

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

研究代表者 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 平尾好弘

プログラムオフィサー(PO) 中村尚司

1

課題名 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
研究期間: 令和2年～3年(2年間)

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、ICRP2007年勧告等(以下、新勧告と呼ぶ。)の国内法令取入れで求められる実効線量換算係数等の改訂に対応するため、遮蔽線量評価法を拡張するとともに、使用されるデータを適切に見直すための手順を開発する。また、検討の成果をとりまとめて、新勧告取入れの効率的な運用に資するガイドラインを作成する。

実施状況

・令和2年度: 海外の新勧告取入れと遮蔽計算の実態を把握するため、米国で利用される遮蔽計算コードの仕様調査を行い、国内での実用性や重要度の点から各仕様の受容性を評価した。さらに、専門家の意見も踏まえて、新勧告取入れで求められる遮蔽計算法と使用データの見直し範囲を決定した。

遮蔽計算用データの見直し手順を検討して、実用性の高い遮蔽材に対して遮蔽厚さ80mfpまで、実際に作成を開始。線量換算係数の改訂に対応し、また高エネルギー γ 線(<30MeV)による光核反応、干渉性散乱を考慮する。並行して、作成したデータの妥当性を確認するための簡易計算コードの開発を開始。

・令和3年度: 遮蔽計算用データの整備を進めるとともに、スラブ遮蔽斜め透過、及び二重層遮蔽に対応するように遮蔽計算法の適用性を拡張した。本研究で整備したデータと計算手法を計算コードに反映し、また例題を用意して見直しの影響を確認した。最後に、見直しの概要をまとめるとともに、遮蔽計算実務への潜在的影響を専門家へのヒアリング調査等を通じて明らかにし、新勧告取入れの理解と運用に資するガイドライン案を作成した。

研究成果の公表として、日本原子力学会で2件の一般発表、放射線工学部会セッションで4件の連続講演を実施した。また、放射線遮蔽国際会議(ICRS-14, 2022年9月開催予定)に論文を投稿した。

人材育成活動として簡易遮蔽計算コードレビューWGを3回開催し、若手と研究協力及び意見交換を行った。

研究成果: 【データベース開発】 最新の勧告・知見に基づく γ 線遮蔽計算用データライブラリ
【ソフトウェア開発】 上記のライブラリファイルを読み込んで遮蔽線量計算を実行できる γ 線遮蔽計算コード
【ガイドライン文書の草案】 ICRP2007年勧告等を踏まえた γ 線遮蔽計算ガイドライン案

2

研究体制

情報セキュリティ最高責任者

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所理事長

情報セキュリティ責任者、担当者

・海上技術安全研究所 所長
・同 海洋リスク評価系系長

規制庁担当

・プログラムオフィサー
・プログラムオフィサー補佐
・担当調査官

研究主任者

平尾好弘 (海洋リスク評価系 システム安全技術研究Gr)
担当: 全体管理、遮蔽計算法の適用性拡張、ガイドライン作成

研究参加者

・大西世紀 (同Gr)
担当: 遮蔽線量計算用データの見直し手順検討と妥当性評価
・近内亜紀子 (同Gr)
担当: 新勧告取入れの運用に資するガイドライン作成

若手人材育成を兼ねた研究協力

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WG
協力内容: 遮蔽計算法の適用性拡張、遮蔽線量計算用データの整備

海上技術安全研究所 研究業務管理方

・研究品質保証主体: 研究係主幹
・業務管理責任者: 企画部
・経理担当: 会計課

研究レビュー委員会

委員 (研究協力者): 成果レビュー
・上義義朋 (日本アイソトープ協会)
・横山須美 (藤田医科大学)
・保田浩志 (広島大学)
・中島 宏 (北海道大学)
・吉田昌弘 (原子力安全技術センター)
・波戸芳仁 (高エネルギー加速器研究機構)
・助川篤彦 (量子科学技術研究開発機構)
・坂本幸夫 (アトックス)
・延原文祥 (東京ニュークリアサービス)
・松居祐介 (テブコシステムズ)
・高田祐太 (三菱重工業)
・吉岡健太郎 (東芝エネルギーシステムズ)

