

ISSN 1881-7297

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ

Vol.5 No.1

放射線防護に用いる線量概念の専門研究会

2007年8月

日本保健物理学会

日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ ISSN 1881-7297  
Vol. 5, No. 1, 放射線防護に用いる線量概念の専門研究会

---

2007年8月

発行者 日本保健物理学会企画委員会  
発行所 日本保健物理学会  
〒160-0023 東京都新宿区西新宿 3-5-3-716  
NPO 事務センター内 日本保健物理学会事務局  
TEL : 03-5339-7286  
FAX : 03-5339-7285  
E-mail : [jhps@wwwsocnii.ac.jp](mailto:jhps@wwwsocnii.ac.jp)  
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jhps/index.html>

「放射線防護に用いる線量概念の専門研究会」活動報告書

2007年7月

日本保健物理学会

放射線防護に用いる線量概念の専門研究会

## 目 次

第1章 緒言 .....	1
1.1 研究会設立の背景と目的.....	1
1.2 研究会の構成員及び検討経緯.....	1
1.2.1 研究会の構成員.....	1
1.2.2 研究会の検討経緯.....	2
1.3 本報告の内容.....	3
第2章 専門研究会で抽出された主な論点.....	4
2.1 専門研究会の設置以前の議論.....	4
2.2 放射線の線質に応じて荷重される係数.....	4
2.3 放射線防護の目的で定義された線量.....	5
2.4 外部被ばく防護のためのモニタリングに使用される線量.....	7
第3章 専門研究会での主な調査内容.....	9
3.1 ICRP における最近の議論.....	9
3.2 放射線生物研究.....	9
3.3 医療被ばくにおける線量の考え方 .....	10
3.4 ICRP の新基本勧告のドラフト文書（平成 18 年 6 月公開）.....	11
第4章 放射線防護に用いる線量に関する提言.....	13
4.1 提言へ向けた議論の方針.....	13
4.2 科学的に得られた知見と放射線防護に用いる諸量の関係.....	13
4.3 実測による放射線防護に必要な量.....	14
4.4 放射線防護に用いる線量の全般的な問題点.....	16
4.5 今後の課題.....	18
第5章 結言.....	19
謝 辞 .....	19
付 記 .....	19
参考文献.....	21

## 第1章 緒言

### 1.1 研究会設立の背景と目的

国際放射線防護委員会(ICRP)は、作業員、公衆を過度の被ばくから防護する際の指標として、実効線量などの「防護量」を勧告している。一方、国際放射線単位測定委員会(ICRU)は、放射線測定に用いる量及びその単位について検討しており、その中で防護量を合理的に評価するための対象として「計測実用量」も定義している。これらの放射線防護のために定められている線量は、物理量に決められた係数を荷重して被ばくによる影響、放射線場の特性を定量化して表現するものである。我が国の放射線防護に関する法令、基準、指針類も、国際機関が与えている線量の定義に従って策定されており、放射線管理などもこれに従って実行される。しかし、放射線防護に関係する線量の定義や使い方については、保健物理関係者の間でも複雑であるという印象を持つ者が多くあり、時には曖昧であるなどの意見、批判も与えられてきた。

以上の背景を受けて、日本保健物理学会は、2005年4月に「放射線防護に用いる線量概念の専門研究会」を設置した。以降、同専門研究会は、放射線防護に用いる線量について、これまでの変遷から現行の体系を中心として問題点を抽出し、線量のあるべき姿を議論してきた。この他に、専門研究会が設置された時期においては、ICRPの基本勧告の改訂が示唆されていた(2007年3月にICRPが新基本勧告を正式に採択)。この基本勧告の改訂においては、国際的に意見を参酌するため、いくつかのドラフト文書が、web上で公開された。そこで、線量に関する最新の問題点の把握するため、これらのドラフト文書に記されている内容も議論の対象とした。また、必要な場合は、検討の結果をコメントとしてICRP宛に提出した。

### 1.2 研究会の構成員及び検討経緯

#### 1.2.1 研究会の構成員

- 小田 啓二 (神戸大学)
- 岩井 敏 (三菱総合研究所)
- 岩波 茂 (北里大学)
- 佐藤 理 (三菱総合研究所)
- 寿藤 紀道 (千代田テクノル)
- 辻村 憲雄 (日本原子力研究開発機構)
- 鶴田 隆雄 (近畿大学)
- 中村 尚司 (東北大学)
- 平山 英夫 (高エネルギー加速器研究機構)
- 山口 恭弘 (日本原子力研究開発機構)
- 吉澤 道夫 (日本原子力研究開発機構)
- 高橋 史明 (日本原子力研究開発機構)(幹事)
- 杉浦 紳之 (近畿大学)(担当企画委員)

### 1.2.2 研究会の検討経緯

専門研究会は、計 8 回の会合を開催した。各会合の主な議事内容は、以下の通りである。

第 1 回会合（2005 年 5 月 27 日 大崎総合研究所）

研究会の設置趣旨について  
放射線防護に用いる線量概念の現状とその問題点  
今後の活動方針について

第 2 回会合（2005 年 8 月 22 日 大崎総合研究所）

放射線防護に用いる線量概念に係る論点の整理  
ICRP 第 2 委員会基本文書について（コメント提出など）

第 3 回会合（2005 年 10 月 3 日 高エネルギー加速器研究機構）

放射線防護に用いる線量について（ICRP 第 2 委員会委員 Menzel 氏の講演）

第 4 回会合（2005 年 11 月 4 日 大崎総合研究所会議室）

放射線防護に用いる線量に係る ICRP における最近の議論のレビュー  
今後の専門研究会の進め方（講師の招聘、提言へ向けた議論）

第 5 回会合（2006 年 3 月 6 日 大崎総合研究所会議室）

放射線の生物影響について（京都大学 教授 丹羽大貫氏の講演）  
線量概念の提言へ向けての議論(1)  
・ 検討項目の整理  
・ より簡素な体系の提案の可能性

第 6 回会合（2006 年 5 月 11 日 大崎総合研究所）

医療被ばくにおける線量の考え方（放射線医学総合研究所 赤羽恵一氏の講演）  
線量概念の提言へ向けての議論(2)  
・ 放射線防護における計測実用量の必要性

第 7 回会合（2006 年 9 月 20 日 大崎総合研究所）

ICRP 新基本勧告ドラフト（2006 年 6 月公開）について  
・ The 3rd Asian Regional Conference on the Evolution of the System of Radiological Protection（OECD/NEA、2006 年 7 月 5 日～6 日）の報告  
・ 専門研究会委員からの主な意見（9 月 4 日開催のワーキンググループ）  
線量概念の提言へ向けての議論(3)  
・ 低線量域における諸量の適用をめぐる問題  
・ 放射線防護に用いる線量の限界

