

医療用放射線発生装置の安全管理に関する研究 (I)

—— 医用中性子線の線量計測に伴う問題点 ——

西村明久・西下創一・伊藤安彦

Health Physics of Medical Generator:
On the Neutron Dosimetry

Akihisa NISHIMURA, Soichi NISHISHITA, Yasuhiko ITO

概 要

放射線生物学のみならず、放射線治療等の研究で、速中性子の利用が盛んになりつつある。これ等の目的のため、 ${}^3\text{T}(d, n){}^4\text{He}$ 中性子発生装置、バン・デ・グラーフ、サイクロトロン等の加速器が中性子源として使用されている。一般に放射線発生装置の設置にあたっては生体遮蔽について充分検討する必要がある。生体遮蔽はあくまでも放射線防護の立場から検討されるべきであり、最終的に要求されるのは放射線による生体効果を加味した線量当量 (rem) の情報である。中性子線の場合、線量当量が中性子のエネルギーに大きく依存するので三種の中性子線量計を試作し、これによる中性子線量計測法および線量計測に伴う問題点について検討した。試作した線量計は人体組織等価 (ポリエチレン-エチレングラス) 電離箱、Hurst 型比例計数管および γ 線用 GM 管型線量計である。また、イオウの放射化法を利用した中性子計測法についても検討を加えた。

§1 はじめに

放射線に対する生体遮蔽を考える場合、まず問題となるのはどのような放射線の物理量を用いるかである。放射線の単位と測定に関する国際委員会 (International Committee Radiation Unit: ICRU) によって勧告されている放射線の物理量として次のものがあげられている¹⁾。それは、照射線量 (exposure)、吸収線量 (absorbed dose)、線量当量 (dose equivalent)、フルーエンス (fluence)、カーマ (kerma) 等である。生体に対する遮蔽を考える場合、放射線防護の立場から考慮することが重要であり、最終的に必要なのは放射線による生体効果を含めた線量当量 (単位・rem) の情報である。線量当量 (DE) は吸収線量 (D_0 rad)、線質係数 (quality factor・QF) および分布係数 (distribution factor・DF) など必要な修正係数の積として表される。すなわち、 $DE = D_0 \cdot QF \cdot DF \dots\dots (1)$

電磁放射線 (x 線, γ 線) では、 $QF = 1$ としても放射線防護上は差しつかえないことが分か

っているので、数量的には吸収線量がそのまま線量当量と考えて問題はない。しかし、中性子線の場合には、線質係数(QF)は中性子のエネルギーに依存するので吸収線量の値をそのまま線量当量とすることは出来ない。一般に、中性子束密度(flux density), フルーエンスあるいは吸収線量から線量当量(rem)を算出することは中性子のエネルギー・スペクトルの情報が得られた場合のみ可能となる²⁾。

§2 線量計の試作と計測の方法

現在稼動しているすべての中性子源は中性子だけでなく γ 線の放出を伴う。このような中性子と γ 線の混合場(mixed field)において、中性子の線量計測を行うことは可成りの困難が付きまとう。一般に中性子と γ 線による線量値を分離して測定するために、各々の放射線に対して異なる感度をもつ二種類の線量計が用いられている。理想的には一方の線量計は中性子にだけ感度をもち、他方の線量計は γ 線にだけ感度をもつような検出器を使用すべきである³⁾。さらに、放射線防護上の観点から広範囲のエネルギーにわたって体組織に等価な感度をもった線量計が好ましい⁴⁾。

このような混合場において、中性子と γ 線の線量を分離して計測するためには、① Rossiおよび Failla により開発の組織等価電離箱(tissue-equivalent chamber)⁵⁾と炭素-炭酸ガス電離箱(C-CO₂ chamber)またはテフロン-炭酸ガス電離箱(Teflon-CO₂ chamber), ② Hurst 等により開発されたGM管式線量計, ③中性子にだけ感度をもつ各種物質の放射化法(activation method)やエッチピットおよび写真乾板等に代表される固体飛跡検出器(solid state detector)と γ 線に感度(中性子に低感度)をもつLiF, 蛍光ガラス, フィルム等の固体線量計(solid detector), ④その他, 化学線量計やシンチレーション検出器等の種々のものが利用されている。

