



Title	速中性子線に対するEricke線量計のG値
Author(s)	星野, 一雄
Citation	日本医学放射線学会雑誌. 1981, 41(2), p. 144-157
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/18872
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

速中性子線に対する Fricke 線量計の G 値

放射線医学総合研究所物理研究部

星 野 一 雄

(昭和55年8月1日受付)

(昭和55年10月13日最終原稿受付)

The G-value for the Fricke Dosimeter for Fast Neutron Beams

Kazuo Hoshino

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

Research Code No.: 203

Key Words: Fricke dosimeter, G-value, Fast neutron, Cyclotron

The G-values for the Fricke dosimeter have been determined for the fast neutron beam from NIRS-Chiba isochronous cyclotron. The neutron beams generated by 30 MeV deuterons on a thick beryllium target. The experiments were made "in air" and "in phantom". The dosimetry was based on measurements made with the paired chambers of the tissue equivalent plastic-tissue equivalent gas and carbon-air. The Fricke solutions were 0.8 N H_2SO_4 , 10^{-3} mol/l FeSO_4 and 10^{-3} mol/l NaCl . The Fe^{3+} concentration was obtained by spectrophotometry at a wavelength of 304 nm. The irradiation cells were made of polyethylene.

The G-values for the mixed neutron and γ -ray fields in air and in phantom were determined to be 9.56 and 9.44, respectively, and assuming a G-value of 15.5 for the γ -ray component, the G-values for neutrons were deduced to be 9.51 and 9.30, respectively. The difference between the G-values for the neutrons determined from "in air" and "in phantom" is considered to arise from the quality difference between these two neutron fields.

1. 緒 言

種々の化学線量計のなかで、最も広く利用されている Fricke 線量計¹⁾は、組織等価なこと、医学・生物学分野で通常使用する線量率領域では線量率依存性が全くないこと、線量計容積内に吸収されたエネルギーの総量が測れること、線量計の形状(容器の形状)をある程度任意に選べること等の特徴がある。これ等の特徴から、吸収線量の絶対線量計として、放射線治療時のモニター校正や容積線量の測定、培養細胞照射時の線量測定、高線量率放射線照射時の線量評価等に使われてい

る。

ところで、Fricke 線量計を絶対吸収線量計として用いるには、G 値(この場合、100eV のエネルギー吸収当りに生成される Fe^{3+} イオンの数)を知っておく必要がある。 $\text{X} \cdot \gamma$ 線については、すでに十分信頼できる G 値が得られており²⁾、電子線についても、これに近い状況にある³⁾。

一方、高 LET 放射線として、最近、放射線治療への応用に関心が深まっている速中性子線においても、Fricke 線量計は上述の特徴を失わないので、測定に利用することが可能である。速中

中性子線に対する Fricke 線量計の G 値の研究は、1960年代より行われて来たが⁴⁾⁵⁾、信頼できる値は中性子線 dosimetry が軌道に乗った1970年代に入ってから得られ始めた。従って、1977年発行の ICRU Report 26⁶⁾には僅か5編の文献が引用されているに過ぎない。しかも、これ等の論文は $d+T$, $d(16)+Be$ および ^{252}Cf の中性子線源を用いて求めた G 値を報告しているだけである。その上、同種の線源でも、研究者間でかなりの差がみられる (Table 7 参照)。このように速中性子線に対する Fricke 線量計の G 値は十分確立しているとはいえない。

本研究は速中性子線に対する Fricke 線量計の G 値の確立を目的として行った。特に、空中とファントム中とにおける G 値の差異の有無に注目した。使用した速中性子線源は放医研サイクロトロン (NIRS-Chiba Isochronous Cyclotron) によって 30MeV に加速された重陽子を Be ターゲットへ衝突させて発生させたものである。これは若干の γ 線を伴う連続エネルギー中性子線である (以下これを $d(30)+Be$ 中性子線と略記)。加速エネルギーを 30MeV としたのは、これによる中性子線によって現在がん治療の臨床的・トリアルが進められていることによる。

Fricke 線量計の中性子線に対する G 値確立のあかつきには、中性子線治療施設間における中性子線の吸収線量の相互比較に、郵送法による Fricke 線量計の利用が考えられ、治療線量の統一、トレーサビリティの確立に貢献でき、治療成績の向上に寄与し得るであろう。

2. 測定原理

Fricke 線量計の G 値は、照射により生ずる Fe^{3+} イオンの定量を、吸光度分析法で行う場合、一般に (1) 式で表わされる。

$$G = \frac{N_A \cdot \Delta A_s}{D_F \cdot \epsilon_m \cdot \rho \cdot l} \times 1.602 \times 10^{-15} (100eV)^{-1} \quad (1)$$

ここで、 N_A : アボガドロ数 (mol^{-1})、 ΔA_s : 照射および対照 Fricke 溶液の吸光度差 (O.D)、 D_F : Fricke 溶液の吸収線量 (rad)、 ϵ_m : Fe^{3+} イオンの分子吸光係数 ($l \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$)、 ρ : Fricke 溶

液の密度 ($g \cdot cm^{-3}$)、 l : 分光光度計セルの光路長 (cm) である。吸光度測定は 304nm の波長で実施した。この場合 ϵ_m は溶液温度 25°C にて $2,205 l \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$ である。吸光度測定時の溶液温度が T°C のときは $[1 + 0.0069 (T - 25)]$ により補正した。光度計セルは $l = 1.00cm$ の石英製を使用した。Fricke 溶液は 0.8N H_2SO_4 タイプを用いたが、この場合 $\rho = 1.024g \cdot cm^{-3}$ である。それに $N_A = 6.225 \times 10^{23} mol^{-1}$ であるから、これ等の数値を (1) 式に代入すると (2) 式のようになる。

$$G = \frac{1}{D_F} \times \frac{\Delta A_s}{1 + 0.0069 (T - 25)} \times 4.273 \times 10^5 (100eV)^{-1} \quad (2)$$

ところで、中性子線と γ 線の混在場においては、Fricke 溶液が両放射線に反応するので、 D_F はそれぞれの Fricke 吸収線量 $D_{F,N}$ と $D_{F,G}$ の和 $D_{F,M}$ として与えなければならない。この場合、G 値も特定の混在場における値、 G_M として求まる。 G_M は中性子線および γ 線に対する G 値、それぞれ G_M, G_G の加重平均値である。今、 γ 線線量の全線量に対する割合を $f (=D_{F,G}/D_{F,M})$ とすると、 G_N は (3) 式で表わされる。

$$G_N = \frac{G_M - f G_G}{1 - f} (100eV)^{-1} \quad (3)$$

3. 実験

3. 1. Fricke 線量計

3. 1. 1. Fricke 試料の作製

Fricke 溶液は 0.8N H_2SO_4 (空気飽和溶存) 中に $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ と $NaCl$ をそれぞれ 1mmol/l の割合で溶解させ調製した。0.8N H_2SO_4 調製時に使用した水は標準的手法で精製した再蒸留水である⁸⁾。 H_2SO_4 は分析級、その他の試薬は特級を用いた。

