



放射線遮蔽ハンドブック

— 基礎編 —

A Handbook of Radiation Shielding
— basics —

2015年3月

「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会
一般社団法人 日本原子力学会

Research Committee on Shielding Handbook
Atomic Energy Society of Japan

目次

はしがき	1
1. 概説	2
1.1 刊行の経緯	2
参考文献	3
1.2 編集方針	3
1.3 本書使用上の注意点	3
1.4 委員名簿と各章の執筆者	5
2. 線源	8
2.1 概要	8
2.2 アイソトープ線源	8
2.2.1 γ 線源	8
2.2.2 β 線源	10
2.2.3 中性子線源	11
(1) 自発核分裂、(2) (α , n)反応	
参考文献	12
2.3 商業用軽水型原子炉施設における線源	12
2.3.1 線源の概要	12
(1) 中性子、(2) γ 線	
2.3.2 BWR	12
(1) 通常運転時の線源、(2) 事故時の線源	
2.3.3 PWR	16
(1) 通常運転時の線源、(2) 事故時の線源、(3) 大型改造工事に係る線源	
参考文献	20
2.4 核融合炉	20
2.4.1 磁場閉じ込め DT 核融合炉	20
2.4.2 DT 核融合中性子及び γ 線の発生	22
2.4.3 核融合炉における中性子発生量と遮蔽の目的	24
参考文献	26
2.5 核燃料再処理施設等における線源	27
2.5.1 施設の概要と線源	27
(1) 再処理施設等の概要、(2) 再処理施設等の線源の考え方	
2.5.2 線源強度への影響因子	32
(1) 線源の生成プロセス、(2) 燃焼度の影響、(3) 冷却時間の影響	
2.5.3 線源強度の算出法	35
(1) 燃焼計算コードを用いた線源強度の算出法、(2) 放射化 γ 線源強度の算出法	

参考文献	37
2.6 電子線加速器	37
2.6.1 考慮すべき放射線と主な発生源	37
2.6.2 電磁カスケードに対する遮蔽設計	38
2.6.3 中性子の生成と遮蔽設計	38
2.6.4 ミューオンの生成と遮蔽設計	39
2.6.5 ガス制動放射線	39
参考文献	41
2.7 陽子線、重イオン加速器	41
2.7.1 背景	41
2.7.2 陽子線、重イオン加速器の概要	41
(1) サイクロトロン、(2) 小型サイクロトロン、(3) 線形加速器、(4) 重イオン加速器	
2.7.3 γ 線生成	42
2.7.4 中性子生成	42
(1) Moving Source Model による中性子生成量スペクトルの汎用評価法	
参考文献	50
3. 断面積とライブラリー	52
3.1 概要	52
3.2 断面積	52
3.2.1 定義	52
(1) 微視的断面積、(2) 巨視的断面積、(3) 反応率	
3.2.2 種類	53
(1) γ 線、(2) 中性子	
3.2.3 断面積データライブラリー	63
(1) 評価済核データライブラリー、(2) 特殊目的核データライブラリー	
参考文献	67
3.3 群定数ライブラリー	68
3.3.1 群定数ライブラリーの定義	68
3.3.2 群定数処理	69
(1) 共鳴パラメータ処理、(2) スムース断面積処理、(3) 温度処理、(4) KERMA 係数と DPA 断面積の処理、(5) 自己遮蔽因子処理、(6) 中性子散乱マトリックス処理	
(7) 群定数ライブラリーの作成	
3.3.3 群定数処理コード	78
(1) NJOY99、(2) NJOY2012、(3) AMPX-2000、(4) CALENDF-2010、(5) PREPRO2012	
3.3.4 群定数ライブラリーセット	80
参考文献	83
3.4 連続エネルギー断面積ライブラリー	85

