

平成 30 年度原子力規制庁委託成果報告書

実用量及び防護量としての実効線量に係る  
動向調査

公益財団法人原子力安全研究協会  
平成 31 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果を取りまとめたものです。

## まえがき

本報告書は、原子力規制庁の平成30年度放射線対策委託費（実用量及び防護量としての実効線量に係る動向調査）事業の調査結果を取りまとめたものである。

我が国における放射線障害防止に関する技術的基準は、国際放射線防護委員会（ICRP）や国際原子力機関（IAEA）等で国際的に合意された放射線防護の考え方を尊重し、各制度間の斉一を図りながら、策定されてきた。

現在、ICRPでは、国際放射線単位測定委員会（ICRU）と合同で、放射線防護に係る概念である実用量の定義を変更するための検討を進めている。また、ICRP 単独で、同じく放射線防護に係る線量の概念である実効線量の使用に関する問題点の検討を進めている。

放射線防護に係る線量の概念は、我が国だけでなく世界各国で放射線防護の体系に取り入れられ、広く普及しており、これらに変更された場合、各国で法令や規制制度への取り入れに向けた検討が求められることとなる。しかし、我が国においては、これらの概念を取り入れている制度が各省庁にまたがっていることから、制度間の斉一に関する検討が不可欠であり、迅速な検討を行うためには現時点から予備的な検討を行うことが必要である。

本事業は、これらについて内容を精査し、我が国に導入した場合の影響を調査するとともに、影響を受ける関係者の意見を取りまとめ、これらが国際的に勧告された場合の予備的検討を行うことを目的とする。

平成31年3月

公益財団法人 原子力安全研究協会



## 1. 実施概要

以下に本事業の概要を記す。

### 1.1 実用量及び実効線量の概念変更に関する情報収集及び概要作成

下記のICRP/ICRUのレポート（ドラフト版）1件およびICRPのタスクグループのレポート（ドラフト版）2件（パブリックコメントを含む）について、関連する過去の経緯、我が国の制度、関係事業者に影響すると思われる内容を中心にそれぞれ概要図、および概要資料にまとめた。これら3件のレポートは、平成31年3月の時点においても、暫定的なドラフトであり、内容は、今後改訂されて発行される予定であることに注意が必要である。また、概要の作成に当たってはドラフトを邦訳した部分があるが、他のICRPの刊行物の邦訳版に比べて厳密な確認を受けたものではないことにも注意が必要である。

- (1) ICRP/ICRUレポート（ドラフト版）：外部放射線被ばくに関する実用量  
(Operational quantities for external radiation exposure –Joint report of the international commission on radiation units and measurements and the international commission on radiological protection (final draft July 2017))
- (2) ICRP TG79 レポート（ドラフト版）：放射線防護量としての実効線量の使用 (The use of effective dose as a radiological protection quantity (the international commission on radiological protection draft report for consultation, 24 April 2018))
- (3) ICRP TG90レポート（ドラフト版）：環境線源による外部被ばくのための線量係数 (Dose coefficients for external exposures to environmental sources (the international commission on radiological protection draft report for consultation, 5 July 2018))

### 1.2 海外動向に関する調査

1.1の(1)から(3)のレポート（ドラフト版）の内容に関し、海外の関係機関における検討状況を調査し、取りまとめた。調査対象は、国際原子力機関（IAEA）、原子放射線の影響に関する国際科学委員会（UNSCEAR）、国際標準化機構（ISO）、国際電気標準会議（IEC）、欧州委員会（EC）、欧州放射線線量評価グループ（EURADOS）、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）、米国原子力規制委員会（NRC）、米国エネルギー省(DOE)、米国環境防護庁（EPA）、カナダ原子力安全委員会（CNSC）、フランス原子力安全局（ASN）、ドイツ放射線防護委員会（SSK）、アイスランド放射線安全委員会（IRSA）及び韓国原子力安全技術院（KINS）である。調査は、国内で上記の機関の担当者、委員等として活動している者からヒアリングを行い、最新の検討

状況を把握した。

### 1.3 実用量及び実効線量の概念変更に伴う我が国への影響に関する整理

1.1の資料の内容を踏まえ、これらの内容が我が国の放射線防護の法体系に導入しようとした場合、制度面での対応の要否（関係法令においてどのような対応が必要となるのか）及び許可届出使用者（放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律（昭和32年法律第167号）第15条第1項の許可届出使用者をいう。）、個人線量測定機関その他の関係者の運用上の影響について、整理した。

### 1.4 実用量及び実効線量の概念変更の導入に当たっての課題に関する整理

当事業を的確かつ円滑に推進することを目的として、下記に示す放射線防護に関する専門的知見を有する学識経験者等で構成する検討会を設置した。

#### 検討会 委員構成

平成31年3月現在（敬称略、順不同）

委員長	小田 啓二	国立大学法人神戸大学大学院海事科学研究科教授
委員	黒澤 忠弘	国立研究開発法人産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門グループ長
〃	小口 靖弘	個人線量測定機関協議会 ／株式会社千代田テクノ大洗研究所研究開発課課長
〃	中村 年孝	電気事業連合会 ／関西電力株式会社原子燃料サイクル室 サイクル環境グループマネジャー
〃	吉澤 道夫	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門原子力科学研究所保安全管理部部長

本検討会は、調査期間中に3回開催した。検討会は実用量及び実効線量の概念変更の導入に当たっての課題に関する整理に加えて、1.1から1.3までの業務に基づく情報収集及び概要作成の結果、海外動向、実用量及び実効線量の概念変更に伴う我が国への影響等について、専門的かつ客観的な立場からの助言を行った。この助言を取り入れ、報告書の取りまとめを行った。検討会の開催実績は、以下のとおりである。

#### ①第1回検討会

日時：平成30年11月30日（金） 10:00－12:30

場所：新橋パークサイドビル 6階会議室

議事：

- (1) 平成30年度実用量及び防護量としての実効線量に係る動向調査事業「検討会」の運営と委員長の互選について
- (2) 平成30年度「実用量及び防護量としての実効線量に係る動向調査」の実施内容とスケジュールについて
- (3) 実用量及び実効線量の概念変更に関する概要資料の作成方針について
- (4) 海外動向の調査及び国内関係者における検討状況の調査方針について
- (5) その他

#### ②第2回検討会

日時：平成31年1月28日（月） 13:30－16:30

場所：（公財）原子力安全研究協会 地下会議室

議事：

- (1) 第1回検討会議事録（案）の確認
- (2) 実用量及び実効線量の概念変更に関する概要資料の確認
- (3) 国際機関及び国内機関へのヒアリング内容について
- (4) 課題及び問題点の検討
- (5) その他

#### ③第3回検討会

日時：平成31年3月7日（木） 13:30－16:00

場所：（公財）原子力安全研究協会 地下会議室

議事：

- (1) 報告書について
- (2) その他

## 2. 調査の結果

### 2.1 実用量及び実効線量の概念変更に関する情報収集及び概要作成

ICRP/ICRUのレポート（ドラフト版）1件およびICRPのタスクグループのレポート（ドラフト版）2件（パブリックコメントを含む。）について、関連する過去の経緯、我が国の制度、関係事業者に影響すると思われる内容を中心にそれぞれ概要図と、概要資料（10枚程度）にまとめた。

#### 2.1.1 「外部放射線被ばくに関する実用量」（2017年7月版ドラフト）

# 「外部放射線被ばくに関する実用量」(2017年7月版ドラフト)に関する概要

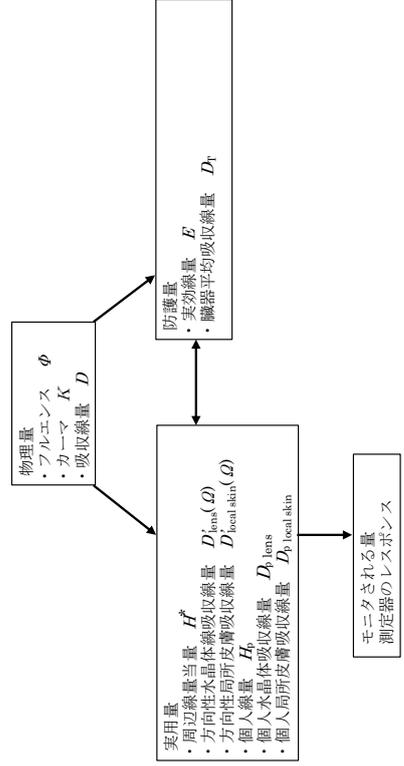
## 背景

### ■はじめに

外部被ばくの放射線防護に用いられる実効線量や等価線量等は実測できないため、測定器で評価可能な実用量が使用されている。近年高エネルギー放射線の利用や宇宙線の被ばくなど高エネルギー領域での被ばくの防護も考慮する必要がある。このような高エネルギー領域において、現行の実用量は実効線量より低く評価され、保守的ではない場合が生じる問題がある。このため、実用量の定義を直接防護量と関連付けるように変更した。

### ■放射線防護のための線量に関する諸量の経緯

国際放射線防護委員会 (ICRP) は、最適化や線量限度などの線量制限を行うために重要な実効線量や等価線量などの防護量を定義してきた。それらの防護量は、実測することはできないので、ICRU は、1985年に測定値での評価が可能な実用量を規定し、現在は、ICRU57(1998年)に示された実効線量への換算係数を用いている。近年高エネルギー放射線の利用が増えたことから、ICRPにより防護量における放射線の種類、エネルギーの拡張が検討されたが、実用量については旧来のままであった。本レポートにおいて、広いエネルギー領域で、対応できる新たな実用量の定義を提案している。



## 概要 1

- 現行と提案された防護量及び実用量  
変更によって、モニタリングに用いる実用量と防護量は以下のように変更される。
- ・ 現在の実用量と防護量

役割	防護量	実用量	
		エリアモニタリング	個人モニタリング
実効線量の管理	実効線量 $E$	周辺線量 $H^*$ (10)	個人線量当量 $H_p$ (10)
眼の水晶体の線量管理	等価線量 $H_{lens}$	方向性線量当量 $H$ (3)	個人線量当量 $H_p$ (3)
局所的な皮膚の線量管理	等価線量 $H_{local skin}$	方向性線量当量 $H$ (0.07)	個人線量当量 $H_p$ (0.07)

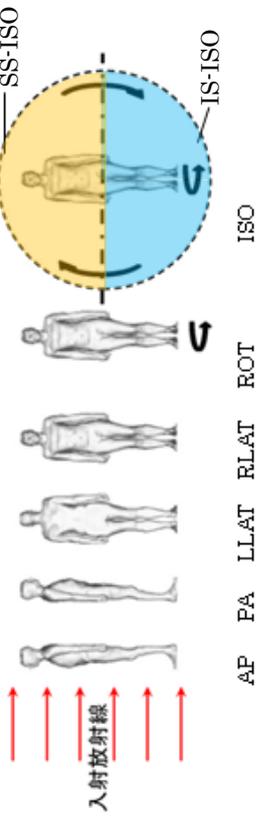
- ・ 新たな実用量と防護量 (  は変更される部分)

役割	防護量	実用量	
		エリアモニタリング	個人モニタリング
実効線量の管理	実効線量 $E$	周辺線量 $H^*$	個人線量 $H_p$
眼の水晶体の線量管理	臓器平均吸収線量 $D_t$ (水晶体における吸収線量)	方向性水晶体吸収線量 $D'_{lens}(\Omega)$	個人水晶体吸収線量 $D_{p lens}$
局所的な皮膚の線量管理	臓器平均吸収線量 $D_t$ (局所皮膚の規定された部分の吸収線量)	方向性局所皮膚吸収線量 $D'_{local skin}(\Omega)$	個人局所皮膚吸収線量 $D_{p local skin}$

## 概要 2

### ■新たな実用量

- (1) 定義：入射する点での測定可能なフルエンス(またはカーマ)と計算で求められる防護量(実効線量や臓器における吸収線量)への換算係数との積で与えられる。
- (2) 周辺線量：エネルギーが  $E_p$  の放射線について、ICRP/ICRU 標準ファントムに示すような様々な照射ジオメトリで照射した場合の実効線量の最大値  $E_{max}(E_p)$  への換算係数とある点に入射するフルエンス  $\Phi(E_p)$  の積。



- (3) 方向性水晶体吸収線量：水晶体における吸収線量と関係付けられる実用量で、入射角度  $\Omega$  の放射線場ある一点の粒子フルエンス  $\Phi$  と、換算係数  $d_{lens}(\Omega)$  との積。

- (4) 方向性局所皮膚吸収線量：局所皮膚における吸収線量と関係付けられた実用量で、入射方向  $\Omega$  の放射線場のある一点のフルエンス  $\Phi$  と、換算係数  $d_{local\ skin}$  との積。

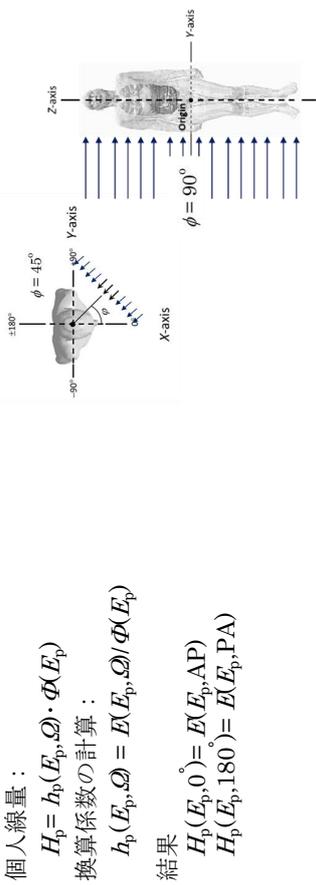
### ■レポートの結論

- ・新たな実用量は、防護量の値に直接関連付けられるため、防護量と実用量の体系を単純化することができ、複雑であった線量に関係する諸量の理解やそれら諸量の一貫性の確立に役立つと考えられる。
- ・ICRP が、標準ファントム、組織加重係数、放射線加重係数等を変更する場合、フルエンスから実用量への換算係数も変化するようになる。係数の改訂の度に実用量の値が変更されると混乱が生じることが考えられる。この問題に対して係数などに有意に大きな変更がない場合については、実用量の換算係数の変更は必要ないとしている。
- ・光子における 70 keV ~ 2 MeV のエネルギー範囲、荷電粒子平衡の状態での電子の 2 MeV ~ 10 MeV のエネルギー範囲については、周辺線量及び個人線量に対する換算係数の値は、現行の定義で与えられているものになり近い。そのままあるいは一律の係数を使用して使用することで、従来の測定器の使用に問題がないことを示唆している。
- ・70 keV 未満のエネルギー線やガンマ線の測定のためのエリアモータおよび個人線量計や水晶体の線量モニタなどについては過剰に大きく見積もることになるため、機器の修正が必要になるとしている。

### 【参考】【パブリックコメントの概要】

- ・導入によって生じる多額のコストの検討がされていない。
- ・換算係数が大きく変わる医療分野への影響や作業員への説明の困難さを指摘
- ・現行規制が Sv で実施されているが、眼と皮膚の評価が Gy に変わることで規制の変更が必要との意見
- ・勧告が理想的な条件で換算係数を提示しているか、実際の場での考慮がない。

- (5) 個人線量：防護量の実効線量  $E$  に関連付けられる実用量で、身体のある点でのフルエンスと、幅広い平行ビームで入射方向が  $\Omega$  で照射した場合の実効線量への換算係数の積で定義される。換算係数の計算は ICRP/ICRU 標準ファントムの胴体のある点に、幅広い平行ビームで入射方向が  $\Omega$  で照射した場合右または左からの照射の実効線量の最大値で計算される。  
ある線種で、あるエネルギーの放射線についての個人線量  $H_p$  は以下の図のように示される。



- (6) 個人水晶体吸収線量：水晶体における吸収線量と関係付けられた実用量で、頭部または身体のある一点のフルエンス  $\Phi$  と換算係数  $d_{p\ lens}$  との積。

- (7) 個人局所皮膚吸収線量：局所皮膚における吸収線量と関係付けられた実用量で、入射角度  $\Omega$  の放射線場のある一点のフルエンス  $\Phi$  と、換算係数  $d_{local\ skin}$  との積。

### 2.1.1.2 概要

#### (1) 実用量の定義変更となった背景

放射線防護に用いられる実効線量や等価線量などの防護量は、実測することはできないので、実際の外部被ばくの管理には、測定器による評価が可能な実用量が用いられている。現在用いられている実用量の定義においては、組織等価物質でできた球や人体または人体を模擬したファントムの決められた深さの点での線量当量で規定されている。この決められた深さにおける線量当量の値は、数MeVまでの通常よく用いられるエネルギー領域においては、防護量と比べて安全側の値を示すことで実用量としての役割を果たしてきた。しかし、近年、防護量における放射線の種類、エネルギーの拡張がなされるにつれて、高エネルギー領域で実効線量より実用量の方が低い値になるなどの問題点があった。本レポートにおいて、実用量は、入射点におけるフルエンスや空気カーマと、それらから計算で求められる実効線量の最大値や臓器吸収線量への換算係数の積として定義され、直接防護量との関連付けをしたことで、問題点を解決している。

#### 1) 放射線防護のための線量に関する諸量の経緯

国際放射線防護委員会(ICRP)は、放射線防護において重要な線量制限に用いる様々な線量に関する諸量を規定してきた。臓器における吸収線量が同じであっても光子、ベータ線、アルファ線、中性子など放射線の種類によって放射線障害の程度が異なり、受けた吸収線量を単純に合計することでは障害の程度を評価することができない。このため、放射線の種類による重み付けのために線質係数と呼ばれる係数を乗じて得られる「線量当量」の概念をICRP 1964年勧告で導入した。その後、放射線の身体影響には、皮膚障害、白内障などのようにしきい値のある確定的影響（2007年勧告以降組織反応とも呼ばれている）と、がんや遺伝性影響のようにしきい値がなく、低い線量から線量とともに発生確率が直線的に増加するような確率的影響に分けられることが明らかになった。そこでICRP 1977年勧告では、確定的影響については、しきい値よりも低い線量で設定する線量限度を規定することにより、その発生を防止することとした。確率的影響に対する防護措置として、最適化という概念で、合理的に達成できる限り低く抑えることと、蓄積する個人のリスクがある限度を超えないように線量限度を設定した。これらの線量制限を取り入れるためには、複数の臓器で受けた線量を全身で積算した線量で制限する必要があることから、各臓器で受けた線量に発がんや遺伝性影響の発生の起こりやすさで重み付けする組織加重係数を乗じた値を全身で合計するという「実効線量当量」の概念を導入した。しかし、実効線量当量を定義通りに求めるためには、臓器の吸収線量を評価する必要があるが、これを実測することが不可能であるという課題が残っていた。そこで、国際放射線単位測定委員会(ICRU)は、外部被ばくの条件の下に適切に防護量を評価するた

めに「実用量」の概念を導入し、ICRU Report39 (1985年)とReport43 (1988年)において、場所のモニタリングのために「周辺線量当量」と「方向性線量当量」を、個人モニタリングのために「透過性個人線量当量」と「表層部個人線量当量」を規定した。その結果、校正した測定器を用いて実用量をモニタリングすることにより、防護量の基準に基づく線量管理を行えるようになった。その後、ICRPは、1990年勧告で、組織や臓器のある一点で規定されている「線量当量」とは別に、組織・臓器全体にわたって平均した吸収線量に放射線加重係数を乗じた「等価線量」と、「等価線量」に組織加重係数を乗じて総和をとる「実効線量」を新たに導入した。これにより、「実効線量当量」はなくなり、線量当量は、実用量（周辺線量当量、方向性線量当量及び個人線量当量）として引き続き用いられることとなり、防護量と実用量の量が区別された。個人モニタリング用の実用量については、ICRU Report 51(1993年)において、「透過性個人線量当量」と「表層部個人線量当量」を統合して「個人線量当量」とした。さらにその後ICRU Report 57(1998年)において、実用量から実効線量への換算係数が提示された。その後は、最新の主勧告であるICRP 2007年勧告で、最新の科学的知見に基づいて放射線加重係数や組織加重係数が改訂された。現行の放射線防護モニタリングに用いられる諸量についての関係を図1-1に示す。

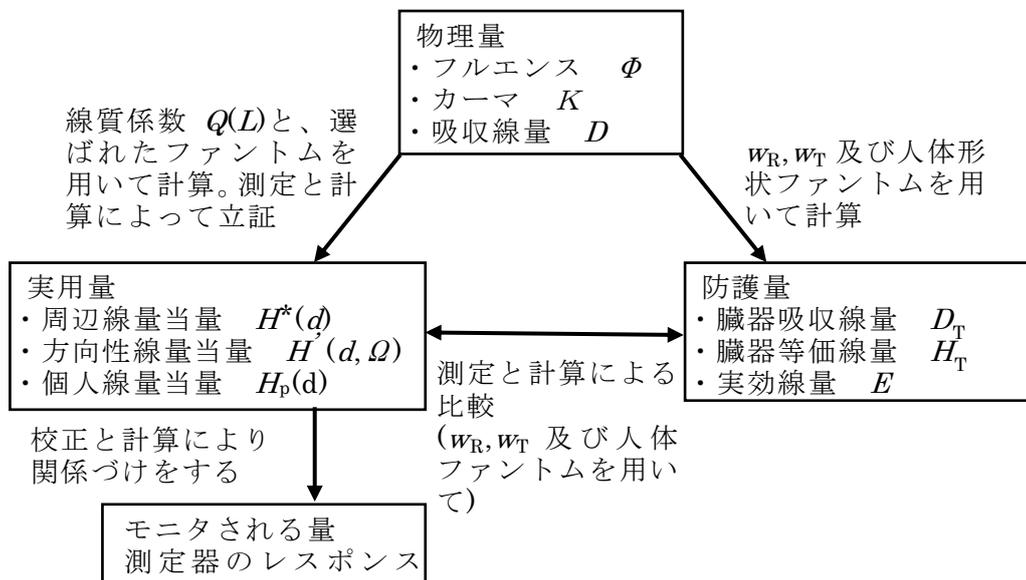


図 1-1 放射線防護モニタリングの目的のための諸量間の関係  
(ICRP Publication74 の図より作成)

## 2) 現行の実用量の定義

現行の実用量は、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量の3種類であり、それらの定義の概要について、それぞれ図1-2、図1-3、図1-4に示す。

### 周辺線量当量

- ICRU 球（直径 30cm、密度が  $1 \text{ g/cm}^3$  の組織等価物質 [O 76.2 %, C 11.1 %, H 10.1 %, N 2.6 %]）に 1 方向から入射する放射線場において深さ  $d$  の位置での線量当量で定義される
- 深さ  $d$  が、1 cm、3 mm、70  $\mu\text{m}$  での  $H^*(10)$ 、 $H^*(3)$ 、 $H^*(0.07)$ がある。

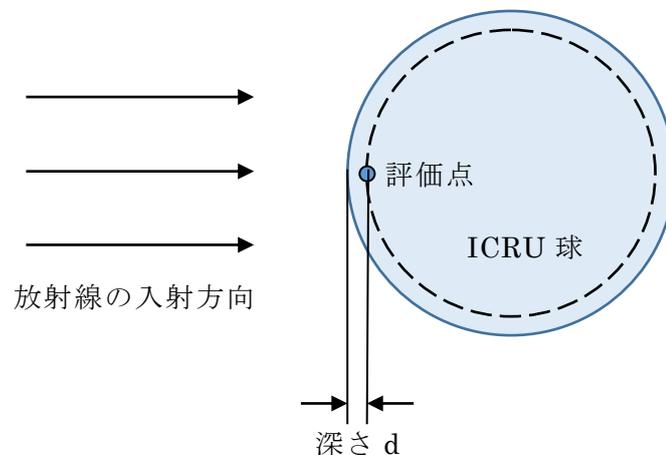


図1-2 現行の実用量（周辺線量当量）の定義

### 方向性線量当量

- 方向性線量当量  $H'(d,\alpha)$  は、 $\alpha$  の方向から入射した放射線による、ICRU 球の深さ  $d$  における線量当量で定義される
- 特に透過力の弱い放射線（ $\alpha$ 、 $\beta$  線）に対して導入された
- ある入射方向  $\alpha$  における線量当量として  $H'(0.07,\alpha)$ 、 $H'(3,\alpha)$ がある

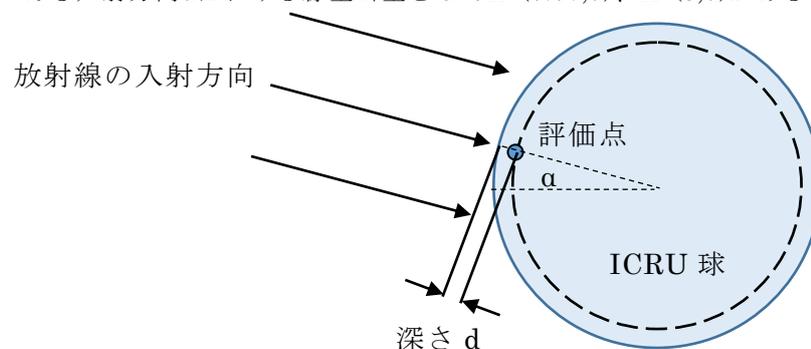


図 1-3 現行の実用量（方向性線量当量）の定義

## 個人線量当量

- ・ 個人線量当量  $H_p(d)$  は、身体内の深さ  $d$  における線量当量で定義される
- ・ 体幹部に装着する線量計の校正のためには、ICRU スラブファントム（ $30\text{ cm} \times 30\text{ cm} \times 15\text{ cm}$ ）における、深さ  $1\text{ cm}$ 、 $3\text{ mm}$ 、 $70\text{ }\mu\text{m}$  での線量当量で規定されている
- ・ 放射線の入射方向  $\alpha$  について  $H_p(10, \alpha)$ 、 $H_p(3, \alpha)$ 、 $H_p(0.07, \alpha)$  が用いられる

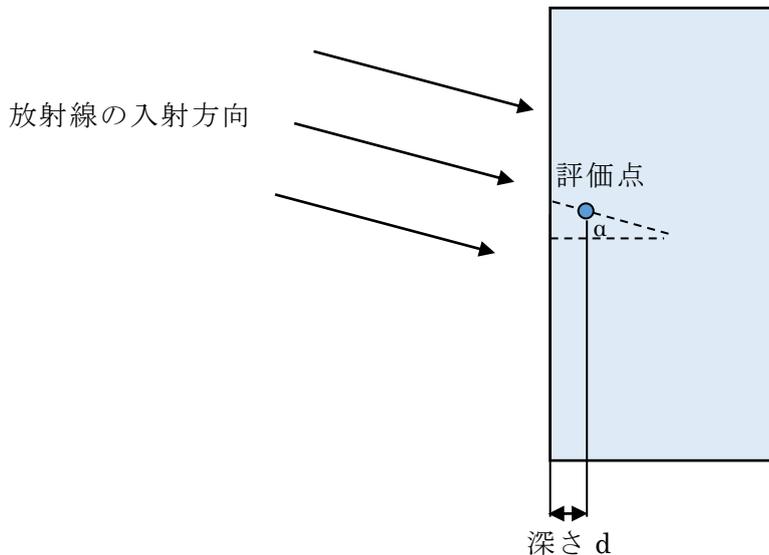


図1-4 現行の実用量（個人線量当量）の定義

### 3) 現行の実用量の問題点

これら現行の実用量の定義は、ICRU球、人体又はファントムのある深さの1点での評価点における線量当量としており、前述のとおり、光子では2 MeVまでの放射線のエネルギーの範囲においては、実用量が防護量に近い値の推定値を与え、また防護量より低い値となることはないことから、実用量としての役割を果たしてきた。しかし、近年医療、科学研究の進歩とともに、利用する放射線の種類やエネルギー範囲が拡張され、また宇宙船や高高度で航行するジェット機による高エネルギーの宇宙線による被ばくが増大している。そのような状況で、ICRP（Publication 116, 2010）において防護量の高エネルギー領域での計算について検討が行われた。その結果、例えば光子について、広い範囲での入射エネルギーにおける周辺線量当量  $H^*(10)$  と実効線量  $E$  との関係は、図1-5に示すようになっている。

この図に示すように、これまで通常よく使われる2 MeV未満の光子のエネルギーの領域においては、周辺線量当量  $H^*(10)$  は、実効線量  $E$  よりも高い値となり、保守的な値を示しているが、高エネルギー領域では周辺線量当量は実効線量より低い値となり、保守性が保てないという問題点が明らかになった。また、70 keV未満のエネルギー領域では、逆に周辺線量当量の方が、実効線量よりも過剰に大