外注作業

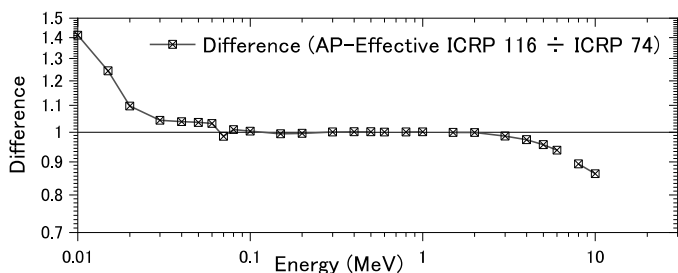
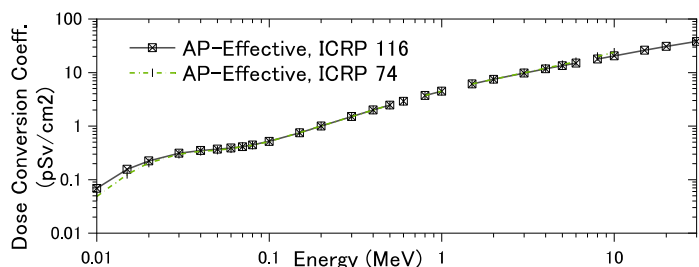
・新勧告を反映した遮蔽線量計算用データの作成支援作業
担当: 遮蔽計算用データの作成全般支援
・新勧告を反映した簡易遮蔽計算コード開発支援作業
担当: 遮蔽線量計算コードの開発全般支援

最新の国際勧告及び知見を踏まえた、 γ 線遮蔽計算用データの見直し

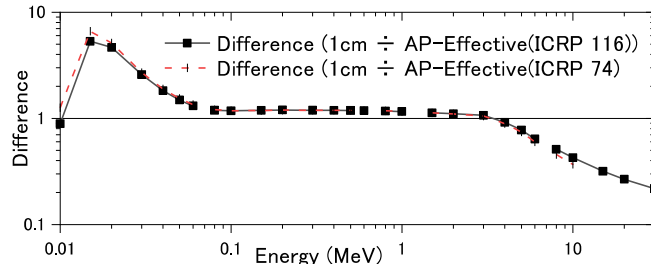
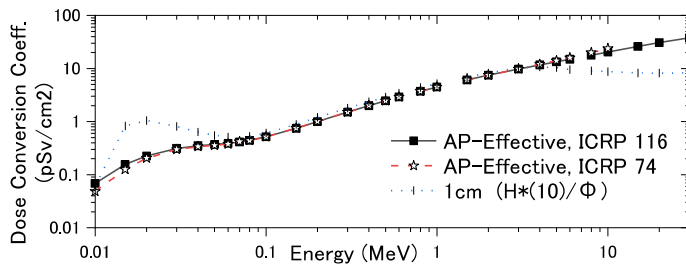
最新のICRP勧告とその法令取入れ、研究知見をふまえて、 γ/X 線の遮蔽線量計算で用いられる遮蔽計算用データ(ビルドアップ係数(BFという。)、減衰係数等)を見直すための方法をレビューし、実際にデータを作成して、その特徴を明らかにする。

最新の勧告及び知見を踏まえた見直し項目	概要	作成した遮蔽計算用データ
線量換算係数の改訂	<ul style="list-style-type: none"> ・(実効)線量換算係数を、従来のICRP 74から改訂されたICRP 116の値に改訂 ⇒100keV未満の低エネルギー領域で差 	代表遮蔽材13種(鉄、鉛、コンクリート、水、銅、ポリエチレン等)に対して、0.01~30MeVの単色 γ/X 線を入射した場合の減衰(減弱)係数
高エネルギーへの拡張	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギー範囲の上限を、従来の10MeVから、30MeVへ拡張 ・放射線発生装置の発生する高エネルギーγ/X線の遮蔽計算に対応 ⇒光核反応による光中性子の線量寄与 	上の減衰係数と同じ条件で、遮蔽材の厚さが0.5~80mfpの実効線量ビルドアップ係数(全6種の照射体系)
干渉性散乱の考慮	<ul style="list-style-type: none"> ・γ線の相互作用として、従来の3種(光電、コンプトン散乱、電子対生成)に加えて、干渉性散乱(レイリー散乱)を考慮 ⇒原子番号中以上の核種に対して、低エネルギー一部で差 	その他、委員会での検討を踏まえて整備したビルドアップ係数: ・(実用量)1cm線量当量、及び3mm線量当量 ・(等価線量)皮膚、眼の水晶体 ・空気カーマ (<10MeV)

