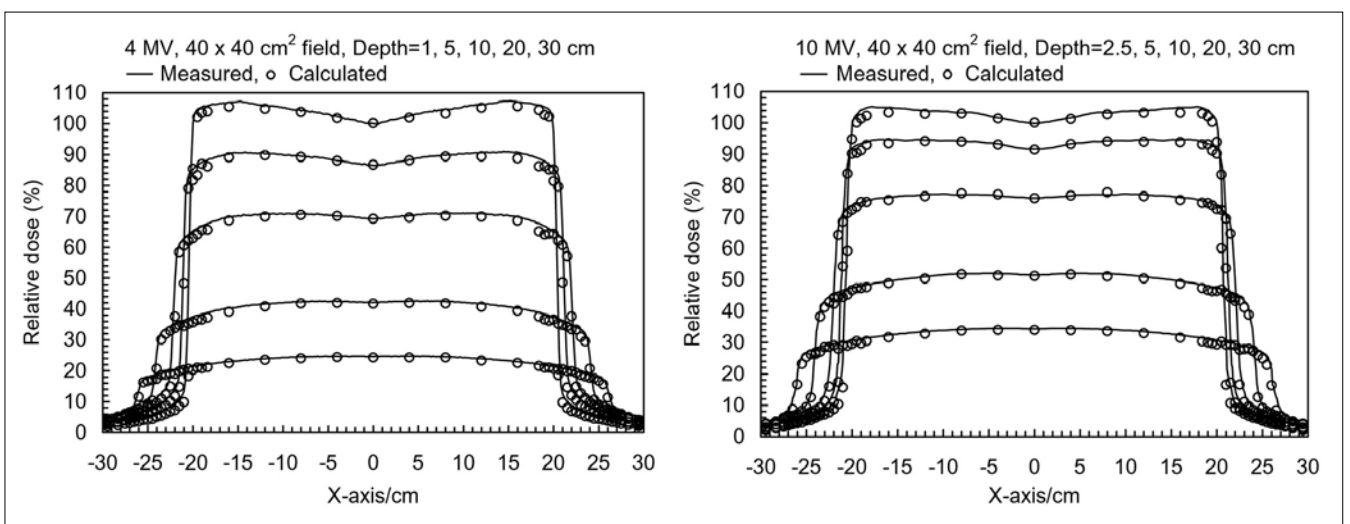


Fig. 4 Comparison of measured and Monte Carlo calculated dose profiles for a 40x40 cm² field at 4 MV and 10 MV, SSD=100 cm. The profiles are at depths of d_{max} , 5, 10, 20 and 30 cm.(Ref. 7)

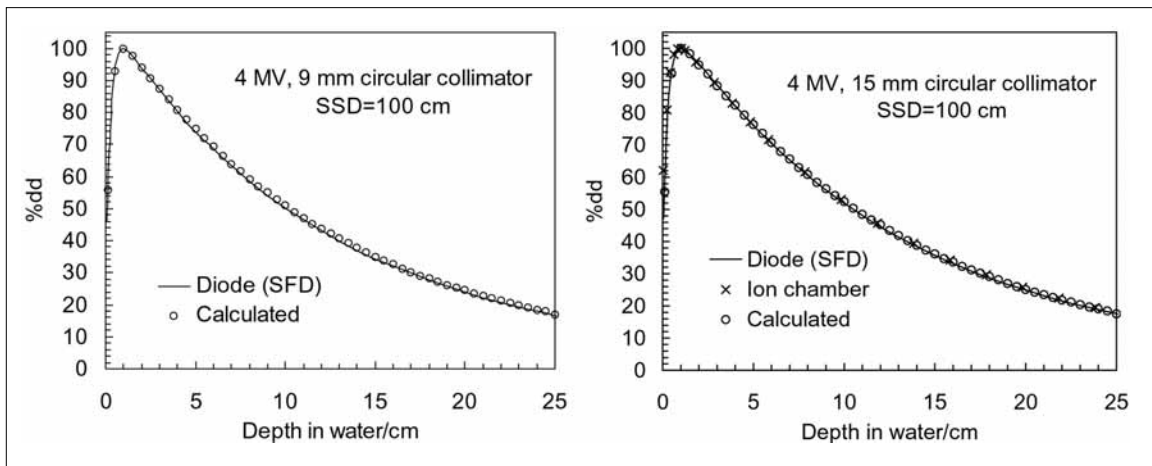


Fig. 5 Comparison of measured and Monte Carlo calculated central axis depth-dose curves for 9 mm and 15 mm circular collimators at 4 MV photon beams, SSD=100 cm. Measurements were performed with a 0.125 cm³ ion chamber and an SFD silicon diode.(Ref. 8)

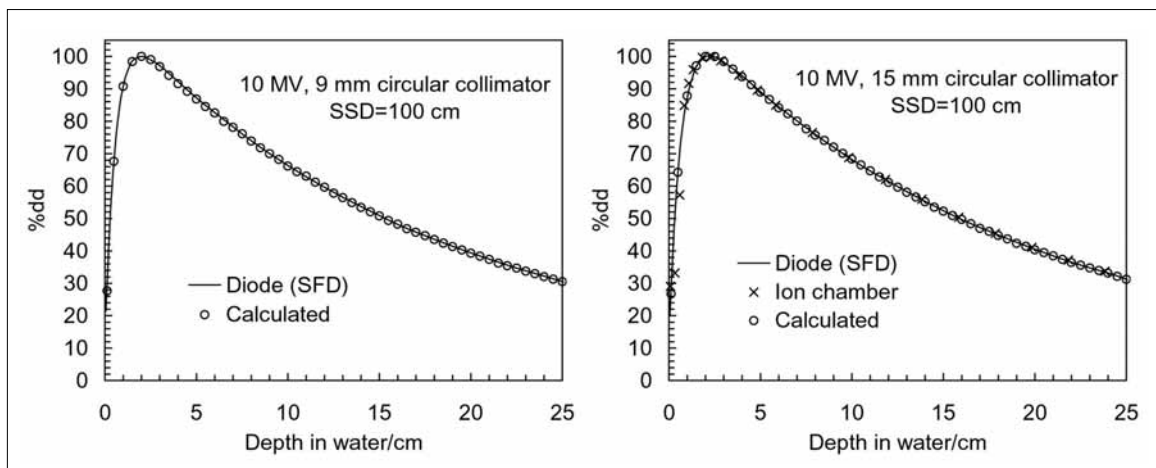


Fig. 6 Comparison of measured and Monte Carlo calculated central axis depth-dose curves for 9 mm and 15 mm circular collimators at 10 MV photon beams, SSD=100 cm. Measurements were performed with a 0.125 cm³ ion chamber and an SFD silicon diode.(Ref. 8)

