

## 関係文献の紹介

これらの文献の紹介は群馬県立健康科学大学の保科正夫教授のご教示による。

N L Powell, A Newing, M A Bullen, C Sims and S F Leaton, "A radiation safety survey on a Clinac-20 linear accelerator," Phys. Med. Biol., 1987, Vol. 32, No 6, 707-718

この論文の検討項目

1. 18 MV 光子ビームに伴う中性子の発生
2. 患者への中性子による吸収線量
3. 中性子遮蔽
4. 加速器および周辺物質の中性子による放射化

NCRP(1984)

医用加速器による中性子の発生に関する報告をした。その中では装置の遮蔽や部屋の構造によって中性子のエネルギースペクトルが大きく影響を受けるとした。Clinac-20 の 18 MV では中性子の平均エネルギーは 2 MeV であるが、加速器ヘッド内のタンゲステン遮蔽（平均厚 15 cm）により 0.5 MeV まで低下する。遮蔽コンクリートは中性子の多重散乱が複数回起るので、スペクトルはさらに変化する。

コンクリート自体はかなり低原子番号であるので、有効な中性子遮蔽である。直接中性子の平均エネルギーとコンクリートの 10 分の 1 価層 (TVL) の関係は McCall (NCRP 1984) に示されている。平均中性子エネルギーが 0.5 MeV の場合にはコンクリート TVL は 18 cm である。Clinac-20 (18 MV) の場合には TVL は 46 cm である (NCRP 1977)。コンクリートは光子ビームの遮蔽体として機能するが、付随する中性子に対して妥当な遮蔽体として機能する。しかし、中性子がコンクリート内で捕獲されると 10 MeV 程度までの  $\gamma$  線が放出されるので、この  $\gamma$  線の遮蔽も考慮しなければならない。

18 MV の光子のみであれば、迷路は 1 回屈曲 (single-leg) で十分で、扉も不要である。しかし、中性子が混入するので、中性子が捕獲される前までにエネルギーを低下させるために少なくとも 2 回の散乱を起こす迷路でなければならない。よって、中性子を考慮した two-leg 構造の迷路が必要であり、さらにコンクリートからの高エネルギー捕獲  $\gamma$  線を阻止するために遮蔽扉が必要となる。別法として、ボロンの利用がある。ボロンは  $(n, \alpha)$  による中性子捕獲断面積が大きく、捕獲  $\gamma$  線は 0.48 MeV 程度に過ぎない。そこで、水素含有率の高いポリエチレンとボロンを組み合わせることで、中性子遮蔽効率だけでなく  $\gamma$  線の低下も効率的となる。リチウムは  $(n, \alpha)$  による中性子捕獲断面積は中程度であるが、 $\gamma$  線の放出は無視できる程度であるので、リチウムの方がすぐれている。リチウム水素混合物による遮蔽材は商品化されている (Premadex, Premise

Engineering, Watford, UK)。

測定器材：光子線量率測定 Victoreen 470A サーベイメータ、中性子線量率測定 NM2 レムメータ  
(この検出器は放射線場に検出器を配置し、遠隔で信号量を記録できる)

中性子の速度は光子と較べると非常に遅い。しかし、10 keV 以上の中性子は加速器の光子発生パルスの  $10\ \mu\text{s}$  以内には迷路に入口に到達する。光子の発生は 150 パルス/s (光子の発生数は装置に依存する)

#### 治療室外のサーベイメータ測定

ポリエチレン 5 から 10 mm をサーベイメータに被せたが測定値に影響はなく、20 mm 厚で 20% の線量率の低下があった。このことより、二次電子の有意な存在はなく、漏洩ビームのエネルギーもかなり低くなっていることが分かった。

外壁での最大光子線量率は、アイソセンタで 3 Gy/min において 0.26 mGy/h であり、設計計算値の 0.4 mGy/h と十分な一致である。同一点での最大中性子線量当量率は  $2\ \mu\text{Sv/h}$  であった。この建家での壁を貫通するダクトはすべて “dog-leg” 構造とし、有意な漏洩線量は見られなかった。

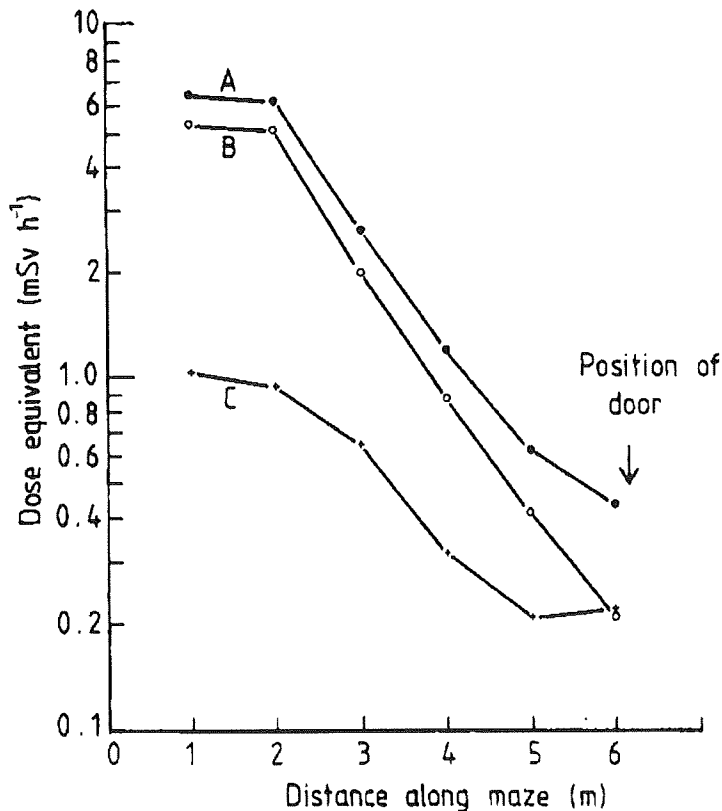
屋上の最大光子線量率は直接線束中の位置で 5 mGy/h、換気ダクトが直線的に貫通する部分からの漏洩中性子の線量当量率は 28 mSv/h (ビーム方向に依存しない)。

