

Title	高エネルギー陽子線の吸収線量の算定とその線量分布に関する研究
Author(s)	平岡, 武
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1982, 42(1), p. 41-65
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/17059
rights	
Note	

Osaka University Knowledge Archive : OUKA

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

Osaka University

高エネルギー陽子線の吸収線量の算定と その線量分布に関する研究

放射線医学総合研究所物理研究部

平 岡 武

(昭和56年 9月 3日 受付)

(昭和56年 9月17日 最終原稿受付 特別掲載)

Studies of Absorbed Dose Determinations and Spatial Dose Distributions for High Energy Proton Beams

Takeshi Hiraoka

Division of Physics, National Institute of Radiological Sciences, Chiba, Japan

Research Code No.: 203

Key Words: Proton Beam Dosimetry, Absorbed Dose,
Dose Distribution, Dose Intercomparison,
Proton Radiotherapy

High energy proton beams have been regarded as one of the more attractive particles for use in radiotherapy. In the National Institute of Radiological Sciences (NIRS), clinical trials of proton beams started in 1979, using a spot scanning system. Superficial treatment of less than 4 cm depth in tissue is possible because the maximum energy of the proton beams from our isochronous cyclotron is 70 MeV.

Absolute dose determinations were made with three types of ionization chamber and a Faraday cup. Methane based tissue equivalent (TE) gas, nitrogen, carbon dioxide, air were used as an ionizing gas with flow rate of 10 ml per minute, except for air which was used as open to atmosphere. Measurements were made at the entrance position of unmodulated beams and for a beam of a spread out Bragg peak at a depth of 17.3 mm in water. For both positions, the mean value of dose determined by the ionization chambers was 0.993 ± 0.014 cGy for which the value of TE gas was taken as unity. The agreement between the doses estimated by the ionization chambers and the Faraday cup was within 5%. Total uncertainty estimated in the ionization chamber and the Faraday cup determinations is 6 and 4%, respectively.

Common sources of error in calculating the dose from ionization chamber measurements are depend on the factors of ion recombination, W value, and mass stopping power ratio. These factors were studied by both experimentally and theoretically. The observed values for the factors show a good agreement to the predicted one.

Proton beam dosimetry intercomparison between Japan and the United States was held at NIRS in April, 1980. Two institutions in the US and two in Japan participated in the intercomparisons. All participants used ionization chambers as one detector, and one institution used a TE calorimeter. Good agreement was obtained with standard deviation of 1.6%. The value of the TE calorimeter is close to the mean value of all.

In the proton spot scanning system, lateral dose distributions at any depth for one spot beam can be simulated by the Gaussian distribution. From the Gaussian distributions and the central axis depth doses for one spot beam, it is easy to calculate isodose distributions in the desired field by superposition of dose distribution for one spot beam. Calculated and observed isodose curves were agreed within 1 mm at any dose levels.

目 次

1. 緒言
2. 実験装置及び方法
 - 2.1. ビームトランスポート
 - 2.2. 線量測定用検出器
 - 2.3. 電離箱による線量評価
 - 2.4. ファラディカップによる線量評価
3. 吸収線量測定結果
 - 3.1. 電離箱の ^{60}Co による校正と物理定数
 - 3.2. 70MeV 陽子線の特徴
 - 3.3. 組織吸収線量
 - 3.4. 誤差の評価
4. 線量評価に及ぼす因子の検討
 - 4.1. イオン再結合損失
 - 4.2. 阻止能
 - 4.2.1. 理論的計算法
 - 4.2.2. 実験による決定法
 - 4.3. W値
5. 吸収線量の相互比較
 - 5.1. 相互比較
 - 5.2. 線量計
 - 5.3. 線量モニタ
 - 5.4. 結果
6. 陽子線線量分布
 - 6.1. スポットビームの特徴
 - 6.1.1. ラテラル分布
 - 6.1.2. 深部線量分布
 - 6.1.3. 平面分布
 - 6.2. 等線量曲線
 - 6.3. 半影の改善
7. 考按
8. 結論

1. 緒 言

1946年 Wilson¹⁾ は陽子線や重荷電粒子線（以後陽子線も重荷電粒子線に含める）の癌治療への応用を発表した。それによれば鋭いブラッグピークを有する陽子線では、このピークを適当に利用すれば正常組織への障害を少なく、腫瘍組織に十分な線量を与えることができると言う、従来の放射線に対して線量分布の改善を主体とするものであつた。1948年当時 Berkeley で完成したばかりの184インチサイクロトロンを使用して、Tobias

ら²⁾³⁾は重荷電粒子線の生物学的効果の研究を開始した。これら基礎実験の下に1954年初めて陽子線が人体の癌腫瘍の治療に用いられた⁴⁾。しかしこのときの治療には陽子線特有のブラッグピークが用いられたのではなく、プラトー部分による治療であつた。ブラッグピークが初めて治療に応用されたのは1960年 Berkeley⁵⁾ に於て、又同時期からスウェーデンの Uppsala⁶⁾ や Harvard⁷⁾ に於て陽子線治療が開始された。ソ連では1960年代後半から3施設で陽子線による治療が行なわれている⁸⁾。我が国では1979年放医研に於て70MeV陽子線による治療が開始されたが、エネルギーが低いため組織中4cm以内の腫瘍への適用のみであるが、既に11名の患者が治療された。また筑波大学医科学センターでは、高エネルギー物理学研究所のプロトンシンクロトロンのブースタを利用して、200~250MeVの陽子線による治療と診断のための建設が行なわれており⁹⁾、本格的な陽子線の臨床医学への応用が開始されようとしている。

現在まで世界中で2,000人を越える患者が重荷電粒子線の治療を受けて来たが、その内の大部分は陽子線によるものである。初期の治療は脳下垂体のように小照射野に限られていたが、照射技術の進歩と共に大照射野の治療が開始され、適応症例も拡大されつつある。陽子線治療の最大の利点は正確な線量配分が可能なることで、治療技術の改善に伴って治療成績の向上が期待できる。

重荷電粒子線の物質との相互作用は、他の放射線に比較して極めて特徴あるふるまいをする¹⁰⁾¹¹⁾。最も大きな違いは2次荷電粒子線の発生が少ないことで、特に陽子線の場合は δ 線や重荷電粒子線の発生が極めて少なく¹²⁾¹³⁾、そのため吸収線量の算定は速中性子線や負パイ粒子等にくらべて比較的容易である。しかしW値や阻止能の不確定度のため、線量評価の絶対誤差を小さくすることはむずかしい。重荷電粒子線の線量評価法については Brice ら¹⁴⁾と Raju ら¹⁵⁾によってレビューされている。

陽子線の線量評価法は腫瘍治療や宇宙飛行士の

受ける放射線影響の基礎データを得るために発展してきた。多くの場合電離箱とファラデーカップにより吸収線量が算定されてきたが、ファントム中任意の位置の線量を比較的精度良く評価できる点で、電離箱法による線量評価が主流をなすようになった。その他カリメータや固体、化学線量計も用いられているが使用頻度は極めて少ない。

評価した吸収線量を確かめる方法の1つとして、線量相互比較がある。施設間又は各国間で生物効果や治療成績を比較するためには、物理的な線量は同じ基準の上で評価する必要があるが、これは相互比較で統一された線量評価に於てのみ可能である。このような条件下では異なった施設間での治療症例を一緒にし、他の放射線との比較評価も可能である。高 LET 放射線と呼ばれる放射線は発生装置の点から設置できる施設はかぎられてしまう現状からして、施設間での線量相互比較は特に意義が深い。

放射線治療において深部線量分布図や等線量曲線図は不可欠のものであるが、重荷電粒子線は物質中をほぼ直進し、多重散乱の影響は飛程末端近くで生ずるため、モニタ線量計、窓、カリメータからの散乱の影響は無視でき、理論的な分布の計算値と実験値は良く一致する。陽子線のブロードビームに対する線量分布の計算法は Litton ら¹⁶⁾ や河内¹⁷⁾ によって求められている。放医研ではスポットスキヤニング法により最大 $20 \times 20 \text{cm}^2$ の任意の形の照射野や線量配分がカリメータを必要とせず可能な装置が開発された¹⁸⁾。このスポットビームは普通のブロードビームと異なり特別な深部線量分布を形成するが、放射線治療計画のためにはこのビームに対する線量分布の計算法を確立する必要がある。

本研究では 70MeV 陽子線治療のためのドシメトリを確立することを目的とし、電離箱法とファラデーカップ法により吸収線量を算定し両者の比較を行ない、また両者の絶対誤差を検討した。電離箱法においては種々の壁材質と形状、種々の空洞ガスを使用し W 値や阻止能の理論的、実験的検討またイオンの再結合損失に対する検討も加え

た。吸収線量の確立を図るため日米間での線量相互比較に参加し線量統一を図ると共に、施設間で使用した物理定数についてそれらの妥当性を検討した。相互比較には検出器として組織等価カリメータも使用されたため、それと他の検出器との比較検討も行った。スポットビーム特有の深部線量分布を測定し、この分布から等線量曲線を計算により求める方法を確立した。

2. 実験装置及び方法

2.1. ビームトランスポート

放医研サイクロトロンでは最大 70MeV 陽子線が得られるが、これら陽子線はスイッチングマグネット、ステアリングマグネット、3連4極電磁石、2個のスリットを通り、整形されたビームとなって陽子線照射装置に入る¹⁹⁾。この装置はサイクロトロン本体のトランスポート系とは完全に独立し、入射窓から約 7m の真空パイプを通過し、マイラ窓より下流 40cm の治療位置に達する¹⁸⁾。この間陽子線はスリット、垂直水平偏向用スキヤニングマグネット、モニタ電離箱、レンジモジュレータを通過する。最大 $20 \times 20 \text{cm}^2$ の照射野の治療が可能で、 $\pm 2.5\%$ 以内の線量平坦度である。小照射野の場合はブロードビームとしても使用できる。この場合はスリット幅を適当に開き、陽子線照射装置入射窓位置に 0.5mm 厚のアルミニウムスキヤッターリングフォイルを置くことにより達成される。本実験でも絶対線量の測定には大照射野を必要としないためブロードビームで実験を行い、 $4 \times 4 \text{cm}^2$ の照射野を用いた。照射野の中心位置はレーザ光線によるフロント及びバックポイントで正確な確認ができる。FSD が大きい治療位置での線量の変化は 2.5cm で 1% の異なりであり、位置設定に対する線量への誤差は無視できる。

2.2. 線量測定用検出器

電離箱とファラデーカップを検出器として用いた。電離箱には形状、壁材質、空洞ガスの違いによる線量測定への影響を求めるため次の3種類が用いられた。(1) 平行平板型は自製で、ルサイトにアクアダックを塗布した壁材質に、空気、炭

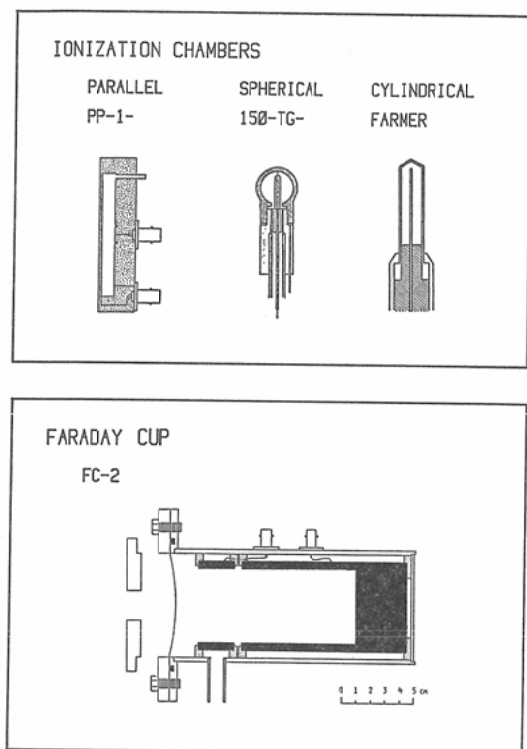


Fig. 1 Three types of ionization chamber and a Faraday cup which were used for absolute dose determinations.

