

## Measurement of photon beam backscatter from collimators to the beam monitor chamber using target-current-pulse-counting and telescope techniques

(ターゲットパルス電流計数法とテレスコープ法によるコリメータからビームモニタ電離箱への光子ビーム後方散乱の測定)

M. K. Yu, R. S. Slobada, and F. Mansour

Phys. Med. Biol. 41, 1107-1117 (1996)

**概要** 照射野限定コリメータより発生し、ビームモニタ電離箱 (BMC) に入射する後方散乱線 (BSR) は、医用直線加速器でみられる光子ビームのコリメータ設定による出力変化に寄与するであろう。したがって、特定の動作条件における一つの加速器におけるこのような寄与の程度を測定することは、加速器のヘッド散乱を理解し、モデル化しようとするときに重要である。この研究はこれまでに報告されたコリメータ絞りの後方散乱の測定を確実なものとし、その他の加速器やマルチリーフコリメータ (MLC) を含めるように拡張するために計画した。

Clinac 600C, 2100C および 2300CD 加速器の絞りと 2300CD の MLC からの BMC に到達する BSR を、ターゲットパルス電流計数法とテレスコープ法の両方を用いて調べた。測定より、Clinac 600C の BSR 依存の出力変動は無視できることが分かる。しかし、2100C と 2300CD の BSR 依存の相対的出力はほぼ直線的に増加し、 $5 \times 5 \text{ cm}^2$  から  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  まで照射野サイズが変化すると、15MV と 18MV ビームで 2.4%、6MV で 1.7% に達した。BSR の量は予想されたように、ヘッド内のコリメータの位置に依存した。それによって、コリメータ反転効果に寄与することとなった。テレスコープ法を用いた我々のセンターでの初期の研究では、高いレベルの BSR が報告された。この食い違いは、先の報告では無視できると仮定したテレスコープブロックと室内散乱線に対する補正をすることで解決された。

### 1. はじめに

ビームモニタ電離箱 (BMC) と協調して機能する医用ライナックの場合、コリメータから BMC への後方散乱線 (BSR) の照射野サイズ依存の出力への影響を理解することは重要である。いくつかのグループ (Patterson と Shragge 1981, Watts と Ibbott 1987, Luxton と Astrahan 1988, Kubo 1989, Duzenli 等 1993) によるこの現象の研究より、結果は装置の構造、動作条件および測定法そのものに依存して変化するであろうということが示された。例えば、ターゲットビーム電流をモニタリングすることにより、Patterson と Shragge (1981) は AECL Therac-20 による 18MV 光子ビームで、照射野サイズ依存の出力に対して 10% の BSR の

寄与を報告した。しかし、Kubo (1989) はテレスコープ法を用い、出力に対する BSR の寄与は同じタイプの装置の同じエネルギーの光子ビームで 7% であると結論した。同じ手法を用いたとしても、別のグループが得た BSR の結果は似た装置の同じエネルギーのビームでまったく異なる (Kubo 1989, Duzenli 等 1993)。ゆえに、この現象を十分に理解するためには、注意深い研究がまだ必要である。

この研究では、Varian の単一光子エネルギーとデュアルエネルギーの加速器で、ビームをコリメートする絞りとマルチリーフコリメータ (MLC) からの BSR の照射サイズ依存の出力に対する影響を調べるために、ターゲットパルス電流計数法とテレスコー

プ法の両方を用いた。今回の結果と我々のセンターで報告した初期の研究 (Duzenli 等 1993) を比較する中で、パルス計数より推論される BSR の推定値は、同じ装置の同じエネルギーの光子ビームにおけるテレスコープ法の測定から得られた初期の値よりも一貫して小さいことが分かった。そこで、この差の起因を理解するために追加実験を計画し、行った。

## 2. 実験法

### 2. 1. ターゲットパルス電流計数法

Varian の Clinac シリーズの加速器では、ターゲットに衝突する電子は抵抗を介してアースに至るパルス電流を発生する。1V のオーダーである抵抗による電圧降下は、試験機器をコンソールの “TARGET I” とラベルされたカードラックの BNC 端子に接続することで簡単にモニタできる。ターゲットパルス電流の振幅と幅が一定のときには (これは Fluke 97 ScopeMeter で確認した)、あるモニタ単位数を投与するのに必要なパルス数も一定のはずである。

