

令和 3 年度研究成果報告会 研究代表者発表資料

○目次

- 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 -原子力災害支援保健チーム (NuHAT) の実現を目指して- P.1
- ② 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 P.8
- ③ 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 P.15
- ④ 自然起源放射性物質 NORM による被ばくの包括的調査 P.21
- ⑤ 染色体線量評価のための AI 自動画像判定アルゴリズム (基本モデル) の開発 . . . P.27
- ⑥ 福島原発事故の経験に基づく防護措置に伴う社会弱者の健康影響と放射線リスクの比較検討に関する研究 P.34
- ⑦ 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 . . . P.43
- ⑧ 健全な放射線防護実現のためのアイソトープ総合センターをベースとした放射線教育と安全管理ネットワーク P.51
- ⑨ 放射線防護研究分野における課題解決型ネットワークとアンブレラ型統合プラットフォームの形成 P.59

原子力規制庁
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-

2022年2月14日

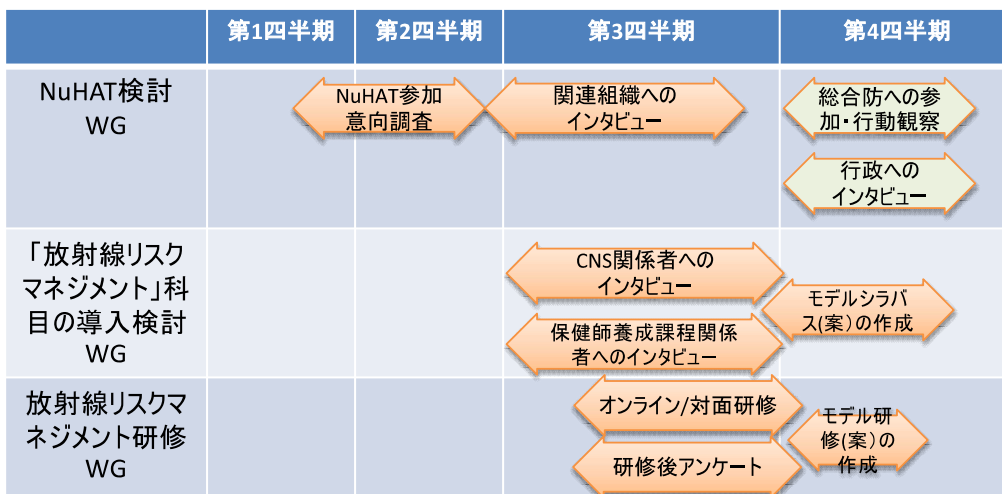
東京医療保健大学
主任研究者 明石真言

【課題名】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-

研究期間: 2021年(1年間)

【背景・目的】原子力防災対策では、平常時から原子力災害時の復旧期に至るまでの住民の不安に対する継続的な支援体制が不十分である。そこで看護職の持つ保健指導に関する能力を活用し、原子力・放射線利用に伴う放射線リスクに対する住民の「不安」に対峙していく必要があると考えた。本研究では、NuHATの構築を目指し、原子力災害対策とくに住民に対する放射線リスクマネジメントに看護職(看護師・保健師・助産師)を活用する方策の実現性について検討する。

【実施状況】



- インタビュー調査や研修はオンラインへの切り替えなどによって実施できた。
- 総合防への参加・行動観察、行政へのインタビューは調整中。
- 各WGの結果を踏まえて取りまとめを行う

【期待される成果】原子力災害の初期すなわち緊急時の防災対策に関しては緊急被ばく医療を含め整備されつつある。しかし、中長期的な視点に立った対策が手薄である。NuHATの活動は、この課題の解決に貢献できると考えている。また、原子力の看護職に対する関心・認識の高揚つながると考える。

研究体制

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)、

研究の背景と目的

原子力災害・放射線事故対して平常時から事故後の復旧・復興期に至るまでを通して
住民、被災者の想いに寄り添った放射線リスクマネジメントが不可欠

住民の放射線
リスクマネジメント

放射線リスク
(科学的エビデンス)



住民が理解・認識し
自ら判断できる状況

看護職(保健師・看護師・助産師)

住民にとって最も身近で信頼される保健・医療職として活動
しかし、原子力・放射線利用に関する関心・認識は不十分



放射線に関する看護職を
取り巻く教育環境の変化

- 看護の基礎教育(看護学モデルコアカリキュラム)
- 専門性の高い高度な実践力を備えた看護の養成(大学院教育)

看護職を活用した原子力災害保健医療チーム(NuHAT)を編成し
原子力・放射線利用の推進に寄与

研究目的

原子力・放射線利用に関する社会・時代のニーズに
対応できるNuHATの実現に向けての検討

研究方法

| WG | 研究方法 |
|-------------|---|
| NuHAT全般 | <p><NuHATを組織的に定着・維持していくための要件等の検討></p> <p>①既存の組織の経験から学ぶ災害時医療支援組織および被ばく医療支援組織の関係者に対するインタビュー</p> <p>②原子力防災における看護職の役割を知るために原子力防災訓練へ参加し行動観察</p> <p>③NuHAT参加希望調査</p> |
| メンバー養成教育 | <p><NuHATの構成員の人材を継続的に供給するための養成プログラムの検討(モデルシラバスの提案)></p> <ul style="list-style-type: none"> 放射線看護専門看護師養成関係者および保健師課程(大学院)の関係者へのフォーカスグループミーティング |
| メンバーの質向上の研修 | <p><NuHATの構成員の質の担保・向上のための定期的な研修の必要性と研修プログラムの提案></p> <ul style="list-style-type: none"> 放射線看護専門看護師養成課程の修了者等を対象に、放射線リスクマネジメントに係る研修を実施し、アンケートにて研修に関する意見聴取 |

- 東京医療保健大学の研究倫理委員会の承認 (承認番号: 教33-3B)
- COI: 該当事項無し

研究結果-1 NuHAT全般

| 既存組織へのインタビュー結果 | |
|----------------|---|
| 語られた実態 | 事務局等を有して運営。 |
| | 災害全般を対象とする医療関連チーム(以下災害チーム)は全国に数百、原子力災害時の支援チームはあまりない。 |
| | 災害チームは度重なる災害での活動などを通して認知、原子力災害時の支援チームの社会的な認知は災害チームに比べると不十分。 |
| 語られた課題 | 安定した財源と人材の確保 |
| | 常にあるわけではない災害への構成員のモチベーションを保つ方法の工夫 |
| | 教育の機会の確保 |



【NuHATを定着し継続していくための要件】

- 組織基盤(当面は日本放射線看護学会へ管理を依頼)
- チームの規模と必要なチーム数
- 構成員(メンバー)の確保
- 財政基盤の確保(今後の課題)
- 社会的な認知(今後の課題)

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 | 原子力防災訓練での行動観察の結果 | 行動観察の結果 |
| 現存被ばく状況下 | ・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 | ・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 |

- NuHATの役割を考えると機動性のあるチームは**1つとし**、複数の構成員が所属する。
- チームの運営・管理は当面は日本放射線看護学会に依頼する
- 現地派遣の際は、原則、NuHAT構成員から**2名1組**となり実践活動を行う
- DMATや災害支援ナース(JNA)などと同様に現地の負担にならないように自己完結で派遣現場で生活できるようにする

NuHATの構成員の供給源

放射線看護専門看護師(CNS)課程修了に対するアンケート調査

- CNSの養成課程
 - ・弘前大学、長崎大学、鹿児島大学
- 2014年3月～2021年3月までの修了者
 - 36名を対象に参加に関する意向調査
- NuHATが構築された場合、参加する意思があるか？
 - ・「参加する」:32名
 - ・「職場等と調整がいたら参加の意思を表明する」:4名
 - ・「参加する意思はない」:0名

研究結果-2 メンバー養成教育

フォーカスグループミーティング(FGM) 参加者

・CNS関係者:6名 ・保健師教育関係者:4名

FGMの主な検討内容

(1)大学院教育の現状

- 大学院課程の修了要件(単位数)
- 放射線リスク関連の科目の有無と単位数
- 担当教員
- 放射線リスク関連科目がある場合、演習実習の有無
- 外部の研修等に参加した場合の単位等の取り扱い
- 単位互換制度の有無
- 課程修了者の現在の活動状況
- 就労場所、就労場所でのポジションなど

(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

放射線リスクマネジメント論のシラバス(案)

1単位 8コマ(90分)

| | |
|---|----------------------------------|
| 1 | 放射線リスクマネジメントの概念および目的(講義) |
| 2 | 放射線リスクアセスメント(講義) |
| 3 | 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(講義) |
| 4 | 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(講義) |
| 5 | 放射線リスクマネジメントのプロセス(講義) |
| 6 | 放射線リスクマネジメントの実践(事例検討) |
| 7 | 放射線リスクマネジメントの実践(個人を対象にしたロールプレイ) |
| 8 | 放射線リスクマネジメントの実践(集団を対象にしたロールプレイ) |

研究結果-3 メンバーの質向上の研修

オンライン研修 12/11 (参加者22名)

| 時間(分) | 内容 |
|-------|-------------------------------------|
| 10 | 開会 |
| 40 | 放射線リスクマネジメント |
| 50 | 福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応 |
| 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 |
| 25 | 【演習】サーバイメータの取り扱い |
| 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 |
| 5 | 閉会 |

対面研修 1/19-20 (参加者6名)

1日目

| 時間(分) | 内容 |
|-------|-------------------------|
| 10 | 開会 |
| 50 | 福島原発事故後、住民の抱える不安とその対応 |
| 50 | 個人モニタリング(測定と評価)の基礎 |
| 40 | 【演習】自然放射線の測定 |
| 40 | 【演習】ポータブルX線撮影装置を用いた防護演習 |
| 40 | 【演習】体表面汚染のモニタリング |
| 5 | 解散 |

2日目

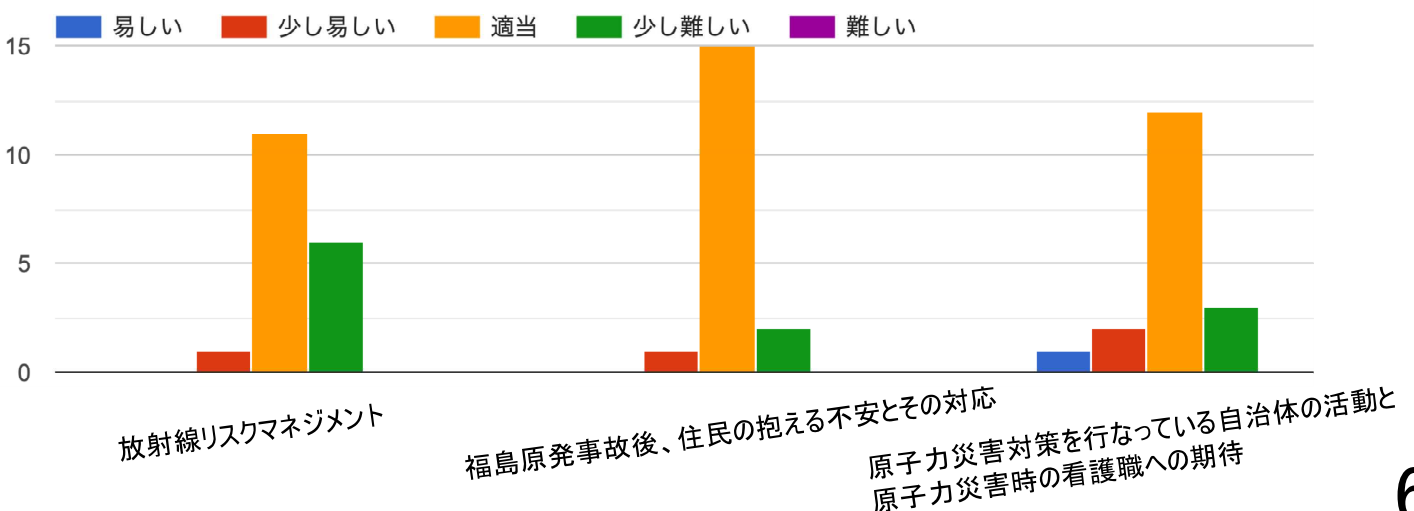
| 時間(分) | 内容 |
|-------|----------------|
| 60 | 放射線リスクマネジメント |
| 40 | 【演習】甲状腺のモニタリング |
| 60 | グループワーク |
| 10 | 閉会(アンケート依頼) |

研修会参加者に対するアンケート調査の結果

【研修の必要性について】

- ・「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。」
- ・「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。」
- ・「看護職として適切な知識を身に付けておくことの必要性を改めて感じました。」

【研修の難易度について】



NuHATの今後の見通し

ーフーズビリティスタディのまとめー

1. 一般社団法人 日本放射線看護学会 が運営母体となって NUHATを構築
 - 日本放射線看護学会を運営母体とした理由
 - ①NuHATの主な構成員は、放射線看護専門看護師(CNS)である
 - ②日本放射線看護学会は、CNSの養成機関(大学院)の支援母体であり、学会内にCNS-WGがある
2. NuHAT構成員のネットワークの構築
3. CNS等を対象とした放射線リスクマネジメントに係る研修会を開催
 - 東京医療保健大学に依頼し、定期的を開催する
4. CNSの大学院カリキュラムの中に放射線リスクマネジメントの科目を設定し、モデルシラバスに沿った教育を実施

【運営していく上での課題】

- ①原子力界、関係都道府県の行政担当者のNuHATに対する認識
- ②NuHATを継続していくための財政的基盤の確保

今年度の成果

- 日本放射線看護学会 第10回学術集会(2021/9/18,19開催)にて口演発表

今後(令和4年3月まで)の予定

- 2022年1月28日 第2回全体会議
- 2022年?月 総合防災訓練に参加
- 報告書のまとめ
- 日本放射線看護学会との話し合い

自己評価

| 評価の視点 | 自己評価 | コメント |
|------------------------------|---|---|
| 評価時点までの研究の実施が研究計画に沿って行われているか | 1 計画を上回る 2 概ね計画どおり 3 計画を達成できない 4 計画を達成できないが代替手段によって今年度の目標を達成した | WG2および3については、研究目的を達成し、計画通りに進めることができた。総合防災訓練における行動観察が実施できていないために、現時点では、一部の計画を遂行できていない。 |

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

| | |
|-------|------------------|
| 研究代表者 | 箕輪はるか(慈恵医大) |
| 分担研究者 | 小島貞男(愛知医大) |
| | 青山道夫(筑波大) |
| 研究協力者 | 緒方良至(愛知医大・大阪産業大) |
| | 加藤結花(日立製作所) |
| | 宮部慎介(日本化学工業) |
| | 佐久間貴志(荏原製作所) |
| 研究参加者 | 有信哲哉(愛知医大) |

1

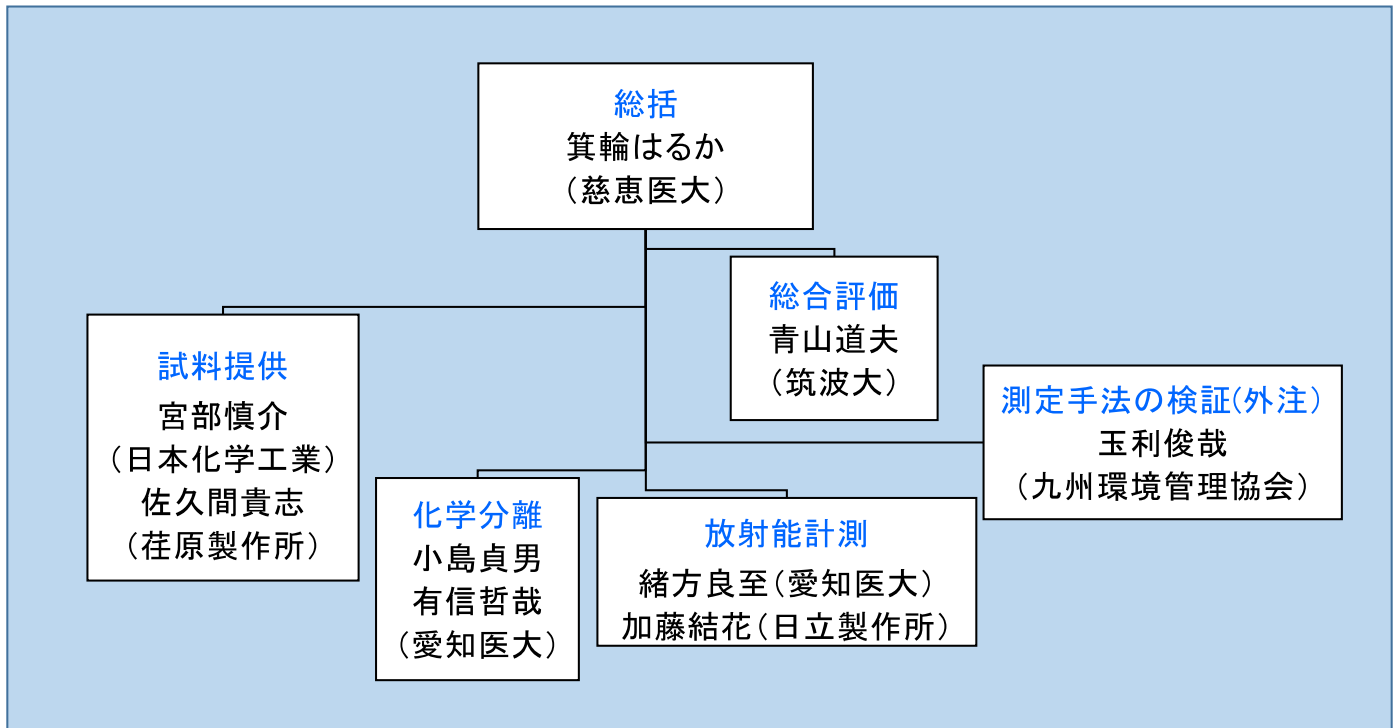
課題名 水中の放射性ストロンチウムの安全、迅速、安価な分析法の開発

研究期間: 令和3年度(1年間)

