

# ICRP 2007 年勧告等に基づく光子遮蔽計算ガイドライン

令和4年3月

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

本ガイドラインは、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所が実施した「令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（ICRP 2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究（研究代表者平尾好弘）事業」の成果の一部です。

## 目 次

1. 本ガイドラインの目的と構成.....	1-1
2. ICRP2007年勧告等に基づく外部被ばく線量評価に係る変更点	
2. 1. ICRP1990年勧告等に基づく主な変更点の一覧.....	2-1
2. 2. 放射線加重係数及び組織加重係数.....	2-2
2. 3. 実効線量の計算に用いられる人体モデル.....	2-2
2. 4. 入射粒子フルエンス当たりの線量換算係数.....	2-5
2. 5. 眼の水晶体の等価線量限度及び線量評価の算定.....	2-6
2. 6. 放射性同位元素の核壊変データ.....	2-7
参考文献.....	2-8
3. 外部被ばくに係る線量換算係数の改訂と国際動向	
3. 1. 外部被ばくに係る線量換算係数の改訂.....	3-1
3. 1. 1. 実効線量（防護量）への換算係数について.....	3-1
3. 1. 2. 測定に係る量（実用量）への換算係数について.....	3-2
3. 2. 2021年までのICRP/ICRUレポートから想定される将来の改訂課題.....	3-4
3. 2. 1. ICRU 95（外部被ばくに係る実用量）の要点.....	3-3
3. 2. 2. ICRP 147（放射線防護における線量の使用）の要点.....	3-5
3. 2. 3. 次のICRP主勧告の論点.....	3-6
3. 2. 4. 放射線施設の遮蔽安全評価に係る留意点.....	3-7
参考文献.....	3-8
4. ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽計算法の見直し対応	
4. 1 遮蔽計算法の概要.....	4-1
4. 1. 1. 遮蔽計算法の適用範囲と見直し部分.....	4-1
4. 1. 2. 見直しを行った遮蔽体透過線量計算法の概要.....	4-3
4. 2. 遮蔽計算法の見直し事項.....	4-8
4. 2. 1. ICRPレポートに基づく見直し事項.....	4-8

4. 2. 2. 国内法令に基づく見直し事項	4-11
4. 2. 3. 最新の研究に基づく見直し事項	4-12
4. 2. 3. 1. 干渉性散乱の考慮	4-12
4. 2. 3. 2. 高エネルギーへの拡張	4-15
4. 2. 3. 3. 二重層遮蔽の線量計算	4-16
4. 2. 3. 4. スラブ遮蔽体の斜め透過による線量補正	4-18
4. 3. 見直しで整備した簡易遮蔽計算で用いるデータの一覧	4-21
4. 4. 簡易遮蔽計算コードを用いた遮蔽計算の手順	4-23
4. 4. 1. 放射性同位元素を取り扱う施設	4-23
4. 4. 2. 放射線発生装置を使用する施設	4-23
4. 5. 計算値に基づく遮蔽安全評価の留意事項	4-25
参考文献	4-26

## 5. 遮蔽計算法の見直しによる遮蔽計算の実務への潜在的影響

5. 1. 遮蔽計算の実務への潜在的影響の調査	5-1
5. 2. 実務で参照される図書の記載内容への影響	5-3
5. 3. 施設の遮蔽安全評価の再確認手順の例	5-5
5. 3. 1. 放射性同位元素を取り扱う施設	5-5
5. 3. 2. 放射線発生装置を使用する施設	5-7
5. 4. ICRP 2007 年勧告等に基づく遮蔽計算で想定される主な影響の示唆	5-8
5. 4. 1. 放射性同位元素を取り扱う施設で現れる影響	5-8
5. 4. 2. 高エネルギー拡張による光核反応の考慮が与える影響	5-13
5. 4. 3. 実効線量換算係数の照射条件による違いが与える影響	5-16
5. 4. 4. 実効線量とその実用量 (1 cm 線量当量) の差に与える影響	5-17
5. 5. 今後の課題	5-20
参考文献	5-22

用語集	T-1
-----	-----

付録-1 簡易遮蔽計算コードを用いた遮蔽計算の手順 (参考)

付録-2 遮蔽の実務で用いられる図書に対して想定される ICRP 2007 年勧告等に基づく記載変更範囲 (参考)

## 第1章 本ガイドラインの目的と構成

本ガイドラインは、ICRP 2007年勧告等<sup>※1</sup>に基づく光子の遮蔽計算の見直しについて概要を示すとともに、見直しが与える遮蔽計算の実務への潜在的影響を明らかにすることで、ICRP 2007年勧告等の国内法令取り入れ後に放射性同位元素等規制法に基づく申請者（以下「申請者」という。）が実施する遮蔽評価に資する指針を与えるものである。遮蔽計算の対象施設としては、放射性同位元素又は放射線発生装置を使用する施設（以下「放射線施設」という。）を想定する。ただし、本ガイドラインでの放射線発生装置とは基本的に医療用電子リニアックを指しており、研究用、陽子線、重粒子線等の特殊な加速器を含まない。

本ガイドラインの構成は、以下のとおりである。

第1章で、本ガイドラインの作成目的と内容構成を示す。

第2章で、外部被ばくに関するICRP 2007年勧告等の内容を、現行のICRP 1990年勧告と比べたときの主な変更点を示す。それらは国内法令に最近取り入れられたか又は将来の取り入れが見込まれる事項である。

第3章で、前章で示した変更点のうち、遮蔽計算の結果に直接影響を及ぼす実効線量換算係数について、将来の国内法令の改定で想定される規定範囲を示す。また施設の線量評価の確認は実測による方法も取り得ることから、実効線量に対応する実用量の換算係数についても改訂情報を記載する。さらに最近ICRU又はICRPから刊行された防護量と実用量に関するレポートをもとに、最新の外部被ばくに係る国際課題を示し、遮蔽評価との関係について留意点を示唆する。

第4章で、今回ICRP 2007年勧告等に基づいて見直した遮蔽計算法の適用範囲を示す。今回見直した範囲は、光子が遮蔽体を透過した後の線量を簡易に求める方法に限られ、光子以外の放射線を線源に用いる場合又はストリーミングやスカイシャインの体系を含まない。また、見直しの内容をICRPレポートに基づく部分と最新の研究に基づく部分に分けて紹介し、新たに整備した遮蔽計算用データの概要を示す。最後に、今回の見直しに基づく遮蔽計算を計算コードで実施する手順を示し、またその計算値を遮蔽安全評価に適用する場合の注意を与える。

第5章で、今回の見直しで想定される遮蔽計算の実務への潜在的影響を示す。遮蔽計算の実務で用いられる図書について、将来の国内法令取り入れで想定される記載変更の範囲を示す。また施設の変更許可申請に関して、申請者が実施する遮蔽安全評価の再確認手順を例示する。最後に、再確認時の遮蔽計算において、今回の見直しに基づく遮蔽計算の結果を従来の計算値と比べたときに現れる典型的な差異の例を示す。

---

<sup>※1</sup> ICRP 2007年勧告等には、ICRP 2007勧告に基づく見直し（表2-1の上から3番目までの項目）に加えて、同勧告以降の法令改定や数値データ改訂による見直し（表2-1の4番目と5番目の項目）を含む。

本文の表記における注意を与える。ICRP の主勧告は、勧告年次を指して 1990 年勧告又は 2007 年勧告と略する。ICRP 又は ICRU の刊行するレポートは、発行機関とレポート番号を指して、例えば ICRP 116 と略する。特定の放射性同位元素は、質量数と元素記号で表記する。遮蔽計算の説明においては  $\gamma$  線と X 線という用語を使い分けることをせず、電子による制動 X 線及び図書の記載を除いて、光子 (photon) と総称する。なお、読者に馴染みが薄いと考えられる用語については、本ガイドラインの最後に用語集を付けて解説した。

## 第2章 ICRP2007年勧告等に基づく外部被ばく線量評価に係る変更点

### 2. 1. ICRP 1990年勧告等に基づく主な変更点の一覧

表2-1に、外部被ばくに関する2007年勧告等の内容を、1990年勧告のそれと比べたときの主な変更点の一覧を示す。これらの変更は、国内法令に既に取り入れられたか、又は今後、取り入れが見込まれる。なお、表2-1の最下行に示した核壊変データの改訂については、勧告に基づく変更ではないが、放射性同位元素に係る遮蔽計算用定数<sup>※2</sup>の算出に用いられることから取り上げた(4.1.2項参照)。以降の節で各変更点の概要を述べる。

表2-1 ICRP 2007年勧告等に基づく外部被ばく線量評価に係る主な変更点

ICRP 1990年勧告からの変更点	変更の要点
放射線加重係数及び組織加重係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>放射線加重係数：陽子、中性子に対する値が見直され、パイ粒子に対する値を新設</li> <li>組織加重係数：乳房、生殖腺、甲状腺、食道、膀胱、肝臓、残りの組織・臓器の値が見直され、また、脳及び唾液腺の値を新設</li> </ul>
実効線量の計算に用いられる人体モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>全身：従来のMIRD型ファントムから、男性・女性別のICRP/ICRU標準ボクセルファントムに変更</li> <li>眼の水晶体：数式を組み合わせた眼球ファントムを組み込んだ頭部ファントム</li> </ul>
外部被ばくに対する放射線防護量のための換算係数 <sup>※3</sup>	高エネルギー加速器施設や宇宙空間における放射線防護にも対応するため、放射線の種類及びエネルギー範囲を拡張し、フルエンス又は空気カーマ当たりの線量換算係数を改訂
眼の水晶体の等価線量に対して用いる実用量と線量評価	眼の水晶体の線量限度が改められたことを踏まえて、放射線業務従事者の外部被ばく管理における眼の水晶体の線量評価には、 $H_p(10)$ 、 $H_p(0.07)$ 又は $H_p(3)$ のうち状況に応じて適切な量を用いる。
放射性同位元素の核壊変データ	放射性同位元素が放出する放射線の種類、エネルギー、放出率(壊変あたり放出数)のデータを改訂

※2 遮蔽計算用定数とは、遮蔽線量を簡便に手計算するために整備される中間的データの総称であり、本ガイドラインでは放射性同位元素の実効線量率定数及び遮蔽材の実効線量透過率を指す(用語集参照)。

※3 「外部被ばくに対する放射線防護量のための換算係数」は、ICRP 116のタイトル邦訳から引用した。

## 2. 2. 放射線加重係数及び組織加重係数

現在の国内法令においては、1990年勧告の放射線加重係数及び組織加重係数を用いて算出された実効線量係数が取り入れられている。2007年勧告では、1990年勧告からの変更点として、放射線加重係数及び組織加重係数がそれぞれ見直された（表 2-2）。放射線加重係数について、1990年勧告と比べて陽子の値が小さくなり、またパイ粒子の値が新設された。中性子の値は連続エネルギー関数で新たに定義され、1 MeV 以下、とりわけ 0.1 MeV 以下で小さくなった（5.5 節参照）。また組織加重係数について、乳房、生殖腺、甲状腺、食道、膀胱、肝臓及び残りの組織・臓器の値が見直され、新たに脳及び唾液腺に対する係数が追加された（表 2-3）。

表 2-2 放射線加重係数  $W_R$

放射線の種類	1990 年勧告	2007 年勧告
光子	1	1
電子・ $\mu$ 粒子	1	1
陽子	5	2
荷電 $\pi$ 粒子	—	2
$\alpha$ 粒子、核分裂片、重イオン	20	20
中性子（エネルギーにより異なる）	5~20	2.5~20

## 2. 3. 実効線量の計算に用いられる人体モデル

実効線量を計算する際の人体モデルとして、ICRP 110 [2-1]で新たに CT・MRI による医学診断画像に基づく男性・女性別の ICRP/ICRU 標準ボクセルファントムが与えられ、数式に基づく従来の MIRD 型ファントム[2-2]に代わって適用された（図 2-1）。そのため、実効線量を算出する手順のなかに、性別のファントムを用いて男女平均の等価線量を計算する過程が含まれている（図 2-2）。

表 2-3 組織加重係数  $W_T$

組織・臓器	1990 年勧告	2007 年勧告
肺	0.12	0.12
胃	0.12	0.12
結腸	0.12	0.12
赤色骨髄	0.12	0.12
乳房	0.05	0.12
生殖腺	0.20	0.08
甲状腺	0.05	0.04
食道	0.05	0.04
膀胱	0.05	0.04
肝臓	0.05	0.04
骨表面	0.01	0.01
皮膚	0.01	0.01
脳	—	0.01
唾液腺	—	0.01
残りの組織・臓器	0.05	0.12
合計	1.00	1.00

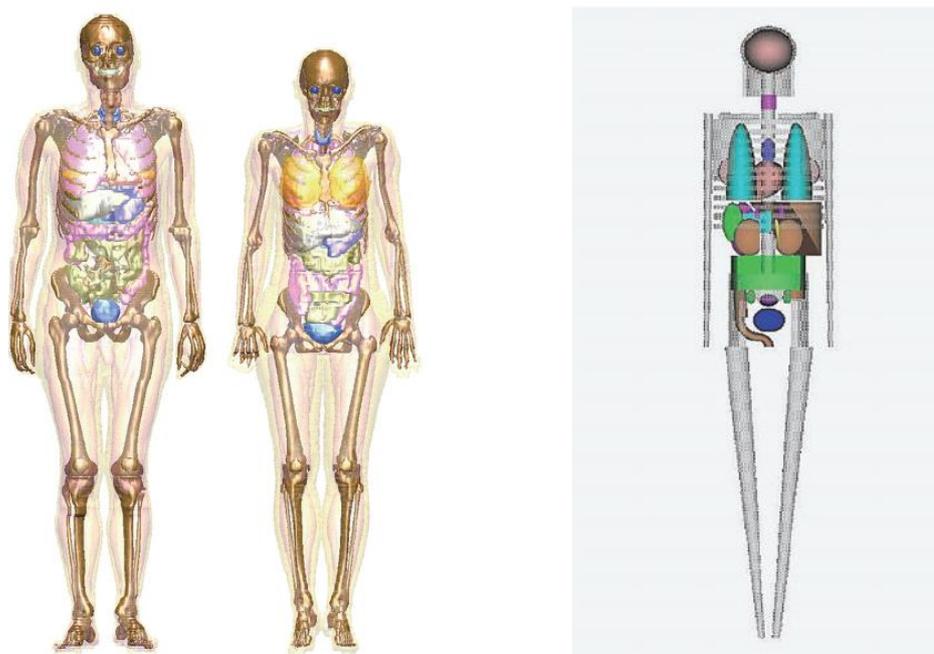


図 2-1 ICRP/ICRU 標準ファントム男女[2-4] (左)、MIRD 型ファントム[2-3] (右)

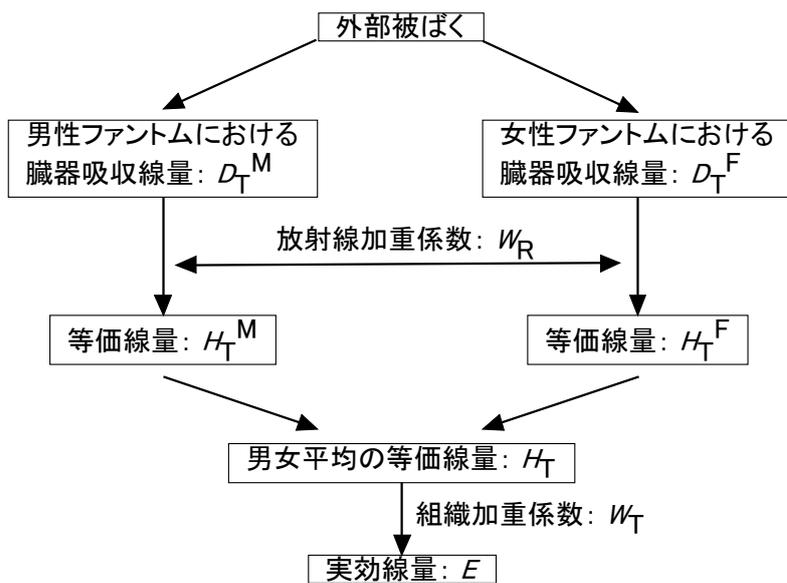


図 2-2 男女別ファントムを用いた実効線量の算出手順 [2-3]

2010年、放射線加重係数、組織加重係数及び人体モデルの変更を取り入れて、新たに計算された外部放射線に係る組織・臓器吸収線量と実効線量の換算係数がICRP 116 [2-4]として発行された。これは、1990年勧告に基づく従来の換算係数 [2-5]に取って代わる位置付けである。

なお、小さい組織について、皮膚に対する吸収線量は、上述した男性と女性の標準ファントムのすべての皮膚ボクセルに対する平均吸収線量に基づいて評価された。一方、眼の水晶体に対する吸収線量の計算には、眼球ファントムを様式化された頭部ファントムに組み込んだ眼モデルが新たに用いられた (図 2-3)。

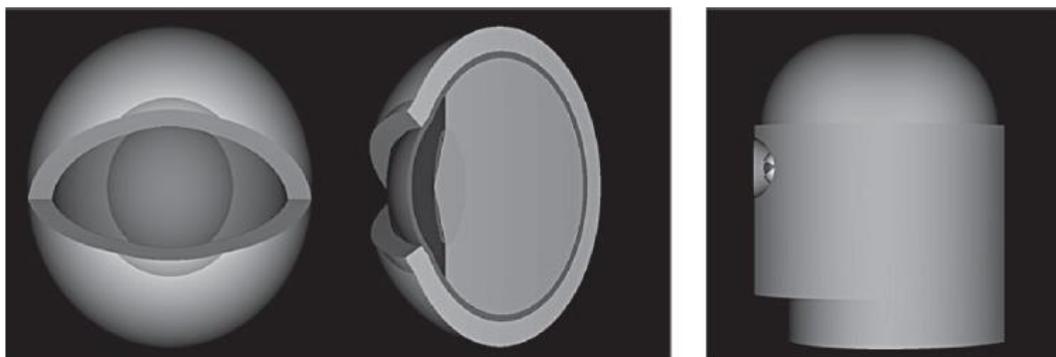


図 2-3 眼球ファントム及びそれを様式化された頭部ファントムに組み込んだ眼モデル (左：電子についての検討で使用、右：光子についての検討で使用) [2-4]

## 2. 4. 入射粒子フルエンス当たりの線量換算係数

外部被ばくに対する放射線防護量のための換算係数は、従来のICRP 74 [2-5]から新たにICRP 116に示された値に改訂された。入射粒子フルエンス当たりの実効線量換算係数として、ICRP 103 [2-6]で記述された手順に従い、臓器線量換算係数、放射線加重係数 $W_R$ 、及び組織加重係数 $W_T$ から導出された男女平均の値が示された（表2-4）。従来からの変更点として、原子力施設や放射線取扱施設だけでなく、高エネルギー加速器施設、航空機内及び宇宙における放射線防護にも対応するため、放射線の種類及びエネルギー範囲が拡張された。臓器線量換算係数については、従来と比べて標的臓器が追加され、それぞれ男女別の値が与えられた。

表 2-4 ICRP 116 で改訂された実効線量換算係数の概要

放射線の種類 (入射粒子)	光子、電子、陽電子、中性子、陽子、ミューマイナス粒子とミュープラス粒子、パイマイナス中間子とパイプラス中間子、並びにヘリウムイオン  (1990年勧告は、光子、電子及び中性子)	
放射線エネルギー	光子及び電子：10 keV~10 GeV、中性子：0.001 eV~10 GeV (1990年勧告は、光子：10 keV~10 MeV、 中性子：0.001 eV~180 MeV)	
全身の理想化された照射条件	前方-後方 (AP)、後方-前方 (PA)、左側方 (LLAT)、 右側方 (RLAT)、回転 (ROT) 及び等方 (ISO)	
数表の単位	入射粒子フルエンスで規格化した $pSv \cdot cm^2$ なお、自由空気中の空気カーマ当たりの実効線量換算係数は、 20 MeV までの光子について Sv/Gy の単位で与えられた。	
性別	男性と女性のファントムの平均値	
臓器線量換算係数	標的臓器の種類	赤色 (活性) 骨髄、結腸、肺、胃、乳房、卵巣、精巣、 膀胱壁、食道、肝臓、甲状腺、骨内膜、脳、唾液腺、皮膚、 残りの組織  (残りの組織に含まれる個々の臓器：副腎、胸郭外領域、 胆嚢、心臓、腎臓、リンパ節、筋肉、口腔粘膜、膵臓、 前立腺、小腸、脾臓、胸腺、子宮/子宮頸部)
	性別	男性と女性のファントムについて別々に評価
	数表の単位	入射粒子フルエンスで規格化した $pGy \cdot cm^2$

## 2. 5. 眼の水晶体の等価線量限度及び線量評価の算定

眼の水晶体等価線量は直接測定できない量であり、ICRUはこれを測定により評価する実用量として3 mm 線量当量を用いることが適当であるとしている（3.1 節参照）。国内の旧法令等においては、1990年勧告取り入れ時の検討[2-7]より、3 mm 線量当量率（方向性線量当量  $H(3,\alpha)$  及び個人線量当量  $H_p(3,\alpha)$ ）については1 cm 線量当量率及び70  $\mu\text{m}$  線量当量率の測定評価を行うことにより、放射線防護に必要な情報が得られるとしており、測定の義務を課していなかった。また、眼の水晶体の線量評価の算定については、「通常、1 cm 線量当量又は70  $\mu\text{m}$  線量当量のうち、放射線の種類やエネルギー等を考慮して適切と判断される方をもって眼の水晶体の等価線量の評価値とすることができる」と規定されていた。その理由は、光子、中性子及び電子においては、1 cm 線量当量及び70  $\mu\text{m}$  線量当量の測定評価により、実効線量限度及び皮膚等の等価線量限度が担保されていれば、3 mm 線量当量の評価しなくても自動的に眼の水晶体等価線量限度（150 mSv/年）が担保されたからである。

2011年4月、ICRPは組織反応（確定的影響）に関する声明[2-8]において、計画被ばく状況下にある職業被ばくのうち、眼の水晶体等価線量に対して「5年間の平均が20 mSv/年を超えず、いかなる1年間においても50 mSvを超えないようにすべきである」ことを示した[2-9]。この声明を受けて、IAEAは2011年11月当時、改定作業を行っていた国際基本安全基準(BSS) [2-10]においてその新しい眼の水晶体等価線量限度を取り入れた。

この新しい眼の水晶体等価線量限度は国内の法令に既に取り入れられており<sup>※4</sup>、旧法令の職業被ばくに係る眼の水晶体等価線量限度（150 mSv/年）は、2021年度から「1年間につき50 mSv及び5年ごとに区分した各期間につき100 mSv」に変更された。これは実効線量限度と同じ基準である。同時に、1 cm 線量当量率と70  $\mu\text{m}$  線量当量率の測定評価を行うことで眼の水晶体の防護に必要な情報が得られるという上述の点が見直され、眼の水晶体の線量評価の算定については、「放射線業務従事者の外部被ばく管理における眼の水晶体の線量の評価上は、1 cm 個人線量当量  $H_p(10)$ 、70  $\mu\text{m}$  個人線量当量  $H_p(0.07)$  又は3 mm 個人線量当量  $H_p(3)$  の実用量のうち状況に応じて適切なものを用いる」と規定が改められた。また、日本保健物理学会は、眼の水晶体等価線量が他の身体部位より高く、先立って限度値に達するおそれがあるような場合には、 $H_p(3)$  を用いて水晶体の線量をより正確に評価することが望まれるとの見解を示している[2-11]。なお、中性子線については、その影響の程度がはっきりと分かっていないことから、従来どおり1 cm 線量当量を用いて算定するものとし、変更はなされなかった。

<sup>※4</sup> 眼の水晶体の線量限度の変更のための放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則の一部を改正する規則（令和2年原子力規制委員会規則第13号）

## 2. 6. 放射性同元素の核壊変データ

放射性同位元素に由来する被ばく線量評価では、放射性同位元素の核壊変で放出される放射線の種類、エネルギー、放出率の核壊変データが必要である。1990年勧告の法令取り入れ段階では、1983年に刊行されたICRP 38のデータ[2-12]が用いられた。その後、2008年に同データを改訂したICRP 107[2-13]が刊行され（表2-5）、放射性同位元素を用いた遮蔽線量の評価で用いられるようになった。国内の図書においても、最新版のアイソトープ手帳[2-14]、遮蔽計算実務データ集[2-15]などでICRP 107の核壊変データを用いて算出した遮蔽計算用定数が記載されている。

表2-5 ICRP 107で改訂された核壊変データの概要

データ掲載	ICRP 107（新）	ICRP 38（旧）
収録核種数	全 97 元素 1,252 核種 ・ 10 分を超える半減期の核種： 922 ・ 10 分以下の半減期の核種：330	全 838 核種 ・ 10 分を超える半減期の核種： 764 ・ 10 分以下の半減期の核種：56
核壊変データの内容	右列に示す ICRP 38 のデータ内容に、以下を追加 ・ 中性子エネルギースペクトル ・ オージェ電子スペクトル	・ 放射性同位元素の半減期、壊変様式、壊変系列 ・ 放出する放射線の種類、エネルギー及び放出率 ・ ベータ線エネルギースペクトル
刊行年	2008	1983
参照元	最新の ENSDF[2-16]から放射線のエネルギー・放出率を計算する手法の改良、不完全なデータの修正を施した核壊変データパッケージ DECDC2 [2-17]を採用	1970 年代の評価済核構造データファイル ENSDF に基づいて編集

## 参考文献

- [2-1] ICRP, Adult Reference Computational Phantoms, ICRP Publication 110, Ann. ICRP 39 (2) (2009).
- [2-2] ICRP, Report of the Task Group on Reference Man, ICRP Publication 23, Pergamon Press, Oxford (1975).
- [2-3] 遠藤, ICRP2007年基本勧告に基づく外部被ばく線量換算係数の計算, RIST ニュース, 47 (2009).
- [2-4] ICRP, Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures, ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5) (2010).
- [2-5] ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74, Ann. ICRP 26 (3-4) (1996).
- [2-6] ICRP, The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, ICRP Publication 103, Ann. ICRP 37 (2-4) (2007).
- [2-7] 放射線審議会基本部会, 外部被ばく及び内部被ばくの評価法に係る技術的指針 (平成11年4月).
- [2-8] ICRP, Statement on Tissue Reactions, <https://www.icrp.org/page.asp?id=123> (2011).
- [2-9] 横山, I. 眼の水晶体の放射線影響評価と線量限度に関する最近の動向, 東京大学放射線取扱者再教育資料 No.32-2 (2014).
- [2-10] European Commission, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements No. GSR Part 3) (2014).
- [2-11] 日本保健物理学会, 眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン(2020年7月, 2021年6月修正), Jpn. J. Health Phys., 56 (3), 179-257 (2021).
- [2-12] ICRP, Radionuclide Transformations - Energy and Intensity of Emissions, ICRP Publication 38, Ann. ICRP 11-13 (1983).
- [2-13] ICRP, Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38 (3) (2008).
- [2-14] 日本アイソトープ協会, アイソトープ手帳 12 版 (2020).
- [2-15] 原子力安全技術センター, 放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集 2015 (2015).
- [2-16] J.K.Tuli, Evaluated Nuclear Structure Data File: a Manual for Preparation of Data Sets. BNLNCS51655-01/02-Rev. Brookhaven National Laboratory, Upton, NY (2001).
- [2-17] A. Endo, Y. Yamaguchi and K.F. Eckerman, Nuclear Decay Data for Dosimetry Calculation - Revised Data of ICRP Publication 38, JAERI 1347 (2005).