線量換算係数の改訂による影響



実効線量換算係数 (AP): 従来と今回の比較



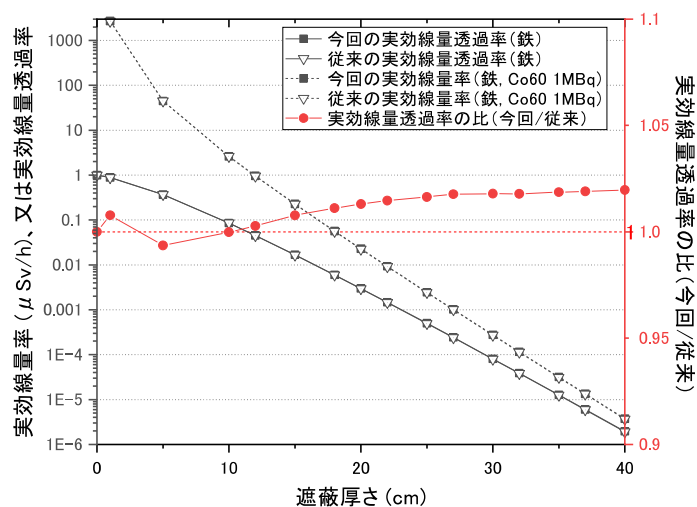
参考: 実用量H*(10)に対する実効線量の換算係数比較

今回と従来では、100keV未満の低エネルギー領域の線量換算係数の差が、主に遮蔽でエネルギーが減衰したときの実効線量の差となって現れる。

5

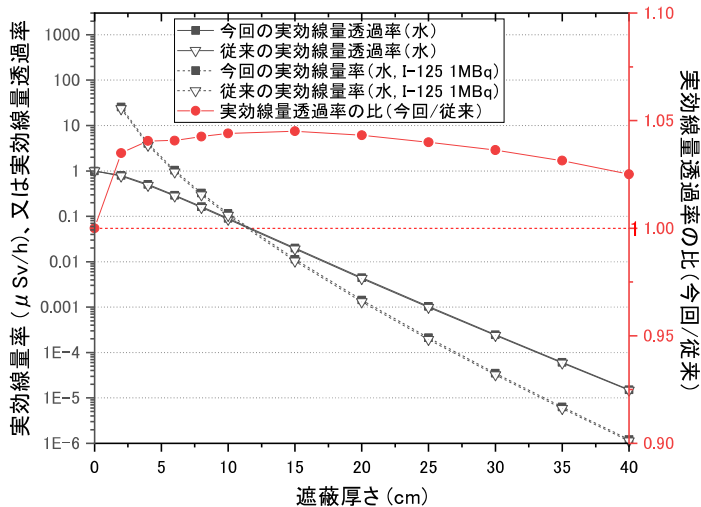
RI核種の実効線量率定数、鉄の実効線量透過率と実効線量率の計算結果: 今回と従来と比較

100keV以上のγ/X線を放出するRI核種の例 (Co-60)
鉄に対する実効線量率及び実効線量透過率のグラフ



エネルギー (MeV)	発生率 (p/dis)	Co-60 実効線量率定数 (μSv/h per 1MBq)	
1.17	9.99E-01	今回 (ICRP116)	3.06E-01
1.33	1.00E+00	従来 (ICRP74)	3.06E-01

