決定臓器吸収線量測定用ガラス線量計

横 田 良 助*, 武 藤 雄 平*
直 井 次 郎**, 西 島 俊 二**

(1968年9月6日 受理)

Glass Dosimeter for Measuring the Absorbed Dose in Critical Organs

by Ryosuke Yokota, Yuhei Muto, Jiro Naoi and Shunji Nishijima

Glass dosimeter developed by Piesch for measuring the absorbed dose in critical organs, in which only one FD-P8-1 glass was encased in suitable badge case, was examined for the case of FD-3 glass, FGD-6 type Fluorimeter, standard Japanese man phantom, and a badge case manufactured by us.

This experiment confirmed the same validity for this case as well as the case of FD-1 glass, FGD-3B type Fluorimeter and Alderson man phantom which were used by Piesch.

The merits of this glass dosimeter against other dosimeters are discussed from the viewpoint of the personnel dosimetry for radiation protection.

1 ま え が き

周知のようにICRP勧告¹⁾では最大許容年積算線量が決定臓器の dose equivalent で表現されている。従って、放射線防護のための個人被曝線量計は単に exposure のみでなく、決定臓器の dose equivalent が必要に応じて測定されるか、又は評価されなければならない。ここで“必要に応じて”の必要とは低レベル被曝のときでないことは勿論である。

外部被曝の場合に、もし個人被曝線量計がたんに exposure のみを測定するだけであって、決定臓器の dose equivalent が評価しえないならば、ICRP勧告はその技術的有効性に乏しくなる。

ここでは問題を電磁放射線（即ち、 γ 線、X線）に限ることとする。すると個人被曝線量計によって決定臓器の吸収線量が rad で測定されるか又は評価されなければならない。そしてその方法は出来るだけ簡単にコストの少ないことが極めて望ましい。

γ 線又はX線のエネルギースペクトルと入射方向がわかれば、胸につけた exposure を測定する線量計で決定臓器吸収線量が評価されうる。何故ならばファントムによる実験で各エネルギーと入射方向に対する depth-dose 曲線がすでに求められているからである。

フィルム線量計に対する評価は統一されていないが、

フィルム線量計では放射線のエネルギースペクトルと入射方向が求められ、従って決定臓器吸収線量が評価されうるという意見もある。²⁾しかし、フィルム線量計は方向依存性が相当あり、殊に 60~130keV 領域でこれが著しいので、実際使用下ではエネルギースペクトルは相当不正確なものとなり、また入射方向も正しく求められないことが多い。放射線測定E.N.E.Aシンポジウム（1967年、ストックホルム）でも批判が多かった。³⁾従って実際使用下でのフィルム線量計の決定臓器吸収線量評価機能は大いに疑わしいといってよいであろう。

Piesch と Maushart はガラス線量計を用いて、球形カプセルを適当に選ぶと、たった一個のガラスで各決定臓器の吸収線量が±15%の精度で求まることを示した。その適用エネルギー範囲は45~50keVより1.25MeVまでである。彼等は横田ら⁴⁾が開発した線量計ガラス（FD-1ガラス）とFGD-3B形測定器を用いた。

現在の改良された標準の測定器はFGD-6形で、光学系がFGD-3B形とことなり、線量計ガラスに対する刺激紫外線の入射方向やセルの形状もちがうので、果して、

* 東芝中央研究所 (Central Research Laboratory, Tokyo Shibaura Electric Co)

** 電気試験所田無分室 (Electrotechnical Laboratory, Tanashi Branch)

FGD-3B 形と同様な結果が得られるかどうか、又線量計ガラスも進歩してFD-3 ガラスとなり、エネルギー依存性も僅かであるがFD-1 ガラスとことなるので標準の日本人の寸法のファントムで実験して Piesch らの方法が同様にあてはまるかどうか確かめる必要が生じたので実験して確かめることができた。

2 各臓器吸収線量のエネルギー依存性

以下に必要なために、A. R. Jones, Facey, Piesch らが求めた結果を簡単にのべる。

(1) A. R. Jones⁵⁾はファントムを用いて非常に精密な実験をした。各臓器に LiF 熱ルミネッセンス線量計を埋めこんだ。曝射した各実効値の γ 線又は X 線はそのエネルギースペクトルが充分鋭いものであって、その結果は充分信用しうるものである。表 1 に A. R. Jones が LiF 線量計を Alderson ファントムにうめこんだ各臓器の位置を示す。赤色骨髓は身体全体、特に胴に多く分布しているので夫々にうめこんだ。夫々の赤色骨髓に夫々の重量分率をかけて平均した平均赤色骨髓吸収線量を求めた。

問題となる臓器は身体内部のほぼ中央にある平均骨髓と卵巣の一群と、男子生殖腺、皮膚、水晶体、胃腸管粘膜の身体表面や表面下 2 cm 以内にある一群との二つの

Table 1.

