

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

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」の成果をとりまとめたものです。

目 次

1	事業の概要	
1.1	事業の目的	1
1.2	実施項目	2
1.3	実施体制	3
1.4	実施期間	4
2	遮蔽線量評価への新勧告取入れに係る海外対応調査	
2.1	海外の規制利用コードの対応状況調査	4
2.1.1	調査手順	4
2.1.2	調査対象の規制利用コード選定	4
2.1.3	規制利用コードの技術仕様の整理と受容性評価	5
2.1.4	受容性評価の確認と質疑対応	6
2.2	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	6
2.2.1	調査手順	6
2.2.2	調査票の作成と送付先	7
2.2.3	調査票の回答状況と今後の予定	7
2.3	本事業で開発する遮蔽計算コードの仕様・機能の決定	7
	参考文献	10
3	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	
3.1	遮蔽線量計算法及び使用データの見直し検討項目	11
3.2	遮蔽線量計算用データの作成手順	12
3.2.1	遮蔽材料の選定と組成・密度データ	12
3.2.2	計算する線量種類の選定	14
3.2.3	遮蔽線量計算用データベースのテーブル設計	16
3.2.4	遮蔽材料の減衰係数算出	17
3.2.5	遮蔽材料のビルドアップ係数算出	18
3.3	作成した遮蔽線量計算用データの例示	20
3.3.1	係数データベース構成管理ファイル	20
3.3.2	減衰係数データファイル	21
3.3.3	線量換算係数データファイル	26
3.3.4	ビルドアップ係数データファイル	29
	参考文献	33
4	新勧告を踏まえた遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究	
4.1	遮蔽線量評価法の適用性拡張検討項目	34
4.2	高エネルギー領域への範囲拡張対応	34
4.2.1	範囲拡張の背景	34
4.2.2	範囲拡張対応の考え方	35
4.2.3	光中性子線量ビルドアップ係数の定義について	36
4.2.4	減衰係数の算出で考慮するガンマ線の相互作用について	36
4.2.5	試算の結果、及び今後の検討事項	36
4.3	新勧告を反映した簡易遮蔽線量計算コードの開発	38
4.3.1	コードの開発目的、及び基本仕様・機能	38
4.3.2	コードの開発項目、及び進捗状況	38
4.3.3	コードの操作画面、及び基本的な操作イメージ	40

4.3.4	コードの基本設計.....	42
4.3.5	入出力フォーマット検討	43
4.3.6	計算結果の妥当性検証.....	48
	参考文献.....	52
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.....	53
5.2	研究レビュー委員会.....	54
5.2.1	委員会趣旨と委員構成.....	54
5.2.2	開催実績と議事.....	55
5.3	成果発表.....	56
5.4	人材育成活動.....	56
6	まとめ.....	59

付 録

- ・付録Ⅰ 海外規制利用コードの技術仕様と本事業への受容性評価一覧
- ・付録Ⅱ 海外規制利用コードのV&V検証項目と本事業への受容性評価一覧
- ・付録Ⅲ 遮蔽線量計算法の見直し提案に係る確認事項と研究レビュー委員会意見
- ・付録Ⅳ ガンマ線遮蔽計算コードの新勧告対応に係る海外実態調査で用いた調査票
- ・付録Ⅴ 新勧告取入れで求められる遮蔽計算法・計算コードの仕様・機能一覧
- ・付録Ⅵ 組込材料の組成・密度の決定根拠
- ・付録Ⅶ 遮蔽線量計算用データベースのテーブル設計
- ・付録Ⅷ ガンマ線ビルドアップ係数 (BF-g) の作成例 (鉄、及び鉛)
- ・付録Ⅸ 光中性子ビルドアップ係数 (BF-n) の作成例 (鉄、及び鉛)
- ・付録Ⅹ ガンマ線遮蔽線量計算コードの基本設計内容
- ・付録Ⅺ 成果発表資料 (日本原子力学会 2021 年春の年会)

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、事業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旨とするとともに、一方で安全審査において事業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、代表的なベンチマーク問題に対して、海外の同種コード及びモンテカルロ法シミュレーション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、2020年（令和2年）度は次に示す項目を実施する。なお、ICRP2007年勧告を含む、放射線遮蔽線量の安全評価に係る最新の勧告を総称して「新勧告」と呼ぶこととする。

(1) 遮蔽線量評価への新勧告取入れに係る海外対応調査

海外で規制利用される代表的な γ 線遮蔽計算コードとその計算法の妥当性を示す資料を購入して、最新の遮蔽線量計算における新勧告対応状況を調査する。また、海外の遮蔽安全評価に係る専門家に対するアンケート調査を通じて、施設・機器の遮蔽安全評価に新勧告がどのように反映されているか実態調査を行う。調査結果をまとめて、本事業で実施する新勧告による見直しの範囲と方針を提案するとともに、見直しの課題を整理する。

(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

(1)の調査結果を踏まえて、国内で利用される遮蔽線量評価法に対して、新勧告取入れによる見直し手順を検討する。新勧告による変更点を整理して、遮蔽線量評価法と使用データの見直し項目を決定し、個別に見直しの手法とその妥当性の確認の仕方を提案する。この提案に基づき、新勧告取入れで見直しを要する遮蔽線量計算用データを外注作業により効率的に整備する。

(3) 遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究

新勧告の取入れによる線量評価の範囲拡大に対応するため、 γ 線遮蔽計算法の適用性拡張を検討する。この検討に基づき、実際に適用性を拡張した点減衰核積分法コー

ドを効率的に開発するため、外注作業を実施する。なお、コード開発は次年度に引き継がれ、最終的に開発したコードを用いて(2)で整備した新しいデータに基づく遮蔽計算を実施し、(1)で購入した最新の海外規制利用コード等の結果と比較して、遮蔽線量評価法の見直し手順を検証する予定である。

(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)に関する成果を報告する。また、日本原子力学会において成果の発表を行う。

(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。）及びPO補佐に対し、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・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た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。

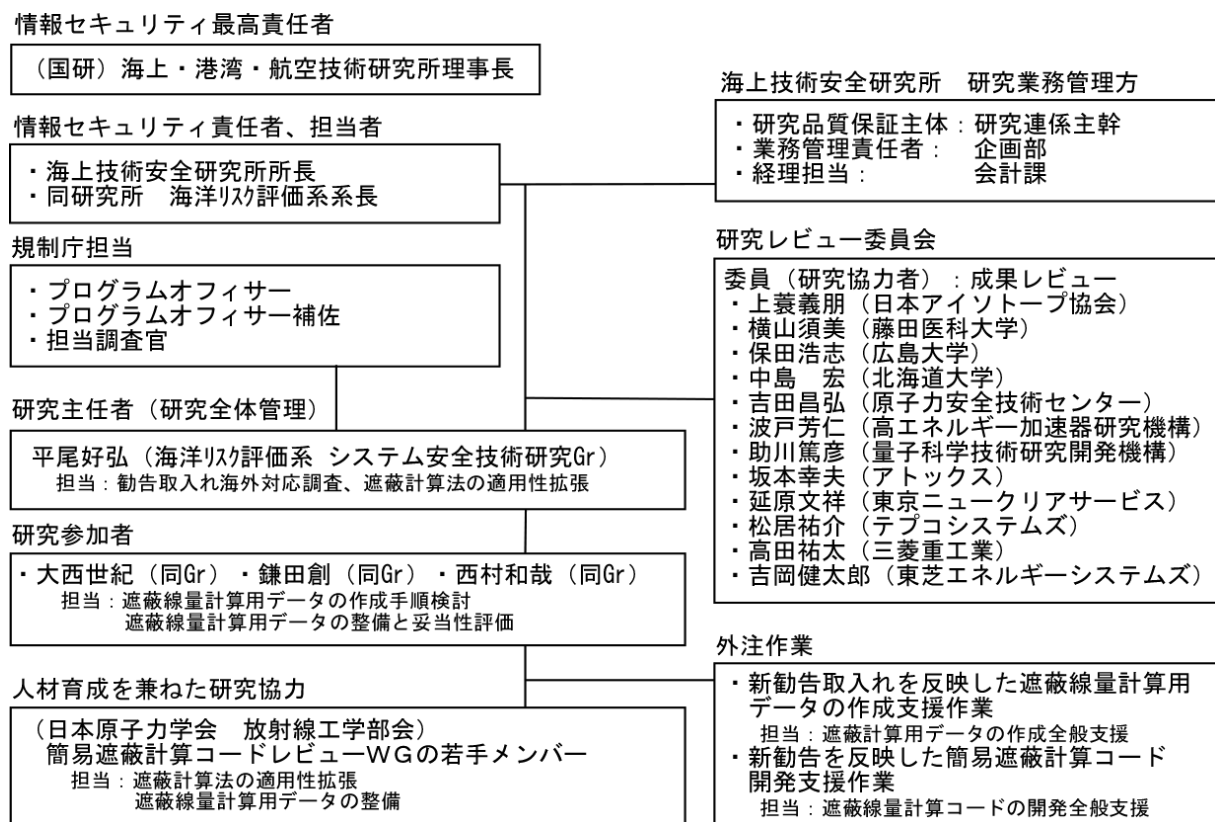


図 1-1 事業実施体制

事業を実施する機関と事業代表者（図1-1の研究主任者）は下記のとおりである。

<事業実施機関名>

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

<事業代表者名>

平尾 好弘（国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所 海洋リスク評価系
システム安全技術研究グループ 上席研究員）

1.4 実施期間

全体の事業期間は、2020年（令和2年）度から2021年（令和3年）度までの2年である。表1-1に2020年度の年間事業スケジュールを示す。

表 1-1 年間事業スケジュール（2020年度）

実施項目	令和2年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
(1) 遮蔽線量評価への新勧告取入れに係る海外対応調査	<p style="text-align: center;">←—————→</p> <p style="text-align: center;">海外の規制利用コードの対応状況調査</p> <p style="text-align: center;">←—————→</p> <p style="text-align: center;">海外の専門家ヒアリングによる実態調査</p> <p style="text-align: right;">☆調査結果報告</p>			
(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	<p style="text-align: center;">←—————→ 遮蔽計算法の見直し範囲決定</p> <p style="text-align: center;">←—————→</p> <p style="text-align: center;">見直し手順の検討</p> <p style="text-align: center;">見直し手順の確立☆</p> <p style="text-align: center;">←—————→</p> <p>新勧告取入れを反映した遮蔽計算用データの作成（外注）</p>			
(3) 新勧告を踏まえた遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究	<p style="text-align: center;">←—————→</p> <p style="text-align: center;">遮蔽線量評価法の適用性拡張研究</p> <p style="text-align: center;">←—————→</p> <p>新勧告を反映した簡易遮蔽計算コードの開発（外注）</p>			
(4)及び(5) 成果公表、事業進捗管理等	<p>研究班会議 ☆ ☆ ☆ ☆ ☆ ☆</p> <p>(各月末に月報送付) 年次報告会 ☆</p> <p style="text-align: right;">学会発表☆</p> <p style="text-align: center;">研究レビュー委員会 ☆ ☆</p>			

2 遮蔽線量評価への新勧告取入れに係る海外対応調査

海外の原子力主要国で規制利用されている γ 線遮蔽線量計算について、新勧告、あるいは最新の知見の対応状況を、次の調査によって明らかにし、その結果を踏まえて本事業において適切と考えられる遮蔽線量評価法の見直し範囲を決定する。

- ・海外の規制利用コードの対応状況調査
- ・専門家のヒアリングによる実態調査

本事業では、次章以降、本章で決定した見直し範囲に基づいて、遮蔽線量評価法の拡張、及び新勧告に対応した遮蔽計算用データと計算コードの開発を行う。

2.1 海外の規制利用コードの対応状況調査

2.1.1 調査手順

海外で規制利用される γ 線遮蔽線量計算コードを選定して、技術仕様・機能、及びV&V検証項目を調査して、本事業にとって適切と考えられる遮蔽線量計算法の見直し範囲を決定する。調査手順は次のとおり。

- ・調査対象となる海外の規制利用コードの選定
- ・選定コードの技術仕様・機能の整理と本事業における受容性評価
- ・選定コードに対するV&V検証項目の整理と本事業における受容性評価
- ・研究協力者らによる受容性評価結果の確認
- ・以上を踏まえて、本事業で実施する遮蔽線量計算法の見直し範囲の決定

2.1.2 調査対象の規制利用コード選定

調査対象とする海外の規制利用コードを選定する。

表 2-1 に、原子力主要国で許認可利用実績のある γ 線遮蔽線量計算コードシステムの例を示す。多くは商用ライセンスとなって更新が継続されており、開発元のサポートを受けられる状況にある。なかでもアメリカのMicroShield[2-1]は、提供する遮蔽計算コードの信頼性・妥当性を示すためのV&Vパッケージソフトを併売しており、遮蔽計算に対するV&Vの検証項目と方法を調査することが可能である。また、2020年8月に最新のMicroShield Pro Version 12 がリリースされたばかりであり、遮蔽計算に対する新勧告対応等の状況を知るのに好適である。以上をふまえて、MicroShield Pro とそのV&Vパッケージソフトを調査対象に選定した。

2.1.3 規制利用コードの技術仕様の整理と受容性評価

MicroShield Pro は、 γ 線の遮蔽計算を実行するプログラムだけでなく、入力の作成を容易にし、また出力を分かりやすく表示するためのグラフィカルなユーザサポートツールを備えた統合的なシステムソフトウェアである。

まず、MicroShield Pro のマニュアルを参照して、入力の作成、出力の内容、及びサポートツールの機能について技術仕様（あるいは機能）を調査した。

次に、各技術仕様に対して、本事業の目的である新勧告対応、及び期待される技術レベルの観点から、本事業で見直しを検討する遮蔽線量計算法（遮蔽線量計算用データを含む。）の仕様として適切かどうかの受容性評価を行った。最後に、受容性が比較的高く評価された仕様に対して、遮蔽計算コード開発のポイントを考察した。

付録 I に、MicroShield Pro の技術仕様、受容性評価、及び計算コード開発のポイントを並べた一覧表を示す。表中、受容性評価の結果を示す記号の意味は次のとおりである。

（本事業への受容性評価の結果を表す記号の意味）

- ： MicroShield Pro に実装された当該仕様について、本事業で見直す遮蔽計算法の範囲に含めるか、または遮蔽計算コードの開発項目として採用する。
- △： 部分的に採用する。場合によっては、部分的に修正して採用する。
- ×： 不採用、または優先度が低い。場合によっては、仕様の新設を要する。

△または×の評価が付いた仕様については、付録 I の一覧表中「仕様の技術評価コメント」列に評価の事由を示すとともに、「コード開発ポイント」列に仕様の修正、あるいは仕様の新設の考え方を記載した。

表 2-1 ガンマ線遮蔽計算評価を行うための海外規制利用コードの例

コード・ソフトウェア名称	開発国	最終更新・文献発表年	配布状況（開発元）	妥当性確認状況
MicroShield[2-1]	アメリカ	2020 年	商用（Grove Software）	開発元による V&V 資料及び V&V パッケージソフト提供
RANKERN[2-2]	イギリス	2016 年	商用（The ANSWERS Software）	開発元による V&V 資料
NARMER-1[2-3]（MERCURE-6 [2-4]の後継）	フランス	2017 年	不明（フランス原子力庁 CEA）	開発元による V&V 資料

2.1.3 規制利用コードに対する V&V 検証項目の整理と受容性評価

MicroShield V&V Package は、MicroShield Pro の V&V を実施する独立したモジュールの実行と、その結果をまとめた V&V レポートの作成をサポートするツールを集めたパッケージソフトである。MicroShield Pro とは独立して販売されているが、計算結果の妥当性を証明することが求められる場面、例えば許認可に係る遮蔽安全評価にとっては不可欠のツールと考えられる。

まず、MicroShield V&V Package のマニュアルを参照して、V&V の検証項目とその目的、及び検証方法について仕様調査を行った。次に、各検証項目について、本事業の目的である新勧告対応、及び期待される検証レベルの観点から、本事業で見直しを

検討する遮蔽計算法（遮蔽計算用データを含む。）の仕様として適切かどうかの受容性評価を行った。最後に、受容性が比較的高く評価された仕様に対して、V&Vのポイントを考察した。

付録Ⅱに、MicroShield V&V Package の検証項目と目的、検証方法、本事業への受容性評価、V&V のポイントを並べた一覧表を示す。表中、受容性評価の結果を示す記号の意味は次のとおりである。

（本事業への受容性評価の結果を表す記号の意味）

- ： MicroShield V&V Package に実装された当該検証項目を、本事業で見直す遮蔽計算法、または開発する遮蔽計算コードに対して実施する。
- △： 部分的に実施する。場合によっては、部分的に検証方法を修正して実施する。
- ×： 検証不要、または優先度が低い。場合によっては、別の検証方法を要する。

△と×の評価を付けた検証項目については、付録Ⅱの一覧表中、「本事業で実施するV&Vのポイント」列に評価の事由を示すとともに、検証方法に修正が必要な場合はその考え方を記載した。

2.1.4 受容性評価結果の確認と質疑対応

以上の調査をもとに、本事業で見直すべき遮蔽計算法の技術仕様について検討を重ねたところ、より広い見地から外部専門家の意見を取り入れて判断すべき事項が明らかになった。そこで、それらを確認事項として整理し、第一回研究レビュー委員会を開催して研究協力者らに諮問を行った。

付録Ⅲに、確認事項とその解説、及び研究協力者らから得られた回答とコメントを示す。これらの回答とコメントについて、委員会の後でメールを通じて審議を行い、確認事項に係る仕様受容の考え方について検討した。それらも付録Ⅲに併せて記載した。

本事業で検討する遮蔽計算法の見直し範囲は、基本的に本節の調査の成果に基づいて決定された（2.3節参照）。

2.2 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

2.2.1 調査手順

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踏まえて、本事業で検討する遮蔽計算法の見直し範囲を修正することである。この調査の位置付けは、2.1節で示したコード仕様調査を基本に、現場の意見を盛り込むための補足である。

本調査は、2020年9月にアメリカシアトルで開催する予定の放射線遮蔽国際会議(ICRS14/RPSD2020)において、参加者ら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ウィルス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り、それに回答をもらう形でヒアリングを行うこととした。

2.2.2 調査票の作成と送付先

付録Ⅳに、作成したアンケート調査票を添付する。内容について、本事業で調査を行う目的を述べた後、4問の質問文を与えた。各質問の要点は下記のとおりである。

- Q1 施設・機器の許認可申請で提出されるγ線の遮蔽安全解析において、点減衰核法コードが用いられる事例があるか。
- Q2 提出された遮蔽安全解析を審査する場合、点減衰核法コードを用いて妥当性をチェックする事例があるか。もしあるなら、何という計算コードを使用しているか。また、どのような手順で審査しているか。それに関するガイダンスはあるか。
- Q3 その点減衰核法コードで使用されるデータ/パラメータは、最新の国際的な勧告事項に準拠しているか。最新勧告の例：ICRP 116、ICRP 107、ICRU/ICRP 共同レポート。
- Q4 遮蔽解析の安全審査において、あれば便利と思われる点減衰核法コードの仕様や機能があるか。

調査票の送付先として、研究代表者らが係る国際原子力機関（IAEA）の輸送安全基準委員会（TRANSSC）に参加する主要国の規制担当者から選定した。付録Ⅳの末尾に送付先を記載する。

2.2.3 調査票の回答状況と今後の予定

調査票を送付した直後、アメリカを含む送付先から、質問の明確化を求める返信があったが、正式な回答は現在まで得られていない。次年度、送付先の担当者らと深い面識のある研究参加者を通じて、簡潔に催促を行う予定である。

ただし、調査票を受け取った担当者がその内容について関心をもたないケースも考えられるため、次年度に延期された遮蔽国際会議に参加して、可能な範囲で参加者へのヒアリングを行い、実態の把握に努める計画である。

2.3 本事業で開発する遮蔽計算コードの仕様・機能の決定

2.1節で示したアメリカの規制利用コードの仕様調査で得られた成果のリストは下記のとおりである。

- ・（付録Ⅰ）海外規制利用コードの技術仕様に対する受容性評価一覧
- ・（付録Ⅱ）海外規制利用コードのV&V検証項目と本事業への受容性評価一覧
- ・（付録Ⅲ）遮蔽線量計算法の見直し提案に係る確認事項と研究レビュー委員会意見

- ・ (付録V) 新勧告取入れで求められる遮蔽計算法・計算コードの仕様・機能一覧

付録Ⅰ、付録Ⅱ、及び付録Ⅲの成果に基づき、本事業で検討する遮蔽計算法の見直し範囲を決定した。付録Ⅴに、その見直し範囲を含む、新勧告取入れで求められる遮蔽計算法・計算コードの基本的な仕様・機能の一覧を示す。遮蔽計算法の拡張が必要な所は、一覧の該当する仕様にそのことを記載した。ただし、2.2節で示したように、次年度に実施予定の補足的な実態調査の結果次第で、付録Ⅴの一覧表を部分的に改訂する可能性がある。

表 2-2 に、付録Ⅴの一覧表を見やすく 1 ページに縮約して示す。表中の太字は、国内で従来利用されてきたガンマ線遮蔽線量計算コード (QAD 系) で対応していなかった新設仕様を表す。

次章以降、一覧表の内容に従って、遮蔽計算用データを見直すための手順を検討し、また実用性の高い遮蔽計算用データを実際に作成する (3 章参照)。並行して、遮蔽計算法の適用性拡張を検討し、それらの成果を取り入れた新勧告対応のガンマ線遮蔽計算コードを開発する (4 章参照)。

次年度、遮蔽計算用データ及び計算コードの開発が一通り完了した段階で、付録Ⅱに示したとおり、受容性が比較的高く評価された V & V 検証項目に対して、開発した計算コードの V & V を実施する予定である。

表 2-2 新勧告対応の遮蔽計算コードに期待される基本的な仕様・機能の一覧（縮約）

大項目	中項目	概要	GUIサポートツール
動作・開発環境	プラットフォーム、言語等	WindowsPC、オンプロミス設計、OpenMP対応、C系言語	
計算入力作成 ・遮蔽体系 (評価点含む) ・材料情報 ・線源情報	遮蔽体系入力	体系要素(線源・遮蔽体・線量評価点)の形状と座標を定義し、各要素に線源情報と材料情報を割り当てる。 CGによる形状設定	
	材料情報入力	体系要素の空間投影図を対話的に表示しながら入力 体積線源・遮蔽体に割り当てる材料情報(組成、密度、減弱係数、ビルドアップ係数(制動放射含む))を定義する。 任意組成のカスタム材料を定義して、材料情報を生成 線源情報(RI核種、エネルギー毎放出率)を直接入力 体系の投影図表示 組込材料データ作成 カスタム材料データ作成 線源データ作成	
各入力データは、個別にファイルで管理、再利用可能とする。	線源情報入力	またはRI核種ライブラリから選択参照して読込む。 体積線源のメッシュ分割手法の選択 (ガウス積分等 の採用)	RI核種インポート
	遮蔽計算プロセス	ビルドアップ係数レファレンス材料選択 透過線に存在する遮蔽体を、線源と線量評価点の間に引いた透過線上に存在する遮蔽体の中から選択する。 異なる遮蔽体を選択した場合の結果比較等。 透過線上に存在する体系要素の情報を表示して、要素の位置関係や、材料情報が想定どおりか確認する。 透過線の通過領域情報	
計算出力表示	遮蔽計算法の適用性拡張	・ 高エネルギーガンマ線に対応 (光中性子の寄与考慮) ・ 特定の二重層遮蔽に対応 ・ スラブ遮蔽の斜め透過に対応 非衝突線フルエンス、各線量種類の出力、 計算に用いたデータや、コードが生成した情報の表示・可視化	関係するデータの作成
	計算出力のサマリー		グラフ化、可視化

※太字は、従来の QAD 系の遮蔽計算コードでは対応していない新設仕様

参考文献

- [2-1] Grove Software, MicroShield® Pro, <https://radiationsoftware.com/microshield>.
- [2-2] A. Bird, C. Murphy and G. Dobson "Release of RANKERN16A" 13th International Conference on Radiation Shielding (ICRS-13) & 19th Topical Meeting of the Radiation Protection & Shielding Division of the American Nuclear Society (RPSD-2016), Paris, France (Oct. 2016).
- [2-3] T. Visonneau, L. Pangault, F. Malouch, F. Malvagi and F. Dolci, "NARMER-1: a photon point-kernel code with build-up factors," EPJ Web of conferences, 153, 06028 (2017).
- [2-4] C. Suteau and M. Chiron, "Improvement of MERCURE-6 general formalism for calculating gamma-ray build-up factors in multilayer shields," Nucl. Sci. Eng., 147, 43-55 (2004).

3 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

3.1 遮蔽線量評価法及び使用データの見直し検討項目

2章で実施した調査の結果、本事業で検討する遮蔽線量評価法の見直し範囲、及び本事業で開発する遮蔽計算コードの基本的な仕様・機能を、付録Vに示すとおり、決定した(2.3節参照)。

付録Vまたは表2-2を参照して、遮蔽線量計算用(使用)データの見直しを検討すべき事項を特定した。表3-1に、本事業で求められる使用データの見直し・拡充項目をまとめて示す。次節から、各項目の概要とこれまでの検討状況について述べる。同表の最右列に、各項目について記載した本報告書の該当する章節項を示す。

表3-1 新勧告対応で期待される遮蔽線量計算用データの見直し・拡充項目

検討項目	研究内容	関係章節項
遮蔽材料の遮蔽計算用データ整備 (ICRP Pub.116の線量換算係数に対応)	・遮蔽材料の選定	3.2.1
	・各材料の組成・密度の見直し、根拠整備	3.2.3
	・各材料の減衰係数を最新ライブラリから整備	3.2.4
	・各材料のビルドアップ係数を線量種類毎に計算で整備(下記の最新線量換算係数を使用)	3.2.5 3.3.2
		3.3.4
計算する線量種類 (線束から各線量種類への換算係数データ整備)	・実効線量(ICRP 116, 照射体系6種) ・皮膚等価線量(ICRP 116, AP照射、男女別) ・眼の水晶体等価線量(ICRP116, AP照射) →実用量Hp3の考慮(レビュー委員会の要請) ・空気カーマ率(ICRP74, 10MeVまで)	3.2.2 3.3.3 5.2.2
RI核種ライブラリから線源データ利用	・ICRP 107(DECDC2)等、代表的ライブラリからRI核種を選択してイールドデータを参照 ・ユーザが核種を追加可能なデータベース設計	4.3.2 4.3.4 4.3.5
ユーザ定義の遮蔽材(カスタム材料)に対する遮蔽線量計算用データの生成	・材料密度、実効原子番号から減衰係数を生成 ・実効原子番号等からビルドアップ係数を補間生成	次年度検討
高エネルギーγ線への対応	・高エネルギーガンマ線(<30MeV)に対応 ・光核反応による光中性子の線量寄与を考慮 線量寄与を表すデータの扱い方を検討	3.2.5 3.3 4.2
特定の二重層遮蔽対応	コンクリートと鉄板等、特定の頻出材料を重ねた二重層遮蔽体の透過線量を計算する。	次年度検討

スラブ遮蔽に対する斜め透過線量計算	スラブ遮蔽体に対して、従来の垂直入射だけでなく、斜めに透過する場合の線量を計算する。	次年度検討
計算結果のレポート、比較サマリー表	<ul style="list-style-type: none"> ・旧勧告に基づく計算値の参考提示 ・施設別・被ばく状況別の線量限度（参照線量）の表示 ・計算結果のグラフ化、2次元・3次元可視化 	次年度検討 4.3.2 4.3.3 4.3.5

3.2 遮蔽線量計算用データの作成手順

3.2.1 遮蔽材料の選定と組成・密度データ

γ 線の簡易遮蔽計算一般において、遮蔽体（媒質）として用いられる材料の定義には、組込材料とカスタム材料（または混合材料）という二つの考え方がある。組込材料とは、計算に必要な材料の特性値データ（減衰係数、ビルドアップ係数（以下、BFと呼ぶ。）等）を、モンテカルロ法コード等を用いて外部で高精度に決定した材料を指す。一方、カスタム材料とは、材料の実効原子番号、密度及び組成データをもとに、特性値データを近似的に推定した材料を指す。

全ての材料を組込材料として高精度の特性値データを整備するコストは高いため、カスタム材料を定義できるメリットは大きく、特性値が近似であっても、適用性に注意して用いれば実用的である。

ここでは、本事業で整備する組込材料の候補を選定する。表 3-2 に実務マニュアルデータ集[3-1]と AESJ BF 標準[3-2]で BF 値が整備された材料リスト、及び各材料に対する組込みの優先度を示す。なお、アメリカの標準 ANSI/ANS-6.4.3[3-3]で整備された材料は、AESJ BF 標準でカバーされている。材料リストから組込材料の優先度を次のように判定した。

- 優先度高
 - 国内で標準的に参照される実務マニュアルデータ集に掲載された材料
 - ANSI/ANS-6.4.3 で複合組成として特別に掲載された材料。
 - 研究担当者・協力者のヒアリングに基づき、重要と考えられる材料
- 優先度中
 - 遮蔽計算で使用実績がある材料

検討の結果、組込優先度の高及び中の材料を整備することに決定した。また、掲載されていない重要な混合材料として、ポリエチレン、土壌、ステンレスを加えることとした。表 3-3 に、本事業で優先的に整備する組込材料のリストを示す。これらは、特に実用性の高い材料と考えられる。

表 3-2 に示した組込材料に対して、遮蔽評価の使用実績または保守性の観点から適当と考えられる組成と密度を検討した。付録 VI に、組込材料に対する組成と密度の決定根拠をまとめて示す。

表 3-2 ビルドアップ係数値が整備された標準・マニュアルの材料リスト

元素/ 混合物	物質名または記 号	組込優先度	実務マニュアル データ集 2015	AESJ BF 標準
元素	Be		-	○
	B		-	○
	C	中	-	○
	N		-	○
	O		-	○
	Na		-	○
	Mg		-	○
	Al	中	-	○
	Si		-	○
	P		-	○
	S		-	○
	Ar		-	○
	K		-	○
	Ca		-	○
	Fe	高	○	○
	Cu	中	-	○
	Rb		-	○
	Mo		-	○
	Sn		-	○
	La		-	○
	Gd		-	○
	W	高	○	○
	Pb	高	○	○
	Bi		-	○
	U		-	○
混合物	空気	高	○	○
	コンクリート	高	○	○
	水	高	○	○
	鉛ガラス (パイレ ックスガラス)	高	○	-
	アクリル樹脂	高	○	-

表 3-3 本事業で優先的に整備する組込材料リスト

連番	物質名	密度(g/cm ³)	組成等出典	備考
1	炭素	2.2	理科年表	
2	アルミニウム	2.7	理科年表	
3	鉄	7.8	鉄 100%	密度は推奨値の一つ。不純物を考慮して保守的に設定
4	銅	8.9	銅 100%	同上
5	鉛	11	Sb 等、断面積の大きい不純物を考慮	同上
6	タングステン	19	理科年表	
7	空気	1.205×10 ⁻³	NIST	ANSI/ANS-6.4.3,NBS-29 に準ずる
8	水	1.0	実務マニュアル	
9	コンクリート-ANL	2.1	ANL-5800	後で選択する可能性あり
10	コンクリート-Si 系	2.1	AESJ-CONC 標準案	
11	コンクリート-Ca 系	2.1	AESJ-CONC 標準案	
12	コンクリート-NBS	2.1	NBS29 密度変更	
13	鉛ガラス	2.23	実務マニュアル	
14	アクリル樹脂	1.19	実務マニュアル	
15	ポリエチレン	0.92	ANSI/ANS-6.4.3	高密度
16	土壌	1.5 (暫定)	ANSI/ANS-6.4.3 Sand (暫定)	組成調査中 次年度決定
17	ステンレス SUS304	(調査中)	(調査中)	委員会意見で追加 次年度決定

3.2.2 計算する線量種類の選定

ICRP Pub.116 に記載された外部被ばく線量換算係数について。実効線量及び眼の水晶体吸収線量は男女共通モデルであり、それ以外の各臓器・組織に対する換算係数は男女別に整備されている。照射体系について、実効線量は 6 体系 (AP、PA、LLAT、RLAT、ROT、ISO)、それ以外の線量は 5 体系 (AP、PA、LAT、ROT、ISO) の係数がそれぞれ与えられている。

表 3-4 に、検討の結果、選定した計算線量の種類を示す。

表 3-4 本事業で計算する線量種類

線量種類	照射体系	性別	換算係数の出典
実効線量	AP, PA, LLAT, RLAT, ROT, ISO	—	ICRP Pub.116
眼の水晶体等価線量	AP	—	ICRP Pub.116
皮膚等価線量	AP	男性、女性	ICRP Pub.116
空気カーマ	—	—	ICRP Pub.74 (ICRU Report 57)
3mm 線量当量, Hp(3)	—	—	

選定の主な理由は、下記のとおりである。

- 実効線量
 - 法令上要求される線量種類であり、全ての照射体系の中で最も保守的な線量を与える AP は不可欠である。
 - 事故時または緊急時対応等で、被ばくシナリオに即した照射体系で現実的な被ばく評価を求められるケースが考えられる。さらに、全身への確率的影響を表す実効線量の防護における重要性を考慮して、全ての照射体系に対する実効線量を出力に含める。
- 皮膚等価線量
 - 局所被ばくによる組織影響を表す線量種類であり、法令上要求されるケースがある。その場合、保守的な照射体系である AP が用いられる。
 - ICRP Pub.116 の該当する換算係数は男女別で分けて与えられる。特にいずれかを選択する理由はないため、両方とも出力に含める。
- 眼の水晶体等価線量
 - 上記の皮膚等価線量と同様の理由で、AP 体系の等価線量を出力に含める。
 - 新勧告により線量基準が実効線量限度と同レベルに引き下げられることから、簡易的な評価の重要性が見込まれる。
- 3mm 線量当量 (Hp(3))
 - 眼の水晶体に関する外部被ばく線量評価の明確化のため、研究レビュー委員会の委員から国内外の動向と線量限度引き下げに係る講演を賜った。討議の結果、計算する線量種類に Hp(3)を追加することとなった (5.2 節参照)。
- 空気カーマ
 - 空気カーマは、測定利用の観点から、照射線量より重要性が高まっており、むしろ空気カーマや空気吸収線量をもとに照射線量を算出する傾向にある。
 - 換算係数について、ICRU Report 57 から同 90 にかけて見直しが行われてきたが、計算で使用可能な数表の改訂は与えられていない。本事業では改訂表を作成することはせず、ICRU Report 57 に記載された値を用いる。これは、現行法令のベースである ICRP Pub.74 に記載された係数と同等である。

- 整備から外した線量種類
 - 照射線量
 - ◇ 過去に実測で使用された経緯から整備されてきたが、昨今、照射線量を算出する機会は殆どなく、もし算出されるとしても過去の実験値の再現を目的とする例が多い。よって、照射線量から空気カーマへの換算式を用いて、外部で照射線量を算出することで十分と考えられる。
 - 1cm 線量当量
 - ◇ 防護で使用する機会は限られること、また防護量と実用量を一緒にして見直す ICRU/ICRP 共同レポート¹が発行されたら、将来的に線量概念が整理される可能性があるため。
 - エネルギー吸収線量
 - ◇ 照射線量同様、現状でニーズは殆どないと考えられる。もし計算する場合でも、エネルギー吸収断面積に変更がない限り、線量算出に必要なデータを見直す必要はなく、既存のデータを踏襲してよい。

3.2.3 遮蔽線量計算用データベースのテーブル設計

整備した遮蔽線量計算用データは、開発する計算コードで参照するためにデータベースにして格納して管理する必要がある。そこで、データの特性を考慮してデータベースのテーブル設計を行い、適切と考えられるテーブルの構成とフォーマットを作成した。データベースの管理について、現時点ではデバッグと V&V におけるデータ差し替えの便宜を考慮して、専用のデータベース管理システムを使わず、ファイル単位で管理している。表 3-5 にデータベースの概要を示す。

付録 VII に、データベースのテーブル設計の内容を示す。係数データのエネルギー範囲、計算する線量種類、有効桁数に関する記載を含む。

これらのデータベースのテーブル設計情報は、コード開発側に渡されて関係する仕様・機能の開発に用いられた。並行して、作成したデータを格納したファイルを逐次コード開発側に渡して、仕様・機能の動作の確認、または計算の妥当性評価を実施した。

¹ 2020 年 12 月、ICRU の実用量に関するレポート (ICRU Report 95, Operational Quantities for External Radiation Exposure) が ICRP の協力のもと正式に刊行された。
<https://www.icru.org/report/icru-report-95-operational-quantities-for-external-radiation-exposure/>

表 3-5 遮蔽線量計算用データベースの概要

データファイル名	概要
遮蔽材料データファイル	遮蔽材料の密度と組成元素の存在割合を格納する。また、組込材料とユーザ定義のカスタム材料の別を明示する。
線源データファイル	線源スペクトルデータ（光子放出率）を格納する。外部の RI 核種線源ライブラリから選択した核種のデータを参照できるように、また任意の群構造をもつデータ配列にも対応した設計を行う。
係数データベース構成管理ファイル	計算で用いる各係数データ（減衰係数、ビルドアップ係数、線量換算係数等）のデータファイル名を指定した構成管理ファイル。
減衰係数データファイル	遮蔽材料の減衰係数を格納する。
ビルドアップ係数データファイル	遮蔽材料のビルドアップ係数を格納する。計算する線量種類毎にデータファイルが必要である。
線量換算係数データファイル	（直接線の）エネルギー線束から、計算する線量種類を算出するための換算係数を格納する。
その他のデータファイル	空気カーマから照射線量への換算に用いる(1-g)補正係数データ等。

3.2.4 遮蔽材料の減衰係数算出

（線）減衰係数 μ は、ガンマ線が有意な相互作用を起こす、単位距離あたりの確率として定義される。各遮蔽材料に対して、次の関係が成り立つ。

$$\mu(E) = N[\sigma_c(E) + \sigma_{ph}(E) + \sigma_{pp}(E)]$$

ここで、 N は核密度、 σ_c , σ_{ph} , σ_{pp} はそれぞれコンプトン散乱、光電効果、対生成の断面積を指す。

相互作用の断面積は、XCOM ライブラリ²の最新版であるバージョン 3.1 からそのまま引用した（2020/10/12 時点）。

なお、XCOM ライブラリにはレイリー散乱の断面積も掲載されており、今回、減衰係数にレイリー散乱を加えるかどうかの検討を行った（4.2.4 項参照）。その結果、まずはレイリー散乱を考慮せず、従前どおり上式を用いて算出される減衰係数を用いることとした。

² XCOM: Photon Cross Sections Database, NIST Standard Reference Database 8 (XGAM), <https://www.nist.gov/pml/xcom-photon-cross-sections-database/>

この減衰係数は、遮蔽体を衝突せずに透過する直接線（非衝突線・非散乱線ともいう）の線量を求めるために用いられる。直接線の線量は、従前どおり、次式によって算出される。

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

ここで、 $E_d(AP)$ ：直接線線量(μ Sv/h)

S：ガンマ線源強度(photon/s)

r：線源と評価点の距離(cm)

μ ：減衰係数(cm^{-1})

t：遮蔽厚(cm)：

$\left(\frac{E}{\phi}\right)$ ：線束－線量換算係数

線束－線量換算係数として、3.2.2 項及び 3.3.3 項で示した線量種類の線量換算係数を与えることによって、当該線量種類の直接線線量が求められる。

3.2.5 遮蔽材料のビルドアップ係数算出

今回、ガンマ線と光中性子に線種を分けて、ビルドアップ係数を計算することとし、次の式によって算出する（4.2.3 項参照）。

・光中性子線量ビルドアップ係数（BF-n） =
光中性子の透過線量(二次 γ 線の線量は含まず) / γ 直接線の線量

・ガンマ線ビルドアップ係数（BF-g） =
 γ 線の透過線量(光中性子の二次 γ 線の線量を含む) / γ 直接線の線量

遮蔽透過線量は、PHITS 3.20³を用いて MC 法による計算を行った。最新の知見を用いる方針から、PHITS 推奨の EGS モードで遮蔽体の輸送過程を詳細にシミュレーションする。PHITS-EGS で計算可能な相互作用を全て考慮し、PHITS の CHARD 入力はデフォルト値とする。光核反応も含まれる。また、光中性子の透過線量とガンマ線の透過線量の弁別は、PHITS のカウンター機能を用いて実現した。

（線量計算体系）

透過線量の計算体系を図 3-1 に示す。半径 80mfp の球体の外側に 20mfp の反射体を置いた遮蔽体透過モデルを用いる。球体及び反射体の密度として、3.2.1 項で示した遮蔽材の密度を用い、PHITS には密度を負値で入力する。深層透過問題を効率的に解くために mfp 毎のセル切りを行うと共に、遮蔽厚さの位置に線量計算用の薄い球殻セル ($\pm 5 \times 10^{-6}$ mfp 程度の厚さ)を設定して、各セルの線量を算出した。

³ PHITS (Particle and Heavy Ion Transport code System) <https://phits.jaea.go.jp/indexj.html>.

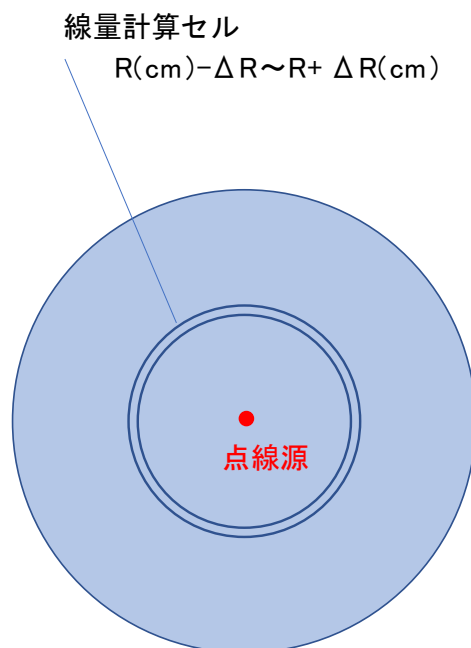


図 3-1 ビルドアップ係数算出のための線量計算体系図

(タリー設定)

セル毎に[T-Track](Track Length Tally)を設定すると共に、[Multiplier]に線束－線量換算係数を、計算結果が[μ Sv/h]単位になるように設定して線量を計算する。線束－線量換算係数は、3.2.2 項で示した線量種類の換算係数を用いる

(カットオフエネルギー指定)

カットオフエネルギーとして、次の設定を行った。

光子：1keV

電子：10keV(150keV 未満)、または 100keV(150keV 以上)

電子カットオフエネルギーについて、150keV を境に高エネルギー側のカットオフエネルギーを高くした理由は、計算の効率を上げるためである。試計算で結果に影響が無いことを確認している。150keV という値は、不連続部として注目される K-X 線の最大エネルギーが高い原子番号の元素でも 150keV 未満であることから決定した。

(相対誤差の基準)

PHITS で算出する線量の相対誤差(R.E.)は、0.1 未満になるようにヒストリー数を調整する。

以上が、PHITS 線量計算の条件設定のポイントである。なお、個別の具体的な入力内容については、次年度に作成する技術ガイドラインに記載する予定である。

3.3 作成した遮蔽線量計算用データの例示

3.2.3 項で示したデータベースのテーブル設計に基づき、実際に作成した主なデータファイルの例を示す。また、データのグラフからわかる特徴について述べる。

なお、作成したデータは妥当性を評価して、それぞれ誤りのないことを確認している。次年度に作成する技術ガイドラインにおいて、その概要をまとめて記載する予定である。

3.3.1 係数データベース構成管理ファイル

○lib_setting.dat

```
library setting file
[Attenuation]
atten_xcom.dat

[Calculation Dose]
1. ICRP Pub.116 E(AP) 実効線量(Default)
bf_icrp_116_eap.dat    !線量種類毎のビルドアップ係数データファイル
conv_icrp_116_eap.dat  !線量種類毎の換算係数データファイル
2. ICRP Pub.116 E(PA) 実効線量
bf_icrp_116_epa.dat
conv_icrp_116_epa.dat
3. ICRP Pub.116 E(LLAT) 実効線量
bf_icrp_116_ellat.dat
conv_icrp_116_ellat.dat
4. ICRP Pub.116 E(RLAT) 実効線量
bf_icrp_116_erlat.dat
conv_icrp_116_erlat.dat
5. ICRP Pub.116 E(ROT) 実効線量
bf_icrp_116_erot.dat
conv_icrp_116_erot.dat
6. ICRP Pub.116 E(ISO) 実効線量
bf_icrp_116_eiso.dat
conv_icrp_116_eiso.dat
7. ICRP Pub.116 水晶体(AP)
bf_icrp_116_dlensap.dat
conv_icrp_116_dlensap.dat
8. ICRP Pub.116 皮膚(AP) 男性
bf_icrp_116_dskinmap.dat
conv_icrp_116_dskinmap.dat
```


9. ICRP Pub.116 皮膚(AP) 女性

bf_icrp_116_dskinfap.dat

conv_icrp_116_dskinfap.dat

10. ICRP Pub.74 空気カーマ)

bf_icrp_74_kair.dat

conv_icrp_74_kair.dat

[1-g file]

conv_1-g.dat

Calculation_Dose_Num=10

3.3.2 減衰係数データファイル

XCOM 3.1 光子反応ライブラリを参照して、 γ 線の3つの主要な反応の和から算出した。吸収エッジの不連続部を含む、詳細な群構造を再現するため、XCOMに内蔵されるデータ点全てをライブラリに収めた。

○atten_xcom.dat

Photon Mass Attenuation coefficient data (free) ref.: XCOM

z= 1, ele="H", name="hydrogen"

EGrp=43

Energy(MeV) mu/rho(cm²/g)

1.00000E-02 3.608E-01

1.50000E-02 3.648E-01

2.00000E-02 3.628E-01

3.00000E-02 3.540E-01

4.00000E-02 3.441E-01

5.00000E-02 3.344E-01

6.00000E-02 3.253E-01

8.00000E-02 3.087E-01

1.00000E-01 2.941E-01

1.50000E-01 2.650E-01

2.00000E-01 2.428E-01

3.00000E-01 2.112E-01

4.00000E-01 1.893E-01

5.00000E-01 1.728E-01

6.00000E-01 1.599E-01

8.00000E-01 1.405E-01

1.00000E+00 1.263E-01

1.02200E+00 1.250E-01

1.25000E+00	1.129E-01
1.50000E+00	1.027E-01
2.00000E+00	8.769E-02
2.04400E+00	8.663E-02
3.00000E+00	6.921E-02
4.00000E+00	5.807E-02
5.00000E+00	5.049E-02
6.00000E+00	4.498E-02
7.00000E+00	4.078E-02
8.00000E+00	3.746E-02
9.00000E+00	3.478E-02
1.00000E+01	3.254E-02
1.10000E+01	3.067E-02
1.20000E+01	2.906E-02
1.30000E+01	2.767E-02
1.40000E+01	2.646E-02
1.50000E+01	2.539E-02
1.60000E+01	2.445E-02
1.80000E+01	2.284E-02
2.00000E+01	2.153E-02
2.20000E+01	2.045E-02
2.40000E+01	1.953E-02
2.60000E+01	1.875E-02
2.80000E+01	1.807E-02
3.00000E+01	1.748E-02

z= 2, ele="He", name="helium"

EGrp=43

Energy(MeV) mu/rho(cm²/g)

1.00000E-02 1.885E-01

(後略)

(減衰係数データの特徴)

減衰係数の算出値は、計算に用いるガンマ線の断面積の値に依存する。今回、減衰係数の作成に用いたガンマ線の断面積は XCOM ライブラリから引用した。使用した断面積データの妥当性を示すため、その他の実績ある光子断面積ライブラリ PHOTX⁴ (QAD コード付属)、及び EPDL97[3-4] (JENDL-4.0 PH ファイル使用) の断面積データと比較する。

⁴ RSIC DATA LIBRARY DLC-136, PHOTX: Photon Interaction Cross Section Library (1989).

相互作用別に断面積の逆数をとった鉄の減衰係数を図 3-2 に、同様に鉛の減衰係数を図 3-3 に示す。いずれのデータも相互作用別にみてほとんど差がないことが分かる。

今回作成した減衰係数データのポイントは、K-X 線等、蛍光 X 線領域の減衰データを詳しく整備したことである。各図に、今回作成した減衰係数を μ_{new} で示し、従来利用されてきた QAD-CGGP2R コードの減衰係数をそれぞれ Fe(QAD)、Pb(QAD)で示した。今回作成した減衰係数はデータ点数を追加したことで、QAD のデータと比べて不連続部周辺の減衰係数をよく再現しており、線量の計算精度向上が期待できる。

また、従来ビルドアップ係数は下限 15keV として整備されていたため、それ以下のエネルギーに対して線量計算することはできなかった。今回、線量換算係数の出典に合わせる形で、線量計算に必要な係数データを下限 10keV から整備した。これによって、低エネルギー X 線の利用施設、または低エネルギー放出核種の線量計算に応用が利くと考えられる。

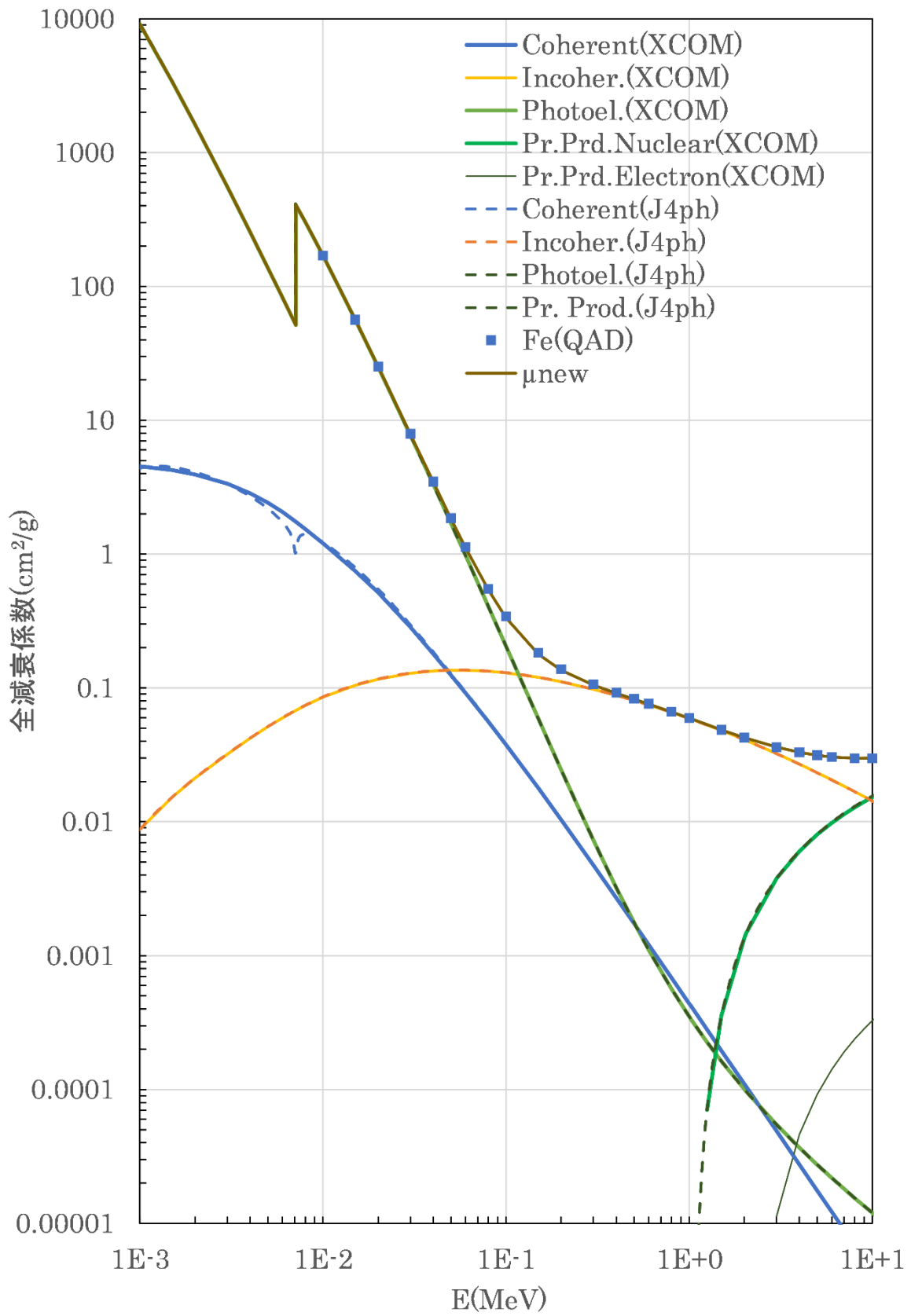


図 3-2 鉄の相互作用別減衰係数データと断面積ライブラリ間の比較

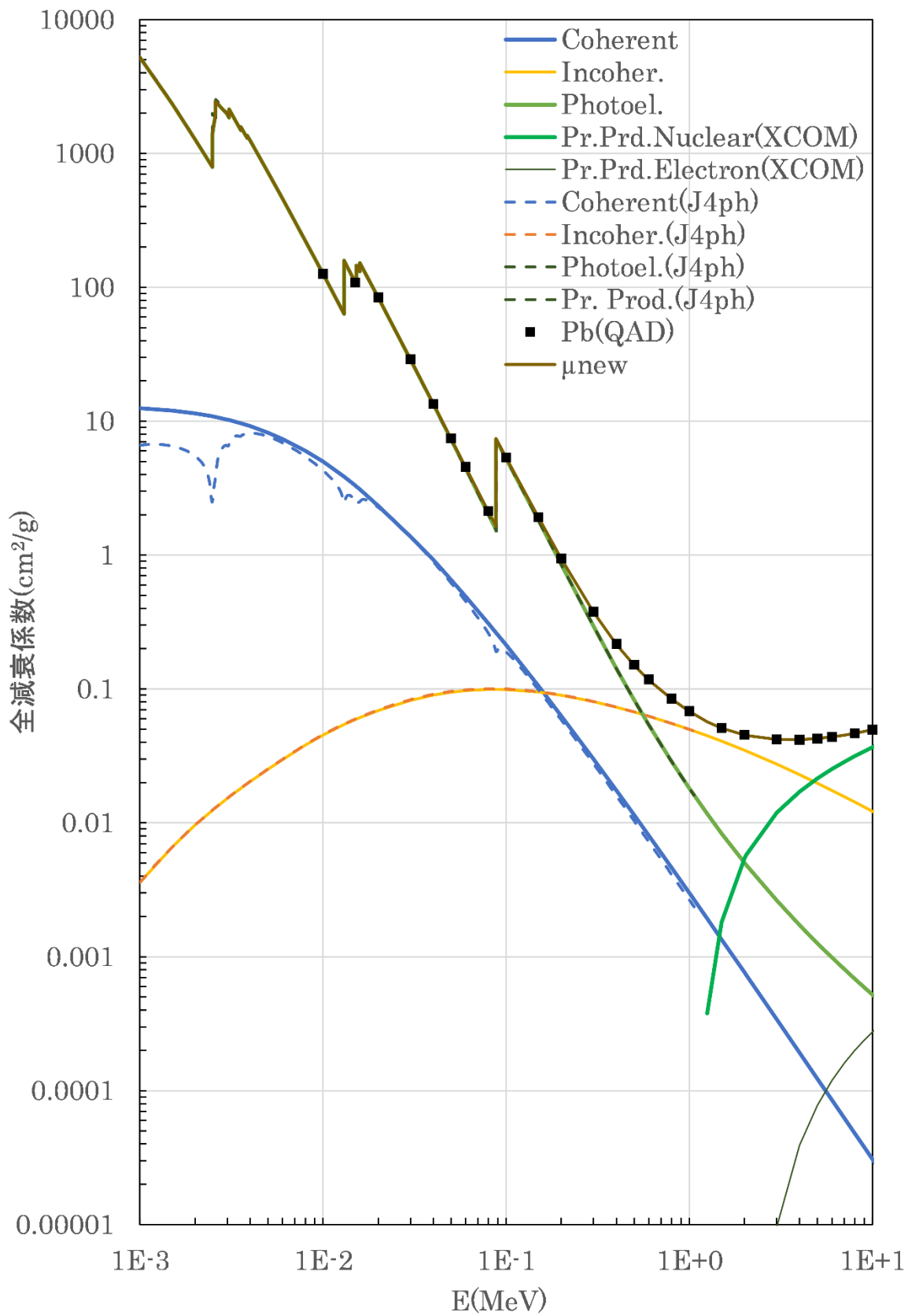


図 3-3 鉛の相互作用別減衰係数データと断面積ライブラリ間の比較

3.3.3 線量換算係数データファイル

3.2.2 項に示した線量種類に対して、出典から線束－線量換算係数をそのまま電子データ化した。計算する線量種類毎にファイルを作成しており、ここでは実効線量 E(AP) の例を示す。

○conv_icrp_116_eap.dat

```
E(AP) Conversion Factor ref.: ICRP Pub.116
Photons: Effective dose per fluence, in units of pSv cm2, for monoenergetic particles
incident in AP geometry.
EGrp=34
1.000E-02 6.850E-02
1.500E-02 1.560E-01
2.000E-02 2.250E-01
3.000E-02 3.120E-01
4.000E-02 3.500E-01
5.000E-02 3.690E-01
6.000E-02 3.890E-01
7.000E-02 4.110E-01
8.000E-02 4.430E-01
1.000E-01 5.180E-01
1.500E-01 7.470E-01
2.000E-01 1.000E+00
3.000E-01 1.510E+00
4.000E-01 2.000E+00
5.000E-01 2.470E+00
5.110E-01 2.520E+00
6.000E-01 2.910E+00
6.620E-01 3.170E+00
8.000E-01 3.730E+00
1.000E+00 4.490E+00
1.117E+00 4.900E+00
1.330E+00 5.600E+00
1.500E+00 6.120E+00
2.000E+00 7.480E+00
3.000E+00 9.750E+00
4.000E+00 1.170E+01
5.000E+00 1.340E+01
6.000E+00 1.500E+01
6.129E+00 1.510E+01
```

8.000E+00	1.780E+01
1.000E+01	2.050E+01
1.500E+01	2.610E+01
2.000E+01	3.080E+01
3.000E+01	3.790E+01

作成した線束－線量換算係数ファイルリストを表 3-6 に示す。

表 3-6 作成した線束－線量換算係数リスト

No.	線量種類	性別	照射体系	線量換算係数データ ファイル名
1	E(AP)	共通	AP	conv_icrp_116_eap.dat
2	E(PA)	共通	PA	conv_icrp_116_epa.dat
3	E(LLAT)	共通	LLAT	conv_icrp_116_ellat.dat
4	E(RLAT)	共通	RLAT	conv_icrp_116_erlat.dat
5	E(ROT)	共通	ROT	conv_icrp_116_erot.dat
6	E(ISO)	共通	ISO	conv_icrp_116_eiso.dat
7	眼の水晶体等価線量	共通	AP	conv_icrp_116_dlensap.dat
8	皮膚等価線量	男性	AP	conv_icrp_116_dskinmap.dat
9	皮膚等価線量	女性	AP	conv_icrp_116_dskinfap.dat
10	空気カーマ	共通	－	conv_icrp_74_kair.dat

作成した線量換算係数データのエネルギー変化を表したグラフを図 3-4 に示す。作成した点データが出典データを誤りなく参照しており、異常のないことを確認した。

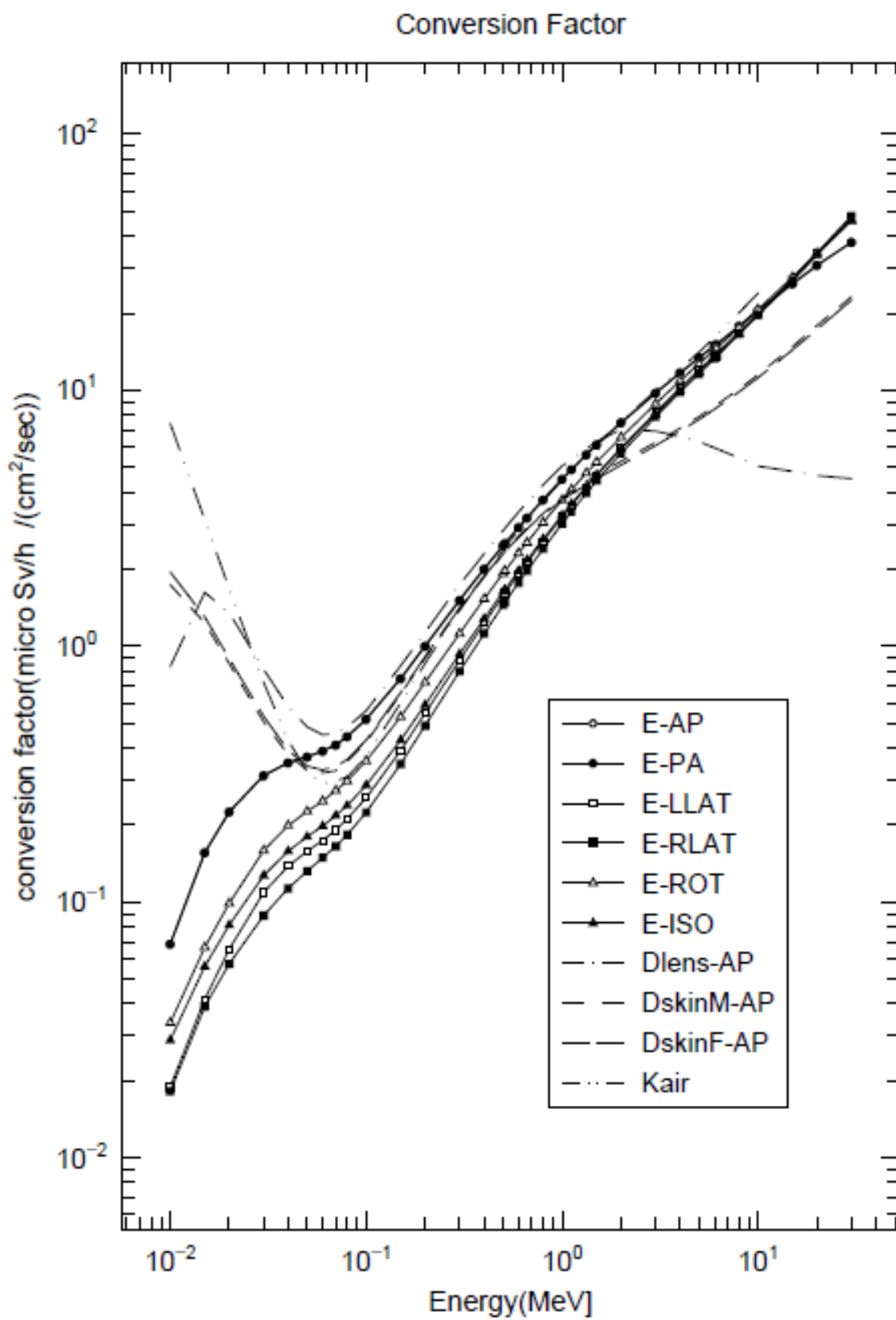


図 3-4 作成した線量換算係数データのエネルギー変化

3.3.4 ビルドアップ係数データファイル

3.2.5 項で示した方法に従ってビルドアップ係数データを作成した、鉄に対する 0.5MeV- γ 線のガンマ線ビルドアップ係数値 (BF-g、実効線量 E(AP)) を表 3-7 に、また作成したビルドアップ係数ファイルのリストを表 3-8 に示す。