しかし、BSR はパルス電流の個数を減らすことになる BMC の余剰な信号を生む。また、それに対応した実際の光子出力の低下を生む。そこで、あるモニタ単位数を投与するのに必要なパルス数の変化を、BMC に対する BSR の照射野サイズ依存の出力への影響を測定するための尺度として用いることができる。この研究では、Kenwood FC-757 Universal Counter を Clinac 600C, 2100C および 2300CD の加速器の 6, 15MV および 18MV のビームのターゲットパルス電流を

計数するために用いた。BSR 実験を行う前に、 $40 \times 40 \text{ cm}^2$  の照射野において 1- 400MU を投与するのに必要なパルス数を測定した。そして、そのデータを最小二乗法により直線に回帰させ、パルス計数と MU 設定値の間に直線関係があることを確認した。すべてのパルス計数実験において 100MU の設定とすることにした。

Clinac 600C の場合、BMC の出射窓は厚さ 0.43 mm の銅で裏打ちしたスチールである。Clinac 2100C と 2300CD は共に、出射窓は厚さ 0.127 mm の Kapton 箔である。出射窓から上部絞りの上面までの距離は 600C で 15.16 cm, 2100C と 2300CD で 11.64 cm である。Varian のライナックの BMC の構成の詳細については、Duzenli 等 (1993) の論文が参考になる。

照射野サイズは焦点から 100 cm で規定した。正方形照射野の大きさは  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  から  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  まで変化させた。各絞りの BSR における BMC への個々の絞りの影響を調べるために、矩形照射野を用いた。このとき、一方の絞りの組は 40 cm の最大照射野サイズまで開き、もう一方の組を 1 cm から 40 cm まで変化するように規定した。2300CD で起こりうる MLC の寄与は、X 絞りを引き戻し、Y 絞りを 25 cm の長さに固定して、5 cm から 25 cm まで照射野幅を変化させて調べた。計数の読み値は  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  の照射野で 1.0 となるように標準化した。

### 2. 2. テレスコープ法

この方法は Kubo (1989) により詳しく述べられた。今回の測定は Co-60 用ビルドアップ

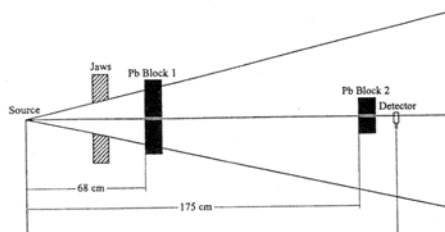


Fig. 1. テレスコープ法の実験配置. 大きさはすべて任意である.

プキャップで囲んだ空中、もしくは  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  のポリスチレンファントム中の最大線量の深さに配置した Capintec model PR-06C の電離箱 ( $0.6 \text{ cm}^3$ ) を用いて行った. 各々がピンホールを有する二つの鉛ブロックを用いた我々の実験配置は Duzenli 等 (1993) の配置と同じであった. それを Fig.1 に示す. 鉛ブロックの厚さは  $10 \text{ cm}$  である. テレスコープ実験は Clinac 600C と 2100C の加速器の  $6$  と  $18 \text{ MV}$  のビームで,  $1 \times 1 \text{ cm}^2$  から  $40 \times 40$

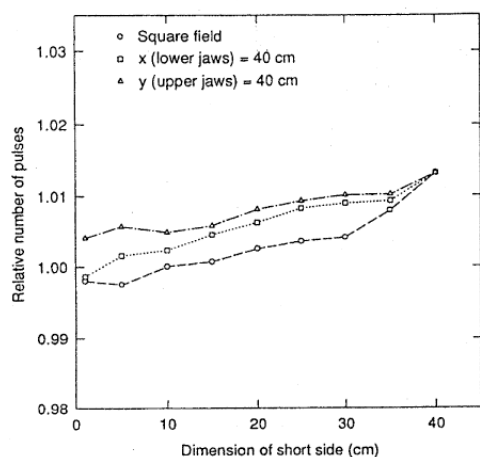


Fig.2 Clinac 2100C による  $6 \text{ MV}$  光子ビームにおける照射サイズに対する  $100 \text{ MU}$  の線量投与に必要な相対的パルス数. 矩形照射野の場合の絞りの一方の設定は  $40 \text{ cm}$  に固定し, 他方を  $1$  から  $40 \text{ cm}$  まで変えた. すべての読み値は  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  の照射野で  $1.00$  に標準化した.