3.4.1	連続エネルギー断面積ライブラリーの定義	85
3.4.2	断面積処理	87
	(1) エネルギー・角度分布処理、(2) 連続エネルギー断面積ライブラリーの作成	
3.4.3	断面積処理コード	89
	(1) NJOY99、(2) NJOY2012、(3) AMPX-2000、(4) CALENDF-2010、(5) PREPRO2012、 (6) LICEM2010	
3.4.4	連続エネルギー断面積ライブラリーセット	90
	参考文献	93
3.5	線量換算係数	94
3.5.1	実効線量	94
3.5.2	計測実用線量	94
3.5.3	照射線量	95
3.5.4	遮蔽計算に用いる線量換算係数の標準値	95
	参考文献	95
4.	輸送計算法	98
4.1	概要	98
4.2	ボルツマン輸送方程式の基礎概念	98
4.2.1	緒言	98
4.2.2	位相空間と分布関数	98
4.2.3	輸送方程式の導出	101
4.2.4	遮蔽計算コードで用いる輸送方程式	103
4.2.5	境界条件	104
4.2.6	基本形状に対するドリフト項の表現	104
4.2.7	積分表現	104
4.2.8	多群近似	106
	参考文献	108
4.3	離散座標法	108
4.3.1	序論	108
4.3.2	基本式	109
4.3.3	差分近似式	110
4.3.4	数値解法	111
4.3.5	中性子・ γ 線結合計算	112
4.3.6	離散座標法における注意点	114
	(1) 空間メッシュと差分近似、(2) レイエフェクト、(3) 角度分点とルジャンドル展開	
4.3.7	計算コード	116
	(1) ANISN、(2) DOT 及び DORT、(3) TORT、(4) PARTISN、(5) SCALE コードシステム、(6) その他のコードシステム	

参考文献	121
4.4 モンテカルロ法	124
4.4.1 概要	124
4.4.2 乱数と疑似乱数	126
4.4.3 確率分布	127
(1) 確率変数が 1 つの場合の確率密度関数及び累積分布関数、(2) 分布からの標本抽出、(3) 確率変数が 2 つの場合の確率密度関数及び累積分布関数	
4.4.4 アナログモンテカルロ法による標本抽出	132
(1) 粒子の追跡、(2) 統計の方法	
4.4.5 誤差の評価	134
(1) 期待値、(2) 分散、(3) 中心極限定理	
4.4.6 アナログモンテカルロ法を使用した具体的な計算例	139
4.4.7 非アナログモンテカルロ法	141
(1) 分散の性質、(2) インポートランス・サンプリング、(3) 分散低減法	
4.4.8 位相空間内における粒子の追跡	149
(1) 断面積と衝突、(2) 中性子の散乱、(3) 光子の相互作用、(4) 多群相互作用、(5) タリー、(6) 幾何学的形状内における粒子の追跡、(7) 粒子の追跡、(8) 幾何学的形状の記述の単純化	
4.4.9 計算形状	155
(1) 計算形状定義の種類、(2) 計算形状作成の留意点、(3) 計算体系の定義例 (原点が中心の上側半球の領域)、(4) CAD データから形状入力データ自動作成コード	
4.4.10 CADIS 法	160
(1) 概要、(2) 理論、(3) CADIS 法、(4) FW-CADIS	
4.4.11 計算コード	164
(1) MCNP、(2) PHITS、(3) MVP/GMVP、(4) EGS、(5) FLUKA、(6) TRIPOLI、(7) MARS、(8) MONACO/MAVRIC、(9) Geant	
参考文献	178
4.5 随伴計算	182
4.5.1 概要	182
4.5.2 輸送計算と随伴結合計算による遮蔽設計	182
(1) 基礎式、(2) モンテカルロ-随伴モンテカルロ結合計算法の計算例	
4.5.3 輸送計算と随伴計算による断面積感度解析	185
(1) 基礎式、(2) 断面積感度解析の適用	
参考文献	186
4.6 Invariant Embedding 法	188
4.6.1 序論	188
(1) 開発の経緯、(2) 角度分布計算上の課題	
4.6.2 反射・透過関数の基本式	188