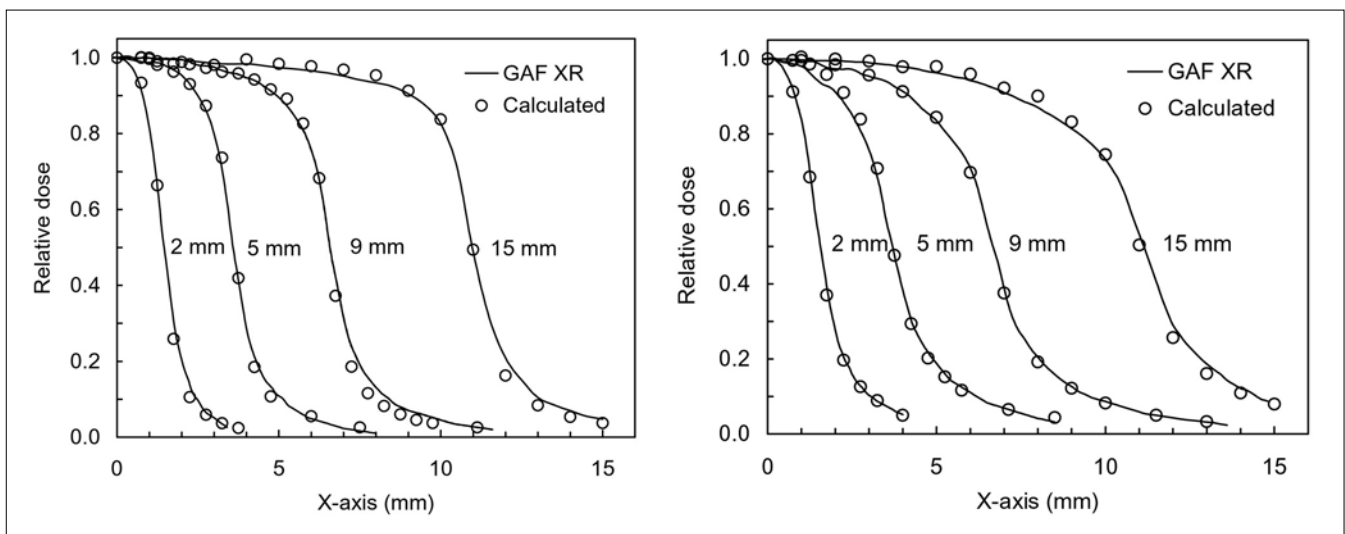


Fig. 7 Comparison of dose profiles between GAFROMIC XR film and Monte Carlo calculations. Measurements were performed at a depth of 5 cm with circular collimators of 2, 5, 9 and 15 mm diameter for (a) 4 and (b) 10 MV beams, SSD=95 cm.(Ref. 8)

a | b

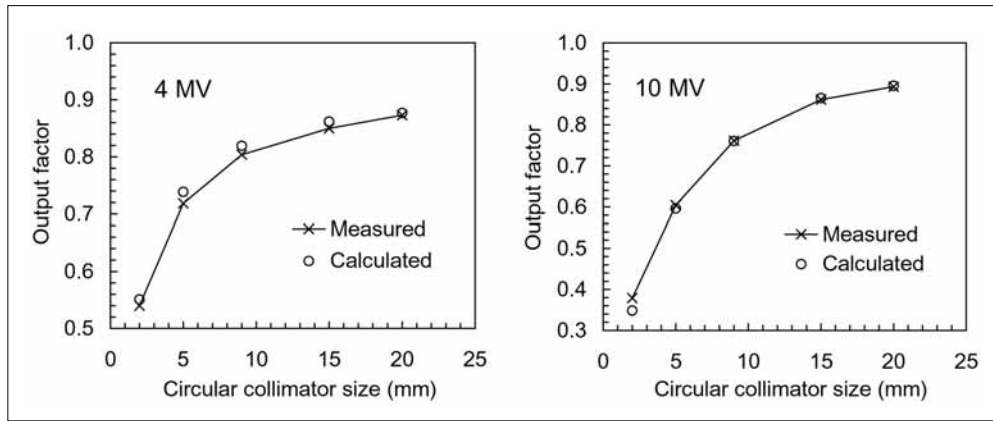


Fig. 8 Comparison of output factors between measured and Monte Carlo calculations. The output factors are normalized to that of a 10×10 cm² field. Measurements were performed with SFD silicon diode at a depth of 5 cm for circular collimators of 2, 5, 9, 15, and 20 mm diameter with 4 MV and 10 MV beams, SSD=95 cm(Ref. 8)

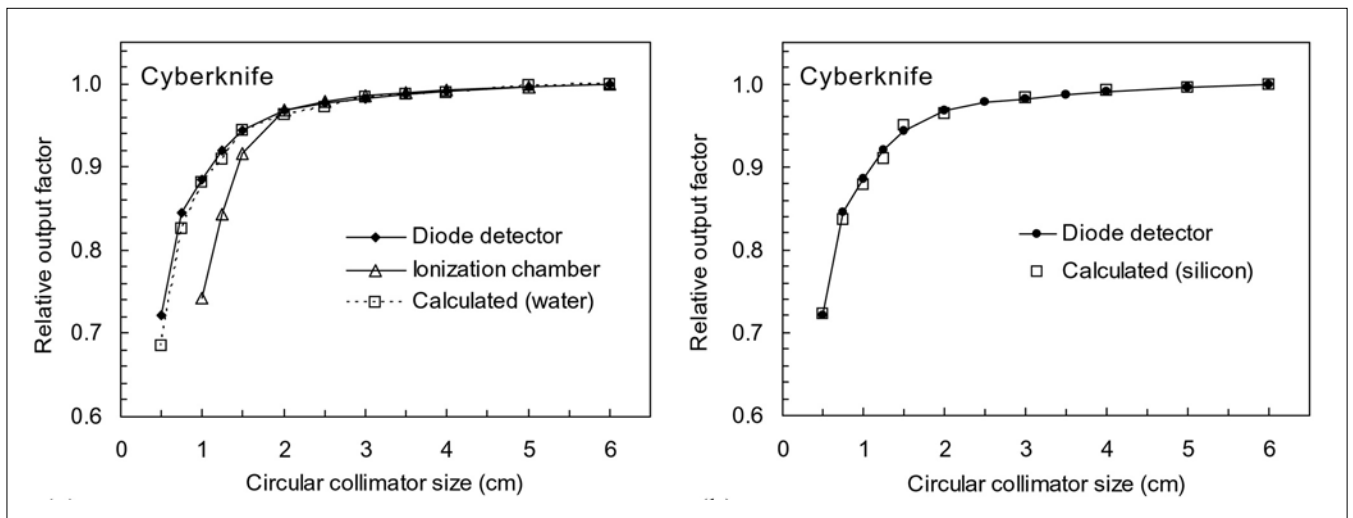


Fig. 9 Comparison of relative output factors(a)measured with a diode detector(SFD)and a 0.125 cm³ ion chamber, and calculated.(b)measured with the diode detector and calculated with silicon material of 1×1×1 mm³ voxel size, at 1.5 cm depth in water for circular collimator sizes of 5 to 60 mm at 80 cm SAD(Ref. 9)

