

Title	速中性子線治療用コリメータの設計およびその特性
Author(s)	丸山, 隆司; 稲田, 哲雄; 平岡, 武 他
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1978, 38(7), p. 633-642
Version Type	VoR
URL	<a href="https://hdl.handle.net/11094/17340">https://hdl.handle.net/11094/17340</a>
rights	
Note	

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

## 速中性子線治療用コリメータの設計およびその特性

放射線医学総合研究所物理研究部

丸山 隆司 稲田 哲雄 平岡 武  
河内 清光 橋 詰 雅

放射線医学総合研究所臨床研究部

恒 元 博 久津谷 譲 梅垣洋一郎

(昭和53年1月26日受付)

(昭和53年3月17日最終原稿受付)

Design and Evaluation of a Semicontinuously Variable Collimator  
for a Cyclotron Neutron RadiotherapyT. Maruyama, T. Inada, T. Hiraoka, K. Kawachi and T. Hashizume,  
H. Tsunemoto\*, Y. Kutsutani\* and Y. Umegaki\*Division of Physics and Division of Clinical Research\*, National Institute of Radiological  
Sciences, 9-1, 4-chome Anagawa, Chiba, Japan

---

*Research Code No.:* 601

---

*Key Words:* Neutron dosimetry, Apparatus, Collimator

---

Since November 1975, the NIRS (National Institute of Radiological Sciences) Medical Cyclotron has been used three times weekly for the clinical trials of fast neutron radiotherapy. For this purpose, the neutron produced by bombarding a thick beryllium target with 30 MeV deuterons have been used. The deuteron beams initially transported in the horizontal plane and directed downwards by a 90° bending magnet, so that patients are irradiated with a fixed vertical neutron beams. A semicontinuously variable collimation system was developed. The collimator consists of three part: namely (1) the first is a fixed square collimator made of a pressed wood (Benelex-401); (2) the second is a fixed square collimator made of the pressed wood, in which a lead shutter, a field illumination lamp system and beam monitoring transmission chambers are included; and (3) the third is a semicontinuously variable collimator which consists of 8 couples of iron slabs and makes an irregularly shaped field. The collimator system is rotatable around a beam axis. This paper describes the design criterias of the collimation system and performances of beam profiles of fast neutrons.

## 1. 緒 言

放射線治療のための速中性子線の発生と核医学のための短寿命放射性医薬品の生産の2つを目的として、放医研に医療用サイクロトロンが設置された。このサイクロトロンを利用した速中性子線

治療の試みが1975年10月に開始された。これに先だち、治療用コリメータを設計・製作し、その特性を調べた。

コリメータの設計にあたっては、物理系4人と医学系4人からなるワーキング・グループを放医

研に設けた。このグループで検討した結果、コリメータとして次のような条件で意見が一致した。

(i) 速中性子線治療には、Be (d, n) B 反応からの中性子線を利用する。重陽子のエネルギー (Ed) は30MeV を基準とする。しかし、コリメータの遮蔽部については安全性を考慮し、Ed=50MeV での厚いターゲットによる Be (d, n) B 反応を考える。

(ii) 速中性子線の線量率は Ed=35MeV で、30rad/min 以上とする。ターゲットから照射すべき腫瘍までの距離 (STD) は150cm から200cm までとする。

(iii) 照射野は連続可変で、 $4 \times 4 \sim 20 \times 20$  cm 以上とする。腫瘍のまわりの健全組織の被ばくを低減するため、不整形照射野が得られることが望ましい。この場合、10mm 以下のきざみで連続可変であればよい。

(iv) 照射野の設定は電動遠隔操作方式で、併置されるシミュレータのコリメータと連動可能とする。

(v) 不整形照射野を得るために補助コリメータを用いる場合、これによる透過線量は利用線の線量の1/4以下とする。

(vi) 照射野外への漏洩は、 $10 \times 10$  cm の照射野のとき、ビームの中心軸より10cm 以上離れた

ところではできるだけ低減する。

(vii)  $\gamma$  線の混合比を照射野内で空気中で (中性子+ $\gamma$  線) 線量の5%以下とする。

(viii) コリメータの材質を吟味し、中性子による残留放射能を少なく、技術者の被ばくをできるだけ下げる。

(ix) コリメータと患者の間に30cm 以上の間隔を設け、この間にウェッジ・フィルタなどを取付けられるようにする。

(x) ライト・ビーム、フロントおよびバックポインタなど治療付属設備はライナックや $^{60}\text{Co}$ 治療装置に準ずるものとする。

以上のような条件を充たすと思われるいろいろなコリメータが考案された。STD が150~200cm であるため、遮蔽を厚くすることができる利点があった。この利点をいかし、水などを利用したコリメータなど10種以上が提案された。しかし、技術的な問題や時間的、経済的事情のために実現不可能なものが多く、ここに述べるコリメータが製作された。