きい値を示していることも確認することができる。

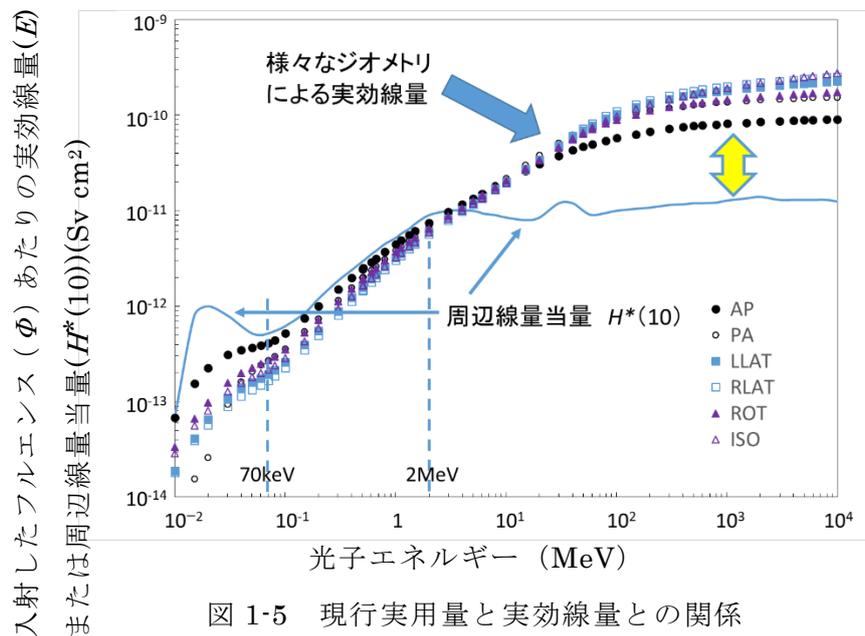


図 1-5 現行実用量と実効線量との関係

(Akira Endo, “The Operational Quantities and New Approach by ICRU”, The 3rd International Symposium on the System of Radiological Protection の資料をもとに作成)

他の線種の放射線の被ばくについても、あるエネルギー領域において周辺線量当量や他の実用量の値と、防護量の値とのかい離が認められ、現行のICRUの提示する仮想球体 (ICRU球) などのファントムのある深さdでの線量当量やファントム中のある一点での線量当量に基礎を置くという定義そのものを見直す必要性が生じた。

また、ICRPは、タスクグループ (TG79) において、実効線量の使用に関するレポートを作成しているが、その検討の中で、等価線量を確定的影響(組織反応)の線量限度に用いることを止めることを検討している。これは、等価線量の算出に用いられる放射線加重係数は、確率的影響の生物学的効果比 (RBE) を参考に設定していることから、確定的影響 (組織反応) の発生を防止するための臓器/組織線量の限度には、吸収線量の方が相応しいとの判断である。このことも、本レポートで、実用量の線量体系を改訂する背景の一つとなっている。

本レポートは、これらの問題点を解決するために、防護量のより良い推定値としての実用量の新たな定義を規定している。実効線量に関係付けされる実用量の新たな定義は、これまでのようにファントムのある点の計測量で示すのではなく、ある点におけるフルエンス (または空気カーマ) の計測量に、広いビームで照射される放射線場において様々な照射ジオメトリで最も高くなる実効線量への換算係数を乗じた値で規定している。光子については、フルエンスの他に空気カーマからの換算係数も示されている。粒子の種類も拡張され、光子、電子、中性子、

陽子、ミュー粒子、パイ中間子、ヘリウムイオンについての換算係数が提示されている。

## (2) レポート全体の内容

本レポートは以下のような構成になっている。ただし、今後発行される正式版のレポートでは、構成が変更される予定であることには注意が必要である。

第1章「序論」：人体の電離放射線への被ばくを定量化するために防護量および実用量を使用することの背景を記載している。

第2章「概念および用語」：本レポートで用いている概念や用語について記載している。

第3章「諸量の定義」：関連する放射計測と線量評価のための諸量の定義、および外部被ばくの防護のための防護量と新たな実用量の定義を記載している。エリアモニタリングのための実用量は、周辺線量（Ambient Dose）、方向性水晶体吸収線量（Directional Absorbed Dose in the Lens of the Eye）および方向性局所皮膚吸収線量（Directional Absorbed Dose in Local Skin）であり、個人のモニタリングのための実用量は、個人線量（Personal Dose）、個人水晶体吸収線量（Personal Absorbed Dose in the Lens of the Eye）および個人局所皮膚吸収線量（Personal Absorbed Dose in Local Skin）である。

第4章「換算係数」：勧告する線量の計算方法に関する情報（新たな換算係数とこれまでの換算係数を比較など）を記載している。

第5章「実用量の適用」：職業人の放射線防護および環境モニタリングについて実用量の適用範囲についての考察を記載している。

第6章「エリアモニタおよび個人線量計の校正」：校正手順、および校正ファントムの情報を提示し、エリアモニタおよび個人線量計の校正についての考察を記載している。

第7章「結論」：新たに勧告された実用量が改善した項目に関する総論的な結論（これまでの実用量の限界を超えてより高いエネルギーの光子、電子および中性子その他の種類の粒子の放射線場における防護上の問題への解決策を提供していることなど）を記載している。

付録A「換算係数の値」：周辺線量、個人線量、方向性水晶体吸収線量、方向性局所皮膚吸収線量、個人水晶体吸収線量および個人局所皮膚吸収線量に対する換算係数の値を示している。光子については、2通りの換算係数（①電子の輸送を実際に計算した場合の空気カーマから実用量への換算係数、②荷電粒子平衡を近似するためにカーマ近似法を用いて計算したフルエンスまたは空気カーマから実用量への換算係数）を提示している。

付録B「計算コードに関する記述」：これらの値を計算するために使用した計算コードについて簡単な説明を記載している。

付録C「水晶体吸収線量換算係数」：感受性細胞または水晶体全体への粒子フルエンスによる水晶体吸収線量の最大値と光子に関する空気カーマからの換算係数の情報をまとめた図表を示している。

### (3) 実用量の定義の変更内容の概要

#### 1) 線量に関する諸量の新しい体系

本レポートの3章において記述されている新しい実用量の定義により、図1-1に示す現行の放射線防護モニタリングに用いられる諸量間の関係は、図1-6のように改訂される。

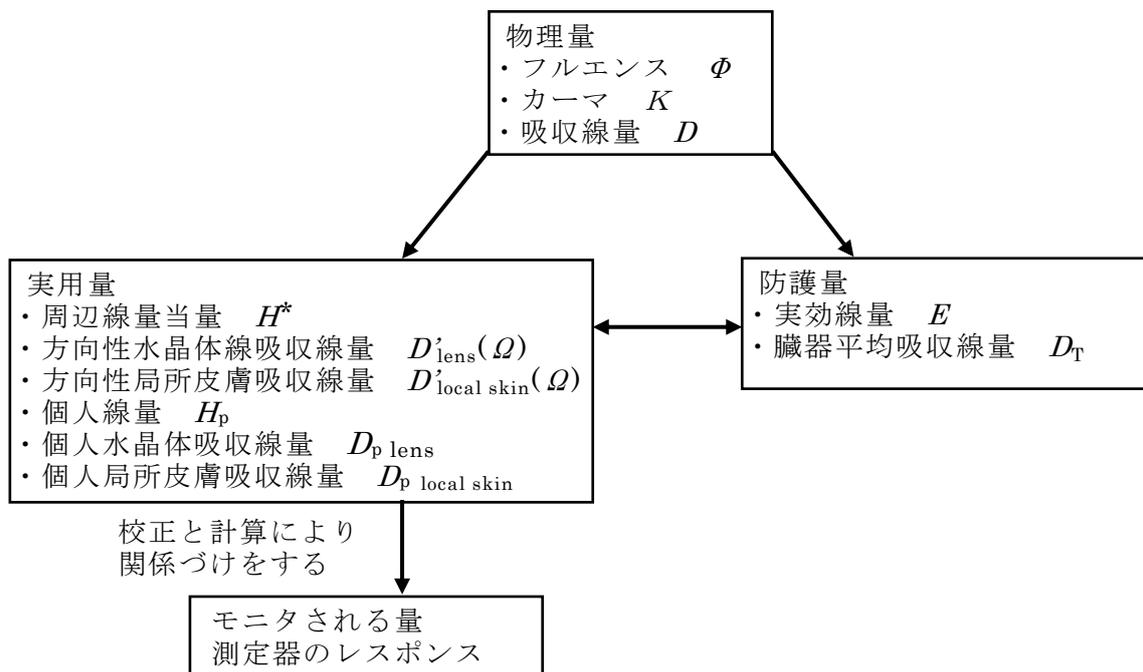


図1-6 本レポートで提案された放射線防護モニタリング目的のための諸量間の関係

## 2) 実用量の定義の変更

### (ア) 定義変更の概要

現状の実用量の定義は、図1-2～1-4に示すように周辺線量当量、方向性線量当量についてはICRU球のある深さ（1 cm、3 mm、70  $\mu\text{m}$ ）の点での線量当量、個人線量当量は、ICRUスラブファントム中のある深さ（1 cm、3 mm、70  $\mu\text{m}$ ）の点での線量当量で定義されている。

本レポートにおける実用量の新しい定義は、従来のようにファントムのある点の線量当量の値ではなく、ある点におけるフルエンス（または空気カーマ）の計測量に、広いビームで照射される放射線場において様々な照射ジオメトリで最も高くなる実効線量への換算係数を乗じた値で規定している。

### (イ) 周辺線量

周辺線量 $H^*$ は、エネルギーが $E_p$ の放射線について、身体に図1-7に示すような様々な照射ジオメトリで照射した場合の実効線量の最大値 $E_{\text{max}}(E_p)$ への換算係数とある点に入射するフルエンス $\Phi(E_p)$ の積で定義される。実際の評価はICRP/ICRU成人標準全身ファントムに様々な種類の放射線やエネルギーの放射線を照射した場合に、すべてのエネルギーで積分し、放射線の種類 $i$ ごとの総和として以下のように示される。周辺線量の単位は、 $\text{J kg}^{-1}$ 、特別名称として、Svを用いる。

$$H^* = \sum H_i^*$$

$$H_i^* = \int h_{E_{\max,i}}^*(E_p) [d\Phi_i(E_p) / dE_p] dE_p$$

また、換算係数は、以下のとおり示される。

各エネルギーに対する  $h_{E_{\max,i}}^*$  (単位: pSv cm<sup>2</sup>) の値は付録に示されている。

$$h_{E_{\max,i}}^*(E_p) = E_{\max,i}(E_p) / \Phi(E_p)$$

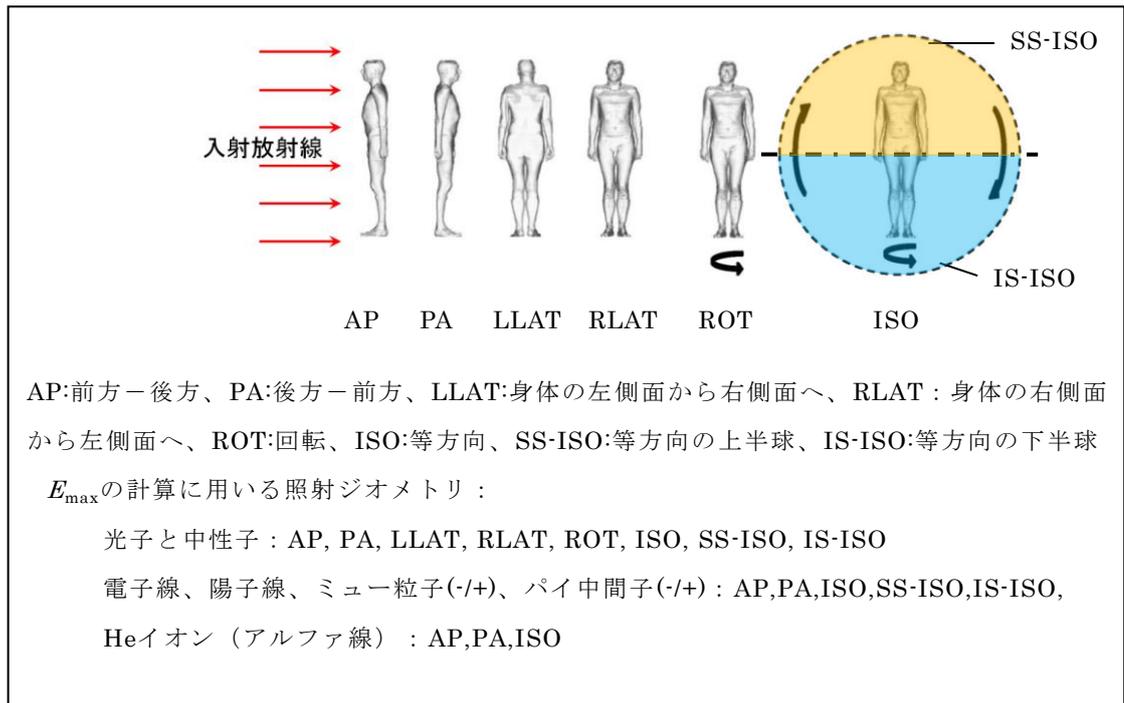


図1-7 照射ジオメトリ

入射角度によって重要臓器の配置や、放射線のエネルギーによって臓器へのエネルギー付与が変化するために、実効線量も変化する。

光子と中性子についての、様々な照射ジオメトリにおける入射する放射線のエネルギーに対する実効線量への換算係数  $h_E(\Omega)$  と周辺線量への換算係数 ( $h_{E_{\max}}^*$ ) の変化を図1-8, 1-9に示す。

光子の場合は、約10 MeV以下では、APの照射ジオメトリが最も高い実効線量を示すために、 $h^*_{E_{max}}$ と一致している。それ以上のエネルギー領域では、最も高い実効線量を示すように適切な照射ジオメトリを選択し、 $h^*_{E_{max}}$ を決定している。

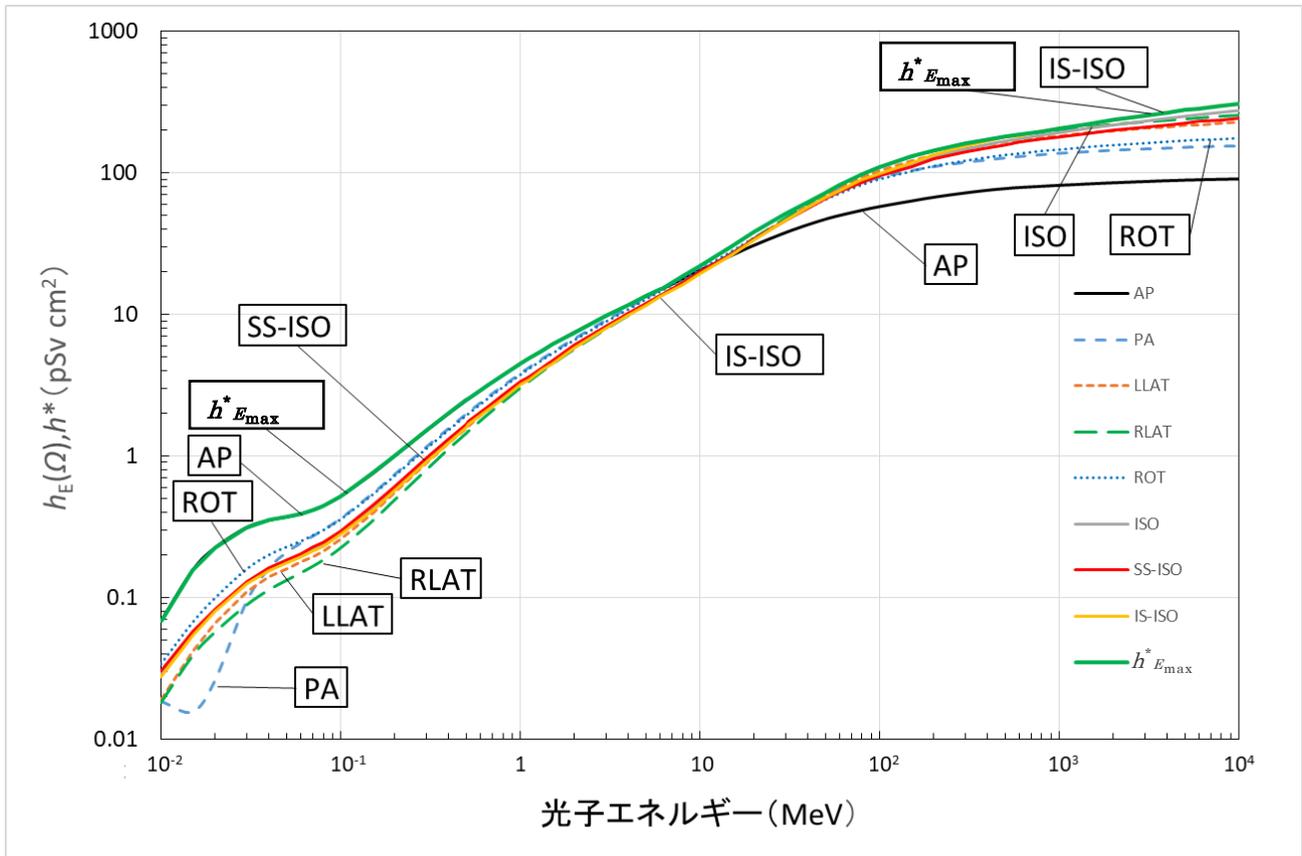


図 1-8 光子における様々な照射ジオメトリでの実効線量への換算係数  $h_E(\Omega)$  と周辺線量への換算係数  $h^*_{E_{max}}$  との関係

(JAEA 遠藤章 ; Review of ICRP Publication 116; Conversion coefficients for radiological protection quantities for external radiation exposures のデータを参照)

中性子の場合、約100 MeV以下では、APの照射ジオメトリが最も高い実効線量を示すために、 $h^*_{E_{max}}$ と一致している。それ以上のエネルギー領域では、他の照射ジオメトリが、 $h^*_{E_{max}}$ と一致している。

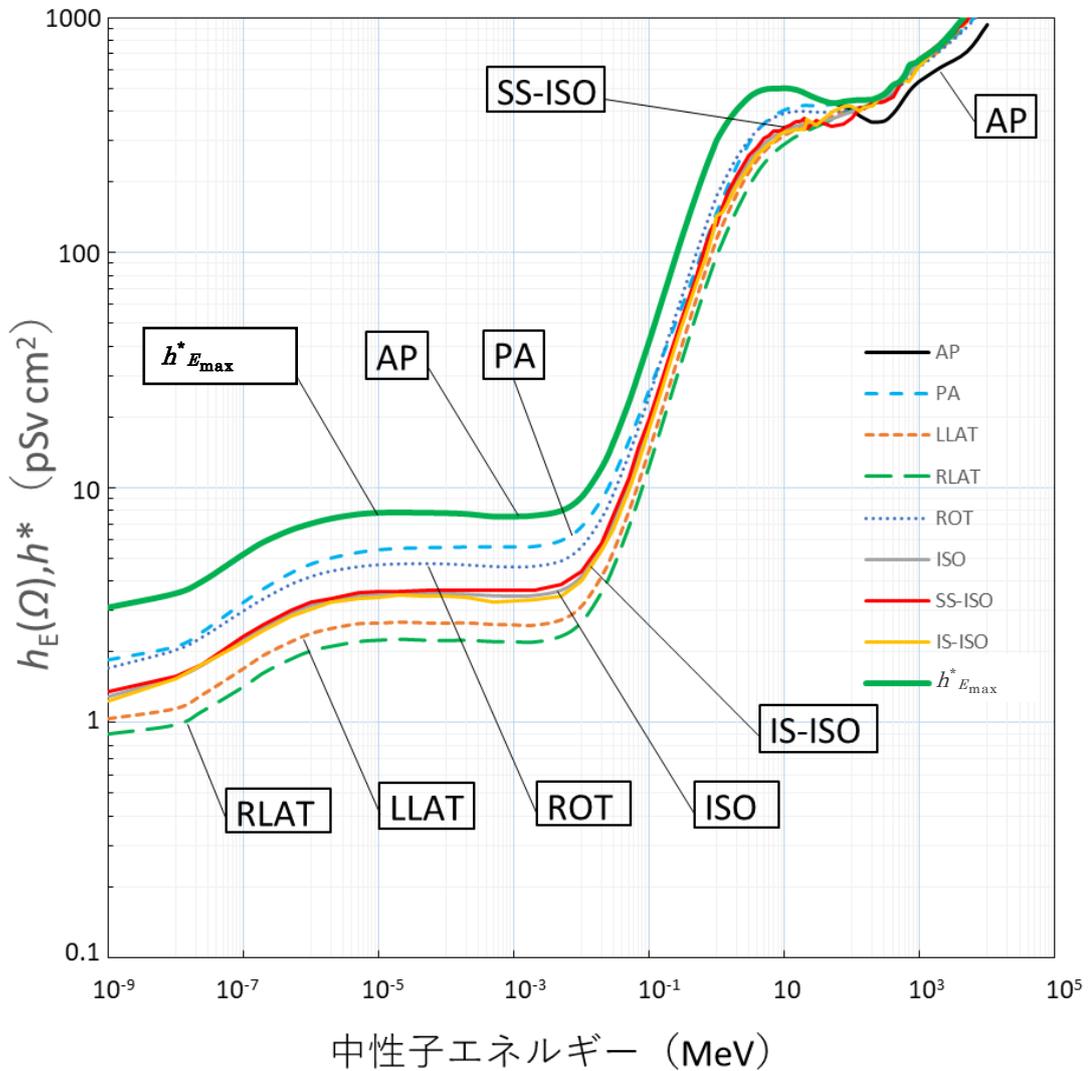


図 1-9 中性子における様々な照射ジオメトリでの実効線量への換算係数  $h_E(\Omega)$  と周辺線量への換算係数  $h^*_{E_{max}}$  との関係

(ウ) 方向性水晶体吸収線量

方向性水晶体吸収線量  $D_{\text{lens}}(\Omega)$  は、水晶体における吸収線量の値と関係付けられた実用量で、ある入射方向  $\Omega$  の放射線場でのある一点の粒子フルエンス  $\Phi$  と、換算係数  $d_{\text{lens}}(\Omega)$  との積である。

換算係数は、放射線の種類  $i$  のエネルギー  $E_p$  の幅広い平行ビームが入射方向  $\Omega$  で様式化された眼のモデルに入射した場合の水晶体全体の吸収線量を計算して求められる。様々な種類の放射線やエネルギーの放射線を照射した場合について、すべてのエネルギーで積分し、放射線の種類  $i$  ごとの総和として以下のように表される。

$$\begin{aligned} D_{\text{lens}}(\Omega) &= \Sigma D_{\text{lens},i}(\Omega) \\ &= \Sigma \int d_{\text{lens},i}(E_p, \Omega) [d\Phi_i(E_p, \Omega) / dE_p] dE_p \end{aligned}$$

単位は、 $\text{J kg}^{-1}$ 、特別名称として、 $\text{Gy}$ を用いる。換算係数は以下のように表される。

$$d_{\text{lens},i}(E_p, \Omega) = D_{\text{lens},i}(E_p, \Omega) / \Phi_i(E_p, \Omega)$$

エネルギーおよび入射方向ごとの  $d_{\text{lens},i}(E_p, \Omega)$  (単位： $\text{pGy cm}^2$ )の値は、本レポートの付録に示されている。

単一方向場の特別な場合で、入射方向と AP (身体の正面から後の方向) 照射の入射角度  $\Omega_0$  となす角度  $\alpha$  で  $\Omega$  が規定される。 $\alpha=0^\circ$  の場合、測定の評価点における  $D'_{\text{lens}}(\Omega)$  の値は  $D'_{\text{lens}}$  と記述する。

(エ) 方向性局所皮膚吸収線量

方向性局所皮膚吸収線量  $D_{\text{local skin}}(\Omega)$  は、局所皮膚における吸収線量の値と関係付けられた実用量で、入射方向  $\Omega$  の放射線場のある一点の粒子フルエンス  $\Phi$  と、換算係数  $d_{\text{local skin}}(\Omega)$  との積である。様々な種類の放射線やエネルギーの放射線を照射する場合は、すべてのエネルギーで積分し、放射線の種類  $i$  ごとの総和として以下のように示される。

$$\begin{aligned} D_{\text{local skin}}(\Omega) &= \Sigma D_{\text{local skin},i}(\Omega) \\ &= \Sigma \int d_{\text{local skin},i}(E_p, \Omega) [d\Phi_i(E_p, \Omega) / dE_p] dE_p \end{aligned}$$

単位は  $\text{J kg}^{-1}$ 、特別名称は、 $\text{Gy}$ である。換算係数は放射線の種類  $i$  のエネルギー  $E_p$  の幅広い平行ビームで入射方向  $\Omega$  での放射線場におけるファントム

での規定された部分における吸収線量として計算される。

ファントムは、ICRUの4元素で構成される300 mm×300 mm×150 mmの大きさ及び密度1.0 g cm<sup>-3</sup>のスラブファントムで、内側は、2 mmの厚さで密度が1.09 g cm<sup>-3</sup>の皮膚の層がある。吸収線量は、直円柱の表面からの深さが50 μmから100 μmの間の容積で、前面表面の中心から下に断面積10 mm<sup>2</sup>の部分で平均する。

換算係数は以下のように示される。

$$d'_{\text{local skin},i}(E_p, \Omega) = D'_{\text{local skin},i}(E_p, \Omega) / \Phi_i(E_p, \Omega)$$

エネルギーごと、入射方向ごとの計算値は、本レポートの付録に示されている。α=0° の場合、測定の評価点におけるD'\_{\text{local skin}}(Ω)の値はD'\_{\text{local skin}}と記述する。

#### (オ) 個人線量

個人線量H<sub>p</sub>は、防護量の実効線量Eに関連付けられる実用量で、身体のある点でのフルエンスと、幅広い平行ビームで入射方向がΩで照射した場合の実効線量への換算係数の積で定義される。実際の評価は、周辺線量と同様に、ICRP/ICRU成人標準全身ファントムのある点に入射フルエンスΦとフルエンスからの換算係数h<sub>p,i</sub>(E<sub>p</sub>, Ω)の積で示され、様々な種類の放射線やエネルギーの放射線を照射した場合は、すべてのエネルギーで積分し、放射線の種類 i ごとの総和として以下のように示される。

$$H_p = \Sigma H_{p,i} = \Sigma [ h_{p,i}(E_p, \Omega) [d^2 \Phi_i(E_p, \Omega) / d E_p d \Omega] d E_p d \Omega ]$$

個人線量の単位は、J kg<sup>-1</sup>、特別名称として、Svを用いる。また、換算係数は以下のように示される。

$$h_{p,i}(E_p, \Omega) = E(E_p, \Omega) / \Phi_i(E_p, \Omega)$$

個人線量について、ある線種で、あるエネルギーの放射線についての個人線量  $H_p$  は図1-10のように示される。このような定義とすることで、実効線量  $E$  と個人線量  $H_p$  の間の数値が一致し、換算などなしで良い近似が得られる。

個人線量：

$$H_p = h_p(E_p, \Omega) \cdot \Phi(E_p)$$

換算係数の計算：

$$h_p(E_p, \Omega) = E(E_p, \Omega) / \Phi(E_p)$$

結果

$$H_p(E_p, 0^\circ) = E(E_p, AP)$$

$$H_p(E_p, 180^\circ) = E(E_p, PA)$$

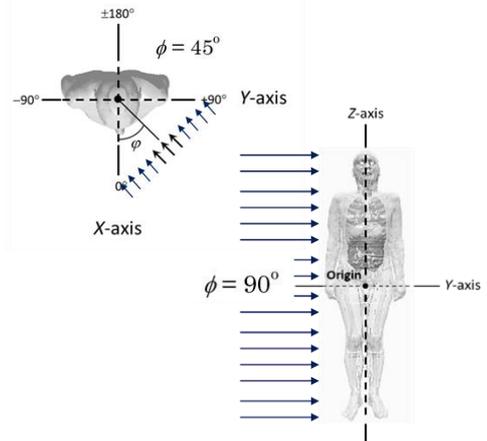


図 1-10 個人線量の定義と人体模擬ファントム

#### (カ) 個人水晶体吸収線量

個人水晶体吸収線量  $D_{p \text{ lens}}$  は、水晶体における吸収線量と関係付けられた実用量で、頭または体のある一点に入る粒子フルエンス  $\Phi$  と、換算係数  $d_{p \text{ lens}}$  との積で定義される。換算係数は、ある入射方向  $\Omega$  について、放射線の種類  $i$  のエネルギー  $E_p$  の幅広い平行ビームで、様式化された眼のモデル全体へ照射した場合の右か左の眼の吸収線量の最大値で規定される。様々な種類の放射線やエネルギーの放射線を照射した場合は、すべてのエネルギーで積分し、放射線の種類  $i$  ごとの総和として以下のように示される。

$$D_{p \text{ lens}} = \sum D_{p \text{ lens}, i}$$

$$= \sum \int \int d_{p \text{ lens}, i}(E_p, \Omega) [d^2 \Phi_i(E_p, \Omega) / dE_p d\Omega] dE_p d\Omega$$

単位は、 $J \text{ kg}^{-1}$ 、特別名称として、Gyを用いる。

個人水晶体吸収線量  $D_{p \text{ lens}}$  の計算は、入射方向が、 $0^\circ$  から  $90^\circ$  まで  $15^\circ$  の刻みで計算を行っている。換算係数  $d_{p \text{ lens}}$  は、換算係数  $d'_{p \text{ lens}}$  と同じ値となっている。