付録VIIIに、作成したガンマ線ビルドアップ係数 (BF-g) の例を、鉄及び鉛に対して、代表的なエネルギー、及び比較のためのグラフを示す。また、付録IXに、作成した光中性子ビルドアップ係数 (BF-n) の例をグラフで示す。

表 3-7 作成した鉄に対する 0.5MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数 (BF-g)

○bf_icrp_116_eap.dat から引用

mfp	BF-g	mfp	BF-g	mfp	BF-g	mfp	BF-g
1	2.070E+00	21	6.249E+01	41	1.793E+02	61	3.298E+02
2	3.301E+00	22	6.722E+01	42	1.862E+02	62	3.380E+02
3	4.736E+00	23	7.207E+01	43	1.931E+02	63	3.461E+02
4	6.381E+00	24	7.706E+01	44	2.002E+02	64	3.543E+02
5	8.234E+00	25	8.219E+01	45	2.073E+02	65	3.625E+02
6	1.029E+01	26	8.744E+01	46	2.145E+02	66	3.707E+02
7	1.254E+01	27	9.282E+01	47	2.217E+02	67	3.791E+02
8	1.499E+01	28	9.832E+01	48	2.290E+02	68	3.874E+02
9	1.763E+01	29	1.039E+02	49	2.364E+02	69	3.957E+02
10	2.045E+01	30	1.096E+02	50	2.439E+02	70	4.041E+02
11	2.346E+01	31	1.155E+02	51	2.514E+02	71	4.124E+02
12	2.664E+01	32	1.214E+02	52	2.591E+02	72	4.210E+02
13	2.999E+01	33	1.274E+02	53	2.667E+02	73	4.294E+02
14	3.351E+01	34	1.336E+02	54	2.744E+02	74	4.379E+02
15	3.719E+01	35	1.398E+02	55	2.822E+02	75	4.464E+02
16	4.103E+01	36	1.462E+02	56	2.900E+02	76	4.548E+02
17	4.502E+01	37	1.526E+02	57	2.979E+02	77	4.633E+02
18	4.917E+01	38	1.591E+02	58	3.058E+02	78	4.719E+02
19	5.347E+01	39	1.658E+02	59	3.138E+02	79	4.806E+02
20	5.790E+01	40	1.725E+02	60	3.218E+02	80	4.892E+02

*BF-n (中性子ビルドアップ係数) は全てゼロ

表 3-8 ビルドアップ係数ファイルリスト

No.	線量種類	性別	照射体系	ビルドアップ係数データ ファイル名
1	E(AP)	共通	AP	bf_icrp_116_eap.dat
2	E(PA)	共通	PA	bf_icrp_116_epa.dat
3	E(LLAT)	共通	LLAT	bf_icrp_116_ellat.dat
4	E(RLAT)	共通	RLAT	bf_icrp_116_erlat.dat
5	E(ROT)	共通	ROT	bf_icrp_116_erot.dat
6	E(ISO)	共通	ISO	bf_icrp_116_eiso.dat
7	眼の水晶体等価線量	共通	AP	bf_icrp_116_dlensap.dat
8	皮膚等価線量	男性	AP	bf_icrp_116_dskinmap.dat
9	皮膚等価線量	女性	AP	bf_icrp_116_dskinfap.dat
10	空気カーマ	共通	—	bf_icrp_74_kair.dat

(作成したガンマ線ビルドアップ係数データの特徴)

付録Ⅷに示したガンマ線ビルドアップ係数 (BF-g) は、吸収エッジエネルギー近傍の不連続な減衰に注目したグラフをいくつか示した。例えば、鉄に対する 10keV の減衰曲線をみると、15keV のそれと比べて減衰率が大きく、即ち減衰していないことがわかる。鉄の K-X 線が 10keV より少し低い所にあるが、線源エネルギーが K-X 線に近い場合、減衰傾向がその周辺のエネルギーと異なることがある。よって、ビルドアップ係数の内挿方法に注意が必要である。係数データの補間は、コード開発側の課題であり、今回設計した処理の仕方を 4.3.4 項に示した。別の設計として、係数補間ではなく、計算結果の線量を補間する方法も考えられる。これら補間設計の妥当性は、次年度に検証する予定である。

次に、今回作成したガンマ線ビルドアップ係数 (BF) データを、従来の日本原子力学会標準 BF データ (QAD-IE 内臓) と比較して特徴を明らかにする。0.5MeV- γ 線に対する鉄の BF を 図 3-5 に、また鉛の BF を 図 3-6 に示す。

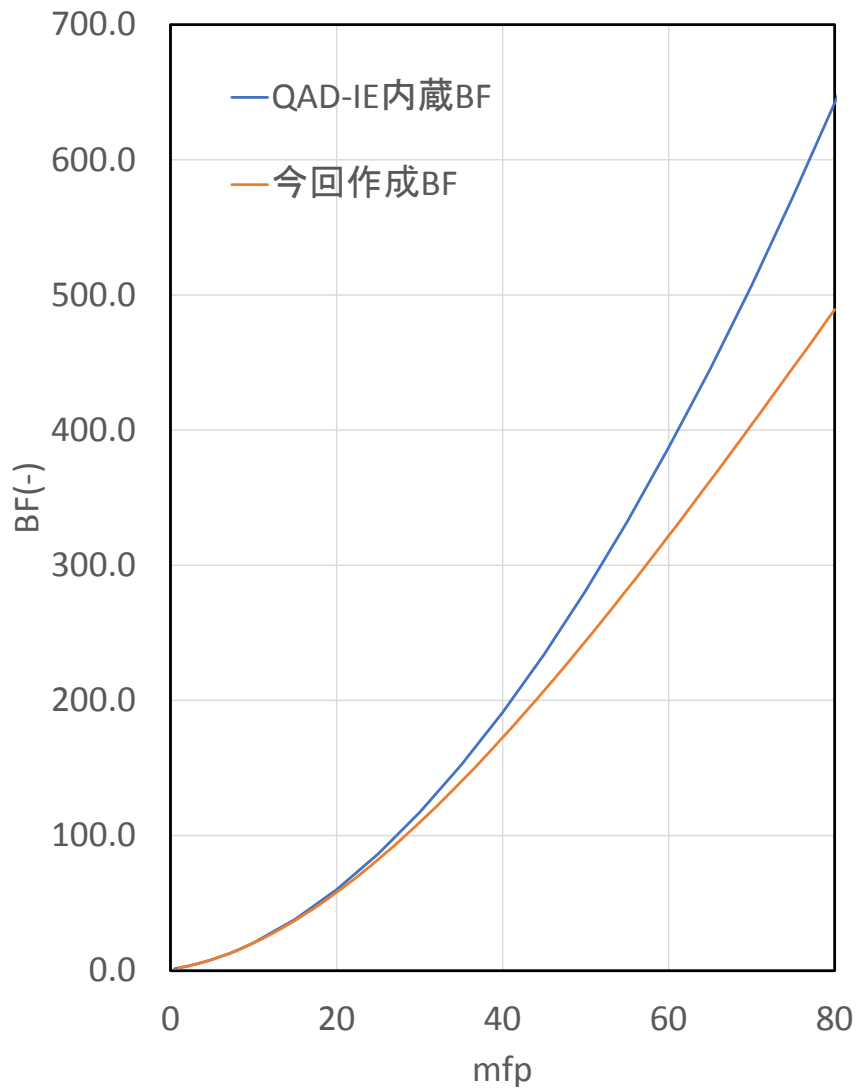


図 3-5 作成した 0.5MeV- γ 線に対する鉄のビルドアップ係数の従来値との比較

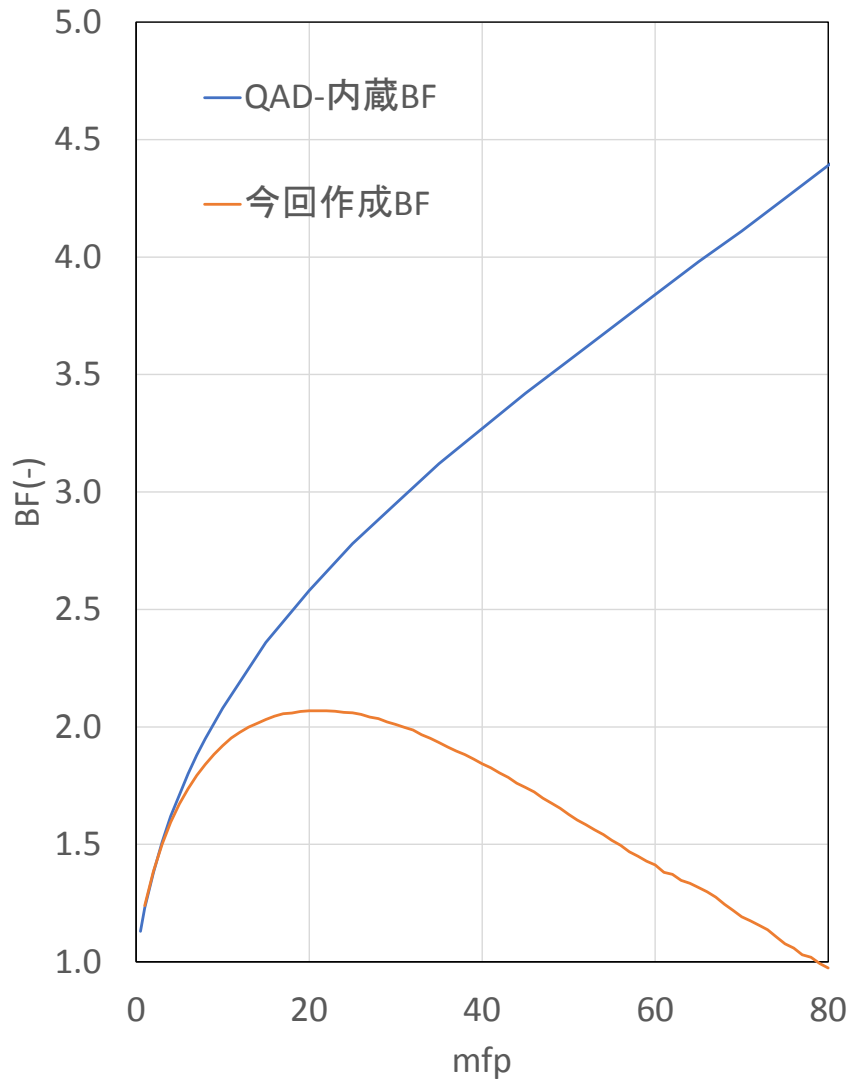


図 3-6 作成した 0.5MeV- γ 線に対する鉛のビルドアップ係数の従来値との比較

暫定的な調査の結果、今回作成した鉄のガンマ線ビルドアップ係数が、透過距離が伸びるにつれて従来値と徐々に乖離する主な原因は、鉄の密度を少し低く設定したためと考えられる。レイリー散乱を考慮した影響は、この場合それほど大きくない。

一方、鉛のガンマ線ビルドアップ係数が従来値と比べて、10MeV を越えて全く異なる傾向をみせた。これには、レイリー散乱を含む断面積の微小な違いと、今回作成した減衰係数にレイリー散乱を考慮しなかったことの複合的な原因が考えられる。レイリー散乱を考慮した場合、特に高い原子番号の元素に対して、確かにビルドアップ係数は従来値のように単調増加しない可能性がある。ただし、図に示した鉛のビルドアップ係数は 80mfp 辺りで 1 を下回っており、明らかに係数の定義に違反する。この点は、減衰係数の算出にレイリー散乱を考慮することで善処されるものと推察される。

次年度、減衰係数にレイリー散乱の効果を含めて見直すことで、ビルドアップ係数データの整備をすすめる予定である。

参考文献

[3-1] 公益財団法人原子力安全技術センター, 放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集 2015 (2015).

[3-2] 日本原子力学会標準, γ 線ビルドアップ係数 : 2013, AESJ-SC-A005:2013 (2013).

[3-3] RSICC DATA LIBRARY COLLECTION, ANS-6.4.3 Geometric Progression Gamma-Ray Buildup Factor Coefficients, DLC-129/ANS643 (1993).

[3-4] D.E. Cullen, "EPDL97: the Evaluated Photon Data Library, '97 Version," Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-50400, Vol. 6, Rev. 5 (September 1997).

4 新勧告を踏まえた遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究

4.1 遮蔽線量評価法の適用性拡張検討項目

今年度の研究計画として、「新勧告を踏まえた遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究」の実施が含まれており、原子力施設・放射線施設の安全規制で利用される点減衰核積分法に基づく遮蔽線量計算コード（以下、点減衰核積分法コードと呼ぶ。）に対して、最新の研究結果を反映した適用性の拡張を行い、新勧告に基づく安全基準を確実に満たし且つ適度な保守性を持った評価が求められている。

2章で実施した調査の結果、本事業で期待される遮蔽線量評価法の見直し範囲、及び本事業で開発する遮蔽計算コードの基本的な仕様・機能を、付録Vに示すとおり、決定した（2.3節参照）。

付録Vまたは表 2-2 を参照して、遮蔽線量計算法の拡充を検討すべき事項を特定した。表 4-1 に、本事業で実施する遮蔽線量計算法の拡張検討項目をまとめて示す。次節に、高エネルギー領域への範囲拡張対応の概要と成果を示す。その他 2 件の検討項目は、次年度に検討する予定である。

表4-1 遮蔽線量評価法の適用性拡張検討項目

遮蔽線量評価法の拡張検討項目	概要
高エネルギー領域への範囲拡張対応 (光核反応による光中性子の線量計算)	光中性子をガンマ線と分けて遮蔽線量計算用データを整備し、計算コードにおいて個別に線量寄与を計算して合算する。
特定の二重層遮蔽対応	次年度検討予定 コンクリートと鉄板等、特定の頻出材料を重ねた二重層遮蔽体の透過線量を計算する。
スラブ遮蔽に対する斜め透過線量計算	次年度検討予定 スラブ遮蔽体に対して、従来の垂直入射だけでなく、斜め方向に透過する場合の線量を計算する。

4.2 高エネルギー領域への範囲拡張対応

4.2.1 範囲拡張の背景

今回、本事業に係る新勧告の範囲において、重要な改訂ポイントの一つは、ICRP Pub.116 に記載された線量換算係数が 10GeV の高エネルギー領域まで拡張されたことである。そこで、遮蔽線量評価法の適切な見直しを行う上で、本事業の目的に照らしてどの領域まで拡張対応するか検討した。

結果的に、研究班会合及び研究レビュー委員会の討議を踏まえて、上限 30MeV までの γ 線に対応することに決定した。また下限エネルギーについて、ICRP Pub.116 に記載された換算係数の範囲に従い、10keV から対応することとした。

上限を 30MeV とした主な事由は次のとおり。

- ・ 従来の QAD 系コードで対応していたエネルギー範囲は上限 10MeV であったが、国内の PET 施設または電子リニアックを考慮すると、それを越える範囲拡張が必要である。
- ・ IEC（国際電気標準会議標準）TC45 は、原子力計測に関する規格を制定する専門委員会である。現在、大強度陽子サイクロトロンについて審議されており（PT63175）、そのエネルギー上限が 30MeV に設定された。最新の規格情報として一つの目安になるため、これに従うこととした。

4.2.2 範囲拡張対応の考え方

1 次ガンマ線（線源から発するガンマ線のこと）のエネルギーを高くしていくと、しきい値はターゲット元素によるが、およそ 8MeV 辺りから遮蔽体との光核反応により光中性子が発生し始める。また、光中性子の捕獲による 2 次ガンマ線も発生し、それらが透過線量を押上げるため、透過距離が伸びるにつれて光中性子と 2 次ガンマ線に起因する線量の方が 1 次ガンマ線よりも高くなる可能性がある。そこで、これらの線量を簡易に計算処理する考え方について検討した。

代表的なガンマ線遮蔽計算手法として知られる点減衰核積分法は本来、1 次ガンマ線の減衰と散乱ビルドアップを係数として表した線量計算法であり、2 次的に発生する放射線を扱っていなかった。時代が下って、透過中に発生する制動放射線や特性 X 線を精密なモデル計算で扱うことが可能になり、それらの線量寄与を簡易式の形を変えることなく表すために、ビルドアップ係数を見直して対処する方策がとられてきた。

検討の結果、光中性子及び 2 次ガンマ線の線量寄与について、従前の考え方に従い、簡易式の構成を変えることなく処理する方針に決定した。ただし、研究レビュー委員会において、光中性子の線量寄与をガンマ線のそれと分けて扱った方がよいとの意見があり、それにも従うこととした。線種で分別して計算結果を整理することで光中性子の影響をおよそ把握し、また応用における長短を明らかにするためである。

光中性子をガンマ線と分けて扱う方針から、次の検討事項が追加された。

- ・ 光中性子の捕獲による 2 次ガンマの扱いをどうするか。
- ・ 光核反応のカスケードを追跡するか。

現在の MC 法コードにおいて、2 次ガンマ線の線量寄与を 1 次ガンマ線のそれと分けて計算することは困難である。よって、ガンマ線のビルドアップ係数としては、1 次と 2 次のガンマ線を合算したデータを整備することにした。ただし、中性子を発生しないオプションを設定して、1 次ガンマ線だけを考慮した MC 法の計算を再度行うことで、差し引き 2 次ガンマ線の寄与を知ることは可能である。

光核反応のカスケードについては、2次ガンマ以外に生ずる放射線の影響は小さいと考えられるため、基本的に考慮せず、光中性子の線量計算の中で余裕をみてしまうのが適当との意見があった。研究の時間的制約もあるため、当分はその意見に沿ってデータ整備を進めることとした。

4.2.3 光中性子線量ビルドアップ係数の定義について

上で解説したとおり、30MeVまでのガンマ線を線源とする遮蔽透過線量について、光中性子の線量寄与をガンマ線のそれと分けて扱う。本研究では、光中性子線量ビルドアップ係数 (BF-n) を次のように定義した。

・ BF-n = 光中性子の透過線量(二次 γ 線の線量は含まず) / γ 直接線の線量

二次 γ 線の線量寄与は、ガンマ線のビルドアップ係数 (BF-g) の方で説明される。

・ BF-g = γ 線の透過線量(光中性子の二次 γ 線の線量を含む) / γ 直接線の線量

BF-n の定義について、分母がガンマ線の直接線であるため、中性子ビルドアップという用語はあまり適当でないが、ガンマ線源から2次的に発生する放射線の線質による補正と考えてもよい。このBF-nを導入することで、点減衰核法の簡易式の構成を変えることなく、従前どおりの仕方でデータを整理できるという利点がある。

4.2.4 減衰係数の算出で考慮するガンマ線の相互作用について

本研究では、MC法コードによるガンマ線の透過線量計算において、コヒーレント散乱(ここではレイリー散乱)を含め、可能な全ての相互作用を考慮している。そこで、直接線の線量計算に用いる減衰係数の算出において、従前どおり主要な3反応(光電効果、コンプトン散乱、電子対生成)に加えて、レイリー散乱を考慮するかどうかの検討がなされた。これは旧くから議論のあるところで、Shultisのテキストによれば[4-1]、レイリー散乱の内、77%が前方4°の立体角に向くことから、観測上「直接線」と呼ばれる線源と同一エネルギーの線束には、レイリー散乱後のガンマ線も含まれる。一方で、レイリー散乱を考慮しない考え方にも一理あり、例えば直接線を線源と同一エネルギーの線束と考えるなら、レイリー散乱を考慮しない方が都合がよい。

今回、暫定的に、既往データとの連続性を重んじてレイリー散乱を考慮せず、従前どおり主要な3反応の断面積の合計から減衰係数を算出した。

4.2.5 試算の結果、及び今後の検討事項

手始めに、鉄または鉛の減衰係数及びビルドアップ係数を作成してその特徴を示すとともに、上述の計算手法または計算条件が係数データにもたらす影響を調べた。

(1) ガンマ線及び中性子の線量減衰

遮蔽体を鉄として、初期エネルギー 10keV から 30MeV までの数点のエネルギーに対する試計算を実施した。光核反応で中性子が発生するエネルギー閾値を越える領域では、中性子線量はガンマ線量に比べて高く、中性子線量の減衰は 1 次ガンマ線量の減衰と比べて緩やかである。従って、ガンマ線の減衰曲線について、透過距離が短い間は 1 次ガンマ線量の減衰であるが、透過距離が長くなるにつれて 2 次ガンマ線量の影響が増加し、最終的には 2 次ガンマ線量の減衰が支配的となる。

図 4-1 に、鉄に対する 10MeV のガンマ線並びに、光核反応による中性子発生・輸送を行った線量減衰曲線を示す。10mfp 以下で 1 次ガンマ線より中性子の線量が高くなるのがわかる。ガンマ線の減衰曲線が 17mfp 以降で変化しているのは、中性子が鉄に捕獲されて発生する 2 次ガンマ線の線量が、1 次ガンマ線の線量に被さってくるためである。現状、前述した理由により、1 次ガンマ線と 2 次ガンマ線の線量寄与を分けていない。

このガンマ線と中性子の関係は、遮蔽材の実効原子番号 Z や密度によって異なる。一般に Z が小さい場合、中性子の閾エネルギーが高いため、中性子発生率が低く、且つ中性子が減速（遮蔽）されやすい。 Z が大きくなると、閾エネルギーが低くなり、且つ中性子が減速されにくい。

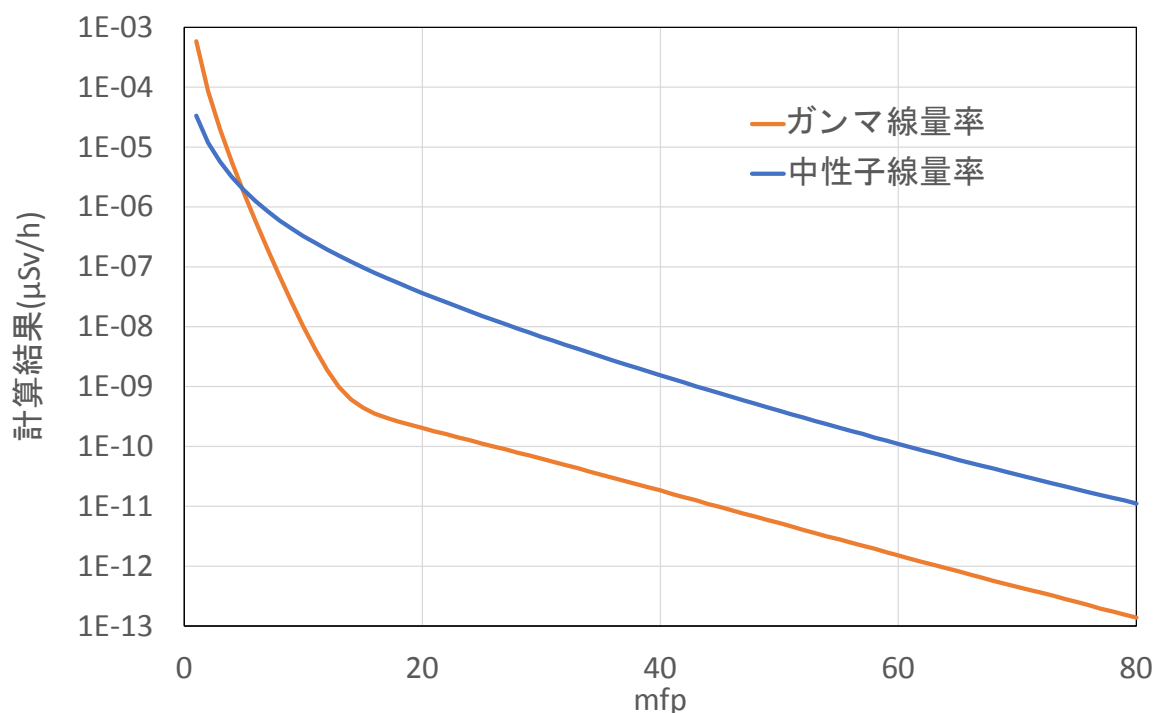


図 4-1 鉄に対する 10MeV の線量減衰曲線

(2) 中性子とガンマ線のビルドアップ係数

図 4-2 に、鉄に対する 10MeV のビルドアップ係数曲線を示す。中性子のビルドアップ係数 (BF-n) は、中性子とガンマ線の線量率がクロスする辺りでガンマ線ビルドアップ係数 (BF-g) より高くなる。また、2 次ガンマ線が線量に被さってくる辺りの距

離から先は、中性子とガンマ線のビルドアップ係数が平行に単調増加する。こうしたBFの特徴は、図4-1に示した線量減衰曲線から大まかに推測可能である。

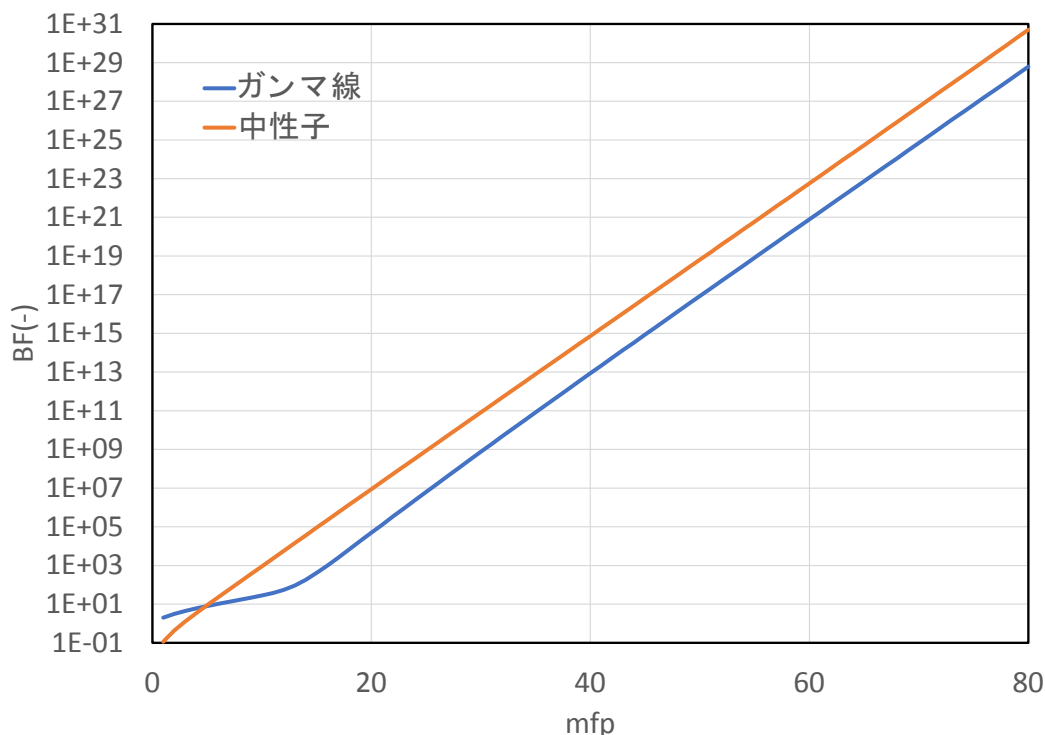


図 4-2 鉄に対する 10MeV のビルドアップ係数曲線

4.3 新勧告を反映した簡易遮蔽線量計算コードの開発

4.3.1 コードの開発目的、及び基本仕様・機能

本事業の研究成果を取り入れた簡易遮蔽計算コードを開発し、遮蔽線量計算法の拡張、及び新勧告に対応した遮蔽線量計算用データの妥当性を検証する。

新勧告対応の遮蔽計算コードに求められる基本仕様・機能は、2章で示したとおり、海外の規制利用コードの調査の結果に基づいて決定した。付録Vまたは2.3節の表2-2に示した一覧表を参照されたい。

それらの基本仕様・機能に基づき、新勧告対応のガンマ線簡易遮蔽計算コードを開発する。最終的に、実際に開発コードを用いた計算を行って、新勧告を反映した妥当な結果が得られるか検証する。

4.3.2 コードの開発項目、及び進捗状況

基本仕様・機能の一覧を参照して、コード開発項目を整理し、順次コード設計と開発を行った。表4-2及び表4-3に、コード開発項目と進捗状況をCUIベースの入出力による部分とGUIを要する部分のそれぞれに分けて示す。今年度、CUIベースで動作

する部分の開発は一通り完了し、試計算が可能な状態まで達成した。次年度、GUIベースのサポートツール作成と遮蔽計算法の拡張に対応し、一通り計算用データが揃った段階で計算結果の妥当性検証を行う。

なお、以降で示す検討内容と成果は、次年度に作成する技術ガイドラインにおいて仔細に示す予定である。

表 4-2 新勧告対応のガンマ線簡易遮蔽計算コード開発項目と進捗状況 (CUI 操作)

開発項目	詳細項目	進捗	備考	
テキストベース (CUI)	初期設定ファイル 読込	ライブラリ構成管理 ファイル	完了	
	計算入力ファイル 読込	幾何形状	完了	直方体、球、円筒、組合せ立体 (必要に応じて後で追加)
		線源	完了	点、直方体、球、円筒
		線量評価点	完了	任意点 1~3 次元メッシュ
	データライブラリ 読込	減衰係数ファイル	完了	以下、本事業で作成した遮蔽線量計算用データを使用
		ビルドアップ係数ファイル	完了	
		線量換算係数ファイル	一部 未完	眼の水晶体被ばく評価を支援するため実用量 Hp(3)を追加
		RI 核種ライブラリ	完了	
		材料組成ライブラリ	完了	
	データのエネルギー 補間	減衰係数	完了	基本、対数-対数スケールにおける 3 次 (4 点) ラグランジュ補間。ただし遮蔽厚 (mfp) に対しては線形-対数の 3 次ラグランジュ補間。
		ビルドアップ係数	完了	
		線量換算係数 (1-g)補正係数含む	完了	
線量計算	線源分割	完了		
	直達線計算	完了		
	ビルドアップ係数	完了		
	二重層遮蔽対応	次年度		
	スラブ斜め入射対応	次年度		
	線量計算	完了		
結果出力	計算入力エコー	完了		
	使用ライブラリデータ	完了		
	計算結果	完了		
	可視化ファイル	次年度	グラフ化含む。	

表 4-3 新勧告対応のガンマ線簡易遮蔽計算コード開発項目と進捗状況 (GUI 操作)

	開発項目	詳細項目	進捗	備考
グラフィックベース (GUI)	計算入力編集	幾何形状	完了	直方体、球、円筒、組合せ立体
		線源	次年度	
		線量評価点	次年度	
	計算実行	試算実行	完了	
		結果表示	完了	
	計算結果可視化	2次元	次年度	
		3次元	次年度	
	GUI サポートツール	材料作成ツール	次年度	
		線源ファイル作成ツール	次年度	
		核種インポートツール	次年度	
		計算妥当性確認ツール	次年度	
		材料データ、核データの表示	次年度	
	二重層データ作成ツール	次年度	その他、斜め透過データ作成ツール等、次年度検討	

4.3.3 コードの操作画面、及び基本的な操作イメージ

開発した遮蔽計算コードは、基本的に CUI (テキスト) ベースの入出力で動作するように作成されている。その上で、Windows PC の GUI を活用して操作性を高める工夫がなされており、ユーザを GUI でサポートするツールもいくつか用意される。その殆どは次年度に開発する予定である。今年度、計算コードを操作する GUI 画面のレイアウトを決定し、画面上で入力を作成して試算を実施した。

ここでは、コード操作のイメージを大まかに知ってもらうために、操作画面の概観を示して操作の流れを説明する。図 4-3 に、注釈を入れた操作画面のスクリーンショットを示す。操作の基本的な流れは下記のとおりである。

1. 入力設定エディタ①を用いて入力ファイルを作成する。体系幾何形状の設定には各種サポートツール②が用意されている。③の可視化ボタンを押すと可視化ペイン④に体系の投影図が表示される。それを見ながら対話的に設定する。
2. 入力ファイルが完成したら、計算実行ボタン⑤で計算を実行する。
3. 計算結果は、発生したエラーメッセージとともに、別途出力エディタに出力される。出力エディタはタブ⑥で表示される。
4. エラーが発生している場合は、出力を確認してエラーの原因を確認し、入力を修正して再実行する。

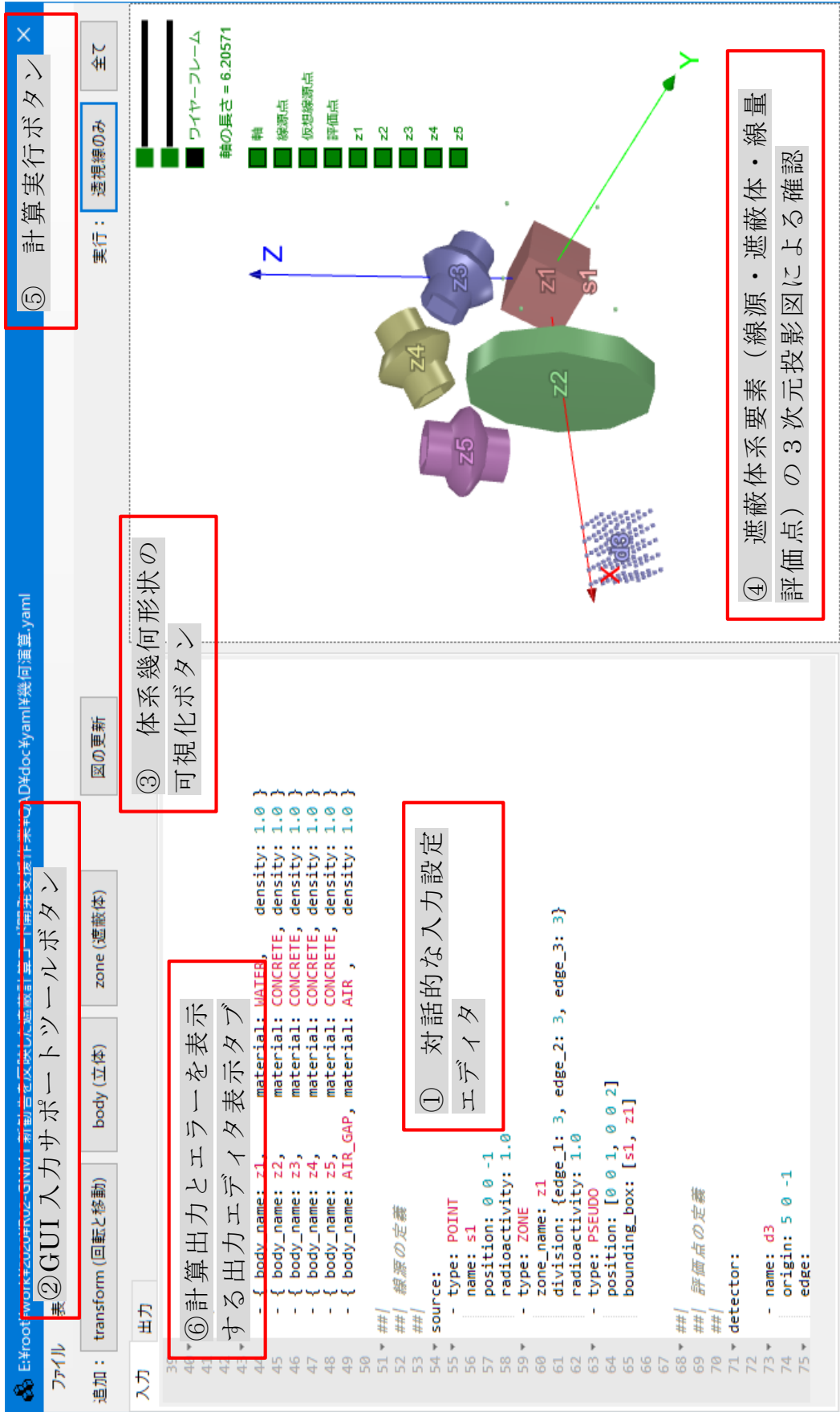


図 4-3 開発中の新報告対応の遮蔽計算コードの操作画面

4.3.4 コードの基本設計

基本仕様に基づき、適切なコードの基本設計について検討した。設計項目と概要を表 4-4 に示す。具体的な設計内容については、付録 X に添付する。

表 4-4 開発コードの基本設計に関する検討項目と概要

設計項目	概要
線源エネルギーに依存する線源強度の算出	RI 核種のイールド（光子発生率）ライブラリは、核種の放出するガンマ線束数、放出エネルギー、光子発生率を収録する。線源エネルギーを参照した線源強度(photons/s)の計算法を与える。
係数データの補間	特定の線源エネルギーに相当する 3 種類の係数の値を点群データから内挿して求める。内挿法は 4 点（三次）ラグランジュ補間公式を用いる。エネルギー内挿は全て log-log 内挿とする。ただし、遮蔽厚（mfp）のビルドアップ係数内挿のみ、linear(mfp)-log 内挿とする。
体積線源領域のメッシュ分割	直方体、円筒、球体の体積線源に対して、領域を適切なメッシュ分割する方法を示す。また微小体積線源と線源領域の体積を与える式、及び微小体積の代表点における体積で重み付けした線源強度補正係数の定義を与える。
遮蔽材による減衰計算とガンマ線エネルギーフラックスの計算	遮蔽材による減衰とフラックスの計算式を与える。 <ul style="list-style-type: none"> 線源領域分割数だけ繰り返す、減衰率の算出式 透過線上の物質による吸収を考慮せず、線量評価点までの距離減衰のみ考慮したフラックス Flux0 の定義式 透過線上の物質による吸収を考慮したフラックス Flux1 の定義式 ビルドアップ係数レファレンス材料によるビルドアップ効果を考慮したフラックス FluxR の定義式
様々な線量種類に対応した線量率の計算	上で定義した 3 種類のフラックスに、求めたい線量種類の線量換算係数を乗じて、3 種類の線量率（Dose0, Dose1, DoseR）をそれぞれ出力する。 計算結果として参照するビルドアップを考慮した線量は DoseR である。 なお、Dose0 は RI 線源核種の減衰率の算出で参照する。

4.3.5 入出力フォーマット検討

基本仕様に基づき、適切な入出力フォーマットの検討を行った。

入力ファイルは、前述のとおり、入力エディタにテキストで入力、またはサポートツールを使って入力する。入力はファイル単位でロード・セーブ可能である。

入力ファイルの記述には、YAML形式を採用した⁵。構造化データを文字列にシリアライズするためのデータ形式の一種であり、可読性が高く、本計算コードのような入力データの操作にも適している。

入力ファイルは以下の7個のノードから構成される。

```
unit:   
  
transform:   
  
body:   
  
zone:   
  
material_for_buildup_factor: IRON  
  
source:   
  
detector: 
```

以下、各ノードのフォーマットの要点を示す。

```
##/  
##| 入出力で使用される単位  
##/  
unit:  
  length      : cm      # m      , cm      , mm  
  angle       : radian  # radian, degree  
  density     : g/cm3   # g/cm3  
  radioactivity: Bq     # Bq  
  
##/  
##| 回転と平行移動 (省略可能)  
##/  
transform:  
  - name: tr1  
    operation:  
      - rotate_around_x: 1  
      - rotate_around_y: 2  
      - rotate_around_z: 3  
      - rotate_by_axis_angle: {axis: 1 0 0, angle: 0}  
      - rotate_by_matrix: {row_1: 1 0 0, row_2: 0 1 0, row_3: 0 0 1}  
      - translate: -1 0 0  
  
body:  
  - { name: z1, type: BOX, vertex: 0 0 0, edge_1: 1 0 0, edge_2: 0 1 0, edge_3: 0 0 1 }  
  - { name: b1, type: RPP, min: 0 0 -1, max: 1 1 0 }  
  - { name: b2, type: SPH, center: 0 0 0, radius: 1 }  
  - { name: b3, type: RCC, bottom_center: 0 0 0, height_vector: 0 0 -2, radius: 0.5 }  
  - { name: b4, type: CMB, expression: z1 + (b1 & b2 - b3) }  
  - { name: z2, type: CMB, expression: b4, transform: tr1 }
```

・ここに示した6種類の座標変換が使用可
重複も含めて自由に組み合わせ可

⁵ YAMLの文法については、以下のリンクを参照。
<https://magazine.rubyist.net/articles/0009/0009-YAML.html>



- type: BOX 直方体
- type: RPP xyz 軸に平行な直方体
- type: SPH 球
- type: RCC 円柱
- type: CMB 上の立体を複数組み合わせる集合演算した立体
expressionでは、各立体の name および+&()が使用可
+ 和集合, - 差集合, & 積集合
- 回転・移動を行う transform は全ての type に適用可

```

##/
##/ 遮蔽体の定義
##/
zone:
- { body_name: z1,      material: IRON, density: 7.8 }
- { body_name: z2,      material: IRON, density: 7.8 }
- { body_name: ATMOSPHERE, material: VOID }

```

- body_name は body ノードで定義された立体の name を指定する。
- ATMOSPHERE は未定義部分を埋めることを表す専用の名称
- 真空の場合は material: VOID 指定

material_for_buildup_factor: IRON

ビルドアップ係数の計算に使用するビルドアップ係数レファレンス材料名を指定する。


```

source:
- type: POINT # 点線源
  name: s1
  position: 0 0 0
  nuclide: Co60
  radioactivity: 1
- type: ZONE # 体積線源
  zone_name: z1 # zone_nameを指定する
  nuclide: Co60
  radioactivity: 1
  division:
    edge_1: {type: UNIFORM, number: 10}
    edge_2: {type: GAUSS_FIRST, number: 10}
    edge_3: {type: MANUAL, end_point: 0 0.5 1}
- type: PSEUDO # 仮想線源点
  position: 0 0 0 # 座標を直接与える (配列も可能:[0 0 0, 0 0 1])
  bounding_box: z1 # 線源のbounding boxとその中心 (点線源の場合は線源位置)を仮想線源点とする

```

点線源” POINT” と体積線源” ZONE” の一方のみを指定する

- ・ zoneを線源とする場合、可能な type は BOX, RPP, SPH, RCC のみである。
- ・ division は zone の type に応じて以下の座標軸ノードを定義する :
 BOX, RPP => edge_1, edge_2, edge_3
 SPH => r, theta, phi
 RCC => r, phi, z
- ・ 座標軸の分割手法は以下の通り :
 {type: UNIFORM , number: 10} # 等分割
 {type: GAUSS , number: 10} # ガウス分割
 {type: MANUAL , end_point: 0 0.5 1} # 任意分割
 MANUAL の場合、end_point で分割された領域の中心に線源点を置く。
- ・ type: PSEUDO は仮想線源点用 (透過線を計算する際に使用)。

```

##|
##| 評価点の定義
##|
detector:
- name: d1
  origin: 2 0 0 # グリッドの始点
  edge:
    - { vector: 1 0 0, division: 2 } # division = 1 => edgeの中点
    - { vector: 0 1 0, division: 2 } # division ≥ 2 => edgeの端点を含むように等分割
    - { vector: 0 0 1, division: 2 }
  transform: tr1
  show_path_trace: false

```

- ・ 線量評価点は、点、1次元、2次元、3次元グリッドを設定可能。
- ・ transform は回転・移動設定
- ・ show_path_trace: 仮想線源点と評価点を結ぶ透過線上の情報表示、及び未定義領域・重複領域がないことを検証。

出力ファイルのフォーマットも YAML 形式である。次の 3 個のノードから構成される。

```
##|
##| 入力パラメータ
##|
input: {}

##|
##| 計算情報
##|
intermediate: {}

##|
##| 計算結果
##|
result: {}
```

以下、各ノードのフォーマットの要点を示す。

```
##|
##| 入力パラメータ
##|
```

```
input:
```

```
  unit:
```

```
    length      : cm
    angle       : radian
    density      : g/cm^3
    radioactivity: Bq
```

```
  body:
```

```
- { name: g1.tr2, type: RCC, bottom_center: -0.67 0.00 1.57, height_vector: 1
- { name: g1.tr2.tr2, type: RCC, bottom_center: 0.96 0.00 3.41, height_vector
- { name: g1.tr2.tr2.tr2, type: RCC, bottom_center: 3.39 0.00 3.04, height_ve
# ~中略~
- { name: z3.tr2.tr2, type: CMB, expression: g1.tr2.tr2.tr2 g2.tr2.tr2.tr2 g3
- { name: z4.tr2, type: CMB, expression: z3.tr2.tr2 }
- { name: z5, type: CMB, expression: z4.tr2 }
```

・ 入力の確認のため、整理されてエコー表示される。

(後略)

```

##|
##| 計算情報
##|
intermediate:
  thread_num: 8
  photon_rate: # Co60
  # energy(MeV) photons/Bq
  - 1.173 0.9997
  - 1.332 0.9999
  attenuation_coefficient_for_zones:
  # energy(MeV) inner outer ATMOSPHERE(1/cm)
  - 1.173 0.434062 0.434062 0
  - 1.332 0.407329 0.407329 0
  buildup_factor:
  - # E(AP), IRON
    # MFP 1.173 MeV 1.332 MeV
    - 1 1.88098 1.85062
    - 10 15.2877 14.1995
    - 20 37.1889 34.1835
    - 30 61.3041 56.2235
    - 40 86.6029 81.0535
    - 50 106.395 108.923
    - 60 123.075 133.271
    - 70 160.175 159.03
    - 80 175.395 177.178
  - # E(PA), IRON
    # MFP 1.173 MeV 1.332 MeV
    - 1 1.82598 1.79564
    - 10 14.3464 13.313
    - 20 34.7288 31.9021
    - 30 57.1744 52.416
    - 40 80.7676 75.522
    - 50 99.1916 101.434
    - 60 114.942 124.188
    - 70 149.265 147.874
    - 80 163.518 164.948
  conversion_factor:
  # energy(MeV) E(AP) E(PA)
  - 1.173 5.08992 4.41096
  - 1.332 5.60633 4.90614

```

2 列目以降は遮蔽体ごとの値

```

##|
##| 計算結果
##|
result:
  elapsed_time: 0.022 sec
  detector:
  - name: detector1
    dose:
    - at: 500.000 300.000 100.000 # 評価点 No. 1
      # energy Flux av.Bld E(AP) E(PA)
      # Mev 1/cm2/s - μSy/h μSy/h
      - 1.1730e+00 2.2701e+03 3.0878e+00 3.5678e+04 2.9612e+04
      - 1.3320e+00 2.5953e+03 2.8570e+00 4.1569e+04 3.4844e+04
      - TOTAL 4.8654e+03 5.3554e+00 7.7247e+04 6.4457e+04
    path_trace_from_pseudo_source_point:
    - from: 300.000 300.000 100.000 # 仮想線源点 No. 1
      to: 500.000 300.000 100.000 # 評価点 No. 1
      # 領域 物質 通過距離 x y z x y z
      - ATMOSPHERE VOID 100.000 from 300.000 300.000 100.000 to 400.000 300.000 100.000
      - inner IRON 5.000 from 400.000 300.000 100.000 to 405.000 300.000 100.000
      - ATMOSPHERE VOID 95.000 from 405.000 300.000 100.000 to 500.000 300.000 100.000
    - name: detector2

```

計算線量の出力

確認のため、「from 点」と「to 点」を結ぶ線分上にある領域を列挙

(後略)

4.3.6 計算結果の妥当性検証

現在までの開発項目について妥当性を検証するため、典型的な放射線取扱施設を想定した体系を用いた試算を実施した。包括的な妥当性検証は、次年度に実施する予定である。

計算体系を図 4-4 と図 4-5 に示す。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た体系である。

この線源利用空間の中央に、 ^{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。

以下、単位記載のない座標数値は cm 単位とする。

標準線源点は、利用空間内の $(x,y,z)=(300,300,100)$ とした。

線量評価点の座標は $(x,y,z)=(500,300,100)$ 、及び $(x,y,z)=(1100,300,100)$ とした。

表に ^{60}Co 線源の光子発生率を示す。

表 4-6 に計算に使用した物質組成を示す。

ビルドアップ係数のレファレンス材料は、評価点によらず、鉄とした。

表 4-5 線源核種 ^{60}Co の光子発生率

Energy(keV)	Yield
1,170	0.9997
1,330	0.9999

表 4-6 計算に使用した遮蔽材の物質組成

Element	H	C	N	O	MG	AL	SI	S	CA	FE	$\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$
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

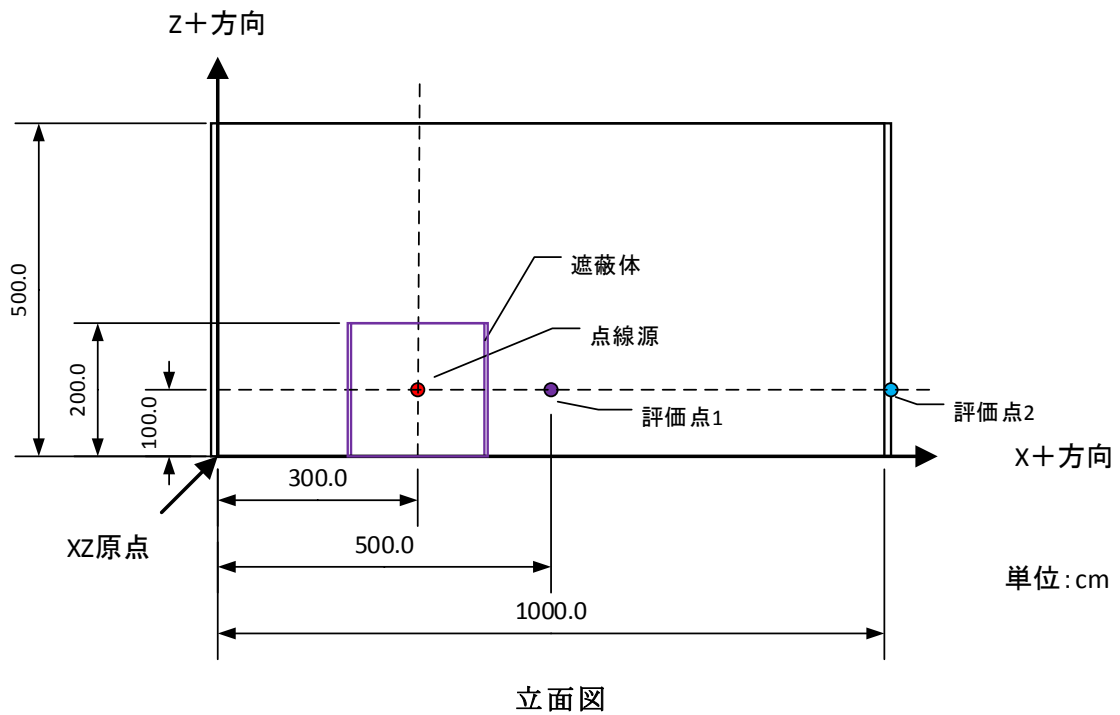
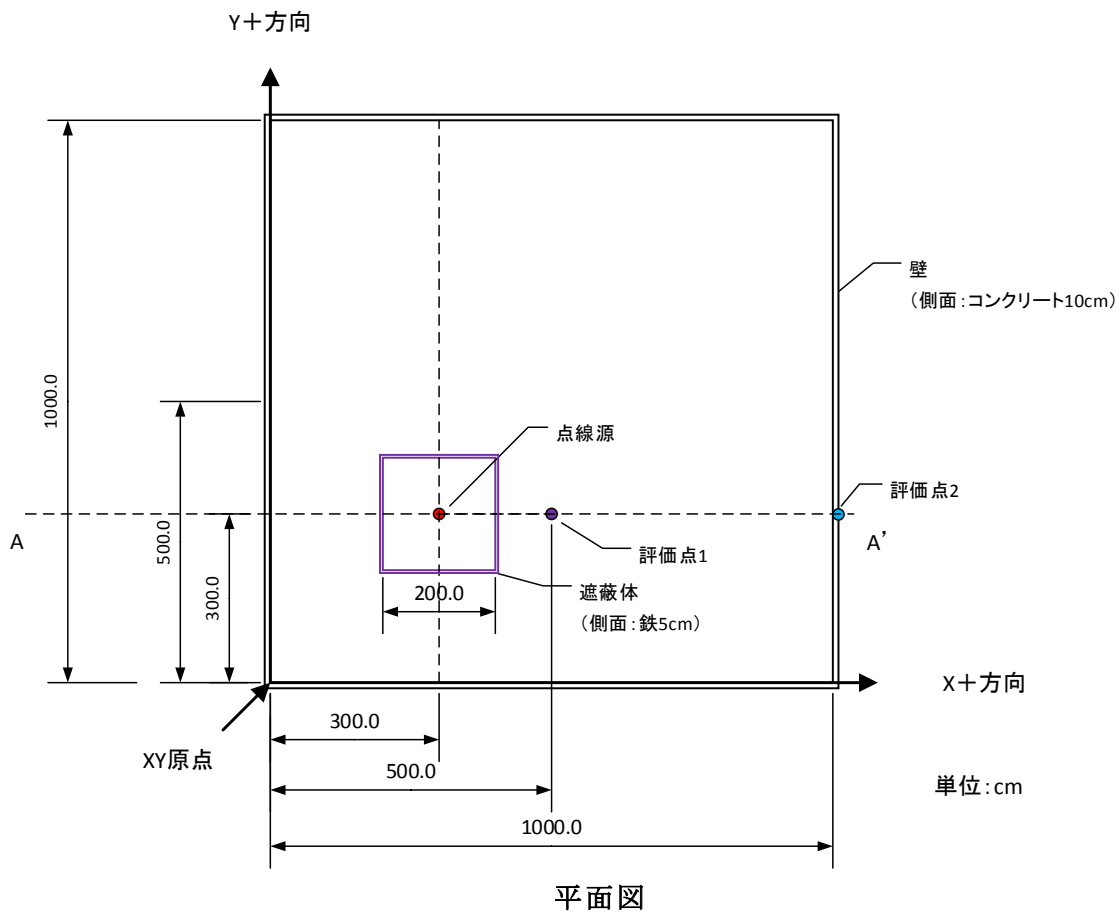


図 4-4 妥当性検証の計算体系例

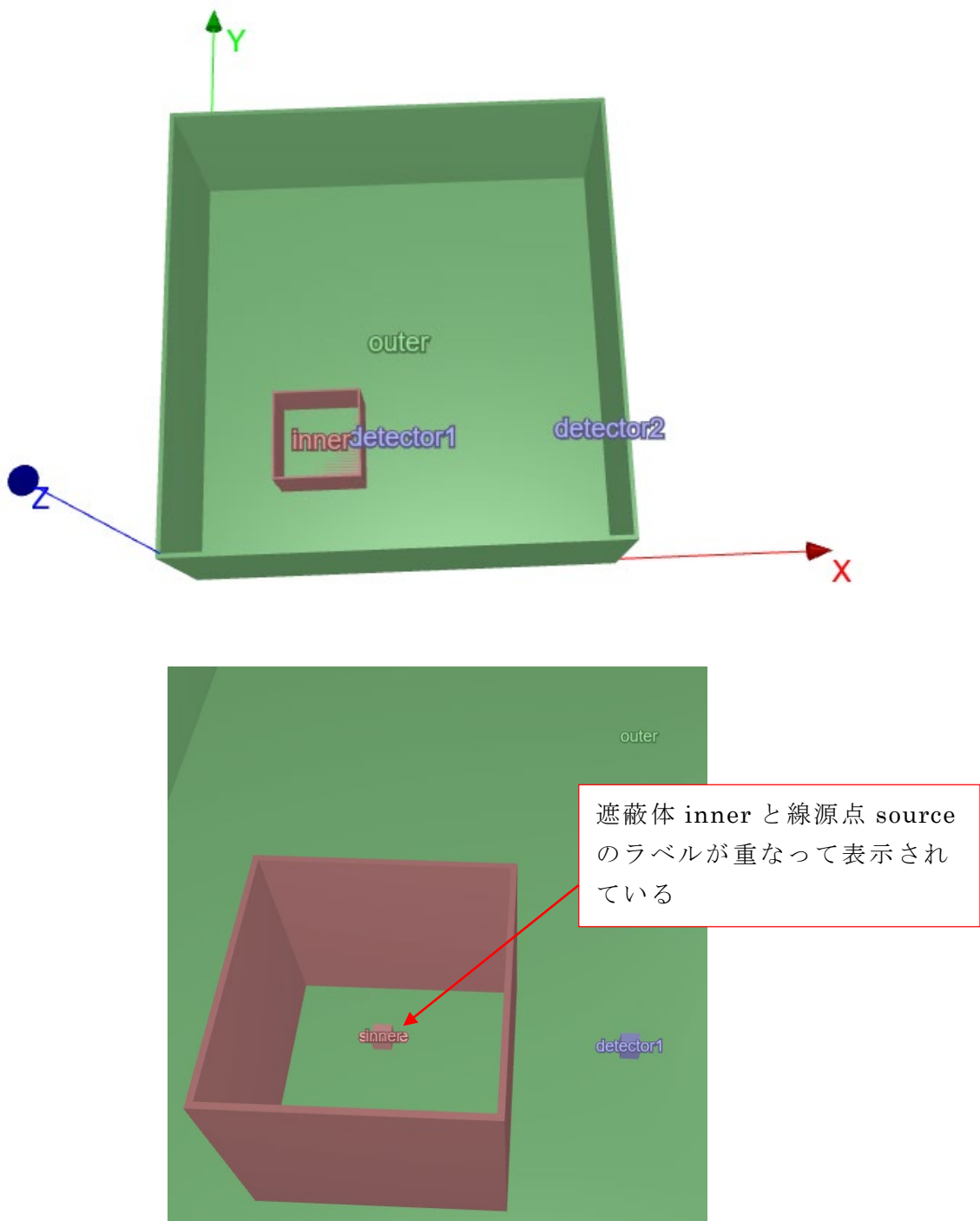


図 4-5 妥当性検証の計算体系例（可視化ペインの投影図）

計算コードの基本的な処理の妥当性を確認するために、線源形状を変化させた次の4ケースの計算を行った。

- 1) 点線源による計算 $(x,y,z)=(300,300,100)$
- 2) 直方体の体積線源による計算 $x=y=z=1$ 重心 $= (300,300,100)$

- 3) 球による体積線源の計算 $r=1$ 重心=(300,300,100)
- 4) 円筒による体積線源の計算 $r=1$ $h=1$ 重心=(300,300,100)

開発した計算コードの計算結果を、従来の実績ある QAD-CGGP2R 相当コードの計算結果と比較した。

また、このとき計算処理プロセスを調査して、以下の処理が正しく実行されていることを確認した。詳細は、次年度に予定する V&V 検証作業のなかで報告する。

- ・ RI 核種線源による光子発生率ライブラリのデータ読込処理
- ・ 幾何形状の入力と計算体系の組立処理
- ・ 線原点と線量評価点を結ぶ透過線上の幾何形状分析により透過距離算出
- ・ 物理定数、減衰係数、ビルドアップ係数、線量換算係数の内挿処理
- ・ 複数元素で定義された遮蔽材による減衰効果に係る処理
- ・ 微小体積に分割された体積線源の強度重み付けの処理
- ・ ガンマ線フラックスと線量率の算出処理

QAD-CGGP2R 相当コードは、次の点で本事業の開発コードと条件が異なる。

- ・ ビルドアップ係数
 - 『日本原子力学会標準 γ 線ビルドアップ係数：2013』(AESJ-SC-A005:2013)に基づく GP 近似式から求めている。
 - 物理定数 (GP フィッティングパラメータを含む) の内挿式として Akima の式を導入している。

表 4-7 に、計算に使用したパラメータの値と計算結果の比較を示す。比較の結果、処理手法の異なるビルドアップ係数も含めて、実効線量率 $E(AP)$ を求めるためのパラメータはすべて 1%以内の差異で一致していることがわかった。

表 4-8 に、1) から 4) までのケースに対する線量評価点 2 の $E(AP)$ 計算結果をまとめた。線源形状の変化は計算結果に影響しておらず、体積線源の計算処理が正常に動作していることを確認できた。

ただし、この妥当性検証問題の設定は、実績のあるガンマ線エネルギー範囲を対象としている。今回、開発した計算コードは、30MeV までエネルギー範囲を拡張していることから十分な検証とはいえない。次年度、高エネルギー領域のガンマ線に対する検証に取り組む必要がある。また、係数データに不連続部や急激な変化が現れる場合、エネルギー及び遮蔽厚さの補間が正しく行われることを検証する必要がある。

表 4-7 QAD-CGGP2R 相当コードと計算処理の比較（線量評価点 1）

60Co	A [QADCG-GPR2相当]					B [New Version(点線源)]					Err=(A-B)/B				
energy	Flux	av.Bld	AP	DF E(AP)	μ	Flux	av.Bld	E(AP)	df E(AP)	μ	Flux	Build	dose	df	μ
MeV	1/cm ² ·s	-	μ Sy/h	μ Sv/h	cm ⁻¹	1/cm ² ·s	-	μ Sy/h	μ Sv/h	cm ⁻¹					
1.17E+00	2.23E+03	3.11E+00	1.27E+02	1.83E-02	4.35E-01	2.24E+03	3.10E+00	1.27E+02	1.83E-02	4.34E-01	-0.6%	0.3%	-0.6%	-0.2%	0.2%
1.33E+00	2.56E+03	2.88E+00	1.48E+02	2.02E-02	4.08E-01	2.56E+03	2.87E+00	1.48E+02	2.02E-02	4.07E-01	-0.3%	0.3%	-0.1%	-0.1%	0.1%
total	4.78E+03	2.98E+00	2.75E+02			4.80E+03	2.97E+00	2.76E+02			-0.4%	0.3%	-0.3%		

(New Version : 本事業の開発コード)

表 4-8 異なる線源形状に対する E(AP)計算結果の比較（線量評価点 2）

線源形状ケース	1) 点線源	2) 直方体体積	3) 球体積	4) 円筒体積
E(AP) (μ Sv/h)	9.4585	9.4585	9.4585	9.4585

参考文献

[4-1] J. Kenneth Shultis and Richard E. Faw, American Nuclear Society, La Grange Rark, IL, ISBN 0-89448-456-7 (1999).