The positions of the various organs into which dosimeters are implanted, (by A. R. Jones)

No	organ	distance from front surface (cm)	distance from back surface (cm)
1	brain	3	16
2*	cranium marrow	18	2
3*	sternum marrow	2	20
4*	scapula marrow	12	4
5*	sixth thoracic vertebra marrow	15	7
6*	2nd lumbar vertebra marrow	13	8
7*	scapula marrow	15	7
8*	iliac crest marrow	8	12
9	ovaries	10	11
10	eye lens	0.5	18
11	testes	2	indeterminate
12	skin (forehand)	0	20
13	skin (at chest)	0	22
14	skin (at back chest)	22	0

* From No. 2, 3, 4, 5, 6, 7 and 8 weighted average bone marrow is obtained.

群に分れる。

15才から35才までの年齢による身体寸法の差は少ない。標準の人間を考えると平均の寸法の $\pm 20\%$ 以内に90%の人が入る。平均の寸法から $\pm 20\%$ ちがっても、各決定臓器の吸収線量の変化は少ない。5) A. R. Jones はファントムの前面より、また背面より、また廻転させて曝射した。

1 R 曝射したとき、どれだけのエネルギーが各臓器に吸収されるかを、27keV より 1.25MeV のエネルギー領域で各エネルギーに対して求めた。

図 1 は正面曝射のもので、縦軸は rad/R、横軸はエネルギーである。図 1 を見ると、平均赤色骨髓と卵巣の吸収線量のエネルギー依存性は驚くほど一致している。また、水晶体、男子生殖腺、胃腸管粘膜、皮膚の吸収線量のエネルギー依存性曲線は比較的良好に似ている。水晶体、男子生殖腺は表面より夫々 0.5cm、および 2cm 奥にあり、胃腸管も比較的表面近くにあるので夫々の臓器の吸収線量のエネルギー依存性曲線も互いに似ているのである。60~130keV 領域での吸収線量が ^{60}Co γ 線等の高エネルギー領域より著しく大きくなっているのは、身体による後方散乱がこのエネルギー範囲で著しく増加するからである。

Fig. 1. Absorbed dose in various organs as a function of photon energy referred to an exposure of 1 R in the case of frontal irradiation (after A. R. Jones).

重要なことは、正面曝射のときに得られた図 1 の関係は、前面でありさえすればその入射方向に殊んどよらないことである。即ち真横からの入射をのぞいたすべての前面入射に対して第一近似で成立するのである。

(2) 図 2 はファントムを回転して曝射したときである。全部の被曝が散乱線のときに相当する。平均赤色骨髓は全身に分布しているので吸収線量に方向依存性は殆んどない。卵巣は身体の内ほぼ中央にあるので殆んど方向によらない。身体前面にある水晶体、男子生殖腺や胃腸管粘

Fig. 2. Absorbed dose in various organs as a function of photon energy referred to an exposure of 1 R in the case of rotational irradiation (after A. R. Jones and Facey).
chain line.....average bone marrow (rotational) after Facey
broken line.....average bone marrow (rotational) after A. R. Jones.

膜は背面からの被曝に対しては吸収線量は当然少ない。従って、ファントムを回転して曝射したときは、赤色骨髓、卵巣、皮膚、水晶体、男子生殖腺や胃腸管粘膜は±25%の範囲内で同一のエネルギー依存性の曲線を持つことがわかる。

骨髓内では線質が骨のために少し硬くなる。Facey⁶⁾はエネルギー依存性のことなる2種のTLD即ちLiFとCaSO₄:Smを一对として用いて実験し、A. R. Jonesの赤色骨髓吸収線量のエネルギー依存性曲線を修正した。これを図2の鎖線に示した。しかし、この修正によっても大勢に殆んど影響がなく、±25%の範囲に含まれる。他の臓器に対しては修正の必要がなかった。即ち、ファントムを回転して曝射したときの各臓器の吸収線量は正面曝射のときの平均赤色骨髓の吸収線量のエネルギー依存性曲線に近いのである。

