実効線量当量と性別・年齢別リスク荷重線量当量の 関連に関する考察

占 部 逸 正^{*1}(1985 年 12 月 5 日受理)
(1986 年 5 月 17 日再受理)

Study on a Relation between Effective Dose Equivalents and Risk Weighted
Dose Equivalents Depending on Age and Sex

Itsumasa URABE^{*1}

KEY WORDS : effective dose equivalent, organ or tissue dose, dose equivalent limits, stochastic risk, weighting factor, photon energy spectrum

I 序

放射線被曝によるリスクの表現体としての実効線量当量は、線質の異なる放射線による被曝をひとつの線量概念で評価できるとともに全身被曝と局所被曝を統一して把握できる量であり放射線防護上きわめて有効な概念である¹⁾。しかし同時に実効線量当量を求める際の確率的影響に関するリスクの荷重係数には、各個人について差異のあることを認めながらも、すべての年齢、両性に同一の値を採用しているため、特定の個人のリスクを表現する量としてとらえると大きなあいまいさを伴ったものとならざるをえない。

放射線作業従事者個々の生涯を通じた被曝の状況はきわめて多様で、これらをすべて考慮することは一般に不可能である。しかし実効線量当量がリスクの表現体として導入された量であることを考慮すると、個人についてもできるだけ実際のリスクを考慮した被曝管理の方法を採用することにより、(1)個人の状況を反映した安全性の高い作業計画の立案が可能となることや、(2)放射線作業に従事した期間のリスクの積算が可能となることなど安

全管理の信頼性や合理性を飛躍的に向上させることができる。

実効線量当量と被曝した個人のリスク間のあいまい性から生じる危険を最小限にするための実務的な方法として、認定限度などの防護基準を十分低くおさえることも考えられるが、とくに変化の著しい性別・年齢別のリスク荷重線量当量を評価し、これを安全管理の実務に反映することも最適化の観点から重要である。またこの方法は、あるひとつの被曝集団に対し、性別・年齢別に与えられたリスク荷重線量当量に基づく集団線量当量の評価を可能にすることからも検討に値するものと考えられる。

最近 D. BENINSON と D. SOWBY²⁾ は医療上の被曝を実効線量当量と比較するために ICRP 報告³⁾に基づいて確率的影響の性別・年齢別リスク係数を提案している。このリスク係数を使用した線量当量は、多くの不確定さを有しつつも性別・年齢別に分類した個人的状況をいくらかでも勘案した量を与えることができる。ここでは放射線被曝による確率的影響の個々人のリスクを評価するひとつの試みとして性別・年齢別リスク荷重線量当量を定義し、照射線量に対する換算係数(以後、性別・年齢別リスク荷重線量当量換算係数と呼ぶ)を照射条件を考慮し決定した。さらに実際のガンマ線場で作業者の年齢・性によるリスク荷重線量当量の変化の特徴を調べ、放射線作業従事者の年齢別構成⁴⁾に基づいて得られるリス

^{*1} 京都大学原子炉実験所放射線管理研究部門; 大阪府泉南郡熊取町野田 (〒590-04)
Division of Radiation Protection, Research Reactor Institute, Kyoto University, Kumatori-cho, Sennan-gun, Osaka-fu 590-04.

ク荷重線量当量の平均値と ICRP の勧告したリスクの荷重係数¹⁾に基づいて得られる実効線量当量との関連を検討した。

II 性別・年齢別リスク荷重線量当量の評価法

実効線量当量 (H_E) はよく知られているように各種臓器・組織の線量当量 H_T に確率的影響のリスクの全体のリスクに対する割合をしめす荷重係数 w_T を乗じて得られる。

$$H_E = \sum_T w_T \cdot H_T = \sum_T w_T \cdot D_T \cdot Q \cdot N \quad (1)$$

ここで D_T は臓器 T の吸収線量, Q は線質係数, N は照射条件などの修飾因子で ICRP は現在これを 1 としている。

性別・年齢別に分けた場合の i グループに属する個人のリスク荷重線量当量 (WDE_i) は, 荷重係数の取扱いが異なるだけで実効線量当量と同様の考え方に従って得ることができる。

$$WDE_i = \sum_T p_{iT} \cdot H_{iT} = \sum_T p_{iT} \cdot D_{iT} \cdot Q \cdot N \quad (2)$$

