

令和 3 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費
(ICRP2007 年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の
適切な見直しに関する研究) 事業

成果報告書

令和 4 年 3 月

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

本報告書は、国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所が実施した「令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究）事業の成果をとりまとめたものです。

目 次

1 事業の概要.....	1
1.1 事業の目的.....	1
1.2 実施項目.....	1
1.3 実施体制.....	2
1.4 実施期間.....	3
2 新勧告取入れによる遮蔽線量評価法の見直し手順の開発.....	4
2.1 遮蔽計算用データの見直し検討項目.....	4
2.2 遮蔽計算用データの作成検討.....	5
2.2.1 遮蔽材料.....	5
2.2.2 計算する線量種類.....	5
2.2.3 遮蔽計算用データベースのテーブル設計.....	6
2.3 遮蔽計算用データの妥当性確認.....	8
2.4 光核反応に関するヒアリング調査.....	10
参考文献.....	10
3 遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究.....	11
3.1 遮蔽線量評価法の適用性拡張検討項目.....	11
3.2 高エネルギーへの範囲拡張.....	11
3.2.1 遮蔽材の光中性子発生量の目安.....	11
3.2.2 光核反応が線量計算に与える影響の例.....	12
3.3 二重層遮蔽線量計算.....	16
3.3.1 二重層遮蔽の概念と遮蔽計算用データの定義.....	16
3.3.2 二重層遮蔽の遮蔽厚さによる線量変化、及び遮蔽計算用データの例.....	18
3.3.3 二重層遮蔽計算用データのまとめ方と線量計算式.....	21
3.3.4 二重層遮蔽のエネルギーによる線量変化の例.....	21
3.4 スラブ遮蔽に対する斜め透過線量補正.....	23
3.4.1 スラブ遮蔽の斜め透過の概念と対応意義.....	23
3.4.2 スラブ遮蔽の斜め透過の角度による線量変化.....	24
3.4.3 スラブ遮蔽の斜め透過補正データのまとめ方と線量計算式.....	26
3.5 新勧告を反映した遮蔽線量計算コードの開発.....	28
3.5.1 コード開発の概要.....	28
3.5.2 今年度実施したコード開発項目.....	28
3.5.3 計算結果の妥当性確認.....	31
3.6 遮蔽計算コードのレポート作成で求められる表示項目の調査.....	33
参考文献.....	35
4 新勧告取入れの運用に資するガイドラインの検討.....	36
4.1 簡易遮蔽計算コードの利用、及び新勧告対応に係る実態調査.....	36
4.1.1 調査目的と前年度の経緯.....	36
4.1.2 今年度の調査中止と影響について.....	36
4.2 実用量の定義変更に関するヒアリング調査.....	36
4.3 新勧告取入れによる遮蔽線量計算・安全評価実務への影響調査.....	37
4.4 ICRP2007年勧告に基づく γ 線遮蔽線量計算ガイドラインの作成.....	38
参考文献.....	41

5	事業の進捗管理、及び人材育成活動	42
5.1	研究班会合の実績	42
5.2	研究レビュー委員会	43
5.2.1	委員会趣旨と委員構成	43
5.2.2	開催実績と議事	44
5.2.3	アンケート調査	45
5.3	ヒアリング調査	46
5.4	成果発表	47
5.5	人材育成活動	47
	参考文献	48
6	まとめ	49

付 録

- ・付録I ビルドアップ係数の計算方法
- ・付録II 遮蔽計算用データベースのテーブル設計
- ・付録III 遮蔽計算用データの妥当性確認要領
- ・付録IV 遮蔽線量計算コードの開発、及び妥当性確認の詳細

別冊「ICRP2007年勧告等に基づく γ 線遮蔽線量計算ガイドライン」

1 事業の概要

1.1 事業の目的

原子力施設や放射線施設においては、放射線防護に係る法令の遵守を確実にするため、放射線の遮蔽安全評価が実施される。本研究では、今後の ICRP2007 年勧告等の国内法令取入れにおける外部被ばく実効線量換算係数等の改訂に対応するため、遮蔽安全評価法と使用データを適切に見直す手順を検討し、放射線規制の効率的な運用に資する技術ガイドラインを作成する。

本研究で作成する技術ガイドラインは、施設の遮蔽安全評価に際して、許認可の申請者自らが本ガイドラインを参照して勧告の取り入れを行うことを可能とすることを目指すとともに、一方で安全審査において申請者が申請に使用する遮蔽安全評価法の妥当性確認に資することを旨とする。

技術ガイドラインに従い、線量を分かりやすく迅速に計算できる簡易遮蔽計算コードを開発し、代表的な例題に対して、文献値又は同種コードとの比較検証を行うことで、遮蔽安全評価の見直しが適切かつ妥当に行われていることを確認する。

また、遮蔽安全評価技術のレベル維持のための若手人材の育成を図る。

1.2 実施項目

上記の目的を達成するため、2021 年（令和 3 年）度は次に示す項目を実施する。なお、ICRP2007 年勧告を含む、放射線遮蔽線量評価に係る最新の勧告を総称して「新勧告」と呼ぶ。

(1) 新勧告取入れによる遮蔽線量評価法の見直し手順の開発

前年度の事業で決定した遮蔽線量評価法の見直し範囲に従い、国内で利用される遮蔽線量計算用データに対して、引き続き新勧告取入れによる見直しの手順とその妥当性を検討する。それらの検討に基づき、実用性の高い材料に対して、実際に新勧告を反映した遮蔽線量計算用データを外注作業により整備する。

(2) 遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究

最新の知見に基づく遮蔽安全評価の適用性拡張を行うため、高エネルギー γ 線による光核反応の中性子寄与、二重層遮蔽、及びスラブ遮蔽の斜め透過に係る線量評価法の検討を行う。前年度に引き続き、(1)で整備した遮蔽計算用データを組み込み、適用性を拡張した遮蔽計算コードを開発し、適切な例題を用いて従来との比較を行い、本研究で実施した見直しの妥当性、及び見直しを与える影響を確認する。

(3) 新勧告取入れの運用に資するガイドラインの検討

前年度に参加予定であった遮蔽国際会議が 2021 年 9 月開催に延期されたため、同会議に参加して海外の専門家に新勧告取入れの運用についてヒアリングを行う。最後に、本研究で見直しを行った遮蔽計算用データと遮蔽計算法の拡張について成果をまとめて、新勧告取入れの運用に資するガイドラインを作成する。

(4) 成果の公表

原子力規制庁が開催する成果報告会において、上記（1）から（3）の成果を報告する。また、日本原子力学会等において成果の外部発表を行う。

(5) 事業の進捗管理等

本事業のプログラムオフィサー（以下、POと呼ぶ。）らに対し、研究班会合及び月報を通じて、事業の進捗を報告するとともに必要な助言を仰ぐ。特に、事業実施内容について疑問や変更すべき事項が生じた場合、報告して都度助言を仰ぐ。

さらに、研究協力者らを委員とする研究レビュー委員会を設置し、放射線安全・放射線防護に係る各位の専門の立場から、本事業について幅広く意見を求める。

遮蔽安全評価技術のレベル維持のため、遮蔽安全評価に携わる若手が参加する学会ワーキンググループを通じて人材育成活動を行う。

1.3 実施体制

図 1-1 に事業の実施体制を、研究担当者らの役割とともに示す。

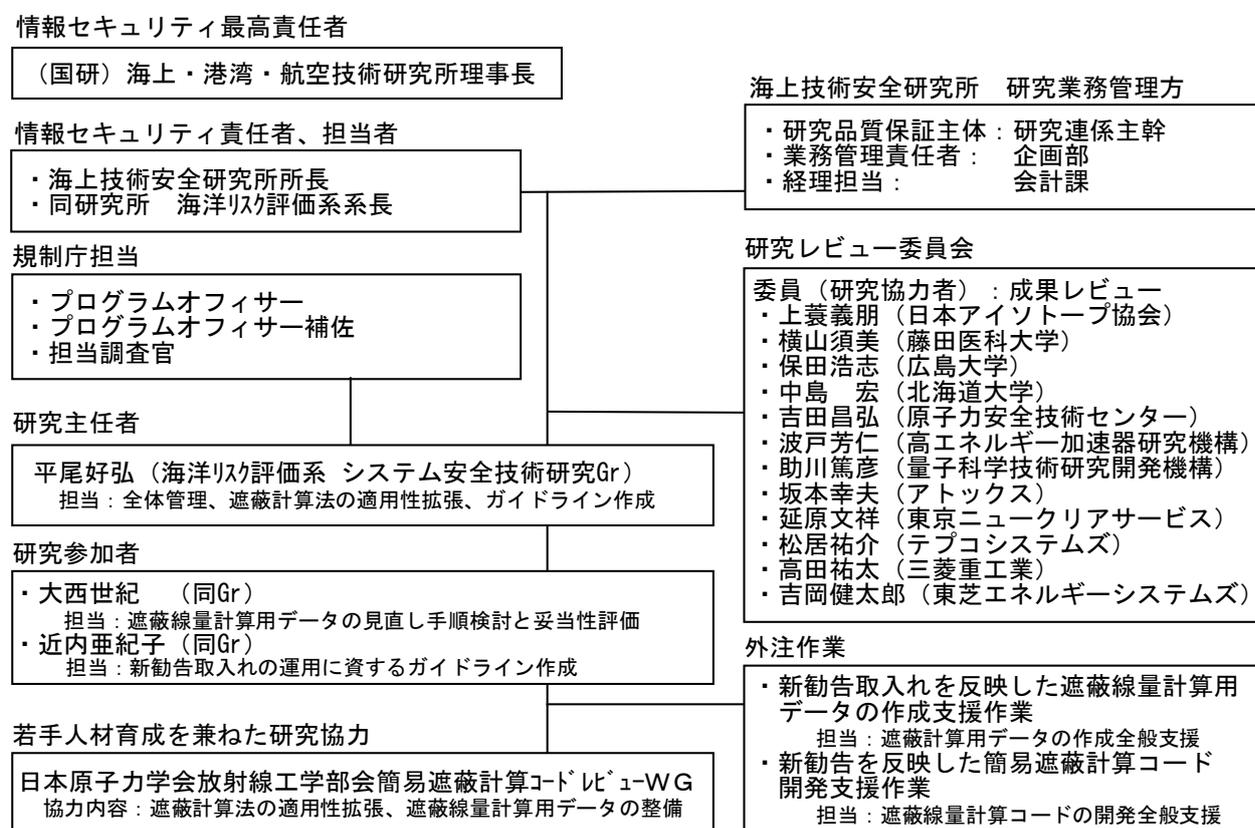


図 1-1 事業実施体制

2 新勧告取入れによる遮蔽線量評価法の見直し手順の開発

2.1 遮蔽計算用データの見直し検討項目

前年度調査を踏まえて、表 2-1 に今年度実施した遮蔽計算用データの見直し範囲と検討項目をまとめて示す。次節以降、各項目について前年度に検討した所からの進捗と新たな成果について述べる。同表の最右列に、各項目に対する本報告書の記載箇所（章節項）を示す。

表 2-1 新勧告対応で求められる遮蔽計算用データの見直し範囲・検討項目

検討項目	小項目	記載箇所
遮蔽材料	<ul style="list-style-type: none">・材料の組成・密度の見直し、根拠・材料の減衰係数・材料のビルドアップ係数	2.2.1
線量種類の出力	<ul style="list-style-type: none">・実効線量 (照射条件 6 種)・皮膚等価線量 (AP 照射、男女別)・眼の水晶体等価線量 (AP 照射)・実用量の 3mm 線量当量 : Hp(3)・空気カーマ・1cm 線量当量 H*(10)の追加	2.2.2
遮蔽計算用データベースのテーブル設計	<ul style="list-style-type: none">・ビルドアップ係数データ・スラブ遮蔽の斜め透過線量補正データ・出力する線量種類について・その他のデータファイル	2.2.3
遮蔽計算用データの妥当性確認	本研究で作成したビルドアップ係数を算出するために用いた MCNP コードの入出力の妥当性を確認	2.3
光核反応に関するヒアリング調査	光核反応による中性子生成について、関連する実験と解析を行っている専門家に、光核反応の理論計算の不確かさと実測との差異についてヒアリングを実施	2.4

2.2 遮蔽計算用データの作成検討

2.2.1 遮蔽材料

前年度報告書[2-1]3.2.1項で示した検討に基本的に従った。表 2-2 に、今年度の検討で変更された箇所、又は前年度に引き続きデータ整備をすすめた所を示す。遮蔽計算用データ算出法と線量種類については、詳細を 付録 I 「ビルドアップ係数の計算方法」に添付した。

表 2-2 遮蔽材料に係る遮蔽計算用データの検討

検討小項目	今年度の検討内容	成果の詳細
材料の組成・密度の見直し、根拠	<ul style="list-style-type: none"> ・コンクリートについては、原子力学会標準が確定しなかったため、従来の ANL-5800 ベースで作成した（前年度報告書表 3-3 のコンクリートから 9 を選択）。 ・土壌については、国内の慣例を参考に、密度を $1.5(\text{g}/\text{cm}^3)$ で作成した（同表 3-3 の 16 番）。 ・ステンレスについては、鉄のデータで代用できるとの認識から特に作成しなかった。（同表 3-3 の 17 番）。 	前年度報告書付録 VI 「組込材料の組成・密度決定の根拠」
材料の減衰係数	前年度の検討では、既往データとの連続性を重んじて干渉性（コヒーレント）散乱を考慮しない方針であったが、MCNP 線量計算では光子相互作用を全て考慮した断面積を用いることから、減衰係数データの方も干渉性散乱を含める形で作成し直した。	<ul style="list-style-type: none"> ・付録 I 「ビルドアップ係数の計算方法」 ・前年度報告書 4.2.4 項
材料のビルドアップ係数	前年度の検討により、MCNP 6.2 を用いて光核反応を考慮し、線量種類毎にビルドアップ係数を作成し直した。	付録 I 「ビルドアップ係数の計算方法」

2.2.2 計算する線量種類

前年度報告書 3.2.2 項で示した検討に基本的に従った。表 2-3 に、今年度の検討で変更された箇所、又は前年度に引き続きデータ整備をすすめた所を示す。

表 2-3 線量種類の出力に係る遮蔽計算用データの検討

検討小項目	今年度の検討内容	成果の詳細
<ul style="list-style-type: none"> ・実効線量 ・皮膚等価線量 ・眼の水晶体等価線量 ・空気カーマ 	前年度と同様の計算を MCNP6.2 を用いて改めて行い、線量種類に対するビルドアップ係数データを整備する。	付録 I 「ビルドアップ係数の計算方法」
3mm 線量当量 Hp(3)	前年度の研究レビュー委員会において、眼の水晶体被ばく評価の参考として指摘のあった実用量 Hp(3) のデータを整備する。	<ul style="list-style-type: none"> ・前年度報告書 5.2 節 ・付録 I 「ビルドアップ係数の計算方法」
1cm 線量当量 H*(10) の追加	輸送法令における線量管理、測定による実効線量の評価等によく使用される 1cm 線量当量のデータを追加した。前年度、整備対象から外す方向で検討していたが、委員らの意見により方針を変更した。	<ul style="list-style-type: none"> ・前年度報告書 3.2.2 項参照 ・付録 I 「ビルドアップ係数の計算方法」

2.2.3 遮蔽計算用データベースのテーブル設計

前年度報告書 3.2.3 項で示した検討に基本的に従い、作成した遮蔽計算用データをテーブルに格納して計算コードで利用できる形に整えた。表 2-4 に、今年度の検討で変更された箇所を示す。テーブル設計の詳細については、前年度付録 VI 「遮蔽計算用 DB のテーブル設計」の改訂版を 付録 II 「遮蔽計算用データベースのテーブル設計」に添付した。

各データの例示については、基本的に前年度報告書 3.3 節で示したとおりである。部分的な改訂については、付録 II を参照のこと。

表 2-4 遮蔽計算用データベースのテーブル検討

検討小項目	今年度の検討内容	成果の詳細
ビルドアップ係数 (BF)データ	前年度の検討では、1次 γ 、光中性子、2次 γ の寄与を分けて各BFデータを整備する計画であったが、値の整合性の問題が発生したため、1次 γ 、光中性子、全 γ (1次 γ +2次 γ)の各BFデータを格納するテーブルを整備した。線量計算上の支障はない。将来の整備を見据えて2次 γ を分離して格納できる場所は残した。	付録II「遮蔽計算用DBのテーブル設計」
スラブ遮蔽の斜め透過線量補正データ	スラブ遮蔽を透過線が斜めに横切る場合に、ビルドアップ係数値を補正するためのデータテーブルを追加した。現状、遮蔽材は鉄、鉛、コンクリート、また線量種類はE(AP)に対応した。	付録II「遮蔽計算用DBのテーブル設計」
出力する線量種類について	1cm線量当量H*(10)に対するデータテーブルを追加した。	付録II「遮蔽計算用DBのテーブル設計」
その他のデータファイル	線量計算で得られた空気カーマから照射線量への換算に用いる(1-g)補正係数データの整備を中止した。昨今、測定の方で照射線量を使用する場面が減っていることによる。	付録II「遮蔽計算用DBのテーブル設計」

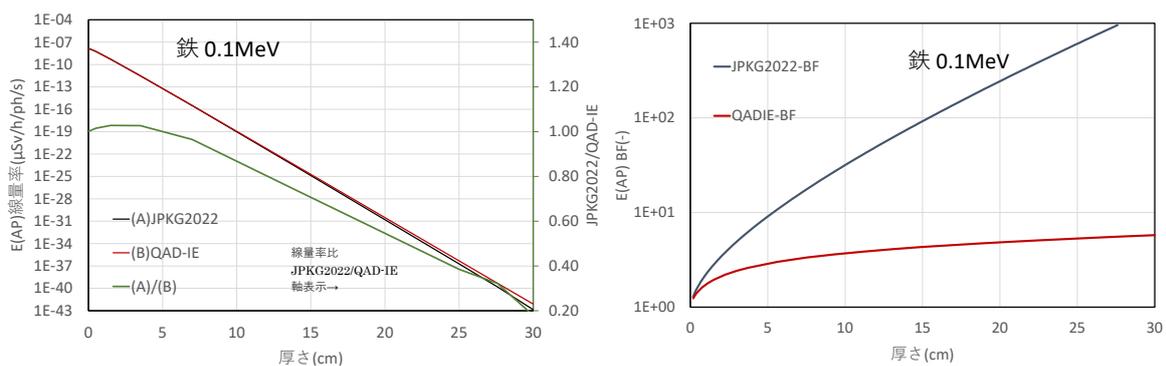
2.3 遮蔽計算用データの妥当性確認

本研究で作成したビルドアップ係数を算出するために用いた MCNP コードの入出力の妥当性を確認した。確認の結果、明らかな間違いや異常が見つかった場合は、原因を調査して対応した。

整備した遮蔽計算用データの妥当性確認の要領及び確認作業の概要を示した文書を付録 III 「遮蔽計算用データの妥当性確認要領」に添付する。

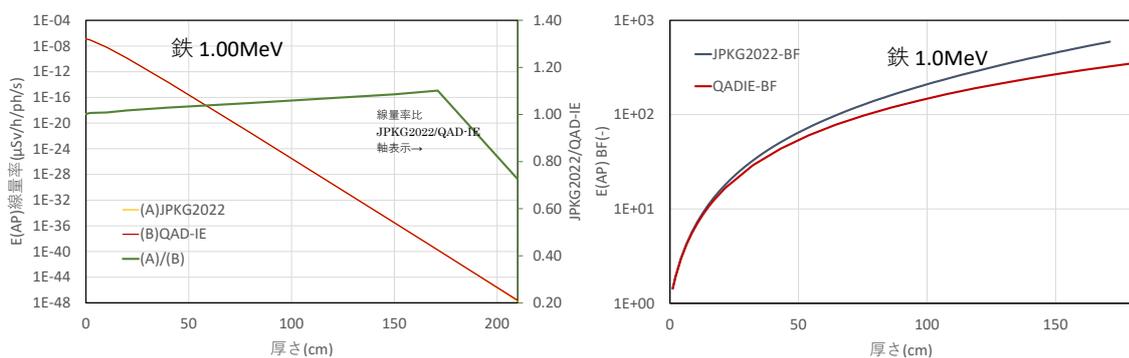
付録 III の 3.17 「ビルドアップ係数について文献との比較による妥当性確認」において、本事業で作成したビルドアップ係数と遮蔽線量計算値 (JPKG2022) を、1990 年勧告ベースの従来値 (QAD-IE) と比較した。従来データは光核反応を考慮していないため、比較できるのは線源の 1 次 γ 線だけである。例として、図 2-2 及び図 2-3 に、鉄及び鉛に対する比較グラフをそれぞれ示す。

まず、遮蔽線量計算値を従来値と比較すると、対数グラフ上では殆ど一致しているように見えるが、比をとってみると 0.1MeV の場合、遮蔽が厚くなるにつれて今回の計算値の方が徐々に低くなる。その原因として、今回の見直しで光子の干渉性散乱を考慮したことにより、特に低エネルギー部で影響がでたためである。



(a) 0.1MeV、遮蔽線量値と新旧比

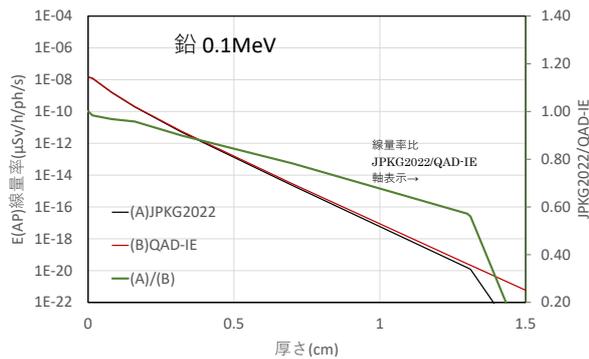
(b) 0.1MeV、ビルドアップ係数



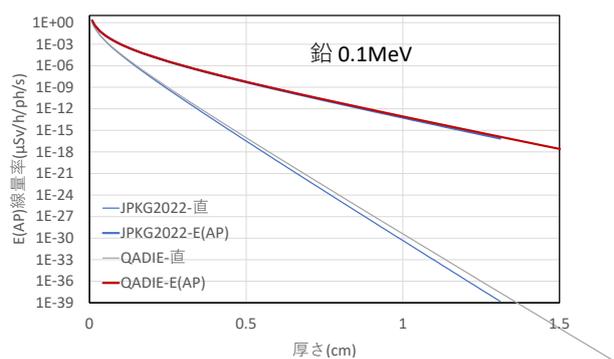
(c) 1MeV、遮蔽線量値と新旧比

(d) 1MeV、ビルドアップ係数

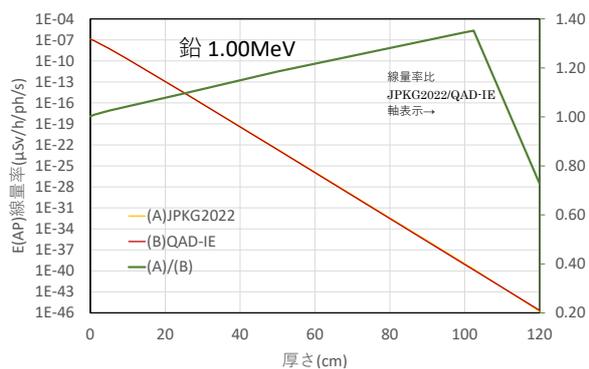
図 2-1 鉄に対する遮蔽線量計算値、及びビルドアップ係数の新旧比較



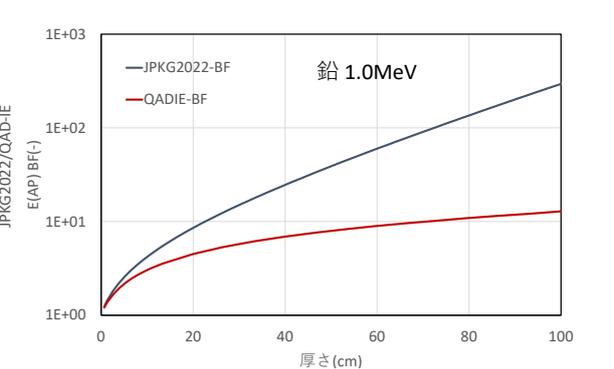
(a) 0.1MeV、遮蔽線量値と新旧比



(b) 0.1MeV、ビルドアップ係数



(c) 1MeV、遮蔽線量値と新旧比



(d) 1MeV、ビルドアップ係数

図 2-2 鉛に対する遮蔽線量計算値、及びビルドアップ係数の新旧比較

一方、ビルドアップ係数の方は、全線量が低くなった分、高くなる傾向にあるが、やはり干渉性散乱の考慮で減衰係数の値も変わるため、直接線の線量が減って従来との差が広がる。

以上、今回の見直しで作成したビルドアップ係数には従来との差が現れているが、遮蔽線量計算値と比較するとその差は大きくない。ただし、中重核以上の材料で低エネルギーの遮蔽を行う場合は、遮蔽が厚くなるにつれて従来との計算値との差が広がる懸念がある。ただし、実際には、低エネルギーの γ 線を厚く重い材料で遮蔽設計するケースは考えにくい。

2.4 光核反応に関するヒアリング調査

光核反応による中性子生成について、研究レビュー委員会においてモデル計算の予測精度に難があるとの指摘がなされた。そこで、関連する実験と解析を行っている専門家に対して、光核反応の理論計算の不確かさと実測の差異についてヒアリングを2回行った（5.3節参照）。

ヒアリングの結果、光核反応に係る遮蔽計算用データ整備に資する議論は次のとおりであり、成果は本事業のデータ作成に適切に反映された。

- LA150の光核データが現状で最も信頼性があり、MCNPコードでLA150を用いた光核反応の計算が測定と比較的よく一致するという情報が論文等により裏付けされた。
- JENDL/PDの光核データも同程度に信頼性があり良い結果を与える。ただし、現状、同データをMCNP又はPHITSコードで読みこんで一般に計算できるようにはなっていない。
- それらのデータを用いた計算結果を、出典や誤差が明らかなカーボン、窒素、クロム、鉄、ニッケル等の実験データと比べると、計算の方が測定に対して過小評価するケースが見られる。その差は、線量で精々1.5倍程度である。
- 以上の議論から、前年度のデータ作成方針であったPHITSコードの利用を一旦諦め、MCNP（LA150）の計算結果に基づく遮蔽計算用データの整備を改めて行うことにした。基本的な計算手法、整備の進め方に変更はない。
- 光中性子とその捕獲による二次 γ 線の線量計算値には、安全側の評価を確実にするために、適当な尤度を設ける必要がある。

参考文献

- [2-1] 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所、令和2年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究）事業成果報告書、令和3年3月。

3 遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究

3.1 遮蔽線量評価法の適用性拡張検討項目

前年度の研究で特定した遮蔽線量計算法の適用性拡張方針を踏まえて、表 3-1 に、今年度事業で実施した拡張研究の項目と概要を示す。次節以降、各項目の研究成果について述べる。

表 3-1 遮蔽線量評価法の適用性拡張検討項目

遮蔽線量評価法の適用性拡張項目	今年度の研究概要
高エネルギーへの範囲拡張 (光核反応による光中性子の考慮)	前年度報告書[3-1]に、上限 30MeV まで範囲拡張を行う背景、考え方、並びに光中性子に係るビルドアップ係数の定義、光核反応に係る線量の試算について示した。今年度は、遮蔽材の光中性子発生量の目安を与えるとともに、光核反応が線量計算に与える影響の例をまとめて示す。
二重層遮蔽線量計算	構造材と遮蔽材の組み合わせ、または異なる線種やエネルギーの放射線を効率的に減衰させる目的で用いられる二重層遮蔽体系の透過線量計算 材料：(コンクリート、鉄)、(ポリエチレン、鉄)、(ポリエチレン、鉛)、(コンクリート、鉛) の組み合わせ 第 1 層厚さ：40cm まで検証
スラブ遮蔽に対する斜め透過線量補正	スラブ遮蔽体に対して、線源位置と線量評価点を結ぶ透過線が、スラブ遮蔽体を垂直ではなく、斜めに横切る場合の線量補正計算 材料：コンクリート、鉄、鉛

3.2 高エネルギーへの範囲拡張

3.2.1 遮蔽材の光中性子発生量の目安

放射線発生施設の発生する高エネルギーの制動 X 線による線量計算に対応するために、線源エネルギー範囲の上限を従来の 10MeV から 30MeV へ拡張した。その結果、比較的高エネルギー領域で発生する光核反応による光中性子を考慮することにした。

図 4-5 に、代表的な遮蔽材の光中性子発生量の目安を示す。光核反応には閾エネルギー値があり、コンクリートやポリエチレンに含まれる重水素は、2.2MeV から光中性子を発生する。ただし、その発生量はかなり少なく、 γ 線と比べて線量が有意になるケースは 8MeV まで考えにくい。一方、コンクリートに含まれるシリコン・カルシウム、鉄及び鉛は、6.5~8.5MeV から光中性子を発生しはじめ、エネルギーとともに増加して 15~25MeV 辺りにピークが現れる。一般に、15MeV 辺りまで同じエネルギー

なら原子番号が高い方が少し多い傾向にある。よって、従来の光核反応を考慮していない光子ビルドアップ係数を用いた遮蔽線量評価は、そうした7~8MeVを超える高いエネルギーに対して光核反応を考慮すると一部評価が変わる可能性がある。

なお、後述のとおり、RI核種の場合、遮蔽材の閾エネルギー値を超える光子を放出して線量に寄与するケースは非常に稀であり、光核反応の考慮を要する施設は基本的に放射線発生装置の取扱施設である。

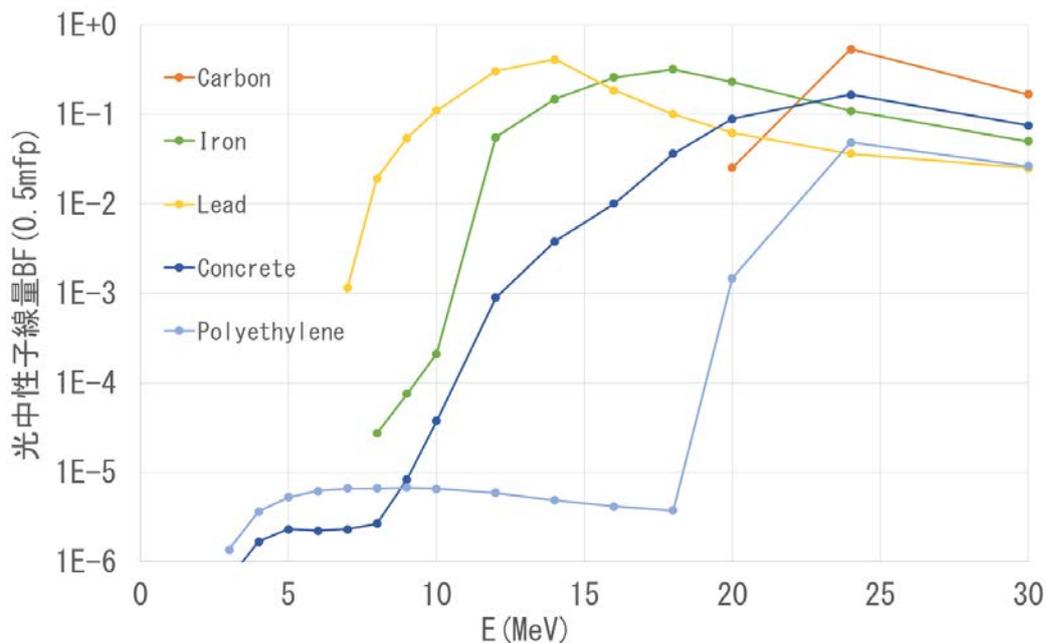


図 3-1 遮蔽材の光核反応で発生する光中性子の線源エネルギーによる変化

3.2.2 光核反応が線量計算に与える影響の例

光核反応の閾エネルギー値は基本的に高い所にあり、RI核種を線源とした遮蔽線量計算で光核反応の影響が現れることはまずない。例外的な核種として、参考まで6.5MeVを超える高エネルギーγ線を放出する¹⁶Nの鉛に対する実効線量透過率を、光核反応の考慮の有無でそれぞれ計算した結果を示す(表3-2、図3-2)¹。光核反応を考慮した場合、遮蔽厚さ15cm位から光中性子の線量寄与が現れて、その後は光核反応を考慮しない場合と比べて指数的に差が広がる。鉛のような原子番号の大きい材料で遮蔽した場合に影響が現れる非常に稀なケースである。

一方、放射線発生施設においては、線源スペクトルに光核反応の閾エネルギー値を超える高エネルギーX線が含まれるため、光核反応を考慮しない線量計算値は実際と大きく乖離することがある。図3-3に、参考まで8MeVの単色光子を鉄で遮蔽した場合の線量変化を光核反応の考慮の有無を仮定して例示する。光核反応を考慮すると約13mfp(56cm)から中性子の寄与が支配的になり、それ以降は考慮しない場合と比べ

¹ ¹⁶Nは原子炉施設の方で取り上げられることがある。半減期が短く産業利用されていない。

て大きな線量差を生ずる。ただし、56cmの厚さで線量にして6桁も減衰するため、実際の設計でそれほど厚い鉄で遮蔽することは考えにくい。

図3-4に、同じく鉄遮蔽に対して、光核反応を考慮した場合の γ 線と中性子の線量寄与の変化を示す。8MeVの場合、遮蔽厚さ20mfp(86cm)位から光中性子の捕獲で発生した二次 γ 線の寄与が、一次 γ 線の寄与に加わって γ 線の減衰勾配が変化する。そして、それ以降の γ 線の減衰カーブは、中性子のそれに追従する形になる。一方、20MeVの場合、約2mfp(8cm)で γ 線と中性子の寄与が逆転し、約10mfpで γ 線の減衰勾配が変化する。よって、ケースに応じて γ 線と中性子で適切に線量管理する必要がある。また遮蔽設計においては、鉄単体よりむしろ、中性子と γ 線をともに効率よく減衰させるための多重層遮蔽が検討される(3.3節参照)。

次に、照射条件による実効線量の差について述べる図3-5に、光子フルエンスあたりの実効線量換算係数の照射条件による比較を示す。6MeV近辺まではAPが最も高いが、それを超えるとPAの方が高くなり、更に80MeV近辺より上ではISOが最も高くなる。よって、従来は照射条件としてAPが規定されていたが、高エネルギー拡張により状況に応じた適切な照射条件の選択が推奨される。表3-3に、線源エネルギー30MeV、強度1M(photon/sec)の γ 線をコンクリートで遮蔽したときの実効線量率を照射条件ごとに示す。コンクリートの厚さ10cmの場合、AP以外の照射条件は全てAPより高く、線量で10%から23%位まで高い。また、コンクリートの厚さ100cmの場合、PAのみがAPより高く、線量で7%位の差が現れる。結果的に、APより高い線量を示す他の照射条件が現れるのは、特に遮蔽が薄い場合であり、E(PA)で20%を超える位の線量差を示した。なお、線源エネルギー25MeVの場合、同じ遮蔽条件でAPと他の照射条件の間で線量差は殆どあらわれなかった。30MeVという高いエネルギーを扱う施設は限定的であり、25MeV以下の光子線束を遮蔽する場合はE(AP)を基準にしてもよいと考えられる。

以上、放射線発生施設の線量計算においては、エネルギーが7-8MeVを超える場合、光核反応を考慮した遮蔽計算用データを使うように、又は光核反応を考慮した放射線輸送計算を行うようにすべきである。また、過去の評価で光核反応を考慮した計算を行っていても、光核データが改訂されている場合があるため、最新のデータを用いて線量の再確認を行うことが望ましい。

表 3-2 ^{16}N の放射性核種データ (光子)

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

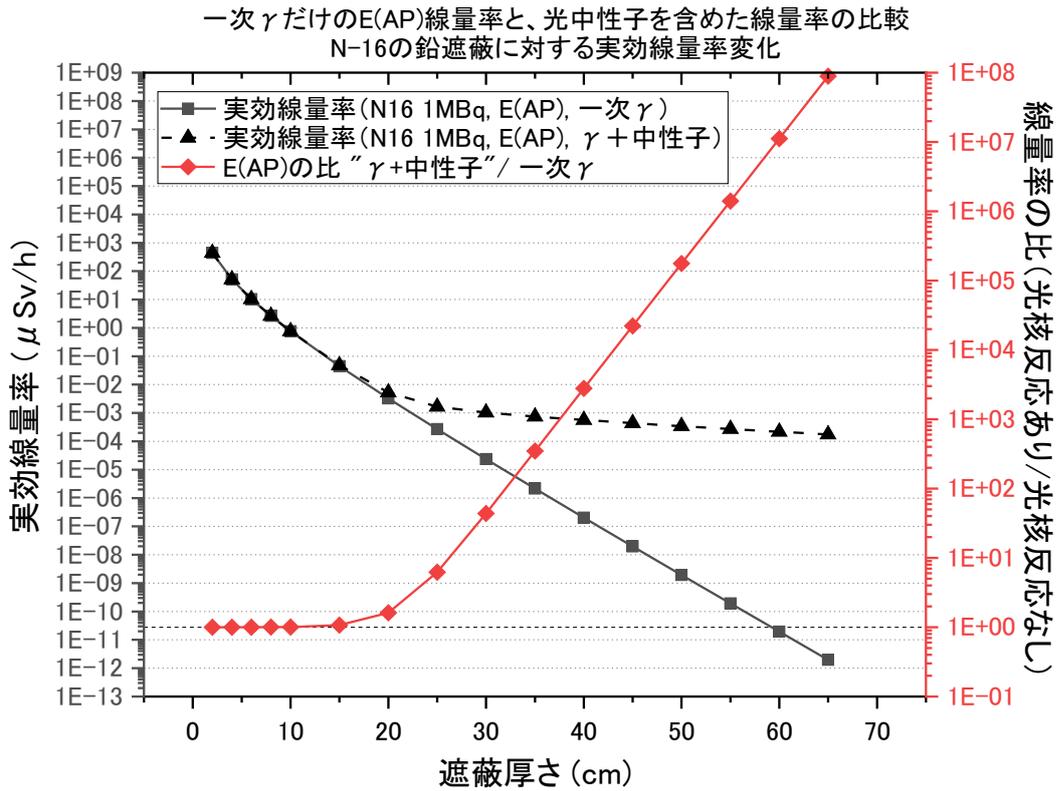


図 3-2 ^{16}N の鉛に対する実効線量透過率の遮蔽厚さによる変化
(光核反応の考慮の有無)

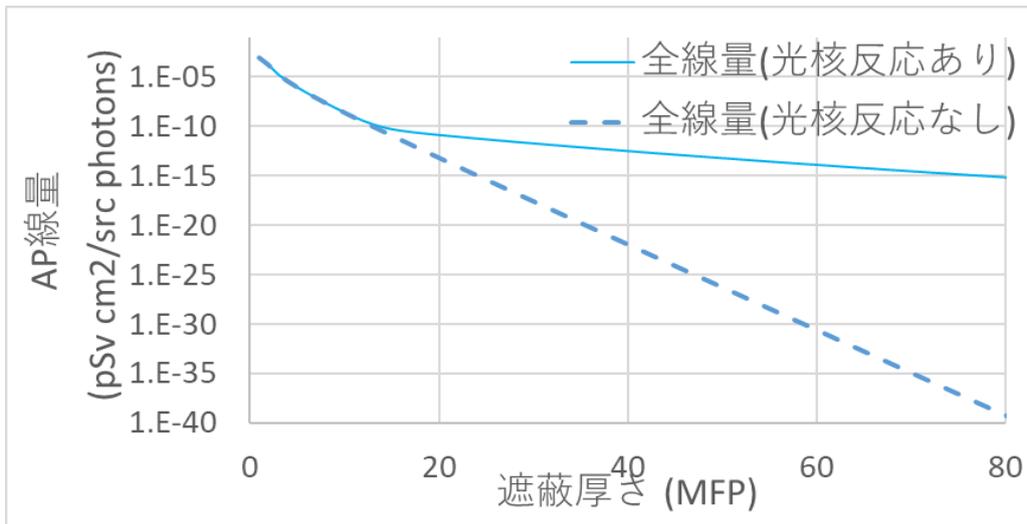
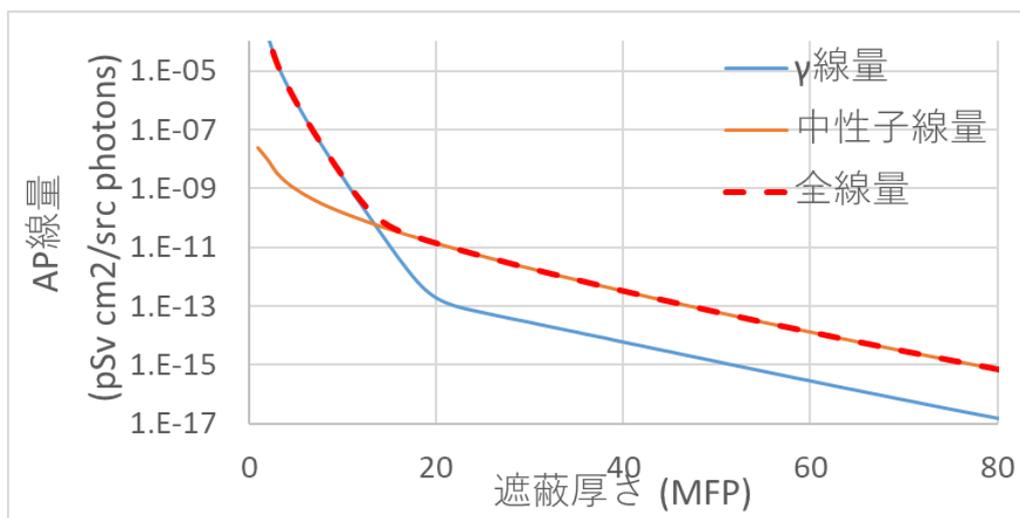
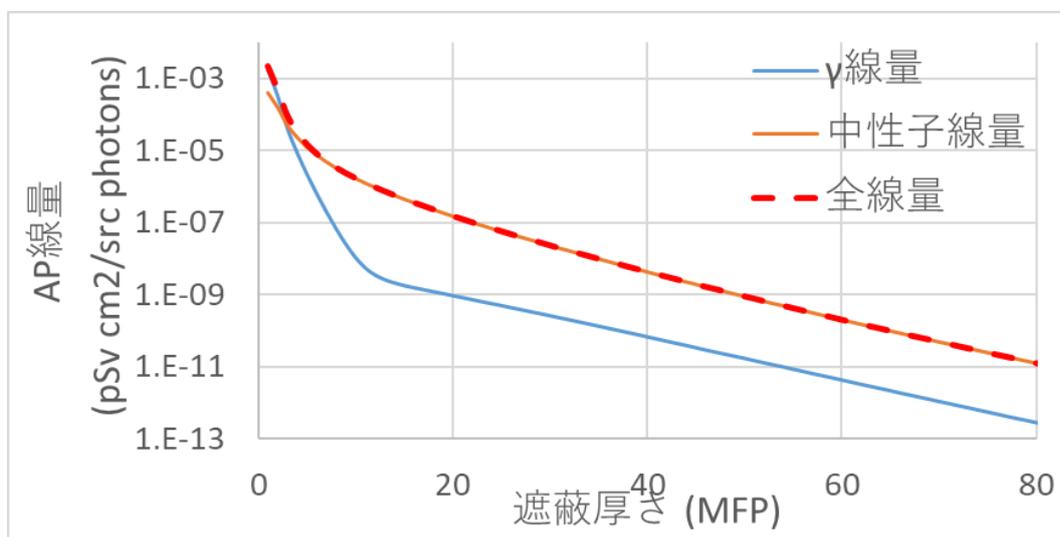


図 3-3 8MeV の単色光子を鉄で遮蔽した場合の遮蔽厚さによる線量変化の計算例
(光核反応の考慮の有無を仮定した考察のための参考)



(a) 線源エネルギー8MeV



(b) 線源エネルギー20MeV

図 3-4 高エネルギー γ 線を鉄で遮蔽した場合の光核反応を考慮した線量変化の例

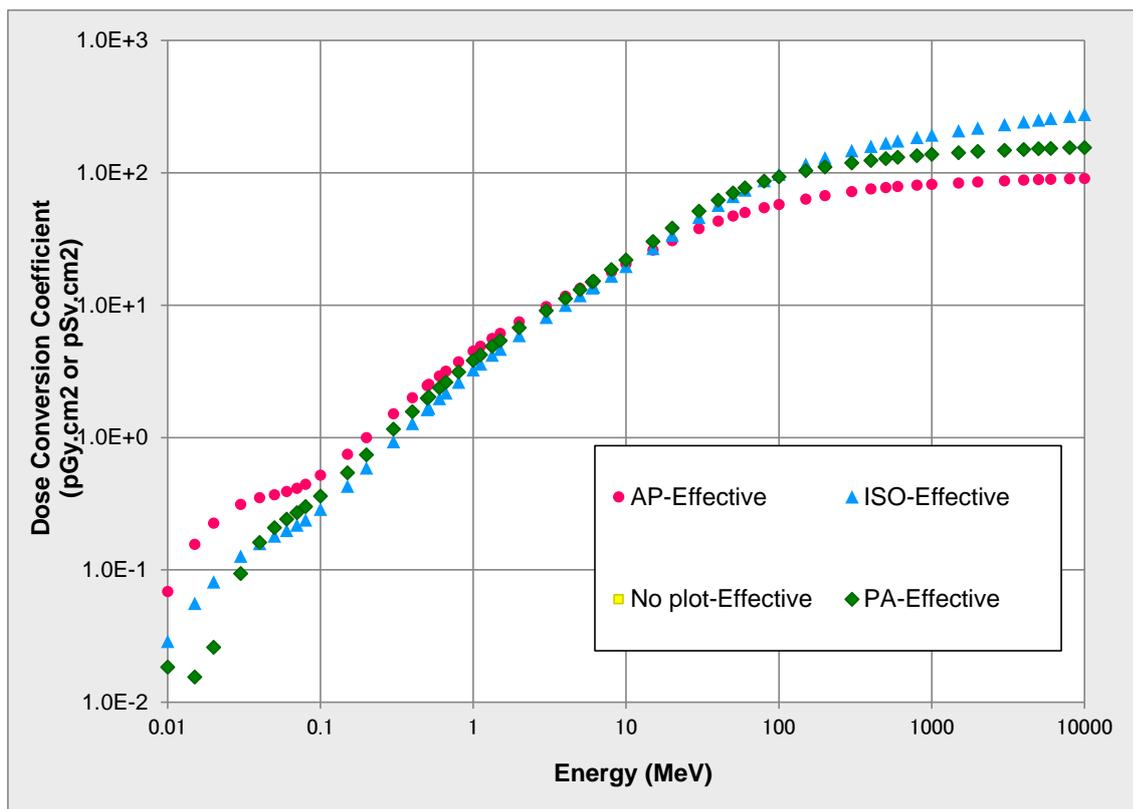


図 3-5 光子フルエンスあたりの実効線量換算係数の照射条件による比較

表 3-3 高エネルギー γ 線をコンクリートで遮蔽したときの実効線量率（照射条件別）

	コンクリート10cmの遮蔽透過後の線量率(μ Sv/h)					コンクリート100cmの遮蔽透過後の線量率(μ Sv/h)				
	E(AP)	E(PA)	E(LLAT)	E(ROT)	E(ISO)	E(AP)	E(PA)	E(LLAT)	E(ROT)	E(ISO)
合計線量率	2.59E-02	3.18E-02	2.89E-02	2.89E-02	2.84E-02	1.18E-03	1.26E-03	1.12E-03	1.17E-03	1.11E-03
中性子	1.62E-03	1.05E-03	7.95E-04	1.08E-03	8.82E-04	1.18E-04	7.41E-05	5.50E-05	7.65E-05	6.19E-05
一次 γ +二次 γ	2.43E-02	3.08E-02	2.81E-02	2.78E-02	2.75E-02	1.06E-03	1.19E-03	1.06E-03	1.10E-03	1.05E-03
E(AP)に対する比	-	1.23	1.12	1.12	1.10	-	1.07	0.95	1.00	0.94

(30MeV、1M(photon/sec)の単色 γ 線源を用いた場合)

3.3 二重層遮蔽線量計算

3.3.1 二重層遮蔽の概念と遮蔽計算用データの定義

異なる線種やエネルギーの放射線を効率よく減衰させるため、あるいは構造材に遮蔽材を重ねる形で施設設計には多重層の遮蔽がよく現れる。多重層遮蔽に関する既往研究はあるが、簡易計算モデルのコンテキストで系統的に処理する方法は見つかっていない。例えば、遮蔽実務マニュアルに記載された最外層法の適用性は限られる。一方、海外でも最近、 γ 線の遮蔽計算コードが二重層遮蔽に対応してきている[3-2]。

今回の見直しでは、代表的な遮蔽材による二重層遮蔽に対し、線量計算の結果を網羅的に揃えて、線量減衰カーブを直接フィッティングする方法で対応した。図 3-6 に二重層遮蔽の概念図を示す。線源から線量評価点まで2つの異なる遮蔽材を透過するとき、線源側を第1層、評価点側を第2層と呼ぶ。

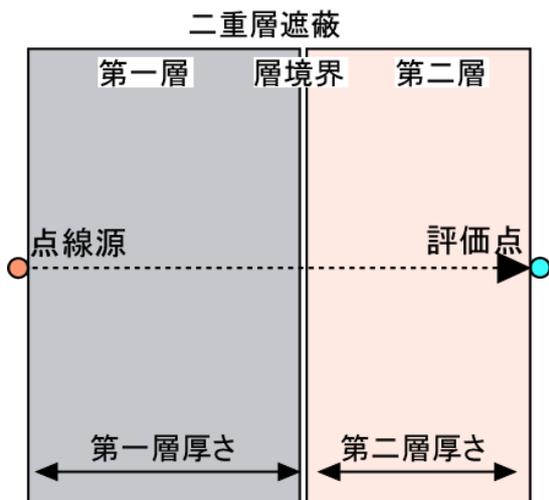


図 3-6 二重層遮蔽の概念図

ここで、光核反応に係る遮蔽計算用データについて改めて述べる（図 3-7）。まず、線量計算の結果を、線源由来の一次 γ 線、光中性子、及び光中性子の捕獲で生じた二次 γ 線の寄与に分けておく。それから、次のように遮蔽計算用データを作成した。

- ・ 一次 γ 線のビルドアップ係数 : 一次 γ 線量 \div 一次 γ 線の直接線量
- ・ 光中性子の擬似ビルドアップ係数 : 光中性子線量 \div 一次 γ 線の直接線量
- ・ 二次 γ 線の擬似ビルドアップ係数 : 二次 γ 線量 \div 一次 γ 線の直接線量
- ・ 全 γ のビルドアップ係数 : (一次 γ + 二次 γ) 線量 \div 一次 γ 線の直接線量

擬似ビルドアップ係数とは、線種に関係なく、ビルドアップ係数の定義式の分母に、一次 γ 線の直接線量を用いて作成した値である。本来の物理的な意味は失われているが、光核反応による線量計算を簡便に実行するために敢えて定義した。なお、二次 γ 線の擬似ビルドアップ係数が 0 の場合、全 γ のビルドアップ係数を参照する。

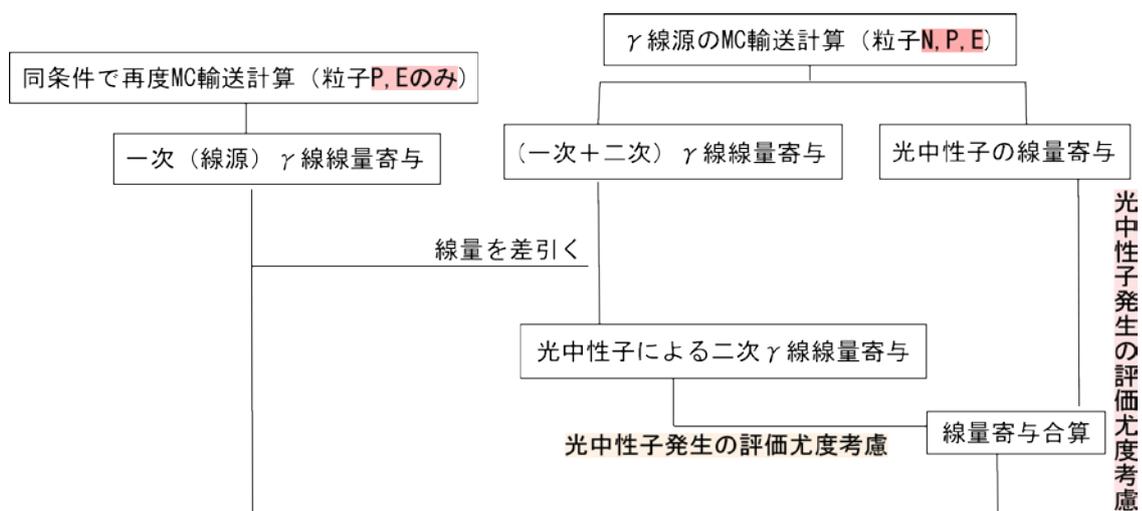


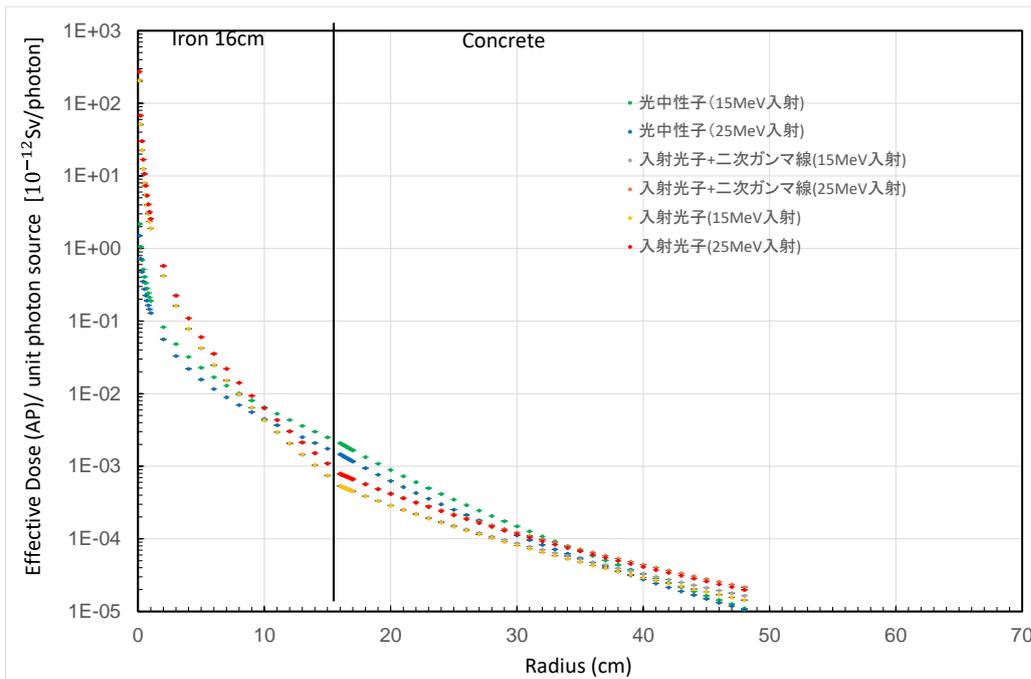
図 3-7 モンテカルロ法輸送計算に基づく光核反応に係る線量寄与の分割手順

3.3.2 二重層遮蔽の遮蔽厚さによる線量変化、及び遮蔽計算用データの例

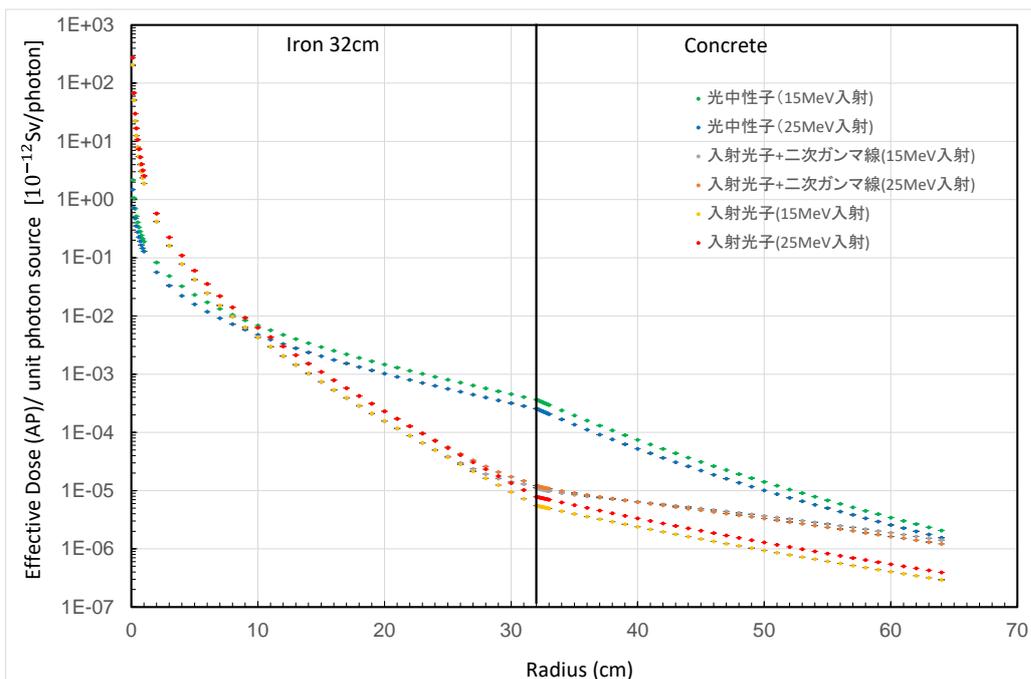
図 3-8 に、15MeV 及び 25MeV の γ 線源を用いた、第 1 層が鉄、第 2 層がコンクリートの二重層遮蔽の実効線量変化を示す。線量減衰の様子は 15MeV と 25MeV であまり変わらない。第 1 層の厚さが 16cm の場合 (図 3-8(a))、初めは γ 線の線量が高いが、鉄で発生した中性子の線量が層境界の手前で γ 線を超えてくる。そして、第 2 層のコンクリートで中性子が減衰し、35cm 辺りで γ 線の線量が中性子より再び高くなる。この傾向は、第 1 層の厚さが 32cm の場合 (図 3-8(b)) でも同様であるが、層境界が後方に下がった分、層境界で中性子と γ 線の線量差が大きくなり、また第 2 層のコンクリートで中性子の捕獲で発生した二次 γ 線の線量が厚さとともに高くなり、65cm 辺りで中性子の線量と並ぶことがわかる。

図 3-9(a) に、図 4-8 で示した 15MeV の線量減衰をもとに算出した二重層遮蔽用ビルドアップ係数の遮蔽厚さによる変化を示す。上述した放射線の発生と線量減衰の様子を大凡知ることができる。第 1 層に入射して直ぐに光中性子が多く発生し、鉄では殆ど減衰しないが、第 2 層との境界からコンクリートの水分により急に減衰しはじめる。同時に、二次 γ の線量寄与が現れて漸増しはじめ、第 2 層が厚くなるにつれて、減衰する中性子の線量に近づく。なお、凡例記号の 'p.g'、'pn'、's.g' は、一次 γ 、光中性子、二次 γ をそれぞれ表す。

図 3-9(b) に、第 1 層と第 2 層の材料を入れ替えて、第 1 層をコンクリート、第 2 層を鉄とした場合のビルドアップ係数の変化を示す。第 2 層の境界を過ぎた辺りで光中性子が急激に発生し、第 2 層が厚くなるにつれて γ 線との線量差が急激に広がる。場合によっては、鉄の後方に中性子と γ 線を効率よく減衰させるための追加遮蔽 (コンクリート等) の検討が必要になる。

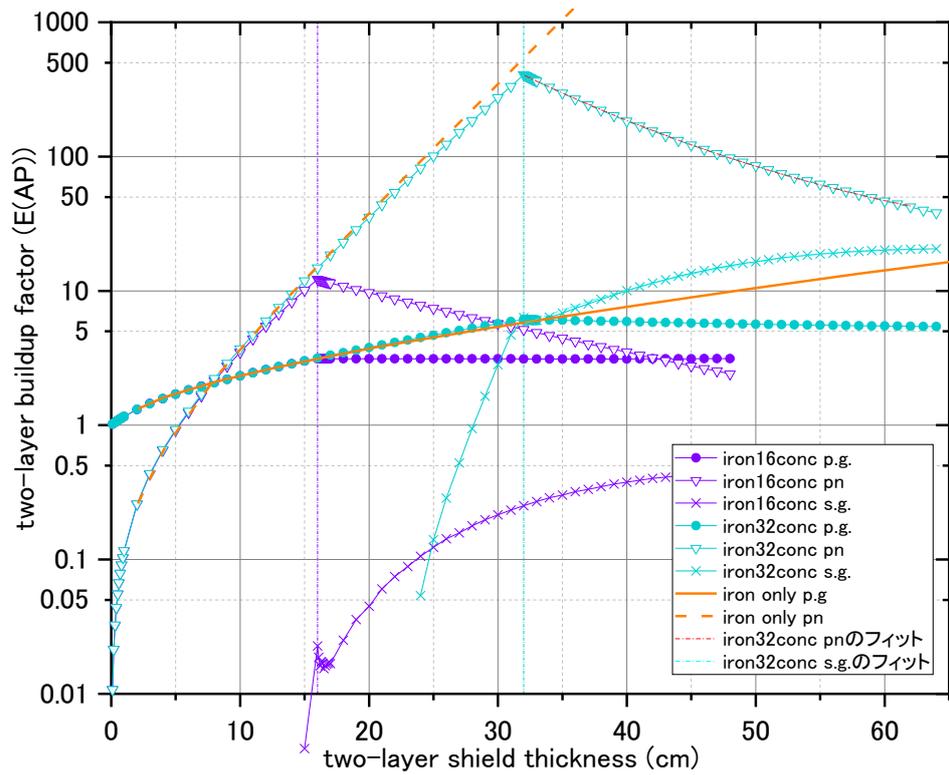


(a) 第1層：鉄 16cm、第2層：コンクリート

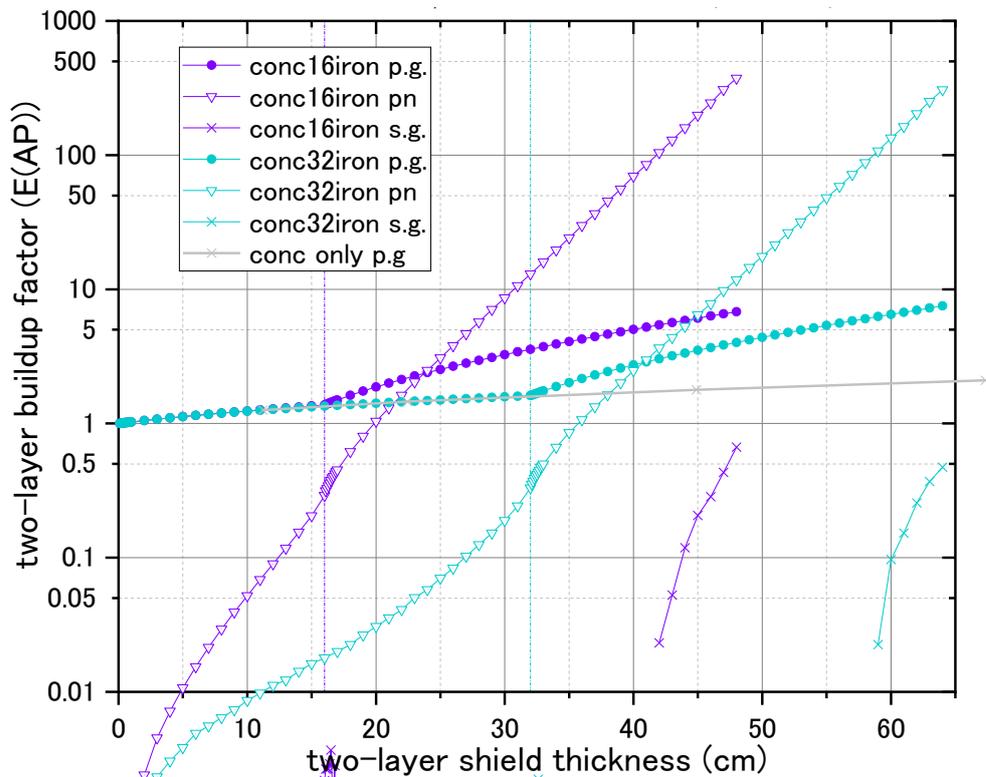


(b) 第1層：鉄 32cm、第2層：コンクリート

図 3-8 二重層遮蔽における γ 線及び中性子の線量寄与の厚さによる変化の例



(a) 第1層：鉄16cm又は32cm、第2層：コンクリート、15MeV線源



(b) 第1層：コンクリート16cm又は32cm、第2層：鉄、15MeV線源

図3-9 二重層遮蔽計算用ビルドアップ係数の遮蔽厚さによる変化の例

3.3.3 二重層遮蔽計算用データのまとめ方と線量計算式

図 3-9 に示されるように、第 2 層におけるビルドアップ係数の変化は、一次 γ 、中性子、二次 γ のいずれも滑らかであり、二次または三次多項式を用いてよくフィッティングできることがわかった。そこで、各ビルドアップ係数をフィッティングした多項式のパラメータ (a, b, c, d) を二重層用ビルドアップ係数データとして整備した。

$$BF_{pg}(e, t_1, t) = a_{pg}(e, t_1) \cdot t^3 + b_{pg}(e, t_1) \cdot t^2 + c_{pg}(e, t_1) \cdot t + d_{pg}, t_1 \leq t$$

$$BF_{pn}(e, t_1, t) = a_{pn}(e, t_1) \cdot t^3 + b_{pn}(e, t_1) \cdot t^2 + c_{pn}(e, t_1) \cdot t + d_{pn}, t_1 \leq t$$

$$BF_{sg}(e, t_1, t) = a_{sg}(e, t_1) \cdot t^3 + b_{sg}(e, t_1) \cdot t^2 + c_{sg}(e, t_1) \cdot t + d_{sg}, t_1 \leq t$$

