Radiation Protection in the World

外部放射線に対する放射線防護実用量 に関する ICRU レポート委員会出席報告

遠 藤 章^{*1}

国際放射線単位測定委員会 (ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements) は、外部被ばくに対する線量測定に現在使われている実用量を検討し、新たなレポートを作成するための委員会を2010年に設置した。その委員会の第2回目の会合が、2011年6月15～17日、イタリア新技術・エネルギー・持続的経済開発機構 (ENEA) Bologna 研究センターにおいて行われた。この会議に出席する機会を得たので、第1回目の会合と合わせて、これまでの検討の概要を紹介する。

1. レポート委員会の設置の背景及び目的

(1) 背景

本レポート委員会で検討される実用量は、線量測定に密接に関係し、見直しの内容は、放射線測定器の校正、放射線モニタリング等、放射線管理実務に影響を及ぼすことも想定される。そこで、今般この検討に着手するに至った背景について最初に述べたい。

放射線防護の線量評価に使われている実効線量や等価線量の“防護量”は、人体の臓器線量を基に評価されるため、直接測定できない。これを放射線測定器を用いた測定から評価するために、ICRU は“実用量” (Operational Quantities) を提案した。現在使われている実用量は、ICRU Report 51¹⁾ (以下 ICRU51 のように記す) に定義されているものであるが、その概念や実際のモニタリングへの適用については、ICRU39, 43, 47, 66 の一連のレポートに詳しく述べられている。放射線測定器の製作や校正、線量測定等は、ここで定義されている場のモニタリングのための周辺線量当量や、個人モニタリングのための個人線量当量に基づき実施されている。

実用量と防護量に基づく放射線モニタリングや線量評

価は、現在広く定着していると考えられる。しかし、一方で、この線量体系には、その考え方の提案以来、多くの問題点や疑問も指摘されてきた。我が国でも、日本原子力研究所で開催されたワークショップ^{2,3)}、日本保健物理学会専門研究会⁴⁾等、多くの機会を通してこの問題について活発に議論されてきた。

このような背景から、ICRU は実用量に対して指摘されてきた問題点や課題を改めて整理・検討し、3～4年をかけて ICRU51 を改訂するためのレポート委員会 No. 26 を2010年に立ち上げた。今、この検討に着手するきっかけになったのは、国際放射線防護委員会 (ICRP) の2007年勧告である。ICRP は、2007年勧告に基づき、外部被ばく線量評価に用いられる実効線量等の換算係数を見直し、新たなデータを収録した刊行物⁵⁾を近く出版する。この刊行物では、放射線の種類、エネルギー範囲が現在より拡張されたデータが提供される。これを受けて、ICRU はこれらの測定をどう考えるかを整理する必要性が生じた。ICRU 委員長の MENZEL 氏は、ICRP 主委員及び第2専門委員会委員長も務めており、ICRP の新しい換算係数の導入を機会に、懸案であった課題の解決に取り組むに至った。

(2) レポート委員会の目的

第1表に、レポート委員会 No. 26 のメンバーを示す。委員会は、線量の測定や評価を専門とするメンバーで構成されている。この中で、MENZEL 氏、HERTEL 氏、BARTLETT 氏、GUALDRINI 氏、PELLICCIONI 氏及び筆者の6名は、前述した ICRP の新しい外部被ばく線量換算係数データ集⁵⁾の作成にも参加している。レポートの作成作業は、レポート委員が中心となり、コンサルタントの支援を受けながら進められる。また、スポンサーとして参加する ICRU 主委員は、主委員会とレポート委員会を仲介し、ドラフトのレビュー等、全体調整を行う。

この委員会に課せられた課題は、ICRP 2007年勧告における防護量の変更を踏まえ、実用量について整理することである。その中には、放射線管理の対象となる放射線場の多様化、具体的には高エネルギー加速器施設、航空機高度や宇宙空間で遭遇する高エネルギー放射線への対応の提案も含まれる。現在の実用量に代わる新たな提案にあたっては、それが現在の線量測定体系に及ぼす影響を検討するとともに、実用量に対する疑問についても整理し、説明することが求められている。

本レポート委員会の会合は、第1回目が既に2010年11月に行われ、今回は第2回目である。ここまでの検

Akira ENDO; Report of the ICRU Report Committee on Operational Radiation Protection Quantities for External Radiation.