酸、窒素、組織等価ガス²⁰⁾ (TEG) を充填して用い、この電離箱を PP-1 と名付けた。(2) 球型は米国 EG & G 社製の 150-TG で組織等価プラスチック²¹⁾ (TEP) 壁にガスは空気を用いた。(3) 円筒型はファーマ 0.6ml で、壁材質はナイロンにアクアダックを塗布しガスは空気である。全ての電離箱に対し測定時における高圧端子への印加電圧は -500volt とした。Fig. 1 にこれら 3 種類の電離箱を示す。FC-2 と名付けたファラデーカップは自製で、真鍮製のカップをルサイトで絶縁したものでやはり Fig. 1 に示してある。発生する 2 次電子の漏洩による電荷損失を防ぐため、リング電極を置き -100volt の印加電圧にて測定を行なった。測定時の真空度はカップの入口に於て 1×10^{-3} mmHg 以下であった。

2.3. 電離箱による線量評価

陽子線の電離箱による線量評価法は Warshaw

ら²²⁾, Maienshein ら²³⁾, Cercsek ら²⁴⁾, Verhey ら²⁵⁾, 伊藤ら²⁶⁾によって報告されているが、全て Bragg-Gray の空洞原理を応用したものである。ここでもこの原理に従い電離箱の空洞ガスの質量をあらかじめ求め、それから吸収線量を評価する方法を採用した。

照射線量が既知の ⁶⁰Co ガンマ線場に電離箱を置き、電離電流と吸収線量の関係からこの電離箱中のガスの質量が求められる。電子技術総合研究所の標準線量にトレーサブルな線量計で ⁶⁰Co ガンマ線場の照射線量を求めその値を R (roentgen) とすると、組織吸収線量 De (gray) と電離箱の電離電流との関係は次式で与えられる。

$$De = R \times 0.957 \times Aeq/100 \\ = \frac{Q_e \times W_{e/e} \times (Se)_{Wall/Gas} \times K_1 \times K_2}{M \times (\mu_{en}/\rho)_{Wall/Gas}} \quad (1)$$

ここで Aeq はビルドアップキャップ補正係数、 Q_e は電離電流 (coulomb)、 $W_{e/e}$ は 1 イオン対を生ずるのに必要な平均エネルギー (joule/coulomb)、 $(Se)_{Wall/Gas}$ は電離箱の壁材質とガスの質量阻止能比、M はガスの質量 (kg)、 $(\mu_{en}/\rho)_{Wall/Gas}$ は壁とガスの質量エネルギー吸収係数比である。また K_1 は温度と気圧変化による空洞ガスの質量変化に対する補正係数、その他イオン再結合損失の補正係数や電位計のメータ補正係数等が K_2 である。(1) 式より空洞ガスの質量 M を求めることができる。そこでこの電離箱による陽子線の組織吸収線量 Dp (gray) は次式で求められる。

$$Dp = \frac{Q_p \times W_{p/e} \times (Sp)_{Wall/Gas} \times K_1 \times K_2}{M \times (Sp)_{Wall/Tissue}} \quad (2)$$

ここで各記号は前記した係数の陽子線に対する値である。(2) 式を用いれば任意の壁材質、ガスの電離箱で吸収線量を評価できる。但し組織との質量阻止能比のエネルギー依存性の小さい、また W 値のはっきり知られたガスを選ぶ必要がある。

2.4. ファラデーカップによる線量評価

線量率が高い荷電粒子の線量測定にはファラデーカップはしばしば有効な測定器の 1 つである。

また粒子の平均飛程とは、普通入射粒子数が半分
に減少する深さをいうため、この飛程測定器とし
ても有効な手段である。

ファラデーカップに集められる粒子数Nは次式
で与えられる。

$$N = \frac{Q_{FC}}{ze} \quad (3)$$

ここで Q_{FC} は集められた電荷 (coulomb), z
は入射粒子当たりもたらされる電荷の平均数, e は
電子の電荷 (coulomb) である。そこでこの粒子
数から吸収線量に変換するためには、入射する粒
子フルーエンス ϕ という量²⁷⁾を導入することによ
ってなされる。

$$\phi = \frac{\Delta N}{Aa} \quad (4)$$

ここで ΔN は断面積 Aa に入射する粒子数で
ある。そこで陽子線の組織吸収線量 D_p (gray)
は次式で与えられる。

$$D_p = 1.602 \times 10^{-10} \times \phi \times (Sp)_{Tissue} \quad (5)$$

ここで ϕ は粒子フルーエンス (cm^{-2}), $(Sp)_{Tissue}$
は陽子線に対する組織の質量阻止能 ($MeV \cdot cm^2$
 $\cdot g^{-1}$) である。

3. 吸収線量測定結果

3.1. 電離箱の ^{60}Co による校正と物理定数

電離箱により陽子線の吸収線量を評価するた
めには、(1)式を用いて空洞ガスの質量を求め
る必要がある。電子技術総合研究所で毎年一回校
正を行なっている JAPM 医療用標準線量計で ^{60}Co
ガンマ線の照射線量を測定し、各電離箱とガス
の組合せによる空洞ガスの質量を求め、結果を
Table 1 に示してある。これらの質量をそれぞ
れのガスの密度で割ることにより電離箱の電離体
積が求められるが、その値を同じ Table の第3例に

示す。但し TEG の密度は一般に知られていない
ため、各構成ガスの分圧荷重によって求めた。4
種類のガスにより求めた PP-1 電離箱の電離体積
は 0.603 ± 0.007 (1.2%) である。第4列には各
電離箱の ^{60}Co ガンマ線に対するレスポンス (cou
lomb/Gy) を示してある。W値などの違いは各ガ
ス間でそれほど大きくないため、レスポンスの差
はほとんど密度差に依存する。

ガスの質量を求めるためには(1)式に現われ
る基準となる ^{60}Co ガンマ線に対する物理定数
をあらかじめ評価しておく必要があり、Table 2
にそれらの値を示す。まず質量阻止能は Berger
ら²⁸⁾の値を使用し、 ^{60}Co ガンマ線が水に入射し
発生する2次電子スペクトル²⁹⁾で荷重平均して
求めた。電子線に対するガスのW値は ICRU リ
ポート³⁰⁾を、又質量エネルギー吸収係数は Storm
ら³¹⁾の値を用いて計算した。Table 2 には又陽子
線に対する質量阻止能とW値を示してある。前者
は 70MeV 陽子線に対する値で、後述するが質量
阻止能比のエネルギー依存性は 1MeV 以上では
非常に小さい。W値は ICRU リポート³²⁾の値を
使用したが、エネルギー依存性については無視し
全てのエネルギーにこの値を用いた。

3.2. 70MeV 陽子線の特性

70MeV 陽子線の特性を調べるため、水中での
深部線量分布を正確に求めた。PP-1-TEG 電離箱
で測定した $4 \times 4 cm^2$ 照射野の中心軸上の深部線
量分布を Fig. 2 に示す。測定値の誤差表示は 8
回の異なった測定での標準偏差値を示すが、ブラ
ッグピーク附近の線量変化の激しい領域以外では
この値は極めて小さかった。陽子線の物質中での

Table 1 Mass of the gas, volume, response per tissue dose for various chamber system.

Chamber system	Mass of gas kg	Volume ml	Response per tissue dose, C/Gy
PP-1-AIR	7.218×10^{-7}	0.6032	1.878×10^{-8}
PP-1-TEG	6.303×10^{-7}	0.5964	2.173×10^{-8}
PP-1-N ₂	6.933×10^{-7}	0.5993	1.766×10^{-8}
PP-1-CO ₂	1.102×10^{-6}	0.6122	2.948×10^{-8}
150-TG-AIR	1.143×10^{-6}	0.9552	2.927×10^{-8}
FARMER-AIR	7.331×10^{-7}	0.6127	1.891×10^{-8}

Table 2 Physical parameters used for dose estimation of ^{60}Co gamma rays and also 70 MeV proton beams.

Material	^{60}Co Gamma rays			Proton beams	
	stopping power $\text{MeV cm}^2\text{g}^{-1}$	W-value J/C	mass energy abs. coeffi-, cm^2g^{-1}	stopping power $\text{MeVcm}^2\text{g}^{-1}$	W-value J/C
AIR	2.855	33.73	0.02661	8.439	35.2
TEG	3.275	29.2	0.02936	9.703	31.0
N_2	2.867	34.6	0.02664	8.491	36.5
CO_2	2.864	32.9	0.02665	8.428	35.0
TEP	3.274		0.02932	9.756	
LUCITE	3.191		0.02878	9.471	
MUSCLE	3.251		0.02934	9.611	

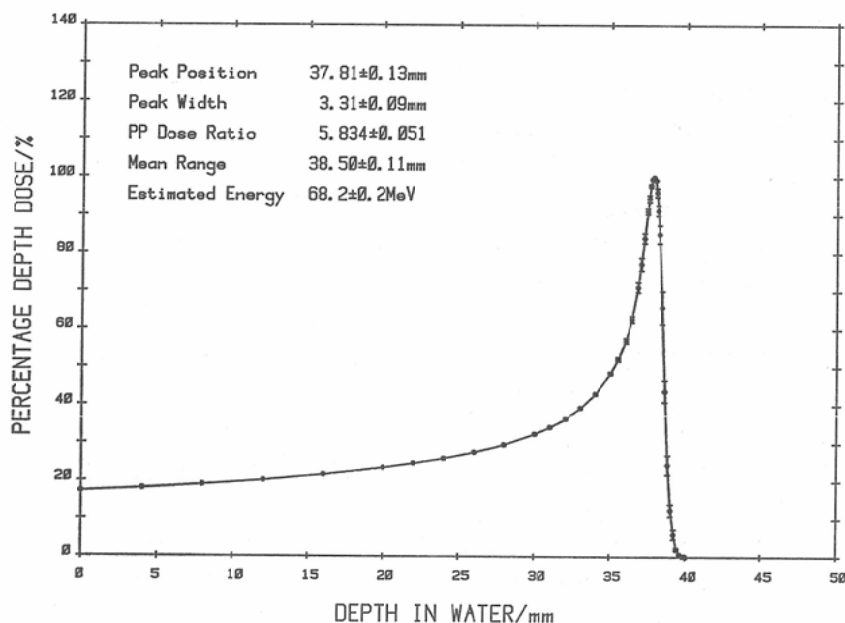


Fig. 2 Depth dose distribution in water which was measured on eight separate days.

平均2乗散乱角は飛程の末端近くまでは小さいので、照射野をより大きくしても分布に変化は見られない。Fig. 2よりブラッグピークの位置は $37.81 \pm 0.13 \text{ mm}$ 、ピーク幅はFWHMで $3.31 \pm 0.09 \text{ mm}$ であった。表面とピーク線量比は 5.834 ± 0.051 で、Littonら¹⁶⁾による70 MeV陽子線に対する水中での計算値6.60より小さい値である。但し完全に表面の値は測定できなかったので外挿により求めたが、Carlssonら³⁹⁾による185 MeV陽子線の実験では、 δ 線や2次粒子によるビルドアップ

があることを報告している。しかし70 MeVでのこの δ 線等の影響はあったとしても0.5 mm以内である。ブラッグピークを越した50%線量となる深さを平均飛程として求めた所 $38.50 \pm 0.11 \text{ mm}$ であり、この飛程よりJanni³⁴⁾のTableから求めたエネルギーは $68.2 \pm 0.2 \text{ MeV}$ である。

線量分布の飛程末端の傾斜から平均飛程 $R_m = 38.50 \text{ mm}$ 、外挿飛程 $R_e = 38.91 \text{ mm}$ が求められ、飛程のストラグリング δR は次式で表わされる³⁵⁾。

$$\frac{\delta R}{R_m} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{R_e - R_m}{R_m} = 0.013 \quad (6)$$

Bethe のエネルギー損失の式を基に Wilson³⁶⁾ は単一エネルギーの陽子線のストラグリングに対する近似式を求めたが、次式により与えられる。

$$\frac{\delta R}{R} \approx 0.24K^{-0.1} E_0^{-0.5} = 0.010 \quad (7)$$

ここでKは陽子線の運動エネルギーとその静止エネルギーの比で、E₀は陽子線の静止エネルギーである。(6)式により実験から求めたストラグリングの値と(7)式より求めたそれは可成り良く一致しており、このことは入射陽子線のエネルギーが非常に均一であることを示している。

3.3. 組織吸収線量

電離箱による吸収線量の比較は Fig. 1 に示した分布の表面位置に於て行われた。PP-1, 150-TG, ファーマの3種類の電離箱の壁厚は 0.06~0.14g・cm⁻² の厚さであったが、この差は小さいため厚さの補正は行っていない。求めた吸収線量の結果を Table 3 に示す。PP-1-TEG の値を1に規格化したときの比を示してあるが極めて良く一致しており、空洞ガスによる違い、形状による違い、又壁材質による違いといったものは全く見出されない。陽子線と物質との相互作用に於て、エネルギー損失の大部分は構成物質の電子との非弾性衝突によって行われ、2次荷電粒子の寄与が小さいため、これらの結果が得られたものと思われる。後述する線量評価への絶対誤差の大きさから考えれば、この結果はむしろ良く一致しすぎているともいえる。誤差表示の付いた測定値は3回の

