

VII. 参考文献

- Morita, T., Nomura, S., Tsubokura, M., Leppold, C., Gilmour, S., Ochi, S., . . . Kami, M. (2017). Excess mortality due to indirect health effects of the 2011 triple disaster in Fukushima, Japan: a retrospective observational study. *J Epidemiol Community Health*, *71*(10), 974–980. doi:10.1136/jech-2016-208652
- Nomura, S., Gilmour, S., Tsubokura, M., Yoneoka, D., Sugimoto, A., Oikawa, T., . . . Shibuya, K. (2013). Mortality Risk amongst Nursing Home Residents Evacuated after the Fukushima Nuclear Accident: A Retrospective Cohort Study. *PLoS One*, *8*(3), e60192. doi:10.1371/journal.pone.0060192
- Tsubokura, M. (2018). Secondary health issues associated with the Fukushima Daiichi nuclear accident, based on the experiences of Soma and Minamisoma Cities. *Journal of the National Institute of Public Health*, *67*(1), 71–83. doi:10.20683/jniph.67.1_71

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

成果報告書

令和 4 年 3 月

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

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

目 次

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

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

付 録

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

別冊「ICRP2007年勧告等に基づく γ 線遮蔽線量計算ガイドライン」

1 事業の概要

1.1 事業の目的

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

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

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

また、遮蔽安全評価技術のレベル維持のための若手人材の育成を図る。

1.2 実施項目

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

(1) 新勧告取入れによる遮蔽線量評価法の見直し手順の開発

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

(2) 遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究

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

(3) 新勧告取入れの運用に資するガイドラインの検討

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

(4) 成果の公表

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

(5) 事業の進捗管理等

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

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

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

1.3 実施体制

図 1-1 に事業の実施体制を、研究担当者らの役割とともに示す。

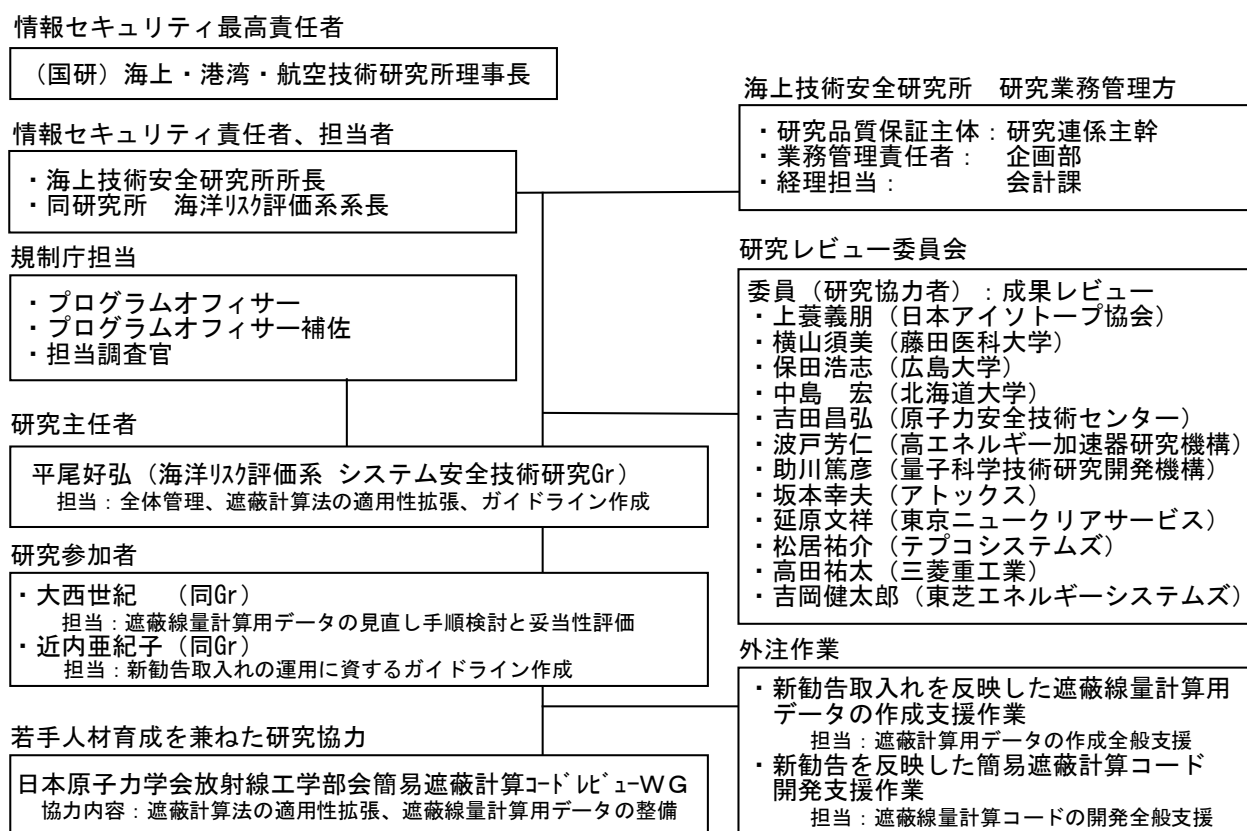


図 1-1 事業実施体制

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 2021 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（2021 年度）

実施項目	令和 3 年度			
	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
(1) 勧告取入れによる遮蔽線量評価法の見直し手順の開発				
(2) 遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究				
(3) 新勧告取入れの運用に資するガイドラインの検討	<p>止) ☆遮蔽国際会議参加（再延期で中止）</p> <p>★実用量変更調査 ★遮蔽実務影響調査</p>			
(4) 成果公表、事業進捗管理等	<p>研究班会合 ←</p> <p>(各月末に月報送付) 年次報告会 ★</p> <p>学会発表★ ★</p> <p>研究レビュー委員会★ ★ ★</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

2.1 遮蔽計算用データの見直し検討項目

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

表 2-1 新勧告対応で求められる遮蔽計算用データの見直し範囲・検討項目

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

2.2 遮蔽計算用データの作成検討

2.2.1 遮蔽材料

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

表 2-2 遮蔽材料に係る遮蔽計算用データの検討

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

2.2.2 計算する線量種類

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

表 2-3 線量種類の出力に係る遮蔽計算用データの検討

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

2.2.3 遮蔽計算用データベースのテーブル設計

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

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

表 2-4 遮蔽計算用データベースのテーブル検討

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

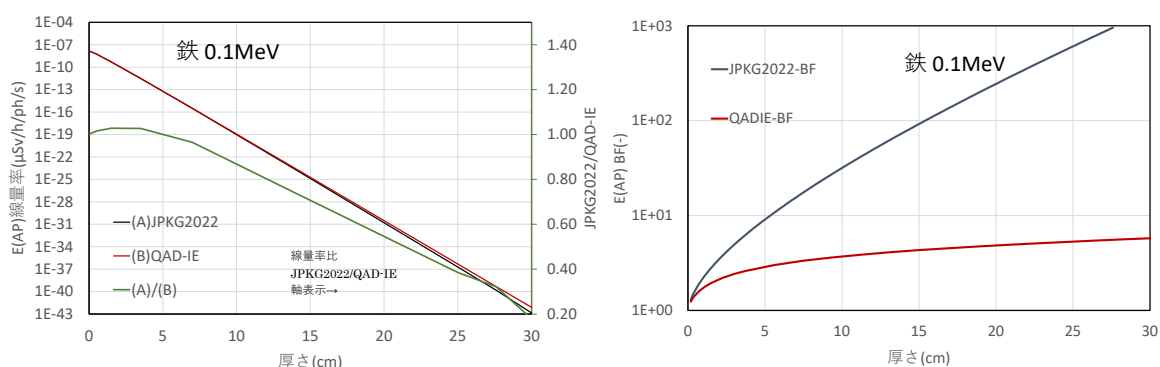
2.3 遮蔽計算用データの妥当性確認

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

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

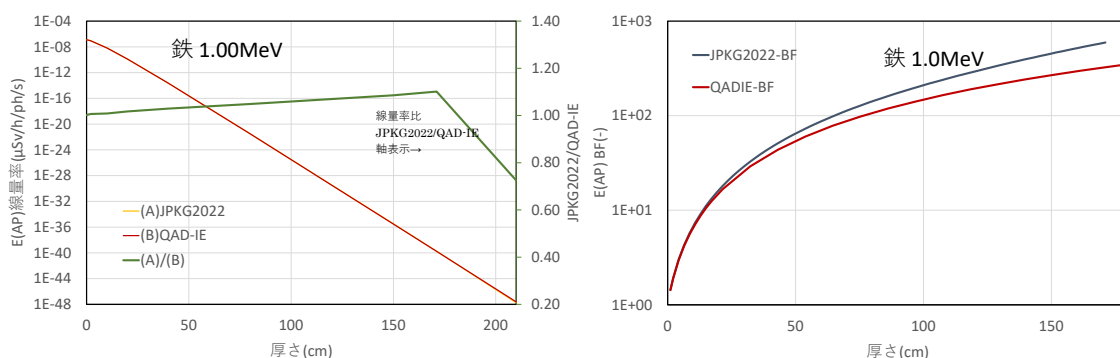
付録 III の 3.17 「ビルドアップ係数について文献との比較による妥当性確認」において、本事業で作成したビルドアップ係数と遮蔽線量計算値 (JPKG2022) を、1990 年勧告ベースの従来値 (QAD-IE) と比較した。従来データは光核反応を考慮していないため、比較できるのは線源の 1 次 γ 線だけである。例として、図 2-2 及び図 2-3 に、鉄及び鉛に対する比較グラフをそれぞれ示す。

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



(a) 0.1MeV、遮蔽線量値と新旧比

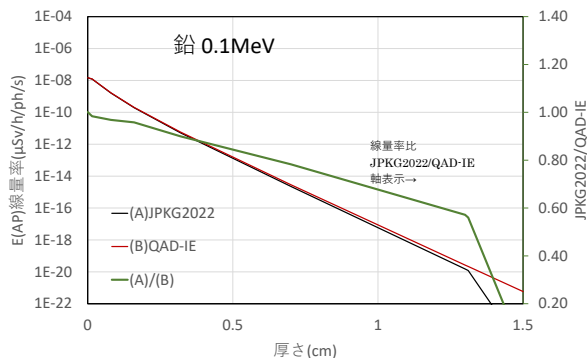
(b) 0.1MeV、ビルドアップ係数



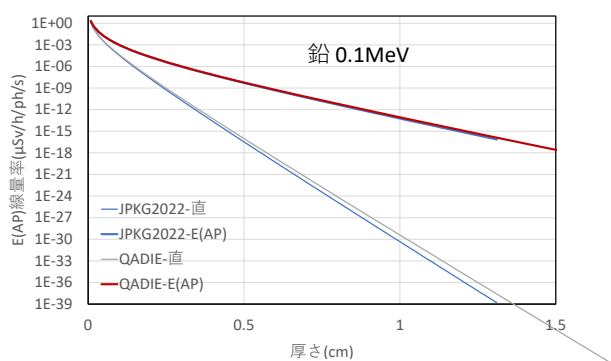
(c) 1MeV、遮蔽線量値と新旧比

(d) 1MeV、ビルドアップ係数

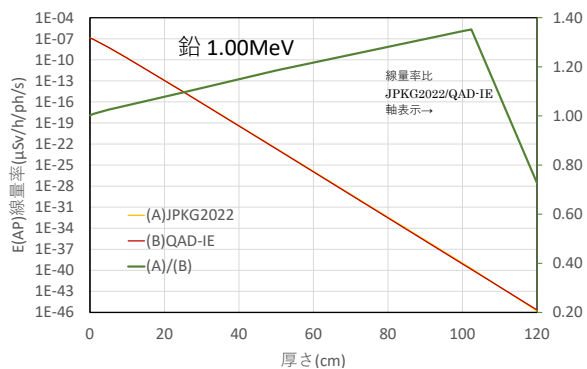
図 2-1 鉄に対する遮蔽線量計算値、及びビルドアップ係数の新旧比較



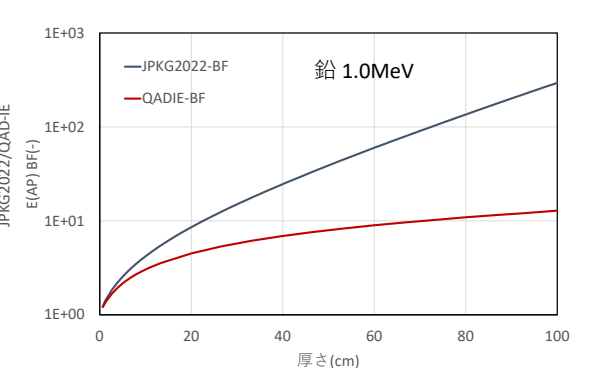
(a) 0.1MeV、遮蔽線量値と新旧比



(b) 0.1MeV、ビルドアップ係数



(c) 1MeV、遮蔽線量値と新旧比



(d) 1MeV、ビルドアップ係数

図 2-2 鉛に対する遮蔽線量計算値、及びビルドアップ係数の新旧比較

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

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

2.4 光核反応に関するヒアリング調査

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

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

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

参考文献

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

3 遮蔽線量評価法の適用性拡張に係る研究

3.1 遮蔽線量評価法の適用性拡張検討項目

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

表 3-1 遮蔽線量評価法の適用性拡張検討項目

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

3.2 高エネルギーへの範囲拡張

3.2.1 遮蔽材の光中性子発生量の目安

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

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

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

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

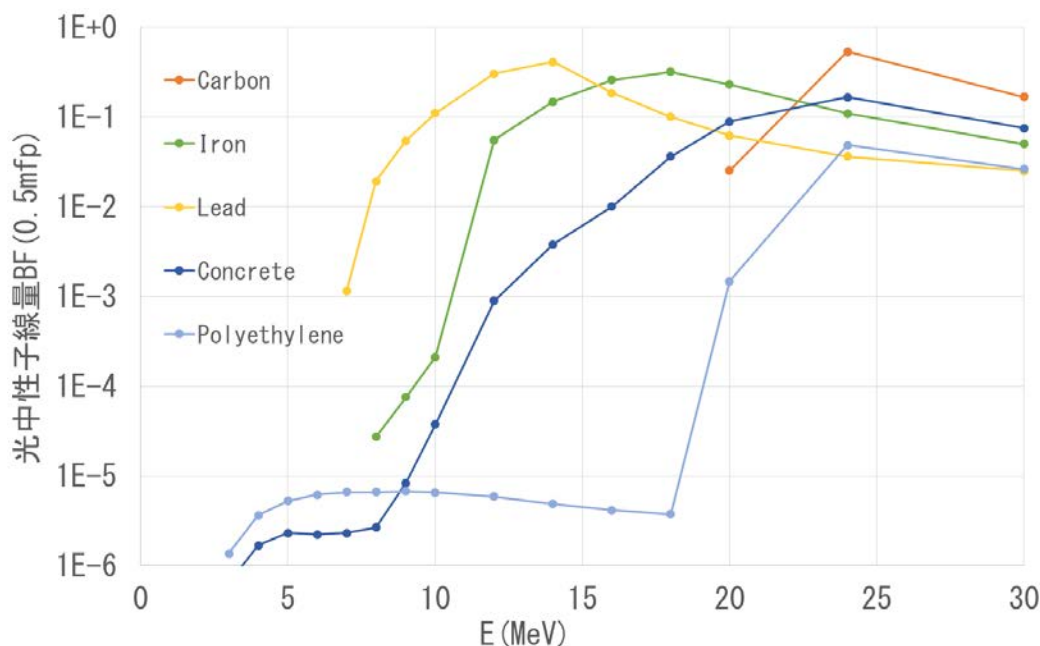


図 3-1 遮蔽材の光核反応で発生する光中性子の線源エネルギーによる変化

3.2.2 光核反応が線量計算に与える影響の例

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

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

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

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

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

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

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

表3-2 ^{16}N の放射性核種データ(光子)

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

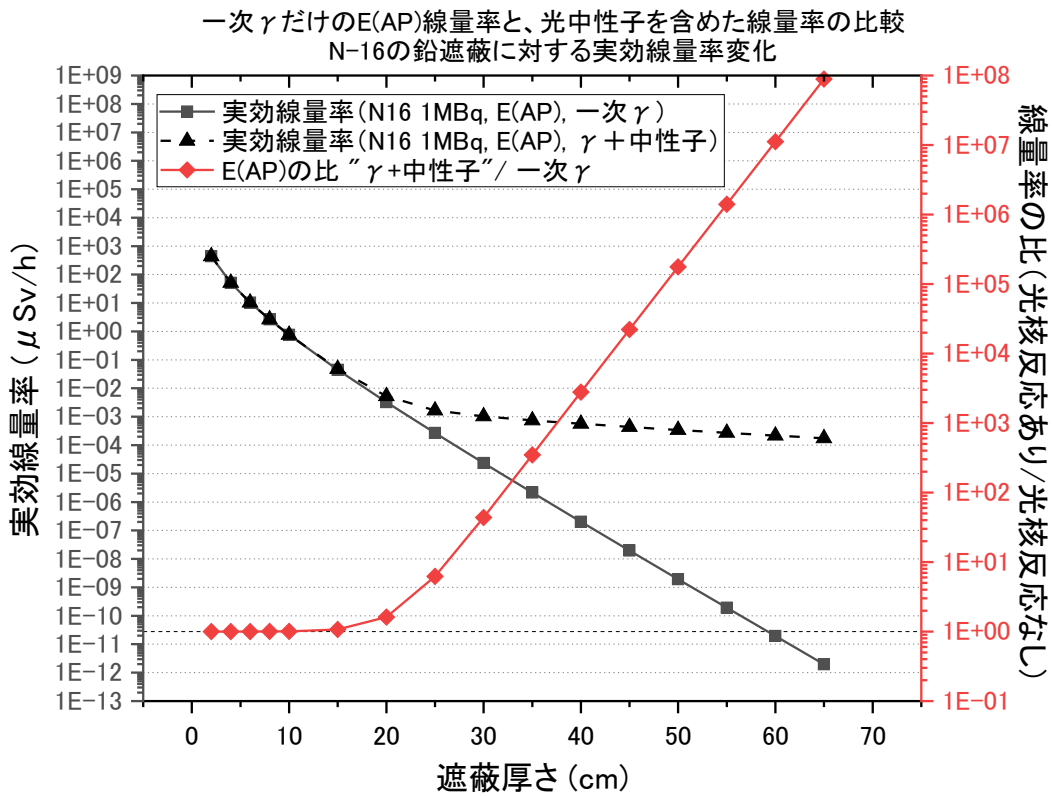


図 3-2 ^{16}N の鉛に対する実効線量透過率の遮蔽厚さによる変化
(光核反応の考慮の有無)

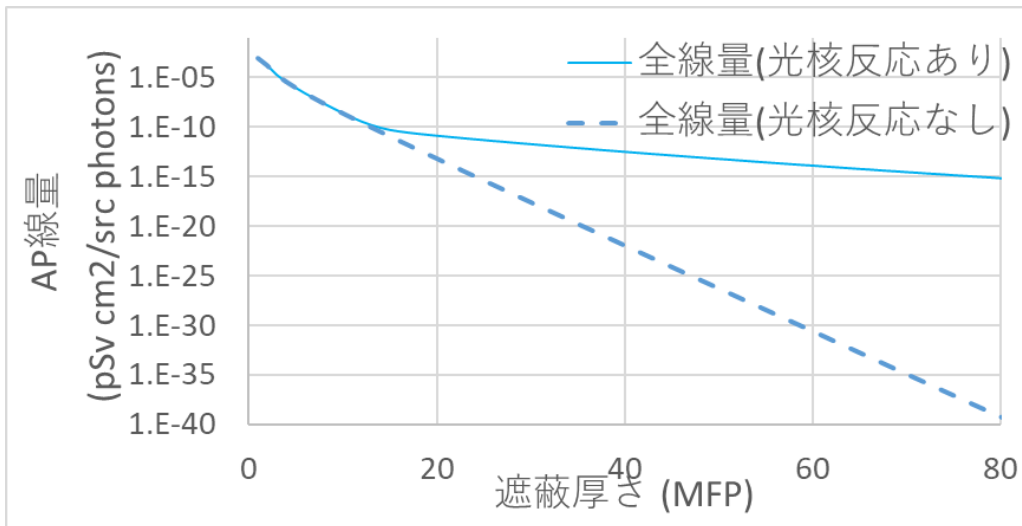
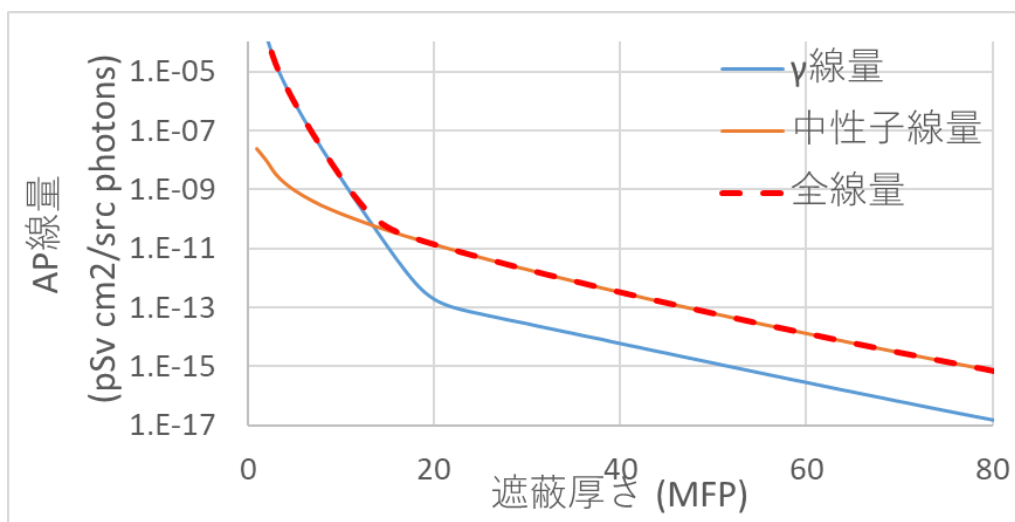
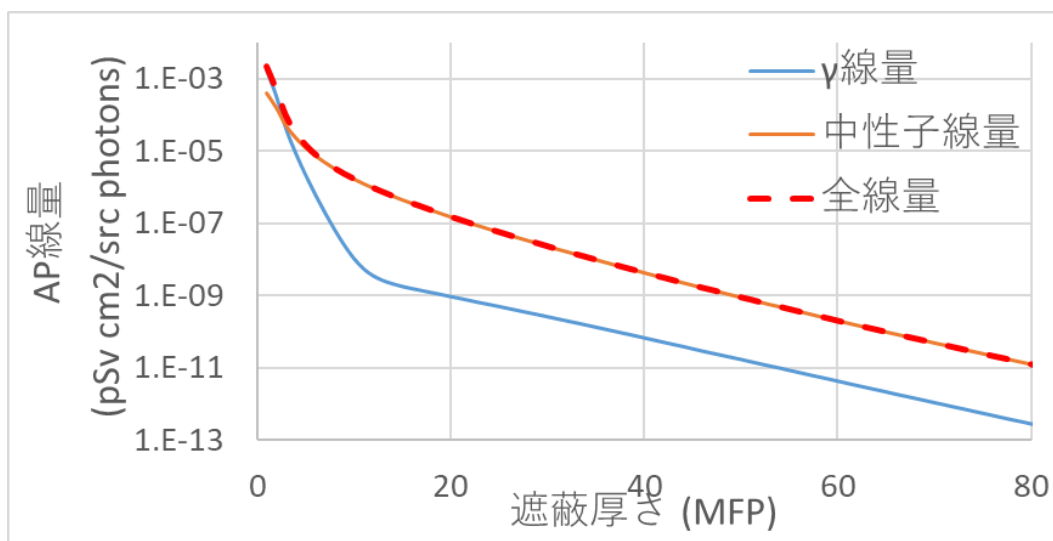


図 3-3 8MeV の単色光子を鉄で遮蔽した場合の遮蔽厚さによる線量変化の計算例
(光核反応の考慮の有無を仮定した考察のための参考)



(a) 線源エネルギー8MeV



(b) 線源エネルギー20MeV

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

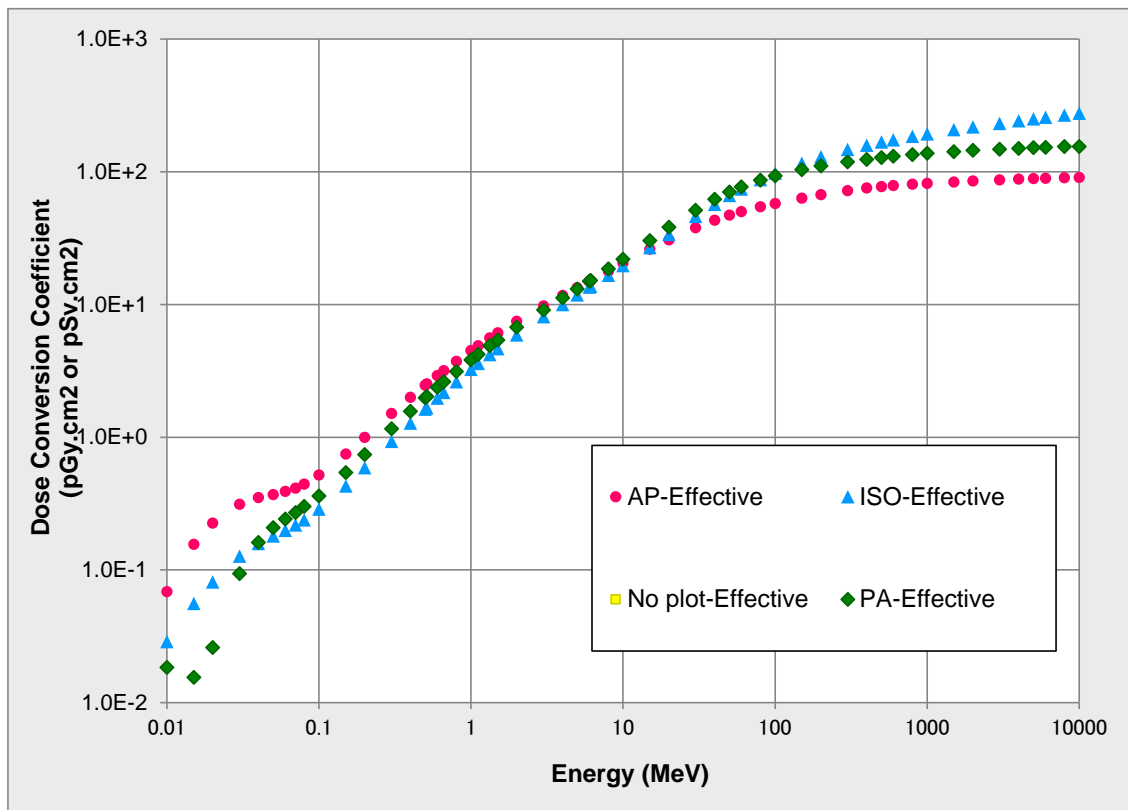


図 3-5 光子フルエンスあたりの実効線量換算係数の照射条件による比較

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

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

(30MeV、1M(photon/sec)の単色γ線源を用いた場合)

3.3 二重層遮蔽線量計算

3.3.1 二重層遮蔽の概念と遮蔽計算用データの定義

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

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

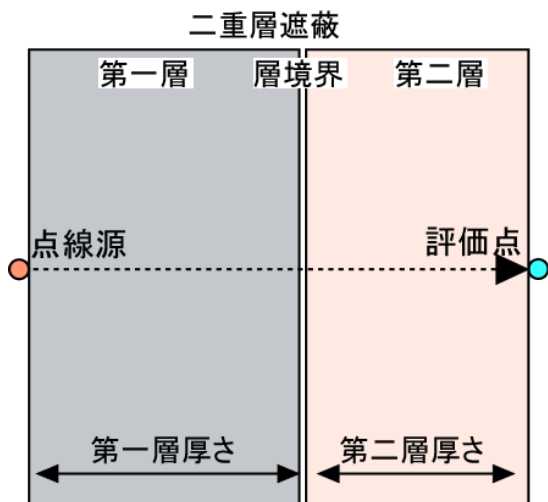


図 3-6 二重層遮蔽の概念図

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

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

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

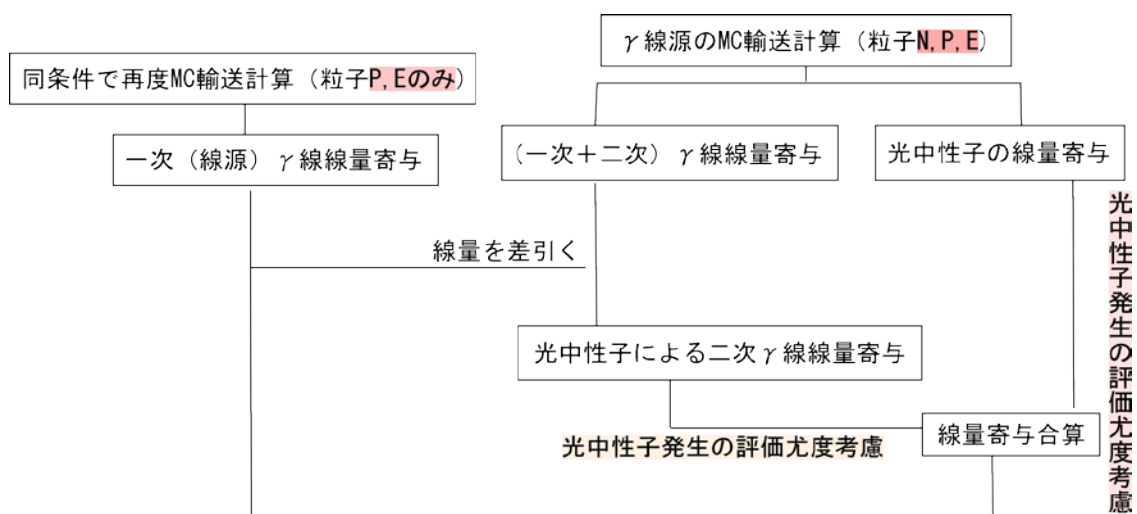


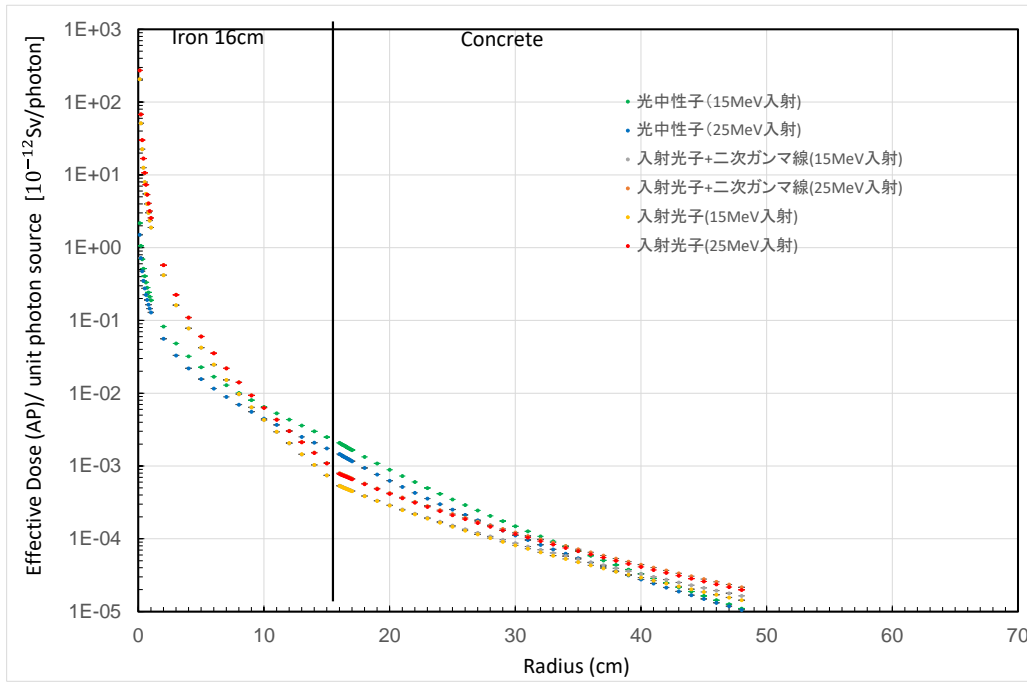
図 3-7 モンテカルロ法輸送計算に基づく光核反応に係る線量寄与の分割手順

3.3.2 二重層遮蔽の遮蔽厚さによる線量変化、及び遮蔽計算用データの例

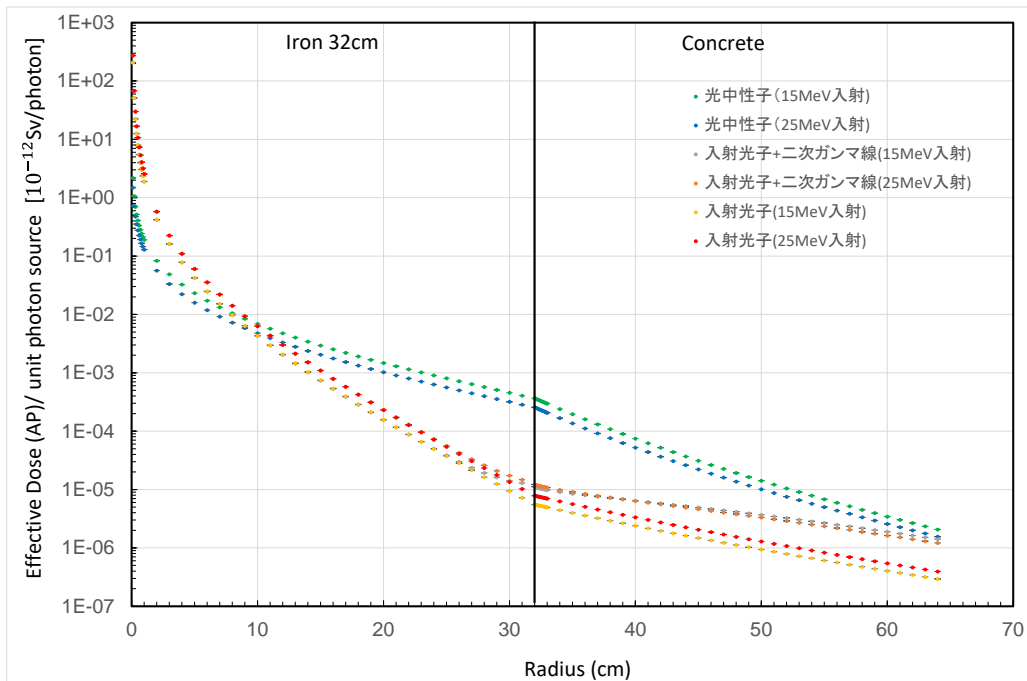
図 3-8 に、15MeV 及び 25MeV の γ 線源を用いた、第 1 層が鉄、第 2 層がコンクリートの二重層遮蔽の実効線量変化を示す。線量減衰の様子は 15MeV と 25MeV であまり変わらない。第 1 層の厚さが 16cm の場合 (図 3-8(a))、初めは γ 線の線量が高いが、鉄で発生した中性子の線量が層境界の手前で γ 線を超えてくる。そして、第 2 層のコンクリートで中性子が減衰し、35cm 辺りで γ 線の線量が中性子より再び高くなる。この傾向は、第 1 層の厚さが 32cm の場合 (図 3-8(b)) でも同様であるが、層境界が後方に下がった分、層境界で中性子と γ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

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

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

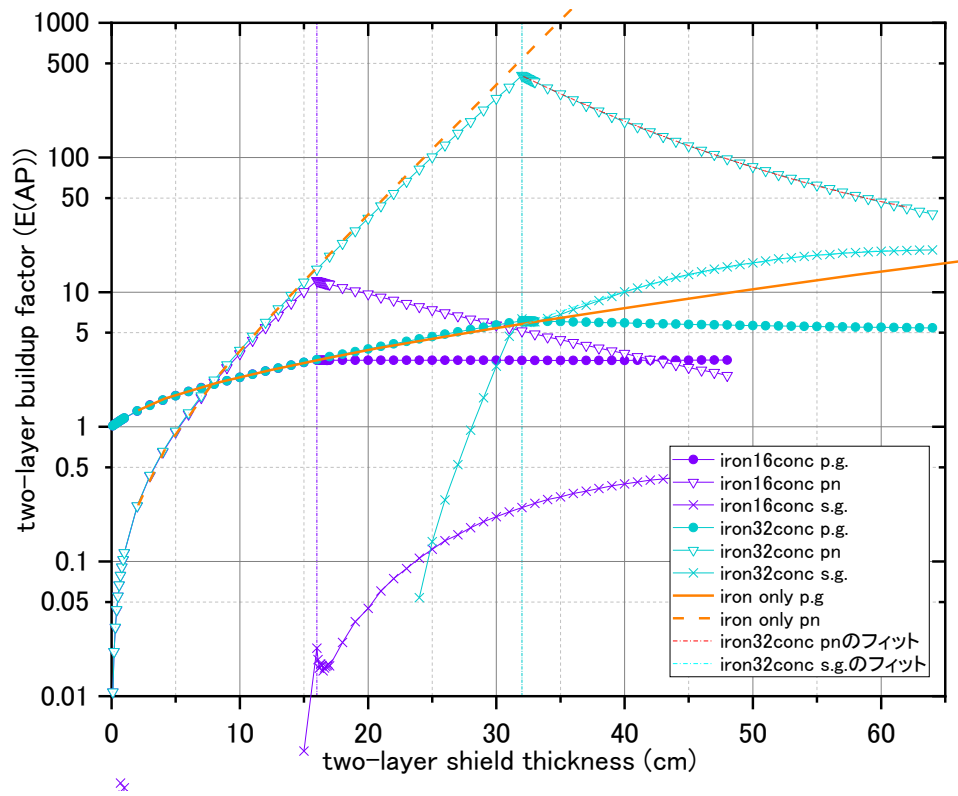


(a) 第1層：鉄16cm、第2層：コンクリート

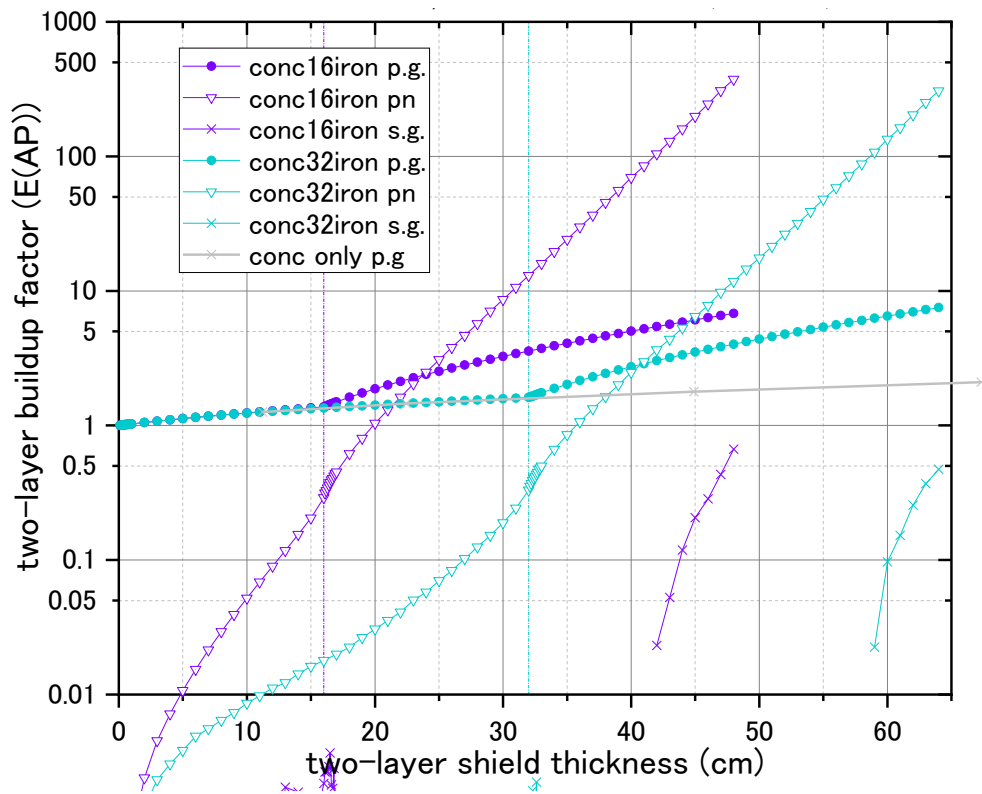


(b) 第1層：鉄32cm、第2層：コンクリート

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



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



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

図3-9 二重層遮蔽計算用ビルドアップ係数の遮蔽厚さによる変化の例

3.3.3 二重層遮蔽計算用データのまとめ方と線量計算式

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

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

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

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

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

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

e : 光子エネルギー (MeV)

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

r : 線源から第一層までの距離 (cm)

t_1, t_2 : 第一層、または第二層の厚さ (cm)

t : 第一層の初めから線量評価点までの距離 (cm)

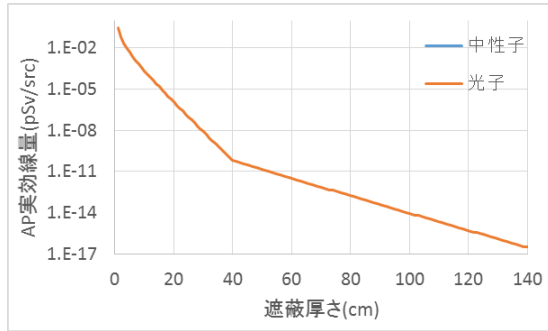
$BF(e, t)$: 二重層用の実効線量ビルドアップ係数

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

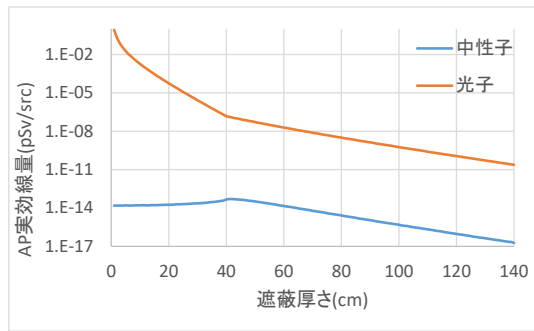
3.3.4 二重層遮蔽のエネルギーによる線量変化の例

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

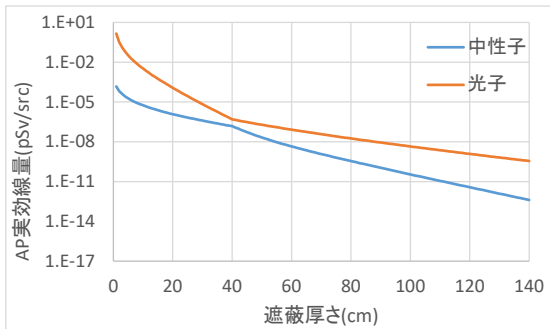
図 3-10 に、第 1 層に鉄 40cm、第 2 層にコンクリート 100cm とした場合の線源エネルギー別の線量変化を示す。4MeV からコンクリートで発生した中性子の寄与が現れ、その散乱影響が第 1 層側にも現れる。いずれも γ 線と比べて無視できるレベルである。10MeV の場合、鉄で中性子が発生して、その線量が層境界の辺りで γ 線の線量に接近するが、まだ全体的に γ 線の線量が支配的である。しかし、それを超えて 15MeV になると、中性子の線量が高くなって 10cm 辺りで γ 線と線量寄与が逆転し、また第 2 層で中性子が減衰すると今度は二次 γ 線の寄与が顕著になり、80cm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



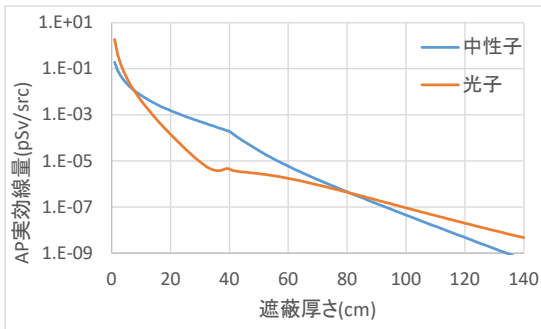
(a) 1MeV



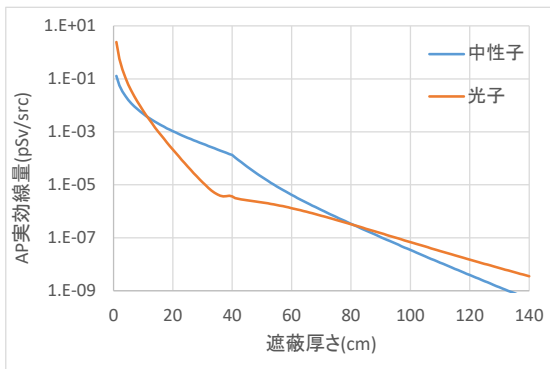
(b) 4MeV



(c) 10MeV



(d) 15MeV



(e) 25MeV

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

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

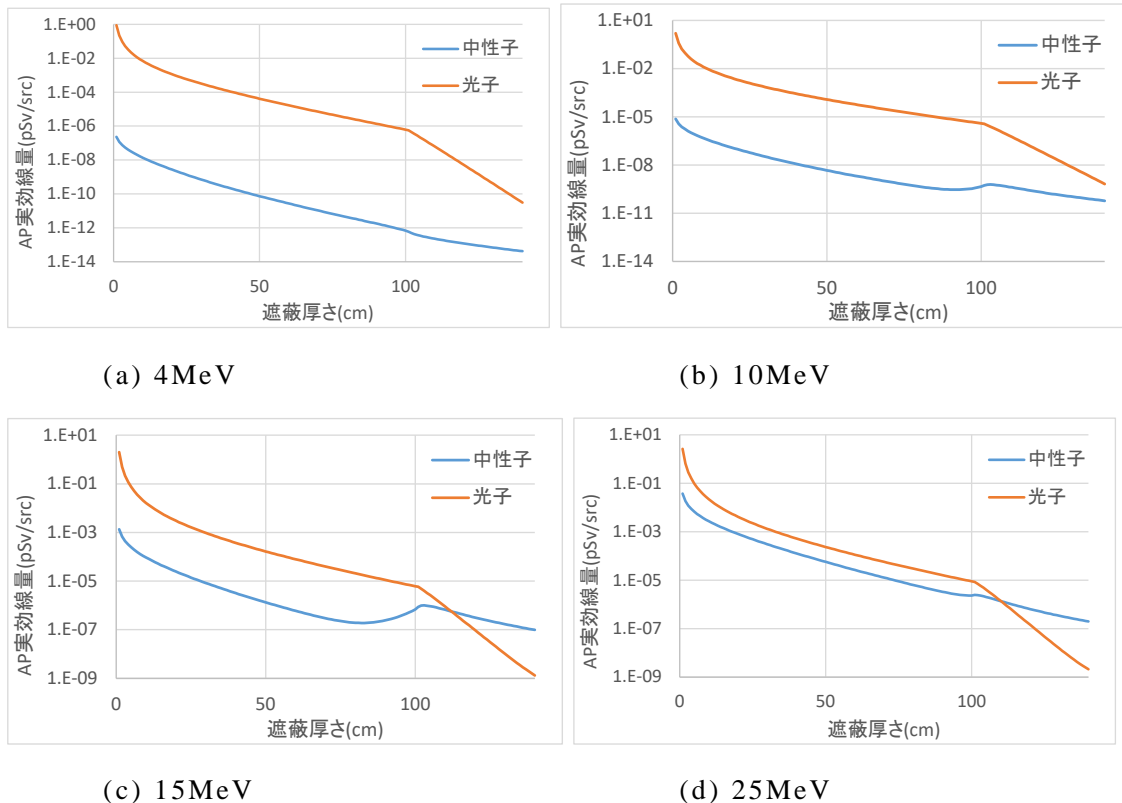


図 3-11 二重層遮蔽の線源エネルギー別の線量変化
(第 1 層 : コンクリート 100cm、第 2 層 : 鉄 40cm)

3.4 スラブ遮蔽に対する斜め透過線量補正

3.4.1 スラブ遮蔽の斜め透過の概念と対応意義

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

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

壁に対して透過線が垂直方向
通常のビルドアップ線量計算の体系

壁に対して透過線が斜め方向にある
適当に補正して計算できないか？

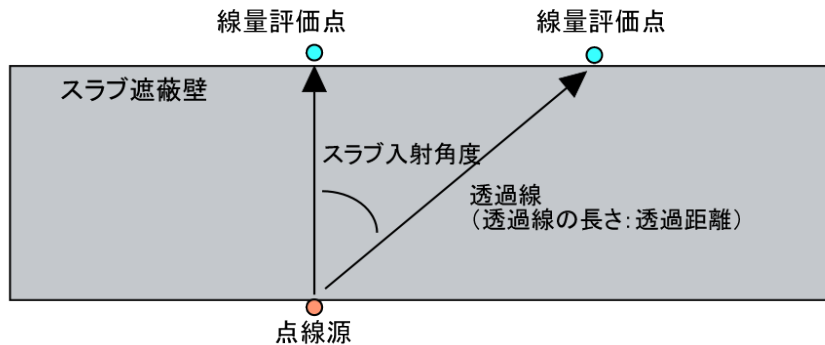


図 3-12 スラブ遮蔽の垂直透過及び斜め透過の概念図

3.4.2 スラブ遮蔽の斜め透過の角度による線量変化

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

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

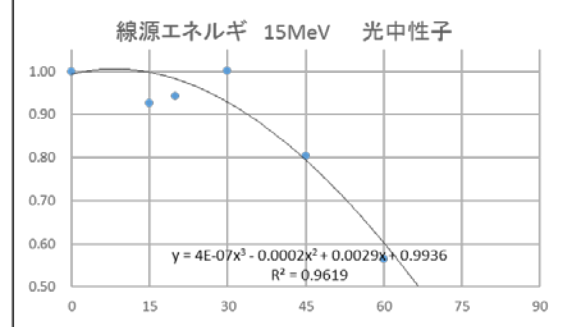
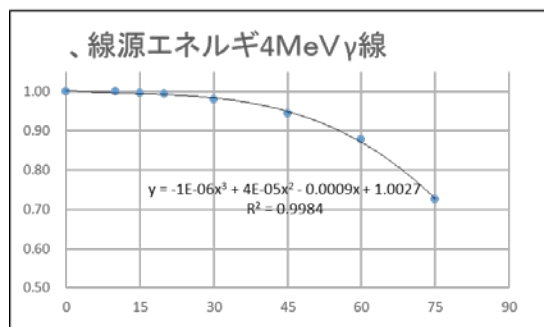
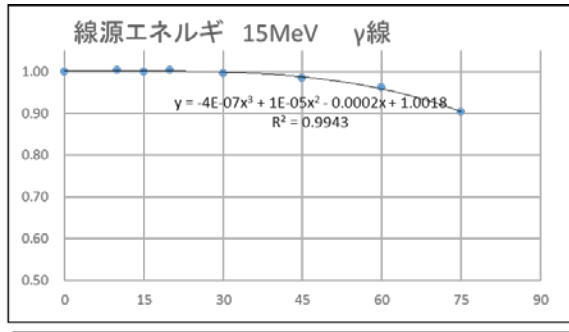
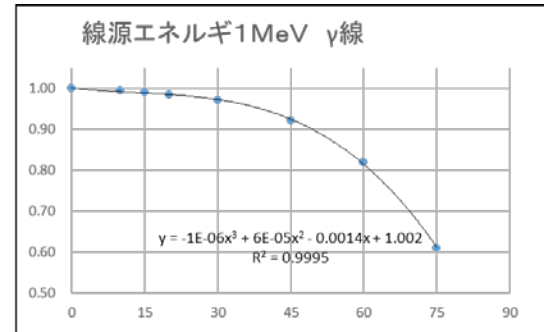
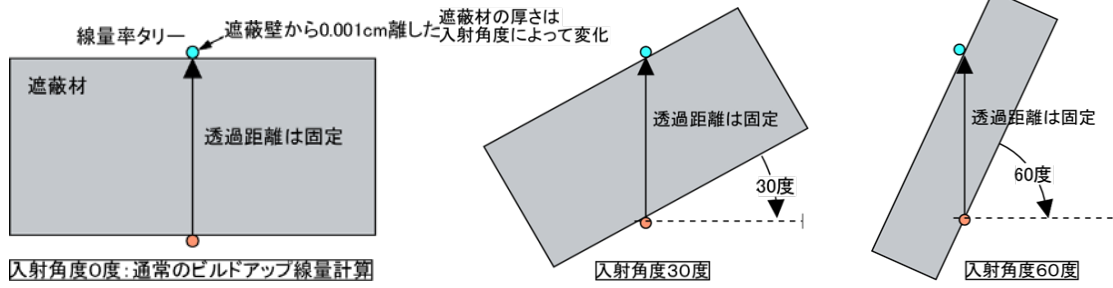


図 3-13 コンクリート遮蔽で透過距離 32cm に固定したときの透過線の入射角度による線量比の変化

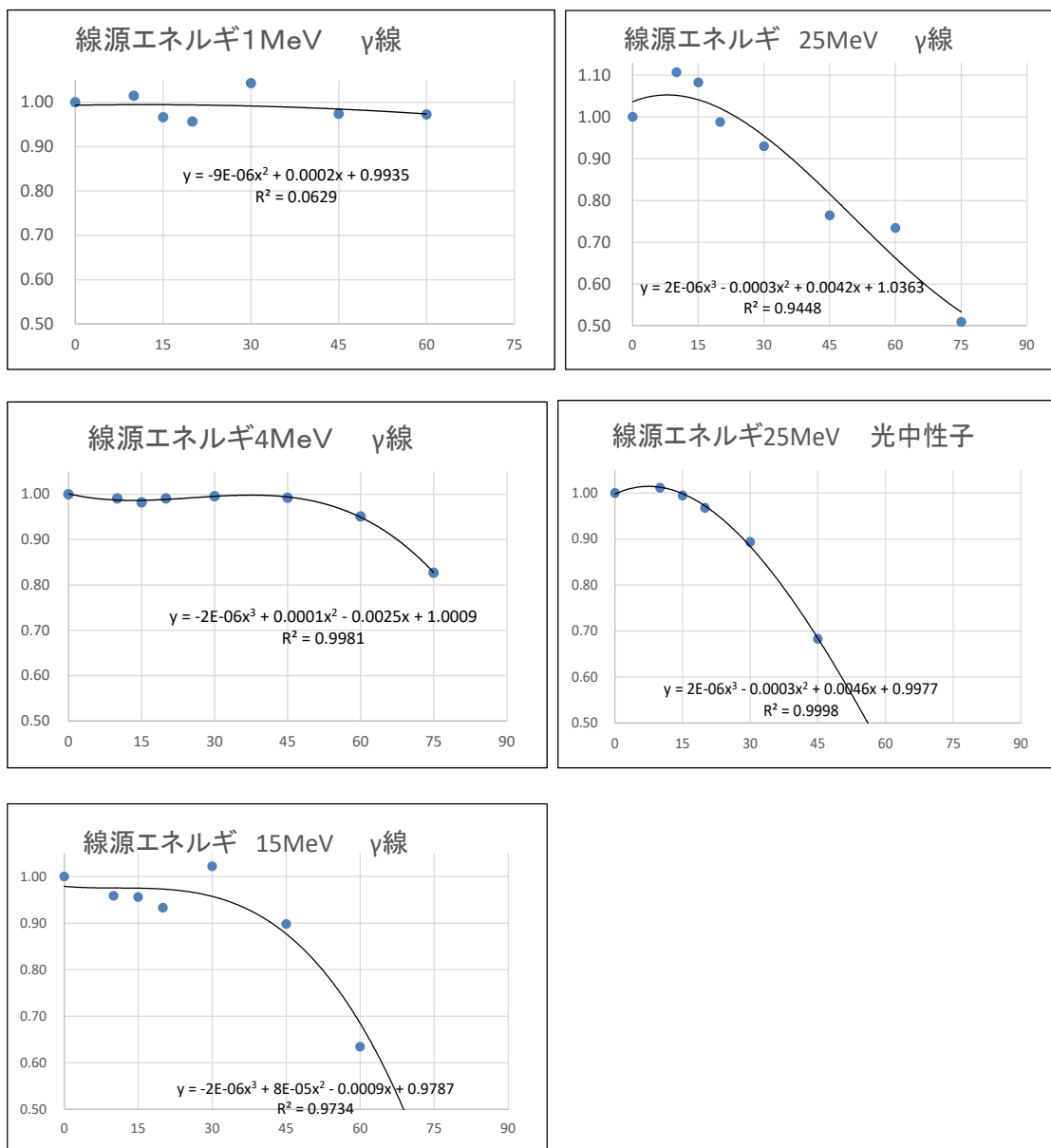


図 3-14 鉛遮蔽で透過距離 32cm に固定したときの、透過線の入射角度による線量比の変化

3.4.3 スラブ遮蔽の斜め透過補正データのまとめ方と線量計算式

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

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

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

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

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

- e : 光子エネルギー (MeV)
- $E/\Phi(e)$: フルエンス($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)あたりの実効線量換算係数($\text{pSv} \cdot \text{cm}^2$)
- r : 線源から遮蔽体までの距離(cm)
- t : 透過距離(cm)
- s : 透過線のスラブ入射角度(deg)
- $BF(e, t)$: 一次 γ_{pg} 、光中性子 $_{pn}$ 、二次 γ_{sg} の各実効線量ビルドアップ係数
- $\mu(e)$: 遮蔽体の光子の減衰係数(cm^{-1})
- $CF(e, t, s)$: (一次 γ + 二次 γ) $_{pg+sg}$ 、光中性子 $_{pn}$ の各斜め透過用線量補正係数
- $lim(e, t)$: 適用可能な入射角度の上限(deg)

3.5 新勧告を反映した遮蔽線量計算コードの開発

3.5.1 コード開発の概要

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

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

3.5.2 今年度実施したコード開発項目

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

表 3-4 今年度実施した γ 線遮蔽計算コード開発項目（CUI 操作）

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

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

表 3-5 今年度実施した γ 線遮蔽計算コード開発項目 (GUI 操作)

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

3.5.3 計算結果の妥当性確認

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

表 3-6 遮蔽線量計算コードの妥当性確認に用いた例題

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

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

表 3-7 遮蔽線量計算コードの妥当性確認の結果一覧

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

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

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

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

3.6 遮蔽計算コードのレポート作成で求められる表示項目の調査

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

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

表 3-8 遮蔽計算コードのレポート作成で求められる表示項目調査のまとめ

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

参考文献

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

4 新勧告取入れの運用に資するガイドラインの検討

4.1 簡易遮蔽計算コードの利用、及び新勧告対応に係る実態調査

4.1.1 調査目的と前年度の経緯

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

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

4.1.2 今年度の調査中止と影響について

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

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

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

4.2 実用量の定義変更に関するヒアリング調査

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

ヒアリングの結果、本事業の遮蔽線量評価に係る議論は下記のとおりである。

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

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

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

4.3 新勧告取入れによる遮蔽線量計算・安全評価実務への影響調査

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

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

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

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

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

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

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

表 4-2 に、ガイドラインの目次を示す。

第 1 章で、本ガイドラインの作成目的と内容構成を示す。

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

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

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

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

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

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

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

参考文献

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

5 事業の進捗管理、及び人材育成活動

5.1 研究班会合の実績

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

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

表 5-1 研究班会合の開催実績

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

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

5.2 研究レビュー委員会

5.2.1 委員会趣旨と委員構成

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

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

表 5-2 研究レビュー委員会の委員構成

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

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

5.2.2 開催実績と議事

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

表 5-3 研究レビュー委員会の開催実績

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

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

5.2.3 アンケート調査

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

表 5-4 アンケート調査の実績

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

5.3 ヒアリング調査

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

表 5-5 ヒアリング調査の実績

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

5.4 成果発表

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

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

5.5 人材育成活動

本事業の人材育成活動は、次の学会ワーキンググループを通じて行われた。

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

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

表 5-5 学会 WG を通じた人材育成活動実績

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

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

参考文献

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

6 まとめ

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

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

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

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

以上

付録 I

ビルドアップ係数の計算方法

付録 I ビルドアップ係数の計算方法

目次

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

1. 序

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

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

2. 点減衰核法コードが算出する線種及び疑似ビルドアップ係数の定義

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

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

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

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

3 ビルドアップ係数の算出方法

3.1 計算コード

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

○コードバージョン選定理由：

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

3.2 核データライブラリ

中性子・ γ 線：JENDL-4.0

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

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

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

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

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

3.3 計算方法

(1) モンテカルロ法で、光核反応を含む全反応を考慮して遮蔽線量計算を実施

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

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

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

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

S： γ 線源強度(ph/s) 1ph/s

r：線源と評価点の距離(cm)

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

t：遮蔽厚(cm) 0.5,1-80mfp までの厚み

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

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

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

(3) BF を以下の通り計算する。

計算実施の 3 成分と実行 MCNP ケースの対応を下記とする。

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

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

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

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

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

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

3.4 計算体系

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

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

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

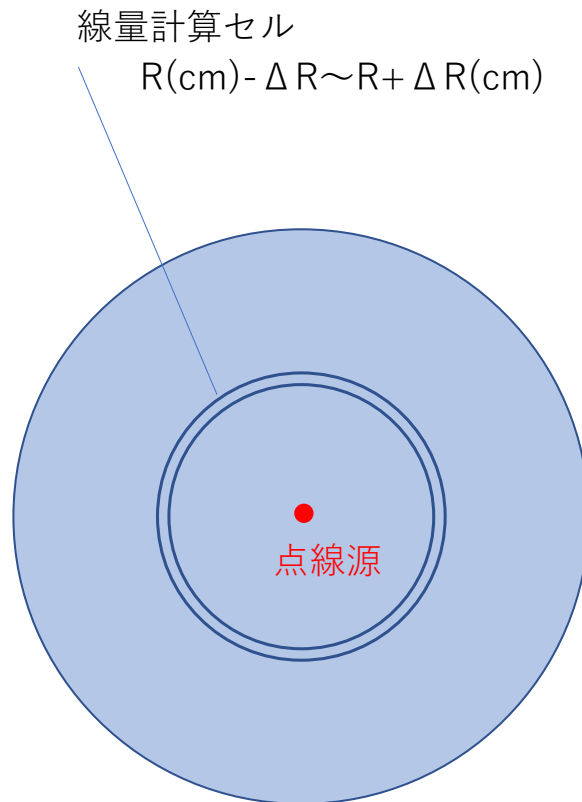


図1 計算体系図

3.5 遮蔽体の組成

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

表 1 作成する材料組成リスト

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

3.6 タリー設定

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

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

表 2 線束－線量換算係数の設定

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

3.7 カットオフエネルギー

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

光子：1keV

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

3.8 光核反応バイアス

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

インプット設定は下記の通りになる。

PHYS:P j 0 0 1 j

3.9 特記すべきオプション設定

パラメータ	中性子ありケース	中性子なしケース
MODE	MODE N P E	同左
CUT	CUT:N j 1.0E-11 3j CUT:P j 1.0E-3 3j CUT:E j 1.0E-1 3j	CUT:N 1e-100 1.0E-11 3j CUT:P 1e+100 1.0E-3 3j CUT:E 1e+100 1.0E-1 3j
PHYS:pISPN	PHYS:P j 0 0 1 j	同左

3.10 相対誤差の基準

MCNP で算出する線量値の相対誤差(R.E.)は、0.1 未満(0.06 未満を推奨)になるようヒストリー数やインポートンス値或いはウェイト値を調整する。

全実行ケース且つ 0.5mfp~80mfp の全てのセルに対して、図 2 に例示する相対誤差マップを作成し、全ての実効線量計算結果が基準 0.1 以下であることを確認した。

```
R. E. MAP

Water

mfp check

R. E. map

O: R. E. <=0.06
o: R. E. <=0.10
X: R. E. > 0.1
x: R. E. = 0.0

縦軸: エネルギー
横軸: mfp

R. E. map only E(AP)

Gamma          0.5mfp~80mfp の各位置の状況を 1 文字 (0oXx) で表示 (表示の意味は上を参照)

001 1.00000E-02 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
002 1.50000E-02 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
... (略)

Neutron

... (略)

032 1.40000E+01 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
033 1.60000E+01 00000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000000
```

図 2 相対誤差マップ

3.11 分散低減法について

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

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

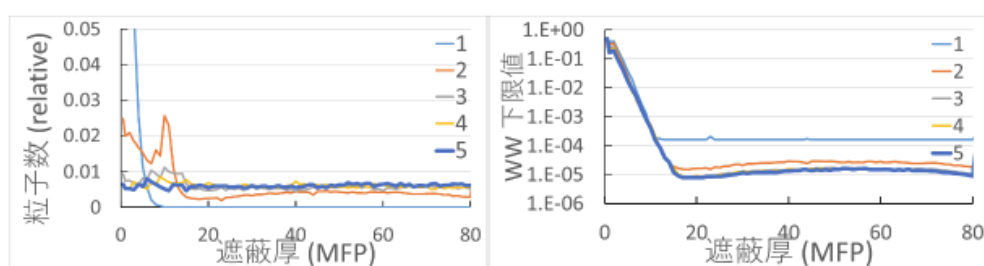


図3 チューニングパラメータによる RE の傾向の一例

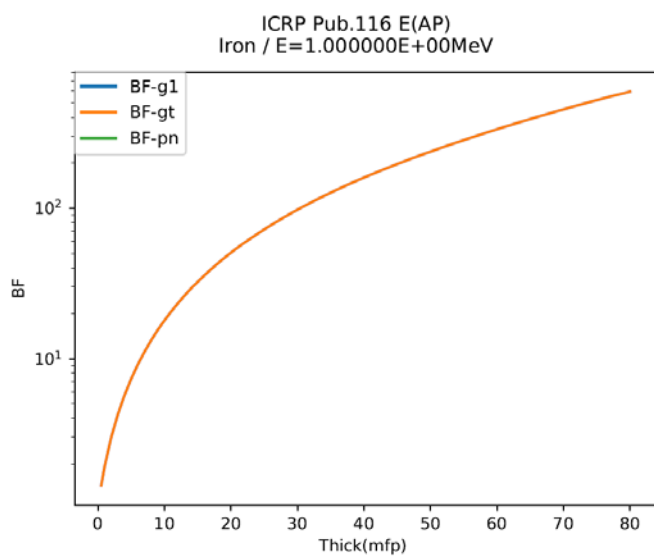
3.12 ビルドアップ係数の計算結果のまとめ

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

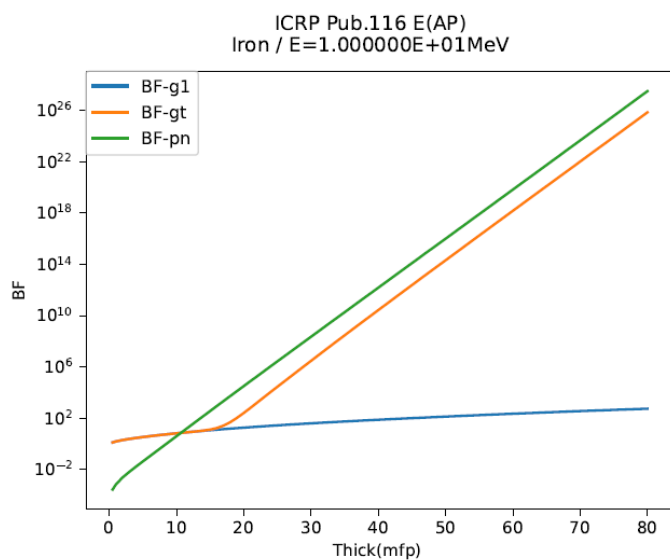
また、遮蔽計算コードで読み込むために、ビルドアップ係数データを設計したテーブル形式で出力する。テーブル形式は付録II「遮蔽線量計算用データベースのテーブル設計」に示したとおりである。ビルドアップ係数データのテーブル例を図5に示す。

表3 ビルドアップ係数データ算出時に使用する線量計算ケース

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



(1) γ 線エネルギー : 1.0MeV



(2) γ 線エネルギー : 10MeV

図4 鉄に対する γ 線の実効線量ビルドアップ係数

```

PKG2022 Build Up File

ICRP Pub. 116 E(AP)

BF Released Officially in 2022, calculated with MCNP 6.2+LA150, ENDF/B7, and IAEA PD 2019

lib-type="buildup-file"

name="Carbon"

density=2.200E+00 g/cm3

EGrp=37

1.000000E-02

```

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

図 5 ビルドアップ係数データのテーブル例

4. 光核反応計算の課題と対応策

4.1 光中性子の発生量が少ないときの2次 γ 線の統計精度

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

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

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

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

4.2 モデル計算使用時の計算速度低下

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

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

4.3 「光核しきいエネルギー < 捕獲 γ エネルギー」となる材料

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

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

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

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

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

参考文献

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

付録 II

遮蔽計算用データベースのテーブル設計

目 次

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

1. データベースファイル

データベースのテーブル設計を行う、基本データファイルを下記に示す。

1)減衰係数ファイル

atten_xcom.dat 基本固定

2)ビルドアップ係数ファイル(全線量/直接線)

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

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

・・・(※計算するデータセット分の整備が必要)

bf_icrp74_air_kerma.dat 空気カーマ

3)換算係数ファイル

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

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

conv_icrp74_air_kerma.dat 空気カーマ(ICRP74)

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

4)ライブラリ設定ファイル(lib_setting.dat)

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

・ICRP Pub.116 E(AP)実効線量(デフォルト)

bf_icrp_116_eap.dat

conv_icrp_116_eap.dat

・・・

5)線源データ

6)物質組成ライブラリ

標準物質組成ライブラリ(lib_material.dat)

2.減衰係数データ

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

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

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

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

```

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

```

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

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

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

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

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

エネルギー、減衰係数の右にK-X線等のコメントを追記する。

3. ビルドアップ係数データ

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

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

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

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

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

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

作成したデータの並びについては、基本的にエネルギーに関して昇順とする。

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

¹ 現状で GP 法フィッティング形式への対応は考慮しない。

```

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

```

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

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

4.線量換算係数データ

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

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

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

5.係数データファイル構成管理

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

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

```

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

```

6.線源データ

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

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

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

7.物質組成ライブラリ

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

```

標準物質組成ライブラリ(lib_material.dat)
material library [ standard material ]/ [ user material ]<タイトル
matNum=10
Iron
7.8 1      !密度 ρ(g/cm3) (規格化)
  26 7.8 !元素 NUCLID×1000 [SPS] rho(g/cm3)又は重量割合(wt%)
<BLANK>
lead
11.0 1
  82 11.0
<BLANK>
Polyethylene
0.92 2
  1 1.3223E-01
  6 7.8777E-01
<BLANK>

```

...

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

8. スラブ遮蔽の斜め透過線量補正データ

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

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

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

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

```

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

slant_correction_coefficient:
-
material: Iron

```

```

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

```

9.エネルギー範囲まとめ

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

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

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

10.計算する出力線量について

計算する出力線量は下記のとおり。

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

11.有効桁数について

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

12.XCOM データにおける K-X 線エネルギーの扱いについて

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

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

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

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

例えば鉄の場合、X線エネルギーは7112.0eVだが、

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

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

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

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

付録 III

遮蔽計算用データの妥当性確認要領

目次

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

1. 序

本付録は、本事業で作成した成果物の妥当性確認を目的としてその要領を示した。

2. 成果物並びに確認概要

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

データ毎の確認の概要を表 2-1～表 2-3 に示す。

表 2-1(1/2) 遮蔽計算コード PKG2022 で使用するデータ

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

表 2-1(2/2) 遮蔽計算コード PKG2022 で使用するデータ

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

表 2-2(1/2) モンテカルロ計算コード入出力データ

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

表 2-2(2/2) モンテカルロ計算コード入出力データ

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

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

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

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

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

3. 確認作業詳細

確認作業においては、下記内容を明記の上、確認作業記録とする。

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

3.1 ビルドアップ係数計算に用いる組成

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

入力：文献値

出力：組成表

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

入力：組成表

出力：XCOM インプット

3.2 減衰係数ファイル(atten_xcom.dat)

>XCOM の入力値が正しいことを確認する。

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

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

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

入力：XCOM アウトプット

出力：減衰係数ファイル (atten_xcom.dat)

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

Iron、Lead、Tungsten について、比較を実施する。

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

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

3.3 ビルドアップ係数ファイル(bf_[BFDATA].dat)

MCNP コード入出力についての確認は別項で実施する。

>代表ケースについて下記の作図を行い、傾向分析等を実施する。

>1)横軸 mfp、縦軸 BF で複数のエネルギーを図示

>2)横軸 mfp、縦軸 BF で複数のエネルギーについて線量種別に図示

>3)横軸エネルギー、縦軸 BF で複数の mfp を図示

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

入力：ビルドアップ係数ファイル (BF_[BF].dat)

出力：上記図

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

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

3.4 換算係数ファイル(conv_[BF].dat)

>文献値のデータ入力を確認する。

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

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

>入力しており、文献値と比較を行う。

出典となる文献と換算係数ファイルを印刷して比較し、レ点チェックを行う。

入力：文献値

出力：換算係数ファイル (conv_[BF].dat)

>全線量換算係数を同じ図に描画し、換算係数値間で想定されない

>大きな差異が出ていないかを確認する。

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

入力：換算係数ファイル (conv_[BF].dat)

出力：横軸エネルギー、縦軸換算係数の図

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

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

3.5 ライブラリ設定ファイル(lib_setting.dat)

>全てのデータが適切に設定されていることを確認する。

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

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

3.6 物質組成ライブラリ(lib_material.dat)

>指定したデータが適切に設定されていることを確認する。

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

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

入力：組成表

出力：物質組成ライブラリ(lib_material.dat)

3.7 MCNP コード入力データ (ベースインプット)

>印刷して根拠と比較し、レ点チェックを行う。

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

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

3.8 入力自動作成シェル(01makeinp_mixM.sh)

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

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

該当箇所：[Material],[En],[Rho],[Mum]

3.9 surface 作成(somake.exe)

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

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

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

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

3.10 MCNP コード出力データ (アウトプット)

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

員数確認データ：MCNP_BF_[Material]_e[En]o

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

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

3.11 中性子カットによるアウトプットの整理

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

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

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

Iron、Lead について、確認する。

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

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

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

>できれば 0.06 以下とする。

>なお、当該抽出処理は中性子カットオフの有無に関係なく行う。

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

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

入力：MCNP アウトプット

出力：線量抽出ファイル

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

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

>なお、当該作成処理は中性子カットオフの有無に関係なく行う。

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

入力：線量抽出ファイル、換算係数ファイル

出力：材質別、線量別のビルドアップ係数処理ファイル

3.14 ビルドアップ係数結合シェル(07runallbf.sh)

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

>データを比較し、適切に処理されていることを確認する。

>テーブル設計仕様通りのフォーマットであることを確認する。

>なお、当該作成処理は中性子カットの有無に関係なく行う。

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

入力：材質別、線量別のビルドアップ係数処理ファイル

出力：線量別のビルドアップ係数処理ファイル

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

>中性子カットの有無別に作成された線量毎のビルドアップ係数から適切に

>ビルドアップ係数ファイルが作成されていることを画面上で確認する。

ビルドアップ係数として採用する中性子カットの有無は下表の通りである。

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

*光核反応オプションは常に設定

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

入力：線量別のビルドアップ係数処理ファイル（光核反応の有無別）

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

3.16 MCNP 計算 BF 処理記録

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

3.17 ビルドアップ係数について文献との比較による妥当性確認

1.序

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

2.比較対象元についての記述

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

従来コードと最新コードの比較表

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

3.比較データと比較結果

3.1 比較データ

比較する具体的なケースは下記とする。

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

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

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

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

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

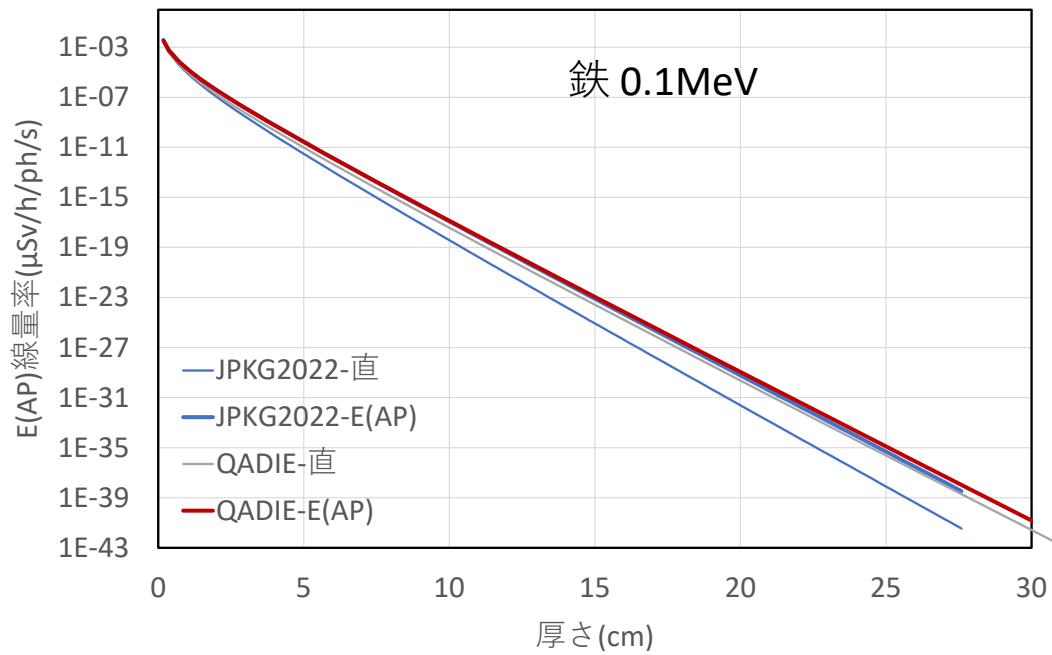
3.2 比較結果の記述

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

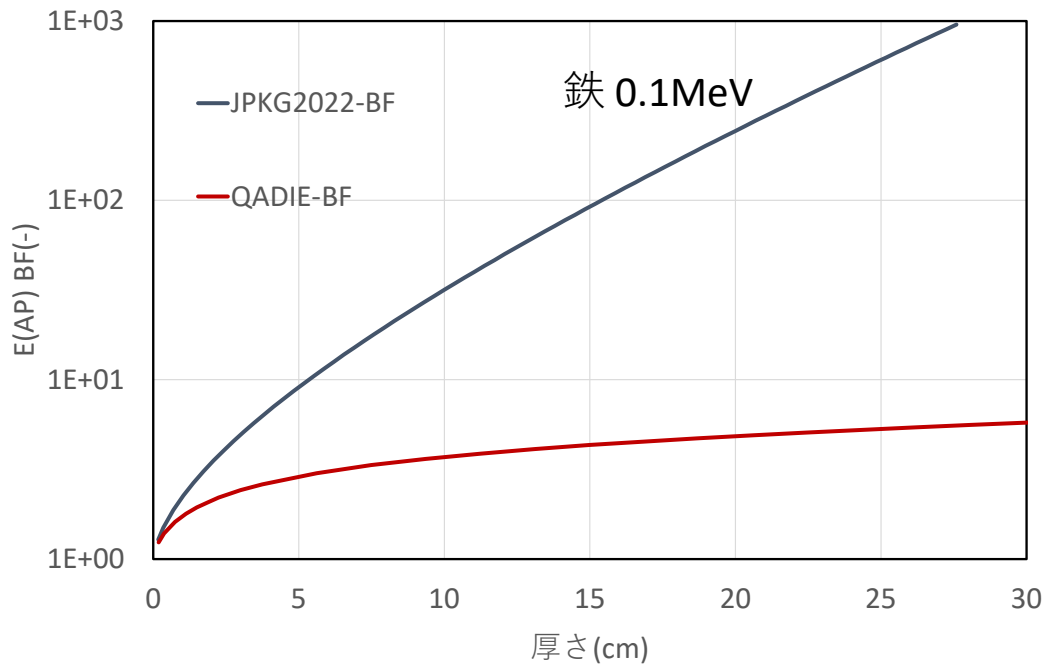
鉄の 80mfp(PKG2022 での厚みで比較)で比較した結果を表 3.2-1 に示す。上で記載した結果が表れているが、鉄では、低エネルギーで 0.3 倍、高エネルギーでは 10%内で一致している。