## 2. コリメータの設計と製作

サイクロトロンを用いた速中性子線治療では、回転照射や振子照射は技術的および経済的理由などによつて殆んど不可能である。これまで速中性子線治療を行つている Hammersmith 病院 (英)

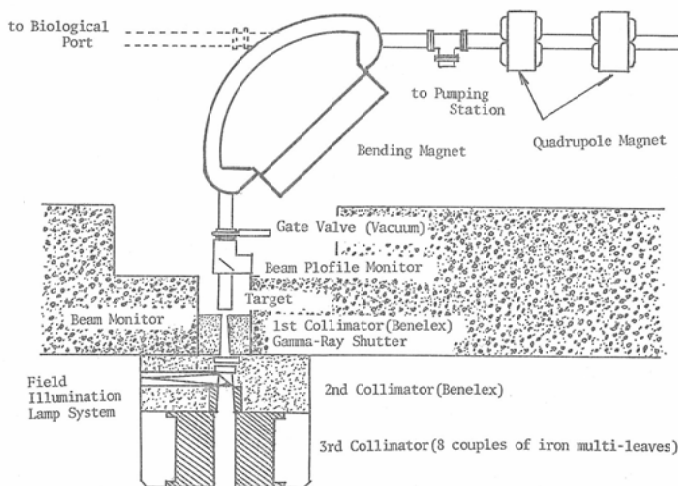


Fig. 1. Top view of apparatus arrangement used for neutron radiotherapy.

などでは、横方向からの中性子線を利用している。しかし、X、 $\gamma$ 線による放射線治療でもわかるように、実際には仰向き又は俯向きの患者に対して上方向から照射する場合が多い。放医研の速中性子線治療では、上方向から照射する方式を採用した。

Fig. 1に医用サイクロトロン棟内に設置された速中性子線治療室の断面図の一部を示す。治療室は地下1階にあり、既設の病院棟とは廊下で連絡している。治療室の隣室には治療装置操作室があり、テレビなどで監視しながら治療ができるようになっていいる。サイクロトロン本体で加速された重陽子ビームは、地上1階の生物照射室内にある偏向電磁石で90°方向に曲げられ、Beターゲットに衝突して中性子を発生する。

ターゲットは治療室の天井（厚さ：コンクリート100cm）に開けた40×40cmの穴のほぼ中央にある。治療室の床面からターゲットまでの距離は322cmである。ベッドの高さを120cmとし、コリメータの先端と患者の照射面との間に30cm以上の空間をつくるとすれば、コリメータの長さは天井から120cm以下でなければならない。

天井にコリメータ移動用にI字レールが取り付けられているが、これを含めて天井の耐荷重は建家の設計側から6.5トン以下に制限された。この数値はかなりの安全度をみているが、できるだけ軽量で患者に威圧感を与えない小型のコリメータが望ましい。

コリメータの設計には、中性子の遮蔽データが必要である。現在では、30MeV～50MeV程度の重陽子によるBe(d, n)B反応からの中性子に対する鉄やベネレックスなどの減弱曲線が測定されている<sup>1)2)</sup>。しかし、このコリメータを設計した当時は、D-T中性子(150keV程度の重陽子によるT(d, n)He反応からの中性子で、エネルギーは14.1～16MeV程度である。)に対する遮蔽データしか利用できなかった。速中性子線に対して、ポリエチレンなど水素含有物は単位質量当りではよい遮蔽体であり、鉄は単位厚さ当りで効果的である。

速中性子線治療用コリメータとしては、遮蔽部分にいろいろな照射野を与える補助コリメータを差し込む方式が用いられている<sup>5)6)7)</sup>。しかし、この方式ではあらゆる種類の補助コリメータを準備しておく必要があり、遠隔操作で任意の照射野を設定することは殆んど不可能である。X線装置や<sup>60</sup>Co遠隔治療装置などでは多重絞り方式が用いられ、ライナックやベータトロンでも二重絞りが採用され、遠隔操作で連続的に正方形又は矩形照射野が設定されている。放医研に設置される速中性子線治療用コリメータには、遠隔操作による不整形照射野設定方式が要求された。治療の対象となる照射野は円形又は楕円形に近いと考えられる。放射線治療の目的からすれば、問題としている治療部位だけに放射線を照射し、その周辺にある正常組織の被曝を最小にすることが必要である。この要求を満足させるため、Fig. 2に示すよ