異なった日の測定値の平均値とその標準偏差を示す。同じ位置に FC-2 を置いて同様に3回の異なった日に測定を行ったが、平均値は電離箱の値に比較して5%小さい線量評価であった。次節に述べる絶対誤差の範囲からすれば妥当な結果とも考えられる。

陽子線治療を行なう場合にはブラッグピークを腫瘍の深さ方向の大きさにわたって拡大する必要があるが、この拡大されたピーク (spread out Bragg peak: SOBP) で PP-1 電離箱のガスの違いによる比較を行なった。この結果も Table 3 に示してある。15mm厚さのルサイトファントムのうしろに電離箱を置いたが、この位置での平均エネルギーは 38.5MeV と見積った。4種類のガスの違いによる平均値からのずれは変動係数で1.5%であるが、測定回数を増すことにより平均化され、より小さな偏差値となるものと思われる。

3.4. 誤差の評価

絶対測定を行う場合には誤差の評価が必要であるが、Table 4 に電離箱法とファラデーカップ法での線量評価に見積られる不確定度を示す。ここでは2%以上の不確定度の項目について説明を加える。まず電離箱の場合、空洞ガスの質量を(1)式を使用して求めるが、その内 ⁶⁰Co ガンマ線場の照射線量を決定する際の線量計のコバルト校正定数 N_c の不確定度が最も大きく1.5%と見積ったが、その他(1)式に生ずる物理定数は全て1%以下であり、これらの全体としてこの項目は3%と見積った。陽子線に対するガスのW値は測定値の不足と低エネルギー領域での強いエネルギー依存性等のためから ICRU³²⁾ でも4%見積っている。測定器は市販の標準器で校正をしているがこれに対し2%と見積った。つぎにファラデーカップの場合、阻止能に対してはエネルギーや物質によって異なるが、ここで用いたエネルギー領域と物質については Bichsel³⁷⁾ の評価を参考にして3%と見積った。電離箱でも阻止能の値が必要であるが、幸いにもこの場合は必ず阻止能比として用いられるため1.5%と見積った。全不確定度は電離箱とファラデーカップに対してそれぞれ

Table 3 Evaluated absorbed dose at two points for different detectors. The reference value is marked by an asterisk.

Detector	Entrance plateau 68.2 MeV	SOBP 38.5 MeV
PP-1-AIR	0.993±0.003	0.970
PP-1-TEG	1.000*	1.000*
PP-1-N ₂	1.005±0.003	0.990
PP-1-CO ₂	0.993±0.020	0.972
150-TG-AIR	1.014	
FARME-AIR	0.997	
FC-2	0.946±0.015	

Table 4 Estimated uncertainties in ionization chamber and faraday cup dosimetry.

Ionization chamber	Percentage	Faraday cup	Percentage
Mass of gas	3	Efficiency of faraday cup	1
W-value	4	Range of calibration beam	0.5
Stopping power ratio	1.5	Stopping power	3
Temp. and pressure	0.5	Low energy proton	1
Saturation	0.5	Effective area	0.3
Beam Inhomogeneity	1	Nuclear interaction	1
Measurement	2	Measurement	2
Total uncertainty	5.7		4.0

5.7%と4.0%となり, Verhey ら²⁵⁾による見積りとほぼ同じ評価である.

4. 線量評価に及ぼす因子の検討

4.1. イオン再結合損失

イオン再結合損失は一般再結合損失と初期再結合損失とに大別されるが, 後者は高 LET 放射線で問題となり, 高エネルギー陽子線程度の LET では一般に無視しうる. 但し飛程末端では LET が約 $100\text{KeV} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 程度にもなるため初期再結合損失が影響することも考えられるが, 正確に実験で求めることは困難である.

線量率と LET を大きくするため, ブラックビーク位置に PP-1 電離箱を置き, 空気, 炭酸, 組織等価, 窒素ガスを充填して飽和特性を求め, イオン再結合損失を検討した. 各空洞ガスに対して電離電流の逆数と印加電圧の2乗の逆数のプロットはほとんど直線となり, 飽和曲線は一般再結合損失に従うことがわかる³⁸⁾. Fig. 3 に印加電圧に対するイオン収集効率 (f =観察される電離電流/飽和電離電流) の測定値を示す. 横軸の q は発生するイオン密度 ($\text{esu} \cdot \text{cc}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), d は電極間隔 (cm), V は印加電圧 (volt) である. 曲線

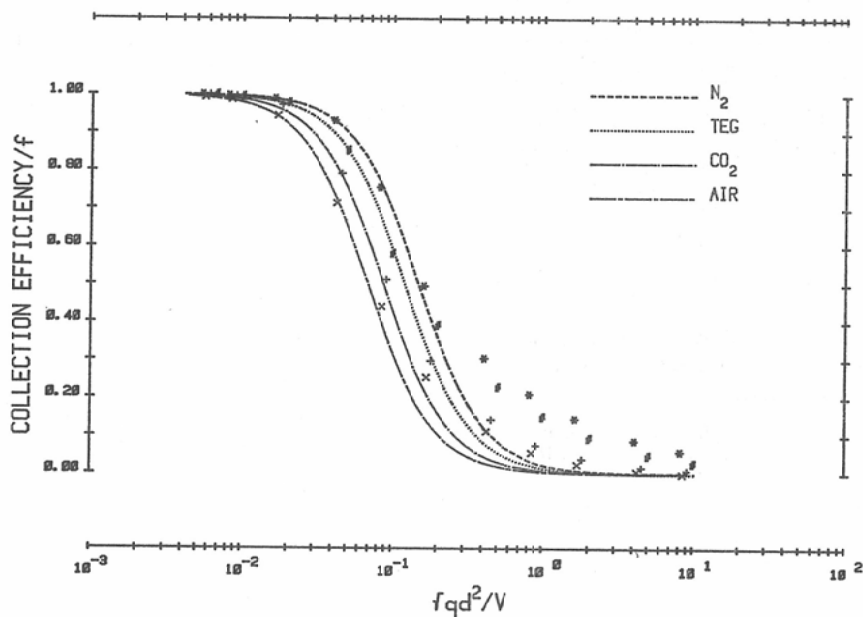


Fig. 3 Observed and calculated ion collection efficiencies for four different gases used.

は連続放射線に対する Boag³⁹⁾ の一般再結合損失の理論値で、 $f=0.8$ で実験値に規格化した、約0.5以上の収集効率では実験値と極めて良く一致している。この実験には60MeVの陽子線を使用した、このエネルギーの加速周波数は17.65MHzで、イオンの易動度から考えればほとんど連続放射線として取扱うことができる。測定時のビーム強度は飽和電離電流として $1,300 \sim 1,700 \text{esu} \cdot \text{cc}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ であった。Boagの理論式中のガスに固有な定数 m の値は Fig. 3 から空気、炭酸、組織等価、窒素ガスに対しそれぞれ、35.5, 28.0, 20.2, 16.3であった。空気に対する値は Boag が提唱している値36.7と非常に近い値である。ファーマ0.6mlの指頭型電離箱でも全く同様な結果が得られた。陽子線に対するイオン再結合損失の補正は、Boagの理論で充分良い精度で補正できることがわかる。但しパルスビームとして放出されるサイクロトロンの場合には、パルス状放射線に対する式を用いなければならぬことは言うまでもない。

4.2. 阻止能

4.2.1. 理論的計算法

線量測定に於て阻止能は最も重要な物理的パラメータの一つであるが、陽子線に対する物質の阻止能は Williamson ら⁴⁰⁾、Barkas ら⁴¹⁾、Janni³⁴⁾、Bichsel⁴²⁾ によって計算されてきた。最近 Andersen ら⁴³⁾ は膨大な実験データを理論式で、フィットすることにより全ての元素の阻止能を求めた。混合物についてはブラッグ加算則により近似できるが、化合物の場合平均電離ポテンシャルの違いにより正しく求めることが困難である。ここでは次の方法により任意の物質の阻止能を計算し求めた。

1MeV以上のエネルギー領域では Bethe の質量阻止能の理論式が適用されるが、Bichsel⁴²⁾ によれば次式で与えられる。

$$S_p = 0.30706 \frac{z^2}{\beta^2} \frac{Z}{A} \left[f(\beta) - \ln I - \sum (C_i/Z) - \frac{\delta}{2} \right] \quad (8)$$

ここで z は入射粒子の有効電荷、 $\beta=v/c$ 、 v は

粒子の速度、 c は光の速度、 A は阻止物質の原子量、 Z はその原子番号、 I は平均電離ポテンシャル (eV) である。 C_i/Z は i 番目の殻に対する補正項で、 δ は密度効果の補正項である。 $f(\beta)$ は相対論的速度の補正項を含んだもので、

$$f(\beta) = \ln(2mc^2\beta^2) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2 \quad (9)$$

で与えられる。ここで m は電子の静止質量で $mc^2=511006 \text{eV}$ である。 $0.30706=4\pi mc^2 r_0^2 N_A$ で、 r_0 は電子の古典半径、 N_A はアボガドロ数である。これら (8), (9) 式から質量阻止能は $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ の単位で求められる。密度効果は入射粒子の静止エネルギー (938.256MeV) 程度までは影響がない⁴¹⁾ので、500MeV までのこの計算では無視した。平均電離ポテンシャルは Ahlen⁴⁴⁾ の最近の推奨値を用いた。内殻補正は Andersen ら⁴³⁾ の値を用いたが、それによれば、

$$C/Z = \sum_{k=0}^4 A_k (\ln E)^k \quad (10)$$

という多項式で実験値をフィットして $A_0 \sim A_4$ の各係数を求めた。ここで E は amu 単位での陽子線のエネルギーである。ベリリウム、アルミニウム、銅、スズ、鉛に対する内殻補正の値を Fig. 4 に示す。比較的低原子番号の元素の内のいくつかについては、100MeV を越えるエネルギー領域に於てこの補正值が上昇する傾向が見られたが、ここでは高エネルギー側の最低値を採用することにした。例えば Fig. 4 の (0) と示した点線の部分は酸素に対する Andersen らの値であるが、ここでの計算にはこの部分は零とした。

混合物、化合物に対しては Z/A , $\ln I$, $\sum (C_i/Z)$ を次式のような平均値で置き換えることにより求められる。

$$\langle Z/A \rangle = \sum_j \epsilon_j (Z_j/A_j) \quad (11)$$

$$\langle \ln I \rangle = (\langle Z/A \rangle)^{-1} \sum_j \epsilon_j (Z_j/A_j) \ln I_j \quad (12)$$

$$\langle \sum (C_i/Z) \rangle = (\langle Z/A \rangle)^{-1} \sum_{ij} \epsilon_j (C_{i,j}/A_j) \quad (13)$$

ここで ϵ_j は j 番目の元素の重量分率である。アルミニウム、水、筋肉³⁰⁾ に対する質量阻止能を計算し、他のデータとの比較を Table 5 に示

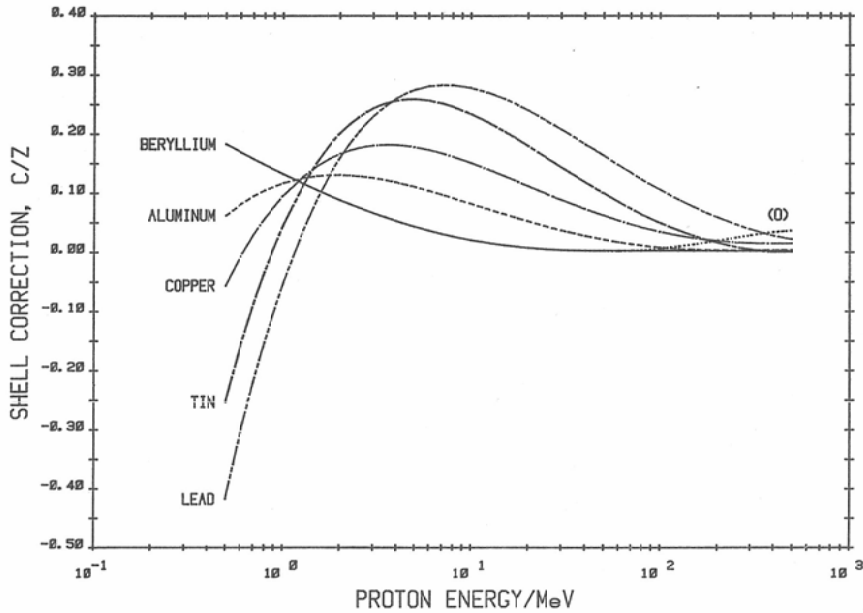


Fig. 4 Estimated shell correction term as a function of proton energy for typical elements.