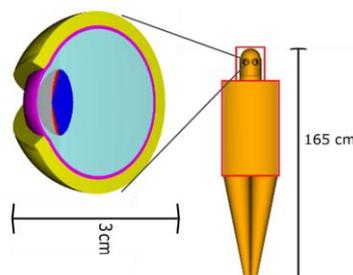


図 1-11 個人水晶体吸収線量のための眼の模擬ファントム

(キ) 個人局所皮膚吸収線量

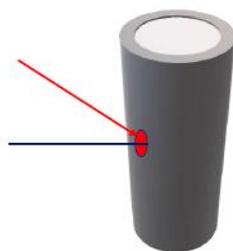
個人局所皮膚吸収線量  $D_{p, \text{local skin}}(\Omega)$  は、局所皮膚における吸収線量と関係付けられた実用量で、入射方向  $\Omega$  の放射線場のある一点のフルエンス  $\Phi$  と、換算係数  $d_{\text{local skin}}(E_p, \Omega)$  との積である。様々な種類の放射線やエネルギーの放射線を照射した場合は、すべてのエネルギーで積分し、放射線の種類  $i$  ごとの総和として以下のように示される。

$$\begin{aligned} D_{p, \text{local skin}} &= \sum D_{p, \text{local skin}, i} \\ &= \sum \int d_{p, \text{local skin}, i}(E_p, \Omega) [d^2 \Phi_i(E_p, \Omega) / dE_p d\Omega] dE_p d\Omega \end{aligned}$$

単位は  $\text{J kg}^{-1}$ 、特別名称として Gy を用いる。

換算係数は放射線の種類  $i$  のエネルギー  $E_p$  の幅広い平行ビームで入射方向  $\Omega$  での放射線場における以下の体幹部、四肢、指のための3種類のファントムでの規定された部分における吸収線量が計算される。

体幹部については、ICRUの4元素で構成される  $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$  の大きさで密度  $1.0 \text{ g cm}^{-3}$  のスラブファントムで、内側は、 $2 \text{ mm}$  の厚さの密度が  $1.09 \text{ g cm}^{-3}$  の皮膚の層がある。吸収線量は直円柱の表面からの深さが  $50 \mu\text{m}$  から  $100 \mu\text{m}$  の間の容積で、前面表面の中心から下に断面積  $10 \text{ mm}^2$  の部分で平均する。四肢については、直径  $73 \text{ mm}$  で、長さ  $300 \text{ mm}$  のICRUの4元素の成分の材料で、密度が  $1.11 \text{ g cm}^{-3}$  の柱状ファントムを用い、指については、四肢と同じ成分の材料で、直径  $19 \text{ mm}$  で長さ  $300 \text{ mm}$  の棒状のファントムを用いる。



ファントムにおける断面積が  $10 \text{ mm}^2$  で深さ  $0.05 \text{ mm}$  から  $0.1 \text{ mm}$  までの部分における吸収線量

- ・四肢 直径  $73 \text{ mm}$  × 長さ  $300 \text{ mm}$
  - ・指 直径  $19 \text{ mm}$  × 長さ  $300 \text{ mm}$
- 密度が  $1.11 \text{ g cm}^{-3}$  の ICRU 組織

図 1-12 個人局所皮膚吸収線量の四肢及び指のためのファントム

#### (4) 結論

本レポートの結論として、以下の要点を挙げている。

- 1) 防護量の値に直接関連づけられた実用量の利用は、防護量および実用量の体系を単純化し、ユーザーの放射線防護諸量の理解や一貫性に役立つであろう。
- 2) ICRPが、標準ファントム、組織加重係数や放射線加重係数などを変更した場合、フルエンスから実用量への換算係数も変化し、実用量の値も変更になる。係数などに有意に大きな変更がない場合は、実用量の換算係数の変更は必要ないであろう。
- 3) 光子における70 keV～2 MeV のエネルギー範囲、また荷電粒子完全平衡の状態での電子の2 MeV ～10 MeV のエネルギー範囲においては、周辺線量および個人被ばく線量に対する換算係数の値は、現行の定義で与えられているものにかなり近い。
- 4) 既存の測定器の修正は、以下に挙げる場合には必要となるであろう。
  - ア) 70 keV 未満の光子エネルギーについて、現行のエリアモニタおよび個人線量計による実効線量への過大評価を是正する場合
  - イ) 光子および電子についての水晶体吸収線量の評価を改善する場合
  - ウ)  $H^*(10)$ および $H_p(10)$ と比較して粒子フルエンスから $H^*$ および $H_p$ への換算係数の低い値を是正することを目的として、熱中性子から2 MeVのエネルギーの中性子に対するエリアモニタリング機器および線量計の性能を改善する場合、およびその高い値を是正することを目的として50 MeV以上のエネルギーの中性子のレスポンスを改善する場合

#### 2.1.2 「TG79 放射線防護量としての実効線量の使用」(2018年4月版ドラフト)

# 「TG79 放射線防護量としての実効線量としての使用」(2018年4月版ドラフト)に関する概要

## 背景

「実効線量」は、リスクマネージメントの目的のために導入されたが、本来の目的を超えて放射線防護および関連分野で広く使用されている。ICRPは2007年勧告で線量制限のガイダンスを示しているが、これらを医療被ばくの分野に拡大することを考えている。

## 概要1

・吸収線量は、組織反応（確定的影響）を防止するための臓器/組織の線量限度の設定に最も適した量であり、限度を設定するための等価線量の使用は中止すべきである。（新勧告が出されるまでは現在の限度を適用し続けることができる。）

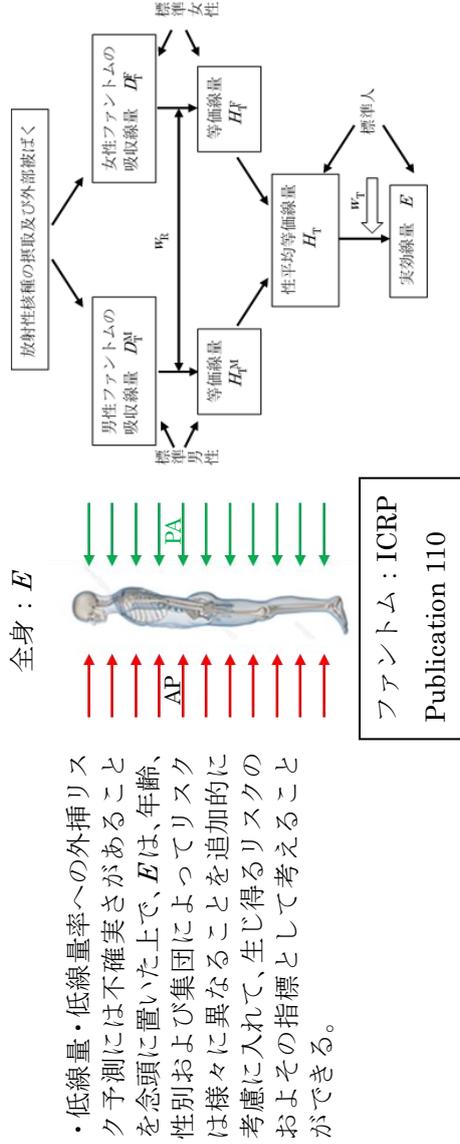
役割	実用量	
	エリアモニタリング用	個人モニタリング用
実効線量の管理	周辺線量 $H^*$	個人線量 $H_p$
眼の水晶体の線量管理	方向性水晶体吸収線量 $D'_{lens}(\mathcal{Q})$	個人水晶体吸収線量 $D_{p,lens}$
局所的な皮膚の線量管理	方向性局所皮膚吸収線量 $D'_{local\ skin}(\mathcal{Q})$	個人局所皮膚吸収線量 $D_{p,local\ skin}$

・実効線量  $E$  は一般に 100 mSv 未満の線量で使用されるが、例外的に緊急事態では約 1 Sv までの範囲の急性被ばくでの使用が妥当である。

## 概要2

・ICRPは、放射線作業や一般公衆の外部被ばくと内部被ばくに対して、さらに患者への放射線医薬品の投与に対して、予測的（prospective）および遡及的（retrospective）な線量評価に使用するための基準係数（reference coefficients）として、実効線量係数を提供する。  
 ・ $E$ は年齢、性別および人口集団によるリスクの変動をさらに考慮して、考えられるリスクのおおよその指標と考えることができる。

・集団実効線量は、防護の最適化、特に職業被ばくの防護の最適化において価値あるツールである。集団実効線量は、リスクを推定するために使うことは意図していない。集団実効線量を潜在的な/生じ得る健康影響を予測するために使う際には、十分な注意を払い、ベースラインとなる生涯罹患率リスクに関する側面として考慮判断する必要がある。一般公衆の被ばくの集団線量を推定するに際して、特に大きな集団について非常に長期にわたる被ばくを考慮するに際しては、時間と空間の線量の積算要素を考慮に入れるべきである。



## 【パブリックコメントの概要】

- ・7つの国際機関は、おおむね、実効線量の使用を明確にしたドラフトに賛成であり、また等価線量を吸収線量に置き換えることに同意している。
- ・25の国家機関・大学・企業では、意見が分かれており、医療関係ではLNTに基づく実効線量を患者に適用するのに賛同しかねる意見が多い。
- ・DRL（診断参考レベル）、DDREF（線量・線量率効果係数）、眼の水晶体の線量限度、預託線量のあまりに保守的な計算等について複数の国または機関からコメントが寄せられた。

## 2.1.2.2 概要

### (1) TG79策定の背景

ICRPは、放射線リスクを管理する目的で、すなわちリスクを制限し最適化を図るために、防護量として“実効線量 (effective dose)”を定義し、導入した。実効線量は、放射線防護の分野において使用されているが、次第に元々の目的を超える広い範囲の分野で使用されるようになり、一部に適切とは言えないような使用例もみられる。ICRP 2007年勧告に、放射線の利用を量的に制限するための有用なガイダンスを示しているが、ICRPは、こうしたガイダンスを医療被ばくの分野にも広げていく必要があると考えている。

### (2) 概要と主なポイント

#### 1) 概要

「実効線量 ( $E$ )」(以下「 $E$ 」という。)という概念は、ICRPが、確率的影響(主にかん)から防護するための管理を行うにあたりリスクを適用するための線量として発展させてきたもので、計画線量や被ばくする線量について、線量限度、線量拘束値および参考レベルとして同じ量で表現し、比較できるようにしたものである。直線しきい値なし(LNT)の線量反応関係、低線量・低線量率での急性被ばくと慢性的被ばくが等価であること、また、外部被ばくと内部被ばくが等価であることを仮定することで、 $E$ は全ての放射線被ばくを一緒にして検討したり合計したりすることが可能となる。医療行為の際に患者が受ける被ばくにおいて、 $E$ は様々な診断検査や放射線治療、様々な病院や様々な国において実施される類似の医療技術や医療手技、同じ医療検査において使用される多様な技術等で受ける線量の比較をする実際的な値である。ここで、実効線量の対象となる個々の患者や患者集団は、年齢および性別に関し類似しているという前提を置くこととしている。

2007年勧告(Publication 103)において、「・・・医療診断や治療のリスク評価は、・・・問題とされる個々の組織に対して、また実施中の個々の医療行為(それぞれ年齢や性別が異なる)に対して、適切なリスクの値を用いて最適な数値評価を行うこと」であると述べている。 $E$ および個別臓器や組織の等価線量に対する目的や使用に関する詳細な説明は、Publication 103に記載されているものの、実際に適用するにあたって疑問が示されていることから、特定の局面については、さらに詳しいガイダンスを示す必要があることは明らかである。本レポートは、Publication 103の説明を利用して作成しており、 $E$ は、防護の最適化において使用する上で、また、線量基準を設定しそれが遵守されていることを確かめる上で、価値ある堅固(robust)な量であることを強調している。

結論として導き出していることは、

(ア) 等価線量( $H$ )は、防護量として要求されるものではない。手足、眼の

水晶体および皮膚の組織反応を避けるための限度としては、等価線量 (Sv) よりも吸収線量 (Gy) を用いた方がより適切である。

- (イ) 個々人のために行うリスク評価 (臓器/組織線量および特定の線量リスクモデルに基づいて行う) は、最善の科学知識を用いて行うのに対して、 $E$ は、生じ得るリスクの、おおよその指標として使用される。ただ、 $E$ は実用的だが、 $E$ をリスク分析等に応用することは意図していないことを認識しておいたほうがいい。

本レポートでは、低レベルの被ばく線量は、合理的な精度で測定し、評価することが可能かも知れないが、評価されるリスクは低い線量では不確実さが増すことを明確にしている。しかし、低い線量への外挿によるリスク予測には不確実さが伴うことを念頭に置き、さらにリスクは、年齢、性別および集団によって多様であることも考慮に入れておけば、 $E$ は、生じ得るリスクを示す上で適当な指標であると考えてよいだろう。特に医療関係で患者の放射線検査または治療でありがちな、 $E$ を用いて臓器/組織線量の最適な推定値を求めてリスク分析を行うことは適切でなく、また、様々な種類の放射線、年齢、性別、集団特有のリスク因子などの不確実さを考慮する際に、これらの相対的な影響を知るために、 $E$ を適切な情報として利用することも好ましくない。

## 2) 本レポートの主なポイント

この本レポートに示す内容はICRP防護量の意図した使用を明確にするものである。なお、これまでのワーキング活動で行った従来のICRPに対する変更点と強調点を下線で示す。

- 1) 放射線防護に使われる線量は、吸収線量 ( $D$ ) でグレイ (Gy) が使われ、等価線量 ( $H$ ) と実効線量 ( $E$ ) は共にシーベルト (Sv) が使われる (いずれも国際単位 (SI) では  $J\ kg^{-1}$ ) 。
- 2) 吸収線量は、放射線防護の目的で、臓器/組織の平均として計算される科学的な量であり、この値から  $E$  が計算される。吸収線量は、組織反応 (確定的影響) を防止するための臓器/組織の線量限度の設定に最も適切な量である。
- 3) 臓器/組織の等価線量 ( $H_T$ ) は、臓器/組織の吸収線量に、低線量被ばくレベルにおける確率的影響の原因となる様々な種類の放射線の相対的な効果を考慮するため、放射線加重係数 ( $w_R$ ) を掛け合わせることで得られるが、これは  $E$  を計算する途中の段階のものと見ることができる。

(参考) 算出式を以下に示す。Publication 103からの変更はない。

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

$$= \sum_T w_T H_T$$

ここに

$D_{T,R}$  : 特定の放射線による、特定の臓器/組織の吸収線量

$H_T$  (特定の臓器/組織の等価線量) =  $\sum w_R D_{T,R}$

(参考) 組織加重係数及び放射線加重係数は、表 2-1及び表2-2に示されており2007年勧告 (Publication 103) からの変更はない。

表2-1 組織加重係数の勧告値

組 織	$w_T$	$\sum w_T$
骨髄 (赤色), 結腸, 肺, 胃, 乳房, 残りの組織 *	0.12	0.72
生殖腺	0.08	0.08
膀胱, 食道, 肝臓, 甲状腺	0.04	0.16
骨表面, 脳, 唾液腺, 皮膚	0.01	0.04
合計		1.00

※残りの組織 : 副腎, 胸郭外 (ET) 領域, 胆嚢, 心臓, 腎臓, リンパ節, 筋肉, 口腔粘膜, 睪臓, 前立腺 (♂), 小腸, 脾臓, 胸腺, 子宮 / 頸部 (♀)。

表2-2 放射線加重係数の勧告値

放射線のタイプ	放射線加重係数, $w_T$
光子	1
電子とミュー粒子	1
陽子と荷電パイ中間子	2
アルファ粒子, 核分裂片, 重イオン	20
中性子	中性子エネルギーの連続関数※

すべての数値は、人体へ入射する放射線、または、内部放射線源に関しては取り込まれた放射性核種から放出される放射線に関係する。

※人体に入射する中性子の生物学的実効性は、中性子エネルギーに大きく依存する (Publication 103、Annex B参照)。図2-1に示すエネルギー関数は、低エネルギーでの人体の吸収線量に対する二次光子の大きな寄与を考慮し、物理的理由から50 MeVを超える中性子エネルギーでの  $w_R$  の減少を見込んでいる。

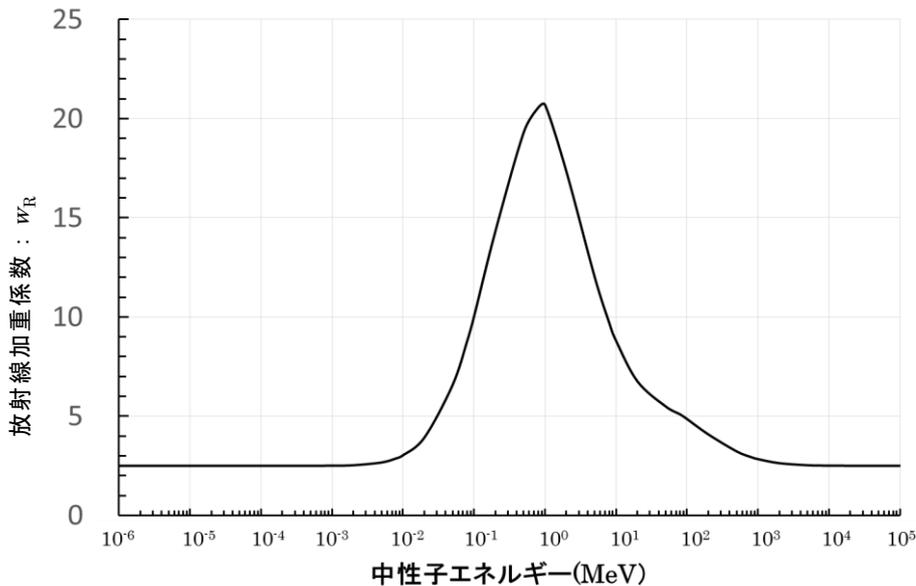


図2-1 中性子に対する放射線加重係数のエネルギー依存性

- 4) ICRPは、組織反応を防止するために臓器/組織線量に関する限度を設定するための等価線量については、今後使用をやめるべきと考えるが、新しい主勧告が発行されるまでの間は、現在の限度を継続して使うことが可能であるとす。

(参考) 例えば、甲状腺の等価線量が実効線量に対して20倍以上 ( $w_T=0.04$  から換算すると25倍) であるヨウ素131の摂取量を説明する上で、同じ単位 (Sv) で表される等価線量と実効線量が十分に区別されていない状況では、実効線量、等価線量、実用量 (線量当量) (いずれもSv) との間の混乱をきたしている。必要であれば、低および高LET成分を指定して、臓器および組織線量を吸収線量の観点から言及すれば、このような困難は回避される。ヨウ素131を摂取した場合、実効線量は10 mSv、甲状腺線量は250 mGy (低LET) と表現することができ、明確な防護量として同等の線量を使用する必要はない。

- 5) 実効線量は、がんおよび遺伝性の影響から生じる確率的な損害 (stochastic detriment) の合計に対する部分的寄与の単純化した代表値を提供する組織加重係数 ( $w_T$ ) を掛け合わせた等価線量の合計であり、臓器/組織等価線量の重み付けをした平均値として計算される。損害について調整した名目リスク係数 (Sv<sup>-1</sup>) は、全ての職業人 (被ばく時年齢18~64歳) および全ての集団 (被ばく時年齢0~84歳) に対して国際的に適用できる係数を提供するため、性別、年齢および集団固有の数値を考慮した平均値として計算される。

- 6)  $E$ は、がんおよび遺伝性の影響のリスクに関連する外部被ばく線源および内部被ばく線源から受ける体全体に対する線量のリスクを調整した尺度を提供するもので、中心的な放射線防護量として国際的に受け入れられる。
- 7)  $E$ は、防護の最適化、管理区域（線量限度、拘束値および参考レベル）の設定および遵守の確認において使用するための価値ある堅固な量であることが証明されている。
- 8)  $E$ を使用するには、低線量・低線量率被ばくにおいてリスクとの線量反応関係に直線しきい値なし（LNT）の関係があることを仮定すること、急性と慢性の低線量レベルでの被ばくおよび外部被ばくと内部被ばくの影響が等価であると仮定することが必要となる。
- 9)  $E$ は、特定の年齢で性別を平均化した標準人に対して計算されるものである。Publication 103における $E$ の定義では、放射線の輸送計算をするために、標準男性と標準女性の解剖学的モデルを示している。被ばくは、個人や集団に関するものであるが、 $E$ は、何らかの被ばくをした標準人に対して計算されるものである。

（参考）人体の計算上のファントム（または数学的モデル）は、内部および外部の放射線被ばくから臓器および組織におけるエネルギー付与をモデル化するために使用されている。これらのファントムは、一般に、身体構造の形状に合理的な近似をするための幾何学的形状を表す数学的手法に基づいて作られている。このファントムは、核医学会のMIRD（Medical Internal Radiation Dose）委員会の要請により米国オークリッジ国立研究所で開発された。成人MIRDファントムをはじめとして、様々な年齢の乳児および児童を代表するいくつかの小児ファントムが開発され、これらのモデルが、今までのICRP線量係数の計算に使用されている。

より最近では、多くのグループが、医用画像データに基づき、いわゆる断層撮影またはボクセル・モデルを開発し、人間の現実的な解剖学的構造を実現している。国際放射線単位測定委員会（ICRU）と共同で作成したPublication 110は、このようにして得られた個人用の画像データから成人男女の標準ファントムを構築した。両性ファントムよりもむしろ男性と女性のファントムを使用するためには、実効線量の計算において明白な性別の平均が必要であった。したがって、2007年勧告に関する計算では、男女別に等価線量を計算し、性別に平均化された標準人の実効線量の計算を行った（図2-2）。ICRPはまた、異なる年齢の児童および妊婦および胎児のための一連の基準ファントムを刊行している。

更に、Publication 116は、外部放射線に対する職業上の被ばくを考慮して、Publication 103の方法論およびPublication 110の解剖学的モデルを用いて

計算された線量係数の1セットを提供している。考慮された放射線は、単一エネルギー光子の外部ビーム、電子および陽電子；中性子；陽子；パイ中間子（ $-/+$ ）；ミュー粒子（ $-/+$ ）およびHeイオンである。

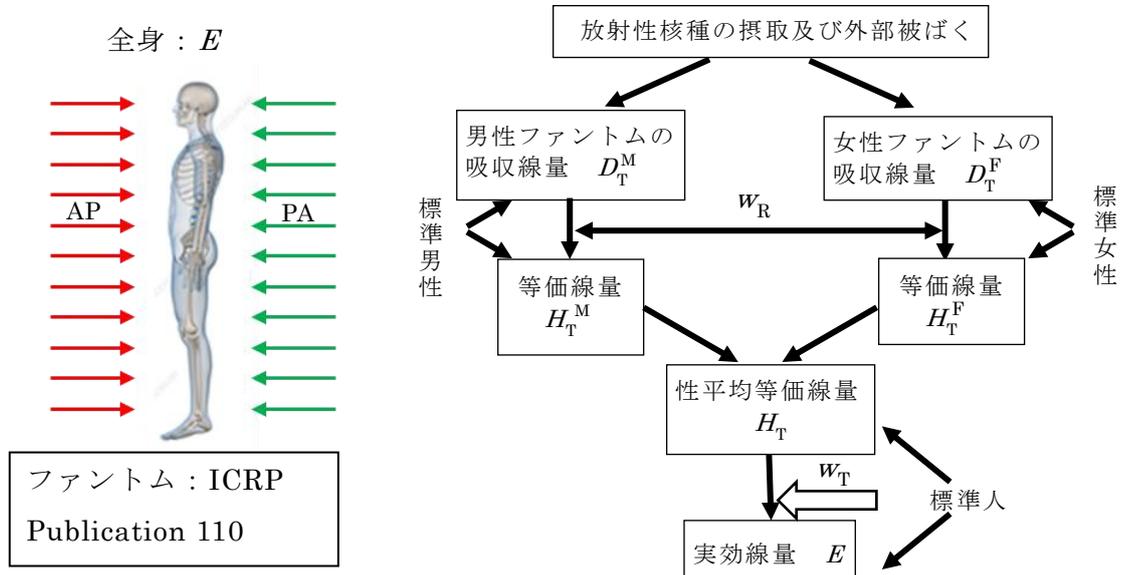


図2-2 標準ファントムPublication 110 (ICRP, 2009a)を用いた実効線量の計算における性の平均化

- 10)  $E$ は、一般的に100 mSvよりも低い線量で使われるであろうが、緊急時被ばくの状況においては、例外的に上限が約1 Svまでの範囲で使用することは合理的である。ただし、外部被ばく線量が均一に受けるものでなかったり、特定の臓器/組織に放射性核種が集中したりする場合は考慮する必要がある。
- 11) ICRPは、放射線作業員や一般公衆に対する外部被ばくと内部被ばくの状況に対して、さらに患者への放射性医薬品の投与に対して、予測的 (prospective) および遡及的 (retrospective) な線量評価に使用するための基準係数 (reference coefficients) として、実効線量係数を与える。
- 12) 一般的に言って、新しいICRP主勧告の発行に伴い線量係数の変更があったとしても、それまでの線量評価について再計算する必要はない。
- 13) 基準線量係数は、摂取したあるいは吸入した放射性核種の化学的・物理的な特定の形態など、特定の被ばく状況のために与えられている。被ばくに関する部位特異的な情報は、可能であれば、また被ばくのレベルがより正確な線量推定に繋がるのであれば使用されることが望ましい。
- 14) 年間被ばく線量の推定において、 $E$ は、年間に受ける外部被ばく、その年に受けた内部被ばくの預託線量の合計として計算される。ここで、預託線量は、成人については摂取後の50年間、小児については70年間積算した線量である。この計算では、保守的に生物学的半減期の長い、長寿命核種を

採用している。

- 15) 実効線量の係数については、子供についていくつかの年齢集団を提供しているが、一般公衆の線量評価を行うには、1歳、10歳、成人のグループで通常は十分である。
- 16) 放射性核種を摂取した際の胎児 (fetus) の実効線量係数が、他の年齢グループの線量との比較するために準備されている。ただし、胎児の線量を考慮する必要があるかもしれない、数種類の放射性核種のみを絞られている。

(参考) 線量評価プロセスでは、Publication 89に規定されているように、年齢および性別の異なる複数の標準人が考慮され得る。6つの年齢層のフルセットは、3ヶ月の幼児、1年、5年、10年、および15歳の小児および成人である。さらに、ICRPは、母親による放射性核種の摂取で生じる胚/胎児および授乳児に対する線量を考慮している (第3.5節参照)。Publication 103では、多くの場合、胚/胎児および授乳児への線量は、成人が受けた線量に比べて小さいことに留意すべきである。しかし、必ずしもそうであるとは限らず、4つの放射性核種、リン32および33、カルシウム45およびストロンチウム89について、胎児/母乳栄養児は、いくつかの被ばく状況において他の年齢群よりも有意に高い線量を受ける可能性があり、母親による毎年の放射性核種摂取量を用い、妊娠中の胎児の慢性被ばくに対する線量係数を適用することで簡略化した線量評価を行うことが適切である。

- 17) グレイ (Gy) あたりのリスクは、年齢、性別および集団によって差があることは認識されているが、実効線量による拘束値や参考レベルの設定や最適化を作業員および一般公衆の全てに対して適用することによって、個人ベースで際だった例を生じさせることなく、実際的で公正で役に立つ防護システムを提供することができる。
- 18) 医療において、様々な診断、インターベンショナルな手技 (例えば、CTや核医学等)、体内組織において放射線の異なる空間分布を与える技術などから受ける被ばく線量を比較するため、標準人に対する  $E$  の推定が行われる。この意味において、 $E$  は、治療する者と患者がリスクについて話をする上で、リスクという幅広いカテゴリーの中に様々なタイプの医療行為を分類して示すことにより、共通の指標を提供するものである。

(参考) 図2-3に異なるモダリティーで様々な部位の診断を行った時、及び全身照射時の、単位実効線量当たりのがん罹患率を示す。このように実効線量は個人の線量を反映したものではないが、臨床医と患者に対するリスクコミュニケーションの目的に、異なる医療行為を大まかにカテゴリー分けす