## 第3章 外部被ばくに係る線量換算係数の改訂と国際動向

### 3. 1. 外部被ばくに係る線量換算係数の改訂

#### 3. 1. 1. 実効線量（防護量）への換算係数について

放射性同位元素等規制法に基づく「放射線を放出する同位元素の数量等を定める件」（平成12年科学技術庁告示第5号）の第26条において、光子及び中性子について実効線量換算係数が規定されている（2022年3月現在）。これらは1990年勧告に基づきICRP 74で示された値である。

2007年勧告に基づきICRP 116で改訂された実効線量換算係数及び（皮膚及び眼の水晶体を含む）組織・臓器吸収線量への換算係数（表2-4参照）については、今後、これらを全面的に国内法令に取り入れることが見込まれる。放射線施設の使用に係り、これらの線量換算係数を必要とするのは「放射性同位元素等の規制に関する法律施行規則」の第14条の7第3項において定められた基準を満たすために、放射線の遮蔽に係る次の線量を計算する場合である<sup>※5</sup>。

- ・ 使用施設内の人が常時立ち入る場所において人が被ばくするおそれのある線量
- ・ 工場又は事業所の境界（工場又は事業所の境界に隣接する区域に人がみだりに立ち入らないような措置を講じた場合には、工場又は事業所及び当該区域から成る区域の境界）及び工場又は事業所内の人が居住する区域における線量

法令における放射線防護の基準を定める量は、原則として次の防護量である。

- ・ 放射線業務従事者等の線量限度を定める量は、「実効線量」及び「等価線量」とする。
- ・ 管理区域や遮蔽物に係る基準線量等、放射線施設に係る基準を定める量は、「実効線量」とする。

例外的に、放射性物質の運搬に関して、IAEA 放射性物質安全輸送規則[3-1]の慣例に従い、輸送物の外部線量又は運搬船の居住区域の線量評価に実用量の「1 cm 線量当量」を用いることがある。この場合は、現行のICRP 74に示された1 cm 線量当量への換算係数を用いた線量計算を行う。

実効線量は、同じ放射線場であっても、放射線の人体への入射条件（以下、照射条件という。）により値が変化するため、ICRP 116には6種類の照射条件に対する換算係数が示されている。申請者が、施設における放射線業務従事者及び公衆への照射条件の違いを明確に把握できない場合、安全側の評価値となる照射条件に対する換算係数

<sup>※5</sup> 他にも放射化物の取扱い又は事故等の報告に関係して線量換算係数を用いた計算を行うことがある。

を採用することが適当である。一方、申請者が施設の利用状況を考慮した適切な照射条件を明示できる場合は、該当する照射条件に対する換算係数を採用すべきである。なお、従来は、照射条件として前方-後方照射（以下「AP」という。）に対する換算係数を用いることが推奨されていたが、10 MeV を超える高エネルギーの場合、AP 以外の照射条件の方が AP より実効線量の計算値が高くなるおそれがある。高エネルギー光子の場合、AP の換算係数を用いた実効線量の計算値が必ずしも安全側の評価を与えるわけではないことに留意する（4.2.1 項、5.4.3 項参照）。

表 3-1 に、国内法令改定後に届出又は許可申請の遮蔽計算で使用される実効線量換算係数を示した ICRP 116 の該当する表を、光子、中性子及び電子についてそれぞれ示す。次章から示す今回見直した遮蔽計算法においては、放射線の種類及びエネルギーに関して ICRP 116 の該当する表の値を用いた。

表 3-1 光子、中性子及び電子に対して新たに該当する実効線量換算係数の表

放射線の種類	物理量からの換算係数	エネルギー範囲	ICRP116 の該当する表
光子	単位光子フルエンス当たりの実効線量	10 keV ~10 GeV	表 A.1
	自由空気中の空気カーマ当たりの実効線量	10 keV ~20 MeV	表 A.2
中性子	単位中性子フルエンス当たりの実効線量	0.001 eV~10 GeV	表 A.5
電子	単位電子フルエンス当たりの実効線量	10 keV ~10 GeV	表 A.3

表 3-1 に示した実効線量換算係数は成人モデルの被ばくを対象としているが（2.3 節参照）、公衆を対象とした事業所境界における線量評価においても、現行どおり、表 3-1 の値を使用して差し支えないと考えられる。ただし、ICRP では年齢別の実効線量の評価が議論されており、今後の動向を注視する必要がある（3.2.2 項、3.2.3 項参照）。

### 3. 1. 2. 測定に係る量（実用量）への換算係数について

国内の法令に関しては、遮蔽安全評価に必要な防護量への換算係数を規定するだけでよく、測定に係る量（実用量）への換算係数を規定する必要は特にない。一方、放射線施設の現場では、実際に測定することのできない防護量を、放射線の実用測定器で測定した実用量で評価しており、防護量と実用量の関係を知っておくことは放射線の線量管理の面で一定の意義がある。実用量は、防護量同様、物理量から換算係数を用いて計算できるため、ここに実用量への換算係数の出所を示しておく。

物理量から実用量への換算係数は、表 3-2 に示すとおり、眼の水晶体等価線量の評価に用いる 3 mm 線量当量  $H_p(3)$ を除き、現行の ICRP 74 の該当する表で与えられてい

る。 $H_p(3)$ の換算係数については、眼の水晶体等価線量限度の国内法令改定に係る潜在的な計算の機会を考慮して（2.5 節、4.2.2 項参照）、現在入手できる文献を示した。

なお、最近 ICRU が報告した実用量の概念変更については 3.2.1 項で紹介する。

表 3-2 光子及び中性子に対して該当する実用量への換算係数の表  
(場所 (エリア) に係る測定に用いる実用量)

放射線の種類	実用量	物理量からの換算係数	ICRP 74 の該当する表
光子	周辺線量当量 $H^*(10)$	自由空気中の空気カーマから 周辺線量当量への換算係数	表 A.21 (第 1 欄及び第 2 欄)
	方向性線量当量 $H'(0.07,\alpha)$	自由空気中の空気カーマから 方向性線量当量への換算係数	表 A.21 (第 1 欄及び第 3 欄) 及び表 A.23
中性子	周辺線量当量 $H^*(10)$	単位中性子フルエンスから 周辺線量当量への換算係数	表 A.42 (第 1 欄及び第 2 欄)

(個人の外部被ばくに係る測定に用いる実用量)

放射線の種類	実用量	物理量からの換算係数	該当する表
光子	個人線量当量 $H_p(10)$	自由空気中空気カーマから ICRU スラブ中の $H_{p,slab}(10,\alpha)$ への 換算係数	ICRP 74 の 表 A.24
	個人線量当量 $H_p(3)$	自由空気中空気カーマから ICRU スラブ又は円筒ファントム 中の $H_p(3,\alpha)$ への換算係数	IEC62387 [3-2]
	個人線量当量 $H_p(0.07)$	自由空気中空気カーマから ICRU スラブ中の $H_{p,slab}(0.07,\alpha)$ への 換算係数	ICRP 74 の 表 A.25
中性子	個人線量当量 $H_p(10)$	単位中性子フルエンス当たり、 ICRU スラブ中の $H_{p,slab}(10,\alpha)$ への 換算係数	ICRP 74 等の表 A.42 (第 1 欄及び第 3～8 欄)
	個人線量当量 $H_p(3)$	単位中性子フルエンス当たり、 ICRU スラブ又は円筒ファントム 中の $H_p(3,\alpha)$ への換算係数	Gualdrini 論文 [3-3]

### 3. 2. 2021年までのICRP/ICRUレポートから想定される将来の改訂課題

最近のICRU又はICRPのレポートに基づき、将来のICRP主勧告で想定される外部被ばくに係る改訂課題を示す。また、それらの課題との関係において、放射線施設の遮蔽評価で留意すべき点を挙げる。

#### 3. 2. 1. ICRU 95（外部被ばくに係る実用量）の要点

2020年2月、ICRUはICRU 95「外部被ばくに係る実用量」[3-4]を刊行し、従来の実用量の概念を大きく変更する新たな線量体系を提案した。動機として、2010年に刊行されたICRP 116により、10 MeVを超える高エネルギー領域の実効線量の評価が可能になり、従来の実用量ではICRP 116で示された粒子やエネルギーの範囲を十分にカバーできなくなったことがある。以前から、高エネルギー放射線に対してICRU球の1 cm線量当量を用いた実効線量の評価が過小評価になるケースがあることは知られていた[3-5]（4.2.1項、5.4.4項参照）。また、2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故の教訓として、等価線量(equivalent dose)と線量当量(dose equivalent)の名称が類似すること、実効線量と等価線量の単位が同じであることが、放射線防護に関連して生じた混乱の要因であったと指摘された[3-6]。

これらの課題を踏まえてなされたICRU 95の提案の要点は下記のとおりである。

- ・ 職業上の放射線防護には、防護量の適切な推定値を示す実用量が必要である。
- ・ 実効線量の管理に対して、ICRU球や軟組織の線量当量を用いるのではなく、防護量である実効線量をもとに測定量を定める。線量当量は廃止される。
- ・ 組織反応の発生防止に対して、等価線量を用いるのではなく、吸収線量をもとに測定量を定める。等価線量は廃止される。
- ・ 防護量に一貫した単位を用いることとし、組織反応には吸収線量の単位グレイ Gyを、確率的影響には実効線量の単位シーベルト Svを用いる。

さらにICRU 95では、新しい実用量の定義が提案されるとともに（表3-3）、高エネルギー放射線場でのみ発生する粒子を含む、広範囲の粒子とエネルギーに対して、下記の実用量への換算係数の値が示された。

- ・ 200 GeVまでのエネルギー範囲で、光子、中性子、電子、陽電子、陽子、ミュー中間子、パイ中間子、アルファ線のフルエンスから実用量（周辺線量、個人線量、眼の水晶体への方向性吸収線量、局所皮膚への方向性吸収線量）への換算係数
- ・ 50 MeVまでの光子の空気カーマから実用量への換算係数

表 3-3 ICRU 95 で新たに示された防護量と実用量との関係

防護量 (Sv)	実用量 (Gy)	
	場所に係る測定に用いる量	個人の外部被ばくに係る測定に用いる量
実効線量 (全身の被ばく)	周辺線量 [ $H^*$ ]	個人線量 [ $H_p$ ]
皮膚の吸収線量 (皮膚の被ばく)	局所皮膚への方向性吸収線量 [ $D'$ local skin ( $\Omega$ )]	局所皮膚への個人吸収線量 [ $D_p$ local skin]
眼の水晶体吸収線量 (眼の水晶体被ばく)	眼の水晶体への方向性吸収線量 [ $D'$ lens ( $\Omega$ )]	眼の水晶体への個人吸収線量 [ $D_p$ lens]

### 3. 2. 2. ICRP 147 (放射線防護における線量の使用) の要点

2021 年 4 月、ICRP 147「放射線防護における線量の使用」[3-7]が、放射線の健康リスクについて 2007 年勧告の説明を補完し、線量の用途を明確にするために刊行された。線量を取り巻く課題が下記のとおり総括され、明確化とガイドラインの必要性が指摘された。

- 手足、眼の水晶体及び皮膚の被ばくによる組織反応を防止するための限度設定に等価線量を使用する問題
  - 臓器・組織の急性障害の発生のしきい値より低い限度が設定されている点
  - 作業者と公衆の限度が異なる点
- 外部被ばくの測定に使用される実用量と防護量との混同
  - 特に 1 cm 線量当量と等価線量の混同。
  - 等価線量は、実効線量の計算における中間量の位置付けである。
- 放射線加重係数  $W_R$  の設定における不整合
  - 低線エネルギー付与 (LET) 放射線と  $\alpha$  粒子に対しては単純なアプローチを使用する一方、中性子に対しては非常に複雑である点
  - 実用量に対して、 $W_R$  ではなく線質係数  $Q(L)$  を使用して異なる重み付けを行っている点
- 全ての年齢層及び男女の実効線量の算出に単一の組織加重係数セットを使用する問題
  - がんリスクは本来、年齢、性別及び集団によって異なる点
- 実効線量の算出において、性別平均の標準人を対象としている問題

- 男性と女性、大人と子供を分けていない点
- 「標準人(reference man)」と「代表的個人(representative person)」の間の混同
- ・ 高線量被ばくにおいて、実効線量が適用できる線量範囲の問題
  - 事故時の高線量被ばくの結果、個々の臓器・組織へ高い吸収線量が与えられた場合は、リスク評価のために実効線量を使用することが適さない点
- ・ 医療処置による患者の被ばくリスク推定に実効線量を使用する問題
- ・ 被ばく集団への放射線リスクの評価に集団実効線量を使用する問題

これらの課題についての議論の中で、実効線量と吸収線量に関連して下記の言及がなされている。

- ・ 実効線量及び集団実効線量は、職業上及び公衆の被ばくにおける確率的影響、主にがんに対する防護を最適化するために用いる有用なツールである。
- ・ 実効線量は、医療においては、異なる医療行為による線量の比較、正当性の判断、医療研究における介護者やボランティアの制約条件の設定などに用いられる。
- ・ 実効線量は、一般に 100 mSv 未満の線量で使用される。ただし、線量の不均一な分布による組織反応の発生可能性に留意してさえいれば、約 1 Sv までの急性被ばく線量に使用しても妥当と考えられる。
- ・ 実効線量は、低線量率・低線量へのリスク外挿に関連する不確実性を考慮し、かつ生涯がんリスクが被ばく年齢、性別、集団によって異なることを認識する限りにおいて、リスクの近似的な指標とみなせる。一方で、具体的な条件を考慮した臓器・組織線量の最良評価値を用いたリスク分析にとって代わるものではない。
- ・ 集団実効線量について、潜在的な健康影響の予測に使用する場合は注意を要する。状況を考慮し、バックグラウンド罹患率との関連で判断されるべきである。
- ・ 吸収線量は、組織反応（確定的影響）を防止するための臓器・組織線量の限度設定に最も適切な量である。ICRP は次の主勧告において、臓器・組織線量の限度設定に従来の等価線量を使用しない予定である。
- ・ ICRP が組織反応を防止するための臓器・組織線量の限度設定に吸収線量を使用する予定について、ICRP が次の主勧告を発行するまでは、現行の等価線量限度の適用を維持する。

### 3. 2. 3. 次の ICRP 主勧告の論点

2021 年 7 月、ICRP は次の主勧告の検討を開始するに当たり、その論点として、年齢、性別、個人の特性を含んだ実効線量及びその簡素化に言及した [3-8]。また、医療における実効線量について、患者固有の数値に基づく評価に言及した。

- 年齢別の実効線量を評価するために、さまざまな年齢の子供の一連の標準ファントムを開発し、妊婦と胎児用の標準ファントムも提供する。既にICRP 144「環境線源に対する外部被ばく線量係数」[3-9]で、年齢別の標準ファントムを用いた核種ごとの臓器線量率係数と実効線量率係数の値が示されている。
- 実効線量について、例えば、適切に平均化された線量基準を限度として設定するような簡素化を、整備プロセスの最後に行うことができる。
- 結果的に、実効線量と確率的リスクとの関連がより明確になり、防護体系と防護の最適化に資する。

### 3. 2. 4. 放射線施設の遮蔽安全評価に係る留意点

以上、最近のICRP/ICRUレポートの外部被ばくに係る議論を踏まえて、将来に想定される放射線施設の遮蔽安全評価に係る留意点を表3-4にまとめて示す。

表3-4 2021年までのICRU/ICRPレポートから想定される遮蔽安全評価に係る留意点

遮蔽安全評価に係る留意点	個別の具体的な注意の例
実効線量の評価を、放射線防護以外の目的（特に医療又は急性影響の治療）に使用しないこと	医療被ばくにおける実効線量は、異なる医療行為の線量比較、正当性の判断、医療研究における制約条件の設定等に用いられる。職業上・公衆の被ばくにおける確率的影響の防護最適化とは用途が異なることに注意する。
	医療に関する治療、検査等の外部被ばくは一般に局所被ばくであり、全身被ばくは稀である。例えば、局所被ばくの防護を要する場面で、実効線量を用いた説明を行うことのないように注意する。
	放射線防護は低線量被ばくによる晩発性の確率的影響の防護が主体である。実効線量は一般に100 mSv未満の線量で使用される。大量被ばく事故等で想定されるGyレベルの高線量評価に実効線量を用いるのは適切でない。
実効線量の定義が、年齢、性別、個人の特性を含むように拡張される可能性	現行の実効線量は性別平均の標準人（成人）に対して定義されている。実際の被ばく対象が性別平均の標準人で近似できない場合、又は特定の年齢、性別、集団に偏る場合は実効線量の適用性に注意する。
	ICRPの次の主勧告において、年齢・性別・個人の特性に応じた実効線量換算係数の提示が示唆された。それに伴い、年齢・性別・人口集団の違いに応じた放射線デトリメントが提示される可能性がある。

<p>集団実効線量の評価値の用途について</p>	<p>集団実効線量は、実効線量とともに職業上・公衆の被ばくにおける確率的影響の防護最適化に有用である。ただし、特定集団の潜在的な健康リスクの予測近似等に集団実効線量を使用する場合は注意する。状況を考慮し、バックグラウンド罹患率等との関連で判断すべきである。</p>
<p>組織反応の防止のために使用される臓器・組織線量の種類及び限度設定の変更</p>	<p>ICRP の次の主勧告において、組織反応の防止のための限度設定に等価線量(Sv 単位)を使用せず、吸収線量(Gy 単位)を用いることが示唆された。ただし、次の主勧告が出るまでは、現行の等価線量限度の適用を維持する。</p> <p>限度設定に吸収線量を用いる場合、組織反応の防止に係る追加的ガイドが提示される可能性がある。同じ吸収線量でも粒子とエネルギーによって組織反応が異なる場合に対応するため、例えば放射線加重係数や生物学的効果比を追加的に提示することが考えられる。</p>

## 参考文献

- [3-1] IAEA, Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, IAEA Safety Standards Series No. SSR-6 (Rev.1) (2018).
- [3-2] IEC 62387, Radiation Protection Instrumentation - Passive Integrating Dosimetry Systems for Personal and Environmental Monitoring of Photon and Beta Radiation, TC 45/SC 45B (2012).
- [3-3] G. Gualdrini et al., Fluence to  $H_p(3)$  Conversion Coefficients for Neutron from Thermal to 15 MeV, Radiation Protection Dosimetry , 1–13 (2013).
- [3-4] ICRU. Operational Quantities for External Radiation Exposure, ICRU Report 95, J. ICRU 20(1) (2020).
- [3-5] 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).
- [3-6] A J Gonzalez et al., Radiological Protection Issues Arising during and after the Fukushima Nuclear Reactor Accident, J.Radiol.Prot., 33, 497 (2013).
- [3-7] ICRP, Use of Dose Quantities in Radiological Protection, ICRP Publication 147, Ann. ICRP 50(1) (2021).
- [3-8] C. Clement et al, Keeping the ICRP Recommendations Fit for Purpose, J. Radiol. Prot. (2021) <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ac1611>.
- [3-9] ICRP, Dose Coefficients for External Exposures to Environmental Sources, ICRP Publication 144, Ann. ICRP 49(2) (2020).

## 第4章 ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽計算法の見直し対応

### 4. 1. 遮蔽計算法の概要

#### 4. 1. 1. 遮蔽計算法の適用範囲と見直し部分

本ガイドラインのスコープは、1章で述べたとおり、放射線が遮蔽体を透過した後の線量率（以下、「遮蔽体透過線量」という。）の計算である。表4-1に、放射線施設に対して実務で実施される遮蔽体透過線量計算の全範囲を示す。同表「線量計算方法」の列に、遮蔽体透過線量の計算法を、施設で取り扱う放射線の種類又は遮蔽体を透過中に発生する主な二次放射線の種類に分けて通し番号で示した。表4-2は、それらを番号順に並べて、遮蔽計算実務マニュアル[4-1]の該当する説明箇所を示したものである。

放射線施設は、放射性同位元素を取り扱う施設と放射性発生装置を使用する施設に大別される。放射性同位元素が放出する光子の遮蔽計算法は、表4-2の（1）、（2）及び（3）である。それらは、計算条件の与え方や使用するデータによって違いがあるように見えるが、基本は（1）ビルドアップ係数を用いた線量計算である。今回、見直しを行った遮蔽計算法は（1）であるが、（1）を見直すと（2）及び（3）も同時に見直されることになり、結果的に光子を起点とする遮蔽計算法が全て見直しの対象となる。一方、表4-2の（5） $\beta$ 核種を起点とする制動X線及び（7）中性子源を起点とする遮蔽計算は、今回の見直しの対象ではない。

その他、放射線の種類やエネルギーによらない計算法として、一般に線量の幾何（的）減衰と呼ばれる表4-2（6）の方法がある。線源から一定距離における線量率分布をもとに、さらに距離の離れた場所の線量を、距離の逆自乗則による減衰によって求める。線源の種類によらず、放射性同位元素と放射線発生装置の両方で適用可能である。

放射線発生装置を使用する施設の場合、電子リニアックで加速した電子線のターゲット衝突（光子コンバータ）で生じるX線の利用線すい又は漏えい線の遮蔽計算は、リニアックの使用線量及び遮蔽体の線量透過率を用いる方法が基本である。遮蔽体の線量透過率は、X線のエネルギースペクトルが与えられたら（1）のビルドアップ線量計算で簡易に求められる（4.1.2項（1）連続エネルギー光子の説明を参照）。そのX線スペクトルは、文献や測定を通じて、或いはモンテカルロ法粒子輸送シミュレーションコード（以下、「MC法コード」という。）を用いた光子コンバータと照射ヘッド内の計算で別途求めることになる。加えて、もしX線源の強度（光子発生率）情報も与えられるなら、（1）の方法により線量評価点の実効線量を図面どおりに計算できるようになる。

なお、X線スペクトルをMC法コードで計算するとき、続けて施設の遮蔽計算も同じMC法コードで実行することも可能である。ただし、MC法コードによる遮蔽計算は慣例的な実務計算の範疇を超えるため、本ガイドラインでは説明しない。

