



Title	放医研サイクロトロンによる速中性子線用ウェッジフィルタ
Author(s)	中村, 譲; 古川, 重夫; 飯沼, 武 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1983, 43(5), p. 691-699
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/17782
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

放医研サイクロトロンによる速中性子線用ウェッジフィルタ

放射線医学総合研究所臨床研究部

中村 譲* 古川 重夫 飯沼 武 恒元 博
 同 物理研究部
 川島 勝弘 星野 一雄 平岡 武 丸山 隆司

(昭和57年6月21日受付)
 (昭和57年8月20日最終原稿受付)

Wedge Filter for Fast Neutron Beam from NIRS Cyclotron

Y. Kutsutani-Nakamura, S. Furukawa, T. Iinuma and H. Tsunemoto
 Division of Clinical Research, National Institute of Radiological Sciences
 K. Kawashima, K. Hoshino, T. Hiraoka and T. Maruyama
 Division of Physics, National Institute of Radiological Sciences

Research Code No.: 203.2

Key Words: Wedge filter, Fast neutron, Dose gradient method,
Dose distribution, Cyclotron

The fast neutron beam from NIRS cyclotron has been in use for the clinical trial of radiotherapy since November 1975. The beam is produced by bombarding a thick beryllium target with 30 MeV deuterons.

The polyethylene wedge filter is mounted on the exit of collimator at 140 cm from the target. Wedge filters designed based on the dose gradient method for SSD 190 cm and 6 cm depth were the angle of 26°, 40° and 50° for the isodose curves of 30°, 45° and 55°, respectively. The total dose distribution in tissue equivalent (TE) phantom for neutron beam was obtained by an air-filled cylindrical ionization chamber with TE plastic wall. The resultant dose distributions were satisfactory for practical use but isodose curves were slightly roundish, compared with those for cobalt-60 gamma rays.

緒 言

放射線医学総合研究所（以下放医研という）に医用サイクロトロンが設置され、それによってえられる速中性子線を使用したClinical trialが50年11月から開始された。

放射線治療の照射技術として、病巣領域を均等な線量分布にするためにウェッジフィルタが使用されている。そこで速中性子線治療用ウェッジフィルタを作成するための基礎的実験を行い、えられたデータに基づいてウェッジフィルタを作成した。測定された線量分布は実用上ほぼ満足すべ

き結果をえたので臨床に使用されている。

速中性子線治療用ウェッジフィルタの実用的作成法およびそれを用いた線量分布の測定結果について報告する。

方 法

中性子線源は放医研サイクロトロンから発生する30MeV重陽子（電流は $20\mu A$ または $30\mu A$ **)をペリリウムターゲットにあて生ずる速中性子線を用いた^{1,2)}。速中性子線は垂直下方に射出される。コリメータは圧縮木材（Benelex 402）と鋼材とから構成され³⁾、照射野は鋼材によつて作成される。ウェッジフィルタはポリエチレンを材料として作成し、ターゲット（線源）から140cmのコリメ

* 旧姓 久津谷

** 初当の電流値は $20\mu A$ 、その後 $30\mu A$ を使用。

タ下端射出口に取り付けた。

線量分布の測定に用いるファントムには Goodman⁴⁾の処方に従った組織等価液体（重量比一水：65.6%，グリセリン：26.8%，尿素：7.6%，密度：1.084g/cm³）を使用した。線量計は組織等価プラスチック壁⁵⁾（2mm厚）をもつ円筒型電離箱（内径6mmφ×20mm長さ）で密封防水型（以下電離箱という）を用いた。

測定は電離箱をファントム中のビーム中心軸およびそれに対して直角方向に走査して行った。実測値からビーム中心軸上の深部量百分率とデクレメント値⁶⁾、すなわち深さが同じでビーム中心軸外での線量を中心軸上での線量との比を求めた。これらの値を基に線源表面間距離（SSD）を一定としたSSD型および線源病巣間距離（STD）を一定としたSTD型等線量曲線を作成した。

測定に用いた中性子線束内にはガンマ線も混在するが²⁾、本報で使用する線量は電離箱により測られる中性子線とガンマ線とによる電離の総量で示した。

1. ウェッジフィルタの設計法

ウェッジフィルタの設計には dose gradient 法⁷⁾を採用した。

1) Fig. 1に示すようにファントムの表面およびビーム中心軸をそれぞれX軸およびY軸とし、ファントム表面からの深さ（以下深さという）がy、ビーム中心軸からの距離xでの点Tの線量を D(x, y) とする。