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。

表 5-1 研究班会合の開催実績

日程	対応者	連絡事項
令和 2 年 9 月 15 日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 委託事業の実施概要と工程確認 ・ 実施項目の研究進捗状況報告 ・ 今後のスケジュール
令和 2 年 10 月 27 日	同上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 委託事業の研究進捗状況報告 ・ 第一回研究レビュー委員会の議題確認 ・ 今後のスケジュール
令和 2 年 12 月 8 日	同上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 委託事業の研究進捗状況報告 ・ 第一回研究レビュー委員会の結果報告 ・ 今後のスケジュール
令和 3 年 1 月 20 日	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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) ・ 同 内海和紀 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 委託事業の中間報告 ・ 規制庁年次報告会の発表資料確認 ・ 眼の水晶体の外部被ばく評価に係る講演会報告 ・ 遮蔽計算コードの開発状況報告 ・ 今後のスケジュール
令和 3 年 3 月 24 日	同上	<ul style="list-style-type: none"> ・ 委託事業の年次最終報告 ・ 規制庁年次報告会の結果報告 ・ 遮蔽計算用データの整備状況報告 ・ 第二回研究レビュー委員会の結果報告 ・ 学会の成果発表報告 ・ 実績報告書の確認

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うこととした。

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 (2020.08)
上叢 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

2020年8月から2022年3月末まで約2年間に、2～3回／年の頻度で委員会開催を予定する。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。

開催形式として、東京都内に集合して成果報告と討議を行う予定であったが、コロナ禍の折、第1回委員会は、約1週間にわたってメールベースで報告と意見交換を行った。第2回委員会は、委員らの希望によりWeb会議を開催した。

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】 令和2年11月25日 ～12月4日 （メールベースの通信会議） 開催期間：約1週間	(1) 事業の概要 (2) 委員会の活動計画について (3) 研究進捗状況の報告 ① 海外の規制利用コードの対応状況調査 ② 簡易遮蔽計算コードの利用と新勧告対応に係る実態調査 ③ 本事業で開発する遮蔽計算コードの仕様・機能の提案 ④ 新勧告を反映した遮蔽計算用データの作成 (4) その他、次回予定等
【第2回】 令和3年3月16日 （Web会議） 09:30～12:00	(1) 事業の活動実績報告 (2) 外部被ばく計算における眼の水晶体の評価に係る講演報告 (3) 研究進捗状況の報告 ① 新勧告取入れに係る海外対応調査 ② 新勧告取入れを反映した遮蔽計算用データの開発 ③ 新勧告を反映した遮蔽計算コードの開発 (4) 規制庁年次報告会の報告 (5) 人材育成活動について (6) 次年度事業計画について (7) その他

また、第1回委員会において、追加質問事項として挙げた、眼の水晶体に関する外部被ばく線量評価の明確化を行うため、委員より国内外の動向と線量限度引き下げに係るご講演を賜った。表5-4に講演の開催実績を示す。

講演内容を踏まえた討議の結果、眼の水晶体の評価に対する国内動向を考慮して、次年度に3mm線量当量（Hp(3)）の評価を追加する検討を行うこととなった。

表 5-4 研究レビュー委員会の委員講演開催実績

タイトル、日程、講演者	議事
<p>【外部被ばく計算における眼の 水晶体の評価（実用量と防護 量）に係る講演】 令和3年1月14日（Web会 議）13:00~15:00</p> <p>講演者（発表順）： 保田浩志（広島大） 横山須美（藤田医科大）</p>	<p>議事：</p> <p>（1）開会挨拶 事務局 （2）「眼の水晶体に関連する国際的・国内動向 等」 保田講師 （3）「眼の水晶体の限度引き下げ等に係る話題提 供について」 横山講師 （4）ご質疑・ご討論</p> <p>配布資料：</p> <ul style="list-style-type: none"> ・（保田講師）外部被ばく計算コードにおける眼の 水晶体の評価の討議に係るメモ ・（横山講師）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会合、眼の水 晶体の限度引き下げ等に係る話題提供について

5.3 成果発表

今年度、本事業の概要と成果を報告する目的で下記1件の学会発表を実施した。。
付録XIに発表資料を添付する。

- ・平尾好弘、延原文祥、大西世紀、 γ 線簡易遮蔽線量計算法の適切な見直しに関する研究、日本原子力学会 2021年春の年会[1D04]、2020年3月17日。

5.4 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 簡易遮蔽計算コードレビューワーキンググループ（WG）

同WGは、その前身である「国産安全解析コード開発戦略検討WG」の提言を踏まえ、平成27年に設立された簡易遮蔽計算に係る専門家ワーキンググループである。

「国産安全解析コード開発戦略検討WG」では、放射線工学に係る解析コードの開発課題や体制について検討がなされており、遮蔽解析に使用される簡易解析コードについて、アメリカで半世紀近く前に開発されたものがベースであり、それらの多くに開発元のサポートは既がない[5-1]として、コードの国産化による新設を呼びかける提言がなされた[5-2][5-3]。

この提言を受けて、同部会は、実設計から安全評価まで広く用いられる簡易遮蔽計算コードの新設を目指して、従来のコードの課題を具体的に検討し、現代の計算環境

や最新の知見を反映する活動を開始した。その役割を担う作業会として平成 27 年に設立されたのが簡易遮蔽計算コードレビューWG である。

同 WG は 2 年間で活動を区切り、成果を踏まえてアクションプランの見直しを行っており、現在第三期の活動を行っている。これまで検討してきた計算コードの新設課題は、以前の WG 報告書に記されている[5-4][5-5]。

同 WG は、本事業の研究参加者、研究協力者の一部、及び研究機関、メーカー、エンジニアリング、ゼネコンから若手が参加しており、事実上、遮蔽計算技術に係る人材育成のプラットフォームとなっている。そこで、本事業で求められる人材育成活動を、同 WG を通じて次のとおり行うこととした。

- ・ 本事業の研究計画を示し、取り組んでいる課題とその進捗を報告する。
- ・ 課題に関心のあるメンバーを募り、協力して課題の解決にあたる。
- ・ WG で活動の成果発表とレポート作成を行い、意見交換を行う。

今年度、12 月と 3 月に 2 回の WG 会合を開催した。表 5-5 に活動実績と本事業に係る議事を抜粋して示す。現在、6～7 名の委員の協力により、ガンマ線ビルドアップ係数の計算とその妥当性の評価を実施している。

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
<p>【第 15 回 WG 会合】 日時：2020 年 12 月 21 日 14:00～ (Web 会議) 出席者(所属、敬称略)： 平尾、大西(海技研)、松田(原子力機構)、田中(株安藤ハザマ)、猪狩(MRA 株)、助川(量研機構)、稲吉(株テプコシステムズ)、延原(TNS 株)</p>	<p>・平尾より、配布資料③に基づき、規制庁安全研究の内容の説明と今後の計画について報告があった。本 WG を通じて研究課題の一部を実施することで若手の人材育成を図ること、及びビルドアップ係数(BF)の計算について協力依頼がなされた。</p> <p>配布資料： ③受託研究「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」の概要</p>
<p>【第 16 回 WG 会合】 日時：2021 年 3 月 11 日 14:00～ (Web 会議) 出席者(所属、敬称略)： 平尾、大西、近内(海技研)、松田(原子力機構)、猪狩(MRA 株)、田中(株安藤ハザマ)、坂本(ATOX)、助川(量研機構)、松居、稲吉(株テプコシステムズ)</p>	<p>・田中より、配布資料③に基づき、規制庁安全研究の課題である MC 法による BF 計算の進捗が報告された。</p> <p>・松田より、多重層遮蔽に対する簡易線量計算法をレビューした「IE 法に関する調査」が報告された。</p> <p>・平尾より、配布資料④の年次報告資料をもとに、規制庁安全研究の進捗報告が行われた。</p> <p>・延原より、Spring8 の遮蔽設計で用いられた STAC8 という簡易遮蔽計算コードについて情報提供があった。</p> <p>配布資料：</p>

ズ)、 時吉（大成建設）、 延原（TNS 株）	③モンテカルロ法によるビルドアップ係数計算 ④ICRP2007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(年次報告会資料)
-------------------------------	--

参考文献

- [5-1] 国産安全解析コード開発戦略検討ワーキンググループ,「国産安全解析コード開発戦略検討報告書」,日本原子力学会放射線工学部会,平成26年11月. <http://www.aesj.or.jp/~rst/fukushima/20150318.pdf>
- [5-2] 須山賢也,平尾好弘,坂本浩紀,「解説 国産安全解析コードの現状と課題ー我が国の安全規制への貢献を目指してー」,日本原子力学会誌,平成27年12月.
- [5-3] 中島宏,佐藤理,平山英夫「世界に取り残されつつある放射線輸送計算コード開発体制」,Isotope News, No.745, pp11-14,平成28年6月.
- [5-4] 簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ,「平成29年度簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ活動報告書」,日本原子力学会放射線工学部会,平成30年8月. http://www.aesj.or.jp/~rst/H29_WG_report.pdf
- [5-5] 簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ,「令和元年度簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ活動報告書」,日本原子力学会放射線工学部会,令和3年1月. http://www.aesj.or.jp/~rst/R1_WG_report.pdf

6 まとめ

本事業の研究期間は2年間であり、令和2年度はまず、海外における新勧告取入れ状況の調査を行い、国内専門家の意見も踏まえて遮蔽計算法とそれに使用されるデータの見直し範囲を決定した。また、その見直し範囲に従って、適切な見直し手順を検討し、実際に遮蔽線量計算法及び使用データの見直しをすすめるとともに、それらを導入した新勧告対応の γ 線遮蔽線量計算コードを開発した。

次年度は、引き続き、新勧告に対応した計算コードの開発を進め、異なる遮蔽計算コードの結果と比較して見直しの妥当性と影響を評価する。最後に、見直しの手順と根拠をまとめて、新勧告取入れの運用ガイドラインを作成する予定である。

各実施項目の達成状況は、下記のとおりである。

- (1) 遮蔽線量評価への新勧告取入れに係る海外対応調査（第1四半期～第2四半期）
 - ・ 米国で規制利用される遮蔽計算コードの調査し、最新の遮蔽線量計算法の仕様・機能を確認した。
 - ・ 遮蔽計算の妥当性を示すためのV&V手法を調査し、遮蔽計算法と使用データのV&V検証手法を確認した。
 - ・ 新勧告取入れの海外実態調査のため、欧米の規制担当者にメールで調査票を送って調査を申し入れた。
 - ・ 以上の調査をまとめて、新勧告取入れで求められる遮蔽線量計算コードの仕様・機能を提案した。個別に本事業における受容性評価を行い、遮蔽線量計算法及び使用データの見直し範囲を決定した。
 - ・ 調査の成果を研究レビュー委員会で報告し、外部専門家の意見を収集し、質疑・コメントを通じて仕様・機能の明確化を行った。
- (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（第2四半期～）
 - ・ (1)で決定した見直し範囲に従い、遮蔽線量計算用データの作成手順の検討を行い、根拠資料の整備を行った。
 - 実用性の高い遮蔽材料の選定、計算する線量種類の選定、データベースのテーブル設計、減衰係数の算出方法、ビルドアップ係数の算出方法
 - ・ 鉄及び鉛に対して作成したデータを、数表及びグラフを用いて例示するとともに、その特徴を示した。
- (3) 遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究（第2四半期～）
 - ・ (1)で決定した見直し範囲に従って遮蔽計算法の適用性拡張項目を決定した。
 - ・ 30MeVまで高エネルギー領域への範囲拡張対応検討を行い、光核反応による光中性子の線量寄与をガンマ線と分けて処理する簡易計算法を開発した。
 - ・ 新勧告に対応したガンマ線遮蔽線量計算コードの開発をすすめた。基本的な仕様に対してテキストベースの入出力による動作を確認し、計算の妥当性の確認を部分的に行った。

(4) 成果の公表

- ・ 日本原子力学会 2021 年春の年会において、研究の概要と進捗を報告した。

(5) 事業の進捗管理、及び人材育成活動

- ・ 研究班会議を計 5 回開催し、規制庁の対応者に進捗を報告し助言を仰いだ。
- ・ 月報を各月末に送付した。
- ・ 研究協力者から成る研究レビュー委員会を設置し、成果について意見を求めて検討を加えた。眼の水晶体の外部被ばく評価に係わる仕様の明確化のため、委員の講演を開催し、補足的に実用量を考慮する必要性を明らかにした。
- ・ 日本原子力学会放射線工学部会の簡易遮蔽計算コードレビューWGにおいて、若手メンバーらと協力して、遮蔽線量計算用データの作成と妥当性確認を行い、遮蔽線量計算技術の伝達を図った。

以 上

付録 I

海外規制利用コードの技術仕様と本事業への受容性評価

一覧

海外規制利用y 線遮蔽計算コード(MicroShield Pro Ver.12)				新勧告対応の観点から望ましいコード開発の技術仕様		本研究で開発する点減衰核法コードの仕様案		
付録 I 章節	仕様カテゴリー	概要	仕様	説明	左記仕様の受容性評価コメント	受容性評価結果	計算コード開発のポイント	外部専門家による確認事項
	1 計算ケースの入力作成	入力作成ステップ(左記1から7)に従う						
	1.1 1. 寸法入力	線源の定義	形状・寸法・位置			△		
	線源及び遮蔽体の寸法と材料組成を指定	遮蔽体の定義	寸法、位置、遮蔽厚さ、中間遮蔽体の選択(最大10個)	事前に定義された16種類の基本形状の中から、(点線源+スラブ遮蔽)、(円柱線源+円柱遮蔽体+スラブ遮蔽体)のように、数種類の線源と遮蔽体の組み合わせを選択し、それに応じたデータを入力する。	16種類の基本形状は必要な形状をカバーしている。線源と遮蔽体の組み合わせから体系を選ぶ方法は、設定項目が減って入力の容易さやミス防止の観点から有利であるが、体系設定の自由度に劣る。	△	複雑な体系の施設が増えている状況から、線源と形状の定義を独立させて自由度を確保する。形状の定義について、(既にQADやPHITSで実装されている)複雑な形状を表現可能なcombinatorial geometry手法を採用する。ただし、入力が煩瑣になるため、ユーザ教育や、妥当性確認のためのサポートツールが不可欠。	
		線量評価点の定義	位置(最大6個)		評価点の位置を空間の座標点で指定	△	評価点の設定数は任意とする。指定した線や面の上に並んだ格子点を一括設定する機能を追加する。	
		上記入力の妥当性確認	入力の整合性等を自動確認	・必要な全ての数値が入力されているか ・数値妥当性:項目間の矛盾や許されない範囲の値がないか ・計算上の制約:線源と評価点が近接しすぎないか	簡易な妥当性の自動確認が入力設定の段階で行われると便利である。	○	左記の仕様を採用	
	1.2 2. 材料密度入力	組込材料(内蔵)	12種類の材料を内蔵し、減衰係数データはANSI/ANS-6.4.3-1991から引用			△		
		カスタム材料の定義	一ケースにつき、最大8種類まで選択可能	カスタム材料作成ツール(5.3.1参照)を用いて、カスタム材料の定義を予め行い選択する。減弱係数・密度・BFの値は、同ツールで指定するか、または自動計算される。自動計算の信頼性に注意。	遮蔽によく使われる材料を組込むべきであるが、材料の種類が12種類と少ない。	△	単元素25種、混合物8種を組込の候補とし、そのうち、優先度の高〜中と考えられる15材料の情報をまず外部で計算して組み込む。	正確な特性値を整備した組込材料の候補について資料を配布するので、過不足ないか確認を依頼する。
		ミックス材料の定義	上の組込材料とカスタム材料から複数を指定して、かさ密度をベースに混ぜて新たにミックス材料を定義可能。	ミックス材料の実効密度は、2つの方法から選んで自動計算される。上のカスタム材料同様、減弱係数やBFの自動計算時の信頼性に注意。	カスタム材料・ミックス材料を、線量計算とは独立して、外部でユーザが定義できる点は材料の再利用の観点から有利である。QADの例では、ユーザが材料の組成を与えて、実効的な密度・減弱係数を内部で計算していたが、BFの自動計算までは行っていない。	○	線量計算とは別に、カスタム材料・ミックス材料を定義するための独立したサポートツールの開発が望ましい。カスタム・ミックス材料のように、任意の組成に対する材料を定義する場合は、基本的に外部で計算したBFを直接入力するが、BFの自動計算についても信頼性に注意して実装を検討する。	
		標準エネルギー群インデックス(内蔵)	0.015MeVから15 MeVまで25エネルギー群で予め定義された標準エネルギー群構造のこと	減衰係数及びビルドアップ係数に対する組込みライブラリの群構造に使用される。	ICRP 116において、外部被ばく線量換算係数のエネルギー範囲は拡張された。より高エネルギーに対応するのが望ましい。	△	高エネルギー対応のため、標準エネルギー群構造の範囲は0.010MeVから30MeVとする。15MeV以上の群分けの境界エネルギーは後で検討する。計算では光核反応で発生する中性子の寄与を考慮する。	各材料に対する減弱係数とBFの値は、標準エネルギー群構造にわたって整備される。計算の適用範囲として、このエネルギー範囲でよいか確認を依頼する。
	1.3 3. 線源強度入力	核種とその線源強度を指定する場合	核種リストから核種を選択する。核種選択後、選択した核種の線源強度(BqかCi)を入力する。	親と娘の核種関係は、ユーザが線源を崩壊させる選択をした場合、自動的に処理される。消滅光子は、線源核種が陽電子を放出する場合、自動的に含まれる。	線源入力について、RI核種を選択する方法の実装は望ましい。	○	ICRP107発行で、RI核種の崩壊による放射線データが新たに更新された。よって、線源入力において、RI核種の選択をサポートする機能の実装を検討する。	
	線源の強度及びエネルギーの指定方法は右の二種類	エネルギー群毎に放射線を直接入力する場合	線源強度(photon/sec)を各エネルギー群に直接入力する。線源強度で用いることのできるエネルギー群数は最大25まで。	—	このエネルギー群毎に線源強度を与える方法が、QAD等、以前からの指定の仕方である。	○	左記の仕様を採用	
	線源強度の入力で用いるエネルギー群構造をユーザが定義する方法について	光子エネルギーの群分け手法	標準群インデックス、線形、対数、指数、線源推定、ユーザ定義(直接入力)の6種類から選択可。	線源推定とは、外部測定データから線源を推定し、ケースを実行することなしに崩壊の影響を計算する手法のこと(5.3.3項参照)。例えば、廃棄物コンテナと遮蔽の組み合わせがあり、収納された廃棄物の線源以外を不変と仮定するなら、線源推定を使って線源を推定できる。	一般に線源データがどのように与えられるか分からないため、エネルギー群分けはユーザが任意に指定できる方が望ましい。線源推定は、外部測定データから線源強度を推定して入力するのに役立つが、5.3.3項のようなサポートツールが別に必要になる。	△	例えば、上で述べたRI核種の線源データをICRP107等から取り込む場合、内部で処理する群構造を自動で与えられるようにする。線源推定による線源の自動入力の必要性については検討を要する。	Y 線源のエネルギー群分けについて、線型、対数、または指数で分割するのがよい例があるか。また、測定した線量データから線源強度を推定して自動入力する機能は必要か。
		光子エネルギー群分けのオプション	上の群分け手法の選択で、標準群インデックス、線形、対数、指数のいずれかを選んだ場合、右の3つの群分けオプションを指定する。	・自動群分けの群数 ・エネルギーの下限カットオフ(デフォルト15keV、これ以下は指定不可) ・カットオフ未満のエネルギーの光子を、最低群の中に含めるか否かの選択(デフォルトは含める)	カットオフエネルギーの選択、及びそれ以下のエネルギーを考慮するか無視するかは選択は、ケースによって結果に影響する。	○	左記の使用を採用。ただし、下限カットオフのデフォルトは、上の標準群インデックスの最低群のエネルギーに従い、0.010MeVとする。	
		外部線源ファイルから読込	読み込んだ核種の情報が、組込ライブラリから得られるかを知らせる。	組込の核種ライブラリは次の三種類(核種数) ・Grove Nuclide Library (497) ・ICRP Publication 38 (838) ・ICRP Publication 107 (1252)	核種選択による放射線データは、基本的に最新のICRP-107から取り込む。古い勧告からデータを読み込む理由は、結果の比較のためと考えられる。	△	核種選択による放射線データは、基本的に最新のICRP-107から取り込む。	今後、古い勧告(ICRP38)の核種崩壊による放射線データを用いる機会はあるか。
	1.4 4. ビルドアップ係数レファレンス材料選択	ビルドアップ係数が用意されている材料(ソフト内蔵)について	・23種類の単元素:ベリリウム、ホウ素、炭素、窒素、酸素、ナトリウム、マグネシウム、アルミニウム、ケイ素、リン、硫黄、アルゴン、カリウム、カルシウム、鉄、銅、モリブデン、錫、ランタン、ガドリニウム、タングステン、鉛、ウラン ・3種類の混合物:空気、コンクリート、水	このうち、12種類が組込材料(5.1.2項参照)、14種類がANSI/ANS-6.4.3-1991からデータ引用	左記の26種類の材料以外の遮蔽材は、ユーザがそれらをミックスして、カスタム定義する。よって、カスタム材料の減弱係数やBF値は、自動的に近似計算で与えられており、誤差がある。頻用する材料は、外部でMCコードを使い、正確な値を評価して組み込んだ方がよい。	△	上の5.1.2項で述べた単元素26種、混合物8種の特性を外部で正確に計算して組込むことを目指す。初めは、優先度の高い15種類の材料から整備する。	上の5.1.2項を参照。本研究で整備する材料の他に、遮蔽材として注目される、または頻用される材料があれば、ご教示願う。
	以上の情報をもとにビルドアップするレファレンス材料を選択する。	ビルドアップするレファレンス遮蔽材の選択	上の5.1.1項~5.1.3項の入力が完了した後、線源から評価点の間の直線上に存在する遮蔽材のうち、一つをレファレンス遮蔽材として選択する。そして、レファレンス遮蔽材に対して適切なBF値を選択または指定する。	ここで選択したレファレンス材料だけがビルドアップ計算の対象になり、それ以外の材料では減弱係数を用いて減衰計算される。一般的なルールとして、評価点に近い最後の遮蔽材、または最大のビルドアップを示す(つまりMFP長の最も長い)材料を保守的に選択する。	画面上に、線源から評価点の間に存在する遮蔽材のリストと特性値が現れて、レファレンス遮蔽材の選択をサポートする機能は便利である。ただし、一般的なルールに従うだけなら、半自動的に選択可能と考えられる。	△	保守的なレファレンス材料を半自動的に選択するだけで十分か検討する。そうでないなら、レファレンス材料の選択をサポートする表示機能について検討する。	
		レファレンス遮蔽材に対するビルドアップ係数の定義	上の26種類の内蔵された材料から、あるいは、カスタム材料・ミックス材料を定義して、それを割り当てる。レファレンス遮蔽材のBF値はその選択した材料のBF値が用いられる。	レファレンス材料に対して最適なBF値を選択するのはユーザの責任である。一般的なBF値選択のアドバイスは、上に示したとおり。	レファレンス遮蔽材に対するBF値の選択は、ユーザに任せるとはいえ、上に述べたとおり、半自動的に選択可能と考えられる。	○	正確な特性値をもった組込材料から、あるいは、それらをカスタム・ミックスした材料からの両方から選択できるように検討する。	
		カスタム材料・ミックス材料のBF値の自動計算について	BF作成画面(5.3.1項参照)で、カスタム材料を定義するとき、次の方法でBF値が近似計算される。 ・無限平面、及び無限スラブの遮蔽体系 →テイラーの式で生成 ・それ以外の全ての遮蔽体系 →BFデータベース(ANSI/ANS-6.4.3-1991など)から抽出し、必要に応じて補間	カスタム・ミックス材料に対して、与えられた入射エネルギーとMFPのBF値が、データベースの数表から直接得られるわけではない。よって、原子番号、エネルギー、MFPに対して、数表の値を補間する必要がある。 原子番号によるBFの補間手法は、Sakamoto-NSE論文による。	カスタム材料作成ツールで、ユーザ定義の材料を作成したときに、BF値を生成する方法の説明である。現在の計算能力からみて、テイラー法に頼らずとも、構成材料のBFデータを逐次読み込んで補間計算で対応可能と考えられる。	△	カスタム材料や遮蔽体系にかかわらず、構成材料のBFデータを読み込み、データを補間してBF値を生成する。カスタム材料は、外部のサポートツールを用いて線量計算とは別に作成できることが望ましい。	

海外規制利用コード(MicroShield Pro Ver.12)		新勧告対応の観点から望ましいコード開発の技術仕様		本研究で開発する点減衰核法コードの仕様案				
付録 I 章節	仕様カテゴリー	概要	仕様	説明	左記仕様の受容性評価コメント	受容性評価結果	計算コード開発のポイント	外部専門家による確認事項
		カスタム材料・ミックス材料で自動計算されたBF値の信頼性について	・カスタム材料の組成やエネルギー範囲によっては、右のとおり、ビルドアップ係数値の近似計算に信頼性に注意が必要である。	・原子番号が50未満の元素のミックス … OK ・原子番号が42より大きな元素のミックス … × ・原子番号が42以上の元素を含むミックス、または、原子番号が42以上の元素を含むカスタム材料が、重量%で10%を超える場合 … △ ×・△は外部でMCコードで評価したBF値の使用を推奨	原子番号によるBF値の補間が可能になると、任意の組成の材料を定義してビルドアップ計算できるようになる。左記のような注意が必要であるが、QAD等にはない機能である。	○	Sakamoto-NSE論文に記載された近似計算を採用して、原子番号によるBF値の補間を採用する。ただし、	
		レファレンス材料に対して定義したビルドアップ係数を用いた点減衰核法計算の仕方について	レファレンス遮蔽材に対して定義されたBF値を、線源と評価点の間にある全ての遮蔽材を併せたMFP長に対して適用して、ビルドアップ計算を行う。	つまり、レファレンス材料だけでなく、間にある全ての材料に対しても同じBF値でビルドアップするものとみなす。この方法が大抵の遮蔽体系の一般に良い近似を与えたと考えられている。	レファレンス材料を一つ選んでそのBF値で全ての材料のBF値を代表する方法は、QAD等と同じである。ただし、多重層遮蔽で不都合があるため、下記のとおり、多重層用のBFを例外的に計算する機能がある。	○	左記の使用を採用。	
	右の二つの機能が新たに追加された。	ビルドアップ感度解析	様々な材料のビルドアップ係数を用いて、評価点における線量計算値の変化の傾向、及びその範囲の検討を利用者自らに実施させる。	レファレンス材料は一つしか選べず、それに最適なBF値を設定してビルドアップ計算する必要がある。その検討のために行う解析である。	異なる材料のBF値を自動設定して感度解析を行う機能は、手動で行うことも可能だが便利である。ただし、BF選択は大抵、半自動的に行われるため、使用する機会は多くない。	△	左記の使用を採用	レファレンス材料に対して最適なBF値を設定するために、感度解析を行う機能が必要か。
		多重層ビルドアップ係数対応	The equivalent atomic number interpolation algorithmを用いて、2つ以上のスラブ遮蔽層の組み合わせに対する多重層遮蔽のBFを生成する。ただし、スラブ遮蔽のみに対応。	左記のアルゴリズムは、カスタム材料作成ツール(5.3.1項)において、指定した組成の均質化材料のBFを生成する方法と同じである。指定した各スラブ遮蔽の組成を使ってBFを計算する。ただし、カスタム・ミックス材料には対応しない。	QAD等にはない機能だが、二重層遮蔽はよく使われるため、対応は急務である。ただし、各層の材料をミックスしたり、片方の層で代表したりすると、計算結果が過度に保守的になったり、非安全側になることが知られている。	△	左記の汎用的な方法ではなく、よく使われる特定の遮蔽材の組み合わせに対して、BFを正確に外部で評価して組み込む方法を検討する。	異なる材料を重ねた二重層遮蔽を用いる施設の例があればご教示願う。例えば、中性子と二次γ線を遮蔽する、あるいは異なるエネルギー範囲を効率的に遮蔽する目的。
1.5	5. 積分パラメータ入力	体系が、点、無限平面、または無限スラブの場合	解析式が、評価点のフルエンス率計算に用いられる。	—	体系で積分法を変える必要は特にないため、下の数値積分法を用いて良い。	×	下の数値積分法に従う。	
	体積線源に対する非衝突線の線量計算方法	その他全ての体系の場合、	ガウス求積法が、ポイントカーネル数値積分で用いられる。積分メッシュ分割の細かさは、ユーザ指定可能。 ・メッシュが細かいほど計算時間大 ・逆にメッシュサイズが大きすぎると真値から外れる。	・線源が小さくて線量点が遠い場合、粗いメッシュで十分。 ・一般に(線源と)線量点が近い場合、高次の求積が必要になる。高次ほど計算時間は長くなる。 ・場合により、2つ以上の積分セグメントに分けて積分を実行する機能あり。メッシュが細かい場合の収束が向上する。	体積線源に対して、体積のメッシュの切り方によって、左記のような体系で結果が変わることが知られている。自動的に体系を判定して、ガウス求積法を用いて対応するとよい。	○	左記の仕様を採用。ただし、体積線源と線量点が近い体系を判別して、ガウス求積法を自動的に適用する検討を行う。	
6.	タイトル・説明の入力	ユーザ利便のためのケース説明を記載	—	—	ケースの説明を入力に付属することはケースの再利用や見直しに必要である。	○	左記コードの仕様を採用	
1.6	7. 感度解析実行	感度解析におけるパラメータの設定	感度解析パラメータとして、線源、評価点、又は遮蔽体の厚さなどが指定可能 これにより、例えば、照射線量率の変動が遮蔽体厚さ、または線量点位置の関数として評価できるようにする。	感度の増分は、次の要素によって自動決定される。 ・増分=(最終値—初期値)÷ ケース数	手動で実行可能なため、自動化は将来の課題とする。	×	線源・評価点・遮蔽厚さに対する感度解析は、必要に応じて手動で行うこととし、自動実行する機能の実装は将来の課題とする。	
	ユーザが選択した変数に対する感度解析を実行	上のパラメータ以外のパラメータで感度解析したい場合	材料密度及び線源強度のような、その他のパラメータの感度解析も実行できるが、その場合、個別のケースをパラメータ修正しながら、解析を実施する必要がある。	個別に増分した感度ケースを作成してバッチ処理する。	同上	×	同上	
	感度解析とは、ある1つのパラメータを変化させ、それが評価点の線量値に与える影響を評価する解析のこと	パラメータ設定の妥当性チェック	感度設定を終了する前に、寸法がチェックされ、誤りがないか確認される。例えば、遮蔽体厚さの合計が線源から線量点までの距離を超えるような寸法設定。	線源寸法を変更した場合は、実行中、トータルの線源強度を一定に保つか、あるいは濃度を一定に保つかを尋ねられる。	同上	×	同上	
2	計算ケースの出力表示・レポート							
2.1	計算出力について	基本出力は下記。 ・入力で指定した各エネルギーに対する線量評価点のフルエンス率(photons/cm2/sec) ・上にエネルギーを乗じたエネルギーフルエンス率(MeV/cm2/sec)	左記の値を測定値や被ばく評価と比較できるように下記に換算する。 ・空気中の照射線量率(ICRP51) ・空気中のエネルギー吸収線量率(ICRP51) ・浅部線量当量、深部線量当量(ICRP74とICRP116に記載の各臓器に対する係数を使用) ・実効線量当量(ICRP51)	・換算係数として、基本的にICRP 51の該当表が用いられ、一部にICRP 74、ICRP 116、ANSI/ANS-6.1.1の該当表が用いられる。 ・空気中の照射線量率と実効線量当量の換算係数は、該当表のエネルギーに対して、減衰係数とビルドアップ係数の補間と同様、三次スプライン補間法で内挿される。	古いICRP勧告の換算係数を最新の勧告に従って換算係数を見直す必要がある。最近、W値の補正がICRU90で発表され、今後、照射線量・空気カーマに係る改定の可能性がある。 国内法令では基本的に、局所被ばくとして皮膚と眼の水晶体の等価線量を参照するため、それらの換算係数の整備を優先する。	△	各線量当量に対する換算係数を、次の新しい国際勧告に従って見直しを検討する。 ・空気中の照射線量率(換算係数:ICRP51、現状10MeVまで) ・空気カーマ率(ICRP51、現状10MeVまで) ・皮膚等価線量(ICRP116、AP照射体系、男女別) ・眼の水晶体等価線量(ICRP116、AP照射体系) ・実効線量当量(ICRP116、6種の照射体系)	左記の見直し対象の他に、整備を期待する換算係数があるか。例えば、臓器に対する深部線量当量の換算要請はあるか。吸収線量と1cm線量当量に対する換算の需要はあるか。
	出力レポートの提示	次の二種類のレポート ・ケースサマリー ・計算結果の数表	・ケースを再現するのに必要な全ての入力データ ・各エネルギー群、各線量評価点での計算結果 ・計算結果は、ビルドアップなしの場合と、ビルドアップあり(BFデータによる)の場合の二種類のフルエンス率で示される。	ビルドアップの有無で結果を比較すると、ビルドアップの効果を知るのに役立つ。	ケースサマリーはケースの再現計算や結果の説明にとって重要である。 なお、ビルドアップなしの計算結果を敢えて提出する必要はないが、結果の妥当性を調べる参考になる。	○	左記の仕様を採用する。左記の出力項目は、サマリーとして最低限必要な情報と考えられる。ビルドアップなしの計算結果も併記する。	ケースサマリーとして、他に出力が期待される計算の情報があれば、ご教示願う。
2.2	線減衰係数の表示	・遮蔽体に対するビルドアップ係数の選択で、減衰係数の配列を生成して表示する。	・遮蔽体毎、光子エネルギー毎に、材料密度と質量減衰係数の積の合計を表示 ・ミックス材料の場合、その個別の組成に対する減衰係数は表示されない。(例: 空気とコンクリートをミックスする場合、空気成分による寄与は分離表示できないため)	・この表示の目的は、別の計算コードの結果と比較して差異の理由を調べるためである。 ・大抵、遮蔽体の減衰係数の値が僅かな差異が原因である。指数で効くので僅かでも結果に影響する。 ・同じ結果を得ようとするなら、材料密度を調整して減衰係数を同じにするとよい。	線減衰係数は、プログラムにバグがなければ、特に表示する必要はない。プログラムの作成段階で徹底的に検証するか、上のケースサマリーに追記するオプションがあるとよい。 別の計算コードとの比較を行うとしても、結果を同一にする要請はないと考える。	△	線減衰係数の情報は、必要に応じてテキストで出力して確認できるようにする。画面表示機能は優先度低い。	
2.3	ビルドアップなしの計算結果	上の5.2.1項を参照(以下略)			オプションで出力	○	各評価点での計算結果をケースサマリーに出力する。	
2.4	ビルドアップありの計算結果	上の5.2.1項を参照(以下略)			出力必須	○	同上	
2.5	実効線量当量の提示	上の5.2.1項を参照(以下略)			出力必須	○	同上	
3	サポートツール							
3.1	カスタム材料作成ツール	カスタム材料組成画面	材料の構成要素名、重量%、相対原子数を入力する。	高Z元素を含んだ構成要素が全体の10重量%以上を占めたら警告を発する。 ・理由は、低エネルギーの光電吸収エッジで発生する特異点的発散が、実効原子番号による補間では正しく補正できないため。	線量計算とは独立して、カスタム材料を外部で作成するためのサポートツールがあると、材料データの整理と再利用に便利である。 BF値の自動計算に関する注意は、当然知っておくべき事であるため、警告不要と思われる。	○	カスタム材料作成ツールを実装して備える。左記の入力項目に従う。	
	右の6種類の画面を用いて、ユーザ定義の材料作成を支援する。	ビルドアップ係数作成画面	BFの配列(行を遮蔽厚mfp、列をエネルギーとした2次元表)を作成する。	BF作成に3つのオプションが選択可 ・実効原子番号補間による自動計算 ・ソフトのメモリに直接入力 ・外部材料ファイルから読込 自動計算は近似であり要注意(5.1.4項参照)	BF作成のオプションについて、MCコードを用いて外部で評価したBF値を指定するため、3つとも必要である。	○	左記のBF作成オプションに従う。	

		海外規制利用y 線遮蔽計算コード(MicroShield Pro Ver.12)			新勧告対応の観点から望ましいコード開発の技術仕様		本研究で開発する点減衰法コードの仕様案	
付録 I 章節	仕様カテゴリー	概要	仕様	説明	左記仕様の受容性評価コメント	受容性評価結果	計算コード開発のポイント	外部専門家による確認事項
	カスタム材料とは、構成要素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。構成要素とは、元素あるいは化合物を意味する。	カスタム材料光電吸収エッジ画面	低エネルギーに吸収エッジがある場合、断面積の不連続を解消するための補間を指示する。	必要な入力情報は、断面積不連続部(光電吸収エッジ)の「数」、「エネルギー」、「エッジ前後のビルドアップ係数」	光電吸収エッジの効果は、該当する材料とエネルギーにのみ現れるため、このように例外的な扱いをする必要がある。	○	左記の吸収エッジの入力情報に従う。吸収エッジに係る補間とビルドアップ計算を適切に実施する。	
	材料定義が完了したら、実効原子番号、実効原子量、エネルギー毎の質量減弱係数が生成される。	カスタム材料ビルドアップ係数グラフ画面	カスタム材料のビルドアップ係数がグラフで描画	カスタム材料に対して、特に減弱係数及びBF値を自動的に計算した場合、その妥当性をグラフや数表で確認するための機能である。	カスタム材料の特性値生成について、信頼性の点から自動計算の使用を限定し、基本的にMCコードで評価して正確に与えることとする。	△	優先度は高くないが、確認のためにあるとよい機能である。	
		カスタム材料減弱係数表示画面	線減弱係数を表形式、またはグラフ形式で表示	同上	同上	△	同上	
		カスタム材料質量減弱係数グラフ画面	質量減弱係数を表形式、またはグラフ形式で表示	同上	同上	△	同上	
	収録カスタム材料ファイルについて	コンクリート	10種類、データソース:ANS 6.4-2006 及びNIST		コンクリートの種類が多くて混乱を招く。また国内施設の評価に適用できるか不明である。	△	本研究では、国内向けとして、ANL-5800、学会標準案、NBS29のコンクリート組成と特性値を整備する。いずれも密度2.1g/cm3を参照値とする。	本研究で整備する組込材料の候補について資料を配布する。コンクリート遮蔽として、整備を期待する組成の情報があれば、お知らせ願う。
	65種以上のカスタム材料を、右の4つのカテゴリで収録	土壌	5種類、データソースは公開文献	クレイ、ロック、サンド、シルト、ソイル	左記の5種類は、土壌の水分量や粒度に依存しており、密度も異なる。代表的な土壌という概念は決定困難である。	△	本研究では、左記のソイル、あるいは土壌を輸送計算に用いた論文からデータを引用する。	本研究で整備する組込材料の候補について資料を配布する。土壌を輸送計算に用いた論文等の組成データがあればお知らせ願う。
		生体関連	19種類、データソースはNISTその他	ICRU-44からの引用含む	生体関連の材料について、遮蔽材としての応用が不明である。	×	本研究では、整備対象としていない。	生体関連の材料について、遮蔽用に整備が期待される材料があればお知らせ願う。
		その他	31種類、データソースはNISTその他	空気、水、高分子材、鉛ガラス等	一部の混合物について、遮蔽材としてポピュラーである。	△	本研究では、空気、水、ポリエチレン、鉛ガラス等を内蔵材料として整備する。組成は国内のデータを用いる。	本研究で整備する組込材料の候補について資料を配布する。単元素以外の混合物について、他に整備を期待する材料が、お知らせ願う。
3.2	外部線源ファイル作成ツール	頻用する標準的な核種、または標準的なエネルギー分布/放射線分布を作成する。外部線源ファイルとして保存する。	・エネルギー群とそれに対応する放射能(線源強度)を指定して作成 ・エネルギー群分けをユーザがカスタム可能	このツールは、上の5.1.3項で示した線源データの設定をサポートするツールである。	線源データの入力に際して、RI核種リストから核種を選択したり、エネルギー群毎に強度を指定する作業をサポートするツールは便利である。	○	いわゆる線源データ作成ツールの実装を検討する。	
3.3	線源推定ツール	外部で測定等で得られた照射線量率に基づいて線源の同位体含有量を推定する。	(省略)		外部測定データから線源を推定して、それを線源データとして指定するオプションの必要性について調査する。	×	実装の要請は、専門家の調査結果による。	上の5.1.3項で述べたとおり、外部測定データから線源を推定して、それを線源データとして用いる機会があるか。そうした線源推定は、遮蔽計算コードとは別に行われた方がよい。
3.4	照射線量率の経時的な変化に関する図表表示	親核種の崩壊やそれに伴う娘核種の生成に起因する線量率の経時的な変化を、時間の関数として予測する目的。	(省略)		例えば冷却、貯蔵、輸送の時間経過で線源が減衰したり、娘核種が生成したりして、計算結果が変化する可能性がある。検討の範囲外と考えるが、必要性について調査する。	×	実装の要請は、専門家の調査結果による。	時間経過による線源の変化と、計算結果の変化の関係を表示する必要性や実際の機会はあるか。
3.5	熱/エネルギー計算ツール	放射性核種の崩壊の結果、単位時間あたりに発生するトータルのエネルギー/熱を計算し、結果を表示する。	放射性核種セットとして、既存のケースファイルや線源ファイル(核種の情報を含む)、又はユーザが作成した核種と放射能のデータを取り込むことができる。		線源崩壊で発生する熱計算は、検討の範囲外である。	×		
3.6	材料データ及び核データの表示	線減弱係数	質量減弱係数が内蔵ファイルより読み込まれて表示される。 ・光電吸収エッジデータを含む。 ・この減弱係数表には100の元素と空気、水、コンクリートのデータが含まれる。 ・他にも半価層や(単体の)デフォルト密度を含む。		内蔵データをほぼ全て表示して、確認するための機能である。データがミスなく設定され、正常に読み込まれるなら、特に画面で確認する必要はない。	△	内蔵データを分かりやすく表示する機能が合った方がよいが、優先度は低い。	
	右の4種類のデータを表示する	ビルドアップ係数	・相関係数(correlation coefficients)が、内蔵ファイルから読み込まれる。 ・ANSI/ANS-6.4.3と比較可能な、GP法及びテイラー法によるビルドアップ係数相関係数(全てのエネルギー)を表にまとめる。		同上	△	本研究では、GP方やテイラー法等の補間手法は使用しないため、ビルドアップ係数表を直接表示することになる。優先度は低い。	
		線量換算係数	・評価点で算出されたフルエンス率は、換算係数により、空気中の照射線量、空気吸収線量、実効線量に換算される。これらの換算はICRP 51に基づいて実行される。 ・ソフトに内蔵された次の数値が表示される。 ・ICRP 51の表2.4.5.11の値とグラフ ・ANSI/ANS-6.1.1収録の相関係数		同上	△	新しい勧告に基づく線量換算係数の表を直接表示することになる。優先度は低い。	
		単位変換係数	組込みの数学定数や、単位系変換係数(inch⇔cm)等を表示する。		同上	△	優先度は低い。	
3.7	感度解析ケースの出力のグラフ表示	下のいずれかを選択すると、感度パラメータをX軸としたビルドアップ有り無し両方の出力グラフが表示される。 ・フルエンス率(光子数)/フルエンス率(エネルギー) ・空気中のmR/hr / 空気中のmrad/hr / 空気中のmGy/hr	必要に応じて、線量評価点を変更したり、Y軸の単位を下記いずれかに変更したりすることが可能。		本研究の感度解析は手動で行うため、優先度は低いが、単に入力の変化に応じて、結果がどう変化するか見たいとき等に便利である。ただし、rad(吸収線量)、Ci, rem はSI単位ではなく、選択単位として不要かもしれない。	×	感度解析の自動化が実装されたら、必要になる機能と考えられる。優先度は低い。	SI単位は、線源強度Bq、照射線量C/kg、吸収線量Gy、実効線量Svである。それらに対する旧来のCi, R, rad, remといった単位を使用できるようにすべきか、ご教示願う。
3.8	核種インポートツール	ORIGENコードの計算結果やその他の外部で作成した線源を取り込むことができる。	核種情報をいちいち手で再入力せずに済むメリットがある。特に核燃料線源の場合、ORIGENコードで線源データを作成する機会が多い。	基本的に、5.3.3項の外部線源ファイル作成ツールと同様の機能である。	核種情報をいちいち手で再入力せずに済むメリットがある。特に核燃料線源の場合、ORIGENコードで線源データを作成する機会が多い。	○	外部線源ファイル作成ツールで、外部線源ファイルを読み込むオプションがあるため、そこに統合することも考えられる。	
3.9	計算妥当性検証ツール	ソフト付属のベースケースとテストケースのセットがあり、自動的にテストケースを実行して、その出力をベースの結果と比較する。	このツールの目的は、ソフトが期待通りに動作することを合理的に保証することである。なお、計算をより厳密にチェックするV&Vパッケージが別に存在するが、その代替を意図したものではない。		V&V用の実行入力と(その入力による参照)結果があり、実行入力の計算結果と参照結果を比較して差異をチェックするツール。新しく開発するコードにおいて実現したい機能である。	○	V&V用の参照入力と参照結果を用意して、簡潔に計算の妥当性を確認する要請は高い。コードの開発が進み、一通り計算できるまでになったら、実装を検討する。	参照入力と参照結果は、過去の文献やマニュアルから引用する予定であるが、もし妥当性確認に好適な計算事例があれば、ご教示願う。

付録Ⅱ

海外規制利用コードの V&V 検証項目と本事業への受容性

評価一覧

遮蔽線量計算コード(MicroShield Pro)のV&Vパッケージ(MicroShield V&V Package)			本事業で求められる遮蔽線量計算法、または計算コードのV&Vのポイント																		
V&V検証項目	検証目的	検証方法	本事業で開発するコードのV&V検証項目	受容性評価	本事業で求められる遮蔽線量計算法のV&V検証方法																
外形寸法 入力制約—記載stated	寸法の入力制約を確認する。	識別されるべき寸法の入力制約が含まれることをレビューし、確認する。	入力制約は全ての入力項目について設定し、入力値の範囲や入力項目間の整合性を、入力終了時、ダイアログ終了時、または実行コマンド時にチェックする。制約に違反したら、その内容を表示して処理を止めて警告する。	○	全ての数値入力に対して、下限と上限を設定する。決まった選択肢は、選択リスト化して選択制にして入力を制限する。入力項目間に関係性があるものを洗い出して、一方の入力が他方の入力に与える変化を適切に反映、表示する。																
入力制約—チェック	識別された入力制約が正しく適用されていることを確認する。	ステップ1.各体系に対して、変数ごとに有効なデータと無効なデータを入力し、無効なデータの処理を確実に防止する。 ステップ2.各体系に対して、線量点が線源から1センチ以内にある場合、警告が表示されることを確認する。	・入力項目の全てについて、有効なデータと無効なデータを入力して、無効なデータの場合に実行しても処理されないことを確認する。 ・線源と評価点の距離が1cm以内にある場合、警告が表示されることを確認する。	○	全ての入力項目に対して、無効なデータが入れられたら、それをチェックして警告して処理を止める。チェックする段階は、入力終了時、ダイアログ終了時、または実行個々時とする。 線源と評価点の間の距離が1cm以内である場合、警告を表示する。ただし、ケース設定で警告の有無を選択可能とする。																
寸法変換係数		単一の体系に対して、インチ、フィート、およびメートルの入力変換が入力時に行われることを確認する。	寸法単位は、内部においてcmで統一して管理する。現状、入力の単位についてもそれぞれ統一してよい。	×	寸法単位は、入力においてcmで統一し、内部でもそれぞれで管理する。単位の変換はユーザが外部で行う。																
材料 ミックス材料(混合物)の減衰係数一定式化	ミックス材料の減衰係数を決定するために使用される方法が妥当か確認する。	均質なミックス材料の減衰係数を計算するために使用される方法が、「Principles of Radiation Shielding」の3.2節8」に記載の参照方法と同じか確認する。 8 Chilton, Shultis and Faw (1984), Principles of Radiation Shielding, Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.	ミックス材料の減衰係数を自動計算する方法が、左記に基づくことを確実にする。	○	ユーザ定義したミックス材料について、減衰係数の自動計算に左記の手法を用いる。																
ミックス材料の減衰係数—計算	均質混合物の減衰係数が正しく決定されるか確認する。	点線源ケースを作成し、混合物の減衰係数が適切に計算されているか確認する。 これを次の混合物に対して1 MeVでスプレッドシート/手計算を行う。 <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><thead><tr><th>Constituents</th><th>Volume %</th><th>Approximate Partial Density</th></tr></thead><tbody><tr><td>Concrete</td><td>85</td><td>2</td></tr><tr><td>Iron</td><td>15</td><td>1</td></tr></tbody></table>	Constituents	Volume %	Approximate Partial Density	Concrete	85	2	Iron	15	1	ミックス材料の減衰係数の自動計算手法の実装に対して、プログラムがバグなく正常に動作することを確実にする。	○	左記のミックス材料の例をコードで定義し、減衰係数の値を別途スプレッドシートを用いて計算した結果と比較し、同一であることを確認する。							
Constituents	Volume %	Approximate Partial Density																			
Concrete	85	2																			
Iron	15	1																			
ミックス材料のビルドアップ係数—配合	異なる材料の均質な混合物に対するビルドアップ係数の計算に使用される方法を確認する。	異なる材料の均質な混合物に対するビルドアップ係数の計算に使用 Compendium on Radiation Shielding」9で議論されたとおりであるか確認する。 9 Jaeger RG, et al., (1968) Engineering Compendium on Radiation Shielding, New York, Springer-Verlag.	ミックス材料のビルドアップ係数を自動計算する方法が、左記に基づくことを確実にする。	○	ユーザ定義したミックス材料について、ビルドアップ係数の自動計算に左記の手法を用いる。																
ミックス材料のビルドアップ係数—計算	均質な混合物のビルドアップ係数が正しいことを確認する。 また混合物のビルドアップ係数が適切に作成できない場合、警告が表示されることを確認する。	ステップ1 点線源ケースを実行し、ミックス材料のビルドアップ係数が計算されることを確認する。確認は、1MeVでの1mfplで等価な実効原子番号(EAN)に対して、遮蔽厚さを1MeVでの1mfplに設定することでなされる。上の2.1cで示したミックス材料の例に対して比較計算を行う。 1)ミックス材料のEANを計算し、手計算でそのビルドアップ係数を決定する。1mfplでのEAN等価材料に対して、ANSI / ANS-6.4.3に記載された表のデータを用いる。 3)EANと1mfplに対してソフトで自動計算を行い、上の手計算と比較してBFが正しく計算されていることを確認する。 4)ビルドアップ入力のオプション表示に同じ値が表示されることを確認する。 5)点線源ケースを実行する。この材料をビルドアップ領域として使用して、ビルドアップがある場合とない場合で結果を比較して、ビルドアップ係数がプログラムで適切に使用されているか確認する。 ステップ2 遮蔽体の一つとして鉛とウランをビルドアップ材料のリファレンスとして用いて、点線源ケースを設定する。そのケースの結果の表示及び印刷において、警告が表示されることを確認する。	ミックス材料のビルドアップ係数の自動計算手法の実装に対して、プログラムがバグなく正常に動作することを確実にする。 なお、適切に計算できない範囲の組成を用いた場合の警告については、実装の優先度は低い。	○	左記のミックス材料の例をコードで定義し、ビルドアップ係数の値を別途手計算した結果と比較し、同一であることを確認する。 2.1cの減衰計算の確認で用いたミックス材料の例を用いて、そのEANと1mfplに対してコードの自動計算と手計算の結果を比較する。手計算を行うためのBFデータは、ANSI/ANS-6.4.3記載の表から引用する。																
カスタム材料の作成—配合	分子・原子を組み合わせてカスタム材料を作成する方法を確認する。	重量%を指定して分子・原子を組み合わせてカスタム材料を作成するための配合式が適切に導かれているか確認する。	カスタム材料の作成において、指定した分子・原子の重量%を用いて適切に配合されていることを確実にする。	○	下記参照																
カスタム材料の作成		カスタム材料の構成要素が正しく組み合わせられていることを確認する。 ANSI / ANS-6.4.3の表6に示すNBSコンクリートの仕様に従ってカスタムコンクリートを作成する。材料の成分を印刷し、元素割合を表示する。カルシウムを選択し、手計算して元素の重量分率を確認する。	同上	○	ANSI / ANS-6.4.3の表6に示すNBSコンクリートの仕様に従ってカスタムコンクリートを作成する。材料の成分を印刷して元素割合を確認する。成分からカルシウムを選択し、重量%を手計算して結果が同一であることを確認する。																
カスタム材料の減衰係数とビルドアップ係数	カスタム作成した材料の特性を正しく計算しているか確認する。 カスタム材料のビルドアップ係数を正しく作成できない場合は、ユーザに警告を発するか確認する。	水、空気、コンクリートに対する組込みの減衰係数とBFの値がANSI / ANS-6.4.3記載のそれらと基本的に同じであることを確認する。 1)次の材料を作成する <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><thead><tr><th>Custom Material</th><th>Name</th></tr></thead><tbody><tr><td>Water (H₂O)</td><td>Water</td></tr><tr><td>Concrete</td><td>NBSConc</td></tr><tr><td>Air</td><td>NBSAir</td></tr></tbody></table> NBSConcおよびNBSAirの場合、ANSI / ANS-6.4.3の表6に記載されているミックス材料を使用する。 2)これらカスタム材料の減衰係数とビルドアップ係数を、組込材料のそれと比較する。 3)カスタム材料が、いずれも10重量パーセントを超える2つの高Z成分を用いて作成できないことを確認する。	Custom Material	Name	Water (H ₂ O)	Water	Concrete	NBSConc	Air	NBSAir	カスタム材料を作成した場合に、その特性値(減衰係数及びBF値)が正しく計算されるか確認する。 カスタム材料のビルドアップ係数を正しく作成できない場合に警告する機能は、後で検討する。	○	水、空気、コンクリートに対する組込みの減衰係数とBFの値がANSI / ANS-6.4.3記載のそれらと基本的に同じであることを確認する。 1)次のカスタム材料をそれぞれ作成する。 <table border="1" style="display: inline-table; vertical-align: middle;"><thead><tr><th>Custom Material</th><th>Name</th></tr></thead><tbody><tr><td>Water (H₂O)</td><td>Water</td></tr><tr><td>Concrete</td><td>NBSConc</td></tr><tr><td>Air</td><td>NBSAir</td></tr></tbody></table> NBSConcおよびNBSAirの場合、ANSI / ANS-6.4.3の表6に記載されているミックス材料の組成を使用する。 2)これらカスタム材料について自動計算された減衰係数とBFの値を、組込の同じ材料に対する特性値(ANSI/ANS-6.4.3引用)と比較し、基本的に同じであることを確認する。	Custom Material	Name	Water (H ₂ O)	Water	Concrete	NBSConc	Air	NBSAir
Custom Material	Name																				
Water (H ₂ O)	Water																				
Concrete	NBSConc																				
Air	NBSAir																				
Custom Material	Name																				
Water (H ₂ O)	Water																				
Concrete	NBSConc																				
Air	NBSAir																				
カスタム材料の使用	定義したカスタム材料を必要に応じてセーブし、またリロードすることを確認する。また、高Z材料がビルドアップに対して使用されたとき、それが認識されることを確認する。	上記で作成したカスタム材料を使用して、点線源ケースを設定する。 1)材料がロードされ、デフォルトの密度が適切に表示されることを確認する。 2)既定の遮蔽に組込の水、あるいはカスタム材料として作成した水を用いてケースを実行する。それらの結果が基本的に同一であることを確認する。 3)より大きい原子番号を持つ元素を含むカスタム材料を作成する。このカスタム材料が、ビルドアップ材料リファレンスとして遮蔽体の一つになる点線源ケースを設定する。このケースの結果の表示と印刷において警告が出ることを確認する。	ユーザが定義したカスタム材料を必要に応じてセーブしたり、リロードしたりできることを確認する。 なお、高Z材料がビルドアップに対して使用されたときに発する警告の機能は後で検討する。	○	上で作成したカスタム材料を使用して、点線源ケースを設定する。 1)材料がロードされ、デフォルトの密度が正しく表示されることを確認する。 2)既定の遮蔽体として、組込の水、あるいはカスタム材料として作成した水を用いてそれぞれケースを実行する。結果が基本的に同一であることを確認する。																
線源 光子ライブラリデータ	使用される光子ライブラリデータが次の参考文献と同じであることを確認する。 Kocher, DK (1981) Radioactive Decay Data Tables, A Handbook of Decay Data for Application to Radiation Dosimetry and Radiological Assessment, Technical information Center, USDoE.	MicroShieldにある放射性同位元素のデータを確認する(ランダムに選択された同位体-核分裂生成物 I-131, Cs-137, およびCe-144を含む。腐食生成物Co-60及びMn-54; アクチニドU-236, Cm-244, Am-241, Pu-241; および放射性核種C-14, K-40 及びCu-67)。データが参考文献データと同じであることを確認する。	内臓の光子ライブラリデータが、ICRP 107のデータと同じであることを確認する。	○	ランダムに選択された同位体、例えば核分裂生成物(I-131, Cs-137, Ce-144)、腐食生成物(Co-60, Mn-54)、アクチニド(U-236, Cm-244, Am-241, Pu-241)、及び放射性核種(C-14, K-40, Cu-67)に対して、内臓ライブラリの崩壊データが文献データと同じであることを確認する。																
減衰	崩壊方程式の数学的導出を確認する。	同位体崩壊方程式の数学的導出式をレビューして、それらが正しいことを確認する。	線源崩壊による時間減衰計算は検討の範囲外である。実装の必要性について調査を行う。	×																	
崩壊計算	崩壊計算を正しく実行するか確認する。	1)Ir-190m2の崩壊計算を60分間実行する。同じことを第4世代までのスプレッドシートを使用した計算を行って結果を比較する。 2)Th-232を1半減期の間崩壊させて、結果として生じる娘核種を確認する。親核種と平衡に達した娘核種を定性的に評価する。	同上	×																	