照射容器は内径 1.2cm ϕ 、長さ 3.9cm、肉厚 0.1cm のポリエチレン試験管を in air 用に、内径 1.2cm ϕ 、長さ 4.9cm、肉厚 0.1cm のポリエチレンおよびポリスチレン試験管を in phantom 用に使用した。後者で材質の異なる容器を使用したのは、水素含有量のちがう材質による影響の有無を確かめるためである。これ等の照射容器は標準的

手法に従って処理⁹⁾し、不純物混入防止に留意した。

Fricke 溶液を照射容器に充填した後、パラフィルムでこれを密封し Fricke 試料とした。試料は8個を1組とし、内4個は照射用に、残り4個は対照用に供した。

3. 1. 2. ^{60}Co — γ 線によるチェック

照射による Fe^{3+} イオンの収率は、Fricke 溶液中の不純物の種類や濃度に左右される。たとえ溶液の調製や容器の取扱いを標準的手法で注意深く行ったとしても、不純物の影響が皆無であるという保証はない。それ故、Fricke 線量計システム全体の検討も兼ねて、 ^{60}Co — γ 線によりチェックした。

(1) ^{60}Co — γ 線に対する Fricke 線量計の G 値と、電離箱線量計のラド変換係数 C_2 が十分確立している点に着目して、後述するファントム中で両者の比較を行った。即ち、 $G=15.5^{2)}$ 、 $C=0.95^{2)}$ として、それぞれの線量計から水の吸収線量を求めた。両者の結果は0.5%以内の差で一致

した。

(2) 電子技術総合研究所により、ある特定の照射条件(空中)での Fricke 線量計に対する基準照射が、昭和49年以後数次に亘って実施されていて、照射線量/吸光度、 $(R \cdot \text{dA}_0^{-1})$ なる変換係数が求められている⁹⁾。基準照射と同一条件で照射した Fricke 線量計から、この変換係数を用いて求めた照射線量と、電離箱で測定した照射線量は、0.3%以内の差で一致した。使用した電離箱線量計は(1)、(2)とも JAPM 標準線量計(応用技研製)である。

これ等のチェックは Fricke 溶液新調の都度実施したが(期間中5回新調)、いずれも上記偏差以内にあった。これより本 Fricke 線量計システムは、十分信頼に足るシステムであるといえよう。

3. 1. 3. 照射

実験は“in air”および“in phantom”で実施した。Fig. 1 (a) に in air, in phantom 同時照射実験時の幾何学的配置を示す。ここで SCD はタ

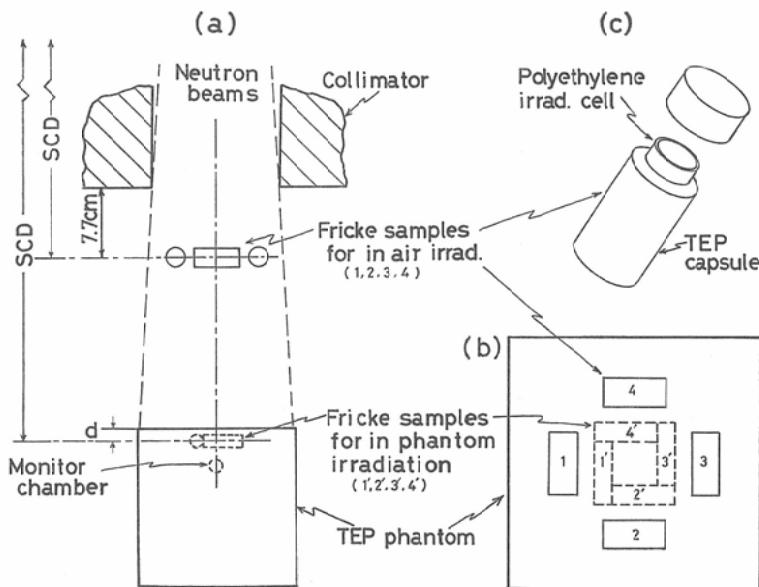


Fig. 1. Schematic diagram of irradiation set-up for neutron beams.

- Typical irradiation set-up for “in air” and “in phantom” Experiments.
- Top view of the Fricke samples arrangements.
- Fricke sample for “in air” irradiation.

Table 1. Irradiation condition for "in air" and "in phantom" experiments.

Geometry	SCD (cm)		Field size (cm ²)		Depth, d (cm)
	In air	In phantom	In air	In phantom	In phantom
g 1	148	172	16.9×16.9	19.6×19.6	1.6
g 2	—	148	—	17.4×17.4	1.6
g 3	158	—	18.1×18.1	—	—

ターゲット試料（又は電離箱）間距離である。両照射共、1度に4個のFricke試料をFig. 1 (b)の如く配置した。この幾何学的配置をg1と呼ぶ。他にSCDを異にし、in phantomのみで照射するg2とin airのみのg3 (in air照射の項で説明)がある。これ等の諸元をTable 1に示す。

g1およびg2で実施したin phantom照射は、20×20×20cm³の組織等価プラスチック¹⁰⁾（以下TEPと略記）ファントム中の深さ1.6cmの位置に、Fricke試料を埋め込み行なった (Fig. 1 (a),

(b)参照)。このファントム中には、ビーム中心軸上の深さ5cmの位置に、TEP壁—空気の指頭型電離箱（応用技研製）が挿入してある。これを主モニターとした。他にターゲットとコリメータ間に設けられている透過型電離箱と、ターゲット電流とを副モニターとした。

in air照射はFig. 1 (c)の如く、照射容器をTEP製ビルド・アップ・カプセルに入れ、荷電粒子平衡を達成させた。このFricke試料を空中に固定するために、g1においてはアクリル樹脂製ジグを、g3においてはナイロンテグスを使用した。g3は2個のFricke試料を照射野の中央附近（ビーム中心軸より互に3cm離れた位置）に平行に並べる配置である。g3はファントムが存在しないので、モニターは透過型を主、ターゲット電流を副とした。

各照射共 $\bar{D}_F, M$ で7,000rad以上与えるようモニターを介して照射した。

3. 1. 4. 吸光度分析

照射済および対照試料の吸光度の測定は、ダブル 40D 分光光度計を使用し、波長：304nm, バンド幅：1nm にセットして行った。2章で述

べたように、吸光度には温度依存性がある。それ故、吸光度測定後直ちにサーミスター温度計（横河電機製）にて、試料温度T°Cを測定し、(2)式の石辺第2項の如く補正して、25°Cにおける吸光度差 $(\Delta A_s)_{25}$ を求めた。

3. 2. 吸収線量の評価

3. 2. 1. 対電離箱法

照射場は中性子線とγ線の混在場であるから、線量評価の際、両者の分離を必要とする。そのため、本研究では対電離箱法⁹⁾を応用した。これによる線量測定に関しては、すでに詳細な報告¹¹⁾が成されているので、ここでは概略を述べるに止める。

