

平成29年度  
簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ

活動報告書

平成30年8月

一般社団法人日本原子力学会 放射線工学部会

*(This page is blank)*

## まえがき

本報告書は、平成 28 年から 30 年にかけて行われた簡易遮蔽解析又はそのために用いられる計算コードに係るレビュー活動の成果をまとめたものである。当該レビュー活動は、日本原子力学会放射線工学部会において以前平成 24 年から 25 年にかけて開催された「国産安全解析コード開発戦略検討ワーキンググループ」の検討内容を踏まえており、新設された「簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ」（以下、WG と呼ぶ。）の延べ 8 回にわたる会合を通して活動方針の議論と進捗・成果の報告がなされた。本報告書は、同部会に所属する専門家らによって執筆及び内容の精査が行われている。

本報告書の各章の概要は、下記のとおりである。

第 1 章：WG の設立趣意として、活動の目的と背景、メンバー構成、活動期間、検討範囲、基本姿勢等を記載する。

第 2 章：WG の活動実績を示し、開催した会合一覧、議題、外部発表、及びメンバーらの係る事業紹介や施設見学の記録を記載する。

第 3 章：簡易遮蔽計算の利用と開発に関して、文献調査と部会アンケートを実施し、結果をまとめて WG のアクションプランを策定する。

第 4 章： $\gamma$  線ビルドアップ係数について、研究の歴史及び基礎となる光子断面積ライブラリの特徴をまとめる。またモンテカルロ法コードによる係数計算の仕方をレビューし、断面積ライブラリの違いが係数に与える影響について調べる。

第 5 章：薄い遮蔽体を透過する  $\gamma$  線の簡易線量計算に係る課題をレビューする。厚さが平均自由行程の半分以下の薄肉タンクに汚染された水や吸着剤が入っているケースを取り上げ、適切なビルドアップ係数の選択、あるいは点減衰核積分法コードの適用性について調べる。

第 6 章：点減衰核積分法コードの新設を目指し、期待される機能や更新すべきデータ等をレビューして、コードの仕様と開発ロードマップを提案する。また実装に向けた開発資金獲得活動について紹介する。

第 7 章：ダクト・迷路に対する簡易ストリーミング計算の課題として、線源が環境に広範囲に面的分布するケースを取り上げ、屈曲ダクトの散乱線評価について述べる。また建屋の貫通部において、貫通孔内部が鉄で充填されているケースの簡易線量評価法をレビューする。

本報告書が、放射線遮蔽に携わる研究者、技術者、計算実務者、行政担当官をはじめ、原子力・RI 施設の遮蔽設計・安全解析に関心ある

多くの方々に活用され、放射線の利用とより一層の安全に向けた取り組みを推進していくための一助となれば幸いである。

平成 30 年 8 月  
簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ委員一同

## 目次

1. ワーキンググループ設立趣意 .....	1
1. 1. 活動の目的 .....	1
1. 2. WG の構成 .....	1
1. 3. 開催期間 .....	1
1. 4. 検討範囲 .....	2
1. 5. その他（本 WG の基本方針等） .....	2
参考文献 .....	3
2. ワーキンググループ活動実績 .....	4
2. 1. ワーキンググループ会合 .....	4
2. 1. 1. 会合一覧 .....	4
2. 1. 2. 検討議題のまとめ .....	6
2. 2. 外部発表 .....	7
2. 2. 1. 日本原子力学会 .....	7
2. 2. 2. NPO 法人放射線線量解析ネットワーク（ラドネット） .....	9
2. 3. 事業紹介、施設見学 .....	9
参考文献 .....	11
3. 簡易遮蔽解析コードの利用と開発に関する課題調査 .....	12
3. 1. 簡易遮蔽解析コードに係る文献調査 .....	12
3. 1. 1. 調査対象文献 .....	12
3. 1. 2. 調査結果と考察 .....	12
3. 2. 簡易遮蔽解析コードに係る課題共有アンケート .....	13
3. 2. 1. アンケート質問票と調査方法 .....	13
3. 2. 2. アンケート回答のまとめ .....	13
3. 3. WG アクションプランの提案 .....	17
参考文献 .....	19
4. $\gamma$ 線ビルドアップ係数のレビュー .....	20
4. 1. $\gamma$ 線 BF 研究の歴史 .....	20
4. 1. 1. GP 式の変遷 <sup>4-1), 4-2)</sup> .....	20
4. 1. 2. GP パラメータの決定 .....	22
4. 1. 3. $\gamma$ 線 BF を利用した計算コードの整備 .....	23
4. 1. 5. 日本原子力学会の $\gamma$ 線 BF 標準 .....	25
4. 1. 6. $\gamma$ 線減衰係数 .....	26
4. 1. 7. 日本国内における $\gamma$ 線 BF 研究 .....	27

4. 2. 光子断面積ライブラリの比較 .....	29
4. 2. 1. 評価済み核データ .....	29
(1) EPDL 系の評価済み核データ .....	29
(2) ENDF 系の評価済み核データ .....	30
4. 2. 2. 断面積ライブラリ .....	31
(1) mcplib 系の断面積ライブラリ .....	31
(2) JENDL 系の断面積ライブラリ .....	32
(4) XCOM 系の断面積ライブラリ .....	32
(5) 評価済み核データと断面積ライブラリとの関係 .....	34
4. 3. $\gamma$ 線ビルドアップ係数の計算方法 (モンテカルロ法) .....	36
4. 3. 1. $\gamma$ 線ビルドアップ係数の定義 .....	36
4. 3. 2. 光子の全断面積 .....	37
4. 3. 3. 計算体系 .....	38
(1) MCNP による $\gamma$ 線 BF の計算体系 .....	38
(2) EGS(PHITS)による $\gamma$ 線 BF の計算体系 .....	39
4. 3. 4. 分散低減法の設定 .....	40
4. 4. 光子断面積ライブラリの違いが $\gamma$ 線 BF の計算に与える影響 .....	40
4. 4. 1. ドップラー広がり (CDBD) .....	40
4. 4. 2. 干渉性散乱 .....	41
4. 5. 干渉性散乱を考慮した $\gamma$ 線 BF の計算 .....	43
4. 6. 点等方線源体系を展開した計算体系における $\gamma$ 線 BF の計算 .....	44
4. 7. まとめ ( $\gamma$ 線ビルドアップ係数のレビュー) .....	47
参考文献 .....	49
5. 薄い遮蔽体に対する簡易計算のレビュー .....	51
5. 1. 薄い遮蔽体に対する BF 選択の課題 .....	51
5. 1. 1. ベンチマーク問題の設定 .....	51
5. 1. 2. QAD コードによる試計算 .....	52
5. 1. 3. 詳細計算条件 .....	55
5. 1. 4. 詳細計算結果 .....	57
5. 1. 5. QAD-CGGP2R と QAD-IE ビルドアップ係数の差異 .....	61
5. 2. 薄い遮蔽体と後方散乱影響の検討 .....	65
参考文献 .....	66
6. 点減衰核積分法コードのレビュー .....	67
6. 1. コード改良について .....	67
6. 1. 1. メッシュ自動分割のレビュー .....	67
6. 2. コード新設のための仕様提案 .....	68

6. 2. 1. 仕様策定に係る考え方の整理 .....	68
6. 2. 2. 既往報告書の提言骨子 <sup>6-1)</sup> .....	68
6. 2. 3. 当 WG の提案骨子の整理 .....	70
6. 3. 計算コアプログラム仕様案 .....	70
6. 3. 1. 基本方針 .....	70
6. 3. 2. 幾何形状について .....	72
6. 3. 3. 線源・散乱 .....	72
6. 3. 4. 新規計算機能に対する $\gamma$ 線ビルドアップ係数 .....	74
6. 3. 5. 計算項目 .....	74
6. 3. 6. 不要な入力項目・機能の削除 .....	74
6. 4. データライブラリ更新 .....	74
6. 4. 1. 質量減衰係数 $\mu/\rho$ .....	74
6. 4. 2. $\gamma$ 線ビルドアップ係数データ .....	75
6. 4. 3. $\gamma$ 線スペクトルデータ .....	75
6. 4. 4. $\gamma$ 線ビルドアップ係数計算について討議したい事項 .....	75
6. 5. プレ・ポスト機能について .....	80
6. 6. コード開発ロードマップの提案 .....	81
6. 6. 1. 直近の課題 .....	81
6. 6. 2. ロードマップについて .....	81
6. 7. 外部資金獲得活動 .....	83
6. 8. 点減衰核積分コードのカーネル設計案 .....	85
6. 8. 1. 入力項目 .....	85
6. 8. 2. 出力項目 .....	85
6. 8. 3. 実行環境 .....	86
6. 8. 4. 開発言語 .....	86
6. 8. 5. モジュール構成 .....	86
参考文献 .....	87
7. ダクト・迷路に対する簡易計算レビュー .....	88
7. 1. ダクト・迷路の簡易式による評価方法の検討 .....	88
7. 1. 1. 矩形屈曲ダクトにおける散乱線の評価方法の検討 .....	88
(1) パラメータ設定 .....	88
(2) 今後の取り組み .....	88
7. 1. 2. ダクト内詰め物がある場合のストリーミング評価方法 .....	89
(1) 簡易式による評価方法の検討 .....	89
参考文献 .....	91
8. まとめと今後の活動計画 .....	92

付録

- 付録Ⅰ ワーキンググループ参加者リスト（平成30年3月時点）
- 付録Ⅱ ワーキンググループ議事録（第一回～第八回）
- 付録Ⅲ 原子力学会  $\gamma$ 線ビルドアップ係数標準データに対する調査結果について



## 略 語 集

- BF：ビルドアップ係数  
CBRF：コニカルビームレスポンス関数  
GP、G-P 法：Geometric Progression、等比数列を用いた近似表現  
ICRP：国際放射線防護委員会  
INSS：株式会社原子力安全システム研究所  
LBRF：ラインビームレスポンス関数  
MC 法：モンテカルロ法  
MFP：平均自由行程  
MRA：エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社  
NPO 法人：特定非営利活動法人  
RADONET, RADONet：NPO 法人放射線線量解析ネットワーク  
SPE：Solar Particle Event, 太陽粒子現象  
TEPSYS：株式会社テプコシステムズ  
TNS：東京ニュークリア・サービス株式会社  
V&V：Verification and Validation, 検証と妥当性確認  
VIC：株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター  
WG（本 WG）：簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ

## 執筆者一覧

各章の執筆者は以下のとおりである。

1. ワーキンググループ設立趣意  
平尾好弘
2. ワーキンググループ活動実績  
平尾好弘
3. 簡易遮蔽解析コードの利用と開発に関する課題調査  
平尾好弘
4.  $\gamma$ 線ビルドアップ係数のレビュー  
松田規宏、大西世紀、坂本幸夫、延原文祥
5. 薄い遮蔽体に対する簡易計算のレビュー  
延原文祥、松居祐介
6. 点減衰核積分法コードのレビュー  
延原文祥、根本誠、平尾好弘
7. ダクト・迷路に対する簡易計算レビュー  
助川篤彦、廣内崇幸
8. まとめと今後の活動計画  
平尾好弘

## 1. ワーキンググループ設立趣意

### 1. 1. 活動の目的

日本原子力学会放射線工学部会は、平成 24 年に「国産安全解析コード開発戦略検討ワーキンググループ」を組織し、同年 10 月からその翌年 9 月まで放射線工学に係る解析コードの開発課題や開発体制について検討し、平成 26 年に報告書<sup>1-1)</sup>を上梓するとともに日本原子力学会誌に解説<sup>1-2)</sup>を投稿した。

同解説では、“原子力施設に対する世界最高の安全性を追求する上で、また安全解析コード開発に携わる人材育成のために、解析コードやデータの国内における持続的な改良や発展に資する体制の構築とそれを維持する仕組みが不可欠であり、なかでも遮蔽解析に使用される簡易解析コードについて、米国で半世紀近く前に開発されたものがベースであり、それらの多くに対し開発元のサポートは既がない、”としている。これを受けて、放射線工学部会としては、専門家集団として、実設計から安全審査まで広く用いられる簡易遮蔽解析コードの見直しに係る課題を実コードに基づいて具体的に検討し、現代の計算環境や最新の知見を反映していく必要がある。この役割を担う作業会として、簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ（以下、WG と呼ぶ。）を設立する。

WG 活動の終わりに、WG の検討結果を報告書にまとめ、既存コードの改良、新たなコード化及びデータ整備の方針を勧告するとともに、開発の優先性を考慮した開発ロードマップを提示する。

### 1. 2. WG の構成

「国産安全解析コード開発戦略検討ワーキンググループ」委員の平尾好弘（国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所）を WG の主査とする。WG は、日本原子力学会の放射線工学部会、遮蔽ハンドブック」研究専門委員会、及び標準委員会基盤応用・廃炉技術専門部会放射線遮蔽分科会の委員らを中心とした産官学のメンバーで構成するものとし、また放射線工学に関連するその他の会員の参加を歓迎する。効率的な活動のために主査の下に複数の幹事を置き、必要に応じて WG の下にサブグループを設ける。

### 1. 3. 開催期間

平成 28 年 1 月から平成 29 年 12 月までの約 2 年間で WG 会合と従属するサブグループの会合を適宜開催して活動を行う。

#### 1. 4. 検討範囲

点減衰核積分法解析コード（例：QAD 及び G33 派生コード）、ダクトストリーミング解析コード（例：DUCT 系コード）、及びスカイシャイン解析コード（例：SHINE 系コード）について、解析コード及び関連データの見直しに係わる項目や解析コードの見直しに関して、計算法やアルゴリズムの他、プラットフォーム、使用言語及びユーザ支援機能等の周辺項目を含む。

#### 1. 5. その他（本 WG の基本方針等）

- 1) 本 WG の課題検討において作成されたプログラム類は、誰でもレビューできるようにオープンソースライセンス等に従って公開する。
- 2) 本 WG の課題検討において作成されたデータのうち、遮蔽に係る基本データとして広く利用が見込まれるものについては、標準委員会基盤応用・廃炉技術専門部会放射線遮蔽分科会と連携して標準化の検討を行うこととする。
- 3) 上記検討範囲のコード及び関連データに興味があり、既存の考え方や形式にとらわれない、自由な精神をもつ方をメンバーとして広く歓迎する。
- 4) 活動の成果は放射線工学部会ホームページ等を通じて公表する。

## 参考文献

1-1) 日本原子力学会放射線工学部会国産安全解析コード開発戦略検討ワーキンググループ、「国産安全解析コード開発戦略検討報告書」、平成 26 年 11 月.

<http://www.aesj.or.jp/~rst/fukushima/20150318.pdf>

1-2) 須山賢也、平尾好弘、坂本浩紀、「解説 国産安全解析コードの現状と課題ー我が国の安全規制への貢献を目指してー」、日本原子力学会誌、平成 27 年 12 月.

## 2. ワーキンググループ活動実績

### 2. 1. ワーキンググループ会合

#### 2. 1. 1. 会合一覧

WG 設立の直前に準備会合を一度開催した。そして、約二年間の開催期間において計八回の WG 会合を開催した。表 2-1 に、会合一覧を示す。会合では、WG 活動に直接係る議事の他、メンバー各位のご厚意により関連する施設見学及び事業の紹介が随時行われた。それらについて 2.3 節で紹介する。

表 2-1 簡易遮蔽解析コードレビューWG の会合一覧(1/2)

回	期 日	場 所	主な議事
準備	2015/11/6	日本原子力研究開発機構本部会議室	WG の位置づけ・方針の検討 QAD、G33 コードの見直し検討 福島事故で汚染した場の線量特性 専門家ノウハウの伝達について
1	2016/3/4	日本原子力学会本部会議室	WG 設立趣意の説明 簡易計算の定義について 簡易計算コードを遮蔽設計で使用する上の問題点 個別の簡易計算コードの特徴 遮蔽簡易解析コードの改良案 課題共有アンケートの実施について
2	2016/5/26	日本原子力学会本部会議室	簡易遮蔽解析コードに係る最近（過去 5 年程度）の動向調査とまとめ 簡易遮蔽計算に対する課題共有アンケートの回答
3	2016/7/15	日本原子力研究開発機構東京事務所会議室	課題共有アンケート結果のまとめ アクションプランの提案 $\gamma$ 線断面積のライブラリ間比較 $\gamma$ 線 BF の計算について $\gamma$ 線 BF 研究の歴史 干渉性散乱の有無による Fe の BF の違い 点減衰核積分法コードの新仕様提案
4	2016/9/29	日本原子力研究開発機構東京事務所会議室	INSS における計算コード開発について VIC 開発の $\gamma$ Shielder について $\gamma$ 線ビルドアップ係数の EGS4 と EGS5 の計算結果比較
5	2017/5/17	日本原子力研究開発機構東京事務所会議室	テプコシステムズ開発の簡易遮蔽計算ソフト FLEXDOSE について 「薄い遮蔽体の BF 選択」および「MC 法に基づく BF の算出」に関する検討 ジオメトリ解釈ソフトについて PHITS ユーザ定義タリーの紹介

表 2-1 簡易遮蔽解析コードレビューWG の会合一覧(2/2)

回	期 日	場 所	主な議事
6	2017/7/20	秋葉原ダイビル 18 階共用会議室	薄い遮蔽体と後方散乱影響の追加検討 簡易遮蔽計算コードのミニ講習会開催に関するアンケート、及び実習の概要について 簡易遮蔽解析コードの抱える課題に対する情報発信の必要性について
7	2017/9/29	(株) アトックス 技術開発センター 会議室	(株) アトックス技術開発センターの施設見学、及び遮蔽計算業務の紹介 ダクト・迷路の簡易計算の課題について 遮蔽ハンドブック応用編の「ダクトストーリーミング」に係る原稿案の紹介 簡易遮蔽解析コードの開発予算獲得について 「薄い遮蔽体と後方散乱に関する予備調査」学会発表について 実用量の定義変更 (Joint report of ICRU and ICRP) の紹介
8	2017/12/6	山王パークタワー MRA (株) 会議室	点減衰核積分法コードの概要設計検討について 簡易遮蔽解析コードの開発予算獲得について 「薄い遮蔽体と後方散乱影響その2」について ダクト・迷路の評価における簡易式による評価方法の検討結果について 「原子力の安全向上に資する技術開発費補助金」について MRA (株) の業務サービス紹介 ラドネット研究会の紹介 WG の開催期間更新について

## 2. 1. 2. 検討議題のまとめ

表 2-1 に示した会合の主な議事を整理し、会合の成果である検討議題を表 2-2 にまとめた。基本的な検討の流れとしては、まず、簡易遮蔽解析コードの利用と課題について動向調査と課題共有のためのアンケート調査を実施し、その結果をまとめて WG のアクションプランを作成した。そして、アクションプランにある個別の検討議題について、関心をもつメンバーらでレビューを進めることとし、WG 会合で進捗報告あるいは学会等で成果発表が行われた。



外部発表については、2.2節でまとめて紹介する。また、検討が進められた議題については、本報告書でそれぞれ章立てして概要を述べる。

表 2-2 簡易遮蔽解析コードレビューWG の検討議題

報告書の 該当章	議 題	検 討 内 容
3	簡易遮蔽解析コードの利用・課題に関する調査	簡易遮蔽解析コードに係る最近の動向調査 簡易遮蔽解析コードに係る課題共有アンケート WG アクションプランの提案
4	$\gamma$ 線 BF データレビュー	$\gamma$ 線断面積のライブラリ比較 $\gamma$ 線 BF の計算方法 (MC 法) $\gamma$ 線 BF 研究の歴史 干渉性散乱が BF に与える影響 $\gamma$ 線 BF のコード間計算結果比較
5	薄い遮蔽体に対する簡易計算レビュー	薄い遮蔽体に対する BF 選択の課題 薄い遮蔽体と後方散乱影響の検討
6	点減衰核積分法コードレビュー	コード改良、カーネル設計の検討 コード新設のための仕様提案 コード開発ロードマップの提案 外部資金獲得のための活動
7	ダクト・迷路に対する簡易計算レビュー	ダクト・迷路の簡易計算の課題 (遮蔽ハンドブック応用編の関連記載案) ダクト・迷路の簡易式による評価方法の検討

## 2. 2. 外部発表

本ワーキンググループにおける検討結果を日本原子力学会において発表した。また、NPO 法人放射線線量解析ネットワーク (ラドネット) においてWG活動を紹介した。

### 2. 2. 1. 日本原子力学会

本WGにおける検討の概要を日本原子力学会において発表した。表 2-2 に示すとおり、本WGで実施した簡易遮蔽解析コードの利用調査とアクションプラン<sup>(2-1)</sup>、点減衰核コード開発ロードマップ<sup>(2-2)</sup>、そして薄い遮蔽体についての検討結果<sup>(2-3,2-4)</sup>に係る発表である。

表 2-3 簡易遮蔽解析コードレビューWG の係る発表（日本原子力学会）

会合、日付、場所	発表タイトル	概要
2017 年春の年会(2017 年 3 月 27～ 29 日、東海大学湘南キャンパス)	簡易遮蔽解析コードレビューWG の 2016 年活動概要 (1) コード開発利用調査とアクションプラン	「簡易遮蔽解析コードレビューWG」の 2016 年活動の成果を報告する。簡易遮蔽計算の利用と開発に関して、アンケートと文献調査を行い、現場ニーズと関連発表の傾向を整理した。調査から浮かび上がった課題と従前からの課題に専門家のスクリーニングをかけて、WG のアクションプランを策定した。
2017 年春の年会（2017 年 3 月 27～29 日、東海大学湘南キャンパス）	簡易遮蔽解析コードレビューWG の 2016 年活動概要 (2) 新しい点減衰核コードの開発課題とロードマップ	新しい国産簡易遮蔽計算コードを開発し、QAD, G33 の著作権問題を解決するとともに、我が国独自に展開させていくため、放射線工学部会員からのアンケート調査、特にメーカーやエンジニアからのニーズ、及び従前からの課題等を整理し、コード開発の課題を整理し、ロードマップ案を作成した。
2017 年秋の大会（2017 年 9 月 13 ～ 15 日、北海道大学）	簡易遮蔽解析コードレビューWG 2017 年活動報告(1) 薄い遮蔽体と後方散乱に関する予備調査ーベンチマーク問題設定ー	簡易遮蔽解析コード（QAD）では散乱線を考慮するビルドアップ係数に 1 つしか物質が設定できないため、タンク厚が薄い場合、タンク表面やタンク周辺の線量を計算する際のビルドアップ係数（以下 BF 呼ぶ）の設定がコード使用者の課題の 1 つである。どの程度の薄さまで前の層の物質を選択すべきかをモンテカルロ計算コード等を用いて求めることとして、ベンチマーク問題を設定し、計算を実施した。
2018 年春の年会（2018 年 3 月 26 ～ 28 日、大阪大学）	簡易遮蔽解析コードレビューWG2017 年活動報告(2)ー既存係数データから見る薄い遮蔽体における挙動理解と解析ー	簡易遮蔽解析コードレビューWG 2017 年の活動として薄い遮蔽体についての調査を継続した。薄い遮蔽体におけるγ線線量挙動の理解を助けるため、ビルドアップ係数の既存データの調査と線源付近でのデータの解析を実施した。

## 2. 2. 2. NPO 法人放射線線量解析ネットワーク（ラドネット）

平成 29 年度第 2 回 RADONET 研究会（平成 29 年 11 月 11 日）において、坂本幸夫委員より、『学会放射線工学部会・簡易遮蔽計算レビューWG活動と計算のためのデータ・ツールの現状』と題した講演が行われ、WG 活動の紹介がなされた。詳細はラドネット HP<sup>1</sup>を参照されたい。

## 2. 3. 事業紹介、施設見学

メンバー及び関係者各位のご厚意により、所属または関係する施設見学及び事業・サービスの紹介が下記のとおり行われた。

- 株式会社原子力安全システム研究所
  - 吉田至孝委員のご厚意により、第 4 回 WG 会合において、原子力安全システム研究所の放射線遮蔽に係る計算コード開発について以下の紹介がなされた  
SADOSE システムの開発、R - Cubic システムの開発、FSKY4C、事象進展予測システム（IPPS）の開発、使用済燃料プール（SFP）評価（PitCalculator）の開発、原子力防災訓練シナリオ解析（IPPS）、広域大気拡散評価技術（WRF or MM5+GEARN）の適用、海洋拡散評価技術（Delft3D+SeaGEARN）の適用  
OIL に基づく被ばく評価技術（OILAS）の開発
- 株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター
  - 根本委員のご厚意により、第 4 回 WG 会合において、ヴィジブルインフォメーションセンター開発の  $\gamma$  線遮蔽計算ソフト  $\gamma$ Shielder の紹介がなされた。
- 株式会社テプコシステムズ
  - 松居委員のご厚意により、第 5 回 WG 会合において、テプコシステムズ開発の簡易遮蔽計算ソフト FLEXDOSE の紹介がなされた。
- 公益財団法人原子力安全技術センター
  - 吉田昌弘氏（原子力安全研究センター理事）のご厚意により、平成 29 年 6 月 30 日及び 7 月 6 日に原子力安全技術センターで開催されている簡易計算に係るミニ講習会に委員らを参加させていただいた。
  - 坂本幸夫委員より、第 6 回 WG 会合において、同ミニ講習会開催に関するアンケート、及び実習の概要について報告がなされた。
- 株式会社アトックス 技術開発センター
  - 坂本幸夫委員のご厚意により、第 7 回 WG 会合において、アトックス 技術開発センター（千葉県柏市）の施設見学が行われた。また、同センターの放射線遮蔽計算業務について紹介がなされた。
- エム・アール・アイリサーチアソシエイツ株式会社

---

<sup>1</sup> <https://www.radonet.org/>

- 猪狩委員のご厚意により、第8回WG会合において、エム・アール・アイリサーチアソシエイツの事業・サービスの紹介が行われた

## 参考文献

2-1) 平尾 好弘, 松田 規宏, 坂本 浩紀, 河野 秀紀, 大西 世紀, 延原 文祥, 簡易遮蔽解析コードレビューWG の2016年活動概要(1) コード開発利用調査とアクションプラン, 日本原子力学会 2017年春の年会(2017年3月27日～29日, 東海大学湘南キャンパス) 3D08.

2-2) 延原 文祥, 平尾 好弘, 松田 規宏, 坂本 浩紀, 坂本 幸夫, 岩下 充成, 吉岡 健太郎, 簡易遮蔽解析コードレビューWG の2016年活動概要(2) 新しい点減衰核コードの開発課題とロードマップ, 日本原子力学会 2017年春の年会 2017年3月27日～29日 東海大学湘南キャンパス 3D09.

2-3) 延原 文祥, 岩井 梢平, 古澤 哲, 松居 祐介, 久保田 修, 高野 大将, 簡易遮蔽解析コードレビューWG 2017年活動報告(1) 薄い遮蔽体と後方散乱に関する予備調査ーベンチマーク問題設定ー, 日本原子力学会 2017年秋の大会(2017年9月13日～15日, 北海道大学) 1K11.

2-4) 延原 文祥, 岩井 梢平, 松居 祐介, 坂本 幸夫, 簡易遮蔽解析コードレビューWG 2017年活動報告(2)ー既存係数データから見る薄い遮蔽体における挙動理解と解析ー, 日本原子力学会 2018年春の年会(2018年3月26日～28日, 大阪大学) 1H06.