a | b

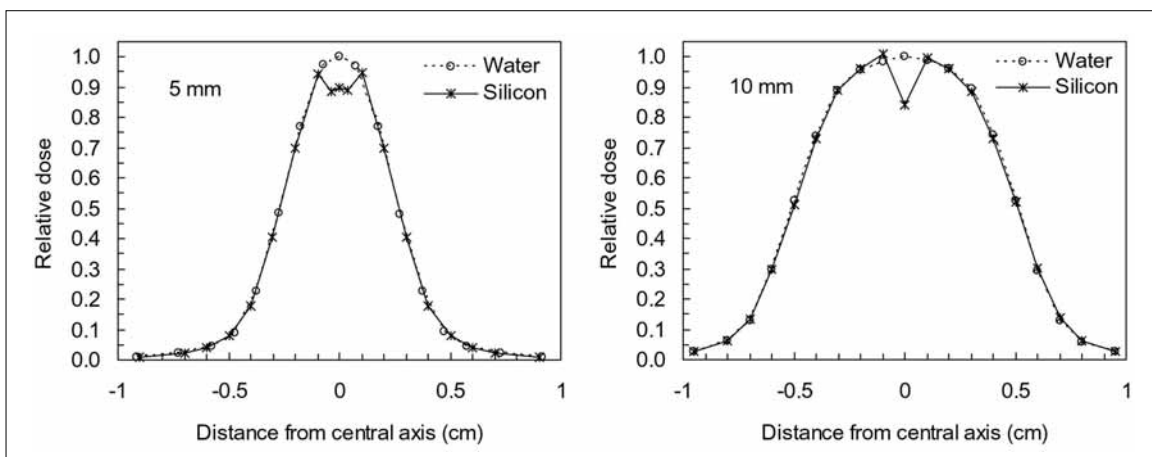


Fig. 10 Comparison between dose profiles calculated with water and silicon detectors for 5 mm and 10 mm collimators at a 1.5 cm depth(80 cm SAD). The silicon detector size is 1×1×1 mm³(Ref. 9)

合が相対的に少ない．すなわち，5mmφと7.5mmφの小照射野ではSi検出器は水に比べて過大なレスポンスを示すことがモンテカルロ計算から分かる．

2. 衝突カーマと吸収線量の比較

カーマ K と衝突カーマ K_c ，および吸収線量 D の関係をFig. 11に示す¹⁰⁾．Al物質中において6MeV光子の平行ビームで計算されている．ここで， K と K_c は次式で表される．

$$K = \Psi \frac{\mu_{tr}}{\rho} \dots\dots\dots(1)$$

$$K_c = \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho} = \Psi \frac{\mu_{tr}(1-g)}{\rho} \dots\dots\dots(2)$$

Ψ は光子のエネルギーフルエンス， μ_{tr}/ρ と μ_{en}/ρ は質量エネルギー転移係数と質量エネルギー吸収係数， g は荷電粒子(二次電子)による制動放射線の割合である． K_c と D はbuild-up領域を過ぎると過渡電子平衡状態になり，次の関係で表される．

$$D = \beta K_c = \beta \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho} \dots\dots\dots(3)$$

β は吸収線量と衝突カーマの比で， $\beta \approx 1 + \mu' \bar{x}$ で表される． β は⁶⁰Co γ 線で1.005である． μ' は光子の実効線減弱係数， \bar{x} は電子の平均飛程(1/ μ_{el} ：電子の実効線減弱係数の逆数)である．上記の式からFig. 11の過渡電子平衡領域における $K > K_c$ ， $D > K_c$ の関係が理解できる．

小照射野では側方電子平衡が成り立たないためFig. 11に示す K_c と D の過渡電子平衡状態が崩れる．Fig. 12は，それぞれ4MV-X線におけるコリメータサイズ9mmφと15mmφの水中での D と K_c の関係を示す．同様に，Fig. 13は深さ5cmにおける D と K_c のプロファイルである． D と K_c は，1項でシミュレーションしたphase

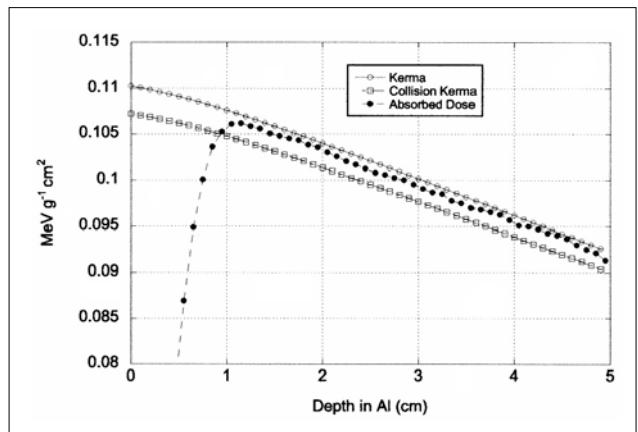


Fig. 11 Kerma, collision kerma and absorbed dose calculated as a function of depth in aluminum for 6 MeV parallel photon beams.

space fileを用いてDOSRZnrcコードで計算した．Fig. 12とFig. 13から9mmφでは $D < K_c$ で側方電子平衡が成立しないが，15mmφではほぼ成立することが分かる．Fig. 14とFig. 15は10MV-X線について示す．10MV-X線では30mmφでほぼ側方電子平衡が成立する．Fig. 13とFig. 15のプロファイルにおいて照射野端では， D と K_c の分布の違いがよく分かる．10MVでは4MVに比べ照射野端における線量勾配が緩やかで，側方非電子平衡による D と K_c の差が大きい．

Fig. 16は基準照射野10×10cm²と各コリメータサイズの β 値を示す．4MVにおける過渡電子平衡での β の平均値は，それぞれ9，15mmφ，10×10cm²で0.986，1.004，1.006であり[Fig. 16(a)]，照射野10×10cm²の値は⁶⁰Co γ 線の1.005とほぼ一致する．一方，10MVでは，それぞれ9，15，20，30mmφ，10×10cm²で0.883，0.961，0.984，1.005，1.011であり[Fig. 16(b)]，照射野10×10cm²の β 値は4MVに比べて大きい．

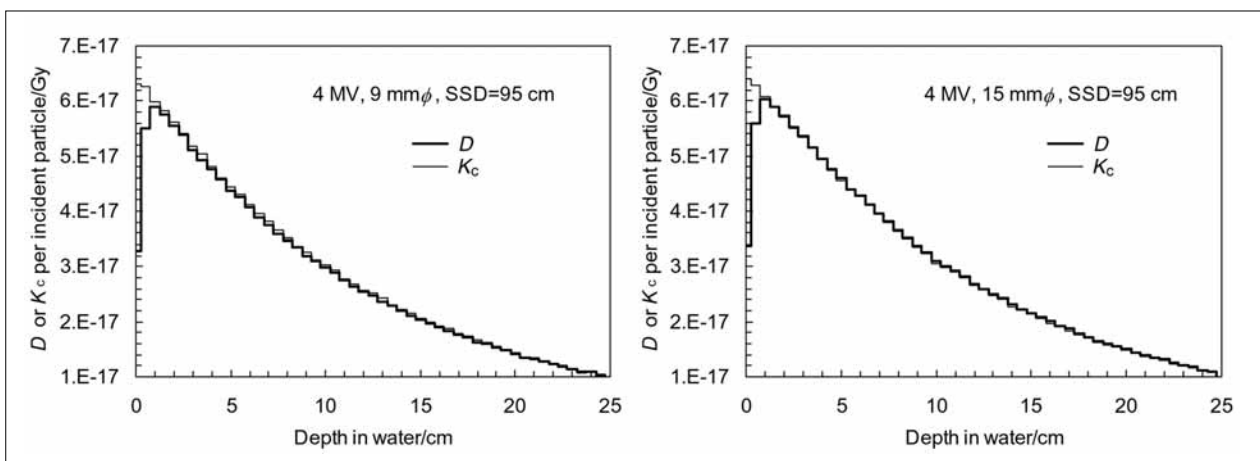


Fig. 12 Absorbed dose and collision kerma calculated as a function of depth in water for 9 mm and 15 mm circular collimators at 4 MV photon beams.