二重層遮蔽の線量は、上のビルドアップ係数を用いて下式で求められる。離散データにおける線源エネルギー e の間は、第 2 層の遮蔽厚さ t_2 に対して対数補間する。また第 1 層厚さ t_1 の間は、線源エネルギー e に対して対数補間する。

$$D_{two-layer}(e, t, r) = \frac{1}{4\pi(r+t)^2} \cdot E/\Phi(e) \cdot \exp(-\mu_1(e) \cdot t_1 - \mu_2(e) \cdot t_2) \times [BF_{pg}(e, t_1, t_1+t_2) + BF_{pn}(e, t_1, t_1+t_2) + BF_{sg}(e, t_1, t_1+t_2)], t \geq t_2$$

e : 光子エネルギー (MeV)

$E/\Phi(e)$: フルエンス ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) あたりの実効線量換算係数 ($\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$)

r : 線源から第一層までの距離 (cm)

t_1, t_2 : 第一層、または第二層の厚さ (cm)

t : 第一層の初めから線量評価点までの距離 (cm)

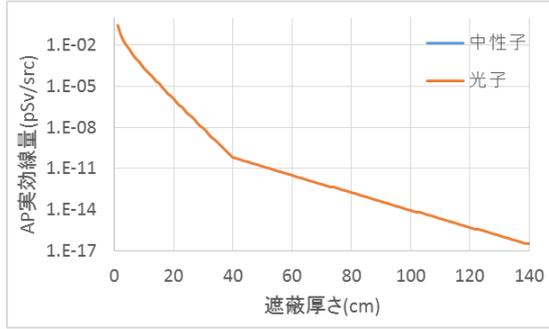
$BF(e, t)$: 二重層用の実効線量ビルドアップ係数

$\mu_1(e), \mu_2(e)$: 第一層、または第二層における光子の減衰係数 (cm^{-1})

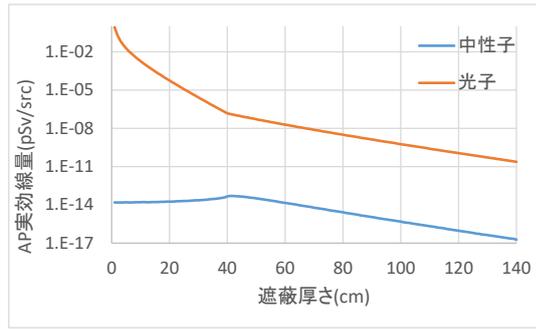
3.3.4 二重層遮蔽のエネルギーによる線量変化の例

放射線遮蔽施設の遮蔽でよく現れる鉄とコンクリートの二重層遮蔽を例に、改めて線源エネルギーと遮蔽厚さによる線量変化の特徴を述べる。

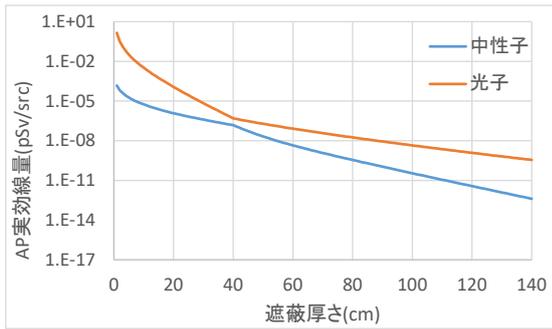
図 3-10 に、第 1 層に鉄 40cm、第 2 層にコンクリート 100cm とした場合の線源エネルギー別の線量変化を示す。4MeV からコンクリートで発生した中性子の寄与が現れ、その散乱影響が第 1 層側にも現れる。いずれも γ 線と比べて無視できるレベルである。10MeV の場合、鉄で中性子が発生して、その線量が層境界の辺りで γ 線の線量に接近するが、まだ全体的に γ 線の線量が支配的である。しかし、それを超えて 15MeV になると、中性子の線量が高くなって 10cm 辺りで γ 線と線量寄与が逆転し、また第 2 層で中性子が減衰すると今度は二次 γ 線の寄与が顕著になり、80cm 辺りで再び寄与が逆転する。高エネルギーの線量管理においては、遮蔽条件に応じて γ 線と中性子を適切に使い分けるか、または両方で管理する必要がある。なお、15MeV を超えて 25MeV の線量変化は、15MeV と比べて殆ど変わらない。



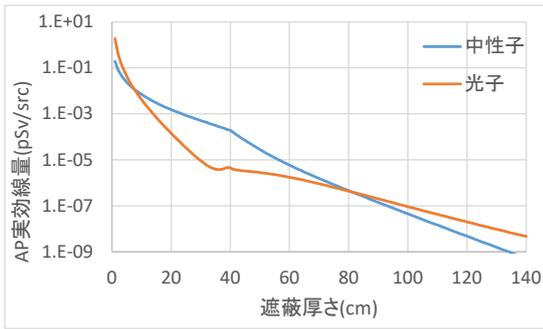
(a) 1MeV



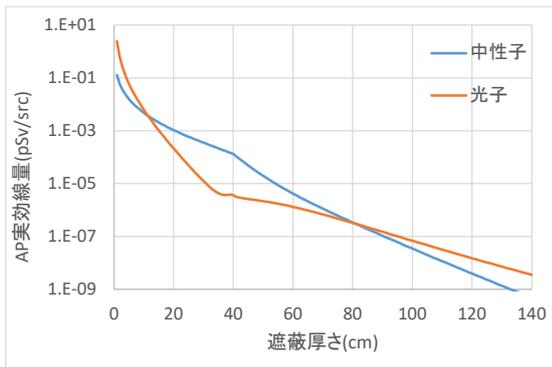
(b) 4MeV



(c) 10MeV



(d) 15MeV



(e) 25MeV

図 3-10 二重層遮蔽の線源エネルギー別の線量変化
(第 1 層 : 鉄 40cm、第 2 層 : コンクリート 100cm)

次に、図 3-11に第 1 層と第 2 層を逆転させて、コンクリート 100cm と鉄 40cm の二重層の線量変化を示す。コンクリートで発生する光中性子の線量は、図 4-5で示したとおり、数 MeV から 25MeV までエネルギーとともに漸増する。4MeV では γ 線と比べて無視できるレベルであるが、10MeV を超えると層境界 100cm 辺りで鉄から発生した中性子の寄与が上乘せされる。第 1 層のコンクリートの範囲では、エネルギーにかかわらず γ 線の線量が支配的である。一方、第 2 層の範囲では、15MeV を超えると中性子による線量管理が求められる。なお、15MeV を超えて 25MeV の線量変化は、第 2 層において 15MeV とあまり変わらない。

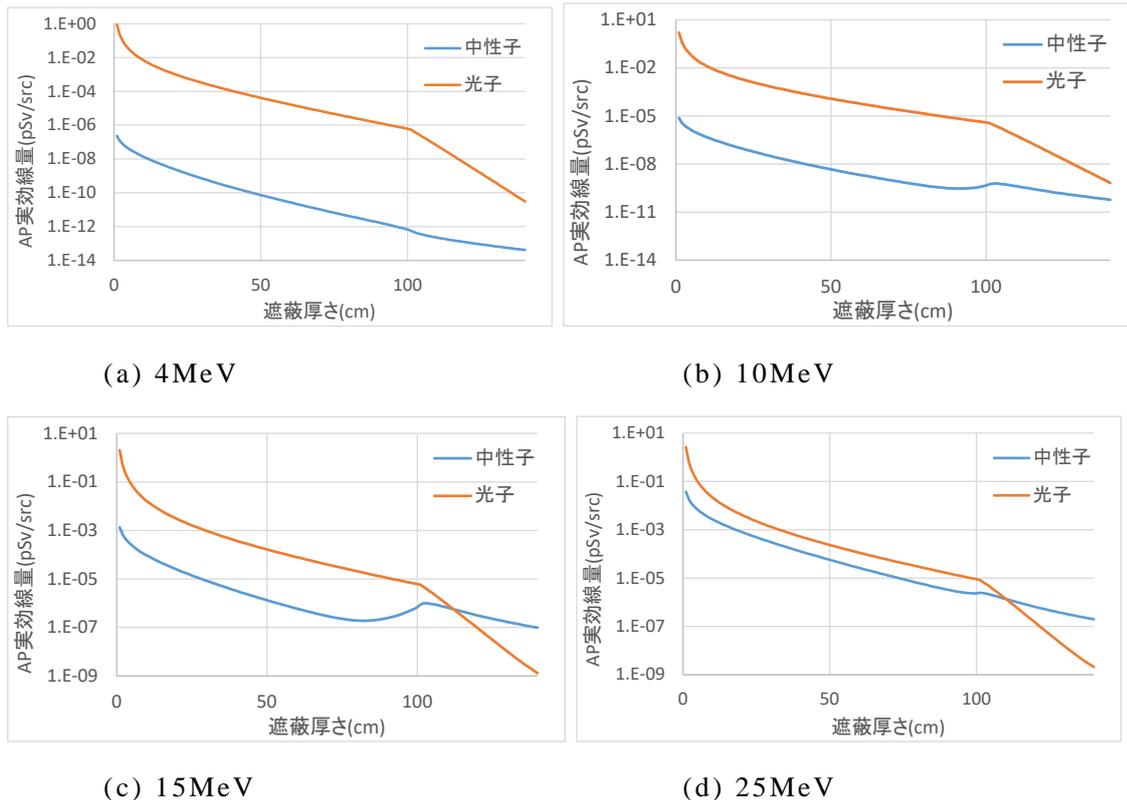


図 3-11 二重層遮蔽の線源エネルギー別の線量変化
(第 1 層 : コンクリート 100cm、第 2 層 : 鉄 40cm)

3.4 スラブ遮蔽に対する斜め透過線量補正

3.4.1 スラブ遮蔽の斜め透過の概念と対応意義

スラブ遮蔽の斜め透過の概念とその対応意義を述べる。図 3-12 に示すように、簡易遮蔽計算は理論的に、線源と線量評価点を結ぶ透過線がスラブ遮蔽体を垂直に横切る場合に対応する。一方、実際の遮蔽設計ではスラブ遮蔽を多少斜めに横切る配置がよく現れる。従来、線源や評価点の位置をずらして対応することがあり、正確な評価の妨げになっていた。そこで、斜めのままでも遮蔽計算できるように適用性を拡張した。

この問題を表すパラメータは、線源エネルギー、スラブに対する透過線の入射角度、及びスラブ内の透過距離である。

壁に対して透過線が垂直方向
通常のビルドアップ線量計算の体系

壁に対して透過線が斜め方向にある
適当に補正して計算できないか？

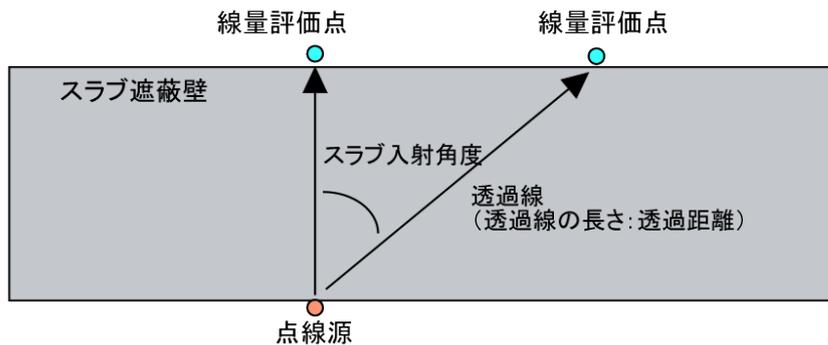


図 3-12 スラブ遮蔽の垂直透過及び斜め透過の概念図

3.4.2 スラブ遮蔽の斜め透過の角度による線量変化

γ 線の等方点線源に対してパラメータを変えながら線量変化を調べた。図 3-13 に、コンクリート遮蔽で透過距離 32cm に固定したまま、透過線の入射角度を変えたときの垂直透過（0度入射）に対する線量比の変化を示す。グラフは線源エネルギー別に 1, 4, 15 (MeV) の γ 線または光中性子に対する変化を示した。入射角度が大きくなるにつれて、線量比は 1 から指数的に減少する。 γ 線の場合、1MeV、60度で約 8 割になり、エネルギーが高くなるにつれて減少は緩やかになり、15MeV では入射角度によってあまり減らなくなる。一方、光中性子の場合、入射角度により線量比が急に減少し、15MeV、60度で約 6 割になる。この光中性子の線量比カーブは 25MeV の場合でも全体的に殆ど変わらないという特徴がある。

次に、鉛遮蔽に対して同様の变化を示す（図 3-14）。光子の場合、小角度では線量が殆ど減少しないか、僅かに高くなることさえある。そしてある角度から指数的に減少し始めるが、その角度はエネルギーが高くなるにつれて小さくなる。このように、原子番号の高い核種のエネルギーに対する線量比の減少傾向は、コンクリートの場合とかなり異なる。一方、光中性子の線量比の減少はコンクリートより更に急になり、15MeV、60度で 5 割未満である。

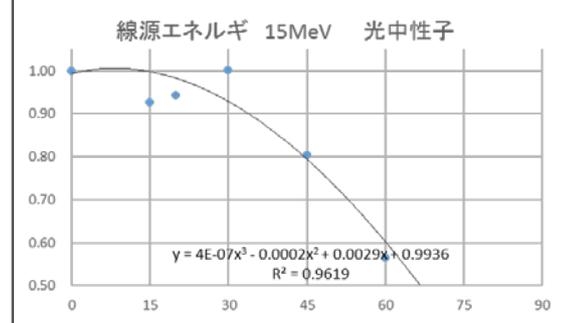
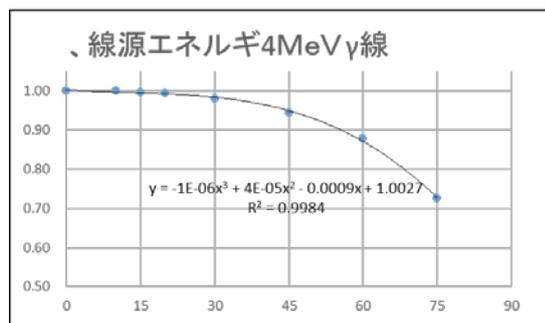
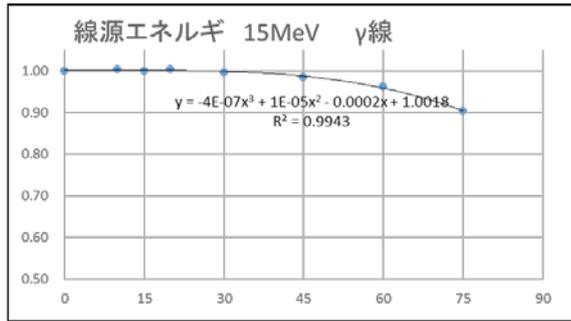
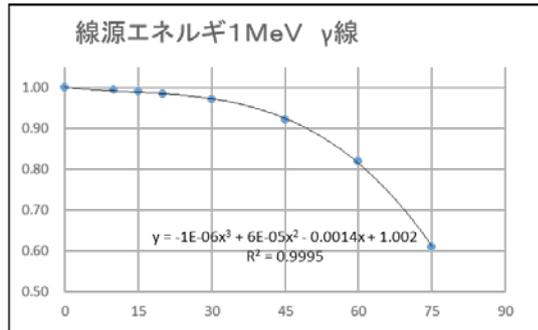
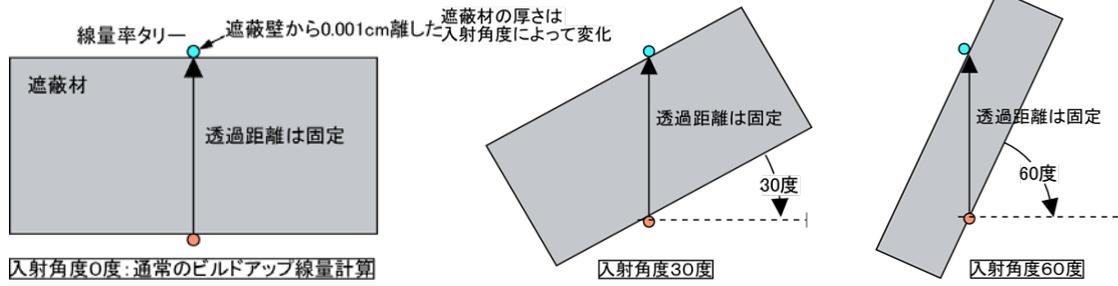


図 3-13 コンクリート遮蔽で透過距離 32cm に固定したときの透過線の入射角度による線量比の変化

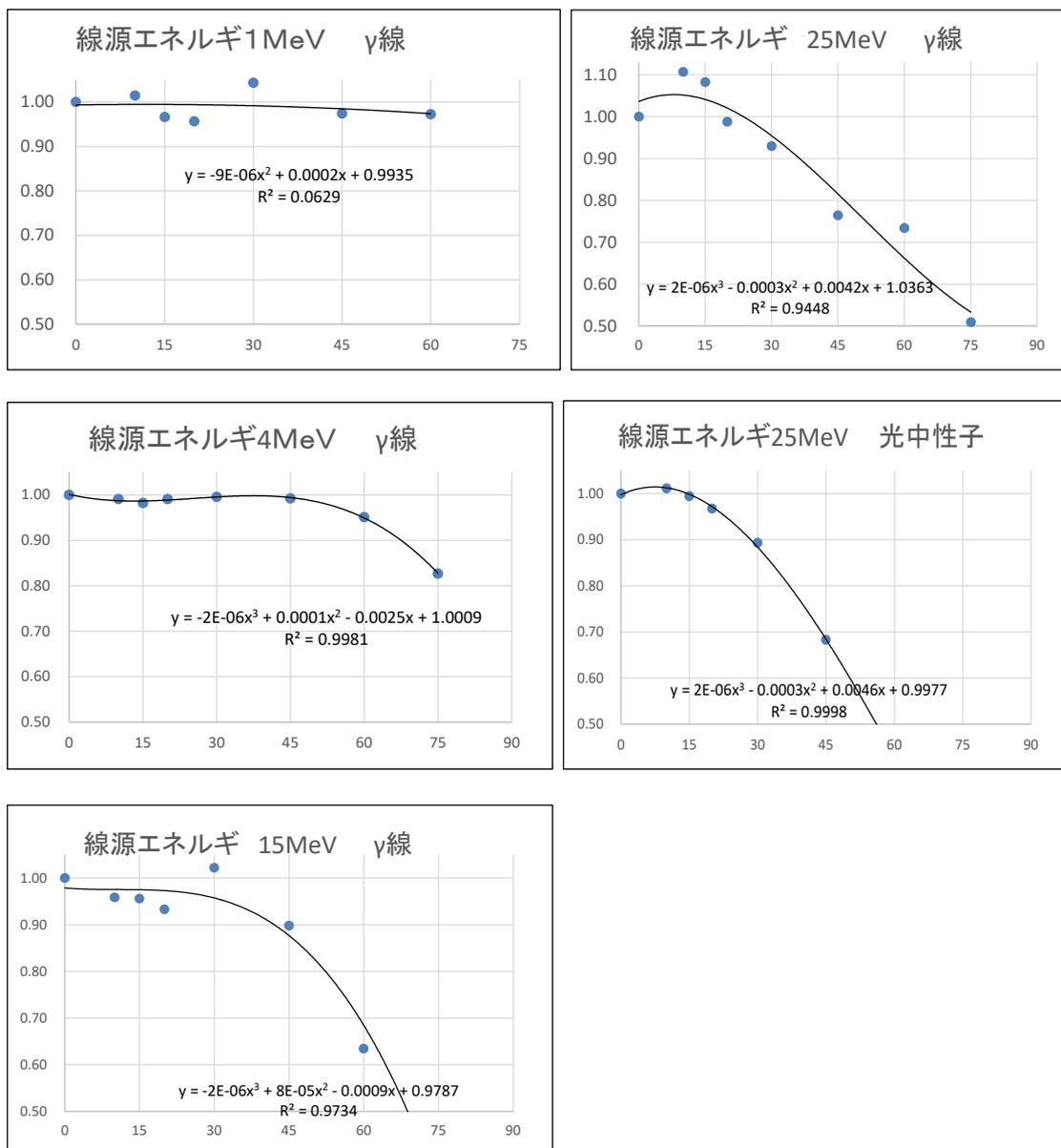


図 3-14 鉛遮蔽で透過距離 32cm に固定したときの、透過線の入射角度による線量比の変化

3.4.3 スラブ遮蔽の斜め透過補正データのまとめ方と線量計算式

図からわかるとおり、線量比の変化は γ 線、中性子ともに滑らかであり、三次多項式を用いてよくフィッティングできる。そこで、入射角度による線量比の変化をフィッティングした多項式のパラメータ (a , b , c , d) を斜め透過用線量補正係数データとして整備することにした。図中の式は、フィットした多項式の例である。

$$CF_{pg+sg}(e, t, s) = a(e, t)_{pg+sg} \cdot s^3 + b(e, t)_{pg+sg} \cdot s^2 + c(e, t)_{pg+sg} \cdot s + d, s \leq \lim(e, t)$$

$$CF_{pn}(e, t, s) = a(e, t)_{pn} \cdot s^3 + b(e, t)_{pn} \cdot s^2 + c(e, t)_{pn} \cdot s + d, s \leq \lim(e, t)$$

斜め透過の線量は、ビルドアップ係数を用いて計算した垂直透過の線量に対して、上述の補正係数を乗ずることで得られる。離散データにおける線源エネルギー e の間は、透過距離に対して対数補間する。また透過距離 t の間について、 γ 線の場合は線源エネルギー e に対して対数補間、中性子の場合は線形補間する。

$$D_{slant}(e, t, s) = \frac{1}{4\pi(r+t)^2} \cdot E/\Phi(e) \cdot \exp(-\mu(e) \cdot t) \times \\ \left[(BF_{pg}(e, t) + BF_{sg}(e, t)) \cdot CF_{pg+sg}(e, t, s) + BF_{pn}(e, t) \cdot CF_{pn}(e, t, s) \right]$$

e : 光子エネルギー (MeV)

$E/\Phi(e)$: フルエンス($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)あたりの実効線量換算係数($\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$)

r : 線源から遮蔽体までの距離(cm)

t : 透過距離(cm)

s : 透過線のスラブ入射角度(deg)

$BF(e, t)$: 一次 γ_{pg} 、光中性子 $_{pn}$ 、二次 γ_{sg} の各実効線量ビルドアップ係数

$\mu(e)$: 遮蔽体の光子の減衰係数(cm^{-1})

$CF(e, t, s)$: (一次 γ +二次 γ) $_{pg+sg}$ 、光中性子 $_{pn}$ の各斜め透過用線量補正係数

$lim(e, t)$: 適用可能な入射角度の上限(deg)

3.5 新勧告を反映した遮蔽線量計算コードの開発

3.5.1 コード開発の概要

遮蔽線量計算コードの開発目的、基本仕様・機能、及び開発項目は、前年度に検討して示したとおりである（前年度報告書 4.3 節参照）。また、コードの操作画面と操作イメージ、基本設計、入出力フォーマットも基本的に前年度示した内容と同じである。

今年度は、前年度に引き続き、本事業の研究成果を取り入れたコード開発を行って開発を一通り完了した。そして、適切な例題に対して計算コードによる線量計算を行い、従来の計算と比較して妥当性の確認を行った。今年度行った開発作業、及び妥当性確認の詳細をまとめて 付録 IV 「遮蔽線量計算コードの開発、及び妥当性確認の詳細」に添付する。

3.5.2 今年度実施したコード開発項目

表 3-4 及び表 3-5 に、今年度実施したコード開発項目を、CUI（テキスト）ベースの入出力による部分と、GUI（グラフィカルな操作）を要する部分のそれぞれに分けて示す。各開発項目について、作業の概要を記載した。

表 3-4 今年度実施した γ 線遮蔽計算コード開発項目（CUI 操作）

開発項目	詳細項目	作業の概要	付録 IV 説明箇所
計算入力ファイル読込	幾何形状	直方体、球、円柱に加えて、くさび形、楕円体、楕円柱、円錐台、トーラスを追加した。それらの、組合せ立体も定義可能	4.1
	体積線源	体積線源（直方体、球、円筒）の形状定義の仕方を変更	4.2(1)
	複数線源 複数核種	線源条件として、1 線源かつ 1 核種だけでなく、複数線源、複数核種を設定可能にし、線源エネルギー指定も可能とする。	4.2(4)
データの補間	減衰係数	前年度は、対数-対数（エネルギー係数）または線形-対数（遮蔽厚さ-係数）の 3 次ラグランジュ補間を採用していたが、特性 X 線の所で値が不連続になる不具合が分かり、代わりに秋間スプライン補間を採用した。	4.4
	ビルドアップ係数		
線量計算	二次粒子の線量寄	遮蔽計算用データを参照して、一次	3.1

	与（光核反応による光中性子、及び二次 γ 線）	γ 線、中性子、二次 γ 線、全 γ 線の各線量寄与を個別に計算し出力する。	
	線源分割	等分割、ガウス分割（始点・終点・両端・中央細分）、任意分割に対応 等分割、ガウス分割各種に対して、任意の範囲で分割可能とし、球および円柱に対して半球や半円柱を設定可能にする。 任意分割に対して、微小体積線源に任意の重みを割り当てられるようにした。	4.2(2) 4.2(3)
	有限媒質補正機能	無限媒質に対するビルドアップ係数データに対して有限媒質補正を行う機能を設けた。ただし補正データ自体は与えていない。	3.2
	薄い遮蔽材対応	0.5mfpの遮蔽線量計算用データを追加し、1mfp以下の薄い遮蔽材に対する近似線量計算を可能にする。	3.3
	スラブ斜め入射対応	γ 線がスラブ遮蔽に斜めに入射して透過する場合の透過線量計算用データを整備し、遮蔽体系にスラブ遮蔽が現れた場合に、入射角度に依存したデータを適用する線量計算を行う。	3.4
結果出力	可視化ファイル	計算結果の可視化機能が参照するファイルを出力する。	2.1

表 3-5 今年度実施した γ 線遮蔽計算コード開発項目 (GUI 操作)

開発項目	詳細項目	備考	付録 IV 説明箇所
計算入力編集	幾何形状	形状追加に対応	4.1
	体積線源	体積線源の形状定義変更	4.3.3(1)
	線源分割	領域分割条件・任意分割時の重みの設定	4.3.3(1)
	複数線源 複数核種	線源の種類や線源強度の個別指定・光子発生率のカットオフ設定	4.3.3(1)
	線量評価点	検出器編集機能の作成	4.3.3(2)
計算結果可視化	2次元、3次元	計算結果を可視化する機能。可視化ファイルのフォーマットと整合性をとる。	2.1
GUI サポートツール	カスタム材料作成ツール (定義した材料情報は、保存・読込可とする)	カスタム材料情報を定義する。カスタム材料とは、構成要素(元素または化合物)ごとにバルク密度及び原子数密度を指定した混合物のこと。	2.2
	線源ファイル作成ツール (定義した線源情報は、保存・読込可とする)	線源情報を定義する。よく使う線源核種の組み合わせ、又は線源エネルギー分布及び強度を直接指定・編集する。	2.3
	核種インポートツール	線源情報として、ORIGEN コード等の外部で計算した情報を取り込めるようにする。	2.4
	計算妥当性確認ツール	妥当性検証で用いた計算ケースの入力ファイルと出力ファイルをまとめておき、選択した入力ファイルを編集して計算を実行し、出力ファイルとの比較を表示する。	2.5
	斜め入射データ作成ツール	斜め入射データは、斜め透過補正係数ファイルのパラメータを用いて自動生成されるため、基本的に GUI 操作は不要である。	—
	二重層データ作成ツール	同上	—

3.5.3 計算結果の妥当性確認

開発した計算コードの妥当性を確認するため、代表的な文献や既存計算コードから適当な例題を引用して包括的な試算を実施した。表 3-6 に例題の一覧を示す。各例題に対する妥当性確認の詳細は、付録 IV の 5 章に記載した。同表に各例題に対して付録 IV の記載箇所を示す。

表 3-6 遮蔽線量計算コードの妥当性確認に用いた例題

例題	比較量	線源	遮蔽	付録 IV
放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015				
1.2 光子の遮蔽計算方法 1.2.1 透過率データを用いて実効線量率を求める方法	実効線量率定数	Co-60	なし	5.1.1
	実効線量透過率	Co-60	コンクリート	
1.2.2 実効線量ビルドアップ係数を用いて実効線量率を求める方法	実効線量率	Co-60	コンクリート	5.1.2
3.1 診療用腔内照射施設の例 3.1.3 人が常時立ち入る場所における 1 週間あたりの実効線量の計算	実効線量率定数	Ir-192	なし	5.1.3
	実効線量透過率	Ir-192	タングステン	
	実効線量	Ir-192	タングステン	
第 5 章 放射線発生装置取扱施設における遮蔽計算例 (7)管理区域の境界等に対する計算 B 点 (操作室)	利用線錐の透過率	X 線 10MeV (MCNP で評価した線源スペクトルを使用)	コンクリート、鉄	5.1.4
	実効線量	X 線 10MeV	コンクリート、鉄	
QAD-IE マニュアル				
例題	比較量	線源	遮蔽	付録 IV
サンプル問題 1	実効線量率	Co-60	コンクリート	5.2.1
サンプル問題 2	実効線量率	廃棄物貯蔵タンク	水	5.2.2
QAD-CGGP2R コード				
例題	比較量	線源	遮蔽	付録 IV
鉛遮蔽の例	実効線量透過率	Co-60	鉛	5.3.1
	実効線量率	Co-60	鉛	
土壌遮蔽の例	実効線量率定数	Cs-134,-Cs-137	土壌	5.3.2
	実効線量透過率	Cs-134,-Cs-137	土壌	
	実効線量率	Cs-134,-Cs-137	土壌	
一括と個別計算の比較				
例題	比較量	線源	遮蔽	付録 IV
複数核種の例	実効線量率	Co-60、Cs-134、Cs-137	アルミ	5.4.1
複数線源の例	実効線量率	Co-60、Cs-137	鉄	5.4.2

各例題の計算コードによる結果を、例題を引用した文献・コードに示された従来の計算値と比較した。表 3-7 に比較結果の一覧を示す。

表 3-7 遮蔽線量計算コードの妥当性確認の結果一覧

例題	線源	遮蔽	比較結果 (見直し計算 値) / (文献コード 記載値)	遮蔽厚さ
放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015				
1.2 光子の遮蔽計算方法 1.2.1 透過率データを用いて実効線量率を求める方法	Co-60	なし	1.00	—
	Co-60	コンクリート	1.02	厚さ 155cm まで
1.2.2 実効線量ビルドアップ係数を用いて実効線量率を求める方法	Co-60	コンクリート	1.07	厚さ 100cm
3.1 診療用腔内照射施設の例 3.1.3 人が常時立ち入る場所における 1 週間あたりの実効線量の計算	Ir-192	なし	1.00	—
	Ir-192	タングステン	0.88	厚さ 6cm
	Ir-192	タングステン	0.88	厚さ 6cm
第 5 章 放射線発生装置取扱施設における遮蔽計算例	X 線 10MeV (MCNP で評価した線源スペクトルを使用)	鉄	(1 次 γ) 1.03-1.55 (中性子込) 1.03-2.05	厚さ 1-50cm
		コンクリート	1.01-1.09 (中性子寄与は無視できる)	厚さ 1-50cm
QAD-IE マニュアル				
例題	線源	遮蔽		
サンプル問題 1	Co-60	コンクリート	0.91-0.96	—
サンプル問題 2	廃棄物貯蔵タンク	水	0.99-1.00	—
QAD-CGGP2R コード				
例題	線源	遮蔽		
鉛遮蔽の例	Co-60	鉛	1.00-1.64	厚さ 0.1-30cm
	Co-60	鉛	1.08	厚さ 10cm
土壌遮蔽の例	Cs-134、137	土壌	1.00	—
	Cs-134、137	土壌	0.97-1.00	厚さ 5-100cm
	Cs-134、137	土壌	0.97	—
一括と個別計算の比較				

例題	線源	遮蔽		
複数核種の例	Co-60、Cs-134、137	アルミ	一括計算と個別計算の計算結果は一致したことを確認	—
複数線源の例	Co-60、Cs-137	鉄		—

今回見直した遮蔽線量計算法による計算結果を、従来の文献・計算コードに記載された計算値と比べたところ、基本的にRI核種を線源とする場合は、重核で遮蔽が厚くなると差が現れるケースもあるが、比較的よく一致する。

一方、放射線発生施設における比較結果はよく一致しないケースがある。従来の計算値は光中性子を考慮していないため、中性子が多く発生するケースで差が現れることがある。また、放射線発生装置の利用線錐又は漏洩線の線源強度が不明である点も比較の障害となっており、適当な例題がなく、比較結果は一つの参考である。

3.6 遮蔽計算コードのレポート作成で求められる表示項目の調査

第4回レビュー委員会で、開発した遮蔽計算コードに対して、計算入力または出力を画面に羅列して表示するだけでなく、許認可用の印刷やファイリングを目的とした簡潔な計算レポート作成を求める意見があった。それを受けて、計算コードのレポート作成に資するため、研究レビュー委員会の委員（研究協力者）らにアンケート調査を行った（5.2.3項参照）。その目的は、各位の専門分野・関心分野の施設において、遮蔽設計・遮蔽線量計算・安全評価で求められる計算情報を示してもらい、遮蔽計算の出力として、何をどのように提供するのが適当かを明らかにすることである。

表3-8に調査結果をトピックスごとに分類した一覧を示す。調査結果をふまえて、意見の一致がみられた部分について、遮蔽計算コードのレポート機能の拡充を行った。

表 3-8 遮蔽計算コードのレポート作成で求められる表示項目調査のまとめ

分類	レポート記載項目
計算コードの入力	入力データのエコー
	ユーザが指定したパラメータ
	パラメータ等のデフォルト値
計算コードの内蔵データ	計算で使ったデータファイル名 <ul style="list-style-type: none"> ・減衰係数 ・ビルドアップ係数 ・使ったビルドアップ係数の線量種類と材料名
	データの出典・作成年度、そのデータのバージョン、またはそのデータが準拠する ICRP 等の元文献
計算中に作成される情報	線源から評価点まで透過線が通過する途中にある各遮蔽体の透過距離 (当該計算で使ったデータの情報を含む)
	計算エラー情報の提示 <ul style="list-style-type: none"> ・計算の入力データや内蔵データに整合性が欠落 ・入力ミスの可能性 ・コードのバグに起因
計算コードの出力	線量評価点の情報 <ul style="list-style-type: none"> ・評価点番号 ・評価点位置(X,Y,Z) or (RZθ) ・計算した線量値 ・数値の単位 ・準拠する線量換算係数
	メッシュ状の評価点 (2次元、3次元) <ul style="list-style-type: none"> ・多次元の空間情報出力の並べ方、見せ方は要検討
	その他の一般情報 <ul style="list-style-type: none"> ・計算タイトル ・計算コードバージョン ・計算実行日時 ・実行フォルダ ・計算入力ファイル名、出力ファイル名
レポートのファイル形式	CSV より固定長のフォーマットがよい。 選択可能にする。
	アスキーTEXT データがよい。 2次元/3次元の出力項目がある場合、別のファイルに切り分けて出力
その他	代表的な施設の許認可申請書を参照してレポート項目を抽出するとよい。 レポートの書式は申請書の添付資料自体、又はその品質を保証できるものや裏付けデータとして利用できるものがよい。

参考文献

- [3-1] 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所、令和 2 年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（ICRP2007 年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究）事業成果報告書、令和 3 年 3 月。
- [3-2] Grove Software, MicroShield® Pro Version 12,
<https://radiationsoftware.com/microshield/>.

4 新勧告取入れの運用に資するガイドラインの検討

4.1 簡易遮蔽計算コードの利用、及び新勧告対応に係る実態調査

4.1.1 調査目的と前年度の経緯

本調査の目的は、遮蔽の安全審査に係る担当者にヒアリングを行い、 γ 線の簡易遮蔽計算が利用される場面で、簡易遮蔽計算コードに期待される仕様・機能を調査すること、そして得られた知見を、本事業で検討する遮蔽計算法に反映することである（前年度報告書 2.2 節参照[4-1]）。

本調査は、前年度事業において、2020年9月にアメリカシアトルで開催予定の放射線遮蔽国際会議(ICRS14/RPSD2020)に参加し、参加者へのヒアリングを通じて実施する計画であった。ところが、COVID-19のパンデミックにより、同会議は2021年9月に開催が延期されたため、想定していた調査を遂行できなかった。その代替りとして、原子力主要国の規制担当者に対してメールで調査票を送ったが、特に成果は得られなかった。そこで、2021年9月に延期された同国際会議に参加して、改めて参加者にヒアリングを行うように計画を変更した。

4.1.2 今年度の調査中止と影響について

2021年4月、同国際会議の主催者より、参加者らに対してメールで連絡があり、会議開催を2021年9月から更に2022年9月に再延期する旨の通達がなされた。これを受けて、本事業の期間中に海外の関係者に直接ヒアリングする機会はなくなると判断し、調査を中止することにした。

調査中止により、海外では遮蔽実務に関して新勧告をどのように考え、また法規類にどの程度取り入れているかを明確にすることはできなかった。一方、前年度事業で実施した海外の規制利用コードの対応状況調査を通じて、海外の新勧告対応について大凡の見当をつけることができた（前年度報告書 2.1 節参照）。その成果は、本事業に適切に反映されており、調査中止の実質的な影響は殆どないと考えられる。

なお、本事業終了後の開催になるが、同国際会議で本事業の研究成果を発表する予定であり、論文投稿を行った（5.4 節参照）。

4.2 実用量の定義変更に関するヒアリング調査

ガイドラインの作成に資するため、最近刊行されたICRU95[4-2]で示された実用量の概念変更が遮蔽線量評価に与える潜在的影響について、専門家にヒアリング調査を行った（5.3 節参照）。

ヒアリングの結果、本事業の遮蔽線量評価に係る議論は下記のとおりである。

- ICRU95 では、場を測る線量である周辺線量(ambient dose)は、各照射条件に対する実効線量の換算係数が最大となる値と新たに定義された。従来、入射エネルギーによって実効線量が最大になる照射条件は変わることが知られており、加速器のようにエネルギーが高くなると AP より PA の方が大きくなるケースがある。照射条件を考慮して最大になる所をとろうとするのが新しい周辺線量の考え方である。
- その変更の動機として、ICRP Pub116 の高エネルギー拡張により、数 MeV を超えると 1cm 線量当量 $H^*(10)$ が実効線量を過小評価するという実用量の課題が指摘されており、その是正措置である。
- 施設の遮蔽計算評価に関する限り、現行法令に従い、実効線量又は等価線量をベースに防護するという点を変える必要はない。線量計算の出力もそれに従う。
- 一方で、場の設計の方を考えると実用量を補足的に考慮するケースもありうる。例えば、眼の水晶体の等価線量限度の引下げを踏まえて、1cm 線量当量と 3mm 線量当量の関係を予測する場合、等。

以上の議論を踏まえて、本事業で見直した遮蔽線量計算法では、実効線量を 6 種類全ての照射条件に対して計算できるようにした。また、実用量 (1cm, 3mm 線量当量) も現行法令に従って計算できるようにした。

ガイドラインにおいては、実効線量の照射条件による変化、及び実効線量と 1cm 線量当量の差について記載した。さらに、実用量の定義変更が将来に検討される場合の参考として、ICRU95 の要点を記載した。

4.3 新勧告取入れによる遮蔽線量計算・安全評価実務への影響調査

2007 年勧告等の法令取入れが遮蔽の実務 (施設設計、許認可、規制) に与える影響をガイドラインに記載するため、研究レビュー委員会の委員 (研究協力者) らにアンケート調査を行った (5.2.3 項参照)。表 4-1 に調査結果をトピックスごとにまとめた一覧を示す。

調査結果をふまえて、ガイドラインにおいては個々のトピックスに対して想定される対応の具体例を記載した。

表 4-1 2007 年勧告等の法令取入れが遮蔽計算実務に与える潜在的影響のまとめ

法令改定による遮蔽線量評価の実務影響トピックス	概要
1 設計・安全評価における線量の再評価、及び過去の評価結果との整合性確認	<p>施設の設計・安全評価において過去に提示した評価を見直して整合性を改めて確認する。次の計算作業を実施し、場合によっては認可の再申請・再審査が必要になる。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・過去の評価に対する再計算 ・設計尤度に係る妥当性評価 <p>なお、こうした作業は、一部の申請者にとってはリソースの面で負担となり、対応に苦慮することが懸念される。</p>
2 実務で使用されるデータ、及び参照文献の確認と修正	<p>設計・安全評価プロセスの変更は殆ど無いが、その中で使用されるデータ及び参照文献については、広く確認と修正を要する。</p>
3 施設の放射線安全管理規程との整合性確認	<p>施設の放射線安全管理規程との整合性を確認する。場合によっては、各種の予防規程、自主管理基準等の修正が必要になる。</p>
4 法令改定に伴い、今回の見直しでまだ対応していない範囲の確認	<p>今回の見直しでは、γ/X 線を起点とするバルク遮蔽計算に対応したが、それ以外の線種には未対応である。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・β 線を起点とする制動 X 線の遮蔽線量評価用データ、及び計算コードへの実装 ・同様に、中性子を起点とするデータ
5 法令改定に関するポイントの周知並びにガイドライン及び遮蔽計算コードの利活用	<p>遮蔽安全性評価を確実に実施するためには、遮蔽計算用のデータとコードを提供するだけでなく、法令改定のポイント、遮蔽計算の仕方と適用性について伝達する必要がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ガイドラインの提供、放射線取扱主任者などを通じた周知徹底 ・特に数の多い申請者に対する遮蔽計算コードの利活用 ・計算コード等を用いた遮蔽線量評価に不慣れな申請者にとっては、その評価方法についての理解及び習熟が必要

4.4 ICRP2007 年勧告に基づく γ 線遮蔽線量計算ガイドラインの作成

本事業の成果を整理して、放射線規制の効率的な運用に資する技術ガイドライン「ICRP2007 年勧告等に基づく γ 線遮蔽線量計算ガイドライン」を作成し、別冊として提出した。その目的は、ICRP 2007 年勧告等の法令取入れ準備のために行われた γ 線の遮蔽線量計算法の見直しについて概要を示すとともに、見直しを与える遮蔽線量計算の実務への潜在的影響を明らかにすることで、同勧告等の法令取入れ後に放射性同位元素等規制法に基づく申請者が実施する遮蔽評価に資する指針を与えることである。遮蔽線量計算の対象施設としては、放射性同位元素 (RI) を取り扱う施設及び放

放射線発生装置を使用する施設を想定する。ここでの放射線発生装置とは基本的に医療用電子リニアックを指しており、研究用、陽子線、重粒子線等の特殊な加速器を含まない。

表 4-2 に、ガイドラインの目次を示す。

第 1 章で、本ガイドラインの作成目的と内容構成を示す。

第 2 章で、外部被ばくに関する ICRP 2007 年勧告の内容を、1990 年勧告のそれと比べたときの主な変更点について示す。

第 3 章で、前章で述べた変更点のうち、遮蔽線量計算に直接影響を及ぼす実効線量換算係数の改訂について、法令で想定される規定について示す。また遮蔽線量計算の確認は実測による方法も取り得ることから、対応する実用量への換算係数についても記載した。なお、防護量と実用量に関しては、最近になって ICRU 又は ICRP から次期主勧告を見据えたレポートが続けて刊行された。それらのレポートから遮蔽線量評価に係るポイントを抽出して、将来を見越した注意喚起を行う。

第 4 章で、放射線施設に対する遮蔽線量計算法を俯瞰して、今回見直しを行った γ 線の遮蔽線量計算法の適用範囲を明らかにする。次に、その見直しの内容を、ICRP レポートに基づく部分と最新の研究に基づく部分に分けて紹介し、主な成果として新たに作成した遮蔽線量計算用データの一覧を示す。最後に、遮蔽線量計算の手順を具体的な例題とともに示し、また計算結果を遮蔽評価に用いる場合の注意を与える。

第 5 章で、今回の遮蔽線量計算法の見直しが与える遮蔽計算の実務への潜在的影響について示す。専門家に対するアンケート調査で明らかになった関心事として、遮蔽計算の実務で用いられる図書・マニュアル類に対して、法令改定で想定される記載変更の範囲を示す。次に、施設の許認可に関して、申請者が実施すべき遮蔽の再確認手順を例示する。今回の遮蔽線量計算法の見直しによって、過去の評価と同じ計算条件であっても遮蔽線量の計算値に変化を生じることがある。そのため、申請者は遮蔽評価を改めて実施し、規制要件への適合性を再確認する必要がある。最後に、今回の遮蔽線量計算法の見直しにより、そうした再確認時に典型的に現れる線量計算値の変化の傾向について述べる。

以上、本事業で実施した遮蔽計算法の見直しについて、適用範囲と計算の仕方をガイドし、また実務への潜在的影響を示唆することで、事業者が実施する遮蔽安全性評価の指針を与えた。

表 4-2 ICRP2007 年勧告等に基づく γ 線遮蔽線量計算ガイドラインの目次

1	ガイドラインの目的と構成
2	ICRP2007年勧告等に基づく外部被ばく線量評価に係る変更点
2.1	ICRP1990年勧告等に基づく主な変更点の一覧
2.2	放射線加重係数、及び組織加重係数
2.3	実効線量の計算に用いられる人体モデル
2.4	入射粒子フルエンスあたりの線量換算係数
2.5	眼の水晶体の等価線量限度、及び線量評価の算定
2.6	放射性核種データ
3	外部被ばくに係る線量換算係数の改訂と最新の国際動向
3.1	外部被ばくに係る線量換算係数の改訂
3.1.1	実効線量（防護量）への換算係数について
3.1.2	測定に係る量（実用量）への換算係数について
3.2	最新のICRP/ICRUレポートを踏まえた遮蔽線量評価に係る注意
3.2.1	ICRU95（外部被ばくに係る実用量）の要点
3.2.2	ICRP 147（放射線防護における線量の使用）の要点
3.2.3	ICRP次期主勧告の論点
3.2.4	将来に想定される遮蔽線量評価に係る注意
4	ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽線量計算法の見直し対応
4.1	遮蔽線量計算法の概要
4.1.1	遮蔽線量計算法の適用範囲とその見直し部分
4.1.2	見直しを行ったバルク遮蔽線量計算法の説明
4.2	遮蔽線量計算法の見直し事項
4.2.1	ICRPレポートに基づく見直し事項
4.2.2	法令に基づく見直し事項
4.2.3	最新の研究に基づく見直し事項
4.3	見直しで作成した遮蔽計算用データの一覧及び従来との比較
4.4	遮蔽計算コードを用いた遮蔽線量計算の手順と例題
4.4.1	放射性同位元素を取り扱う施設
4.4.2	放射線発生施設を使用する施設
4.5	評価に遮蔽計算の結果を用いる際の注意
5	遮蔽線量計算法の見直しによる遮蔽計算の実務への潜在的影響
5.1	遮蔽計算の実務への潜在的影響の調査
5.2	実務で用いられる図書・マニュアル類への影響範囲
5.3	放射線施設の遮蔽の再確認手順の例
5.3.1	放射性同位元素を取り扱う施設
5.3.2	放射線発生施設を使用する施設
5.4	遮蔽線量計算で想定される主な影響の示唆
5.4.1	線量換算係数等の改訂による影響
5.4.2	高エネルギー拡張による影響
5.4.3	実効線量と対応する実用量（1cm線量当量）の差について
5.5	今後の課題
付録-1	遮蔽計算コードを用いた遮蔽線量計算の手順と例題
付録-2	新勧告法令取入れによる遮蔽線量計算・安全評価実務への影響調査結果
付録-3	遮蔽実務で用いられる図書・マニュアル類で想定される記載変更範囲の例

参考文献

- [4-1] 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所、令和2年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究）事業成果報告書（本文及び付録抜粋）、令和3年3月。
- [4-2] ICRU. Operational Quantities for External Radiation Exposure, ICRU Report 95, J. ICRU 20(1) (2020).

5 事業の進捗管理、及び人材育成活動

5.1 研究班会合の実績

委託業務実施期間中に、研究の進捗状況を報告・確認する目的で開催された研究班会合の実績を表 5-1 に示す。規制庁側の対応者は、基本的に下記 3 名である。

- ・原子力規制庁長官官房放射線防護グループ放射線規制部門 中村尚司 (PO)
- ・同 益子真一 (PO 補佐)
- ・同 宮脇豊 (安全管理調査官)

表 5-1 研究班会合の開催実績

連番	日程	連絡事項
1	令和 3 年 4 月 20 日	<ul style="list-style-type: none"> ・委託事業の実施概要と工程確認 ・光核反応のヒアリング報告 ・ビルドアップ係数の計算コード比較 ・遮蔽国際会議の再延期について
2	令和 3 年 5 月 25 日	<ul style="list-style-type: none"> ・外注「新勧告を反映した簡易遮蔽計算コード開発支援作業」の仕様確認 ・外注「新勧告を反映した遮蔽線量計算用データの作成支援作業」の仕様確認 ・ビルドアップ係数計算の計画報告 ・スラブ斜め入射の線量評価について
3	令和 3 年 7 月 6 日	<ul style="list-style-type: none"> ・第 3 回研究レビュー委員会開催報告 ・人材育成活動（簡易計算コードレビューWG 会合）から情報提供 ・第 2 四半期の予定確認 ・日本原子力学会秋の大会予稿確認
4	令和 3 年 8 月 31 日	<ul style="list-style-type: none"> ・スラブ斜め透過線量評価法のまとめ ・遮蔽線量計算用データ作成の進捗報告 ・遮蔽線量計算コード開発の進捗報告 ・ガイドライン案の進捗報告 ・第 2～3 四半期の予定確認
5	令和 3 年 10 月 5 日	<ul style="list-style-type: none"> ・実用量変更のヒアリング報告 ・ガイドライン案の追記確認 ・外注作業の進捗報告 ・二重層遮蔽進捗報告 ・学会発表報告
6	令和 3 年 12 月 1 日	<ul style="list-style-type: none"> ・第 4 回研究レビュー委員会開催報告 ・外注作業進捗報告 ・ガイドライン案の進捗報告 ・二重層遮蔽計算評価の進捗報告 ・第 3～第 4 四半期の予定確認 ・日本原子力学会 R4 春の年会企画セッション提案報告
7	令和 4 年 1 月 12 日	<ul style="list-style-type: none"> ・中間報告 ・外注作業進捗報告 ・ガイドライン案の進捗報告

		<ul style="list-style-type: none"> ・二重層遮蔽計算評価の進捗報告 ・第4四半期の予定確認 ・人材育成活動（日本原子力学会簡易計算コードレビューWG会合）の報告 ・日本原子力学会 R4 春の年会予稿確認
8	令和4年1月21日	<ul style="list-style-type: none"> ・規制庁成果報告会の発表資料確認
9	令和4年2月8日	<ul style="list-style-type: none"> ・成果報告会発表資料の最終確認 ・日本原子力学会 R4 春の年会、部会セッション連続講演の概要報告 ・外注作業進捗報告（データ・コードの妥当性確認） ・二重層遮蔽の線量計算用データ作成について（コンクリート 100cm+鉄 40cm） ・第5回研究レビュー委員会の議事次第報告（3/1）
10	令和4年3月7日	<ul style="list-style-type: none"> ・最終報告 ・第5回研究レビュー委員会の報告 ・規制庁成果報告会の報告 ・ガイドライン案の進捗報告、ドラフト提出
11	令和4年3月29日	<ul style="list-style-type: none"> ・ガイドライン案の最終確認 ・成果報告書の確認

5.2 研究レビュー委員会

5.2.1 委員会趣旨と委員構成

本事業の実施に際して、研究の成果及び方向性について専門家の意見を、各位の業務・専門の立場から幅広く聴取し、研究に資することを目的に、研究レビュー委員会を設置した。

委員の構成を表5-2に示す。本事業の研究協力者らに加えて、本事業に関して豊富な経験を有する外部有識者を12名招聘した。特に裁決を要する会合ではないため、委員長を設けず、研究代表者及び研究参加者らが事務・運営方となって議事の進行を行った。

表 5-2 研究レビュー委員会の委員構成

氏名	所属	部署/役職等（2021.04）
上蓑 義朋	公益社団法人日本アイソトープ協会	常務理事
波戸 芳仁	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構 共通基盤研究施設	放射線科学センター
中島 宏	国立大学法人北海道大学 大学院工学研究院	応用量子科学部門 原子力支援社会基盤技術分野 特任教授

横山 須美	藤田医科大学 研究支援推進本部	共同利用研究設備サポ ートセンター
助川 篤彦	国立研究開発法人量子科学技術研究開発 機構	核融合エネルギー部門 那珂核融合研究所トカマ クシステム技術開発部
吉田 昌弘	公益財団法人原子力安全技術センター	常務理事
保田 浩志	国立大学法人広島大学 原爆放射線医科学研究所	線量測定評価研究分野 教授
松居 祐介	株式会社テプコシステムズ	原子力炉心技術部
延原 文祥	東京ニュークリア・サービス株式会社	技術部
高田 祐太	三菱重工業株式会社	原子力セグメント 炉心・安全技術部 炉心・放射線技術課
坂本 幸夫	株式会社アトックス	技術開発センター 基盤技術開発部
吉岡健太郎	東芝エネルギーシステムズ株式会社	磯子エンジニアリングセ ンター 原子力安全シス テム設計部

5.2.2 開催実績と議事

今年度の委員会開催実績を主な議事とともに [表 5-3](#) に示す。計 3 回の会合が開催され、開催形式は、コロナ禍により、3 回とも Web 会議とした。

表 5-3 研究レビュー委員会の開催実績

日 程	主な議事
【第 1 回、通算第 3 回】 令和 3 年 6 月 28 日 13:00～16:00	(1) 今年度事業の実施計画の確認 (2) 光核反応に関するヒアリング調査報告 (3) 研究、及び外注作業の進捗報告 ・新勧告を反映した遮蔽計算用データの開発進捗 ・662keV 及び 15MeV の光子線源を用いた計算コード間比較 ・スラブ斜め透過時の簡易線量評価 ・新勧告を反映した遮蔽計算コードの開発進捗
【第 2 回、通算第 4 回】 令和 3 年 10 月 27 日 14:00～15:00	(1) 事業の活動実績報告 (2) 研究、及び外注作業の進捗報告 ・新勧告を反映した遮蔽計算用データの開発進捗 ・スラブ斜め透過の簡易線量評価 ・二重層遮蔽の簡易線量評価 ・新勧告を反映した遮蔽計算コードの開発進捗 ・計算コードのデモンストレーション ・ガイドライン案の目次と前半部 ・実用量の変更に係るヒアリング報告

<p>【第3回、通算第5回】 令和4年3月1日 10:00～12:30</p>	<p>(1) 事業の活動実績報告 (2) 研究、外注作業の成果報告</p> <ul style="list-style-type: none"> ・新勧告を反映した遮蔽計算用データの開発 ・データ整備における課題、データの特徴 ・二重層遮蔽の簡易線量評価 ・新勧告を反映した遮蔽計算コードの開発 ・計算コードの全体像 ・整備したデータ・コードの妥当性確認 ・実務影響及び計算のレポートニングに関するアンケート調査 ・ガイドライン案の目次と後半部 <p>(3) その他</p> <ul style="list-style-type: none"> ・日本原子力学会 R4 春の年会、部会セッション講演について ・規制庁の成果報告会と年次評価について ・事業終了の挨拶
---	---

5.2.3 アンケート調査

研究レビュー委員会、又は研究班会合で指摘された課題について、専門家から広く情報を集めるために、研究協力者らに対してアンケート調査を2件実施した。調査結果は、成果に適切に反映された(3.6節、4.3節参照)。表5-4にアンケート調査の実績を示す。

表 5-4 アンケート調査の実績

タイトル、日程	概要
<p>新勧告法令取入れによる遮蔽線量計算・安全評価実務への影響調査</p> <p>令和3年11月 調査票配布</p>	<p>【背景】2007年勧告等の法令取入れが遮蔽の実務(施設設計、許認可、規制)に与える影響をまとめてガイドラインに記載する必要がある。1990年勧告に基づく法令以降の改正、さらに直近に計画される改正を含めた影響を幅広く考慮する。</p> <p>【目的】各位の専門分野・関心分野において、遮蔽線量計算・遮蔽安全評価の実際的な影響について示してもらい、ガイドライン作成の一助とする。</p>
<p>簡易遮蔽計算コードのレポート作成で求められる表示項目の調査</p> <p>令和3年11月 調査票配布</p>	<p>【背景】第4回レビュー委員会で、計算入力または出力を画面に羅列して表示するだけでなく、許認可用の印刷やファイリングを目的とした簡潔な計算レポート作成を求める意見があった。遮蔽計算の出力項目をどのように提供するのが適当か調査する。</p> <p>【目的】各位の専門分野・関心分野の施設において、遮蔽設計・遮蔽線量計算・遮蔽安全評価で求められる計算情報を示してもらい、それらをまとめて計算コードのレポートニング機能に資する。</p>

5.3 ヒアリング調査

特定の課題に詳しい専門家に対するヒアリング調査を、光核反応に関して2件、実用量に関して1件、計3件実施した。調査結果は、成果に適切に反映された（2.4節、4.2節参照）。表5-5にヒアリング調査の開催実績を示す。

表 5-5 ヒアリング調査の実績

タイトル、場所、日程、参加者	議事
<p>光核反応に関する講演会、及びヒアリング 令和3年4月12日 10:00~12:00 場所：KEK 放射線管理棟ビデオ室、Web 会議同時開催</p> <p>講演者（発表順）： 延原（株 TNS） T.K.Tuyet（総研大）</p> <p>参加者： 深堀、松田（JAEA） 中島（北大） 佐波、波戸他（KEK）</p>	<p>(1) 開会挨拶 (2) 「規制庁事業における光核反応の扱いについて現状報告」 延原講師 (3) 「兵庫大の NewSUBARU 施設を使った光中性子測定実験に係る講演」 Tuyet 講師 (4) 質疑・討論</p> <p>配布資料： ・「PHITS 等 MC コードによる光核反応の調査について」 ・発表資料「Measurement of photonutron from the (γ, xn) with Laser Compton back scattering photon at NewSUBARU BL-01」 ・発表資料「Comparison of Double-differential Cross Sections between JENDL/PD-2016 and Experimental Data for Photo-neutron Production of Medium-heavy Nuclei at 16.6MeV」</p>
<p>光核反応に関するヒアリング 令和3年4月15日 15:00~ 場所：清水建設技術研究所会議室</p> <p>参加者： 小迫、能任（清水建設株） 延原（株 TNS）</p>	<p>(1) 論文紹介 小迫氏 (2) 質疑・討論</p> <p>配布資料： ・K. Kosako, et al., Angular distribution of photoneutrons from copper and tungsten targets bombarded by 18, 28 and 38 MeV electrons,” J. Nucl. Sci. Technol., 48, 227-236 (2011). ・小迫, 中村, 医療用リニアック室の遮蔽計算に使用する光核反応ファイルの比較, 日本原子力学会和文論文誌, 20, 1, 22-33 (2021). ・小迫, 医療用リニアック室の遮蔽計算における中性子のエネルギー分布の妥当性, 日本原子力学会和文論文誌, 20, 4, 143-158 (2021).</p>
<p>実用量の定義変更に関するヒアリング 令和3年9月16日 13:30~ 場所：産総研黒澤氏居室</p> <p>講演者（発表順）： 平尾（海技研） 黒澤忠弘氏（産総研）</p> <p>参加者： 延原（株 TNS）</p>	<p>(1) 事業におけるガイドライン作成について、平尾 (2) ICRP/ICRU から出た実用量改定に関する発表、黒澤氏 (3) 質疑・討論</p> <p>配布資料： ・ガイドライン作成の意図説明資料 ・黒澤, ICRP/ICRU レポート“Operational Quantities for External Radiation Exposure”について, 勉強会資料 ・原子力安全研究協会, 令和元年度放射線対策委託費事業報告書 放射線管理に係る実用量の測定等の実態調査 令和2年3月.</p>

5.4 成果発表

今年度、本事業の概要と成果を報告するために、セッション連続講演を含む7件の国内発表、及び1件の国際会議への論文投稿を実施した。

- 第6回放射線遮蔽設計法に係るワークショップ：簡易遮蔽解析コードレビューWG活動に係る成果発表（2021年8月）
- 日本原子力学会 2021年秋の大会：光核反応、スラブ斜め入射の影響について発表（2021年9月）[5-1]
- 日本原子力学会 2022年春の年会：二重層遮蔽線量計算の再評価について発表（2022年3月）[5-2]
- 同年会：放射線工学部会セッション「簡易遮蔽計算法のレビューで得られた知見と計算コードの実装」、研究担当者ら4名の連続講演（2022年3月）
 - 遮蔽設計における簡易計算法の位置付けと工学的課題[5-3]
 - 目指すべき簡易遮蔽計算コード JPKG2022 の開発目標と課題[5-4]
 - ビルドアップ係数のための光核反応を考慮した深層透過計算[5-5]
 - 簡易遮蔽計算コードの開発とデモンストレーション[5-6]
- 放射線遮蔽国際会議（ICRS-14, アメリカ、シアトル開催予定、2022年9月）：論文投稿「Photon deep penetration calculation including the photonuclear reaction using the Monte-Carlo code for a buildup factor」[5-7]

5.5 人材育成活動

本事業の人材育成活動は、次の学会ワーキンググループを通じて行われた。

- 日本原子力学会 放射線工学部会 簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ（WG、第三期）

同WGの目的、沿革、本事業との係り、前年度開催実績については、前年度報告書5.5節[5-8]に記載したとおりである。今年度は、表5-5に示すとおり、計3回のWG会合を開催し、WG委員の協力により本事業で作成した遮蔽計算用データのレビューを行うとともに、得られた知見について報告と意見交換を行った。

表 5-5 学会 WG を通じた人材育成活動実績

日 程	本事業の人材育成活動に係る議事
【第17回WG会合】 日時：2021年6月9日14:00～ （Web会議）	（1）「ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究」進捗報告 （2）光核反応を含むビルドアップ係数のGP近似式適用について （3）スラブ斜め入射時の簡易線量評価について （4）日本原子力学会発表について （5）遮蔽計算コードについて話題提供（角度固

	有値法、散乱カーネル法) (6) その他 ・ICRS16再延期について ・遮蔽設計法ワークショップ日程通知
【第18回WG会合】 日時：2021年9月9日10:00～ (Web会議)	(1)「ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究」進捗報告 (2)規制庁安全研究のビルドアップ計算その2 (3)光核反応を含むビルドアップ係数のGP近似式適用について (3)スラブ斜め入射時の簡易線量評価について (4)簡易遮蔽計算コード開発の進捗報告 (6)その他 ・遮蔽設計法ワークショップ(8/20)開催報告
【第19回WG会合】 日時：2021年12月22日10:00～ (Web会議)	(1)「ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究」ガイドライン骨子報告 (2)2次ガンマ線の分離による不整合について (3)許認可申請等及び講習研究会アンケート報告