水平から  $45^\circ$  上方向にビームを照射したときの “air shine” である公道における地表での線量率は最大  $2\ \mu\text{Gy/h}$  であった。

治療室扉 (heavy door コンクリートからの高エネルギー捕獲  $\gamma$  線の遮蔽を考慮した扉) の外側で光子漏洩線量率は  $10\ \mu\text{Gy/h}$ 、中性子は  $4\ \mu\text{Sv/h}$  であった。

#### 迷路内の中性子線量当量率

扉を閉じた状態で迷路幅の中心を通る直線状を 1 m 間隔で NM2 のカドミウムシールド有無の二つの状態で中性子線量当量率を測定した。測定結果は下図に示す。距離に伴う線量率の低下は指数関数的であり、3 m の距離で 10 分の 1 まで低下した。迷路を進む中で急速な熱中性子化が起きていることが確認された。理由は図の説明を参照。



図の説明

迷路の中心上の中性子線量当量率。A：全中性子線量当量率、B：速中性子線量当量率（レムメータをカドミウムでシールドしたときの値）、C：熱中性子線量当量率（AとBの差）。

図中のAとBの最初の2つの点の線量率はほとんど同じである。というのは、これらの点は治療室内にあり、室内における中性子線量当量はかなり等方的であることによる。

NCRP (1984)の提案する中性子線量当量の推定方法

方法1：迷路内での距離に伴う線量当量の低下は指数関数的であり、10分1となる距離は5 mとする（今回の調査では3 m）。迷路の治療室端での線量当量は加速器ヘッドからの漏洩（距離1 mの地点の漏洩）から逆二乗則に従う（厳密には、直接速中性子に対して適用される）。今回の例では、アイソセンタでの線量率の0.1%がヘッド漏洩線量当量と仮定すると、迷路端での全線量当量率は0.52 mSv/hとなる。実測値では、図から分かるように0.44 mSv/hであった。

方法2：中性子は加速器や扉から直接見通せる壁、天井および床の面積で一度だけ散乱すると考える。そのときの線量当量は問題とする面積を介して加速器から扉までの逆二乗則に従うと仮定する。定式は各面積におけるアルベド albedo（反射？）に対して与えられる。漏れ線量を0.1%と仮定すると、この方法による推定値は0.14 mSv/hである。この方法は速中子と epithermal 中子に対してのみ適用されるので、図中の0.21 mSv/hが実測値となる。

## 放射化

### 治療室内の放射化

#### 結果

1. NCRP が推奨した迷路端における中性子線量等価の予測式は信頼のおけるものである。

B. Perrin, A. Walker and R. Mackay, "A model to calculate the induced dose rate around an 18 MV ELEKTA linear accelerator," Phys. Med. Biol. 48, N75-N81, 2003

加速器：Elekta

X線公称エネルギー：18 MV

照射野：10 cm×10 cm

光核反応： $(\gamma, n)$

測定対象：加速器ヘッド、加速器寝台、EPID

測定結果：ビームオフ後2分の線量率  $4.6 \mu\text{Sv h}^{-1}$

測定精度：加速器表面の線量率は計算値と測定値は±12%で一致

影響：治療技師の全身被曝は60,000 MU/週、18 MVのX線照射で2.5 mSv/週

21EX(Varian社)で報告された結果2.9 mSvと一致

過去論文の結果は  $0.5 - 5 \text{ mSv y}^{-1}$

#### 方法

- ・測定は電離箱測定器、校正は National Physical Laboratory
- ・対象装置は、ELEKTA precise linac で MLCi 治療ヘッドがついている
- ・診療前の月曜日の朝に測定（照射は最小限で放射化物生成には影響なし）
- ・モデルをつくって計算。その計算と測定を比較。

#### 2.1 治療ヘッドの誘導線量率のモデル化

- ・2,000MU 照射し、数時間にわたってヘッド前面の誘導放射能の半減期を測定した方法に倣って500MU照射し測定（1.3分の照射）
- ・指数関数を当てはめ、主要な半減期成分と一定程度寄与する成分を同定
- ・単位照射あたりの短半減期核種の生成量は5,000MU照射との結果とも比較し確認

#### 2.2 治療ヘッド周囲の線量率の解析

- ・照射野、エネルギー、ビーム射出後のモダリテイを変えて、10 cm×10 cmの開放照射野での

## 18 MV 照射と比較

### 2.3 治療室内の誘導放射能による線量率測定

- ・ 18MV のみ照射施設で、導入数ヶ月後に、稼働日に毎日 2 時間と翌日の朝 8 時に測定
- ・ 測定点はアイソセンター高さの 1m 側方とアイソセンターから 50cm ガントリ側（これをルーム位置とした）
- ・ ガントリは 90 度回転
- ・ これらの配置は、治療スタッフの立ち位置を考慮
- ・ 計測は 8 時間後まで繰り返した

### 2.4 治療ヘッドと室内の長半減期核種の測定

- ・ 18MV のみ照射施設で、臨床導入から半年後に、ヘッドなどに蓄積されている誘導放射能がなにか計測した
- ・ 測定は連続した月曜日の朝に行い短半減期核種の影響をキャンセルした

### 2.5 誘導放射能のモデル化

- ・ 室内の線量率を得る計算式を作成
- ・ 位置とエネルギーを重み付け
- ・ 残留放射能の影響も考慮
- ・ MU 数とビーム照射数から計算
- ・ 各核種の寄与線量率は減衰も考慮

### 2.6 臨床でのモデルの当てはめを評価

- ・ 計算と測定を比較
- ・ 平均的な患者は治療室に 12 分間滞在
- ・ ウエッジなし conformal 4-field brick 治療を受け、フィールドあたり 75MU
- ・ フィールドは、8 分間のインターバルで 1.1 分間デリバーされる
- ・ スタッフは、最終ビーム照射後 2 分で入射し、次の患者のビーム照射直前に退出
- ・ 1 日 40 人の患者さんを治療