ここで p_{iT} は D. BENISON と D. SOWBY の示した ponderation factors で各年齢の臓器別リスク係数を ICRP の与えた放射線防護のための全身均等被曝のリスク係数で除した量である。ガンマ線による外部被曝の場合, D_{iT} はしばしばグループ i についてそれほど大きく異ならないことを仮定し, あるエネルギー領域 j のガンマ線による単位照射線量に対する臓器吸収線量換算係数 d_{iTj} (以後, 臓器吸収線量換算係数と呼ぶ) を用いて決定される。またこの場合 $Q=1$ となるためリスク荷重線量当量は照射線量 E_j と

$$WDE_i = \sum_j \sum_T p_{iT} \cdot d_{iTj} \cdot E_j = \sum_j f_{ij} \cdot E_j \quad (3)$$

の関係で示される。ここで f_{ij} はエネルギー領域 j のガンマ線に対する性別・年齢別リスク荷重線量当量換算係数である。

体外のガンマ線に対する臓器吸収線量の研究は数多く行われ⁵⁻¹²⁾, 日本人を対象としたものもいくつか報告されている^{5,6)}。神永らはとくに生殖腺に対する吸収線量を与え, 丸山らは実効線量当量の評価を意図して多くの臓器を対象として吸収線量の評価を行っている。ここではおもに後者の結果に基づいて臓器吸収線量換算係数を決定した⁶⁾。丸山らは放射線作業従事者のフィルムバッジの読取り値から実効線量当量を推定するために, 0~1.25 MeV のエネルギー領域で換算係数を得ているが, ここでは原子炉施設周辺で ~10 MeV のエネルギー領域の換算係数を必要とするため丸山らの結果を KRAMER と

DREXLER⁷⁾ や JONES ら¹¹⁾の結果を参考に 10 MeV ままで外挿した。また前方照射条件で, しかも $\pm 45^\circ$ の上下方向からの入射を考慮した場合の臓器吸収線量換算係数は文献⁶⁾に与えられた結果から同じ文献に示されたフィルムバッジの感度補正をしてこれを決定した。性別・年齢別リスク荷重線量当量換算係数を決定するために考慮した臓器は, 生殖腺, 乳房, 骨髄, 肺, 甲状腺, 骨表面およびその他の臓器で, 骨表面は低エネルギー光子にたいする応答に問題が残るが赤色骨髄で代用した。またその他の臓器としては, 胃, 小腸, 大腸, 肝臓, すい臓を選んだ。

得られた性別・年齢別リスク荷重線量当量換算係数を実際の放射線作業環境での線量当量の評価に応用し, その年齢による変化の特徴を調べるための一例として, 京大原子炉実験所に設置された研究炉が 5 MW で運転されているときの比較的広いエネルギー範囲を有する原子炉室内ガンマ線エネルギー分布を使用した。ガンマ線エネルギー分布の測定には, 直径 7.6 cm, 長さ 7.6 cm の結晶を有する NaI(Tl) 検出器を使用し, 得られた波高分布から真のガンマ線エネルギー分布を評価するための応答関数は文献¹³⁾の 0~9.2 MeV のエネルギー領域のものを使用した。

III 結果および考察

照射線量対リスク荷重線量当量換算係数を性別・照射条件別に Fig. 1~4 に示す。図の縦軸は臓器の線量当量に ponderation factors を乗じて得られる性別・年齢別リスク荷重線量当量を照射線量で除したリスク荷重線量当量換算係数を示す。図中のパラメータは, 年齢を表わ

Fig. 1 Risk weighted dose equivalent, WDE (Sv) per unit exposure in free air (0.87 Gy in air), frontal whole body irradiation. Numbers show the age.

Fig. 2 Risk weighted dose equivalent, WDE (Sv) per unit exposure in free air (0.87 Gy in air), isotropical whole body irradiation. Numbers show the age.

Fig. 3 Risk weighted dose equivalent, WDE (Sv) per unit exposure in free air (0.87 Gy in air), frontal whole body irradiation. Numbers show the age.

し、上から順に 15, 25, 35, 45 および 55 歳の結果を示す。それ以上はさらに小さくなるので省略した。図のリスク荷重線量当量換算係数の精度は、ponderation factors を固定して考えると各臓器の吸収線量換算係数の精度に依存し、1 MeV 以下のエネルギー領域で $\pm 20\%$ 、1 MeV 以上の高エネルギー側で $\pm 10\%$ 程度の誤差を含むものと考えられる。とくに前者では照射条件によって換算係数が大きく異なり単一の係数を使用すること自体大きい誤差を伴うものと思われる。

Fig. 1, 3 に示した前方照射条件におけるリスク荷重線量当量換算係数では、いずれの場合にも年齢が若いほどより大きなエネルギー依存性を示す。これらは、男性の場合生殖腺に対する荷重係数の寄与が大きいことに、

Fig. 4 Risk weighted dose equivalent, WDE (Sv) per unit exposure in free air (0.87 Gy in air), isotropical whole body irradiation. Numbers show the age.