中性子線およびγ線に対し、ほぼ同程度の感度を有する電離箱（T型電離箱、以下これに関連する係数等には添字Tを付す）と、中性子線に低感度な電離箱（U型、添字U）で、中性子線およびγ線の組織吸収線量が、それぞれ D_N, D_G を与えるような混在場を測定したときの両電離箱のレスポンス R_T, R_U は、(5), (6)式で表わされる。

$$R_T = k_T \cdot D_N + h_T \cdot D_G \quad (4)$$

$$R_U = k_U \cdot D_N + h_U \cdot D_G \quad (5)$$

ここで、 k_T, k_U および h_T, h_U はそれぞれ中性子線およびγ線に対する感度で、校正用γ線（ここでは⁶⁰Co-γ線）に対する感度の比として与えると、 R_T, R_U はそれぞれの電離箱の読み値 M_T, M_U を校正用γ線で単位吸収線量与えたときの読み値 α_T, α_U で除した値に対応する。これより D_N, D_G は(6), (7)式のように求められる。

$$D_N = \frac{h_U \cdot R_T - h_T \cdot R_U}{h_U \cdot k_U - h_T \cdot k_U} \quad (6)$$

$$D_G = \frac{k_T \cdot R_U - k_U \cdot R_T}{h_U \cdot k_T - h_T \cdot k_U} \quad (7)$$

3. 2. 2. 測定

TおよびU型離箱として、それぞれ TEP 壁—TE ガスおよびグラファイト壁—空気で構成された、1.6ml の円筒型電離箱（応用技研製）を使用した。T型電離箱には Rossi タイプ TE ガスを大気圧と平衡になる流量で流した。U型は大気へ開放とした。両電離箱の h および k はすべてによく検討されていて、 $h_T = h_U = 1.0$, $k_T = 0.98$, $k_U = 0.28$ と与えられている¹²⁾。電荷の読み取りは振動容量電位計（タケダ理研製）で行った。

in air および in phantom の Frick 試料照射位置の全箇所を、順次これ等の電離箱で測定した。その際、現測定個所以外のところには、模擬試料を置いた。in air 測定では壁材と同材質のビルド・アップ・キャップを電離箱に装着した。in phantom 測定では電離箱、ファントム共導電性なので、電離箱をパラフィルムで覆い絶縁した。これ等の測定より読み値 M_T , M_U を求めた。 M_T , M_U はメータの読みに大気補正、再結合損失の補正等を施して得た。両電離箱の再結合損失に関しては、すでに詳細な検討が行われていて、-200V の印加電圧での使用において、T型電離箱について1.018、U型について1.024なる補正係数が与えられている¹³⁾。その他、U型で in phantom 測定を行う場合にのみ次の補正を加えた。ファントム内に設けられている Fricke 試料挿入用の穴の直径は1.5cm ϕ である。それに対しビルド・アップ・キャップを装着したときの電離箱の外径は2.0cm ϕ である。それゆえ、ここへ電離箱を挿入するときは、ビルド・アップ・キャップを外した。従って、グラファイト電離箱の場合グラファイト壁の厚さが、中性子線によりファントム中で発生した荷電粒子の最大飛程よりも小さくなり、ファントムからの荷電粒子の侵入が問題となる。この補正係数は以下の方法で実験的に求めた。U型電離箱にグラファイトまたは TEP のビルド・アップ・キャップを装着し、空中照射にてそれぞれの場合の電離を測定した。両者の比（グラファイト/TEP）をもって補正係数とし0.963を得た。

3. 2. 3. 平均の Fricke 吸収線量への変換

(6), (7)式から得られる D_N , D_G は組織吸収線量であるから、これを Fricke 吸収線量へ変換しなければならない。中性子線による Fricke 吸収線量 $D_{F,N}$ は D_N に Fricke 溶液と組織の平均のカーマの比 (K_F/K_T) を乗じて得た。 $\bar{K}_F$, $\bar{K}_T$ は ICRU Report 26 に掲載されているカーマ・ファクターと、Attix 等¹⁴⁾の d(35)+Be 中性子線のエネルギー・スペクトルから推定した d(30)+Be 中性子線のエネルギー・スペクトルを用いて計算した。但し、Fricke 溶液のカーマ・ファクターは溶液の元素組成（重量%）を、 $H=10.84$, $O=87.89$, $S=1.26$ として前記データから計算した ($Fe+Na+Cl=0.01$ は無視)。また、組織のカーマ・ファクターとしては ICRU muscle を用いた。これ等の計算の結果 $\bar{K}_F/\bar{K}_T$ として1.043を得た。

一方、 γ 線による Fricke 吸収線量 $D_{F,G}$ は D_G に Fricke 溶液と組織の平均の質量エネルギー吸収係の比 ($(\mu_{en}/\rho)_F/(\mu_{en}/\rho)_T$) を乗じて得た。この比は γ 線の平均エネルギーを、 ^{60}Co γ 線のエネルギーに同じと仮定して、Radiation Dosimetry Vol II¹⁵⁾より求めた。この値は1.004である。

ところで、電離箱で観測されるのは微少容積要素内の吸収線量である。それに対し Fricke 線量計では、これの約2700倍に相当する容積にエネルギーが不均一に与えられ、観測されるのはその平均値に対応した変化である。それ故、G値の算定には平均の Fricke 吸収線量 $\bar{D}_F$ を与える必要がある。そのための補正は次のようにして求めた。なお、この補正は中性子線についてのみ行った。 γ 線に対して補正を無視したが、これは γ 線線量の全線量に占める割合が小さく、補正の有無が結果に影響を及ぼさぬからである。

in air の場合は入射ビームの減弱を考慮することで補正した。Fig. 2 に電離箱と Fricke 試料の断面図を示す。両者共 TEP 壁で覆われた Cavity よりなる。照射容器も TEP 壁の一部と看なすと、壁での減弱は厚さが等しいから ($W=W'$)

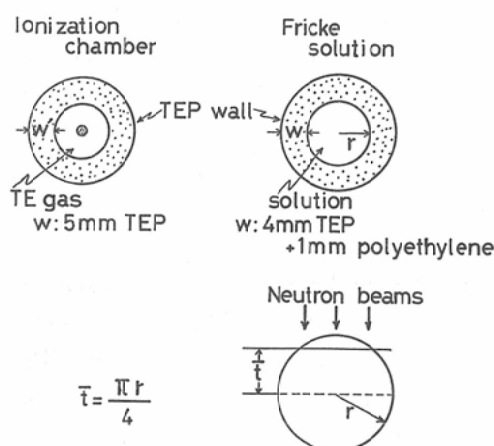


Fig. 2. A cross-sectional view of an ionization chamber and Fricke sample, for "in air" experiments.

同じである。Cavity 内の減弱は、電離箱では無視してよいが、Fricke では無視できない。Fricke 溶液内の平均の減弱を求めることにより、補正係数 F_a を導いた。Fricke 試料の平均線量を、試料の中心軸を含むビームに垂直な面 (Fig. 2 に破線で示す) における線量の平均値と考えると、入射ビームはこの面に到達する迄に、平均の厚さ $\bar{t} = \pi r / 4$ (r は試料内の半径) の Fricke 層を通過し減弱するであろう。この減弱を以下の方法で実

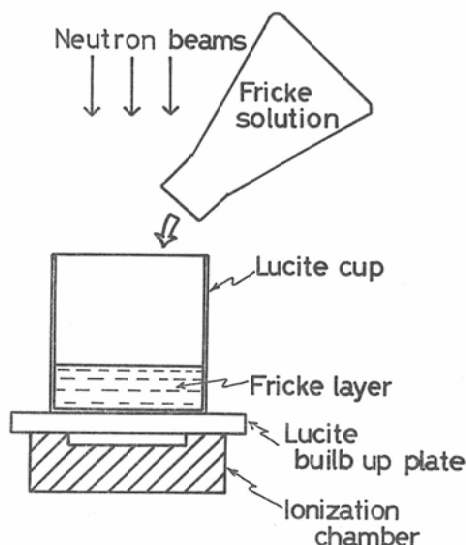


Fig. 3. Sketch of attenuation measurements in Fricke solution for neutron beams and ^{60}Co γ rays.