背景・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、その分析には、多量の劇物を用いた複雑な化学操作が必要で時間を要するため、十分な分析ができていないのが現状である。本研究では、放射性ストロンチウムの安全、迅速、安価な分析法として、Sr吸着剤ピュアセラムMAqを用いた測定法を開発することを目的とした。

| 項目 | 実施状況 |
|--|-------------|
| Sr吸着剤における天然放射能 ^{210}Pb の影響評価 | 計画通り実施済 |
| Sr吸着剤における ^{140}Ba の影響評価 | 計画通り実施済 |
| Sr吸着率の評価 | 計画より遅れて実施済 |
| Sr吸着剤のSr吸着率が予備実験の結果(98%)に及ばず、90%程度であったため、その原因の追究と対策の為研究が遅延した。大気中 CO_2 の吸収による劣化が原因と推定し、防止策を検討した。 | |
| ^{90}Sr の迅速測定法の確立 | 計画より遅れて実施済 |
| 迅速測定法の天然海水試料への応用 | 計画より遅れて実施済 |
| 精密測定における ^{90}Y のミルクキング法の開発 | 計画より遅れて実施済 |
| 当初予定していたSr吸着剤からの塩酸を用いたY溶出がうまくいかなかったため、方針の変更を余儀なくされた。EDTAを用いた脱離により、測定可能であることがわかり、実用化の目途は付いた。 | |
| 大容量試料への適用 | 2022年2月実施予定 |
| 精密測定 of 天然海水試料への応用 | 研究期間終了後 |

期待される成果: 本法の迅速測定により、**測定頻度・測定箇所を増加**し、かつ、**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**することができ、一般公衆の**被ばくりスク**を低く抑え、**健康・安全に貢献**すると思われる。本法の精密測定の利用により、平常時においても**信頼できる値が広範囲・高頻度で得られ**、海洋の放射性物質の広がりの実態の把握が容易に可能となることが期待できる。



研究の概要1 背景

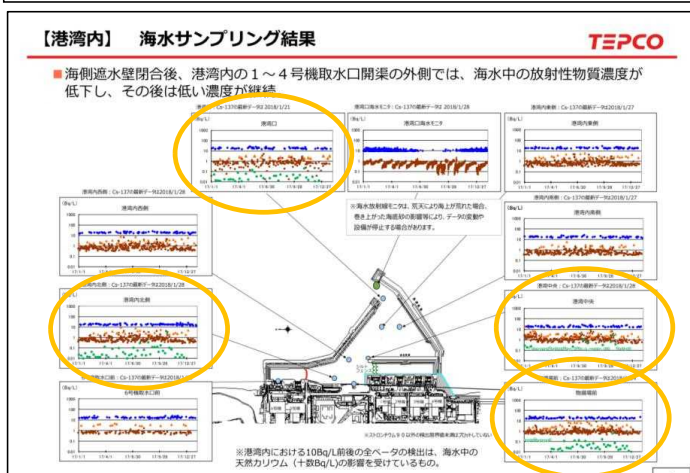
緊急時の ^{89}Sr ^{90}Sr 、および 平常時の ^{90}Sr は、環境モニタリングにおける重要な核種である。

「平常時モニタリングについて(原子力災害対策指針補足参考資料)」p.41 表A-1

| 目的 | 調査項目 | 対象核種 |
|-----------------------|----------------|---|
| 周辺住民等の被ばく線量の推定及び評価 | 大気中の放射性物質の濃度 | Co-60、I-131、Cs-134、Cs-137 |
| | 環境試料中の放射性物質の濃度 | Co-60、 Sr-90 、I-131、Cs-134、Cs-137 |
| 環境における放射性物質の蓄積状況の把握 | 環境試料中の放射性物質の濃度 | Cs-137 |
| 緊急事態が発生した場合への平常時からの備え | 環境試料中の放射性物質の濃度 | H-3、Co-60、 Sr-90 、Cs-137、Pu-238、Pu-239+240 |

原子力規制庁監視情報課(平成30年4月4日、令和3年12月21日改訂)

しかし、放射性Srは純ベータ線放出核種のため、発煙硝酸など劇物を使う複雑で長時間の前処理が必須で、測定に時間がかかる。



東京電力による ^{90}Sr の2018年2月公開データでは、港内の測定点9地点のうち ^{90}Sr の測定値は4地点のみで、測定は3日に1回程度である。
※ ^{134}Cs 、 ^{137}Cs の測定は毎日

β 核種測定も γ 核種測定と同程度の測定点・測定頻度となるのが理想的である。

放射性Srの安全、迅速、安価な前処理法の開発が必要とされている。

「福島第一港湾内・周辺海域の海水モニタリング状況」
東京電力ホールディングス 2018年2月14日

目的: 環境水中のストロンチウムの安全・迅速・安価な分析方法の開発と海水・陸水への適用

方法: Sr吸着剤「ピュアセラム®MAq」を利用して海水からSrを選択的に回収し、放射性Srを測定する。

(1) 迅速測定 【緊急時モニタリング】

海水からSrを吸着させた吸着剤をそのまま測定

(2) 精密測定 【平常時モニタリング】【環境研究測定】

^{90}Y の成長を待ち、Sr吸着剤から分離して測定

(3) 天然海水試料への適用

目標検出下限値 迅速測定: ^{90}Sr 濃度 $0.4\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$

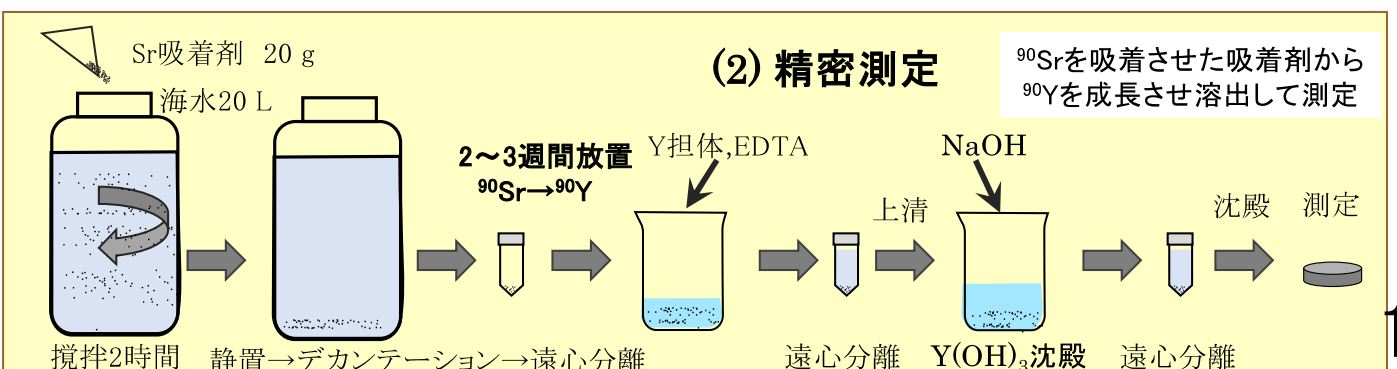
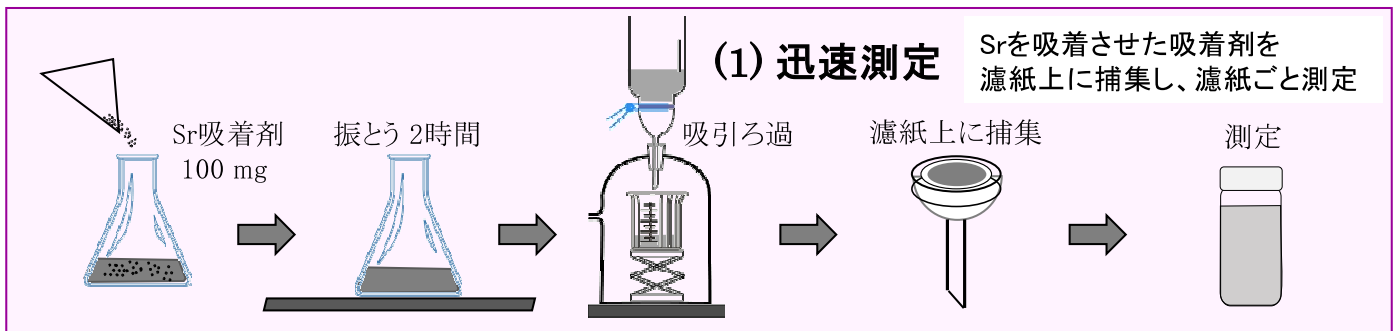
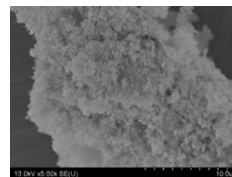
精密測定: ^{90}Sr 濃度 $0.2\text{mBq}\cdot\text{L}^{-1}$

研究の概要3 特色

Sr吸着剤:ピュアセラム®MAq (日本化学工業)

主成分: ケイ酸バリウム(BaSi_2O_5)

Srを選択的に吸着・捕集する/海水に適用可能である



緊急時モニタリング

平常時モニタリング・環境研究試料

| | TEPCO | Uesugi et al. (2018) | 本研究 迅速測定 | 文科省 ストロンチウム 分析法 | 田副ら (2017) | 本研究 精密測定 |
|--------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------------------|
| 分析法 | Sr レジン | Sr RadDisk | Sr吸着剤 | ①イオン交換法 ②発煙硝酸法 ③シュウ酸塩法 | DGA レジン | Sr吸着剤 |
| 測定機器 | ピコベータ | 液体シンチレーションカウンタ | 液体シンチレーションカウンタ/低BG-ガスフロー | 低BG-ガスフロー | 低BG-ガスフロー | 低BG-ガスフロー |
| 試料量 | 1 L | 0.1 - 1 L | 0.1 L | 40 L | 0.5 - 3 L | 20 L |
| 分析時間 測定時間 | 7日間程度 | 4h | 3h すぐに測定 | 操作1週間+ 2週間後測定 | 20hすぐに測定or 2週間後測定 | 3h+2週間後 測定 |
| 劇物 | 劇物不使用 | 硝酸 | 劇物不使用 | 発煙硝酸 (②の場合) | 硝酸 | 劇物不使用 |
| 費用 | 高 | 44,000円 /試料 | 数千円 /試料 | 中 | 高 | 低 |
| 検出下限 | 0.3 Bq L ⁻¹ | 0.035Bq L ⁻¹ | 0.4 Bq L ⁻¹ | 0.6 mBq L ⁻¹ | 0.15 mBq kg ⁻¹ | 0.2 mBq L ⁻¹ |

進捗1:ロードマップ

| 実施項目 | 9月 | 10月 | 11月 | 12月 | 1月 | 2月 | 3月 | 状況 |
|-----------------|----------|--------------------------------|-----|-----|----|----|-----|------|
| 基礎 実験 | 迅速・精密 | 天然放射能(²¹⁰ Pb)の影響評価 | | | | | | 一部実施 |
| | 迅速・精密 | 140Baの影響評価 | | | | | | 実施済 |
| | 迅速・精密 | 90Sr吸着率の確認 | | | | | | 実施済 |
| | 精密 | 90Yミルキング法の確立 → | | | | | | 実施中 |
| | 迅速・精密 | 90Sr測定の整備 | | | | | | 実施済 |
| | 精密 | 大容量試料へ適用 → | | | | | | 実施予定 |
| 環境水 への応 用 | 迅速 | 天然海水に応用 (迅速測定) → | | | | | | 実施中 |
| | 精密 | 天然海水に応用 (精密測定) × | | | | | | 未実施 |
| まとめ | 結果のとりまとめ | | | | | | 実施中 | |

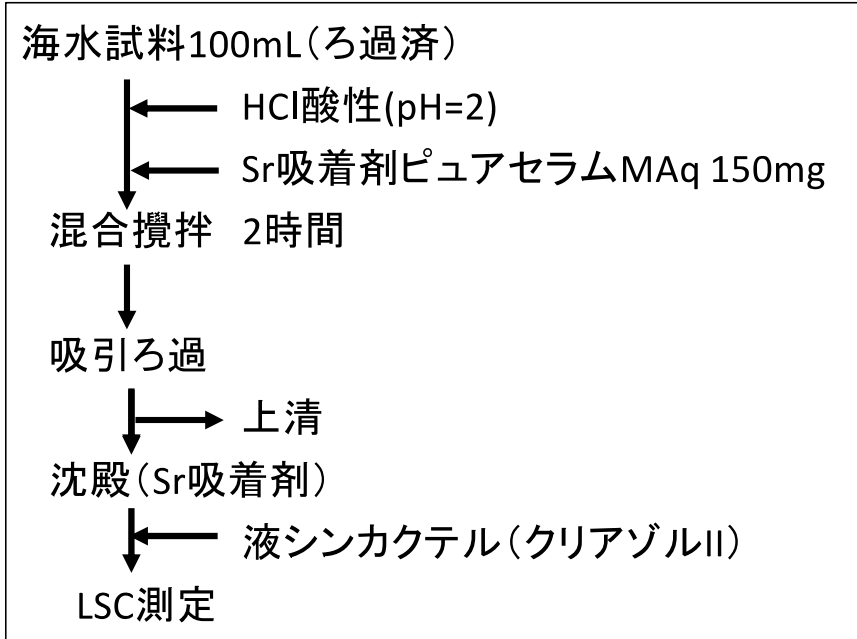
迅速測定法を確立し、海水に応用した。

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。

- (1) Sr吸着剤の ^{90}Sr 測定における ^{140}Ba の影響評価
 - ☞ BaはSr吸着剤にほぼ定量的に吸着する。混入が疑われる場合は寄与を見積もり差し引くことで補正できる。
- (2) Y吸着率の確認
 - ☞ 吸着率は10%以下であり、 ^{90}Sr 分析の妨害とならない。
 ^{90}Y トレーサによる実験(2021年11月実施)
- (3) Sr吸着率の確認
 - ^{90}Sr トレーサによる実験(2021年9月、12月実施)
 - ^{85}Sr トレーサによる実験(2021年10、11、12月実施)
 - ☞ 予備実験と同等の98%以上にはならず、1回操作で90%以上
 - ☞ ピュアセラムMAqの劣化と推定 ☞ 2回の操作で98%以上を達成
- (4) ピュアセラムMAqにおけるSr吸着率の安定性の評価
 - ☞ 吸着率の低下は大気中の CO_2 によるものと推定
 - ☞ 保存状態による劣化の影響の確認、劣化の予防法を検討

- (5) ^{90}Sr の測定の整備
 - 低BGガスフローカウンタの導入と、 ^{90}Y 計数効率の測定
- (6) 迅速測定法の確立
 - 海水100mL、吸着剤150mg、2時間攪拌
 - ☞ 人工海水+ ^{90}Sr トレーサで確認 → Sr回収率 平均93%
- (7) 迅速測定法の天然海水試料への応用
 - ☞ ^{90}Sr トレーサで確認(2022年1月実施)
 - 適用条件: 塩酸酸性pH=2、Y担体の添加、 SO_4^{2-} イオン存在下
- (8) 精密測定法の確立
 - ^{90}Sr 吸着～ ^{90}Y 溶出(ミルクング)方法
 - ☞ 当初考えていたYのみ酸溶出は困難→EDTAによる脱離
 - ☞ ^{85}Sr , ^{90}Y トレーサで確認(2021年12月,2022年1月実施)
- (9) 精密測定法の大容量試料への適用←2022年2月実施予定
- (10) 精密測定法の天然海水試料への応用←未実施

実験操作



実験操作に要する時間
3時間

天然海水(小笠原,表層水)
+ ⁹⁰Srトレーサー
で検証した結果:
Sr回収率 平均93%

Sr吸着剤ピュアセラムMAq
を用いた海水中の放射性
Srの迅速測定法を確立した

検出下限濃度 (MDC: the minimum detectable concentration)

算出条件: 試料容量100mL, Sr回収率90%, 計数効率97%, バックグラウンド 42cpm, 計測時間60min
⇒ MDC = 0.00046 Bq・mL⁻¹ = 0.46 Bq・L⁻¹

成果

学会発表(口頭)

小島貞男(愛知医大)、緒方良至(愛知医大・大阪産業大)、加藤結花(日立製作所)、高宮幸一(京大複合研)、箕輪はるか(慈恵医大)

「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」

日本放射化学会第 65 回討論会 Web 開催(2021/9/22-24)講演番号2K07

緒方良至(愛知医大・大阪産業大)、小島貞男(愛知医大)、箕輪はるか(慈恵医大)、加藤結花(日立製作所)

「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 Web 開催(2021/9/22-24)講演番号2K08