著者等は、中性子および γ 線による総線量(total dose)の測定には、ポリエチレン-エチレンガス(polyethylene-ethylene gas)線量計を試作し、また、中性子線量成分には Hurst タイプの比例計数管を、 γ 線線量成分にはマイクロGM(micro G-M)計数管をそれぞれ試作し、ヴァン・デ・グラーフ(Van・de・Graaff)加速器からの中性子、 γ 線混合場中で各々を用い線量計測を行った。

1) ポリエチレン-エチレンガス線量計

³T(d, n)⁴He 反応からの18MeV単色中性子の測定に用いた電離箱で、外径10cm ϕ の球状、Polyethyleneの壁厚は0.3cmである。なお、⁹Be(d, n)¹⁰B 反応からの平均2MeVの中性子には組織等価電離箱(2cm ϕ ×4cm, 壁厚0.3cm)を使用した。

この二つの線量計は、中性子とガンマ線の両方にレスポンスをもっているため、ここでの測定値は中性子、ガンマ線による線量成分の和、すなわち、Total Doseである。これ等の線量計はガス封入式になっているため、測定日ごとに封入ガスを入れかえて用いた。ここで、標準人の元素組成についてふれておく。放射線防護に関する国際委員会(International Committee

Radiation Protection : ICRP)による標準人 (standard man) の元素組成は、水素10%、炭素18%、窒素 3.0%、酸素65%、その他の元素約 4%である。これ等のデータから壁材として組織等価プラスチック (水素10.1%、窒素 3.5%、炭素と酸素86.4%重量) が作られている。組織等価ガスとして CH_4 64.4%、 CO_2 32.4%、 N_2 3.2%分圧の混合気体を用いられている。このような線量計を組織等価 (tissue-equivalent, 略称 TE) 線量計と呼んでいる。一方、中性子に低い感度の γ 線用線量計には、壁材として炭素 (または、導電性テフロン)、封入気体として炭酸ガスから構成する C- CO_2 chamber がある。

2) Hurst タイプ比例計数管

γ 線が混在している放射線場 (mixed field) でも速中性子の線量の分離測定を可能とされるのが、いわゆる比例計数管である。⁶⁾⁷⁾ ブラック・グレイ (Bragg-Gray) の空洞原理が適用出来ることにより、組織 1 g 当たり吸収されるエネルギーとエチレンガス 1 g 当たり吸収されるエネルギーとの比は中性子のエネルギーに依存しないので、壁材のポリエチレンと封入のエチレンガスは速中性子に対して条件を満足している。比例計数管と電離箱との違いは、封入ガス中でつくられたイオン対の数を電荷や電流の積分値としてではなく、パルス波高 (pulse height) で求めることである。これを可能ならしめるには、空洞の大きさと封入ガス圧の方を、電子によるパルスが陽子によるパルスよりも小さくなるように工夫すれば、中性子によるパルスだけを取り出せることである。このパルス波高が生成されるイオン対の数に比例すれば、電離箱と同じように線量の計測ができることになる。