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

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

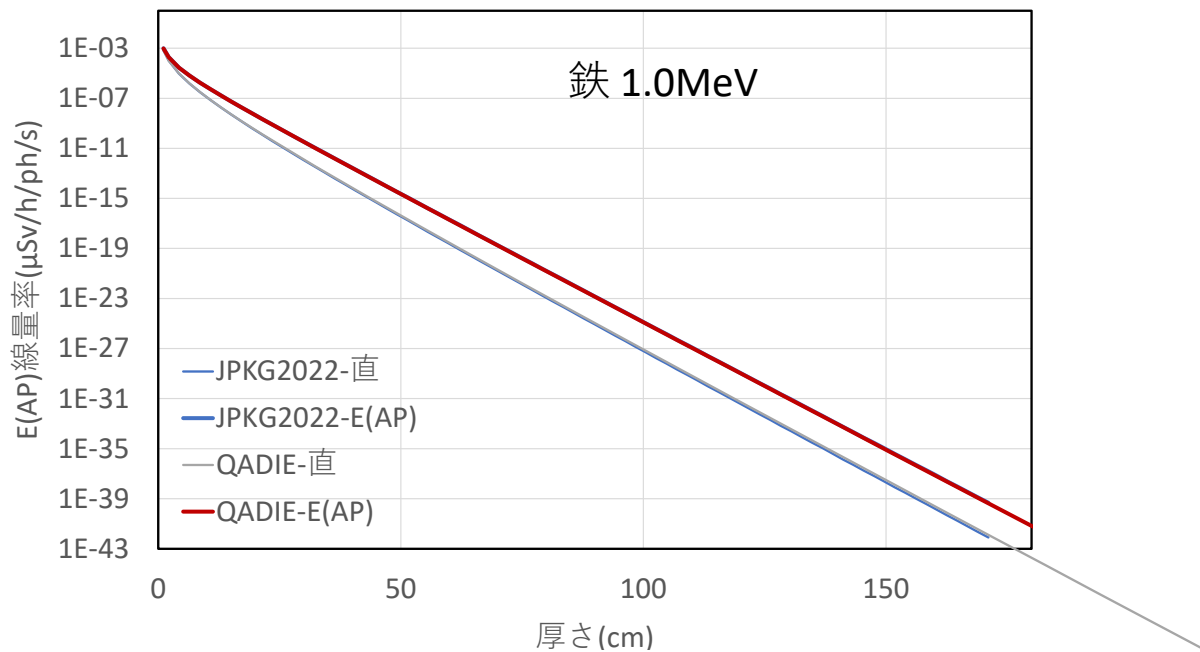


(1)1 次ガンマ線線量率比較

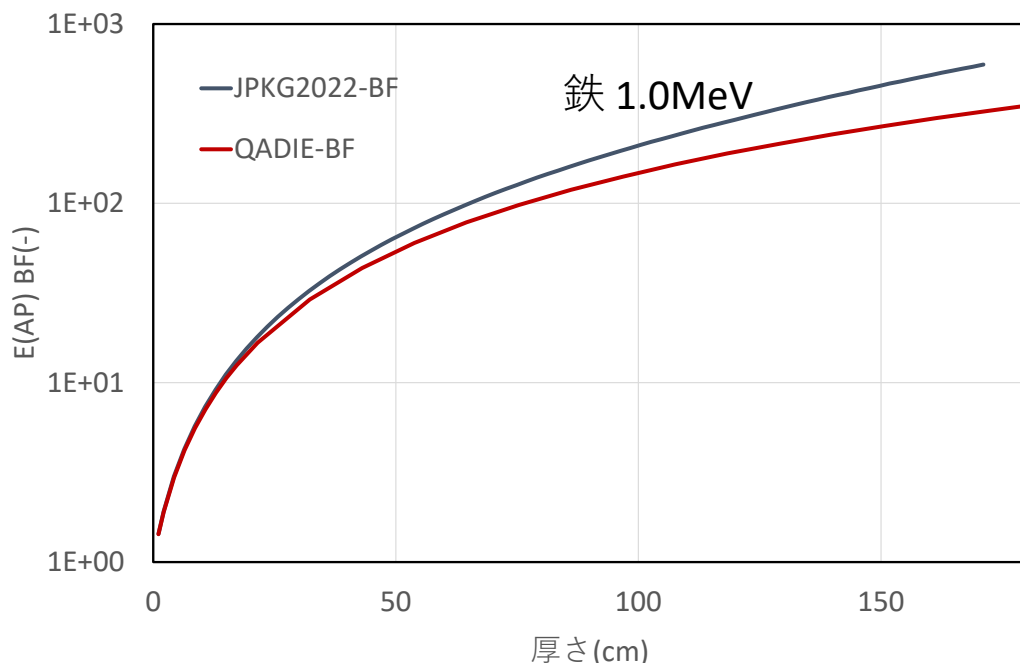


(2)1 次ガンマ線ビルドアップ係数比較

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

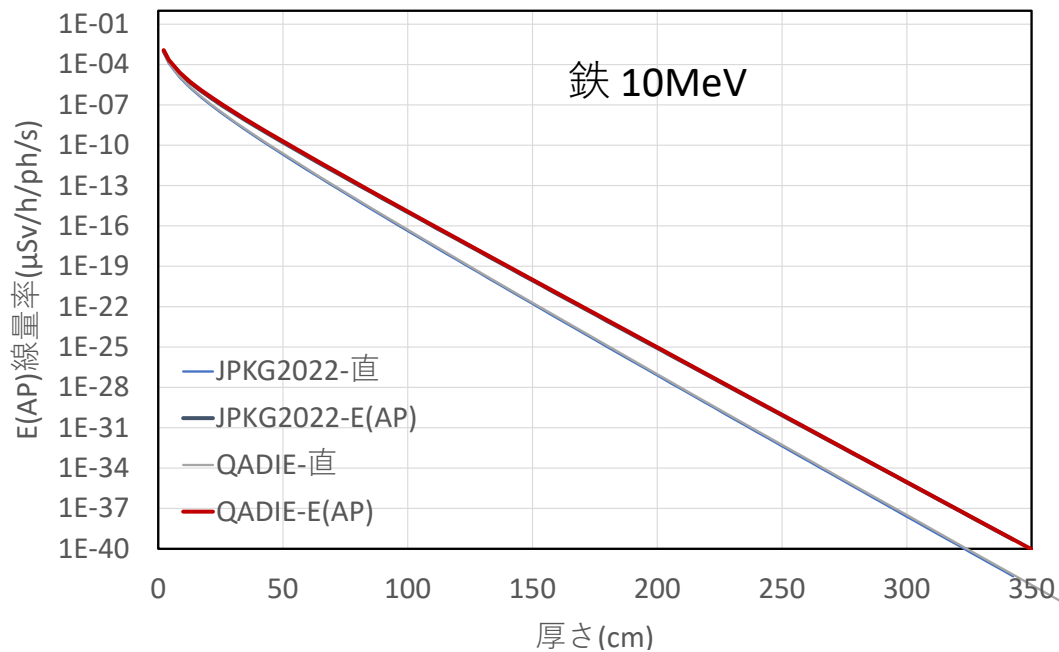


(1) 1次ガンマ線線量率比較

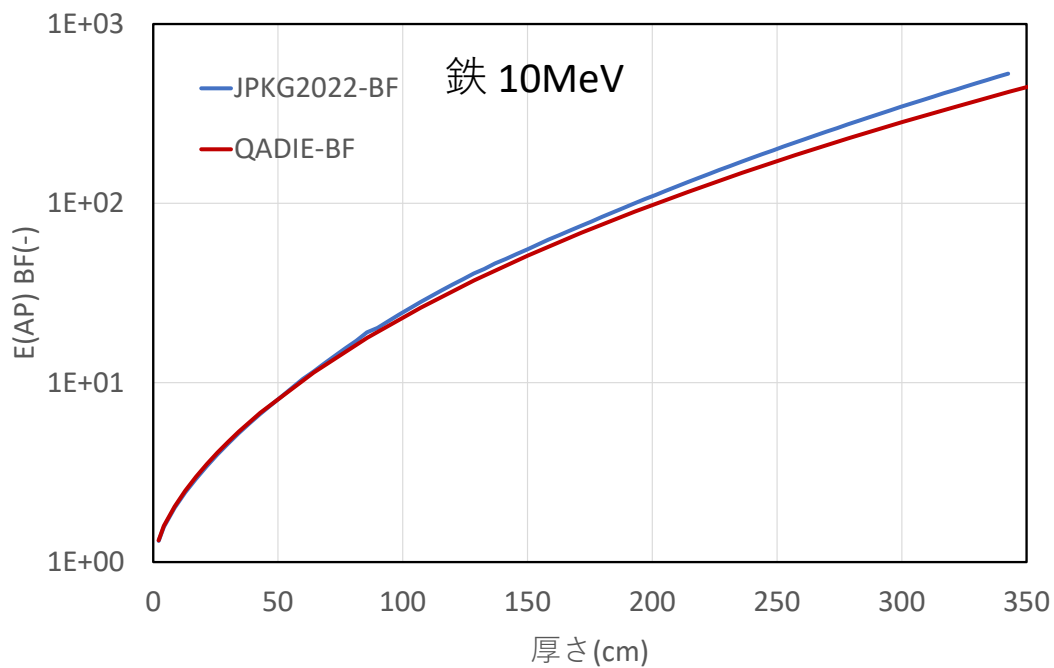


(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

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

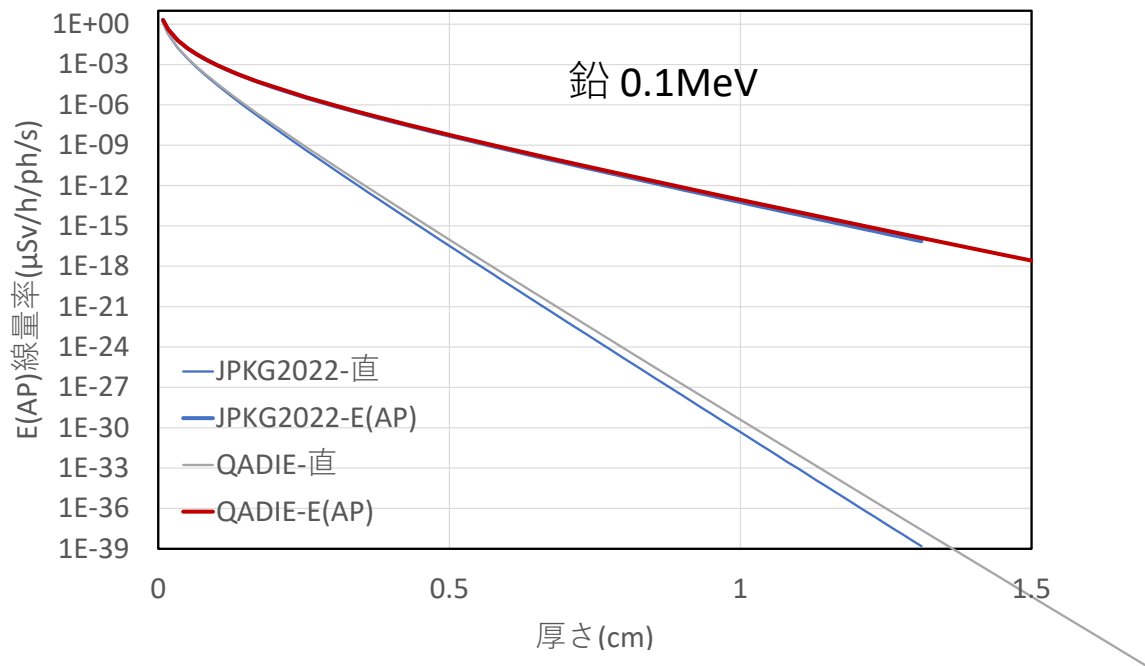


(1) 1次ガンマ線線量率比較

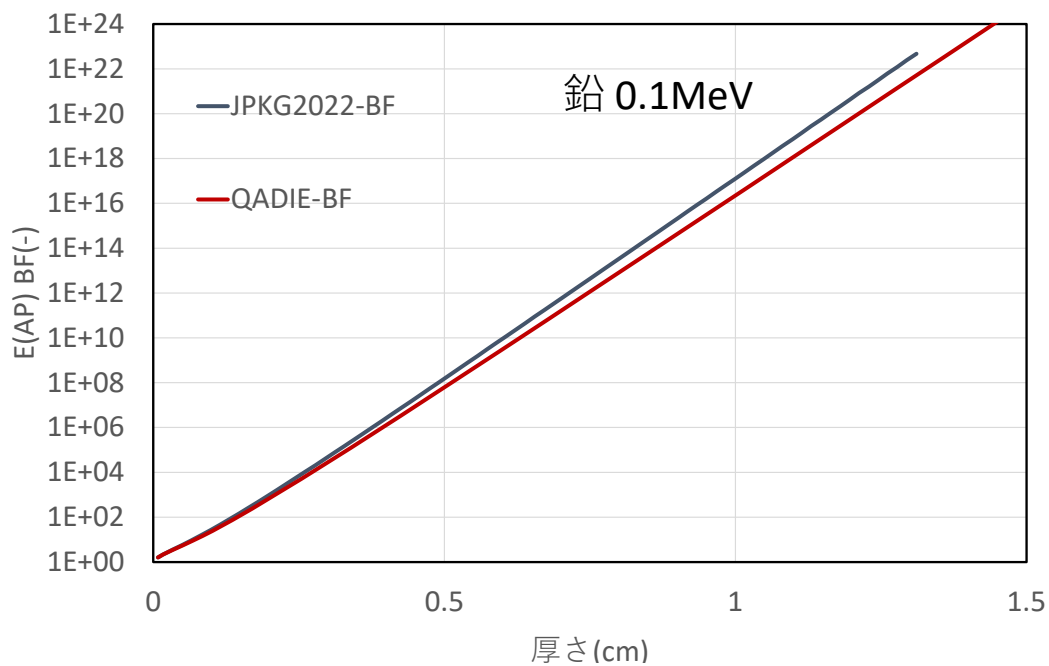


(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

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

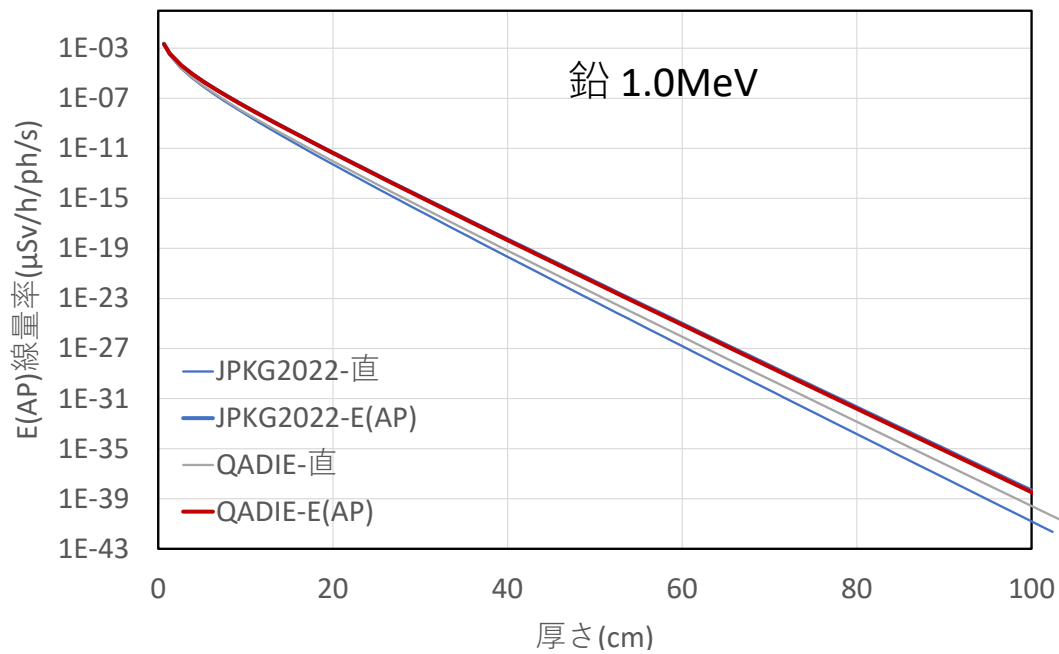


(1) 1次ガンマ線線量率比較

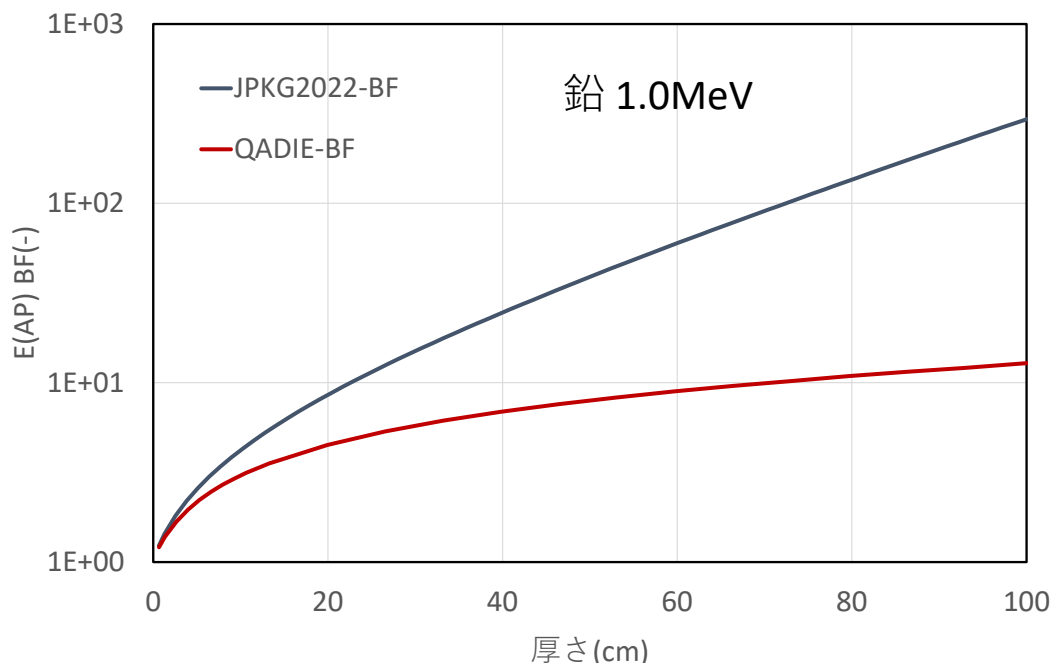


(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

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

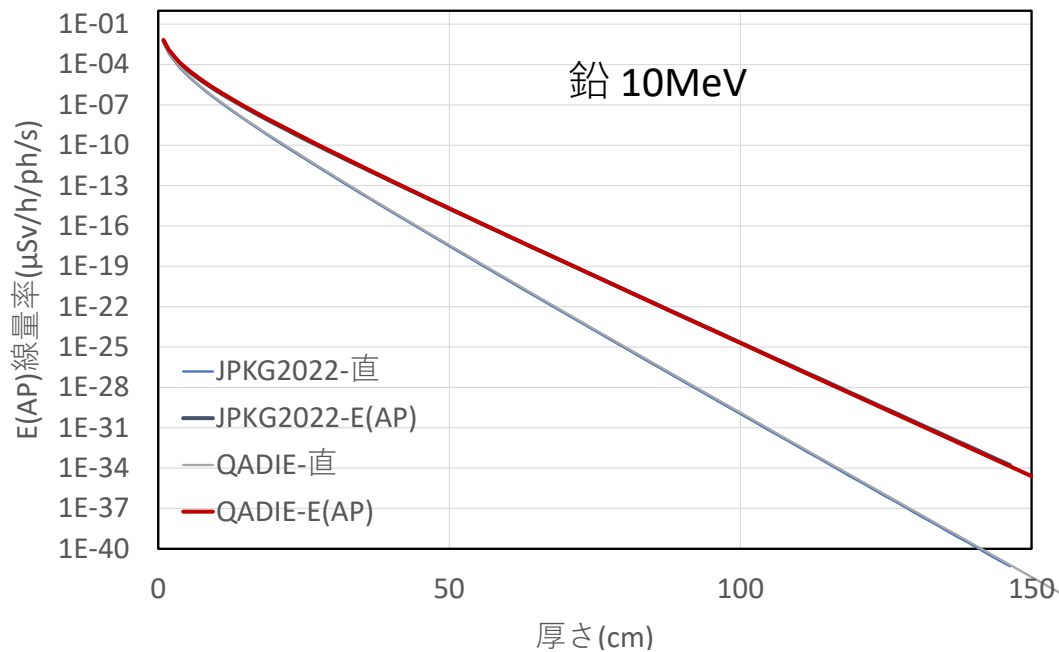


(1) 1次ガンマ線線量率比較

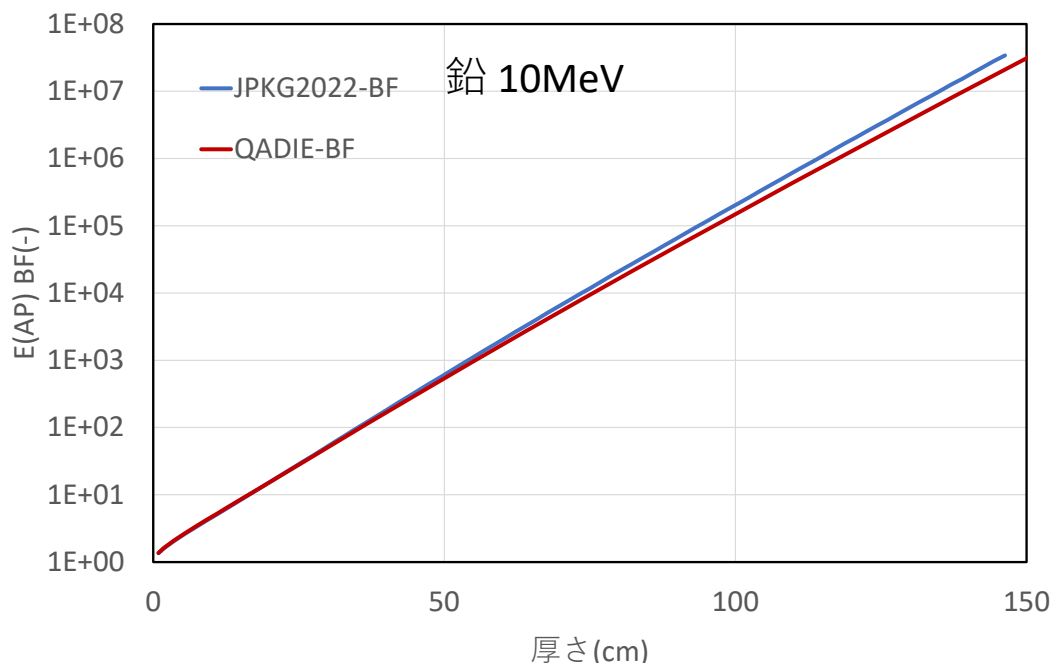


(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

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



(1) 1次ガンマ線線量率比較



(2) 1次ガンマ線ビルドアップ係数比較

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

表 3.2-1 鉄遮蔽体における PKG2022 と QAD-IE の比較

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

表 3.2-2 鉛遮蔽体における PKG2022 と QAD-IE の比較

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

4. 相対比分析

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

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

4.1 線量計算で使用している値の比

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

表 4.1-1 鉄遮蔽体における PKG2022 と QAD-IE の比較

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

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

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

表 4.1-2 鉛遮蔽体における PKG2022 と QAD-IE の比較

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

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

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

4.2 減衰係数のエネルギー変化と相対比

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

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

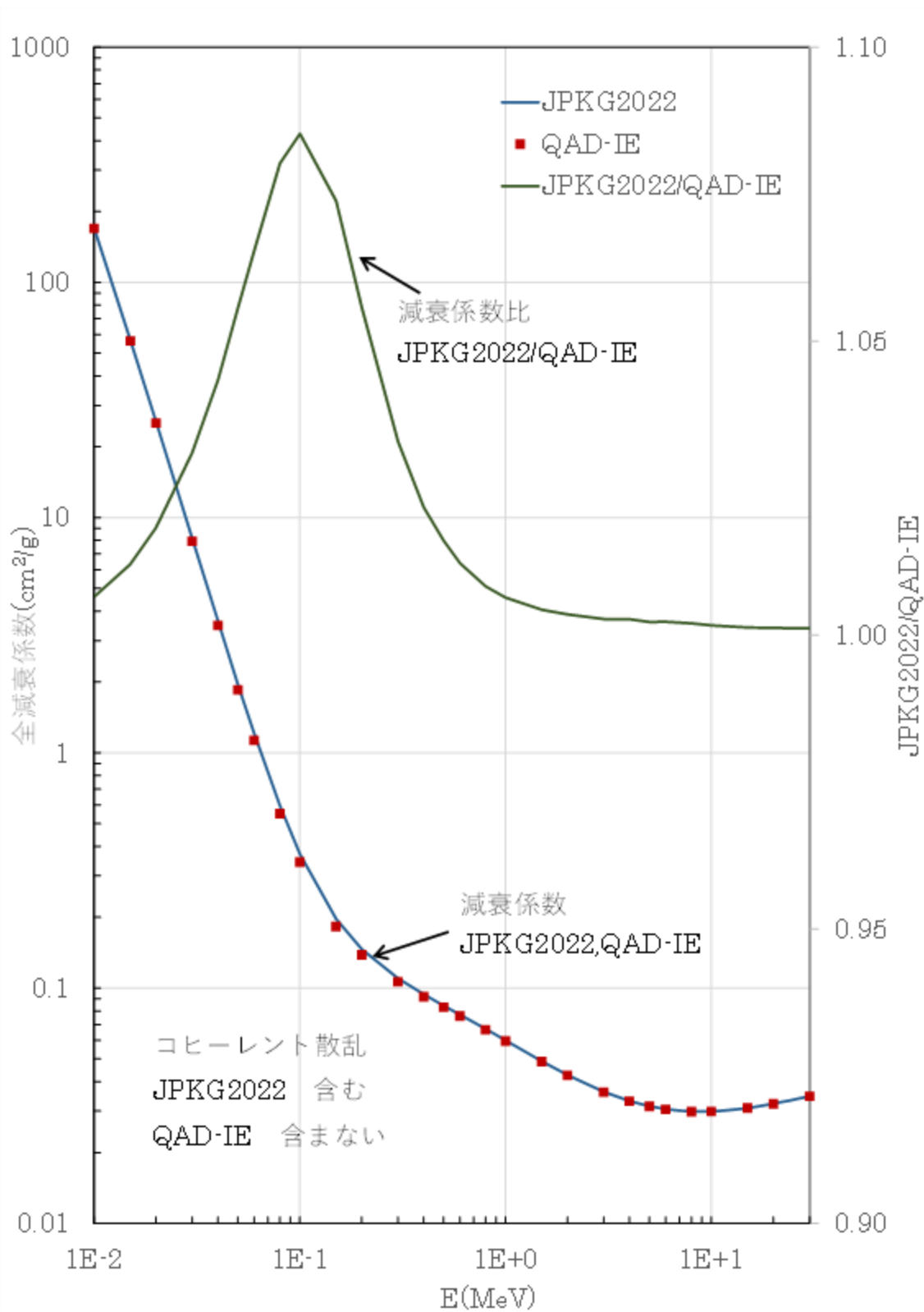


図 4.2-1 鉄減衰係数のエネルギー変化の比較

(比は、両者に数値があるデータの比を結び、Y軸は右側に示している)

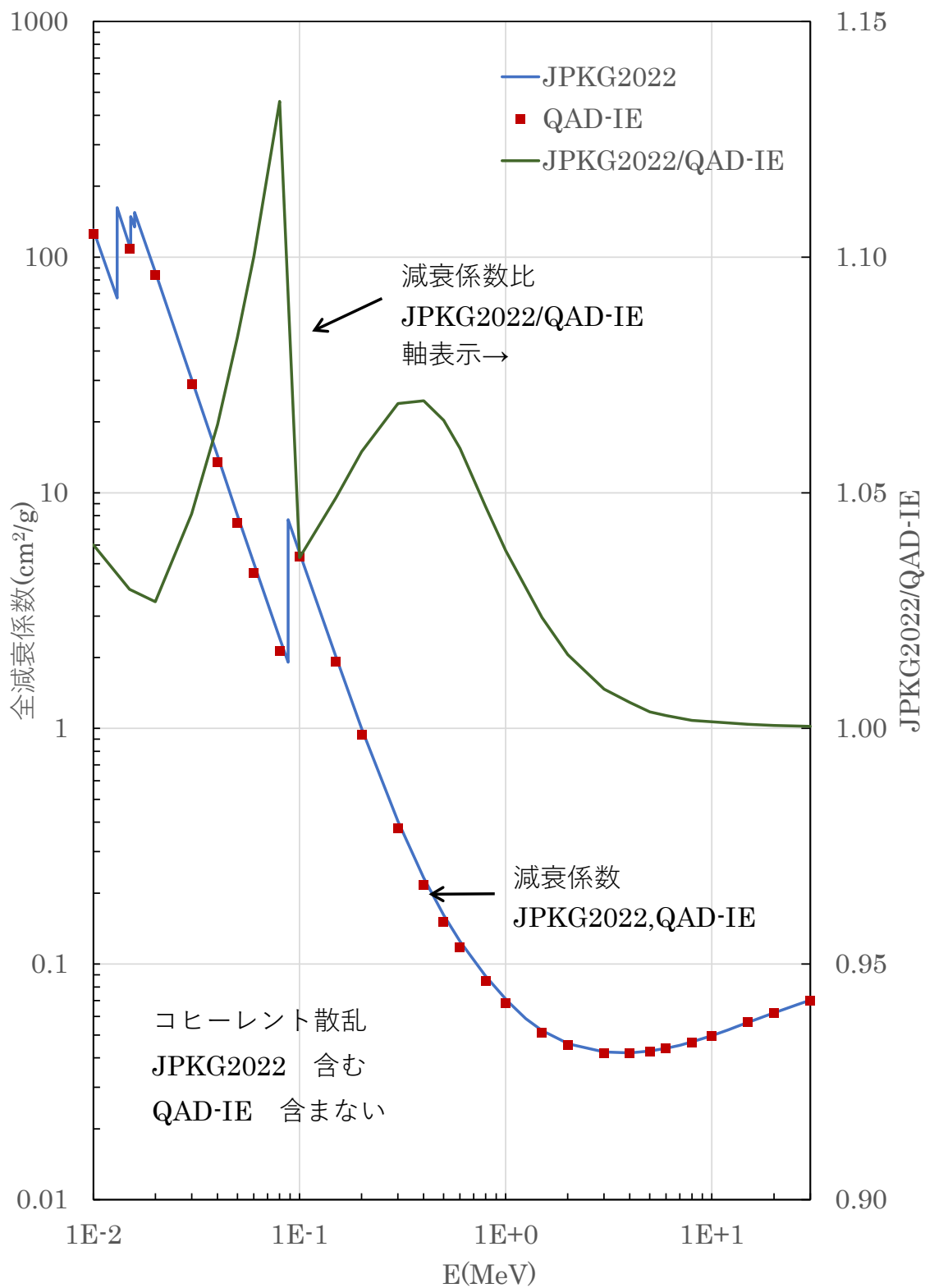


図 4.2-2 鉛減衰係数のエネルギー変化の比較

(比は、両者に数値があるデータの比を結び、Y 軸は右側に示している)

4.3 線量率の遮蔽厚さに対する相対比

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

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

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

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

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

表 4.3-1 鉄遮蔽体の計算結果

(1)鉄 0.1MeV

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

80mfp予測

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

(2)鉄 1MeV

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

80mfp予測

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

(3)鉄 10MeV

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

80mfp予測

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

単位： $(\mu\text{Sv/h})/(\text{ph/s})$

表 4.3-2 鉛遮蔽体の計算結果

(4)鉛 0.1MeV

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

80mfp予測

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

(5)鉛 1MeV

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

80mfp予測

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

(6)鉛 10MeV

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

80mfp予測

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

単位： $(\mu\text{Sv/h})/(\text{ph/s})$

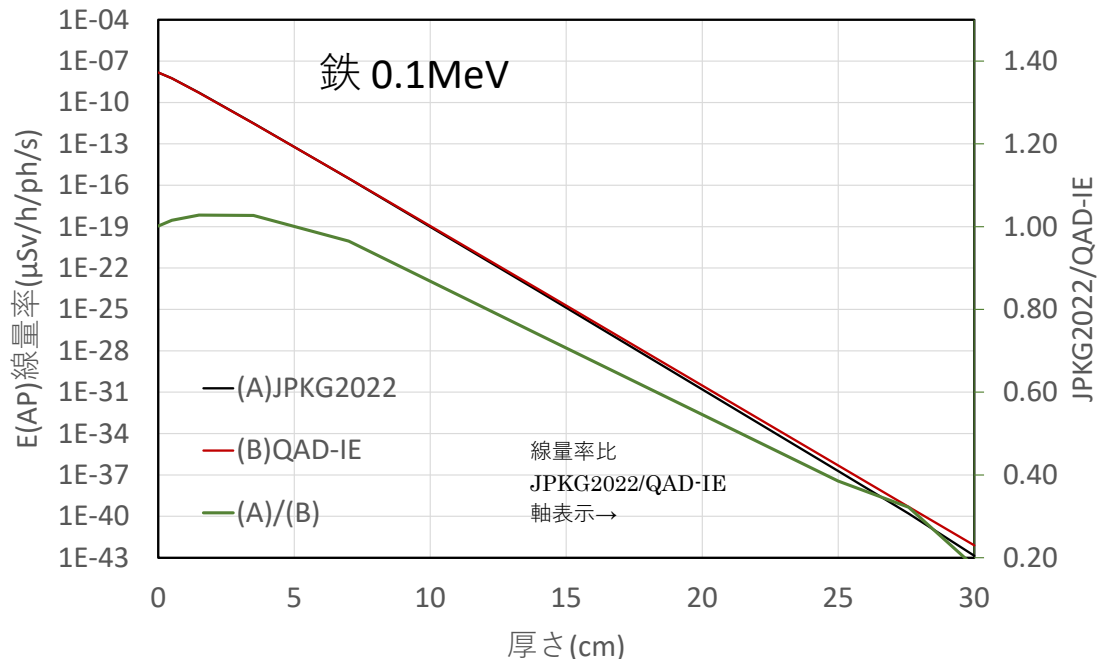


図 4.3-1 鉄 0.1MeV 遮蔽体中の計算結果

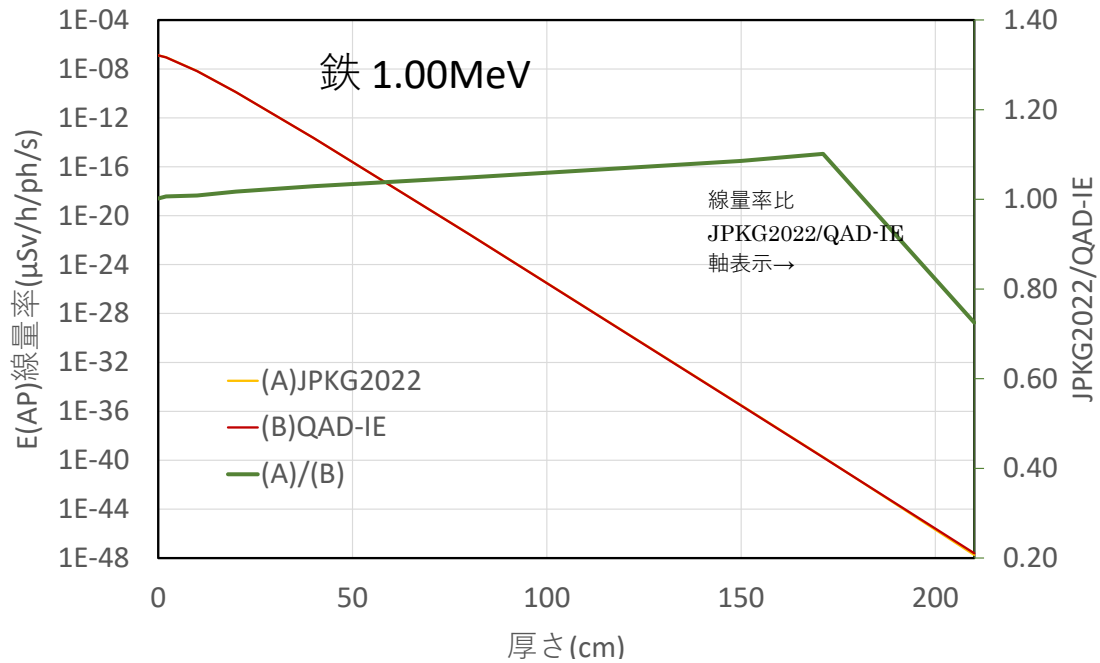


図 4.3-2 鉄 1MeV 遮蔽体中の計算結果

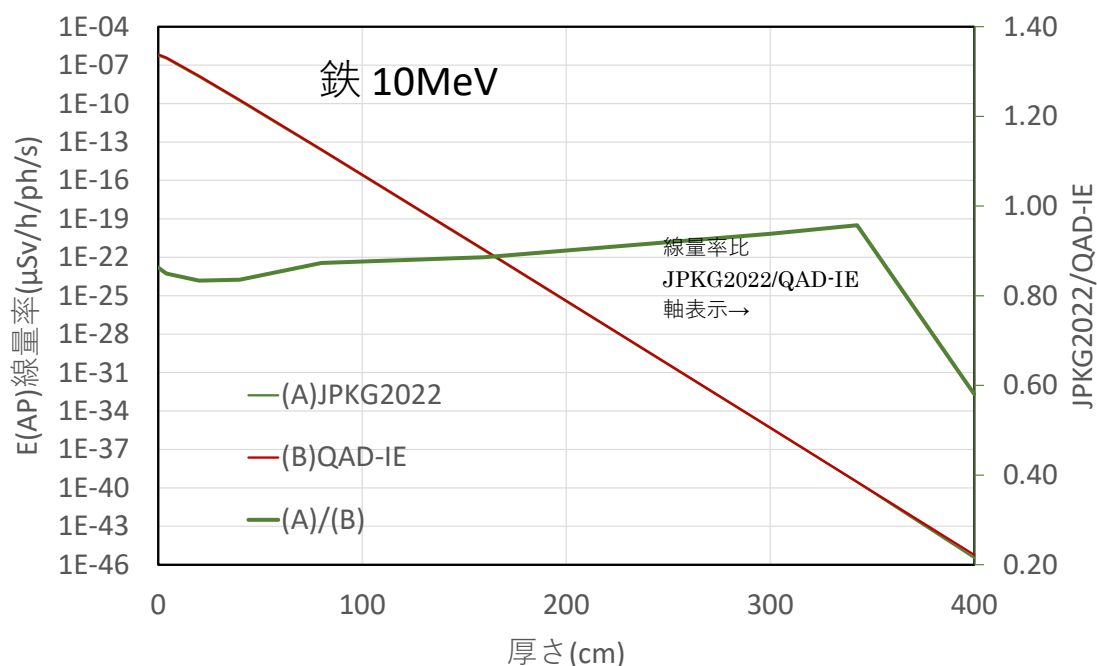


図 4.3-3 鉄 10MeV 遮蔽体中の計算結果

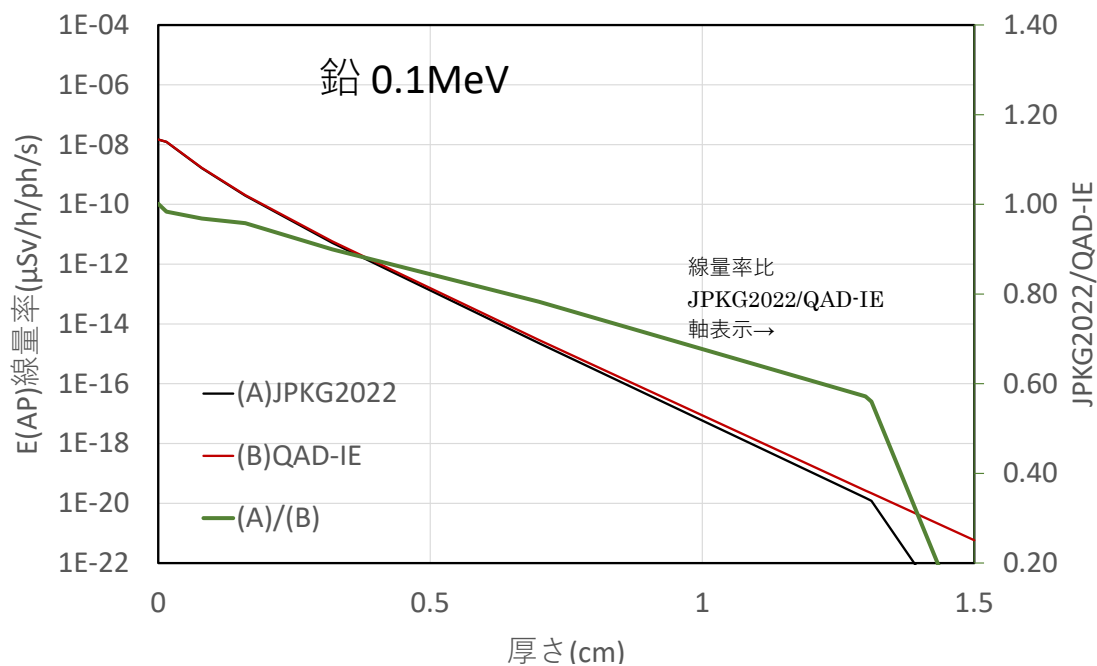


図 4.3-4 鉛 0.1MeV 遮蔽体中の計算結果

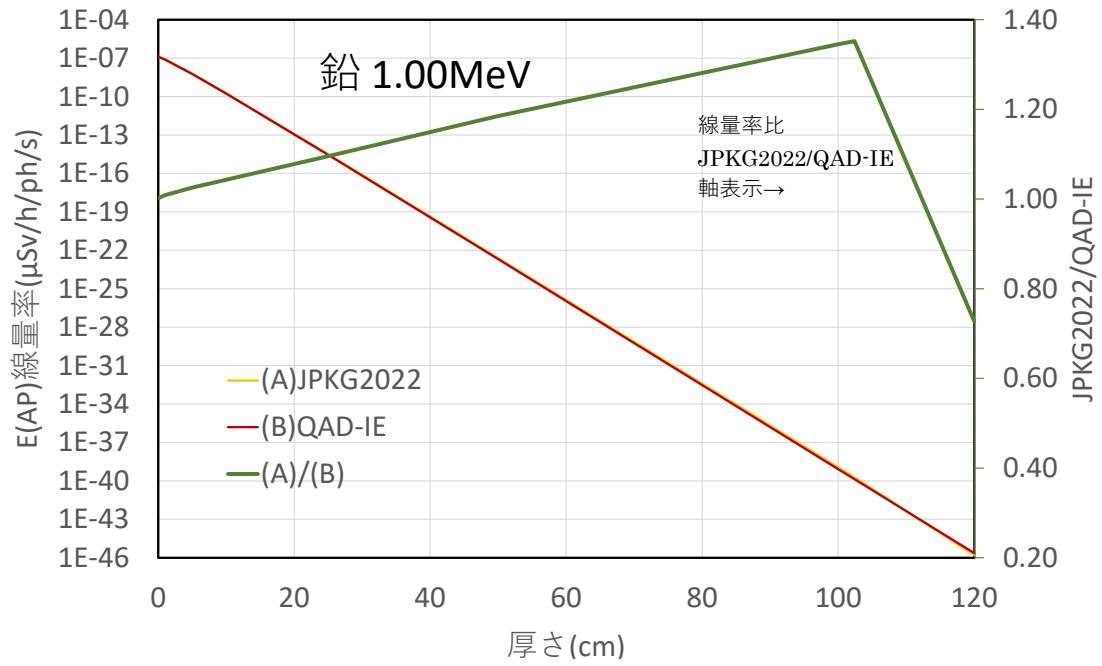


図 4.3-5 鉛 10MeV 遮蔽体中の計算結果

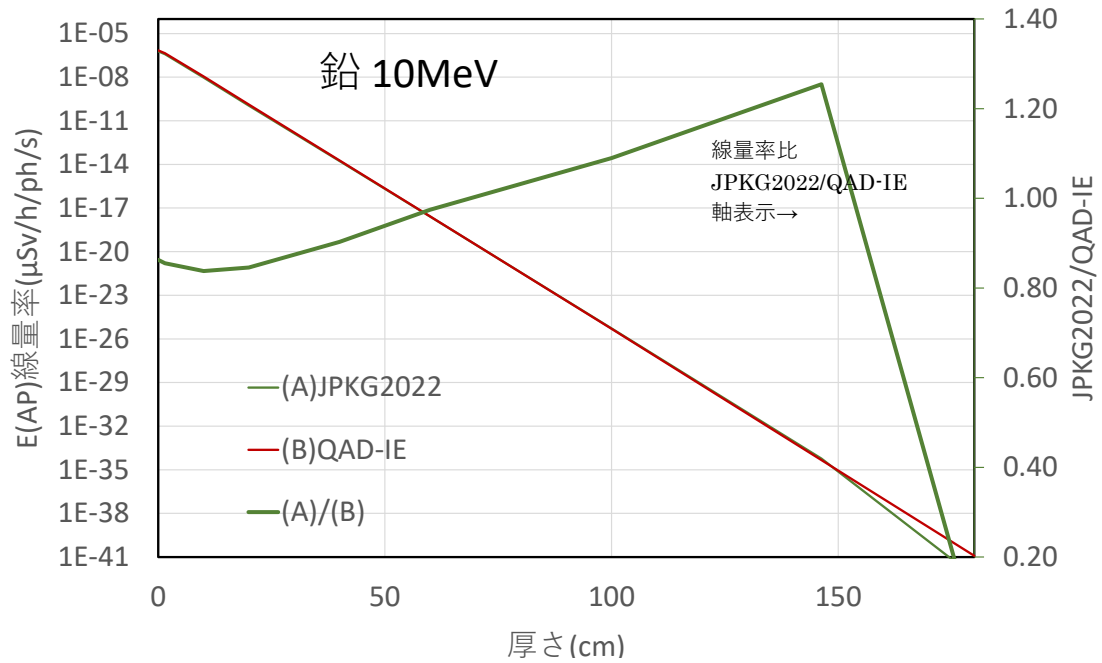


図 4.3-6 鉛 1MeV 遮蔽体中の計算結果

添付1 QAD-IE データと原子力学会標準(AESJ-SC)の比較

AESJ-SC

(1)鉄

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

QAD-IE

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

(2)鉛

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

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

付録 IV

遮蔽線量計算コードの開発、及び妥当性確認の詳細

目次

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

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

図目次

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

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

表目次

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

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

1. はじめに

1.1 概要

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

1.2 開発実施項目、及び実施内容

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

表 1-1 今年度実施した γ 線遮蔽計算コード開発項目 (CUI 操作)

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

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

表 1-2 今年度実施した γ 線遮蔽計算コード開発項目 (GUI 操作)

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

2. 遮蔽計算コードに係る入出力サポートツールの作成

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

2.1 計算結果可視化機能の作成①

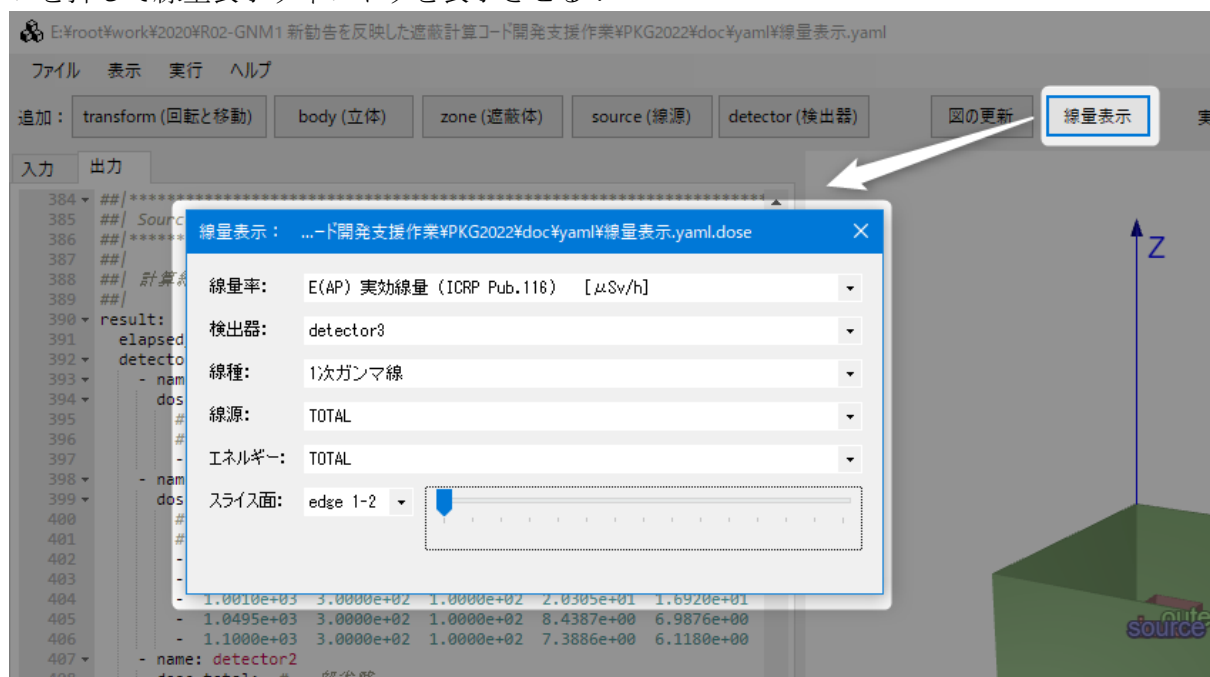
2.1.1 仕様検討

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

2.1.2 作業内容

(1) GUI 上での可視化処理の実装

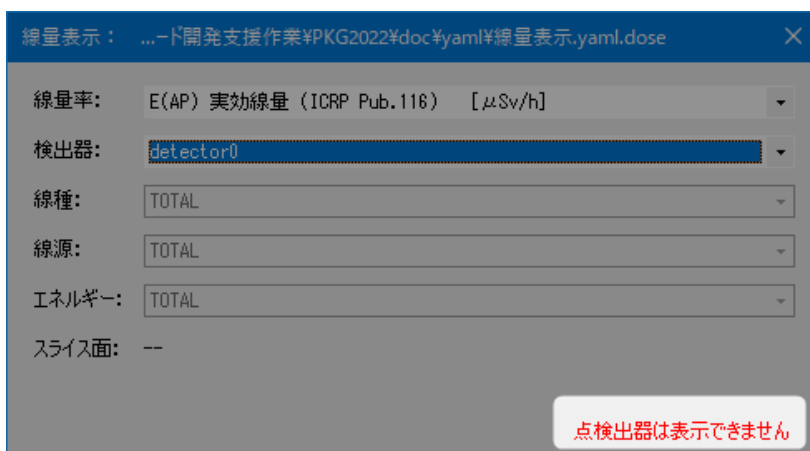
計算結果の可視化処理を実装した。操作の流れは以下ようになる。まず、「線量表示」ボタンを押して線量表示ウィンドウを表示させる：



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

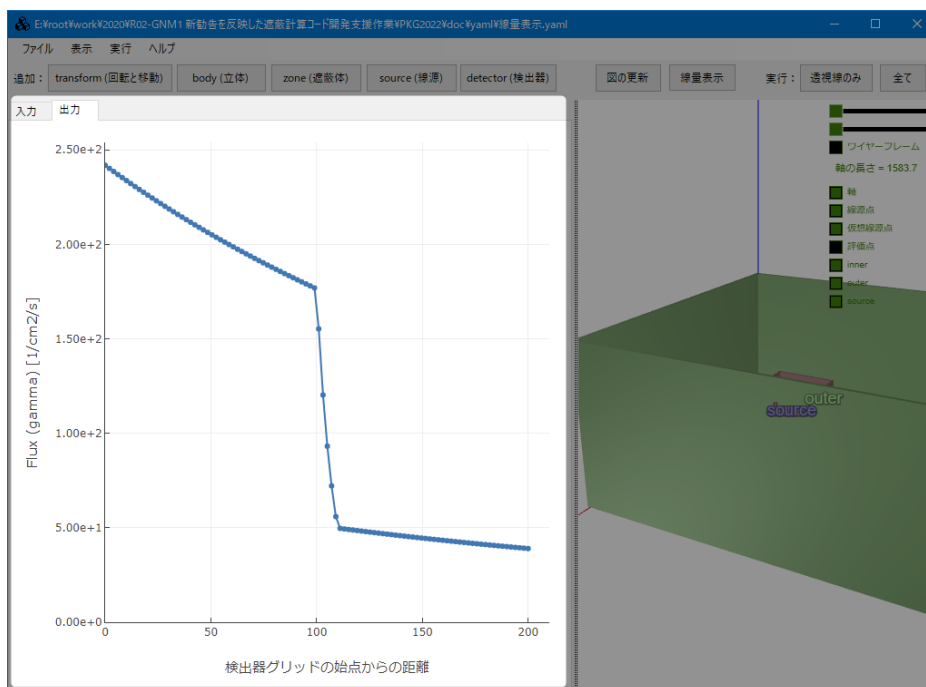
点検出器

点検出器は可視化できない。以下のようなエラーメッセージが表示される：



1次元検出器

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

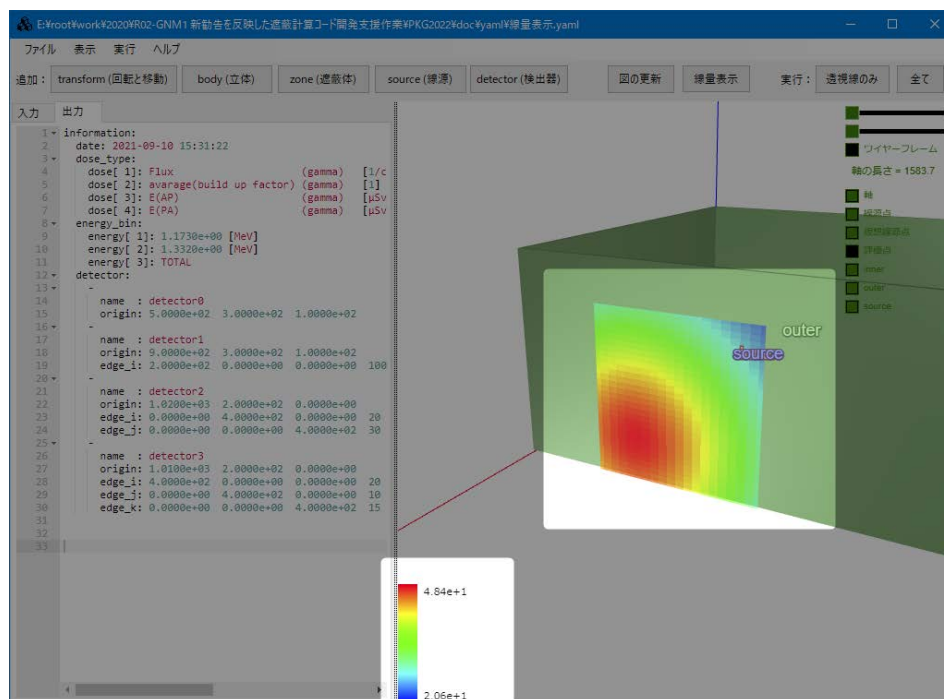


以下のグラフの操作が可能：

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

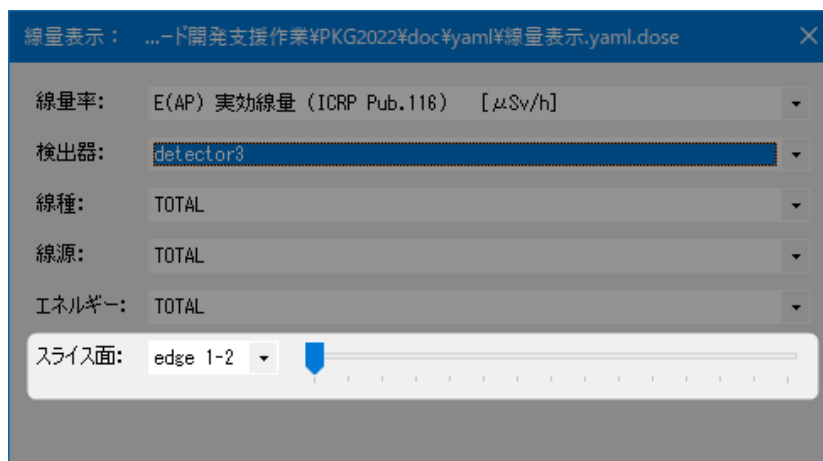
2次元、3次元検出器

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



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

3次元検出器の場合は、以下のようにスライス面を指定することができる：



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

(1) 可視化ファイルのフォーマット

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

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

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

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

後半のデータ部は、以下のようにデータが並ぶ：

```

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

```

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

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

2.2 カスタム材料作成ツール②

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

2.2.1 仕様検討

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

カスタム材料作成ツールのシステム構成

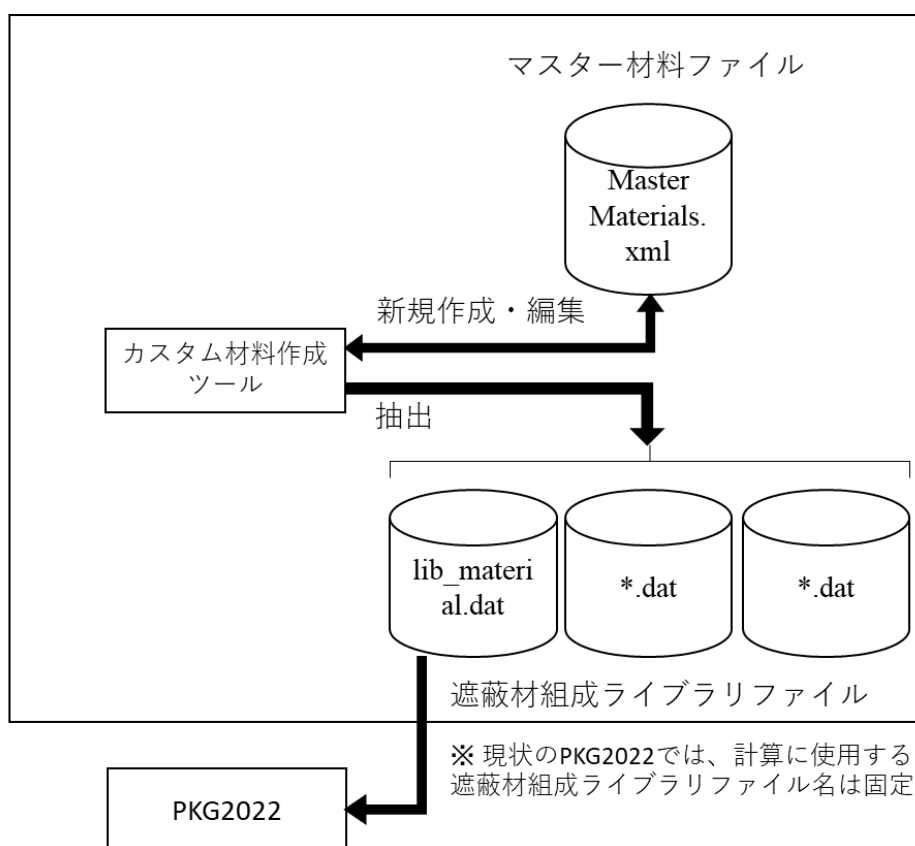


図 2-1 カスタム材料作成ツールのシステム構成と PKG2022 との関係

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

```

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

```

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

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

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

```

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

lead
11.0 1
82 11.0

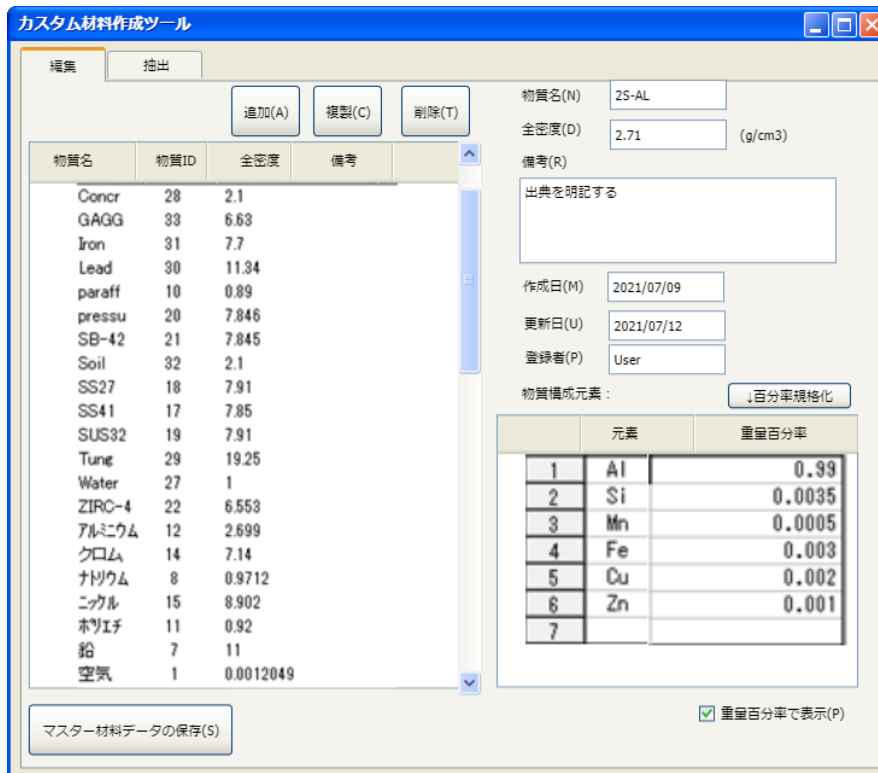
Polyethylene
0.92 2
1 1.3223E-01
6 7.8777E-01

```

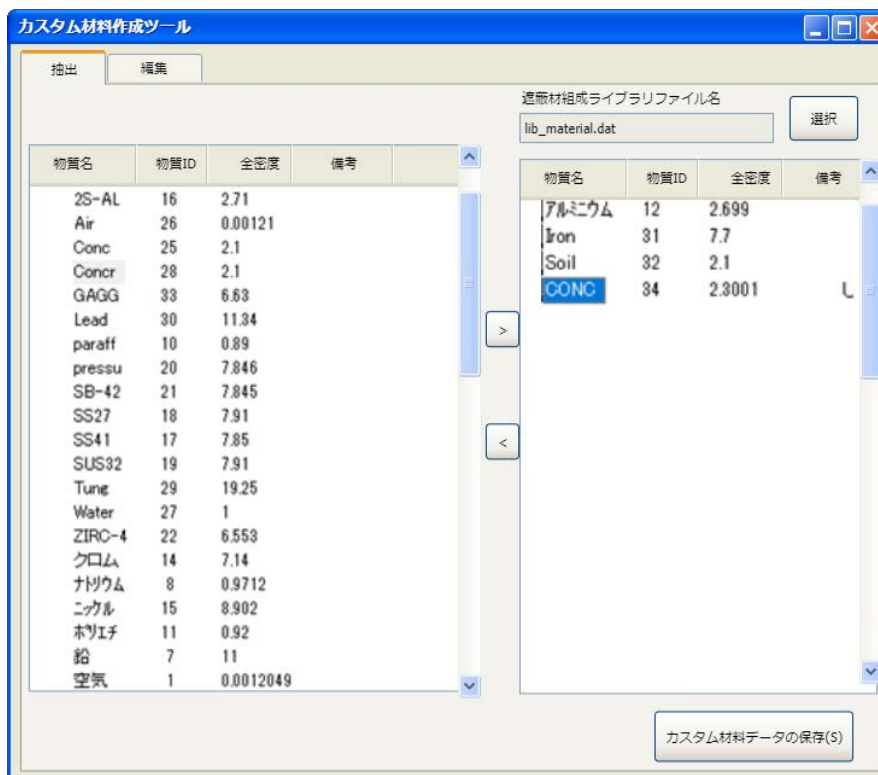
図 2-3 遮蔽材組成ライブラリファイル (lib_material.dat) のファイルフォーマット

2.2.2 追加設計

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



(a) 新規作成・編集画面



(b) 抽出画面

図 2-4 カスタム材料作成ツールの GUI 画面構成案

2.2.3 追加開発

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

(1) 編集タブ

カスタム材料作成ツールにおける編集タブの画面構成を図 2-5 に示す。

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

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

⑨ 部分密度あるいは重量百分率の規格化ボタン：

部分密度の場合は全密度で、重量百分率の場合は1で、規格化される。

⑩ 部分密度・重量百分率表示切替ボタン：

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

⑪ 登録ボタン：

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

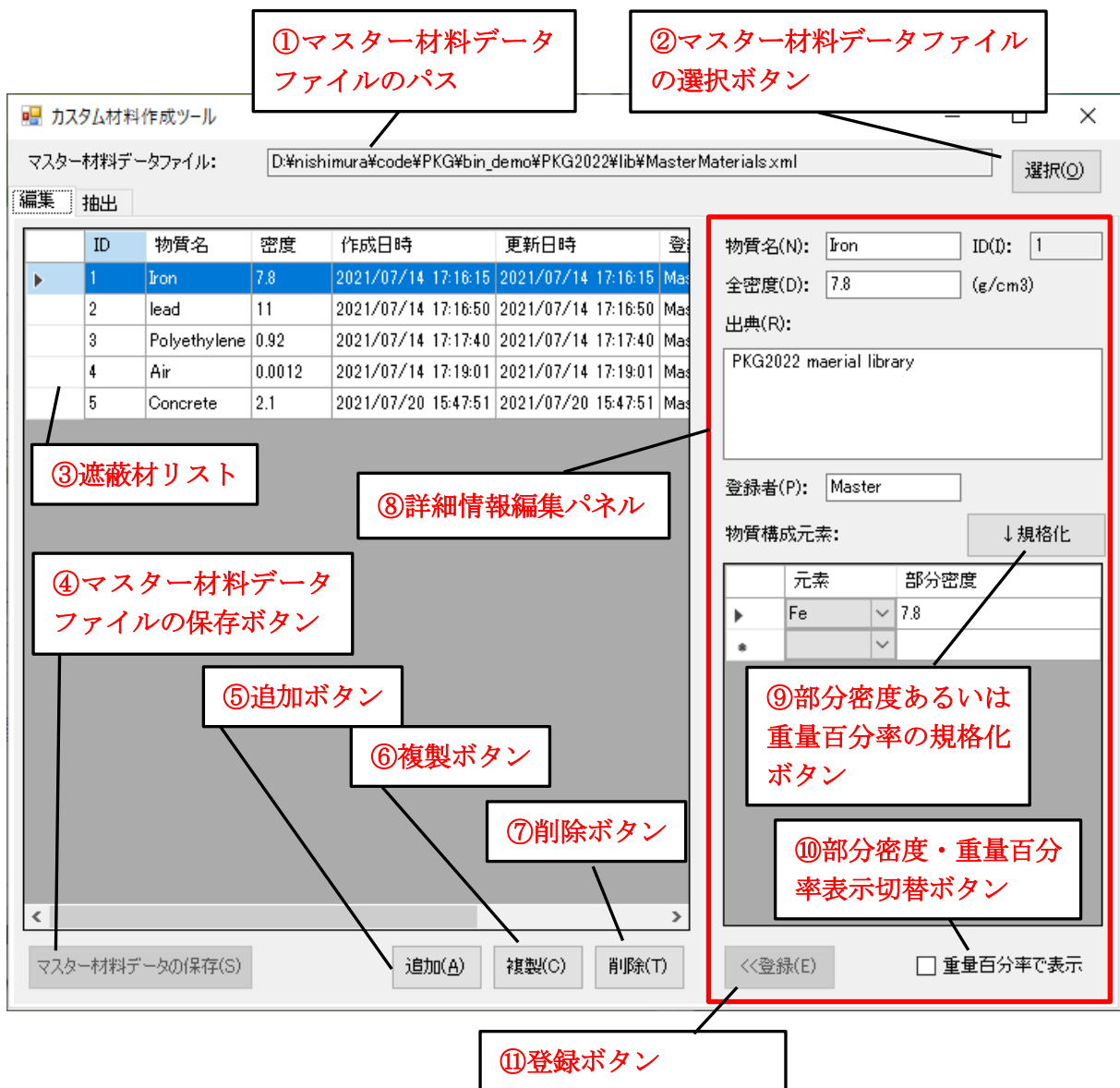


図 2-5 カスタム材料作成ツール：編集タブの画面構成

(2) 抽出タブ

カスタム材料作成ツールにおける抽出タブの画面構成を図 2-6 に示す。

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

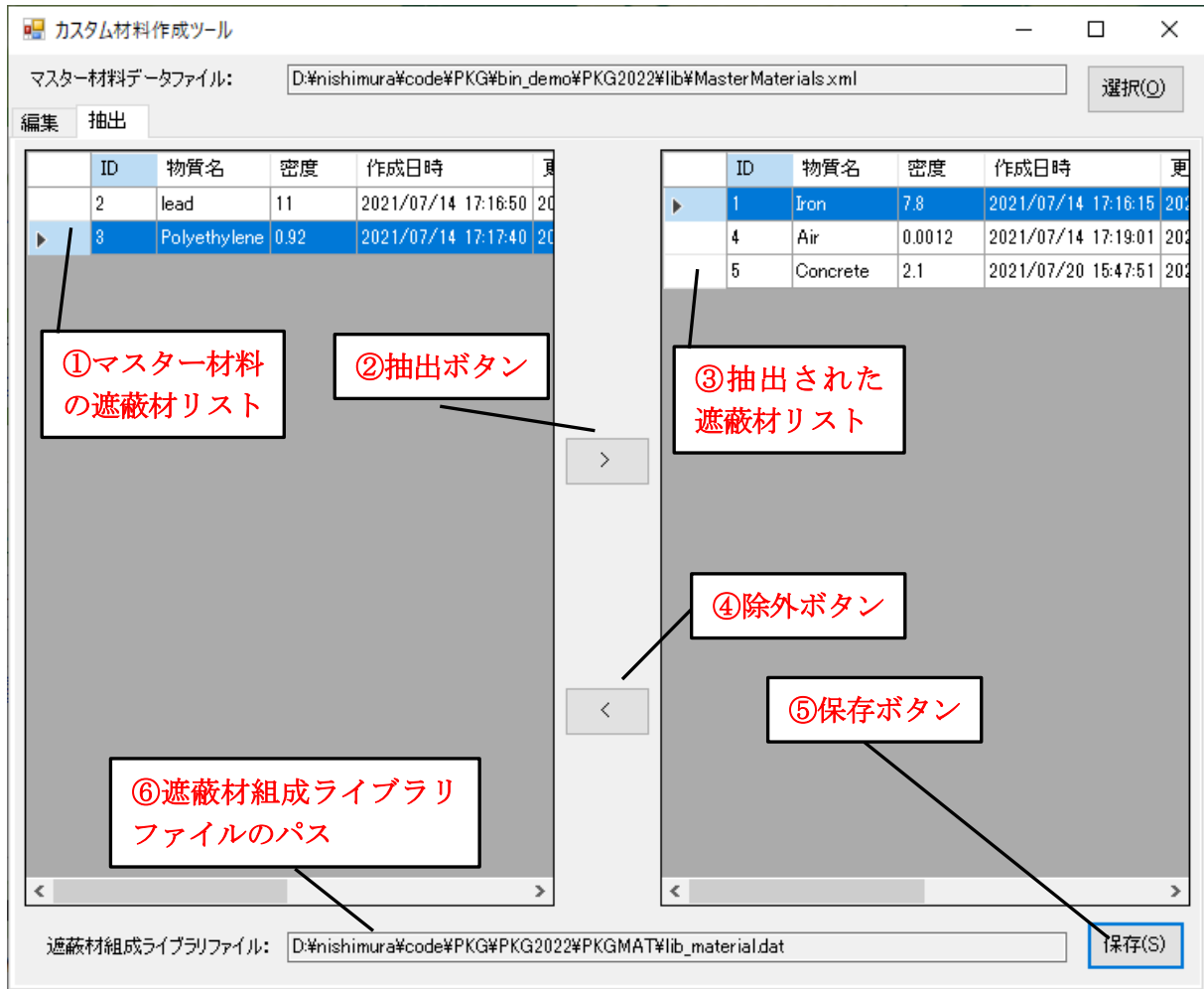
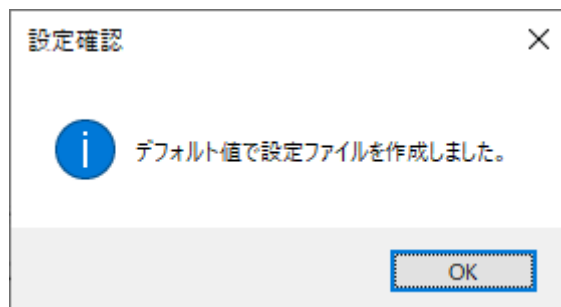


図 2-6 カスタム材料作成ツール：抽出タブの画面構成

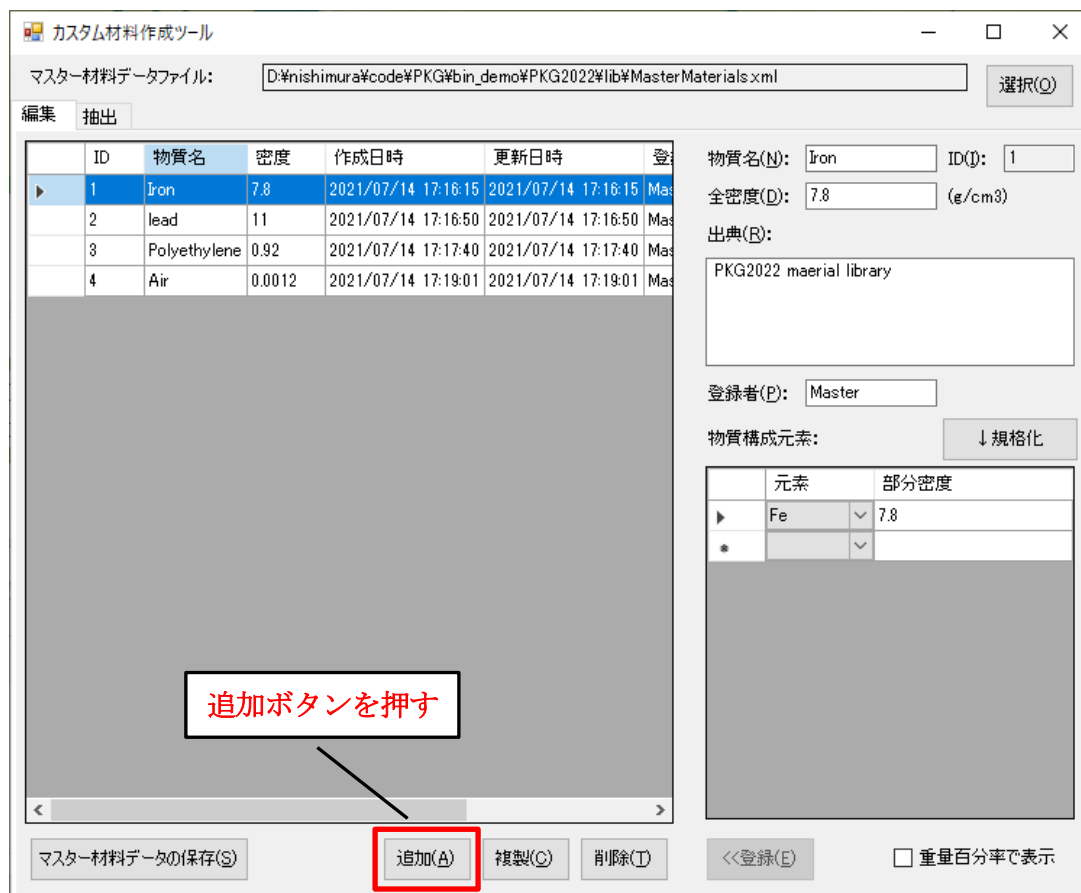
(3) 使い方

(a) 遮蔽材の新規作成 (例 : Concrete)

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



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



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

マスター材料データファイル:

編集 抽出

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

物質名(N): ID(I):

全密度(D): (g/cm³)

出典(B):

登録者(P):

物質構成元素:

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

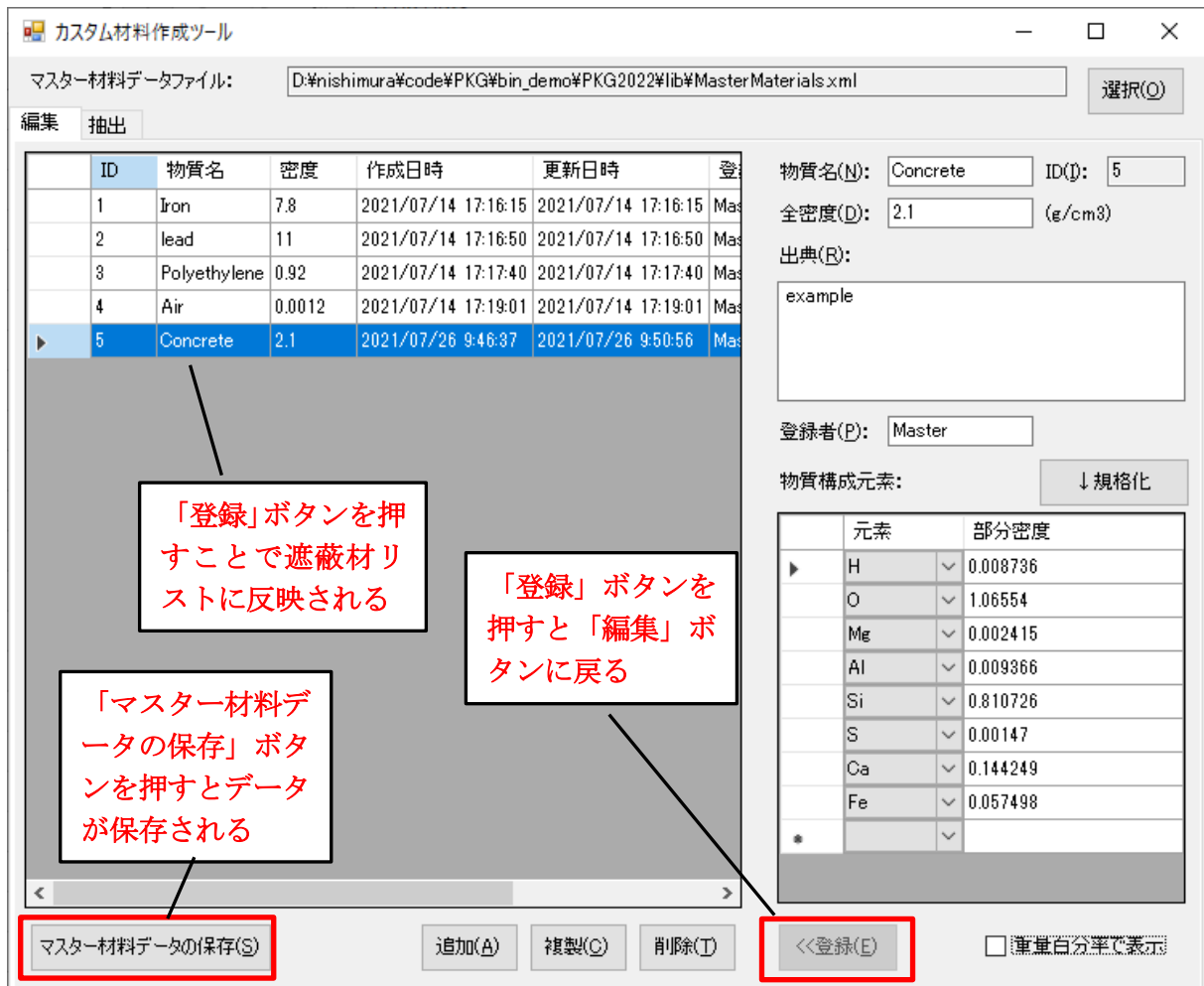
重量百分率で表示

マスター材料データの保存(S)

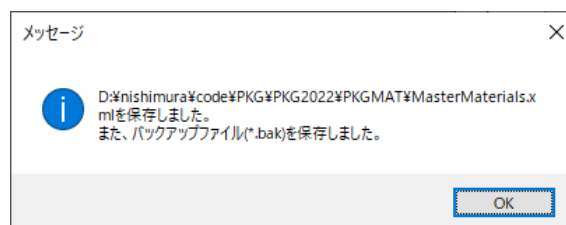
詳細情報編集パネルで適宜データを編集する

元素はコンボボックスのリストから選択する

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



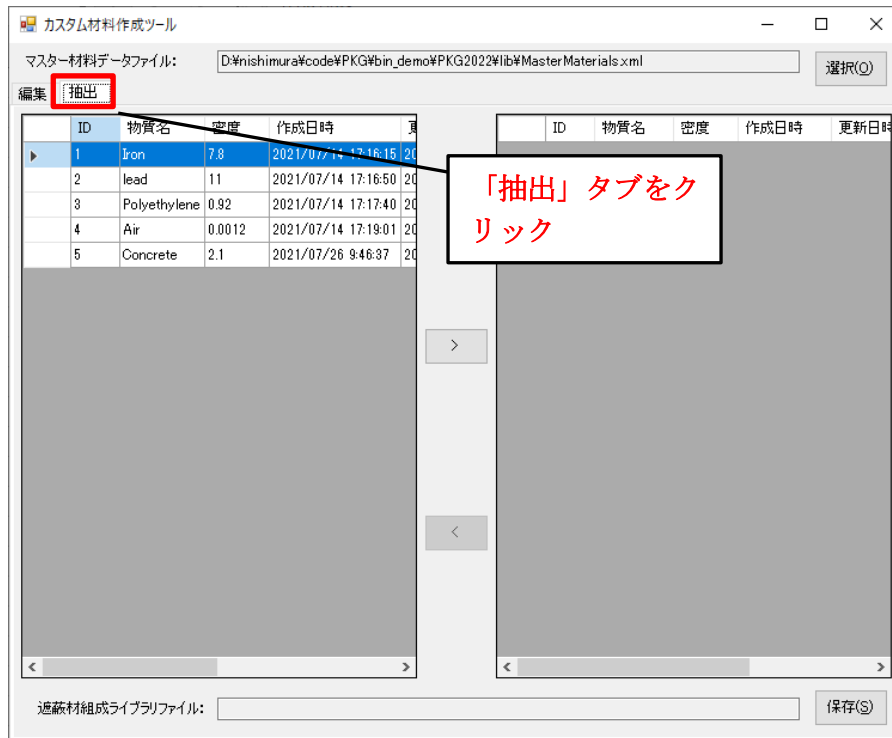
- すると、保存に成功した場合、その旨のメッセージが表示される。
 - このとき、マスター材料データファイルは上書き保存されるため、一つ前の状態のマスター材料データファイルがバックアップファイルとして保存される。



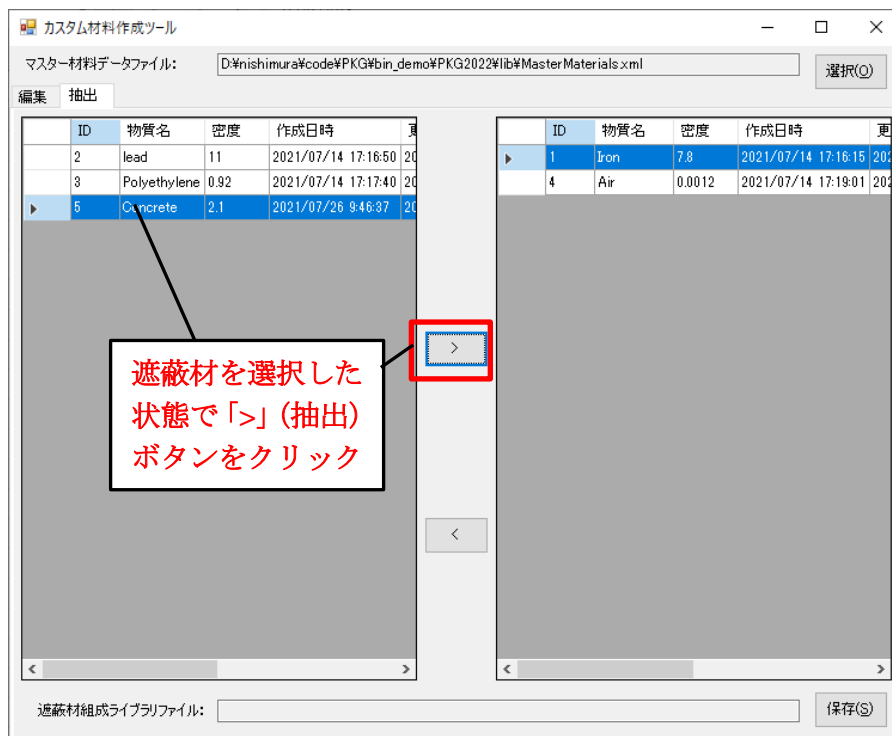
- なお、既存の材料の編集の場合は、遮蔽材リストからターゲットとなる行を選択することで、右側の詳細情報編集パネルでデータを編集することができる。編集の手順は、新規作成と同様である。

(b) 計算用遮蔽材組成ライブラリファイルの抽出

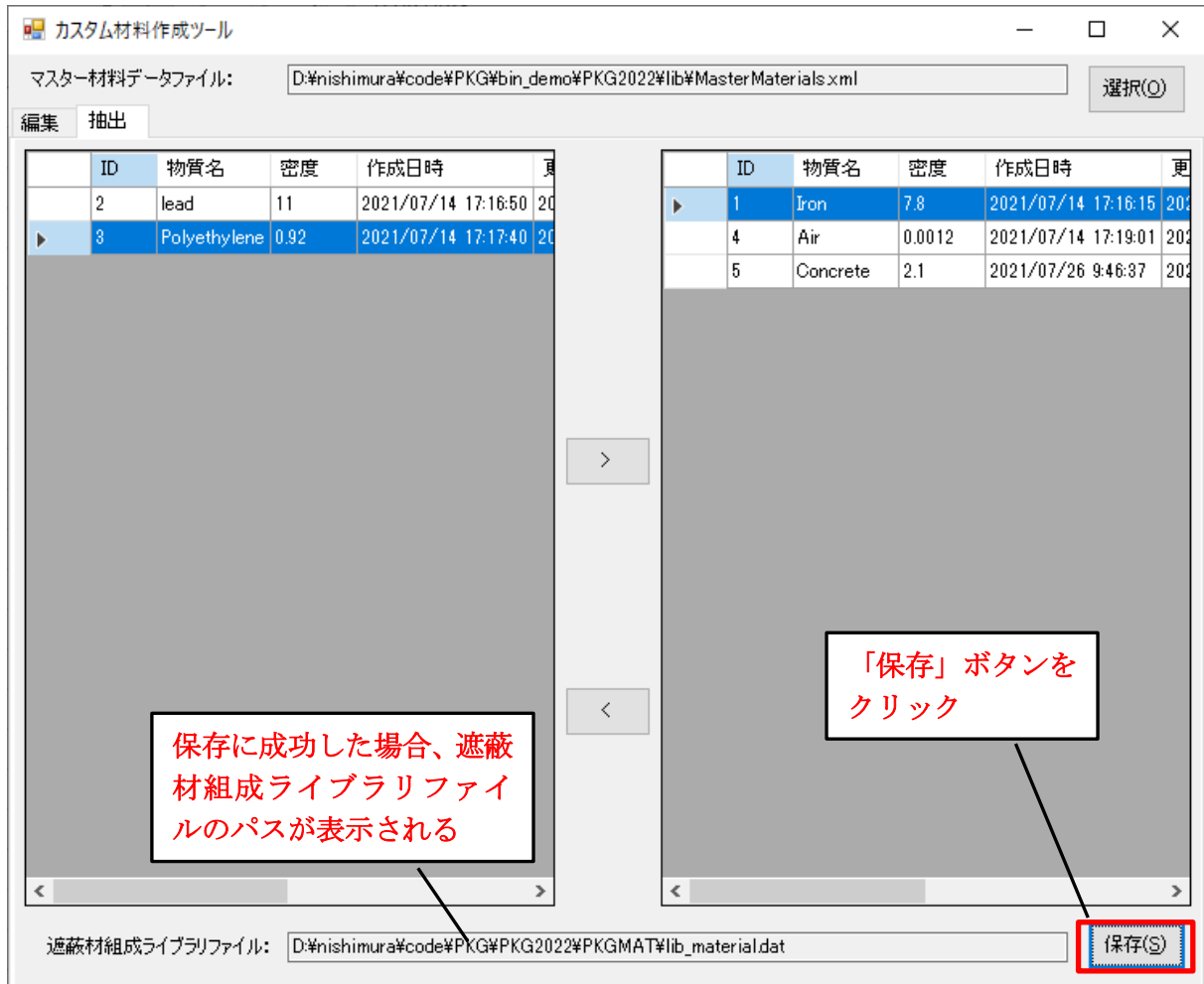
- マスター材料データファイルが選択されている状態で、抽出タブをクリックする。



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



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



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

```

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

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

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

```

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

2.3 線源ファイル作成ツール③

2.3.1 仕様検討

以下の仕様を満たすものとする。

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

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

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

線源情報外部ファイル（線源核種定義）

Column 1: nuclide ID.