表 4-1 放射線施設に対する遮蔽体透過線量計算法の全範囲（網掛け：見直し部分）

線源	一次放射線	二次放射線	エネルギー分布	計算条件の与え方（線源、データ）	線量計算方法
放射性同位元素	光子 ( $\gamma$ 線/X線)	—	単色（特性X線） 又は連続	<ul style="list-style-type: none"> <li>線源の強度、エネルギーと発生割合</li> <li>遮蔽体の線量ビルドアップ係数</li> <li>遮蔽体の減衰係数</li> <li>実効線量換算係数</li> </ul>	(1) 線量ビルドアップ係数を用いる方法
		—	連続エネルギーの場合、 エネルギー分布を離散化して エネルギー群に分割する。各群の代表エネルギーと光子発生量を線源条件として与える。	<ul style="list-style-type: none"> <li>線源強度</li> <li>放射性同位元素の線量率定数</li> <li>遮蔽体の線量透過率</li> </ul>	(2) 放射性同位元素の線量率定数及び遮蔽体の線量透過率を用いる方法
		—	連続	<ul style="list-style-type: none"> <li>線源の強度、エネルギーと発生割合</li> <li>遮蔽体の線量透過率</li> <li>実効線量換算係数</li> </ul>	(3) 単色光子に対する遮蔽体の線量透過率及び光子の線量換算係数を用いる方法
電子線 ( $\beta$ 線)	—	—	単色（内部転換電子、 オージェ電子） 又は連続（崩壊 $\beta$ 線）	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\beta</math>線エネルギー（連続の場合、<math>\beta</math>線最大エネルギー）</li> </ul>	(4) 遮蔽体における $\beta$ 線の飛行計算 (電子自体は遮蔽体を透過しないため、線量計算まで行わない)
	—	制動X線	連続	<ul style="list-style-type: none"> <li>起点の<math>\beta</math>線スペクトル</li> <li>起点の<math>\beta</math>線(最大)エネルギー</li> <li>制動X線の線量率定数<math>\Gamma_{20}</math> (Ca比)</li> <li>制動放射効率比<math>K_{20}(Z)</math></li> <li><math>\beta</math>崩壊分岐比</li> <li>遮蔽体の制動放射線透過率</li> </ul>	(5) 制動X線の遮蔽計算 (線源から $\beta$ 線とともに光子が放出される場合、光子の寄与を支配的とみなして $\beta$ 線による制動X線を無視することがある。よって、制動X線の計算は純 $\beta$ 線核種に限られる例がある。)
	—	—	連続	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\beta</math>+線最大エネルギー</li> </ul>	(4) 遮蔽体における $\beta$ 線の飛行計算
陽電子線 ( $\beta$ +線)	—	—	連続	—	(4) 遮蔽体における $\beta$ 線の飛行計算
	—	制動X線	連続	—	$\beta$ +線による制動放射は消滅光子より寄与が小さく無視されることがある。
	—	消滅光子	単色	消滅光子 (0.511 MeV、2本)	(1) 又は (3)
中性子源からの中性子	—	—	連続（自発核分裂、 ( $\alpha, n$ )反応等)	(省略)	(7) 中性子源を起点とする遮蔽計算
	任意	—	与えられた線量率分布による計算のため、エネルギー分布を特定しない。	<ul style="list-style-type: none"> <li>線源から特定距離の吸収線量率又は実効線量率（線量率の空間分布が与えられた場合は最大値とその距離）</li> <li>遮蔽体の線量透過率（核種やエネルギーから線量透過率を求める例がある）</li> </ul>	(6) 距離の逆自乗則による線量の減衰計算
放射線発生装置	電子線 (医療用電子リニアック想定)	X線照射 (電子線のターゲット衝突(コンバータ)で発生)	制動X線:連続 (利用線すい及び漏えい線) (特性X線はエネルギー的に隠れて見えない)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ターゲットから1 mでの最大使用線量</li> <li>利用線すい及び漏えい線に対する遮蔽体の実効線量透過率</li> <li>対抗板の実効線量透過率</li> <li>方向利用率</li> <li>漏えい線量率(利用線すいの1/1000)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>装置の使用線量及び遮蔽体の線量透過率を用いた(2)と同じ考え方に基づく遮蔽計算</li> <li>さらに離れた距離における線量は(6)の幾何減衰で求める。</li> </ul>
			同上	<ul style="list-style-type: none"> <li>X線の強度及びエネルギー分布</li> <li>遮蔽体の線量ビルドアップ係数（光核反応を考慮）</li> <li>遮蔽体の減衰係数</li> <li>線量換算係数</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>X線の強度で規格化したエネルギー分布を離散化してエネルギー群に分割し、各群の代表エネルギーと光子発生量を線源としたビルドアップ計算を行う(1)の方法</li> <li>或いは、同様のビルドアップ計算で遮蔽体の線量透過率を求めておき、装置の使用線量をもとに(2)と同じ考え方に基づく遮蔽計算</li> </ul>
			電子線照射	電子線:連続 (ヘッド内で散乱)	<ul style="list-style-type: none"> <li>電子線最大エネルギー</li> </ul>
—	—	ヘッド内で付随的に発生する制動X線:連続 (利用線すい側及び漏えい線の両方)	<ul style="list-style-type: none"> <li>ターゲットから1 mでの最大使用線量</li> <li>電子線出力線量率のうち、制動X線の線量率になる割合</li> <li>利用線すい及び漏えい線に対する遮蔽体の実効線量透過率</li> <li>方向利用率</li> <li>漏えい線量率(利用線すいの1/1000)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>装置の使用線量及び遮蔽体の線量透過率を用いた(2)と同じ考え方に基づく遮蔽計算</li> <li>さらに離れた距離における線量は(6)の幾何減衰で求める。</li> </ul>	

表 4-2 遮蔽計算実務マニュアル記載の遮蔽体透過線量計算法（網掛け：見直し部分）

	遮蔽体透過線量計算法	計算手順、例題	施設計算事例
(1)	線量ビルドアップ係数を用いる方法	1.2.2 項	—
(2)	放射性同位元素の線量率定数及び遮蔽体の線量透過率を用いる方法	1.2.1 項 (1)	3.1～3.4 節 3.8 節、3.9 節 4.1 節
	放射線発生装置の使用線量及び遮蔽体の線量透過率を用いる方法	5 章	5 章
(3)	単色光子 <sup>※6</sup> に対する遮蔽体の線量透過率及び光子の線量換算係数を用いる方法	1.2.1 項 (2) 1.5 節	—
(4)	遮蔽体におけるβ線の飛程計算	解説編 3.3.3 項	3.6 節、5.1 節
(5)	β核種を起点とする制動 X 線の遮蔽計算	1.3 節	3.6 節、4.1 節
(6)	距離の逆自乗則による線量の減衰計算	3 章以降の施設計算例を参照	3.5 節、3.8 節 3.9 節、5 章
(7)	中性子源を起点とする遮蔽計算	1.4 節	—

#### 4. 1. 2. 見直しを行った遮蔽体透過線量計算法の概要

今回、見直しを行った遮蔽計算法の範囲は、表 4-1 又は表 4-2 に示した光子の遮蔽体透過線量計算法 (1)、(2) 及び (3) である。手法の理解を深めるため、通し番号に沿って数式を用いた説明を行う。

##### (1) 線量ビルドアップ係数を用いる方法

線源強度  $I$  (photon/sec)、エネルギー  $e$  (MeV) の単色光子が、線源から  $r$  (cm) 離れた所にある厚さ  $t$  (cm) の遮蔽体を透過した後の実効線量率  $D_{mono}(e, t)$  (pSv/sec) は、下式で与えられる。

$$D_{mono}(e, t, r) = \frac{1}{4\pi(r+t)^2} \cdot E/\Phi(e) \cdot B(e, t) \cdot \exp(-\mu(e) \cdot t) \quad (4-1)$$

$e$  : 光子エネルギー (MeV)

$E/\Phi(e)$  : 光子エネルギー  $e$  のフルエンス率 ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) 当たり実効線量換算係数 ( $\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$ )

$r$  : 線源から遮蔽体までの距離 (cm)

$t$  : 遮蔽体の厚さ (cm)

$B(e, t)$  : 遮蔽体の厚さ  $t$  に対する光子エネルギー  $e$  の実効線量ビルドアップ係数

※6 単色光子とは、理想的に特定の単一エネルギーをもつ光子を指す。

$\mu(e)$  : 遮蔽体に対する光子エネルギー  $e$  の減衰係数 ( $\text{cm}^{-1}$ )

これらのパラメータのうち、実効線量換算係数、実効線量ビルドアップ係数及び減衰係数は外部から数表等のデータとして与えられる。今回、これら 3 種類の係数を 2007 年勧告等に基づいて見直したが (4.3 節参照)、実際に計算し直したのは線量ビルドアップ係数及び減衰係数である。実効線量換算係数は、ICRP 116 に示された値をそのとおり引用した。以降、説明の便宜を図るため、実際に計算してデータ整備した線量ビルドアップ係数及び減衰係数の 2 種類の係数を指して遮蔽計算用データと呼ぶ。

次に、放射能  $S(\text{Bq})$  の放射性同位元素から放出される  $N$  個の異なるエネルギーの単色光子に対して(4-1)式を拡張する。放射性同位元素から  $r$  (cm)離れた所にある厚さ  $t$  (cm)の遮蔽体を透過した後の実効線量率  $D_{RI}(S, t, r)$  (pSv/sec)は、単色光子毎に実効線量率を(4-1)式で求めて総和することで得られる。

$$D_{RI}(S, t, r) = \sum_{k \leq N} S \cdot R_k \cdot D_{mono}(e_k, t, r) \quad (4-2)$$

$e_k$  :  $k$  番目に放出される光子エネルギー (MeV)

$R_k$  :  $k$  番目に放出される光子の壊変当たり放出数 (photon/dis)

特定の放射性同位元素から放出される異なるエネルギーの光子データは、核壊変データと呼ばれ、今回の見直しでは ICRP 107 [4-2]のデータを引用して整備した (4.2.1 項、2.6 節参照)。以上が、放射性同位元素の崩壊光子に代表される単色光子に対するビルドアップ計算法である。

一方、放射線発生装置で発生する制動 X 線のように連続エネルギーをもつ線源の場合には、エネルギースペクトルを適当な幅のエネルギー群に分割して、各エネルギー群の代表エネルギー値をもつ光子強度の形に離散化すると、異なるエネルギーの単色光子による計算法(4-2)式を近似的に適用することができる。

$$D_{Group}(e_k, R_k, t, r) = \sum_{k \leq N} R_k \cdot D_{mono}(e_k, t, r) \quad (4-3)$$

$N$  : 線源スペクトルを適当なエネルギー群で分割したときのエネルギー群の総数

$e_k$  :  $k$  番目のエネルギー群の代表エネルギー (MeV)

$R_k$  :  $k$  番目のエネルギー群の光子強度 (photon/sec)

この場合、各エネルギー群の代表エネルギーに対する光子強度 ( $e_k, R_k$ ) を外部から指定

する必要がある。またエネルギー群の代表エネルギーとして、各群のエネルギー範囲の中央値又は最大値を採用する例がある。

ここで、放射線発生装置の遮蔽計算を(4-3)式を用いて実施する場合の注意を与える。医療用リニアックを例にとると、利用線すい又は漏えい線<sup>\*7</sup>の線源条件は別途評価されたものを用いるため（4.1.1 項参照）、対象施設への適用性を確認する。また施設の放射線場には方向性があること、設置状況によっては放射線の回り込みや後方散乱の影響があること等、簡易計算法(4-3)式の適用範囲を超える可能性がある。必要に応じて、安全側の計算条件の設定、或いは適切な尤度を設定した評価を検討する（4.5 節参照）。

最後に、今回の見直しで計算可能にした線量種類を表 4-3 に示す。同表の各線量種類に対して、光子エネルギー 30 MeV までの線量換算係数及び線量ビルドアップ係数をデータ整備した（4.3 節参照）。ただし、放射線施設の遮蔽評価で用いられる線量種類は、同表の 1 から 6 までの実効線量のみである（3.1.1 項、4.2.2 項参照）。その他の線量種類は異なる応用を想定しており、例えば等価線量は放射線業務従事者等の線量評価の参考に、また実用量は実効線量又は等価線量を測定値で代替するときの参考に供し得るように用意したものである（2.5 節、3.1.2 項、4.2.2 項、5.4.3 項参照）。

表 4-3 今回の見直しで計算できるようにした線量種類

	計算可能な線量種類	性別	照射条件
1	実効線量：E(AP)	共通	AP
2	実効線量：E(PA)	共通	PA
3	実効線量：E(LLAT)	共通	LLAT
4	実効線量：E(RLAT)	共通	RLAT
5	実効線量：E(ROT)	共通	ROT
6	実効線量：E(ISO)	共通	ISO
7	眼の水晶体等価線量	共通	AP
8	皮膚等価線量	男性	AP
9	皮膚等価線量	女性	AP
10	空気カーマ	共通	—
11	1 cm 線量当量： $H^*(10)$	共通	—
12	3 mm 線量当量： $H_p(3)$	共通	—

<sup>\*7</sup> 本ガイドラインでの漏えい線とは、放射線発生装置のビーム発射点から利用線すい以外の方向に出射される放射線を指す。診療用機器の漏えい線は利用線すいの線量の 1000 分の 1 以下になるように遮蔽されなければならない。照射ヘッドからの漏えい線については、遮蔽計算実務マニュアル[4-1]解説編 3 章に解説がある。

(2) 放射性同位元素の線量率定数及び遮蔽体の線量透過率を用いる方法

放射能  $S$  (MBq)の放射性同位元素の実効線量率定数  $\Gamma_E$  ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2\cdot\text{MBq}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ )、及び放射性同位元素の厚さ  $t$  (m)の遮蔽体に対する実効線量透過率  $F_a$  を用いて、放射性同位元素から  $r$  (m)離れた所に在る厚さ  $t$  (m)の遮蔽体を透過した後の実効線量率  $D_{RI}(S, t, r)$  ( $\mu\text{Sv/h}$ )は(4-4)式で求められる。パラメータ及び変数の単位に注意する。

$$D_{RI}(S, t, r) = S \cdot \Gamma_E \cdot (r + t)^{-2} \cdot F_a(t) \quad (4-4)$$

実効線量率定数  $\Gamma_E$  は、線源 1 MBq の放射性同位元素から放出される全ての放射線による、遮蔽体が無い場合の線源から 1 m の位置で規格化した実効線量率を表す。遮蔽体が無い空間で、放射性同位元素から任意の距離離れた場所の実効線量率を求めるのに便利な定数である。

放射性同位元素の遮蔽体に対する実効線量透過率  $F_a(t)$  とは、遮蔽体が無い場合の実効線量に対する、厚さ  $t$  の遮蔽体がある場合の実効線量の比を表す。(4-4)式から分かるように、放射性同位元素から距離  $r$  離れた位置に在る厚さ  $t$  の遮蔽体を透過した後の実効線量を、放射性同位元素から遮蔽体を置かずに距離  $(r + t)$  離れた場所の実効線量で除した値に相当する。放射性同位元素から遮蔽体を挟んで任意の距離離れた場所の実効線量率を求めるのに便利な定数である。

以降、説明の便宜を図るために、これら 2 種類の定数、すなわち放射性同位元素の実効線量率定数及び遮蔽体の実効線量透過率を指して遮蔽計算用定数と呼ぶ。現行法令に基づく遮蔽計算用定数は、代表的な放射性同位元素に対してデータ集[4-3, 4-4]で与えられている。一方、2007 年勧告等に基づく遮蔽計算用定数を得るには、今回の見直しで整備したデータを用いて計算し直す必要がある (5.5 節参照)。

遮蔽計算用定数は、上記「(1) 線量ビルドアップ係数を用いる計算法」で示した(4-2)式を参照して、(4-5)式及び(4-6)式で求められる。

$$\Gamma_E = D_{RI}(1 \times 10^6, 0, 100) \times 10^{-6} \times 3600 \quad (4-5)$$

$$F_a(t) = \frac{D_{RI}(1 \times 10^6, 100t, 0) \times 10^{-6} \times 3600}{\Gamma_E} = \frac{D_{RI}(1 \times 10^6, 100t, 0)}{D_{RI}(1 \times 10^6, 0, 100)} \quad (4-6)$$

遮蔽計算用定数の計算に必要なデータは、(4-2)式同様、核壊変データ、遮蔽体に対する実効線量ビルドアップ係数及び減衰係数である。なお、今回見直したデータを用いて遮蔽計算用定数を求める場合、紙媒体を参照して手計算するより、むしろ計算機を使って計算コードで求めた方が効率的であり、また計算ミスも防げる。よって、本ガイドラインでは、遮蔽計算コードを用いた遮蔽計算用定数の計算の仕方についてガイドを与え

ることとした (4.4 節参照)。

(3) 単色光子に対する遮蔽体の線量透過率及び光子の線量換算係数を用いる方法

遮蔽体の実効線量透過率データは、放射性同位元素に対してだけではなく、点等方線源を仮定した単色光子に対しても与えられる[4-3]。エネルギー  $e$  (MeV) の単色光子に対する厚さ  $t$  (cm) の遮蔽体の実効線量透過率  $F_{mono}(e, t)$  は、(4-1)式を用いて次のように求められる。

$$F_{mono}(e, t) = \frac{D_{mono}(e, t, 0)}{D_{mono}(e, 0, t)} \quad (4-7)$$

単色光子の線量透過率を用いて、線源強度  $S$  (Bq) の放射性同位元素が放出する全ての光子が遮蔽体を透過した後の実効線量率  $D_{RI}(S, t, r)$  (pSv/sec) は、(4-8)式で求められる。

$$D_{RI}(S, t, r) = \sum_{k \leq N} S \cdot R_k \cdot \frac{1}{4\pi(r+t)^2} \cdot E/\Phi(e_k) \cdot F_{mono}(e_k, t) \quad (4-8)$$

$r$  : 放射性同位元素 (線源) から遮蔽体までの距離 (cm)

$t$  : 遮蔽体の厚さ (cm)

$E/\Phi(e)$  : 光子エネルギー  $e$  のフルエンス率 ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) 当たりの実効線量換算係数 ( $\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$ )

$N$  : 放射性同位元素が放出する単色光子のエネルギー総数

$e_k$  :  $k$  番目に放出される光子エネルギー (MeV)

$R_k$  :  $k$  番目に放出される光子の壊変当たり放出数

また、放射線発生装置の放出する連続エネルギーをもつ光子の場合でも、(4-3)式のところで示したエネルギー群による離散化の考え方にしたがって、単色光子の線量透過率を用いた遮蔽計算が可能である。

## 4. 2. 遮蔽計算法の見直し事項

### 4. 2. 1. ICRP レポートに基づく見直し事項

今回の見直しでは、放射性同位元素の線源となる核壊変データについて、現行のデータ集[4-3,4-4]でも採用されている ICRP 107 に基づく改訂に対応した (2.6 節参照)。ICRP 107 の核壊変データの特徴は、紙媒体よりむしろ付属 CD を通じた計算機による利用を前提としているため、放射線のエネルギーと放出率の数を絞っていないことである。その結果、以前の ICRP 38 の掲載データと比べて放射線の数が増加しており、同じ放射性同位元素であっても線量計算の結果に影響することが考えられる。よって、異なるデータ集から引用した遮蔽計算用データ又は遮蔽計算用定数を用いた計算結果の比較には注意が必要である。

次に、今回の見直しでは、2007 年勧告等を踏まえた国内法令の改定に備えて、ICRP 116 に基づく外部被ばく線量換算係数の改訂に対応した。図 4-1 に、AP 照射を例に、今回の ICRP 116 及び現行の ICRP 74 に示された光子の実効線量換算係数のエネルギー変化及び両者の比を示す。両者で差が現れるエネルギー領域は、約 100 keV 以下又は約 3 MeV 以上である。約 100 keV 以下では ICRP 116 の方が ICRP 74 より高く、エネルギーが低くなるにつれて差が拡がり 10 keV で 40%程高くなる。約 3 MeV 以上では逆に ICRP 116 の方が ICRP 74 より低く、エネルギーが高くなるにつれて差が拡がり 10 MeV で 15%程低くなる。なお、ICRP 74 には 10MeV を超える光子の線量換算係数は示されていない。この線量換算係数の差が遮蔽計算に与える影響については、5.4.1 項で後述する。

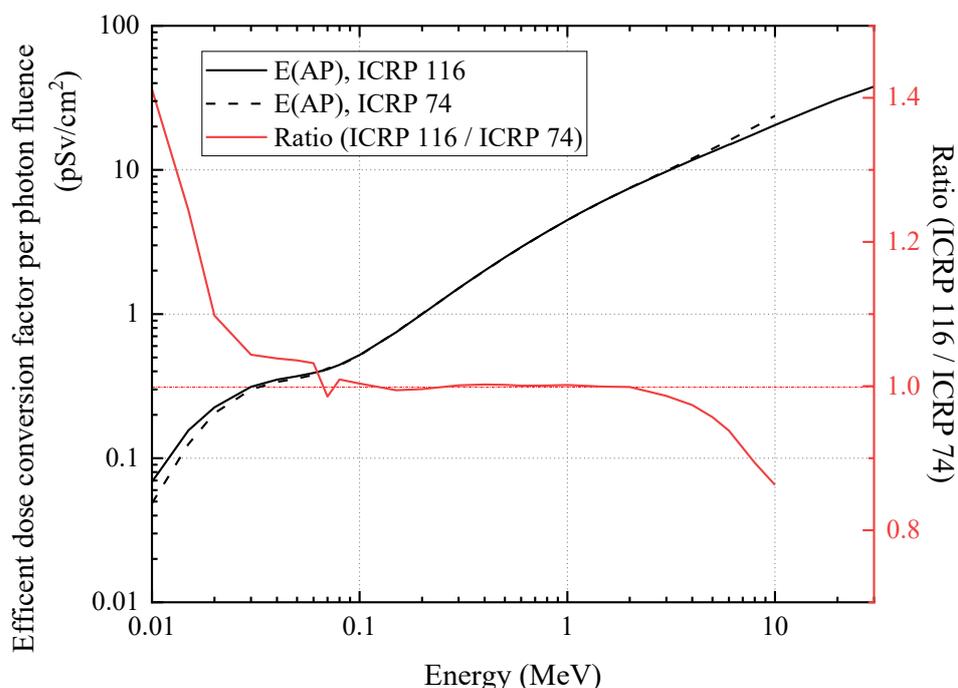


図 4-1 光子フルエンス当たりの実効線量換算係数 (AP 照射) のエネルギー変化

以下、今回の見直しで計算できるようにした線量種類について（表 4-2 参照）、概要及び線量換算係数の改訂との関係を述べる。

放射線施設の遮蔽評価で用いられる線量種類は基本的に実効線量である。実効線量換算係数として、全身に対する 6 種類の照射条件毎に、高エネルギー領域までエネルギー依存の値が示された（2.4 節参照）。図 4-2 に、そのうち 3 種類の照射条件に対する光子フルエンス率当たりの実効線量換算係数のエネルギー変化を示す。6 MeV 近辺までは AP が最も高いが、それを超えると PA の方が高くなり、更に 80 MeV 近辺より上では ISO が最も高くなる。一般に、放射性同位元素を取り扱う施設において 6 MeV を超える光子を扱うケースは考えにくいため、安全側の評価を得るために AP の換算係数の使用が適当と考えられる。一方、更に高エネルギーの放射線を発生する放射線発生装置を設置する施設の場合は、AP 以外の換算係数を使う方が AP よりも高い線量値を与えるケースも想定されるため（5.4.3 項参照）、状況に応じて適切な照射条件の換算係数を使った線量評価が必要である。よって、今回の見直しでは 6 種類全ての照射条件に対する遮蔽計算用データを整備し、任意の照射条件の実効線量を計算できるようにした。それによって照射条件の異なる実効線量の値を比較できるようになる（5.4.3 参照）。光子エネルギーの上限は、医療用リニアック等を十分に包絡し得る 30 MeV とした。

次に、皮膚又は眼の水晶体の局所被ばく管理に用いられる線量種類は等価線量である。ICRP 116 で皮膚（男女）及び眼の水晶体の吸収線量換算係数が改訂されたことから、それらの遮蔽計算用データを整備して等価線量を計算できるようにした。ただし、放射線施設の遮蔽評価で必要とされる線量種類ではないため、代表的に AP 照射条件にのみ対応した。

また、測定の用途では昨今、照射線量に代わって空気カーマが多く用いられるようになってきている。そこで空気カーマを 10 MeV まで計算できるようにした。なお、計算に用いたフルエンス当たりの空気カーマ換算係数は 1990 年勧告ベースの ICRP 74 で示された値を使用しており、今回の見直しの対象ではない。

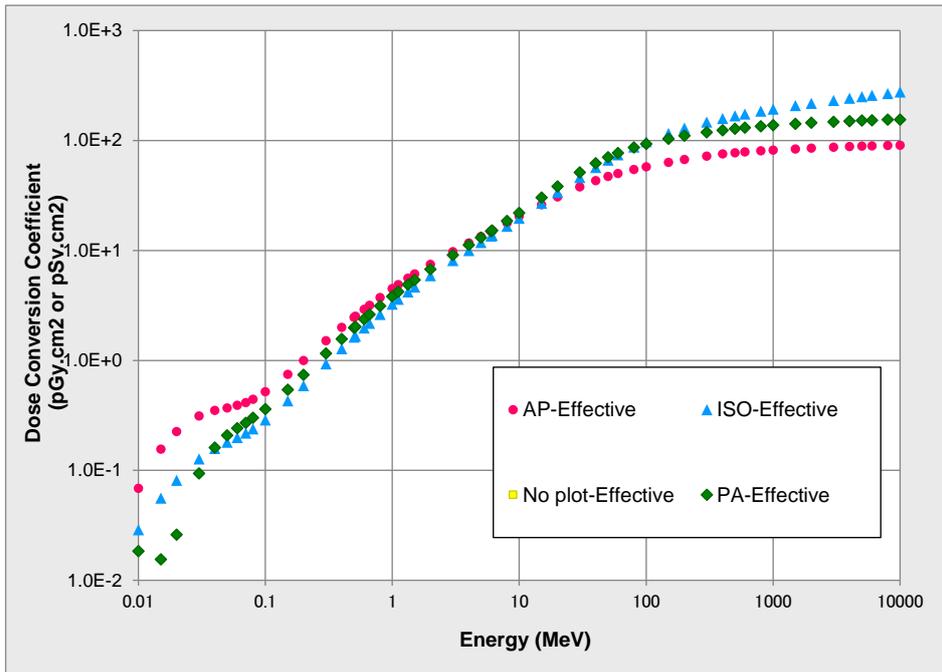


図 4-2 各照射条件に対する光子フルエンス当たりの実効線量換算係数 [ICRP 116]

最後に、次の実用量に対するフルエンス当たりの換算係数を整備して、実用量を計算できるようにした。なお、実用量は直接測ることのできない防護量の安全側指標を与えるものであり、一般に測定器から得られる量である。一方、施設の遮蔽設計において線量限度との比較に用いる量は防護量であり、実用量の計算値を代わりに用いることのないように注意する。

- 場所の測定に係る周辺線量当量（1 cm 線量当量、 $H^*(10)$ ）
- 個人被ばくの測定に係る個人線量当量（3 mm 線量当量、 $H_p(3)$ ）