(1) 半無限均質平板の反射関数、(2) 修正透過関数の導入と基本方程式	
4.6.3 IE 法コード GTIET5	190
(1) 計算コードの概要、(2) 空間積分誤差の評価	
参考文献	191
5. バルク遮蔽の簡易計算手法	192
5.1 概要	192
5.2 単純形状線源に対する計算式	192
5.2.1 点減衰核法	192
(1) γ 線、(2) 中性子、(3) 点減衰核法の適用	
5.2.2 実効線量等の透過率を使用した各種計算法	202
(1) 放射性同位元素に対する計算方法、(2) 医療用電子加速器、(3) 高エネルギー電子加速器、(4) 高エネルギーイオン加速器	
参考文献	215
5.3 簡易計算コード	128
5.3.1 γ 線計算コード	218
(1) SPAN、(2) QAD	
5.3.2 高エネルギーイオン加速器計算コード	224
(1) BULK	
参考文献	227
6. ストリーミングの簡易計算手法	229
6.1 概要	229
参考文献	230
6.2 簡易計算法	231
6.2.1 放射線ストリーミングの計算原理	231
(1) 線源条件、(2) 直接線に対する計算式、(3) アルベド直接線に対する計算式、(4) 漏えい線に対する計算式	
6.2.2 直円筒ダクト	235
(1) 直接成分、(2) 原子炉遮蔽における速中性子に対する経験式、(3) γ 線アルベド成分に対する Shindo らの半経験式、(4) 中性子アルベド成分に対する Simon-Clifford の式、(5) Ray analysis 法による漏えい成分の計算式、(6) Piercey の方法、(7) Fisher の理論式、(8) 中性子に対する Miura の式、(9) γ 線または速中性子に対する漏えい成分の計算データ表	
6.2.3 遮蔽体を部分的に貫通した直円筒ダクト	242
(1) 開口部が遮蔽体出口にある場合、(2) 開口部が線源側にある場合	
6.2.4 屈曲円筒ダクト	244
(1) 中性子に対する $1/\sin\theta$ 結合式、(2) 原子炉遮蔽での速中性子の経験式、(3) 中性子に対する Miura の式、(4) γ 線に対する Wijker の式、(5) γ 線に対する DIN 規格の式、(6) Fisher の理論式、(7) Shin の半経験式	

6.2.5 直円環ダクト	253
(1) 直接成分、(2) 原子炉遮蔽における経験式その 1、(3) 中性子に対する原子炉遮蔽における経験式その 2、(4) 中性子に対する Price らの式、(5) 中性子に対する Miura らの式、(6) Fisher の理論式	
6.2.6 直スロット (矩形直ダクトまたは直スリット)	256
(1) 直接成分、(2) 速中性子に対する原子炉遮蔽における経験式、(3) Fisher の理論式	
6.2.7 屈曲スロット (矩形屈曲ダクトまたは屈曲スリット)	259
(1) Fisher の理論式、(2) γ 線に対する Ingold-Huddleston の経験式、(3) γ 線に対する Huddleston-LeDoux の経験式、(4) γ 線に対する矩形 2 回屈曲ダクトの経験式、(5) 中性子に対する中村-上叢の式、(6) 中性子に対する Tesch の式、(7) 日本医学放射線学会の式等	
6.2.8 補償遮蔽設計法	266
6.2.9 アルベドデータ	267
(1) γ 線に対するアルベド簡易式、(2) 中性子に対するアルベド簡易式	
6.2.10 簡易式の適用における問題点	273
(1) 斜め入射、(2) 簡易式パラメータの選択、(3) 屈曲ダクトの問題点、(4) 空隙部斜め後方の線量評価、(5) 配管相互の影響	
参考文献	281
6.3 簡易計算コード (DUCT-III)	283
(1) 基本式、(2) 直接線の評価式、(3) ダクト入口面での仮想線源項 S_j の定義、(4) n 回散乱線束の深さ分布関数 $\phi_j^{(n)}(x)$ 、(5) アルベドデータ、(6) 屈曲ダクト、(7) 壁散乱成分、(8) 線源データベース	
参考文献	287
7. スカイシャインの簡易計算手法	289
7.1 概要	289
7.2 γ 線スカイシャイン	289
7.2.1 一回散乱計算法	289
7.2.2 Line-beam を用いた計算法	290
7.2.3 γ 線スカイシャイン簡易計算コード	292
(1) G33、(2) SKYSHINE	
参考文献	294
7.3 中性子スカイシャイン	295
7.3.1 空気の実効減弱距離を用いた計算法	295
(1) Stevenson-Thomas の式、(2) Stapleton の式	
7.3.2 中性子スカイシャイン簡易計算コード	297
(1) SHINE コード	
参考文献	298