## 3.結果と考察

### 3.1 治療ヘッドの誘導線量率のモデル化

主要な誘導核種と MU あたりの線量率

Al-28: 4.4 {nSv/h/MU}

Co-62: 5.6 {nSv/h/MU}

Mn-56: 0.3 {nSv/h/MU}

W-187: 0.04 {nSv/h/MU}

### 3.2 治療ヘッド周囲の線量率の解析

表 2 : 18MV ではウエッジフィルタのために 1,2 位置で従来よりも誘導放射能線量率が小さい

表 3 : ビームサイズで誘導放射能線量率は変化。ただし、どこで生成されるかで線量率計の方向依存性が効いてきて結果の解釈を困難にしている

### 3.3 治療室内の誘導放射能による線量率測定

- ・線量率はルームポジションで  $0.4 \mu\text{Sv/h}$ 、イメージャーで  $1.1 \mu\text{Sv/h}$ 、PSS では最大  $3 \mu\text{Sv/h}$

### 3.4 治療ヘッドと室内の長半減期核種の測定

- ・残留放射能は検出されず
- ・しかし、月曜の朝でもフロントフェイスで  $0.4 \mu\text{Sv/h}$ 、これはヘッドでの長半減期核種によるに違いない

### 3.5 誘導放射能のモデル化

- ・木曜日の最後の患者 (MU 値が大きかった) 後の値が  $0.7 \mu\text{Sv/h}$  ずれていた以外は  $0.3 \mu\text{Sv/h}$  以内で一致
- ・照射後 2 分では、誘導放射能線量率の半分が、前の二人の患者由来であり、計算値よりも高くなった

### 3.6 職員の最大被ばく線量

- ・照射後 2 分では、front face  $4.5 \mu\text{Sv/h}$
- ・室内で  $0.4 \mu\text{Sv/h}$
- ・スタッフの平均線量率は  $0.265 \mu\text{Sv/h}$  なので線量限度は超えない

**Table 2.** The relative variation ( $W_{rel}$ ) of the IDR as a function of position and energy setting around the head of an ELEKTA Precise linac. Values quoted are for a dose rate induced by an 18 MV photon beam, with a  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  jaw size, and normalized to the front face reading with 18 MV settings.

Position/energy setting	18 MV (photons)	6 MV (photons)	6 MeV (electrons)
1 (front face)	1	2	0.5
2 (isocentre)	0.5	1.2	0.4
3 (under jaws)	0.35	0.35	0.35
4 (level with jaws)	0.5	0.5	0.5
5 (level with target)	0.5	0.5	0.5

**Table 3.** Relative dose rate at front face and isocentre as a function of field size normalized to  $10 \times 10 \text{ cm}^2$  field at the front face for each energy setting.

Field size	6 MV		18 MV	
	Face	Isocentre	Face	Isocentre
$5 \times 5 \text{ cm}^2$	0.7	0.4	0.5	0.4
$10 \times 10 \text{ cm}^2$	1.0	0.6	1.0	0.6
$20 \times 20 \text{ cm}^2$	2.5	0.8	3.5	0.8
$30 \times 30 \text{ cm}^2$	2.5	0.8	3.5	0.8

(コメント)

・この論文が対象にしているのはスタッフの誘導放射能による被ばく

寝台と治療室の 10 MV 以上での放射化についての論文

L. Ahlgren and L. E. Olsson, "Induced activity in a high-energy accelerator," *Phys. Med. Biol.* 33, 351-354 (1988)

10MV 以上の加速器における光核反応による放射化は加速器の操作者に対する被曝に関係する。最大の放射化は最大の光子フルエンスに晒されるターゲット、ターゲットホルダ、平坦化フィルタ、照射時に用いる種々のアクセサリといった加速器の構成部品であると予想される。

この論文では 18MV (Clinac 1800, 20cm と 10cm 深部の電離比 1.52) で発生する放射性核種を、Ge 検出器 (1.25 MeV で 5% の検出効率) を用いて同定している。この装置の定格治療距離における最大吸収線量で 2 Gy となる  $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  の照射野サイズで 40 秒照射した。Ge 検出器をターゲットを見通す方向にアイソセンタに配置し、 $\gamma$  線スペクトルを解析した。測定は照射後 10 分を超えないように開始した。511 keV の消滅放射線の半減期を推定するために、測定は繰り返して行った。壁で発生する放射性核種はコンクリートと鉄の 0.5 kg のサンプルを照射して同定した。

放射化がターゲット領域以外のコンクリート壁や空中といった場所に起るか否かを確認する

ために、アイソセンタから種々の距離においてプラスチックシンチレーションサーベイメータで吸収線量を調べた。コリメータヘッド、くさびフィルタ、シャドートレイの表面の吸収線量はTLDで推定した。このとき、公称治療距離で40 Gyの吸収線量に相当する10分(10 cm×10 cm)とした。放射化による放射線は60分間の累積で測定した。

これとは別にくさびフィルタとシャドートレイは加速器からの影響を避けるために、TLD測定中は別の部屋に持ち出した。このときの測定は3 Gy/分の1分照射の後、照射時間、検出器の測定累積時間、放射化物の半減期から、吸収線量を推定した。

通常の治療における平衡吸収線量率は、患者当たり2 Gy(線量率3 Gy/分)で150分の間に10名の患者の治療という条件で、プラスチックシンチレーションサーベイメータを加速器のアイソセンタに配置して測定した。

## 結果

### γ線スペクトル解析

Table 1. Activation products found in the accelerator head.