### 3. 簡易遮蔽解析コードの利用と開発に関する課題調査

簡易遮蔽解析コードの利用と開発に関して、文献調査と部会アンケートを実施し、簡易遮蔽計算の利用場面・目的、デザイナー・エンジニア・レビューの現場ニーズ及び関連発表の傾向等を整理した。また、従前から知られていた課題に加えて、調査から浮かび上がってきた課題を専門家らのスクリーニングにかけて、本WGのアクションプランを作成・提案した。

#### 3. 1. 簡易遮蔽解析コードに係る文献調査

##### 3. 1. 1. 調査対象文献

福島事故より後に開催された9回の日本原子力学会の年会・大会（2012春～2016春）及び直近2回の遮蔽国際会議（ICRS-11及びICRS-12）のプロシーディングから、直接間接を問わず、簡易遮蔽計算の適用性が見込まれる発表を網羅的に拾い上げた。そして、概要をもとに発表を大まかに項目分けし、簡易遮蔽解析コードの潜在的な利用と開発の傾向を整理した。

##### 3. 1. 2. 調査結果と考察

表3-1（順計算と逆推定）及び表3-2（その他）に、項目名、各項目に含まれる発表の計算目的・計算対象、及び発表件数を示した。表3-1に示すとおり、線源項（ソース）から離れた空間線量・被ばく線量を計算する順計算と、逆に線量情報をもとに離れた所にあるソースタームを推定する逆推定に関する発表は、福島事故に関連して特に多かった。福島事故では周辺環境全体が汚染されたことから、炉内、炉建屋、各種施設屋内、あるいは屋外（陸海空）のあらゆる地点に散らばったソースと空間線量・被ばく線量の関係を調べて評価する機会が増えたためと考えられる。緊急時あるいは事故後に求められる迅速な評価、説明性、透明性、非専門家の関与等を考慮すると、いずれも簡易計算の応用が十分に期待される事例である。しかし、調べた範囲では高精度を謳う高コストのモンテカルロ法が主に使用されており、簡易計算の適用例は少数であった。理由として、既存の簡易遮蔽解析コードの設計が旧く、最近のコードと比べて使い勝手が悪いこと、こうした事例に即応する機能やデータの整備が十分でないことが考えられる。

それに対して、既存の簡易遮蔽解析コードを用いるのではなく、独自に計算コードシステムを開発して事例に対処する動きもみられた。ただし、発表をみる限り、複数の組織が同様の目的と機能を持つシステムを開発していたり、入出力のみの利便から別のコードの機能を援用したりと開発の冗長性は否めない。点減衰核法はレガシー技術であり、欧米ではRANKERN<sup>3-1)</sup>、MicroShield<sup>3-2)</sup>、VISIPLAN<sup>3-3)</sup>などプリポストを含むコードシステムが既に商用化され、ベンダーがV&Vやサポートを担い、同国内や

目的の近い所で新規に開発を始める例は殆どない。国内において、現代環境で手軽に動作する簡易遮蔽解析コードの開発ターゲットプラットフォームと、使用データの拡充・整備を関係者で協力して効率よく実施するプロジェクトが求められる所以である。

点減衰核法に直接係る発表として、表 3-2 に示すとおり、 $\gamma$ 線ビルドアップ係数、線源モデル化、あるいは電子線への拡張に関する報告もみられる。そうした様々な拡張・整備に対しては V&V による精度や適用性の保証が不可欠であり、それに関して安全解析コード全般の国産化に対応した V&V 学会標準の策定に関する報告がされている。

最後に、簡易計算の使用場面として、点減衰核法による透過線の他に、ダクトストリーミングやスカイシャイン線の計算があるが、ダクトストリーミングに係る報告は殆どなかった。一方、スカイシャイン線については、中間貯蔵や廃炉廃棄物等施設の多様化、あるいは環境汚染による線源の多様化に伴う評価事例が報告されている。中性子線に対してモンテカルロ法を適用するベンチマーク計算事例がみられたが、一方で $\gamma$ 線や加速器施設等、簡易計算が適用可能な場面も多くある。

### 3. 2. 簡易遮蔽解析コードに係る課題共有アンケート

#### 3. 2. 1. アンケート質問票と調査方法

ここでは簡易遮蔽計算に議題を絞り、その利用と開発について実務担当者の考えを聞き出すため、アンケートをコーディネートした。アンケート質問票の項目は下記のとおりである。

- 簡易計算の利用経験
- 簡易計算で対応したい場面
- 簡易計算で適用性を拡張したい点
- 入出力支援のあり方
- 適用範囲や使い方をどう教えるか

アンケート調査は、放射線工学部会のメーリングリストを通じて部会員らにアンケート質問票を送付し、ボランティアで回答を要請する形式で実施した。結果的に、著者の他、9名の方から回答を得ることができた。

#### 3. 2. 2. アンケート回答のまとめ

表 3-3 に、アンケート回答をもとに当方で項目分けして課題を整理した課題名の一覧を示す。課題の内容については説明を割愛する。

表 3-1 簡易遮蔽計算に係る文献調査のまとめ（順計算と逆推定）

順計算		逆推定	
ソース	線量計算	線量	ソース推定
小項目	目的、対象	小項目	目的、対象
環境汚染（土壌、平地、森林、下草、樹木、舗装路、水田、流水） → 空間線量率（平地、上空） 屋内線量率	建屋遮蔽係数、斜面地形効果 土壌除染効果検証、遮蔽シート効果検証 屋外構造物、避難シールド 上空モニタリング	35	除染効果検証、歩行・自動車移動サーベイ、自動車の遮蔽効果 複数サーベイメータからホットスポット検出、降雨によるラドン崩壊生成物 複数検出器応答から土壌汚染深さ分布、 γカメラ開発 上空高度線量率から土壌汚染分布 地形効果考慮
大気プルーム → 地上空間線量率	避難シールド シビアクシデント時UPZ 輸送中妨害破壊行為	3	モニタリングポスト、I-131 複数検出器からアンフォールディング
屋内汚染 → 屋内線量率	住宅室内、原子炉建屋内（機器、フロア他） 除染、解体等作業計画・最適化 遮蔽効果検証、遮蔽シート効果検証 γカメラ	13	屋内線量率から屋内汚染分布 廃止措置時の高空間線量率(100Sv/h) 除染効果検証 原子炉建屋フロア内 γカメラ開発
施設・機器内部汚染・線源 → 外部空間線量率	燃料デブリ、遮蔽ポッド サンプリングした汚染土壌、汚染水 建屋内機器汚染から屋外線量率 除染効果検証 汚染土壌・瓦礫の中間貯蔵容器 深度分布測定用鉄パイプ グローブボックス、使用済み燃料容器	12	汚染水処理の吸着塔 汚染排水モニタリング 食品表面汚染検査 検出器出力のアンフォールディング ドラム缶ウラン廃棄物 廃棄物処理システム(タンク)
空間線量率、サーベイメータ → 実被ばく線量率、線量積算	文献・行動観察に基づく住民の滞在時間、移動経路、建物遮蔽考慮 輸送容器、あるいは汚染稲わらの輸送作業者被ばく 個人線量計測定から住民外部被ばく	5	海底線量率 → 海底面汚染密度
遮蔽材性能評価	透過減衰率、スラブ空隙率 吹きつけモルタル、B4Cコンクリート、セシウム用遮蔽材、耐熱性レジン、シヨット遮蔽材	8	



表 3-2 簡易遮蔽計算に係る文献調査のまとめ（その他）

線源モデル化	環境汚染の線源モデル開発	土壌汚染の線量減衰モデル 土壌汚染の線源深度線源モデル 水田・流水汚染モデル 環境減衰モデル	4
その他のソフト開発	点減衰核法システム QAD改良	解体作業者被ばく最適化(仏、加) 評価点数増加、自動線源分割	2 1
γ線ビルドアップ係数	学会標準の更新について	100mfpまでの遮蔽厚さと二次放射線を考慮した、GPパラメータ 近似式の改良 電子対生成とコンプトン散乱で発生する二次電子の制動放射 影響の考慮	5
入出力支援	出力可視化 入力自動作成	粒子ベースのポリユームレンダリング 環境放射線データの適応的可視化技術 霧箱を活用した放射線の理解 モンテカルロ法のメッシュタリ-可視化 実測スキャンデータからCADモデル変換 CADモデルから遮蔽計算入力レポート	4 2
簡易計算式開発	球面・円柱面線源の非衝突線解析式 高エネルギー光子の二次電子輸送 中性子輸送 宇宙線被ばく予測	球面線源、円柱面線源からの非衝突線 単色電子点減衰核法開発 トカマク型核融合装置の円筒モデル化 SPE	4
ストリーミング	複雑形状ストリーミング	施設吸排気口の翼列コンクリ遮蔽体 線量率低下効果検証	1
	スカイシャイン線源の多様化	環境汚染(平地、森林、樹木)からスカイシャイン地形効果 除染効果検証	4
スカイシャイン	施設の敷地境界線量率評価 簡易計算用データ作成 ベンチマーク実験解析	核燃施設 廃炉廃棄物・汚染水保管施設 汚染土壌中間貯蔵施設 陽子線施設ビームダンプから中性子 LBRFとCERF、4点パラメータフィッティング モンテカルロ法と比較	3 2 1
コードのV&V活動関係	国産安全解析コード開発	炉物理・遮蔽分野における国産安全解析コード開発戦略(実 コードのV&V事例はない) 遮蔽ベンチマーク実験データベース(SINBAD)の紹介	3

表 3-3 簡易遮蔽計算の利用と開発に関するアンケート回答まとめ

γ線ビルドアップ係数	多重層遮蔽対応（多重層境界での線量減衰不連続性の表現）
	BF及び減弱係数に対するコヒーレント散乱の影響
	（MFPの小さい）薄い遮蔽体のBF選択
	後方散乱が影響する場合の適切なBF選択
	遮蔽体の媒質種類の拡張、媒質厚さの拡張
	遮蔽体の斜め入射対応
二次粒子の扱い	β線制動放射の扱い
	PETで用いる陽電子放出核種の遮蔽計算
データの更新・整備	ICRP勧告の国内取入れに伴う簡易計算用データの改訂
	遮蔽計算実務データ集に基づく計算支援ツール開発
	BF学会標準の線量種類を区別した出力
ストリーミング	DUCT-III コードにおける脚の屈曲角度拡張
	給排気口に付ける翼列遮蔽板
	補償遮蔽計算法における一回散乱法（G33コード）の適用性
	ダクト出口からの空間伝播（距離減衰）
	ダクト出口側空間の後方散乱
	環境全面汚染状況での迷路評価
	入口から見える迷路壁面積設定の妥当性
	ダクト入射角設定の妥当性
スカイシャイン	ストリーミング簡易式に適用する角度算出の労力削減
	角度単位の明確化、統一化
	方向によって非対称な敷地のスカイシャイン計算
	線源の放出角度メッシュ分割
	評価点の下からの後方散乱
	線量レスポンスカーブのフィッティング
線源モデル 線源入力の仕事	天井遮蔽がある場合の線量レスポンスデータの整備
	土壌汚染深度分布対応
	線源メッシュ自動分割
	線源形状の多様化
	線源設定における局所座標系と移動・回転オペレータの導入
	核種単位の入力、放射線スペクトルの内蔵
	線源エネルギー群数の任意化
	入力データの整合性チェック（線源メッシュ、数値）
	マルチソース化
	メッシュ散乱領域の多重化（G33コード援用）
詳細計算コードへの簡易計算組み込み 体系統一化、コードパッケージ化	QADをPHITSコードの一機能として組み込む
	遮蔽体系を統一した簡易遮蔽計算コードパッケージの確立
計算機メモリ、プロセス関連	メモリ実行時割当て
	コンパイラオプションの最適化
適用性と使用法の教え方	入出力リスト含む例題集の作成、ベンチマーク解析支援
	講習会の開催、ユーザフォーラム作成
	入出力支援機能によるアクティブ・パッシブなユーザガイド
	* 線源や体系を画面タッチで吹き出し、出力コンターマップ
	* 入力の数値妥当性や関係整合性の自動チェック
* 適用範囲外設定のメッセージ警告	

専門家へのアンケートやヒアリングの結果、簡易計算の得意な利用場面は、基本設計時に必要なラピッドエンジニアリング、線源数と評価点数が相当多い時に計算時間をできるだけ小さくしたい場合、及び緊急時対応等精度より即応性を要する場合であることがわかった。また、幾何は単純だが、計算体系が大きい場合、例えば深層透過バルク透過やスカイシャイン線の評価に向いている。逆に、幾何形状が複雑でも計算体系が小さければモンテカルロ法で解く方が適切な場合もある。

ユーザの入力作成や出力理解を助け、コードの使い勝手を向上させるユーティリティの拡充も求められている。例えばエラー回避を助けるプリポスト、データや結果のレポート、線源や体系のモデリング機能である。昨今の計算コードは、ユーザ獲得のため、コード本体よりもむしろそうした省力化ツールの整備に力を入れることが多い。いっそのこと、高度なユーザ支援機能を既に備えた PHITS コードに、簡易計算機能を組み込むような提案もなされた。そうすると、特定の問題に対して詳細計算と簡易計算の間で入力や体系を使い回せるようになり、既往資源の有効活用にも貢献する。

その他、ダクト・迷路のストリーミングの簡易計算法に対して、過度の保守性を避けて合理的な評価を求める見直しの要請、あるいは後方散乱を伴う問題への適用性に関する指摘がなされた。

最後に、既存の簡易計算コード自体の設計の旧さ、あるいは使用データの旧さに対して、改良や見直しの要望が多数あげられた。例えば、点減衰核法コードにおける体積線源のモデル化や入力時の考慮等、これまでユーザ側が外部で個別に用意してきたことは、今やコード側で自動化できる場合が殆どである。また、最近の問題の大規模化や使用データの増大で、一度に扱えるデータ量の制限を取り払う要求もある。その場合、計算機メモリの動的な割当てのためのプログラム見直しが必要になる。使用データの更新については、ICRP 新勧告の国内取り入れが迫っており、線量換算係数見直しや眼の水晶体等価線量限度引下げ対応が喫緊の課題となっている。こうした課題に根本的に対処するため、簡易遮蔽解析コードの新規設計開発とそれに伴う V&V について必要性が指摘された。

### 3. 3. WG アクションプランの提案

表 3-4 に、調査の結果を受けて作成した WG アクションプランを示す。

以上の調査を総合的に検討した結果、七つの項目に対して、相互に関係する課題もあるが総じて 19 件の WG アクション課題が特定された。不要な努力を避けるため、既往研究の調査を通じて十分性を検討しつつ、表に示すとおり、委員らのイニシアティブで取り組みを進めているところである。

表 3-4 簡易遮蔽解析コードレビューWGの暫定アクションプラン

項目	課題名	WG取り組み状況
γ線ビルドアップ係数	多重層遮蔽対応	対応中、実験計画中
	媒質後方の空気中での線量変化	
	薄い遮蔽体のBF選択	対応中、学会発表、BF学会標準反映検討
壁による後方散乱	遮蔽体の斜め入射対応	実験計画中
	後方散乱が影響するBF選択	上の薄い遮蔽体問題で影響評価
ストリーミング	ダクト出口側空間の後方散乱	
	DUCT-IIIコードにおける脚の屈曲角度拡張	
	補償遮蔽計算における一回散乱法の適用性	
	環境全面汚染状況での迷路評価	対応中
	入口から見える迷路壁面積設定の妥当性	遮蔽ハンドブック応用編に反映検討
スカイシャイン	ダクト入射角設定の妥当性	
	詰め物の入ったダクトのストリーミング評価	対応中
	線源の放出角度メッシュ分割	既往研究調査
線源モデル 線源入力の仕方	評価点の下からの後方散乱	既往研究調査
	天井遮蔽がある場合の線量レスポンスデータ整備	既往研究調査
ベンチマークと教育	線源メッシュ自動分割	既往コード調査
	数多く例題集を用意、手計算と実際の出力を比較	対応中
点減衰核積分法コード	簡易計算の原理の理解を促進する例題	遮蔽ハンドブック応用編に反映検討
	開発ターゲットプラットフォームの確立	対応中、仕様作成、外部資金獲得計画
	効率的な使用データ拡充整備	
	*ICRP新勧告の国内取入れ、福島事故知見反映	同上
	*遮蔽実務マニュアル、最新データ集反映	
	コード開発・データ整備に対するV&V	

## 参考文献

3-1) RANKERN, Energy, Safety and Risk Consultants, UK.

3-2) MicroShield, Grove Software, US.

3-3) Visiplan, SCK-CEN, Belgium.

## 4. $\gamma$ 線ビルドアップ係数のレビュー

$\gamma$ 線ビルドアップ係数 (Buildup Factor, BF) とは、線源から評価点まで媒質に一度も衝突・散乱せずに到達する (非衝突)  $\gamma$ 線の線量に対する、散乱線を含む (全)  $\gamma$ 線の線量の比である。この $\gamma$ 線 BF を用いた点減衰核法は、 $\gamma$ 線の遮蔽計算 (線量計算) に旧くから、モンテカルロ法計算コードを用いた遮蔽計算法が発展した今日においても広く使用されている。これは、非衝突 $\gamma$ 線の線量が、線源から評価点までの距離及びその線上での各媒質における透過率から容易に算出でき、これに $\gamma$ 線 BF を適用することで、散乱線を含む全線量を詳細計算 (決定論的計算手法若しくはモンテカルロ計算手法) せずとも評価できるためであり、また、適用範囲において安全側の評価をもたらすためである。

### 4. 1. $\gamma$ 線 BF 研究の歴史

$\gamma$ 線 BF 自体は、1950年代からモーメント法等によって算出されてきたが、それらは遮蔽厚さに対する離散的な値であった。遮蔽計算では、任意の遮蔽厚さに対する $\gamma$ 線 BF の連続的な値が必要であり、このために幾つかの近似式 (フィッティング式) が提案されてきた。良い $\gamma$ 線 BF 近似式の条件は、①厚さゼロでその値が 1.0 となること、②単一物質内では単調増加となること、③パラメータの数ができるだけ少ないこと、④積分項に含まれることが多いので関数形はあまり複雑でないことである。

播磨は、 $\gamma$ 線 BF に対してフィッティング精度の高い近似式を提案し、“Mrs. BF”として世界的に有名である。本節では、播磨の業績を中心に、日本国内での $\gamma$ 線 BF 研究の歴史を述べる。世界における BF 研究の歴史は[参考資料 4-1\)](#) に詳しい。 $\gamma$ 線 BF の計算を行う方法 (対応コード) として、モーメント法、制動放射線の前方放出近似 (PALLAS)、制動放射線の等方放出近似 (ASFIT)、Sn 計算法 (ANISN、BERMUDA)、モンテカルロ計算法 (EGS4、MCNP) 及び IE (Invariant Embedding) 法等がある。

#### 4. 1. 1. GP 式の変遷 [4-1\), 4-2\)](#)

播磨が提案した $\gamma$ 線 BF の式は、(4.1.1) 式で表現される等比級数の和の形式で、GP (Geometric Progression) 式と呼ばれる。

$$1 + r + r^2 + r^3 + \dots + r^{n-1} = \sum_{m=0}^{n-1} r^m = \frac{r^n - 1}{r - 1} \quad (4.1.1)$$

この式を利用すると、 $r$  の値により小さな数から大きな数まで表現できる。

図 4.1-1 に  $X$  ( (4.1.1) 式の  $n$  に相当) 及び  $K$  ( (4.1.1) 式の  $r$  に相当) による幾何級数和の変化を示す。左の図は、 $K$  の値を一定にしたときの幾何級数和の変化を示

し、 $K$  が 1.1 でも  $X$  が 100 の場合には  $10^5$  を表現できる。一方、右の図は、 $X$  の値を一定にした場合の幾何級数和の変化を示し、大きな  $X$  では  $K$  のわずかな変化で小さな値から大きな値まで広い範囲の数値を表現できる。

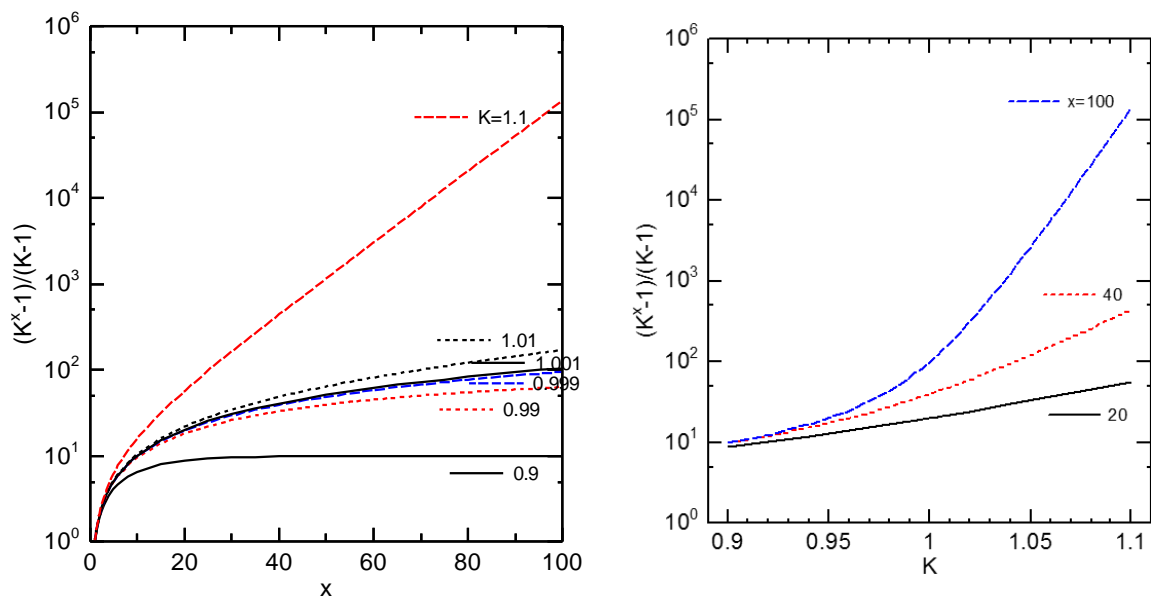


図 4.1-1  $X$  及び  $K$  による幾何級数和の変化

$\gamma$  線 BF の GP 式は下記のように表現される。

$$B(E, X) = 1 + (b - 1) \frac{K^X - 1}{K - 1} \quad K \neq 1 \text{ に対して} \quad (4.1.2)$$

$$B(E, X) = 1 + (b - 1)X \quad K = 1 \text{ に対して} \quad (4.1.3)$$

ここで、

$B(E, X)$  : エネルギー  $E$ 、遮蔽厚さ  $X$  (mfp) での  $\gamma$  線 BF

$b$  : 厚さ 1 mfp での  $\gamma$  線 BF

$K$  :  $\gamma$  線が 1 mfp 進む毎の線量の増倍係数

である。また、パラメータ  $K$  については下記の式で表現される。

$$K(X) = cX^a \quad X < X_k \text{ に対して} \quad (4.1.4)$$

$$K(X) = cX^a + d(X - X_k) \quad X > X_k \text{ に対して} \quad (4.1.5)$$

参考資料<sup>4.3)</sup>では20 mfpまでの遮蔽厚さに適用し、参考資料<sup>4.4)</sup>では40 mfpまでの遮蔽厚さに適用している。パラメータ  $K$  が  $X$  の変動範囲に応じて2つの式で表現されるので、参考資料<sup>4.5)</sup>では式の一体化を図った。

$$K(E, X) = cX^a + d \frac{\tanh(X / X_k - 2) - \tanh(-2)}{1 - \tanh(-2)} \quad (4.1.6)$$

(4.1.6) 式の右辺第2項の  $\tanh$  を含む項は、0 から1まで変動し、 $X$  が  $X_k$  より十分小さいときはほぼ0であり、 $X$  が  $X_k$  付近では直線関係となる。また、 $X$  が  $X_k$  より十分大きいときは1に漸近し、(4.1.5) 式の右辺第2項に制限を掛けることにした。

40 mfpを超えた遮蔽厚さに対して(4.1.6) 式を適用したところ不具合が生じたので、40 mfp以上の遮蔽厚さに対する外挿式を提案した<sup>4.6)</sup>。

$$K(E, X) = 1 + (K_{35} - 1) \left[ \frac{K_{40} - 1}{K_{35} - 1} \right]^{\xi(X)} \quad (4.1.7)$$

$$\xi(X) = \frac{(X / X_{35})^{0.1} - 1}{(X_{40} / X_{35})^{0.1} - 1} \quad (4.1.8)$$

$K_{35}$  及び  $K_{40}$  は、(4.1.6) 式で求めた35 mfp及び40 mfpにおける  $K$  パラメータの値である。なお、この式は  $(K_{40}-1)/(K_{35}-1)$  が0から1の範囲にある場合に適用する。これ以外の場合は、(4.1.7) 式の変形版がある。

$\gamma$  線 BF の算出に IE 法が使われるようになって、遮蔽厚さが100 mfpまでのデータが出現したため、GP 近似式での外挿式の改良が必要になった<sup>4.7)</sup>。

$$K(E, X) = 1 + (K_{m-1} - 1) \left[ \frac{K_m - 1}{K_{m-1} - 1} \right]^{\xi(X)} \quad (4.1.9)$$

$$\xi(X) = \frac{(X / X_{m-1})^\eta - 1}{(X_m / X_{m-1})^{0.1} - 1} \quad (4.1.10)$$

従来の外挿式では35 mfpと40 mfpでの  $K$  パラメータの値を用いるとともに、 $\eta$  の値を0.1に固定していたが、新しい外挿式では  $X_{m-1}$  mfp 及び  $X_m$  mfp での  $K$  パラメータの値を用いるとともに、 $\eta$  の値を変数とした。

#### 4. 1. 2. GP パラメータの決定

$\gamma$  線 BF に対する GP 近似式でのフィッティング (GP パラメータの決定) には、最小自乗法と Min Max 法がある。



前者は元データとフィッティング値との誤差の自乗和が最小となるパラメータ組を見つけるもので、比較的ユニークな解が短時間で求まるが、各パラメータをエネルギー内挿するにはスムーズさが欠けることが多々ある。最小自乗法は米国原子力学会の  $\gamma$  線 BF 標準データ<sup>4-8), 4-9)</sup> に対して使用された。

後者は元データとフィッティング値との最大誤差を最小化する方法であり、この方法で得られるパラメータの組は一つとは限らないが、エネルギー内挿した際にスムーズに精度良く再現できるパラメータの組を採用することができる。日本原子力学会  $\gamma$  線 BF 標準<sup>4-2)</sup> の GP パラメータは、この方法で得られたものである。

以下に Min Max 法による GP パラメータの決定プロセスを述べる。

- ・パラメータ  $b$  : 1 mfp の値を中心に値を 5% の範囲で変動して、最適値を調べる。
- ・パラメータ  $X_k$  : 15 mfp 前後の値で、同一物質中ではエネルギーに関係なく同じ値とする。1 mfp から深層透過につれて  $\gamma$  線透過スペクトルでの低エネルギー成分が増加 ( $K$  パラメータが指数関数で表される。) するが、15 mfp 辺りからスペクトル形状の変化がなくなる。
- ・パラメータ  $X_m$  : 外挿は 100 mfp までの遮蔽厚さに対して行うので、 $K$  パラメータの勾配が一定になり始めるところとする。

#### 4. 1. 3. $\gamma$ 線 BF を利用した計算コードの整備

遮蔽 (線量) 計算用として QAD-CG を基に、ANSI/ANS-6.4.3-1991<sup>4-8)</sup> データを取り込んだ QAD-CGGP、実効換算係数を用いて 1 cm 線量当量  $H^*(10)$  を計算する QAD-CGGP2、実効換算係数を用いて人体前方からの照射による実効線量  $E(AP)$  を計算する QAD-CGGP2R が開発された。

また、スカイシャイン線量等の計算に使われる一回散乱法コード G33 を基に、QAD-CG と同様に、G33-GP、G33-GP2 及び G33-GP2R が開発されている。

#### 4. 1. 4. 米国原子力学会標準委員会 ANSI/ANS-6.4.3 の活動<sup>4-8)</sup>

1979 年、米国においてスリーマイル島 (TMI) 原子力発電所で炉心溶融事故があり、その後処理で低エネルギー  $\gamma$  線に対するデータ (光子に対する質量減衰係数及び  $\gamma$  線 BF) の不足が認識された。具体的には、

- ・事故後 2~3 日の廃ガス減衰タンク内の Xe-133 濃度をタンクの外側から測定した線量率から推定して、排出量を決定しようとしていた。Xe-133 からの  $\gamma$  線のエネルギーは主として 80 keV と低エネルギーであり、評価に使えるデータがなくタンクでの  $\gamma$  線減衰が評価できなかった。
- ・60 日後に 3.8 cm 厚さの鋼材容器ハッチ外側から  $\gamma$  線量率及びエネルギースペクトルを測定し、主として希ガスの放射能濃度を推定した上で、希ガス放出時の敷地境界における被ばく線量を評価しようとしたが、データ不足のためできなかった。

という状況であった。

このことから“TMI 事故からの教訓プログラム”では、減衰係数と  $\gamma$  線 BF のエネルギー範囲を広げ、物質の種類を増やした標準データ作成の要請が米国原子力学会 ANS に出され、作業がワーキンググループ (WG) で進められていることが、1983 年東京で開催された放射線遮蔽国際会議で、WG 委員長の Trubey 氏 (米国オークリッジ国立研究所) の講演で明らかになった。

GP 式も使えないかと Trubey 氏に播磨氏が問い合わせた際の返事に、WG の一員で  $\gamma$  線 BF の近似式を提案している Hoderaro 氏が GP 式を高く評価した手紙が同封されていた。そこには「自分は 1 mfp の  $\gamma$  線 BF の値が近似式には重要と 15 年前から考えていたが、播磨氏はそれをうまく利用した。自分の式では大きな値を表現できない」と書かれていた。

ANSI/ANS-6.4.3-1991 は次のデータから構成されている。

- ・質量減衰係数 (without coherent scattering, with coherent scattering) : 【エネルギー範囲】 0.010~30 MeV
- ・質量エネルギー吸収係数 : 【エネルギー範囲】 0.010~30 MeV
- ・ $\gamma$  線 BF (Exposure, Energy Absorption) :
  - 【物質】 Be~Cu の元素、水、空気、普通コンクリート (モーメント法算出)、Mo ~U の元素 (PALLAS コード算出)
  - 【エネルギー範囲及び遮蔽厚】 0.015 ~ 15 MeV, 0 ~ 40 mfp
- ・ $\gamma$  線 BF に対する近似式 : G-P 式、Taylor 近似式
- ・遮蔽体-人体組織相互効果
- ・Coherent 散乱効果

ANSI/ANS-6.4.3-1991 への日本の研究者の貢献は、下記の通りである。

- ・ $\gamma$  線 BF の算出 : Mo~U の高原子番号の物質に対するデータを PALLAS コードで計算、これには制動 X 線・消滅  $\gamma$  線・蛍光 X 線の二次放射線の寄与が含まれている。
- ・ $\gamma$  線 BF のデータ検証 : 電磁カスケードモンテカルロ計算コード EGS4 で  $\gamma$  線 BF を算出できるして、他の計算コードの計算結果の精度検証、コヒーレント散乱断面積等の影響評価を行った。当初の計算は 10 mfp までの遮蔽厚さであったが、分散低減法の導入により 40 mfp までの計算が可能になった。
- ・GP 式の改良及び適用 : GP 式の改良を行うとともに、最小自乗法のフィッティングプログラムを整備し大量の  $\gamma$  線 BF に対するフィッティングを実施した。
- ・モーメント法による  $\gamma$  線 BF (Be 及び B) の不自然なデータの見直し : モーメント法の Be 及び B の遮蔽が薄いデータの中に不自然なもの (前後のデータに比べて 1~

2点ズレたデータ)があり、GP式で他のデータから推定するとともに、PALLASコード及びANISNコードでも不具合があった $\gamma$ 線BFの計算を行った。

- ANSI/ANS-6.4.3-1991に収納されたGPパラメータを導入したQAD-CGGP及びG33-GPを開発した<sup>4-9)</sup>。

#### 4. 1. 5. 日本原子力学会の $\gamma$ 線BF標準

米国原子力学会の $\gamma$ 線BF標準<sup>4-8)</sup>が制定されてから20年以上経過し、日本国内でのこの種の研究が継続して進展されていることから、日本原子力学会標準委員会において $\gamma$ 線BF標準<sup>4-2)</sup>が制定された。この動機付けは下記の通りである。

- $\gamma$ 線BFは、同一の計算コード及び断面積データで算出する。
- 40 mfpを超える深層透過まで対応する(100 mfpまで)。
- 低原子番号の物質にも、制動X線の寄与を含める。
- $\gamma$ 線BFの種類として、従来の照射線量、吸収線量以外に、AP照射条件及びISO照射条件の実効線量並びに1 cm線量当量を増やす。
- 100 mfpまで対応できるGP式を改良する。

$\gamma$ 線BFに関する米国原子力学会標準と日本原子力学会標準の比較を表4.1-1に示す。日本標準<sup>4-2)</sup>の中には、各種データとともに、モーメント法による米国標準との比較、EGS4計算結果との比較、各種の感度解析(空間メッシュ、角度メッシュ、エネルギー群)、新旧 $\gamma$ 線BFを使用した際の線量透過率の比較結果が示されている。

表 4.1-1 日米の  $\gamma$  線 BF 標準の比較<sup>4-2)</sup>

項目	ANSI/ANS-6.4.3(1991)	AESJ-SC-A005:2013
線量の種類	照射線量、吸収線量	照射線量、吸収線量、実効線量 (AP 及び ISO 照射条件)、1 cm 線量当量
物質	Be から U までの 23 元素、水、コンクリート、空気	Be から U までの 25 元素 (Rb 及び Bi を追加)、水、コンクリート、空気
エネルギー	0.015~15 MeV	同 左
遮蔽厚	0.5~40 mfp (16 点)	0.5~100 mfp (29 点)
計算条件		
散乱	自由電子によるコンプトン散乱	同 左
蛍光 X 線・制動 X 線	高原子番号物質のみ考慮 (K 殻の寄与のみ、制動 X 線は前方放出近似)	全ての物質で考慮 (K 殻の寄与のみ、制動 X 線は EGS4 の計算結果に基づく放出分布)
断面積データ	低原子番号: NBS29 高原子番号: PHOTX <sup>4-10)</sup>	全て PHOTX <sup>4-10)</sup>
エネルギー吸収係数	Hubbell のデータ <sup>4-11)</sup> NISTIR5632	同 左
計算コード	低原子番号: モーメント法 高原子番号: PALLAS	全て IE 法
フィッティング式	GP 式及び Taylor 式	改良 GP 式

#### 4. 1. 6. $\gamma$ 線減衰係数

点減衰核法で重要なデータのの一つは、物質中での  $\gamma$  線の透過率を算出するための減衰係数である。元素毎の  $\gamma$  線に対する散乱・吸収プロセスに応じた断面積データは古くから評価されているが、点減衰核法では  $\gamma$  線に対する全断面積が使用され、元素に対する全断面積から、元素の質量当たりの値 (質量減衰係数) に変換したものをを用いる。また、化合物若しくは混合物に対する減衰係数は、着目物質を構成する元素の質量減衰係数に、その元素の部分密度を乗じて総和を取ることによって算出する。

$\gamma$  線 (光子) に対する断面積データで、多くの元素に対して広いエネルギー範囲でレポート若しくはファイルに計算しているのは、下記のものがある。

- Storm & Israel (DLC-15)<sup>4-12)</sup> : エネルギー範囲 (1 keV~100 MeV)、元素 (Z = 1~100)

・ NBS29 : エネルギー範囲 (10 keV~100 GeV)、元素 (Z = 1~100)、光子断面積 (23 元素、13 化合物・混合物)、減衰係数 (23 元素)、エネルギー吸収係数 (空気・水・18 元素-10 keV~10 MeV、空気・水 7 元素~100 MeV)

・ PHOTX(DLC-136) : エネルギー範囲 (1 keV~100 GeV)、元素 (Z = 1~100)

最新の QAD-CGGP2 及び G33-GP2 に組み込まれている質量減衰係数は、PHOTX に基づくもので、各元素の電子対生成断面積、自由電子のコンプトン散乱断面積 (クライン・仁科の式) 及び光電吸収断面積の総和から算出されたものである。<sup>ii</sup>

このことは、一般的な輸送断面積で考慮される干渉性散乱 (レイリー散乱) 及び束縛電子の非干渉性散乱が最新の QAD-CGGP2 及び G33-GP2 には含まれていないことを示している。

#### 4. 1. 7. 日本国内における $\gamma$ 線 BF 研究

日本国内における  $\gamma$  線 BF 研究は次の委員会等の下で行われた。

##### 【原子力学会活動】

・ 歴代の遮蔽に関する研究専門委員会 :

ビルドアップ小委員会 / 原子力施設等での遮蔽安全性評価手法及びデータの調査 / 遮蔽計算定数 WG

・ 標準委員会 : 放射線遮蔽分科会

・ 放射線工学部会 : 簡易遮蔽解析レビューWG

##### 【原研の委員会活動】

・ 原子力コード委員会 : RADHEAT WG

##### 【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<sup>4-13)</sup>

また、本研究に関与した人は以下の通りである。

##### 【 $\gamma$ 線 BF の算出】

PALLAS : 田中、竹内、坂本

EGS4、EGS5 : 平山、波戸

IE 法 : 清水

ANISN : 石川

BERMUDA : 鈴木、坂本

多重層 : 秦、播磨

##### 【 $\gamma$ 線 BF の近似式】

GP 式 : 播磨、黒澤、根本、坂本

---

<sup>ii</sup> 4.2.2(4)に PHOTX での合算データを記述する。

多重層：播磨、秦

【点減衰核コードへの組み込み】

QAD：松本、山口、坂本

G33：河合、山口、坂本

【その他】

実効換算係数：田中、鈴木

コヒーレント散乱等の検討：平山、波戸

放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル：田中、坂本、黒澤

## 4. 2. 光子断面積ライブラリの比較

### 4. 2. 1. 評価済み核データ

現在、種々の光子断面積ライブラリが存在しているが、これらは評価済み核データ等のデータベースから生成されている。主な原子-光子反応の評価済み核データとして、EPDL (Evaluated Photon Data Library) 及び ENDF (Evaluated Nuclear Data File) photo-atomic がある。

#### (1) EPDL 系の評価済み核データ

EPDL はローレンス・リバモア国立研究所 (LLNL) からリリースされている評価済み核データであり、ENDL [Howerton et al., 1983; Perkins and Cullen, 1994]<sup>iii</sup> フォーマットで記述されている。また、EPDL には光子相互作用データ (EPDL) 以外にも電子相相互作用データ (EEDL) 等も収録されている。

- EPDL89 (1989) [Cullen et al., 1989] :  
Z = 1~100 までの元素について 10 eV~100 GeV の光子断面積データ、平均エネルギー沈着、形状因子を収録している。光電効果については殻ごとの断面積とコヒーレント異常散乱因子も含まれている。1 MeV 以下については Scofield らのデータ [Scofield, 1973; Saloman et al., 1988] を、1 MeV~100 GeV については Hubbell らのデータ [Hubbell et al., 1986; Berger and Hubbell, 1987] を採用している。
- EPDL97 (1997) [Cullen et al., 1997] :  
実験や理論の更新による EPDL89 のアップグレード版。エネルギー下限の 1 eV まで拡張、光励起データの追加、コヒーレント散乱断面積の更新等が実施されている。

---

<sup>iii</sup> 本節に限っては、参考文献が多いため脚中に記載する。

R. J. Howerton et al., "OMEGA: A Cray 1 Executive Code for LLNL Nuclear Data Libraries", Vol.25, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, UCRL-50400 (1983).