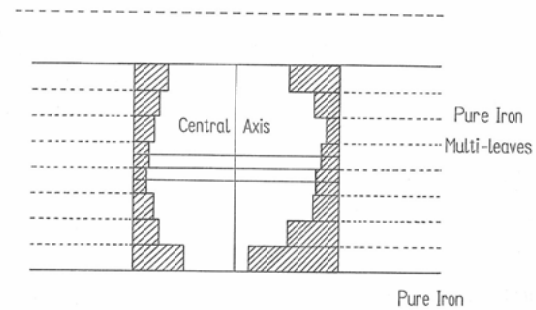
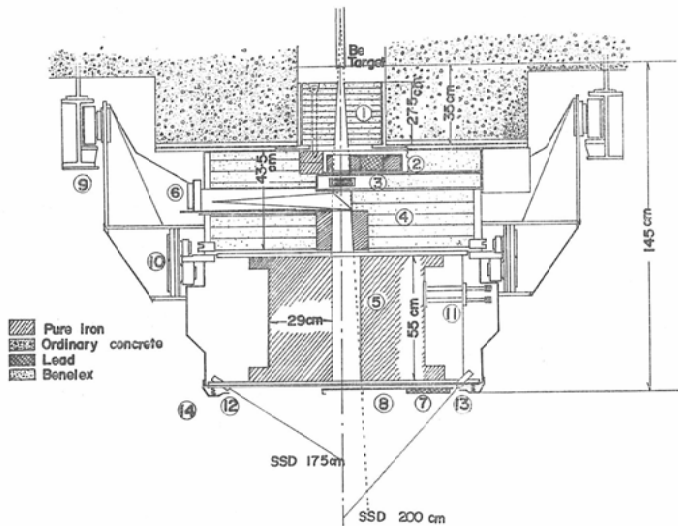


Fig. 2. Illustration of irregularly shaped field.

うに左右8枚の鉄板をそれぞれ独立に動かすことによりヒストグラム型の照射野を作るコリメータを考案した。この鉄板はサーボ・モータにより駆動するが、鉄板の幅が限定されているため駆動に伴って照射野の反対側部分に間隙が生じ遮蔽効果が減少する。また、治療装置とするには、モニター線量計や照射野表示用ランプなどが必要である。このため、鉄板コリメータ（以後、第3コリメータと云う）の前に第1、第2コリメータを設置した。Fig. 3に試作設計されたコリメータの断面図を示す。第3コリメータの鉄板のこを羽根とよぶことにする。羽根の大きさはビーム方向の



1. First collimator. 2. First gamma-ray shutter. 3. Neutron beam monitor (transmission type ionization chamber). 4. Second collimator. 5. Third collimator. Definition of field size and shape is provided by 8 couples of iron leaves which are usually motor driven. 6. Field illumination lamp system. 7. Second gamma-ray shutter. 8. opening window for neutron beams. 9. Gantry of collimator assembly. 10. Turning gear. This provides to rotate the complete collimator system around beam axis. 11. Motor driving system of multileaves. 12. Source-skin distance indicator lamp (SSD=175cm). 13. Source-skin distance indicator lamp (SSD=200cm)

Fig. 3. Schematic diagram of collimator assembly.

長さが長ければ長いほど遮蔽効果が大きいですが、羽根の遠隔駆動機構や重量などの関係で羽根の長さには限度がある。15MeV 中性子に対する鉄の1/10価層は約35cm (中性子+ガンマ線の total dose で測定した) であり、1/20に減弱させるには約55cm の鉄の厚さが必要である<sup>3)</sup>。左右8枚の羽根によつて、175cm の STD で20×20cm の照射野を得るため、20cm/8枚で1枚の鉄板による照射野間隔は2.5cm となる。従つて、鉄板の厚さを1.99cm とした。この程度の厚さは1枚の羽根の速中性子に対する遮蔽効果のみならず、駆動を円滑に行うためにも必要であつた。STD が175cm では、一辺が2.5cm の倍数で、他の一辺が連続可変な照射野が得られる。羽根の幅はできるだけ広い方が望ましいが、幅が広くなると1枚あたりの鉄板の重さは重くなり、モータによる羽根の駆動が困難になる。羽根の幅を29cm としたが、これは駆動を円滑にすることを主眼として決

められた。羽根と羽根との間のすきまからの漏洩を減らす目的で、羽根には Fig. 4 のように凹凸面をつけた。

モニタ線量計や照射野表示用ランプの他に、均

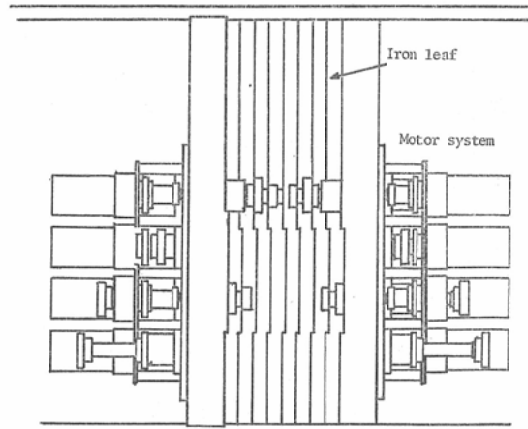


Fig. 4. Cross section of iron leaves used for third collimator.