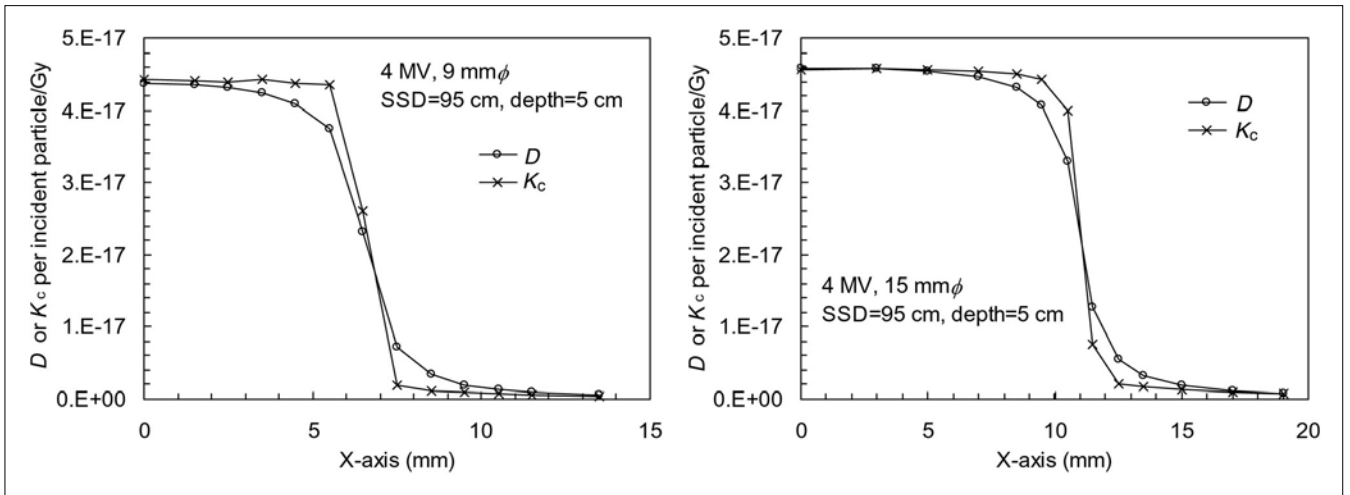


Fig. 13 Profiles of absorbed dose and collision kerma calculated at a 5 cm depth in water for 9 mm and 15 mm circular collimators at 4 MV photon beams.

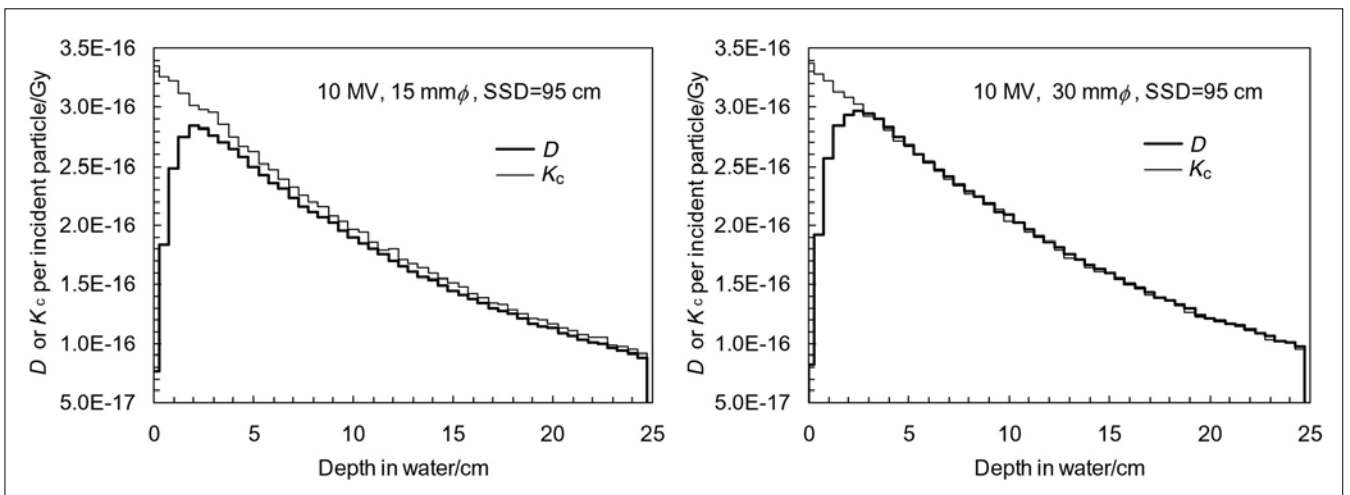


Fig. 14 Absorbed dose and collision kerma calculated as a function of depth in water for 15 mm and 30 mm circular collimators at 10 MV photon beams.

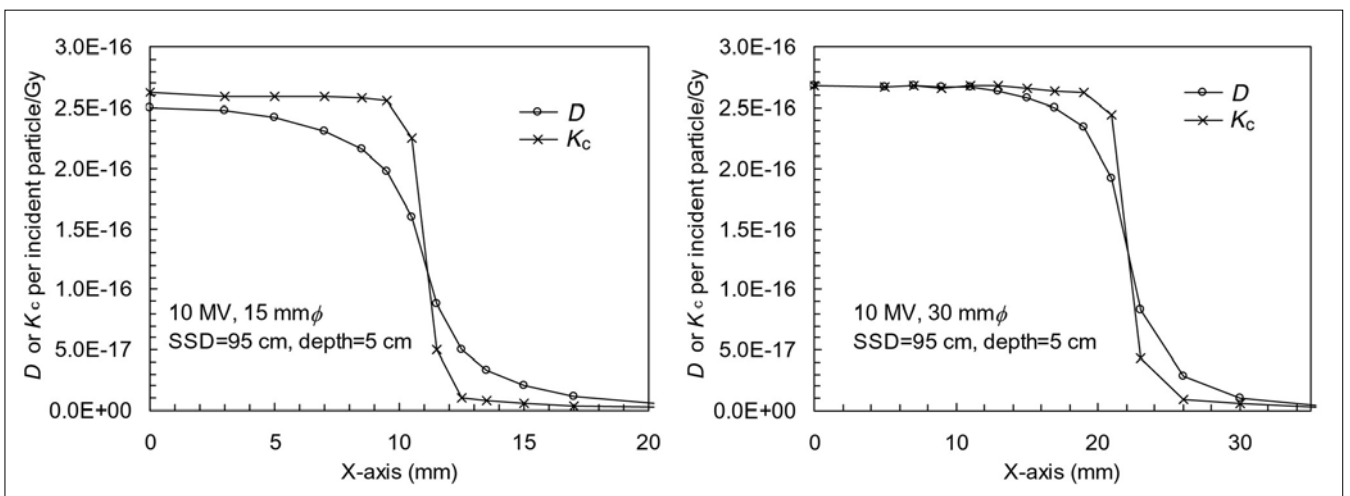


Fig. 15 Profiles of absorbed dose and collision kerma calculated at a 5 cm depth in water for 15 mm and 30 mm circular collimators at 10 MV photon beams.