験的に求めた。Fig. 3 の如く荷電粒子平衡状態にある平行平板型電離箱 (Capintec 製) 上にアクリル樹脂製カップを置き、これに Fricke 溶液を注入する。液量を加減して種々の厚さの Fricke 層を作る。各厚さにおける電離測定より減弱曲線を作製した。Fig. 4 に実線でこれを示す。 $r = 6\text{mm}$ であるから $t = 4.7\text{mm}$ となり Fig. 4 より $F_a =$

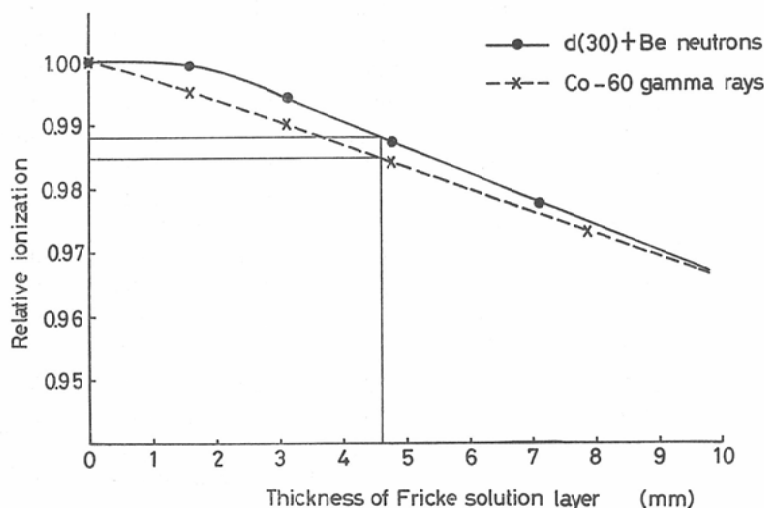


Fig. 4. Relative attenuation curves in Fricke solution for neutron beams and ^{60}Co γ rays.

0.988を得た。

一方, in phantom では電離箱の実効中心の変位を考慮することで補正した。電子線の深部線量を指頭型電離箱で測定する場合, 測定点が電離箱の幾何学的中心より $(2/3)r$ (r は電離箱内の半径) だけ線源測へ変位する⁹⁾のに習い, 中性子線の場合も同様と仮定した。ファントム中の深部線量曲線¹⁰⁾を利用し, 幾何学的中心と実効中心に対応する深さにおける線量の比をもって補正係数 F_d とした。その結果 $F_d=0.994$ を得た。

本節をまとめると, 中性子線の場合, in air で

$$\bar{D}_{F,N}=D_N \cdot \bar{K}_F/\bar{K}_T \cdot F_a=D_N \times 1.031 \quad (8)$$

in phantom で

$$\bar{D}_{F,N}=D_N \cdot \bar{K}_F/\bar{K}_T \cdot F_d=D_N \times 1.037 \quad (9)$$

また, γ 線については in air, in phantom 共

$$\begin{aligned} D_{F,G} &= D_G \cdot (\mu_{en}/\rho)_F/(\mu_{en}/\rho)_T \\ &= D_G \times 1.004 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。

4. 結 果

Table 2 と 3 に, それぞれ in phantom と in air

における実験結果を示す。Exp. No 1 と 2 は in phantom 単独, 3 と 4 は in air と in phantom 同時そして 5 は in air 単独の実験である。これ等の実験は, 昭和53年7月から54年11月にかけて実施した。Fricke 溶液は各実験の都度新調した。

$(\Delta A_s)_{25}$ は照射済試料と対照試料の25°Cにおける吸光度差で, (2)式の右辺第2項に該当する。 $\bar{D}_{F,M}$ は $\bar{D}_F + D_{F,M}$ である。 f は $D_{F,G}/D_{F,M}$ である。 f は in air で1%未満, in phantom でも3%未満であり, 好都合であった。 G_M は $D_{F,M}$ を (2)式の D_F に代入して計算した。 G_N は G_G を15.5 (^{60}Co - γ 線に同じ) と仮定して, (3)式から計算した。各 Table の G_M, G_N 欄の最下行に, 全実験を通してのそれぞれの平均値を相対標準偏差 (%) とともに与えた。 G_M, G_N は in air においてそれぞれ9.56, 9.51 (100eV)⁻¹であり, in phantom において, それぞれ9.44, 9.30 (100eV)⁻¹であった。これ等の値は何れも $\pm 0.4\%$ の相対標準偏差で得られ, 極めて良好な再現性といえる。

Table 4 に G 値評価時に見積られる uncertainty

Table 2. Results of "in phantom" experiments.

Exp. No.	Ceometry	$(\Delta A_S)_{25}$ (O.D.)	$\bar{D}_{F,M}$ (rad)	$\bar{D}_{F,N}$ (rad)	$D_{F,G}$ (rad)	f	$G_M^{(100\text{eV})^{-1}}$	$G_N^{(100\text{eV})^{-1}}$
1	g 2	0.2318	10478	10209	269	0.0256	9.45	9.29
		0.2306	10421	10149	272	0.0261	9.46	9.30
		0.2314	10422	10150	272	0.0261	9.49	9.33
		0.2331	10466	10202	264	0.0252	9.52	9.37
2	g 2	0.2061	9380	9139	241	0.0257	9.39	9.23
		0.2056	9329	9086	243	0.0260	9.42	9.26
		0.2065	9329	9086	243	0.0260	9.46	9.30
		0.2064	9369	9132	237	0.0253	9.41	9.25
3	g 2	0.1684	7660	7535	125	0.0163	9.39	9.29
		0.1683	7652	7522	130	0.0173	9.40	9.29
		0.1693	7660	7535	125	0.0166	9.44	9.34
		0.1693	7652	7522	130	0.0173	9.45	9.34
4	g 1	0.1671	7604	7480	124	0.0163	9.39	9.29*
		0.1679	7596	7467	129	0.0170	9.45	9.34*
		0.1671	7604	7480	124	0.0163	9.39	9.29
		0.1681	7596	7467	129	0.0170	9.46	9.35
Overall mean							9.44 ±0.4 %	9.30 ±0.4 %

* polystyrene cells used

Table 3. Results of "in air" experiments.

Exp. No.	Geometry	$(\Delta A_S)_{25}$ (O.D.)	$\bar{D}_{F,M}$ (rad)	$\bar{D}_{F,N}$ (rad)	$D_{F,G}$ (rad)	f	G_M (100eV) ⁻¹	G_N (100eV) ⁻¹
3	g 1	0.2133	9531	9434	97	0.0102	9.56	9.50
		0.2145	9634	9567	67	0.0070	9.51	9.47
		0.2155	9663	9596	67	0.0070	9.53	9.48
		0.2155	9696	9660	36	0.0037	9.50	9.48
4	g 1	0.2131	9462	9365	97	0.0103	9.62	9.56
		0.2135	9566	9499	67	0.0070	9.54	9.50
		0.2146	9593	9526	67	0.0070	9.56	9.52
		0.2160	9626	9590	36	0.0037	9.59	9.57
5	g 1	0.1828	8127	8064	63	0.0078	9.61	9.56
		0.1817	8127	8064	63	0.0078	9.55	9.50
Overall mean							9.56 ±0.4 %	9.51 ±0.4 %

Table 4. Estimated uncertainties on G-value.