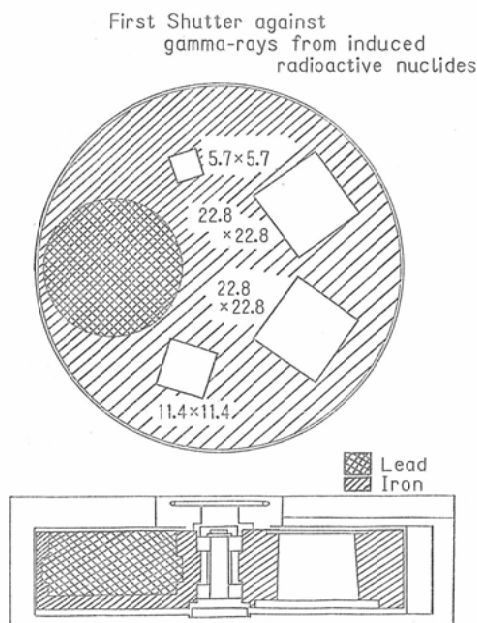


Fig. 5. Turntable of first gamma-ray shutter assembly.

一なビームを得るため、高エネルギーX線発生装置に用いられているビーム・フラッタニング・フィルタの取付口も必要である。また、ペリリウム・ターゲットやその近傍での残留放射能からのガンマ線による患者や術者の被曝の低減および照射後のモニタ線量計のバック・グラウンドを減らすため、ガンマ線シャッターを使用した。ガンマ線シャッターとビーム・フラッタニング・フィルタ取付口とを Fig. 5に示すように鉄製回転円盤に設置した。これを第1ガンマ線シャッターと云う。シャッターは直径9.8cm、厚さ5cmの鉛からなる。取付口はSTD 175cmで5×5cm、10×10cm、20×20cmの照射野を与える角穴テーパ付きである。第1ガンマ線シャッターは第2コリメータの最上部に設置した。第2コリメータは Fig. 3に示す如く、直径120cm、長さ43.6cmのベネレックス（圧縮木材で、密度1.4g/cm<sup>3</sup>）製円筒で、STDが175cmで20×20cmの照射野が得られるように角穴テーパ付である。第2コリメータにはモニタ線量計や照射野表示ランプなどが取り付けられているため、照射口に間隙ができ、半影が大きくな

ると考えられる。そのため、第2コリメータの最下端に長さ17.2cmの鉄コリメータを挿入した。第1ガンマ線シャッター、モニタ線量計および照射野表示ランプはそれぞれベネレックス製の箱の中に組み込み、故障修理・保守点検の際にコリメータから引き出すことができるようになっている。

ペリリウム・ターゲットから天井面まで35cmのスペースがあるが、この部分には厚さ27.5cm、直径35cmのベネレックス・コリメータ（第1コリメータ）を設置した。これはSTD 175cmで20×20cmの照射野が得られるようにした角穴テーパ型コリメータである。

速中性子線治療室は縦18m、横5mの細長い部屋であり、治療用寝台を回転することは困難である。照射野の形状に自由度をもたせるために、コリメータをビーム中心軸のまわりに±90°回転できるようにした。また、ターゲット部分が天井の穴の中にあり、修理・点検の際にコリメータを除去することが必要である。第2・3コリメータを天井に固定したI字レールに保持し、必要なときにはモータにより114cmだけ水平方向に移動できるようにした。第1コリメータは第2コリメータとの間の回転棒によつて±90°回転を行うが、水平移動の際はこの回転棒を抜き取ると共に、天井の第1コリメータ保持具を取り去ることによつて、ターゲット直下から取り除くことができる。

第3コリメータの最下端には低エネルギー中性子線遮蔽のため厚さ1cmのアクリル樹脂板が用いられている。開口部にはウェッジフィルタやシャドウ・トレイが取り付けられる照射口と、コリメータの放射化によつて生成された残留放射能からのガンマ線を遮蔽する厚さ2cmの鉛シャッター（第2ガンマ線シャッターと云う）を取付けた。

以上のようにして設計されたコリメータはベッド、治療計画用シュミレータなど治療用付属装置と合わせて、東芝メディカルと東芝玉川工場で作られた。当初計画されていたコリメータに比べて機構部分が複雑化したこともあり、設計製作には1年近くかかった。コリメータの治療室への取り付けにあたっては、ビームの中心とし、またビ