## 報告書の作成について（構成案）

### 第8回会合（2006年12月18日 大崎総合研究所）

#### 線量概念の提言へ向けての議論(4)

- ・防護量の適用の考え方について
- ・放射線防護における不確実性

#### 放射線防護に用いる線量概念に関する提言（審議のまとめ）

#### 報告書の作成について（骨子）

#### シンポジウムの開催について

この他、第42回アイソトープ・放射線研究発表会（2005年7月6日(水)：日本青年館）においては本専門研究会の委員が中心となりパネル討論会を開催した。また、第40回研究発表会（2006年6月8日(木)：広島プリンスホテル）では、企画セッションにおいて、当専門研究会のそれまでの活動及び主要な議論を報告した。

研究会の活動を締めくくるにあたっては、下記のように企画委員会主催のシンポジウムを開催した。

専門研究会の目的と活動	小田主査
現在の放射線防護における線量の体系	高橋委員
放射線質に応じて荷重する係数	岩井委員
放射線モニタリングに用いる諸量と必要性	吉澤委員
何故、放射線の「線量」は議論されるのか？	山口委員
全体討論：「線量」をめぐる残された課題の解決へ向けて	司会：鶴田委員

### 1.3 本報告書の内容

本報告書は、専門研究会における活動の概要及び得られた一定の結論について取りまとめたものである。第2章では、研究会の各会合において、委員などから提示された線量概念に係る主要な問題点を記載した。第3章では研究会の会合で招聘した国内外の著名な先生方の講演を通じて得られた知見などをまとめた。第4章では、線量概念についての提言へ向けた議論の内容及び得られた一定の結論を記す。第5章では、全体のまとめと残された課題を述べる。

## 第2章 専門研究会で抽出された主な論点

### 2.1 専門研究会の設置以前の議論

ICRP は、公衆、作業者などの過度の被ばくを避けるため、実効線量及び等価線量という「防護量」で線量限度を与えている。現在の我が国における放射線防護では、1990年勧告（ICRP Publication60）<sup>1)</sup>で示されている線量、係数が適用されている。一方、体外からの放射線に対して防護量は実測できないので、ICRU は外部被ばく防護における放射線モニタリングのための「計測実用量（以下、実用量）」を定義している。現在、用いられている実用量は、1985年に発刊された Report39<sup>2)</sup>に示されている整列場及び拡張場の概念に基づき定義されたものであり、その後、Report43<sup>3)</sup>、Report 47<sup>4)</sup>、Report 51<sup>5)</sup>及び Report 66<sup>6)</sup>でも更なる報告がされた。

これらの放射線防護に用いる線量が初めて提示された際には、日本国内でも専門家による検討、詳細な解説がされた。また、平成7年及び平成8年に日本原子力研究所（当時）において、外部被ばく線量評価法に関する2回のワークショップ<sup>7), 8)</sup>が開催され、ICRP の1990年勧告で示された防護量、ICRU Report 39で定義された実用量についての活発な議論がされた。しかし、従来からの変更について、プロセスや科学的根拠が明確にされていなかったこともあり、更なる議論を引き起こし、時には曖昧であるという批判的な意見も提示された。その後、ICRP は放射線防護に用いる線量及びそれを導出するための係数について、いくつかの報告書を発刊し、近年では基本勧告の改訂に係る作業に着手していた。その過程において、広く関係者より意見を参酌するため、改訂案のドラフト文書も公開された。その中では、大きくはないが放射線防護に用いる線量に関係する変更も示唆されていた。

線量概念について、以上のような継続的に提示されてきた意見、議論が、本専門研究会の設立の動機付けとなっていた。

本章では、専門研究会の活動を開始した初期の段階で、委員が現行の放射線防護に係る諸量に対して提示した主要な問題点などを記す。以下、放射線の線質に応じて荷重される係数、ICRP の勧告する放射線防護に用いる量と関連する係数、ICRU の定義する実用量の順に示す。ここでは、研究会の活動を開始した時期に公開された線量計測量に関する基本文書（ICRP 第2委員会）で示唆されていた変更点に関する意見なども一部含まれている。なお、基本文書に関する意見については、ICRP へコメントとして提出した。

### 2.2 放射線の線質に応じて荷重される係数

放射線により人の受ける影響は、放射線の強度により変化するので、これを表すフルエンスあるいは単位質量あたりに付与されたエネルギーである吸収線量  $D$  が、最も基本の量となる。一方で、被ばくに関与した放射線の種類、エネルギー（線質）により受ける生体影響が違ふことは古くより知られていた。そこで、これを考慮して吸収線量を補正するための係数が定義され、最新の知見を反映しつつ見直されてきた。現在の防護体系では、ICRP1990年勧告で定義されている線質係数  $Q(L)$  及び放射線荷重係数  $w_R$  が用いられてい

る。両者は、確率的影響について用いられるという共通点があるが、その定義は大きく異なる。線質係数  $Q(L)$  は、水中の限定されない線エネルギー付与  $L$  の関数として定義される。一方、放射線荷重係数  $w_R$  は体内に取り込んだ放射性核種の放出する放射線（内部被ばく）または人体に入射する放射線（外部被ばく）について、一義的に決定される。

専門研究会の委員からは下記の意見が提示された。

1) 中性子の放射線荷重係数  $w_R$  について

例えば、熱中性子などの低エネルギーでは体内元素の捕獲反応で発生する線、エネルギーがより高くなると反跳された水素核（陽子）が、主として被ばくに寄与する。ICRP1990年勧告では、線及び陽子の放射線荷重係数の値はそれぞれ1及び5（ICRP Publication 92<sup>9)</sup>では、2が提案された。）であるが、中性子については5から20の数値が与えられており、乖離している。

このうち、低エネルギー中性子の放射線荷重係数  $w_R$  については、ICRP Publication 60以降にも見直し提案されているが、第1回の会合では、岩井委員（当時は、講演者として招聘）より、陽子と中性子に関する放射線荷重係数  $w_R$  と線質係数  $Q$  が10MeV以上で不整合が見られるというデータが提示された。その上で、10MeV以上の中性子についても、数値はより下げるべきであるという指摘があった。

2) 放射線荷重係数  $w_R$  の bilocality（両地点性）

岩井委員からは、ICRPのPublication 92でも示されている放射線荷重係数  $w_R$  の bilocality（両地点性）について言及があった。例えば、1)の前段にある疑問は、放射線荷重係数  $w_R$  が人体への入射時（外部被ばく）もしくは線源からの放出時（内部被ばく）の放射線と人体組織の相互作用で生じる二次粒子の影響を適切に表現しないことに起因している。放射線荷重係数  $w_R$  の導入は、防護に便宜性を与えたが、この bilocality を含めた両面からの議論が必要である旨の説明がされた。