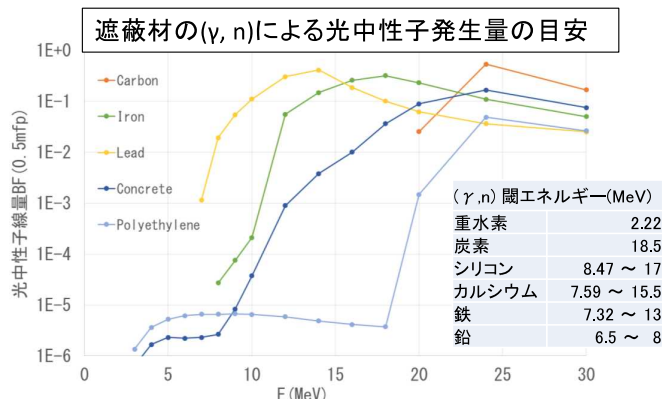
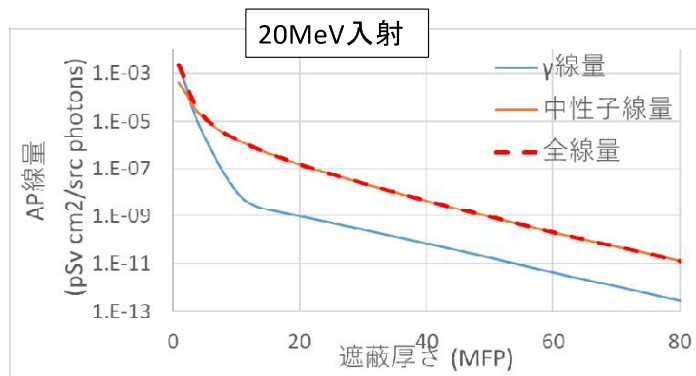
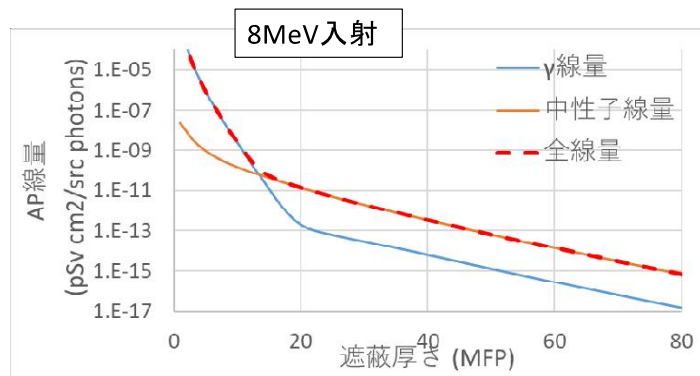
主に100keV未満のγ/X線を放出するRI核種の例 (I-125)
水に対する実効線量率及び実効線量透過率のグラフ



エネルギー (MeV)	0.1を超える発生率 (p/dis)	I-125 実効線量率定数 (μSv/h per 1MBq)	
2.72E-02	4.05E-01	今回 (ICRP116)	1.28E-02
2.75E-02	7.54E-01	従来 (ICRP74)	1.22E-02
3.10E-02	1.35E-01		

6

高エネルギー拡張による光核反応の影響(鉄遮蔽の例)



光核反応の閾値を超える高エネルギー γ 線の場合、遮蔽が厚くなると光中性子の線量が支配的

- 8MeV入射では、13mfp (~56cm)
- 20MeV入射では、2mfp (~8cm)

