中性子の線量評価をめぐる最近の話題

加藤 和明*

(1986年 2月10日 受理)

Current Topics on Neutron Protection Dosimetry

By Kazuaki KATOH

Reviews are given on the following two topics: (1) ICRP's recent recommendation of increasing the quality factor for neutrons by a factor of two, and (2) newly introduced four quantities in the ICRU Report 39.

KEYWORDS: *neutrons, dosimetry, new dose concepts, quality factor, radiation protection, ICRU, ICRP, review, dose equivalents*

このところ、放射線防護の観点から中性子の線量評価に関心を持つ者には見逃すことのできないニュースが相次いでいる。中性子の線量評価は往々にして放射線計量(radiation dosimetry)の基礎論と深いかかわりを持つので、この観点からも重要である。

- (1) 1985年2月に ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements, 国際放射線単位測定委員会) は Report 39 として「外部放射線源に起因する線量当量の決定」を発表し、放射線防護の実務に使用する量として新たに4つの線量概念を導入した⁽¹⁾⁽²⁾。
- (2) 1985年3月に ICRP (International Commission on Radiological Protection, 国際放射線防護委員会) はバリで会議を開き、中性子に対する線質係数をそのエネルギーにかかわらず2倍に引き上げることを決定した⁽³⁾。
- (3) 線質係数の決定法と数値を見直すための検討委員会を ICRP と ICRU が合同で設けていたことと、この委員会が1985年9月に「放射線防護における線質係数」と題する報告書⁽⁴⁾をまとめ、線質係数の定義変更や各種放射線に対する線質係数の勧告値変更を提案していることが明らかになった。本報告書は近々 ICRU から出版されるとのことである⁽⁵⁾。
- (4) 中性子間の線量評価においてこれまで、フルエンス-線量間の換算関係などの技術的データの標準として活用されて来た ICRU Pub. 21 の改訂版⁽⁶⁾がまとまり、近々刊行される運びとなった⁽⁶⁾(医療

に関する分はすでに ICRP Publ. 35 として改訂版が刊行済みである)。

- (5) カナダのチョーク・リバーにある原子力研究所の H. Ing らが開発した BDPD (Bubble-Damage Polymer Detector) と呼ばれる、これまでのものと全く異なる新しい方式の中性子線量計が出現^{(17)~(19)}して話題を呼んでいる。

以上のトピックスについて以下に簡単な紹介を試みる(ただし(4), (5)については誌面の関係で次の機会にまわすことになった)。著者のコメントも随意付記される。

I. 線量概念の新顔登場

ICRP の現行の基本勧告は1977年に ICRP Publ. 26 として発表されたもの⁽⁷⁾である。そこでは、線量制限の体系を実効線量当量、眼の水晶体に対する線量当量、皮膚に対する線量当量という3種類の量(これを ICRP では specified dose equivalents と呼んでいる)で記述している。

困ったことに、実効線量当量は直接測定の対象となり得ず、また評価すべき量が3種類もあるということとは簡便を旨とする放射線管理の現場には馴染まない。

実効線量当量の“実務用代用品”としては当初線量当量指標が考えられたが、加算性の欠陥などといった致命的な欠陥が明らかとなり⁽⁸⁾、ICRU としてはより優れた代用品探しを余儀なくされていたのであった

* 高エネルギー物理学研究所(KEK-Nat'l. Lab. for High Energy Phys.)

が、今回それへの解答が見付かって Report 39 でのお披露目となった次第である。関連して同時に、実効線量当量と皮膚の線量当量がそれぞれ ICRP の設定した限度(それぞれ年間 50 と 500 mSv)を超えなければ、通常眼の水晶体の受ける線量当量が ICRP の年限度(150 mSv)を超えることがないと結論し、ICRU はこの報告書で4つの新しい線量概念を導入した⁽¹⁾。

4種類を必要としたのは、空間監視用と個人監視用の区別をした上で、実効線量当量を近似的に表現する量と、皮膚に対する線量当量を近似的に表現する量とを求めたからである。これらをマトリックス構造で示せば第1表のようになる。漢字で書いたのは著者の試訳である。

第1表 ICRU Rep. 39 で導入された
4種の新しい線量概念

用途	近似の対象	
	実効線量当量	皮膚の線量当量
環境監視	囲繞線量当量($H^*(d)$) ambient dose equivalent	指向線量当量($H'(d)$) directional dose equivalent
個人監視	透過個人線量当量($H_p(d)$) individual dose equivalent, penetrating	表層個人線量当量($H_s(d)$) individual dose equivalent, superficial