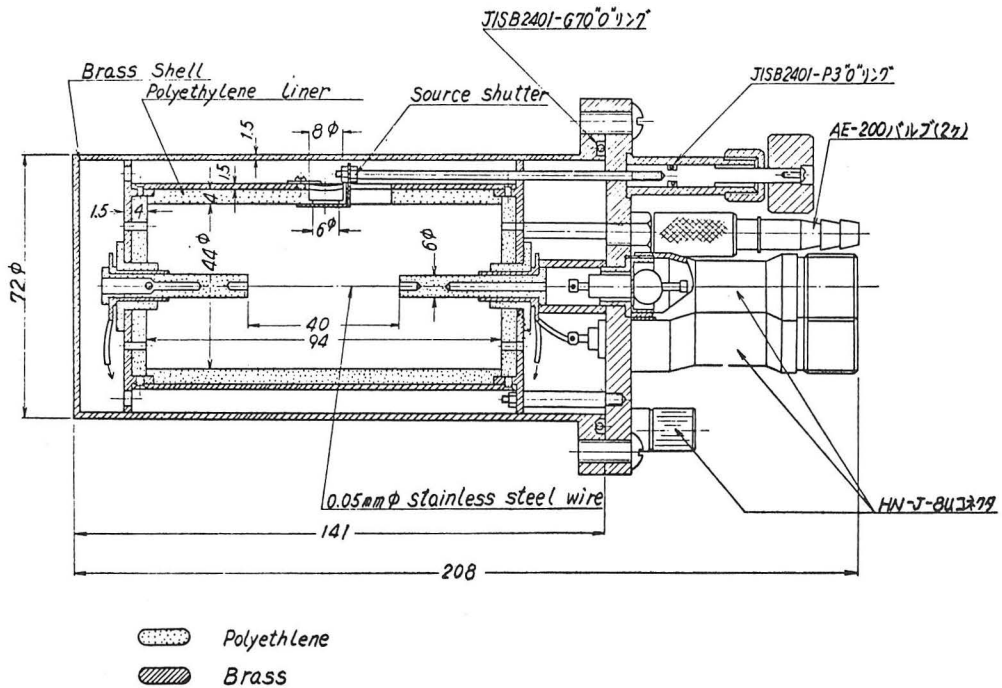


Fig.-1 Hurst 型比例計数管 (単位 mm)

Fig-1は、この原理に従って試作した、Hurstタイプの比例計数管の断面図である。中心電極には0.05mmφのstainless steel wireを用い、カウンター較正用の ^{241}Am - α 線源を内蔵した。また、有効体積(sensitive volume)は44mmφ×40mmで、このVolumeを決定するfield tuve電圧として550Vを印加した。この電圧はpower suply電圧(1700V)に対して、およそ30%に相当した。さらに、760mmHgのエチレンガスを充填して測定を行った。

上述したカウンターの較正(calibration)とは、まず、内蔵の ^{241}Am - α 線源で吸収エネルギーの較正を行う。比例計数管の電極からのパルスをTMC 100チャンネル波高分析器に入れて、 ^{241}Am - α 線によるpulse heightのスペクトルをとる。スペクトル図をFig-2に示す。このspectrumから分かるようにFWHM(full width half maximum)で13.4%の分解能を得た。

次に、実験に用いた $^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$ 反応からの平均2 MeVの中性子ビームを計数管に照射し