2) 点Tと同じ深さyでビーム中心軸上の点Cでの線量を Dc(y), 点Tでのウェッジフィルタを併用しない場合のデクレメント値および併用した場合のデクレメント値の補正係数をそれぞれ K(x) および Cw(x) すると、D(x, y) は(1)式で表わされる。

$$D(x, y) = K(x) Cw(x) Dc(y) \quad \dots \dots (1)$$

$$\text{但し, } D(0, y) = Dc(y)$$

$$K(0) = 1$$

$$Cw(0) = 1$$

3) Fig. 1に示すようにウェッジフィルタを設計する場合のファントム中の基準点を中心軸上深さ y₀ の点Rとし、そこでの dose gradient (G) の

深さ方向 (y) およびビーム中心軸に直角方向 (x) の成分をそれぞれ P および Q とすると、P および Q は(1)式を用い、それぞれ(2)式および(3)式のように表わされる。

$$D = \left\{ \frac{\sigma}{\sigma y} D(x, y) \right\}_{x=0}^{y=y_0} = K(0) Cw(0) \left\{ \frac{d}{dy} Dc(y) \right\}_{y=y_0} \quad \dots \dots (2)$$

$$Q = \left\{ \frac{\sigma}{\sigma x} D(x, y) \right\}_{x=0}^{y=y_0} = Dc(y_0) \left[\frac{d}{dx} \left\{ K(x) Cw(x) \right\} \right]_{x=0} \quad \dots \dots (3)$$

まず、Qについて考える。

もし、ウェッジフィルタを併用しない場合の照射野内の等線量曲線の平坦度がよい時、すなわち、ビーム中心軸近傍で $\left\{ \frac{d}{dx} K(x) \right\}_{x=0} = 0$ の時、(3)式は(4)式となる。

$$Q = Dc(y_0) \left\{ \frac{d}{dx} Cw(x) \right\}_{x=0} \quad \dots \dots (4)$$

Cw(x) は(5)式により近似される。但し、Fig. 1に示すように線源・ウェッジフィルタ間距離を a, SSD を f, ウェッジフィルタ物質の線吸収係数

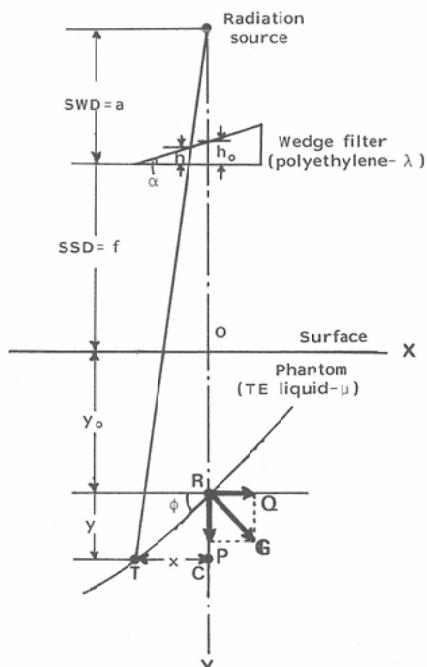


Fig. 1 Schematic diagram for the design of wedge filter.

を λ , ウェッジフィルタの角度（以下フィルタ角という）を α （ここではウェッジフィルタの厚い方が右側にある場合を正, 左側にある場合を負とする）, ならびにビーム中心軸および線源と点Tとを結ぶ線上でのウェッジフィルタの厚さをそれぞれ h_0 および h とし, x はビーム中心軸から右方向への距離を正とする。

$$Cw(x) = \exp(h-h_0) = \exp(-\lambda \frac{ax}{f+y_0} \tan \alpha) \quad \dots \dots (5)$$

(5)式を(4)に代入すると Q は(6)式のように表わされる。

$$Q = -\frac{a\lambda}{f+y_0} Dc(y_0) \tan \alpha \quad \dots \dots (6)$$

次に P について考える。

もし, 深さに対する Dc を片対数グラフ上に表示した場合の深さ y_0 での接線の勾配を $-\mu(y_0)$ とすると(2)式は(7)式で近似できる²⁾.

$$P = -\mu(y_0) Dc(y_0) \quad \dots \dots (7)$$

4) ウェッジフィルタを併用した場合, ビーム中心軸上での等線量曲線の傾斜角度（以下ウェッジ角という）を ϕ とすると, ϕ は(8)式で表わされる。

$$\tan \phi = \frac{Q}{P} \quad \dots \dots (8)$$

(8)式に(6)式および(7)式を代入すると(9)式と表わされる。

$$\tan \phi = \frac{a\lambda}{(f+y_0)\mu(y_0)} \tan \alpha \quad \dots \dots (9)$$

フィルタ角 α は(9)式から(10)式と表わされる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ \frac{(f+y_0)\mu(y_0)}{a\lambda} \tan \phi \right\} \quad \dots \dots (10)$$