Column 2: nuclide activity (Bq)

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

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

※ 行頭に#を付けるとコメント行となる。

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

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

線源情報外部ファイル（線源エネルギー分布定義）

Column 1: energy (MeV)

Column 2: energy spectrum (-)

Column 3: nuclide activity (Bq)

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

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

※ 行頭に#を付けるとコメント行となる。

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

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

2.3.2 遮蔽計算コードの追加設計

線源条件編集機能の一部として、線源ファイル作成ツールを整備した。

2.3.3 遮蔽計算コードの追加開発

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

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

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

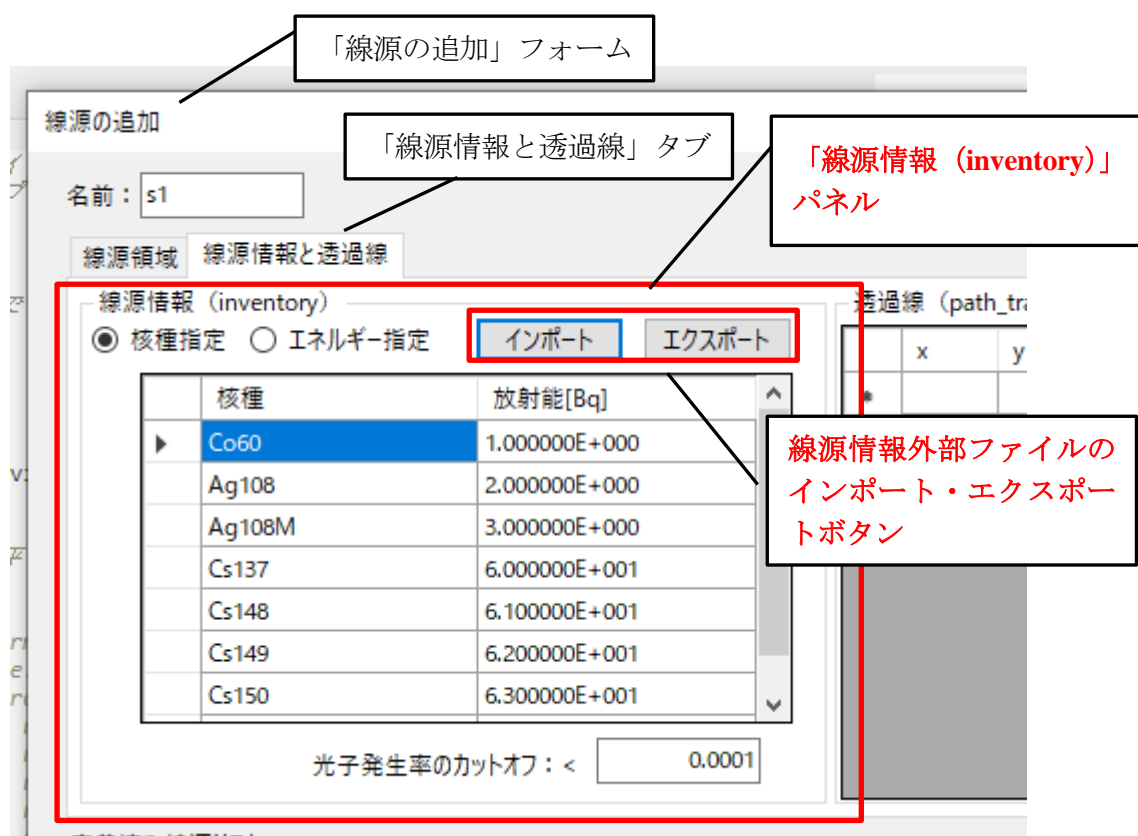


図 2-10 PKG2022_GUI プログラム: 「線源の追加」フォームの「線源情報と透過線」タブにおける「線源情報 (inventory)」パネルと線源情報外部ファイルのインポート・エクスポートボタン

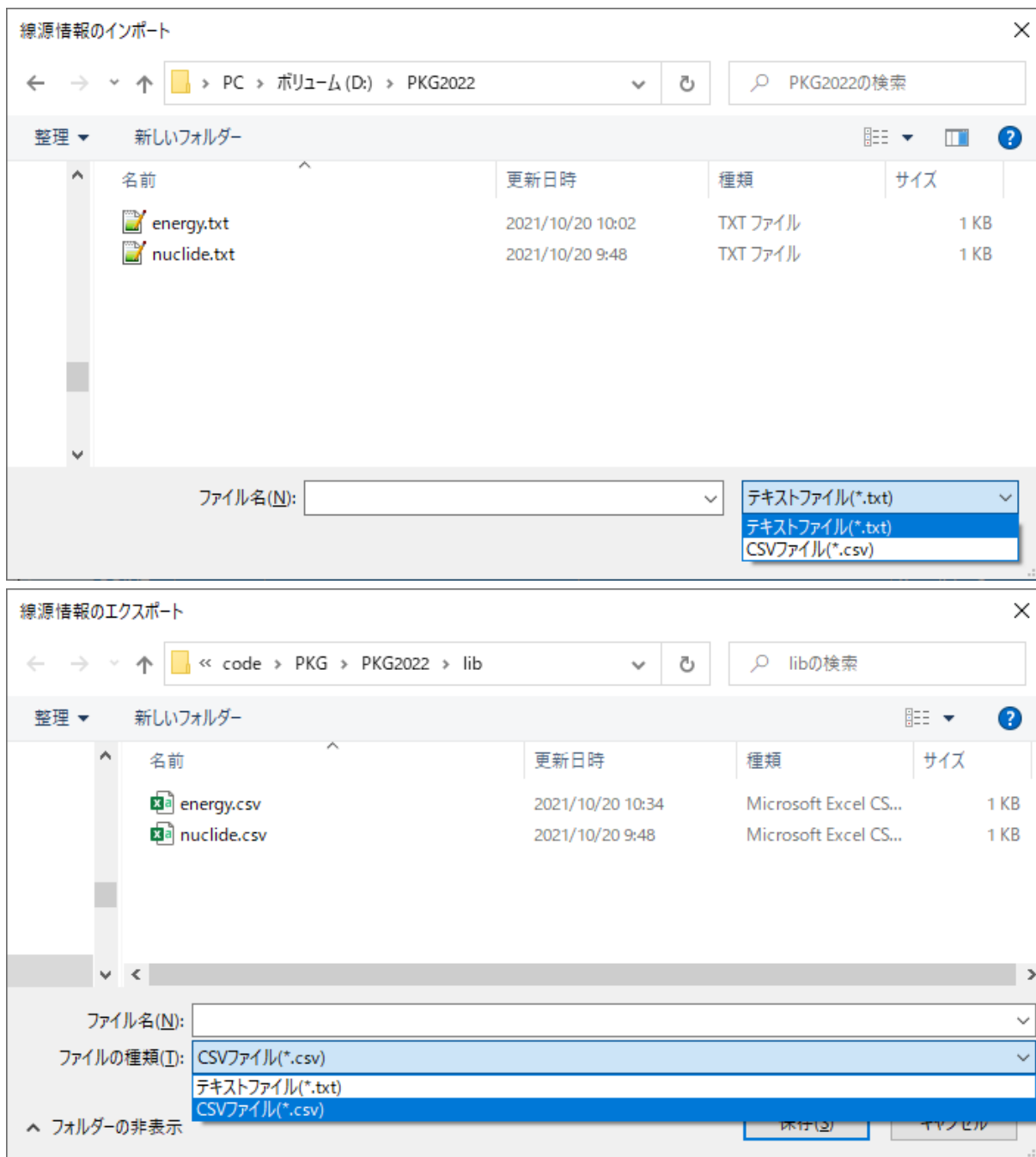


図 2-11 線源情報のインポートおよびエクスポートダイアログにおける拡張子選択

2.4 核種インポートツール④

2.4.1 仕様検討

コード仕様の検討を行った。

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

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

2.5 計算妥当性検証ツール⑤

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

2.5.1 仕様検討

コード仕様の検討を行った。

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

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

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

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

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

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

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

2.5.2 遮蔽計算コードの追加設計

遮蔽計算コードの追加設計を行った。

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

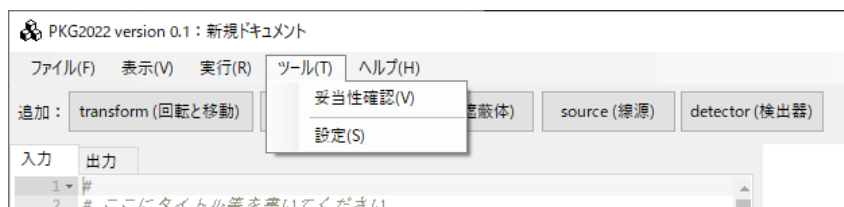


図 2-14 メインフォームのメニューバーに「ツール」->「妥当性確認」および「設定」を追

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

加

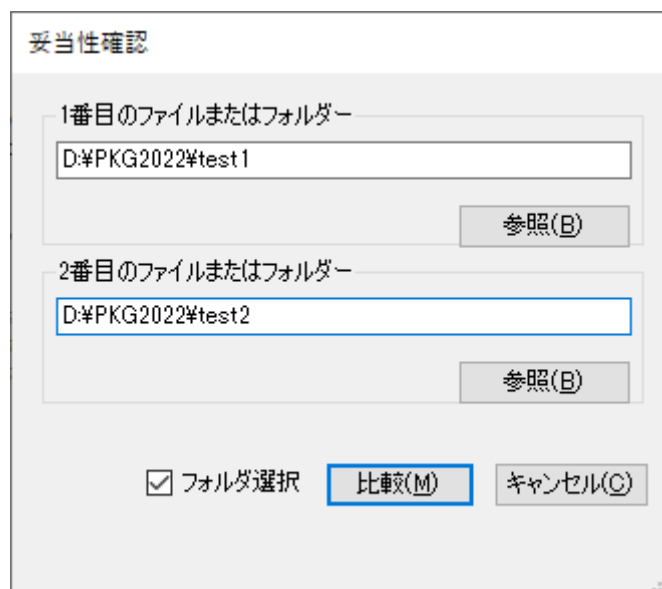


図 2-15 「妥当性確認」フォーム：比較するファイルあるいはフォルダーを選択する

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

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

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

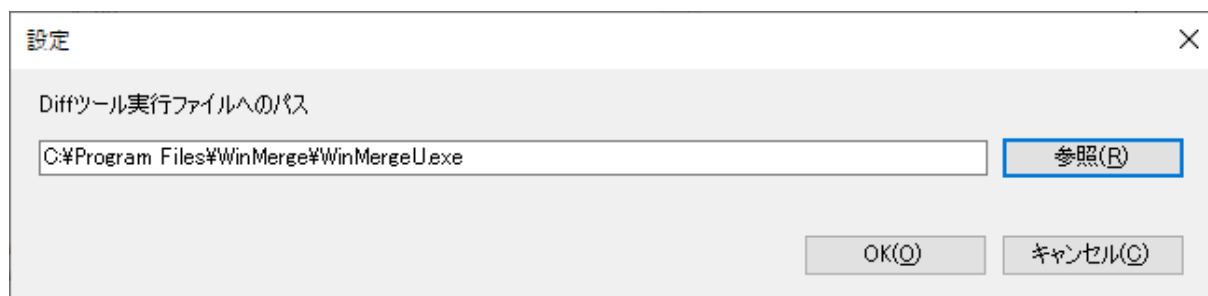


図 2-16 「設定」フォーム : Diff ツールのパスを設定する

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

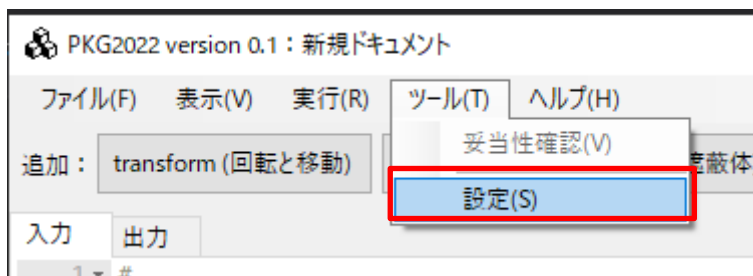
図 2-17 user.config のファイルフォーマット

2.5.3 遮蔽計算コードの追加開発

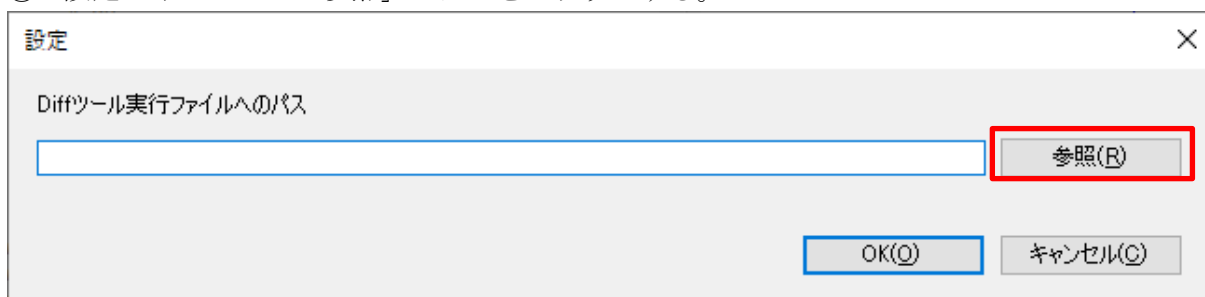
計算妥当性検証ツールの使い方を以下に示す。

(1) Diff ツールへのパスの設定

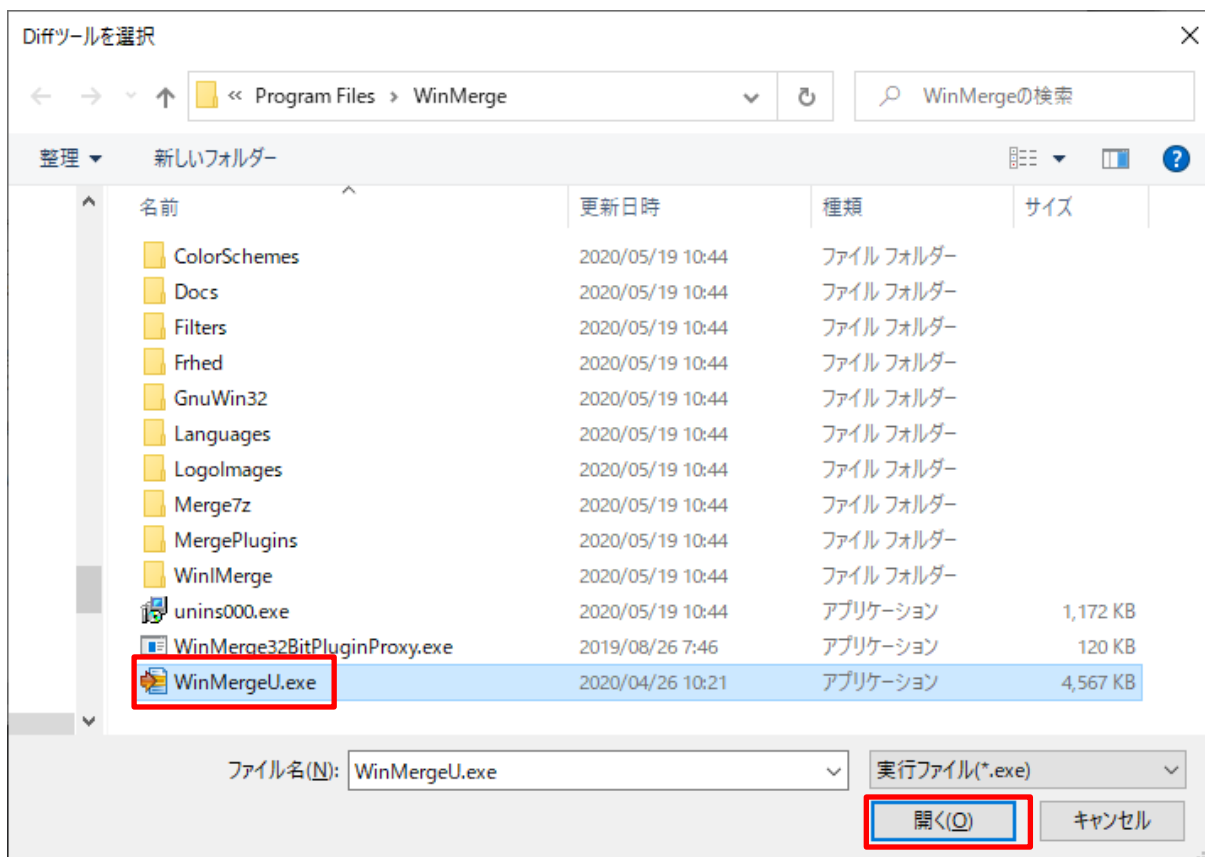
- ① 「ツール」->「設定」をクリックし、設定フォームを開く。



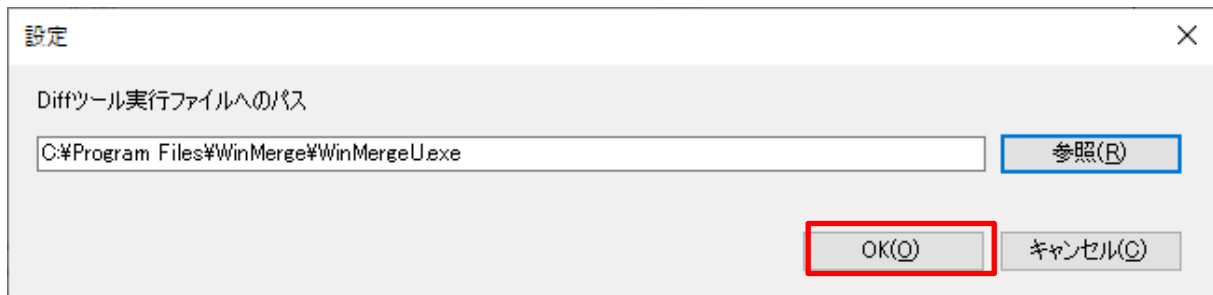
- ② 設定フォーム上の「参照」ボタンをクリックする。



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



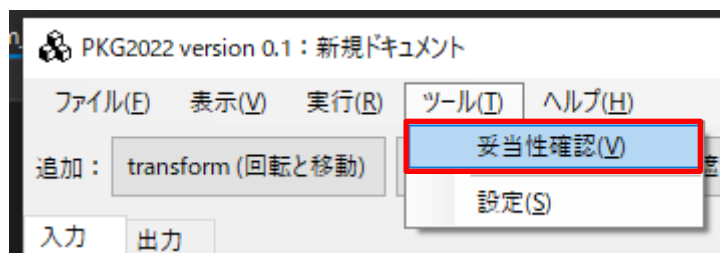
- ④ 選択した Diff ツールへのパスが表示されていることを確認し、「OK」ボタンをクリックする。



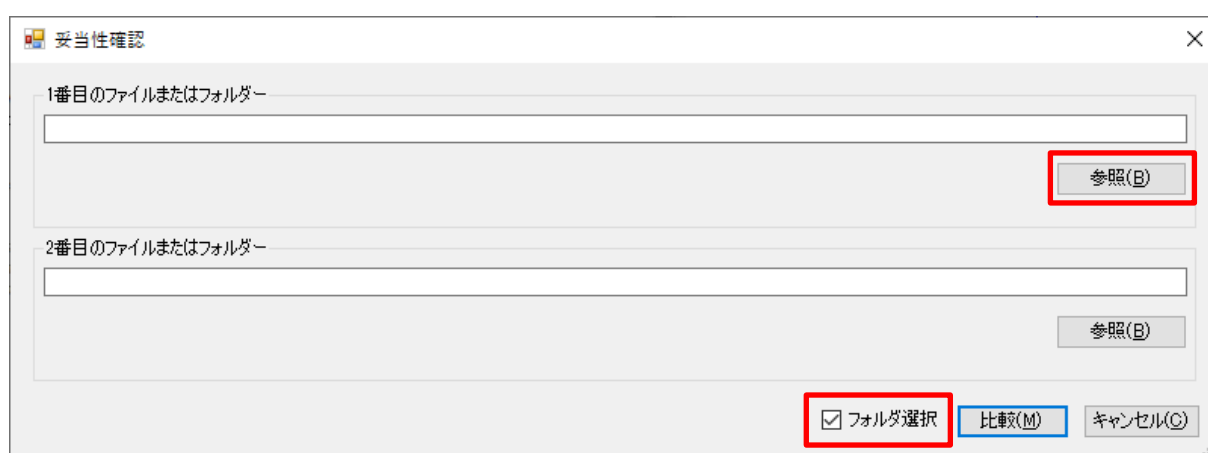
(2) 妥当性確認

(a) フォルダ間比較を行う場合

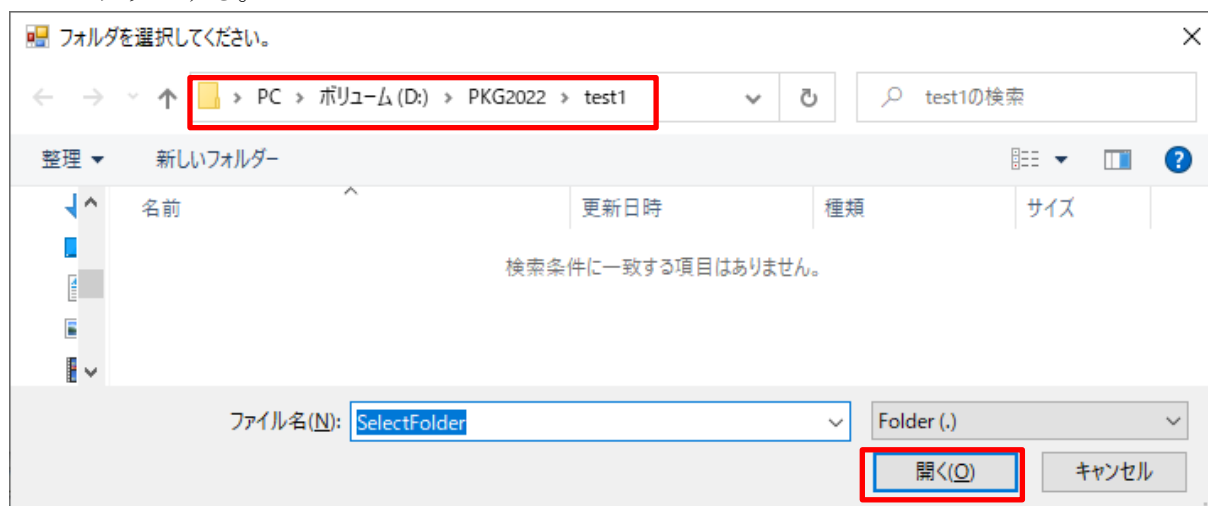
- ① Diff ツールへのパスが設定されていると、「妥当性確認」項目が有効になっているので、クリックする。



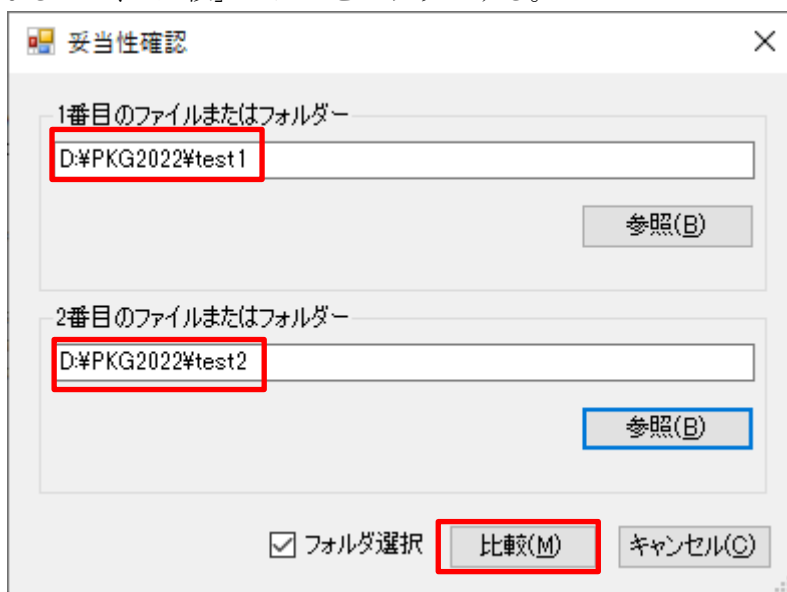
- ② 「妥当性確認」フォームが表示されるので、右下の「フォルダ選択」にチェックを入れ、「1 番目のファイルまたはフォルダ」の「参照」ボタンをクリックする。



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



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

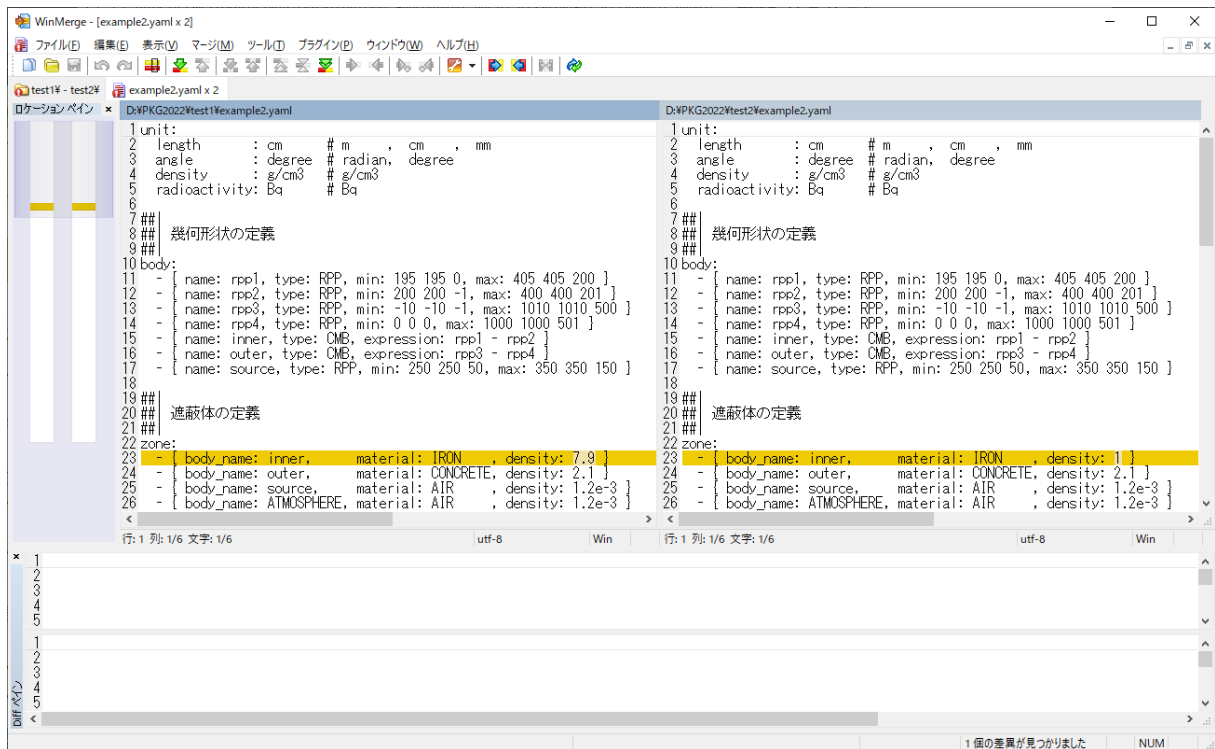


- ⑤ すると、外部プログラムの Diff ツールが起動するので、使用する Diff ツールのフォーマットにしたがってファイル等の比較を行う。例えば、WinMerge を Diff ツールとして使用した場合、下図のような画面が表示され、内容の異なるファイルが強調表示される。

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

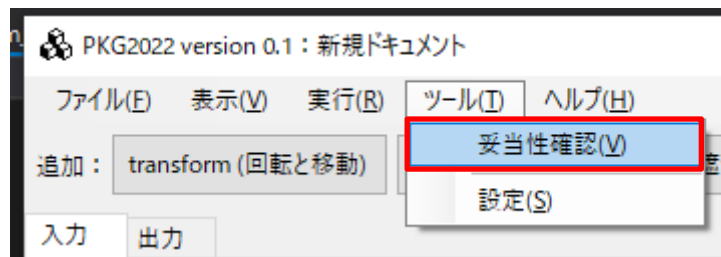
経過時間: 262 ms フル コンテンツ NUM

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

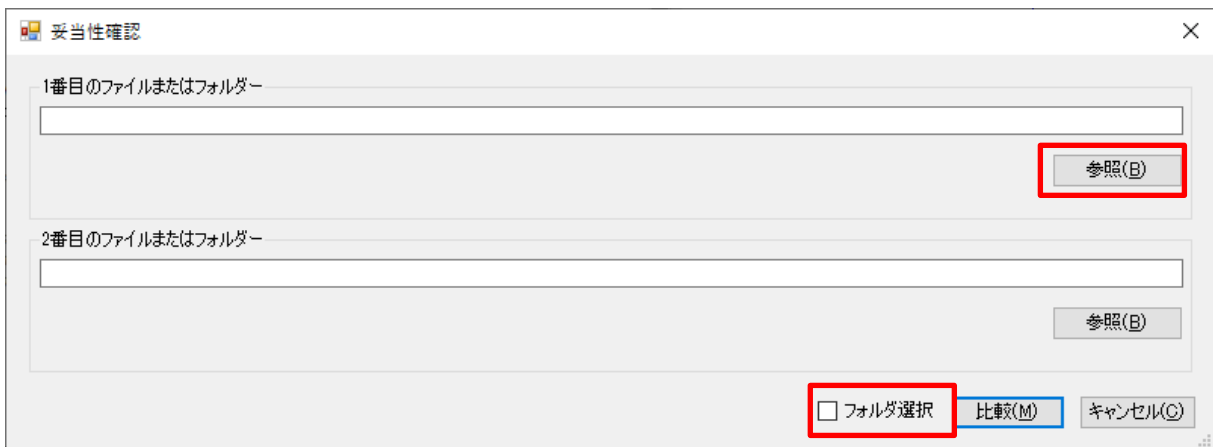


(b) ファイル間比較

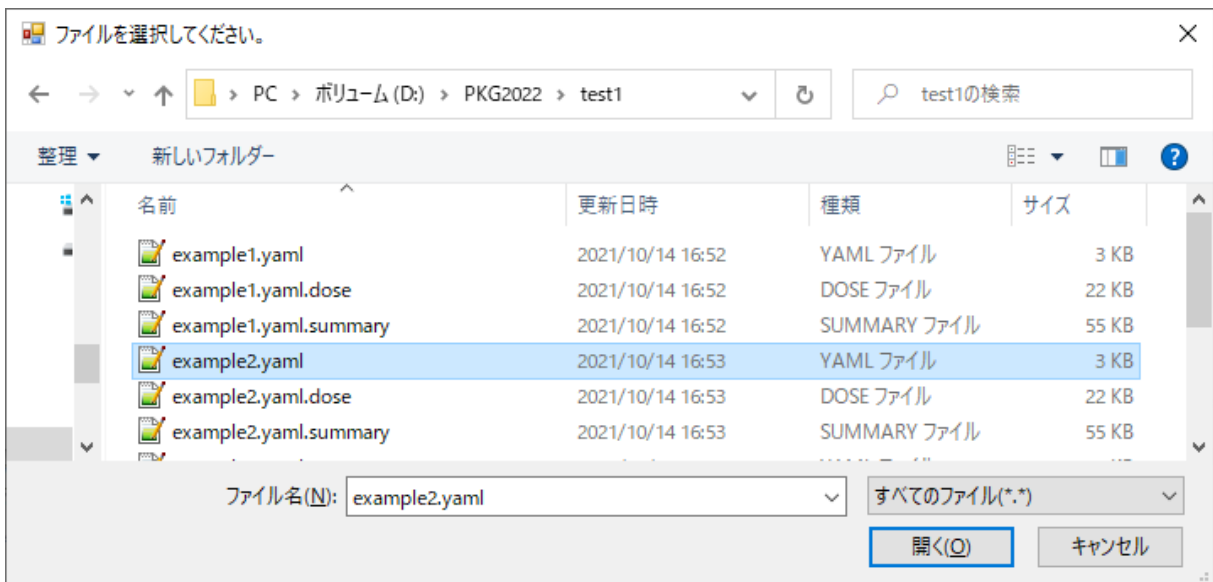
- ① Diff ツールへのパスが設定されていると、「妥当性確認」項目が有効になっているので、クリックする。



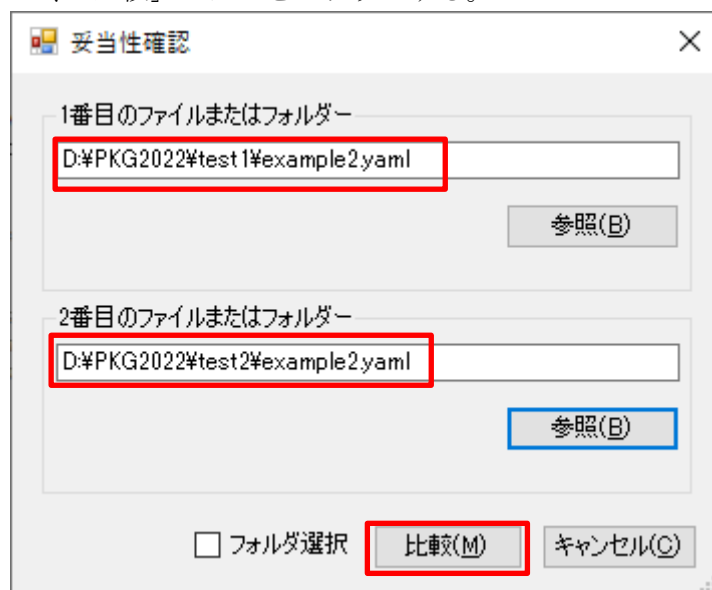
- ② 「妥当性確認」フォームが表示されるので、右下の「フォルダ選択」にチェックがないことを確認し、「1 番目のファイルまたはフォルダー」の「参照」ボタンをクリックする。



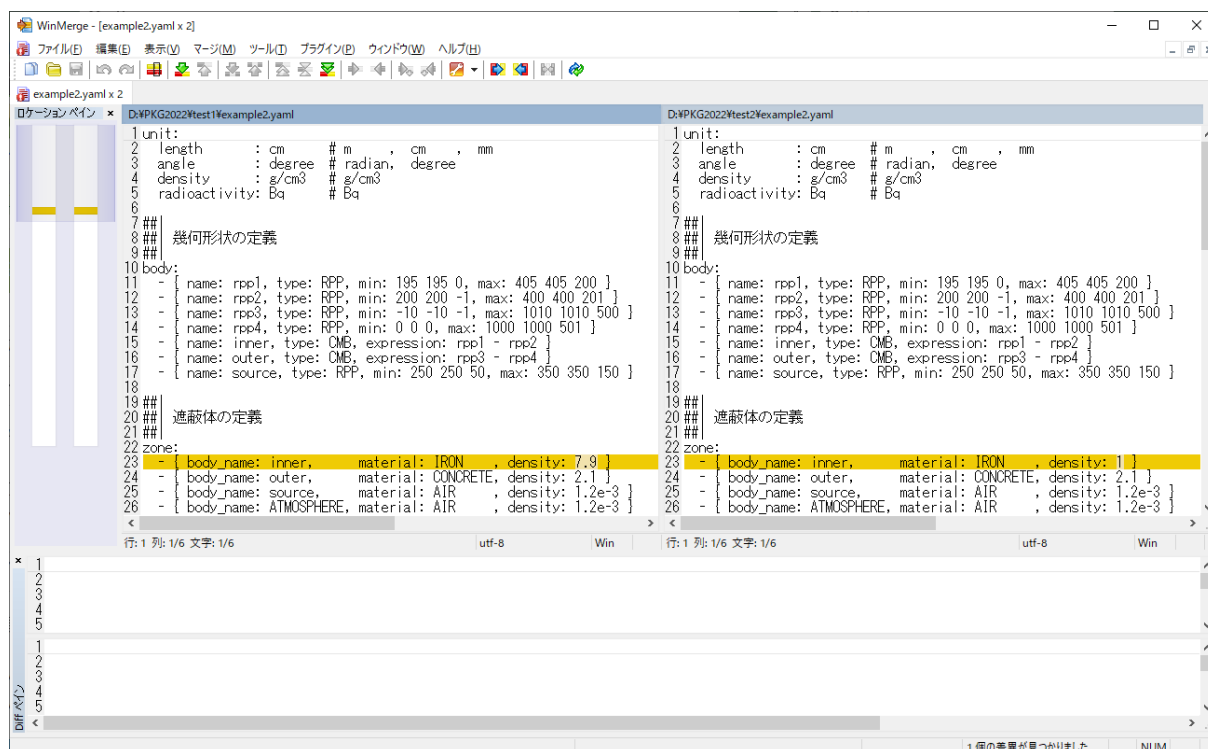
- ③ するとダイアログが表示されるので、比較したいファイルが存在するフォルダーに移動し、比較したいファイルを選択した状態で「開く」ボタンをクリックする。



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



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



2.6 線量計算で用いる透過線上にある材料データの表示⑥

前年度作業で実装済みのため、省略する。

2.7 斜め入射データ作成ツール⑦

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

3. 遮蔽計算コードに対する遮蔽線量計算法の適用性拡張

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

3.1 二次粒子の線量寄与⑨

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

3.1.1 仕様検討

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

3.1.2 作業内容

仕様検討に従って作業を行った。

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

線源ごとの出力部分では、平均ビルドアップ係数は線種ごとに分けて出力する：

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

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

線源の寄与の合算値を出力する箇所では、各々の線種の寄与を分けて出力する：

```
##|
##| 計算結果 (Total)
##|
result:
  elapsed_time: 9.3080 sec
  detector:
    - name: detector0
      dose_total:
        # 線種: g1 = 1次ガンマ線, n = 中性子線, g2 = 2次ガンマ線, TOTAL = g1 + n + g2
        # 評価点
        # x y z
        - 5.0000e+02 3.0000e+02 1.0000e+02
        -
        -
        -
      - name: detector1
```

線種	E(AP) μSv/h	E(PA) μSv/h
TOTAL	2.7537e+02	2.2994e+02
g1	2.7537e+02	2.2994e+02
n	0.0000e+00	0.0000e+00
g2	0.0000e+00	0.0000e+00

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

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

3.2 有限媒質補正機能⑩

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

3.2.1 仕様検討

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

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

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

3.2.2 作業内容

仕様検討に従って作業を行った。

3.3 薄い遮蔽材対応①

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

3.3.1 仕様検討

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

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

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

3.3.2 遮蔽計算コードの追加開発

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

(1) 検証計算

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

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

これが正しい値になっているかを検証する。

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

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

1.19401

E_1, B_1 :

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

E_2, B_2 :

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

3.4 スラブ斜め入射対応⑬

- 入射角度依存ビルドアップ係数に対応できるように本コードを改良する。

3.4.1 仕様検討

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

斜め透過補正が使用できるのは、以下の場合のみである：

- ビルドアップ係数の対象となる物質を持つ立体が直方体のみ。

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

線量率

現状、データが整備されている線量率は

E(AP) ファイル名：sc_icrp_116_eap.dat

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

物質

対応している物質は

Iron Lead Concrete

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

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

フォーマット

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

- ・ 透過距離は、対象となる直方体を通過した幾何学的な距離である。
- ・ 適用角度上限を超える角度が検出された場合、計算は続行するが、計算終了後に警告メッセージを表示する。データテーブルを補間する際は、より小さい適用角度上限を採用する。
- ・ 補正值 f は以下の式で計算する：

$$f(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$$
 ただし、 x は角度（度）である。これをビルドアップ係数にかけたものを新たなビルドアップ係数として採用する。透過距離は透過線ごとに異なるので、透過距離に関する a, b, c, d の補間計算は毎回行う。ただし、エネルギーは固定なので、エネルギーに関する補間はあらかじめ行っておく。
- ・ d は常に1である。
- ・ ガンマ線の補正係数は、上記のように1次ガンマ線と2次ガンマ線の和として与えられている。従って、出力ファイルには両者を足し合わせたものが出力される。（斜め透過補正を使用しない場合には、両者が個別に出力されるので、この違いに注意。）

データテーブル a, b, c, d の補間

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

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

3.4.2 作業

仕様検討において決定した事項をもとに実装を行った。

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

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

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

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

3.5 可視化ファイル⑭

計算結果の可視化機能が参照するファイルを出力する機能を実装した。

2.1 節「計算結果可視化機能の作成」を参照のこと

4. その他拡張作業

打合せ等で提案された拡張項目に対して行った作業について、以下に示す。

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

4.1 遮蔽体で考慮可能な幾何形状の追加

4.1.1 作業内容

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

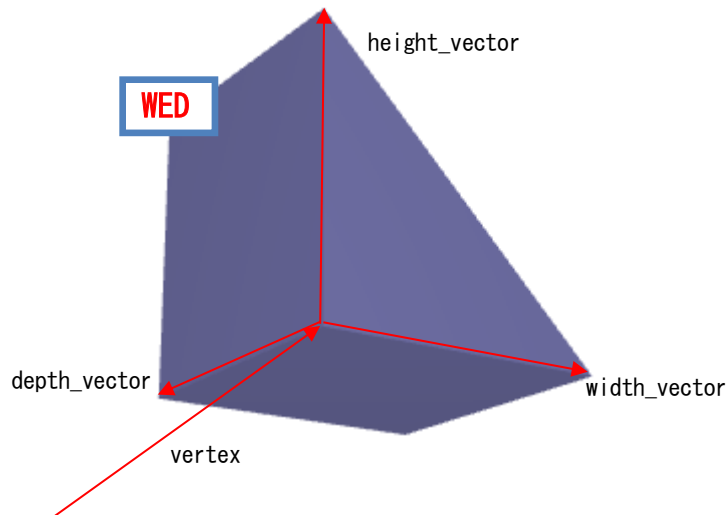


図 4-1 使用可能な立体（左の3つはCMB）

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

WED のフォーマット

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



WED (くさび型、直角三角柱)

Vertex : くさび型の1つの頂点 (3辺が直交する点)

width_vector : 三角形の1辺 (vertexを通る辺)

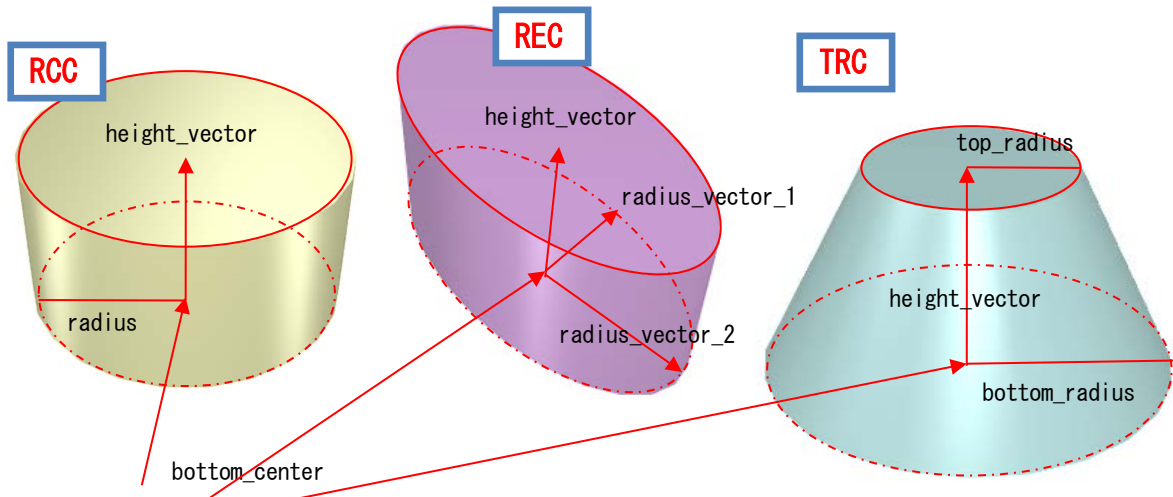
height_vector : 三角形のもう1辺 (vertexを通る辺)

depth_vector : vertexを通る残りの1辺 (柱方向)

図 4-2 WED のフォーマット

RCC, REC, TRC のフォーマット

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



RCC (円柱)

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

REC (楕円柱)

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

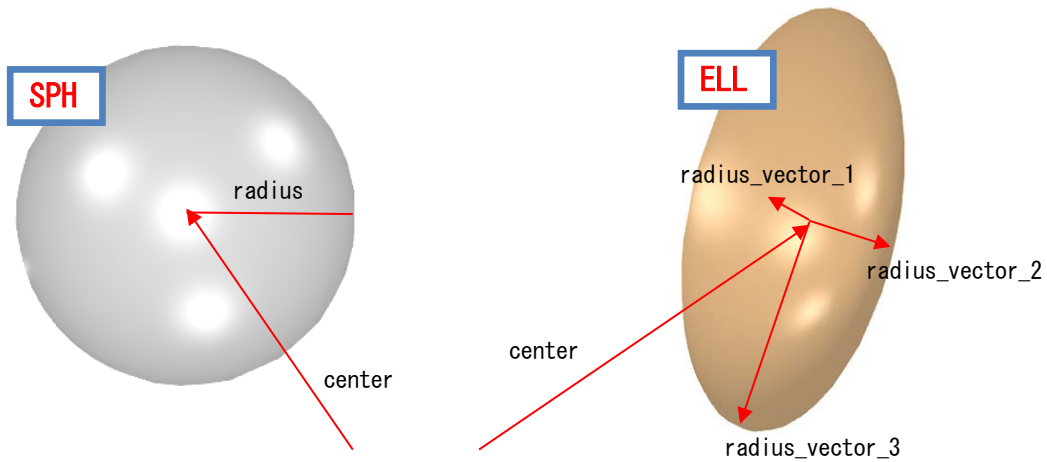
TRC (円錐台、底面と上面の半径が異なる円柱)

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

図 4-3 RCC, REC, TRC のフォーマット

SPH, ELL のフォーマット

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



SPH (球)

center : 球の中心点
radius : 球の半径

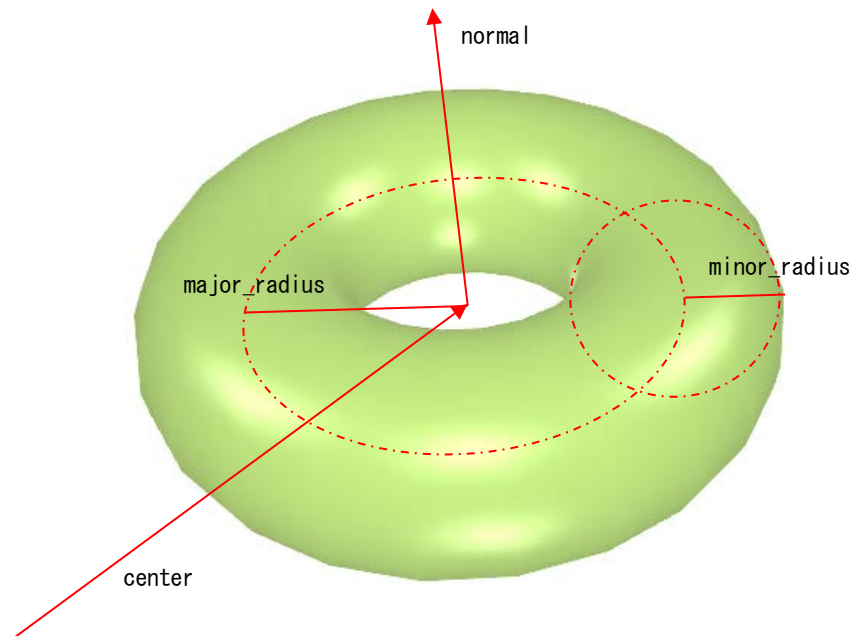
ELL (楕円体、球を3方向からつぶしたもの)

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

図 4-4 SPH, ELL のフォーマット

TOR のフォーマット

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



TOR (トーラス、ドーナツ形)

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

図 4-5 TOR のフォーマット

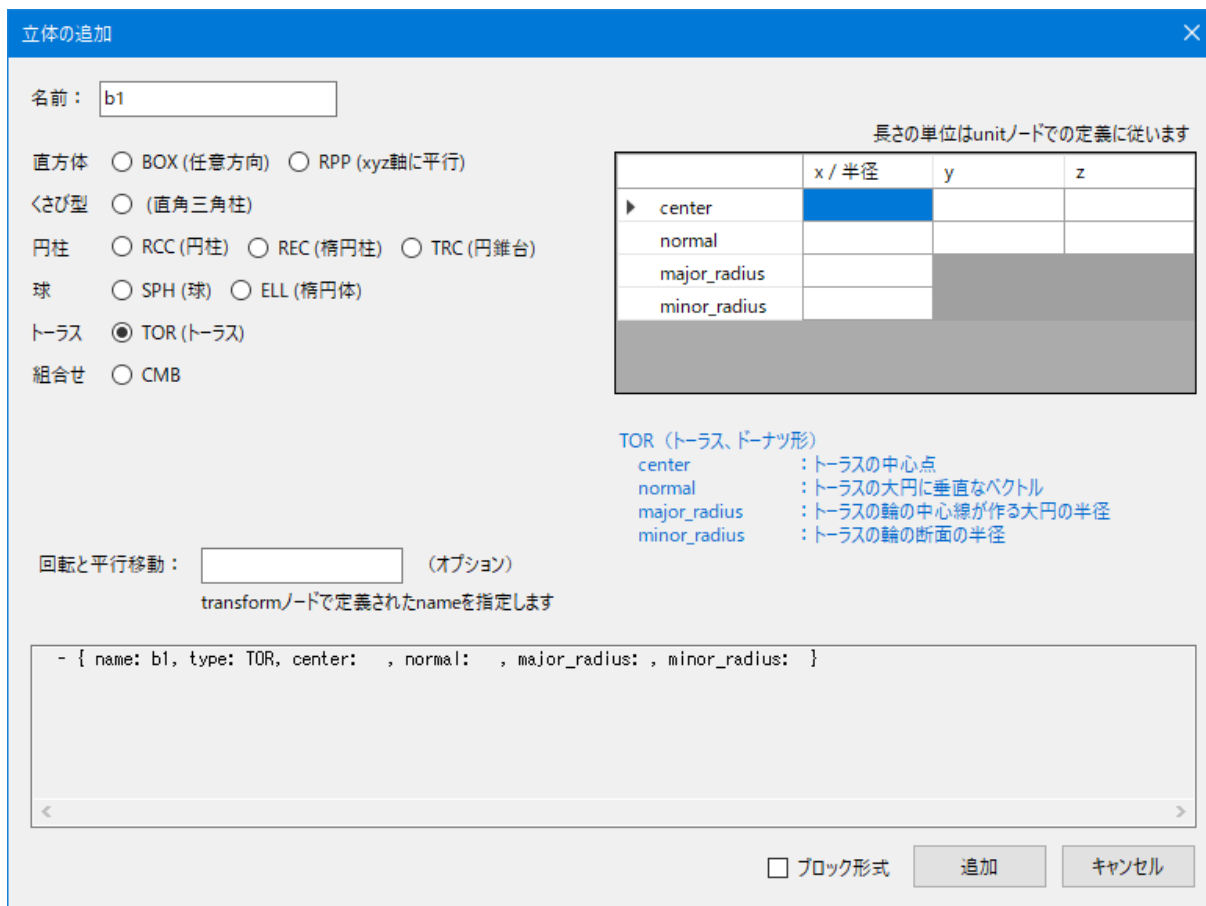


図 4-6 立体の追加ダイアログ

4.1.2 検証

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

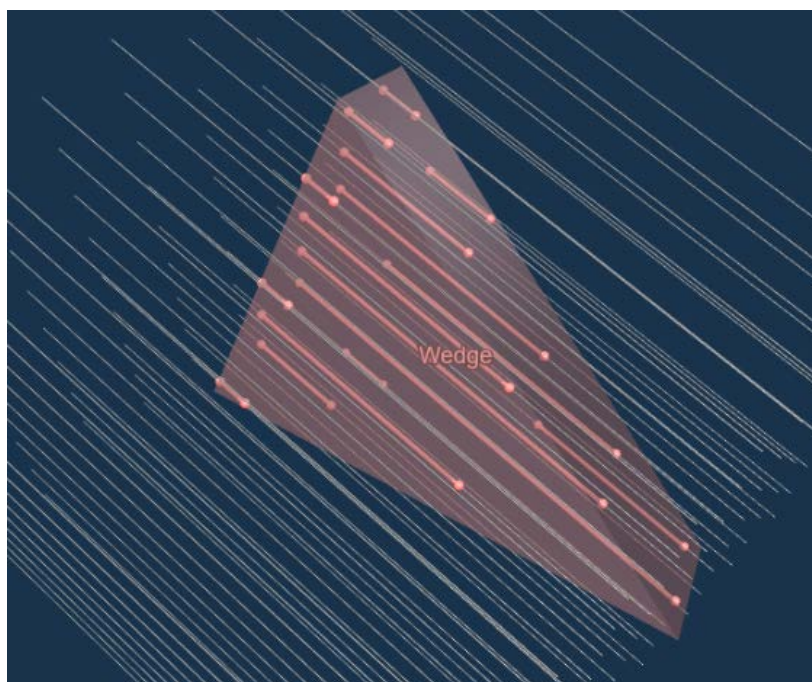


図 4-7 くさび型

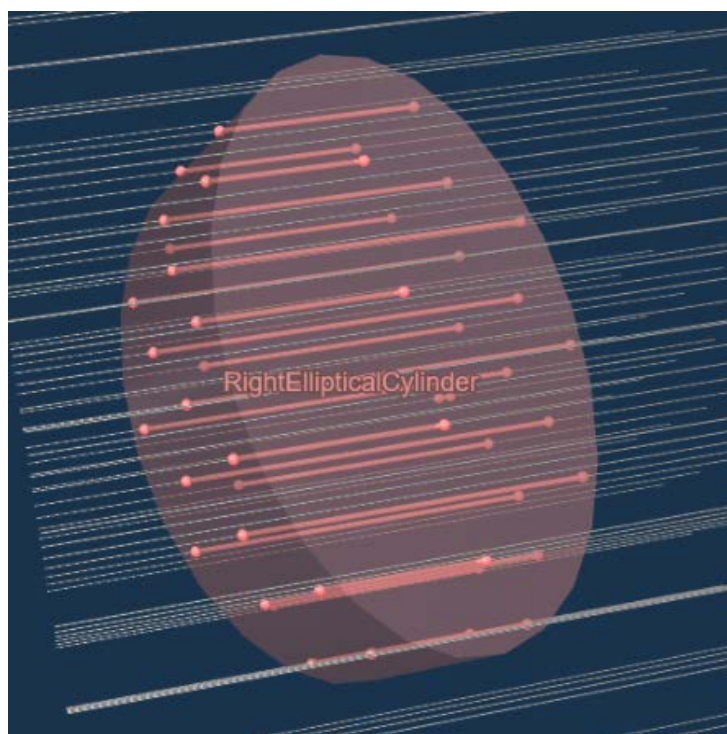


図 4-8 楕円柱

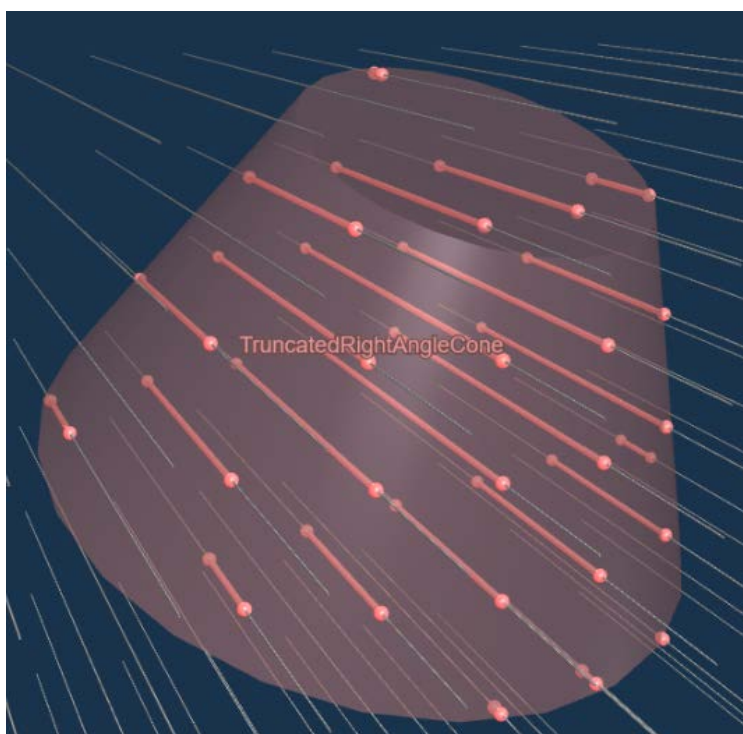


图 4-9 圆锥台

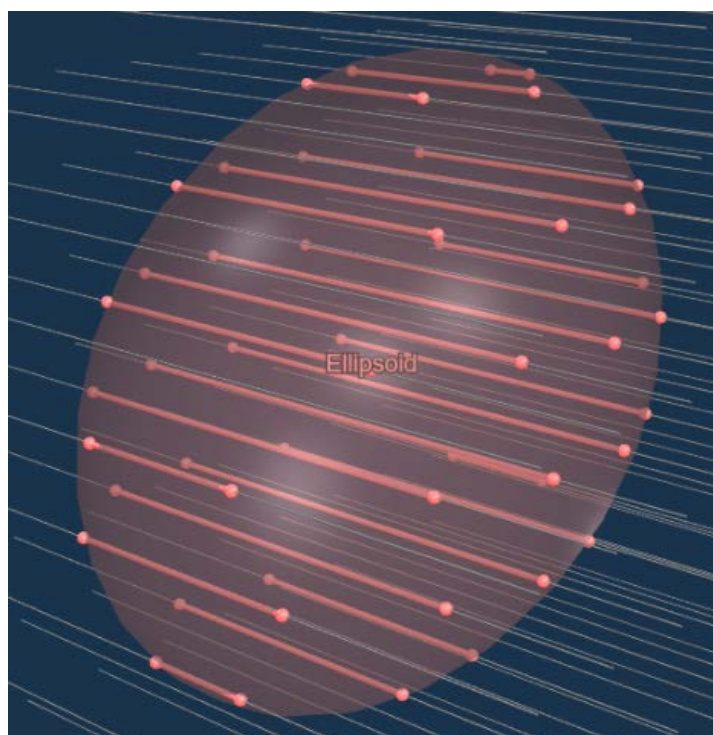


图 4-10 橢圓體

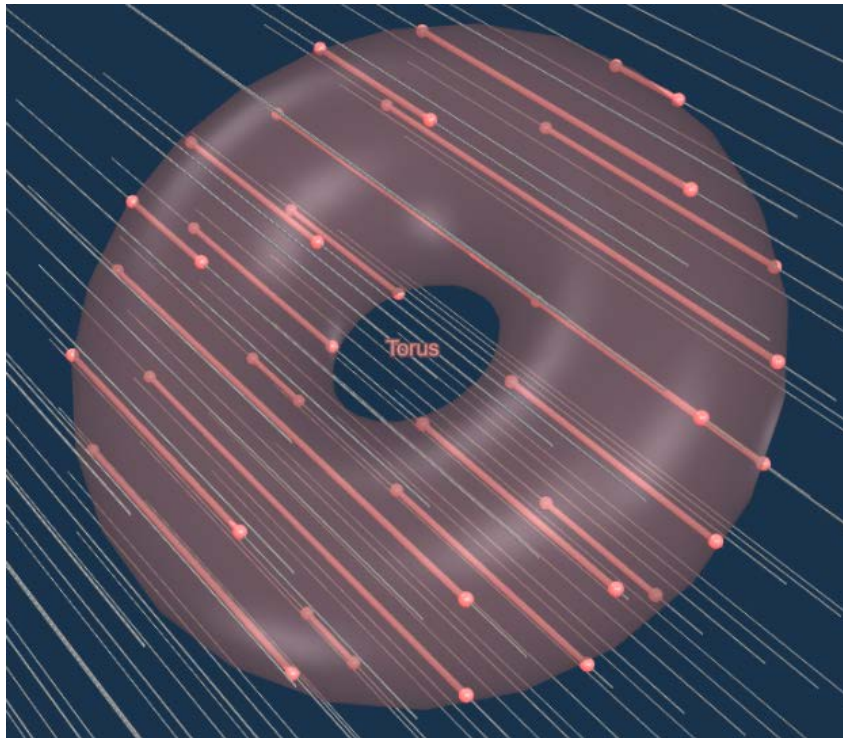


図 4-11 トーラス

4.2 線源条件の追加機能

線源条件として、以下の仕様を考慮できるように拡張を行った。

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

4.2.1 作業内容

(1) SOURCE ノードにおける線源形状の指定

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

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

・ type ノードの変更

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

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

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

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

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

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

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

拡張後のコード：新フォーマット (BOX)

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

形状を **type** ノードで指定する。

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

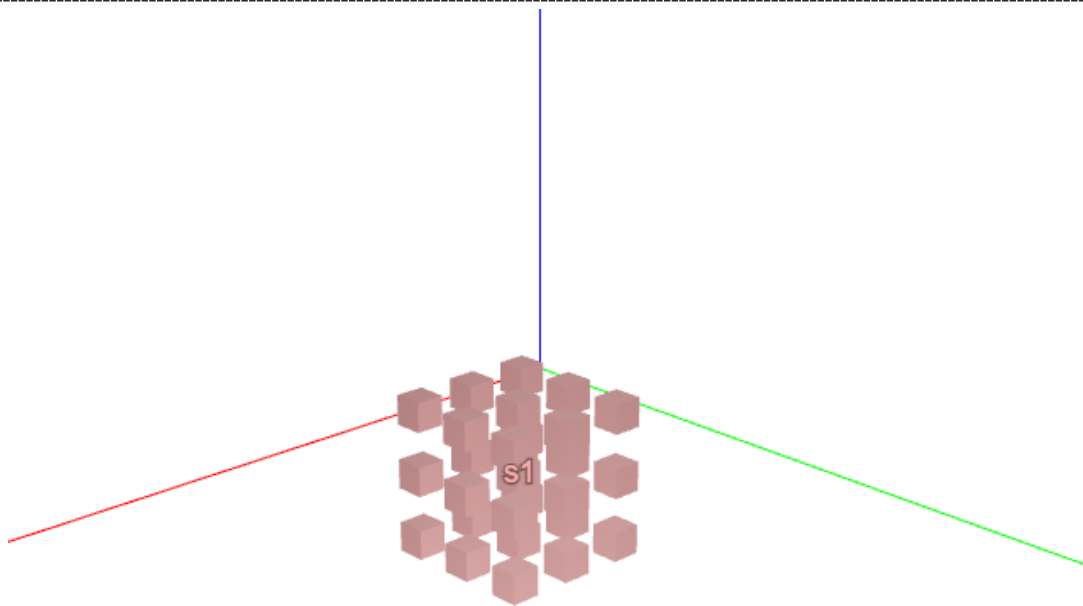


図 4-12 体積線源 BOX (直方体) の入力例 (上) と GUI 3D View 上の線源点 (下)

拡張後のコード：新フォーマット（RPP）

source:

- type: RPP

name: s1

geometry:

min: 250 250 50

max: 350 350 150

division:

edge_1: {type: UNIFORM, number: 3}

edge_2: {type: UNIFORM, number: 3}

edge_3: {type: UNIFORM, number: 3}

形状を **type** ノードで指定する。

geometry ノードで幾何形状を定義する。

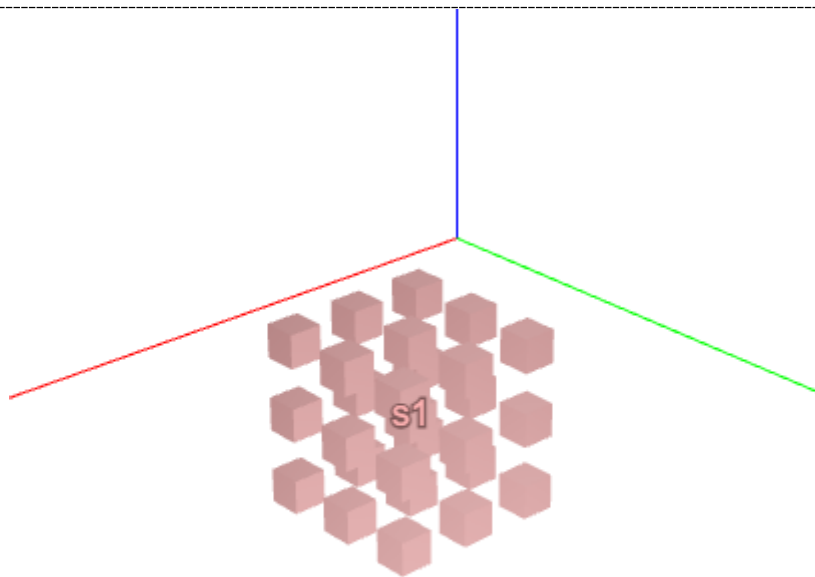


図 4-13 体積線源 RPP（直方体）の入力例（上）と GUI 3D View 上の線源点（下）

拡張後のコード：新フォーマット（SPH）

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

形状を **type** ノードで指定する。

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

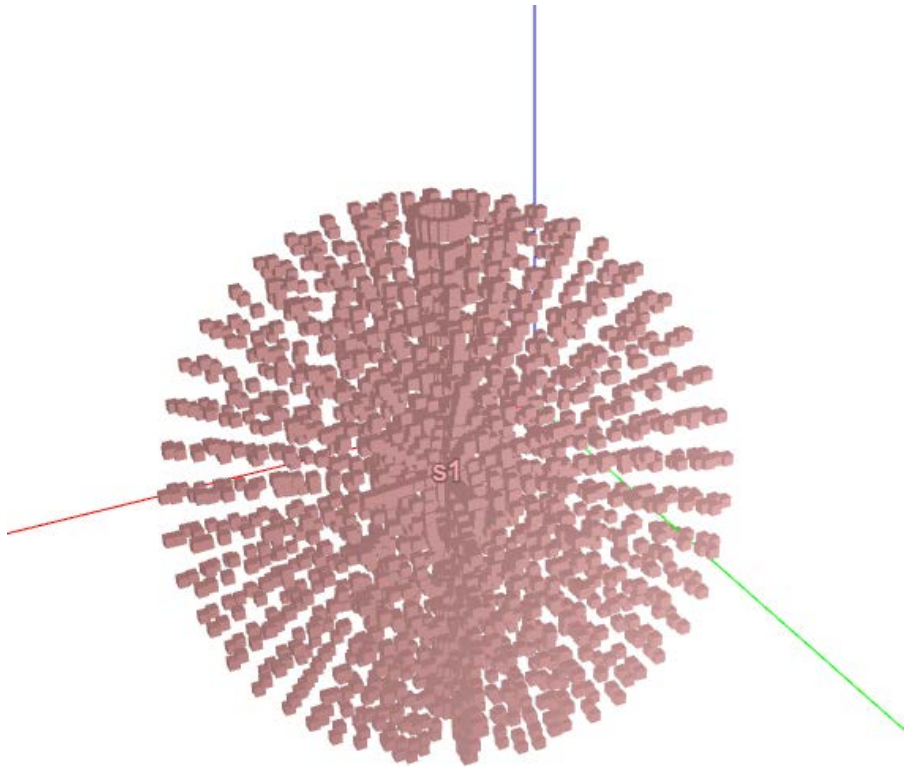


図 4-14 体積線源 SPH（球）の入力例（上）と GUI 3D View 上の線源点（下）

拡張後のコード：新フォーマット（RCC）

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

形状を **type** ノードで指定する。

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

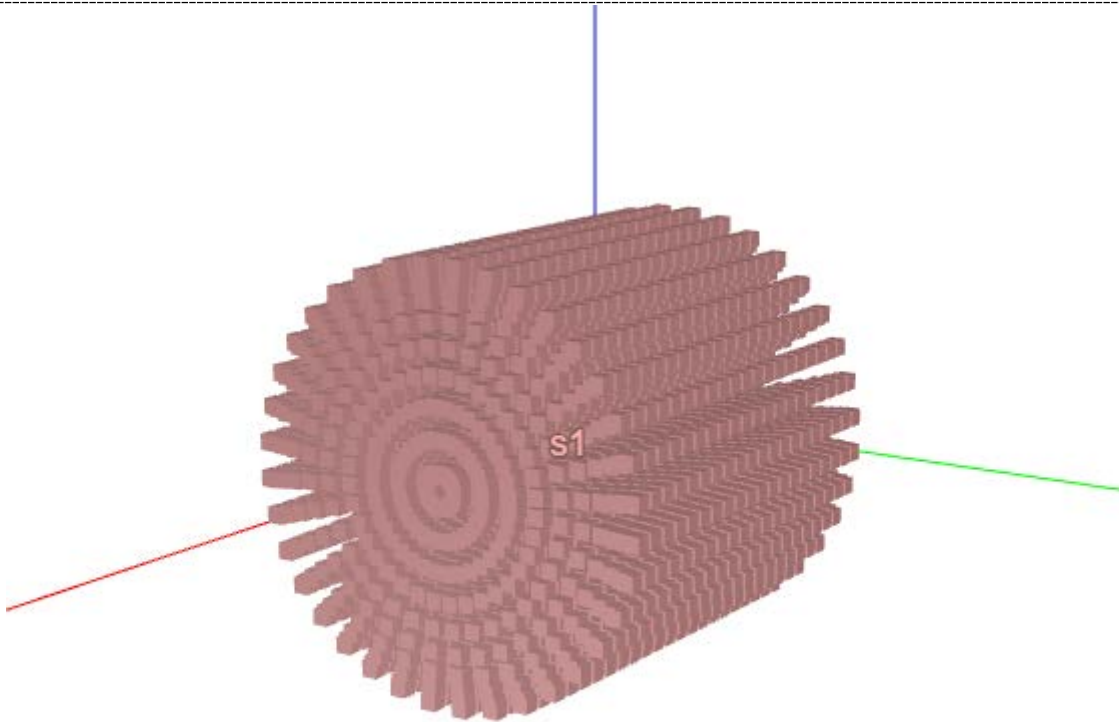


図 4-15 体積線源 RCC（円柱）の入力例（上）と GUI 3D View 上の線源点（下）

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

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

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

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

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

また、各軸の分割範囲は以下の通りである。

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

type:SPH (球) を使った半球の入力例

transform:

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

source:

```
- type: SPH
```

```
name: s1
```

```
geometry:
```

```
center: 0 0 0
```

```
radius: 400
```

```
transform: tr2
```

```
division:
```

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

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

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

transform で回転・平行移動を適用できる。

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

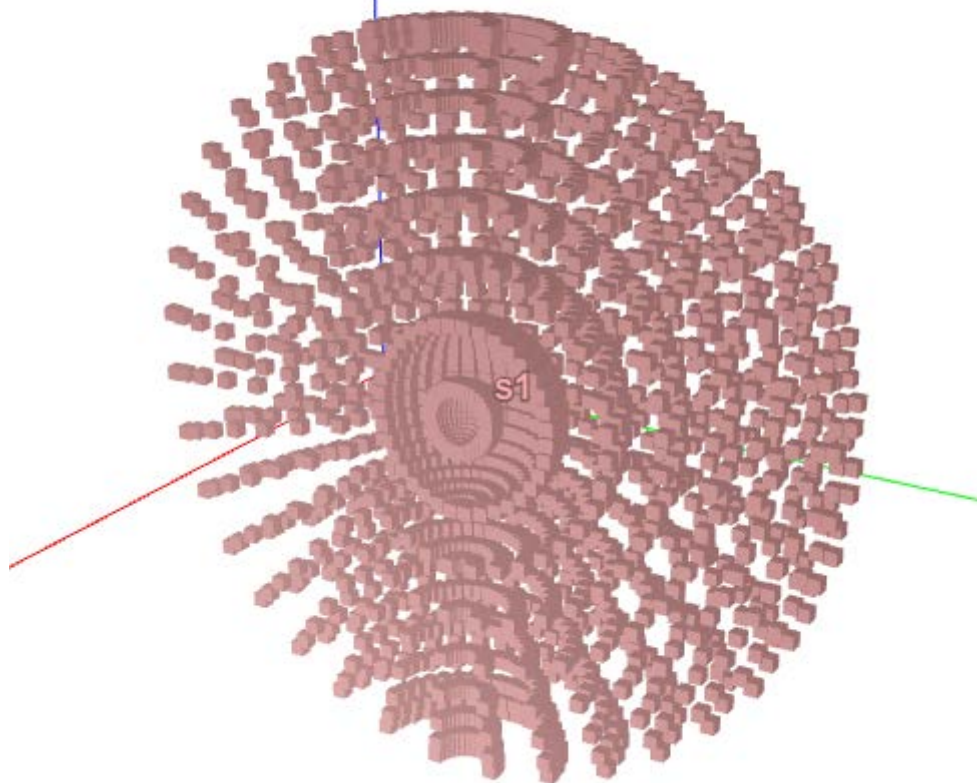


図 4-16 体積線源 SPH を使った半球の入力例 (上) と GUI 3D View 上の線源点 (下)

type:RCC (円柱) を使った半円柱の入力例

transform:

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

source:

```
- type: RCC
```

```
name: s1
```

```
geometry:
```

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

```
height_vector: 0 0 800
```

```
radius      : 400
```

```
transform: tr3
```

division:

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

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

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

transform で回転・平行移動を適用できる。

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

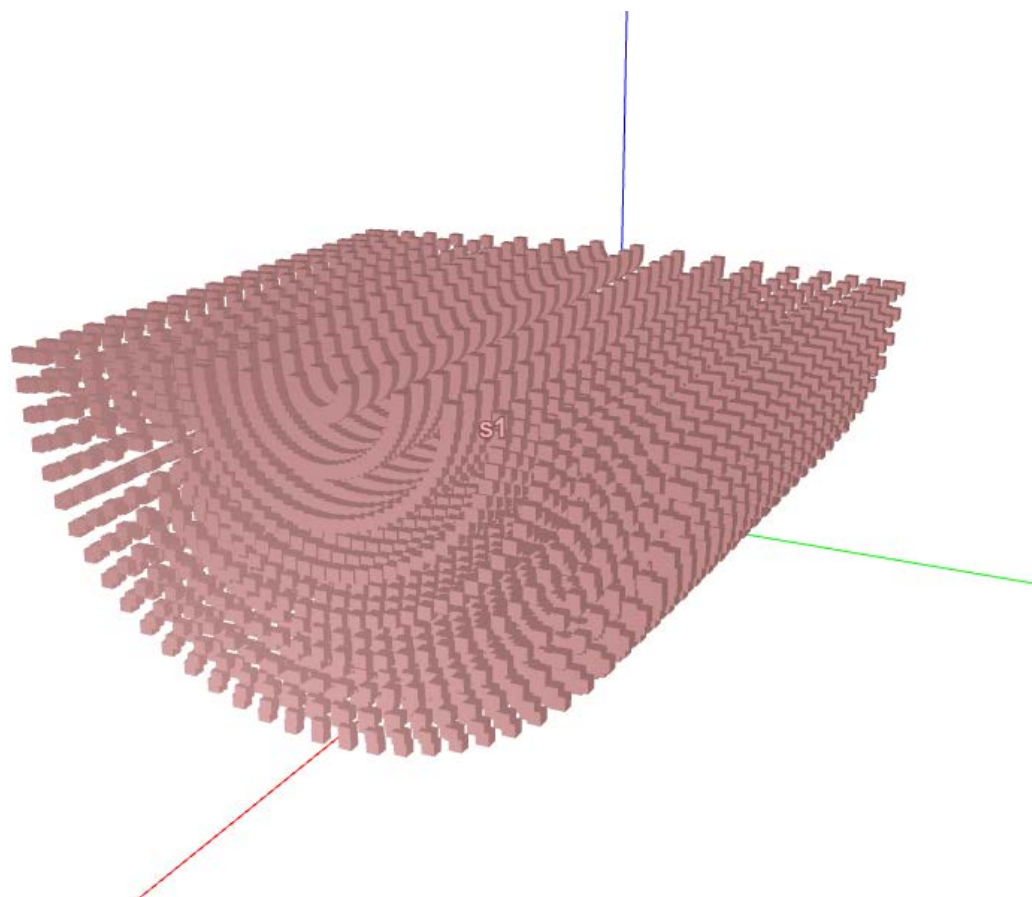


図 4-17 体積線源 RCC を使った半円柱の入力例 (上) と GUI 3D View 上の線源点 (下)

type:RCC (円柱) を使った半円筒の入力例

transform:

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

source:

```
- type: RCC
```

```
name: s1
```

```
geometry:
```

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

```
height_vector: 0 0 800
```

```
radius      : 400
```

```
transform: tr3
```

```
division:
```

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

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

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

transform で回転・平行移動を適用できる。

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

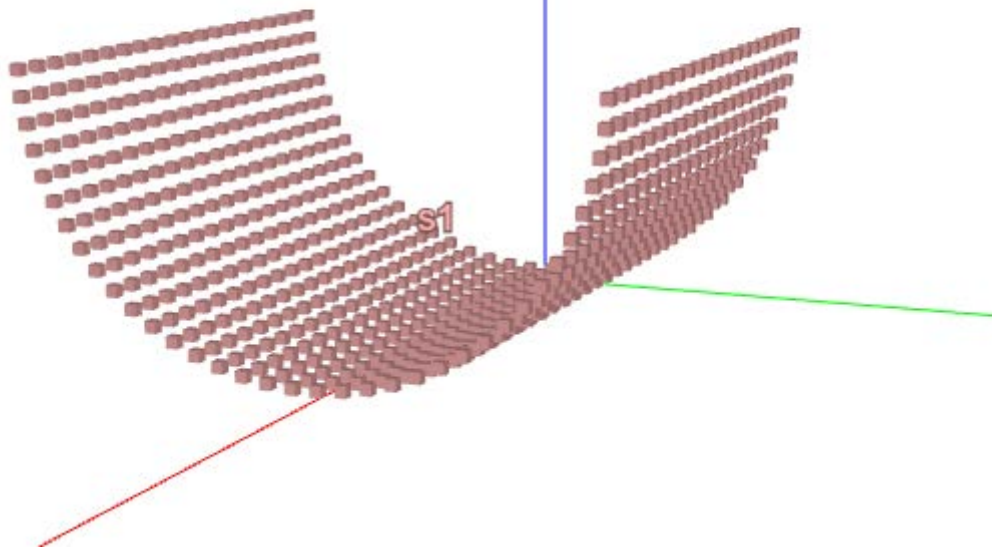


図 4-18 体積線源 RCC を使った半円筒の入力例 (上) と GUI 3D View 上の線源点 (下)

(3) MANUAL 分割時の重み指定

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

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

・重みの適用方法

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

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

※ x, r, z : 0.0~1.0 (全長に対する比率)

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

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

weight ノードが設定されている場合

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

・直交座標系 (Cartesian) : BOX および RPP

x : FL(l)

z : FM(m)

y : FN(n)

・円柱座標系 (Cylindrical) : RCC

r : FL(l)

z : FM(m)

ϕ : FN(n)

・球面座標系 (Spherical) : SPH

ρ : FL(l)

θ : FM(l)

ϕ : FN(n)

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

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

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

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

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

weight ノードが設定されていない場合

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

- 直交座標系 (Cartesian) : BOX および RPP

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

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

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

- 円柱座標系 (Cylindrical) : RCC

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

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

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

- 球面座標系 (Spherical) : SPH

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

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

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

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

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

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

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

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

- weight ノードの機能確認

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

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

(入力ファイル抜粋)

source:

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

weight ノード設定なし
の場合は微小体積の割合
で重み付けされる

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

point_source:

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

type:BOX (直方体) : 重み (weight) 指定

division:

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

各分割点と同じ重みを
設定

point_source:

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

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

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

(入力ファイル抜粋)

source:

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

weight ノード設定なし
の場合は微小体積の割合で重み付けされる

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

point_source:

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

type:SPH (球) : 重み (weight) 指定

division:

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

r 方向の分割による微小体積の比は 2 等分割の場合 1 : 7 となる

point_source:

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

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

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

(入力ファイル抜粋)

source:

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

division:

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

weight ノード設定なし
の場合は微小体積の割合
で重み付けされる

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

point_source:

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

type:RCC (円柱) : 重み (weight) 指定

division:

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

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

point_source:

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

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

(4) 複数線源、複数核種、エネルギー指定、スペクトル下限値の設定

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

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

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

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

従来のコード：旧フォーマット

source:

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

核種名による1核種
のみの定義

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

複数線源の定義は
許されていない

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

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

図 4-22 従来の入力ファイルにおける source ノードの記述例

拡張後：新フォーマット

source:

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

エネルギー指定が可能

inventory:

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

cutoff_rate: 1.0e-4

光子発生率の下限値とし
て任意の値を設定可能

path_trace:

```
position: 300 300 100
```

透過線の基準点を線源ごと
に設定可能 (type: PSEUDO
は廃止)。

```
- type: POINT
```

```
name: s2
position: 300 300 200
inventory:
```

```
- {nuclide: Co60, radioactivity: 0.25e+10}
- {nuclide: Be7, radioactivity: 0.25e+10}
```

複数核種が定義可能

cutoff_rate: 1.0e-4

path_trace:

```
bounding_box: s2
```

複数線源が定義可能

図 4-23 拡張後の入力ファイルにおける source ノードの記述例



図 4-24 従来コードにおける複数線源定義時のエラーメッセージ

4.2.2 検証

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

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

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

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

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

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

放射エネルギーを半分にして
エネルギー指定

放射エネルギーを1/4にしてCo60
を2つ定義

図 4-26 2線源に分割した場合の入力ファイルにおける線源定義部分

```

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

```

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

```

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

```

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

同検出器の位置で
同じ合計線量となった

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

なお、詳細な計算条件は、昨年度報告書と同様に以下のように設定した。

(1) 計算体系と条件

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

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

* 単位記載のない座標数値は cm。

(2) 光子発生率ライブラリの整備

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

表 4-1 線源核種 ^{60}Co の光子発生率

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

(3) 物質組成とビルドアップ代表物質

表 4-2 に検証計算に使用した物質組成を示した。

ビルドアップ代表物質として鉄を採用した。

表 4-2 計算に使用した物質組成

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

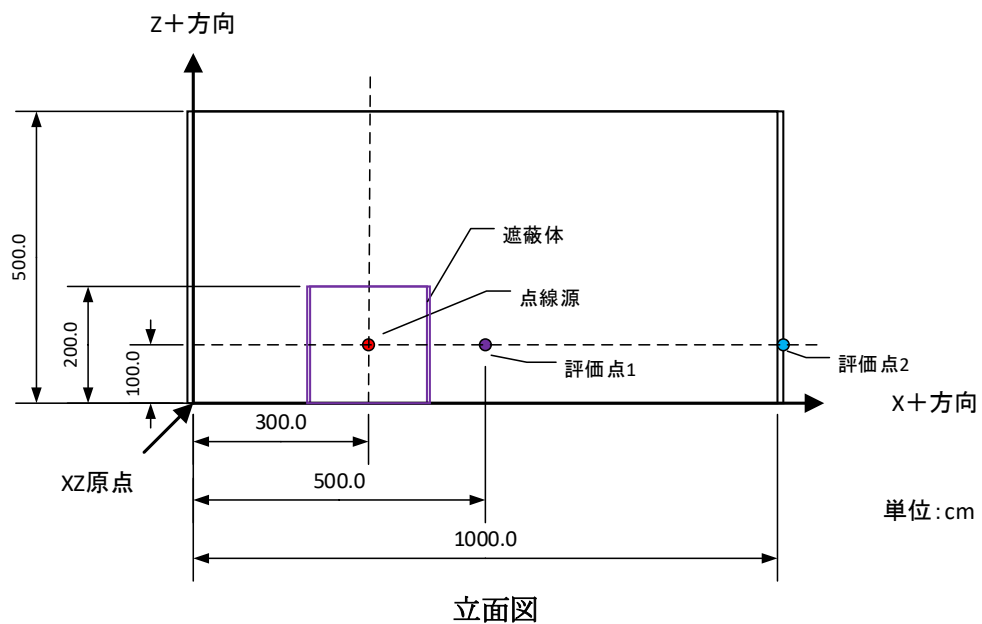
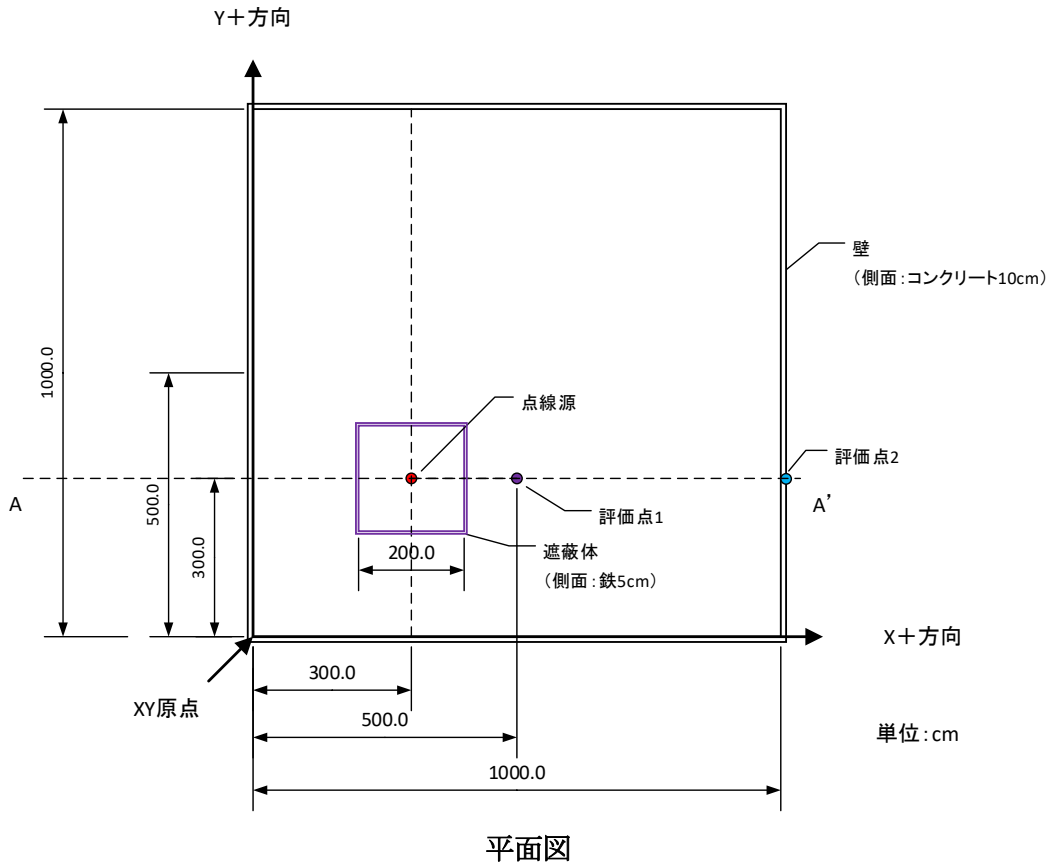


図 4-28 放射線取扱施設の計算体系

4.3 計算条件編集機能の作成

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

4.3.1 仕様検討

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

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

4.3.2 遮蔽計算コードの追加設計

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

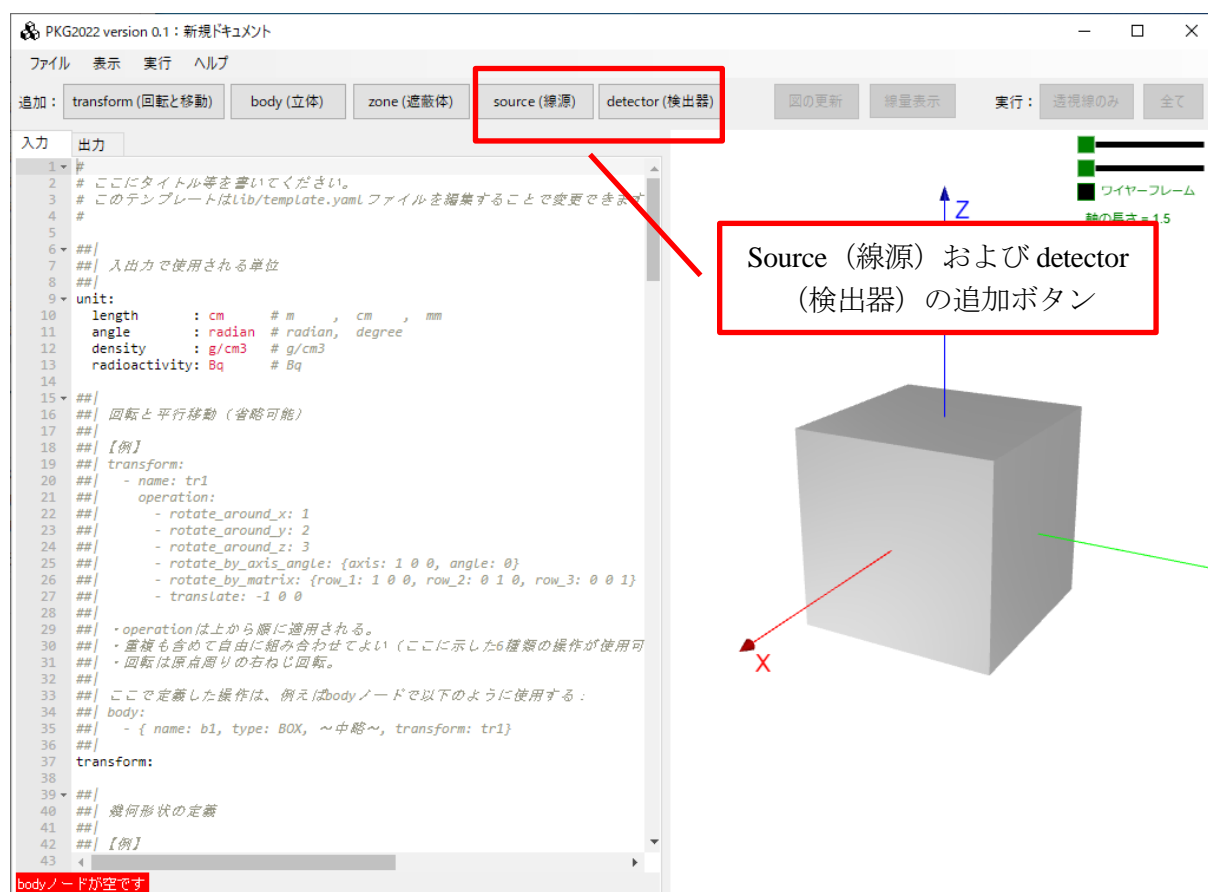


図 4-29 PKG2022_GUI における線源 (source ノード) および検出器 (detector ノード) の追加ボタン

4.3.3 遮蔽計算コードの追加開発

遮蔽計算コードの GUI に関して追加開発を行った。

(1) 線源条件編集機能の作成

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

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

「線源領域」タブ (図 4-30) では、主に以下の項目を設定する。

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

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

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

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

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

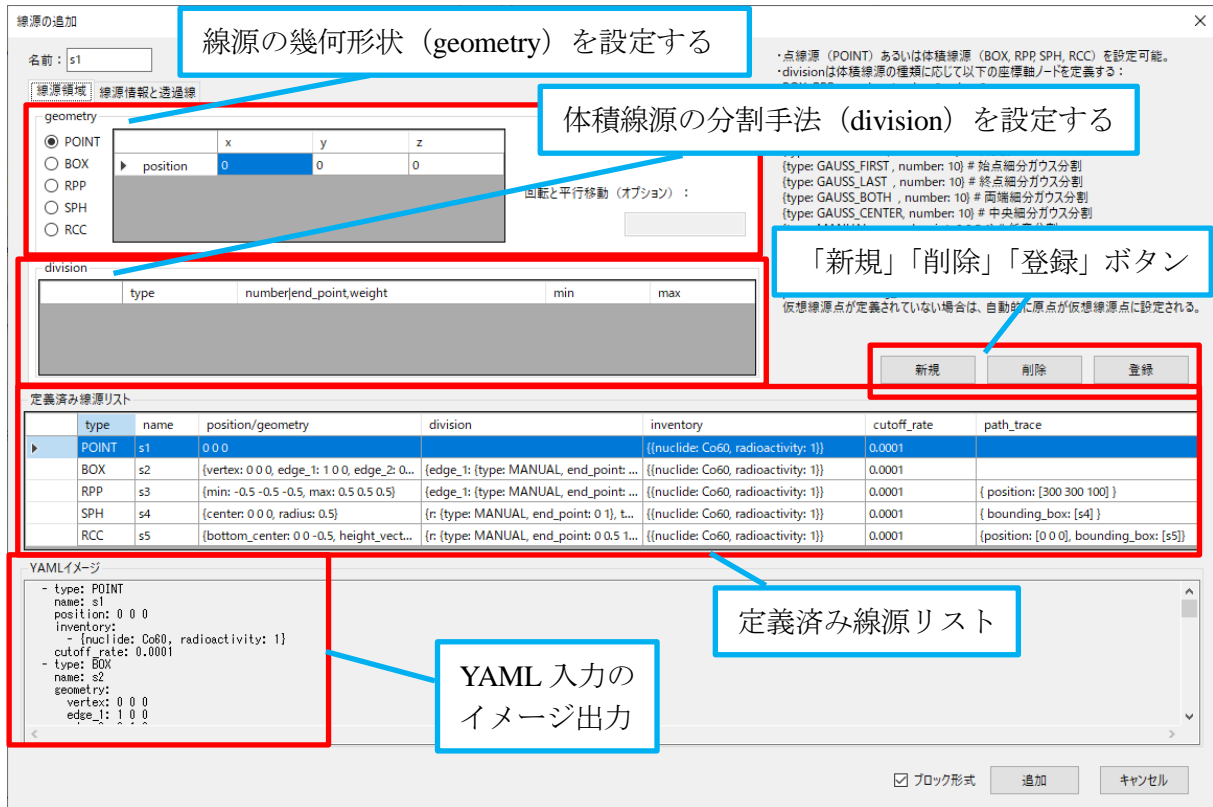


図 4-30 線源条件編集画面：「線源領域」タブ

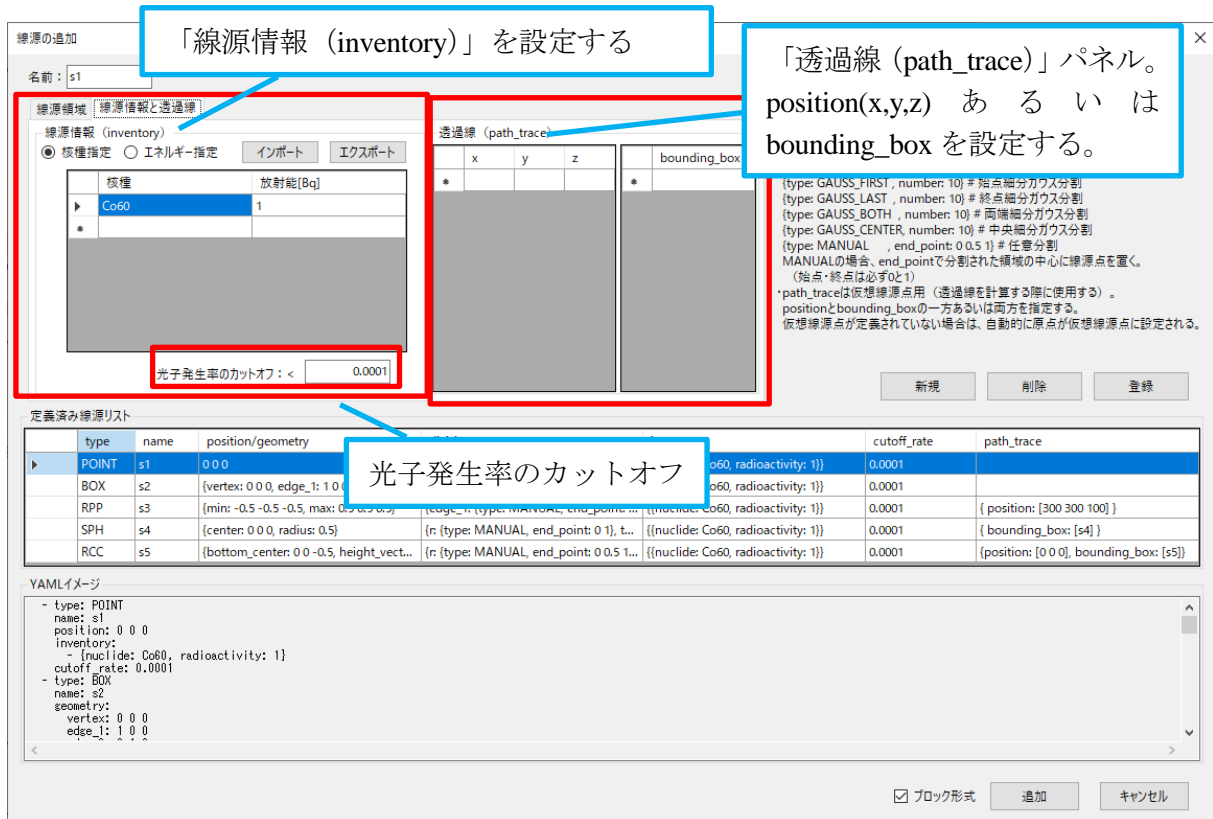


図 4-31 線源条件編集画面：「線源情報と透過線」タブ

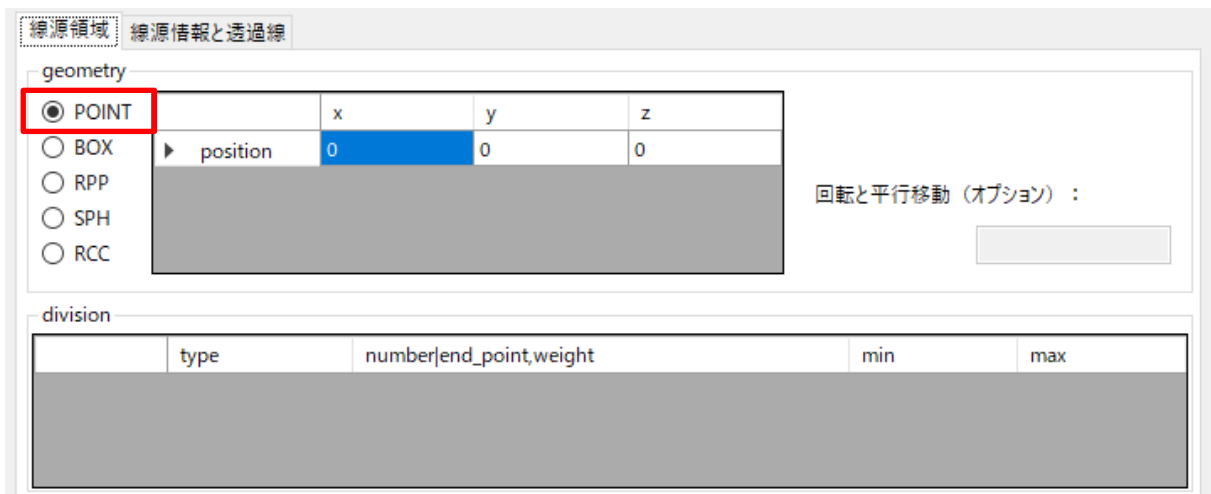


図 4-32 「線源領域」タブにおける設定：点線源の場合

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

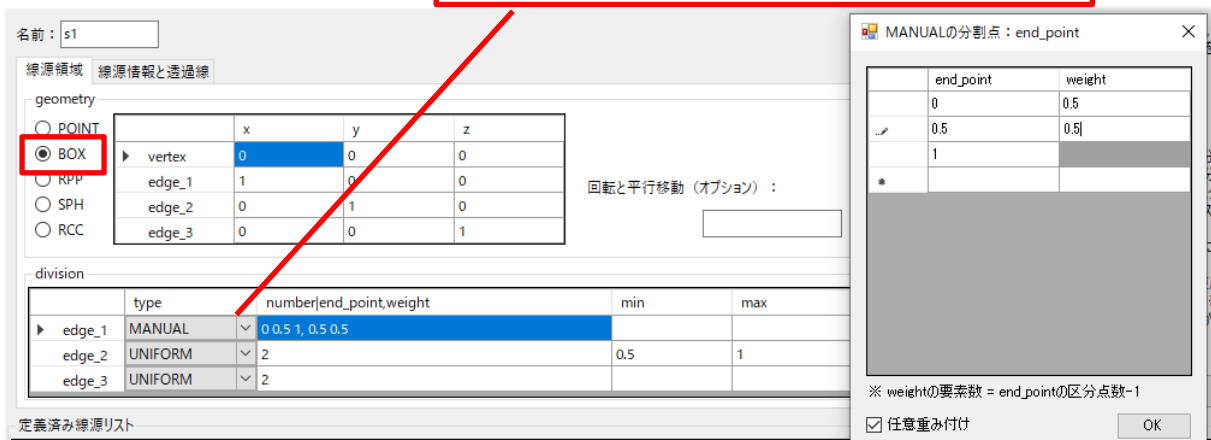


図 4-33 「線源領域」タブにおける設定：体積線源 BOX の場合

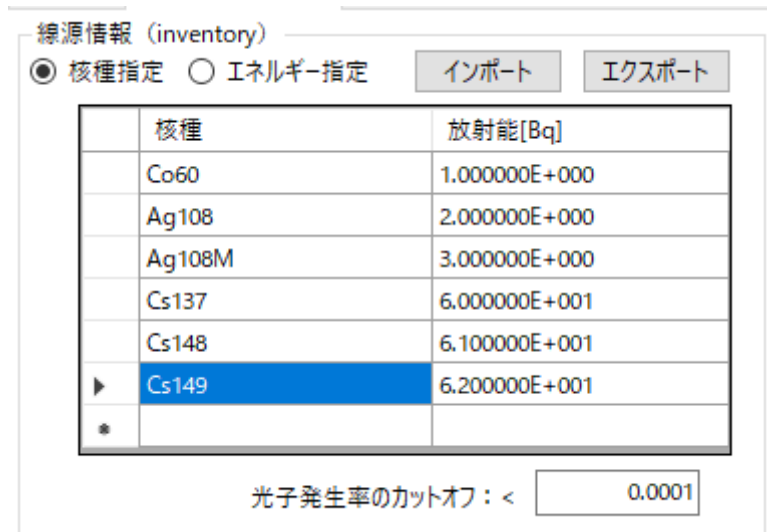


図 4-34 「線源情報 (inventory)」パネル：線源情報 (核種指定)