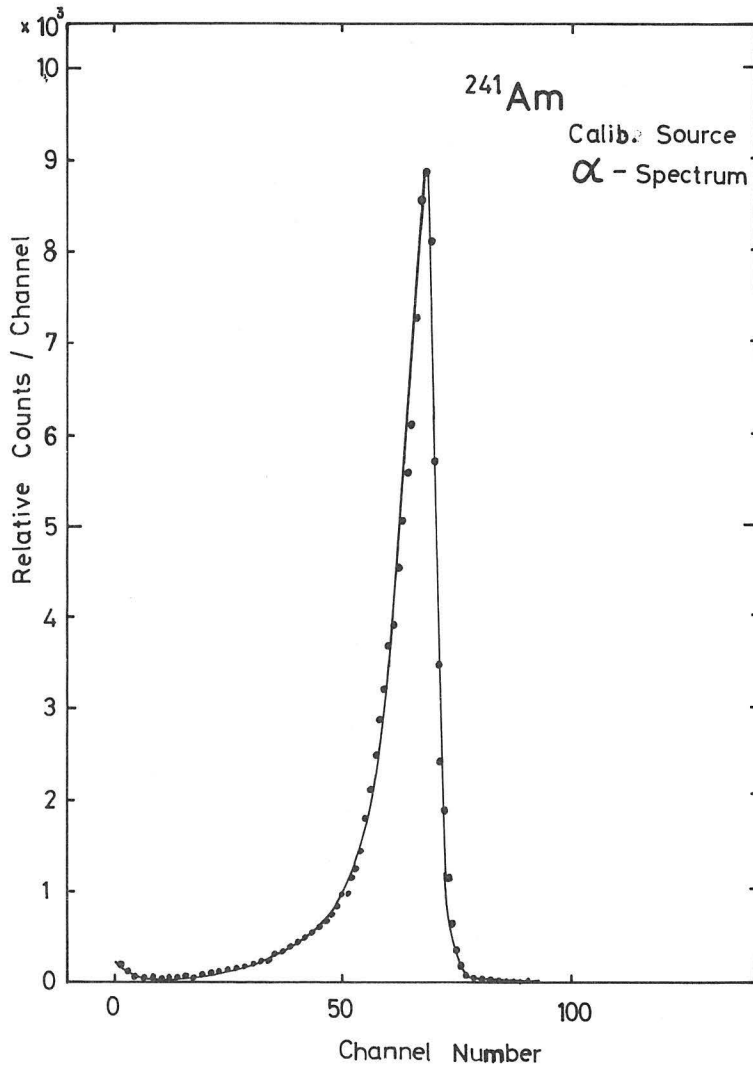


Fig-2 ^{241}Am - α 線のエネルギースペクトル

(空气中, ターゲット中心から100cmの距離), 反跳陽子 (recoil proton) に対する pulse height のスペクトルを測定する。このスペクトルから α 線の場合と同様にパルス波高に対する積分計数率を示すグラフを作る (Fig-3)。このグラフの曲線の下側の面積から Hurst 等の方法により中性子の線量 (一回衝突線量) を算出した。

3) micro G. M. 計数管

中性子, γ 線混合場での γ 線用線量計として GM管タイプを使用した。⁸⁾⁹⁾ それは, フィリップ社製の No. 18509 micro GM管にズと鉛のフィルタをつけてエネルギー依存性を減らしたものである。今回計測に用いた, micro GM計数管の断面図を Fig-4 に示す。この線量計は熱中性子に対して感度をもつので, 図に示すような酸化ホウ素を満したキャップを用いて熱中性子を吸収させる。これにより, 熱中性子に対する感度をキャップなしの場合の約100分の1にすることが出来た。この GM管の欠点はプラトーが短いので, 安定性のある高圧電源を用いた。Fig-5 に GM管の線質依存性を示す。測定点は有効エネルギー 1.25 MeV (^{60}Co), 0.662 MeV (^{137}Cs), および診断用 x 線装置からの実効エネルギー (KeV) の 112, 102, 86, 72, 67, 54, 43, 34 で最大ピーク点は 67 KeV x 線に相当した。全ての測定点は ^{60}Co 1.25 MeV を 1 に