$\text{cm}^2$  までの範囲の正方形照射野を用いて行った. 電離箱の読み値は, ピンホールを有する二つの鉛ブロックがビームをコリメートする位置で  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  の照射野で  $1.0$  となるように標準化した.

測定値に対するテレスコープブロックと室内散乱線の影響を調べるために, まったく同じ別の実験を, いずれの鉛ブロックにもピンホールがない状態でを行った.

### 3. 結果と検討

MU 設定値とパルス計数との間の直線の相関が  $50$  より大きい MU 設定で強いことが分かった. また, 我々が選んだ  $100$  という値以上ではさらに強い相関であった. 例えば, Clinac 2100C の  $18 \text{ MV}$  ビームの場合,  $400 \geq MU \geq 100$  の範囲のデータは回帰値との rms 偏差は  $0.4\%$  に過ぎない. しかし,  $MU \leq 50$  ではデータは徐々に直線から変位し,  $9\%$  の rms 偏差となった. よって,  $MU \leq 50$  では実際に投与される線量はそれに対応する設定値から有意に変化するであろう. このような知見は, Varian, Siemens および AECL の加速器における線量の直線性 (線量/MU) を調べた Das 等 (1991) が報告したものと一致する.

Fig.2 と 3 はパルス計数に対して得た Clinac 2100C での結果である.  $100 \text{ MU}$  を投与するのに必要なパルス数は, 照射野サイズを  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  から  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  まで大きくすると,  $6 \text{ MV}$  と  $18 \text{ MV}$  のビームでそれぞれ  $1.6 \pm 0.4\%$  と  $2.4 \pm 0.4\%$  まで増加した. Clinac 600C による  $6 \text{ MV}$  の結果を Fig.4 に示す. ここでは,  $100 \text{ MU}$  を投与するのに必要なパル

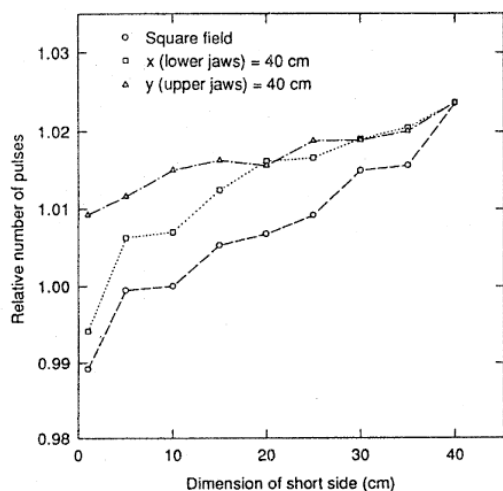


Fig. 3. Clinac 2100C による 18MV ビームであることを除くと Fig.2 と同じ。

ス数は照射野サイズが変化してもほとんど一定であった。比較すると、室内散乱線に対する補正をしないテレスコープ法を用いて得た結果はパルス計数法の結果よりも大きい。例えば、相対的電離箱読み値は Clinac 2100C の 18MV ビームで約 3.6%ほど増加した。

加速器ヘッドの外側で散乱した放射線によるテレスコープ法での寄与は、次節で詳しく述べるように二つ目の実験により確定した。Clinac 600C と 2100C の 6MV と 18MV の結果を、Fig.5-7 の挿入図に示す。これらの図の大きい方のグラフは電離箱読み値の照射野サイズによる変動を余剰な散乱線に対する補正の有無で示している。Table 1 は