女性の場合おもに乳房に対する荷重係数の寄与が大きいことに起因している。また若い女性の場合、光子のエネルギーが高くなるにしたがい換算係数が大きくなる傾向が著しいが、これはおもに生殖腺に対する遮蔽効果が減少したことによるものと考えられる。

Fig. 2, 4 に示す均等照射条件でのリスク荷重線量当量換算係数では、女性の場合乳房の寄与が著しく、男性にくらべ全般にリスク荷重線量当量換算係数が大きくなる傾向にある。換算係数を性別でくらべると最大値の現れるエネルギー位置が少し異なり女性のほうが高くなる傾向にある。また数 MeV の高エネルギー側では照射条件の違いによる差異が小さくなることも明らかである。以上のように換算係数のエネルギー依存性は、各臓器・組織のリスク係数の大きさとともに臓器・組織の生体内での位置に強く依存して得られる。文献3)にも述べているようにここで使用した ponderation factors は、多くの不確定さを残しているが、今後リスク係数の研究が進むにつれこれらの信頼性の向上が期待できるものと思われる。

Fig. 5 に京大原子炉実験所の KUR 炉室内の重水照射設備前で得たガンマ線エネルギー分布を示す。図に示すように炉室内では減速材や構造材との中性子捕獲反応や放射化によるガンマ線あるいは空気放射化によるガンマ線、およびこれらによる散乱線が観測されるのが一般的である。ガンマ線エネルギー分布に基づく空気吸収エネルギー率は $0.51 \mu\text{Gy/hr}$ ($58.4 \mu\text{R/hr}$) である。各年齢のリスク荷重線量当量換算係数を使用してガンマ線エネルギー分布から計算したリスク荷重線量当量を **Fig. 6** に示す。各年齢に対するなめらかな曲線を仮定

Fig. 5 Gamma-ray energy spectrum obtained around the heavy water irradiation facility in the KUR reactor room.

して結んだ。図中の実線および破線は男性の場合の前方照射と均等照射にそれぞれ対応し、一点鎖線および二点鎖線は女性の場合の前方照射と均等照射にそれぞれ対応する。また白丸および四角はICRPの勧告する荷重係数を使用した場合の実効線量当量を示す。ここで男性の場合は乳房の荷重係数を0としている。図の結果から30~33歳前後を境として若年層でリスク荷重線量当量が実効線量当量を上回っていること、またリスク荷重線量当量の年齢依存性は、ponderation factorsの大きさに応じた各臓器・組織の線量当量が考慮されているにもかかわらず、ICRPの与えるリスク係数の年齢依存性³⁾とはほぼ同様の傾向を示していることなどがわかる。しかし同時に図からガンマ線エネルギー分布に極端な偏りがある場合には、これらは多少異なった傾向を示すことも予想される。照射条件別では、女性の場合あまり顕著な差異が認められないのに対し、30歳以下の男性の場合照射条件の違いによる変動幅が広くなりここで設定した照射条件下では、15%程度の差が現れている。

リスク荷重線量当量の年齢依存性のひとつの応用例として性別・年齢別リスク荷重線量当量の平均値と実効線量当量の比較を試みた。京大原子炉実験所では年間300名を超える研究者による共同利用研究が行われている。しかしその作業内容は複雑で作業環境のガンマ線エネルギー分布も多様である。また研究者の年齢分布も現在のところ明かにされていない。したがって放射線場の典型例としてFig. 5の結果を、また研究者の年齢構成比をわが国の研究・教育に従事する放射線作業者の年齢分布⁴⁾と同一のものと仮定して年齢別リスク荷重線量当量

Fig. 6 Variation of risk weighted dose equivalent rates (WDER) as a function of age of a worker. Solid and broken lines show the frontal and isotropical irradiation for male, respectively, and upper and lower chain lines show the frontal and isotropical irradiation for female, respectively. ○ and □ represent the effective dose equivalent rates for male and female, respectively.

の平均値を計算した。Table 1の第5欄に年齢別リスク荷重線量当量の平均値を示す。表の第3欄には照射線量を、第4欄にはICRPの勧告値を使用した場合の実効線

Table 1 Comparison among exposure rates, effective dose equivalent rates and risk weighted dose equivalent rates.

Sex	Condition*	ER ($\mu\text{R/hr}$)	EDER ($\mu\text{Sv/hr}$)	WDER ($\mu\text{Sv/hr}$)
Male	iso.	58.4	0.42	0.37
	fro.		0.46	0.40
	iso.		0.48	0.53
Female	fro.	58.4	0.50	0.56

* iso. and fro. mean isotropic and frontal irradiation conditions.