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

(2) 検出器編集機能の作成

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

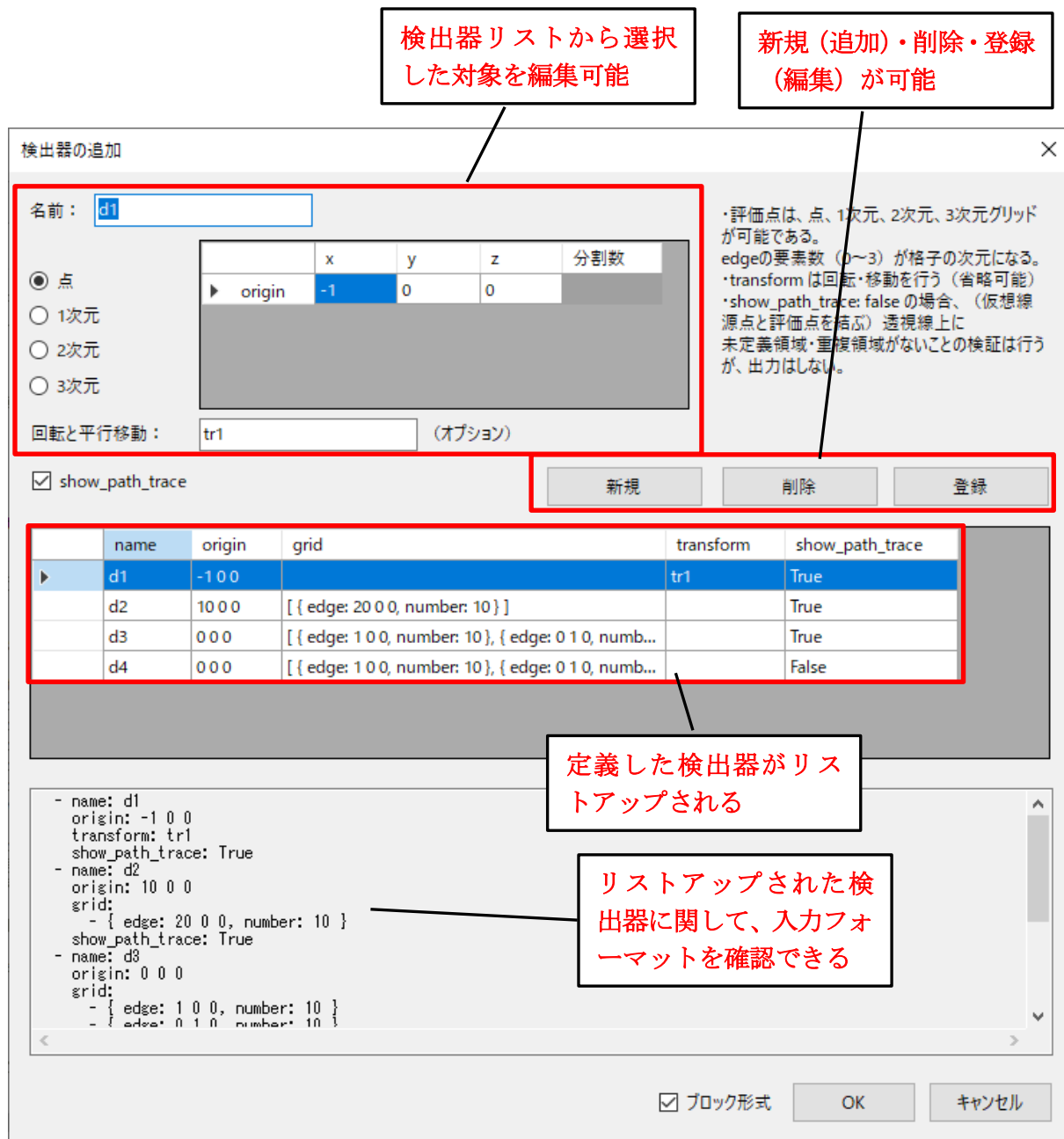


図 4-36 検出器編集機能

5. コードの妥当性検証作業

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

表 5-1 コードの妥当性検証作業の実施項目

(1)放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル2015

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

(2)QAD-IEマニュアル

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

(3)QAD-CGGP2R相当コード

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

(4)一括と個別計算の比較

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

5.1 放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015

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

5.1.1 透過率データを用いて実効線量率を求める方法

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

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

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

表 5-2 実効線量率定数 (Co-60)

Co-60実効線量率定数(μ Sv/h per 1MBq at 1m)

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

表 5-3 実効線量透過率 (Co-60、コンクリート)

実効線量透過率

線源核種 : Co-60

遮蔽材 : コンクリート

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

5.1.2 実効線量ビルドアップ係数を用いて実効線量率を求める方法

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

表 5-4 計算条件（実務マニュアル 1.2.2）

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

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

表 5-5 実効線量率（実務マニュアル 1.2.2）

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

5.1.3 診療用腔内照射施設の例

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

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

表 5-6 実効線量率定数 (Ir-192)

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

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

※M3.1:実務マニュアル 3.1節 p.3-7

表 5-7 実効線量透過率 (Ir-192、タングステン)

実効線量透過率

線源核種 :Ir-192

遮蔽体 :タングステン

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

※M3.1:実務マニュアル 3.1節 p.3-7

実務マニュアルには厚さ6cmのみ記載されている。

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

表 5-8 計算条件 (実務マニュアル 3.1.3)

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

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

表 5-9 実効線量 (実務マニュアル 3.1.3)

放射性同位体を使用する室内の実効線量(μ Sv/週)

遮蔽体 : タンゲステン6cm

距離 : 0.56m

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

※M3.1:実務マニュアル 3.1節 p.3-7

5.1.4 放射線発生装置取扱施設における遮蔽計算例

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

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

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

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

実効線量透過率(1次 γ)
線源 : 10MeV X線
遮蔽体 : 鉄

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

表 5-11 鉄遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率 (中性子込み)

実効線量透過率(1次 γ +中性子+2次 γ)

線源 : 10MeV X線
遮蔽体 : 鉄

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

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

表 5-12 コンクリート遮蔽における利用線錐光子の実効線量透過率

実効線量透過率(1次 γ)

線源 : 10MeV X線

遮蔽体 : コンクリート

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

5.2 QAD-IE マニュアル

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

5.2.1 サンプル問題 1

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

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

表 5-13 QAD-IE サンプル問題 1 の計算結果比較

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

原子力安全技術センターのサンプル問題
(⁶⁰Co 線源、 $E_0=1.25\text{MeV}$ 、コンクリート密度 2.30g/cm^3)

5.2.2 サンプル問題 2

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

表 5-14 QAD-IE サンプル問題 2 の計算結果比較

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

米国原子力学会の標準問題（廃棄物貯蔵タンク）

5.3 QAD-CGGP2R 相当コード

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

5.3.1 鉛遮蔽の例

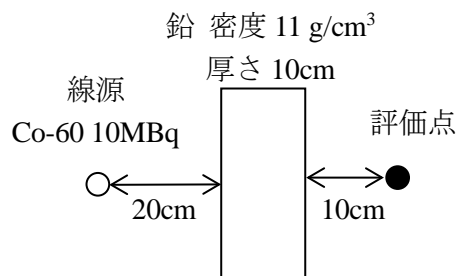
始めに、鉛遮蔽における Co-60 線源の実効線量透過率を γ Shielder と JPKG2022 で計算した。計算結果の比較を表 5-15 に示す。厚さが増すと JPKG2022 の値が高くなっていく傾向が見られる。

表 5-15 実効線量透過率 (Co-60、鉛)

実効線量透過率
線源核種 : Co-60
遮蔽材 : 鉛

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

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



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

表 5-16 鉛遮蔽の計算結果比較

実効線量率 (μ Sv/h)		
線源核種 : Co-60		
線源強度 : 10MBq		
遮蔽体 : 鉛 10cm		
距離 : 線源から40cm		
①JPKG2022	② γ Shielder	①/②
1.17E-01	1.08E-01	1.08

5.3.2 土壌遮蔽の例

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

表 5-17 実効線量率定数 (Cs-134、Cs-137)

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

表 5-18 実効線量透過率 (Cs-134、Cs-137、土壌)

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

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

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

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

表 5-19 土壌遮蔽の計算結果比較

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

5.4 一括と個別計算の比較

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

5.4.1 複数核種の例

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

表 5-18 複数核種の計算結果比較

実効線量率 (μ S/h)

線源強度 : 各核種 1MBq
遮蔽体 : アルミ 10cm
距離 : 線源から 40cm

Co-60個別計算	1.1085E+00
Cs-134個別計算	7.2336E-01
Cs-137個別計算	2.6218E-01
個別計算合計	2.0940E+00
3核種一括計算	2.0940E+00

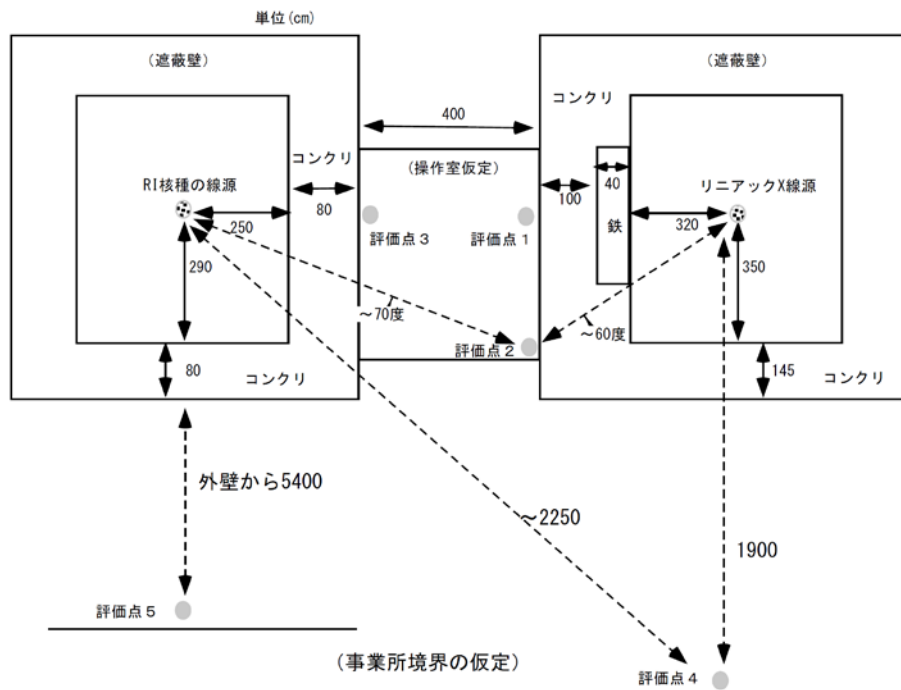
5.4.2 複数線源の例

複数線源の計算条件を以下に示す。

計算条件

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

平面図を以下に示す。



※RI 核種の線源を原点、→を X+、↑を Y+とする。

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

表 5-19 複数線源の計算結果比較

実効線量率($\mu\text{Sv/h}$)

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

参考文献

- ¹ 「放射線施設のしゃへい計算実務マニュアル 2015」、公益財団法人原子力安全技術センター
- ² 「QAD-IE コードマニュアル」、(株)原子力安全システム研究所、平成 18 年 5 月 22 日
- ³ 「 γ 線ビルドアップ係数：2013」、一般社団法人日本原子力学会、2013 年 12 月

令和3年度放射線対策委託費（放射線安全規制研究戦略的推進事業費）
放射線安全規制研究推進事業

看護職を活用した住民に対する

放射線リスクマネジメントの推進

-原子力災害支援保健チーム（NuHAT）の実現を目指して-

報告書

令和4年3月

東京医療保健大学

目次

I	はじめに.....	1
I-1	研究背景と目的.....	1
I-2	研究体制.....	4
II	NuHAT 検討 WG.....	5
II-1	研究目的・目標.....	5
II-2	研究方法.....	5
II-3	結果.....	7
II-4	考察.....	9
II-5	今後の課題.....	13
II-6	結語.....	14
II-7	表.....	15
II-8	文献等.....	15
III	「放射線リスクマネジメント」科目の導入検討 WG.....	16
III-1	目的・目標.....	16
III-2	方法.....	16
III-3	結果・考察.....	17
III-4	今後の課題.....	23
III-5	結語.....	23
III-6	表.....	24
IV	放射線リスクマネジメント研修 WG.....	45

IV-1	研究目的・目標.....	45
IV-2	研究方法.....	45
IV-3	研究結果.....	49
IV-4	考察.....	50
IV-5	今後の課題.....	52
IV-6	結語.....	53
IV-7	写真・表.....	53
V	まとめ.....	64
VI	資料.....	66

I はじめに

I-1 研究背景と目的

2011年に発生した東京電力福島第一原子力発電所の事故（F1事故）では、医療保健の専門職である看護職は、放射線の視点に立った役割を果たすことができなかった。住民の健康情報、地域の特性を把握・理解し、地域住民にとって最も身近な存在であることを自認し、地域の医療・保健活動に日常的に取り組んできた看護職であるが、原子力・放射線に関する知識・技術が不十分であったことが大きな理由であった。そこで、制度上も、看護の基礎教育の中に放射線教育が取入れられつつある現状を踏まえ、医療職の半数以上を占める看護職が、放射線・原子力防災に寄与できる方策を検討する時期にあると考え、その方策の一つとして、放射線の健康影響・リスクに関する専門性の高い知識・技術を習得した看護職（看護師・保健師・助産師）等から構成される原子力災害支援保健チーム（NuHAT：Nuclear disaster Health Assistance Team）を設置し、放射線・原子力事故発生直後のみならず復興期を含む中長期にわたり住民と向き合い、住民の放射線の健康リスクに対する不安などに恒常的に対応できる役割を果たすことができればと考え、本研究を通してNuHATの実現に向けての検討を行うことにした。

医療支援や生活環境支援などを目的とした災害支援チーム（災害支援ナース、DMAT等）はすでに複数、存在し、活躍しているが、放射線リスクマネジメントに着目し住民と向き合って相談等に対応できる看護職を中心としたチームは、今までになかった。原子力規制庁は、平成30年に「帰還に向けた安全・安心対策に関する基本的考え方について」をまとめ、相談員の一人として保健師、看護師の活用を提案している。放射線リスクマネジメントに関するより専門性の高い知識・技術を備えたメンバーから構成され、教育・研修を受けたNuHATが、被災現場で相談員として活動する保健師、看護師を支援していくことも考えている。

本研究で実現性等を検討することとしたNuHATであるが、なぜ看護職を中心としたチームであるか、なぜ、放射線リスクマネジメントに注目したかを以下に記述する。

I-1-1 設置を予定しているNuHAT（原子力災害支援保健チーム）の概要

1. NuHATの役割と構成メンバー

1) NuHATの役割

NuHATは、原子力災害時（事故直後から中長期まで）はもとより、平常時においても、地域住民に対する放射線リスクマネジメントに関する活動を行うチームである。

(1) NuHAT の構成メンバー

日本看護系大学協議会が課程認定し、日本看護協会が資格認定した放射線看護専門看護師課程（大学院修士課程）を修了した看護師および大学院修士課程において放射線リスクマネジメントに関する科目を修得した保健師、看護師、助産師を主なメンバーとする。

(2) なぜ、看護職を中心としたチームか

看護職は、①患者や住民にとって最も身近な存在である、②とくに保健師は地域診断、地区踏査、家庭訪問などの保健活動を通して地域の特性や住民の生活背景も含めた情報を最も多く持っている医療・保健職である、③傾聴・観察を基本に対象者を包括的にアセスメントし、対象者の QOL 向上を目指してマネジメントしていくスキルを取得しており住民の信頼を得やすい立場にある、④コミュニケーション能力に長けているなどの特徴があり、住民の不安等に応えることができるものと考えている。しかし、F1 事故で、看護職の原子力・放射線に関する知識・技術が不足していることが露見した。この反省を踏まえ、2014 年には「看護学モデル・コア・カリキュラム」の中に「放射線」の科目を取入れることができ看護職の放射線看護に関する知識・技術が進化しつつあること、「放射線看護専門看護師（CNS: Certified Nurse Specialists）」の養成が3つの看護系大学院修士課程で実施されており、40 人近い修了生が輩出されていること、保健師の大学院教育が始まっていること等から、放射線リスクに関するスキルを習得した看護職が、住民の放射線リスクマネジメントに係ることにより、F1 事故で明らかとなった行政・専門家と住民との間の放射線リスクに関する溝を埋める役割を果たし、原子力防災に貢献していきたいと考えた。

住民に対する放射線リスクマネジメントはさまざまな職種が、それぞれの専門性を尊重し、お互いの連携・協働のもとで行われるが、看護職のコミュニケーションスキルを活用し、多職種間の調整役の役割を果たすこともできると考えている。

2) なぜ、放射線リスクマネジメントか

災害発災直後の活動を主たる役割とする DMAT（Disaster Medical Assistance Team：災害派遣医療チーム）や災害支援ナース（日本看護協会）はすでに組織化され、数多くの自然災害の現場での活動実績も集積されている。

原子力災害に関しても緊急被ばく医療の整備が 1999 年の JCO 事故以降進められ、緊急被ばく医療拠点病院や緊急被ばくネットワークなどがすでに構築され、体制が整備されている。しかし、原

子力災害時には、住民に緊急被ばく医療を必要とされる事例が発生しないように種々の防災対策が講じられており、F1事故でも緊急被ばく医療を必要とする住民はいなかった。

原子力防災において今後、整備が必要とされる方策は、事故直後から中長期にわたり放射線リスクに不安を抱く住民に対する放射線リスクマネジメントの仕組みづくりであると考えている。放射線リスクマネジメントに関しては、①平常時から中長期にわたる長期間の対応が必要であること、②「いのち」に直結する課題ではないこと、③アウトカムの可視化・客観化が難しいこと、④リスクマネジメントの実施主体、責任が明確でないことなどから組織的な取り組みが進んでいないのが現状である。

F1事故においても、行政や専門家がエビデンスとしての放射線リスクを住民に示すことは既に行われているが、住民がリスクを理解・認識し、そのリスクを受け入れるか否かを自ら判断する段階までには至っておらず、行政・専門家と住民との間に溝が生じ、その溝が埋まらないままの状態にある。

本研究では設置を予定している NuHAT が、恒常的な組織として活動できることを目指して1年間の限られた研究期間の中で以下の3点を明らかにすることを目標として、3つのワーキンググループ (WG) において検討を進めることとした。

- ① WG-1 NuHAT 検討WG： NuHAT を継続的なチームとしていくための組織の要件等
- ② WG-2 「放射線リスクマネジメント」科目の導入検討WG： NuHAT メンバーを恒常的に供給できるようにするための、養成教育における放射線リスクマネジメント教育の内容
- ③ WG-3 放射線リスクマネジメント研修WG： NuHAT メンバーが「いつでもどこでも」活動できる質を維持・向上するための研修のあり方

なお、本研究で実施した調査は全て東京医療保健大学「ヒトに関する研究倫理審査委員会」の承認を得て実施した(承認番号：教33-3B)。

総括

明石眞言(東医保大)・草間 朋子(東医保大)

NuHAT 検討WG

太田勝正(東都大)、野戸結花(弘前大)、吉田浩二(長崎大)、赤羽恵一(量研)、
小嶋光明(大看科大)、佐藤潤(東医保大)、加藤知子(東医保大)、堀田昇吾(東医保大)

【NuHATの人材供給源】

**看護系大学院修士課程
「放射線リスクマネジメント」科目の
導入検討 WG**

佐藤潤(東医保大)、
小嶋光明(大看科大)、加藤知子(東医保大)、
野戸結花(弘前大)、吉田浩二(長崎大)

【NuHATの質向上】

**放射線リスクマネジメント
研修WG**

堀田昇吾(東医保大)、赤羽恵一(量研)、
太田勝正(東都大)、野戸結花(弘前大)、

II NuHAT 検討 WG

II-1 研究目的・目標

構成する予定の NuHAT を恒常的に運営していくためのチームのあり方（チームの役割の明確化、構成メンバーの質向上、運営経費の確保など）を検討し、NuHAT の実現に向けた要件を明らかにする。

II-2 研究方法

NuHAT の実現、継続的な運営に向けて以下の調査を行う

1. NuHAT 参加意向調査
2. 既存の災害時医療支援組織および緊急被ばく医療支援組織の運営体制等についてのインタビュー調査
3. 原子力発電所の立地県および隣接県の行政担当者や事業者を対象にしたインタビュー調査

なお、計画段階では、原子力総合防災訓練へ参加し看護職の行動観察を行い看護職の活動実態を参考に NuHAT の役割を検討することとしていたが、新型コロナウイルス感染症拡大に伴う緊急事態宣言発令及び蔓延防止等重点措置などがあり、防災訓練への参加が困難となり実施できなかった。

II-2-1 対象者

1. NuHAT 参加意向調査

一般社団法人日本放射線看護学会内にある「放射線看護専門看護師(仮)活動支援ワーキンググループ」が管理している CNS 養成課程修了生のメーリングリスト登録者全員を対象とした。

1) 既存の災害時医療支援組織および被ばく医療支援組織へのインタビュー調査

災害時医療支援組織：関係者 2 名

被ばく医療支援組織：関係者 1 名

2) 原子力発電所の立地県および隣接県の行政担当者へのインタビュー調査

原子力発電所の立地県および隣接県の行政担当者：3 名

いずれのインタビュー調査も対象者は機縁法にて選択した。

II-2-2 調査およびインタビューの実施時期と実施方法

NuHAT 参加意向調査：2021 年 7 月

災害時医療支援組織：2021 年 9 月

被ばく医療支援組織：2021 年 10 月

原子力発電所の立地県および隣接県の行政担当者：2022 年 3 月

インタビューはいずれも遠隔（Zoom Video Communications 社が提供するオンラインミーティングツール Zoom を使用した）で、インタビューガイドにそって実施した。

II-2-3 調査内容

1. NuHAT 参加意向調査

NuHAT が設置された場合、参加するか否か

2. 災害時医療支援組織についてのインタビュー調査

- 1) 設立の経緯
- 2) 災害時医療支援組織の参加者（登録者）は、各所属組織が選定した者か、個人で登録した者か
- 3) 登録者（参加者）に条件をつけているか(例えば、救急部所属の経験ありなど)
- 4) 登録者の中から、災害発生時に派遣するメンバーをどのように選択しているか
- 5) 登録者に対して定期的な情報提供、研修などを行っているか
- 6) 災害時医療支援組織の参加者の現地への派遣に係わる必要経費の支給とその財源について
- 7) 災害時医療支援組織の参加者の、派遣時の所属母体、勤務との関係について
- 8) 事務局の運営について(構成メンバー、財源)
- 9) 学会や職能団体等との関係（支援を受けているか）
- 10) 今後の課題について

3. 被ばく医療支援組織についてのインタビュー調査

- 1) 設立の経緯
- 2) 研修のあり方(特に看護職)
- 3) 財源の確保
- 4) 今後の課題

4. 原子力発電所の立地県および隣接県の行政担当者へのインタビュー調査

- 1) 県庁内の医療職の配置状況（配置部署、職種、人数、勤務形態）

- 2) 県庁内で原子力防災を担当している部署における常勤または非常勤の看護職(看護師、保健師、助産師)の有無
- 3) 原子力防災訓練への看護師の関わりと役割
- 4) 平常時の県民からの放射線や放射線の健康影響などに関する相談への対応：誰が、どのように
- 5) 原子力災害時に、看護職に担ってほしい役割
- 6) 県庁の看護職が、外部の放射線関連の研修会に参加した経験の有無
- 7) 今後、医療職を採用するとした時どのような職種の人を採用して欲しいか
- 8) 原子力防災で苦労している点
- 9) 本プロジェクトで計画している NuHAT に対するご意見

II-2-4 分析方法

NuHAT 参加意向調査は、単純集計を算出した。インタビュー調査は、質的記述的分析を実施した。いずれのインタビューも IC レコーダーに録音し、逐語録を作成したのち、調査目的にあった内容を抽出し分析した。

II-3 結果

II-3-1 NuHAT 参加意向調査

NuHAT 参加意向調査は、36 名から回答があり(回収率 100%)、NuHAT が設置された場合「参加する」が 32 名 ・ 「職場等と調整がいたら参加の意思を表明する」が 4 名 ・ 「参加する意思はない」は 0 名であった。

II-3-2 インタビュー調査

インタビュー時間は災害時医療支援組織の関係者 60 分、被ばく医療支援組織の関係者 81 分、原子力発電所の立地県および隣接県の行政担当者 66 分であった。

インタビューでの対象者の語り部分をカギ括弧(「 」)で示した。

1. チームの規模と運営について

2 組織とも全国に複数の拠点やチームがあり、各チームを構成するメンバーの総数は数千人に及ぶ。災害時医療支援組織は地域ブロック毎の管理もなされていた。各チームから現地に派遣するの

は3-4名程度のメンバーから構成されるグループであり、主に災害発生初期の急性期に災害現場に派遣される。

各組織は事務局を有しており、専任または併任のスタッフを配置している。勤務形態は常勤と、非常勤（半数以上）である。インタビューでは「事務局を作って、派遣チームが安心して働ける環境づくりに労力を費やしてきた」と語っていた。事務局は、平時は研修の企画運営や組織メンバーの情報管理、備品の管理や組織の運営方針の検討など「組織としてのメンテナンス機能」を行っていた。

2. 組織を構成するメンバーの確保

インタビューでは、「チームメンバーは志が高い人が多いのであまり苦労はないです。」と語り、医療者の中に、災害対応を希望する者が常時かなりの人数いることが推測できた。一方で、「最近数年は、自ら組織に参加することを希望した訳では無いけれども病院から言われたのできました。研修の一環で来ましたと言うような方も実際にはかなりいるだろうと言う印象です」、とも語られ、「モチベーションの高いメンバーをいかに募り、そのモチベーションを維持し続けられるかがチームメンバーの人材確保の視点から重要である」と語られていた。

3. 構成メンバーへの教育機会

チームメンバーの教育の機会として、各組織も研修を開催しており、「年間大体24回、技能を維持するための研修を組んでいます。」、「全国を地方ブロックに分けて複数都道府県のメンバーが年一回訓練を行うことになっています。これも技能のブラッシュアップの一環ということになります。」と述べられた。インタビューに回答した関係者の施設の研修の参加者は、「施設外の方が基本で、全国の医療従事者を対象にした研修です」と述べており、自施設の職員のみを対象とするだけでなく、さまざまな施設に所属するメンバーを対象とした研修を開催していた。また「各ブロックの事例の紹介を随時提供しています」と、各地での訓練や実際の災害時の様子を共有することも教育の一環としていた。

4. 構成メンバーのモチベーションを保つ工夫

チームメンバーのモチベーション維持について、「モチベーションに関しては訓練に参加したり研修会等で(構成メンバーが)教える側になり、自分のスキルを外に出せる機会をつくることでモチベーションにもなると思っています。」と語った。また、研修以外で、「いくつかの学会で専門医の更新をするときに災害医療の訓練に参加してることが点数は低いですが、何点かにはなっており専門医の更新の時などに多少なりとも利点がある。」と、個人にインセンティブをつける試みが述べられた。

5. NuHAT に期待する役割

A 県では、現在、原子力防災に関連する部署に看護職はおらず、唯一の医療職は薬剤師 3 名であった。県で行う原子力防災訓練では、オフサイトセンターでの活動も含まれているが、看護職をはじめとする医療職を配置はしておらず、“地域を知る人”として保健所のスタッフがオフサイトセンターに配置されるように規定されていた。A 県担当者は、「オフサイトセンターに配置される保健所職員の中に保健師もいるかもしれないが、県では把握はしていない」と述べた。また、「避難が始まって、(NuHAT のメンバーには)地元の保健所の総括保健師を、放射線防護の視点から(支援を)行なってもらえると良いのではないかと思う。(中略)実際には、総括保健師やリーダー保健師は放射線に関する知識が乏しいと思うので、自分達(地元の保健師)も放射線防護をしながら避難所を支えていければと思う。行政担当者が避難所を回っていく時に一緒に回ってもらって、放射線について不安に思っている方々のフォローに入ってもらおう。(NuHAT のメンバーには)総括保健師のサポート 1 名、巡回する保健師のサポートが 2 名ぐらいで」と語られた。

さらに、A 県担当者からは「(原子力災害は)急性期だけでなく、数年のスパンでフォローアップをしていく中で、あの時は大丈夫だったけど、そのあと(住民が)不安になったとかはたくさん出てくるだろうと思う。そういった時に一緒に(住民のもとを)回ってもらおうなど、(NuHAT メンバーから)レクチャーをしてもらうなど(してほしい)。保健師ならではの悩みがあると思う。辛い所に手が届くような人材が有難いと思う。」と述べられた。

II-4 考察

意向調査およびインタビューの結果をもとに NuHAT の実現、継続に必要な要件について考察する。

1. 事務局設置の必要性

NuHAT が、放射線・原子力災害発生直後だけではなく、平時も住民に対する放射線リスクマネジメントを効果的、効率的に実施できる体制を整えていくためには常設の事務局の設置は不可欠である。事務局は、放射線・原子力災害が発生した際には、被災現場の情報を集約しつつ、どのメンバーをいつまでどこに派遣するかを迅速に行い、メンバー間や行政等との連絡をする役割を果たす。また、平常時は、NuHAT メンバーの質向上のため研修の企画・実施を行う必要がある。さらに、災害現場で活動する組織メンバーの安全と安心の確保も重要な役割である。

災害時医療支援組織と異なり、派遣の期間が短い(災害時医療支援組織は自然災害や人為的な災害発生時に複数のチームが派遣される)こと、構成メンバーの全数が少なく研修の機会も少なく(年 2 回程度を想定)・研修の規模も小さい(1 回あたり 20 人程度)ことから事務局のスタッフは複数

名の常勤体制である必要はないと考えている。ただし、原子力災害、看護職の日常の実践現場（勤務形態、勤務状況等）などについて精通したスタッフが望ましい。これらの諸点から、当面は、一般社団法人日本放射線看護学会に事務局機能を依頼することが現実的ではないかと考えているが、将来的には継続的に事業を企画・運営するための専従者が必要になると考える。

1) NuHAT の規模と運営

原子力事故が同時に複数の箇所で発生する可能性は極めて低いと考える。また、原子力災害発生直後の活動は、都道府県首長により設置された災害対策本部の指示の基で活動することになる。したがって、NuHAT は組織（チーム）としては1つあれば良く、原子力災害の規模に応じて複数のグループを派遣できればと考えている。NuHAT の構成メンバーは、放射線看護専門看護師、大学院修士課程で放射線リスクマネジメントの科目を修了した看護職等から構成することを考えているので、NuHAT の構成メンバーは、50人程度を考えている。1グループの構成員2名程度とし、原子力災害発生時、平常時に必要な数のグループ（原子力災害発生直後は3～5グループ、平常時は1グループ）を派遣することを考えている。メンバーの誰を派遣するかは、事務局が個々のメンバーと相談して決定する。

2) NuHAT 構成メンバーの確保

前述した通り NuHAT の構成メンバーは主に放射線看護専門看護師（CNS）と保健師である。NuHAT への参加は自由意思であるが、CNS および保健師の NuHAT に対する関心は高く、参加に対するモチベーションも高い。36名のCNSを対象に、NuHAT への参加に関する移行調査を行った結果、32名は「参加する」と回答し、4名は所属長の許可が必要であるため調査時点では「わからない」と回答し、「参加しない」と回答した人はいなかった。したがって、NuHAT の構成メンバーの確保は、比較的容易であると考えている。特に「放射線看護専門看護師（CNS）」は、「原子力災害に対する支援」をミッションの一つとして掲げ、分野認定（日本看護協会）を受けており、資格認定更新にあたっては、実践活動の成果が問われるので、NuHAT の設置およびNuHAT メンバーとしての活動を期待している。

放射線・原子力災害が発生した場合に、派遣の意思の高い看護職が、現地へ派遣できるように事業主（雇用主）の理解が得られるように、NuHAT に対する認識・関心を高める努力も必要であると考える。

3) 構成メンバーに対する教育機会(研修)の必要性

構成メンバーは、日常的には、医療施設や保健所などで看護職として医療・保健業務を行っており、放射線に係る業務をおこなっている看護職は限られている。ましてや、原子力災害を経験し

たメンバーは皆無に等しい。発生頻度の極めて低い原子力災害に関連する知識や技術については、定期的な研修を開催し、知識・技術を再認識する教育の機会を確保することが不可欠である。定期的な研修の開催の必要性については、WG3 の実施した研修の参加者からも聞かれた意見である。また、研修の機会は、日常の業務の場所が異なるメンバー同士が、研修を通して行われるコミュニケーションを通して、仲間を知る機会ともなり、原子力災害発生時にお互いのコミュニケーションをとりやすくなり、スムーズに NuHAT としての役割を果たすことができる効果も得られると考える。

4) 構成メンバーのモチベーションを保つために

NuHAT の構成メンバーである放射線看護専門看護師 (CNS) の役割から判断しても、モチベーションは高い。CNS の資格は、5 年毎に更新 (日本看護協会) する必要がある。そこで、専門医制度と同様に、CNS の資格更新の際に、NuHAT の平常時、災害時の活動、研修参加がポイントになる仕組みを作ることにより、NuHAT メンバーの知識・技術の定着とモチベーションの維持につながると考えられる。

5) NuHAT の役割の明確化

今回の検討結果を踏まえ、NuHAT の役割を「緊急被ばく状況下」「現存被ばく状況下」「計画被ばく状況下」の3つの状況に分けて整理した結果を表に示す。

(1) 「緊急被ばく状況下」 (災害発生直後の役割)

今回のインタビュー結果から、原子力災害発生直後に現場では緊急被ばく医療に対するニーズはほとんどなく、緊急被ばく医療の視点からの看護職の果たす役割はないことが明らかとなった。インタビューでは、“地域を知る人”を求めていることから、日常の保健活動の地域診断、地区踏査、家庭訪問などの活動を通して地域、地域住民の生活実態を把握している保健師が活躍する場を明確にしていく必要がある。また、放射線防護の視点から、保健師をサポートする役割が期待されていたことから、NuHAT は、統括保健師及び避難所等の現場で住民対応をおこなっている保健師や看護師等を放射線防護の視点 (住民の放射線被ばくによる健康影響や生活への影響) についての不安に答えることなど) から支えていくことが重要な役割ではないかと考えられた。この役割を果たすためには、2名のメンバーで構成する複数のグループ (2から3グループ) の派遣が妥当と思われる。

(2) 「現存被ばく状況下」 (災害発生後の中長期の役割)

この時期の住民への放射線リスクマネジメントが重要な役割となる。住民の不安は、放射線被ばくに伴う健康影響・リスク、生活環境の変化である。現場で活躍する保健師では解決できない事例に対して、現場に出向き保健師のサポートをする役割を果たすことが NuHAT の役割であると考えている。現地の保健師と共に現場に足を運び、住民と直接、対話の機会を作ったり、看護職を対象に

した研修会等を開催し、保健師や看護職の放射線の健康影響・リスクに関する知識の向上を図る活動を行なっていく。

(3) 「計画被ばく状況下」 (平常の役割)

住民に対する放射線リスクマネジメントは、原子力災害発生時だけではなく、平常時から恒常的に続けていく必要がある。非医療職である自治体職員が平時から住民に対する原子力防災等に関する説明会を行なっている自治体もあり、一方的な説明ではなく対話の重要性が指摘され、対話形式で進められている。住民との対話において重要なことは、住民の想いを聞き取り、住民の立ち位置を確認しながらコミュニケーションをとることである。看護職は、自分達の特徴は医療保健の専門職として「寄り添うこと」とであると自認し活動している。放射線リスクマネジメントに関する知識・技術を習得した NuHAT メンバーが、地域で活躍している保健師や行政担当者等と一緒に、住民の対話集会に参加し、住民に対する放射線リスクマネジメントが円滑に行われることを考えている。

一般的に災害時支援組織として、DMAT や災害支援ナース、原子力災害拠点病院の派遣チーム、災害派遣精神医療チーム (DPAT)、災害時健康危機管理支援チーム (DHEAT) などがある。DMAT や災害支援ナースは、その活動要領¹⁾⁻³⁾より、災害発生直後から急性期の支援を主たる活動期間としており、本研究で提案している NuHAT が目指す中長期の支援とは異なる。また、DPAT や DHEAT はその活動要領^{4,5)}に1週間以上、場合によってはより長期的な介入を実施するとある。しかし、活動の主たる目的は専門性の高い精神科医療の提供と精神保健活動の支援や保健医療調整本部及び保健所の指揮調整機能等を応援すると記載されている。また、原子力災害拠点病院の派遣チームは、その活動要領⁶⁾に、状況に応じて活動期間を柔軟に対応させることが可能であると記載されているが、基本的な活動内容は汚染のある傷病者への救急医療提供や被ばく傷病者等の搬送支援であり、NuHAT が実施する放射線リスクマネジメントとは活動内容が異なると思われる。

看護教育の中に「放射線」が取り入れられ、今後、看護職の放射線・原子力に関する知識の充足が進んでいくことが期待される。看護の基礎教育の中で、アクティブラーニングを取り入れた「放射線」教育を行う担当者が不足している。そこで NuHAT メンバーが、看護基礎教育における放射線教育 (日本放射線看護学会は、2 コマのモデルシラバスを提案している) を担当することにより、看護職の放射線・原子力の知識・技術の向上に寄与できるのではないかと考えている。

II-5 今後の課題

NuHAT を実現し、継続していくための主な課題として以下の2点がある。

1. 財政基盤の確保

インタビュー対象とした2つの組織（災害時医療支援組織、被ばく医療支援組織）はいずれも関連省庁などから補助金や委託金等を受けており、事務局の運営費用や必要な機材、研修費用などの一部も賄われていた。研修開催地までの旅費は参加者あるいは所属施設から出張として扱われていた。また、被災地へ派遣されたメンバーの勤務形態としては、通常勤務として扱われていた。災害医療支援組織のインタビューでは、組織運営にあたっては事務局の存在が不可欠であり、事務局の存在が組織の財政的な安定にもつながっていることが明らかとなった。メンバーの質担保のために定期的におこなっていく研修に関しても、演習を行うための備品などが必要であり、その購入・維持にも資金が必要である。さらに、災害時にメンバーを派遣することから、派遣中のメンバーの賃金等も保証される必要がある。NuHAT を継続的に運営していくためには確固とした財政基盤が必要であり、NuHAT の活動実績を積み上げ、2つの組織のように関係省庁等から必要な経費の補助を受けられるようにしていきたい。

2. 社会的な認知

既存組織へのインタビューの際に福島で住民を対象にした復興支援を行なっている組織を紹介してもらい、「我々の組織(災害時医療支援組織)はどちらかと言うと目に入りやすくモチベーションも維持しやすいですけど、被災地の住民の不安を払拭するような地道な活動というのは、あまり人の目にもつきにくく、活動自体がわからないような、長い期間の努力で成り立っていると思いますのでそういう人たちをどうやって維持していくのかというのが1番大変なのかなと思っています。」との意見があった。また、A 県担当者からは「看護職が原子力防災に関わるとの視点は今までなかったので NuHAT への期待については今回答ができないのが実態です。最初は講習会に出てもらう、訓練へ参加してもらう、避難所運営に参加してもらうなどを通して、NuHAT はこういうことができるということをお互いわかってくると色々お願いできるかと思う」との意見が聞かれた。

NuHAT が目指している原子力災害の中長期間にまたがる地道な活動は、原子力災害発生直後の活動と異なり、社会から注目されることは少なく、理解されることも少ない。しかし、住民にとっては必要な活動であると認識している。また、看護職が原子力防災・災害対策、特に放射線リスクマネジメントに取り込むという発想に対しては、今回の調査を通して今まで関係省庁も自治体も目を向けていなかったことを改めて認識した。研究者らが、以前に、11 県の原子力発電所立地県の原子力部門担当者を対象に行った調査（非公表）では、原子力防災に対する看護職の起用などは全く念

頭になかったが、行政担当者等が、原子力災害における看護職の役割を認識する機会になることを期待している。NuHAT および放射線看護専門看護師（CNS）など放射線リスクマネジメントに関する専門知識・技術を備えた看護職の存在についてより多くの人々に認知してもらった環境下で活動していくことが NuHAT の活動の幅を広げ、構成メンバーのモチベーション維持にもつながると考えている。

II-6 結語

NuHAT を実現、継続していくためのあり方について、NuHAT 参加意向調査、既存の組織（災害時医療支援組織 及び被ばく医療支援組織）及び原子力発電所の立地県または隣接県の自治体の原子力防災担当者にインタビューを行い検討した。その結果、NuHAT を定着させ、継続していくための要件として、事務局設置の必要性、NuHAT の適切なチーム規模と運営、組織を構成するメンバーの確保、構成メンバーへの教育機会の確保、構成メンバーのモチベーションを保つ工夫、NuHAT の役割の特定が重要であると考えられた。今後の課題として、財政基盤の確保、社会的な認知が上げられた。

なお、NuHAT が、既存の災害時医療支援組織、災害支援ナースと異なる点は、放射線リスクマネジメントを主たる支援目標とし、それを実行できるよう大学院教育、現任研修を通して系統的に能力を習得することとしていること、および中長期、平常時の住民に対するリスクマネジメントも行うチームであることを理解していただきたい。もちろん、災害発生直後は、災害支援ナース等と連携協力し、住民等に対する医療支援、生活支援も併せて行う。なお、日本看護協会が、各都道府県の看護協会の要請を受けて派遣する災害支援ナースは、災害発生翌日から活動を開始し、個々のナースの活動期間は、現地への移動時間を含めて原則 72 時間とされている。F1 事故の際には、宮城県、岩手県の看護協会の要請を受け災害支援ナースを派遣し、保健医療活動を行っている。

原子力防災訓練での行動観察は行えなかったが、行政へのインタビュー等で補えたため目標の達成率は 100%である。

II-7 表

表 原子力防災に NuHAT が果たす役割

被ばく状況	役割	派遣数
緊急被ばく状況下	被災地の統括保健師及び避難所等の現場で住民対応をおこなっている保健師や看護師等を放射線防護の視点からサポート	2名のメンバーで構成される複数（2から3）のグループ
現存被ばく状況下	<ul style="list-style-type: none"> ● 住民とのコミュニケーション（放射線リスクマネジメント） ● 看護職の教育・相談 	状況に応じて
計画被ばく状況下	<ul style="list-style-type: none"> ● 住民とのコミュニケーション（放射線リスクマネジメント） ● 看護師・保健師等を対象にした研修（放射線リスク） ● 看護学生に対する放射線教育 	1組/1回派遣

II-8 文献等

- 1) 災害医療派遣チーム（「東京 DMAT 活動要領」）NBC 災害発生時活動要領 <https://www.fukushioken.metro.tokyo.lg.jp/iryo/kyuukyuu/saigai/300717unkyo.files/sankou2.pdf> 2022年3月24日検索
- 2) 災害支援ナース派遣要領 <https://www.nurse.or.jp/nursing/practice/saigai/pdf/hakenyoryo.pdf> 2022年3月24日検索
- 3) 日本 DMAT 活動要領 <http://www.dmat.jp/dmat/katsudoyoryo.pdf> 2022年3月24日検索
- 4) 災害派遣精神医療チーム(DPAT) 活動要領 https://www.mhlw.go.jp/seisakunitsuite/bunya/hukushi_kaigo/shougai Shahukushi/kokoro/ptsd/dpat_130410.html 2022年3月24日検索
- 5) 災害時健康危機管理支援チーム活用要領 <https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/0000197835.html> 2022年3月24日検索
- 6) 原子力災害医療派遣チーム活動要領 <https://www.nsr.go.jp/data/000183394.pdf> 2022年3月24日検索

Ⅲ 「放射線リスクマネジメント」科目の導入検討 WG

Ⅲ-1 目的・目標

原子力災害支援保健チーム（NuHAT）を構成する放射線看護専門看護師（CNS）および保健師に対して、養成課程において、住民の放射線リスクへの不安に対応できる放射線リスクマネジメント能力・技術を修得するための教育科目「放射線リスクマネジメント論」の教育内容について検討し、モデルシラバスを作成することを目標に取り組んだ。

Ⅲ-2 方法

「放射線リスクマネジメント論」に関連した情報を収集するために、放射線関連教育の現場に関する質問紙調査および放射線看護専門看護師養成課程および大学院保健師養成課程の教育担当者によるフォーカスグループインタビューを行い、インタビューの分析結果を基にモデルシラバスを作成した。

Ⅲ-2-1 フォーカスグループインタビュー調査

1. 対象者

放射線看護専門看護師（仮称）養成課程の教員7名のグループと大学院課程で保健師を養成している大学2校の教員4名のグループの2グループを対象とした。

2. 対象者の選定方法

機縁法にて実施した。

3. 実施日と実施方法

2021年11月21日（日）および2021年12月6日（月）に、遠隔（Zoom Video Communications社が提供するオンラインミーティングツール Zoomを使用した）で、インタビューガイドにそって実施した。

4. 調査内容

1) 教育の現状についての情報収集（放射線リスク関連の教育内容）

2) 「放射線リスクマネジメント論」のあり方についての意見聴取

(1)放射線リスクマネジメントにおける放射線リスクコミュニケーションの位置づけ

(2)放射線リスクマネジメントに必要な能力/修了生がNuHAT構成員として放射線リスクマネジメントを行うのに必要と考える能力

(3)放射線リスクマネジメントの能力を育成するために実施している教育とその内容（現状の教育）、現状における能力修得の程度（教育の効果）

(4)大学院教育での到達可能な放射線リスクマネジメント能力の程度（教育のゴール）

(5)能力の獲得に向けて、現状の教育の強化が必要と思う内容

(6)放射線リスクマネジメントに関する教育実施の課題

5. 分析方法

質的記述的分析を行なった。インタビュー内容を IC レコーダーに録音し、逐語録を作成後、意味内容の類似性に配慮し、調査目的に合った内容を抽出した。

Ⅲ-2-2 「放射線リスクマネジメント論」のモデルシラバス作成

フォーカスグループインタビューの分析結果に基づきモデルシラバスを作成した

Ⅲ-3 結果・考察

Ⅲ-3-1 フォーカスグループインタビュー調査：放射線看護専門看護師（CNS）養成課程

1. 対象者

放射線看護専門看護師（仮称）養成課程で教育に携わっている大学（A 大学院、B 大学院、C 大学院）の教員等 7 名

2. 結果

1) 教育の現状

グループインタビューに先立ち、各大学院（3校）の当該内容に関する教育の現状を情報収集した。調査内容は①教育課程修了要件、②放射線リスクに関する科目・単位数・内容、③原子力災害および放射線事故に関する科目・単位数・内容、④コミュニケーション能力の育成に関する科目・単位数・内容、⑤調整や連携に関する科目・単位数・内容、⑥放射線リスクマネジメントに関する演習の有無・内容、⑦放射線リスクマネジメントに関する実習の有無・内容とし、各大学院の教員の代表者に文書での回答を依頼した。結果を表 1 に示す。各大学院ともに、放射線の基礎的・専門的知識を含む放射線リスクや原子力災害・放射線事故に関する講義科目はそれぞれ 2～4 科目開講されていた。放射線リスクマネジメントに関する演習も実施されていた。実習科目に取り入れていたのは 1 大学院のみであった。また、各大学院とも、「リスクマネジメント」「放射線リスクマネ

ジメント」ではなく、「リスクコミュニケーション」「放射線リスクコミュニケーション」のキーワードで教育内容を構成していた。

2) 放射線リスクマネジメント論の在り方

(1)放射線リスクマネジメントの考え方

グループインタビューで得られたデータを熟読し、意味内容が損なわれないように要約後、類似性を勘案して以下の3点を抽出した。

- ①「リスクアセスメント」「リスクコミュニケーション」「リスクマネジメント」の概念と関係が不明瞭である
- ②「放射線リスクマネジメント」とした場合の介入過程や目標を明確化する必要がある
- ③関わりの姿勢として「対象者の選択を支援する」「コミュニケーションの重視」を念頭におく必要がある

放射線リスクマネジメント、放射線リスクコミュニケーションの考え方や両者の関係性に関する考え方にはインタビュー参加者により温度差があったが、リスクマネジメントの中に、リスクアセスメントがあり、さらには対人への手段としてリスクコミュニケーションが含まれていることが語られていた。今回の意見聴取を通して、モデルシラバス作成にあたっては以下の議論が必要と考える。

- ①放射線リスクマネジメントのゴールとしての「容認」「納得」のとらえ方である。看護職が実施する放射線リスクマネジメントでは、科学者や施政者にとっての望ましい結論に誘導するのではなく、住民自身が自らの価値観に基づく意思決定ができることを支援していくことが必要と考える。
- ②他分野で発達し、すでに活用されている「リスクマネジメント」の考え方や理論との比較や適用から、放射線リスクマネジメントにおける「容認」「納得」以外の構成要素を検討することである。リスク対策として予防、軽減、転移、容認の4つのリスク対策が知られている。看護職が関わる「放射線リスク」をどうとらえるのか、その「マネジメント」の範囲をどこまでとするのか等の検討の上で、教育内容の吟味をしていく必要があると考える。

(2) 放射線リスクマネジメントに必要とされる能力

グループインタビューで得られたデータを熟読し、放射線リスクマネジメントに必要とされる能力を抽出した(表2)。結果は以下の通りである。

- ①基礎的なコミュニケーション能力
- ②リスクコミュニケーションの理解と実践力
- ③放射線に関する基礎的・専門的知識

④放射線リスクに関する科学的な根拠の理解と説明能力(放射線防護や被ばくに関して最新の科学的根拠に基づいて説明する能力、科学的根拠や数値を生活の中に落とし込んだデータにして説明する能力)

⑤住民理解の能力(リスクアセスメントの能力、住民が置かれている状況の理解、住民の気がかりを察知する能力、不安を心配に置き換える力、寄り添う力、発達課題も含む住民理解、認知心理学に基づく対象理解、情報バイアス・メディアバイアス、リスク認知に影響する要因としての価値観(社会の見方、スティグマ、あいまいな喪失など、対象理解のための基盤となる学問))

⑥対象となる地域を把握する能力(地域の組織の仕組みや役割、地域の社会資源に関する情報をキャッチする力、地域住民の生活や社会支援、地域診断や地域アセスメント能力、必要な情報収集ができる能力)

⑦政策提言や発信の能力

⑧多職種連携と役割の明確化(チーム内での保健師と CNS の役割の明確化、事務系を含む多職種との協働における自分の立ち位置と法的根拠、役割分担を認識した組織的活動ができる能力)

NuHAT メンバーとして放射線リスクマネジメントを実施するために必要とされる能力の種類については多様な意見が述べられた。シラバス作成に当たっては、今回抽出された以外の能力(放射線リスクマネジメントの過程など)の有無の検討に加え、各能力の到達目標を定め、既履修内容との対比検討を行い、体系的な教育としてシラバスに反映できるような検討が必要と考える。

(3) 教育上の課題と対応

グループインタビューで得られたデータを熟読し、放射線リスクマネジメントの教育上の課題と対応を抽出した(表3)。結果は以下の3点に整理できた。

① 教育内容の構成上の困難

履修単位が多く新規の内容を追加する時間的な余裕がない。2年間で急性期から中長期の対応を凝縮して学ぶことは難しい。教育を担当できる適任者がいない。放射線リスクマネジメントをこれまでの教育内容の中でどう整理して、順序だてて教育をしていくのか、全体の教授内容との整合性の確認が必要となる。対応として、必要な教育内容が現カリキュラム内で網羅されているかを点検し、不足は盛り込む努力をする。また、モデルシラバスの教育内容を継続教育として学ぶことができる機会をつくるなどがある。

② 放射線リスクマネジメントの実践力を養うフィールドの提供が困難

講義や演習(事例等)で学ぶことは可能であるが、実際の対象者(住民等)と対話する機会(実践の場)の提供ができない。帰還者(自分の中である程度納得している)とは接触できる可能性がある

るが、実習期間も限られていることで、リスクコミュニケーションを必要とする対象者に会う機会を意図的につくることは難しい。対応としては、直接接触ができる機会を希求していくほか、学修事例やディスカッションの充実を図ることが考えられる。

③ 多様な考え方に触れる機会が持てない

一大学院の学生数が少ないことで共修の効果が期待できない。大学院間で共修の機会を持てるように考えていく必要がある。

シラバス作成に当たっては、各大学院が抱える課題に十分に配慮し、課題解決や代替手段の提案等を検討する必要がある。課題は多いが、各大学院の共通科目としての開講が考えられる。

III-3-2 フォーカスグループインタビュー調査：保健師養成課程（大学院）

1. 対象者

大学院で保健師を養成している大学（A 大学院、B 大学院）の教員 4 名

2. 結果

1) 放射線および危機管理に関する教育の現状について（表 4）

グループインタビューに先立ち、各大学院の教育課程に関して現状について情報収集を行なった。調査内容は①放射線に関する教育、②災害対応に関する教育、③コミュニケーション能力の育成に関する教育、④地域住民との調整や連携に関する知識・技術、⑤放射線リスクマネジメントに関する教育を、どの科目において、どのような内容を何コマ実施しているのかについて、各大学院の教員の代表者に文書での回答を依頼した。結果を表 4 に示す。

放射線に関する教育は、A 大学院では臨床検査に関するオムニバス科目において、放射線を測定する実習を 2 コマ実施していた。B 大学院は学部教育において放射線の生体影響に関する講義を 10 コマ、放射線の測定や染色体異常を観察する実習を 4 コマ実施していた。

災害対応に関する教育は、A 大学院では保健師指定規則に沿うような形で実施していた。具体的には、自然災害への対応に関する内容 2 コマ、避難所運営のシミュレーション 2 コマ実施し、さらに街づくりから健康を考える科目の中で防災に関する街づくりを 1 コマ実施していた。B 大学院では、健康危機管理に関する内容を重点的に行っており、DMAT、IHEAT など災害だけに特化せず感染症も含めた健康危機管理論 15 コマ、健康リスクアセスメント学演習 15 コマ、放射線のばく露と健康リスクに関する内容を含む環境保健学特論 12 コマを実施していた

コミュニケーション能力の育成に関する教育は、A 大学院、B 大学院ともに、全科目・全演習を通して意識して取り組んでおり、単独の科目として実施していなかった。地域住民との調整や連携に関する教育についても、同様であった。

放射線リスクマネジメントに関する教育は、A 大学院では現在実施していなかった。B 大学院では、放射線のばく露と健康リスクに関する内容を含む環境保健学特論で一部実施していた。

2) 放射線リスクマネジメント論の在り方

(1) NuHAT で活躍するために保健師に必要な能力について (表 5)

フォーカスグループインタビューで得られたデータを熟読し、意味内容が損なわれないように要約後、類似性を勘案して NuHAT で活躍するために保健師に必要な能力として以下の 6 点を抽出した。

① 放射線の基礎知識を含む健康リスク

「放射線リスクマネジメントの中で、レディネスを最低限のところまでそろえる意味でも、基本の基本からやっていかないと。NuHAT で共通言語として放射線(看護)専門看護師さんと話ができないかな。」といった放射線の基本の基本から学ぶ必要性などが述べられていた。

② NuHAT の役割の認識

「原発の周りの住民の方々に対して、定期的にリスクコミュニケーションじゃないけれども、お話をしていかなきゃいけないんだよって。そういう役回りをするのが NuHAT なんだよっていう。」といった住民の方々に対するリスクコミュニケーションの役回りなどが述べられていた。

② 身近な(生活レベル)放射線の知識

「保健師の方々って、地域とか生活をするっていうことにすごく重点に置かれてるように感じるんです。そういうふうな形に、必要な放射線の知識があったほうがいいって感じます。」といった生活に重点をおいた放射線の知識などが述べられていた。

③ 放射線リスクコミュニケーション

「コミュニケーションの能力は、保健師は持っているけれども、リスクコミュニケーションとしての部分をきちんと入れるっていうのは必要なんじゃないでしょうか。」といったコミュニケーション能力ではないリスクコミュニケーションが必要などと述べられていた。

⑤放射線危機管理

「特殊訓練とか災害時訓練とかもあるので、そういうところにこういうチームが定期的に参加したり、研修を組んで、DMAT のようにずっと研修をしていくようなチームにできればいい。」といった特殊訓練や災害時訓練への定期的な参加の必要性などが述べられていた。

⑥原子力災害事例からのリフレクション

「過去の話からもずっと入れながら、自分たちがこの場合はどうするかっていうふうなことも放射線に特化して入れていっていただけると。（そうすることで）より具体的に実践につながるかなというふうに思います。」といった事例検討は必ず入れてほしいなどが述べられていた。

(2) 「放射線リスクマネジメント論」において目指すべき目標について（表6）

フォーカスグループインタビューで得られたデータを熟読し、意味内容が損なわれないように要約後、類似性を勘案して「放射線リスクマネジメント論」において目指すべき目標について到達度レベルに応じて以下のようにまとめた。

① 知識レベル

知識レベルとしては、「放射線の種類や作用を知る」、「放射線の健康リスクを知る」、「原子力災害訓練の状況・内容を知る」、「原発の安全対策を知る」、「放射線の利用（非破壊検査など）を知る」、「生活の中の放射線を知る」、「過去の原子力災害を学ぶ」の7つがあげられた。

② 理解・応用レベル

理解・応用レベルとしては、「避難すべきかどうかの線量の判断」、「過去の原子力災害から何を学び、それを今後はどう活かすのか」、「地域住民の目線でその地域を見て、より良く安全に快適に健康に暮らせるのかを考える」、「平時からの放射線の意識付け」、「原子力災害時に誰と連携するのか、どうつなげるのかといった他職種連携を理解できる」の5つがあげられた。

③ 分析・統合・評価レベル

分析・統合・評価レベルとしては、「放射線の線量が測定できること」、「線量から健康リスクを説明しマネジメントできること」、「過去の原子力災害事例を通してリスクのコミュニケーションとマネジメントできること」、「放射線看護専門看護師と保健師の専門性を理解し合う協働演習」、「放射線看護専門看護師との事例の展開」の5つがあげられた。

(3) 教育上の課題と対応

フォーカスグループインタビューを通して、保健師教育では放射線の基礎知識に関する講義がほとんど開講されていないことがわかった。放射線看護専門看護師と協働していくためには、基礎知識の乖離をどのように無くしていくかが課題である。

Ⅲ-3-3 モデルシラバス(表7)

2グループのフォーカスグループインタビューの分析結果を参考に、WGメンバー間で授業概要や授業到達目標を検討した。その後、授業到達目標に必要な教育内容や授業展開を検討し、モデルシラバスを作成した。

Ⅲ-4 今後の課題

CNS養成課程と保健師養成課程の学生間には放射線に関する基礎的な知識量に大きな乖離があると懸念される。そのため、本WGにて作成した「放射線リスクマネジメント論」の受講にあたっては、日本放射線看護学会が提示している「放射線看護教育モデルシラバス」の到達目標相当の知識を修得していることが望ましく、看護師養成課程の基礎教育内で放射線看護教育の充実が求められる。

また、「放射線リスクマネジメント論」のモデルシラバス作成時に、実際の活用に関する検討が不十分であった。今後は、導入を検討する大学院の実情(既存のカリキュラムや教員数、本科目を担当できる教員の有無など)を踏まえ、具体的な活用方法について検討をすすめていく必要がある。

Ⅲ-5 結語

原子力災害の発災直後から中長期(復興期)、さらには平常時における放射線に関する住民の不安に適切に対応するためには、放射線リスクマネジメントに関する知識・技術は必須である。本WGでは、NuHATを構成する専門職を育成する教育課程の教員へのインタビューを通して、「放射線リスクマネジメント論」のモデルシラバスを作成することができた。しかし、「放射線リスクマネジメント論」を導入するためには、その具体的な活用法を含めていくつかの課題があることも見出すことができた。

本WGはモデルシラバスを作成することを最終目標としてきたため、今年度の達成度は100%と評価する。

III-6 表

表1. 教育の現状

教育課程名称	A 大学院	B 大学院	C 大学院
教育課程修了要件 (単位数)	<p>コースが定める科目から42 単位以上を修得し、このうち課題研究については必要な研究指導を受けたうえ、課題研究論文審査及び最終試験に合格することが必要。課題研究の提出及び審査については「A 大学学位規則」に準じる。</p> <p>42 単位 (CNS 38 単位+課題研究 4 単位)</p>	<p>別コース修了要件の34 単位を取得し、それに加え本 コース要件の38 単位のうち不足分の18 単位(共通科目B、専攻共通科目、専攻専門科目、実習科目等)を履修する。</p> <p>計52 単位以上</p>	<p>コースが定める科目から42 単位以上を修得し、このうち課題研究については必要な研究指導を受け、課題研究論文審査及び最終試験に合格することが必要。課題研究の提出及び審査については「C 大学保健学研究科規則」による。</p> <p>42 単位 (CNS 38 単位+課題研究 4 単位)</p>
放射線リスクに関する科学的な情報を学ぶ科目 科目名・単位数 内容(コマ数)	<p><u>基礎放射線学特論</u>・2 単位</p> <p>放射線物理学の基礎 (3)</p> <p>放射線生物学の基礎 (2)</p> <p>人体影響 (2)</p> <p>放射線防護 (3)</p> <p>放射線医学の理解に必要な放射線の基礎知識 (1)</p>	<p><u>基礎放射線医科学</u>・2 単位</p> <p>放射線物理学の基礎 (3)</p> <p>放射線生物学の基礎 (2)</p> <p>人体影響 (2)</p> <p>放射線防護 (3)</p> <p><u>放射線看護学</u>・2 単位</p> <p>人体影響のアセスメント (2)</p>	<p><u>基礎放射線学</u>・2 単位</p> <p>放射線物理学の基礎 (2)</p> <p>放射線生物学の基礎 (2)</p> <p>人体影響 (2)</p> <p><u>被ばく医療・放射線防護学特論</u>・2 単位</p> <p>晩発性放射線障害 (4)</p> <p>急性放射線障害 (4)</p> <p>遺伝的影響 (1)</p>

	<p><u>放射線医学特論・2単位</u></p> <p>医療被ばくと職業被ばく、放射線防護(1)</p> <p><u>放射線看護学特論・2単位</u></p> <p>被ばくに伴う心理・社会的影響の理解と看護(2)</p> <p>放射線診療における放射線の人体影響のアセスメントと看護(1)</p> <p>放射線災害・事故における放射線の人体影響のアセスメントと看護(1)</p> <p>放射線防護の歴史的変遷、放射線防護の考え方と看護ケア(1)</p> <p>特別な配慮を必要とする対象者(妊婦と胎児・子ども)の被ばく(1)</p> <p>放射線の人体影響に関する根拠の理解と看護相談(1)</p> <p>放射線リスクコミュニケーション(2)</p>	<p>放射線診断/治療と看護(2)</p> <p>原子力災害/放射線災害と看護(3)</p> <p><u>被ばく影響学・2単位</u></p> <p>晩発性放射線障害(5)</p> <p>急性放射線障害(4)</p> <p>遺伝的影響(1)</p> <p><u>リスクコミュニケーション学・1単位</u></p> <p>クライシスコミュニケーション(2)</p> <p>リスクコミュニケーションと安心・安全(1)</p> <p>復興期におけるリスクコミュニケーション(1)</p> <p>環境放射能評価からリスクコミュニケーションへ(1)</p>	<p>放射線防護(3)</p> <p>クライシスコミュニケーション(2)</p>
--	--	---	--

<p>原子力災害・放射線事故に関する内容を学ぶ科目 科目名・単位数 内容(コマ数)</p>	<p><u>被ばく医療看護論・2単位</u></p> <p>被ばく医療の基礎(2) 災害静穏期における準備(2) 福島第一原子力発電所事故に伴う地域住民の理解(1) 被ばく医療における看護職者の役割(1) 原子力災害・放射線事故等の対象者の理解と看護(8) 被ばく医療における放射線看護高度実践者の役割(1)</p> <p><u>被ばく医療学特論・2単位</u></p> <p>原子力災害医療における看護の役割(1) 原子力災害・事故後の放射性物質の動態(1) 被ばく医療における放射線管理(1) 放射能・放射線事故の歴史(1)</p>	<p><u>放射線ヘルスプロモーション看護学・2単位</u></p> <p>原子力災害・放射線事故後の急性期・亜急性期対応の実際(1) 原子力災害・放射線事故後の中長期対応の実際(2) 原子力災害・放射線事故の外部被ばく(1) 原子力災害・放射線事故の内部被ばく(1)</p> <p><u>被ばく影響学・2単位</u></p> <p>チェルノブイリ原子力発電所事故による健康影響(1)</p> <p><u>緊急被ばく医療概論・2単位</u></p> <p>汚染拡大防止策(2) 放射線防護策(1) 放射線情報収集と傷病者受け入れ準備(2) 汚染検査と除染(2) 線量評価(1)</p> <p><u>地域放射線看護学特論・2単位</u></p>	<p><u>被ばく医療看護論Ⅰ・2単位</u></p> <p>原子力災害・放射線事故等の対象者の理解と看護(7) 緊急被ばく医療における看護(3)</p> <p><u>被ばく医療看護論Ⅱ・2単位</u></p> <p>原子力災害・放射線事故等への備え(7) 原子力災害・放射線事故等における中長期の看護支援(3)</p>
---	--	---	--

	<p>緊急被ばく医療のシミュレーションと必要とされる被ばく医療(1)</p> <p>汚染や被ばくを伴った患者の診療：医療施設での受け入れ(1)</p> <p>局所被ばく患者の診療(専門職者連携)(1)</p> <p>放射線の人体影響とその機構(1)</p> <p>染色体による線量(1)</p> <p>原子力災害急性期における内部被ばくの理解と課題(2)</p> <p>核実験・原子力災害による放射性物質が環境・人体に及ぼす影響(2)</p> <p>急性放射線症候群の診断と治療(2)</p> <p><u>被ばく医療看護方法論・2単位(選択)</u></p> <p>原子力安全対策の現状(1)</p> <p>国内外の被ばく医療研修(1)</p> <p>原子力災害・放射線事故等への備え(3)</p>	<p>原子力災害、放射線事故の歴史(1)</p> <p>原子力災害、放射線事故への備え(4)</p> <p>原子力災害、放射線事故等における急性期の看護支援(3)</p> <p>原子力災害、放射線事故等における中長期の看護支援(3)</p> <p>被ばく医療体制における放射線看護高度実践者としての役割(1)</p>	
--	---	--	--

	<p>原子力災害・放射線事故等における急性期の看護支援(3)</p> <p>原子力災害・放射線事故等における中長期の看護支援(4)</p> <p>防災訓練での高度実践者としての看護者の役割と課題(1)</p> <p>中央官庁の原子力災害・放射線対応について(1)</p> <p>所属する地域または施設の被ばく医療体制における放射線看護高度実践者としての役割と課題(1)</p>		
<p>コミュニケーション能力の育成に関する科目 科目名・単位数 内容</p>	<p>コミュニケーション能力の育成に特化した科目はないが、対象理解やリスクコミュニケーションなどコミュニケーションに関連する内容は教授している。</p>	<p>コミュニケーション能力の育成に特化した科目はないが、対象理解やリスクコミュニケーションなどコミュニケーションに関連する内容は教授している。</p>	<p>コミュニケーション能力の育成に特化した科目はないが、対象理解やリスクコミュニケーションなどコミュニケーションに関連する内容は教授している。</p>
<p>調整や連携に関する内容を学ぶ科目</p>	<p><u>放射線看護学特別演習・2単位</u></p> <p>専門看護師の能力(10コマ中、調整やリーダー</p>	<p><u>放射線看護学・2単位</u></p> <p>専門看護師の役割と実践(2)</p>	<p><u>放射線看護専門実践特論・2単位</u></p> <p>専門看護師の役割と実践(10)</p>

<p>科目名・単 位数 内容</p>	<p>ーシップに関する内容 が1コマ) (1)</p>		
<p>放射線リス クマネジメ ントに関連 した演習の 有無と具体 的な内容</p>	<p><u>放射線看護学特論・2単 位</u> 放射線リスクコミュニ ケーション事例検討 (2) <u>放射線看護学特別演習・ 2単位</u> 放射線の可視化、放射 線防護の原則の理解、 X線撮影における照射 条件と画質の関係、散 乱線(3) 原子力災害時の対応 (5) 看護相談(2)</p>	<p><u>放射線看護学演習 2単位</u> 放射線の可視化、放射 線防護の原則の理解、 放射線の性質、測定の 実際、計測値の理解、 X線撮影における照射 条件と画質の関係、散 乱線(5) 緊急被ばく医療及び原 子力災害対応に必要な 知識・技術：救護所活 動(2) 病院における被ばくや 汚染に伴う傷病者の受 け入れ(3) 事例を用いたリスクコ ミュニケーションの検 討(5)</p>	<p><u>被ばく医療看護論 I・2 単位</u> 放射線の測定と線量測 定と計測値の理解(1) 放射線防護の原則の理 解(1) 緊急被ばく医療及び原 子力災害対応に必要な 知識・技術：避難待機 所での活動および医療 施設における被ばくや 汚染に伴う傷病者の受 け入れ(1) 事例を用いたリスクコ ミュニケーションの検 討(2)</p>
<p>放射線リス クマネジメ ントに関連 した実習の 有無と具体 的实施方法</p>	<p><u>放射線看護学実習の一部</u> 福島県浪江町での実 習：原子力災害により 低線量被ばくを懸念す る住民の健康に関連す る問題や放射線に関す る不安、生活状況を理 解する。対象者の健康</p>	<p><u>川内村実習の一部</u> 福島県川内村・富岡町 において、原子力災害 により低線量被ばくを 懸念する住民の健康に 関連する問題で、食品 中の放射性物質測定や 環境中の空間線量測定</p>	<p><u>放射線看護学初期実習の 一部</u> C県におけるUPZの住 民に対し、原子力災害 により被ばくに関連し た健康問題についての 説明会におけるリスク コミュニケーションに</p>

	<p>問題を明らかにし、個別あるいは集団への介入方法を検討する。また、被災した住民に直接かかわる担当者や関連する施設との調整について学ぶ。</p> <p>東通原子力発電所での実習</p> <p>①被ばく医療の急性期における対象者と場の情報収集を行い、想定される傷病や事故、リスク、防護、精神的支援等のアセスメント・考察を行う。</p> <p>②放射線看護専門看護師として活動する場を把握し、関連職種(機関)の役割・権限・責任について理解を深め、連携・調整・情報共有の課題と改善策についてアセスメント・考察する。</p> <p>*対象者に放射線リスク</p>	<p>を行い、その線量を正しく評価して、リスクコミュニケーションについて学ぶ。実際に現地住民と対話する機会を設け、震災当時の状況などを振り返る。</p> <p>原爆被爆者医療実習Ⅱの一部</p> <p>中核人材研修：机上演習や被ばく医療実習はチームで多職種協働して目標達成する。そのチーム内で看護職が役割を發揮できるように、放射線看護専門看護師として効果的な介入を考察する。</p>	<p>について学ぶ。実施内容は、1年1回の原子力訓練における住民説明会における30分間を利用し、「原子力災害について知っておきたい放射線の知識」と題し、学生は10分間を担当し、放射線に関する健康影響について説明し、その後、住民と関わる時間を設定している。</p>
--	--	---	---

	<p>放射線リスクマネジメント)を実施する機会はない。</p>		
--	---------------------------------	--	--

表2. 放射線リスクマネジメントに必要とされる能力

生データ	必要な能力の抽出
<p>放射線リスクマネジメントですね。これを実施するのに必要な能力っていうことで、(中略) 基礎的なコミュニケーション能力とか、リスクコミュニケーションの理解であるとか、リスクコミュニケーションする能力であるとか、放射線リスクのことをちゃんと分かってる、科学的に分かって説明ができるとか、住民がどんな今状況に置かれているかっていう、住民の理解とか、いろいろあると思うんですけど。</p>	<p>基礎的なコミュニケーション能力、リスクコミュニケーションの理解、リスクコミュニケーションを実施する能力、放射線リスクに関する科学的な根拠の理解と説明ができる、住民が置かれている状況の理解</p>
<p>放射線の科学的な理解っていうか、それは絶対必要だなと思うんですね。その放射線の基礎的な知識であったり、専門性が高い知識で、被ばくとか防護とかそういうところがちゃんと分かって、今の科学にのっとった、ちゃんと論文を基に、今の住民の方が心配されてるような現象を、ちゃんと説明できるとかっていう力が必要だなんていうふうに、一つは思うんですけど。</p>	<p>放射線防護や被ばくに関して最新の科学的根拠に基づいて説明ができる能力</p>
<p>多分、放射線に関する知識とかは、結構放射線の先生たちにいろいろ教わったり、現場で活動していることを知る機会が多いし、現地にも入っているので、かなり蓄積されるのかなというふうに考えて、今の現状を捉える力とか、住民の置かれている立場を理解する能力とか、何かそういうのは、今のプログラムの中でやれてるのかなというふうには感じていました。</p>	<p>放射線に関する知識、現状や住民がおかれている立場を理解する能力</p>

<p>た。実際に、リスクマネジメントがちょっとまだ私の中でははっきり分かってないんですけど、リスクコミュニケーションをしていくというようなことで考えると、やはり住民がどこで立ち止まっているのかっていうところを察知していける力というか、不安を心配に変えて、置き換えていける力という、何か平たい言葉で言うと。そういうのが理解できるかというのかな、というふうには感じています。ちょっと放射線の能力的な教育、実際測定できるとか、目で伝えること、見せて伝えることができるとか、いろいろあるとは思いますが。そうですね、やっぱり住民の困りごとを捉える力ですかね。(中略)そこが、住民の人と接する中ではとても必要なと思いました。看護としての、当然寄り添う力とか、そういうのは必要だと思いたんですけど。ただ、マネジメントする際に、やっぱり組織的に動くっていうことも必要なので、その、入り込んだ地域での組織的な仕組みや役割を理解できるとか、地域にある社会資源ですよ、どこで測定できるとか、そういうような情報をキャッチする力とか、そういうことも大事なかなというふうに思います。やっぱりちょっと、普段活動していない現場に入り込むっていうことがあるので、災害看護でも多分、能力的にいろいろ出てるのかなっていうふうなことを考えると、そういうところもちょっと参考にしてもいいのかなっていうふうに思いました。</p>	<p>住民がどこで立ち止まっているのかを察知する能力、不安を心配に置き換えていける力、住民の困りごとをとらえる力、寄り添う力</p> <p>入り込んだ地域の組織の仕組みや役割を理解する、地域の社会資源に関する情報をキャッチできる力</p> <p>災害看護の能力を参考にしようか</p>
<p>リスクアセスメント、リスクコミュニケーション、リスクマネジメントっていう、このとこ、どう回すかっていったとこで、やっぱりリスクアセスメントと、特にその放射線のリスクを、そういう知識に基づいたリスクを、住民の方たちがどのように理解できてるのかな。理解するっていうのが非常に難しいというところがありますし、その理解の仕方がその人の発達課題等々踏まえての理解っていうところで、やっぱり最終的には人間理解っていうところに落ち着くのかなっていう、そういうふうな思いは大きくしますね。そのとこ捉えないと、初めての職場へ行って、その住人の方たちとどういふふうに向き合うかっていう、向き合えるところ</p>	<p>リスクアセスメントの能力、リスクに関する住民の理解、発達課題も含む住民理解、住民との向き合い方</p>

<p>までにはいかないと、何かリスクもマネジメントも、最終的なマネジメントもできないなって。</p>	
<p>実際、福島に行って思ったことが、科学的に正しいとか、数値とか、そういうことを示しても、生活の中に落とし込んだデータでなければなかなか住民の方の理解につながらないんだなっていうことはすごく感じています。そういったところを看護職の視点で、どういう地域であるとか、どういうツールがあるとか、その地域の特性であったりとか、あとは、住民の方がどういう生活を送ってきて、どういう困りごとがあるっていうことを、その生活の中に落とし込むようなデータの示し方とか、物差し。住民さん自身がその物差しを持って判断していけるっていうことがすごく重要なかなっていうのを、実体験で感じたことがありました。</p>	<p>科学的根拠や数値を生活の中に落とし込んだデータにする、地域や地域のツール、特性、住民の生活や困りごとをとらえた上で生活に落とし込むデータの示し方をする、住民が物差しをもって判断ができるようにする</p>
<p>対象の理解をしたりとかするとき、一般の方々がそのリスクをどんなふうに捉えて認知していくのかっていうところと、それが認知心理学っていうか、心理的にどう影響を与えていくのかとか、ある情報にやっぱりバイアスが掛かりやすくて、より多く、大きいリスクとして感じやすいとか、そういった学問ですかね、認知心理学っていうのか何ていうのか分からないんですけど。人のものの見方の、見方っていうところは、理論的には、基本的には押さえたほうが多分いいんだろうなっていうふうなことを、ちょっと思ったりします。(中略)メディアの影響っていうところがすごくあたりするのかなと思うんで。本とかも読むと、やっぱり多くの人々がメディアバイアスに掛かって、でも、正しい情報を、メディアを通すと、結構インパクトのある情報に変えられたりとか、何か偏ったメッセージに伝えられやすい。そこを私たちが知った上で、多分正しく伝え直すとか、分かりやすくしていくとか。生活に引き付けて、その事実っていうふうな指し示していかないと、何か強烈なインパクトだけが</p>	<p>認知心理学に基づく対象理解、情報バイアス、メディアバイアス</p>

<p>残ってしまうってことにもなりかねないので。世の中に伝わっているメディアバイアスの在り方ってどんなもので、それが私たちの、例えばリスクマネジメントする上でのどんな障害にもなり得るのかとか、あるいは手助けにもなり得るのかってところも、もしかしてあったりすると何かいいのかななんて、ちょっと思ったりもしました。</p>	
<p>やっぱり対象になる人たちがどんな状況に置かれてて、どんなリスクの受け取り方をするのかっていうことを考える上で、その人自身のものの見方とか価値観とかはもちろんだし、メディアの影響っていうのもそうだし、メディアだけではなくて、社会の放射線被ばくに対する見方ですよ。日本人特有のとか。今の福島のことと言えば、曖昧な喪失だったり、スティグマだったりってところが、全部その人のリスクの受け取り方とかにも考え方にも影響してるので、結構その人を、対象を理解するっていったときの裾野にならなければいけない学問って、結構広んだなっていうふうに、改めて思って聞きました。</p>	<p>置かれている状況、リスク認知の仕方に影響する要因としての価値観、メディアの影響、社会の見方、スティグマ、あいまいな喪失など、対象理解のための基盤となる学問</p>
<p>実際に現地でリスクコミュニケーションのようなことをやってきたので、現地で保健師さんだったり住民の方に聞くのは、この地域が元々どんな生活してたかですね。ていうところで、やっぱり社会支援のこととかっていうところを聞くので、そういう地域診断とか地域アセスメントができるというか、そういう情報が取れるような能力でしたり、私が講義で学生たちにそういうリスクミのこと話すときにメディアのバイアスっていう話をするので、みんながメディア脳になってるっていうところ。どこまで授業の中で話せるか分かりませんが、そういったところを知っていく力っていうのは必要になっていくんじゃないかな、というところです。</p>	<p>地域の人の生活、社会支援、地域診断や地域アセスメント能力、必要な情報収集ができる能力、メディアバイアス</p>
<p>リスクマネジメントが、看護管理もナーシングマネジメントなので、医療事故のリスクマネジメントと、放射線リスクマネジメントと、どんなステップでどんな違いがあるのかなっていうのは、ちょっとまだまだ混乱します。</p>	<p>放射線リスクマネジメントのステップが不明確</p>

	→放射線リスクマネジメントのステップの検討が必要
<p>せっかく保健師と CNS の人と一緒にチームになるので、さっき出た地域アセスメントするとかはその保健師の方たちにやってもらって、CNS の人は放射線の理解を進めるようなところとか、何かチームの中での能力の比重というか、重み付けみたいなものをされて、で、役割を少し明確していくのもいいのかなっていうふうに感じました。</p>	<p>チーム内での保健師と CNS の役割の明確化が必要ではないか</p>
<p>私も聞いたときに、保健師さんが放射線看護の知識を付けるの？って思ってしまったんですけど、やはり共同できるぐらいの保健師さんには、物理の方とか、そういう放射線に関する専門の方々と共同できるぐらいでいいのかなと思ったんですね。それで、われわれの放射線看護は、地区診断とか、保健師のライセンスを持ってる方は学部教育で習ってきたかとは思いますが、やはりそこは共同できるぐらいの(不明) にしないと無理なのかなと思いました。</p>	<p>保健師は放射線の専門家と協働ができること、CNS は地区診断で共同ができること</p>
<p>マネジメントっていうのは、最終的に多分、住民の行動変容か何かを、容認なり何かもたらして、その後、評価してモニターしてっていうプロセスをたどっていくのかなっていう。PDCA サイクルだと、アセスメント、最後の分析をして評価してっていうところがあると思うんですけど。リスクマネジメントまで、きちんとマネジメントまでするのであれば、そこで問題を吸い上げて新たな政策だとか、例えば地域診断とか、組織的に動いたりとか、地域の改善ってところまで持っていくのであれば、政策提言なり、その地域やその住民の課題をどこかに持って行って、きちんと発信していく能力までもマネジメントするのであれば、求められるのかなって。</p> <p>CNS の、もちろん授業の中で政策論っていうのはあるかなと思うんですけども、マネジメント論の中でどこまでやるかは別として、何かみんなが、一応私も何か聞いてると、住人だけが納得して終わるって、何か住民だけが損してるような印象も正直あって。さっき、予防、移転、軽減、容認っていうところの、もしかしてどこかその政策とか違うところに、きちん</p>	<p>組織的に活動し、地域の改善までを目指すのであれば、政策提言や発信の能力が必要</p>

<p>と問題を発信していけるのであれば、そのリスクそのものの回避の仕方、回避っていうか、どこかにつながっていけたらば、予防っていう発想もあるのかなと思うと、何か、そこまでちゃんと能力があると本当はいいのかなって。</p>	
<p>先ほど、保健師さんと CNS との共同であったり、あとは多職種の中で、地域の中で働くとなると、多職種との共同という形にもなってくると思うので、そういったところの自分の立ち位置であったりとか、介入していくときの法的な根拠であったりとか、あと役割分担というところを、自分たちはしっかりと認識した上で、組織的に活動していけるってというような、何か組織学的な、組織学ってというのが正しいのか分かりませんが、そういう組織としての一員ってところの立ち位置ってところを、このメンバーになる場合は理解しておく必要があるのかなということは今少し思いました。</p>	<p>多職種との協働における自分の立ち位置、法的な根拠、役割分担を認識して、組織的に活動できること (組織学)</p>
<p>鹿児島県の技師さん、診療放射線技師さんの方と5年ぐらい研修を一緒にしたり勉強しているんですけど、その方々から、多職種の人とのディスカッションをしたいって求められるんですね。例えば保健師さん、あるいは看護師さん、それから薬剤師さん、それからあと、ちょっと書いてましたけど、そういう方々と自分たちが、原子力災害が起こったときにどういうことを、それぞれの役割を認識をしているのかということで、どこまでできるんだろうってようなことを、何か知りたいようなことをよく言われて。今年ちょっと、それを取り入れようかなとは思ってるんですけど、そうなるらとやっぱり、放射線の、われわれの放射線看護って、さらに医療職以上に事務系の方とも関わらないといけないし、いろんな方と関わらないといけないので、そういう多職種理解を、進むような科目が必要なのかなとか思ったりもします。</p>	<p>事務系を含む多職種連携の理解の科目</p>

表3. 教育上の課題について

生データ	課題の抽出
<p>時間、結構きつきつじゃないですか、単位が(中略) 時間的に新しいものを入れていく余裕がなかなかないかなっていうふうに思ったりするんですね。あとは多分、教育する側の問題。実践、私的には実践として放射線リスクマネジメントとコミュニケーションのお話をどんどんしてくれる先生たちに、どんどん教育に入っていて、実践の場の話とかをしていただいたり、あとは本当に、演習をしたら、実践をさせる場を作れたらいいかなと思うんですけど。なかなかそこにいかないっていうか、機会が持てないっていうような課題があるんじゃないかなっていうふうには思いますけど。</p>	<p>履修単位が多く新しい内容を入れる余裕がない 教育の適任者がいない</p>
<p>少なくとも、被ばくに関してのリスクを対象者と話す機会は、そもそもそんなにうちの大学ないですよ。だからもっと、例えばリスクコミュニケーションも演習の中でしたりとか、例えば社会心理的影響について学んでたとしても、その人たちを実際にアセスメントして、じゃあこの人たちの暮らしの中で何がゴールなのかな、この人たちがどこに自分たちの生活を持っていくのかなっていうことを対話する機会はそもそもないのが、うちの大学のちょっと弱いところだなっていうふうには思っています。</p> <p>一つの課題は、実践の場がなかなか作れない、机上では授業とかはできたとしても、実際に対象者と、その問題を抱えている対象者の方と話をして、で、実際にいる人、目の前にいる人のアセスメントをするっていう機会が持てないっていうのは、確かにあるなっていうふうに思います。</p>	<p>講義や演習で学ばせることは可能だが、現実の対象者と対話する機会(実践の場)をつくることができない</p>
<p>コロナがなければ多分住民の方とお会いできる機会も作れるので、対応できる可能性はあるのかなという気はしますが、帰還してきてる人と、もう既にそこら辺をある程度自分の中で納得してから、皆さん帰ってきていらっしゃってるので、実際に本当のコミュニケーションが必要な人たちはなかなか会えないのかな、というのはありますね。学外……</p>	<p>自分の中である程度納得している帰還者とは接触できる可能性があるが、実習期間も限</p>

<p>そうですね、なかなか実習の期間とかも限られてる中で、そこでマッチングして実習してもらってというのは、結構厳しいかなってようなことはあります。ただ、現地に行くと、やはりまだリスクコミュニケーションが必要な場面も、私も今年もありましたので、素材はないわけではないと思うんですけど、マッチングは難しいというのが現状かなというふうに思います。</p> <p>学生が実習で行って、そこに、出会えるかって、意図的にそういう機会を作るっていうのが難しいのかなっていうふうに、今もお話聞いて思いました。</p>	<p>られていること で、リスクコミュニケーションを必要とする対象者に会う機会を意図的につくることは難しい</p>
<p>現実の原子力災害、福島事故から10年たってるっていったところ、その対象者をどう捉えるかっていったところも一つ、だからフィールドの問題、大きいと思います。科目としてそのリスクマネジメント何とかがってというのは、現在はできてないけど、今後どうするかっていったところがあった中に、内容的には、実習の中にいろいろと演習、実習で、内容はずっと少しずつ入ってきてる中を、それをどう整理していくかなっていったところも課題かなっていうふうなことは思います。実習するっていうことは、現実的に基礎的にいろいろ勉強進んでいかなきゃいけないところですけど、やはり科目としてどういうふうに順序立てて整理して、順序立ててっていうことで、学生がどういうふうに進んでいくかっていうこと、学生に示しながらやっていくっていうのも、少し科目を整理していかなきゃいけないところではあるかなっていうふうには思いません。</p>	<p>現実の対象者とかかわるフィールド問題は大きい</p> <p>放射線リスクマネジメントをこれまでの教育内容の中でどう整理して、順序だてて教育をしていくのか。科目の整理が必要。</p>
<p>CNS教育に関しては、日本看護系大学協議会にカリキュラムを申請して、10年は動かさないで、新しい科目を作るってなかなか難しいなと思うんですけど。例えば、これは私個人の考えなんですけど、例えば今回モデルシラバスっていうのを作るっていうか、示したときに、卒後教育っていうか、継続教育として、修了生の継続教育として、例えば中身を1コマずつ、今回はこの話題、今回は話題っていうふうに、継続教育の形でやっていくっていうのも一つありかなと思うし、そのモデルシラバス</p>	<p>CNSカリキュラムの中で新規の科目をつくることは難しい。モデルシラバスの教育内容を継続教育で学ぶ機会をつくる、内容が</p>

<p>自体を一つの単位として、科目として入れていくっていうことが不可能であれば、その内容が、各、それぞれの大学で持っているカリキュラムの中で網羅されていけばいいわけで。網羅されているかどうかのチェックをして、されてないものを新たにどこかで入れるっていうことを検討することもできると思うんですね。</p>	<p>網羅されているかを各大学で確認し、必要なものを現カリキュラムの中に盛り込む努力をするなど</p>
<p>実践力というか、そこを養っていくのが難しいな、特に急性期のときですね、と思うので、私が急性期でそうやって関わってきたので、その話をできるだけ学生には伝えようとして、やってきたことっていうところを伝えてますけども。その学生が実際に、その次の年に川内村実習だったり行くんですけども、実際そこで、その当時の話とかをどこまで考えて、その場の実習で中長期になってきている今の状況を捉えているかとか、そういう、結局その後のフォローとかフィードバックを聞けないので、そこがどうなのかな。教育の効果とかですね、そこが理解できてないところが課題でもあるかなと思ってます。</p>	<p>実践力を養う教育が難しい。体験した当時の内容を伝えた上で実習に行かせているが、教育の効果が見えないことが課題</p>
<p>能力が低くても急性期の対応が、うちの人たちができるかなと思ったら、そこが一番課題かなと思ってます。大体、K先生のお話を聞いて、それこそ対象の人がそれぞれ自分の中で折り合いを付けて、さらに変わってきてつつあるっていう中で、いかに事故が起こった後も、混乱時にどう対応していくのかなと思うと、やはり事例を使って示して、そしてディスカッションを持ってっていうのを何かしていかないと駄目なのかなと思います。</p>	<p>急性期の対応ができることについては課題。事故後の混乱時の対応は事例やディスカッションで学ばせないとダメかと思う</p>
<p>大学院の2年間の課程だけで、急性期から中長期っていうふうに渡って、どう対応が、こちらの介入がどうしていくべきか。それによって住民の方がどう変化していくのかっていうのを、すごく凝縮して学ぶのはとても難しいなどは個人的に思っていて。やっぱり卒業してから実際に現場に出て、住民の方と対応するとか、あとはN先生おっしゃられましたけど、継続教育のような形でどんどん知識を新たにしていって、自分</p>	<p>2年間で急性期から中長期の対応を凝縮して学ぶことが難しい。継続教育のかたちで能力を</p>

<p>の能力もそれで補っていく、またさらに身に付けていくということが必要なのかなということは、受けた側からの感想になりますが、あります。</p>	<p>高めていく必要がある</p>
<p>入ってくる学生の人数が少ないので、何だろう、他の人たちがどう対象を見るのかっていう、他の視点からの学びが、機会が少ないのが、すごい限界を感じるなっていうふうにちょっと思います。放射線看護の視点しかないとか、あるいは独りぼっちと教員との対話で、何かどっか学生が正解を求めてくるところがあって。そうじゃなくて、いろんな考え方や価値観があるんじゃないのって、人と対話だよなってところが、どうしてもそこが伸びないというのか。何かそこに、すごく難しさを感じるかなというふうには思っています。</p> <p>1人のときにはやはり、B大学が2人とかいますので、そのときにやはり同じ演習をさせてもらうとか、一緒に科目を聞いてもらうとかすることで、やはりそこからうちの学生は、長崎大学の学生さんはこんな、っていうようなことで学び得ているので。本当、それはすごく助けられたなってずっと思っております。</p> <p>何かの科目を共修して単位互換、そういうことしていかないと、本当にこのCNSの教育課程っていうのは、ちょっと発展的にというか、考えていかないといけないし、そこの中の一つが、放射線看護学会での、そこでの何かの企画っていうのは非常に大きな、今回もそういうことやっていただいているようなところだったので、非常に大事なところかなっていうふうには思ってます。</p>	<p>学生数が少ないことで共修ができない</p> <p>大学間で共修の機会を持てるように考えていく必要がある</p>