る指標に使用できる。

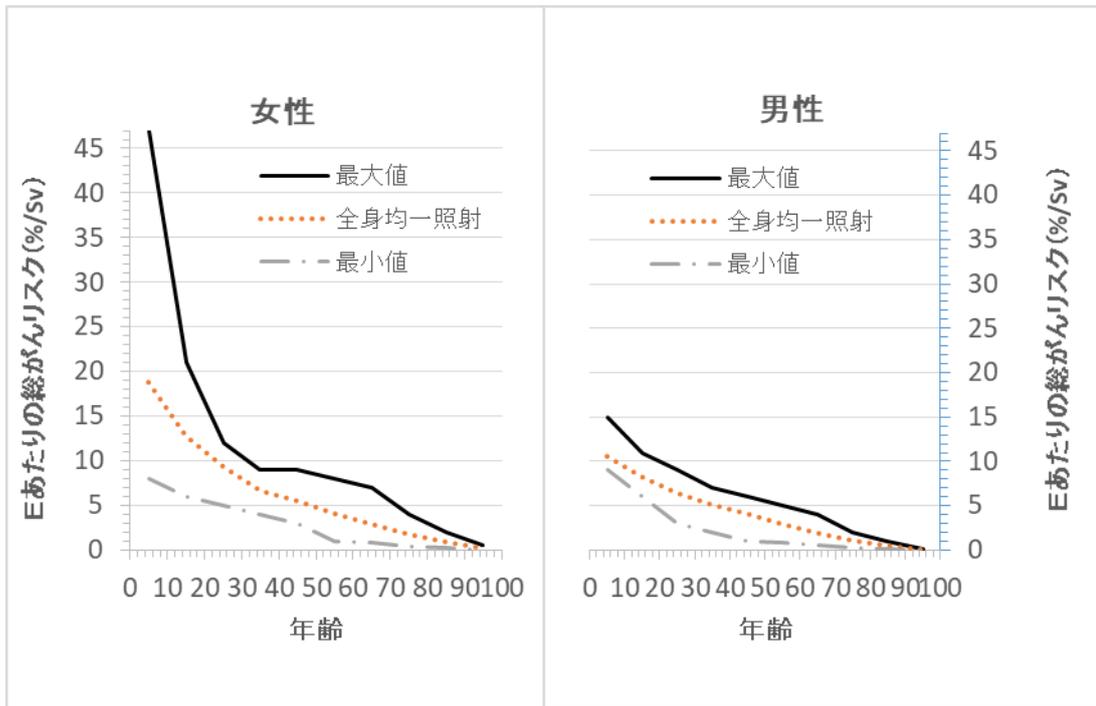


図2-3 アジア人のX線検査における実効線量（1 Sv当たり）に対するがん罹患率（%）  
 実線は、種々の異なる診断手法でX線照射を行った時の最大値、一点鎖線は、最小値  
 を示す。点線は、全身に均一に照射したときのがん罹患率を示す。

出典：Wallら2011のデータ及びICRP（2007a）を利用

- 19)  $E$ は、診断やインターベンショナルな手技、調査研究の計画あるいは不慮の被ばくについて評価上での正当化に関する決定をするための情報を与える上でも使用する。こうした個々の例では、 $E$ は損害に関する一つの尺度を提供する。このようにして、 $E$ は、予測的には、正当化の決定を行うときや被ばくを伴う医療研究を計画するときの指標として用い、また遡及的には、意図しない被ばくや患者に対する過剰被ばくの初期評価において用いる。
- 20) 低線量・低線量率への外挿リスク予測には不確実さがあることを念頭に置いた上で、 $E$ は、年齢、性別および集団によってリスクは様々に異なることを追加的に考慮に入れて、生じ得るリスクのおよその指標として考えることができる。
- 21) 医療行為や線量の大半を感受性の高い単一の臓器が受ける状況、例えば乳房に対するマンモグラフィー、甲状腺に治療上ヨウ素を投与する場合には、当該組織に対して、実効線量ではなく平均吸収線量を使用すべきである。これから病気が悪くなる可能性が高い患者に対する線量について考える際には、放射線リスクの評価において余命についても検討することとなる。

(参考)図2-4に肺および甲状腺がんに対する外部被ばくによる吸収線量当たりのがん発生率リスクを示す。

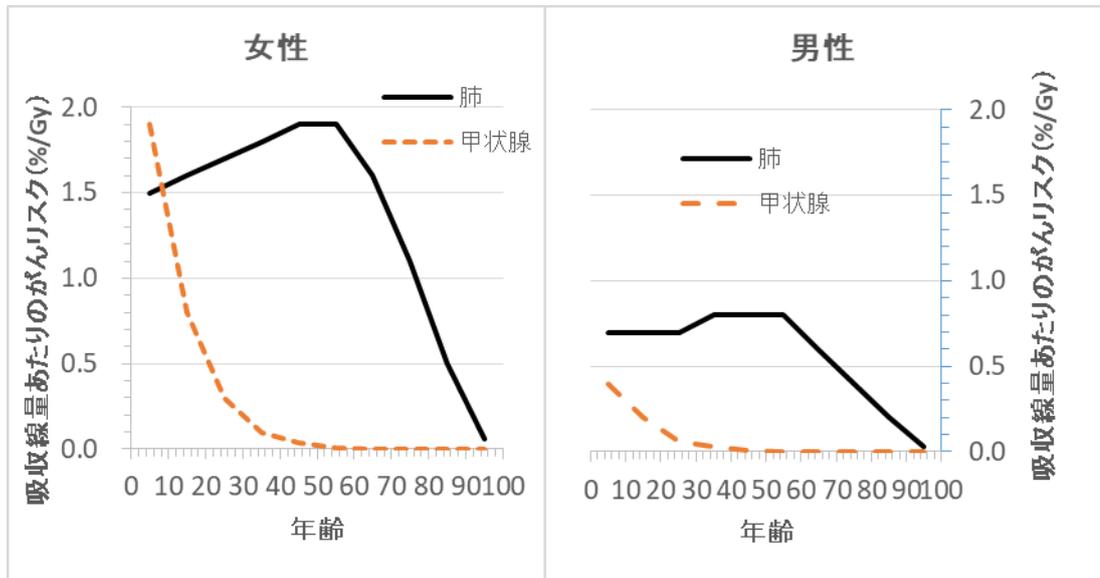


図2-4 肺および甲状腺がんの欧米人に対するγ線の一様な外部被ばくによる吸収線量当たりのがん発生率リスク (%/ Gy) 出典：ICRP (2007a)

22)  $E$ は、生じ得るリスクのおおよその指標として使用するものである。 $E$ を用いて臓器/組織線量の最適な推定値を求めてリスク分析を行うことは適切でなく、また、様々な種類の放射線、年齢、性別、集団特有のリスク因子などの不確実さを考慮する際に、これらの相対的な影響を知るために、 $E$ を適切な情報として利用することも好ましくない。

23) 集団実効線量は、防護の最適化、特に職業被ばくの防護の最適化において価値あるツールである。集団実効線量は、リスクを推定するために使うことは意図していない。集団実効線量を潜在的な/生じ得る健康影響を予測するために使う際には、十分な注意を払い、ベースラインとなる生涯罹病率リスクに関する側面として考慮判断する必要がある。一般公衆の被ばくの集団線量を推定するに際して、特に大きな集団について非常に長期間にわたる被ばくを考慮するに際しては、時間と空間の線量の積算要素を考慮に入れるべきである。

### (3) 実用量に関する記述

現在の使用におけるICRUの実用量のセットは、30年以上前に定義されたものである。外部線源による職業被ばくに対して更新された線量係数(第3.5節参照)を準備してきたPublication 116に続き、ICRUは実用量の定義をレビューした。カーマ近似を使用して(すなわち二次荷電粒子によるエネルギー輸送を

考慮せずに) 換算係数が計算されているので、実用量が低エネルギーおよび高エネルギーで実効線量に対して良好な近似でないことを含み、その定義にはいくつかの欠点があることがわかった。レビューの結果、ICRUは、エリアおよび個人のモニタリングの実用量の新しい定義を提案した (ICRU /ICRU Draft Joint Report、Operational Quantities for External Radiation Exposure)。その提案では、フルエンスまたは空気カーマと換算係数の積として定義し、換算係数はPublication 116で検討されているすべての粒子エネルギーの関数として実効線量の換算係数曲線の最大値から導かれた。結論として、提案された実用量は、人体形状標準計算ファントムを用いて定義しており、実効線量との一致性に富み、防護システムの単純化が図られることとなった。

### 2.1.3 「TG90 環境線源による外部被ばくのための線量係数」(2018年7月版ドラフト)

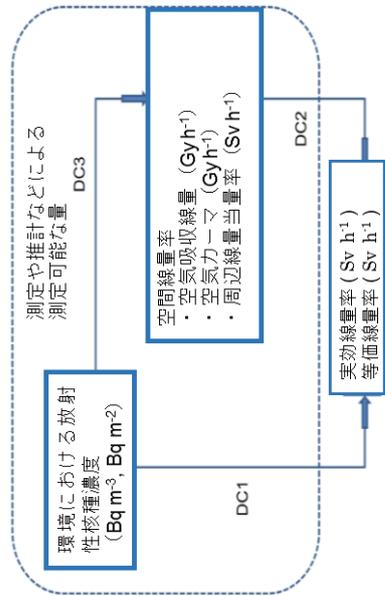
# 「TG90 環境線源による外部被ばくのための線量係数」(2018年7月版ドラフト)に関する概要

## 背景

福島原発事故の後でも、環境に放出した放射性核種からの外部被ばくが重要となった。しかし、ICRPはこれまでに内部被ばくについては、年齢別の線量換算係数を提示しているが、環境被ばくの評価のための外部被ばくの線量換算係数は評価していない。本報告の目的は、環境に存在する放射性核種から被ばくした公衆の放射線防護のためのアセスメントに必要な外部被ばくの年齢別の線量換算係数を提示することである。

## 概要1

・土壌汚染、空中サブマージョン(放射性物質を含む大気に覆われた状態)、水中イマージョン(放射性物質を含む水に覆われた状態)の環境下における外部被ばくに関する放射性核種特有の標準臓器の等価線量率係数と実効線量率係数を提示する。  
 ・環境における実効線量率及び臓器等価線量率の評価系を下図に示す。この評価系では、環境における放射能濃度、自由空間の空気カーマ、空気吸収線量、または周辺線量当量から、実効線量及び/または臓器等価線量を評価するために必要な線量換算係数を提示している。



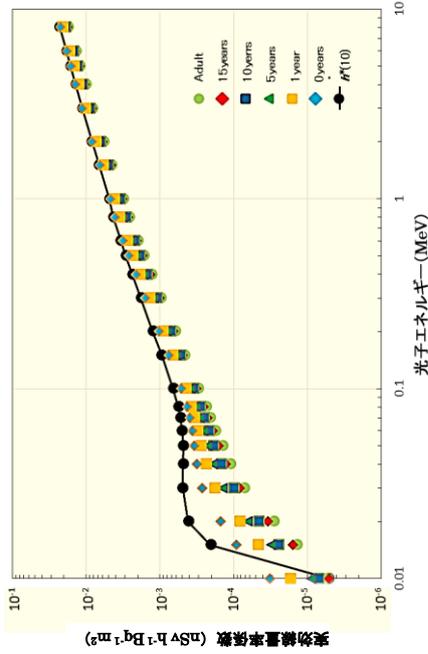
## 概要2

・本レポートは、地面の表面や様々な深さの土壌汚染、汚染した大気中のサブマージョン及び汚染した水中のイマージョンでの被ばく経路における年齢ごと(新生児、1歳、5歳、10歳、15歳、および成人)、実効線量率及び臓器等価線量率係数を提示した。これによってICRPは初めて環境中の放射性核種への被ばくに関する標準の線量係数を確立した。周辺線量当量率や空気カーマ率も計算したが、成人や新生児の両方において、実効線量率の保守的な推定値を与えることが分かった。これらの線量率係数は、以下の用途に適用できる。

- (a) 仮定される放射線事故による公衆への影響の予測
- (b) 被ばくした住民のための放射線防護方策を策定するための線量推計
- (c) 通常運転中の原子力、放射線施設からの放射性核種の排出後の評価
- (d) 環境中の自然起源放射性核種の評価

本レポートは戸外の標準的な被ばく状況での線量係数を提示しているが、実際の線量評価の際には、ユーザーが建物の遮蔽や公衆の戸内での居住係数などを考慮する必要がある。

一例として「地表面に線源が広がった時の光子エネルギーに対する実効線量率係数及び地上1m高さにおける相当する周辺線量当量率」のグラフを右に示す。



## 【パブリックコメントの概要】

- ・環境中に存在する線源についての線量換算係数をICRPから提示されるのを歓迎する。
- ・規制当局は、この文書のような根拠に基づきアプローチを利用して、線量評価の基礎を提供する。
- ・詳細については、様々な問題点があり、改善が期待される。
- ・屋根や側溝などの環境媒体に蓄積された放射性核種の放射線被ばくを緩和するための公衆衛生生活動について考える場合、示された概念は、リスク削減の見積もりにも役立つはずである。

### 2.1.3.2 概要

#### (1) TG90 レポート策定の背景

公衆は自然起源の放射性核種のような環境中の様々な外部放射線源によって被ばくしており、チェルノブイリ事故や東京電力福島第一原発事故の後でも、環境に放出した放射性核種からの一般公衆の被ばく経路のうち外部被ばくが重要となった。しかし、ICRP はこれまでに内部被ばくについては、年齢別の線量換算係数を提示しているが、環境被ばくについての外部被ばくのための線量換算係数は評価していない。本レポートの目的は、被ばくした子供や成人について放射線防護のアセスメントに必要な環境に存在する放射性核種からの外部被ばくを評価するための年齢別の線量換算係数を提示することである。

#### (2) 環境被ばくからの線量評価のための枠組み

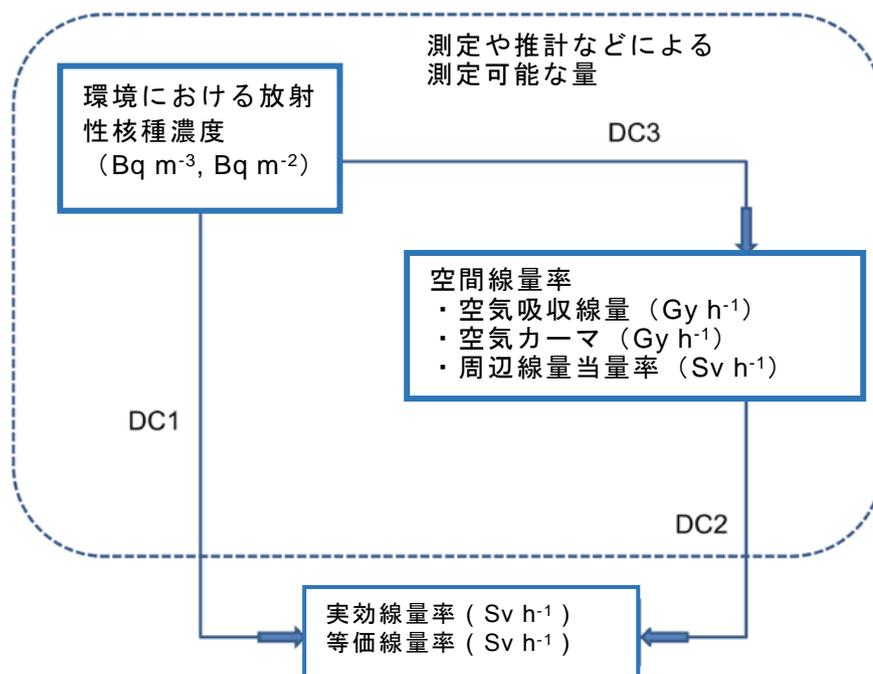


図 3-1 環境における実効線量率及び臓器等価線量率の評価の概念図

環境における実効線量率及び臓器等価線量率の評価には、図 3-1 に示すように、DC1, DC2, DC3 の 3 つの方法がある。DC1 は土壌、空気や水のような環境の媒体における核種濃度から直接換算する方法で、媒体での濃度は、 $\text{Bq kg}^{-1}$  や  $\text{Bq m}^{-3}$  の単位が、また土壌の汚染の場合には、 $\text{Bq m}^{-2}$  のような面積あたりの放射能の沈着密度がよく用いられる。DC2 は、空間線量率の測定に基づいた換算を利用する方法で、空間線量率は、空気カーマや空気吸収線量(単位  $\text{Gy h}^{-1}$ )が用いられていたが、実用量が導入された後は、周辺線量当量率(単位  $\text{Sv h}^{-1}$ )が環境

モニタリングにも適用された。これらの空間線量率の多くのデータが蓄積され、実効線量率や等価線量率に換算される。UNSCEAR では、空気吸収線量 (Gy) から実効線量 (Sv) への換算のために 0.7 の値を使用してきた。この値は、代表的な値であり、個人線量を評価する際には年齢やエネルギーによっては問題が生じる。福島原発事故後では、周辺線量当量は、換算しないでそのまま実効線量に等しいと見なし、公衆の線量を過大評価することになった。DC3 は空間線量率の推計が、実効線量率と等価線量率の推計に付加して必要な場合に用いられる。例えば、事故直後に、地表面の沈着の密度の推計のデータがすでにあるが、空間線量率の実測値が十分でない場合に、実効線量または等価線量を計算するために、まず環境中の放射性核種の濃度を DC3 の方法で 1 m の高さでの空間線量率に換算した後に DC2 を用いて実効線量や等価線量に換算する。

線源の条件が典型的でなく、DC3 が信頼できる空間線量率の推計値を提供できず、直接的な測定が難しい場合は、汚染状況の特別な条件を考慮した線量率を評価して、その評価した値に DC2 を用いて実効線量及び等価線量に換算する。このアプローチは、福島原発事故後にも単位面積あたりの沈着密度および放射性核種の深度分布が、場所によって著しく変化する場合、特に除染作業が実施された場合に用いられた。

### (3) 環境放射線場のシミュレーション (ステップ 1)

本レポートでは、環境放射線による外部被ばくのシミュレーションのために以下の 3 つの環境の線源の事例に取り組んだ。

- ① 表面の完全無限平面線源として、地面の異なる深さでシミュレートした  
土壌(地面)汚染
- ② 空気中の半無限容積線源としてシミュレートした空気サブマージョン
- ③ 水中の完全無限線源としてシミュレートした水イマージョン

①と②は人体が地面に直立して立っていることを、また③は人体が完全に液面下に浸っていることを仮定している。

放射線粒子の環境中の輸送は PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) というモンテカルロシミュレーション計算コードを用いて計算した。環境の放射線の輸送シミュレーションにおいては、光子だけが輸送され、光子の相互作用で生成された二次電子は扱っていない。これは、二次電子は、連続的にエネルギーを失い、環境媒体の中の短い距離で停止するからである。ただし、二次電子によって生成された制動放射光子は二次電子に匹敵する最大エネルギーを持ち、長い距離を伝搬することができるので、厚いターゲットの制動放射近似モデルに基づいて計算した。電子については、一次電子と二次電子の両方が環境中で輸送される。

汚染された空気や土壌の中からの単一 (単色) エネルギーの放射線放出によ

る放射線場は、高さ 2 m、直径 0.6 m の垂直の円柱の表面での、位置、入射方向および入射粒子のエネルギーとして表現される。この円柱は被ばくする個人を囲むもので、「カップリングシリンダー」という用語で呼ぶ。

図 3-2 は、カップリングシリンダーの表面で記録される粒子を示している多くの異なる核種により放出される放射線の広いエネルギー範囲を扱うために、考慮する光子と電子のエネルギーは単色とし、0.01~8 MeV の範囲とした。

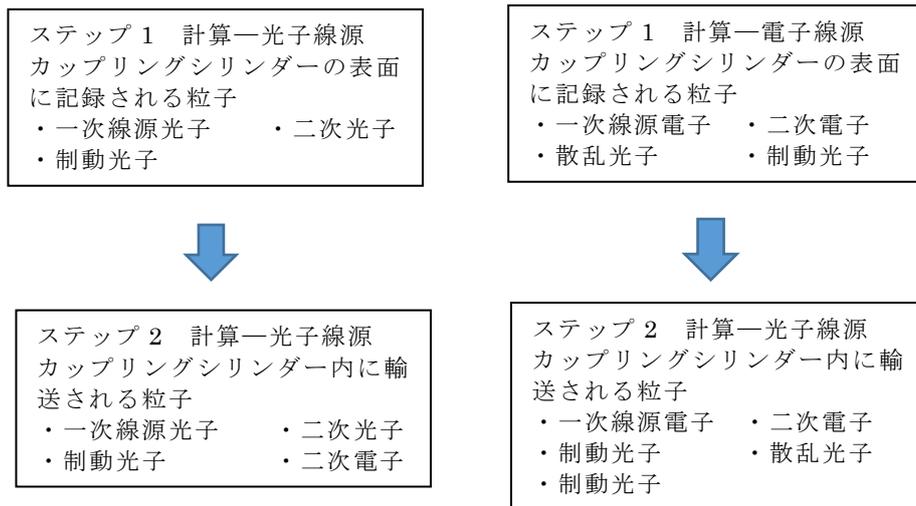


図 3-2 計算のステップ 1 とステップ 2 の間の粒子の輸送の概念図

### 1) 土壌汚染

沈着直後は、地面に沈着した放射性核種は地表面での平坦な線源を形成すると仮定する。時間が経つと、これら放射性核種は、移動または土壌中へ浸出し、異なる深度分布を形成する。単一エネルギー放射能線源は、光子の平均自由行程 (mean free paths) (以下「mfp」という。) で表した土壌の深さでの平面線源として、定義した。

図 3-3 は、土壌の深度 0.2mfp での 0.5MeV の線源から高さ 0 m から 0.4 m および 1.60 m から 2.00 m での光子のエネルギー分布と角度分布を示す。

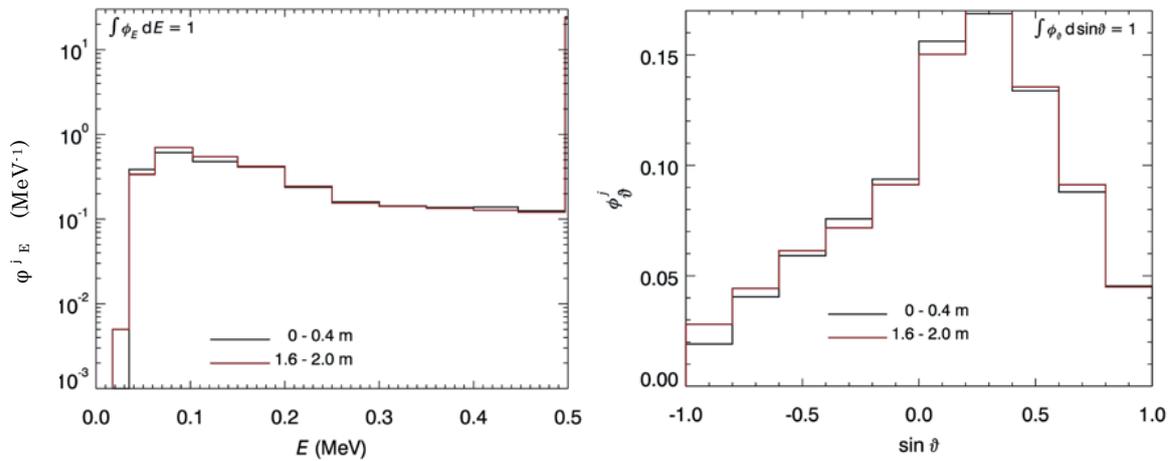


図 3-3 0.5 MeV の単一エネルギーの光子を放出する 0.2 mfp の深さの土壌中の等方性無限線源エネルギー分布 (左図) 及び角度分布 (右図)。縦軸は、表示した高さの範囲における、単位エネルギーあたりの光子数(左図)、 $\sin$ (入射角度)あたりの光子数(右図)。すべての高さについてのそれぞれの分布を区別するために、光子数 ( $\phi$ ) には、 $i$  の上付き添字を付けている。

## 2) 汚染した空気のサブマージョン

空気サブマージョンシナリオにおいては、汚染した空気は、放出され地点から離れた場所で地上に直径 5 mfp (1 MeV 光子では約 490 m)、高さ 3 mfp (1 MeV 光子では約 294 m) の大気中に放射能濃度が均質なガス状の放射能があることを仮定し、その中央にカップリングシリンダーを配置している。図 3-4 に示すように、空気サブマージョンのジオメトリは、範囲が半無限であると見なし、地面との界面は、汚染のない無限の面積の平坦な表面であると仮定する。左図の環境場の計算で、空気の領域で放出される粒子 (光子) は、輸送され、カップリングシリンダーの表面に入射する粒子 (光子) の位置、角度、エネルギーが記録される。その後、右図の臓器線量の計算で、記録されたデータを用いて、シリンダー表面から放出される粒子およびシリンダー内の線源から放出される光子と電子の入射フルエンスを計算する。

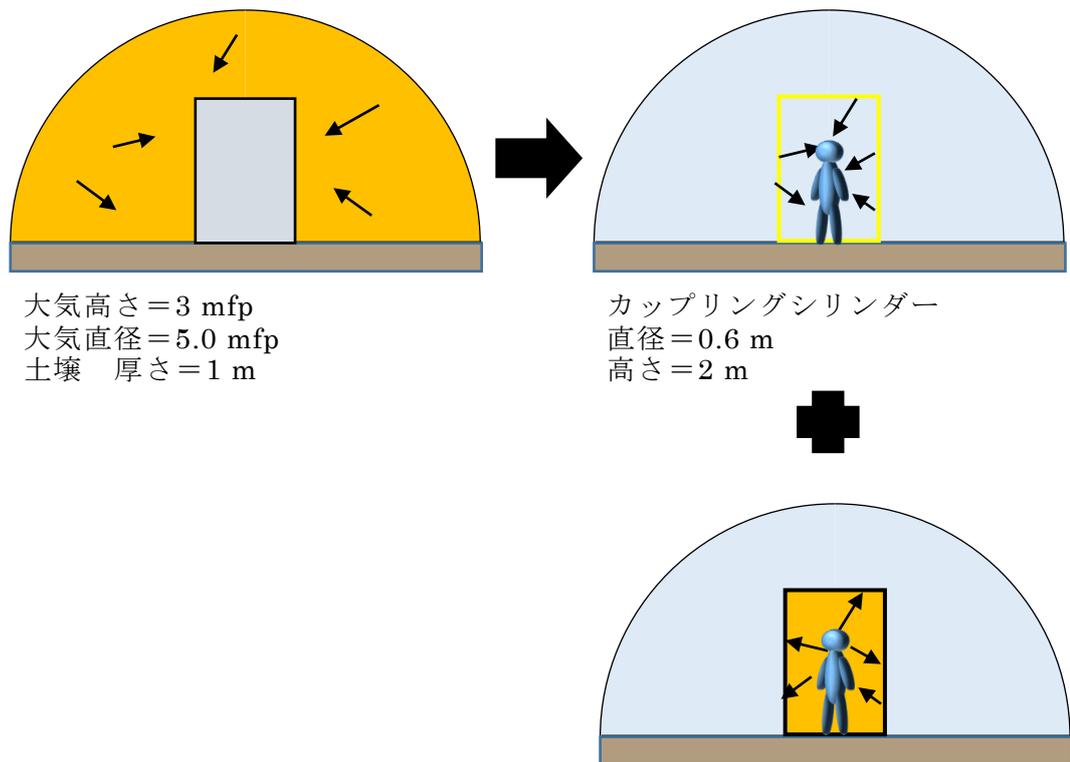


図 3-4 汚染空気へのサブマージョンをシミュレートするジオメトリの概念図。黄色の領域は線源領域を示す。臓器等価線量についてはカップリングシリンダーの内側媒体は空気である。電子による被ばくについては、粒子は、シリンダーの表面だけからではなく中側からも発する。(光子については、空気中の mfp は長く、シリンダーの中の線源は、等価線量の計算に寄与しないのでこのことは必要ない)

図 3-5 は、高さ 0 m から 0.4 m および 1.60 m から 2.00 m での 0.5 MeV の線源からの環境での光子のエネルギースペクトルを示す。

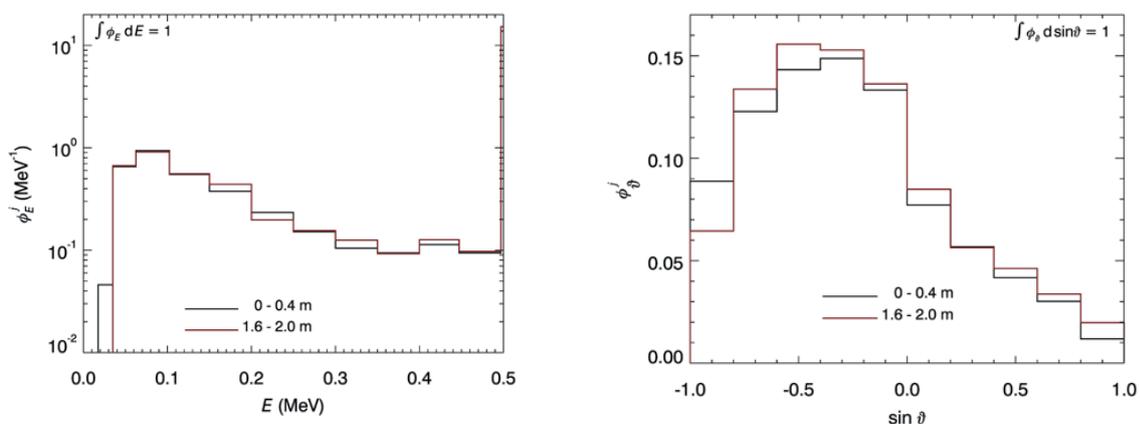


図 3-5 0.5 MeV の単一エネルギーの光子を放出する空気中の半無限線源のエネルギー分布 (左図)、角度分布 (右図)。縦軸は、表示した高さの範囲における、単位エネルギーあたりの光子数(左図)、 $\sin$  (入射角度)あたりの光子数(右図)。すべての高さについてのそれぞれの分布を区別するために、光子数 ( $\phi$ ) には、i の上付き添字を付けている。