(10)式中, f , y_0 および a はウェッジフィルタを設計する際の基本条件で, それぞれ SSD, 基準とする深さおよび線源・ウェッジフィルタ間距離であるので, (10)式は(11)式と表わされる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left\{ b \frac{\mu(y_0)}{\lambda} \tan \phi \right\} \quad \dots \dots (11)$$

$$\text{但し, } b = \frac{f+y_0}{a}$$

すなわち, ウェッジフィルタ物質の線吸収係数

λ および基準深さ y_0 での深部量百分率の線量勾配 $\mu(y_0)$ が求められれば, ウェッジ角 ϕ に対するフィルタ角 α は(11)式を用いて計算できる。

2. ウェッジフィルタ物質の線吸収係数の測定

ウェッジフィルタ物質の線吸収係数を測定するために, コリメータ下端から30cm下方, すなわち, 線源から170cmの所にヤグラをおき, その上にポリエチレン板をのせ, 電離箱は線源から200cmの空中に厚さ0.5cmのビルドアップキャップをかぶせて設定し, ポリエチレン板の厚さを変え, その透過線量を測定した。

結果

1. ウェッジフィルタ物質ポリエチレンの線吸収係数 (λ)

ポリエチレンの厚さに対する透過線量を線源から200cmでの照射野 $5.7 \times 5.7 \text{ cm}^2$ および $11.4 \times 11.4 \text{ cm}^2$ について片対数グラフ上に表示したもの

を Fig. 2 に示す。ほぼ直線で表わされ, その勾配を最小2乗法で求めると照射野 $5.7 \times 5.7 \text{ cm}^2$ で 0.12_6 cm^{-1} , および $11.4 \times 11.4 \text{ cm}^2$ で 0.12_2 cm^{-1} となった。

2. ウェッジフィルタを併用した場合の深部量百分率

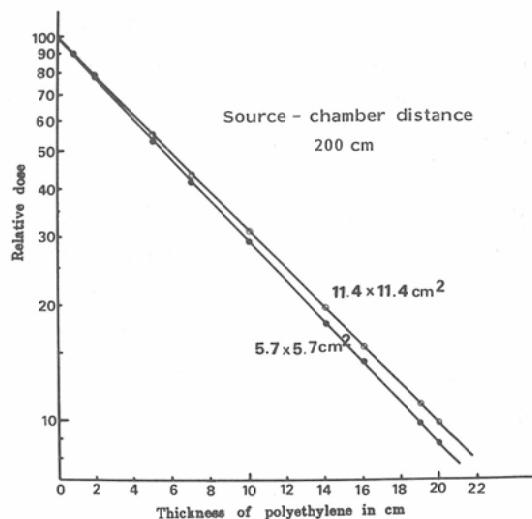


Fig. 2 Transmission dose of neutron against the thickness of polyethylene measured for the field size of $5.7 \times 5.7 \text{ cm}^2$ (●) and $11.4 \times 11.4 \text{ cm}^2$ (○) at 200cm from a source.

ポリエチレン板をコリメータの下端射出口におき、その厚さを8cm および4cm とした場合とポリエチレン板を入れない場合の $SSD=190\text{cm}$, ファントム表面での照射野 (A_0) $5.4 \times 5.4\text{cm}^2$ および $10.8 \times 10.8\text{cm}^2$ の深部量百分率を Fig. 3 に示す。ポリエチレン板が厚くなるに従い、深部量百分率は上昇する。また照射野が大きくなると上昇する値も大きくなる。しかし深さ10cm での上昇率は3.2%以下である。

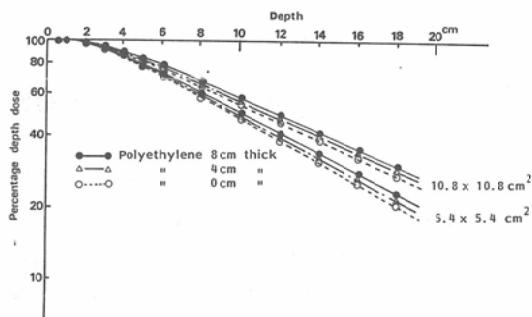


Fig. 3 Percentage depth dose curves with the various thickness of polyethylene filter for $A_0 = 5.4 \times 5.4\text{cm}^2$ and $10.8 \times 10.8\text{cm}^2$ at $SSD=190\text{cm}$.

3. ウェッジフィルタの設計

ウェッジフィルタを設計する際、基準とする深さ (y_0) および照射野は従来のテレコバルトガンマ線などに使われているものを考慮し、それぞれ6cm および $8 \times 8\text{cm}^2$ とした。ウェッジフィルタは線源から140cm の所に取り付けた。