Source	Uncertainty (%)
(1) Determination of D_M	5
(2) Determination of $\bar{D}_{F,M}$ from D_M	1.5
(3) Measurement of A_s	0.5
(4) Molar extinction coefficient, ϵ_m	0.5
(5) Standard deviation of experimental observations	0.4
Overall	5.3

(不確定度)を、原因別に示す。(1)は D_M の測定・評価に基因する uncertainty で、各種パラメータ (W 値、カーマ、質量阻止能等) の校正用 γ 線と中性子線との比や、再結合損失補正、校正用 γ 線による校正、電荷読み取りなどに伴う uncertainty を総合した値である。これは Law 等¹⁷⁾ の評価を参考にして推定した。(2)は D_M から $\bar{D}_{F,M}$ への変換に基因するもので、 $\bar{K}_F/\bar{K}_T$ 、 $(\mu_{en}/\rho)_F/(\mu_{en}/\rho)_T$ や F_a 、 F_d などが含まれる。(3)と(4)は吸光度測定に関連するもので、ICRU Report 14²⁾ に準じて評価した。(5)は実験値の標準偏差で Table 2, 3 に示した値である。以上を総合すると overall uncertainty は±6.4%となる。

これ等の uncertainty を考慮した結果、本研究で得た G_N 値は、in air のとき 9.5 ± 0.5 , in

phantom のとき 9.3 ± 0.5 (100eV)⁻¹ であった。

5. 考 察

G 値に見積られた±5.3%の uncertainty は、比較的大きな値に思える。これは主に dosimetry の誤差に起因している。中でも W 値とカーマ・ファクターに関連する誤差がそれぞれ3%を占め、大きな要因となっている。従って、dosimetry の精度が G 値の精度に直結していると云っても過言ではない。放医研における中性子線 dosimetry (電離測定法) は、過去数次におよぶ国際、国内相互比較¹⁸⁾を経て、国際的水準に達しているが、これは国際的に容認され、かつ現段階で考えられる、最も確からしい値を評価し得る能力があるという事であって、評価された値そのものが、絶対値の見地から、正しいと云う事とは別である。 W 値や阻止能やカーマ・ファクターあるいはスペクトルと云った基本的なもののより正確な知見が、dosimetry の精度向上に繋がり、ひいては Fricke 線量計の G_N 値の精度向上に結び付く、約6%の uncertainty は現段階で考えられる最小の値で国際的水準にあり、やむを得ない値である。ここでは寧ろ±0.4%の実験精度に注目して戴きたい。

G_N 値は in air と in phantom とで約2%異なつた。これは±0.4%の実験精度を大きく超える有意な差である。この相違が線量評価に基因するか、

線質の相違による Fricke 線量計のレスポンスの違いによるものか、検討の必要がある。両実験における線量評価上の相違点は、 D_F より $\bar{D}_F$ を導くための補正係数 F_a および F_d の求め方にある。

F_a が妥当か否か、 ^{60}Co - γ 線により検討した。まず、3.2.3. に述べたと同様な減弱測定を ^{60}Co についても実施した。結果を Fig. 4 に破線で示す。これより F'_a として 0.985 を得た。次に TEP カプセル内の照射線量 $X(R)$ を電離箱線量計 (JAPM 準標準線量計) で測定した。この場合、Fricke 用 TEP カプセル内にはこの電離箱は挿入できないので、肉厚を同じくする他の TEP カプセルを用いた。測定された X にラド変換係数 $(0.869 \times (\mu_{\text{en}}/\rho)_F / (\mu_{\text{en}}/\rho)_{\text{air}})$ と F'_a を乗じて、平均 Fricke 吸収線量を求めた。一方、TEP カプセルに入れた Fricke 試料の照射より、 $G = 15.5$ として直接平均 Fricke 吸収線量を求めた、両者の差は 0.2% であり、極めて良好な一致を得た。これより本方法の適切なことが確認され、中性子線の場合も適正な F_a を与え得るものと判断した。

他方、 F_a に関しては実験的検証は行わなかったが、ICRU⁶⁾ も本方法を推奨しており、問題はないと思われる。

次に in air, in phantom と同一の値を用いた、 $\bar{K}_F/\bar{K}_T$ について考察する。

Table 5 に 1~29MeV の単一エネルギー中性子線に対する筋肉 (ICRU muscle) と、Fricke 溶液のカーマ・ファクターとその比を示す。カーマ比のエネルギー依存性は比較的大きいが、 G_N 値の相違の原因をこの比に求めるには、例えば、in air で 1.043 とすると、in phantom では 1.069 にならねばならない。このような値は Table 5 にみられるように、1MeV 以下のエネルギーにならなければ実現しない、このような極端なエネルギー・スペクトルの変化は、現実には有り得ない。これは Harrison 等¹⁹⁾ や Hannan²⁰⁾ 等のスペクトルのデータから明白である。

ちなみに、Harrison 等の 6MeV, Hannan 等の

Table 5. Kerma factors for ICRU muscle and Fricke solution.

Neutron energy (MeV)	ICRU muscle (rad·cm ²)	Fricke solution (rad·cm ²)	Ratio Fricke muscle
1.05	($\times 10^{-8}$) 0.248	($\times 10^{-8}$) 0.263	1.060
5	0.455	0.477	1.048
8.2	0.516	0.538	1.043
10.5	0.573	0.596	1.040
12.5	0.610	0.630	1.033
15.5	0.677	0.692	1.022
18.5	0.705	0.718	1.018
21.0	0.730	0.744	1.019
29	0.791	0.713	1.003

15MeV の各単一エネルギー中性子線の、phantom 中の深さ 2cm におけるエネルギー・スペクトルの測定データを用いて、 $\bar{K}_F/\bar{K}_T$ を計算したところ、前者は 1.044、後者は 1.035 であった。これに対し、in air における $\bar{K}_F/\bar{K}_T$ は、それぞれの単一エネルギーに対する値として、1.043、1.027 である。in air と in phantom との差異は、低エネルギーの 6MeV の場合ほとんど無く、15MeV でもわずかである。本研究に使用したのは、連続エネルギー中性子線であるから、in air といえども、低エネルギー成分を有する。それ故、in air と in phantom の差異は、より僅少であろう。これより本研究において、同一の $\bar{K}_F/\bar{K}_T$ を使用したことが、 G_N 値の相違の原因となったとは考え難い。

照射容器は TEP 等価として扱ったが、これは次の根拠による。照射容器としてポリエチレン製、ポリスチレン製の 2 種類を使用し比較したところ、中性子線による Fe^{3+} イオンの収量には有意差が見られなかった (Table 2 参照)。中性子線線量において最大に寄与する元素である水素の含有率は、ポリエチレン 14.4% (重量%)、TEP 10.1%、ポリスチレン 7.7% である。3 者中最大の水素含有量を持つポリエチレンと最小のポリスチレンとで差が見られないから、中間の TEP と差が現われないであろう。差が観測されないのは容器の肉厚が薄く、これよりの寄与率が小さい