1 cm 線量当量の計算値は、サーベイメータや線量計の測定値が、実効線量を適切に反映しているかどうか予測するための参考になる（5.4.3 項参照）。特に高エネルギーの場合、測定器のレスポンス関数のフィッティングを行っており、対応する範囲の実用量を計算で求めておくことが安全確認の面で必要とされる。

$H_p(3)$ については、国内法令の改定との関係を次項で述べる。

#### 4. 2. 2. 国内法令に基づく見直し事項

新しい眼の水晶体の等価線量限度が国内法令に取り入れられ、職業被ばくに係る眼の水晶体の等価線量限度が実質的に引き下げられて実効線量と同じ基準に変更された(2.5節参照)。図4-3に、光子フルエンス当たりの実効線量と眼の水晶体等価線量の換算係数のエネルギー変化を示す。1.5 MeVを下回ると、同じエネルギーフルエンスでも眼の水晶体の等価線量の方が実効線量より高くなるため、全身被ばくだけでなく、眼の水晶体も個別に線量管理することが必要になる。眼の水晶体の等価線量の算定については、日本保健物理学会のガイドラインに次のように記載されている[4-5]。

- 眼の水晶体の等価線量の算定に用いる実用量は  $H_p(3)$  である。しかしながら以下の場合を除いて、眼の水晶体の等価線量を過小に算定しない場合には従来の  $H_p(10)$  又は  $H_p(0.07)$  のいずれかの値の高い方を眼の水晶体の等価線量としてもよい。
  - 眼の水晶体の等価線量が管理基準に近づく、又は超えるおそれがある場合
  - 上述の場合以外で、より正確に眼の水晶体の等価線量を算定する場合

また、眼の水晶体等価線量が管理基準に近づく、又は超えるおそれがあるかどうかについては、作業に伴う線量評価を事前に行う必要があるとしており、その判断方法の一つとしてシミュレーション計算による評価が示されている。

以上を踏まえて、今回の見直しにおいては、眼の水晶体等価線量とともに、これまで取り上げられることのあまりなかった  $H_p(3)$  を新たに計算で出力できるようにした。ただし、本ガイドラインで示した簡易遮蔽計算法は、眼の特定部位を通過する放射線の正確な線量評価に適さないおそれがあるため、あくまで一つの参考値である。最後に、医療分野において眼の水晶体等価線量を評価するために  $H_p(3)$  の測定を要するケースは、特殊な作業をする場合を除いて想定し難いことを指摘しておく。

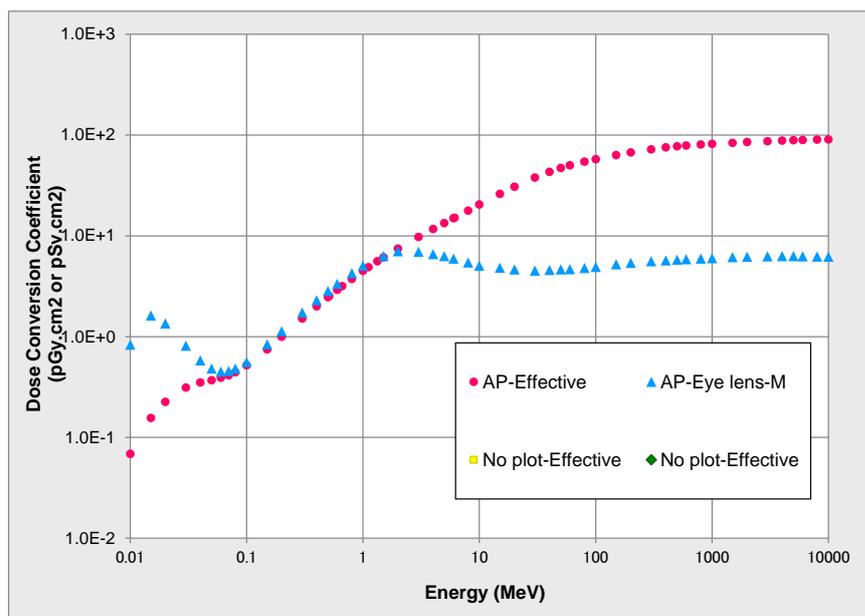


図4-3 光子フルエンス当たり実効線量及び眼の水晶体等価線量の換算係数 [ICRP 116]

#### 4. 2. 3. 最新の研究に基づく見直し事項

表 4-4 に、最新の研究に基づく見直し事項の一覧を示す。同表の最下行に示した薄い遮蔽体の線量計算とは、0.5 mfp (mean free path、平均自由行程<sup>※8</sup>) のビルドアップ係数をデータに追加して、1 mfp 未満の薄い遮蔽でも近似的に線量計算ができるように拡張したことを指す[4-6]。光子に対して薄い遮蔽は一般に無視されるが、1 mfp 未満でもエネルギーや材料によってかなりの厚さになるため、遮蔽効果を議論するケースも考えられる。以下、その他の見直し項目について要点を述べる。

表 4-4 最新の研究に基づく見直し事項の一覧

	見直し項目	概要
光子の遮蔽計算用データ	干渉性散乱の考慮	・光子の相互作用として、従来の3種(光電、コンプトン散乱、電子対生成)に加えて、干渉性散乱(レイリー散乱)を考慮
	高エネルギーへの拡張	・放射線発生装置の使用施設への適用を考慮して、エネルギー範囲の上限を従来の10 MeV から、30 MeV へ拡張 ・光核反応による光中性子及び二次光子を考慮 ・電子輸送を考慮
光子の遮蔽計算法の拡張	二重層遮蔽の線量計算	構造材と遮蔽材の組合せ又は異なる線種やエネルギーの放射線を効率的に減衰させる目的で用いられる二重層遮蔽体系の線量計算
	スラブ遮蔽の斜め透過線量補正	線源位置と線量評価点を結ぶ透過線が、スラブ遮蔽体を垂直ではなく、斜めに通る場合の線量計算
	薄い遮蔽体の線量計算	厚さ1 mfp 未満の薄い遮蔽体に対する線量計算

##### 4. 2. 3. 1. 干渉性散乱の考慮

干渉性(coherent)散乱とは、レイリー(Rayleigh)散乱とも呼ばれ、光子と個々の電子の散乱ではなく、原子に在る電子を集散的にみたときの散乱を指す。干渉性散乱の反応断面積は光電効果のそれよりも一般に小さく、またエネルギーと進行方向に僅かな影響しか与えないため、遮蔽計算では干渉性散乱を無視するのが通例であった。

一方、放射線輸送計算の進展に伴い干渉性散乱を考慮した遮蔽計算ができるようになり、遮蔽計算でも稀に干渉性散乱を考慮する必要のあることが指摘された[4-7]。近年、MC法コードによって相互作用を全て含めた放射線輸送計算が可能になったことを踏

<sup>※8</sup> 放射線の粒子が、他の粒子と衝突することなく進むことのできる距離(自由行程)の平均値を指す。

まえて、今回の見直しでは MC 法コードを用いて遮蔽計算用データの整備を行った。光子の全断面積データには、遮蔽で従来考慮していた 3 種の相互作用（光電効果  $ph$ 、コンプトン散乱  $c$ 、電子対生成  $pp$ ）に加えて、干渉性散乱  $coh$  の断面積が含まれる。光子の減衰係数  $\mu$  は(4-9)式によって表され、従来の減衰係数と比べて干渉性散乱の効果の分だけ差異が現れる。

$$\mu(E) = \mu_{ph}(E) + \mu_c(E) + \mu_{pp}(E) + \mu_{coh}(E) \quad (4-9)$$

図 4-4 に、鉄の質量減衰係数を、今回の干渉性散乱を考慮した値 (JPKG2022)と、従来の干渉性散乱を考慮しない値 (QAD-IE)とで比較する。今回の値の従来の値に対する比 (JPKG2022/QAD-IE)は 1 MeV 未満の領域で差を生じ、特に低エネルギー部で顕著になり 100 keV 近辺にピークが現れて今回の値の方が 8%程高くなる。

なお、減衰係数は、遮蔽計算において直接線（又は非散乱線）の線量計算に用いられる。よって、遮蔽計算の結果の線量値が同じであっても、減衰係数の値が従来から変わると自動的にビルドアップ係数の値も変わることになる。今回整備した遮蔽計算用データの値を、別のデータ集に掲載された値と比較する場合にはこの点に留意する。

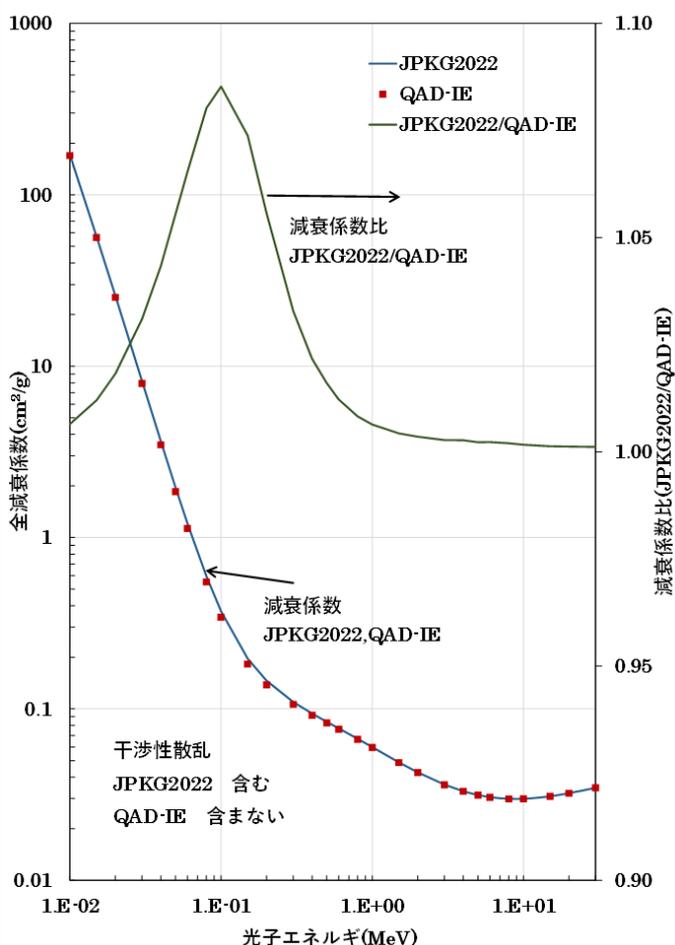


図 4-4 干渉性散乱の有無による質量減衰係数のエネルギー変化の比較（鉄の例）

干渉性散乱の影響として、主に原子番号中以上の遮蔽材に対して、低エネルギー部で線量差を生ずる特徴がある。図 4-5 に、鉄球の中心に光子線源を置いたときの遮蔽厚さによる線量減衰の変化を干渉性散乱の有無で比較する。線源エネルギー 100 keV の場合、遮蔽厚さが増えるにつれて線量差が徐々に開き、干渉性散乱を考慮した場合、考慮しない場合と比べて 10 cm で 6 割、20 cm で 2 割程度に減少する。一方で 1 MeV の場合、干渉性散乱の影響は殆ど見られない。

干渉性散乱の影響は概して遮蔽線量を減らす方向に働くことから、大抵の場合、干渉性散乱を考慮しない従来計算値の方が安全側の評価を与える。ただし、今回の見直しでは干渉性散乱だけでなく、例えば光子線量換算係数も従来と異なるため（4.2.1 節参照）、今回整備した遮蔽計算用データを用いた計算値は、従来計算値と単純に比べられないことを指摘しておく。

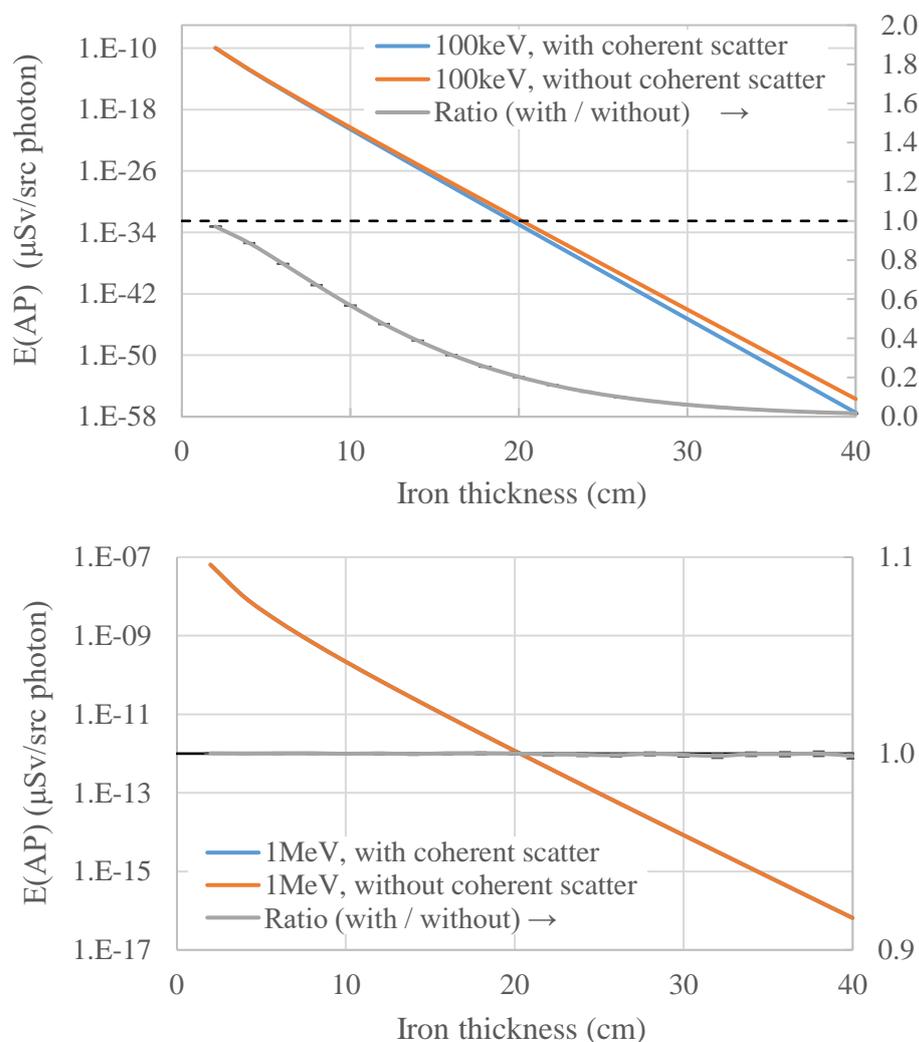


図 4-5 干渉性散乱が遮蔽線量に与える影響の例（鉄遮蔽、上：100 keV、下：1 MeV）

#### 4. 2. 3. 2. 高エネルギーへの拡張

今回の見直しにおいては、放射線発生装置を使用する施設で発生する高エネルギーの制動 X 線による遮蔽計算に対応するために、線源エネルギー範囲の上限を従来の 10 MeV から 30 MeV へ拡張した。そこで MC 法コードを用いて電子輸送及び光核反応を考慮した精密な遮蔽計算を行うとともに、一次光子に加えて、光中性子及びその捕獲で生ずる二次光子の線量寄与を分けて計算できるようにした。

図 4-6 に、代表的な遮蔽材の光中性子発生量の目安を線量変化で示す。光核反応にはしきいエネルギー値があり、例えばコンクリートやポリエチレンに含まれる重水素の場合、2.2 MeV 辺りから光中性子を発生するが、発生量は少なく光子と比べて線量が有意になるケースは考えにくい。一方、コンクリートに含まれるシリコン及びカルシウム並びに鉄及び鉛の場合、6.5~8.5 MeV から光中性子を発生し、エネルギーとともに発生量が増加して 15~25 MeV 辺りにピークが現れる。また 15 MeV 辺りまでは同じエネルギーなら原子番号が高い方が発生量の多い傾向にある。そうした遮蔽材を用いる場合、エネルギーや遮蔽厚さによっては光核反応の影響を無視できないケースがある。光核反応の考慮が遮蔽計算に与える影響については 5.4.2 項にまとめて示す。

従来のデータを用いた遮蔽計算の注意として、従来のビルドアップ係数データは 10 ~15 MeV まで整備されているが、光核反応を考慮していないため、光中性子による線量の分だけ計算値が過小評価となるおそれがある。ただし、放射性同位元素を線源とする場合、重水素を除いて光核反応のしきいエネルギー値を超えるほど高いエネルギーの光子を扱う例は限られており、過小評価を懸念するような実際的なケース<sup>※9</sup>は殆ど無い。

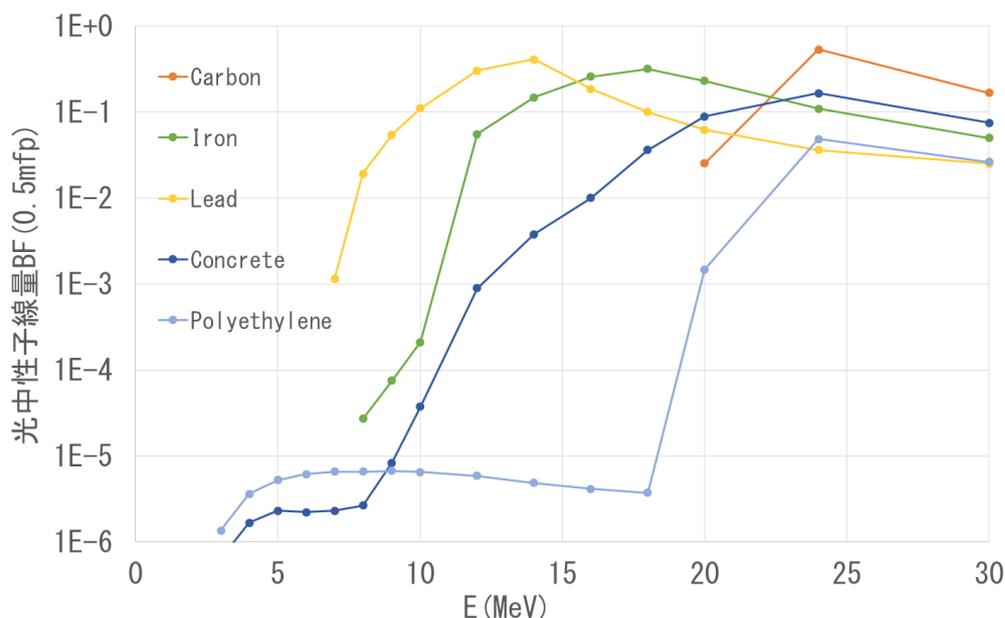


図 4-6 遮蔽材の光核反応で発生する光中性子の線源エネルギーによる線量変化

<sup>※9</sup> 例外として、高エネルギー光子を放出する短寿命核種の  $^{16}\text{N}$  等がある。

#### 4. 2. 3. 3. 二重層遮蔽の線量計算

異なる線種やエネルギーの放射線を効率よく減衰させるため、遮蔽設計においては異なる材料を層状に重ねた多重層遮蔽が現れる。多重層遮蔽の簡易線量計算法はかつてよく研究されたが、現在も簡易計算モデルで系統的に扱う方法は確立されていない。遮蔽計算実務マニュアル[4-1]に紹介された最外層法等の適用性は限られている。

図 4-7 に二重層遮蔽の概念図を示す。二重層遮蔽のスラブを基本的に想定し、線源と線量評価点を結ぶ透過線がスラブを垂直に横切る状況を想定する。二重層のうち、線源側を第 1 層、線量評価点側を第 2 層と呼ぶ。今回の見直しでは、二重層の線量計算を実施するために、第 2 層中の厚さによる線量減衰カーブを多項式で直接的にフィッティングする手法を提案した[4-8, 4-9]。

具体的には、第 2 層中の線量分布を計算して一次光子（線源光子）、光中性子、及び中性子捕獲による二次光子の線量寄与に大きく分け、各々の線量減衰カーブを一次光子の直接線量で規格化してから三次多項式でフィッティングする。このフィッティングを、線源光子エネルギー及び第 1 層厚さを変えて計算した線量減衰カーブに対して実施し、多項式の係数パラメータをデータ整備した。二重層遮蔽の線量計算を実施する場合は、指定した線源光子エネルギー及び第 1 層厚さに対する係数パラメータを用いて、第 2 層中の線量減衰カーブを多項式で再現し、指定した第 2 層厚さでの一次光子、光中性子及び二次光子の線量寄与を求めて総和する。

公募研究では、(コンクリート、鉄)、(ポリエチレン、鉄)、(ポリエチレン、鉛) 及び (コンクリート、鉛) の材料組合せに対して、第 1 層厚さとしてコンクリートは 100 cm まで、ポリエチレン、鉄及び鉛は 40 cm まで、実効線量 E(AP) を求めるためのデータを整備した。手法及びデータの詳細については別稿を参照されたい[4-9]。

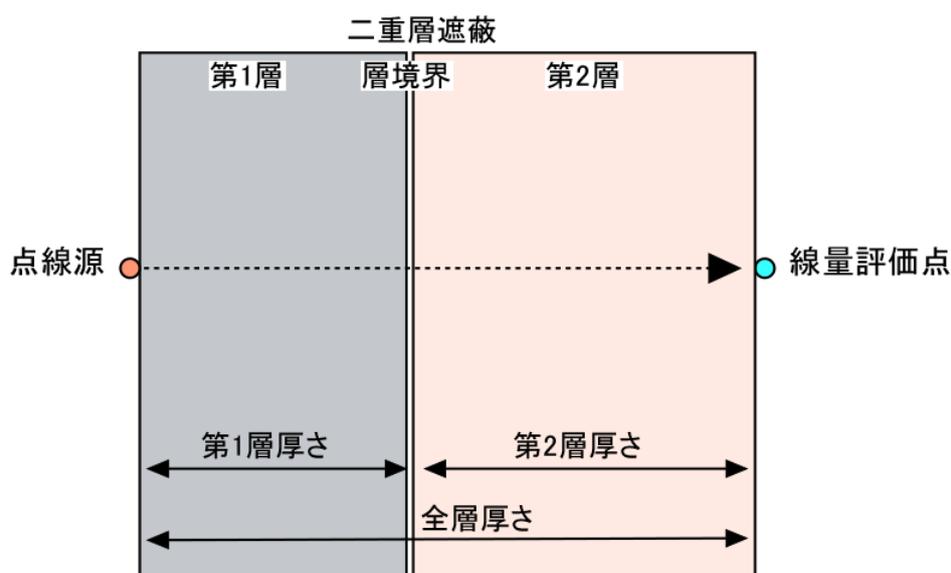


図 4-7 二重層遮蔽の概念図

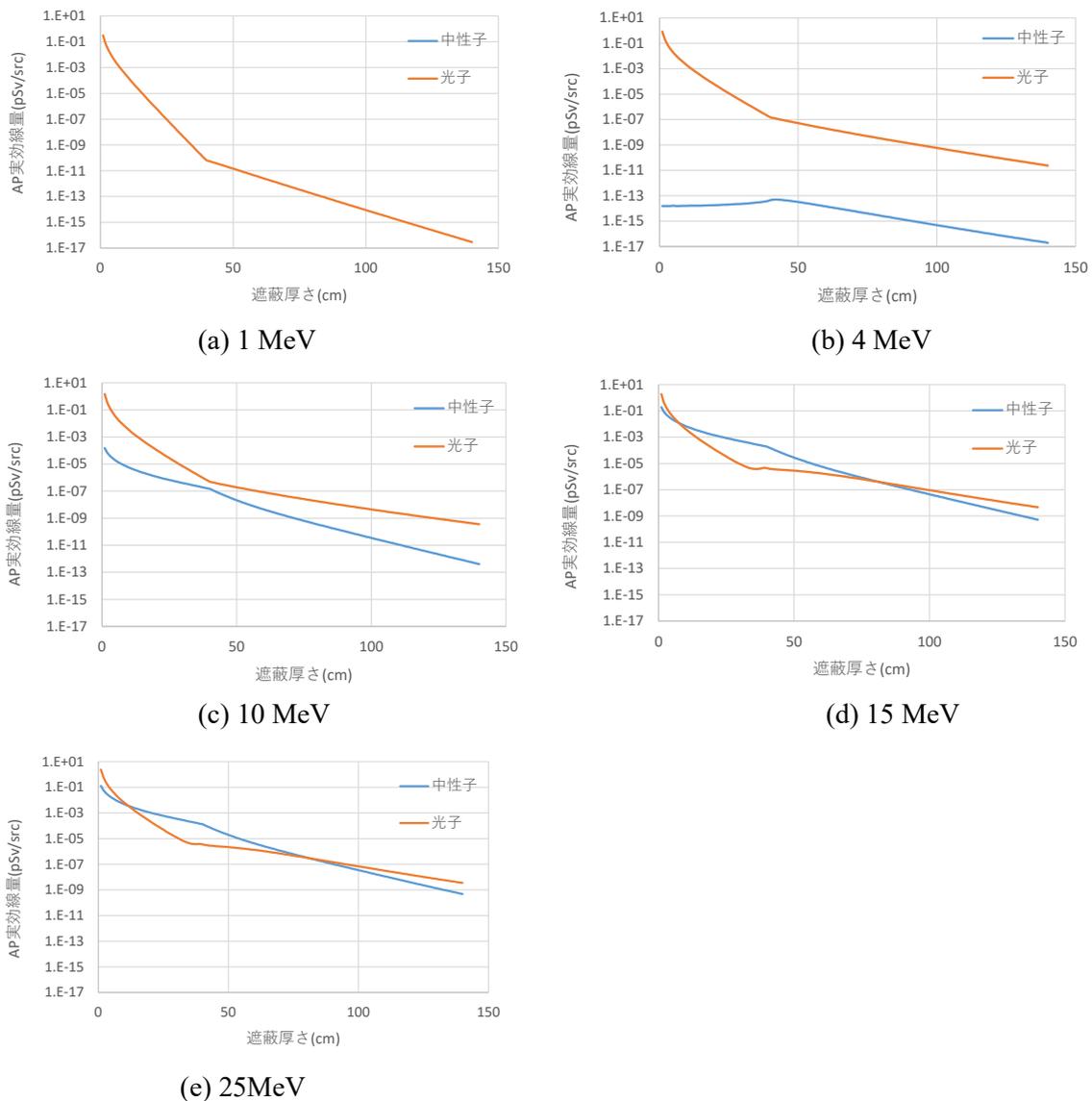


図 4-8 異なる光子エネルギーに対する二重層遮蔽の透過線量分布（第 1 層：鉄 40 cm、第 2 層：コンクリート 100 cm の例）

ここでは、放射線発生装置に対する遮蔽設計の参考として、鉄とコンクリートの二重層遮蔽を例に、線源エネルギーによる線量分布の変化及び線量管理の考慮について述べる [4-9]。図 4-8 に、第 1 層に鉄 40 cm、第 2 層にコンクリート 100 cm とした場合の異なる線源エネルギーに対する透過線量分布を示す。(a) 1 MeV では光子の線量変化のみが観察される。(b) 4 MeV から第 2 層コンクリートの重水素の光核反応で発生する光中性子の寄与が現れ、その散乱による影響が第 1 層側にも観察されるが、いずれも光子線量と比べて無視できるレベルである。(c) 10 MeV になると、第 1 層の鉄で光中性子が発生し始めて層境界の辺りで光子線量に接近するが、全体的にはまだ光子の線量が支配的である。