参考文献

- [5-1] 平尾, 延原, 大西, γ 線簡易遮蔽線量計算法の適切な見直しに関する研究—光核反応、またはスラブ斜め入射の影響—, 日本原子力学会 2021年秋の大会, 1H05 (2022).
- [5-2] 平尾, 大西, 佐藤, 二重層遮蔽線量計算の再評価—, 日本原子力学会 2022年春の年会, 1B12 (2022).
- [5-3] 平尾, 遮蔽設計における簡易計算法の位置付けと工学的課題, 日本原子力学会 2022年春の年会, 2B_PL01 (2022).
- [5-4] 延原, 目指すべき簡易遮蔽計算コード JPKG2022 の開発目標と課題, 日本原子力学会 2022年春の年会, 2B_PL02 (2022).
- [5-5] 大西, ビルドアップ係数のための光核反応を考慮した深層透過計算, 日本原子力学会 2022年春の年会, 2B_PL03 (2022).
- [5-6] 田村, 簡易遮蔽計算法のレビューで得られた知見と計算コードの実装, 日本原子力学会 2022年春の年会, 2B_PL04 (2022).
- [5-7] S. Ohnishi, F. Nobuhara, and Y. Hirao, "Effect of photonuclear reaction on deep penetration problem for build-up coefficient calculation", ICRS14/RPSD2022, to be published.
- [5-8] 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所、令和2年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究）事業成果報告書、令和3年3月。

6 まとめ

本事業の研究期間は2年間である。令和3年度は最終年度であり、新勧告に基づく遮蔽線量計算法の見直しを前年度に検討した範囲に対して実施し、新勧告に対応した遮蔽計算用データの作成、及び最新の知見に基づく遮蔽線量計算法の拡張を完了した。また、許認可の申請者自らが新勧告取入れに対応した遮蔽線量計算を実行できるように、本研究の成果を取入れた γ 線遮蔽線量計算コードを開発した。最後に、申請者に対して新勧告取入れの趣旨と内容について理解を深め、また安全審査において申請に使用する遮蔽安全性評価の妥当性確認に資するため、「ICRP2007年勧告等に基づく γ 線遮蔽線量計算ガイドライン」を作成し、別冊として提出した。

実施期間中、成果の外部発表、及び研究協力者を委員とする研究レビュー委員会を通じて、事業活動の専門家レビューを行い、得られた意見を適切に研究調査に反映した。また、学会のワーキンググループを通じて、遮蔽線量計算・安全性評価技術のスキル向上・維持に資するための人材育成活動を行った。

なお、前年度に実施する計画であった遮蔽計算コードの利用及び新勧告対応に係る実態調査について、参加を予定していた国際会議の開催がCOVID-19のパンデミックにより来年度に再延期されたため、ヒアリング調査を中止せざるを得なくなった。ただし、その目的は別の調査で部分的に補われており、影響は実質的に殆どなかった。

以上、本事業の実施項目に対する研究調査活動をほぼ計画どおり完了し、成果を達成することができた。

以上

付録 I

ビルドアップ係数の計算方法

付録 I ビルドアップ係数の計算方法

目次

1.序	2
2.点減衰核法コードが算出する線種と疑似ビルドアップ係数の定義	2
3.ビルドアップ係数の算出方法.....	2
3.1.計算コード.....	2
3.2.核データライブラリ	3
3.3.計算方法	3
3.4.計算体系	4
3.5.遮蔽体の組成.....	5
3.6.タリー設定.....	5
3.7.カットオフエネルギー	6
3.8.光核反応バイアス.....	6
3.9.特記すべきオプション設定	7
3.10.相対誤差の基準	7
3.11.分散低減法について	8
3.12.ビルドアップ係数の計算結果のまとめ.....	8
4.光核反応計算の課題と対応策.....	11
4.1.光中性子の発生量が少ないときの 2 次 γ 線の統計精度	11
4.2.モデル計算使用時の計算速度低下	11
4.3.「光核しきいエネルギー < 捕獲 γ エネルギー」 となる材料.....	11
参考文献	12

1. 序

2020年度の調査と作業、並びに研究レビュー委員会での議論等を踏まえ、ビルドアップ係数の計算方針を以下のとおりとする。

- (1) γ 線の計算範囲は、従来コードにおいて10MeVまでであったが、今回、高エネルギー施設の増加に対応するため、30MeVまで整備する。
- (2) γ 線の減衰係数は、今回、低エネルギー領域の計算の信頼性を上げるため、XCOMデータの干渉性（コヒーレント）散乱を考慮した値とする。
- (3) 計算コードはMCNP 6.2、光核反応の断面積データライブラリはLA-150を用いる。

2. 点減衰核法コードが算出する線種及び疑似ビルドアップ係数の定義

γ 線30MeVを線源とする場合、中性子発生とそれに伴う2次 γ 線が発生する。計算コードの内部では、中性子を起因とする2次 γ 線を、1次 γ 線と分解することはできないが、2次 γ 線の線量寄与は全 γ から1次 γ の寄与を差し引くことで算出可能である。よって、同じ計算条件で中性子ありの線量計算と中性子なしの線量計算を実施し、前者で出力される全 γ と後者で出力される1次 γ の線量差を取って2次 γ の寄与を分離する試みを行った。その動機は、光核反応の計算結果に独立に評価尤度を与えるためである。

ここで、光核反応に係るビルドアップ係数について述べる。線量計算の結果を、線源由来の1次 γ 線、光中性子、及び光中性子の捕獲で生じた2次 γ 線の寄与に分けておく。それから、次のようにビルドアップ係数を作成する。

- 1次 γ 線のビルドアップ係数 : 1次 γ 線量 ÷ 1次 γ 線の直接線量
- 光中性子の疑似ビルドアップ係数 : 光中性子線量 ÷ 1次 γ 線の直接線量
- 2次 γ 線の疑似ビルドアップ係数 : 2次 γ 線量 ÷ 1次 γ 線の直接線量

疑似ビルドアップ係数とは、線種に関係なく、ビルドアップ係数の定義式の分母に、1次 γ 線の直接線量を用いて作成した値である。本来の物理的な意味は失われているが、光核反応による線量計算を簡便に実行するために敢えて定義した。

3 ビルドアップ係数の算出方法

3.1 計算コード

ビルドアップ係数は、MCNP 6.2を用いて計算する全線量と直接線計算式を用いて計算する直接線の比により算出する。詳細輸送過程の模擬を必要とすることからMCNPの電子輸送オプションをONにする。光核と20MeV以上中性子計算のための設定として光核反応でモデルを使用するため、物理オプション(MPHYS)をONとする。また、コードマニュアルにしたがって、CEM、LAQGSMを使用する。

○コードバージョン選定理由：

MCNPの最新バージョンであり、またMCNP5で粗くモデル化されたフォームファクターが、MCNP 6.2で細かく考慮できるように改良された。

3.2 核データライブラリ

中性子・γ線：JENDL-4.0

光核反応：LA-150-> ENDF/B-VII(endf70u) (MCNP6.2 に内蔵)

一部 IAEA photonuclear data2019 (IAEA サイトより DL 可)

LA-150 ライブラリに存在しない同位体の内、K は IAEA photonuclear data (PD) [1]に存在することから、IAEA PD を使用する。モデル計算や代替同位体を使うより、むしろ別の断面積ライブラリを使用した方が正確と判断した。なお、JENDL Photonuclear Data File 2016(JENDL/PD-2016)¹については、2021/6 現在、ACE ライブラリ化されていないため利用できない。

光核断面積ライブラリ中に同位体が含まれていない場合、例えば ¹H 等に対して、MATERIAL CARD NUCLIDE SUBSTITUTION 機能を使用して光核考慮しない／モデル使用／ライブラリ使用／代替同位体使用を設定する。光核反応を考慮しない場合は、MXm:p カードで Zaid_iパラメータを 0 に設定する。その他の核種の設定は以下の通り。

- ・¹H (1001)は、光核反応を考慮しない。
- ・¹⁰B(5010)、¹¹B(5011)、²⁰⁴Pb-(82204)は、モデル計算を実施する。

3.3 計算方法

(1) モンテカルロ法で、光核反応を含む全反応を考慮して遮蔽線量計算を実施

MCNP は光子／電子輸送計算において“詳細計算モード(mode n p e)”とする。“e”を入れると、電子の発生・輸送・反応を考慮し、また制動放射線、蛍光 X 線発生、コヒーレント散乱を詳細なモデルで考慮される。

(2) 直接線の線量は、 $\exp(-\mu t)/4\pi r^2$ で算出する。

$$E_d(AP) = \left(\frac{E}{\phi}\right) \cdot \frac{S \cdot \exp(-\mu t)}{4\pi r^2} \quad - \textcircled{1}$$

ここで、 $E_d(AP)$ ：直接線量($\mu\text{Sv/h}$)

S：γ線源強度(ph/s) 1ph/s

r：線源と評価点の距離(cm)

μ ：減衰係数(cm^{-1}) from XCOM(コヒーレント散乱を含む)²

t：遮蔽厚(cm) 0.5,1-80mfp までの厚み

$\left(\frac{E}{\phi}\right)$ ：線束－線量換算係数 from ICRP Pub.74/116, IEC 62387

1 <https://wwwndc.jaea.go.jp/ftpnd/jendl/jendl-pd-2016.html>

2 μ はレイリー散乱を含むものとし、XCOM データの最新版 3.1 から算出した。

(3) BF を以下の通り計算する。

計算実施の 3 成分と実行 MCNP ケースの対応を下記とする。

MCNP ケース	中性子結果	γ 線結果
中性子あり	中性子線量	全 γ 線量
中性子なし	—	1 次 γ 線量

$$BF_{pg} (1 \text{ 次 } \gamma) = 1 \text{ 次 } \gamma \text{ 線量} / 1 \text{ 次 } \gamma \text{ の直接線量} \quad - \text{①}$$

$$BF_{pneutron} (\text{光中性子}) = \text{光中性子線量} / 1 \text{ 次 } \gamma \text{ の直接線量} \quad - \text{②}$$

$$BF_{pn-g} (2 \text{ 次 } \gamma) = 2 \text{ 次 } \gamma \text{ 線量} / 1 \text{ 次 } \gamma \text{ の直接線量} \quad - \text{③}$$

$$BF_{tg} (\text{全 } \gamma) = \text{全 } \gamma \text{ 線量} / 1 \text{ 次 } \gamma \text{ 直接線量} \quad - \text{④}$$

なお、③の 2 次 γ については、(全 γ 線量 - 1 次 γ 線量) の計算結果が、モンテカルロ計算誤差等により、物理的な意味を持たない数値、例えば負値になるケースが多々あった(4 章参照)。そこで、現時点では 2 次 γ の寄与を分離する試みを一旦中止し、BF_{pn-g} (2 次 γ) を全て 0 として、BF_{tg} (全 γ) の方で 1 次と 2 次を合算した全 γ 線のデータを整備することにした。ユーザーの立場から見ると、全 γ 線から 2 次 γ 線の寄与を分離して与える必要性はなく、計算上の支障はない。なお、将来的に γ 線寄与を分離できた場合を想定して、BF_{pn-g} データを格納する場所を残した。

3.4 計算体系

半径 80 [mfp] 球の外側に 20 [mfp] の反射物質をモデル化する。材質は、遮蔽体として設定する密度とし、コード内での密度入力は、密度を負値で直接入力する。

セルは、深層透過問題である計算を効率的に実施できるよう mfp 毎のセル切りを行うと共に、線量計算用の薄い球殻セル(mfp を中心に±5E-6mfp 程度)を作成して、各セルの線量を算出する。計算体系図を図 1 に示す。

計算位置は、0.5mfp 及び、1~80mfp まで 1mfp 毎に計算を行う。

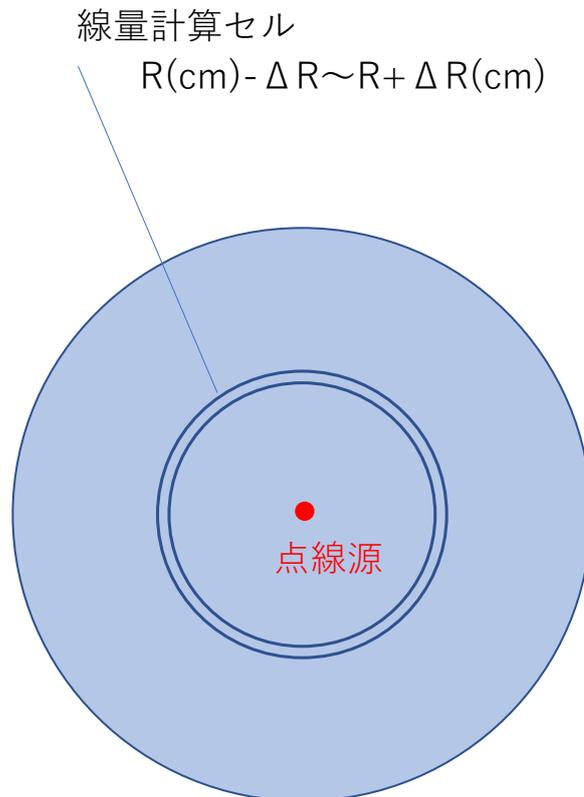


図1 計算体系図

3.5 遮蔽体の組成

計算する遮蔽体の組成は、前年度報告書 3.2.1 項、又は前年度報告書付録 VI「組込材料の組成・密度決定の根拠」に基づいて設定する。計算する組成を表 1 に示す。

表 1 作成する材料組成リスト

優先度高	コンクリート (ANL-5800 ベース)、水、タングステン、空気、鉄、鉛
優先度中	炭素、アルミニウム、銅、パイレックスガラス、アクリル樹脂、ポリエチレン、土壌($\rho=1.5\text{g}/\text{cm}^3$ で根拠作成)

3.6 タリー設定

線量計算は、セル毎に Track Length Tally (MCNP : F4)を設定する。文献の線束－線量換算係数 ($[\text{pSv}\cdot\text{cm}^2]$ あるいは $[\text{pGy}\cdot\text{cm}^2]$) は、DE/DF カードに設定し、計算結果が $[\mu\text{Sv}/\text{h}]$ あるいは $[\mu\text{Gy}/\text{h}]$ の単位で出力されるよう、乗数として $3.6\text{E}-3(1\text{E}6\times 3600)$ をタリー結果に乗じる。乗数は E/EM カードにより設定する。

換算係数は、表 2 に示す、ICRP 116 実効線量等への換算係数を設定する。

表 2 線束－線量換算係数の設定

No.	データ	性別	照射形状	Tally(Ph /N)	出典
1	E(AP)	共通	AP	4/504	ICRP 116
2	E(PA)	共通	PA	14/514	ICRP 116
3	E(LLAT)	共通	LLAT	24/524	ICRP 116
4	E(RLAT)	共通	RLAT	34/534	ICRP 116
5	E(ROT)	共通	ROT	44/544	ICRP 116
6	E(ISO)	共通	ISO	54/554	ICRP 116
7	水晶体	共通	AP	64/564	ICRP 116
8	皮膚	男性	AP	74/574	ICRP 116
9	皮膚	女性	AP	84/584	ICRP 116
10	空気カーマ	共通	－	94/594	ICRP 74
11	1cm 線量当量 H*(10)	共通	－	104/604	ICRP 74
12	3mm 線量当量 Hp(3)	共通	－	114/614	IEC 62387, Gualdrini[2]

3.7 カットオフエネルギー

電子カットオフエネルギーについては、低エネルギー領域：10keV、高エネルギー (>150keV 以上)領域で 100keV とした。試算で、カットオフエネルギーの差異が計算結果に影響しないことを確認した。カットオフエネルギー切替は、K-X 線の最大エネルギーは高いZ元素でも 150keV未満であることから、K-X線の影響があるエネルギー領域 150keV 以上はカットオフエネルギーを 100keV とし、それ未満で 10keV とした。

光子：1keV

電子：10keV (150keV 未満) or 100keV(150keV 以上)

3.8 光核反応バイアス

光核反応による中性子発生断面積は、閾値近傍では極めて小さく、中性子がほとんど発生しない。よって、光核反応バイアス(PHYS:p カードの ISPN カード)を ON(1)にする。また、この設定だけでは、光中性子のウェイトが小さく、中性子輸送が打ち切られてしまうため、WWNカードでウェイト値を設定する（4章参照）。

インプット設定は下記の通りになる。

PHYS:P j 0 0 1 j

3.11 分散低減法について

分散低減は、MCNP 出力中に表示される、各セルの **population** を参考にインポートランス値／ウェイト値を調整する方法とする。中性子なしのケースでは、インポートランス値を設定する方法を採用し、中性子ありのケースでは光核反応バイアスと 2 次 γ 線のバイアスの関係上、ウェイトウィンドウ法を用いて計算する（4 章参照）。

深層透過中の γ 線 RE 値がセル毎に大体同じ位で推移するような値をサーベイする。図 3 に深さ毎の相対誤差の傾向を示す。横に寝ている方が良いチューニングを表す。

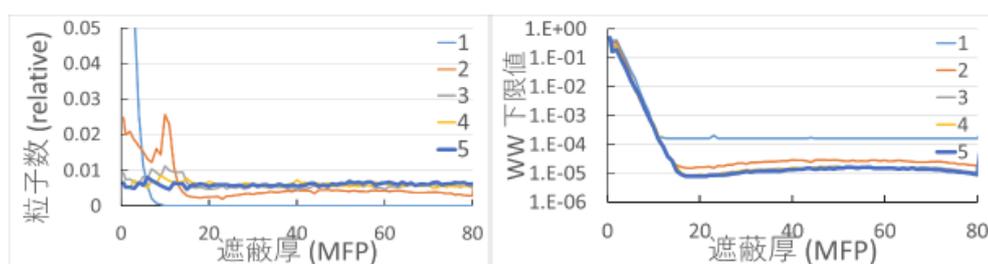


図 3 チューニングパラメータによる RE の傾向の一例

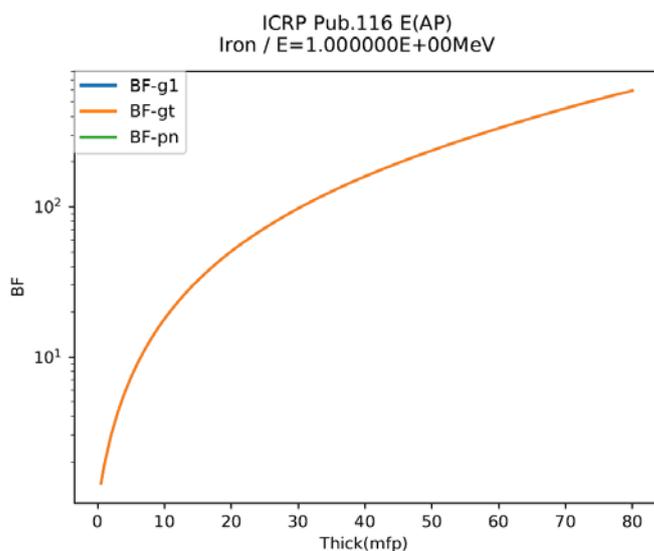
3.12 ビルドアップ係数の計算結果のまとめ

以上、ビルドアップ係数データは、表 3 に示すケースの線量結果を基に算出した。算出したビルドアップ係数に対して、Python でコーディングしたシェルを利用して、可視化を行った。図 4 に結果のサンプル図を示す。

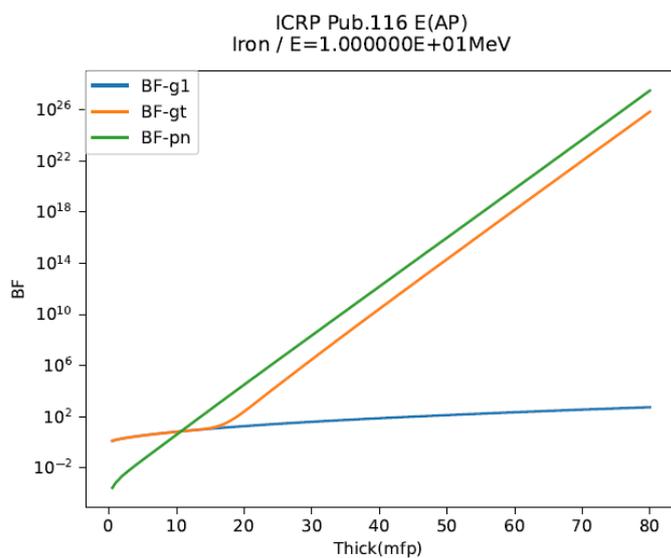
また、遮蔽計算コードで読み込むために、ビルドアップ係数データを設計したテーブル形式で出力する。テーブル形式は付録 II 「遮蔽線量計算用データベースのテーブル設計」に示したとおりである。ビルドアップ係数データのテーブル例を図 5 に示す。

表 3 ビルドアップ係数データ算出時に使用する線量計算ケース

ビルドアップ係数	p-gamma (1次 γ)	pneutron (光中性子)	pn-gamma (2次 γ)	t-gamma (全 γ)
光核反応が起こらない エネルギー範囲	中性子あり	中性子あり (値は全て 0)	(値は 0 固定)	中性子あり
光核反応が起こる エネルギー範囲	中性子なし	中性子あり	(値は 0 固定)	中性子あり



(1) γ 線エネルギー : 1.0MeV



(2) γ 線エネルギー : 10MeV

図4 鉄に対する γ 線の実効線量ビルドアップ係数

```

PKG2022 Build Up File
ICRP Pub.116 E(AP)
BF Released Officially in 2022, calculated with MCNP 6.2+LA150, ENDF/B7, and IAEA PD 2019
lib-type="buildup-file"
name="Carbon"
density=2.200E+00 g/cm3
EGrp=37
1.000000E-02

```

MFPGrp=81									
Thick	Thick	BU-F	RE	BU-F	RE	BU-F	RE	BU-F	RE
(mfp)	(cm)	(p-gamma)	(gamma)	(pneutron)	(pn)	(pn-gamma)	(pn-g)	(t-gamma)	(t-g)
0.5	9.577E-02	1.092E+00	0.0003	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000	1.092E+00	0.0003
1.0	1.915E-01	1.154E+00	0.0004	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000	1.154E+00	0.0004
2.0	3.831E-01	1.253E+00	0.0005	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000	1.253E+00	0.0005
(略)									
79.0	1.513E+01	5.912E+00	0.0039	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000	5.912E+00	0.0039
80.0	1.532E+01	5.978E+00	0.0039	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000	5.978E+00	0.0039
1.500000E-02									
MFPGrp=81									

図 5 ビルドアップ係数データのテーブル例

4. 光核反応計算の課題と対応策

4.1 光中性子の発生量が少ないときの2次 γ 線の統計精度

ビルドアップ計算では、当初、1次 γ 線、2次 γ 線、中性子の線量寄与をそれぞれ計算した。その結果、遮蔽体によっては、深層透過で線量が中性子>2次 γ >1次 γ の順になるケースが多々見られた。正確な線量計算のためには、2次 γ 線の統計精度を上げることが重要になる。

しかしながら、モンテカルロ計算手法上、 γ 線エネルギーがしきいエネルギー近傍である場合、光中性子断面積は1/1000 [b]と小さい場合、光中性子発生数が1次 γ に比べて相対的に少ない場合がある。更に、1次 γ からみると、2次 γ は3次粒子であり、単純なサンプリングだけで計算を進めると、2次 γ 線がどんどんスプリットされてキルされてしまい、 γ 線のタリーが適切な結果を与えなくなることがある。

こうした場合に適切に対応するため、今回、`phys:p`カードに`ispn=1`を指定して光中性子にバイアスをかけ、光核反応のサンプリング数を増やした。なお、現状`ispn=1`は、`weight window`を使わないと有効にならない仕様のため、`wwn`カードを使用して計算を行った。

今回、前述したとおり、全 γ から1次 γ の寄与を差し引いて、2次 γ の寄与を分離する試みを結果的に避けたが、この光中性子にバイアスをかける方法によって2次 γ の統計精度を上げて適切に分離できる可能性がある。

4.2 モデル計算使用時の計算速度低下

光核計算に対して光核データを使わずに、モデル計算を使用するオプションを設定すると計算速度が低下することがわかった。水素に対して、`MX1:P`で軽水素に0を入力すると、下記のメッセージと共に計算遅延が発生した。よって、水素に対して光核データを使わずにモデル計算を使用する場合、非並列で計算を行うこととした。なお、この現象はMCNP6.2に特有であり、MCNP6.1では起こらない。

```
comment. *****
comment. * OMP threading is in use, but non-thread-safe model-physics *
comment. *   has been invoked. OMP locks will be used to enforce *
comment. *   single-thread execution for model-physics.           *
comment. * This will degrade performance for OMP threading.      *
comment. *****
```

4.3 「光核しきいエネルギー < 捕獲 γ エネルギー」となる材料

水素含有複合材料では、重水素の光核反応閾値が低いため(～2.3MeV)、入射光子のエネルギーが比較的低い場合でも中性子が発生する。この中性子が鉄やカルシウム等金属に捕

獲されると 6MeV 程度の 2 次 γ が発生し、線源よりも高いエネルギーを持った γ 線が急にサンプリングされることになる。この現象は、例えばコンクリートに対する 4MeV の計算で相対誤差(RE)が比較的高いままになる傾向が見られた。

4MeV γ 線 \rightarrow 重水素の(γ ,n)で中性子発生 \rightarrow ^{40}Ca の(n, γ)で 6.5MeV の 2 次 γ 発生

線源 γ より高いエネルギーの 2 次 γ 線が発生した場合、例えば 6.5MeV γ は 4MeV γ より減衰し難いため、深層透過で 2 次 γ の方が比較的寄与が大きくなり、統計的に収束し難いケースが現れる。ただし、 ^{40}Ca の捕獲断面積は小さいので、この現象は計算条件に依存して稀にしか発生しない。

今回、この現象の発生が予測されるケースで、中性子捕獲反応をバイアスするため、PIKMT カードを使用した計算を行った。

参考文献

- [1] T. Kawano, et al., Nuclear Data Sheets 163 109-162. (2020).
- [2] G.Gualdrini, et al., Fluence to Hp(3) conversion coefficients for neutron from thermal to 15 MeV, Radiation Protection Dosimetry , 1-13 (2013).

付録 II

遮蔽計算用データベースのテーブル設計

目 次

1. データベースファイル.....	2
2. 減衰係数データ	2
3. ビルドアップ係数データ	4
4. 線量換算係数データ	6
5. 係数データファイル構成管理.....	6
6. 線源データ.....	7
7. 物質組成ライブラリ	7
8. スラブ遮蔽の斜め透過線量補正データ	8
9. エネルギー範囲まとめ	9
10. 計算する出力線量について	10
11. 有効桁数について.....	10
12. XCOM データにおける K-X 線エネルギーの扱いについて	10

1. データベースファイル

データベースのテーブル設計を行う、基本データファイルを下記に示す。

1)減衰係数ファイル

atten_xcom.dat 基本固定

2)ビルドアップ係数ファイル(全線量/直接線)

bf_icrp_116_eap.dat デフォルト ICRP Pub.116 E(AP)実効線量

bf_icrp_116_epa.dat ICRP Pub.116 E(PA)実効線量

・・・(※計算するデータセット分の整備が必要)

bf_icrp74_air_kerma.dat 空気カーマ

3)換算係数ファイル

conv_icrp_116_eap.dat デフォルト ICRP Pub.116 E(AP)実効線量

conv_icrp_116_epa.dat ICRP Pub.116 E(PA)実効線量

conv_icrp74_air_kerma.dat 空気カーマ(ICRP74)

・・・(※計算するデータセット分の整備が必要。ビルドアップ係数ファイルと同数)

4)ライブラリ設定ファイル(lib_setting.dat)

上の3つのファイル設定を記述するファイル(アプリの config から変更・保存可)

・ICRP Pub.116 E(AP)実効線量(デフォルト)

bf_icrp_116_eap.dat

conv_icrp_116_eap.dat

・・・

5)線源データ

6)物質組成ライブラリ

標準物質組成ライブラリ(lib_material.dat)

2.減衰係数データ

内容：単一元素、混合物質のエネルギーと線減衰係数(μ/ρ :cm²/g)の数表

データ構造：元素毎、混合物質毎、エネルギー毎、K-X線等のデータを含めることができるようにする。エネルギーの横に K-X D/U といった記号を入れる。

テーブル書式を下記に示す。データ行で 'または !'がある場合、それ以降はコメント行とする。

減衰係数ファイル(atten_xcom.dat)
Photon Mass Attenuation coefficient data (free) ref.: XCOM<タイトル z= 1,ele="H",name="hydrogen" EGrp=28 !エネルギー群数 28 個が列挙される。K-X線分により数字は可変。 Energy(MeV) mu/rho(cm ² /g) 1.00000E-02 3.854E-1

```

. . .
3.00000E+01 1.741E-2
<BLANK>
z= 2, ele="He", name="helium"
EGrp=28 !
. . .
<BLANK>
z=82, ele="Pb", name="lead"
EGrp=28 !
. . .
8.80044E-02 X.XXX K-X D <-K-X 線の下側
8.80045E-02 X.XXX K-X U <-K-X 線の上側
. . .

```

行	入力パラメータと書式
1	タイトル(文字列)
2	減衰情報(元素) z=原子番号(3桁整数右揃), ele=原子記号(2文字), name=元素名(20文字まで) z= 1,ele="H",name="hydrogen"
3	エネルギー群数 入力パラメータ : EGrp=エネルギー群数(整数) 入力例 : EGrp =28
4	ヘッダ(文字列) Energy(MeV) mu/rho(cm ² /g)
5	エネルギー(MeV)及び減衰係数(cm ² /g) 1.00000E-02(実数有効桁数 6桁) [SPS×Y] 3.854E-1(実数有効桁数 4桁)

・減衰係数を算出するためのγ線相互作用データとしてXCOMライブラリを用いる。

XCOMデータにおいて、K-X線のエネルギー表現には有効桁数6桁を必要とする。よって、減衰係数データファイルとしてはXCOMの元データが表現できるエネルギーの有効桁数とする。XCOMのデータの内、何個かはK-X線のエネルギーが同じデータがある。生データのままで、K-X線の上と下で同じ結果になる。K-X線が同じ場合は差異が出るよう強制的にK-X線上のデータを0.1eV増加させる扱いとする。

原子番号87番以降はK-X線のエネルギーが100keVを超える。Rb(Z=87)のK-X線は、"1.01137E-01"であり、101.137 keVである。K-X線上側のエネルギーをK-X線増加分を0.1keVとした場合、1011371eVとなる。これは現状の有効桁数6桁では、K-X線の上下のエネルギーが同一となる。

本件の扱いを検討した結果、XCOMの表示桁は有効桁数6桁であることから、100keVを超過するK-X線の場合、K-X線の増分は1keVにする。ファイル名も同様とする。

エネルギー、減衰係数の右にK-X線等のコメントを追記する。

3. ビルドアップ係数データ

遮蔽財、エネルギー、厚さに対するビルドアップ係数 (BF) データについて、表タイプ
の書式を規定する。¹ 今回のガンマ線の計算では、30MeV までの線源 (1 次) γ 線による
線量を、次のパターンで計算する。

- 1) 光核反応ありで γ 線の直接線量と全 γ 線量で、全 γ の BF 値を算出する。
- 2) 光核反応ありで γ 線の直接線量と全中性子線量で、中性子疑似 BF 値を算出する。
- 3) 光核反応なしで γ 線の直接線量と γ 線量で、1 次 γ の BF 値を算出する。

光核反応ありのモンテカルロ (MC) 法計算では 1 次 γ と中性子の捕獲による 2 次 γ を分
離できないため、それらを合算して全 γ として扱う。中性子疑似 BF とは、光中性子の線
量寄与を点減衰核法の BF と同様の考え方で整理するために暫定的に定義した値である
(付録 I 参照)。

前年度の検討では、BF 計算を光核反応ありとなしで別々に実施して、(全 γ -1 次 γ) で 2
次 γ の寄与を分けて算出する計画であったが、統計誤差 10% を下回った場合でも整合性の
ないケースがあり (付録 I 参照)、BF テーブルとしては意味のあるのは、1 次 γ (pg)、光中
性子(pneutron)、全 γ (t-gamma) の 3 つであり、2 次 γ (pn-gamma) については、今後の対応
を考慮し、枠を残して全て 0 を格納した。

エネルギーの有効桁数は K-X 線等の不連続箇所が記述できる桁数とする。BF 値は有効
桁数 3 桁程度で十分だが、計算結果 4 桁と合わせる目的で 4 桁とする。

安全尤度をデータに予め盛り込むことについて、検討の結果、データには尤度を与えず、
MC 法計算から算出したデータをそのまま格納することにした。尤度設定については、計
算コード側に指定した係数を乗じる機能を設けて対応する。

作成したデータの並びについては、基本的にエネルギーに関して昇順とする。

ビルドアップ係数ファイル(bf_icrp_116_eap.dat)								
Build Up File !タイトル(1)								
ICRP Pub.116 E(AP)!タイトル(2) <-ソフトで読込、表示タイトル								
Calculated with MCNP 6.2+LA150,IAEA PD 2019;!タイトル(3)、非表示タイトル								
lib-type="buildup-file" !ビルドアップ係数ファイルの指定								
name="concrete"!材質(1) 物質順は後で追加しても処理できるよう順不同								
density=7.8 g/cm3,!物質の説明密度や組成の出典など								
EGrp=28 !エネルギー群数。数字は可変。								
1.00000E-02 !Energy(1) (MeV)								
MFPGrp=81 !mfp 計算数。数字は可変。現状基本 1-80mfp の整数								
Thick	Thick	BU-F	RE	BU-F	RE	BU-F	RE	BU-F
RE								
(mfp)	(cm)	(p-gamma)	(gamma)	(pneutron)	(pn)	(pn-gamma)	(pn-g)	
(t-gamma)	(t-g)							
0.5	9.577E-02	1.092E+00	0.0003	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000	0.0000

¹ 現状で GP 法フィッティング形式への対応は考慮しない。

```

1.092E+00  0.0003
  1.0  1.915E-01  1.154E+00  0.0004  0.000E+00  0.0000  0.000E+00  0.0000
1.154E+00  0.0004
. . .
<BLANK>
1.50000E-02  ! Energy(2) (MeV)
MFPGrp=81
Thick Thick  BU-F      RE    BU-F      RE    BU-F      RE    BU-F
RE
(mfp) (cm)    (p-gamma)  (gamma) (pneutron) (pn)  (pn-gamma) (pn-g)
(t-gamma) (t-g)
. . .
<BLANK>
name="iron" ! 材質(2)
. . .

```

行	入力パラメータと書式		
1	タイトル(文字列)		
2	表示タイトル ICRP Pub.116 E(AP) !タイトル(2) <-ソフトで読込、表示タイトル(文字列)		
3	非表示タイトル		
4	ビルドアップ係数ファイルの指定 lib-type="buildup-file"(20文字迄) ビルドアップ係数表形式ファイル lib-type="buildup GP-file"(20文字迄) ビルドアップ係数 GP形式ファイル (旧来)		
物質数	5	ビルドアップ係数物質名 入力パラメータ : name="ビルドアップ係数物質名"(20文字迄) 例 : name="concrete" ! 材質(1) 物質順は後で追加しても処理できるよう順不同	
	6	物質の説明(文字)	
	7	エネルギー群数 入力パラメータ : EGrp=エネルギー群数(整数) ※群数は [2.減衰係数] と異なることもソフト上許容する。	
	エネルギー	8	エネルギー(MeV) 入力パラメータ : エネルギー(実数) 入力例 : 1.00000E-02 ! Energy(1) (MeV)
		9	mfp 計算数 入力パラメータ : MFPGrp=mfp 計算数(整数) ※数字は可変。現状基本 1-80mfp の整数
		10-11	ヘッダ(文字列) 入力例 Thick Thick BU-F RE BU-F RE BU-F RE BU-F RE (mfp) (cm) (p-gamma) (gamma) (pneutron) (pn) (pn-gamma) (pn-g) (t-gamma) (t-g)
		12	厚み(mfp 単位)、厚み(cm 単位)、BU-F(p-gamma)、相対誤差、

		BU-F(pneutron)、相対誤差、BU-F(pn-gamma)、相対誤差、BU-F(t-gamma)、総体誤差 ※MFPGrp 個入力
	92	<BLANK>

4.線量換算係数データ

換算係数データは、基本的に ICRP Pub.116 等の文献値データをそのまま使用する。

換算係数データファイル(conv_icrp_116_eap.dat)	
E(AP) Conversion Factor ref.: ICRP Pub.116<タイトル Photons: Effective dose per fluence, in units of pSv cm ² , for monoenergetic particles incident in AP geometry EGrp=34 !エネルギー群数 34 個が列挙される。ICRP データのまま Energy (MeV) E_AP 0.01 0.0685 ... ICRP データ 30.0 37.9 (エネルギー、換算係数) <BLANK>	

換算係数データファイル(conv_icrp74_air_kerma.dat)	
Ka Conversion Factor ref.: ICRU Report 57(47) & ICRP Pub.74 <タイトル Photons: Air Kerma per fluence, in units of pGy cm ² , for monoenergetic particles EGrp=34 !エネルギー群数 34 個が列挙される。IURU データのまま Energy (MeV) Ka_74 0.01 7.43 ... ICRU データ 10.0 24.0 (エネルギー、換算係数) <BLANK>	

5.係数データファイル構成管理

上の 3 つのファイル設定を記述するファイルである。計算コードの config 等から編集保存できるようにする。一般ユーザにデータ構成の変更を認めるかどうかの考え方を明確にする。計算コードはこの設定ファイルで参照して、指定されたデータファイルだけを読み込むようにする。同種のデータファイルを異なるファイル名で複数用意しておけば、ユーザは設定ファイルのファイル名を変更するだけでデータを差し替えられるようになる。

ライブラリ設定ファイル(lib_setting.dat)
library setting file <タイトル settings: file_material : lib_material.dat file_attenuation: atten_xcom.dat file_photon_rate: REV_IC38.YLD dose:

```

full_name      : E(AP) 実効線量 (ICRP Pub.116)
summary_name   : E(AP)
output_unit    : μSv/h
unit_conversion: 3.6E-3 # pSv · cm2 ⇒ μSv/h per Flux
file_buildup   : bf_icrp_116_eap.dat
file_conversion : conv_icrp_116_eap.dat
file_slant_correction : sc_icrp_116_eap.dat
file_finite_medium_correction: ff_dummy.dat

```

6.線源データ

RI 核種の放射性核種データ、又は線源スペクトルデータのファイルフォーマットを指しており、計算コードでユーザが線源となる核種やスペクトルを指定すると、該当データが読み込まれて遮蔽計算で用いられる。

ファイルフォーマットについて、RI 核種の放射性核種データの場合、基本的に ICRP 107 (又は DECDC2)で提供される光子データのフォーマットに従う。また元が連続エネルギーの線源スペクトルデータの場合、その作成に用いた計算コード (例えば ORIGEN2、18 群) のフォーマットに従う。特に中間的なファイルを想定しておらず、テーブル設計に検討を要しない。

線源スペクトルデータについて、各エネルギー群を代表するエネルギー値の与え方についてはいくつかパターンがある。その指定の仕方と処理については、計算コード側で対応する。

7.物質組成ライブラリ

コード標準 (組込材料) の物質組成データファイル (テキスト)。同一の書式でユーザ一用 (カスタム材料) 物質組成データファイルも利用可能とする。

標準物質組成ライブラリ (lib_material.dat)

```

maerial library [ standard material ]/ [ user material ]<タイトル
matNum=10
Iron
7.8 1      !密度 ρ(g/cm3) (規格化)
 26 7.8 !元素 NUCLID×1000 [SPS] rho(g/cm3)又は重量割合(wt%)
<BLANK>
lead
11.0 1
 82 11.0
<BLANK>
Polyethylene
0.92 2
 1 1.3223E-01
 6 7.8777E-01
<BLANK>

```

...

行	入力パラメータと書式	
1	タイトル(文字列) material library [standard material]<タイトル	
2	物質数 入力パラメータ : matNum=登録物質数(整数) 入力例 : matNum=10	
物質数	3	物質名 入力パラメータ : 文字列(例 : iron 物質順は後で追加しても処理できるよう順不同
	4	密度(g/cm3) 元素数(整数)
	5	NUCLID(整数) 密度(g/cm3) or 重量割合(wt%)(実数) 26 7.8 ※元素数回読み込む。1行には1元素分のみ入力可。
	6	<BLANK>

8. スラブ遮蔽の斜め透過線量補正データ

スラブ遮蔽を透過線が垂直でなく、斜めに横切る場合、正確な評価のためにはビルドアップ係数を補正する必要がある。現状、遮蔽材は鉄、鉛、コンクリート、また線量種類はE(AP)に対応する。ただし、E(AP)以外の線量種類に対する補正係数はE(AP)とあまり変わらないため、暫定的に他の線量種類についてもE(AP)と同じ補正データを格納している。

- ・ 透過距離は、スラブ遮蔽体を横切る透過線の幾何学的な距離
- ・ 入射角度は、スラブ遮蔽体に対する透過線の入射角度 x (度)
- ・ 適用角度上限を超える角度が検出された場合、補正後に警告メッセージを表示する。
- ・ 補正係数 f は下式で計算する。データファイルには、透過距離とエネルギーに対して、下式の係数と切片のパラメータ値が格納される。切片 d は常に1とする。

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$

- ・ この補正係数をビルドアップ係数に乗じて補正する。透過距離は透過線ごとに異なるので、透過距離に関する a, b, c, d の補間計算は毎回行う。一方、エネルギーは固定なので、エネルギーに関する補間は予め行っておく。補間処理は計算コード側で実行される。
- ・ 現状、 γ 線の補正データは、全 γ (1次と2次 γ の和) 線量に対して与えられている。

```
斜め透過補正データファイル (sc_icrp_116_eap.dat)
# 斜め遮蔽ライブラリ

slant_correction_coefficient:
-
material: Iron
```

```

data:
# 透過距離 エネルギー 補正パラメータ(ガンマ線一次+二次) (中性子) 適用
角度上限
# (cm) (MeV) a b c d a b c d (deg)
- 2 0.1 3.00E-07 -5.00E-05 1.10E-03 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 60
- 0.5 -8.00E-07 3.00E-05 -7.00E-04 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 75
- 1.0 -7.00E-07 3.00E-05 -9.00E-04 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 75
- 4.0 0.00E+00 -2.00E-05 3.00E-04 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 75
- 15.0 -3.00E-07 2.00E-05 -5.00E-04 1.00E+00 -1.00E-06 9.00E-06 -1.20E-03
1.00E+00 75
- 25.0 -3.00E-07 1.00E-05 -6.00E-04 1.00E+00 -7.00E-07 -3.00E-05 -1.20E-03
1.00E+00 75
- 4 0.1 -8.00E-07 4.00E-05 -7.00E-04 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 45
- 0.5 -1.00E-06 5.00E-05 -1.30E-03 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 60
...
- 32 0.1 0.00E+00 0.00E+00 2.00E-03 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 20
- 0.5 -3.00E-07 -3.00E-05 4.00E-04 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 45
- 1.0 -1.00E-06 4.00E-05 -8.00E-04 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 45
- 4.0 -9.00E-07 4.00E-05 -3.00E-04 1.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
1.00E+00 60
- 15.0 -8.00E-07 2.00E-05 -2.00E-04 1.00E+00 3.00E-07 -2.00E-04 8.00E-04
1.00E+00 60
- 25.0 -1.00E-06 1.00E-04 -2.80E-03 1.00E+00 6.00E-07 -2.00E-04 1.30E-03
1.00E+00 60
-
material: Lead
data:
# 透過距離 エネルギー 補正パラメータ ((ガンマ線一次+二次) (中性子) 適用角度上
限
# (cm) (MeV) a b c d a b c d (deg)
...

```

9.エネルギー範囲まとめ

計算コードに内蔵したデータファイルで適用可能なエネルギー範囲は下記とする。
10keV以下の光子については、ICRP 116で示されていないため、作成範囲から除外した。

データ	従来 (QAD-CGGP2R)	本事業開発コード	備考
減衰係数	0.01~30MeV	0.01~30MeV	XCOM より
換算係数	0.01~10MeV	空気カーマ : 0.01 ~	文献より

		10MeV H*(10) : 0.01~10MeV Hp(3) : 0.005~10MeV 上記以外 : 0.01~30MeV	
ビルドアップ係数	0.015~15MeV	空気カーマ : 0.01 ~ 10MeV H*(10) : 0.01~10MeV Hp(3) : 0.005~10MeV それ以外 : 0.01~30MeV	計算値

10. 計算する出力線量について

計算する出力線量は下記のとおり。

- ・実効線量(AP,PA,LLAT,RLAT,ROT,ISO) ICRP Pub.116
- ・水晶体吸収線量(AP) ICRP Pub.116
- ・皮膚(男性)吸収線量(AP) ICRP Pub.116
- ・皮膚(女性)吸収線量(AP) ICRP Pub.116
- ・空気カーマ ICRP Pub.74
- ・1cm 線量当量 H*(10) ICRP Pub.74
- ・3mm 線量当量 Hp(3) IEC62387 等

11. 有効桁数について

データ	従来 (QAD-CGGP2R)	本事業で開発した遮蔽計算コード	備考
線源強度	入力桁数は、フリーフォーマットで細かい桁数でも入力できるようにする。 但し、実際の精度はエンジニアリングジャッジで 2桁から 1桁(悪ければ)程度と考えられる。		
減衰係数	4桁	4桁	XCOM より
換算係数	3桁	3桁	文献より
ビルドアップ係数	GP フィッティング フィッティング誤差 5%~10%程度。 物質にも依存	計算上の精度は恐らく 2桁程度、精々 3桁程度であるが、計算コードによる計算結果の 4桁に合わせた。現状、データに安全尤度を含まない。	MCNP 計算値
計算結果	4桁	4桁	

12. XCOM データにおける K-X 線エネルギーの扱いについて

XCOM データを出力する計算機プログラムを確認したところ、その元となる MDATX フ

ファイルの光子エネルギーを読み込んであるものの、X線の処理はその前の行で読み込んだ値（X線エネルギー）を元にプログラム内で計算している。光子エネルギーとX線エネルギーが一致した場合、以下の処理をしていた。

$$EN(N-1)=EN(N-1)*0.99995$$

$$EN(N)=EN(N)*1.00005$$

例えば鉄の場合、X線エネルギーは7112.0eVだが、

下側を $7112.0*0.99995=7111.6444\text{eV}$ 、

上側を $7112.0*1.00005=7112.3556\text{eV}$

として処理していた。光子エネルギーとしては下側が7111.9eV、上側が7112.0eVとなっているが、これはX線の処理結果を挿入する際のフラグとして利用しているだけであり、下側の光子エネルギーは、便宜上7112.0-0.1した値としているだけのように見える。（鉛も同様）

以上、XCOM出力は単純にX線エネルギーから0.1eV引いた値を下のエネルギーとしている。

付録 III

遮蔽計算用データの妥当性確認要領

目次

1. 序.....	1
2. 成果物並びに確認概要.....	1
3. 確認作業詳細	8
3.1 ビルドアップ係数計算に用いる組成	8
3.2 減衰係数ファイル(atten_xcom.dat).....	8
3.3 ビルドアップ係数ファイル(bf_[BFDATA].dat).....	9
3.4 換算係数ファイル(conv_[BF].dat)	9
3.5 ライブラリ設定ファイル(lib_setting.dat)	10
3.6 物質組成ライブラリ(lib_material.dat).....	10
3.7 MCNP コード入力データ (ベースインプット)	10
3.8 入力自動作成シェル(01makeinp_mixM.sh)	11
3.9 surface 作成(somake.exe)	11
3.10 MCNP コード出力データ (アウトプット)	11
3.11 中性子カットによるアウトプットの整理.....	11
3.12 アウトプット中の該当タリーの抽出シェル(05Get_BF_MCNP1.sh).....	12
3.13 ビルドアップ係数作成プログラム(06Get_BF_MCNP.exe, 06Get_BF_MCNP.sh) 12	
3.14 ビルドアップ係数結合シェル(07runallbf.sh).....	12
3.15 ビルドアップ係数ファイル作成プログラム(08addNGData.py).....	13
3.16 MCNP 計算 BF 処理記録.....	13
3.17 ビルドアップ係数について文献との比較による妥当性確認.....	14

1. 序

本付録は、本事業で作成した成果物の妥当性確認を目的としてその要領を示した。

2. 成果物並びに確認概要

本事業で作成するデータは、開発する遮蔽計算コード PKG2022（仮）で使用するデータとビルドアップ係数データを作成するためのモンテカルロ計算コード（MCNP）入出力に分かれる。

データ毎の確認の概要を表 2-1～表 2-3 に示す。

表 2-1(1/2) 遮蔽計算コード PKG2022 で使用するデータ

データ名 &ファイル名等	出典・根拠	妥当性確認の概要
1)減衰係数ファイル atten_xcom.dat	XCOM データのコヒーレントを含む断面積	<ul style="list-style-type: none"> ・XCOM の入力値が正しいことを確認する。 ・XCOM プログラムの出力ファイルをシェルで成形して減衰係数ファイルを作成しており、シェル動作後の代表例を何ケースか確認をする。 ・代表ケースについて、XCOM データ、JENDL、ENDF 等を比較する。 ・テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。
2)ビルドアップ係数ファイル bf_icrp_116_eap.dat bf_icrp_116_epa.dat bf_icrp_116_ellat.dat bf_icrp_116_erlat.dat bf_icrp_116_erot.dat bf_icrp_116_eiso.dat bf_icrp_116_dlensap.dat bf_icrp_116_dskinmap.dat bf_icrp_116_dskinfap.dat bf_icrp_74_kair.dat bf_icrp_74_H1cm.dat bf_IEC_Hp3.dat	MCNP コード入出力	<ul style="list-style-type: none"> ・MCNP コード入力については、表 2-2 の確認を実施する。 ・MCNP コード出力をツールにより成形出力しており、代表例で適切に処理されているか、別作業者が EXCEL 等別法を用いて再現できるかを確認する。 ・代表ケースについて下記の作図を行い、傾向分析等を実施する。 <ol style="list-style-type: none"> 1)横軸 mfp、縦軸 BF で複数のエネルギーを図示 2)横軸 mfp、縦軸 BF で複数のエネルギーについて線量種別に図示 3)横軸エネルギー、縦軸 BF で複数の mfp を図示 ・テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

表 2-1(2/2) 遮蔽計算コード PKG2022 で使用するデータ

データ名 &ファイル名等	出典・根拠	妥当性確認の概要
3)換算係数ファイル conv_icrp_116_eap.dat conv_icrp_116_epa.dat conv_icrp_116_ellat.dat conv_icrp_116_erlat.dat conv_icrp_116_erot.dat conv_icrp_116_eiso.dat conv_icrp_116_dlensap.dat conv_icrp_116_dskinmap.dat conv_icrp_116_dskinfap.dat conv_icrp_74_kair.dat conv_icrp74_H1cm.dat conv_IEC_Hp3.dat	ICRP Pub.116 〃 〃 〃 〃 〃 〃 〃 〃 ICRP Pub.74 〃 IEC62387、 GUALDRINI	<ul style="list-style-type: none"> ・文献値のデータ入力を確認する。ICRP Pub.116 は、テキストデータで成形されており、そのデータと比較する。ICRP Pub.74、IEC62387、GUALDRINI のデータでは、文献値(紙)をエディタで入力しており、文献値と比較を行う。 ・全線量換算係数を同じ図に描画し、換算係数値間で想定されない大きな差異が出ていないかを確認する。 ・テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。
4)ライブラリ設定ファイル lib_setting.dat	上の設定を記述する。	<ul style="list-style-type: none"> ・全てのデータが適切に設定されていることを確認する。 ・テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。
5) 物質組成ライブラリ	「ビルドアップ係数 計算に用いる組成の 作成について」	<ul style="list-style-type: none"> ・指定したデータが適切に設定されていることを確認する。 ・テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

表 2-2(1/2) モンテカルロ計算コード入出力データ

データ名 &ファイル名等	出典・根拠	妥当性確認の概要
<p>1)ベースインプット i)baseMCNP_0main.in ii)baseMCNP_material iii)baseMCNP_1cell iv)baseMCNP_tally</p> <p>a)線源 i)に含む</p> <p>b)物質組成 ii)に含む</p> <p>c)計算体系 iii)に含む < surface>はμからプログラムで生成→3)参照</p> <p>d)タリー設定 i), iv)に含む</p> <p>e)換算係数 iv)に含む</p>	<p>XCOM のエネルギー点 及び ACELIB の KX 線 エネルギー点</p> <p>「ビルドアップ係数 計算に用いる組成の 作成についてデータ」</p> <p>「ビルドアップ係数 計算手法」</p> <p>XCOM からμを利用 グラムで生成→3)参照</p> <p>「ビルドアップ係数 計算手法」</p> <p>文献</p>	<p>・印刷して根拠と比較し、レ点チェックを行う。エネルギー点、μ、材質、密度については、ツールにより可変するパラメータが設定されていることを確認する。</p> <p>・線量値になるよう $1.0E-6 \times 3600$ が乗じられていることを確認する。</p>
<p>2)自動作成シェル 01makeinp_mixM.sh</p>	<p>—</p>	<p>シェルで作成した代表ケース(後述)を画面で開き、下記の箇所が変更されていることを確認する。 [Material],[En],[Rho],[Mum]</p>
<p>3)surface 作成 somake.exe</p>	<p>—</p>	<p>シェルで抽出した [Material],[En],[Rho],[Mum] から、mfp 毎に出力されているかを画面上で確認する。</p>

表 2-2(2/2) モンテカルロ計算コード入出力データ

データ名 &ファイル名等	出典・根拠	妥当性確認の概要
4)MCNP アウトプット MCNP_BF_[Material]_e[En]o	上で設定した各換算 の線量ビルドアップ 係数	<ul style="list-style-type: none"> ・実行したケースに対応したアウトプットが出力されているか、員数検査を実施する。 ・抜き取りで想定通りの計算条件が設定されているかをアウトプット中のエコーで確認する。

表 2-3(1/2) MCNP コード入出力データから PKG2022 で使用するデータへの処理

データ名 &ファイル名等	出典・根拠	妥当性確認の概要
1)中性子カットによるアウトプットの整理	-	<ul style="list-style-type: none"> ・MCNP コード出力が中性子カットの有無により適切に整理（フォルダ分け）されていることを画面上で確認する。 ・中性子カットおよび光核反応オプションが適切に設定されていることを画面上で確認する。
2)アウトプット中の該当タリーの抽出 05Get_BF_MCNP1.sh	-	<ul style="list-style-type: none"> ・MCNP コード出力から該当位置が適切に抽出されているかを画面上で確認する。 ・相対誤差が MCNP のガイドラインである、0.1 以下であることを確認する。できれば0.06 以下とする。 ・なお、当該抽出処理は中性子カットの有無に関係なく行う。
3)ビルドアップ係数作成プログラム 06Get_BF_MCNP.sh 06Get_BF_MCNP.exe	-	<p>MCNP コード出力をツールにより成形出力しており、代表例で適切に処理されているか、別作業者が EXCEL 等別法を用いて再現できるかを確認する。なお、当該作成処理は中性子カットの有無に関係なく行う。</p>
4)ビルドアップ係数結合シエル 07runallbf.sh	-	<ul style="list-style-type: none"> ・材質別、線量別に処理されたビルドアップ係数を線量毎に結合しており、結合前後のデータを比較し、適切に処理されていることを確認する。 ・テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。 ・なお、当該作成処理は中性子カットの有無に関係なく行う。

表 2-3(2/2) MCNP コード入出力データから PKG2022 で使用するデータへの処理

データ名 &ファイル名等	出典・根拠	妥当性確認の概要
5)ビルドアップ係数ファイル作成プログラム 08addNGData.py	-	中性子カットの有無別に作成された線量毎のビルドアップ係数から適切にビルドアップ係数ファイルが作成されていることを画面上で確認する。
6)ビルドアップ係数ファイル bf_[BFDATA].dat	上記シェル、プログラム等の最終出力	表 2-1 の 2)参照

3. 確認作業詳細

確認作業においては、下記内容を明記の上、確認作業記録とする。

- 1)確認日時
- 2)確認者
- 3)確認内容
- 4)合否判定基準
- 5)合否判定

3.1 ビルドアップ係数計算に用いる組成

文献値から作成した組成表(EXCEL)について、適切に文献値を引用して作成されているかを印刷、レ点チェックで確認する。

入力：文献値

出力：組成表

また、XCOM インプットに指定する組成が上記で作成した組成表の値と一致しているかを印刷、レ点チェックで確認する。

入力：組成表

出力：XCOM インプット

3.2 減衰係数ファイル(atten_xcom.dat)

>XCOM の入力値が正しいことを確認する。

Iron、Lead、Tungsten について XCOM インプットが正しいことを画面上で確認する。

>XCOM プログラムの出力ファイルをシェルで成形して減衰係数ファイルを作成しており、>シェル動作後の代表例を何ケースか確認をする。

Iron、Lead、Tungsten について、シェルで作成した減衰係数ファイルの[En],[Mum]が適切に抽出されているか、10keV、1MeV、30MeV のデータ + K-X 線データの代表について画面上で比較作業を行う。

入力：XCOM アウトプット

出力：減衰係数ファイル (atten_xcom.dat)

>代表ケースについて、XCOM データ、JENDL、ENDF 等を比較する。

Iron、Lead、Tungsten について、比較を実施する。

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

Iron、Lead、Tungsten について、テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

3.3 ビルドアップ係数ファイル(bf_[BFDATA].dat)

MCNP コード入出力についての確認は別項で実施する。

>代表ケースについて下記の作図を行い、傾向分析等を実施する。

>1)横軸 mfp、縦軸 BF で複数のエネルギーを図示

>2)横軸 mfp、縦軸 BF で複数のエネルギーについて線量種別に図示

>3)横軸エネルギー、縦軸 BF で複数の mfp を図示

上記グラフを作成し、異常値が無い、異常な傾向が見られないか等、問題ないことを確認する。

入力：ビルドアップ係数ファイル (BF_[BF].dat)

出力：上記図

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

E-AP と Kair について、テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

3.4 換算係数ファイル(conv_[BF].dat)

>文献値のデータ入力を確認する。

>ICRP Pub.116 は、テキストデータで成形されており、そのデータと比較する。

>ICRP Pub.74、IEC62387、GUALDRINI のデータでは、文献値(紙)をエディタで

>入力しており、文献値と比較を行う。

出典となる文献と換算係数ファイルを印刷して比較し、レ点チェックを行う。

入力：文献値

出力：換算係数ファイル (conv_[BF].dat)

>全線量換算係数を同じ図に描画し、換算係数値間で想定されない

>大きな差異が出ていないかを確認する。

全線量換算係数のグラフを作成し、傾向がおかしくないか、換算係数間で大きな差異が無く、傾向が文献と類似しているかを確認する。

入力：換算係数ファイル (conv_[BF].dat)

出力：横軸エネルギー、縦軸換算係数の図

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

E-AP と Kair について、テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

3.5 ライブラリ設定ファイル(lib_setting.dat)

>全てのデータが適切に設定されていることを確認する。

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

減衰係数ファイルや換算係数ファイル等、テーブル設計仕様通りに設定されていることをレ点チェックにより確認する。

3.6 物質組成ライブラリ(lib_material.dat)

>指定したデータが適切に設定されていることを確認する。

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

指定したデータがテーブル設計仕様通りに設定されていることをレ点チェックにより確認する。

入力：組成表

出力：物質組成ライブラリ(lib_material.dat)

3.7 MCNP コード入力データ (ベースインプット)

>印刷して根拠と比較し、レ点チェックを行う。

ベースインプット	項目	確認方法
i)baseMCNP_0main.in	a)線源 d)タリー設定	・線源エネルギー点、 μ 、材質、密度については、ツールにより可変するパラメータが設定されていることを確認する。 ・線量値になるよう $1.0E-6 \times 3600$ が乗じられていることを確認する。
ii)baseMCNP_material	b)物質組成	「ビルドアップ係数計算に用いる組成の作成について」のデータと比較して確認する。
iii)baseMCNP_1cell <surface>は μ からプログラムで生成→3.8 参照	c)計算体系	・密度については、ツールにより可変するパラメータが設定されていることを確認する。 ・surface 番号はプログラムで生成した値を適切に使用していることを確認する。

iv)baseMCNP_tally	d)タリー設定 e)換算係数	<ul style="list-style-type: none"> ・ 文献値と同じであることを確認する。 ・ cell 番号は iii) で設定した値を適切に使用していることを確認する。
-------------------	-------------------	---

3.8 入力自動作成シェル(01makeinp_mixM.sh)

>シェルで作成した代表ケースの MCNP 入力を画面で開き、該当箇所が変更されている
>ことを確認する。

Iron、Lead、Concrete について、シェルで置換している下記の該当箇所が適切に変更されていることを、10keV、1MeV、30MeV + K-X 線データの代表について、画面上で確認する。

該当箇所：[Material],[En],[Rho],[Mum]

3.9 surface 作成(somake.exe)

>シェル上で抽出した[Material],[En],[Rho],[Mum]から、
>mfp 毎に出力されているかを代表ケースについて画面上で確認する。

Iron、Lead、Concrete について、シェル実行後の[En],[Mum]が適切に抽出されていること、また mfp が適切に計算されていることを、10keV、1MeV、30MeV のデータ + K-X 線データの代表について画面上で確認する。

入力：Iron_xcom.out, Lead_xcom.out, Concrete_xcom.out

出力：MCNP_BF_[Material]_e[En] (MCNP 入力データ)

3.10 MCNP コード出力データ (アウトプット)

>実行したケースに対応したアウトプットが出力されているか、員数検査を実施する。

員数確認データ：MCNP_BF_[Material]_e[En]o

>抜き取りで想定通りの計算条件が設定されているかをアウトプット中のエコーで
>確認する。

Iron、Lead のうち、10keV、100keV、1MeV、10MeV のデータ + K-X 線データの代表について、想定通りの計算条件が設定されているかのチェックを画面上 (アウトプットのエコー) で実施する。

3.11 中性子カットによるアウトプットの整理

>MCNP コード出力が中性子カットの有無により適切に整理 (フォルダ分け) されている
>ことを画面上で確認する。

Iron、Lead について、中性子カットの有無によりアウトプットが適切に整理（フォルダ分け）されていることを画面上で確認する。なお、光反応が起こらないエネルギーの一次ガンマ線量は中性子カットなしの計算結果を採用する。

>中性子カットおよび光核反応オプションが適切に設定されていることを画面上で確認する。

Iron、Lead について、確認する。

3.12 アウトプット中の該当タリーの抽出シェル(05Get_BF_MCNP1.sh)

>MCNP コード出力から該当位置が適切に抽出されているかを画面上で確認する。

>相対誤差が MCNP のガイドラインである、0.1 以下であることを確認する。

>できれば 0.06 以下とする。

>なお、当該抽出処理は中性子カットオフの有無に関係なく行う。

Iron、Lead のうち、10keV、100keV、1MeV、10MeV のデータ + K-X 線データの代表について、抽出シェル出力結果とアウトプット中のタリー結果を比較し、抽出が正しく行われていることを画面上で確認する。

また、シェルにより抽出した相対誤差が 0.1 以下であることを画面上で確認する。

入力：MCNP アウトプット

出力：線量抽出ファイル

3.13 ビルドアップ係数作成プログラム(06Get_BF_MCNP.exe, 06Get_BF_MCNP.sh)

>ビルドアップ係数作成プログラムは、MCNP コード出力をツールにより成型出力しており、代表例で適切に処理されているか、別作業者が EXCEL 等別法を用いて再現できるかを確認する。

>なお、当該作成処理は中性子カットオフの有無に関係なく行う。

Iron、Lead のうち、10keV、100keV、1MeV、10MeV のデータ + K-X 線データの代表（Iron は E-AP と E-PA、Lead は E-AP と Kair）について、抽出シェル出力結果を基に適切に処理されていることを、プログラム処理結果と EXCEL による手計算結果を比較することで確認する。

入力：線量抽出ファイル、換算係数ファイル

出力：材質別、線量別のビルドアップ係数処理ファイル

3.14 ビルドアップ係数結合シェル(07runallbf.sh)

>材質別、線量別に処理されたビルドアップ係数を線量毎に結合しており、結合前後の

>データを比較し、適切に処理されていることを確認する。

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

>なお、当該作成処理は中性子カットの有無に関係なく行う。

E-AP と Kair について、結合前後のデータを比較し、適切に結合されていることを画面上で確認する。また、テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