(3) 個人被曝線量計は身体表面に装置されていて、しかも必要な臓器吸収線量が測定できる必要がある。実際には作業者は衣服をつけているのであるから、個人被曝線量計は裸のファントムから1cm前の部位にある。すると、身体の後方散乱をうける度合いが変化し、この変化は60~130keV領域では大きくその他の領域では少ない。Piesch⁷⁾はこの点に着目して、Aldersonファントムの前1cmのところの吸収線量を男子生殖腺について求めた。実験は、A. R. Jonesと同じく、フィルターを充分強くしてエネルギースペクトルの巾を充分狭くしたX線を照射して正面曝射に対して求めたもので充分信用できるものである。図3に掲げた。各臓器の吸収線量のエネルギー依存性を正面曝射に対して図4に示した。ただし平均赤色骨髓のみは背面からの曝射のときをとった。背面か

Fig. 3. Absorbed dose in testes as a function of photon energy referred to an exposure of 1 R in the case of frontal irradiation (after E. Piesch).

— at phantom surface
..... 1 cm from phantom surface

Fig. 4. Absorbed dose in various organs as a function of photon energy referred to an exposure of 1 R of an Alderson man phantom in the case of frontal irradiation (after E. Piesch).

らの方が僅かに吸収線量が大である。図4で大事なことは、(45~50) keV~1.2 MeV領域では、男子生殖腺のエネルギー依存性の曲線の形は赤色骨髓や卵巣のそれによく似ており、男子生殖腺のその1/1.5が平均赤色骨髓や卵巣のそれはほぼ等しいことである。

即ち45 keV~1.25 MeV領域でのエネルギー依存性曲線が図4の平均赤色骨髓のそれに近い個人被曝線量計があり、しかも方向依存性が実際上無視できるならば、これによってすべての臓器吸収線量が求められる。

3 各臓器吸収線量が求まるガラス線量計の開発

MaushartとPiesch⁸⁾は東芝ガラスFD-P8-1(8×8×4.7mm)を用い、Sn 1.2mm厚の球形カプセルをかぶせた。Snカプセルの20%に相当する面積に120°のテーパーのついた穴があり、Snカプセルとガラスとの間に

Fig. 5. New spherical capsule badge case for the absorbed dose measurement of critical organs and FD-3 dosimeter glass ($8 \times 3 \times 4.7$ mm³).

Fig. 6. New spherical capsule badge case for critical organs at 1 cm apart from the chest of Japanese standard man phantom.

は15mmφの球形のベークライトがある。方向依存性は実用上無視できる。我々も同じものを試作した。図5の写真が試作したものである。現在の改良されたFGD-6形測定器では線量計ガラスに対する励起紫外線の入射方向がFGD-3B形のそれとことなるのと、FD-3線量計ガラスはFD-1ガラスと較べて僅かにエネルギー依存性が良くなっているの、MaushartとPieschが前述の球形カプセルパッチケースに入れたFD-1ガラスとFGD-3B形測定器とAldersonファントムで成功したけれども〔FGD-6形測定器+FD-3ガラス+試作パッチケース+標準日本人ファントム〕の組合せが目的に合って同じく成立するかどうか実験によってたしかめる必要がある。日本人の標準人の寸法のファントムを用いて、ファントムの左胸に試作パッチケースをつけて、電気試験所において、曝射X線のエネルギー幅をできるだけ狭くするようにフィルタを強くして曝射した。衣服をつけたことに相当して、厚さ1cmのスポンジゴム板をつけて、その上にガラスを入れた試作パッチケースをつけた。図

Fig. 7. Response of new spherical capsimeter by 1.6 as a function of photon energy in the case of FGD-3B type Fluorimeter.

— new spherical capsule dosimeter response divided by 1.6
 absorbed dose of an average bone marrow

Fig. 8. Response of new spherical capsule dosimeter divided by 1.6 as a function of photon energy in the case of FGD-6 type Fluorimeter.