更に高い(d) 15 MeV の場合、鉄中の光中性子の発生量が格段に多くなり、第1層 10 cm 辺りから中性子の線量寄与が光子より明らかに高くなる。第2層に入るとコンクリートの水素で中性子の減衰が観察されるが、今度は中性子捕獲による二次光子の寄与が顕著になり 80 cm 辺りで再び光子の線量寄与が中性子より高くなる。このように、高エネルギー施設では条件によって光子と中性子の線量寄与が複雑に変化するため、放射線の種類及びエネルギーを適切に考慮した測定に基づく線量管理が不可欠である。

なお、(e) 25 MeV の線量変化は(d) 15 MeV と比べて殆ど変わらない。鉄の光中性子発生量は 8 MeV から 12 MeV 辺りまで急激に増加し、それを超えると比較的フラットになるためである (図 4-6 参照)。よって、この材料の組合せの場合、第1層厚さにもよるが、15 MeV を超えるエネルギーの第2層の線量変化は 15 MeV のそれで代表可能である。

#### 4. 2. 3. 4. スラブ遮蔽体の斜め透過による線量補正

図 4-9 にスラブ遮蔽の垂直透過及び斜め透過の概念図を示す。簡易遮蔽計算は理論的に、線源と線量評価点を結ぶ透過線がスラブ遮蔽体を垂直に通る場合に対応する。一方、実際の遮蔽設計では透過線がスラブ遮蔽を斜めに横切る配置が現れることがあり、それに対して線量計算の結果が安全側になるように線源又は評価点の位置を適当にずらす措置が施されてきた。しかし、こうした修正措置による線量への影響は不明であり、正当な評価の妨げになっていた。今回の見直しでは、斜め透過のままでも正確な簡易遮蔽計算ができるように、斜め透過に対して垂直透過による線量を補正する方法を提案した [4-9, 4-10]。

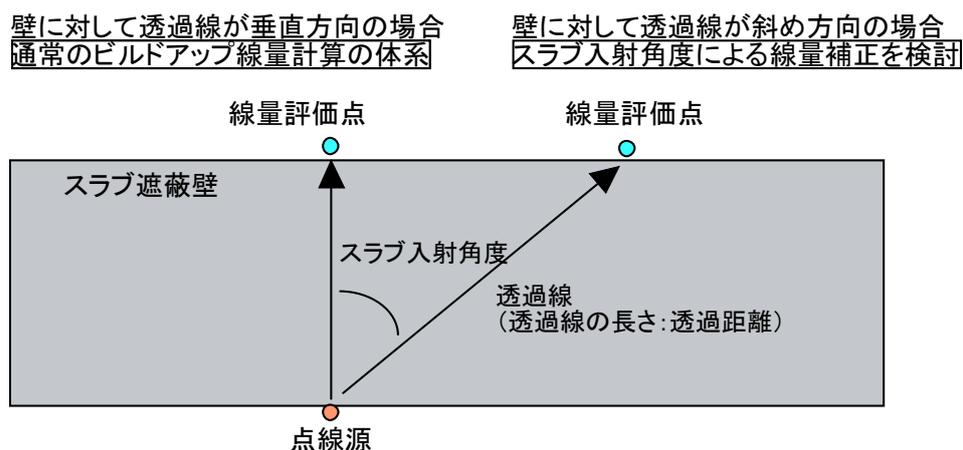


図 4-9 スラブ遮蔽の垂直透過及び斜め透過の概念図

斜め透過の遮蔽体系を表すパラメータは基本的に次の三種類である。

- ・線源光子エネルギー
- ・スラブ遮蔽体に対する透過線の入射角度
- ・スラブ遮蔽体内を通過する透過線の（直線）距離

ここで誤解を避けるために、スラブ斜め透過における入射角度と透過距離について定義を図説する（図 4-10）。透過距離とはスラブ内を横切る透過線の長さを指し、また入射角度とは水平にしたスラブを斜めに傾けたときの上面又は下面の水平面に対する角度を指す。(a)は垂直透過で理想的な簡易遮蔽計算の体系を表し、(b)及び(c)は斜め透過を表す。(a)、(b)、及び(c)の透過線はそれぞれスラブに対して異なる入射角度をもつが、透過距離は全て同じである。ただし斜めにした分だけスラブの厚さが薄くなることに注意する。スラブの厚さではなく透過距離の方をパラメータに選んだ理由は、一般に計算コードでは遮蔽体の形状によらず、透過距離を幾何的に算出して遮蔽計算に用いるためである。

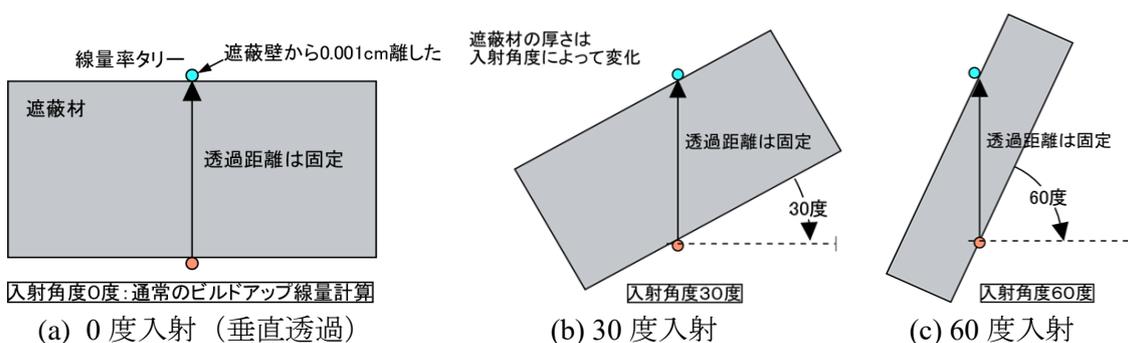
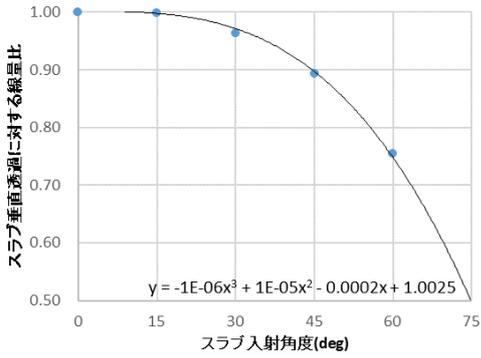
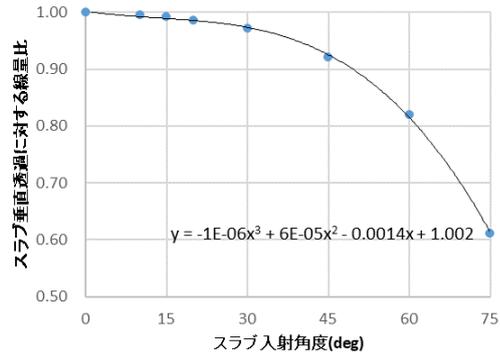


図 4-10 スラブ斜め透過問題の入射角度及び透過距離の定義

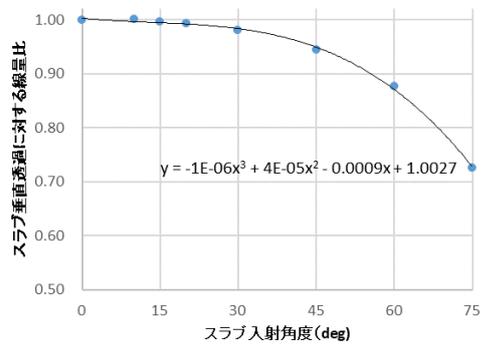
コンクリートスラブの例を用いて、パラメータを変えたときのスラブ斜め透過の線量変化の特徴について述べる。図 4-11 に、コンクリートスラブで透過距離 32 cm に固定して、入射角度を変えたときの垂直透過に対する線量比の変化を示す。(a)、(b)、(c)、(d)、(f)は 0.5、1、4、15、25 MeV の線源光子による変化をそれぞれ表す。一方、(e)及び(g)は 15 MeV 及び 25 MeV の線源光子の光核反応で生じた光中性子による変化をそれぞれ表す。いずれのケースも入射角度が大きくなるにつれて、線量比は 1 から指数的に減少する。光子の場合、(b) 1 MeV の 60 度で約 2 割減少するが、線源エネルギーが高くなるにつれて減少の割合は緩やかになり、(d) 15 MeV 光子の 60 度では殆ど減少しなくなる。(f) 25 MeV の線量比カーブは、(d) 15 MeV のそれと全体的にほぼ一致する。一方、光中性子の場合、入射角度による線量比の減少の割合は光子と比べてかなり大きく、(e) 15 MeV の 60 度で約 3 割減少する。また、光子同様、(g) 25 MeV の線量比カーブも(e) 15 MeV のそれとほぼ一致する。よって、コンクリートの場合、15 MeV を超えるエネルギーの線量比カーブは、光子、光中性子ともに 15 MeV のそれで代表可能である。



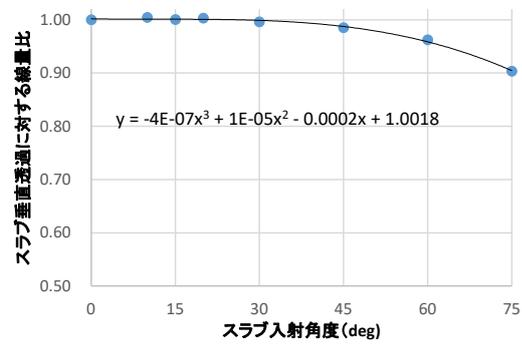
(a) 0.5 MeV 光子



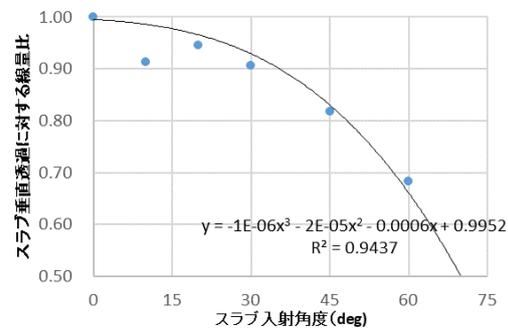
(b) 1 MeV 光子



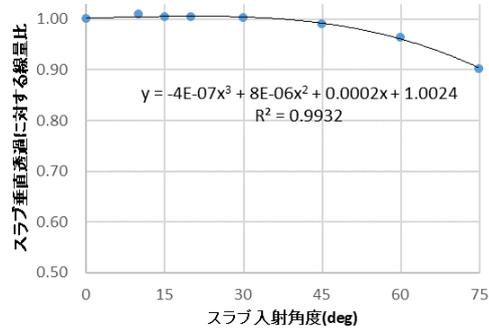
(c) 4 MeV 光子



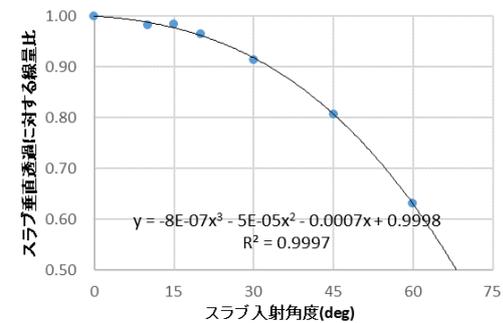
(d) 15 MeV 光子



(e) 15 MeV 光子による光中性子



(f) 25 MeV 光子



(g) 25 MeV 光子による光中性子

図4-11 コンクリートスラブの入射角度による線量比の変化(線源エネルギー: 0.5~25 MeV、透過距離 32 cm 固定)

今回の見直しでは、二重層の線量計算を実施するために、第2層中の厚さによる線量減衰カーブを多項式で直接的にフィッティングする手法を提案した[4-8, 4-9]。

斜め透過の線量補正に用いるデータは、基本的に図 4-11 に示した入射角度に対する線量比カーブを三次多項式でフィッティングした係数パラメータである。図 4-11 の各グラフ中に挿入した多項式は実際にフィッティングした例である。このフィッティングを、線源光子エネルギー及び透過距離を変えて計算した線量比カーブに対して実施し、多項式の係数パラメータをデータ整備した。斜め透過の線量補正を行う場合は、指定した線源光子エネルギー及び透過距離に対する係数パラメータを用いて線量比カーブを表す多項式を再現し、その多項式から指定した入射角度に対する線量比を求める。そしてビルドアップ係数を用いて計算した垂直透過の線量に対して、その求めた線量比を乗ずる補正を行う。

公募研究では、鉄、鉛及びコンクリートのスラブ斜め透過で用いるデータを、入射角度 75 度まで、透過距離 32 cm (コンクリートは 64 cm) まで整備した。線量補正手法及びデータの詳細については別稿を参照されたい[4-9]。

#### 4. 3. 見直しで整備した簡易遮蔽計算で用いるデータの一覧

表 4-5 に、今回の見直しで整備した光子の簡易遮蔽計算で用いるデータの一覧を示す。比較のため、同じ用途で従来利用されてきた QAD-CGGP2R コード[4-11]の内蔵データの例を示す。

表 4-5 今回の見直しで整備した光子遮蔽計算で用いるデータの一覧

データ項目	概要
遮蔽体の材料及び厚さ	<p>13 種 (炭素、アルミ、鉄、銅、タングステン、鉛、大気、水、普通コンクリート、アクリル樹脂、ポリエチレン、ホウ珪酸ガラス、土壌)、0.5 ~80 mfp (mfp: 平均自由行程長)</p> <p>(QAD-CGGP2R の例) :</p> <p>単元素 23 種 (元素記号 : Be, B, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, Ar, K, Ca, Fe, Cu, Mo, Sn, La, Gd, W, Pb, U)、混合物 3 種 (水、コンクリート、空気)、0.5 ~40 mfp</p>
線量換算係数	<p>ICRP 116 ベース、10 keV~30 MeV (QAD-CGGP2R の例)</p> <p>ICRP 74 ベース、15 keV~15 MeV</p>
減衰係数	<p>XCOM ベース[4-12]、10 keV~30 MeV (QAD-CGGP2R の例)</p> <p>PHOTX ベース[4-13]、10 keV~30 MeV</p>
ビルドアップ係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 光電効果、コンプトン散乱、電子対生成、干渉性散乱を考慮</li> <li>・ 線量種類 : 実効線量 (6 種類全ての照射体系)、皮膚又は眼の水晶体等価線量、空気カーマ、1 cm 線量当量、3 mm 線量当量</li> <li>・ 点等方線源、無限球体系に対する最新の核データ[4-15] (光核反応[4-16]) を用いた MC 法コード[4-14]による放射線輸送計算に基づく。 (QAD-CGGP2R の例)</li> <li>・ 光電効果、コンプトン散乱、電子対生成を考慮</li> <li>・ 線量種類 : 実効線量 (前方-後方照射 AP のみ)、空気カーマ、1 cm 線量当量、照射線量、エネルギー吸収線量</li> <li>・ 点等方線源、無限球体系に対する決定論的な輸送計算に基づく。</li> </ul> <p>低原子番号 : モーメント法、高原子番号 : 直接積分法コード[4-17]</p>
二重層遮蔽計算用データ	<p>第 1 層及び第 2 層の材料の組合せ : (コンクリート、鉄)、(ポリエチレン、鉄)、(ポリエチレン、鉛)、(コンクリート、鉛)</p> <p>第 1 層厚さ : 40 cm (コンクリートは 100 cm) まで</p> <p>光子エネルギー : 30 MeV まで</p> <p>(QAD-CGGP2R は二重層遮蔽に対応していない)</p>
スラブ斜め透過用線量補正データ	<p>材料 : 鉄、鉛、コンクリート</p> <p>光子エネルギー : 30 MeV まで、スラブ入射角度 : 75 度まで、透過距離 : 32 cm (コンクリートは 64 cm) まで</p> <p>(QAD-CGGP2R はスラブ斜め透過に対応していない)</p>

#### 4. 4. 簡易遮蔽計算コードを用いた遮蔽計算の手順

本ガイドラインの作成に当たり、今回の見直しで整備した光子の遮蔽計算用データを使って、下記の目的に対して実際に遮蔽計算の実施が要求された。

- 外部被ばくに係る 2007 年勧告等のうち、特に線量換算係数の改訂が線量計算に与える影響を明らかにするため（5 章参照）。
- 既存施設で行われた遮蔽安全評価を見直す必要性を検討するため（4.5 節参照）。

結果的に、放射線施設で使用する線源は多種に及ぶこと、遮蔽体の材料及び形状も様々であることから、汎用性と使い勝手を重視した簡易遮蔽計算コードを新たに作成して計算することにした。同計算コードには、今回の見直しで整備した光子の遮蔽計算用データが内蔵されている。

新たに作成した簡易遮蔽計算コードの概要及び機能の紹介は別稿<sup>※10</sup>に譲ることとし、ここでは計算過程のイメージを伝えるために、同計算コードを用いた遮蔽計算の実施手順を例示する。次章で示される今回の見直しを踏まえた遮蔽計算の結果は、同計算コードを用いて再現することができる。

##### 4. 4. 1. 放射性同位元素を取り扱う施設

放射性同位元素を線源とする施設の遮蔽設計又は遮蔽線量評価は、一般に「放射性同位元素の線量率定数、及び遮蔽体の線量透過率を用いる方法」に基づいて実施される（4.1.2 項（2）参照）。2007 年勧告等に基づく遮蔽計算用定数は未だデータ集の形で公開されていないため、今回の見直しで整備した遮蔽計算用データを用いて計算し直す必要がある。付録-1 の 1 章で、例として  $^{192}\text{Ir}$  線源の実効線量率定数、及びコンクリート遮蔽の実効線量透過率の求め方を図説した。

一方、遮蔽計算用定数を用いずに、放射性同位元素の放出する光子の遮蔽計算用データ（ビルドアップ係数及び減衰係数）を用いて計算する方法もある（4.1.2 項（1）参照）。遮蔽計算用データは内容が豊富でボリュームがあるため、計算機を使って計算コードで計算するのが一般的である。その場合、線源や遮蔽の計算条件は図面通りに計算コードに入力する。付録-1 の 3 章で、簡易遮蔽計算コードの使用経験のある利用者向けに、実地的な図面を使って  $^{192}\text{Ir}$  線源の遮蔽計算を実施する手順を例示した。

##### 4. 4. 2. 放射線発生装置を使用する施設

X 線又は電子リニアック装置の遮蔽計算法として、遮蔽計算実務マニュアル[4-1]に、装置の使用線量及び電子線最大エネルギーに対する遮蔽体の実効線量透過率を用いる方

※10 簡易遮蔽計算コードに係る情報は、<http://pointkernel.com/> に登録されている。

法が記載されている（表 4-2 (2)、4.1.2 項 (2) 参照）。前項 4.4.1 の放射性同位元素を線源とする計算と同じ考え方にに基づき、装置の照射ヘッド部を一個の点線源と仮定した簡易計算モデルである。2007 年勧告等に基づく放射性発生装置の遮蔽計算用定数は未だ公刊されていないため、今回整備した遮蔽計算用データ又は簡易遮蔽計算コードを用いて計算し直す必要がある。付録-1 の 2 章で、遮蔽計算実務マニュアル記載の計算法を示し、その計算で使用する遮蔽体の実効線量透過率の求め方を図説した。

一方、遮蔽計算用定数を用いずに、簡易遮蔽計算コードに図面どおりに計算条件を入力して計算する方法もある。ただし、この場合は線源条件としてエネルギースペクトル及び強度を与えなければならない。付録-1 の 3 章で、放射線発生装置の線源設定の注意を与えるとともに、簡易遮蔽計算コードを用いて実際の施設の遮蔽計算を実施する手順を例示した。

以上、本ガイドラインでは、計算ミスの防止、作業の効率化・省力化の観点からも、計算コードを用いた遮蔽計算の実施を勧めているが、計算コードを用いずに手計算で実施することも可能である。その場合、今回整備した遮蔽計算用データを参照して、4.1.2 節に示した遮蔽計算法に従い、適切なデータを選択して計算しなければならない。遮蔽計算用データはフォーマット化された可読性の高いテキスト形式で電子ファイルに収録されている<sup>※11</sup>。

なお、初めに計算コードを用いて遮蔽計算を実施すると、その計算で使用したデータも同時に出力されるので、改めて手計算で結果を確認するのに便利である。計算コードの結果を自ら手計算で再確認するというセルフチェック又はセルフフィードバックの行為には、結果の信頼性を高め、それを納得して受け入れるという実務上の代えがたい意義がある。

---

※11 遮蔽計算用データの電子ファイルは、新たに作成した簡易遮蔽計算コードに内蔵されている。データ単体での配布等については、<http://pointkernti.com/> を参照されたい。

#### 4. 5. 計算値に基づく遮蔽安全評価の留意事項

今回見直しを行った遮蔽計算用データは、MC法コードによる遮蔽計算に基づいて整備された。MC法コードの計算値は、現在入手可能な最良推定値であり、簡易計算で用いる二次的なデータの作成で参照するのに好適である。よく使われる遮蔽材及びエネルギー領域の遮蔽計算については、MC法コードでヒストリ数を十分に多くとって統計誤差を減らすと核データをダイレクトに反映した良好な結果を得ることができる。ただし、MC法コードの結果は最良推定値であるがゆえに、計算値をそのまま設計又は安全評価で使用すると測定値よりも低くなる可能性がある。

そこで、遮蔽線量に係る法定要件を確実に遵守するため、計算値に適切な尤度（設計尤度又は安全尤度）を与えて保守的な評価を行う慣例がある。MC法コードの場合、計算値に対してファクター2程度の尤度を考慮することが一般的である。今回の見直しで整備した遮蔽計算用データはそうした尤度を含んでいないため、計算値に対してケースバイケースで尤度を検討する必要がある<sup>※12</sup>。特に、光核反応に係る遮蔽計算は測定に対して多少低い結果となる例があるため[4-18]、放射線発生装置の使用施設に対する計算では注意を要する。

尤度の決定には、計算法や核データの不確かさ以外にも、次のような遮蔽に係るリスク情報が参考になる。それらを用意深く検討し、安全側の計算条件に基づく設計及びリスクを合理的なレベルでカバーできる位の尤度設定を推奨する。

- ・ 計算モデルで考慮されていない（床・天井・壁・周辺物による）放射線の後方散乱や回り込み
- ・ 計算で使用する基礎データ（特に線量換算係数）の不確かさ
- ・ 長期供用期間中に想定される施設の経年変化、環境変化
- ・ 国内関係法令の改定（線量概念、限度値、基礎データの変更）
- ・ 評価の整合性を測定で確認する場合、（測定器、測定者及び測定環境の違いによる）測定値の不確かさ

---

<sup>※12</sup> 現状、光中性子及びその二次光子の線量寄与に対しては安全尤度を与えることを推奨する。なお、今回見直した遮蔽計算用データは一次光子、光中性子及び二次光子に分けて整備されており、簡易遮蔽計算コードにはそれぞれの線量寄与の計算値に対して、個別に指定した安全係数を乗ずる機能がある。

## 参考文献

- [4-1] 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 2015 (2015).
- [4-2] ICRP, Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations, ICRP Publication 107, Ann. ICRP 38 (3) (2008).
- [4-3] 原子力安全技術センター, 放射線施設の遮蔽計算実務データ集 2015 (2015).
- [4-4] 日本アイソトープ協会, アイソトープ手帳 12 版 (2020).
- [4-5] 日本保健物理学会, 眼の水晶体の線量モニタリングのガイドライン (2020 年 7 月, 2021 年 6 月修正), Jpn. J. Health Phys., 56 (3), 179-257 (2021).
- [4-6] 吉田, 山口, ガンマ線遮へい計算コード QAD の改良, 日本原子力学会 2006 年秋の大会予稿集 E57 (2006).
- [4-7] D.K.Trubey and Y.Harima, Topical Conf. on Theory and Practices for Radiation Protection and Shielding, PR & S Division and Oak Ridge/Knoxville Section of ANS 503, April (1987).
- [4-8] 平尾, 大西, 佐藤,  $\gamma$  線簡易遮蔽線量計算法の適切な見直しに関する研究—二重層遮蔽線量計算の再評価—, 日本原子力学会 2022 年春の年会, 1B12 (2022).
- [4-9] 日本原子力学会放射線工学部会, 令和三年度簡易遮蔽計算コードレビューワーキンググループ活動報告書, [http://www.aesj.or.jp/~rst/R3\\_WG\\_report.pdf](http://www.aesj.or.jp/~rst/R3_WG_report.pdf) (令和 5 年).
- [4-10] 平尾, 延原, 大西,  $\gamma$  線簡易遮蔽線量計算法の適切な見直しに関する研究—光核反応、またはスラブ斜め入射の影響—, 日本原子力学会 2021 年秋の大会, 1H05 (2022).
- [4-11] 坪井他, ガンマ線簡易遮へい計算コードの開発・整備, 日本原子力学会 2010 年春の年会予稿集 C32 (2010).
- [4-12] M.J.Berger et al., XCOM: Photon Cross Section Database (version 1.5) Available: <http://physics.nist.gov/xcom>, National Institute of Standards and Technology.
- [4-13] ZZ PHOTX, Photon Interaction Cross-Section Library for 100 Elements. (Sep 1991). Available on-line: <http://www.nea.fr/abs/html/dlc-0136.html>
- [4-14] MCNP User's Manual Code Version 6.2, Los Alamos National Laboratory report LA-UR-17-29981.
- [4-15] AceLibJ40: A Set of Neutron, Photon and Electron Cross Section Libraries in the Ace Format Based on JENDL-4.0 for Continuous-energy Monte Carlo Codes, Available; <https://prodas.jaea.go.jp/PRAD1000>.
- [4-16] M.B.Chadwick et al., "ENDF/B-VII.0: Next Generation Evaluated Nuclear Data Library for Nuclear Science and Technology," Nucl. Data Sheets, 107, 12, 2931 (2006).
- [4-17] K.Takeuchi and S.Tanaka, PALLAS-PL, SP-Br: A Code for Direct Integration of Transport Equation in One-dimensional Plane and Spherical Geometries (JAERI-M 9695) (1981).
- [4-18] 小迫, 中村, 医療用リニアック室の遮蔽計算に使用する光核反応ファイルの比較, 日本原子力学会和文論文誌, 20, 1, 23-33 (2021).