Radionuclide	Half life	Identified by (keV)
<sup>24</sup> Na	15 h	1369
<sup>28</sup> Al	2.2 min	1779
<sup>54</sup> Mn	312 d	835
<sup>56</sup> Mn	2.6 h	847, 1811
<sup>57</sup> Ni	36 h	1378, 1920
<sup>53</sup> Fe	8.5 min	378
<sup>59</sup> Fe	45 d	1099, 1292
<sup>58</sup> Co	71 d	811
<sup>62</sup> Cu	9.7 min	511
<sup>64</sup> Cu	12.7 h	1346
<sup>82</sup> Br	35.3 h	554, 776, 828, 1044, 1317, 1475
<sup>122</sup> Sb	2.7 d	564
<sup>187</sup> W	24 h	480, 618, 686

Table 2. Activation products found in the accelerator accessories.

Radionuclide	Half life	Identified by (keV)
<sup>28</sup> Al	2.2 min	1779
<sup>53</sup> Fe	8.5 min	378



$^{56}\text{Mn}$	2.6 h	847, 1811	
$^{27}\text{Mg}$	9.5 min	844, 1014	Lead wedge filter 60°
$^{28}\text{Al}$	2.2 min	1779	
$^{120}\text{Sb}$	16 min	703, 989, 1172	
	5.8 d	1023	
$^{122}\text{Sb}$	2.7 d	564, 693, 1257	
$^{124}\text{Sb}$	60.2 d	603, 646, 723, 1691	
$^{15}\text{O}$	2 min	511	Transparent lead-block holder
$^{34\text{m}}\text{Cl}$	32 min	146, 1176	
$^{38}\text{Cl}$	37 min	1642	

コンクリートサンプルに対する照射では自然の放射性同位元素と同時に、 $^{53}\text{Fe}$ 、 $^{56}\text{Mn}$  および  $^{28}\text{Al}$  が同定された。

#### 吸収線量

3 Gy/min の 1 分照射の後の吸収線量率の計算値を Table 3 に示す。

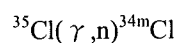
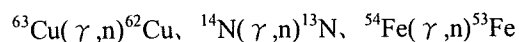
Table 3. Absorbed dose rate at the surface of the accelerator head and accessories after 2 Gy at normal treatment distance.

Position	Dose rate ( $\mu\text{Gy/h}$ )		Dominating half life (min)
	One patient	Ten patients	
Accelerator head	8.5	10	10 and 2.2
Lead holder	80	270	32
Lead wedge	130	-	16

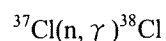
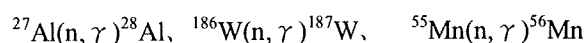
#### 検討

生成された放射性核種 (Table 1 と 2) より、中性子捕獲と同時に光核反応が認められた。

#### 光核反応



#### 中性子捕獲



シンチレーションサーベイメータで得た吸収線量率の測定では、加速器ターゲットから 3.4 m の距離にある壁よりも加速器ヘッド近傍は約 8 倍の強度であった。これより、誘導放射能の主たる部分は加速器ヘッドであるということを示している。

加速器ヘッド内の誘導放射能より、術者の被曝はほぼ  $8\mu\text{Gy/d}$  ( $2\text{ mGy/y}$ ) 程度と推定される。通常自然放射能による線量は  $0.3\ \mu\text{Gy/h}$  であり、8 時間就労とすると  $1.2\ \mu\text{Gy}$  程度であるから、その 7 から 8 倍程度の被曝となる。シャドートレイの表面吸収線量率は  $80\ \mu\text{Gy/h}$  と高い。これは  $\beta$  線と  $\gamma$  線の両方による。したがって、治療直後に加速器ヘッド内の光照射野のような部品の修理しなければならないような場合には注意を要する。

#### 治療技師の被曝

A. Almen, L. Ahlgren and S. Mattsson, "Absorbed dose to technicians due to induced activity in linear accelerators of radiation therapy," *Phys. Med. Biol.* 36, 815-822 (1991)

#### 測定

加速器が臨床使用前の月曜日の朝

それまでの加速器の使用状況は臨床であるので間欠的照射であり、月曜日の朝の測定では誘導残留放射能は最小であるはず。

#### 照射条件

18 MV の 2000 MU の照射後、誘導線量率を加速器ヘッド前面で数時間測定した。

#### 放射化生成物の同定

測定データを指数関数で回帰することで、半減期と放射性同位元素を同定した。500 MU の照射を繰り返すことで得た MU 当たりの放射化係数は

Isotope name	Half-life	Coefficient per MU ( $\text{nSv h}^{-1}$ )
Aluminium 28	2.3 min	4.4
Copper 62	9.7 min	5.6
Manganese 56	2.6 h	0.3
Tungsten 187	23.9 h	0.04

#### 誘導線量率 $DR$ のモデル ( $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ )

$$DR = C_{\text{room}} + W_{\text{rel}} \left[ C_{\text{res}} + N \sum_p \sum_i a_i \cdot \exp(-k_i t_p) \right]$$

$C_{\text{room}}$  : 治療室内の誘導線量率

18 MV の臨床照射の 2 時間ごとと翌日の午前 8 時に測定  
測定点はアイソセンタの高さで側方 0.5 m と 1 m の位置  
加速器の架台は 90°

$W_{ref}$ : 加速器ヘッド周囲の誘導線量率

18 MV の 10 cm×10 cm 照射野、2000 MU 照射後、電離線量率による測定（読み取り  
下限  $0.1 \mu\text{Sv h}^{-1}$  の機器）

$C_{res}$ : 加速器臨床使用を開始後 6 ケ月間 18 MV のみを使用して、加速器ヘッド、寝台、EPID の  
長半減期の同位元素による残留放射能を測定（10 cm×10 cm 照射野）

$a_i$ : 表中の各同位元素の coefficient/MU

$k_i$ :  $\ln 2/T_{0.5}(i)$

$t_p$ : ビーム“p”を停止してからの分単位の経過時間

David S. Followill, Marilyn S. Stovall, Stephen F. Kry, and Geoffrey S. Ibbott, “Neutron source strength measurements for Varian, Siemens, Elekta, and General Electric linear accelerators”, JOURNAL OF APPLIED CLINICAL MEDICAL PHYSICS, VOLUME 4, NUMBER 3, SUMMER, 189-194, 2003