ームの中心軸をターゲットからの幾何学的垂線としてコリメータの中心線をこの垂線に一致させた。

### 3. コリメータの特性

サイクロトロンを用いた速中性子線治療では、いつでも安定した重陽子ビームを Be ターゲットにあてられるようにサイクロトロンを運転する技術陣と治療陣の2チームが必要である。放医研の場合、サイクロトロン本体室にある振分け電磁石の前後にビーム・ストッパーがある。これは厚さ17mmの銅円板で、これをビーム・トランスポート管に挿入することにより重陽子ビームを止め、速中性子線を中断する。従つて、速中性子線照射用のスイッチに相当するのがビーム・ストッパーと云うことになる。コリメータの第1・2ガンマ線シャッタはビーム・ストッパーに連動している。すなわち、治療機器制御盤上の照射開始ボタンを押すと、第1、ガンマ線シャッタが開き、2つのビーム・ストッパーが開いて速中性子線が治療部位に照射される。モニタ線量計に予めセットされた線量に達すると、2つのビーム・ストッパーは閉じ、第1・2ガンマ線シャッタも閉じて照射が終わる。患者や術者の安全管理のため、第2ガンマ線シャッタは照射室内の手元スイッチで必要なときだけ開けられるようにした。照射室内には治療計画装置(120kV X線発生装置)があり、この装置は照射野設定の際コリメータと連動する。X線透視時にモニタ・テレビによつて左右8枚の羽根やコリメータの回転を遠隔操作し、所定の照射野を得ることができる。

モニタ線量計には、透過型の電離箱を用いているが、さらに安全性を考慮して Be ターゲットに当たったイオン電流でもモニタしている。8枚の鉄コリメータの鉄板に Fig. 3に示すように凹凸を作つた。照射野照準灯で照射野をみたとき、この凸面によつて光が遮えぎられる。このため、速中性子線の照射野と光の照射野が多少ずれることがわかつた。しかし、このずれは幾何学的なものであり容易に補正できる。

ターゲット部分の保守点検などのため、コリメ

ータを取除き下側から天井にあるターゲットを操作する必要がある。コリメータを天井のI型レールに吊下げ、モノレール状に第2、3コリメータを移動可能にした。第1コリメータは1階にある生物照射室側から回転軸を抜き取ることにより、第2、3コリメータとは分離できる。また、第1コリメータを天井から容易に除去できる。

ターゲットから第3コリメータの全長まで145cmであつた。STDを175cmとすると患者の表面からコリメータ先端までほぼ30cmの間隔が得られ、当初の予定通りであつた。サイクロトロンの性能が計画されたもの以上によく、STDを200cmとしても十分な線量率が得られること、ウェッジ・フィルタとシャドウトレートを併用することなども考えて速中性子線治療をSTD 200cmで行うことになつた。そこで、ターゲットから200cmの距離での空中の線量分布を組織等価電離箱で測定した。第2、3コリメータを移動し、第1コリメータを用いて、中性子線束に垂直な面での線量分布を測定した。その結果を Fig. 6

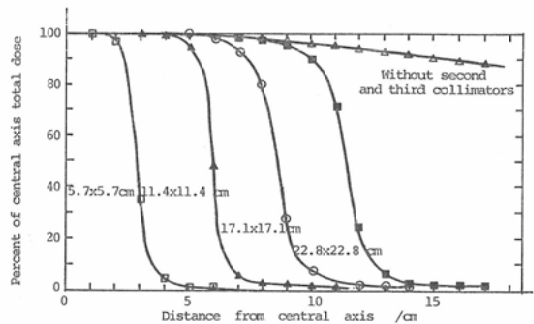


Fig. 6. Beam profiles in air for  $5.7 \times 5.7$ cm,  $11.4 \times 11.4$ cm,  $17.1 \times 17.1$ cm and  $22.4 \times 22.4$ cm square field and open field (without second and third collimator) at 200cm from Be-target.

に示す。図から明らかな如く、 $20 \times 20$ cm 以内の照射野ではビーム・フラタニング・フィルタを用いなくても十分な平坦度をもっている。従つて、当初予定したフラタニング・フィルタの使用をとりやめた。第3コリメータの左右8枚の鉄板羽根の移動は、治療機器制御盤に取付けられているプラスチック製のカーソルによるか、照射室内の

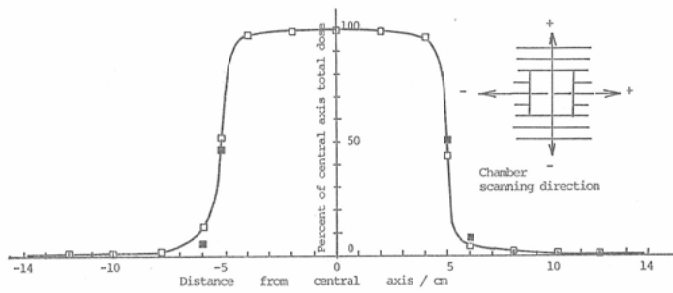


Fig. 7. Beam profiles for a field of  $10 \times 10$  cm at 175 cm from Be-target on a line parallel to the direction of sliding movement of iron leaves and a line perpendicular to the direction of sliding movement.