遮蔽線量計算コード(MicroShield Pro)のV&Vパッケージ(MicroShield V&V Package)			本事業で求められる遮蔽線量計算法、または計算コードのV&Vのポイント																																																																																												
V&V検証項目	検証目的	検証方法	本事業で開発するコードのV&V検証項目	受容性評価	本事業で求められる遮蔽線量計算法のV&V検証方法																																																																																										
光子ライブラリからの抽出	同位体の選択と光子の抽出を正しく実行するか確認する。	点線源ケースを作成し、次の核種グループを核種ライブラリから個別に選択し、核種ごとにICiを入力する。 ・グループ1: Ac-225(23個のガンマ線) ・グループ2: Ba-137m, Co-60, N-16(12個のガンマ線) 各グループについて、適切なエネルギー及び確率をもつ光子が全てライブラリから抽出されるか確認する。 これらの各グループを外部線源ファイルに正しくエクスポートされるか確認する。ケースファイルと外部線源ファイルを個別にロードし、リストを比較して一致することを確認する。	内臓の光子ライブラリデータから、線源核種の選択により、光子放出データが正しく抽出されるか確認する。 線源データが、外部線源ファイルに適切に保存されること、また外部線源ファイルから適切に読み込まれることを確認する。	○	点線源ケースを作成し、下記の核種グループを線源核種リストから個別に選択し、線源強度としてICiを入力する。 ・グループ1: Ac-225(23個のガンマ線) ・グループ2: Ba-137m, Co-60, N-16(12個のガンマ線) 各グループに対して、適切なエネルギーと放出確率がライブラリから抽出されるか確認する。また、各グループが外部線源ファイルに正しくエクスポートされること、そして、そのファイルを個別に読み込み、核種リストを比較して一致することを確認する。																																																																																										
光子エネルギー群分けオプションの実行	エネルギー群分けオプションを適切に実行するか確認する。	MicroShieldが次の核種グループをその下の各エネルギー群分けオプションに対してに正しくソートするか確認する。 ・核種グループ: Ac-225およびCo-60(群分けなしの場合、Co-60のみ) ・群分けオプション: 群分けなし、線形(10群)、指数(10群)、対数(10群)、ANS標準インデクス MicroShieldでこれらの核種をもつ点線源ケースを実行し、同じエネルギー群分けが線源メニューで作成されるか確認する。また、ケースファイルに対して、これらの同じエネルギー群分けがそれぞれ表示および印刷されるか確認する。	線源データの作成において、指定した核種のエネルギー群分けが指定したオプションどおりに正しく実行されることを確認する。 なお、本研究における線源データのエネルギー群構造は、基本的に本研究で決めた標準インデクスとするため、その他の群分けオプションの使用頻度は低い。よって、標準インデクスのオプションを優先して検証する。	○	外部線源ファイル作成ツールにおいて、次の核種グループを指定して読み込み、5種類の各エネルギー群分けオプションに対して正しく線源データがソートされるか確認する。 ・核種グループ: Ac-225およびCo-60(群分けなしの場合、Co-60のみ) ・群分けオプション: 群分けなし、線形(10群)、標準インデクス これらの核種をもつ点線源ケースを実行し、同じエネルギー群分けが線源メニューで作成されるか確認する。また、ケースサマリーにおいて、同じエネルギー群分けがそれぞれ表示および印刷されるか確認する。																																																																																										
線源強度をトータルに変換	線源のエリアとボリュームだけでなく、トータルの線源と線源強度の間の変換を正しく計算しているか確認する。	次の各体系についてケースを実行する。ディスク、矩形エリア、球、円筒(サーフェスとボリューム)、円錐台、矩形ボリューム(これらのエリアとボリューム)。そして、次のことを確認する。 ・エリアとボリュームが、材料入力画面に示されているとおり、正確に計算されていること ・線源強度またはトータルのいずれかを入力すると、もう一方が線源入力スクリーンに正しく計算されること また、線源入力で、データが入力されたとき、キュリーとベクレルが正しく変換されることを確認する。	定義した面線源及び体積線源について、その面積または体積を正確に計算して、その線源強度をトータルまたは単位あたりで正確に与えられることを確実にする。 線源形状として、直方体、球、円柱の優先度を高く想定して先に実装と検証を行い、次点に面線源を、その他は後で検討する。	○	・線源形状の入力に際して、面線源の面積または体積線源の体積が正しく計算されることを確認する。線源の形状は、直方体、球、円柱(表面または体積)から先に実装と検証を行う。 ・単位面積または単位体積あたりの線源強度を入力すると、トータルの線源強度に正確に変換されること、あるいはその逆の変換を確認する。 ・線源強度の単位はBqとCiのいずれにも対応し、互いに適切に換算されることを確認する。																																																																																										
外部線源ファイルのロード	外部の線源ファイルを適切に読み込んでいるか確認する。	正しい同位体またはエネルギー群が次のタイプの線源ファイルからケースファイルにインポートされるか確認する。まず、ライン、エリア、及びソリッドの体系の場合、それぞれ5 cm、5cm 2、および5cm 3の線源を使用する。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Check #</th> <th>Case Geometry</th> <th>External Source File Units</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Point</td><td>Ci</td></tr> <tr><td>2</td><td>Line</td><td>Ci</td></tr> <tr><td>3</td><td>Rectangular Area</td><td>Ci</td></tr> <tr><td>4</td><td>Rectangular Solid</td><td>Ci</td></tr> <tr><td>5</td><td>Line</td><td>µCi/cm</td></tr> <tr><td>6</td><td>Rectangular Area</td><td>µCi/cm²</td></tr> <tr><td>7</td><td>Rectangular Solid</td><td>µCi/cm³</td></tr> <tr><td>8</td><td>Point</td><td>Photon/sec</td></tr> <tr><td>9</td><td>Line</td><td>Photon/sec</td></tr> <tr><td>10</td><td>Rectangular Area</td><td>Photon/sec</td></tr> <tr><td>11</td><td>Rectangular Solid</td><td>Photon/sec</td></tr> <tr><td>12</td><td>Line</td><td>Photon/sec/cm</td></tr> <tr><td>13</td><td>Rectangular Area</td><td>Photon/sec/cm²</td></tr> <tr><td>14</td><td>Rectangular Solid</td><td>Photon/sec/cm³</td></tr> </tbody> </table>	Check #	Case Geometry	External Source File Units	1	Point	Ci	2	Line	Ci	3	Rectangular Area	Ci	4	Rectangular Solid	Ci	5	Line	µCi/cm	6	Rectangular Area	µCi/cm ²	7	Rectangular Solid	µCi/cm ³	8	Point	Photon/sec	9	Line	Photon/sec	10	Rectangular Area	Photon/sec	11	Rectangular Solid	Photon/sec	12	Line	Photon/sec/cm	13	Rectangular Area	Photon/sec/cm ²	14	Rectangular Solid	Photon/sec/cm ³	定義した線源形状に対して、外部線源ファイルから線源データ(核種またはエネルギー群毎の線源強度)を読み込んで正しく設定できるか確認する。また、入力可能な線源強度の全ての単位に適切に対応することを確認する。	○	下記の線源形状に対して、様々な単位の外部線源ファイルを読み込んで線源データが適切にインポートされるか確認する。線、面、及び体積の線源のサイズは、それぞれ5 cm、5cm2、および5cm3と仮定する。 また、いずれかの体系を使って、単位の不整合があった場合にユーザに通知されるか確認する。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Check #</th> <th>Case Geometry</th> <th>External Source File Units</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>Point</td><td>Ci</td></tr> <tr><td>2</td><td>Line</td><td>Ci</td></tr> <tr><td>3</td><td>Rectangular Area</td><td>Ci</td></tr> <tr><td>4</td><td>Rectangular Solid</td><td>Ci</td></tr> <tr><td>5</td><td>Line</td><td>µCi/cm</td></tr> <tr><td>6</td><td>Rectangular Area</td><td>µCi/cm²</td></tr> <tr><td>7</td><td>Rectangular Solid</td><td>µCi/cm³</td></tr> <tr><td>8</td><td>Point</td><td>Photon/sec</td></tr> <tr><td>9</td><td>Line</td><td>Photon/sec</td></tr> <tr><td>10</td><td>Rectangular Area</td><td>Photon/sec</td></tr> <tr><td>11</td><td>Rectangular Solid</td><td>Photon/sec</td></tr> <tr><td>12</td><td>Line</td><td>Photon/sec/cm</td></tr> <tr><td>13</td><td>Rectangular Area</td><td>Photon/sec/cm²</td></tr> <tr><td>14</td><td>Rectangular Solid</td><td>Photon/sec/cm³</td></tr> </tbody> </table>	Check #	Case Geometry	External Source File Units	1	Point	Ci	2	Line	Ci	3	Rectangular Area	Ci	4	Rectangular Solid	Ci	5	Line	µCi/cm	6	Rectangular Area	µCi/cm ²	7	Rectangular Solid	µCi/cm ³	8	Point	Photon/sec	9	Line	Photon/sec	10	Rectangular Area	Photon/sec	11	Rectangular Solid	Photon/sec	12	Line	Photon/sec/cm	13	Rectangular Area	Photon/sec/cm ²	14	Rectangular Solid	Photon/sec/cm ³
Check #	Case Geometry	External Source File Units																																																																																													
1	Point	Ci																																																																																													
2	Line	Ci																																																																																													
3	Rectangular Area	Ci																																																																																													
4	Rectangular Solid	Ci																																																																																													
5	Line	µCi/cm																																																																																													
6	Rectangular Area	µCi/cm ²																																																																																													
7	Rectangular Solid	µCi/cm ³																																																																																													
8	Point	Photon/sec																																																																																													
9	Line	Photon/sec																																																																																													
10	Rectangular Area	Photon/sec																																																																																													
11	Rectangular Solid	Photon/sec																																																																																													
12	Line	Photon/sec/cm																																																																																													
13	Rectangular Area	Photon/sec/cm ²																																																																																													
14	Rectangular Solid	Photon/sec/cm ³																																																																																													
Check #	Case Geometry	External Source File Units																																																																																													
1	Point	Ci																																																																																													
2	Line	Ci																																																																																													
3	Rectangular Area	Ci																																																																																													
4	Rectangular Solid	Ci																																																																																													
5	Line	µCi/cm																																																																																													
6	Rectangular Area	µCi/cm ²																																																																																													
7	Rectangular Solid	µCi/cm ³																																																																																													
8	Point	Photon/sec																																																																																													
9	Line	Photon/sec																																																																																													
10	Rectangular Area	Photon/sec																																																																																													
11	Rectangular Solid	Photon/sec																																																																																													
12	Line	Photon/sec/cm																																																																																													
13	Rectangular Area	Photon/sec/cm ²																																																																																													
14	Rectangular Solid	Photon/sec/cm ³																																																																																													
減衰係数	質量減衰係数ライブラリのデータがANSI / ANS-6.4.3のデータと整合していることを確認する。また、これによって正しい値がインポートされることを確認する。	0.15、0.5、1.0および2.0 MeVのエネルギーの点線源と7つのスラブ遮蔽をもつケースを次の仕様で作成する。すべての材料に1.0の様な密度を与える。そのケースに対する線減衰係数の表示を確認し、材料とエネルギーに対する値をANSI / ANS-6.4.3と比較して確認する。 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Case Specification</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>X = 10</td></tr> <tr><td>Y = 0</td></tr> <tr><td>Z = 0</td></tr> <tr><td>t(1) = t(2) =t(10) = 1 cm</td></tr> <tr><td>Shield-1 = iron, Shield-2 = lead, Shield-3 = concrete, Shield-4 = aluminum,</td></tr> <tr><td>Shield-5 = tin, Shield-6 = air, Shield-7 = water</td></tr> </tbody> </table>	Case Specification	X = 10	Y = 0	Z = 0	t(1) = t(2) =t(10) = 1 cm	Shield-1 = iron, Shield-2 = lead, Shield-3 = concrete, Shield-4 = aluminum,	Shield-5 = tin, Shield-6 = air, Shield-7 = water	内蔵された質量減衰係数ライブラリのデータを読み込んで、ANSI / ANS-6.4.3のデータと整合していることを確認する。	○	0.15、0.5、1.0および2.0 MeVの点線源、及び7つのスラブ遮蔽をもつケースを次の仕様で作成する。材料は全て1.0の様な密度を与える。そのケースの線減衰係数の表示を確認し、同じ材料とエネルギーに対してANSI / ANS-6.4.3のデータと比較して正しいか確認する(左記nCase Specification参照)。																																																																																			
Case Specification																																																																																															
X = 10																																																																																															
Y = 0																																																																																															
Z = 0																																																																																															
t(1) = t(2) =t(10) = 1 cm																																																																																															
Shield-1 = iron, Shield-2 = lead, Shield-3 = concrete, Shield-4 = aluminum,																																																																																															
Shield-5 = tin, Shield-6 = air, Shield-7 = water																																																																																															
減衰係数の内挿	指定したエネルギーに対して正しく減衰係数を内挿しているか確認する。	エネルギー内挿が正しく実行されていることを確認する。鉛を使用して0.088 MeVのkエッジエネルギー周辺が正しく処理されるか確認する。	減衰係数が、指定したエネルギーに対して、正しく内挿されることを確実にする。	○	エネルギー内挿が正しく実行されていることを確認する。鉛の材料を使用して、0.088 MeVのkエッジエネルギー付近の内挿が正しく処理されるか確認する。																																																																																										
ビルドアップ係数	内蔵ライブラリに正しいデータセットが含まれることを確認する。	選択した材料(空気、水、鉛)について、次のデータが次に記載の標準値と一致することを確認する。 ANSI / ANS-6.4.3-1991: 工学材料のガンマ線減衰係数とビルドアップ係数, ANS ・ビルドアップ係数 ・GP相関係数 ・テイラー相関係数	内蔵ライブラリにおいて収録するのは、左記のうちビルドアップ係数だけである。ビルドアップ係数は外部で改めて評価した値を用いるため、それが左記の標準値と大きく異なることを確認する。	△	選択した内蔵材料(空気、水、鉛)について、読み込まれたビルドアップ係数値が、次に記載の標準値と大きく異ならないか確認する。 ANSI / ANS-6.4.3-1991: 工学材のガンマ線減衰係数とビルドアップ係数																																																																																										
ビルドアップ係数の使用	ビルドアップ係数をロード、内挿および適切に使用しているか確認する。ビルドアップ係数の内挿を実効原子番号(EAN)、エネルギー、および平均自由行程(MFP)に対して正しく実行しているか確認する。	1. MFPの範囲にわたるEANによる内挿 鉛データ(エネルギー= 0.088および1.0 MeV)に対するビルドアップ対EAN)を使用してグラフを確認し、EANに対してビルドアップ係数のlog-linear内挿が、またMFPIに対して3次スプライン補間と多項式外挿が、0~60 MFPの範囲でEAN = 79およびEAN = 41に対して正しく実行されることを確認する。 2. エネルギーによる内挿 鉛に対して、内挿がビルドアップデータと実効的に一致することをビルドアップ係数対エネルギーのグラフを調べることで確認する。MFP=1及び7に対する検査を実行する。 3. ケース比較 BFのレファレンス材料として鉛を使用した点線源ケースをいくつかのエネルギーに対して実行する。mfp数が線減衰係数と等しくなるような1 cm遮蔽厚さを選択する。各エネルギーに対して、ビルドアップありのフルエンス率をビルドアップなしのそれで割った値を、ビルドアップ係数と比較する。	内蔵された材料のビルドアップ係数に対して、読み込み、内挿、計算での使用が適切になされていることを確実にする。 ビルドアップ係数の内挿について、実効原子番号(EAN)、エネルギー、および平均自由行程(MFP)に対して正しく実行されているか確認する。	○	1. 指定したMFPの範囲に対して、EANによるBF内挿の確認 鉛のBFデータ(0.088MeVおよび1.0 MeV)に対するビルドアップ対EANのデータ)を使用して、EANに対するlog-linear内挿、及びMFPIに対する3次スプライン補間が、指定した範囲(0から40mfp ↑)でEAN = 79および41の材料に対して正しく実行されるか確認する。 2. エネルギーによるBF内挿の確認 同様に、エネルギーに対するlog内挿、またはスプライン補間が実効的に適用できることを、エネルギーに対するBF変化のグラフをみて確認する。MFP=1及び7に対する検証を行う。 3. ケース比較 BFのレファレンス材料として鉛を使用した点線源ケースを作成し、いくつか異なる線源エネルギーに対して実行する。鉛遮蔽の厚さとして、mfp数が線減衰係数と等しくなるような1 cm遮蔽厚さを選択する。各エネルギーに対して、ビルドアップ有りのフルエンス率計算結果を無しの結果で割り、それをBF値と比較する。																																																																																										
テイラービルドアップ係数相関の使用	テイラー相関データに適切にアクセスしているか確認する。	VNVを使用して、テイラー相関ビルドアップ係数を表形式データ及びGP相関と比較する。これを0.1、0.5、1 MeVで鉛について実施する。	テイラー相関は使用されない。	×																																																																																											
ガウス求積法	求積法の横座標と重みの生成が正しいことを確認する。	8、16、および32求積次数の係数を生成し、次の公表値と結果を比較する。 Abramowitz, M., Stegun, IA(1968)、Handbook of Mathematical Functions, New York: Dover Publications.	ガウス求積法が正しく計算されていることを、文献値、あるいは文献のアルゴリズムと比較して確認する。	○	8、16、および32求積次数の係数を生成し、次の公表値と結果を比較する。 Abramowitz, M., Stegun, IA(1968)、Handbook of Mathematical Functions, New York: Dover Publications.																																																																																										

遮蔽線量計算コード(MicroShield Pro)のV&Vパッケージ(MicroShield V&V Package)			本事業で求められる遮蔽線量計算法、または計算コードのV&Vのポイント		
V&V検証項目	検証目的	検証方法	本事業で開発するコードのV&V検証項目	受容性評価	本事業で求められる遮蔽線量計算法のV&V検証方法
横座標と重みの使用	正しく横座標と重みを使用することを確認する。	ソースコードを見直して、計算の間、横座標と重みがVNVと同じルーチンを使用していることを確認する。	同上	×	下記の求積テクニックの確認に含まれる。
ガウス積分法のコーディング	1次元、2次元、および3次元の積分法ルーチンが正しくコーディングされているか確認する。	ソースコードを確認し、次のガウス求積法アルゴリズムが1、2、および3次元の積分に対して適切にコーディングされていることを確認する。 Press、WH、Flannery、BP、Teukolsky、SA、Vettering、WT(1989)、Numerical Recipes、Art of Scientific Computing (Fortran Version ed) Cambridge University Press、pp80-83.	同上	×	下記の積分実行による確認に含まれる。
積分チェック	1次元、2次元、および3次元の積分法ルーチンが求められた積分を正しく実行しているか確認する。	ライン(1次元)、エリア(2次元)、ポリウム(3次元)を数値的に積分して、上の求積テクニックが正しく使用されていることを示す。	同上	○	線(1次元)、面(2次元)、体積(3次元)の線源を各1例ずつ数値的に積分して、次の求積テクニックが正しくコーディングされ、使用されていることを確認する。 Press、WH、Flannery、BP、Teukolsky、SA、Vettering、WT(1989)、Numerical Recipes、Art of Scientific Computing (Fortran Version ed) Cambridge University Press、pp80-83.
線量換算係数 線量換算係数ライブラリ	被ばく換算データセットを正しく格納しているか確認する。	内蔵データセットが次の公開データと同一であることを確認する。 ICRP、1987。外部放射線の防護に使用するデータ。ICRP Publication51、Ann。ICRP 17(2-3)	換算係数の内蔵データセットにおいて、引用した公開データが正しく登録されていることを確実にする。ただし、左記の公開データは旧いため、新しいICRP2007年勧告に基づくデータセットを整備している。	○	内蔵の換算係数データセットからランダムにデータを拾い、次の新しい国際勧告のデータと同一であることを確認する。 ・皮膚被ばく(ICRP116、AP照射体系、男女) ・眼の水晶体被ばく(ICRP116、AP照射体系) ・実効線量当量 (ICRP116、6種類の照射体系)
線量換算n係数の内挿	上のデータを正しく内挿しているか確認する。	内挿が表形式のデータ間で正確にフィットしているか確認する。	換算係数データのエネルギー内挿が正しく実行されることを確実にする。	○	上記の内蔵されたデータセットに対して、ランダムにエネルギーに対するlog内挿またはスプライン補間を行い、グラフ表示して適切さを確認する。
フルエンス率の計算方法 線量変換係数の適切な使用	線量換算係数を正しく使用しているか確認する。	表インデックス間のエネルギーを指定した異なる5つのエネルギーでケースを実行する。そして、適切な換算係数が使用されていることを、フルエンス率の計算結果を、手計算で実行した換算結果と比較して確認する。その5つのエネルギー群に対して線量換算係数を生成する。	フルエンス率の換算計算において、正しく換算係数が使用されていることを確実にする。	○	異なる5つのエネルギーで特定の計算ケースを実行し、線量の計算結果を、フルエンス率の計算結果を手計算で換算した結果と比較して、換算係数が適切に使用されているか確認する。
数学的な導出(数式)	線源、遮蔽および線量点といった体系の数学的定式を検証する。	次の各線源タイプに対して、フルエンス率方程式の数式が正しいことを確認する。これらには、次の各線源タイプに対して、空間関係、積分リミット、平均自由行程、フルエンス率方程式に対して導出された数式が含まれる。 ・ポイント ・ライン ・円盤面 ・矩形面 ・円錐台 ・球体積 ・円筒体積 ・円筒面 ・直方体体積 ・無限平面 ・無限スラブ	実装した線源タイプについて、フルエンス率計算、すなわち点減衰核積分法のアルゴリズムが正しくコーディングされていることを確実にする。	×	下のコーディングの正しさの確認に含まれる。また、その下の計算結果の検証とも併せて計算方法の正しさの確認に役立つ。
コーディング	数式が正しくコーディングされていることを確認する。	ソースコードを確認して、次の各線源タイプに対して数式を正しく表現しているか確認する。 ・ポイント ・ライン ・円盤面 ・矩形面 ・円錐台 ・球体積 ・円筒体積 ・円筒面 ・直方体体積 ・無限平面 ・無限スラブ	同上	○	次の各線源タイプに対して、ソースコードのアルゴリズムが数式を正しく表現しているか確認する。線源タイプの実装の優先度は次のとおりである。 高)ポイント 球体積 円筒体積 直方体体積、中)円盤面 矩形面 円筒面 球面、低)ライン 円錐台
フルエンス率計算の検証		MicroShield V11との比較を1 MeVで実施する。比較に寄与する差異の数を最小限に抑えるために、MicroShield V11における減衰メディアの密度を、線減衰係数がMicroShield V12(最新版)のそれと同じになるように調整する。	開発したコードの計算結果を、同じ条件を用いたMicroShield V12、またはQAD系列コードの計算結果と比較して妥当性を検証する。		計算コード間の比較においては、次の条件を基本的に用いる。 ・使用する線源エネルギーは基本的に1MeVとする。 ・両方で遮蔽材の密度を同じに設定する。
点線源	点線源の計算結果を確認する。オフセットが適切に処理されることを確認する。	1.点線源ケースを同じ入力に対してMicroShieldV11とMicroShield V12を使って実行する。 2. MicroShield V12におけるY及びZ> 0で、MicroShield V11に対するline-of-sightの遮蔽厚さを手計算する。そして、結果を計算する。	点線源の計算結果を確認する。オフセットが適切に処理されることを確認する。	○	1.点線源ケースを作成し、遮蔽体を適当に配置して同じ入力に対して計算結果を比較する。 2. 1の比較をいくつかの評価点に対して実施する。 3. ケースサマリーに現れる遮蔽材の減衰係数やBF値を調べて、異常な差異が現れていないことを確認する。
線(ライン)線源	ライン線源の計算結果を確認する。オフセットが適切に処理されることを確認する。	1.同一のケースを実行する。角度を変えて結果を比較する。 2. MicroShield V12におけるZ>0で、plane-of-sight((X2+Z2)*0.5に沿って)の遮蔽厚さを手計算し、それをMicroShield V11に入力して結果を計算する。さらに、角度を調整する(あるいは、どちらのケースも90°を使用する)。 3.角度> 180°(MicroShield V12)で、V11を使用してミラーイメージを実行して結果を比較する。	ライン線源の計算結果を確認する。オフセットが適切に処理されることを確認する。ただし、ライン線源の実装は優先度が低いため、後にまわす。	△	基本的に上の点線源ケースに同じ検証手順を実行する。 ライン線源の場合、角度を変えて結果を比較する手順も考えられる。
円盤面線源	円盤面線源の計算結果を確認する。中心線の線量点及びオフセットの線量点に対して用いられる2つのアルゴリズムの間の整合性を調べる。	1. MicroShieldV12 をV11で同じ線源と構成で実行する。 2. □大きいR - X比とY = 0.001センチ(非常に小さい)を用いて、MicroShield V11とV12で結果を比較する。	円盤面線源の計算結果を確認する。中心線の線量点及びオフセットの線量点に対して用いられる2つのアルゴリズムの間の整合性を調べる。ただし、円盤面線源の実装は優先度が低いため、後にまわす。	△	基本的に上の点線源ケースに同じ検証手順を実行する。 円盤面線源の場合、円盤の半径が極端に大きい場合と極端に小さい場合で結果を比較する手順も考えられる。
矩形面線源	矩形面線源の計算結果を確認する。	1. MicroShieldV12 をV11で同じ線源と構成で実行する。	矩形面線源の計算結果を確認する。ただし、実装の優先度が低いため、後にまわす。	△	基本的に上の点線源ケースに同じ検証手順を実行する。
球面線源	球体積線源の計算結果を確認する。オフセットの線量点の影響を調査する。	1. MicroShield V12においてY = Z = 0をセットし、MicroShield V11とビルドアップなしで結果を比較する。 a)すべての球形遮蔽 b)球形遮蔽とスラブ遮蔽 2. Y> 0、スラブ遮蔽なし、ビルドアップなしで、MicroShield V11とMicroShield V12の結果を比較する。 MicroShield v11に対してXをマニュアルで調整し、同じケースを作成する。調整は、空気ギャップのみに適用される。 3. MicroShield V11を Y = 0.001及びZ = 0で実行し、MicroShield V11と結果を比較する。Y = Z = 0でMicroShield V12と結果を比較する。	球体積線源の計算結果を確認する。	○	基本的に上の点線源ケースに同じ検証手順を実行する。 球線源の場合、径が極端に大きい場合、と極端に小さい場合で結果を比較する手順も考えられる。 体積線源の場合、線源と評価点の距離を近づけて、ガウス求積法による結果を比較する手順も考えられる。
円筒線源	円筒体積線源の計算結果を確認する。オフセット線量点の影響を調査する。非常に薄い円筒を処理する機能を確認する。	1.円筒線源と水平(エンド)スラブ遮蔽を用いて、MicroShield V11とMicroShield V12の結果を比較する。線量点は、円筒軸上のR >> 0に置く。 2. 上記1の設定を使用して、MicroShield V11(中心線)を、MicroShield V12をX = 0.001で比較する。 3.垂直(側面)遮蔽を備えた円筒線源を使用して、MicroShield V11とV12で同じケースを実行する。すなわち、MicroShield V12に対してオフセット= 0とする。3つすべての遮蔽配置(Cyl、CylとSlab、およびSlab)に対してこれを繰り返す。また、Yを変化させて繰り返す(0から線源高さの半分まで)。	円筒体積線源の計算結果を確認する。	○	基本的に上の球体積線源ケースに同じ検証手順を実行する。

遮蔽線量計算コード(MicroShield Pro)のV&Vパッケージ(MicroShield V&V Package)			本事業で求められる遮蔽線量計算法、または計算コードのV&Vのポイント		
V&V検証項目	検証目的	検証方法	本事業で開発するコードのV&V検証項目	受容性評価	本事業で求められる遮蔽線量計算法のV&V検証方法
円筒面線源	円筒面線源の計算結果を確認する。オフセット線量点の影響を調査する。	1. 円筒サーフェス線源を使い、円筒軸上に線量点を置いてMicroShield V12のケースを実行する。円筒と同じ長さのライン線源を同じトータル線源強度でもつMicroShield V11ケースを作成する。そして、90度の角度、X=円筒半径でそのライン線源のケースを実行する。 2. 上記1を、異なる高さに線量点をおいて繰り返す。 3. 次の例外を除いて上記を繰り返す。サーフェスを10個の垂直スライスに分割する。各スライスをMicroShield V11のライン線源を用いて表す。そして、それらライン線源の結果の(10個分)総和して、サーフェス線源の結果と比較する。線量点は、 $X > 0$ に置く。	円筒面線源の計算結果を確認する。実装の優先度は中であり、後にまわす。	△	基本的に上の点線源ケースと同じ検証手順を実行する。円筒面線源の場合、円筒面の外側、または内側に評価点を置いて結果を検証する手順が考えられる。面線源の場合、面線源をライン線源の集合に分割して、結果を比較する手順も考えられる。
直方体体積線源	直方体体積線源の計算結果を確認する。オフセット線量点の影響を調査する。	1. MicroShield V11とMicroShield V12を同じ入力で比較する。 2. 大きなHとWの値で、MicroShield V11の中心線をMicroShield V12と比較する。オフセットの場合、小さいYを使用して比較する。 3. コーナーに線量点をおいたMicroShield V12の結果を、 $2 * W$ 、 $2 * H$ 、及び中心線に線量点をおいたV11の結果と比較する。V11の結果はV12の結果の4倍近くになるはずである。	直方体体積線源の計算結果を確認する。	○	基本的に上の球体積線源ケースと同じ検証手順を実行する。立方体線源の場合、評価点を立方体のコーナーに置いた場合と、立方体の中心線に置いた場合で結果を比較すると、4倍近い差が現れる。
円錐台線源	円錐台線源の計算結果を確認する。	MicroShield V11とMicroShield V12を同じ入力で比較する。	円錐台線源は実装の優先度が低いため、後にまわす。	△	
無限平面線源	無限平面線源の計算結果を確認する。	MicroShield V11とMicroShield V12を同じ入力で比較する。	同上	△	
無限スラブ線源	無限スラブ線源の計算結果を確認する。	MicroShield V11とMicroShield V12を同じ入力で比較する。	同上	△	
ANSI参照問題によるフルエンス率計算の比較 標準参照問題I.1	ANSI / ANS-6.6.1標準参照問題I.1に対して、同じ結果を与えることを確認する。	ANSI / ANS-6.6.1問題I.1と同じ計算を実施して結果を比較する。	同じ参照問題に対して、別の計算コードの結果と比較して妥当性を確認する。	○	MicroShield Pro、及びQADコードに対しても同じ参照問題を実施して、結果を比較する。
標準参照問題II.1	ANSI / ANS-6.6.1標準参照問題II.1に対して、同じ結果を与えることを確認する。	ANSI / ANS-6.6.1問題II.1と同じ計算を実施して結果を比較する。	同上	○	同上
追加の参照問題によるフルエンス率計算の比較 追加の参照問題1	追加の参照問題1に対して、同じ結果を与えることを確認する。	追加の参照問題1と同じ計算を実施して結果を比較する。	追加問題はマニュアルで与えられている。同上	○	同上
追加の参照問題2	追加の参照問題2に対して、同じ結果を与えることを確認する。	追加の参照問題2と同じ計算を実施して結果を比較する。	同上	○	同上
オフセット線量点によるフルエンス率計算の比較 オフセットありのディスク線源	オフセットありのディスク線源の結果を、オフセット線量点を置いた薄い円筒線源の結果と比較する。	非常に薄い円筒(高さ=0.001cm)であらわされた比較的大きい半径のディスクを使って、オフセットありのディスク線源による計算結果を確認する。このケースを異なるオフセット値で繰り返す。	オフセットとは、MicroShieldで設定可能な線源と遮蔽体の決められた位置に対して、線量評価点の位置をを少しずらすことを指す。これによって、空間移動で線量が微小に変化することを示し、別の計算コードと結果を比較して計算の妥当性を示す。 円盤面線源の実装の優先度は中であり、検証は後回しとする。	△	左記のオフセット条件に対して、MicroShield、またはQADコードと計算結果を比較して、線量変化に異常な差がないことを確認する。
オフセットありの球線源	オフセットありの球線源に対して、別の計算コードの結果と同様の結果を与えるか確認する。	球線源を使用して同じケースをQAD-CGコードの結果と比較する。遮蔽は3タイプ(球形、球形およびスラブ、スラブ)で、次の線量点位置を用いる。 線量点の場所: 1) オフセット[(Y2 + Z2)0.5] <半径 2) オフセット[(Y2 + Z2)0.5] >半径	同上。球線源の実装の優先度は高い。	○	同上
エンド遮蔽付きの円筒線源	オフセットありの円筒線源に対して、別の計算コードの結果と同様の結果を与えるか確認する。	円筒線源を使用して同じケースをQAD-CGコードの結果と比較する。遮蔽は水平スラブで、次の線量点位置を用いる。 線量点の場所: 1) オフセット[(X2 + Z2)0.5] <半径 2) オフセット[(X2 + Z2)0.5] >半径 次の[オフセット>半径]ケースを繰り返す。 3) サイドおよびエンドにクラッドclad付き、空気のイマージョン 4) 3と同じだが、サイドクラッドがなく、水にイマージョンする。	同上。円筒線源の実装の優先度は高い。	○	同上
サイド遮蔽付きの円筒線源	オフセットありの円筒線源に対して、別の計算コードの結果と同様の結果を与えるか確認する。	円筒線源を使用して同じケースをQAD-CGコードの結果と比較する。遮蔽は垂直スラブで、次の線量点位置を用いる。 線量点の場所: 1) オフセット[Z] <半径 2) オフセット[Z] >半径 3) Y > 高さ 4) 上の2と3の組み合わせ 次のバリエーションで上記のケースを繰り返す。 a) サイドおよびエンドにクラッドclad付き、遮蔽のアレンジを変化させる。 b) イマージョン遮蔽が空気 c) イマージョン遮蔽が水	同上	○	同上
内部に線量点のある円筒面線源	線量点が線源の円筒の内部にある円筒面線源に対して、別の計算コードの結果と同様の結果を与えるか確認する。	面線源は、QAD-CGコードの場合、薄肉円筒の「壁」で表現できる(二つの円筒の間の違い)。この体系で次のケースを実行して結果を比較する。 i) 円筒軸上の線量点 ii) $X > 0$ の異なるXを使用して、減衰媒体に空気を使用する。	同上。ただし、円筒面線源の実装の優先度は中である。	△	同上
外部に線量点のある円筒面線源	線量点が線源の円筒の外部にある円筒面線源に対して、別の計算コードの結果と同様の結果を与えるか確認する。	12.5c同様、面線源は、QAD-CGコードの場合、薄肉円筒の「壁」で表現できる(二つの円筒の間の違い)。この体系で次のケースを実行して結果を比較する。 i) Yを一定に保ち、Zを変化させる($Z = 1/2 * \text{Radius}$ 、 $Z = 2 * \text{Radius}$) ii) Z>半径を一定に保ち、Yを変化させる($Y = 0$ 、 $Y = 0.5 * \text{高さ}$)	同上	△	同上
直方体体積線源	オフセットありの直方体体積線源に対して、別の計算コードの結果と同様の結果を与えるか確認する。	QAD-CGコードを使用して、次の2つのケースを実行して結果を比較する。 1) $Y < H$ 2) $Y > H$	同上。直方体体積線源の実装の優先度は高い。	○	同上

遮蔽線量計算コード(MicroShield Pro)のV&Vパッケージ(MicroShield V&V Package)			本事業で求められる遮蔽線量計算法、または計算コードのV&Vのポイント		
V&V検証項目	検証目的	検証方法	本事業で開発するコードのV&V検証項目	受容性評価	本事業で求められる遮蔽線量計算法のV&V検証方法
線量点オフセットありのフルエンス率の変化—プロファイル (以降の体系に対して、遮蔽に平行な軸に沿ってエネルギーフルエンス率プロファイルを作成する。) エンド遮蔽付き円筒線源—プロファイル	水平遮蔽を備えた円筒線源に対して、遮蔽に「平行」な線量点でのエネルギーフルエンス率の変動が整合しており、適度にスムーズであることを定性的に確認する。	少なくとも1つのスラブ遮蔽、サイドクラッド、及びエンドクラッドをもつ円筒線源のケースを設定する。鉄のサイドとエンドクラッド付きのベースケース(空気中)を、線量点をオフセット=0からオフセット=(半径+高さ)の範囲で実行する。 次のバリエーションで実行を繰り返す。 a) サイド材料が空気 b) エンドクラッド材料が空気 これらのバリエーションはベースケースに関連している。ベースケースについて、QAD-CGコードを使用して同じプロファイルを作成する。	遮蔽に並行な軸に沿って線量評価点のオフセット位置をずらしながら、エネルギーフルエンス率の計算結果を保存して評価点位置による変化のグラフを作成する。こうした計算結果の分布表示に対して、変動の大きさや変動のスムーズさを調べることが計算の妥当性の確認に資する。 なお、スラブ遮蔽は直方体体積線源で置き可能である。	○	左記の連続的なオフセット条件に対して、MicroShield、またはQADコードによる計算結果の分布グラフと比較して、異常な差がないことを確認する。
サイド遮蔽付き円筒線源—プロファイル	垂直遮蔽を備えた円筒線源に対して、遮蔽に「平行」な線量点でのエネルギーフルエンス率の変動が整合しており、適度にスムーズであることを定性的に確認する。	少なくとも1つの円筒遮蔽と1つのスラブ遮蔽、サイドクラッドとエンドクラッドを備えた円筒線源のケースを設定する。鉄のサイドとエンドクラッドを備えた次の3つのベースケースを実行する(空気中)。 1) 線量点位置が、円筒軸に並行な垂直線に沿って変化する垂直プロファイル。XとZ(Z=0)は定数。Yは0から1.5*高さまで変化させる。 2) 線量点位置が、円筒軸に並行な垂直線に沿って変化する垂直プロファイル。XとZ(Z=0.5 * Radius)は一定。Yは0から1.5 *高さまで変化させる。 3) 線量点位置が、円筒ベースに並行な水平線に沿って変化する水平プロファイル。XとY(Y=中間の高さ)は一定。 基本ケースごとに、次のバリエーションを使用して計算を繰り返す。 a) サイドクラッド材が空気、 b) エンドクラッド材が空気 これらのバリエーションは、ベースケースに関連している。基本ケースごとに、比較のためにQAD-CGコードを使用して同じプロファイルを作成する。	同上	○	同上
球体線源—球形およびスラブ遮蔽	球形遮蔽とスラブ遮蔽を備えた球線源に対して、遮蔽に「平行」な線量点での被ばく率の変動が整合しており、適度にスムーズであることを定性的に確認する。	少なくとも1つのスラブ遮蔽を備えた球線源のベースケースを設定する。線量点をオフセット(YまたはZ)=0から、オフセット>=(2 * Radius)までの範囲に対して、空気中間遮蔽をもつベースケースを実行する。中間遮蔽の材料をコンクリートにかえて実行を繰り返す。 ベースケースについて、QAD-CGコードを使用して同じプロファイルを作成する。	同上	○	同上
線(ライン)線源—プロファイル	スラブ遮蔽を備えたライン線源に対して、線量点での被ばく率の変動が整合しており、適度にスムーズであることを定性的に確認する。	少なくとも1つのスラブ遮蔽とイマージョン遮蔽(空気)を備えたライン線源のベースケースを設定する。イマージョン遮蔽は、少なくともライン線源の長さの厚さ(Xにそって)をもつ。角度=0及びY=Z=0でベースケースを実行する。 0度と360度の間で角度を変えてベースケースを繰り返す。イマージョン遮蔽を水に変えて繰り返す。 次の各体系について、10ずつ増分して感度ケースを作成する。 ・2つの遮蔽を備えた線源 ・オフセット線量点と2つの遮蔽を備えたディスク線源 ・オフセット線量点と2つの遮蔽を備えた球形線源 ・オフセット線量点と2つのエンド遮蔽を備えた円筒線源 ・オフセット線量点と2つのサイド遮蔽を備えた円筒線源 許容できる範囲の寸法を全て使用する。寸法の増分が正しく実行されていることを確認する。	同上。ただし、ライン線源の実装優先度は低いため、検証を後回しとする。	△	同上
感度解析の計算 感度解析の設定	感度解析の設定で、寸法の増分が正しく実行されるか確認する。		感度解析を自動的に実行する機能の実装は、検討の範囲外である。現状では、感度計算が必要な場合、手動でパラメータを変えて実施する。 自動的な感度計算の必要性について、専門家にヒアリングする。	×	
線量点位置の変化	線量点の位置が異なる感度ケースまたは個別のケースに対して、類似の結果を与えることを確認する。同時に、不適切なデータ入力拒否されることを確認する。	13.2cのケースを用いて、サイド遮蔽を備えた円筒線源に対する感度解析ケースを設定する。そして、不適切なデータを入力しようとしても、ソフトが受け入れないことを保証する。 ・Yの変化 ・Zの変化 ・Xの変化 上のケースを実行した結果を感度解析の結果と比較し、同一であることを確認する。比較のために、異なるXで二つの個別ケースを選んで実行する。	同上	×	
遮蔽厚さの変化	遮蔽厚さを変化させた感度ケース、あるいは個別のケースに対して類似の結果を与え、不適切なデータが確実に拒否されることを確認する。	遮蔽厚さの異なるサイド遮蔽を備えた円筒線源に対する感度解析ケースを設定する。結果を比較して結果が一致することを確認する。また、不適切な遮蔽厚さのデータを入力しようとしても、ソフトが受け入れないことを確認する。	同上	×	
線源寸法の変化	線源寸法を変化させた感度ケースあるいは個別のケースに対して類似の結果を与え、また不適切なデータが確実に拒否されることを確認する。	点線源及び無限平板線源を除く、各体系に対して線源寸法の異なる感度解析ケースを設定する。ケースを作成して、ソフトがそれらのケースを適切に設定するか確認する。三つの線源に対して(ライン、ディスク、円筒)、トータル線源と線源強度を維持するオプションを実行し、プログラムがケースを正しく設定するか確認する。二つの体系(ディスクと円筒)に対して、感度ケースを実行し、結果が一致することを確認する。	同上	×	
その他のチェック ケースファイルのセーブとロード	ケースファイルを適切に保存、またはロードするか確認する。	このテスト計画の一部として、以前に実行され保存された2つのケースを再ロードして、再実行する。ケースを印刷して、その入力と結果を最初の実行時のものと比較して、それらが同一か確認する。	作成したケースを適切にファイルに保存し、またケースファイルを正しくロードすることを確実にする。	○	このテスト計画の中で実行された計算ケースを2種類ファイルで保存しておき、それを再ロードして再実行する。ケースサマリーをみて、入力と結果を最初の実行時のものと同一か確認する。
印刷および表示された出力	印刷された内容と、画面表示された出力が一致することを確認する。	各体系に対するケースに対して表示された結果を、そのケースファイルの印刷と比較する。そして入力と出力が一致することを確認する。また、次の入力変数が印刷および表示されることを確認する。 ・すべての寸法と位置、 ・ケースのすべての材料、 ・線源が核種毎に入力された場合のすべての核種、 ・すべてのエネルギー群と線源強度、 ・積分パラメータ、 ・ビルドアップ係数関連	画面で表示されたケースサマリーの入力または出力、その他の情報と、それらを保存したケースファイルの内容が一致するか確認する。	○	このテスト計画の中で実行された計算ケースに対して、計算結果の画面表示と、計算情報を保存したケースファイルの内容が一致するか確認する。また、次の入力変数がケースファイルにあることと、画面に表示されることを確認する。 ・すべての寸法と位置、 ・ケースのすべての材料、 ・線源が核種毎に入力された場合のすべての核種、 ・すべてのエネルギー群と線源強度、 ・積分パラメータ、 ・ビルドアップ係数関連
バッチ実行	バッチファイルを正しくロードして実行するか確認する。	このテスト計画の実装に使用される5つのケースを含むバッチファイルを作成し、バッチ実行入力キューを実行する。その結果を印刷し、ケースを個別に実行した結果と比較して結果が同一であることを確認する。	ケースを連続して自動実行するバッチ処理の実装は、検討の範囲外である。その必要性について専門家にヒアリングする。	×	
単位変換係数	正しい単位変換係数を使用しているか確認する。	1) 計算結果のフルエンス率をエネルギーフルエンス率へ変換 印刷出力と表示画面印刷を使用して、光子フルエンス率がエネルギーフルエンス率に適切に変換されることを確認する。 2) 照射線量率 点線源ケースを作成し、選択単位としてmR / hrを用いて結果を表示する。その結果を照射線量率に対して表示し、換算が適切であることを確認する。	基本的な計算出力の種類は、線量評価点のフルエンス率(photons/cm2/sec)と、それにエネルギーを乗じたエネルギーフルエンス率(MeV/cm2/sec)である。また、それに換算係数を乗じて得られる照射線量率や実効線量率等がある。同じ線量種類に対して、異なる単位が用いられる場合、換算が正しく行われていることを確実にする。単位が一つの場合は省略する。	○	1) 計算結果のフルエンス率をエネルギーフルエンス率へ変換 このテスト計画で実行した計算ケースに対して、画面で示されるフルエンス率がエネルギーフルエンス率に適切に変換されていることを、手計算と比較して確認する。 2) 照射線量率 同様に、照射線量率を二つの異なる単位(C/kg/hrとmR/hr)で表した結果が適切な変換であるか確認する。単位Rを用いない場合は省略する。

付録Ⅲ

遮蔽線量計算法の見直し提案に係る確認事項と

研究レビュー委員会意見

連番	仕様・機能	解説	研究レビュー委員会での確認事項	委員から得られた主な意見、及び本事業への受容性評価(→)	委員からの付帯コメント、及び本事業への受容性評価(→)
1	組込材料	組込材料とは、精度の高い特性値(密度・減弱係数・ビルドアップ係数等)を与えた遮蔽材料のことである。カスタム材料とは、ユーザが組込材料を混合して作成するユーザ定義の材料のことである。組込材料に含まれない材料を指定すると、カスタム材料として作成されるが、カスタム材料の特性値は特定のルールで自動計算されるため、混合する核種によって誤差が現れる可能性がある。	本事業で整備する組込材料のリストを報告書案に示した。リストに不足がないか、つまり特定の施設・応用にとって重要な、あるいは頻用される γ 線の遮蔽材料が他にないか確認する。 理由は、重要な遮蔽材は組込材料に含めて正確な特性値を与えた方がよいため。(付録Ⅵ参照)	<ul style="list-style-type: none"> 組込材料のリストは概ね妥当と考えられる。 鉛: 鉛には通常Sbが数%入っており断面積が大きいので、詳細計算で含める。 → <u>組込材料として鉛を追加し、Sbを含めて特性値を算出する。</u> SUS(304,316系が代表的): 水に接する設備や容器ではSUS材が利用される。 炭素鋼: オーバーバック候補材。鉄筋を含めない。 → <u>複数の要請があったため、SUSは組込材料として整備を検討する。</u> (以下の材料はその特殊性から、検討を後回しとする) <ul style="list-style-type: none"> UO2: プール水喪失事故を仮定した特殊ケースで使用済燃料の直接線評価に用いる。 RASHIX(酸化鉄のセラミック): オフサイトセンターや6MeV LINAC室の遮へい壁 無鉛遮蔽石膏板: X線分野 遮蔽シート(バリウム、タングステン): X線分野、ダクト開口部に貼る。 	<ul style="list-style-type: none"> 委員からの付帯コメント、及び本事業への受容性評価(→) カスタム材料に関する特性値計算のルールを明確にすべき。実際のコンクリートは千差万別で、低放射化、ポロン入り、重コンクリートなど特殊コンクリートの様に、施工管理によって密度・成分指定する場合もある。カスタム材料の特性値作成方法の例示が必要と考える。 組込材料の密度が変化できると良い。(領域を均質化させて材料設定するときがある) → <u>カスタム材料に対する特性値計算のルールを明確化する</u> → <u>材料の組成・特性値の密度補正のルールを明確化する</u>
2	組込材料のコンクリート組成	コンクリートは重要な遮蔽材であるため、組込材料に含まれる。コンクリートの構成は大まかにセメントと骨材であるが、特に骨材が地域によって異なるため、組成の分布にバラツキがある。暫定的にANL-5800とNBSコンクリート、及び今後予定される日本原子力学会標準の組成案を組込材料のリストに含めた。 なお、配筋による強化コンクリートまたは重コンクリートの類は、鉄とコンクリートを混合してカスタム定義することで十分と考えられる。	施設・応用の遮蔽設計、またはは遮蔽安全評価に用いられるコンクリートで、本事業で整備を期待する組成の情報(他に)があるか確認する。 また、最近はまだ見ないが、重コンクリートのようにコンクリートに鉄のような何かを混ぜて製作したものを使用する場合があるか確認する。(付録Ⅵ参照)	<ul style="list-style-type: none"> 原子力発電所での事例は多くないが、次の事例がある。 重コンクリート: IF水処理廃棄物の保管設備 軽(量)コンクリート: 原子炉建屋天井など 日本原子力学会で検討している標準コンクリート組成 → <u>軽量コンクリートについて天井で用いられることがあるため、カスタム材料として後で検討する。</u> 新勧告による外ばく換算係数は、低エネルギー光子の係数が高くなるため、壁等の追加遮蔽が必要か検討するケースが考えられる。2重層との関係も含めて、コンクリート+追加遮蔽材の簡易評価法も重要と考えられる。 → <u>コンクリート+追加遮蔽材の簡易評価法について、二重層遮蔽の検討に加える。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> 組込材料組成を大量に作成しても、ユーザが選択に悩む原因になる。代表組成を1つとし、複数作成する場合はデフォルト(推奨値)を設定することが望ましい。 → <u>コンクリートはバラツキが大きく、代表組成を絞りこむ。ただし、ユーザの利便性を考えて、できるだけ少数の組成を組込み、あとは密度の補正でカスタムできるようにしたい。</u> 元素組成と密度に応じた整理をしておく、今回対象にする素材以外の物質でできた遮へい材への応用が容易になるのではないかと → 拝承 質量減弱係数はコンクリートの構成元素の質量減弱係数から算出できるが、γ線ビルドアップ係数は明確な根拠がない。実効原子番号を評価して、γ線ビルドアップ係数の原子番号による内挿が望ましい。 → 拝承。カスタム材料の実効原子番号によるBF内挿をルールとして採用する。
3	組込材料の土壌組成	土壌は、盛り土・土嚢による遮蔽、ピット・地下施設設計、あるいは土壌汚染等の緊急時対応で用いられる可能性がある。これまで土嚢等の効果を無視して保守的な評価を行うことがあった。計算による合理的な評価を検討する。	特定の施設・応用における土壌を用いた遮蔽の方策と、その場合の土壌の組成について参照があるか確認する。(付録Ⅵ参照)	<ul style="list-style-type: none"> 土壌遮蔽について、原発での事例は少ないが、土嚢袋など補助的遮蔽に利用された事例はある。緊急時の使用であれば保守性の観点から、元素組成より密度の評価が重要である。下記の検討を行う。 経験上、土壌の密度は1.1-1.7程度の幅があり、現物があれば嵩密度を参考に1.4、1.5を用いる。組成は、H,C,O,Al,Ca,Si,K,Feから成るが、Ge検出器のsumming factorをMC計算する際は、SiO2で代表させている。 → <u>組成は付録Ⅵで検討したものを採用する。密度については、代表的に1.5をデフォルト値として整備し、特定の範囲の密度で補正可能とする。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> 原子力発電所での事例は少ないが、土嚢袋など補助的遮蔽に利用された事例がある。 緊急時の使用では、保守性以外に合理性はない。実際、カスタムが大半になると思うが、この場合、組成、密度など、選択の判断指標を示すことが合理的と考えられる。 → <u>組込材料の組成・密度に関する選択の根拠を明確化する。</u>
4	フィルタ系材料の組成	各種の排気フィルタによる遮蔽効果はこれまで無視することが多かった。吸着剤の入った汚染水処理タンク等に対して、吸着剤の効果について合理的な評価を検討する。	特定の施設・応用に対して用いられるフィルタ・吸着剤の類で、遮蔽効果が期待される事例はあるか。また、それらの材料組成に関する情報があるか確認する。(付録Ⅵ参照)	<ul style="list-style-type: none"> IFのCs吸着フィルタのゼオライトの密度を考慮した評価事例がある。 フィルタ・吸着剤に放射能が吸着された場合の自己遮蔽効果が期待されるが、密度は大きくないので無視してもさほど過大評価にならない。 → <u>ゼオライトをフィルタ系の代表と考える。ただし、安全評価上、無視されるとの意見があるため、フィルタ系の整備を後回しとする。</u> その他の組込候補材料 → カスタム材料として対応するため、検討を後回しとする。 遮蔽シート(タングステン、バリウム) シリコン樹脂をバインダーにしたタングステン配合の塗料 ポリエチレン・ホウ酸樹脂材料 廃炉関係で超重泥水 	<ul style="list-style-type: none"> 企業秘密(特許など)に抵触する恐れがあるため、その際の取決めを用意する必要がある。ぜひ確認してほしい。 → 拝承 フィルタや吸着剤だけでなく、廃棄物などで領域を均質化することがあるため、組込材料の密度が変化できると良い。 → <u>カスタム材料は指定した組成を均質化して考えている。それに密度を指定して特性値を調整することで対応する。</u>
5	RI核種の放出する崩壊放射線データの読込	γ 線の線源データの入力方法として、次の二つを採用する。 ・ RI核種とその強度を指定する。RI核種の崩壊放射線データはライブラリから読み込む。 ・ エネルギー群毎に放出率を直接入力する。エネルギー群構造はデフォルトを用意するが、任意の群構造を指定可能にするか検討する(下の第6番、第7番参照)。	本事業では、RI核種の崩壊放射線データライブラリとして、最新のICRP 107(DECDC2ベース)を採用する。今後、旧ICRP 38の崩壊放射線データを用いる機会は考えられるか。また、特定の施設・応用に対してよく用いられる線源データライブラリ、あるいはよく用いられる線源作成コード(ORIGENやD-CHAIN等)はあるか確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ICRP Pub.107ベースのyieldデータが適切であり、提案仕様で概ね妥当。 β核種の制動放射線の扱いをサポートできる機能(Sr90/Y90など)。 → <u>その他の委員コメントで同様の指摘があった。実務マニュアル記載のベータ核種の線源対応を試験的に検討する。</u> デフォルトは必須として、任意性も欠かせないと考えられる。 → <u>エネルギーに対する線源強度を直接指定可能とする。</u> ORIGEN2の内蔵データを良く使うため、後者の入力方法も必要。 → 拝承 ICRP38リバイス版でJEARI03(ICRP1983,Endo1999,endo2001)と呼ばれるライブラリも使うことがある。 → <u>後から出版されたICRP 107でカバーされているはずである。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> 左記のJAERI03参考文献 Endo, A. et al., Compilation of Nuclear Decay Data Used for Dose Calculation Revised Data for Radionuclides Not Listed in ICRP Publication 38, JAERI-Data/Code 99-035, 1999. Endo, A., and Y. Yamaguchi, Compilation of Nuclear Decay Data Used for Dose Calculation Revised Data for Radionuclides Listed in ICRP Publication 38, JAERI-Data/Code 2001-004, 2001.
6	線源エネルギー範囲の拡張デフォルトのエネルギー群構造	γ 線源、また材料の特性値は、内部のエネルギー群構造に従ってデータが作成される。一般によく用いられる群構造は、ANS標準エネルギー群インデクスと呼ばれ、0.015MeVから15MeVまで25のエネルギー群で定義される。 ただし、新勧告のICRP 116において、下は10keVから上は15MeVよりさらに高いエネルギーに対する線量換算係数が示された。また、ICRP 107において、核種から放出される放射のエネルギーがかなり低い所まで登録された。	本事業では、上は30MeVの γ 線源エネルギーまで高エネルギー対応を計画する。デフォルトの群構造として、15keVから15 MeVまではANS標準エネルギー群インデクスを用い、15MeVから30MeVまでは5MeV毎に分割し、全部で29群を予定する。エネルギー範囲拡張と群構造について、注意や意見があれば頂きたい。 なお、この高エネルギー拡張は、PET施設を念頭に置いているが、その他に15MeVを越えるような高エネルギー γ 線を遮蔽する必要のある施設・応用が考えられるか確認する。	<ul style="list-style-type: none"> γ線のデフォルトのエネルギー群構造に対して、中性子のエネルギー群構造はγ線のエネルギー群構造と同じとするのか。 → 現状、光中性子以外に、中性子線源一般の入力まで検討していない。 エネルギーバンドではなく、XCOM等文献で整備された点群を用いる方が良い。ただしデータ量としては多くなる。 → <u>点群で整備された線源データはそのまま扱えるようにする。</u> エネルギー群構造はユーザ指定できれば、デフォルトに拘るずともよい。 → デフォルトを一応用意する。 	<ul style="list-style-type: none"> FDGを作るサイクロ施設の場合、自前施設で12-15MeV,専門の製薬会社でポジロンFDGをデリバリーする施設で30MeV程なので、高エネルギー対応が必要になる。 質量減弱係数については、PHOTXで1keVから100Gevのデータがあるが、γ線BFについては上限15MeV程度である。また高エネルギーγ線は、物質によって光中性子が発生するため中性子の線量評価も必要になる。 → <u>今回、高エネルギーγ(<30MeV)及び光中性子の線量についてMC計算でデータ整備する。</u>

連番	仕様・機能	解説	研究レビュー委員会での確認事項	委員から得られた主な意見、及び本事業への受容性評価(→)	委員からの付帯コメント、及び本事業への受容性評価(→)
7	任意のエネルギー群構造に対応	デフォルトのエネルギー群構造以外に、任意のエネルギー群構造で線源データを指定する場合が考えられる。例えば、 ・測定で得られたエネルギー放出率データの取り込み ・外部の線源作成コード(ORIGEN等)用いられる群構造で表された線源データの取り込み ・線量測定データから逆推定された線源データの取り込み(直下の第7番参照)	γ線源データの入力において、線型、指数(対数)等を指定してエネルギー群を任意に分割し、群毎の放出率を直接入力する事例があるか。また、下記のように線源を指定する事例があるか確認する。 ・測定で得られたエネルギースペクトルデータの取り込み ・外部の線源作成コード(ORIGEN等)で作成された任意群の線源データの取り込み ・線量測定データから逆推定された線源データの取り込み	・既存実績では、基本的に代表群構造で計算している。 → 代表群構造をデフォルトで用意する。 ・他で測定、計算された線源について入力した例は多々ある。 → 特定フォーマットの外部線源データのインポートを採用する。 ・エネルギー群構造はユーザ指定できる方がよい。 → ユーザが群構造を指定できるようにする。 ・エネルギー群による取扱いでは、群の平均エネルギーを代表エネルギーとするか、バンドスペクトルで評価するのか検討が必要。 → 群構造を指定可能にすると、こうした検討が必要になる。オプションで選べるようにしたい。	
8	外部線量データから線源を推定する機能	測定した線量データから線源データ、すなわちエネルギー毎の放射線放出率を逆に推定する機能の必要性について検討する。	測定した線量データから、エネルギー毎の放射線放出率を逆に推定する機能、そしてその結果をそのまま遮蔽計算の線源データとして設定する機能は必要か確認する。事例をご存じならお知らせ願う。	・線源核種が既知、またはスペクトル測定があるなら、線量から線源強度の推定は有る程度可能である。下記の特種なニーズがある。 ・線量分布(測定結果)から、線源濃度分布の推定の要望は多くある。(1F特有のニーズと思われる) ・通常、線源は管理されているので必要ないが、1F等で重宝される機能ではないか。 → 緊急時対応ニーズであるため、線量データからの線源推定機能は整備を後回しとする。	
9	線源・遮蔽体に対して指定できる形状の種類	線源形状・遮蔽体形状の入力は、CG(combinatorial geometry)形式で任意形状に指定可能とする。ただし、CGは自由度が高い分、指定が複雑なので、次の基本形状について寸法を入力するだけで設定できるように検討中。 線源形状:点線源・ライン(線)線源・ディスク(円盤)面線源・矩形面線源・球(面・体積)、円柱(面・体積)、直方体(体積) 遮蔽体形状:球、円柱、直方体、環状円筒、円錐台	特定の施設・応用でよく用いられる面線源や体積線源の形状があるか確認する。 また、遮蔽体の基本形状として、球、円柱、直方体を優先して実装する予定である。特定の施設・応用において、それらの基本形状を組み合わせただけでは作れないような遮蔽体の形状が考えられるか確認する。	・PHITS等、CGベースにGGが一部含まれるので対応すべき。 → GGも一部検討する。 ・線源はXYZ軸平行だけでなく、斜めになったものもトライしたい。また、楕円体も必要ではないか。 → 座標変換可能にする。楕円体の用途は少ないと考えられるため、整備を後回しとする。 ・医療被ばく管理で面線源、円錐ビームで評価することがある。→ 挿入 ・施設ではある程度距離があるので、体積線源で自己吸収を考える必要がある。例えば、WISEプロジェクトでは教育用として48Y、30Bシリンダ、再処理ウラン貯蔵等の計算ができる。→ 体積線源の自己吸収を検討する。 ・ドーナツ状(BWRサブプレッションチェンバ)や配管内の残水を模擬できるとよい。ただし近似的に考えられるので必須ではない。 → ドーナツ型についてトカマク形状の用途も考えられる。環状円筒で模擬できるため、整備は後回しとする。	・簡易遮蔽解析コードレビューWG平成29年度報告書が良くてきているのでそちらを参照されたい(原子力学会放射線工学会HP)。 ・CADからの読み込み若しくは変換、体系の単純化などは視野に入らないか？ → 技術ハードルが高いため、検討を後回しとする。 ・ボクセル形式で体系情報を構築することを試行している人がいる。 → 生体等の特殊用途と推測されるが、関係情報を求める。 ・WISEプロジェクト:Web上に理科教育のための統合的学習環境を構築しようとする試み。全米科学財団(NSF)がサポート。http://wise.berkeley.edu/
10	光核反応により発生する中性子の簡易線量計算方法	γ線の光核反応は、物質により8MeV位から立ち上がり15MeVでピークをみせる。30MeVまでの高エネルギー対応の一つとして、光核反応で発生した中性子の線量寄与を考慮する。 なお、同様に発生する陽子の寄与は検討を保留する。	中性子の簡易線量計算は、γ線とは別に扱うこととし、中性子透過線量をMC計算し、結果を線量ビルドアップ計算と同様の考え方で整理する。そして、最後にγ線の線量と合算する。 なお、中性子の捕獲γによる線量寄与は、(線源からの)一次γの寄与とセットにして、γ線の線量ビルドアップ計算で一括して扱う。理由は、MC計算で捕獲γの寄与を分けて出力するのが困難なため。 光核反応の簡易処理の仕方について、この考え方でよいか確認する。	・処理の考え方は概ね妥当と考えられるが、検証を要する。 ・個人的には、簡易計算コードで中性子線量の計算まで必要ないのではないかと。特殊な場合であり、ユーザは限られるし、そうしたユーザならMCコードが使えるはず。 → 申請側だけでなく審査側の利便や事情を考慮する必要がある。なお、本研究ではγ線から二次的に発生する光中性子の線量寄与に限定しており、中性子発生一般の対応まで考えていない。	・光核反応の簡易処理の方法は新しい考え方であり、経験者を交えてしっかり協議すべき。 → 挿入 ・中性子についてMC計算を行うなら、γ線も含めて計算してしまえば良いのではないかと。敢て簡易計算に拘る理由が分からない。 → 複雑なMC計算の妥当性チェックは審査の負担であり、代替計算としてMC計算の結果を確認する用途も考えられる。
11	ビルドアップ係数(BF)レファレンス材料の選択に係る感度解析	線量ビルドアップ計算は、線源から線量評価点の間に存在する遮蔽材の中でビルドアップ計算する材料を一つだけ選んで行われる。選ばれた材料をBFレファレンス材料と呼ぶ。BFレファレンス材料は任意に選ぶことが可能だが、一般に保守的な結果になる材料が一定のルールで自動的に選ばれる。BFレファレンス材料の選択によって、線量計算の結果は変化する。	遮蔽設計・解析を行うとき、線源から線量評価点の間に存在する遮蔽材の中でどれをBF材料に選ぶか、迷うケースはあるか。 あるいは、遮蔽材の特性値(密度・減弱係数・BF)を少し変えてみて、感度解析を行う場面や経験があるか確認する。(別の材料に入れ替えるため、あるいは一部の特性値を例外的に変えて保守的な評価を行うため等)	・BF選択の妥当性は、初学者が多重層や薄い遮蔽体で悩む問題である。薄い遮蔽材で評価点が高いときに迷う例がある。多重層の場合、構成によって安全側のBF材質を検討する例がある。 ・BF材料は自動選択ではなく、あくまでユーザーに任せるべき。 → BF材はユーザがシステム上で確認して選択可能にする。ただし、利便性から一般的なルールで自動選択するオプションも検討する。体系に多重層や薄い遮蔽が現れた場合は必要な警告を与える。 ・経験者ならよいが、簡易計算は誰が使用するかわからないので、自動的に何パターンか計算し、リスクを低減させる手法があるとよい。 → BFの感度解析を自動で行う機能は整備を後回しとし、ユーザの反応をみる。 ・簡単な二重層に対する計算法を確立すべき。→ 二重層遮蔽の検討へ。	・安全評価用の簡易計算コードは、審査手続きを簡便かつ合理的に行うこと、またある程度安全尤度をもたせることで簡略化することと考えられる。一方、設計解析には熟練者の技術が必要であり、安全尤度を前もってシミュレーションする遮蔽設計等にそれをを用いない方がよいのではないかと。 → 感度解析をあくまで遮蔽設計側の用途と考えるなら、本事業では後回しすべきである。後で審査側の意見、ユーザの反応をみて検討したい。 ・特性値のパラメータを振ってみて感度解析を行う場面について、密度、減弱係数を振ることはあるが、BFはエネルギー、材質と厚さ、密度(減弱係数)以外に入射角度にも依存するため、計算体系のバリエーションが多数できてしまう。点線源のみの体系として検討せざるを得ないのではないかと。 → ご指摘のとおり、変化させるパラメータが多くなるため、BFの感度解析を自動で行う機能は整備を後回しとする。
12	二重層遮蔽を用いる設計の例	遮蔽設計においては、特定の遮蔽材料を特定の順番で重ねて、放射線を効率的に遮蔽することがある。これを多重層遮蔽と呼ぶが、大抵は二重層である。例えば、中性子を遮蔽して発する二次γ線を後で遮蔽する場合、また異なるエネルギー範囲を効率的に遮蔽する場合、構造材に遮蔽材を貼って強度も持たせる場合。	特定の施設・応用で、異なる材料を重ねた多重層遮蔽の例があるか確認する。	・簡単な二重層に対する計算法を確立すべき。 ・コンクリート+追加遮蔽材の簡易評価法を検討してはどうか。 → 二重層遮蔽の対応は、典型的な材料の組み合わせについて二重層BF、あるいは別の計算評価法を用いてデータを整備して簡易計算する。 ・既存遮蔽(コンクリートのみ)に対して、線源想定が変更となった場合、追加遮蔽の設置を鉄、鉛で検討するケースが多く、多重層となる事例がある。 ・中性子遮蔽材とγ線遮蔽材を組み合わせることがある。 → 二重層の遮蔽材組み合わせの候補として取り入れる。	・中性子が多数存在する体系は除外すべき。γ線に対する二重層のみ調査すべき。(この簡易計算コードでは中性子計算を行わない方がよい) ・ベストな手法は調査しないとわからないが、原子力学会放射線工学会の簡易計算コードWGの平成30年報告書にその記載があり、大変興味がある。 ・多重層の計算は様々な試みがなされたが未だ解決に至っていない。簡易計算に頼ることが妥当か疑問である。簡易計算に拘るのであれば、何パターンか自動で計算し、リスク低減を図る手法の開発が必要と考える。