対象機種: Varian, Siemens, Elekta/Philips, General Electric のモデル別に 36 機種

方法: 加速器とエネルギーの組み合わせで明確な中性線源強度 ( $Q$  値) が明確ではなく、論文からの情報も少ない。そこで、この研究では金箔放射化法により中性子フルエンスを 36 の直線加速器において測定した。

結果: 患者平面における中性子フルエンスは照射室の表面積に依存せず、室内散乱線ではなく加速器ヘッドからの直接中性子フルエンスにより依存すると考えられる。中性子線源強度  $Q$  値は測定した中性子フルエンスから求めた。予想されたように、 $Q$  値は光子エネルギーの増に伴い増加した。 $Q$  値は 10 MV ビームで  $0.02 \times 10^{12}$  中性子数/Gy、25 MV ビームで  $1.44 \times 10^{12}$  中性子数/Gy の範囲にあった。

これまでの報告

NCRP Report 79<sup>6</sup>と McGinley<sup>7</sup>によると、加速器によって発生する X 線吸収線量当たりの全中性子フルエンス ( $\text{n/cm}^2$ )  $\Phi_{total}$  は直接中性子 (dir)、散乱中性子 (sc) および熱中性子 (th) のフルエンスの和として次式で与えられる。

$$\Phi_{total} = \Phi_{dir} + \Phi_{sc} + \Phi_{th} \quad (1)$$

<sup>6</sup> Neutron Contamination from Medical Accelerators, NCRP Report No. 79 (National Council on Radiation Protection and Measurements, Bethesda, MD, 1984).

<sup>7</sup> P. H. McGinley, Shielding Techniques for Radiation Oncology Facilities (Medical Physics Publishing, Madison, WI, 1998).

コンクリート遮蔽の照射室の場合には、McCall<sup>8,9</sup>のモンテカルロ解析では次式で中性子フルエンスが求まることが示された。

$$\Phi_{\text{total}} = \Phi_{\text{dir}} + \Phi_{\text{sc}} + \Phi_{\text{th}} = (aQ/4\pi d^2) + (5.4aQ/S) + (1.26Q/S) \quad (2)$$

ここで、

$a$  : 加速器ヘッド遮蔽体を透過する中性子の透過率係数。鉛で 1.0、タングステンで 0.85。

$S$  : 照射室の表面積 (cm<sup>2</sup>)

$Q$  : アイソセンタにおける X 線吸収線量 Gy 当たり加速器ヘッドからの中性子の線源強度

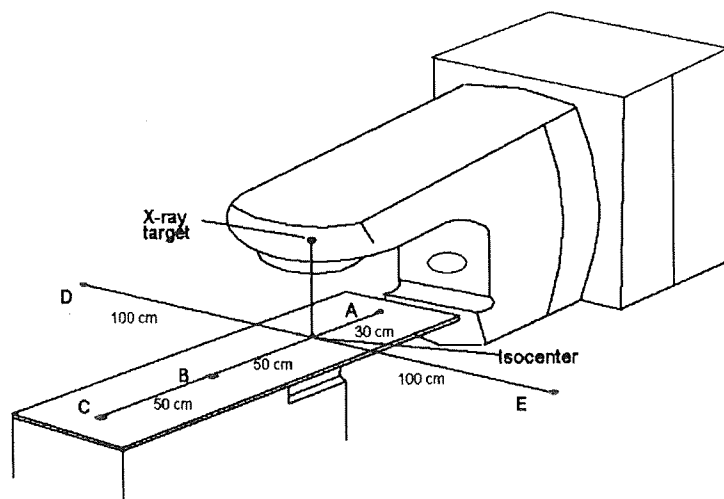
$d$  : X 線ターゲットから直接中性子を評価する点までの距離 (cm)

---

<sup>8</sup> R. C. McCall, T. M. Jenkins, and R. A. Shore, "Transport of acceleration produced neutrons in a concrete room," IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26, 1593-1602 (1979).

<sup>9</sup> R. C. McCall, P.H. McGinley, K. E. Huffman, "Room scattered neutrons," Med. Phys. 26, 206-207 (1999).

## 中性子フルエンス測定のための金箔の配置



中性子フルエンスは加速器コリメータ開度に依存するので、この研究では 20 cm×20 cm とした。しかし、絞りを 0 cm×0 cm とすると中性子の発生が増加することも分かっている。X線の投与線量はアイソセンタにある最大線量深で 30 Gy とした。

金箔放射化法によって得た  $\Phi_{\text{total}}$  を式(2)で展開することにより  $Q$  値を求めた。金箔放射化法での中性子フルエンスの推定精度は  $\pm 2\%$  (1s.d.) である。

## 金箔放射化法

金箔は中性子ポリエチレン変調カバーの内側にあり、この変調カバーによって入射する速中性子を熱中性子とする。したがって、金箔は熱中性子のみで晒される。金箔は熱中性子エネルギーレベルで放射化断面積が高い。変調カバー自体がカドミウムカバーで覆われている。カドミウムは入射熱中性子を吸収する役割を果たす。この結果、金箔は熱中性子のエネルギーレベルにエネルギー損失をした速中性子のみをカウントすることになる。

以上のことより、式(2)による解は次式で表される。すなわち、測定には熱中性子が含まれないので、また、遮蔽体をタングステンとして  $a=1.0$  とすると

$$Q = \frac{\Phi_{\text{dir+sc}}}{\frac{1}{4\pi d^2} + \frac{5.4}{S}}$$

アイソセンタに配置した金箔の場合、変調カバー自体の( $\gamma, n$ )反応による中性子に晒され、中性子線源強度を過大評価することになる。そこで、今回の分析ではアイソセンタでの中性子フルエンスの測定値は用いることはしていない。

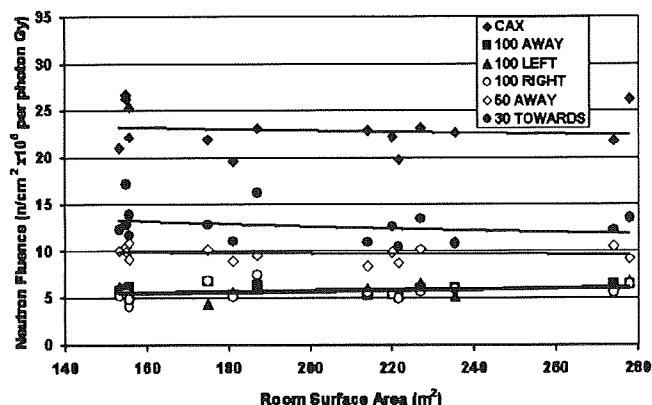
Table I. Neutron source strength ( $Q$ ) values for various linac model and energy combinations.

