

硫酸鉄線量計による高エネルギー放射線の吸収線量測定

九州大学医学部放射線医学教室 (主任 入江英雄教授)

竹 下 健 児 吉 本 清 一

広島大学原爆放射能医学研究所 (主任 吉永春馬教授)

安 徳 重 敏

(昭和38年4月17日受付)

Absorbed Dose Measurements of High Energy Radiations Using Ferrous Sulfate Dosimeter.

By

Kenji Takeshita, Seiichi Yoshimoto

Department of Radiology, Faculty of Medicine, Kyushu University, Fukuoka

(Director: Prof. H. Irie)

and Shigetoshi Antoku

Department of Radiation Biology, Research Institute for Nuclear Medicine

and Biology, Hiroshima University, Hiroshima

(Director: Prof. H. Yoshinaga)

The Fricke ferrous sulfate dosimeter was used to measure the absorbed dose of 200 KVp X-rays, ^{60}Co gamma-rays and 15 MV X-rays. The ratio of the absorbed dose of the ferrous sulfate to the r-reading of the Victoreen thimble chamber, which was set in conditions of the equilibrium of the secondary electrons, was each 0.95 ± 0.03 for 200 KVp X-rays, 0.96 ± 0.04 for ^{60}Co gamma-rays and 1.01 ± 0.03 for 15 MV X-rays of the Betatron. We propose to call this r-reading for the radiations above 3 MeV the "r-equivalent" (r-eq.) against the r-unit for the conventional X-rays.

I. 緒 言

放射線の照射線量は、一般に指頭型電離槽 Thimble ionization chamber による空気の電離を r 単位に換算して用いている。r 単位の絶対測定は古くから各方面で行なわれており、入江¹⁾も Free air ionization chamber により標準測定を行なつたが、通常は Küstner の Eichstandgerät によつて X 線に関しては標準測定に準じている。しかし放射線の生物学的作用を研究する場合、しかも通常の X 線のみならず ^{137}Cs 及び ^{60}Co γ 線等多様に亘つて、線質の相違による生物学的效果比 Relative biological effectiveness を論じよう

とするには、生物体内に吸収された放射線量が問題になり、各実験に応じて比較更正された指頭型電離槽により先ず r 量を測定し、これにより吸収線量 rad への換算²⁾が行なわれている。

一方、r 単位は 3 MeV 以下の電磁波に対して定義されたものであつて、今日の Betatron 或は Lineac 等の高エネルギー放射線利用の趨勢においては、あくまでも erg という絶対単位を使用すべきだとされているが又、NBS Handbook 55³⁾に従えば、10~40 MV の X 線に対しては二次電子平衡が成立つ条件で、11.5 cm 立方のアクリライト・ブロック (比重 1.18~1.19) の中心部に 25 r

Victoreen thimble chamber を挿入して、その r 読みをもつて便宜上使用することになっている。

こういう事情により高エネルギー X 線までの領域において、照射線量と吸収線量の関係を適確にしておく必要性が痛感される。このために外挿型電離槽或は熱線量計等により多くの実験も報告されているが、R.J. Shalek et al.⁴⁾ は W.K. Sinclair et al. の一連の RBE に関する研究の基礎実験として、硫酸鉄線量計 Ferrous sulfate dosimeter による吸収線量の測定を行なっている。

硫酸鉄線量計については安德^{5,6)}が行なつた X 線及び ^{60}Co γ 線に対する研究があるので、これを更に 15MV Betatron X 線に対して用い、吸収線量測定に関して r 単位より rad 単位への換算係数 Conversion factor を求め、高エネルギー X 線の分野で r 読みというものの性格なり意味づけを行ないたいと思つた。又この種の実験はわが教室における RBE 研究の基礎的研究でもあり、将来高エネルギー放射線が広く医療用に利用されるための第一段階とも考え実験を行なつたものである。

II. 測定原理

Fe^{2+} イオンは放射線照射によつて Fe^{3+} イオンに酸化される。この時の変化量は照射線量と直線関係にあるので、系内に起つた化学変化量と吸収されたエネルギーの量との間にある関係を知つておれば、 Fe^{3+} イオンの生成量から照射された又は吸収された線量を知ることが出来る。 Fe^{2+} イオンの硫酸酸性溶液では、G 値 (1 g 当り 100eV のエネルギー吸収により変換される分子数) は、