表4. 放射線および危機管理に関する教育の現状

	大学院 A	大学院 B
放射線に関する知識	<ラボラトリー・メソッド特論：15 コマ> 放射線測定 2 コマ	大学院教育では行っていない
災害対応に関する知識	<公衆衛生危機管理論：8 コマ> ・災害に対する健康危機管理：2 コマ ・災害時における避難所運営：2 コマ <すまいつくり論：8 コマ> ・防災とまちづくり：1 コマ	<健康危機管理論：15 コマ> ・地域社会における健康危機管理（災害時保健活動を含む）に関する考え方 ・保健師活動の展開方法 ・他職種連携について <環境保健学> ・放射線の暴露と健康リスク
コミュニケーション能力の育成に関する知識	科目としての特別な設定はなし	すべての科目で、何らかの学修を行っている
地域住民との調整や連携に関する知識・技術	科目としての特別な設定はなし	すべての科目で、何らかの学修を行っている
放射線リスクマネジメントに関する知識	大学院教育での実施はなし	<環境保健学> ・放射線の暴露と健康リスク

表5. フォーカスグループインタビューより導き出された NuHAT で活躍するために保健師に必要な能力

コード	カテゴリ
放射線に関する基本的な知識は必須	放射線の基本知識を含む健康リスク
放射線に関する基本的な知識は繰り返しでも入れるべき	
放射線に関する知識	
単位からの学習	
放射線の線量の理解が大事	
まずは線量を知ることが大事	
保健師は放射線の知識が弱い	
保健師は放射線の知識がきちんと入っているとは思えない	
放射線の基本の基本から学ぶ必要性	

放射線の基礎知識に測定できることがあるとよい	
基本的なところから積み上げていく教育	
放射線をしっかりと学んだ上で対住民、対組織として学ぶ。	
自治体側のステークホルダーとしての役割を担う。	
DMAT でいうロジスティックの役割を担う。	NuHAT の役割の認識
住民の方々に対するリスクコミュニケーションの役回り	
非常時にアウトリーチするための関わり	
放射線による影響をきちんと知る	
生活の中の放射線を入れていく	
生活に重点をおいた放射線の知識	身近な（生活レベル）放射線の知識
生活習慣と同じレベルの放射線	
住民目線に役立たせるための基本となる知識	
アウトリーチするコミュニケーションのとり方	
コミュニケーション能力ではないリスクコミュニケーションが必要	
知識の上にリスクに関する学びを加える	
リスクコミュニケーションとヘルスコミュニケーションの合体	放射線リスクコミュニケーション
放射線に特化したコミュニケーション	
有事に備えた市民の教育	
平時からの住民への対応	
放射線管理も健康危機管理	
特殊訓練や災害時訓練への定期的な参加	放射線危機管理
保健師からすれば全て危機管理で対応可能	
過去に起こった原子力災害の事例から学ぶ	
事例検討は必ず入れてほしい	原子力災害事例検討
事例から自分たちの場合どうするのか考えることが必要	

表6. フォーカスグループインタビューより導き出された「放射線リスクマネジメント論」において目指すべき目標

コード	到達度
放射線の種類や作用を知る	知識
放射線の健康リスクを知る	
原子力災害訓練の状況・内容を知る	
原発の安全対策を知る	
放射線の利用（非破壊検査やなど産業検査）を知る	
生活の中の放射線を知る	
過去の原子力災害を学ぶ	
避難すべきかどうかの線量の判断	理解・応用
過去の原子力災害から何を学び、それを今後はどう活かすのか	
地域住民の目線でその地域を見て、より良く安全に快適に健康に暮らせるのかを考える	
平時からの放射線の意識付け	
原子力災害時に誰と連携するのか、どうつなげるのかといった他職種連携を理解できる	
放射線の線量が測定できること	分析・統合・ 評価
線量から健康リスクを説明しマネジメントできること	
過去の原子力災害事例を通してリスクのコミュニケーションとマネジメントできること	
放射線看護専門看護師と保健師の専門性を理解し合う協働演習	
放射線看護専門看護師との事例の展開	

表7. モデルシラバス「放射線リスクマネジメント論」

202x 度	後期	○曜・○校時	必修・選択	単位数	1 単位
授業科目 (英語名)	放射線リスクマネジメント論 (Radiological Risk Management)				
授業概要					
<ol style="list-style-type: none"> 1) 原子力災害および放射線事故時に必要な放射線リスクマネジメントを看護職の視点から学ぶ。 2) 放射線による健康影響への不安を抱える対象者のニーズを捉え、放射線リスクマネジメントを実践するための手法を学ぶ。 3) 対象者のニーズに合った支援や多職種連携の意義について学ぶ。 					
授業到達目標					
<ol style="list-style-type: none"> 1) 原子力災害および放射線事故時における災害サイクル各期の放射線リスクマネジメントの必要性及び支援システムについて説明できる。 2) 放射線リスクマネジメントのプロセスについて説明できる。 3) 対象者のニーズに合ったマネジメントプランを作成し、必要な支援内容について他者と協議することができる。 4) 放射線の健康影響に不安を抱える対象者のニーズを捉え、放射線リスクマネジメントを展開するためのチームアプローチについて考察することができる。 					
キーワード					
原子力災害、放射線リスク、リスクマネジメント、チームアプローチ					
回数	授業内容			教育内容 (キーワード)	
1回目	放射線リスクマネジメントの概念及び目的			リスクマネジメントの基礎 放射線リスクマネジメント 過去の原子力災害・放射線事故 放射線リスクマネジメントの目的 (意思決定支援、自立支援)	
2回目	放射線リスクマネジメントの構造と機能			放射線リスクマネジメントの手段 (手法)	
3回目	放射線リスクマネジメントにおける社会資源とその活用			放射線リスクマネジメントを担う 機関や専門職 社会資源の活用と開発 原子力災害後の制度と補償	
4回目	放射線リスクマネジメントにおける個人および 集団の対象理解 (心理面)			地域状況の調査 原子力災害後のメンタルヘルス 原子力災害後のサポート (実際)	
5回目	放射線リスクマネジメントのプロセス			リスクアセスメント リスクマネジメントプランの作成 モニタリング (効果測定)	
6回目	放射線リスクマネジメントの実践 (事例検討)			原子力災害後の集団および個人の ニーズに対する事例検討	
7回目	放射線リスクマネジメントの実践 (ロールプレ イ) ※個人への対応			原子力災害後の個人ニーズに対す るリスクコミュニケーション	
8回目	放射線リスクマネジメントの実践 (ロールプレ イ) ※集団への対応			原子力災害後の集団ニーズに対す る健康教育 (情報提供)	

※本講義受講にあたっては、日本放射線看護学会が提示している「放射線看護教育モデルシラバス」の到達目標が達成できていることが望ましい。

IV 放射線リスクマネジメント研修 WG

IV-1 研究目的・目標

NuHAT の構成員に必要とされる放射線リスクマネジメントに関する知識や技術は、学部教育さらにWG2 で検討したモデルシラバスを活用して修得する。放射線リスクマネジメントに関する知識・技術を恒常的に維持し、さらに向上させていくためには、構成員を対象にして定期的に研修を継続していくことが必要である。そこで、本WG では、研修モデルを開発するために、放射線リスクマネジメント研修を実施し、その結果等を基に、実施した研修プログラム等の改善を行うことを目標とした。

IV-2 研究方法

IV-2-1 研修プログラムの開発

本WG では、オンライン会議2回とメール会議を通して研修内容及び研修方法についてWG メンバーおよび福島第一原子力発電所での事故後に放射線の専門家として現地でのリスクコミュニケーションに携わった外部専門家で議論して決定した。研修プログラムの検討にあたっては、文部科学省 国際原子力人材育成イニシアティブ事業にて日本アイソトープ協会が主催で2016年から2018年に年2回ずつ実施した「看護職の原子力・放射線教育のためのトレーナーズ・トレーニング」研修と、2021年3月に量子科学技術研究開発機構で開催された「放射線看護アドバンス課程」研修のプログラム等を参考とした。

WG メンバー及び外部専門家による検討の結果、以下の4項目の講義を含め、アクティブラーニングを基本とし、演習、グループワーク（GW）を設けることとした。

1. 「放射線リスクマネジメント」

放射線リスクマネジメントにおいては、エビデンスとしての放射線リスクの知識は不可欠であり、最新の情報を習得する必要がある。放射線リスク、リスクコミュニケーションを包含する「放射線リスクマネジメント」の講義を設けた。

2. 「福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応」

NuHAT は原子力事故発生後、急性期から中長期（復興期）にわたる活動を想定している。そのため、事故後長期にわたる住民の不安の変化やそれへの対応の経験を共有することが、今後NuHAT の活動を行うために必要になると考えた。そこで、実際に事故後現地で継続して住民対応の活動をしてきた有識者からの講義を設けることとした。

3. 「原子力災害対策を行なっている自治体の活動と原子力災害時の看護職への期待」

NuHAT は原子力災害時の住民対応は自治体との連携のもとで行うことになる。原子力防災対策に関する原子力発電所立地道県や隣接府県における原子力防災対策の現状および看護職の活動実態、看護職への期待を聴く必要があると考え、自治体の原子力防災対策の担当者による講義を設けることとした。

4. 「個人モニタリング(測定と評価)の基礎」

NuHAT メンバーは、原子力災害発生時自らの身を守りながら活動する必要があり、そのために被ばく線量の測定について基本的な知識を身につける必要がある。また、NuHAT メンバーは平時には医療施設等に所属して放射線診療に携わると同時に、所属施設で放射線に関わる教育を実施する立場になると考え、放射線防護の基本である線量モニタリングについて理解を深めることが重要であると考え、個人モニタリングについての講義を設けることとした。

演習として以下の4項目について実施することとした。

1. 「体表面汚染のモニタリング」および「甲状腺のモニタリング」

NuHAT は原子力災害発生直後から中長期における活動を目的としており、状況に応じて体表面汚染モニタリングまたは甲状腺のモニタリングに携わる可能性がある。また、直接、体表面汚染モニタリングや・甲状腺のモニタリングに関わらない場合でも、避難所等で住民に対して実施されているモニタリングを理解することは被災者との円滑なコミュニケーションのために必要であると考えた。そのため演習として設けることとした。

2. 「自然放射線の測定」

NuHAT は、原子力災害時（事故直後から中長期まで）はもとより、平常時においても、地域住民に対する放射線リスクマネジメントに関する活動をするチームである。地域住民にとって最も身近な放射線は自然放射線であり、NuHAT メンバーが、自然放射線の測定を通して、被ばく線量、線量と健康リスク、内部被ばくと外部被ばくなどの基本的な知識を整理するための演習として設けることとした。

3. 「ポータブルX線撮影装置を用いた防護演習」

NuHAT は原子力災害発生時だけでなく、平時から医療施設等における看護職等の医療従事者の教育・研修も活動のひとつである。ポータブルX線撮影装置を用いた防護演習により、被ばくの区分（公衆被ばく、職業被ばく、医療被ばく）、外部被ばくに対する防護の原則などの放射線防護の基本を習得することができる。前述したトレーナーズトレーニング研修でも、最も役立つ演習との評価を受けている。

グループワークについて

アクティブラーニングの手段としてグループワークを取り入れることとした。住民に対する放射線リスクマネジメントに関しては、看護職としてのコミュニケーション能力、すなわち住民との対応姿勢が問われる。グループワークを通して、放射線リスクを住民にどう伝えていくかなどに関して、お互いの意見を交換する機会とすることとした。グループワークでは事前に事例を研修参加者に連絡した。オンライン研修では後述するテキストのGW事例5、対面研修では、テキストのGW事例2を用いた。

研修方法は、計画当初2021年度内に2回対面で行うことを予定していたが、COVID-19の影響もあり、1回はオンライン、1回は対面で実施した。研修では、テキストとして、「改訂版 看護と放射線」（日本アイソトープ協会）を事前に研修参加者に配布した。

IV-2-2 研修の実施

1. 参加者

参加者は、一般社団法人日本放射線看護学会に依頼しCNS養成課程修了生に公募をかけた。さらに、長崎大学・福島県立医科大学の共同大学院修了生、保健師養成大学院在籍生、地域保健所等に所属する保健師を対象に公募した。

2. 研修の実施

- 1) 2021年12月11日(土) にオンラインにて表1のプログラムで実施
- 2) 2022年1月19日(水)、20日(木) に対面にて表2,3のプログラムで実施

IV-2-3 研修参加者を対象にアンケート調査

研修会参加者に対して、Webによるアンケート調査を実施した。調査項目を以下に示す。なお、オンライン研修のみで調査した項目には(WEB)、対面研修のみで調査した項目には(対面)と付した。それ以外は両研修で調査した。

1. 職種をお答えください
2. どのような方法で本研修を知りましたか
3. 本研修を受講するまでに放射線関連の研修を受講したことはありますか
4. これまでに受講した研修を教えてください(複数回答可)
5. 現在、就労している施設において放射線に関連した業務に係わっておられますか
6. 具体的な業務内容を教えてください

7. 現在、就労している施設で、法令上の「放射線業務従事者」として管理されていますか
8. 今まで患者さんや一般の方から放射線に関する質問や相談を受けたことがありますか
9. 誰からどのような質問であったか具体的に教えてください
10. 今まで、ご自身が放射線や放射線被ばくについて不安に思ったことはありますか
11. どのような不安か具体的に教えてください
12. 本日の講義の時間についてご回答ください [放射線リスクマネジメント]
13. 本日の講義の時間についてご回答ください [福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応]
14. 本日の講義の時間についてご回答ください [原子力災害対策を行なっている自治体の活動と原子力災害時の看護職への期待] (WEB)
15. 本日の講義の時間についてご回答ください [個人モニタリング(測定と評価)の基礎] (対面)
16. 本日の講義の内容についてご回答ください [放射線リスクマネジメント]
17. 本日の講義の内容についてご回答ください [福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応]
18. 本日の講義の内容についてご回答ください [原子力災害対策を行なっている自治体の活動と原子力災害時の看護職への期待] (WEB)
19. 本日の講義の内容についてご回答ください [個人モニタリング(測定と評価)の基礎] (対面)
20. NuHAT の研修に追加してほしい講義内容がありますか
21. 演習の時間についてご回答ください
22. 演習の難易度についてご回答ください
23. NuHAT の研修に追加してほしい演習はありますか(WEB)
24. グループワーク時間の長さについてご回答ください(WEB)
25. グループワークで取り上げた事例の難易度は適切でしたか(WEB)
26. グループワークで取り上げてほしい事例があれば記載してください(WEB)
27. NuHAT のメンバーとして参加したいと思いますか
28. 研修の時期、期間、方法等についてご意見ございましたら回答ください
29. 本日の研修に対する意見、看護職が原子力防災に専門家として関わっていくことなどに関するご意見をご自由に記載してください

IV-2-4 アンケートの分析方法

アンケートで結果を単純集計と一部クロス集計を行なった。自由記載欄の研修に対する意見を集約した。

IV-3 研究結果

オンライン研修には24名の応募者のうち22名、対面研修は10名の応募者のうち7名参加した(写真1,2)。

IV-3-1 研修参加者のアンケート結果

アンケートの回答者はオンライン研修18件(回答率82%)、対面研修で5件(回答率71%)の回答があった。

オンライン研修ではCNS課程修了者及び保健師養成課程の大学院生がそれぞれ6名と最も多く、対面でもCNS課程修了者が最も多かった(表4)。研修を知ったきっかけも、オンライン、対面いずれにおいても「大学院課程の教員からの情報」が最も多かった(表5)。

放射線関連の研修受講経験について、「ある」との回答がオンライン、対面ともに多く、「量子科学技術研究開発機構(放射線医学総合研究所)の研修」や「看護職のトレーナーズトレーニング研修」の受講経験者が多かった(表6,7)。

放射線に関連する業務への関わりについては、オンライン、対面研修参加者共におよそ半数が「放射線に関連した業務に関わっている」と回答しており、放射線診療や研修の企画・運営に携わっている参加者もいた(表8,9)。放射線に関連する業務へ関わっていても、「放射線業務従事者」としての管理の対象になっている人は約半数に過ぎなかった(表10)。

患者さんや一般の方から放射線に関する質問を受けたことがあるかについて、オンライン研修参加者は12名、対面研修参加者は4名が質問や相談を受けたことがあり(表11)、具体的には被ばくによる健康影響、食品汚染、放射線診療の内容に関するものなど多岐にわたっていた(表12)。

研修参加者自身の放射線や被ばくについての不安についてオンライン研修参加者は5名、対面参加者は3名が「不安に思ったことがある」と回答した(表13)。具体的な内容は原発事故に関連する健康不安や、病院での職業被ばくについてであった(表14)。

講義については、いずれの講義時間も「適当」との回答が多かったが、「放射線リスクマネジメント」は「少し短い」との回答がオンライン研修で5名、対面研修で3名いた(表15)。講義内容についても「適当」との回答が多かったが、「放射線リスクマネジメント」は「少し難しい」との回答が、オンライン研修で6名、対面研修で1名おり(表16)、オンライン研修で「少し難しい」と回答した6名のうち3名は「保健師養成課程の大学院生」であった。追加希望のあった講義として、

「放射線の健康影響に関する基本的な事項」と「自治体以外の行政の原子力防災に対する取り組み」が最も多かった(表 17)。

演習について、演習時間は「適当」との回答が最も多く、オンラインで 13 名、対面で 5 名であった(表 18)。また、対面研修のみ演習の難易度について調査したところ、いずれの演習も難易度は「適当」と全参加者が回答した(表 19)。研修に追加してほしい演習について「身体汚染のチェック」が最も多く 15 名、次いで「甲状腺のモニタリング」が 7 名であった(表 20)。

グループワークについてオンライン研修では、60 分を設けたが、「適当」8 名、「少し短い」6 名、「短い」3 名と回答があった(表 21)。また、テーマとして、「外部被ばくと内部被ばくのの違い」についてテキストの事例 5 を用いて行ったが、「適当」9 名、「少し難しい」7 名、「難しい」1 名であった(表 22)。「少し難しい」と回答した 7 名のうち、3 名は「保健師養成課程の大学院生」であった。なお、対面研修でのグループワークに関するアンケートはアンケートフォームに不備があり、回答が得られなかった。

NuHAT メンバーとしての参加意思について、オンライン研修では 14 名、対面研修では 4 名が「参加したい」と回答があり、「参加したくない」の回答はいずれの研修でもなかった(表 24)。「わからない」と回答したのはいずれも保健師養成課程の大学院生及びその他であった。

研修の時期・方法について、「講義やグループワークの場合オンラインであれば参加しやすい」などオンライン研修について肯定的な意見が複数あった。一方で、「画面上ではグループワーク時にメンバーの反応が見えにくい」などの指摘もあった。開催頻度や時期については、勤務の都合から週末を希望するコメントがあった(表 25)。

研修に対する意見および看護職が原子力防災に専門家として関わっていくことなどに関する意見について、定期的な研修の必要性や NuHAT の運営について多数コメントがあった(表 26)。

IV-4 考察

IV-4-1 研修の必要性

今回の研修参加者の多くは CNS 課程等、大学院での放射線教育を修了している人であった。また、参加者で実際に放射線業務にかかわっていた人は約半数で、放射線看護に関する大学院教育を修了した人であっても、放射線診療に従事しているわけではないと考えられる。また、今回のアンケートでも「日常の診療に追われ、放射線の知識はどうしても忘れてしまうと思いました…」と回答しており、平時の医療現場で活動する看護職が、災害時を想定できるためには、原子力災害に備えた研修の重要性・必要性が明らかになったと考える。また、定期的な研修を望む回答も多く見られた。

IV-4-2 研修内容の妥当性

オンライン研修・対面研修ともに、各講義・演習・グループワークも時間・難易度ともに「適当」の回答が多かった。今回行った研修プログラムは、研修参加者のニーズに合った研修内容であると考え、モデル研修となると考える。しかし、研修参加者から、「参加者それぞれで知識に差があるように感じたので、まずは知識の統一が大事になるかと思いました」とコメントがあった。今回は放射線に関する教育を受けてきた CNS 課程修了者だけでなく、放射線に関する教育を受けてこなかった保健師や保健師養成課程の大学院生も研修に参加していたためにこのようなコメントがあったものと考えられる。NuHAT の構成員は CNS のみでなく、学部教育において放射線に関する教育を受けてこなかった保健師等も含まれる。そのため、研修自体もラダーを設けるなど、参加者のレディネスに応じた内容を実施できるようにする必要があると考えた。

IV-4-3 グループワークの重要性

本研修では、グループワークとして事例に対する意見交換の場を設けた。グループワークは、先述した通り、知識の定着・統合・活用および住民とのコミュニケーション能力のブラッシュアップを目的としている。グループワークの中で、「現場ではこのように説明している」など、研修参加者間での意見交換なども活発に見られ、情報共有の場として有用であったと考える。また、住民にどのように説明するのかを具体的に考えるプロセスを通して、自分が理解できていなかった部分が意識化されることも多かった。緊急被ばく医療の研修等では汚染チェックなどの技術について演習が組み込まれている例もあるが、本研修のように事例をもとにどのように住民とコミュニケーションをとっていくのかをグループワーク形式で実施している研修はあまりない。アンケートでは、グループワークで「もっと皆さんと話したかった」とコメントもあることから、有益な内容であったと考える。

IV-4-4 研修方法(時期、開催方法)について

研修の開催時期は、当初の予定(第2四半期と第3四半期に各一回)とは異なり、COVID-19の影響もあって12月(土曜日)と1月(水・木曜日)となった。研修参加者からのフリーコメントでは、「仕事との兼ね合いもあるため、土日、もしくは平日1日のみに集中する形だと参加しやすいです」とあり、NuHATの主要メンバーであるCNSや保健師が、病院や保健所に勤務する人が多いことを考慮すると、研修は祝祭日に開催することがよいと考えた。また、時期について、「対面なら冬以外が良い。移動の関係上」との意見があった、CNS養成課程のある大学院に弘前大学があること、ま

た、原発立地道県が北陸や北日本に多いことことから、天候による交通機関への影響などを考慮すると、冬以外での開催が望ましいと考えた。

開催方法について、オンライン開催とすることで、移動の時間をなくすることができるなど、ポジティブな意見が多かった。一方で、オンライン研修の参加者から「グループワークはグループメンバーの反応が見えづらかった」とコメントがあった。グループワークのファシリテーターからも、Zoom のビデオはオンにしているが、オンラインだと参加者の反応が見えにくく、お互い発言しにくい印象であったと意見があった。今回は、Zoom を利用し、ブレイクアウトルームを活用して、少しでも発言しやすいように 5-6 名/グループにしたが、オンラインでのグループワーク方法については、今後も改善方法を検討する必要があると考える。

IV-4-5 NuHAT の参加意思について

研修へ参加した人の 8 割弱が「NuHAT へ参加したい」と回答があった。「参加したくない」と回答した人はおらず、「わからない」と回答した人が約 2 割だった。「わからない」と回答した人の所属は、保健師養成課程の大学院生であり、今後の所属などが不確定であったためと思われる。NuHAT での活動は、今後の放射線看護専門看護師の役割を実現していく一分野として定着していくものと思われる。

IV-4-6 放射線リスクマネジメント研修のモデル

オンライン及び対面での研修を実施し、その参加者に対するアンケート調査の結果を踏まえ、研修モデルとして、表 1~3 に示したプログラムであると考ええる。

IV-5 今後の課題

NuHAT の構成員の多様性を考えると研修内容について、今後ラダーを設ける等の検討が必要である。また、ラダーによっては講義メインのプログラムとし、開催方法をオンラインにすることで、参加しやすい研修とすることができる。一方で、演習やグループワークは、参加者が能動的に参加できるメリットがある。今後は、研修内容のブラッシュアップを行うとともに、内容に伴って適切な方法を検討していくことが必要であると考ええる。

IV-6 結語

オンライン研修1回、対面研修1回を実施し、研修参加者へアンケート調査を実施した。その結果、本研修はNuHAT構成メンバーにとって有益な研修であり、NuHATメンバーの質保証のために定期的に継続して実施していく必要があると考える。

WG3の目標の達成率100%。

IV-7 写真・表



写真1 講義の様子



写真2 演習の様子

表1. オンライン研修プログラム

時間 (分)	内 容
13:00 (10)	開会
13:10 (40)	放射線リスクマネジメント
13:50 (50)	福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応
14:40 (60)	原子力災害対策を行なっている自治体の活動と原子力災害時の看護職への期待
15:40 (10)	休憩
15:50 (25)	【演習】サーベイメータの取り扱い
16:15 (55)	【グループワーク】原子力災害時のリスクコミュニケーション
17:10 (5)	閉会 (アンケート)

表2. 対面研修プログラム(1日目)

時間 (分)	内 容
13:00 (10)	開会
13:10 (50)	福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応
14:00 (5)	休憩
14:05 (50)	個人モニタリング(測定と評価)の基礎
14:55 (10)	休憩・移動
15:05 (40)	【演習】 自然放射線の測定
15:45 (40)	【演習】 ポータブルX線撮影装置を用いた防護演習
16:25 (5)	休憩
16:30 (40)	【演習】 体表面汚染のモニタリング
17:10 (5)	解散

表3. 対面研修プログラム(2日目)

時間	内容
9:00 (60)	放射線リスクマネジメント
10:00 (10)	休憩・移動
10:10 (40)	【演習】 甲状腺のモニタリング
10:50 (10)	休憩・移動
11:00 (60)	【グループワーク】 原子力災害時のリスクコミュニケーション
12:00 (10)	閉会 (アンケート)

表4. 職種をお答えください(人)

	web	対面
その他	4	2
保健師	1	0
保健師養成課程 大学院生	6	0
放射線看護専門看護師課程修了者	6	3
総計	17	5

表 5. どのような方法で本研修を知りましたか？(人)

	web	対面
CNS・保健師等の仲間からの情報	4	1
大学院課程の教員からの情報	14	3
総計	18	4

表 6. 本研修を受講するまでに放射線関連お研修を受講したことはありますか？(人)

	web	対面
ある	13	4
なし	4	1
大学の授業で受講したことがある	1	0
総計	18	5

表 7. 本研修までに受講した研修(複数回答可) (人)

研修名	web	対面
量子科学技術研究開発機構(放射線医学総合研究所)の研修	5	2
看護職のトレーナーズトレーニング	4	2
原子力安全技術センターの研修	3	2
原子力安全研究協会の研修	2	0
その他	4	2

表 8. 現在、就労している施設において放射線に関連した業務に係わっておられますか
(人)

	web	対面
就労していない(大学院生)	5	0
放射線とは関係ない	5	2
放射線に関連した業務に係わっている	8	3
総計	18	5

表 9. 関わっている放射線に関連した業務の具体的な内容を教えてください(人)

	web	対面
IVR	1	0
原子力災害医療に関する研修の企画、準備、運営等	1	1
被ばく医療	1	0
被ばく医療にかかわる研修の企画・運営	1	0
放射線治療を受ける患者の看護	1	0
放射線診療	3	1
食品中の放射性物質関連	0	1
総計	8	3

表 10. 現在、就労している施設で、法令上の「放射線業務従事者」として管理されていますか(人)

	web	対面
放射線業務従事者である	4	1
放射線業務従事者ではない	4	2
総計	8	3

表 11. 今まで患者さんや一般の方から放射線に関する質問や相談を受けたことがありますか(人)

	web	対面
ある	12	4
ない	6	1
総計	18	5

表 12. 誰からどのような質問であったか具体的に教えてください(人)

どのくらい被ばくしたら、健康影響が出るのか
 飼っているペットへの影響、対応について 等々
 周囲の人への被ばくの影響について

短期間のうちに、放射線の検査を何回も受けているが、本当に大丈夫なのか
日常生活において注意したほうがよい点があるか（例えば、家族のご飯を作ってもいいの
か、洗濯は別にしたほうがいいのか等）

病院で受ける検査で、検査は何回までなど、限度は決められているのか 等々

PET 検査後の対応に関して

被ばくの影響について

CTをとる患者さんから、何回もCTをとって身体に悪くないのかといった質問を受けまし
た。

外科病棟勤務時に、食道の手術後の患者さんから、「毎週CTを撮ってるけど被ばくは大
丈夫なのか」と質問された。

患者さんから。PET 検査室に従事歴があり、その際に質問や相談を受けたことがある。

原爆被爆者だが放射線治療を受けて本当に大丈夫なのか？

子どもから成人まで、被ばくに対する不安

事故後に福島から避難してきた住民の検査を行った。米を食べてホールボディ検査で少し
検出された際に大丈夫か聞かれた。

住民から測定した食品のことで相談を受けた

前立腺癌患者の小線源療法について患者より

放射線と聞くとよく分からないが不安。放射線治療中、家族と一緒に生活しても良いか。

放射線治療を受けている患者

放射線皮膚炎・粘膜炎が起こるメカニズム

<対面>

救急外来を受診された小児の親御さんから、昨日もCTを撮ったが今日も連続で撮って大
丈夫なのかと問われた。

PET 検査室に従事していた際に、患者さんやその家族から、PET 検査後の日常生活におけ
る注意点、周囲への被ばくに関する質問、自宅で飼っているペットに関する質問など

放射線治療を受けている患者から皮膚トラブルと宿酔について聞かれた

IVR での被ばくについて問題ないのか

表 13. 今まで、ご自身が放射線や放射線被ばくについて不安に思ったことはありますか

(人)	web	対面
ある	5	3
ない	13	2
総計	18	5

表 14. どのような不安か具体的に教えてください

<WEB>

外部被ばく

原発事故による被ばくの自身への影響、子どもへの影響、胎児への影響（事故当時妊娠中）、そのまま生活し続けても本当に大丈夫なのか等々の不安があった。

就労前までは量に関係なく被ばくすると健康被害があると思っていた。

東日本大震災・福島第一原子力発電所事故発生時、福島県内の病院で働いていた。

東日本大震災時、気仙沼へDMAT支援に行った際、情報が全くない状況であった

病院で透視下で処置を行う事があるが、個人線量計を配布されていない

<対面>

放射線に関してほとんど無知ということもあり、漠然とした不安がある。

2011年の福島第一原子力発電所事故時、福島県に住んでいて、妻は妊娠中であり、生まれてくる子どもに放射線被ばくの影響がないか心配だった。

東日本大震災時、DMATで気仙沼へ支援に行った際、情報が二転三転したときに、被ばくはどの程度考えられるか。その時点の対処など

表 15. 本日の講義の時間についてご回答ください(人)		短 い	少	適 当	少	長 い	総 計
			し 短 い		し 長 い		
web	[放射線リスクマネジメント]	1	5	11	1	0	18
	[福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応]	0	3	13	2	0	18
	[原子力災害対策を行なっている自治体の活動と原子力災害時の看護職への期待]	0	2	14	2	0	18
対 面	[放射線リスクマネジメント]	0	3	2	0	0	5
	[福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応]	0	2	3	0	0	5
	個人モニタリング(測定と評価)の基礎	0	2	3	0	0	5

表 16. 本日の講義内容についてご回答ください(人)		易 し い	少	適 当	少	難 し い	総 計
			し 易 い		し 難 い		
web	[放射線リスクマネジメント]	0	1	11	6	0	18
	[福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応]	0	1	15	2	0	18
	[原子力災害対策を行なっている自治体の活動と原子力災害時の看護職への期待]	1	2	12	3	0	18
対 面	[放射線リスクマネジメント]	0	0	4	1	0	0
	[福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応]	0	0	5	0	0	0
	個人モニタリング(測定と評価)の基礎	0	0	5	0	0	0

表 17. NuHAT の研修に追加してほしい講義内容がありますか。(人)

	web	対面
放射線の基本的な事項	8	2
放射線の健康影響に関する基本的な事項	12	2
原子力発電の仕組み	4	0
リスクコミュニケーション等の対応に関するグループワーク	1	1
自治体以外の行政の原子力防災に対する取り組み	12	5

表 18. 演習の時間についてご回答ください(人)

	web	対面
短い	3	0
少し短い	1	0
適当	13	5
少し長い	1	0
長い	0	0
総計	18	5

表 19. 演習の難易度についてご回答ください
(対面のみ) (人)

	易し い	少し 易し い	適当	少し 難し い	難し い	総計
自然放射線の測定	0	0	5	0	0	0
身体汚染のチェック	0	0	5	0	0	0
移動型エックス線装置を用いた防護方法	0	0	5	0	0	0
甲状腺のモニタリング	0	0	5	0	0	0

表 20. NuHAT の研修に追加してほしい演習はありますか(人) (オンラインのみ)

リスクコミュニケーションに関する演習	1
移動型エックス線装置を用いた防護方法	3
甲状腺のモニタリング	7
自然放射線の測定	1
身体汚染のチェック	15

表 21. グループワーク時間の長さについてご回答ください(人)

短い	3
少し短い	6
適当	8
少し長い	1
長い	0
総計	18

表 22. グループワークで取り上げた事例の難易度は適切でしたか(人)

易しい	0
少し易しい	1
適当	9
少し難しい	7
難しい	1
総計	18

表 23. グループワークで取り上げてほしい事例があれば記載してください

遺伝的影響について

対住民、患者を想定して、どの程度説明の内容を平易化するかなど

表 24. NuHAT のメンバーとして参加したいと思いますか(人)

	web	対面
わからない	4	1
参加したい	14	4
総計	18	

表 25. 研修の時期、期間、方法等についてご意見ございましたら回答ください

〈WEB〉

グループワークはグループメンバーの反応が見えづらかったことと、時間が限られていたため、議論があまり盛り上がらなかった印象でした。もっと皆さんと話をしたかったなと思いました。

講義・グループワークの場合、オンラインであれば参加しやすいと思いました。

今回のようにオンラインと対面が選べると便利だと感じました。

仕事との兼ね合いもあるため、土日、もしくは平日1日のみに集中する形だと参加しやすいです

仕事を行っているので、平日は難しい

対面なら冬以外が良い。移動の関係上

〈対面〉

年に2回開催していただきたいです

仕事上、金・土が参加しやすいです

表 26. 本日の研修に対する意見、看護職が原子力防災に専門家として関わっていくことなどに関するご意見をご自由に記載してください

〈WEB〉

NuHAT の活動概要はこれから検討になるかと存じますが、NuHAT の立ち位置、指揮命令系統、他の医療・保健チームとの連携、日本看護協会との関係性等につきましても、ご検討をお願いいたします。

どの内容も大変勉強になりました。また、オンラインでの開催のため、参加しやすく、とても良かった。

看護職が原子力災害時にどのように関わっていくべきなのか、看護職の強みとは何かを考えると、やはり『寄り添う力』ではないかと考えました。放射線に関する専門的な知識、最新の知見を説明できる専門家の存在は重要ですが、知識の押しつけは住民（被災者）にとって残酷な現実を知らされる場面でもあります。そんなときに住民の生活や考え、価値観・不安を理解し受け入れ、正解のない問題について一緒に考えることができるのは看護職ではないかと感じました。自分自身、放射線に関する知識はまだまだ不十分なため、今後さらに努力し放射線の知

識を身に着けることと、知識の押しつけではなく看護職の強みを活かし自分にできることを考えていくことが必要だと感じました。

看護職として適切な知識を身に着けておくことの必要性を改めて感じました。ありがとうございました。

看護職の方が定期的に知識を再確認できるような機会を作っていけるように、私も頑張りたいと思いました。とても貴重な経験となりました、ありがとうございました。

関わるまでの知識を持つ看護師の母数が絶対的に少ないと感じる。また、関わる場があるのか、他の職種が看護職が専門家として必要としているのかがわからない。

研修に関して：2つめの講義と3つ目の講義の間に5分だけでも休憩があると、頭の整理がしやすいのと集中力も続きやすいのではないかと思います。

言葉の意味を正しく理解していないと、住民への対応ができないと思った。相手にわかる表現や伝え方をするためには、自分自身が理解していないといけないので、放射線の基本的なことや健康影響に関する事項については、大学院で勉強してきた（している）看護職であっても、研修で定期的に復習できる機会が必要ではないかと思った。（皆さん診療に従事されていると思うので、どうしても忘れてしまうと思いました…。）

参加者それぞれで知識に差があるように感じたので、まずは知識の統一が大事になるかと思いました

定期的に研修に参加させていただく事により、知識の復習になります。又、モチベーションを保つ上でも大切だと感じております。

<対面>

看護師が被災者に関わることは必要だとかんがえます。被災者に寄り添い、リスクコミュニケーションすることは大切だと考えます。

同様の内容の研修を引き続き開催してほしい。

NuHAT として活動するにあたり、指揮命令系統を明確にしてほしい。

一般診療と違い、放射線の専門知識を持った看護師が主体的に関わることができる分野であると考えます。その放射線看護専門看護師の地位を確立する1つとして、NuHAT が認められていくことと、各施設内及び日本で必要とされる人材であることが認知され、後に続く看護師が増えることを期待します。

V まとめ

「看護職を活用した住民に対する放射線リスクマネジメントの推進-原子力災害支援保健チーム (NuHAT) の実現を目指して」のテーマで NuHAT の実現及び継続して運営していくための方策について、3つのWGを設置し、相互の連携を図り検討を進めた。

NuHAT を実現し継続していくためには、①NuHAT を継続的に運営していくための条件の検討、②NuHAT を構成するメンバーを供給していく看護教育のあり方についての検討、③NuHAT 構成メンバーの質を担保するための研修のあり方についての検討が必要と判断し、3つのWGを設けた。

NuHAT は、主として放射線看護専門看護師 (CNS) 及び大学院修士課程において「放射線リスクマネジメント論」の科目を履修した看護職からなるチームで、平常時はもとより原子力災害発生時の初期から中長期に渡り、住民と直接あるいは間接的に向き合い、住民の放射線の健康影響・リスクに応える(放射線リスクマネジメントを行う) 役割を果たすことを目的にしたチームである。東京電力福島第一原子力発電所の事故を経験し、看護職が原子力防災に積極的に関わっていくことが、今まで不足していた事故後の中長期のわたる対策として、今後、特に必要と考えた。そこで放射線リスクマネジメントに着目し、看護職の持つコミュニケーションスキルを活用していくことの必要性を認識したことが NuHAT 設置のきっかけである。

今回の調査を通し、原子力関係者の間で、原子力防災に看護職を活用するという発想が極めて少ないことを改めて認識したが、すでに専門看護師 (CNS) としての「放射線看護」(安全・安心な放射線・原子力利用に寄与する活動、特に、原子力防災対策、および、放射線の医療利用における放射線防護・安全に関わる活動) の分野特定も実現しており、看護職の特性を活かした NuHAT を設置し実現していきたいと考えている。NuHAT への参加に関する意向調査では、殆どの CNS が参加するとの回答を寄せており、キャリアアップした看護職が原子力防災において活動する道を開いていきたいと考えている。

(CNS は、大学院修士課程においてそれぞれの専門分野に関するスキルを習得した看護職で、現在13分野が特定されている)

研究結果から、次に示す事項を地道に実行していくことが NuHAT を実現し、継続していくことにつながると考えた。

- ① 事務局を設置し、財政的な基盤を確保するようにすること
- ② 社会、特に原子力関係者が、原子力防災における看護職の役割、NuHAT の存在を認識する活動を行うこと
- ③ 放射線看護専門看護師養成課程及び看護系大学院修士課程において本研究で検討した「放射線リスクマネジメント」科目を導入し、NuHAT 構成メンバーを恒常的に供給できるようにすること
- ④ NuHAT 構成メンバーを対象にした研修会を定期的で開催し、メンバーの質向上を図る。研修は、本研究を通して妥当と判断された「モデル研修」に沿って進めること
- ⑤ NuHAT メンバーが看護基礎教育の「放射線教育」に関わり、看護職全体の放射線・原子力に関する知識の充実を図ること

NuHAT が原子力防災に具体的に関わっていく上で、既存の組織（日本看護協会、原子力発電所立地道県・隣接県の看護協会、保健師会、医師会、診療放射線技師技師会、関連学会など）との連携・協働が不可欠であるが、1年間の研究期間ではこの点に関する検討はおこなっていないが、まず、設置し、防災訓練への参加などの機会を通して関係者にNuHATのプレゼンスを認識・理解してもらいながら実施的な連携・協働のあり方を模索していくことが現実的であると考えている。

NuHAT の設置が、医療従事者の半数以上を占める看護職の、原子力領域まで活動範囲を広げ原子力・放射線利用に積極的に関わっていくこと、特に、放射線リスクマネジメントに関する専門性を強化した専門看護師、保健師等の活動の機会となることとなり、エビデンスだけに頼ってはいけな解決できない原子力・放射線の課題の解決につながることを期待している。

原子力関係者が、「看護職のもつ潜在能力」を信頼する姿勢が、NuHAT の今後の活動に大きく影響するものと考えている。

当面は、NuHAT の運営について一般社団法人日本放射線看護学会（学会内に放射線看護専門看護師のネットワークが既にできあがっている）に依頼する予定であるので、日本放射線看護学会と連携し、関連団体との連携やさまざまな課題を検討していきたいと考えている。

VI 資料

全体会議議事録

2021 年度 NuHAT 研究

第 1 回全体会議 議事概要

日時：2021 年 8 月 11 日(水) 17:00～18:45

場所：zoom 会議

出席者(敬称略)：

明石眞言、草間朋子、甲斐倫明、太田勝正、赤羽恵一、野戸結花、吉田浩二、小嶋光明、佐藤潤、加藤知子、苫米地(原子力規制庁 PO 補佐)、堀田昇吾

書記：堀田昇吾

議事内容

1. 報告事項(全体)

- ・ RNSJ10th 学術集会で演題発表する(演題：原子力災害支援保健チーム(NuHAT)研修プログラムの開発(1)―看護職を活用した住民に対する放射線リスクマネジメントの推進―)。(堀田)
- ・ 研究助成金の概算払いが確定した(9月から)。(堀田)
- ・ 東京医療保健大学の研究倫理審査が7月20日付で承認が得られた。(佐藤)

2. 各WGより進捗と今後の予定を報告

<WG1>(リーダー：太田)

- ・ 本年度に実施される予定の原発立地県等での防災訓練について情報収集している。現在は開催県、開催日時等の情報が公開されていない。
- ・ 今年度の原子力総合防災訓練(以下総合防)実施される可能性がある。原発立地県の担当者へのインタビュー調査については、総合防調査と関連する情報が期待されるのでA県を第一候補として今後調査協力依頼等の手続きを進めることとした。
- ・ 総合防での参加観察調査(エスノグラフィー)では、看護職の行動観察と同時に、オフサイトセンターなども観察対象とし原子力災害発災時の看護職の活動の可能性を考察できる情報を収集することとした。

- ・ F1 事故の際に弘前大学の看護職が、避難所で活動をしたので、その経験についても情報収集することとした。
- ・ 災害時医療支援組織関係者へのインタビューについては堀田が調整中であるが、定期的な研修への災害時医療支援組織隊員の参加に関する旅費等の経費負担がどうなっているか、また、所属施設からの派遣の形での参加になっているのか等についても情報収集することとした。
- ・ 総合防に関して原子力規制庁で把握している情報(場所、時期等)について本研究班に開示できるかどうかを規制庁内で検討してもらうこととなった。
- ・ 総合防に放射線看護 CNS 課程修了生が参加する際の旅費等については、参加による成果等が今回の NuHAT 研究事業の成果に還元されると判断された場合は事業費の範囲内で執行できることとの了解が得られた。

<WG2> (リーダー：佐藤)

- ・ 7月15日にWG会議を内容した。
- ・ フォーカスグループインタビュー (FGI) にはWGメンバーがファシリテーターとして参加することが確認された。
- ・ FGI では、CNS 課程を持つ3大学院、保健師大学院課程を持つ2大学院のシラバスの提出を依頼し、シラバスを基にモデルシラバス作成に向けての議論を進めていくこととした。
- ・ 9月に次回WG会議を予定している。

<WG3> (リーダー：堀田)

- ・ 7月8日にWG会議を開催した。
- ・ 研修日程、場所、研修内容、講師候補を決定したが、開催場所である東京医療保健大学より開催日時を平日に変更して欲しい旨の連絡があり、現在調整している。
- ・ 研修会は、年度内に対面1回(2022年1月以降)、オンライン1回(2021年中)の計2回開催することとなった。対面研修とオンライン研修の内容は必ずしも一致しないが、オンラインで実施可能な内容を早急に検討することとした。オンライン研修の期間は2日間に限らないこととした。
- ・ オンライン研修では、原発立地県の行政担当者を講師に招いて防災訓練において医療職にどのように関わってもらっているのかなどを話してもらうことも含めて検討することとなった。
- ・ 研修参加者は放射線看護 CNS 課程修了者としているが、長崎大学・福島県立医科大学の共同大

学院修了生も NuHAT 構成員として参加する可能性もあるので、研修の対象者に含めることとなった。共同大学院修了生への研修の案内は吉田が調整することとなった。

- ・ 研修参加者の旅費、参加の際の施設からの派遣等について議論した結果、施設からの派遣形式について、自己研鑽の目的で参加してもらうこととした。
- ・ 研修参加者の旅費は事業費の範囲内で支払いが可能である旨の了解が得られた。
- ・ 量研機構で 2021 年 3 月に実施したアドバンス研修の際の、研修参加者の旅費、施設からの派遣形式について赤羽が担当者に確認することとなった。

3. その他

P 0 補佐より 5 点確認事項あり。

- ・ 契約書では研修会を年度内に 2 回やることになっている。1 回にすることは契約不履行になる。研修形態を変更するなどして、2 回実施はできないか？
→提案を参考に検討した結果、オンライン研修を開催することとした(WG3 の欄に反映)
- ・ 本研究にある CNS は放射線看護の CNS で良いか？
→放射線看護専門看護師 (CNS) である。
- ・ なぜ全ての看護職ではなく CNS を対象としたのか？
→原子力災害時の NuHAT の役割は、住民の不安の軽減等に向けた放射線リスクマネジメントが必要になる。エビデンスに基づいた対応ができるためには放射線リスクに関する卓越した知識が必要であり、大学院 2 年間の養成課程で放射線について学修している CNS が適任であると考えた。
- ・ NuHAT において保健師はどのような位置付けになるのか？
→地域の情報を最も把握しているのは保健師である。F 1 事故後、現在も被災住民とのコミュニケーションを取り続けている看護職の多くは地元の保健師である。放射線リスクに関するスキルを大学院課程で修得した保健師は、NuHAT の重要な構成メンバーであると考えている。
- ・ NuHAT 研修を受ければどんな看護職でも NuHAT メンバーになれるのか？
→NuHAT は CNS 課程修了者および大学院修士課程で育成された保健師を中心に構成する。そのため、研修を受けた人が誰でも NuHAT になれるわけではないと考えている。
- ・ 総合防へ研究班メンバーが参加するのは CNS 課程、保健師大学院課程のシラバスの作成に必要な情報を収集するためか？

→総合防への参加は、災害が起こった際の NuHAT の具体的な活動のあり方を検討することが目的であり、シラバスの作成に必要な情報を収集するためではない。総合防に参加させていただくことにより、原子力災害における看護職のプレゼンスを認識していただける機会になることも期待している。なお、シラバスは、放射線リスクマネジメントに必要な知識・技術を検討して作成していく予定である。

4. 今後の予定

- ・ 7月の月例報告は、本日の会議内容をまとめて報告する。
- ・ 8月の月例報告は9月上旬以降にメールまたはWGリーダーのみのオンライン会議を開催して作成する。
- ・ 全体会議は、各WGの進捗状況を確認しながら時期を調整する。

2021 年度 NuHAT 研究
第 2 回全体会議 議事録案

日 時 : 2022 年 1 月 28 日 (金) 16:30~18:10

場 所 : zoom 会議

出席者(敬称略) :

草間朋子、甲斐倫明、太田勝正、赤羽恵一、吉田浩二、小嶋光明、野戸結花、佐藤潤、加藤知子、本間*、平瀬*、苫米地*、堀田昇吾

*は原子力規制庁

書 記 : 堀田昇吾

配布資料

原子力規制庁報告会資料(案)1_24 日版

議事内容

1. 2月14日(月)の原子力規制庁 報告会 について

草間より、発表資料(配布資料)を用いて説明があった。今後の NuHAT の運営母体は、これまでのインタビュー調査の結果から NuHAT 専任の事務員を置けるような事務局が本来必要であるが、当面の間は日本放射線看護学会に依頼することで合意が得られた。

2. 各 WG よりこれまでの活動のまとめと今後の予定を報告

<WG1>

これまで災害時医療支援組織や緊急被ばく医療支援組織等の関係者にインタビューを行ってきた。総合防災訓練におけるエスノグラフィー(看護職等の行動観察)については、看護職が原子力災害に関わるという自治体関係者の認識が高くはないことに加え、COVID-19 の再拡大によって実施に向けての交渉が難航している。緊急被ばく状況下における NuHAT の役割を本研究を通して明確にするために、引き続き総合防災訓練における行動観察を実現できるように交渉していくこととなった。行政担当者へのインタビューは実施できる予定である。

CNS の修了生を対象にしたアンケート調査では、90%以上の回答者が、NuHAT が設置された場合には、「構成員として参加する」との結果が得られた。

NuHAT を今後運営していくためには、メンバーの登録、メンバーへの連絡、メンバーへの研修を継続できるシステムが必要であることが述べられた。

総合防災訓練が行われる場合、福島県立医科大学に訓練参加の話があるはずであり、もし自治体と直接交渉が難しい場合には、福島医大に相談することも今後検討する。

<WG2>

CNS 課程関係者および保健師養成課程関係者へのフォーカスグループインタビューを実施した。その結果を基に「放射線リスクマネジメント論」科目の1単位(8)のモデルシラバス(案)を作成した。今回作成したシラバスは、NuHAT メンバーにとっての最小限のものであり、講義中心の内容とした。また、CNS 課程の学生と保健師養成課程の学生では放射線に関する知識の修得レベルが異なるが、「放射線リスクマネジメント論」科目は放射線に関する基礎科目はすでに修得し、アドバンス教育科目であることから両課程 (CNS 大学院、保健師大学院) 同一のシラバスとすることにした。報告書では検討の経過、シラバスの具体的内容を詳細に記載していく。

<WG3>

2021年12月にオンライン研修、2022年1月に対面の研修を実施した。研修後にアンケートを実施し、研修内容については概ねポジティブな意見だった。今後はオンラインの研修と対面の研修のメリットを活かした研修方法、研修内容を検討し、報告書にまとめる。

本研究 (NuHAT に関するフィージビリティスタディ) の結果、「NuHAT を設置し、継続的に運営していくことは可能である」との結論が得られ、今後、運営のための経費の確保、原子力・自治体関係者等への NuHAT に関する情報発信を行い、NuHAT の認知度を高めることが課題であることが明らかとなった。

3. その他

原子力規制庁より以下のコメントがあった。

- 2/14 の報告会は現時点での実施状況報告でよく、未実施の計画があっても問題ない。
- 原子力災害発生後、中長期的な関わりを担う NuHAT に対する期待は大きい。

- 総合防災訓練への参加は年度内であれば本委託事業費を使って参加することは問題ない。
- 報告書では、NuHAT を継続して運営していくための課題（具体的な運営に必要な経費等）についての詳細な記載をお願いしたい。

上記のコメントを受け、草間から NuHAT を継続的に運営していくための経費等について原子力規制庁でも今後検討してほしいことを申し添えた。

以上

WG2 会議議事録

令和3年度放射線対策委託費 放射線安全規制研究推進事業

NuHAT 研究

第1回「放射線リスクマネジメント」科目の導入検討WG②会議議事録

日時：2021年7月15日（木） 10：00～11：00

場所：Zoom

出席者：野戸結花、吉田浩二、小嶋光明、佐藤潤、加藤知子

書記：加藤知子

資料：研究計画書（看護職を活用した住民に対する放射線リスクマネジメントの推進-原子力災害支援保健チーム（NuHAT）の実現を目指して-）

議事概要：

1. 確認事項

- ・東京医療保健大学研究倫理審査委員会承認後のNuHATの構成メンバーの育成のための大学院課程のモデルシラバスの作成にむけた2つの課題調査についてメンバー全員で確認をした。
 - （1）大学院カリキュラムへの「放射線リスクマネジメント」の導入および導入にともなう課題調査（放射線看護専門看護師（CNS）養成課程）
 - （2）大学院カリキュラムへの「放射線リスクマネジメント」の導入および導入にともなう課題調査（保健師養成課程）

2. 決定事項

- ・課題調査を進める上で、現行の放射線看護専門看護師（CNS）養成課程および保健師養成課程のシラバス（科目）を野戸、佐藤、小嶋が次回会議にて提示し、シラバス全体の概要を確認する。
- ・課題調査（1）（2）のインタビューガイドについて次回会議にて確認する。
- ・各課題調査の実施に向けて、対象者の選定、実施時期、実施方法について次回会議にて検討する。

3. その他

- ・第2回WG②は、8月11日の全体会議後の9月第1・2週に開催する予定である。

以上

第2回「放射線リスクマネジメント」科目の導入検討WG②会議議事録

日時：2021年9月6日（月） 12:30～13:35

場所：Zoom

出席者：野戸結花、吉田浩二、小嶋光明、佐藤潤、加藤知子（敬称略）

書記：加藤知子

閲覧資料：

1. 放射線看護専門看護師（CNS）養成課程 シラバス（A, B 大学）
2. 保健師養成課程 シラバス（A 大学）

議事内容：

1. シラバス概要について

放射線看護専門看護師（CNS）養成課程および保健師養成課程のシラバスについて閲覧し、それぞれの養成課程の全体の教育内容の概要について確認した。

現在のシラバスでの教育内容への課題や更に今後さらに修得したほうがよい能力等も放射線リスクマネジメント科目の導入に向けて考えていく視点として重要であるとの意見があった。

2. 調査スケジュールについて

下記の通りのスケジュール等を調整していくこととなった。

（放射線看護専門看護師（CNS）養成課程）

- ・調査対象者（A, B, C 大学）への参加依頼と日程調整を野戸先生が担当する。
- ・フォーカスグループインタビューは、11月下旬/12月上旬で実施を予定する。

（保健師養成課程）

- ・A大学の調査対象者への参加依頼と日程調整を小嶋先生が担当する。
- ・B大学の調査対象者への参加依頼と日程調整を佐藤先生が担当する。
- ・フォーカスグループインタビューは、11月下旬/12月上旬で実施を予定する。

3. その他

- ・フォーカスグループインタビューに際して、「NuHAT」および「放射線リスクマネジメント」について参加対象者に分かりやすく説明できる資料を確認準備する。
- ・CNS 養成課程および保健師養成課程に関するそれぞれのフォーカスグループインタビューの際は、ファシリテーター以外の WG メンバーはオブザーバーとして参加可能とする。
- ・第3回 WG②の会議は、10月25日～10月29日間の夕方16時以降で日程調整を行う。

以上

第3回「放射線リスクマネジメント」科目の導入検討WG②会議議事録

日時：2021年10月27日（水） 18：00～19：00

場所：Zoom

出席者：野戸結花、吉田浩二、小嶋光明、佐藤潤、加藤知子（敬称略）

書記：加藤知子

資料：1. 本研究事業における放射線リスクマネジメントについて
2. NuHAT 補足説明資料

議事概要：

1. 放射線リスクマネジメント（資料1）について

放射線リスクマネジメントについて、メンバー全員にて確認した。

2. NuHAT 補足説明資料について(資料2)

フォーカスグループインタビューの対象者に研究協力についての説明の際に、インタビューの目的等を明確に理解していただくために研究計画書と共に資料2を用いて説明することとなった。

3. 各調査について

1) 放射線看護専門看護師（CNS）養成課程

2021年11月21日（日）16時から実施する。

下記の内容についてメンバーにて検討し、全員の同意をえた。

(1) 研究対象者に、研究計画書・調査協力依頼文書・放射線リスクマネジメント説明文書(資料1)・原子力災害支援保健チーム（NuHAT）の説明文書（資料2）・同意書・同意撤回書を事前に郵送する。（担当：加藤）

- (2) 研究対象者に、メールにてフォーカスグループミーティングの内容（CNS インタビューガイドの1）現状について）について連絡し、資料等の確認を事前に依頼する。（担当：野戸）
- (3) フォーカスグループミーティングのファシリテーターとして司会運営を野戸が担当する。
- (4) 当日の zoom 開設およびインタビュー内容の IC レコーダーによる録音を加藤が担当する。
- (5) インタビュー終了後に WG②のメンバーで 30 分程度の zoom 会議を行う。

2) 保健師養成課程

小嶋と佐藤にて、近日中に A, B 両大学院の保健師養成課程の教員とのフォーカスグループインタビューの日程調整をおこなう。

4. その他

- ・インタビューにて収集したデータを逐語録、カテゴリー分類等に成果をまとめることを今後検討する。

以上

令和3年度放射線対策委託費 放射線安全規制研究推進事業

NuHAT 研究

第4回「放射線リスクマネジメント」科目の導入検討WG②会議

日時：2021年11月21日（日） 18：00～18：30

場所：Zoom

出席者：野戸結花、吉田浩二、小嶋光明、佐藤潤、加藤知子（敬称略）

書記：加藤知子

議事概要：

1. 各調査（フォーカスグループミーティング）について

1) 放射線看護専門看護師（CNS）養成課程

- ・本日実施したインタビューで具体的な内容を聞くことができたため今後のシラバス作成に活用できるデータは得ることができた。
- ・今後インタビューの録音データを文字起こしの作業をすすめる。

2) 保健師養成課程

- ・2021年12月6日（月）18時～実施予定である。
- ・対象者は4名のA大学2名、B大学2名とする。
- ・依頼書および同意書等の書類の手続きを進める。

2. 今後の予定

- ・12月20日～24日頃に次回のWG②の会議を開催する。

以上

第5回「放射線リスクマネジメント」科目の導入検討WG②会議議事録

日時：2021年12月20日（月） 18：00～18：50

場所：Zoom

出席者：野戸結花、吉田浩二、小嶋光明、佐藤潤、加藤知子（書記）（敬称略）

資料：1. フォーカスグループミーティング（放射線看護専門看護師（CNS）養成課程）の結果に関する資料

議事概要：

1. 各調査（フォーカスグループミーティング）の結果報告

1) 放射線看護専門看護師（CNS）養成課程

11月20日に実施したインタビュー内容について報告があった。

- ・教育の現状については不足事項（講義の単位数、コマ数、修了者の活動場所などについて）を追加する。
- ・（1）放射線リスクマネジメントの考え方について、（2）放射線リスクマネジメントに必要なとされる能力、（3）教育上の課題についての3つの枠組みでまとめる。
- ・データを要約、キーワードの構成でまとめる。
- ・まとめた内容から、今後の「放射線リスクマネジメント論」のシラバス(案)作成にむけての考察をする。
- ・シラバス案の作成は吉田先生が主に担当いただく。
- ・今後放射線看護専門看護師 CNS 養成課程に必要な内容であるため、シラバス(案)として2単位(15コマ)で作成をする。
- ・授業内容について講義に追加して演習も含める。

2) 保健師養成課程

12月6日に実施したインタビュー内容について報告があった。

- ・インタビューデータの逐語録を作成でき次第、データをまとめる。

- ・ CNS 養成課程と同様にまとめる。
- ・ 放射線に関する基礎知識も必要となるため、保健師養成課程においては3単位程度必要ではないかと検討している

2. 今後の予定

- ・ 2月14日 規制庁での報告会である。
- ・ 1月31日に報告会の資料締切である。
- ・ 1月22日以降にNuHAT研究の全体会議が予定されるであろう。
- ・ 1月11日から18日までの間で第6回会議を予定する（調整さんにて日程調整）
- ・ 各シラバス(案)を作成できたら、メールにてメンバーに送り次回会議までに各自が検討しておく。

以上

第6回「放射線リスクマネジメント」科目の導入検討WG②会議議事録

日時：2022年1月11日（月） 17：00～18：50

場所：Zoom

出席者：野戸結花、吉田浩二、小嶋光明、佐藤潤、加藤知子（書記）（敬称略）

資料：1. CNS 養成課程用シラバス(案)
2. 保健師 調査データまとめ資料

議事内容：

1. シラバス作成に向けての取り組み方針の確認

- 1) 「放射線リスクマネジメント論」シラバスはCNS および保健師の共通の科目として作成する
- 2) 1単位 8コマで検討する
- 3) 講義および演習（事例検討）の内容を含み構成する

2. 各調査（フォーカスグループミーティング）の結果について

1) 保健師養成課程（佐藤・小嶋）

【放射線に関する基本事項の確認】 【NuHAT の役割の認識】 【身近な（生活レベル）放射線の知識】 【放射線リスクコミュニケーション】 【放射線危機管理】 【原子力災害事例検討】
6つのカテゴリをデータから抽出した。さらに内容について言葉の適切性等を検討する。

3. シラバス作成(案)について

1) 放射線看護専門看護師（CNS）養成課程（野戸・吉田）

- ・シラバス案について説明があった。シラバス（案）の8コマの構成について、CNS と保健師に共通に検討できる内容となっている。
- ・今後、吉田先生に授業内容ごとの教育内容を含めたシラバス案を作成いただき、メールが会議にて、シラバス案を1月28日までに完成させる予定とする。

4. 今後の予定

- 1) メール会議等で1月28日の全体会までにシラバス(案)を完成させる。
- 2) 1月31日までに報告書のP.Pを作成してメンバーにメールにて確認する。
- 3) 最終報告にむけてFGMの結果のまとめの整理を進める。

以上

2021 年度 NuHAT 研究 研修 WG 第1回ミーティング

議事概要

日時：2021年7月8日(木) 17:00～18:30

場所：zoom 会議

出席者(敬称略)：

草間朋子、太田勝正、赤羽 恵一、野戸結花、堀田昇吾

書記：堀田昇吾

(配布資料)

資料1：研修内容(案)

議事内容

1. 報告事項

堀田より本研修の位置付けについて説明があった。また、本WGのゴールはモデル研修を作成し、実施することまであり、モデル研修に対する評価は含まないこと(4月のプレキックオフミーティングで決定)を確認した。また、本研修は、CNSが原子力災害に関連して平常時から事故発生後の中長期にわたり住民の放射線リスクマネジメントのために活動できるスキルを修得することを目的としている。したがって、医療放射線利用・防護に関する研修項目は含めないこととすることが確認された。

2. 決定事項

【研修対象者】

CNS 課程修了者

【研修のスタッフ】

研修実施にあたっては、東京医療保健大学の明石眞言先生、加藤知子先生にもご協力いただくようお願いすることとなった。

【研修の開催日】

第1 候補：2021 年 12 月 11, 12 日(土、日)

第2 候補：2022 年 1 月 22, 23 日(土、日)

コロナ禍下での開催であるため堀田が東京医療保健大学と調整し、日程を決定することとした。

【研修の場所】

東京医療保健大学 国立病院機構立川キャンパス(立川看護学部)

【研修内容】

研修は、講義、演習、グループワークで構成する。それぞれの内容等は以下のように決まった。

➤ 講義

講義は2時間とし、以下の内容とした。講師は、本事業およびNuHATの周知を図るため外部に依頼することとした。

- ・ 原子力発電所の事故と看護職の役割
- ・ 放射線リスクマネジメント
- ・ 放射線業務従事者に対する個人モニタリング

外部講師には堀田が連絡を取ることもなった。

➤ 演習

演習は4時間とし、以下の課題とした。括弧内に記す班員が各演習を担当することとした。

- ・ 自然放射線の測定(加藤先生)
- ・ 身体汚染のチェック (GMサーベイメーターの使い方) (太田)
- ・ 甲状腺のモニタリング (線量測定・評価) (赤羽)
- ・ ポータブルエックス線撮影装置を用いた防護演習(堀田)

演習は、5人/グループがローテーションして4課題を実施する形式とした。

➤ グループワーク

- グループワークは、日本アイソトープ協会出版部「看護と放射線」丸善（2021）に記載されている事例の中から事例を選択肢しディスカッションすることとした。
- グループワークは、班員がファシリテーターとして参加することとした。演習の効果をあげるために、研修生に事前学習を課すことも検討したが、研修生の日常業務に支障を来す恐れがあるので、事前学習は強要しないこととした。

【研修参加者の募集】

日程が確定次第、CNS 課程修了者へ日本放射線看護学会のメーリングリストで募集することとなった。

【その他】

- 日本アイソトープ協会出版部「看護と放射線」丸善（2021）を WG の班員に配布する。
- 次回 WG は参加者の人数等が決まった後に開催することとした。
- 研修終了時に NuHAT への参加の意思に関する調査を行うこととなった。

2021 年度 NuHAT 研究 研修 WG 第 2 回ミーティング

議事概要

日 時 : 2021 年 9 月 2 日 (木) 10:00~11:30

場 所 : zoom 会議

出席者(敬称略) : 草間朋子、太田勝正、甲斐倫明、赤羽 恵一、野戸結花、堀田昇吾

書 記 : 堀田昇吾

議事内容

8 月 11 日に開催した全体会議で、研修は年度内に 2 回開催することとなり、1 回は対面、もう 1 回はオンラインで実施することとなった。本ミーティングではオンライン研修の内容を検討することを目的として開催した。

決定事項

- 対面・オンラインともに講義はリアルタイムで講師に実施してもらうこととなった。

【オンライン研修について】

- オンライン研修は以下の日にちを候補とすることとなった。時間はいずれも 13:00-17:00 とした。
第一候補 : 2021 年 12 月 11 日 (土)
第二候補 : 2021 年 12 月 12 日 (日)
- 研修の対象者は対面・オンラインともに CNS 課程修了者・保健師養成課程大学院生のみではなく、保健師も含めることとなった。
- オンライン研修の構成は対面研修と同じく、講義、演習、グループワークで構成する。それぞれの内容等は以下のように決まった。

〈講義〉(150 分)

- 原子力発電所の事故と看護職の役割 (50 分)
- 放射線リスクマネジメント (40 分)
- 原子力災害対策を行なっている自治体の活動内容(訓練での看護職の活動等) (自治体の

防災担当者) (60 分)

〈演習〉(30 分)

- サーベイメータの取り扱い(堀田) (25 分+休憩 5 分)

〈グループワーク〉(60 分)

- 内容は対面研修同様
- Zoom のブレイクアウトセッション機能を用いて行う。
- グループワークは、班員がファシリテーターとして参加することとした。

【研修参加者の募集】

- CNS 課程修了者及び保健師養成課程学生へチラシを用いて募集することとなった。
- QST のアドバンス研修参加者(参加予定者)への告知が可能か、赤羽が確認することとなった。

【その他】

- 対面研修とオンライン研修は両方参加も可とした。
- 研修開催告知については、ポスターを作成することとした。
- ポスターには対面とオンライン両方の内容を記載することとした。
- 自治体の防災担当者には甲斐が連絡をとることとなった。(9/2 ミーティング後連絡済)

【ミーティング後に決まった内容】

- 対面研修は 2022 年 1 月 19 日(水), 20 日(木)に実施することとなった。

放射線安全規制研究戦略的推進事業費
(自然起源放射性物質(NORM)による被ばくの包括的調査)事業

令和 3 年度事業成果報告書

令和 4 年 3 月

国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

本報告書は、原子力規制委員会令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業費（自然起源放射性物質（NORM）による被ばくの包括的調査）事業による委託業務の成果を、代表機関である量子科学技術研究開発機構が、とりまとめたものである。

目 次

I. 事業の目的	1
II. 事業の実施内容と実施体制	3
III. 事業の実績	6
III. 1. 事業計画書と実績との対照	6
III. 2. 実績の付属説明	9
III. 2.1 使用量の調査（付属説明1）	9
III. 2.2 放射能濃度の調査（付属説明2）	35
III. 2.3 とりまとめ（付属資料3）	46
IV. 今年度の成果の概要	67

I. 事業の目的

「自然起源放射性物質 (NORM) による被ばくの包括的調査」(以下、「NORM 調査事業」) は、令和 3 年度に放射線安全規制研究戦略的推進事業の放射線防護に係る中長期的課題への対応に向けたフィジビリティ研究の一課題として採択された事業である。主として次の調査を行う。

- 量子科学技術研究開発機構の NORM データベースのオリジナルデータや最新の貿易統計データ等【量研, NORM データベース, 2021; 財務省, 貿易統計, 2020 等】を調査することにより、天然資源 (岩石や鉱石など) の国内使用量と放射能濃度に関するデータの整理を行う。

この NORM 調査事業の目的は、国内規制の在り方を検討するための基礎データを把握し、国内規制に繋がる新たな課題を探ることにある。そのために、NORM 被ばくに関する調査データを整理することとしている。

自然起源放射性物質 (NORM: Naturally Occurring Radioactive Material) の被ばくに関する諸問題については、次のような背景がある。金属鉱石や化石燃料といった天然資源は、様々な産業分野で活用されている。このような天然資源は地下資源であるため、産出にあたり地中に含まれるウラン (^{238}U)、トリウム (^{232}Th) といった自然放射性核種も一緒に意図せずに産出されてしまうことが指摘されている。例えば、スマートフォン等の高機能電子材料として注目されているレアアース原料 (モナザイト鉱石) については、トリウムの放射能濃度が 340Bq/g であり国際的な濃度レベル (1Bq/g) を大幅に超えることが指摘されている【ICRP, ICRP Publication 142, 2019; 原子力規制委員会, 「ウラン又はトリウムを含む原材料、製品等の安全確保に関するガイドライン, 2009;

Iwaoka et al, Health Phys, 2017】。このような天然資源は自然起源放射性物質 (NORM) とも呼ばれており、人工放射性物質と同様に、利用によって高いレベルの被ばくをもたらす場合がある。

したがって、NORM による放射線被ばくから人々を防護することが重要となるが、放射線被ばくによる障害の発生確率・重篤度は被ばくする量に依存する。NORM による被ばくは、国際原子力機関 (IAEA) において自然放射性核種 (ウラン、トリウム) の規制管理方法の整備が進められているほか、国際放射線防護委員会 (ICRP) では、NORM の産業利用に関する新たな勧告が 2019 年に出版されたところである【*ICRP, ICRP Publication 142, 2019*】。また、我が国においても国内の実情に応じた NORM の規制管理の方法の検討が進められている【*文部科学省, 平成 15 年放射線審議会基本部会, 2003; 原子力規制委員会, 令和 2 年度放射線審議会, 2021*】。これら近年の国内外の動向や勧告に対応するためにも、日本における NORM 利用に関するデータの整理・更新が必要な状況にあると言える。

以上を背景にして、本研究では令和 3 年度 1 年間で、放射線防護に係る中長期的課題への対応に向けたフィジビリティ研究として、NORM の被ばくに関する調査データ (放射能濃度と国内生産量) を整理し、国内規制等に繋がる新たな課題を探ることを目指す。本報告書では、これらの実施した活動について取りまとめる。

II. 事業の実施内容と実施体制

NORM 規制科学研究全体における NORM 調査事業の位置付けは図 1 に示すとおりである。NORM 調査事業は量子科学技術研究開発機構（以下、量研）が受託し、国内規制に繋がる新たな課題を探るために、本事業の応募時のスケジュールと実施体制（図 2、3）で NORM による被ばくに関する調査データを整理することとなっている。したがって、これらのスケジュールと実施体制で、令和 3 年度（1 年間）に調査を行い、量研に所属する研究代表者と参加者が下記に示す①使用量の調査、②濃度の調査、③とりまとめを行った。

① 使用量の調査

少資源国であるわが国においては、天然資源の輸入量≒国内使用量と見なすことができる。我が国では様々な天然資源が輸入され産業利用されていると考えられるが、それらすべての物質について放射能濃度を調査することは困難である。したがって、それら物質の中で、輸入量(使用量)と国内生産量のデータが存在する物質について調査を行った。具体的には、財務省貿易統計 2020 年(輸入量)、経済産業省資源エネルギー統計（国内生産量）など最新の統計データを用いて行った。

② 放射能濃度の調査

①使用量の調査の結果を踏まえ、ウラン系列、トリウム系列の放射能濃度を調査した。具体的には、最新の量研 NORM データベースのオリジナルデータと本事業実施者の最新の国内 NORM の実測データを用いて行った。

③ とりまとめ

①使用量の調査と②放射能濃度の調査で得られたデータを「国内使用量」と「濃度」の数量で、整理・分類し、NORM 規制に必要な新たな課題を検討した。なお、濃度に関しては IAEA GSR Part3 の計画被ばくの要件を適用するレベル 1Bq/g を用いて分類

した。

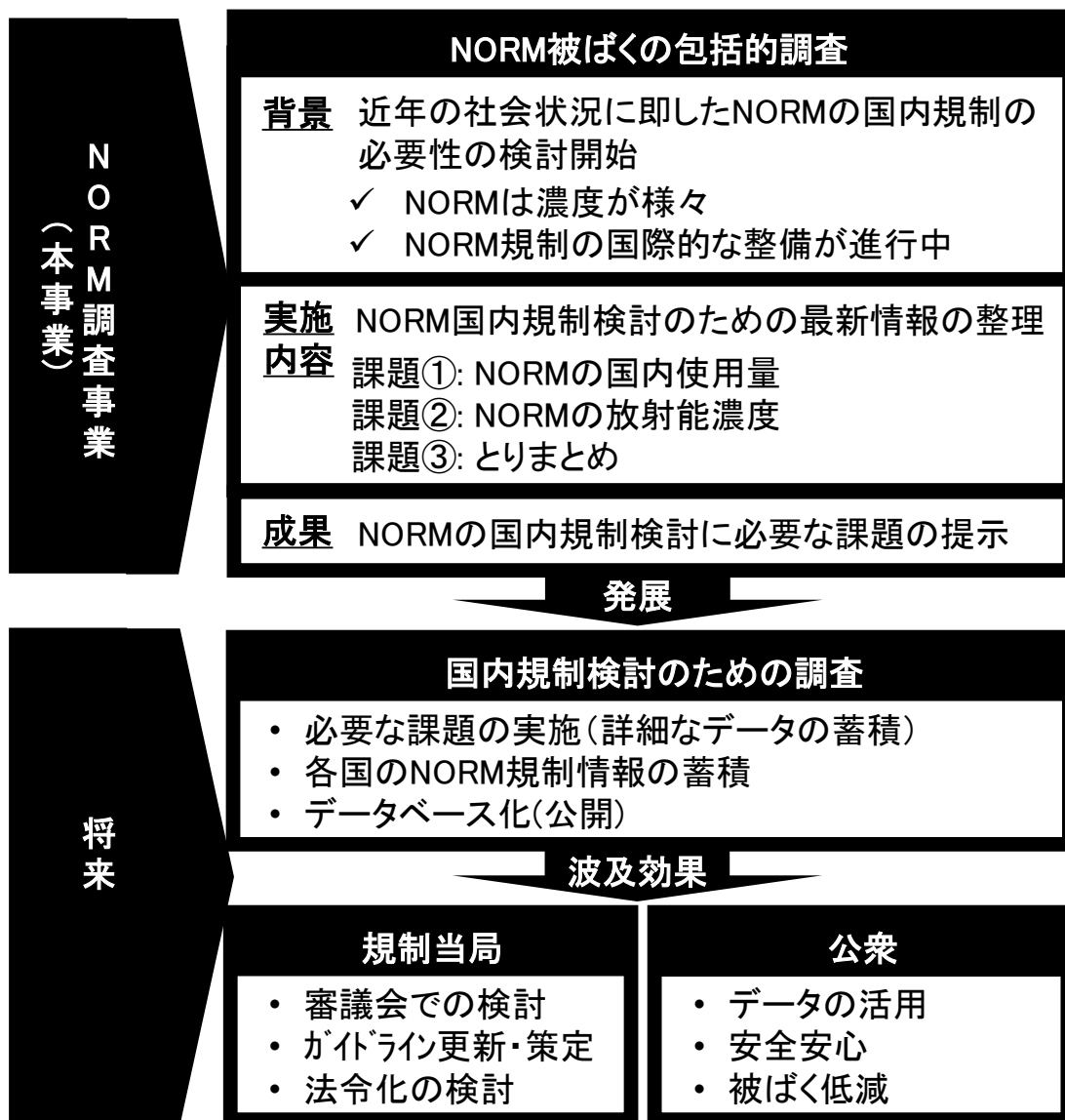


図1. NORM規制科学研究全体の構想とNORM調査事業の位置付け

<実施体制>

研究代表者：岩岡和輝

研究参加者：矢島千秋、富坂侑斗、神田玲子

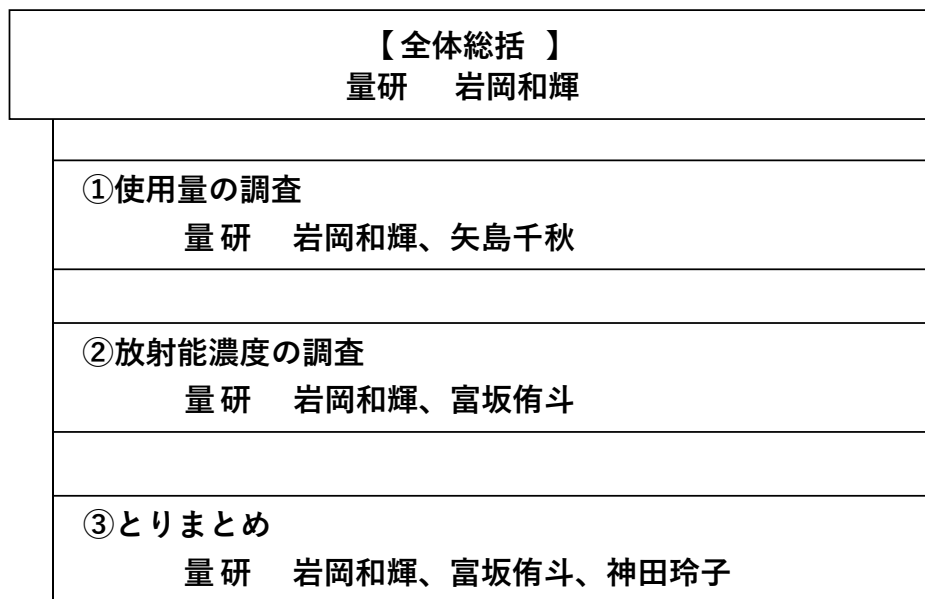


図 2. 実施体制図

<スケジュール>

実施項目	担当者 (所属機関)	令和3年度			
		第1四半期	第2四半期	第3四半期	第4四半期
(1)使用量調査	岩岡和輝(量研) 矢島千秋(量研)	←国内使用量の調査・整理→			
(2)放射能濃度の調査	岩岡和輝(量研) 新規採用者(量研)	←NORMデータベースのオリジナルデータの調査・整理→ ←申請者の実測データの調査・整理→			
(3)とりまとめ	岩岡和輝(量研) 神田玲子(量研) 新規採用者(量研)	←結果のとりまとめ→			

図 3. スケジュール

Ⅲ. 事業の実績

事業計画書の項目別に

- ・事業計画と実績との対照（表 1）
- ・実績の付属説明（個別の実施概要等）

について記載する。

Ⅲ. 1. 事業計画書と実績との対照

表 1. 令和 3 年度事業計画と実績の対象

令和 3 年度事業計画	令和 3 年度実績	付属説明
(1) 使用量の調査 少資源国であるわが国においては、天然資源の輸入量≒国内使用量と見なすことができる。我が国には様々な天然資源が輸入され産業利用されていると考えられるが、それらすべての物質について放射能濃度を調査することは困難である。したがって、それら物質の中で、輸入量(使用量)と国内生産量のデータが存在する物質について調査を行う。具体的には、財務省貿易統計 2020 年(輸入量)、経済産業省資源エネルギー統計(国内生産量)など最新の統計データを用いて行う。	輸入量(使用量)と国内生産量のデータが存在する物質について調査を行った。財務省貿易統計 2020 年(輸入量)、経済産業省の統計データ(国内生産量)などから最新統計データを調査・整理した。	付 属 説明 1

<p>(2) 放射能濃度の調査</p> <p>(1)使用量の調査の結果を踏まえ、我が国の産業にとって重要な物質を選定し、それらのウラン系列、トリウム系列の放射能濃度を調査する。具体的には、最新の量研 NORM データベースのオリジナルデータと申請者の最新の国内 NORM の実測データを用いて行う。</p>	<p>「(1)国内の使用量調査」で国内使用されている物質が、我が国の産業にとって重要物質と考えられるが、使用量が不明な物質もあるため、ウラン系列、トリウム系列の濃度データが存在する物質のすべての物質を調査対象として、濃度データを調査・整理した。なお、調査には、最新の量研 NORM データベースのオリジナルデータと申請者（本事業実施者）の最新の国内 NORM の実測データを用いた。物質の名称の分類には、「(1)国内の使用量調査」の結果を用いた。</p>	<p>付 属 説明 2</p>
<p>(3) とりまとめ</p> <p>(1)使用量の調査と(2)放射能濃度の調査で得られたデータを「国内使用量」と「濃度」の数量で、整理・分類することにより、NORM 規制に必要な新たな課題を探る。なお、濃度に関しては IAEA GSR Part3 の計画被ばくの要件を適用するレベル 1Bq/g を用い、これより高いもの、低いもの、不</p>	<p>「(1)使用量の調査」と「(2)放射能濃度」の調査で得られたデータを「国内使用量」と「濃度」の数量で、整理・分類した一覧表を作成した。具体的には、1Bq/g を基準にして、物質を分類し、これにより、我が国の NORM 規制検討に必要な新たな課題を（レアア</p>	<p>付 属 説明 3</p>

<p>明のものに分類する。また、本調査研究で得られる成果については、将来のデータ公開に向けて、ウェブサイトによる発信を検討する。</p>	<p>ースや化石燃料) を示した。</p> <p>本年度は、将来のウェブ公開に向けた検討を実施し、様々な NORM に関しうる機関に既存の NORM データベースを積極的にアピールした。またデータベースに組み込みやすいようなデータ形式に整えた。</p>	
<p>(4) 成果の公表</p> <p>原子力規制庁が開催する研究成果報告会や国内の学術研究発表学会において、本調査に関する成果を報告する。</p>	<p>学術会議等で本事業に関する成果を発表した。また放射線審議会や原子力規制庁が開催する研究成果報告会にて、本研究に関する成果を発表した。</p>	
<p>(5) 事業の進捗管理等</p> <p>原子力規制庁並びにプログラムオフィサー(P0)及びP0補佐に対し、研究班会議計4回程度(事業当初、中間報告を2回程度、研究成果報告会の1ヶ月前頃)及び電子メール(月に1回程度)により、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、P0会合等を通じて報告し、その都度助言を仰ぐ。</p>	<p>全4回の班会議を実施した。また、事業の円滑な実施のため、メールやウェブを使用して事業の進捗を適宜報告した。</p>	

Ⅲ. 2. 実績の付属説明

Ⅲ. 2.1 使用量の調査（付属説明 1）

① 概要

少資源国であるわが国においては、天然資源の輸入量≒国内使用量と概ね見なすことができる。我が国には様々な天然資源が輸入され産業利用されていると考えられるが、それらすべての物質を調査対象とすることは困難である。したがって、それら物質の中で、輸入量と国内生産量のデータが存在する物質について調査・整理した。

② 使用したデータ

②-1 輸入量

調査時に最新であった次の資料が使われた。

- ・財務省貿易統計 2020 年(輸入量) (輸入 1-12 月：確々報)

②-2 国内生産量

調査時に最新であった次の資料が使われた。

- ・セメントハンドブック 2020 年度版
- ・化学工業統計編 平成 31 年 (2019 年) 経済産業省生産動態統計年報
- ・鉱物資源マテリアルフロー2011
- ・鉱物資源マテリアルフロー2018
- ・鉱物資源マテリアルフロー2019
- ・採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁 HP
- ・産業分類別の副産物(産業廃棄物 有価発生物)の発生状況等に関する調査(平

成 24 年度実績) 報告書

- ・資源・窯業・建材統計編 平成 31 年 (2019 年) 経済産業省生産動態統計年報
- ・石炭灰全国実態調査報告書 (令和元年度実績) 一般財団法人石炭フロンティア機構 HP
- ・鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 平成 31 年 (2019 年) 経済産業省生産動態統計年報
- ・鉄鋼スラグ統計年報 (2019 年度版) 鉄鋼スラグ協会
- ・日本肥料アンモニア協会 HP 令和 1 肥料年度 単肥および複合肥料受払実績 総括表
- ・非鉄金属等需給動態統計 令和元年度版 経産省資源エネルギー庁
- ・平成 28 年経済センサス - 活動調査 経済産業省 HP

③ 調査対象

③-1 輸入量

品目の分類のために HS コードを用いた。HS コードとは「商品の名称及び分類についての統一システムに関する国際条約」に基づいて品目毎に定められているコードである。大きな区分で分類した一覧表を下記に示す。HS コードは 8 桁であり、上 2 桁が大きな区分で分類した分類番号である。

HS コードは貿易上の観点で分類されており、自然核種の観点で分類するには限界がある。HS コードで分類されている物質の中でも、自然核種が多く含まれる可能性があるものは、ICRP Publication 142 を参考にすれば、主に工業利用のもととなる原料である天然資源 (鉱石、岩石、石油、石炭) である。したがって、主として天然

資源（鉍石、岩石、石油、石炭）、それらから造られる物質を調査対象として選定した。なお、同一種と考えられる物質が複数 HS コードで分類されている場合は、それらの輸入量を合算して一つの物質として分類した。金属塊といった金属製品については、種類によって組成が大きく異なるものでないと考え、HS コード 2 桁で分類した。また、放射性同位元素として輸入されている物質はや天然資源であっても、物質の種類が明確でないもの、例えば砂利などは調査対象から除外した。これらの条件により、輸入量調査の対象とした物質の一覧（表 2）を下記に示す。

表 2. 輸入量調査の対象物質

輸入量の文献による品目名	HS コード	その他該当する HS コード
硫化鉄鉍（焼いてないものに限る。）	250200000	
天然黒鉛	250400000	
石英	250610000	
けい岩	250620000	
カオリンその他のカオリン系粘土	250700000	
ベントナイト	250810000	
耐火粘土	250830000	
ばん土頁岩	250840010	
アンダルーサイト、カイアナイト及びシリマ ナイト	250850000	
ムライト	250860000	
シャモット及びダイナスアース	250870000	

白亜	250900000	
天然のリン酸カルシウム及びリン酸アルミニウムカルシウム並びにリン酸塩を含有する白亜	251000000	
天然の硫酸バリウム（重晶石）	251110000	
パミストーン	251310000	
エメリー、天然のコランダム、天然のガーネットその他の天然の研磨用の材料	251320000	
スレート	251400000	251400000&68030000
大理石、トラバーチン、エコーシンその他の石 碑用又は建築用の石灰質の岩石	251511000	251511000&680291011&680291019&680291090
花こう岩	251611000	251611000&251612000&680223000&680293000
その他の石碑用又は建築用の岩石	251690000	251690000&680299000
ドロマイト	251800000	
天然の炭酸マグネシウム（マグネサイト）並びに溶融マグネシア、焼結マグネシア（焼結前に他の酸化物を少量加えてあるかないかを問わない。）及びその他の酸化マグネシウム（純粋	251900000	

であるかないかを問わない。)		
天然石膏及び天然無水石膏並びに天然石膏を焼いたもの又は硫酸カルシウムから成るプラスチック	252000000	
石灰石その他の石灰質の岩石	252100000	252100000&680292000
生石灰、消石灰及び水硬性石灰（第 28.25 項の酸化カルシウム及び水酸化カルシウムを除く。）	252200000	
ポルトランドセメント、アルミナセメント、スラグセメント、スーパーサルフェートセメントその他これらに類する水硬性セメント	252300000	
石綿	252400000	
雲母（はく離雲母を含む。）及びそのくず	252500000	252500000&681410000
ステアタイト（天然のものに限るものとし、粗削りしてあるかないか又はのこぎりでひくことその他の方法により長方形（正方形を含む。）の塊状若しくは板状に単に切つてあるかないかを問わない。）及びタルク	252600000	
長石	252910000	
ほたる石 ふつ化カルシウムの含有量が全重量の 97%以下のもの	252921000	252921000&252922000&252930000

蛭石、真珠岩及び緑泥岩（膨脹させてないものに限る。）	253010000	
キーゼル石及び瀉利塩（天然の硫酸マグネシウム）	253020000	
鉍物 その他のもの	253090000	
鉄鉍	260100000	
マンガン鉍	260200000	
銅鉍	260300000	
ニッケル鉍	260400000	
コバルト鉍	260500000	
アルミニウム鉍	260600000	
鉛鉍	260700000	
亜鉛鉍	260800000	
すず鉍	260900000	
クロム鉍	261000000	
タングステン鉍	261100000	
ウラン鉍	261210000	
トリウム鉍	261220000	
モリブデン鉍	261300000	
チタン鉍	261400000	
ジルコニウム鉍	261510000	
ニオブ鉍、タンタル鉍、バナジウム鉍	261590000	

銀鉍	261610000	
その他の貴金属鉍（精鉍を含む。）	261690000	
アンチモン鉍	261710000	
金属のスラグ、スラッジ、灰及び残留物	261800000	261800000&261900000&262000000
都市廃棄物の焼却によつて生じた灰及び残留物	262110000	
石炭類（石炭、無煙炭、瀝青炭）	270100000	
亜炭	270200000	
泥炭	270300000	
石油及び瀝青油(原油に限る。)	270900000	
石油及び瀝青油(原油を除く)、これらの調整品	271000000	271099 除く(石油汚泥除く)
廃油 その他のもの	271099000	
石油アスファルト	271320000	
天然ピッチューメン、天然アスファルト、瀝青質頁岩、油母頁岩、タールサンド、アスファルタイト及びアスファルチックロック	271400000	
希土類金属、スカンジウム及びイットリウム (これらの相互の混合物又は合金にしてあるかないかを問わない。)	280530000	
りん酸及びポリりん酸	280920000	
マグネシウムの水酸化物及び過酸化物	281610000	

ストロンチウム又はバリウムの酸化物、水酸化物及び過酸化物	281640000	
酸化亜鉛及び過酸化亜鉛	281700000	
人造コランダム（化学的に単一であるかないかを問わない。）、酸化アルミニウム及び水酸化アルミニウム	281800000	
クロムの酸化物及び水酸化物	281900000	
マンガンの酸化物	282000000	
鉄の酸化物及び水酸化物	282100000	
コバルトの酸化物及び水酸化物並びに商慣行上酸化コバルトとして取引する物品	282200000	
チタンの酸化物	282300000	
鉛の酸化物、鉛丹及びオレンジ鉛	282400000	
酸化リチウム及び水酸化リチウム	282520000	
バナジウムの酸化物及び水酸化物	282530000	
ニッケルの酸化物及び水酸化物	282540000	
銅の酸化物及び水酸化物	282550000	
ゲルマニウムの酸化物及び二酸化ジルコニウム	282560000	
モリブデンの酸化物及び水酸化物	282570000	
アンチモンの酸化物	282580000	
酸化第一すず及び酸化第二すず	282590100	
酸化ベリリウム	282590200	