Table 5 Calculated mass stopping power of aluminum, water, and the muscle for different energies. The values are compared to other published data.

	Present Cal.	Andersen	Janni	Bichsel	Williamson	Barkas	Mean
Aluminum							
1 MeV	171.5	173.2	174.0	173.9	174.5	171.0	173.0
10 MeV	33.79	34.08	33.97	33.89	33.84	33.80	33.90
100 MeV	5.690	5.734	5.695	5.689	5.715	5.697	5.703
Water							
1 MeV	271.1	265.5	268.0	271.4	269.4	273.5	269.8
10 MeV	46.36	46.43	46.17	46.77	45.93	46.81	46.41
100 MeV	7.357	7.389	7.346	7.411	7.397	7.425	7.385
Muscle (ICRU)							
1 MeV	267.7	262.9	264.3			269.6	266.1
10 MeV	45.88	45.99	45.70			46.25	45.96
100 MeV	7.284	7.320	7.273			7.342	7.305

す。3種類の物質と全てのエネルギーに対して著者の求めた値は、全体の平均値とはほぼ一致している。

上記のほかに電離箱を構成する壁材質や空洞ガス、又ファントム材質の質量阻止能を計算し、各物質の陽子線線量測定への適応性について検討した。Fig. 5は TEP に対するアルゴン、炭酸、空

気、窒素、組織等価、メタンガスの質量阻止能比を示す。アルゴンガスを除けばこのエネルギー領域ではほぼ平坦なエネルギーレスポンスを示す。70MeV 陽子線のブラッグピークでの平均エネルギーは 6.3MeV と見積った¹⁶⁾が、その点からすれば実質上質量阻止能比は一定と取ることができる。特に TEG の場合 1~500MeV に於て0.2%

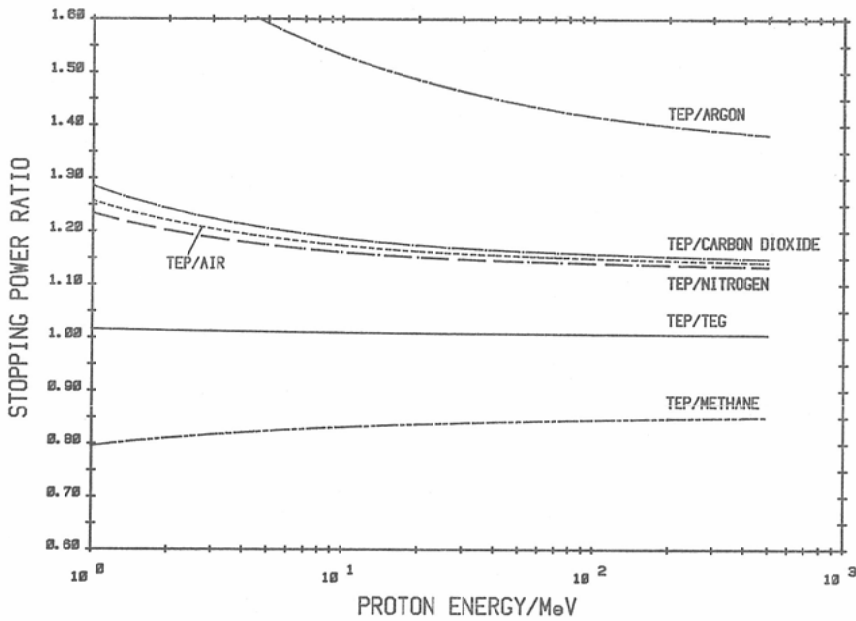


Fig. 5 Mass stopping power ratio of the tissue equivalent plastic to some cavity gases.

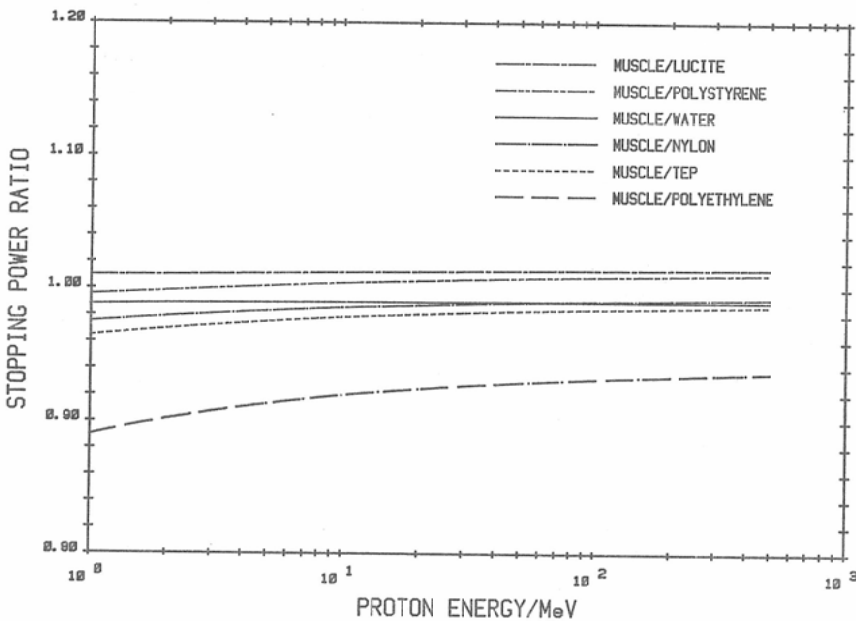


Fig. 6 Mass stopping power ratio of the muscle to some materials used in dosimetry

以内で一定である。Fig. 6は筋肉に対するルサイト、ポリスチレン、水、ナイロン(6)、TEP、ポリエチレンの質量阻止能比を示す。これらの物質

の筋肉に対するエネルギー依存性は極めて小さく、線量測定用材質として有効である。水と筋肉では1%異なり、どちらの吸収線量を評価するか

によって1%の差が生ずるが、高エネルギーガンマ線と全く同じ現象である。

4.2.2. 実験による決定法

質量阻止能を実験的に求める方法には Bakker⁴⁵⁾の、ある物質の深部線量分布と吸収体通過後の分布との比較から求める方法がある。この方法は比較的簡単な装置で測定精度も高いので、Thompson⁴⁶⁾は阻止能のブラック加算則の有効性の検討に応用したが、ここでもこの方法によって元素、化合物、混合物の質量阻止能を測定した。

水ファントム通過後の深部線量分布を基準としたが、これは水の厚さを任意に可変できることと、この厚さがマイクロメータにより遠隔操作で精度良く求められることによる。吸収体はカーボン(グラファイト)、アルミニウム、銅、カドミウム、スズ、鉛、ルサイト、ポリスチレン、ポリエチレン、Mix-R⁴⁷⁾で、約2~3g・cm⁻²の厚さである。分布測定にはPP-1-TEG電離箱を用いた。Fig. 7に吸収体がない時の水中での深部線量分布と、元素物質の吸収体通過後の分布を示す。カーボンのピーク値は非常に低いが、これは

グラファイトにすが入っているためで、そのためFWHMも大きくなっている。鉛の値は図の重さなり合いを避けるため横軸は10mmを零としてプロットした。鉛のピーク値も多少低いが、これは原子核との相互作用が大きいためと思われる。プラスチック類については示されていないが、全ての物質でピーク値はほぼ100%で、FWHMもほぼ水と同じ値であった。

Table 6に全体の結果を示す。第2列には密度を示してあるが、カーボン、スズとプラスチック類は測定値で、他のものは理化年表の値を引用した。第3列はピー位置で、この差と吸収体の厚さ、密度から質量阻止能が求められるが、カーボンについてはすの影響をなくすため、飛程末端近くの50%線量になる深さどうしの比較から求めた。水の値を1としたときの相対質量阻止能が直接求められこれを第4列に示したが、一般にはアルミニウムを基準に取ることが多いのでそれを第5列に示した。また計算値を第6列に示し実験値との偏差を第7列に示した。偏差値は±1%以内で極めて良い一致が得られた。これらの結果より

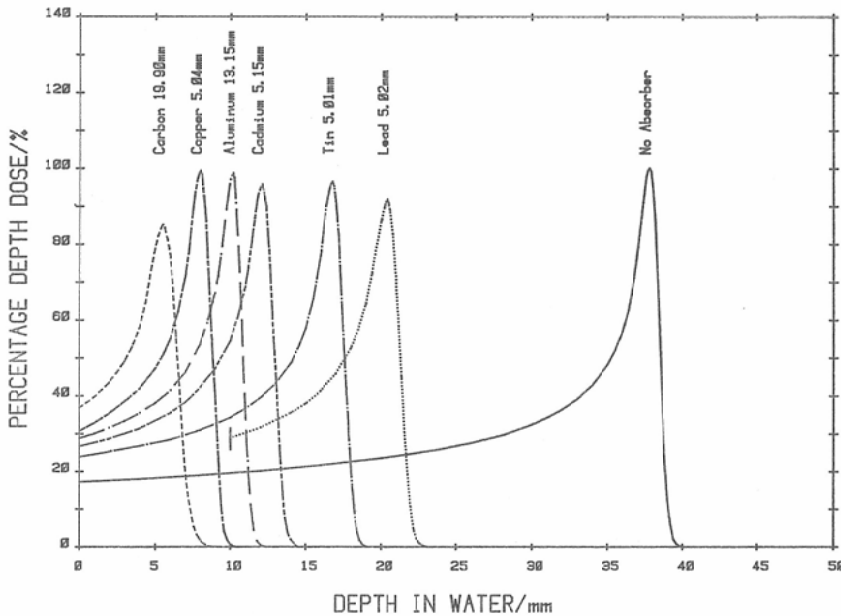


Fig. 7 Depth dose distributions in water passing through various elements and no absorber. The value of the Bragg peak for no absorber is taken as 100%.

Table 6 Physical density, peak position, and mass stopping power for various materials to be investigated. In each column the reference value is marked by an asterisk.

Element	Density g/cm ³	Peak position mm	Mass stopping power H ₂ O=1	Al=1	Calculation	Deviation %
Carbon	1.790	6.61	0.898	1.149	1.151	- 0.2
Aluminum	2.69	10.20	0.781	1.000*	1.000*	0
Copper	8.93	8.00	0.662	0.848	0.846	+ 0.2
Cadmium	8.64	12.10	0.578	0.740	0.739	+ 0.1
Tin	7.354	16.80	0.570	0.731	0.724	+ 1.0
Lead	11.34	10.40	0.481	0.617	0.618	- 0.2
Lucite	1.185	10.20	1.000	1.280	1.267	+ 1.0
Polystyrene	1.06	13.80	0.985	1.263	1.272	- 0.7
Polyethylene	0.926	6.80	1.080	1.383	1.377	+ 0.4
Mix-R	1.033	9.20	1.010	1.294	1.301	- 0.5
Water	1.00	37.81	1.000*	1.287	1.297	- 0.8

高エネルギー陽子線に対する質量阻止能は計算により充分精度良く求めることができることが判った。但し治療の際必要となるポーラス材質等は元素組成がはっきりしないものが多く、その場合この方法により実験的に求める必要がある。現在種々のポーラス材質と骨によるエネルギー損失の検討にこの方法を応用している。

4.3. W 値

電離箱法による線量測定に於ける精度に最も大きく影響する因子は空洞ガスのW値である。電子線に対するガスのW値のエネルギーレスポンスは20keV以上ではほぼ一定であるとされている。しかし重荷電粒子では質量の増加と共にエネルギー依存性が強く現われるようになる。ICRUの定義からW値には積分型W値と微分型 w 値とがあるが、ここでは空気、組織等価、炭酸、窒素ガスを用いて微分型 w 値の測定を行なった。

陽子線の電離箱中でのエネルギー損失は阻止能と空洞のサイズから求められるので、w 値は電離電流とこの比から求めることができる。測定にはPP-1 電離箱を用いた。入射陽子線のエネルギーの違いによるガスの影響を調べるため、吸収体なしの70MeV陽子線と、このビームが5.02mm厚さの鉛通過後の水中での深部線量分布を求めた。Fig. 8 にその結果を示す。ピーク値を100%に規格化した分布で、鉛通過の分布はピーク後多少のばらつきを示すがこれは測定精度の範囲内であ

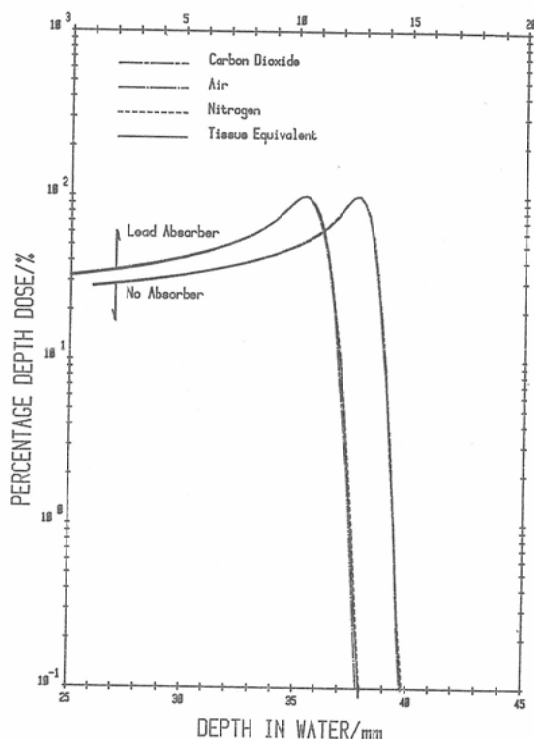


Fig. 8 Depth dose distributions in water plotted on semilogarithmic scale for no absorber and lead absorbed beams.