入力：材質別、線量別のビルドアップ係数処理ファイル

出力：線量別のビルドアップ係数処理ファイル

3.15 ビルドアップ係数ファイル作成プログラム(08addNGData.py)

>中性子カットの有無別に作成された線量毎のビルドアップ係数から適切に

>ビルドアップ係数ファイルが作成されていることを画面上で確認する。

ビルドアップ係数として採用する中性子カットの有無は下表の通りである。

ビルドアップ係数	p-gamma	pneutron	pn-gamma	t-gamma
光核反応が起こらない エネルギー範囲	中性子カット なし	中性子カット なし	— (0 に固定)	中性子カット なし
光核反応が起こる エネルギー範囲	中性子カット あり	中性子カット なし	— (0 に固定)	中性子カット なし

*光核反応オプションは常に設定

E-AP と Kair について、最終的なビルドアップ係数ファイルが上表のとおりに作成されていることを画面上で確認する。

入力：線量別のビルドアップ係数処理ファイル（光核反応の有無別）

出力：線量別のビルドアップ係数処理ファイル（上表を基に結果を結合した最終版）

3.16 MCNP 計算 BF 処理記録

計算された MCNP 計算結果の内、実効線量率 E(AP)ビルドアップ係数の相対誤差が 10% 未満であることを確認する。実効線量率 BF の RE が 10%であれば、他の線量についても同様に満足していると考えられる。

3.17 ビルドアップ係数について文献との比較による妥当性確認

1.序

今回見直しで作成したビルドアップ係数(PKG2022)を従来コードである QAD-IE の数表タイプ及び計算結果と比較をすることで、妥当性を確認する。

2.比較対象元についての記述

- (1)QAD-IE コード付属ライブラリの実効線量率 E(AP)のビルドアップ係数と比較を行う。
- (2)過去との比較のため、1次ガンマ線のデータのみ比較する。
- (3)過去のデータは ICRP 74 ベースの線量換算係数を用いて、IE 法で算出したビルドアップ係数であり、原子力学会標準の γ 線ビルドアップ係数の値と同等とされる。添付 1 に QAD-IE データと原子力学会標準(AESJ-SC)の比較を示す。比較結果はほぼ一致している。
- (5)大きな差異として、比較元データの減衰係数は、PHOTX(1988)ベースのコヒーレント散乱を含まない。今回の見直しは、XCOM(2020 v3.1) ベースのコヒーレント散乱を含む。コヒーレント散乱は低エネルギーで影響が大きい。最終の線量結果が同じであっても、減衰係数が異なることから、直接線の線量が変わり、ビルドアップ係数として差が生じることがある。
- (6)上記以外の相違点は、高エネルギー領域での光核反応取扱い有無があるが、さほど大きくないと推察される。従来コードと最新コードの比較を下表に示す。

従来コードと最新コードの比較表

	比較元	今回
比較データ	QAD-IE 内蔵データ (IEBF.dat)	PKG2022 内蔵データ bf_icrp_116_eap.dat
計算コード	IE 法	MCNP6.2
直接線減衰係数	PHOTX(1988)自由電子によるコヒーレント散乱を含まない	XCOM(2020 ver.3.1)によるコヒーレント散乱を含む
計算線量	ICRP Pub.74 E(AP)	ICRP Pub.116 E(AP)
光核反応	無し	有り
遮蔽厚適用範囲	100mfp /300mfp	80mfp

3.比較データと比較結果

3.1 比較データ

比較する具体的なケースは下記とする。

	比較データ	図番号
遮蔽体①	鉄 0.1MeV	図 3.1-1
	鉄 1.0 MeV	図 3.1-2
	鉄 10.0MeV	図 3.1-3
遮蔽体②	鉛 0.1MeV	図 3.1-4
	鉛 1.0 MeV	図 3.1-5
	鉛 10.0MeV	図 3.1-6

鉄、鉛の線量率の減衰曲線については、比較元データと今回で同等な結果となっていると考えられる。また、最新コードでは、ビルドアップ係数の適用範囲が 80mfp までであり、80mfp を超えると差異が出る。

それ以外の微小な差異として、IE 法でのコヒーレント散乱考慮の有無や、モンテカルロ計算コードの計算誤差などによるものも考えられる。2章に記述した影響の中で物理的に大きい変化としては、低エネルギー(0.1MeV)では、直接線線量計算の際、減衰係数にコヒーレント散乱を含んだことにより、直接線が減少し、全線量に変わりがないが、ビルドアップ係数としては上がる方向にあると予測される。鉛など高い原子番号(Z)では、低エネルギーではなくとも、コヒーレント散乱の影響があるエネルギー領域で、上の挙動になると予測される。

エネルギー代表3点の選定については、減衰係数等が異なる点にした。平山によるIEとEGSの比較図[1]においても、0.1, 1, 10 で実施されていたので、3点設定は妥当と考える。

[1]Hideo HIRAYAMA (1995) Calculation of Gamma-ray Exposure Buildup Factors up to 40mfp using the EGS4 Monte Carlo Code with a Particle Splitting, Journal of Nuclear Science and Technology, 32:12, 1201-1207, DOI:10.1080/18811248.1995.9731842

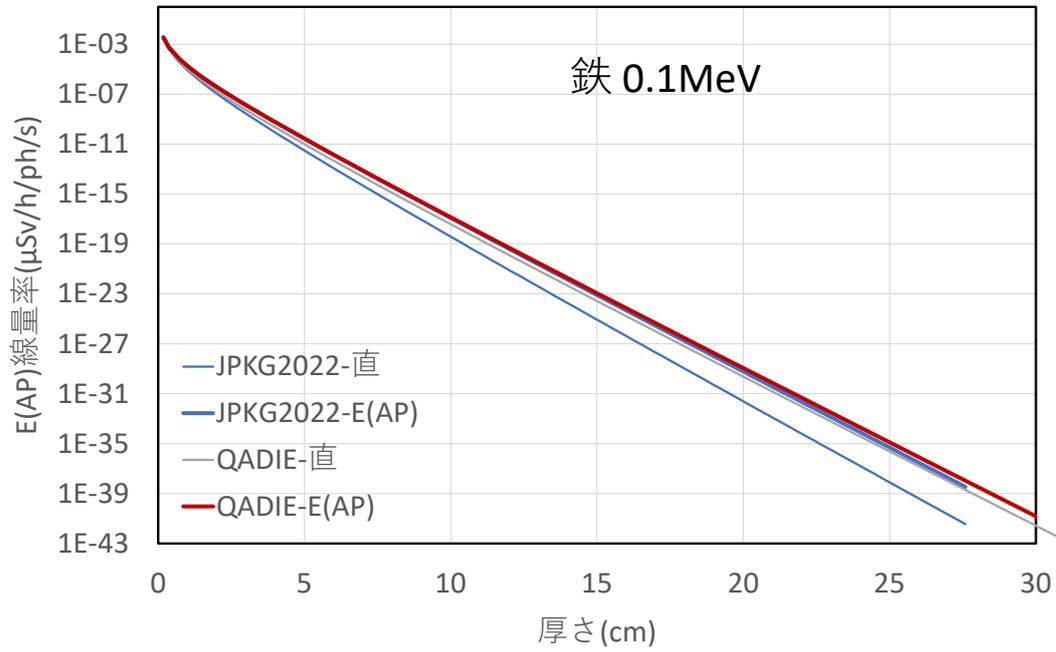
3.2 比較結果の記述

鉄での全線量の比較結果は、3.1 で述べたように、鉄 0.1MeV と 10MeV、鉛 0.1MeV で PKG2022<QAD-IE、鉄 1MeV、鉛 1MeV と 10MeV では逆に PKG2022>QAD-IE である。総じてはコヒーレント散乱の影響が小さくなる、1 MeV、10MeV ではほぼ一致している。

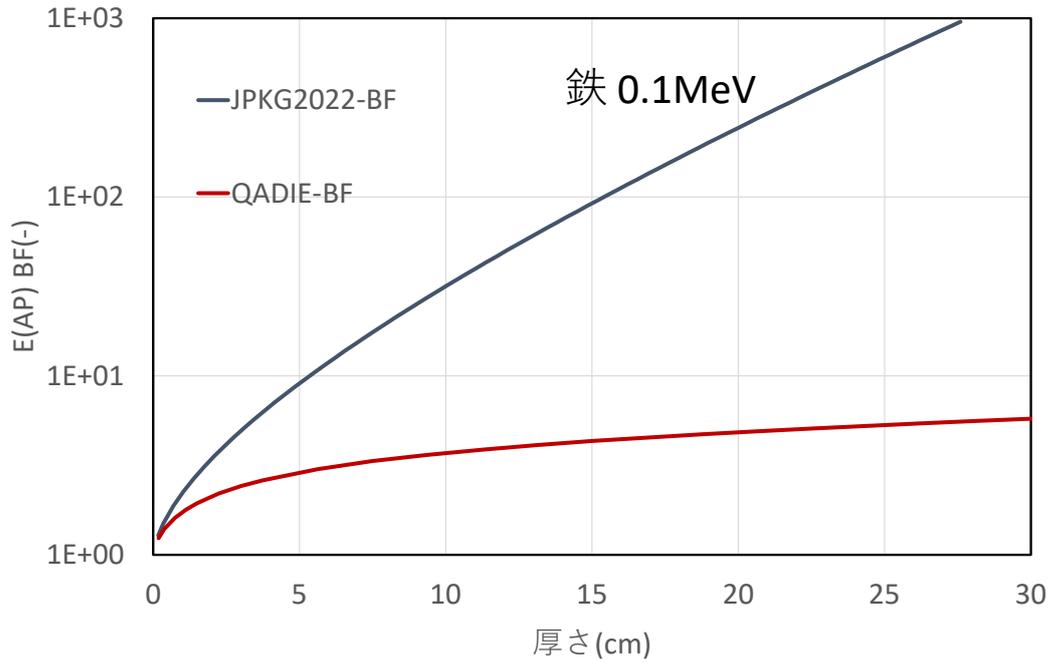
鉄の 80mfp(PKG2022 での厚みで比較)で比較した結果を表 3.2-1 に示す。上で記載した結果が表れているが、鉄では、低エネルギーで 0.3 倍、高エネルギーでは 10%内で一致している。

鉛での全線量の比較結果を表 3.2-2 に示す。鉛で 0.1MeV 以外の 1,10MeV では

PKG2022>QAD-IE 結果となったことは、MCNP の鉛断面積が過去のデータから変わっている可能性や、MCNP6.2 を用いた BF 計算において、過去に MCNP ライブラリ中の原子量が古いことによる影響が考えられる。MCNP 計算コード内部に踏み込んだ検討は行っていない。

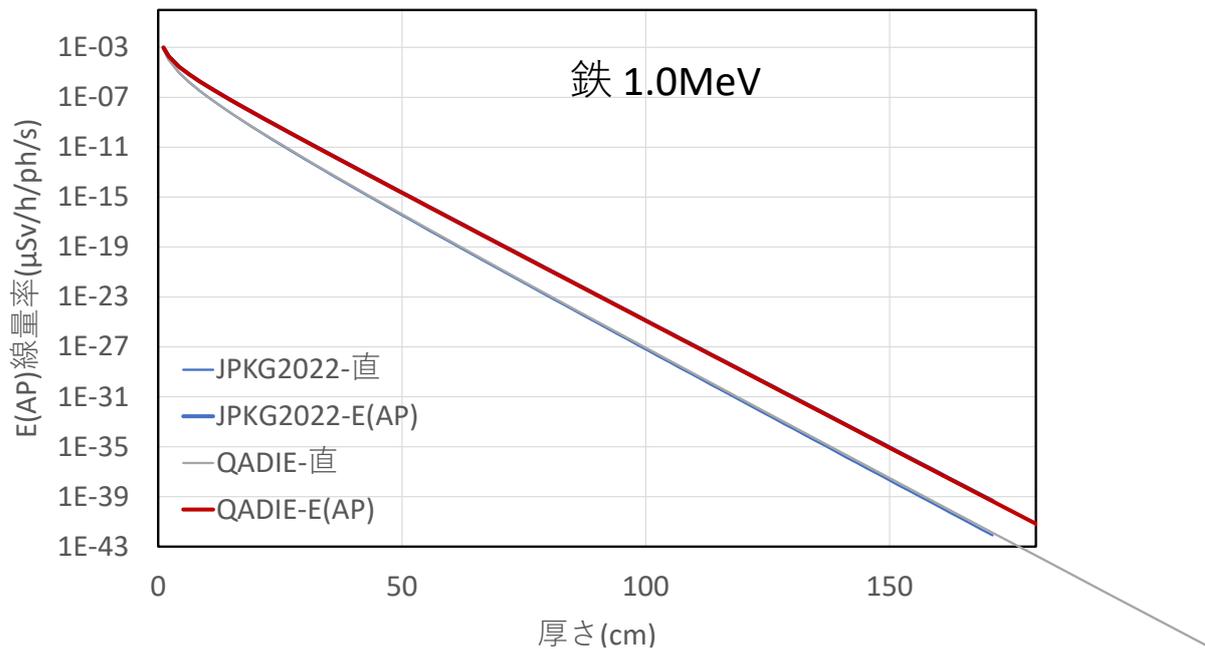


(1)1 次ガンマ線線量率比較

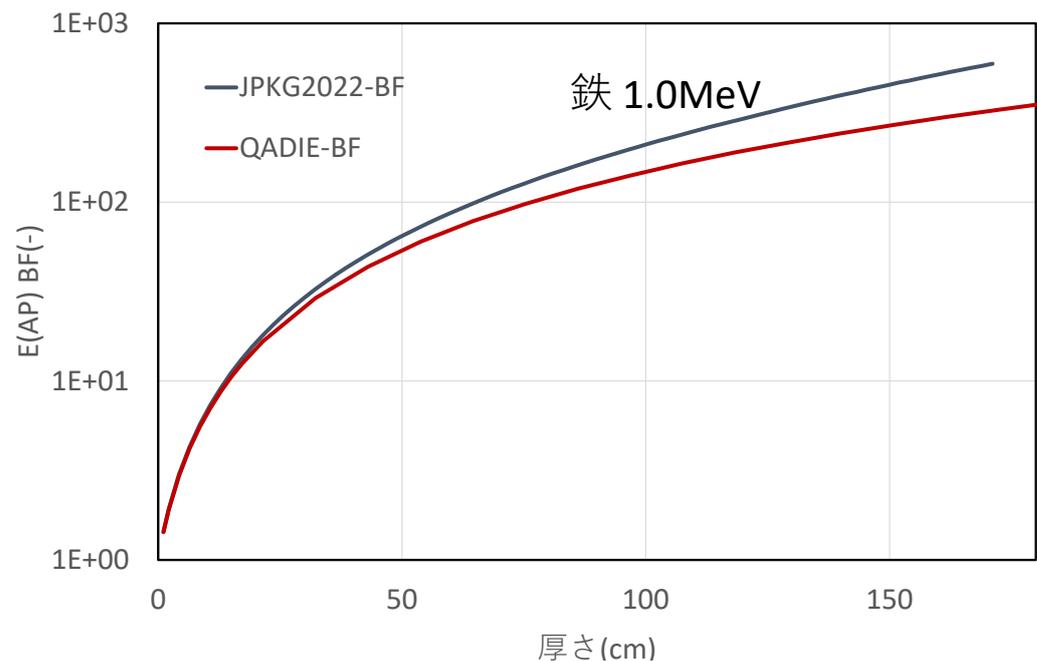


(2)1 次ガンマ線ビルドアップ係数比較

図 3.1-1 鉄 0.1 MeV ガンマ線の E(AP)線量及びビルドアップ係数比較

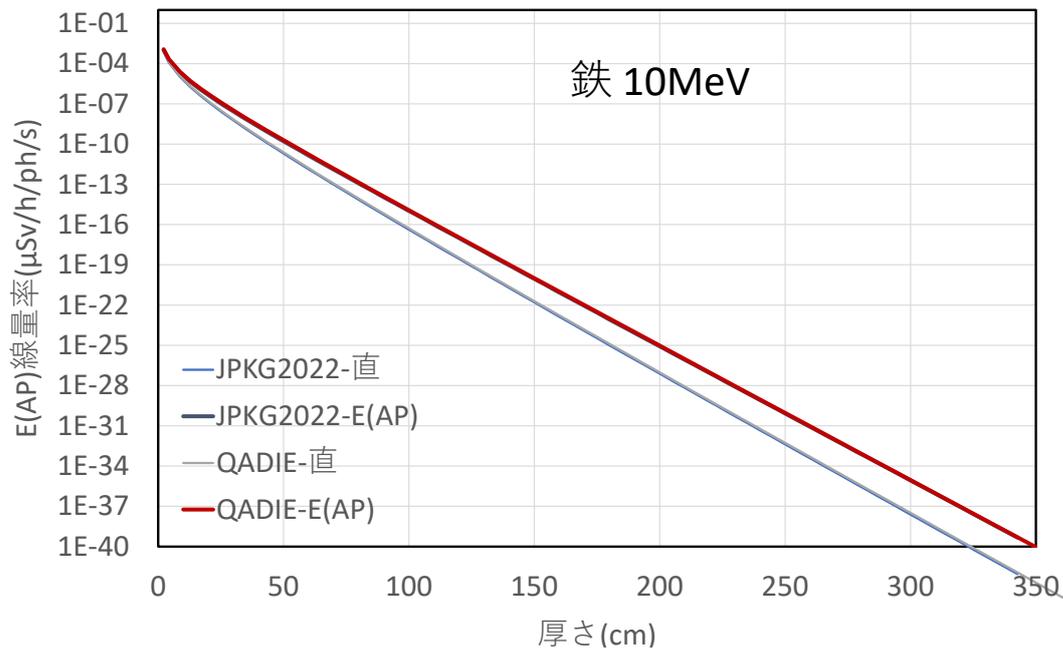


(1) 1次ガンマ線線量率比較

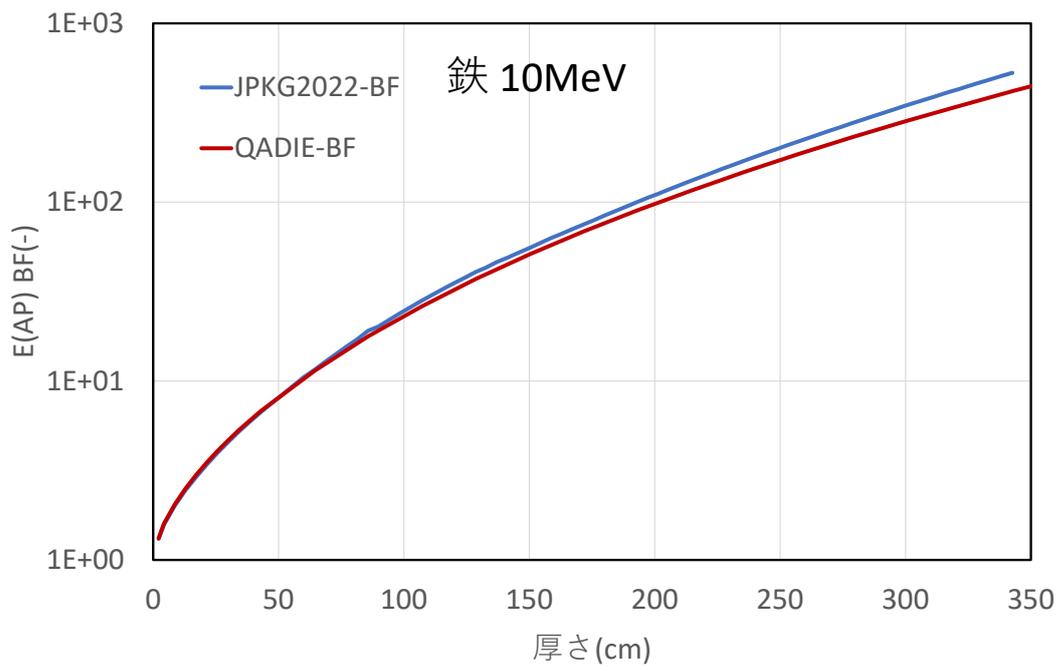


(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

図 3.1-2 鉄 1.0 MeV ガンマ線の E(AP)線量及びビルドアップ係数比較

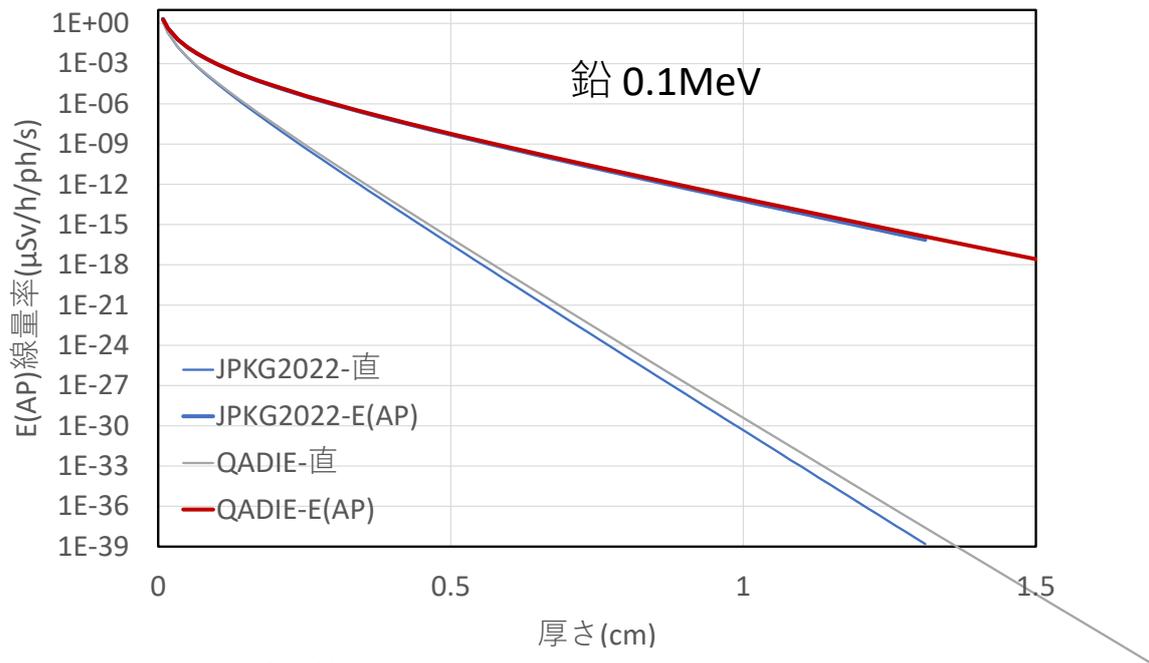


(1) 1次ガンマ線線量率比較

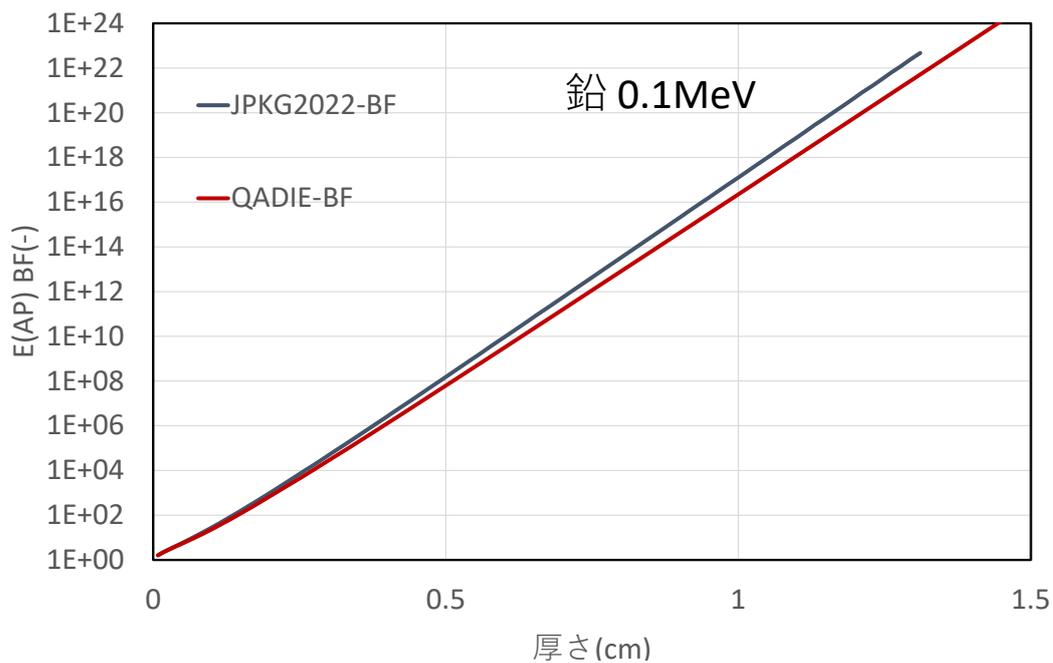


(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

図 3.1-3 鉄 10.0 MeV ガンマ線の E(AP)線量及びビルドアップ係数比較

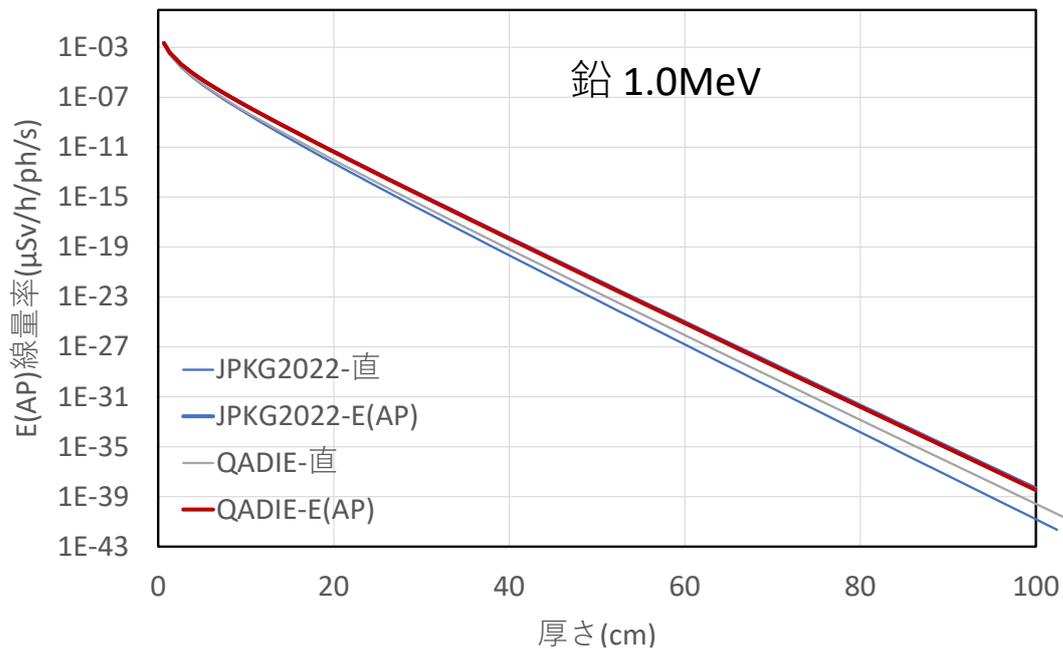


(1) 1次ガンマ線線量率比較

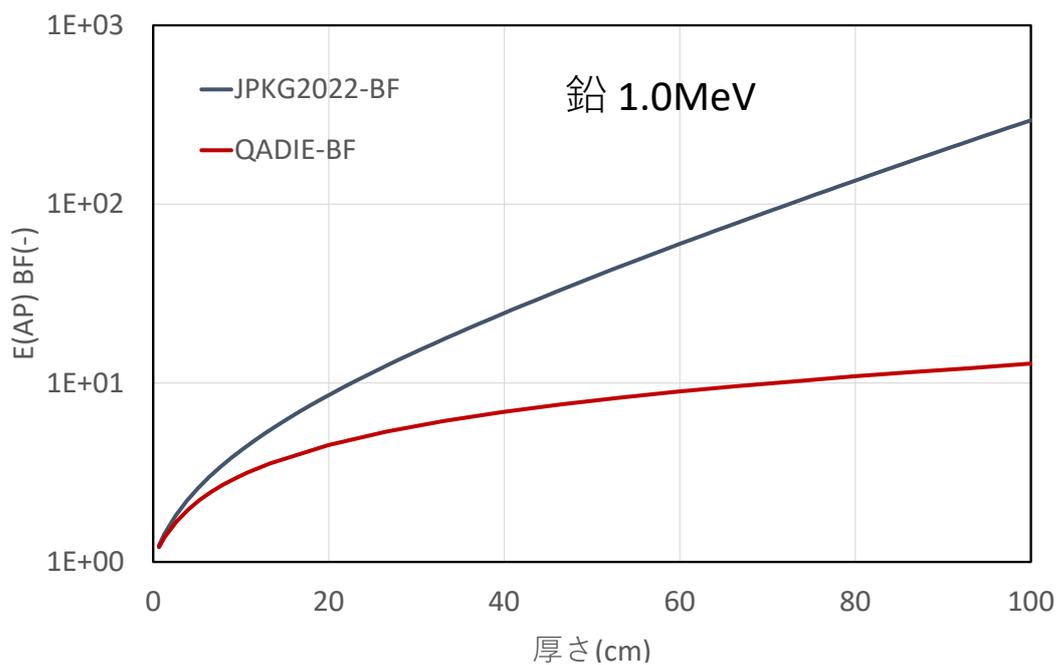


(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

図 3.1-4 鉛 0.1 MeV ガンマ線の E(AP)線量及びビルドアップ係数比較

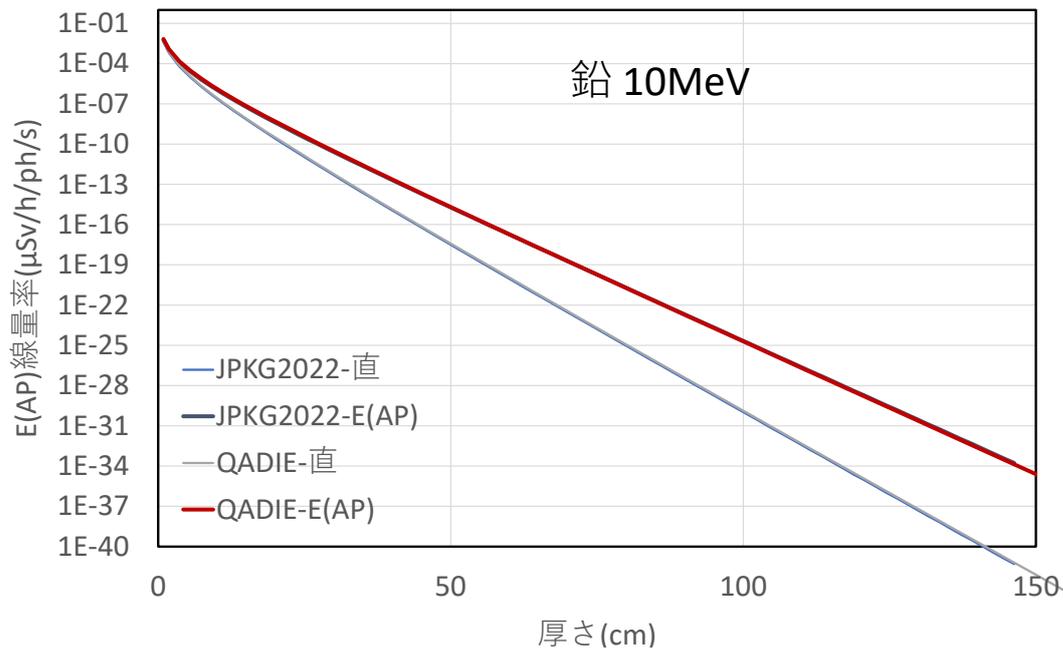


(1) 1次ガンマ線線量率比較

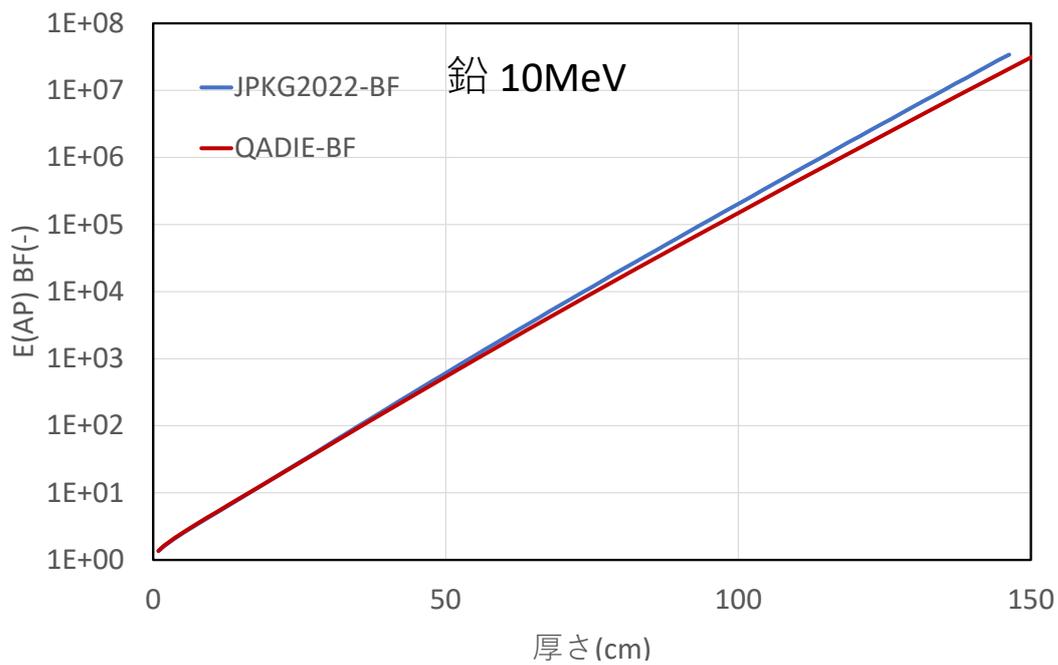


(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

図 3.1-5 鉛 1.0 MeV ガンマ線の E(AP)線量及びビルドアップ係数比較



(1) 1次ガンマ線線量率比較



(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

図 3.1-6 鉛 10.0 MeV ガンマ線の E(AP)線量及びビルドアップ係数比較

表 3.2-1 鉄遮蔽体における PKG2022 と QAD-IE の比較

遮蔽体	E(MeV)	厚み(cm)	(A)PKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
鉄	0.1	27.59	3.36E-39	1.05E-38	0.32
	1	171.1	4.71E-40	4.24E-40	1.11
	10	342.6	4.78E-40	4.95E-40	0.96

表 3.2-2 鉛遮蔽体における PKG2022 と QAD-IE の比較

遮蔽体	E(MeV)	厚み(cm)	(A)PKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
鉄	0.1	1.311	7.38E-17	1.28E-16	0.57
	1	102.4	7.14E-40	5.3E-40	1.35
	10	146.3	1.69E-34	1.33E-34	1.27

4. 相対比分析

3 章で記載された両コード差異比較検討用データ分析のため、指定したエネルギー(0.1,1,10MeV)に対し、以下の結果を示す。

- 1)線量計算で使用している値の比
- 2)減衰係数のエネルギー変化と相対比の図
- 3)線量率の遮蔽厚さに対する相対比の図

4.1 線量計算で使用している値の比

計算のチェックのため、直接線線量計算で使用している、線束-線量換算係数、減衰係数について両コードの値を鉄と鉛で比較した結果を表 4.1-1 及び表 4.1-2 にそれぞれ示す。

表 4.1-1 鉄遮蔽体における PKG2022 と QAD-IE の比較

遮蔽体	E(MeV)	比較データ	(A)PKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
鉄	0.1	(E/ϕ)	0.518	0.517174	1.00
		μ (cm ² /g)	0.3717	0.3425	1.09
	1	(E/ϕ)	4.49	4.48341	1.00
		μ (cm ² /g)	0.05995	0.05957	1.01
	10	(E/ϕ)	20.5	23.76	0.86
		μ (cm ² /g)	0.02994	0.02989	1.00

PKG2022 : ICRP Pub.116 E(AP)、 μ XCOM ベースコヒーレント散乱を含む

QAD-IE : ICRP Pub.74 E(AP)、 μ PHOTX 1988 コヒーレント散乱含まない

表 4.1-2 鉛遮蔽体における PKG2022 と QAD-IE の比較

遮蔽体	E(MeV)	比較データ	(A)PKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
鉛	0.1	(E/ϕ)	0.518	0.517174	1.00
		μ (cm ² /g)	5.549	5.355	1.04
	1	(E/ϕ)	4.49	4.48341	1.00
		μ (cm ² /g)	0.07102	0.06844	1.04
	10	(E/ϕ)	20.5	23.76	0.86
		μ (cm ² /g)	0.04972	0.04965	1.00

PKG2022 : ICRP Pub.116 E(AP)、 μ XCOM ベースコヒーレント散乱を含む

QAD-IE : ICRP Pub.74 E(AP)、 μ PHOTX 1988 コヒーレント散乱含まない

4.2 減衰係数のエネルギー変化と相対比

PKG2022 で作成した μ (XCOM ベースコヒーレント散乱を含む) と QAD-IE の μ (PHOTX 1988 コヒーレント散乱含まず) のエネルギー変化と相対比を図 4.2-1 及び図 4.2-2 に示す。

図に示したように、PKG2022/QAD-IE は、コヒーレント散乱が支配的な低エネルギー節で大きくなる傾向にあり、ビルドアップ係数としてはその分小さくなると考えられる。仮に過去のビルドアップ係数（全線量）がコヒーレント散乱を含まない評価結果であった場合は、今回結果は全線量（ビルドアップ係数）としても若干小さくなると予測される。

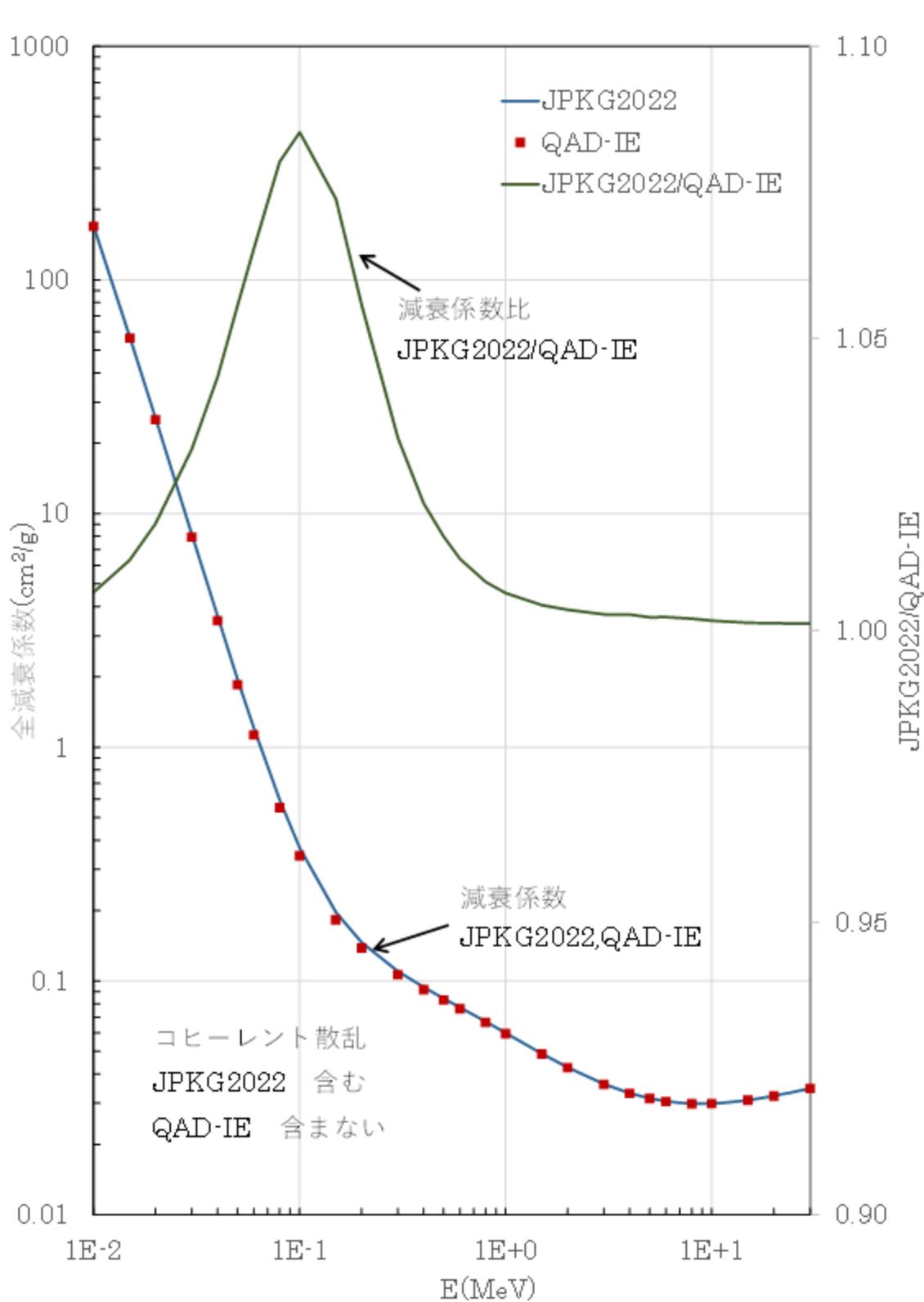


図 4.2-1 鉄減衰係数のエネルギー変化の比較

(比は、両者に数値があるデータの比を結び、Y軸は右側に示している)

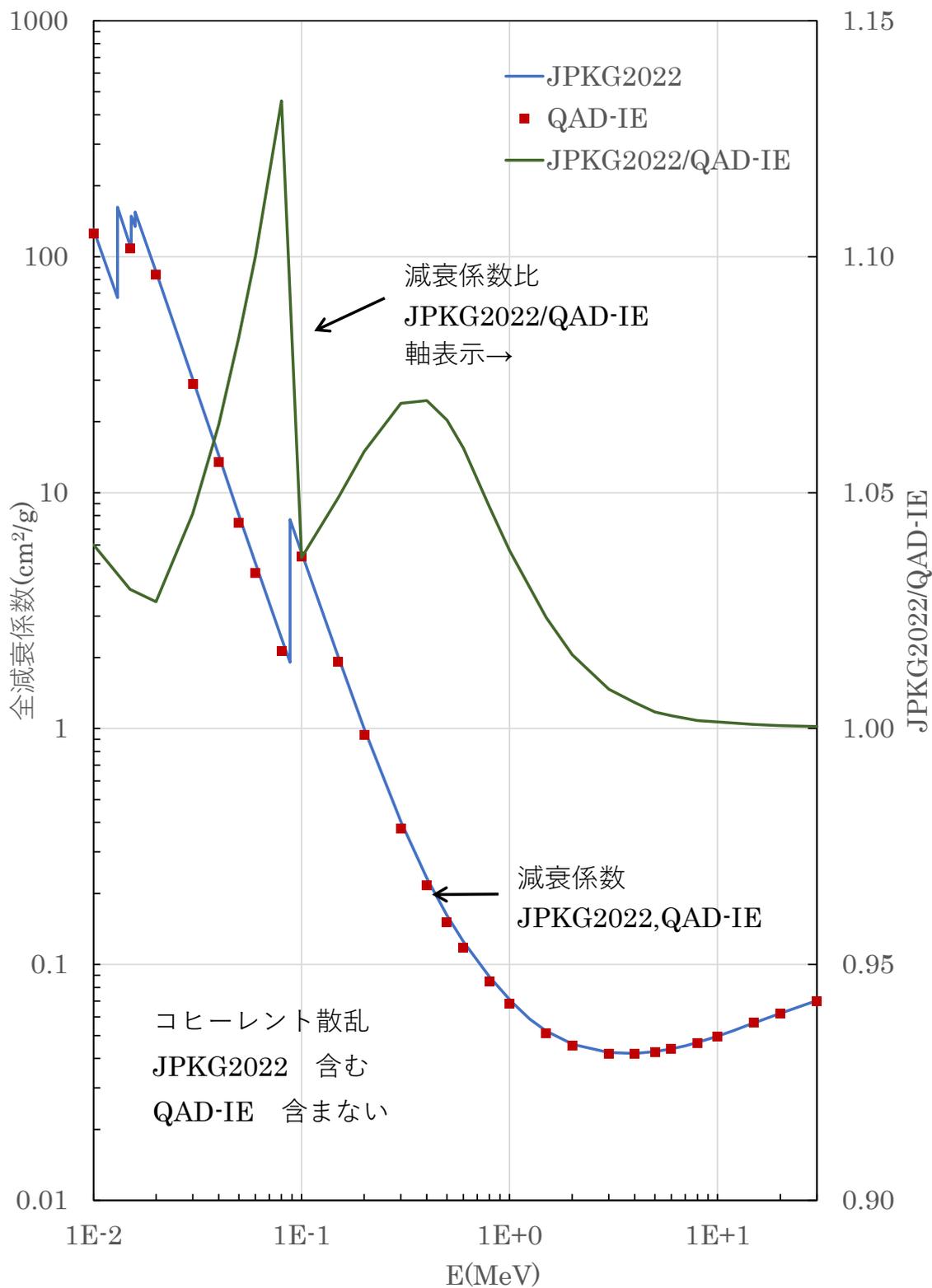


図 4.2-2 鉛減衰係数のエネルギー変化の比較

(比は、両者に数値があるデータの比を結び、Y 軸は右側に示している)

4.3 線量率の遮蔽厚さに対する相対比

遮蔽厚さに対する、PKG2022 と QAD-IE コードの比較を示す。計算条件を以下に示す。

- ・点線源
- ・エネルギー(MeV) 0.1,1,10MeV
- ・遮蔽体：鉄 7.8g/cm³ 及び 3,鉛 11.0g/cm³
- ・遮蔽体までの距離：100cm
- ・遮蔽厚：0-Xcm までの 9 点
- ・計算する 9 点は、遮蔽体、エネルギー依存で 80mfp 前後まで設定する。
- ・比較実行ケース数 6 ケース
- ・比較値：(A)PKG2022/(B)QAD-IE
- ・QAD-IE コードでは、表タイプ(IBUILD=20)を設定

計算結果の比較表を表 4.3-1 及び表 4.3.2 に示し、図 4.3-1～表 4.3.6 に示す。表中の下には、ビルドアップ係数データより、80mfp 位置における EXCEL で算出した線量を参考として示す。80mfp 以上は、PKG2022 コード適用範囲外であり、その場合は QAD-IE コードより小さくなる結果である。これはビルドアップ係数が上限 mfp 到達後はデータが無いことによる。この場合アウトプット中にメッセージが出力されているので、ユーザーは注意深く確認する必要がある。

低エネルギーでの PKG2022/QAD-IE は、遮蔽体が薄い場合は同様であるものの、遮蔽体透過により比が小さくなっている。1MeV と 10MeV の遮蔽体厚に対する減衰は、QAD-IE に比べると、PKG2022 の方が若干落ちにくい結果となっている。

遮蔽体中の JPKG2022/QAD-IE コードは、3 章で示した結果を網羅し、且つその比の挙動についてより詳細な分析ができる結果が得られている

表 4.3-1 鉄遮蔽体の計算結果

(1)鉄 0.1MeV

計算点No.	遮蔽厚(cm)	(A)JPKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
1	0	1.48E-08	1.48E-08	1.00
2	0.5	5.77E-09	5.68E-09	1.02
3	1.5	5.22E-10	5.08E-10	1.03
4	3.5	3.15E-12	3.07E-12	1.03
5	7	3.08E-16	3.19E-16	0.97
6	14	2.02E-24	2.74E-24	0.74
7	25	1.92E-37	4.97E-37	0.39
8	27.59	1.59E-40	4.93E-40	0.32
9	30	1.41E-43	7.89E-43	0.18

80mfp予測

1.57E-40	4.93E-40	0.32
----------	----------	------

(2)鉄 1MeV

計算点No.	遮蔽厚(cm)	(A)JPKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
1	0	1.29E-07	1.28E-07	1.00
2	2	8.98E-08	8.92E-08	1.01
3	10	6.73E-09	6.67E-09	1.01
4	20	1.27E-10	1.25E-10	1.02
5	40	2.25E-14	2.18E-14	1.03
6	80	3.19E-22	3.05E-22	1.05
7	150	3.22E-36	2.97E-36	1.09
8	171.1	1.86E-40	1.69E-40	1.10
8	210	1.79E-48	2.47E-48	0.73

80mfp予測

1.88E-40	1.69E-40	1.11
----------	----------	------

(3)鉄 10MeV

計算点No.	遮蔽厚(cm)	(A)JPKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
1	0	5.87E-07	6.81E-07	0.86
2	4	3.27E-07	3.85E-07	0.85
3	20	1.24E-08	1.49E-08	0.83
4	40	1.62E-10	1.94E-10	0.84
5	80	2.31E-14	2.65E-14	0.87
6	160	3.30E-22	3.72E-22	0.89
7	300	4.76E-36	5.08E-36	0.94
8	342.6	2.84E-40	2.97E-40	0.96
9	400	3.35E-46	5.78E-46	0.58

80mfp予測

2.86E-40	2.97E-40	0.96
----------	----------	------

単位： $(\mu\text{Sv/h})/(\text{ph/s})$

表 4.3-2 鉛遮蔽体の計算結果

(4)鉛 0.1MeV

計算点No.	遮蔽厚(cm)	(A)JPKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
1	0	1.48E-08	1.48E-08	1.00
2	0.015	1.22E-08	1.24E-08	0.98
3	0.08	1.63E-09	1.68E-09	0.97
4	0.16	1.96E-10	2.04E-10	0.96
5	0.32	5.18E-12	5.76E-12	0.90
6	0.7	2.25E-15	2.88E-15	0.78
7	1.3	1.52E-20	2.66E-20	0.57
8	1.311	1.21E-20	2.16E-20	0.56
8	1.5	1.18E-25	5.80E-22	0.00

80mfp予測

1.24E-20	2.15E-20	0.57
----------	----------	------

(5)鉛 1MeV

計算点No.	遮蔽厚(cm)	(A)JPKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
1	0	1.29E-07	1.28E-07	1.00
2	1	7.76E-08	7.69E-08	1.01
3	5	5.98E-09	5.84E-09	1.03
4	10	1.81E-10	1.73E-10	1.04
5	25	3.11E-15	2.84E-15	1.10
6	50	2.42E-23	2.04E-23	1.19
7	100	1.12E-39	8.31E-40	1.35
8	102.4	1.83E-40	1.36E-40	1.35
9	120	1.66E-46	2.28E-46	0.73

80mfp予測

1.83E-40	1.36E-40	1.35
----------	----------	------

(6)鉛 10MeV

計算点No.	遮蔽厚(cm)	(A)JPKG2022	(B)QAD-IE	(A)/(B)
1	0	5.87E-07	6.81E-07	0.86
2	1.5	3.80E-07	4.44E-07	0.86
3	10	9.36E-09	1.12E-08	0.84
4	20	1.12E-10	1.32E-10	0.85
5	40	1.71E-14	1.89E-14	0.90
6	60	2.61E-18	2.68E-18	0.97
7	100	5.28E-26	4.85E-26	1.09
8	146.3	5.89E-35	4.69E-35	1.25
9	180	4.51E-43	1.23E-41	0.04

80mfp予測

5.97E-35	4.69E-35	1.27
----------	----------	------

単位： $(\mu\text{Sv/h})/(\text{ph/s})$

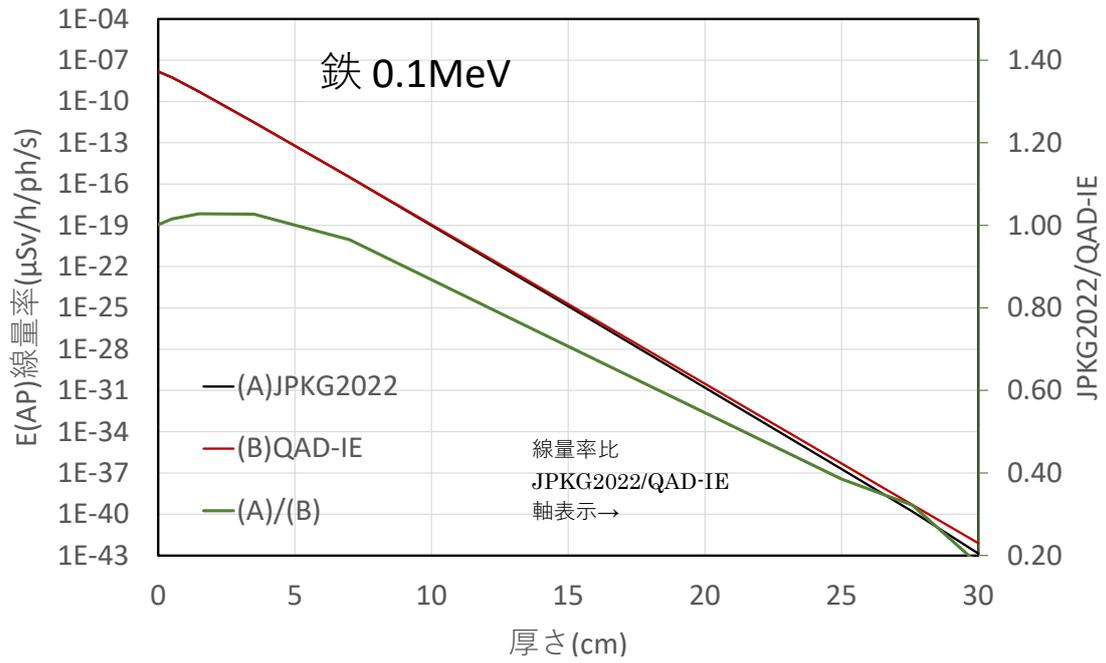


図 4.3-1 鉄 0.1MeV 遮蔽体中の計算結果

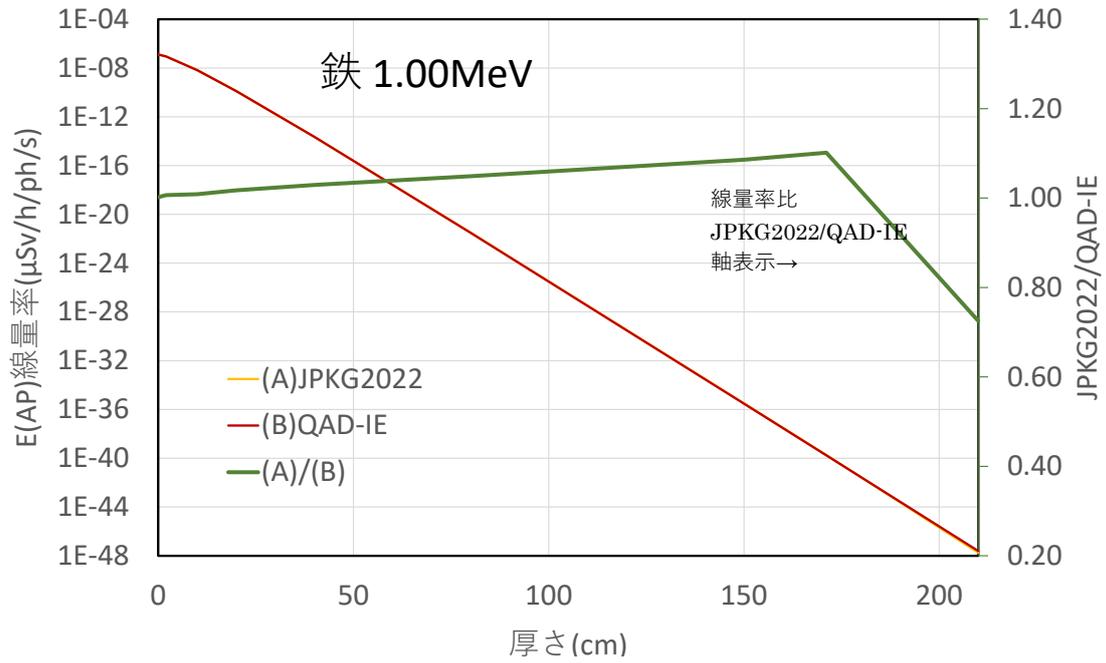


図 4.3-2 鉄 1MeV 遮蔽体中の計算結果

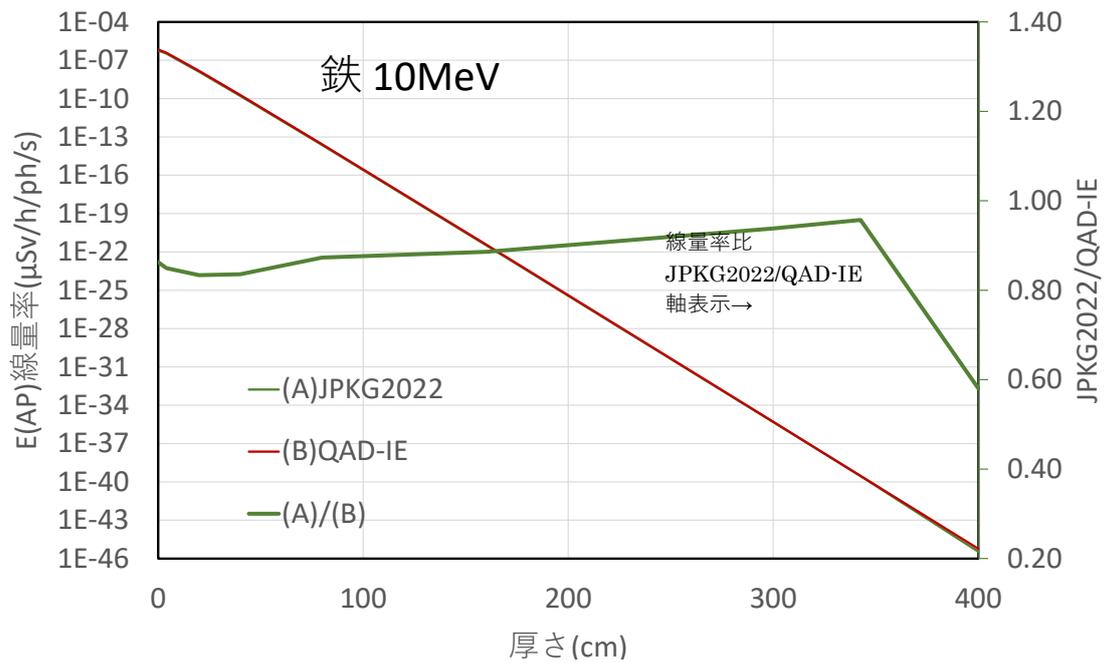


図 4.3-3 鉄 10MeV 遮蔽体中の計算結果

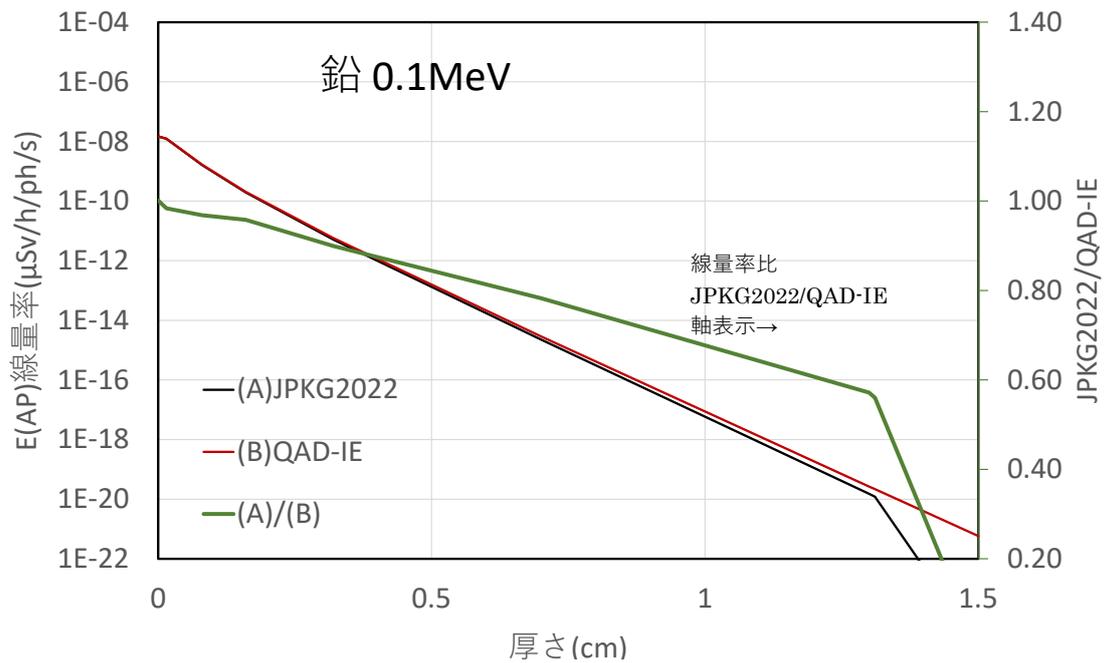


図 4.3-4 鉛 0.1MeV 遮蔽体中の計算結果

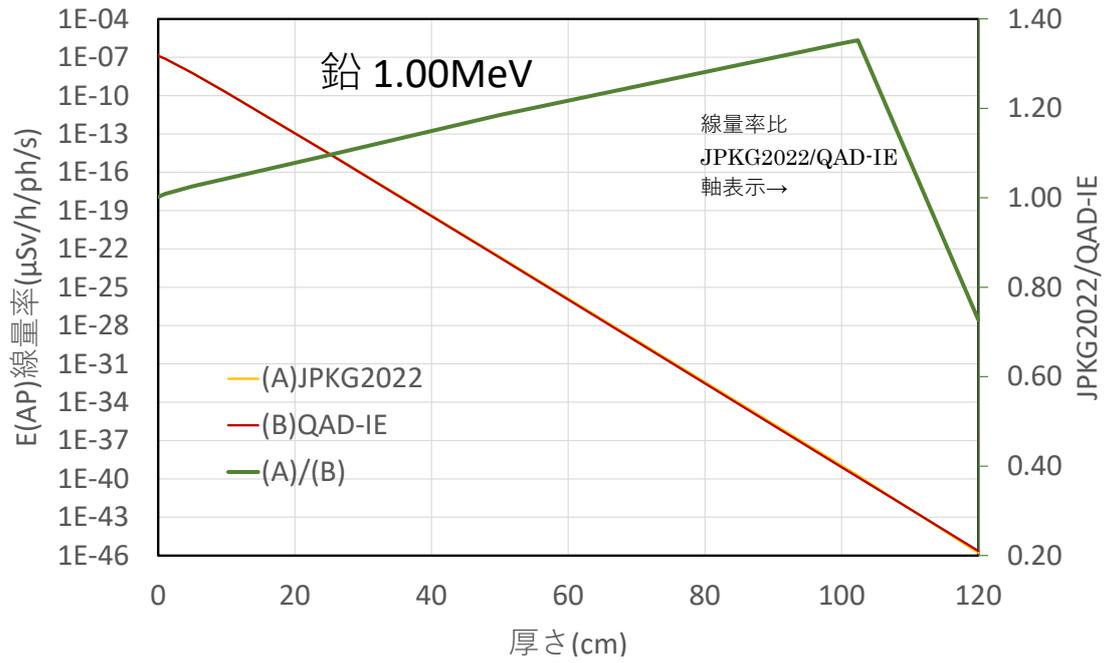


図 4.3-5 鉛 10MeV 遮蔽体中の計算結果

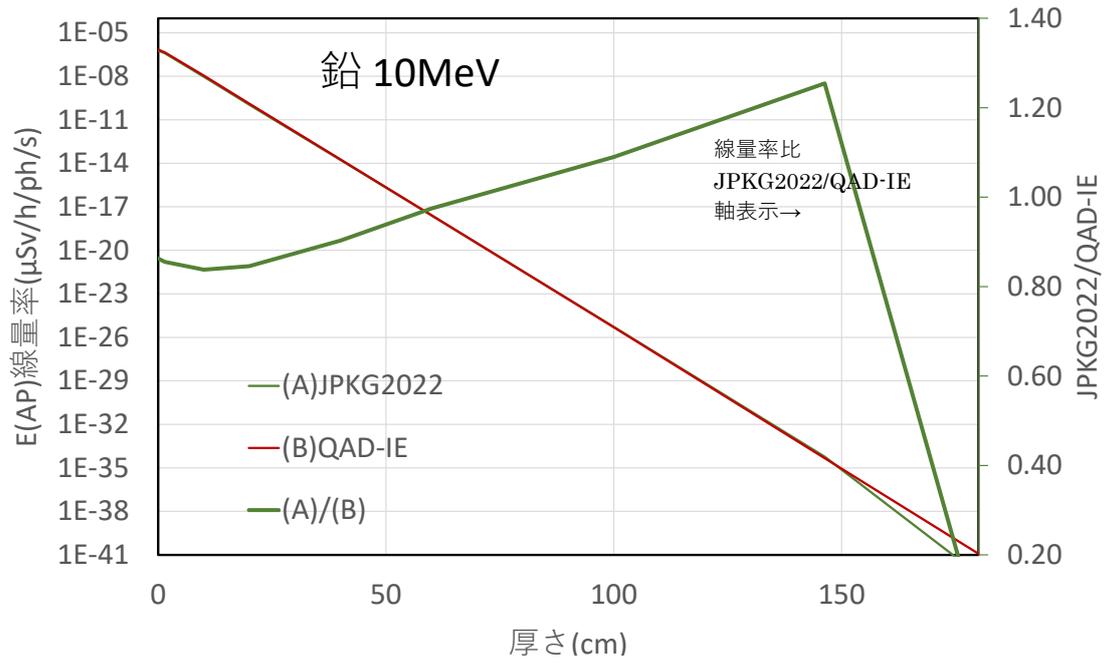


図 4.3-6 鉛 1MeV 遮蔽体中の計算結果

添付1 QAD-IE データと原子力学会標準(AESJ-SC)の比較

AESJ-SC

(1)鉄

Thick (mfp)	E(MeV)		
	10	1	0.1
40	6.85E+01	1.19E+02	4.32E+00
80	4.19E+02	3.28E+02	5.76E+00
100	8.42E+02	4.56E+02	6.42E+00