ふつ化物及びフルオロけい酸塩、フルオロアルミン酸塩その他のふつ素錯塩	282600000	
塩化物、塩化酸化物、塩化水酸化物、臭化物、臭化酸化物、よう化物及びよう化酸化物	282700000	
次亜塩素酸塩、商慣行上次亜塩素酸カルシウムとして取引する物品、亜塩素酸塩及び次亜臭素酸塩	282800000	
塩素酸塩、過塩素酸塩、臭素酸塩、過臭素酸塩、よう素酸塩及び過よう素酸塩	282900000	
硫化物及び多硫化物（多硫化物については、化学的に単一であるかないかを問わない。）	283000000	
亜二チオン酸塩及びスルホキシル酸塩	283100000	
亜硫酸塩及びチオ硫酸塩	283200000	
硫酸塩、みょうばん及びペルオキシ硫酸塩（過硫酸塩）	283300000	
亜硝酸塩及び硝酸塩	283400000	
ホスフィン酸塩（次亜りん酸塩）、ホスホン酸塩（亜りん酸塩）、りん酸塩及びポリりん酸塩（ポリりん酸塩については、化学的に単一であるかないかを問わない。）	283500000	
炭酸塩、ペルオキシ炭酸塩（過炭酸塩）及び商慣行上炭酸アンモニウムとして取引する物品でカルバミン酸アンモニウムを含有するもの	283600000	

シアン化物、シアン化酸化物及びシアノ錯塩	283700000	
けい酸塩及び商慣行上アルカリ金属のけい酸塩として取引する物品	283900000	
ほう酸塩及びペルオキシほう酸塩（過ほう酸塩）	284000000	
オキシ金属酸塩及びペルオキシ金属酸塩	284100000	
その他の無機酸塩及びペルオキシ酸塩	284200000	
酸化セリウム	284610010	
セリウム化合物 無機又は有機の化合物及びこれらの金属の混合物の無機又は有機の化合物	284610090	
酸化イットリウム 無機又は有機の化合物及びこれらの金属の混合物の無機又は有機の化合物	284690210	
酸化ランタン 無機又は有機の化合物及びこれらの金属の混合物の無機又は有機の化合物	284690220	
そのほか 希土類金属、イットリウム又はスカンジウムの無機又は有機の化合物及びこれらの金属の混合物の無機又は有機の化合物	284690290	
炭化ほう素、炭化ニオブ及び炭化タンタル	284990010	
水銀の無機又は有機の化合物（化学的に単一であるかないかを問わないものとし、アマルガムを除く）	285200000	

窒素肥料	310200000	
リン酸肥料	310300000	
カリ肥料（鉍物性肥料及び化学肥料に限る。）	310400000	
二酸化チタンをもととした顔料及び調製品	320611000	320611000&320619000
フェロセリウムその他の発火性合金（形状を問わない。）及びこの類の注2の可燃性材料の製品	360600000	360610000&360690000
スラグウール、ロックウールその他これらに類する鉍物性ウール	680610000	
プラスター又はプラスターを元にした材料からなる製品	680911000	
石綿セメント製品、セルロースファイバーセメント製品その他これらに類する製品	681100000	
貴金属及び貴金属を張つた金属	710600000	7106&7107&7108&7109&7110&7111&7112
鉄鋼	720000000	
鉄鋼製品	730000000	
銅及びその製品	740000000	
ニッケル及びその製品	750000000	
アルミニウム及びその製品	760000000	
鉛及びその製品	780000000	
亜鉛及びその製品	790000000	

すず及びその製品	800000000	
タングステン及びその製品	810100000	
モリブデン及びその製品	810200000	
タンタル及びその製品	810300000	
マグネシウム及びその製品	810400000	
コバルトのマットその他コバルト製錬の中間 生産物並びにコバルト及びその製品	810500000	
ビスマス及びその製品	810600000	
カドミウム及びその製品	810700000	
チタン及びその製品	810800000	
ジルコニウム及びその製品	810900000	
アンチモン及びその製品	811000000	
マンガン及びその製品	811100000	
ベリリウム及びその製品	811212000	811212000&8112130 00&811219000
クロム及びその製品	811221000	811221000&8112220 00&811229000
タリウム及びその製品	811251000	811251000&8112520 00&811259000
インジウム及びその製品	811292100	
バナジウム及びその製品	811292200	811292200&8112999 10
ゲルマニウム及びその製品	811292910	811292910&8112992

		00
		811292990&8112999
その他金属及びその製品	811292990	90
ニオブ・チタン合金	811299100	
サーメット及びその製品	811300000	

③-2 国内生産量

上述の輸入量調査と同様に、国内生産量に関する文献の中で、自然核種が多く含まれる可能性がある品目（岩石、鉱石、石炭など）を、国内生産量の調査対象として選定した。対象物質を表3に示す。

表3. 国内生産量の対象物質

国内生産量の文献による品目名
フライアッシュセメント
りん酸
化学石膏
酸化チタン
酸化亜鉛
酸化第二鉄
次亜塩素酸ナトリウム溶液(12%換算)
生石灰、消石灰
ニッケル・カドミウム電池、合金、その他

タリウム化合物
フルオロカーボン類、フッ素樹脂
需要量
地金
白金地金、パラジウム地金、ロジウム地金、金（新産、再生）、銀（新産、再生）
チタン展伸材（純分量不明）、スポンジチタン、インゴット
加工地金
高炭素 FeMn、中低炭素 FeMn
酸化アンチモン
地金
二酸化ジルコニウム
かんらん岩
じゃ紋岩
せん緑岩
はんれい岩
ひる石
ベントナイト
安山岩
雲母
花こう岩
凝灰岩
結晶片岩

玄武岩
酸性白土
粘板岩
廃油、スラッジ
セメント
ドロマイト
亜鉛鉱石（亜鉛含有量）
鉛鉱石（鉛含有量）
金鉱石（金含有量）
銀鉱石（銀含有量）
珪石
石灰石
耐火レンガ ジルコン
耐火レンガ 粘土質
燃料油
石炭灰
アルミニウム、アルミニウム圧延製品、アルミニウム鋳物、ダイカスト（アルミニウム）
亜鉛
伸銅製品、銅・銅合金鋳物
銑鉄、フェロアロイ、粗鋼、鋼半製品、鍛鋼品・鋳鋼品
粗鉛（副産粗鉛を含む）、電気鉛

普通鋼熱間圧延鋼材、「普通鋼冷間仕上鋼材（線類を除く）・めっき鋼材（線類を除く）・冷間ロール成型形鋼」、特殊鋼圧延鋼材、鋼管、「磨棒鋼・線類・鑄鉄管・鉄鋼加工製品」
高炉スラグ、鉄鋼スラグ
窒素単肥
磷酸単肥
すず
タングステン
ニッケル
モリブデン
その他の金属鉱業
ろう石
亜炭
石英粗面岩・同類似岩石
石炭
長石
鉄鉱
銅鉱

④ データ一覧表

調査・整理した一覧表を表 4 に示す。この作業を実施するにあたって設定した条件は下記である。

- ・ 輸入量の総量は各国からの輸入量をすべて足したものである。

- ・ 輸入量、国内生産量が不明なものについては空欄とした。
- ・ 物質名は貿易統計上(HS コード分類)の品目名とすることを基本とした。しかしながら、国内生産量と輸入量はそれぞれ異なる統計データであるため、物質の種類が異なる場合がある。本調査では、大まかな物量と濃度の傾向を探ることを目的としているため、いくつかの物質について一般的な名称を物質名とすることにより整合性を図った。例えば、輸入量の品目名が「ゲルマニウムの酸化物及び二酸化ジルコニウム」であり、国内生産量の品目名が「二酸化ジルコニウム」の場合、物質名を「ゲルマニウムの酸化物、ジルコニウムの酸化物」とした。なお、このような設定をした場合には、補足的な情報として輸入量の品目名と国内生産量の品目名を一覧表に追記した。

表4. 輸入量と国内生産量

物質名	輸入量 (トン)	国内生産量 (トン)	輸入量の文献	輸入量の文献による品目名	国内生産量の文献	国内生産量の文献による品目名
石炭	173,754,558	1,665,966	財務省貿易統計2020 確々報	石炭類(石炭、無煙炭、瀝青炭)	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	石炭
石油、瀝青油(原油)	123,156,604	522,472	財務省貿易統計2020 確々報	石油及び瀝青油(原油に限る。)	資源・窯業・建材統計編 平成31年 (2019年) 経済産業省生産動態統 計年報	原油
鉄鉱	99,436,638	0	財務省貿易統計2020 確々報	鉄鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	鉄鉱
精製油	25,377,932	166,582,480	財務省貿易統計2020 確々報	石油及び瀝青油(原油を除く、これらの調 整品)	資源・窯業・建材統計編 平成31年 (2019年) 経済産業省生産動態統 計年報	燃料油
鉄鋼	6,294,962	273,060,821	財務省貿易統計2020 確々報	鉄鋼	鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 平 成31年(2019年) 経済産業省生産 動態統計年報	鉄鉄、フェアラロイ、粗鋼、鋼半製品、鍛 鋼品・鋳鋼品
銅鉱	5,228,679	0	財務省貿易統計2020 確々報	銅鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	銅鉱
アルミニウム及びその製 品	2,625,266	4,715,635	財務省貿易統計2020 確々報	アルミニウム及びその製品	鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 平 成31年(2019年) 経済産業省生産 動態統計年報	アルミニウム、アルミニウム圧延製品、ア ルミニウム鋳物、ダイカスト(アルミニウ ム)
ニッケル鉱	2,520,439	0	財務省貿易統計2020 確々報	ニッケル鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	その他の金属鉱業
石膏	2,417,379	4,251,689	財務省貿易統計2020 確々報	天然石膏及び天然無水石膏並びに天然 石膏を焼いたもの又は硫酸カルシウムか ら成るプラスチック	化学工業統計編 平成31年(2019 年) 経済産業省生産動態統計年報	化学石膏
鉄鋼製品	2,365,305	131,913,440	財務省貿易統計2020 確々報	鉄鋼製品	鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 平 成31年(2019年) 経済産業省生産 動態統計年報	普通鋼熱間圧延鋼材、「普通鋼冷間仕上 鋼材(線類を除く)・めっき鋼材(線類を除 く)・冷間ロール成型形鋼」、特殊鋼圧延 鋼材、鋼管、「磨棒鋼・線鋼・鋳鉄管・鉄鋼 加工製品」
ドロマイト	2,110,170	3,259,001	財務省貿易統計2020 確々報	ドロマイト	資源・窯業・建材統計編 平成31年 (2019年) 経済産業省生産動態統 計年報	ドロマイト
アルミニウムの酸化物な ど	892,775		財務省貿易統計2020 確々報	人造コランダム(化学的に単一であるか ないかを問わない)、酸化アルミニウム 及び水酸化アルミニウム		
マンガン鉱	794,574	0	財務省貿易統計2020 確々報	マンガン鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	その他の金属鉱業
亜鉛鉱	726,117	0	財務省貿易統計2020 確々報	亜鉛鉱	資源・窯業・建材統計編 平成31年 (2019年) 経済産業省生産動態統 計年報	亜鉛鉱石(亜鉛含有量)

天然の炭酸マグネシウム	610,570	財務省貿易統計2020 確々報	天然の炭酸マグネシウム(マグネサイト)並びに溶融マグネシア、焼結マグネシア(焼結前に他の酸化物を少量加えてあるかないかを問わない。)及びその他の酸化マグネシウム(純粋であるかないかを問わない。)	天然の炭酸マグネシウム(マグネサイト)並びに溶融マグネシア、焼結マグネシア(焼結前に他の酸化物を少量加えてあるかないかを問わない。)及びその他の酸化マグネシウム(純粋であるかないかを問わない。)		
カリ肥料	565,658	財務省貿易統計2020 確々報	カリ肥料(鉱物性肥料及び化学肥料に限る。)	カリ肥料(鉱物性肥料及び化学肥料に限る。)	鉱物資源マテリアルフロー2018	需要量
窒素肥料	442,401	財務省貿易統計2020 確々報	窒素肥料	窒素肥料	日本肥料アンモニア協会HP 令和1肥料年度 単肥および複合肥料受払実績 総括表	窒素単肥
石灰石	384,475	財務省貿易統計2020 確々報	石灰石その他の石灰質の岩石	石灰石その他の石灰質の岩石	資源・窯業・建材統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	石灰石
カオリン	366,236	財務省貿易統計2020 確々報	カオリンその他のカオリン系粘土	カオリンその他のカオリン系粘土		
チタン鉱	343,111	0 財務省貿易統計2020 確々報	チタン鉱	チタン鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経済産業省HP	その他の金属鉱業
石油アスファルト	336,001	財務省貿易統計2020 確々報	石油アスファルト	石油アスファルト		
炭酸塩	328,434	財務省貿易統計2020 確々報	炭酸塩、ペルオキソ炭酸塩(過炭酸塩)及び商慣行上炭酸アンモニウムとして取引する物品でカルバミン酸アンモニウムを含有するもの	炭酸塩、ペルオキソ炭酸塩(過炭酸塩)及び商慣行上炭酸アンモニウムとして取引する物品でカルバミン酸アンモニウムを含有するもの		
花崗岩	325,984	財務省貿易統計2020 確々報	花こう岩	花こう岩	採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギーHP	花こう岩
銅、銅製品	307,487	財務省貿易統計2020 確々報	銅及びその製品	銅及びその製品	鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	伸銅製品、銅・銅合金精物
鉱物(その他)	290,703	0 財務省貿易統計2020 確々報	鉱物 その他のもの	鉱物 その他のもの	平成28年経済センサス-活動調査 経済産業省HP	その他の金属鉱業
金属スラッグなど	277,852	財務省貿易統計2020 確々報	金属のスラッグ、スラッジ、灰及び残留物	金属のスラッグ、スラッジ、灰及び残留物	鉄鋼スラッグ統計年報(2019年度版) 鉄鋼スラッグ協会	高炉スラッグ、鉄鋼スラッグ
硫酸塩	265,228	財務省貿易統計2020 確々報	硫酸塩、みょうばん及びペルオキソ硫酸塩(過硫酸塩)	硫酸塩、みょうばん及びペルオキソ硫酸塩(過硫酸塩)		
ニッケル及びその製品	257,546	財務省貿易統計2020 確々報	ニッケル及びその製品	ニッケル及びその製品	非鉄金属等需給動態統計 令和元年年度版 経済産業省資源エネルギー庁	ニッケル
塩化物、臭化物、よう化物	190,721	財務省貿易統計2020 確々報	塩化物、臭化酸化物、塩化水酸化物、臭化物、臭化酸化物、よう化物及びよう酸化物	塩化物、臭化酸化物、塩化水酸化物、臭化物、臭化酸化物、よう化物及びよう酸化物		
ステアタイト、タルクなど	183,376	財務省貿易統計2020 確々報	ステアタイト(天然のものに限るものとし、粗削りしてあるかないか又は他のこざりてひくことその他の方法により長方形(正方形を含む。)の塊状若しくは板状に単に切つてあるかないかを問わない。)及びタルク	ステアタイト(天然のものに限るものとし、粗削りしてあるかないか又は他のこざりてひくことその他の方法により長方形(正方形を含む。)の塊状若しくは板状に単に切つてあるかないかを問わない。)及びタルク		

貴金属	168,019	2,426	財務省貿易統計2020 確々報	貴金属及び貴金属を張った金属	鉱物資源マテリアルフロー2018	白金地金、パラジウム地金、ロジウム地金、金(新産、再生)、銀(新産、再生)
リン鉱	151,477		財務省貿易統計2020 確々報	天然のリン酸カルシウム及びリン酸アルミニウムカルシウム並びにリン酸塩を含有する白亜		
リン酸肥料	121,600	160,174	財務省貿易統計2020 確々報	リン酸肥料	日本肥料アンモニア協会HP 令和1年度肥料単肥および複合肥料受払実績 総括表	磷酸単肥
鉛鉱	119,872	0	財務省貿易統計2020 確々報	鉛鉱	資源・窯業・建材統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	鉛鉱石(鉛含有量)
泥炭	115,489		財務省貿易統計2020 確々報	泥炭		
ペントナイト	113,685	281,438	財務省貿易統計2020 確々報	ペントナイト	採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁HP	ペントナイト
雲母	112,409	48,359	財務省貿易統計2020 確々報	雲母(はく雑雲母を含む。)及びそのくず	採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁HP	雲母
珪岩	87,480	9,184,591	財務省貿易統計2020 確々報	けい岩	資源・窯業・建材統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	珪石
セメント	80,368	53,461,683	財務省貿易統計2020 確々報	ポートルランドセメント、アルミナセメント、スラグセメント、スーパーサルフェートセメントその他これらに類する水硬性セメント	資源・窯業・建材統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	セメント
ケイ酸塩など	77,361		財務省貿易統計2020 確々報	けい酸塩及び商慣行上アルカリ金属のけい酸塩として取引する物品		
ほたる石	62,381		財務省貿易統計2020 確々報	ほたる石 ふつ化カルシウムの含有量が全量の99%以下のもの		
マンガン及びその製品	59,187	331,000	財務省貿易統計2020 確々報	マンガン及びその製品	鉱物資源マテリアルフロー2019	高炭素FeMn、中低炭素FeMn
石英	56,734	715,214	財務省貿易統計2020 確々報	石英	平成28年経済センサス-活動調査 経済産業省HP	石英粗面岩・同類似岩石
リン酸塩	50,034		財務省貿易統計2020 確々報	ホスフィン酸塩(次亜りん酸塩)、ホスホン酸塩(亜りん酸塩)、りん酸塩及びポリりん酸塩(ポリりん酸塩については、化学的に単一であるか否かを問わない。)		
蛭石、真珠岩、緑泥岩	49,843	1,325	財務省貿易統計2020 確々報	蛭石、真珠岩及び緑泥岩(膨脹させないものに限る。)	採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁HP	ひる石
酸化チタンを含む顔料	48,385		財務省貿易統計2020 確々報	二酸化チタンをもととした顔料及び調製品		
ばん土頁岩	47,116		財務省貿易統計2020 確々報	ばん土頁岩		

オキソ金属硫酸塩	財務省貿易統計2020 確々報	44,802	オキソ金属硫酸塩及びペルオキソ金属硫酸塩	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	
天然黒鉛	財務省貿易統計2020 確々報	42,775	天然黒鉛	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	
硝酸塩	財務省貿易統計2020 確々報	41,709	亜硝酸塩及び硝酸塩	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	
クロム鉱	0 財務省貿易統計2020 確々報	41,161	クロム鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	その他の金属鉱業
長石	100,409 財務省貿易統計2020 確々報	39,298	長石	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	長石
塩素酸塩、臭素酸塩、よう 素酸塩	37,731 財務省貿易統計2020 確々報	37,731	塩素酸塩、過塩素酸塩、臭素酸塩、過臭 素酸塩、よう素酸塩及び過よう素酸塩		
鉛及びその製品	413,336 財務省貿易統計2020 確々報	36,903	鉛及びその製品	鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 平 成31年(2019年) 経済産業省生産 動態統計年報	粗鉛(副産粗鉛を含む)、電気鉛
アルミニウム鉱	0 財務省貿易統計2020 確々報	35,422	アルミニウム鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	その他の金属鉱業
モリブデン鉱	0 財務省貿易統計2020 確々報	32,875	モリブデン鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	その他の金属鉱業
リチウムの酸化物など	32,516 財務省貿易統計2020 確々報	32,516	酸化リチウム及び水酸化リチウム		
亜鉛及びその製品	526,717 財務省貿易統計2020 確々報	32,095	亜鉛及びその製品	鉄鋼・非鉄金属・金属製品統計編 平 成31年(2019年) 経済産業省生産 動態統計年報	亜鉛
マグネシウム及びその製 品	30,837 財務省貿易統計2020 確々報	30,837	マグネシウム及びその製品		
リン酸・ポリリン酸	29,744 財務省貿易統計2020 確々報	29,744	りん酸及びポリりん酸	化学工業統計編 平成31年(2019 年) 経済産業省生産動態統計年報	りん酸
ほう酸塩	27,165 財務省貿易統計2020 確々報	27,165	ほう酸塩及びペルオキソほう酸塩(過ほう 酸塩)		
無機酸塩類	27,128 財務省貿易統計2020 確々報	27,128	その他の無機酸塩及びペルオキソ酸塩		
大理石など	25,778 財務省貿易統計2020 確々報	25,778	大理石、トラバーチン、エコーシンその他 の石碑用又は建築用の石灰質の岩石		
スラグウール、ロックウー ル等	24,932 財務省貿易統計2020 確々報	24,932	スラグウール、ロックウールその他これら に類する鉱物性ウール		
亜炭	21,570 財務省貿易統計2020 確々報	21,570	亜炭	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	亜炭
バリウム鉱	21,030 財務省貿易統計2020 確々報	21,030	天然の硫酸バリウム(重晶石)		
すず及びその製品	1,547 財務省貿易統計2020 確々報	20,162	すず及びその製品	非鉄金属等需給動態統計 令和元年 度版 経産省資源エネルギー庁	すず
ジルコニウム鉱	0 財務省貿易統計2020 確々報	17,399	ジルコニウム鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	その他の金属鉱業
その他の岩石(花崗岩、 大理石など以外)	15,733 財務省貿易統計2020 確々報	15,733	その他の石碑用又は建築用の岩石		

貴金属鉱	14,079	6 財務省貿易統計2020 確々報	その他の貴金属鉱(精鉱を含む。)	資源・窯業・建材統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	金鉱石(金含有量)
鉄の酸化物など	12,484	財務省貿易統計2020 確々報	鉄の酸化物及び水酸化物	化学工業統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	酸化第二鉄
フッ化物	12,382	財務省貿易統計2020 確々報	ふっ化物及びフルオロロイ酸塩、フルオロアルミニウム酸塩その他のふっ素錯塩	鉱物資源マテリアルフロー2018	フルオロカーボン類、フッ素樹脂
ムライト	12,170	財務省貿易統計2020 確々報	ムライト		
チタンの酸化物	11,807	財務省貿易統計2020 確々報	チタンの酸化物	化学工業統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	酸化チタン
ガーネットなど	11,379	財務省貿易統計2020 確々報	エメリー、天然のコランダム、天然のガーネットその他の天然の研磨用の材料		
銀鉱	11,160	3 財務省貿易統計2020 確々報	銀鉱	資源・窯業・建材統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	銀鉱石(銀含有量)
シヤモットなど	10,643	財務省貿易統計2020 確々報	シヤモット及びダイナサース		
アンダルーサイトなど	10,519	財務省貿易統計2020 確々報	アンダルーサイト、カイアナイト及びシリマナイト		
スレート	9,962	財務省貿易統計2020 確々報	スレート	採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁HP	粘板岩
マグネシウム水酸化物など	9,805	財務省貿易統計2020 確々報	マグネシウムの水酸化物及び過酸化物		
亜鉛の酸化物など	8,955	財務省貿易統計2020 確々報	酸化亜鉛及び過酸化亜鉛	化学工業統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	酸化亜鉛
コバルト及びその製品	8,246	財務省貿易統計2020 確々報	コバルトのマットその他コバルト製錬の中間生産物並びにコバルト及びその製品	鉱物資源マテリアルフロー2019	地金
セリウム化合物	6,996	財務省貿易統計2020 確々報	セリウム化合物 無機又は有機の化合物及びこれらの金属の混合物の無機又は有機の化合物		
石綿セメント	6,934	財務省貿易統計2020 確々報	石綿セメント製品、セルロースファイバーセメント製品その他これらに類する製品		
希土類金属など	6,791	財務省貿易統計2020 確々報	希土類金属、スカンジウム及びイットリウム(これらの相互の混合物又は合金にしてあるかないかを問わない。)		
硫化鉄鉱	6,203	財務省貿易統計2020 確々報	硫化鉄鉱(焼いてないものに限る。)		
亜硫酸塩など	6,137	財務省貿易統計2020 確々報	亜硫酸塩及びチオ硫酸塩		
ゲルマニウムの酸化物、ジルコニウムの酸化物	5,632	財務省貿易統計2020 確々報	ゲルマニウムの酸化物及び二酸化ジルコニウム	鉱物資源マテリアルフロー2019	二酸化ジルコニウム
耐火粘土	5,057	財務省貿易統計2020 確々報	耐火粘土	資源・窯業・建材統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	耐火レンガ 粘土質

アンチモン及びその製品	4,835		財務省貿易統計2020 確々報	アンチモン及びその製品			
天然の硫酸マグネシウム	4,276		財務省貿易統計2020 確々報	キーゼル石及び瀉利塩(天然の硫酸マグネシウム)			
ニオブ鉱、タンタル鉱、バナジウム鉱	4,257	0	財務省貿易統計2020 確々報	ニオブ鉱、タンタル鉱、バナジウム鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経済産業省HP		その他の金属鉱業
亜ニチオン酸塩など	4,144		財務省貿易統計2020 確々報	亜ニチオン酸塩及びスルホキシル酸塩			
チタン及びその製品	4,141	91,000	財務省貿易統計2020 確々報	チタン及びその製品	鉱物資源マテリアルフロー2019		チタン展伸材(純分量不明)、スポンジチタン、インゴット
バミストーン	4,066		財務省貿易統計2020 確々報	バミストーン			
クロム及びその製品	3,639		財務省貿易統計2020 確々報	クロム及びその製品			
クロムの酸化物など	3,592		財務省貿易統計2020 確々報	クロムの酸化物及び水酸化物			
消石灰、生石灰など	3,588	8,659,649	財務省貿易統計2020 確々報	生石灰、消石灰及び水硬性石灰(第28.25項の酸化カルシウム及び水酸化カルシウムを除く。)	化学工業統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報		生石灰、消石灰
アンチモンの酸化物	3,535	5,113	財務省貿易統計2020 確々報	アンチモンの酸化物	鉱物資源マテリアルフロー2019		酸化アンチモン
ストロンチウム、バリウム酸化物など	3,019		財務省貿易統計2020 確々報	ストロンチウム又はバリウムの酸化物、水酸化物及び過酸化物			
モリブデンの酸化物など	2,860		財務省貿易統計2020 確々報	モリブデンの酸化物及び水酸化物			
マンガンの酸化物	2,167		財務省貿易統計2020 確々報	マンガンの酸化物			
その他希土類金属の化合物	2,072		財務省貿易統計2020 確々報	そのほか 希土類金属、イットリウム又はスカンジウムの無機又は有機の化合物及びこれらの金属の混合物の無機又は有機の化合物			
酸化セリウム	2,039		財務省貿易統計2020 確々報	酸化セリウム			
鉛の酸化物など	1,864		財務省貿易統計2020 確々報	鉛の酸化物、鉛丹及びオレンジ鉛			
銅の酸化物など	1,843		財務省貿易統計2020 確々報	銅の酸化物及び水酸化物			
ビチューメンなど	1,744		財務省貿易統計2020 確々報	天然ビチューメン、天然アスファルト、歴青質頁岩、油母頁岩、タールサンド、アスファルトサイト及びアスファルトチックロック			
硫化物	1,678		財務省貿易統計2020 確々報	硫化物及び多硫化物(多硫化物については、化学的に単一であるかないかを問わない。)			
タングステン及びその製品	1,554	3,904	財務省貿易統計2020 確々報	タングステン及びその製品	非鉄金属等需給動態統計 令和元年年度版 経産省資源エネルギー庁		タングステン
酸化イットリウム	1,298		財務省貿易統計2020 確々報	酸化イットリウム、無機又は有機の化合物及びこれらの金属の混合物の無機又は有機の化合物			

モリブデン及びその製品	1,223	692	財務省貿易統計2020 確々報	モリブデン及びその製品	非鉄金属等需給動態統計 令和元年 度版 経産省資源エネルギー庁	モリブデン
廃油(石油汚泥など)	1,008	332,221	財務省貿易統計2020 確々報	廃油 その他のもの	産業分類別の副産物(産業廃棄物有 価発生物)の発生状況等に関する調 査(平成24年度実績)報告書	廃油、スラッジ
コバルトの酸化物など	895		財務省貿易統計2020 確々報	コバルトの酸化物及び水酸化物並びに商 慣行上酸化コバルトとして取引する物品		
フェロセリウム	794		財務省貿易統計2020 確々報	フェロセリウムその他の発火性合金(形 状を問わない。)及びこの類の注2の可燃 性材料の製品		
バナジウムの酸化物など	750		財務省貿易統計2020 確々報	バナジウムの 酸化物及び水酸化物		
次亜塩素酸塩	736	899,253	財務省貿易統計2020 確々報	次亜塩素酸塩、商慣行上次亜塩素酸カ ルシウムとして取引する物品、亜塩素酸 塩及び次亜臭素酸塩	化学工業統計編 平成31年(2019 年) 経済産業省生産動態統計年報	次亜塩素酸ナトリウム溶液(12%換算)
アンチモン鉱	676	0	財務省貿易統計2020 確々報	アンチモン鉱	平成28年経済センサス-活動調査 経 済産業省HP	その他の金属鉱業
酸化ランタン	662		財務省貿易統計2020 確々報	酸化ランタン 無機又は有機の化合物及 びこれらの金属の混合物の無機又は有 機の化合物		
炭化物(ほう素、ニオブ、タ ンタル)	465		財務省貿易統計2020 確々報	炭化ほう素、炭化ニオブ及び炭化タンタ ル		
サーメット及びその製品	347		財務省貿易統計2020 確々報	サーメット及びその製品		
シアン化物	284		財務省貿易統計2020 確々報	シアン化物、シアン化酸化物及びシアノ 錯塩		
ジルコニウム及びその製 品	259		財務省貿易統計2020 確々報	ジルコニウム及びその製品		
ピスマス及びその製品	242	448	財務省貿易統計2020 確々報	ピスマス及びその製品	鉱物資源マテリアルフロー2011ピス マス(BI)	
白亜	240		財務省貿易統計2020 確々報	白亜		
インジウム及びその製品	214	637	財務省貿易統計2020 確々報	インジウム及びその製品	鉱物資源マテリアルフロー2018	地金
その他金属及びその製品	155		財務省貿易統計2020 確々報	その他金属及びその製品		
バナジウム及びその製品	117		財務省貿易統計2020 確々報	バナジウム及びその製品		
タンタル及びその製品	89	154	財務省貿易統計2020 確々報	タンタル及びその製品	鉱物資源マテリアルフロー2019	加工地金
すずの酸化物	60		財務省貿易統計2020 確々報	酸化第一すず及び酸化第二すず		
ニッケルの酸化物など	43		財務省貿易統計2020 確々報	ニッケルの酸化物及び水酸化物		
ニオブ・チタン合金	41		財務省貿易統計2020 確々報	ニオブ・チタン合金		

石膏ボード	21	財務省貿易統計2020 確々報	プラスチック又はプラスチックを元にした材料 からなる製品	プラスチック又はプラスチックを元にした材料 からなる製品								
ゲルマニウム及びその製 品	7	財務省貿易統計2020 確々報	ゲルマニウム及びその製品	ゲルマニウム及びその製品								
ベリリウム及びその製品	0	財務省貿易統計2020 確々報	ベリリウム及びその製品	ベリリウム及びその製品								
ベリリウムの酸化物	0	財務省貿易統計2020 確々報	酸化ベリリウム	酸化ベリリウム								
カドミウム及びその製品	0	1,804 財務省貿易統計2020 確々報	カドミウム及びその製品	カドミウム及びその製品								ニッケル・カドミウム電池、合金、その他
ウラン鉱	0	0 財務省貿易統計2020 確々報	ウラン鉱	ウラン鉱								その他の金属鉱業
コバルト鉱	0	0 財務省貿易統計2020 確々報	コバルト鉱	コバルト鉱								その他の金属鉱業
タングステン鉱	0	0 財務省貿易統計2020 確々報	タングステン鉱	タングステン鉱								その他の金属鉱業
トリウム鉱	0	0 財務省貿易統計2020 確々報	トリウム鉱	トリウム鉱								その他の金属鉱業
石炭灰	0	12,344,000 財務省貿易統計2020 確々報	都市廃棄物の焼却によって生じた灰及びび 残留物	都市廃棄物の焼却によって生じた灰及びび 残留物								石炭灰
すず鉱	0	0 財務省貿易統計2020 確々報	すず鉱	すず鉱								その他の金属鉱業
石棉	0	財務省貿易統計2020 確々報	石棉	石棉								
水銀化合物	0	財務省貿易統計2020 確々報	水銀の無機又は有機の化合物(化学的 に単一であるか否かを問わないものと し、アマルガムを除く)	水銀の無機又は有機の化合物(化学的 に単一であるか否かを問わないものと し、アマルガムを除く)								
タリウム及びその製品	0	1 財務省貿易統計2020 確々報	タリウム及びその製品	タリウム及びその製品								タリウム化合物
かんらん岩		1,692,256 財務省貿易統計2020 確々報										かんらん岩
安山岩		41,712,155 財務省貿易統計2020 確々報										安山岩
凝灰岩		4,538,666 財務省貿易統計2020 確々報										凝灰岩
玄武岩		5,019,068 財務省貿易統計2020 確々報										玄武岩

蛇紋岩		9,200			採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁HP	じゃ紋岩
閃緑岩		3,217,843			採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁HP	せん緑岩
斑輝岩		4,752,972			採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁HP	はんれい岩
片岩		3,825,605			採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁HP	結晶片岩
耐火物(ジルコン)		6,235			資源・窯業・建材統計編 平成31年(2019年) 経済産業省生産動態統計年報	耐火レンガ ジルコン
フライアッシュセメント ろう石		73,000 42,586			セメントハンドブック2020年度版 平成28年経済センサス-活動調査-経済産業省HP	フライアッシュセメント ろう石
酸性白土		227,608			採石業者の業務の状況に関する報告書の集計結果(令和元年再修正版) 経済産業省 資源エネルギー庁HP	酸性白土

Ⅲ. 2.2 放射能濃度の調査（付属説明 2）

① 概要

天然資源は様々な分野で利用されている。これらの濃度は産地や物質の種類によって大きく異なる。したがって、物質や産地ごとの天然資源の放射能濃度のおよそのレベルを知ることが目的に、それらの情報を調査・整理した。なお、国内使用されている物質が我が国の産業にとって重要物質として考えられるが、使用量が不明の物質もあるため、濃度データが存在する物質すべてについて調査・整理を行った。

② 使用したデータ

次の資料が用いられた。

(a) 量研 NORM データベースのオリジナルデータ

(b) 国内 NORM の実測データ

- Kazuki Iwaoka, Hiroyuki Tabe, Hidenori Yonehara: Natural radioactivity of bedrock bath instruments and hot spring instruments in Japan, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 295, 817-821 (2013).
- Kazuki Iwaoka, Hiroyuki Tabe, Hidenori Yonehara: Activity concentration of natural radioactive nuclides in nonmetallic industrial raw materials in Japan, Journal of Environmental Radioactivity, 137, 130-136 (2014).
- Kazuki Iwaoka, Masahiro Hosoda, Napakan Suwankot, Yasutaka Omori, Tetsuo Ishikawa, Shinji Tokonami: Natural Radioactivity and radon exhalation rate in man-made tiles used as building materials in Japan, Radiation Protection Dosimetry, 167, 135-138 (2015).
- Kazuki Iwaoka, Kazuaki Yajima, Toshikazu Suzuki, Hidenori Yonehara, Masahiro Hosoda, Shinji Tokonami, Reiko Kanda: Investigation on natural

radioactivity in a monazite processing plant in Japan, Health Physics, 113, 220-224 (2017).

- Kazuki Iwaoka, Hiroyuki Tabe, Toshikazu Suzuki, Hidenori Yonehara: Occupational exposure to natural radiation in zirconium refractory plants in Japan, Health Physics, 104, 151-157 (2013).
- Kazuki Iwaoka, Hosoda Masahiro, Hiroyuki Tabe, Tetsuo Ishikawa, Shinji Tokonami, Hidenori Yonehara: Activity concentration of natural radionuclides and radon and thoron exhalation rates in rocks used as wall coverings in Japan, Health Physics, 104, 41-50 (2013).

③調査対象 (調査対象のデータ項目)

(a) 量研 NORM データベースのオリジナルデータ

量研の NORM データベースは uranium、natural radioactivity などキーワードとして web of science(国際誌データベース)や CiNii (国内誌データベース) で検索された文献 (1999 年以降から概ね 2012 年) に記載されている放射能濃度データがとりまとめられている。物質の名称や産地が明らかなもの (具体的には砂や土は除く) のみのデータの具体的なデータの項目は下記である。本調査ではこれらの各データ項目の情報を濃度調査整理の対象として選定した。

- 物質名
- 物質の産地
- 物質の自然核種の放射能濃度

なお、物質の種類については、具体的には下記のもものが収録されている。

- ・金属鉱石や非金属鉱石

亜鉛鉱石（閃亜鉛鉱など）

アルミニウム鉱石（ボーキサイトなど）

ウラン鉱石（歴青ウラン鉱など）

クロム鉱石（クロム鉄鉱など）

ジルコニウム鉱石（ジルコン、バデライトなど）

タングステン鉱石（タングステン酸鉄など）

チタン鉱石（ルチル、イルメナイトなど）

鉄鉱石（かっ鉄鉱など）

銅鉱石（黄銅鉱など）

マンガン鉱石（水マンガン鉱など）

モリブデン鉱石（硫化モリブデンなど）

リン鉱石（リン酸カルシウムなど）

レアアース鉱石（モナザイト、バストネサイトなど）

- ・化石燃料

亜炭

石炭

石油、歴青油（原油）

泥炭

- ・石材や鉱物

安山岩
カオリン
花崗岩
花崗閃緑岩
かんらん岩
輝岩
凝灰岩
玄武岩
スレート
石灰石
千枚岩
閃緑岩
大理石
石こう
ドロマイト
はんれい岩
ばん土頁岩
片岩
片麻岩
流紋岩
・工業製品
精製油
セメント

窒素肥料

リン酸

リン酸石膏

リン酸肥料

・廃棄物

亜炭灰

アルミ工場のスラッジ

精油所のスケール

精油所のスラッジ

石炭灰

泥炭灰

(b) 国内 NORM の実測データ

研究代表者によって得られた最新の国内 NORM の実測データについても (a) と同様に下記の各データ項目の情報を濃度調査整理の対象として選定した。

- ・物質の名称
- ・物質の産地
- ・物質の自然核種の放射能濃度

④データの一覧表

調査・整理した一覧表を表 5 に示す。この作業を行うにあたって設定した条件は下記である。

- ・放射能濃度の単位は Bq/kg に統一した。
- ・放射能濃度の値は、文献ごとの代表値※を集約・計算して平均値、最小値、最大

値を求めた。

※個々の文献中の代表値。文献中の濃度データは、平均値（例えば、同種の5サンプルの平均値）、単独値（例えば、サンプル1つに対して1つのデータ）などに整理できる、あるいは整理されている。これら整理された平均値などを代表値と定めた。

- ND等の測定上の下限値は、具体的に数値が記載されていればその値（例えば、<5と記載されていれば5）をデータに入力し、それ以外は全て0Bq/kgとした。
- 輸入量調査の際に設定した物質名、すなわち貿易統計上(HSコード分類)を基本とした品目名を、濃度調査での物質名とした。輸入量調査の際に設定した物質名に分類するのが難しい物質については、当該物質の名称を物質名とした。

表5. 放射能濃度データ

物質名	U-238			Ra-226			Th-232			Ra-228			K-40							
	データ数	放射能濃度 (Bq/g)		データ数	放射能濃度 (Bq/g)		データ数	放射能濃度 (Bq/g)		データ数	放射能濃度 (Bq/g)		データ数	放射能濃度 (Bq/g)						
		平均	最小		最大	平均		最小	最大		平均	最小		最大	平均	最小	最大			
錳物(その他)	1	11.000	11.000	11.930	11.930	11.930	2	47.600	37.200	58.000	0	0	0	0	0	0				
ウラン鉱	1	7605.480	7605.480	5.370	5.370	5.370	1	0.125	0.125	0.125	0	0	1	0.010	0.010	0.010				
トリウム鉱	7	29.685	18.500	58.312	4	35.795	28.600	40.580	8	291.962	122.000	497.578	3	319.333	260.000	360.000	11.300	17.205		
セリウム化合物	0						0						2	0.775	0.150	1.400				
希土類金属など	0						2	0.000	0.000	0.000	0	0	2	0.000	0.000	0.000				
その他希土類金属の化合物	0						0						12	1.058	0.150	3.800				
酸化セリウム	0						1	0.004	0.004	0.004	1	0.036	0.036	4	2.020	0.150	5.200	0.482	0.482	
酸化イットリウム	0						0				0		2	0.430	0.330	0.530				
フェロセリウム	0						0				0		0							
フェロセリウム	0						0				0		1	7.800	7.800	7.800				
ほう酸塩	0						0				0		0							
炭化物(ほう素、ニオブ、タンタル)	0						0				0		0							
バリウム鉱	0						1	0.004	0.004	0.004	1	0.000	0.000	0			1	0.000	0.000	0.000
ベリリウム及びその製品	0						0				0		0				0			
ベリリウムの酸化物	0						0				0		0				0			
ビスマス及びその製品	0						0				0		0				0			
コバルト及びその製品	0						0				0		0				0			
コバルト鉱	0						0				0		0				0			
コバルトの酸化物など	0						0				0		0				0			
クロム鉱	0						1	0.000	0.000	0.000	0		1	0.001	0.001	0.001	1	0.000	0.000	0.000
クロム及びその製品	0						0				0		0				0			
クロムの酸化物など	0						0				0		0				0			
ゲルマニウム及びその製品	0						0				0		0				0			
ゲルマニウム及びその製品	0						0				0		0				0			
ゲルマニウムの酸化物、ジルコニウムの酸化物	1	5.600	5.600	5.600	1	2.800	2.800	2.800	1	1.200	1.200	1.200	1	0.630	0.630	0.630	1	0.030	0.030	0.030
インジウム及びその製品	0						0				0		0				0			
リチウムの酸化物など	0						0				0		0				0			
マンガン及びその製品	0						0				0		0				0			
マンガン鉱	1	0.007	0.007	0.007	1	0.003	0.003	0.003	1	0.004	0.004	0.004	1	0.004	0.004	0.004	1	0.000	0.000	0.000
マンガンの酸化物	0						0				0		0				0			
モリブデン及びその製品	0						0				0		0				0			
モリブデン鉱	3	0.030	0.000	0.068	3	0.030	0.000	0.057	3	0.005	0.000	0.008	3	0.005	0.000	0.010	3	0.034	0.000	0.068

フライアッシュセメント	1	0.042	0.042	0.042	0.042	1	0.040	0.040	0.040	0.040	1	0.034	0.034	0.034	0.034	0.039	0.039	0.039	1	0.120	0.120	0.120	
亜炭	34	0.185	0.003	1.306	0.001	42	0.129	0.001	0.536	0.001	36	0.017	0.001	0.049	0.024	6	0.024	0.013	0.052	35	0.084	0.006	0.191
泥炭	2	0.012	0.008	0.016	0.004	2	0.007	0.004	0.011	0.001	2	0.003	0.001	0.005	0.005	2	0.005	0.005	2	0.017	0.006	0.028	
精油所のステール	15	0.175	0.000	2.500	0.001	26	53.068	0.001	897.500	0.001	15	0.006	0.001	0.027	148.771	6	148.771	0.091	679.500	5	13.929	0.009	65.100
精油所の製造水	0					3	0.904	0.600	1.481	0.600	0					3	0.577	0.251	0.740	0			
泥炭灰	2	0.111	0.102	0.121	0.026	2	0.027	0.026	0.029	0.026	2	0.008	0.004	0.011		0			2	0.089	0.070	0.108	
火力発電所からの廃棄物	3	0.062	0.007	0.115	0.000	1	12.900	12.900	12.900	0.000	4	1.725	0.000	6.858		0			4	2.868	0.030	10.983	
亜炭灰	14	0.709	0.274	1.098	0.149	23	0.605	0.149	1.063	0.001	14	0.044	0.001	0.060	0.052	9	0.052	0.030	0.100	20	0.304	0.009	0.502
金属スラグなど	0					0					0					0			0				
メタルマッチ	0					1	0.000	0.000	0.000	0.000	0					1	0.000	0.000	0.000	0			
ライター石	0					4	0.000	0.000	0.000	0.000	0					4	0.000	0.000	0.000	0			
銀錠	0					0					0					0				0			
水銀化合物	0					0					0					0				0			
アルミニウム及びその製品	0					0					0					0				0			
アルミニウムの酸化物など	11	0.207	0.066	0.500	0.005	15	0.214	0.005	1.500	0.007	15	0.265	0.007	0.760	0.121	2	0.121	0.082	0.160	6	0.038	0.013	0.091
アルミニウムの酸化物	2	0.135	0.000	0.270	0.001	2	0.102	0.001	0.203	0.001	2	0.139	0.001	0.278		0			2	0.023	0.010	0.035	
アルミ工場のスラッジ	10	0.327	0.020	1.549	0.009	8	0.405	0.009	1.675	0.012	14	0.512	0.012	1.800		0			3	0.066	0.048	0.103	
金錠	1	0.047	0.047	0.047		0				0.038	1	0.038	0.038	0.038		0			1	0.665	0.665	0.665	
金鉱山からの廃棄物	1	0.048	0.048	0.048		0				0.033	1	0.033	0.033	0.033		0			1	0.578	0.578	0.578	
カトミウム及びその製品	0					0					0					0			0				
銅、銅製品	0					0					0					0			0				
銅錠	8	0.216	0.000	1.495		0				0.034	1	0.034	0.034	0.034		0			1	0.257	0.257	0.257	
銅の酸化物など	0					0					0					0			0				
鉄鋼	0					0					0					0			0				
鉄鋼製品	0					0					0					0			0				
鉄の酸化物など	0					1	0.178	0.178	0.178	0.139	1	0.139	0.139	0.139		0			1	0.756	0.756	0.756	
鉄錠	10	0.019	0.008	0.051	0.005	7	0.013	0.005	0.024	0.007	11	0.007	0.000	0.020	0.005	6	0.005	0.004	0.007	11	0.083	0.000	0.331
硫化鉄錠	0					0					0					0			0				
鉄鋼工場からの廃棄物	1	0.014	0.014	0.014		1	0.009	0.009	0.009	0.004	1	0.004	0.004	0.004		0			1	0.005	0.005	0.005	
天然の炭酸マグネシウム	2	0.012	0.011	0.012	0.000	2	0.005	0.000	0.010	0.002	2	0.002	0.002	0.002	0.000	2	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000
マグネシウム及びその製品	0					0					0					0			0				
マグネシウム水酸化物など	0					0					0					0			0				
天然の硫酸マグネシウム	0					0					0					0			0				
ニッケル錠	2	0.000	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000
鉛及びその製品	0					0					0					0			0				
鉛錠	0					0					0					0			0				
鉛の酸化物など	0					0					0					0			0				
すず及びその製品	0					0					0					0			0				
すず錠	0					0					0					0			0				
すずの酸化物	0					0					0					0			0				
酸化チタン工場の廃棄物	3	0.142	0.006	0.210	0.007	3	0.562	0.007	0.860	0.014	3	0.238	0.014	0.350	1.728	3	1.728	0.009	2.590	3	0.189	0.000	0.284
亜鉛及びその製品	0					0					0					0			0				
亜鉛の酸化物など	0					0					0					0			0				

亜鉛鉱	1	0.012	0.012	0.012	1	0.011	0.011	0.011	0.011	1	0.005	0.005	0.005	0.005	1	0.005	0.005	0.005	0.005	1	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	0.063	
サマーメット及びその製品	0				0					0					0						0						
天然鉱石などが添加含有された製品	21	4.829	0.011	34.000	42	1.630	0.000	19.100	0.000	21	46.297	0.010	270.000	0.000	44	5.847	0.000	93.000	0.000	23	0.604	0.000	0.000	0.000	0.000	2.900	
石灰石	9	0.017	0.001	0.037	13	0.027	0.000	0.132	0.000	18	0.012	0.000	0.045	0.000	3	0.003	0.000	0.005	0.000	18	0.275	0.000	0.000	0.000	0.000	2.493	
セメント	19	0.043	0.020	0.130	50	0.051	0.004	0.152	0.030	62	0.033	0.003	0.130	0.020	1	0.020	0.020	0.020	0.020	62	0.206	0.000	0.000	0.000	0.000	0.883	
安山岩	10	0.018	0.004	0.052	17	0.025	0.003	0.066	0.003	16	0.033	0.003	0.075	0.000	10	0.021	0.000	0.060	0.000	17	0.585	0.200	0.000	0.000	0.000	0.960	
花崗岩	198	0.047	0.058	0.588	190	0.059	0.001	0.434	0.001	290	0.082	0.001	0.906	0.000	87	0.070	0.000	0.370	0.000	287	1.128	0.045	0.000	0.000	0.000	10.990	
珪岩	7	0.007	0.000	0.019	9	0.005	0.000	0.017	0.000	7	0.004	0.000	0.013	0.000	7	0.005	0.000	0.011	0.000	7	0.064	0.000	0.000	0.000	0.000	0.140	
消石灰、生石灰など	0				0					0					0					0							
スレート	4	0.052	0.033	0.086	4	0.042	0.034	0.052	0.034	5	0.055	0.047	0.067	0.060	3	0.072	0.060	0.082	0.060	5	0.928	0.430	0.000	0.000	0.000	1.200	
玄武岩	4	0.014	0.003	0.043	9	0.072	0.000	0.494	0.000	7	0.125	0.001	0.733	0.026	1	0.026	0.026	0.026	0.026	8	0.797	0.160	0.000	0.000	0.000	2.354	
斑輝岩	11	0.006	0.000	0.015	4	0.004	0.000	0.014	0.000	10	0.008	0.001	0.021	0.000	3	0.009	0.000	0.026	0.000	11	0.144	0.000	0.000	0.000	0.000	0.540	
凝灰岩	4	0.017	0.006	0.022	14	0.117	0.007	0.470	0.007	14	0.102	0.007	0.313	0.012	4	0.028	0.012	0.039	0.012	14	1.150	0.260	0.000	0.000	0.000	2.135	
石膏	1	0.013	0.013	0.013	2	0.017	0.016	0.017	0.016	3	0.006	0.003	0.013	0.003	0					3	0.439	0.070	0.000	0.000	0.000	1.142	
片岩	7	0.033	0.005	0.095	4	0.108	0.003	0.389	0.003	8	0.063	0.001	0.260	0.000	0					8	0.583	0.025	0.000	0.000	0.000	0.979	
ドロマイト	5	0.025	0.010	0.068	3	0.008	0.000	0.015	0.000	4	0.005	0.000	0.012	0.000	3	0.003	0.000	0.005	0.000	5	0.078	0.000	0.000	0.000	0.000	0.286	
閃緑岩	2	0.027	0.020	0.034	0					2	0.034	0.020	0.048	0.000	0					2	0.550	0.410	0.000	0.000	0.000	0.114	
かんらん岩	8	0.003	0.000	0.008	4	0.000	0.000	0.000	0.000	8	0.001	0.000	0.005	0.000	3	0.000	0.000	0.000	0.000	9	0.019	0.000	0.000	0.000	0.000	0.114	
窒素肥料	0				2	0.254	0.019	0.489	0.019	2	0.034	0.029	0.038	0.000	0					2	0.158	0.046	0.000	0.000	0.000	0.270	
次亜塩素酸塩	0				0					0					0					0							
石英	0				0					0					0					0							
ペントナイト	5	0.045	0.013	0.130	5	0.036	0.000	0.100	0.000	5	0.044	0.014	0.120	0.000	5	0.039	0.000	0.110	0.000	5	0.204	0.000	0.000	0.000	0.000	0.350	
カリ肥料	0				0					0					0					0							
酸性白土	3	0.025	0.019	0.034	3	0.025	0.017	0.037	0.017	3	0.035	0.019	0.047	0.018	3	0.041	0.018	0.058	0.018	3	0.097	0.061	0.000	0.000	0.000	0.120	
リン酸肥料	48	0.920	0.002	6.980	42	0.287	0.005	0.871	0.005	52	0.147	0.003	0.650	0.003	21	0.101	0.003	0.283	0.003	29	0.550	0.003	0.003	0.003	0.003	4.670	
長石	7	0.056	0.000	0.220	7	0.057	0.000	0.250	0.000	7	0.031	0.000	0.120	0.000	7	0.039	0.000	0.160	0.000	7	2.311	0.180	0.000	0.000	0.000	3.600	
耐火粘土	5	0.079	0.004	0.242	5	0.069	0.008	0.173	0.008	5	0.071	0.011	0.202	0.011	4	0.064	0.013	0.093	0.013	5	0.253	0.000	0.000	0.000	0.000	0.620	
フッ化物	0				0					0					0					0							
リン酸・ボリン酸	15	0.793	0.000	2.888	16	0.011	0.002	0.055	0.002	13	0.079	0.000	0.475	0.000	10	0.003	0.002	0.006	0.002	10	0.052	0.001	0.001	0.001	0.001	0.308	
石膏	6	0.003	0.002	0.004	6	0.003	0.000	0.005	0.000	6	0.001	0.001	0.005	0.000	6	0.003	0.000	0.009	0.000	6	2.733	2.700	0.000	0.000	0.000	2.900	
ろう石	3	0.027	0.022	0.032	3	0.026	0.022	0.030	0.022	3	0.041	0.025	0.055	0.044	3	0.054	0.044	0.061	0.044	3	0.102	0.043	0.000	0.000	0.000	0.180	
蛇紋岩	2	0.002	0.000	0.005	3	0.001	0.000	0.004	0.000	2	0.000	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
軽石、真珠岩、緑泥岩	3	0.007	0.007	0.007	3	0.009	0.007	0.011	0.007	3	0.026	0.020	0.032	0.020	3	0.045	0.038	0.055	0.038	3	1.367	1.300	0.000	0.000	0.000	1.400	
カオリン	9	0.113	0.048	0.166	3	0.114	0.013	0.247	0.013	12	0.149	0.045	0.302	0.045	0					12	0.238	0.008	0.000	0.000	0.000	1.220	
石油アスファルト	0				0					0					0					0							
炭酸塩	0				0					0					0					0							
硫酸塩	0				0					0					0					0							
塩化物、臭化物、珪化物	0				0					0					0					0							
ステアタイト、タルクなど	4	0.010	0.002	0.019	4	0.016	0.003	0.026	0.003	4	0.002	0.000	0.007	0.000	4	0.002	0.000	0.010	0.000	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
リン鉱	75	0.804	0.014	4.391	62	0.895	0.004	5.760	0.004	88	0.110	0.000	3.238	0.000	22	0.139	0.000	0.497	0.000	46	0.206	0.000	0.000	0.000	0.000	1.202	
ケイ酸塩など	0				0					0					0					0							
ほたる石	3	0.009	0.001	0.021	3	0.008	0.000	0.020	0.000	3	0.003	0.000	0.009	0.000	3	0.004	0.000	0.008	0.000	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
リン酸塩	0				0					0					0					0							
ばん士頁岩	1	0.052	0.052	0.052	1	0.030	0.030	0.030	0.030	0					1	0.023	0.023	0.023	0.023	1	0.515	0.515	0.000	0.000	0.000	0.515	
オキソ金属酸塩	0				0					0					0					0							
天然黒鉛	0				0					0					0					0							
硝酸塩	0				0					0					0					0							
塩素酸塩、臭素酸塩、ヨウ素酸塩	0				0					0					0					0							
無機酸塩類	0				0					0					0					0							

大理石など	53	0.012	0.000	0.148	97	0.018	0.000	0.309	109	0.009	0.000	0.166	39	0.000	0.000	0.003	108	0.083	0.000	1.353
スラグウール、ロックスウール等	0				1	0.091	0.091	0.091	1	0.021	0.021	0.021	0				1	0.087	0.087	0.087
その他の岩石(花崗岩、大理石など以外)	0				0				0				0				0			
ムライト	0				0				0				0				0			
ガーネットなど	2	0.083	0.017	0.150	1	0.017	0.017	0.017	2	0.157	0.064	0.250	0				1	0.009	0.009	0.009
シヤモットなど	0				0				0				0				0			
アンダラーサイトなど	2	0.028	0.014	0.042	2	0.032	0.017	0.046	2	0.027	0.013	0.041	2	0.049	0.030	0.067	2	0.336	0.012	0.660
石綿セメント	0				0				0				0				0			
亜硫酸塩など	0				0				0				0				0			
亜二チオン酸塩など	0				0				0				0				0			
バミストーン	0				0				0				0				0			
ビチューメンなど	3	0.008	0.000	0.013	3	0.011	0.000	0.017	3	0.014	0.000	0.021	3	0.017	0.000	0.026	3	0.173	0.000	0.260
硫化物	0				0				0				0				0			
シアン化物	0				0				0				0				0			
白亜	1	0.005	0.005	0.005	0				1	0.010	0.010	0.010	0				1	0.087	0.087	0.087
石膏ボード	0				4	0.174	0.000	0.678	4	0.005	0.000	0.016	0				4	0.015	0.004	0.024
石綿	0				0				0				0				0			
リン酸肥料工場からの固形廃棄物	4	1.086	0.400	1.952	6	0.986	0.003	2.548	3	0.017	0.003	0.032	2	0.017	0.007	0.028	4	0.377	0.003	1.200
タイル	0				15	0.079	0.025	0.170	4	0.059	0.051	0.073	10	0.062	0.031	0.110	11	0.609	0.260	1.228
紙	0				10	0.004	0.001	0.008	0				10	0.009	0.001	0.022	10	0.008	0.002	0.019
壁紙鋪用レンガ	0				4	0.018	0.010	0.028	0				4	0.017	0.011	0.025	0			
黒曜石	5	0.065	0.033	0.120	5	0.063	0.033	0.120	5	0.067	0.026	0.110	5	0.077	0.028	0.120	5	1.180	1.100	1.200
温泉沈殿物	0				0				0				1	27.000	27.000	27.000	0			
リン酸石膏	23	0.133	0.002	0.650	36	0.416	0.008	0.907	30	0.080	0.001	0.273	15	0.108	0.001	0.273	20	0.069	0.000	0.226
片麻岩	1	0.016	0.016	0.016	14	0.045	0.001	0.166	12	0.061	0.000	0.121	0			12	0.955	0.055	2.341	
花崗閃緑岩	2	0.057	0.044	0.070	1	0.004	0.004	0.004	2	0.049	0.045	0.053	0				2	1.104	0.893	1.315
石綿スレート	0				1	0.040	0.040	0.040	1	0.009	0.009	0.009	0				1	0.083	0.083	0.083
流紋岩	6	0.038	0.015	0.061	7	0.053	0.017	0.111	7	0.064	0.020	0.122	2	0.016	0.014	0.018	9	0.720	0.157	1.608
リン酸肥料工場からの廃液	2	0.559	0.011	1.106	2	0.083	0.006	0.160	1	1.091	1.091	1.091	0				2	0.107	0.003	0.210
チヨークスティック	2	0.008	0.006	0.010	1	0.024	0.024	0.024	2	0.003	0.002	0.004	1	0.023	0.023	0.023	3	0.155	0.018	0.412
リン酸肥料工場からの中間生成物	1	0.350	0.350	0.350	1	0.120	0.120	0.120	0				0				1	3.200	3.200	3.200
チャート及びフリント	1	0.039	0.039	0.039	0				1	0.062	0.062	0.062	0				1	1.583	1.583	1.583
輝岩	1	0.001	0.001	0.001	1	0.171	0.171	0.171	2	0.082	0.002	0.163	0				2	0.531	0.015	1.048
接触岩類	0				1	0.035	0.035	0.035	0				0				0			
千枚岩	3	0.039	0.035	0.043	0				3	0.076	0.044	0.094	0				3	0.576	0.412	0.776
ミグマタイト	0				1	0.028	0.028	0.028	1	0.026	0.026	0.026	0				1	0.964	0.964	0.964
リン酸肥料工場からの沈殿物	2	0.638	0.020	1.257	2	27.926	0.018	55.833	0				2	1.239	0.021	2.457	1	0.560	0.560	0.560
角閃岩	1	0.021	0.021	0.021	1	0.001	0.001	0.001	1	0.038	0.038	0.038	0				1	0.032	0.032	0.032

Ⅲ. 2.3 とりまとめ（付属資料3）

「(1) 使用量の調査」と「(2) 放射能濃度の調査」のデータを統合させ、整理・分類を行った。具体的には、新たな調査が期待される物質を特定するために、下記のステップで物質の整理・分類した。

・ステップ① 1Bq/g を超える可能性がある物質の特定

どのような物質が高い放射能濃度を有しているのかを調べるために、濃度データの一覧表（表5）から1Bq/g を超える物質を抽出した。抽出した一覧表を表6に示す。

・ステップ② 国内管理体系外の物質の特定

1Bq/g を超える物質の中でも、いくつか物質、例えば「ウラン鉱」、「トリウム鉱」などの物質はすでにガイドラインの対象となっている。温泉沈殿物は、産業原材料や産業生成物ではなく、自然な状態で自然環境に存在することから規制に馴染まないため、規制から除外することが適切と考えられる【文部科学省，放射線審議会自然放射性物質の規制免除について，2003】。したがって、1Bq/g を超える物質の中で国内管理体系の枠組みから外れている物質としては、「酸化セリウム」や「精油所のスケール」などが抽出される。これらの物質は、「レアアース・レアメタル」や「化石燃料」といった産業工程で原料あるいは発生する物質であるため、「レアアース・レアメタル」や「化石燃料」に関連する物質が国内 NORM 被ばく防護の観点で重要な物質と言える。

・ステップ③ 国内利用状況と濃度調査状況

国内利用量（表4）と濃度（表5）を用いて、国内利用状況と濃度調査状況を統合した一覧表を表7に示す。「レアアース・レアメタル」や

「化石燃料」に関連する物質を黄色セルで示してある。この表からわかるように、「レアアース・レアメタル」については、国内利用が確認されているものの濃度が不明な物質が多いことが分かったため、現時点では被ばく評価の要となる濃度データを拡充する必要がある。一方、「化石燃料」については、関連する物質の濃度の情報が比較的多く、1Bq/g を超えることが多くのデータの中で示されてきており、高レベルで被ばくする可能性があるため、様々な利用実態に応じた被ばく調査を行う必要がある。

表6. 1Bq/gを超える物質

国内管理の有無	物質名	関連産業	U-238		Ra-226		Th-232		Ra-228	
			データ数	平均濃度 (Bq/g)	データ数	平均濃度 (Bq/g)	データ数	平均濃度 (Bq/g)	データ数	平均濃度 (Bq/g)
なし	酸化セリウム	レアース								
ガイドライン	ウラン鉱	レアース	1	7605.5	1	5.4				2.0
ガイドライン	トリウム鉱	レアース	7	29.7	4	35.8	8	292.0	3	319.3
なし	鉱物(その他)	レアース	1	11.0	1	11.9	2	47.6		
なし	酸化ランタン	レアース							1	7.8
なし	その他希土類金属の化合物	レアース							12	1.1
なし(注はガイドライン)	ゲルマニウムの酸化物、シリコニウムの酸化物	レアメタル	1	5.6	1	2.8	1	1.2		
なし	タンタル処理工場の廃棄物	レアメタル			2	2387.3			2	106.5
ガイドライン	酸化チタン工場の廃棄物(酸化鉄)	レアメタル					1	1.0		
ガイドライン	Th入りタングステン溶接棒	レアメタル					1	86.0		
ガイドライン	ジルコニウム鉱	レアメタル	50	4.3		3.9				
ガイドライン	耐火物(ジルコニウム)	レアメタル	5	3.8		2.6				
なし	精油所のスケール	化石燃料				53.1			6	148.8
なし	火力発電所からの廃棄物	化石燃料					4	1.7		
なし	廃油(石油汚泥など)	化石燃料	14	1.1		24.2			8	33.6
ガイドライン	酸化チタン工場の廃棄物	金属							3	1.7
ガイドライン	天然鉱石などが添加含有された製品	添加含有	21	4.8	42	1.6	21	46.3	44	5.8
該当なし*	温泉沈殿物	該当なし							1	27.0
ガイドライン	リン酸肥料工場からの固形廃棄物	非金属	4	1						
ガイドライン	リン酸肥料工場からの沈殿物	非金属			2	27.9			2	1.2
ガイドライン	リン酸肥料工場からの廃液	非金属					1	1.1		

*自然な状態で自然環境に存在する物質のため除外した【文部科学省, 放射線審議会自然放射線物質の規制免除について, 2003】

表7. 国内使用と放射能濃度調査のデータ

物質名	関連産業	物質の種類	輸入量 (トン)	国内生産量 (トン)	U-238&Ra226& Th232&Ra228& K40 放射能濃度データ 数
フェロセリウム	レアアース	産業製品	794		0
酸化ランタン	レアアース	産業製品	662		1
セリウム化合物	レアアース	産業製品	6,996		2
酸化イットリウム	レアアース	産業製品	1,298		2
ウラン鉱	レアアース	天然資源	0	0	3
鉱物(その他)	レアアース	天然資源	290,703	0	4
希土類金属など	レアアース	産業製品	6,791		4
酸化セリウム	レアアース	産業製品	2,039		6
その他希土類金属の化合物	レアアース	産業製品	2,072		12
トリウム鉱	レアアース	天然資源	0	0	22
ほう酸塩	レアメタルB	産業製品	27,165		0
炭化物(ほう素、ニオブ、タンタル)	レアメタルB、Nb、	産業製品	465		0
バリウム鉱	レアメタルBa	天然資源	21,030		2
ベリリウム及びその製品	レアメタルBe	産業製品	0		0
ベリリウムの酸化物	レアメタルBe	産業製品	0		0
ビスマス及びその製品	レアメタルBi	産業製品	242	448	0
コバルト及びその製品	レアメタルCo	産業製品	8,246	3,669	0
コバルト鉱	レアメタルCo	天然資源	0	0	0
コバルトの酸化物など	レアメタルCo	産業製品	895		0
クロム及びその製品	レアメタルCr	産業製品	3,639		0
クロムの酸化物など	レアメタルCr	産業製品	3,592		0
クロム鉱	レアメタルCr	天然資源	41,161	0	2
ゲルマニウム及びその製品	レアメタルGe	産業製品	7		0
その他金属及びその製品	レアメタルGe、V、	産業製品	155		0
ゲルマニウムの酸化物、ジルコニウムの酸化物	レアメタルGe、Zr	産業製品	5,632	10,622	4
インジウム及びその製品	レアメタルIn	産業製品	214	637	0
リチウムの酸化物など	レアメタルLi	産業製品	32,516		0
マンガン及びその製品	レアメタルMn	産業製品	59,187	331,000	0
マンガンの酸化物	レアメタルMn	産業製品	2,167		0
マンガン鉱	レアメタルMn	天然資源	794,574	0	4
モリブデン及びその製品	レアメタルMo	産業製品	1,223	692	0
モリブデンの酸化物など	レアメタルMo	産業製品	2,860		0
モリブデン鉱	レアメタルMo	天然資源	32,875	0	12
ニオブ鉱、タンタル鉱、バナジウム鉱	レアメタルNb、Ta、	天然資源	4,257	0	0
ニオブ・チタン合金	レアメタルNb、Ti	産業製品	41		0
ニッケル及びその製品	レアメタルNi	産業製品	257,546	58,778	0
ニッケルの酸化物など	レアメタルNi	産業製品	43		0
ニッケルメタルハライド水素吸蔵合金蓄電池	レアメタルNi	産業製品			2
貴金属	レアメタルPt、Pd、	産業製品	168,019	2,426	0
貴金属鉱	レアメタルPt、Pd、	天然資源	14,079	6	0
アンチモンの酸化物	レアメタルSb	産業製品	3,535	5,113	0
アンチモン鉱	レアメタルSb	天然資源	676	0	0
アンチモン及びその製品	レアメタルSb	産業製品	4,835		0
ストロンチウム、バリウム酸化物など	レアメタルSr、Ba	産業製品	3,019		0
タンタル及びその製品	レアメタルTa	産業製品	89	154	0
タリウム及びその製品	レアメタルTa	産業製品	0	1	0
タンタル処理工場からの廃棄物	レアメタルTa	副産物			4
チタン及びその製品	レアメタルTi	産業製品	4,141	91,000	0
酸化チタンを含む顔料	レアメタルTi	産業製品	48,385		2
酸化チタン工場の廃棄物(酸化鉄)	レアメタルTi	副産物			2
チタンの酸化物	レアメタルTi	産業製品	11,807	189,302	10
チタン鉱	レアメタルTi	天然資源	343,111	0	75
バナジウムの酸化物など	レアメタルV	産業製品	750		0
バナジウム及びその製品	レアメタルV	産業製品	117		0
タングステン及びその製品	レアメタルW	産業製品	1,554	3,904	0
Th入りタングステン溶接棒	レアメタルW	産業製品			2
タングステン鉱	レアメタルW	天然資源	0	0	4
ジルコニウム及びその製品	レアメタルZr	産業製品	259		0

耐火物(ジルコン)	レアメタルZr	産業製品		6,235	20
ジルコニウム鉱	レアメタルZr	天然資源	17,399	0	161
フライアッシュセメント	化石燃料	産業製品		73,000	4
精油所の製造水	化石燃料	副産物			6
泥炭灰	化石燃料	副産物			6
泥炭	化石燃料	天然資源	115,489		7
火力発電所からの廃棄物	化石燃料	副産物			8
石油、歴青油(原油)	化石燃料	天然資源	123,156,604	522,472	24
廃油(石油汚泥など)	化石燃料	副産物	1,008	332,221	60
亜炭灰	化石燃料	副産物			60
精油所のスケール	化石燃料	副産物			62
精製油	化石燃料	産業製品	25,377,932	166,582,480	83
石炭	化石燃料	天然資源	173,754,558	1,665,966	100
亜炭	化石燃料	天然資源	21,570	0	118
石炭灰	化石燃料	副産物	0	12,344,000	123
金属スラグなど	金属	副産物	277,852	36,172,000	0
メタルマッチ	金属	産業製品			2
ライター石	金属	産業製品			8
銀鉱	金属Ag	天然資源	11,160	3	0
水銀化合物	金属Ag	産業製品	0		0
アルミニウム及びその製品	金属Al	産業製品	2,625,266	4,715,635	0
アルミニウムの酸化物など	金属Al	産業製品	892,775		6
アルミ工場のスラッジ	金属Al	副産物			32
アルミニウム鉱	金属Al	天然資源	35,422	0	43
金鉱	金属Au	天然資源			2
金鉱山からの廃棄物	金属Au	副産物			2
カドミウム及びその製品	金属Cd	産業製品	0	1,804	0
銅、銅製品	金属Cu	産業製品	307,487	823,638	0
銅の酸化物など	金属Cu	産業製品	1,843		0
銅鉱	金属Cu	天然資源	5,228,679	0	9
鉄鋼	金属Fe	産業製品	6,294,962	273,060,821	0
鉄鋼製品	金属Fe	産業製品	2,365,305	131,913,440	0
硫化鉄鉱	金属Fe	天然資源	6,203		0
鉄の酸化物など	金属Fe	産業製品	12,484	136,053	2
鉄鋼工場からの廃棄物	金属Fe	副産物			3
鉄鉱	金属Fe	天然資源	99,436,638	0	34
マグネシウム及びその製品	金属Mg	産業製品	30,837		0
マグネシウム水酸化物など	金属Mg	産業製品	9,805		0
天然の硫酸マグネシウム	金属Mg	天然資源	4,276		0
天然の炭酸マグネシウム	金属Mg	天然資源	610,570		8
ニッケル鉱	金属Ni	天然資源	2,520,439	0	8
鉛及びその製品	金属Pb	産業製品	36,903	413,336	0
鉛鉱	金属Pb	天然資源	119,872	0	0
鉛の酸化物など	金属Pb	産業製品	1,864		0
すず及びその製品	金属Sn	産業製品	20,162	1,547	0
すず鉱	金属Sn	天然資源	0	0	0
すずの酸化物	金属Sn	産業製品	60		0
酸化チタン工場の廃棄物	金属Ti	副産物			12
亜鉛及びその製品	金属Zn	産業製品	32,095	526,717	0
亜鉛の酸化物など	金属Zn	産業製品	8,955	60,648	0
亜鉛鉱	金属Zn	天然資源	726,117	0	4
サーメット及びその製品	金属複合	産業製品	347		0
天然鉱石などが添加含有された製品	添加含有	産業製品			128
消石灰、生石灰など	非金属	天然資源	3,588	8,659,649	0
次亜塩素酸塩	非金属	産業製品	736	899,253	0
石英	非金属	天然資源	56,734	715,214	0
カリ肥料	非金属	産業製品	565,658	243,800	0
フッ化物	非金属	産業製品	12,382	70,100	0
石油アスファルト	非金属	天然資源	336,001		0
炭酸塩	非金属	産業製品	328,434		0
硫酸塩	非金属	産業製品	265,228		0
塩化物、臭化物、よう化物	非金属	産業製品	190,721		0
ケイ酸塩など	非金属	産業製品	77,361		0
リン酸塩	非金属	産業製品	50,034		0
オキシ金属酸塩	非金属	産業製品	44,802		0
天然黒鉛	非金属	天然資源	42,775		0

硝酸塩	非金属	産業製品	41,709		0
塩素酸塩、臭素酸塩、よう素酸塩	非金属	産業製品	37,731		0
無機酸塩類	非金属	産業製品	27,128		0
その他の岩石(花崗岩、大理石など以外)	非金属	天然資源	15,733		0
ムライト	非金属	天然資源	12,170		0
シャモットなど	非金属	天然資源	10,643		0
石綿セメント	非金属	産業製品	6,934		0
亜硫酸塩など	非金属	産業製品	6,137		0
亜二チオン酸塩など	非金属	産業製品	4,144		0
パミストーン	非金属	天然資源	4,066		0
硫化物	非金属	産業製品	1,678		0
シアン化物	非金属	産業製品	284		0
石綿	非金属	天然資源	0		0
温泉沈殿物	非金属	天然資源			1
接触岩類	非金属	天然資源			1
スラグウール、ロックウール等	非金属	産業製品	24,932		2
白亜	非金属	天然資源	240		2
石綿スレート	非金属	産業製品			2
リン酸肥料工場からの中間生成物	非金属	副産物			2
チャート及びフリント	非金属	天然資源			2
ミグマタイト	非金属	天然資源			2
ばん土頁岩	非金属	天然資源	47,116		3
角閃岩	非金属	天然資源			3
閃緑岩	非金属	天然資源		3,217,843	4
窒素肥料	非金属	産業製品	442,401	1,248,782	4
輝岩	非金属	天然資源			4
ガーネットなど	非金属	天然資源	11,379		5
花崗閃緑岩	非金属	天然資源			5
リン酸肥料工場からの廃液	非金属	副産物			5
石膏	非金属	天然資源	2,417,379	4,251,689	6
チョーク スティック	非金属	産業製品			6
千枚岩	非金属	天然資源			6
リン酸肥料工場からの沈殿物	非金属	副産物			6
アンダーサイトなど	非金属	天然資源	10,519		8
石膏ボード	非金属	産業製品	21		8
壁装飾用レンガ	非金属	産業製品			8
蛇紋岩	非金属	天然資源		9,200	9
酸性白土	非金属	天然資源		227,608	12
ろう石	非金属	天然資源		42,586	12
蛭石、真珠岩、緑泥岩	非金属	天然資源	49,843	1,325	12
ほたる石	非金属	天然資源	62,381		12
ピチューメンなど	非金属	天然資源	1,744		12
ドロマイト	非金属	天然資源	2,110,170	3,259,001	15
リン酸肥料工場からの固形廃棄物	非金属	副産物			15
スレート	非金属	天然資源	9,962	6,112,961	16
ステアタイト、タルクなど	非金属	天然資源	183,376		16
片岩	非金属	天然資源		3,825,605	19
耐火粘土	非金属	天然資源	5,057	70,945	19
ベントナイト	非金属	天然資源	113,685	281,438	20
紙	非金属	産業製品			20
黒曜石	非金属	天然資源			20
玄武岩	非金属	天然資源		5,019,068	21
流紋岩	非金属	天然資源			22
かんらん岩	非金属	天然資源		1,692,256	23
雲母	非金属	天然資源	112,409	48,359	24
カオリン	非金属	天然資源	366,236		24
片麻岩	非金属	天然資源			27
斑糲岩	非金属	天然資源		4,752,972	28
長石	非金属	天然資源	39,298	100,409	28
タイル	非金属	産業製品			29
珪岩	非金属	天然資源	87,480	9,184,591	30
凝灰岩	非金属	天然資源		4,538,666	36
石灰石	非金属	天然資源	384,475	138,533,553	43
安山岩	非金属	天然資源		41,712,155	53
リン酸・ポリリン酸	非金属	産業製品	29,744	61,129	54
リン酸石膏	非金属	産業製品			104

セメント	非金属	産業製品	80,368	53,461,683	132
リン酸肥料	非金属	産業製品	121,600	160,174	163
リン鉱	非金属	天然資源	151,477		247
大理石など	非金属	天然資源	25,778		298
花崗岩	非金属	天然資源	325,984	25,014,473	765

物質名	U-238				Ra-226			
	データ数	放射能濃度 (Bq/g)			データ数	放射能濃度 (Bq/g)		
		平均	最小	最大		平均	最小	最大
フェロセリウム	0				0			
酸化ランタン	0				0			
セリウム化合物	0				0			
酸化イットリウム	0				0			
ウラン鉱	1	7605.480	7605.480	7605.480	1	5.370	5.370	5.370
鉱物(その他)	1	11.000	11.000	11.000	1	11.930	11.930	11.930
希土類金属など	0				2	0.000	0.000	0.000
酸化セリウム	0				1	0.004	0.004	0.004
その他希土類金属の化合物	0				0			
トリウム鉱	7	29.685	18.500	58.312	4	35.795	28.600	40.580
ほう酸塩	0				0			
炭化物(ほう素、ニオブ、タンタル)	0				0			
バリウム鉱	0				1	0.004	0.004	0.004
ベリリウム及びその製品	0				0			
ベリリウムの酸化物	0				0			
ビスマス及びその製品	0				0			
コバルト及びその製品	0				0			
コバルト鉱	0				0			
コバルトの酸化物など	0				0			
クロム及びその製品	0				0			
クロムの酸化物など	0				0			
クロム鉱	0				1	0.000	0.000	0.000
ゲルマニウム及びその製品	0				0			
その他金属及びその製品	0				0			
ゲルマニウムの酸化物、ジルコニウムの酸化物	1	5.600	5.600	5.600	1	2.800	2.800	2.800
インジウム及びその製品	0				0			
リチウムの酸化物など	0				0			
マンガン及びその製品	0				0			
マンガンの酸化物	0				0			
マンガン鉱	1	0.007	0.007	0.007	1	0.003	0.003	0.003
モリブデン及びその製品	0				0			
モリブデンの酸化物など	0				0			
モリブデン鉱	3	0.030	0.000	0.068	3	0.030	0.000	0.057
ニオブ鉱、タンタル鉱、バナジウム鉱	0				0			
ニオブ・チタン合金	0				0			
ニッケル及びその製品	0				0			
ニッケルの酸化物など	0				0			
ニッケルメタルハライド水素吸蔵合金蓄電池	0				1	0.022	0.022	0.022
貴金属	0				0			
貴金属鉱	0				0			
アンチモンの酸化物	0				0			
アンチモン鉱	0				0			
アンチモン及びその製品	0				0			
ストロンチウム、バリウム酸化物など	0				0			
タンタル及びその製品	0				0			
タリウム及びその製品	0				0			
タンタル処理工場からの廃棄物	0				2	2387.250	369.500	4405.000
チタン及びその製品	0				0			
酸化チタンを含む顔料	0				0			
酸化チタン工場の廃棄物(酸化鉄)	0				0			
チタンの酸化物	1	0.001	0.001	0.001	3	0.035	0.003	0.060
チタン鉱	20	0.225	0.007	1.134	18	0.329	0.005	1.146
バナジウムの酸化物など	0				0			
バナジウム及びその製品	0				0			
タングステン及びその製品	0				0			
Th入りタングステン溶接棒	1	0.012	0.012	0.012	0			
タングステン鉱	1	0.003	0.003	0.003	1	0.001	0.001	0.001
ジルコニウム及びその製品	0				0			

耐火物(ジルコン)	5	3.760	1.900	5.800	5	2.600	1.500	3.300
ジルコニウム鉱	50	4.341	1.830	13.400	38	3.943	1.341	13.400
フライアッシュセメント	1	0.042	0.042	0.042	1	0.040	0.040	0.040
精油所の製造水	0				3	0.904	0.600	1.481
泥炭灰	2	0.111	0.102	0.121	2	0.027	0.026	0.029
泥炭	2	0.012	0.008	0.016	2	0.007	0.004	0.011
火力発電所からの廃棄物	3	0.062	0.007	0.115	1	12.900	12.900	12.900
石油、歴青油(原油)	2	0.000	0.000	0.001	10	0.108	0.000	1.031
廃油(石油汚泥など)	14	1.070	0.000	7.500	25	24.163	0.001	122.000
亜炭灰	14	0.709	0.274	1.098	23	0.605	0.149	1.063
精油所のスケール	15	0.175	0.000	2.500	26	53.068	0.001	897.500
精製油	13	0.001	0.000	0.009	35	0.002	0.000	0.018
石炭	24	0.043	0.003	0.356	28	0.038	0.005	0.321
亜炭	34	0.185	0.003	1.306	42	0.129	0.001	0.536
石炭灰	25	0.198	0.044	0.889	42	0.174	0.011	2.111
金属スラグなど	0				0			
メタルマッチ	0				1	0.000	0.000	0.000
ライター石	0				4	0.000	0.000	0.000
銀鉱	0				0			
水銀化合物	0				0			
アルミニウム及びその製品	0				0			
アルミニウムの酸化物など	2	0.135	0.000	0.270	2	0.102	0.001	0.203
アルミ工場のスラッジ	10	0.327	0.020	1.549	8	0.405	0.009	1.675
アルミニウム鉱	11	0.207	0.066	0.500	15	0.214	0.005	1.500
金鉱	1	0.047	0.047	0.047	0			
金鉱山からの廃棄物	1	0.048	0.048	0.048	0			
カドミウム及びその製品	0				0			
銅、銅製品	0				0			
銅の酸化物など	0				0			
銅鉱	8	0.216	0.000	1.495	0			
鉄鋼	0				0			
鉄鋼製品	0				0			
硫化鉄鉱	0				0			
鉄の酸化物など	0				1	0.178	0.178	0.178
鉄鋼工場からの廃棄物	1	0.014	0.014	0.014	1	0.009	0.009	0.009
鉄鉱	10	0.019	0.008	0.051	7	0.013	0.005	0.024
マグネシウム及びその製品	0				0			
マグネシウム水酸化物など	0				0			
天然の硫酸マグネシウム	0				0			
天然の炭酸マグネシウム	2	0.012	0.011	0.012	2	0.005	0.000	0.010
ニッケル鉱	2	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000
鉛及びその製品	0				0			
鉛鉱	0				0			
鉛の酸化物など	0				0			
すず及びその製品	0				0			
すず鉱	0				0			
すずの酸化物	0				0			
酸化チタン工場の廃棄物	3	0.142	0.006	0.210	3	0.562	0.007	0.860
亜鉛及びその製品	0				0			
亜鉛の酸化物など	0				0			
亜鉛鉱	1	0.012	0.012	0.012	1	0.011	0.011	0.011
サーメット及びその製品	0				0			
天然鉱石などが添加含有された製品	21	4.829	0.011	34.000	42	1.630	0.000	19.100
消石灰、生石灰など	0				0			
次亜塩素酸塩	0				0			
石英	0				0			
カリ肥料	0				0			
フッ化物	0				0			
石油アスファルト	0				0			
炭酸塩	0				0			
硫酸塩	0				0			
塩化物、臭化物、よう化物	0				0			
ケイ酸塩など	0				0			
リン酸塩	0				0			
オキシ金属酸塩	0				0			
天然黒鉛	0				0			

硝酸塩	0				0			
塩素酸塩、臭素酸塩、よう素酸塩	0				0			
無機酸塩類	0				0			
その他の岩石(花崗岩、大理石など以外)	0				0			
ムライト	0				0			
シャモットなど	0				0			
石綿セメント	0				0			
亜硫酸塩など	0				0			
亜二チオン酸塩など	0				0			
パミストーン	0				0			
硫化物	0				0			
シアン化物	0				0			
石綿	0				0			
温泉沈殿物	0				0			
接触岩類	0				1	0.035	0.035	0.035
スラグウール、ロックウール等	0				1	0.091	0.091	0.091
白亜	1	0.005	0.005	0.005	0			
石綿スレート	0				1	0.040	0.040	0.040
リン酸肥料工場からの中間生成物	1	0.350	0.350	0.350	1	0.120	0.120	0.120
チャート及びフリント	1	0.039	0.039	0.039	0			
ミグマタイト	0				1	0.028	0.028	0.028
ばん土頁岩	1	0.052	0.052	0.052	1	0.030	0.030	0.030
角閃岩	1	0.021	0.021	0.021	1	0.001	0.001	0.001
閃緑岩	2	0.027	0.020	0.034	0			
窒素肥料	0				2	0.254	0.019	0.489
輝岩	1	0.001	0.001	0.001	1	0.171	0.171	0.171
ガーネットなど	2	0.083	0.017	0.150	1	0.017	0.017	0.017
花崗閃緑岩	2	0.057	0.044	0.070	1	0.004	0.004	0.004
リン酸肥料工場からの廃液	2	0.559	0.011	1.106	2	0.083	0.006	0.160
石膏	1	0.013	0.013	0.013	2	0.017	0.016	0.017
チョークスティック	2	0.008	0.006	0.010	1	0.024	0.024	0.024
千枚岩	3	0.039	0.035	0.043	0			
リン酸肥料工場からの沈殿物	2	0.638	0.020	1.257	2	27.926	0.018	55.833
アンダルーサイトなど	2	0.028	0.014	0.042	2	0.032	0.017	0.046
石膏ボード	0				4	0.174	0.000	0.678
壁装飾用レンガ	0				4	0.018	0.010	0.028
蛇紋岩	2	0.002	0.000	0.005	3	0.001	0.000	0.004
酸性白土	3	0.025	0.019	0.034	3	0.025	0.017	0.037
ろう石	3	0.027	0.022	0.032	3	0.026	0.022	0.030
蛭石、真珠岩、緑泥岩	3	0.007	0.007	0.007	3	0.009	0.007	0.011
ほたる石	3	0.009	0.001	0.021	3	0.008	0.000	0.020
ピチューメンなど	3	0.008	0.000	0.013	3	0.011	0.000	0.017
ドロマイト	5	0.025	0.010	0.068	3	0.008	0.000	0.015
リン酸肥料工場からの固形廃棄物	4	1.086	0.400	1.952	6	0.996	0.003	2.548
スレート	4	0.052	0.033	0.086	4	0.042	0.034	0.052
ステアタイト、タルクなど	4	0.010	0.002	0.019	4	0.016	0.003	0.026
片岩	7	0.033	0.005	0.095	4	0.108	0.003	0.389
耐火粘土	5	0.079	0.004	0.242	5	0.069	0.008	0.173
ベントナイト	5	0.045	0.013	0.130	5	0.036	0.000	0.100
紙	0				10	0.004	0.001	0.008
黒曜石	5	0.065	0.033	0.120	5	0.063	0.033	0.120
玄武岩	4	0.014	0.003	0.043	9	0.072	0.000	0.494
流紋岩	6	0.038	0.015	0.061	7	0.053	0.017	0.111
かんらん岩	8	0.003	0.000	0.008	4	0.000	0.000	0.000
雲母	6	0.003	0.002	0.004	6	0.003	0.000	0.005
カオリン	9	0.113	0.048	0.166	3	0.114	0.013	0.247
片麻岩	1	0.016	0.016	0.016	14	0.045	0.001	0.166
斑糲岩	11	0.006	0.000	0.015	4	0.004	0.000	0.014
長石	7	0.056	0.000	0.220	7	0.057	0.000	0.250
タイル	0				15	0.079	0.025	0.170
珪岩	7	0.007	0.000	0.019	9	0.005	0.000	0.017
凝灰岩	4	0.017	0.006	0.022	14	0.117	0.007	0.470
石灰石	9	0.017	0.001	0.037	13	0.027	0.000	0.132
安山岩	10	0.018	0.004	0.052	17	0.025	0.003	0.066
リン酸・ポリリン酸	15	0.793	0.000	2.888	16	0.011	0.002	0.055
リン酸石膏	23	0.133	0.002	0.650	36	0.416	0.008	0.907

セメント	19	0.043	0.020	0.130	50	0.051	0.004	0.152
リン酸肥料	48	0.920	0.002	6.980	42	0.287	0.005	0.871
リン鉱	75	0.804	0.014	4.391	62	0.895	0.004	5.760
大理石など	53	0.012	0.000	0.148	97	0.018	0.000	0.309
花崗岩	198	0.047	0.001	0.588	190	0.059	0.001	0.434

物質名	Th-232				Ra-228			
	データ数	放射能濃度 (Bq/g)			データ数	放射能濃度 (Bq/g)		
		平均	最小	最大		平均	最小	最大
フェロセリウム	0				0			
酸化ランタン	0				1	7.800	7.800	7.800
セリウム化合物	0				2	0.775	0.150	1.400
酸化イットリウム	0				2	0.430	0.330	0.530
ウラン鉱	1	0.125	0.125	0.125	0			
鉱物(その他)	2	47.600	37.200	58.000	0			
希土類金属など	0				2	0.000	0.000	0.000
酸化セリウム	1	0.036	0.036	0.036	4	2.020	0.150	5.200
その他希土類金属の化合物	0				12	1.058	0.150	3.800
トリウム鉱	8	291.962	122.000	497.578	3	319.333	260.000	360.000
ほう酸塩	0				0			
炭化物(ほう素、ニオブ、タンタル)	0				0			
バリウム鉱	1	0.000	0.000	0.000	0			
ベリリウム及びその製品	0				0			
ベリリウムの酸化物	0				0			
ビスマス及びその製品	0				0			
コバルト及びその製品	0				0			
コバルト鉱	0				0			
コバルトの酸化物など	0				0			
クロム及びその製品	0				0			
クロムの酸化物など	0				0			
クロム鉱	0				1	0.001	0.001	0.001
ゲルマニウム及びその製品	0				0			
その他金属及びその製品	0				0			
ゲルマニウムの酸化物、ジルコニウムの酸化物	1	1.200	1.200	1.200	1	0.630	0.630	0.630
インジウム及びその製品	0				0			
リチウムの酸化物など	0				0			
マンガン及びその製品	0				0			
マンガンの酸化物	0				0			
マンガン鉱	1	0.004	0.004	0.004	1	0.004	0.004	0.004
モリブデン及びその製品	0				0			
モリブデンの酸化物など	0				0			
モリブデン鉱	3	0.005	0.000	0.008	3	0.005	0.000	0.010
ニオブ鉱、タンタル鉱、バナジウム鉱	0				0			
ニオブ・チタン合金	0				0			
ニッケル及びその製品	0				0			
ニッケルの酸化物など	0				0			
ニッケルメタルハライド水素吸蔵合金蓄電池	0				1	0.010	0.010	0.010
貴金属	0				0			
貴金属鉱	0				0			
アンチモンの酸化物	0				0			
アンチモン鉱	0				0			
アンチモン及びその製品	0				0			
ストロンチウム、バリウム酸化物など	0				0			
タンタル及びその製品	0				0			
タリウム及びその製品	0				0			
タンタル処理工場からの廃棄物	0				2	106.500	0.000	213.000
チタン及びその製品	0				0			
酸化チタンを含む顔料	1	0.090	0.090	0.090	1	0.040	0.040	0.040
酸化チタン工場の廃棄物(酸化鉄)	1	1.020	1.020	1.020	1	0.580	0.580	0.580
チタンの酸化物	4	0.161	0.002	0.275	2	0.051	0.012	0.090
チタン鉱	24	0.327	0.005	1.911	13	0.360	0.006	2.200
バナジウムの酸化物など	0				0			
バナジウム及びその製品	0				0			
タングステン及びその製品	0				0			
Th入りタングステン溶接棒	1	86.000	86.000	86.000	0			
タングステン鉱	1	0.002	0.002	0.002	1	0.001	0.001	0.001
ジルコニウム及びその製品	0				0			