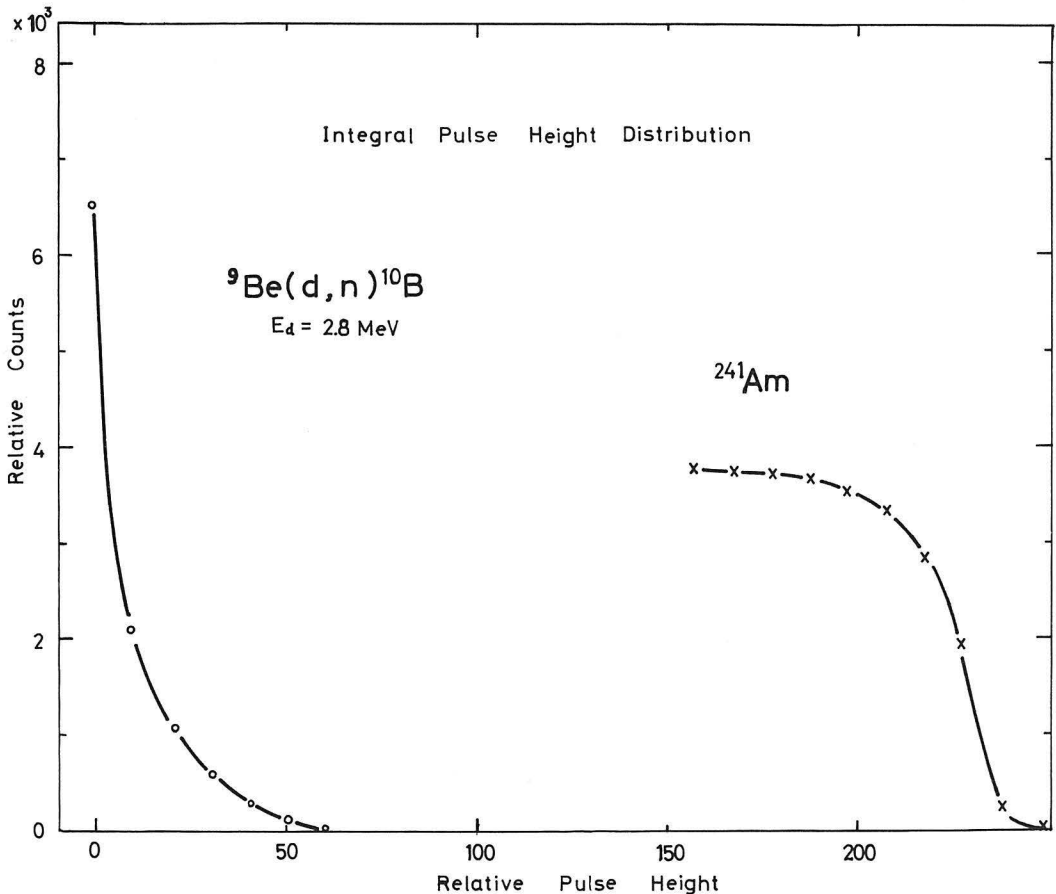


Fig.-3 $^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{B}$ 反応による中性子および ^{241}Am - α 線の積分計数率

規格化したものである。

さらに、Fig-6にGM計数管の入射ビームに対する応答 (response) を示す。この図で示してある angle 0°の方向とはカウンターの軸とビーム方向との間の角が直角の場合で、この点を1に規格化し、90°方向が最少値となり、およそ0.79となった。

§ 3 線量計測に伴う問題点と計測例

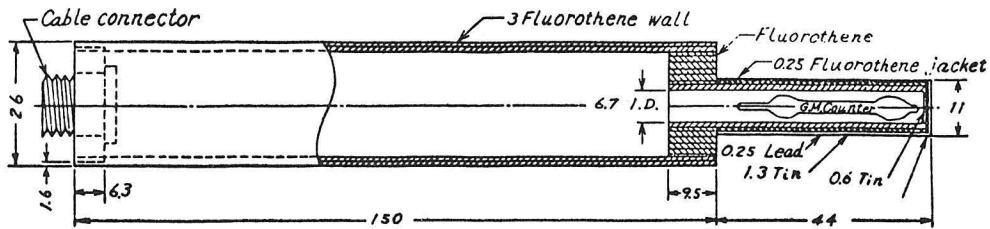
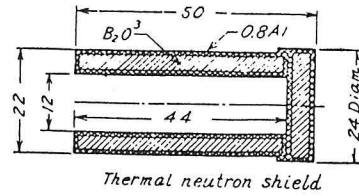


Fig.-4 マイクロGM管型線量計 (単位 mm)

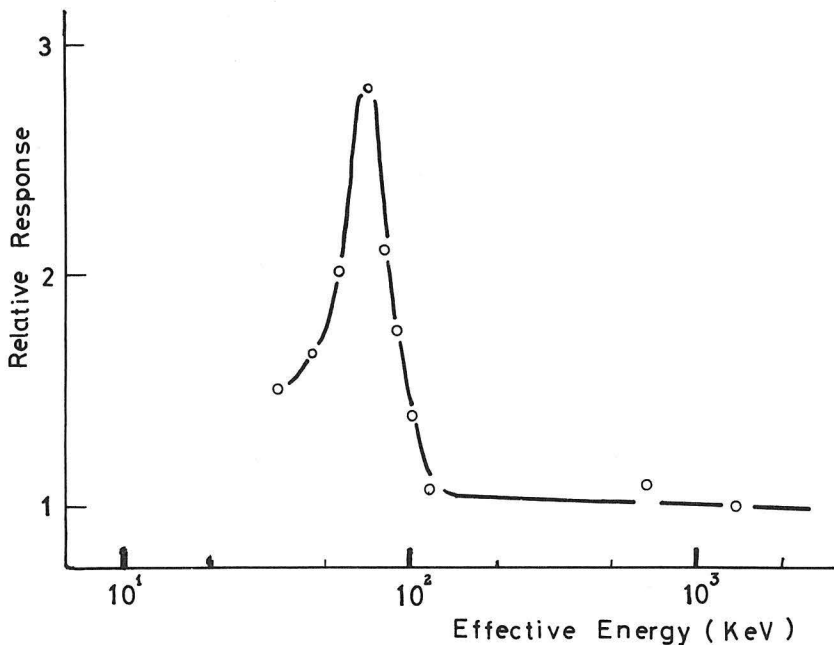


Fig.-5 GM管型線量計の線質依存性

すでに述べたように、中性子およびガンマ線による線量成分の和、即ち Total dose を計測する線量計として組織等価 (TE) 電離箱があり、また、中性子に低感度の γ 線用線量計として、C-CO₂ 電離箱を試作した。これ等の線量計を使用して、中性子と γ 線の線量を分離して、計測および計測値を出すには次のような考え方¹⁰⁾¹¹⁾に従っている。