S.T. Perkins, and D.E. Cullen, "ENDL TypeFormats for the LLNL Evaluated Atomic Data Library, EADL, for the Evaluated Electron Data Library, EEDL, and for the Evaluated Photon Data Library, EPDL," Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-ID-117796 (July 1994).

D. E. Cullen, M. H. Chen, J. H. Hubbell, S. T. Perkins, E. F. Plechaty, J. A. Rathkopf and J. H. Scofield. "Tables and Graphs of Photon-Interaction Cross Sections from 10 eV to 100 GeV Derived from the LLNL Evaluated Photon Data Library (EPDL)." Lawrence Livermore National Laboratory report UCRL-50400, Vol. 6 (October 31, 1989).

J. H. Scofield, UCRL-51326, Lawrence Livermore National Laboratory (1973).

E. B. Saloman, J. H. Hubbell, and J. H. Scofield, At. Data Nucl. Data Tables 38, 1 (1988).

J. H. Hubbell, H. M. Gerstenberg, and E. B. Saloman, NBSIR 86-3461 National Bureau of Standards (1986).

M. J. Berger and J. H. Hubbell, XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer, NBSIR 87-3597, National Bureau of Standards (1987).

D. E. Cullen, J. H. Hubbell and Lynn Kissel. "EPDL97: The Evaluated Photon Data Library, '97 Version." Lawrence Livermore National Laboratory report UCRL-50400, Vol. 6, Revision 5 (September 19, 1997).

## (2) ENDF 系の評価済み核データ

ENDF は、Cross Section Evaluation Working Group (CSEWG) よりリリースされている評価済み核データであり、ENDF フォーマット [McLane, 1995]<sup>iv</sup> で記述されている。ENDF は光子データだけでなく、中性子データ、崩壊データ、熱中性子散乱データ、荷電粒子データ等様々なサブライブラリで構成されている。数値データは、IAEA の web サイト [IAEA ENDF-Archive] より過去のバージョンを含めダウンロード可能である。以下では ENDF の光子相互作用データの主なバージョンについて述べる。

- ENDF/B-IV (1974) [Garber, 1975] :  
Z = 1~83 及び 86, 90, 92, 94 の元素に対し [Hubbell et al., 1975; Hubbell et al., 1977; Plechaty and Terrall, 1968] 等を元にした評価値を収録している。エネルギー領域は 1 keV~10 MeV。
- ENDF/B-VI (1991) [Rose, 1991] :  
EPDL89 を ENDF フォーマットに変換した [McLane, 1996] もの。
- ENDF/B-VI.8 (2001) [Lemmel et al., 2001] :  
EPDL97 を ENDF フォーマットに変換した [Lemmel, 2001] もの。
- ENDF/B-VII photo-atomic データ (2011) [Chadwick et al., 2011] :  
光子原子反応については ENDF/B-VI.8 と同様のデータ。

---

<sup>iv</sup>本章に限っては、参考文献が多いため脚中に記載する。

V. McLane, C. L. Dunford and P.F.Rose, "ENDF-102 Data Formats and Procedures for the Evaluated Nuclear Data File, ENDF-6," BNL-NCS-44945, Rev.11/95, National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory (1995).

International Atomic Energy Agency - Nuclear Data Section, "ENDF-Archive,;" <https://www-nds.iaea.org/public/download-endf/>

(Ed.) D. Garber: "ENDF/B Summary Documentation", BNL-17541, 2nd Edition (1975).

J. H. Hubbell et al., Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections, Journal of Physical and Chemical Reference Data 4, 471 (1975);

<https://doi.org/10.1063/1.555523>

J. H. Hubbell et al., Atomic form factors, incoherent scattering functions, and photon scattering cross sections, Journal of Physical and Chemical Reference Data (Erratum) 6, 615 (1977);

<https://doi.org/10.1063/1.555554>

E. F. Plechaty and J. R. Terrall, "Photon Cross Sections 1 keV to 100 MeV," UCRL-50400, Vol. VI (1968).

Edited by P. F. Rose, "ENDF-201, ENDF/B-VI Summary Documentation", BNL-NCS-17541, Brookhaven National Laboratory, (1991).

V. McLane, and Cross Section Evaluation Working Group, "ENDF-201 ENDF/B-VI SUMMARY DOCUMENTATION SUPPLEMENT I ENDF/HE-VI SUMMARY DOCUMENTATION", BNL-NCS-17541 [ENDF-201] 4th EDITION [ENDF/B-VI] SUPPLEMENT I, BNL (1996).

H.D. Lemmel, P.K. McLaughlin, and V.G. Pronyaev, "ENDF/B-VI Release 8 (Last release of ENDF/B-VI)," IAEA-NDS-100, IAEA (2001).

H.D. Lemmel, "EN6-PHOTO" and "JEF-2/PHOTO" PHOTO-ATOMIC INTERACTION DATA LIBRARY, IAEA-NDS-58 (2001).

M.B.Chadwick et al., "ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data", Nuclear Data Sheets Volume 112, Issue 12, 2887-2996 (December 2011).



近年、EPDL97 においても ENDL 形式のほか、ENDF 形式のデータも公開しており、実際、ENDF/B-VI.8 以降の ENDF photo-atomic データは、EPDL からのフォーマット変更によって作成されている。また LLNL は、ENDF 形式から ENDL 形式へ変換するプログラム [Brown and Hedstrom, 2006]<sup>v</sup> を公開している。しかしながら ENDL 形式に関しては、ENDF 形式に比べて制約が多いことや、LLNL のみが ENDL 形式に拘ることに対する批判があり、新たなフォーマットのテストや変換ツールの開発 [Beck and Mattoon, 2014] も行われている。

#### 4. 2. 2. 断面積ライブラリ

評価済み核データが輸送計算に直接使用されることは少なく、実際には、計算機で利用しやすい形式に変換された断面積ライブラリが使用されることが多い。主要な光子断面積ライブラリを以下に挙げる。

##### (1) mcplib 系の断面積ライブラリ

mcplib には、以下に述べるように複数のバージョンがあり [Conlin et al., 2014]、何れも ACE (A Compact ENDF) 形式で記述されている。

- mcplib (1982) :  
Z < 94 の大半の核種では断面積データと形状因子に ENDF/B-IV 評価値 (RSICC: DLC7et) を採用し、1 keV~100 MeV の範囲を対象とする。一部の核種は 15 MeV 以下のみであり、Storm and Israel [1970] のデータ (RSICC:DLC15) をなぞっている。蛍光 X 線データも Storm and Israel のデータを採用している。
- mcplib02 (1993) :  
EPDL89 データを採用し、エネルギー領域を 10 GeV まで拡張。10 MeV 以下の領域に関しては、mcplib からの変更はない。
- mcplib03 (2002) :  
mcplib02 に momentum profile (CDBD, Compton Doppler broadening data) [Biggs et al., 1975] が追加されている。その他のデータには変更なし。

---

<sup>v</sup>本節に限っては、参考文献が多いため脚中に記載する。

D. Brown and G. Hedstrom, "User's Guide to fete: From ENDF To ENDL", UCRL-SM-218496, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550 USA (2006).

B. R. Beck and C. M. Mattoon, "FUDGE: A Toolkit for Nuclear Data Management and Processing", LLNL-PROC-648476, Lawrence Livermore National Laboratory (2014).

J. L. Conlin, D. K. Parsons, S. J. Gardiner, M. G. Gray, A. C. Kahler III, M. C. White, and M. B. Lee, "Listing of Available ACE Data Tables", LA-UR-13-21822, LANL (2014).

L. Storm and H. Israel, "Photon cross sections from 1 keV to 100 MeV for elements Z=1 to Z=100", Atomic Data and Nuclear Data Tables, Volume 7, Issue 6, p. 565-681 (1970); 10.1016/S0092-640X(70)80017-1

F. Biggs, L. B. Mendelsohn, and J. B. Mann, "Hartree-Fock Compton Profiles for the Elements," Atomic Data and Nuclear Data Tables, Volume 16, pp. 201-309 (1975).

- mcplib04 (2002) :  
断面積、形状因子、蛍光データを ENDF/B-VI.8 の評価値（元データは EPDL97）に更新。エネルギー領域は 1 keV-1 GeV で、CDBD は mcplib03 と同様である。
  - mcplib63, mcplib84 (2012) :  
それぞれ mcplib03/mcplib04 の Doppler broadening data の修正版 [White, 2012]<sup>vi</sup>。
- (2) JENDL 系の断面積ライブラリ
- AcelibJ40 (2013) [Sato et al., 2013] :  
AcelibJ40 は、mcplib 同様 ACE 形式を採用し、MCNP 及び PHITS 等で利用可能である。光子相互作用断面積データには EPDL97 を採用し、CDBD は含まれていない。
- (3) PHOTX 系の断面積ライブラリ
- PHOTX (1989) [Trubey et al., 1989] (RSICC: DLC-136) :  
EGS 等で使用されることの多い光子断面積ライブラリ。断面積データは、NIST データベース [Saloman et al., 1988] に基づいた評価値を使用。PHOTX 論文 [Trubey et al., 1989] では ENDF/B-VI のために作成されたと述べられているが、前述のように ENDF/B-VI には EPDL89 が採用されている。
- (4) XCOM 系の断面積ライブラリ
- XCOM (1987) [Berger and Hubbell, 1987] (RSICC: DLC-174) :  
PHOTX 同様の NIST データベースの値を用いている。FORTRAN プログラム及び web [NIST, XCOM: Photon Cross Sections Database] からの利用が可能となっている。
- ここで、坂本氏より提供を受けた、PHOTX 1988 で処理された結果より、PHOTX でデータ化されたデータ及び計算されたデータ(変数名に※を追記)を表 4.2-1 に示す。なお、RIST RSICC 友の会に登録された、PHOTX(IBM-PC) (PHOTX 1988 (RSIC DATA LIBRARY DLC-136, May 1989.) には、ATMUKN というパラメータは無い。

<sup>vi</sup>本節に限っては、参考文献が多いため脚中に記載する。

M. C. White, "Further Notes on MCPLIB03/04 and New MCPLIB63/84 Compton Broadening Data For All Versions of MCNP5", LA-UR-12-00018, LANL (2012).

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).

D.K. Trubey, M.J. Berger and J.H. Hubbell, "Photon Cross Sections for ENDF/B-IV", CONF-890408-4, ANS Topical Meeting Advances in Nuclear Engineering Computation and Radiation Shielding, Santa Fe, New Mexico, April 9-13, (1989).

E. B. Saloman, J. H. Hubbell, and M. J. Berger, "National Bureau Of Standards Data Base Of Photon Absorption Cross Sections From 10 eV To 100 GeV", SPIE, 911, 100 (1988).

M. J. Berger and J. H. Hubbell, XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer, NBSIR 87-3597, National Bureau of Standards (1987).

NIST, "XCOM: Photon Cross Sections Database" (Last update: November 2010);

<https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database>

表 4.2-1 PHOTX の格納データ

No.	変数名	記号	名称
1	SCATCO	$\sigma_{\text{coh}}$	干渉性散乱(coherent scattering) (unit:b) レイリー散乱
2	SCATIN	$\sigma_{\text{incoh}}$	非干渉性散乱(incoherent scattering) (unit:b) コンプトン散乱
3	SCATKN	$\sigma_{\text{comp}}$	クライン-仁科散乱断面積 (unit:b)
4	PHOT	$\sigma_{\text{photo}}$	光電効果(photoelectric effect) (unit:b)
5	PAIRAT	$\sigma_{\text{pair}}$	原子核場電子対生成 (par creation) (unit:b)
6	PAIREL	$\sigma_{\text{pair}}$	電子場電子対生成 (triplet creation) (unit:b)
7	SIGTOT	$\sigma_{\text{tot}}$	全断面積 (unit:b) SCATCO+SCATIN+PHOT+PAIRAT+PAIREL
8	ATMU <sup>*</sup>	$\mu_{\text{TM}}$	質量減衰係数 (unit: cm <sup>2</sup> /g) Base on SIGTOT
9	ATMUNC <sup>*</sup>		干渉性散乱を除く減衰係数 1 SIGTOT – SCATCO
10	ATMUKN <sup>*</sup>		干渉性散乱を除く減衰係数 2 SCATKN+PHOT+PAIRAT+PAIREL ANSI/ANS-6.4.3 ビルドアップ係数で使用

最新断面積として、XCOM 3.1 を利用する場合を考慮し、Fortran ソースファイル中に記載されたデータから、XCOM でデータ化されているデータ及び計算されたデータ(変数名に※を追記)を調査した。データを表 4.2-2 に示す。XCOM には、ATMUKN に相当するデータは用意されていないため、XCOM を利用する場合は、ATMUKN に相当する部分を出力できるよう変更する必要がある。

表 4.2-2 XCOM の格納データ

No.	変数名	記号	名称
1	SCATCO	$\sigma_{\text{coh}}$	干渉性散乱(coherent scattering) (unit:b) レイリー散乱
2	SCATIN	$\sigma_{\text{incoh}}$	非干渉性散乱(incoherent scattering) (unit:b) コンプトン散乱
4	PHOT	$\sigma_{\text{photo}}$	光電効果(photoelectric effect) (unit:b)
5	PAIRAT	$\sigma_{\text{pair}}$	原子核場電子対生成 (par creation) (unit:b)
6	PAIREL	$\sigma_{\text{pair}}$	電子場電子対生成 (triplet creation) (unit:b)
7	SIGTOT <sup>**</sup>	$\sigma_{\text{tot}}$	全断面積 (unit:b) SCATCO+SCATIN+PHOT+PAIRAT+PAIREL
8	AT1 <sup>**</sup>	$\sigma_{\text{T1T}}$ $\mu_{\text{T1}}$	断面積 or 質量減衰係数等 1 ユーザー指定 (unit: cm <sup>2</sup> /g or b)
9	ATNC <sup>**</sup>	$\sigma_{\text{TNC}}$ $\mu_{\text{TN}}$	干渉性散乱を除く減衰係数等ユーザー指定 (unit: cm <sup>2</sup> /g or b)

(5) 評価済み核データと断面積ライブラリの関係

前項までの評価済み核データ及び断面積ライブラリの間を、横軸を年代として図 4.2-1 にまとめた。

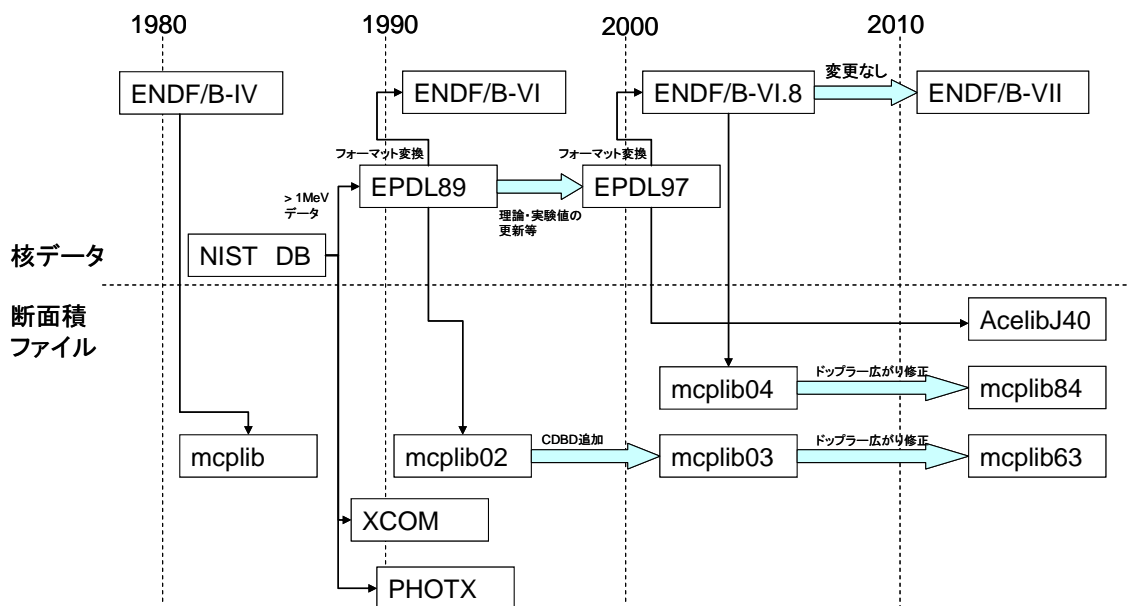


図 4.2-1 光子の評価済み核データ及び断面積ライブラリの関係。  
 実線矢印はデータの提供、水色吹き出し矢印は直接のバージョンアップを表す。

#### 4. 3. $\gamma$ 線ビルドアップ係数の計算方法（モンテカルロ法）

モンテカルロ法計算コード（MCNP<sup>4-14</sup>、EGS<sup>4-15</sup>、PHITS<sup>4-16</sup>）などは、近年の計算機の性能向上及び一般普及により、今や放射線挙動解析の一般的なツールであり、 $\gamma$ 線ビルドアップ係数の計算にも利用することができる。上述したモンテカルロ法計算コードの予測精度は、実験結果との比較においてよく検証されており、実験による再現が難しい理想的な条件下（例えば、任意の単色エネルギーの $\gamma$ 線を放出する線源、実験に全く影響を与えることのない検出器、不純物を含まない純度100%の組成など）においても、 $\gamma$ 線BFを計算・評価することができる。モンテカルロ法計算コードによる $\gamma$ 線の輸送計算では、前節で紹介した断面積ライブラリが使用される。ただし、各モンテカルロ法計算コードは、利用可能な最新の断面積ライブラリと併せて配布・提供されているため、モンテカルロ法計算コードと断面積ライブラリの組み合わせは基本的に決まっている。先の予測精度の検証も、基本的に、そのモンテカルロ法計算コードと共に配布・提供されている断面積ライブラリを使用したものであるため、モンテカルロ法計算コードを用いて $\gamma$ 線BFを計算・評価する際には、原則として、この組み合わせを変えないで用いることが肝要である。

ここでは、MCNP及びPHITSに組み込まれているEGS（以下、「EGS(PHITS)」という。）を用いた $\gamma$ 線ビルドアップ係数の計算方法について解説する。

##### 4. 3. 1. $\gamma$ 線ビルドアップ係数の定義

モンテカルロ法計算コードを用いて $\gamma$ 線BFを計算するときの定義として、文献<sup>4-17</sup>では次式が用いられている。一次元平板体系（one-dimensional plane geometry）における吸収線量のBF  $B(E_0, x)$  の定義は、

$$B(E_0, x) = \int_0^{E_0} \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}(E) I(x, E) dE / \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}(E_0) I(x, E_0)$$

ここで、

$E_0$  :  $\gamma$ 線の入射エネルギー (MeV)

$x$  : 線源からの距離 (任意、cm 又は mfp)

$\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air}(E)$  :  $\gamma$ 線に対する空気の質量エネルギー吸収係数 ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ )

※ この式では、 $\gamma$ 線に対する空気の質量エネルギー吸収係数を使用しているが、評価したい線量の種類に応じて係数を変更することができる。

$I(x, E)$  :  $\gamma$ 線エネルギーEのフラックス ( $\text{cm}^{-2}$ )

この式の分子は、ある距離  $x$  における  $\gamma$  線のエネルギースペクトルより求められる全線量で、モンテカルロ法計算コードの一般的な検出器（エスティメータ）で計算可能である。一方の分母は、 $\gamma$  線の入射エネルギー  $E_0$  と同じエネルギーを持つ、ある距離  $x$  における  $\gamma$  線より求められる線量で、PHITS の検出器では、検出器で指定するエネルギービン幅の下限値を入射エネルギーと同じ値に指定することで計算できる。（MCNP や EGS では、エネルギー境界の取り扱いが異なるため、検出器で指定するエネルギービン幅の下限値を入射エネルギーより若干小さい値に指定することで計算できる。）

文献<sup>4-18)</sup>では、分母の  $I(x, E_0)$  を非衝突線束と定義している。PHITS の検出器では、指定した媒質中における衝突イベントの有無を判定することができるため、この機能を使用することで非衝突線束を計算することができ、EGS(PHITS)でもこの機能は使用可能である。MCNP の”uncollided photon flux” は、 $\gamma$  線の干渉性散乱（レイリー散乱）を含む全断面積から算出していることに留意する必要がある。

さらに、簡易計算手法の点減衰核法計算コードで計算される分母の線量は、エネルギー  $E_0$  の  $\gamma$  線による媒質の線減衰係数 ( $\text{cm}^{-1}$ ) 又は質量減衰係数 ( $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ) に基づく指数関数的な減少で表現されるため、モンテカルロ法計算コードによる計算・評価の結果を簡易計算手法で忠実に再現するために、この値を分母に使用することもできる。

この節の冒頭でも触れたとおり、モンテカルロ法計算コードは、近年の計算機の性能向上及び一般普及により、今や放射線挙動解析の一般的なツールである。そのため、BF を用いた簡易計算手法による線量評価の結果と、モンテカルロ法計算コードを用いた評価結果との矛盾（差異）は、容易に比較されうる環境にあることを認識しておかなければならない。

#### 4. 3. 2. 光子の全断面積

媒質中での光子の主な反応は、光電効果（photoelectric effect）、干渉性散乱（coherent scattering）、非干渉性散乱（incoherent scattering）及び電子対生成（原子核場（pair creation）及び電子場（triplet creation））であり、物質中での光子の減衰は、これらのマクロ反応断面積の和により支配される<sup>4-19)</sup>。

$$\mu = \mu_{\text{photo.}} + \underline{\mu_{\text{coh.}}} + \mu_{\text{incoh.}} + \mu_{\text{pair.}} \quad (\text{cm}^{-1})$$

このうち干渉性散乱断面積  $\mu_{\text{coh.}}$  は、低エネルギー領域では光電効果断面積より小さく、高エネルギー領域では非干渉性散乱断面積や電子対生成断面積より顕著に小さい。光子に対する鉄の断面積（AcelibJ40）を図 4.3-1 に示す。光子のエネルギーが 100 keV のとき、干渉性散乱断面積は全断面積の 10% 程度を占めていることがわかる。

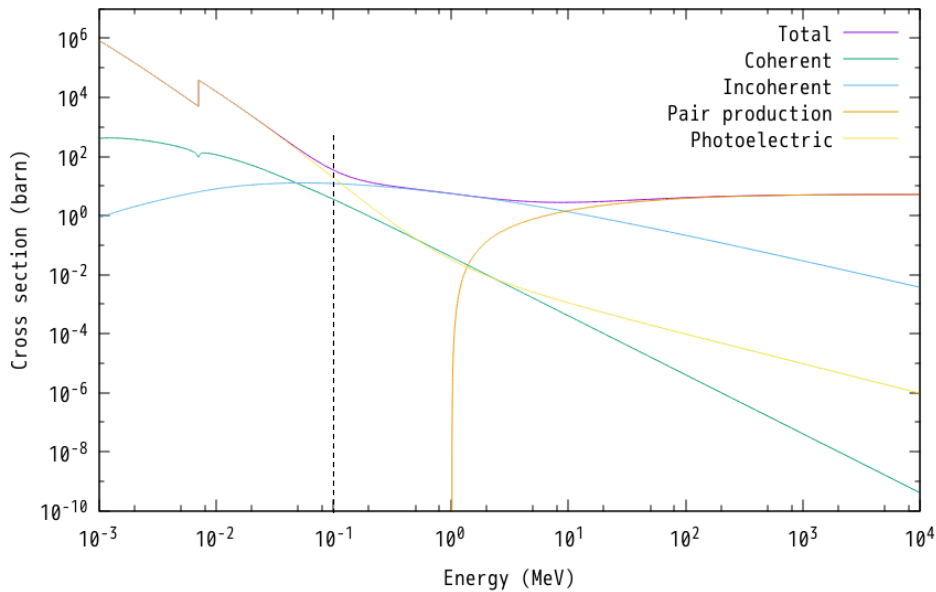


図 4.3-1 光子に対する鉄の断面積 (AcelibJ40)

光子の全断面積に対する干渉性散乱断面積の割合が小さいため、モンテカルロ法計算コードでは、干渉性散乱を無視して計算を高速化するオプションが用意されている。しかしながら、近年の計算機の進歩により計算能力が飛躍的に増加しているため、干渉性散乱断面積を考慮しても十分な計算能力が得られる状況となっている。実際に、MCNP や PHITS では、干渉性散乱断面積の取り扱いオプションをデフォルトで有効にしている。4. 1. 6. 項の「 $\gamma$ 線減衰係数」に記述したように、最新の QAD-CGGP2 及び G33-GP2 に組み込まれている質量減衰係数には、干渉性散乱（レイリー散乱）及び束縛電子の非干渉性散乱が含まれていないため、モンテカルロ法計算コードで使用している断面積との違いにより、結果に差異が生じる可能性を示唆している。

### 4. 3. 3. 計算体系

#### (1) MCNP による $\gamma$ 線 BF の計算体系

MCNP を用いて  $\gamma$  線 BF を計算する厚い体系（点等方線源体系）を図 4.3-2 に示す。体系は、半径 170 cm の鉄球（密度  $7.86 \text{ g cm}^3$ ）とし、中心に単色  $\gamma$  線源を設置した。また、体系の中心（線源位置）から一定の間隔にリング検出器を設置した。



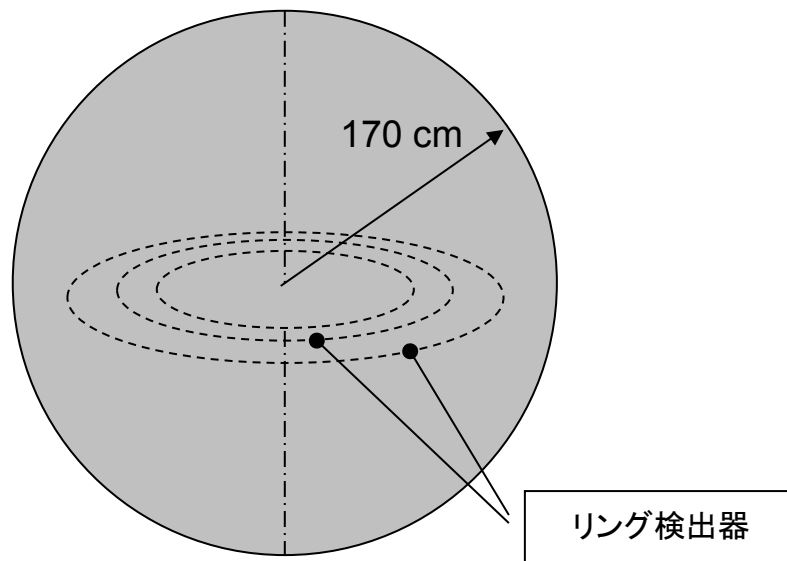


図 4.3-2 MCNPによる $\gamma$ 線ビルドアップ係数の計算体系

MCNP には、点検出器 (point detector) あるいはリング検出器 (ring detector) といった決定論的手法を併用する検出器がある。これらの検出器では、実際の $\gamma$ 線の全エネルギーによる線束に加えて、非衝突の線束 (線源から直接、決定論的手法により検出器に到達するもの。) を同時に計算することができる。

## (2) EGS(PHITS)による $\gamma$ 線 BF の計算体系

EGS(PHITS) を用いて $\gamma$ 線 BF を計算する厚い体系 (点等方線源体系) を図 4.3-3 に示す。体系は、半径 100mfp の鉄球 (密度  $7.86 \text{ g cm}^{-3}$ ) とし、中心に単色 $\gamma$ 線源を設置した。また、体系の中心 (線源位置) から一定の間隔に、 $\pm 0.5 \text{ mm}$  厚の飛跡長 (Track length) 検出器を設置した。

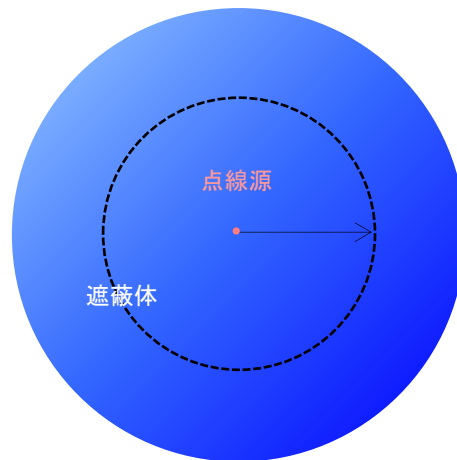


図 4.3-3 EGS (PHITS) による $\gamma$ 線ビルドアップ係数の計算体系

#### 4. 3. 4. 分散低減法の設定

モンテカルロ法計算コードを用いて、厚い体系（～数十 mfp）の $\gamma$ 線 BF を効率よく計算するためには、分散低減法を有効に活用する必要がある。分散低減法の設定値の目安は、文献<sup>4-20)</sup>を参考に、線源からの距離が 1 mfp 増加するごとに $\gamma$ 線の個数がおよそネイピア数（自然対数の底）倍となるように、分散低減手法の一つであるインポートランスを設定した。この設定は非常にシビアで、ネイピア数倍を超えて設定した場合は、分割された $\gamma$ 線の数がねずみ算式に増加するため、計算効率を逆に悪くしてしまう。一方、ネイピア数倍より低く設定した場合は、体系深部での統計上昇に支障が生じる。