光中性子の線量は、 γ 線と比べて減衰しにくいいため、遮蔽設計に注意が必要。

⇒ 高エネルギー γ 線を直接あてない。後方に中性子遮蔽体を置く等、多重層遮蔽の要請

7

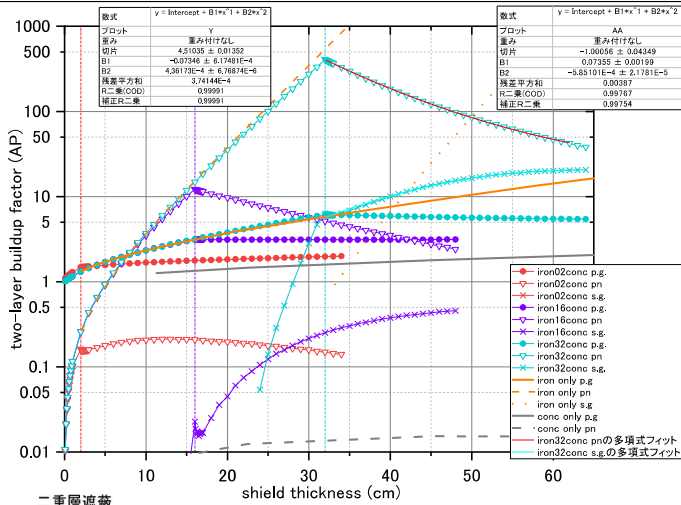
γ 線遮蔽計算法の適用性拡張研究

新たに適用性を拡張した遮蔽線量計算法	概要	遮蔽計算用データの整備手法 研究で整備したデータの範囲
二重層遮蔽	<p>構造材と遮蔽材の組み合わせ、または異なる線種やエネルギーの放射線を効率的に減衰させる目的で用いられる二重層体系の線量計算</p> <p>既往研究はあるが、計算コードに取入れられた例は少ない。遮蔽実務マニュアル記載の最外層法の適用性は限定的。</p>	<p>二重層遮蔽に対して、MC法で線量減衰計算を実施し、第二層における一次γ、光中性子、二次γの(疑似)BFの変化を、二次多項式で近似してパラメータを整備した。</p> <p>現在、鉄・コンクリート・鉛・ポリエチレンの組み合わせに対して、遮蔽厚さ32cmまでカバー。</p>
スラブ遮蔽の斜め透過	<p>線源位置と線量評価点を結ぶ透過線が、スラブ遮蔽体を斜めに横切る場合の線量計算</p> <p>遮蔽計算では透過線がスラブ遮蔽体を垂直に横切る理想的なケースを想定している。ただし、実際には多少、斜めに横切る例が多い。</p>	<p>スラブの透過距離を一定にして、斜め透過の角度を変えたときの線量変化を、垂直透過の線量比に規格化し、3次までの多項式で近似してパラメータを整備した。</p> <p>現在、鉄・コンクリート・鉛の斜め透過に対して、遮蔽厚さ64cmまでカバー。</p>
その他: 薄い遮蔽体	<p>厚さ1mfp未満の薄い遮蔽体に対する線量計算</p> <p>γ線の安全評価では保守的に考えて1mfp未満の薄い遮蔽を無視することが多い。例えば薄い容器や壁・カバーの減衰効果を参考まで評価。</p>	<p>各遮蔽体のBFデータに0.5mfpのBF値を追加し、1mfp未満のBF値を近似的に補間できるようにした。補間の妥当性を確認して調整。</p>

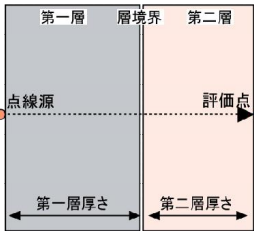
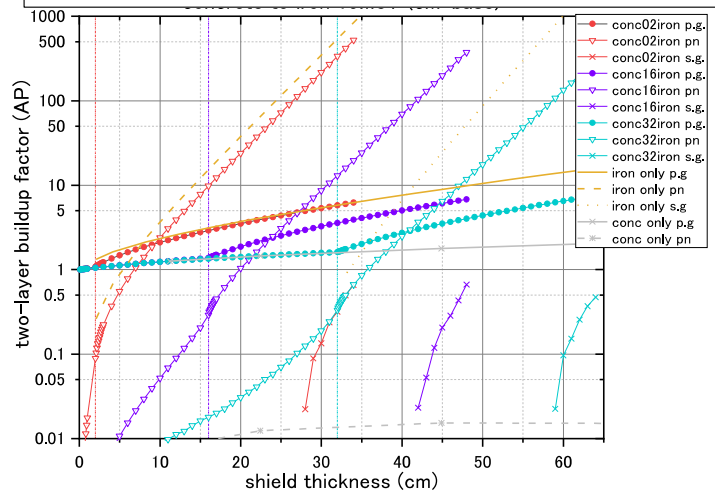
8

15MeVのγ線入射に対する、鉄とコンクリートの二重層ビルドアップ係数の例

第1層(鉄)が2cm, 16cm, 32cmの各厚さ、後は第2層(コンクリ)