() 内は記号で、 d は標準ファントム“ICRU の球”⁽²⁾の主軸上の深度を表す。

4つの新量の中で特に重要なのは H^* (ambient dose equivalent)である。人の立入りできる空間が放射線の場合であるとき、その強度を空間の hazard index として表現するのに、人がその場所に(ある時間)存在したとしたら受けるであろう実効線量当量を評価することが(ICRPの1977年勧告⁽³⁾を導入する上で)必要となる。これを実際に実行する方策として、「ICRUの球を持ち込み、中心軸上表面から1 cmの深さの点で線量当量を測定し、その値を(実効線量当量に代わる量として)用いる」ことを決めたという訳である。

測定は空間の1点(ICRU 球の中心?)で行われ、一方、実効線量当量は空間中にかなりの容積を占めかつ動き回る人体についてのものであるが、ICRUは今回、1点で測定した放射線場(と同じ強度、性質の場合)に全身が浸される“放射線場拡張(expanded field)”の仮定と、放射線の到来が1方向からのみでない場合には1点に到来する(4 π 方向からの)放射線が1方向から入射するものと見なす“一線配列(aligned field)”の仮定を導入して割切ることになっている。

皮膚についての hazard indexとして用いる $H'(direc-$

tional dose equivalent)については expanded fieldのみを仮定して aligned fieldの仮定は入れないことにしている。

H_p , H_s (individual dose equivalent)は個人被曝線量計で測定されるべき量として導入されたものであるが、較正はICRUの球で行なってよいとされている。

H^* や H' を用いることでの割切りが耐え難い誤差をもたらす場合や、高エネルギー放射線の場合には、場の解析を行うなど別の方策によるべしと謳ってある(第1図)。

The ratio of effective dose equivalent, H_E , for different orientations of an anthropomorphic phantom, to the ambient dose equivalent, $H^*(10)$, when exposed to the same neutron beam, as a function of neutron energy (Burger et al., 1984). The beam, without the phantom in it, is parallel and unidirectional and its fluence is constant over the volume to be occupied by the phantom. The ratios for a stationary anthropomorphic phantom are indicated by diamonds ($\diamond$) when the radiation is directed in the anterior-posterior direction (sometimes called AP irradiation) and by circles ($\circ$) when the radiation is directed in the posterior-anterior direction (sometimes called PA irradiation). The ratios obtained when the radiation beam is horizontal and the anthropomorphic phantom is rotated about a vertical axis (sometimes called rotational irradiation) are indicated by triangles (Δ). The ratios obtained when the anthropomorphic phantom is rotated about vertical and horizontal axes so that it receives an equal fluence from all directions (sometimes called isotropic irradiation) are given by squares ($\square$).

第1図 中性子線に対する実効線量当量と
囲繞線量当量との比較⁽¹⁾

Ⅱ. 中性子に対する線質係数の変更

線質係数(quality factor)は線量当量を得るために吸収線量に乗ぜられるべき荷重係数で、その値は吸収線量をもたらす荷電粒子の線エネルギー付与(linear energy transfer, LET)の関数として与えられている⁽¹²⁾。

中性子線は間接電離放射線であり、吸収線量に寄与する荷電粒子は電子(光電効果により生成される光電子やコンプトン効果により散乱される反跳電子など)と陽子(反跳水素原子核)と重イオン(水素以外の反跳核)であるから、中性子に対する線質係数というときには実効的な値を意味する。

第2図 中性子に対する実効線質係数, すなわち線量当量が最大値を与える場所での線量当量値を吸収線量値で除したものの⁽¹¹⁾, 曲線は ICRP による勧告値を示す。

現在使用されている中性子の実効線質係数は、幾何学的形状および素材の原子構成を単純化した人体模型について、各部位における吸収線量と(定義に忠実に求められた)線量当量をモンテカルロ計算で求め、線量当量の最大値を与える位置での両者の比を採るか、両者の比の体内分布を求めてその最大値を採るかしたものである。ICRP Publ. 21に記載されている実効値は前者である(第2図)。

このような背景の中で、ICRP は1985年3月にパリで開いた会議で「中性子に対する線質係数をエネルギーにかかわらず現在使用中のものの2倍に引上げる」ことを勧告することとし、声明の形でこれを発表した⁽⁹⁾。