Manufacturer	Model	Nominal MV	$Q$ values ( $\times 10^{12}$ neutrons/ Gy)	Std. deviation ( $\times 10^{12}$ )	No. of Linacs	Published values neutrons/ Gy)	$Q$ ( $\times 10^{12}$ )
Varian	1800	10				0.06	
	1800	15				0.76	
	1800	18				1.22	
	2100C	18	0.96	0.11	17		
	2100C <sup>b</sup>	18	0.87		1		
	2300CD	18	0.95	0.03	2		
	2500	24	0.77		1		
Siemens	MD2	10	0.08		1		
	MD	15	0.20	0.02	2		
	KD	18	0.88	0.10	2		
	KD	20				0.92	
	Primus <sup>a</sup>	10	0.02		1		
	Primus <sup>a</sup>	15	0.12		1		
	Primus <sup>b</sup>	15	0.21		1		
Elekta	Primus	15			1	0.20	
	SL-20	17				0.69	
	SL-20	18	0.46		1		
	SL-25	18	0.46		1		
	SL-25	22				2.37	
GE	SL-25	25	1.44	0.31	3		
	Saturne 41	12				0.24	
	Saturne 41	15				0.47	
	Saturne 43	18	1.32		1	1.50	
	Saturne 43	25				2.40	

<sup>a</sup> With MiMIC device in place.

<sup>b</sup> With the multileaf collimator set to a 3.8 cm x 3.8 cm field.

### 照射室の表面積に対する中性子フルエンス



患者平面内の6つの位置における15台のClinac 2100Cの18 MVのX線による照射室の表面積に対する中性子フルエンス ( $\text{n}/\text{cm}^2 \times 10^6/\text{photon Gy}$ )

患者平面内の測定点によって中性子フルエンスの量は異なる。しかし、照射室の表面積に対する依存はない。照射室の空間内の散乱中性子と熱中性子のフルエンスは表面積に依存する。したがって、上図の結果は、患者平面での中性子フルエンスは基本的に加速器ヘッドで発生する直接中性子フルエンスによるもので、壁で発生する散乱した速中性子の影響はほとんどないということを示唆している。

一般的には、発生する中性子の数はX線のエネルギーと共に増加すると期待される。今回示したQ値には必ずしもそのような傾向にないものもある。例えば、2100Cの18 MVと2500の24 MVではエネルギーと中性子数は逆転している。これはヘッド遮蔽によるものである。これまでに公表されたデータを含めたここに示したQ値は、加速器モデルとエネルギーの組み合わせでみると、中性子フルエンス測定固有誤差 $\pm 20\%$ を考えると一致すると云える。

F. d'Errico, R. Nath, L. Tana, G. Curzio, and W. G. Alberts, "In-phantom dosimetry and spectrometry of photoneutrons from an 18 MV linear accelerator," Med. Phys. 25 (9) 1717-1724, (1998)

異なる中性子エネルギーにレスポンスをもつ3つのsuperheated drop detectorを組み合わせることで、高エネルギーX線を照射したファントム中の $(\gamma, n)$ 反応の中性子の線量当量dose-equivalentとエネルギー分布を評価した。1つの検出器は全中性子線量当量を、残り2つの検出器は1 MeVと5.5 MeV以上の速中性子の寄与を測定する。確認試験は18 MVのX線10 cm  $\times$  10 cmから発生する中性子場で行った。測定は組織等価液体ファントム中の深さ1、5、10 cmおよび15 cm、ビーム中心軸から0、10 cmおよび20 cmの軸外点で行った。これらのデータを用い、加速器ヘッドからの透過中性子と直接中性子による放射線治療患者の平均積分線量の計算に用いた。今回の検出器を用いた手法の有効性を確認するためにtrack etch検出器も用いた。X

線の一次ビーム内では入射中性子線量当量は、光子線量 Gy 当たり 4.5 mSv であった。1 MeV 以上の速中性子がビーム軸上の全中性子線量のほとんどを生むことが分かった。その相対的寄与は深さと共に増し、入射面での約 60% から深さ 10 cm での 90% 強となる。したがって、平均エネルギーは中性子スペクトルが硬化するのでファントム中の深さと共に増加する。

この研究で用いた検出器

superheated emulsions (SE), 商品名 superheated drop detectors (SDD, Apfel Enterprises, New Haven, CT, USA) もしくは bubble damage detectors (BDD, Bubble Technology Industries, Chalk River, ON, Canada)

この検出器は放射線防護の分野で 20 年以上前から使用されてきたが、最近放射線治療分野へ応用できるよう開発された。



The dosimeters consist of ~4.5 ml vials (14 mm inner diameter, 30 mm height) connected to graduated pipettes.