(1) 迅速測定法の確立と海水試料への応用 →成果発表準備中

・迅速測定法の実験操作

- ☞ 海水試料100mLとSr吸着剤150mgを混合攪拌2時間, Sr回収率 90%以上
適用条件: 塩酸性pH=2、Y担体の添加、SO₄²⁻イオン存在下

・迅速測定法における⁹⁰Srの検出下限値

- ☞ 海水試料量100mLで MDC=0.46 Bq・L⁻¹
目標値 0.4 Bq・L⁻¹ ほぼ達成。排水濃度基準 30 Bq・L⁻¹ の 1/65

(2) 精密測定法の実用化への目途

ピュアセラムMAq吸着⁹⁰Srからの⁹⁰Yミルキング法の確立

- ☞ Sr吸着剤にYキャリアを加え0.05M-EDTAでSr, Y脱離→NaOHでY(OH)₃沈殿を生成、回収し測定
※最終的に⁹⁰Yを測定するため、Pb,Raなど天然RIの影響が少ない
- ☞ 海水試料量100mL, Sr吸着剤120mgで ⁹⁰Y回収率98% を確認
大容量試料へ適用できる目途がついた。

| 項目 | 計画 | 成果 | 評価 |
|------------------------|-------------------------------------|---|-------------------|
| Sr吸着剤ピュアセラムMAqのSr吸着能評価 | 試料100mLに対し100mg、2時間攪拌でSr吸着率98% | 試料100mLに対し150mg×2時間攪拌でSr吸着率90%、さらに50mg×2時間攪拌で吸着率98% | 代替手段によって目標を達成した |
| 放射性妨害核種の評価 | Pb, Ba, Raの吸着率を測定し評価する | 吸着率 Pb 86% Ba 99.93%, Ra 99.85% | 目標を達成した |
| 迅速測定法の確立 | 操作時間3時間 Sr回収率98% | 操作時間3時間 Sr回収率90%以上 | 目標をほぼ達成した |
| 迅速測定法の海水試料への応用 | Sr検出下限 目標値 0.4BqL ⁻¹ | Sr検出下限値 0.46BqL ⁻¹ | 目標をほぼ達成した |
| 精密測定法の確立 | 酸によるYのミルクング | EDTAによるSrとYの脱離、 Y回収率98% | 代替手段によって目標を達成した |
| 精密測定の大容量試料への適用 | 試料量1L - 20L | 2022年2月実施予定 | 現段階ではまだ目標を達成していない |
| 精密測定法の天然海水試料への応用 | Sr検出下限 目標値 0.2mBqL ⁻¹ | 実施は研究期間終了後 | 目標を達成しなかった |

| 評価の視点 | 自己評価 | コメント |
|------------------------------|----------------------------------|--|
| 評価時点までの研究の実施が研究計画に沿って行われているか | 4. 計画を達成できないが代替手段によって今年度の目標を達成した | 迅速測定法を確立し、海水に応用した。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。 |

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

京都大学複合原子力科学研究所
谷垣 実

課題名 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

研究期間：2021年度（1年間）

背景・目的

KURAMA-IIで実績のある受光素子にMPPCを使用したシンチレーション検出器をベースに、環境放射線モニタリングに適したMPPC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。

実施状況

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。新型コロナウイルス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核サ研の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。

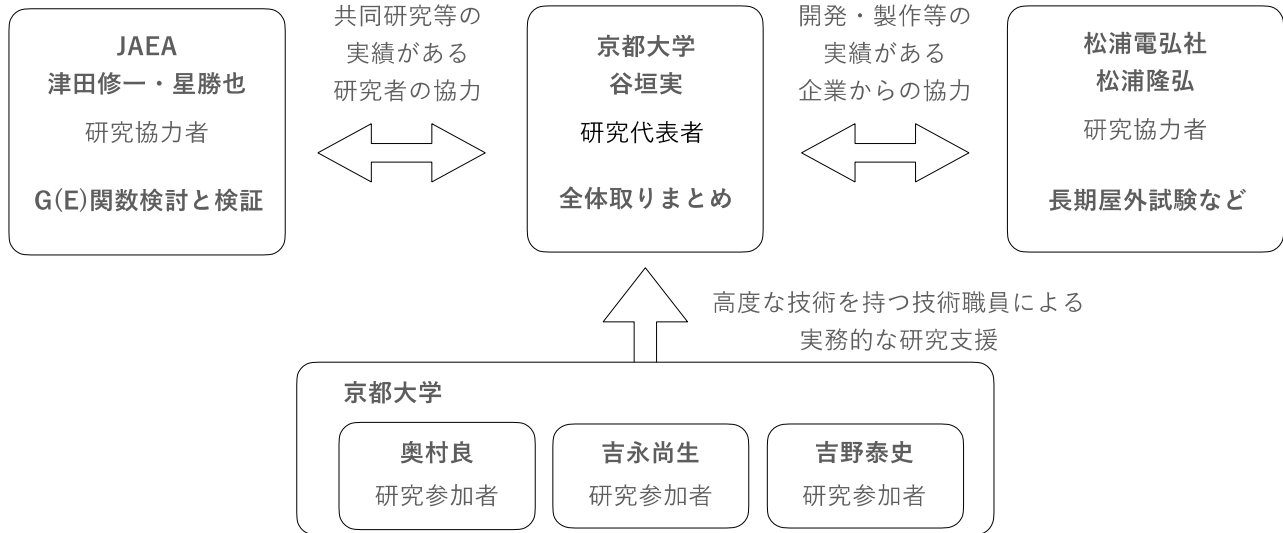
また、今回の研究成果である10 mSv/h程度まで計測可能な高線量率用検出器については商品化を実現した（浜松ホトニクス社C12137-06HA）。

| 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 | | | |

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。

研究体制



研究の背景

既存のモニタリングポスト用検出器

参考図：茨城県Webページより引用



NaI(Tl)検出器

- 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
- 高電圧の精密制御が必要（±1%未満）

参考図：茨城県Webページより引用



電離箱検出器

- エネルギー特性・方向特性が良い
- 線量率直線性が良い
- エネルギー情報が得られない
- 平常時レベルの測定が困難
- 外気温や気圧、湿度に影響される

島根県の例：放射能測定法シリーズ No.17より



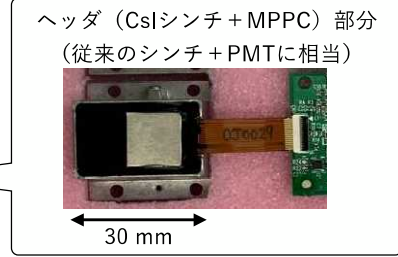
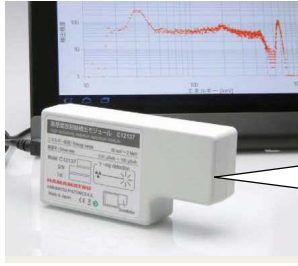
半導体検出器

- 高線量率計測が可能
- 安価
- エネルギー情報が得られない
- 環境の外気温の変化に対する安定性
- 平常時レベルの測定は難しい

研究の背景

MPPCを受光素子とした全固体検出器の実用化

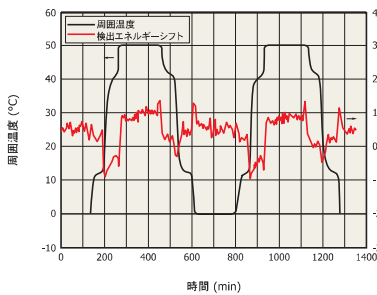
CsI(Tl)+MPPC検出器 (浜ホトC12137シリーズ)



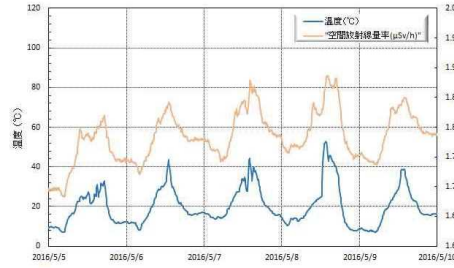
- 検出器+受光素子の大幅な小型化
検出器+受光素子のモールドで適切な温度補償・湿度管理の実現
- MPPCで低バイアス電圧 (~50 V) 動作
電圧制御が容易
耐圧処理が不要になり小型化・軽量化に貢献
低消費電力 (USBバスパワー動作)
- CsI(Tl)の発光波長とMPPCの受光効率が適合

検出器を温度管理なしで使用した場合の温度依存性の例

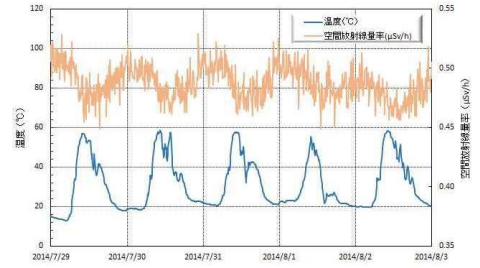
浜ホトC12137シリーズ(注1)



NaI(Tl)の例(注2)



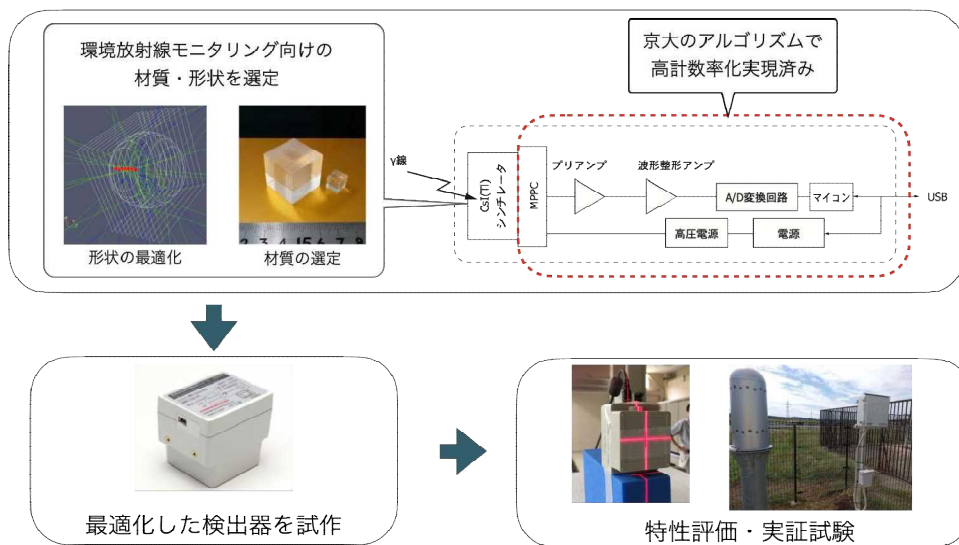
シリコン半導体の例(注2)



(注1) 浜松ホトニクスカタログより (注2) 放射能測定法シリーズ No. 17 可搬型モニタリングポストのデータより

研究の概要

目標：モニタリングポストの測定能力維持 + 維持管理コスト削減



具体的には

- モニタリング目的に合致した線量率範囲
- 特性及び価格面で合理的なシンチレータの検討 (材質や形状)
- 耐環境性向上による維持管理コスト削減 (温度、湿度、機械強度など)
- 既存モニタリングポストとの運用の連続性

目標とする設定範囲

ユーザの声を聴きながら用途に応じた範囲を設定



C12137-01 (~300 $\mu\text{Sv/h}$)

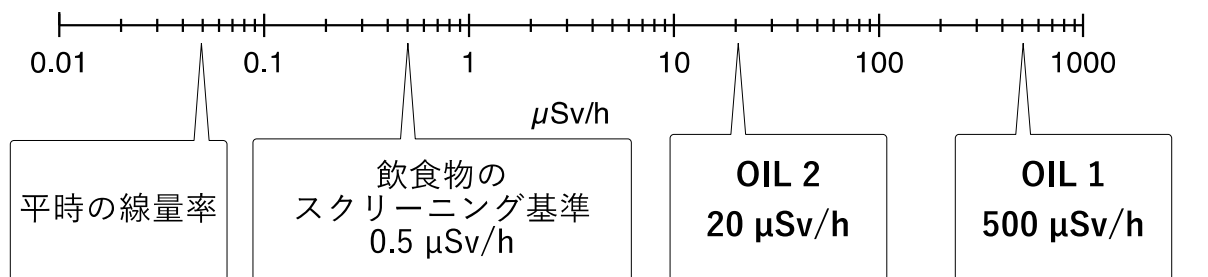


C12137-00 (0.1 ~ 2000 $\mu\text{Sv/h}$)

モニタリングポストを運用する
周辺自治体担当者への聞き取り

0.01~10 $\mu\text{Sv/h}$ (NaI(Tl) 2 inch 置き換え)

1~5000 $\mu\text{Sv/h}$ 以上 (緊急時対応)



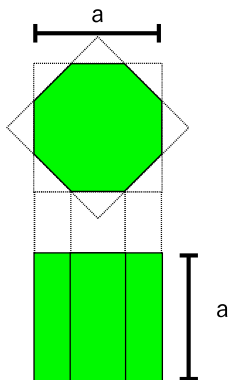
シンチレータの検討

形状：低線量率は八角柱・高線量率は立方体

低線量率

立方体の異方性は角の実効厚で発生。

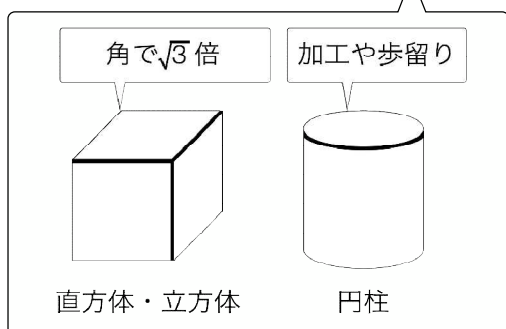
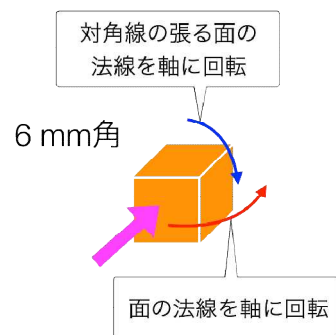
加工しやすさや歩留まりを考慮して八角柱を採用



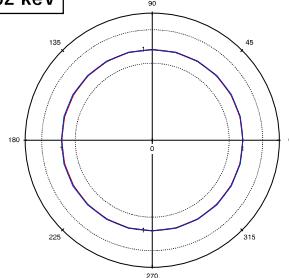
高線量率

γ 線の平均自由行程が結晶寸法以上になる。
e.g. CsIで2.6 cm@662 keV

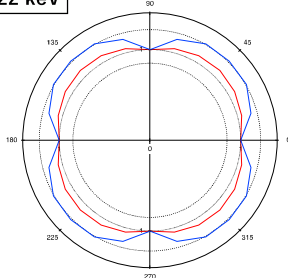
立方体のままでJISを満たす特性が得られる



662 keV



122 keV

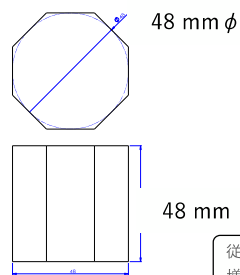


図中の点線はJIS Z4325 (モニタリングポスト) $\pm 20\%$ (^{137}Cs , $0^\circ \sim \pm 120^\circ$)
JIS Z4333 1型 (サーベイメータ) は $-29\sim+67\%$ (80 keV~1.5 MeV, $0^\circ, \pm 30^\circ, \dots$)

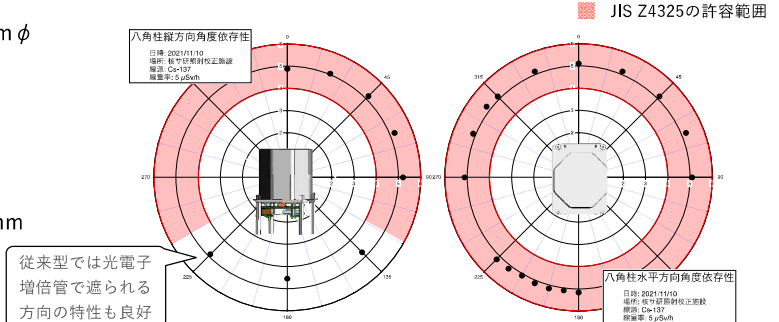
試作品評価: 低線量率用(八角柱)

良好な特性 + 設計通りのダイナミックレンジ

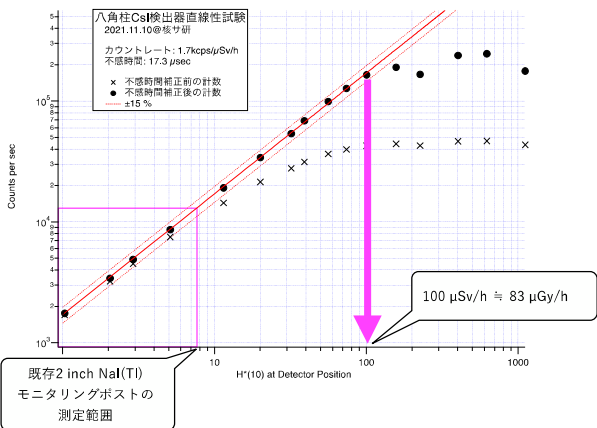
試作品形状



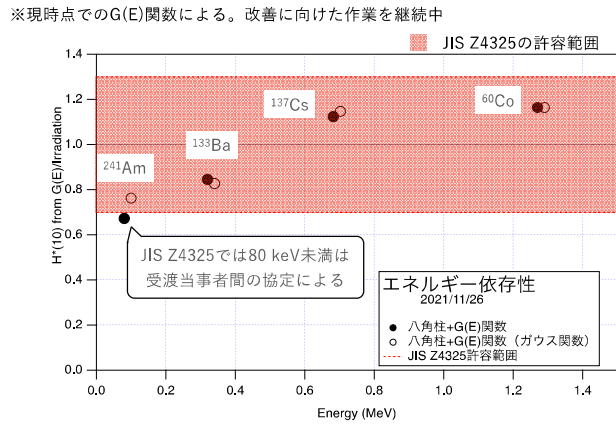
方向特性試験@JAEA核サ研



直線性試験@JAEA核サ研

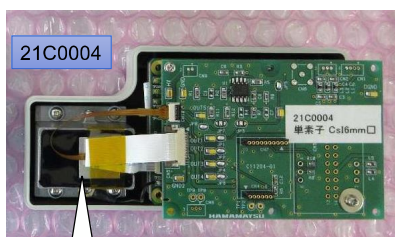


エネルギー特性@JAEA核サ研



試作品評価: 高線量率用(立方体)