人体は水素を多量に含むので、人体に入射した高速中性子は体内で減速されて究極的に水素に捕獲されるものも多い。この際放出される“捕獲γ線”も“中性子線量”の主要成分の一つである。したがって、LETの関数として規定されている線質係数の定義をそのままにして中性子に対する実効値のみを変更するというのは、systemとしてのlogicを破壊してしまうことになる。このような訳でICRPのこの勧告はdosimetryの基礎論を専攻する専門家に大きな衝撃を与え、轟々たる非難を浴びることになってしまった。

“主委員会(Commission)はもっと慎重であるべきだった。4つある専門委員会(Committees)のいずれにも諮らずに急にこのような勧告を出したのは遺憾である”。

“ $Q \equiv Q(L)$ を変えると論理に矛盾を来すから、 $H \equiv Q \cdot N \cdot D$ の中で Q でなしに N を変えるのだということにしては?”

“ICRPは面子にこだわらず今回の勧告を撤回した方が良い”, 等々。

ICRPが今回の新勧告の根拠としているのは“試験管内の細胞に対する種々の影響と二十日ネズミ(マウス)の寿命短縮にかかわる生物学的効果比(RBE)についての新しい実験的知見”であるが、人間の身体は物理的サイズとして遙かに大きく、放射線に高い感受性をもつ幾つかの器官・部位はその中に埋設された形になっているのであって、同じ中性子線の場合においても、これらの部位におけるdoseの大きさや質は試験管内細胞や二十日ネズミの体内に与えられるdoseとは大きく異なるのが普通である。この点にも著者は疑問を覚えるものである。

論理の破綻ではないかという批判に対してICRPは線質係数の定義を変更するという事で答えようとしていることがその後明らかになった。それは、LETに代えて新たにmicrodosimetricな量としてICRUが導入している線エネルギー(lineal energy)⁽¹²⁾を変数に採りこれでもって線質係数を定義しようというものである。第3図に示すのが現在使用されている定義、第4図に示すのがICRU/ICRP合同のTask Group(委員長 H.H. Rossi 教授)が提唱している新定義である。

線エネルギー y というのは、微小物体を横切る荷電粒子がその通路に沿ってdepositして行くエネルギー

第3図 L_0 の関数として定義された
現行の線質係数⁽¹¹⁾

γ としてはICRU組織等価物質でつくられた
直径1 μm のQ値を使う。

第4図 新しく勧告された線エネルギー
 γ の関数としての線質係数⁽⁴⁾

の平均であり、Task Group が線質係数の定義に用いている微小物体は直径 1 μm の球状組織等価物質である*。現行の定義にある LET は水中の値が用いられることになっているが、今回は敢えてこれをICRUのTE (tissue equivalent) といわれる物質に変更した。

第4図から光子線、 α 線および中性子線に対する線質係数をエネルギーの関数として与えることができ(第5～7図)、これらから第2表に示すような勧奨値を導き出した。比較のため現在使用されている値を第3表に示す**。

ともあれ、ICRP の Commission は使命感に燃え、重要度の高い中性子についてのみ取りあえず倍増を勧告しておこう、ということになったものと思われる。

線質係数の LET による現行の規定は、今から30年以上前の1954年のICRP勧告⁽¹⁸⁾において初めてなされたものである(第4表)。表に見るように放射線の種類ごとにマチマチの効果(影響)が選ばれてこの係数が決められているのである。今日放射線防護の分野にと

第5図 荷電粒子平衡条件下の光子に対する
実効線質係数 $\bar{Q}$ の勧告値⁽⁴⁾

第6図 α 粒子の全飛程にわたる実効
線質係数 $\bar{Q}$ の勧告値⁽⁴⁾

参照放射線としてのX線エネルギー
には真電圧を採用。

第7図 荷電粒子平衡条件下にある
中性子に対する実効線質係
数 $\bar{Q}$ の勧告値⁽⁴⁾

* 直径 d の球を at random によぎる粒子の通路長の平均は $(2/3)d$ となる。

** 熱中性子に対しては今度出るレポート⁽⁶⁾で従来の2.3を3.5に変更する予定。

第2表 実効線質係数の受容近似値⁽⁴⁾

γ -rays > 0.5 MeV	0.5
Electrons > 100 keV	0.5
X-rays with mean energy between ~30 and 200 keV	1.0
Tritium β -rays†	2.0
Neutrons, with energy between 0.1 and 1 MeV and fission neutrons	25
Protons and heavier ions	25
α -particles from radionuclides	25