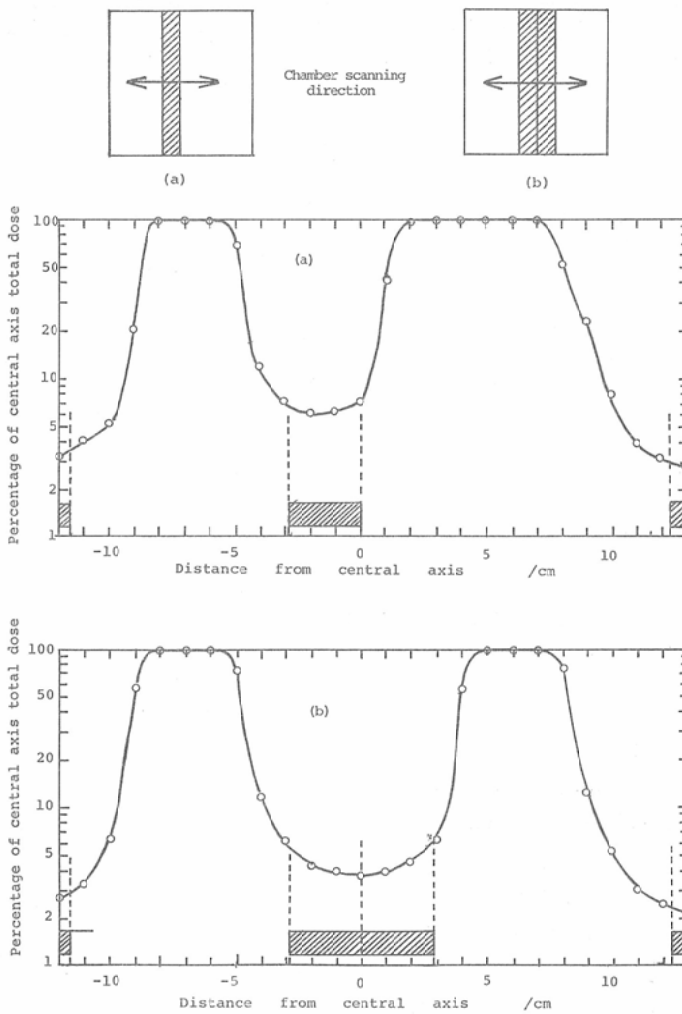


Fig. 8. Beam profiles on eccentric fields which were intercepted a  $22.4 \times 22.4$  cm square field with two or four iron leaves. The slash marks shows the position of iron leaves.



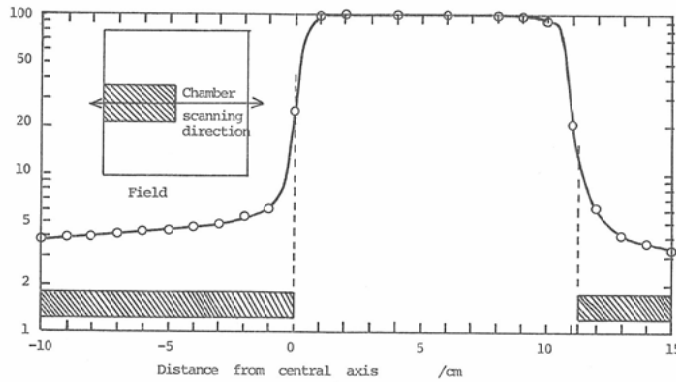


Fig. 9. Beam profile on an eccentric field which was intercepted a  $22.4 \times 22.4$  cm square field with two iron leaves on left hand side. The slash marks shows the position of iron leaves in the field.

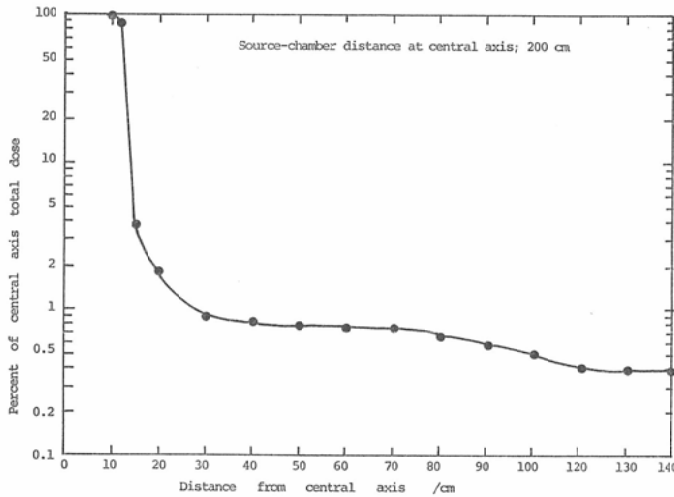


Fig. 10 Total dose distribution in air along a line perpendicular to the primary beam axis at 200cm from the target.