3) 根拠となる生物学実験データ

線質係数  $Q(L)$  及び放射線荷重係数  $w_R$  の根拠となる生物学的、物理学的なデータが明確でない点は、専門研究会設立の大きな動機付けの一つであった。このうち、ICRU Report 40<sup>10)</sup>にある線エネルギー  $y$  に関係付けられた  $Q(y)$  については、その根拠とした実験について記載している点が、岩井委員より紹介された。それは、Zeiderらが1985年に公開した論文<sup>11)</sup>の中で、リンパ球中の二動原体染色体異常の発現率と  $Q(y)$  を関係付けているというものである。

## 2.3 放射線の防護の目的で定義された線量

ICRP1990年勧告では、放射線防護の目的で、確率的影響の発現を推定するために臓器の平均線量  $D_{TR}$ 、等価線量  $H_T$  及び実効線量  $E$  を(1)式及び(2)式のように勧告された。

$$H_T = \sum_R w_R \cdot D_{T,R} \quad (1)$$

$$E = \sum_T w_T \cdot H_T \quad (2)$$

ここで、 $w_R$ ：放射線荷重係数、 $w_T$ ：組織荷重係数である。

現在の放射線防護の考え方では、(1)式のように、組織・臓器にわたって平均した吸収線量  $D_{T,R}$  が最小の単位となる。線量に荷重する2つの係数は無次元であるので、等価線量及び実効線量も SI 単位では J/kg となる。しかし、等価線量  $H_T$  及び実効線量  $E$  の特別単位はグレイ(Gy)ではなく、シーベルト(Sv)である。等価線量及び実効線量は、体外から入射した放射線による被ばく（外部被ばく）及び摂取した放射性核種による被ばく（内部被ばく）に共通して定義されており、被ばくの経路によらず合算することができる。

専門研究会の委員などから示された主な意見は以下の通りである。

#### 1) 等価線量

例えば、作業員、公衆の線量限度に用いられるように、実際の放射線管理の多くの場面では実効線量を基本としている。そのため、物理量からの換算係数、遮へい設計などに用いる係数などは、実効線量について整備されている。その中で、等価線量は実効線量の途中段階で出てくる量という印象を多くの者は持っており、実効線量の換算係数などを解析する者のみがこの量を扱うと考えられる。また、実効線量が防護の場面でも確率的影響に関係している点は明確に理解できるが、等価線量は確定的影響を防止するための線量限度としても用いられる。以上の背景から、等価線量については、防護に用いる線量としての意味付けを検討すべきという意見が提示された。

研究会の活動を開始した時期に公開された ICRP 第2委員会による文書において、等価線量という名称を放射線荷重線量 (Radiation weighted dose) に置き換える意見が提示されていた。何名かの委員については、現状の定義から内容についての変更がなく、名称のみの変更では混乱を招くだけになる可能性が高いという意見が提示された。この他、同文書では放射線荷重線量 (等価線量) の単位として Sv に置き換わり、Gy として荷重した旨を明記して表示する案が示されていた。この変更については、等価線量は確定的影響を防止する線量限度に用いられており、等価線量と実効線量が考慮している影響を単位で区別できるので合理的であるという意見もあった。一方、この場合、防護に用いるために放射線荷重係数  $w_R$  で荷重され線量が、臓器の吸収線量と単位が同一となる問題点も指摘された。また、単位の問題に関して、荷重した線量に対して、SI 単位として J/kg を使用することの妥当性に疑問も提示された。この等価線量の単位の問題については、第40回研究発表会の企画セッションでも、会場からもコメントがあった。

#### 2) 実効線量

実効線量については、その定義及び適用法について、議論が展開された。例えば、ICRP

により提示されている換算係数は、標準人について定義された量である。ここで、性差、体格差のある各個人を考慮した場合、提示された換算係数により与えられる実効線量を適用した場合の不確かさをどのように考えるかという意見が出された。この中で、現状の放射線防護では、換算係数が内部被ばくでは公衆のことを考慮して年齢群別<sup>12),13)</sup>に、外部被ばくは成人モデルについてのみ整備している点<sup>14),15)</sup>が確認された。

ICRP 第2委員会による基本文書においては、成人のモデルの整備、両性の平均の取り方のルールが示された。同文書と1990年勧告の大きな相違点の一つとして、より明確に実効線量の適用のルールが提示されていた点があった。そこで、この文書で提示されている内容については、研究会でも精査していくことにした。

#### 2.4 外部被ばく防護のためのモニタリングに使用される線量

ICRUは、放射線測定における基本的な量とその単位を検討している。これに加えて、外部被ばく防護について、実効線量などを合理的に実測により確認するための実用量を定義している。ICRPとICRUにより定義されている外部被ばく防護のための諸量は、図1のように関係付けられる。

現在のエリアモニタリングに用いる実用量は、ICRUのReport39に示された概念を基本としている。これらの量は、実測可能という点を鑑みて、何れもある1点の吸収線量に $Q(L)$ を乗じて求められる<sup>14),15)</sup>。また、ICRUは実用量が成立するための仮想的な2つの場の概念を以下のように定めている。

拡張・整列場：フルエンスとそのエネルギー分布が、着目する体積全体にわたって、基準点における実際の場合と同じ値を持ち、フルエンスの方向が単一である場

拡張場：フルエンスとその方向分布、エネルギー分布が、着目する体積全体にわたって、基準点における実際の場合と同じ値をもつ場

エリアモニタリングに用いる量として、周辺線量当量  $H^*(d)$ 、方向性線量当量  $H'(d, \Omega)$  が定義されている。何れも、ICRUが定義する半径30cmの組織等価球中のある1点の線量で定義されるが、前者は拡張・整列場、後者は拡張場の中で定義される。ここで、 $d$ は放射線の入射点からの組織等価中の深さであり、 $d$ として、実効線量に関係する量は1cm、皮膚線量に関係する量は70 $\mu$ m、眼の水晶体に関係する量は3mmが与えられる。方向性線量当量の $\Omega$ は、特定された方向と放射線の入射方向の間の角度である。

個人モニタに用いる実用量は、ICRU Report39以降にも変更が見られ、現在は個人線量当量  $H_p(d, \Omega)$ のみが定義されている。この量は、人体内の一点で定義されるため、各個人間、個人の中でも変化する多価量となる。また、個人モニタリングに用いる線量計の校正においては、人体の代用となるファントムは球形ではなく、30cm×30cm×15cmのスラブ形状である。この場合の線量は、上記の人体組織中で定義される量と区別するため、 $H_{p,slab}(d, \Omega)$ と表記されることもある。

内部被ばく防護については、このような特別に定義されている実用量はない。しかし、

ICRP の 1990 年勧告の第 2 章放射線防護に用いられる諸量の中の 2.4 節(その他の量)では、第 37 段落に放射能が示され、その後段に実用量がある。また、実際の放射線管理を鑑みた場合、体内に摂取した放射性核種の放射能が実用量の役割を果たすと考えられる。