100 KeV より 2 MeV までの電磁波及び 1~15 MeV の電子線に対して $15.6 \pm 0.37^{8)}$ という値が得られている。即ち系の 1 g が 100 eV の放射線エネルギーを吸収したとき、15.6 個の Fe^{3+} イオンが生成することになる。G 値としてはいろいろの線質により異なつた値をとつている人も多く、これらの報告^{4,9)}の平均値として 200 KVp X 線では 15.2, ^{60}Co γ 線では 15.7, 15MV X 線では 15.9 (5 MVe_{eff}. として) と線質が硬くなるにつれて少しずつ高い値を示している。我々の実験では、各線質による吸収線量を r 読みと比較する上

で、G 値としては後者を採用する。

試料溶液は 4 回蒸溜水 (単蒸溜 1 回, 酸性過マンガン酸カリを入れて 1 回, アルカリ性過マンガン酸カリを入れて一夜還流後 1 回, 更に単蒸溜 1 回合計 4 回蒸溜水) 978 ml に特級モール塩 (硫酸第 1 鉄アンモニウム $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) 0.4 g, 特級食塩 0.06 g, 特級硫酸 22 ml を溶解し、一夜空気飽和を行なつた溶液を試料として用いた。上記溶液の密度は計算によつて 1.015 g/cm^3 である。

照射容器は $1.5 \text{ cm } \phi \times 7 \text{ cm}$ の硬質 (ハリオ) ガラス製、栓つき容器を主として用いた。他にポリエチレン製容器についても照射を行なつて材質の検討を加えた。

測定には島津製光電分光光度計 QR-50 型を用いた。使用波長は $305 \text{ m}\mu$ 及び $220 \sim 230 \text{ m}\mu$ で、 Fe^{3+} 濃度と吸光度は Beer-Lambert 則に従うので両波長について測定した。しかし信頼度は $305 \text{ m}\mu$ の方が高いので、 $225 \text{ m}\mu$ は参考として用いた。測定波長 $305 \text{ m}\mu$ における Fe^{3+} の分子吸光係数は、用いた分光光度計で 2,300 (30°C) で吸光度は温度差 1°C 当り 0.7% 増加するためその都度温度補正を加えた。

放射線照射によつて変化した吸光度 $\Delta\epsilon$ と吸収線量 D の関係は次式で表わされる。

$$D = \frac{N \times \Delta\epsilon}{\epsilon \times 10^3} \times \frac{100}{G} \times \frac{1}{\rho} \times f \text{ (rad)} \quad (1)$$

ここで N は Avogadro 数 (6.023×10^{23}), ϵ は分子吸光係数 (2,300 at 30°C), G は G 値, ρ は試料の密度 (1.015 g/cm^3), f は eV 単位より rad 単位への換算係数 ($1.602 \times 10^{-14} \text{ rad/eV}$) である。これらの値を (1) に代入すると、

$$D = 4.112 \times 10^5 \times \frac{\Delta\epsilon}{G} \text{ (rad)} \quad (2)$$

となる。

予備テストとして同一試料溶液 9 本について実験用コバルト照射装置により線源・試料間距離 75 cm で 1 時間照射した結果、照射線量は $5,460 \pm 160 \text{ r}$ ($G=15.6$ として) であり、1961 年 9 月硫酸鉄線量計及び Radocon 線量計により測定された値をもとにして ^{60}Co の物理的減衰を考慮して計算した値 5,430 r に一致した。

III. 実験条件

高エネルギー放射線によるRBEの研究において、使用する放射線の種類を200KVp X線、 ^{60}Co γ 線及び15MV X線（或は電子線）を主として比較しているので、この3種にしまつて吸収線量を求めた。

照射線量の測定には米国 Victoreen 社 Condenser r-Meter Model 70A を用い、Probe に使用した電離槽はX線用 (Medium energy) Model 70-5 (25r range), Model 154 (250 r range) 及び γ 線用 (High energy) Model 553 (25r range)である。X線用は適用範囲50~400 KeV, γ 線用は400~2,000 KeV で何れも Thimble condenser type である。Chamber に対する照射量とr読みとの間には、Range の範囲内では直線性を確めた。

15MV X線の出力測定は、NBS Handbook 55 に従つて11.5cm立方のアクリライト・ブロック中に Model 70-5 (25 r)を挿入し、そのr読みを以て便宜上行なつてゐるが、我々はファントム中二次電子平衡が成立つ深さ（15MV X線では表面より3cmの深さより深部）でのこのr読みを假に r-equivalent (以下簡単に r-eq. と書く。) と称する。15MV X線に Model 70-5 (25 r) を使用する関係上、この実験においては Model 70-5 を標準にとり、 ^{60}Co γ 線に対してだけ Model 553を用いた。