#### 4. 4. 光子断面積ライブラリの違いが $\gamma$ 線 BF の計算に与える影響

##### 4. 4. 1. ドップラー広がり (CDBD)

4. 2. 節「光子断面積ライブラリの比較」より、断面積ライブラリ mcplib84 及び AcelibJ40 は、データの由来をたどると両者とも評価済み核データ EPDL97 をコンパイルしたものであることがわかる。両者の差異は、実質的には Compton Doppler broadening data, CDBD のみであるため、ドップラー広がりによる影響が問題にならない場合、同一の計算結果となることが期待される。一般にドップラー広がり線量計算に影響を与えるケースは稀であるが、MCNP ではある種の検出効率曲線の計算に影響を与え得ることを念頭に置いて処理が実装されている<sup>4-21)</sup>。

CDBD が $\gamma$ 線 BF の計算に与える影響を確認するため、図 4.3-2 の体系において 1 cm 線量当量率を計算した。計算コードは MCNP5、断面積ライブラリは mcplib84 及び AcelibJ40、 $\gamma$ 線のエネルギーは 1 MeV、換算係数には 1 cm 線量当量換算係数<sup>4-22)</sup>を用いた。

5 mfp ごとの結果を表 4.4-1 に示す。若干の差異はあるが、概ね同等の値となっていることがわかる。

表 4.4-1 鉄体系内における 1 cm 線量当量率

mfp	mcplib84 (CDBD あり) 線量率(pSv/h)		AcelibJ40 (CDBD なし) 線量率(pSv/h)		比 (なし/あり)	
	/photon	FSD	/photon	FSD	比	FSD
5	6.50E-07*	0.110%	6.53E-07	0.210%	1.004	0.24%
10	2.64E-09	0.160%	2.65E-09	0.380%	1.003	0.41%
15	1.40E-11	0.160%	1.40E-11	0.480%	1.004	0.51%
20	8.14E-14	0.270%	8.15E-14	0.320%	1.001	0.42%
25	4.95E-16	0.240%	4.94E-16	0.300%	0.998	0.38%
30	3.08E-18	0.620%	3.07E-18	0.430%	0.999	0.75%
35	1.93E-20	0.310%	1.93E-20	0.410%	1.000	0.51%
40	1.23E-22	0.330%	1.24E-22	0.450%	1.002	0.56%

※6.50E-07 は、 $6.50 \times 10^{-7}$  と読む。

FSD : 相対標準偏差

#### 4. 4. 2. 干渉性散乱

4. 1. 節「 $\gamma$  線 BF 研究の歴史」から、これまでの  $\gamma$  線 BF は干渉性散乱(coherent scattering)を考慮した評価結果を用いていない。干渉性散乱が  $\gamma$  線 BF の計算に与える影響を確認するため、図 4.3-2 の体系において 1 cm 線量当量率を計算した。計算コードは MCNP5、断面積ライブラリは mcplib84、 $\gamma$  線のエネルギーは 1 MeV、換算係数には 1 cm 線量当量換算係数<sup>4-22)</sup>を用いた。

はじめに、リング検出器の設置間隔を干渉性散乱 あり/なし に寄らず同一 (cm 単位) としたときの 1 cm 線量を表 4.4-2 に示す。

表 4.4-2 鉄体系内における 1 cm 線量当量率

位置(cm)	干渉性散乱あり 線量率		干渉性散乱なし 線量率		比(なし/あり)	
	(pSv/photon)	FSD	(pSv/photon)	FSD	比	FSD
10.7	6.50E-07 <sup>※</sup>	0.11%	6.54E-07	0.09%	1.005	0.14%
21.3	2.64E-09	0.16%	2.66E-09	0.15%	1.005	0.22%
32.0	1.40E-11	0.16%	1.41E-11	0.18%	1.006	0.24%
42.6	8.14E-14	0.27%	8.19E-14	0.23%	1.006	0.35%
53.3	4.95E-16	0.24%	4.98E-16	0.28%	1.007	0.37%
63.9	3.08E-18	0.62%	3.09E-18	0.32%	1.005	0.70%
74.6	1.93E-20	0.31%	1.96E-20	0.37%	1.015	0.48%
85.2	1.23E-22	0.33%	1.25E-22	0.41%	1.017	0.53%

※6.50E-07 は、 $6.50 \times 10^{-7}$  と読む。

FSD：相対標準偏差

表 4.4-2 より、干渉性散乱を考慮した場合と考慮しない場合では、 $\gamma$  線 BF の分子となる全線束については 1% 程度の過大評価に収まることがわかった。

次に、リング検出器の設置間隔をそれぞれ 5 mfp として、 $\gamma$  線 BF を計算した。ただし、リング検出器の設置間隔 (cm) は、干渉性散乱の あり/なし によってわずかに異なり、干渉性散乱断面ありの場合は 10.61 cm、なしの場合は 10.69 cm となる。5 mfp ごとの 1 cm 線量を図 4.4-1 (左) に、また、BF (全線束の線量/非衝突線束の線量) を図 4.4-1 (右) に示す。

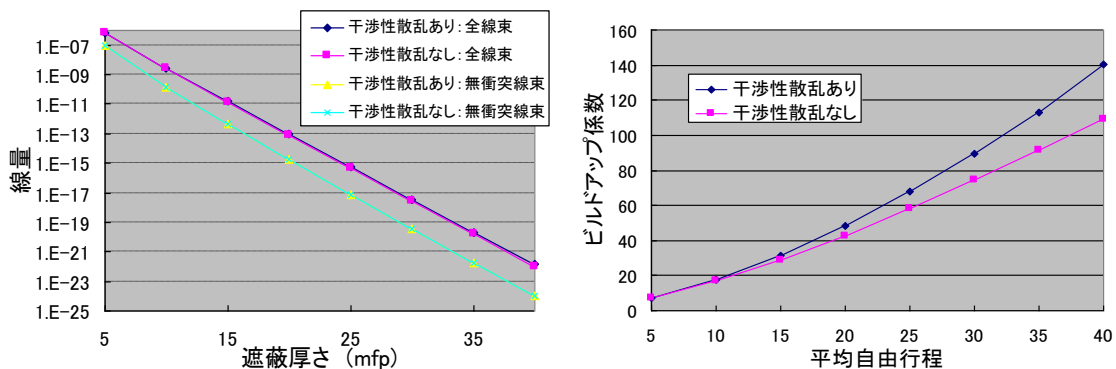


図 4.4-1 鉄体系内における 1 cm 線量当量率 (左) 及びビルドアップ係数 (干渉性散乱 あり/なし による全線束及び非衝突線束)

図 4.4-1 (右) の結果から、干渉性散乱の あり/なし の BF は、40 mfp において約 25% もの違いを示すことがわかる。これは、干渉性散乱の あり/なし による光子の全断面積  $\mu$  の違い (あり > なし) にもかかわらず、BF の分子である全線束による線量の減衰にほとんど差異が見られないため、もう一方の、BF の分母である非衝突線束による線量の減衰は干渉性散乱ありの方が大きくなるためである。

#### 4. 5. 干渉性散乱を考慮した $\gamma$ 線 BF の計算

干渉性散乱を考慮した  $\gamma$  線 BF と文献値<sup>4-13)</sup> との関係を確認するため、図 4.3-3 の体系において実効線量率を計算した。計算コードは EGS5(PHITS) 、断面積ライブラリは PHOTX 、 $\gamma$  線のエネルギーは 1 MeV 、換算係数には実効線量換算係数<sup>4-22)</sup> を用いた。このとき、1 mfp は、密度  $7.86 \text{ g cm}^{-3}$  として 2.13 cm とした。計算結果を図 4.5-1 に示す。このとき、BF の分母を  $\gamma$  線の入射エネルギー  $E_0$  と同じエネルギーを持つ線束による実効線量(4. 3. 1. 項の「 $\gamma$  線ビルドアップ係数の定義」参照)としたときの結果 (分子の全線束による線量は同じ値を使用) を併せて示す。

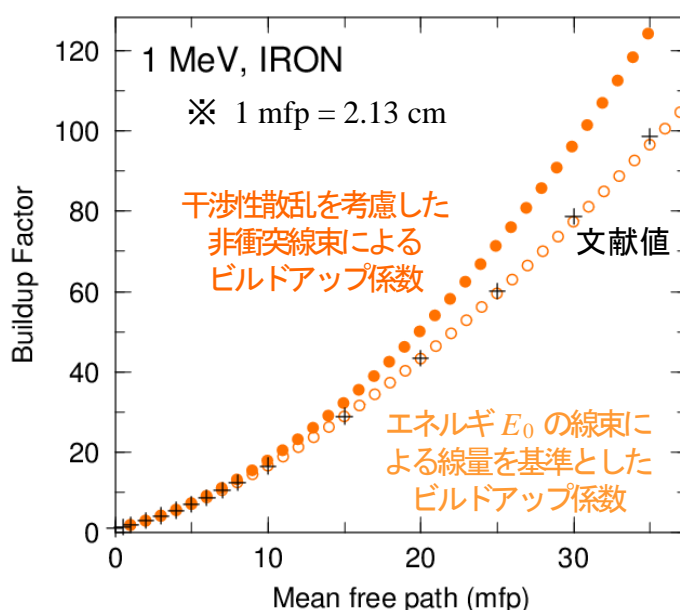


図 4.5-1 鉄体系内におけるビルドアップ係数(点等方線源体系)

図 4.5-1 の結果から、干渉性散乱を考慮した BF は、文献値と比べて大きな値を示しており、その値は、35 mfp において約 20% 大きくなることがわかる。一方、エネルギー  $E_0$  の線束による実効線量を基準とした BF は、文献値とよく一致することがわかる。これは、干渉性散乱では散乱後のエネルギーは変わらず、散乱角度は前方方向が中心となるためである。つまり、モンテカルロ法計算コードによる  $\gamma$  線の輸送計算において、干渉性散乱は散乱イベントではあるものの、エネルギー  $E_0$  の線束の減衰にはほと

んど寄与せず、あたかも干渉性散乱を考慮しない断面積による非衝突線束の減衰とほぼ同じ結果を示すためである。

#### 4. 6. 点等方線源体系を展開した計算体系における $\gamma$ 線BFの計算

図 4.3-2 及び図 4.3-3 の計算体系は、無限厚の遮蔽体の $\gamma$ 線BFを計算するために使用される。しかしながら、現実の遮蔽体は、すべて有限厚である。現実に即した $\gamma$ 線BFを計算するため、点とみなせる直方体検出器（20 mm×20 mm×5 mm；以下、「疑似点検出器」という。）を用いて、鉄体系内における実効線量率を計算した。計算コードはEGS5(PHITS)、断面積ライブラリはPHOTX、 $\gamma$ 線のエネルギーは1 MeV、換算係数には実効線量換算係数<sup>4-22)</sup>を用いた。計算体系を図 4.6-1 に示す。無限厚の遮蔽体の場合、疑似点検出器は、図 4.6-1（左）のように点線源から等距離に配置する必要がなくなるため、図 4.6-1（右）のように置き換えることができる。図 4.6-1（右）を点線源・疑似点検出器体系とする。疑似点検出器での非衝突線は、4. 3. 1. 項の「 $\gamma$ 線ビルドアップ係数の定義」に記載した方法を用いて算出する。

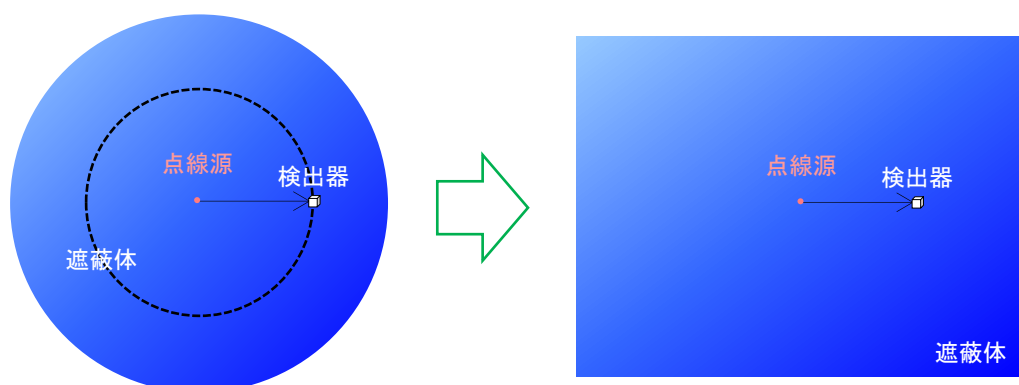


図 4.6-1 EGS(PHITS)を用いたビルドアップ係数の計算体系  
(左は点等方線源体系、右は点線源・疑似点検出器体系)

計算結果を図 4.6-2 に示す。点線源・疑似点検出器体系における $\gamma$ 線BFの計算結果は、点等方線源における計算結果とよく一致することがわかり、現実に即した体系に拡張できている。ただし、25 mfp 以降の計算結果は統計精度が悪く、点線源・疑似点検出器体系は、物理的に考えて、点等方線源体系と比べて計算効率が悪いことがわかる。

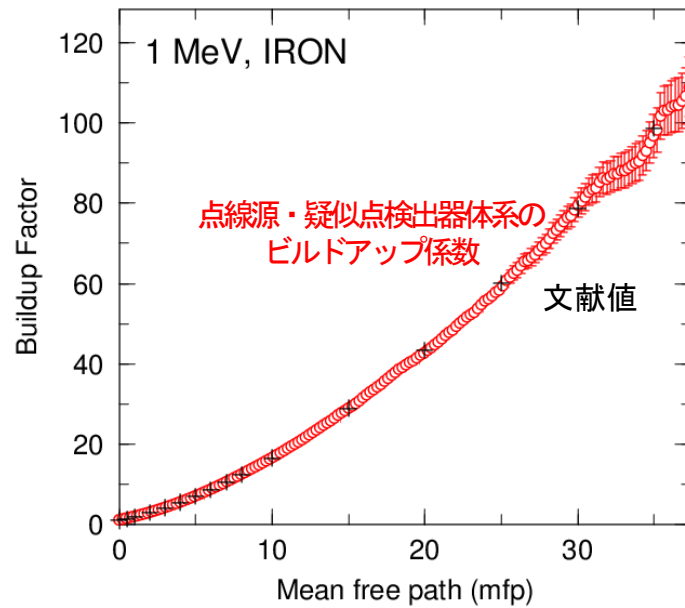


図 4.6-2 鉄体系内におけるビルドアップ係数(点線源・疑似点検出器体系)

※ 25 mfp 以降の計算結果は、統計精度が悪い。

図 4.6-1 (右) の計算体系をさらに現実的な計算体系に近づけるため、図 4.6-3 a) に示すように、検出器から見て点線源後方の遮蔽体を排除し、真空に置き換えた(線源から検出器へと向かう方向以外に放出されたガンマ線による後方散乱の影響を除去するため)。次に、図 4.6-3 b) 点線源と遮蔽体の入射面との距離が離れている体系を、点線源と遮蔽体との距離が十分に離れた体系として、図 4.6-3 c) に示す垂直入射体系を考え、それぞれの体系において BF を計算した。

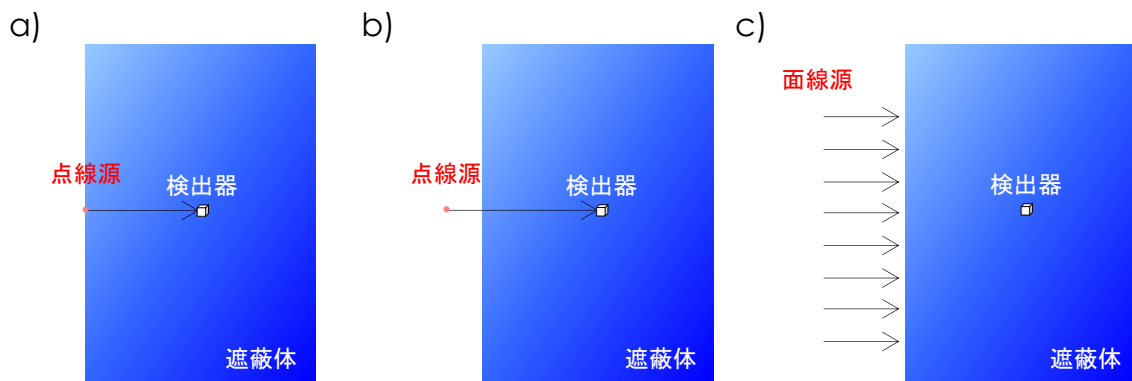


図 4.6-3 EGS(PHITS)を用いたビルドアップ係数の計算体系

a)点線源・疑似点検出器体系 から c)垂直入射体系 まで

計算結果を図 4.6-4 に示す。点線源と遮蔽体の入射面との距離が 0 cm (図 4.6-3 a)、50 cm (図 4.6-3b)、200 cm (図 4.6-3b)、及び距離 $\infty$ cm を模擬した垂直入射 (図 4.6-3c) の BF を、それぞれ、赤、橙、黄緑、青の標識で示す。

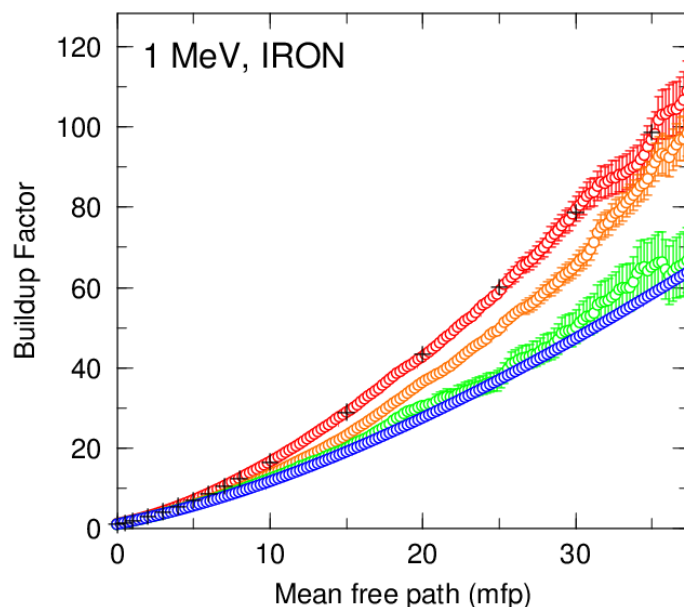


図 4.6-4 鉄体系内におけるビルドアップ係数  
(点線源・疑似点検出器体系から垂直入射体系まで。)

図 4.6-4 より点線源と遮蔽体の入射面との距離が離れていくにしたがい、BF は、点等方線源体系での BF の値から垂直入射体系での BF の値に徐々に近づいていくことがわかる (BF の値の傾向は、点等方線源体系 > 垂直入射体系)。点等方線源体系と垂直入射体系での  $\gamma$  線 BF の差異は、線源と検出器との距離による関係 (立体角) によるものと考えられる。

点等方線源体系を点線源・疑似点検出器体系に変更することにより、点等方線源体系では確認することができなかつた 0~数 mfp の  $\gamma$  線 BF の計算が可能になる。垂直入射体系における数 mfp までの BF を図 4.6-5 に示す。



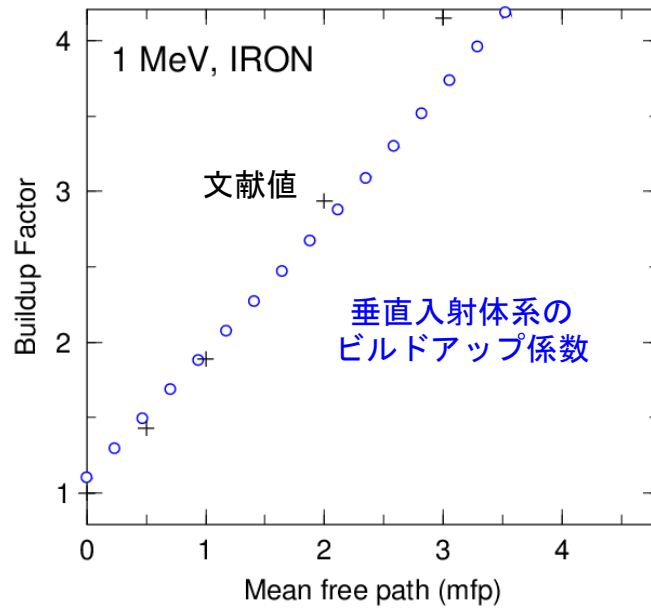


図 4.6-5 鉄体系内における数 mfp までのビルドアップ係数(垂直入射体系)

文献<sup>4-13)</sup>では、無限厚とは、「無限に広がったしゃへい体中に、放射線源と着目する測定点が置かれている、仮想的な状態」と定義されており、無限媒質のビルドアップ係数 BF は、この定義を踏襲していると考えられる。したがって、図 4.7-34.6-3 c) の垂直入射体系での計算結果を用いて検証することは大きく間違っていない。上記文献<sup>4-13)</sup>では、無限媒質の 0 mfp のビルドアップ係数 BF は、1.0 とされている。しかしながら、厚さ方向に無限に広がった遮蔽体からの後方散乱線があるため、0 mfp のビルドアップ係数は 1.0 にはならず (必ず 1.0 以上)、図 4.7-44.6-5 の結果からもそれを確認することができる。

#### 4. 7. まとめ (γ線ビルドアップ係数のレビュー)

γ線 BF のレビューとして、γ線 BF 研究の歴史やモンテカルロ法計算コードで利用される光子断面積ライブラリを調査し、モンテカルロ法計算コードを用いたγ線 BF の計算方法を改めて整理した。また、ここで整理した計算方法を用いてγ線 BF を計算し、γ線 BF 標準との比較・検証を行った。

γ線 BF を用いた点減衰核法は、モンテカルロ法計算コードを用いた遮蔽計算法が発展した今日においても広く使用されている。これは、非衝突γ線の線量にγ線 BF を適用することで、散乱線を含む全線量を迅速かつ簡易に評価できるためである。しかしながらその予測精度においては、近年の計算機の性能向上及び一般普及を背景として、モンテカルロ法計算コードによる評価結果が比較の対象となっている。つまり、簡易計算手法であるγ線 BF を用いた点減衰核法と、詳細計算手法であるモンテ

カルロ法計算コードとによる評価結果の矛盾（差異）は、できるだけなくしておくことが求められている。

モンテカルロ法計算コードを用いた遮蔽計算（線量計算）では、一般的に、干渉性散乱を考慮した計算が行われており（MCNP や PHITS ではデフォルトでこの取り扱いオプションが有効となっている。）、これまで干渉性散乱を除外して計算・評価されてきた $\gamma$ 線 BF においても、これを取り扱わない理由がない。光子断面積ライブラリの違いが $\gamma$ 線 BF の計算に与える影響の調査では、干渉性散乱に関する考慮のあり/なしは、 $\gamma$ 線 BF の分子である全線束による線量の減衰にほとんど影響を与えないことを明らかにした。ただし、 $\gamma$ 線 BF の分母である非衝突線束は、モンテカルロ法計算コードの検出器（エスティメーター）の指定方法によって、これまでの $\gamma$ 線 BF 標準を再現しないことを示した。これは、干渉性散乱を考慮することにより、非衝突線束の定義との間に齟齬が生じたものである。

点減衰核法による評価結果を現実の評価結果に近づけるため、点等方線源体系による $\gamma$ 線 BF からの展開について検討した。点線源・疑似点検出器体系を介した従来の点等方線源体系から垂直入射体系への変換は、これまでの過大な安全側の評価結果の改善につながる可能性がある。

また、従来の点等方線源体系では確認することができなかった 0～数 mfp における $\gamma$ 線 BF を垂直入射体系で計算・評価した。この結果は、これまでの $\gamma$ 線 BF 標準を評価してきた計算体系の考え方に影響を与え、GP パラメータについても少なからず影響を与える結果であると考えている。

## 参考文献

- 4-1) Y. Harima, "An Historical Review and Current Status of Buildup Factors Calculations and Applications", *Radiat. Phys. Chem.* Vol.41 (1993).
- 4-2)  $\gamma$ 線ビルドアップ係数：2013 (AESJ-SC-A005 : 2013)
- 4-3) Y. Harima and Y. Nishiwaki, "An approximation of gamma-ray buildup factors by geometrical progression", *Nucl. Eng. & Design.* v. 23(2) p. 209-227 (1972).
- 4-4) Y. Harima, "An approximation of gamma-ray buildup factors by modified geometrical progression", *Nucl. Sci. & Eng.*, v. 83(2) p. 299-308, (1983).
- 4-5) Y. Harima, Y. Sakamoto, S. Tanaka and M. Kawai, "Validity of the geometric-progression formula in approximating gamma-ray buildup factors", *Nucl. Sci. & Eng.*, 94(1), p.24-35 (1986).
- 4-6) Y. Harima, D.K.Trubey, Y. Sakomoto and S. Tanaka, "Gamma-ray attenuation in the vicinity of the K edge in molybdenum, tin, lanthanum, gadolinium, tungsten, lead and uranium", *Nucl. Sci. & Eng.*, v.107, p.385 (1991).
- 4-7) Y. Harima, Y. Sakamoto, N. Kurosawa and A. Shimizu "Improvement of the Geometric-Progression Formula for Approximating Gamma-Ray Buildup Factors Up to Depths of 100 mfp" *Journal Nuclear Technology*, Volume 168, 2009 - Issue 3: Special Issue on the 11th International Conference on Radiation Shielding and the 15th Topical Meeting of the Radiation Protection and Shielding Division (Part 3) .
- 4-8) ANSI/ANS-6.4.3-1991, "Gamma-Ray Attenuation Coefficients and Buildup Factors for Engineering Materials".
- 4-9) Y. Sakamoto and S. Tanaka, "QAD-CGGP2 and G33-GP2; Revised versions of QAD-CGGP and G33-GP codes with the conversion factors from exposure to ambient and maximum dose equivalents", *JAERI-M 90-110* (1990).
- 4-10) D. K. Trubey, M. J. Berger and J. H. Hubbell, "Photon Cross Sections for ENDF/B-VI," American Nuclear Society topical meeting, *Advances in Nuclear Engineering Computation and Radiation Shielding*, Santa Fe, New Mexico (April 9-13, 1989).
- 4-11) John H. Hubbell, "Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV", *NSRDS-NBS 29*, 85p. (1969).
- 4-12) E. Storm and H. I. Israel, "Photon Cross Sections from 1 keV to 100 MeV for Elements Z = 1 to Z = 100," *Nuclear Data Tables A7* (1970) 566-575, 639-642.
- 4-13) 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015、公益財団法人原子力安全技術センター発行 (2015)
- 4-14) X-5 Monte Carlo Team, "MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5," *LA-UR-03-1987* (2003).