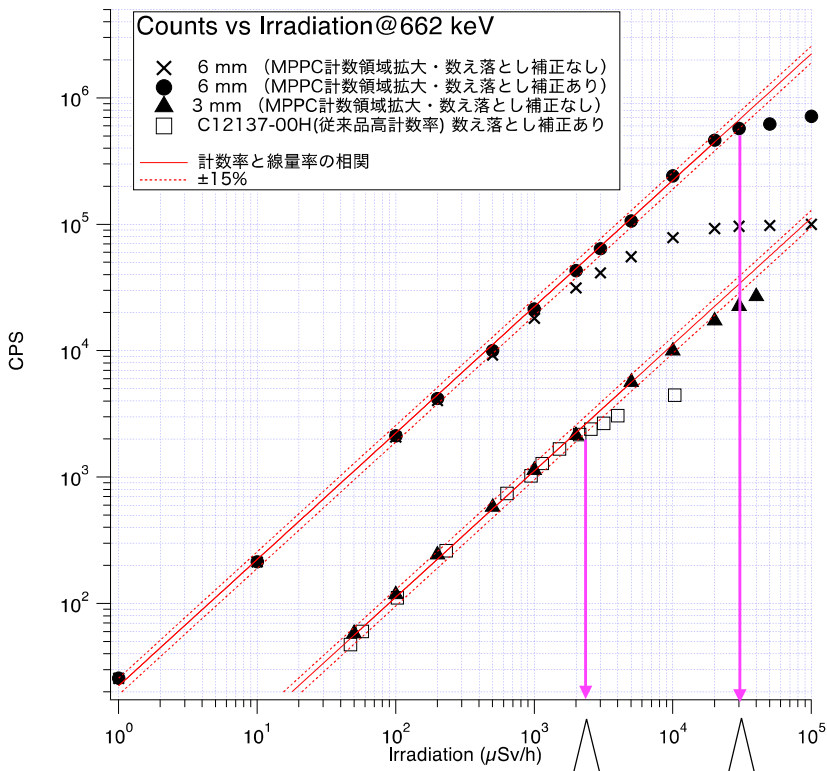
CsI(Tl)の直線性評価



結晶の大きさを変える

- CsI(Tl) 6 mm角立方体
- CsI(Tl) 3 mm角立方体

- 従来品 (白抜き四角) に比べて大幅に改善
- 3 mm角はFRSの照射上限 40 mSv/hまでしか取れなかった



今年度の成果

高線量率用検出器の商品化

浜松ホトニクスC12137-06HA（6 mm角 CsI(Tl)搭載）

※ 低線量率用八角柱検出器も商品化作業中

学会等での発表

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

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



左：商品化され石川県に導入されるC12137-06HA（銘板は間に合わず試作品のものを流用）

右：C12137-06HAは樹脂容器に収められて設置される（写真内の一番右側）

一般向け広報

- ・「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）

自己評価

| 項目 | 当初計画 | 現状 | 評価 |
|--------------|---|---|--|
| 検出器の試作 | 安定した運用実績のあるCsI(Tl)+MPPCたいぶで、各種判断基準をカバーする環境放射線モニタリングに適した特性をもつ検出器の設計・製作 | PHITSによるシミュレーション等をもとに、製造時の歩留まりと方向特性を両立させた2 inch NaI(Tl)置き換え八角柱型検出器と緊急時モニタリングに対応可能な10 mGy/h以上測定可能な検出器を試作し、これらに適用するG(E)関数も決定した。 | 新型コロナの影響で遅れが発生したものの、事業内で目標通りの試作を行うことができた |
| 性能評価 | 校正場をもちいた検出器の特性評価 G(E)関数の妥当性を確認 | 試作した検出器について校正場による評価を行い、JIS規格に適合する良好な結果を得た。G(E)関数の改善による一層の特性改善の試みを継続中 | 目標通りの結果を得た |
| 運用試験 | 既設のモニタリングポスト横に設置して長期運用を行い、実測値の相互比較や耐久性の評価を行う | 新型コロナの影響の試作遅れで着手が遅れる。高線量率対応型は2021年秋頃より屋外耐久性試験を実施。2022年1月より八角柱型と高線量率対応型を石川県内のモニタリングポスト横に設置しての長期運用に着手。 | 試作の遅れによる遅れが発生したが、年度内に結果をまとめる予定。 |
| 成果公表 社会実装 | 研究成果の学会等での発表 一般への研究開発状況の紹介 | 国内外での学会発表 (原子力学会・EPR2021) 一般への情報公開 (Maker Faire, Twitter等) 高線量率対応検出器の商品化 (浜ホトC12137-06HA) 低線量率対応検出器の商品化作業中 | 研究成果を商品化まで結びつけることができた |

【研究課題名】 自然起源放射性物質(NORM)による 被ばくの包括的調査

【研究区分】
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
【研究期間】
1年間(R3年度)

量子科学技術研究開発機構
量子生命・医学部門
放射線医学研究所
放射線規制科学研究部
岩岡和輝

研究全体の概要

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

課題名

自然起源放射性物質(NORM)による被ばくの包括的調査

研究期間: 2021年度(1年間)

背景・目的

自然起源放射性物質(NORM: Naturally Occurring Radioactive Material)による被ばくについて、我が国において規制管理方法の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。本研究は、NORMの被ばくに関する調査データを整理することにより、国内規制に繋がる新たな課題を探るものである。

実施状況

量子科学技術研究開発機構(量研)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った。

期待される成果

本事業の成果から、今後の調査の対象物質の優先順位等が明らかとなる。すなわち、本事業の成果は、我が国の実情に応じたNORMの放射線防護のあり方に関する検討材料となることが期待できる。

研究代表者: 岩岡和輝

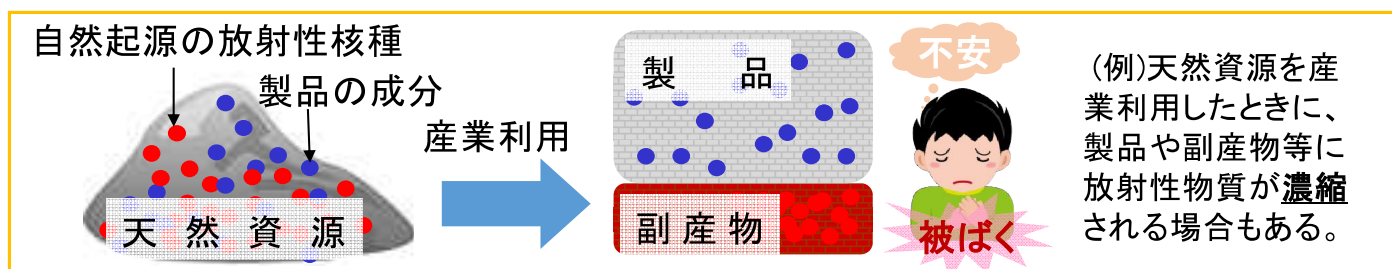
研究参加者: 矢島千秋、富坂侑斗、神田玲子

| |
|-----------------------------|
| 【 全体総括 】 量研 岩岡和輝 |
| ①使用量の調査 量研 岩岡和輝、矢島千秋 |
| ②放射能濃度の調査 量研 岩岡和輝、富坂侑斗 |
| ③とりまとめ 量研 岩岡和輝、富坂侑斗、神田玲子 |

研究概要①

研究背景

- 天然資源に含まれる自然起源の放射性核種の量は、天然資源の種類(品目や産地)によって大幅に異なる。



- 自然起源の放射性核種を多く含む天然資源の産業利用による被ばくは国際的な問題となっており、国際的な規制の整備が進められています。

➤ 国際基準(近年の状況)

- ・U-238系列やTh-232系列の濃度で1000Bq/g (IAEA基本安全基準)
- ・NORM産業利用に関する勧告 (ICRP Publication142)

- 我が国についても、国際基準の最近の状況を踏まえて、自然起源の放射性核種を多く含む天然資源の規制を検討していく必要がある。

問題点

我が国において、“どんな天然資源がどれだけ使われていて、自然起源の放射性核種がどのくらい含まれているか”という情報が、国内規制を検討できるほど整理されていない。



我が国の喫緊の課題として

本研究の実施内容(課題)

我が国の実情に応じた最新のデータ(天然資源の原料や製品等の国内使用量と放射能濃度)の整理を行う。

課題①NORMの国内使用量の調査

➤ 近年、わが国で使われている天然資源はどれで、どのくらいつかわれているのか調査する。

※財務省貿易統計2020年(輸入量)、経済産業省統計(国内生産量)など最新の統計データを調査

課題②NORMの放射能濃度の調査

➤ どのような天然資源が高い放射能濃度を有しているか調査する。

※量子科学技術研究開発機構のNORMデータベース及び申請者の国内NORMの実測データを活用。

課題③とりまとめ

➤ 課題①②の結果から天然資源を「国内使用量」と「放射能濃度」で、整理・分類する。

進捗状況①

研究計画のロードマップ

(研究期間:1年間)

| 実施項目 (課題) | 担当者 (所属機関) | 2021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 ←————→ 完了 | | | |
| ②放射能濃度の調査 | 岩岡和輝(量研) 富坂侑斗(量研) | NORMデータベースのオリジナルデータの調査・整理 ←————→ 完了 | | | |
| | | 申請者の実測データの調査・整理 ←————→ 完了 | | | |
| ③とりまとめ | 岩岡和輝(量研) 富坂侑斗(量研) 神田玲子(量研) | とりまとめ (整理・分類) ←————→ 完了予定 | | | |

本研究で整理したデータ

約200種に整理

成果①国内使用量（一部）

| 物質名 | 輸入量(トン) | 国内生産量(トン) | 輸入量の文献 | 国内生産量の文献 |
|-------------|-----------|-----------|----------------|------------------|
| 石炭 | 173754558 | 1665966 | 財務省貿易統計2020確々報 | 平成28年経済センサス-活動調査 |
| アンチモン及びその製品 | 4835 | 不明 | 財務省貿易統計2020確々報 | |
| トリウム鉱 | 0 | 0 | 財務省貿易統計2020確々報 | 平成28年経済センサス-活動調査 |
| コバルト鉱 | 0 | 0 | 財務省貿易統計2020確々報 | 平成28年経済センサス-活動調査 |

： 下に続く

成果②放射能濃度（一部）

| 物質名 | U-238 Bq/kg | | Ra-226 Bq/kg | | Th-232 Bq/kg | | Ra-228 Bq/kg | |
|-------|-------------|-------|--------------|-------|--------------|--------|--------------|--------|
| | データ数 | 平均濃度 | データ数 | 平均濃度 | データ数 | 平均濃度 | データ数 | 平均濃度 |
| 石炭 | 24 | 43 | 28 | 38 | 34 | 21 | 14 | 23 |
| トリウム鉱 | 7 | 30000 | 4 | 36000 | 8 | 300000 | 3 | 320000 |

： 下に続く

成果③とりまとめ（一部）

| 物質名 | 輸入量(トン) | 国内生産量(トン) | U-238 Bq/kg | | Ra-226 Bq/kg | | Th-232 Bq/kg | | Ra-228 Bq/kg | |
|-------------|-----------|-----------|-------------|-------|--------------|-------|--------------|--------|--------------|--------|
| | | | データ数 | 平均濃度 | データ数 | 平均濃度 | データ数 | 平均濃度 | データ数 | 平均濃度 |
| 石炭 | 173754558 | 1665966 | 24 | 43 | 28 | 38 | 34 | 21 | 14 | 23 |
| アンチモン及びその製品 | 4835 | 不明 | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |
| トリウム鉱 | 0 | 0 | 7 | 30000 | 4 | 36000 | 8 | 300000 | 3 | 320000 |
| コバルト鉱 | 0 | 0 | 0 | | 0 | | 0 | | 0 | |

： 下に続く

本研究で整理したデータ

データの分類

- ・1000Bq/kg(IAEAの濃度レベル)を超える物質
- ・我が国のNORMガイドライン等の対象になっていない物質

| 物質名 | 関連産業 |
|-----------------------|-------|
| 酸化セリウム | レアアース |
| 鉱物(その他)レアアース含む | レアアース |
| 酸化ランタン | レアアース |
| その他希土類金属の化合物 | レアアース |
| 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 |
| タンタル処理工場からの廃棄物 | レアメタル |
| ジルコニウム鉱 | レアメタル |
| 耐火物(ジルコン) | レアメタル |
| 精油所のスケール | 化石燃料 |
| 火力発電所からの廃棄物 | 化石燃料 |
| 廃油(石油汚泥など) | 化石燃料 |

- 「レアアース・レアメタル」や「化石燃料」に関連する物質については、濃度レベルが高い傾向にあると推測され、優先的に調査が必要。
 - 現在、我が国でどのようなタイプの「レアアース・レアメタル」や「化石燃料」が使われているのか？
 - それらの物質の濃度は調査されているのか？

本研究で整理したデータ

データの分類

- ・「レアアース・レアメタル」、「化石燃料」の関連物質。
- ・国内利用の可能性(例えば、国内使用量1トン以上など)がある物質

レアアース・レアメタルの関連物質

| 物質名 | 放射能濃度のデータ数 |
|--------------|------------|
| フェロセリウム | 0 |
| 鉱物(その他) | 4 |
| 希土類金属など | 4 |
| 酸化セリウム | 6 |
| その他希土類金属の化合物 | 12 |
| 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 |

∴下に続く

化石燃料の関連物質

| 物質名 | 放射能濃度のデータ数 |
|-------------|------------|
| フライアッシュセメント | 4 |
| 精油所の製造水 | 6 |
| 泥炭灰 | 6 |
| 泥炭 | 7 |
| 火力発電所からの廃棄物 | 8 |
| 石油、歴青油(原油) | 24 |
| 廃油(石油汚泥など) | 60 |
| 亜炭灰 | 60 |
| 精油所のスケール | 62 |
| 精製油 | 83 |
| 石炭 | 100 |
| 亜炭 | 118 |
| 石炭灰 | 123 |

濃度が不明な物質が多い

データが集まっている

- 「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濃度が不明の物質が多い。
 - **濃度調査が必要**
- 「化石燃料」については、国内利用が確認されており、それらの関連物質の濃度の情報が比較的多く集まってきた。
 - 濃度データを参考にして利用実態に応じた**被ばく調査が必要**

成果

○データ集

他に2つとないデータ集



将来的に



量研NORMデータベースで公開予定



○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

○その他の発表(ワークショップ、講演)4件

| 個別の項目 | 自己評価 | 概要 |
|--------------|----------|---|
| 実施体制 | 妥当 | 研究計画通りに、4名のエキスパートで構成された研究体制で、限られた予算内で効率的に本研究を実施。 |
| 研究期間・方法 | 妥当 | 研究計画通りに、研究期間1年間で①使用量調査(第1から第2四半期)、②放射能濃度調査(第3四半期)、③とりまとめ(第4半期)を実施。 |
| 予算の執行 | 妥当 | 計画時に適切に見積もられた予算額であり、コロナの影響で使用できなかった旅費を除き当初の計画通りに執行される見込みである。 |
| 評価時点までの目標達成度 | 十分に達している | ①使用量の調査:天然資源の輸入量(使用量)と国内生産量のデータについて、調査・整理。第1から第2四半期で行い、すでに完了。 ②放射能濃度の調査:天然資源のウラントリウム放射能濃度を調査・整理。第3四半期に行い、これもすでに完了。 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情報を整理・分類し、新たな課題を抽出。報告書の作成も第4半期中に確実に完了する予定。 |
| 評価時点までの研究成果 | 成果を挙げている | 規制管理に繋がる新たな課題を抽出するために、国内使用量や濃度データのデータ集を作成した。このデータ集は大量のデータを入手して整理するという非常に時間がかかる作業の結果得られたものであり、唯一性があるものである。また、本研究はデータ整理を目的としており、学術的な成果を挙げるのが難しいテーマであったが、学会や放射線審議会等において積極的に発表することにより学術的な成果も着実に挙げた。さらに、将来、本成果(データ集)を量研NORMデータベースに組み込む予定であるため、量研NORMデータベースを講演会等で積極的にアピールし、本成果(データ集)の将来の普及に向けた活動も行った。 |

自己評価(全体):概ね計画通りに達成。

- 研究計画に沿って進め、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・分類することができた。
- これにより、我が国のNORM規制検討に必要な新たな課題を示すことができた。

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

染色体線量評価のための AI自動画像判定アルゴリズム (基本モデル)の開発

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
数藤由美子 (主任研究者)

課題名 染色体線量評価のためのAI自動画像判定アルゴリズム(基本モデル)の開発

研究期間: 令和2年度～令和3年度(2年間)

背景・目的

- 線量評価のための染色体異常判定の標準化および効率化を目指して、人工知能(AI)技術のひとつである深層学習法を基盤とした染色体画像自動判定モデルの開発を行う。
- 本事業で開発するモデルは量子科学技術研究開発機構(以下、量研)の基本モデルとする。汎用化に向けて、多様な染色体画像品質への対応やアプリケーション化のための技術検討を行う。

実施状況

- PNA-FISH画像と同一のメタフェーズのギムザ画像のペア(2.0 Gy照射、2,638組)を追加作成した。
- 量研の基本モデルを作成し、良好な性能を得た。量研に設置済み。2月末まで改良を進め、結果を年度末報告書に記載する予定。
- 品質のより低い標本を用いたFISH画像を用いて基本モデルをテストし、技術検討を行った。他機関での利用を考慮したアプリケーション化を検討した。