使用した装置は、1) 200KVp X線として島津製「信愛」200 KVp, Filter 0.9mm Cu + 0.5mm Al (HVL 1.63mm Cu), 20 mA, 線源・測定器間距離30cm, 線量率 240 r/min, 2) ^{60}Co γ 線として島津製 RT-2000型コバルト治療器, 1500C, Filter 0.5mm Cd, 線源・測定器間距離50cm, 線量率126 r/min, 3) 15MV X線として島津製 BT-15 型ベータートロン, Filter 2mm Fe + 2mm Al (HVL 13 mm Pb), 線源・測定器間距離70cm, アクリライト・ファントム表面より3cmの深さでのX線出力39 r-eq./min (夏季), 57 r-eq./min (冬季)であつた。この出力の相違は加速ドーナツを取換えたためである。

IV. 実験方法

動物実験における照射方法に準じて、Fig. 1に示す様に 200KVp X線では支持台上に露出し、 ^{60}Co γ 線では二次電子平衡の条件に合わせて0.5cmの厚みのアクリライト板を上にかぶせ、15MV X線ではアクリライト・ファントム中表面より被照射体中心が3cmになる様にして周囲を米粒で埋めた状態である。この場合、Condenser chamber をはさんで硫酸鉄試料を間隔をおいて併置し、線量率が一定な時には硫酸鉄試料のみに必要な時間照射を継続した。又ベータートロンの出力は若干ふらつくので、Output monitor の指示の他に、ファントムの下部線束中心に島津製 Dose-reader RM-1 (Radocon 型), Probe No. B 412 (X線用)を固定し、毎回の測定に対して積算線量を得られる様にした。Fig. 1でC (int.) がそれである。

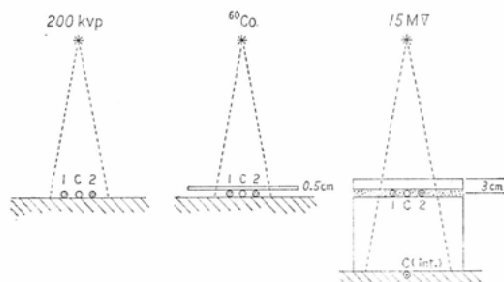


Fig. 1 Experimental arrangements in conditions of the secondary electron's equilibrium. 1 and 2 were the ferrous sulfate samples, C was the Victoreen thimble chamber and C (int.) was the integral ionization dosimeter.

硫酸鉄線量計は試料作成後、若しくは照射後長時間放置することはFe²⁺変化量に影響を及ぼすので、試料作成、照射、吸光度測定は引続いて行なうようにしたため、200KVp X線、 ^{60}Co γ 線、15MV X線のそれぞれの照射日は必ずしも一致せず、数日に亘ることもあつた。又8~10月にかけて行なつた測定と比較する意味もあつて、1月中旬の冬季においても測定を繰返した。吸光度測定に十分な照射線量は最低2,000 r, 3,000 r以上の照射量が誤差を少なくするために必要であり、1回の照射時間は200KVp X線では15分、 ^{60}Co γ 線では30分、ベータートロンでは60分を要した。毎回使用する硫酸鉄試料は2個づつ、各線質毎に

夏季5回、冬季4回の測定を行ない、その都度 Victoreen condenser chamber による2～3回のr読みの平均と比較した。

電離槽によるr量測定は厳密には、その時の気温及び気圧によりかなり大幅に補正しなければならない。補正係数は次の式で与えられている。

$$\text{補正係数} = \left(\frac{273+t}{295} \times \frac{760}{p} \right)$$

ここでtは摂氏目盛による温度、pはmmHgで表わされた気圧である。この補正は、Victoreen chamber が米国NBS規格によつて22°C、760mmHgを基準にして、国際r単位に校正しているためである。

以上の線量測定並びに吸光度測定によつて、各測定毎に吸収線量のVictoreen condenser chamberによるr又はr-eq.量に対する比を求めると、目的とするConversion ratio、この場合はr読みのrad換算比を得ることが出来る。

V. 実験結果

夏一秋季における各線質での試料10個の平均値と5回の電離槽読みの平均値により換算比を求めると、Table Iの(A)の如く、又冬季における試料8個の平均値と4回の電離槽平均値による換算比は(B)の如く得られた。

Table I Ratios of the absorbed dose using the ferrous sulfate dosimeter to the r-reading of the ionization chamber.

(A): Average of 10 samples in Summer to Autumn, (B): Average of 8 samples in Winter, (C): Average of each conversion ratio for 9 examinations through two series; (A) and (B).