8. 放射化	299
8.1 概要	299
8.2 核分裂炉と核融合炉における放射化	299
8.2.1 放射化のメカニズム	299
(1) 1次核反応、(2) シーケンシャル反応（荷電粒子逐次反応）、(3) 多段階反応	
8.2.2 放射化計算の基礎理論	300
8.2.3 誘導放射能	301
(1) 原子炉施設、(2) 核融合施設	
参考文献	302
8.3 加速器施設における放射化	305
8.3.1 放射化のメカニズム	305
(1) 中性子による放射化、(2) 陽子による放射化、(3) 重イオンによる放射化、	
(4) 電子による放射化	
8.3.2 簡易計算手法	314
(1) 空気の放射化、(2) 水の放射化	
参考文献	315
8.4 放射化計算コード	317
8.4.1 計算手法	317
(1) 遷移行列、(2) 指数行列法、(3) Bateman 法、(4) 輸送計算コードとの結合、	
(5) 荷電粒子による放射化、(6) モンテカルロシミュレーションによる放射化計算	
8.4.2 ORIGEN	324
(1) 核種生成量の計算手法、(2) ORIGEN2、(3) ORIGEN-S、(4) ORIGEN-ARP	
8.4.3 FISPACT	328
8.4.4 ACTIVE	330
8.4.5 DCHAIN-SP	331
参考文献	333
8.5 低放射化	335
8.5.1 低放射化のための考え方	335
(1) 構造材の放射化に起因する主要核種を低減する方法、(2) 構造材中に中性子吸収物質を入れて放射化に起因する主要核種の誘導放射能を減らす方法、(3) 構造材に入射する中性子を低減する方法	
8.5.2 低放射化のための具体例	337
8.5.3 クリアランス	338
参考文献	342
9. 遮蔽材	343
9.1 概要	343
参考文献	343
9.2 γ 線用遮蔽材	343

9.2.1 鉛	343
9.2.2 タングステン	344
9.2.3 水	345
参考文献	345
9.3 中性子用遮蔽材	346
9.3.1 水	346
9.3.2 ポリエチレン	346
9.3.3 ホウ素	347
9.3.4 グラファイト（黒鉛）	347
9.3.5 カドミニウム	348
9.3.6 水素含有材料	348
参考文献	348
9.4 γ 線・中性子共通の遮蔽材料	349
9.4.1 コンクリート	349
9.4.2 土	352
9.4.3 鉄	354
参考文献	354
9.5 各材料の中性子遮蔽特性	354
10. 放射線防護の考え方	357
10.1 いくつかのICRP主勧告を通じた放射線防護の変遷と線量限度	357
参考文献	358
10.2 線量概念の変遷	359
10.2.1 放射線防護に使用される諸線量の関係	359
10.2.2 防護量	360
10.2.3 実用量（実用計測量）	361
10.2.4 放射線加重係数、線質係数及びRBE	361
10.2.5 組織加重係数	363
参考文献	364
10.3 遮蔽計算における線量評価と線量測定	365
10.3.1 遮蔽計算における線量評価	365
(1) 遮蔽計算で求める線量、(2) 線量の計算法及び換算係数、(3) γ 線の計算で使用される係数及びカーマについて	
10.3.2 場の線量測定	367
(1) サーベイメータによる線量率測定、(2) モニタリングポストでの線量率測定	
10.3.3 個人被曝線量の測定	368
参考文献	369

はしがき

放射線遮蔽ハンドブックは、1988年1月に「放射線施設遮蔽」研究専門委員会の下で、「ガンマ線遮蔽設計法」ワーキンググループ（主査 竹内清（船舶技術研究所））が刊行している。その後、1993年4月に「放射線挙動工学」研究専門委員会の下で、「中性子遮蔽設計法」ワーキンググループ（主査 竹内清から中村尚司（東北大）に引き継ぎ）が刊行している。それから既に20年余り経ち、この間放射線の工業や医療利用が急速に進展し、加速器施設が大幅に増えている。また、コンピューターの急速な発展により、遮蔽設計にも複雑形状でのモンテカルロ法などの精密計算が取り入れられている。これらの遮蔽計算に使用される断面積データライブラリの整備も大きく進展している。

最近では、計算コードの国産化とコードの **Verification & Validation** の重要性が認識され、それを進めようとしている。このような状況の中で、ガンマ線と中性子に対する遮蔽研究の最新の知見をまとめたハンドブックを「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会が20年ぶりに刊行することは、極めて有意義なことである。

2015年3月

中村尚司

1. 概説

1.1 刊行の経緯

1964年、日本原子力学会に「遮蔽」研究専門委員会が設置されて以来、歴代の放射線遮蔽関連の研究専門委員会は、原子炉、燃料サイクル施設、輸送容器、RI取扱施設、加速器施設、核融合実験施設等の遮蔽研究の進展に重要な役割を果たしてきた。

これらの活動の一環として、1984年に竹内清氏を主査として発足した「放射線施設遮蔽」研究専門委員会は、ガンマ線遮蔽設計法ワーキンググループを設け、1988年1月に「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」[1.1-1]を刊行した。次いで主査が中村尚司氏に交代した委員会は、1993年4月に「中性子遮蔽設計ハンドブック」[1.1-2]を出版した。