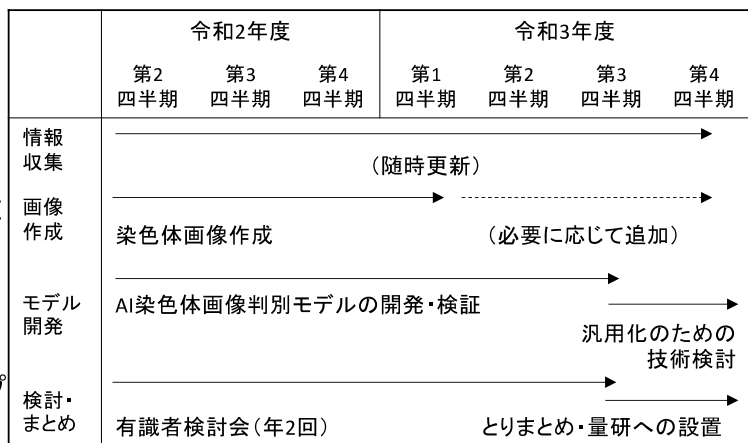
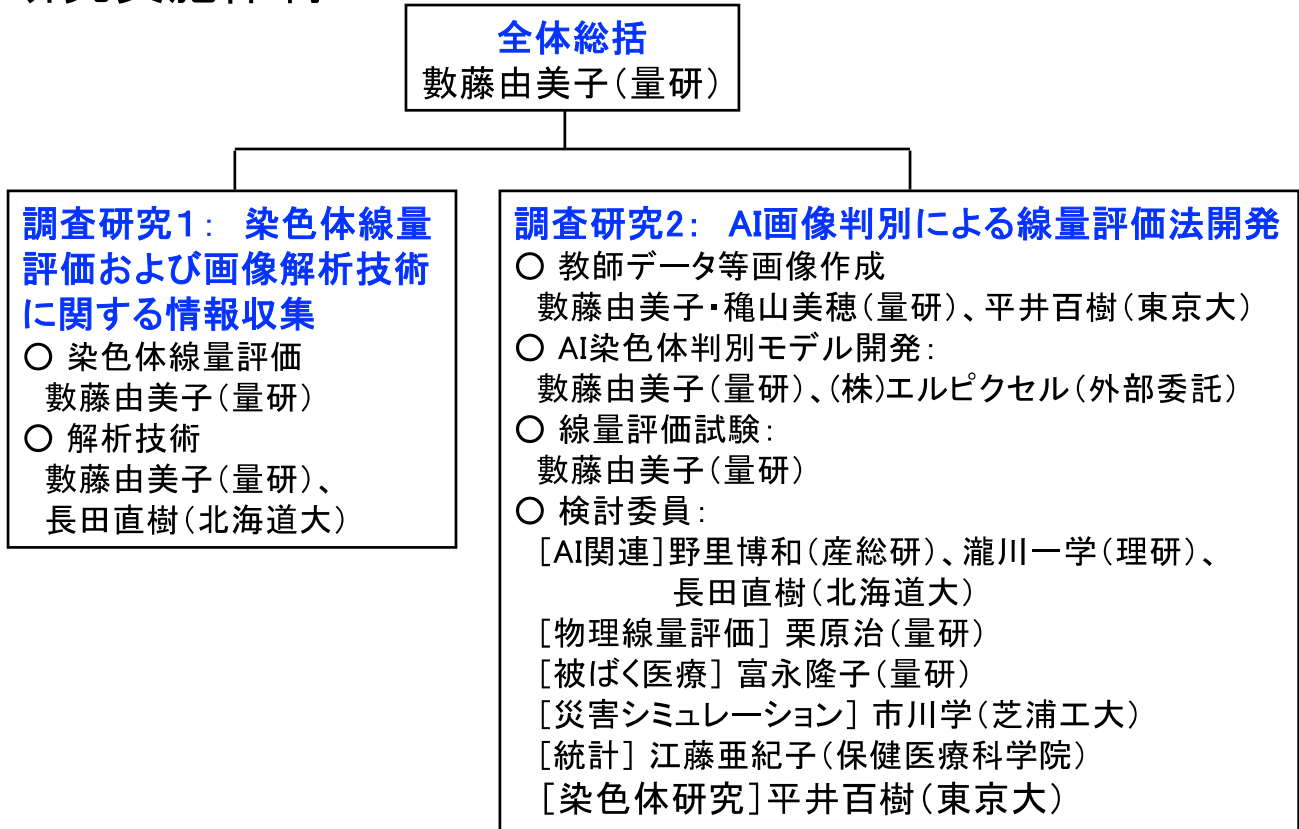


図1. ロードマップ

期待される成果

- AIの導入により、画像判定が1検体につき10分以下で可能となることが期待でき、大規模放射線事故における多検体トリアージ診断支援の大きな力となる。

研究実施体制



研究概要(1) 背景と目的

染色体線量評価では、あらかじめ線量と染色体異常頻度から成る検量線を作成し、患者の末梢血リンパ球の染色体異常頻度を当てはめて被ばく線量を推定する。染色体画像の作成までは装置の自動化により高速化されたが、画像判定は依然、検査者の目視観察による(患者1人当たりの判定に高度熟練者で実質30時間以上かかる)。熟練者養成は困難で、また、検査者により判定基準にブレが生じている。大規模原子力災害等に備え、染色体異常の画像判定の標準化と効率化が最大で喫緊の課題である。

研究概要(1) 背景と目的 (つづき)

一方、近年、分子細胞遺伝学の発展により染色体の染色方法の選択肢が増えた。並行して人工知能(以下、AI)による画像識別手法の開発には目覚ましいものがある。主任研究者らは平成30・31年度本事業において、染色体画像判定におけるAI導入の有効性の検証を行い、この分野での先鞭をつけた。染色体線量評価において、PNA-FISH法を適用することにより、AI利用による染色体画像判定アルゴリズム開発が有望であることが示された(図2~4)。線量効果関係(検量線)も得られることが分かった。

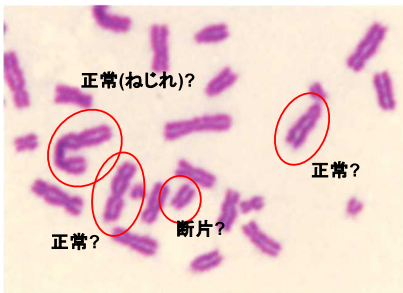


図2. メタフェーズのギムザ染色画像(一部)
染色体異常の判定が必ずしも容易でない。

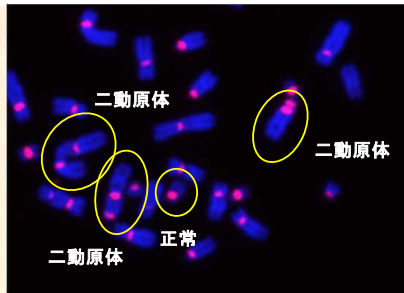


図3. メタフェーズのFISH画像(一部)
動原体領域: 赤色; 対比染色: 青色
図2と同一の標本でPNA-FISHを行った。
正確な染色体異常の検出、教師データ作成が可能。

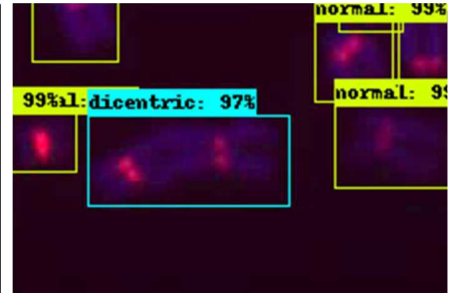


図4. AI自動画像判定により染色体異常が検出されたFISH画像の例(一部)
dicentric: 二動原体; normal: 正常;
%表示: 確度

* 図2, 3, 4は「染色体線量評価手法の標準化に向けた画像解析技術に関する調査研究」令和元年度報告書より改変

研究概要(1) 背景と目的 (つづき)

以上の背景をふまえ、本研究では2年間で、AI技術のひとつである深層学習法を基盤とした染色体画像自動判定モデルの開発を目標とする。

本事業で開発するモデルは、量研の基本モデルとし量研に設置する。これによりトリアージのための線量評価の画像判定が1検体につき約10分以下で可能となることを目指す。

加えて2年目後半には、汎用化に向けて、様々な品質の画像に対応するための技術検討、および他機関での利用を容易にするアプリケーション化のための技術検討を行う。

研究概要(2) 令和3年度実施事項

(1) 量研モデル作成(事業計画2/5)

- ① 教師用とテスト用の画像データを追加作成した。
- ② 令和2年度試作モデルをもとに、画像データを用いて訓練・検証・修正を行うことで基本モデルを作成している(量研に設置したAI画像解析PCに搭載・試用)。
- ③ 画像データ検討会(40回)(専門家1名が参加)および研究会合(2回)(本研究の協力者・参加者、各分野専門家検討委員)を開催して助言を得た。

(2) 汎用化のための検討(事業計画3/5)

- * 他の検査機関での使用を考慮した汎用化に向けて、多様な品質の画像やギムザ染色画像に対応するための技術検討やアプリケーション化のための技術検討を行った。

(3) 情報の更新・成果の公表・事業の進捗管理(事業計画1・4・5/5)

- * 本研究の推進にあたり、適宜、AI・画像解析技術・染色体線量評価法に関する情報収集、成果発表、進捗報告(月末報告書提出)を行った。

研究の進捗(1)

(1) 画像データ作成

● ^{60}Co -ガンマ線2.0 Gy照射末梢血リンパ球染色体標本を用いてメタフェーズ画像を追加作成した(2,638枚)。(注:2.0 Gy以上照射すると死細胞や複雑な染色体異常をもつ細胞が増え、熟練者による判定が困難になり非効率的)

1) PNA-FISHの教師画像作成

* 15,311枚の画像コレクション

→ 0 Gy (12%), 0.50 Gy (15%), 1.0 Gy (17%), 2.0 Gy (29%), 3.0 Gy (18%), 4.0 Gy (9%); 二動原体染色体数1,562個、染色体断片数2,701個で、昨年度比それぞれ約1.5倍増)。

2) 同一細胞のFISH画像・ギムザ画像作成 (特許申請のため詳細は非公開)

(現在 2,638組)

→ 将来、汎用化の研究開発へ
(ギムザ染色画像の対応へ)

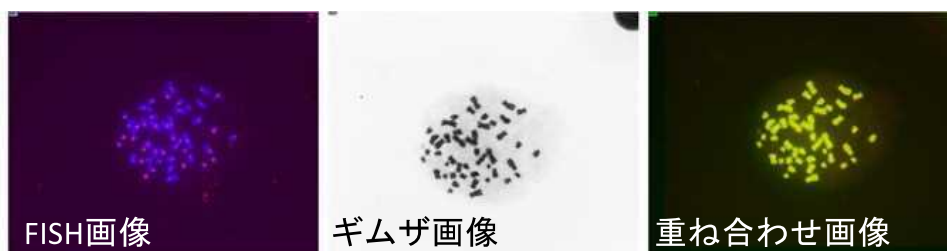


図5. 同一細胞の画像マッチング例

研究の進捗(2)

(2) AIアルゴリズム 量研モデルの開発と設置

- 量研モデルを開発・改良し、性能を向上させた。

→ 染色体検出効率は一貫してほぼ100%であったため、分類のミス(特に二動原体で)を課題として、分類性能を上げた(詳細は論文発表まで非公開)。

《改良の結果》

- ① 感度・精度が向上した。特に、二動原体の検出性能が良好になった。

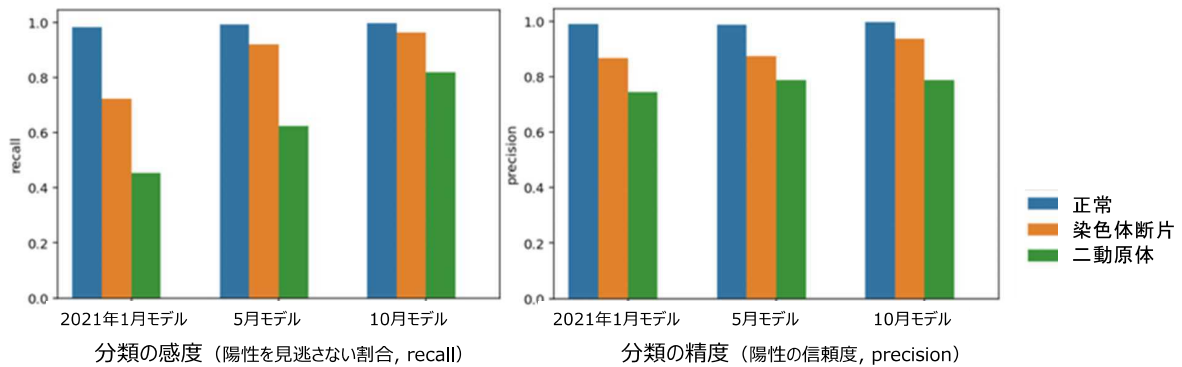


図6. AIモデルの感度と精度

[注:ヒト目視観察の場合、二動原体および染色体断片の感度は0.95、0.95、精度は0.90、0.53(n=3).]

研究の進捗(3)

《改良の結果》(つづき)

- ② 熟練者の判定を正解とした場合の判定一致率が良好になった。特に二動原体の一致率が上昇した。

- ③ 現状、2.0 Gyを超えたかどうかのトリアージ判定については1検体当たり70メタフェーズ以上を用いることで可能。

- ④ 被ばく患者由来標本画像(2検体)に試用し、トリアージ判定を行い、有用であることを確認した。

- 量研モデルを開発し、量研に設置した。

* 2022年2月末頃まで改良を続け、年度末報告書に結果を記載する予定。

* 現状のスペックでは70細胞で10分未満、1000細胞では約56分かかった。

なお、ヒト目視観察の場合、約2000分(34時間)以上かかる。必要に応じて、複数台連結する等より高性能なPCを用意すれば更なる高速化が期待できる。

表1. 熟練者の判定を正解とした場合の判定一致率(%)

| | 二動原体 | 染色体断片 |
|-------------------|----------|-----------|
| 非熟練染色体検査者 (3名) | 82.0±5.9 | 52.6±18.4 |
| AI 2021年1月モデル | 36.1 | 68.2 |
| AI 2021年10月モデル | 81.8 | 96.4 |

注: AIの判定再現率は100%のため回数を省略。検査者による目視判定では100メタフェーズ、AIでは7,865メタフェーズを用いた。

研究の進捗(4)

(3) 汎用化のための技術検討

● 様々な品質の染色体画像への対応

* QST・弘前大・福島医大・広島大・長崎大の染色体線量評価ラボ共通プロトコルに従い作成された、染色体凝縮の進んだ厚みのあるメタフェーズの画像(約2,000枚)について2021年5月モデルでテストした。熟練者目視観察が不採用とするメタフェーズを採用する率が上がり、特に染色体断片の判定性能が下がる傾向がみられた。

* 他の医用画像診断のAI利用研究報告にみられるように、染色体画像作成する機関ごとにファイン・チューニングを行う必要があるとおもわれる(脳腫瘍の画像対応でラボ当たり20枚の画像でファイン・チューニングが行われた例があるので、可能と考られるが、染色体の場合に要するチューニング用画像枚数は要検討)。ギムザ染色しかできないラボへの対応も、本研究で手法開発して得た同一細胞由来FISH画像・ギムザ画像を用いて開発可能である。

● 他機関での利用

* 本モデルではコンピュータ言語やコマンド入力の知識が必要。他機関に配布して利用する場合、ユーザーに使いやすいようなインターフェイスを開発する必要があるが、時間と費用を要する。特定の機関で請け負って集中的に利用するという考え方もあり、可能性のある災害規模や需要を考慮し検討した。

研究の進捗(5)

(4) 情報の更新、成果の公表、進捗管理

● 情報収集

- 1) 人工知能EXPO(令和3年4月7日～4月9日、東京ビックサイト)
- 2) 第3回日本メディカルAI学会(令和3年6月11日～6月12日、オンライン開催)
- 3) 日本人類遺伝学会第66回大会(令和3年10月14日～10月16日、オンライン開催)
- 4) ISO/TC85/SC2 (Radiological Protection) 会議, WG-18(被ばく事故発生時の二動原体分析手順書の策定)、WG-25会議(被ばく事故・住民等対応手順書の策定)(令和3年9月7日～9月9日、令和4年2月・予定、オンライン開催)
- 5) 文献・ウェブ情報探索(米・加グループによる二動原体解析自動化検討など)
(注:参加予定していた国際学会1件は新型コロナウイルス感染症の影響により来年度に延期)

● 成果の公表 → スライド13参照

● 進捗管理 → 毎月末、POおよびPO補佐に報告書を提出

今年度の成果

- 1) 原著論文: なし (投稿中2報、作成中2報)
- 2) 学会発表: 1題→中止 (国際学会1件がコロナ感染症の影響で延期決定)
- 3) その他: RCARO/AEANTOMプロジェクト「TECHNICAL REPORT: Guideline for Radioactivity Measurements in the Environment and Individual Dose Assessment following a Nuclear or Radiological Emergency」第3版、第8章「3. Biological Dosimetry」(p. 59 - 64)執筆。(RCARO and KIRAMS, 2021年10月刊行)。
- 4) その他: 国際標準化機構ISO/TC85/SC2(放射線防護関連)WG-18(バイオドシメトリー)の策定委員として参加(会議は2021年9月, 2022年2月開催)。ISO 17099, ISO 19238の改訂に寄与。さらに新規課題「バイオドシメトリーの自動化に関する標準化」を立ち上げ2021年10月より策定委員として活動。

今年度の自己評価

1. 研究代表者(主任研究者)による自己評価

| 評価の視点 | 自己評価 | コメント |
|------------------------------|-----------|---|
| 評価時点までの研究の実施が研究計画に沿って行われているか | 2. 概ね計画通り | <ol style="list-style-type: none"> 1) 同一細胞のFISH画像・ギムザ画像を追加作成した(2.0 Gy照射サンプル、2,638組)。 2) 深層学習法などを利用した基本モデルを開発し、人と同等またはそれ以上という良好な性能を得た。 3) 基本モデルを量研に設置した。現状のスペックではトリージ判定、画像70枚で10分未満かかる(画像1000枚では1時間弱かかる)。基本モデルを被ばく者由来標本に試験適用してトリージ判定に有用であることを確認した。 4) 基本モデルを染色体線量評価担当5機関共通プロトコルで作成した標本画像に試験適用した。ラボによってファイン・チューニングが必要であることがわかった。2021年の報告によれば腫瘍の画像診断でラボ当たり20画像を用いてチューニングできたという報告があるので、可能と考える。 5) 汎用化という点ではこのほかに、ギムザ染色しかできないラボのためのモデル開発[上述1)の技術が利用できる]、コンピュータ言語やコマンド入力に不慣れな人のためのインターフェース開発を検討した。 |

2. 分担研究者による自己評価 → (分担研究者 無し)