る。ピークプラトー線量比、ピーク幅 (FWHM)、平均飛程を各ガスでの測定について求め、両分布に対する値を Table 7 に示す。これらの値のガス間に於ける偏差値は極めて小さく、この程度の

Table 7 Physical properties of lead absorbed and no absorbed beams for different gases.

	No absorber			Lead absorber		
	P-P dose ratio	peak width mm	mean range mm	P-P dose ratio	peak width mm	mean range mm
AIR	5.70	3.48	38.45	3.07	4.48	11.30
TEG	5.75	3.30	38.40	3.12	4.35	11.32
CO ₂	5.70	3.50	38.45	3.07	4.44	11.32
N ₂	5.70	3.45	38.42	3.08	4.46	11.35

Table 8 Mean energy required to produce an ion pair in the gases for different energies.

Gas	10 MeV	20 MeV	30 MeV	50 MeV	70 MeV	Mean
AIR	35.7	35.9	35.7	36.0	35.9	35.8±0.1
TEG	30.2	30.5	30.5	30.3	30.4	30.4±0.1
CO ₂	35.0	34.9	34.4	34.7	34.6	34.7±0.2
N ₂	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5	36.5

エネルギー差ではガスの違いによる分布への差がないと結論できる。吸収体のない分布に対し、陽子線のエネルギーと水の深さとの関係を計算により求め、10, 20, 30, 50, 70MeV に対するガスの w 値を求めた。結果を Table 8 に示す。ICRU リポート³²⁾より比較的实验値の多い窒素ガスの値を 36.5eV とし他のガスの w 値を求めた。エネルギーが 10MeV 以上と高いためここで求めたエネルギー範囲内の偏差は極めて小さい。平均値を ICRU リポートの値と比較して見ると、炭酸ガスについてはほぼ同じ値である。空気に対しては ICRU は推奨値を示していないが、グラフに値をプロットして見ると良く一致する。TEG の場合著者の値は 2%小さいが、高エネルギーまで外挿すれば良く一致する。医学利用に用いられる陽子線の平均エネルギーはほとんど 10MeV を越すものであるため、線量測定には微分型 w 値を用いるのが妥当と思われる。

5. 吸収線量の相互比較

5.1. 相互比較

陽子線吸収線量の日米相互比較は過去 3 回実施された。第 1 回は 1980 年 4 月東大核研の FM サ

イクロトンによる 52MeV 陽子線、第 2 回はその直後放医研の AVF サイクロトンによる 70 MeV 陽子線、そして第 3 回は 1981 年 4 月米国ハーバード大学のシンクロサイクロトンによる 160 MeV 陽子線を用いて行なわれた。これら 3 回の比較においてほぼ同様の結果が得られたが、ここでは第 2 回の結果について述べる。この相互比較は 4 月 21~25 日に行なわれたが、この間物理的相互比較と生物学的相互比較も行われた。物理的線量相互比較の参加は放医研 (NIRS)、東大医科研 (IMS)、マサチューセッツ総合病院 (MGH)、メモリアルスローンケッタリング癌研究所 (MSKCC) の 4 施設であった。

5.2. 線量計

全ての施設は電離箱を検出器とし、MSKCC はこれに加えて組織等価カロリメータ⁴⁸⁾も線量計とした。電離箱は EG & G 社製の電離体積約 0.1 ml の IC-18 型又は自製で 0.6ml の平行平板型かで、空気 (大気) か TEG を 10ml・min⁻¹ の流量率で流しながら測定した。壁材質は PP-1 以外は全て A-150 TEP²¹⁾ で壁厚は 0.10~0.18g・cm⁻² である。電極間隔は平行平板型が 5mm、

IC-18 型は 1.4mm 等価で、各施設により250～500volt の印加電圧で測定が行なわれた。組織等価カロリメータの吸収体はやはり A-150 TEP で、2cm 直径 2mm 厚さの吸収体がジャケットの中に配置され、測定時は吸収体部分が真空中に引かれる構造になっている。このジャケット全体が 2cm 厚さのポリスチレンファントムの中心に納められているため、表面の線量は測定不可能で、SOBP の測定にのみ用いられた。

5.3. 線量モニタ

相互比較において最も重要なことは、全参加施設の測定時におけるビーム条件が常に一定に保たれていることである。このためにはサイクロトロンが安定に運転されていることと、信頼できるモニタを用いる必要がある。線量モニタは 20×20 cm² の照射野による照射を可能とする平行平板型電離箱で、5mm の電極間隔に 1,000volt が加えられ、40ml・min⁻¹ の流量率で窒素ガスを流している。サイクロトロンビームの線量率変化に対するイオン再結合損失は0.1%以下であり無視した。Fig. 9 に相互比較期間中のモニタの安定度

を示す。校正は PP-1-TEG で行ったが、平均値に対する変動係数は0.7%であった。但し Fig. 9 の値は PP-1-TEG にのみ温度気圧の補正をした値で、モニタと両方にこの補正を加えると、モニタカウント当りの平均値は 1.690±0.009cGy、変動係数は0.5%となり、ビーム条件は相互比較期間中安定していたことがわかる。そこで最終結果にはこのモニタ補正は加えていない。各施設の測定時の温度気圧の変化による空洞ガスの質量変化への補正は行なったが、この補正値は全施設で差は0.5%以下であった。

5.4. 結果

相互比較は 70MeV 陽子線のファントムへの入射表面と、25mm レンジモジュレータの SOBP における 15mm ルサイト板通過後の2点で行なわれた。Fig. 10 に両深部線量分布を示す。実線はサイクロトロンからの直接のビームで Fig. 2 と同じものであり、点線は SOBP の分布で深部方向の平坦度は2.5%以内であった。但しこの平坦度は深さと共にゆるやかに変化するため、相互比較での検出器の大きさの違いによる影響は無

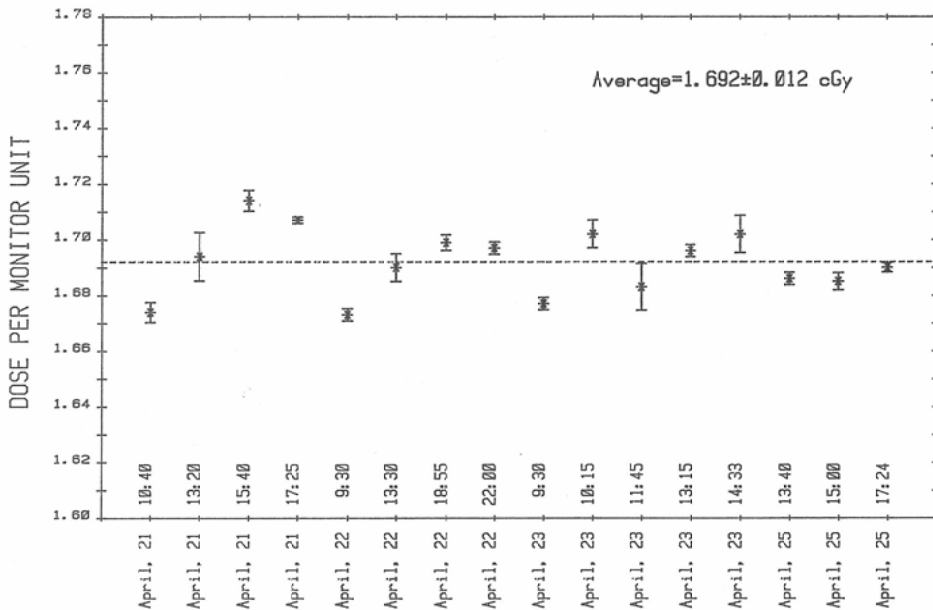


Fig. 9 Plot of the constancy of the thin walled transmission monitor chamber during the intercomparison.

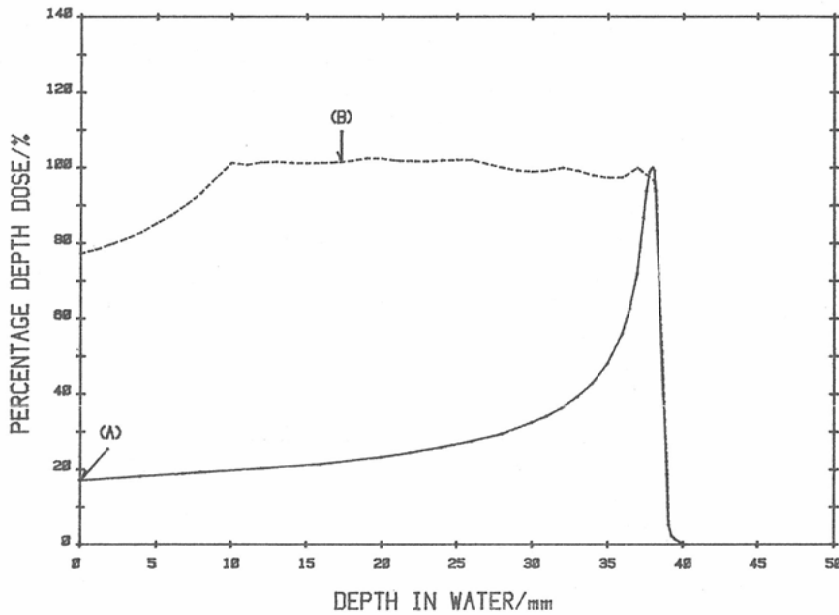


Fig. 10 Depth dose distributions in water for unmodulated beam (solid curve) and spread out Bragg peak (dotted curve).

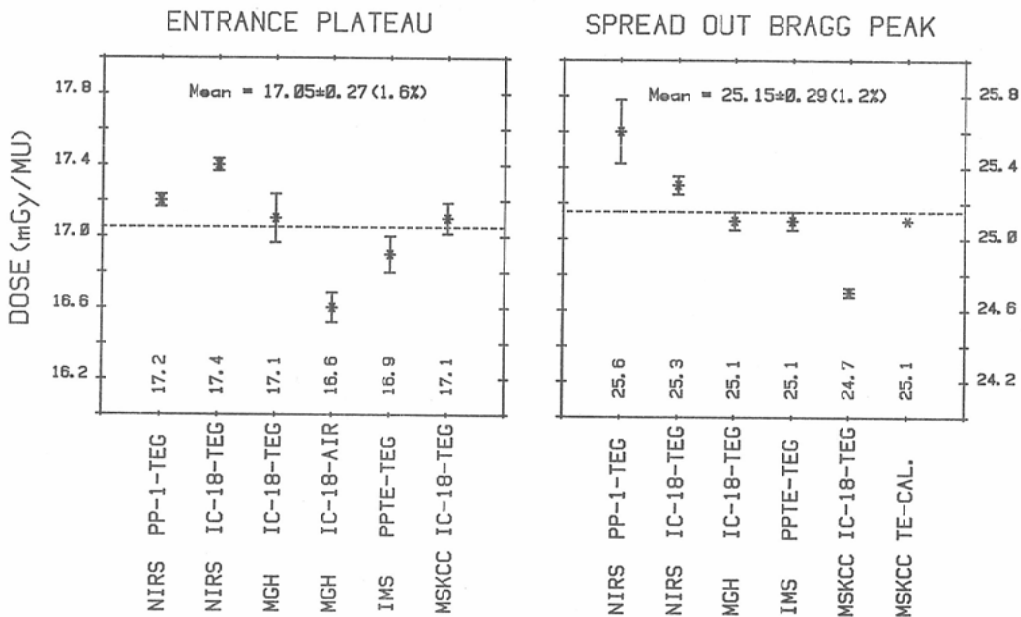


Fig. 11 Results of dose intercomparison at the entrance plateau and the spread out Bragg peak.