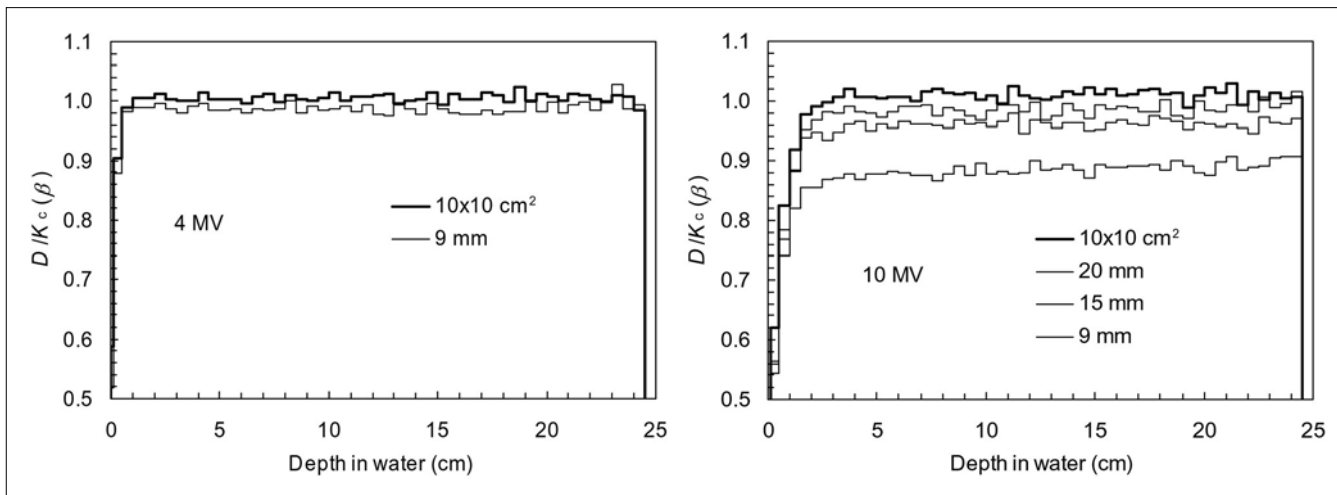


Fig. 16 β values of small fields and a 10×10 cm² field for 4 MV and 10 MV photon beams.

a | b

3. 光子・電子のエネルギースペクトルの変化

ここでは、基準照射野10×10cm²と小照射野(4MV : 9mmφ, 10MV : 15mmφ)における光子・電子のエネルギースペクトルと平均エネルギーの比較を示す。水ファントム表面と任意の深さにおける光子・電子のエネルギースペクトルは、1項で計算したphase space fileを用いて、それぞれBEAMDP¹¹⁾とFLURZnrcコード²⁾で計算した。Fig. 17は水ファントム表面での4MV-X線と10MV-X線の照射野の違いによる光子エネルギースペクトルの比較である。照射野中心領域でのエネルギースペクトルはほとんど差がない。一方、水ファントム1cm(4MV), 2.5cm(10MV), 5cm, 10cm, 20cmの深さにおける光子エネルギースペクトルは照射野の違いによって変化する(Fig. 18, 19)。小照射野では基準照射野に比べ高エネルギー側へシフト(平均光子エネルギーが増加)し、この傾向は深さが増加するほど大きくなる。これに対し、光子と水の相互作用で生じる電子線のエネルギースペクトルは、Fig. 20とFig. 21に示すように照射野および深さによってほとんど変化なく、小照射野における平均電子エネルギーの増加はわずかである。

Fig. 22とFig. 23は、水ファントム内での照射野の違いによる平均光子エネルギーと平均電子エネルギーを4MVと10MV-X線について示す。小照射野では基準照射野に比べ光子エネルギーは増加するが、電子エネルギーの増加はわずかである。また、10MVでは4MVに比べて小照射野で光子と電子エネルギーの増加が大きい。

4. 水/空気の平均制限質量衝突阻止能比(SPR)の変化

3項で示した基準照射野10×10cm²と小照射野(4MV : 9mmφ, 10MV : 15mmφ)における平均制限質

量衝突阻止能比SPRをphase space fileを用いてSPRRZnrcコード²⁾で計算した。使用したパラメータは、AE=ECUT=0.521MeV, AP=PCUT=0.01MeVである。SPRRZnrcにおけるSPRの計算には、次式のSpencer-Attixの理論^{12, 13)}が用いられている。

$$\left(\frac{\bar{L}}{\rho}\right)_{\text{air}}^w = \frac{\int_{\Delta}^{E_{\text{max}}} [\Phi_E^t(E)]_w [L(E, \Delta)/\rho]_w dE + [\Phi_E(\Delta)]_w [S(\Delta)/\rho]_w \Delta}{\int_{\Delta}^{E_{\text{max}}} [\Phi_E^t(E)]_w [L(E, \Delta)/\rho]_{\text{air}} dE + [\Phi_E(\Delta)]_w [S(\Delta)/\rho]_{\text{air}} \Delta} \dots\dots\dots (4)$$

ここで、エネルギーEは媒質から空洞に入射する全電子(微分)スペクトル(primary+δelectrons)で、EはΔ cut-off energyより大きく、E>Δで電子平衡が成立すると仮定している。Δに相当する電子飛程は空洞の大きさに相当する。円筒形電離箱6mmφではΔ=10keVである。[Φ_E(Δ)] [S(Δ)ρ]はE<Δに低下する全(微分)電子フルエンス(electrons/g)である。[Φ_E(Δ)] [S(Δ)ρ]_{air}Δはtrack-ends¹³⁾による空洞へのエネルギー付与である。(L/ρ)_{air}^wは水/空気の制限質量衝突阻止能比、(S/ρ)_{air}^wは水/空気の非制限質量衝突阻止能比である。

Fig. 24は計算された4MVと10MV-X線における小照射野でのSPRの変化を示す。小照射野のSPRは、基準照射野に比べて低下するが1%以内である。また、10MVが4MVに比べてSPRの低下がやや大きい。これは、3項で示した基準照射野に対する小照射野の平均電子エネルギーの緩やかな増加(Fig. 22, 23)と良い相関関係にある。すなわち、小照射野と深さにおけるSPRの低下は、水ファントム中の平均光子エネルギーの増加よりむしろ平均電子エネルギーの緩やかな増加を表している。