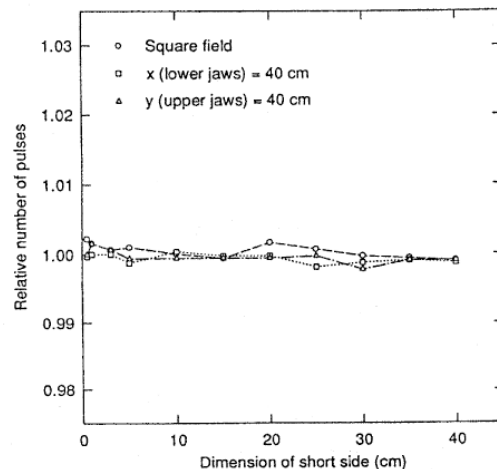


Fig. 4. Clinac 600C による 6MV 以外は Fig.2 と同じ。

テレスコープ法とパルス計数法の両方における正方形照射野の結果の概略である。余剰散乱線に対する補正を加えると、テレスコープ法のデータはパルス計数法で得たデータと一致するのは明らかである。

一般的に云うならば、パルス計数法はテレスコープ法と比較すると、重い鉛ブロックをビーム中心軸上に置き、幾何学的配置を確保する必要がないので実行が容易であり、時間もかからない。しかし、この方法はいくつかの装置ではターゲット電流のパルス数の短時間のゆらぎがみられるので、すべての加速器に適するとは限らないだろう。例えば、我々のセンターの一台の 600C のパルス計数の測定値は一定の照射野サイ

Table 1. パルス計数法とテレスコープ法で測定した  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  から  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  の絞りで設定した正方形照射野における BSR に関する相対的出力変化。テレスコープ法の測定はファントム中で行った。

Photon beam energy, Linear accelerator	Pulse counting method (%)	Telescopic method before correction for external scatter (%)	Telescopic method after correction for external scatter (%)
6 MV, Clinac 600C	$-0.1 \pm 0.4$	1.2	$0.4 \pm 0.5$
6 MV, Clinac 2100C (No.1)	$1.6 \pm 0.4$	3.1	$1.7 \pm 0.5$
18 MV, Clinac 2100C (No.1)	$2.4 \pm 0.4$	3.6	$1.9 \pm 0.5$

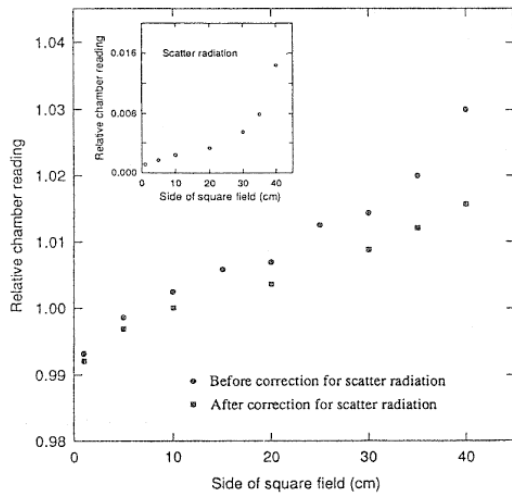


Fig. 5. Clinac 2100C による 6MV ビームにおける加速器ヘッドの外側で散乱した放射線に対する補正の前後における照射野サイズ設定に対する相対的電離箱読み値の依存性. テレスコープ法の結果は,  $25 \times 25 \text{ cm}^2$  のポリスチレンファントム中の最大線量の深さの電離箱で得た. 挿入図は照射野サイズによる散乱線の依存性を示す.

ズ設定で許容できるゆらぎで安定していた. しかし, 他の二台の 600C では同じ照射サイズ設定で 10% 以上の変化することもある. BSR は一次ビームフルネスの約 1-2% 程度の変化を起こすに過ぎないので, これらの後者の装置のデータは明らかに, 装置出力に対する BSR の影響を推定するために用いることはできない. 上記で述べたゆらぎの原因は明確には分らないが, X 線ターゲットに衝突する加速された電子群を構成する電子数の変動を引き起こすようなパルス時間調整回路のボードのバージョンと関連すると思われる.