QAD-IE

Thick (mfp)	E(MeV)		
	10	1	0.1
40	6.85E+01	1.19E+02	4.32E+00
80	4.19E+02	3.28E+02	5.76E+00
100	8.42E+02	4.56E+02	6.41E+00

(2)鉛

Thick (mfp)	E(MeV)		
	10	1	0.1
40	7.71E+03	8.28E+00	6.95E+10
80	2.14E+07	1.34E+01	3.35E+22
100	9.61E+08	1.60E+01	2.52E+28

Thick (mfp)	E(MeV)		
	10	1	0.1
40	7.71E+03	8.28E+00	6.95E+10
80	2.14E+07	1.34E+01	3.35E+22
100	9.61E+08	1.59E+01	2.52E+28

付録 IV

遮蔽線量計算コードの開発、及び妥当性確認の詳細

目次

1. はじめに.....	1
1.1 概要.....	1
1.2 開発実施項目、及び実施内容.....	1
2. 遮蔽計算コードに係る入出力サポートツールの作成.....	5
2.1 計算結果可視化機能の作成①.....	5
2.1.1 仕様検討.....	5
2.1.2 作業内容.....	5
2.2 カスタム材料作成ツール②.....	11
2.2.1 仕様検討.....	11
2.2.2 追加設計.....	13
2.2.3 追加開発.....	15
2.3 線源ファイル作成ツール③.....	26
2.3.1 仕様検討.....	26
2.3.2 遮蔽計算コードの追加設計.....	28
2.3.3 遮蔽計算コードの追加開発.....	28
2.4 核種インポートツール④.....	30
2.4.1 仕様検討.....	30
2.5 計算妥当性検証ツール⑤.....	31
2.5.1 仕様検討.....	31
2.5.2 遮蔽計算コードの追加設計.....	33
2.5.3 遮蔽計算コードの追加開発.....	35
2.6 線量計算で用いる透過線上にある材料データの表示⑥.....	42
2.7 斜め入射データ作成ツール⑦.....	42
3. 遮蔽計算コードに対する遮蔽線量計算法の適用性拡張.....	43
3.1 二次粒子の線量寄与⑨.....	43
3.1.1 仕様検討.....	43
3.1.2 作業内容.....	44
3.2 有限媒質補正機能⑩.....	45
3.2.1 仕様検討.....	45
3.2.2 作業内容.....	45
3.3 薄い遮蔽材対応⑪.....	46
3.3.1 仕様検討.....	46
3.3.2 遮蔽計算コードの追加開発.....	46
3.4 スラブ斜め入射対応⑬.....	48
3.4.1 仕様検討.....	48
3.4.2 作業.....	50
3.4.3 検証.....	51
3.5 可視化ファイル⑭.....	54

4. その他拡張作業.....	55
4.1 遮蔽体で考慮可能な幾何形状の追加.....	56
4.1.1 作業内容.....	56
4.1.2 検証.....	62
4.2 線源条件の追加機能.....	65
4.2.1 作業内容.....	65
4.2.2 検証.....	82
4.3 計算条件編集機能の作成.....	86
4.3.1 仕様検討.....	86
4.3.2 遮蔽計算コードの追加設計.....	86
4.3.3 遮蔽計算コードの追加開発.....	87
5. コードの妥当性検証作業.....	93
5.1 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015.....	94
5.1.1 透過率データを用いて実効線量率を求める方法.....	94
5.1.2 実効線量ビルドアップ係数を用いて実効線量率を求める方法.....	96
5.1.3 診療用腔内照射施設の例.....	97
5.1.4 放射線発生装置取扱施設における遮蔽計算例.....	99
5.2 QAD-IE マニュアル.....	101
5.2.1 サンプル問題 1.....	101
5.2.2 サンプル問題 2.....	101
5.3 QAD-CGGP2R 相当コード.....	102
5.3.1 鉛遮蔽の例.....	102
5.3.2 土壌遮蔽の例.....	104
5.4 一括と個別計算の比較.....	106
5.4.1 複数核種の例.....	106
5.4.2 複数線源の例.....	107
参考文献.....	109

図目次

図 2-1	カスタム材料作成ツールのシステム構成と PKG2022 との関係	11
図 2-2	マスター材料データ (MASTERMATERIALS.XML) のファイルフォーマット	12
図 2-3	遮蔽材組成ライブラリファイル (LIB_MATERIAL.DAT) のファイルフォーマット	13
図 2-4	カスタム材料作成ツールの GUI 画面構成案	14
図 2-5	カスタム材料作成ツール：編集タブの画面構成	17
図 2-6	カスタム材料作成ツール：抽出タブの画面構成	19
図 2-7	作成された遮蔽材組成ライブラリファイル (LIB_MATERIAL.DAT)	25
図 2-8	線源核種を定義する場合のファイルフォーマット (上) および テキストファイル例 (下)	27
図 2-9	線源エネルギー分布を定義する場合のファイルフォーマット (上) および テキストファイル例 (下)	27
図 2-10	PKG2022_GUI プログラム：「線源の追加」フォームの「線源情報と透過線」タブにおける「線源情報 (INVENTORY)」パネルと線源情報外部ファイルのインポート・エクスポートボタン	28
図 2-11	線源情報のインポートおよびエクスポートダイアログにおける拡張子選択	29
図 2-12	比較の参照元となるフォルダと比較したいフォルダーの構成例：条件を変えて比較したいファイル名は同じにする	31
図 2-13	比較の参照元となるファイルと比較したいファイルの例：ファイル名は同じである必要はない	32
図 2-14	メインフォームのメニューバーに「ツール」->「妥当性確認」および「設定」を追	33
図 2-15	「妥当性確認」フォーム：比較するファイルあるいはフォルダーを選択する	33
図 2-16	「設定」フォーム：DIFF ツールのパスを設定する	34
図 2-17	USER.CONFIG のファイルフォーマット	34
図 4-1	使用可能な立体 (左の 3 つは CMB)	56
図 4-2	WED のフォーマット	57
図 4-3	RCC, REC, TRC のフォーマット	58
図 4-4	SPH, ELL のフォーマット	59
図 4-5	TOR のフォーマット	60
図 4-6	立体の追加ダイアログ	61
図 4-7	くさび型	62
図 4-8	楕円柱	62
図 4-9	円錐台	63
図 4-10	楕円体	63
図 4-11	トーラス	64
図 4-12	体積線源 BOX (直方体) の入力例 (上) と GUI 3D VIEW 上の線源点 (下)	66
図 4-13	体積線源 RPP (直方体) の入力例 (上) と GUI 3D VIEW 上の線源点 (下)	67
図 4-14	体積線源 SPH (球) の入力例 (上) と GUI 3D VIEW 上の線源点 (下)	68

図 4-15	体積線源 RCC (円柱) の入力例 (上) と GUI 3D VIEW 上の線源点 (下)	69
図 4-16	体積線源 SPH を使った半球の入力例 (上) と GUI 3D VIEW 上の線源点 (下)	71
図 4-17	体積線源 RCC を使った半円柱の入力例 (上) と GUI 3D VIEW 上の線源点 (下)	72
図 4-18	体積線源 RCC を使った半円筒の入力例 (上) と GUI 3D VIEW 上の線源点 (下)	73
図 4-19	体積線源 BOX (直方体) : 区分点 (END_POINT) のみ指定の場合 (上) と 重み (WEIGHT) 指定まで行った場合の入出力例 (下)	76
図 4-20	体積線源 SPH (球) : 区分点 (END_POINT) のみ指定の場合 (上) と 重み (WEIGHT) 指定まで行った場合の入出力例 (下)	77
図 4-21	体積線源 RCC (円柱) : 区分点 (END_POINT) のみ指定の場合 (上) と 重み (WEIGHT) 指定まで行った場合の入出力例 (下)	78
図 4-22	従来の入力ファイルにおける SOURCE ノードの記述例	80
図 4-23	拡張後の入力ファイルにおける SOURCE ノードの記述例	80
図 4-24	従来コードにおける複数線源定義時のエラーメッセージ	81
図 4-25	1 核種 1 線源として計算した場合の入力ファイルにおける線源定義部分	82
図 4-26	2 線源に分割した場合の入力ファイルにおける線源定義部分	82
図 4-27	1 核種 1 線源として計算した場合の入力ファイルにおける線源定義部分	83
図 4-28	放射線取扱施設の計算体系	85
図 4-29	PKG2022_GUI における線源 (SOURCE ノード) および検出器 (DETECTOR ノード) の追加ボタン	86
図 4-30	線源条件編集画面 : 「線源領域」タブ	89
図 4-31	線源条件編集画面 : 「線源情報と透過線」タブ	89
図 4-32	「線源領域」タブにおける設定 : 点線源の場合	90
図 4-33	「線源領域」タブにおける設定 : 体積線源 BOX の場合	90
図 4-34	「線源情報 (INVENTORY)」パネル : 線源情報 (核種指定)	91
図 4-35	「線源情報 (INVENTORY)」パネル : 線源情報 (エネルギー指定)	91
図 4-36	検出器編集機能	92

表目次

表 1-1	今年度実施した Γ 線遮蔽計算コード開発項目 (CUI 操作)	2
表 1-2	今年度実施した Γ 線遮蔽計算コード開発項目 (GUI 操作)	4
表 2-1	代表的なライセンスフリーかつ高機能な差分ツール (DIFF ツール)	32
表 4-1	線源核種 ^{60}Co の光子発生率	84
表 4-2	計算に使用した物質組成	85
表 5-1	コードの妥当性検証作業の実施項目	93
表 5-2	実効線量率定数 (CO-60)	95
表 5-3	実効線量透過率 (CO-60、コンクリート)	95
表 5-4	計算条件 (実務マニュアル 1.2.2)	96
表 5-5	実効線量率 (実務マニュアル 1.2.2)	96

表 5-6	実効線量率定数 (IR-192)	97
表 5-7	実効線量透過率 (IR-192、タングステン)	97
表 5-8	計算条件 (実務マニュアル 3.1.3)	98
表 5-9	実効線量 (実務マニュアル 3.1.3)	98
表 5-10	鉄遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率 (1次 Γ のみ)	99
表 5-11	鉄遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率 (中性子込み)	99
表 5-12	コンクリート遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率	100
表 5-13	QAD-IE サンプル問題 1 の計算結果比較	101
表 5-14	QAD-IE サンプル問題 2 の計算結果比較	101
表 5-15	実効線量透過率 (CO-60、鉛)	102
表 5-16	鉛遮蔽の計算結果比較	103
表 5-17	実効線量率定数 (CS-134、CS-137)	104
表 5-18	実効線量透過率 (CS-134、CS-137、土壌)	104
表 5-19	土壌遮蔽の計算結果比較.....	104
表 5-20	複数核種の計算結果比較.....	106
表 5-21	複数線源の計算結果比較.....	108

1. はじめに

1.1 概要

本事業の研究成果を取り入れた γ 線遮蔽計算コードについて、今年度実施した各開発項目の概要を示す。また、線量計算の妥当性を確認するために、適当な例題に対して従来の計算値との比較を行った。

1.2 開発実施項目、及び実施内容

表 1-1 及び表 1-2 に、今年度実施したコード開発項目を、CUI (テキスト) ベースの入出力による部分と、GUI (グラフィカルな操作) を要する部分のそれぞれに分けて示す。各開発項目について、作業の概要を記載した。また、本付録における説明箇所を示した。

表 1-1 今年度実施した γ 線遮蔽計算コード開発項目 (CUI 操作)

開発項目	詳細項目	作業の概要	付録 IV 説明箇所
計算入力ファイル読込	幾何形状	直方体、球、円柱に加えて、くさび形、楕円体、楕円柱、円錐台、トーラスを追加した。それらの、組合せ立体も定義可能	4.1
	体積線源	体積線源 (直方体、球、円筒) の形状定義の仕方を変更	4.2(1)
	複数線源 複数核種	線源条件として、1 線源かつ 1 核種だけでなく、複数線源、複数核種を設定可能にし、線源エネルギー指定も可能とする。	4.2(4)
データの補間	減衰係数	前年度は、対数-対数 (エネルギー係数) または線形-対数 (遮蔽厚さ係数) の 3 次ラグランジュ補間を採用していたが、特性 X 線の所で値が不連続になる不具合が分かり、代わりに秋間スプライン補間を採用した。	4.4
	ビルドアップ係数		
線量計算	二次粒子の線量寄与 (光核反応による光中性子、及び二次 γ 線)	遮蔽計算用データを参照して、一次 γ 線、中性子、二次 γ 線、全 γ 線の各線量寄与を個別に計算し出力する。	3.1
	線源分割	等分割、ガウス分割 (始点・終点・両端・中央細分)、任意分割に対応 等分割、ガウス分割各種に対して、任意の範囲で分割可能とし、球および円柱に対して半球や半円柱を設定可能にする。任意分割に対して、微小体積線源に任意の重みを割り当てられるようにした。	4.2(2) 4.2(3)
	有限媒質補正機能	無限媒質に対するビルドアップ係数データに対して有限媒質補正を行う機能を設ける。ただし補正データは与えていない。	3.2
	薄い遮蔽材対応	0.5mfp の遮蔽線量計算用データを追加し、1mfp 以下の薄い遮蔽材に対する近似線量計算を可能にする。	3.3
	スラブ斜め入射対応	γ 線がスラブ遮蔽に斜めに入射して透過する場合の透過線量計算用データを整備し、遮蔽体系にスラブ遮蔽が現れた場合に、入射角度に依存したデータを適用す	3.4

		る線量計算を行う。	
結果出力	可視化ファイル	計算結果の可視化機能が参照するファイルを出力する。	2.1

表 1-2 今年度実施した γ 線遮蔽計算コード開発項目 (GUI 操作)

開発項目	詳細項目	備考	付録 IV 説明箇所
計算入力編集	幾何形状	形状追加に対応	4.1
	体積線源	体積線源の形状定義変更	4.3.3(1)
	線源分割	領域分割条件・任意分割時の重みの設定	4.3.3(1)
	複数線源 複数核種	線源の種類や線源強度の個別指定・光子発生率のカットオフ設定	4.3.3(1)
	線量評価点	検出器編集機能の作成	4.3.3(2)
計算結果可視化	2次元、3次元	計算結果を可視化する機能。可視化ファイルのフォーマットと整合性をとる。	2.1
GUI サポート ツール	カスタム材料作成ツール (定義したカスタム材料情報は、外部に保存・読込可能とする)	カスタム材料情報を定義する。カスタム材料とは、構成要素(元素または化合物)ごとにバルク密度及び原子数密度を指定した混合物のこと。	2.2
	線源ファイル作成ツール (定義した線源情報は、外部に保存・読込可能とする)	線源情報を定義する。よく使う線源核種の組み合わせ、又は線源エネルギー分布及び強度を直接指定・編集する。	2.3
	核種インポートツール	線源情報として、ORIGEN コード等の外部で計算した情報を取り込めるようにする。	2.4
	計算妥当性確認ツール	妥当性検証で用いた計算ケースの入力ファイルと出力ファイルをまとめておき、選択した入力ファイルを編集して計算を実行し、出力ファイルとの比較を表示する。	2.5
	斜め入射データ作成ツール	斜め入射データは、斜め透過補正係数ファイルのパラメータを用いて自動生成されるため、基本的に GUI 操作は不要である。	—
	二重層データ作成ツール	同上	—

2. 遮蔽計算コードに係る入出力サポートツールの作成

昨年度から開発している遮蔽計算コードのグラフィカルなユーザインタフェース（GUI）に対して、計算条件編集、計算実行、計算結果可視化をサポートするツールの作成を行った。

2.1 計算結果可視化機能の作成①

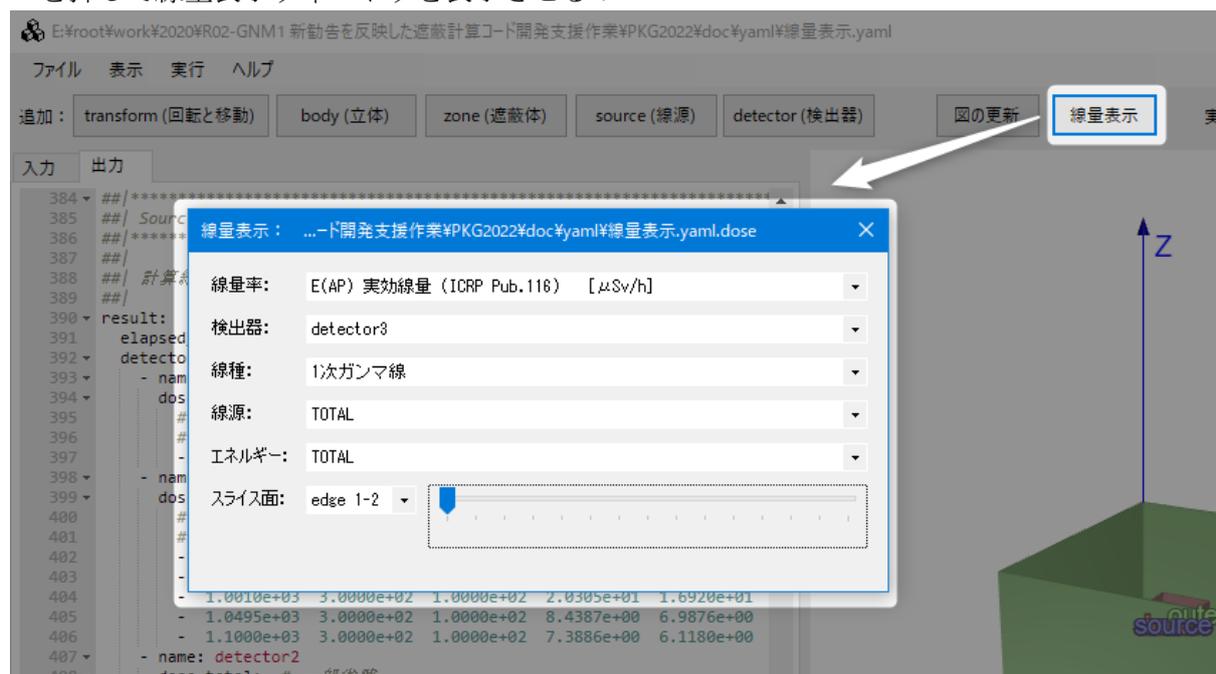
2.1.1 仕様検討

- ・ 計算によって得られた各種線量率を GUI 上で可視化する機能を実装する。
 - 点検出器は可視化対象としない。1次元検出器はグラフで表示する。2次元・3次元検出器は3次元可視化ペインにスライスマップの形で表示するようにする。3次元検出器の場合は、スライスの向き・位置を検出器の軸方向に沿って変更できるようにする。
 - 可視化対象となるデータは、線量率・検出器・線種（1次ガンマ、2次ガンマ、中性子）・線源・エネルギー毎に用意する。線種・線源・エネルギーについてはそれぞれの項目を合算したものも表示できるようにする。
 - データが大きくなる可能性があるため、読み込み時にプログレスバーを表示するようにする。
- ・ 可視化に必要な計算結果を格納するファイルのフォーマットも策定する。
 - テキストファイルとする。

2.1.2 作業内容

(1) GUI 上での可視化処理の実装

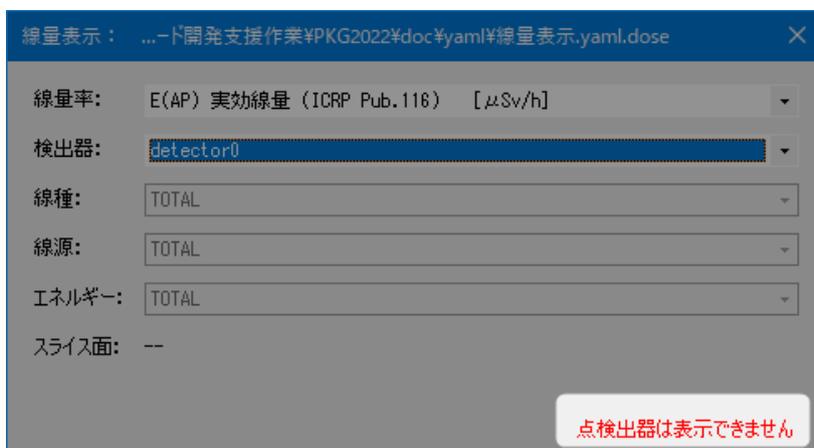
計算結果の可視化処理を実装した。操作の流れは以下ようになる。まず、「線量表示」ボタンを押して線量表示ウィンドウを表示させる：



このウィンドウ上で、各項目を指定すると、可視化ペインなどに線量率が表示される。検出器の種類ごとの違いを次ページ以降に述べる。

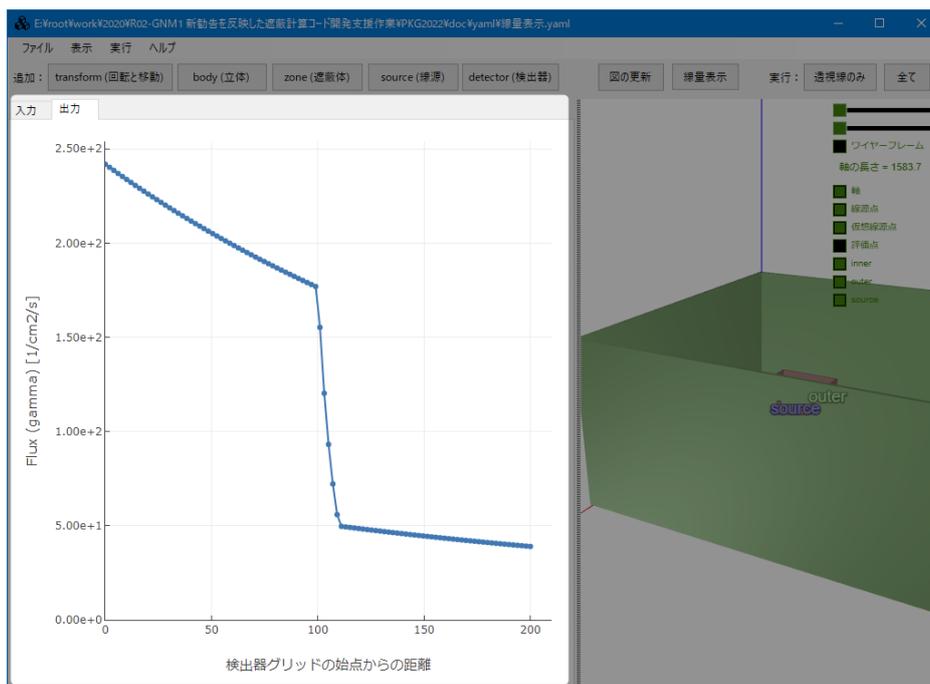
点検出器

点検出器は可視化できない。以下のようなエラーメッセージが表示される：



1次元検出器

1次元検出器の場合は、メインウィンドウの左ペインの「出力」タブにグラフが表示される：

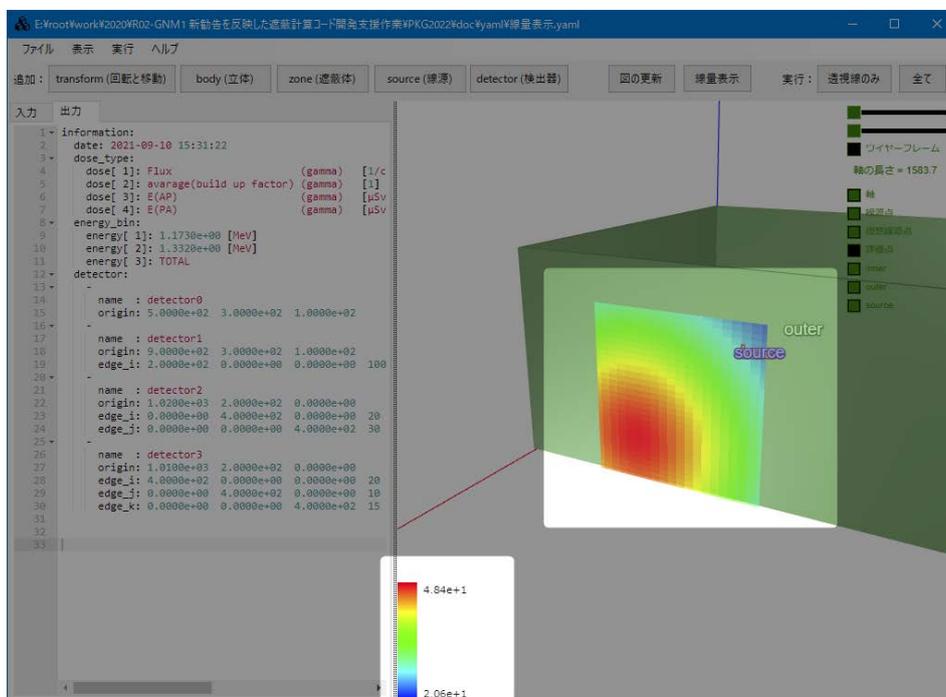


以下のグラフの操作が可能：

- ドラッグ：ドラッグ領域にズーム
- ダブルクリック：ズーム・移動を解除
- Shift+ドラッグ：表示領域の平行移動
- 縦・横軸の両端でドラッグ：軸の倍率を変更
- 縦・横軸の中央でドラッグ：表示領域の平行移動

2次元、3次元検出器

2次元または3次元検出器の場合は、メインウィンドウ右の可視化ペインにスライスが表示される：



左下にカラーバーが表示される。なお、2次元または3次元検出器が存在する場合、このスライスと重なって見づらくなならないように、検出点は自動的に非表示になる（可視化ペインの検出器チェックボックスがオフになる）。

3次元検出器の場合は、以下のようにスライス面を指定することができる：



「edge 1-2」という表示は、「1番目と2番目のedgeが作る面」がスライス面になっていることを表す。その右側のトラックバーは、残りのedge（今の場合3番目のedge）方向への移動距離を表す。

(1) 可視化ファイルのフォーマット

可視化に使用するファイルは*.yaml.dose という名称のファイルである。このファイルのフォーマットを以下に示す。

このファイルは、冒頭の YAML 形式部とその後のデータ部に分かれる。前半の YAML 部は以下のように、線量率の種類、線種、エネルギー値、検出器の情報が記載される：

```
information:
  date: 2021-10-12 10:11:40
  dose_type:
    dose[1]: E(AP) 実効線量 (ICRP Pub.116) [μSv/h]
    dose[2]: E(PA) 実効線量 (ICRP Pub.116) [μSv/h]
  ray_type:
    ray[1]: 1次ガンマ線
    ray[2]: 中性子線
    ray[3]: 2次ガンマ線
    ray[4]: TOTAL
  source:
    -
      name: source
      energy_bin:
        energy[1]: 1.1730e+00 [MeV]
        energy[2]: 1.3320e+00 [MeV]
        energy[3]: TOTAL
    -
      name: TOTAL
      energy_bin:
        energy[1]: TOTAL
  detector:
    -
      name : detector0 - 点検出器
      origin: 5.0000e+02 3.0000e+02 1.0000e+02
    -
      name : detector1 - 1次元検出器
      origin: 9.0000e+02 3.0000e+02 1.0000e+02
      edge_i: 2.0000e+02 0.0000e+00 0.0000e+00 100
    -
      name : detector2 - 2次元検出器
      origin: 1.0200e+03 2.0000e+02 0.0000e+00
      edge_i: 0.0000e+00 4.0000e+02 0.0000e+00 20
      edge_j: 0.0000e+00 0.0000e+00 4.0000e+02 30
    -
      name : detector3 - 3次元検出器
      origin: 1.0100e+03 2.0000e+02 0.0000e+00
      edge_i: 4.0000e+02 0.0000e+00 0.0000e+00 20
      edge_j: 0.0000e+00 4.0000e+02 0.0000e+00 10
      edge_k: 0.0000e+00 0.0000e+00 4.0000e+02 15
```

edge_i の最初の 3 つの成分は検出器を構成する評価点グリッドの始点と終点を結ぶベクトル。4 つ目の成分はその範囲内に配置する評価点の数 number_i (2 以上で、始点・終点およびその間に等間隔に配置する)。edge_j, edge_k についても同様。

後半のデータ部は、以下のようにデータが並ぶ：

```

#
# 線源： source
#
#
# 検出器： detector0
# [dose, ray, energy]
# [1,1,1] [1,1,2] [1,1,3] [1,2,1] [1,2,2] [1,2,3] [1,3,1] [1,3,2] [1,3,3]
1.2677e+02 1.4860e+02 2.7537e+02 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
#
# 検出器： detector1 (測定点IIにおける線量率は[i]行目)
1.3836e+01 1.6238e+01 3.0074e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.3742e+01 1.6128e+01 2.9870e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.3649e+01 1.6019e+01 2.9668e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.3557e+01 1.5911e+01 2.9468e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.3466e+01 1.5804e+01 2.9270e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.3376e+01 1.5698e+01 2.9074e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.3286e+01 1.5593e+01 2.8880e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.3198e+01 1.5490e+01 2.8688e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.3110e+01 1.5387e+01 2.8497e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.3024e+01 1.5285e+01 2.8309e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.2938e+01 1.5185e+01 2.8122e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.2853e+01 1.5085e+01 2.7938e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00
1.2769e+01 1.4986e+01 2.7755e+01 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 0.0000e+00

```

1つの列には「1つの線量率・線種・エネルギーにおける検出値」が評価点ごとに並ぶ。並び順は以下の通りである：

- 点検出器：1点のみ
- 1次元検出器：始点から「ファイル冒頭に記載されている edge_i 方向」に向かって i=1, 2, 3, ... という順に評価点に番号を付けていくとき、評価点 i での線量率は、[i]番目のデータである。
- 2次元検出器：edge_i, edge_j 方向の評価点番号をそれぞれ i, j とおくと、評価点(i, j)での線量率は[i + j * number_i]番目のデータである。
- 3次元検出器：edge_i, edge_j, edge_k 方向の評価点番号をそれぞれ i, j, k とおくと、評価点(i, j, k)での線量率は[i + j * number_i + k * number_i * number_j]番目のデータである。

2.2 カスタム材料作成ツール②

- カスタム材料情報を定義する。カスタム材料とは、構成要素（元素または化合物）ごとにバルク密度及び原子数密度を指定した混合物のこと。
- 定義したカスタム材料情報は、外部ファイルに保存・読込可能とする。

2.2.1 仕様検討

- 開発環境は Visual C# の Windows フォームアプリ (.NET Framework) とする。
 - システム構成は、マスター材料データファイル、カスタム材料作成ツール、遮蔽材組成ライブラリファイルとする（図 2-1）。
 - カスタム材料作成ツール（案 PKGMAT）は、主に以下の 2 つの機能を有する。
 - ◇ マスター材料データ（XML ファイル：MasterMaterials.xml）に対するカスタム材料の新規作成・編集機能。
 - ◇ マスター材料データから計算に使用する遮蔽材をユーザーが選択・抽出し、遮蔽材組成ライブラリファイル（テキストファイル：lib_material.dat）として出力する機能。

カスタム材料作成ツールのシステム構成

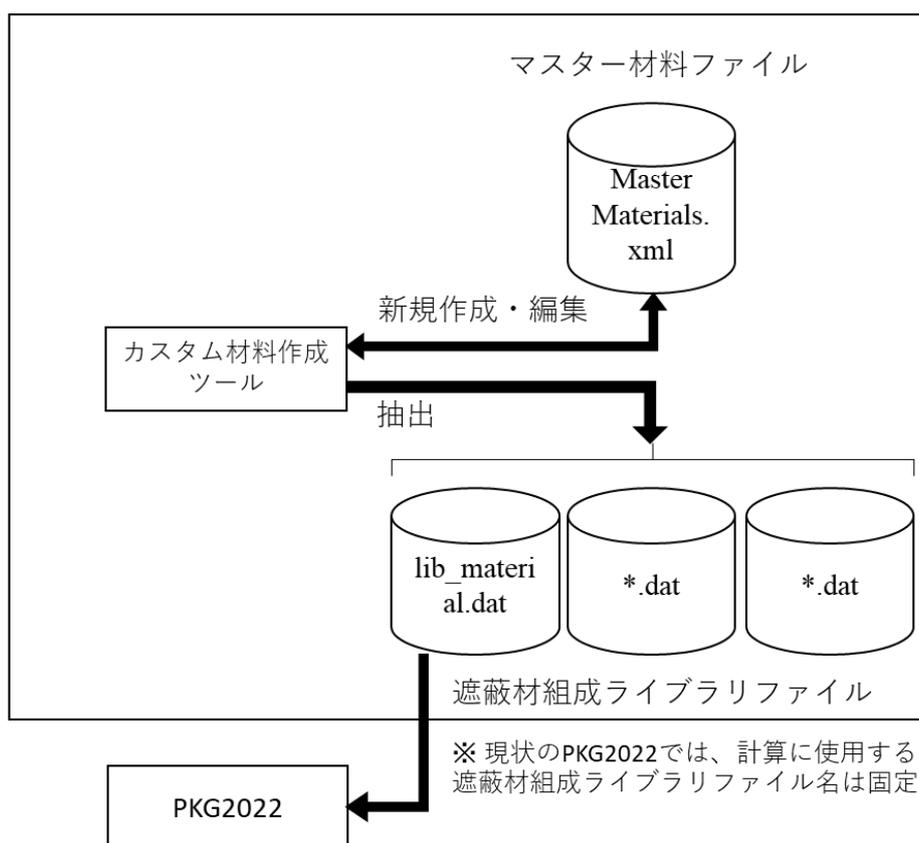


図 2-1 カスタム材料作成ツールのシステム構成と PKG2022 との関係

- マスター材料データファイル (MasterMaterials.xml) は、XML ファイル形式で記述され、以下の情報を格納する。マスター材料データ (MasterMaterials.xml) のファイルフォーマットを図 2-2 に示す。
 - Name : マテリアル名
 - Density : バルク密度
 - Reference : 出典 (組成のもとになった文献情報などを記述)
 - Create : 作成日
 - Update : 更新日
 - User : 登録・更新を行ったユーザー名
 - Components : 組成
 - ◇ EleNo : 元素番号
 - ◇ PartDens : 部分密度
 - ◇ EleSym : 元素記号
 - ◇ EleName : 元素名

```

<Materials>
  <Material>
    <Name>マテリアル名</Name>
    <Density>バルク密度</Density>
    <Reference>出典</Reference>
    <Create>作成日</Create>
    <Update>更新日</Update>
    <User>ユーザー名</User>
    <Components>
      <Component>
        <EleNo>元素番号</EleNo>
        <PartDens>部分密度</PartDens>
        <EleSym>元素記号</EleSym>
        <EleName>元素名</EleName>
      </Component>
      <Component>
        ...
      </Component>
    </Components>
  </Material>
  <Material>
    ...
  </Material>
</Materials>

```

図 2-2 マスター材料データ (MasterMaterials.xml) のファイルフォーマット

- 遮蔽材組成ライブラリファイル (lib_material.dat) は、プレーンテキストファイル形式で記述され、以下の情報を格納する。遮蔽材組成ライブラリファイル (lib_material.dat) のファイルフォーマットを図 2-3 に示す。

- title : タイトル
- matNum : 遮蔽材数
- material : 遮蔽材
 - ◇ Name : 遮蔽材名
 - ◇ Density : 密度
 - ◇ Components : 組成
 - EleNo : 元素番号
 - PartDens : 部分密度

```

PKG2022 maerial library [ standard material ]/[ User material ]! タイトル
matNum=5
Iron
7.8 1          ! 密度 ρ (g/cm3) (規格化)
26 7.8 !元素 NUCLID×1000 [SPS] rho(g/cm3)又は重量割合(wt%)

lead
11.0 1
82 11.0

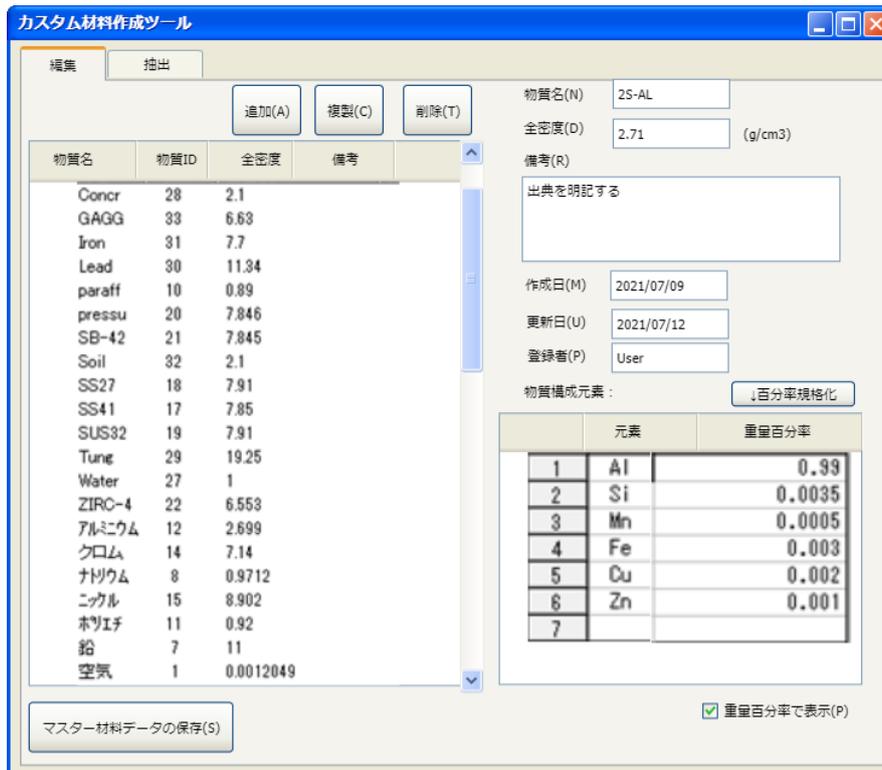
Polyethylene
0.92 2
1 1.3223E-01
6 7.8777E-01

```

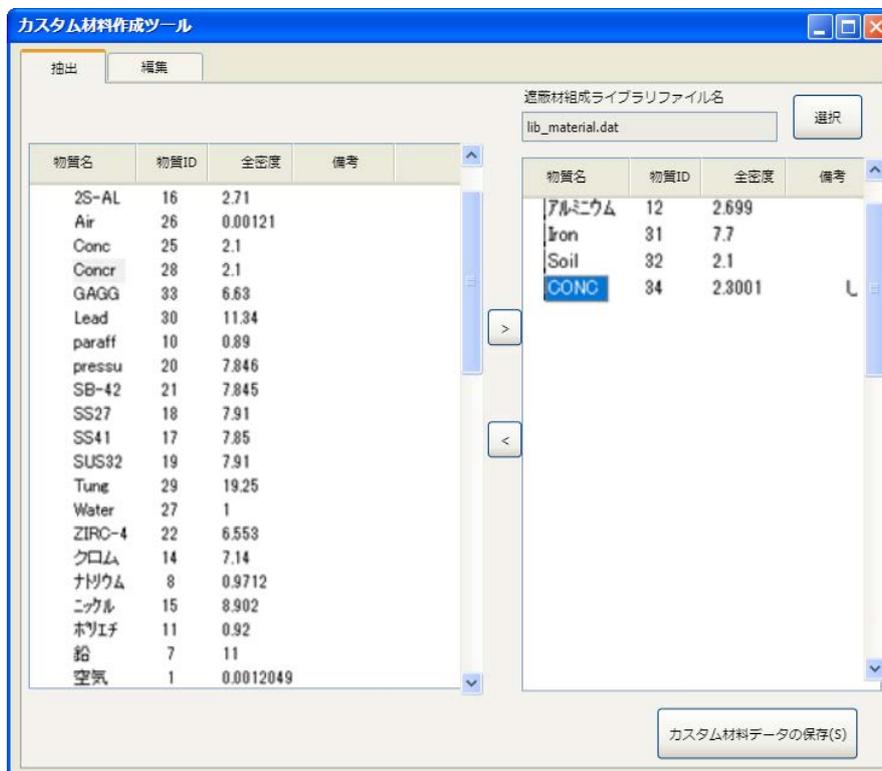
図 2-3 遮蔽材組成ライブラリファイル (lib_material.dat) のファイルフォーマット

2.2.2 追加設計

- 新たにカスタム材料作成ツール (プログラム名: 案 PKGMAT) として、GUI を作成する。
- カスタム材料作成ツールの GUI 画面構成案を図 2-4 に示す。
 - カスタム材料作成ツールは、編集タブと抽出タブから構成される。
 - ◇ 編集タブでは、マスター材料データに対して、新規作成・編集・保存を行う。
 - ◇ 抽出タブでは、左側のペイン (マスター材料データ) から計算に使用する材料を選択し、右側のペインに抽出された材料を蔽材組成ライブラリファイル (lib_material.dat) として出力する。



(a) 新規作成・編集画面



(b) 抽出画面

図 2-4 カスタム材料作成ツールの GUI 画面構成案

2.2.3 追加開発

- 上記、仕様および設計に基づいて、開発を行った。
- カスタム材料作成ツール（PKGMAT 案）は、編集タブと抽出タブから構成される。
 - ▶ 編集タブでは、カスタム材料情報の新規作成・編集・保存を行う。編集タブで新規作成・編集されたデータは、マスター材料データファイル（MasterMaterials.xml）として保存される。
 - ▶ 抽出タブでは、マスター材料データから計算に使用する材料を選択し、抽出された材料を遮蔽材組成ライブラリファイル（lib_material.dat）として出力する。

(1) 編集タブ

カスタム材料作成ツールにおける編集タブの画面構成を図 2-5 に示す。

- ① マスター材料データファイルのパス：
現在選択されているマスター材料データファイルのフルパスが表示される。
- ② マスター材料データファイルの選択ボタン：
任意のマスター材料データファイルを選択することができる。ボタンを押すと、「開く」ダイアログが表示される。
- ③ 遮蔽材リスト：
選択されているマスター材料データファイルに存在する遮蔽材リストが表示される。遮蔽材リストで選択された遮蔽材の詳細情報が、「⑧詳細情報編集パネル」に表示される。ここで表示される ID は、登録順で番号付けされる。なお、「⑦削除ボタン」で削除した物質の ID は一時的に欠番となるが、「④マスター材料データファイルの保存ボタン」を押す」ことでリナンバリングされる。
- ④ マスター材料データファイルの保存ボタン：
遮蔽材の追加・複製・削除・編集を行った場合に、マスター材料データファイルを保存するためのボタン。
- ⑤ 追加ボタン：
遮蔽材を新規作成するためのボタン。ボタンを押すと「⑧詳細情報編集パネル」にデフォルト値が設定される。また、「⑩編集」ボタンの表記が「登録」に変更されるので、適宜詳細情報を変更し、登録を行う。
- ⑥ 複製ボタン：
「③遮蔽材リスト」で選択した遮蔽材を複製するためのボタン。マテリアル名は同じものが設定される。なお、マスター材料データファイルでは、マテリアル名の重複を許可する。ただし、蔽材組成ライブラリファイル（lib_material.dat）では、マテリアル名の重複を許可していないので、必要な場合は、マテリアル名を変更しておく。
- ⑦ 削除ボタン：
「③遮蔽材リスト」で選択した遮蔽材を削除するためのボタン。ボタンを押すと、確認ダイアログが表示され、「はい」を押すと削除される。
- ⑧ 詳細情報編集パネル：
「③遮蔽材リスト」で選択した遮蔽材の詳細情報が表示される。この状態で、物質名、全密度、登録者、物質構成元素を変更した（ID は編集不可）場合、「⑩編集」ボタンが有効になるので、編集ボタンを押すと、「③遮蔽材リスト」に変更が反映される。ただし、このままではマスター材料データファイルに変更は反映されていないの

で、変更を反映する場合は、「④マスター材料データファイルの保存ボタン」を押す。

- ⑨ 部分密度あるいは重量百分率の規格化ボタン：

部分密度の場合は全密度で、重量百分率の場合は1で、規格化される。

- ⑩ 部分密度・重量百分率表示切替ボタン：

物質構成元素の存在割合を、部分密度で表示するか、重量百分率で表示するかを切り替えることができる。

- ⑪ 登録ボタン：

「⑧詳細情報編集パネル」で行った編集を、「③遮蔽材リスト」に登録するためのボタン。ただし、このままではマスター材料データファイルに変更は反映されていないので、変更を反映する場合は、「④マスター材料データファイルの保存ボタン」を押す。

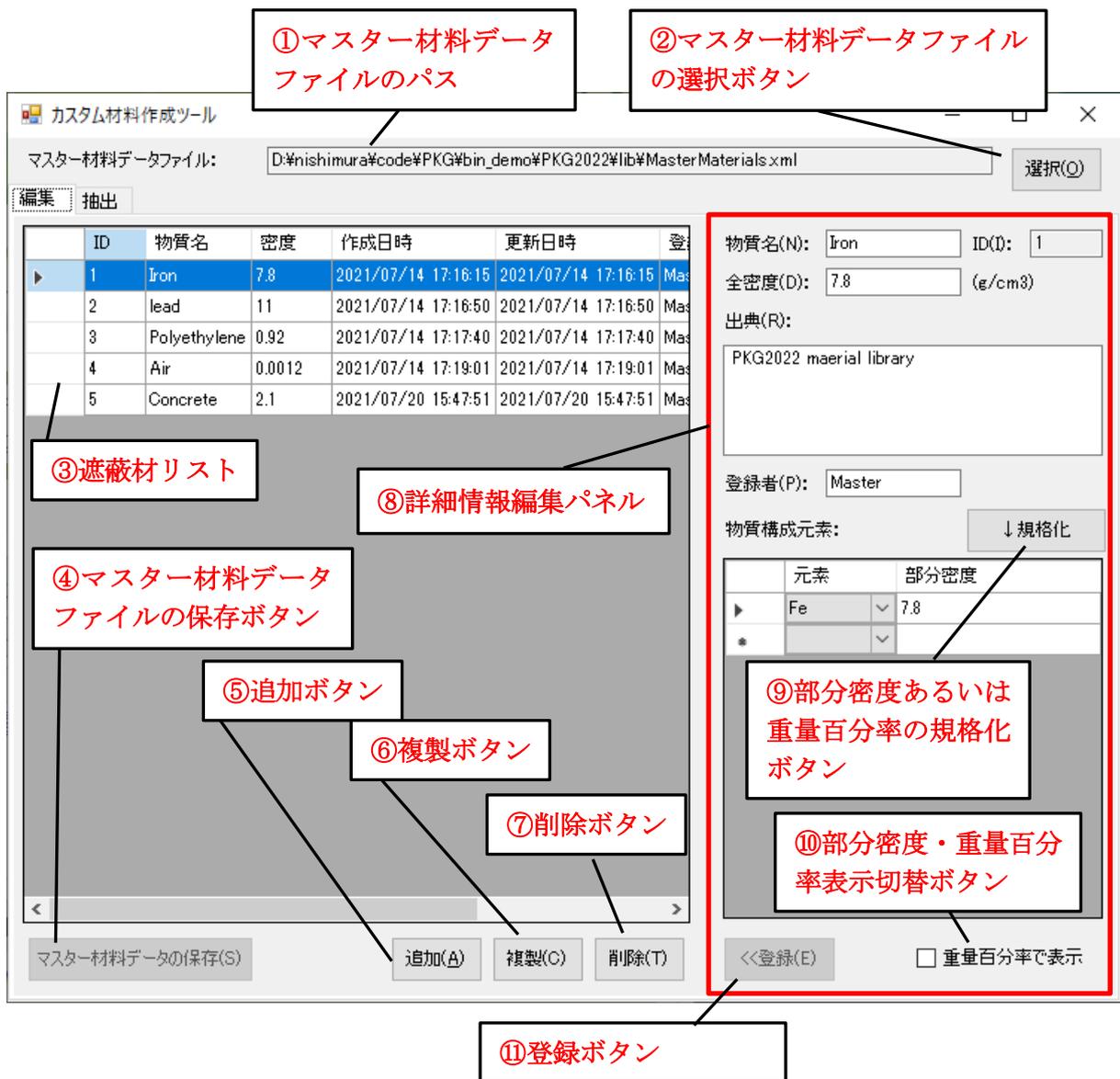


図 2-5 カスタム材料作成ツール：編集タブの画面構成

(2) 抽出タブ

カスタム材料作成ツールにおける抽出タブの画面構成を図 2-6 に示す。

- ① マスター材料の遮蔽材リスト：
選択されているマスター材料データファイルに存在する遮蔽材リストが表示される。
ただし、抽出された材料は表示されない。マスター材料の遮蔽材リストでは、物質名の重複が許されている。
- ② 抽出ボタン：
「①マスター材料の遮蔽材リスト」から遮蔽材を選択した状態で、抽出ボタン（「>」と表示されたボタン）を押すと、その選択された遮蔽材が「③抽出された遮蔽材リスト」へ移動する。
- ③ 抽出された遮蔽材リスト：
「①マスター材料の遮蔽材リスト」から計算に使用する遮蔽材を抽出した遮蔽材リスト。ここで表示されている遮蔽材が、遮蔽材組成ライブラリファイルのデータとして出力される。
- ④ 除外ボタン：
「③抽出された遮蔽材リスト」から選択した遮蔽材を除外するためのボタン。除外された遮蔽材は、「①マスター材料の遮蔽材リスト」に移動する。
- ⑤ 保存ボタン：
「③抽出された遮蔽材リスト」に存在する遮蔽材のデータを、遮蔽材組成ライブラリファイルとして保存するためのボタン。任意のファイル名で保存することができるが、PKG2022 で使用する遮蔽材組成ライブラリファイル名は、lib_material.dat で固定のため、計算に使用する場合は適宜変更する必要がある。
- ⑥ 遮蔽材組成ライブラリファイルのパス：
保存に成功した場合、遮蔽材組成ライブラリファイルのフルパスが表示される。

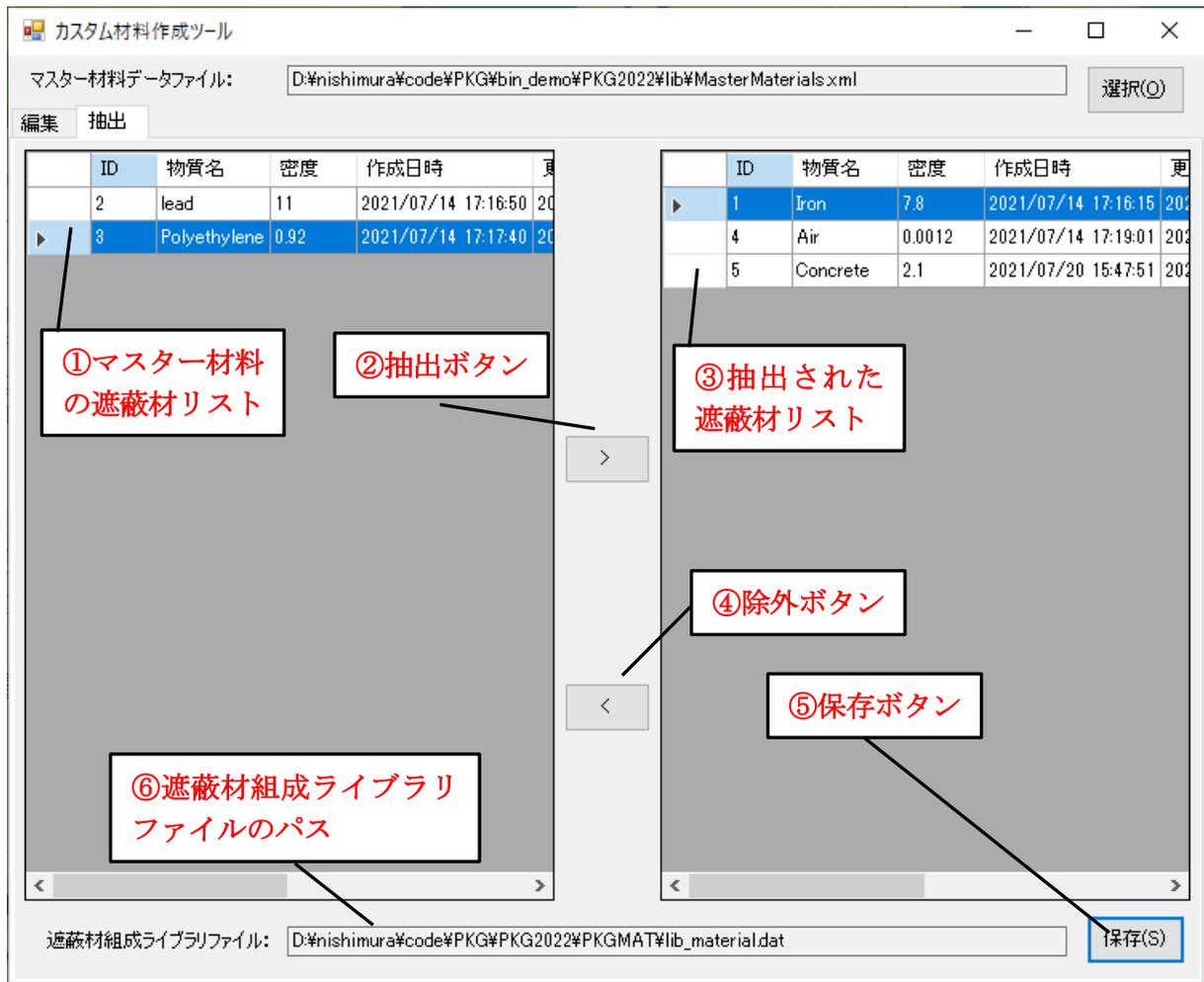
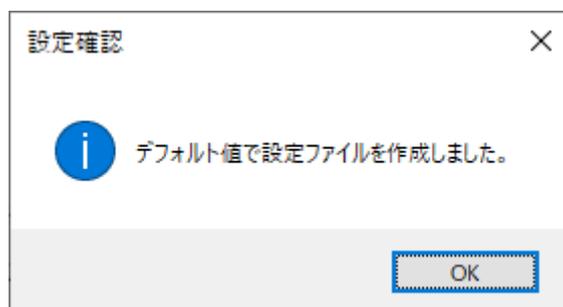


図 2-6 カスタム材料作成ツール：抽出タブの画面構成

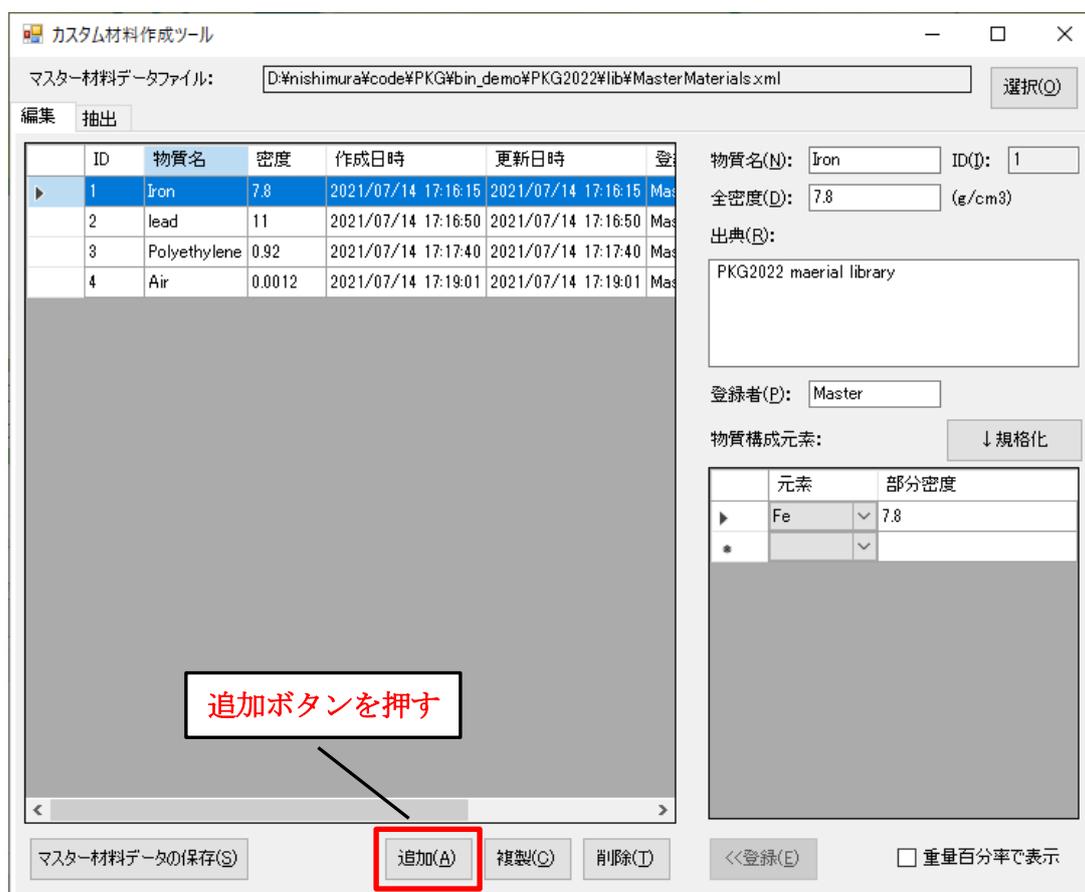
(3) 使い方

(a) 遮蔽材の新規作成 (例 : Concrete)

- はじめて使用する場合は、下図のような設定確認ダイアログが表示され、実行ファイルと同じフォルダーに設定ファイル (Settings.ini) が作成される。
 - 設定ファイル (Settings.ini) には、編集の対象となるマスター材料データファイルのフルパス (デフォルトでは、¥lib¥MasterMaterials.xml) が保存される。



- 2回目以降の起動では、前回選択していたマスター材料データファイルが自動的に選択される。
- また、対象とするマスター材料データファイル変更したい場合は、画面右上の選択ボタンをクリックして、任意のマスター材料データファイルを選択する。
- プログラムが起動すると、編集タブにおいて、マスター材料データファイルに保存されている遮蔽材リストが一覧に表示されるので、画面中央下の「追加」ボタンを押す。



- すると、「遮蔽材リスト」に新規材料が追加され、右側の「詳細情報編集パネル」にデフォルト値が設定される。
 - この状態で、「詳細情報編集パネル」のデータを適宜編集していく。
 - 物質名は、空欄およびスペースを含む場合にエラーとなる。
 - ID は自動的に付与されるため、編集不可。
 - 全密度は、0 より大きい実数以外が入力されるとエラーとなる。
 - 出典および登録者は、空欄の場合にエラーとなる。
 - 物質構成元素のうち、元素は、コンボボックスで表示されるリストから選択する。
 - 物質構成元素のうち、部分密度（あるいは重量百分率）は、空欄あるいは0 より大きい実数以外が入力されるとエラーとなる。また、「重量百分率で表示」チェックボックスにチェックを入れることで部分密度の代わりに、重量百分率で入力することができる。さらに、「規格化」ボタンを押すことで、部分密度は全密度で、重量百分率は1で規格化することができる。なお、部分密度（あるいは重量百分率）に関しては、EXCEL からコピー・アンド・ペーストで値を入力することができる。

カスタム材料作成ツール

マスター材料データファイル: D:\nishimura#code#PKG#bin_demo#PKG2022#lib#MasterMaterials.xml 選択(O)

編集 抽出

ID	物質名	密度	作成日時	更新日時	登
1	Iron	7.8	2021/07/14 17:16:15	2021/07/14 17:16:15	Mas
2	lead	11	2021/07/14 17:16:50	2021/07/14 17:16:50	Mas
3	Polyethylene	0.92	2021/07/14 17:17:40	2021/07/14 17:17:40	Mas
4	Air	0.0012	2021/07/14 17:19:01	2021/07/14 17:19:01	Mas
5	Concrete	2.1	2021/07/26 9:46:37	2021/07/26 9:46:37	Mas

詳細情報編集パネルで適宜データを編集する

元素はコンボボックスのリストから選択する

物質名(N): Concrete ID(I): 5

全密度(D): 2.1 (g/cm³)

出典(B): example

登録者(P): Master

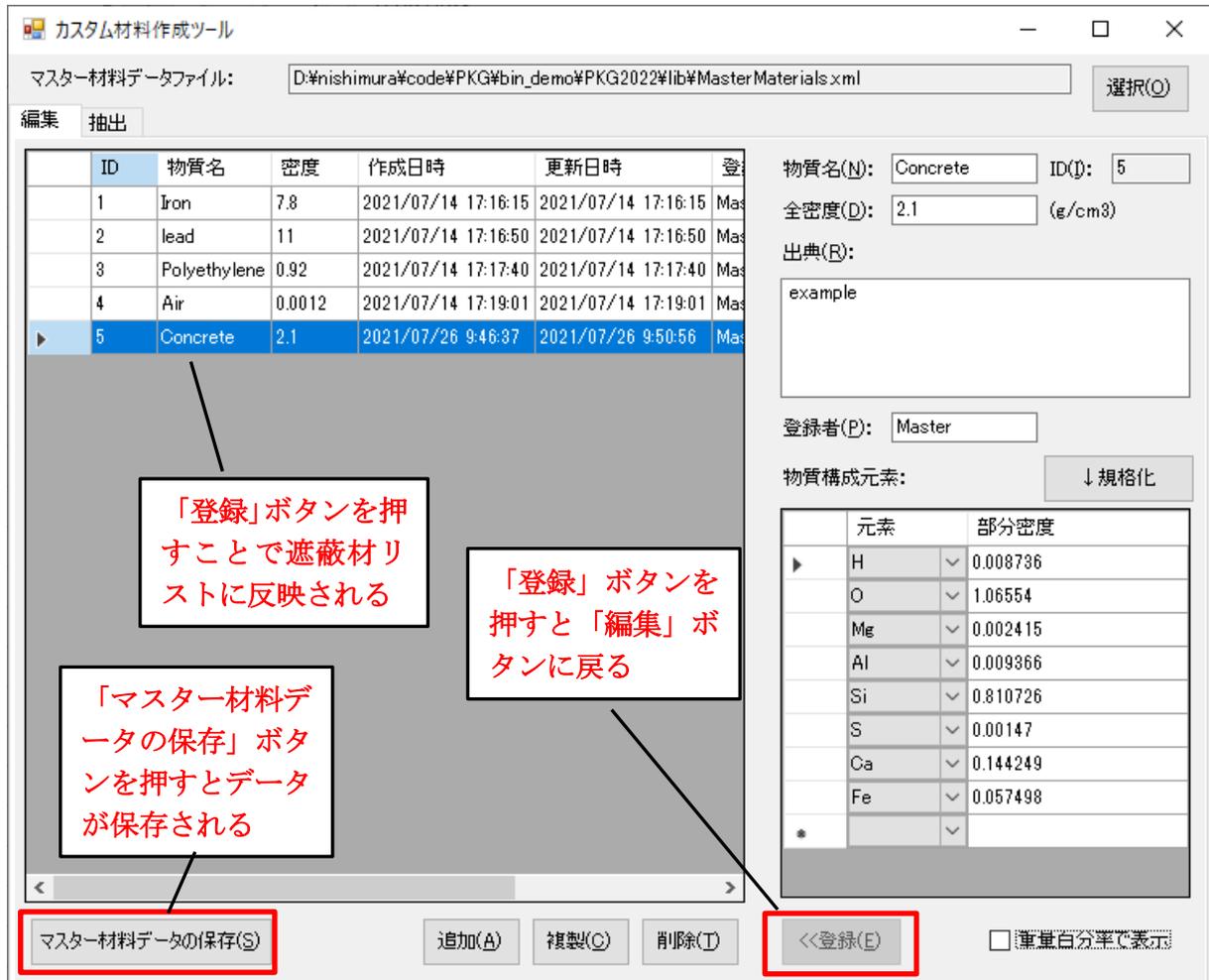
物質構成元素: ↓規格化

元素	部分密度
H	0.008736
O	1.06554
F	
Ne	
Na	
Mg	
Al	
Si	
P	
S	
Cl	
Ar	
K	
Ca	
Sc	
Ti	
V	
Cr	
Mn	
Fe	
Cu	