耐火物(ジルコン)	5	0.924	0.470	1.500	5	0.638	0.340	0.850
ジルコニウム鉱	63	0.753	0.331	2.650	10	0.957	0.550	1.900
フライアッシュセメント	1	0.034	0.034	0.034	1	0.039	0.039	0.039
精油所の製造水	0				3	0.577	0.251	0.740
泥炭灰	2	0.008	0.004	0.011	0			
泥炭	2	0.003	0.001	0.005	1	0.005	0.005	0.005
火力発電所からの廃棄物	4	1.725	0.000	6.858	0			
石油、歴青油(原油)	11	0.039	0.000	0.371	1	0.027	0.027	0.027
廃油(石油汚泥など)	13	0.043	0.000	0.218	8	33.636	0.153	139.400
亜炭灰	14	0.044	0.001	0.060	9	0.052	0.030	0.100
精油所のスケール	15	0.006	0.001	0.027	6	148.771	0.091	679.500
精製油	35	0.005	0.000	0.018	0			
石炭	34	0.021	0.001	0.093	14	0.023	0.008	0.066
亜炭	36	0.017	0.001	0.049	6	0.024	0.013	0.052
石炭灰	40	0.086	0.020	0.204	16	0.047	0.006	0.100
金属スラグなど	0				0			
メタルマッチ	0				1	0.000	0.000	0.000
ライター石	0				4	0.000	0.000	0.000
銀鉱	0				0			
水銀化合物	0				0			
アルミニウム及びその製品	0				0			
アルミニウムの酸化物など	2	0.139	0.001	0.278	0			
アルミ工場のスラッジ	14	0.512	0.012	1.800	0			
アルミニウム鉱	15	0.265	0.007	0.760	2	0.121	0.082	0.160
金鉱	1	0.038	0.038	0.038	0			
金鉱山からの廃棄物	1	0.033	0.033	0.033	0			
カドミウム及びその製品	0				0			
銅、銅製品	0				0			
銅の酸化物など	0				0			
銅鉱	1	0.034	0.034	0.034	0			
鉄鋼	0				0			
鉄鋼製品	0				0			
硫化鉄鉱	0				0			
鉄の酸化物など	1	0.139	0.139	0.139	0			
鉄鋼工場からの廃棄物	1	0.004	0.004	0.004	0			
鉄鉱	11	0.007	0.000	0.020	6	0.005	0.004	0.007
マグネシウム及びその製品	0				0			
マグネシウム水酸化物など	0				0			
天然の硫酸マグネシウム	0				0			
天然の炭酸マグネシウム	2	0.002	0.002	0.002	2	0.000	0.000	0.000
ニッケル鉱	2	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000
鉛及びその製品	0				0			
鉛鉱	0				0			
鉛の酸化物など	0				0			
すず及びその製品	0				0			
すず鉱	0				0			
すずの酸化物	0				0			
酸化チタン工場の廃棄物	3	0.238	0.014	0.350	3	1.728	0.009	2.590
亜鉛及びその製品	0				0			
亜鉛の酸化物など	0				0			
亜鉛鉱	1	0.005	0.005	0.005	1	0.005	0.005	0.005
サーメット及びその製品	0				0			
天然鉱石などが添加含有された製品	21	46.297	0.010	270.000	44	5.847	0.000	93.000
消石灰、生石灰など	0				0			
次亜塩素酸塩	0				0			
石英	0				0			
カリ肥料	0				0			
フッ化物	0				0			
石油アスファルト	0				0			
炭酸塩	0				0			
硫酸塩	0				0			
塩化物、臭化物、よう化物	0				0			
ケイ酸塩など	0				0			
リン酸塩	0				0			
オキシ金属酸塩	0				0			
天然黒鉛	0				0			

硝酸塩	0				0			
塩素酸塩、臭素酸塩、よう素酸塩	0				0			
無機酸塩類	0				0			
その他の岩石(花崗岩、大理石など以外)	0				0			
ムライト	0				0			
シャモットなど	0				0			
石綿セメント	0				0			
亜硫酸塩など	0				0			
亜二チオン酸塩など	0				0			
パミストーン	0				0			
硫化物	0				0			
シアン化物	0				0			
石綿	0				0			
温泉沈殿物	0				1	27.000	27.000	27.000
接触岩類	0				0			
スラグウール、ロックウール等	1	0.021	0.021	0.021	0			
白亜	1	0.010	0.010	0.010	0			
石綿スレート	1	0.009	0.009	0.009	0			
リン酸肥料工場からの中間生成物	0				0			
チャート及びフリント	1	0.062	0.062	0.062	0			
ミグマタイト	1	0.026	0.026	0.026	0			
ばん士頁岩	0				1	0.023	0.023	0.023
角閃岩	1	0.038	0.038	0.038	0			
閃緑岩	2	0.034	0.020	0.048	0			
窒素肥料	2	0.034	0.029	0.038	0			
輝岩	2	0.082	0.002	0.163	0			
ガーネットなど	2	0.157	0.064	0.250	0			
花崗閃緑岩	2	0.049	0.045	0.053	0			
リン酸肥料工場からの廃液	1	1.091	1.091	1.091	0			
石膏	3	0.006	0.003	0.013	0			
チョークスティック	2	0.003	0.002	0.004	1	0.023	0.023	0.023
千枚岩	3	0.076	0.044	0.094	0			
リン酸肥料工場からの沈殿物	0				2	1.239	0.021	2.457
アンダラーサイトなど	2	0.027	0.013	0.041	2	0.049	0.030	0.067
石膏ボード	4	0.005	0.000	0.016	0			
壁装飾用レンガ	0				4	0.017	0.011	0.025
蛇紋岩	2	0.000	0.000	0.000	2	0.000	0.000	0.000
酸性白土	3	0.035	0.019	0.047	3	0.041	0.018	0.058
ろう石	3	0.041	0.025	0.055	3	0.054	0.044	0.061
蛭石、真珠岩、緑泥岩	3	0.026	0.020	0.032	3	0.045	0.038	0.055
ほたる石	3	0.003	0.000	0.009	3	0.004	0.000	0.008
ピチューメンなど	3	0.014	0.000	0.021	3	0.017	0.000	0.026
ドロマイト	4	0.005	0.000	0.012	3	0.003	0.000	0.005
リン酸肥料工場からの固形廃棄物	3	0.017	0.003	0.032	2	0.017	0.007	0.028
スレート	5	0.055	0.047	0.067	3	0.072	0.060	0.082
ステアタイト、タルクなど	4	0.002	0.000	0.007	4	0.002	0.000	0.010
片岩	8	0.063	0.001	0.260	0			
耐火粘土	5	0.071	0.011	0.202	4	0.064	0.013	0.093
ベントナイト	5	0.044	0.014	0.120	5	0.039	0.000	0.110
紙	0				10	0.009	0.001	0.022
黒曜石	5	0.067	0.026	0.110	5	0.077	0.028	0.120
玄武岩	7	0.125	0.001	0.733	1	0.026	0.026	0.026
流紋岩	7	0.064	0.020	0.122	2	0.016	0.014	0.018
かんらん岩	8	0.001	0.000	0.005	3	0.000	0.000	0.000
雲母	6	0.001	0.001	0.002	6	0.003	0.000	0.009
カオリン	12	0.149	0.045	0.302	0			
片麻岩	12	0.061	0.000	0.121	0			
斑禰岩	10	0.008	0.001	0.021	3	0.009	0.000	0.026
長石	7	0.031	0.000	0.120	7	0.039	0.000	0.160
タイル	4	0.059	0.051	0.073	10	0.062	0.031	0.110
珪岩	7	0.004	0.000	0.013	7	0.005	0.000	0.011
凝灰岩	14	0.102	0.007	0.313	4	0.028	0.012	0.039
石灰石	18	0.012	0.000	0.045	3	0.003	0.000	0.005
安山岩	16	0.033	0.003	0.075	10	0.021	0.000	0.060
リン酸・ポリリン酸	13	0.079	0.000	0.475	10	0.003	0.002	0.006
リン酸石膏	30	0.080	0.001	0.273	15	0.108	0.001	0.273

セメント	62	0.030	0.005	0.130	1	0.020	0.020	0.020
リン酸肥料	52	0.147	0.003	0.650	21	0.101	0.003	0.283
リン鉱	88	0.110	0.000	3.238	22	0.139	0.000	0.497
大理石など	109	0.009	0.000	0.166	39	0.000	0.000	0.003
花崗岩	290	0.082	0.001	0.906	87	0.070	0.000	0.370

物質名	K-40			
	データ数	放射能濃度 (Bq/g)		
		平均	最小	最大
フェロセリウム	0			
酸化ランタン	0			
セリウム化合物	0			
酸化イットリウム	0			
ウラン鉱	1	0.010	0.010	0.010
鉱物(その他)	0			
希土類金属など	0			
酸化セリウム	1	0.482	0.482	0.482
その他希土類金属の化合物	0			
トリウム鉱	2	14.253	11.300	17.205
ほう酸塩	0			
炭化物(ほう素、ニオブ、タンタル)	0			
バリウム鉱	1	0.000	0.000	0.000
ベリリウム及びその製品	0			
ベリリウムの酸化物	0			
ビスマス及びその製品	0			
コバルト及びその製品	0			
コバルト鉱	0			
コバルトの酸化物など	0			
クロム及びその製品	0			
クロムの酸化物など	0			
クロム鉱	1	0.000	0.000	0.000
ゲルマニウム及びその製品	0			
その他金属及びその製品	0			
ゲルマニウムの酸化物、ジルコニウムの酸化物	1	0.030	0.030	0.030
インジウム及びその製品	0			
リチウムの酸化物など	0			
マンガン及びその製品	0			
マンガンの酸化物	0			
マンガン鉱	1	0.000	0.000	0.000
モリブデン及びその製品	0			
モリブデンの酸化物など	0			
モリブデン鉱	3	0.034	0.000	0.058
ニオブ鉱、タンタル鉱、バナジウム鉱	0			
ニオブ・チタン合金	0			
ニッケル及びその製品	0			
ニッケルの酸化物など	0			
ニッケルメタルハライド水素吸蔵合金蓄電池	0			
貴金属	0			
貴金属鉱	0			
アンチモンの酸化物	0			
アンチモン鉱	0			
アンチモン及びその製品	0			
ストロンチウム、バリウム酸化物など	0			
タンタル及びその製品	0			
タリウム及びその製品	0			
タンタル処理工場からの廃棄物	0			
チタン及びその製品	0			
酸化チタンを含む顔料	0			
酸化チタン工場の廃棄物(酸化鉄)	0			
チタンの酸化物	3	0.005	0.000	0.010
チタン鉱	16	0.064	0.006	0.333
バナジウムの酸化物など	0			
バナジウム及びその製品	0			
タングステン及びその製品	0			
Th入りタングステン溶接棒	0			
タングステン鉱	1	0.000	0.000	0.000
ジルコニウム及びその製品	0			

耐火物(ジルコン)	5	0.033	0.008	0.065
ジルコニウム鉱	51	0.135	0.000	1.256
フライアッシュセメント	1	0.120	0.120	0.120
精油所の製造水	0			
泥炭灰	2	0.089	0.070	0.108
泥炭	2	0.017	0.006	0.028
火力発電所からの廃棄物	4	2.868	0.030	10.983
石油、歴青油(原油)	11	0.019	0.000	0.053
廃油(石油汚泥など)	16	1.887	0.004	21.500
亜炭灰	20	0.304	0.009	0.502
精油所のスケール	5	13.929	0.009	65.100
精製油	35	0.018	0.000	0.057
石炭	30	0.179	0.026	0.706
亜炭	35	0.084	0.006	0.191
石炭灰	37	0.343	0.088	1.109
金属スラグなど	0			
メタルマッチ	0			
ライター石	0			
銀鉱	0			
水銀化合物	0			
アルミニウム及びその製品	0			
アルミニウムの酸化物など	2	0.023	0.010	0.035
アルミ工場のスラッジ	3	0.066	0.048	0.103
アルミニウム鉱	6	0.038	0.013	0.091
金鉱	1	0.665	0.665	0.665
金鉱山からの廃棄物	1	0.578	0.578	0.578
カドミウム及びその製品	0			
銅、銅製品	0			
銅の酸化物など	0			
銅鉱	1	0.257	0.257	0.257
鉄鋼	0			
鉄鋼製品	0			
硫化鉄鉱	0			
鉄の酸化物など	1	0.756	0.756	0.756
鉄鋼工場からの廃棄物	1	0.005	0.005	0.005
鉄鉱	11	0.083	0.000	0.331
マグネシウム及びその製品	0			
マグネシウム水酸化物など	0			
天然の硫酸マグネシウム	0			
天然の炭酸マグネシウム	2	0.000	0.000	0.000
ニッケル鉱	2	0.000	0.000	0.000
鉛及びその製品	0			
鉛鉱	0			
鉛の酸化物など	0			
すず及びその製品	0			
すず鉱	0			
すずの酸化物	0			
酸化チタン工場の廃棄物	3	0.189	0.000	0.284
亜鉛及びその製品	0			
亜鉛の酸化物など	0			
亜鉛鉱	1	0.063	0.063	0.063
サーメット及びその製品	0			
天然鉱石などが添加含有された製品	23	0.604	0.000	2.900
消石灰、生石灰など	0			
次亜塩素酸塩	0			
石英	0			
カリ肥料	0			
フッ化物	0			
石油アスファルト	0			
炭酸塩	0			
硫酸塩	0			
塩化物、臭化物、よう化物	0			
ケイ酸塩など	0			
リン酸塩	0			
オキシ金属酸塩	0			
天然黒鉛	0			

硝酸塩	0			
塩素酸塩、臭素酸塩、よう素酸塩	0			
無機酸塩類	0			
その他の岩石(花崗岩、大理石など以外)	0			
ムライト	0			
シャモットなど	0			
石綿セメント	0			
亜硫酸塩など	0			
亜二チオン酸塩など	0			
パミスストーン	0			
硫化物	0			
シアン化物	0			
石綿	0			
温泉沈殿物	0			
接触岩類	0			
スラグウール、ロックウール等	1	0.087	0.087	0.087
白亜	1	0.087	0.087	0.087
石綿スレート	1	0.083	0.083	0.083
リン酸肥料工場からの中間生成物	1	3.200	3.200	3.200
チャート及びフリント	1	1.583	1.583	1.583
ミグマタイト	1	0.964	0.964	0.964
ばん士頁岩	1	0.515	0.515	0.515
角閃岩	1	0.032	0.032	0.032
閃緑岩	2	0.550	0.410	0.690
窒素肥料	2	0.158	0.046	0.270
輝岩	2	0.531	0.015	1.048
ガーネットなど	1	0.009	0.009	0.009
花崗閃緑岩	2	1.104	0.893	1.315
リン酸肥料工場からの廃液	2	0.107	0.003	0.210
石膏	3	0.439	0.070	1.142
チョークスティック	3	0.155	0.018	0.412
千枚岩	3	0.576	0.412	0.776
リン酸肥料工場からの沈殿物	1	0.560	0.560	0.560
アンダルーサイトなど	2	0.336	0.012	0.660
石膏ボード	4	0.015	0.004	0.024
壁装飾用レンガ	0			
蛇紋岩	2	0.000	0.000	0.000
酸性白土	3	0.097	0.061	0.120
ろう石	3	0.102	0.043	0.180
蛭石、真珠岩、緑泥岩	3	1.367	1.300	1.400
ほたる石	3	0.000	0.000	0.000
ピチューメンなど	3	0.173	0.000	0.260
ドロマイト	5	0.078	0.000	0.286
リン酸肥料工場からの固形廃棄物	4	0.377	0.003	1.200
スレート	5	0.928	0.430	1.200
ステアタイト、タルクなど	4	0.000	0.000	0.000
片岩	8	0.583	0.025	0.979
耐火粘土	5	0.253	0.000	0.620
ベントナイト	5	0.204	0.000	0.350
紙	10	0.008	0.002	0.019
黒曜石	5	1.180	1.100	1.200
玄武岩	8	0.797	0.160	2.354
流紋岩	9	0.720	0.157	1.608
かんらん岩	9	0.019	0.000	0.114
雲母	6	2.733	2.700	2.900
カオリン	12	0.238	0.008	1.220
片麻岩	12	0.955	0.055	2.341
斑禰岩	11	0.144	0.000	0.540
長石	7	2.311	0.180	3.600
タイル	11	0.609	0.260	1.228
珪岩	7	0.064	0.000	0.140
凝灰岩	14	1.150	0.260	2.135
石灰石	18	0.275	0.000	2.493
安山岩	17	0.585	0.200	0.950
リン酸・ポリリン酸	10	0.052	0.001	0.308
リン酸石膏	20	0.069	0.000	0.226

セメント	62	0.206	0.000	0.883
リン酸肥料	29	0.550	0.003	4.670
リン鉱	46	0.206	0.000	1.202
大理石など	108	0.083	0.000	1.353
花崗岩	287	1.128	0.045	10.990

※本成果の社会還元

得られた成果をウェブサイトで公開することは、研究成果を広く一般社会に還元するためにも重要と考える。近年、量研の NORM データベースが開発され（図 4）【量研, NORM データベース, 2021】、これを活用して情報の公開を検討することは非常に有効な手段と考える。この NORM データベースは 1 日に 10-30 件程度のアクセスがあり、NORM に関連する研究情報を社会に提供するための WEB ツールとして運用されている。



図 4. 量研の自然起源放射性物質 (NORM) データベース

<https://www.nirs.qst.go.jp/db/anzendb/NORMDB/index.php>

本年度は、本事業により得られた結果を用いた NORM データベース更新の可能性を検討した。本研究で得られた成果を量研の NORM データベースで公開するにあたっては、いくつか対応すべき技術的な課題が表面化しつつある。量研の NORM データベースは 2000 年代に作成されたものであり、それに使用されているソースコードの記述な

どが古いため長期的な運用が難しくなる可能性があり、ソースコードを含めた全体的な改修が必要である。NORM データベースの改修は将来的な課題として対処することになるが、本年度では、将来の公開に伴う社会への還元をより効果的にするために、様々な NORM 関係機関に積極的に NORM データベースをアピールし、成果の普及に向けた活動を行った。また、将来の円滑な公開を踏まえデータベースに組み込みやすい形式にデータを整えた。

IV. 今年度の成果の概要

1. 成果の概要

NORM の規制管理の在り方について、我が国においても検討が進められているが、NORM は多種多様であり関連するデータは無数に存在するため、国内規制を検討できるほど情報が整理されていない。この諸問題に対して、本年度は我が国の実情に応じた最新のデータ（天然資源の国内使用量と放射能濃度）を入手して整理を行い、NORM の国内規制の検討に繋がるような情報（次に検討すべき新たな課題）を示せたことが今回の成果である。具体的には、下記である。

①喫緊の課題として期待される調査

「レアアース・レアメタル」、「化石燃料」の関連する物質のいくつかは、1Bq/g を超える可能性が高く、国内管理体系外（NORM ガイドライン対象外）となっている可能性がある。

- ・「レアアース・レアメタル」については、国内利用が確認されているものの放射能濃度が不明の物質が多い。したがって、次のステップとして、放射能濃度調査の実施が期待される。
- ・「化石燃料」については、関連物質の濃度の情報が比較的多く集まってきている。したがって、次のステップとして、これらの濃度データを参考に利用実態に応じた被ばく調査が期待される。

これらの調査については、現在のコロナ禍の状況を踏まえ、実施可能な調査（例えば、文献調査やシナリオ計算など）を検討して実施していくことが期待される。

②上記以外の物質

上述の以外の物質、例えば、国内利用されているが 1Bq/g を超える可能性が低

い物質（あるいは濃度が不明なもの）については、リスクコミュニケーションの観点から「濃度が低い」ことをデータとして示すことも重要であるため、社会のニーズを踏まえながら必要に応じて調査を行うことが期待される。

NORM については、どの物質がどこでどのように利用されているのか、そのパターンは無数に考えられ、それらすべてを把握するのは難しい。したがって、利用者が NORM はどのようなものなのか知ったうえで、自主的な管理等のもと取り扱いに気を付けられるように、NORM に関する様々な最新データを公開しておくことが大切である。量研では、NORM 被ばくに関するデータベースを一般に公開してきた。この取り組みは利用者の自主的かつ安全な NORM の取り扱いにつながるものであり、今後も NORM 調査を行い、最新の情報を用いてデータベースの拡充を続けていくことが重要であろう。

2. 事業の実績

外部への情報発信として、ワークショップ、学会発表、審議会での報告等を 5 件行った。それぞれの情報は下記である。

○ワークショップ

- ・Kazuki Iwaoka. Current status of NORM survey in Japan. 2021 FNCA Workshop on Radiation Safety and Radioactive Waste Management Project. 10 December, 2021, Tokyo (web), Japan.

○学会発表

- ・Kazuki Iwaoka, Kazuaki Yajima, Reiko Kanda. Current status of comprehensive survey on naturally occurring radioactive material. The

64th Annual Meeting of the Japanese Radiation Research Society.

September 22-24, 2021, Mito (web), Japan.

○審議会での報告

- ・岩岡和輝：国内における NORM 被ばくの実態，第 153 回放射線審議会，2021 年
6 月 23 日

○講演会、セミナー

- ・岩岡和輝：NORM に関する最近の話題—NORM 被ばくに関するデータの調査状況—，令和 3 年度「放射線安全管理講習会」，公益財団法人原子力安全技術センター，東京(web)，2021. 11. 25
- ・岩岡和輝：NORM に関する最近の話題—NORM 被ばくに関するデータの調査状況—，令和 3 年度「放射線安全管理講習会」，公益財団法人原子力安全技術センター，東京(web)，2021. 11. 18

令和 3 年度 原子力規制庁

放射線安全規制研究戦略的推進事業 調査報告書

水中の放射性ストロンチウムの 安全、迅速、安価な分析法の開発

令和 4 年 3 月

東京慈恵会医科大学 箕輪はるか

筑波大学 青山道夫

愛知医科大学 小島貞男、有信哲哉 緒方良至

日立製作所 加藤結花

日本化学工業 宮部慎介

荏原製作所 佐久間貴志

目次

1	研究背景と目的	1
2	研究手法	2
2.1	Sr 吸着剤	2
2.2	迅速測定法	2
2.3	精密測定法	2
3	基礎的実験	4
3.1	Sr 吸着率の確認	4
3.1.1	ピュアセラム MAq の ^{85}Sr を用いた Sr 吸着率の測定 (2021 年 10 月実施)	4
3.1.2	新ロットのピュアセラム-MAq の Sr 吸着率の評価 (2021 年 12 月実施)	5
3.1.3	ピュアセラム MAq への Sr 吸着率の確認 (2022 年 1 月実施)	7
3.2	Y 吸着率の確認 (2021 年 11 月実施)	8
3.3	Ba の影響評価 (2021 年 9 月実施)	10
3.4	Pb など天然放射能の影響評価	15
4	分析手法の開発	16
4.1	迅速測定法の確立	16
4.1.1	ピュアセラム MAq による ^{90}Sr 迅速測定法の確立 (2022 年 1 月実施)	16
4.1.2	^{90}Sr をスパイクした海水を用いた迅速測定法の検証 (2022 年 1 月実施)	18
4.2	精密測定法における Y 溶出 (ミルキング) 方法の検討	20
4.2.1	ピュアセラム MAq からの硫酸による ^{90}Y の溶出 (2021 年 11,12 月実施)	20
4.2.2	酸溶出による ^{90}Y ミルキング法の検討(2021 年 12 月実施)	24
4.2.3	EDTA による脱離と $\text{Y}(\text{OH})_3$ 沈殿生成の検討 (2022 年 1 月実施)	25
4.2.4	H_2O_2 による EDTA 分解と Fe 共沈法の検討 (2022 年 2 月実施)	26
4.2.5	EDTA によるピュアセラム MAq 溶解法の検討 (2022 年 1 月実施)	27
4.2.6	EDTA 存在下における $\text{Y}(\text{OH})_3$ 沈殿生成実験 (2022 年 2 月実施)	30

4.3	大容量試料への適用.....	32
4.3.1	ピュアセラム MAq の EDTA 溶解と Y 回収方法の検討 1 (2022 年 2 月) .	32
4.3.2	ピュアセラム MAq の EDTA 溶解と Y 回収方法の検討 2 (2022 年 2 月) .	34
4.4	実海水への応用 (2022 年 1 月実施)	36
5	議論	38
5.1	ピュアセラム MAq への Sr の吸着率について	38
5.2	Sr 吸着の条件	39
5.3	⁹⁰ Y ミルキング操作の方法について	40
5.4	検出下限濃度	42
5.4.1	迅速測定.....	42
5.4.2	精密測定.....	42
5.5	放射線測定における妨害核種の評価.....	43
5.5.1	迅速測定.....	43
5.5.2	精密測定.....	43
6	課題と今後の展望.....	44
6.1	実験手法における課題.....	44
6.2	測定における課題.....	45
7	まとめ.....	47
7.1	本研究において確立した迅速測定法.....	47
7.2	本研究において提案する精密測定法.....	48
7.3	Sr 分析法まとめ	49
	参考文献	50
	研究体制	51
	付録	52

1 研究背景と目的

放射性ストロンチウム(^{90}Sr 、 ^{89}Sr)は、環境モニタリングにおける重要な核種であるが、分析は容易ではない。文部科学省放射能測定シリーズ2「放射性ストロンチウム分析法」(以下「公定法」)に示される方法では、多量の劇物を用い、複雑な化学操作が必要で、完了まで少なくとも約3週間を要する。近年、放射性ストロンチウムの迅速測定の開発が進んでいるが、課題が多く、公定法の改訂は進んでいない。**放射性ストロンチウムの安全、迅速、安価な分析法**を開発することにより、放射性ストロンチウムの濃度分布やその時間変動の正確な把握が可能となり、放射線防護措置の的確な実施にも役立つ。

本研究では、環境水の放射性ストロンチウム(^{90}Sr ・ ^{89}Sr)の安全、迅速、安価な分析法の開発を目的とする。**迅速測定**【原子力事故時を想定し、排水中の濃度限度(^{90}Sr : $30 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 ^{89}Sr : $300 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$)を迅速に確認】と、**精密測定**【平常時のモニタリングを想定し、 ^{90}Sr を $0.001 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ 程度まで分析】の二つの分析法の開発を目指す。

化学操作は、放射性トレーサー ^{90}Sr 、 ^{85}Sr を加えた海水・陸水を作成し、新規に開発されたSr吸着剤(特許 日本化学工業株式会社 吸着剤およびその製造方法 特許第 5890568 号 2016-5-19)を加えて攪拌した後、Sr吸着剤を回収、測定する。妨害核種として、天然放射性核種であるRa、Ac、 ^{210}Pb など、また、事故時に放出が予想される ^{140}Ba などの挙動も解析する。実際の海水を本法に適用し、従来法と比較する。

本研究は①化学操作が簡便で**迅速**、②劇物を使用せず**安全**、③**安価**、という特色がある。文部科学省が制定した「放射性ストロンチウム分析法」を改訂するための基礎資料となることが期待される。本法により、測定頻度・箇所が増加、コスト低減が可能となる。安心できる情報をすみやかに公開でき、一般公衆の被ばくリスクを低く抑え、健康・安全に貢献すると思われる。

2 研究手法

2.1 Sr 吸着剤

使用した Sr 吸着剤は「ピュアセラム®MAq」（荏原製作所・日本化学工業、以下「P-MAq」）という名称で、主成分はケイ酸バリウム BaSi_2O_5 であり、水に不溶、広い温度範囲で安定な、白色の粉末である（図 2.1）。Sr を選択的に吸着し、Na, Ca, K, Mg などの海水中の主成分元素を吸着しないことから、海水中の放射性核種 ^{89}Sr 、 ^{90}Sr の捕集剤として有用であると期待されている。淡水に対して硫酸イオン SO_4^{2-} を加えることで Sr をほぼ定量的に吸着・分離することができるため、難溶性の SrSO_4 が本吸着剤への吸着挙動に関与していることが示唆される。

2.2 迅速測定法

原子力事故時を想定し、迅速に結果を確認することを目的とする。海水に、Sr 吸着剤を加えて 2 時間振とうする。吸引ろ過でろ紙上に Sr 吸着剤を回収する。乾燥後ポリエチレンフィルムで覆い、ベータ線を測定し Sr 濃度を求める。検出感度は、 ^{90}Sr および ^{89}Sr について排水中濃度限度 $30 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $300 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ の 10 分の 1 を目指す。

2.3 精密測定法

平常時のモニタリングを想定している。 ^{90}Sr を含む海水に Sr 吸着剤を加えて 2 時間攪拌する。遠心分離により Sr 吸着剤を溶液と分離する。その後約 3 週間、 ^{90}Sr が壊変し ^{90}Y が

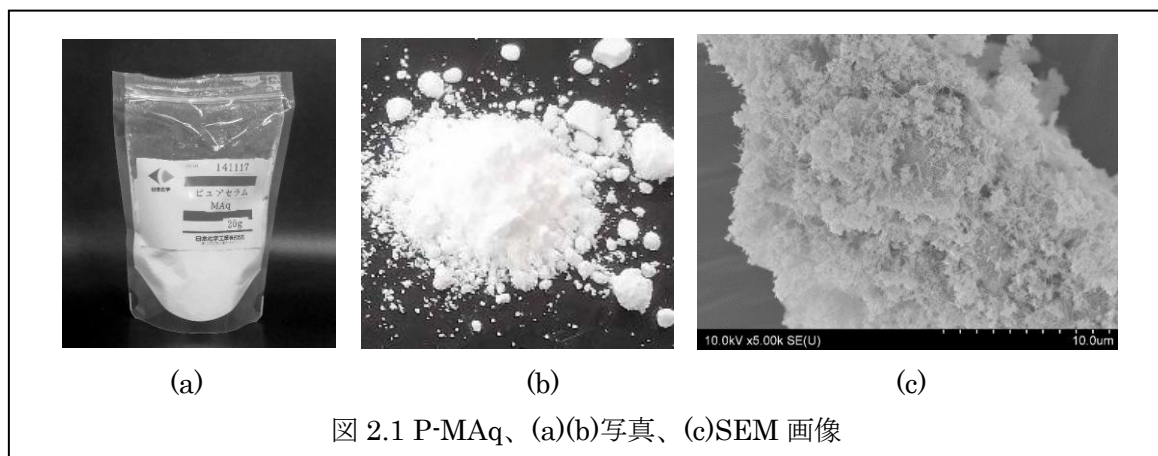
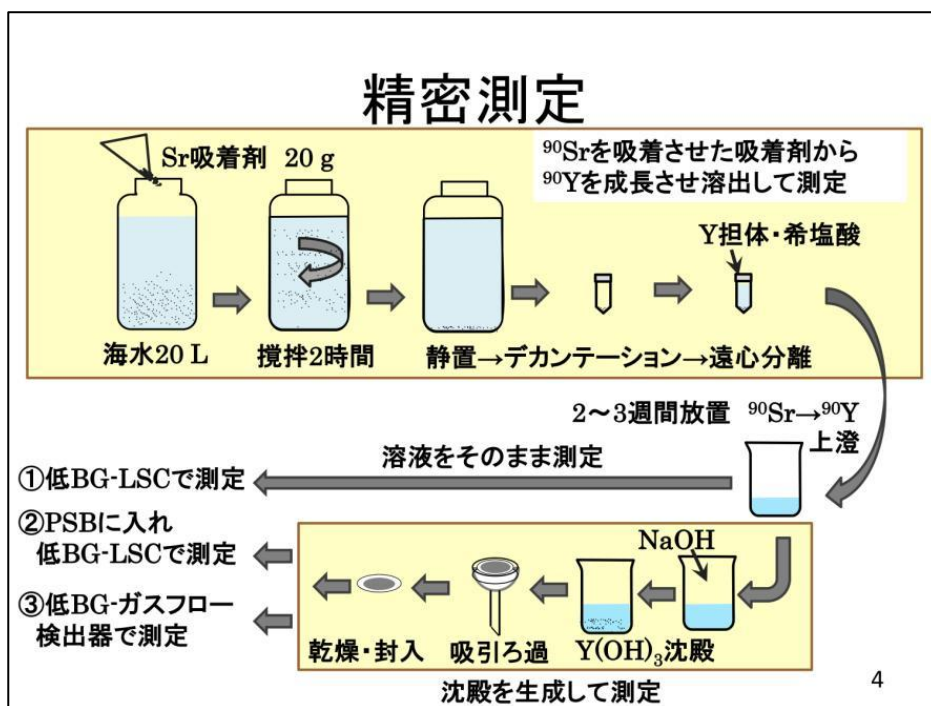
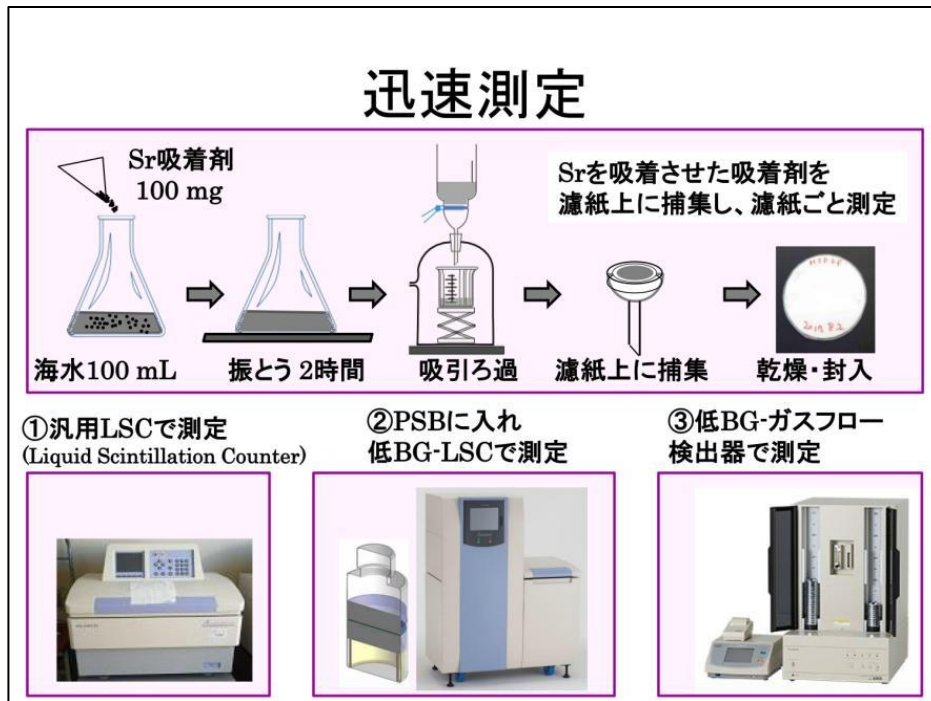


図 2.1 P-MAq、(a)(b)写真、(c)SEM 画像

成長するのを待つ。 ^{90}Y の成長後、 Y を水酸化物沈殿として回収し、吸引ろ過してろ紙上に収集し、乾燥後ポリエチレンフィルムで覆い、ベータ線を測定する。現在の海洋の平均的な ^{90}Sr 濃度である $0.001 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 程度が測定可能な方法となる。



3 基礎的実験

3.1 Sr 吸着率の確認

3.1.1 ピュアセラム MAq の ^{85}Sr を用いた Sr 吸着率の測定(2021 年 10 月実施)

(1) 実験の目的

長期間保存した P-MAq への Sr 吸着能を ^{85}Sr により確認する。

(2) 実験概要

300 mL 三角フラスコに人工海水¹200 mL(0.01M HCl 酸性)に ^{85}Sr 溶液を 700 μL (40 kBq)加え、攪拌後 2 mL 分取し、試験管に入れ、井戸型 Ge 半導体検出器(GWL-120230、結晶容積 120 cm^3 , ORTEC)を用いて γ 線測定を行なった。この人工海水試料に P-MAq を 200 mg に加え、マグネットスターラを用いて攪拌した。攪拌開始から 5 分後、30 分後、1 時間後、2 時間後、4 時間後にピペットを用いて懸濁液を各々 2 mL ずつ分取した。懸濁液は先端にシリンジフィルター (0.45 μm) を取り付けた 3 mL 注射器を用いてろ過し、溶液と P-MAq に分離した。溶液は試験管に採取し、液体の質量を秤量した。攪拌開始からの Sr 吸着率を測定するために、井戸型 Ge 半導体検出器を用いて、 ^{85}Sr の γ 線を測定した。

(3) 得られた結果

^{85}Sr の γ 線測定から得られた溶液中の Sr 残存率を図 3.1.1 に示す。以前の結果では 2 時間の攪拌で 98.5% の Sr が吸着し残存率は 1.5% だったが、本実験では約 20% と大きな値を示した。保存中に P-MAq の Sr 吸着能が劣化したと考えられる。

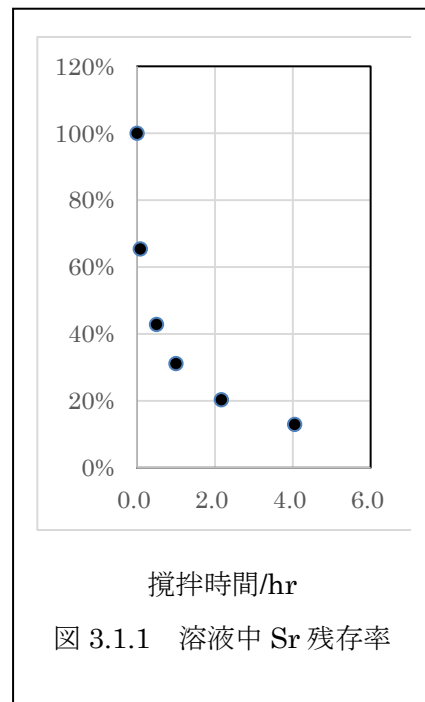


図 3.1.1 溶液中 Sr 残存率

¹ ダイゴ人工海水 SP、日本製薬(株)

3.1.2 新ロットのピュアセラム-MAq の Sr 吸着率の評価 (2021 年 12 月実施)

(1) 実験の目的

P-MAq の Sr 吸着能を測定する。これまでの実験で P-MAq を長期保存すると Sr 吸着能が低下したため、その原因を推察し吸着能の低下を防ぐことを目的とする。

(2) 実験の概要

日本化学工業社に作製を依頼した新しいロットの P-MAq を用いて、人工海水の条件下で ^{85}Sr による Sr 吸着実験を実施し、Sr 吸着能を評価する。

(3) 実験操作

- i. ^{85}Sr 約 7 kBq をスパイクした人工海水 100 mL に、新 P-MAq を 25 mg (J1L-21), 50 mg (J1L-22), 100 mg (J1L-23), 150 mg (J1L-24), 200 mg (J1L-25) 加え、スターラーで攪拌した。
- ii. 30 分、60 分、120 分、240 分後に懸濁液を 2 mL 分取し、シリンジフィルターでろ過した後、シリンジフィルターおよびろ液をガンマカウンタ(WIZARD², PerkinElmer)で測定した。
- iii. 240 分後に試料採取したのち、攪拌を停止し、一晩放置した。
- iv. 試料を遠心分離により P-MAq と上清に分けた。
- v. 上清を三角フラスコに移し、新 P-MAq を 25 mg (J1L-21), 50 mg (J1L-22), 100 mg (J1L-23), 150 mg (J1L-24), 200 mg (J1L-25) 加え、スターラーで攪拌した。
- vi. 30 分、60 分、120 分、240 分後に懸濁液を 2 mL 分取し、シリンジフィルターでろ過した後、シリンジフィルターおよびろ液をガンマカウンタで測定した。
- vii. 240 分後に試料採取したのち、攪拌を停止し、試料を遠心分離により P-MAq と上清に分けた。

(4) 得られた結果

^{85}Sr 添加量を100とした場合の溶液および沈殿における ^{85}Sr 量の比を表3.1に示した。図3.1.2には1回目の、図3.1.3には2回目の攪拌における溶液中の値のグラフを示した。海水100 mLに対してP-MAq 100 mg、4時間攪拌の条件での吸着率は80%程度であり、以前実施した同様の実験よりも値が低い結果となった。海水100 mLに対してP-MAqを150 mg使用し、1回目の上清に再びP-MAqを加えて攪拌することにより、98%以上の吸着率でSrが吸着できることがわかった。

表 3.1 P-MAq への ^{85}Sr の吸着率

	P-MAq mg	1回目 (4時間攪拌後)			2回目 (4時間攪拌+4時間攪拌後)			合計
		溶液残 存分	途中測定 ロス分	沈殿吸着分 (溶液残存 分より算出)	溶液残 存分	途中測 定ロス分	沈殿吸着 分(溶液 残存分より 算出)	沈殿吸 着率
		%	%	%	%	%	%	%
J1L-21	25	71.4	6.66	21.9	23.3	5.01	43.1	65.0
J1L-22	50	52.2	5.43	42.4	2.87	1.72	47.6	90.0
J1L-23	100	18.0	2.92	79.1	0.19	0.28	17.5	96.6
J1L-24	150	5.92	1.01	93.1	0.19	0.12	5.62	98.7
J1L-25	200	6.20	0.96	92.8	0.22	0.12	5.86	98.7

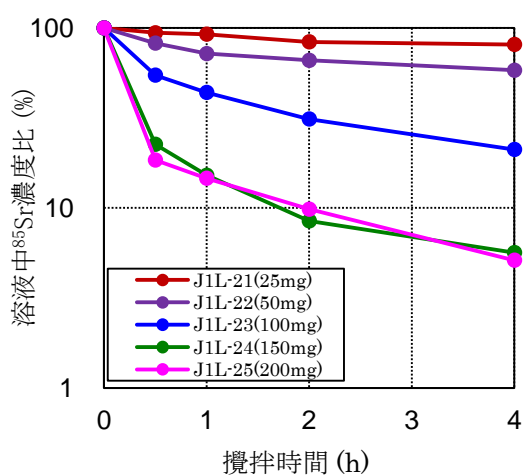


図 3.1.2 1回目攪拌における溶液中 ^{85}Sr 濃度比の変化

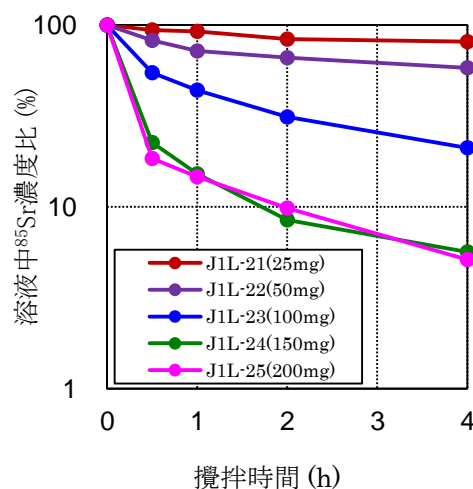


図 3.1.3 2回目攪拌における溶液中 ^{85}Sr 濃度比の変化

3.1.3 ピュアセラム MAq への Sr 吸着率の確認 (2022 年 1 月実施)

(1) 実験の目的

^{85}Sr トレーサーを添加した人工海水を用いて P-MAq へ Sr を定量的に吸着させる手順を確認する。これまでの実験では Sr 吸着率が 98%であったが、新しいロットの P-MAq では吸着率が低下しているようなので、2 回の操作で 98%以上吸着できるか確認する。

(2) 実験の概要

^{85}Sr トレーサーを添加した人工海水に新しいロットの P-MAqを加えて攪拌し、上清と沈殿物とに分離してガンマカウンタで測定する。

(3) 実験操作

- i. 人工海水 81.8 mL を三角フラスコに入れ、 ^{85}Sr (約 12 kBq/0.2g at 2022/1/17) 200 μL を加えた。混合後 2 mL 分取し、ポリバイアルに入れガンマカウンタで測定した。(J2A-2a)
- ii. 三角フラスコ内の溶液 80 mL に P-MAq を 119.9 mg 加え 2 時間攪拌した。
- iii. 懸濁液をポリ遠心管(50 mL)2 本に分けて、3000 rpm で 10 分の遠心分離後、P-MAq と上清に分けた。上清を 2 mL 分取し、ポリバイアルに入れガンマカウンタで測定した。(J2A-2b : 2.0301 g)。
- iv. 上清を用いて P-MAq を一本の遠心管に集め、遠心分離後、上清を取り除いたのち (上清全量 78 mL : 78.3189 g)、P-MAq を 0.025M Na_2SO_4 を 10 mL で洗浄した。
- v. 洗浄液 (10 mL) をプラバイアルに移して秤量し、ガンマカウンタで測定した。(J2A-2c : 9.9449 g)
- vi. P-MAq が入っている遠心管の γ 線測定を Ge 検出器で行った。
- vii. 上清 (78 mL : 78.3189 g) を三角フラスコに移し、P-MAq を 60.2 mg 追加し、再吸着操作を行った。
- viii. 1 時間の攪拌の後に、2 本の遠心管に移し、3000 rpm で 10 分の遠心分離を行った。
- ix. 上清の大部分を別の容器に移した後に、2 本の遠心管内の P-MAq を 1 本に集めて、遠心分離を行った。

- x. 上清を除いた遠心管内の P-MAq の γ 線測定を Ge 検出器で行った。(J2A-2e)
- xi. 上清より 20 mL を分取しガンマカウンタで測定した。(J2A-2f: 19.5378 g) (上清全量 57.3495 g)

(4) 結果

新ロットの P-MAq の Sr 吸着率は平均 93%であり、予備実験の結果 (98%) には劣るが、迅速測定法に使用可能であると判断した。また Sr を吸着させ P-MAq を取り除いた溶液に、さらに P-MAq を加えて 2 回吸着させることにより、98%の吸着を達成した。

3.2 Y 吸着率の確認 (2021 年 11 月実施)

(1) 実験の目的

^{90}Y の P-MAq への吸着率を確認する

(2) 試料

実験 J1K-2 の AnaLig-Sr²通過液(^{90}Y)、人工海水、HCl、Na₂SO₄溶液

(3) 実験操作

- i. 下記の組成の液 100 mL に、AnaLig-Sr 通過液(^{90}Y) 1 mL 加えた。(各全量 102 mL)
 - J1K-41:人工海水 0.01M-HCl 101 mL
 - J1K-42: (人工海水 0.01M HCl 101 mL + conc.HCl 1 mL) - 1 mL
 - J1K-43: (純水 0.1M HCl 100 mL + Na₂SO₄溶液 2 mL) - 1 mL
- ii. 各試料から、2 mL 採取し、Clearsol II 18 mL を加え、LSC で測定した。測定試料 a
- iii. ^{90}Y を添加した溶液に P-MAq を 100 mg 加え、2 時間攪拌した。
- iv. 攪拌後の溶液から 2 mL 採取し、シリンジフィルターでろ過した後、液シンカクテルを

² 付録参照

18 mL 加え、LSC で測定した。測定試料 b

(4) 結果

J1K-41a, 42a, 43a を 100 とし、それに対する 41b, 42b, 43b の割合を求めた。b の試料は、 ^{90}Y と考えられるので、計数効率を 99% とした。上清における ^{90}Y の回収率は 90% 以上であった。即ち P-MAq への ^{90}Y の吸着率は 10% 以下であった。

表 3.2 J1K-4 測定結果

Sample	NET cpm	Eff %	Activity Bq	Yield %
J1K-41a	624	97.49	10.7	100.0
J1K-41b	605	99.00	10.2	95.5
J1K-42a	655	97.49	11.2	100.0
J1K-42b	601	99.00	10.1	90.4
J1K-42a	620	96.80	10.7	100.0
J1K-43b	571	99.00	9.6	90.0

3.3 Baの影響評価（2021年9月実施）

(1) 実験の目的

^{133}Ba トレーサーを添加した海水と、海水と同程度の Ba 濃度の人工海水からの Sr 特異的吸着剤 (P-MAq) への Ba 吸着率を測定する。

(2) 実験概要

^{133}Ba トレーサーを、現有の ^{133}Ba 標準溶液 ($9.606 \times 10^4 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 、2021/2/1) を希釈して調製した。 ^{133}Ba トレーサーを添加した人工海水に P-MAq を加え、2 時間攪拌後、吸着ろ過し、P-MAq とろ液に分離した。P-MAq への Ba の吸着率およびろ液への残存率を得るために必要な、 ^{133}Ba 面線源と ^{133}Ba 体積線源を作製した。それぞれの試料について、Ge 半導体検出器を用いて γ 線測定を行なった。P-MAq と面線源は測定器との距離を 57 mm で、ろ液と体積線源については試料を測定器上に直接置いたジオメトリーで測定を行なった。得られた測定結果から Ba のろ液中への残存率および Ba の P-MAq への吸着率を得た。

(3) 分析試料および標準試料

作製した線源および調製した試料を表 3.3.1 に示す。Ba 濃度は ^{133}Ba 標準溶液の Ba キャリアー濃度 (BaCl_2 、 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$) を基に算出した。

表 3.3.1 試料一覧

試料	^{133}Ba 溶液/g	P-MAq/ mg	Ba 濃度/ppm
SEP-02(面線源)	0.1023	—	—
SEP-03(体積線源)	0.1411	—	0.0116
SEP-04	0.3065	82.2	0.0253
SEP-05	0.1371	83.0	0.0113
SEP-07	0.0465	81.8	0.0038
SEP-06 (淡水)	0.3044	34.5	0.0251

<注>海洋における Ba の平均濃度は 0.015 ppm である。

野崎義行, 日本海水学会誌, 51, 302 (1997)

(4) 結果および考察

ろ液試料および体積線源の γ 線測定の結果および Ba の液相残存率

体積線源の γ 線スペクトルを図 3.3.1-1 に、ろ液試料の一例として SEP-04a の γ 線スペクトルを図 3.3.1-2 に示す。両者を比較するとろ液試料では計数値が大幅に減少していることが分かる。体積線源およびろ液試料の γ 線測定の結果を表 3.3.2 に示す。± σ は計数誤差 1 σ である。

表 3.3.2 体積線源およびろ液試料の γ 線測定結果

	Energy/keV	81.0		356.0	
	放出率	32.9%		62.1%	
試料	測定時間/s	計数率/s-1	± σ	計数率/s-1	± σ
SEP-03(体積線源)	1800	11.16	±0.10	7.87	±0.07
SEP-04a	144000	0.0170	±0.0008	0.0118	±0.0005
SEP-05a	60000	0.0030	±0.0007	0.0032	±0.0005
SEP-07a	75000	N.D.		0.0067	±0.0014
SEP-06a(淡水)	75000	0.0340	±0.0011	0.0271	±0.0008

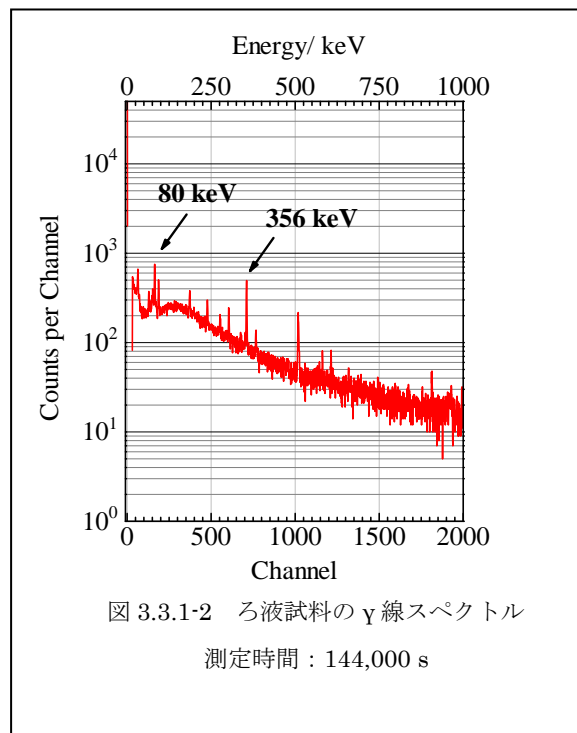
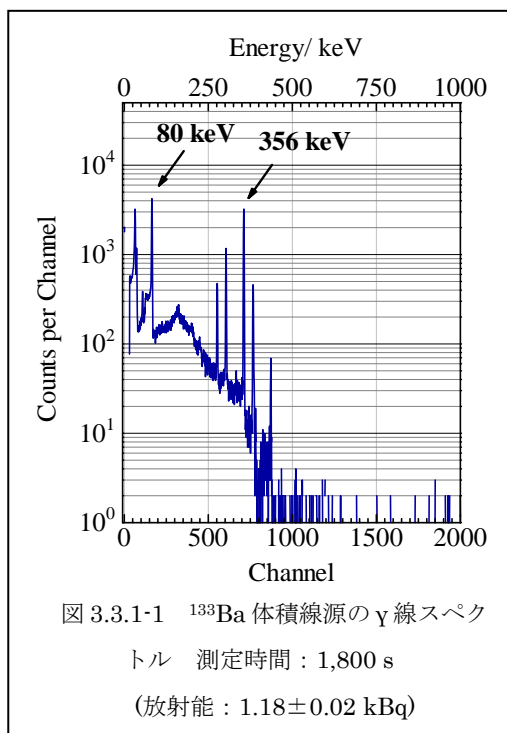
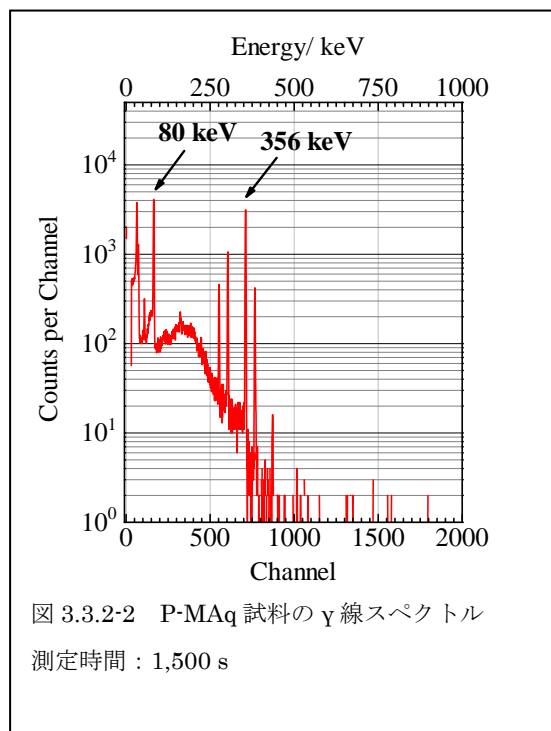
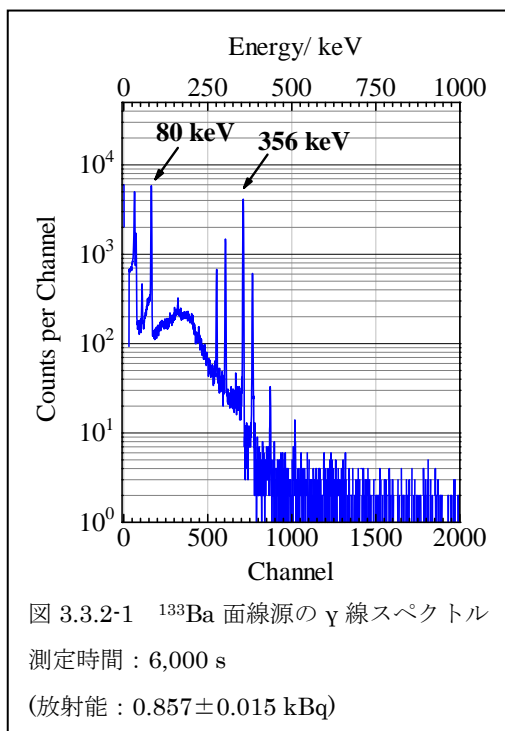


表 3.3.3 に、表 1 の ^{133}Ba トレーサー溶液を加えた量と表 3.3.2 の計数率を用いて算出した、Ba の液相残存率を示す。81 keV と 356 keV における残存率のデータはほぼ一致しているが、計数率の低い場合には 356 keV のデータがより信頼性が高いと考えられる。

表 3.3.3 Ba の液相残存率

試料	Energy/keV	81.0		356.0	
	Ba 濃度/ppm	残存率	$\pm\sigma$	残存率	$\pm\sigma$
SEP-04a	0.0253	0.070%	$\pm 0.003\%$	0.069%	$\pm 0.003\%$
SEP-05a	0.0113	0.012%	$\pm 0.003\%$	0.019%	$\pm 0.003\%$
SEP-07a	0.0038	—		0.012%	$\pm 0.002\%$
SEP-06a(淡水)	0.0251	0.140%	$\pm 0.005\%$	0.159%	$\pm 0.005\%$



面線源および P-MAq 試料の γ 線測定結果および Ba の固相吸着率

面線源の γ 線スペクトルを図 3.3.2-1 に、P-MAq 試料の一例として SEP-04b の γ 線スペクトルを図 3.3.2-2 に示す。 ^{133}Ba は P-MAq すなわち固相に大部分が吸着していることが明瞭である。

表 3.3.5 Ba の固相吸着率

	Energy/keV	81.00		356.01	
試料	Ba 濃度/ppm	吸着率	$\pm\sigma$	吸着率	$\pm\sigma$
SEP-04b	0.0253	96.2%	$\pm 1.1\%$	96.7%	$\pm 1.1\%$
SEP-05b	0.0113	100.0%	$\pm 1.1\%$	96.8%	$\pm 1.1\%$
Sep-07b	0.0038	103.3%	$\pm 1.1\%$	98.3%	$\pm 1.1\%$
Sep-06b(淡水)	0.0251	101.5%	$\pm 1.1\%$	97.3%	$\pm 1.1\%$

面線源および P-MAq 試料の γ 線測定の結果を表 3.3.4 に示す。

表 3.3.4 面線源および P-MAq 試料の γ 線測定結果

	Energy/keV	81.0		356.0	
	放出率	32.9%		62.1%	
試料	測定時間/s	計数率/s ⁻¹	$\pm\sigma$	計数率/s ⁻¹	$\pm\sigma$
SEP-02(面線源)	6000	4.11	± 0.03	3.13	± 0.02
SEP-04b	1500	11.88	± 0.10	9.09	± 0.08
SEP-05b	3600	5.52	± 0.05	4.07	± 0.03
Sep-07b	12000	1.94	± 0.02	1.402	± 0.011
Sep-06b(淡水)	1800	12.45	± 0.10	9.08	± 0.07

表 3.3.5 に、表 3.3.1 の ^{133}Ba トレーサー溶液を加えた量と表 3.3.4 の計数率を用いて算出した、Ba の固相吸着率を示す。吸着率は 100%近い値を示している。誤差などを考慮すると、固相吸着率は 100%から液相残存率を引いた値と見なすことができる。

P-MAq-海水系および P-MAq-淡水系における分配係数

物質の固相および液相への分配係数 K_d は以下の式 (1) で表される。

$$K_d = \frac{A_s \times V}{A_L \times W} \quad \dots (1)$$

ただし、 A_s : 固相吸着率、 A_L : 液相残存率、 W : 固相質量/g、 V : 液相体積/mL である。(1) 式に基づいた計算結果を表 6 に示す。P-MAq-海水系、P-MAq-淡水系のいずれも Ba の分配係数 K_d は 1.4×10^6 である。

表 3.3.6 P-MAq-海水系および P-MAq-淡水系における分配係数

液性	液相残存率 A_L / %	溶液量 V mL	固相吸着率 A_s / %	P-MAq W g	分配係数 K_d / $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$
海水	0.07%	80	99.93%	0.082	1.4×10^6
淡水	0.16%	80	99.84%	0.035	1.4×10^6

現在までに得られた種々の元素の分配係数

今までに得られた種々の元素の分配係数を表 7 に示す。Ba の分配係数は Ra の分配係数とほぼ等しく、Sr よりも 20 倍以上大きな値となっている。

表 3.3.7 種々の元素の分配係数 K_d

元素	核種	液相 / %	溶液量 / mL	固相 / %	P-MAq / g	分配係数 K_d / $\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$
Na	-	99%	100	1%	0.100	1.0×10
Mg	-	99%	100	1%	0.100	1.0×10
K	-	99%	100	1%	0.100	1.0×10
Ca	-	99%	100	1%	0.100	1.0×10
Sr	^{85}Sr	1.6%	100	98.4%	0.100	6.2×10^4
Cs	^{134}Cs	99.9998%	100	0.0002%	0.100	2.0×10^{-3}
Ba	^{133}Ba	0.07%	80	99.93%	0.082	1.4×10^6
Pb	^{212}Pb	14%	100	86%	0.040	1.5×10^4
Ra	^{228}Ra	0.15%	100	99.85%	0.040	1.7×10^6
Ac	^{228}Ac	0.15%	100	99.85%	0.040	1.7×10^6

¹⁴⁰Ba の本測定法への影響評価

原子力災害時に ⁸⁹Sr や ⁹⁰Sr とともに ¹⁴⁰Ba が放出されたときには、¹⁴⁰Ba は P-MAq にはほぼ定量的に吸着されると推測される。ただし、¹⁴⁰Ba は 537 keV (分岐比 24%) の γ 線を放出することから、Ge 半導体検出器を用いた γ 線スペクトロメトリにより混入を見いだすことは容易であり、定量も比較的簡単に行なうことができる。そのため ⁸⁹Sr、⁹⁰Sr を測定する β 線測定器で ¹⁴⁰Ba および子核種 ¹⁴⁰La の計数効率を測定することで、¹⁴⁰Ba および ¹⁴⁰La の寄与を差し引くことができ、⁸⁹Sr、⁹⁰Sr の定量は可能となる。

3.4 Pb など天然放射能の影響評価

小島ら (2020) において、Th 系列である天然放射性核種の ²²⁸Ra (β 壊変、半減期 : 5.75 年)、²²⁴Ra (α 壊変、半減期 : 3.66 日) および ²¹²Pb (β 壊変、半減期 : 10.6 時間) を用いて、Ra および放射性 Pb の Sr 吸着剤への吸着挙動を明らかにした。マントルから抽出、精製した ²²⁸Ra、²¹²Pb 混合トレーサーを用い、人工海水 (液相) と Sr 吸着剤である P-MAq (固相) 間で Ra および放射性 Pb がどのように分配されるかを測定した。

三角フラスコに入れた 100 mL の人工海水に 100 μ L の ²²⁸Ra と 40 mg の吸着剤 P-MAq を加え、2 時間振とうした。振とう終了後、直ちにろ過を行ない、吸着剤 P-MAq をろ紙 5C 上に捕集し、約 10 mL の純水で洗浄後、ポリ袋に封入した。洗浄が終了した時刻を固相と液相の分離時刻とした。ろ液 100 mL は U8 型容器に移した。吸着剤 P-MAq 試料およびろ液試料については、Ge 半導体検出器で速やかに γ 線測定を開始し、その後約 1 カ月間に渡り測定を繰り返した。

Ra の溶液への残存率が 0.15% であり、99% 以上の Ra が吸着したと考えられた。²²⁸Ra とその子核種 ²²⁸Ac の吸着性能はほぼ同一であり、ほぼ全量が固相に吸着されることが明らかになった。²¹²Pb の吸着剤 P-MAq への吸着率は $69.2 \pm 0.3\%$ と推定された。²²⁸Th も ²¹²Pb と同様に溶液・吸着剤の両者に分配されることが分かった。

4 分析手法の開発

4.1 迅速測定法の確立

4.1.1 ピュアセラム MAq による ^{90}Sr 迅速測定法の確立 (2022 年 1 月実施)

(1) 実験の目的

新たに提供を受けた P-MAq を用いて、海水から ^{90}Sr を迅速に分析する方法を確立し、人工海水および ^{90}Sr トレーサーにより確認する。

(2) 実験の概要

^{90}Sr トレーサーを添加した人工海水に P-MAq を加えて攪拌し、P-MAq のみを分離して ^{90}Sr を測定する。

(3) 実験操作

- i. 人工海水 101.9 mL を三角フラスコに入れ、 ^{90}Sr トレーサー (^{90}Sr 原液) を加えた。
- ii. ^{90}Sr 原液 : 9.96 kBq/100 μL at 2022.1.18
- iii. 試料溶液から 2 mL を分取して秤量し、乳化シンチレータ 18 mL と混合し、LSC 測定した。(A2A-4a : 2.0500g)
- iv. 試料溶液に P-MAq 149.4 mg を加え、2 時間攪拌した。
- v. ガラス繊維ろ紙 (GF/A, 47mm ϕ) を用いて、吸引ろ過を行った。
- vi. P-MAq を捕集したろ紙をガラスバイアル (20 mL) に入れ、乳化シンチレータ 19 mL を加え、LSC 測定を行った。(A2A-4c)
- vii. ろ液 (ろ液全量 100.1146g) から 2 mL を分取し、ポリバイアルに入れ、乳化シンチレータ 18 mL を加え、LSC 測定を行った。(A2A-4b : 2.0196 g)
- viii. ろ液を三角フラスコに入れ、P-MAq を 50.7 mg 加え、30 分攪拌を行った。
- ix. ガラス繊維ろ紙 (GF/A, 47mm ϕ) を用いて、吸引ろ過を行った。
- x. ろ液約 5 mL を使って三角フラスコを洗浄し、洗液もろ過した。
- xi. P-MAq を捕集したろ紙をガラスバイアルに入れ、乳化シンチレータ 19 mL を加え、LSC 測定を行った。(A2A-4e)
- xii. ろ液 (ろ液全量 95.9771 g) から 2 mL を分取し、ポリバイアルに入れ、乳化シン

チレータ 18 mL を加え、LSC 測定を行った。(A2A-4d : 2.0325 g)

xiii. ろ液から 20 mL を分取し、ポリバイアルに入れ、チェレンコフ法で測定を行った。
(A2A-4d' : 19.7317 g)

(4) 結果と考察

表 4.1 に測定結果を示す。ろ液(4b)の 46.9%の放射能は、ほぼ ^{90}Y 由来と考えられる。フィルター(4c)は、沈殿が沈降した状態で測定すると 15.5%であったが、試料バイアルをシェイクして沈殿をバイアル内に拡散させて計ると 50.2%となり、ほぼ全ての ^{90}Sr がフィルター上に回収されたと考えられる。2 回目の収集フィルター(4e)上の 4.86%と合わせて、 $^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$ 合計値の 50%の放射能が沈殿中に存在した。ろ液中にほぼ全量の ^{90}Y が存在し、沈殿中にほぼ全量の ^{90}Sr が回収できたと考えられる。

表 4.1 放射能測定 ($^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$)

	Sample	Sample 放射能 (Bq)	全体の放射能 (Bq)	収率 (%)	推定核種	備考
^{90}Sr スパイク後	J2A-4a	336±6	16,871±280	100	$^{90}\text{Sr}+^{90}\text{Y}$	
1 回目ろ液	J2A-4b	160±3	7,911±144	46.9±0.9	^{90}Y	
1 回目フィルター	J2A-4c	2,611±3	2,611±40	15.5±0.2	^{90}Sr	沈殿が沈降した状態で測定
1 回目フィルター (再測定)	J2A-4c	8,469±40	8,469±128	50.2±0.8	^{90}Sr	沈殿を拡散させた状態で測定
2 回目ろ液	J2A-4d	148±3	6,976±129	41.3±0.8		
2 回目フィルター	J2A-4e	820±3	820±13	4.86±0.08		

4.1.2 ^{90}Sr をスパイクした海水を用いた迅速測定法の検証（2022年1月実施）

(1) 実験の目的

^{90}Sr をスパイクした海水を用い、迅速測定法により ^{90}Sr を定量し、迅速測定法が海水に応用できることを確認する。なお、この実験は1月17日から20日にかけて慈恵医大で実施した実験を継続するものである。

(2) 実験操作

- i. 小笠原海藻研究会より入手した海水（HCl 添加、ろ過済）に HCl を加え pH を 2 とし、 ^{90}Sr を加えた。2 mL を分取し乳化シンチレータを加え、LSC 測定を行なった。
- ii. 海水試料 100 mL に P-MAq を 150 mg 加え、2 時間攪拌後、吸引ろ過し、ろ紙に捕集した P-MAq をろ紙ごと乳化シンチレータで LSC 測定した。ろ液についてはチェレンコフ法で測定を行なった。
- iii. チェレンコフ法測定に用いたろ液試料は先のろ液と合わせ、再吸着操作を行なった。P-MAq を 50 mg 加え 30 分攪拌の後、ろ紙を LSC 測定した。また、ろ液の LSC 測定、チェレンコフ法で測定を行なった。

(3) 得られた結果

表 4.2 に初期溶液およびろ液試料の LSC による測定結果を示す。また、表 2 にろ液試料の表にチェレンコフ法での測定の結果を示す。チェレンコフ法の結果から ^{90}Y は P-MAq に吸着していないことが分かる。また、LSC の測定結果からろ液中への ^{90}Sr 残存率が 6%となっていることが示された。ただし、再吸着により ^{90}Sr はほぼ定量的に吸着していることが分かる。表 3 にろ紙試料の LSC の測定結果を示す。 ^{90}Sr の投与量が 35,150 Bq であり、 ^{90}Sr の計数効率が 75%であることが分かった。以上の実験から迅速測定法により、 ^{90}Sr は1回の吸着操作で 94%が P-MAq に吸着され、計数効率 75%で測定できることが分かった。

表 4.2 初期溶液およびろ液試料の LSC 測定による結果

測定試料		計数率 (cpm)	放射能(⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y) (Bq)	ろ液中残存率 (%)	備考
初期溶液	A2A-2a	80,031±287	1,408±22	100	⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y
ろ液	A2A-2b	46,678±216	801±13	56.2±0.9	⁹⁰ Sr 主、 ⁹⁰ Y 残存
再吸着時 ろ液	A2A-2e	43,696±209	750±12	49.6±0.8	⁹⁰ Y

表 4.3 ろ液試料のチェレンコフ法での測定による結果

測定試料		計数率 (cpm)	放射能(⁹⁰ Sr+ ⁹⁰ Y) (Bq)	ろ液中残存率 (%)	備考
ろ液	A2A-2b'	256,120±506	7,114±108	49.5±0.8	⁹⁰ Sr 主、 ⁹⁰ Y 残存
再吸着時 ろ液	A2A-2e'	249,343±499	6,926±105	46.7±0.7	⁹⁰ Y

表 4.4 ろ紙試料の LSC 測定による結果

測定試料		計数率 (cpm)
ろ液	A2A-2c	1,591,911±1262
再吸着時ろ液	A2A-2f	126,511±356

4.2 精密測定法における Y 溶出（ミルクング）方法の検討

4.2.1 ピュアセラム MAq からの硫酸による ^{90}Y の溶出（2021 年 11,12 月実施）

(1) 実験の目的

Y の化学的性質として中性、塩基性では $\text{Y}(\text{OH})_3$ 沈殿を生成し、固相中に存在する。また Sr は硫酸イオンが不足すると P-MAq への吸着能は低下する。これらを踏まえ、P-MAq に ^{90}Sr を吸着させ、放射平衡になった子核種 ^{90}Y を選択的に溶液に抽出するために適した硫酸イオン濃度および pH を実験的に明らかにする。

(2) 実験操作

- i. Y キャリア（10 μg ）と HCl を加え、塩酸酸性にした人工海水に ^{90}Sr をスパイクした溶液 100 mL に P-MAq を 100 mg 加えた。4 個の懸濁試料を調製した。
- ii. それらを 4 時間攪拌した後に遠心分離により上澄み液と P-MAq 沈殿に分離した。ただし、P-MAq が乾燥しないように上澄み液を約 1 mL 残した。 ^{90}Sr と ^{90}Y を放射平衡にするため 2 週間放置した。
- iii. 4 個の P-MAq 試料にそれぞれ異なる濃度の硫酸と Y キャリア（10 μg ）を加え、攪拌した。これらの試料に硫酸を加え、4 個の試料中の硫酸濃度をそれぞれ①1 M (OCT-8)、②0.5 M (OCT-9)、③0.05 M (OCT-10)、④0.005 M (OCT-11) とした。
- iv. 攪拌開始 2 時間後にそれぞれの試料から懸濁溶液を各 2 mL ずつ分取し、シリンジフィルターを用いてろ過し、ろ液をバイアル瓶に入れ、チェレンコフ法で測定を行なった。その測定後に乳化シンチレータ（クリアゾル II）18 mL を加え、液体シンチレーション測定を行なった。
- v. 攪拌開始 4 時間後にも同様に、懸濁溶液各 2 mL ずつを分取し、ろ液についてチェレンコフ法で測定および液体シンチレーション法で測定を行なった。
- vi. 翌日ろ過後 16 時間後に、残ったそれぞれの懸濁液をガラス繊維ろ紙で吸引ろ過操作を行なった。ろ紙に捕集した P-MAq に吸着している ^{90}Sr の定量を液体シンチレーション測定で行なった。
- vii. ろ液から 5 mL を分取し、乳化シンチレータを加えて、LSC 測定試料を調製した。また、ろ液から 20 mL を分取し、チェレンコフ法測定試料を調製した。
- viii. 液体シンチレーション測定およびチェレンコフ法測定は分離直後から約 2 週間続けた。

図4.1 実験操作			
OCT-8d~11	/ 200 mL三角フラスコ		
↓	2時間攪拌後		
↓	→	2 mL分取し、シリンジフィルタでろ過	→OCT-8e~11e
↓	4時間攪拌後		
↓	→	2 mL分取し、シリンジフィルタでろ過	→OCT-8f~11f
↓	吸引ろ過(ガラス繊維ろ紙GA-55、アドバンテック社)		
↓	→	↓	
GFろ紙		ろ液OCT-8h~11h	/ 100 mLポリ広口瓶
OCT-8g~11g		↓	→ 5 mL分取、乳化シンチレータ15 mL添加
		↓	→ 20 mL分取
		ろ液OCT-8h~11h(残液)	/ 100 mLポリ広口瓶

なお、行った実験操作を図 4.1 に示す。

(3) 得られた結果

4 時間攪拌した後、約 16 時間後にろ過を行い、P-MAq を捕集したガラス繊維ろ紙試料 OCT-8g~11g を、LSC で測定した結果を図 4.2 に示す。表ではろ過終了時刻から測定開始時刻までの経過時間の単位を日、計数率を cps で表してある。OCT-8g~11g の 4 種類ともその経時変化は同様の傾向を示しているため、図には OCT-8g と OCT-10g のみを示した。同様に、ろ液試料 OCT-8i~11i を LSC で測定した結果を図 4.3 に、ろ液試料 OCT-8j~11j をチェレンコフ法で測定した結果を図 4.4 に示す。

図 4.2 において計数率が極めて短時間に上昇し、一定となっており ^{90}Sr と ^{90}Y の放射平衡が成り立っている。黒線は LSC 測定による ^{90}Sr と ^{90}Y の計数効率が等しいと仮定したときに、OCT-8g について予想される ^{90}Sr - ^{90}Y の成長曲線を示している。測定結果と予想される成長曲線は大きく異なっている。吸引ろ過後にガラス繊維ろ紙を乾燥させることなく乳化シンチレータを加えて測定しており、比較的エネルギーの低い ^{90}Sr の β 線が水相により遮蔽されていたものが、徐々にエマルジョンが形成され、水が取り除かれることで ^{90}Sr の β 線が検出されるようになったとすればこの現象を説明することができる。LSC による計数効率は ^{90}Sr 、 ^{90}Y ともにほぼ 100%であり、P-MAq に吸着されている ^{90}Sr 、 ^{90}Y

の放射能はともに 110 Bq と見なせる。

図 4.3 の紫の線は ^{90}Y 単独の減衰を表しており、ろ液中に ^{90}Sr が混入していることが分かる。ろ過直後の $t=0$ における $^{90}\text{Sr}=0.17\text{ Bq}$ 、 $^{90}\text{Y}=0.85\text{ Bq}$ としたときの計数率の経時変化は桃色の線で示してあり、実測値をよく再現できている。測定試料は 5 mL、ろ液全体では 100 mL であり、ろ液全体では $^{90}\text{Sr}=3.4\text{ Bq}$ 、 $^{90}\text{Y}=17\text{ Bq}$ である。今回の 1M H_2SO_4 による抽出法では、 ^{90}Y の脱離率は 13%、 ^{90}Sr の脱離率は 3%であった。当初の目的である ^{90}Y のみを脱離させることに成功していない。なお、チェレンコフ法での測定の結果によれば、 ^{90}Y の計数効率 は 60% であり、ろ過直後の $t=0$ において、 $^{90}\text{Y}=4.7\text{ Bq}$ であり、また、 ^{90}Sr と ^{90}Y がほぼ放射平衡に達した 15 日後の計数率から $^{90}\text{Sr}=1.3\text{ Bq}$ となる。測定に用いたろ液は 20 mL であるので、試料全体では $^{90}\text{Sr}=6.5\text{ Bq}$ 、 $^{90}\text{Y}=23\text{ Bq}$ である。チェレンコフ法での測定の結果では ^{90}Y の脱離率は 17%、 ^{90}Sr の脱離率は 6%であった。チ

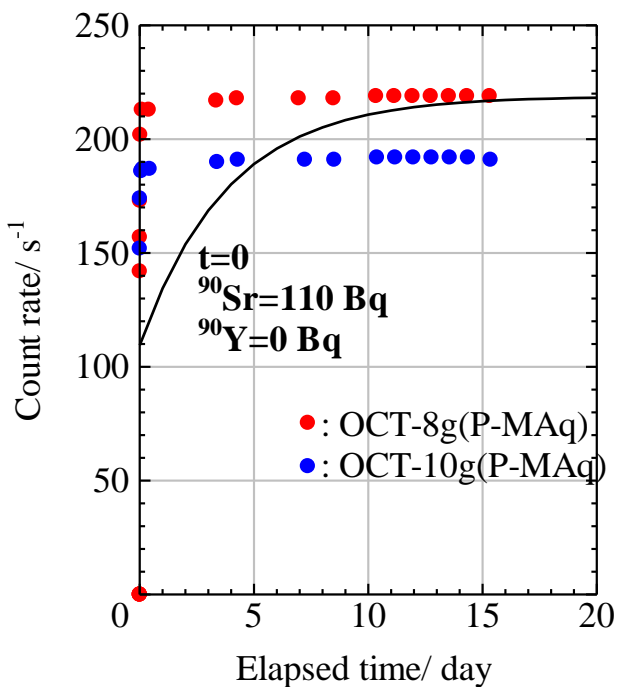


図 4.2 OCT-8g および OCT-10g (P-MAq) の LSC 測定による計数率の経時変化

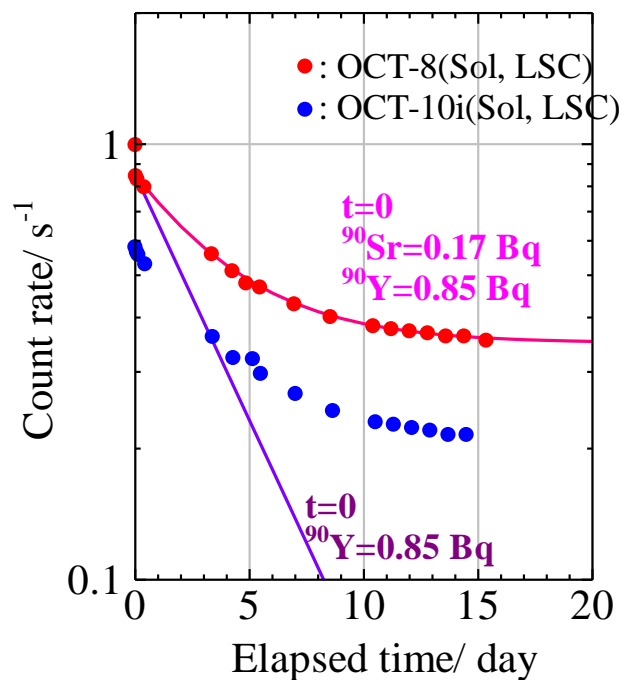


図 4.3 OCT-8i および OCT-10i (ろ液) の LSC 測定による計数率の経時変化

チェレンコフ法測定の結果は LSC 測定の結果より 1.5~1.9 倍ほど大きな値となっている。

この不一致の原因について現在検討を行なっている。

^{90}Y のミルキングに硫酸 H_2SO_4 を用いた実験では、濃度が 0.005M~1M のいずれの条件でも効率よく ^{90}Y を脱離させることができていない。P-MAq に吸着された ^{90}Sr から β 壊変で生成された ^{90}Y は P-MAq に強固に吸着（収着）していると考えられる。

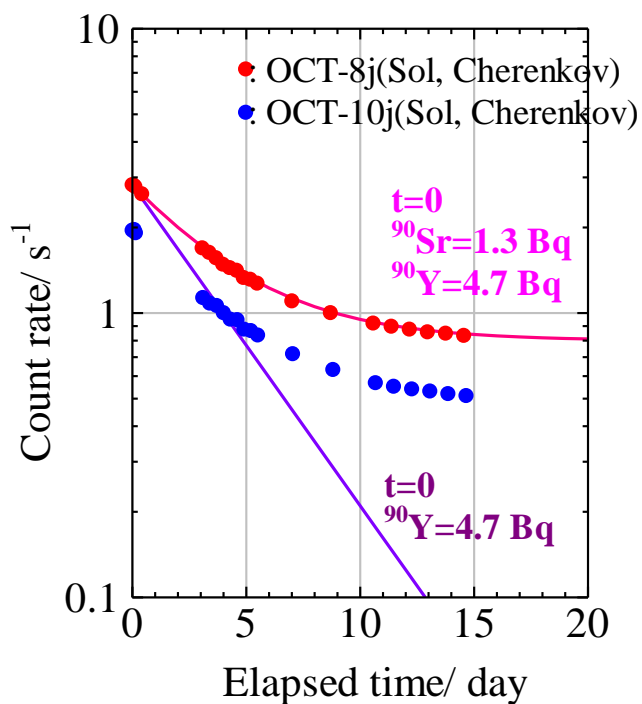


図 4.4 OCT-8j および OCT-10j (ろ液) のチェレンコフ法での測定による計数率の経時変化

4.2.2. 酸溶出による⁹⁰Y ミルキング法の検討(2021年12月実施)

(1) 実験の目的

⁹⁰Sr を吸着させた P-MAq から ⁹⁰Y を溶出 (ミルキング) する条件を確立することを目的とする。

(2) 実験の概要

⁹⁰Sr を吸着させ 2 週間以上放置し ⁹⁰Y と放射平衡になった P-MAq から、適切な溶出液を用いて ⁹⁰Y のみを脱離させる。

(3) 実験操作

i. ⁹⁰Sr を吸着させた P-MAq (11 月に実施し保管しておいた試料 J1K-31, J1K-32) を遠心分離し、上清を取り除いた。→ 上清 J1L-11a, 12a

ii. 遠心管内に残った P-MAq (J1L-11, J1L-12) に 0.01M あるいは 0.1M HCl を (1.25M Na₂SO₄ 0.8 mL, 1000 mgY/mL の Y キャリア溶液 10 μL を含む) 40 mL 加えて三角フラスコに移し、2 時間攪拌した。

iii. 懸濁液を遠心管に移し、遠心分離を行い (3000 rpm, 10 分) P-MAq 沈殿と上清に分けた。→ 上清 LSC 測定試料 J1L-11c, 12c、上清チェレンコフ測定試料 J1L-11d, 12d

(4) 得られた結果

表 4.5 に測定結果を示す。P-MAq に ⁹⁰Sr を吸着させた際の ⁹⁰Sr の添加量は約 8 kBq だったので、吸着率約 95% と考えると、P-MAq が吸着していると予測される ⁹⁰Y の量は約 7.6 kBq と算出される。本実験における溶出液の測定結果を合計しても 400 Bq 程度であり、溶出された Y は吸着量の 5% 以下と推定される。本実験の溶出条件 (0.01M あるいは 0.1M HCl, 2 時間攪拌) では、Y の大部分は P-MAq に吸着したままであると思われる。

表 4.5 ⁹⁰Y の溶出量

	上清 (40 日間保管)	LSC 測定結果 /Bq	上清 (2 時間攪拌)	LSC 測定結果 /Bq	チェレンコフ測 定結果/Bq
J1L-11	0.1M HCl	252.3 ±5.3	0.01M HCl	90.4 ±1.3	68.5 ±1.5
J1L-12	0.1M HCl	246.7 ±5.2	0.1M HCl	141.7 ±1.7	101.5 ±2.2

4.2.3 EDTA による脱離と $Y(OH)_3$ 沈殿生成の検討 (2022 年 1 月実施)

(1) 実験の目的

人工海水に ^{85}Sr をスパイクし、P-MAq に吸着させる。Y は P-MAq に吸着しないが、測定を目的とする ^{90}Sr については、子核種である ^{90}Y が P-MAq 上で生成される。 ^{90}Sr と ^{90}Y が放射平衡に達した状態を想定し、 ^{85}Sr を吸着させた P-MAq に ^{90}Y を加え、EDTA により溶液中に Y を脱離させる方法の検証を行なう。Sr と Y は塩基性の条件で EDTA を作用させると P-MAq から脱離されると考えられる。この溶液に過剰に NaOH を加えることで、 $[^{90}Y-EDTA]^-$ イオンを $^{90}Y(OH)_3$ の沈殿を生じさせる ^{90}Y ミルキング法で、Sr と分離できることを確認する。この方法で Ra、Ba の分離も可能となる。なお、この実験は 1 月 17 日から 20 日にかけて慈恵医大で実施した実験を継続するものである。

(2) 実験操作

- i. 人工海水 82 mL に ^{85}Sr をスパイクし、2 mL 分取し γ 線測定を行なった。P-MAq を 123 mg 加え、攪拌した。
- ii. 遠心分離し、上清から 2 mL 分取し、 γ 線測定を行なった。液相残存率は 7.2%であった。
- iii. P-MAq 沈殿を 5 mL の 0.05M EDTA でビーカーに移し、さらに 15 mL の 0.05M EDTA を加えた。NaOH を加え pH を 11 に調整し、20 分間攪拌した。
- iv. 遠心分離により液相と固相とに分け、それぞれ γ 線測定を行なった。液相に 2 mg の Y キャリアと ^{90}Y 溶液を加えた。8M NaOH を 6 mL 加え $Y(OH)_3$ 沈殿を生成させた。
- v. 遠心分離後、液相と固相に分け、それぞれ γ 線測定を行なった。その後、 $Y(OH)_3$ の再沈殿操作を行なった。1 mL の 6M HCl で沈殿を溶解し、7 mL の 1M NaOH を加えて、 $Y(OH)_3$ を再沈殿させた。
- vi. 遠心分離で上清を取り除いた。1 mL の 6M HCl で沈殿を溶解し、水 21 mL で希釈し、20 mL をチェレンコフ法での測定用に使用し、残り 2 mL を LSC 用に使用した。チェレンコフ法測定により、 ^{90}Y の回収率は 97.7%であった。

(3) 得られた結果

P-MAq に吸着させた Sr および Y は EDTA を塩基性で作用させることで、定量的に脱離させることができた。Y(OH)₃ 生成ミルキング法により、⁹⁰Y の回収率は 97.7% と高い値が得られた。一連の操作により ⁹⁰Sr を P-MAq に吸着させ、EDTA で Sr、Y を脱離させた後に NaOH を添加、Y(OH)₃ 沈殿させる ⁹⁰Y ミルキング法で、当初の目的である Ra や Ba、Pb などの妨害核種と分離できる ⁹⁰Y ミルキング法を確立することができた。

4.2.4. H₂O₂ による EDTA 分解と Fe 共沈法の検討 (2022 年 2 月実施)

(1) 実験の目的

精密測定法では試料として 20 L の海水を用いることになるが、まず 1 L 程度の試料で測定が可能となる IAEA-433 試料を測定対象とする。そのために海水試料を 1 L 使用したときに必要となる P-MAq (以下 P-MAq) は 2 g となる。EDTA 溶液から Y を Y(OH)₃ 水酸化物沈殿として回収するためには多量の NaOH を必要とする。NaOH の必要量を減少させるためには、過酸化水素水 H₂O₂ で EDTA を分解する方法が考えられ、これを実証する。また、Y(OH)₃ 水酸化物沈殿は白色であり、ケイ酸塩化合物などの他の不溶残渣との識別が困難である。一般に用いられる鉄共沈法を応用することで、着色した沈殿が生成することから目視により確認することが可能となる。また、H₂O₂ による EDTA 分解においても Fe の存在で紫色に着色し、これが脱色されることが EDTA 分解の指標となる。この方法の実用化を目指す。

(2) 実験操作

- i. 2 g の P-MAq を 1 L のビーカーに入れ、400 mL の 0.05M EDTA と 5 mL の 8M NaOH を加え塩基性 (pH 11) にし、30 分攪拌した。P-MAq の大部分は溶解した。
- ii. 50 µg の Y キャリア、5 mg の Fe (鉄共沈 Y ミルキング法と同様)、10 mL の 30% H₂O₂ を加えた。赤紫色を呈した。
- iii. 時計皿をかぶせ、加熱しながら 1 時間ほど攪拌した。ごく薄い紫色になった (EDTA

が H_2O_2 により分解されたと考えられる)。

- iv. EDTA を完全に分解するために、10 mL の H_2O_2 を追加し、約 1 時間加熱しながら攪拌した。白色沈殿が生成し、pH 9 に低下した。
- v. 5000rpm で 20 分遠心分離し、白色沈殿と上清を分けた。沈殿に 6M HCl を加え、溶解したが、Fe はわずかしか沈殿していなかった。
- vi. 上清に 5 mL の 8M NaOH を加え、加熱したところ、黄色の $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沈殿を生成した。
- vii. 5000rpm で 20 分遠心分離し、白色沈殿と上清を分けた。黄色沈殿に 6M HCl を加え、溶解した。黄色の溶液が得られた。