視できる。図の矢印で示した (A) (B) の2点で相互比較が行われたが、ルサイト単位の電子密度は水のそれにくらべて1.15倍となり、(B) 点は水に換算すると 17.3mm に相当する。

スポットスキニング法により 6×6cm² の照射野を用い、スポット当りの線量率は (A) 点で約50Gy・min⁻¹、(B) 点で約70Gy・min⁻¹ であった。

Fig. 11 に相互比較の結果を示す. 各施設の測定点の誤差表示は測定値の標準偏差であるが組織等価カロリメータについては報告されていない.

(A) (B) 两点における平均値からの標準偏差はほぼ同じであった. (A) 点における MGH の IC-18-AIR の値は低すぎるように思われるが, これは引用したW値によるものと思われる. NIRS に対し MGH のW値34.3eV は3%低く, ICRU リポート³²⁾の値を参照しても, この値は低すぎると言わざるを得ない. 4.3. で著者が求めた空気の w 値は 35.8eV である. (B) 点に於ては NIRS の PP-1-TEG と MSKCC の IC-18-TEG の値が, 同じガスにもかかわらず大きな差となっている. これは1つには引用したW値の値に原因する. 組織等価カロリメータの値は全体のほぼ平均値であることは, 電離箱による吸収線量の算定法が有効な手段であることを物語っている.

陽子線線量の相互比較と同時に, ⁶⁰Co ガンマ線の相互比較も行われたが, 2分間の照射による全施設の求めた値の平均値は0.8165±0.0024Gy

で変動係数は0.3%と極めて良い一致であった. このことから考えると陽子線相互比較でのばらつきは阻止能やW値といった物理定数に主に原因し, ビーム安定度が多少それに影響するものと思われる. 但し (A) (B) 点とも変動係数で1.6%以内であることは, 新しい放射線の線量評価として非常に良い一致であると言える.

6. 陽子線線量分布

6. スポットビームの特徴

6.1.1. ラテラル分布

高エネルギー陽子線は多重クローン散乱によってエネルギー損失を行ないながら物質を通過し, このため線束は物質の深さと共に広がりをもつ様になる. この広がりに対する理論計算と実験値は良く一致しており⁴⁹⁾⁵⁰⁾, 陽子線束が数mm直径以下ではブラッグピークが消失する報告もある⁴⁹⁾. 陽子線治療の場合には SOBP を得るためレンジモジュレータを使用するが, このモジュレータが散乱体となるため, ファントム中での横方向への散乱は直接線とは全く異なった現象を示す.

スポットスキヤニングビームのスポットの大

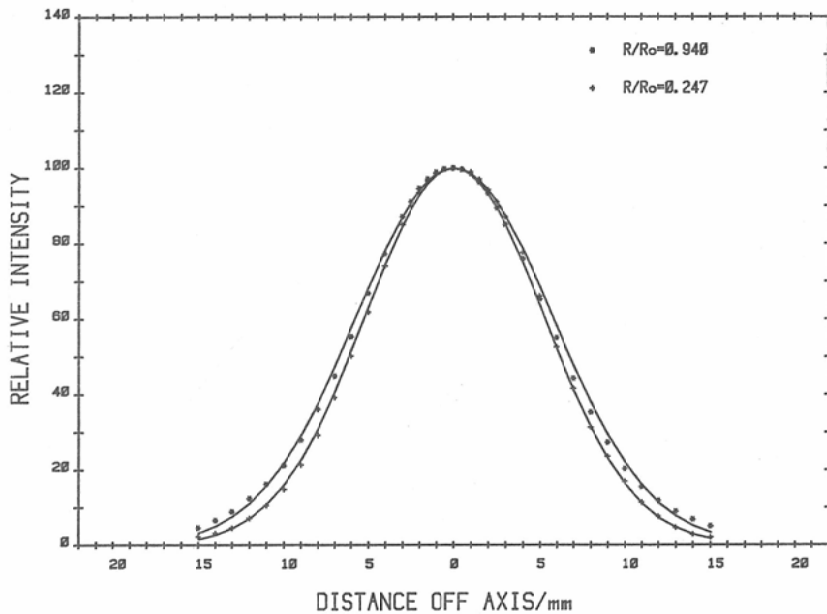


Fig. 12 Experimental and fitted lateral dose distributions of one spot beams for two depth in water.

きさは治療位置に於て $1 \times 1 \text{cm}^2$ で、この組合せによって任意の照射野が得られる。Fig. 12にファントム中2カ所の深さでのスポットビームの横方向の分布を示す。深さは飛程 R_0 と残余飛程 R との比として示してある。有効面積 1mm 直径、電離体積 0.004ml という超小型電離箱をビームに対して直角方向に動かして実験値を求めた。この電離箱のエネルギー依存性は非常に小さいので、これらの値は相対的な線量分布と見なすことができる。ガウス分布でフィットさせたのが実線で実験値に良く一致している。そこで任意の深さで、中心軸から距離 x の点のスポットビームの線量 $D(x)$ は次式で与えることができる。

$$D(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-(-x-\mu)^2/2\sigma^2) \quad (14)$$

ここで σ はある深さに於ける分布の標準偏差、 μ は平均値であるがここでは零とした。種々の深さでの分布の測定より、深さと標準偏差値の関係を求めることができ Fig. 13に示す。表面から 9mm まで立上りを示すが、これはモジュレータによるSOBP領域がブラッグピークから 9mm の深さまでであることを意味している。モジュレー

トされないビームの水中での広がり深いほど大きい。モジュレートビームでは浅い所ほど広がり大きい。この理由は浅い所に寄与する陽子線はモジュレータの厚い所を通過したビームによるからである。

6.1.2. 深部線量分布

治療用陽子線の深部線量分布は Fig. 10の点線で示した分布であるが、スポットビームの分布はこれとは同じにならない。Fig. 14にスポットビームの分布を示すが、実線がモジュレートされていない分布で、点線がモジュレートビームの分布である。実線の分布でも、Fig. 10の実線とはブラッグピーク付近で多少異なっているが、これはビームの大きさに依存するためである。特に点線のモジュレートビームではモジュレータによる陽子線の散乱によるため、中心軸上の分布は浅い所ほど線量が少なくなってしまう。これは前項に記した如く、浅い所ほど横方向への散乱が大きいことに原因する。

6.1.3. 平面分布

スポットビームは治療位置より 4.6m 上流に於

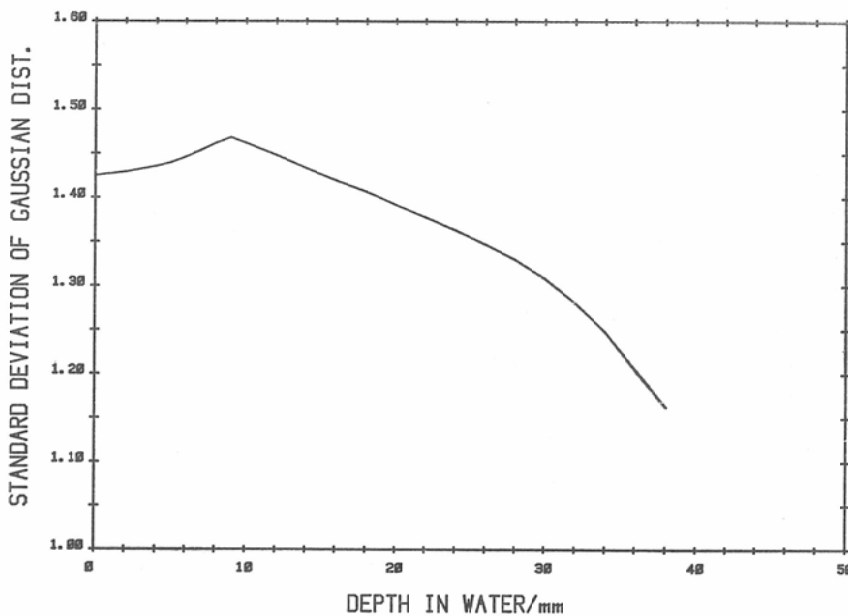


Fig. 13 Relationship between the standard deviation of the Gaussian distribution and the depth in water.

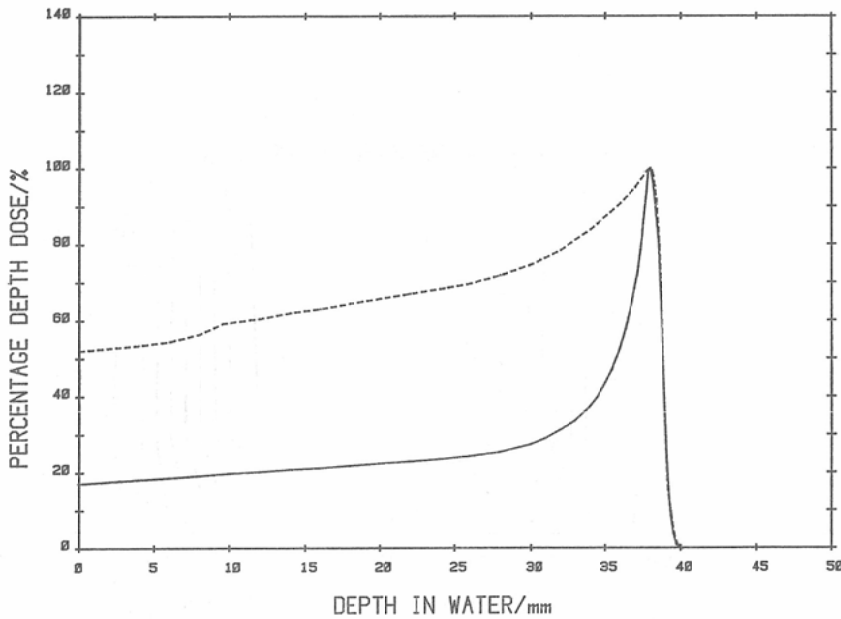


Fig. 14 Modulated (dotted line) and unmodulated (solid line) central axis depth dose curve in water for one spot beam.

て上下左右のスリットで作られるため、この位置での大きさは約 $4 \times 4 \text{mm}^2$ である。この面積内の陽子線は等しい確率でガウス分布の広がりをして治療位置に達する。Fig. 15 に計算により求めた治療位置での平面分布 (a) とその3次元表示 (b) とを示す。(a) の実線は中心のピーク値を100%としたときの90%から10%までの線量分布を示す。対角線方向の曲率は単純な関数曲線とならない。ここではこの曲線を正弦と余弦の関数で近似した。(b) 図からもわかる様に全ての方向に対してガウス分布をしている。

6.2. 等線量曲線

スポットスキヤニングビームの等線量曲線は、各深さの照射野内のスポットビームからの分布の寄与を加算することによって求められる。Fig. 16は $4 \times 4 \text{cm}^2$ の照射野の等線量曲線で、90%から10%まで10%間隔の値を示す。モジュレータからの散乱の影響がビルドアップ領域を除けば浅い所ほど大きいため、半影は深さによって異なることに注目したい。Fig. 14 に示したスポットビームの分布の影響が等線量曲線に良く現われて

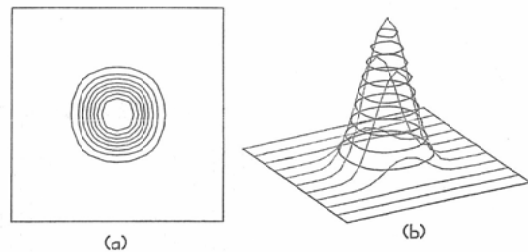


Fig. 15 Calculated isodose contours of one spot beam at the treatment site. (b) represented with three dimensional form.