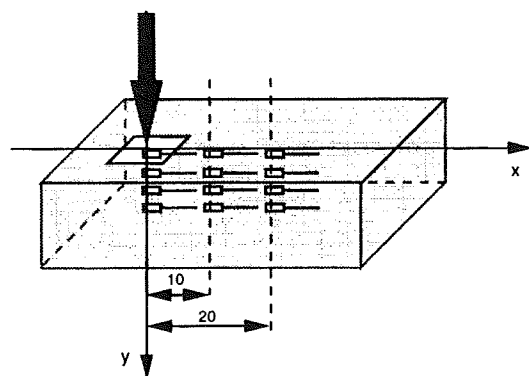
用いた直線加速器：CGR-MeV Saturne 20 の 18 MV の X 線

照射野サイズ：10 cm × 10 cm

線源表面間距離：100 cm

ファントムサイズ：20 cm × 30 cm × 80 cm の Plexiglas (アクリル) 製のタンクに組織等価 (TE) 溶液を充填し、温度  $30 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 。

検出器のファントム中での配置





## 測定結果

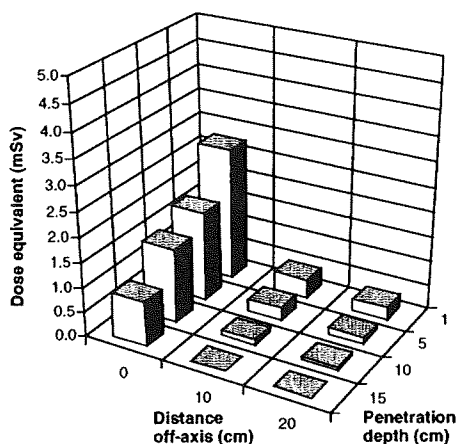
### 全中性子線量当量

Measured total neutron dose equivalent per unit photon dose in a phantom irradiated by an 18 MV x-ray beam.

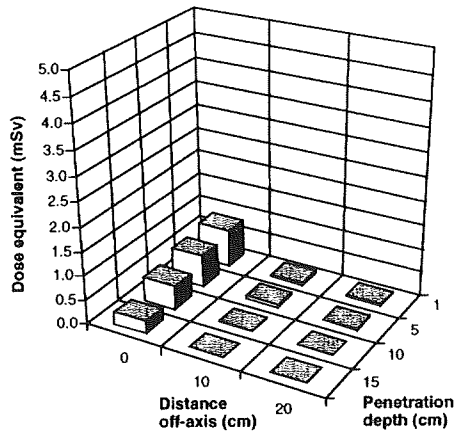
Neutron dose equivalent per unit photon dose (mSv/Gy)			
Depth (cm)	On axis	10 cm off-axis	20 cm off-axis
1	4.50	2.05	1.75
5	2.50	0.80	0.60
10	1.50	0.30	0.20
15	1.00	0.25	0.15

### 速中性子線量当量

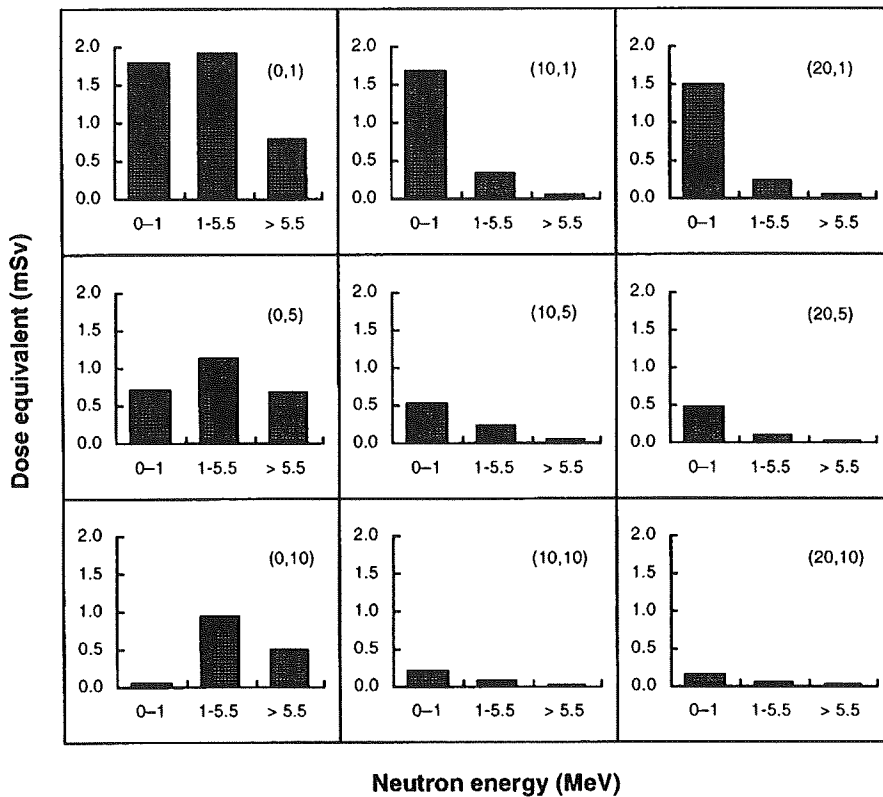
X線一次ビーム内に速中性子（1 MeV から 5.5 MeV）は存在している。一次ビーム外に速中性子が到達するためには加速器ヘッドの遮蔽体を衝突なしに通過してこなければならない。したがって、このような中性子の割合は非常に少ないということである。



Neutron dose equivalent per unit photon dose from neutrons above 1.0 MeV in a phantom irradiated by a 10 cm × 10 cm field of 18 MV x-rays.