連番	仕様・機能	解説	研究レビュー委員会での確認事項	委員から得られた主な意見、及び本事業への受容性評価(→)	委員からの付帯コメント、及び本事業への受容性評価(→)
13	線量当量の出力	計算出力は基本的に非衝突線のフルエンス率で与えられる。それを、国内法令及び新勧告に従って、以下の線量種類に換算して出力する。 ・空気中の照射線量率(カーマ率から変換、現状10MeVまで) ・空気カーマ率(ICRP74、現状10MeVまで) ・皮膚等価線量(ICRP116、AP照射、男女別) ・眼の水晶体等価線量(ICRP116、AP照射) ・実効線量(ICRP116、6種の照射体系) エネルギー吸収、及び1cm線量等量は今後の需要が不明。照射線量率も同様である。	出力として、左記の線量種類で過不足ないか確認する。 他に整備を期待する線量種類がある場合は、応用の場面をお知らせください。例えば、各臓器に対する深部線量当量、個人線量計で用いる1cm線量等量等。	・国内法令に照らして、皮膚は70μm線量当量、眼の水晶体は3mm線量当量を評価する必要がある。また、眼の水晶体の線量は2021年4月から「70μm、3mm、1cmの各線量当量のうち適切なもの」で評価することになるので、1cm線量当量も評価しておくのが望ましい。 → 拝承。本件、委員より講演をいただき、明確化する。 ・後でICRU等で実用量の考え方が整理された場合、等価線量は「吸収線量」に変更が提案されそうなので言及しておく方がよい。→検討する。 ・個人線量計を用いた簡易測定を行うことがあり、1cm線量は評価できるほうが利便性が高い。→検討する。 ・既往係数との比較の観点から、Pub74での評価値にニーズはあるかもしれない(過渡期だけか)。→ Pub74について、限られたケースに対してV&V目的で比較検証のために計算を検討。 ・輸送物の法令基準は1cm線量当量率のため需要あり。→検討する。	・フルエンス率を評価できるのは非衝突線だけである。計測実用量はまだ確定していないのではないかと。 ・被ばく評価だけではなく、線量計のための評価でも使用されることはある。 ・原子炉施設の生体遮蔽装置については、熱除去計算が必要であり、ガンマ線による発熱量が必要のため、エネルギー吸収についても需要あり。 → 原子炉の熱除去計算の需要を確認。ただし本事業のスコープからエネルギー吸収について整備を後回しにする。
14	計算結果のサマリー	ケース実行のサマリーとして下記を出力することを検討中。 ・ケースを再現するのに必要な全ての入力のエコー ・計算出力の数表(各エネルギー群、各線量評価点でのフルエンス率、各種の線量当量率)	左記の他に期待されるサマリーの内容はあるか。 例えば、ケースで使用されている材料とその特性値のリスト、過去の勧告に基づく計算出力との比較、等	サマリーの内容は概ね妥当。所期の目的に従い、規制で申請者規制者が簡便に使うものに主眼を置く。 ・カスタム材料の密度が内部で算出される場合、意図したものであるか確認が必要と考える。 → <u>材料の特性値について、特に密度等、簡便に確認できる機能を設ける。</u>	・原子力学会放射線工学部会の簡易遮蔽解析コードレビューWG平成29年度報告書が良くできているので参照されたい。
15	線源核種の崩壊に起因する出力の経時的な変化の予測機能	線源親核種の崩壊、またはそれに伴う娘核種の生成に起因する線量率の経時的な変化を、時間の関数で予測する機能が考えられる。線源の経時的変化は外部で手動計算して与えることも可能なため、自動化による効率向上機能である。	崩壊による経時的な変化を予測する機能を実際に使用する機会は考えられるか確認する。 例えば、放射性核種の輸送や貯蔵による経時的な出力変動等。	・核種数が多い場合、現状ではORIGEN等で親娘の関係を反映した減衰線源を作成し、QAD計算をすることが多い。 ・一つの計算コードに盛り込む必要はない。あくまで線源条件の変化に対応した計算ができればよい。 ・積算崩壊数を計算してインプットすることがあるため、使用する機会はあり。 → 経時変化機能があれば使用する機会は出てくると考えられる。ただし、線源作成時に外部で別途考慮することもできるため、整備を後回しとする。	・個人的にはトリウム、ウランが放射平衡にあるか、つまり精製物かどうかを見分ける時に経時変化の放射能を計算することはあるが、安全評価上の遮蔽計算でRI内蔵量の変化を求められることは少ない。(MOX輸送でも承認容器の性能内であれば最大で評価している)
16	入出力の単位	SI単位は、線源強度Bq、照射線量C/kg、吸収線量Gy、実効線量Svである。従来からCi, R, rad, remの単位がそれぞれ用いられることがある。	SI以外の単位系を使って、計算で入出力できるようにすべきか。もしそうなら、それはどういう単位でどのような理由に基づくか確認する。例えば、歴史・地域・業界慣行・法令・標準・基準からの使い勝手等。	SI単位系で十分である。国内法令で使われていない単位(Ci, R, rad, remなど)について、脚注程度の説明はあってもよい。 ・ユーザインタフェースについて、和文に代えて英文でも表記できるようにするのはどうか。 → <u>国際対応は後回しとするが、後でロケール対応できるように設計しておく。</u>	・単位換算は手計算で対応すればよい。 ・ユーザインタフェースは和文のみか。英語も使用可能にするか。ちなみにKEKから配布しているcgviewというプログラムは、設定ファイルの中の1行を変えるだけで、和文、英文が選べるようにしている。
17	計算の妥当性を応急的に確認するための参照問題の候補	計算コードが期待どおり動作しているか、あるいはユーザの計算プロセスが妥当かを一応確認するために、参照問題をその入力例と正解の出力例と共に用意することがある。ユーザは計算結果が出力例と一致するか調べて妥当性を確認する。	点減衰核法コードが適用できる好適なγ線の遮蔽計算例、または参照問題の例があるか確認する。 例えば、MicroShieldの場合、既存のANS参照問題と、それでは足りないものでさらにいくつか参照問題を追加している。	参照問題による計算例を設けた事由は、計算の妥当性の確認のためではなく、ユーザの理解度の向上のためと考えられる。 → その目的に見合う最低限の参照問題を用意するに留める。	・点減衰核の計算はあまり問題／困難がないように感じる。参照問題をさらに増やす必要があるか。 ・測定との比較は不要と思われる。仮想的な問題を必要に応じて作成すれば良い。 ・「ユーザは計算結果が出力例と一致するか調べて妥当性を確認する。」というところに違和感がある。ユーザの計算結果が出力例と一致することを行うのは、ユーザが入力したやり方を理解したかどうかの確認なので妥当性を確認することにはならない。MicroShieldもユーザ理解度の向上で参照問題を追加したと思われる。 ・開発されたコードをユーザがどこまで参照問題で確認する必要があるのか。

連番	研究レビュー委員会での個別コメント	事務局の回答
1	ICRS遮蔽国際会議が延期になってしまったので、メールで各国の調査をされていますが、相当な友人でない限り、返事は期待薄だと思います。	担当者らと面識のある規制者を対象としましたが、ダイレクトに規制支援する研究者に送付することも考えます。 なお、ICRSは来年に延期されましたが、Web会議の場合、やはり面会レベルの調査は難しいと考えます。本件については流動的です。
2	遮蔽計算実務マニュアルには、①純β核種による制動放射線の遮蔽、②中性子放出核の遮蔽、のデータが載っていますが、これらの扱いは？(制動放射線だけでも入ると大方のRユーザーに朗報です)	現状、γ線源を対象としているため、仕様案には入っておりません。ご意見に従い、①の扱いから試験的に検討いたします。
3	作業の中には遮蔽データの作成がありますが、遮蔽計算実務マニュアルに載っている、核種ごとの実効線量の透過率を表にして公表する予定はありますか？	ご指摘の透過率は電子化して、開発するコードで利用するために含める計画です。ただし、本研究の範囲では完全性を保証できないため、データの利用はユーザの責任で行ってまいります。
4	点減衰核の計算では、入出力に要する時間は別として、遮蔽計算自体の計算時間はほとんど問題ないように思っていますが、並列化まで検討する必要があるのでしょうか？	計算時間は、線源数N及び評価点数LによってO(N×L)で効きます。一度に計算できる線源数を増やすため、計算時間向上を可能な範囲で目論んでいます。 よって、MPIによるモジュール化で対応する予定ですが、コードの量から考えて対応にさほど労力があるとは思えません。
5	「開発する簡易計算コードの仕様・機能案一覧」に遮蔽材の密度を入力する項目に気づきませんでした。必要です。	材料の特性値のなかに密度が含まれます。カスタム材料の密度はユーザ入力可能とし、材料特性の密度による補正を可能とします。
6	薄い遮蔽体への斜め入射の問題については、具体的な対策はどのようにされる予定でしょうか？	スラブ遮蔽への放射線の入射角度によって、ビルドアップ係数を変化させることで対応します。ただし、対応する角度範囲及び透過距離を限定することとし、透過距離があまり長かったり、あまり急な角度で入射する場合は別途保守的に評価します。
7	開発されたコードは素人にも使われます(特にRユーザー)。デフォルトのパラメータはできるだけ妥当な結果を与えるものに設定すべきだと思います。	ご意見を反映し、デフォルトのパラメータを検討して設定します。
8	若手の人材育成について、あまり詳しい説明がなく、付け足したような印象を受けます。どのような形で人材育成を行うのかを明確にしておいた方が良くと思います。	ご指摘の従い、報告書で人材育成活動について追記し、明確化します。現在、原子力学会の放射線工学部会で簡易計算レビューWGを組織しており、事業者を中心に若手を多く集めて本研究に係るレクと議論を行っています。
9	今後点減衰核積分コードの仕様を考えることになると思いますが、従来のQADコードにある機能なのか／それとも新規に加える機能なのかを区別していただければ幸いです。	拝承。報告書で示す付録のコード開発仕様案において、区別を追記したく。
10	出来上がった計算コードの配布方法を今から考えてください。商業コード／規制当局からの配布コード／RSICC、NEAデータバンク、RIST登録コード／フリーソフト	受託元を所有者とし、当初RISTIに登録することを考えています。コードのライセンスはオープンソースを旨とするライセンスを付与したく。ただし本件も決定ではなく流動的です。
11	「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」の中に、「反映した遮蔽計算用データの作成」とあります。「手順の開発」の中にデータ作成が含まれる理由は何ですか？	新勧告及び高エネルギー対応等、コードで使用するデータの見直しを行っているため、見直しに用いる計算手法・入力条件等を総称して手順の開発と呼んでいます。
12	データ作成に関するV&Vは、検討されますか？	海外コードのV&Vを参考に、作成データのV&Vを実施し、V&Vの仕方と結果を報告します。報告書は技術ガイドラインの位置づけをもちます。ただし、それは完全なものではありません。
13	「新勧告を踏まえた遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究」に「コード開発」が含まれていますが、これは、標準コードとなるのでしょうか？	本研究の範囲では標準を目論んでおりません。研究で開発されたコード・データが標準に見合うものであるなら、学会等で別途議論されるものと考えます。
14	他のコードの規制適用性はどのように考えますか？	本研究では他のコードについて考えておりません。
15	他のコードがこの手順について、どこまで適合していれば、規制において使用可能となるのでしょうか？	本研究で試行するV&Vは、規制で利用するコードに求められるV&Vの在り様を検討するためのテストの位置づけもあります。ただし、その適合性については事後に評価されるものと考えます。
16	V&Vコードの作成は開発視野には入りませんか？	現状、コードの信頼性は場面に依りて個別に審査されています。将来、許認可で用いられるコードに対して、もし所定のV&Vを求める指針が提示されたら、V&Vのためのパッケージ開発が視程に入ると考えます。

連番	研究レビュー委員会での個別コメント	事務局の回答
17	V&Vコードの適用は、規制上必須になりますか？若しくは、他の方法での信頼性確認資料作成は可能ですか？	V&Vコードを用いた計算コードの信頼性確認は、標準化されると規制を効率化して一層の安全性向上が見込まれます。本研究では、海外のV&Vコードを参考にして開発コードのV&Vを試験的に行いますが、そうした信頼性確認を一般化するような提言は考えておりません。
18	他のコードに対し、V&Vコードの作成を求めますか？	事業者及び規制当局の考え方によると思われます。本研究のスコープには入っておりません。
19	<p>1)目的:放射線防護法令の遵守を確実にする</p> <ul style="list-style-type: none"> >外部実効線量換算係数等の改訂対応 (対象は外部実効線量のみ、なお中性子の取扱は注意必要) >遮蔽安全評価法と使用データの見直し手順検討 (炉規法は審査上の計算コードと使用方法の取り纏め、RI法では遮蔽実務マニュアル等が見直し対象ではないか) >規制の効率的運用のための技術ガイドラインの作成(審査官等の力量にあった記載が必要) 	本研究では、新勧告取入れにより、 γ 線の簡易計算で見直しが求められる範囲とその手順について提案を行います。我々が用意する技術ガイドは、それについて委託元と協議しながら、なるべくわかりやすく記載することを心がけます。
20	<p>2)ガイドラインの使われ方</p> <ul style="list-style-type: none"> >事業者の参照指針 (事業者の多くは工事や請負業者に行わせており、炉規法ではゼネコン、RI法では請負業者等で業者の力量に相当違いがある。発注者の事業者が技術的指針を理解できるか。発注者責任の重要性) >規制側の妥当性確認 (炉規法ではANISN, DOT, MC等計算コードは使用実績が多く、入力パラメータ位のチェックになってしまい、入力エネルギー縮約や高エネルギーベータ線影響等の妥当性確認は難しい。適用範囲を明確化しておくべき。) 	<p>研究を実施している間も、人材育成の活動として、学会で若手を集めた簡易遮蔽計算のWGを開催し、レクを行います。また、研究の終了後、開発されたコードやデータについて、教育セミナーを開催する予定です。</p> <p>詳細計算による評価を審査する場合、実績によるとして、入力パラメータのチェック位しかできないことに懸念があります。ここで開発するコードの出力が、一つの比較対象として確認に資することを期待しています。また、簡易計算は汎用性より、適用範囲を絞って計算のしやすさや分かりやすさの方を重視しますので、その明確化は重要です。技術ガイドに記載します。</p>
21	<p>3)ガイドライン以外のアウトプット</p> <ul style="list-style-type: none"> >簡易遮蔽計算コードの開発 (点減衰核法コードについて、理想は安全尤度が少しあるが、WEB上で計算できる程の簡略化) >他のコードとの比較による有効性検証 (何で比較するかを事前に検討しておく必要あり、計算結果は各コードで当然異なり、これが正しいという値がないため、有効であるか判断できない。エネルギーフルエンス、散乱線エネルギーが指標になるのでは。) >遮蔽技術レベルの維持のための若手人材育成 (大変重要である。原子力・放射線安全のSDGsの観点からも簡単な指標を作り、実行プランを作るのが遮蔽関係者の勤めだろう。) 	<p>基本的に規制の用途で作られますので、計算の誤差や些細な部分は保守的になるようにデータを評価する計画です。</p> <p>簡易計算ですので、Web上でサーバ側に計算を任せることも可能ですが、セキュリティの懸念から、検討は後回しになります。</p> <p>結果の妥当性の確認には、過去のデータを用いたQADとMicroShieldの計算と簡易なベンチマーク参照問題で比較することを考えています。非衝突線フルエンス、実効線量等が指標としてあげられます。</p> <p>人材育成の実行プランについて、学会の遮蔽専門委員会やWGで議論してたたき台を作ることも考えられます。→ 参考になる情報が別の事業の成果にないか確認する。</p>

付録Ⅳ

ガンマ線遮蔽計算コードの新勧告対応に係る海外実態調査
で用いた調査票

ガンマ線遮蔽計算コードの新勧告対応に係る海外実態調査で用いた調査票

原子力主要国の規制担当者にメールで送付した調査票を下記に示す。調査目的と協力のお願いを述べて、計4つの質問を行った。

_____ (ここから) _____

October 14, 2020

Dear colleagues,

I hope all of you doing well. Thankfully Akiko introduces you as the right person for this survey request.

Currently, our research group is entrusted by the Nuclear Regulation Authority (NRA) to develop a new point-kernel code for the gamma-ray shielding calculation. In Japan, we have improved and used the QAD code originally developed in the United States, but it's too old to maintain anymore. Therefore, we plan to review the data with the latest international recommendations and also renew the computer program under the modern computing environment.

We hope that the new code will cover a wide range of applications of practical interest. In order to determine the specifications of the code, we would like to conduct a questionnaire survey on a situation the point-kernel calculation is used in the safety review of a nuclear power/radiation use facility.

If you don't mind, please ask the safety reviewer of shielding analysis to answer the questionnaire below. We'd greatly appreciate if the person takes time for us. I think that it may take about 30 minutes.

Notice: The answers will be used only for the specific purpose of this entrusted research. All of your responses will be anonymized and then the summary will be reported to the NRA for use in the new code development.

Q1. Applicants for licensing a facility/equipment need to perform shielding analysis in an appropriate manner to demonstrate that they meet the dose limit of safety standard. At this time, is there any case where the point kernel code (or simple calculation) is used for gamma-ray shielding analysis?

If so, for what kind of facility/equipment, and what point-kernel code do the applicants use?

(Example of Japan)

Facility/Equipment: Spent-fuel cask, non-destructive inspection equipment (Co-60), nuclear fuel use facility (small amount), etc.

Point-kernel code name: QAD-CGGP2R

Q2. In a safety review of license application, a regulator/reviewer needs to check the validity of the shielding analysis submitted by the applicant to ensure that the dose limit is met. At this time, is there any case of checking the gamma-ray shielding analysis using the point kernel code (or simple calculation)?

If so, what point kernel code is being used? Also, how is the safety review performed using the code? Is there any guidance on the review procedure?

(Example of Japan)

Cross-checking with the result independently evaluated using a simple shielding calculation manual (guide) for radiation facilities and data collection. It includes gamma-ray attenuation rates or the point-kernel method for bulk shielding.

For those who know a specific point-kernel code come up in the above answers, please answer below.

Q3; Do the data/factors used in the point kernel code comply with the latest international recommendations?

Support for ICRP 116 report*: full, partial, future plan, no idea

Support for ICRP 107 report**: full, partial, future plan, no idea

Support for ICRU / ICRP draft joint report***: full, partial, future plan, no idea

Please let us know about the supported range if partial.

*ICRP116 report: Conversion Coefficients for Radiological Protection Quantities for External Radiation Exposures. ICRP Publication 116, Ann. ICRP 40(2-5) 2010.

**ICRP107 report: Nuclear Decay Data for Dosimetric Calculations. ICRP Publication 107. Ann. ICRP 38 (3) 2008.

***ICRP/ICRP draft joint report Operational Quantities for External Radiation Exposures, (2017).
<https://www.icrp.org/docs/ICRU%20and%20ICRP%20Draft%20Joint%20Report%20Operational%20Quantities%20for%20External%20Radiation%20Exposure.pdf>

Q4: Please let us know if there are any specifications or functions of the point-kernel code that would be useful for the safety review of shielding analysis.

Thank you for taking our survey. Feel free to write below if you find any questions/comments.

_____ (ここまで) _____

調査票の送付先は、研究代表者らと面識のある下記5ヶ国の5名である。IAEA 輸送安全基準委員会（TRANSSC）に参加する規制当局または規制支援機関の専門家である。

アメリカ：David Pstrak

Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Division of Fuel Management
U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC)

ドイツ：Ingo Reiche

Bundesamt für Kerntechnische Entsorgungssicherheit (BfE)
Willy-Brandt Strasse 5

フランス：Thierry Chrupek

Autorité de Sûreté Nucléaire
ASN - DTS

イギリス：Tiberio Cabisianca

Leader, Planned Exposures Group
Radiation Assessments Department
Public Health England (PHE)

スイス：Frank Koch

Fachspezialist
Eidg. Nuklearsicherheitsinspektorat
Sektion Abfallbehandlung & Transporte
Industriestrasse 19 (ENSI)

以上

付録 V

新勧告取入れで求められる遮蔽計算法・計算コードの
仕様・機能一覧

付録V 新勧告取入れで求められる遮蔽計算法・計算コードの仕様・機能一覧

連番	仕様・機能カテゴリー	概要	仕様・機能案	仕様選定の背景・事由	
1.1	動作・開発環境	計算コードの動作環境	Windows PC、現状オンプロミス設計 OpenMP対応	デスクトップアプリとして需要が高い スレッド化による高速化	
1.2		開発言語	C系(C++)	仕様・機能が追加されたため、計算速度は重要な開発指標である。 入出力等のサポートツールを効率的に実装するためのライブラリ充実	
2.1	計算実行プロセス	計算入力の作成ステップ	次の計算入力を作成し、入力ファイルに保存する。 1. 体系定義入力 線源・遮蔽体・線量評価点の形状と位置を指定し、下の2及び3で作成する線源情報と材料情報を割り当てる。 2. 材料情報入力 体積線源または遮蔽体に割り当てる材料情報を作成または読み込む。 3. 線源情報入力 線源に割り当てる線源情報を作成または読み込む。 4. ビルドアップ係数(BF)レファレンス材料情報入力 ビルドアップ計算に用いるレファレンス材料を選択する。 5. 計算パラメータ入力 ガウス積分パラメータその他の定数入力 6. 計算ケースを表すタイトル・説明の登録	従来の典型的な遮蔽計算ステップに従う。 1~3: 遮蔽計算一般に必要なとされる入力情報 4~5: 点減衰核法計算に固有の入力情報 6: 入力の整理や再利用に資する説明を入れる。 これらの入力を効率的に作成するサポートツールを開発する。 以降、この順序で仕様・機能の説明を行う。	
2.2		計算実行ステップ	入力ファイルを計算モジュールに渡して実行し、計算出力のサマリーを含む出力ファイルを得る。	感度解析に係るプロセス・モジュールの開発は保留する。	
2.3		計算出力表示ステップ	出力ファイルから求める情報を参照して表示・可視化する。	出力を表示・可視化するツールの開発は保留し、外部で揃える。	
3.1	体系定義入力	線源の形状定義	線源の設定数は任意。 基本形状を寸法入力して簡単に定義	複雑な体系の施設・応用に対して合理的な評価を行うため、形状の定義は、(QADやMCコードで実装された)複雑な形状を表現可能なCG手法(一部GG)を採用する。 点以外の基本形状として、球、直方体、円柱を先に整備するが、面線源(円盤、矩形、球面、円柱面等)、円錐(台)、環状円筒を可能な範囲で考慮する。	
3.2		遮蔽体の形状定義	遮蔽体の設定数は任意。 基本形状は寸法を入力して簡単に定義 複雑な形状は、基本形状を組み合わせてCG形式で定義 CG形式の入力は複雑なため、ユーザ教育や妥当性確認のサポートが不可欠。		
3.3		線量評価点の定義	評価点の設定数は任意。点座標だけでなく、指定した線や面の上に並んだ格子点を一括設定する機能を追加する。		
3.4		体積線源及び遮蔽体の材料情報選択	上で定義した体積線源及び遮蔽体の形状に対して、それぞれ材料情報を指定する。材料情報は、下記の4.1または4.2で定義する組込材料またはカスタム・ミックス材料から割り当てる。		カスタム・ミックス材料は、形状に割り当てる前にカスタム材料作成ツール(10.1参照)を使って予め定義する必要がある。過去に定義した材料ファイルを読み込むことも可能とする。
3.5		線源情報割当	上で定義した線源形状に対して、それぞれ線源情報を指定する。線源情報は、下記の5.1または5.2で定義する線源データを割り当てる。		線源データは、線源形状に割り当てる前に線源ファイル作成ツール(11.1参照)を使って予め定義する必要がある。過去に定義した線源データファイルを読み込むことも可能とする。
3.6		入力数値の妥当性確認	入力した数値の妥当性や整合性を自動確認 ・ 必要な全ての数値が入力されているか ・ 数値項目間の矛盾や許されない範囲の値がないか ・ 計算上の制約: 線源と評価点が近接しすぎないか		簡易な妥当性確認が入力の段階で行われると便利
4.1		組込材料の準備	単元素25種、混合物8種の組込みが求められるが、ここでは特に優先度が高いと考えられる10種程度について特性値を文献またはMC計算から準備する。	報告書で組込材料の説明	

付録V 新勧告取入れで求められる遮蔽計算法・計算コードの仕様・機能一覧

連番	仕様・機能カテゴリー	概要	仕様・機能案	仕様選定の背景・事由
4.2	材料情報入力	カスタム材料の定義 ミックス材料の定義	カスタム材料・ミックス材料は、カスタム材料作成ツールを用いて予め組成を入力して定義する。材料情報は材料ファイルとして保存・読込可能にする。材料の特性値は、同ツールで自動計算されるか、直接入力して指定する。特性値を自動計算して用いる場合は信頼性に注意	カスタム材料・ミックス材料を、サポートツール(10.1参照)を使ってユーザが定義して保存できることは材料の再利用の観点から有利。 このように任意の組成で材料を定義する場合、外部で特性値を計算して与えるのが通例だが、可能な範囲で自動計算できることは便利。
4.3		材料の減衰係数・BFの与え方	材料の減衰係数及びビルドアップ係数(BF)は、エネルギーと遮蔽厚さに対する数値で与えられる。 ・エネルギー群構造はデフォルト群構造(10keV-30MeVの29群) ・遮蔽厚さは約40から80mfpの間で計算リソースの許す範囲で整備する。mfp単位の代わりにcm単位で与える。 ・光核反応で発生する中性子と捕獲 γ 線の寄与を考慮する。ただし、中性子は γ 線とは分けて、BFに準じた考え方で扱う。	MC計算でマイナーな干渉性散乱等を考慮すると、遮蔽厚さによってmfp長が微妙に変化する。よって、従来のように減衰係数の逆数として一定のmfp長を与えると、遮蔽厚さをcmからmfp単位に換算するときに誤差を生じる。これを避けるため、mfpを用いず、特性値は全てcm単位で直接与えられるようにする。
5.1	線源情報入力	RI核種とその線源強度を指定する場合	線源データは、線源ファイル作成ツール(11.1参照)を用いて、次の方法で指定して定義する。線源情報は線源ファイルとして保存・読込可能にする。 ・ICRP 107ライブラリからRI核種を選択して強度(Bq)を与える。 ・外部の線源作成コード(ORIGEN等)で作成した出力の取込み	線源データをサポートツール(11.1参照)を使ってユーザが定義できることは、データの再利用の観点から有利。 放射線データを特定のエネルギー群構造に振り分ける場合の注意： ・エネルギーの下限カットオフはデフォルトを10keVとし、それ未満の値は指定不可とする。 ・カットオフ未満のエネルギーの γ 線を、最低群の中を含めるか否かの選択(デフォルトでは含める)
5.2		エネルギー群毎に放出率を直接入力する場合	放出率(phon/sec)を各エネルギー群に直接入力する。 エネルギー群構造は基本的にデフォルト群構造による。	従来のQAD系コードの入力の仕方である。 測定で得られたスペクトル・放出率データを線源に取込む場合に便利
6.1		BF値が正確に与えられる組込材料の整備	単元素26種、混合物8種の組込みが求められるが、実用性から優先度の高い10種程度を組込材料を整備する。	新勧告及び上記4.3で示した与え方に従い、減衰係数・BF値をMC計算により高い精度で与える。
6.2	ビルドアップ係数(BF)レファレンス情報入力	BFレファレンス材料の選択	線源から評価点の間の直線上に存在する遮蔽材のうち、一つをBFレファレンス材料として選択する。基本、保守的な結果を与える材料が自動的に選択される。ただし、用意されたBF値の適用範囲外にある材料や特殊な体系の場合、ユーザが別途材料やBF値を指定する必要がある。	選択したBFレファレンス材料だけがビルドアップ計算の対象になる。 一般に、評価点に近い最後の遮蔽材か、または最大のビルドアップを示す(つまりMFP長が最長)材料を自動選択する。もしBFの適用範囲外にある材料や特殊な体系の場合、画面上に、線源から評価点の間にある遮蔽材リストと特性値が現れて、指定をサポートする機能があると便利。
6.3		選択したBFレファレンス材料による点減衰核法の計算について	BFレファレンス材料のBF値をもって、線源と評価点の間にある全ての遮蔽材のBF値を代表する。よって、全ての遮蔽材厚さの合計に対して、そのBF値を用いた点減衰核法のビルドアップ計算を行う。 なお、減衰には各遮蔽材の減衰係数値をそれぞれ用いる。	QAD等と同様の計算法であり、大抵の遮蔽体系において良い近似を与える。ただし、斜め透過及び二重層遮蔽で不都合を生じる可能性があるため、下記のとおり、特別に計算する機能を設ける。
6.4		斜め透過対応	点減衰核法は、本来、遮蔽体を垂直に透過する場合のビルドアップを計算する。ここでは、スラブ等、特定形状の遮蔽体に対して、入射角度でBF値を補正を行い、ある程度の角度まで斜めに透過するケースに拡張して、合理的な評価を行う。	実際に線量を評価したい位置からみて、線源から放射線が遮蔽体を斜めに横切ることがある。点減衰核法の制約から、これまで遮蔽体を垂直に横切るように評価点の位置を調整することがあったが、そうせずとも合理的な評価を可能にする。特に薄めの遮蔽体で問題になる。
6.5	最新の知見に基づく遮蔽計算法の見直し部分	二重層遮蔽対応	点減衰核法は、本来、単層の遮蔽体のビルドアップ計算に対応する。ここでは、よく使われる特定の二種類のスラブ遮蔽材料の組み合わせが現れたとき、特別に透過線量を合理的に評価する方法を検討する。なお、組込材料の組み合わせを基本とし、カスタム・ミックス材料の使用を保留する。	二重層は効率的な遮蔽のためによく現れる。BF値を各層の材料でミックスしたり、片方の層で代表したりすると結果の誤差が大きくなることが知られている。いくつかの手法を試験的に導入、検討する。 ・実効原子番号によるBF補間(カスタム材料のBF自動計算と同じ) ・透過行列法によるBF計算 ・順透過スペクトル法による透過計算

付録V 新勧告取入れで求められる遮蔽計算法・計算コードの仕様・機能一覧

連番	仕様・機能カテゴリ	概要	仕様・機能案	仕様選定の背景・事由
7.1	計算パラメータ入力	体積線源の線量計算で用いられる積分法パラメータ設定	体積線源の場合、メッシュの切り方が結果に影響することがある。ポイントカーネル数値積分でガウス求積法を導入して対処する。求積次元や積分メッシュ分割の細かさをユーザ指定可とするが、線源サイズ及び線源と評価点の距離をもとに自動判定も行う。	<ul style="list-style-type: none"> メッシュサイズが粗すぎると真値から外れ、細かいほど計算時間長。 線源が小さく且つ線量点が遠い場合、粗いメッシュでよい。 線源から線量点が近いと高次の求積が必要になり、計算時間長。 場合により、2つ以上の積分セグメントに分けて積分する。メッシュが細かい場合の収束性を上げるため。
8.1	タイトル・説明の登録	計算ケースのタイトル・説明の登録	入力情報全体を総称して計算ケースと呼ぶ。計算ケースに関する最低限の説明をテキストで記載。	入力を作成した計算の目的や説明を入力に登録することは、入力の再利用や見直し、バージョン管理に不可欠である。
9.1	計算出力について	基本出力: 入力で指定した各エネルギーに対する評価点の非衝突線フルエンス率 (photons/cm ² /sec)、及びエネルギーフルエンス率 (MeV/cm ² /sec)	線量当量出力: 測定や被ばく評価と比較するため、括弧内の勧告による換算係数を用いて算出する。 <ul style="list-style-type: none"> 空気カーマ率 (ICRP74, 現状10MeVまで) 空気中の照射線量率 (空気カーマ率から変換, 10MeVまで) 皮膚等価線量 (ICRP116, AP照射体系, 男女別) 眼の水晶体等価線量 (ICRP116, AP照射体系) 実効線量 (ICRP116, 6種の照射体系) H_p(3) (IEC62387, JIS4345) 	新勧告に従って換算係数を見直す。なお、最近W値の補正がICRU90で発表され、照射線量・空気カーマに係る改定の可能性がある。国内法令では、局所被ばくとして皮膚と眼の水晶体の等価線量を参照するため、それらの換算係数の整備を優先する。 <ul style="list-style-type: none"> 換算係数表のエネルギー内挿は、必要に応じて三次スプライン補間法を用いる。 2021年4月から、眼の水晶体線量は「70μ m, 3mm, 1cmの各線量当量のうち適切なもの」で評価する方針。委員講演を踏まえてH_p(3)の評価を補足的に行う。
9.2	出力レポートの提示	次の二種類のレポート作成 <ul style="list-style-type: none"> ケースサマリー 計算結果の数表 	<ul style="list-style-type: none"> 計算を再現するのに必要な全ての入力エコー 各エネルギー群、各線量評価点での計算出力表 基本出力について、ビルドアップなしの場合と、ビルドアップありの場合の二種類のフルエンス率を示す。 	ケースサマリーの作成は再現計算や結果の説明にとって重要である。なお、ビルドアップなしの結果の提示は、ビルドアップの効果を知って結果の妥当性を確認するための参考になる。
9.3	遮蔽材の特性値の提示	計算で使用した材料の線減衰係数とBFの値を列挙する。	出力レポートとして下記の情報を作成して提示・保存する。 <ul style="list-style-type: none"> 遮蔽体毎、エネルギー毎に、材料密度と質量減衰係数の積算 評価点に対して選択されたBFレファレンス材料、及び使用されたエネルギーと遮蔽厚に対するBF値 	<ul style="list-style-type: none"> 表示目的は、別の計算コードの結果と比較して差異の理由を調べるため。大抵、遮蔽体の減衰係数の値が僅かな差異が原因である。
10.1	カスタム材料作成ツール	カスタム・ミックス材料組成画面	材料の構成要素名、重量%、相対原子数を入力する。高Z元素を含んだ構成要素が全体の10wt%以上を占めたら警告を発する。理由は、低エネルギーの光電吸収エッジで発生する特異点発散が、実効原子番号による補間では補正困難なため。	線量計算とは独立して、カスタム材料を作成するためのサポートツールがあると、材料データの整理と再利用に便利である(10.1参照)。特性値の自動計算に関する注意はユーザ側で意識すべきだが、一応警告する。
10.2	GUIで、ユーザ定義の材料作成を支援する。	ビルドアップ係数作成画面	BF値の配列(行を遮蔽厚cm、列をエネルギーとした2次元表)を作成する。	BF作成に3つのオプションが選択可 <ul style="list-style-type: none"> 等価原子番号補間による自動計算 ユーザがBF値を直接入力 外部材料ファイルから読込
10.3	カスタム材料とは、構成要素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。構成要素とは、元素または化合物を意味する。	光電吸収エッジ画面	低エネルギーに吸収エッジがある場合、断面積の不連続を解消するための補間を指示する。BF値の補間、あるいは作成したBF値のチェックに用いられる。	必要な入力情報は、断面積不連続部(光電吸収エッジ)の「数」、「エネルギー」、「エッジ前後のビルドアップ係数」 光電吸収エッジの効果は、特定の材料とエネルギーにのみ現れるため、こうした例外的な扱いをする。
10.4	カスタム材料・ミックス材料のBF値の自動計算について	構成要素のBF値の自動計算について	構成要素のBFデータを読み込み、データを補間してBF値(表)を自動生成する。BF値の自動計算には、実効原子番号、エネルギー、遮蔽厚さに対して、構成要素のBF値表を補間する必要がある。特に要素の原子番号による補間近似の信頼性に注意する。	構成要素の実効原子番号によるBF値の補間手法は、Sakamoto-NSE論文に基づく。信頼性について、必要に応じて警告する。BF値のエネルギー内挿について旧来GP法が適用されたが、計算機能力の向上から、構成要素に詳細なBF値表を持たせて一般的な補間法の適用性を検証する。
10.5		ビルドアップ係数表示画面	カスタム材料のBF値を表形式、またはグラフで描画	カスタム材料に対して、減衰係数及びBF値の妥当性をグラフや数表で確認する機能。主に自動計算による結果の確認。
10.6		減衰係数表示画面	線減衰係数、または質量減衰係数を表形式、またはグラフで表示	同上

付録V 新勧告取入れで求められる遮蔽計算法・計算コードの仕様・機能一覧

連番	仕様・機能カテゴリー	概要	仕様・機能案	仕様選定の背景・事由
10.7		材料ファイルの保存・読み込み	組成及び特性値の情報を材料情報として、材料ファイルに保存可能にする。また、以前作成した材料ファイルを読み込んで再利用可能にする。	カスタム・ミックス材料の特性値とは、実効原子番号、実効原子量、密度、エネルギー毎の質量減衰係数とBF値を指す。材料組成の定義から自動的に作成されるが、直接入力も可能とする。
11.1	線源ファイル作成ツール	線源データ作成を支援する。	上の5.1及び5.2に示した線源データの設定を画面上で支援するツールである。作成した線源データは、線源ファイルとして保存したり、また読み込むことを可能にする。	画面上で、ライブラリの核種リストから核種を選択したり、与えられた群構造に沿って放出率を入力したりする作業のサポートは便利。線源データをファイル単位で整理することで再利用に資する。
11.2	核種インポートツール	線源データを外部コードで作成した出力ファイルから取り込む。	応用によっては、ORIGENコード等、外部の代表的なツールで線源データを作成する機会がある。その場合、核種情報を逐一入力せずに済む。	基本的に、上の線源ファイル作成ツールの一機能として組み込んでよい。
12.1	内臓データの確認表示	内臓データが正しく読み込まれて設定されているか表示確認する。	使用材料の特性値 線量換算係数 単位系変換係数 数学定数その他のパラメータ	データが正常に入力され、また読み込まれていることを確認する目的なので、開発当初の優先度は低い。データが多くなり、実際的な利用や結果の比較検証を行う場合に必要になる機能である。
13.1	妥当性簡易検証ツール	付属の参照問題を用いて、計算が正しく実行されることの検証をサポートする。	V&V用の参照問題に対する入力例と正しい出力例を用意しておき、自動的に入力例を実行して、計算出力と正しい出力例を比較する。いくつか参照問題を用意してパスするか確認する。	コード開発やデータ更新等でプログラムが期待通りに動作することを確認し、バグやミスを手軽にチェックするのに便利。なお、より厳密に検証するためのV&Vパッケージが別にあるが、その代替を意図したものではない。コードの開発が進み、一通り実行できるようになったら実装を検討する。
14.1	二重層遮蔽対応ツール	特定の二重層遮蔽の順列組み合わせに対して、透過線量の合理的な算出をサポートする。	線源から評価点の間にある遮蔽材の探索において、特定の遮蔽層の順列組み合わせが見つかったら二重層とみなし、このツールで指定した計算法を用いて透過計算を行う。計算法は、下記のオプションから選択する。 ・等価原子番号補間アルゴリズム ・MC法計算でダイレクトに整備した二重層BFデータ使用 ・その他	透過行列法や順透過スペクトル法の場合、特定の二重層の順列材料組み合わせ、及び各層の厚さに対して計算パラメータを予め用意し、透過計算で用いる。遮蔽体の形状はスラブのみに対応。カスタム・ミックス材料には対応せず、当初は組込材料の組み合わせによる。

付録VI

組込材料の組成・密度の決定根拠

組込材料の組成・密度の決定根拠

目次

1. 遮蔽計算用の組込材料リスト.....	1
2. 各組込材料に対する組成と密度の決定根拠.....	1
2.1 組成及び密度決定の考え方.....	1
2.2 単体元素.....	2
2.3 コンクリート.....	2
2.4 空気.....	2
2.5 土壌.....	6
2.6 ステンレス.....	8
原子個数密度算出式.....	8
参考文献.....	8

1. 遮蔽計算用の組込材料リスト

表 1 に、遮蔽計算用の組込材料リスト、及び各材料に対して決定した密度値及び組成の出典を示す。以降、表中に示した各材料に対する組成と密度の決定根拠について述べる。

表 1 本事業で整備する遮蔽計算用の組込材料リスト

連番	物質名	密度(g/cm ³)	組成等出典	備考
1	炭素	2.2	理科年表	
2	アルミニウム	2.7	理科年表	
3	鉄	7.8	鉄 100%	不純物を考慮し、密度を保守的に調整
4	銅	8.9	銅 100%	同上
5	鉛	11	Sb 等、断面積の大きい不純物を考慮	同上
6	タングステン	19	理科年表	
7	空気	1.205 × 10 ⁻³	NIST	ANSI/ANS-6.4.3, NBS-29 に準ずる
8	水	1.0	実務マニュアル	
9	コンクリート-ANL	2.1	ANL-5800	後で選択する可能性あり
10	コンクリート-Si 系	2.1	AESJ-CONC 標準案	
11	コンクリート-Ca 系	2.1	AESJ-CONC 標準案	
12	コンクリート-NBS	2.1	NBS29 密度変更	
13	鉛ガラス	2.23	実務マニュアル	
14	アクリル樹脂	1.19	実務マニュアル	
15	ポリエチレン	0.92	ANSI/ANS-6.4.3	高密度
16	土壌	1.5 (暫定)	ANSI/ANS-6.4.3 Sand (調査中)	組成調査中 次年度決定
17	ステンレス SUS304	(調査中)	(調査中)	委員会の要請 次年度決定

2. 各組込材料に対する組成と密度の決定根拠

2.1 組成及び密度決定の考え方

組成と密度は、基本的に遮蔽計算でよく使用している値を推奨値とする。候補が複数あつて根拠に欠ける場合は、専門家の意見を参考にして保守的に選択、あるいはジャッジする。

2.2 単体元素

検討の結果、鉄と鉛については下記組成で作成することとした。

- ・鉄 7.8g/cm³ 鉄 100%
- ・鉛 11.0g/cm³ Sb 等、断面積の大きい不純物を考慮

鉛について、理科年表上の 100%密度は 11.34g/cm³ だが、下記の点からその保証が難しいため、保証できる数値として 11.0g/cm³ を設定した。慣例的にみても妥当と考える。

- ・製作精度
- ・硬度を上げるため添加する Sb(アンチモン)等の影響

その他単体元素の密度については、経験上討議材料に乏しい。炭素、アルミニウム等の単体元素については、密度を減少させない理科年表[1]の記載値を用いて実施することが妥当と考える。

2.3 コンクリート

コンクリート 2.1g/cm³ (通常の遮蔽計算で使用)とする。参考にした代表的な密度と組成の文献値は下記のとおり。密度については、最も保守的な結果を与える 1 実務マニュアルと最新の 5 原子力学会標準案の値を採択した。

1. 実務マニュアルデータ集[2] (元文献：ANL-5800[3] pp660) 2.1g/cm³
2. ANS/ANS-6.4.3 [4](元文献：NBS concrete[5]) 2.35 g/cm³
3. JAERI-M6928[6] (国内遮蔽でよく使用されるが出所不明) 2.15 g/cm³
4. AESJ ビルドアップ係数標準[7] (元文献：NBS concrete) 2.35 g/cm³
5. AESJ コンクリート組成標準案 (策定中) [8] Si 系/Ca 系、2.1g/cm³

組成についても同様に、実務マニュアルと原子力学会標準の組成をベースとする。原子力学会標準は未刊であるが、ドラフトを見る限り、骨材の違いによって岩石 (Si) 系との石灰 (Ca) 系の二種類の組成が規定される予定である。

ここで、過去に実施した NBS-29[5]の組成との差異を確認する目的で、次の組成も検討対象とする。代表ケースについて各組成による透過計算を実施し、後で保守的な結果を与える組成に整備対象を絞ることを検討する。

- ・ ANS/ANS-6.4.3 (NBS concrete) 2.1 g/cm³

なお、原子力学会標準では、密度変更による組成の調整方法についても規定が予定されている。必要に応じて、カスタム材料の定義による密度計算に反映する。

2.4 空気

空気の密度を、1.205E-03 g/cm³ とする。参考にした代表的な密度と組成の文献値は下記のとおり。密度について、下記 2 から 5 の代表的文献で採用されている値を採択した。な

お、理科年表[1]によると乾燥空気で $1.293\text{E-}3 \text{ g/cm}^3(0^\circ, 1 \text{ 気圧})$ であるが、湿度による H_2O の増加や温室効果ガス CO_2 他による増加変動もありうるため、保守側に文献値を採用して妥当と考えられる。

1. NBS-29 密度記載無し
2. ANS/ANS-6.4.3 (元文献：NBS Air だが 1 とは元素 C を含む相違あり) $1.205\text{E-}3 \text{ g/cm}^3$
3. AESJ ビルドアップ係数標準 $1.205\text{E-}3 \text{ g/cm}^3$ 密度・組成とも 2 と同じ
4. JAERI-M6928 $1.205\text{E-}3 \text{ g/cm}^3$ (元素 C を含む、Ar は無い)
5. NIST X-Ray Mass Attenuation Coefficient Table 2 Material $1.205\text{E-}3 \text{ g/cm}^3$ [8]
6. Reactor Handbook Second Edition 密度記載無し [10]
7. Eckerman 1993 密度記載無し [11]
8. Patterson, Accelerator Health Physics 1973 密度記載無し [12]

組成について、代表的な文献値を表 2 に列挙して比較検討する。

NBS-29 組成は、ANS/ANS-6.4.3、あるいはアイソトープ手帳の元文献であるが、他の組成と比較すると元素 C が含まれないという違いがある。なお、現在 US NIST で公開されている空気組成は、ANSI/ANS-6.4.3 と異なる組成である。

AESJ BF 標準の組成は ANSI/ANS-6.4.3 を出典とするため、元は NBS-29 データである。

ANSI/ANS-6.4.3 は 1977 年と古い時代なのでそれに拘らず設定をすることとする。

JAERI-M 6928 の組成には元素 Ar が含まれていない。当時 Ar 核データが不要と考えられたものを推測されるが、重量割合で約 1.3% 含まれるため無視できない。よって、Ar を含む別の組成を選定することが適当である。

保健物理分野で用いられる ICRU の Air, Dry(near sea level)は、NIST データ[9]を元文献としており、元素 C、Ar を含み、密度 $1.205\text{E-}03 \text{ g/m}^3$ である。最近、アメリカ DOE の支援を受けて作成された PNNL レポート[13]でも NIST データを元としており、アメリカでは、NIST データが標準的に使用されている可能性が高いと推測される。ただし、NIST データ自体の出典は不明である。

過去によく使用された Reactor Handbook[10]の組成は、ICAO の 1937 年データを元とするが、C を含めた他元素で 0.013% と設定されている。これを CO_2 とみなして分配することで C を含む組成を作成可能である。

JAEA 外部被ばく研究者が時折使用する Eckerman のデータ[11]は、40%湿度のデータであり、元素 H を微量含んでいる。被ばく線量計算用としては良いが、遮へい計算用としては H を含まない方が安全側と考えられる。

加速器の放射化計算で用いられる Patterson の空気組成データ[12]は、他の組成データと比べて同等である。

以上の検討から、多くの組成文献の出典である NBS29 か、または NIST の空気組成データの使用が適切と考えられるが、大抵の組成データに元素 C が含まれることから、NIST データの方を採択する。

表 2 空気組成の比較 単位 : weight fraction

元素	NBS-29[4]	ANSI/ANS- 6.4.3[4] Air Harima	ANSI/ANS- 6.4.3[4] calculation	JAERI-M 6928[6] AIR	NIST[9]	Reactor Handbook Tipton[10]	Eckerman 1993[11] Table II.2.	Patterson 1973[12] P521
H				1.0000E-05			0.00064	
C			0.00014	1.2554E-04	0.000124		0.00014	1.6E-4
N	0.755	0.755	0.75519	7.5470E-01	0.755268	0.75553	0.75086	0.755
O	0.232	0.232	0.23179	2.3233E-01	0.231781	0.23152	0.23555	0.23
Ar	0.013	0.013	0.01288		0.012827	0.01283	0.01281	0.013
Total	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	9.8717E-01	1.000000	1.000000	1.00000	
Density(g/cm ³)	-	1.2050E-03	1.2050E-03	1.2049E-03 (Sum:1.1894E-03)	1.2050E-03	-	-	
備考		出典:NBS-29	出典:NBS-29 とあるが C がある。AESJ 標準同じ		NIST/ICRU データ出所 不明	ICAO TN 3182、その他元素を 0.013%とする。	湿度 40%	

2.5 土壌

土壌の組成は、遮蔽評価における重要性は高いものの標準案の検討は進んでいない。γ線の遮蔽を検討するなら主に密度を考慮すればよいが、中性子の遮蔽を検討する場合は元素による差異を考慮する必要がある。土壌の組成は地域によってコンクリートより更にばらつきがあり、水分等も変動する。

ここで参考にした代表的な密度と組成の文献値は下記のとおり。

1. ANSI/ANS-6.4.3 播磨[4] Sand 1.6g/cm³
2. JAERI-M-8171 ガンマ線スカイシャイン計算コード BCG[14] 1.52 g/cm³
3. JAERI-M-84-038 SOIL(N.T.S) [15] 1.7 g/cm³
4. JAERI-M-93-020 HILO86R[16] (Engineering Compendium on Radiation Vol II[17] が元文献)
5. JAERI-M 85-004 [18] 航空機γ線サーベイ用、同様の目的の文献が他にもある。

組成について、代表的な文献値を表 3 に列挙して比較検討する。

ANSI/ANS-6.4.3 播磨と JAERI-M-93-020 の組成は、Engineering Compendium Average Soil 10% H₂O をベースとする。

その Engineering Compendium は 1937 年の古いデータであり、SiO₂ が 70~80%位の平均的組成で、密度 1.0 に規格化されている。よって密度を別途決める必要がある。

ANSI/ANS-6.4.3 播磨の sand 密度は 1.6g/cm³ としているが、これは Engineering Compendium の砂(Sand)の密度表(Table 51.61)から、乾燥純水晶(rammed)に対する 1.60-1.92g/cm³ の最小値を採用したと推測される。Engineering Compendium の密度表(Table 51.60)に示された泥(mud)も同等の密度としているが、砂は平均的に泥より重いはずである。乾燥バラスト(Perfectry Dry loose)の密度は 1.15~1.28 範囲にある。

遮蔽用途ではなく、航空機ガンマ線サーベイに係る文献 JAERI-M85-004 記載の乾燥土壌密度は、実測ベースで 0.82~1.5 の範囲にある。同様の目的の別文献[19][20]に記載の乾燥土壌密度は、0.8~1.6 の範囲にある。最新の ICRP 144 も同様の文献を引用した土壌データを用いており、最も保守的な下限として密度 0.8 位を想定しうる。

なお、理科年表では、SiO₂ 結晶は 2.2g/cm³、普通の土は約 2 g/cm³ とかなり重い想定である。Engineering Compendium Volume 2 p.31 9.1.8.1 の記述によると、土壌中の SiO₂ は、45%~95%の範囲にあることから、SiO₂ 分の密度は 2.2×45%=0.99~2.09 g/cm³ の範囲に入るため、他の成分を考慮して、上限として 2 g/cm³ 位を想定しうる。

以上、組成については、過去の経緯を重視して Engineering Compendium 記載の Average Soil 10% H₂O と Average Soil H₂O 無しの組成を代表とみなし、保守性の観点から、後者の水を含まない組成を採用する。密度については、次年度に決定するが、1.5~1.7 あたりを設定する例が多いため、暫定的に 1.5g/cm³ を採用する。組成は密度で調整して用いる。

表 3 土壌の組成比較 単位 : weight fraction

元素	ANSI/ANS- 6.4.3[4] Harima sand	JAERI-M 8171[14]	JAERI-M-84-038 SOIL N.T.S. [15]	JAERI-M-93-020 [16]	Engineering compendium Table 9.2-83 Average Soil 10% H ₂ O[17]	Engineering compendium Table 9.1-19 Average Soil[17]	Eckerman1993 [11]
H	0.0111	2.4910E-02	9.6163E-03	1.1097E-02	1.1097E-02	0.0000E+00	2.1000E-02
C						0.0000E+00	1.6000E-02
O	0.5367	5.6936E-01	5.4369E-01	5.3668E-01	5.3668E-01	4.7330E-01	5.7700E-01
Na		1.0060E-02				2.8400E-02	
Mg		6.7333E-03				2.1100E-02	
Al	0.0784	1.0009E-01	1.2857E-01	7.8409E-02	7.8409E-02	8.2400E-02	5.0000E-02
Si	0.2660	2.1206E-01	3.1812E-01	2.6583E-01	2.6583E-01	2.8100E-01	2.7100E-01
K	0.0251	4.3487E-03		2.5061E-02	2.5061E-02	2.6400E-02	1.3000E-02
Ca	0.0347	9.8886E-03		3.4607E-02	3.4607E-02	3.6500E-02	4.1000E-02
Ti		4.7734E-03				0.0000E+00	
Fe	0.0483	5.8388E-02		4.8315E-02	4.8315E-02	5.0900E-02	1.1000E-02
Total	1.0003E+00	1.0006E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00	1.0000E+00
Density(g/cm ³)	1.6	1.52059 (sum 1.5215)	1.7	1.0	1.0	-	-
出典	記載ないが、 Engineering compendium と同 等	-	記載なし	Engineering compendium と同 等			Jacob

2.6 ステンレス

研究レビュー委員会の意見に基づいて、追加された材料である。SUS304 または 316 が候補であるが、ここでは SUS304 を整備する。遮蔽材料の設定では一般に、ステンレスを鉄で代用することが多いが、次年度に検討して組成と密度を決定する。

原子個数密度算出式

物質の密度及び元素の重量比が分かっている場合の原子個数密度は下式で計算できる。

$$N_i = \frac{\rho_{mix} w_i N_{avo}}{A_i} \quad - (1)$$

ここで、 N_i : i 番目の元素の原子個数密度(atom/b/cm \sim 10²⁴ atom/cm³)

ρ_{mix} : 混合物質の密度(g/cc)

w_i : i 番目の元素の重量比(-)

A_i : i 番目の元素の原子量(g/mol)[3]

N_{avo} : アボガドロ数(=6.022140758E+23 atoms/mol)[3]

$$\Rightarrow 0.60221140758 \text{ atoms-cm}^2 / \text{b /mol}$$

中性子計算では、同位体存在比を乗じて作成する。原子量及び同位体存在比は、理科年表最新版である、2019 記載値とする。原子量の数値に幅がある場合はその平均値を使用する。

参考文献

- [1] 国立天文台編, “理科年表 2019 平成 31 年机上版第 92 冊” (2019).
- [2] 公益財団法人原子力安全技術センター, 放射線施設の遮蔽計算実務(放射線)データ集 (2015).
- [3] Reactor Physics Constants, ANL-5800, United States (1963).
- [4] RSICC DATA LIBRARY COLLECTION, ANS-6.4.3 Geometric Progression Gamma-Ray Buildup Factor Coefficients, DLC-129/ANS643(1993)
- [5] J. H. Hubbel, Photon cross sections, attenuation coefficients and energy absorption coefficients from 10keV to 100GeV, US department of commerce National Bureau of Standard(NSRDS), NSRDS-NBS 29(1969).
- [6] 小山他, “遮蔽材料の群定数—中性子 100 群・ガンマ 20 群・P5 近似”, JAERI-M 6928(1977).
- [7] 日本原子力学会標準, γ 線ビルドアップ係数: 2013(AESJ-SC-A005:2013)
- [8] 日本原子力学会標準, 遮蔽設計に用いるコンクリート組成ドラフトによる (策定中、本

標準 2022 年発行予定) .

- [9] NIST X-Ray Mass Attenuation Coefficient
<http://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/tab2.html> .
- [10] C.R.Tipton,Jr eds, Reactor Handbook Second Edition Volume 1 Materials, Interscience publishers inc. (1960).
- [11] Eckerman,K.F, Ryman,J.C., 1993. External Exposure to Radionuclides in Air, Water, and Soil. Oak Ridge National Laboratory (ORNL). EPA-402-R-93e081..
- [12] H. W. Patterson et. al., Accelerator Health Physics, Academic Press, New York (1973).
- [13] R.G. Williams III, et al., Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling, April 2006,PNNL-15870, Prepared for the U.S. Department of Energy under Contract DE-AC05-76RL01830 (2006).
- [14] 龍福他, ガンマ線スカイシャイン計算コードシステム BCG,JAERI-M 8171(1979).
- [15] 山野 直樹, JSD1000: Multi-Group Cross Section Sets for Shielding Materials, JAERI-M84-038 (1984).
- [16] ZZ-HILO86R, Neutron-Photon Multigroup Cross Sections for Neutron energies Up to 400 MeV: HILO86R - Revision of HILO86 Library,RSIC DATA LIBRARY COLLECTION DLC-0187/01,Hiroshi Kotegawa et al., JAERI-M 93-020.
- [17] R.G. Jaeger, eds, Engineering compendium on radiation shielding. Volume II. Shielding materials, NSA-33-019296(1975).
- [18] 斎藤他、航空機ガンマ線サーベイシステムの開発IV, JAERI-M 85-004 (1985).
- [19] HASL-195, The radiation field in air due to distributed gamma ray sources in the ground. Nucl. Sci. Eng. 93, 248-261 (1986).
- [20] Riso-317, Numerical evaluation of the natural gamma radiation field at aerial survey heights (1975).