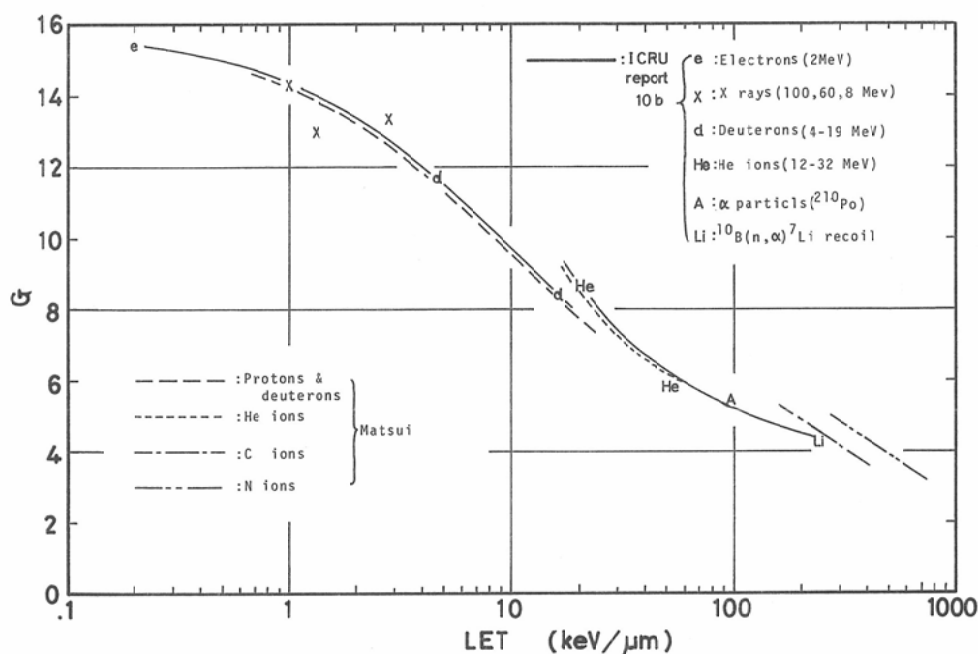


Fig. 5. G-values as a function of the initial LET of the irradiating particles.

Table 6. G-values for x, γ rays and electrons recommended by ICRU.²⁾³⁾²¹⁾

Radiation	G (100eV) ⁻¹	Reference
5 keV, X	12.5±0.3	21
10 keV, X	13.2±0.2	21
20 keV, X	13.8±0.3	21
50 keV, X	14.4±0.3	21
100 keV, X	14.7±0.2	21
¹³⁷ Cs, γ	15.3±0.3	2
2MV, X	15.4±0.3	2
⁶⁰ Co, γ	15.5±0.2	2
4MV, X	15.5±0.3	2
5 to 10 MV, X	15.6±0.4	2
11 to 30 MV, X	15.7±0.6	2
1 to 30 MeV, e ⁻	15.7±0.6	3

ためと思われる。

G_M から G_N を求める際、 $G_G=15.5$ と仮定したが、ICRU⁶⁾ では 15MeV までの中性子線による γ 線に対し、 $G_G=15.4$ を勧告している。しかしながら、本研究ではより高エネルギーの γ 線が含まれると予想されるので、⁶⁰Co-γ 線と同じ値を定めた。幸い f が小さいから、 G_G 値の相違に

よる G_N 値への影響は 0.1% 以下である。

G 値は放射線の種類やエネルギーにより変化する。Table 6 に X, γ 線および電子線に対する G 値を示す²⁾³⁾²¹⁾。また、Fig. 5 に各種荷電粒子に対する G 値を LET の関数として示す⁹⁾²²⁾。このように G 値は放射線の線質に依存することが知られている。この現象の機序については概略次のような解釈が一般に受け入れられている。

放射線による Fe^{2+} イオンの酸化は、水の放射線分解により生ずる初期生成物と、 Fe^{2+} イオンとの化学反応を経て行われる。初期生成物としては e^-_{aq} (水和電子)、 $H\cdot$ 、 $OH\cdot$ 、 H_2 、 H_2O および H_2O_2 などが確認されている。このうち直接 Fe^{2+} イオンの酸化に関与するものは $OH\cdot$ 、 $H\cdot$ 、 H_2O_2 である。酸素溶存の 0.8N H_2SO_4 タイプの Fricke 溶液の場合、 Fe^{3+} イオン生成の G 値、 $G(Fe^{3+})$ と、これ等の初期生成物生成の G 値、 $G(OH)$ 、 $G(H)$ 、 $G(H_2O_2)$ との間には次式の関係がある¹⁵⁾。

$$G(Fe^{3+}) = G(OH) + 3G(H) + 2G(H_2O_2)$$

ところで、荷電粒子が物質 (この場合 Fricke

溶液)を通過する際、生ずるイオンや励起分子の集団をスプールと呼ぶが、スプール内ではまず遊離基が生成され、次いで遊離基同士の反応により上記分子が生成される。スプールの間隔は LET が大きくなると小さくなる。従って、高 LET 放射線ではスプールが重なり合って、局所的に遊離基が稠密になり、遊離基同士の反応の確率が増す。そのため $G(OH)$ と $G(H)$ は著しく減少し、 $G(H_2O_2)$ はやや増加する。結果として、 $G(Fe^{3+})$ 値は減少することになる。本研究におけるエネルギー領域の中性子線では、Fricke 溶液のエネルギー吸収は、主として反跳陽子により与えられる。陽子のエネルギーによるスプール間隔は、例えば 1MeV で 2.1nm, 10MeV で 13nm のように大変異なる²³⁾。中性子線のエネルギーが低下すると、反跳陽子のエネルギーも低下するから、低エネルギー中性子線成分が増加すれば、スプール間隔は平均して小さくなり、 $G(Fe^{3+})$ は低下するであろう。

in air および in phantom における照射場の中性子線スペクトルは未だ正確に知られていないが、Harrison 等¹⁹⁾の 1, 2.9, 6MeV, Hannan 等²⁰⁾の 15MeV 中性子線(いずれも単一エネルギー)のエネルギー・スペクトルの測定では、in phantom で低エネルギー成分が付加されることを報告している。従って、本研究に用いた連続エネルギー中性子線の場合も、in phantom での低エネルギー成分の増加が予測される。他方、Law 等¹⁷⁾の d+T 中性子線に対する Fricke 線量計の G 値の研究(in air 実験)では、発生した中性子線をそのまま照射したとき 9.36, ウラニウム板を透過してから照射したとき 8.46 を得たと報告している。彼等は Lawson 等²⁴⁾によるスペクトル測定に基づき、両照射場を平均 14.3MeV の高エネルギー成分と、平均 1.5MeV の低エネルギー成分に弁別し、それぞれの中性子線線量への寄与率を与えている。前者の照射場は高 86.6%, 低 13.4% であるのに対し、後者はそれぞれ 43.1%, 56.9% となっている。この解析は G_N 値の低下の原因が、低エネルギー成分の増加によることを明白にし