† 第7図に基づく

って最も重要な効果は“確率論的 (stochastic) な影響”であり、反応としては放射線(間接電離放射線の場合は2次の荷電粒子線)とDNA(デオキシリボ核酸)との相互作用である。放射線の線質に依存する荷重係数の決定にはこの効果のみに着目して行なってよいのではなからうかというのが著者の考えである(ICRPはそも

第4表 1954年のICRP勧告における線質係数(当時はRBEで表現)の規定⁽¹³⁾

(a) RBE 値

Radiation	R.B.E.	Biological effect
X rays, γ rays and electrons and β rays of all energies	1.0	Whole-body irradiation (blood-forming organs critical)
Fast neutrons and protons up to 10 MeV	10	Whole-body irradiation (cataract-formation critical)
Naturally occurring α -particles	Compare with 0.1 μ Ci Ra, otherwise = 10	Carcinogenesis
Heavy recoil nuclei	20	Cataract formation

(b) RBE 値

<p>The following values of R.B.E. for all the critical organs according to the value of the average specific ionizations occurring in the critical organ in which it is highest, are recommended for the determination of permissible tissue doses in rads from external sources by the relation:</p> <p style="text-align: center;">Permissible dose in rads = $\frac{\text{Permissible dose in rems}}{\text{R.B.E.}}$</p> <p>The specific ionization is expressed in ion pairs per micron of water in terms of its air equivalent.</p> <p>R.B.E. is expressed in terms of the pertinent biological effectiveness of ordinary X rays taken as one (average specific ionization of 100 ion pairs per micron of water, or linear energy transfer of 3.3 keV per micron of water).</p> <p>1. X rays, electrons and positrons of any specific ionization R.B.E. = 1</p> <p>2. Heavy ionizing particles</p>		
Average specific ionization (ion pairs per micron of water)	R.B.E.	Average linear energy transfer to water (keV per micron)
100 or less	1	3.3 or less
100 to 200	1 to 2	3.3 to 7.0
200 to 650	2 to 5	7.0 to 23
650 to 1500	5 to 10	23 to 53
1500 to 3000	10 to 20	53 to 175

For practical purposes, an R.B.E. of 10 is applicable to fast neutrons and protons up to 10 MeV and an R.B.E. of 20 to heavy recoil nuclei for whole-body irradiation and the most sensitive critical organs. (See report of Sub-Committee IV and V.)

第3表 各種放射線に対する実効線質係数の(現行の)勧告近似値⁽⁷⁾

Type of radiation	Approximate value of Q
X-rays, γ -rays and electrons	1
Thermal neutrons	2.3
Neutrons, protons and singly-charged particles of rest mass greater than one atomic mass unit of unknown energy	10
α -particles and multiply-charged particles (and particles of unknown charge) of unknown energy	20

そも単一の dose による放射線防護の体系づくりは諦め、眼の水晶体や皮膚に対する管理基準を別枠にしているのであるから)。そのような観点から見れば、上記の直径 $1\mu\text{m}$ の組織等価物質というのはいかにも大き過ぎる(DNAの大きさは1nm程度である)。Task Groupが $1\mu\text{m}$ の系を採用したのはそれが測定できる実際上の限界だからであると思われるが、 γ のスペクトルは系の大きさに大きく依存することを忘れてはならない。

今度の Task Group の報告書は H.H. Rossi 教授の強力な指導力の下に作成されたものと思われるが、これが現時点で我々が採択すべき最善の選択であるとはどうも著者には思われない。第7図のカーブが試験管の中での生物実験の結果(第8図)と良く似ているからといって、これだけで万人を納得させる根拠にはなり得まい。線量を受けるべき物体が放射線の場に持ち込まれることにより場が乱される程度は、人体の方が比較にならないほど大きいというのがその理由の一つである。しかしながら、種々の生物学的効果が低線量域に近づくほど生物効果比(RBE)が増大するという知見

第8図 直径 $1\mu\text{m}$ の Q における $\bar{y}^*$ (γ^* の線量平均値)と、豆の根の生長阻害とハムスター細胞の不活性に対する生物効果比を中性子エネルギーの関数として表わしたもの⁽⁴⁾

(第5表, RBE_M は低線量領域で見られるRBEの最大値)は軽視できず, その限りではICRPの今回の措置は心情的に理解できるといわざるを得ない。

第5表 分割されて照射された7線と比較した時の核分裂中性子の最大RBEの値⁽⁴⁾

Tumor induction	~3~200
Life shortening	45-45
Transformation	35-70
Cytogenetic studies	40-50
Genetic endpoints in mammalian systems	10-45
Other endpoints	
Lens opacification	25-200
Micronucleus	6-60
Testes weight loss	5-20