ICRU の定義する実用量については、主に以下のようなコメントが提出された。

1) 実用量の実測の可能性

ICRU は、実際の現場を仮想的に表現した放射線場を導入して、そこに存在する ICRU ファントムや人体組織中の一点で定義される実用量を実測可能としている。ただし、ICRU ファントムがこれまでに実現されたことはなく、ファントムや人体組織中の線量も現実的には実測できない。そのため、実用量も物理量からの導出は、防護量と同じ計算という手段に頼らざるを得ない現状にある。

2) 防護量の保守的な評価

近年、科学技術の進展という背景から、高エネルギー加速器、宇宙環境での放射線防護が必要となってきた。このような状況では、従来の放射線施設、原子力施設よりも高エネルギー放射線に防護が重要となってくるが、このような場合には現行の実用量が必ずしも防護量を保守的に評価できないことが分かってきている。

以上の 1)及び 2)の実用量に関するコメントから、実測に用いる測定機器を防護量で校正して、実用量を除外した体系の構築の可能性を検討すべきという意見が提示された。

3) 実用量の定義に用いるファントム

上術のとおり、実用量については、多くのファントムが関係している。そのため、深さ  $d$  が同じ場合でも、エリアモニタリング及び個人モニタリングで異なる実測の対象量が導入されることになる。実測に必要な量ということであれば、校正などでの混乱を避ける意味からも、人体を代用するファントムを統一した方がよいという意見も提示された。

### 第3章 専門研究会での主な調査内容

専門研究会においては、国内外の著名な専門家を招聘して放射線防護に用いる線量に直接または間接的に関係する事項の講演を頂戴した。また、国内において開催された勉強会に類する会合において、線量の問題についてなされた議論を専門研究会の会合でもレビューした。

3.1 及び 3.4 節の内容については、審議した時点での情報に基づいている。いくつかの点については、2007年3月にICRPより採択された新基本勧告と異なっている可能性もある。

#### 3.1 ICRPにおける最近の議論

第3回会合において、ICRP第2委員会委員のMenzel氏(CERN)を招聘し、2005年4月に公開された線量計測量に係る基本文書などの内容について、講演を頂戴した。その中で入手できた主な情報は以下のとおりである。なお、同会合に参加できなかった者のうち何名かは、日本原子力研究開発機構で、同氏から類する講演を頂戴したので、その時に得た情報も併せて記載する。

- ・ 等価線量の放射線荷重線量への名称変更は、基本文書の紹介後にコメントが寄せられた。その結果、この量についての名称変更は行わない予定であるという報告を受けた。
- ・ 実効線量については、男女のvoxel型の標準モデルが整備中であり、今後はこのモデルを用いて線量換算係数が解析されることになる。また、男女間の性差を考慮した実効線量の算出法について、一定のルールも決定された点が、その決定に至る経緯を含めて紹介された。
- ・ 専門研究会でも疑問が多く提示された中性子の放射線荷重係数について、説明があった。その中では、100MeV以上の高エネルギー域については、いくつかの最近の研究成果を紹介しつつ、数値が引き下げられる可能性もある点が紹介された。
- ・ 高エネルギー中性子、陽子の $w_R$ 値の見直しにより、実用量が防護量を過小評価するという問題は、改善される。
- ・ この他、人体モデルを用いて計算された各臓器の線量、そこでの線質係数及びその臓器の組織荷重係数 $w_T$ (1990年勧告の値)から全身の実効的な $q_E$ を計算し、これと $w_R$ の関係付けの説明があった。この成果に基づき、 $w_R$ と $Q(L)$ の間の整合性などが説明された。

以上の説明、意見交換により、中性子の $w_R$ などについて、その決定の経緯、参照した研究成果を知ることができた。

#### 3.2 放射線生物研究

丹羽太貴氏(京都大学放射線生物研究センター、教授)を招聘し、放射線による生物影

響について、講演を頂戴した。その主な内容は、下記のとおりである。

- ・ ゼロリスク（「リスクがない」）の証明は、どのような問題でも、難しい（ほぼ不可能）という本質がある。
- ・ DNA 損傷が最終的に生物影響へと繋がるが、生物影響の発現までの経緯は単一なものではなく、介する段階の数の順列、組み合わせで決定される多くの数を持つ。
- ・ 放射線の線質により荷重される係数（線質係数、放射線荷重係数）は、指標とする生物影響により異なる。意見交換により、その中で、染色体異常（二動原体染色体の発現率）の観測は、信頼性の高い指標であることが分かった。
- ・ 中性子の RBE も指標により変化して、3~5 という数値を与えている熱中性子を使用した実験がある。信頼性の高い染色体異常の観察に基づく実験では、20 という値が提示されている。
- ・ 低線量率効果を表す DDREF については、放射線防護に用いる諸係数の定義にも深く関係する。ICRP は実測に基づき、線形二次関係の理論式より 2 という値を DDREF の数値として導出している。一方、最近報告された BEIR では、2 より小さな値（1.5）が算出されている。このように数割程度変化する DDREF もまた、指標の影響を受けている。
- ・ 発ガンについては、放射線の寄与を明確にすることは難しい。例えば、ガンの発生率は、その種類により日本国内の都道府県の間でも数 10%の差が見られる。放射線影響に重要な役割を果たす疫学調査の前提は、集団内での均一性であるが、いくつかの調査では、（線量と影響の関係付けの大前提となる）線量の定量化が一番の問題と考えられている。

以上の講演は、線量の指標となる生物影響に関する詳細な解説がされた有意義なものであり、放射線防護の体系を構築における放射線生物研究の重要性を改めて認識することができた。特に低線量の被ばくに対する防護の体系は、多くの生物研究で得た知見に基づくジャッジメントで決定されている点が理解できた。この講演の内容については、低線量被ばくによる防護に用いる線量のあり方についての審議に反映させることとした。

### 3.3 医療被ばくにおける線量の考え方

赤羽恵一氏（放射線医学総合研究所）を招聘し、医療被ばくにおける線量の考え方についての講演を頂戴した。その主な内容は、以下のとおりである。

- ・ 医療被ばくは、診断、核医学、治療などと多岐にわたり、それぞれ線量レベル、発現する影響も異なる。
- ・ 通常の防護と大きく異なる点としては、一定の線量以上を与えることにより得られる便益と被ばくによるリスクの両面からの検討が必要である。しかし、被ばくによるリスクのみ評価される傾向がある。そのリスクの不確かさとして、線量評価、リスクモデル、DDREF の値、評価及び手法の精度がある。
- ・ 医療被ばくには線量評価の法的な義務はないが、診断参考レベルの考慮など、最

適化の過程では線量推定を行う場合がある。

- ・ 線量として、放射線防護に用いる実効線量、臓器線量、皮膚線量なども含まれる。また、特徴的な量として、人体組織の後方散乱を考慮した空間中の線量である入射表面線量、X線管球から出る線量を表現する面積線量などがある。これらは、何れも測定の対象とする量である。
- ・ 相対リスクの値を丸めて、組織荷重係数  $w_T$  は定義される。つまり、実効線量にはこれに関係する固有の不確かさが含まれることになる。