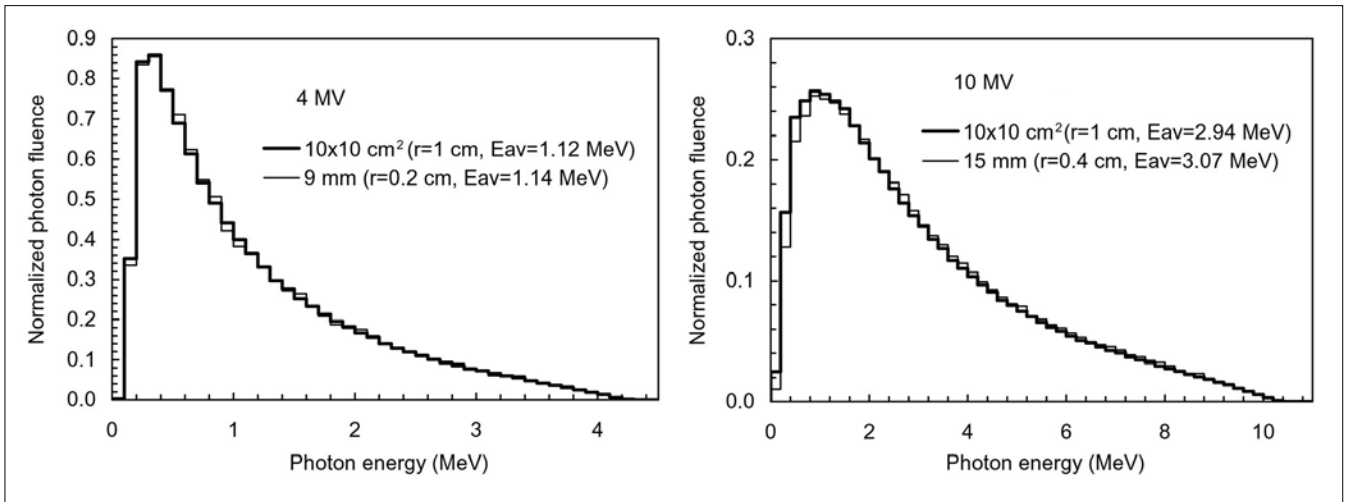


Fig. 17 Comparison of photon fluence spectra between a small field and a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field at phantom surface for 4 MV and 10 MV photon beams, SSD=100 cm.

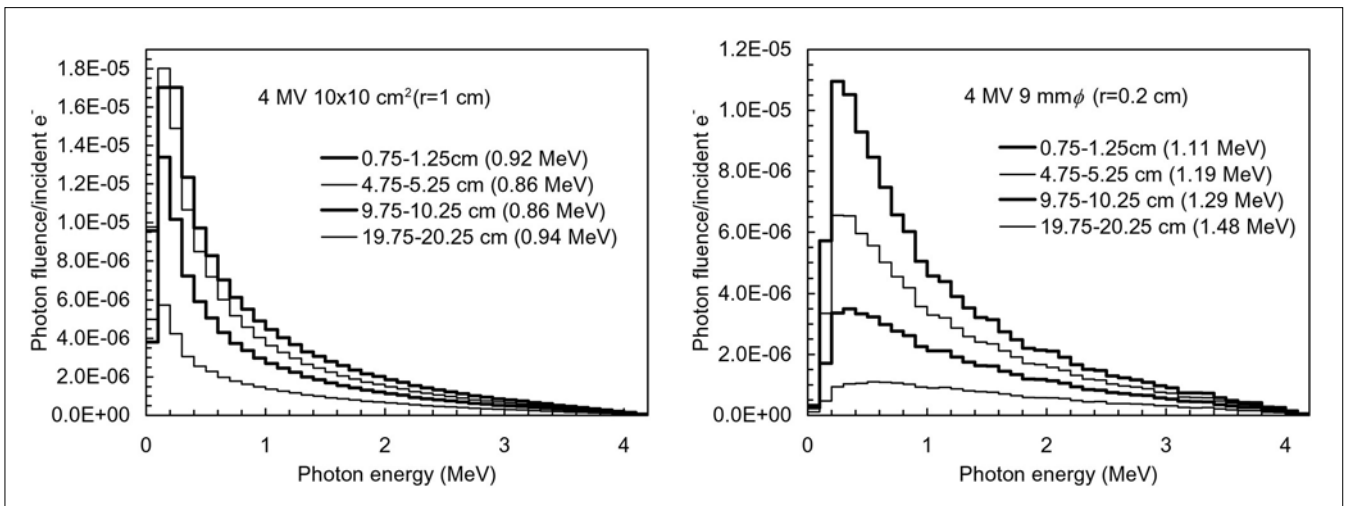


Fig. 18 Comparison of photon fluence spectra between a 9 mm circular collimator and a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field at depths of 1, 5, 10, and 20 cm in water for 4 MV photon beams, SSD=100 cm.

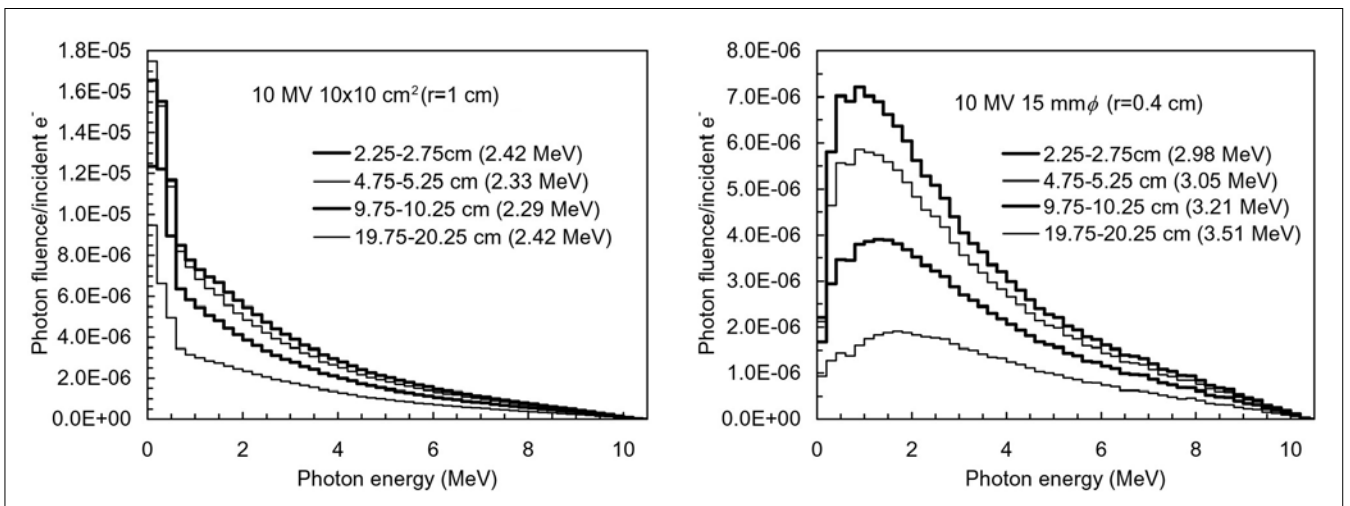


Fig. 19 Comparison of photon fluence spectra between a 15 mm circular collimator and a $10 \times 10 \text{ cm}^2$ field for at depths of 2.5, 5, 10, and 20 cm in water for 10 MV photon beams, SSD=100 cm.