令和3年度放射線安全規制研究戦略的推進事業
研究成果報告（継続課題）

重点テーマ2：原子力災害に対する防護措置のリスク・ベネフィット評価

研究課題名：

「福島原発事故の経験に基づく防護措置に伴う社会弱者の健康影響と放射線リスクの比較検討に関する研究」

主任研究者：福島県立医科大学医学部放射線健康管理学講座
主任教授 坪倉正治

令和4年2月14日 令和3年度研究成果報告会

1

目次

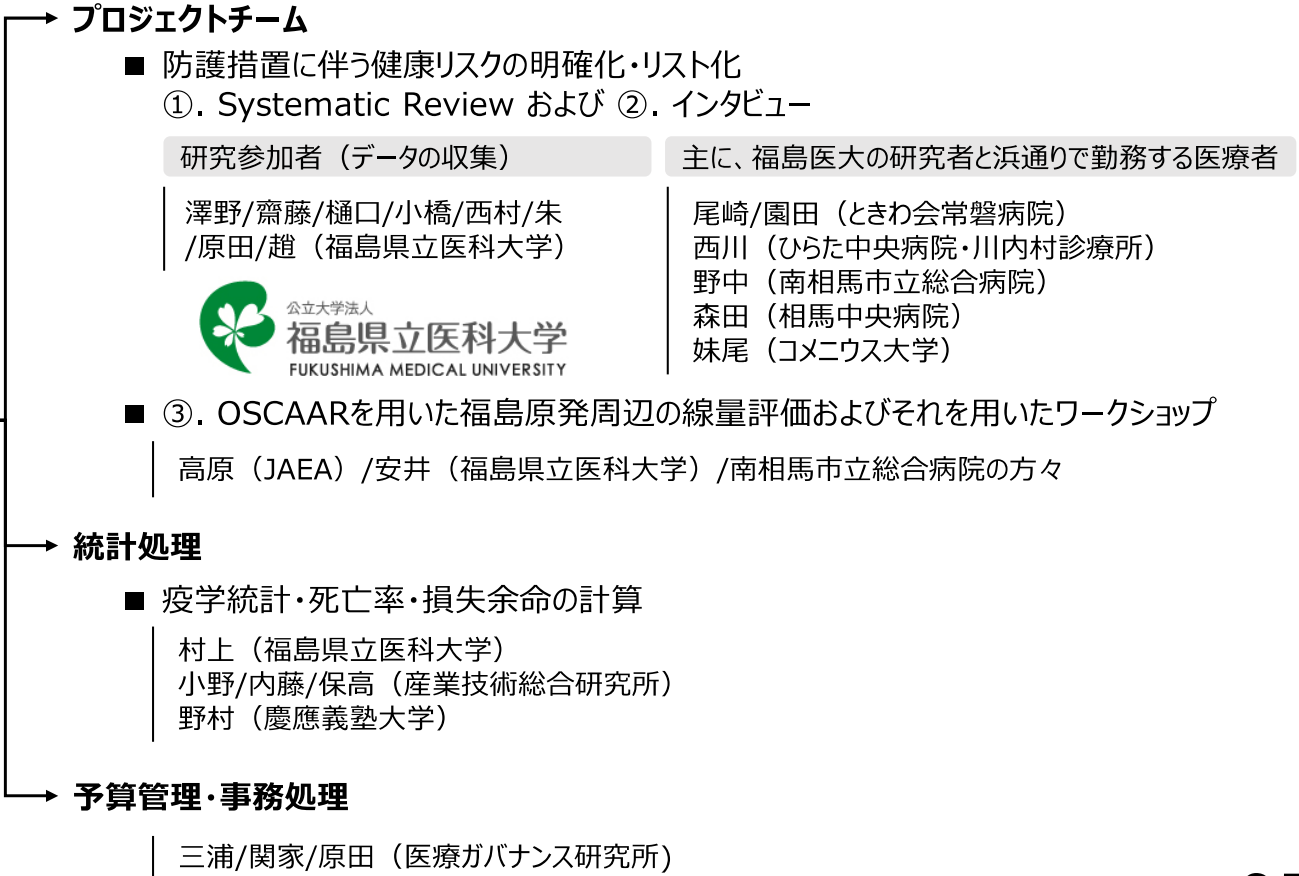
| | | |
|-------------|-------|---------|
| 1. 研究全体の概要 | | P3 |
| 2. 研究体制 | | P4 |
| 3. 今年度の研究概要 | | P5-7 |
| 4. 今年度の進捗 | | P8-12 |
| 5. 今年度の成果 | | P13 |
| 6. 今年度の自己評価 | | P14 |
| 7. 参考資料1-4 | | P15-P18 |

1. 研究全体の概要

| | |
|----------------|--|
| 課題名 | 福島原発事故の経験に基づく防護措置に伴う社会弱者の健康影響と放射線リスクの比較検討に関する研究 研究期間 令和2年度～令和3年度（2年間） |
| 背景目的 | 原子力災害時における避難などの防護措置は、放射線リスク低減のために最も重要な対策の一つである一方、住民に対し大きな精神的・心理的・身体的負担を与える。本研究は、過去の災害を参考とし、福島原発事故時の避難に伴うリスク及び困難をまとめる。そして、福島原発周辺の医療・介護施設における被ばく線量評価シミュレーションにより被ばくリスクを定量化し、避難に伴うリスクと比較検討し、その結果を用いたワークショップを行い他の原子力発電所立地地域でのより効果的な防護措置立案のための情報を生成することを目的とする。 |
| 実施状況 | <ol style="list-style-type: none"> ①. 災害時における医療・介護施設からの避難の影響について・過去報告のsystematic review 昨年度のpubmedから拡張し、Scopusを含めた5つのデータベースを用いて災害 + 避難 + 医療施設に関する文献を収集した。合計23編の論文が最終的に採用された。避難に伴う影響についての報告はハリケーンおよび原発事故に集中し、各文献からの災害前後での教訓のとりまとめを行った。 ②. 福島原発事故後の地域弱者の緊急避難状況を明らかにするための症例集積研究およびインタビュー調査 福島原発事故後、実際に避難に従事した関係者へのインタビュー（昨年度）に加え、今年度は追加インタビューおよび他地域での災害（熊本地震と佐賀水害）時の病院避難の状況と比較することで、福島原発事故時の原発周辺地域の病院の避難時の困難をまとめた症例報告、および医療から見た法律上の問題点をまとめた報告を行った。 ③. OSCAARを用いた、福島第一原発周辺の医療・介護施設における被ばく線量評価シミュレーションとその結果を用いたWS 今年度は、福島第一原子力発電所事故当時、南相馬市内の医療機関に勤務していた医療従事者を招き、本研究のこれまでの成果を伝え、グループワーク形式で避難オペレーションを振り返った。今後の原発事故に対する備えとして、患者の意思の確認と選択肢、管理とシステムの改善のポイントが明らかになった。 |
| 期待される効果 | <ul style="list-style-type: none"> ●原子力災害だけに留まらず、災害時の避難に関する網羅的なリスクの評価を行うことが出来る。 ●実際の福島原発事故後の医療・介護施設避難に伴うリスクを詳細に記述し、地域別に取りまとめることが出来る。 ●実際に避難に従事した方々を交えて、被ばくシミュレーションと実際の経験に基づいた、必要な防護対策について情報を取りまとめることが出来る。 |

2. 研究体制

総括・坪倉（福島県立医科大学）



3.今年度の研究概要①

災害時における医療・介護施設からの避難の影響について・過去報告のsystematic review

目的

災害時における医療・介護施設から外部への避難とその場に留まることを比較考量した既報を体系的に整理する。

方法

■ Pubmed・CINAHL・Embase・APA PsycInfo・Scopusで、検索を行った（2021.6.02時点）

各データベースの検索結果

| Database | Total records | Unique records | Duplicate records |
|---------------|---------------|----------------|-------------------|
| PubMed | 942 | 941 | 1 |
| CINAHL | 509 | 184 | 325 |
| Embase | 1459 | 708 | 751 |
| PsycInfo | 106 | 51 | 55 |
| Scopus | 1990 | 736 | 1254 |
| Totals | 5006 | 2620 | 2386 |

■ 該当した論文を2名の独立した調査者がタイトルと抄録で適格性を審査した。相違が生じたものは合議の上判定を決定した。

■ 本文取得可能であったものを7名の調査者で分担し、適格性を審査した

■ 組入論文で記述された災害の種類や発生地、発生時期、避難に伴う影響、今後の教訓をまとめた

検索式

■ Pubmedによる検索式（例）

((((Disaster*) OR (Hazard)) OR ("Natural Disaster*")) OR (Disasters[MeSH Terms]))

AND (((evacuat*) OR ("Emergency Shelter*")) OR ("Evacuation Shelter*")) OR (Emergency Shelter[MeSH Terms]))

AND (((("Health Facilit*") OR (Health Facilities[MeSH Terms])) OR (Hospital*)) OR (Hospitals[MeSH Terms])) OR ("Medical Facilit*"))

■ 災害に関するキーワード+避難に関するキーワード+病院および医療施設に関するキーワードを組み合わせて検索を行った。

■ それぞれのデータベースにあわせたキーワードの組み合わせを変更し、検索を行った。

3.今年度の研究概要②

福島原発事故後の地域弱者の緊急避難状況を明らかにするための症例集積研究およびインタビュー調査

目的

福島原発事故後の地域の弱者、特に医療・介護施設からの避難の実態とその困難、留まる際に考慮すべき課題、医療・法律上の現在の問題点を公開資料およびインタビュー調査を用いて明らかにすること。

方法

前年度のインタビュー結果に加えて、今年度は、

■ 追加インタビュー（双葉病院・小高病院・DMAT関係者）

■ 他地域での災害時（熊本地震と佐賀水害、東日本大震災時の宮城県）の病院・施設避難の状況と比較することで、福島原発事故時の原発周辺地域の病院の避難時の困難をまとめた症例報告

■ 医療の立場から見た法律や取り決めの問題点をまとめた報告を行った。

※、線量評価を行ったスタッフへのインタビューについては、病院に線量評価を主体に行ったスタッフがおらず、上記のインタビューの中で線量についてコメントが無いことを確認した。結果、線量についての知識や方法がほぼ皆無であったことが判明している。



福島第一原発周辺の病院
赤線は5kmと20km

成果・研究対象一覧

- 1. 双葉病院（5km圏内）の病院避難時の困難のまとめ Sawano et al. Disaster Med Public Health Prep. 2021 Oct 14;1-4.
- 2. 双葉厚生病院（5km圏内）の病院避難時の困難のまとめ Sawano et al. J Radiat Res. 2021 May 5;62(Supplement_1):i122-i128.
- 3. （現在の）PAZ内の病院避難時の状況比較および困難まとめ Sawano et al. submitting
- ※. 避難までの時間・方法・開始から完了までの所要時間について比較し、その原因について考察
- 4. 小高赤坂病院（精神科病院・20km圏内）の病院避難時の困難のまとめ Hori et al. submitting
- 5. 20～30km内の3病院の病院避難時の状況比較および困難まとめ（submission準備中）
- ※. 避難指示が出てから実際に避難するまでの待ち時間、情報の伝達など中心に考察
- 6. 災害関連死の定義の歴史の変遷と現状のまとめ Tsuboi et al. submitting
- 7. 災害対策基本法の変遷と病院避難の課題についてまとめ Yoshida et al. J Glob Health. 2021 Oct 2;11:03108.
- ※. 関連死の定義の医学的問題点、および災害対策基本法と弱者の関係について考察

3.今年度の研究概要③

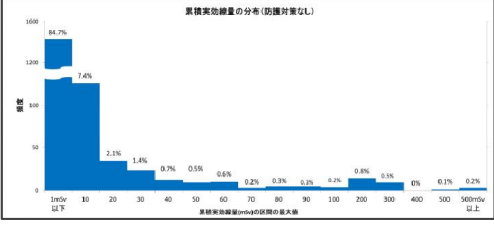
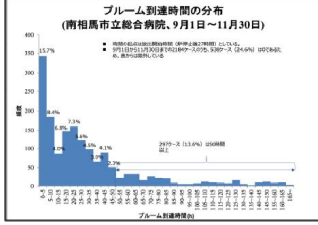
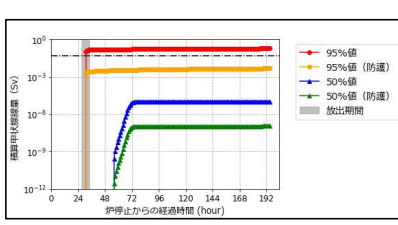
OSCAAR (off-site consequence analysis code for atmospheric release in reactor accident) を用いた、福島第一原発周辺の医療・介護施設における被ばく線量評価シミュレーションとその結果を用いたワークショップ

| | | |
|------|---|----------------|
| 目的方法 | 福島第一原子力発電所事故当時、南相馬市内の医療機関に勤務していた医療従事者を招き、本研究のこれまでの成果を伝え、グループワーク形式で避難オペレーションを振り返った。このワークショップは今後、再び原子力災害が発生した場合に備え、対応力を向上させるための要件を抽出することを目的として開催した。 | |
| 開催日時 | 2021年11月30日 17:30-20:30 | 開催場所 南相馬市立総合病院 |
| 参加者 | 14名（医師1、看護師6、放射線技師3、検査技師1、薬剤師1、リハビリテーション技師1、医療事務1） ※. 全員が福島第一原発事故時、実際に病院に勤務し、病院避難のオペレーションにあたった病院幹部 | |

| | | | |
|------------|------------|-------------------------------------|-----------|
| プログラムアジェンダ | 1 開会式 | 主旨説明 | 「3.講義」の概要 |
| | 2 グループワーク① | 原発事故後に困ったこと、足りなかったこと。 | |
| | 3 講義 | OSCAARを用いた被ばく量の計算結果と本研究成果の報告 | |
| | 4 グループワーク② | 事故後のQOLを上げるために何が必要か。 | |
| | 5 閉会式 | 全参加者が本日の内容について感想を述べる。アンケート記入。 | |

- ①. 施設入所の避難後の高齢者の死亡リスクと避難後生存率
- ②. 原発20-30kmの3病院の避難概要
- ③. 原発事故後の放射性プルームと被ばく量 (OSCAARによる線量評価シミュレーションの提示)

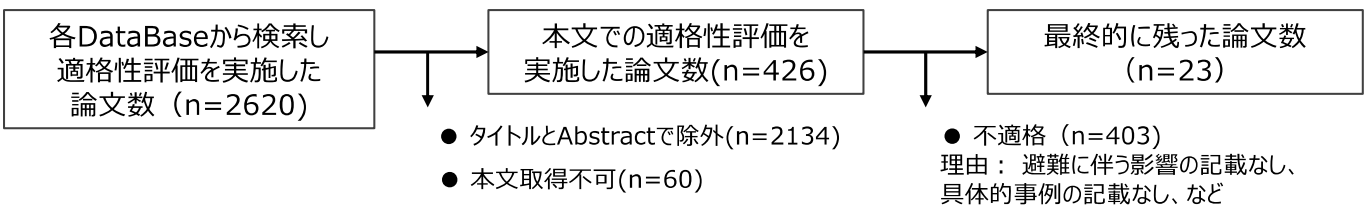
講義にて、プルーム到達時間、累積実効線量分布について提示



4.今年度の進捗①-1

論文組入結果およびその特性、災害と影響の種類、今後の教訓について

論文組入結果



災害と影響の種類

| 災害の種類 (論文件数) | |
|---------------------------|--------------------|
| 原発事故 (8) | ハリケーン (13) |
| 死亡率 (5) | 死亡率 (3) |
| 損失余命 (1) | 入院率 (1) |
| 診療情報の喪失 (1) | せん妄スコア (1) |
| communication lineの崩壊 (1) | 透析をできなかった割合 (1) |
| 介護保険利用率 (1) | 医療費等 (1) |
| | 居住者の外傷 (1) |
| | 居住者の心理的苦痛・PTSD (2) |
| | 認知機能の低下 (1) |
| | 看護師のストレス (1) |

組入論文の特性

| 変数 | |
|---------------|-----------|
| 発生国 | (N=23) |
| アメリカ | 13(56.5%) |
| 日本 | 8(34.8%) |
| その他 | 2(8.7%) |
| 災害の種類 | (N=23) |
| ハリケーン | 13(56.5%) |
| 原発事故・地震 | 8(34.8%) |
| その他 | 2(8.7%) |
| 発災年 *複数回答可 | (N=23) |
| 1998 | 1 (4.3%) |
| 2002 | 1 (4.3%) |
| 2005 | 6 (26.1%) |
| 2008 | 4 (17.4%) |
| 2011 | 8 (34.8%) |
| 2012 | 2 (8.6%) |
| 2017 | 1 (4.3%) |

種類の影響

4.今年度の進捗①-2

※論文番号については「7.参考資料」参照

今後の教訓について

| 時期 | 主体 | すべきことの概要 |
|-----|------------------|---|
| 震災前 | 国・自治体レベル | ■各施設の現状レビュー ^{*14} / ■災害・避難計画（人的・物的・移動手手段）レビュー・策定 ^{*5,8,19,22} ■病院避難時の医療費保証の計画策定 ^{*9} / ■被災リスクの高い場所に施設建設を許可しない ^{*22} |
| | 施設レベル | ■避難計画の立案、物的・人的資源の確保 ^{*5} / ■避難訓練 ^{*5} （災害時の臨時スタッフ、運転手を含め）実施 / ■外部組織との災害時協力の締結 ^{*16} / ■即時避難を避けるための備蓄 ^{*16} / ■サイコロジカル・ファーストエイドについて学ぶ ^{*10} |
| | 個人レベル | ■災害への意識向上 ^{*5} 避難訓練への参加 ^{*5} |
| | 避難の受け手 | ■避難者のせん妄対策 やスペース確保が必要である |
| 震災中 | 避難の有無の 決断について | ■避難するかどうかは、リスクとベネフィットを鑑みた決断を行うべきである ^{*13, 14} ■全施設避難ではなく、ハイリスクorローリスク群のみの避難も考慮される ^{*20} ■避難を決断するタイミングは、はやいほうが良い ^{*20} メリット：天気・電気・交通状況・スタッフ配置・転院先と患者に関するコミュニケーションを十分に取れるなど |
| | 避難の有無の 決断後 | ■十分な準備ができるまでは各施設がシェルターの役割を果たすことができる ^{*16} ■避難の有無に関わらず、必要な措置を講じる（※） |
| その他 | | ■災害時は平時よりも多いスタッフ数が必要とされる ^{*20} ■普段と異なる環境で働くスタッフのケアが必要とされる ^{*19} ■医療情報を含んだICチップ入りリストバンドや身体への埋め込みが考慮される |