この講演では、医療被ばくの現場においても防護量が使用されている他に、測定のための量が導入されている点が紹介できた。この測定のための量は、現場の状況により明確に結び付いて定義されていることが認識できた。また、組織荷重係数の決定についても、有益な情報を入手することが出来た。この他、医療被ばくにおける、線量の告知、実効線量の適用並びに解釈の問題点について、意見交換を通じて情報を得ることができた。

#### 3.4 ICRP の新基本勧告のドラフト文書 (2006 年 6 月公開)

ICRP は、基本勧告の案となるドラフト文書を 2006 年 6 月に web 上で公開した。専門研究会でもこのドラフト文書について調査した。線量について記述されていた第 4 章の概要は、下記のとおりである。(2006 年 7 月に経済協力開発機構/原子力エネルギー機関 (OECD/NEA) 主催で開催された The 3rd Asian Regional Conference on the Evolution of the System of Radiological Protection における、石樽信人氏 (名古屋大学) の報告などを参考に記述する。)

- ・ 放射線防護に用いる量は以下のとおりで、加算性の考慮を維持している。  
臓器・組織の平均吸収線量、等価線量、実効線量、  
預託実効線量 (内部被ばく)、集団実効線量
- ・ 放射線荷重係数  $w_R$  は、陽子及び中性子で見直し、新たにパイオンについて定義。内部被ばくで重要な粒子は変更がない。
- ・ 中性子の放射線荷重係数  $w_R$  はより正確なデータの有用性はなかったが、研究、実用面を考慮して、連続関数とした。低エネルギー中性子で主要な因子となる二次線に由来する吸収線量の寄与は、人体形状ファントムを用いた計算解析により見直した。RBE は、50MeV 以上では、50MeV で 5、10GeV で 2.5 へ減少するので、高エネルギー中性子の数値も見直した。ただし、1MeV  $<$  E  $<$  50MeV では、新しい実験データがなく、この領域における RBE の一般的な不確かさが存在するので、1990 年勧告における値を維持するのが適当とした。
- ・ 高エネルギー陽子の外部被ばくは、実効線量の評価に関連性がある。動物実験、100MeV までに適用される  $Q(L)$  関数、GeV 単位における二次荷電粒子は、全て 2 以下の値なので、 $w_R$  として 2 を採用する。
- ・ 粒子の放射線荷重係数  $w_R$  について、人に関するデータは限られているが、最近の

データも変更を支持したのではなく、20 という数値が保持された。

- ・ 内部及び外部被ばくによる臓器への放射線の吸収線量は、成人男女のリファレンスボクセルファントムにより計算される。男女とも実効線量は、各臓器組織の等価線量（吸収線量×放射線荷重係数）×組織荷重係数の総和として評価する。最終的な等価線量、実効線量の数値として、両性の平均を採用する。各臓器組織における組織荷重係数は、男女で平均化されたものである（例：男性も乳房の等価線量を算出する。性差があるのは、その他の臓器に含まれる前立腺と子宮である。）
- ・ 内部被ばくによる線量評価は、バイオアッセイによる測定値→摂取量評価→実効線量評価によって評価される。不確かさはより小さくなるが、外部被ばくに比べた場合は大きい。放射性核種の代謝モデルには、Publication 66 の呼吸気道モデル<sup>16)</sup>及び新胃腸管モデル（後に Publication100<sup>17)</sup>として発刊）及びを採用。

専門研究会としては、幸いにもいくつかの情報は 3.1 節のように Menzel 氏による講演で既に入手していた。

この他、専門研究会メンバーの間で勉強会を開催し、乳房の組織荷重係数  $w_T$  の変更の根拠に係る記述の追加、年齢群ごとの標準モデル（voxel モデル）の定義の必要性などの疑問が、委員より提示された。このような疑問については、何名かの委員より ICRP 宛にコメントとして提出した。

## 第4章 放射線防護に用いる線量に関する提言

### 4.1 提言へ向けた議論の方針

研究会では、第2章に示したような疑問に限らず、線量をめぐる問題の多くは、以下のような点に起因すると考えられた。

- ・ 従来、放射線防護に用いる新しく線量、係数が定義されたり、変更されたりした場合、プロセスや科学的な根拠が不明確であった。
- ・ 現在、あまりにも多くの線量が放射線防護において使用されている。一部には、不要なものがあるのではないかという疑問も出てくる。

理想的には、科学的な根拠に基づき、例えば、図1よりも単純化した体系を構築することにより、以上の問題は解決できる。

一方で、現行の体系が維持されてきたには、それなりの理由があるはずである。また、以下のような意見にも留意することを確認した。

- ・ 線量に関する度重なる変更は、更なる混乱を招いてきた。

例えば、第2章にもあるように、等価線量はその定義を変更することなく、名称のみの変更（放射線荷重線量）が提案されていた。この変更は、一部の言語については、線量当量との区別ができないという本質的なものといえる。しかし、日本国内ではこのような本質的でない変更は、混乱を招くだけで得策とはいえない。この例では、定義の変更がない場合は、むしろ等価線量という用語を維持する方がよいという意見が専門研究会では大勢であった。

以上より、理想的な体系の構築を目標とするが、時にはある程度の割り切りも行い、混乱を招く可能性がある場合は、現状の線量の体系を維持する考えも適当であるとした。ただし、その場合は、どのような理由で現行の結果に落ち着いたのかは、可能な限り調査しておく必要があると考えた。

### 4.2 科学的に得られた知見と放射線防護に用いる諸量の関係

放射線防護に用いる線量の持つ固有の問題として、被ばくによる生体影響を定量的に表現することがある。そのため、単純な物理量に加えて、これに放射線生物学の研究成果を基に決定した係数を荷重するという特徴的な手順が必要とされる。このために導入された放射線荷重係数や線質係数の信頼性、基となる科学的な実験データを追求することは、本専門研究会の設置の動機付けの一つであった。ICRPの1990年勧告においては、「Q(L)関係が放射線の違いによるQの値の変化を大まかに示すにすぎないものと考えられたが精密さがあるように解釈されていた。放射線荷重係数 $w_R$ はこのような精密さがあると思

わないことを希望する。」という記述がある。しかし、導入された時点では、この係数が科学的根拠あるいはプロセスを明示することがなく、唐突に与えられたという印象を多くの者が受けて、多くの疑問、批判が出されたものと考えられる。