^{*1} (独) 日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究部門; 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4 (〒319-1195)
Nuclear Science and Engineering Directorate, Japan Atomic Energy Agency; 2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195, Japan.
E-mail: endo.akira3@jaea.go.jp

第1表 “ICRU Report Committee 26 on Operational Radiation Protection Quantities for External Radiation” メンバー

主委員会スポンサー

Elena FANTUZZI (イタリア ENEA)

Hans MENZEL (スイス CERN)

Stephen SELTZER (米国 NIST)

レポート委員

Nolan HERTEL (委員長, 米国 Georgia Tech)

David BARTLETT (英国元 HPA)

Jean-Marc BORDY (フランス CEA)

Günther DIETZE (ドイツ元 PTB)

Akira ENDO (日本 JAEA)

Gianfranco GUALDRINI (イタリア ENEA)

Maurizio PELLICIONI (イタリア INFN)

コンサルタント

Peter AMBROSI (ドイツ PTB)

David BURNS (フランス BIPM)

Bernd SIEBERT (ドイツ元 PTB)

Kenneth VEINOT (米国 Y-12 NSC)

討から、現状の定義を維持する、あるいは一部を見直すことから、定義そのものを根本的に改め再構築する等、いくつかの提案がされている。議論はまだ途中であるが、その内容を以下に紹介する。検討の過程を理解するために、時期は遡るが、最初に第1回会合のポイントを述べ、その後、第2回会合の内容を報告する。

2. 第1回会合の概要

2010年11月21～23日、ドイツ Braunschweig で行われた第1回目の会合では、3日の会期のうち、最初の2日を現在使われている実用量の問題点の自由討論に費やした。そして3日目に議論の内容を分析し、第2回会合までに検討すべき課題を整理した。

自由討論では、実用量の定義から実務への適用に至るまでの多くのテーマに対して、幅広い観点から様々な意見が交わされた。その一端を、“実用量は必要か？”という議論を例に紹介する。ここでは、実用量とは、周辺線量当量、個人線量当量等の狭義の意味ではなく、測定により防護量を評価するための量という広い意味で議論がなされた。放射線防護の3原則である正当化、防護の最適化、線量限度の適用を実施するには、測定に基づく線量評価が必須である。すなわち、実用量そのものの必要性には、委員から異論はなかった。

しかし、測定対象量を何にすべきかになると、現状の定義が適切か、あるいは新たな量を考えるべきかで意見

が分かれた。新たな量の候補として、実効線量等の防護量を基に実用量を定義することが挙げられた。これについては、3.で改めて述べる。

例えば、周辺線量当量の議論に絞ると、この定義の問題点として、人体の主要4元素(H, C, N, O)からなる密度1.0 g/cm³の直径30 cmの球(ICRU球)は現実には作製できないため、測定のために導入された実用量自体が実測できないこと、強透過放射線に対して定められている半径上1 cmの深さの線量当量は、高エネルギー放射線に対しては、防護量を適切に評価できないこと等が挙げられた。これらは、以前から指摘されている問題である。

一方で、以下の理由により現在の定義を支持する意見もある。実用量は防護量と関連づけられることが必要だが、定義が異なることから、防護量の変更に対して、必ずしも実用量を見直す必要がない。近く出版される外部被ばく線量換算係数に係るICRP刊行物⁹⁾でも、新しい防護量と現在の実用量との比較がなされ、従来のエネルギー領域(例えば中性子で20 MeVまで)では、現在の実用量が利用できると結論している。また、高エネルギー放射線への対応については、現在の実用量を定義したICRU39に述べられており、異なる深さの線量当量に着目する選択肢が挙げられている。さらに現実的な問題として、一部の放射線場には適用できないことは理解しつつも、現在の実用量は様々な国で導入され機能しており、この変更が及ぼす影響に十分に配慮する必要があるという意見である。

このように、放射線管理用測定器の校正実務、線量評価換算係数の計算等、各メンバーの携わる専門分野の視点から、実用量をどう捉えるかで様々な意見があり、この再検討が難しい課題であることを改めて実感した。

上記の自由討論は、解決すべき課題をメンバー全員が共有する上で重要なプロセスであり、これにより、実用量に対する疑問や批判に対して、明確にすべき項目を整理した。また、実用量を再定義するにあたり、現在の定義を拡張するか、あるいは防護量を基本とする体系を構築するかについて、具体的な計算結果を基に、第2回会合で議論することにした。

3. 第2回会合の検討内容

(1) 検討項目に対する議論と整理

2011年6月15～17日の第2回会合では、第1回会合で検討された実用量について明確にすべき項目について、各メンバーの検討結果を基に整理した。紙面の都合

で、個々の内容は紹介できないが、実用量の必要性に加え、実用量の対象として線量を選定する理由、実務上必要な実用量の種類、線量測定や評価に求められる精度、線量体系を構築する上での計算の役割、整列場・拡張場の概念の必要性、実用量を定義する放射線の種類やエネルギーに制限を設けるべきか等について整理した。これらの結果は、実用量の必要性や疑問に答えるものとして、新たに作成するレポートにQA形式で収録することにした。

(2) 新たな実用量の提案に関する検討

新たな実用量の検討は、高エネルギー放射線に対する測定をどのように構築するかを中心に、まず、周辺線量当量を対象に行われた。これについて、ふたつの提案が検討された。

ひとつめの提案は、ICRU球を用いて、現在使われている深さ1 cmにおける線量当量に代わり、様々な放射線について、高エネルギーまで含めた幅広いエネルギーの測定に対応できる別の位置を検討することである。この提案自体は、ICRU39にも述べられているが、様々な放射線に対する線量当量の系統的解析は、当時は容易ではなかったと推察される。現在では放射線輸送シミュレーション技術の進展により、このような解析が可能になったことから、この提案を検討した。