上記2冊のハンドブックの刊行から20年以上が経過した。この間の特筆すべき第一の変化は、計算機の飛躍的発展であろう。従来は、放射線輸送計算を行うには限られた大学や研究所、企業が所有する大型計算機が必要であり、比較的計算時間が短い決定論的方法（ S_N 法など）によっても、2次元あるいは3次元計算では長時間の占有が必要であった。しかし近年は卓上の小型計算機が20年前のスーパーコンピュータに比肩する性能を有するようになっている。比較的小型の構造物ならば、卓上で気軽にモンテカルロ計算を行えるようになった。また計算機の発達と普及は複雑な輸送計算に寄与しただけではなく、簡易計算法による手計算においても、Excelなどの表計算ソフトを用いて、少し込み入った計算でも短時間で出来るようになった。

一方計算機の発達と両輪をなすように、モンテカルロコードの発展は目覚ましい。昔使われた多群モンテカルロコード[1.1-3]は姿を消し、現在主に使われるのは連続エネルギーモンテカルロコードである。また以前は中性子と光子だけ、あるいは光子と電子だけを扱うというように、限られた用途のコードが主流であったが、現在は中性子、光子を始めとして、加速されたイオン、電子なども含め、放射線を総合的に扱うコードが複数開発されている。これによって、小規模のRI施設から原子力施設、高エネルギーの加速器施設までを、一つのコードで計算できるようになりつつある。我が国において、重イオンも扱える総合的なコードであるPHITS[1.1-4]、光子と電子を精密に扱うEGS5コード[1.1-5]などが開発され、広く世界的に利用されるようになってきたことは特筆すべきである。

しかし技術革新は肯定的な面を有するだけではない。従来であれば、遮蔽設計計算を行う場合、放射線の挙動を深く理解した研究者が、さまざまな工夫をすることによって、合理的な時間内に計算を進めるように努力してきた。一方近年では手軽に複雑な計算を行うことが可能になったため、物理的な要点を深く考えず、やみくもにモンテカルロ計算を実施し、結果だけを見る傾向があることも否めない。

2008年には「放射線遮蔽」研究専門委員会（主査は平山英夫氏）が発足し、放射線遮蔽分野に係る技術課題を整理し、技術ロードマップが作成された[1.1-6]。その中では下記の3つの重要課題が指摘された。

- ①許認可を見据えた遮蔽計算手法（含むコード、核データライブラリ）の標準化
- ②国産遮蔽コード開発を含む遮蔽計算手法の高精度化
- ③人材育成を含む技術伝承

上記の内、特に③の「技術伝承」に重点をおき、2012年に「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会を発足させ、前記2冊の遮蔽ハンドブックを最新の知見をもとに大幅改定することとなった。これは放射線遮蔽分野での技術知見の「見える化」を図るとともに、作成の活動を通じて若手委員を含めた放射線遮蔽分野の人材育成も見据えている。またハンドブックの作成

は、必然的に遮蔽計算手法の標準化、高精度化に繋がるものである。

参考文献

- [1.1-1] 「放射線施設遮蔽」研究専門委員会 「ガンマ線遮蔽設計法」ワーキンググループ, “ガンマ線遮蔽設計ハンドブック,” 日本原子力学会 (1988).
- [1.1-2] 「放射線挙動工学」研究専門委員会 「中性子遮蔽設計法」ワーキンググループ, “中性子遮蔽設計ハンドブック,” 日本原子力学会 (1993).
- [1.1-3] E. A. Straker, P. N. Stevens, D. C. Irving and V. R. Cain, “The MORSE Code – A Multigroup Neutron and Gamma-ray Monte Carlo Transport Code”, ORNL-4585 (1970).
- [1.1-4] T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, “Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52”, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013)
- [1.1-5] H. Hirayama, Y. Namito, A.F. Bielajew, S.J. Wilderman and W.R. Nelson, “The EGS5 Code System”, SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
- [1.1-6] 「放射線遮蔽」研究専門委員会, 放射線遮蔽分野の技術ロードマップの検討, 日本原子力学会 (2012). http://www.aesj.or.jp/special/report/2011/r_hoshasenshahei20120614.pdf