一方、2007年3月に採択されたICRPの基本勧告の改訂作業においては、その途中の段階でドラフト文書を公開し、世界的に広くコメントを募集するという手順を踏んでいた。何より、専門研究会では、線量の問題に関係するICRPにおける最近の検討に参加している委員と意見交換を行うことが出来た。また、ICRP Publication 92などの最近の文書では、定義されている放射線荷重係数の数値を支持する研究成果に加えて、中性子の放射線荷重係数の見直しの根拠としている計算解析なども明示されている。これらの記述からは、裏づけとなる多種多様（生物学、物理学的な研究）の科学データが存在し、専門家の判断により放射線荷重係数という防護での約束事が決定されていることが理解できる。例えば、中性子の放射線荷重係数は、最近の研究成果を反映しつつ、 $Q(L)$ との整合性を考慮に入れて、熱中性子などの低エネルギー、50MeV以上では見直された。一方で、放射線荷重係数の値が高くなる1MeV付近については、数値は1990年勧告とほぼ同等の数値が保持されている。ドラフト文書では、この点について、大きな変更は従来から存在する放射線防護体系の安定性に問題を及ぼすことも懸念され、そのために20という数値が保持されていることが示されている。

以上のような、議論、調査より、特に、放射線荷重係数、線質係数に関連する疑問については、科学的事実に基づくデータ（例、放射線生物研究の実験データ）と、それに基づく専門家の判断で決定した数値には明確な区分があることを認識する必要があると考える。なお、これと同様の意見は、第40回研究発表会の企画セッションでも、会場の参加者より提示された。

#### 4.3 実測による放射線防護に必要な量

「放射線防護は、実測による確認で達成される。」という点については、専門研究間の委員の間でもコンセンサスは得られていた。しかし、そのために用いる量について、特に外部被ばくに対して、どのように定義するかは様々な意見があった。簡単に分類すると、実用量と防護量からなる体系を見直す、実測による放射線管理が行われる限り実用量は保持すべき、という2つの意見である。

##### 1) 実用量の導出方法に係る疑問（現行の体系の見直し）

図1にある現行の体系についての批判は、主として、「実用量が実際には測定できない？」という疑問が出発点としてある。ICRUが定義する組織等価な球またはスラブ形状のファントム中の一点の線量（=実用量）は、実際には計算解析に頼って算出される。この手段は、人体形状のファントムを用いて、理想的な照射ジモメトリ条件の下で、臓器・組織の平均線量と物理量の換算係数を放射線輸送コードにより計算で解析し、これに基づき定義されている係数及び一定のルールにより等価線量及び実効線量を算出するというプロセス

と同様である。

そこで、同じような手順を踏むのであれば、「図1にある測定される量を防護量と関係付け、実用量を除外して、"dual"な体系を解消して簡素な体系を構築する。」という可能性も考慮すべきという意見が提示された。この案では、図1の「測定される量」は防護量の下に置かれて、実用量を介さない防護が実現できる。

## 2) 実測という行為を考慮した実用量の定義（現行の体系の保持）

1)の意見は、「実用量はICRUの定義する簡易形状のファントム中の一点で定義される。」ということに着目したものと見える。一方、実用量については、「放射線測定器を用いて、放射線の強度を実測により決定するための概念に基づき定義される量である。」という点をむしろ着目すべきという意見が提示された。

実用量を除外する場合、その代わりに等価線量及び実効線量という防護量が測定器に関係付けることが予想される。ここでは、これらの量が臓器・組織にわたって平均された線量  $D_{TR}$  を基本とする点を留意する必要がある。外部被ばくにおいては、放射線荷重係数は人体に入射する放射線に一義的に決定される。そのため、入射放射線と実際に臓器にエネルギーを付与する放射線が異なる放射線荷重係数を持つ可能性もある。（例：低エネルギー中性子被ばくにより、人体組織の捕獲反応で発生した線による被ばく。）すなわち、体内の線量という理由だけでなく、2.2節でも論じた放射線荷重係数の bilocality の問題に起因して、 $D_{TR}$  は本質的に測定できない量となる。

現在の実用量は、ICRU Report 39などで示された概念に基づいて定義されている。特に、2.4節に示した整列・拡張場、拡張場の定義は、直ぐにこれを理解することはかなり困難な作業である。しかし、ICRUの示す場の定義は、実際の放射線管理での測定行為を物理的に端的に表現したものであることが分かる。例えば、光子、中性子などの透過性の強い放射線に対するエリアモニタリングでは、空間のある点における測定をもって人体が実際に受けるだろう線量（実効線量）を予測する。ここでは、測定者は、方向依存性を考慮しない放射線測定器を最大の線量を示す場所かつ方向に置くことになると考えられる。また、個人線量計は人体と一体となって、初めて個人モニタリングに使用されることになる。そのため、人体組織と関係づけた一点の線量で規定される個人線量当量が必要となる。以上のように、実測という行為を鑑みた場合、現行の実用量の概念は除外することは出来ない量である。

一方、内部被ばくについては、有用な防護量である預託実効線量は、実際には被ばく者の摂取した放射性核種の量に基づき、線量換算係数を用いて算出する。この摂取量は、バイオアッセイによる排泄物中の放射能測定、または全身計測器を用いた体外計測による体内の放射能測定の結果に基づき、代謝モデルを用いて求める。すなわち、実測された値は、図2のように代謝モデル及び換算係数を介して、防護量である預託実効線量と結び付けられる。内部被ばくによる線量評価では、代謝に起因する不確かさ、核種ごとの線量換算係数の整備など、外部被ばく線量評価にはない困難さが存在する。しかし、実測に用いる線量と最終的に防護の評価対象とする量の関係付けは、外部被ばくにおける体系と比較した

場合、理解は容易であると言える。

放射線管理においては、実測による確認を排除することは考えられない。以上の検討より、特に外部被ばく防護において、測定と最終的な評価対象とする防護量を結びつける現行の実用量の概念は必要不可欠なものであるという結論が導かれると考える。

#### 4.4 放射線防護に用いる線量の全般的な問題点

2007年3月に採択されたICRP新基本勧告のドラフト文書（2006年6月公開）では、放射線防護における実効線量の適用法について、詳細な説明がされていた。専門研究会は、このドラフト文書などを調査して、実効線量について算出された値の持つ意味、適用できる条件について検討した。また、実効線量は現在の防護体系の中でも最も基本的な量となるので、この量を通じて放射線防護に用いる線量の全般的な問題点を検討した。

##### 1) 等価線量について

2006年7月に開催されたOECD/NEA主催のThe 3rd Asian Regional Conference on the Evolution of the System of Radiological Protectionにおいて、等価線量について、専門研究会の委員などと石樽氏の意見交換により、以下の情報を得ることが出来た。

- ・ 組織反応（確定的影響）の防護（皮膚線量）を等価線量で与える理由は、放射線荷重係数で決定する等価線量の使用で、より安全側の防護を提供できる。
- ・ 実効線量の途中段階と考えられる等価線量は、性差の平均化について話をする時に必須となり、実用上でも意味がある。
- ・ 等価線量の名称は維持する。また、単位についても単位も確率的影響に関係する人工的なものなのでSvを維持している。（物理量である吸収線量との区別。）

以上の点は、勧告にはオフィシャルには記載されていないが、例えば、最初の項目については、専門研究会の委員の間でも、おそらくそうであろうという認識があった。この他の項目についても、十分に合理的と考える。