付録Ⅶ

遮蔽線量計算用データベースのテーブル設計

遮蔽線量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.....	1
2. 減衰係数データ	2
3. ビルドアップ係数データ.....	3
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. 核種線源ライブラリ.....	7
7. 物質組成ライブラリ.....	8
8. (1-g) 補正係数ファイル.....	9
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.....	9
11. 有効桁数について.....	10
12. XCOM 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) 核種ライブラリ

次年度に検討予定

6) 物質組成ライブラリ

標準物質組成ライブラリ (lib_material.dat)

7) (1-g) 補正係数ファイル

1-g 補正係数ファイル (conv_1-g.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。生データのままだと、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

ビルドアップ係数 (BF) の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 (1 次) ガンマ線による線量を、次の 2 パターンで計算する。

1) 光核反応有りでガンマ線の直接線と全線量 (ガンマ) で BF 値を算出する。

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。

2) 光核反応有りでガンマ線の直接線と全線量(中性子)で中性子BF値を算出する。
 2次ガンマ線の線量について、鉄の場合、試算で80mfpにおいて2次ガンマ>1次ガンマになり、線量への影響は明らかである。ただし、モンテカルロ(MC)法コードの計算では1次ガンマ線と分離できないために合算して扱う。中性子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本研究で定義した用語である(本文参照)。データ自体はMC法コードで計算する結果を格納する。
 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し、また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。

```

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
2020 PHITS 3.20 calculation value; !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。ソフト上、[2.減衰係数]と異なっても良い?
1.00000E-02  !Energy(1) (MeV)
MFPGrp=80  !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
(mfp)  (cm)       (gamma)  (gamma) (neutron) (neutron)
  1    7.564E-04  1.586E+00  0.0061  0.000E+00  0.0000
. . .
<BLANK>
1.50000E-02  !Energy(2) (MeV)
MFPGrp=80
Thick  Thick      BU-F      RE      BU-F      RE
(mfp)  (cm)       (gamma)  (gamma) (neutron) (neutron)
. . .
<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	2020 PHITS 3.20 calculation value; 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 エネルギー	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) 入力例 : EGrp =28 ※群数は [2. 減衰係数] と異なることもソフト上許容する。
	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) 入力例 : MFPGrp=80 ※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 (mfp) (cm) (gamma) (gamma) (neutron) (neutron)
	12	厚み(mfp 単位)、厚み(cm 単位)、BF-g、BF-g 相対誤差、BF-n、BF-n 相対誤差 ※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
...		(エネルギー、換算係数)
10.0	24.0	
<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。アプリの config 等から編集保存できるようにする。

[1-g file](conv_1-g.dat)は、空気カーマから照射線量を算出する際に必要な係数ファイルの指定を行う。同セクションの Calculation_Dose_Num=10 は、[Calculation Dose]の10番目のデータを使用するという指定である。なお、[1-g]係数の整備の優先度は低いため、設計書としての記述に留める。

ライブラリ設定ファイル(lib_setting.dat)
library setting file <タイトル