ポリエチレンの厚さ8cm を入れた場合の $SSD=190\text{cm}$, $A_0=5.4 \times 5.4\text{cm}^2$ および $10.8 \times 10.8\text{cm}^2$ の深さ6cm での μ (6) は Fig. 3 からそれぞれ 0.085cm^{-1} となり, $A_0=8 \times 8\text{cm}^2$ に相当する値は 0.075cm^{-1} と求められた。同様に線源から190cm での照射野 $8 \times 8\text{cm}^2$ に相当する λ は 0.124cm^{-1} と求められる。(11)式を用い, $f+y_0=196\text{cm}$, $a=140\text{cm}$, $\lambda=0.124\text{cm}^{-1}$, $\mu(6)=0.075\text{cm}^{-1}$ を代入するとウェッジ角 α は(12)式で表わされる。

$$\alpha = \tan^{-1} (0.85 \tan \phi) \quad \dots \quad (12)$$

(12)式を用いるとウェッジ角 (ϕ) 30° , 45° および 55° に相当するフィルタ角 (α) はそれぞれ 26° , 40° および 50° と求められる。ウェッジフィルタの

ビーム中心軸上での厚さが変ると深部量百分率が変るのでウェッジフィルタの厚さをビーム中心軸上で8cm になるようにした。

4. ウェッジフィルタを併用した場合のデクレメント値

ウェッジフィルタの α を 26° , 40° および 50° の $SSD=190\text{cm}$, $A_0=10.8 \times 10.8\text{cm}^2$ の場合に測定されたビーム中心軸に直角方向の線量分布（以下ビームプロファイルという）を、深さ1cm および10cm についてそれぞれ Figs. 4 (a) および 4 (b) に示す。 α が大きくなると照射野内のビームプロファイルの傾斜も大きくなる。深さ1cm でのビームプロファイルは散乱線の影響が少ないので、照射野端付近で極度に線量が降下しているが、深さ10cm では散乱線の影響によりビームプロファイルは広がっている。

次に等しいデクレメント値を結んでできる曲線（以下デクレメントラインという。）を $\alpha=50^\circ$, $SSD=190\text{cm}$, $A_0=10.8 \times 10.8\text{cm}^2$ についてビーム中心軸でのデクレメント値を100%にして表示した場合を Fig. 5 に示す。デクレメントラインはビーム中心軸に対し左右対称にならず、最大値は約140% となっている。

5. ウェッジフィルタを併用した場合の線量分布

ウェッジフィルタを併用した場合の測定された深部量百分率およびデクレメントラインを基に等線量曲線を作成した。

まず Figs. 6 および 7 に $\alpha=40^\circ$, $SSD=190\text{cm}$ の $A_0=5.4 \times 5.4\text{cm}^2$ および $10.8 \times 10.8\text{cm}^2$ の SSD 型等線量曲線をそれぞれ示す。線量の100% はビーム中心軸上深さ1cm の点とした（以下 SSD 型の線量分布は同様に表わす）。両者とも深さ6cm での等線量曲線の接線はほぼ 45° となっている。しかし深さが6cm より浅くなると等線量曲線の勾配はだんだん急になり、一方深さが増すと緩かになります、10cm 深さでは約 40° になっている。又中心軸近傍での等線量曲線は直線というより幾分丸みをおびている。10% の線量は前者に比べ後者の方が広がつておらず、照射野外の小線量の領域は照射野の増加とともに拡大している。

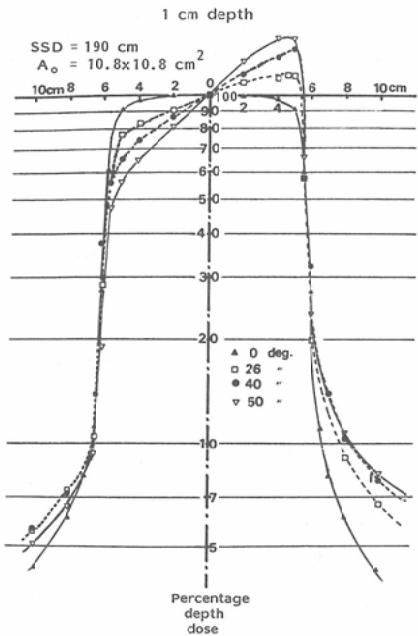


Fig. 4(a)

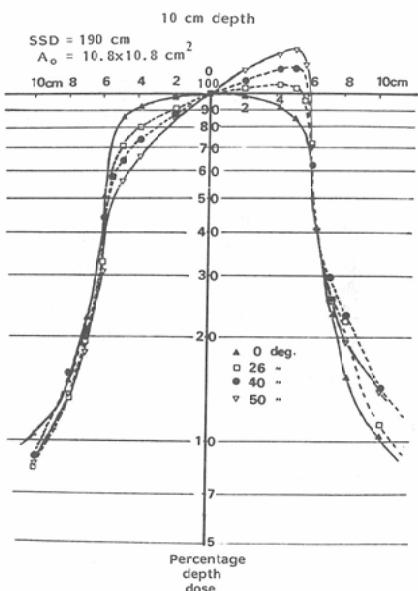


Fig. 4(b)

Fig. 4 Dose profiles measured with wedge filters cut to various angles for $A_0=10.8 \times 10.8 \text{ cm}^2$ at SSD=190cm. (a) At 1cm depth. (b) At 10cm depth.