いる。Fig. 16において横方向は5mm 間隔、深さ方向は2mm 間隔に点が打たれているが、これらの点での線量を計算し内挿により等線量曲線を求めた。計算には YHP 9825B ディスクトップコンピュータを用いた。照射野が大きくなると計算に時間がかかるが、 $4 \times 4 \text{cm}^2$ 程度での計算時間は数分で、プロット完成まで含めても10分以内である。

スポットスキヤニングビームの最大の特徴は照射野内のスポットの線量配分を任意に行うことができることにある。Fig. 17は $12 \times 12 \text{cm}^2$ 照射

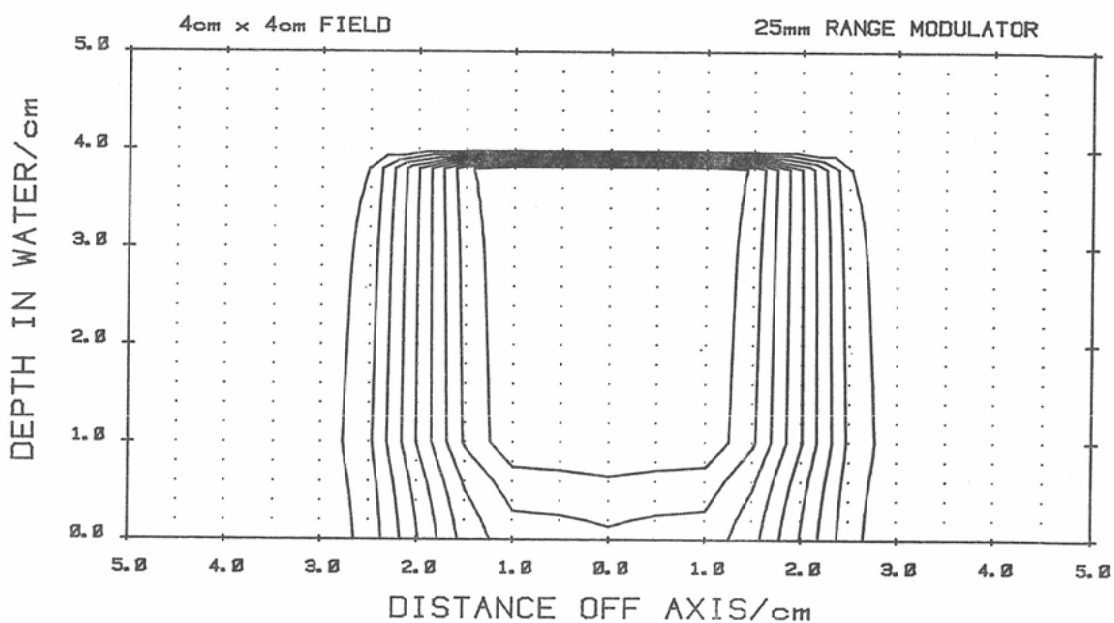


Fig. 16 Calculated isodose distributions in water for $4 \times 4 \text{ cm}^2$ field.

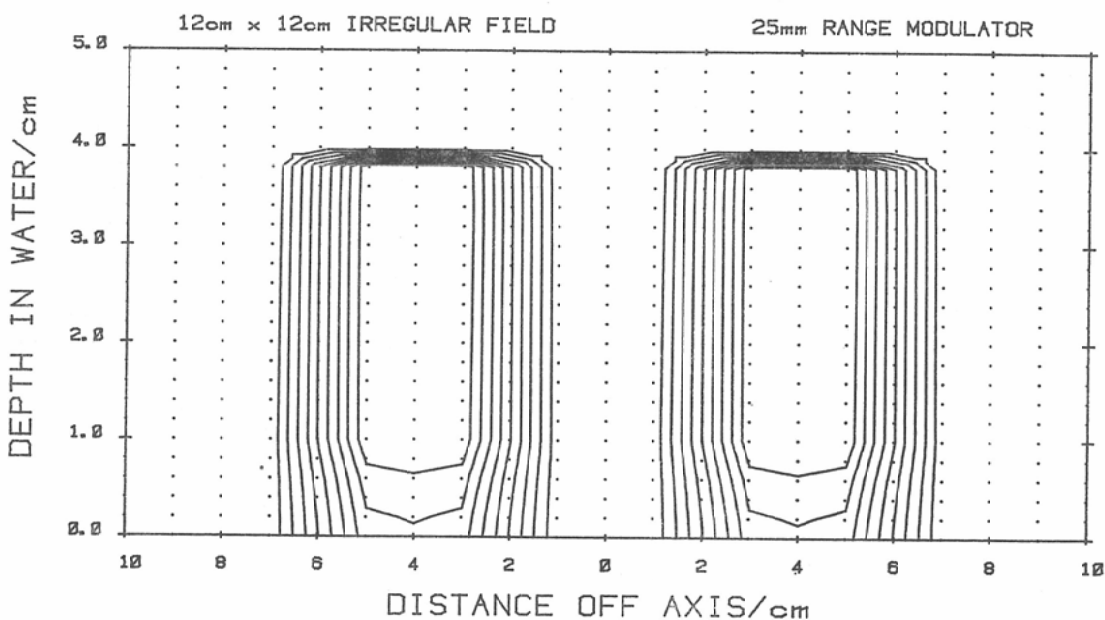


Fig. 17 Isodose distributions in water for $12 \times 12 \text{ cm}^2$ field with irregular dose localization.

野内で、中心の $4 \times 4 \text{ cm}^2$ 部分の予定線量を零としたときの等線量曲線を示す。曲線はやはり90%から10%までの値を示すが、完全に中心部分には線量が与えられないことがわかる。即ちスポット

スキヤニング法では任意の照射野に任意の線量配分を行うことができる。

6.3. 半影の改善

スポットスキヤニング法の1つの欠点は半影

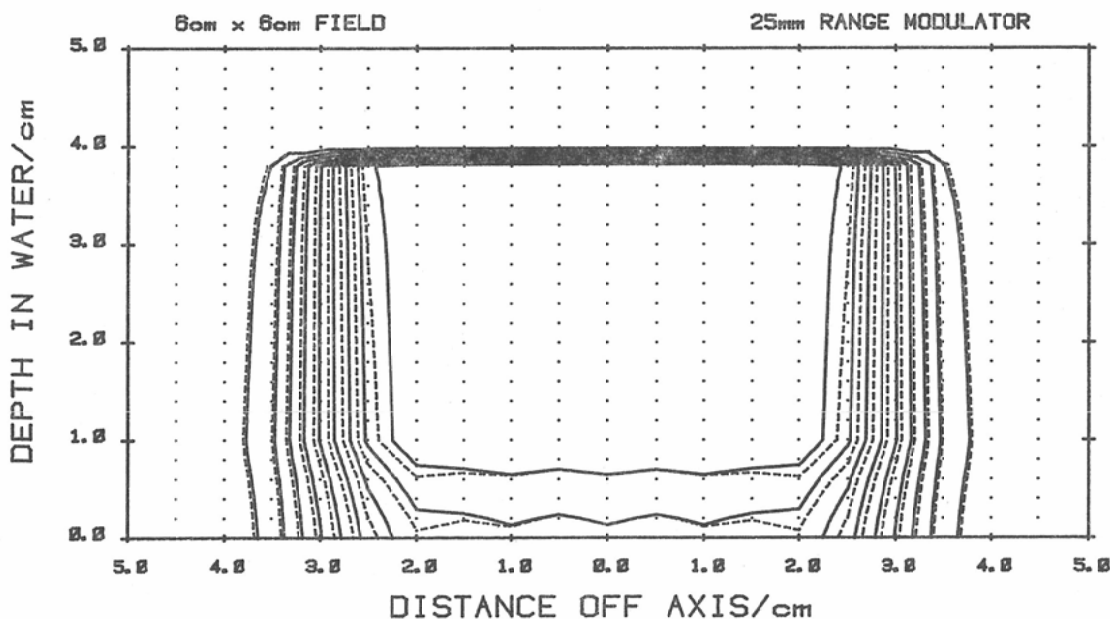


Fig. 18 Isodose distributions in water for $6 \times 6 \text{cm}^2$ field with (dotted line) and without (solid line) the improved method.

が多少大きいことである。勿論従来の放射線とは比較にならないが コリメータによる半影よりは悪くなる。その主な原因はモジュレータから治療位置までの距離に関係し、この場合は20cmである。半影を改善する1つの方法は、照射野内の最外側スポットの線量をそれ以外のスポットの線量にくらべて増してやることである。Fig. 18に $6 \times 6 \text{cm}^2$ 照射野の等線量曲線を示す。実線は各スポットの線量を全て同じにした場合で、点線は一番外側のスポット（この場合20個）の線量を他のスポットにくらべ8%増加した分布である。10%や20%の分布はほぼ同じ位置にあるが、90%や80%の線量位置が拡大され半影の改善を示している。このスポットの線量増加による100%領域の線量増加は2%以内である。即ち平坦度を損なうことなく半影を改善したことになる。

スポットビームの横方向への分布の影響は2cm以上ではほとんど無視できるので、 $4 \times 4 \text{cm}^2$ 以上の照射野の半影は全て同じで、Fig. 16の半影と Fig. 18の実線とは全く同じである。モジュレータによる半影への影響を小さくするためには、

治療部位とモジュレータ間にコリメータを用いることが望ましく、放医研では今までの治療のほとんどはこれを併用して治療を行なっている。

7. 考案

高エネルギー陽子線の吸収線量の算定を電離箱とファラデーカップによって行なったが、両者は5%の一致であった。それぞれの全不確定度の大きさからすればこの値は理解できるが、数回にわたる比較に於ける平均値のバラツキが小さいことからすれば、何か補正係数に妥当でないものが含まれているかも知れない。相互比較時に電離箱の値が組織等価カロリメータと良く一致していた事実から、電離箱による方法が信頼できるものと考えられる。何故なら McDonaldら⁵¹⁾によれば、組織等価カロリメータの全不確定度は2.5%と評価しているためである。ファラデーカップはエネルギーのはっきりした陽子線でないと線量への換算が困難であるが、放射線治療で必要とするファントム中任意の位置の線量評価には、電離箱が最も簡単で且つ便利で信頼できる検出器となる。

陽子線では電離箱の壁からの陽子線以外の2次荷電粒子線による空洞ガスへの電離効果が少ないため、どんな壁材質の電離箱でも絶対線量測定に用いられるが、 ^{60}Co ガンマ線による校正時での吸収線量の算定の面からすれば、組織等価物質壁の電離箱が最良である。ここで検討したプラスチック類ではエネルギー依存性にほとんど差はなく、空洞ガスの選定に重点を置くべきである。アルゴンを除けば炭酸、窒素、組織等価、メタンガスに対するエネルギー依存性にそれほど大きな違いは見られず、空洞ガスはW値の精度から選定すべきである。これらの点から現時点に於てはTEP-TEGの組合せが最も無難である。

電離箱による線量評価に及ぼす誤差の最大の要因はW値である。電子線に対する空気のW値は現在0.5%の不確定度であり、陽子線に対する4%をより小さくすることが急務で、もしこの値を1%程度に出来れば全不確定度の大きな改善となる。治療に用いられる陽子線の平均LETは全て $10\text{keV}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ 以下であるため、W値よりもw値を用いる必要があり、広いエネルギー領域のW値の確立が望まれる。誤差要因のもう1つの大きな原因は ^{60}Co ガンマ線による空洞ガスの質量の決定にあるが、直接的な方法によりこの値を精度良く種々な形の電離箱に対して決定することは極めてむずかしい。

空間線量分布が平坦な位置での線量評価にはいかなる形状の電離箱でも良いが、ブラッグピークのような急激な線量変化を生ずる分布の測定には位置分解能の良い電離箱を用いる必要がある。円筒型や球型電離箱では空洞の曲面による測定位置の実効中心の問題と、中心電極の影響により正しい値を示さず、この様な測定には小型平行平板型を用いるべきである。

陽子線に対する電離箱のイオン再結合損失はほとんどの場合一般再結合損失によるものと思われる、平行平板型電離箱で電極に直角にビームが入射する様な場合でさえ、初期再結合損失による影響を実験で求めることは困難である。重荷電粒子線に対して平行平板型モニタの極板をビームに対

して直角からわずかずらして配置する報告もあるが⁵³⁾、陽子線の場合全く不要である。電離箱の幾何学的形状と絶縁体との兼ね合いで、なるべく高い印加電圧を加え、Boag³⁹⁾の理論から補正係数を求めるべきである。500voltの印加電圧による各種電離箱とガスの組合せに於てここでの測定に対しての補正係数は全て0.2%以下であった。

高LET放射線又は重荷電粒子線と呼ばれている放射線の内、陽子線以外では速中性子線による線量相互比較が日米間で行われてきた⁵³⁾⁵⁴⁾。これら今まで行われてきた全ての相互比較に於て、 ^{60}Co ガンマ線の線量相互比較の結果1%以内で一致していたが、参加施設に日米両国の医療用線量標準センタがそれぞれ含まれていたことは誠に意義深いものである。陽子線の場合2次粒子による影響が小さいとはいえ、相互比較の結果良く一致したことは誠に喜ばしいことである。

スポットスキヤニング法による線量分布の計算法を確立したが、測定によりパラメータを決定したため、求めた等線量曲線と実験値との差は1mm以内と極めて良い一致であった。スポットの大きさを現在の $1\times 1\text{cm}^2$ からもっと小さくすることにより半影をより小さくできる。