- 4-15) H. Hirayama et al., "The EGS5 code system," SLAC-R-730 (2005) and KEK Report 2005-8 (2005).
- 4-16) 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).
- 4-17) H. Hirayama, "Exposure buildup factors of high-energy gamma rays for water, concrete, iron and lead," Nucl. Tech., 77, 60-67 (1987).
- 4-18) 「放射線施設遮蔽」研究専門委員会 ビルドアップ係数小委員会, "ガンマ線ビルドアップ係数の現状と今後の課題," 日本原子力学会誌, 30:5, 385-393 (1988).
- 4-19) 平山 英夫, "光子の線量概念と実効線量への換算係数との関係 ICRP90 年勧告の実施にあたって," 日本原子力学会誌, 43:5, 427-432 (2001).
- 4-20) H. Hirayama, "Calculation of gamma-ray exposure buildup factors up to 40mfp using the EGS4 Monte Carlo code with a particle splitting," J. Nucl. Sci. Technol. 32, 1201-1207 (1995).
- 4-21) M. C. White, "Further Notes on MCPLIB03/04 and New MCPLIB63/84 Compton Broadening Data For All Versions of MCNP5", LA-UR-12-00018, LANL(2012).
- 4-22) ICRP, Conversion Coefficients for use in Radiological Protection against External Radiation, ICRP Publication 74. Ann. ICRP 26 (1996)

## 5. 薄い遮蔽体に対する簡易計算のレビュー

### 5. 1. 薄い遮蔽体に対する BF 選択の課題

薄肉のタンクやドラム缶、容器に対して、中に水、吸着剤、密度が薄く原子番号の小さい線源がある場合の BF 選択について日常的な疑問があった。

事例のサンプルを図 5.1-1 に示す、コンクリート室内に汚染水の入ったタンクがあるケースである。タンク厚が薄い( $t=1\text{mm}-10\text{mm}$ , 1 mfp 以下)場合、タンク表面やタンク周辺の線量を計算する際に、①水(線源部)、②鉄(タンク)、③コンクリート(後方散乱物質)の内、何れを設定すればよいか悩む場合がある。

この背景には、放射線施設の遮蔽計算実務マニュアル 2015<sup>5-1)</sup>に「一番外側の層(最外層)の厚さが平均自由行程以上あるとき最外層の材質の BF とする方法がもっとも精度が高い。最外層の厚さが平均自由行程の半分以下の時にはこの方法は適用できない。」と記載があり、タンクの肉厚は基本的に薄く、文中に適用できる手法の記載が無いため迷いが生じる。

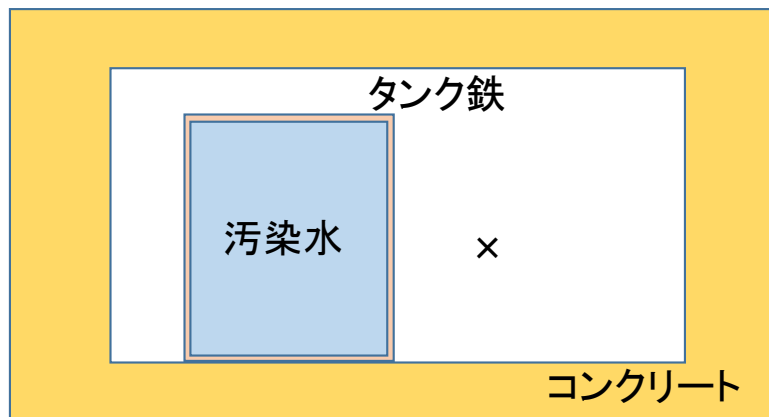


図 5.1-1 薄い遮蔽体のサンプル図

本検討では、タンク表面の線量を簡易遮蔽解析コードとモンテカルロ計算コードで計算し、ビルドアップの差異基準ガイドラインを 10% 以内に設定、実務レベルで判定する。モンテカルロ計算コードと、点減衰核積分コードによるビルドアップ係数選択によるコード差異は、できれば 30% 程度が望ましいと考える。

#### 5. 1. 1. ベンチマーク問題の設定

JIS 等公開文献等から設定可能条件を元に実務レベルで遭遇する条件に近い形状、組成等でベンチマーク問題を設定する。タンク形状により線源の自己遮蔽が異なる可能性があることから、線源の大きさを変更することについて検討する。

コンクリート室内に RI 線源水の入ったタンクがあるケース、タンク厚が薄い( $<1\text{mfp}$ )場合のビルドアップ係数を算出する。線源エネルギー( $0.1\text{MeV}\sim 10\text{MeV}$ )、線源形

状(50L タンク、200L タンク、1m<sup>3</sup> タンク)、タンク鉄厚さ(0.1cm~1cm)をサーベイする。計算点はタンク中心高さ、タンク表面とする。反射用壁コンクリートを置き、部屋中心とタンク中心を一致させ、床上にタンクを設置する。計算は実効線量 E(AP)について計算する。計算を簡便にする観点から円筒形状とし、計算体系を図 5.1-2 に、計算に使用する物質の組成を表 5.1-1 に示す。

表 5.1-1 薄い遮蔽体計算に使用する物質組成

物質名	組成(g/cm <sup>3</sup> )		備考
水 (密度1.0g/cm <sup>3</sup> )	H	1.1190E-1	水分子式と原子量で分割
	O	8.8810E-1	
鉄 (密度7.8g/cm <sup>3</sup> )	Fe	7.8	JIS炭素鋼を丸め
空気 (密度1.1894 × 10 <sup>-3</sup> g/cm <sup>3</sup> )	H	1.2049E-08	組成 JAERI-M 6928
	C	1.5126E-07	
	N	9.0934E-04	
	O	2.7993E-04	
コンクリート (密度2.1g/cm <sup>3</sup> )	H	8.7360E-03	組成 JAERI-M 6928
	O	1.0655E+00	
	Mg	2.4150E-03	
	Al	9.3660E-03	
	Si	8.1073E-01	
	S	1.4700E-03	
	Ca	1.4425E-01	
	Fe	5.7498E-02	

### 5. 1. 2. QAD コードによる試計算

線源エネルギーと厚見の影響範囲を把握するため、QAD-IE コード<sup>5-2)</sup>による試計算(0.1MeV~10MeV)を実施する。線源エネルギーは単色エネルギーで0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.0、3.0、5.0、8.0、10MeVについてサーベイを行う。QAD-IE のビルドアップフィッティングパラメータは100mfp 最適フィット(NBLD=+15)とする。線束-線量換算係数はコード内蔵値を使用する。線源メッシュについては最大メッシュ数(100)で均等分割とする。ビルドアップ・FX 指定物質をWATE、IRON、CONC、AIR の4種類に設定した場合のビルドアップ係数設定による差異を確認する。

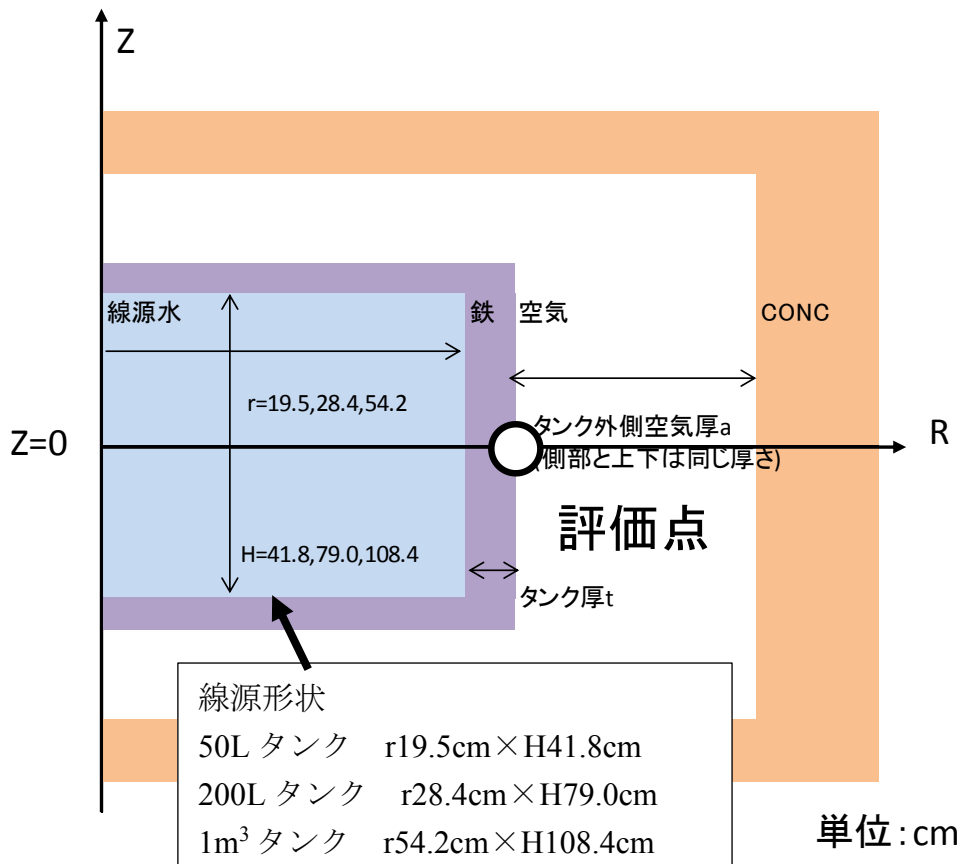


図 5.1-2 ベンチマーク問題計算体系

ビルドアップ係数指定物質をタンク(鉄)から線源(水)に変更することによる(WATER/IRON)線量比の内、50L タンクの結果を表 5.2-2 に、200L タンクを表 5.2-3 に、1m³ タンクを表 5.2-4 に示す。表 5.2.2 に示した試算結果からは、体積線源のため、タンクの鉄遮蔽以前に線源水の自己遮蔽があり、BF 係数変更すると低エネルギーガンマ線の線量はかなり増加することが分かる。影響は 2MeV 以下の領域に限られている。200L タンクになると線源形状が大きくなることにより、50L より線量比が大きくなっている。これは線源自己遮蔽が大きくなった影響と考えられる。同様に 1m³ 容器となると線源形状が大きくなる効果で、200L より線量比が大きくなっている。以上をまとめると次のようになる。

鉄遮蔽厚 1mfp 以下の範囲で、BF 物質選択水と鉄の場合を比較すると 3 倍の差異がある。鉄が薄いにもかかわらず差異が生じるのは、線源自己遮蔽による。線量比が 10% 以上見られたエネルギーは 2MeV 以下の領域に見られた。試算の結果、モンテカルロ計算は 0.1MeV、0.5MeV、1MeV、3MeV のエネルギーについて実施する。

表 5.1-2 鉄→水で 10%以上線量差異が生じたケース (水/鉄)

計算コード : QAD-IE; 100mfp 最適フィット

50L タンク(線源形状 r19.5cm×H41.8cm)

E(MeV)	タンク厚(cmt)				
	0	0.1	0.2	0.5	1
E=0.1MeV	3.74	5.37	6.79	11.13	19.60
E=0.2MeV	2.15	2.41	2.62	3.21	4.10
E=0.5MeV	1.29	1.33	1.37	1.46	1.59
E=1.0MeV	1.12	1.13	1.14	1.18	1.22
E=1.5MeV	1.07	1.08	1.08	1.11	1.14
E=2.0MeV	1.04	1.05	1.05	1.07	1.08
E=3.0MeV	1.01	1.01	1.01	1.02	1.03
E=5.0MeV	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
E=8.0MeV	0.99	0.99	0.98	0.98	0.97
E=10.0MeV	0.98	0.98	0.97	0.96	0.95

表 5.1-3 鉄→水で 10%以上線量差異が生じたケース (水/鉄)

計算コード : QAD-IE; 100mfp 最適フィット

200L タンク(線源形状 r28.4cm×H79.0cm)

E(MeV)	タンク厚(cmt)				
	0	0.1	0.2	0.5	1
E=0.1MeV	4.09	5.77	7.20	11.49	19.94
E=0.2MeV	2.37	2.63	2.85	3.43	4.33
E=0.5MeV	1.37	1.41	1.45	1.53	1.66
E=1.0MeV	1.15	1.17	1.18	1.21	1.25
E=1.5MeV	1.10	1.10	1.11	1.13	1.16
E=2.0MeV	1.06	1.07	1.07	1.08	1.10
E=3.0MeV	1.02	1.02	1.02	1.03	1.04
E=5.0MeV	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
E=8.0MeV	0.98	0.98	0.98	0.97	0.96
E=10.0MeV	0.97	0.96	0.96	0.95	0.94



表 5.1-4 鉄→水で 10%以上線量差異が生じたケース (水/鉄)

計算コード : QAD-IE; 100mfp 最適フィット

1m<sup>3</sup> タンク(線源形状 r54.2cm×H108.4cm)

E(MeV)	タンク厚(cmt)				
	0	0.1	0.2	0.5	1
E=0.1MeV	4.38	6.11	7.56	11.83	20.20
E=0.2MeV	2.52	2.78	3.00	3.56	4.43
E=0.5MeV	1.42	1.47	1.50	1.58	1.70
E=1.0MeV	1.18	1.20	1.21	1.24	1.28
E=1.5MeV	1.12	1.13	1.14	1.16	1.18
E=2.0MeV	1.08	1.08	1.09	1.10	1.11
E=3.0MeV	1.03	1.03	1.03	1.04	1.04
E=5.0MeV	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
E=8.0MeV	0.97	0.97	0.96	0.96	0.95
E=10.0MeV	0.95	0.95	0.94	0.93	0.92

### 5. 1. 3. 詳細計算条件

モンテカルロ計算コード等を用いたタンク厚透過後のビルドアップ係数計算結果が水、鉄、コンクリートの内、どのビルドアップ係数に近いのか比較する。計算は 5. 1. 2 で決定したケースについて計算を実施する。計算は PHITS コード<sup>5-3)</sup>、MCNP5 コード<sup>5-4)</sup>を用いて実施する。適宜 DORT コード<sup>5-5)</sup>も用いる。各計算コードにおける計算条件を表 5.1-5、表 5.1-6、表 5.1-7 に示す。結果の比較はビルドアップ係数で行う。ビルドアップ係数を算出する際、直接線線量が必要になるが、QAD コード等の点減衰核積分コードで算出している直接線と、MCNP コードの uncollided flux 結果が相違していること、モンテカルロ計算コード上で正確に算出するには手間と計算時間がかかる。よって、全てのコードで、直接線を、QAD-IE コードで算出した結果に換算係数を乗じて下式で示した数式により算出する。<sup>vii</sup>

$$Ed(AP)=Rd \times 8.764 \times (E\_AP/K) \quad \dots (5-1)$$

ここで

<sup>vii</sup>本 WG において PHITS コードで直接線線量を算出する手法は提案された。PHITS コードで直接線を算出した結果と統計誤差の範囲で一致した。

- Ed(AP) : 直接線実効線量 ( $\mu\text{Sv/h}$ )  
 Rd : 直接線照射線量率( $\text{mR/h}$ )  
 8.764 : 照射線量と空気カーマと換算係数( $\mu\text{Gy/mR}$ )  
 (E\_AP/K) : 空気カーマと実効線量の換算係数( $\text{Sv/Gy}$ )

ビルドアップ係数は、モンテカルロ計算コード等で実効線量率 E(AP)計算を行った後、下式で算出する。

$$\text{BF}=\text{E}(\text{AP})/\text{E}_d(\text{AP}) \quad \cdot \cdot \cdot (5-2)$$

表 5.1-5 モンテカルロコード計算条件

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1. PHITS 2.88+AcelibJ40 / MCNP5+MCPLIB84</li> <li>2. [T-point] (ring) Tally/ Point Detector(Ring)</li> <li>3. [Multiplier]/[de-df]で線量を直接算出</li> <li>3. 除外半径 0.001cm</li> <li>4. エネルギーカットオフ 光子 0.01MeV,電子,陽電子 0.1MeV)</li> <li>5. 相対誤差が 5%以下になるようにヒストリーを設定</li> </ol> |
|---|

表 5.1-6 QAD-IE コード計算条件

- |   |
|---|
| <ol style="list-style-type: none"> <li>1.ビルドアップ、FX 指定物質を WATE,IRON, CONC, AIR に設定し、どれが良く合うか確認</li> <li>2.線束-線量換算係数はコード内蔵値を使用</li> <li>3.線源メッシュは最大メッシュ数(100)で均等分割</li> </ol> |
|---|

表 5.1-7 DORT コード計算条件

1. DORT/FALSTF+JENDL-4.0(MATXSLIB-J40) 2. P5S16(分点数 160) 3. 換算係数 : AESJ-SC-R02 2010(42 群) 4. 線源エネルギー補正実施(E/Emid) 下表の通り 5. 線源メッシュ Mesh 約 0.2cm 6. FALSTF で該当点(タンク表面境界)の線量を計算 7. FALSTF 36 分点			
線源エネルギー補正と補正係数			
E(MeV)	MATXSLIB-J40		補正係数
	E <sub>max</sub> (MeV)	E <sub>min</sub> (MeV)	
0.1	0.1	0.075	1.143*
0.5	0.51	0.45	1.042
1.0	1.0	0.8	1.111
3.0	3.0	2.5	1.091

#### 5. 1. 4. 詳細計算結果

50L タンク線源エネルギー 0.1MeV のビルドアップ係数結果を表 5.1-8 と図 5.1-3 に 0.5MeV のビルドアップ係数結果を表 5.1-9 と図 5.1-4 に、1.0MeV のビルドアップ係数結果を表 5.1-10 と図 5.1-5 に、3.0MeV のビルドアップ係数結果を表 5.1-11 と図 5.1-6 に示す。

線源エネルギー 1.0MeV、3.0MeV のビルドアップ係数の図を見ると、ビルドアップ係数を変えてもほとんど差異は無い。ビルドアップの大きい順序は原子番号の小さい順である、空気、水、コンクリート、鉄であるが値自体は大きな差異は無い。PHITS 結果はタンク 0cm の時は、鉄と重なっているが、それ以外は鉄より下にある。ビルドアップ鉄の結果は PHITS 結果とよく一致している。0.5MeV では 1MeV に比べ、ビルドアップ係数による差異が見られるが、表 5.1-8 の PHITS 結果との比から見ると、0.5MeV 以上であればタンク鉄厚 0.1cm あればビルドアップ係数は鉄と設定して良い。

0.1MeV の場合は、図 5.1-3 に示された通り、0.5MeV でのエネルギーに比べ、ビルドアップ係数間の差異が大きくなっている。PHITS 結果はタンク厚 0cm の時は、鉄と水の間であり、鉄透過後は、ビルドアップ鉄の値より大きく、ビルドアップ鉄は実際よりかなり低い値で推移していることがわかる。また、鉄 0cm の水ビルドアップ値は PHITS 結果より 6 割以上で大きい、これは、コード内に内蔵されているビルドアップ係数値が水の無限媒質中で計算していることによる影響である。遮蔽計算マニュアル

ル<sup>5-1)</sup>の有限媒質係数を考慮すると、1.04 となり良く一致する。これはコード内に有限媒質係数を持たせ、オプション等で適用できるようにすればよい。1mfp を越えた 1cm の鉄のビルドアップ値より PHITS 結果は 10%以上小さくなっており、鉄の設定が必ずしも安全側評価と言えない状況である。通常の汚染水の主成分は Cs-137、Cs-134 などの比較的高エネルギー  $\gamma$  線によるものであり、0.5MeV 以上の  $\gamma$  線を主としたタンクの計算においては、0.1cm 以上は鉄として良いことが分かった。汚染水以外でも実用レベルでは 0.1MeV 単色のガンマ線はほとんど存在せず、通常 0.5MeV 以上と見ることが出来ることから、本計算体系では 0.5MeV 以上であれば 0.5mfp 未満であっても 0.1cm 以上は“IRON”で良い。なお、0.1MeV(<0.5MeV)は 1mfp を透過しても過小評価でこれについてはさらなる検討（多重層の検討）が必要である。

200L タンク、1m<sup>3</sup> タンクについても実施したが、同様に 0.5MeV 以上であれば 0.5mfp 未満であっても 0.1cm 以上は“IRON”で良い。0.1MeV では鉄厚さ 1mfp を超えても、PHITS 結果はビルドアップ係数を鉄とした結果より大きくなっている。

表 5.1-8 PHITS コードと QAD 計算結果の比(QAD/PHITS)

線源エネルギー：0.1MeV

BF/厚 (cm)	0	0.1	0.2	0.5	1
WATE	1.60	3.12	4.35	8.19	16.3
IRON	0.43	0.58	0.64	0.74	0.83
CONC	0.85	1.42	1.77	2.62	3.93

表 5.1-9 PHITS コードと QAD 計算結果の比(QAD/PHITS)

線源エネルギー：0.5MeV

BF/厚 (cm)	0	0.1	0.2	0.5	1
WATE	1.27	1.37	1.44	1.59	1.79
IRON	0.98	1.03	1.05	1.09	1.13
CONC	1.15	1.22	1.27	1.37	1.49

表 5.1-10 PHITS コードと QAD 計算結果の比(QAD/PHITS)

線源エネルギー：1.0MeV

BF/厚 (cm)	0	0.1	0.2	0.5	1
WATE	1.15	1.20	1.22	1.28	1.37
IRON	1.03	1.06	1.07	1.09	1.12
CONC	1.10	1.14	1.16	1.20	1.26

表 5.1-11 PHITS コードと QAD 計算結果の比(QAD/PHITS)

線源エネルギー：3.0MeV

BF/厚 (cm)	0	0.1	0.2	0.5	1
WATE	1.05	1.07	1.08	1.10	1.13
IRON	1.04	1.06	1.07	1.08	1.10
CONC	1.04	1.06	1.07	1.09	1.11

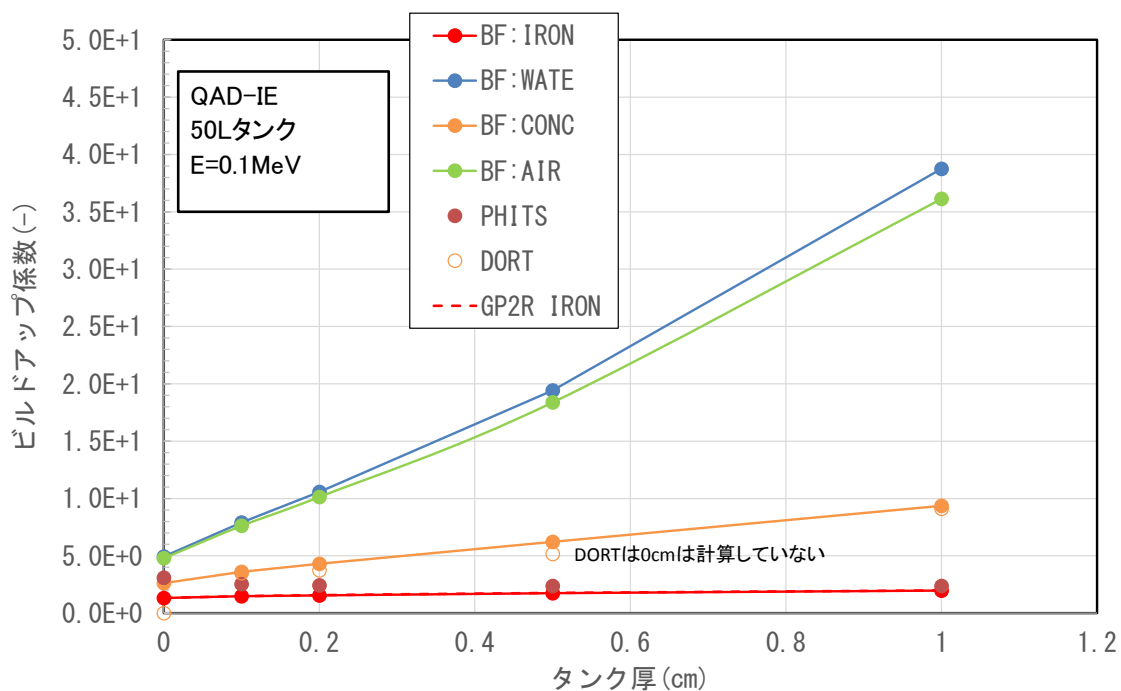


図 5.1-3 0.1MeV のビルドアップ係数結果

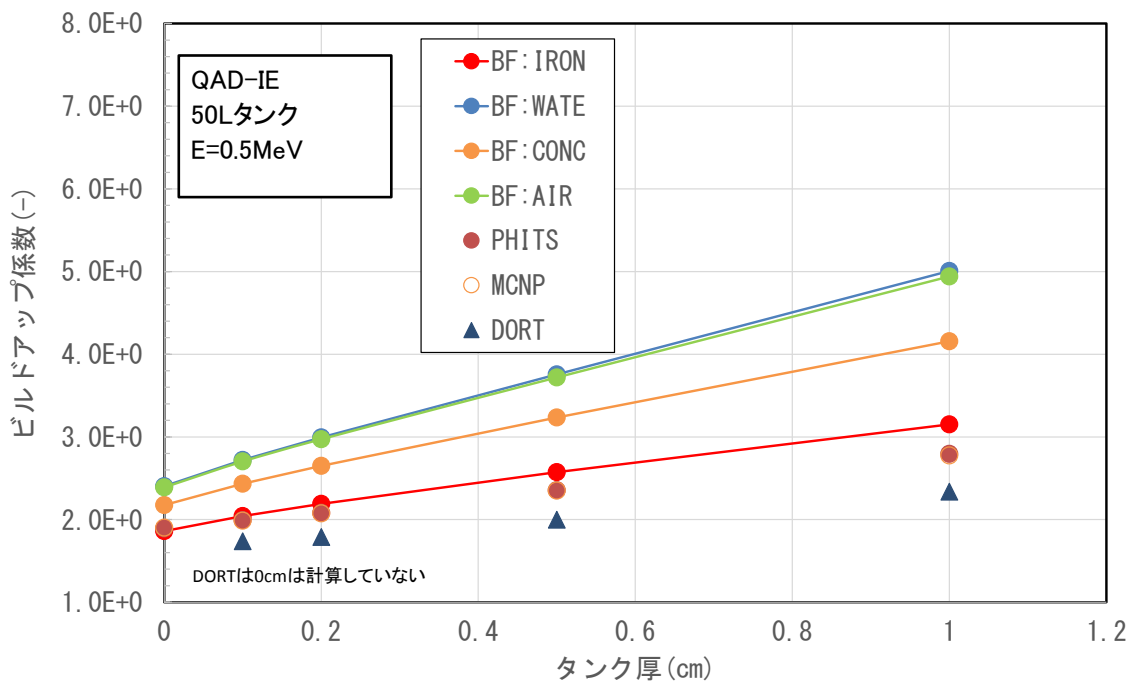


図 5.1-4 0.5MeV のビルドアップ係数結果

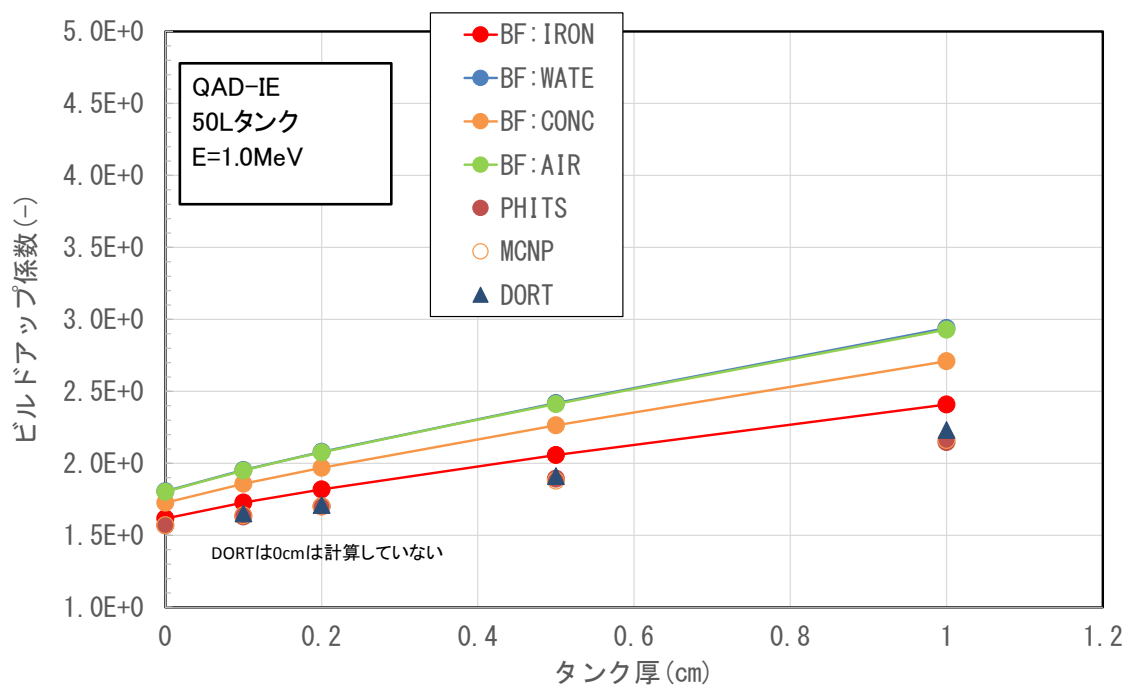


図 5.1-5 1.0MeV のビルドアップ係数結果

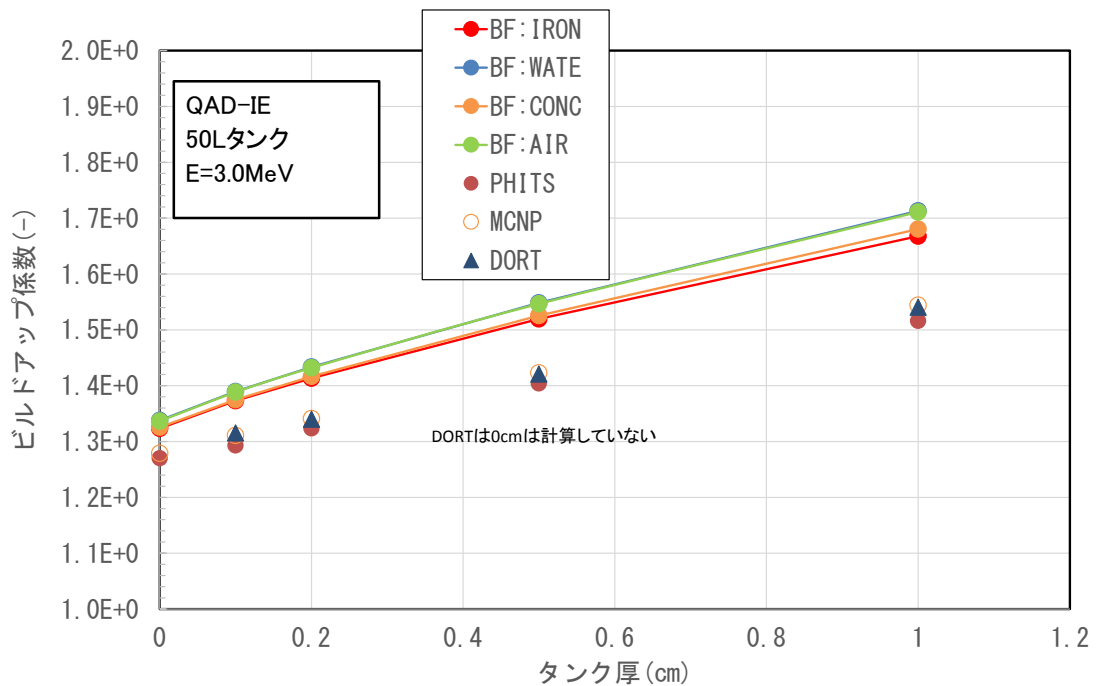


図 5.1-6 3.0MeV のビルドアップ係数結果

### 5. 1. 5. QAD-CGGP2R と QAD-IE ビルドアップ係数の差異

本検討を行っている中で、QAD-CGGP2R コードと QAD-IE コードはほぼ同一の値を示したが、以下 2 点について差異が見受けられた。

① 線源エネルギー 0.1MeV、ビルドアップ係数設定を水とした場合

QAD-IE/QAD-CGGP2R の比が 0.7 程度となっていた。これについて確認した結果を表 5.2-12 に示す。確認結果より、IE コードに内蔵されているビルドアップ係数値と GP2R コードに内蔵されているビルドアップ係数値が相違していることが分かった。

② QAD-CGGP2R と QAD-IE では 0.5mfp 以下の処理方法の差異

5. 1. 5 節試算段階の QAD-IE と QAD-CGGP2R 結果を比較した結果を表 5.1-13 に示す。参考として今回体系における mfp 単位の遮蔽厚を表 5.2-14 に示す。10MeV では 1 割程度の差異になっている。0.5mfp 以下のビルドアップ係数内挿式の違いによるものである。ビルドアップの低い鉄なので差異は小さいが、水などにすると差異が大きくなる可能性がある。どちらの処理方が適切か確認する必要がある。

表 5.1-12 コード間のビルドアップ係数差異

ビルドアップ係数：水

線源エネルギー：0.1MeV

コード オプション	(1)		(2)		(3)		(4)		
	mfp	BF	QAD-IE	100mfp最適フィット	QAD-IE	IE 3点補間用(NBLD=+20)	QAD-IE	ANS_40mfp最適フィット	
長さ (mfp)	mfp	BF	mfp	(2)/(1)	Mfp	(3)/(1)	mfp	BF	(4)/(1)
0.5	2.42E+00	2.26E+00	0.5	0.937	0.5	0.948	0.5	2.39E+00	0.990
1	4.66E+00	4.14E+00	1	0.888	1	0.888	1	4.53E+00	0.972
2	1.18E+01	1.03E+01	2	0.871	2	0.831	2	1.16E+01	0.983
4	4.03E+01	3.15E+01	4	0.781	4	0.764	4	4.12E+01	1.02
8	1.89E+02	1.26E+02	8	0.666	8	0.677	8	1.89E+02	0.997
10	3.31E+02						10	3.22E+02	0.972
20	2.13E+03		20	0.635	20	0.648	20	2.14E+03	1.01
40	2.08E+04		40	0.651	40	0.650	30	8.10E+03	
60	7.14E+04		60	0.895	60	0.884	40	2.09E+04	1.01
			100	5.26E+05	100	5.36E+05			



表 5.1-13 QAD-IE と QAD-CGGP2R コードの比 (ビルドアップ係数 : 鉄)

E (MeV)	タンク厚(cmt)			
	0.1	0.2	0.5	1
0.1	1.01E+0	1.00E+0	1.01E+0	1.01E+0
0.2	1.03E+0	1.03E+0	1.03E+0	1.03E+0
0.5	1.02E+0	1.02E+0	1.02E+0	1.01E+0
1.0	1.02E+0	1.02E+0	1.02E+0	1.01E+0
1.5	1.01E+0	1.01E+0	1.01E+0	1.00E+0
2.0	1.01E+0	1.01E+0	1.01E+0	1.00E+0
3.0	9.92E-1	9.89E-1	9.87E-1	9.83E-1
5.0	9.71E-1	9.66E-1	9.62E-1	9.52E-1
8.0	9.51E-1	9.41E-1	9.34E-1	9.16E-1
10.0	9.38E-1	9.25E-1	9.15E-1	8.92E-1

表 5.1-14 タンク厚の遮蔽厚(mfp)

E (MeV)	タンク厚(cmt)			
	0.1(cm)	0.2(cm)	0.5(cm)	1(cm)
0.1	0.267	0.534	1.336	2.672
0.2	0.108	0.216	0.539	1.079
0.5	0.065	0.129	0.323	0.646
1.0	0.046	0.093	0.232	0.465
1.5	0.038	0.076	0.190	0.379
2.0	0.033	0.066	0.166	0.332
3.0	0.028	0.056	0.141	0.282
5.0	0.024	0.049	0.122	0.245
8.0	0.023	0.047	0.116	0.233
10.0	0.023	0.047	0.117	0.233

### 5. 1. 6. FLEXDOSE を用いた解析

本検討を行っている中で、QAD-CGGP2R と同等のコードである、テプコシステムズ社製 FLEXDOSE での検討を実施した。通常ビルドアップ係数はユーザがエンジニアリングジャッジを行って指定する必要があるが、本コードでは自動で設定しているコードであり、最外層が 0.5mfp を下回っている時、手前の層を取るなどの設定を自動で実施する。この判定は放射線施設の遮蔽計算実務マニュアル 2015 にしたがって実施されている。本コードと QAD-CGGP2R コードが同等であることは事前の比較計算等を用いて確認した上で自動選択時の挙動を確認し、今後の新しいコードに生かせるか確認した。