## 第5章 遮蔽計算法の見直しによる遮蔽計算の実務への潜在的影響

### 5. 1. 遮蔽計算の実務への潜在的影響の調査

2007年勧告等の国内法令への取り入れが将来行われることを仮定して、遮蔽評価の実務（施設設計、届出・許可申請、安全審査）に与える潜在的な影響について、専門家にアンケート調査を実施した。その結果、配布した調査票に対して2名から回答が得られた。表5-1に、回答に基づいて実務への潜在的影響をトピックス別にまとめた結果を示す。以降の各節においては、下記のとおり、個々のトピックスに対して想定される対応の具体例を示した。

- ・ 表5-1のトピックス1

施設の設計・安全評価において過去に実施した遮蔽計算を見直し、評価の整合性を再確認するためのプロセスを5.3節に例示する。また、その再確認のプロセスで実施する遮蔽計算で、今回の見直しで整備したデータを用いた場合と現行法令に基づくデータを用いた場合で結果に現れる代表的な差異を5.4節に例示する。

- ・ 表5-1のトピックス2

実務でよく用いられる図書について、記載内容の変更が想定される範囲を5.2節に例示する。

- ・ 表5-1のトピックス3

放射線施設の放射線障害予防規程の見直しについては、施設固有の情報に基づくことから、特に具体例を示さずに今後の課題として5.5節に記載する。

- ・ 表5-1のトピックス4

2007年勧告等に基づく国内法令の改定により影響を受ける遮蔽計算の範囲のうち、今回の見直しで対応していない部分については、今後の課題として5.5節に記載する。

- ・ 表5-1のトピックス5

本ガイドラインでは、2007年勧告等に基づく遮蔽計算の見直しのポイント、新たに整備した遮蔽計算用データの概要、及び計算コードを用いた遮蔽計算の手順を示した。今後、遮蔽設計・遮蔽安全評価に係る申請者がそれらを理解し、また遮蔽計算を適切に実行できるようにするためにはガイドラインの提供だけでなく、例えば講習会を通じて不明な点を補うことが不可欠である。簡易遮蔽計算コードの習熟及び実際的な利用に関する教育実習については、今後の課題として5.5節に記載する。

表 5-1 2007 年勧告等の国内法令取り入れによる遮蔽計算実務への潜在的影響の例

	遮蔽計算実務への潜在的影響のトピックス	概要
1	過去に実施した施設の遮蔽安全評価の再評価及び整合性確認	施設の遮蔽安全評価において過去に行った評価を見直して、評価の整合性を再確認する。国内法令改定に基づいて遮蔽安全評価を見直す作業は、人員リソースの制約から一部の申請者にあつては負担となり、対応に苦慮することが懸念される。再確認の結果によっては、変更許可申請が必要になる。
2	実務で参照されるデータ・文献の妥当性確認及び修正	施設の遮蔽安全評価で参照されるデータ及び文献について妥当性を確認し、必要に応じて修正する。
3	施設の放射線安全管理規程との整合性確認	施設の放射線障害予防規程及び同規程に基づく各種の規定類の整合性を確認し、必要に応じて修正する。
4	国内法令の改定に伴い、今回の見直しで対応していない範囲の確認	<p>今回の見直しでは、光子を起点とする遮蔽計算に対応した。一方、下記の線源による遮蔽計算には未対応である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>\beta</math> 核種を起点とする制動 X 線</li> <li>・ 自発核分裂核種又は(<math>\alpha, n</math>)反応による中性子線</li> </ul>
5	国内法令改定に関するポイントの周知並びに本ガイド及び遮蔽計算コードの利活用	<p>2007 年勧告等に基づく遮蔽計算を確実に浸透させるには、遮蔽計算用データ及び遮蔽計算コードを提供するだけでなく、国内法令改定のポイント並びに遮蔽計算の手順について講習が必要である。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ ガイダンスの提供、放射線取扱主任者などを通じた周知徹底</li> <li>・ 計算コードを用いた遮蔽計算に不慣れな申請者にあつては、計算コードによる評価方法についての理解及び習熟を要する。</li> </ul>

## 5. 2. 実務で参照される図書の記載内容への影響

実務で参照される図書については、将来 2007 年勧告等の国内法令への取り入れが行われた後で関係する記載内容の変更が行われる。付録-2 に、実務でよく参照される図書に対して想定される記載内容の変更ポイントを一覧にして示す。

付録-2 から特に遮蔽計算に関係すると思われる変更の項目を抽出して表 5-2 に示す。放射線施設の届出又は許可申請において該当図書の該当項目を参照している場合は、将来の国内法令改定の後、それまでに実施した遮蔽安全評価の整合性を再確認する必要がある（5.3 節参照）。

表 5-2 ICRP2007 年勧告等の国内法令取り入れで想定される図書の記載変更範囲の例

図書名称 発行元、発行時期	概要・目的	国内法令改定後に変更が想定される記載項目
放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル (2015) 原子力安全技術センター 2015 年 3 月	放射線施設の遮蔽計算法及び計算に係るデータが示されており、施設の遮蔽安全に係る申請資料の作成等に利用される。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 光子又は中性子の実効線量換算係数</li> <li>・ 眼の水晶体等価線量限度</li> <li>・ ビルドアップ係数、実効線量率定数、又は実効線量透過率を用いた計算例</li> </ul>
放射線施設の遮蔽計算実務（放射線）データ集 (2015) 原子力安全技術センター 2019 年 3 月	「放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル (2015)」を補填するデータ集	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 光子又は中性子の実効線量換算係数</li> <li>・ 光子の遮蔽計算用定数及び遮蔽計算用データ</li> <li>・ <math>\beta</math> 線による制動 X 線の遮蔽計算用定数</li> <li>・ 中性子線の遮蔽計算用定数及び遮蔽計算用データ</li> <li>・ 医療用電子リニアックからの制動 X 線の遮蔽計算用定数</li> </ul>
アイソトープ手帳 12 版 日本アイソトープ協会 2020 年 3 月	放射性同位元素から放出される放射線の詳細なデータを収録。広く申請者、放射線管理者に使用される。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 上記、放射線施設の遮蔽計算実務（放射線）データ集 (2015) と同じ記載項目</li> <li>・ 告示に定める（特定）放射性同位元素の数量及び濃度</li> </ul>

<p>原子力発電所放射線遮蔽設計規定 JEAC4615-2020 電気協会 原子力規格委員会 令和2年1月</p>	<p>原子力発電所の放射線遮蔽設計に当たり、通常運転時に原子力発電所で働く従事者並びに原発周辺の一般公衆が、告示に定められた線量限度を超えないようにする。(中略)原子力発電所における放射線の遮蔽設計の方法、遮蔽設計の考え方、線量評価の方針等を示す。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 計算コードの概要について、現行の1990年勧告ベースの点減衰核法コード(QAD等)</li> <li>・ 計算で使用する線量換算係数及びビルドアップ係数について、現行の1990年勧告ベースの引用文献</li> </ul>
<p>γ線ビルドアップ係数：2013(AESJ-SC-A005：2013) 日本原子力学会 2013年12月</p>	<p>28種類の物質に対して、0.015～15 MeVの遮蔽厚さ100 mfpまでの5種類の線量に対するγ線ビルドアップ係数及びそのGP近似式パラメータを示す。また、点減衰核法の計算に必要な線量換算係数及び遮蔽材のγ線減衰係数を示す。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 各線量種類に対するγ線ビルドアップ係数</li> <li>・ γ線の線量換算係数</li> <li>・ γ線の減衰係数</li> </ul>
<p>放射線遮蔽計算のための線量換算係数：2010(R002:2010) 日本原子力学会 2010年10月</p>	<p>1990年勧告に基づく実効線量換算係数の値を示す。ただし、次の2点について独自の値を採用した。</p> <p>(1)高エネルギーの光子及び中性子の実効線量率換算係数</p> <p>(2)エネルギーを多群化した実効線量率換算係数</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高エネルギーの光子及び中性子の実効線量率換算係数</li> <li>・ エネルギーを多群化した実効線量率換算係数</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 放射線遮蔽ハンドブック 基礎編 日本原子力学会 2015年3月</li> <li>・ 放射線遮蔽ハンドブック 応用編 日本原子力学会 2020年3月</li> </ul>	<p>近年の放射線の工業・医療利用の進展、加速器施設の増加、遮蔽設計へのMC法の取り入れ、断面積データライブラリの進展等を踏まえて、遮蔽専門委員会が編纂した最新の知見に基づく遮蔽ハンドブック。旧版の「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」、「中性子遮蔽設計ハンドブック」を大幅に改訂した。</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>(基礎編)</li> <li>・ 線量換算係数</li> <li>・ バルク遮蔽、ストリーミング及びスカイシャインの簡易計算手法</li> <li>・ 放射線防護の考え方 (応用編)</li> <li>・ 設計手順および計算手法の選択ならびに注意点</li> </ul>

### 5. 3. 施設の遮蔽安全評価の再確認手順の例

2007 年勧告等に基づく遮蔽計算では、従来の計算値と計算条件が同じであっても、線量計算値が変わるおそれがある。そのため、将来の国内法令改定後、既存の放射線施設の申請者は、過去の届出又は許可申請で提出した遮蔽安全評価を見直して、法定要件との適合性を再確認する必要がある。ここでは再確認を行う手順の例を、放射性同位元素を取り扱う施設と放射線発生装置を使用する施設に分けて示す。

#### 5. 3. 1. 放射性同位元素を取り扱う施設

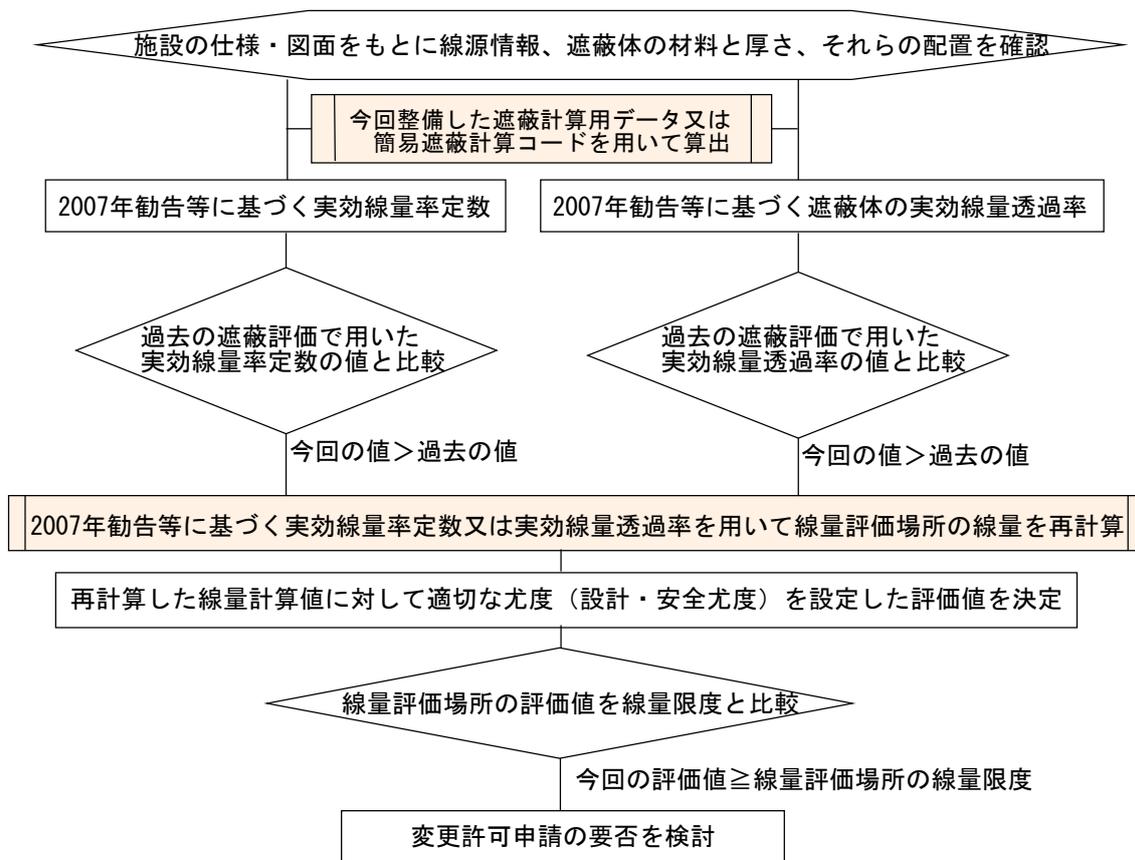
放射性同位元素を線源とする遮蔽計算法として、次の二つのアプローチが考えられる。

- 1) 放射性同位元素の遮蔽計算用定数（実効線量率定数及び遮蔽材の実効線量透過率）を用いる方法（4.4.1 項の前段参照）
- 2) 放射性同位元素が放出する光子の遮蔽計算用データ（ビルドアップ係数及び減衰係数）を用いる方法（4.4.1 項の後段参照）

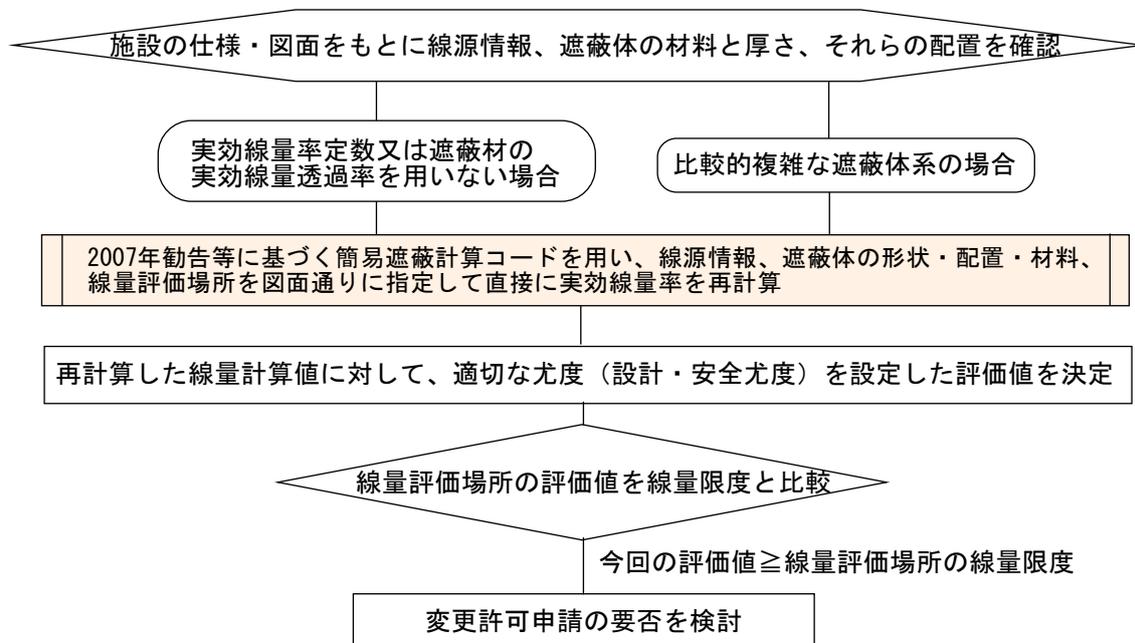
図 5-1(a)に、過去に届出又は許可申請で提示した施設の遮蔽評価を 1)の方法で行った場合の再評価プロセスをフローチャートで例示する。まず、今回の見直しで作成した簡易遮蔽計算コードを用いて、施設で取り扱う放射性同位元素の実効線量率定数及び遮蔽体の実効線量透過率を計算する。次に、それらの計算値を過去の遮蔽評価で用いた値とそれぞれ比較する。比較の結果、今回見直した計算値の方が過去の遮蔽評価で用いた値より一つでも高い場合は、将来の国内法令改定により遮蔽線量の計算値が高くなるおそれがある。そのときは、今回見直した計算値を用いて、施設の線量評価位置の線量を改めて手計算する（4.1.2 項 (2) 参照）。線量評価位置は過去の届出又は許可申請に基づくこととし、大抵の場合、施設の管理区域境界及び作業者が普段居る場所に設定されている。逆に、今回の見直しによる計算値がいずれも過去の遮蔽評価で用いた値と同じか又は低い場合は、そこで確認作業を終了する。

一方、過去の遮蔽評価で用いた値を 1)以外の方法で得ている場合は、2)の方法により今回作成した簡易遮蔽計算コードを用いて遮蔽線量を計算する。図 5-1(b)に、2)の方法による再評価プロセスをフローチャートで例示する。この場合、簡易遮蔽計算コードに線源や遮蔽の計算条件を図面通りに入力して、施設の線量評価位置の線量を求める。

1) 又は 2) の方法により施設の線量評価位置の線量を改めて計算した後は、計算値に対してケースバイケースで尤度を考慮した評価値を決定する（4.5 節参照）。特に指定されない限り、過去の遮蔽評価と同じ考え方に基づいて尤度を検討する。最後に、評価値を線量限度と比べて十分に余裕がある場合は確認作業を終了する。もし評価値が一つでも線量限度に近接したり、また線量限度を超過したりする場合は、尤度設定の妥当性を検討した上で、既許可の内容との対応を再点検し、必要な場合には変更許可申請をしなければならない。



(a) 実効線量率定数又は遮蔽体の実効線量透過率を用いた遮蔽計算を行う場合



(b) ビルドアップ係数及び減衰係数を用いた図面通りの遮蔽計算を行う場合

図 5-1 ICRP 2007 年勧告等の国内法令への取り入れを想定した、放射線施設の遮蔽安全評価に対する再確認手順の例

### 5. 3. 2. 放射線発生装置を使用する施設

医療用リニアックの X 線の遮蔽計算法として、次の二つのアプローチが考えられる。

- 1) 装置の使用線量及び照射部から放出される X 線の利用線すい又は漏えい線<sup>※13</sup>による遮蔽体の実効線量透過率を用いる方法（4.4.2 項の前段、付録-1 の 2 章参照）
  - (a) 遮蔽計算実務マニュアルに示された方法を指す。この場合、マニュアルに示された電子線最大エネルギーに対する遮蔽体の実効線量透過率データを、ICRP 2007 年勧告等に従って計算し直す必要がある。
  - (b) 遮蔽体の実効線量透過率の計算には、利用線すい又は漏えい線の X 線エネルギースペクトルが必要である（強度情報は不要）。スペクトルが過去の施設評価で与えられていない場合は、装置仕様や文献の参照、測定、MC 法コード等を用いた（電子線の光子コンバータによる）線源計算によって求める。
  - (c) スペクトルが与えられたら、今回作成した簡易遮蔽計算コードを用いて遮蔽体の実効線量透過率を計算する。
- 2) 装置の利用線すい又は漏えい線の X 線スペクトル及び強度を用いて図面通りに遮蔽計算を行い、線量評価位置の実効線量を求める方法（4.4.2 項の後段、付録-1 の 3 章参照）
  - (a) X 線のスペクトル及び強度の情報が過去の申請で与えられていない場合、装置仕様や文献の参照、測定、MC 法コード等を用いた線源計算によって求める。
  - (b) X 線スペクトル及び強度が与えられたら、今回作成した簡易遮蔽計算コードを用いて実効線量を計算する。
  - (c) 或いは、MC 法コードを用いて線源計算だけでなく遮蔽計算も一括で実行する。

対象施設で過去に申請した遮蔽評価を 1)の方法で行っている場合は、前項で説明したとおり、図 5-1(a)に示した手順に従って再確認を行う。過去の申請の殆どがこの 1)の方法によるものと考えられる。ただし、遮蔽体の実効線量透過率を計算し直すには、対象施設の利用線すい又は漏えい線の X 線スペクトルの情報が必要である。

一方、2)の方法で線量計算を行う場合、利用線すい又は漏えい線の X 線スペクトルだけでなく強度の情報も必要になる。ただし、強度の決定に必要な電子線場の情報は一般に十分でないため、適当な仮定を置いた上で、装置のアイソセンタでの吸収線量や線量モニタリングの測定に基づく保守的な推定を行う方策が考えられる。もし 2)の方法で線量評価場所の線量を計算した場合は、図 5-1(b)に示した手順に従って再確認を行う。

なお、2)の(c)の方法で MC 法コードを用いた遮蔽計算を行う場合、その結果を過去の安全側の評価値と比較する意味はあまりないことに留意する。遮蔽計算法が異なると、2007 年勧告等の国内法令取り入れとかかわりのない所でも差異を生ずるからである。

---

※13 本ガイドラインでの漏えい線については、4.1.2 項の脚注を参照のこと。

よって、その場合は MC 法コードを用いた遮蔽計算の妥当性を単体で証明したうえで、計算評価値を線量限度と比べる必要がある<sup>※14</sup>。

#### 5. 4. ICRP 2007 年勧告等に基づく遮蔽計算で想定される主な影響の示唆

代表的な遮蔽事例に対して、今回の見直しで整備した遮蔽計算用データを用いた遮蔽計算の結果を、従来のデータに基づく計算値と比較して、今回の見直しが過去の遮蔽評価に与える影響を明らかにする。ただし、過去の遮蔽評価で用いられたデータは施設によって異なり、データの算出条件もまちまちであるため、過去の遮蔽評価からデータを網羅的に集めて影響を特定することは難しい。よって、ここでは現行の 1990 年勧告に基づく国内法令のもとで整備された日本原子力学会標準の遮蔽計算用データ[5-1]を用いた計算値と比較して、今回の見直しによる主な影響を示唆するに留めた。実際の放射線施設の遮蔽評価に与える影響については、個別に計算して確認する必要がある。

##### 5. 4. 1. 放射性同位元素を取り扱う施設で現れる影響

まず、今回の見直しで改訂した実効線量換算係数の差異による影響が考えられる。4.2.1 項で前述したとおり、光子の実効線量換算係数 (AP 照射) について、今回の 2007 年勧告に基づく ICRP 116 と現行の 1990 年勧告に基づく ICRP 74 を比べると、約 100 keV 以下又は約 3 MeV 以上のエネルギー領域で差がみられる (図 4-1 参照)。約 100keV 以下では ICRP 116 の方が ICRP 74 より高く、エネルギーが低くなるにつれて差が拡がり 10 keV で 40%程高くなる。約 3 MeV 以上では逆に ICRP 116 の方が ICRP 74 より低くなる。

この線量換算係数の差異が最もよく現れるケースとして、放射性同位元素の実効線量率定数の計算値を例示する。表 5-3 に、代表的な放射性同位元素の光子放出データ及びそれらを線源に用いて計算した実効線量率定数の値をまとめて示す。<sup>60</sup>Co 及び <sup>41</sup>Ar の場合、ICRP 116 と ICRP 74 の間で値に変化はないが、主に 100 keV 以下の光子を放出する <sup>125</sup>I の場合、ICRP 116 の方が 5%ほど高い結果を与える。こうした実効線量率定数の変化による影響は遮蔽計算を行う場合にも同程度に現れる。なお 3 MeV を超える光子を主に放出する放射性同位元素は一般に使用されないため、3MeV 以上の線量換算係数の差異の影響を示すことは次項に譲る。

次に、同じ放射性同位元素を線源に用いて、代表的な遮蔽材の実効線量透過率の計算値を、今回の 2007 年勧告等に基づく遮蔽計算用データと現行の 1990 年勧告ベースのそれとで比較する。図 5-2 に、主に MeV レベルの光子を放出する代表核種として、<sup>60</sup>Co を用いた鉄及び水の実効線量透過率を、鉄の厚さ 40 cm まで、水の厚さ 180 cm までそれぞれ示す。2007 年勧告等と現行を比べて、鉄、水ともに線量透過率の差異は小さく