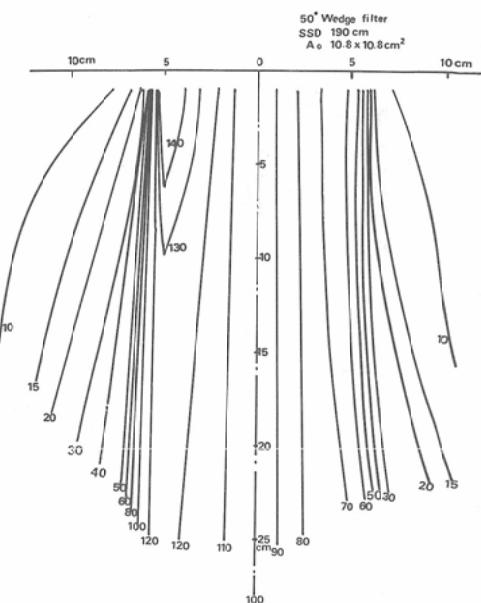


Fig. 5 Decrement lines for a neutron beam with a wedge filter cut to angle of 50° for $A_0=10.8 \times 10.8 \text{ cm}^2$ at SSD=190cm.

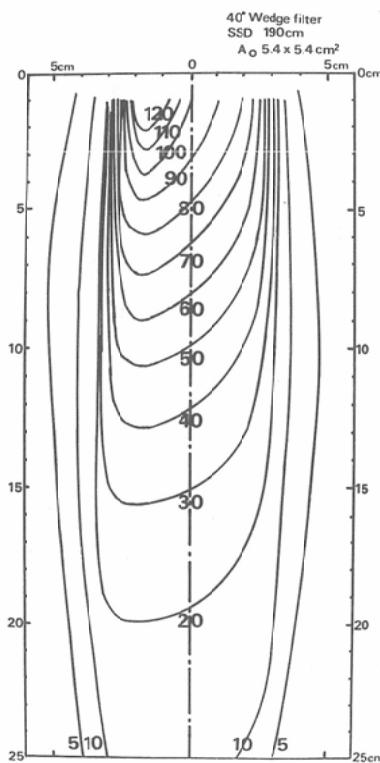


Fig. 6 Isodose chart for a neutron beam with a wedge filter of 40° for $A_0=5.4 \times 5.4 \text{ cm}^2$ at SSD=190cm.

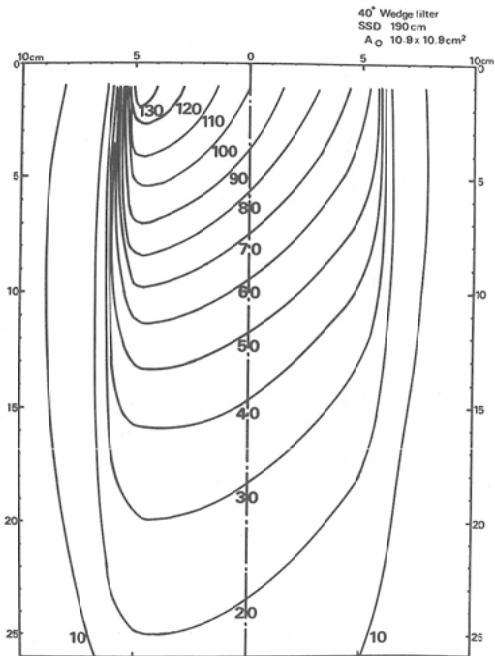


Fig. 7 Isodose chart for a neutron beam with a wedge filter of 40° for $A_0 = 10.8 \times 10.8 \text{ cm}^2$ at SSD=190cm.

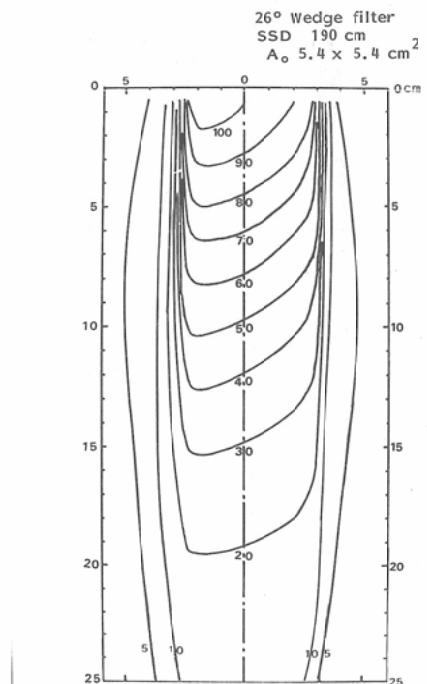


Fig. 8 Isodose chart for a neutron beam with a wedge filter of 26° for $A_0 = 5.4 \times 5.4 \text{ cm}^2$ at SSD=190cm.