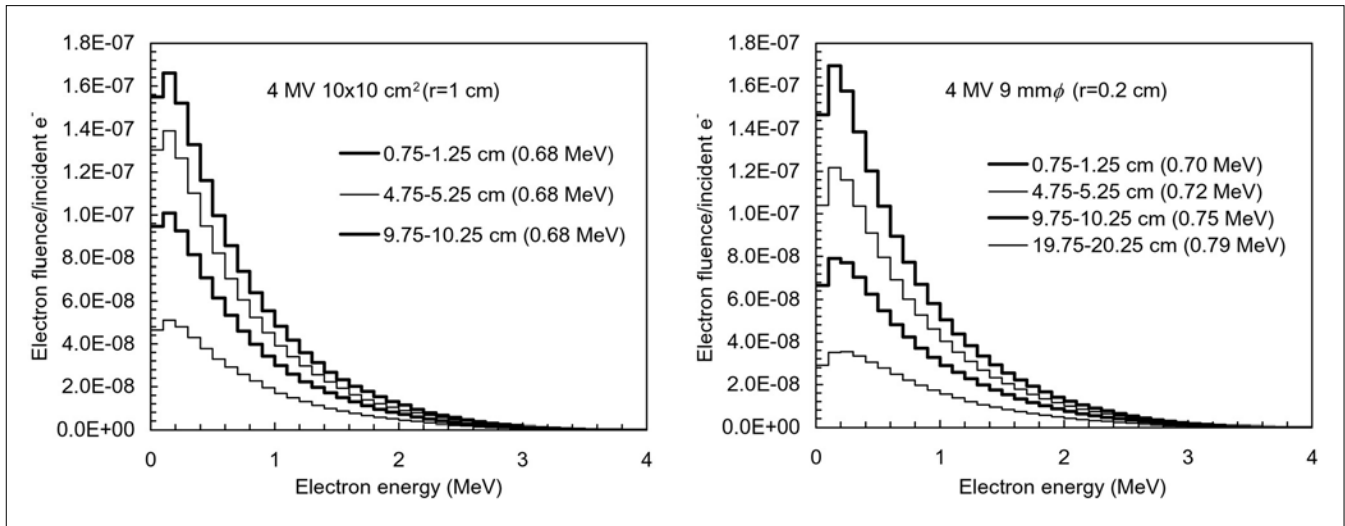


Fig. 20 Comparison of electron fluence spectra between a 9 mm circular collimator and a 10x10 cm² field at depths of 1, 5, 10, and 20 cm in water for 4 MV photon beams, SSD=100 cm.

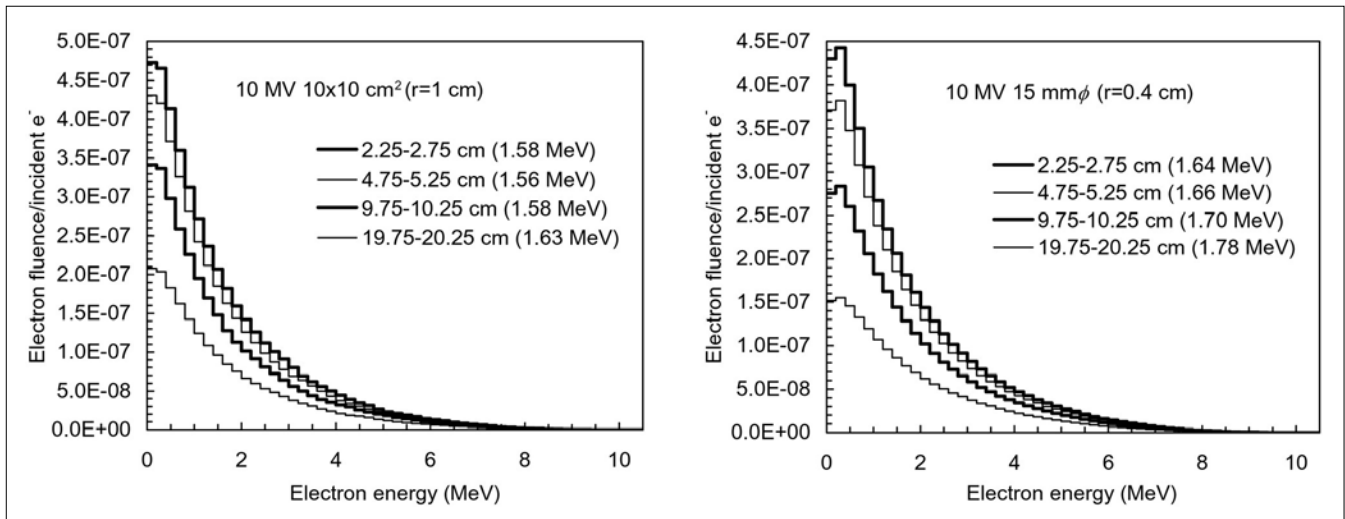


Fig. 21 Comparison of electron fluence spectra between a 15 mm circular collimator and a 10x10 cm² field at depths of 2.5, 5, 10, and 20 cm in water for 10 MV photon beams, SSD=100 cm.

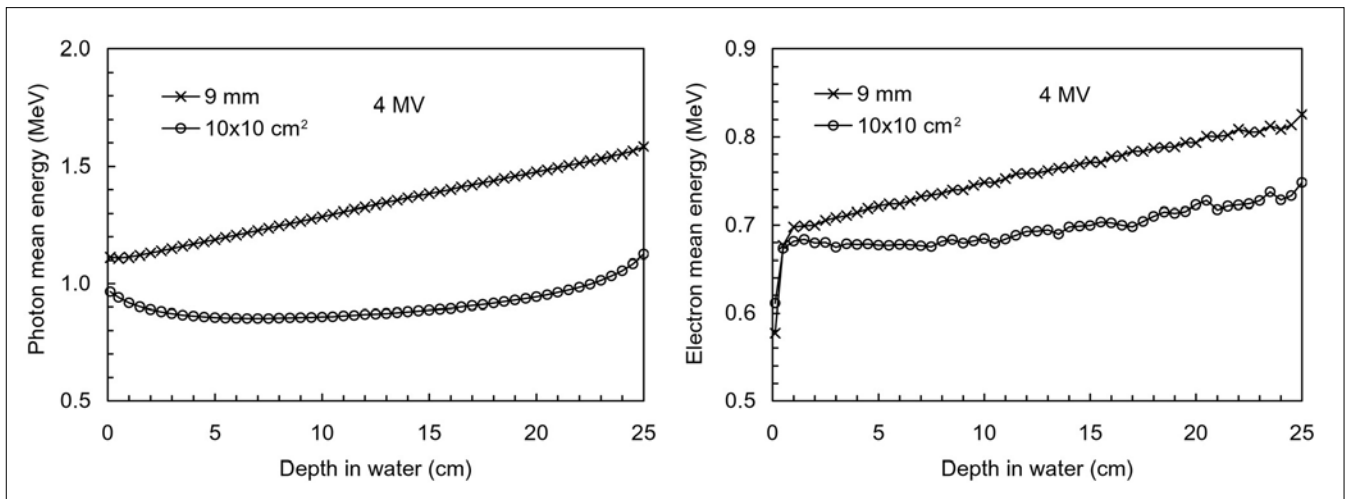


Fig. 22 Comparison of photon and electron mean energies between a 9 mm circular collimator and a 10x10 cm² field as a function of depth in water for 4 MV photon beams, SSD=100 cm.