<sup>※14</sup> MC 法コードによる遮蔽計算は、本ガイドラインのスコープ外である。

数%以内に収まる。傾向として、鉄の場合は厚さとともに 2007 年勧告等の方が現行より少しずつ高くなり、水の場合は厚さによって高低がみられる。

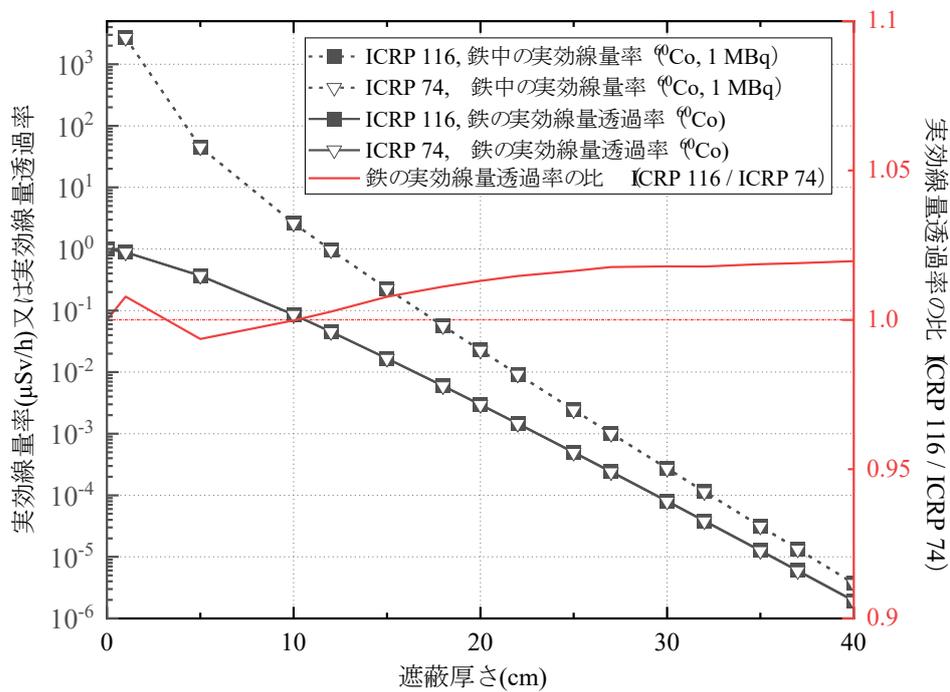
図 5-3 に、主に数 10keV の光子を放出する代表核種として、<sup>125</sup>I を用いた鉄及び水の実効線量透過率をそれぞれ示す。水の場合、図 5-3(b)に示すとおり、2007 年勧告等の方が現行と比べて最大で 5%程高い。これは、上述した約 100 keV 以下の実効線量換算係数の差異がそのまま遮蔽線量の差となって現れたものと考えられる。一方、鉄の場合は傾向が異なり、図 5-3(a)に示すとおり、遮蔽が厚くなるにつれて 2007 年勧告等の方が現行よりかなり低くなる。これは、線量換算係数の差異よりもむしろ、光子の相互作用として新たに干渉性散乱を考慮したことによるものと考えられる。干渉性散乱の影響は、中重核以上の材料で、特に低エネルギーの光子を遮蔽する場合に現れる(4.2.3.1 項参照)。

図 5-4 に、放射線発生装置を使用する施設において大気放射化で発生する <sup>41</sup>Ar を用いた大気の実効線量透過率を示す。線源から距離が 20 m 離れても線量透過率は 1%未満しか変化しない。一般に <sup>41</sup>Ar に対して遮蔽は考慮されないことから、2007 年勧告等に基づく大気中の線量計算値は現行の場合と殆ど同じである。仮に、鉄又は水で遮蔽したとしても、<sup>41</sup>Ar の放出する光子エネルギーからみて上記 <sup>60</sup>Co の場合と同等の傾向を示すと考えられる。

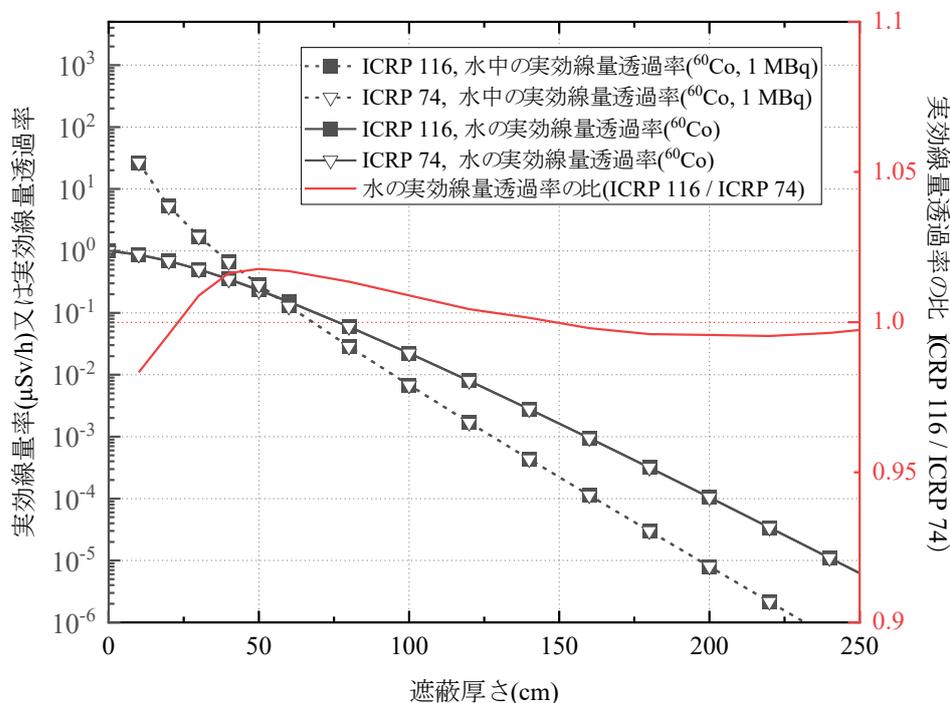
以上、放射性同位元素の遮蔽計算で用いられる遮蔽計算用定数(実効線量率定数及び遮蔽体の実効線量透過率)について、2007 年勧告等に基づく計算値は、現行の計算値と比べて、放出エネルギー、遮蔽材とその厚さによって高低があるものの、高くなっても 5%程度と推察される。

表 5-3 代表的な放射性同位元素の光子放出データ及び実効線量率定数の計算値

	核壊変データ(光子) 実効線量率定数 (μSv/h per 1 MBq)				
	エネルギー (MeV)	発生率 (p/dis)	ICRP 116	ICRP 74	Ratio (ICRP 116/ICRP 74)
<sup>60</sup> Co	1.17E+00	9.99E-01	3.06E-01	3.06E-01	1.00
	1.33E+00	1.00E+00			
<sup>125</sup> I	3.55E-02	6.68E-02	1.28E-02	1.22E-02	1.05
	2.72E-02	4.05E-01			
	2.75E-02	7.54E-01			
	3.09E-02	6.95E-02			
	3.10E-02	1.35E-01			
	3.12E-02	6.20E-04			
	3.12E-02	8.52E-04			
	3.17E-02	1.44E-02			
	3.17E-02	2.83E-02			
	3.18E-02	1.04E-04			
	3.18E-02	1.43E-04			
<sup>41</sup> Ar	1.29E+00	9.92E-01	1.56E-01	1.56E-01	1.00
	1.68E+00	5.16E-04			

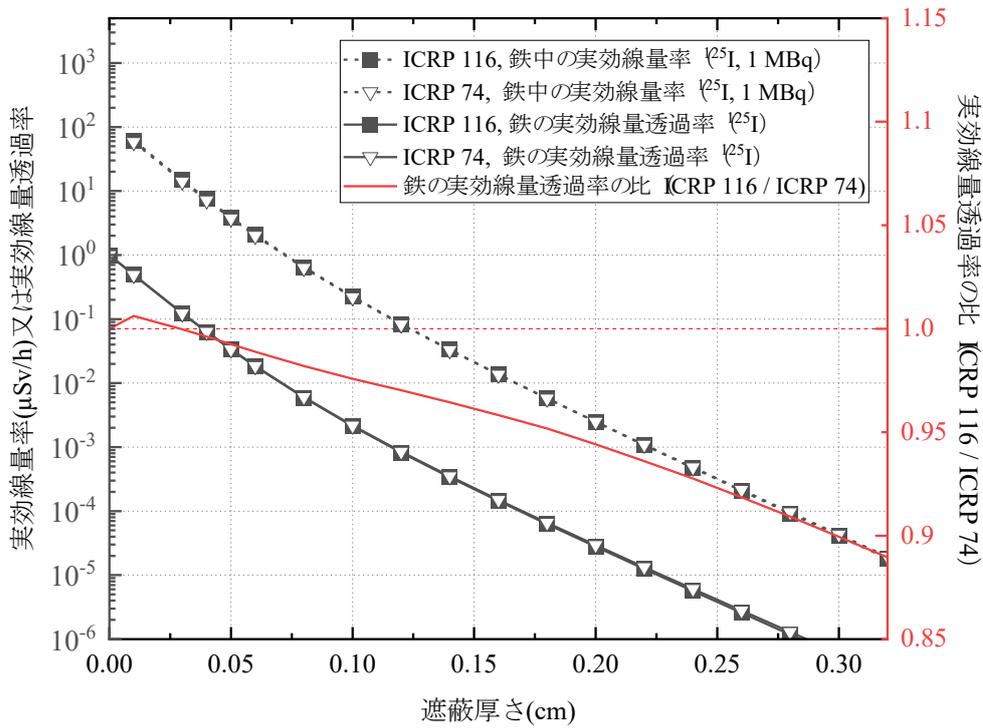


(a) 鉄の実効線量率分布及び実効線量透過率

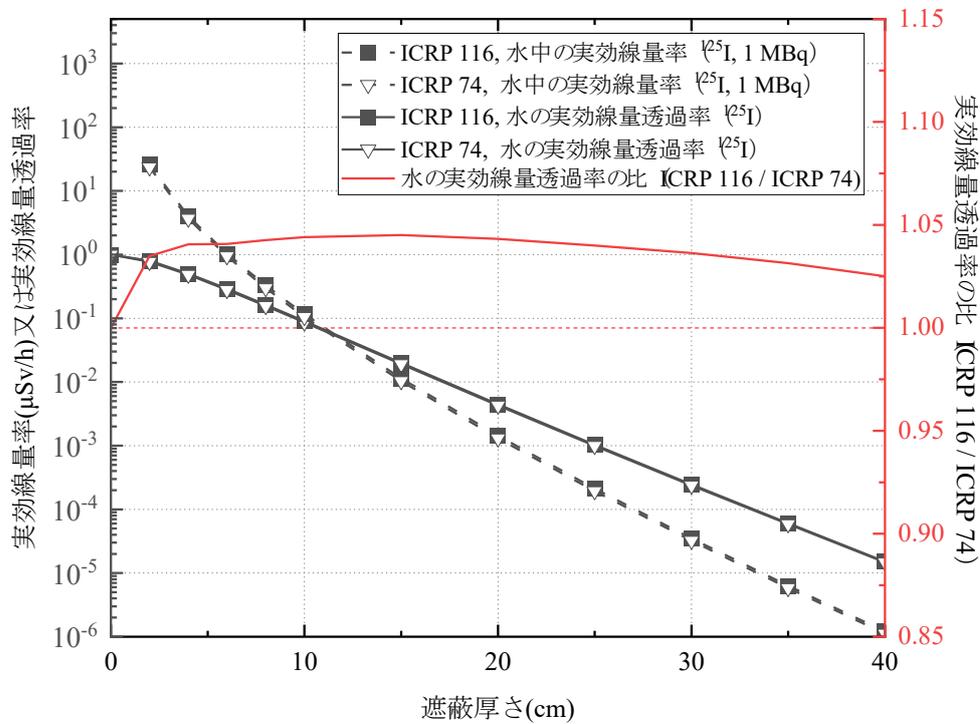


(b) 水の実効線量率分布及び実効線量透過率

図 5-2  $^{60}\text{Co}$  を用いた鉄及び水の実効線量透過率の遮蔽厚さによる変化



(a) 鉄の実効線量率分布及び実効線量透過率



(b) 水の実効線量率分布及び実効線量透過率

図 5-3  $^{125}\text{I}$  を用いた鉄及び水の実効線量透過率の遮蔽厚さによる変化

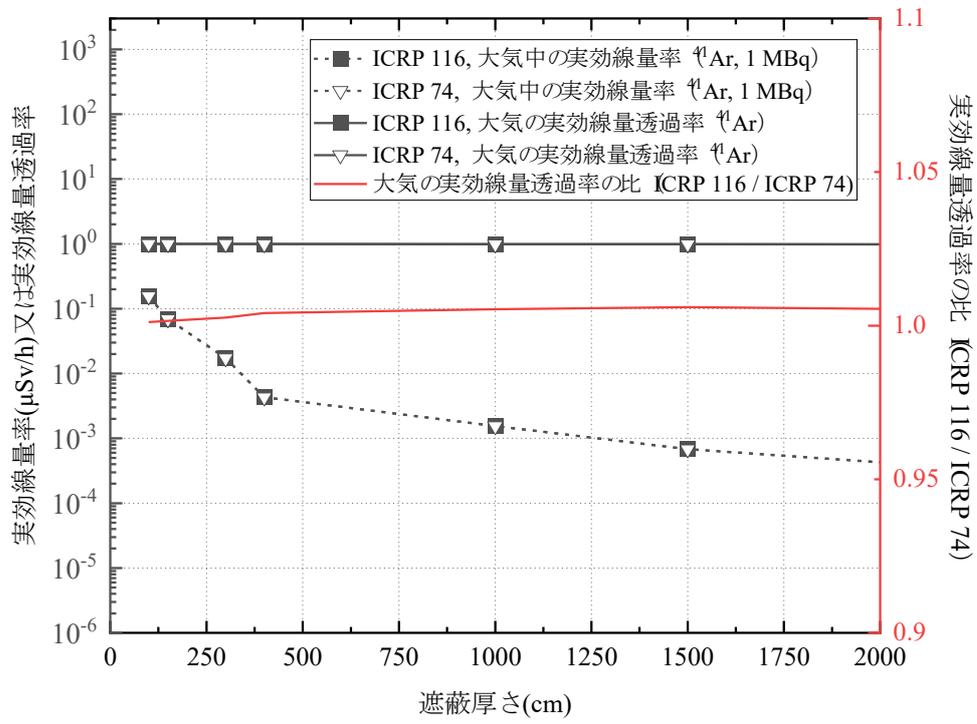


図 5-4  $^{41}\text{Ar}$  を用いた大気の実効線量透過率の距離による変化

#### 5. 4. 2. 高エネルギー拡張による光核反応の考慮が与える影響

今回の見直しでは、線源光子エネルギーの範囲を 30 MeV まで上に拡張し、光核反応を考慮した遮蔽計算用データを整備した。前項で述べたとおり、光核反応のしきいエネルギー値は概して高い所にあるため、一般に利用される放射性同位元素の遮蔽計算でその影響が現れることはないと考えてよい。ここでは、純粹に光核反応の考慮が遮蔽計算に与える影響を示す目的で、表 5-4 に示すとおり、例外的に 6 MeV を超える光子を放出する  $^{16}\text{N}$  を用いた鉛の実効線量透過率を計算した (図 5-5) <sup>※15</sup>。光核反応を考慮した場合、遮蔽厚さ 15 cm 位から中性子の線量寄与が現れ、光核反応を考慮しない場合と比べると厚さが増すにつれて指數的に差が広がる。この傾向は、鉛のように原子番号の大きい材料で遮蔽した場合に現れることが多く、鉄遮蔽の例では光子エネルギーからみて光中性子の発生量が低く光核反応の考慮の有無による線量差は殆ど現れない (図 4-6 参照)。

一方、放射線発生装置を使用する施設においては、光核反応のしきいエネルギー値を超える高エネルギー X 線を遮蔽するため、光核反応で生じる放射線の線量寄与を適切に考慮しないと実際と乖離した評価になるおそれがある。実際の X 線は電子線の加速エネルギーを最大とする連続エネルギー分布をもつが、ここでは単色光子を使って影響の要点を示す。図 5-6 に、8 MeV 又は 20 MeV の単色光子を鉄で遮蔽した場合の厚さによる線量変化を、光子と中性子の寄与に分けて示す。光核反応による光中性子の発生量は 8 MeV より 20 MeV の方が桁違いに多い (4.2.3.2 項参照)。8 MeV の場合、厚さ 56 cm 位から中性子の寄与が光子と比べて支配的になる。そして 86 cm 位から中性子の捕獲で発生した二次光子の寄与が加わり、光子の減衰勾配が変化する。その厚さ以降の光子の減衰は、中性子の減衰に追従する形になる。一方、20 MeV の場合、8 cm 位でもう光子と中性子の寄与が逆転し、40 cm 位で光子の減衰勾配が変化する。よって、放射線発生装置を使用する施設の遮蔽計算では、線源光子の減衰だけでなく、光核反応を適切に扱うことのできるデータ又は計算コードを用いる必要がある。参考まで、日本原子力学会標準のビルドアップ係数[5-1]は 15 MeV まで規定されているが光核反応を考慮していない。また過去の遮蔽評価で光核反応を考慮している場合でも、後にデータが改訂されていないか確認すべきである。

最後に、実際の施設では 50 cm を超える厚さの鉄を用いるケースは限られること、また中性子の発生量が多いと想定される場合は複数の材料を重ねた多重層遮蔽が用いられること (4.2.3.3 項参照) を付け加えておく。

※15  $^{16}\text{N}$  は原子炉施設の冷却水の放射化で生じることがある。半減期が短く産業的には利用されない。

表 5-4  $^{16}\text{N}$  の核壊変による光子放出データ

エネルギー (MeV)	発生率 (photon/dis)
1.76	1.21E-03
1.96	3.80E-04
2.74	8.20E-03
2.82	1.30E-03
6.13	6.70E-01
6.92	3.80E-04
7.12	4.90E-02
8.87	7.60E-04

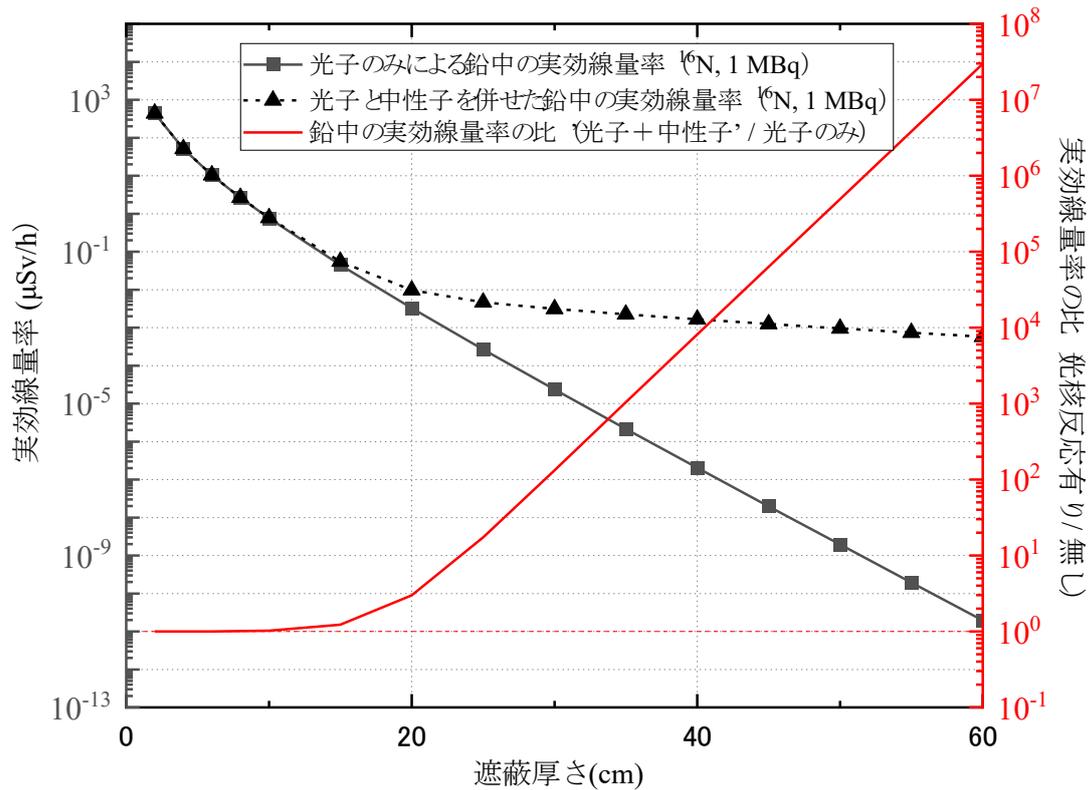
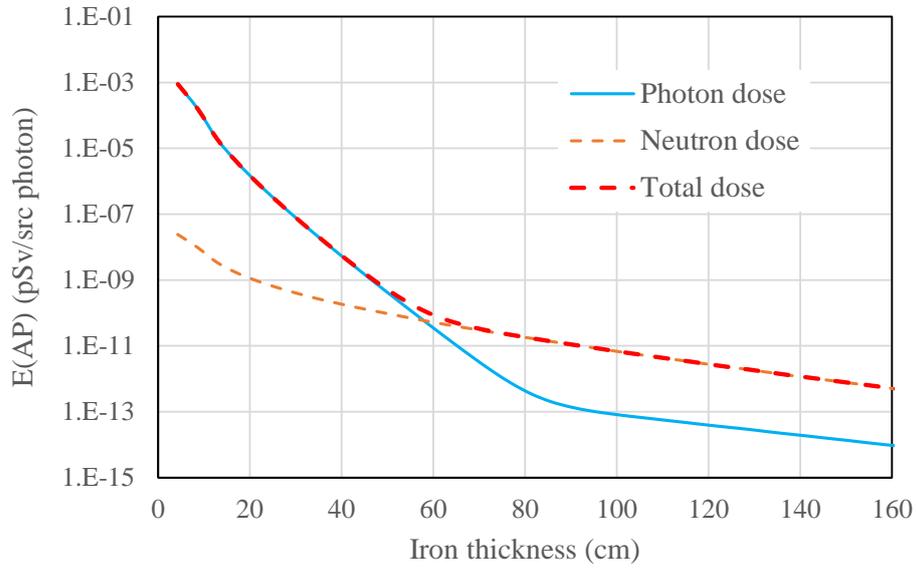
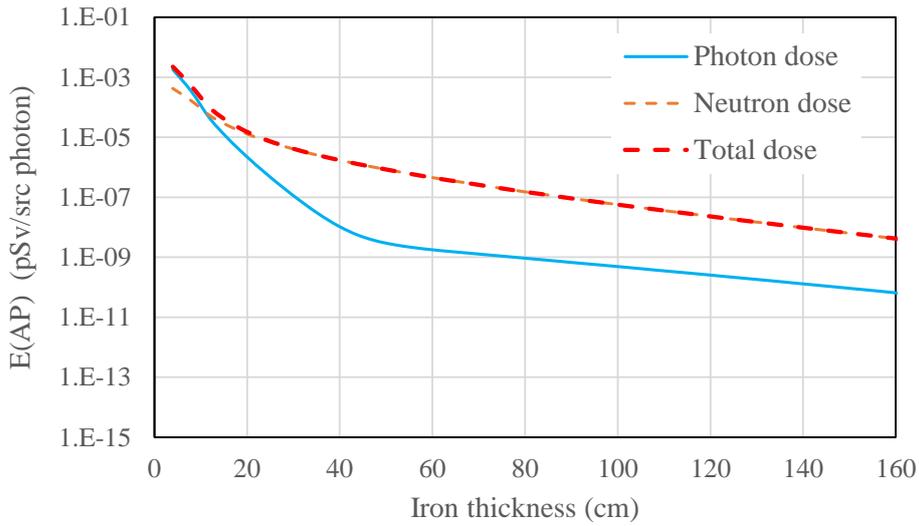


図 5-5  $^{16}\text{N}$  を用いた鉛の実効線量透過率の遮蔽厚さによる変化



(a) 線源エネルギー 8 MeV



(a) 線源エネルギー 20 MeV

図 5-6 高エネルギー光子を鉄で遮蔽した場合の光核反応を考慮した線量変化

### 5. 4. 3. 実効線量換算係数の照射条件による違いが与える影響

現行法令においては、光子の全身照射条件を AP とした実効線量換算係数が 10 MeV まで規定されている。一方、2007 年勧告等に基づく高エネルギー拡張を想定した場合は、ケースバイケースで適切な照射条件の選択が考えられる（4.2.1 項参照）。

ここでは、高エネルギー光子が遮蔽体を透過した後、エネルギーが減衰して広い範囲に分布するようになったときの照射条件による実効線量の差異を示す。表 5-5 に、線源エネルギー 30 MeV、光子放出率  $10^6$  (photon/sec) の単色光子を用いたコンクリートの透過線量率を異なる照射条件に対して示す。コンクリートの厚さ 10 cm の場合、AP 以外の照射条件は全て AP より高く、線量比は 10% から 23% まで幅があり PA で最も差が大きい。一方、コンクリートの厚さ 100 cm の場合、PA のみが AP より高く、線量比で 7% の差が現れる。なお、表には示していないが、線源エネルギー 25 MeV の場合、異なる照射条件の間で線量差は殆ど現れなかった。よって、AP 以外の照射条件を用いたときに AP よりも明らかに高い実効線量を結果するのは、線源エネルギーが 25 MeV を超え、かつ遮蔽厚さが比較的薄い場合と推察される。