人体組織等価電離箱が 1R の ⁶⁰Co の γ 線に照射された時、吸収線量は 0.96rad に相当する。同一の電離が (W_α/W_β) \times 0.96rad に等しい中性子線量によって、この線量計の中で作られる。ここで、 W_α 、 W_β はそれぞれの α 線、 β 線によって気体中で 1 イオン対を生ずるに要する平均エネルギーである。気体中での W の値が α 線、陽子および重粒子に対して同一であると仮定する。W の比は混合気体によって 1.03~1.06 までわずかに変化する。もし、W の比を 1.04 と設定すれば、組織等価電離箱で ⁶⁰Co からの γ 線 1R によって作られた電離に対する γ 線 Γ rad と、中性子 N rad によって作られた電離の比 T は次式によって与えられる。

$$T = \frac{\Gamma}{0.96} + \frac{N}{1.00} = 1.04\Gamma + N \dots\dots (2)$$

一方、C-CO₂ 電離箱による ⁶⁰Co からの γ 線 1R によって作られる電離に対する中性子と γ 線による電離の比 C は次式で与えられる。

$$C = 1.04 + kN \dots\dots (3)$$

比例定数 k は、C-CO₂ 電離箱が 1R の ⁶⁰Co γ 線に照射されたとき観測される読みに対する標準組織で 1rad を生ずるような中性子フルーエンスに照射されたときのこの電離箱の読みの比である。 k の値は 0.5~8 MeV の中性子エネルギーに対して実験と理論から算出されており、このエネルギー範囲では $k = 0.16 \pm 0.08$ としてよい。