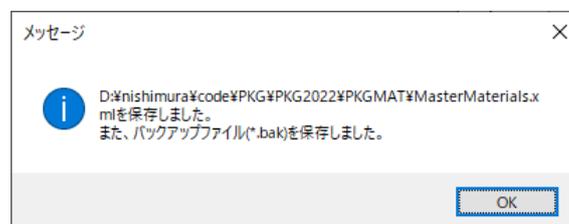
重量百分率で表示

マスター材料データの保存(S) 追加(A) 複製(C) 削除(D)

- すべてのデータの 입력が完了したら、「登録」ボタンを押すことで、遮蔽材リストにデータが反映される。
 - このとき「登録」ボタンの表記が「編集」に戻る。
 - この状態では、遮蔽材リストのデータはマスター材料データファイルに反映されていないので、「マスター材料データの保存」ボタンをクリックする。



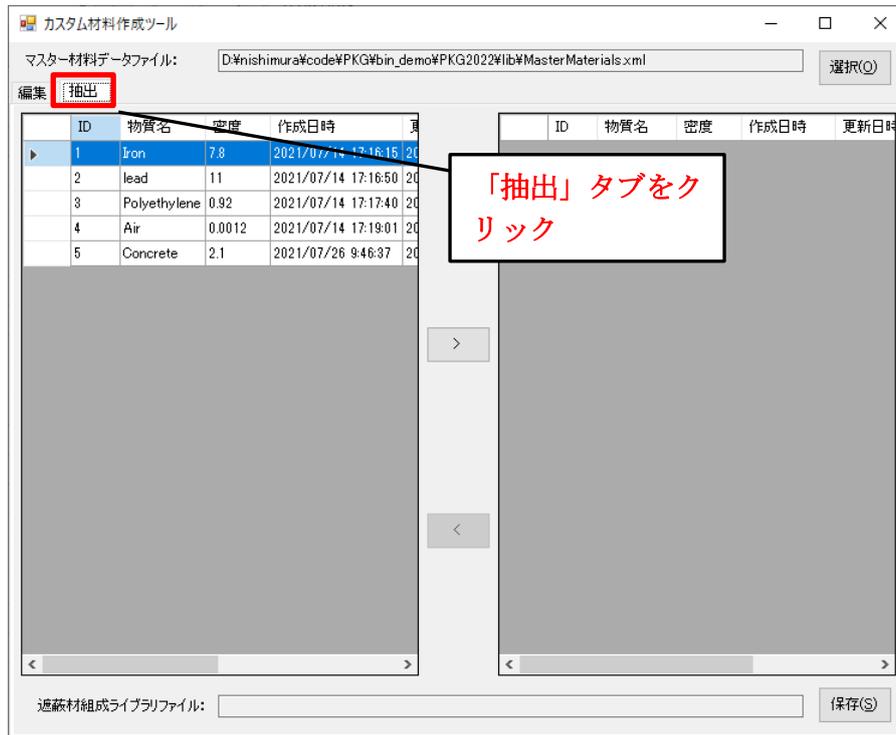
- すると、保存に成功した場合、その旨のメッセージが表示される。
 - このとき、マスター材料データファイルは上書き保存されるため、一つ前の状態のマスター材料データファイルがバックアップファイルとして保存される。



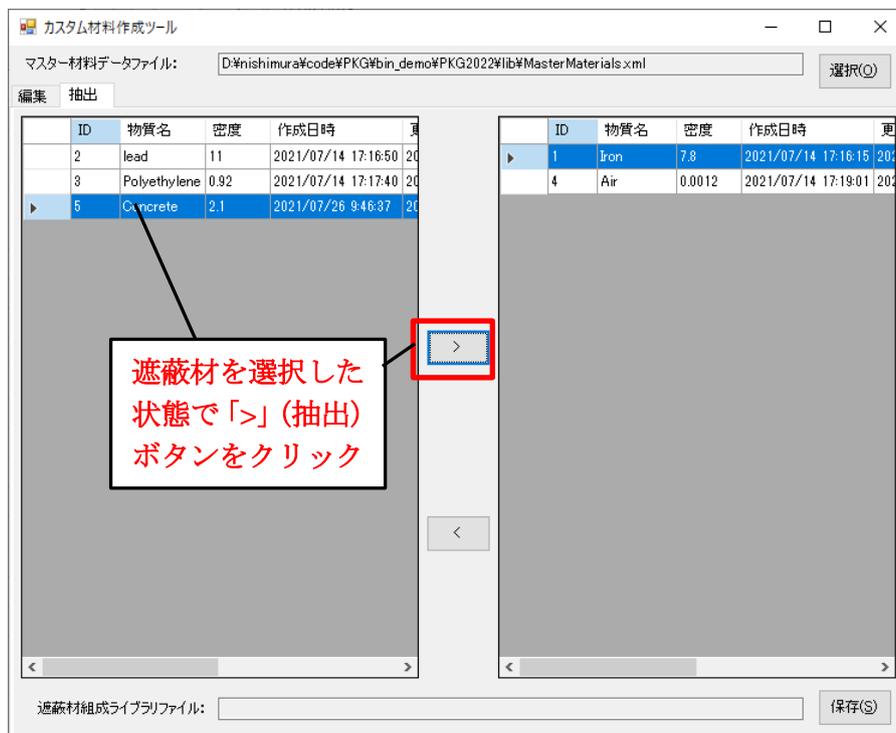
- なお、既存の材料の編集の場合は、遮蔽材リストからターゲットとなる行を選択することで、右側の詳細情報編集パネルでデータを編集することができる。編集の手順は、新規作成と同様である。

(b) 計算用遮蔽材組成ライブラリファイルの抽出

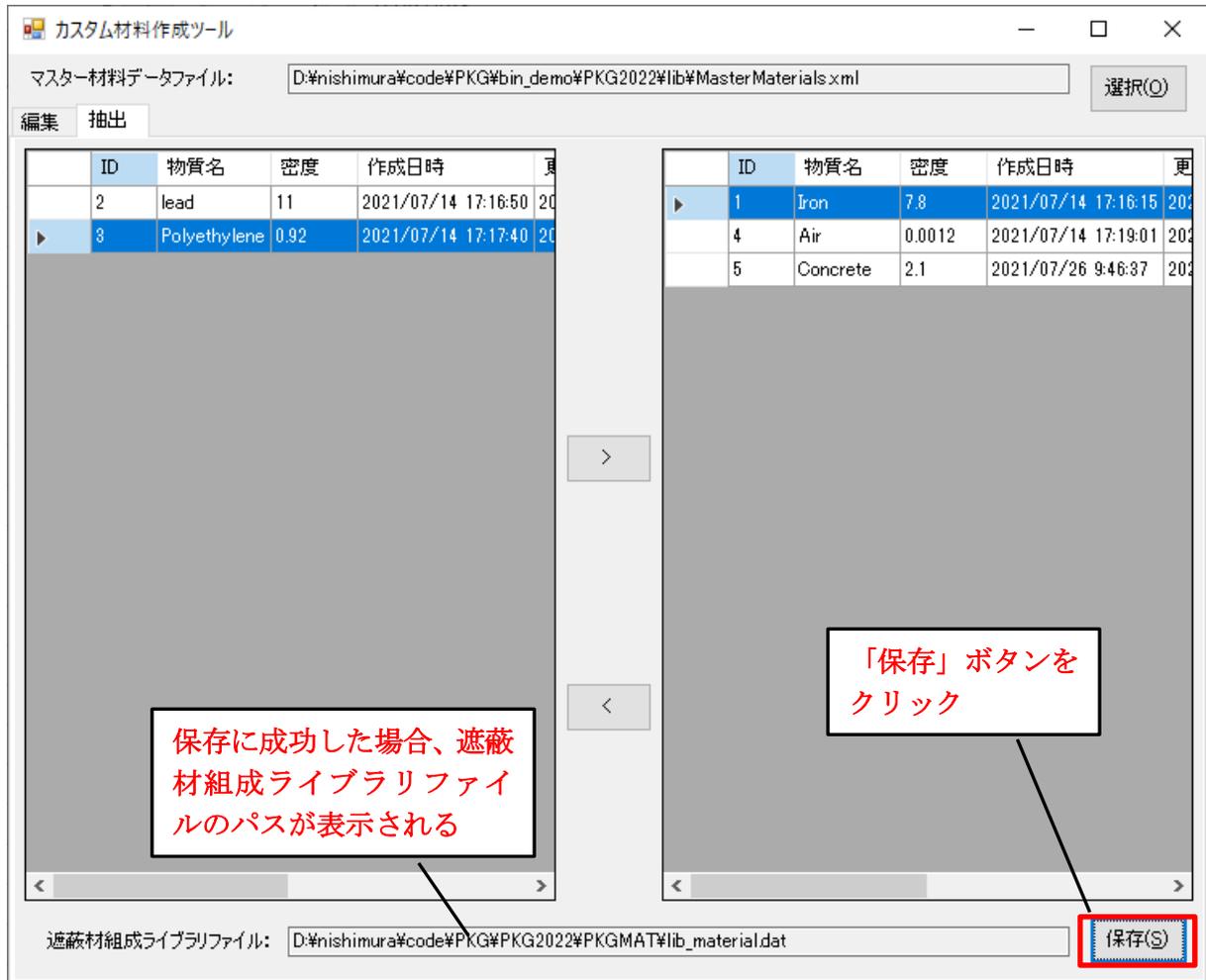
- マスター材料データファイルが選択されている状態で、抽出タブをクリックする。



- 左側のマスター材料の遮蔽材リストから計算に使用する遮蔽材を選択した状態で、「>」(抽出) ボタンをクリックする。
 - なお、抽出した遮蔽材リストから遮蔽材を削除する場合は、「<」(除外) ボタンをクリックする。



- 計算に使用する遮蔽材をすべて抽出し終わったら、画面右下の「保存」ボタンをクリックし、保存ダイアログでファイル名を指定して保存する。
 - 任意のファイル名で保存することができるが、PKG2022 で使用する遮蔽材組成ライブラリファイル名は、lib_material.dat で固定のため、計算に使用する場合は適宜変更する必要がある。



- 上記の操作で作成された遮蔽材組成ライブラリファイル (lib_material.dat) を図 2-7 に示す。

```
PKG2022 maerial library [ standard material ]/[ User material ]! タイトル
matNum=3
! Ref      : PKG2022 maerial library
! Create   : 2021/07/14 17:16:15
! Update   : 2021/07/14 17:16:15
! User     : Master
Iron
7.8 1
26 7.8

! Ref      : PKG2022 maerial library
! Create   : 2021/07/14 17:19:01
! Update   : 2021/07/14 17:19:01
! User     : Master
Air
0.0012 4
1 1.2049E-08
6 1.4766E-07
7 0.00090934
8 0.00029541

! Ref      : example
! Create   : 2021/07/20 15:47:51
! Update   : 2021/07/20 15:47:51
! User     : Master
Concrete
2.1 8
1 0.008736
8 1.06554
12 0.002415
13 0.009366
14 0.810726
16 0.00147
20 0.144249
26 0.057498
```

図 2-7 作成された遮蔽材組成ライブラリファイル (lib_material.dat)

2.3 線源ファイル作成ツール③

2.3.1 仕様検討

以下の仕様を満たすものとする。

- 線源情報を定義する。よく使う線源核種の組み合わせ、あるいは線源エネルギー分布及び強度を直接編集する。
- 定義した線源情報は、外部ファイルに保存・読込可能とする。

線源情報として、線源核種を定義する場合、ならびに線源エネルギー分布を定義する場合に対応する。

線源情報外部ファイルのファイルフォーマットおよびテキストファイル例（拡張子.txt）に関して、線源核種を定義する場合を図 2-8 に、線源エネルギー分布を定義する場合を図 2-9 示す。また、線源情報外部ファイルのファイル形式は、EXCEL 等の外部プログラムでの編集を考慮して、テキストファイル以外に、Column 間をカンマ（,）で区切る CSV ファイル（.csv）にも対応させる。

線源情報外部ファイル（線源核種定義）

Column 1: nuclide ID.

Column 2: nuclide activity (Bq)

※ テキストファイル (.txt) の場合は Column 間を 1 文字以上の空白で区切る。

※ CSV ファイル (.csv) の場合は Column 間をカンマ (,) で区切る。

※ 行頭に#を付けるとコメント行となる。

#nuclide	activity
Co60	1.000000E+000
Ag108	2.000000E+000
Ag108M	3.000000E+000
Cs137	6.000000E+001
Cs148	6.100000E+001
Cs149	6.200000E+001
Cs150	6.300000E+001

図 2-8 線源核種を定義する場合のファイルフォーマット（上）および
テキストファイル例（下）

線源情報外部ファイル（線源エネルギー分布定義）

Column 1: energy (MeV)

Column 2: energy spectrum (-)

Column 3: nuclide activity (Bq)

※ テキストファイル (.txt) の場合は Column 間を 1 文字以上の空白で区切る。

※ CSV ファイル (.csv) の場合は Column 間をカンマ (,) で区切る。

※ 行頭に#を付けるとコメント行となる。

#energy	spectrum	activity
3.471000E-001	7.500000E-005	1.000000E+000
8.261000E-001	7.600000E-005	2.000000E+000
1.173000E+000	9.985000E-001	3.000000E+000
1.332000E+000	9.998000E-001	4.000000E+000
2.159000E+000	1.200000E-005	5.000000E+000
2.506000E+000	2.000000E-008	6.000000E+000

図 2-9 線源エネルギー分布を定義する場合のファイルフォーマット（上）および
テキストファイル例（下）

2.3.2 遮蔽計算コードの追加設計

線源条件編集機能の一部として、線源ファイル作成ツールを整備した。

2.3.3 遮蔽計算コードの追加開発

PKG2022_GUI プログラムの「線源の追加」フォームの「線源情報と透過線」タブにおいて、線源情報 (inventory) を設定する箇所 (「線源情報 (inventory)」パネル) があり、核種指定あるいはエネルギー指定で線源情報を定義することができる (図 2-10)。

また、「線源情報 (inventory)」パネルには、インポートボタンとエクスポートボタンが用意されており、核種指定あるいはエネルギー指定に従い、インポートボタンで線源情報外部ファイルの読み込み、エクスポートで線源情報外部ファイルへの書き込みを行うことができるよう整備した。なお、インポートおよびエクスポートともにテキストファイル (.txt) の他、CSV ファイル (.csv) を取り扱うことができる (図 2-11)。

さらに、EXCEL 上でコピーしたデータ (タブ区切り) を、線源情報のリスト上でペースト (Ctrl+V) することで、直接貼り付けることが可能である。

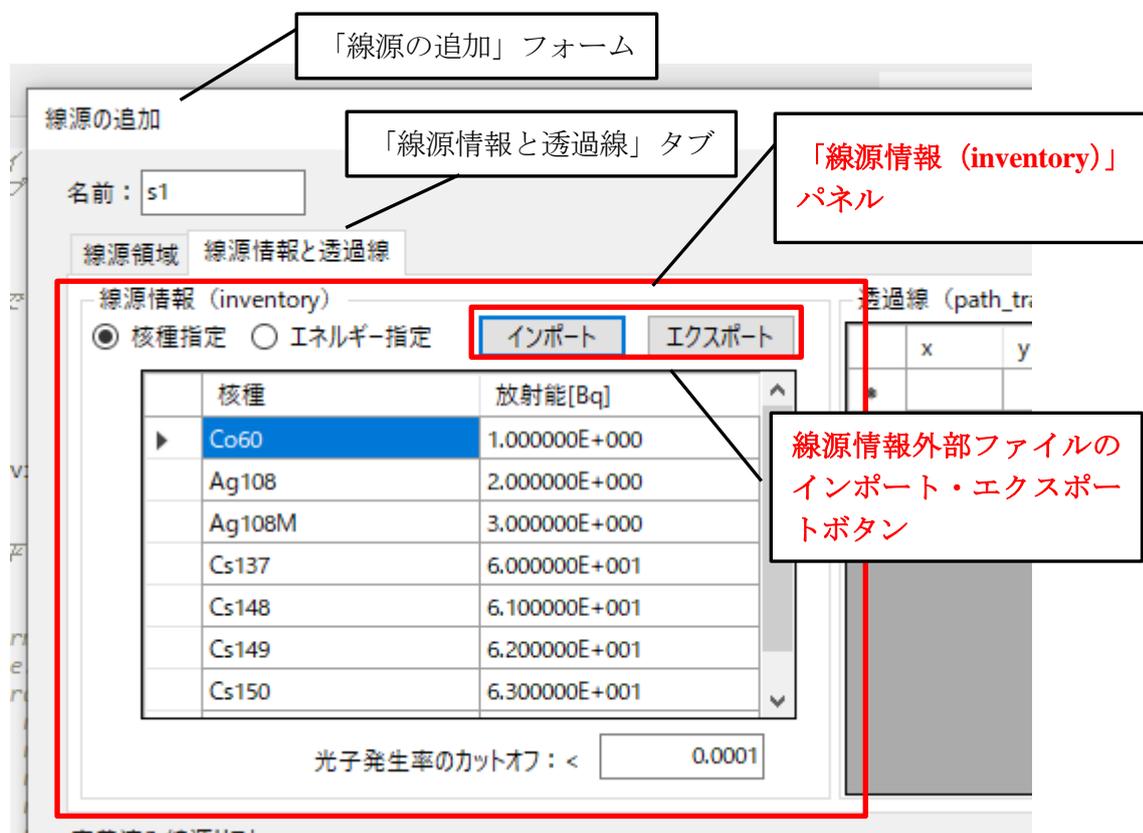


図 2-10 PKG2022_GUI プログラム: 「線源の追加」フォームの「線源情報と透過線」タブにおける「線源情報 (inventory)」パネルと線源情報外部ファイルのインポート・エクスポートボタン

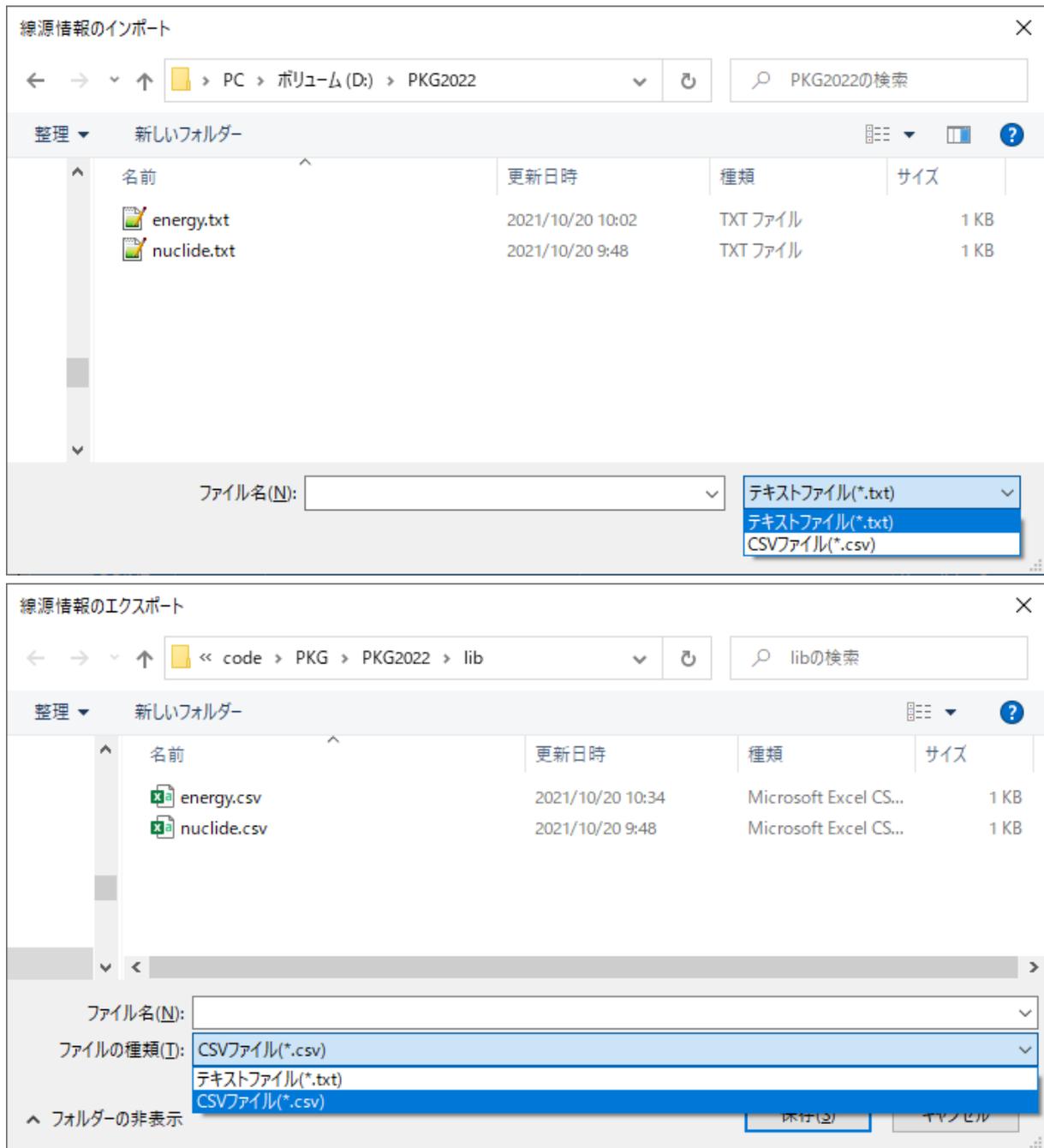


図 2-11 線源情報のインポートおよびエクスポートダイアログにおける拡張子選択

2.4 核種インポートツール④

2.4.1 仕様検討

コード仕様の検討を行った。

- 線源情報として、ORIGEN コード等を用いて、外部で計算した情報を取り込めるようにする。

本機能は、「2.3 線源ファイル作成ツール③」において整備した機能に含まれるため、ここでは説明を割愛する。

2.5 計算妥当性検証ツール⑤

- 妥当性検証で用いた計算ケースの入力ファイルと出力ファイルをまとめておき、選択した入力ファイルを編集して計算を実行し、出力ファイルとの比較を表示する。
- 目的は、入力の細かい編集による出力の差を確認。またはデータの入れ替えに伴う出力の差を確認する等。

2.5.1 仕様検討

コード仕様の検討を行った。

- 図 2-12 のように、比較の参照元となるフォルダーおよび比較したいフォルダーごとに、入力ファイルと出力ファイルをまとめたフォルダーを作成する。このとき、条件を変えて比較したいファイル名は同じにしておく。この状態でフォルダー比較（図の場合、test1 と test2）を行ったとき、同名ファイル間で差異があるかどうかを確認できるようにする。
- また、図 2-13 のように、任意のファイル同士を比較したい場合は、直接ファイル名を指定（図の場合、example1.yaml と example1.yaml2）してファイル比較を行った場合、ファイル間で差異があるかどうかを確認できるようにする。
- 上記機能を実現するのに、フォルダー比較およびファイル比較をゼロから実装したり、せいぜい C# の Diff ライブラリ（例えば、diff-match-patch や diffplex）を使った実装を行ったりすることも考えられるが、ライセンスフリーかつ高機能な差分ツール（Diff ツール）が利用できるため、ここでは、同機能を任意の Diff ツールを外部プログラムとして呼び出すことで実現することとする。ライセンスフリーかつ高機能な差分ツール（Diff ツール）の例を表 2-1 に示す。ここでは、表 2-1 の WinMerge を呼び出すことで、上記機能を実現するものとした。なお、使用する Diff ツールは、ユーザーが任意に選択できるように整備し、WinMerge と同様の呼び出し方法（プログラム名 引数 1：参照元 引数 2：比較対象）であれば、WinMerge 以外のツールも使用できるものとする。

参照元となるフォルダー	比較したいフォルダー
└─test1 example1.yaml example1.yaml.dose example1.yaml.summary example2.yaml example2.yaml.dose example2.yaml.summary example3.yaml example3.yaml.dose example3.yaml.summary example4.yaml example4.yaml.dose example4.yaml.summary	└─test2 example1.yaml example1.yaml.dose example1.yaml.summary example2.yaml example2.yaml.dose example2.yaml.summary example3.yaml example3.yaml.dose example3.yaml.summary example4.yaml example4.yaml.dose example4.yaml.summary

図 2-12 比較の参照元となるフォルダと比較したいフォルダーの構成例：
条件を変えて比較したいファイル名は同じにする

参照元となるファイル	比較したいファイル
<pre>#example1.yaml ## ## 線源の定義 ## source: - type: BOX name: s1 geometry: vertex: -50 -50 -50 edge_1: 100 0 0 edge_2: 0 100 0 edge_3: 0 0 100 transform: tr1 division: edge_1: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1} edge_2: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1} edge_3: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1} inventory: - {nuclide: Co60, radioactivity: 1.0e+10} cutoff_rate: 0.0001 path_trace: bounding_box: - s1 position: - 300 300 100</pre>	<pre>#example2.yaml ## ## 線源の定義 ## source: - type: RPP name: s1 geometry: min: 250 250 50 max: 350 350 150 division: edge_1: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1} edge_2: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1} edge_3: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1} inventory: - {nuclide: Co60, radioactivity: 1.0e+10} cutoff_rate: 0.0001 path_trace: bounding_box: - s1 position: - 300 300 100</pre>

図 2-13 比較の参照元となるファイルと比較したいファイルの例：
ファイル名は同じである必要はない

表 2-1 代表的なライセンスフリーかつ高機能な差分ツール (Diff ツール)

ツール名	ライセンス	入手先	備考
WinMerge	GPL2	https://winmergejp.bitbucket.io/	本ツールの使用を推奨
Meld	GPL2	https://meldmerge.org/	少し動作が重い。
Diffuse	GPL2	https://sourceforge.net/projects/diffuse/	注：ファイル比較のみ対応。フォルダ比較はできない。

2.5.2 遮蔽計算コードの追加設計

遮蔽計算コードの追加設計を行った。

メインフォームのメニューバーに、「ツール」->「妥当性確認」および「設定」を追加する（図 2-14）。

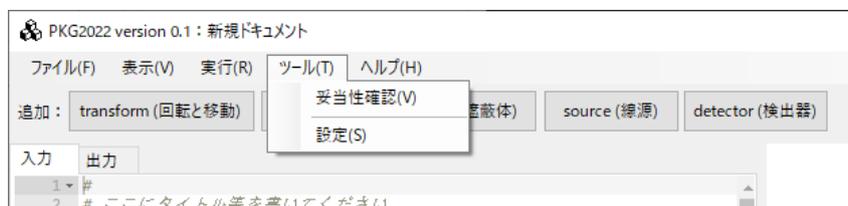


図 2-14 メインフォームのメニューバーに「ツール」->「妥当性確認」および「設定」を追

「妥当性確認」項目をクリックすると、ファイルまたはフォルダーを選択する画面が表示される（図 2-15）。この画面上で比較したい 2 つのファイルまたはフォルダーを選択し、「比較」ボタンを押すことで、外部プログラムである Diff ツールが呼び出される。また、「ツール」->「設定」において、外部プログラムである Diff ツールのパスを設定することで、任意の Diff ツールを選択する。

加

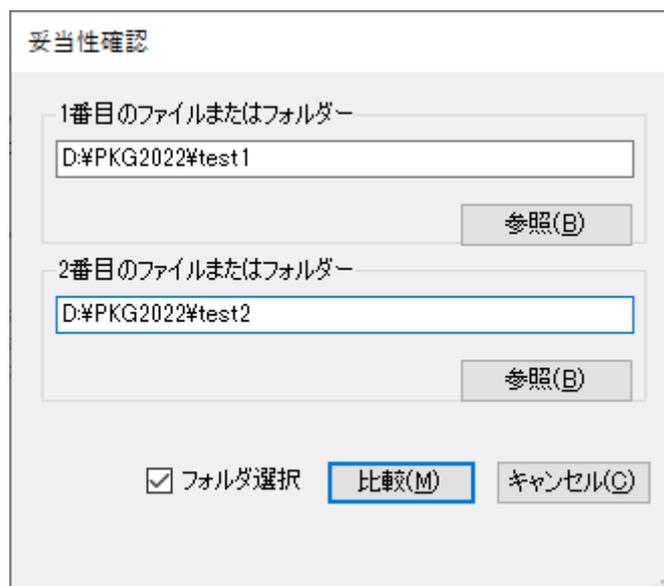


図 2-15 「妥当性確認」フォーム：比較するファイルあるいはフォルダーを選択する

「設定」項目をクリックすると、妥当性確認で使用する Diff ツールのパスを設定する画面が表示される (図 2-16)。この画面において、「参照」ボタンを押すことで、外部プログラムである Diff ツールのインストールされているパスを選択し、「OK」ボタンを押すことで設定が保存される。保存情報は、ユーザーごとに以下のファイルに保存される。

“C:¥Users¥(ユーザー名)¥AppData¥Local¥GUI¥PKG2022.exe_Url_XXXX¥1.0.0.0¥user.config”

ここで、XXXX は 30 文字程度のランダムな英数字文字列が割り当てられる。例えば、図 2-16 の設定を行った場合、user.config ファイルのフォーマットは図 2-17 のようになる。

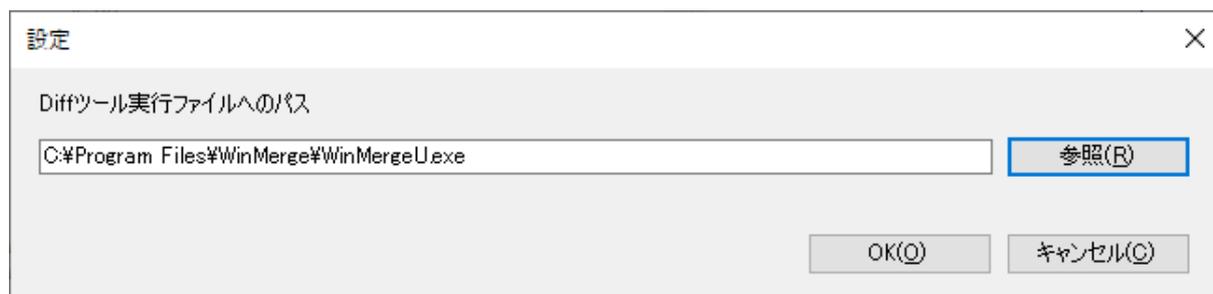


図 2-16 「設定」フォーム : Diff ツールのパスを設定する

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<configuration>
  <userSettings>
    <GUI.Properties.Settings>
      <setting name="DiffToolPath" serializeAs="String">
        <value>C:¥Program Files¥WinMerge¥WinMergeU.exe</value>
      </setting>
    </GUI.Properties.Settings>
  </userSettings>
</configuration>
```

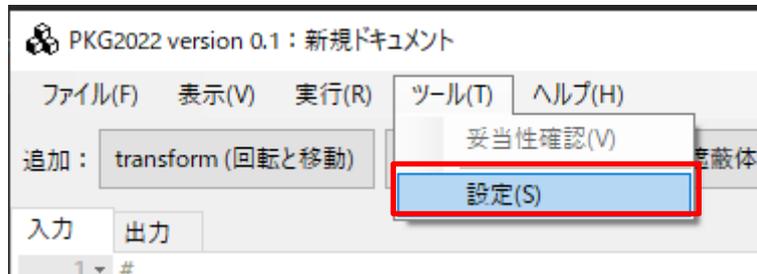
図 2-17 user.config のファイルフォーマット

2.5.3 遮蔽計算コードの追加開発

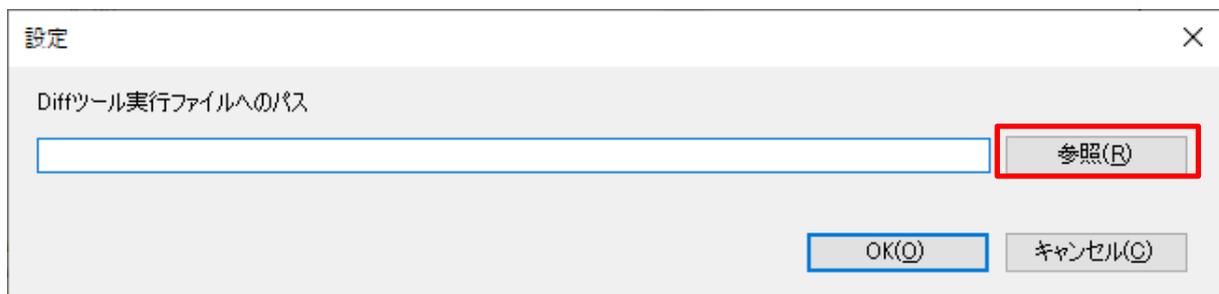
計算妥当性検証ツールの使い方を以下に示す。

(1) Diff ツールへのパスの設定

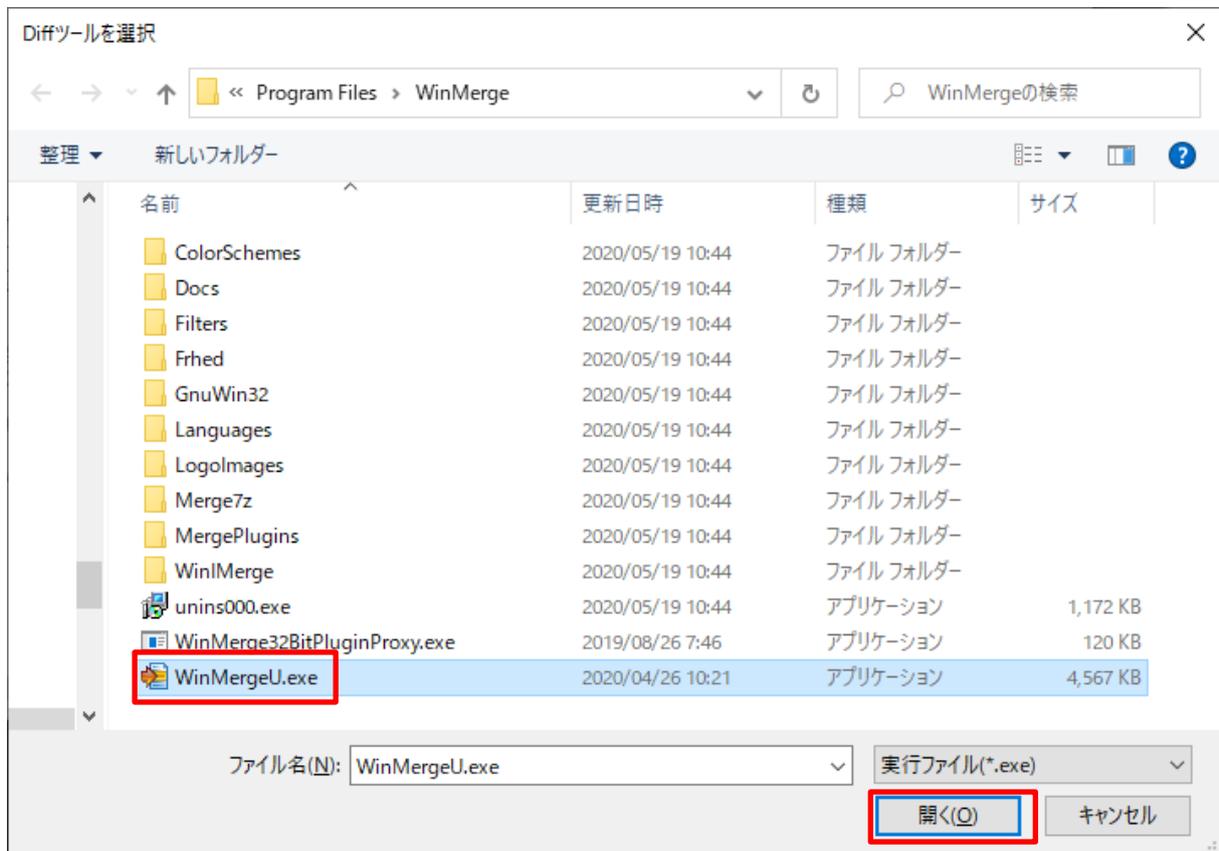
- ① 「ツール」->「設定」をクリックし、設定フォームを開く。



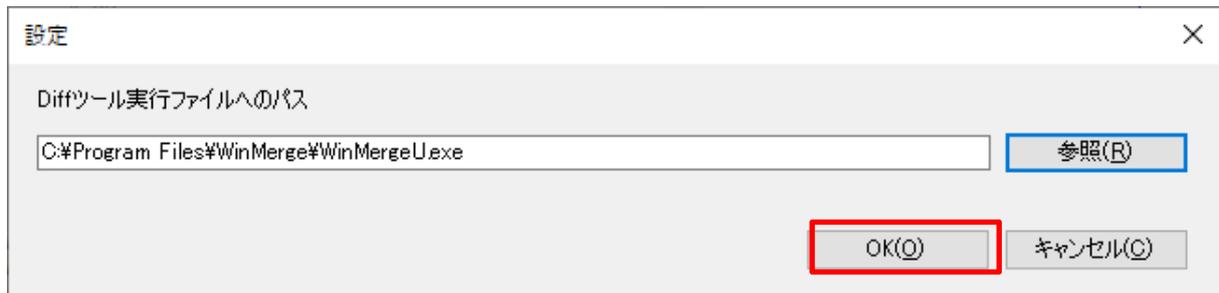
- ② 設定フォーム上の「参照」ボタンをクリックする。



- ③ 使用する Diff ツールの実行ファイルを選択し、「開く」ボタンをクリックする。



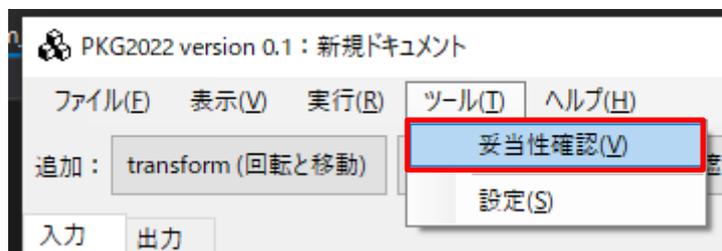
- ④ 選択した Diff ツールへのパスが表示されていることを確認し、「OK」ボタンをクリックする。



(2) 妥当性確認

(a) フォルダ間比較を行う場合

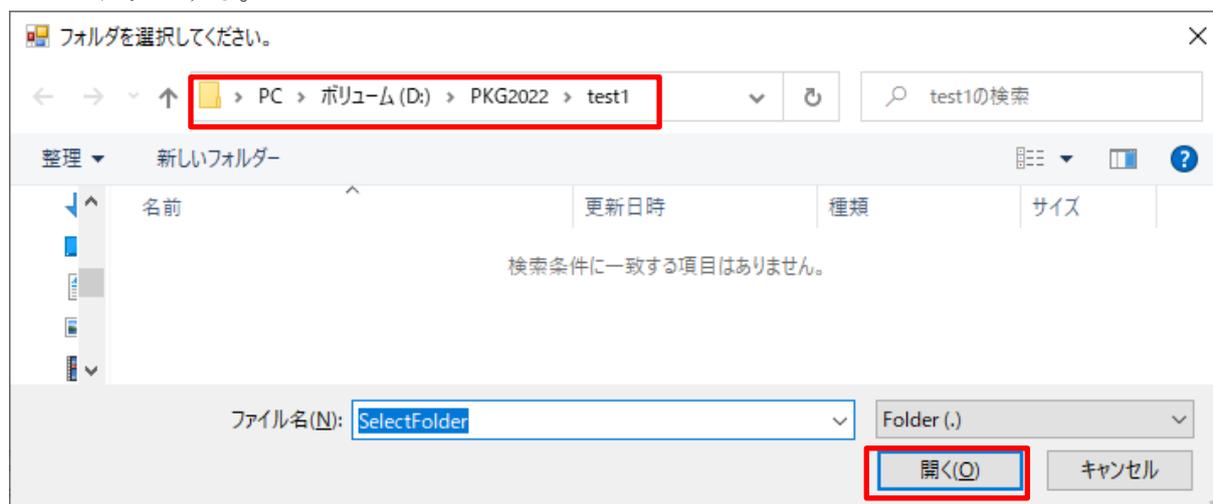
- ① Diff ツールへのパスが設定されていると、「妥当性確認」項目が有効になっているので、クリックする。



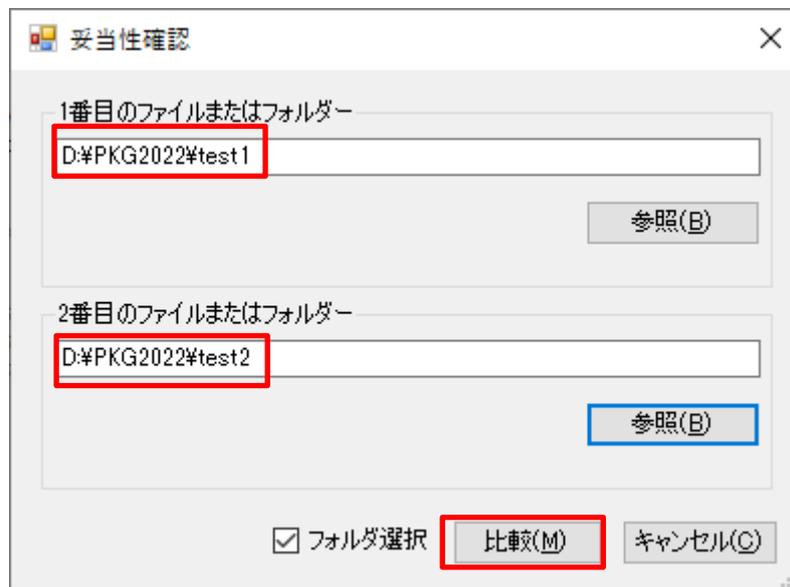
- ② 「妥当性確認」フォームが表示されるので、右下の「フォルダ選択」にチェックを入れ、「1 番目のファイルまたはフォルダ」の「参照」ボタンをクリックする。



- ③ するとダイアログが表示されるので、比較したいフォルダに移動し、「開く」ボタンをクリックする。



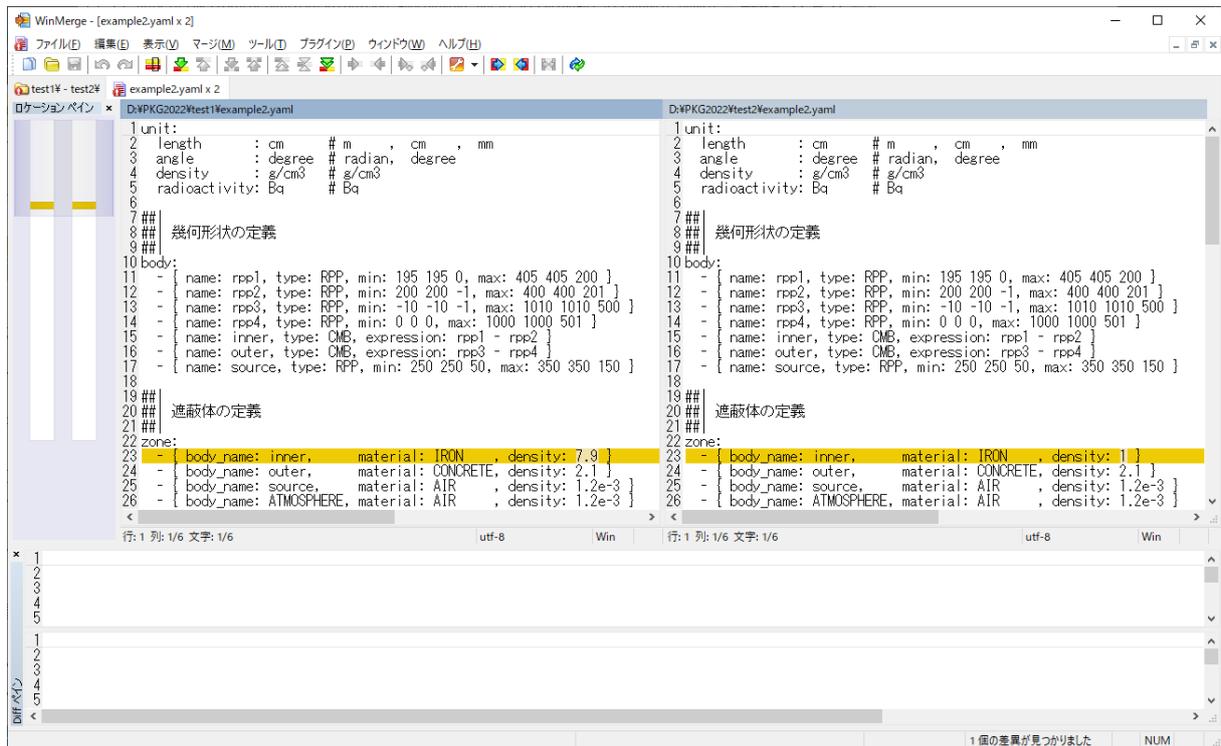
- ④ 「2 番目のファイルまたはフォルダー」についても同様に、「参照」ボタンをクリックし、表示されるダイアログから比較したいフォルダーを選択する。選択を完了すると下図のような状態になるので、「比較」ボタンをクリックする。



- ⑤ すると、外部プログラムの Diff ツールが起動するので、使用する Diff ツールのフォーマットにしたがってファイル等の比較を行う。例えば、WinMerge を Diff ツールとして使用した場合、下図のような画面が表示され、内容の異なるファイルが強調表示される。

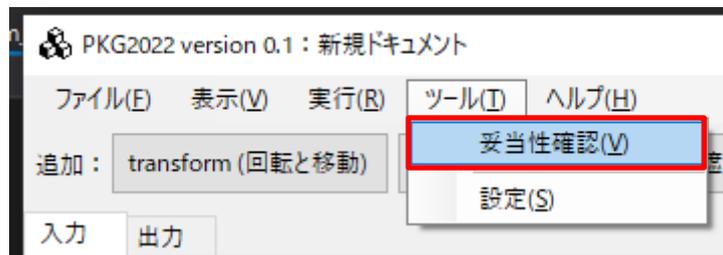
名前	フォルダー	比較結果	左更新日時	右更新日時	拡張子
example1.yaml		テキスト ファイルは同一です	2021/10/14 16:52:53	2021/10/14 16:52:53	yaml
example1.yaml.dose		テキスト ファイルは同一です	2021/10/14 16:52:54	2021/10/14 16:52:54	dose
example1.yaml.summary		テキスト ファイルは同一です	2021/10/14 16:52:54	2021/10/14 16:52:54	summary
example2.yaml		テキスト ファイルは異なります	2021/10/14 16:53:05	* 2021/10/29 17:04:56	yaml
example2.yaml.dose		テキスト ファイルは異なります	2021/10/14 16:53:06	* 2021/10/29 17:05:16	dose
example2.yaml.summary		テキスト ファイルは異なります	2021/10/14 16:53:06	* 2021/10/29 17:05:16	summary
example3.yaml		テキスト ファイルは同一です	2021/10/14 16:53:15	2021/10/14 16:53:15	yaml
example3.yaml.dose		テキスト ファイルは同一です	2021/10/14 16:53:15	2021/10/14 16:53:15	dose
example3.yaml.summary		テキスト ファイルは同一です	2021/10/14 16:53:15	2021/10/14 16:53:15	summary
example4.yaml		テキスト ファイルは同一です	2021/10/14 16:53:24	2021/10/14 16:53:24	yaml
example4.yaml.dose		テキスト ファイルは同一です	2021/10/14 16:53:24	2021/10/14 16:53:24	dose
example4.yaml.summary		テキスト ファイルは同一です	2021/10/14 16:53:24	2021/10/14 16:53:24	summary

- ⑥ また、WinMerge の場合には、この画面上で比較したいファイルをダブルクリックすると、ファイル比較を行うことができる。この場合、ファイル間で異なる部分が強調表示される。



(b) ファイル間比較

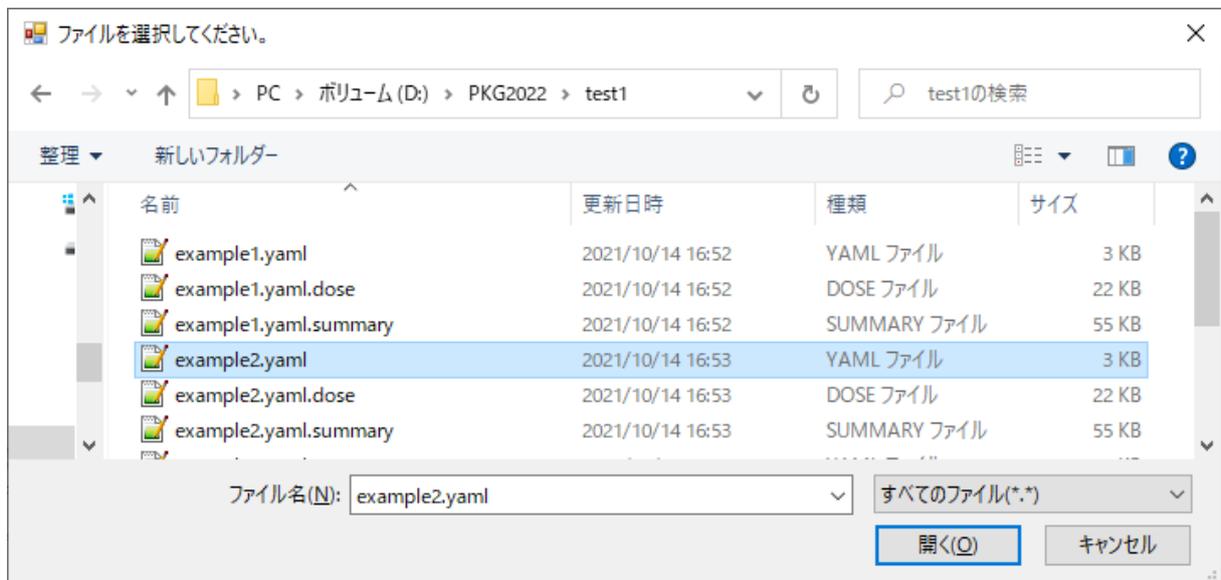
- ① Diff ツールへのパスが設定されていると、「妥当性確認」項目が有効になっているので、クリックする。



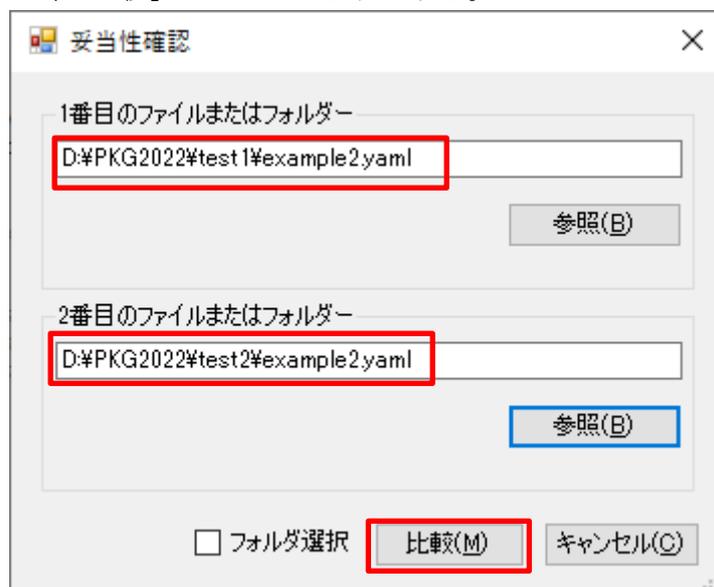
- ② 「妥当性確認」フォームが表示されるので、右下の「フォルダ選択」にチェックがないことを確認し、「1 番目のファイルまたはフォルダー」の「参照」ボタンをクリックする。



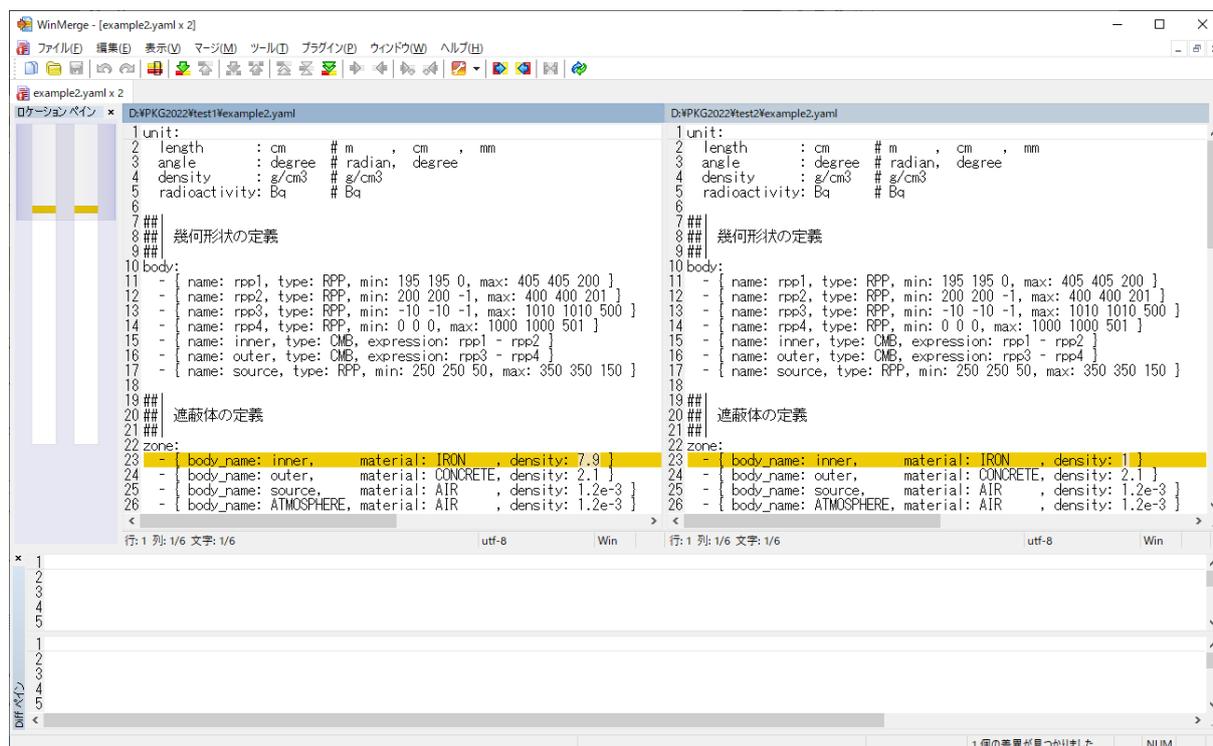
- ③ するとダイアログが表示されるので、比較したいファイルが存在するフォルダーに移動し、比較したいファイルを選択した状態で「開く」ボタンをクリックする。



- ④ 「2番目のファイルまたはフォルダー」についても同様に、「参照」ボタンをクリックし、表示されるダイアログから比較したいファイルを選択する。選択を完了すると下図のような状態になるので、「比較」ボタンをクリックする。



- ⑤ すると、外部プログラムの Diff ツールが起動するので、使用する Diff ツールのフォーマットにしたがってファイル等の比較を行う。例えば、WinMerge を Diff ツールとして使用した場合、下図のような画面が表示され、ファイル間で異なる部分が強調表示される。



2.6 線量計算で用いる透過線上にある材料データの表示⑥

前年度作業で実装済みのため、省略する。

2.7 斜め入射データ作成ツール⑦

3.4 節に示したように斜め入射データは、斜め透過補正係数ファイルのパラメータを用いて自動生成される。したがって、GUI 機能は不要である。

3. 遮蔽計算コードに対する遮蔽線量計算法の適用性拡張

昨年度から開発している遮蔽計算コードに対して、遮蔽線量計算法の機能拡張を取り込むための詳細仕様を検討した。

3.1 二次粒子の線量寄与⑨

前年度の作業で、一次ガンマ線による線量率の計算に対応している。今回の作業で、光核反応による中性子線及び、二次ガンマ線に寄与も計算できるようにする。

3.1.1 仕様検討

- ・ 入力ファイル
 - ビルドアップ係数ファイルの仕様は以下のように変更されているので、これに対応する。
 - ◇ 従来の形式ではデータテーブルに一次ガンマ線（とその誤差）と中性子線（とその誤差）の列が定義されていた。今回の変更により最後の列に二次ガンマ（とその誤差）が追加される。
 - 換算係数は、線種によらず同じ値を使用するので、フォーマットに変更はない。
- ・ 計算
 - 一次ガンマ線、中性子線、二次ガンマ線それぞれの寄与を個別に計算し出力する。
 - ただし、斜め入射補正が有効になっている場合には、一次ガンマ線と二次ガンマ線を合わせた形で斜め入射補正のデータテーブルが与えられているので、分離して出力することができない。この場合は、一次ガンマ線と二次ガンマ線を足し合わせたものを出力する。

3.1.2 作業内容

仕様検討に従って作業を行った。

ここでは、計算結果を要約したファイルである*.yaml.summary ファイルのフォーマットの変更点について以下で述べる。

線源ごとの出力部分では、平均ビルドアップ係数は線種ごとに分けて出力する：

```
##|
##| 計算結果
##|
result:
  elapsed_time: 9.3080 sec # (number of threads = 8)
  detector:
    - name: detector0
      dose:
        - at: 5.0000e+02 3.0000e+02 1.0000e+02 # 評価点 No. 1
          # energy Flux av.Bld.g1 av.Bld.n av.Bld.g2 E(AP) E(PA)
          # Mev 1/cm2/s - - - μSv/h μSv/h
          - 1.1730e+00 2.2364e+03 3.0935e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 1.2677e+02 1.0550e+02
          - 1.3320e+00 2.5616e+03 2.8743e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 1.4860e+02 1.2444e+02
          - TOTAL 4.7980e+03 2.9712e+00 0.0000e+00 0.0000e+00 2.7537e+02 2.2994e+02
      path trace from pseudo source point:
```

ここでは線量率は全ての線種を合算したものを出力している（上図の E(PA)列など）。これは、各々の線種を分離して出力すると煩雑になるためである。

線源の寄与の合算値を出力する箇所では、各々の線種の寄与を分けて出力する：

```
##|
##| 計算結果 (Total)
##|
result:
  elapsed_time: 9.3080 sec
  detector:
    - name: detector0
      dose_total:
        # 線種: g1 = 1次ガンマ線, n = 中性子線, g2 = 2次ガンマ線, TOTAL = g1 + n + g2
        # 評価点
        # x y z 線種 E(AP) E(PA)
        # 5.0000e+02 3.0000e+02 1.0000e+02 TOTAL μSv/h μSv/h # No. 1
        - g1 2.7537e+02 2.2994e+02
        - n 0.0000e+00 0.0000e+00
        - g2 0.0000e+00 0.0000e+00
    - name: detector1
```

g1 が一次ガンマ線、n が中性子線、g2 が二次ガンマ線である、TOTAL が全ての線種の合算である。

このファイルには、全ての情報が記載されているわけではない。全ての情報は*.yaml.dose ファイルに記載されている。このファイルのフォーマットについては、2.1 節を参照のこと。

3.2 有限媒質補正機能⑩

ビルドアップ係数ファイルは無限媒質を仮定したものなので、多少保守的な値となっている。これを有限媒質の形で補正するための係数ファイルである。

3.2.1 仕様検討

この値をビルドアップ係数にかけたものを、新たなビルドアップ係数として使用する。

フォーマットはビルドアップ係数ファイルと同一である。対象とする線量率・物質・エネルギービン・mfp ビンなどもビルドアップ係数ファイルと同じである。

ただし、現状では値が整備されておらず、ff_dummy.dat というダミーデータが設定されている。このデータは全ての値が 1.0 となっているので、有限媒質補正を有効にしても計算結果は変化しない。将来的に補正係数が整備されれば、その値で置き換えることにより、有限媒質補正を行うことができる。

3.2.2 作業内容

仕様検討に従って作業を行った。

3.3 薄い遮蔽材対応①

従来のビルドアップ係数データテーブルは厚みの下限が 1mfp であった。ここに 0.5mfp のデータを追加することにより、0~1mfp の厚みに対してもビルドアップ係数が計算できるようにする。

3.3.1 仕様検討

- ・ ファイルフォーマットの変更
 - 従来のビルドアップ係数のデータテーブルの先頭に 0.5mfp のデータを追加する。
- ・ ビルドアップ計算
 - 0.5mfp 以上の厚みに対しては従来の補間手法をそのまま使用する（線形-対数 3 次ラグランジュ補間）。
 - 0.5mfp 以下の厚みに対しては QAD-IE ソフトウェアで使用されている手法を採用する。そのアルゴリズムは以下の通り：
エネルギーE、通過距離mfpに対し、ビルドアップ係数 $B(E, \text{mfp})$ を以下のように線形補間する：

$$B(E, \text{mfp}) = 1 + \frac{\text{mfp}}{0.5} \left[\frac{B_2 - B_1}{E_2 - E_1} (E - E_1) + B_1 - 1 \right]$$

E_1, E_2 は、 $E_2 \leq E < E_1$ を満たすようとする。 B_1, B_2 は、それぞれ E_1, E_2 におけるビルドアップ係数（mfp=0.5）である。

3.3.2 遮蔽計算コードの追加開発

仕様検討の結果に従って薄い遮蔽材に対応したビルドアップ係数計算処理を実装した。

(1) 検証計算

実際に薄い遮蔽体で線量率を計算した。その際に使用されたビルドアップ係数を以下にしめす：

設定		得られたビルドアップ係数
体系	AP	1.19401
素材	Iron	
線種	1次ガンマ線	
エネルギーE	1.1730 MeV	
厚さ mfp	0.23109 mfp	

これが正しい値になっているかを検証する。

bf_icrp_116_eap.dat ファイルの該当部分を見ると、補正式の E_1, E_2, B_1, B_2 および $B(E, \text{mfp})$ は以下のように、上のビルドアップ係数と一致しており妥当である：

$B(E, \text{mfp})$	
$E_1 = 1.022$	$B_1 = 1.435$
$E_2 = 1.250$	$B_2 = 1.412$

1.19401

E_1, B_1 :

1.02200E+00							
MFPGrp=81							
Thick (mfp)	Thick (cm)	BU-F (p-gamma)	RE (gamma)	BU-F (pneutron)	RE (pn)	BU-F (pn-gamma)	RE (pn-g)
0.5	1.081E+00	1.435E+00	0.0006	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000
1.0	2.163E+00	1.909E+00	0.0009	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000
2.0	4.325E+00	2.988E+00	0.0014	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000
3.0	6.488E+00	4.236E+00	0.0019	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000
4.0	8.651E+00	5.670E+00	0.0023	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000
5.0	1.081E+01	7.275E+00	0.0027	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000

E_2, B_2 :

1.25000E+00							
MFPGrp=81							
Thick (mfp)	Thick (cm)	BU-F (p-gamma)	RE (gamma)	BU-F (pneutron)	RE (pn)	BU-F (pn-gamma)	RE (pn-g)
0.5	1.198E+00	1.412E+00	0.0006	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000
1.0	2.396E+00	1.858E+00	0.0010	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000
2.0	4.793E+00	2.859E+00	0.0015	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000
3.0	7.189E+00	4.013E+00	0.0021	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000
4.0	9.585E+00	5.293E+00	0.0025	0.000E+00	0.0000	0.000E+00	0.0000

3.4 スラブ斜め入射対応⑬

- 入射角度依存ビルドアップ係数に対応できるように本コードを改良する。

3.4.1 仕様検討

ビルドアップ係数ファイルは無限媒質を仮定したものである。そのため、平板に対して斜めに放射線が入射した場合、このビルドアップ係数を使ったものよりも実際の線量は小さくなる。すなわち、計算結果として得られた線量率は、実際よりも保守的な値となる。斜め透過補正係数ファイルは、これを補正するためのデータテーブルである。この斜め入射補正係数をビルドアップ係数にかけたものを、新たなビルドアップ係数として使用する。

斜め透過補正が使用できるのは、以下の場合のみである：

- ビルドアップ係数の対象となる物質を持つ立体が直方体のみ。

それ以外の場合、斜め透過補正を有効にするとエラーが表示されて計算を中断する。ただし、上記を満たす場合であっても、対象となる複数の直方体が存在して、かつ、透過線がそれら複数の直方体を通過するような場合、その透過線に対しては、補正を行わない（1つの層を透過する状況を想定してデータテーブルを作成しているため）。

線量率

現状、データが整備されている線量率は

E(AP) ファイル名：sc_icrp_116_eap.dat

のみである。ただし、E(AP)以外の線量率に対してもそれほど違いはないと考えられる。

物質

対応している物質は

Iron Lead Concrete

である。斜め透過補正を行うときには、ビルドアップ係数の対象となる物質をこれらのどれかにとっておく必要がある（そうでないとエラーが表示され計算を行わない）。

なお、このファイルを編集して物質を追加する際、このファイルだけでなくライブラリ設定ファイル（libsettings.dat）の末尾にある項目 `slant_correction_material` に、追加した物質の名称を追加する必要がある。（そうしないと使用可能な物質として認識されず、エラーになる。）

フォーマット