### 3) 水イマージョン

水イマージョンは、環境放射線被ばくの経路では希であるかもしれないが、福島原発事故では、放射性のヨウ素やセシウムが水道水から検出され、入浴に使用したことで汚染された水による被ばくが推定された。図 3-6 に水イマージョンジオメトリの概念図を示す。線源のジオメトリは、範囲は無限と仮定し、ファントムは、水の中に完全に浸されて、半径 2 m の球の中心に位置すると仮定する。6 つの標準年齢の男性と女性のための臓器等価線量率換算係数は、1 回のステップで計算され、カップリングシリンダーは必要でなかった。

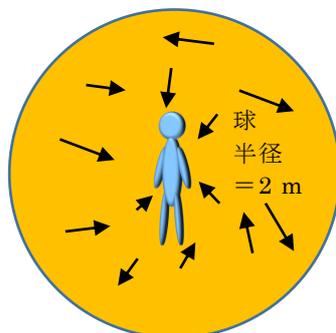


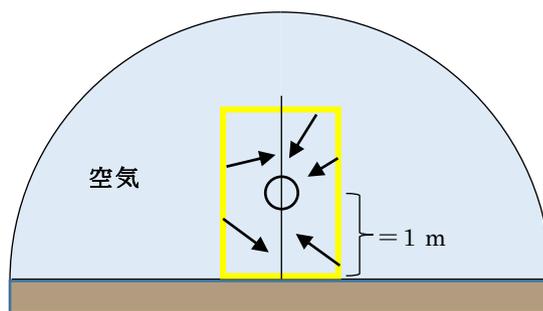
図 3-6 水イマージョンの概念

### 4) 環境場における空気カーマと周辺線量当量の計算

空気カーマと周辺線量当量は環境被ばくの放射線防護の目的で、広く使われてきた。

空気カーマは光子エネルギーフルエンスに関連した基本的な量であり、自然環境においては UNSCEAR が空間線量率を表すために使ってきた空気吸収線量と実質的に等価である。拡張放射線場に置かれた ICRU 球の 10 mm の深さの線量当量として定義された周辺線量当量は、保守的に実効線量を評価することを目的としている。この実用量は、元は作業者の放射線防護のために導入されたものであるが、環境モニタリングにも応用され、 $H^*(10)$  のモニタリングのための測定器は、入射する光子のエネルギーと入射角度の分布の両方の観点で等方性の応答を持っている。空気汚染や地面の沈着密度から空気カーマや周辺線量当量への換算係数は多くの研究者が公表しているが、本レポートでは、上で述べた土壌汚染と空気サブマージョンの被ばくジオメトリについて地面から 1 m の位置における空気カーマと周辺線量当量を考慮して、この換算係数を再計算した。図 3-7 は計算のジオメトリを示す。

この結果に基づいて、放射能濃度から周辺線量率に関係付ける周辺線量当量率係数  $\dot{h}^*(10)$  [ 単位 :  $\text{nSv h}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^2$  または  $\text{nSv h}^{-1} \text{Bq}^{-1} \text{m}^3$  ] を導出できる。



半径 = 50 m	カップリングシリンダー
土壌厚さ = 1 m	半径 = 0.60 m
	高さ : 2 m

図 3-7 空気カーマと周辺線量当量の計算概念図

実効線量の個人モニタリングは、個人線量当量  $H_p(d)$  で校正した線量計で実施される。作業グループ (TG) は、本レポートには  $H_p(d)$  を含めないことを決めたが、個人モニタリングを環境で用いる場合は、問題点がある。校正は、入射角度 ( $\alpha$ ) が  $0^\circ$ 、つまり正面からの一方向からの照射で行われるが、本レポートで考慮される環境場では、広いエネルギー分布の光子が様々な方法から入射するが、標準放射線場の標準化や校正方法について、ISO (国際標準化機構) や IEC (国際電気標準会議) から勧告されていない。日本では、2011 年以降、環境放射線場における一方向照射で校正した線量計で個人モニタリングが多く実施され (原子力規制委員会の Website2013)、個人モニタリングが実効線量評価のために合理的な値を示しているかが関心事であるが、佐藤ら (2017) は観察した条件において、エリアモニタリングと個人モニタリングの両方について実効線量の合理的な推定値を示していることを報告した。

#### (4) 単一エネルギー粒子に関する線量率係数の決定 (ステップ 2)

##### 1) 人体形状ファントムにおける光子および電子の輸送のモンテカルロ計算

これまでに議論した汚染した土壌と空気の被ばくジオメトリに関して、ステップ 2 の計算は、ステップ 1 の計算からのシミュレートした放射線場から結論づけられる性別及び年齢別の各々のファントムにおける臓器線量係数の計算を含んでいる。カップリングシリンダーの表面から発する粒子の輸送計算は PHITSversion2.66 を用いて実施した。

## 2) 土壌汚染についての線量率係数

図 3-8 の左図は、ステップ 1、右図はステップ 2 の計算のジオメトリを示している。右図においてファントムはカップリングシリンダーの内側に置き、隙間のスペースは空気で満たされている。左図は無限平面上にカップリングシリンダーがおかれた状態を示している。

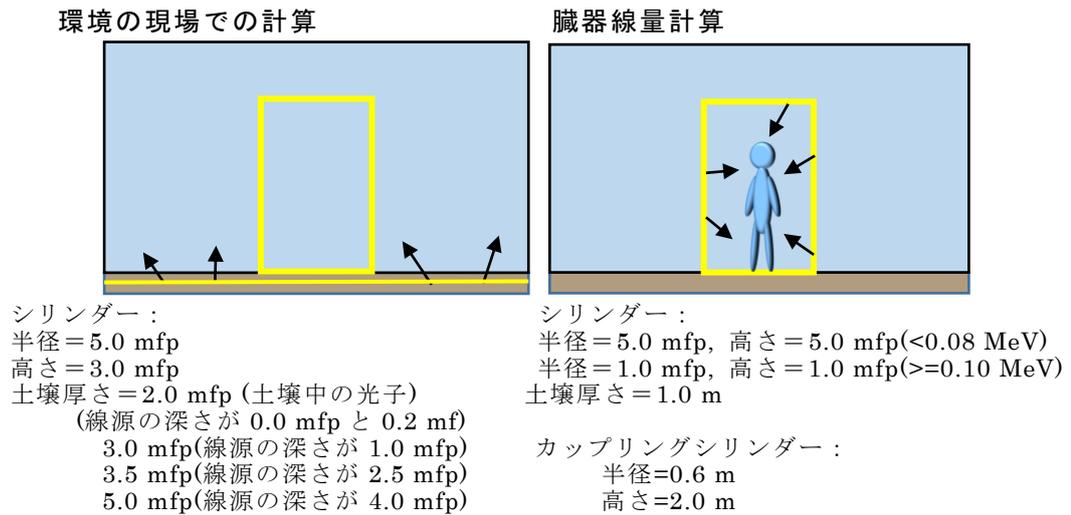


図 3-8 土壌汚染をシミュレートするジオメトリの概念図

計算された単一光子エネルギーごと、年齢ごとの実効線量率係数と周辺線量当量率の結果を下図に示す。

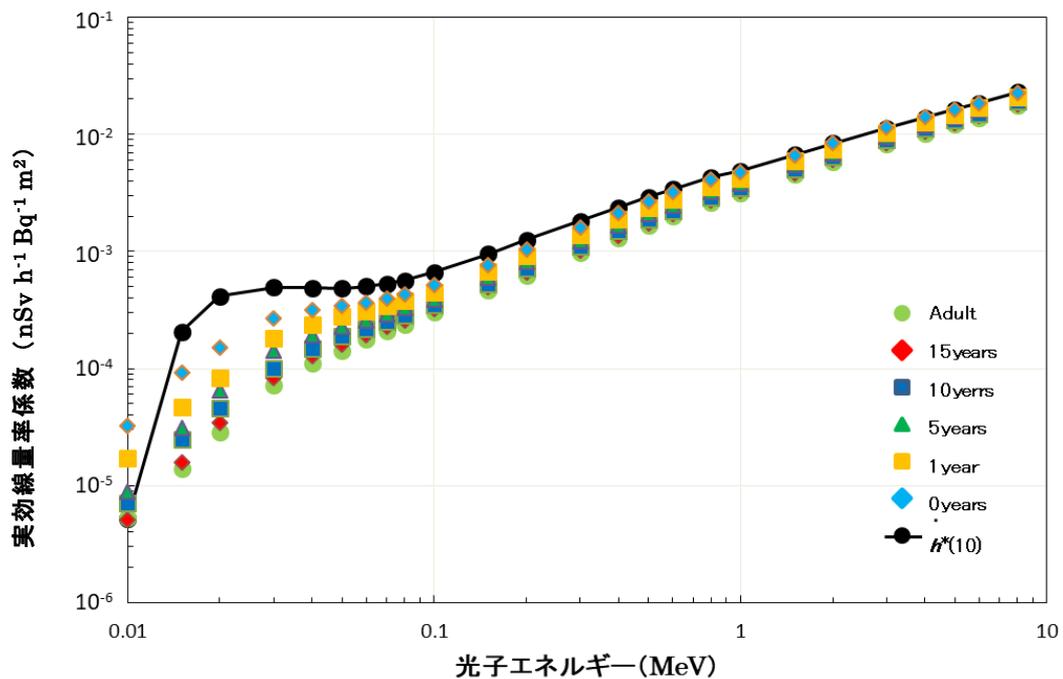


図 3-9 地面の平板線源としての表面に分布した単一エネルギーの光子についての実効線量率係数とそれに相当する地面から 1 m の高さでの周辺線量当量率  $\dot{h}^*(10)$

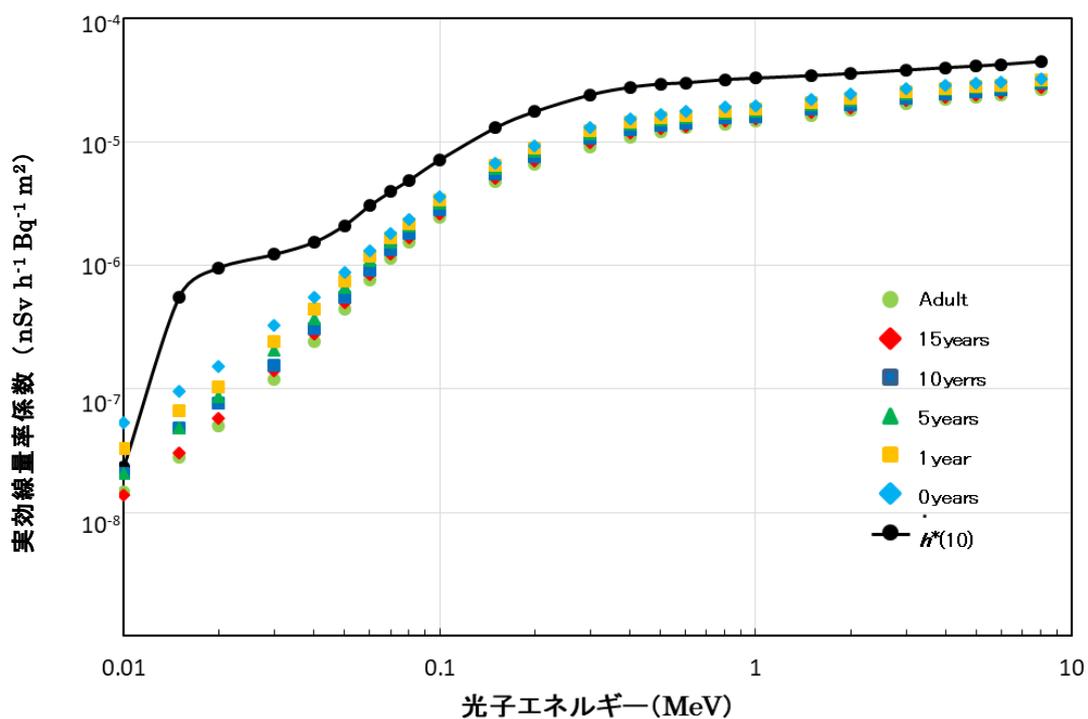


図 3-10 地面の平板線源としての土壌の深さ 4 mfp に分布した単一エネルギーの光子についての実効線量率係数とそれに相当する地面から 1 m の高さでの周辺線量当量率  $h^*(10)$

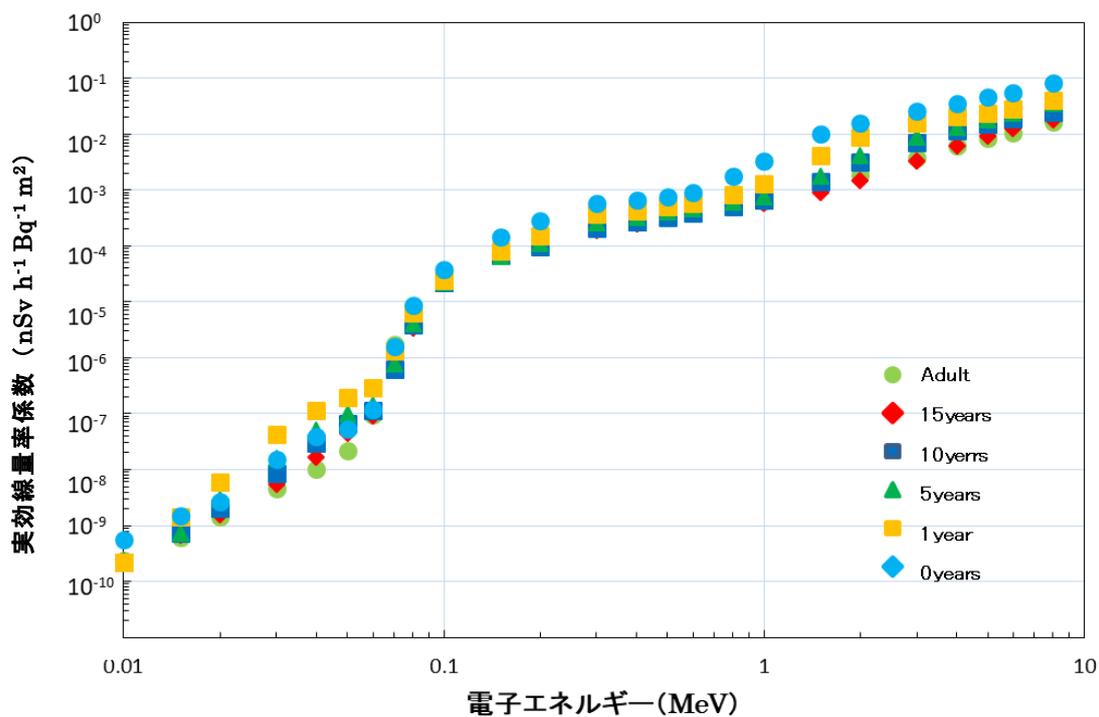


図 3-11 地面の平板線源としての表面に分布した単一エネルギーの電子についての実効線量率係数

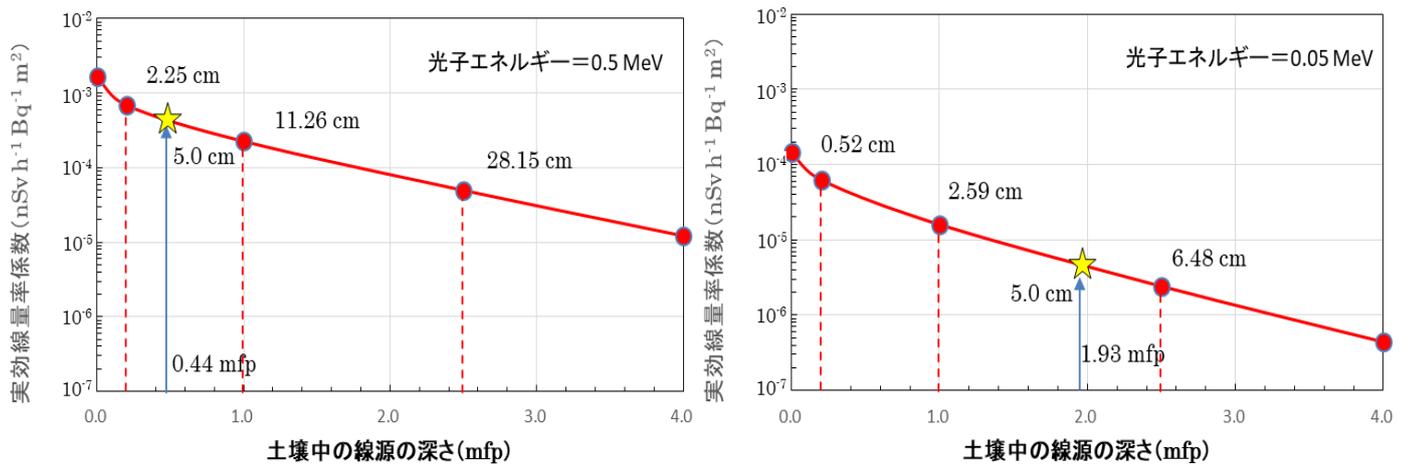


図 3-12 0.5 MeV および 0.05 MeV の光子の線源の土壤中の深さ(平均自由行程(mfp))の関数としての成人ファントムについての実効線量率係数

### 3) 空気サブマージョンについての線量率係数

計算された単一光子エネルギーごと、年齢ごとの空気サブマージョンについての実効線量率、周辺線量当量率および空気カーマ率の係数の計算結果を以下にまとめる。

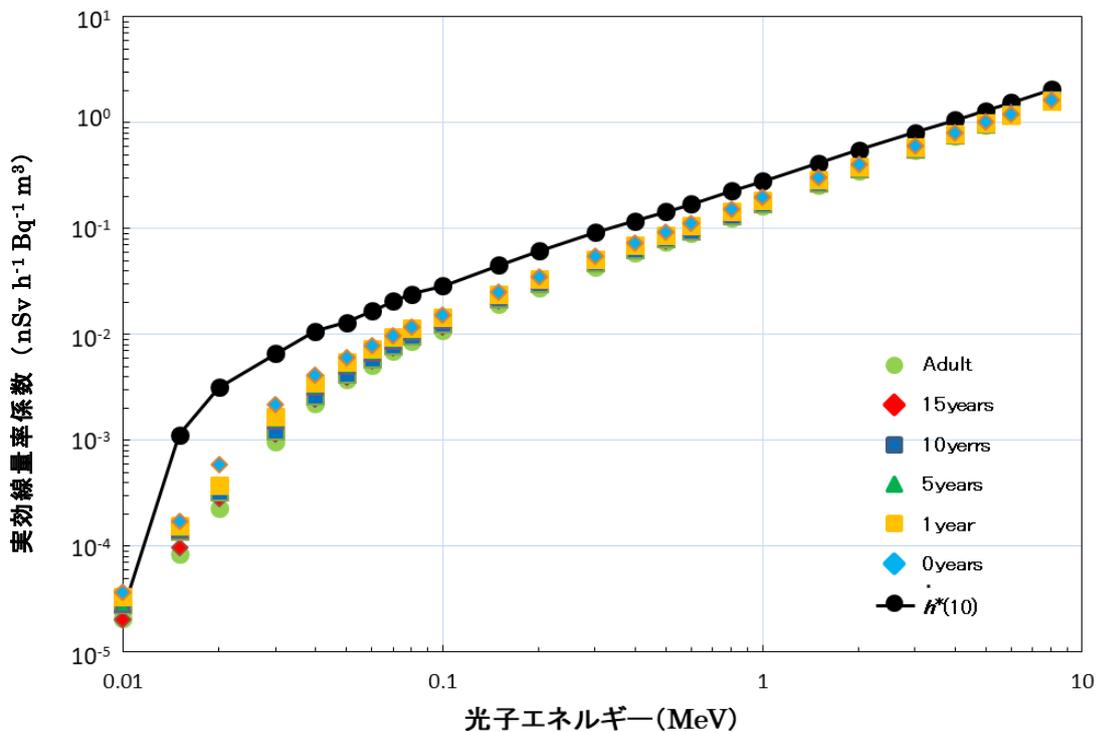


図 3-13 光子エネルギーの関数として大気中に均一に分布する単一エネルギーの光子線源についての実効線量率係数

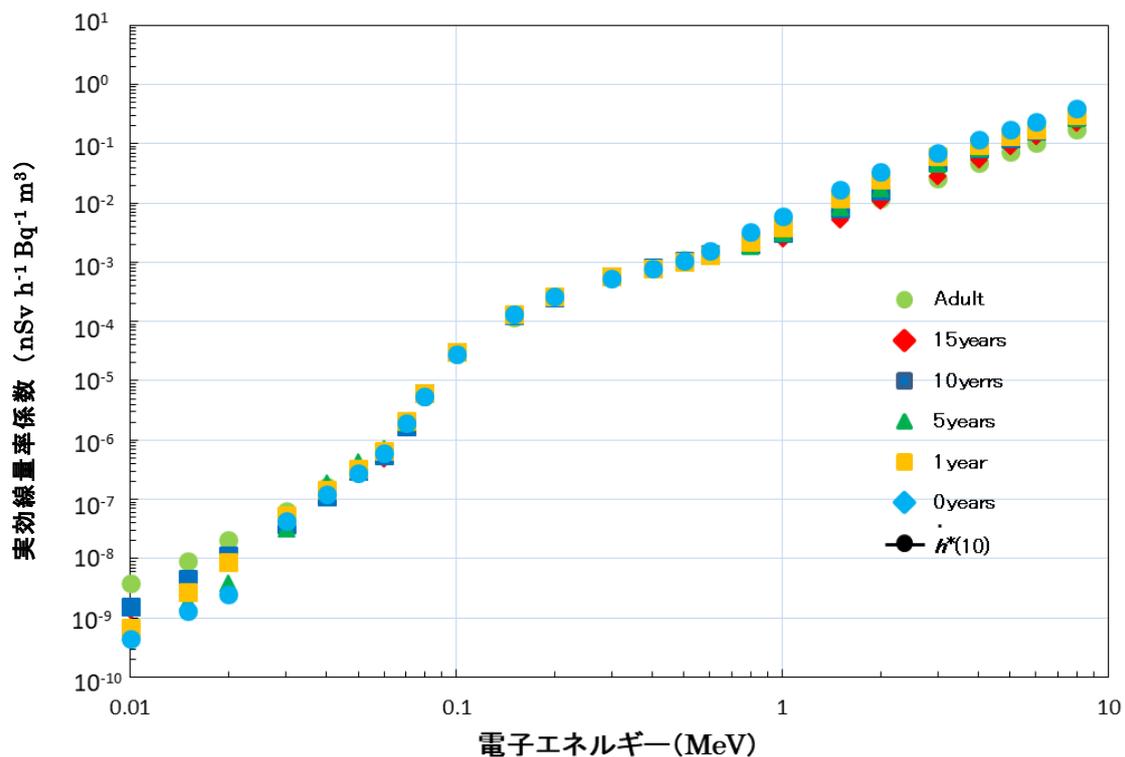


図 3-14 電子エネルギーの関数として大気中に均一に分布する単一エネルギー電子線源についての実効線量率係数と地面から 1 m の高さの周辺線量当量

#### 4) 水イマイジョンについての線量率係数

計算された単一光子エネルギーごと、年齢ごとの水イマイジョンについての実効線量率係数と周辺線量当量率の計算結果を下図に示す。

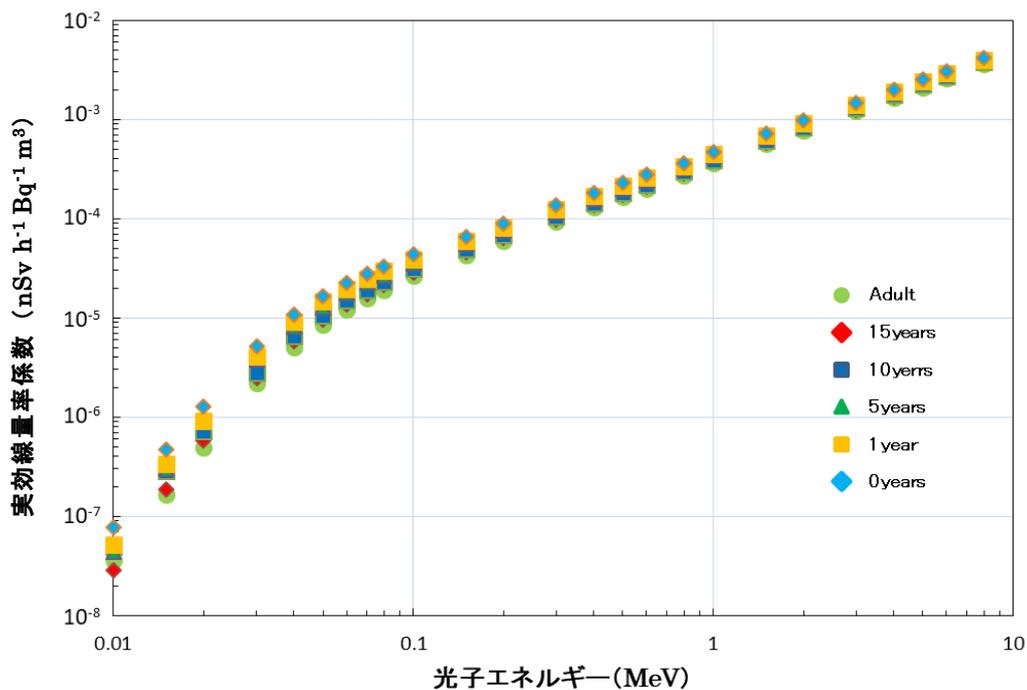


図 3-15 水中に均一に分布した単一エネルギー光子線源についての実効線量率係数

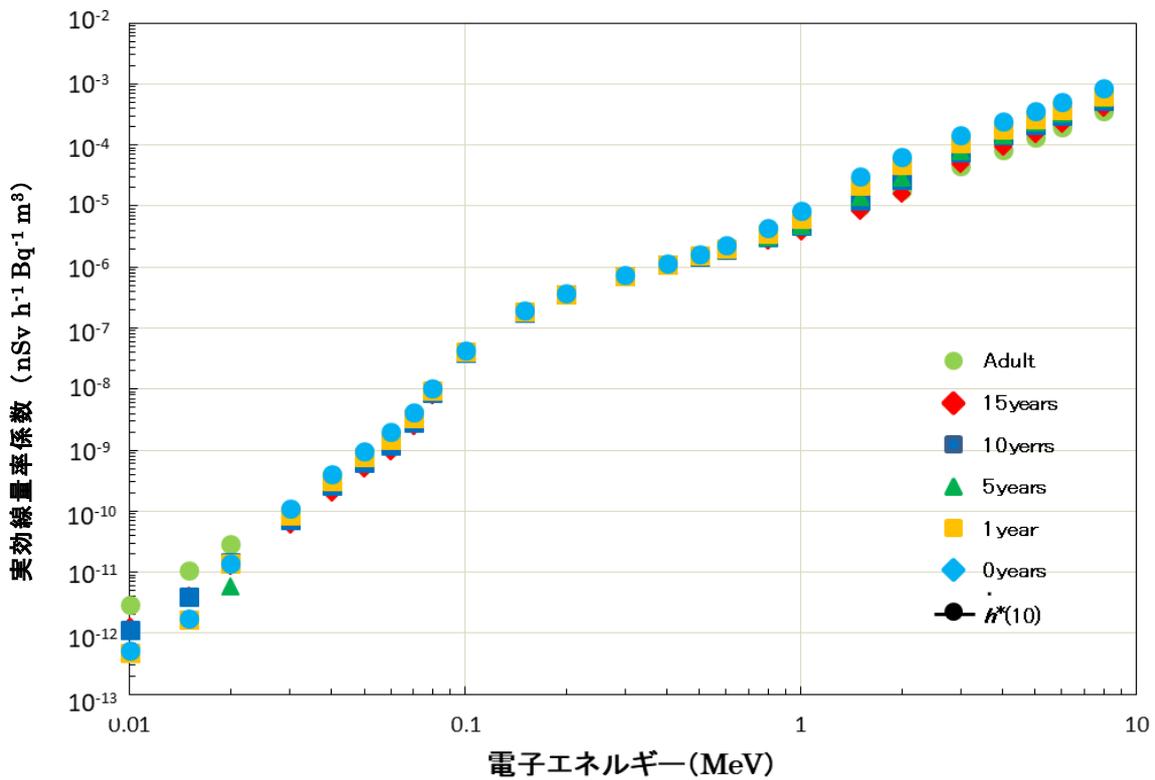


図 3-16 水中に均一に分布した単一エネルギー電子線源についての  
実効線量率係数

#### (5) 結論

本レポートは、地面の表面や様々な深さの土壌汚染、汚染した大気中のサブマージョン及び汚染した水中のイマージョンでの被ばく経路における年齢ごとの実効線量率及び臓器等価線量率係数を提示した。これによって ICRP は初めて環境中の放射性核種への被ばくに関する標準の線量率係数を確立した。周辺線量当量率や空気カーマ率から計算した値は、成人や新生児の両方において、実効線量率の保守的な推定値を与えることが分かった。これらの線量率係数は、以下の用途に適用することが期待される。