ICRPは昨1985年に構成員のreshufflingを行なった。新委員の任期は(Commission, Committeeともに)89年までとされており, 線質係数の見直しは, 77年の基本勧告(Publication 26)の見直しの一環として検討を続け, 89年までに結論を出すことになっていると聞く。

—参考文献—

- (1) Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, *ICRU Report* 39, (1985).
- (2) 加藤和明: ICRU報告書39「外部放射線源に起因する線量当量の決定法」の要点, 保物誌 21, 27~31 (1986).
- (3) 国際放射線防護委員会の1985年パリ会議の声明, *Isotope News*, 1985年7月号, 16~17, 日本RI協.
- (4) The Quality Factor in Radiation Protection, Recommendations of the ICRP-ICRU Task Group on Radiation Protection Quantities, (1985).
- (5) ICRPの最近の活動, *Isotope News*, 1986年1月号, 22.
- (6) Data for Use in Protection against External Radiation, *ICRP Publ.* シリーズの1冊として1986年春刊行の予定.
- (7) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *ICRP Publ.* 26, (1977).
- (8) 加藤和明: 放射線の量と単位に関するICRU勧告, その過去, 現在及び未来, *Radioisotopes*, 32, 127~134 (1983).
- (9) 同上: 中性子線量当量の意味, 原子力誌, 21(8), 631~636 (1979).
- (10) Microdosimetry, *ICRU Rep.*, 36, (1983).
- (11) Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources; Supplement to ICRP Publ. 15, *ICRP Publ.* 21, (1971).
- (12) A Compilation of the Major Concepts and Quantities in Use by ICRP, *ICRP Publ.* 42, (1984).
- (13) Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, *Br. J. Radiol.*, Suppl. No. 6, (1955).
- (14) APFEL, R.E.: The superheated drop detector, *Nucl. Instrum. Methods*, 162, 603~608 (1979).
- (15) APFEL, R.E., ROY, S.C.: Investigations on the applicability of superheated drop detectors in neutron dosimetry, *ibid.*, 219, 582~587 (1984).
- (16) *idem*: Superheated drop detector; A possible alternative for fast neutron dosimetry, *Radiat. Protection Dosimetry*, 10, 327~330 (1985).
- (17) ING, H., BIRNBOIM, H.C.: A bubble-damage polymer detector for neutrons, *Nucl. Tracks*, 8, 285~288 (1984).
- (18) *idem*: Bubble-damage polymer detectors for neutron dosimetry, Presented at Fifth Symp. on Neutron Dosimetry, Neuherberg, West Germany, Sep. 17~21, 1984.
- (19) *idem*: Properties of bubble-damage polymer detectors, Paper presented at Symp. on Personal Radiation Dosimetry, Knoxville, Tennessee, USA, Oct. 15~18, 1984.

○高エネルギー物理学研究所○

教 官 公 募

公募人員 (A) 教授1名, (B) 助手1名 (各任期なし)

職 種 放射線安全管理センター

研究分野・内容

(A) 本研究所の放射線安全管理業務を掌理する。

加速器に関連する放射線防護および放射性同位元素の取扱について十分な学識と経験があり, 放射線取扱主任者(第1種)の資格を有していること。

(B) 放射線安全管理業務に従事する。管理区域責任者として区域管理をすることを主な業務とし, 併せて関連する技術開発研究を行う。

放射線取扱主任者(第1種)の資格を有することが望ましい。

提出書類 ①履歴書(履歴事項のあとに①応募する研究系(施設)および職種(2つ以上の場合はその順位), ②可能な着任時

期を明記), ②研究歴, ③発表論文リスト(和文と英文は別業とすること。共著の論文については共著者名をすべて記入する), ④論文別刷, ⑤本人に関する推薦書または2名以上による参考意見書(健康に関する所見を含む)

(上記の書類は, 履歴書用紙を除きすべてA4判横書きとし, それぞれ別業にする。なお, 各業に氏名を記入する。)

公事締切 昭和61年6月30日(月)必着

書類送付先 (〒305)茨城県筑波郡大穂町上原1-1

高エネルギー物理学研究所長 西川哲治

(封筒の表に「教官公募関係」と朱記し, 郵送の場合は書留とする) 問合せ先

①研究分野・内容等については,

放射線安全管理センター長 加藤和明(内線3501)

②提出書類については, 管理部庶務課人事第二係(内線3026) (0298-64-1171(代))

着任時期 採用決定後できるだけ早い時期。