表 5.1-15 及び図 5.1-7 の通り、FLEXDOSE 結果は、遮蔽無しの時水に近い値が、遮蔽されるにつれ、鉄に近づくという傾向になっており、自動で望ましい動きになっている。但し、細かく見ていくと、鉄 0.5mfp 透過する前までの FLEXDOSE ビルドアップ値は PHITS 結果より大きく、ビルドアップ係数計算が無限である影響が出ている。鉄 1mfp を超えた箇所では FLEXDOSE < PHITS となっており、元々のビルドアップ係数が持つ問題点については改善できていない。これらについてはビルドアップ係数自動選択ルーチンとして適切な関数化できれば、望ましい結果を得ることができると考えられる。今後のコード開発の課題と考えられる。

表 5.1-15 FLEXDOSE コードを用いたビルドアップ係数自動計算  
(QAD or FLEXDOSE/PHITS)

線源エネルギー : 0.1MeV

BF/厚 (cm)	0	0.1	0.2	0.5	1
WATE	1.60	3.12	4.35	8.19	16.3
IRON	0.43	0.58	0.64	0.74	0.83
CONC	0.85	1.42	1.77	2.62	3.93
FLEXDOSE	1.83	2.35	0.65	0.75	0.84

境界  
0.5mfp 1.0mfp

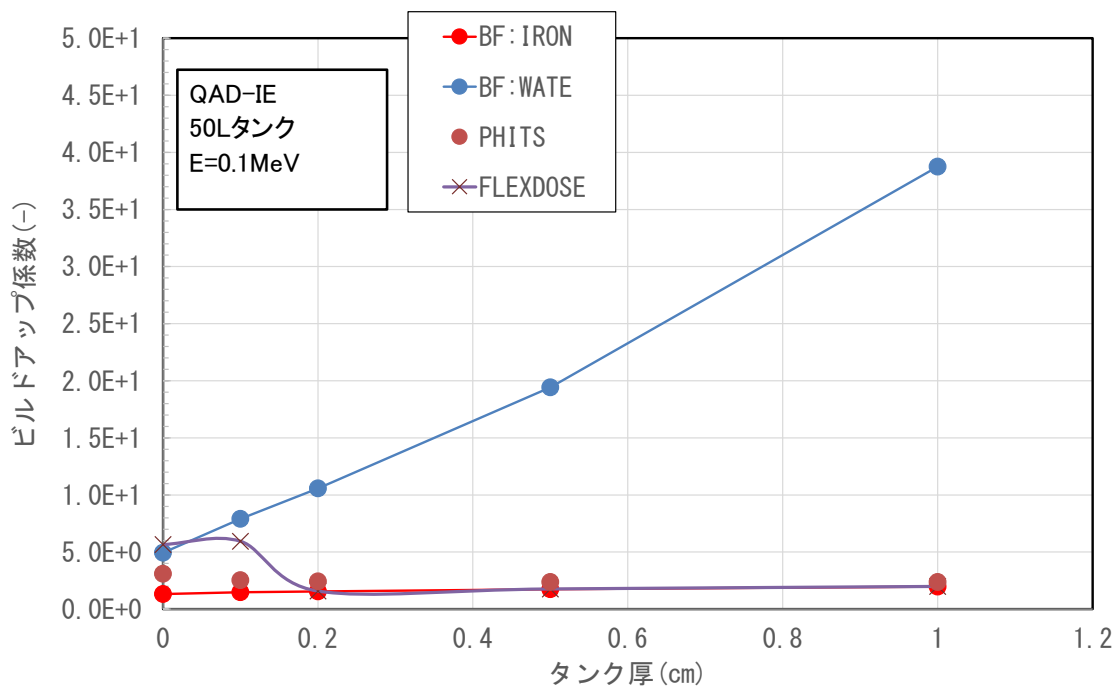


図 5.1-7 FLEXDOSE を用いたビルドアップ係数自動計算結果

## 5. 2. 薄い遮蔽体と後方散乱影響の検討

5. 1. で検討した薄肉のタンクの計算体系に対して、後方コンクリート壁からの散乱影響を検討するため、空気厚さを 50cm~10m とサーベイした場合にタンク側部表面の PHITS 計算結果がどの程度変化するか検討する。

外側空気厚さサーベイ時の PHITS コードによって算出したタンク側部表面の実効線量率計算結果から算出したビルドアップ係数結果を表 5.2-1 に示す。

本計算体系では、外側壁の散乱効果は小さい。0.1MeV の場合はより高いエネルギー(0.5MeV,1MeV,3MeV)に比べて散乱影響が大きい傾向にあることが分かる。

表 5.2-1 後方散乱影響検討計算結果 (ビルドアップ係数)

E (MeV)	外側空気厚さ (m)					0.5m/10m
	0.5	1	2	4	10	
0.1	2.42	2.38	2.37	2.36	2.36	1.03
0.5	2.82	2.80	2.79	2.78	2.78	1.01
1.0	2.16	2.15	2.14	2.14	2.14	1.01
3.0	1.52	1.52	1.51	1.51	1.51	1.00

## 参考文献

- 5-1) (財)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
- 5-2) 吉田至孝, 山口勝義, 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 E57
- 5-3) 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).
- 5-4) X-5 Monte Carlo Team, “CCC-740/MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume I: Overview and Theory,” LA-UR-03-1987 (April 2003 revised June 2004)
- 5-5) ORNL RSICC CCC-650, DOORS3.2a ; One, Two- and Three Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System, October 2003
- 5-6) 日本原子力学会標準, 放射線遮へい計算のための線量換算係数 : 2010(AESJ-SC-R002)

## 6. 点減衰核積分法コードのレビュー

### 6. 1. コード改良について

#### 6. 1. 1. メッシュ自動分割のレビュー

QAD、G33 では線量計算の際、その名前の通り、体積線源や散乱領域を点減衰核に分割して計算を実施している。オリジナルの QAD-CGGP2R コードや G33-GP2R コードでは、ユーザがメッシュ境界を小さい値から大きい値へ全て手入力する必要がある。これは手間がかかる上に入力ミスで連続でない値を設定しても計算できてしまうという点から改善の余地がある。QAD-IE コードや G33-IE コードで提案された自動分割機能(均等分割、ガウス分割)を実現することでメッシュ入力を自動化できると考える。

メッシュ自動分割の有効性を把握するため、メッシュ分割数サーベイ計算を実施した。5章の薄い遮蔽体で設定したベンチマーク計算体系の内、メッシュ分割の影響が顕著に表れる  $1\text{m}^3$  タンク (半径 54cm、高さ約 1m 円筒形) で計算を行った。計算点は線源領域に近く、メッシュ分割が大きな影響を与える容器中央高さ側部位置とした。

結果の推測としては、線源メッシュが粗いと点減衰核となる線源が粗い領域毎に設定されるため、線源の自己遮蔽が大きくなり、線量計算値は小さくなる。

メッシュ数がどの位で最も正しい結果になるかを図 6.1-1 に示す。図の横軸は R、 $\theta$ 、Z のメッシュ分割数、縦軸はメッシュを 100 個に均等分割した場合の計算結果を 1 とした線量率相対値とする。図には、均等分割時、片ガウス分割時及びエキスパートによる結果を示す。図のようにメッシュ均等分割に比べ、ガウス分割はメッシュ分割数が低い状態でも 1 に近い結果を算出できていることが分かる。ガウス分割では線源メッシュは 30 メッシュ程度あれば 1 に近くなり、非常に有効であることが確認できた。

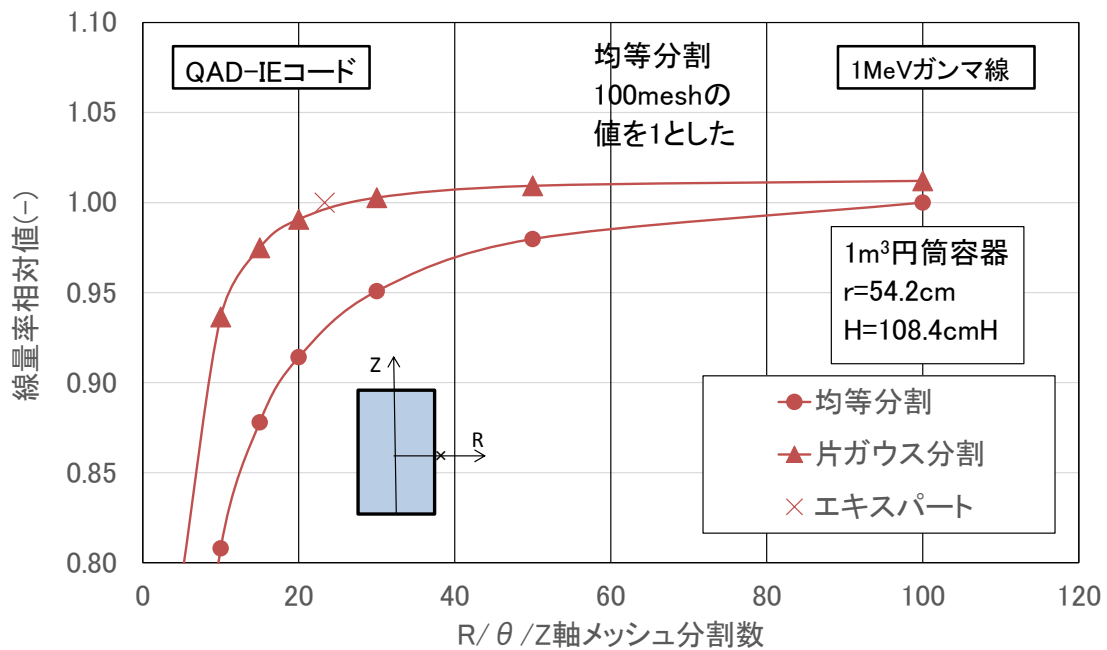


図 6.1-1 メッシュ自動分割による結果確認(1m<sup>3</sup>タンク)

## 6. 2. コード新設のための仕様提案

本節の位置付けは、今までのWGでの提案などを踏まえて、新しい点減衰核積分コードで求められている、内容や機能を1個人の意見を整理・作成した資料である。今後より多くの視点やご意見を反映したものにブラッシュアップしていく。

### 6. 2. 1. 仕様策定に係る考え方の整理

放射線工学部会「国産安全解析コード開発戦略検討WG」の報告書<sup>6-1)</sup>(以下報告書と呼ぶ)でまとめられた方針・アクティビティをベースにしつつ、当該WGで提案された具体的仕様について必要度などについて検討・整理を行い、コードの仕様を提案する。

### 6. 2. 2. 既往報告書の提言骨子<sup>6-1)</sup>

福島第1原子力発電所事故のような環境汚染を引き起こさないため、また原子力施設に対して世界最高水準の安全性を追求するという国家目標を達成するためには、国産の安全解析コードの開発を継続的に行っていく事が必要である。

最新の技術と知見に基づく安全解析コードを日本独自に開発するとともに、それを支える人材の育成が急務である。

#### (1) 安全解析の高度化

精度、信頼性、トレーサビリティの高度化を国内で開発して保守・管理し、海外で開発されたコードをブラックボックス的には使用しない。

## (2) ソフトウェアセキュリティ

米国ソフトウェアを利活用することでライセンス問題が発生しており、国産コードで開発することでこれを解決する。

## (3) 原子力産業国際化への寄与

日本製原子炉の輸出の際、米国産の解析コードが使えないような国への解析技術国際貢献に寄与する。

### 報告書中の新しい点減衰核コードに対する具体的な記述(p7)

(前略)、点減衰核積分コードについては、これまでは、新たに作成するという取り組みが希薄で、米国で作られた解析コードのデータ部分を入れ替え、QAD-CGGP2R の様な名称で、準国産コードの様な扱いがされてきたが、解析コードそのものはQAD であるので米国の管理下に置かれているコードであることは変わらない。日本で世界最先端のデータを使った国産の点減衰核積分コードを作成することが求められ、その作成が進んでいる。簡易解析法コードは、その簡易さ故に、適用範囲が限られるなどいくつかの問題を抱えている。例えば、QAD では斜め透過問題を考慮する必要があり、G33 では体積線源や面線源を取扱えない。安全評価解析の現場では、QAD と G33 と同一の入力データを使用する結合解析コードに対する要求がある。更には、特殊組成等の基礎データの整備や、多重層問題等に対する対応を検討する必要がある。(後略)

その他報告書における開発要件の整理については以下に示す。

### 報告書の開発内容の検討 要件の整理より

WG で整理された、原子炉や放射線取扱施設の安全性高度化のための基盤となる解析コードに要求される要件は下記の通り。

- (1) 国産であること。
- (2) 最新知見を反映しているものであり続けること。
- (3) 品質保証されていること。
- (4) インターフェイスが充実しており、QMS に対応すること。
- (5) 規制側、利用側の双方の共通技術基盤であること。
- (6) 検証結果が文書化されていて追跡性があること。上記要件を満たすために、維持・管理・保守及び補助が可能な体制を構築すること。
- (7) 原子力安全に携わる人材の確保及び育成に貢献すること。
- (8) 継続的な開発と保守を行うための体制が確立されていること。

### 6. 2. 3. 当 WG の提案骨子の整理

- ① 国産開発コードの核心部分はオープンソースとし、今後の維持・改良が可能な形のライセンス形態にしたい。
- ② 技術の発展などを組み入れ、使いやすく、且つ今までの QAD ではできなかった種々機能を実現したい。これについては、新しい技術の適用や開発技術者の維持・発展に資するよう、当該 WG 等にて議論される新たな機能を追加していきたい。具体的な事例としては、既存コードで問題となっている多重層 BF、斜め遮蔽 BF 問題を解決していろいろな適用範囲を広げた計算ができるようにする。モンテカルロ計算コードで実現しているメッシュタリー(幾何形状と線量のコンターマップを同時に表示)機能など適用範囲の拡張を目指したい。
- ③ 許認可向け解析対応の際、ミスが無いようにするため、チェックシート等の作業記録(チェックエビデンスとも呼ばれる)作成などに時間をとられていることを考慮し、こうした作業ができるだけ合理的に行うことができるよう、インプットやアウトプット、必要情報にまとめた解析レポート(テキスト形式、CSV 形式など)が出力できるようにしたい。
- ④ ICRP 2007 年<sup>6-2)</sup>勧告国内法令受け入れに伴う、ICRP Pub.116<sup>6-3)</sup>の外部被ばくの換算係数に準拠した計算ができるようにしたい。実効線量、目の水晶体、皮膚。
- ⑤ 追加機能実現することによって利便性が向上するプレ・ポストの充実を行いたい。  
具体的には、入力作成支援の内体系描画(CGView)、計算結果可視化(線源、幾何形状+メッシュタリー)、ライブラリ用意(標準組成、ガンマ線スペクトル)、EXCEL/VBA などアプリを利用した計算コードの入力作成支援などがあがっている。
- ⑥ それぞれに要求されていることを実現するため、プレ(GUI)・ポスト(GUI)の整備と充実を図ると共に、計算コアプログラムと分けて検討することで柔軟な開発を狙いたい。

コード仕様提案では、以下の②、③、④、⑤に分類して議論を進める。

- ②適用範囲拡張
- ③許認可向け(トレーサビリティ高度化)
- ④データ更新(ライブラリ)
- ⑤プレ・ポスト機能

### 6. 3. 計算コアプログラム仕様案

6. 2 節で提起された、基本的な考え方及び提案骨子の整理による計算コアプログラムの仕様案を以下に示す。

#### 6. 3. 1. 基本方針

- (1)QAD/G33 コードの解析が統一的に実施可能なコードにする。



直接線と散乱線について、組成、幾何形状、換算係数に関して両コードで共通の様式で入力・計算できるようにする。

## (2) 幾何形状

幾何形状表現は下記 4.1.2 に示す通り、過去 QAD で慣れ親しんだ「CG(=macrobody)」で統一する。

RPP, RCC, SPH, TRC body 定義 → 領域定義

## (3) ユーザ定義定数/シンボリックパラメータ・数式使用可

国内で開発されたコード PHITS/MVP の優位点として、幾何形状の寸法や組成データなど全ての値をユーザが定義した定数や数式で表現する機能がある。

この機能があると解析者が体系を作りやすく、且つ第三者が見たときにもチェックがしやすく、ミスを発見しやすくなっている。

放射線の挙動把握のための感度解析などを実施する際にも効率的に実施できる。この機能を実現する。

## (4) メッシュタリー計算機能の追加

線量計算の妥当性を確認する目的で、線量分布傾向を 2 次元の線量等高線（コンター）図で表示できるようにする。評価点は点での指定に加え、範囲を格子状で設定する方式を加える。メッシュタリー出力形式は、ポストアプリ(AVS、Paraview、Silo 等)或いは ANGEL で可視化できる形式とする。

## (5) 並列計算

複数の体積線源、メッシュタリー等による評価点増により計算時間が増えることが想定される。昨今の PC では同一ノード複数コアは通常であるため、並列計算機能(OpenMP, IntelMPI 等)を設け、より迅速に計算結果を出すことができるようにする。

点減衰核積分法は、線源毎→線源メッシュ分割毎→評価点毎の計算であり、並列化が容易である。

## (6) 許認可向け解析対応用解析レポートの出力

原子力発電所・核燃料サイクル施設の解析においては、原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン(JANSI-GQA-01 第 2 版)<sup>6-4)</sup>に沿い、解析時にミスが無いように実施している。過去の計算コードはこうした実態が無い時代のコードの作りをしており、チェックシート等の作業記録作成などに時間をとられている。解析作業をできるだけ合理的に行うことができるよう、インプットやアウトプット、必要情報にまとめた (テキスト形式, CSV 形式など)が出力できるようにしたい。

### 6. 3. 2. 幾何形状について

(1) MORSE-CG コード、VIM コードなどで用いられてきた CG (Combinatorial Geometry) で表現する。

(2) 座標平行移動、オイラー座標変換を可能とする。

PHITS にて実現したオイラー座標変換の 1 例(MCNP の TR カードと類似でも可)

```
1: [ T r a n s f o r m ]
2: set: c10[90] $ angle of around Z (degree)
3: set: c20[30] $ angle of around Y (degree)
4: set: c30[0] $ angle of around X (degree)
5:
6: trl  0 0 0
7:      cos(c10/180*pi)*cos(c20/180*pi)
8:      sin(c10/180*pi)*cos(c30/180*pi)+cos(c10/180*pi)*sin(c20/180*pi)*sin(c30/180*pi)
9:      sin(c10/180*pi)*sin(c30/180*pi)-cos(c10/180*pi)*sin(c20/180*pi)*cos(c30/180*pi)
10:     -sin(c10/180*pi)*cos(c20/180*pi)
11:      cos(c10/180*pi)*cos(c30/180*pi)-sin(c10/180*pi)*sin(c20/180*pi)*sin(c30/180*pi)
12:      cos(c10/180*pi)*sin(c30/180*pi)+sin(c10/180*pi)*sin(c20/180*pi)*cos(c30/180*pi)
13:      sin(c20/180*pi)
14:     -cos(c20/180*pi)*sin(c30/180*pi)
15:      cos(c20/180*pi)*cos(c30/180*pi)
16:      1
```

上の例題では、z 軸周りに c10 度、次に y 軸周りに c20 度、最後に x 軸周りに c30 度回転させる回転行列を書き下したものです。c10, c20, c30 の定数に値を入れることにより、任意の回転を定義できるので便利です。

(3) 繰り返し幾何形状、多重格子形状(層構造)を使えるようにする。

### 6. 3. 3. 線源・散乱

(1) 線源・散乱空間メッシュ分割自動化

現状の QAD-CGGP2R/G33-GP2R コードはメッシュ境界をユーザが手入力しているが、入力設定とチェック等に時間を要するため、線源と評価点が離れている場合などメッシュ分割が計算に影響無い場合に、最小と最大、分割方式(均等、内側に密、外側に密など)を入力することにより自動で分割してくれる機能を持たせる。(QAD/G33-IE 同等機能)

(2) 線源・散乱空間メッシュ分割の実行時割り当て化

現状のメッシュ分割数最大は 100×100×100 の固定であるが、昨今のコンパイラ発展を受け、実行時配列割り当てとすることで、実行マシンのメモリのみで制限するようにする。これによりユーザは状況に応じ、自由にメッシュ数を入力できるようにする。プログラム実行時に実際に必要なメモリ使用量のみ使用することにより、実行マシンのリソースを十分有効に活用することができる。

(3) 線源形状の拡張 (赤字は追加)

昨今のガンマ線の点減衰核計算では、燃料デブリや汚染水貯留タンク、圧力抑制室(S/C 球)、除染土壌など不定形線源に対する要請がある。こうした要請に対して適用できる線源形状を拡張する。

1) 円柱

- 2) 直方体
  - 3) 球
  - 4) 半球の底部槽に貯まった水(半球より高さが低い場合)
    - 化学プラント(再処理施設)で使われている一般的な溶解槽の場合底面は半球ではないお椀型であり、こうしたところにモデルの齟齬が生じており、遮蔽設計上過度に保守側な厚みとしてしまう。こうしたモデルを扱えるようにする。
  - 5) トーラス (1 / 4エルボ)
    - 比較的放射能レベルの高い配管エルボ部などの遮蔽計算には必要である。現状はラフなモデル化で設計をしており、より合理的な設計が可能になる。
  - 6) 円錐
  - 7) ボクセルによる任意の線源形状表現
- (4) 複数線源への対応
- 現状の QAD コードでは、1つのインプットデータで1つの線源の計算しかできない。同一組成、同一幾何形状で複数線源がある場合の計算を同時に計算できるように拡張する。
- (5) 散乱計算の拡張
- 1) 体積線源からの計算(線源位置は自由に指定)
  - 2) 複数散乱領域からの散乱計算
  - 3) 体積線源の場合の散乱領域形状拡張
- (6) 線源群構造の限度を「30」からもっと増加させる。
- 1)VITAMIN-J  $\gamma$  42 群構造
  - 2)THIDA-2 の 78+1(0.511MeV)群構造 DCHAIN-SP2014 MAX
- (7) 線源核種指定機能
- ライブラリにガンマ線放出割合を持たせることで線源入力時に「Co-60」等と入力することで核種の計算を実施できるようにする。現状は、ORIGEN2 等で放射能計算をさせ、ガンマ線スペクトルにしてから計算しており手間がかかっている上にチェックにも時間がかかっている。
- (8) 線源形状の拡張に伴う、線源強度入力時の体積自動計算
- 線源強度の入力の際、放射能強度(Bq/cm<sup>3</sup>)などを与えて、線源強度に体積(cm<sup>3</sup>)を入力する場合がある。円柱、直方体、球のような簡単な形状であれば体積計算が可能であるが、(3)で拡張する複雑な形状とした場合は、体積線源メッシュの入力形状に合わせた体積が自動で指定できるようになると効率的である。線源部の体積については、線源メッシュ分割時にメッシュ毎の体積割合、その合計体積をコード内で計算して全線源強度を分割させている。メタ変数の指定によりコード内で計算した体積が入力されるようにする。具体的には線源強度入力パラメータ名を「aso」とし、体積計算する場合は、'aso=vol'のように指定すると良いなどである。

#### 6. 3. 4. 新規計算機能に対する $\gamma$ 線ビルドアップ係数

##### (1) 有限媒質／無限媒質比データ

$\gamma$ 線ビルドアップ係数計算で整備しているのは、無限媒質中の $\gamma$ 線ビルドアップ係数である。有限な厚さでは $\gamma$ 線ビルドアップ係数は若干低くなるため、その補正を行えるようにする。

##### (2) 多重層 $\gamma$ 線ビルドアップ係数

本WGでの検討結果を持って多重層 $\gamma$ 線ビルドアップ係数への対応方針を決定する。

GPフィッティング法の改良やマトリクス法？

##### (3) 垂直入射/斜め入射

本WGでの検討結果を持って当該 $\gamma$ 線ビルドアップ係数への対応方針を決定する。

#### 6. 3. 5. 計算項目

##### (1) 計算する全線量 (赤字は追加)

QAD-CGGP2Rは1)～4)の計算機能が備わっていたが、昨今、目の水晶体の線量限度が引き下がり、厳しくなること、東電福島事故対策工事のための線量評価で目の水晶体の計算が求められていることなどから、過去のQAD-CGGP2で備わっていた、皮膚の評価と目の水晶体の評価も行えるようにする。どの計算量を計算したいかを設定する。

1) 実効線量 E(AP)

2) 1cm線量当量 H\*(10)

3) 吸収線量

4) 空気カーマ

5) 皮膚の等価線量(測定は70 $\mu$ m線量当量)

6) 目の水晶体の等価線量(測定は70 $\mu$ m線量当量か1cm線量当量の内適切な方)

#### 6. 3. 6. 不要な入力項目・機能の削除

・QADでの中性子計算オプションを削除

・レイジオメトリの削除 →プレ・ポストでの体系チェック

#### 6. 4. データライブラリ更新

断面積は4章に示されたように種々変わってきている。最新知見に基づく、ライブラリを作成することも検討する。

#### 6. 4. 1. 質量減衰係数 $\mu/\rho$

重要な指摘として、ガンマ線の断面積（線減衰係数）算出の際、全反応の断面積を考慮しているのではなく、干渉性散乱（コヒーレント散乱）を考慮しない、質量減衰係数 ATMUKN のデータを使用してビルドアップ係数を計算している。

#### 6. 4. 2. $\gamma$ 線ビルドアップ係数データ

6. 3. 5節で記載した計算量についての $\gamma$ 線ビルドアップ係数データが必要となる。

- (1) ビルドアップ係数を作成する物質、組成と密度について  
→6. 4. 4. 節の計算において討議したい事項を参照
- (2) GP 法保守側/最適フィッティング(IE)
- (3) 数表内挿方式

#### 6. 4. 3. $\gamma$ 線スペクトルデータ

核種の線源スペクトルデータをコードに内蔵しておき、複数核種を入力することで自動的に線量計算できる機能。 $\beta$ 線制動放射線影響：最大のデータ(UO<sub>2</sub>)で可。

$\gamma$ 線スペクトルデータは現状 ORIGEN2 の古いデータを使用することが多いが、Fe-59 の $\gamma$ 線スペクトルデータなど最新ライブラリでは大幅に更新されているものもある。最新の DECDC2/ICRP Pub.107 又は ORIGEN2 群構造に処理された ORLIBJ40 等を用いた $\gamma$ 線スペクトルデータを使用できるようにしたい。 $\beta$ 線の制動放射線影響をどうするかなどは、本 WG の範囲を超えてる。JENDL 核データグループ等からの情報入手要。

#### 6. 4. 4. $\gamma$ 線ビルドアップ係数計算について討議したい事項

(1)計算に関して討議したい事項

・計算する物質？元素毎？

水、鉄、コンクリート、鉛、空気、タンゲステン、鉛ガラス

Mo や U などの重元素単体に対する $\gamma$ 線ビルドアップ係数計算は必要か？

→元々はビルドアップ研究として実施された。実業務で計算に使用することはあまり無い。

・ $\gamma$ 線ビルドアップ係数を計算する密度と組成は遮蔽計算で良く使用している値を推奨値としてはどうか。具体的理由としては、手計算で確認する際、平均自由行程

=  $1 / \{(\mu/\rho) \times \rho_{\text{calc}}\}$  など密度補正が必要になるため。

鉄 7.8g/cm<sup>3</sup> 現データより変更

鉛 11.0g/cm<sup>3</sup> 現状データより変更

コンクリート 2.1g/cm<sup>3</sup> ANL-5800/JAERI-M6928/AESJ 標準？

表 6.4-1 に QAD-CGGP2/QAD-CGGP2R で作成されたビルドアップ係数物質を示す。また使用された ANSI/ANS-6.4.3<sup>6-5)</sup> で使用した密度・組成を表 6.4-2 示す。

表 6.4-3 に加速器・RI で使用されている、実務マニュアル・データ集の組成を示す。

表 6.4-1(1/2) ビルドアップ作成物質(元素)

物質名	優先度	ICRP Pub. 116 改訂 BF	実務マニュアル 2015 (取込必須)	AESJ $\gamma$ -BF (=QAD/G33- IE?)
Be				○
B				○
C	中			○
N				○
O				○
Na				○
Mg				○
Al	中			○
Si				○
P				○
S				○
Ar				○
K				○
Ca				○
Fe	高		○	○
Cu	中		○	○
Rb				○
Mo				○
Sn				○
La				○
Gd				○
W	高		○	○
Pb	高		○	○
Bi				○
U				○

表 6.4-1(2/2) ビルドアップ作成物質(混合物)

物質名	優先度	ICRP Pub. 116 改訂 BF	実務マニュアル 2015 (取込必須)	AESJ $\gamma$ -BF (=QAD/G33- IE?)
空気	高		○	○
コンクリート	高		○	○
水	高		○	○
鉛ガラス (パイレックス ガラス)	高		○	
アクリル樹脂	高		○	
土壌	高			
フィルタ系?	中?			
ポリエチレン	中?			