Figs. 8 および 9 に SSD=190cm, $\alpha=26^\circ$, $A_0=5.4 \times 5.4 \text{ cm}^2$ および $\alpha=50^\circ$, $A_0=10.8 \times 10.8 \text{ cm}^2$ の場合の等線量曲線の傾きはそれぞれ約30°および55°になっている。線量分布の傾向は $\alpha=40^\circ$ の場合と同様である。

以上の結果、(12)式を用いて作成されたウェッジフィルタを用い、測定された SSD=190cm, $A_0=5 \times 5 \text{ cm}^2 \sim 11 \times 11 \text{ cm}^2$ の深さ6cmでのウェッジ角は予定された値が得られた。

次に Fig. 10 に $\alpha=40^\circ$, STD=200cm (SSD=194cm), 病巣での照射野 (A) $5.7 \times 5.7 \text{ cm}^2$, 深さ6cmでの線量を100%にしたSTD型等線量曲線を示す。この線量分布は Fig. 6 の線量分布の照射条件の SSD を194cmにし、深さ6cmでの線量を100cmでの線量を100%にして表示したものであり、深さ6cmでの等線量曲線もほぼ45°となっている。

Fig. 11 に Fig. 10 の線量分布を深さ6cmで直

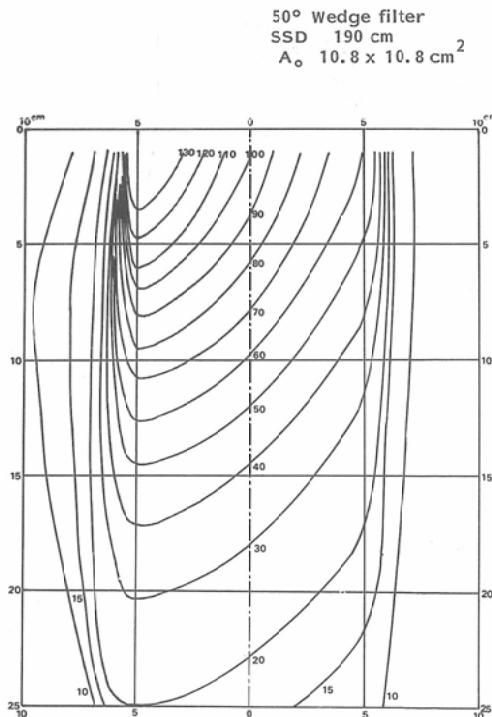


Fig. 9 Isodose chart for a neutron beam with a wedge filter of 50° for $A_0 = 10.8 \times 10.8 \text{ cm}^2$ at SSD=190cm.

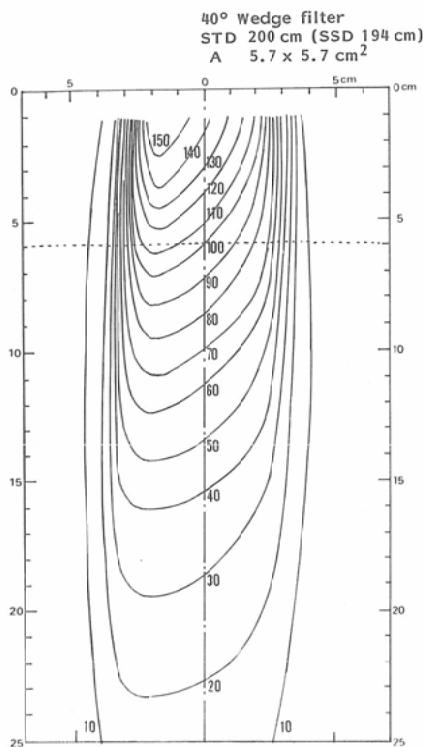


Fig. 10 Isodose chart for a neutron beam with a wedge filter of 40° for $A_0 = 5.7 \times 5.7 \text{ cm}^2$ at STD=200cm. The percentage depth dose is normalized to 100% at 6cm depth.

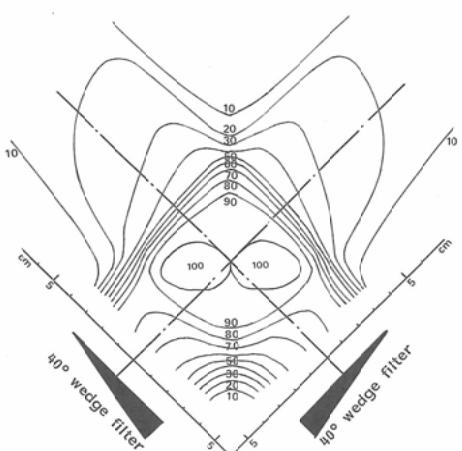


Fig. 11 Dose distributions produced by two wedged beams of 45° isodose angle shown in Fig. 10 combined at right angles to each other at 6cm depth.