現状、25 MeV を超える X 線を発生する電子リニアックなどは殆ど設置されておらず、一般に普及している 20 MeV 以下の電子リニアック施設では、AP 照射の実効線量換算係数を一様に用いることで安全側の評価を得られると考えて良い。

表 5-5 30 MeV 光子をコンクリートで遮蔽した後の実効線量率（照射条件別）

	コンクリート厚さ10 cmの遮蔽を透過後の実効線量率 (μSv/h)				
	E(AP)	E(PA)	E(LLAT)	E(ROT)	E(ISO)
合計線量率	2.59E-02	3.18E-02	2.89E-02	2.89E-02	2.84E-02
中性子	1.62E-03	1.05E-03	7.95E-04	1.08E-03	8.82E-04
光子	2.43E-02	3.08E-02	2.81E-02	2.78E-02	2.75E-02
E(AP)に対する比	-	1.23	1.12	1.12	1.10

	コンクリート厚さ100 cmの遮蔽を透過後の実効線量率 (μSv/h)				
	E(AP)	E(PA)	E(LLAT)	E(ROT)	E(ISO)
合計線量率	1.18E-03	1.26E-03	1.12E-03	1.17E-03	1.11E-03
中性子	1.18E-04	7.41E-05	5.50E-05	7.65E-05	6.19E-05
光子	1.06E-03	1.19E-03	1.06E-03	1.10E-03	1.05E-03
E(AP)に対する比	-	1.07	0.95	1.00	0.94

(30 MeV、 $10^6$  (photon/sec) の単色光子線源を使用)

#### 5. 4. 4. 実効線量とその実用量（1 cm 線量当量）の差に与える影響

実用量は、実際に測ることのできない防護量を測定で評価するために定義された量であり、防護量に対して若干安全側の値になることが期待される（3.1.2 項参照）。ここでは、2007 年勧告等に基づく実効線量換算係数の変化が、実効線量と対応する実用量（1 cm 線量当量）の差に与える影響について述べる。図 5-7 に、現行及び 2007 年勧告等の実効線量換算係数並びに 1 cm 線量当量換算係数のエネルギー変化を示す。1 cm 線量当量換算係数を現行の実効線量換算係数と比べると 100 keV 以下と 3 MeV 以上で比較的大きい差があり、1 cm 線量当量換算係数の方が 10 keV で約 6 倍高く、逆に 10MeV では約 60%低い。100 keV から 3 MeV までは 1 cm 線量当量換算係数が実効線量換算係数を僅かに上回り、1 cm 線量当量が実効線量の良い評価を与える。また 1 cm 線量当量換算係数を 2007 年勧告等に基づく実効線量換算係数と比べても、100 keV 以下の差が現行よりも若干縮まるくらいで、相対的にみて差の傾向は変わらない。よって、将来の国内法令改定で実効線量換算係数が変更されても、1 cm 線量当量に基づく測定値と実効線量の計算値との差異に殆ど変化はなく、現行どおりの関係にある。

それでは、その遮蔽計算における実効線量と 1 cm 線量当量の差を確認するため、<sup>125</sup>I 及び <sup>60</sup>Co を用いた水の線量透過率を、実効線量ベース又は 1 cm 線量当量ベースでそれぞれ比較する（図 5-8）。<sup>125</sup>I は主に数 10 keV の光子を、一方の <sup>60</sup>Co は 1 MeV 以上の光子を放出する放射性同位元素を代表する。1 cm 線量当量を実効線量と比べると、<sup>125</sup>I では遮蔽厚さ 40 cm まで 1 cm 線量当量の方が 2.5～3 倍位高い。一方、<sup>60</sup>Co ではその差は小さく、遮蔽厚さ 300 cm でも 1.3 倍位である。100 keV 以下の実効線量換算係数と 1 cm 線量当量換算係数の差が、<sup>125</sup>I に対して比較的大きい線量差となって現れたと考えられる。よって、<sup>60</sup>Co を水で遮蔽する場合、1 cm 線量当量、すなわち測定値は実効線量の良い評価を与えるが、一方 <sup>125</sup>I の場合は水の厚さに係らず測定値の方が数倍高くなる可能性がある。

なお、3 MeV 以上の領域で 1 cm 線量当量換算係数が実効線量換算係数より低く乖離する点は、現行の実用量の問題とされている[5-2]。これは、以前の 1 cm 線量当量換算係数の算出において、カーマ近似（すなわち二次荷電粒子によるエネルギー輸送を考慮しないこと）を使用したことによる。

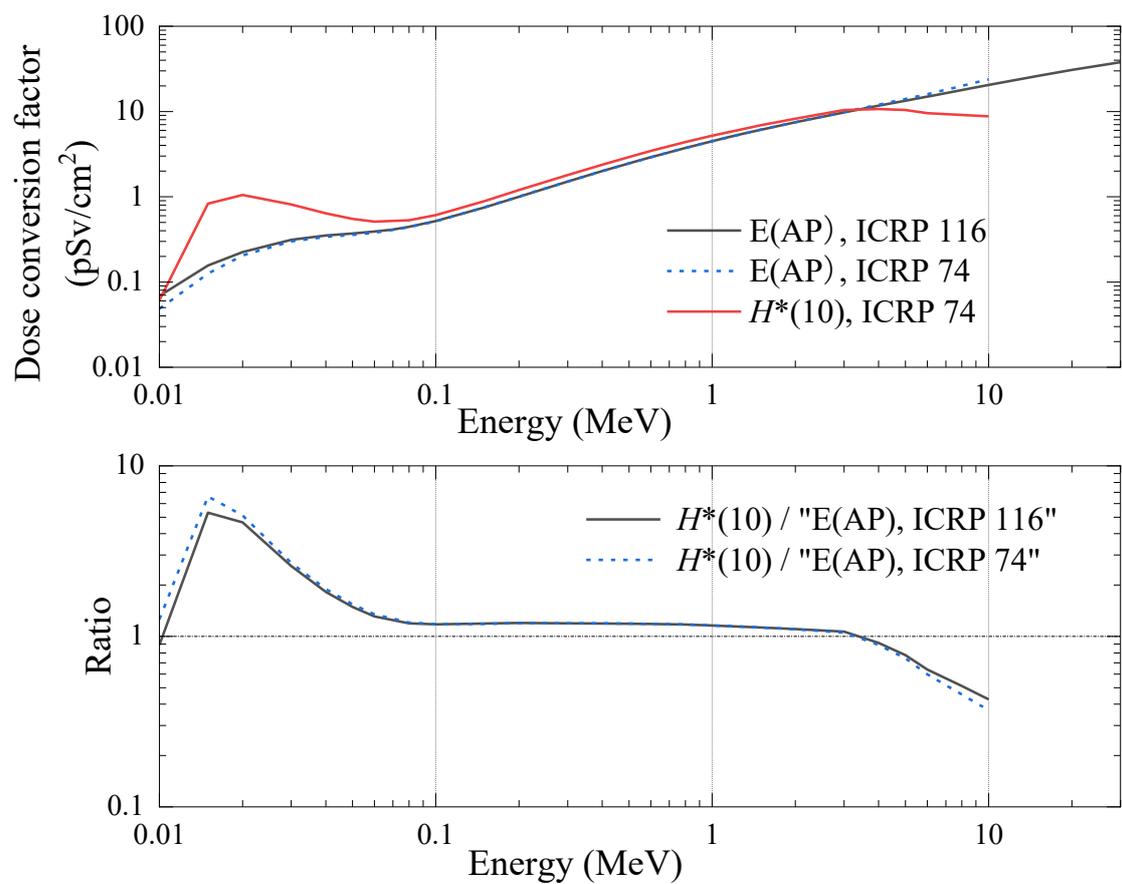
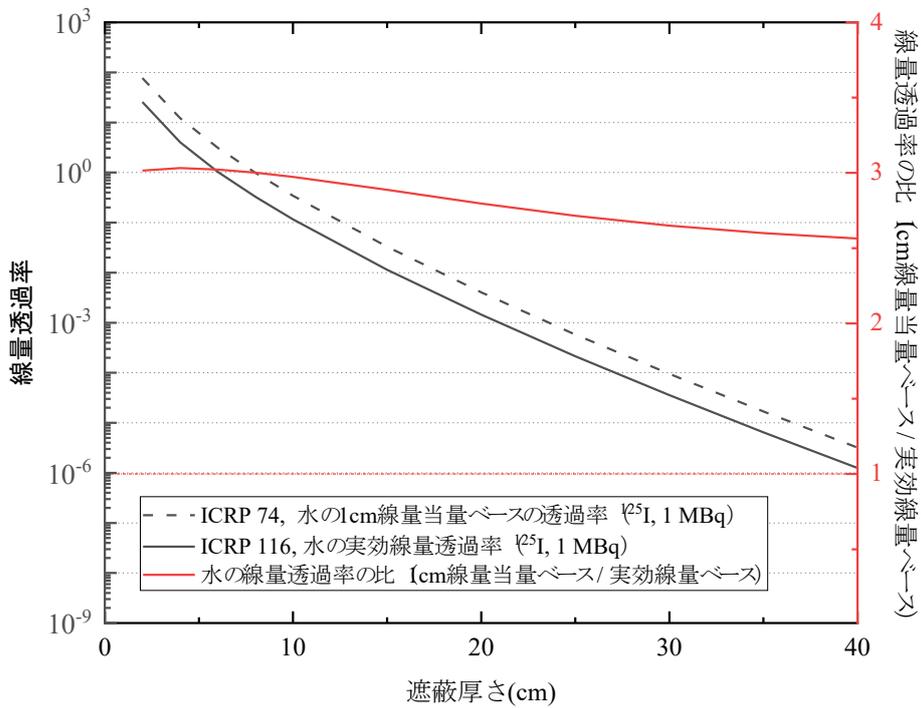
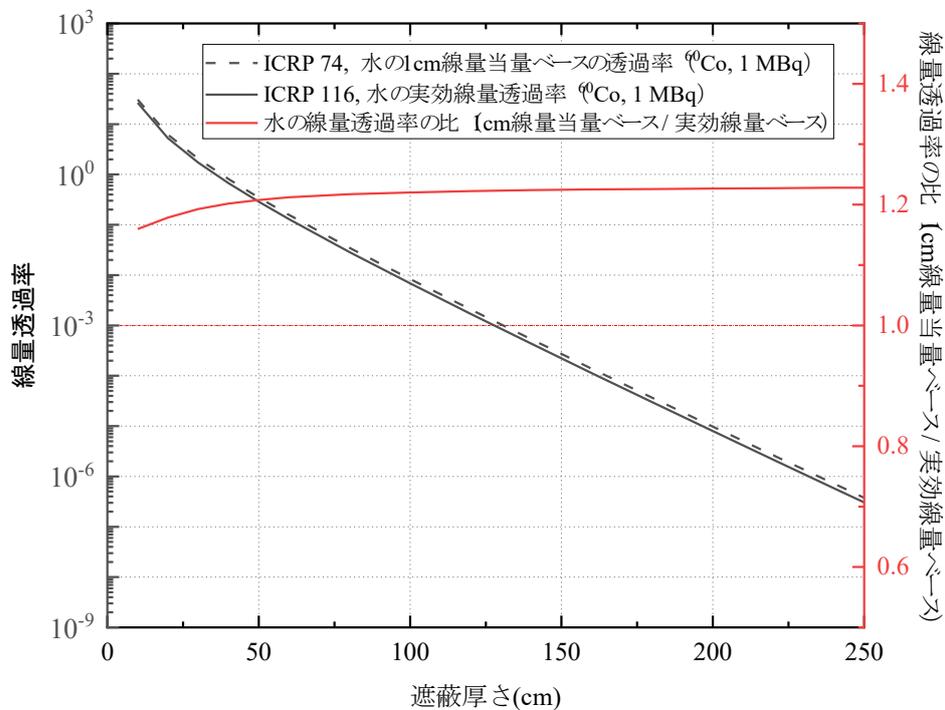


図 5-7 光子フルエンス当たりの実効線量換算係数 (AP 照射) 及び 1 cm 線量当量換算係数のエネルギー変化



(a)  $^{125}\text{I}$  を用いた水の線量透過率 (1cm 線量当量ベース及び実効線量ベース)



(b)  $^{60}\text{Co}$  を用いた水の線量透過率 (1cm 線量当量ベース及び実効線量ベース)

図 5-8  $^{125}\text{I}$  及び  $^{60}\text{Co}$  による水の線量透過率を 1 cm 線量当量又は実効線量で表した場合の遮蔽厚さによる変化

## 5. 5. 今後の課題

以上、2007年勧告等に基づく将来の国内法令改定を想定し、実務への潜在的な影響を検討した。本ガイドラインで特に立ち入らなかった点について、今後の課題として表5-6にまとめて示す。

表 5-6 2007年勧告等に基づく将来の国内法令改定に向けた今後の課題

	課 題	概 要
1	施設の遮蔽評価の再確認の結果を踏まえた変更許可申請の要否検討	将来の法令改定を踏まえて見直した遮蔽線量の評価値が線量限度に近接又は超過する場合、どのような考え方に基づいて申請者がどう対応すべきか具体化する必要がある。
2	個別施設の放射線安全管理規程の整合性確認と修正	放射線障害予防規程の見直しは施設固有の情報に基づくため一元的にガイドし難い。代表的な施設の見直し事例を情報共有し、類似施設間で相互参照して整合性を確認する仕方が考えられる。
3	将来の国内法令改定で想定される遮蔽計算法の見直し範囲のうち、未対応部分の検討	線量換算係数の改訂により見直しが必要となる遮蔽計算法のうち、下記は未対応である。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・<math>\beta</math>核種による制動X線の遮蔽計算用データ</li> <li>・中性子源に対する遮蔽計算用データ</li> </ul>
4	作成した簡易遮蔽計算コードの習熟に係る申請者の教育訓練	将来の国内法令改定を踏まえた施設の遮蔽評価を申請者が確実に実施するには、国内法令改定のポイント及び簡易遮蔽計算コードの習熟に係る講習が必要である。潜在的なユーザが数多く予想される施設については、計算コードの利活用のための特別なプログラムも必要である。
5	国内法令改定を踏まえて見直される遮蔽計算用定数及び遮蔽計算用データの刊行支援	遮蔽計算を実施する申請者の便宜を図るため、国内法令改定時には新しい遮蔽計算用定数及び遮蔽計算用データの一覧が刊行される。今回整備した2007年勧告等に基づくデータ及び簡易遮蔽計算コードを活用して刊行に協力する。

表5-6の3番について、遮蔽計算実務マニュアルには光子の他に $\beta$ 核種及び中性子源の遮蔽計算法も記載されているが(4.1.1項参照)、それらの計算に必要なデータは今回見直していない。2007年勧告等において、特に中性子の実効線量換算係数は広いエネ

ルギ範囲にわたって改訂されており、1 MeV を超える領域では現行の換算係数より 5% 位高い (図 5-9)。中性子源の線量評価の正しさを今後も確保していくためには、中性子源の遮蔽計算用データの見直しが不可欠である。また施設の申請者が実施する遮蔽計算の便宜を図るためには、中性子源に対応した計算コードの開発も必要である。

表 5-6 の 4 番について、放射線施設の遮蔽計算は一般にデータ集を参照した手計算で実行されており、申請者が計算コードを用いる機会は少ないと思われる。そこで、潜在的なユーザも含めて、計算コードの使用に不慣れな申請者を支援するため、簡易遮蔽計算コードの習熟に係る講習会を近く開催する予定である。同時に、将来想定される国内法令改定のポイント及びその潜在的な影響について周知することが、2007 年勧告等に基づく遮蔽評価の確実な履行に不可欠である。

表 5-6 の 5 番について、国内法令の改定時には従来、改定内容にそって見直した遮蔽計算用定数及びデータがアイソトープ手帳や遮蔽計算実務マニュアルのデータ集を通じて刊行されてきた。本ガイドラインでは、2007 年勧告等に基づく遮蔽計算用定数を一覧表の形で与える代わりに、簡易遮蔽計算コードを用いて計算する手順を示すにとどめた (4.4 節参照)。将来のデータ集の改訂に資するため、今後、定数計算の妥当性を改めて確認するとともに、データ集の発行元に成果の活用を働きかける所存である。

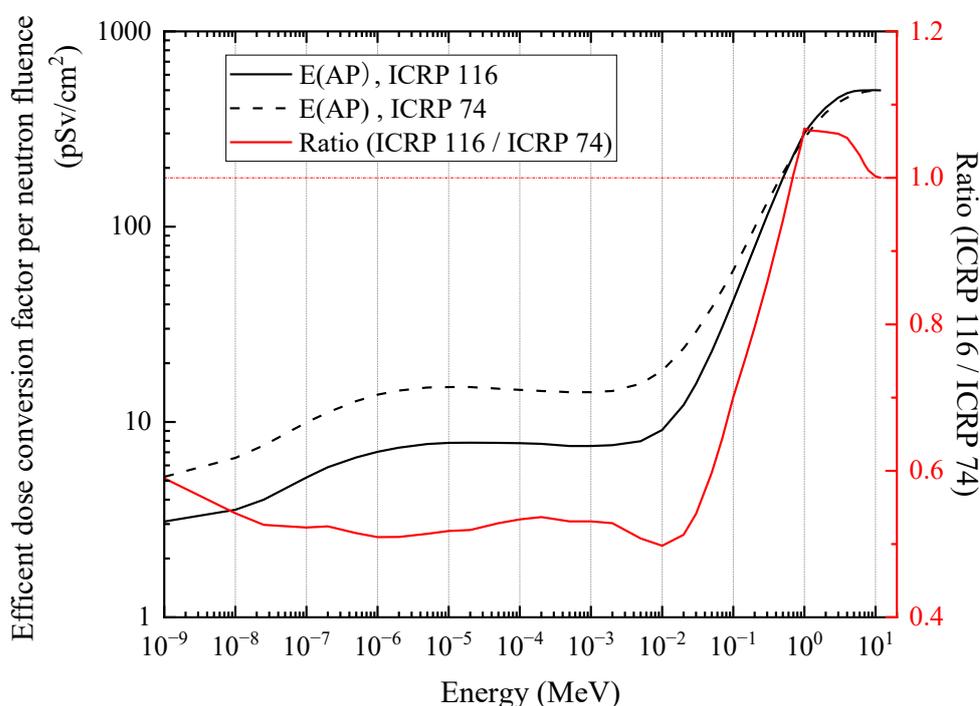


図 5-9 中性子フルエンス当たりの実効線量換算係数 (AP 照射) のエネルギー変化

## 参考文献

- [5-1] 日本原子力学会標準,  $\gamma$  線ビルドアップ係数 : 2013, AESJ-SC-A005 : 2013 (2013).
- [5-2] 原子力安全研究協会, 実用量及び防護量としての実効線量に係る動向調査, 平成30年度原子力規制庁委託成果報告書 (平成31年3月).

## 【用語集】

### ICRP2007 年勧告：

2022 年時点、ICRP 103 に基づく最新の ICRP 主勧告である。放射線加重係数及び組織加重係数が近年の知見により見直された。

### 実用量：

実効線量等の防護量は臓器の吸収線量を元に算出されており、現実には測定不可能な量であるため、これを代替する保守的かつ測定可能な量として実用量が用いられる。実用量には周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量等がある。例えば周辺線量当量は人体を模擬した組成を持つ直径 30cm 球(ICRU 球)を一方向から入射する放射線場に置き、一定の深さの位置での線量当量(吸収線量×線質係数×その他の補正係数)として定義される。

### 防護量：

防護量とは放射線による人体への影響の度合いを数値化したものであり、臓器の被ばく量を表す等価線量と、全身の放射線被ばくの総量を表す実効線量がある。等価線量は各臓器の平均吸収線量に放射線加重係数を掛けて算出され、実効線量は各臓器の等価線量に組織加重係数を掛けて全臓器で足し合わせることで算出される。臓器の平均吸収線量は実際には測定不可能であるため、防護量を測定することは不可能である。また各臓器の吸収線量は体格や性別によって異なるため、同一の放射線場においても防護量は個々人で異なる値となる。

### ICRP：

国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection) の略称。国際放射線防護委員会は、公共の利益のために電離放射線防護に関する勧告と指針を提供することを目的として設立された、登録慈善団体 (チャリティ) である。主な勧告には 1977 年勧告 (ICRP 26)、1990 年勧告 (ICRP 60)、2007 年勧告 (ICRP 103) 等がある。

### ICRU：

国際放射線単位測定委員会 (International Commission on Radiation Units and Measurements) の略称。放射線関連の量と単位、用語、測定手順、基準データに関する勧告を作成し公布することを目的として活動する民間の非営利組織。

放射能 (Bq)、吸収線量 (Gy)、等価線量 (Sv) 等の単位の定義は ICRU による。

IAEA :

国際原子力機関 (International Atomic Energy Agency) の略称。国際連合の保護下にある自治機関であり、原子力の平和的利用の促進、及び原子力の軍事利用の防止を目的とする。

周辺線量当量  $H^*(10)$  :

$H^*(10)$ とは深さ 10 mm (1 cm) の周辺線量当量を表す。これは人体を模擬した組成を持つ直径 30 cm 球 (ICRU 球) を整列拡張場 (場の放射線を一方に揃えた仮想的な放射線場) に置き、照射方向上流側の表面から深さ 10 mm の点での線量当量である。周辺線量当量は、透過力が大きく方向性の小さい放射線 (高エネルギー光子等) を対象として用いられる。

方向性線量当量  $H'(0.07,\alpha)$  :

$H'(0.07,\alpha)$ は深さ 0.07 mm、角度  $\alpha$  の方向性線量当量を表す。これは ICRU 球を一方から入射する放射線場に置き、放射線の方向に対して角度  $\alpha$  傾いた 0.07 mm 深さの位置の線量当量である。透過力の弱いベータ線や軟 X 線は非常に遮蔽されやすく、線量は測定方向に大きく依存するため、このような種類の放射線による被ばくを評価するために方向性線量当量が用いられる。

ICRU スラブ :

ICRU スラブとは ICRU が定めた個人線量当量算出のためのスラブファントムを指す。形状は 30 cm × 30 cm × 15 cm の直方体であり、人体組織を模擬した組成となっている。 $H_{p,slab}(10,0)$ は、この ICRU スラブに放射線が垂直入射した場合の、入射面中央での深さ 10 mm における線量当量である。

円筒ファントム :

3 mm 個人線量当量は低エネルギー  $\beta$  線等の透過力の小さい放射線による、水晶体のような人体表面近くでの被ばくの評価に用いられるが、スラブファントムでの評価では放射線入射角度が大きくなるとファントムで遮蔽が厚くなり実際の人体の被ばくとの差異が大きくなることがわかっている。このため入射角が大きい場合の  $H_p(3)$ 評価には円筒ファントムを用いることが提案されている。

方向性吸収線量 (眼の水晶体への方向性吸収線量、局所皮膚への方向性吸収線量) :

ICRU 95 で提案された方向性線量当量を吸収線量に換えた量である。ICRP 及び ICRU は、近年のレポートで水晶体や皮膚の確定的放射線影響に対しては等価線量ではなく吸収線量を元に管理した方が適切であると提言した。これに従えば、方向性線

量当量の代わりに方向性吸収線量を用いることとなる。

放射線デトリメント (detriment、損害) :

低線量および低線量率の放射線被ばくによる確率的影響 (がん及び遺伝性影響) の健康への影響を定量化するために ICRP が定義した概念で、確定的影響のしきい線量以下での被ばくに適用される。デトリメントは、被ばくした特定の集団において、誘発される確率的影響の発生する確率、その重さの程度、被ばく後の時間的発現分布等を考慮に入れた統計量として表される。

実効線量の計算で用いる (全身の) 照射条件 :

人体の被ばく線量は、放射線の人体への入射条件によって値が異なる。このため、ICRP 74 及び ICRP 116 では、次の 6 種類の入射条件を規定し、それらの条件に対する実効線量への換算係数が示されている。

- ・ AP (前方-後方) 照射条件: 人体前面から後面へ、人体中心軸に垂直方向に一樣に入射する面平行ビームによる照射
- ・ PA (後方-前方) 照射条件: 人体後面から前面へ、AP 同様のビーム照射
- ・ LLAT (左側方) 照射条件: 人体の左側面から右方向へ、AP 同様のビーム照射
- ・ RLAT (右側方) 照射条件: 人体の右側面から左方向へ、AP 同様のビーム照射
- ・ ROT (回転) 照射条件: AP 同様のビームで照射される場の中で、中心軸の周りに一樣な速度で人体を回転させる照射
- ・ ISO (等方) 照射条件: 単位立体角当たりの粒子フルエンスが方向に依存せず一定の放射線場における照射

(以下は、本ガイドラインにおける定義)

遮蔽計算用データ :

光子の遮蔽計算に用いられる基礎的な係数データのこと、本ガイドラインで検討して新たに整備した光子の減衰係数及び線量ビルドアップ係数を指す。なお、核壊変データ及び線量換算係数も遮蔽計算用データの一部であるが、今回の見直しでは ICRP 107 及び ICRP 116 で示された値をそのまま使用しており、特に検討していない。

遮蔽計算用定数 :

遮蔽計算を簡便に手計算で実施できるように整備された中間的な定数のこと、放射性同位元素の実効線量率定数及び遮蔽材の実効線量透過率を指す。10 分の 1 価層及び半価層も遮蔽計算用乗数に含まれるが、今回の見直しでは検討していない。

以上