1.2 編集方針

委員会で議論を重ねた結果、以下の方針で出版することとなった。

- 1) 遮蔽計算の方法論を説明する基礎編と、実際の施設への適用例を示す応用編の2部構成とする。本書はそのうちの基礎編である。
- 2) 高エネルギー γ 線は光中性子を発生させ、また中性子は2次 γ 線を生ずることから、中性子と γ 線を分けずに扱う。
- 3) 医療分野など、加速器の応用が急速に広がっていることから、対象を高エネルギー加速器まで広げる。また原子力分野においても、再処理施設なども範疇に含める。
- 4) 本書に新しい技術の紹介を取り込むことは自明であるが、近年使われることが少なくなった技術については、項目と文献を紹介する程度にとどめる。
- 5) 計算コードについては、学術的ではなく、また流動的ではあるが、読者の利便のために入手方法などの項目も示す。
- 6) 放射化は遮蔽とは異なる。しかし系統的に扱っている文献が少ないこと、遮蔽設計技術者が放射化も扱うことが多いこと、また放射化は γ 線源を生じ、それは遮蔽の対象であることから、本書に含める。
- 7) 線量換算係数やビルドアップ係数のように、学会等で別途標準化されているものは、積極的にそれらを引用することとする。
- 8) 本書の扱う分野は広く、分野によって若干用語の使い方が異なるため、本書全体での用語の統一は図らない。
- 9) 技術の進歩に合わせて本書の改訂が容易に行われるように留意して編集し、今後常に最新状態に維持されるように努める。

1.3 本書使用上の注意点

本書は「ガンマ線遮蔽設計ハンドブック」[1.1-1]と「中性子遮蔽設計ハンドブック」[1.1-2]を合わせた改訂版である。したがって計算理論など、現在でも修正の必要のない内容について

ては、旧版の記述をそのまま踏襲している箇所があることはご容赦願いたい。

本書の内容は非常に幅広く、1章から順に通り読破するのは容易ではない。そのため、限られた目的で実務的に本書を利用する読者を想定し、以下に目的別に読み方を例示する。

1) γ 線を放出するRI線源を使用する施設の簡便な遮蔽設計

- (1) 線源の性質を「2.2.1 γ 線源」から理解する。
- (2) 遮蔽材料を「9.2 γ 線用遮蔽材」、「9.4 γ 線・中性子共通の遮蔽材料」から選択する。
- (3) 壁や天井などの必要な遮蔽厚さを「5.2 単純形状線源に対する計算式」から計算する。
- (4) 壁などに通路やダクトなどの開口部がある場合、「6.2 簡易計算法」から漏えい線量を計算し、必要な対策を講じる。
- (5) 壁に比べ天井が薄い場合、上空の空気による散乱にともなう線量を「7.2 γ 線スカイシャイン」から計算し、必要な対策を講じる。
- (6) 上記では解決できず、さらに精度の高い詳細な計算が必要な場合は、「4. 輸送計算法」とそれに必要な核データ「3. 断面積とライブラリー」をもとに詳細計算を行う。

2) ^{252}Cf や $^{241}\text{Am-Be}$ などの中性子を放出するRI線源を使用する施設の簡便な遮蔽設計

- (1) 線源の性質を「2.2.3 中性子線源」から理解する。
- (2) 遮蔽材料を「9.3 中性子用遮蔽材」、「9.4 γ 線・中性子共通の遮蔽材料」から選択する。
- (3) 壁や天井などの必要な遮蔽厚さを「5.2 単純形状線源に対する計算式」から計算する。
- (4) 壁などに通路やダクトなどの開口部がある場合、「6.2 簡易計算法」から漏えい線量を計算し、必要な対策を講じる。
- (5) 壁に比べ天井が薄い場合、上空の空気による散乱にともなう線量を「7.2 γ 線スカイシャイン」から計算し、必要な対策を講じる。
- (6) 上記では解決できず、さらに精度の高い詳細な計算が必要な場合は、「4. 輸送計算法」とそれに必要な核データ「3. 断面積とライブラリー」をもとに詳細計算を行う。

3) 20 MeV 程度までの医療用電子線加速器を使用する施設の簡便な遮蔽設計

- (1) 線源の性質を「2.6 電子線加速器」から理解する。
- (2) 加速エネルギーが 10 MeV 以下であれば「9.2 γ 線用遮蔽材」、「9.4 γ 線・中性子共通の遮蔽材料」から、10 MeV を超える場合は必要に応じて「9.3 中性子用遮蔽材」を参照し、遮蔽材料を選択する。
- (3) 壁や天井などの必要な遮蔽厚さを「5.2 単純形状線源に対する計算式」から計算する。
- (4) 壁などに通路やダクトなどの開口部がある場合、「6.2 簡易計算法」から漏えい線量を計算し、必要な対策を講じる。
- (5) 壁に比べ天井が薄い場合、上空の空気による散乱にともなう線量を「7.3 中性子スカイシャイン」から計算し、必要な対策を講じる。ただし上階に病室などの居室がある場合は、天井遮蔽は十分な厚さがあるため、スカイシャインを評価する必要はない。
- (6) 上記では解決できず、さらに精度の高い詳細な計算が必要な場合は、「4. 輸送計算法」とそれに必要な核データ「3. 断面積とライブラリー」をもとに詳細計算を行う。