70MeV陽子線の線量評価とその空間線量分布の算定とについて述べたが、治療を満足させるためにはより高いエネルギーの陽子線を必要とし、ここでの方法はそのまま応用できるものである。今後絶対吸収線量評価に及ぼす誤差を小さくする努力が必要であることは勿論であるが、骨、脂肪、肺といった不均質物質での吸収、散乱と言った問題を解明する必要である。3次元スポットスキヤニング⁵⁵⁾によれば大照射野の原体照射と言ったものが可能となり、線量分布の改善を示唆したWilsonの予測はより高度な技術の開発と共に、今後益々重荷電粒子線による治療への期待が大きい。

8. 結 論

(1) 電離箱法による高エネルギー陽子線の吸収線量の算定法を確立した。線量評価に生ずる物理定数であるW値や阻止能を理論的、実験的に求

め既存のデータと比較検討した。またイオンの再結合損失による補正值も4種類のガスについて実験より求めた。

(2) 諸外国の陽子線治療施設との吸収線量の確立と統一を図るため、日米陽子線吸収線量の相互比較を行った。 ^{60}Co ガンマ線については $\pm 0.5\%$ 、陽子線に対しては $\pm 1.6\%$ 以内の一致が得られた。

(3) スポットスキヤニングビームに対する等線量曲線の計算法を確立した。半影の改善法を提案し、計算による等線量曲線は実験値と1mm以内の一致であった。

稿を終るに臨み、御指導と御校閲をいただきました東京女子医科大学放射線医学教室 田崎英生主任教授ならびに放医研物理松沢秀夫部長に深甚なる謝意を表します。また本研究に有益な御教示、御協力をいただきました放医研物理2研川島勝弘室長、星野一雄および河内清光主任研究官、金井達明研究員、そして本研究の遂行に当り安定ビームの供給をしていただきましたサイクロトン管理課の諸氏に深く感謝致します。

文 献

- 1) Wilson, R.R.: Radiological use of fast protons. *Radiology*, 47: 487—491, 1946
- 2) Tobias, C.A., Anger, H., Weymouth, P.P. and Dobson, R.L.: The radiological use of high energy deuteron beams. ACED-2099-A, 1948
- 3) Tobias, C.A., Anger, H.O. and Lawrence, H.J.: Radiological use of high energy deuterons and alpha particles. *Am. J. Roentgenol.*, 1: 1—27, 1952
- 4) Lawrence, J.H.: Proton irradiation of the pituitary. *Cancer*, 10: 795—798, 1957
- 5) Lawrence, J.H., Tobias, C.A. and Born, J.L.: Heavy-particle irradiation in neoplastic and neurologic disease. *J. Neurosurg.*, 19: 717—722, 1962
- 6) Falkmer, S., Fors, B., Larsson, B., Lindell, A., Naeslund, J. and Stenson, S.: Pilot study on proton irradiation of human carcinoma. *Acta Radiol.*, 58: 33—51, 1962
- 7) Kjellberg, R.N., Sweet, W.H. and Preston, W.M.: The Bragg peak of a proton beam in intracranial therapy of tumors. *Trans. Am. Neurol. Ass.*, 87: 216—218, 1962
- 8) Boon, L.M., Lawrence, J.H., Connor, W.G., Morgado, R., Hicks, J.A. and Brown, R.C.: Introduction to the use of protons and heavy ions in radiation therapy: Historical perspective. *Inst. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys.*, 3: 65—69, 1977
- 9) 稲田哲雄: 陽子線照射野形成装置. 高エネルギー陽子線の医学利用に関する調査研究報告書, 49—54, 1980
- 10) Allison, S.K. and Warshaw, S.D.: Passage of heavy particles through matter. *Revs. Mod. Phys.*, 25: 779—817, 1953
- 11) Fano, U.: Penetration of protons, alpha particles, and mesons. *Ann. Rev. Nucl. Sci.*, 13: 1—66, 1963
- 12) Zerby, C.D. and Kinney, W.E.: Calculated tissue current-to-dose conversion factors for nucleons below 400 MeV. *Nucl. Instr. Metho.*, 36: 125—140, 1965
- 13) Carlsson, C.A. and Carlsson, G.A.: Proton dosimetry: Measurement of depth doses from 185-MeV protons by means of thermoluminescent LiF. *Radiat. Res.*, 42: 207—219, 1970
- 14) Birge, A.C., Anger, H.O. and Tobias, C.A.: Heavy charged-particle beams. In *Radiation Dosimetry*. Hine, G.J. and Brownell, G.L. Edited. pp. 623—665, 1956, Academic Press, New York
- 15) Raju, M.R., Lyman, J.T., Brustad, T. and Tobias, C.A.: Heavy charged-particle beams. In *Radiation Dosimetry*. Attix, F.H., Roesch, W.C. and Tochilin, E. Edited. pp. 151—199, 1968, Academic Press, New York
- 16) Litton, G.M., Lyman, J. and Tobias, C.A.: Penetration of high-energy heavy ions, with the inclusion of coulomb, nuclear, and other stochastic processes. UCRL-17392 Rev. 1968
- 17) 河内清光: 陽子線深部線量の計算法. 日本医放会誌, 37: 877—886, 1977
- 18) Kanai, T., Kawachi, K., Kumamoto, Y., Ogawa, H., Yamada, T., Matsuzawa, H. and Inada, T.: Spot scanning system for proton radiotherapy. *Med. Phys.*, 7: 365—369, 1980
- 19) Ogawa, H., Yamada, T., Kumamoto, Y., Sato, Y. and Hiramoto, T.: Status report on the NIRS-chiba isochronous cyclotron facility. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, NS-26: 1988—1991, 1979
- 20) Rossi, H.H. and Failla, G.: Tissue-equivalent ionization chambers. *Nucleonics*, 14: 32—37, 1956
- 21) Shonka, F.R., Rose, J.E. and Failla, G.: Conducting plastic equivalent to tissue, air and polystyrene. *Progress in Nuclear Energy. Series*, 12.1.: 184—187, 1958
- 22) Warshaw, S.D. and Oldfield, D.G.: Pre-

- therapeutic studies with the chicago synchrocyclotron. *Am. J. Roentgenol.*, 78: 876—887, 1957
- 23) Maienschein, F.C. and Blosser, T.V.: The depth-dose distribution produced in a spherical water-filled phantom by the interactions of a 160-MeV proton beam. ORNL-3457, 1963
 - 24) Cercek, L., Ebert, M., Gilbert, C.W., Haigh, M.V., Howard, A., Massey, J.B. and Potten, C.S.: Biological effectiveness of high-energy protons. *Int. J. Radiat. Biol.*, 15: 137—156, 1969
 - 25) Verhey, L.J., Koehler, A.M., McDonald, J.C., Goitein, M., Ma, I-Chang, Schneider, R.J. and Wagner, M.: The determination of absorbed dose in a proton beam for purposes of charged-particle radiation therapy. *Radiat. Res.*, 79: 34—54, 1979
 - 26) Ito, A., Ohmura, H., Hasegawa, T., Take-naka, E. and Sakamoto, K.: Absolute dosimetry of 52 MeV proton beam with ionization chambers. To be published
 - 27) ICRU Report 11: Radiation quantities and units, International Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, D.C., 1968
 - 28) Berger, M.J. and Seltzer, S.M.: Tables of energy losses and ranges of electrons and positrons. in *Studies in Penetration of Charged Particles in Matter*. NAS-NRC, Publication 1133, 1964
 - 29) Cormack, D.V. and Johns, H.E.: Electron energies and ion densities in water irradiated with 200 KeV, 1 MeV and 25 MeV radiation. *Brit. J. Radiol.*, 25: 369—381, 1952
 - 30) ICRU Report 10b: Physical aspects of irradiation. National Bureau of Standards Handbook. 85, Washington, D.C., 1964
 - 31) Storm, E. and Israel, H.I.: Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements $Z=1$ to $Z=100$. *Nuclear Data Tables*, A7: 565—681, 1970
 - 32) ICRU Report 31: Average energy required to produce an ion pair. Internal Commission on Radiation Units and Measurements, Washington, D.C., 1979
 - 33) Carlsson, C.A. and Carlsson, G.A.: Proton dosimetry with 185 MeV protons. Dose buildup from secondary protons and recoil electrons. *Health Phys.*, 33: 481—484, 1977
 - 34) Janni, J.F.: Calculations of energy loss, range, pathlength, straggling, and the probability of inelastic nuclear collisions for 0.1-to 1000-MeV protons. AFWL-TR-65-150, 1966
 - 35) Holloway, M.G. and Livingston, M.S.: Range and specific ionization of alpha-particles. *Phys. Rev.*, 54: 18—37, 1938
 - 36) Wilson, R.R.: Range, straggling, and multiple scattering of fast protons. *Phys. Rev.*, 71: 385—386, 1974
 - 37) Bichsel, H.: Stopping power data for neutron and pion dosimetry with ionization chambers. Univ. of Washington, Internal Report, 1977
 - 38) 川島勝弘, 平岡 武, 星野一雄, 松沢秀夫: 円筒型対電離箱の再結合損失. *日本医放会誌*, 37: 185—191, 1977
 - 39) Boag, J.W.: Ionization chambers. in *Radiation Dosimetry*. Attix, F.H., Roesch, W.C. and Tochilin, E. Edited. pp. 1—72, 1968, Academic Press, New York
 - 40) Williamson, C.F., Boujot, J.P. and Picard, J.: Tables of range and stopping power of chemical elements for charged particles of energy 0.5 to 500 MeV. CEA-R-3042, 1966
 - 41) Barkas, W.H. and Berger, M.J.: Tables of energy losses and ranges of heavy charged particles, in *Studies in Penetration of Charged Particles in Matter*. NAS-NRC, Publication 1133, 1964
 - 42) Bichsel, H.: Charged-particle interactions. In *Radiation Dosimetry*. Attix, F.H., Roesch, W.C. and Tochilin, E. Edited. pp. 157—228, 1968, Academic Press, New York
 - 43) Andersen, H.H. and Ziegler, J.F.: Hydrogen stopping powers and ranges in all elements, in Volume 3 of the *Stopping and Ranges of Ions in Matter*. 1977, Pergamon Press, New York
 - 44) Ahlen, S.P.: Theoretical and experimental aspects of the energy loss of relativistic heavily ionizing particles. *Revs. Mod. Phys.*, 52: 121—173, 1980
 - 45) Bakker, C.J. and Segre, E.: Stopping power and energy loss for ion pair production for 340-MeV protons. *Phys. Rev.*, 81: 489—492, 1951
 - 46) Thompson, T.J.: Effect of chemical structure on stopping powers for high-energy protons (thesis). UCRL-1910, 1952
 - 47) 鎌目一郎: 水等価ゴムの試作. *日本医放会誌*, 36: 143—147, 1976
 - 48) McDonald, J.C., Laughlin, J.S. and Freeman, R.E.: Portable tissue equivalent calorimeter. *Med. Phys.*, 3: 80—86, 1976
 - 49) Preston, W.M. and Koehler, A.M.: The effects of scattering on small proton beams.

- Harvard Univ. Internal Report, 1968
- 50) Carlsson, J. and Rosander, K.: Effects of multiple scattering on proton beams in radiotherapy. *Phys. Med. Biol.*, 18: 633—640, 1973
- 51) McDonald, J.C., Ma, I-Chang and Laughlin, J.S.: Calorimetric dosimetry in neutron and charged particle beams. COO/3522—26, 1980
- 52) Schimmering, W., Vosburgh, K.G., Todd, P.W. and Appleby, A.: Apparatus and dosimetry for high-energy heavy-ion-beam irradiations. *Radiat. Res.*, 65: 389—413, 1976
- 53) 平岡 武, 川島勝弘, 星野一雄, 松沢秀夫, 橋詰雅: 米国中性子線施設の線量相互比較. 日本医放会誌, 37: 949—955, 1977
- 54) Kawashima, K., Hoshino, K., Hiraoka, T., Matsuzawa, H., Hashizume, T., Itoh, A., Almond, P.R., Smathers, J.B. and Bichsel, H.: The second neutron dosimetry intercomparison between Japan and USA. *Jap. Radiol. Phys.*, 1: 31—40, 1981
- 55) Kawachi, K., Kanai, T., Matsuzawa, H. and Inada, T.: Preliminary experiments of three dimensional proton spot beam scanning. Seminar of High LET Radiations and Combined Modalities, Hawaii, Nov. 10—12, 1980
-