— new spherical capsule dosimeter response divided by 1.6
 absorbed dose of an average bone marrow

6に示した。

ここで、方向依存性をよくするための線量計ガラスの配置はFGD-3B形と6形とはことなり、前者では 8×4.7 mmの砂かけ面が正面に向き、高さが4.7mm、横幅が8mmの状態である。後者では前者のときの配置をそのまま180°廻転した位置が良いことがわかった。線量計ガラスFD-3をこのように配置したときに得られるエネルギー依存性曲線をFGD-3B形、FGD-6形について夫々図7、8に示す。ただし図の実線はrad/Rで求めた（ここでradは男子生殖腺のradである）個人被曝

線量計のよみに $1/1.6$ をかけたものである。又図には点線で平均赤色骨髓の吸収線量のエネルギー依存性曲線(図4のもの)を示した。

この実験によって次の三つのことがわかった。(1)試作パッチケースは目的に合っている。(2)線量計ガラスはFD-1ガラスでもFD-3ガラスでも実用上同じに目的を達する。(3)線量計ガラスの配置をパッチケース内であればFGD-3B形と6形との測定器による違いは実際上無視できる。

ファントムを回転して曝射したときは、新しいガラス線量計のよみは図2の男子生殖腺のレスポンスに近いレスポンスを示すことは確実である。従って、このときは、 $\pm 25\%$ の範囲で平均赤色骨髓、卵巣、胃腸管粘膜、水晶体、男子生殖腺の吸収線量を与える。

4 討論と結論

診断用X線装置又はプルトニウム核燃料を取扱わないところ、即ち ^{60}Co 、 ^{137}Cs 等の γ 線源を取扱うところや原子力関係では、最も低いエネルギーの散乱線でも45 keV以上であり、45 keV以下のものは無視できる。

従ってこのような事業所ではこの新しい線量計があてはまる。この方法の特徴は簡単でコストがかからずに各臓器の吸収線量が出せるということである。

一般に作業者は線源に向って仕事をし、男子生殖腺、胃腸管粘膜、水晶体の臓器は身体前面部にあるから、前面曝射に対して男子生殖腺の吸収線量で校正してあるこのガラス線量計のよみは“安全側”にあるといえる。そして前面ならば $\pm 80^\circ$ の入射方向に対して適用できる。

なおこの線量計は20 mm厚の軟組織でおおわれた男子生殖腺の吸収線量を示すように校正されており、45 keV $\sim$ 1.25 MeVのエネルギー領域でいえば、図4で見るように後方散乱の影響をとり入れた本ガラス線量計は、前面曝射に対して、後方散乱をとりのぞいた表面線量を測定している我が国における現行のフィルム線量計のレスポンスより大である。即ちこの新しいガラス線量計の方がフィルム線量計よりも前面曝射に対して“安全側”に

ある。

結論として、FGD-6形又は3B形測定器と、試作パッチケースと標準ガラスFD-3ガラスを用いて、標準日本人の寸法のファントムの胸に1 cmはなしたところにおいて、正面から曝射し、そのレスポンスを男子生殖腺の吸収線量で校正しておけば、その値は45 keV $\sim$ 1.25 MeVのエネルギー範囲で、正面に対して $\pm 80^\circ$ の入射方向に対して、エネルギーに関係なく即ちエネルギーを求める必要なく、男子生殖腺の吸収線量を与える。これは又、水晶体、胃腸管粘膜、皮膚の吸収線量をも $\pm 5\%$ 以内であたえる。この線量計のよみを $1/1.6$ 倍すれば平均赤色骨髓と卵巣の吸収線量が得られる。

ガラス線量計が再測定可能でそのまま年積算線量が求まるのと、良い精度や特性や低いコストと結びついて、放射線防護のための個人被曝線量計として、今までの個人被曝線量計よりもよりよい線量計であるといえよう。

参考文献

- 1) Recommendations of the ICRP Publication 9, Pergamon press, Oxford (1965)
- 2) H. J. Delafield, Phys. Med. Biol. 11, 63(1966)
- 3) E. Piesch, "Radiation Dose measurements", ENEA symposium, Stockholm, 1967, p. 151-170.
- 4) R. Yokota, S. Nakajima and H. Sakai, Health phys., 5, 219 (1961); R. Yokota, S. Nakajima and H. Osawa, Toshiba Review (Oversea Edition) Spring, p. 41 (1962); R. Yokota, and S. Nakajima, Health Phys 11, 241 (1965); R. Yokota and S. Nakajima, Int. Conf. Lum. Dosimetry, Stanford, 1965
- 5) A. R. Jones, AECL-2240; Health Phys 12, 663 (1963)
- 6) R. A. Facey, Health Phys. 14, 557 (1968)
- 7) E. Piesch, Health Phys. 13, 759 (1967)
- 8) R. Maushart und E. Piesch, 1st Int. Cong. Rad. Protection, Rome, 1966