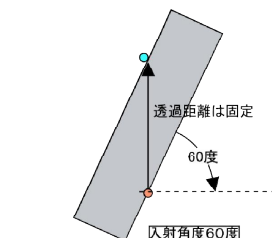
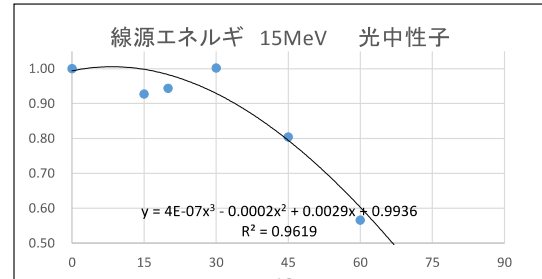
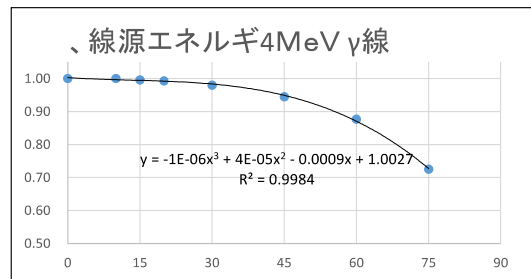
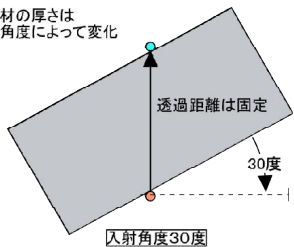
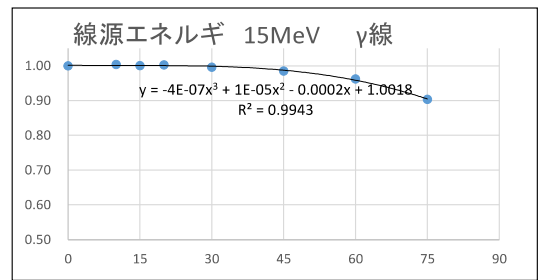
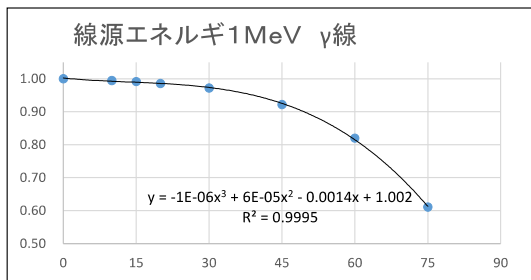
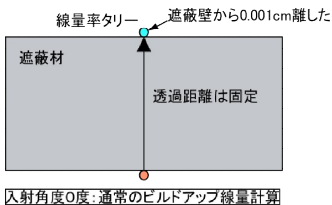
第1層(コンクリ)が2cm, 16cm, 32cmの各厚さ、後は第2層(鉄)



- (左図)第1層が鉄の場合、鉄に入射して直ぐに発生した光中性子が、鉄ではあまり減衰せず、第2層のコンクリート層境界から急に減衰しはじめる。層境界から、二次γの寄与が漸増しはじめる。条件によっては、第2層の遮蔽厚さが増すと、寄与が逆転する可能性がある。
- (右図)第1層がコンクリの場合、γ線はコンクリを透過して、鉄に入射して直ぐに光中性子が発生し、その後、γ線との線量差が広がる。鉄の後方に追加の中性子遮蔽の設置が要請される可能性がある。
- 遮蔽厚さによるBFの変化は、一次γ、中性子、二次γともに滑らかであり、二次多項式を用いてよく近似可能

スラブ遮蔽の斜め透過に対する線量比の変化 (コンクリートの例)

透過距離一定(32cm)、入射エネルギーを変化させて(1, 4, 15MeV) 垂直入射(0度入射)を1としたときの入射角度による線量減衰



γ線も、光中性子も、入射角度による線量比変化を3次以下の多項式でよく近似可能
 角度の他に、エネルギー、または透過距離に対するデータ補間の仕方を検討
 さらに、角度による線量補正の限界、及び線源が壁から離れた場合の影響も検討

ICRP2007年勧告等を踏まえたγ線遮蔽計算ガイドライン案の作成(目次と概要)

章	節	項	タイトル	節・項の概要
2	1~8		ICRP2007年勧告等に基づく外部被ばく線量評価に係る変更点	放射線加重係数及び組織加重係数、実効線量計算用の人体モデル、フルエンス又は空気カーマからの線量換算係数、眼の水晶体等価線量の限度改定と線量評価、外部被ばくに対する実用量の定義(ICRU 95)、放射性核種の放射線データ、他
3			外部被ばくに係る線量換算係数の改定と最新の国際動向	
	11~2		法令等における外部被ばく線量換算係数の改定	実効線量(防護量)、及び測定に係る量(実用量)の換算係数の規定について
	21~4		ICRP/ICRUの最新レポートの要点と想定される将来課題	ICRU95の要点、ICRP147の要点、ICRP次期主勧告の論点、遮蔽線量評価に係る注意、想定される将来の課題
4			遮蔽線量計算法に対する見直し対応	
	1		遮蔽線量計算法の概要	
	21~4		遮蔽線量計算法の見直し概要	ICRP出版物(線量換算係数 線量種類、放射線データ)、法令改定(線量種類、眼の水晶体関係)、研究知見(遮蔽材、減衰係数、干渉性散乱、光核反応、スラブ斜め透過、二重層遮蔽、薄い遮蔽MC法でデータ作成)、見直しのまとめと従来との比較
	3		遮蔽計算のフローと適用範囲(の明確化)	RI核種・放射線発生装置から放出される放射線の種類に基づく、数式ベースの遮蔽計算法・データ説明、計算フローと注意、遮蔽実務マニュアルの対応する記載と例題の対応
5			遮蔽線量計算法の見直しによる遮蔽計算実務への潜在的影響	
	11~2		遮蔽計算実務への潜在的影響の調査	アンケート調査の概要、調査結果(影響と課題)
	2		実務で用いられる図書・マニュアル類への影響	表作成
	3		遮蔽線量計算で想定される影響の示唆	明らかな影響が考えられる点の示唆