※. 震災中に避難者が「避難の有無に関わらず、必要な措置を講じる」の具体例

| 避難する場合 | 避難しない場合 |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| ○避難援助者への検問通過パス発行 | ○外部からの物資供給 ^{*16} |
| ○自治体による避難先の調整援助 ^{*16} | ○入居者の心理的ストレスを減らす工夫をする ^{*10} |
| ○顔見知りの患者・入所者及びスタッフの避難先を同じにする | |

9

4.今年度の進捗②-1

福島原発事故後の地域弱者の緊急避難状況を明らかにするための症例集積研究およびインタビュー調査

結果の概略①

PAZ内の病院の避難時の状況比較および困難まとめ

| | 双葉病院 | 双葉厚生病院 | 福島県立大野病院 |
|------------------|--------------|--------------|--------------|
| 最終的に避難を決断した要因 | 政府からの避難指示 | 災害対策本部からの助言 | 政府からの避難指示 |
| 緊急避難時の交通手段 | バス、自衛隊車両 | バス、自衛隊車両・ヘリ | バス、救急車、自家用車 |
| インフラの供給（水・電気・ガス） | 全壊 | 一時的な障害（水・ガス） | 全壊 |
| 避難指示の時間 | | 3月12日午前5時44分 | |
| 避難決定の時刻 | 3月12日午前8時00分 | 3月12日午前6時40分 | 3月12日午前6時00分 |
| 避難を開始した時刻 | 3月12日午後2:00 | 3月12日午前8時30分 | 3月12日午前7時40分 |
| 避難完了の時刻 | 3月16日午前0時35分 | 3月13日午前8時00分 | 3月12日午前8時10分 |
| 避難に要する時間 | 82.5時間 | 23.5時間 | 0.5時間 |
| 避難直後に死亡した人数 | 39 (11.5%) | 4 (2.9%) | 0 (0%) |
| 避難中の医療ケア提供 | 途絶 | 持続 | 持続 |
| 事故後3ヵ月時点での死亡者数 | 不明 | 17 (12.5%) | 不明 |
| 放射能災害を想定した訓練 | なし | 年に1回実施 | 年に1回実施 |
| 放射線に関する専門家の確保 | なし | なし | なし |

- 避難中から直後の死亡とその後続く二峰性の死亡がありえる。
- 入院患者数(特に重症や寝たきり患者)が多いと移動手手段を確保するのが難しく、避難にも時間がかかる
- 複合災害では、建物やインフラの損傷もあり、実際には避難しないという選択肢は取りづらい
- 放射線量が極めて高い場合を除き、病院避難のdecision makingには、放射線量以外の多くの変数が関与する
- 私立と公立など、病院のシステムが異なる場合、その後の対応に差が生じてしまっている。

4.今年度の進捗②-2

福島原発事故後の地域弱者の緊急避難状況を明らかにするための症例集積研究およびインタビュー調査

結果の概略①

20～30km圏内の3病院の病院避難時の状況比較および困難まとめ

| | 南相馬市立：新潟 | 渡辺病院：県内 | 大町病院：群馬 |
|---------|--|--|--|
| 受入患者数 | 震災初期：33名程 小高病院：68名 | 震災初期：40名程 施設一時避難：160名程 | 震災初期：40名程 西病院透析患者：1名 |
| 最大在院数 | 211名 | 250名超 | 210名程度 |
| 病院避難患者数 | 104名 | 80名程度 | 124名 |
| 避難先詳細 | 新潟 92 (32病院) 福島 68 (6病院) 他県 2、合計162人 | 竹田：約20名 西多賀：約10名 白河医師会：約40名 その他重症者：8名 記録は存在しない | 外来透析約45名 (2病院) 入院透析4名 (県立医大) 群馬124名 |
| 各日の避難者数 | 18日5名 19日49名 20日に38名 | | 19日62名 20日13名 21日62名 |
| 避難後病院機能 | 入院機能閉鎖。 4/4外来診療再開 | 完全閉鎖 | 一時閉鎖、4/4外来再開 |

- 原子力関連施設に近い(PAZおよびUPZ)医療機関では時として避難が避けられないのに、事故を想定した避難計画がない場合がある。
- 施設の決断をサポートする仕組みが手薄である。
- 現実的に屋内退避を続けるために物的・人的資源を支援する手段・方法の検討が不十分な場合がある。
- 特に入居者数が多い施設や体の不自由な方が多くいる施設では、避難に時間がかかるため、施設や避難を支援する機関が事前に具体的な避難の移動手段を準備が必要。
- 実際に避難を行うか行わないかという大方針が変わる可能性がある。という状況に対して職員の士気の維持が非常に難しい。(他災害との差)¹¹

4.今年度の研究進捗③

OSCAAR (off-site consequence analysis code for atmospheric release in reactor accident) を用いた、福島第一原発周辺の医療・介護施設における被ばく線量評価シミュレーションとその結果を用いたワークショップ

今後の原発事故に対する備えとして、患者の意思の確認と選択肢、管理とシステムの改善のポイントが明らかになった。今後、全国の原発所在地にある病院・福祉施設の関係者に対して、原発事故時の避難に関するセミナー（事故時のリスクや線量評価、放射線の基礎知識）を提供するメリットはあると考える。

グループワーク内容

①：原発事故後に困ったこと、足りなかったこと

個人・組織・地域の3つの視点から議論を行った。
抽出されたポイントは以下の表の通り。

| | |
|----|--|
| 管理 | 意志決定の難しさ。短時間での病院避難。避難計画がなかった。避難が患者にとって正しかったかどうかかわからなかった。病院がスタッフを避難させることは大丈夫だと判断。統一された決断を下すのは難しかった。 |
| 情報 | 放射線の健康被害について知らなかった。相談先がなかった。患者の避難先が不明だった。他のユニットや部門の状況が分からなかった。SPEEDIは利用されなかった。 |
| 不足 | 医療資源の不足。人手不足。慣れない仕事をする必要性。情報シートの作成が困難。外部からの助けがなかった。 |
| 患者 | 慢性患者への対応が困難。重病の患者が残った。患者の避難先が決められない。避難先で汚染されているとされた。 |

②：震災後のQOLを上げるために

講義後に本テーマでディスカッションを行った。
講義の情報を知った上で、今後何が必要と考えるか。

| | |
|------------|--|
| 災害前に | 患者情報を詳細に理解しておく。患者に避難に関する考えを事前に尋ねておく。 |
| 管理とシステムの改善 | 避難計画とスタッフの周知。備蓄を増やす。電子カルテのバックアップ。外部患者との遠隔医療。リアルタイムの地域情報。 |
| 原発事故が起これば | 高齢者や重傷者の遠方への移送について熟慮する。患者は避難に関する選択肢を与えられるべき。 |



グループワークは
職種別に3チーム
に分かれ、
KJ法で実施

※. 参考アンケート結果：今後も同様の原発事故が発生したら避難しますか、とどまりますか。留まる=8名/状況による=6名/避難する/0名

5.今年度の成果

論文発表

- Emergency Hospital Evacuation From a Hospital Within 5 km Radius of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: A Retrospective Analysis of Disaster Preparedness for Hospitalized Patients. Sawano et al. Disaster Med Public Health Prep. 2021 Oct 14;1-4.
- Importance of individualized disaster preparedness for hospitalized or institutionalized patients: Lessons learned from the legal revisions made to the Basic Act on Disaster Management in Japan following the Fukushima nuclear disaster
Yoshida et al. J Glob Health. 2021 Oct 2;11:03108.
- 病院避難に関する症例報告を現在投稿中

口頭発表

- Process of emergency evacuation at medical institutions in Fukushima disaster and lesson for future nuclear disaster preparedness 澤野豊明 坪倉正治 ERPW 2021 2021年10月
- 放射線事故時の避難のリスクに関する研究結果 坪倉正治 澤野豊明 内閣府原子力防災研修会 2021年10月
- Overview of secondary health issues after the Fukushima incident, 坪倉正治 IAEA International Conference on a Decade of Progress after Fukushima-Daiichi: Building on the Lessons Learned to Further Strengthen Nuclear Safety 2021年11月
- Overview of secondary health issues after the Fukushima incident, 坪倉正治 SFRP FUKUSHIMA 10 years later 2021年11月
- 新型コロナと原発事故の類似点 坪倉正治 現場からの医療改革推進協議会シンポジウム 2022年11月
- 原子力災害下の入院入所者の「健康」を考える 坪倉正治 災害講演会（八幡浜）webinar 2022年1月
- 原発事故に伴う二次的な健康影響について 坪倉正治 災害関連死シンポジウム（災害関連死の本質 現場で感じるこれからの課題） 2022年2月

13

6.今年度の自己評価

| 評価の視点 | 自己評価 | コメント |
|---|--|--|
| 評価時点までの研究の実施が研究計画に沿って行われているか | <ol style="list-style-type: none"> 1 計画を上回る 2 <u>概ね計画どおり</u> 3 計画を達成できない 4 計画を達成できないが代替手段によって今年度の目標を達成した | 福島原発事故時の病院や医療施設の避難に伴う困難に直面した関係者の多くにインタビューし、その経験をまとめることができた。今後はこのような知見を他の原発立地周辺の施設へ啓発し、可能な対応を検討する必要があると考える。 |
| 今年度の進捗や達成度を踏まえて、次年度の研究計画に変更が必要か ^{※1} | <ol style="list-style-type: none"> 1 必要ない 2 軽微な変更が必要^{※2} 3 大幅な変更が必要^{※2} | |

7. 参考資料-1

| No. | Title | First author | 災害の種類 | 発生国 | 発生年 | 研究の種類 |
|-----|---|--------------|-------|---------|------|-------|
| 1 | Small but mighty. In the face of an impending natural disaster, you need a great plan, an electronic patient record and community cooperation. | McGinty J | ハリケーン | USA | 1998 | 事例報告 |
| 2 | Emergency evacuation of the Dresden Heart Centre in the flood disaster in Germany 2002: Perceptions of patients and psychosocial burdens | Nitschke M | 洪水 | Germany | 2002 | 量的研究 |
| 3 | A comparison of the nursing home evacuation experience between hurricanes katrina (2005) and gustav (2008). | Blanchard G | ハリケーン | USA | 2005 | 量的研究 |
| 4 | Missed dialysis sessions and hospitalization in hemodialysis patients after Hurricane Katrina. | Anderson AH | ハリケーン | USA | 2005 | 量的研究 |
| 5 | Surviving the storms: Emergency preparedness in Texas nursing facilities and assisted living facilities. | Castro C | ハリケーン | USA | 2005 | 量的研究 |
| 6 | Evacuate or 'hunker down?' ED experts ponder options as Katrina wreaks havoc: hurricane veterans say the decision is not as easy as it may appear | | ハリケーン | USA | 2005 | 事例報告 |

15

7. 参考資料-2

| No. | Title | First author | 災害の種類 | 発生国 | 発生年 | 研究の種類 |
|-----|---|--------------|-------|------------|------|-------|
| 7 | DISASTER STRIKES! | Cacchione PZ | ハリケーン | USA | 2005 | 量的研究 |
| 8 | The incomplete circle of the National Disaster Medical System: what Arkansas hospitals learned from hurricane Gustav. | Mason WL | ハリケーン | USA | 2008 | 量的研究 |
| 9 | Effect of forced transitions on the most functionally impaired nursing home residents. | Thomas KS | ハリケーン | USA | 2008 | 量的研究 |
| 10 | The effects of evacuation on nursing home residents with dementia | Brown LM | ハリケーン | USA | 2008 | 量的研究 |
| 11 | Balancing the risk of the evacuation and sheltering-in-place options: a survival study following Japan's 2011 Fukushima nuclear incident. | Shimada Y | 原発事故 | Japan (福島) | 2011 | 量的研究 |
| 12 | Long-term outcomes of patients evacuated from hospitals near the Fukushima Daiichi nuclear power plant after the Great East Japan Earthquake. | Igarashi Y | 原発事故 | Japan (福島) | 2011 | 量的研究 |

16 **41**

7. 参考資料-3

| No. | Title | First author | 災害の種類 | 発生国 | 発生年 | 研究の種類 |
|-----|---|--------------|-------|------------|------|-------|
| 13 | Was the Risk from Nursing-Home Evacuation after the Fukushima Accident Higher than the Radiation Risk? | Murakami M | 原発事故 | Japan (福島) | 2011 | 量的研究 |
| 14 | Mortality risk amongst nursing home residents evacuated after the Fukushima nuclear accident: a retrospective cohort study. | Nomura S | 原発事故 | Japan (福島) | 2011 | 量的研究 |
| 15 | Successful emergency evacuation from a hospital within a 5-km radius of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant: the importance of cooperation with an external body. | Sawano T | 原発事故 | Japan (福島) | 2011 | 事例報告 |
| 16 | Post-nuclear disaster evacuation and survival amongst elderly people in Fukushima: A comparative analysis between evacuees and non-evacuees | Nomura S | 原発事故 | Japan (福島) | 2011 | 量的研究 |
| 17 | Evacuation Decision Making and Expanded Roles of Adult Daycare Services in the Great East Japan Earthquake: Qualitative Analysis Using Semistructured Interviews. | Mori H | 地震 | Japan (宮城) | 2011 | 質的研究 |
| 18 | Delayed recovery of caregivers from social dysfunction and psychological distress after the Great East Japan Earthquake. | Sawa M | 地震 | Japan (福島) | 2011 | 量的研究 |

17

7. 参考資料-4

| No. | Title | First author | 災害の種類 | 発生国 | 発生年 | 研究の種類 |
|-----|--|---------------|-------|-----|------------|-------|
| 19 | Challenges of nurses' deployment to other New York City hospitals in the aftermath of Hurricane Sandy. | VanDevanter N | ハリケーン | USA | 2012 | 量的研究 |
| 20 | Evacuate or shelter in place: A view from the water's edge. | Jarrett MP | ハリケーン | USA | 2017 | 事例報告 |
| 21 | Assisted Living Communities During Hurricane Irma: The Decision to Evacuate or Shelter in Place and Resident Acuity. | Peterson LJ | ハリケーン | USA | 2017 | 量的研究 |
| 22 | To evacuate or shelter in place: Implications of universal hurricane evacuation policies on nursing home residents | Dosa D | ハリケーン | USA | 2008, 2005 | 量的研究 |
| 23 | Exploring factors affecting the decision of emergency hospital evacuation in disasters: A qualitative study | Yaghoubi T | — | イラン | — | 質的研究 |

ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究

研究代表者 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所
海上技術安全研究所 平尾好弘

プログラムオフィサー(PO) 中村尚司

1

課題名 ICRP2007年勧告等を踏まえた遮蔽安全評価法の適切な見直しに関する研究
研究期間: 令和2年～3年(2年間)

放射線施設においては、放射線防護に係る法令の遵守を確実にするため、放射線の遮蔽安全評価が実施される。本研究では、ICRP2007年勧告等(以下、新勧告と呼ぶ。)の国内法令取入れで求められる実効線量換算係数等の改訂に対応するため、遮蔽線量評価法を拡張するとともに、使用されるデータを適切に見直すための手順を開発する。また、検討の成果をとりまとめて、新勧告取入れの効率的な運用に資するガイドラインを作成する。

実施状況

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

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

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

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

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

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

2

研究体制

情報セキュリティ最高責任者

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所理事長

情報セキュリティ責任者、担当者

・海上技術安全研究所 所長
・同 海洋リスク評価系系長

規制庁担当

・プログラムオフィサー
・プログラムオフィサー補佐
・担当調査官

研究主任者

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

研究参加者

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

若手人材育成を兼ねた研究協力

日本原子力学会放射線工学部会簡易遮蔽計算コードレビューWG
協力内容: 遮蔽計算法の適用性拡張、遮蔽線量計算用データの整備

海上技術安全研究所 研究業務管理方

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

研究レビュー委員会

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

外注作業

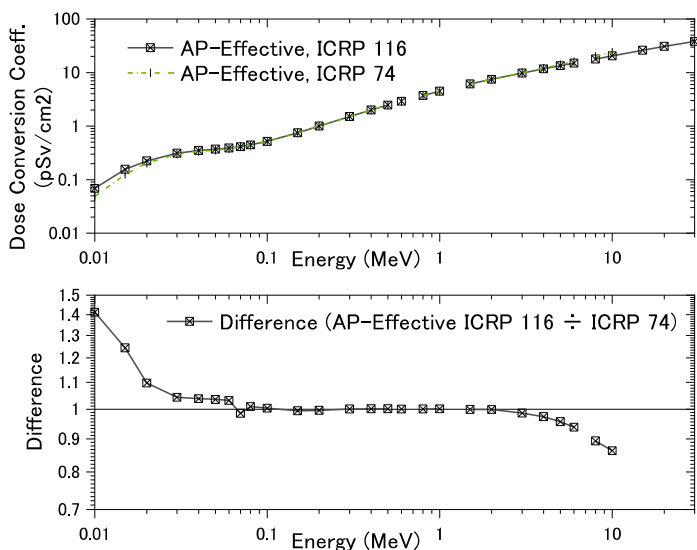
・新勧告を反映した遮蔽線量計算用データの作成支援作業
担当: 遮蔽計算用データの作成全般支援
・新勧告を反映した簡易遮蔽計算コード開発支援作業
担当: 遮蔽線量計算コードの開発全般支援