- ① 仮定される放射線事故による公衆への影響の予測
- ② 被ばくした住民のための放射線防護方策を策定するための線量推計
- ③ 通常運転中の原子力、放射線施設からの放射性核種の排出後の評価
- ④ 環境中の自然起源放射性核種の評価

本レポートは、戸外での被ばく状況における線量係数率を提示したが、建物の遮蔽や公衆の行動による影響については扱っていない。実際の被ばく状況において線量評価する場合は、場所による地形の影響や屋内に居住する時間の割合（居住係数）などについて、考慮する必要がある。また、エネルギーごとの換算係数の他に、主な核種についての換算係数も有用である。

付属書 A 骨格への線量評価

フルエンスから、骨の線量への換算の方法について記述されている。

付属書 B 皮膚への線量評価

皮膚線量への換算方法と土壌汚染、空気サブマージョン、電子の皮膚線量係数の計算結果のグラフを提示している。

付属書 C 電子補遺の内容

## 2.2 海外動向に関する調査

3件のレポート(ドラフト版)について、海外の関係機関における検討状況を調査し、取りまとめた。

調査対象は、国際原子力機関（IAEA）、国際標準化機構（ISO）、国際電気標準会議（IEC）、欧州委員会（EC）、欧州放射線線量評価グループ（EURADOS）、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）、米国原子力規制委員会（NRC）、米国エネルギー省(DOE)、米国環境防護庁（EPA）、カナダ原子力安全委員会（CNSC）、フランス原子力安全局（ASN）、ドイツ放射線防護委員会（SSK）、アイスランド放射線安全委員会（IRSA）及び韓国原子力安全技術院（KINS）である。これらの関連機関の放射線防護関連の担当者にアンケートをメールで送付する方法で調査した。調査の実施期間は平成30年12月26日から平成31年2月25日の期間である。なお、回答は組織としてではなく、あくまで担当者個人の見解であることを付記しておく。また、経済協力開発機構／原子力機関（OECD/NEA）は、組織における検討状況ではなく加盟国である米国のDOE、EPAやカナダ、ドイツ、フランス、アイスランドにおける関連機関へのアンケートを実施した結果について回答であった。原子放射線の影響に関する国連科学委員会（UNSCEAR）にもアンケートを送付したが、調査期間内に回答は得られなかった。

### 2.2.1 「外部放射線被ばくに関する実用量」についての対応

提示された実用量の定義の改訂を取り入れた場合の影響について検討するための対応をとっている国際機関は3件であった。

検討をしている機関については、検討状況やスケジュールを確認し、検討していない機関については、導入した場合の影響についてどのように計画をしているかを確認した。

表2-3 「外部放射線被ばくに関する実用量」についての回答

国際機関	当該機関の専門性	回答
IAEA（国際原子力機関）	放射線安全基準策定	<b>検討している。</b> →2017年にIAEAとICRUの協定によりコメントを提出、2019年に開催される医療における品質管理に関する国際会議で議論するためのICRP、ICRUとの共同セッションを計画している。
ISO（国際標準化機構）	放射線防護や測定器校正などの方法の標準化	<b>検討していない。</b> →規制に用いられることになれば、検討することになると考えられる。議論されることが予想されるWGは、WG2(標準放射線場)、WG19(外部放射線の個人

		モニタリング)、WG21(民間航空機における宇宙線の線量評価)である。
IEC (国際電気標準会議)	測定器の標準化	<p><b>検討していない。</b>(2017年のIEC/TC45上海会議では、議題となっていない。)</p> <p>→定義及び換算係数の変更に伴い、対象線量/用語の定義/エネルギー特性/換算係数表等の見直しを実施することになる。ICRP勧告が発行された後に製品の規格変更に取り組む。IEC規格の場合見直しが起案されてから刊行に至るまで、3~4年かかるのが実態、国内対策委員会として、2019年4月に開催されるIEC/TC45パリ会議で、動向を注視していくとともに、実用量の変更がIEC規格に与える影響を調査することを、各国に提言する予定である。</p>
EC (欧州委員会)	欧州連合 (EU) の放射線防護基準の法令化	<p><b>検討している。</b></p> <p>→6月に開催される欧州原子力共同体条約31条の検討を付託された専門家グループ(電離放射線と放射線防護に関連するすべての課題についてECに助言を与える科学的専門家)の会合にICRUの代表を招待して説明してもらい、取り入れた場合の影響を議論する計画がある。</p>
EURADOS (欧州放射線線量評価グループ)	線量評価	<p><b>検討している。</b></p> <p>→線量評価のコミュニティーの代表として、取り入れた場合の影響についてEURADOSのメンバーの意見を集めている。最初の段階としては、意見をまとめることが目標である。</p>
NRC(米国原子力規制委員会)	原子力/放射性物質の規制の監督	<p><b>検討していない。</b></p> <p>→われわれの機関は、本ドラフトで提案された実用量の改訂された定義の影響を考慮するような対応をとっていない。</p>
DOE (米国エネルギー省)	エネルギー安全保障、核セキュリティなどの政策策定	<p><b>検討していない。</b></p> <p>→DOEは、自主規制の権限をもっている。このドラフトの勧告の影響に取り組む他省庁と連携する。</p>
EPA (米国環境保護庁)	環境における公衆の防	<p><b>検討していない。</b></p> <p>→個人的見解であるが、米国の他の省庁は、パブリッ</p>

	護基準の策定	クコメントの対応はしたが、その他の対応はとっていない。
CNSC(カナダ原子力安全委員会)	原子力安全規制基準策定	検討していない。 →CNSCは、規制に関する文書を定期的に更新しているが、線量評価に関する文書が更新の時期になれば、このレポートを含めて前回の更新以降に発行されたICRPや関連のレポートをレビューする。
ASN(フランス原子力安全局)	原子力安全および放射線防護の対策	検討していない。 →フランスの原子力安全局はこのICRPレポートに取り組んでいない。(電離放射線の医学的応用を担当する部署も産業施設の管理を担当する他の部署も対応していない)。
SSK(ドイツ放射線防護委員会)	法体系の策定	検討していない。 →2017年に、ICRP Publication103と116を含む外部被ばくの実用量の科学的知見を取り扱った文書を改訂したが、現在のところこの件に関する科学的な検討は予定していない。
IRSA(アイスランド放射線安全委員会)	放射線安全規制当局	検討していない。 →IRSAは、通常、特に新たな規則を策定する場合にはICRP刊行物について、考慮する。問い合わせの3つの本ドラフトに関しては、時期が来れば、検討する。
KINS(韓国原子力安全技術院)	原子力規制と安全技術の研究機関	検討していない。 →本ドラフトの規則や規制への影響について調査し、他の国の規制当局の対応を調査する予定。規制を変更する必要性があれば、対応のための措置を講じる。

### 2.2.2 「TG79 放射線防護量としての実効線量の使用」についての対応

提示された実効線量と等価線量の概念の改訂を取り入れた場合の影響について検討している国際機関は1件であった。

検討している機関については、検討状況やスケジュールを確認し、検討していない機関については、導入した場合の影響についてどのように計画をしているかを確認した。

表2-4 「TG79 放射線防護量としての実効線量の使用」についての回答

国際機関	当該機関の専門性	回答
------	----------	----

IAEA（国際原子力機関）	放射線安全基準策定	<p><b>検討している。</b></p> <p>→2019年に開催される医療における品質管理に関する国際会議で議論するためICRP、ICRUとの共同セッションを計画している。</p>
ISO（国際標準化機構）	放射線防護や測定器校正などの方法の標準化	<p><b>検討していない。</b></p> <p>→規制に用いられることになれば、検討することになると考えられる。議論されることが予想されるWGは、WG2(標準放射線場)、WG19(外部放射線の個人モニタリング)、WG21(民間航空機における宇宙線の線量評価)である。</p>
IEC（国際電気標準会議）	測定器の標準化	<p><b>検討していない。</b></p> <p>→IEC/TC45が規定している放射線防護関係の実用測定器では、実用量を取扱い、実効線量は用いないので、今後も取り組むことはないであろう。</p>
EC（欧州委員会）	欧州連合（EU）の放射線防護基準の法令化	<p><b>検討していない。</b></p> <p>→本レポートの影響について検討したい場合には、実用量に関するレポートについて検討する専門化グループに助言を得る。</p>
NRC(米国原子力規制委員会)	原子力/放射性物質の規制の監督	<p><b>検討していない。</b></p> <p>→NRCは、本ドラフトの実効線量および等価線量の改訂された概念の影響を検討するための措置を講じていない。現時点では、近い将来検討する計画はない。2012年、NRCは、線量評価に関する最新の方法論および用語との整合性をとるために、NRCの規制の枠組みをICRPの2007年勧告（ICRP Publication 103）とより密接に整合させるように移行する規制上の方策を検討していた。しかし、2016年には、NRCは放射線防護規則をICRP Publication 103に整合をとるために改訂することになっていたすべての規則制定作業を中止した。現時点では、線量評価に関する最新の方法論および用語に整合をとることやICRP Publication 103または本ドラフトの実効線量および等価線量の改訂された概念を取り入れた場合の影響を検討することの対応のための将来計画はない。</p>
EPA（米国環境保護庁）	環境における公衆の防	<p><b>検討していない。</b></p> <p>→個人的見解であるが、米国の他の省庁は、パブリッ</p>

	護基準の策定	クコメントの対応はしたが、その他の対応はとっていない。
CNSC(カナダ原子力安全委員会)	原子力安全規制基準策定	<b>検討している。</b> →現在のところパブリックコメントの対応以外に対応していないが、今後組織反応に係る線量限度に等価線量から吸収線量に変更する内容を含む基本勧告が発行されたら、その取り入れのためにこの本ドラフトもレビューされる。
ASN(フランス原子力安全局)	原子力安全および放射線防護の対策	<b>検討していない。</b> →フランスの原子力安全局はこのICRPレポートに取り組んでいない。(電離放射線の医学的応用を担当する部署も産業施設の管理を担当する他の部署も対応していない)。
SSK(ドイツ放射線防護委員会)	法体系の策定	<b>検討している。</b> →本ドラフトに以下のようなコメントを提出した。実効線量の科学的基礎情報の更新は、評価する。組織反応の線量限度に等価線量の使用は止めるべきであることは重要な問題である。 このレポート(ドラフト版)は、臓器/組織の吸収線量の正確な評価、生物学的効果比(RBE)に関する情報、組織加重係数のための詳細ながんリスク係数とその不確実性の取り扱う方法など個人の放射線リスク評価に関する科学的情報を取り込むべきである。
IRSA(アイスランド放射線安全委員会)	放射線安全規制当局	<b>検討していない。</b> IRSAは、通常、特に新たな規則を策定する場合にはICRP刊行物について、考慮する。問い合わせの3つの本ドラフトに関しては、時期が来れば、検討する。
KINS(韓国原子力安全技術院)	原子力規制と安全技術の研究機関	<b>検討していない。</b> →本ドラフトの規則や規制への影響について調査し、他の国の規制当局の対応を調査する予定。規制を変更する必要性があれば、対応のための措置を講じる。

### 2.2.3「TG90 環境線源による外部被ばくのための線量係数」についての対応

提示された環境中線源の線量換算係数を規制制度へ導入することについて検討を行っている国際機関は0件であった。

検討をしている機関については、検討状況やスケジュールを確認し、検討していない機関については、導入した場合の影響についてどのように計画をしているか確認した。

表2-5 「TG90 環境線源による外部被ばくのための線量係数」についての回答

国際機関	当該機関の専門性	回答
IAEA（欧州委員会）	放射線安全基準策定	検討していない。 →予定なし。
ISO（国際標準化機構）	放射線防護や測定器校正などの方法の標準化	検討していない。 →2018年から新しいWGとなった、WG25(原子力/放射線緊急事態における人口と対応者の放射線モニタリング)で議論されることが予想される。
IEC（国際電気標準会議）	測定器の標準化	検討していない。 →IEC/TC45が規定している放射線防護関係の実用測定器には該当する線量換算係数を用いないので、今後とも取り組むことはないであろう。
EC（欧州委員会）	欧州連合（EU）の放射線防護基準の法令化	検討していない。 →本ドラフトの影響について検討したい場合には、実用量に関するドラフトについて検討する専門家グループに助言を得る。
NRC（米国原子力規制委員会）	原子力/放射性物質の規制の監督	検討していない。 →NRCは、本ドラフトで提供された線量係数を私たちの規制の枠組みに導入するための対応を取っていない。現時点では、将来的に線量係数を導入する予定はない。
EPA（米国環境保護庁）	環境における公衆の防護基準の策定	検討している。 →EPAもICRP第2専門委員会の委員と同じ専門家ともに2007年勧告の放射線および組織加重係数を用いて米国のための年齢別外部被ばく線量換算係数を検討している。レポート（ドラフト版）3の値とほとんど同じ値になるであろう。米国の規制基準に関わる省庁は、まだ2007年勧告を取り取り入れていないので、EPAの新しい係数も、古い係数と置き換わることはない。将来米国の放射線防護の規制を改定することになれば、これらのドラフトの換算係数が、公衆の規則制定の過程で選択肢となるであろう。

CNSC (カナダ原子力安全委員会)	原子力安全規制基準策定	検討していない。 →環境の線源からの被ばくのための線量係数は、CNSCの規制文書ではなく、国の基準である。CNSCは、2007年勧告での実効線量の組織加重係数など線量諸量について改訂を行っており、2020年に終了する。その後国の基準への取り入れのための検討がされる。
SSK (ドイツ放射線防護委員会)	法体系の策定	検討していない。
IRSA(アイスランド放射線安全委員会)	放射線安全規制当局	検討していない。 →IRSAは、通常、特に新たな規則を策定する場合にはICRP刊行物について、考慮する。問い合わせの3つのドラフトに関しては、時期が来れば、検討する。
KINS (韓国原子力安全技術院)	原子力規制と安全技術の研究機関	検討していない。 →将来的には新しい線量換算係数を用いる予定。

#### 2.2.4 海外機関調査のまとめ

3つのレポートとも、実際に検討している機関がまだ少ない状況である。

実用量の定義変更については、法令の線量制限に用いる線量について法律改正や規制制度の改正が必要となる可能性が大きい。現在のところ、EURATOM加盟国の法令改正に関連する欧州指令（EURATOM BSS）を策定するECにおいても、今後専門家グループにおいて検討を開始する段階で、EU加盟国においてもまだ検討は始まっていない。

### 2.3 実用量及び実効線量の概念変更に伴う我が国への影響に関する整理

2.1で作成した概要資料の内容を踏まえ、これらの内容を我が国の放射線防護の法体系に導入しようとした場合、関係法令等の制度面での対応の要否に加え、使用者、個人線量測定機関その他の関係者の運用上の影響について、整理を行った。

検討状況について日本保健物理学会、個人線量測定機関協議会、電気事業連合会、日本診療放射線技師会及び日本電気計測器工業会に確認を行った。

#### 2.3.1 日本保健物理学会

- 1) 平成29年度から実効線量・実用量委員会を設置している。
- 2) 東電福島第一原発事故後、防護量と実用量の混同に起因する市民の混乱が顕著であった。その後現在に至るまで、この問題については特に大きな進展もなく、具

体的な解決法が見出されていないのが現状である。

- 3) 我が国では水晶体等価線量限度の変更が検討されているが、ICRP Publication 103（2007年勧告）への対応も完了していないことに加えて、この変更にあたっては実用量及び実際の測定に関する検討は十分とは言えず、医療現場等においても課題が残されている。
- 4) 我が国がこのような状況である一方で、国際的にはICRP及びICRUが従来とは異なる新しい線量概念の導入を検討している。この新概念は、1～2年内にほぼ原案通り採択される見込みであり、IECやISOなどの国際機関は既に対応を始めているといった状況下にある。新しい線量概念においては、新概念に基づいた新しい実用量の導入も予定されている。
- 5) 平成31年度以降から線量概念チームと実用対応チームに分かれ下記の検討を行うプロジェクトを提案している。
  - ① 新しい線量概念の整理及び解説書の作成
  - ② 既存測定器への影響調査及び対応策の検討
  - ③ 法令取入れに必要な措置及び課題の抽出と整理

### 2.3.2. 個人線量測定機関協議会

- 1) 概念変更に関する情報収集は継続的に実施しており、必要に応じて検討を実施する体制を整備している。
- 2) 実用量の概念変更への個人線量計の対応は、計算アルゴリズムの変更のみで対応できるものと、線量計の設計変更が必要となるものがある。それらは検出器の種類等に依存する。
- 3) 概念変更への対応は、個人線量計の対応の有無、またその程度の大小に関わらず、線量算出プログラム、報告書作成プログラム、顧客管理プログラム、等の変更が必要となり、多額のコストが必要になることが予想される。
- 4) 線量単位の概念が変更されることから、顧客がその取扱い方について混乱する可能性があり、顧客に対するフォローアップに多くの労力（≒コスト）が必要になることが予想される。
- 5) 5年間のブロック管理の途中に当該概念変更を取り入れた場合には、更なる混乱が予想される。

### 2.3.3 電気事業連合会

実用量及び実効線量の概念変更に関するICRPドラフト文書検討については、内容を確認すると共に、現場の管理に適用した場合の影響や課題等について検討した。その結果は以下の通りである。

- 1) 線量概念については、最近ICRP第2委員会（被ばく線量）で内部被ばく線量係数の改訂（TG95）が進められているが、その一方で実用量の変更（ICRU レポート

26) やメッシュ型人体ファントム (TG103) の導入等も検討されており、先行き不透明な状況にある。したがって実用量や実効線量の概念変更について国内法令への適用を検討する際には、ICRPの検討動向を整理し、合理的に対応する必要がある。

- 2) これらの線量の概念変更による影響については、現時点では不確実性はあるものの、放射線モニタや線量計及び被ばく線量の管理に影響があると考えられ、その対応にあたって大幅なコスト増加が懸念される。また実用量の変更にあたっては、放射線モニタ等の計測値が変わることから、現場が混乱する可能性もある。
- 3) 国内法令にこれらの線量の概念変更を適用する場合には、現場の混乱を避けるため、線量概念を変更する意義や目的を明確にした上で、適用にあたって十分な準備期間を設ける必要がある。
- 4) 組織反応の線量限度の単位を等価線量から吸収線量に変更する件については、線種混在場での影響評価方法等詳細がまだICRPから提示されておらず、現場にこれを適用するには、更なる検討が必要である。
- 5) 被ばく線量管理については、現場の混乱を避けるためにも5年ブロック期間中の運用変更は避けるべきである。

今後必要に応じて更に検討を進める予定である。

#### 2.3.4 日本診療放射線技師会

医療被ばくについては、実効線量や実用量を用いないことから、現在のところ、検討していない。技師の職業被ばくについても、これらのドラフトが発行され、導入が決定されれば、技師会の中で専門家が検討を実施していくことになる。

#### 2.3.5 日本電気計測器工業会

- 1) 2018年のJIS原案作成委員会では、実用量及び実効線量の変更については共に議題となっていない。
- 2) 実効線量については、JIS規格が規定している放射線防護関係の実用測定器では、実用量を取扱い、実効線量是用いないので、該当する量は対象外であり今後も取り組むことはないであろう。
- 3) 実用量については、定義及び換算係数の変更に伴い、対象線量/用語の定義/エネルギー特性/換算係数表等の見直しを実施することになる。

実質的には国内法令が改正された後に製品の規格変更に取り組むことになるであろう。

また、JIS規格はIEC/ISO規格との整合が重視されるので、IEC/ISO規格の変更を待って取り組むことも考えられる。いずれにせよ関連するJIS規格が多数あり法令改正に合わせて一度に改定するのは困難である。参考として、見直しの検討を必要とするJIS規格として次のようなものがある。

表2-6 見直しの検討が必要なJIS規格一覧表

No.	名称	対応（関連）国際規格
Z 4312	X線, $\gamma$ 線, $\beta$ 線及び中性子用電子式個人線量（率）計	IEC 61526
Z 4324	X線及び $\gamma$ 線用据置形エリアモニタ	IEC 60352
Z 4325	環境 $\gamma$ 線連続モニタ	該当国際規格なし
Z 4331	個人線量計校正用ファントム	ISO 4037-3 ISO 8529-3
Z 4333	X線, $\gamma$ 線及び $\beta$ 線用線量当量（率）サーベイメータ	IEC 60846-1
Z 4341	中性子用線量当量（率）サーベイメータ	IEC 61005
Z 4344	X線及び $\gamma$ 線用可搬形エリアモニタ	該当国際規格なし
Z 4345	X・ $\gamma$ 線及び $\beta$ 線用受動形個人線量計測装置並びに環境線量計測装置	IEC 62387
Z 4416	中性子用固体飛跡個人線量計	ISO/DIS 21909
Z 4511	照射線量測定器、空気カーマ測定器、空気吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法	ISO 4037-1~-4
Z 4514	$\beta$ 線組織吸収線量測定器及び線量当量測定器の校正方法	ISO 6980-1,2,3
Z 4521	中性子線量当量（率）計の校正方法	ISO 8529-1,2,3

### 2.3.6 その他

#### 1) 高エネルギー放射線研究施設、電子線治療施設

ヒアリングを実施した結果下記の回答を得た。

加速器施設の場合、数MeV以上のエネルギーの光子を発生するので、換算定数の変更に伴い、高エネルギー領域の線量評価の見直しが必要と考える。ただし、放射線防護の観点から施設では重遮蔽を施すことにより管理区域外への放射線の漏洩は十分に押さえられており、光子のエネルギーも散乱によって低エネルギー化しているので、影響は少ないと考える。

また、管理区域内については、加速器運転中はインターロックにより人は立ち入ることができないので、高エネルギーの光子で直接被ばくすることはない。

#### 2) 航空機乗務員の線量管理

ヒアリングを実施した結果下記の回答を得た。

航空機乗務員の宇宙線被ばく線量評価においては、各乗務員の乗務実績（飛行した時期や航路）に基づいて、コード計算により実効線量を算出・記録している。そ

して、その計算精度を確認する目的で、適宜周辺線量当量 $H^*(10)$ を実測し、計算で得られた $H^*(10)$ の値と比較することとしている。よって、通常の計算による線量評価においては、実用量の定義変更による影響は大きくないと言える。一方、実測による検証においては、光子／電子だけでなく、航空機での被ばくをもたらす主要な成分である中性子、陽子、パイ中間子等についての実用量が同様に定義される必要があり、今後解決の難しい大きな問題が生じると予想される。航空乗務員の受ける宇宙線の線種ごとのエネルギー分布の評価については、今後の研究による科学的知見の蓄積が期待される。

## 2.4 実用量及び実効線量の概念変更の導入に当たっての課題及びその対応策

3件のレポートドラフトの内容が、導入された場合の規制制度、測定器や校正に関する課題及びその対応策について調査した。

### 2.4.1 「外部放射線被ばくに関する実用量」および「TG79 放射線防護量としての実効線量の使用」の導入された場合の課題

#### 2.4.1.1 法令関係

被ばくや線量の測定に関する規定において、防護量や実用量に関連する規定を含む主な法令等について整理した。

(防護量や実用量に関連する規定を含む主な法令)

- ・放射性同位元素等による放射線障害の防止に関する法律関連法令
- ・核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律関連法令
- ・労働安全衛生法関連法令（いわゆる電離則）
- ・医療法関連法令
- ・医薬品、医療機器等の品質、有効性及び安全性の確保等に関する法律関連法令
- ・臨床検査技師等に関する法律関連法令
- ・船員法関連法令
- ・人事院規則
- ・鉱山保安法関連法令
- ・獣医療法関連法令
- ・平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法関連法令

これらの法令の多くは、平成11年4月に放射線審議会基本部会が作成した「外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針」（以下「技術的指針」という。）において提示されている防護量や実用量の概念、外部被ばくや内部被ばくの算定

に用いる換算係数等を基礎として検討されており、ICRP1990年勧告並びにICRP Publication 74及びICRU Report 57を反映した内容となっている。

この技術的指針では、表2-7に示す現行の防護量と実用量に整合をとっている。本レポート導入後は実用量と実効線量は表2-8のように変更されると考えられる。

表2-7 現行「技術的指針」での防護量と実用量

役割	防護量	実用量	
		エリアモニタリング	個人モニタリング
実効線量の管理	実効線量 $E$	周辺線量 $H^*$ (10)	個人線量当量 $H_p(10)$
眼の水晶体の線量管理	等価線量 $H_{lens}$	方向性線量当量 $H'(3)$	個人線量当量 $H_p(3)$
局所的な皮膚の線量管理	等価線量 $H_{local\ skin}$	方向性線量当量 $H'(0.07)$	個人線量当量 $H_p(0.07)$

表2-8 本レポート（ドラフト版）での防護量と実用量

役割	防護量	実用量	
		エリアモニタリング	個人モニタリング
実効線量の管理	実効線量 $E$	周辺線量 $H^*$	個人線量 $H_p$
眼の水晶体の線量管理	臓器平均吸収線量 $D_T$ 〔水晶体における吸収線量〕	方向性水晶体吸収線量 $D'_{lens}(Q)$	個人水晶体吸収線量 $D_{p\ lens}$
局所的な皮膚の線量管理	臓器平均吸収線量 $D_T$ 〔局所皮膚の規定された部分の吸収線量〕	方向性局所皮膚吸収線量 $D'_{local\ skin}(Q)$	個人局所皮膚吸収線量 $D_{p\ local\ skin}$

また、この技術的指針では、これらの実用量の総称として「1センチメートル線量当量等」という名称を用いることとし、個別には「1センチメートル線量当量」、「70マイクロメートル線量当量」、「3ミリメートル線量当量」といった名称を用いることが適当であるとしている。

現行法令は基本的にこれらの内容をそのまま反映したものとなっている。

また、平成30年3月に放射線審議会が関係行政機関の長に意見具申した「眼の水

晶体にかかる放射線防護の在り方について（意見具申）」において、現行法令を見直して眼の水晶体の等価線量の算定をするために $H_p(3)$ による測定を位置付けることが提言されており、現在、関係省庁において当該意見具申を踏まえた検討が行われているところである。

したがって、今後、新たな実用量の概念を取り入れるための検討を行うときは、関係省庁の検討のための基礎となる、技術的指針に代わる新たな資料の作成についても放射線審議会において検討が必要になると考えられる。

その際には、技術的指針が提示している「1センチメートル線量当量等」といった名称が、我が国特有のもので国際的な名称と異なるために、防護量や実用量の概念を理解する上で誤解や混乱を生じさせやすいということや、「1センチメートル線量当量等」が、周辺線量当量と個人線量当量の両方に用いられることの混乱などの指摘があることを踏まえ、新たな実用量の名称についても検討する必要がある。また、法令によっては、空間線量（率）や線量当量（率）などの名称を用いられている場合があり、これらについても混乱が生じる可能性があるため、実用量の名称を統一することも検討する必要がある。

また、新たな実用量の概念を取り入れるためには、単に名称が変更されるのではなく、概念そのものが変更されること、一部のエネルギーや放射線種では同じ放射線場でも実用量が数倍程度異なる数値で評価される可能性があることなどを踏まえ、各法令にどのような影響が生じるのか十分に調査した上で、慎重な検討が必要となると考えられる。

TG79レポート（ドラフト版）において、組織反応についての線量限度は、等価線量ではなく臓器平均吸収線量で示すこととされている。これをそのまま取り入れる場合、上述の防護量や実用量を規定している法令の一部に、眼の水晶体や皮膚の線量限度が等価線量（単位ミリシーベルト）で規定されているため、表2-8に示すように、水晶体における吸収線量や局所皮膚の規定された部分における吸収線量とし、示される限度の値の単位はグレイとする必要がある。なお、線量限度の値については、今後のICRPの基本勧告などで改訂されることが考えられるが、線種ごとに異なる値になることが考えられるため、今後の動向を注視する必要がある。

#### 2.4.1.2 既存のガイドラインその他の文章の改定の必要性

我が国の法令に基づく対応を適切に実施するための文書であって、実用量の概念変更の影響を受ける可能性があるものは、2.4.1.1の法令の実施に関するガイドラインなどに加え、原子力災害対策に関する指針（平成24年10月31日制定。原子力規制委員会）のように、法令そのものには実用量に関する概念は規定されていないものもある。また、直接法令に基づくものではないが、幅広く放射線測定等の現場で用いられている文書もある（例えば、放射能測定シリーズ（文部科学省