##### 2) 不確実性の問題（各個人の実効線量という考え方）

上記のICRPの新基本勧告のドラフト文書では、放射線防護に用いる標準的なモデルとパラメータを使用して算出された値のみが、実効線量として認められると記述された。一方で、ドラフト文書のAnnex Bでは、モデルとパラメータには不確実性がある点を認めている。また、併せて、ドラフト文書のAnnex Bでは、集団の中央値の信頼性、モデルとそのパラメータの信頼性、精度のレベルに関する概念である不確実性は、集団のメンバー間の定量値の変動と区別することが重要である点も記されていた。ここでは、体内線源による被ばくなどでは、臓器の平均線量を基本とした場合、評価に大きな不確実性を伴う可能性がある点が報告されている。一方、被ばくの経路としては種々のものが考えられるが、合理的な防護という観点からは、被ばく線量は可算できる体系を維持することがより賢明

であると考える。

放射線に対する各個人の反応や影響を考えた場合、これは余りにも複雑であり、正確に ICRP や ICRU が提示する量で表現することはできないことは、放射線防護に関係する者は気付いているであろう。また、研究会の調査審議を通じて、防護量の算出に用いる放射線荷重係数、組織荷重係数及び標準的な成人のモデルは、専門家の議論を通じた判断で決定されたという点からも確認された。この点からも、特定の個人の実効線量という考え方は、原則的に成立しないとするのが妥当的と考える。

### 3) 適用の問題点

ICRP の新基本勧告のドラフト文書には、実効線量や集団実効線量の適用法が具体的に明記されていた。例えば、被ばくリスクの評価や疫学の研究目的に使用すべきでない旨の注意事項が明記され、原則的として、実効線量は prospective な評価において、防護の目的にのみ使用できるとしている。この適用法に関する指針は、従来の実効線量に対する意識と比較して、著しい制限を受けたものと考えられる者も多いと考える。しかし、4.2 節でも明記したように、与えられている係数、パラメータ、モデルなどは、科学的な知見を反映しているが、専門家間の議論による判断で決定されたという点に着目する必要がある。

以上より、ICRP の示す線量を用いても、放射線被ばくに関係する現象（生体の影響）を精密に表現することはほぼ不可能と認識するのが適当である。しかし、指標を持つことなく、放射線の防護を実行することはできない。そのため、「防護のための線量」が与えられている点を認識すべきである。

### 4) 名目確率係数について

実効線量などは、放射線防護の目的に使用する線量とするのが妥当的という一定の結論は得られた。一方で、1990 年勧告では単位実効線量当たりの致死ガン、非致死ガン、遺伝的影響の推定確率としての名目確率係数を提示している。また、新基本勧告のドラフト文書でも係数は維持され、1990 年勧告に置き換わる数値が示されていた。このことは、実効線量が防護の目的のために使用されるとしながらも、リスク評価での適用性を示すとい一見すると矛盾を含んだものと考えられる。研究会では、この矛盾に関する問題に加えて、通常の防護の対象としている低線量の被ばくに対して、この係数を用いることについての意見が提示された。

しきい値なしの直線仮説を前提として、高線量被ばくの実験、事例で得た結果を DDREF などの仮定を経て得た数値がこれらの確率係数であるという側面がある。これらの仮説などの利用したツールも、やはり判断で与えられたものである。そのため、名目確率係数をどんな低線量にも適用して、致死ガンなどのリスクを評価することは問題がある。例えば、自然放射線に近い低い線量被ばくでの影響について、名目確率係数により算出された値はリスクを正しく表現したとは言えないと考えるのが適当である。このような使用は、不正確な数字が一人歩きするという問題を含むことを認識しなくてはならない。また、このように、防護に用いるという原則を離れて、名目確率係数の算出に実効線量などを用いる場

合は、そのことを正しく説明する義務が専門家にあると考えられる。

#### 4.5 今後の課題

以上のように、専門研究会では、線量をめぐる問題を抽出し、議論、検討を進めてきた。無論、いくつかの課題も残されている。中性子の放射線荷重係数の見直しにおいては、人体モデルを使用して、全身の実効的な線質係数を算出し、この線質係数との整合性が議論された。しかし、ここに使用されている組織荷重係数は、1990年勧告で与えられたものである。この点については、時間的な問題もあり、仕方がない面もある。このような場合、新勧告が正式に採択された後で、ICRPから提示される予定の新しい成人モデル及び組織荷重係数を使用して、解析する必要があるかもしれない。この他、ICRUの示す実用量については、それを定義するための人体を代用するファントムについては、統一化、あるいは高エネルギー放射線に対する防護を鑑みて人体形状に近いモデルの提案もされるかもしれない。ただし、その議論においても、実測による放射線防護の達成を可能とする実用量の基本的な概念は保持される必要があると考える。

線量に対して提示された数々の疑問点は、例えば、1990年勧告で線質係数に置き換わり、突然、放射線荷重係数が提示されたため、その概念を理解するのに十分な背景を知らなかったことも一因として考えられる。しかし、専門研究会の活動とほぼ同時期に、ICRPの基本勧告の改訂を踏まえて、そのドラフト文書が公開されて、意見募集もされた。また、OECD/NEA主催で、ICRPの新基本勧告に関する意見交換を行う場が提供されるなど、放射線防護に関係する者が意見を発信する機会も生じている。

また、専門研究会での数々の議論、検討を通じて、生物影響、線量評価などの研究から実際の放射線管理の遂行までを考慮したうえで、放射線防護に用いる線量の背景を認識し、それぞれの量が持つ役割を認識する必要があったものと理解できた。そして、議論、検討の結果、ICRP及びICRUの定義している線量からなる現在の体系は、放射線防護の目的には十分に合理性を持ったものであると考える。加えて、各線量の意味、互いの関係付けを正しく理解することが、放射線防護の遂行に不可欠と考える。

## 第5章 結 言

本報告書で記載した内容については、ICRP 及び ICRU の報告書を精査すれば、そのニュアンスを理解できるはずという意見もある。しかし、報告書が改訂される度に、ほぼ同じ内容の議論が繰り返されたという背景があった。そこで、線量に関する問題を可能な限り解明するため、本専門研究会は活動してきた。その結果、現在の ICRP 及び ICRU の示す線量からなる体系は、放射線防護の目的では、十分に合理的なものであるという一定の結論を得ることができた。専門研究会では、放射線防護に用いる線量の系統的な検討により、線量をめぐる数々の問題点を明確にできたと考える。