11

γ/X線を放出するRI核種取扱施設に対する遮蔽安全評価の申請確認フロー例

施設の仕様・図面をもとに、RI核種と数量、遮蔽材の種類と厚さ、それらの配置を確認

今回整備した遮蔽計算用データ、
又は遮蔽計算コードを用いて算出

今回のRI核種の実効線量率定数

今回のRI核種の実効線量透過率

複雑な遮蔽体系の場合

新規の認可申請

新規の認可申請

既認可・既確認

既認可・既確認

従来の実効線量率定数と比較

従来の実効線量透過率と比較

今回の値 > 従来値

今回の値 > 従来値

今回の見直しにより、安全評価の結果に影響が及ぶ可能性がある。

今回整備した遮蔽計算コードを用いて、遮蔽体の形状・配置・属性、線量評価点の位置等を指定して直に実効線量を計算

遮蔽計算コードの結果に基づいて線量評価点の遮蔽線量率を再評価

今回のRI核種の実効線量透過率、又は実効線量透過率を用いて線量評価点の遮蔽線量率を再評価

実効線量率定数: RI核種の数量を1MBqとして、遮蔽のない状態で1m先の実効線量率を計算

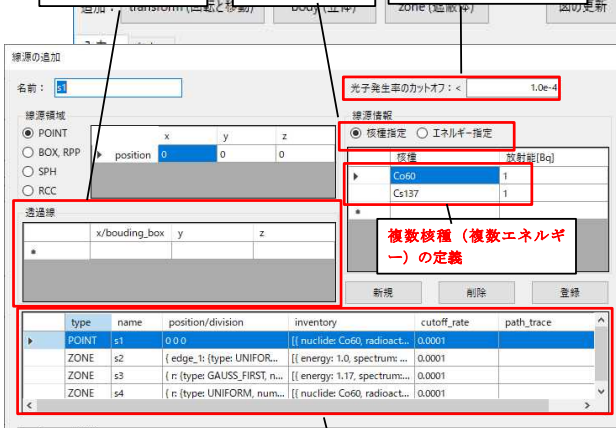
実効線量透過率: 遮蔽材の厚さの位置において、遮蔽材のある場合の実効線量率を、遮蔽のない場合の実効線量率で除した値

12

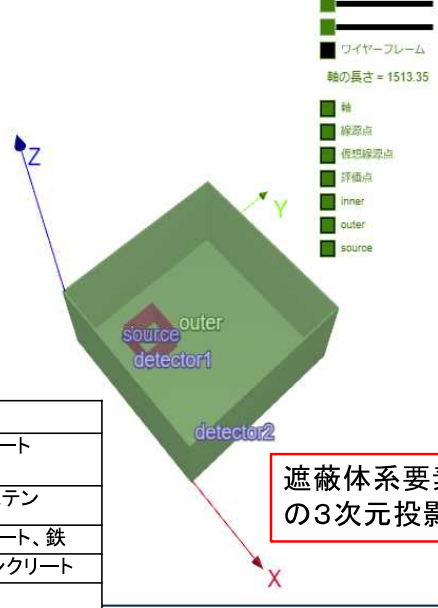
今回、開発した遮蔽計算コードの特徴、妥当性確認の例題

RI核種の指定、遮蔽体の指定

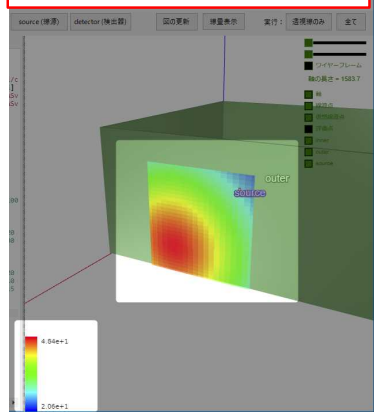
透過線の基準点を線源ごとに設定
核種指定・エネルギー指定の選択
光子発生率の下限値として任意の値を設定可能