角に交差した2門照射の合成線量分布を示す。ビーム中心軸の交点での線量を100%にして表示してあるが、照射野が重なった領域ではほぼ均等な線量分布となっており、実用に使用できる線量分布であると考える。

考 察

放医研サイクロトロンによる速中性子線治療用ウェッジフィルタをdose gradient法によりえられた(12)式を用いて設計し、作成した。ウェッジフィルタの材料にポリエチレンを用い、ウェッジ角を決定する基準深(y_0)を6cmとした。Figs. 6～9に示したように測定した線量分布の基準深6cmでの等線量曲線はほぼ予定したウェッジ角がえられた。また、Fig. 11に示したウェッジ角45°のウェッジフィルタを用いた直角2門照射の6cm深さでの合成線量分布では重なった照射野内ではほぼ均等な線量分布がえられた。

以上の結果、dose gradient法により設計されたウェッジフィルタの線量分布は実用上使用できる線量分布である。また本報告で採用したdose gradient法はphotonで用いられている方法であるが、ここでえられた結果から速中性子線用ウェッジフィルタの設計に適用可能と判断される。

次にウェッジフィルタの線量分布の基準深6cm以外についてふれてみると、基準深6cmより浅い位置でのウェッジ角は、深さ6cmにおけるそれと比べ、やや傾斜が増すが、他方深さ6cmより約10cmまでの傾斜は緩やかになり、10cmより深くなると傾斜はほぼ一定となっている。すなわち、深さとともにウェッジ角の傾斜角度は変化する。それはFig. 3において深部量百分率の対数が深さに対し完全な直線関係ではなく、深さが8cmまで丸みを帯びており、 μ の値が深さによって変化することによっている。星野らは放医研速中性子線の μ はテレコバルトガンマ線と比べると、速中性子線の方がより大きく変ると報告している²⁾。基準深10cmでのウェッジ角を例えれば45°にするフィルタ角は、 $\mu(10) = 0.088 \text{ cm}^{-1}$ を(11)式に代入し、約45°と求まり、基準深を10cmにするとフィルタ角はやや大きくなる。頭頸部などの比較的浅い病

巣部の治療と、胸、腰部などの比較的深い病巣部を治療する場合とでは基準深が変るのでフィルタ角が変ることになる。速中性子線の場合実用上基準深を6cmと10cmの2種類のウェッジフィルタを準備することが望ましい。

本報告で示したウェッジフィルタによる線量分布は欧米の施設から報告されているもの^{8)~11)}と比較して基本的には同等と考えられる。星野らはウェッジフィルタを併用しない場合の放医研速中性子線の線量分布は米国の施設のものとほぼ同じであると報告している²⁾。他方、テレコバルトガンマ線に比べると幾分線量分布の平坦度が悪いので今回えられたウェッジフィルタの線量分布が中心軸から離れるに従い丸みを帯びている。米国の施設ではそのために50MeV重陽子による中性子線について平坦度フィルタを使用している⁸⁾¹⁰⁾。

ウェッジフィルタを併用するとFig. 2から深部量百分率が上昇するが、その上昇率は10cm深さで3.2%以下である。Parnellも16MeV重陽子による速中性子線の深部量百分率を改善するために吸収体として15cmのパラフィンを使用した場合、SSD=125cm, $A_0=10 \times 10\text{cm}^2$ の時、深さ10cmでの深部量百分率が45%から49%に上昇したと報告している¹²⁾。しかし、この程度の深部量百分率の上昇では線量分布への影響は少ない。

ウェッジフィルタの材料を選択する際、速中性子を主として減弱させる水素含有量の多い物質と、速中性子線および混在するガンマ線の両方を減弱させる金属を用いる方法とが考えられる。後者は物質によって放射化確率が高いこと、放医研速中性子線治療用ビームが垂直であり、ウェッジフィルタをコリメータ下端射出口、すなわち患者の頭上に取り付けることになるので、とくに患者への精神的影響を考慮して前者の物質としてポリエチレンを使用した。さらにポリエチレンを使用した理由を以下に示す。

① ウェッジフィルタの取り付け位置が線源から140cmのコリメータ下端にあり、照射野をカバーするためにウェッジフィルタの形状が大きくなるので比較的遮蔽効果がよいポリエチレンだと重量を小さくできること¹³⁾、② 加工性が優れてい

ること、③ 放射化確率が低いことである。

本報告で用いた速中性子線にはガンマ線が混在するが、線量を中性子線とガンマ線の電離の総量として線量分布を求めた。それは星野らが放医研速中性子線のウェッジフィルタを用いない場合について、ガンマ線の混在比が比較的小さく、ファンтом中では全吸収線量の最大値、すなわちビーム中心軸上0.5cm深さでの全吸収線量に対して約3%以下であると報告しており²⁾、例えウェッジフィルタを併用することによりガンマ線の混在比が上昇してもガンマ線の混在比が少ないので、それによる線量分布への影響は少ないと考えられたことによる。