4) 原子力施設、高エネルギー加速器施設の遮蔽設計

複雑な要素が絡むため、簡易計算だけでは済まないことが多い。「2. 線源」の関係しない項目は読む必要はないが、放射化を伴うため、「2.2 アイソトープ線源」の知識は必要である。主には「4. 輸送計算法」に基づいた詳細計算を行うことになる。ただし簡易計算を併用し、詳細計算に大きな誤りが無いか適宜確認することが大切である。

施設が完成し運用が開始された際には、遮蔽性能が設計通りであるか測定を行い、安全を確認する必要がある。測定器は 1 cm 線量当量を与えるのに対し、遮蔽計算は実効線量につい

て行われている。通常は1 cm線量当量は実効線量よりも大きな値(安全側の値)であるので、測定の際に法令等で定める線量率限度を超えることのないよう、計算値には必要な安全裕度を持たせておく必要がある。必要な裕度については「10. 放射線防護の考え方」を参照されたい。

さまざまな使い方がなされる研究施設では、将来の拡張性を考えても、遮蔽設計は余裕を持っていることが望ましい。特に加速器施設では、ビームロス見積もりの不確かさに問題がある。加速器設計の際の見積もりよりも、実際のロスは大きいことが頻繁にあるため、類似施設の経験を参考にするとよい。ロスなどによる線源が不確かな場所では、線源評価には十分な裕度を持って設計すべきである。

1.4 委員名簿と各章の執筆者

「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会の委員名簿を以下に示す。右欄の2012、2014はそれぞれ2012年度から2年間の委員、および延長期間である2014年度からの委員であることを示す。延長期間は応用編出版のための委員会であるが、本書の刊行にも関与している。

区分	氏名	所属	年度
主査	上叢 義朋	独立行政法人理化学研究所	2012, 2014
幹事	浅見 光史	独立行政法人海上技術安全研究所	2012, 2014
幹事	今野 力	独立行政法人日本原子力研究開発機構	2012, 2014
幹事	坂本 浩紀	トランスニュークリア株式会社	2012, 2014
幹事	根本 裕二	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	2012, 2014
委員	安納 章夫	大成建設株式会社	2012, 2014
委員	糸賀 俊朗	公益財団法人高輝度光科学研究センター	2012, 2014
委員	岩下 充成	株式会社 IHI	2014
委員	植木 紘太郎	元東海大学	2012, 2014
委員	大石 晃嗣	清水建設株式会社	2012, 2014
委員	太田 雅之	独立行政法人日本原子力研究開発機構	2012
委員	大西 世紀	独立行政法人海上技術安全研究所	2012, 2014
委員	奥野 功一	株式会社安藤・間	2012, 2014
委員	奥村 啓介	独立行政法人日本原子力研究開発機構	2012, 2014
委員	小田野 直光	独立行政法人海上技術安全研究所	2012, 2014
委員	黒澤 正彦	株式会社東芝	2012, 2014
委員	郡司 智	株式会社東芝	2012, 2014
委員	後神 進史	独立行政法人原子力安全基盤機構	2012
委員	坂本 幸夫	株式会社アトックス	2012, 2014
委員	佐藤 理	株式会社三菱総合研究所	2012
委員	佐藤 聡	独立行政法人日本原子力研究開発機構	2012, 2014
委員	杉田 武志	有限会社科学システム研究所	2012, 2014
委員	助川 篤彦	独立行政法人日本原子力研究開発機構	2012, 2014
委員	高木 俊治	株式会社三菱総合研究所	2012, 2014
委員	高田 真志	防衛大学校	2012, 2014
委員	田中 照也	核融合科学研究所	2012, 2014