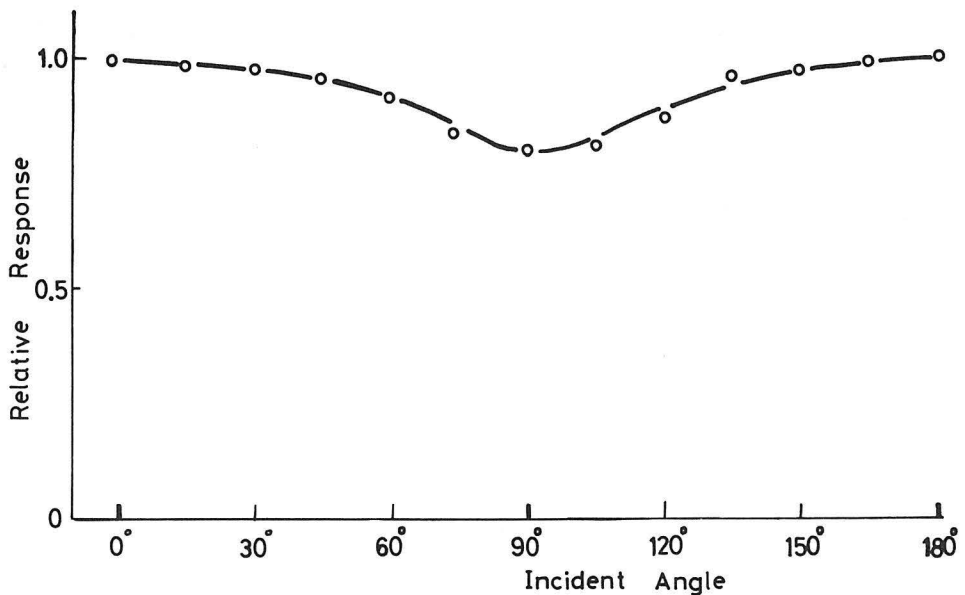


Fig.-6 GM管型線量計の方向依存性

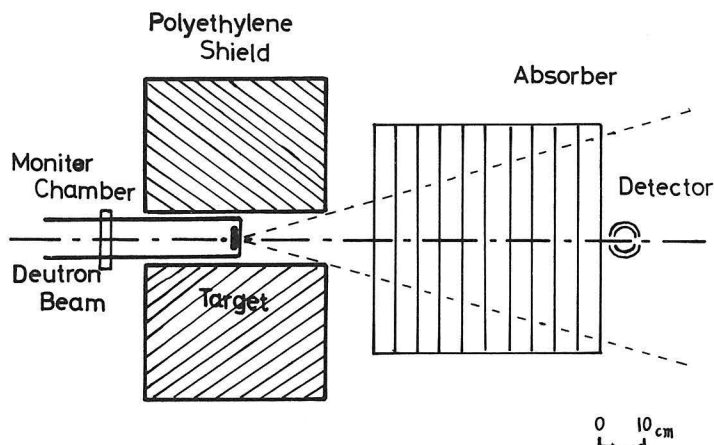


Fig.-7 計測実験のブロック・ダイアグラム

Table-1 各種線量計による計測値

線 質	twin	Hurst	G・M	イオウ(S)
中 性 子	1.3 rad / min	1.1 rad / min		1.2 rad / min
γ	0.2 rad / min		0.2 rad / min	

Van de Graaff 加速器を利用して ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$ 反応から発生する中性子および γ 線の線量を試作した線量計により計測した。¹²⁾ 重陽子の加速エネルギーを 2.8 MeV とし、加速電流を $140 \mu\text{A}$ とした。計測実験のブロック・ダイアグラムを Fig-7 に示す。なお、モニター線量計として透過型電離箱を利用した。種々線量計による測定結果を Table-1 に示す。表中“twin”とは、組織等価電離箱と C-CO₂ 電離箱を対にして用いた（前述）のもの、即ち、twin chamber（対電離箱）の略である。これ等の値はターゲットから 50 cm に検出器を置いた場合である。校正用線源として ${}^{60}\text{Co}$ γ 線を用い、Baldwin 標準線量計で校正した。わずか 1 つの測定例であるが、線量計相互間で値がよく一致している。ここで、表中にあるイオウ(S)の放射化による線量測定についてふれておく。イオウは速中性子によって、 ${}^{32}\text{S}(n, p){}^{32}\text{P}$ 反応を起こす。この反応の断面積は 4~10 MeV のエネルギーの範囲ではほぼ一定である。また、生成される ${}^{32}\text{P}$ が容易に測定される核種であるため、大量の中性子照射の場合のモニターとして適している。欠点はこの反応のしきい値が 2.5 MeV であるため、通常の中性子の線量を測定するためには、中性子線源のエネルギースペクトルについての情報が必要となる。

イオウの放射化による計測例として、 ${}^9\text{Be}(d, n){}^{10}\text{B}$ 反応からの中性子の場合について述べる。最初、イオウを 100 気圧程度に圧縮し成型してペレットをつくる（6 mm ϕ \times 2 mm 厚程度が便利）。これに中性子を照射し、照射後試料皿に入れて 200°C 位に加熱する。イオウを燃焼化すれば自己吸収の少ない ${}^{32}\text{P}$ の β 線源となる。これを GM 計数管タイプのガスフローカウンターで計測すると、いま、a (dps/イオウ 1g) であったとすれば、2.5 MeV 以上の速中性子の一回

衝突線量 D は次式で与えられる。

$$\frac{D}{a} = \frac{W}{N\lambda} \cdot \frac{\int_{2.5}^{\infty} D_0(E)f(E)dE}{\int_{2.5}^{\infty} \sigma(E)f(E)dE} \dots\dots (4)$$

ここで、 $f(E)$: 単位エネルギー間隔あたりの中性子のフルーエンスでエネルギースペクトルから得られる。 $\sigma(E)$: $S(n, p)$ 反応の断面積、 $D_0(E)$: エネルギー E をもった中性子の単位フルーエンス当たりの一回衝突線量である。 W : イオウの原子量、 N : アボガドの定数、 λ : ^{32}P の崩壊定数である。