最後に、放医研ではSSDとして175cmが用いられているが、ウェッジフィルタを併用した場合には線源からウェッジフィルタ上部までが140cmであり、さらに遮蔽用ブロックを用いることなどを考慮して、SSD=190cmを採用した。またウェッジフィルタ設計の基準の照射野 $8 \times 8\text{cm}^2$ の μ を直接求める代りに照射野 $5.4 \times 5.4\text{cm}^2$ と $10.8 \times 10.8\text{cm}^2$ から求めたが、これはコリメータが不整形照射野用に製作されており³⁾、照射野 $8 \times 8\text{cm}^2$ に相当する絞り羽根は3枚となり、ビーム中心軸がコリメータ角中心軸とずれることによるものである。

結論

放医研サイクロotronによる速中性子線治療用ウェッジフィルタをdose gradient法を用いて設計した。ウェッジフィルタ物質にポリエチレンを用い、SSD=190cm, $A_0=8 \times 8\text{cm}^2$, $a=140\text{cm}$, $y_0=6\text{cm}$ におけるウェッジ角(ϕ) 30° , 45° および 55° に対するフィルタ角(α)はそれぞれ 26° , 40° および 50° と求められた。この条件でウェッジフィルタを作成した。求められた線量分布は基準深6cmではほぼ満足すべき結果がみられた。しかし基準深を10cmとした場合のフィルタ角はやや大きくなり、 $\phi=45^\circ$ において、 $\alpha=45^\circ$ となった。

えられた線量分布は欧米の施設のものとほぼ同等である。しかしテレコバルトガンマ線と比較するとビーム中心軸から離れるに従い丸みを帯びてくる。

ウェッジ角45°、直角2門照射の基準深6cmでの合成線量分布において、照射野が重なった領域ではほぼ均等であり、実用上十分使用できる線量分布である。

本稿を終わるに当り、安定したビームの供給に留意された技術部サイクロトロン管理課の諸氏に謝意を表する。

本論文の要旨は第33回、第34回および第35回日本医学放射線学会物理部会において報告した。

(本研究は厚生省がん研究助成金(恒元班54-6および尾内班56-32)から一部援助を受けた。)

文 献

- 1) Ogawa, H., Kumamoto, Y., Yamada, T. and Hiramoto, T.: NIRS-Chiba isochronous cyclotron 1975. pp. 1-8, 1976, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan
- 2) 星野一雄、川島勝弘、平岡 武、久津谷謙：放医研サイクロトロンからの速中性子線の線量分布。日本医学会誌, 37: 248-255, 1977
- 3) 丸山隆司、稻田哲雄、平岡 武、河内清光、橋詰雅、恒元 博、久津谷謙、梅垣洋一郎：速中性子線治療用コリメータの設計およびその特性。日本医学会誌, 38: 633-642, 1978
- 4) Goodman, L.J.: A modified tissue equivalent liquid. Health Phys., 16: 763, 1969
- 5) 平岡 武、川島勝弘、星野一雄、松沢秀夫：中性子線用組織等価物質の試作。日本医学会誌, 36: 420-424, 1976
- 6) Orchard, P.G.: Decrement lines: A new presentation of data in cobalt 60 beam dosimetry. Brit. J. Radiol., 37: 756-763, 1964
- 7) Hope, C.J. and Orr, J.S.: Computer optimization of 4 MeV treatment planning. Phys. Med. Biol., 10: 365-373, 1965
- 8) Smith, A.R., Almond, P.R., Smathers, J.B. and Otte, V.A.: Dosimetric properties of the fast neutron therapy beams at TAMVEC. Radiology, 113: 187-193, 1974
- 9) Williams, J.R., Bonnett, D.E. and Parnell, C.J.: The fixed horizontal neutron therapy beam at Edinburgh: Dosimetry and radiation protection. Brit. J. Radiol., 52: 197-208, 1979
- 10) Hogstrom, K., Smith, A.R., Almond, P.R., Otte, V.A. and Smathers, J.B.: Computer dosimetry for flattened and wedge fast-neutron beam. Med. Phys., 3: 26-30, 1976
- 11) Shapiro, P., August, L.S. and Theus, R.B.: Computer generation of dose distributions for a fast neutron therapy beam. Med. Phys., 6: 12-20, 1979
- 12) Parnell, C.J.: An examination of some methods of improving the depth dose characteristics of cyclotron-produced fast neutron beams. Brit. J. Radiol., 44: 612-617, 1971
- 13) Attix, F.H., Theus, R.B. and Miller, G.E.: Attenuation measurements of a fast neutron radiotherapy beams. Phys. Med. Biol., 21: 530-536, 1976