委員	谷内 廣明	トランスニュークリア株式会社	2012, 2014
委員	辻 政俊	経済産業省商務情報政策局	2012, 2014
委員	坪井 孝文	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社	2012, 2014
委員	中島 宏	独立行政法人日本原子力研究開発機構	2012
委員	中田 幹裕	MHI 原子力エンジニアリング株式会社	2012, 2014
委員	中根 佳弘	独立行政法人日本原子力研究開発機構	2012, 2014
委員	中野 秀生	日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社	2012, 2014
委員	中村 尚司	東北大学名誉教授	2012, 2014
委員	鍋本 豊伸	株式会社 IHI	2012
委員	波戸 芳仁	高エネルギー加速器研究機構	2012, 2014
委員	根本 誠	株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター	2012, 2014
委員	播磨 良子	元東京工業大学	2012, 2014
委員	伴 秀一	高エネルギー加速器研究機構	2012, 2014
委員	平尾 好弘	独立行政法人海上技術安全研究所	2012, 2014
委員	平田 雄一	NPO 法人放射線線量解析ネットワーク	2012
委員	平山 英夫	高エネルギー加速器研究機構	2012, 2014
委員	森島 誠	三菱重工業株式会社	2012, 2014
委員	山口 勝義	伊藤忠テクノソリューションズ株式会社	2012, 2014
委員	山野 直樹	福井大学	2012, 2014

各章の執筆担当者は以下のとおりである。下線は執筆責任者、*斜体字* は委員以外の執筆協力者とその所属を示す。

1 章 概説

上 蓑義朋

2 章 線源

谷内廣明、糸賀敏朗、黒澤正彦、高田真志、田中照也、中田幹裕、中村尚司

3 章 断面積とライブラリー

山野直樹、奥村啓介、*小迫和明 (清水建設株式会社)*、今野力、坂本幸夫、森島誠

4 章 輸送計算法

4.1 節から 4.3 節、4.5 節：郡司智、*上松幹夫(株式会社東芝)*、奥村啓介、*川合將義(高エネルギー加速器研究機構名誉教授)*、黒澤正彦、今野力、坂本浩紀、*多田恵子 (三菱FBR システムズ株式会社)*、谷内廣明、中田幹裕、平尾好弘、森島誠

4.4 節：浅見光史、*浅野芳裕 (独立行政法人理化学研究所)*、植木紘太郎、太田雅之、大西世紀、奥村啓介、*小井辰巳 (スタンフォード大学)*、坂本浩紀、佐藤聡、*佐藤達彦 (独立行政法人日本原子力研究開発機構)*、*佐波俊哉 (高エネルギー加速器研究機構)*、杉田武志、谷内廣明、中根佳弘、波戸芳仁

4.6 節：平尾好弘、*清水彰直 (NPO 法人放射線線量解析ネットワーク)*

5 章 バルク遮蔽の簡易計算手法

安納章夫、大石晃嗣、後神進史、坂本幸夫、中村尚司、播磨良子、伴秀一、平山英夫、森島誠

6 章 ストリーミングの簡易計算手法

平尾好弘、上叢義朋、澤田健一 (独立行政法人海上技術安全研究所)、増川史洋 (独立行政法人日本原子力研究開発機構)、松田規宏 (独立行政法人日本原子力研究開発機構)

7章 スカイシャインの簡易計算手法

中野秀生、坪井孝文、根本裕二、播磨良子、平山英夫

8章 放射化

助川篤彦、飯田浩正 (元独立行政法人日本原子力研究開発機構)、糸賀俊朗、奥村啓介、甲斐哲也(独立行政法人日本原子力研究開発機構)、今野力、中島宏、中村尚司、伴秀一、八島浩 (京都大学原子炉実験所)、山内通則 (株式会社東芝)

9章 遮蔽材

奥野功一、助川篤彦

10章 放射線防護の考え方

坂本幸夫、岩井敏 (一般社団法人原子力安全推進協会)、坂本浩紀、平山英夫

長い間放射線遮蔽分野で活躍して来られた播磨良子委員が、2015年1月1日に逝去された。播磨委員は、特に γ 線ビルドアップ係数に大きな貢献をされ、“Mrs. Buildup Factor”と呼ばれた。精力を注がれたGP(幾何級数)法に基づいたフィッティングはたいへん有用であり、1991年の米国原子力学会の γ 線ビルドアップ係数の標準、および最近の日本原子力学会の γ 線ビルドアップ係数の標準の制定に大きな貢献をされた。1990年4月に「新しい γ 線ビルドアップ係数の開発と遮蔽計算への応用」によって日本原子力学会技術賞、1991年には米国原子力学会からRPSD(放射線防護遮蔽部会) Professional Excellence Awardを受賞された。また2014年3月には「米国原子力学会標準ANSI/ANS-6.4.3(1991)に採用された γ 線ビルドアップ係数データ」に対して日本原子力学会歴史構築賞を受賞された。ここに謹んでお悔やみ申し上げます。(放射線工学部会ニュースレター, 2014-17号(532号)(2015年1月)に加筆・修正)