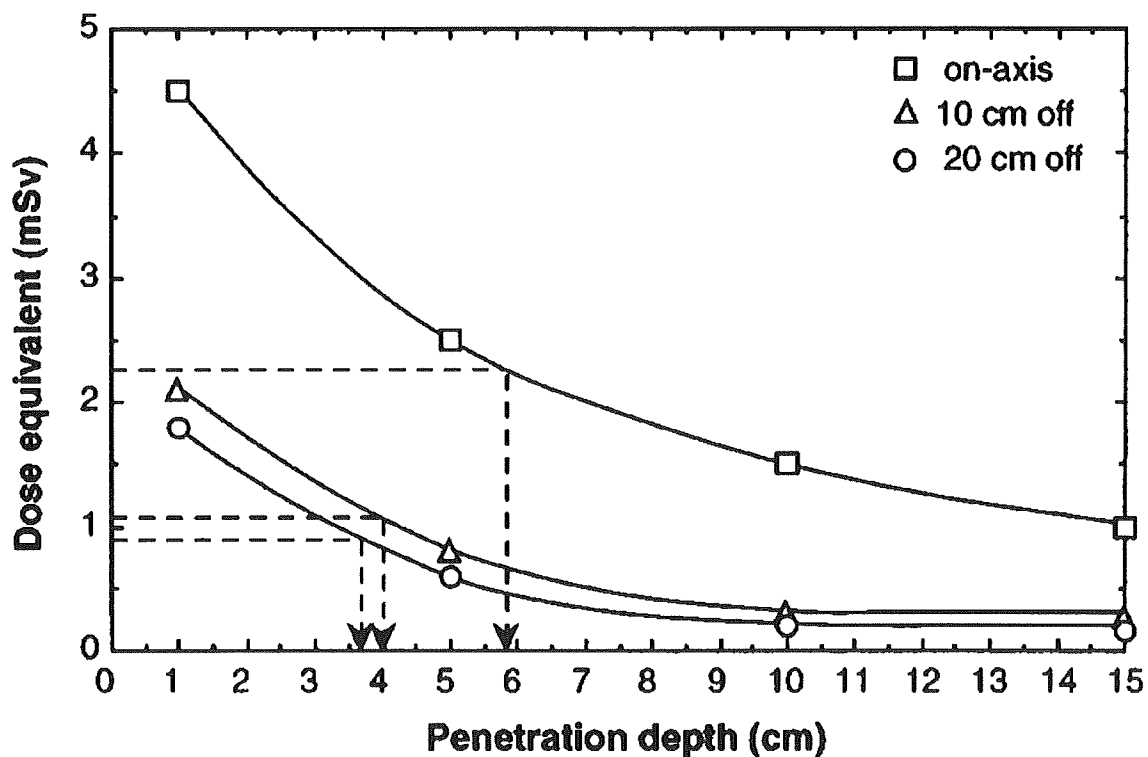
Neutron dose equivalent per unit photon dose from neutrons above 5.5 MeV in a phantom by a 10 cm × 10 cm field of 18 MV x-rays.



Differential distribution of neutron dose equivalent in the energy bins defined by the three SE thresholds. Measurement point coordinates are from the orthogonal reference system of Fig. 2. (図中の(0,5)とは中心軸上の深さ 5 cm の点の座標を示す)

ビームの内外における中性子の特性

ビーム内外での中性子線量当量の深さに伴う変化は下図の通りである。



Total neutron dose equivalent per unit photon dose as a function of depth on central axis ( $\square$ ), 10 cm off-axis ( $\triangle$ ), and 20 cm off-axis ( $\circ$ ).

ビーム軸上の減弱は、人体組織元素の中の主として水素により HVL は約 6 cm であるので、線量減弱係数  $\Lambda = \ln 2 / \text{HVL} = 0.12 \text{ cm}^{-1}$  である。10 cm と 20 cm の軸外での線量減弱係数はそれぞれ 0.17 と  $0.2 \text{ cm}^{-1}$  と大きい。このことより、ビーム内は速中性子、ビーム外は加速器ヘッドのコリメートシステムとの相互作用によりエネルギーの低下した中性子が多いということである。

この論文で示された中性子線量当量の最大値  $4.5 \text{ mSv/photon Gy}$  で考えると、光子総線量 60 Gy としても  $0.3 \text{ Gy}/60 \text{ Gy}$  ということである。したがって、LET を考慮しても治療効果に対する影響は無視できると云えるだろう。考慮の対象となるのは、治療ビーム外の要注意臓器へのエネルギーの低い中性子による線量である。しかし、これは実務的には、その存在があるという認識にとどまる問題と考える。

## 遮へい計算の理解のための解説資料

Q. 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアルの 10MV のリニアックの例で、T=12 時間／月とすると、トータルで 12 時間を超えなければ、それぞれの方向に着目すると、最大で 1 月間に、下 12 時間、上 6 時間、横それぞれ 3 時間、照射してもよいですか？

A. トータルで 12 時間を超えなければ、構いません。

遮蔽計算では、線源から見える面は、利用線錐で照射された場合と照射ヘッドからの漏えい線量の加算で評価しています。

最大で下 12 時間、上 6 時間、横それぞれ 3 時間出しても利用線錐方向の線量は、限度を超えないことが担保されています。

従って、トータルで 12 時間は超えなければ照射ヘッドからの漏えいや迷路散乱中性子の線量も線量限度を超えていないことを担保することができます。

方向利用率が、下：1、上：0.5、横：0.25 である場合に、全体で  $1+0.5+0.25$  だけ照射できるとして、上向きの最大では  $1/(1+0.5+0.25)$  の割合で照射できるという理解は誤りです。

ここでの方向利用率は、許可された使用時間に対し、それぞれの方向にどれだけの時間照射しうるかを示すものです。

Q. 方向利用率とは何ですか？

A. 最大照射方向の方向利用率を 1 として、その他の方向の一次ビームの照射時間や照射した線量を、最大照射方向に対する比で示したものです。

最大照射方向に対する相対的な利用割合がしゃへい計算マニュアルで示されている方向利用率です。

Q. 遮蔽ヘッドからの漏えい線量は、照射方向別に求める必要があるのでしょうか？

A. 照射ヘッドからの漏えい線量は、各方向で照射ヘッドの位置が異なることから、方向別に求めることにしています。

Q. 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアルの 10MV のリニアックの例で、ヘッドからの漏えい線量でビームが評価点方向に向いていない場合に、ヘッドからの漏えい線量を考慮していないのは何故ですか？また、患者さんからの散乱線を考慮していないのはどうしてですか？

A. いずれも無視できるからです（ちなみに、基になった医学放射線学会の指針では、他の