表 6.4-2 ANSI/ANS-6.4.3 の組成

Table 4 Equivalent atomic number of various media

Medium	Air	Water	NBS concrete	FP.a concrete	Lucite (C <sub>5</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> ) <sub>n</sub>	Polyethylene (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ) <sub>n</sub>	Sand
Density (g/cm <sup>3</sup> )	0.001205	1.0	2.35	4.68	1.19	0.92	1.6
Composition (Weight fraction)							
H		0.1119	0.0056	0.005	0.0805	0.0774	0.0111
C				0.0005	0.5999	0.9226	
N	0.755			0.0846			
O	0.232	0.8881	0.4983		0.3196		0.5367
Na			0.0171				
Mg			0.0024	0.0010			
Al			0.0456	0.00399			0.0784
Si			0.03158	0.0280			0.2660
P				0.207			
S			0.0012				
Ar	0.013						
K			0.0192				0.0251
Ca			0.0826	0.0421			0.0347
Cr				0.0005			
Mn				0.0250			
Fe			0.0122	0.603			0.0483
Equivalent atomic number							
E<1.5 MeV	7.8	7.5	13.5	23.3	7.1	5.7	13.8
E>1.5 MeV	7.3	6.5	11.5	21.8	6.7	4.6	12.0

- 81 -

出典：ANSI/ANS-6.4.3<sup>6-5)</sup>

## (2)計算体制

計算は品質保証の観点から第1計算者に加え、第2計算者による検証・妥当性確認が必要と考えられる。

第1計算者による計算

第2計算者による検証・妥当性確認

## (3)計算コードと断面積

複数のコードによる検証・妥当性確認が必要である。

モンテカルロ計算コード(MCNP/PHITS/EGS)

ANISN(Sn)+詳細群？

IE法



表 6.4-3 実務マニュアル・データ集の組成

1. 遮蔽体の標準組成

遮蔽体に使用されるコンクリートの組成については、幾つかのデータ<sup>(1)</sup>が示されているが、本データ集では標準的な組成を使用し、密度を2.1とした。

表 1.1 鉛、鉄、普通コンクリート及び水の密度と原子個数密度

物質	鉛		鉄		普通コンクリート <sup>(1)</sup>	
	11.34		7.86		2.10	
密度 (g・cm <sup>-3</sup> )	原子個数密度 <sup>(2)</sup>	重量比率	原子個数密度 <sup>(2)</sup>	重量比率	原子個数密度 <sup>(2)</sup>	重量比率
H					1.299E-2	0.0103
C					1.082E-4	0.0010
O					4.305E-2	0.5446
Mg					1.161E-4	0.0022
Al					1.632E-3	0.0348
Si					1.588E-2	0.3460
Ca					1.409E-3	0.0446
Fe			8.487E-2	1.0000	3.235E-4	0.0143
Pb	3.296E-2	1.0000				

<sup>(1)</sup> ANL-5900,p.660(1963)より

<sup>(2)</sup> 単位 10<sup>24</sup>atoms・cm<sup>-3</sup>

表 1.2 パイレックスガラス、アクリル樹脂の密度と原子個数密度

物質	パイレックス <sup>(3)</sup> ガラス		アクリル樹脂 <sup>(3)</sup>		水	
	2.23		1.19		1.00	
密度 (g・cm <sup>-3</sup> )	原子個数密度 <sup>(2)</sup>	重量比率	原子個数密度 <sup>(2)</sup>	重量比率	原子個数密度 <sup>(2)</sup>	重量比率
H			5.7260E-2	0.080541	6.674E-2	0.1119
B	4.977E-3	0.040066				
C			3.5790E-2	0.599846		
O	4.529E-2	0.539559	1.4316E-2	0.319613	3.337E-2	0.8881
Na	1.647E-3	0.028191				
Al	5.796E-4	0.011644				
Si	1.804E-2	0.377220				
K	1.141E-4	0.003321				

<sup>(3)</sup> NIST:National Institute of Standards and Technology(2012年4月現在)

・ICRU Report44(1989)より

出典：公益財団法人 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”<sup>6-6)</sup>

## 6. 5. プレ・ポスト機能について

入力効率化のため、今後下記についても検討を行う。線源と計算体系、線量計算結果等が同時に表示できるようなシステムとする。

- ・ 体系入力支援(プレ)
- ・ 標準組成整備(プレ)
- ・ 入力エラーチェック(プレ)
- ・ 結果可視化(ポスト)

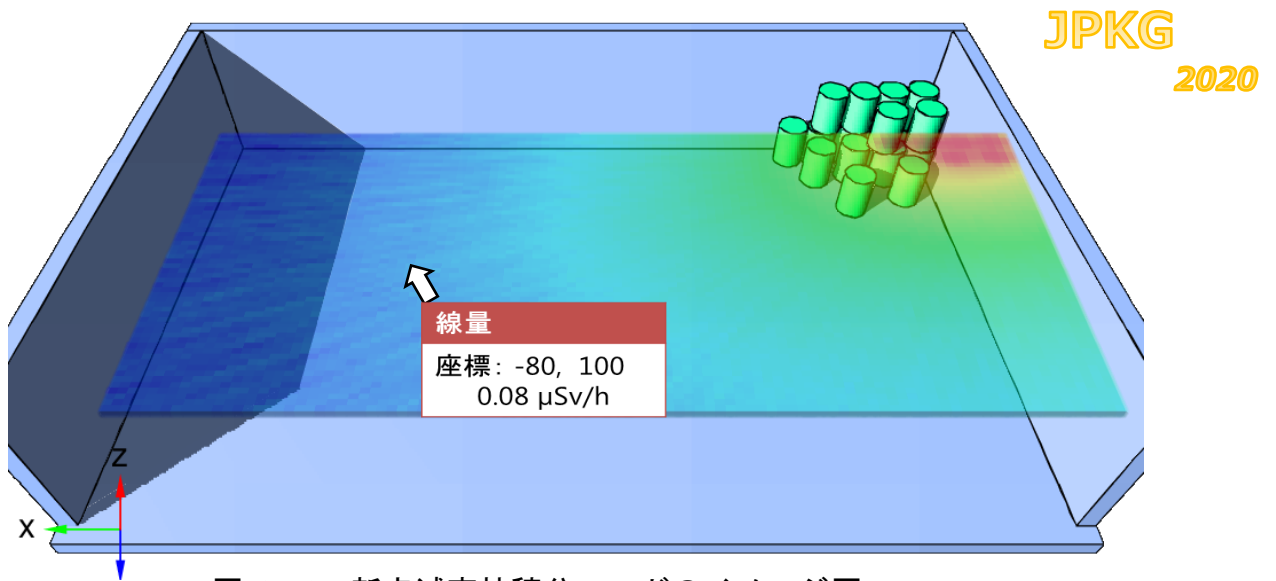


図 6.5-1 新点減衰核積分コードのイメージ図  
(計算体系・線源・コンター・線量結果)

## 6. 6. コード開発ロードマップの提案

### 6. 6. 1. 直近の課題

今後、ICRP 2007年勧告（ICRP Pub.103）を取り入れた法律改正が見込まれる。QAD-CGGP2R/QAD-IEはライセンス問題で改良しても配布できない。アメリカ製コードをベースにすると再度問題が発生する可能性が高い。今のままでは設計／許認可で使用している簡易計算での新法令対応計算ができないため、国産化が必須である。今、改良するならば現状の現場のニーズも取り込んで行くことを検討する必要がある。ステークホルダーの意見を聞いて国産化候補となる既存コード類を洗い出し、国産化優先順位を示すこと、コード類の標準化、V&Vについて議論を含める。

### 6. 6. 2. ロードマップについて

優先度の高い、点減衰核積分コードについての開発ロードマップ作成を行った。本ロードマップ作成に関しては、コード開発についてはプログラム開発予算獲得を前提として作成した。作成したロードマップを表 6.3-1 に示す。

プログラム開発上、ステップを3段階に分け、ステップ1が開発着手から1～3年、ステップ2が2年～4年、ステップ3が4年～の3工程とした。

計算コードのコア部分については、既存機能の整理・試作をステップ1終了までに、既存機能の製作完成をステップ2終了までに、新規機能の製作を4年目以降とする。プレ・ポストについては、今後としているが、試作はステップ2にて進める。

コード検証 V&V については、ステップ1でベンチマーク文献収集を行い、ステップ2でベンチマーク実施、ステップ3でまとめ、論文化をめざす。

予算、マンパワーとも放射線工学部会等数多くのユーザの支援・協力を求めていく。

本WGの目的はレビューであり、仕様検討・試作・製作物のレビューを実施する。

表 6.6-1 点減衰個コード開発のロードマップ  
2016年時点であり、今後予算獲得状況、進捗により見直す

大項目	2016	ステップ1 2017～2019	ステップ2 2018～2020	ステップ3 2021～
全体計画	ロードマップ(案)作成	ロードマップ改訂		
コアコード仕様検討		既存機能整理・検討・試作	既存機能の仕様検討・試作 <b>既存機能製作</b>	改良
		新規追加機能の検討	同左・試作	<b>新規機能製作</b>
プレ・ポスト		幾何形状入力支援検討	プレ・ポスト仕様実装検討 試作	<b>製作</b> 改良
V&V ベンチマーク		線量メッシュコンタナー検討 文献収集 ベンチマーク実施	プレ・ポスト仕様実装検討 ベンチマーク実施	<b>製作</b> コードV&Vまとめ QA、論文化
アウトプット				
ステップ1	ロードマップ改訂版(大枠の計画を記載)			
ステップ2	コアプログラム基本設計書(実装仕様)、既存コード試作、製作			
ステップ3	コアプログラム新機能改良基本、プレ・ポスト製作			

## 6. 7. 外部資金獲得活動

これまで示してきた点減衰核積分コード開発のための予算獲得活動を行ったので、その概略を述べる。当初、開発予算の獲得に際して、WGで指摘された課題は次のとおりである。

1. 国産コード開発戦略報告書には予算獲得に向けた具体的なステップが示されていない。
2. コード開発及び開発予算の必要性について学会誌等への寄稿を通じて情報発信すべきである。
3. 予算の出所によっては、成果が非公開になる等、利活用の制約を受けることがある。

そこで、予算獲得に向けて考えられるオプションとステップをオープンに議論した。またWG趣意書のとおり、成果を公開して幅広く利活用を促進する目的にかなう予算の獲得を目指し、そうした特定の予算の獲得に適したアピールを適所にて行うこととした。

WGで協議した結果、要件に合う開発予算として、原子力規制庁委託事業「放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業費）」を選定し、平成30年度の公募に応じることに決定した。同委託事業では、平成29年度に採択されたプログラム開発案件に対して成果の公開が明記されている。

平成29年7月頃から同事業費を獲得するための活動を開始し、平成30年1月の入札説明会を経て、平成30年2月の公募締切に間に合うようにWGメンバーで協力して応募書類の作成を行った。ところが、研究主任であるWG主査が公募のオンライン申請に失敗してしまい、書類は公募元に届けられることなく申請未了になってしまった。この失態の責任はWG主査にあり、コード開発の準備を進められた方々、応募書類の作成に協力して頂いた方々、及び研究協力を呼びかけて快く引き受けて頂いた方々に心からお詫び申し上げる。ただし、これでコード開発を諦めたわけではなく、今後も関係者や学会活動を通じてコード開発の必要性・重要性をアピールして、引き続き開発予算の獲得を目指す所存である。

以下、この間の公募申請に係る活動の経緯をまとめて示しておく。

<平成29年>

- ・ (7月) 第6回WGにおいて、委員から規制庁委託事業と平成29年度採択課題の紹介がなされた。
- ・ (9月) 第7回WGにおいて、同委託事業公募に応ずることを決定し、準備を開始した。
- ・ 新たな簡易遮蔽解析コードの開発目的と必要性をアピールするため、学会

誌に解説を寄稿する準備を始めた。(未投稿)

- ・ (10月) 原子力規制庁「平成29年度放射線対策委託費(放射線安全規制研究戦略的推進事業費)第6回研究推進委員会」において、「平成30年度放射線対策委託費」の重点テーマについて審議が行われた。
- ・ (12月) 平成30年度規制庁委託事業公募開始、公募説明会に参加
- ・ 第8回WGにおいて、作成した応募書類のドラフトについて審議した。重点テーマその1「科学的根拠に基づく合理的な安全管理の実現に向けた調査研究」に対して申請を行うことを確認した。

<平成30年>

- ・ (1月) 応募書類の作成を進めるとともに、研究分担者・協力者の選定と依頼を行った。
- ・ 申請後に行われる庁内ヒアの準備を行うことの重要性が指摘された。WG活動を含めて、簡易遮蔽解析コードの抱える課題や今後の展開についてのプレゼン準備を開始した。
- ・ (2月) 公募締切日に、WG主査が公募のオンライン申請に失敗してしまい、応募を果たせなかった。

## 6. 8. 点減衰核積分コードのカーネル設計案

点減衰核積分コードのカーネルとして、 $\gamma$ 線ビルドアップ係数等の更新されたデータライブラリの検証に利用できる単純体系に対する遮蔽評価が可能な点減衰核計算ツールの概要設計を検討した。

点減衰核計算ツールは、図 6.8-1 に示したような点減衰核積分法コード内の別ルーチンで算出される遮蔽体の透過距離を入力して実効線量率等を計算することを想定する。

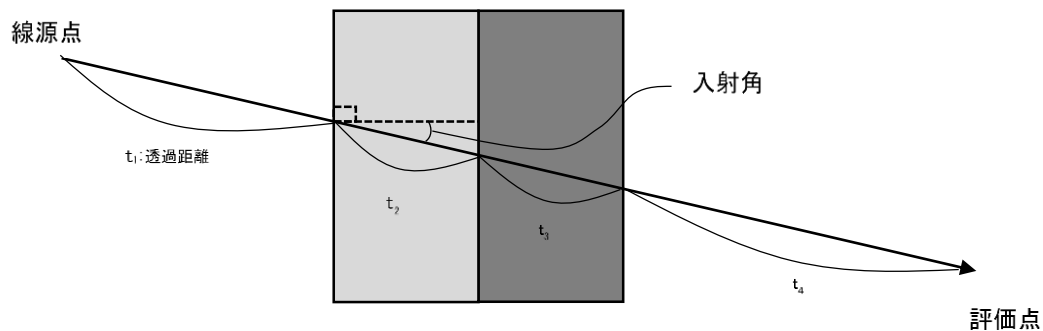


図 6.8-1 遮蔽体の透過距離

### 6. 8. 1. 入力項目

点減衰核法計算ツールの入力項目を以下に示す。

- ・線源強度 (photons/s)
- ・線源エネルギー (MeV)
- ・入射角 (deg) 斜め入射ビルドアップ係数用パラメータ
- ・遮蔽体数
- ・遮蔽体材質 (材質名)
- ・遮蔽体透過距離 (cm)
- ・線源点から評価点までの距離 (cm)
- ・ $\gamma$ 線ビルドアップ係数の材質 (材質名)
- ・ $\gamma$ 線ビルドアップ係数の体系 (無限、有限)

### 6. 8. 2. 出力項目

点減衰核法計算ツールの出力項目を以下に示す。

- ・実効線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ) 等の線量率 ( $\mu\text{Sv/h}$ ,  $\mu\text{Gy/h}$ )
- ・mfp
- ・ $\gamma$ 線ビルドアップ係数

### 6. 8. 3. 実行環境

GUI (Graphical user interface) を備えデスクトップ OS として普及している Windows OS を対象とすることを推奨する。オープンソースの開発環境を採用することにより、他の実行環境への移行も比較的容易となる。

### 6. 8. 4. 開発言語

科学計算向きの開発言語の特徴を以下に示す。点減衰核法計算ツールの使用目的を考慮すると FORTRAN で問題ない。

- FORTRAN

OS、コンパイラ等の環境依存性が比較的低い。原子力分野であれば開発者は多く、今までの原子力分野の資産を活用できる。

- C/C++

OS、コンパイラ、ハードウェアの性能を生かしたコーディングが可能である。そのため、実行速度も速い。最新の情報処理技術を応用したプログラムが作成できる。

- Python

計測器等の機械制御、科学計算に利用されている。コンパイルが不要なスクリプト言語なので開発が容易である。また、コードがシンプルで保守も容易である。実行速度は C や FORTRAN に劣る。

### 6. 8. 5. モジュール構成

実効線量率等を計算するメインモジュール以外に各データライブラリから減衰係数、線量換算係数、ビルドアップ係数を算出するサブモジュールが必要となる。



## 参考文献

- 6-1)日本原子力学会放射線工学部会国産安全解析コード開発戦略検討ワーキンググループ、「国産安全解析コード開発戦略検討報告書」、平成 26 年 11 月、<http://www.aesj.or.jp/~rst/fukushima/20150318.pdf>
- 6-2)一般社団法人 原子力安全推進協会，原子力施設における許認可申請等に係る解析業務の品質向上ガイドライン, JANSI-GQA-01 第 2 版,平成 26 年 3 月
- 6-3) ICRP, 2007. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann. ICRP 37 (2-4).
- 6-4) ICRP, 2010. Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5).
- 6-5)ANSI/ANS-6.4.3 ; Geometric Progression Gamma-Ray Buildup Factor Coefficients
- 6-6)公益財団法人 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”
- 6-7)須山賢也、平尾好弘、坂本浩紀、「解説 国産安全解析コードの現状と課題－我が国の安全規制への貢献を目指して－」、日本原子力学会誌、平成 27 年 12 月.

## 7. ダクト・迷路に対する簡易計算レビュー

### 7. 1. ダクト・迷路の簡易式による評価方法の検討

#### 7. 1. 1. 矩形屈曲ダクトにおける散乱線の評価方法の検討

矩形屈曲ダクトにおける散乱線の評価方法及び課題について示す。

迷路内における散乱線は遮蔽計算マニュアル<sup>7-1)</sup>や遮蔽ハンドブック<sup>7-2)</sup>に記載の簡易計算手法、または DUCT-III 等の簡易計算コードで評価することができる。

従来の線量評価において、線源は特定の機器内等に閉じ込められており、迷路構造では線源を点線源、線線源として設定することが可能な体系が一般的であった。福島第一原子力発電所事故以降において、線源が広範にわたって存在する状態を設定する必要があるが出てきた。一般的なダクトよりも寸法が大きい迷路における散乱線評価では、散乱経路でのパラメータの選定によって簡易評価の保守性が大きく変化する。

#### (1) パラメータ設定

散乱線の簡易評価は散乱点での線量、散乱面積、角度、距離、アルベド値がパラメータである。考慮する線源形状によって散乱範囲が大きい場合、各パラメータすべてを散乱面全体で安全側に設定した結果は保守性が大きく、最適な評価及び設計を妨げる。

具体的な例を図 7.1-1 に示す。散乱面が  $S$  の面積で存在している状態で各パラメータすべてを安全側に設定した場合、散乱面での線量は  $D_a$ 、距離は  $r_b$ 、アルベド値は角度やエネルギーにおける最大値を用いることとなる。例えば距離のパラメータのみについて着目すると、距離  $r_a$  や  $r_c$  として設定した場合の散乱線の線量に比べて、距離  $r_c$  として設定した場合の方が保守的な線量評価結果となる。このように、他にも散乱面の面積  $S$ 、アルベド係数、散乱角度等のファクタの組み合わせによって、散乱線の線量に大きな差が生じる。

#### (2) 今後の取り組み

迷路における散乱線は、散乱経路の代表を迷路や散乱面の中心で選定し、非保守的な結果にならないようパラメータを設定して評価する。より詳細な数値は、散乱範囲を分割して簡易計算で評価する、または、モンテカルロ法等の計算コードで評価を実施することでも得られる。

散乱線評価において、文献調査、実際の評価実施等にて、下記を今後の課題として取り組むことを検討する。

- ・現状の簡易評価手法で線量を適切に評価するためのパラメータの設定方法の確認

- ・ 散乱領域を分割して現状の簡易評価手法を適用する方法の検討
  - ・ 各パラメータを内挿して得た詳細な経路毎の線量を積分する方法の検討
- また、上記の検討に併せて、線源と迷路の形状や線源条件をインプットに、計算コード内で散乱面積等を自動で算出して散乱線の線量を評価する機能への適用も検討する。

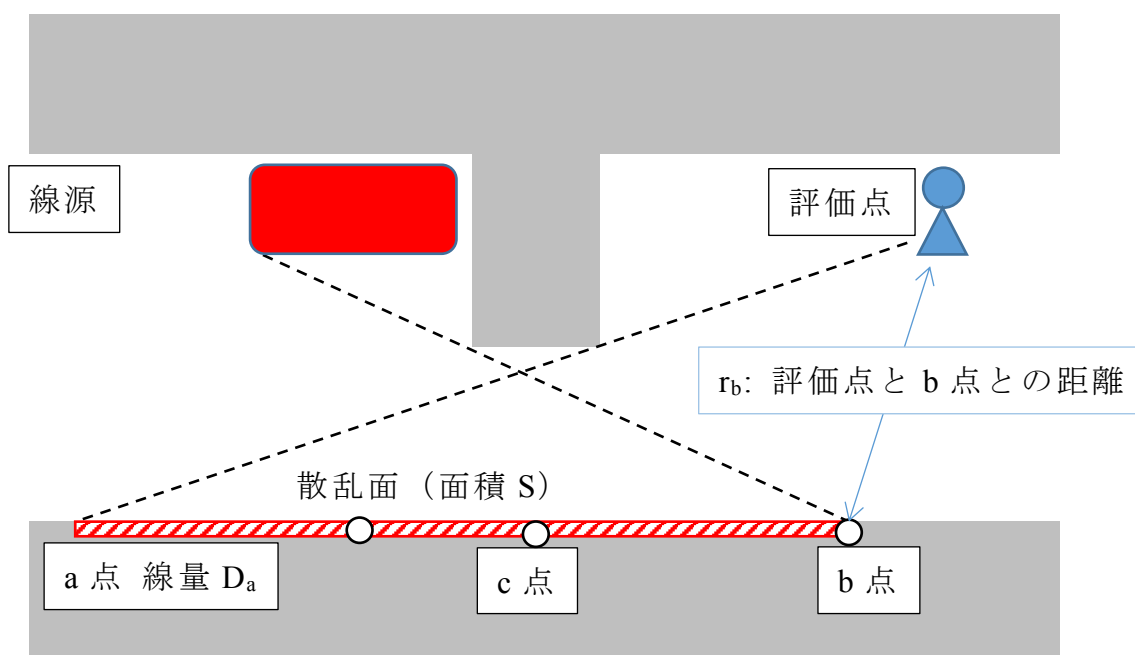


図 7.1-1 散乱線評価におけるパラメータ

### 7. 1. 2. ダクト内詰め物がある場合のストリーミング評価方法

一般的に貫通口（ダクト）からの中性子やガンマ線のストリーミングによる線量を低減するために、シール（穴仕舞い）、迷路構造、貫通部出口での遮蔽材を用いたブロック等の対策を実施する。

ダクト・迷路の簡易計算課題の一つとして、既存建屋の新規貫通部に配線や配管のように空気以外の詰め物で構成されている貫通孔があり、簡易計算によるストリーミングの評価方法が要求されている。

#### (1) 簡易式による評価方法の検討

ダクト入口から出口まで終始ダクト内をストリーミングする中性子に関する簡易式として、Simon-Clifford（サイモン・クリフォード）により提案された理論式がよく用いられる<sup>7-3)</sup>。しかし、この式ではダクト内を空気として扱うため、ダクト内に空気以外の流体や詰め物で構成されているダクトに対しては材料による中性子減衰効果を考慮する必要がある<sup>7-4)</sup>。

今年度については、迷路構造でない詰め物のある直通ダクトに対し、簡易評価方法となる中性子減衰効果を考慮した修正サイモン・クリフォードの式について、モンテカルロ計算手法と比較するために、簡易評価方法で使用するパラメータサーベイ（中性子エネルギー、ダクト断面の寸法、ダクトや詰め物の材質、材質の除去断面積<sup>7-5)</sup>、材質のアルベド<sup>7-6)</sup>、材質の有限媒質効果<sup>7-7)</sup>）を実施した。

修正サイモン・クリフォードの式の汎用性については、今後、様々なケースでのパラメータサーベイが必要であることがわかったものの、中性子エネルギー 2.5 MeV、コンクリート製ダクト内（直径 1 m、長さ 2 m）に鉄を詰めたケースについて、簡易評価方法とモンテカルロ計算手法（PHITS）による両者の結果は概ね一致することを確認した（図 7.1-2 参照）。

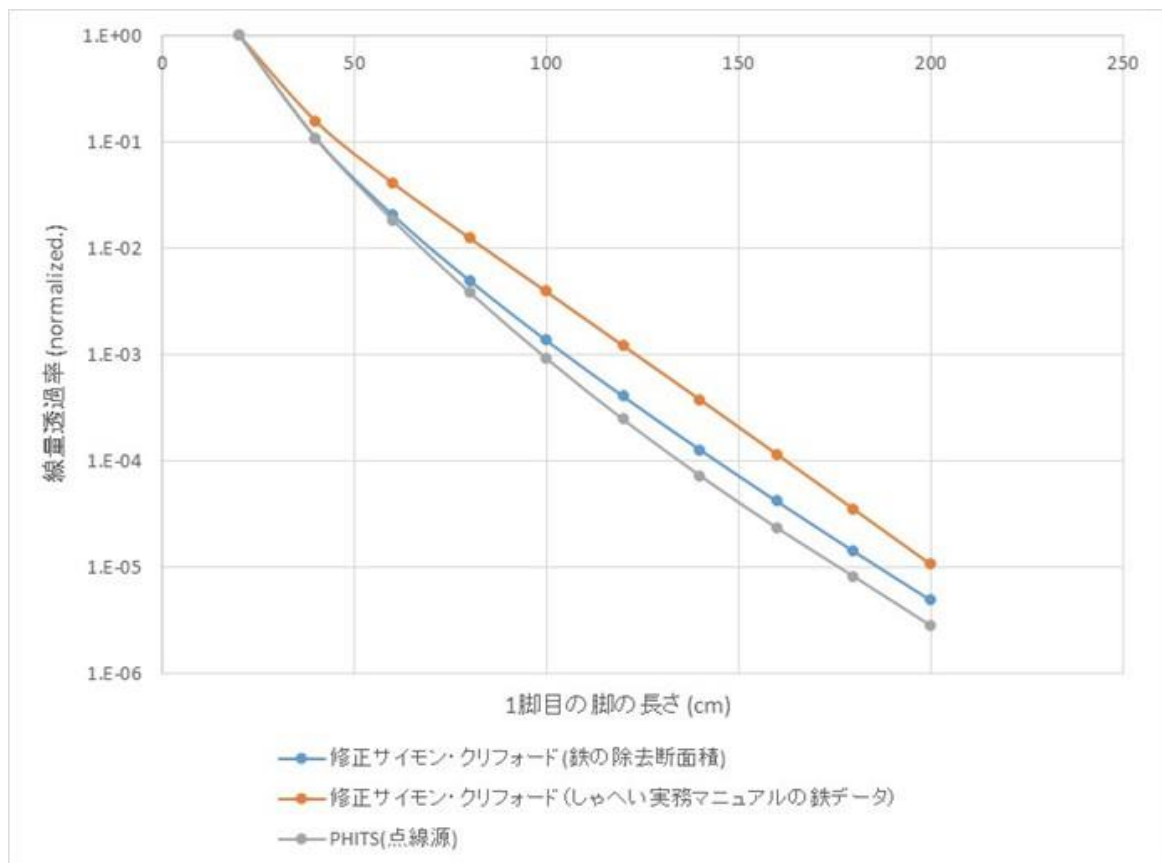


図 7.1-2. 直通ダクト（鉄の詰め物がある）に対する、簡易評価方法とモンテカルロ法による中性子線量透過率の比較結果例

## 参考文献

- 7-1) 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
- 7-2) 放射線遮蔽ハンドブック -基礎編- 日本原子力学会 「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会
- 7-3) A. Simon and C. E. Clifford., The Attenuation of Neutrons by Air Ducts in Shields, Nuclear Science and Engineering., No.1 (1956) pp.156-166.
- 7-4) T. Rockwell III, Reactor Shielding Design Manual (First Edition), USAEC.
- 7-5) K. Shultis, R.E.Faw, Radiation Shielding, ANS, pp.279-288.
- 7-6) W. E. Selph, NEUTRON AND GAMMA-RAY ALBEDOS, OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, ORNL-RSIC-21 (1968) pp.10-12.
- 7-7) 原子力安全技術センター編, 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2007 (pp.6-120 表 6.6.4(4), pp.6-125 表 6.6.6(4))

## 8. まとめと今後の活動計画

平成 28 年 1 月にスタートした本 WG は、平成 29 年 12 月末に約 2 年間の WG 開催期間を満了した。当該期間における主要な WG 活動をまとめると下記のとおりである。

- ・ 簡易遮蔽解析コードの利用状況及び期待される機能等に関するアンケート実施
- ・ 最近の簡易遮蔽解析に係る研究開発と応用の事例調査に基づく最新動向の整理
- ・ 以上の調査結果から、簡易遮蔽解析コードの喫緊の課題を抽出して、WG のアクションプランを策定した。個別課題の検討については、WG メンバーのイニシアティブを尊重することとし、各位関心ある課題のレビューに着手した。
- ・ 本 WG の開催期間において、レビューされた課題は下記のとおりである。
  - $\gamma$ 線ビルドアップ係数のレビュー
    - ◇ ビルドアップ係数に係る研究の歴史
    - ◇ 光子断面積ライブラリの比較
    - ◇ モンテカルロ法によるビルドアップ係数の計算方法
    - ◇ コンプトンドップラー拡張データ (CDBD) の考慮とビルドアップ係数に与える影響
    - ◇ 干渉性散乱の考慮とビルドアップ係数に与える影響
    - ◇ 有限媒質に対するビルドアップ係数の計算方法
  - 薄い遮蔽体 (0.5mfp 未満) に対する簡易計算レビュー
    - ◇ 点減衰核積分法コードの適用性 (単層ビルドアップ係数の適切な選択)
    - ◇ 後方散乱の影響
  - 点減衰核積分法コードのレビュー
    - ◇ コードの改良点 (メッシュ自動分割機能、プレ・ポスト機能、データライブラリ更新)
    - ◇ コード新設の必要性と求められる仕様の考え方
    - ◇ 新設を目指すコードのコアプログラム仕様案
    - ◇ コード開発のためのロードマップと外部資金獲得活動
  - ダクト・迷路に対する簡易計算レビュー
    - ◇ 矩形屈曲ダクト (通路) における散乱線の現実的評価
    - ◇ 直通ダクト内に詰め物がある場合のストリーミング評価

- ・ 上のレビュー成果について外部発表
- ・ メンバーの関係する施設・関連事業及びサービスの紹介
- ・ 主に点減衰核積分法コードの新設に係る外部資金獲得活動

WG 活動に示すとおり、策定したアクションプランに基づき、レビュー活動を着実に実施して成果発表を行った。それらの成果を実務に反映するためには、レビューを継続し V&V を含む出版活動を行う必要がある。また、アクションプランの一部は未着手であり、見直しも含めて残りのプランの対処方針をメンバー間で協議する必要がある。例えば、多重層遮蔽に対するビルドアップ係数表現の開発と計算コードへの反映は、重要課題の一つとして残されている。

今回、点減衰核積分法コードに対する調査及びレビューでわかったことは、施設の遮蔽設計又は被ばく線量評価の場面で今も多くの利用者を抱えており、最新の技術基盤を取り入れた改良が望まれていることである。点減衰核積分法コードは許認可申請で用いられることから、近く予定される ICRP 2007 年勧告の国内法令取り入れに伴うデータの更新が喫緊の課題となっている。そこで、点減衰核積分法コードに求められる技術基盤を専門家の間で幅広く検討し、コード新設のための仕様と開発ロードマップを提案した。今後、開発資金獲得を含め、コードの開発と実用化に向けた活動を継続する予定である。

従って、アクションプランの課題検討を引き続き行い、また点減衰核積分法解析コードの開発をロードマップ案に従って推進するため、WG の開催期間延長を申し出ることとした。平成 29 年 12 月 20 日に WG 更新依頼書を放射線工学部会に提出し、部会の運営から延長の許可が下りた。

第 2 期 WG の開催期間は平成 30 年 1 月～平成 31 年 12 月の 2 年間である。WG の趣意書に特に変更はなく、同じメンバーで活動を継続する。

付録Ⅰ ワーキンググループ参加者リスト（平成30年3月  
時点）

役職	名前	所属
主査	平尾好弘	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
幹事	延原文祥	東京ニュークリア・サービス株式会社
幹事	松田規宏	国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
委員	近内亜紀子	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
委員	吉田至孝	株式会社原子力安全システム研究所
委員	岩下充成	株式会社IHI
委員	和田亜由美	東芝エネルギーシステムズ株式会社
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
委員	猪狩貴史	エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社
委員	坂本幸夫	株式会社アトックス
委員	大西世紀	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
委員	松居祐介	株式会社テプコシステムズ
委員	助川篤彦	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
オブザーバ	後神進史	原子力規制庁
オブザーバ	黒澤亮平	株式会社ヴィジブルインフォメーションセンター
オブザーバ	名雲靖	日立製作所
オブザーバ	川合将嘉	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構
オブザーバ	久保田修	株式会社テプコシステムズ



## 付録Ⅱ ワーキンググループ議事録（第一回～第八回）

## 簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録

日時：2016年3月4日（金） 10:00～12:20

場所：日本原子力学会 本部会議室（新橋）

出席者（敬称略）：

平尾（海技研）、近内（海技研）、岩下（株IHI）、延原（TNS株）、  
廣内（株東芝）、坂本幸（株アトックス）、松田（原子力機構）、猪狩（MRA株）

配布資料：

- ①第1回 日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析WG会合 議事次第（平尾）
- ②簡易遮蔽解析コードレビューWG 名簿（平尾）
- ③簡易遮蔽解析コードレビューWG準備会合 議事録（平尾）
- ④簡易遮蔽解析コードレビューWG 設立趣意書（平尾）
- ⑤簡易計算という言葉の定義、カバーする範囲について（平尾）
- ⑥簡易計算コードを遮蔽設計で使用する上での問題点（平尾）
- ⑦個別の簡易計算コードの特徴（平尾）
- ⑧遮蔽簡易解析コードの改良案（廣内）
- ⑨WG委員への課題共有アンケート（平尾）