(3) 得られた結果

海水を 100 mL から 10 倍の 1 L としても、塩基性条件下で EDTA により P-MAq の大部分は溶解し、Y の大部分は脱離できることが分かった。本実験に引き続き、 ^{85}Sr トレーサーを用いた実験を 24 日から 26 日にかけて東京慈恵会医科大学で行い、90%以上の ^{85}Sr が脱離されることが分かった。鉄(III)水酸化物共沈法により、Sr とともに脱離された Y が黄色の $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沈殿とともに $\text{Y}(\text{OH})_3$ として回収されたと考えられる。この実験事実に基づき 24 日から 26 日にかけて東京慈恵会医科大学で同様の実験を、 ^{90}Y トレーサーを用いて行った。新たに購入した LBC で ^{90}Y を測定することができることが示された。

4.2.5. EDTA によるピュアセラム MAq 溶解法の検討 (2022 年 1 月実施)

(1) 実験の目的

P-MAq から Y をミルクングする代わりに Sr を脱離させる方法を検討する。 ^{85}Sr トレーサーにより確認する。

(2) 実験の概要

^{85}Sr トレーサーを吸着させた P-MAq から、EDTA により Sr を脱離させる。抽出した $[\text{SrEDTA}]^{2-}$ 溶液 (pH 10~11) を酸性にし、不溶性の EDTA を遠心分離または吸引ろ過で除き、 $^{85}\text{Sr}^{2+}$ として回収してガンマカウンタで測定する。

(3) 実験操作

3-1. P-MAq への ^{85}Sr の吸着実験

- i. 人工海水 81.8 mL に ^{85}Sr (12 kBq/0.2g at 2022/1/17) を 200 μL 加えた。混合後 2 mL 分取し、ガンマカウンタで γ 線測定を行なった。(J2A-1a)
- ii. 試料溶液 80 mL に P-MAq を 119.6 mg 加え 2 時間攪拌し、懸濁液をポリ遠心管(50 mL)2 本に分けて遠心分離を行なった。
- iii. 3000 rpm で 10 分の遠心分離操作後、デカンテーションにより P-MAq と上清に分けた。上清を 20 mL 分取し、ポリバイアルに入れガンマカウンタで γ 線測定を行なった (J2A-1b)。
- iv. P-MAq が入っている遠心管を 0.025M Na_2SO_4 10 mL で洗浄したのち遠心分離し、上清をプラバイアルに移して秤量し、ガンマカウンタで γ 線測定を行った。(J2A-1c : 10.0072 g)
- v. P-MAq の入った遠心管を Ge 検出器で測定した。(J2A-1d : 沈殿の高さ 6 ± 2 mm)

3-2. 0.05M EDTA-2Na を用いた ^{85}Sr の脱離実験

- i. P-MAq (J2A-1d) を 0.05 M EDTA-2Na 5 mL を使って 100 mL ビーカーに移した。
- ii. 遠心管に 0.05M EDTA-2Na を 5 mL 入れ洗浄し、洗液を先の 100 mL ビーカーに加えた。この操作を計 3 回行なった (液量 20 mL)。
- iii. 0.5M NaOH を 4.5 mL 加えて、pH を 10~11 とした (液量 24.5 mL)。
- iv. スターラーで攪拌を行い、20 分後に懸濁液を遠心管に移した。
- v. ビーカーに、純水に NaOH を加え pH10 とした溶液 3 mL を入れ洗浄し、この洗液を遠心管に加えた。この洗浄操作を計 2 回行った (遠心管内の液量 : 30.5 mL)。
- vi. 遠心分離 (3000 rpm, 10 分) を行なった。P-MAq の沈殿量が前日の J2A-1d (沈殿の高さ 6 ± 2 mm) と比べると明らかに沈殿量が減少していた。P-MAq のマトリックスが溶解したと考えられる。
- vii. 上清 30.5 mL を遠心管に移し、秤量した。30.7384 g であった。ここから 5 mL をポリバイアルに分取して秤量し、ガンマカウンタで γ 線測定を行った。(J2A-1f: 4.8315 g)
- viii. P-MAq の入った遠心管を Ge 検出器で測定した。(J2A-1e)

3-3. P-MAq から Sr を脱離させた $^{85}\text{SrEDTA}$] $^{2-}$ 溶液から EDTA を除く実験

- i. ガンマカウンタで γ 線測定した溶液 J2A-1f(5 mL) を遠心管に戻した (合計 30.5 mL)。

- ii. 遠沈管に 1M HCl を 6 mL 加え、pH を 1~2 とした。白色沈殿が生成した。
- iii. 遠心分離 (3000 rpm, 10 分) を行なった。これを翌日まで静置した。
- iv. 遠心分離 (3000 rpm, 10 分) を行ない、上清と沈殿物に分けた。
- v. 上清から 1 mL 分取し、ガンマカウンタで γ 線測定を行った。(J2A-1g : 0.9992 g)
- vi. 遠心管内の沈殿物の γ 線測定を Ge 検出器で行った。(J2A-1h)
- vii. 沈殿物 (J2A-1h) を 0.1M HCl 5 mL で懸濁し、5C のろ紙で吸引ろ過を行った。さらに 5 mL で洗浄し、洗液を吸引ろ過した。この洗浄操作を 2 回行った。(合計 15mL)
- viii. ろ液の全量をポリバイアルに入れ秤量し、ガンマカウンタで γ 線測定を行った。(J2A-1i : 14.7844 g)
- ix. ろ紙上に捕集した沈殿をろ紙ごと磁性ろつぼに移した。
- x. 赤外線ランプで乾燥させた後に、電気炉で乾式灰化した。550°C で 75 分間加熱した。加熱終了後は翌日まで放置した。
- xi. 灰化した試料が入っている磁性ろつぼに 6M HCl を 2 mL 加えた。上清をビーカーに移した。残渣は黒色の塊と灰色の微小粒子が混在していた。
- xii. 6M HCl を 2 mL 加えた。上清を先のビーカーに加えた。さらに 6M HCl を 2 mL 加え、懸濁物すべてをビーカーに加えた。
- xiii. 1M HCl 2 mL でろつぼを洗い、洗液をビーカーに加えた。
- xiv. H₂O 2 mL でろつぼを洗い、洗液をビーカーに加えた。さらに H₂O 1 mL でろつぼを洗い、洗液をビーカーに加えた。磁性ろつぼ (J2A-1j) を Ge 検出器で測定した。わずかに ⁸⁵Sr が観測された。
- xv. 懸濁液を入れたビーカーに時計皿をかぶせ、ホットプレートで 30 分加熱した (設定温度 90°C)。
- xvi. 放冷後、ガラス繊維ろ紙 GF/A (47 mm ϕ) で吸引ろ過を行った。H₂O 2 mL でビーカーを洗い、洗液を吸引ろ過した。この操作は 2 回行い、さらに、H₂O 2 mL で沈殿を洗浄した。
- xvii. ろ液をプラスチックバイアルに移して秤量し、ガンマカウンタで測定した。(J2A-1k: 15.8567 g, 約 16mL)。溶解された ⁸⁵Sr は一部であった。
- xviii. 不溶性残渣を捕集したろ紙をポリ袋に封入し、Ge 検出器で測定した。

xix. 不溶性残渣に多くの ^{85}Sr が残留していることが分かった。 ^{85}Sr の多くは P-MAq に由来するケイ酸との化合物中にあると考えられる。

(4) 結果と考察

塩基性条件下で EDTA を作用させることで、P-MAq のマトリックスから Ba を脱離させ、P-MAq を溶解させることで ^{85}Sr を脱離させることができた。これを酸性にすることで EDTA⁴⁻イオンを溶解度の小さな EDTA \cdot 4H として除去することを目指したが、脱離させた Sr が不溶性のケイ酸塩化合物となったと考えられる。そのため、酸を追加しても不溶残渣は溶解することがなく、Sr を回収することが困難であることが分かった。塩基性条件下で EDTA キレート錯イオンを生成し、脱離した Sr、Y は液性を酸性とすると不溶性ケイ酸塩化合物となり、強酸によっても溶出されなくなる。これは Sr が P-MAq に吸着（収着）されると、強酸によっても Sr が脱離されないこととも関連していると考えられる。これらは Avramenko らが Si-O-Sr の結合を形成するというモデルを支持する結果となっている。EDTA がキレート錯体を生成しないようにするために pH を低くする場合は、緩衝液などを用いて pH をコントロールする必要があると考えられる。

4.2.6 EDTA 存在下における Y(OH)₃ 沈殿生成実験（2022 年 2 月実施）

(1) 実験の目的

塩基性で Y が Y(OH)₃ の沈殿を生成する条件を確認する。塩基性条件下で EDTA のために P-MAq が溶解した溶液から Y を分離できるかどうかを確認する。

(2) 実験の概要

EDTA 存在下において Y(OH)₃ 沈殿を生成する。（コールド実験）

(3) 実験操作

i. ビーカー（100 mL）に Y 標準溶液（1.00mg/mL, 1M HNO₃）2.0 mL, Sr 標準溶液（1.00mg/mL, 0.1M HNO₃）10.0 mL, 0.05M EDTA 5.0 mL を入れた（液量 17 mL）。

pH は 2 であった。

ii. 0.5M NaOH を 4 mL を加えたところ pH=3 となった。さらに、0.5M NaOH を 4 mL を加えたところ、pH は 10 となった。中和には 0.5M NaOH を 6mL 要したとみなせる。

iii. さらに 4 mL の 0.5M NaOH を加えたところ pH=11 となった。しかしながら $Y(OH)_3$ の沈殿は生成されなかった (液量 29 mL)。そのため、さらに NaOH を加えることとした。

iv. 6M NaOH を少量ずつ加えていったところ、8 mL 追加したところでわずかに白濁した。そのまま静置した(液量 37 mL)。過剰の NaOH は 51 mmol であり、1.38 mol/L となる。

v. 4 時間経過後には白色沈殿が生成されていた。

(4) 結果

EDTA の 200 倍の NaOH を加えることで $Y(OH)_3$ の沈殿が生成した。

なお、溶液中の Y^{3+} 、 Sr^{2+} 、 $EDTA^{4-}$ 、 Na^+ の各々の化学種のモル濃度は、以下の通りである。

$$[Y^{3+}] = 0.022 \text{ m mol} / 37 \text{ mL} = 0.61 \text{ m mol/L}$$

$$[Sr^{2+}] = 0.12 \text{ m mol} / 37 \text{ mL} = 3.1 \text{ m mol/L} \quad (\text{EDTA の安定度定数が同程度であるので、}$$

P-MAq の Ba の模擬物質として Sr を用いた)

$$[EDTA^{4-}] = 0.25 \text{ m mol} / 37 \text{ mL} = 6.8 \text{ m mol/L}$$

$$[Na^+] = [OH^-] = 51 \text{ m mol} / 37 \text{ mL} = 1.4 \text{ mol/L}$$

$$Y(OH)_3 \text{ の } K_{sp} = 1.0 \times 10^{-22}$$

$$[Y(EDTA)] \text{ の安定度定数 } \beta_{ML} = 8.1 \times 10^{-19}$$

(5) 考察

海水試料から P-MAq に吸着された ^{90}Sr は 0.05M EDTA-2Na, pH10~11 の条件で液相に脱離される。液相に大過剰の NaOH を加え、 $Y(OH)_3$ の沈殿を生成させることで ^{90}Y のミル

キングができることが本実験により分かった。この操作で, Ra, Ba との分離が可能となる。本法を ^{90}Sr トレーサーを用いた実験で実証する必要がある。また, 溶液中の単離された ^{90}Y を放射線測定に適した化学形態にし, これを液体シンチレーションカウンタ(LSC)あるいは低バックグラウンドガスフロー検出器(LBC4601、日立製作所、以降 LBC)で測定することで, 本研究の目的が達成されると考えられる。

4.3 大容量試料への適用

4.3.1 ピュアセラム MAq の EDTA 溶解と Y 回収方法の検討 1 (2022 年 2 月)

(1) 実験概要

海水から Sr を吸着させた P-MAq を, EDTA で溶解し, Fe 水酸化物沈殿共沈法により, Y を回収し測定する方法を検討する。海水 (小笠原) 1 L を用い, ^{85}Sr トレーサーを加えて回収率を測定する。

(2) 実験操作

- i. 海水 (小笠原海藻研究会より入手) をメンブレンフィルター(0.45 μm , 47mm ϕ MILLIPORE) で濾過した。conc.HCl 1~1.3mL/L を添加し, pH=2 を確認した。
- ii. 濾過済海水 1L (1043g) を 2L ビーカーに入れ, ^{85}Sr トレーサー溶液(原液:3M Bq/mL, No.21-007)50 μL を添加し, 攪拌した。20 mL 分取し測定した。
→ 出発試料 J2B-2a、全量 1043g
- iii. P-MAq 2g (2.0013g) を入れてスターラーで 2 時間攪拌した。(十字マグネット使用)
- iv. 上清を 20 mL 分取し, 測定した。→ 上清 J2B-2b、全量 1043g
- v. ビーカー内の上清をアスピレーターで除去し, 沈殿懸濁液を 50 mL 遠沈管 2 本に移して遠心分離した。(3000 rpm, 10 min)
- vi. 上清を除き, 沈殿した P-MAq を 0.025M Na_2SO_4 20 mL を用いて洗浄しながら遠沈管 2 本に移し集めて遠心分離した。(3000 rpm, 10 min)
- vii. 上清を 20mL 分取し, 測定した。→ 洗浄液 J2B-2c、全量 20g

- viii. 遠沈管の P-MAq を 0.05M EDTA 400 mL 用いて 1 L ビーカーに移した。
- ix. 8M NaOH を 5 mL 加え、pH=11 を確認し、スターラーで 45 分攪拌した。
- x. 上清を分取しシリンジフィルターで濾過し測定した。
→上清 J2B-2d 、 シリンジフィルターJ2B-2e、全量 405g
- xi. 0.05M EDTA を 100 mL 追加して再攪拌した。30 分。
- xii. pH を確認したら pH=9 だったので 8M NaOH を 1.5 mL 加え、pH=10 を確認した。
→上清 J2B-2f、 シリンジフィルターJ2B-2g、全量 405g
- xiii. 上清を分取しシリンジフィルターで濾過し測定した。
→上清 J2B-2h、 シリンジフィルターJ2B-2i、全量 403g

(3) 結果および考察

表 4.6 に ^{85}Sr による Sr 回収率の測定結果を示す。試料量 1 L となっても、液相に大過剰の NaOH を加え、 $\text{Y}(\text{OH})_3$ の沈殿を生成させることができた。最終的には、水酸化物沈殿への Sr の混入は 10%以下であった。より低濃度の Sr を測定するため海水試料量を増やすに従い、使用する P-MAq 量も増え、NaOH の量も多量に必要となることから、今後は EDTA を酸化剤で分解し、加える NaOH 量を抑えることを検討したい。

表 4.6 ^{85}Sr による Sr 回収率の測定結果

	Sample	重量 g	^{85}Sr 濃度 Bq/g	全重量 g	全量換算 ^{85}Sr Bq	Sr %
出発試料	J2B-2a	20.3448	352 ±6	1043	18,053 ±290	100
PMAq 上清	J2B-2b	19.9327	18.2 ±0.3	1043	950 ±17	5.3
洗浄液	J2B-2c	19.3831	3.15 ±0.10	20	3.3 ±0.1	0.02
上清	J2B-2d	1.9930	73.09 ±2.19	405	14,872 ±446	82.4
沈殿	J2B-2e	-	10.1 ±0.8	405	2,060 ±157	11.4
上清	J2B-2f	1.9849	72.99 ±2.19	405	14,819 ±444	82.1
沈殿	J2B-2g	-	6.38 ±0.62	405	1,296 ±126	7.2
上清	J2B-2h	2.0028	65.6 ±1.1	403	16,447 ±285	91.1
沈殿	J2B-2i	-	0.71 ±0.09	403	179 ±22	0.99

4.3.2 ピュアセラム MAq の EDTA 溶解と Y 回収方法の検討 2 (2022 年 2 月)

(1) 実験の概要

海水から Sr を吸着させた P-MAq を、EDTA で溶解し、Fe 水酸化物沈殿共沈法により、Y を回収し測定する方法を検討する。海水（小笠原海藻研究会）1 L を用い、⁹⁰Y トレーサーを加えて回収率を測定する。

(2) 実験操作

- i. 海水（小笠原海藻研究会より入手）をメンブレンフィルター(0.45 μm , 47 mm ϕ MILLIPORE) で濾過した。conc.HCl 1~1.3 mL/L を添加し、pH=2 を確認した。
- ii. 濾過済海水 1 L (1023 g) を 2 L ビーカーに入れ、P-MAq 2 g (2.009g) を入れてスターラーで 2 時間攪拌した（十字マグネット使用）。ホットスターラーが 90°C にセットされていて加熱してしまった。
- iii. スターラー OFF にしてそのまま一晩静置した。
- iv. ビーカー内の上清をアスピレーターで除去し、沈殿懸濁液を遠沈管 2 本に移して遠心分離した。(3000 rpm, 10 min)
- v. 上清を除き、沈殿した P-MAq を 0.05M EDTA 400 mL を用いて 1 L ビーカーに移した。
- vi. 8M NaOH を 5 mL 加え、pH=11 を確認し、スターラーで 1 時間攪拌した。
- vii. 溶解しないので 0.05M EDTA を 100 mL 加え、加熱した。
- viii. 8M NaOH を 1.5 mL 加え、pH=11 を確認し、加熱攪拌した。65°C 程度、約 25 分。
- ix. 300mL 遠沈管に移し (278g+231.5g)、遠心分離 (3000 rpm, 10 min) し、上清をアスピレーターで吸引除去したのち、沈殿懸濁液をガラス濾紙(GF/A 47mm ϕ) で吸引濾過した。
- x. 上清を 1L ビーカーに入れ（液量 507g）、Y キャリア (1mgY/mL) 50 μL と ⁹⁰Y トレーサー溶液(2,875 \pm 48 Bq/g)1mL(2,875 \pm 48 Bq)を添加し、攪拌した。
- xi. 20mL 分取 J2B-1c 測定後、戻した。
- xii. Fe キャリア溶液(1 mgFe/mL)を 5 mL 加え、30% H₂O₂ を 10 mL 加えホットスターラー（液温約 60°C）で加熱攪拌した。
- xiii. 無色になったので、30% H₂O₂ を 1 mL 加え、液温約 80°C で約 30 分加熱攪拌した。

- xiv. 8M NaOH を 5 mL 加えた。(沈殿生成せず、紫色に戻った)
- xv. 30% H₂O₂ を 5 mL 加えホットスターラー (液温約 60°C) で約 1 時間加熱攪拌した。
- xvi. 30% H₂O₂ を 4 mL 加えホットスターラー (液温約 60°C) で約 1 時間加熱攪拌した。
- xvii. 白濁してきたため攪拌を止め、上清を分取しシリンジフィルターで濾過し測定した。
→上清 J2B-1d、沈殿 (シリンジフィルター) J2B-1e
- xviii. 30% H₂O₂ を 1 mL 加えたら紫色になったため、さらに 30% H₂O₂ を 4 mL 加え、ホットスターラー (液温約 60°C) で加熱攪拌した。
- xix. 30% H₂O₂ を 5 mL 加え、ホットスターラー (液温約 60°C) で約 2 時間加熱攪拌した。
- xx. 上清を分取しシリンジフィルターで濾過し測定した。
→上清 J2B-1f、沈殿 (シリンジフィルター) J2B-1g、全量 550 g
- xxi. 上清を 300 mL 遠沈管 2 本に入れ遠心分離した (5000 rpm, 20 min)。上清 20 mL をチェレンコフ測定後、戻した。→J2B-1h
- xxii. ガラス濾紙(GF/A 47mm φ)で吸引濾過した。上清 2 mL に D.W 8 mL 加えてチェレンコフ測定した。→ J2B-1 i, 沈殿 (ガラスろ紙) J2B-1j

(4) 結果および考察

表 4.7 に ⁹⁰Y による Y 回収率の測定結果を示す。海水試料量 1 L でも P-MAq の吸着および分離回収は問題なく行うことができた。しかし、EDTA による分解および水酸化物沈殿生成に関しては、Y の 70%以上が上清に留まり、期待したように Y を回収できなかった。

表 4.7 ⁹⁰Y による Y 回収率の測定結果

	Sample	重量 g	⁹⁰ Y 濃度 Bq/g	全重量 g	全量換算 ⁹⁰ Y Bq	Y %
出発試料	J2B-1c	19.6866	108.8 ±1.8	508	2,808 ±47	100
上清	J2B-1d	10.4989	16.9 ±0.3	508	2,152 ±36	81.8
沈殿	J2B-1e	-	0.35 ±0.01	508	45 ±1	1.7
上清	J2B-1f	9.9148	7.8 ±0.1	550	2,238 ±37	97.5
沈殿	J2B-1g	-	0.166 ±0.003	550	48 ±1	2.1
上清	J2B-1h	19.9017	59.6 ±1.0	521	21,560 ±26	68.4
上清	J2B-1i	2.0346	6.9 ±0.1	521	1,761 ±1	78.7

4.4 実海水への応用 (2022 年 1 月実施)

(1) 実験の目的

確立した P-MAq 迅速測定法を海水に応用する。 ^{90}Sr をスパイクした海水 (小笠原海藻研究会) を用いて確認する。

(2) 実験の概要

海水 (小笠原海藻研究会) に HCl を添加し、ろ過した後に ^{90}Sr を加えた試料を調製した。試料 100 mL に P-MAq を 150 mg 加え、2 時間攪拌後、吸引ろ過し、ろ紙に捕集した P-MAq をろ紙ごとバイアルに入れ乳化シンチレータを加えて LSC 測定した。ろ液にさらに P-MAq を 50 mg 加え再吸着させ、LSC 測定した。

(3) 実験操作

- i. 20L ポリタンクに入っている海水 (小笠原海藻研究会) より約 1 L をビーカーに移した。これに conc.HCl 1mL を入れ、メンブレンフィルター (ミリポア社製, 0.45 μm , 47 mm ϕ) を用いて、吸引ろ過した。保管用の 1 L ポリ容器にいった。
- ii. ろ過済の海水 102 mL を三角フラスコに入れ、 ^{90}Sr 原液 (9.96 kBq/100 μL at 2022.1.18) 100 μL を加えて攪拌後 2 mL 分取し、乳化シンチレータ (クリアゾル II) 18 mL を加え、LSC 測定を行った (J2A-7a : 2.0425 g)。
- iii. ^{90}Sr をスパイクした海水試料 J2A-7 に P-MAq 154.2 mg を加え、2 時間攪拌した。
- iv. ガラス繊維ろ紙 (GF/A, 47 mm ϕ) を用いて吸引ろ過を行った (ろ液全量 104.2627 g)。
- v. ろ液を 2mL 分取し、乳化シンチレータ 18mL 加え、LSC 測定を行った (J2A-7b : 2.0363 g)。
- vi. P-MAq を収集したガラス繊維ろ紙をガラスバイアルに入れ、乳化シンチレータ 19 mL を加え、LSC 測定を行った (J2A-7c)。
- vii. ろ液を三角フラスコに戻し、P-MAq 50.0 mg を加え 30 分攪拌した。

- viii. ガラス繊維ろ紙(GF/A)で吸引ろ過を行った。(ろ液全量：101.0478 g) ろ液から 2 mL 分取し、乳化シンチレータ 18 mL を加え LSC 測定を行った (J2A-7d：2.0380 g)。同様にろ液から 20 mL 分取しチェレンコフ測定を行った (J2A-7d'：19.2193 g)。
- ix. P-MAq を捕集したろ紙を LSC バイアルにいれ、乳化シンチレータ 19 mL を加え、LSC 測定を行った (J2A-7e)。

(7) 結果と考察

表 4.4.1 に測定結果を示す。放射能は、 ^{90}Sr と ^{90}Y の合算値である。1 回目のろ過液中の放射能の投与量に対する割合＝収率は、6.46%であり、これが ^{90}Y だとすると、 ^{90}Y のうち 87%が P-MAq に吸着したこととなる。また、1 回目の P-MAq には、投与量の 1.18 倍の放射能が検出された。2 回目のろ液の収率は 1.88%、P-MAq の収率は 5.26%であった。

表 4.4.1 放射能測定 (^{90}Sr + ^{90}Y)

Sample	Sample 放射能 (Bq)	全体の放射能 (Bq)	収率 (%)
^{90}Sr スパイク後 J2A-7a	128 ±2.0	6,505 ±103	100
ろ液 J2A-7b	8 ±0.2	420 ±11	6.46 ±0.20
フィルター J2A-7c	7,704 ±116	7,704 ±116	118 ±2.59
ろ液 J2A-7d	2 ±0.1	122 ±5	1.88 ±0.09
フィルター J2A-7e	342 ±5.2	342 ±5	5.26 ±0.12

5 議論

5.1 ピュアセラム MAq への Sr の吸着率について

Sr の P-MAq への吸着率（正確には「収着率」）は、本研究実施期間前に行った実験では、海水における 4 時間の攪拌で 98%以上であった。しかし、その後の実験では吸着率が低く、2021 年 10 月には同じ条件で 80%程度であった。提供された P-MAq を製造元の日本化学工業社に返送して調査してもらったところ当初含まれていなかった「炭酸バリウム」が含まれており、このことが吸着率の低下につながった可能性が高いとの結果であった。P-MAq は、密閉容器に入れ、デシケータ中で保管していたが、それでも空気中の二酸化炭素と反応して炭酸バリウムに変化したものと考えられる。その後、2021 年 12 月および 2022 年 1 月にそれぞれ新しい P-MAq の提供を受けた（実質、新しい P-MAq を用いて本格的な実験を行うことができたのがこの後であり、本研究遂行にあたって大きな障害となった）。日本化学工業社によると、これまでの P-MAq と新たなロットの P-MAq とは、製造方法、特に粉碎方法が異なるとのことであった。

P-MAq は製造方法が完成しているものではなく、未だ、試行錯誤の部分もあり、ロットや保管方法により吸着性能に差が出ると考えられる。また、吸着率は P-MAq の粒径によっても異なる。粉碎方法、粒度選別法などが影響することが分かっている。

表 5.1 に最近の吸着率を示す。実験は、固液比（固液重量比）1.5 : 1000 即ち、1,000 mL の海水に対し 1.5 g の割合で P-MAq を投入し、2 時間攪拌した結果である。この 4 つの実験では、吸着率は比較的安定していた。保守的な設定で、吸着率を 90%とすれば、安全側の評価となる。なお、2 時間攪拌後、遠心分離で P-MAq と上静を分離し、上静にさらに固液比 0.5 : 1000 で P-MAq を加えて 30 分攪拌することにより、合計の吸着率が 98%を超えることを確認している。精密測定の場合、吸着率を上げておくことが望ましいと考える。また、保管の方法としては、デシケータ中に水酸化ナトリウムなどの二酸化炭素吸収剤を入れておく方法や使う量ごとに個包装とすることなどを検討している。

表 5.1 P-MAq への Sr 吸着率

実験番号	実験年月	試料容量 (mL)	Sr 吸着率 (%)
J2B-2	2022 年 2 月	1,000	94.7±2.3
J2A-1	2022 年 1 月	80	93.6±2.2
A2B-41	2022 年 2 月	80	93.0±1.7
A2A-1	2022 年 1 月	80	92.8±2.8
平均			93.5±2.3

5.2 Sr 吸着の条件

P-MAq の組成（ケイ酸バリウム BaSi_2O_5 ）および本実験の結果から Sr は難溶性の硫酸塩として P-MAq に吸着していると推測する。純水を用いた実験で SO_4^{2-} イオンがない状態では Sr の吸着は 0.1% 以下であった。海水には SO_4^{2-} イオンが 0.28M の濃度で存在する。また、Sr と同様に難溶性の硫酸塩となる Ba、Ra、Ac、Pb など P-MAq に 70% 以上吸着することも分かった。日本化学工業社によると試料水中の Sr 存在量を ICP-AES で測定することにより固液比 1 : 1000 で 4 時間攪拌することにより 97% 以上吸着すると報告している。この場合、試料は人工海水を用いたとのことで、2 月に行った会合で、我々が有していた小笠原海藻研究会より入手した海水を持ち帰ってもらい、「実海水」での試験を依頼した。

海水および陸水は、0.45 μm のメンブランフィルターで懸濁物を除去した後、プランクトンなどの繁殖を防ぐため、1 L あたり 1 mL の濃塩酸を加えている。イットリウム(Y)や鉄(Fe)などが水酸化物沈殿を形成しないためにも弱酸性としておくことが必要となる。

海水中には Sr が約 7 mg kg^{-1} 含まれている。メーカーによれば、この量の Sr を吸着させるに必要な P-MAq は、1 g である。我々は、Sr を確実に吸着させる量として、1 L あたり 1.5 g 投入し 2 時間攪拌することにより 90% 以上吸着、さらに、遠心分離した上静に 0.5 g 投入し 30 分間攪拌することにより 98% 以上吸着することを推奨する。陸水の場合、含有する Sr の量によるが、1 ppm 以下であれば、海水の半分の量の P-MAq で 1 回の投入で 98% 以

上吸着することが分かっている。一旦 P-MAq に吸着（収着）した Sr を脱離しようと様々な濃度の酸やアルカリを用い、加温などを行ったが、芳しい結果は得られなかった。Sr は P-MAq に非常に安定して吸着している。

5.3 ^{90}Y ミルキング操作の方法について

海水試料が 1 L 当たり 2 g の P-MAq で ^{90}Sr は 98% 以上吸着され、吸着された ^{90}Sr から放射壊変により生成した ^{90}Y は塩基性で 20 mmol の EDTA を作用させることで、 ^{90}Sr 、 ^{90}Y ともにほぼ定量的に脱離することができる。しかし、塩酸、硫酸などの酸によっては Sr、Y は脱離されない。これは、V. A. Avramenko ら (Pacific Science Review, vol. 15, A. No. 3, pp. 40-47, 2013) が指摘しているように、Sr、Y がケイ酸バリウムに吸着されているのではなく、ケイ酸塩と化学結合を形成していることによると考えられる。従って、P-MAq による Sr の捕集現象は「吸着(adsorption)」ではなく、「収着(sorption)」とすべきであると考えられる。また、Ba と EDTA の安定度定数 $\log K$ は 7.76 と大きな値であり、P-MAq の主要構成成分である Ba が EDTA キレート錯イオン $[\text{Ba-EDTA}]^{2-}$ として溶解されるとともに、Sr、Y も同様に、 $[\text{Sr-EDTA}]^{2-}$ 、 $[\text{Y-EDTA}]^{-}$ として脱離されたと推測される。P-MAq の Ba 含有率は $50 \pm 1\%$ (放射化分析による測定結果、未発表) であり、2 g 中の Ba は 7.3 mmol となり、化学量論的にも説明できる。

脱離された Y を回収する方法は、NaOH を大過剰に加えることで $\text{Y}(\text{OH})_3$ 沈殿を生成し、遠心分離や吸引ろ過により、Sr との分離を行なうことが最も簡便である。しかし EDTA 存在下で水酸化物沈殿を生成するためには、NaOH の溶液中濃度を $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上としなければならない。廃液処理のことを考慮するならば、EDTA を酸化剤で分解し、加える NaOH 量を抑えることが必要である。そのため、30% 過酸化水素水 H_2O_2 を用いて EDTA を酸化分解した。また、Y(III) キャリアとともに Fe(III) キャリアを加え、 $\text{Y}(\text{OH})_3$ の沈殿を $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の沈殿との共沈により捕集することで、黄色の $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沈殿生成を目視・観測できる利点

がある。また、 H_2O_2 による EDTA 酸化分解時にも Fe^{3+} イオンの存在で赤紫色に発色し、 H_2O_2 の分解も目視・観測できる。

加える鉄キャリアの量は公定法と同様に 5 mg としている。低バックグラウンドガスカウンタ LBC により ^{90}Y の β 線を測定する際に、5 mg 程度の鉄キャリアでは自己吸収はほとんど影響しないことが確認されている。Y を脱離させた条件、0.05M EDTA、pH11 から NaOH が加えられ、 $\text{Y}(\text{OH})_3$ および $\text{Fe}(\text{OH})_3$ の沈殿が生成されるときに考慮すべきは Y^{3+} 、 Fe^{3+} と EDTA との安定度定数 $\log K_{\text{ML}}$ 、およびそれぞれの溶解度積 K_{sp} である。表 5.3 に Y^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Sr^{2+} 、 Ba^{2+} の EDTA との安定度定数および溶解度性を示す。EDTA、NaOH の濃度が高く、モル濃度ではなく活動度 α で取り扱わなければならないなど、定量的に計算で求めることは困難であり、実験により最適条件を得る必要がある。現時点では水酸化物イオンの物質量が EDTA の 200 倍必要であることが得られている。過酸化水素による EDTA の分解方法について、過酸化水素水の濃度、反応時間、反応温度などに関して最適の条件をまだ見いだしていない。

表 5.3 EDTA の安定度定数 $\log K_{\text{ML}}$ および溶解度積 K_{sp}

	Y^{3+}	Fe^{3+}	Sr^{2+}	Ba^{2+}
安定度定数 $\log K_{\text{ML}}$	18.09	25.1	8.6	7.76
水酸化物の K_{sp}	1.0×10^{-22}	2.8×10^{-39}	—	—

加える鉄キャリアを増加させることで $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 沈殿は生成しやすくなる。Fe、Y の水酸化物の混合物から Fe を除去する方法は、陰イオン交換法、溶媒抽出法などがあり、いずれも操作は簡単である。Y キャリアを 5 mg 以下にすれば、LBC で ^{90}Y の β 線を自己吸収なく計測できる。

また、塩基性条件下で EDTA により P-MAq を溶解した後に、pH を適切にコントロールすることで、Y を含まない不溶性ケイ酸塩化合物を生成し、遠心分離などでケイ酸塩化合物

を除去できる可能性がある。このような方法も今後検討されるべきであると考え。

5.4 検出下限濃度

5.4.1 迅速測定

試料水 100 mL に対し P-MAq を 150 mg 投入し、2 時間攪拌の後、P-MAq をメンブランフィルター上に捕集し、乾燥後、熱圧着ポリエチレンフィルムで被覆する。この試料をプラスチックシンチレーターで挟み、低バックグラウンド液体シンチレーションカウンタで測定する場合を想定した。迅速測定における検出下限濃度(MDC)は、以下の式で計算した。

$$n_{DL} = \frac{2}{t} + \sqrt{\frac{4}{t^2} + 8 \frac{n_b}{t}} \quad (1)$$

$$A_{DL} = \frac{n_{DL}}{60 \cdot \varepsilon \cdot Y} \quad (2)$$

$$MDC = A_{DL} \frac{1000}{V} \quad (3)$$

ここで、 t は測定時間(分)、 ε は計数効率、 Y は Sr の化学収率、 n_{DL} は検出下限計数率(cpm)、 A_{DL} は検出下限放射能(Bq)、 n_b はバックグラウンド(BG)計数率(cpm)、 V は試料容積(mL)である。BG 計数率 8.1 cpm、化学収率 90%(投入 1 回)、試料容積 100 mL を入れた。計数効率に分離直後(^{90}Sr のみ)で 45%、2 週間後(^{90}Y 成長後)で 43%($^{90}\text{Sr} + ^{90}\text{Y}$)を代入し、60 分測定した。MDC は、分離直後で $0.5 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ 、2 週間後で $0.14 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$ となった。この値は、分離直後で当初の目標値、即ち、 ^{90}Sr で排水中濃度限度($30 \text{ Bq} \cdot \text{L}^{-1}$)の 10 分の 1 の 60 分の 1であり、目標値を確実に測定できることが分かった。

5.4.2 精密測定

試料水 10 L に P-MAq を 15 g 投入し、2 時間攪拌、1 日後にデカンテーションで P-MAq を分離し、上静にさらに P-MAq を 5 g 投入し、30 分攪拌する。この 2 回の P-MAq への Sr 吸着率は 99%を超える。この P-MAq を合わせ、容積と同量の 0.28M Na_2SO_4 溶液に浸して ^{90}Y の成長を 2 週間待つ。この P-MAq から Y を溶出させ、水酸化イットリウムとしてろ紙上に捕集する。この操作での Y の回収率を 90%とした。この試料を低バックグラウン

ドガスフロー検出器で測定する。測定時間を 10 時間とすると、その 10 時間での ^{90}Y の減衰は、10%であるため、これも考慮に入れる。 MDC は、上述の式を用い、計算値値から 5% の減衰補正を行う。

BG 計数率 0.1 cpm、化学収率 90%、試料容積 10 L、計数効率 35%を代入すると MDC は $0.22 \text{ mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ となり、現在の大洋中の ^{90}Sr 濃度=約 $1 \text{ mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ を測定できる。

5.5 放射線測定における妨害核種の評価

5.5.1 迅速測定

迅速測定では P-MAq に吸着される難溶性硫酸塩を生じる元素 Ba、Ra、Pb の放射性同位体が ^{90}Sr 、 ^{89}Sr 測定の妨害となる。天然放射性核種 ^{226}Ra の海洋中濃度は $1\sim 4 \text{ mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ (参考文献、Radionuclides in the Environment, Editor, D. A. Atwood, pp. 97-108, 2010, John Wiley & Sons Ltd., USA) であり、その子孫核種である ^{210}Pb はその値より低くなる。従ってこれらの核種が影響を与えることはないと考えられる。一方、原子力災害が発生したときに影響を与える核種としては ^{140}Ba が挙げられる。 ^{90}Sr 、 ^{89}Sr と同じように核分裂収率が大きく、また、同じアルカリ土類金属元素であり、その化学的挙動は Sr と類似している。ただし、 ^{140}Ba とその子核種である ^{140}La はともに γ 線放出核種であり、非破壊 γ 線スペクトル分析により容易に定量でき、その影響を評価することができる。また、 ^{140}Ba の半減期は 12.7 日であり 1~2 か月程度でその影響は無視できるようになる。

5.5.2 精密測定

精密測定では分析に供する試料の量が多く、天然レベルの ^{226}Ra 、 ^{210}Pb が測定に影響を与える可能性がある。前述したように ^{226}Ra の海水中の濃度は $1\sim 4 \text{ mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ であり、現在の ^{90}Sr の濃度 $1 \text{ mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ の 1~4 倍となっている。ただし、 ^{90}Y ミルキング法を採用することで ^{90}Sr を分離するときに、同時に ^{226}Ra とも分離され、 ^{90}Y の測定に影響を及ぼさない。 ^{210}Pb も ^{90}Y ミルキング操作により水酸化物沈殿を生成せず、分離されると考えられる。高

濃度の NaOH 水溶液中では両性元素である Pb はテトラヒドロキソ鉛酸イオン $[\text{Pb}(\text{OH})_4]^{2-}$ となり溶解する。しかしながら、 ^{210}Pb の子核種 ^{210}Bi は $\text{Bi}(\text{OH})_3$ 沈殿を生成し、分離されない。また ^{210}Bi の半減期は 5.0 日、 β 線の最大エネルギーが 1.16 MeV であり、 ^{90}Y の半減期 2.7 日、 β 線の最大エネルギーが 2.28 MeV の測定に影響を与える可能性があり注意が必要となる。 ^{210}Bi による妨害が懸念される場合は、鉄キャリアを除く操作で挙げた Cl 型陰イオン交換樹脂を用いた分離法を用いれば、Bi も Fe と同じように陰イオン交換樹脂に吸着され、吸着されない Y と分離される。

6 課題と今後の展望

6.1 実験手法における課題

迅速測定法においては少量の試料を用いて、短時間で測定結果を得ることを主たる目的としているために、Sr の化学収率が 90%程度となっている。この化学収率の値の統計的な取扱は不十分であり、測定の再現性についてさらなる調査が必要である。Sr の化学収率は P-MAq を加える前の試料中の安定 Sr の濃度、および 2 時間の攪拌を行ない P-MAq をろ過したろ液中の安定 Sr の濃度を比較することで得られる。海水では 8 ppm 程度であり、ICP 発光分析法などで定量することができる。本研究では安定 Sr の定量分析を行っていない。

迅速測定法では試料が 0.1 L であり、精密測定法では試料が 10 L 以上となる。日常モニタリングとして試料が 1 L 程度で検出下限濃度も両者の中間となる測定法の確立を目指す必要がある。

精密測定法においてはいくつかの課題が存在している。

- ① pH=11、EDTA 溶液で P-MAq を溶解し Y を脱離させた後に、 H_2O_2 で EDTA を分解するときの、加える H_2O_2 の濃度、反応温度、反応時間などに関する最適条件の検討が不十分である。

- ② $Y(OH)_3 \cdot Fe(OH)_3$ 共沈法により沈殿生成させるときの最適な鉄キャリア量および最適な鉄除去法の検討が不十分である。鉄キャリアの量を増やすことで Y の化学収率を上げることが期待される。
- ③ Sr、Y を脱離させた EDTA 溶液を酸性にすることで、Y を含まない不溶性ケイ酸化合物の生成条件の検討が不十分である。不溶性ケイ酸化合物を遠心分離などで除去することで塩濃度を低下させることができ、 ^{90}Y のミルキングを容易にすることができると期待される。
- ④ 塩基性条件下で EDTA により P-MAq を溶解した後に、pH を適切にコントロールすることで、Y を含まない不溶性ケイ酸塩化合物を生成し、遠心分離などでケイ酸塩化合物を除去できる可能性がある。このような方法も検討されるべきである。
- ⑤ EDTA を用いない ^{90}Y ミルキング法の開発が必要である。EDTA を用いると P-MAq の主要構成成分である Ba が溶出されてしまい、高濃度のケイ酸溶液が生成されてしまう。これを避けるために Y^{3+} との安定度定数が大きく、 Ba^{2+} 、 Sr^{2+} との安定度定数が小さい配位子により、Y 錯イオンを生成する試薬の検討が必要である。

6.2 測定における課題

今回、迅速測定法では、我々の開発したプラスチックシンチレーターボトル(Plastic Scintillator Bottle, PSB)を用い、100 mL の試料を測定することのできる日立社製の低バックグラウンド液体シンチレーションカウンタでの測定を想定して掲出下限を計算した。一方、今回、本研究費で購入した低バックグラウンドガスフロー検出器(LBC)や通常の 20 mL のバイアルを用いる液体シンチレーションカウンタなどでの測定も今後の課題とする。低バックグラウンドガスフロー検出器で P-MAq を測定する場合、乾燥後の P-MAq が飛散しないように固める必要がある。分析シリーズで用いている「コロジオン」の 20 倍希釈液で固めることを試したが、乾燥後にひび割れてしまい、飛散を防ぐことはできなかった。市

販の 5%コロジオン溶液を用いるか、希釈倍率を低くし、乾燥後も P-MAq がしっかり固まった状態を保つ条件を探るか、また、異なる試薬を用いる必要がある。そして、その条件での自己吸収を評価することにより、検出下限を計算することができる。例えば、計数効率を 30%、バックグラウンドを 0.2 cpm とした場合、*MDC*は 0.12 Bq·L⁻¹となり PSB 法の場合の 3.7 分の 1 になる。通常型の液体シンチレーションカウンタを用いる場合、P-MAq がバイアル下部に落下すると計数効率に変化することが予想される。P-MAq をろ紙上に保持したまま計測するため、ゲル状の乳化シンチレータで測定する必要がある。また、メンブランフィルターは、キシレン系有機溶媒の液体シンチレーションカクテルに溶解、茶色を呈するため使用できない。ガラスろ紙もしくはシリカろ紙を用いる必要がある。この場合、計数効率は 100%に近い。計数効率を 99%、バックグラウンドを 30 cpm とした場合、*MDC*は 0.4 Bq·L⁻¹となり PSB 法の場合とほぼ同等になる。

迅速測定では、日常モニタリングあるいは緊急時モニタリングで、少量の漏洩の早い検知を目的とし、より低いレベルまで測定する要望もある。試料容量・化学操作法や測定系を選ぶことにより、迅速測定でも、より低いレベルまで測定できるシステムの構築も可能である。今後の課題の一つである。

精密測定では、⁹⁰Y 水酸化物沈殿を低バックグラウンドガスフロー検出器で測定することが最も低い *MDC* となる。他の測定法では、*MDC* は、より高い値となる。ただ、P-MAq から ⁹⁰Sr を抽出することができれば、長時間測定での ⁹⁰Y の減衰を考慮することなく、また、⁹⁰Y の再成長を待つことができれば、より低濃度まで測定することは可能である。本件も今後の課題の一つである。

7. まとめ

7.1. 本研究において確立した迅速測定法

本研究で確立した迅速測定法の実験操作は以下のとおりである。

- i. 海水(ろ過済・conc.HCl 1mL/L 添加) 100 mL に P-MAq 150 mg 入れ 2 時間攪拌する。
- ii. 吸引ろ過し、沈殿を①ガラスろ紙(シリカろ紙)あるいは②メンブレンフィルター上に回収する。
- iii. 回収した沈殿からの ^{90}Sr によるベータ線を測定する
- iv. 沈殿をろ紙ごとガラスバイアルに入れ、液体シンチレーションカクテル^{*}20 mL を加えて液体シンチレーションカウンタで測定する。
- v. メンブレンフィルター上の沈殿を乾燥後、ポリエチレンフィルムで圧着し、プラスチックシンチレータを用いて液体シンチレーションカウンタで測定する。

迅速測定法における留意事項

- 沈殿を直接液体シンチレーションカウンタで測定する場合、バイアル内に均一に分散させるため、ゲル状の乳化シンチレータ(例えば、エコシンチ GL, National Diagnostics)で測定することが望ましい。通常のシンチレーションカクテルの場合、混合直後の沈殿が分散している場合と時間をおいて沈殿が沈降した後では、値が異なるため注意が必要である。
- 沈殿をろ紙ごとガラスバイアルに入れて測定する場合、メンブレンフィルターは、キシレン系有機溶媒のカクテルに溶けて茶色を呈し、測定不能になる。ガラスろ紙あるいはシリカろ紙を使う必要がある。

7.2. 本研究において提案する精密測定法

精密測定法については、前述のようにいくつか課題が存在するため、さらに検討し最適化の条件を定める必要がある。現時点で提案できる実験操作は以下のとおりである。

- i. 海水 (ろ過済・conc.HCl 1mL/L 添加) 10 L に P-MAq を 15 g 入れ、2 時間攪拌する。
- ii. 攪拌停止後、一晚静置し、デカンテーションで上清と P-MAq を分離する。
- iii. 上清に P-MAq を 5 g 入れ、30 分攪拌する。
- iv. 2 回の P-MAq を合わせ、等容の 0.28M Na₂SO₄ 溶液に浸して約 2 週間置き、⁹⁰Y の成長を待つ。
- v. デカンテーションで上清を除き、P-MAq に EDTA および NaOH を加え、加熱攪拌して溶解する。
- vi. この溶液に Y キャリアおよび Fe キャリアを加えた後、EDTA を分解するために H₂O₂ を加え、80°C で約 1 時間加熱する。
- vii. 冷ました後、NaOH で pH 11 とし、H₂O₂ を入れて 80°C で約 1 時間加熱する。
- viii. 生成した水酸化物沈殿を遠心分離で回収する。
- ix. 沈殿を 6M HCl 少量で溶解し、遠心分離で不溶残渣を除き、上清を回収する。
- x. 上清に NH₄Cl およびアンモニア水を加え水酸化物沈殿を生成し、50°C に加熱して沈殿を熟成させる。
- xi. 上清を除き、吸引濾過で沈殿を捕集する。
- xii. 乾燥後、コロジオン溶液を滴下し、LBC で測定する。

7.3. Sr 分析法まとめ

Sr の迅速測定法を確立し、海水に応用した。海水試料 100 mL と Sr 吸着剤 150 mg を混合し 2 時間攪拌するという条件で、Sr 回収率は 90%以上であった。実験操作にかかる時間は約 3 時間で、分離直後に測定した場合 $0.5 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ 、2 週間後の測定で $0.14 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ の検出下限値が達成された。この方法は、排水濃度の測定や、原子力災害等事故時の緊急モニタリングに利用できる。

平常時モニタリングレベルの精密測定法については、克服すべき課題が生じ開発が遅れたが、実用化への目途がついた。海水試料 10 L と Sr 吸着剤 15 g を混合し 2 時間攪拌後、さらに Sr 吸着剤 5 g を加えて 30 分攪拌し、2 週間以上経過した後に ^{90}Y を回収して測定するという実験操作で、 $0.22 \text{ mBq}\cdot\text{L}^{-1}$ の検出下限値が達成できると考えられる。

参考文献

- a) 文部科学省、放射能測定法シリーズ2 放射性ストロンチウム分析法 (2003)
- b) 箕輪はるか、緒方良至、小島貞男、加藤結花、ケイ酸バリウムを主成分とする吸着剤の海水・陸水における Sr の吸着特性, Proceedings of the 21st Workshop on Environmental Radioactivity, KEK Proceedings 2020-4、176-179 (2020)
- c) 小島貞男、緒方良至、箕輪はるか、加藤結花、ケイ酸バリウムを主成分とする吸着剤への Ra および放射性 Pb の吸着特性, Proceedings of the 21st Workshop on Environmental Radioactivity, KEK Proceedings 2020-4、186-191 (2020)
- d) 加藤結花、箕輪はるか、緒方良至、プラスチックシンチレータボトルを用いた放射性ストロンチウムの測定法の開発, Proceedings of the 19th Workshop on Environmental Radioactivity, KEK Proceedings 2018-7、85-90 (2018)
- e) 緒方良至、加藤結花、箕輪はるか、小島貞男、プラスチックシンチレータボトルを用いた海水中の放射性ストロンチウム測定法, Proceedings of the 33th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK Proceedings 2019-4、33-41 (2019)
- f) Avramenko, V. A. et.al. Sorption Recovery of Strontium from Seawater. Radiochemistry 43, 433-436 (2001)
- g) Avramenko, V. A. et.al. Management of Liquid Radioactive Wastes Containing Seawater. Pacific Science Review 15, 40-47 (2013)
- h) Aoyama, M., HAMGlobal2021: Historical Artificial radioactivity database in Marine environment, Global integrated version 2021, <http://www.ied.tsukuba.ac.jp/database/00085.html>
- i) 出水丈志、佐久間貴志、小松誠、(荏原製作所) 特開 2020-60385, 2020/4/16 公開、放射性ストロンチウム 90 の迅速分析方法
- j) 木ノ瀬豊、宮部慎介、小指健太、山岡かおり (日本化学工業) 特許第 5890568 号 2016/2/26 登録、吸着剤及びその製造方法
- k) 木ノ瀬豊、宮部慎介、小指健太、山岡かおり (日本化学工業) 特許第 6526511 号 2019/5/17 登録、吸着剤及びその製造方法

研究体制

研究代表者

東京慈恵会医科大学 アイソトープ実験研究施設 准教授 箕輪はるか

分担研究者

愛知医科大学 名誉教授 小島貞男

筑波大学 客員教授 青山道夫

研究協力者

愛知医科大学 緒方良至

日立製作所 加藤結花

日本化学工業 宮部慎介

荏原製作所 佐久間貴志

付録

付録 1. AnaLig-Sr を用いた ^{90}Y 溶液の作成

AnaLig®-Sr は、ジーエルサイエンス社が製造する固相抽出剤を用い、IBC Advanced Technologies 社が販売する Sr 固相抽出用カラム*である。このカラムを用いることにより、簡便に ^{90}Y 溶液を得ることができる。この固相抽出剤には、Sr のみ吸着する。このため、 ^{90}Y と放射平衡にある ^{90}Sr 溶液をロードすると ^{90}Y のみカラムを通過する。また、 ^{90}Y が成長する 2~3 週間後に再び ^{90}Y 溶液を得ることができる。

・初回の ^{90}Sr ロードと ^{90}Y 溶液取得

1) Y キャリアー(1 mg/mL 程度)を含む 0.1M HCl 溶液をカラム容量の3倍程度=6mL 程度通液する(カラムが乾燥し、通液できない場合、カラムの下に三方活栓をつなぎ、別のシリンジで吸引することにより通液できる)。

2) ^{90}Sr 溶液を適量カラムにロードする。

3) Y キャリアーを含む 0.1M HCl 溶液を適量ロードする。自然落下に任せて液を集める。およそ15分かかる。

この操作で、カラム通過液として ^{90}Y 溶液を得ることができる。

・2回目以降の ^{90}Y 溶液取得

1) ^{90}Sr を吸着した Analig カラムカラムの上から、Y キャリアーを含む 0.1M HCl 溶液を注ぐ。

2) カラムの通過液を回収する(カラムが乾燥し、通液できない場合、カラムの下に三方活栓をつなぎ、別のシリンジで吸引することにより通液できる)。自然落下に任せて液を集める。およそ15分かかる。



図 付録-1 AnaLig®-Sr カラムからの ^{90}Y 溶液取得

付録 2. ^{90}Y 溶液を用いた計測器の計数効率の確認

^{90}Y は、 β 線最大エネルギーが高い(2.28 MeV)ため液体シンチレーション計測での計数効率は 98%前後となる。また、効率トレーサ(ETM)法が利用できる液体シンチレーションカウンタの場合、校正された ^{14}C 標準バイアルがあればそれを用いてサンプルの放射能を決定できる。この方法で、上記の操作で得られた ^{90}Y 溶液の放射能濃度を求める。次に、同じ溶液で液体シンチレーションカウンタを用いてチェレンコフ法で測定し、この液体シンチレーションカウンタでのチェレンコフ法による ^{90}Y の計数効率を求める。本実験では、東京慈恵会医科大学のアイソトープ実験研究施設の液体シンチレーションカウンタ(LSC-6100、アロカ社)の ^{90}Y の計数効率は、あまり計数効率の体積依存性がなく、 $60\pm 0.6\%$ であった。また、愛知医科大学核医学センターの液体シンチレーションカ

ウンタ(LSC-6100、アロカ社)の⁹⁰Yの計数効率も、あまり計数効率の体積依存性がなく、63±0.6%であった。

さらに、本研究費で購入した低バックグラウンドガスフロー検出器(LBC4601、日立製作所)の計数効率を求めた。公定法でのサンプルと同様に鉄共沈Y沈殿を5Cろ紙に集め、試料皿に糊付けし、その上に上記の⁹⁰Yを滴下し乾燥の後、20倍希釈のコロジオン溶液を滴下、乾燥しサンプルとした。また、鉄共沈Y沈殿作成段階、ろ紙に集める前に⁹⁰Yを加え、鉄共沈Y沈殿を5Cろ紙に集め、上記と同様の方法で測定試料を作製した。この実験で、⁹⁰YのLBCでの計数効率は、35.0±0.4%となった。上記の2つの方法で、計数効率に差はなかった。

備考

*参考 URL: https://www.gls.co.jp/brochure/individual_catalogues/MetaSEPAAnaLig.pdf

ジーエルサイエンス社は、現在、固相抽出剤のAnaLig-Srの販売を終了している。

付録3. ⁹⁰Srのチェレンコフ測定 of 計数効率 (2021年12月実施)

以下の方法で⁹⁰Srのチェレンコフ測定 of 計数効率を実験的に確認した。

- 1) ⁹⁰Sr-⁹⁰Yの放射平衡にある溶液に安定Yキャリアを加え、pH=10~11とし、Yの水酸化物沈殿を形成した。この試料をろ過して⁹⁰Yを除去した。この操作を2回行った。
- 2) ⁹⁰Yを除去した試料の一部を、除去直後に通常の液体シンチレーション計測(LSC)法で⁹⁰Srの放射能を評価すると同時に他の一部をチェレンコフ測定した。
- 3) LSC法で確認した⁹⁰Srの放射能濃度は696±12 Bq g⁻¹であった。他方、同じ溶液100 μL(98.2 mg)をチェレンコフ法で測定した結果、正味計数率で35±8 cpmであった。

この実験の結果、⁹⁰Srのチェレンコフ測定 of 計数効率は、0.9±0.2%であることが分かった。チェレンコフ測定の結果は、ほぼ⁹⁰Yの放射能を示していることを実証した。

付録4. 学会発表要旨

- a) 小島貞男、緒方良至、加藤結花、高宮幸一、箕輪はるか「ケイ酸バリウム(BaSi₂O₅)を主成分とするSr吸着剤へのBaの吸着特性」日本放射化学会第65回討論会(2021年9月23日・オンライン開催)
- b) 緒方良至、小島貞男、箕輪はるか、加藤結花「ケイ酸バリウムを主成分とするSr吸着剤を用いた⁹⁰Srの測定-子核種⁹⁰Yのチェレンコフ測定」日本放射化学会第65回討論会(2021年9月23日・オンライン開催)

2K07

ケイ酸バリウム (BaSi₂O₅) を主成分とする Sr 吸着剤への Ba の吸脱着特性

(愛知医大¹、大阪産業大²、日立製作所³、京大複合研⁴、慈恵医大アイソトープ⁵) ○小島貞男¹、緒方良至^{1,2}、加藤結花³、高宮幸一⁴、箕輪るか⁵

【緒言】我々は、ケイ酸バリウム (BaSi₂O₅) を主成分とする Sr 吸着剤であるピュアセラム®MAq (日本化学工業社製) が海水中の放射性核種 ⁸⁹Sr、⁹⁰Sr の捕集剤として有用であることを、明らかにしてきた。また、難溶性硫酸塩が本吸着剤への吸着挙動に大きく関与していること、天然の放射性元素である Ra は全量が、放射性 Pb の多くの部分が本吸着剤に捕集されることを、明らかにしてきた。原子力災害時に本吸着剤を用いた分析を行なうためには、Ba の硫酸塩が難溶性であることから、¹⁴⁰Ba の影響を予め評価しておく必要がある。本研究では、京都大学研究用原子炉 (KUR) で中性子放射化した Ba の化合物を放射性 Ba トレーサーとして利用し、本吸着剤への Ba の吸着特性を明らかにすることを目的とする。

【実験】KUR で 20 分間照射 (Pn-2) した 79.8 mg の BaCO₃ 試料を、照射 9 日後に 1 mL の 1 M HCl に溶解し、放射性 Ba トレーサー溶液を調製した。80 mL の人工海水 (0.01 M HCl 性) に放射性 Ba トレーサー溶液 50 μL および吸着剤 32 mg を加え、2 時間振盪した。また、80 mL のイオン交換水 (0.01 M HCl 性) に放射性 Ba トレーサー溶液 50 μL、吸着剤 32 mg および 1.6 mL の 1.25 M Na₂SO₄ を加え、2 時間振盪した。吸着過程によりメンブレンフィルタ (0.45 μm、47 mmφ) 上に吸着剤を捕集し、乾燥後ポリ袋に封入し、γ線測定用試料とした。ろ液は U8 容器に移し、γ線測定用試料としたメンブレンフィルタ上に放射性 Ba トレーサー溶液 100 μL を滴下し、乾燥させ面線源を作成した。また U8 容器に 80 mL の 0.01 M HCl および放射性 Ba トレーサー溶液 150 μL を加え体積線源を作成した。Ge 半導体検出器の直上に測定試料を置き、フィルタ試料、面線源については 600~1000 秒、ろ液試料、容積線源については 1800~3000 秒の測定時間で γ線測定を行なった。

【結果および考察】面積線源および体積線源の測定では、半減期 11.5 日の ¹³³Ba の 496.3 keV (分岐比 48%) の γ線が最も顕著であった。それぞれの試料のピーク計数率の測定値を表 1 にまとめた。ろ液中に残存する Ba は検出限界以下であった。また、吸着剤への

ろ液、吸着剤への Ba の分配率

測定試料	計数率/s ⁻¹	分配率/%
体積線源	11.71 ±0.06	(100%)
ろ液(人工海水)	ND	<1%
ろ液(イオン交換水)	ND	<1%
面線源	24.0 ±0.2	(100%)
吸着剤(人工海水)	11.2 ±0.1	96%
吸着剤(イオン交換水)	11.5 ±0.1	96%

ろ液、吸着剤への Ba の分配率 96% が得られた。100% より小さな値となった理由としては、吸着剤がフィルタ上に捕集された状態と、放射性 Ba トレーサー溶液をフィルタに吸収させた面線源による、幾何学的条件の相違を反映している可能性がある。以上のことから、Ba が吸着剤に定量的に吸着されたと評価して良いと見なされる。しかしながら、本実験で行なった吸着実験では、試料溶液中の Ba 濃度が約 700 mg・L⁻¹ と海水と比べて著しく高い値となっており、Ba が低濃度である天然海水と本吸着剤との吸着挙動を反映していない可能性がある。市販の ¹³³Ba トレーサーを用いることで、Ba 濃度を天然海水と同程度にした吸着実験を現在計画している。

Characterization of barium silicate-based adsorbent for Ba in seawater
KOJIMA, S., OGATA, Y., KATO, Y., TAKAMIYA, K., MINOWA, H.

2K08

ケイ酸バリウムを主成分とする Sr 吸着剤を用いた ^{90}Sr の測定 -子核種 ^{90}Y のチェレンコフ測定-

(大阪産業大¹、愛知医大医²、慈恵医大アイソトープ³、日立製作所⁴)

○緒方良至^{1,2}、小島貞男²、箕輪はるか³、加藤結花⁴

【緒言】 ケイ酸バリウム (BaSi_2O_5) を主成分とする Sr 吸着剤(商品名: ピュアセラム MAq[®]、日本化学工業・荏原製作所)は選択的に Sr を吸着する性質を有しており、我々はその性質を利用した水溶液(海水、陸水)中の ^{90}Sr の分離・定量法の開発を行ってきた。本吸着剤 100 mg で 1 mg 程度の Sr を吸着する能力がある。測定条件にもよるが、測定試料が 100 mg を超えると、吸着剤中での β 線の自己吸収の影響で定量的な測定が困難となる。そこで、 ^{90}Y と平衡状態にある ^{90}Sr 水溶液に本吸着剤を加え ^{90}Sr を吸着させ、水溶液中に分離した ^{90}Y を測定することを試みた。今回は、 ^{90}Y をチェレンコフ法で測定した場合の計数効率、バックグラウンド、検出下限放射能を報告する。

【実験】 硫酸イオン濃度 0.02 M の水溶液 40 mL に ~ 20 Bq の ^{90}Sr (同量の ^{90}Y を含む)および 80, 100, 140mg の Sr 吸着剤を加え 2 時間攪拌し、Sr を吸着剤に吸着させた。吸引ろ過により Sr 吸着剤をメンブランフィルタ(孔径 40 μm)上に捕集し、ろ液中に ^{90}Y を分離した。ろ液の一部を液体シンチレーションカクテルと混合し、汎用の液体シンチレーションカウンタ (LSC-7400、日立製作所) で測定し放射能濃度を評価した。ろ液の残りを 20mL のプラスチックバイアルに入れ、LSC-7400 と低バックグラウンド液体シンチレーションカウンタ (LSC-LB7、日立製作所) を用いチェレンコフ測定モードで測定した。

【結果と考察】 ^{90}Y のチェレンコフ測定の計数効率は、LSC-7400 で $61 \pm 2\%$ 、LSC-LB7 で $59 \pm 2\%$ とほぼ同じ値であった。これは、過去の文献値とも一致した。以下の式で検出下限濃度(MDC)を求めた。

$$n_{DL} = \frac{2}{t} + \sqrt{\frac{4}{t^2} + 8 \frac{n_b}{t}} \quad (1)$$

$$A_{DL} = \frac{n_{DL}}{60 \cdot \varepsilon \cdot Y} \quad (2)$$

$$MDC = A_{DL} \frac{1000}{V} \quad (3)$$

ここで、 t は測定時間(分)、 ε は計数効率、 Y は化学収率、 n_{DL} は検出下限計数率(cpm)、 n_b はバックグラウンド計数率(BG、cpm)、 A_{DL} は、検出下限放射能、 V はサンプル容量(cm^3)である。BG は、LSC-7400 および LSC-LB7 で、それぞれ 8.82 cpm、3.30 cpm であった。化学収率を 90%、試料容量(初期容量)を 10 L、測定時間を 240 分とすると、MDC は、LSC-7400 および LSC-LB7 で、それぞれ 1.7 mBq L^{-1} 、1 mBq L^{-1} だと評価された。この値から、 ^{90}Sr の濃度を推定することができる。劇物を使用することなく、極めて簡単な操作で ^{90}Sr の測定ができることが分かった。本吸着剤は、日本化学工業・荏原製作所から提供を受けた。感謝の意を表する。

Estimation of ^{90}Sr activity with bariumsilicate-based adsorbent - application of Cerenkov measurement of progeny nuclide, ^{90}Y -
OGATA Y., KOJIMA S., MINOWA H., KATO Y.

令和3年度
原子力規制庁 放射線対策委託費
(放射線安全規制研究戦略的推進事業費)

環境放射線モニタリングに適した
半導体受光素子ベースの検出器の開発

研究代表者：京都大学 谷垣 実

2022年3月23日

目次

1	概要	1
2	背景	2
3	研究目標	4
3.1	研究の内容	4
3.2	期待される成果	4
4	研究体制と遂行状況	5
4.1	実施体制	5
4.2	研究実施状況	6
4.3	研究成果の公表など	7
5	検出器の設計と試作	8
5.1	検出器の構成	8
5.2	目標とする測定範囲	10
5.3	八角柱型 CsI(Tl) 検出器の設計 - 2 inch NaI(Tl) の置き換え想定	13
5.3.1	形状の決定	13
5.3.2	シンチレータの大きさの決定	14
5.3.3	検出器としての計数率	16
5.3.4	測定上限の見積	16
5.3.5	試作した八角柱検出器の概要	17
5.3.6	エネルギー校正とエネルギー帯域およびエネルギー分解能	18
5.3.7	八角柱型検出器の計数直線性試験	18
5.3.8	八角柱型検出器の方向特性試験	21
5.3.9	八角柱型検出器のエネルギー特性試験	22
5.4	高線量率対応 CsI(Tl) 検出器の設計	25
5.4.1	設計方針	25
5.4.2	計数率の直線性の確認	25
5.4.3	シンチレータの大きさについての検討	28
5.4.4	立方体のシンチレータとしての形状の妥当性の確認	29
5.4.5	6 mm 角 CsI(Tl) 用 G(E) 関数	30
6	環境中での測定試験	34
6.1	6 mm 角 CsI(Tl) 検出器	34
6.1.1	日本品質保証機構による試験	34
6.1.2	既設モニタリングポストに併設しての試験	34
6.2	八角柱型 CsI(Tl) 検出器	38

6.2.1	福島県大熊町での試験運用	38
6.2.2	石川県野々市市での試験運用	40
7	GAGG 検出器の可能性の検討	44
8	まとめ	46
9	謝辞	47

1 概要

原子力施設の周辺に展開される固定・可搬型モニタリングポストについては、従来光電子増倍管を使用した NaI(Tl) シンチレーション検出器や電離箱、半導体検出器のいずれか、あるいは組み合わせたものが利用されている。これらの検出器は特性がよく研究されており運用実績も豊富であるが検出器ごとに課題や制約があり、現場では多大な労力や費用をかけて運用が維持されている。しかし、厳しい昨今の財政事情から設置や管理コストの削減要求は強まる一方である。一方、近年の半導体技術と光計測市場の進展と拡大により、光電子増倍管のような増幅効果を持つ半導体受光素子である APD (Avalanche Photo Diode) や MPPC (Multi Pixel Photon Counter) が安価に広く普及しており、これを放射線計測に応用することで、高圧電源が不要で小型軽量、振動や衝撃にも強く使い勝手の良い検出器が実用化されている。たとえば走行サーベイシステム KURAMA-II で使われている CsI(Tl) + MPPC のシンチレーション検出器ではバックグラウンドレベル \sim mSv/h オーダーを 1 台でカバーする能力を持っている。ただ、この半導体受光素子ベースの検出器は、福島事故対応で展開されたものを除き、固定・可搬型モニタリングポストでの採用が進んでいない。これは半導体受光素子ベースのシンチレーション検出器が固定・可搬型モニタリングポスト用として必ずしも最適化されておらず、運用実績や能力の評価も行われていないことによる。そこで、この研究では、半導体受光素子ベースのシンチレーション検出器について、固定・可搬型モニタリングポストへの対応能力を検証し、検出器のリファレンスモデルを提案する。具体的には、固定・可搬型モニタリングポストとしての利用に適したシンチレータの種類や形状をシミュレーションにより決定して検出器を製作し、校正場や実際の環境での能力評価および従来の固定・可搬型モニタリングポストとの比較検証を行う。この研究により、半導体受光素子ベースの使い勝手のよい検出器が固定・可搬型モニタリングポストに導入できるようになり、ユーザの負担軽減と厳しい財政事情下でもモニタリング能力の維持・強化が可能となる。

2 背景

原子力施設やその周辺地域で展開されている環境放射線モニタリングでは、平常時の環境放射線レベルから緊急時に想定されるような mSv/h オーダーやそれ以上の線量率のモニタリングが必要になることから、異なるタイプの検出器を組み合わせでのモニタリング活動が実施されている。ここで、環境放射線モニタリングに使われる検出器について表 1 にまとめる。

表 1 環境放射線モニタリングに使われる主な検出器とその特徴

		
<p>NaI(Tl) 検出器 (画像は [1] より)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● エネルギー情報が得られる ● 低線量率でも安定した計測が可能 ● 高線量率での数え落とし ● 潮解性が大きい ● 外気温や湿度に影響される ● 高電圧の制御が必要(±1% 未満) 	<p>電離箱検出器 (画像は [1] より)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● エネルギー特性・方向特性が良い ● 線量率直線性がよい ● エネルギー情報が得られない ● 平常時の環境放射線レベルの測定が困難 ● 外気温や気圧、湿度に影響される 	<p>半導体検出器 (画像は [2] より)</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 高線量率計測が可能 ● 安価 ● エネルギー情報が得られない ● 外気温の変化に大きく影響される ● 平常時の環境放射線レベルの測定が困難

これらの検出器はいずれも適切な条件での運用でモニタリングに必要な能力を発揮することができるものがあるが、そのためにはそれぞれの持つ短所（たとえば湿度や温度変化に弱い、あるいは低線量率での感度不足など）について適切な対応が必要であり、現場では測定能力の維持に多大な労力が払われている。たとえば、NaI(Tl) 検出器や半導体の線量率に対する温度依存性として、温度管理機能を搭載しない可搬型モニタリングポストに採用された NaI(Tl) 検出器と半導体検出器の例を図 1 に示す。屋外で想定される範囲の外気温の変化でも外気温に連動して線量率が変化していく様子がよくわかる。また、NaI(Tl) 検出器や電離箱は数百 V 以上の高いバイアス電圧を必要とするため、湿気によるリーク電流や放電をおこしやすい。さらには NaI(Tl)

は潮解性が高いことから多湿の環境でのシンチレータ自身の劣化も発生する。このような問題を解決するため、固定型のモニタリングポストでは電源や信号処理装置、記録装置などを収めた局舎と検出器の容器を一体化し、局舎内と一体の空調管理を行うといった工夫も行われている。しかし、このような大規模な環境制御の構造をとることで設置や維持の費用が著しく上昇することとなり、運用者の大きな負担となっている。

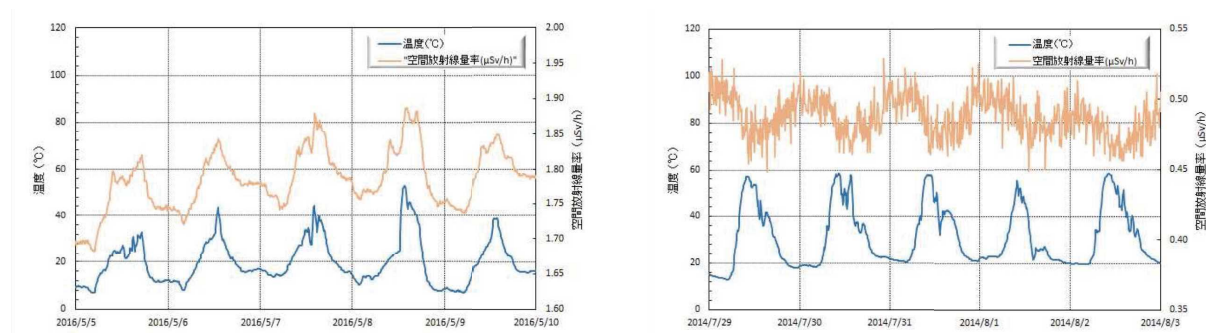


図1 可搬型モニタリングポストに搭載された NaI(Tl) 検出器の線量率の温度依存性（左）と半導体検出器の線量率の温度依存性（右）[2]。

このような事情もあって、老朽化等の更新に際してより運用コストの低い検出器への要望が多いものの、要望に応えられる適切な選択肢が提供されていない現状がある。加えて近年の財政事情に伴う設置や維持管理の費用の節減の一方で東電福島原発事故をはじめとする様々な経験を踏まえた緊急時対応への能力の向上がもためられており [3]、運用コストだけでなく十分な測定能力の維持は不可欠である。

さて、近年の半導体技術の進展により APD (Avalanche Photo Diode) [4] や MPPC (Multi Pixel Photon Counter) [5] のような優れた素子が登場しており、これらを採用した検出器は高い耐環境性と安定した測定能力、小型軽量、低コスト化を達成し、PC に USB 接続するだけで直ちに測定できるような手軽さをも実現している [6]。特に、KURAMA-II[7] の開発の際にこのような検出器の信号処理の高速化アルゴリズムも開発され [8]、バックグラウンドレベル \sim mSv/h オーダーを一つの検出器で測定できるようになってきている。これらの技術をモニタリングポストへの適用することでユーザのニーズに的確に応えられると考えられる。

3 研究目標

3.1 研究の内容

環境放射線モニタリングに適した半導体受光素子ベースのシンチレーション放射線検出器の開発や実装の研究を行う。まず、受光素子に MPPC を使用した CsI(Tl) である浜松ホトニクス社 C12137 の高計数率対応モデルをベースとして、平常時や緊急時を想定した環境放射線モニタリングに適した線量率範囲をカバーする検出器を設計する。この結果を基に環境放射線モニタリング用検出器の試作を行い、従来の環境放射線モニタリング活動で使われてきた NaI(Tl) 検出器や電離箱、半導体検出器との性能比較や置き換え可能性を検証する。成果は本事業および大学の知財の取り扱いの規定に沿って技術供与し、商品化を目指す。

研究で取り組む各項目のより詳細な内容は以下のとおりである。

環境放射線モニタリングに適したシンチレータの材質及び形状の決定

環境放射線モニタリングでは方向依存性がない方が望ましいが、結晶の製作・加工費用や歩留まり、パッケージングを考慮する必要がある。また、MPPC は 500 nm 付近の光に対して良好な感度を示すことから、この付近のシンチレーション光を発生する CsI(Tl) が望ましいが、CsI(Tl) はシンチレーション光の寿命が長く高線量率の場合での数え落としが予想されるため、測定対象とする線量率範囲で十分な統計量が得られる最小の体積であることが望ましい。以上を踏まえて PHITS[10] などのシミュレーションコードにより実用的な環境放射線モニタリングのためのシンチレータ形状を決定する。なお、CsI(Tl) のシンチレーション光の寿命が問題となる場合は GAGG ($\text{Gd}_3(\text{Ga},\text{Al})_5\text{O}_{12}(\text{Ce})$) [9] などの他のシンチレータも考慮する。

製作した検出器の性能評価

1) で試作した検出器について、標準場における特性評価（線量率直線性、方向依存性、エネルギー特性）を行うとともに、自然放射線の環境や福島第一原発周辺の高度に汚染された環境などで試験を行う。標準場の利用にあたっては JAEA 核燃料サイクル工学研究所の施設などを利用する。

既設モニタリングポストに準じた運用試験

令和 2 年度までの規制庁委託研究で開発した可搬型モニタリングポストを改造して 1) で試作した検出器を内蔵したモニタリングポストを製作し、実際に設置されている固定・可搬モニタリングポストの設置箇所に併設して実環境における長期の運用試験を行う。

研究成果の社会還元

今回の研究成果については本事業および大学の知財の取り扱いルールに則って技術供与を行い、早期の商品化を目指す。

3.2 期待される成果

原発立地及び周辺自治体が展開する NaI(Tl) 検出器、電離箱、半導体検出器を用いた固定・可搬モニタリングポストの測定能力の維持や向上と運用の負担軽減を実現し、測定結果の信頼性や評価の一貫性を高める。

4 研究体制と遂行状況

4.1 実施体制

谷垣実（京都大学・助教）のもと、以下の研究協力者と研究参加者によって実施された（表 2, 3, 図 2）。研究協力者と研究参加者はこれまで KURAMA-II 関連の研究開発に従事してきた実績のある者から構成されている。採択後に KURAMA-II での G(E) 関数検討の実績のある JAEA 津田氏と KURAMA-II の校正場での照射試験実績のある JAEA 星氏の参加の了解が得られたことで、試作検出器の性能評価の体制を強化して取り組んだ。

表 2 研究協力者

氏名	参加内容	所属機関	所属機関での職名
松浦隆弘	試作検出器の屋外耐久性試験	株式会社松浦電弘社	代表取締役社長
津田修一	G(E) 関数の検討・照射試験	日本原子力研究開発機構	上級研究員
星勝也	試作検出器の照射試験	日本原子力研究開発機構	技術員

表 3 研究参加者

氏名	参加内容	所属機関	所属機関での職名
奥村良	検出器の開発・調整および試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員
吉永尚生	検出器の開発・調整および試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員
吉野泰史	検出器の開発・調整および試験補助	京都大学 複合原子力科学研究所	技術職員

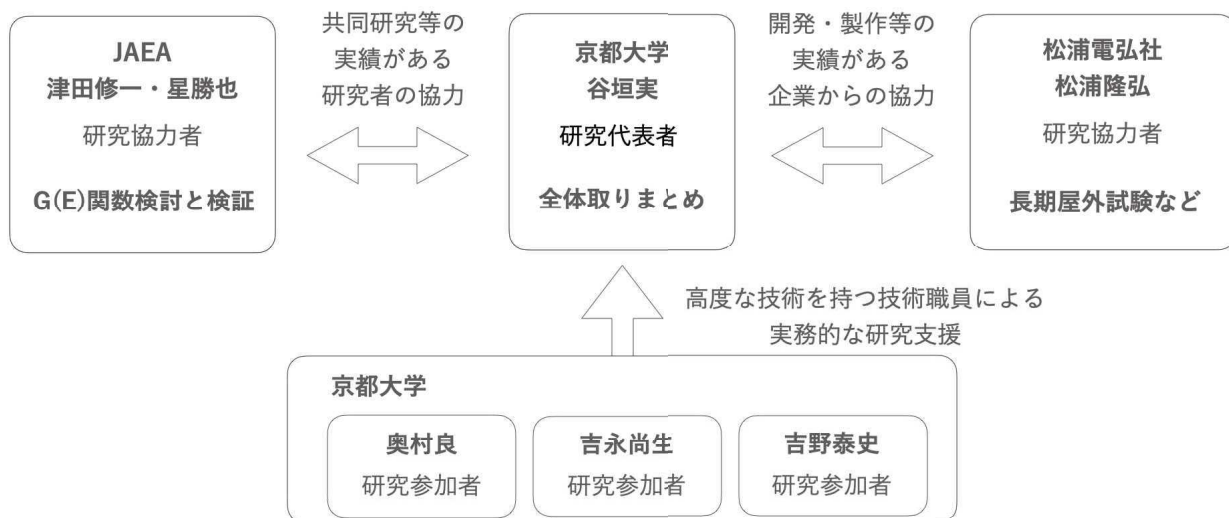


図2 研究体制図

4.2 研究実施状況

本研究は1年計画で取り組む研究である。研究実施のあらましを図3に示す。新型コロナ流行とそれに伴うそれに伴う各種自粛要請が支障となり、試作や動作試験、現地試験などが当初計画通り進められず、内容を精査して実質的な目標達成を目指すこととなった。KURAMA-IIで実績のある受光素子にMPPCを使用したCsI(Tl)検出器をベースに、平時や緊急時に想定される環境放射線モニタリングに適した測定範囲と特性を持った全固体シンチレーション検出器の設計、試作、評価を行った。新型コロナによる出張等の自粛や物流混乱等の影響で試作や試験評価に大きな影響が出たが、主要部分は実施・あるいは期間内の終了の見込みが立っている。利用者のニーズを踏まえ、NaI(Tl) 2 inch 相当の低線量率用検出器と10 mSv/h程度までをカバーする高線量率用検出器を過去の試験評価やシミュレーションで設計し、試作品をJAEA核燃料サイクル工学研究所の計量機器校正施設で試験評価した。また、試作品は既設モニタリングポストに隣接する場所に設置し、長期耐久試験及び測定値の比較検証に着手している。また、今回の研究成果である10 mSv/h程度まで計測可能な高線量率用検出器については商品化を実現した(浜松ホトニクス社 C12137-06HA)。また2 inch NaI(Tl) 検出器相当の検出器も商品化される予定である(浜松ホトニクス社 C1237-88H)。

実施項目	担当者 (所属機関)	第一四半期	第二四半期	第三四半期	第四四半期
検出器の試作	谷垣実 (京都大学) 津田修一 (JAEA)	基本設計 シミュレーション 詳細設計・追加シミュレーション		低線量率用試作器製作	
性能評価	谷垣実・奥村良 (京都大学) 津田修一・星勝彦 (JAEA)	高線量率用試作機 照射試験		低線量率用試作機 照射試験	
運用試験	谷垣実 (京都大学) 松浦隆弘 (松浦電弘社)			既設モニタリングポストとの 比較試験	
成果発表など	谷垣実 (京都大学)		原子力学会	EPR2021	

図3 研究計画。新型コロナウイルス感染拡大に伴う緊急事態宣言や各種移動規制により、概ね第一四半期～第二四半期は実証試験等を中心に事業進捗が見込めない状況であった。

4.3 研究成果の公表など

研究成果の実用化

浜松ホトニクス C12137-06HA (高線量率用：6 mm 角立方体 CsI(Tl) 搭載)

浜松ホトニクス C12137-88HA (低線量率用：48 mmφ 八角柱型 CsI(Tl) 搭載)

国際会議での発表

International Conference on the Development of Preparedness for National and International Emergency Response (EPR2021) (2021年10月11-15日)

M. Tanigaki: A Carborne Gamma-ray Survey System, KURAMA-II

国内学会での発表

日本原子力学会 2021年秋の大会 (2021年9月8-10日)

谷垣 実：福島における放射性物質分布調査 (2) KURAMA-II の手法に基づく分布測定技術開発の現状

一般向け広報

youtube 番組「鈴木光司のパワートーク」出演 (2021年9月19日より公開)

Maker Faire Tokyo 出展 (2021年10月2-3日)

5 検出器の設計と試作

5.1 検出器の構成

本研究で開発する半導体受光素子ベースのシンチレーション放射線検出器では浜松ホトニクス社 C12137[6] をベースに開発を行った。C12137 シリーズの外形を図 4 に、構成を図 5 に、また市販されている C12137 シリーズの電氣的・光学的特性を表 4 に示す。



図 4 C12137 シリーズ。用途に応じて様々な形状および大きさのシンチレータのものが用意されている。

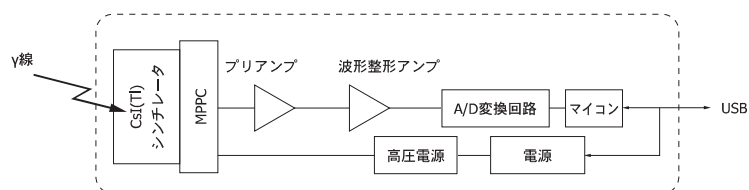


図 5 C12137 の構成図 [6]。MPPC とそのバイアス用高圧電源、波形整形回路、AD 変換回路、信号処理や PC との通信をおこなうマイコンがコンパクトにまとめられ、すべて USB パスパワーで作動する。

表 4 C12137 の電氣的・光学的特性 ([6] より抜粋)

項目	条件	C12137-00	C12137-01	C12137-08	C12137-10	単位
計数効率 min.	^{137}Cs , 0.01 $\mu\text{Sv/h}$	40	400	2000		cpm
エネルギー範囲		0.03 ~ 2		0.06 ~ 2		MeV
エネルギー分解能	^{137}Cs , 662 keV	8	8.5	9	10	%
測定範囲 (線量率)	^{137}Cs , 662 keV 環境放射線による	0.01 ~ 100	0.001 ~ 10	線量率換算なし		$\mu\text{Sv/h}$
測定誤差	遮蔽物による減衰 計数揺らぎを除く	± 20		線量率換算なし		%

C12137 をベースとした開発の理由であるが、

- 光電子増倍管と同様に増倍効果を持つ MPPC を採用していること
- 信号処理のアナログ系や A/D 変換回路、PC とのインターフェースが実装されていること
- KURAMA-II をはじめとする放射線計測装置などで幅広く採用されており、その性能と安定動作の実績があること
- 前年度の規制庁安全規制研究で開発した可搬型モニタリングポストで開発したソフトウェア資産が活用できること
- 既存の C12137 シリーズとの電氣的互換性を確保することで、すでに使用されている KURAMA-II などの放射線計測システムでの採用が極めて容易になること

が挙げられる。これらの特徴は高い信頼性とトラブル発生時も USB ケーブルを差し替えるだけで復旧可能となるためである。

また、シンチレータには CsI(Tl) を採用することとした。これは、蛍光時間が $\sim 1\mu\text{s}$ と長いという欠点はあるものの、NaI(Tl) に比べて潮解性が小さいこと、C12137 シリーズで採用する MPPC の変換効率の高い波長領域に蛍光波長があること、また KURAMA-II 他で長期間の実環境での安定した運用実績があり、耐環境性についても十分あると考えられるためである。なお、近年登場した新しいシンチレータである GAGG は、吸湿性や潮解性がなく自己放射性もないという有望な素材であるが、実際にモニタリングポストとして大量に使用することとなった場合の結晶の供給能力の問題が残っている。そこで、今回の研究では将来の供給体制の安定化の向け基礎的な評価をおこなうこととする。

なお C12137 シリーズでは、一般的な検出器で想定される不感時間に伴う数え落としではなく、AD 変換後のデジタル信号処理遅延による数え落としの影響から、ソフトウェア的に計数率の上限を 10000 cps に制限して市販されている。従来、放射線検出器の線量率校正では ^{137}Cs の 662 keV 単色線が使われているが、無機シンチレータは原子番号の大きな元素で構成されていることから、実環境で散乱等により発生するカウント数あたりの線量率への寄与の小さい低エネルギー成分の計数が高くなる。この結果、従来市販されている C12137 シリーズでは「低エネルギー放射線が支配的な環境放射線を検出する場合、最大測定値が 1/3~1/2 程度になります」との注意喚起が行われている [6]。この欠点については、京大と浜松ホトニクスで共同開発したデジタル信号処理の高速化アルゴリズムを信号処理系に採用して克服して高計数率対応を達成しており [8]、一般向け C12137 でみられた実環境での数え落としがなくなっただけでなく、ダイナミックレンジの大幅な拡大を実現している (図 6)。今回の研究でもデジタル信号処理系にこの高計数率対応アルゴリズムを採用した。

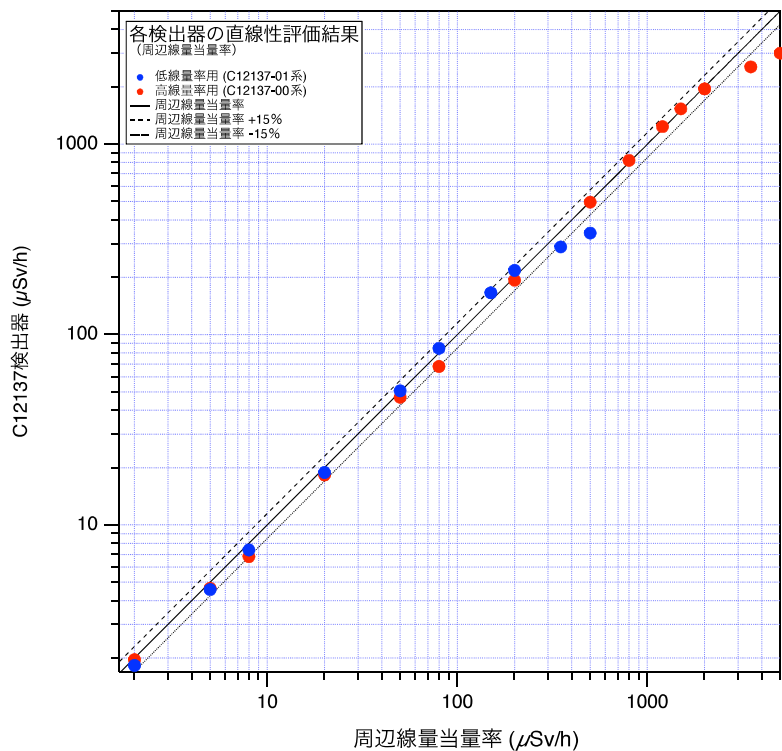


図6 改良型 C12137 シリーズのダイナミックレンジ。JAEA 核燃料サイクル工学研究所計量機器校正施設の所有する ^{137}Cs 線源による校正場で照射した。市販される C12137-00 は公称 $100 \mu\text{Sv/h}$ まで、C12137-01 は公称 $10 \mu\text{Sv/h}$ まで計測可能となっているが、アルゴリズム改良で大幅に測定可能範囲が広がっており、C12137-00 タイプでは 2 mSv/h まで到達する。

5.2 目標とする測定範囲

今回の検出器の開発にあたり、実際に環境放射線モニタリング業務を実施している原発立地県およびその隣の実務担当者を中心に聞き取りを行った。その結果、平時の観測で使用している 2 inch NaI(Tl) 検出器の置き換えと半導体検出器あるいは電離箱の置き換えの希望が多いことがわかった。いずれも測定能力の維持は達成しているものの、そのための人的・金銭的コストの負担が大きいことが理由となっていた。また、可搬型モニタリングポストの整備を検討されている方からは、C12137-00 で達成した 2 mSv/h を超える高線量率への対応の要望が根強かった。この際、従来の KURAMA-II による走行サーベイ時のように 1 ~ 3 秒間隔といった短いものは必要なく、2 分ないし 10 分の平均値で精度を達成すれば良いということであった。

また、既存のモニタリングポスト用検出器の仕様の典型的な例を表 5, 6, 7 に示す。いずれの場合も測定範囲をバックグラウンドレベル ~ 100 mGy/h とし、 $10 \mu\text{Gy/h}$ 程度までを NaI(Tl) 検出器で、それ以上を半導体検出器ないし電離箱でモニタする構成となっている。また、原子力規制庁の可搬型モニタリングポスト調達における仕様 [11] では「測定線量率範囲: $10 \text{ nGy/h} \sim 10 \text{ mGy/h}$ または $10 \text{ nSv/h} \sim 10 \text{ mSv/h}$ (^{137}Cs にて)」とされている。