手元スイッチによつて操作できる。この場合、鉄板の先端の位置は制御盤とコリメータ本体側面の目盛板に表示される。照射野が $5.7 \times 5.7$  cm,  $11.4 \times 11.4$  cm,  $17.1 \times 17.1$  cm および  $22.8 \times 22.8$  cm の正方形になるようにセットし、線量分布を測定した。それらの結果を Fig. 6に示す。また、 $11.4 \times 11.4$  cm の照射野について、2方向での線量分布を Fig. 7に示す。

$11.4 \times 11.4$  cm の正方形照射野に、鉄板羽根を挿入して鉄板羽根の遮蔽効果をみた。それらの結果を Fig. 8と9に示す。それぞれの照射野の形

と電離箱の移動方向は図の中に示してある。200 cm での鉄板羽根1枚が投影する幾何学的な幅は2.85cm になる。

Fig. 10は照射野を $22.8 \times 22.8$  cm とした場合、ターゲットから200cm の位置での治療寝台上での線量分布を示している。

コリメータに取り付けられている第1, 2ガンマ線シャッタの遮蔽効果を調べるため、380rad (3.8Gy), 照射後にターゲットから200cm でのガンマ線の線量と線質を測定した。線量の測定には $^{60}\text{Co}$  ガンマ線で比較校正した電離箱型サーベ

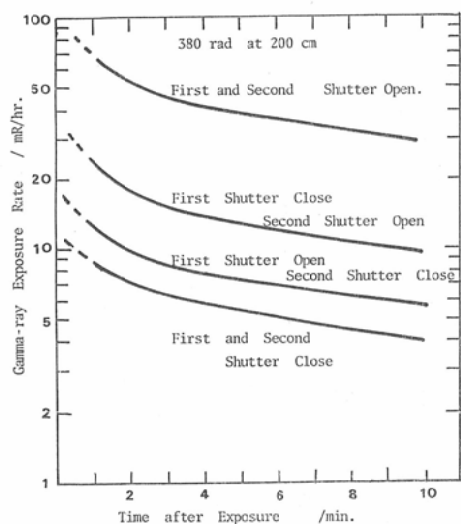


Fig. 11 Gamma-ray exposure rates at a point under the collimator assembly after patient exposure.

イ・メータを用いた。線質の測定には厚さ5cmで1mmφの穴をあけた鉛容器で遮蔽された2"φ NaI (Tl) シンチレーション・スペクトロメータを用いた。シャッターを開いたままの状態では、照射後4分で40mR/hrであるが、第1シャッターを閉じると15mR/hrとなり、両方のシャッターを閉じると6mR/hrとなる (Fig. 11)。これらのガンマ線はほとんどが<sup>56</sup>Mnや<sup>24</sup>Naに基因する。陽電子消滅線はシャッターを閉じることによって低減する。速中性子線治療の条件では、照射が終了すると同時に第1、2ガンマ線シャッターが自動的に閉じるようになっていいる。照射直後にコリメータ直下に近づいても、術者の被曝はほとんどゼロである。

#### 4. 考 察

放医研のコリメータは放医研で考案され、東芝玉川工場および東芝メディカルの手によつて設計図がひかれ、約1年間を費して製作された。STDが175cm~200cmと長い距離であり、世界でも例のなかつた垂直照射方式を取入れたため、医師らの要求を満たしたコリメータができたと確信する。放医研のサイクロトロンによる速中性子の生成量は当初予定した量より多く、30MeV、30μA重陽子でBe(d, n)B反応からの(中性子+ガンマ線)の線量はSSDが200cm約46rad/min (0.46

Gy/min)であつた。このため、当初STDを175cmと考えたが、実際の治療では200cmとし、コリメータと患者との間に40cm以上の間隙をつくることができ、シャドウトレーやウェッジ・フィルタの併用が可能となつた。

主コリメータである第3コリメータの鉄板羽根を工作の都合上左右8枚とした。遮蔽効果の面から長さを55cmとしたため、薄い鉄板では曲つてしまい駆動が困難であつた。当初の要求は、1.0cm以下のきざみで不整形照射野を得ることであつたが、STDが200cmで2.85cmのきざみになつてしまつた。また、鉄板に凹凸をつけたため、光の投影像と線量分布との間にわずかではあるが偏差が生じた。テーパ付のコリメータではないので、この凹凸がなくても鉄板間隙からの漏洩線は無視できる量であつたかも知れない。照射部位の位置決めの場合に光の投影像を使用するが、コリメータの照射中心を十字に張つた糸で指示することによつて偏差の補正を容易にした。