議事概要：

- 配布資料①に基づき、本日の議事次第が平尾より示された。  
配布資料②に基づき、WGの現体制、情報共有サポート体制が平尾より示された。  
WGのメンバー募集について、参加は部会員でなくても学会員であればOK  
配布資料③に基づき、準備会合開催からWG設立の流れが平尾より示された。  
配布資料④に基づき、本WGの目的、構成、期間、検討範囲が平尾より示された。  
本WGでは、簡易遮蔽解析コードに係る課題や要望を集約・分類して  
優先順位を考慮した開発ロードマップを2年後に提示する。  
配布資料⑤を基に、平尾から本WGの検討範囲等に係る話題提供がなされた。  
配布資料⑥を基に、平尾から本WGで対象とする簡易計算コードの課題等に係る  
話題提供がなされた。  
配布資料⑦を基に、平尾から各簡易計算コードの特徴が示された。  
各自の使用実績と解析例等から、各計算コードに対する情報の補足が行われた。  
計算コードによる解析結果に含まれている安全裕度について議論が行われた。  
配布資料⑧を基に、廣内からQAD及びG33の改良案（要望）が示された。  
配布資料⑨について、平尾から補足説明があった。
- ・ 課題等を整理していく上で重要なもの。
  - ・ 来る春の年会の放射線工学部会全体会議で配布予定
  - ・ アンケートへの回答は随時受け付け（ML、直メールなど）

文責：松田

確定：2016年3月29日

簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録

日時：2016年5月26日（木） 13:30～17:00

場所：日本原子力学会 本部会議室（新橋）

出席者（敬称略）：

平尾（海技研）、坂本浩（トランスニュークリア株）、吉田（原安シス研）、  
大西（海技研）、岩下（株IHI）、柳田（株IHI）、延原（TNS株）、  
廣内（株東芝）、猪狩（MRA株）、松田（原子力機構）

オブザーバー：

名雲（株日立）、後神（原子力規制庁）

配布資料：

- ①第2回 日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析WG会合 議事次第（松田）
- ②簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録（松田）
- ③簡易遮蔽解析コードに係る最近（過去5年程度）の動向調査（平尾・松田）
- ④動向調査のまとめ（平尾）  
※ 都合により、2016年春の年会、2015年春の年会・秋の大会、及び2014年秋の大会まで。
- ⑤簡易遮蔽計算に対する課題共有アンケート（回答）（松田）

議事概要：

配布資料①に基づき、本日の議事次第が平尾より示された。

配布資料の確認が松田より行われた。

今回の会合から新たに加わったメンバーがいるため、自己紹介を各自行った。

配布資料②に基づき、前回会合の概要が松田より示された。

配布資料③を基に、日本原子力学会（過去5年分）及び遮蔽国際会議（過去2回分）  
における簡易遮蔽解析コードに係る発表の動向調査の結果（概要）が平尾より示された。

また、配布資料④を基に、動向調査のまとめ（細分類）が平尾より示された。

- ・ 配布資料④は未完成のため、完成させて再度配布することになった。
- ・ 本年度の活動（簡易遮蔽解析コードに係る課題や要望を集約・分類する）について、平尾より再確認された。
- ・ WGで取り上げるべき課題の提案については、随時募集する。

配布資料⑤を基に、簡易遮蔽計算に対する課題等について、各自より補足説明がなされた。

- ・ 項目と回答に間違いがあったため、修正して再配布することになった。
- ・ アンケートの回答者はWGメンバーが大半を占めるため、再案内を出してはどうかとの意見があった。

文責：松田

確定：2016年6月8日

## 簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録

日時：2016年7月15日（金） 13:00～17:00

場所：富国生命ビル20階第2会議室（新橋）

出席者（敬称略）：

平尾（海技研）、坂本浩（トランスニュークリア株）、吉田（原安シス研）、  
岩下（株IHI）、根本（株VIC）、大西（海技研）、柳田（株IHI）、  
松田（原子力機構）、近内（海技研）、猪狩（MRA株）、坂本幸（株アトックス）、  
延原（TNS株）

オブザーバー：

後神（原子力規制庁）、平山（高エネ研）

配布資料：

- ①第3回 日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析WG会合 議事次第（松田）
- ②簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録（松田）
- ③アンケート結果まとめ（平尾）
- ④アクションプラン（平尾）
- ⑤ $\gamma$ 線断面積ライブラリ間の比較（コヒーレント散乱考慮の観点から）（平尾）
- ⑥ガンマ線ビルドアップ係数の計算について（松田）
- ⑦ $\gamma$ 線ビルドアップ係数研究の推移（坂本幸）
- ⑧An historical review and current status of buildup factor calculations and applications
- ⑨干渉性散乱の有無によるFeビルドアップ係数の違い（大西）
- ⑩新しい点減衰核コードの仕様（提案）について（延原）

議事概要：

配布資料①に基づき、本日の議事次第が平尾より示された。

配布資料の確認が松田より行われた。

配布資料②に基づき、前回会合の概要が松田より示された。

配布資料③及び④について、平尾より補足説明がなされた。

- ・ 今後は、配布資料④に示したアクションプラン案を各人が担当し、活動していくことが示された。

配布資料⑥に基づき、アクションプラン案の1項目でもある

「ビルドアップ係数の計算」に関する話題が松田より示された。

- ・ 配布資料⑤について平尾より説明があり、線減弱係数に関する議論がなされた。
- ・ 干渉性散乱の影響（配布資料⑨）について、大西より解説が示された。
- ・ Kエッジの考慮等、ビルドアップ係数の改訂に係る懸案事項が示された。

配布資料⑩に基づき、新しい点減衰核コードの仕様（提案）が延原より示された。

- ・ WGの活動目的は新しい簡易遮蔽解析コードを作ることではないが、現代の風潮に合った簡易遮蔽解析コードが求められていることについて、平尾より補足説明がなされた。

・ 元素の選定に関する過去の経緯が坂本幸より示された。

・ モンテカルロ輸送計算コードへの組み込みに関しては反対意見が示された。

配布資料④のアクションプラン案に対して、各自より担当の希望が示された。

（お手数ですが、各自担当の希望を改めてご確認ください。）

○ビルドアップ係数（松田、大西、延原、岩下、柳田、猪狩、根本、坂本浩）

- +多重層
- +コヒーレント散乱の影響（ほぼ完了）
- +1MFPと比べてかなり薄い遮蔽体のビルドアップ
- +斜め入射

○壁による後方散乱（延原、岩下、柳田）

- +後方散乱のビルドアップ係数
- +ダクト出口側の後方散乱

○ストリーミング（松田、岩下、柳田、平尾、根本）

- +屈曲角度の拡張
- +G33関連
- +広範囲汚染
- +ダクト入射角

○マニュアル・参考書・例題集（坂本幸、坂本浩、近内、平尾）

- +例題集
- +参考書

次回会合において、根本委員はガンマシールドの分析結果を、  
吉田委員はINSの開発した計算コードを紹介することとなった。  
配布資料⑦及び⑧は、参考文献として坂本幸より提供された。

文責：松田  
確定：2016年8月5日

簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録

日時：2016年9月29日（金） 13:30～17:00

場所：富国生命ビル20階第1会議室（新橋）

出席者（敬称略）：

平尾（海技研）、坂本浩（トランスニュークリア株）、吉田（原安シス研）、  
根本（株VIC）、大西（海技研）、松田（原子力機構）、猪狩（MRA株）、  
河野（株アトックス）、廣内（株東芝）、岩井（TNS株）

オブザーバー：

後神（原子力規制庁）

配布資料：

- ①第4回 日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析WG会合 議事次第（松田）
- ②簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録（松田）
- ③INSSにおける計算コード開発について（吉田）
- ④Development and evaluation of a fast calculation method for gamma ray skyshine dose using data libraries（吉田）
- ⑤ $\gamma$  Shielderへの素朴なる招待状 課題説明による使用方法解説（根本）
- ⑥ $\gamma$ 線ビルドアップ係数 計算結果比較（河野）

議事概要：

配布資料①に基づき、本日の議事次第が平尾より示された。  
配布資料の確認が松田より行われた。  
配布資料②に基づき、前回会合の概要が松田より示された。  
配布資料③に基づき、吉田よりINSSの開発した計算コードに関する講演が行われた。  
・原子力システムの信頼性と安全性の向上を目的としたシステム開発（安全研究）  
配布資料⑤に基づき、根本よりガンマシールドに関する講演が行われた。  
配布資料⑥に基づき、河野よりEGS4、EGS5を用いたガンマ線ビルドアップ係数の計算結果の比較が示された。  
WGグループウェアのハードディスク破損について、根本より状況報告がなされた。  
平尾より復旧し次第、各自の手持ちデータの再アップのお願いがあった。

配布資料④は、参考文献として吉田より提供された。

文責：松田

確定：2017年1月25日

簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録

日時：2017年5月17日（水） 13:30～17:00

場所：富国生命ビル19階第5会議室（新橋）

出席者（敬称略）：

平尾（海技研）、助川（量研機構）、大西（海技研）、近内（海技研）、  
久保田（株テプコシステムズ）、松居（株テプコシステムズ）、猪狩（MRA株）、  
廣内（株東芝）、延原（TNS株）、吉田（原安シス研）、松田（原子力機構）

オブザーバー：

川合（高エネ研）

配布資料：

- ①第5回 日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析WG会合 議事次第（松田）
- ②簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録（松田）
- ③簡易遮蔽計算ソフトウェアFLEXDOSE（久保田）  
FLEXDOSE™ (FLEXible radiation DOSE evaluation system) パンフレット
- ④薄い遮蔽体と後方散乱影響（延原）
- ⑤PHITS互換ジオメトリ解釈ソフトの開発（大西）
- ⑥放射線の飛跡を.vtk形式（ParaView）で取り出すusrally.f の例題（松田）
- ⑦簡易遮蔽解析コードレビューWG名簿（平尾）
- ⑧アクションプラン（平尾）

議事概要：

配布資料①に基づき、本日の議事次第が平尾より示された。  
配布資料の確認が松田より行われた。  
配布資料②に基づき、前回会合の概要が松田より示された。  
配布資料③に基づき、久保田より株テプコシステムズの開発した簡易遮蔽計算ソフトウェアFLEXDOSEの実演が行われ、概要が示された。  
配布資料④に基づき、延原よりアクションプランの「（MFPPの小さい）薄い遮蔽体のBF選択」および「MC法に基づくBFの算出」に関する検討結果の報告があった。  
配布資料⑤に基づき、大西より自作のジオメトリ解釈ソフトの概要が示された。  
配布資料⑥に基づき、松田よりPHITSユーザー定義タリーの紹介があった。

配布資料⑦、⑧は、本会合からの新規参加者のために配布された。  
次回のWG会合は7月18～21日で調整する。

文責：松田

確定：2017年6月30日

簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録

日時：2017年7月20日（木） 9:30～12:00  
場所：秋葉原ダイビル18階共用会議室（秋葉原）

出席者（敬称略）：

平尾（海技研）、坂本浩（日立GE株）、坂本幸（株アトックス）、  
根本（株VIC）、黒澤（株VIC）、松居（株テブコシステムズ）、  
岩井（TNS株）、助川（量研機構）、廣内（株東芝）、吉田（原安シス研）、  
柳田（株IHI）、近内（海技研）、大西（海技研）、猪狩（MRA株）、  
松田（原子力機構）

配布資料：

- ①第6回 日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析WG会合 議事次第（松田）
- ②簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録（松田）
- ③薄い遮蔽体のBF選択による線量評価への影響（追加検討）（松居）
- ④原子力学会2017年秋の大会「薄い遮蔽体と後方散乱」発表について（岩井）
- ⑤簡易遮蔽計算コードミニ講習会（坂本幸）
- ⑥放射線遮蔽の安全解析に係る喫緊の課題について（平尾）
- ⑥-1 今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針（吉田）
- ⑥-2 平成29年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費の採択結果について（吉田）
- ⑥-3 国産安全解析コード開発戦略検討 報告書 - もくじ -（吉田）
- ⑥-4 世界に取り残されつつある放射線輸送計算コード開発体制（吉田）

議事概要：

配布資料①に基づき、本日の議事次第が平尾より示された。  
配布資料の確認が松田より行われた。  
配布資料②に基づき、前回会合の概要が松田より示された。  
配布資料③に基づき、松居より「薄い遮蔽体と後方散乱影響」の追加検討の結果（FLEXDOSE、MCNP5及びQAD-CGGP2R）が示された。  
FLEXDOSEのBF自動判定機能は、「放射線施設のしゃへい実務マニュアル」の記述を基に機能実装されたものである。  
この記述は、多重層問題に対しQADは使用できないことが前提となっているため、記述の修正が必要であろうとの意見が出た。  
0.1 MeV光子の単層の結果で、QADとMCNPに差異があることについて、低エネルギー光子のBFの再確認が必要であろうとの意見が出た。  
配布資料④に基づき、岩井より「薄い遮蔽体と後方散乱影響」の追加検討の結果（PHITSのタリーによる差異、BFの補間方法の違い）が示された。  
有限媒質係数の使用について意見が出た。  
配布資料⑤に基づき、坂本幸より簡易遮蔽計算コードミニ講習会の開催に関するアンケート結果、実習の概要等が示された。  
配布資料⑥に基づき、平尾より原子力規制庁への相談内容と、そのときの相談メモが示された。  
本WGの活動を含めて、簡易遮蔽解析コードの抱える課題や今後の展開をまとめ、庁内説明用に耐えうる資料を作成していくことが重要であるとの見解が示された。  
参考資料として吉田より配布資料⑥-1～4が配布された。  
簡易遮蔽解析コードの抱える課題に対する情報発信の必要性が示された。

次回のWG会合は9月末で調整する。

※ WG会合開催場所の提供をお願いいたします。（松田）

文責：松田  
確定：2017年9月7日



## 簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録

日時：2017年9月29日（金） 13:30～17:30

場所：（株）アトックス技術開発センター会議室（千葉県柏市）

出席者（敬称略）：

平尾、大西（海技研）、松居（株テプコシステムズ）、吉田（原安シス研）、  
助川（量研機構）、根本、黒澤（株VIC）、猪狩（MRA株）、柳田（株IHI）、  
延原、岩井（TNS株）、坂本幸、河野、永沢、鶴巻（株アトックス）、  
松田（原子力機構）

配布資料：

- ①第7回 日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析WG会合 議事次第（松田）
- ②簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録（松田）
- ③ダクト簡易計算の応用例について（助川）
- ④ダクトのある遮蔽壁に対する簡易線量率計算の応用（平尾）
- ⑤簡易遮蔽解析コード開発作業について（平尾）
- ⑥2017年秋の大会 延原発表についての質疑応答及び発表後の質疑について（延原）
- ⑦タスク4「薄い遮蔽体」の今後の活動について（延原）
- ⑧Joint Report of ICRU and ICRP: Operational Quantities for External Radiation Exposure 実用量の定義変更について（近内）
- ⑨Operational Quantities for External Radiation Exposure（近内）  
アトックス技報 ATOX Technical Report No.8 2016 (ISSN 2185-5420)

議事概要：

配布資料①に基づき、本日の議事次第が平尾より示された。

配布資料の確認が松田より行われた。

配布資料②に基づき、前回会合の概要が松田より示された。

坂本幸の進行により（株）アトックス技術開発センターの施設見学を実施した。

配布資料③に基づき、現在直面しているダクト・迷路の簡易計算についての課題  
に関して、助川より概要説明があった。

配布資料④に基づき、遮蔽ハンドブック応用編の「5.5 ストリーミング実験」  
の原稿案について、平尾より概要説明があった。（出版前につき取扱注意）

※ 原稿案に対するコメントは平尾まで

配布資料⑤に基づき、新たな簡易遮蔽解析コードの開発予算獲得に関する  
これまでの動向と今後の方針について、平尾より説明があった。

これに関連した大きなアクションとして、

- ・新たな簡易遮蔽解析コードの開発目的と必要性に関して学会誌へ寄稿
- ・「平成30年度放射線対策委託費」への応募（重点テーマが合致すれば）

の2つが挙げられた。

「平成30年度放射線対策委託費」の重点テーマについては、10月3日開催予定の

「平成29年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業費）

第6回研究推進委員会」において議題となっているとの情報が提供された。

上記に係るマイルストーンについては前倒しが必要かもしれない。

配布資料⑥に基づき、「薄い遮蔽体と後方散乱に関する予備調査」に関する

日本原子力学会発表時の質疑応答等について、延原より説明があった。

1 mfp以下のビルドアップ係数については、配布資料⑦で示されたように

近似式の系統調査に基づく補正係数の検討や、詳細計算に基づくデータの補足

・整備などの今後の活動方針が延原より示された。

過去3年の（株）アトックス技術開発センターでの遮蔽計算業務について、

坂本幸より紹介があった。

配布資料⑧、⑨に基づき、実用量の定義変更（Joint report of ICRU and ICRP）

に関して、平尾より説明があった。

本来のアブストラクト及び要約だけでは理解が難しいため、これまでに提出された  
Francois 氏のコメント（#1）の方が要約理解の助けになることが補足された。

次回のWG会合は11月末～12月頭で調整する。

※ WG会合開催場所の提供をお願いいたします。（松田）

文責：松田

確定：2017年12月4日

簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録

日時：2017年12月6日（水） 13:30～17:30

場所：山王パークタワー MRA株会議室（東京都千代田区）

出席者（敬称略）：

平尾、大西、近内（海技研）、助川（量研機構）、松居（株テブコシステムズ）、  
坂本幸（株アトックス）、延原（TNS株）、吉田（原安シス研）、  
猪狩（MRA株）、柳田（株IHI）、松田（原子力機構）

オブザーバー：

後神（原子力規制庁）

配布資料：

- ①第8回 日本原子力学会放射線工学部会 簡易遮蔽解析WG会合 議事次第（松田）
- ②簡易遮蔽解析コードレビューWG会合 議事録（松田）
- ③点減衰核積分法コードのカーネル設計について（根本）
- ④簡易遮蔽解析コード開発作業について（その2）（平尾）
- ⑤放射線安全規制研究推進事業 研究計画書（平尾）
- ⑥薄い遮蔽体と後方散乱影響その2（延原）
- ⑦ビルドアップ係数の比較（松居）
- ⑧ストリーミング簡易評価方法の検討（助川）
- ⑨原子力の安全性向上に資する技術開発費補助金（吉田）  
エム・アール・アイ リサーチアソシエイツ株式会社（業務案内）

議事概要：

配布資料①に基づき、本日の議事次第が平尾より示された。

配布資料の確認が松田より行われた。

配布資料②に基づき、前回会合の概要が松田より示された。

株VIC根本が急遽WG会合不参加となったため、配布資料③に基づき、  
点減衰核積分法コードの概要設計に関する検討資料について、  
平尾より説明があった。

配布資料④に基づき、新たな簡易遮蔽解析コードの開発予算獲得に関する  
これまでの動向と今後の方針について、平尾より説明があった。

配布資料⑤は、放射線安全規制研究推進事業における昨年度の応募用研究  
計画書フォーマットの各項目を試しに記載してみたものである。

応募にあたっては、各項目のブラッシュアップが必須であるため、各自、  
内容の確認及び検討・修正をお願いする。

配布資料⑥に基づき、「薄い遮蔽体と後方散乱影響その2」として、  
ビルドアップ係数の物質・エネルギー依存性に関する傾向を視覚的に把握  
するための検討と、その結果の一例が延原より示された。

また、配布資料⑦に基づき、～数 mfpまでの薄い遮蔽体に対するビルド  
アップ係数とモンテカルロ計算による結果との比較が松居より示された。  
MCNPによるビルドアップ係数が 1.0 以下になるものについては、  
手法を変更した再評価が依頼された。

配布資料⑧に基づき、直面していたダクト・迷路の評価における簡易式  
を用いた評価方法の検討結果について、助川より説明があった。

この評価に用いたPHITS のインプットは、電子データで配布・共有する。

配布資料⑨に基づき、開発予算獲得のための応募先の一つとしての  
「原子力の安全向上に資する技術開発費補助金」について、吉田より  
概要説明があった。

MRA株の業務・サービスについて、猪狩より紹介があった。

11月に開催されたラドネット研究会について、坂本幸より紹介があった。

本WGの活動紹介を含む発表資料は、電子データで配布・共有する。

本WGの開催期間は平成29年12月までであるため、本WGの開催期間を  
更新するための手続きを実施する旨、平尾より説明があった。

次回のWG会合は未定。

ただし、必要に応じて開催（簡易遮蔽解析コードの開発予算獲得に関して）

文責：松田

確定：2017年12月20日

## 付録Ⅲ 原子力学会 $\gamma$ 線ビルドアップ係数標準データに対する調査結果について

本付録は、QAD-CGGP2 コード等に組み込まれている GP 近似式パラメータにより算出した  $\gamma$  線ビルドアップ係数が、基になっている日本原子力学会の  $\gamma$  線ビルドアップ係数標準と比較して、GP 近似式の有効性と改良の余地があるのかを、遮蔽厚、入射  $\gamma$  線エネルギー及び遮蔽物質に関して調査した結果である。

それに先立ったデータの調査において下記の 2 点で修正が必要なことを見出した。本 WG としては、早期に欠落データ及び訂正データを標準データ利用者に通知するか、次回の  $\gamma$  線ビルドアップ係数標準の改定時に修正することを推奨する。

### 1. 要修正点

原子力学会  $\gamma$  線ビルドアップ係数データの完備性という観点で、物質毎の  $\gamma$  線エネルギーと各種線量に対する  $\gamma$  線ビルドアップ係数データの有無を確認した（表 1 参照）。この結果から下記のことが明らかになった。

①ウランウムの照射線量（exposure）に対する 0.6MeV のデータが欠落していた。同データに対する GP パラメータは存在し、他のエネルギーでは 5 種類の線量（照射線量、吸収線量、AP 照射時の実効線量、ISO 照射時の実効線量、周辺線量当量(1cm 線量当量)）に対するデータは存在する。

また、次項の GP 近似式の精度確認に先立って行なった GP パラメータの確認において下記のことが明らかになった。

②原子力学会  $\gamma$  線ビルドアップ係数標準において、

タングステンの照射線量に対する  $\gamma$  線ビルドアップ係数の GP パラメータにおいて、0.15MeV の最大値を示す厚さ（Max at mfp）の値 0 となっているが、100mfp の間違いである。

### 2. GP 近似式による $\gamma$ 線ビルドアップ係数の再現性チェック

#### 2.1 目的

$\gamma$  線ビルドアップ係数に対する GP 近似式の有効性を調べ、どういう遮蔽物質で、どのエネルギー領域でフィッティングが悪化するのかを調べ、GP 近似式改良のターゲットを絞ることにした。

(1)GP 近似式が遮蔽厚の小さい時にフィッティングが悪化することがあったので、0.5mfp 若しくは 1mfp において最大誤差が 5%を超えるケースを選別する。

(2)最大誤差が標準偏差の2倍を超えるケースを選別する。この数値が大きい場合は、特定の1点のデータに疑義がある場合が考えられる。

(3)0mfp、0.5mfp、1.0mfp でプロットした際に、0.5mfp の値が 0mfp ( $\gamma$ 線ビルドアップ係数は1.0) と 1mfp の直線内挿のどちらにあるか。実際の値と内挿値の差異が20%を超えているかを確認する。

上にある場合：U

下にある場合：L

(4)GP法による値  $B_{GP}$  と 1mfp での  $\gamma$ 線ビルドアップ係数  $B_1$  の値がどの程度の差異かについて確認する。

$B_{GP}/B_1$  が 1.1 を上回る場合：U

$B_{GP}/B_1$  が 0.95 を下回る場合：L

## 2.2 結果

結果を表2に示し、その状況を以下に要約する。

- ・多少ずれているように見えるが、100mfp までのデータに対して20%程度の差異であり、かなり合っている。ANISI/ANS-6.4.3(1990)では40mfp のデータに対して10%程度であった。
- ・K-X線が有意になる Rb 以降で(3)及び(4)で一致度が良くない傾向がある。

## 2.3 考察

・減衰係数も PHOTX (蛍光 X 線の断面積分を含む) のデータを共有して実施した方が良い。

・原子力学会の  $\gamma$ 線ビルドアップ係数標準は全て IE 法で整備したものである。一方、原子力安全技術センターの遮蔽計算実務マニュアルの一部のデータ (タングステンのデータ) は、EGS4 コードで計算したものであるが、蛍光 X 線の効果が反映しておらず、今後の改定では配慮する必要がある。

・原子力学会標準であるので、改定に際しては基盤部の審査チェックを受ける必要がある。今回は個人的に依頼し、チェックをしてもらった。

次回もデータチェックをきちんと実施する必要があるが、その枠組みをどうするか(手分けする、W チェックする等)考える必要がある。

表1 日本原子力学会の $\gamma$ 線ビルドアップ係数標準データの完備性チェック

物質	基本エネルギー (注1) (MeV)	データ 完備性 (注2)	備考	追加エネルギー (MeV)	データ 完備性
ベリリウム	15~0.015	○			
ボロン	15~0.015	○			
炭素	15~0.015	○			
窒素	15~0.015	○			
酸素	15~0.015	○			
ナトリウム	15~0.015	○			
マグネシウム	15~0.015	○			
アルミニウム	15~0.015	○			
シリコン	15~0.015	○			
リン	15~0.015	○			
イオウ	15~0.015	○			
アルゴン	15~0.015	○			
カリウム	15~0.015	○			
カルシウム	15~0.015	○			
鉄	15~0.015	○			
銅	15~0.015	○			
ルビジウム	15~0.015	○		0.025, 0.019, 0.018, 0.017, 0.016	○
モリブデン	15~0.015	○		0.035, 0.028, 0.026, 0.024, 0.022, 0.021, 0.019	○
スズ	15~0.015	○		0.09, 0.075, 0.070, 0.055, 0.045, 0.035, 0.029	○
ランタン	15~0.015	○		0.09, 0.075, 0.070, 0.055, 0.048, 0.046, 0.044, 0.042, 0.039, 0.038	○
ガドリニウム	15~0.015	○		0.09, 0.075, 0.070, 0.065, 0.054, 0.052, 0.051	○
タングステン	15~0.015	○		0.14, 0.13, 0.12, 0.11, 0.09, 0.075, 0.070, 0.069,	○
鉛	15~0.03	○		0.16, 0.14, 0.13, 0.12, 0.11, 0.09, 0.089, 0.088	○
ビスマス	15~0.03	○		0.16, 0.14, 0.13, 0.12, 0.11, 0.095, 0.092, 0.091, 0.09	○
ウラニウム	15~0.03	△	0.6MeV Exposure 欠落	0.25, 0.19, 0.18, 0.17, 0.16, 0.14, 0.13, 0.12, 0.116, 0.115	○
水	15~0.015	○			
普通コンクリート	15~0.015	○			
空気	15~0.015	○			

(注1) 15, 10, 8, 6, 5, 4, 3, 2, 1.5, 1, 0.8, 0.6, 0.5, 0.4, 0.3,

0.2, 0.15, 0.1, 0.08, 0.06, 0.05, 0.04, 0.03, 0.02, 0.015

(注2) ○はexposure、absorbed dose、E(AP)、E(ISO)及びH\*(10)に対する  
データが完備していることを示す。

△は一部データが欠落していることを示す。(詳細は備考参照)









表 2(4/7) 日本原子力学会  $\gamma$  線ビルドアップ係数標準における照射線量に対するデータのチェック

- (1) Max.Err > 5% at 0.5 or 1 mfp
- (2)  $\delta_{\max} / \delta_{\text{av}} > 2.0$
- (3)  $B_{0.5} / (1+B_1) * 2 > 1.2$  or  $< 0.8$
- (4)  $B_{\text{GP}} / B_1 > 1.1$  or  $< 0.95$

物質	E(MeV)	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	0.025	0.02	
ルビジウム	(1)																									○	○
	(2)																										
	(3)																					U	U	U	U		
	(4)																								U	U	
物質	E(MeV)	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.08	0.06	0.05	0.04	0.035	0.03	0.028	
モリブデン	(1)																										
	(2)																			○					○		
	(3)																				U	U	U	U			
	(4)																								U		
物質	E(MeV)	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.09	0.08	0.07	0.06	0.055	0.05	0.045	
スズ	(1)				○	○																			○		○
	(2)																							○			
	(3)																					U	U	U	U		
	(4)																								U	U	U

物質	E(MeV)	0.019	0.018	0.017	0.016	0.015		
ルビジウム	(1)	○						
	(2)							
	(3)							
	(4)							
物質	E(MeV)	0.026	0.024	0.022	0.021	0.02	0.019	0.015
モリブデン	(1)		○					
	(2)							
	(3)							
	(4)							
物質	E(MeV)	0.04	0.035	0.03	0.029	0.02	0.015	
スズ	(1)	○						
	(2)							
	(3)							
	(4)							

→

表 2(5/7) 日本原子力学会  $\gamma$  線ビルドアップ係数標準における照射線量に対するデータのチェック

- (1) Max.Err > 5% at 0.5 or 1 mfp
- (2)  $\delta_{\max} / \delta_{\text{av}} > 2.0$
- (3)  $B_{0.5} / (1+B_1) * 2 > 1.2$  or  $< 0.8$
- (4)  $B_{\text{GP}} / B_1 > 1.1$  or  $< 0.95$

物質	E(MeV)	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.09	0.08	0.07	0.06	0.055	0.05	0.048	
ランタン	(1)			○								○			○									○			
	(2)											○			○												
	(3)																										
	(4)																						U	U			
物質	E(MeV)	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.09	0.08	0.075	0.07	0.065	0.06	0.058	
ガドリニウム	(1)		○		○																	○		○			
	(2)																										
	(3)																										
	(4)																					U	U	U	U		
物質	E(MeV)	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.1	0.09	0.08	0.075	
タングステン	(1)			○		○																			○		○
	(2)														○												
	(3)																										
	(4)																							U	U		

物質	E(MeV)	0.046	0.044	0.042	0.04	0.039	0.038	0.03	0.02	0.015
ランタン	(1)	○			○	○				
	(2)						○			○
	(3)									
	(4)									
物質	E(MeV)	0.056	0.054	0.052	0.051	0.05	0.04	0.03	0.02	0.015
ガドリニウム	(1)	○			○					
	(2)							○		
	(3)									
	(4)									
物質	E(MeV)	0.07	0.069	0.06	0.05	0.04	0.03	0.02	0.015	
タングステン	(1)	○								
	(2)		○	○				○		
	(3)									
	(4)									

→

表 2(6/7) 日本原子力学会  $\gamma$  線ビルドアップ係数標準における照射線量に対するデータのチェック

- (1) Max.Err > 5% at 0.5 or 1 mfp
- (2)  $\delta_{\max} / \delta_{\text{av}} > 2.0$
- (3)  $B_{0.5} / (1 + B_1) * 2 > 1.2$  or  $< 0.8$
- (4)  $B_{\text{GP}} / B_1 > 1.1$  or  $< 0.95$

物質	E(MeV)	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.1	0.09	0.089
鉛	(1)				○															○						
	(2)		○														○									
	(3)																			U	U	U	U			
	(4)																			U	U	U	U			
物質	E(MeV)	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12	0.11	0.1	0.095	0.092
ビスマス	(1)			○	○	○														○	○					○
	(2)																									
	(3)																									
	(4)																			U	U	U	U			
物質	E(MeV)	15	10	8	6	5	4	3	2	1.5	1	0.8	0.6	0.5	0.4	0.3	0.25	0.2	0.19	0.18	0.17	0.16	0.15	0.14	0.13	0.12
ウランウム	(1)				○																					
	(2)																	○								
	(3)																									
	(4)																			U						

物質	E(MeV)	0.088	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03		
鉛	(1)								
	(2)			○					
	(3)								
	(4)								
物質	E(MeV)	0.091	0.09	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03	
ビスマス	(1)	○							
	(2)				○		○		
	(3)								
	(4)								
物質	E(MeV)	0.116	0.115	0.1	0.08	0.06	0.05	0.04	0.03
ウランウム	(1)	○							
	(2)								
	(3)								
	(4)								

→