最新の国際勧告及び知見を踏まえた、 γ 線遮蔽計算用データの見直し

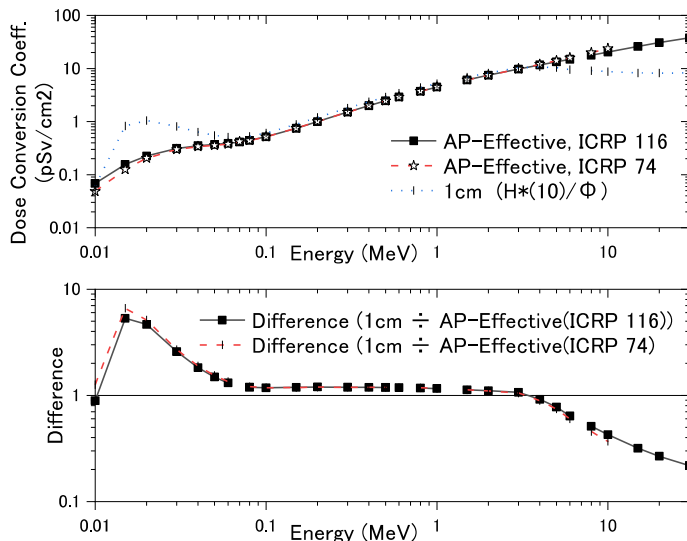
最新のICRP勧告とその法令取入れ、研究知見をふまえて、 γ /X線の遮蔽線量計算で用いられる遮蔽計算用データ(ビルドアップ係数(BFという。)、減衰係数等)を見直すための方法をレビューし、実際にデータを作成して、その特徴を明らかにする。

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

線量換算係数の改訂による影響



実効線量換算係数 (AP): 従来と今回の比較



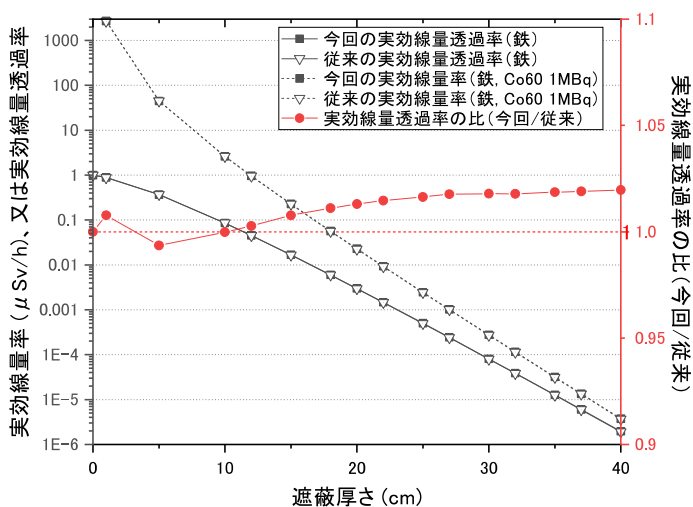
参考: 実用量H*(10)に対する実効線量の換算係数比較

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

5

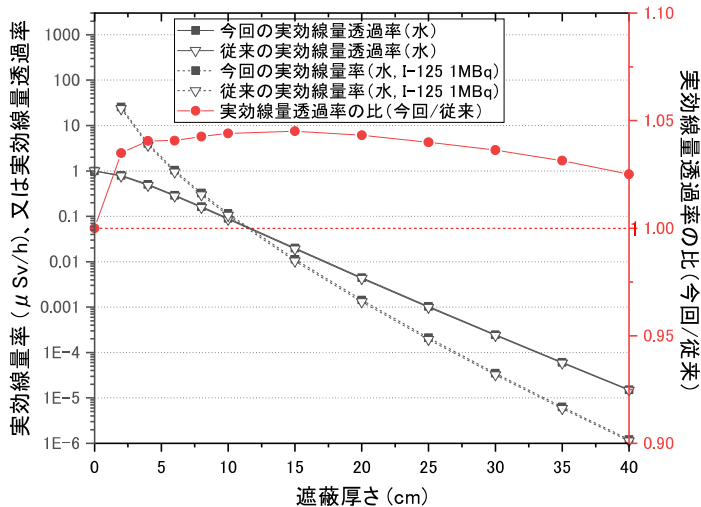
RI核種の実効線量率定数、鉄の実効線量透過率と実効線量率の計算結果: 今回と従来と比較

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



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

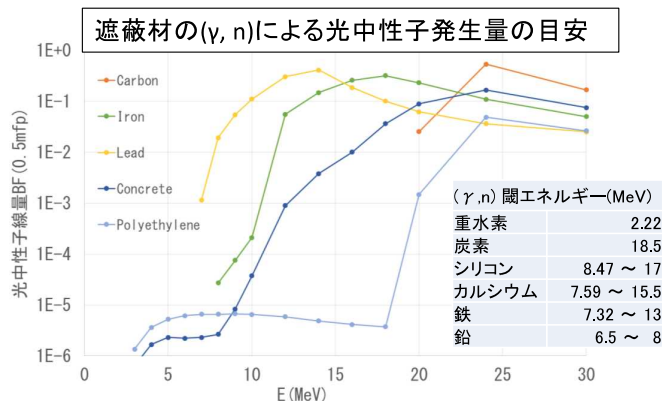
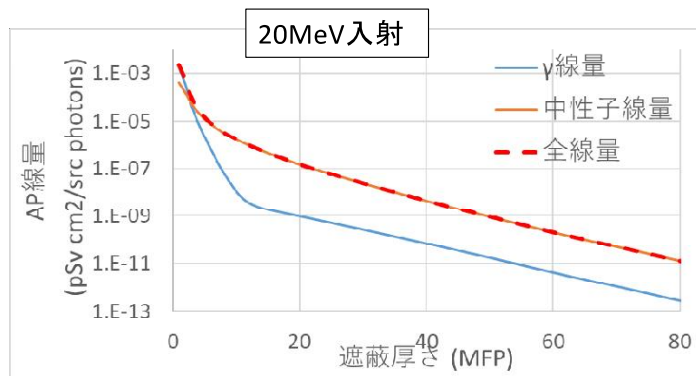
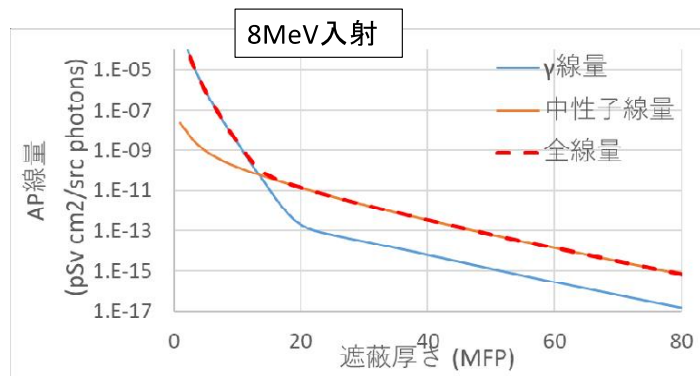
主に100keV未満のγ/X線を放出するRI核種の例 (I-125)
水に対する実効線量率及び実効線量透過率のグラフ



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

6

高エネルギー拡張による光核反応の影響(鉄遮蔽の例)



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

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

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

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

7

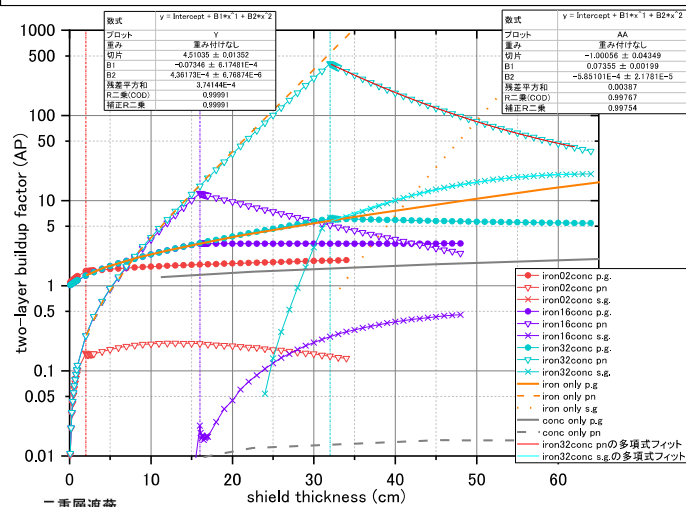
γ 線遮蔽計算法の適用性拡張研究

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

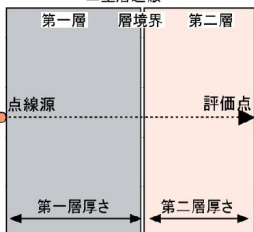
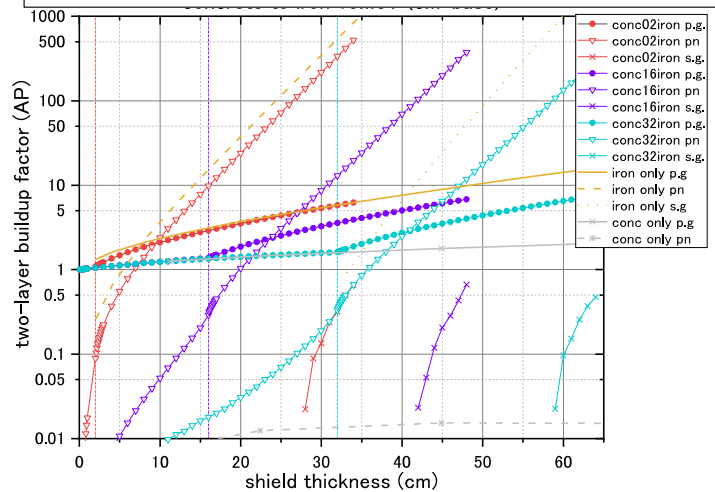
8

15MeVのγ線入射に対する、鉄とコンクリートの二重層ビルドアップ係数の例

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



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

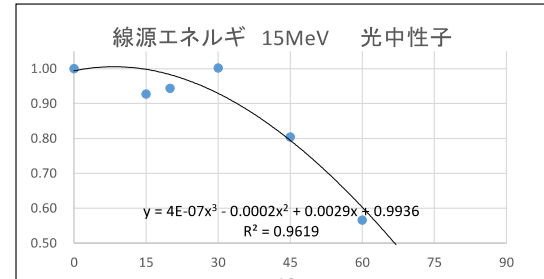
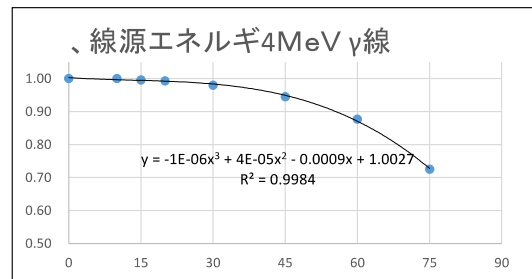
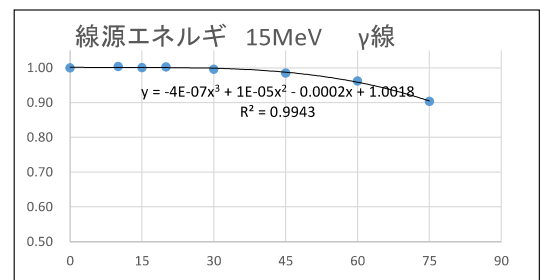
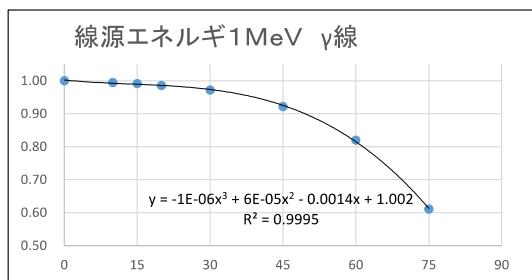
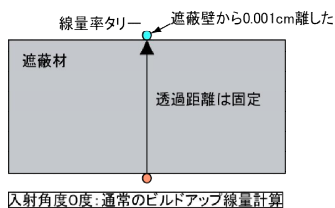


- (左図)第1層が鉄の場合、鉄に入射して直ぐに発生した光中性子が、鉄ではあまり減衰せず、第2層のコンクリート層境界から急に減衰しはじめる。層境界から、二次γの寄与が漸増しはじめる。条件によっては、第2層の遮蔽厚さが増すと、寄与が逆転する可能性がある。
- (右図)第1層がコンクリの場合、γ線はコンクリを透過して、鉄に入射して直ぐに光中性子が発生し、その後、γ線との線量差が広がる。鉄の後方に追加の中性子遮蔽の設置が要請される可能性がある。
- 遮蔽厚さによるBFの変化は、一次γ、中性子、二次γともに滑らかであり、二次多項式を用いてよく近似可能

9

スラブ遮蔽の斜め透過に対する線量比の変化 (コンクリートの例)

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



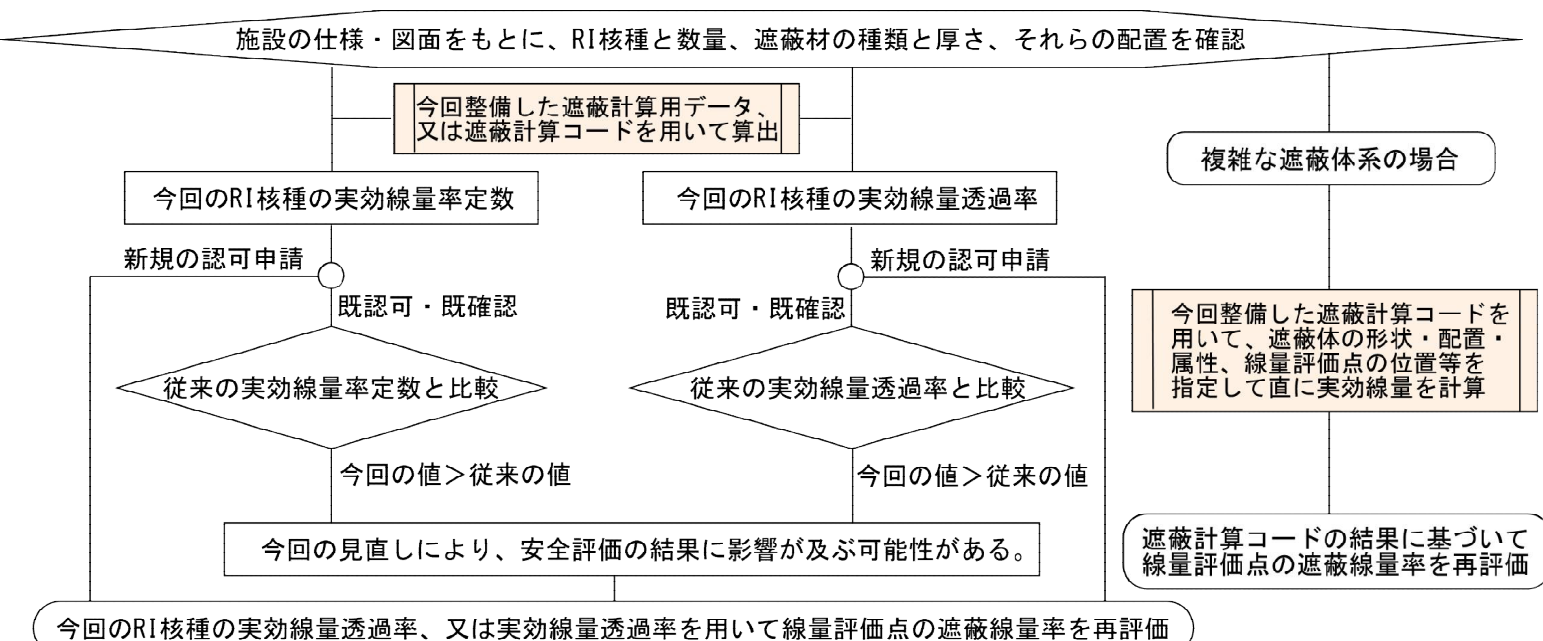
γ線も、光中性子も、入射角度による線量比変化を3次以下の多項式でよく近似可能
 角度の他に、エネルギー、または透過距離に対するデータ補間の仕方を検討
 さらに、角度による線量補正の限界、及び線源が壁から離れた場合の影響も検討

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

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

11

γ/X線を放出するRI核種取扱施設に対する遮蔽安全評価の申請確認フロー例



実効線量率定数: RI核種の数量を1MBqとして、遮蔽のない状態で1m先の実効線量率を計算
 実効線量透過率: 遮蔽材の厚さの位置において、遮蔽材のある場合の実効線量率を、遮蔽のない場合の実効線量率で除した値

12

今回、開発した遮蔽計算コードの特徴、妥当性確認の例題

RI核種の指定、遮蔽体の指定

透過線の基準点を線源ごとに設定

核種指定・エネルギー指定の選択

光子発生率の下限値として任意の値を設定可能

光子発生率のカットオフ: < 1.0e-4

核種指定: 核種指定 エネルギー指定

放射能 [Bq]

Co60 1

Cs137 1

複数核種 (複数エネルギー) の定義

| type | name | position/division | inventory | cutoff_rate | path_trace |
|-------|------|-------------------------------|-------------------------------|-------------|------------|
| POINT | s1 | 0 0 0 | [[nuclide: Co60, radioact... | 0.0001 | |
| ZONE | s2 | [edge_l: (type: UNIFORM... | [[energy: 1.0, spectrum... | 0.0001 | |
| ZONE | s3 | [r: (type: GAUSS_FIRST, n... | [[energy: 1.17, spectrum... | 0.0001 | |
| ZONE | s4 | [r: (type: UNIFORM, num... | [[nuclide: Co60, radioact... | 0.0001 | |

コンクリート壁の部屋に鉄で遮蔽された線源のある遮蔽体系例

軸の長さ = 1513.35

検出器: detector1, detector2

遮蔽体要素 (線源・遮蔽体・線量評価点) の3次元投影図による確認

線量計算結果の可視化

色スケール: 4.04e+1 (赤), 2.09e+1 (青)

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

2021年度の成果

【成果発表】

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

【データベース構築】

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

【ソフトウェア開発】

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

【ガイドライン文書の草案】

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

【ヒアリング調査、アンケート調査、研究レビュー委員会、人材育成活動】

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

自己評価、及び今後の展望

研究代表者による自己評価

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

今後の展望

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