計測に伴う問題点として、さらに線量当量の測定がある。中性子の吸収線量は、一般に、一回衝突線量で測定される。¹³⁾しかし、Radiation Protection を考える場合には一回衝突線量よりはむしろ線量当量を測定すべきである。前にもふれたが、線量当量は吸収線量に線質因子 (QF) を乗ずることによって求められる。この QF は中性子のエネルギーに関係している。最近、Rossi タイプの比例計数管を用いて、LET (線エネルギー付与) 分布を測定し、これから QF を求める研究がなされている。このやり方では施設のまわりのいろいろの点での平均の QF を決定しておいて、これにその点での吸収線量を乗ずることによって線量当量を算出する。しかし、可成り良い方法と考えられるが、経費ばかりでなく、ハイレベルの技術が要求される点で、いまのところ実用的でない。現在のところ実用的にはレム・カウンター (Rem counter) が用いられている。これは国際放射線防護委員会 (ICRP) から勧告された 0.025 eV ~ 10 MeV までの中性子エネルギーに対する、単位中性子フルーエンス当たりの線量当量の関係と同様の感度をもつ検出器である。このタイプのカウンターは、Rem-Response と同一にするため、入射中性子を適当に減速、吸収させるポリエチレンと、ボロン・プラスチック等の遮蔽で包まれた熱中性子検出器からなる。内部の検出器には BF_3 (沸化ホウ素) 比例計数管や LiI シンチレータが主に用いられている。このカウンターの特性的については、Van de Graaff 加速器を利用した中性子源と、 $\text{Ra-Be}(\alpha, n)$ の RI 中性子源を使用して行った。線量当量を計測する場合には、中性子ビームをカウンターの軸に垂直におくべきである。中性子源には、加速器による $^3\text{T}(p, n)^4\text{He}$ 、 $^2\text{D}(d, n)^3\text{He}$ 、 $^3\text{T}(d, n)^4\text{He}$ 反応からの 500 KeV、1 MeV、2 MeV、5 MeV および 18 MeV の中性子を用いた。なお、中性子フルーエンスの計測には電総研 (通産省) で比較校正した、放医研 (科学技術庁) のロングカウンター (long counter) を使用した。

中性子エネルギー 18 MeV を除いて、ICRP の勧告に基づく Rem Response 曲線とよく一致した。18 MeV の中性子の場合には、勧告値よりもやや小さな評価となっている。

謝 辞

稿を終わるに臨み、有益なる御助言を頂いた、織田暢夫教授 (東工大大学院・放射線物理講座)、線量計の試作および計測実験に終始御指導、御協力頂いた、丸山隆司室長 (科学技術庁・放射線医学総合研究所) に深謝の意を表します。

文 献

- 1) ICRU Report 19 ; Radiation Quantities and Units, 15 (1971)
- 2) Gray, L. H. ; The ionization method of measuring energy, Proc. Combridge Phil. Soc. 40, 72 (1944)
- 3) Hurst, G. S., Ritchie, R. H., and Wilson, H. N. ; A count-rate method of measuring fast neutron tissue dose, Rev. Sci. Instr. 22, 981 (1951)
- 4) Marinelli, L. D. ; Radiation dosimetry and protection, Annual Review of Nuclear Science, 3, 249 (Annual Reviews, Inc., Stanford, Calif. 1953)
- 5) Rossi, H. H., and Failla, G. ; Tissue-equivalent ionization chambers, Nucleonics 14, No. 2, 32 (1966)
- 6) Slater, M., Bunyard, G. B., and Randolph, M. L. ; Combination ion chamber-proportional counter dosimeter for measuring gamma-ray contamination of neutron fields, Rev. Sci. Instr. 29, 601 (1968)
- 7) Hurst, G. S., and Ritchie, R. H. ; On energy resolution with proportional counters, Rev. Sci. Instr. 24, 664 (1953)
- 8) Wagner, E. B., and Hurst, G. S. ; Gamma response and energy losses in the absolute fast neutron dosimeter, Health Phys. 2, 57 (1959)
- 9) Wagner, E. B., and Hurst, G. S. ; G-M tube γ -ray dosimeter with low neutron sensitivity, Health Phys. 5, 20 (1961)
- 10) NCRP Report (NBS Handb. 75) ; Measurement of absorbed dose of neutrons and of mixtures of neutrons and gamma rays, 82 (1961)
- 11) ICRU Report (NBS Handb. 85) ; Physical Aspects of Irradiation, 26 (1964)
- 12) Maruyama, T. and Bouts, C. J. ; Dosimetry of D-T neutrons for radio-therapeutic applications, Phys. Med. Biol. 17, 420 (1972)
- 13) 西村明久・丸山隆司 ; 特別研究「医用サイクロトロン of 安全管理に関する研究」 NIRS report 2, 97 (1975)