Table 2 に正方形と矩形の光子照射野におけるパルス計数データを示す. Table 1 に示すデータと共にこれらのデータより, コリメータから BMC への BSR の量は BMC 出

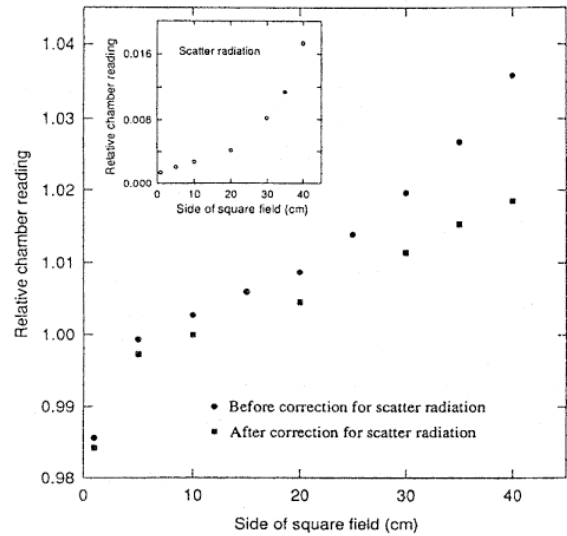


Fig. 6. Clinac 2100C による 18MV ビームであること以外は Fig.5 に同じ.

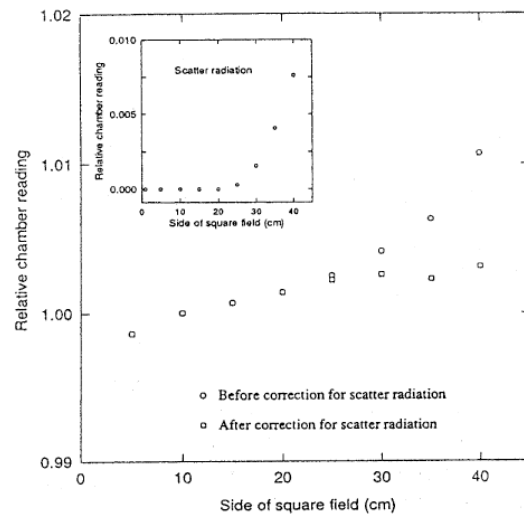


Figure 7. Clinac 600C による 6MV ビームであること以外は Fig.5 に同じ.

射窓の厚さと BMC からコリメータまでの距離に依存し, 出射窓の厚さとモニタ電離箱からの距離が増加すると低下する. Clinac 600C の場合, BMC の出射窓は厚いので, X もしくは Y 絞りのいずれかからの BSR は装置の出力にほとんど影響しない. 非常に薄い出射窓をもつ BMC がほとんど同じ構造

と配置の Clinac 2100C と 2300CD の場合には、X 絞りからの BSR の影響は BMC から遠い Y 絞りよりも比較的小さい。MLC から BMC への BSR は実験誤差以内で測定できない。Varian 加速器の高エネルギービームにおける照射野サイズ依存の出力への BSR の影響は低エネルギービームよりも大きい、多いというわけではない。

Scrimger (1977) は測定プローブから散乱体までの距離と介在する吸収体の厚さに対する光子後方散乱線の影響を報告した。BMC と絞り（散乱体）の間の吸収体として BMC の出射窓を考えると、Clinac 加速器で観察された出射窓の厚さと BMC から絞りまでの距離の BSR への影響は、原理的に Scrimger の知見と一致する。

上で述べたように、薄い BMC 出射窓を有する加速器の場合、装置出力に対する BSR

の影響は X と Y 絞りで異なるであろう。この差はここで調べた加速器で 1% に達する。それがコリメータ反転効果に対して有意な寄与となっており、同種の装置の反転効果の全体の大きさは 3% に達する (Kase と Svensson 1986, Vadash と Bjärngard 1993, Thatcher と Bjärngard 1993, Yu 等 1995)。コリメータ反転効果は主に、一次コリメータ、平坦化フィルタおよびヘッド内のその他の部分で発生した散乱線が測定点に到達するのを X と Y 絞りが遮る量の違いに起因する (Dunscombe と Nieminen 1992, Chaney 等 1994, Yu と Slobada 1995)。最近、Ahnesjö (1995) は測定点に到達する X と Y 絞りから前方に向かう全散乱線は、一般的に一次フルエンスの 1% 以下であり、反転効果への寄与は非常に少ないと報告した。

Table 2. パルス計数法により測定した絞りで設定した示した範囲の照射野サイズにおける BSR による相対的出力変化.