及び原子力規制庁)、被ばく線量の測定・評価マニュアル(原子力安全技術センター)、放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル ((公財) 原子力安全技術センター、放射線障害防止法出版物編集委員会) など)。

これらの文書においても、2.4.1.1の法令で採用されている実用量と同じ考え方が採用されていると考えられるため、新たな実用量の概念を取り入れる場合の影響について、関係者間で検討する必要があると考えられる。

#### 2.4.1.3 測定器の校正に関する課題

新定義に基づく新換算係数が法令に取り入れられた場合、周辺線量及び個人線量ともに、GyからSvへの換算係数が変更されることにより、測定器の指示値及びエネルギー特性に影響を及ぼす。

周辺線量及び個人線量の新定義の換算係数と現在使用している換算係数の違いをそれぞれ図4-1及び図4-2に示す。

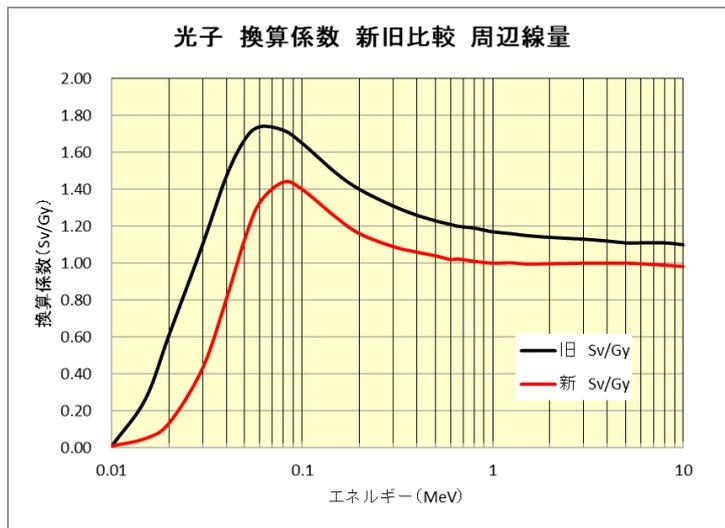


図 4-1 周辺線量の Gy から Sv への換算係数

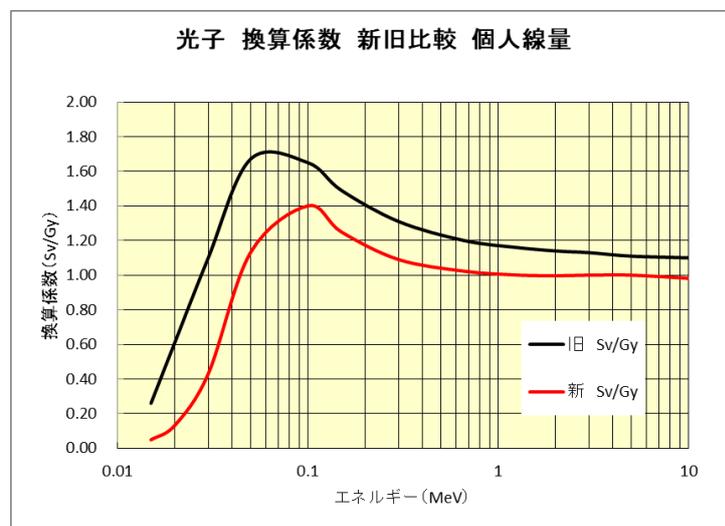


図 4-2 個人線量の Gy から Sv への換算係数

ここで、 $^{137}\text{Cs}$  線源を使用した現行の校正場で校正された装置を、新しい校正場にそのまま置いた場合に指示値がどのように変化するかを考える。

標準場は空気カーマ率 (Gy/h) で与えられており、これに Sv/Gy 換算係数 (現行では  $^{137}\text{Cs}$  の換算係数は 1.2) を乗ずることで参照標準場の線量率 (周辺線量当量率) (Sv/h) が与えられる。この場に置かれた現行線量率計の指示値 (Sv/h) は参照標準場の線量率と同じになるように校正される。

次に、新定義の換算係数を用いた参照標準の新線量率 (周辺線量率) は、同じ空気カーマ率の場合 (ここでは  $^{137}\text{Cs}$ ) で換算係数 1.0 を乗じた値となる。このため、同じ空気カーマ率 (Gy/h) の場にもかかわらず、現行線量率計を校正しない状態で置くと指示値は 1.2 倍の値を示すことになる。

#### 2.4.1.4 放射線測定器 (環境測定用装置) に対する影響

放射線防護に使用されている放射線測定器はその使用検出器によって電離箱式、NaI(Tl)シンチレーション式、半導体式等の測定機器があり、新定義の採用によりそれぞれ異なった対応が必要となる。

- 1) 電離箱式は、電離箱内で発生した電荷を収集する測定器である。エネルギー特性が広いエネルギー範囲にわたりフラットであり、エネルギーが不明な場合でも特別な注意をせず可以使用できる利点を有しており、比較的高い線量率の場の測定やX線施設の漏洩線量測定に使用されている。
- 2) NaI(Tl)シンチレーション式は、固体シンチレータであるNaI(Tl)が放射線により発光する現象を利用したもので、入射エネルギーに応じた出力波高が得られ、高感度であるという特徴を持つ。固体検出器の特性として、特に低エネルギー側は感度が高くなる特性があり、このため、出力波高に応じてJAEAで開発されたG(E)関数を乗ずることによってエネルギー特性の平坦化が行われている。これがエネルギー補償型として一般的に知られ、採用されている。感度が高いため、環境モニタリングポストや環境線量測定用のサーバイメータ等に使用されている。
- 3) 半導体式は、固体電離箱とも呼ばれ、放射線により半導体内に発生した電子・ホールを収集することにより電気信号を得ている。半導体も固体であるので、低エネルギーで感度が高くなる特性があり、フィルターやソフトウェアのアルゴリズムを使用してエネルギー特性の平坦化が行われている。半導体検出器は小型・軽量であるので、電子式個人線量計や管理区域内のエリアモニタなどに使用されている (ここでいう半導体はSi半導体を指し、核種分析に用いるGe半導体ではない)。

製造業者ではそれぞれの検出器に合わせた測定器を開発・製品化し、エネルギー特性はできる限り測定エネルギー範囲内でフラットになるようにしている。

一例として電離箱サーベイメータのエネルギー特性図を示す。

図4-3は、現行装置をそのまま、現在の校正場と新定義で設定された校正場に置いた時のレスポンスの違いを示す。現行の装置をそのまま使用した場合には、 $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) で見ると約20%の指示値増となることが分かる。

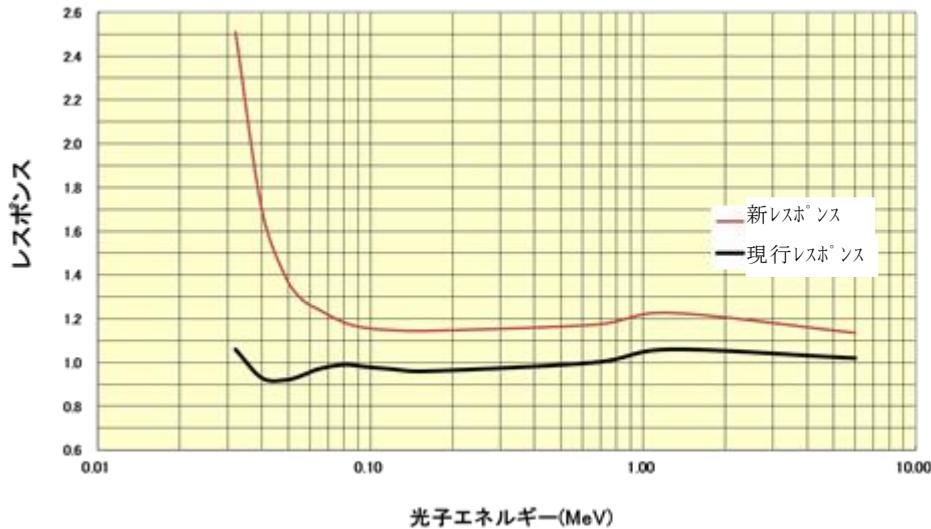


図 4-3 電離箱式サーベイメータ

図4-4は、現行の装置を新定義で設定された $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) の標準場で再校正した時のエネルギー特性を示す。 $^{137}\text{Cs}$ 基準にて校正された場合には80 keV以上ではエネルギー特性は現行機とほぼ変わらずフラットに維持できている。原子力発電所の測定対象となる高エネルギーγ線である $^{16}\text{N}$ の6 MeVでも、影響はない。一方、X線領域で想定される約80 keV以下の低エネルギーではレスポンスが高くなり、30 keV程度では約2倍の指示値となることがわかる。

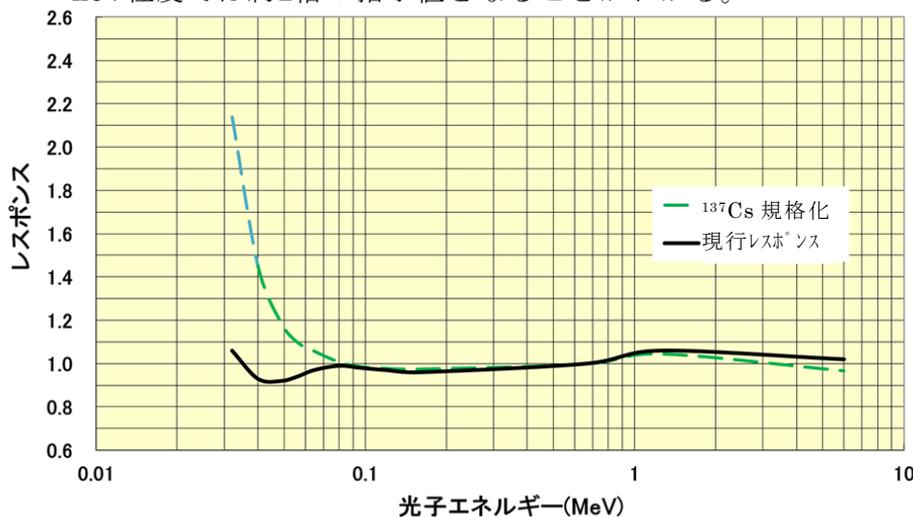


図 4-4 電離箱式サーベイメータのエネルギー特性

(※新定義のレスポンスで $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) のレスポンスを 1.0 として規格化)

以上のことから、放射線測定器（環境測定用）として次の対策が考えられる。

- 1) 測定器は改良を行わず、校正も従来通りでそのまま供給する。
  - ① 原子力発電所及び周辺で放射線防護の測定では、指示値に補正係数として 0.8 を乗じて線量評価を行う。(補正係数を乗じないで保守的に線量評価することもあり得る)
  - ② 医療関係の X 線利用施設では、同様に 0.8 を乗じて線量評価を行うが、あまりにも過大評価と考えられ、エネルギーが分かっている場合には、対象エネルギーに応じたファクター (レスポンスの逆数) を乗じて線量評価を行う。
- 2) 測定器はいじらず新定義の場で再校正し供給する。

ユーザーサイドでは 0.8 を乗ずる必要がなくなるが、X 線利用施設では 1) と同様の対応が必要である。
- 3) 測定器のエネルギー特性を改善する。(機器開発)

電離箱式や半導体式の測定器の場合には、低エネルギー X 線の入射を抑制するフィルターを用いる、NaI(Tl)シンチレーション式ではエネルギー毎の換算定数 (G(E)関数) を変更する等の対応が必要となる。ユーザーにとってはそのまま指示値を読み取ればよくなる。

その他の現用機器のエネルギー特性については、付録 1 に示す。

#### 2.4.1.5. 放射線測定器 (個人線量計) に対する影響

##### (1) 受動形線量計

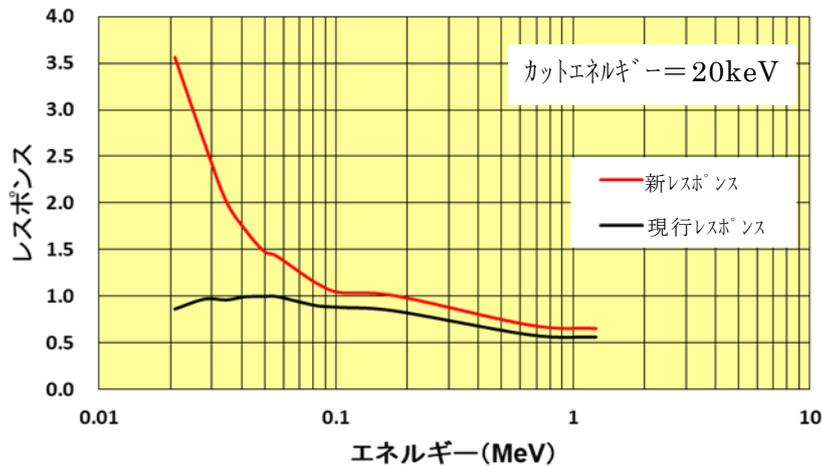
受動形線量計はRPL (蛍光ガラス線量計用) やOSL (光刺激ルミネッセンス線量計用) 等の固体検出素子が使用されている。これらの検出素子は測定対象とする放射線の種類や評価すべき線量 (Gy、Sv) に対して、それぞれ固有のエネルギー特性を持っている。通常は数種類のフィルターを使用して測定し、これを専用の読み取り装置にて測定結果を読み取る。読み取り結果は専用のソフトウェアで演算されて測定結果が得られる。

これらの受動形線量計は主に個人被ばく管理に使用されており、電源が不要のため、長期間 (通常1か月) の測定が可能であり、放射線作業従事者は常時携帯している。しかし、使用者が直読できないため、通常は個人線量測定サービス会社にて測定値を読み出してもらうことが必要である。

##### (2) 電子式個人線量計

電子式個人線量計はSi半導体検出器が主に使用されている。Si半導体は様々な形状があり、測定対象エネルギーに応じて数種類のフィルターを使用し、その測定結果をソフトウェアにて演算して測定結果を出す。これらは直読できるものが多く、使用者は測定値を直接読み取ることができる。放射線施設への一時立ち入りや除染作業等に、また低エネルギー用は医療関係に使用されることが多い。

電子式個人線量計（低エネルギー用）のエネルギー特性図の一例を図4-5に示す。現行の装置をそのまま、現在の校正場と新定義で設定された校正場に置いた時のレスポンスの違いを示している。このように、現行の装置をそのまま使用した場合には、低エネルギーになるに従って指示値が高くなる。60 keV ( $^{241}\text{Am}$ ) 近辺で見るとその指示値は約50%増となる。



エネルギー測定範囲  
20keV～

図 4-5 電子式個人線量計（低エネルギー用）のエネルギー特性

図4-6は、現行の装置を新定義で設定された標準場で再校正した時のエネルギー特性を示す。低エネルギー用のため、100 keVを基準として規格化した図としている。100 keV以上のエネルギーでは現行装置と同じ特性を示しているが、100 keV以下では徐々に高くなり、約60 keVで約20%、約30 keVで約200%の指示値増となるのがわかる。

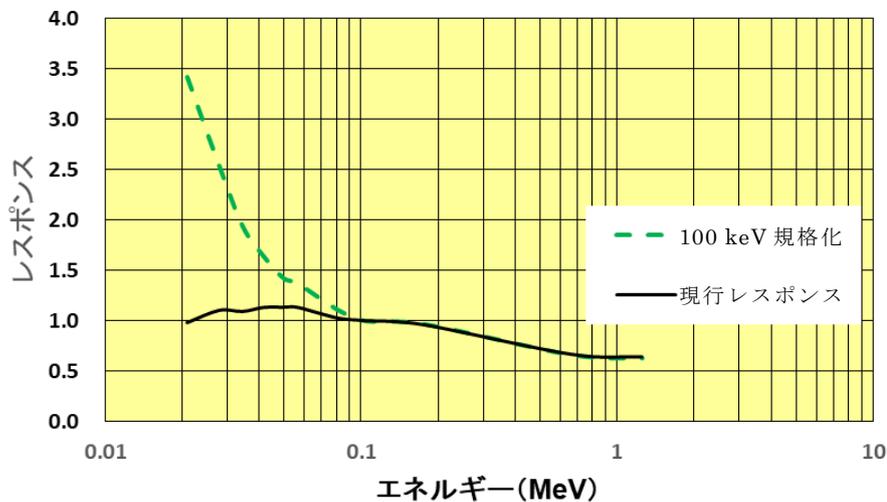


図 4-6 電子式個人線量計（低エネルギー用）のエネルギー特性  
 (※新定義のレスポンスで 100 keV のレスポンスを 1.0 として規格化)

以上のことから、放射線測定器（個人線量計）として以下の2つの対策が考えられる。

- 1) 受動形線量計は個人被ばく管理を行う重要な装置である。このため、読み取り装置用ソフトウェアのアルゴリズム変更を確実に実施する必要がある。また、アルゴリズム変更では対応不可の場合には線量計のフィルター変更も実施する必要がある。
- 2) 電子式個人線量計では、特に低エネルギー測定のものにはフィルター変更および換算係数の変更が必要となる。

また、一般用のものでは付録1にあるように大きくレスポンスが変化しないものもあるため、この様な装置では2.4.1.1 1) ~3) の対応が考えられる。

#### 2.4.1.6 個人線量測定サービスに対する影響

- 1) 個人線量測定サービス機関が用いている線量計の種類によっては、線量計の新規設計や大幅な設計変更を要する可能性がある。また、換算係数の変更により、全ての線量計の線量算出ソフトウェアの変更が必要になる。これら変更に係るコスト負担が課題となる。
- 2) 利用者（事業者および放射線業務従事者）が、従来の測定値と新たな測定値の間で混乱が生じないようにするための配慮および周知徹底が必要となる。

#### 2.4.1.7 標準場・校正場への影響

上述の線量計の対応の他、これらを構成する場にも影響を及ぼすことが考えられ

る。一例として新しい実用量の定義から考えた個人線量計の方向特性や使用環境に合わせた線量計の校正等を挙げることができる。

標準場としては、光子・中性子については、従来の物理量から換算することによって新しい実用量に対応することができるが、ベータ線についてはレポートで出されている換算係数は実際の場合には使えず、定義に基づいて実測等を行う必要がある。ベータ線については、ISO等国际規格化が必要となることから、すぐに対応することは困難であろう。

また、個人線量計の方向特性をどのように考えるかによって、校正方法が異なってくる。ISOでは、定義に合わせて計測するための校正を前提としている。一方、ドラフトでは、校正時に用いるファントムは従来と同様の水ファントムで良いとなっているが、光子の換算係数が示されている180度方向の照射試験が必要な場合、水ファントムが適切であるかどうか検討が不十分である。ドラフトでは概念は示されているが、実際の測定についての議論がほとんどなく、国際規格化に向けて今後様々なデータが必要となることが考えられる。

#### 2.4.1.8 その他の課題

ユーザー側の対応として、以下のような課題を挙げることができる。

- 1) 高エネルギーベータ線を利用する現場において、眼の水晶体の被ばくが問題となる現場での新たな個人線量計、エリアモニタ、可搬型線量計などを導入する必要がある。
- 2) 高エネルギー放射線を利用する施設におけるエリアモニタや個人モニタについて、新たに導入する必要がある。
- 3) 高エネルギー放射線利用施設における、測定により管理される場所における新たな遮蔽の必要がある。
- 4) 従来の測定値と新たな測定値の違いによる混乱が生じる
- 5) 現場の線量計の管理や線量評価にも影響があり、その対応にあたっては大幅なコストが発生する。
- 6) 等価線量限度が吸収線量限度に移行した場合、放射線の種類が混在する現場での、線量の合計の方法が不明である。
- 7) 作業人や公衆に対して分かりやすく説明できるように準備しておくべきである。

#### 2.4.2 TG90 環境線源による外部被ばくのための線量係数」が導入された場合の課題

このレポートで新しく提示された環境線源による外部被ばくの線量係数については、用途として以下に示すような例が考えられる。

- 1) 想定される原子力施設や放射線施設の事故による放出による環境汚染の公衆

の線量の予測

- 2) 原子力事故直後、空間線量の実測値が少ない場合に土壌の沈着密度から、住民の線量を推計する場合
- 3) 原子力事故後、空气中、水中など汚染された環境で被ばくする住民の線量評価
- 4) 通常運転中の原子力・放射線施設からの放出による環境汚染に起因する周辺住民の線量評価
- 5) 環境中の自然放射性核種による作業員や公衆の線量評価

特に福島第一原発事故後には、環境汚染による住民の線量評価が必要であったが、ICRPによる線量係数が提示されていなかった。ICRPはこれまで、実効線量への換算係数としては成人ファントムでの値に限っていたが、このTG90のレポートでは、年齢別の線量係数が与えられている。事故後の学校のグラウンドの除染や水泳の授業をするためのプール水中の濃度の問題など、子供の線量係数が必要であったが、年齢別の線量係数は、このような事例にも適用が可能である。また、公衆の線量限度は、成人ファントムを基に設定されていることから、被ばく線量を線量限度と比較する際には注意が必要である。

ただし、本レポートで土壌汚染からの被ばくについての線量係数は、戸外での単純な条件での被ばくの設定である。実際の事故後の住民の線量評価を行う際には、建物による低減係数、屋内に居る時間の割合（居住係数）、地形による影響など、様々なパラメータ値を設定して、計算する必要がある。これらの値は、場所、建物の構造、事故後の経過期間などにより、大きな変動幅を持つので、そのパラメータ値を設定することが難しい。

## 2.5 まとめ

実効線量や等価線量などの防護量や周辺線量当量や個人線量当量など実用量は、世界の多くの国で放射線の規制制度に取り入れられ、広く普及している。これらの定義や適用範囲などの変更を取り入れる場合、これらの線量概念を取り入れた法令や規制制度において、また測定器の製造や校正、放射線の利用の現場などにおいて様々な影響が生じることが考えられる。本事業では、実用量の定義変更に係るICRPとICRUが合同で作成したレポート（ドラフト版）、ICRPの実効線量に関するレポート（ドラフト版）およびICRPの環境中の線源からの線量係数に関するレポート（ドラフト版）の3件のレポートについて、関連する過去の経緯、我が国の規制制度、関係事業者に影響すると思われる内容を中心に概要資料としてまとめた。また、放射線防護に関連する国際機関や海外の規制機関等での検討状況と、わが国において実用量の定義の改訂を取り入れた場合の影響について調査した。

国際機関や海外規制機関等での検討状況については、これらのドラフトがまだ発刊される前の段階であることから、ほとんどの機関においては、実質的な検討の段階には入

っていない状況であることがわかった。

実用量と実効線量に関するレポートの我が国での影響としては、放射線被ばくに関する規制制度（法令、ガイドライン）、放射線測定器の製造や校正、測定サービス事業や放射線利用の現場などに与える影響について調査した。法令等に関連して検討が必要となる最も重要なものは、放射線審議会基本部会が作成した「外部被ばく及び内部被ばくの評価法における技術的指針」に代わる文章の作成である。我が国の現行法令等に用いられる1センチメートル線量当量や70マイクロメートル線量当量などの実用量の名称は、技術的指針が元となっていることから、これに代わる新たな文書を作成することで、実用量の概念変更による混乱を最小限としつつ、法令の斉一化を図ることが重要と考えられる。

測定器や校正に関する課題としては、環境モニタリングや個人モニタリングのための線量計における対応は、それぞれの線量計の種類や用途によって異なることが挙げられた。通常用いられるエネルギー領域での線量測定や既知のエネルギーの放射線を測定する場合は、読み値に係数を乗じるだけで対応することも考えられるが、低エネルギーエックス線専用の測定器等においては、フィルターの設計変更を伴う場合もあり、利用の現場における線量評価についても測定器の大きな設計変更が必要な場合がある。現在利用数が非常に多い受動形個人線量計においては、数種類のフィルターを配置した各々の測定値から演算で個人線量当量を求めているものもある。これらの線量計については、その計算アルゴリズムの変更で対応することによって大きな影響は受けないと考えられている。

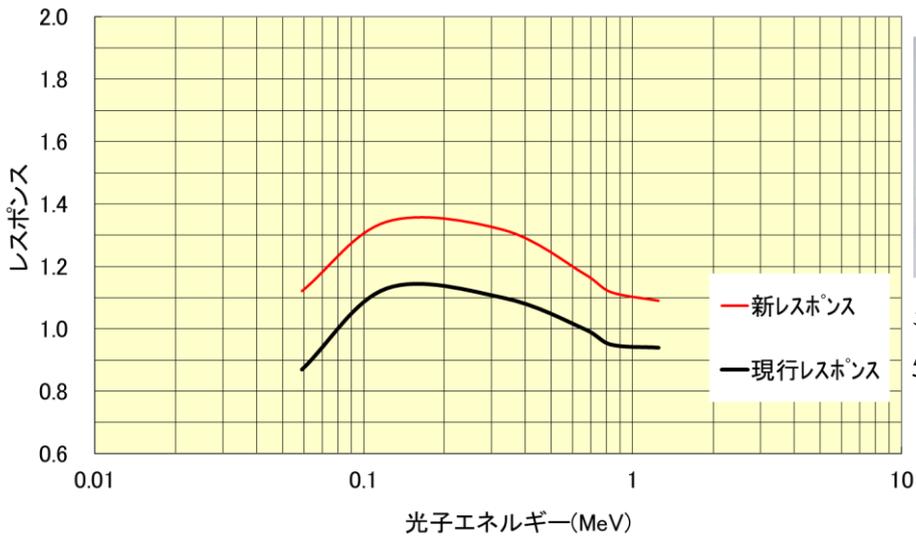
TG90レポート「環境線源による外部被ばくのための線量係数」が発行された場合については、我が国の法規制には直接影響することはないが、原子力や放射線事故の対応や防災関連の目的での線量評価や新たな行政の用途に利用することが可能となる。ただし、実際に利用する場合には、主な核種ごとに算出した換算係数や様々な被ばくパラメータなどさらなる情報が必要となることが予想される。

今回の調査によると、現時点では対応の検討を進めている機関は少ないが、今後海外での検討が進展すると新たな対応策の方向性が出てくることも考えられる。最終版として刊行された場合には、ドラフト版との相違点の確認を行うとともに、関連機関の対応について進捗状況や新たな論点の有無などの調査を継続的に実施することが重要である。本事業で取りまとめた資料が今後の議論の促進に資することを期待する。

## 現行機器のエネルギー特性図

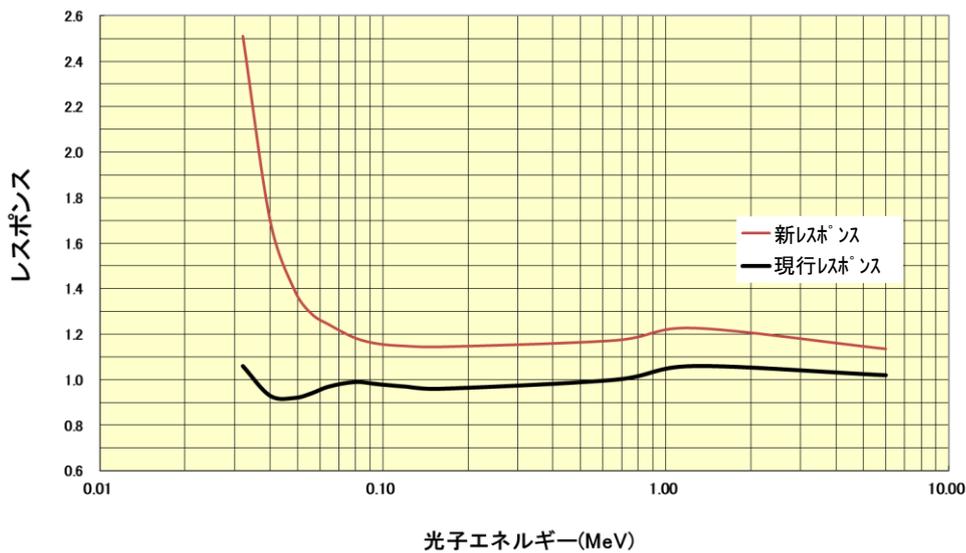
### 1. 現行機器をそのまま使用したエネルギー特性

#### 1. 1 エネルギー補償型 NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ

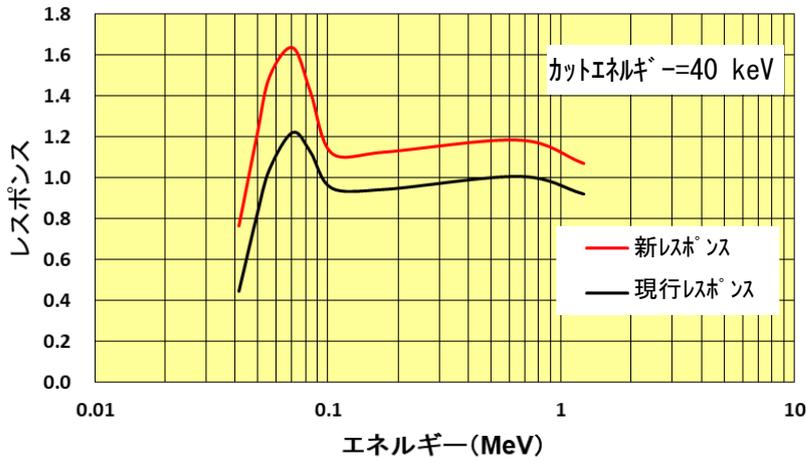


エネルギー測定範囲  
50 keV~3 MeV (3 MeV カットなし)