た。

以上の考察から、in phantom における G_N 値の低下は、線量評価上の問題ではなく、低エネルギー成分の増加による線質の相違によるものと推論できる。低成分の増加はファントムからの散乱中性子線の寄与と考えられる。この推論の裏付けとして以下の実験を試みた。

Fig. 6 (a), (b), (c), (d) のような配置で、Fricke 試料の照射と電離箱による測定を行った。方法は 3 章で述べた通りである。平均 Fricke 線量への補正は全て F_a を用いて行った。配置 (a) は Table 3 に g3 として与えたものと同一である。各配置で得られた諸量等を、それぞれ配置 (a) に対する比として Table 7 に示す。各記号

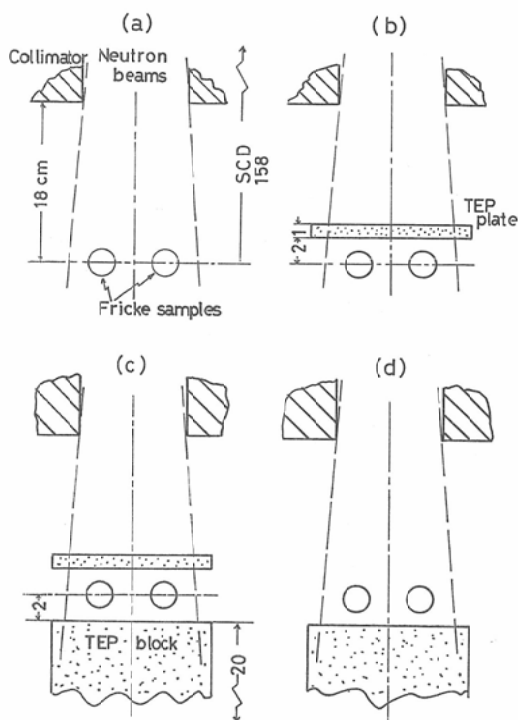


Fig. 6. Schematic diagram of irradiation set-up for examination of the scattered neutron effects.

- a) without plate and block
- b) with plate, without block
- c) with plate, with block
- d) without plate, with block

Table 7. Effect of scattered neutrons.

Geometry	$(\Delta A_s)'_{25}$	$(\Delta A_{s,N})'_{25}$	$\bar{D}'_{F,M}$	$\bar{D}'_{F,N}$	G'_N	G'_M
(a)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
(b)	0.977	0.979	0.977	0.978	1.000	1.001
(c)	1.031	1.024	1.045	1.041	0.985	0.982
(d)	1.057	1.051	1.069	1.066	0.988	0.985

には'をつけて値と区別した。ここで $(\Delta A_{s,N})'_{25}$ は $(\Delta A_s)_{25}$ から γ 線の寄与分を差引いた、正味の中性子線寄与分である。まず、 $(\Delta A_{s,N})'_{25}$ と $\bar{D}'_{F,N}$ をみると、(b) では減少しているが、(c)、(d) では増加している。(b) での減少は 1cm 厚の TEP 板通過による入射中性子フルエンスの減弱による、当然 TEP 板からの散乱線の寄与(増加分)も考えられるが、これは減弱に隠れて観測されない。(c)、(d) の増加はファントムからの後方散乱中性子線の寄与を証明する結果である。ここで問題になるのが両者の増加率の相違である。即ち、 $\bar{D}'_{F,N}$ は (c) で 4.1% (但しこの値は減弱による減少との差額で、正味の増加率は 6.5%)、(d) で 6.6% の増加率を示したのに、 $(\Delta A_{s,N})'_{25}$ はそれぞれ 3.1%、5.7% であった。これは散乱線に対し Fricke 線量計のレスポンスが低下したからに他ならない。次に G'_N に目を向けると、 $G'_N = (\Delta A_{s,N})'_{25} / \bar{D}'_{F,N}$ の関係にあるから、当然減少している。この減少は (c)、(d) でそれぞれ 1.8%、1.5% であった。in phantom 照射では、側方からの散乱線も加わるから、 G_N 値の減少は更に顕著になるであろう。この実験的

検討は前項の推論をよく支持する結果を与えていると思われる。

Table 8 に本研究の結果と ICRU Report 26 に引用されている他の研究者の値を比較する。in air の場合、各者の G_N 値は 8.9 から 9.7 の間にあり、最大約 9% のバラツキがある。著者が得た G_N 値はこれ等の中間に位置し、Law 等¹⁷⁾ の d+T 中性子線 (14MeV) や、Greene 等²⁵⁾ のサイクロトロンによる d (16)+Be 中性子線 (平均 7.6 MeV) の値と、ほぼ一致した (約 1% の差)。Greene 等²⁶⁾ の d+T の値とは大変異なる (約 7% 差)。彼等は大型の照射容器を使用しているが、溶液自身による中性子フルエンスの減弱については何も触れていないので、溶液の吸収量を過大評価した可能性がある。ちなみに、本研究で F_a 決定のため行った実験結果 (Fig. 4) から、彼等の試料での F_a を評価してみると 0.959 となる。この値で吸収線量を補正すれば、 G_N 値は 9.3 となり、本研究の結果に近づく。Liesem²⁷⁾ は約 2% 大きな値を報告している。彼は減弱補正を -3.4% 行っているが、照射容器の大きさは、線量測定に用いた指頭型電離箱に同じとの記述がある

Table 8. Comparison of G-values for neutrons.

Reference	Neutron source	Irradiation condition	Gvalue for neutron component, G_N
Present result	d (30) + Be	In air	9.5±0.5
Present result	d (30) + Be	In phantom	9.3±0.5
Greene et al. ²⁶⁾	d + T	In air	8.9±0.6
Liesem ²⁷⁾	d + T	In air	9.7±1.1
Law et al. ¹⁷⁾	d + T	In air	9.4±0.6
Greene et al. ²⁵⁾	d (16) + Be	In air	9.4±0.6
Greene et al. ²⁸⁾	²⁵² Cf	In air	7.5±1.1
Greene et al. ²⁸⁾	²⁵² Cf	In water	6.1±1.5

のみで定かでない。これはあくまでも推測であるが、Fig. 4 からこの補正值に見合う容器の内径を求めてみると $2.6\text{cm}\phi$ となる。これと同径の電離箱となると、外径 $3.5\text{cm}\phi$ は必要となろう。この大きさはもはや指頭型の範疇を逸脱しているかに思える。即ち、彼の場合は補正過剰による G_N 値の過大評価の可能性が考えられる。

in phantom の場合は、 ^{252}Cf 線源による水中での照射から得られた値²⁸⁾が報告されているだけで、該当するエネルギー域での研究は無く、直接比較できないが、この場合、 G_N 値は in air より低下しており、本研究で得た傾向を支持する証拠として挙げられよう。

ファントム内の中性子線の低エネルギー成分の割合は、深さにより変るから¹⁹⁾²⁰⁾、 G_N 値も深さにより変るであろう。しかしながら、この点に関しては今後実験的検証を必要とする。更にまた、この変化を LET との関連において正確に把握することも重要な課題である。