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



線量計算結果の可視化



遮蔽体系要素（線源・遮蔽体・線量評価点）の3次元投影図による確認

遮蔽実務マニュアルから引用した例題	線源	遮蔽材
透過率、またはビルドアップ係数を用いて実効線量率を求める方法	Co-60	コンクリート
診療用腔内照射施設の例	Ir-192	タンゲステン
放射線発生装置取扱施設の例	線源スペクトルの群化	コンクリート、鉄
二重層遮蔽計算（2-5ページ）	1MeV光子	鉛+コンクリート
複数核種・複数線源（3-47ページ）	複数のRI取扱施設	
ANS標準のサンプル問題	Co-60、廃棄物タンク	コンクリート、水
従来コード記載の問題	Co-60, Cs-134, Cs-137	鉛、土壌

2021年度の成果

【成果発表】

- 第6回放射線遮蔽設計法に係るワークショップ: 簡易遮蔽解析コードレビューWG活動に係る成果発表 (2021年8月)
- 日本原子力学会2021年秋の大会: 光核反応、スラブ斜め入射の影響について発表 (2021年9月)
- 日本原子力学会2022年春の年会: 二重層遮蔽線量計算の再評価について発表 (2022年3月)
- 同年会: 放射線工学部会セッション「簡易遮蔽計算法のレビューで得られた知見と計算コードの実装」、研究担当者4名の連続講演 (2022年3月)
- 放射線遮蔽国際会議(ICRS-14, 2022年9月、アメリカ開催): 論文投稿 “Photon deep penetration calculation including the photonuclear reaction using the Monte-Carlo code for a buildup factor”

【データベース構築】

- 最新の勧告・知見に基づく線遮蔽計算用データライブラリ (代表遮蔽材13種(鉄、鉛、コンクリート、水、ポリエチレン等)に対して、0.01~30MeVの単色γ/X線を射入した場合の減衰係数。同条件で、遮蔽材の厚さが0.5~80mpfの実効線量ビルドアップ係数(全6種の照射体系)。その他のBF)

【ソフトウェア開発】

- 上記のライブラリファイルを読み込んで遮蔽線量計算を実行できるγ線遮蔽計算コード

【ガイドライン文書の草案】

- ICRP2007年勧告等を踏まえたγ線遮蔽計算ガイドライン案(1)新勧告取入れによる遮蔽線量評価法の見直し手順の開発

【ヒアリング調査、アンケート調査、研究レビュー委員会、人材育成活動】

- 光核反応に関する講演会、及び専門家ヒアリング(KEK及び清水建設、2回、2021年4月)
- 実用量の定義変更に関する専門家ヒアリング(産総研、2021年9月)
- 新勧告による遮蔽実務影響、及び遮蔽計算のレポートングに関するアンケート調査(2021年11月)
- 研究協力者による研究レビュー委員会の開催(第3回2020年6月、第4回2021年10月、第5回2022年2月、計3回)
- 日本原子力学会放射線工学部会「簡易遮蔽解析コードレビューWG」を通じた人材育成活動(2021年6月、9月、12月、計3回)

自己評価、及び今後の展望

研究代表者による自己評価

評価の視点	自己評価	コメント
評価時点までの研究の実施が研究計画に沿って行われているか	1 計画を上回る 2. 概ね計画どおり 3 計画を達成できない 4 計画を達成できないが代替手段によって今年度の目標を達成した	下記の件を除き、研究計画どおりに研究を遂行し、当初の目標を達成することができた。 2020年9月に開催されるはずの放射線遮蔽国際会議がパンデミックにより、2021年から更に2022年へと延期された。同会議に参加して行う調査の一部が未達となったが、目標の達成に影響はない。代わりに本研究の成果を発表して意見交換を行う予定である。

今後の展望

- 本研究で作成した遮蔽計算用データ及び計算コードを公開して、認可申請や確認で広く活用してもらう。
 - 今後、さらにデータの拡充や妥当性確認を行って信頼性を確保する必要がある。
- 開発した遮蔽計算コードを、中性子線源に対応するように拡張
 - (α, n)、自発核分裂、特定加速器施設により発生する中性子の簡易遮蔽計算