#### 1. 2 電離箱式サーベイメータ

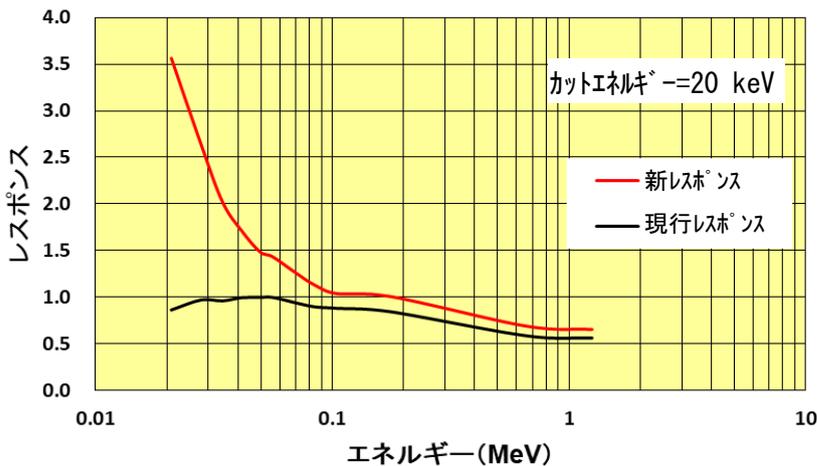


1. 3 電子式個人線量計（一般用）



エネルギー測定範囲  
40 keV～

1. 4 電子式個人線量計（低エネルギー用）



エネルギー測定範囲  
20 keV～

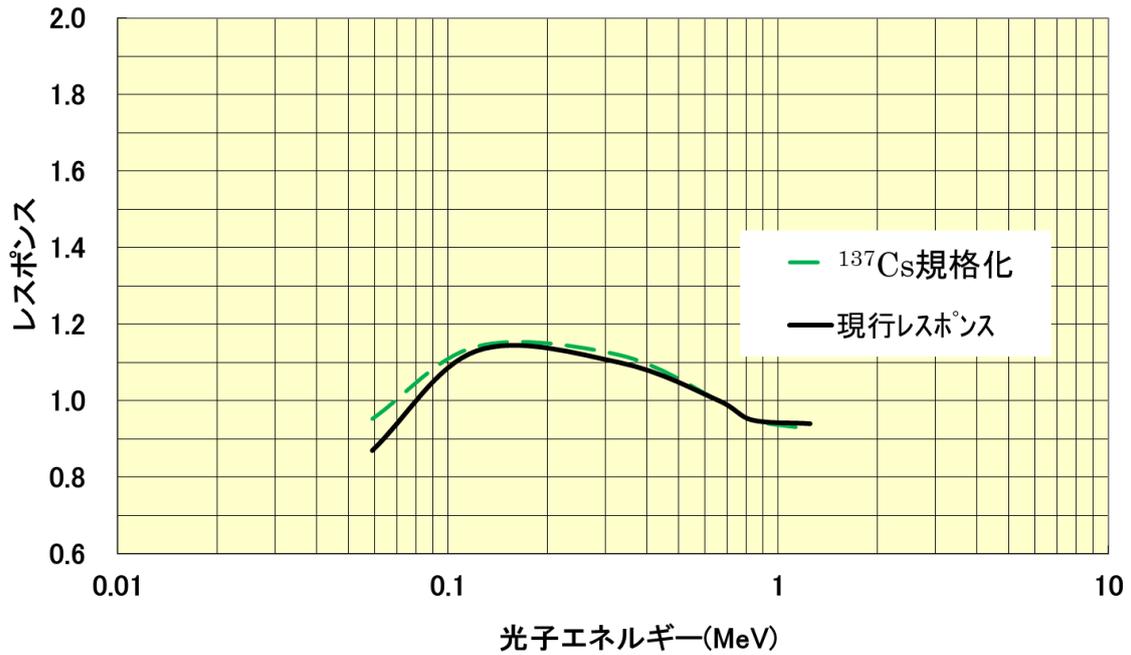
現行の校正場で校正された装置はそのままではレスポンスが高くなり、指示値は高い値を示す。エネルギー補償型NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータでは全測定エネルギー範囲内にて約20%増のレスポンスとなっている。電離箱式サーベイメータ及び電子式個人線量計（一般用）では80 keV以上では約20%増のレスポンスとなっているが、80 keV以下ではさらに高くなっている。また、電子式個人線量計（低エネルギー用）ではエネルギーが低くなるにしたがって、レスポンスの差が大きくなる。

2. 新しい校正場にて $^{137}\text{Cs}$ で校正を行った場合のエネルギー特性図

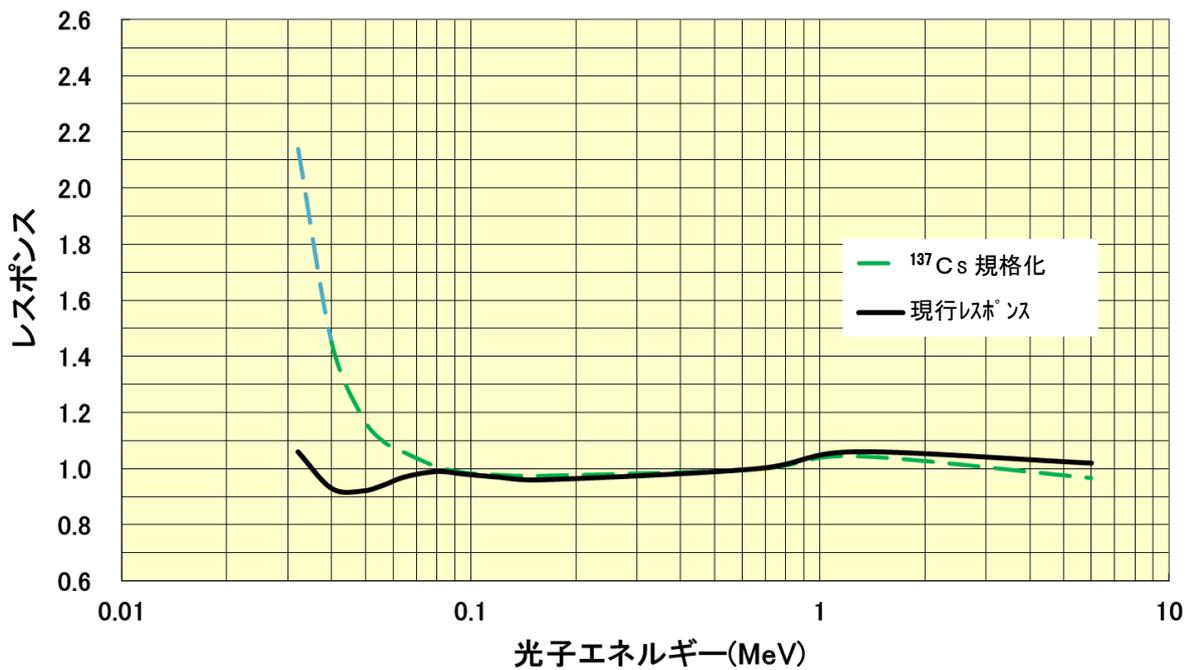
下記特性図は $^{137}\text{Cs}$ のレスポンスを1.0として規格化した。

ただし、電子式個人線量計（低エネルギー用）は $^{137}\text{Cs}$ に対するレスポンスはないため、100 keVで規格化した。

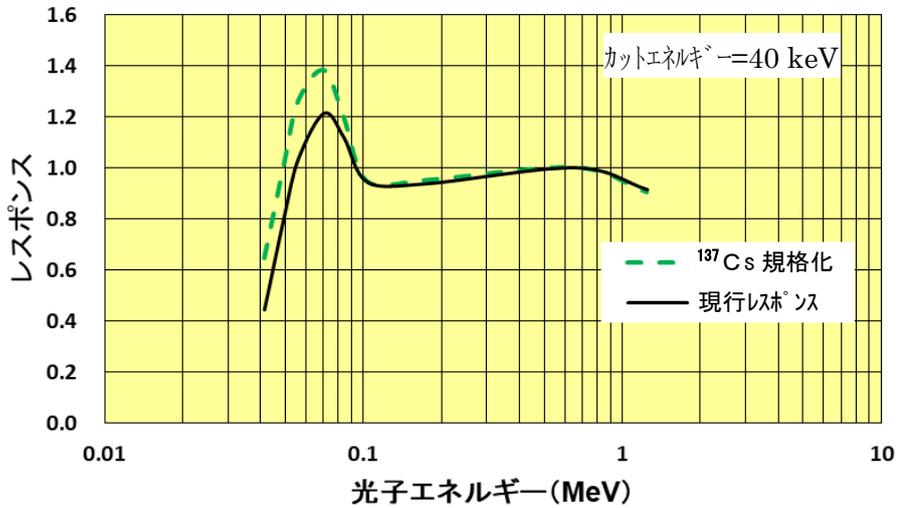
2. 1 エネルギー補償型 NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータ



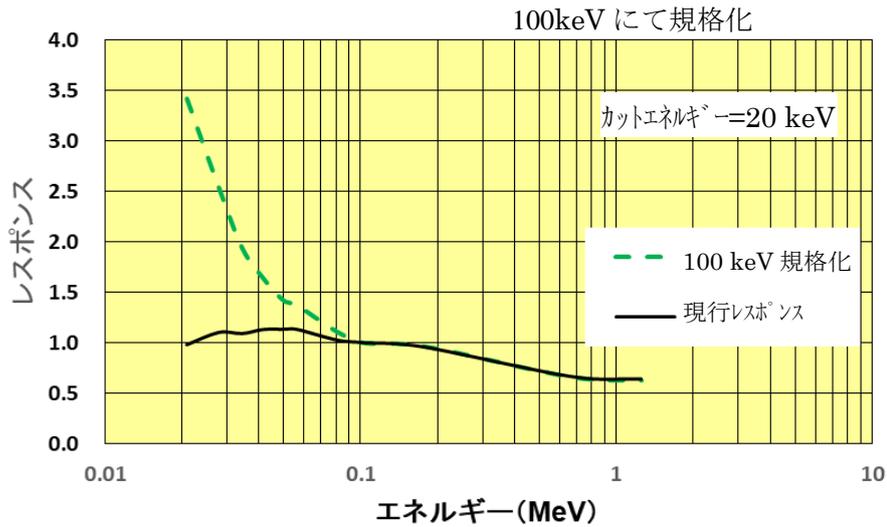
2. 2 電離箱式サーベイメータ



## 2. 3 電子式個人線量計（一般用）



## 2. 4 電子式個人線量計（低エネルギー用）



エネルギー補償型NaI(Tl)シンチレーションサーベイメータは、エネルギー毎の換算係数の変更にて現行機器と同等のエネルギー特性が得られることがわかる。

電離箱式サーベイメータでは約80 keV以上では換算係数を変更することで現行機器と同等のエネルギー特性が得られるが、約80 keV以下ではレスポンスが低エネルギーになるに従って増加している。電子式線量計も同様の傾向となっている。これらは換算定数の変更だけでなく、低エネルギーのレスポンスを低くするためにフィルター等変更などの物理的な改良が必要となると考えられる。

## 用語集

出典を各用語のところに以下の略号で示す。

外部：外部放射線被ばくに関する実用量

TG79：TG79 放射線防護量としての実効線量の使用

TG90：TG90 環境線源による外部被ばくのための線量係数

**1. ICRU の 4 元素軟組織 (ICRU 4-Element (soft) Tissue)** 外部, TG90

ICRU の 4 元素軟組織 (ICRU, 1980 年) は密度が  $1 \text{ g cm}^{-3}$  で、組成は酸素 76.2%、炭素 11.1%、水素 10.1% 及び窒素 2.6% の質量比で、その物質のその他特性に関する仕様はない。

**2. ICRU 球 (ICRU Sphere)** 外部, TG90

ICRU 球 (ICRU, 1980 年) は、ICRU 4 元素組織の直径 30 cm の球である。現行の実用量である周辺線量当量や方向性線量当量は、この ICRU 球の内部のある深さの点での線量当量で定義されている。ICRU 球は、新たに発行される実用量のレポートで改訂される実用量の定義では使用していない。

**3. ICRP 及び ICRU の成人の人体形状標準計算ファントム (ICRP and ICRU Adult Anthropomorphic Reference Computational Phantoms)** 外部, TG79, TG90

ICRP 及び ICRU の人体形状標準計算ファントムは、ICRP Publication 110 (ICRP, 2009 年) で説明する人体モデル (複数) で、ICRP Publication 89 (ICRP, 2002 年) で定義した解剖学的生理的特性を備えたもの。このモデルは、医学的断層撮影に基づく一連の立方体ボクセルで表わされ、そこでは解剖学的構造が小さな三次元体積の要素によって記載されている。多くの組成と密度より成るこれらのボクセル (ICRP, 2009 年) を集めたものを、人体の臓器と組織を定めるために使用する。男性及び女性の、2つの成人標準ファントムが定められている。

**4. 荷電粒子平衡 (Charged-Particle Equilibrium)** 外部, TG90

ある領域に入ってくる荷電粒子の運動エネルギーの総和と、その領域から出ていく荷電粒子のそれが等しい状態。荷電粒子平衡の状態では、対象とする点における衝突カーマの値が吸収線量の値と等しくなる。

**5. カーマ (Kerma) :  $K$**  外部, TG79, TG90

電離した非荷電粒子に対するカーマ  $K$  (ICRU, 2011 年) は、 $dE_{\text{pr}}$  を  $dm$  で除したものの。ここで、 $dE_{\text{pr}}$  は、物質の質量  $dm$  に対する非荷電粒子の入射によって  $dm$  の中で電離したすべての荷電粒子の最初の運動エネルギーの合計の平均値であり、次式で表される。

$$K = dE_{\text{ptr}} / dm$$

カーマの単位は  $\text{J kg}^{-1}$  である。

カーマの単位の特別な名称はグレイ (Gy、gray) で、 $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$  である。

**6. 管理区域 (Controlled area) TG79**

通常の作業条件のあいだ、通常被ばくを管理するか又は汚染の広がりを防ぎ、潜在被ばくを防止するか又はその程度を制限するため、特定の防護対策と安全規定が必要か又は必要となりうる、と定められた区域。

**7. 吸収線量 (Absorbed Dose) : $D$  外部, TG79, TG90**

吸収線量  $D$  (ICRU、2011 年) の  $d\bar{\epsilon}$  を  $dm$  で除したもの。ここで  $d\bar{\epsilon}$  は、質量  $dm$  の物質へ電離放射線により付与された平均エネルギーである。

$$D = d\bar{\epsilon}/dm$$

吸収線量の単位は  $\text{J kg}^{-1}$  である。吸収線量の単位の特別な名称はグレイ (Gy) である。吸収線量は、指定された物質のある領域で吸収されたエネルギーを示す線量の概念で、放射線防護で用いる最も基本的な物理量である。空間線量の測定には、空気における吸収線量が良く用いられる。防護量の基本となるのは、人体の組織における吸収線量である。

**8. 吸収線量率 (Absorbed Dose Rate) : $\dot{D}$  外部, TG90**

吸収線量率 (ICRU、2011 年) は  $dD$  を  $dt$  で除したもの。ここで  $dD$  は時間間隔  $dt$  における吸収線量の増分である。

$$\dot{D} = dD / dt$$

吸収線量率の単位は  $\text{J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$  である。

吸収線量率の単位の特別な名称はグレイ毎秒 ( $\text{Gy s}^{-1}$ ) である。

**9. 個人線量当量 (Personal dose equivalent) : $H_p(d)$  外部, TG79, TG90**

実用量の 1 つ：人体上の特定の点の適切な深さ  $d$  における軟組織（通常，“ICRU 球”と解釈される）中の線量当量。個人線量当量の単位は、キログラム当たりのジュール ( $\text{J kg}^{-1}$ )、また特別な名称はシーベルト (Sv) である。特定の点は通常、個人線量計を装着する部位で与えられている。

**10. 参考レベル (Reference level) TG79, TG90**

緊急時被ばく状況又は現存被ばく状況において、それを上回る被ばくの発生を許す計画の策定は不適切であると判断され、またそれより下では防護の最適化を履行すべき、線量又はリスクのレベルを表す用語。参考レベルに選定される値は、考慮されて

いる被ばく状況の一般的な事情によって決まる。

**11. 実効線量 (Effective dose) :  $E$**  外部, TG79, TG90

体の指定されたすべての臓器及び組織における等価線量の組織加重和は、式

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} = \sum_T w_T H_T$$

ここで、 $H_T$ は、臓器または組織  $T$  における線量当量、 $D_{T,R}$ は、線種  $R$  の放射線からの臓器または組織  $T$  における平均吸収線量、 $w_T$ は、組織加重係数である。総和は、確率的効果の誘発に敏感であると考えられる人体のすべての臓器及び組織にわたって実施される。有効量の SI 単位はジュール/キログラム ( $J kg^{-1}$ ) であり、その特別な名称はシーベルト (Sv) である。

**12. 実効線量率係数 (Effective dose rate coefficient) :  $\dot{e}$**  TG90

放射能濃度と実効線量率に変換するための係数

**13. 実用量 (Operational quantities)** 外部, TG79, TG90

実効線量や等価線量である防護量は、測定することができないので、外部被ばくを伴う状況のモニタリングと調査のための実用的な応用に用いられる線量。体内の線量の測定と評価のために定義された。周辺線量当量、方向性線量当量、及び個人線量当量が規定されている。

**14. 周辺線量当量 (Ambient Dose equivalent) :  $H^*$  (10)** 外部, TG79, TG90

ICRU 球内の対応する拡張され整列したフィールドによって、整列したフィールドの方向とは反対の半径に 10 mm の深さで生成される放射線場の点における線量相当量。周辺線量相当量の単位はジュール/キログラム ( $J kg^{-1}$ ) であり、その特別名はシーベルト (Sv) である。

**15. 周辺線量当量率係数 (Ambient dose equivalent rate coefficient) :  $\dot{h}$  (10)** TG90

放射能濃度を周辺線量当量率に変換するための係数。この報告書で言及されている環境被ばくの周辺線量当量率係数の単位は、 $nSv h^{-1} Bq^{-1} m^3$  または  $nSv h^{-1} Bq^{-1} m^2$  である。

**16. 集団実効線量 (Collective effective dose) :  $S$**  TG79

被ばくした集団について、受けた個人線量の総和を示す指標である。特定の期間  $\Delta T$  において、特定の線源に被ばくした  $E_1$  から  $E_2$  の範囲の個人実効線量についての集団実効線量は、次式のように定義される。

$$S(E_1, E_2, \Delta T) = \int_{E_1}^{E_2} \left( \frac{dN}{dE} \right)_{\Delta T} dE$$

この式は、 $S = \sum_i E_i N_i$  として近似できる。ここで、 $E_i$  はサブグループ  $i$  に対する平

均実効線量，また  $N_i$  はそのサブグループ内の人数である。実効線量を合計する期間及び人数はつねに指定すべきである。集団実効線量の単位は 1 キログラム当たりジュール ( $\text{J kg}^{-1}$ )，またその特別な名称は“人・シーベルト” ( $\text{man} \cdot \text{Sv}$ ) である。

集団実効線量は、集団全体の最適化の達成の程度を評価するためには、有効な指標であるが、微小な実効線量に大きな集団の人数を乗じた値で、集団のリスクを評価することは問題があるとされている。

**17. 集団線量 (Collective dose) TG79**

集団実効線量を参照。

**18. 職業被ばく (Occupational exposure) 外部, TG79, TG90**

次の 3 項目を除く，作業者がその作業の過程で受けるすべての被ばく。

- 1) 除外された被ばく，及び，放射線を含む免除された活動による又は免除された線源による被ばく
- 2) すべての医療被ばく（患者、介護者や介助者、生物医学研究の志願者が受ける被ばく）
- 3) 通常の地域の自然バックグラウンド放射線。

**19. 線質係数 (Quality factor) :  $Q(L)$  外部, TG79, TG90**

組織内の荷電粒子の飛跡に沿った電離密度に基づく，放射線の生物学的効果の特徴づける係数。 $Q$  は，水中の荷電粒子の非限定的線エネルギー付与  $L_\infty$  ( $L$  又は LET と称されることが多い) の係数として定義される：

$$Q(L) = \begin{cases} 1 & L < 10 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1} \\ 0.32L - 2.2 & 10 \leq L \leq 100 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1} \\ 300/\sqrt{L} & L > 100 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1} \end{cases}$$

等価線量の定義において， $Q$  は放射線加重係数に代わったが，モニタリングで使用される実用線量当量の計算では引き続き使用されている。

**20. 線量係数 (Dose coefficient) 外部, TG79, TG90**

内部被ばくにおいて、被ばく線量（預託実効線量）と放射エネルギーの比率。

**21. 線量限度 (Dose limit) 外部, TG79, TG90**

計画被ばく状況から個人が受ける，超えてはならない実効線量又は等価線量の値。

**22. 線量拘束値 (Dose constraint) 外部, TG79**

ある線源からの個人線量に対する予測的な線源関連の制限値。線源から最も高く被ばくする個人に対する防護の基本レベルを提供し，またその線源に対する防護の最適化における線量の上限值としての役割を果たす。職業被ばくについては，線量拘束値は最適化のプロセスで考察される複数の選択肢の範囲を制限するために使用される個人線量の値である。

公衆被ばくについては、線量拘束値は、管理された線源の計画的操業から公衆構成員が受けるであろう年間線量の上限值である。

**23. 線量当量 (Dose equivalent) :  $H$**  外部, TG79, TG90

ある点での線量当量は、

$$H = QD$$

ここで、 $D$  は吸収線量であり、 $Q$  はその点における特定の放射線の線質係数である。線量当量の単位はジュール/キログラム ( $\text{J kg}^{-1}$ ) であり、その特別な名称はシーベルト (Sv) である。

**24. 線量当量率 (Dose equivalent rate) :  $\dot{h}$**  TG79, TG90

単位時間当たりの線量当量。

**25. 線量率係数 (Dose rate coefficient)** TG90

単位時間当たりの内外の放射線被ばくの両方について、線量と物理量を関連付ける係数。

**26. 臓器または組織における平均吸収線量 (Mean absorbed dose in an organ or tissue) :  $D_T$**

外部, TG90

防護量の一つで、従来用いられた等価線量の代わりとして規定される。

指定された臓器または組織  $T$  における平均吸収線量は、

$$D_T = 1/m_T \int D dm$$

ここで、 $m_T$  は臓器または組織の質量であり、 $D$  は質量要素の吸収線量 ( $dm$ ) である。平均吸収線量の SI 単位はジュール/キログラム ( $\text{J kg}^{-1}$ ) であり、その特別な名称はグレイ (Gy) である。

**27. 臓器吸収線量 (Organ absorbed dose)** TG90

「臓器または組織における平均吸収線量 :  $D_T$ 」の略語。

**28. 組織反応 (Tissue reaction)** 外部, TG79, TG90

閾値線量及び線量がさらに増加するにつれて反応の重篤度が増加することを特徴とする、細胞集団における傷害。組織反応は、「確定的影響」とも呼ばれ。いくつかの場合において、これらの影響は生物学的反応修飾物質を含む照射後手順によって変更可能である。

**29. 組織加重係数 (Tissue weighting factor) :  $w_T$**  外部, TG79, TG90

身体への均一照射の結果生じた健康損害全体に対する組織または臓器の相対的寄与を表現するため、組織または臓器  $T$  の等価線量に加重する係数 (ICRP、1991)。

それは以下のように定義される。

$$\sum_T w_T = 1$$

**30. 等価線量 (Equivalent dose) :  $H_T$**  外部, TG79, TG90

臓器または組織  $T$  における等価線量は、

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

ここで、 $D_{T,R}$  は臓器または組織  $T$  における放射線  $R$  からの平均吸収線量、 $w_R$  は放射線加重係数である。等価線量の単位はジュール/キログラム ( $J kg^{-1}$ ) であり、その特別な名称はシーベルト (Sv) である。

31. 等価線量率係数 (Equivalent dose rate coefficient) :  $\dot{h}_T$  TG90

放射能濃度を等価線量率に変換する係数

32. 標準男性及び標準女性 (標準個人) (Reference Male and Reference Female (Reference Individual)) TG90

放射線防護の目的でICRPによって定義された特性を持ち、及び出版物 89 (ICRP, 2002) で定義されている解剖学的及び生理学的特徴を備えた理想化された男性または女性。

33. 標準人 (Reference person) TG79, TG90

標準男性及び標準女性の対応する線量を平均化することによって臓器または組織等価線量を計算するための理想化された人。標準人の等価線量は、各線量に対応する組織加重係数を乗じることによって実効線量に利用される。

34. 標準ファントム (Reference phantom) 外部, TG79, TG90

Publication 89 (ICRP, 2002) に定義されている解剖学的及び生理学的特性を持つ Publication 110 (ICRP, 2009a) に定義されている人体の計算ファントム (医用画像データに基づく男性または女性のボクセルファントム)。

35. フルエンス (Fluence) :  $\Phi$  外部, TG79, TG90

フルエンス  $\Phi$  (ICRU, 2011 年) は  $dN$  を  $da$  で除した量。

$$\Phi = dN/da$$

ここで、 $dN$  は断面積  $da$  の球体に入射する粒子の数である。

フルエンスの単位は  $m^{-2}$  である。

線量測定の計算では、フルエンスは、粒子軌道の長さで表現することが多く、フルエンス  $\Phi$  は次式で与えられる (Weinberg 及び Wigner, 1958 年)。

$$\Phi = dl/dV$$

ここで、 $dl$  は体積  $dV$  内の粒子軌道の長さの合計。

時間間隔  $t$  に関して変化せず、また速度  $v$  の粒子から構成されている放射線場については、フルエンス  $\Phi$  は次式で与えられる。

$$\Phi = n v t$$

ここで  $n$  は、粒子数密度であり、 $n = dN/dV$  で与えられる。ここで、 $dN$  は体積  $dV$  内の粒子の数である。

エネルギーに対するフルエンスの分布  $\Phi_{Ep}$  は、次式で与えられる。

$$\Phi_{Ep} = d\Phi/dE_p$$

ここで  $d\Phi$  は、 $E_p$  と  $E_p+dE_p$  との間のエネルギー区間の粒子のフルエンスである。ある状況の下では立体角に関わる量  $d\Omega$  が必要である。フルエンスの二重微分の完全な表現は  $\Phi_{Ep,\Omega}(E_p,\Omega)$  と記載することができる。

**36. フルエンス率 (Fluence Rate) :  $\dot{\Phi}$**  外部

フルエンス率 (ICRU、2011 年) は  $d\Phi$  を  $dt$  で除したものである。ここで、 $d\Phi$  は時間間隔  $dt$  における粒子のフルエンスの増分である。すなわち、

$$\dot{\Phi} = d\Phi/dt$$

フルエンス率の単位は  $m^2 s^{-1}$  である。

**37. 平均自由行程 (Mean free path) : mfp** TG90

衝突しないで粒子が移動した平均距離。

**38. 防護量 (Protection quantities)** 外部, TG79, TG90

ICRP が放射線防護のために定義した、全身及び身体部分の外部照射と放射性核種の摂取による、人体の電離放射線被ばくの程度の定量化を可能にする放射線防護のための線量概念の総称である。

**39. 放射線加重係数 (Radiation weighting factor) :  $w_R$**  外部, TG79, TG90

低 LET 放射線と比べ、高 LET 放射線の高い生物学的効果を反映させるために、臓器または組織の吸収線量に乗じる無次元の係数。ある組織または臓器にわたって平均した吸収線量から等価線量を求めるのに用いられる。

**40. ボクセルファントム (Voxel phantom)** 外部, TG90

解剖学的構造が小さな三次元体積要素 (ボクセル) によって記述されている医用断層画像に基づく計算用擬人化ファントム。これらのボクセルの集合体は、人体の臓器や組織を特定するために使用される。

**41. 防護 (及び安全) の最適化 (Optimisation of protection)** TG79, TG90

いかなるレベルの防護と安全が、被ばく及び潜在被ばくの確率と大きさを、経済的・社会的要因を考慮の上、合理的に達成可能な限り低くできるかを定めるプロセス。

**46. 名目リスク係数 (Nominal risk coefficient)** TG79

代表的集団における性及び被ばく時の年齢で平均化された生涯リスク推定値。

**47. 粒子エネルギー (Particle Energy) :  $E_p$**  外部, TG79, TG90

粒子運動エネルギーと光子エネルギーの量を、記号  $E$  で示す実効線量の量と区別するために、記号  $E_p$  で示している。

**48. 粒子フルエンス (Particle fluence)** 外部, TG90

フルエンス (Fluence) 参照。