現在、国際度量衡局 (BIPM) により、Fricke 線量計システムの国際相互比較が計画され、実行されつつあるが、こうした機運が昂まったのは、Fricke 線量計が吸収線量の絶対測定に適していることが見直されたからであろう。in air における照射、測定法および G_N 値が確立したので、緒言に述べたように、Fricke 試料の郵送による、中性子線治療施設間の中性子線線量の相互比較への応用の途が考えられる。この場合、TLD を併送して γ 線線量を評価すればよい。 γ 線線量は一般に低いから、その誤差は中性子線線量評価に重大な影響を及ぼさない。本方法によれば、重い機材の運搬や人員の移動などの煩わしさから解放され、相互比較が一段と容易になろう。本方法による中性子線線量の国際的な相互比較が実施せられることを望んでやまない。

6. 結 語

Fricke 線量計の速中性子線に対する G_N 値の確立を目的として、サイクロトロンによる $d(300 + \text{Be})$ 中性子線を用いて実験的研究を行った。測定は in air および in phantom で実施した。両照

射場は中性子線と γ 線の混在場であるから、先づその混在場に対する G_M 値を測定し、次いでこれより γ 線の寄与分を除いて、中性子線に対する G_N 値を決定した。両実験から得た G_N 値について種々考察し次の結論を得た。

in air 実験より G_N 値として $9.5 (100\text{eV})^{-1}$ を得た。この値は他者により得られている。d+T や $d(16)+\text{Be}$ 中性子線に対する値と、ほぼ一致した。本研究の結果、このエネルギー域の中性子線に対する G_N 値は確立したものといえよう。

in phantom 実験からは G_N 値として $9.3 (100\text{eV})^{-1}$ を得たが、これは in air での値よりも小さい。この原因について実験的、文献的検討の結果、ファントムからの散乱中性子線に対する Fricke 線量計のレスポンスの低下と判定した。従って、この値は普遍的なものではなく、条件により変り得るものであろう。

稿を終るに臨み、御指導、御校閲いただきました、東京女子医大田崎英生教授ならびに放医研物理橋詰雅部長に深甚なる謝意を表します。また、本研究に有益な御助言、御協力をいただきました、放医研物理2研川島勝弘室長、平岡武主任研究官、Fricke 線量計について御教示下さいました4研松沢秀夫室長に深く感謝いたします。

本論文の要旨は、第39回日本医学放射線学会学術発表会において発表した。

文 献

- 1) Fricke, H. and Morse, S.: The chemical action of roentgen rays on dilute ferrous sulfate solutions as a measure of dose. Am. J. Roentgenol. Radium Therapy Nucl. Med., 18: 430, 1927
- 2) ICRU Report 14: Radiation dosimetry: X rays and gamma rays with maximum photon energies between 0.6 and 50 MeV. pp. 4—12, 1969, ICRU Publications, Washington
- 3) ICRU Report 21: Radiation dosimetry: Electron with initial energies between 1 and 50 MeV. pp. 27—28, 1972, ICRU Publications, Washington, D.C.
- 4) Armstrong, R.C. and Humphreys, W.G.: The response to 14 MeV neutrons of some chemical dosimeter systems. Can. J. Chem., 42: 1092—1097, 1964
- 5) Axtmann, W.A. and Licari, J.A.: Yield of

- the Fricke dosimeter to 14.6 MeV neutrons. *Radiat. Res.*, 22: 511—518, 1964
- 6) ICRU Report 26: Neutron dosimetry for biology and medicine. pp. 1—116, 1977, ICRU Publications. Washington, D.C.
 - 7) Scharf, K. and Lee, R.M.: Investigation of the spectrophotometric method of measuring the ferric ion yield in the ferrous sulfate dosimeter. *Radiat. Res.*, 16: 15, 1962
 - 8) 日本医学放射線学会 物理部会：放射線治療における高エネルギー電子線の吸収線量の標準測定法. pp. 25—26, 1974, 通商産業研究社, 東京
 - 9) 大線量測定研究委員会：大放射線量 実用測定法. pp. 29—33, 1978. (財)放射線照射振興協会, 高崎
 - 10) 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. 日本医放会誌, 36: 420—424, 1976
 - 11) 平岡 武, 川島勝弘, 星野一雄, 松沢秀夫：放医研サイクロトロン速中性子線の線量測定. 日本医放会誌, 37: 369—376, 1977
 - 12) 川島勝弘, 平岡 武, 星野一雄, 松沢秀夫：対電離箱の中性子感度の測定. 日本医放会誌, 臨増号: 79, 1978
 - 13) 川島勝弘, 平岡 武, 星野一雄, 松沢秀夫：円筒型電離箱の再結合損失. 日本医放会誌, 37: 185—191, 1977
 - 14) Attix, F.H. and Shapiro, A.P.: The physics and dosimetry of fast neutrons. *NRL Memorandum Report*, 3123: 1—33, 1975
 - 15) Fricke, H. and Hart, E.J.: Chemical dosimetry. (In) Attix, F.H., Roesh, W.C., and Tochilin, E. ed: *Radiation dosimetry II*. Second Edition, pp. 167—232, 1966
 - 16) 星野一雄, 川島勝弘, 平岡 武, 久津谷諒：放医研サイクロトロンからの速中性子線の線量分布. 日本医放会誌, 37: 248—255, 1977
 - 17) Law, J., Lawson, R.C. and Porter, D.: Spectral dependence of the FeSO_4 G-values in DT neutron beams. *Phys. Med. Biol.*, 19: 643—655, 1974
 - 18) ICRU Report 27: An international neutron dosimetry intercomparison. pp. 1—50, 1978, ICRU Publication, Washington, D.C.
 - 19) Harrison, K.G., Taylor, A.J., Holt, P.P. and Boot, S.J.: In-phantom neutron spectrometry: A comparison of experimental and calculation. *Proc. IIIrd Symp. on Neutron Dosimetry in Biol. & Med.*
 - 20) Hannan, W.J., Porter, D., Lawson, R.C. and Railton, R.: Spectrum measurements in 15 MeV neut on therapy beams. *Phys. Med. Biol.*, 18: 808—820, 1973
 - 21) ICRU Report 17: Radiation dosimetry: X rays generated at potentials of 5 to 150 kV. pp. 3—5, 1970, ICRU Publications, Washington, D.C.
 - 22) ICRU Report 10b: Physical aspect of irradiation. pp. 14—17, 1962 NBS Handbook 85
 - 23) 日本放射線同位元素協会：アイソトープ 便覧. pp. 199—226, 1970, 丸善株式会社, 東京
 - 24) Lawson, R.C., Porter, D. and Hannan, W.J.: Threshold detector measurements with seaeld tube DT neutron generators. *Phys. Med. Biol.*, 17: 771—782, 1972
 - 25) Greene, D., Law, J., Miles, J.C.H. and Pranell, C.J.: Ferrous sulphate G-value for cyclotron produced neutrons with a mean energy of 7.6 MeV. *Phys. Med. Biol.*, 20: 650—652, 1975
 - 26) Greene, D., Major, D. and Law, J.: The G-value for the ferrous sulphate dosimeter for 14 MeV neutrons. *Phys. Med. Biol.*, 18: 369—378, 1973
 - 27) Liesem, H.: Ferrous sulphate dosimetry for 14 MeV neutrons. *Phys. Med. Biol.*, 18: 740—741, 1973
 - 28) Greene, D., Law, J. and Major, D.: The G-value for the ferrous sulphate dosemeter for the radiation from californium-252. *Phys. Med. Biol.*, 18: 800—807, 1973