一方、2007年3月に採択された ICRP 新基本勧告については、現段階ではその内容を精査することはできなかったが、そのドラフト文書からは実効線量などをリスク評価や疫学の研究目的に使用すべきでない旨が明記されることも予測される。ドラフト文書では、これらの目的では各人の状況を考慮した上で、臓器・組織の吸収線量を評価することも推奨されていた。しかし、その作業は非常に困難なものと考えられ、かつ、ドラフト文書でも 1990 年勧告の数値に置き換わる名目確率係数が提示されている。そのために、原則を離れて、放射線防護以外の目的で、実効線量などが適用される状況も考えられる。無論、実効線量の持つ本来の意味からは、このような使用は避けるべきであるが、現状、被ばくリスクの評価や疫学の研究に使える量は存在しない。そこで、放射線被ばくに関する物理の専門家、生物や医学の専門家、疫学の専門家が協力して検討を行い、この目的に合致した量を提示することが今後の課題となると考える。

### 謝 辞

本専門研究会の調査審議に貴重な講演により、有益な情報を頂いた Menzel 氏、丹羽氏、赤羽氏に深く御礼申し上げます。

### 付 記

本研究会の設立の背景にもあったとおり、ICRP 及び ICRU の示す線量の概念について、これまでの変遷を含めて、正しく理解することは放射線防護において不可欠となる。そこで、今後、学会誌「保健物理」において、本報告書にも記した議論を記載したうえで、各諸量、諸係数の定義、問題点などについて、別途解説する予定である。その解説においては、2007年3月に採択された ICRP の新基本勧告の内容も含む予定である。

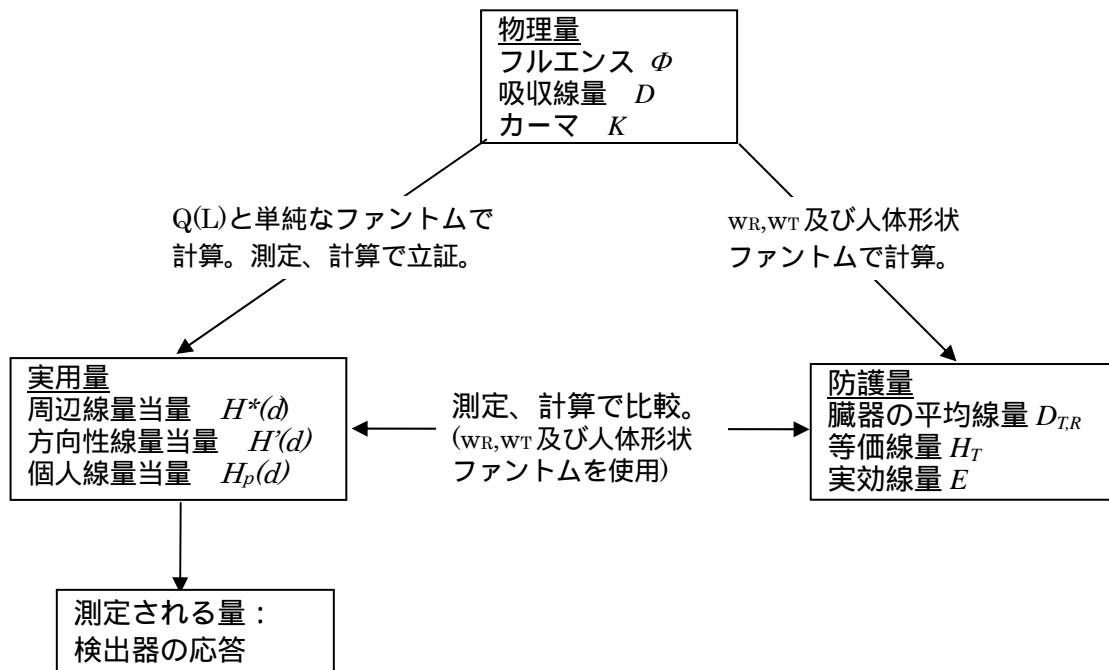


図1 外部被ばくに対する防護に用いる諸量の関係<sup>14),15)</sup>

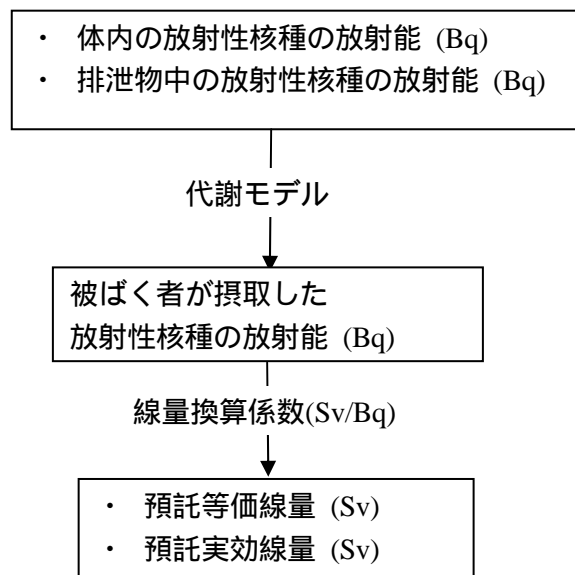


図2 内部被ばくに対する防護に用いる諸量の関係

## 参考文献

- 1) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 60, Annals of ICRP, 21, (1991).
- 2) International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU): Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources, ICRU Report 39, (1985). (reprinted (1991).)
- 3) International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU): Determination of Dose Equivalents Resulting from External Radiation Sources-Part2, ICRU Report 43, (1988).
- 4) International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU): Measurement of Dose Equivalents from External Photon and Electron Radiations, ICRU Report 47, (1992).
- 5) International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU): Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, ICRU Report 51, (1993).
- 6) International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU): Determination of Operational Dose Equivalent Quantities for Neutrons, ICRU Report 66, (2001).
- 7) 山口、吉澤 (編): 第1回「最近の外部被ばく線量評価法に関するワークショップ」法文集, JAERI-Conf-95-007, (1995).
- 8) 山口、遠藤 (編): 第2回「最近の外部被ばく線量評価法に関するワークショップ」法文集, JAERI-Conf-96-011, (1996).
- 9) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Relative Biological Effectiveness (RBE), Quality Factor (Q) and radiation weighting factor ( $w_R$ ), ICRP Publication 92 Annals of ICRP, 33(4), (2003).
- 10) International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU): The Quality Factor in Radiation Protection, ICRU Report 40, (1986).
- 11) M. Zaider and D. J. Brenner: On the Microdosimetric Definition of Quality Factors. *Radiat. Res.*, **103**, 302-316 (1985).
- 12) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 68 Annals of ICRP, 24(4), (1994).
- 13) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Dose to Members of the Public from Intake of Radionuclides-Part4, ICRP Publication 71 Annals of ICRP, 25(3-4), (1995).
- 14) International Commission on Radiological Protection. Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection against Radiological Protection, ICRP Publication 74, Annals of ICRP, 26, (1996).

- 15) International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU): Coefficients for Use in Radiological Protection against Radiological Protection, ICRU Report 57, (1997).
- 16) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Human Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 66, Annals of ICRP, 24(1-3), (1994).
- 17) International Commission on Radiological Protection (ICRP): Human Alimentary Tract Model for Radiological Protection, ICRP Publication 100 Annals of ICRP, 36(1-2), (2006).