放射線輸送計算コードPHITS、FLUKA等を用いて、ICRU球の半径上の様々な深さにおける線量当量を、ICRP 1990年勧告で定義されたQ-L関係を用いて、10 GeVまでの光子、中性子、電子、陽子、ミューオン、パイオン等に対し系統的に解析した。その結果、10 GeVまでの全てのエネルギーの放射線に対して、実効線量を過小評価しない単一の位置は存在しないことが分かった。すなわち、単一エネルギーの放射線に対して、ICRU球で定義する線量当量では、評価位置を変えても、実用量に求められる防護量を保守的に推定する条件を満たすことができない。

ふたつめの提案は、目標とする評価量が実効線量であることを踏まえ、実効線量に基づき実用量を定義する考えである。具体的には、外部被ばく線量換算係数は、人体モデルに6種類の入射方向から単一エネルギーのビームを入射させて臓器線量を計算し算定される。各入射エネルギーに対する6種類の換算係数から最大値を選び、この値のエネルギー依存性を基に実用量を定義する。これを使用する限りは、原理的に実効線量を過小評価することはない。ICRPが2007年勧告において導入したり

ファレンスファントムを用いて計算された線量換算係数をリファレンスデータとし、これを目標に測定を考えるのが合理的であるというアイデアである。

この提案に対してもいくつかの意見があり、例えば、①組織加重係数等、実効線量の評価方法が見直されるたびに、実用量の見直しが必要になる。②放射線測定器を用いた物理的な測定が、各放射線のエネルギー付与特性を表すLETとの関連を失ってしまう。③現在使用されている測定器がこの応答特性に追従できるか、が挙げられた。これについて、①に対しては、実用量は防護量を評価するための量として割り切り、実効線量の最大値を与えるエネルギー依存曲線全体に、例えば1.2程度のファクターをかけて過大に評価しておくことにより、防護量の換算係数の僅かの変更には、実用量の見直しを必要としない工夫が考えられる等の提案があった。一方、③については、今後、その影響を定量的に示す必要がある。

(3) 今後検討する選択肢

上記の検討結果を基に、高エネルギー放射線への対応も含め、取り得る可能性のある3つの選択肢をまとめた。

- ① 従来エネルギー領域、高エネルギー領域のそれぞれに異なる実用量を適用する
- ② 実効線量に基づき実用量を定義する
- ③ 現状の実用量を継続使用し、問題が生じる施設、放射線場に対しては、個別の対応を検討する

①及び③は、原子力施設やRI施設で対象となるエネルギー領域では、現在の実用量が機能している現状を踏まえ、これを活かし、対応できない高エネルギー領域には、別途対応するのが合理的であろうとの考えである。しかし、高エネルギー放射線場といえども、実際には幅広いエネルギー分布をしており、①のように異なる概念の実用量を組み合わせると、値の加算性はない。一方、②では、3.(2)で述べた問題点がある。そのため、どの選択肢が適切かは、現在の線量測定体系に及ぼす影響も含め、より具体的に分析する必要がある。

4. 今後の予定

以上述べた3つの選択肢に対する判断基準を整理するために、現在使用されている測定器のエネルギー応答特性や校正手法、放射線管理の実務上の対応等に及ぼすソフト及びハード面の影響を、定量的に分析する。そのために必要となる関連データの収集及び追加計算も平行で行う。これらの結果に基づき、2012年春の第3回会合で、より具体的な検討を進める予定である。

本レポート委員会に参加することにより、ICRUの過去の資料に触れる機会を得た。実用量の概念を述べた本文僅か7ページのICRU39が、膨大な資料や計算に基づき、多くの専門家により、幾度もの議論、ドラフトの改訂を重ねて作成されたことを改めて知った。実用量の捉え方は様々で、あらゆる人が納得できる答えを見出すのは難しいかもしれない。今回の検討がどのような結論に辿り着くかは、まだ見通せないが、妥協案としてではなく、従来の問題のいくつかを解決し、多くの方に受け入れられる提案となるよう引き続き努力したい。

今後も機会があれば、議論の進展を報告したいと考えておりますので、ご意見、ご指導を頂ければ幸いです。

参 考 文 献

- 1) ICRU; Quantities and Units in Radiation Protection Dosimetry, ICRU Report No. 51 (1993).
- 2) 山口恭弘, 吉澤道夫 (編); 「最近の外部被ばく線量評価法に関するワークショップ」報文集, JAERI-Conf-95-007 (1995).
- 3) 山口恭弘, 遠藤 章 (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」報文集, JAERI-Conf-96-011 (1996).

- 4) 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」活動報告書, 日本保健物理学会専門研究会報告書シリーズ, Vol. 5, No. 1 (2007).
- 5) ICRP; Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication, to be published.

遠藤 章 (えんどう あきら)

(独) 日本原子力研究開発機構原子力基礎工学研究部門研究主席。線量評価に関する研究に従事。「外部放射線に対する放射線防護実用量」に関するICRUレポート委員。ICRP第2専門委員会委員, 同タスクグループDOCALメンバー。

E-mail: endo.akira3@jaea.go.jp