```

[Attenuation]
  atten_xcom.dat
  <BLANK>
[Calculation Dose]
1. ICRP Pub. 116 E(AP) 実効線量(Default)
  bf_icrp_116_eap.dat
  conv_icrp_116_eap.dat
2. ICRP Pub. 116 E(PA) 実効線量
  bf_icrp_116_epa.dat
  conv_icrp_116_epa.dat
  . . .
6. 空気カーマ(ICRP74)
  bf_icrp74_air_kerma.dat
  conv_icrp74_air_kerma.dat
<BLANK>
[1-g file]
  conv_1-g.dat
  Calculation_Dose_Num=10
<BLANK>
[Photon Data] 核種放出率データ (photons/decay)

```

6. 核種線源ライブラリ

次年度の検討事項。線源スペクトルデータのフォーマットは、コード開発側が DECDC2/ICRP Pub. 107 ライブラリから RI 線源データ（光子放出率データ）をロードする機能を実装しているため、そのフォーマットに準ずる。複数の RI 核種を指定して計算可能にする。

コード開発側では、上の DECDC2 だけでなく、ORIGEN2 等を用いて外部で作成された線源ファイルをロードする機能も開発する。よって、任意の群数をもつデータ構造配列にも対応できるように線源データのフォーマットを検討する。

群構造の場合、代表エネルギーが群バンドのどこになるか、また線スペクトルをどのようにデータとして格納して処理するか、コード開発側と協議する。

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ー用（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)	
material library [standard material]/ [user material]<タイトル	
matNum=10	
Iron	
7.8 1	! 密度 ρ (g/cm ³) (規格化)
26 7.8	! 元素 NUCLID×1000 [SPS] rho(g/cm ³) 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/cm ³) 元素数(整数)
	5	NUCLID(整数) 密度 (g/cm ³) 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. (1-g)補正係数ファイル

1-g 補正係数ファイル(conv_1-g. dat)	
1-g file<タイトル	
1-g Factor <タイトル	
EGrp=34 !エネルギー群数 34 個が列挙される。データそのままの値	
Energy (MeV)	1-f
0.01	1.0
...	
10.0	0.99
<BLANK>	

出典：平山論文データ
(エネルギー、1-g)

9.エネルギー範囲まとめ

コード内蔵ライブラリにおける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 Pub.74 及び Pub.116 で示されておらず、作成範囲から除外する。

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：0.01~10MeV 上記以外：0.01~30MeV	文献より
ビルドアップ係数	0.015~15MeV	空気カーマ：0.01~10MeV 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

11. 有効桁数について

データ	従来 (QAD-CGGP2R)	本事業開発コード	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 桁程度であり、多く見て 3 桁程度であるが、新設コードの計算結果を 4 桁とすることから合わせる。安全裕度をとるかは今後議論。	MC 法計算値
計算結果	4 桁	4 桁	

12. XCOM K-X 線エネルギーの扱いについて

例えば鉄の場合、X 線エネルギーは 7112.0eV だが、データとしては

- ・ 下側 : $7112.0 * 0.99995 = 7111.6444\text{eV}$ 、
- ・ 上側 : $7112.0 * 1.00005 = 7112.3556\text{eV}$

としてバンド処理する。ただし、XCOM で出力させる際は、便宜上下側の光子エネルギーを 7112.0 から 0.1 を引いた値で 7111.9eV、上側が 7112.0eV とし、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出力させるようにする。

付録Ⅷ

ガンマ線ビルドアップ係数 (BF-g) の作成例

(鉄、及び鉛)

鉄、及び鉛のガンマ線ビルドアップ係数 (BF-g) をモンテカルロ法シミュレーション (PHITS-EGS) によって計算した。下表に示す代表的なガンマ線源エネルギーについて、横軸を遮蔽厚 (透過距離、mfp 単位)、縦軸をビルドアップ係数で表したグラフを示す。

なお、グラフの一部は、異なる遮蔽厚の領域に対して、タイトルに (1/2) , (2/2) と示して 2 枚に分けた。分けた遮蔽厚の境界は 40 未満と 40 以上である。これは、ビルドアップ係数を示す縦軸の範囲が広く、1 枚のグラフで表しにくいことによる。

遮蔽材	ガンマ線源エネルギー または遮蔽厚 (mfp)	単位	線量種類、備考	表示ページ番号	
鉄	10 (下限)	keV	実効線量 E(AP) (AP 照射)	3	
	15			4	
	20			4	
	50			5	
	100			5	
	150			6	
	200			6	
	500			7	
	1	MeV		7	
	4			8	
	8			8~9	
	10			9~10	
	30 (上限)			10~11	
鉛	10 (下限)	keV		11	
	13.0351		12		
	13.0352		12		
	15.1999		13		
	15.2000		13		
	30		14		
	88.0044		14		
	88.0045		15		
	100		16		
	500		17		
	1.022		MeV		17
	1.25				18

	1.5			18
	2.044			19
	4			19
	7			20
	10			21
	30 (上限)			22
鉄	100keV, 1MeV, 10MeV, 30MeV	—	実効線量 E(AP) γ 線源エネルギー毎のビル ドアップ係数を比較	23
鉛	88.0044keV, 88.0045keV, 100keV, 1MeV, 20MeV, 30MeV	—		24
鉄	1MeV	—	実効線量 (6 種各照射体 系)、目の水晶体等価線 量、皮膚等価線量 (男性、 及び女性) 空気カーマ率 上記の線量種類毎の 1MeV γ 線のビルドアップ 係数を比較	25
鉛				25
鉄	1, 10, 20, 40, 60, 80	mfp	実効線量 E(AP) mfp 毎の横軸エネルギー対 ビルドアップ係数を比較	26
鉛				27

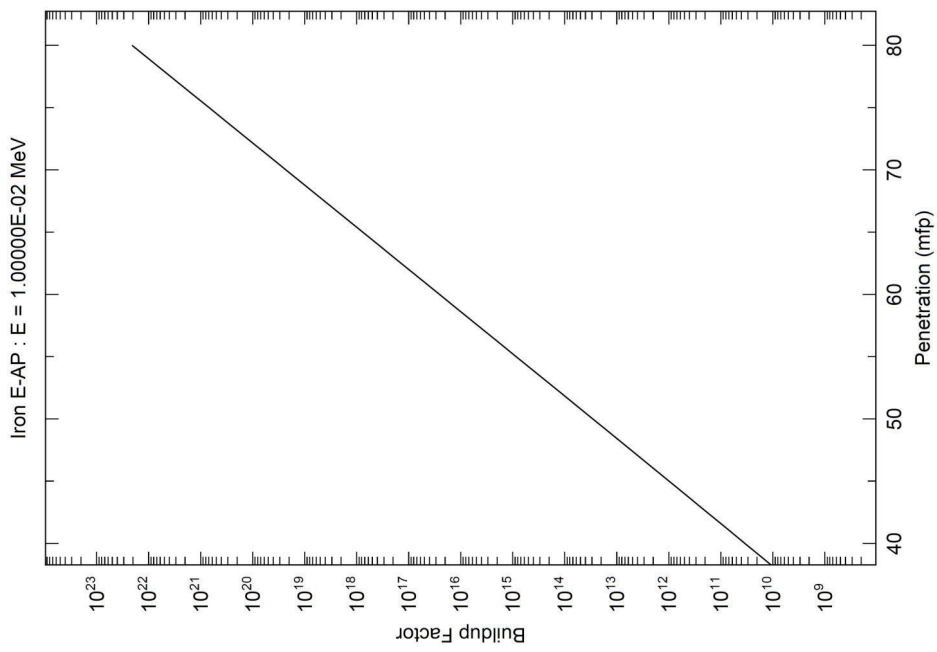


図 鉄に対する 10keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数 (2/2)

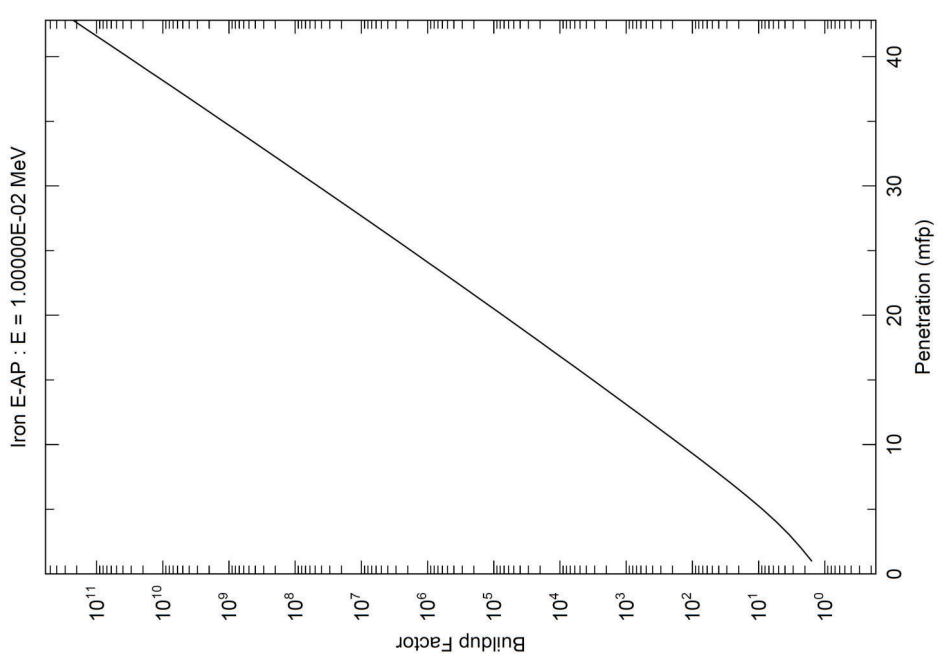


図 鉄に対する 10keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数 (BF-g) (1/2)

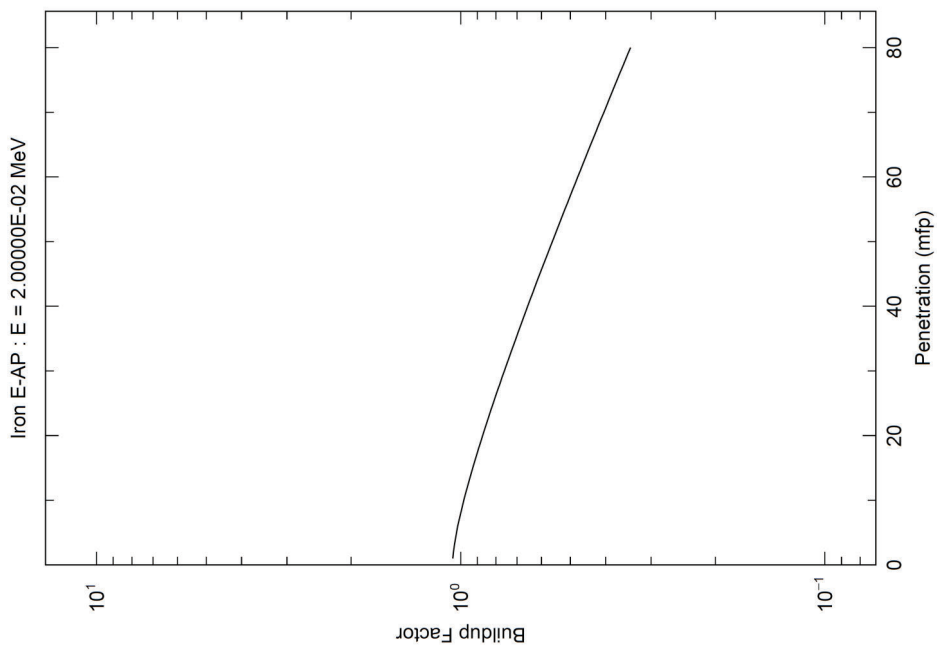


図 鉄に対する 20keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

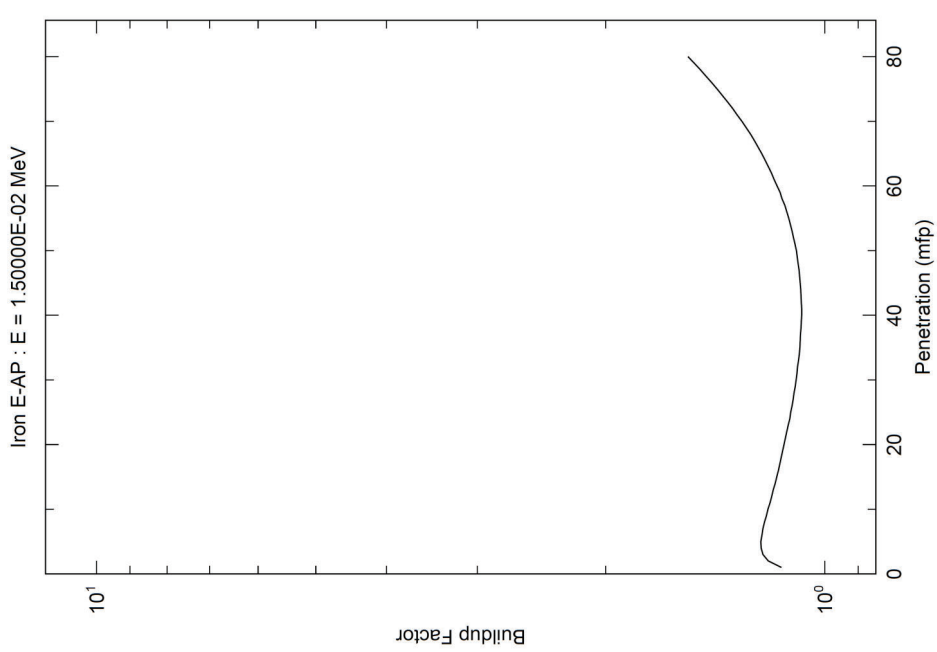


図 鉄に対する 15keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数

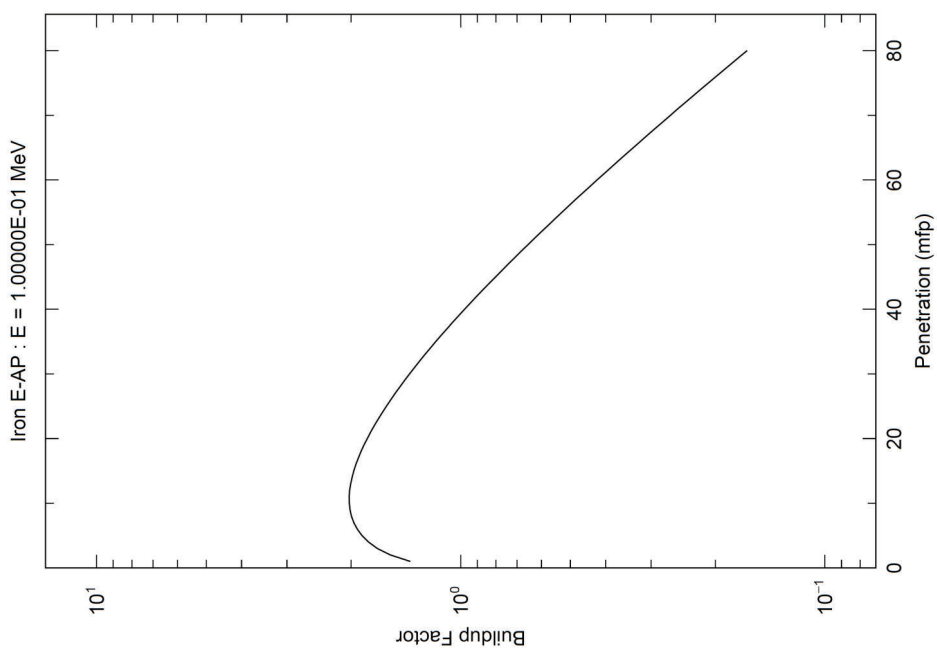


図 鉄に対する 0.1MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

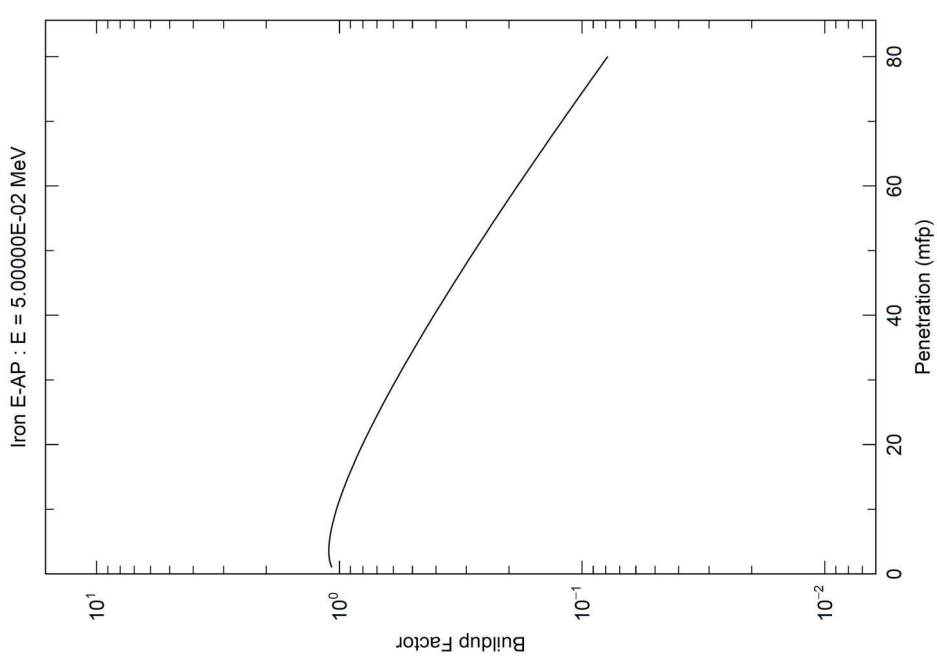


図 鉄に対する 50keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

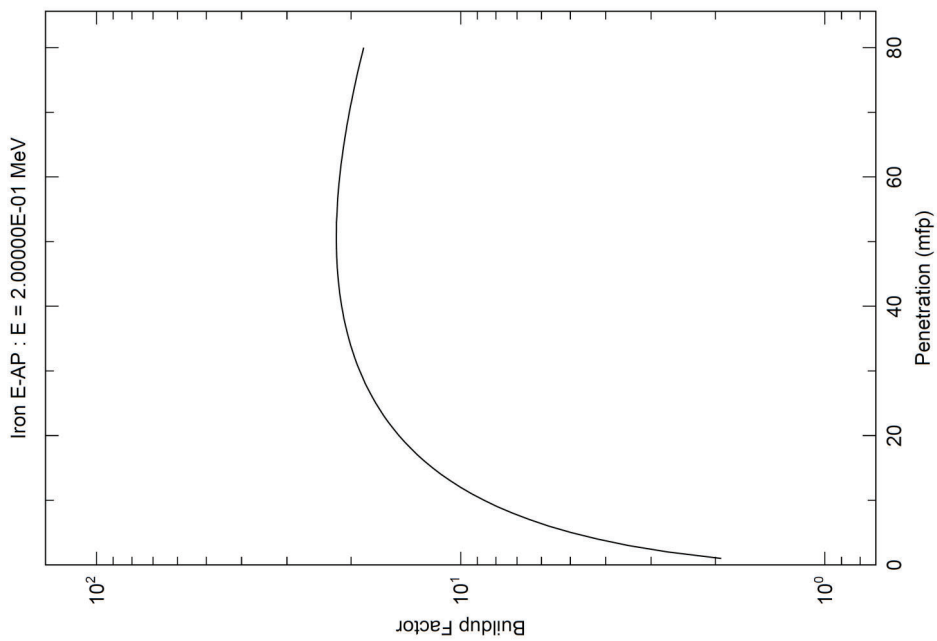


図 鉄に対する 0.2MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

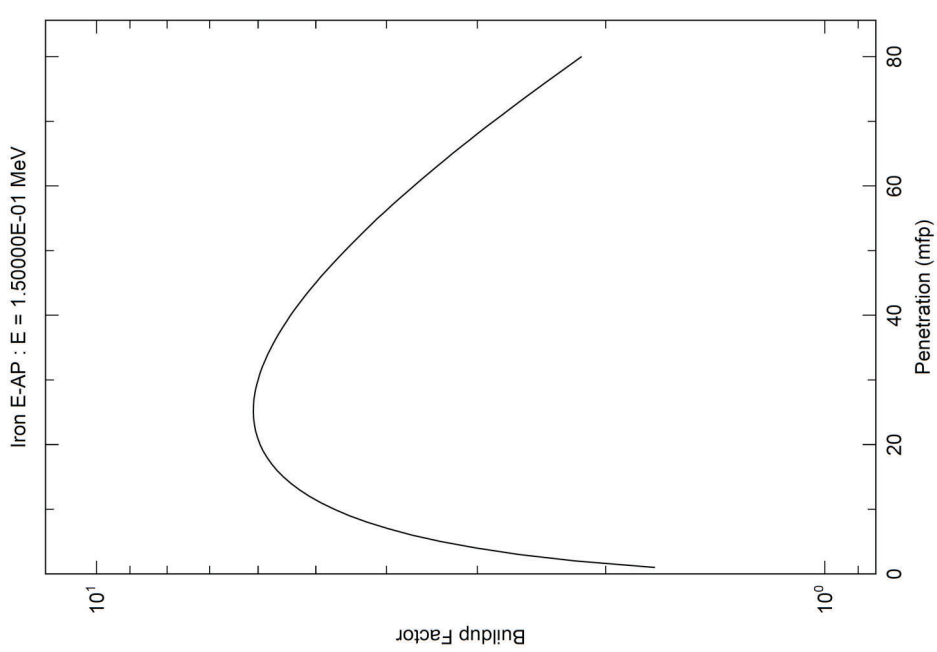


図 鉄に対する 0.15MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

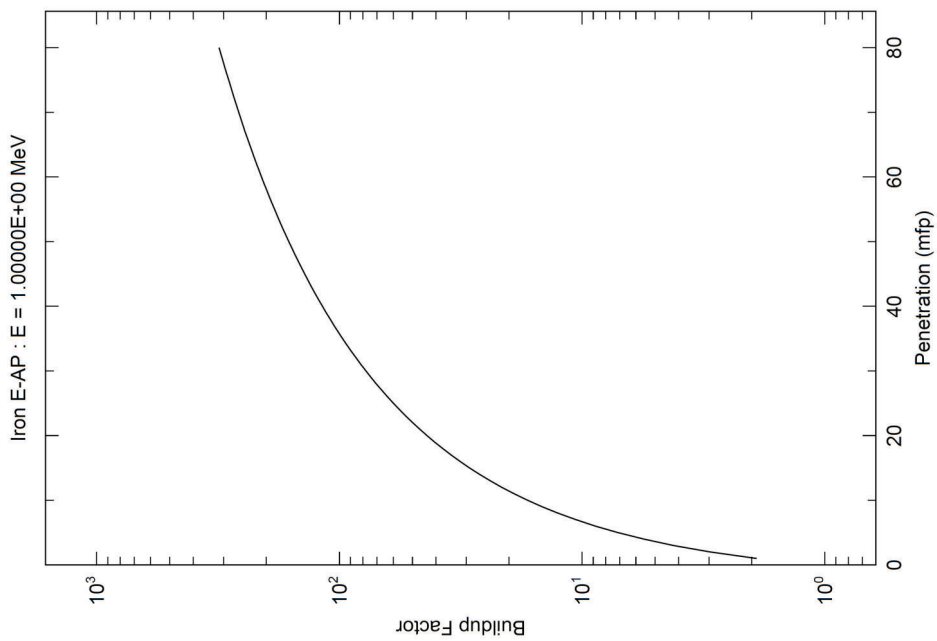


図 鉄に対する 1MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

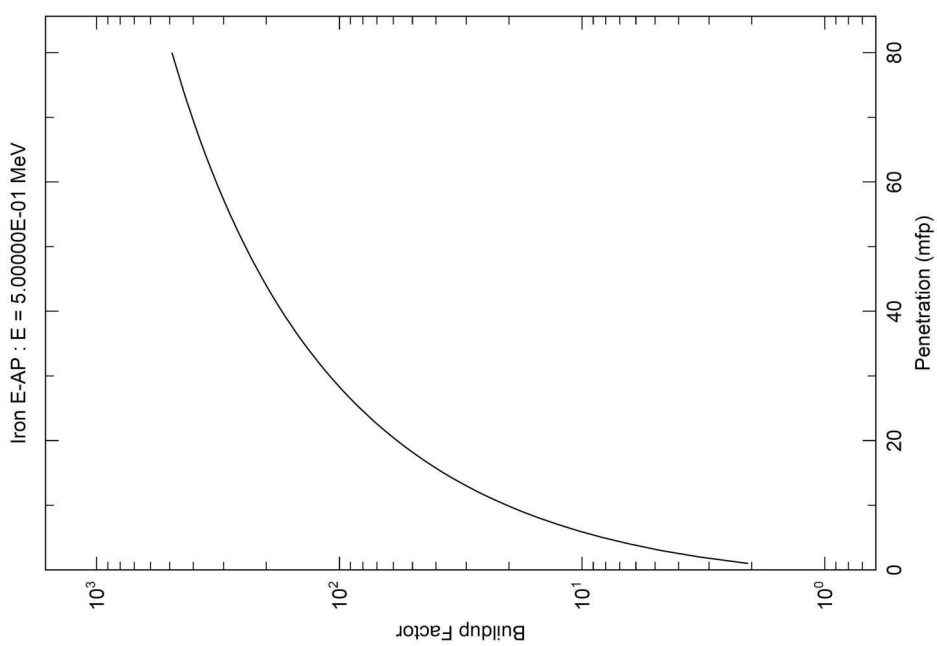


図 鉄に対する 0.5MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

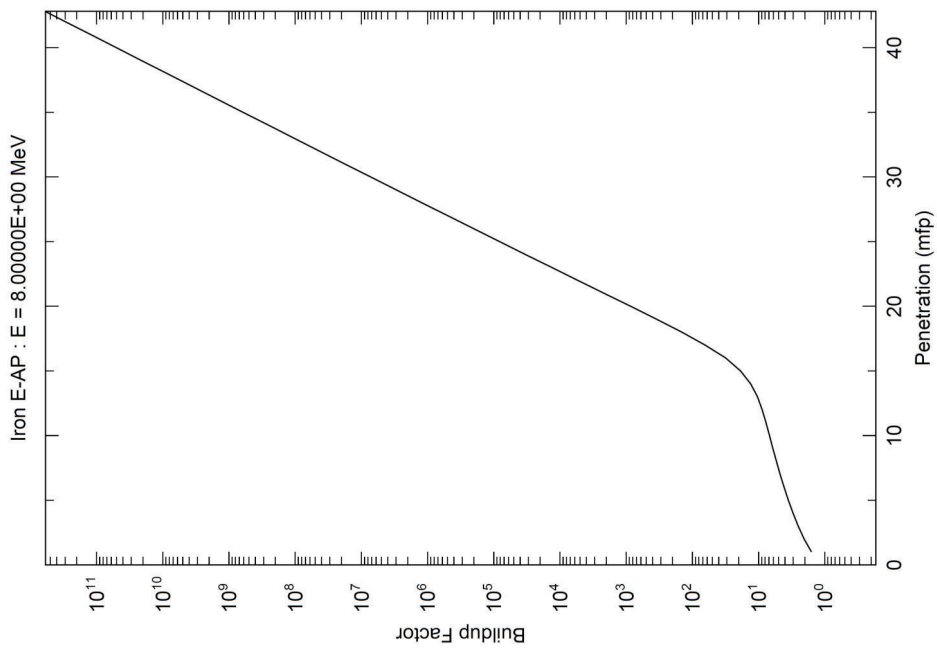


図 鉄に対する 8MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

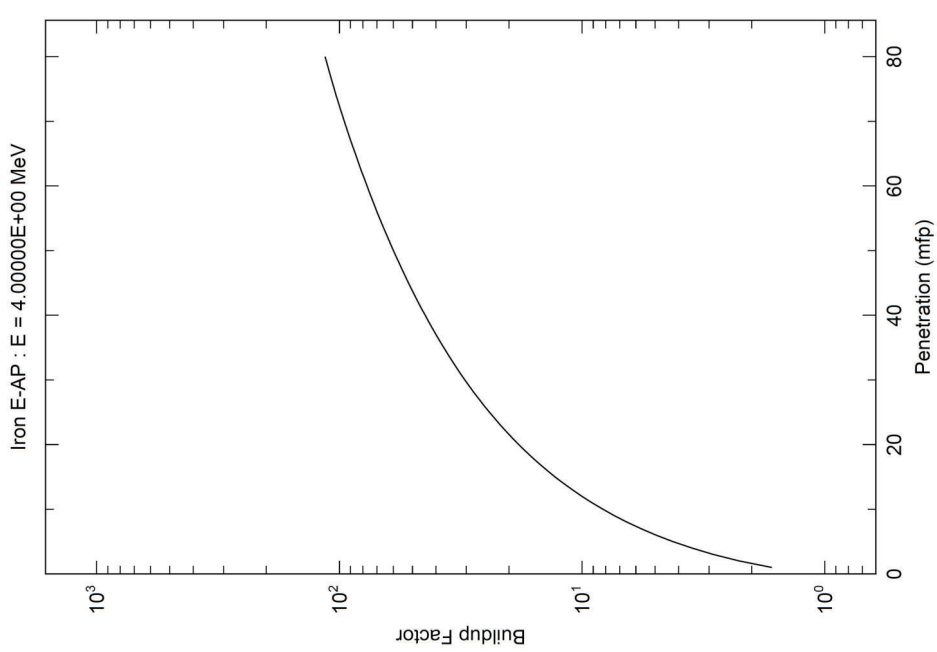


図 鉄に対する 4MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

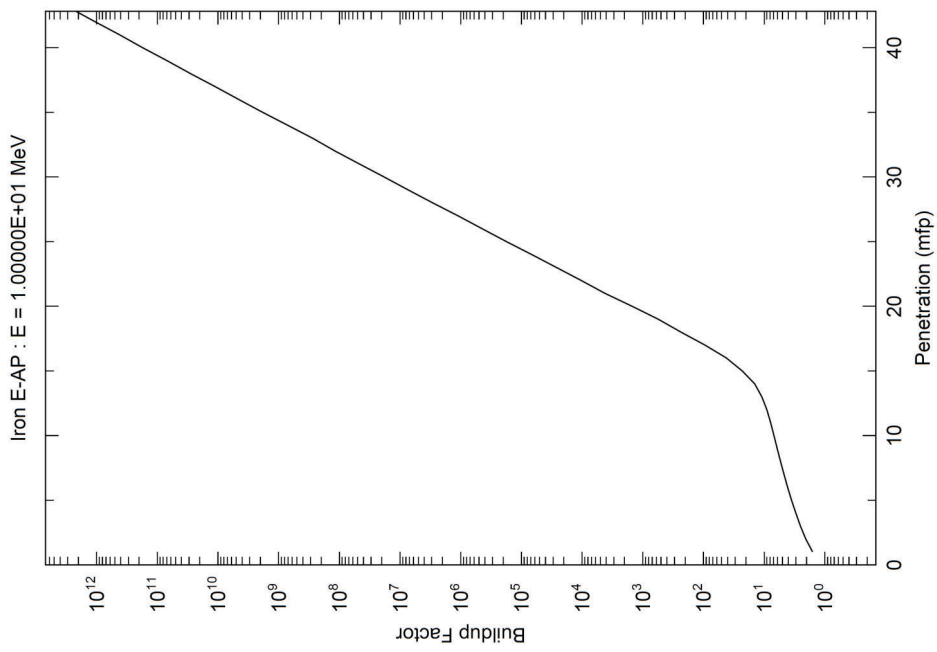


図 鉄に対する 10MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

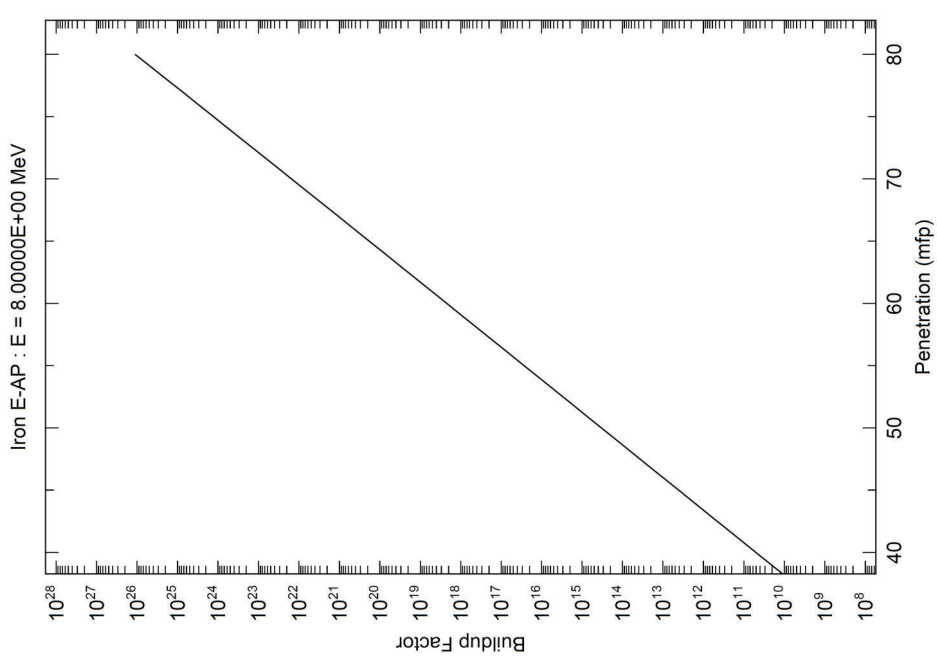


図 鉄に対する 8MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

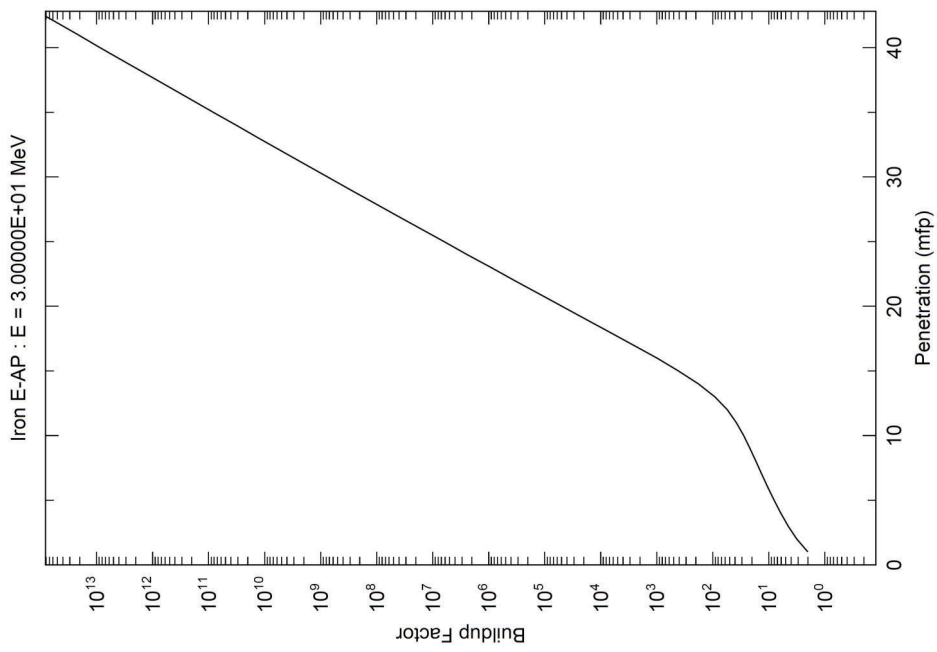


図 鉄に対する 30MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

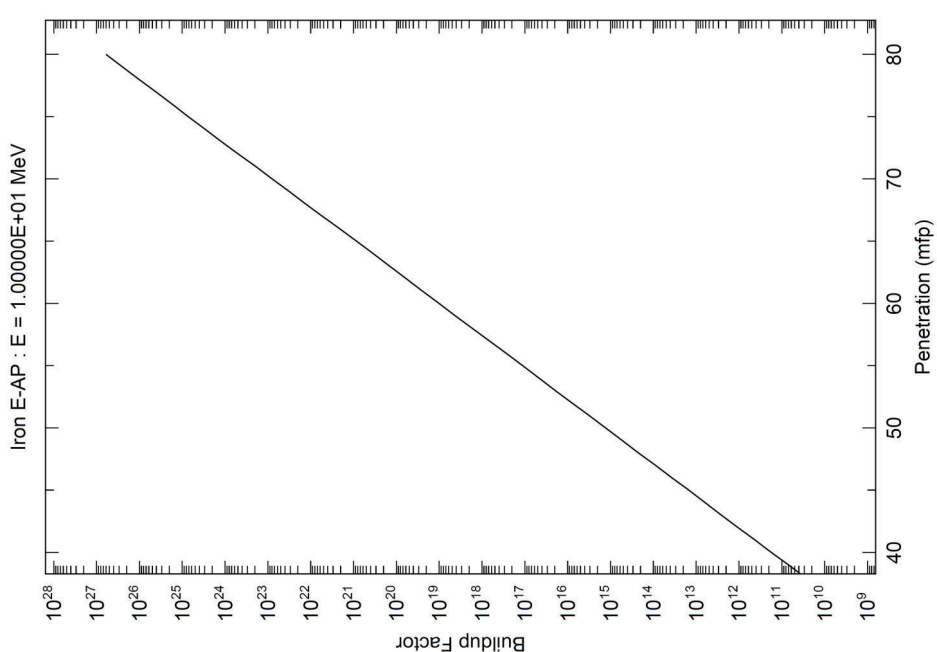


図 鉄に対する 10MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

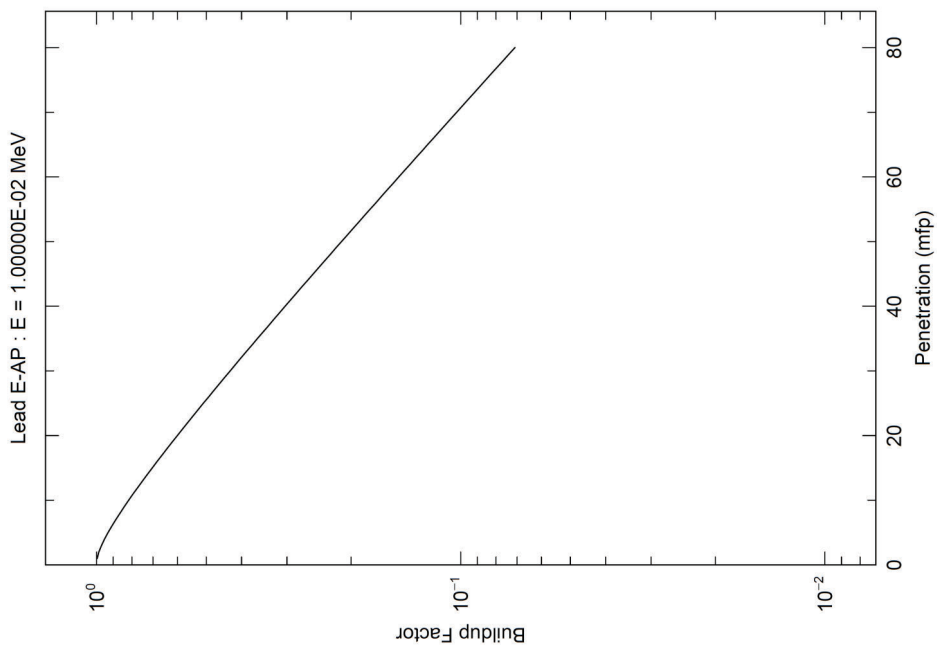


図 鉛に対する 10keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

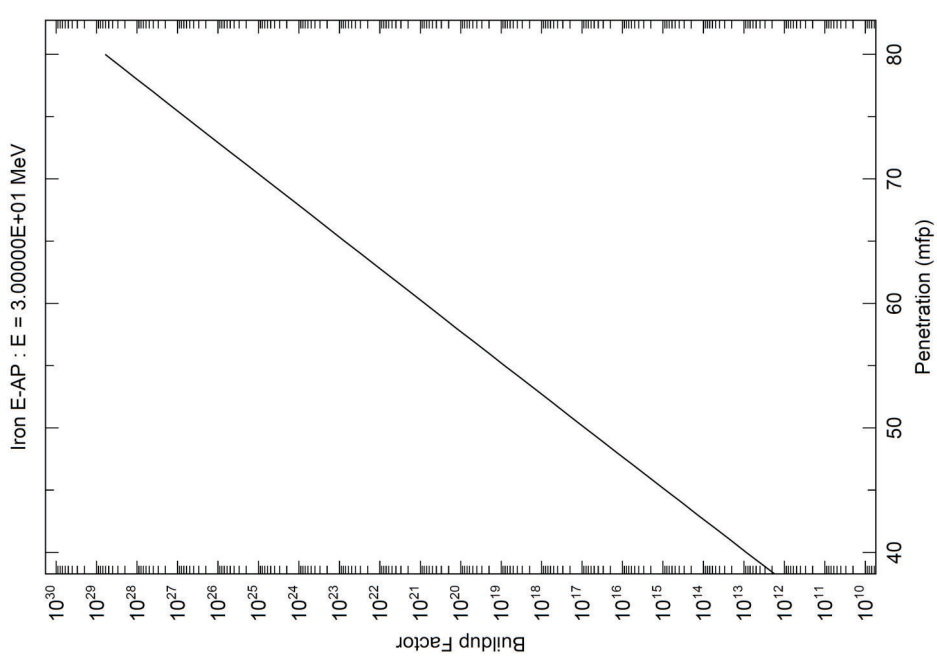


図 鉄に対する 30MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

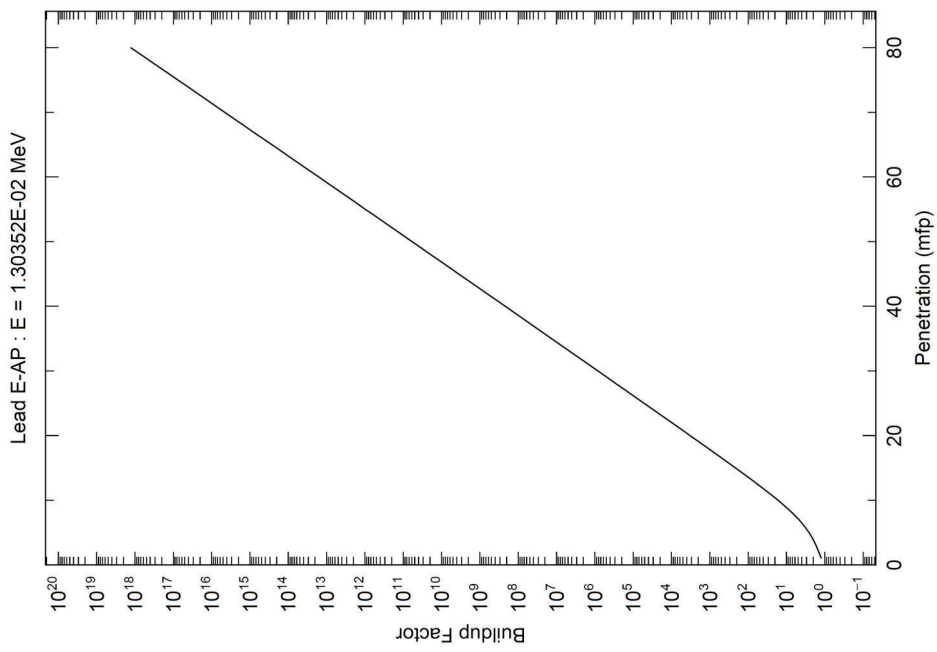


図 鉛に対する 13.0352keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

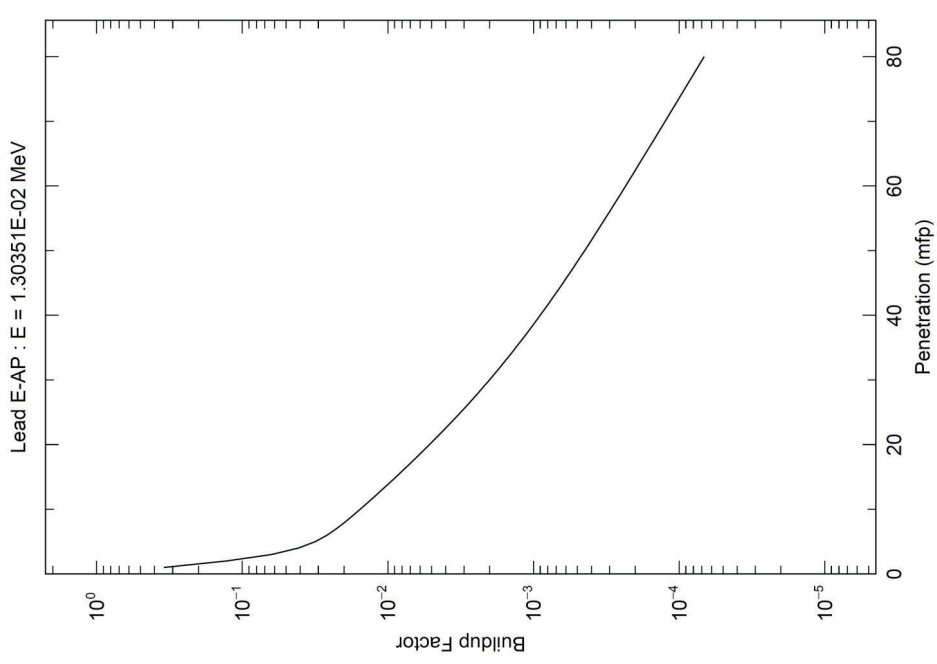


図 鉛に対する 13.0351keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

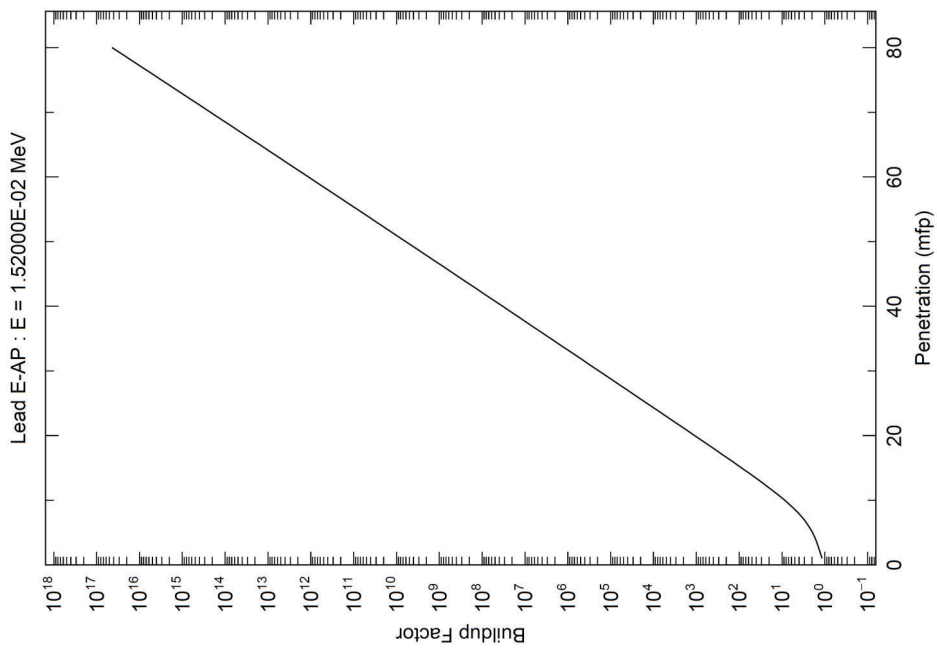


図 鉛に対する 15.2000keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

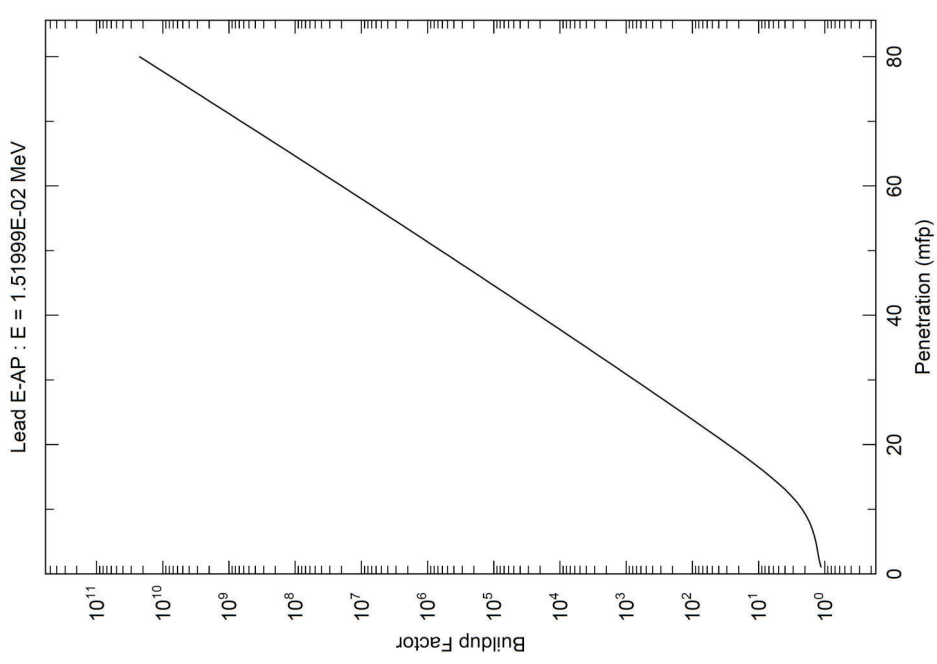


図 鉛に対する 15.1999keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

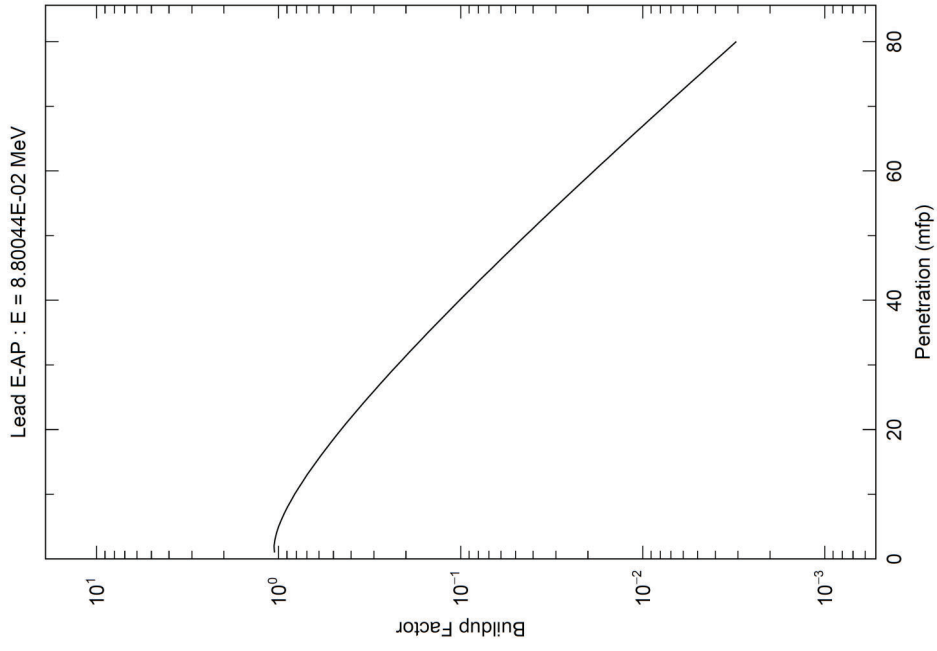


図 鉛に対する 88.0044keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

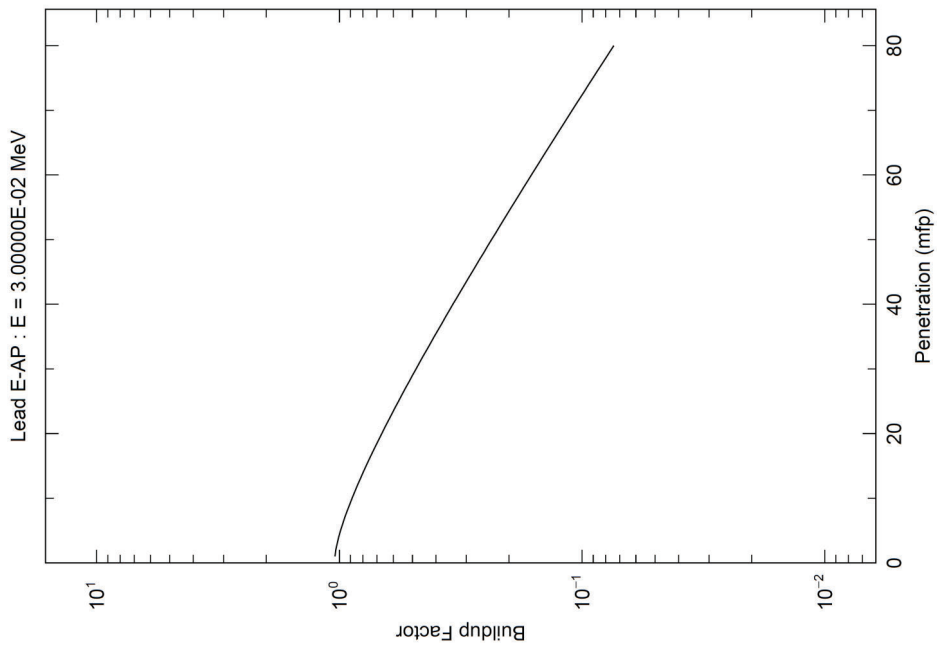


図 鉛に対する 30keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

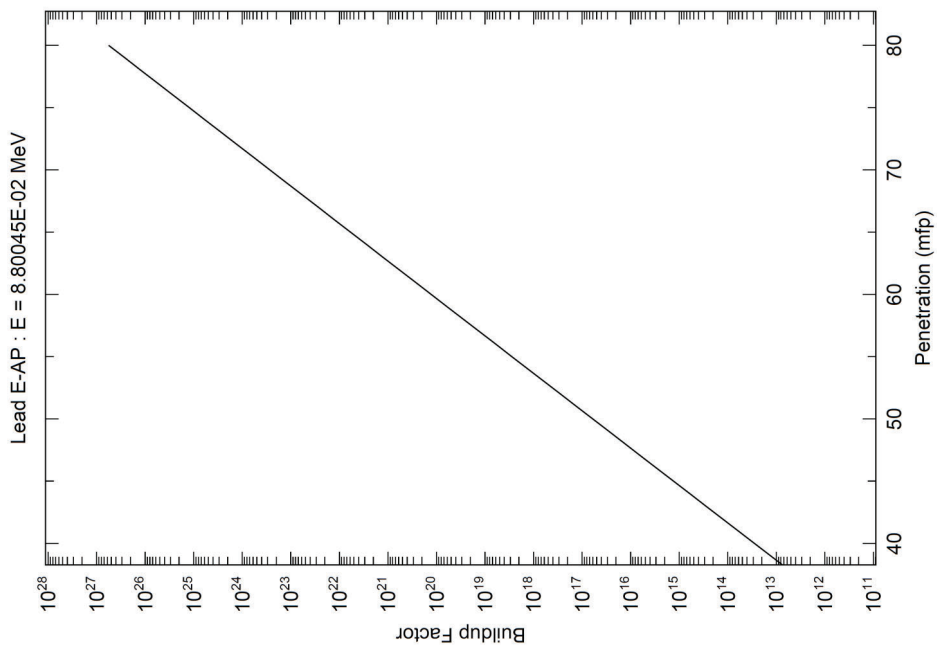


図 鉛に対する 88.0045keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

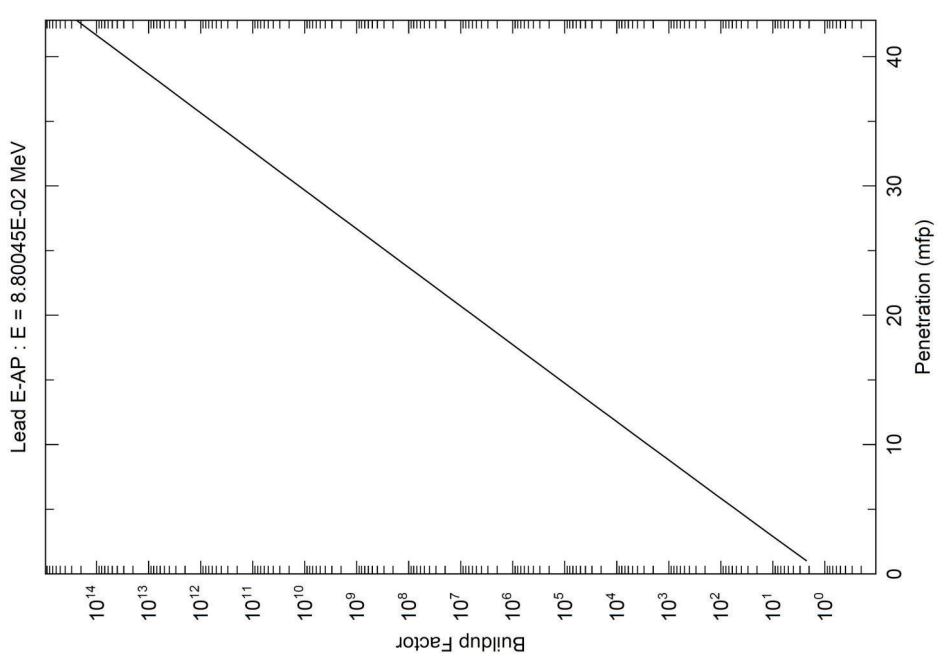


図 鉛に対する 88.0045keV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

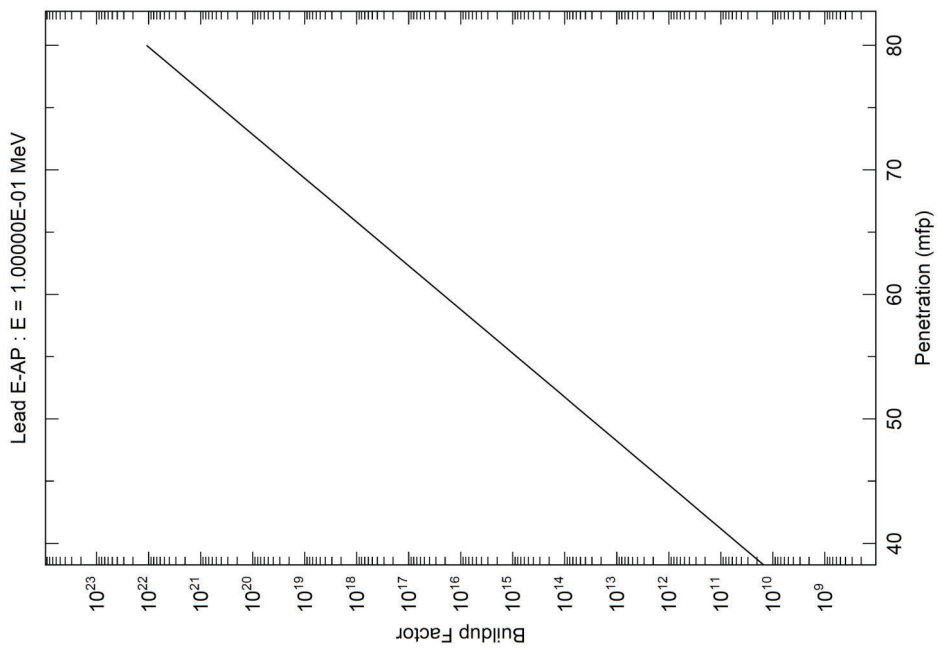


図 鉛に対する 0.1MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

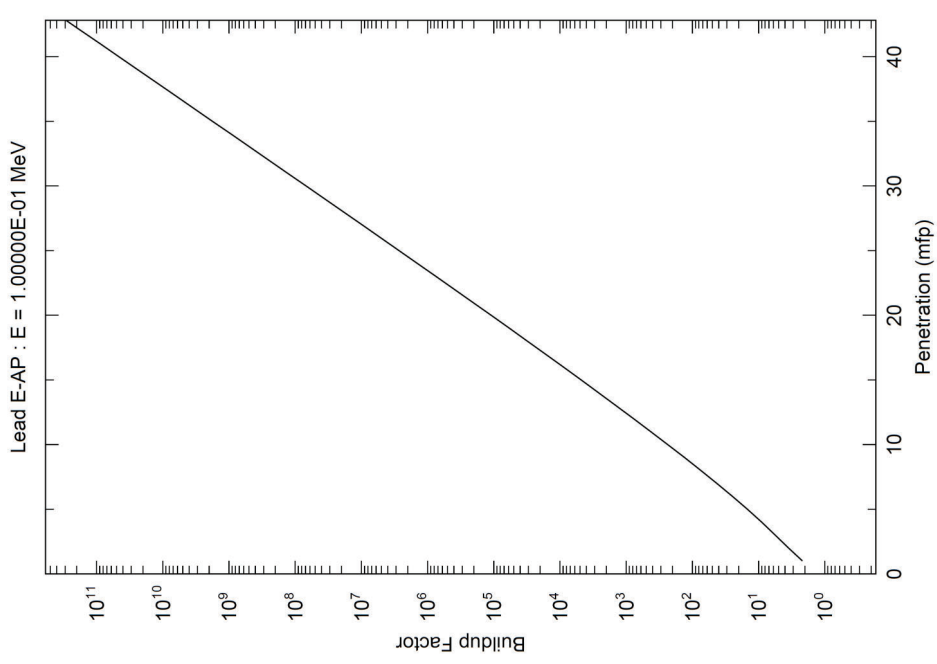


図 鉛に対する 0.1MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

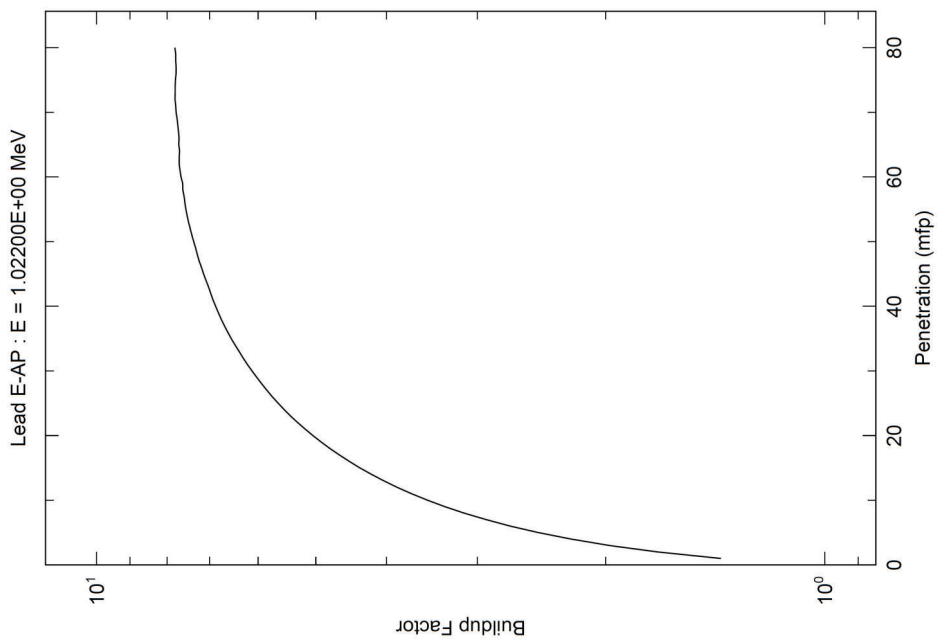


図 鉛に対する 1.022MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

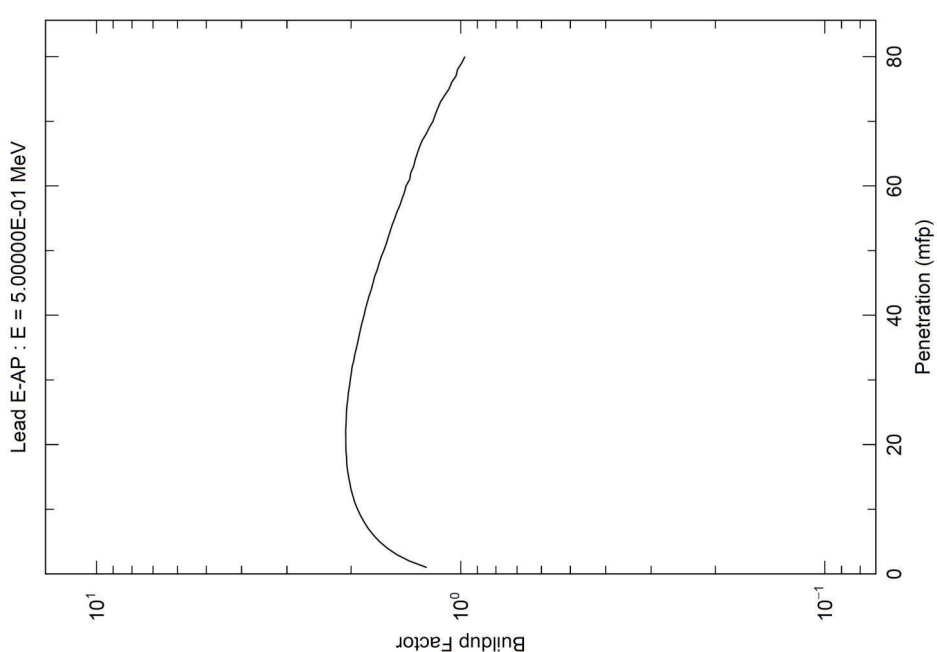


図 鉛に対する 0.5MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

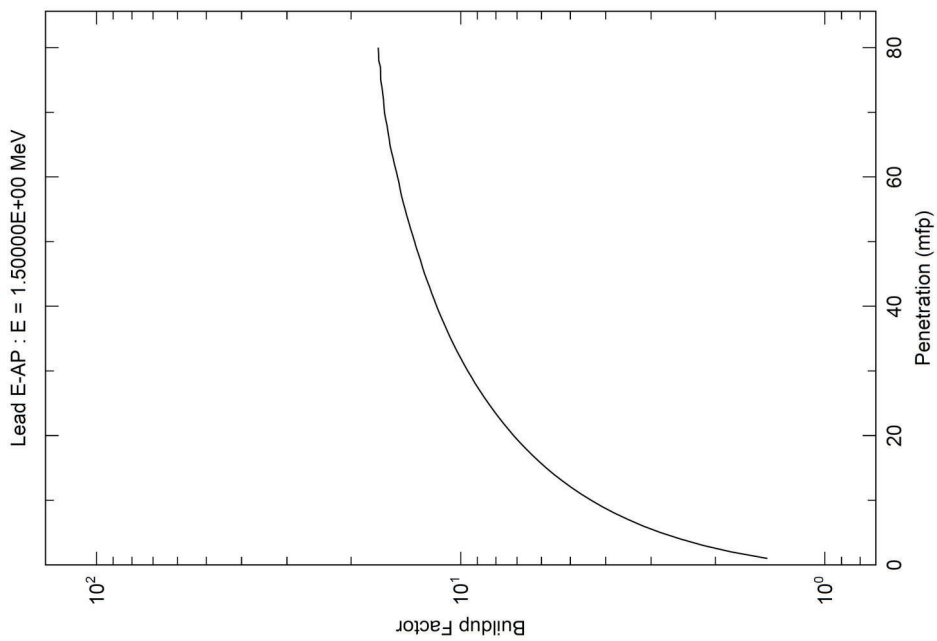


図 鉛に対する 1.5MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

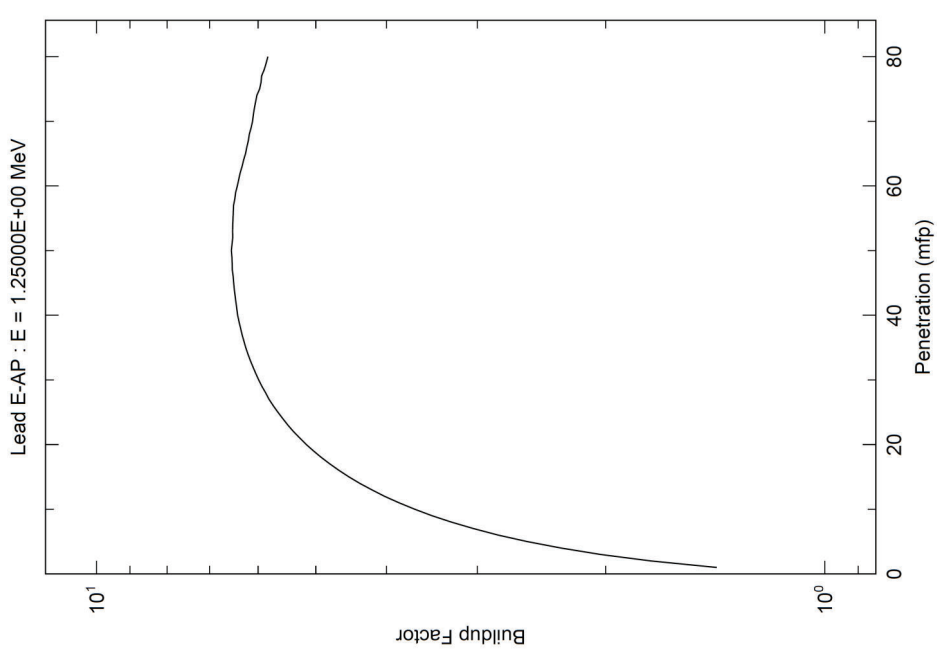


図 鉛に対する 1.25MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

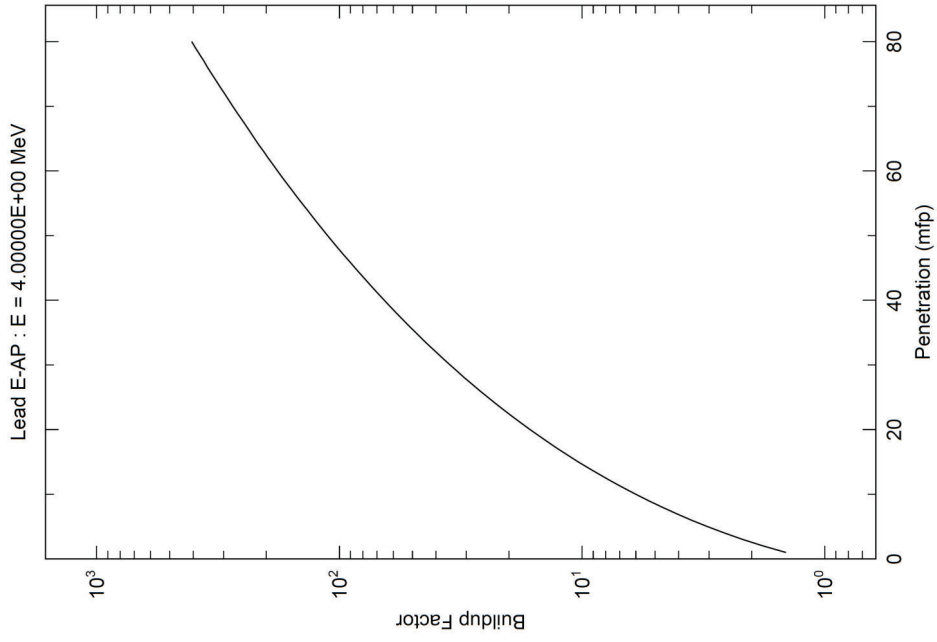


図 鉛に対する 4MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

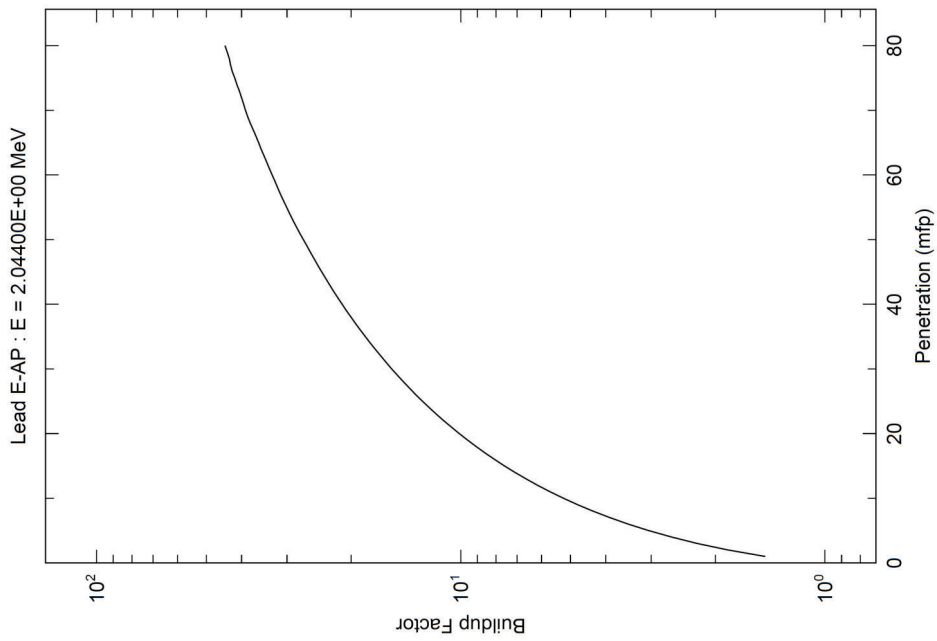


図 鉛に対する 2.044MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g)

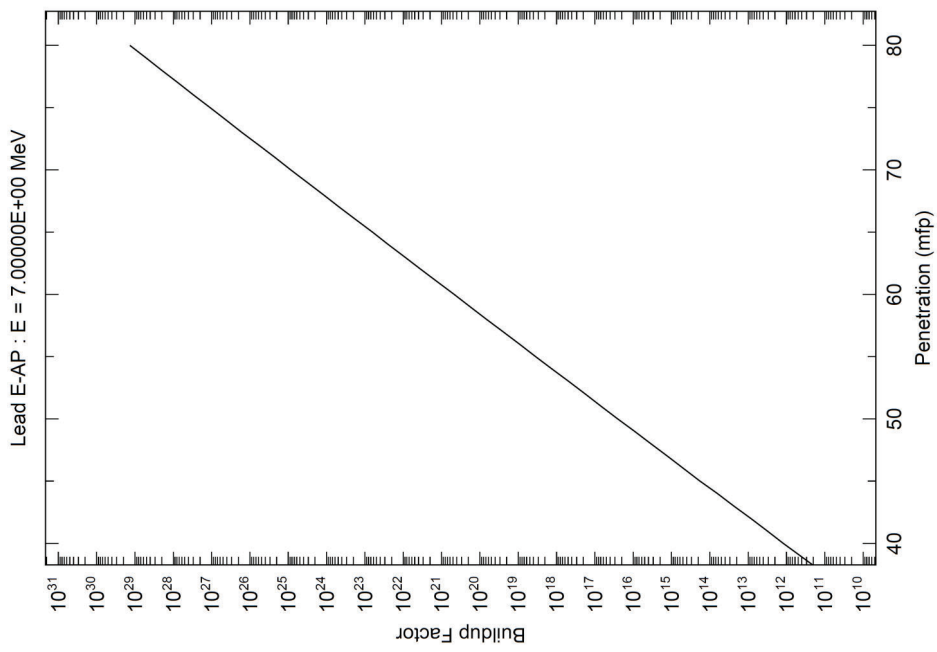


図 鉛に対する 7MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

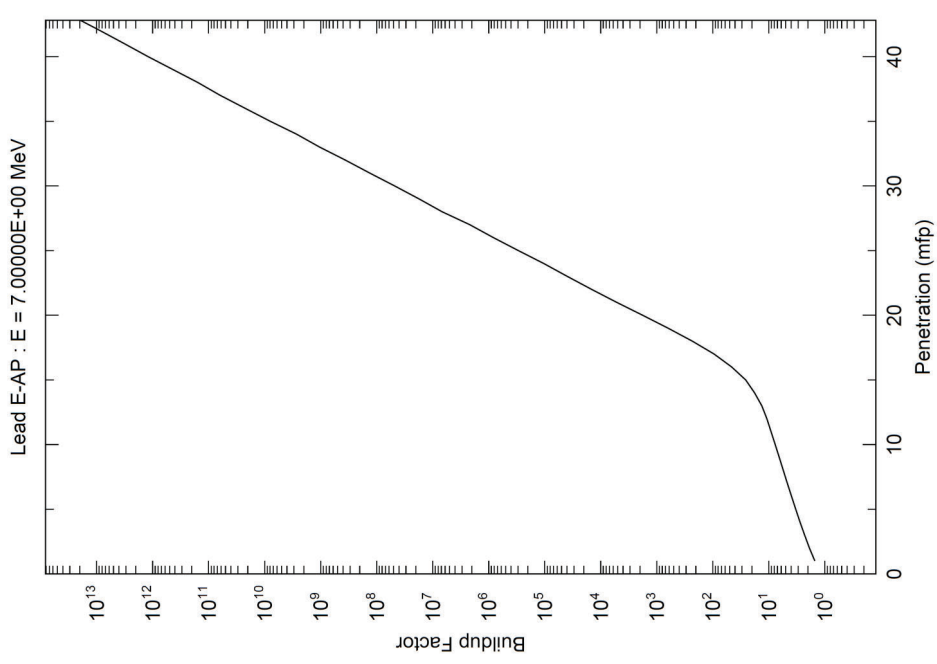


図 鉛に対する 7MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

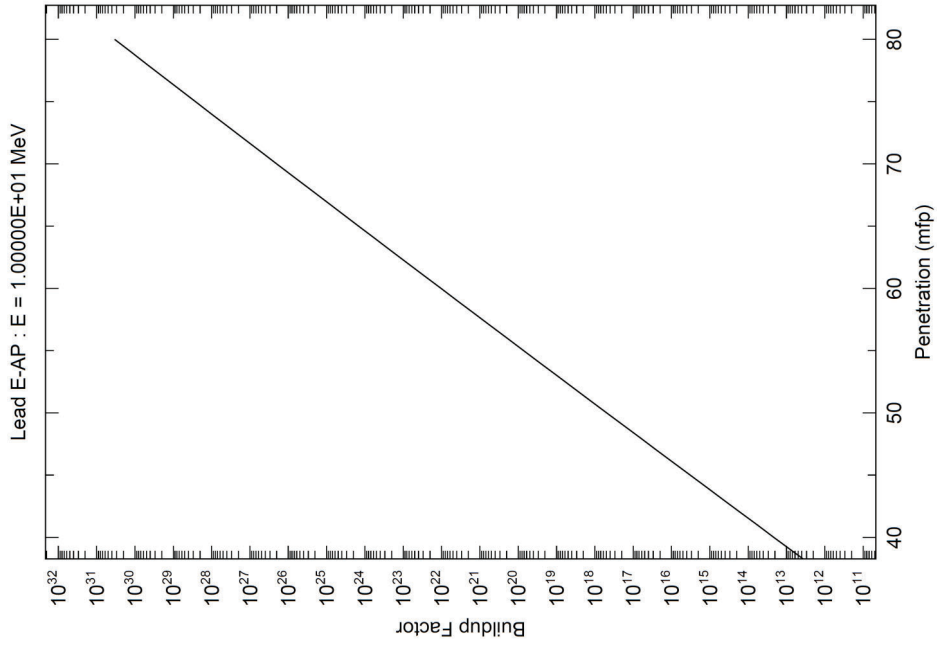


図 鉛に対する 10MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

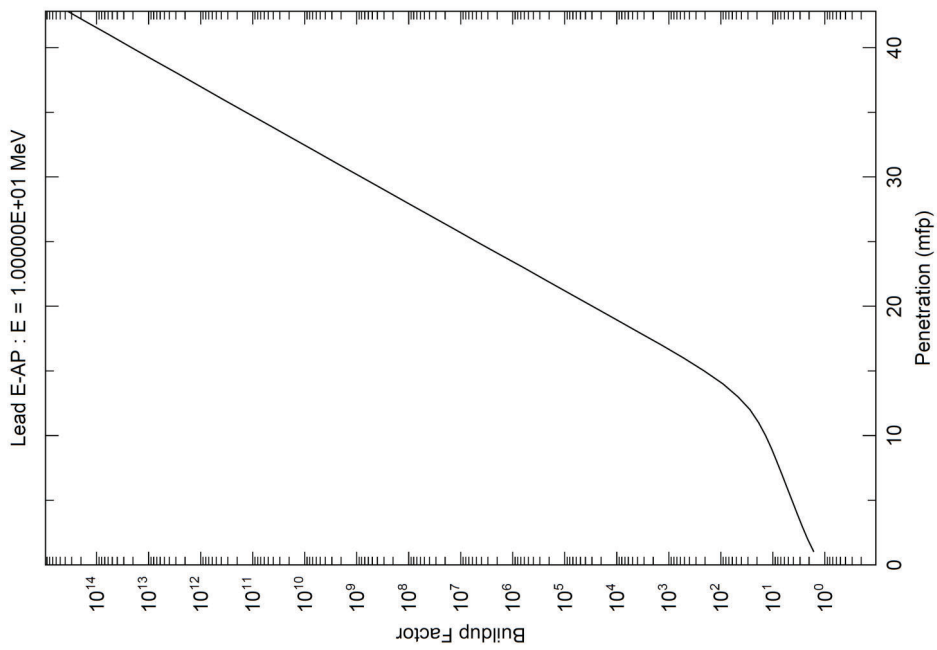


図 鉛に対する 10MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

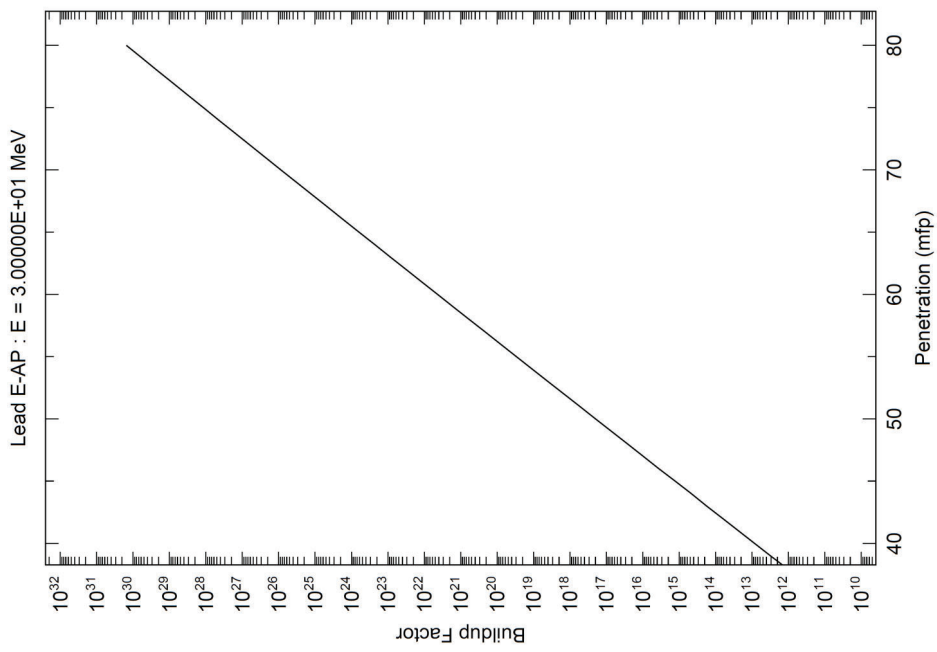


図 鉛に対する 30MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

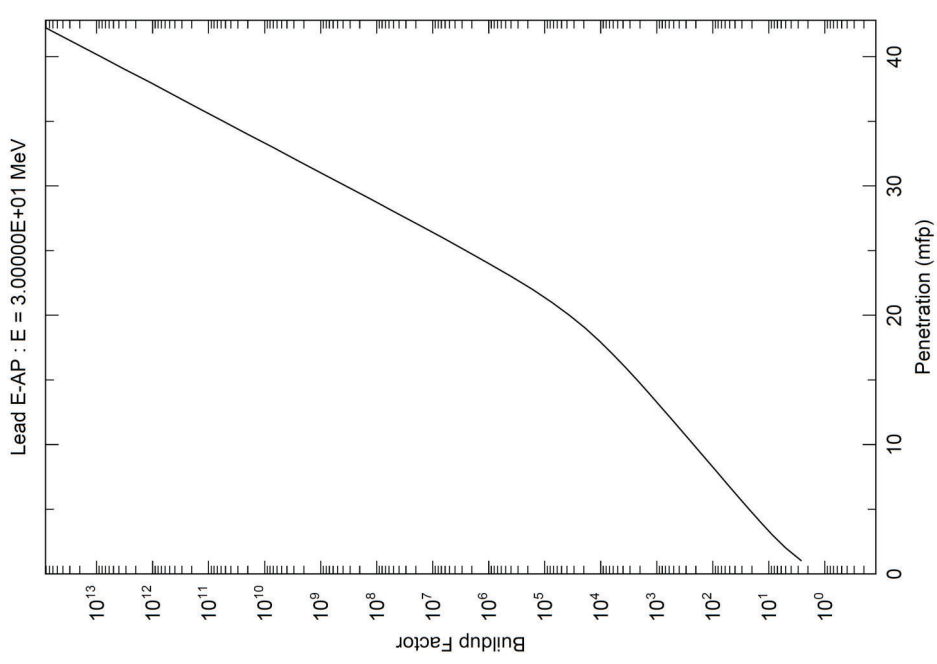


図 鉛に対する 30MeV- γ 線の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

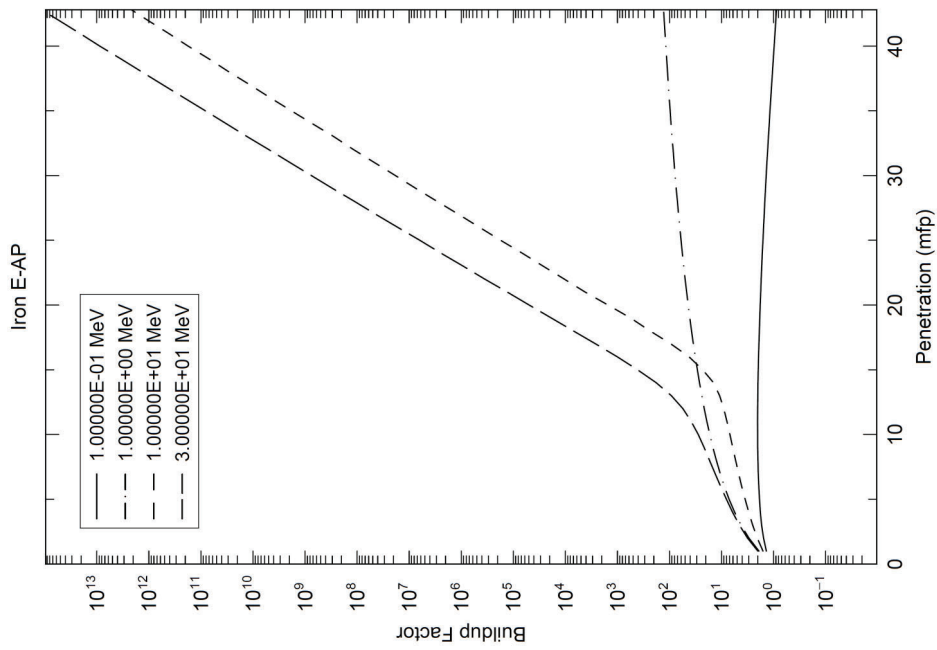


図 鉄に対するγ線エネルギー毎の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

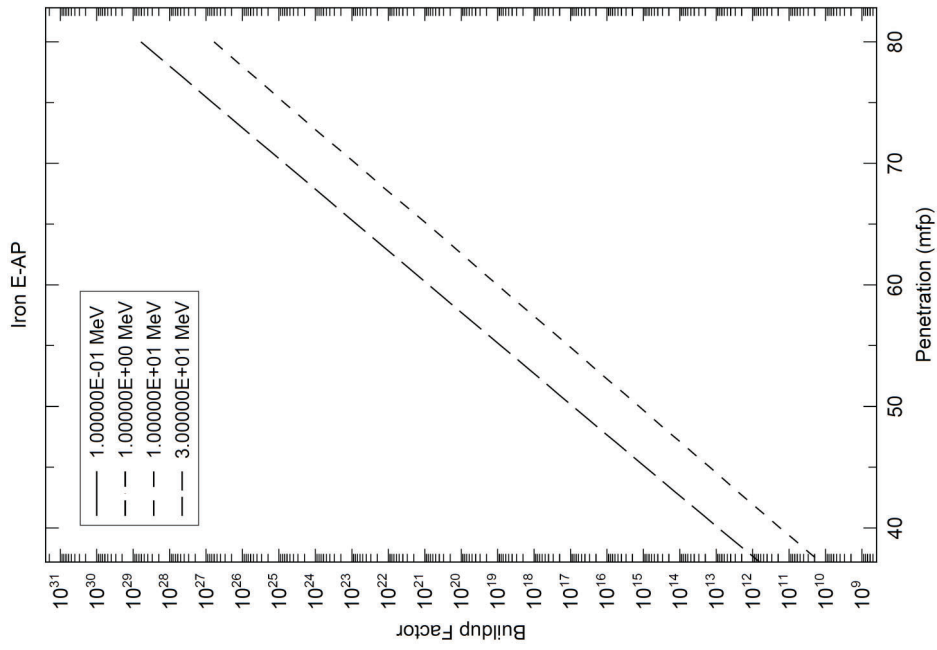


図 鉄に対するγ線エネルギー毎の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

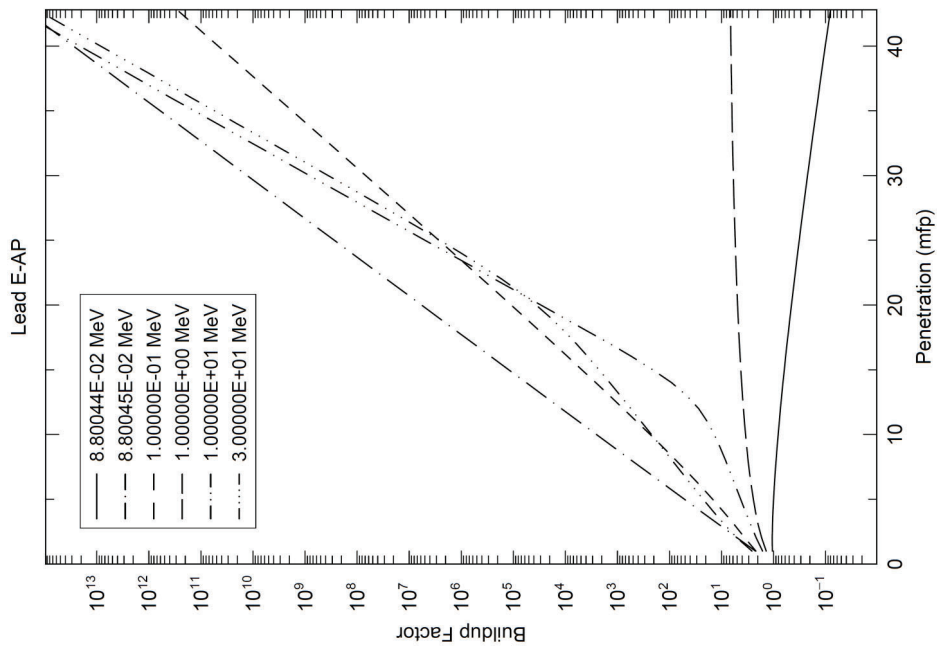


図 鉛に対するγ線エネルギー毎の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

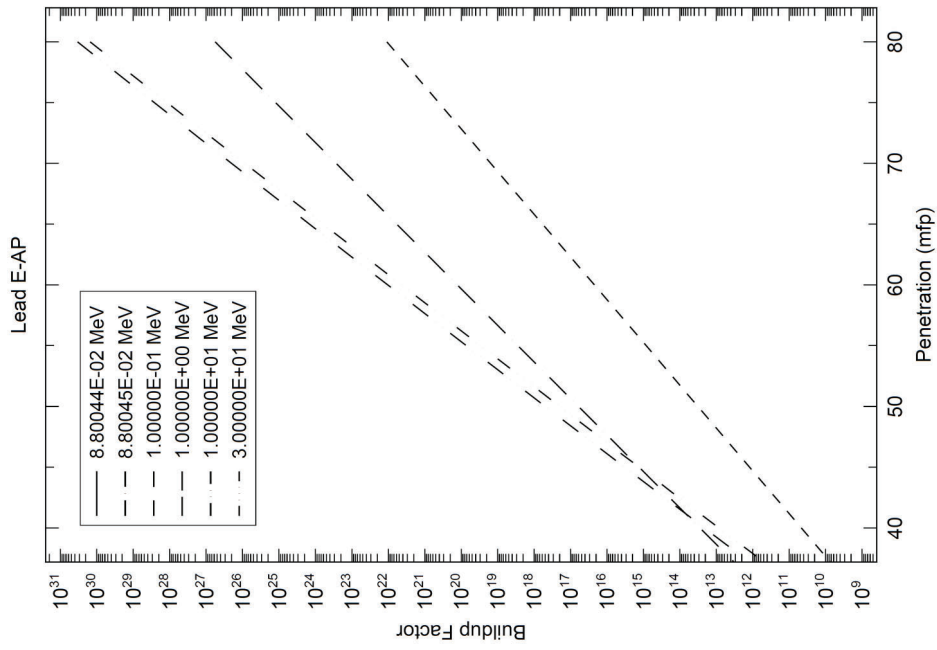


図 鉛に対するγ線エネルギー毎の実効線量ビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

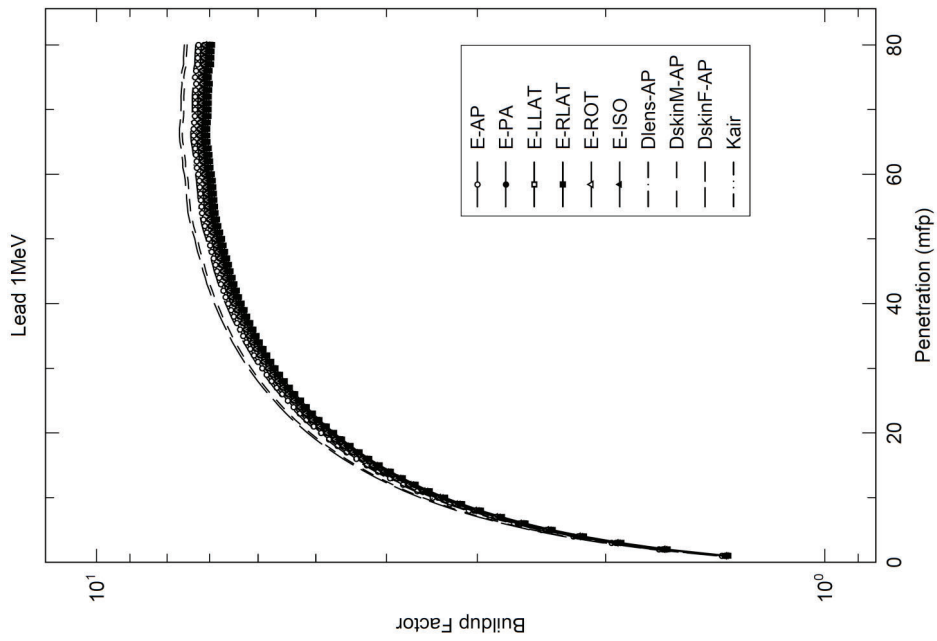


図 鉛に対する 1MeV γ線の各線量種類のビルドアップ係数(BF-g)

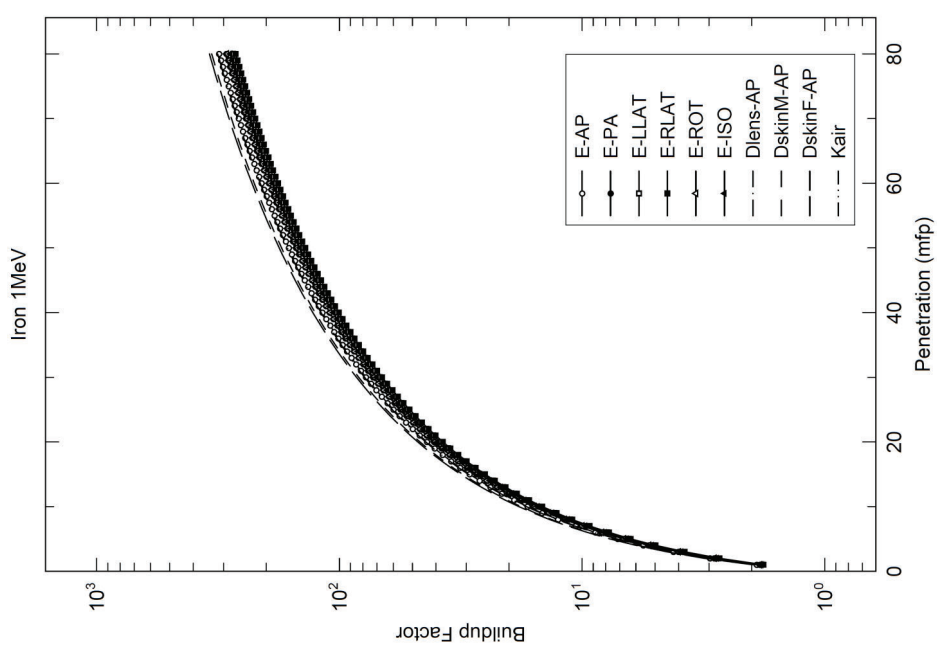


図 鉄に対する 1MeV γ線の各線量種類のビルドアップ係数(BF-g)

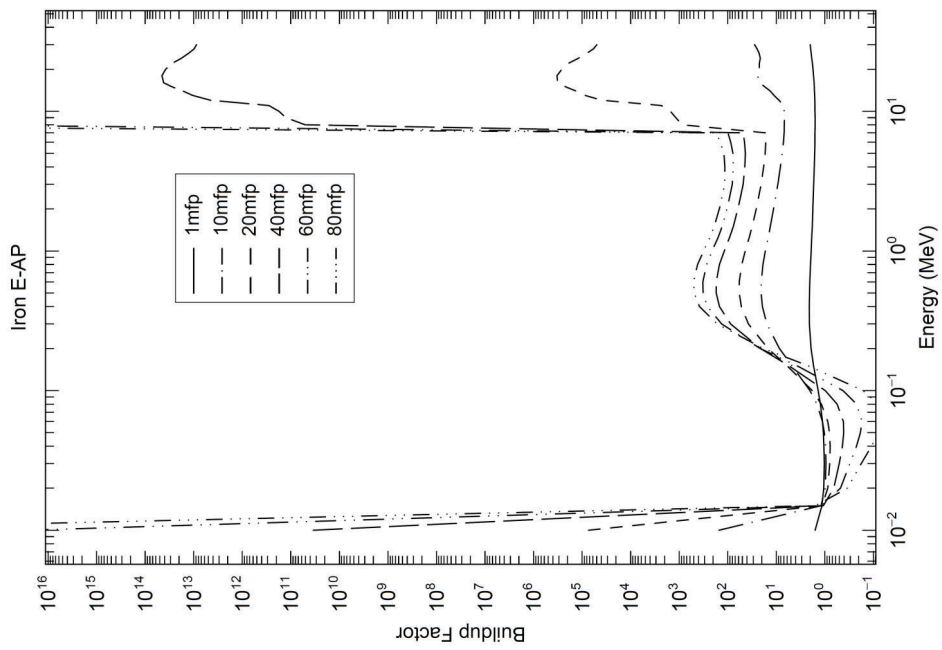


図 鉄に対する mfp 毎のビルドアップ係数(BF-g) (1/2)

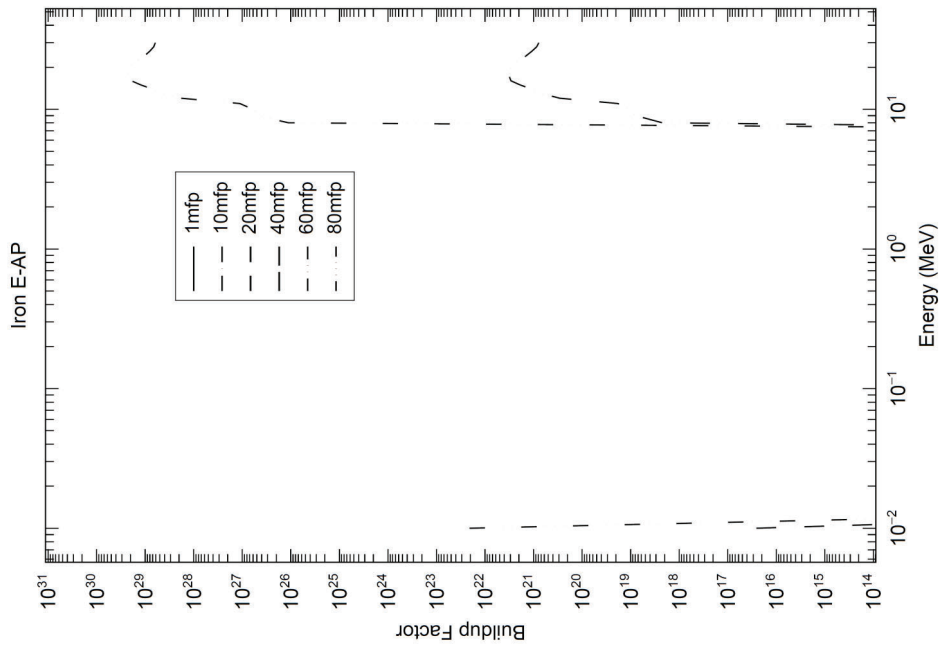


図 鉄に対する mfp 毎のビルドアップ係数(BF-g) (2/2)

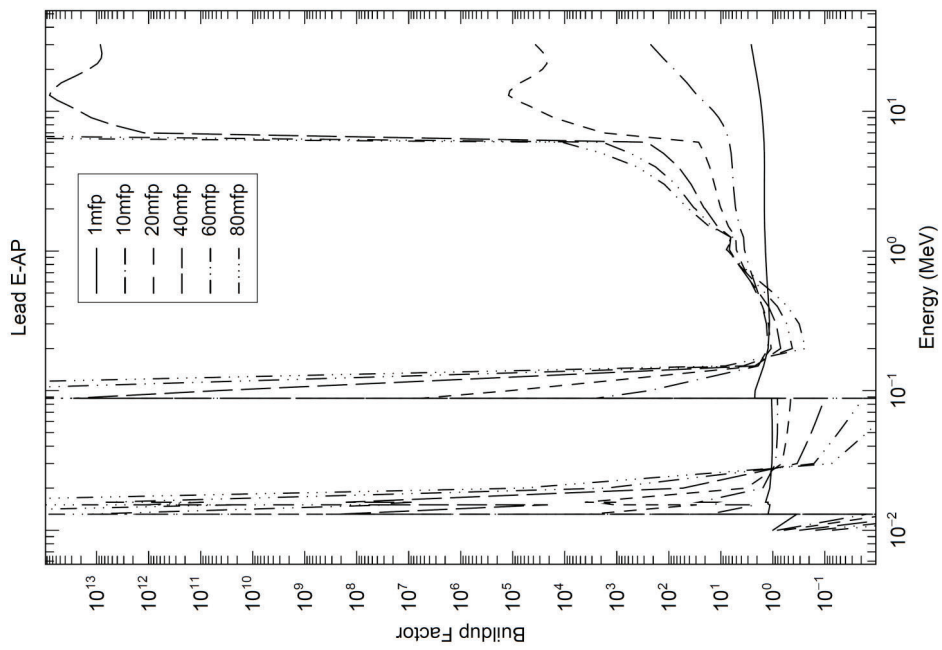


図 鉛に対する mfp 毎のビルドアップ係数(BF-g)

付録IX

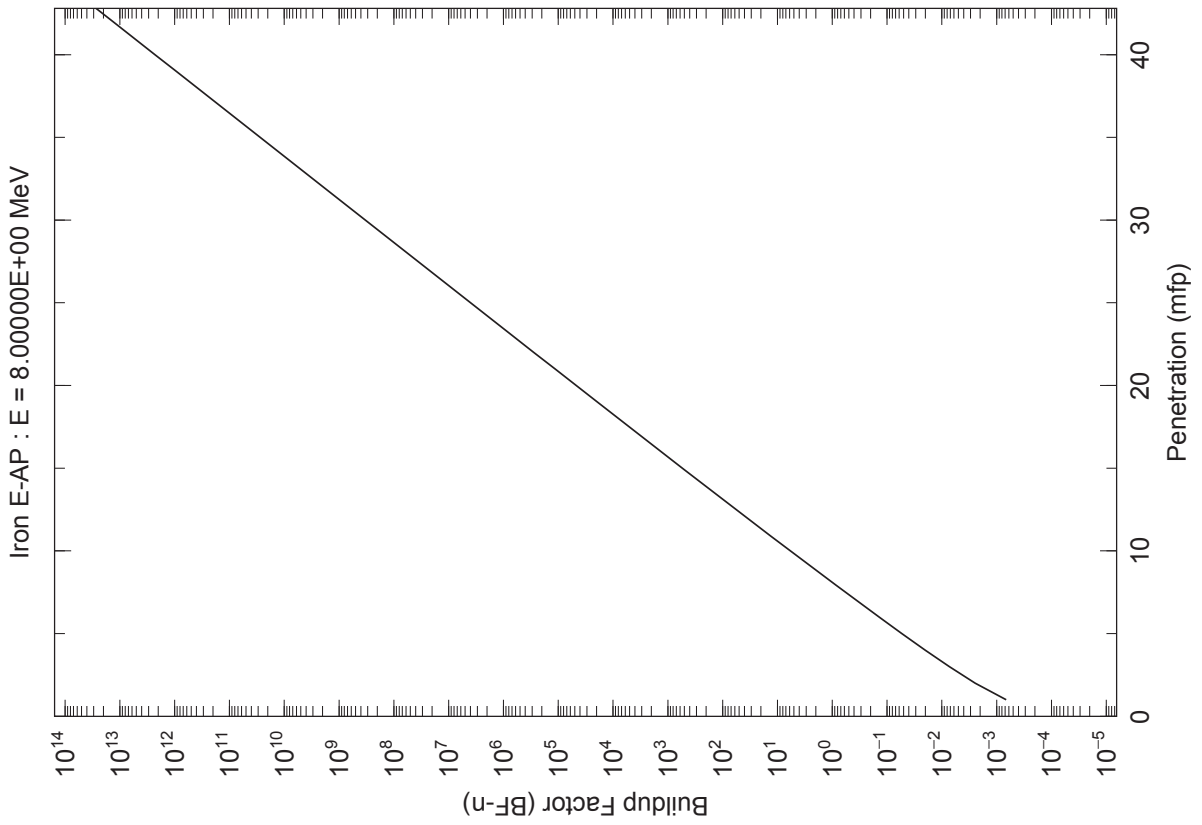
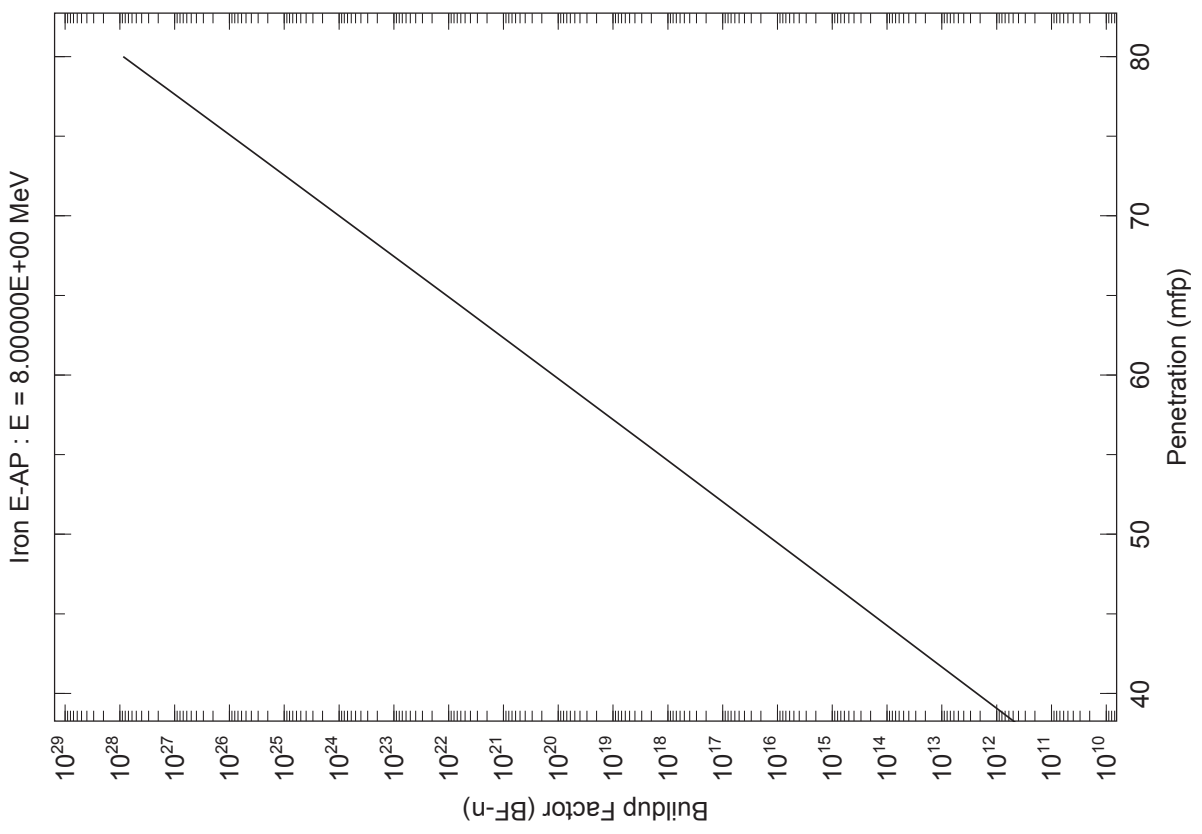
光中性子ビルドアップ係数 (BF-n) の作成例

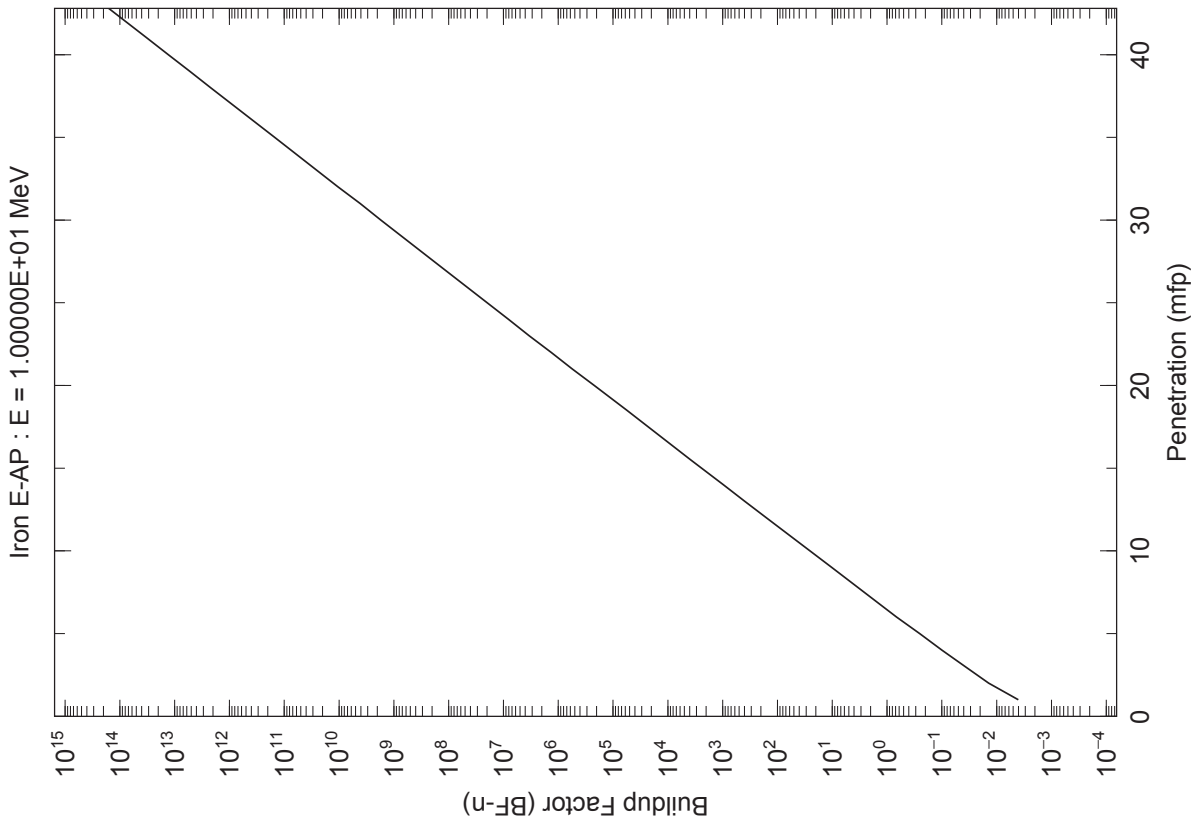
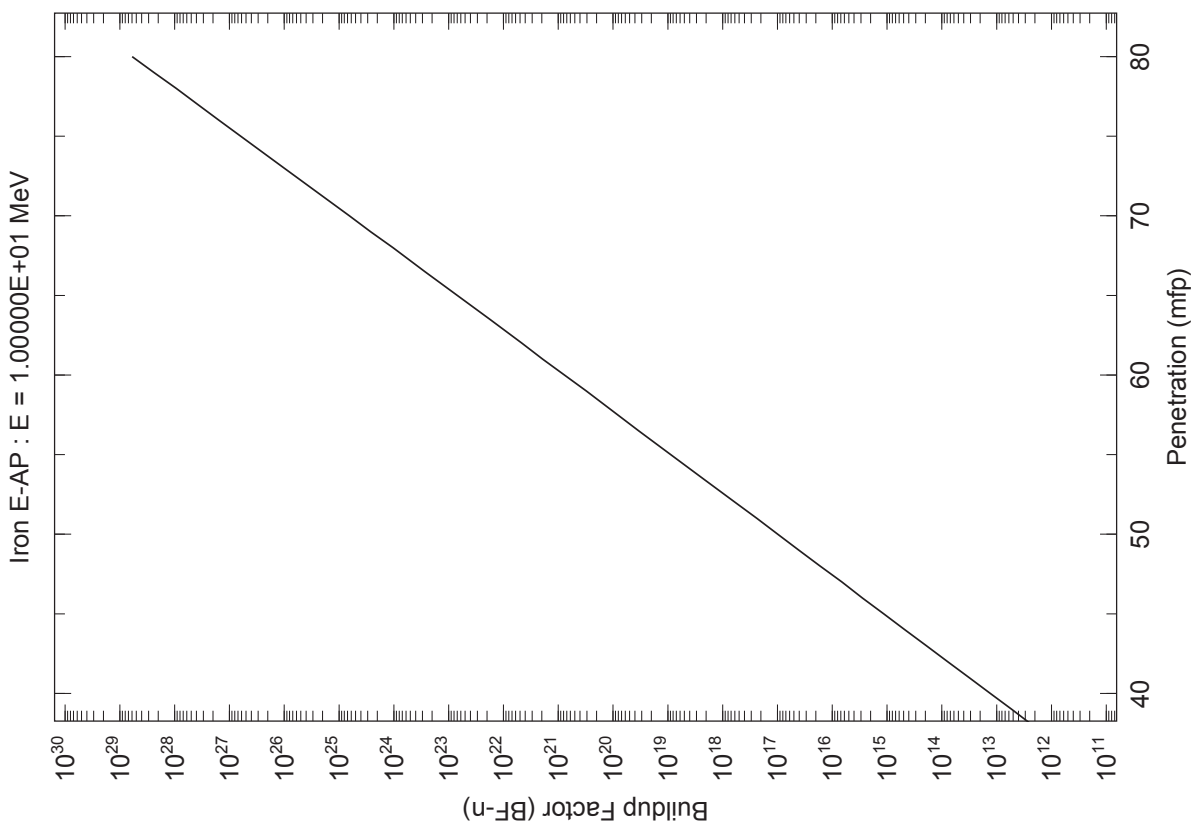
(鉄、及び鉛)

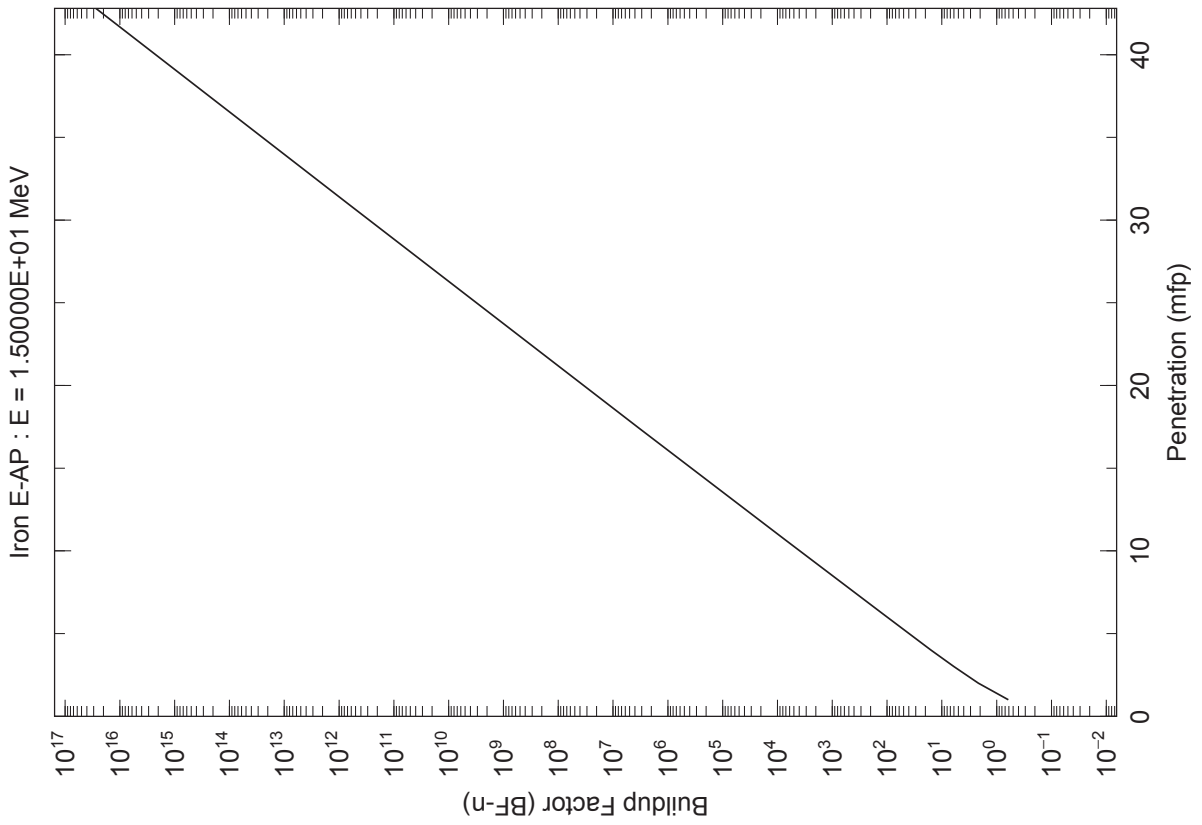
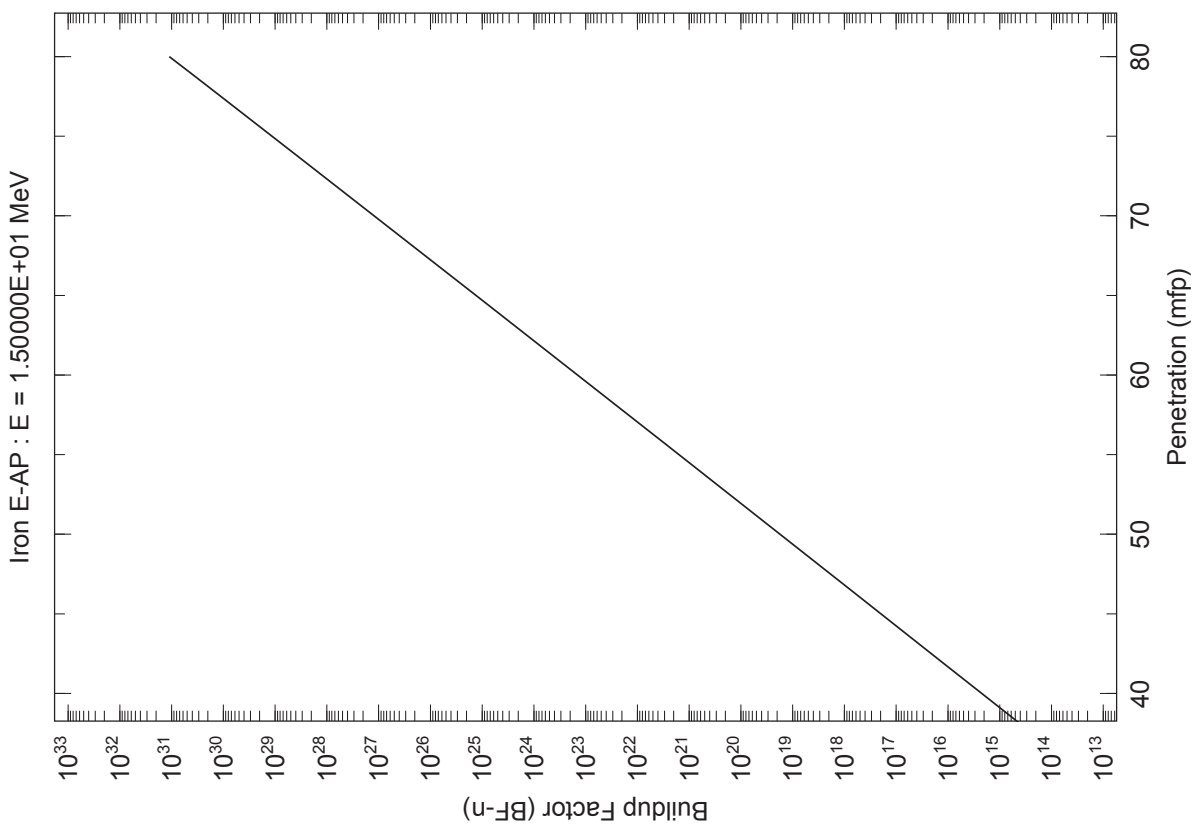
鉄、及び鉛の光中性子ビルドアップ係数 (BF-n) をモンテカルロ法シミュレーション (PHITS-EGS) によって計算した。下表に示す代表的なガンマ線源エネルギーについて、横軸を遮蔽厚 (透過距離、mfp 単位)、縦軸をビルドアップ係数で表したグラフを示す。

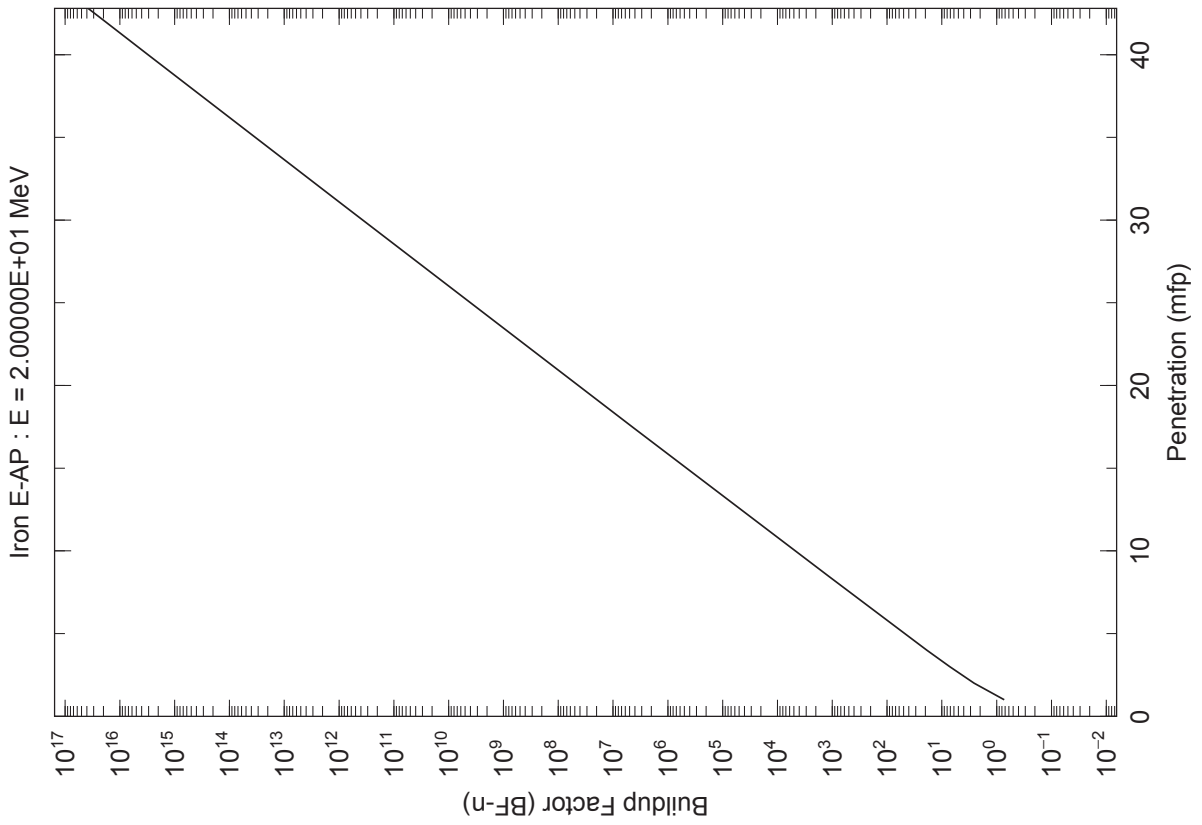
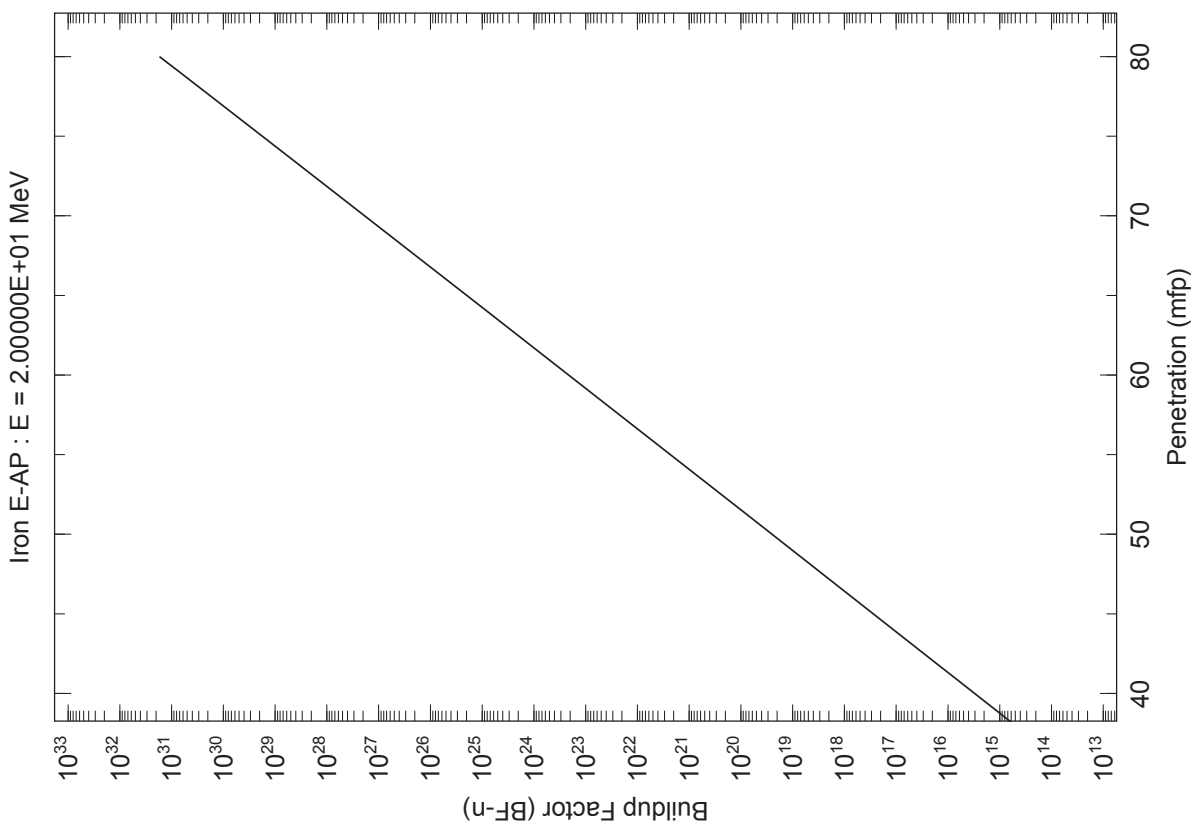
なお、ビルドアップ係数のグラフは、異なる遮蔽厚の領域に対して、2 枚に分けて示した。分けた遮蔽厚の境界は 40 未満と 40 以上である。これは、ビルドアップ係数を示す縦軸の範囲が広く、1 枚のグラフで表しにくいことによる。

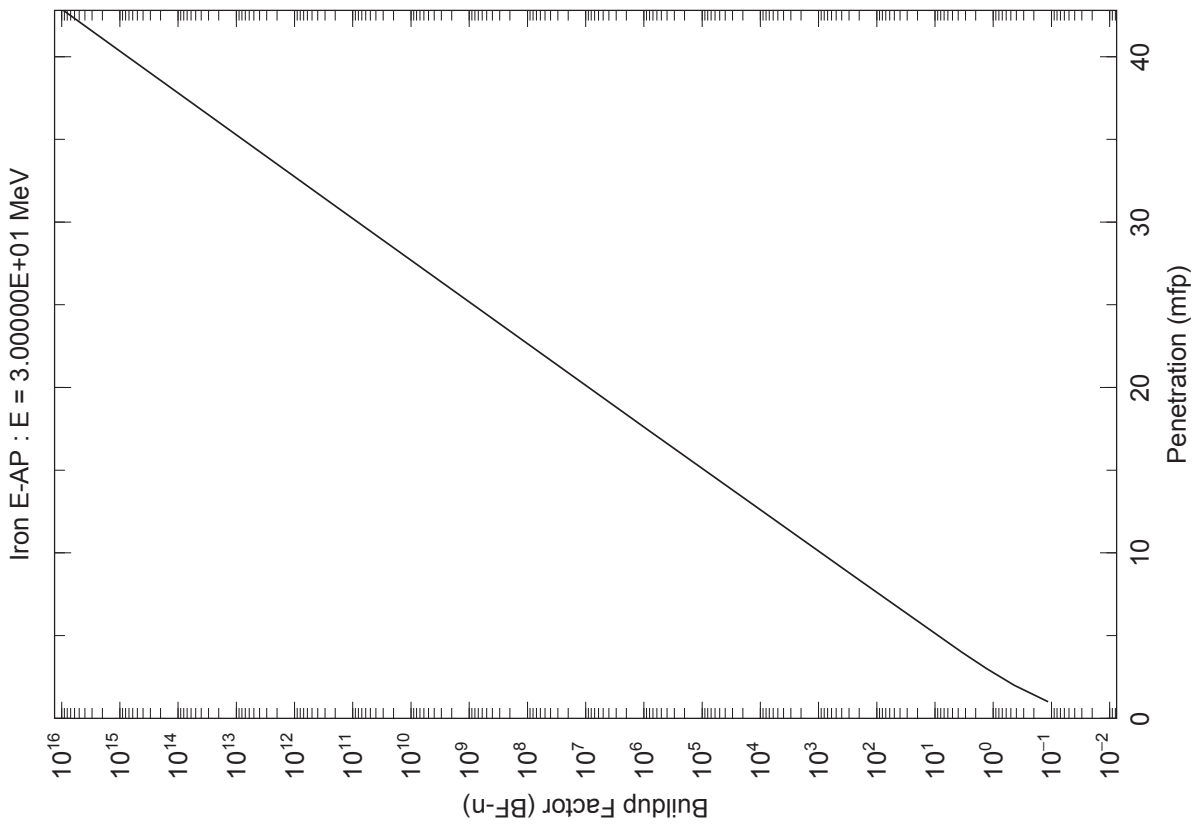
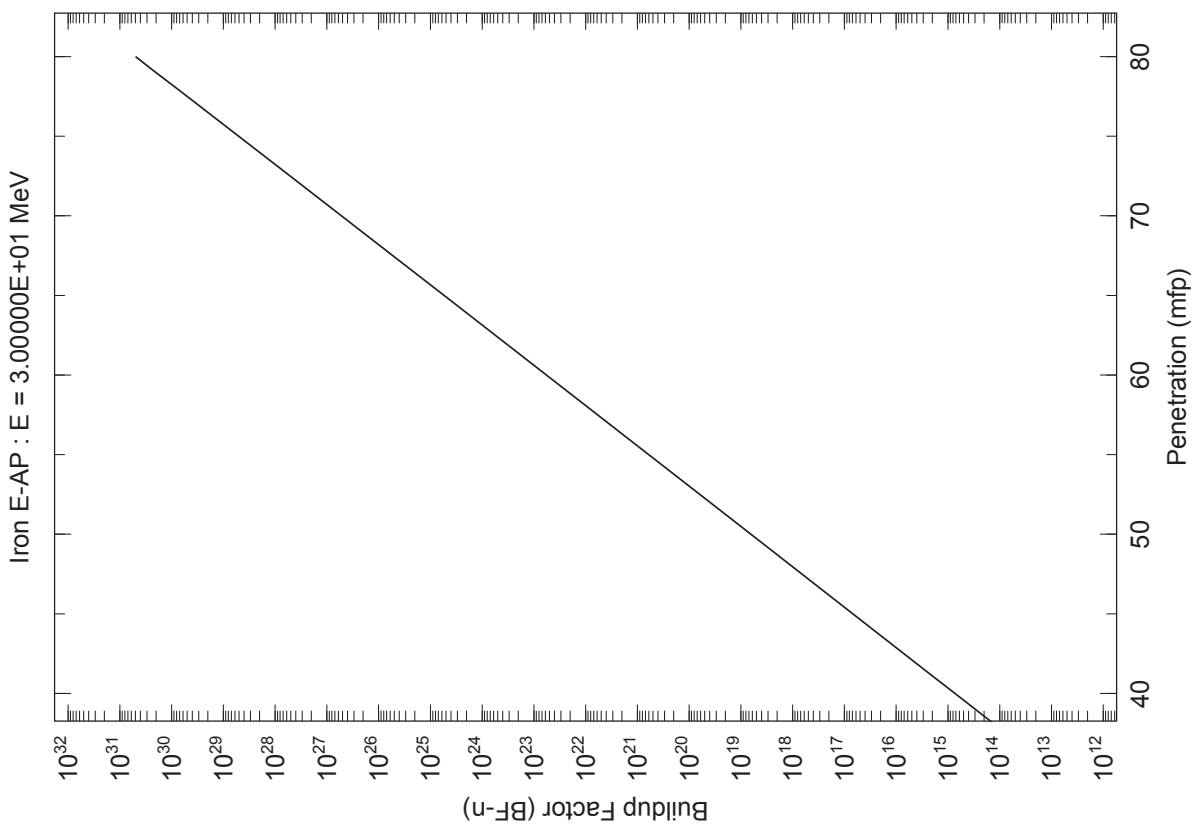
遮蔽材	ガンマ線源エネルギー(MeV)	線量種類	表示ページ番号
鉄	8	実効線量 E(AP) (AP 照射)	2
	10		3
	15		4
	20		5
	30 (上限)		6
鉛	8		7
	10		8
	15		9
	20		10
	30 (上限)		11

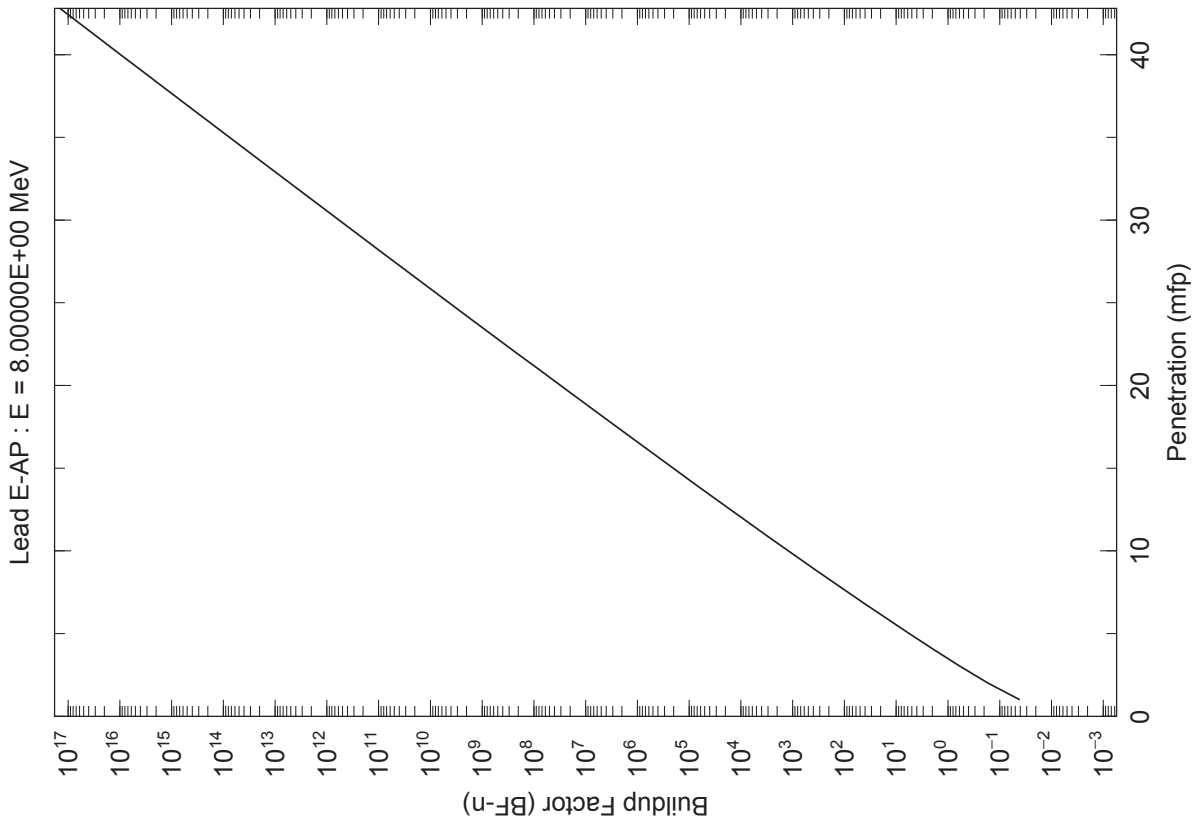
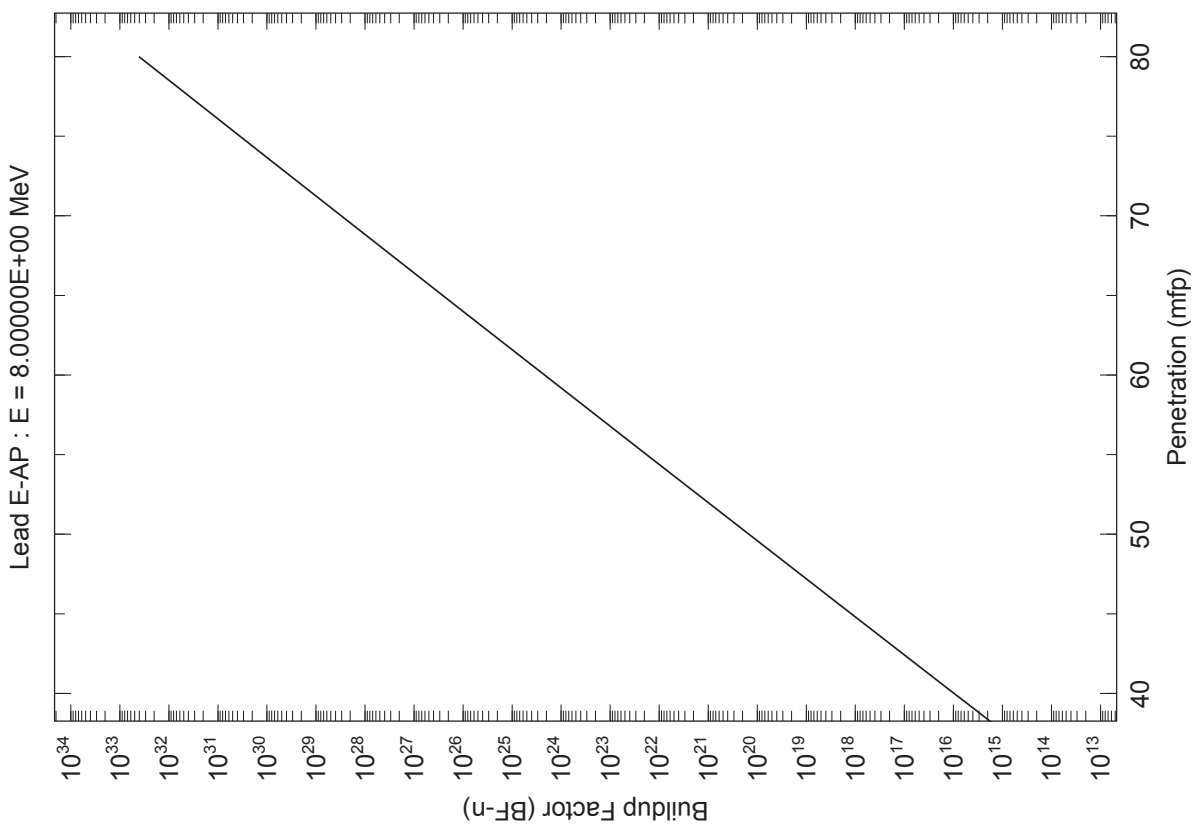




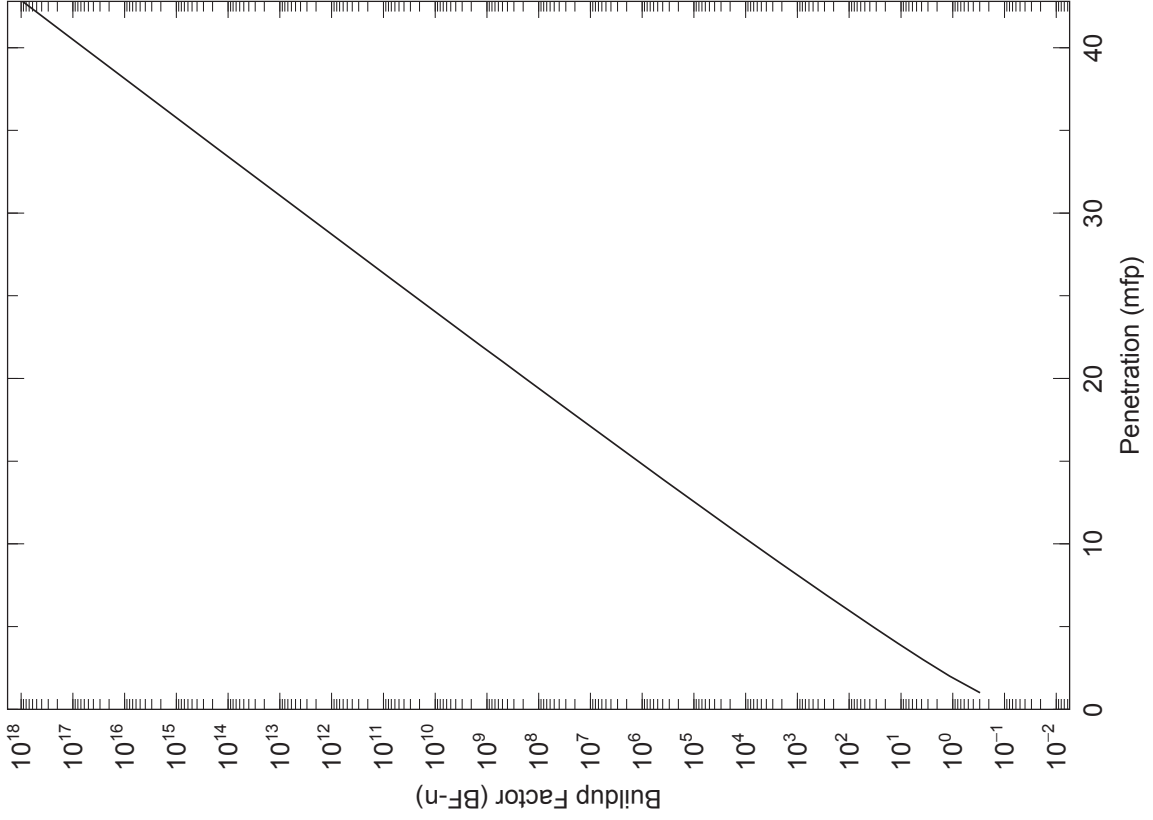




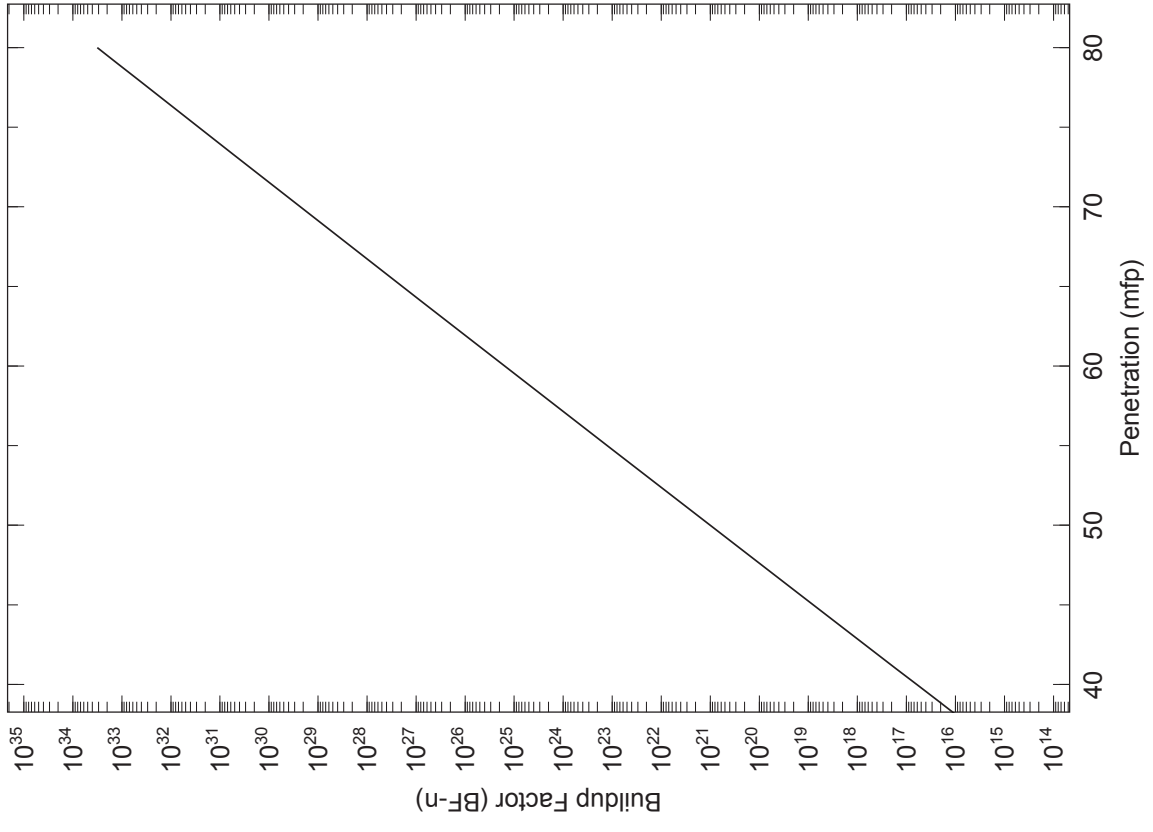




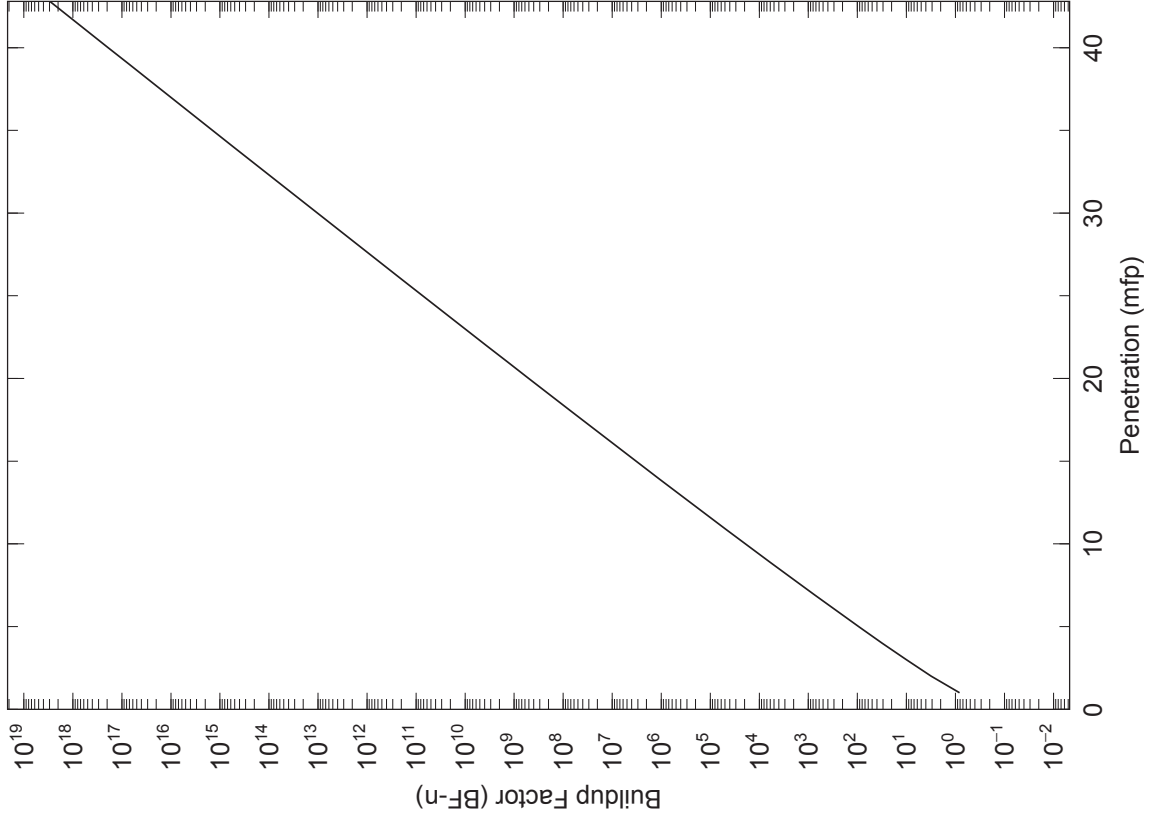
Lead E-AP : E = 1.00000E+01 MeV



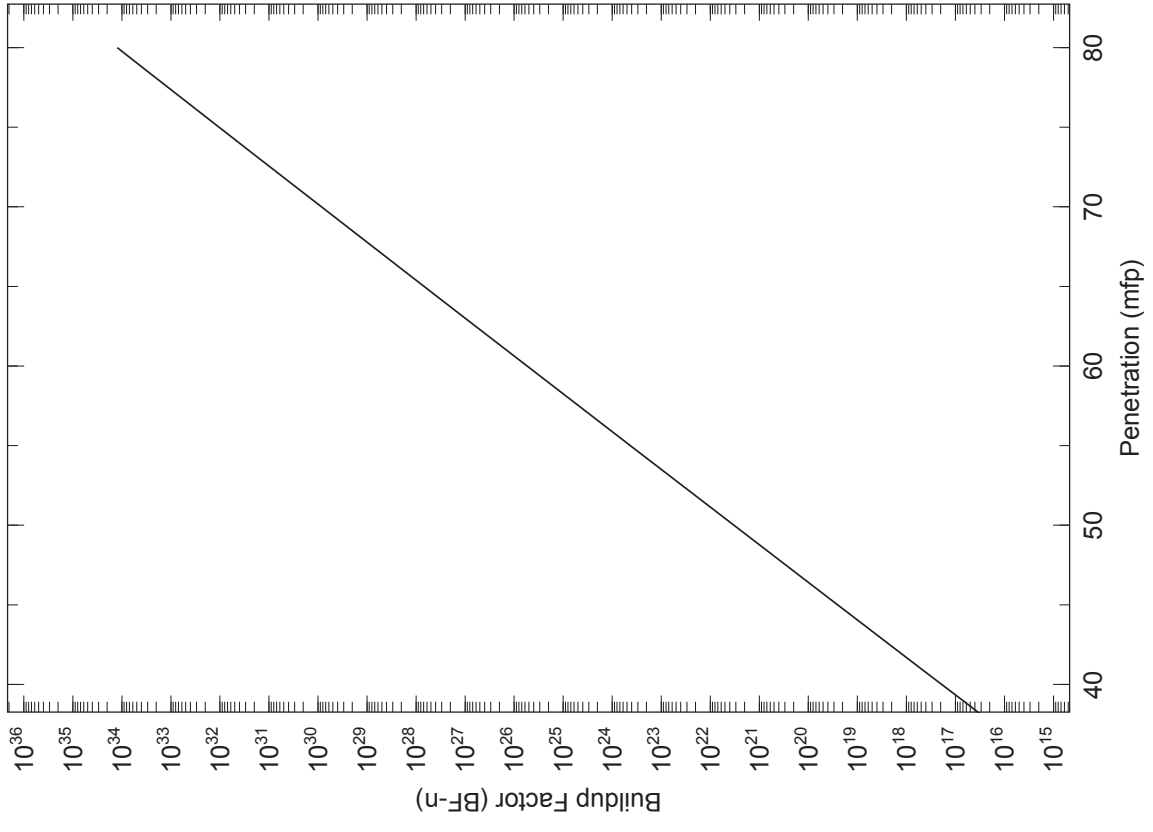
Lead E-AP : E = 1.00000E+01 MeV



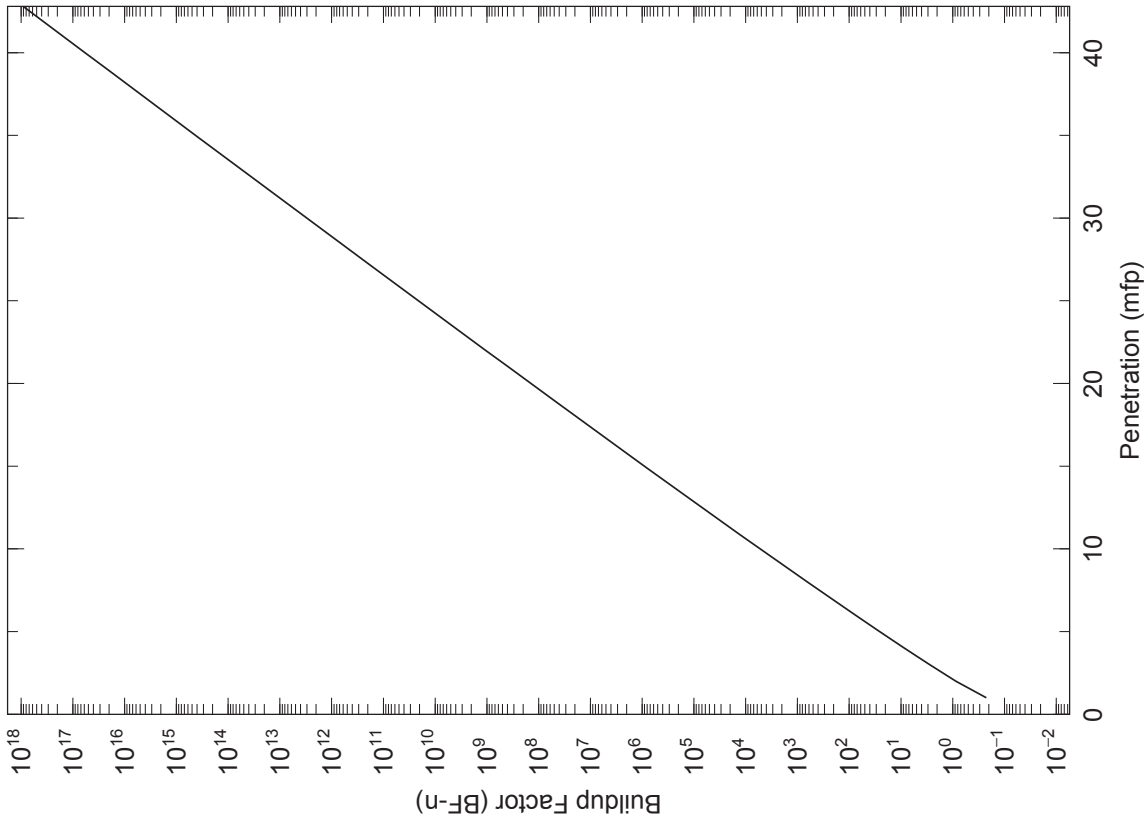
Lead E-AP : E = 1.50000E+01 MeV



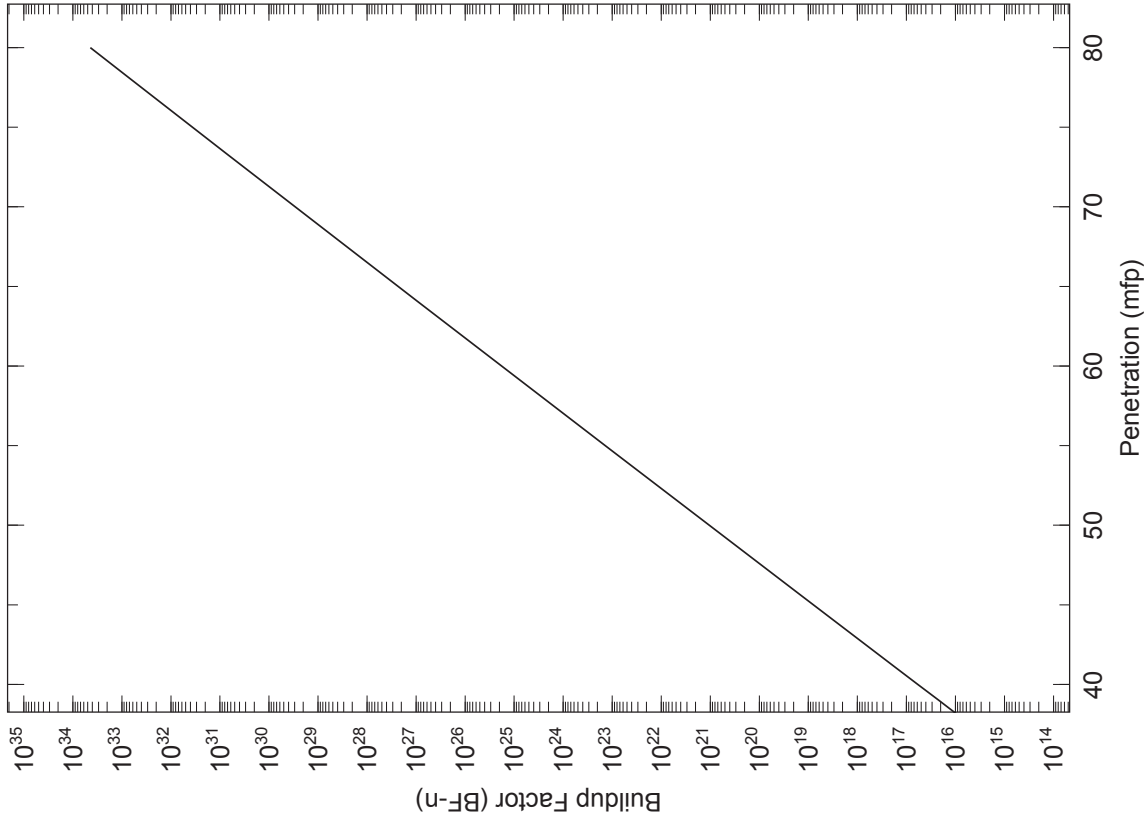
Lead E-AP : E = 1.50000E+01 MeV

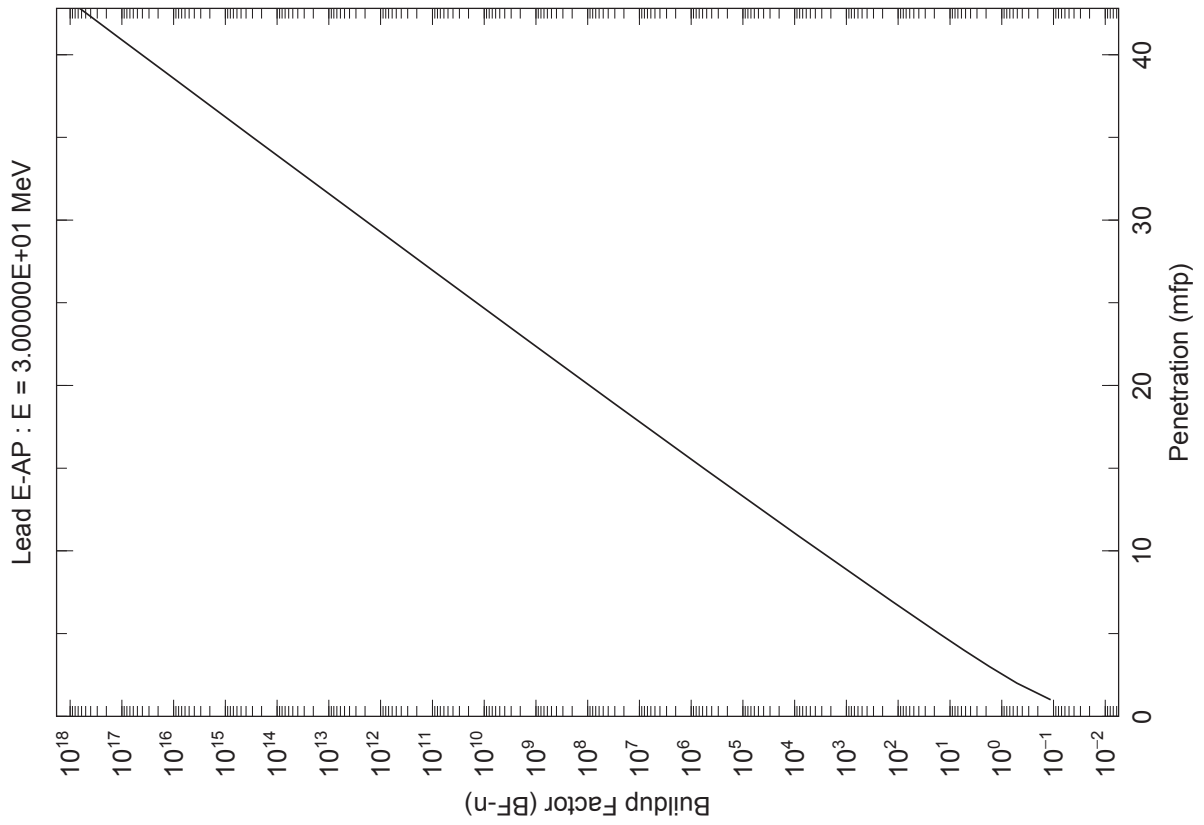
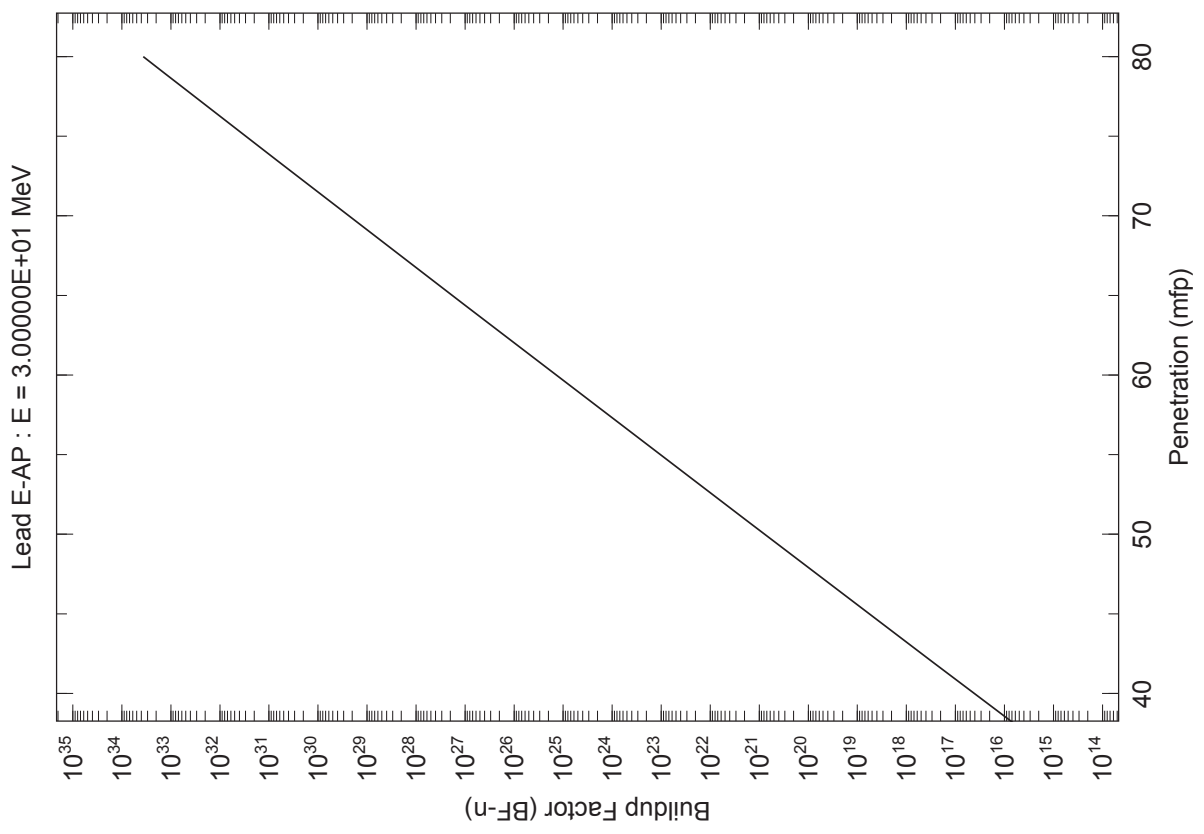


Lead E-AP : E = 2.00000E+01 MeV



Lead E-AP : E = 2.00000E+01 MeV





付録 X

ガンマ線遮蔽線量計算コードの基本設計内容

ガンマ線遮蔽線量計算コードの基本設計内容

1. 線源エネルギーに依存する線源強度の算出

入力

核種 放射能 (Bq)

Nuclide A

ただし、 $A(\text{Bq})=A(\text{disintegration/s})$

RI 核種線源 (光子発生率) ライブラリは、線源核種 Nuclide の放出するガンマ線束数と放出エネルギーおよび光子発生率を収録する。線源強度(photons/s) Sint(j)との関係を以下に示す。

Nuclide	線源エネルギー	光子発生率	線源強度
Nray(j)	keV	photon/disintegration	photons/s
1	E(1)	Yield(1)	Sint(1)
2	E(2)	Yield(2)	Sint(2)
.			
Nray	E(Nray)	Yield(Nray)	Sint(Nray)

ここで Nray は、Nuclide の放出するガンマ線束数を指す。
このとき線源エネルギー E(j)に依存する線源強度(photons/s) Sint(j)は、次式で与えられる。

$$\mathbf{Sint(j)=A \times Yield(j)}$$

2. 係数データの補間

線源エネルギー E(j)に相当する 3 種類の係数の値を内挿処理で求める。内挿法は 4 点 (三次) ラグランジュ補間公式を用いる。エネルギー内挿処理について全て log-log 内挿とする。唯一、MeanFreePath の内挿処理(ビルアップ係数のみ) は、linear(MFP)-log 内挿とする。

Nelm 物質の密度を定義するために利用する元素数

MatB 入力で与えるビルドアップ代表物質を示す変数

Sort 整備されている線量換算係数の線量種類数

線源エネルギーE(j) に対する内挿値を、以下に示す係数について求める。

jlib ライブラリテーブルを定義するエネルギー点数

			内挿スケール
線量換算係数	DF(jlib, sort) → DFint(j, sort)		log-log
質量減衰係数	$\mu_m(jlib, Nelm) \rightarrow \mu_{mint}(j, Nelm)$		log-log
ビルドアップ係数	B(jlib, thick, MatB, sort) → Bint(j, thick, sort)		log(Energy)-log
			linear(MFP)-log

3. 体積線源領域のメッシュ分割

線源領域は幾何形状として/RCC（直方体）/RPP（円筒）/SPH（球体）/で与える。3軸の分割数/Lso/Mso/Nso/として分割座標/divS/divM/divN/(θ と ϕ はラジアン単位)を入力する。

座標系	分割数	分割座標の入力
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

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/を求める。

・デカルト座標

$$\begin{aligned} x : FL(l) &= \text{divS}(l+1) - \text{divS}(l) \\ z : FM(m) &= \text{divM}(m+1) - \text{divM}(m) \\ y : FN(n) &= \text{divN}(n+1) - \text{divN}(n) \end{aligned}$$

・円筒座標

$$\begin{aligned} r : FL(l) &= (\text{divS}(l+1)**2 - \text{divS}(l)**2)/2 \\ z : FM(m) &= \text{divM}(m+1) - \text{divM}(m) \\ \phi : FN(n) &= \text{divN}(n+1) - \text{divN}(n) \end{aligned}$$

・球座標

$$\begin{aligned} \rho : FL(l) &= (\text{divS}(l+1)**3 - \text{divS}(l)**3)/3 \\ \theta : FM(l) &= \text{divM}(m+1) - \text{divM}(m) \\ \phi : FN(n) &= \cos(\text{divN}(n)) - \cos(\text{divN}(n+1)) \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned} V_{unit}(l, m, n) &= FL(l)FM(m)FN(n) \\ V_{src} &= \sum_{l=1}^{Lso} FL(l) \cdot \sum_{m=1}^{Mso} FM(m) \cdot \sum_{n=1}^{Nso} FN(n) \end{aligned}$$

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。

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

4. 遮蔽材組成入力

Nelm 物質の密度を定義するために利用する元素数

Nmat 計算体系の組立に利用する物質数

RhoPrt(n,m) 物質 m=1,Nmat を構成する元素 n=1,Nelm の部分密度 (g/cm³)

5. 遮蔽材による減衰計算とガンマ線エネルギーフラックスの計算

μ_m : 質量減衰係数(cm²/g)

μ_l : 線吸収係数(cm⁻¹)

ρ : 密度(g/cm³)

t : 透過長さ(cm)

とおくと、減衰率は次式で表せる。

$$Atten = e^{-\mu_l t} = e^{-\mu_m \rho t}$$

以下の処理を、線源領域分割数 (Lso * Mso * Nso) 回繰り返す。

Kmax 微小体積を代表する線原点—計算点間の透過線上に介在する領域の数

Leg(k) 透過線上にある領域の透過距離 k=1,kmax (cm)

とにおいて幾何形状分析処理で Leg(k)が求められたら、次式を求める。

$$Smat(n) = \sum_{k=1}^{kmax} \sum_{m=1}^{Nmat} Leg(k) RhoPrt(n, m)$$

この式は $Atten = e^{-\mu_l t} = e^{-\mu_m \rho t}$ の ρt の項を物質構成元素にのみ依存する変数 $Smat$ として与える。

次に線源エネルギーE(j)の線束について透過線上の物質による吸収を考慮せずに空間の広がりによる減衰だけを考慮したガンマ線フラックス $Flux0(j)$ を次式で定義する。

$$Flux0(j) = Wgt_{src}(l, m, n) \frac{Sint(j)}{4\pi R^2}$$

ただし、

R 線原点—計算点間の距離(cm)、 $R = \sum_{k=1}^{kmax} Leg(k)$ でもある。

透過線上の物質による吸収を考慮したガンマ線フラックス $Flux1(j)$ を次式で定義する。

$$Flux1(j) = Flux0(j) e^{-\sum_{n=1}^{Nelm} Smat(n) \mu_m \rho t(j, n)}$$

代表物質 MatB によるビルドアップ効果を考慮したガンマ線フラックス $FluxR(j, sort)$ をビルドアップと線量換算係数データの整備された線量種類数(Isort)分について次式で求める。

$$\mathbf{Flux}_R(\mathbf{j}, \mathbf{sort}) = \mathbf{Flux1}(\mathbf{j}) \mathbf{BintDT}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$$

$\mathbf{BintDT}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$ は、 $\mathbf{TransMFP} = \sum_{n=1}^{Nelm} \mathbf{Smat}(n) \mu_m \mathbf{int}(\mathbf{j}, n)$ として、 $\mathbf{Bint}(\mathbf{j}, \mathbf{thick}, \mathbf{sort})$ を $\mathbf{MeanFreePath}$ 単位に着目して内挿により求める透過距離 $\mathbf{TransMFP}$ に当たるビルドアップ係数となる。

最後に、それぞれのフラックスの積算処理を行う。

6. 様々な線量種類に対応した線量率の計算

上で定義した3種類のガンマ線フラックスに、整備した線量種類数(\mathbf{Isort})分の線量換算係数を乗じることで3種類の線量率を次式で与える。

$$\mathbf{DOSE0}(\mathbf{j}, \mathbf{sort}) = \mathbf{FLUX0}(\mathbf{j}) \mathbf{DFint}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$$

$$\mathbf{DOSE1}(\mathbf{j}, \mathbf{sort}) = \mathbf{FLUX1}(\mathbf{j}) \mathbf{DFint}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$$

$$\mathbf{Dose}_R(\mathbf{j}, \mathbf{sort}) = \mathbf{Flux}_R(\mathbf{j}, \mathbf{sort}) \mathbf{DFint}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$$

ここで、

$\mathbf{DOSE0}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$ 空間の広がりによる距離減衰のみ考慮した線量

$\mathbf{DOSE1}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$ 吸収を考慮し散乱効果を見込まない直接線量

$\mathbf{DOSE}_R(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$ 吸収と散乱効果を取り込んだ線量

となる。主に参照されるビルドアップを考慮した線量は $\mathbf{DOSE}_R(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$ である。

$\mathbf{DOSE0}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$ は、RI 核種の減衰率の算出において参照する。

最後に、それぞれエネルギー \mathbf{j} にわたって積分することで、合計線量を得る。

$$\mathbf{TDOSE0}(\mathbf{sort}) = \sum_{\mathbf{j}=1}^{Nray} \mathbf{DOSE0}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$$

$$\mathbf{TDOSE1}(\mathbf{sort}) = \sum_{\mathbf{j}=1}^{Nray} \mathbf{DOSE1}(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$$

$$\mathbf{TDOSE}_R(\mathbf{sort}) = \sum_{\mathbf{j}=1}^{Nray} \mathbf{DOSE}_R(\mathbf{j}, \mathbf{sort})$$

$\mathbf{TDOSE}_R(\mathbf{sort})$ がビルドアップを考慮した線量の計算結果である。

以 上

付録XI

成果発表資料

(日本原子力学会 2021 年春の年会)

γ線簡易遮蔽線量計算法の適切な見直しに関する研究

平尾好弘(海技研)、延原文祥(東京ニュークリア・サービス)、大西世紀(海技研)

1

目的と背景

放射線施設の許認可や基本設計で用いられるガンマ線の簡易遮蔽計算コードのフレームワークを、最新の法令・勧告・知見をもとに見直して、各所の需要に
応えていける国産コードを新設する。

- ・ 最新の計算環境を活用して、古いQADに対する積年の不満を解消
- ・ 計算プロセスの透明性重視 (与えられた情報で人力でも結果を確認可)
- ・ 計算に使用するデータの根拠と再現性を重視 (誰でも確認・拡張可)

・平成24~26年:放射線工学部会 国産安全解析コード開発戦略検討ワーキンググループ

放射線工学に係る解析コードの開発課題や開発体制について検討

→ 安全解析コード開発に携わる人材育成のため、解析コードやデータの国内における持続的な改良や発展に資する体制の構築とそれを維持する仕組みが不可欠である。遮蔽解析に使用される簡易解析コードについて、米国で半世紀近く前に開発されたものがベースであり、それらの多くに開発元のサポートは既がない。

・平成27年~: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

簡易遮蔽解析コードの見直しに係る課題を実コードに基づいて具体的に検討

→ ガンマ線の点減衰核積分法コードの新設に向けた仕様検討

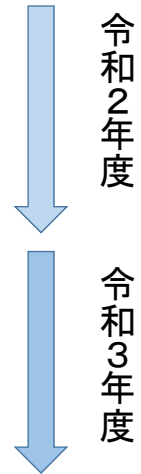
→ 新設資金獲得活動 → 規制庁安全研究公募採択(令和2~3年、2年間)

2

フレームワーク見直しの手順とコード新設計画

- 計算コードの実態調査に基づく見直し範囲検討
 - ✓ 最新の規制利用コードの仕様調査と受容性評価
 - ✓ 見直し範囲の明確化に係る専門家ヒアリング
 - ✓ 新設コードの構成・仕様の決定
- データと計算法の見直しとコード開発
 - ✓ ICRP新勧告を反映した簡易計算用データの作成
 - ✓ 最新の知見に基づく簡易計算法の適用性拡張
 - ✓ 上を組み入れた新設コードの設計・開発
- 新設コードのV&Vと技術ガイド作成
 - ✓ 新勧告反映、及び適用性拡張の妥当性検証
 - ✓ 新勧告対応の計算技術ガイド作成

受託研究
スケジュール



3

最新の規制利用コードの仕様調査

コード名称 ソフトウェア名称	開発国	最終更新・ 文献発表年	配布状況	妥当性確認状況
MicroShield	アメリカ	2020年	商用(Grove Software)	開発元によるV&V資料 V&Vパッケージ提供
RANKERN	イギリス	2016年	商用(The ANSWERS Software)	開発元によるV&V資料
NARMER-1 (MERCURE-6の 後継コード)	フランス	2017年	限定公開 (フランス原子力庁CEA)	開発元によるV&V資料

- アメリカのMicroShieldを仕様調査の対象に選定
 - ✓ V&Vを実施してレポートするV&Vパッケージソフトを併売
 - ✓ V&Vの検証項目と方法を調査することが可能
 - ✓ 2020年8月に最新のMicroShield Pro Ver.12がリリースされたばかり
 - ✓ 勧告・知見の対応状況を知るのに好適

4

調査したコード仕様の受容性評価

- コードマニュアルを参照して技術仕様を整理
 - ✓ 入力の作成、出力の表示、及びサポートツールの機能
- V&Vパッケージを参照して仕様毎のV&V手法を整理
- 技術仕様とV&V手法毎に、新設コードへの受容性評価
 - ：新設目的と専門家意見に照らして新設コードで採択する。
 - △：部分的に採択する。部分的な修正を要する。
 - ×：採択不要、優先度低。場合によっては代替仕様を提案



新設コードの構成・仕様案を決定

5

外部専門家による研究レビュー体制

- 受託元の研究班会合（一月半に一度）
 - プログラムオフィサー、同補佐、調査官
 - 受託事業目的に沿って研究活動の妥当性を監査
 - 受託元が抱える実際的な関心と課題をインプット
 - Ex) 30MeVまでの高エネルギーガンマ線に対応
- 研究レビュー委員会（12月と3月に開催）
 - 12名の外部専門家委員（医療2、加速器2、核融合1、発電3、重複4）
 - 各位の幅広い専門領域から情報・意見をインプット
 - Ex) 眼の水晶体の外部被ばく線量評価法の明確化（1月、委員講演）
→（実用量）3mm深さ線量の計算を検討に追加

6

新設コードの構成・仕様案 → これに沿ってデータとコードを開発中

大項目	中項目	概要	GUIのサポートツール
動作・開発環境	プラットフォーム、言語等	WindowsPC、オンプロミス設計、OpenMP対応、C系言語(C++)	—
計算入力作成	遮蔽体系入力	体系要素(線源・遮蔽体・線量評価点)の形状と座標を定義し、各要素に線源情報と材料情報を割り当てる。 体系要素の空間投影図を対話的に表示しながら入力	CGIによる形状設定 体系の投影図表示
	材料情報入力	体積線源・遮蔽体に割り当てる材料情報(組成、密度、減弱係数、ビルドアップ係数(制動放射含む))を定義する。 任意の組成から成る カスタム材料を定義して、材料情報を自動生成	組込材料データ作成 カスタム材料データ作成
各入力データは、個別にファイルで管理し、再利用	線源情報入力	線源情報(RI核種、エネルギー毎放出率)を直接入力 または RI核種ライブラリから選択参照して読み込む 。 体積線源のメッシュ分割手法の選択 (ガウス積分の採用)	線源データ作成 RI核種インポート
	ビルドアップ係数レファレンス材料選択	散乱ビルドアップ計算する遮蔽体を、線源と線量評価点の間に引いた透過線上に存在する遮蔽体の中から選択する。 透過線上に存在する体系要素の情報を表示して、体系要素の位置関係や、使用される材料情報が想定どおりか確認する。	透過線の通過領域情報
	遮蔽計算法の適用性拡張	<ul style="list-style-type: none"> 高エネルギーガンマ線に対応、光中性子の寄与考慮 特定の二重層遮蔽に対応 スラブ遮蔽の斜め透過に対応 	関係するデータの作成
計算出力表示	計算出力のサマリー	非衝突線フルエンス、各線量種類の出力、 計算に用いたデータや自動作成した情報の表示・ グラフ化	グラフ作成ライブラリ連携等

太字は、従来のQAD系の遮蔽計算コードで対応していない新設仕様

7

簡易計算用データの見直し対応

新勧告に係る検討項目	小項目
遮蔽材料の遮蔽計算用データ整備 (ICRP Pub.116の線量換算係数に対応)	遮蔽材料の選定 各材料の組成・密度の見直し // 減弱係数の整備 // ビルドアップ係数を出力線量種類毎に整備
出力する線量種類の選定 線束から各線量への換算係数データ整備	<ul style="list-style-type: none"> 実効線量 (ICRP116, 照射体系6種全て) 皮膚等価線量(ICRP116, AP照射、男女別) 眼の水晶体等価線量(ICRP116, AP照射) → 外部被ばく評価に関して、実用量の考慮検討 空気カーマ率 (ICRP74, <10MeV)
最新RI核種ライブラリのRI線源データ利用	ICRP Pub.107 (DECDC2)からRI核種のイールドを直接参照
高エネルギーガンマ線への対応	高エネルギーガンマ線(<30MeV)に対応(PET施設等想定) 光核反応による光中性子の線量寄与を考慮

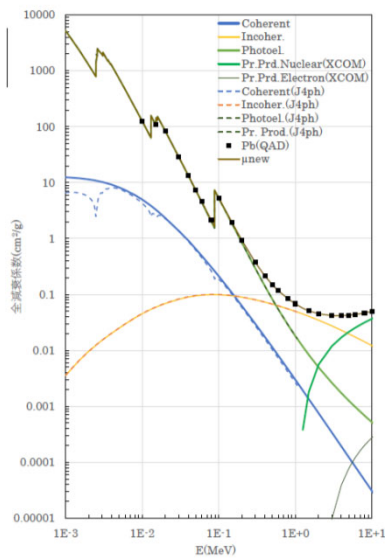
8

簡易計算用データの見直し対応(進捗状況)

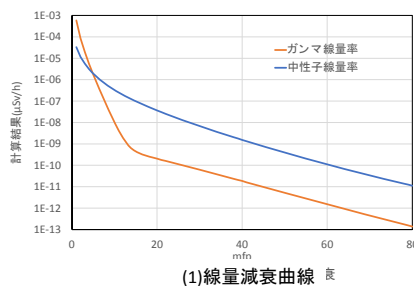
新勧告に係る検討の小項目	進 捗
遮蔽材料の選定 (組込材料リスト) 各材料の組成・密度の見直し // 減弱係数の整備 // ビルドアップ係数を線量種類毎に整備 // 光中性子の線量寄与を整備	実用性の高さから単元素6核種、混合物7種に決定 ・ 空気、水、コンクリ、鉛ガラス、アクリル樹脂、PE、土壌、SUS それらの組成・密度を決定し、根拠資料を作成 減弱係数のデータ整備 モンテカルロ法(PHITS-EGS)による計算手順の検討 鉄と鉛について係数の整備 (10keV~30MeV、0.5~80MFP) 中性子の線量寄与をガンマ線と分けてデータ整備。捕獲ガンマ線の寄与は一次ガンマ線の寄与と合算して扱う。 下記の勧告・標準を参照し、ガンマ線の換算係数データ整備 (ICRP 116) 実効線量、眼の水晶体及び皮膚の等価線量 (≦ 30MeV) (ICRP 74) 空気カーマ (≦ 10MeV) (IEC62387, JIS4345) 眼の水晶体評価に係る実用量Hp(3)
線束から各線量への換算係数データ整備	

9

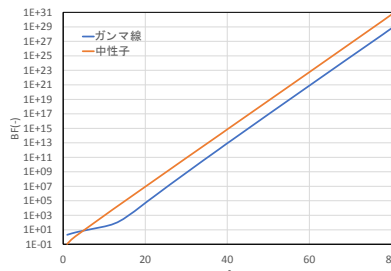
遮蔽計算用データの整備の例 (遮蔽材:鉄、または鉛)



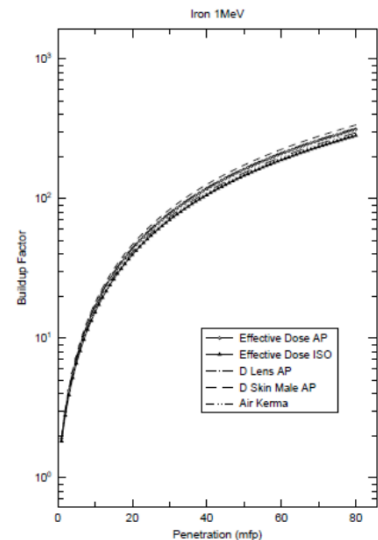
μnew: 減弱係数の整備に使用した鉛の断面積(XCOM) → 吸収端を再現



(1)線量減衰曲線 鉄



(2)ガンマ線と光中性子のビルドアップ係数
30MeVのガンマ線に対する鉄のデータ

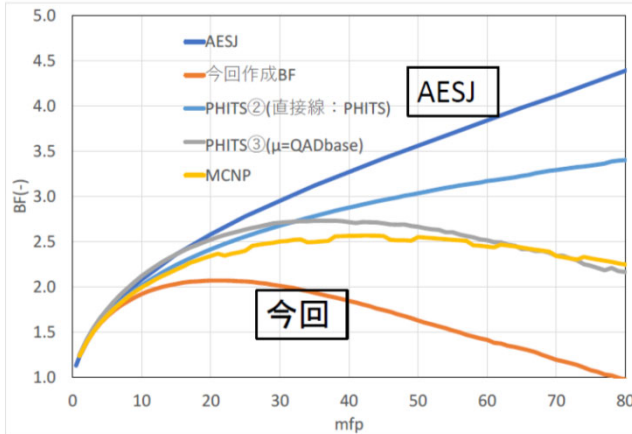


鉄に対する線量ビルドアップ係数
(PHITS-EGSによる計算、
1MeVガンマ線、遮蔽厚<80mfp)

今回、コヒーレント散乱を考慮した輸送計算でデータ整備

QAD-IEのBFとの比較 材質:鉛、0.5MeV- γ

QAD-IEベースと今回の本質的比較
①密度変更、②計算コード変更
密度 鉄 7.86->7.8、鉛11.34->11



今回、輸送計算でコヒーレント散乱を考慮したため、断面積が若干大きくなり、BFが低下傾向となった。

エネルギー低い領域
原子番号大きい物質で
影響あり

BF<1になったのは、減衰係数に、コヒーレント散乱を含めなかったことが原因、それでも厚さでBFの値は少し落ちてくる。

遮蔽線量評価の適用性拡張

最新の線量計算法に係る検討項目	概要
新勧告に対応したガンマ線遮蔽計算コードの開発	(2)で整備した新勧告対応データを用いた遮蔽計算コードを開発する。次年度、実際に計算を行って妥当な結果が得られるか評価する。
下記について、遮蔽計算法の適用性拡張を試み、計算コードに取り込んで妥当性を確認する。	
高エネルギーガンマ線の光核反応による光中性子の線量計算	光中性子をガンマ線と分けて遮蔽計算用データを整備しておき、個別に線量寄与を計算して合算する。
特定の二重層遮蔽対応	次年度予定。コンクリートと鉄板等、特定の頻出材料を重ねた二重層遮蔽体の透過線量を計算する。
スラブ遮蔽に対する斜め透過線量計算	次年度予定。スラブ遮蔽体に対して、従来の垂直入射だけでなく、斜め方向に透過する場合の線量を計算する。

簡易遮蔽計算コードの開発項目

	項目	詳細項目	進捗	備考
アナリスト ベース (GUI)	計算入力ファイル読込	幾何形状	完了	直方体、球、円筒、組み合わせ立体
		線源	完了	点、直方体、球、円筒
		線量評価点	完了	任意点、2次元メッシュ、3次元メッシュ
	データライブラリ読込	減弱係数ファイル	完了	
		ビルドアップ係数ファイル	完了	
		換算係数ファイル	完了	眼の水晶体の被ばく評価に実用量の考慮が追加
		RI核種ライブラリ	今年度	
	エネルギー補間	材料組成ライブラリ	完了	
		減弱係数、ビルドアップ係数、換算係数	今年度	任意のエネルギー群構造に対してデータを内挿
	線量計算	線源分割	今年度	
直達線の減弱計算		今年度		
ビルドアップ係数の散乱寄与		今年度		
線量計算		今年度		
結果出力	計算入力エコー	今年度		
	使用ライブラリデータ表示	今年度		
	計算結果表示	今年度	グラフ化、可視化は次年度	
グラフィック (GUI)	計算入力編集	幾何形状	完了	直方体、球、円筒、組み合わせ立体
	計算結果可視化	線源、及び線量評価点	次年度	
	サポートツール	2次元、3次元	次年度	
			次年度	体系の簡易投影図表示のみ完了

開発中コードのスクリーンショット

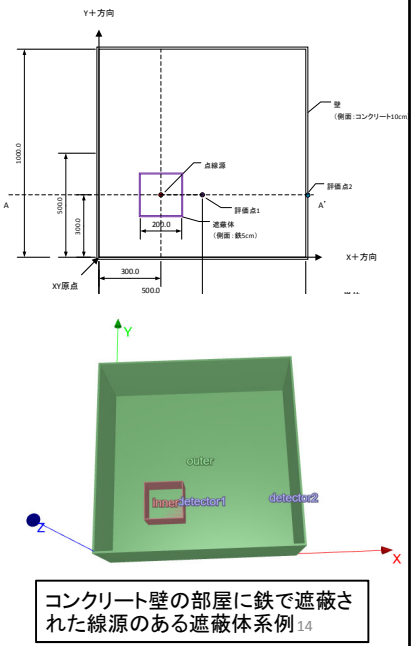
GUI入力サポート

計算出力とエラー表示

対話的な入力設定