ER : Exposure rate.

EDER : Effective dose equivalent rate.

WDER : Risk weighted dose equivalent rate averaged over the age distribution of radiation workers.

量当量を比較のために示した。表から男性の場合、実効線量当量がリスク荷重線量当量の平均値より高いのに対し、女性の場合は低くなる傾向にあることがわかる。これらの違いはいずれの場合も実効線量当量の 10% 程度となっており、放射線作業従事者の分布の偏りや臓器・組織のリスクの荷重係数、とくに乳房の荷重係数の取扱いの差異に起因したものと思われる。

以上のように単一の作業環境を仮定した場合のリスク荷重線量当量の平均値と実効線量当量の相違は、10% 程度と比較的近い値となっているが、リスク荷重線量当量と実効線量当量の関連を詳しく知るためにはさらに広範な作業環境におけるガンマ線エネルギー分布情報や放射線作業者の年齢分布情報に基づいた検討が必要である。

IV 結 論

以上の検討の結果つぎの結論が得られた。

- 1) 0~10 MeV のエネルギー領域のガンマ線に対する照射線量対性別・年齢別リスク荷重線量当量換算係数を決定し、原子炉施設周辺環境等でのガンマ線エネルギー分布情報に基づくリスク荷重線量当量の評価を可能とした。
- 2) 全身照射の場合における性別・年齢別リスク荷重線量当量は、原子炉周辺の広いエネルギー範囲を有するガンマ線場で ICRP の示すリスク係数の年齢依存性とはほぼ同様の傾向を示すが、照射条件に極端な片寄りがある場合、とくに 30 歳以下の男性の場合 10 数%程度のばらつきが認められる。
- 3) 研究・教育に従事する放射線作業従事者の性別・年齢別構成に基づくリスク荷重線量当量の平均値と実効線量当量を比較すると、両者の差異は約 10% と比較的小さいが、実際の放射線作業環境の特徴や放射線作業従

事者の年齢分布に基づく詳しい検討が必要である。

参 考 文 献

- 1) ICRP; Recommendations of the international commission on radiological protection, ICRP Publication 26 (1977), Pergamon Press, Oxford.
- 2) D. BENINSON and D. SOWBY; Age and sex dependent weighting factors for medical irradiation, *Radiat. Prot. Dosim.*, **11**, 57 (1985).
- 3) ICRP; Problems of developing and index of harm, ICRP Publication 27 (1977), Pergamon Press, Oxford.
- 4) 千代田保安用品株式会社; 58年度年齢・性別被ばく線量の実態, フィルムバッジニュース, 118号, 11 (1985).
- 5) 神永博史, 熊沢 蕃, 古田敏城, 立田初巳; 外部被曝による単位照射線量あたりの臓器吸収線量の比較検討, 保健物理, **10**, 193 (1975).
- 6) T. MARUYAMA, K. NISHIZAWA, Y. NODA, E. TAKEDA, K. FUKUHISA, Y. FURUYA and T. HASHIZUME; Estimation of population doses and risk estimates from occupational exposure in Japan, 1978 Part 1, Determinations of organ or tissue doses and effective dose equivalents, *J. Radiat. Res.*, **22**, 182 (1981).
- 7) R. KRAMER and G. DREXLER; on the calculation of the effective dose equivalent, *Radiat. Prot. Dosim.*, **3**, 13 (1982).
- 8) M. ROSENSTEIN; Dose equivalent conversion factors for human organs and tissues from

- external radiation, *Int. J. Appl. Radiat. Isot.*, **23**, 1051 (1982).
- 9) G.D. KERR; A review of organ doses from isotropic fields of γ -rays, *Health Phys.*, **39**, 3 (1980).
- 10) K. O'BRIEN and R. SANNA; The distribution of absorbed dose-rates in humans from exposure to environmental gamma rays, *Health Phys.*, **30**, 71 (1976).
- 11) T.D. JONES, J.A. AUXIER, W.S. SNYDER and G.G. WARNER; Dose to standard reference man from external sources of monoenergetic photons, *Health Phys.*, **24**, 241 (1973).
- 12) J.R. JONES; Proposed calibration factors for various dosimeters at different energies, *Health Phys.*, **12**, 663 (1966).
- 13) Y. NAKASHIMA; Study on evaluation of photon spectra and exposure rates in the radiation fields around nuclear reactors, Doctor's Thesis, Nagoya Univ. (1979).