速中性子線治療用寝台を用いて治療計画を行うため、シミュレータが治療照射室内に併置された。X線テレビをみながら照射野を決めると、カーソル型の模擬コリメータに連動して鉄板羽根も動く。そのときのコリメータ条件を患者の皮膚に記すことができる。コリメータは±90°回転するが、シミュレータも連動して回転する。

コリメータの遮蔽効果は半影部分の線量分布や照射部位外の線量で評価できる。11.4×11.4cmの照射野でビーム中心から8cmの位置での線量は利用線の線量の3.5%であつた。米国での速中性子線治療施設でのコリメータによる空中での線量分布と本コリメータによる線量分布とを比較した。NRL (米国海軍研究所)のコリメータはテーパ型の長さ63cmのベネレックス型であるが、本コリメータの場合もそれと同程度の線量分布であつた。<sup>8)</sup>患者の治療部位外での被曝線量はFig. 10に示した如く、22.8×22.8cmの照射野でビームの中心から100cmのところ利用線維の線量の約0.5%であつた。

鉄板羽根を照射野内に挿入したとき、羽根1枚

では利用線維の線量を約6/100に低減するのに、2枚では約4/100に低減する。当初の要求は1/4以下であり十分に条件は満足する。しかし、鉄板にテーパーをつけることができなかつたため、散乱線により半影部の線量分布は良好ではない。

ターゲットやその近辺での残留放射能、コリメータ自身の残留放射能による術者や患者の被曝を低減するため、鉛製のガンマ線シャッターを2つ取付けた。これらのシャッターにより Fig. 11に示す如く術者らの被曝は低減される。

### 5. 結 語

患者の健常組織への被曝の低減と術者の被曝の低減、さらに  $^{60}\text{Co}$  遠隔治療装置級の速中性子線治療装置の試作を目標に、遠隔操作方式による不整形照射野設定速中性子線コリメータを設計試作した。このコリメータの概略と2, 3の特性について述べた。

(1) 左右8枚の鉄板羽根(長さ55cm, 幅29cm, 厚さ約2cm)を日本式唐紙戸のように摺動することにより不整形照射野を設定するものである。

(2) STD 200cm で11.4×11.4cm の照射野のとき、ビーム中心から8cm での線量は利用線維の線量の3.5%であつた。

(3) コリメータは±90°回転する。この回転は勿論のこと、鉄板羽根の摺動も遠隔操作によつて制御できる。

(4) ガンマ線シャッターによつて、ターゲットやその近辺およびコリメータ自身の残留放射能からの被曝を低減した。

稿を終るにあたり、コリメータの設計試作に御協力いただきました病院部の栗栖明博士、荒居竜夫博士ならびに岡崎実氏、さらに技術部サイクロトン管理課の平本俊幸博士および隈元芳一氏に深く感謝すると共に、心よく製作に応じて下さいました東芝メディカルおよび東芝玉川工場の関係者各位に深甚の謝意を表します。

### References

- 1) Maruyama, T., Kurata, Y., Okamoto, N., Yoshikawa, K., Wada, T., Nishizawa, K. and Hashizume, T.: Attenuation of neutrons produced by 16 and 30 MeV deuteron-beryllium reaction. (to be published)
- 2) Attix, F.H., Theus, R.B. and Miller, G.E.: Attenuation measurements of a fast neutron radiotherapy beams. *Phys. Med. Biol.*, 21, 4, 530, 1976
- 3) Maruyama, T. and Bouts, C.J.: Attenuation of MeV neutrons in multilayer shields composed of steel, polyethylene and borated materials. *Phys. Med. Biol.*, 17, 3, 420, 1972.
- 4) Greene, D. and Thomas, R.L.: Attenuation of 14 MeV neutrons in steel and polyethylene. *Phys. Med. Biol.*, 14, 45, 1969.
- 5) Attix, F.H., August, L.S., Shapiro, P. and Theus, R.B.: The physics and dosimetry of fast neutrons for radiotherapy. *NRL memorandum report 3123*, 1975
- 6) Smith, A.R., Almond, P.R., Smathers, J.B. and Otte, V.A.: Dosimetric properties of fast neutron therapy beams at TAMVEC. *Radiology*, 113, 1, 187, 1974.
- 7) Wootton, P., Alvar, K., Bichsel, H., Eenmaa, J., Nelson, J.S.R., Parker, R.G., Weaver, K.A., Williams, D.L. and Wyckoff, W.G.: Fast Neutron beam radiotherapy at the University Washington. *J. Can. Ass. Radiol.*, 26, 51, 1975
- 8) 丸山隆司: 速中性子線治療のための治療技術, 癌の臨床, 32, 4, 272, 1977.