```

41  ##| 遮蔽体の定義
42  ##|
43  zone:
44  - { body_name: z1, material: WATER, density: 1.0 }
45  - { body_name: z2, material: CONCRETE, density: 1.0 }
46  - { body_name: z3, material: CONCRETE, density: 1.0 }
47  - { body_name: z4, material: CONCRETE, density: 1.0 }
48  - { body_name: z5, material: CONCRETE, density: 1.0 }
49  - { body_name: AIR_GAP, material: AIR, density: 1.0 }
50
51  ##|
52  ##| 線源の定義
53  ##|
54  source:
55  - type: POINT
56  name: s1
57  position: [0 0 -1]
58  radioactivity: 1.0
59  - type: ZONE
60  zone_names: z1
61  division: {edge_1: 3, edge_2: 3, edge_3: 3}
62  radioactivity: 1.0
63  - type: PSEUDO
64  position: [0 0 1, 0 0 2]
65  bounding_box: [s1, z1]
66
67  ##|
68  ##| 評価点の定義
69  ##|
70  detector:
71  - name: d3
72  origin: [5 0 -1]
73  edge:
74  - name: d3
75  position: [0 0 1, 0 0 2]
    
```



コンクリート壁の部屋に鉄で遮蔽された線源のある遮蔽体系例 14

ま と め

- 研究の目的・背景、フレームワーク見直しの手順とコード新設計画
- 米国の規制利用コードの仕様調査を行い、外部専門家を交えて仕様毎に国内事業への受容性評価を実施し、新設コードの構成・仕様を決定した。
- ICRP2007年勧告に対応した簡易計算用データの作成方針
 - 現状、鉄及び鉛から整備、残りの材料については次年度
- 簡易計算法の適用性拡張の方針 →次年度に継続
- 新設コードの開発方針 →次年度に継続
 - 現状、仕様案に対してテキストベースの入出力による動作を確認
- 簡易遮蔽計算コードレビューWGのメンバーに、データ整備と妥当性評価をご協力頂いています。簡易計算に関心のある計算協力者を募集中です。