	(A)	(B)	(C)
200 KVp X-rays	0.94±0.01	0.96±0.03	0.95±0.03
⁶⁰ Co γ-rays	0.98±0.03	0.94±0.02	0.96±0.04
15 MV X-rays	1.02±0.05	0.99±0.03	1.01±0.03

更に二季を通じてVictoreen chamberの毎回のr読みに対する各硫酸鉄線量計(2個づつ)の吸収線量の比をそれぞれ求め、9回測定の前平均値としてTable I(C)の如く、200KVp X線では

0.95±0.03、⁶⁰Co γ線では0.96±0.04、15MV X線では1.01±0.03という結果を得た。

VI. 考 按

以上の実験を通して、軟部組織の組成から吸収係数により求められたr-rad換算係数、即ち200KVp X線では0.95、⁶⁰Co γ線で0.97～0.98と比べて、⁶⁰Co γ線でやや低目の値が得られたが、大体において一致していると思われ、従つて15MV X線の吸収線量を知るために、先に述べた如くr-eq.をとる限りは、即ち二次電子平衡が成り立つ範囲、言換えれば深部量率が最大になる所より深部については、電離槽のr読み、つまりr-eq.は1.01の換算比でそのままradに換算される訳であるから、これまでの3 MeV以下での慣習であるr単位を実用上はそのまま使用しても差支えないということが出来る。

Victoreen chamberについては、それがr単位として適正であるかどうかは未検定であるが、Model 70-5に関しては、Eichstandgerätにより測定した各電圧でのX線量とほぼ一致しているので、この換算比は決してかけ離れた値とは言えないものであり、又Shalek et al.の結果とも矛盾していない。

J. Kretschko et al.¹⁰⁾によると、欧州においては高エネルギー放射線領域で“ρ”という単位を使っている人もあるそうであり、橋詰¹¹⁾によると1st collision doseとしてKerma(erg/g)或はFluence(erg/cm²)の名をNBS Handbook 84に採用しているそうであるが、我々のr-eq.は高エネルギー放射線による生物実験或は治療における吸収線量を求めるためのもので絶対単位の意味でなく、日常の簡便さ、r単位の慣習から、然しながらr単位とは区別する目的のために使用している。高エネルギー放射線領域での絶対単位、又はr-equivalent(r.eq.)の様な日常の使用単位等については、定義その他諸研究をまつて学会で今後検討するべきものと考えらる。

最後に御校閲を賜つた九大入江英雄教授、広大吉永春馬教授に厚く感謝申上げる。又試料の作成及び測定に御協力頂いた九大工学部荒牧輝夫助手、並びに研究用ベータートロンの使用に全面的に協力されている株式会社

社島津製作所の御厚意に深謝する。

この研究の概要は 第16回日本医学会総会 シンポジウム主題43において発表した。

本研究は昭和37年度文部省科学研究費の援助により行なわれたことを付記する。

文 献

1) 入江英雄：国際レントゲン単位ノ標準測定，日本放射線医学会雑誌，6，165—181，昭13。—2) NBS Handbook 62, Report of the International Commission on Radiological Units and Measurements (ICRU), U.S. Department of Commerce, 1956, 伊藤岳郎：吸収線量について，日本医放会誌，18，637—643，1958。—3) NBS Handbook 55, Protection Against Betatron-Synchrotron Radiations up to 100 Million Electron Volts, U.S. Department of Commerce, 1954。—4) Shalek R.J., Sinclair W.K. and Calkins J.C.: The Relative Biological Effectiveness of 22 Mev X-Rays, Cobalt-60 Gamma Rays, and 200 Kvcp X-Rays. II; The Use of the Ferrous Sulfate Dosimeter for X-Ray and Gamma-Ray Beams., Radiation

Research, 16, 344—351, 1962。—5) 安徳重敏：放射線の化学的線量測定について，広大原基研年報，1, 35—46, 1960。—6) Antoku S.: On the Chemical Dosimetry of Ionizing Radiation (2nd Report), 広大原基研年報，2, 1—9, 1961。—7) Rösinger S.: Chemical dosimetry of X-rays, gamma radiation and fast electrons by the ferrous sulfate method, Proceeding of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, 21, 209, 1958。—8) Shida S.: Radiation chemistry of water and aqueous solution, Symposium on biophysics and biophysical chemistry, No. 4, 129, 1959。—9) Weiss J., Allen A.O., Schwartz H.A.: Use of the Fricke ferrous sulfate dosimeter for gamma ray dose in the range 4 to 40 kr, Proceeding of the International Conference on the Peaceful Uses of Atomic Energy, 14, 179, 1955。—10) Kretschko J., Liesen H., Pohlit W., Rase S., Sewkor A.: Vergleichsmessungen an verschiedenen europäischen Betatronstationen, Fortschr. Röntgenstr., 95, 553—564, 1961。—11) 橋詰雅：第5回日本医学放射線学会物理専門部会講演，1963(1月)。