Photon energy, linear accelerator		Square fields from 5 × 5 cm <sup>2</sup> to 40 × 40 cm <sup>2</sup> (%)	Rectangular fields, x=40 cm, y from 5-40 cm (%)	Rectangular fields, y=40 cm, x from 5-40 cm (%)
6 MV, Clinac 600C		- 0.1±0.4	0.0±0.4	0.0±0.4
6 MV, Clinac 2100C (No.1)		1.6±0.4	1.2±0.4	0.7±0.4
18 MV, Clinac 2100C (No.1)		2.4±0.4	1.7±0.4	1.2±0.4
6 MV, Clinac 2100C (No.2)		1.7±0.4	1.4±0.4	0.6±0.4
18 MV, Clinac 2100C (No.2)		2.1±0.3	2.0±0.3	1.1±0.3
6 MV, Clinac 2100CD		1.2±0.3	1.0±0.3	0.5±0.3
15 MV, Clinac 2100CD		1.8±0.3	1.6±0.3	0.5±0.3
6 MV, Clinac 2100CD (MLC)		-	-	- 0.2±0.3 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> MLC による照射野は Y 絞りを 25 cm の長さに固定し, X 絞りを引き込んだ状態で, 5-25 cm まで変えた.

我々のテレスコープ測定では, 電離箱は Co-60 用ビルドアップキャップで囲むか, あるいは 25×25 cm<sup>2</sup> のポリスチレンファントム中の最大線量の深さに配置した. 両方の測定配置の結果は, 余剰散乱線に対する補正後は実験誤差以内で同じである. しかし, 散乱補正をしなければ, ビルドアップキャップ測定はファントム測定で得た測定値よりも大きい. Fig.8 は Clinac 600C の 6MV ビームのこのような挙動を示す. この差は室内散乱線が前方以外のいくつかの方向か

ら電離箱に到達していることによると考える. 電離箱をポリスチレンファントム中に配置すると, 前方以外のすべての方向から電離箱に到達する散乱線の強度は減弱により低下する. 二つの実験配置で測定した散乱線データの比較を, Fig.8 の挿入図に示す.

#### 4. 結論

コリメータからビームモニタ電離箱での後方散乱線の照射野サイズ依存の出力への影響を, Clinac 600C, 2100C および 2300CD の加速器でターゲットパルス電流計数法と

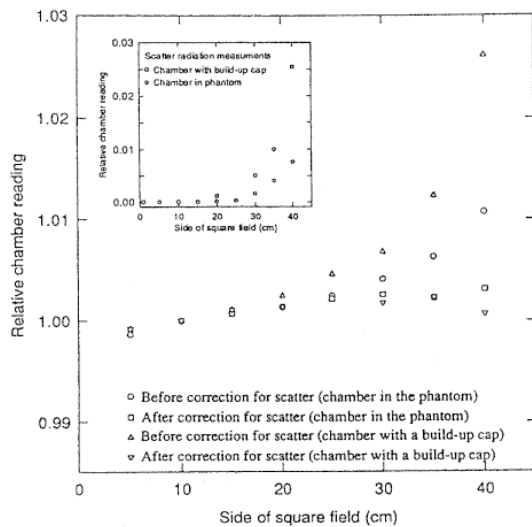


Fig. 8. Fig.7 と同じで、 $25 \times 25 \text{ cm}^2$  のポリスチレンファントム中の最大線量の深さ、もしくは空中において Co-60 ビルドアップキャップを装着した電離箱のいずれかでを行ったテレスコープ法の値。挿入図はファントム中とビルドアップキャップで囲んだ電離箱で測定した散乱線の比較を示す。

テレスコープ法の両方を用いて求めた。後者の方法における測定結果と先に報告した結果は、前者の方法よりも大きい。この差の原因を調べるために、追加実験を計画し、実行した。それより、それはテレスコープ法のブロックと室内散乱線の電離箱読み値への寄与によることが分かった。余剰散乱線に対する補正を加えると、二つの方法の結果は一致した。テレスコープ法に比して