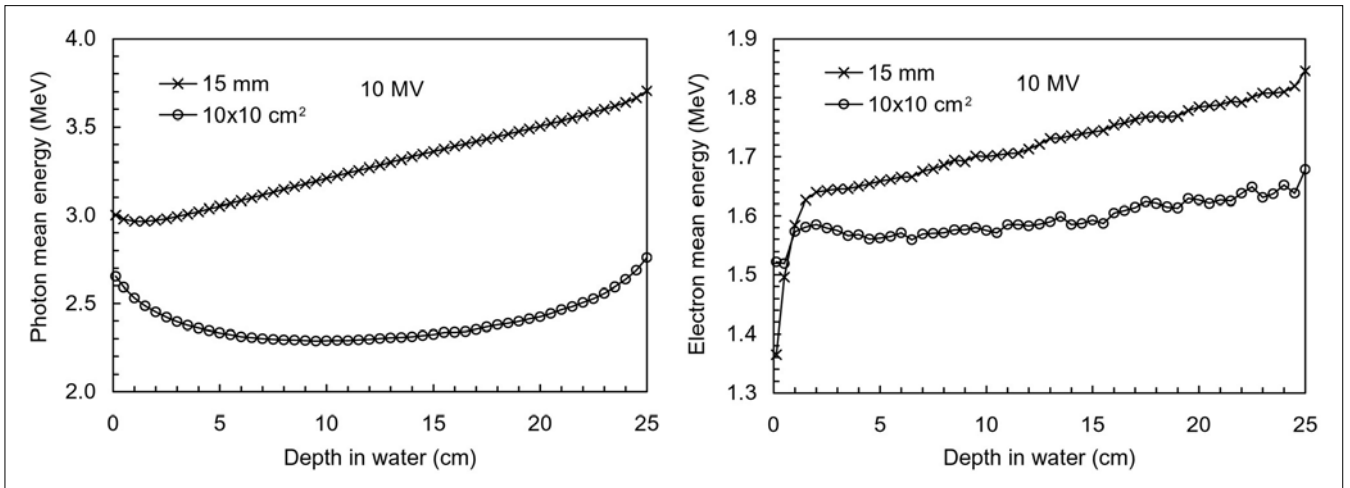


Fig. 23 Comparison of photon and electron mean energies between a 15 mm circular collimator and a 10×10 cm² field as a function of depth in water for 10 MV photon beams, SSD=100 cm.

5. 結論

モンテカルロ計算による小照射野光子ビームの線量評価について次のような結果を得た。

- (1)モンテカルロ計算は小照射野のビームデータの検証に有用である。
- (2)小照射野の線量測定においては側方非電子平衡を十分考慮する必要がある。
- (3)小照射野の光子エネルギースペクトルは、基準照射野10×10cm²に比べて高エネルギー側にシフトするが、電子線のエネルギースペクトルの変化(平均電子エネルギーの増加)はわずかである。したがって、小照射野における平均制限質量衝突阻止能比は、基準照射野10×10cm²に比べて1%以内の低下である。

謝 辞

Varian Clinac 2100C加速器の詳細なヘッド構造をご提供いただいたVarian Medical Systemsに感謝いたします。また、測定データは熊本大学医学部附属病院で取得したものであり、ご協力いただいた中央放射線部副技師長・守部伸幸氏に深く感謝いたします。

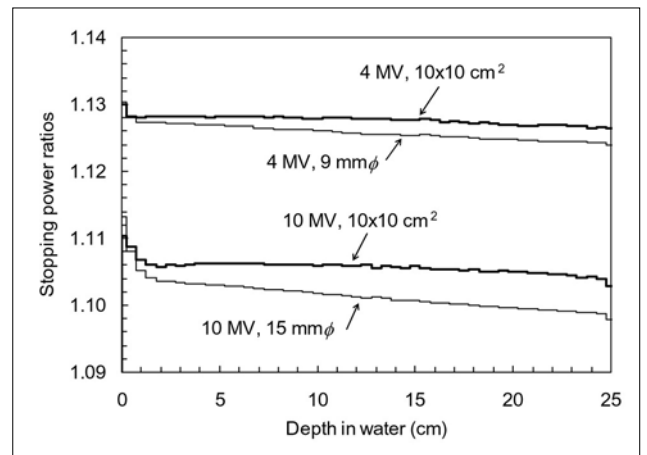


Fig. 24 Comparison of calculated Spencer-Attix water-to-air stopping-power ratios between a small field and a 10×10 cm² field as a function of depth for 4 MV and 10 MV photon beams, SSD=100 cm.

参考文献

- 1) Kawrakow I, Mainegra-Hing E, and Rogers DWO: EGSnrcMP: the multi-platform environment for EGSnrc. NRCC Report PIRS-877 (2004)
- 2) Rogers DW, Kawrakow I, Seuntjens JP, et al.: NRC User Codes for EGSnrc, NRCC Report PIRS-702 revB (2005)
- 3) Rogers DW, Faddegon BA, Ding GX, et al.: BEAM: a Monte Carlo code to simulate radiotherapy treatment units. Med Phys, 22(5) 503-524 (1995)
- 4) Rogers DW, Walters B, and Kawrakow I: BEAMnrc Users Manual. NRCC Report PIRS-509(A) revK (2005)
- 5) Walters B, Kawrakow I, and Rogers DWO: DOSXYZnrc Users Manual. NRCC Report PIRS-794 revB (2005)
- 6) Sheikh-Bagheri D, and Rogers DW: Sensitivity of megavoltage photon beam Monte Carlo simulations to electron beam and other parameters. Med Phys, 29(3) 379-390 (2002)
- 7) 荒木不次男: 医用加速器Varian Clinac 2100Cのモンテカルロシミュレーション - 4 MVと10 MV-X線の線量分布, エネルギースペクトル, 角度分布, フルエンス分布, 平均エネルギー分布の分析 - . 日放腫会誌, 17(2), 53-63, (2005).
- 8) 荒木不次男, 守部伸幸: モンテカルロ計算による極小照射野の線量評価. 医用標準線量, 10(1), 35-42, (2005).
- 9) Araki F: Monte Carlo study of a Cyberknife stereotactic radiosurgery system. Med Phys, 33(8) 2955-2963 (2006)
- 10) 平山英夫: 空気カーマ, 空気衝突カーマ, 空気吸収線量, 照射線量と実効線量. 日本原子力学会誌, 43(5), 427-432, (2001)
- 11) Ma CM, and Rogers DW: BEAMDP users manual. NRCC Report PIRS-509(C) revA (1999)
- 12) ICRU, International Commission on Radiation Unit and Measurement: Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV, ICRU Report No. 35, Nuclear Technology Publishing (1984)
- 13) Nahum AE: Water/air mass stopping power ratios for megavoltage photon and electron beams. Phys Med Biol, 23(1) 24-38 (1978)