```
#
# 斜め透過補正係数ファイル
#
slant_correction_coefficient:
-
  material: Iron
  data:
    # 透過距離 エネルギー 補正係数(ガンマ1次+2次) 補正係数(中性子) 適用角度上限
    # (cm) (MeV) a b c d a b c d (deg)
    - 2 0.1 3.0E-7 -5.0E-5 1.1E-3 1 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 1 60
    - 0.5 -8.0E-7 3.0E-5 -7.0E-4 1 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 1 75
    - 1.0 -7.0E-7 3.0E-5 -9.0E-4 1 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 1 75
    - 4.0 0.0E+0 -2.0E-5 3.0E-4 1 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 1 75
    - 15.0 -3.0E-7 2.0E-5 -5.0E-4 1 -1.0E-6 9.0E-6 -1.2E-3 1 75
    - 25.0 -3.0E-7 1.0E-5 -6.0E-4 1 -7.0E-7 -3.0E-5 -1.2E-3 1 75
    - 4 0.1 -8.0E-7 4.0E-5 -7.0E-4 1 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 1 45
    - 0.5 -1.0E-6 5.0E-5 -1.3E-3 1 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 1 60
    ...
-
  material: Lead
  ...
```

- 透過距離は、対象となる直方体を通過した幾何学的な距離である。
- 適用角度上限を超える角度が検出された場合、計算は続行するが、計算終了後に警告メッセージを表示する。データテーブルを補間する際は、より小さい適用角度上限を採用する。
- 補正值 f は以下の式で計算する：
$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$
ただし、 x は角度（度）である。これをビルドアップ係数にかけたものを新たなビルドアップ係数として採用する。透過距離は透過線ごとに異なるので、透過距離に関する a, b, c, d の補間計算は毎回行う。ただし、エネルギーは固定なので、エネルギーに関する補間はあらかじめ行っておく。
- d は常に1である。
- ガンマ線の補正係数は、上記のように1次ガンマ線と2次ガンマ線の和として与えられている。従って、出力ファイルには両者を足し合わせたものが出力される。（斜め透過補正を使用しない場合には、両者が個別に出力されるので、この違いに注意。）

データテーブル a, b, c, d の補間

- 透過距離内挿
 - ガンマ線 ⇒ 透過距離(cm)を log として、斜め減衰係数を線形 (log-linear) 内挿
 - 中性子線 ⇒ log をとらずに補間：線形 (linear-linear) 内挿
 - 最小距離より短い場合
 - ガンマ線 ⇒ 透過距離 0cm を 1 として線形 (linear-linear) 内挿

- ◇ 中性子 ⇒ 最小距離の減衰係数を採用
- 最大距離より長い場合、最大距離の減衰係数を採用する
- 線源エネルギー内挿：
 - 線源エネルギー(MeV)を log として、斜め減衰係数を線形 (log-linear) 内挿
 - 最小エネルギーより低い場合、最小エネルギーの減衰係数を採用
 - 最大エネルギーより高い場合、最大エネルギーの減衰係数を採用

3.4.2 作業

仕様検討において決定した事項をもとに実装を行った。

斜め透過補正処理を実行するには、入力 YAML ファイルにおいて、以下の `use_slant_correction` を `true` にすればよい：

```
##|
##| ビルドアップ係数の指定
##|
buildup_factor:
  material: IRON
  use_slant_correction: true
  use_finite_medium_correction: false
```

ただし、この機能と、有限媒質補正 (`use_finite_medium_correction`) は同時には使用できない (エラーが表示される)。

$$\begin{aligned}
a_{8\text{cm}} &= -1 \times 10^{-6} \frac{\log(4) - \log(1.173)}{\log(4) - \log(1)} - 8 \times 10^{-7} \frac{\log(1.173) - \log(1)}{\log(4) - \log(1)} \\
&= -9.7698e - 7 \\
a_{16\text{cm}} &= -1.0000e - 6 \\
a &= a_{8\text{cm}} \frac{\log(16) - \log(10\sqrt{2})}{\log(16) - \log(8)} + a_{16\text{cm}} \frac{\log(10\sqrt{2}) - \log(8)}{\log(16) - \log(8)} \\
&= -9.9590e - 7 \\
b_{8\text{cm}} &= 5.8849e - 5 \\
b_{16\text{cm}} &= 4.5755e - 5 \\
b &= 4.8087e - 5 \\
c_{8\text{cm}} &= -1.0885e - 3 \\
c_{16\text{cm}} &= -9.3812e - 4 \\
c &= -9.6490e - 4 \\
x &= 45 \\
C &= ax^3 + bx^2 + cx + 1 \\
&= 0.96320
\end{aligned}$$

3.5 可視化ファイル⑭

計算結果の可視化機能が参照するファイルを出力する機能を実装した。

2.1 節「計算結果可視化機能の作成」を参照のこと

4. その他拡張作業

打合せ等で提案された拡張項目に対して行った作業について、以下に示す。

- (1) 遮蔽体で考慮可能な幾何形状の追加
- (2) 線源条件の追加機能
 - (ア) SOURCE ノードにおける線源形状の指定
 - (イ) MANUAL 以外の分割手法における分割範囲の指定（半球、半円柱、半円筒に対応）
 - (ウ) MANUAL 分割時の重み指定
 - (エ) 複数線源、複数核種、エネルギー指定、スペクトル下限値の設定
- (3) 計算条件編集機能の作成
 - (ア) 線源条件編集機能の作成
 - (イ) 検出器編集機能の作成

4.1 遮蔽体で考慮可能な幾何形状の追加

4.1.1 作業内容

使用できる幾何形状（立体）を追加した。図 4-1 において、赤線で囲って示した立体が今回追加した幾何形状である。入力ファイルにおける各々のフォーマットを図 4-2～図 4-5 に示す。また、立体の追加に伴って、GUI 上での「立体の追加」ダイアログが煩雑になるのでデザインを変更した（図 4-6）。

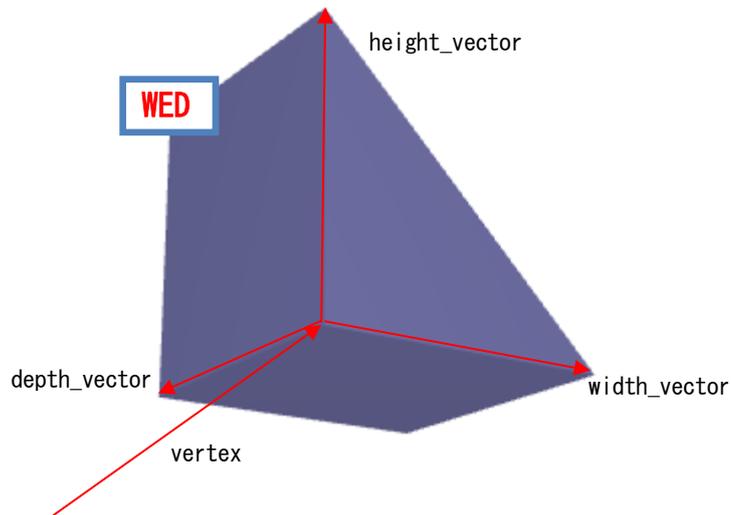


図 4-1 使用可能な立体（左の3つはCMB）

直方体	: BOX (任意方向) RPP (xyz 軸に平行)
くさび型	: WED (直角三角柱)
円柱	: RCC (円柱) REC (楕円柱) TRC (円錐台)
球	: SPH (球) ELL (楕円体)
トーラス	: TOR (トーラス)
組合せ	: CMB

WED のフォーマット

- {name: b1, type: WED, vertex: 0 0 0, width_vector: 1 0 0, height_vector: 0 0 1, depth_vector: 0 1 0}



WED (くさび型、直角三角柱)

Vertex : くさび型の1つの頂点 (3辺が直交する点)

width_vector : 三角形の1辺 (vertex を通る辺)

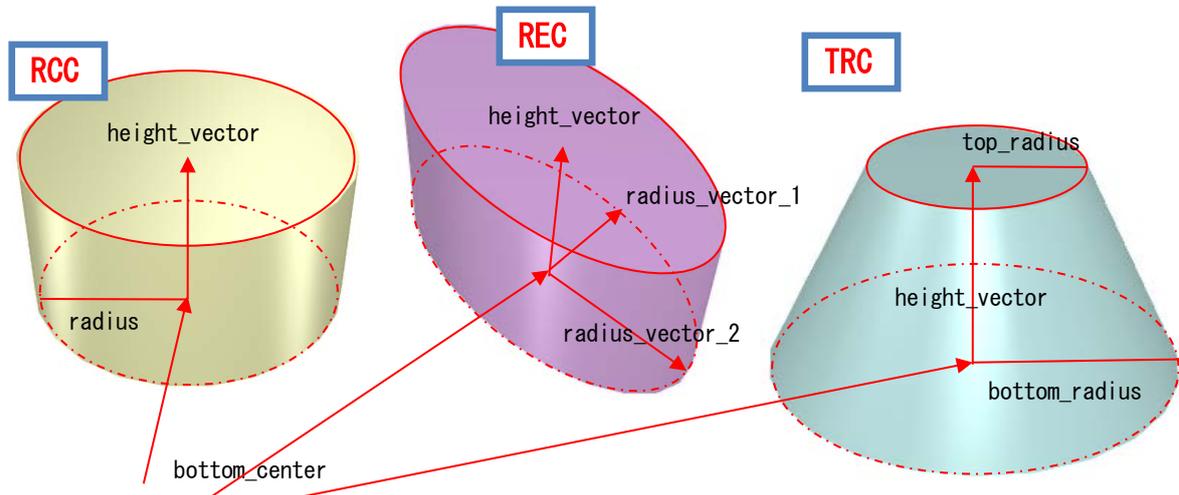
height_vector : 三角形のもう1辺 (vertex を通る辺)

depth_vector : vertex を通る残りの1辺 (柱方向)

図 4-2 WED のフォーマット

RCC, REC, TRC のフォーマット

- {name: b1, type: **RCC**, bottom_center: 0 0 0, height_vector: 0 0 1, radius: 1}
- {name: b1, type: **REC**, bottom_center: 0 0 0, height_vector: 0 0 1, radius_vector_1: 1 0 0, radius_vector_2: 0 1 0}
- {name: b1, type: **TRC**, bottom_center: 0 0 0, height_vector: 0 0 1, bottom_radius: 2, top_radius: 1}



RCC (円柱)

bottom_center : 円柱底面の中心点
 height_vector : 底面中心から上面中心へのベクトル
 radius : 底面の円の半径

REC (楕円柱)

bottom_center : 円柱底面の中心点
 height_vector : 底面中心から上面中心へのベクトル
 radius_vector_1 : 底面の楕円の主軸の1つ
 radius_vector_2 : 同上

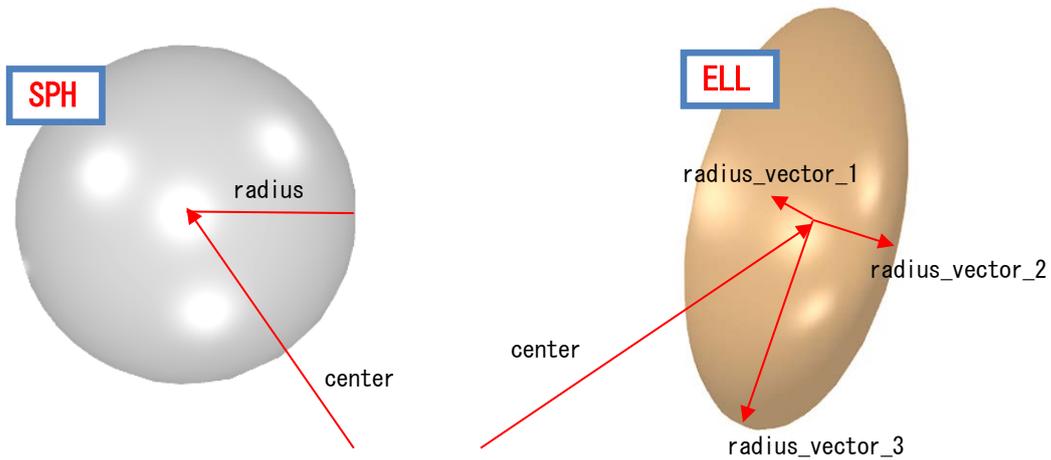
TRC (円錐台、底面と上面の半径が異なる円柱)

bottom_center : 円柱底面の中心点
 height_vector : 底面中心から上面中心へのベクトル
 bottom_radius : 底面の円の半径
 top_radius : 上面の円の半径

図 4-3 RCC, REC, TRC のフォーマット

SPH, ELL のフォーマット

- {name: b1, type: SPH, center: 0 0 0, radius: 1}
- {name: b1, type: ELL, center: 0 0 0, radius_vector_1: 1 0 0, radius_vector_2: 0 2 0, radius_vector_3: 0 0 3}



SPH (球)

center : 球の中心点
radius : 球の半径

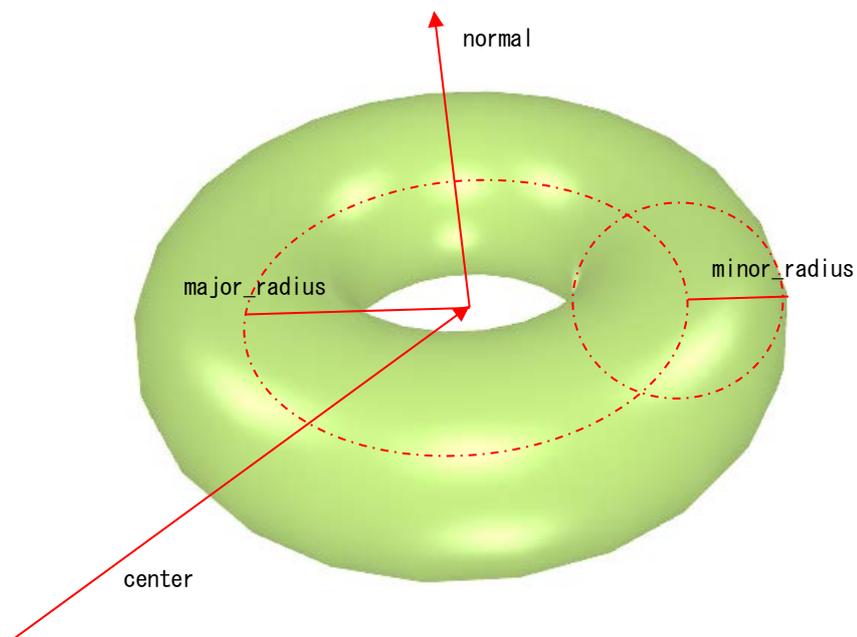
ELL (楕円体、球を3方向からつぶしたもの)

center : 楕円体の中心点
radius_vector_1 : 楕円体の主軸の1つ
radius_vector_2 : 同上
radius_vector_3 : 同上

図 4-4 SPH, ELL のフォーマット

TOR のフォーマット

```
- {name: b1, type: TOR, center: 0 0 0, normal: 0 0 1, major_radius: 2, minor_radius: 1}
```



TOR (トーラス、ドーナツ形)

center : トーラスの中心点
normal : トーラスの大円に垂直なベクトル
major_radius : トーラスの輪の中心線が作る大円の半径
minor_radius : トーラスの輪の断面の半径

図 4-5 TOR のフォーマット

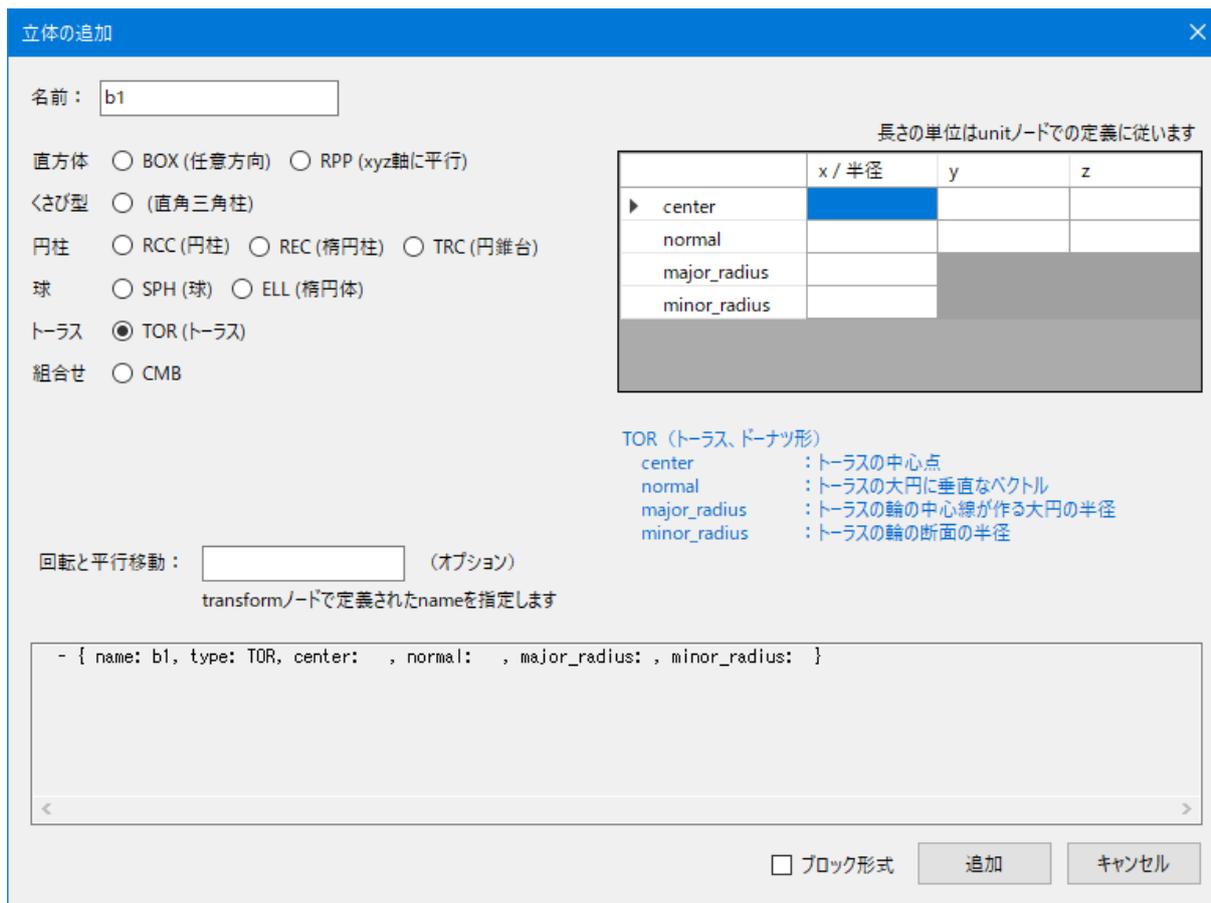


図 4-6 立体の追加ダイアログ

4.1.2 検証

前節で示した各立体に対して、透過線との交点が正しく計算できているかの検証を行った。その結果を図 4-7～図 4-11 に示す。灰色の直線と立体が交差している部分がピンク色の太線で示されている。全て正しく計算されており、妥当である。

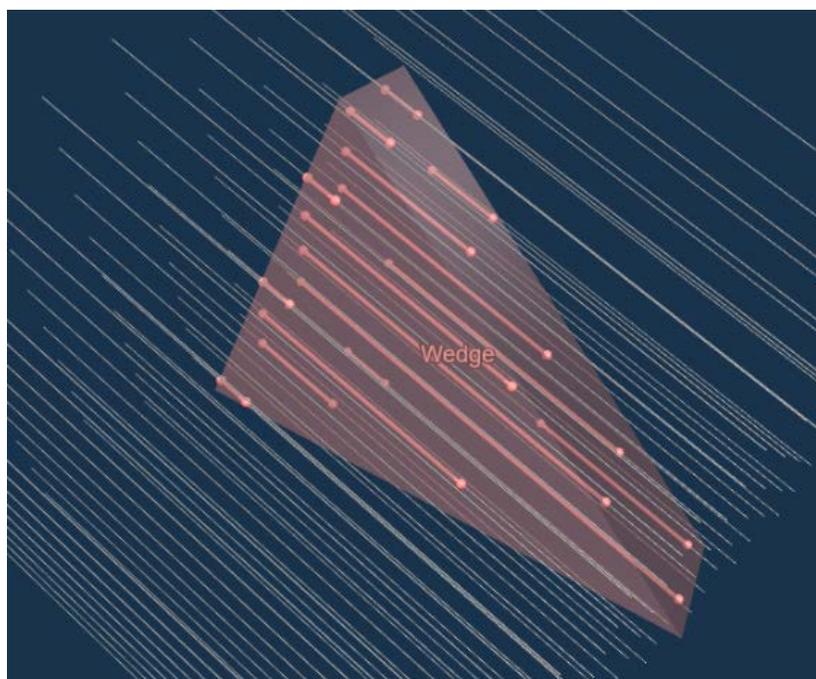


図 4-7 くさび型

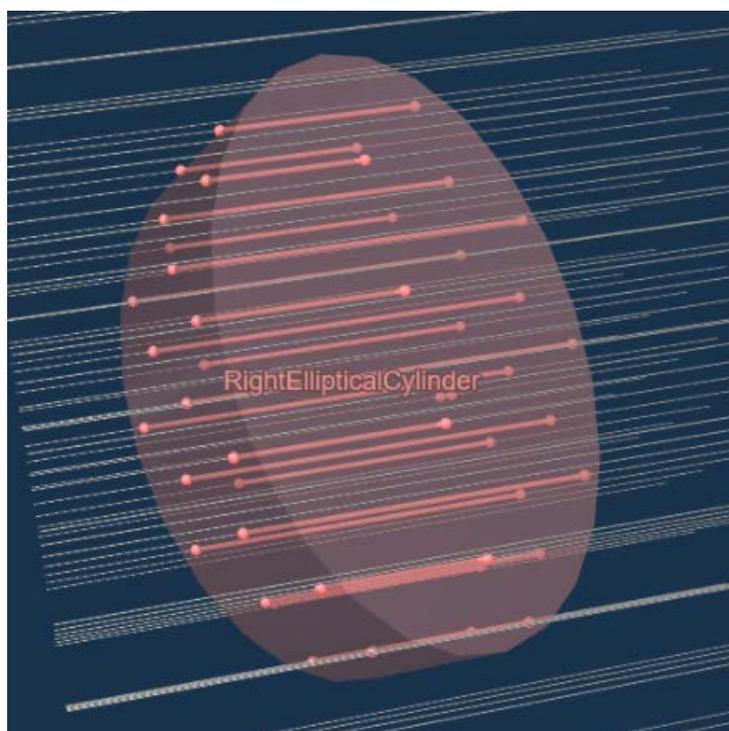


図 4-8 楕円柱

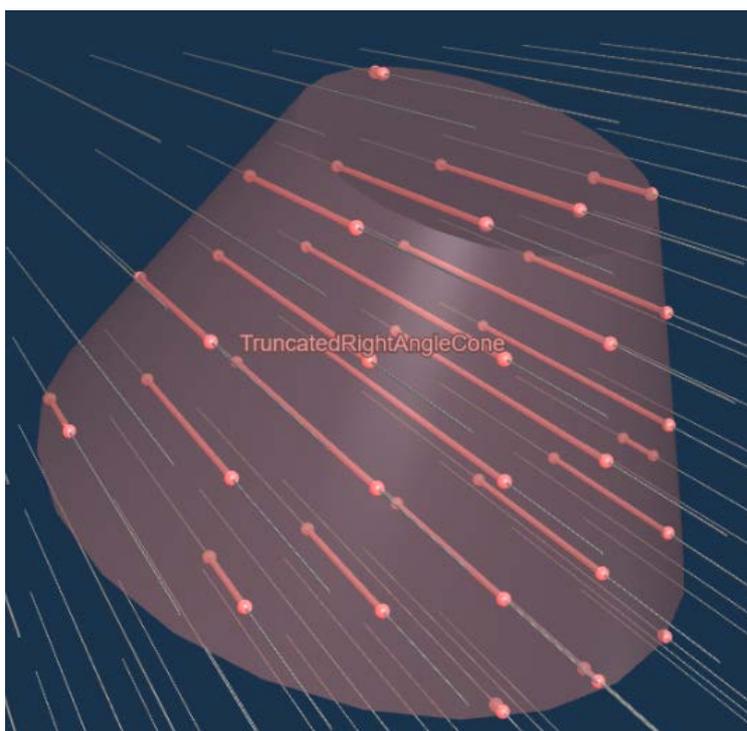


图 4-9 圆锥台

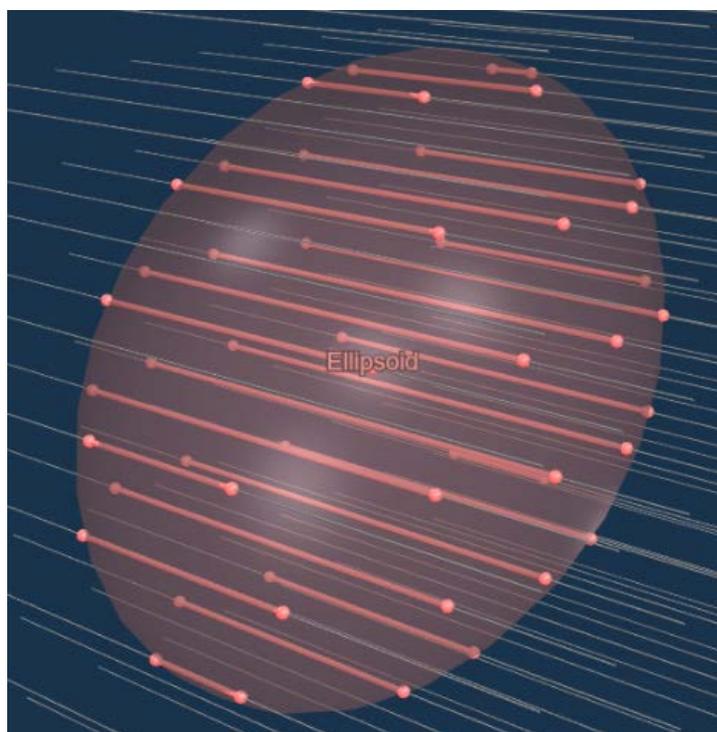


图 4-10 橢圓體

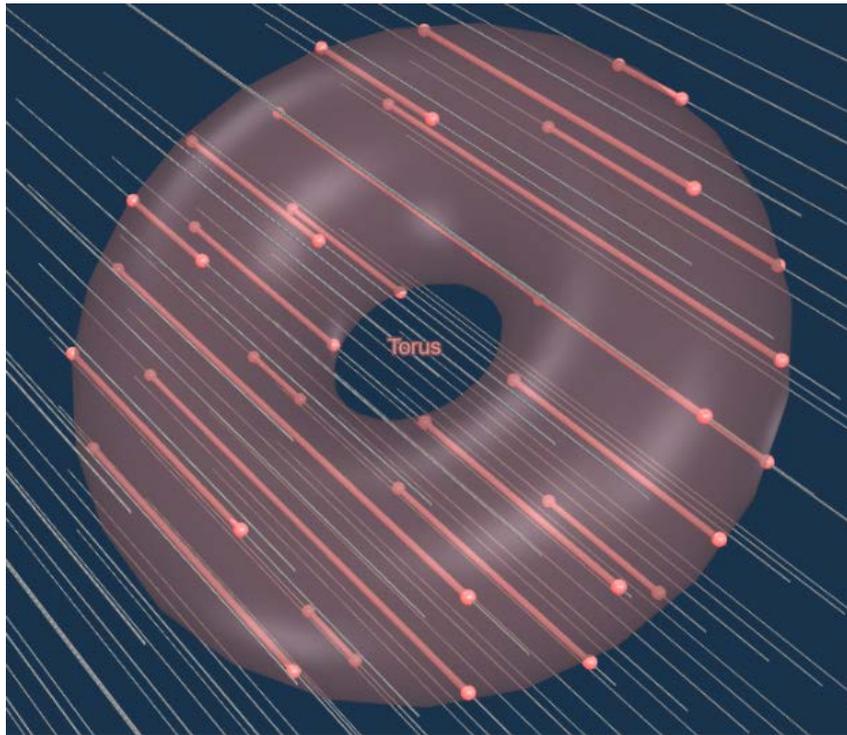


図 4-11 トーラス

4.2 線源条件の追加機能

線源条件として、以下の仕様を考慮できるように拡張を行った。

- (1) SOURCE ノードにおける線源形状の指定
- (2) MANUAL 以外の分割手法における分割範囲の指定 (半球、半円柱、半円筒に対応)
- (3) MANUAL 分割時の重み指定
- (4) 複数線源、複数核種、エネルギー指定、スペクトル下限値の設定

4.2.1 作業内容

(1) SOURCE ノードにおける線源形状の指定

現状コードにおいて、体積線源として、直方体 (BOX および RPP)、球 (SPH)、円柱 (RCC) を考慮することができるが、体積線源として設定する立体は、遮蔽体を設定する BODY ならびに ZONE ノードで定義しておく必要があった。

使い勝手向上のため、ここでは、体積線源の幾何形状は、ZONE ノードとは独立して、SOURCE ノード自体で定義できるように拡張を行った。

・ type ノードの変更

これまで type: ZONE とし、zone_name に ZONE ノードで定義した立体の名前を対象とする幾何形状を指定していたが、これを廃止 (zone_name も name に変更) し、直方体 (BOX および RPP)、球 (SPH)、円柱 (RCC) を直接指定するよう変更した。これに伴い、各体積線源の幾何形状を設定するノード geometry を追加した。

対応する幾何形状ノード (geometry) の子ノードは、BODY ノードでの定義方法と同様に、以下の通りである。

- BOX => vertex, edge_1, edge_2, edge_3
- RPP => min, max
- SPH => center, radius, transform
- RCC => bottom_center, height_vector, radius

また、上記の幾何形状に対して、移動・回転を考慮できるように geometry の子ノードとして transform ノードを追加した。

なお、対応する分割座標軸ノード (division) の子ノードは従来と同様に、以下の通りである。

- BOX および RPP => edge_1, edge_2, edge_3
- SPH => r, theta, phi
- RCC => r, phi, z

各幾何形状の体積線源の入力例とその GUI 3D View 上に線源点表示したものを図 4-12～図 4-15 に示す。

拡張後のコード：新フォーマット (BOX)

```
transform:
- { name: tr1, operation: [{rotate_around_z: 0}, {translate: 300 300 100}] }
source:
- type: BOX
  name: s1
  geometry:
    vertex: -50 -50 -50
    edge_1: 100 0 0
    edge_2: 0 100 0
    edge_3: 0 0 100
    transform: tr1
  division:
    edge_1: {type: UNIFORM, number: 3}
    edge_2: {type: UNIFORM, number: 3}
    edge_3: {type: UNIFORM, number: 3}
```

形状を **type** ノードで指定する。

geometry ノードで幾何形状を定義する。回転・移動 **transform** も設定できる。

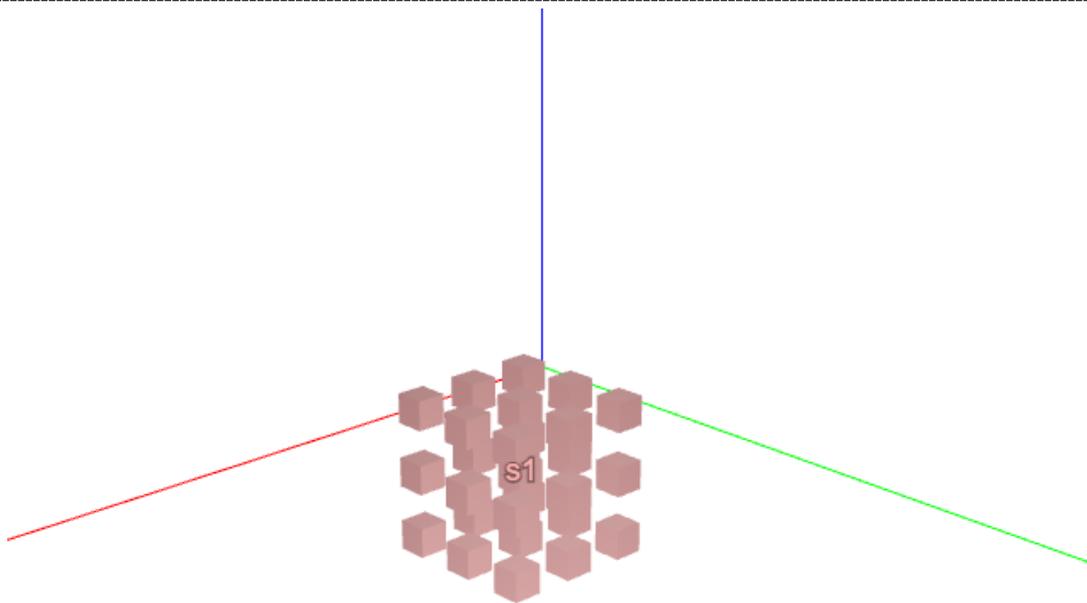


図 4-12 体積線源 BOX (直方体) の入力例 (上) と GUI 3D View 上の線源点 (下)

拡張後のコード：新フォーマット（RPP）

source:

- type: RPP

name: s1

geometry:

min: 250 250 50

max: 350 350 150

division:

edge_1: {type: UNIFORM, number: 3}

edge_2: {type: UNIFORM, number: 3}

edge_3: {type: UNIFORM, number: 3}

形状を **type** ノードで指定する。

geometry ノードで幾何形状を定義する。

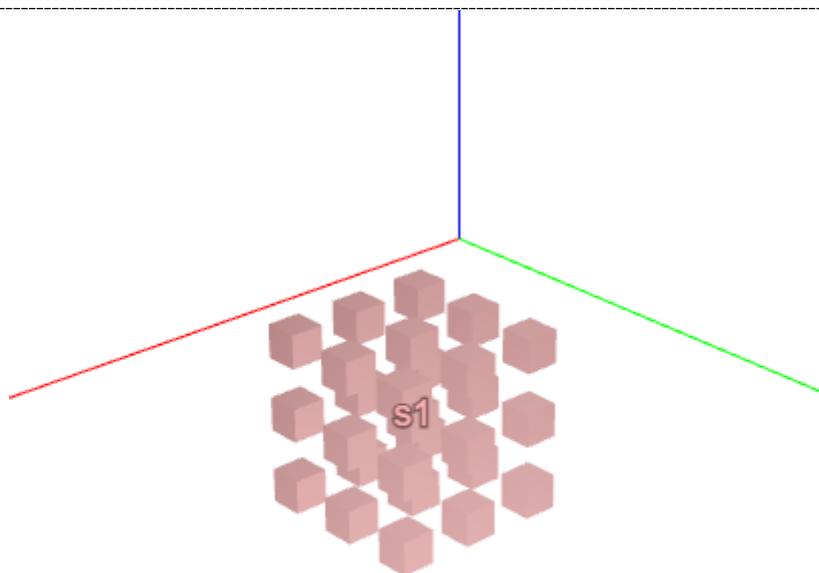


図 4-13 体積線源 RPP（直方体）の入力例（上）と GUI 3D View 上の線源点（下）

拡張後のコード：新フォーマット（SPH）

```
transform:  
  - { name: tr2, operation: [{rotate_around_z: 0}, {translate: 300 300 100}] }  
source:  
  - type: SPH  
    name: s1  
    geometry:  
      center: 0 0 0  
      radius: 400  
      transform: tr2  
    division:  
      r : {type: GAUSS_LAST, number: 9}  
      theta : {type: UNIFORM, number: 18}  
      phi : {type: UNIFORM, number: 18}
```

形状を **type** ノードで指定する。

geometry ノードで幾何形状を定義する。回転・移動 **transform** も設定できる。

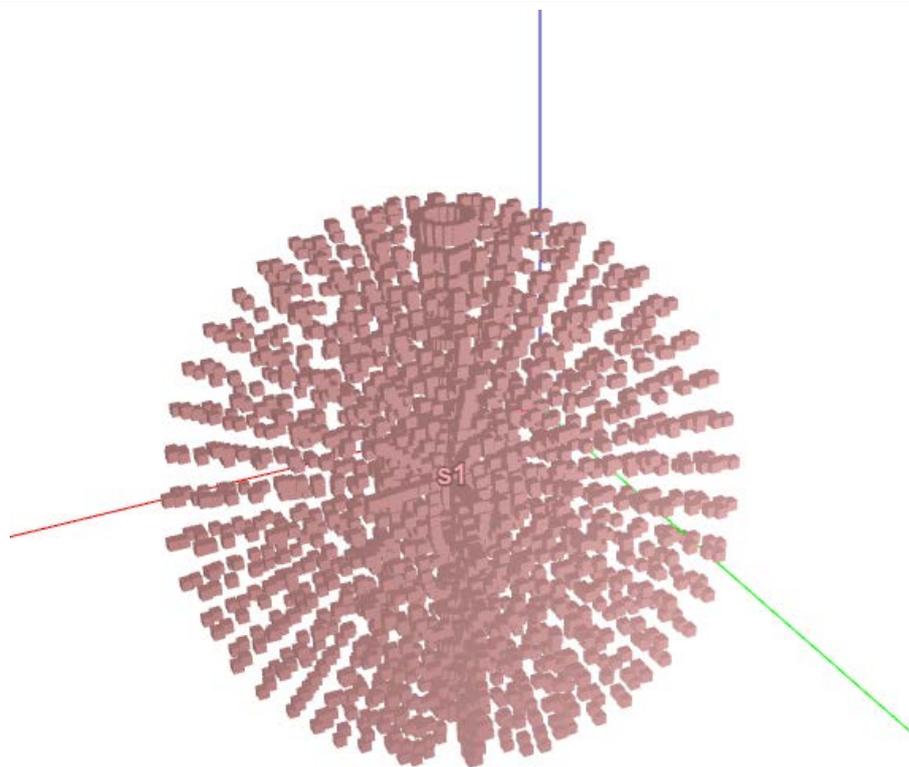


図 4-14 体積線源 SPH（球）の入力例（上）と GUI 3D View 上の線源点（下）

拡張後のコード：新フォーマット（RCC）

```
transform:
- { name: tr3, operation: [{rotate_around_x: 270}, {rotate_around_z: 90}, {translate: 300 300 100}] }
source:
- type: RCC
  name: s1
  geometry:
    bottom_center: 0 0 -400
    height_vector: 0 0 400
    radius      : 200
    transform: tr3
  division:
    r : {type: GAUSS_LAST, number: 10}
    phi : {type: UNIFORM, number: 36}
    z : {type: UNIFORM, number: 20}
```

形状を **type** ノードで指定する。

geometry ノードで幾何形状を定義する。回転・移動 **transform** も設定できる。

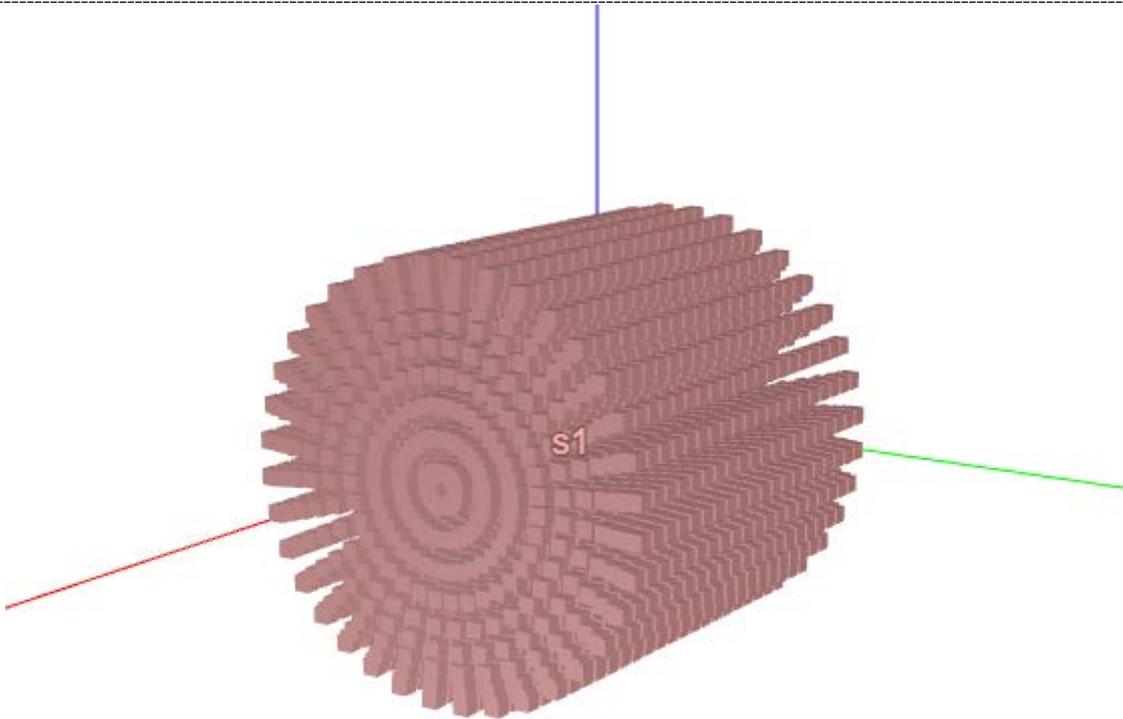


図 4-15 体積線源 RCC（円柱）の入力例（上）と GUI 3D View 上の線源点（下）

(2) MANUAL 以外の分割手法における分割範囲の指定 (半球、半円柱、半円筒に対応)

MANUAL 以外の分割手法 (UNIFORM および GAUSS 分割各種) に対して、座標軸の分割範囲の指定するため、最小値 (min)、最大値 (max) を設定するノードを追加し、任意の範囲で分割することを可能とした。これにより、球 (SPH) および円柱 (RCC) に対して、半球や半円柱 (円筒や半円筒) を設定することが可能となった (半球: 図 4-16、半円柱: 図 4-17、半円筒:)。なお、入力フォーマットの統一を図るため、直方体 (BOX および RPP) の各軸に対しても最小値・最大値の設定は可能とした。

```
{type: UNIFORM      , number: 10 , min: 0.0 , max: 0.5 } # 等分割
{type: GAUSS_FIRST , number: 10 , min: 0.5 , max: 1.0 } # 始点細分
{type: GAUSS_LAST  , number: 10 , min: 0.25 , max: 0.75 } # 終点細分
{type: GAUSS_BOTH  , number: 10 , min: 0.0 , max: 1.0 } # 両端細分
{type: GAUSS_CENTER, number: 10 , min: 0.9 , max: 1.0 } # 中央細分
```

なお、対応する分割座標軸ノード (division) の子ノードは従来と同様に、以下の通りである。

- BOX および RPP => edge_1, edge_2, edge_3
- SPH => r, theta, phi
- RCC => r, phi, z

また、各軸の分割範囲は以下の通りである。

- ※ edge_1, edge_2, edge_3, r, z : 0.0~1.0 (各軸の全長に対する比率)
- ※ theta : 0.0~ π (0° ~ 180°)
- ※ phi : 0.0~ 2π (0° ~ 360°)

type:SPH (球) を使った半球の入力例

transform:

```
- { name: tr2, operation: [{rotate_around_z: 90}, {translate: 300 300 100}] }
```

source:

```
- type: SPH
```

```
name: s1
```

```
geometry:
```

```
center: 0 0 0
```

```
radius: 400
```

```
transform: tr2
```

```
division:
```

```
r : {type: GAUSS_LAST, number: 9, min: 0.0, max: 1.0}
```

```
theta : {type: UNIFORM, number: 18, min: 0, max: 180}
```

```
phi : {type: UNIFORM, number: 18, min: 0, max: 180}
```

transform で回転・平行移動を適用できる。

分割範囲の最小値・最大値を設定。r は 0.0~1.0、theta は 0° ~180°、phi は 0° ~360° の範囲で設定。

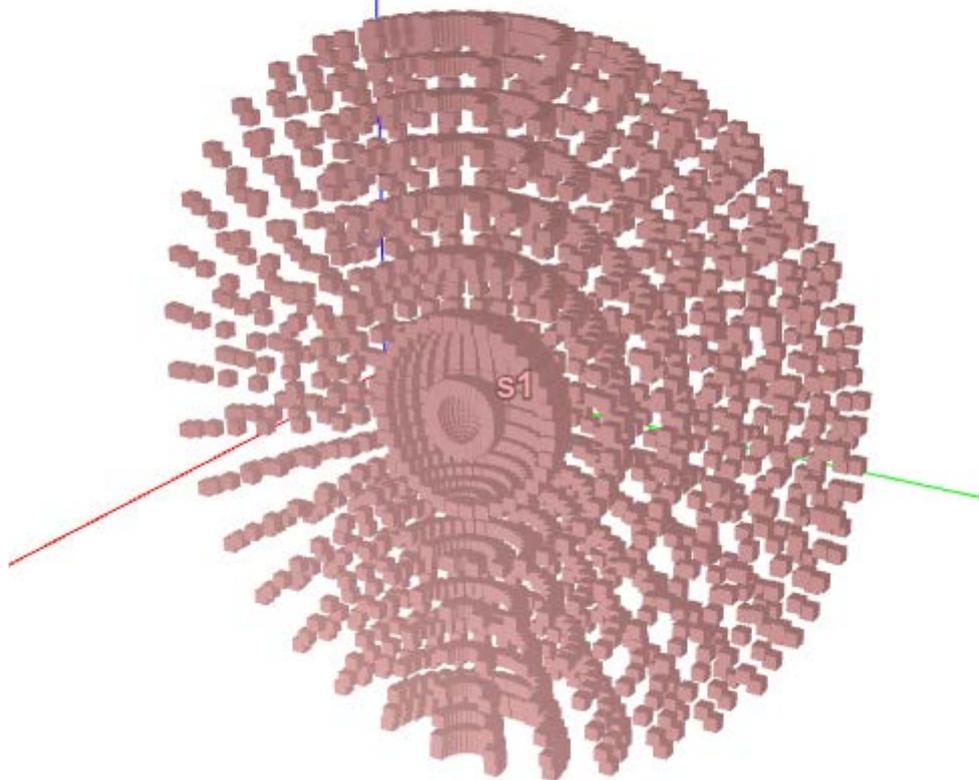


図 4-16 体積線源 SPH を使った半球の入力例 (上) と GUI 3D View 上の線源点 (下)

type:RCC (円柱) を使った半円柱の入力例

transform:

```
- { name: tr3, operation: [{rotate_around_x: 270}, {rotate_around_z: 90}, {translate: 0 0 400}] }
```

source:

```
- type: RCC
```

```
name: s1
```

```
geometry:
```

```
bottom_center: 0 0 -800
```

```
height_vector: 0 0 800
```

```
radius      : 400
```

```
transform: tr3
```

```
division:
```

```
r      : {type: UNIFORM, number: 10, min: 0.0, max: 1.0}
```

```
phi    : {type: UNIFORM, number: 36, min: 0.0, max: 180}
```

```
z      : {type: UNIFORM, number: 20, min: 0.0, max: 1.0}
```

transform で回転・平行移動を適用できる。

分割範囲の最小値・最大値を設定。r, z は 0.0~1.0、phi は 0° ~360° の範囲で設定。

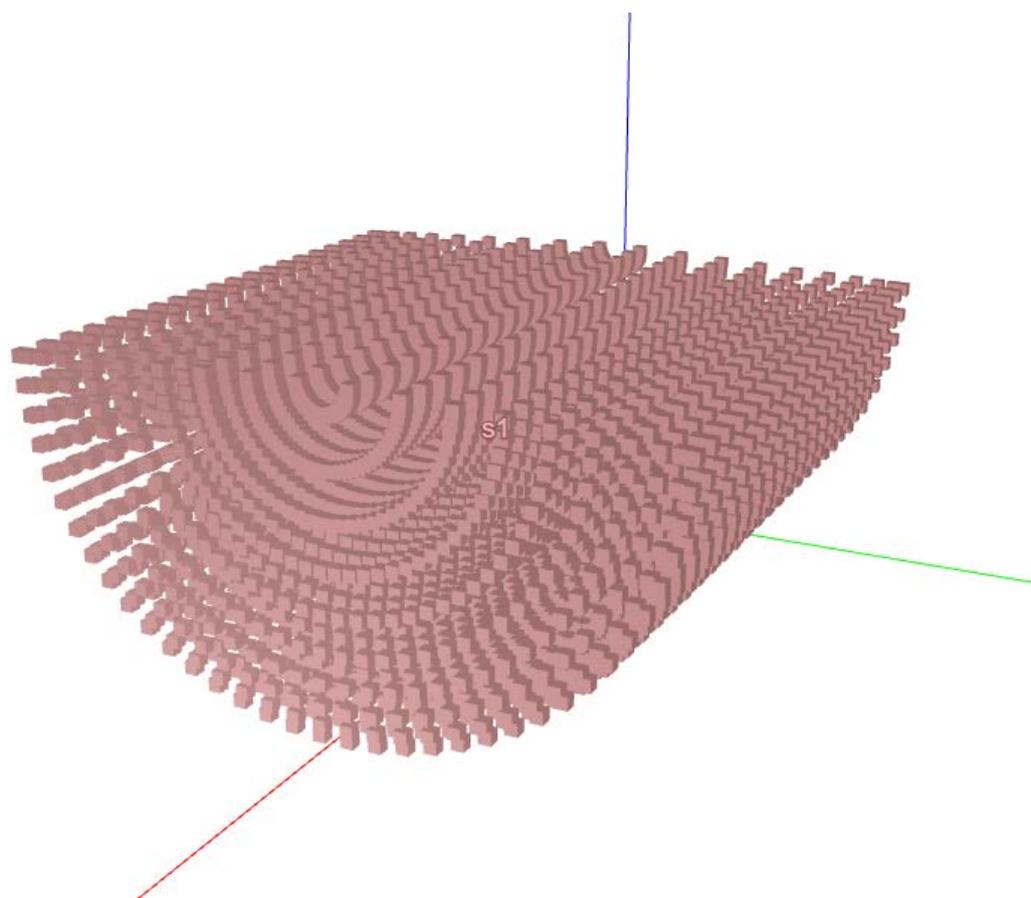


図 4-17 体積線源 RCC を使った半円柱の入力例 (上) と GUI 3D View 上の線源点 (下)

type:RCC (円柱) を使った半円筒の入力例

transform:

```
- { name: tr3, operation: [{rotate_around_x: 270}, {rotate_around_z: 90}, {translate: 0 0 400}] }
```

source:

```
- type: RCC
```

```
name: s1
```

```
geometry:
```

```
bottom_center: 0 0 -800
```

```
height_vector: 0 0 800
```

```
radius      : 400
```

```
transform: tr3
```

```
division:
```

```
r      : {type: UNIFORM, number: 1, min: 0.9, max: 1.0}
```

```
phi    : {type: UNIFORM, number: 9, min: 0.0, max: 180}
```

```
z      : {type: UNIFORM, number: 5, min: 0.0, max: 1.0}
```

transform で回転・平行移動を適用できる。

分割範囲の最小値・最大値を設定。r, z は 0.0~1.0、phi は 0° ~360° の範囲で設定。

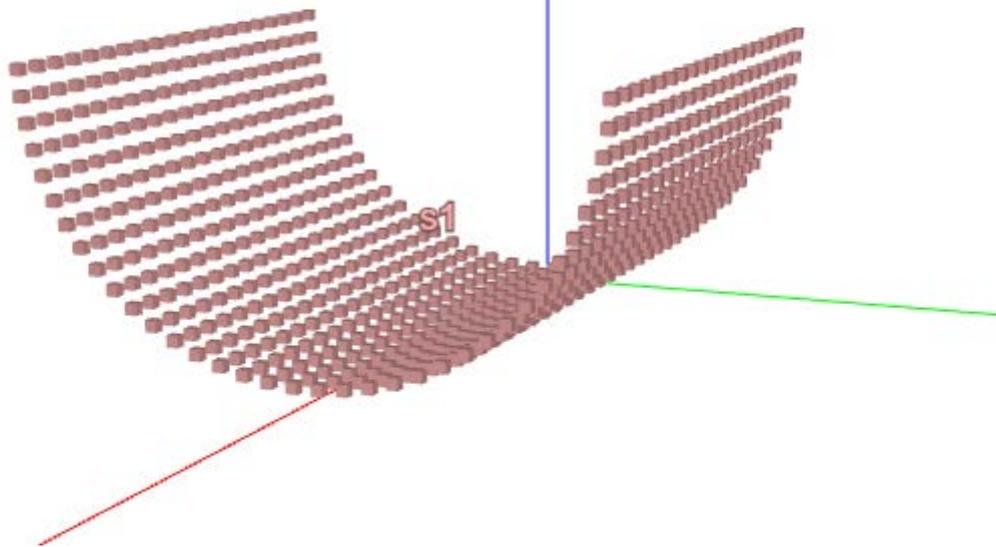


図 4-18 体積線源 RCC を使った半円筒の入力例 (上) と GUI 3D View 上の線源点 (下)

(3) MANUAL 分割時の重み指定

MANUAL 分割時に微小体積線源の重みに任意の値を設定するため、weight ノードを追加した。weight ノードが設定されていない場合は、微小体積線源の体積から重みを設定する（従来の機能）。

```
{type: MANUAL      , end_point: 0 0.5 1, weight: 0 0.5 1.0 } # 任意分割
```

・重みの適用方法

3軸の分割数/Lso/Mso/Nso/として分割座標/divS/divM/divN/(ここで θ と ϕ はラジアン単位。なお、入力ファイルではunitノードのangleで指定した単位となる。)とする。

座標系 (cart., cyl., spher.)	分割数	分割座標
x r ρ	Lso	divS(l),l=1,Lso+1
z z θ	Mso	divM(m),m=1,Mso+1
y ϕ ϕ	Nso	divN(n),n=1,Nso+1

※ x, r, z : 0.0~1.0 (全長に対する比率)

※ θ : 0.0~ π ($0^\circ \sim 180^\circ$)

※ ϕ : 0.0~ 2π ($0^\circ \sim 360^\circ$)

weight ノードが設定されている場合

weight ノードで3軸に沿った微小体積線源の相対的な強度を示すパラメータ/FL/FM/FN/を設定する。

・直交座標系 (Cartesian) : BOX および RPP

x : FL(l)

z : FM(m)

y : FN(n)

・円柱座標系 (Cylindrical) : RCC

r : FL(l)

z : FM(m)

ϕ : FN(n)

・球面座標系 (Spherical) : SPH

ρ : FL(l)

θ : FM(l)

ϕ : FN(n)

ここで、微小体積線源 $F_{unit}(l,m,n)$ と線源領域全体 F_{src} は次式で与えられる。

$$F_{unit}(l, m, n) = FL(l)FM(m)FN(n)$$

$$F_{src} = \sum_{l=1}^{Lso} FL(l) \cdot \sum_{m=1}^{Mso} FM(m) \cdot \sum_{n=1}^{Nso} FN(n)$$

微小体積代表点 P(l,m,n)における重みによる線源強度補正係数は次式で定義される。

$$Wgt_{src}(l, m, n) = \frac{F_{unit}(l, m, n)}{F_{src}}$$

weight ノードが設定されていない場合

weight ノードが設定されていない場合は、3 軸に沿った微小体積線源の相対的な強度を示すパラメータ/FL/FM/FN/を、線源領域の体積 V_{src} に占める微小体積線源 $V_{unit}(l,m,n)$ の割合から求める。

- 直交座標系 (Cartesian) : BOX および RPP

$$x : FL(l) = \text{div}S(l+1) - \text{div}S(l)$$

$$z : FM(m) = \text{div}M(m+1) - \text{div}M(m)$$

$$y : FN(n) = \text{div}N(n+1) - \text{div}N(n)$$

- 円柱座標系 (Cylindrical) : RCC

$$r : FL(l) = (\text{div}S(l+1)**2 - \text{div}S(l)**2)/2$$

$$z : FM(m) = \text{div}M(m+1) - \text{div}M(m)$$

$$\phi : FN(n) = \text{div}N(n+1) - \text{div}N(n)$$

- 球面座標系 (Spherical) : SPH

$$\rho : FL(l) = (\text{div}S(l+1)**3 - \text{div}S(l)**3)/3$$

$$\theta : FM(l) = \text{div}M(m+1) - \text{div}M(m)$$

$$\phi : FN(n) = \cos(\text{div}N(n)) - \cos(\text{div}N(n+1))$$

ここで、微小体積線源 $V_{unit}(l,m,n)$ と線源領域の体積 V_{src} は次式で与えられる。 $V_{unit}(l, m, n)$

$$= FL(l)FM(m)FN(n)$$

$$V_{src} = \sum_{l=1}^{Lso} FL(l) \cdot \sum_{m=1}^{Mso} FM(m) \cdot \sum_{n=1}^{Nso} FN(n)$$

微小体積代表点 P(l,m,n)における体積で重み付けする線源強度補正係数は次式で定義される。

$$Wgt_{src}(l, m, n) = \frac{V_{unit}(l, m, n)}{V_{src}}$$

- weight ノードの機能確認

weight ノード設定なしの場合の区分点 (end_point) のみを指定した従来の方法と weight ノード設定による重み指定の場合について比較したものを、type:BOX (直方体) を図 4-19 に、type:SPH (球) を図 4-20 に、type:RCC (円柱) を図 4-21 に示す。なお、ここでは weight ノード設定による重み指定の場合については、従来の微小体積の割合と同じになるよう重みを設定した。そのため、weight ノード設定なしの場合の区分点 (end_point) のみを指定した従来の方法と weight ノード設定による重みを指定した場合で、線源点の重みが同じ値となっていることが確認できる。

type:BOX (直方体) : 区分点 (end_point) のみ指定 (weight ノード設定なし)

(入力ファイル抜粋)

source:

```
- type: BOX
  name: s1
  geometry:
    vertex: -50 -50 -50
    edge_1: 100 0 0
    edge_2: 0 100 0
    edge_3: 0 0 100
    transform: tr1
```

division:

```
edge_1: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
edge_2: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
edge_3: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
```

weight ノード設定なし
の場合は微小体積の割合
で重み付けされる

(summary ファイル抜粋) : 各点線源の位置 (position: x, y, z) と体積割合による重み (weight)

point_source:

```
- { position: 2.7500e+02 2.7500e+02 7.5000e+01, weight: 1.2500e-01} # No. 1
- { position: 2.7500e+02 2.7500e+02 1.2500e+02, weight: 1.2500e-01} # No. 2
- { position: 2.7500e+02 3.2500e+02 7.5000e+01, weight: 1.2500e-01} # No. 3
- { position: 2.7500e+02 3.2500e+02 1.2500e+02, weight: 1.2500e-01} # No. 4
- { position: 3.2500e+02 2.7500e+02 7.5000e+01, weight: 1.2500e-01} # No. 5
- { position: 3.2500e+02 2.7500e+02 1.2500e+02, weight: 1.2500e-01} # No. 6
- { position: 3.2500e+02 3.2500e+02 7.5000e+01, weight: 1.2500e-01} # No. 7
- { position: 3.2500e+02 3.2500e+02 1.2500e+02, weight: 1.2500e-01} # No. 8
```

type:BOX (直方体) : 重み (weight) 指定

division:

```
edge_1: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1, weight: 1 1}
edge_2: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1, weight: 1 1}
edge_3: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1, weight: 2 2}
```

各分割点と同じ重みを
設定

point_source:

```
- { position: 2.7500e+02 2.7500e+02 7.5000e+01, weight: 1.2500e-01} # No. 1
- { position: 2.7500e+02 2.7500e+02 1.2500e+02, weight: 1.2500e-01} # No. 2
- { position: 2.7500e+02 3.2500e+02 7.5000e+01, weight: 1.2500e-01} # No. 3
- { position: 2.7500e+02 3.2500e+02 1.2500e+02, weight: 1.2500e-01} # No. 4
- { position: 3.2500e+02 2.7500e+02 7.5000e+01, weight: 1.2500e-01} # No. 5
- { position: 3.2500e+02 2.7500e+02 1.2500e+02, weight: 1.2500e-01} # No. 6
- { position: 3.2500e+02 3.2500e+02 7.5000e+01, weight: 1.2500e-01} # No. 7
- { position: 3.2500e+02 3.2500e+02 1.2500e+02, weight: 1.2500e-01} # No. 8
```

図 4-19 体積線源 BOX (直方体) : 区分点 (end_point) のみ指定の場合 (上) と重み (weight) 指定まで行った場合の入出力例 (下)

type:SPH (球) : 区分点 (end_point) のみ指定 (weight ノード設定なし)

(入力ファイル抜粋)

source:

```
- type: BOX
  name: s1
  geometry:
    vertex: -50 -50 -50
    edge_1: 100 0 0
    edge_2: 0 100 0
    edge_3: 0 0 100
    transform: tr1
  division:
    edge_1: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
    edge_2: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
    edge_3: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
```

weight ノード設定なし
の場合は微小体積の割合で重み付けされる

(summary ファイル抜粋) : 各点線源の位置 (position: x, y, z) と体積割合による重み (weight)

point_source:

```
- { position: 3.0000e+02 3.0884e+02 1.0884e+02, weight: 3.1250e-02} # No. 1
- { position: 3.0000e+02 2.9116e+02 1.0884e+02, weight: 3.1250e-02} # No. 2
- { position: 3.0000e+02 3.0884e+02 9.1161e+01, weight: 3.1250e-02} # No. 3
- { position: 3.0000e+02 2.9116e+02 9.1161e+01, weight: 3.1250e-02} # No. 4
- { position: 3.0000e+02 3.2652e+02 1.2652e+02, weight: 2.1875e-01} # No. 5
- { position: 3.0000e+02 2.7348e+02 1.2652e+02, weight: 2.1875e-01} # No. 6
- { position: 3.0000e+02 3.2652e+02 7.3483e+01, weight: 2.1875e-01} # No. 7
- { position: 3.0000e+02 2.7348e+02 7.3483e+01, weight: 2.1875e-01} # No. 8
```

type:SPH (球) : 重み (weight) 指定

division:

```
r : {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1, weight: 1 7}
theta: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1, weight: 1 1}
phi : {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1, weight: 1 1}
```

r 方向の分割による微小体積の比は 2 等分割の場合 1 : 7 となる

point_source:

```
- { position: 3.0000e+02 3.0884e+02 1.0884e+02, weight: 3.1250e-02} # No. 1
- { position: 3.0000e+02 2.9116e+02 1.0884e+02, weight: 3.1250e-02} # No. 2
- { position: 3.0000e+02 3.0884e+02 9.1161e+01, weight: 3.1250e-02} # No. 3
- { position: 3.0000e+02 2.9116e+02 9.1161e+01, weight: 3.1250e-02} # No. 4
- { position: 3.0000e+02 3.2652e+02 1.2652e+02, weight: 2.1875e-01} # No. 5
- { position: 3.0000e+02 2.7348e+02 1.2652e+02, weight: 2.1875e-01} # No. 6
- { position: 3.0000e+02 3.2652e+02 7.3483e+01, weight: 2.1875e-01} # No. 7
- { position: 3.0000e+02 2.7348e+02 7.3483e+01, weight: 2.1875e-01} # No. 8
```

図 4-20 体積線源 SPH (球) : 区分点 (end_point) のみ指定の場合 (上) と重み (weight) 指定まで行った場合の入出力例 (下)

type:RCC (円柱) : 区分点 (end_point) のみ指定 (weight ノード設定なし)

(入力ファイル抜粋)

source:

```
- type: RCC
  name: s1
  geometry:
    bottom_center: 0 0 -50
    height_vector: 0 0 100
    radius      : 50
    transform   : tr4
```

division:

```
r   : {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
phi : {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
z   : {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
```

weight ノード設定なし
の場合は微小体積の割合
で重み付けされる

(summary ファイル抜粋) : 各点線源の位置 (position: x, y, z) と体積割合による重み (weight)

point_source:

```
- { position: 3.0000e+02 3.1250e+02 7.5000e+01, weight: 6.2500e-02] # No. 1
- { position: 3.0000e+02 3.1250e+02 1.2500e+02, weight: 6.2500e-02] # No. 2
- { position: 3.0000e+02 2.8750e+02 7.5000e+01, weight: 6.2500e-02] # No. 3
- { position: 3.0000e+02 2.8750e+02 1.2500e+02, weight: 6.2500e-02] # No. 4
- { position: 3.0000e+02 3.3750e+02 7.5000e+01, weight: 1.8750e-01] # No. 5
- { position: 3.0000e+02 3.3750e+02 1.2500e+02, weight: 1.8750e-01] # No. 6
- { position: 3.0000e+02 2.6250e+02 7.5000e+01, weight: 1.8750e-01] # No. 7
- { position: 3.0000e+02 2.6250e+02 1.2500e+02, weight: 1.8750e-01] # No. 8
```

type:RCC (円柱) : 重み (weight) 指定

division:

```
r   : {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1, weight: 1 3}
phi : {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1, weight: 1 1}
z   : {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1, weight: 1 1}
```

r 方向の分割による微小
体積の比は 2 等分割の
場合 1 : 3 となる

point_source:

```
- { position: 3.0000e+02 3.1250e+02 7.5000e+01, weight: 6.2500e-02] # No. 1
- { position: 3.0000e+02 3.1250e+02 1.2500e+02, weight: 6.2500e-02] # No. 2
- { position: 3.0000e+02 2.8750e+02 7.5000e+01, weight: 6.2500e-02] # No. 3
- { position: 3.0000e+02 2.8750e+02 1.2500e+02, weight: 6.2500e-02] # No. 4
- { position: 3.0000e+02 3.3750e+02 7.5000e+01, weight: 1.8750e-01] # No. 5
- { position: 3.0000e+02 3.3750e+02 1.2500e+02, weight: 1.8750e-01] # No. 6
- { position: 3.0000e+02 2.6250e+02 7.5000e+01, weight: 1.8750e-01] # No. 7
- { position: 3.0000e+02 2.6250e+02 1.2500e+02, weight: 1.8750e-01] # No. 8
```

図 4-21 体積線源 RCC (円柱) : 区分点 (end_point) のみ指定の場合 (上) と
重み (weight) 指定まで行った場合の入出力例 (下)

(4) 複数線源、複数核種、エネルギー指定、スペクトル下限値の設定

従来の入力ファイルにおける source ノードの記述例（旧フォーマット）を図 4-22 に、拡張後の入力ファイルにおける source ノードの記述例（新フォーマット）を図 4-23 に示す。

従来のコードでは、線源条件として、1つの線源かつ1つの核種しか定義できなかったのに対して、本拡張コードでは、線源条件として、複数線源、複数核種、エネルギー指定を考慮できるよう整備した。従来のコードでは、複数線源の計算に対応していなかったため、複数線源を定義すると、図 4-24 のようなエラーメッセージが表示されるようになっていた。従来のコードでは、線源のインベントリ設定として、核種指定のみが可能であったのに対して、拡張後では、inventory ノードの子ノードとして、核種指定 (nuclide) かエネルギー指定 (energy および spectrum) を選択できるようになり、また、それらを配列定義することで、複数の核種およびエネルギーを定義できるようになった。

また、従来のコードでは、計算で考慮する光子発生率の下限値として、内部において $1e-4$ で固定であったのに対して、拡張後では、新たな子ノード cutoff_rate を追加し、任意の下限値を設定できるようになった。なお、入力ファイルにおいて、cutoff_rate ノードを省略した場合は、デフォルト値として、 $1e-4$ が設定される。

さらに、従来のコードでは、透過線の基準点を設定するのに、SOURCE ノードとして、type: PSEUDO を1つ設定する必要があったが、この場合すべての線源に対して同じ基準点が適用されるため、拡張後では、type: PSEUDO を廃止し、各線源定義における子ノードとして path_trace を追加することで、線源ごとに透過線の基準点を設定できるようになった。なお、入力ファイルにおいて、path_trace ノードを省略した場合は、デフォルト値として、bounding_box にその線源名 (POINT の場合は name、ZONE の場合は zone_name に定義された値) が設定される。

従来のコード：旧フォーマット

source:

```
- name: s1
  type: POINT
  position: 300 300 100
  nuclide: Co60
  radioactivity: 1.0e+10
```

核種名による1核種のみの定義

```
# - name: s2
# type: POINT
# position: 300 300 100
# nuclide: Co60
# radioactivity: 1.0e+10
```

複数線源の定義は許されていない

```
- type: PSEUDO
  position: 300 300 100
```

透過線の基準点を1つしか定義できない(このまま複数線源にすると全線源共通になってしまう)

図 4-22 従来の入力ファイルにおける source ノードの記述例

拡張後：新フォーマット

source:

```
- type: POINT
  name: s1
  position: 300 300 100
```

エネルギー指定が可能

```
inventory:
- { energy: 1.1730e+00, spectrum: 9.9970e-01, radioactivity: 0.5000e+10}
- { energy: 1.3320e+00, spectrum: 9.9990e-01, radioactivity: 0.5000e+10}
```

```
cutoff_rate: 1.0e-4
```

光子発生率の下限値として任意の値を設定可能

```
path_trace:
  position: 300 300 100
```

透過線の基準点を線源ごとに設定可能 (type: PSEUDO は廃止)。

```
- type: POINT
  name: s2
  position: 300 300 200
  inventory:
- { nuclide: Co60, radioactivity: 0.25e+10}
- { nuclide: Be7, radioactivity: 0.25e+10}
```

複数核種が定義可能

```
cutoff_rate: 1.0e-4
```

複数線源が定義可能

```
path_trace:
  bounding_box: s2
```

図 4-23 拡張後の入力ファイルにおける source ノードの記述例



図 4-24 従来コードにおける複数線源定義時のエラーメッセージ

4.2.2 検証

ここでは、複数線源、複数核種、エネルギー指定の機能を検証するため、まずは、1核種(Co60)を1線源として割り当てた計算を行った。続いて、線源の位置や総インベントリは同じになるが、入力ファイル上は2つの線源となるように放射エネルギーを半分にして設定し、そのうち一方はエネルギー指定(1.173MeVと1.332MeV)、もう一方は核種指定とした。さらに、核種指定の方は、複数核種設定の確認のため、放射エネルギーをさらに半分(総インベントリの1/4)にしたCo60を2つ設定した。つまり、複数線源、複数核種、エネルギー指定の機能が正しく動作していれば、1核種1線源として計算した場合でも、2線源に分割した場合でも、同じ検出器位置での線量率の合計は同じなることが予想される。

1核種1線源として計算した場合の入力ファイルにおける線源定義部分を図4-25に、2線源に分割した場合の入力ファイルにおける線源定義部分を図4-26に示す。

図4-27に1核種1線源として計算した場合と2線源に分割して計算した場合の合計線量を比較して示す。

```
source:
- type: POINT
  name: s1
  position: 300 300 100
  inventory:
    - {nuclide: Co60, radioactivity: 1.0e+10}
  cutoff_rate: 1.0e-4
```

図 4-25 1核種1線源として計算した場合の入力ファイルにおける線源定義部分

```
source:
- type: POINT
  name: s1
  position: 300 300 100
  inventory:
    - { energy: 1.1730e+00, spectrum: 9.9970e-01, radioactivity: 0.5000e+10}
    - { energy: 1.3320e+00, spectrum: 9.9990e-01, radioactivity: 0.5000e+10}
  cutoff_rate: 1.0e-4
- type: POINT
  name: s2
  position: 300 300 100
  inventory:
    - {nuclide: Co60, radioactivity: 0.25e+10}
    - {nuclide: Co60, radioactivity: 0.25e+10}
  cutoff_rate: 1.0e-4
```

放射エネルギーを半分にして
エネルギー指定

放射エネルギーを1/4にしてCo60
を2つ定義

図 4-26 2線源に分割した場合の入力ファイルにおける線源定義部分

```

1 核種 1 線源として計算した場合
##|*****
##| Source Name: s1
##|*****
##|
##| 計算結果 (Total)
##|
result:
  elapsed_time: 0.0000 sec
  detector:
    - name: d1
      dose:
        #      x          y          z
        #
        - at: 5.0000e+02 3.0000e+02 1.0000e+02
    - name: d2
      dose:
        #      x          y          z
        #
        - at: 1.0000e+03 3.0000e+02 1.0000e+02

```

E (AP)	E (PA)
μ Sv/h	μ Sv/h
2.7576e+02	2.3008e+02
E (AP)	E (PA)
μ Sv/h	μ Sv/h
2.2026e+01	1.8371e+01

```

2 線源に分割して計算した場合
##|*****
##| Source Name: s1 + s2
##|*****
##|
##| 計算結果 (Total)
##|
result:
  elapsed_time: 0.0010 sec
  detector:
    - name: d1
      dose:
        #      x          y          z
        #
        - at: 5.0000e+02 3.0000e+02 1.0000e+02
    - name: d2
      dose:
        #      x          y          z
        #
        - at: 1.0000e+03 3.0000e+02 1.0000e+02

```

E (AP)	E (PA)
μ Sv/h	μ Sv/h
2.7576e+02	2.3008e+02
E (AP)	E (PA)
μ Sv/h	μ Sv/h
2.2026e+01	1.8371e+01

同検出器の位置で
同じ合計線量となった

図 4-27 1 核種 1 線源として計算した場合の入力ファイルにおける線源定義部分

なお、詳細な計算条件は、昨年度報告書と同様に以下のように設定した。

(1) 計算体系と条件

検証のために設定した計算体系を図 4-28 に示す。この体系は典型的な放射線取扱施設を想定している。厚さ 10cm のコンクリート壁の遮蔽を有する 10m×10m×5m の実験室内に、厚さ 5cm の鉄壁の遮蔽を有する 2m×2m×2m の線源利用空間が設置されている体系となっている。計算設定は、この線源利用空間の中央にて ^{60}Co 線源 $1 \times 10^{10}\text{Bq}$ を使用しているときの鉄壁外側とコンクリート壁外側の線量率を求めるといったものである。

- 点線源位置：利用空間内の中央床上 100cm 座標 (x,y,z)=(300,300,100)
- 評価点 1：鉄遮蔽外側 座標(x,y,z)=(500,300,100)
- 評価点 2：コンクリート外側の座標 (x,y,z)=(1100,300,100)

* 単位記載のない座標数値は cm。

(2) 光子発生率ライブラリの整備

計算コード PKG2022 では、線源情報として入力した評価核種と放射能 (Bq) から光子発生率ライブラリを参照することで線源ガンマ線束を算出する機能を有している。その処理で参照する光子発生率ライブラリは、『Nuclear Decay Data for Dosimetry Calculation Revised Data of ICRP Publication 38』(A.ENDO, Y.YAMAGUCHI, K.F.ECKERMAN, JAERI 1347, Feb.2005)を元に編集・作成した。このライブラリには 988 核種の光子発生率データが収録されている。今回の検証計算で線源核種とした ^{60}Co の収録データを表 4-1 に示した。計算においては、 ^{60}C の線量を決定する γ 線エネルギー 1.173MeV と 1.332MeV のガンマ線束で代表している。

表 4-1 線源核種 ^{60}Co の光子発生率

C060	27 B-	1.66353E+08	5.2714 Y
20			
3.469E+02	7.600E-05	Gamma rays	
8.263E+02	7.600E-05	Gamma rays	
1.173E+03	9.997E-01	Gamma rays	
1.332E+03	9.999E-01	Gamma rays	
2.159E+03	1.110E-05	Gamma rays	
2.505E+03	2.000E-08	Gamma rays	
7.478E+00	6.381E-05	X rays	
7.461E+00	3.242E-05	X rays	
7.325E+00	5.099E-11	X rays	
8.265E+00	8.678E-06	X rays	
8.265E+00	4.416E-06	X rays	
8.329E+00	8.423E-09	X rays	
8.511E-01	6.924E-07	X rays	
8.511E-01	7.685E-08	X rays	
8.683E-01	2.690E-07	X rays	
9.400E-01	2.384E-08	X rays	
9.400E-01	1.287E-08	X rays	
8.547E-01	3.060E-09	X rays	
7.601E-01	2.044E-08	X rays	
7.429E-01	5.054E-08	X rays	

(3) 物質組成とビルドアップ代表物質

表 4-2 に検証計算に使用した物質組成を示した。

ビルドアップ代表物質として鉄を採用した。

表 4-2 計算に使用した物質組成

Element	H	C	N	O	MG	AL	SI	S	CA	FE	ρ (g/cm ³)
Concrete	8.7360E-03			1.0655E+00	2.4150E-03	9.3660E-03	8.1073E-01	1.47000E-03	1.4425E-01	5.7498E-02	2.1
Air	1.2049E-08	1.4766E-07	9.0934E-04	2.9541E-04							1.2000E-03
Iron										7.9	7.9

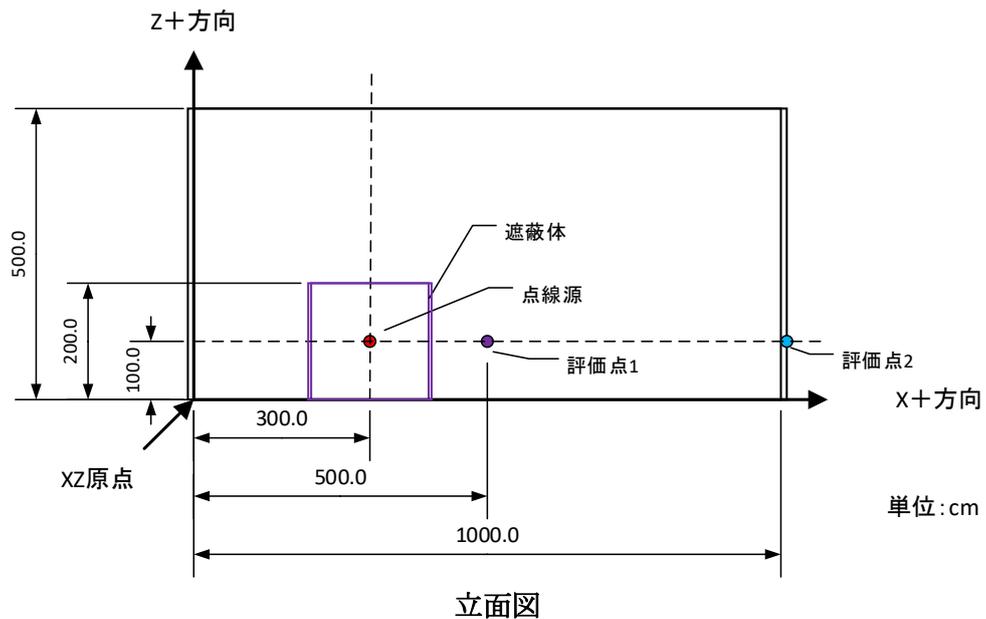
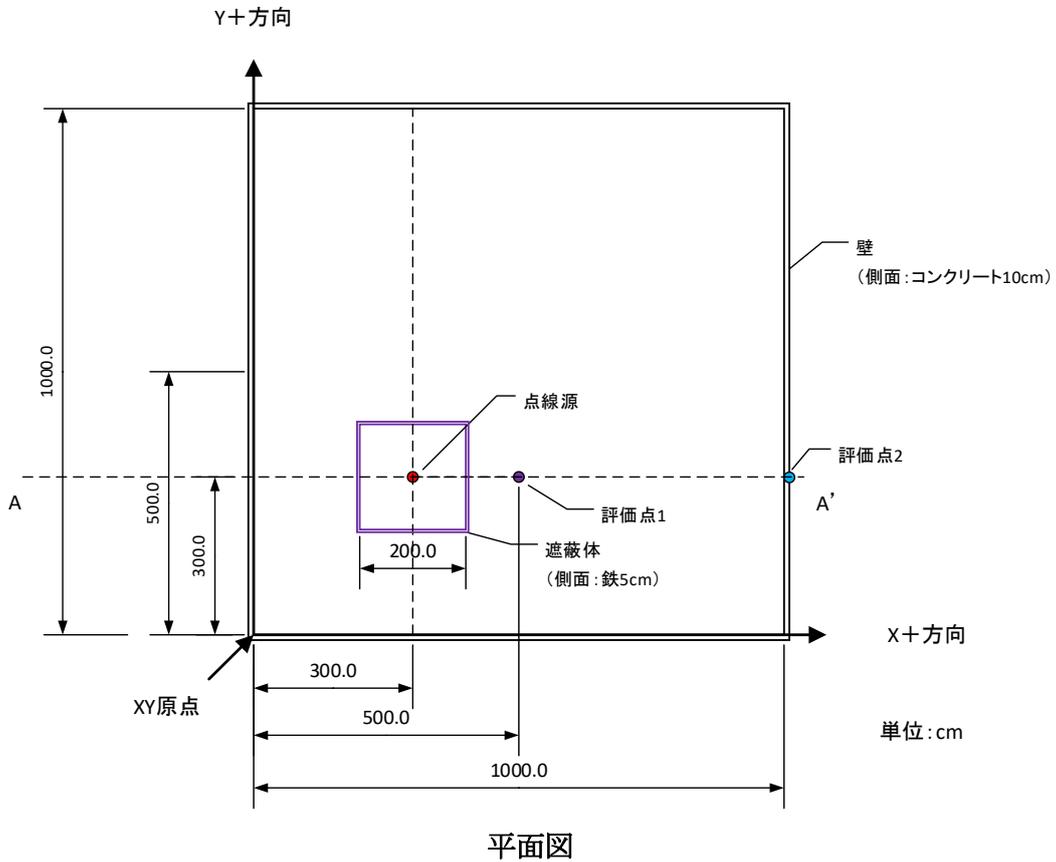


図 4-28 放射線取扱施設の計算体系

4.3 計算条件編集機能の作成

既存の PKG2022_GUI プログラムに対して、線源 (source ノード) および検出器 (detector ノード) に関する計算条件編集機能を整備した。

4.3.1 仕様検討

既存の線源 (source ノード) および検出器 (detector ノード) に関する計算条件を設定できるようにする。また、上記で整備した以下の新規機能に対応した条件も設定できるように整備する。

- (1) SOURCE ノードにおける線源形状の指定
- (2) MANUAL 以外の分割手法における分割範囲の指定 (半球、半円柱、半円筒に対応)
- (3) MANUAL 分割時の重み指定
- (4) 複数線源、複数核種、エネルギー指定、スペクトル下限値の設定

4.3.2 遮蔽計算コードの追加設計

PKG2022_GUI に線源 (source ノード) および検出器 (detector ノード) を追加するためボタンを配置した (図 4-29)。

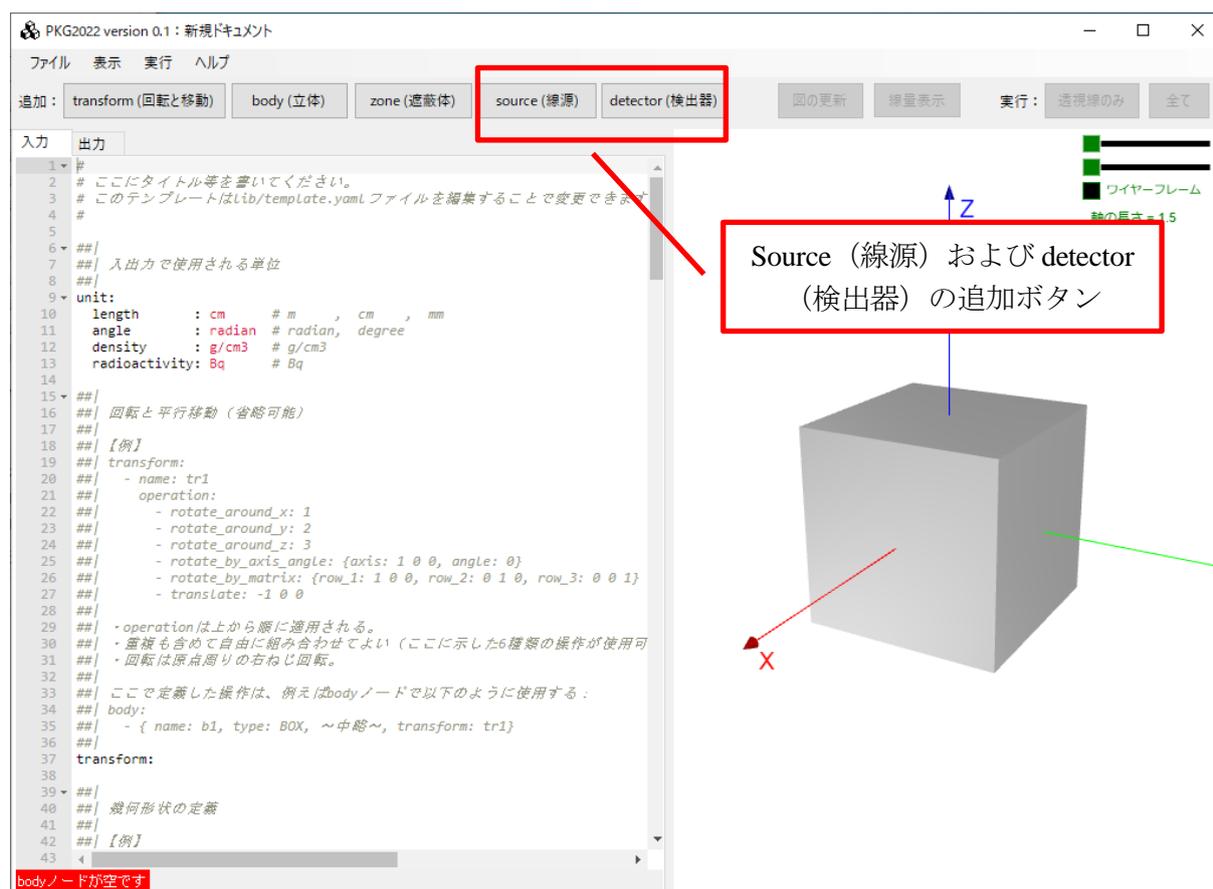


図 4-29 PKG2022_GUI における線源 (source ノード) および検出器 (detector ノード) の追加ボタン

4.3.3 遮蔽計算コードの追加開発

遮蔽計算コードの GUI に関して追加開発を行った。

(1) 線源条件編集機能の作成

線源条件編集画面は、線源の領域に関する幾何形状や分割などの条件を設定する「線源領域」タブ (図 4-30) と、線源の強度や透過線などの条件を設定する「線源情報と透過線」タブ (図 4-31) から構成され、両タブに共通して以下の構成要素をもっている。

- 「定義済み線源リスト」: YAML 入力ファイルあるいは線源条件編集画面で既に定義された線源のリストが表示される。このリストの行ごとに線源条件が定義されている。各行で定義されている線源を選択することで、その条件の値が各種パネルで表示される。
- 「新規」「削除」「登録」ボタン: 新たな線源を追加する場合は「新規」ボタンをクリックする。「削除」ボタンは、「定義済み線源リスト」で選択されている行の線源を削除する。「登録」ボタンは、「定義済み線源リスト」で選択されている行の線源のパラメータを変更した場合にクリックする。
- 「YAML 入力のイメージ出力」: 「定義済み線源リスト」に表示されている線源に関して、YAML 入力ファイルでのイメージが出力される。また、画面右下の「ブロック形式」のチェックが付いている場合は YAML のブロック形式 (ノードが展開された状態) 表示、チェックを外すことでフロー形式 (1 行に収められた状態) 表示となる。

「線源領域」タブ (図 4-30) では、主に以下の項目を設定する。

- 「幾何形状 (geometry)」パネル: 線源の幾何形状を点線源 (POINT) あるいは体積線源 (BOX, RPP, SPH, RCC) から選択し、各線源に対する幾何形状のパラメータを設定する。点線源 (POINT) の場合は位置 (position) を、体積線源 (BOX, RPP, SPH, RCC) の場合はそれぞれの幾何形状を設定する。また、体積線源の場合は、オプションとして回転と平行移動を定義した幾何形状に適用することができる。
- 「領域分割 (division)」パネル: 体積線源 (BOX, RPP, SPH, RCC) の場合は、幾何形状 (geometry) に加えて、幾何形状に応じた領域分割 (division) を設定する。
 - 点線源 (POINT) の場合の例: 図 4-32
 - 体積線源 (BOX) の場合の例: 図 4-33

「線源情報と透過線」タブ (図 4-31) では、主に以下の項目を設定する。

- 「線源情報 (inventory)」パネル: 線源の種類や線源強度を指定する。線源の種類指定方法には、核種指定 (ライブラリからエネルギーや光子発生率を取得する) とエネルギー指定がある。また、計算に使用するガンマ線として光子発生率の下限値「光子発生率のカットオフ」を設定することができる。計算には、「光子発生率のカットオフ」で設定した値以上の光子発生率のデータが使用される。
 - 核種指定の場合の例: 図 4-34
 - エネルギー指定の場合の例: 図 4-35

- 「透過線 (path_trace)」パネル：評価点までの透過線を計算する基準点を設定する。位置 (position) による指定あるいは線源のバウンディングボックス (bounding_box)¹による指定またはその両方を行うことができる。何も設定しない場合は、線源のバウンディングボックス (bounding_box) が使用される。

¹ バウンディングボックス (Bounding Box) とは、図形をちょうど囲うのに必要な大きさの、四角い箱 (矩形) のこと。図形の大体の大きさを知るのに用いられる。

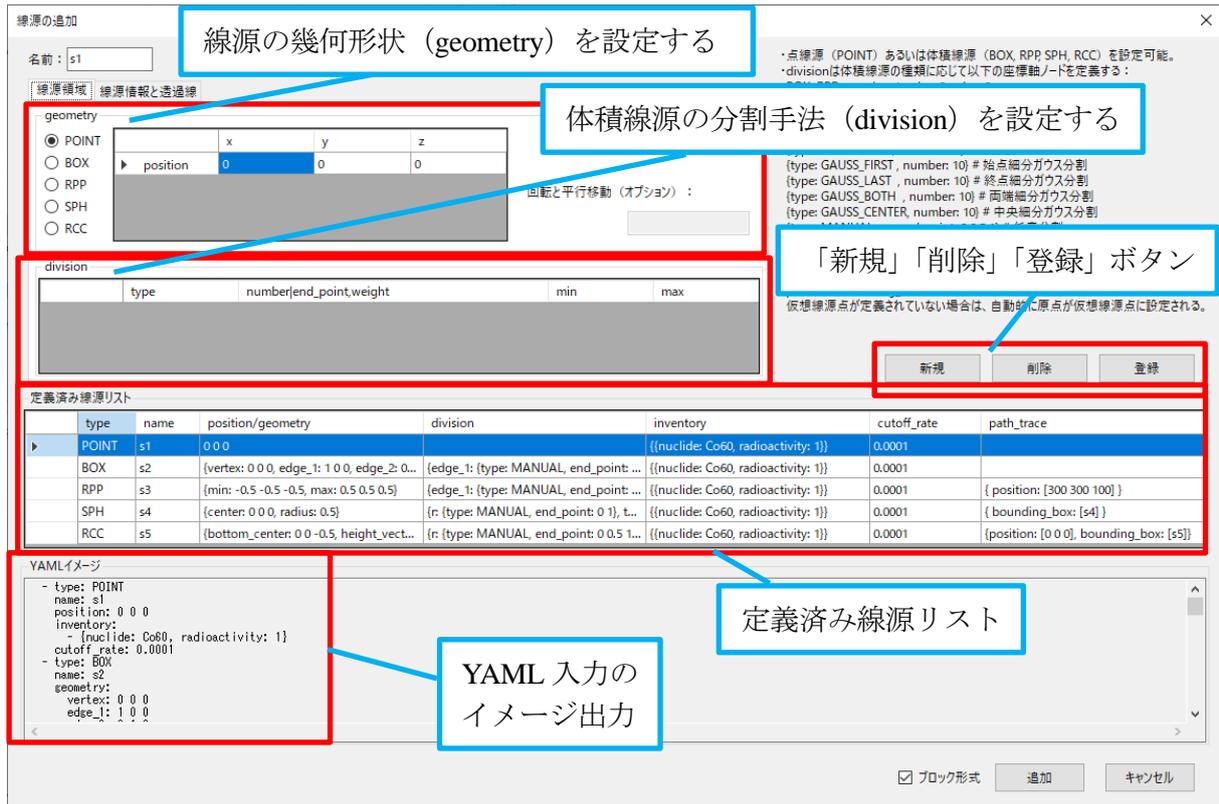


図 4-30 線源条件編集画面：「線源領域」タブ

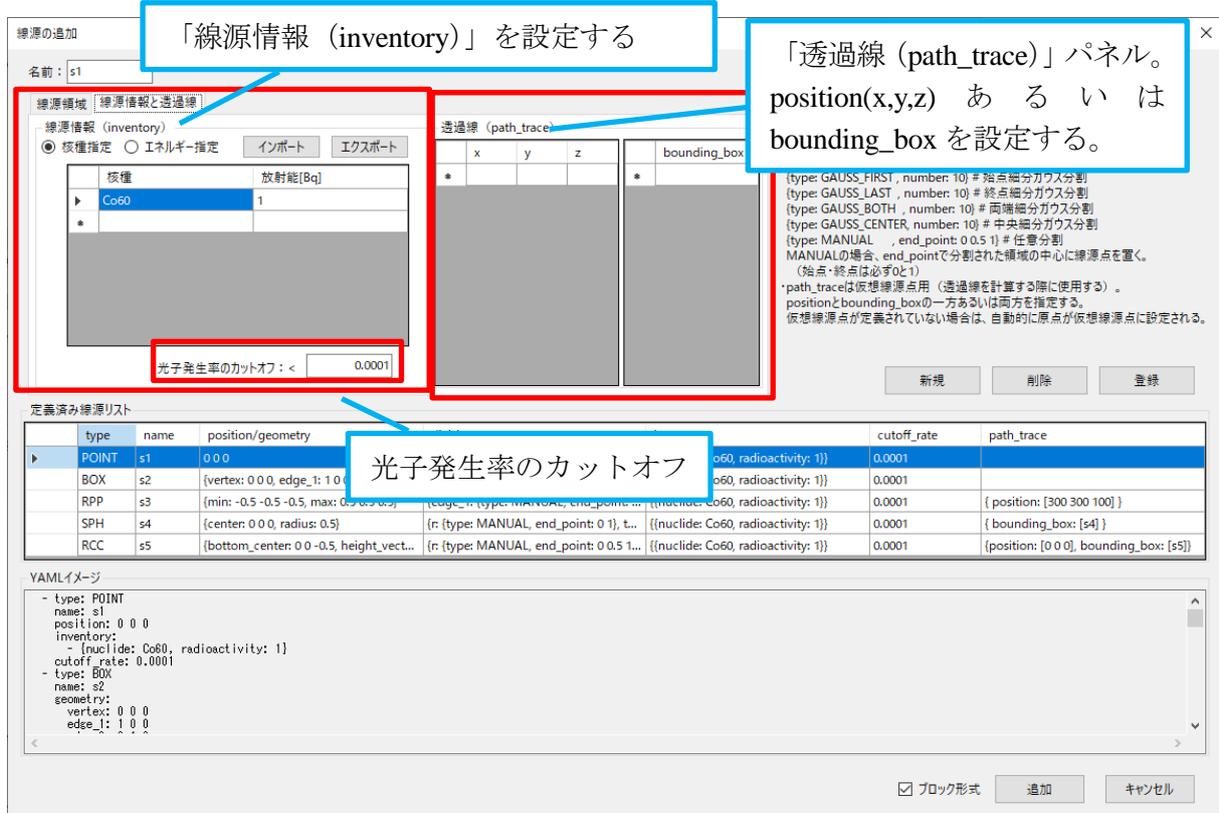


図 4-31 線源条件編集画面：「線源情報と透過線」タブ

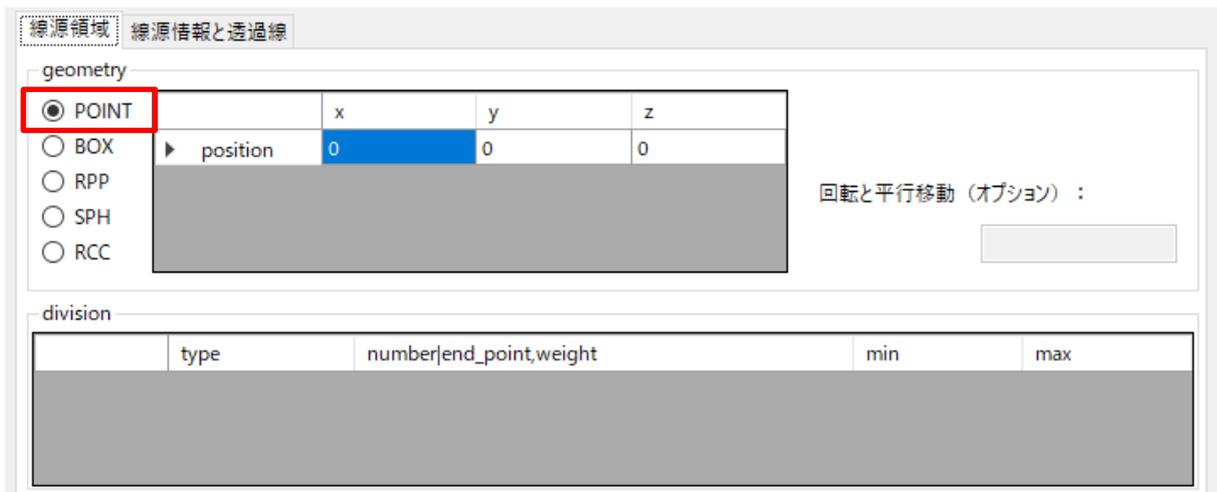


図 4-32 「線源領域」タブにおける設定：点線源の場合

分割 type が MANUAL の場合は、別途ポップアップするダイアログで区切り点 (end_point) および重み (weight) を設定する。

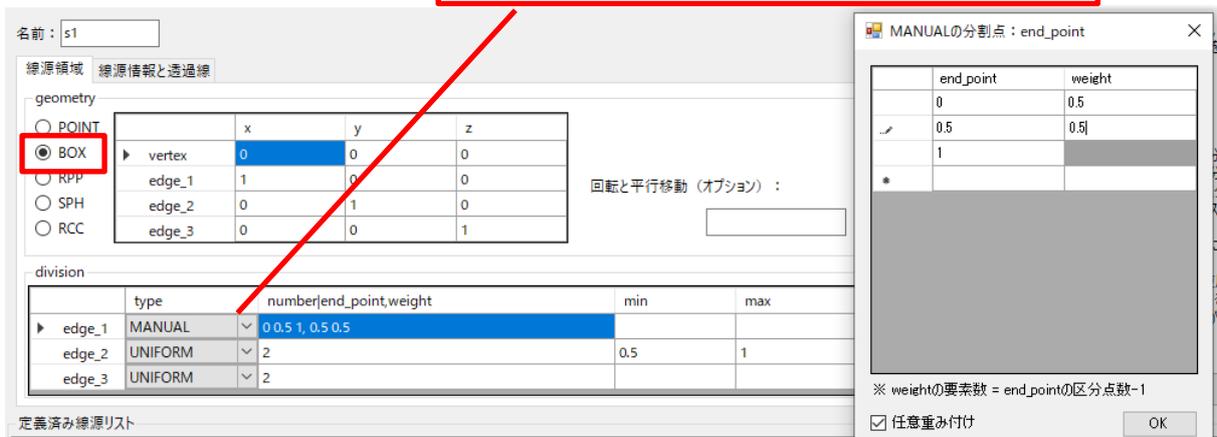


図 4-33 「線源領域」タブにおける設定：体積線源 BOX の場合

線源情報 (inventory)

核種指定 エネルギー指定

	核種	放射能[Bq]
	Co60	1.000000E+000
	Ag108	2.000000E+000
	Ag108M	3.000000E+000
	Cs137	6.000000E+001
	Cs148	6.100000E+001
▶	Cs149	6.200000E+001
*		

光子発生率のカットオフ: <

図 4-34 「線源情報 (inventory)」パネル：線源情報 (核種指定)

線源情報 (inventory)

核種指定 エネルギー指定

	エネルギー [MeV]	線源分布[-]	放射能[Bq]
	3.471000E-001	7.500000E-005	1.000000E+000
	8.261000E-001	7.600000E-005	2.000000E+000
	1.173000E+000	9.985000E-001	3.000000E+000
	1.332000E+000	9.998000E-001	4.000000E+000
▶	2.159000E+000	1.200000E-005	5.000000E+000
*			

光子発生率のカットオフ: <

図 4-35 「線源情報 (inventory)」パネル：線源情報 (エネルギー指定)

(2) 検出器編集機能の作成

「検出器の追加」フォームで入力ファイルに対する検出器の追加・削除・編集が可能となるよう整備した (図 4-36)。

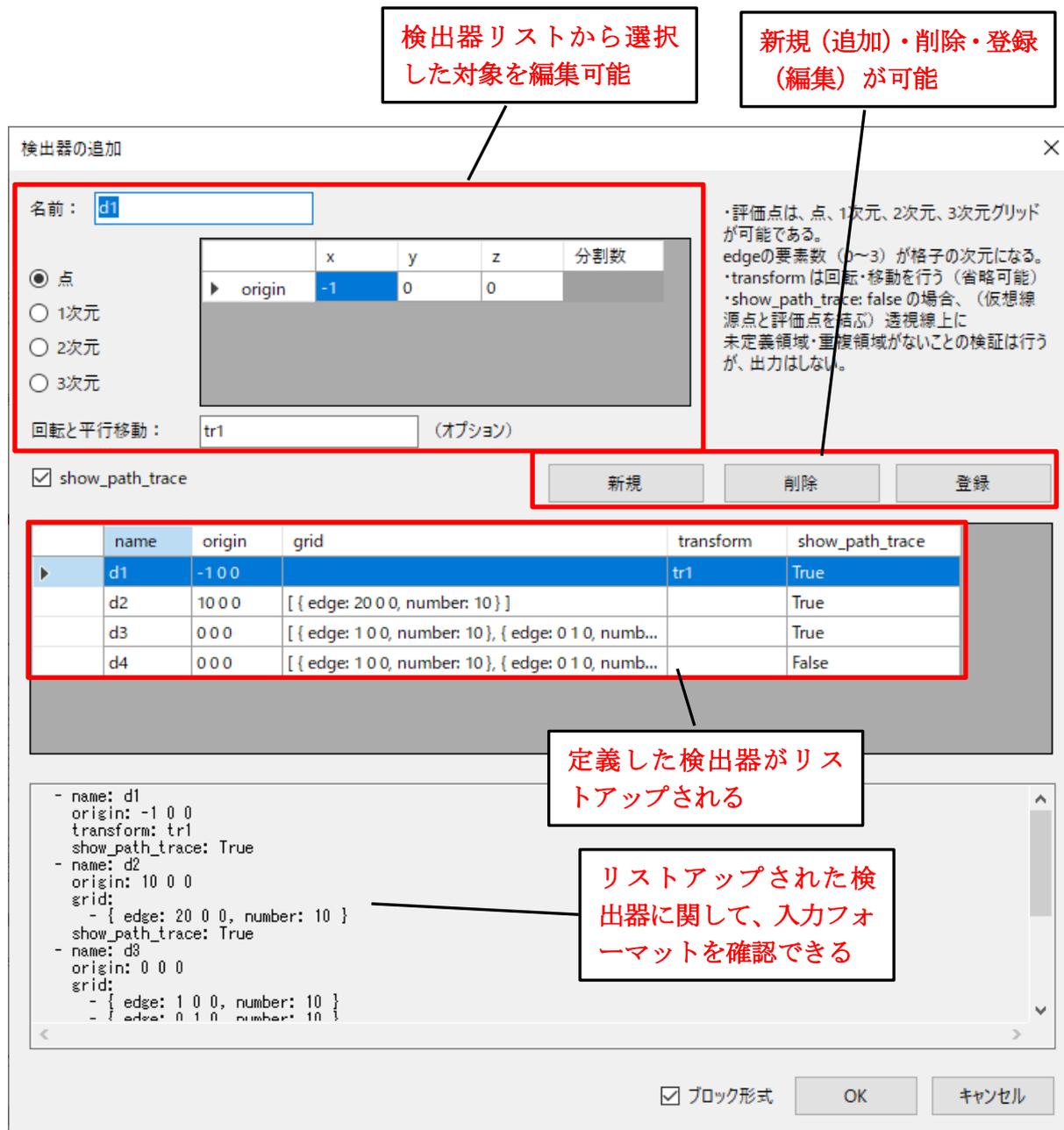


図 4-36 検出器編集機能

5. コードの妥当性検証作業

本作業で作成した遮蔽計算コード JPKG2022（以下、JPKG2022）の妥当性の検証のために既存文献や既存コードの計算結果と比較した。表 5-1 に実施項目を示す。

表 5-1 コードの妥当性検証作業の実施項目

(1)放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル2015

比較問題	比較量	線源	遮蔽
1.2 光子の遮蔽計算方法			
1.2.1 透過率データを用いて実効線量率を求める方法	実効線量率定数	Co-60	無し
	実効線量透過率	Co-60	コンクリート
1.2.2 実効線量ビルドアップ係数を用いて実効線量率を求める方法	実効線量率	Co-60	コンクリート
3.1 診療用腔内照射施設の例			
3.1.3 人が常時立ち入る場所における1週間あたりの実効線量の計算	実効線量率定数	Ir-192	無し
	実効線量透過率	Ir-192	タングステン
	実効線量	Ir-192	タングステン
5.1 診療用リニアック(10MeV)の使用線量の計算例			
(7)管理区域の境界等に対する計算 B点(操作室)	利用線維の透過率	X線10MeV	コンクリート、鉄
	実効線量	X線10MeV	コンクリート、鉄

(2)QAD-IEマニュアル

比較問題	比較量	線源	遮蔽
サンプル問題1	実効線量率	Co-60	コンクリート
サンプル問題2	実効線量率	廃棄物貯蔵タンク	水

(3)QAD-CGGP2R相当コード

比較問題	比較量	線源	遮蔽
鉛遮蔽の例	実効線量透過率	Co-60	鉛
	実効線量率	Co-60	鉛
土壌遮蔽の例	実効線量率定数	Cs-134、137	土壌
	実効線量透過率	Cs-134、137	土壌
	実効線量率	Cs-134、137	土壌

(4)一括と個別計算の比較

比較問題	比較量	線源	遮蔽
複数核種の例	実効線量率	Co-60、Cs-134、137	アルミ
複数線源の例	実効線量率	Ir-192、X線10MeV	コンクリート

5.1 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015

「放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015」¹（以下、実務マニュアル）の例題の計算結果と JPKG2022 の計算結果を比較した。

5.1.1 透過率データを用いて実効線量率を求める方法

実務マニュアルの「1.2 光子の遮蔽計算方法」の「1.2.1 透過率データを用いて実効線量率を求める方法」で使用している Co-60 線源の実効線量率定数、コンクリート遮蔽における Co-60 線源の実効線量透過率と同等なものを JPKG2022 により計算した。

※実効線量率定数は、核種の数量が 1MBq で距離 1m における 1 時間当たりの実効線量率である。実効線量透過率 F_a は、遮蔽体が無い場合の実効線量率 E_0 に対する遮蔽体がある場合の実効線量率 E の比： $F_a=E/E_0$ として表される。

Co-60 線源の実効線量率定数の比較を表 5-2 に、コンクリート遮蔽における Co-60 線源の実効線量透過率の比較を表 5-3 に示す。各表に示したようにほぼ一致している。

表 5-2 実効線量率定数 (Co-60)

Co-60実効線量率定数(μ Sv/h per 1MBq at 1m)

①JPKG2022	②実務マニュアル	①/②
3.06E-01	3.05E-01	1.00

表 5-3 実効線量透過率 (Co-60、コンクリート)

実効線量透過率

線源核種 : Co-60

遮蔽材 : コンクリート

厚さ(cm)	①JPKG2022	②実務マニュアル	①/②
5	8.34E-01	8.52E-01	0.98
10	6.64E-01	6.63E-01	1.00
15	4.90E-01	4.83E-01	1.02
20	3.43E-01	3.37E-01	1.02
25	2.32E-01	2.28E-01	1.02
30	1.53E-01	1.50E-01	1.02
40	6.30E-02	6.19E-02	1.02
50	2.47E-02	2.43E-02	1.02
60	9.32E-03	9.18E-03	1.02
70	3.42E-03	3.38E-03	1.01
80	1.23E-03	1.22E-03	1.01
90	4.37E-04	4.33E-04	1.01
100	1.53E-04	1.52E-04	1.00
110	5.28E-05	5.26E-05	1.00
120	1.81E-05	1.81E-05	1.00
130	6.15E-06	6.15E-06	1.00
140	2.08E-06	2.08E-06	1.00
150	7.00E-07	7.00E-07	1.00
155	4.05E-07	4.05E-07	1.00

5.1.2 実効線量ビルドアップ係数を用いて実効線量率を求める方法

実務マニュアルの「1.2 光子の遮蔽計算方法」の「1.2.2 実効線量ビルドアップ係数を用いて実効線量率を求める方法」で算出された実効線量率と同等なものを JPKG2022 により計算した。計算条件を表 5-4 に示す。

表 5-4 計算条件（実務マニュアル 1.2.2）

線源核種	Co-60
線源強度	3.7E+13Bq
遮蔽体	コンクリート 厚さ100cm
評価点	線源から評価点までの距離600cm

実効線量率の比較を表 5-5 に示す。表に示したように大きな差異は見られなかった。

表 5-5 実効線量率（実務マニュアル 1.2.2）

実効線量率(μ Sv/h)		
①JPKG2022	②実務マニュアル	①/②
4.80E+01	4.49E+01	1.07

5.1.3 診療用腔内照射施設の例

実務マニュアルの「3.1 診療用腔内照射施設の例」の「3.1.3 人が常時立ち入る場所における1週間あたりの実効線量の計算」で使用している Ir-192 線源の実効線量率定数、タングステン遮蔽における Ir-192 線源の実効線量透過率と同等なものを JPKG2022 により計算した。

Ir-192 線源の実効線量率定数の比較を表 5-6 に、タングステン遮蔽における Ir-192 線源の実効線量透過率の比較を表 5-7 に示す。実効線量率定数は、一致している。実効線量透過率は、JPKG2022 が 12% 小さい値となった。

表 5-6 実効線量率定数 (Ir-192)

Ir-192の実効線量率定数
(μ Sv/h per 1MBq at 1m)

JPKG2022	1.17E-01
M3.1	1.17E-01
116/M3.1	1.00

※M3.1:実務マニュアル 3.1節 p.3-7

表 5-7 実効線量透過率 (Ir-192、タングステン)

実効線量透過率

線源核種 :Ir-192

遮蔽体 :タングステン

厚さ(cm)	JPKG2022	M3.1	116/M3.1
1	6.71E-02	-	-
2	8.55E-03	-	-
3	1.28E-03	-	-
4	2.16E-04	-	-
5	4.15E-05	-	-
6	9.10E-06	1.03E-05	0.88
7	2.25E-06	-	-
8	6.09E-07	-	-
9	1.75E-07	-	-
10	5.25E-08	-	-

※M3.1:実務マニュアル 3.1節 p.3-7

実務マニュアルには厚さ6cmのみ記載されている。

また、実務マニュアルの「3.1 診療用腔内照射施設の例」の「3.1.3 人が常時立ち入る場所における1週間あたりの実効線量の計算」の放射性同位体を使用する室内での実効線量と同等なものをJPKG2022により計算した。計算条件を表5-8に示す。

表 5-8 計算条件 (実務マニュアル 3.1.3)

線源核種	Ir-192
線源強度	370GBq
遮蔽体	タンゲステン 厚さ6cm
評価点	線源から評価点までの距離56cm
作業時間	30時間/週

実効線量の比較を表5-6に示す。実効線量透過率と同様に、JPKG2022が12%小さい値となった。

表 5-9 実効線量 (実務マニュアル 3.1.3)

放射性同位体を使用する室内の実効線量(μ Sv/週)

遮蔽体 : タングステン6cm

距離 : 0.56m

JPKG2022	3.76E+01
M3.1	4.28E+01
116/M3.1	0.88

※M3.1:実務マニュアル 3.1節 p.3-7

5.1.4 放射線発生装置取扱施設における遮蔽計算例

実務マニュアルの「5.1 診療用リニアック(10MeV)の使用線量の計算例」で使用している利用線錐光子の実効線量透過率と同等なものを JPKG2022 により計算した。線源スペクトルは、MCNP で計算した 10MeV の X 線スペクトルを利用した。遮蔽体は、鉄とコンクリートとした。

なお、放射線発生施設の例題は、新旧の計算の比較としてはあまり適さないことに留意されたい。放射線発生装置の利用線錐又は漏洩線の線源強度が不明である点も比較の障害となっており、適当な例題がなく、ここでの比較結果は一つの参考である。

鉄遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率の比較を表 5-10、表 5-11 に示す。表 5-11 は、光中性子による線量寄与を含む、表 5-10 は、 γ 線による寄与のみの実効線量透過率である。どちらも JPKG2022 が高い結果となり、厚さが増すごとに差が大きくなる。

表 5-10 鉄遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率 (1次 γ のみ)

実効線量透過率(1次 γ)
線源 : 10MeV X線
遮蔽体 : 鉄

厚さ(cm)	①JPKG2022	②実務マニュアル	①/②
1	8.99E-01	8.71E-01	1.03
5	4.42E-01	4.01E-01	1.10
10	1.55E-01	1.33E-01	1.16
20	1.79E-02	1.41E-02	1.27
30	2.04E-03	1.48E-03	1.38
40	2.31E-04	1.56E-04	1.48
50	2.58E-05	1.66E-05	1.55

表 5-11 鉄遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率 (中性子込み)

実効線量透過率(1次 γ +中性子+2次 γ)
線源 : 10MeV X線
遮蔽体 : 鉄

厚さ(cm)	①JPKG2022	②実務マニュアル	①/②	①/1 γ
1	8.99E-01	8.71E-01	1.03	1.00
5	4.42E-01	4.01E-01	1.10	1.00
10	1.55E-01	1.33E-01	1.16	1.00
20	1.79E-02	1.41E-02	1.27	1.00
30	2.06E-03	1.48E-03	1.39	1.01
40	2.41E-04	1.56E-04	1.54	1.05
50	3.40E-05	1.66E-05	2.05	1.32

次に、コンクリート遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率の比較を表 5-12 に示す。コンクリート遮蔽では、光中性子による線量寄与は無視できる。鉄遮蔽と同様に JPKG2022 が高い結果となり、厚さが増すごとに差が大きくなる。

表 5-12 コンクリート遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率

実効線量透過率(1次 γ)

線源 : 10MeV X線

遮蔽体 : コンクリート

厚さ(cm)	①JPKG2022	②実務マニュアル	①/②
1	9.84E-01	9.79E-01	1.01
5	8.77E-01	8.66E-01	1.01
10	7.22E-01	6.94E-01	1.04
20	4.43E-01	4.08E-01	1.09
30	2.61E-01	2.32E-01	1.12
40	1.53E-01	1.32E-01	1.16
50	9.03E-02	7.58E-02	1.19

5.2 QAD-IE マニュアル

「QAD-IE コードマニュアル」²（以下、QAD-IE マニュアル）のサンプル問題の計算結果と JPKG2022 の計算結果を比較した。

5.2.1 サンプル問題 1

サンプル問題 1 は、5.1.2 節と同じ例題である。しかし、線源エネルギーとコンクリート密度が異なる。

5.1.2 節と異なる計算条件と計算結果の比較を表 5-13 に示す。表に示したように既存コードと大きな差異は見られなかった。

表 5-13 QAD-IE サンプル問題 1 の計算結果比較

サンプル問題1			
計算コード	ビルドアップ 算出方法	E(AP) (μ Sv/h)	H*(10)74 (μ Sv/h)
①JPKG2022	AKIMA補間	16.43	19.43
②QAD-CGGP2R	G-P 法	17.17	20.38
③QAD-IE	G-P 法	17.96	21.29
④QAD-IE	3点補間	17.25	20.38
比較	①/②	0.96	0.95
	①/③	0.91	0.91
	①/④	0.95	0.95

原子力安全技術センターのサンプル問題

(⁶⁰Co 線源、 $E_0=1.25\text{MeV}$ 、コンクリート密度 2.30g/cm^3)

5.2.2 サンプル問題 2

サンプル問題 2 は、米国原子力学会の標準問題（廃棄物貯蔵タンク）である。計算結果の比較を表 5-14 に示す。表に示したように既存コードと大きな差異は見られなかった。

表 5-14 QAD-IE サンプル問題 2 の計算結果比較

サンプル問題2			
計算コード	ビルドアップ 算出方法	E(AP) (μ Sv/h)	H*(10)74 (μ Sv/h)
①JPKG2022	AKIMA補間	3.555E+05	4.337E+05
②QAD-CGGP2R	G-P 法	3.554E+05	4.475E+05
③QAD-IE	G-P 法	3.578E+05	4.557E+05
④QAD-IE	3点補間	3.561E+05	4.539E+05
比較	①/②	1.00	0.97
	①/③	0.99	0.95
	①/④	1.00	0.96

米国原子力学会の標準問題（廃棄物貯蔵タンク）

5.3 QAD-CGGP2R 相当コード

QAD-CGGP2R 相当コードである γ Shielder (V.I.C.社製) は、日本原子力学会標準の γ 線ビルドアップ係数³を取り入れている。日本原子力学会標準の γ 線ビルドアップ係数を用いた QAD-CGGP2R 相当コード γ Shielder と JPKG2022 の計算結果を比較した。

5.3.1 鉛遮蔽の例

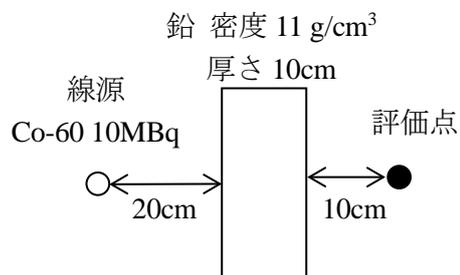
始めに、鉛遮蔽における Co-60 線源の実効線量透過率を γ Shielder と JPKG2022 で計算した。計算結果の比較を表 5-15 に示す。厚さが増すと JPKG2022 の値が高くなっていく傾向が見られる。

表 5-15 実効線量透過率 (Co-60、鉛)

実効線量透過率
線源核種 : Co-60
遮蔽材 : 鉛

厚さ(cm)	①JPKG2022	② γ Shielder	①/②
0.1	9.67E-01	9.65E-01	1.00
0.2	9.34E-01	9.29E-01	1.00
0.3	9.01E-01	8.94E-01	1.01
0.4	8.69E-01	8.60E-01	1.01
0.5	8.38E-01	8.26E-01	1.01
0.7	7.76E-01	7.61E-01	1.02
1	6.76E-01	6.70E-01	1.01
2	4.31E-01	4.24E-01	1.02
3	2.65E-01	2.60E-01	1.02
4	1.59E-01	1.56E-01	1.02
5	9.42E-02	9.17E-02	1.03
6	5.53E-02	5.34E-02	1.04
8	1.86E-02	1.76E-02	1.05
9	1.07E-02	1.00E-02	1.07
10	6.12E-03	5.66E-03	1.08
15	3.62E-04	3.09E-04	1.17
20	2.06E-05	1.59E-05	1.29
25	1.14E-06	7.92E-07	1.44
30	6.29E-08	3.85E-08	1.64

次に、実効線量率の計算例を示す。フード、グローブボックス等で放射性同位体を取り扱う場合に、鉛遮蔽を設置することがある。以下に計算条件を示す。



この計算例を JPKG2022 と γ Shielder と計算して結果を比較した。この計算では鉛遮蔽の厚さを保存して球殻に近似した。計算結果の比較を表 5-16 に示す。JPKG2022 は γ Shielder の 1.08 倍となった。

表 5-16 鉛遮蔽の計算結果比較

実効線量率 (μ Sv/h)

線源核種 : Co-60
 線源強度 : 10MBq
 遮蔽体 : 鉛 10cm
 距離 : 線源から40cm

①JPKG2022	② γ Shielder	①/②
1.17E-01	1.08E-01	1.08

5.3.2 土壌遮蔽の例

始めに、Cs-134 と Cs-137 線源の実効線量率定数、土壌遮蔽における Cs-134 と Cs-137 線源の実効線量透過率を γ Shielder と JPKG2022 で計算した。計算結果の比較を表 5-17、表 5-18 に示す。実効線量率定数は、一致し、実効線量透過率は、ほぼ一致した。

表 5-17 実効線量率定数 (Cs-134、Cs-137)

Cs-134の実効線量率定数(μ Sv/h per 1MBq at 1m)			Cs-137の実効線量率定数(μ Sv/h per 1MBq at 1m)		
①JPKG2022	② γ Shielder	①/②	①JPKG2022	② γ Shielder	①/②
2.11E-01	2.11E-01	1.00	7.76E-02	7.76E-02	1.00

表 5-18 実効線量透過率 (Cs-134、Cs-137、土壌)

実効線量透過率 線源核種 : Cs-134 遮蔽材 : 土壌				実効線量透過率 線源核種 : Cs-137(子孫核種の寄与を含む) 遮蔽材 : 土壌			
厚さ(cm)	①JPKG2022	② γ Shielder	①/②	厚さ(cm)	①JPKG2022	②ICRP74	①/②
5	9.10E-01	9.34E-01	0.97	5	9.01E-01	9.30E-01	0.97
10	7.76E-01	7.87E-01	0.99	10	7.70E-01	7.82E-01	0.98
15	6.11E-01	6.16E-01	0.99	15	6.04E-01	6.09E-01	0.99
20	4.57E-01	4.59E-01	0.99	20	4.48E-01	4.50E-01	0.99
25	3.29E-01	3.31E-01	1.00	25	3.19E-01	3.20E-01	1.00
30	2.31E-01	2.32E-01	0.99	30	2.21E-01	2.22E-01	1.00
35	1.59E-01	1.59E-01	0.99	35	1.50E-01	1.50E-01	1.00
40	1.07E-01	1.08E-01	1.00	40	9.97E-02	1.00E-01	1.00
45	7.19E-02	7.22E-02	1.00	45	6.55E-02	6.56E-02	1.00
50	4.76E-02	4.78E-02	1.00	50	4.25E-02	4.25E-02	1.00
55	3.13E-02	3.14E-02	1.00	55	2.73E-02	2.73E-02	1.00
60	2.04E-02	2.05E-02	1.00	60	1.74E-02	1.74E-02	1.00
65	1.32E-02	1.33E-02	1.00	65	1.10E-02	1.10E-02	1.00
70	8.56E-03	8.59E-03	1.00	70	6.87E-03	6.87E-03	1.00
80	3.54E-03	3.55E-03	1.00	80	2.65E-03	2.65E-03	1.00
90	1.45E-03	1.45E-03	1.00	90	1.01E-03	1.00E-03	1.00
100	5.90E-04	5.93E-04	1.00	100	3.74E-04	3.74E-04	1.00

次に、実効線量率の計算例を示す。汚染土壌等をフレキシブルコンテナバック（通称フレコン）に収納して保管することがある。JPKG2022 を使用することで汚染土壌による自己遮蔽を考慮して実効線量率を算出できる。計算条件を以下に示す。

フレコン内に汚染土壌が 100% 充填された場合のフレコン上面中央の実効線量率を計算する。汚染土壌の寸法は直径 110cm×高さ 110cm、物質は土壌で代表し、密度は 1.5g/cm³ とする。線源は、土壌に均一に分布し、線源濃度は、3000Bq/kg として Cs-134 と Cs-137 が 1 対 1 で存在するものとする。遮蔽体としてフレコンは無視する。

この計算例を JPKG2022 と γ Shielder と計算して結果を比較した。計算結果の比較を表 5-19 に示す。実効線量率は、ほぼ一致した。

表 5-19 土壌遮蔽の計算結果比較

フレコン上面中央の実効線量率 (μ Sv/h)		
①JPKG2022	② γ Shielder	①/②
8.40E-01	8.66E-01	0.97

5.4 一括と個別計算の比較

本作業で作成した JPKG2022 は、複数核種、複数線源に対応している。JPKG2022 で一括計算と個別計算を行って差異がないことを確認した。

5.4.1 複数核種の例

複数核種の計算条件と計算結果の比較を表 5-20 に示す。一括計算と個別計算の計算結果は一致した。

表 5-18 複数核種の計算結果比較

実効線量率 (μ S/h)	
線源強度	: 各核種 1MBq
遮蔽体	: アルミ 10cm
距離	: 線源から 40cm
Co-60個別計算	1.1085E+00
Cs-134個別計算	7.2336E-01
Cs-137個別計算	2.6218E-01
個別計算合計	2.0940E+00
3核種一括計算	2.0940E+00

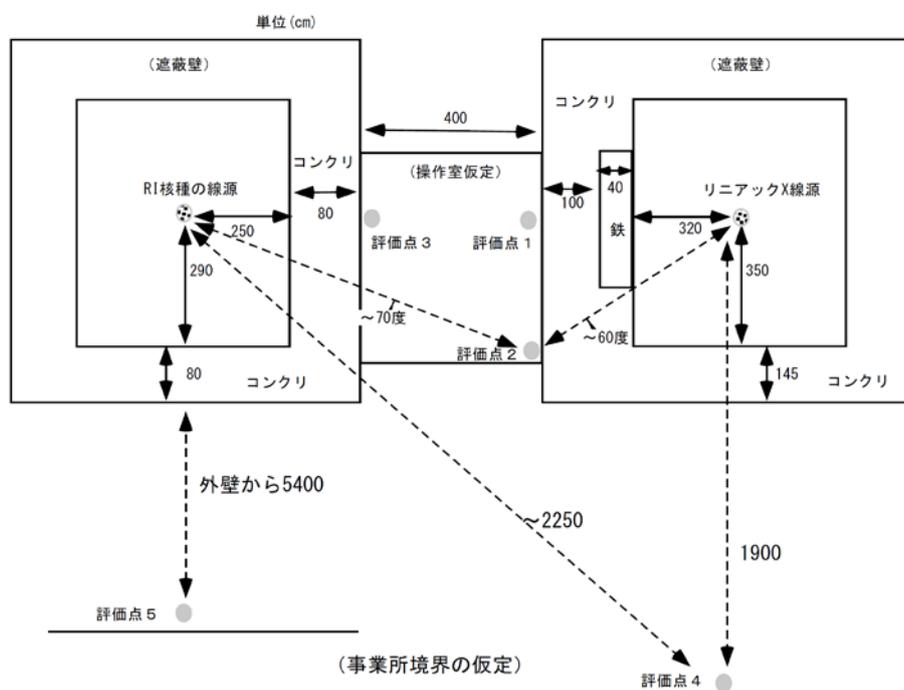
5.4.2 複数線源の例

複数線源の計算条件を以下に示す。

計算条件

線源	RI 核種の線源：Ir-192、1MBq リニアック X 線源：10MeV、1M 光子/秒
遮蔽	RI 核種の線源の遮蔽壁：コンクリート（80cm） リニアック X 線源の遮蔽壁：コンクリート（最大 145cm）、鉄遮蔽無し
評価点	評価点 1：リニアック X 線源からの距離 460cm 評価点 2：リニアック X 線源からの距離 532cm 評価点 3：RI 核種の線源からの距離 330cm 評価点 4：リニアック X 線源からの距離 1900cm 評価点 5：RI 核種の線源からの距離 5770cm

平面図を以下に示す。



※RI 核種の線源を原点、→を X+、↑を Y+とする。

計算結果の比較を表 5-21 に示す。一括計算と個別計算の計算結果は一致した。

表 5-19 複数線源の計算結果比較

実効線量率($\mu\text{Sv/h}$)

評価点	個別計算 Ir-192	個別計算 X線源	個別計算 合計	一括計算 Ir-192+X線源
評価点1	4.4879E-08	9.3280E-06	9.3729E-06	9.3729E-06
評価点2	1.7768E-08	2.4302E-06	2.4480E-06	2.4479E-06
評価点3	2.2756E-07	2.6409E-06	2.8685E-06	2.8685E-06
評価点4	4.5907E-10	3.3242E-08	3.3701E-08	3.3701E-08
評価点5	4.4145E-10	4.1186E-07	4.1230E-07	4.1230E-07

参考文献

- ¹ 「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
- ² 「QAD-IE コードマニュアル」、(株)原子力安全システム研究所、平成 18 年 5 月 22 日
- ³ 「 γ 線ビルドアップ係数：2013」、一般社団法人日本原子力学会、2013 年 12 月