参考文献

- Ahnesjö A 1995 Collimator scatter in photon therapy beams *Med. Phys.* 22 267-278
- Chaney E L, Cullip T J and Gabriel T A 1994 A Monte Carlo study of accelerator head scatter *Med. Phys.* 21 1383-1390
- Das I J, Kase K R and Tello V M 1991 Dosimetric accuracy at low monitor unit settings *Br. J. Radiol.* 64 808-811
- Dunscombe P B and Nieminen J M 1992 On

パルス計数法は実行が容易であり、早い。

しかし、ターゲットパルス電流の振幅もしくは幅がゆらぐような加速器には適していない。

我々のデータより、銅板の貼られた厚いスチール製の BMC 出射窓をもつ Clinac 600C の場合、相対的出力は  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  から  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  までの照射野サイズでほとんど変化しないことが分かる。すなわち、BSR は照射野サイズ依存の出力にほとんど影響しない。しかし、薄い Kapton 製の BMC 出射窓をもつ Clinac 2100C と 2300CD の場合、相対的出力は照射野サイズを  $5 \times 5 \text{ cm}^2$  から  $40 \times 40 \text{ cm}^2$  まで変化させると、15MV と 18MV ビームで 1.8%—2.4%，6MV で 1.2%—1.7% ほど BSR によって増加した。また、上部絞りから BMC への BSR の出力に対する影響は、上部絞りが BMC に近いので下部絞りの場合より大きい。1%に達するこの差は、コリメータ反転効果に対して測定可能な寄与であることが分かる。

the field-size dependence of relative output from a linear accelerator *Med. Phys.* 19 1441-1444

- Duzenli C, McClean B and Field C 1993 Backscatter into the beam monitor chamber: implication for dosimetry of asymmetric collimators *Med. Phys.* 20 363-367

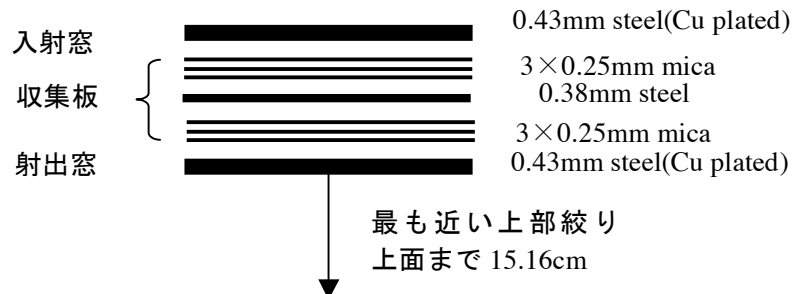
Kase K R and Svensson G K 1986 Head scatter data for several linear accelerators (4-18



- MV) Med. Phys. 13 530-532
- Kubo H 1989 Telescopic measurements of backscattered radiation from secondary collimator jaws to a beam monitor chamber using a pair of slits Med. Phys. 16 295-298
- Luxton G and Astrahan M A 1988 Output factor constituents of a high-energy photon beam Med. Phys. 15 88-91
- Patterson M S and Shragge P C 1981 Characteristics of ann 18 MV photon beam from a Therac 20 Medical Linear Accelerator Med. Phys. 8 312-318
- Scrimger J W 1977 Backscatter from high atomic number materials in high energy photon beams Radiology 124 815-817
- Tatcher M and Bjärngard B E 1993 Head-scatter factors in rectangular photon fields Med. Phys. 20 205-206
- Vadash P and Bjärngard B E 1993 An equivalent-square formula for head-scatter factors Med. Phys. 20 733-734
- Watts D L and Ibbott G S 1987 Measurement of beam current and evaluation of scatter production in an 18-MeV accelerator Med. Phys. 14 662-664
- Yu M K, Murray B and Sloboda R S 1995 Parameterization of head-scatter factors for rectangular fields using an equivalent square formalism Med. Phys. 22 1329-1332
- Yu M K, and Sloboda R S 1995 Analytical representation of head scatter factors for shaped photon beams using a two-component x-ray source model Med. Phys. 22 2045-2055

本文中で引用されている Duzenli 等(1993)の論文で紹介されている Clinac C シリーズのモニタ電離箱の構造を示す図を下記に転載します.

(a) Clinac 600C の mica BMC の断面図



(b) Clinac 2100C の Kapton BMC の断面図

