

**令和5年度開始廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金
(安全システムの開発（被ばく線量評価のための分析手法の技術開発）)**

2024年度最終報告

2025年10月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構
核燃料サイクル工学研究所

Contents

I. 事業の全体像

- 事業の背景・目的
- 実施項目
- 東京電力からのインプット情報
- 実施体制
- 実施スケジュール

II. サブテーマ報告

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリーメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

III. 全体総括

略語・専門用語の説明（報告全体に共通する用語）

略語・専門用語	説明
東京電力	東京電力ホールディングス（株）
1F	福島第一原子力発電所
バイオアッセイ	生体試料（通常、尿や便などの排泄物を用いる）を分析測定することによって、体内に取り込まれた放射能量（摂取量）を評価する方法
鼻スミヤ	ろ紙付きの綿棒を用いて鼻腔内の放射性物質を拭き取り、ろ紙上の放射能を測定することで、吸入摂取（呼吸による内部取り込み）の有無をチェックする簡便な方法
PHITS 	粒子・重イオン輸送計算コード「Particle and Heavy Ion Transport code System」の略語 (https://phits.jaea.go.jp/indexj.html)

略語・専門用語	説明
IDEASガイドライン	欧州線量評価委員会（EURADOS）が発行するレポート（内部被ばくに関する測定データから預託実効線量を評価する方法について体系化されたガイドライン）の名称 (https://www.idea-system.com/ideas-guidelines/)
JEAG	一般社団法人日本電気協会（原子力規格委員会）が発行する民間規格「電気技術指針（Japan Electric Association Guide）」の略称 (https://nusc.jp/jeaclist.html)
ALPS	多核種除去設備「Advanced Liquid Processing System」の略語 (https://www.tepco.co.jp/nu/fukushima-np/f1/genkyo/fp_cc/fp_alps/)
BG	バックグラウンドの略語 測定対象としない自然由来の放射線

注）本ページは、本報告書内で使用している専門用語及び一般には使用されていないと考えられる略語についての説明をまとめたものです。なお、サブテーマ特有の略語・専門用語は「Ⅱ.サブテーマ報告」にて各サブテーマの最初の表にて示させていただきます。

I.事業の全体像

事業の背景*

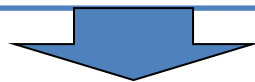
- 1Fの廃止措置、特に、燃料デブリ・炉内構造物の取り出し規模の更なる拡大に係る作業等においては以下が必要
 - α核種等の内部取り込みがないことを定期的に確認すること（作業者の安全確保の観点）
 - 内部被ばく発生時には、摂取量を迅速に把握し線量を評価すること
- プルトニウムの摂取に対して薬剤投与等の医療介入が行われるなど、近年内部被ばくへの対応がより複雑化
 - 注）ここでの「医療介入」とは対象者の被ばく線量を下げる目的で行う医療行為をいう。
- 廃炉に係る作業環境では、取り扱う放射性物質の核種組成や濃度、管理対象となる作業の状況・従事者数などが国内外の既存施設とは大きく異なる

これらの状況を専門的かつ総合的に勘案し、分析・測定等に使用するハードウェアの開発を含めたプロトコルの新たな開発が必要

*公募要領より。赤字は実施事業者による強調

事業の目的

これらの状況を専門的かつ総合的に勘案し、分析・測定等に使用するハードウェアの開発を含めたプロトコルの新たな開発が必要



先行事業*で得られた成果を踏まえ、下記 3 項に対応する、バイオアッセイや体外計測（肺モニタリング等）を用いた線量評価を含めた総合的な内部被ばく対応システムの整備及び標準の開発、並びに内部被ばく線量の測定・評価に係わる技術開発の継続により、内部被ばく線量評価プログラムの開発を進めることで、燃料デブリ等取り出しの安全実施に向けた課題の解決を図る。

- （１）内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発
- （２）作業環境及び人体試料における放射能測定の高度化
- （３）内部被ばく対応システムの開発

*令和 3 年度開始廃炉・汚染水対策事業費補助金（安全システムの開発（被ばく線量評価のための分析手法の技術開発）） 2022年度最終報告

実施項目（全体）

公募要領で示された3項目（以下1～3）に対し、計9項目のサブテーマ（以下a～i）を実施する。
3項目と各サブテーマとの関係については次ページ以降を参照。

- （１）内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発**
- （２）作業環境及び人体試料における放射能測定の高度化**
- （３）内部被ばく対応システムの開発**

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

実施項目 - 公募要領で示された項目と当事業でのサブテーマの関係 (1/3)

(1) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

内部被ばく線量の測定には、内部取り込み有無の判断、スクリーニング、線量評価などの目的に応じて、空气中濃度測定、体表面汚染測定、鼻スミヤ測定、ホールボディカウンタ・肺モニタ等の体外計測、バイオアッセイ等のうち複数の方法が組み合わされて適用される。1Fの廃炉作業に係る内部被ばく事象は、摂取したおそれのある核種の組成が複雑である、被災者が多数発生し得る、等の観点から、**上記の各種測定において迅速性・正確性・安全性等の課題を解決するための技術開発**を行う。

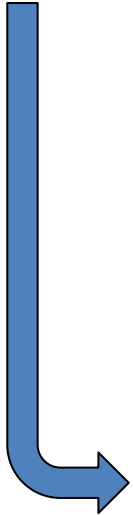
(2) 作業環境及び人体試料における放射能測定の高度化

作業環境（空气中濃度、表面密度）及び人体試料の α 線放出核種、低エネルギー β 線放出核種、純 β 線放出核種等の測定について、**新たな検出器や手法の適用による高度化の検討**を行う。また、測定対象となる**試料（バイオアッセイ試料、各種ろ紙試料）の採取等に係る課題**（代表性、採取効率、クロスコンタミネーションリスク等）の**評価**を行い、それらを**解決するための手法の開発**を行う。

実施項目 - 公募要領で示された項目と当事業でのサブテーマの関係 (2/3)

(1) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

(2) 作業環境及び人体試料における放射能測定の高度化

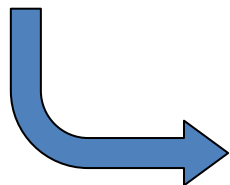
- 
- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
 - b) TES型マイクロカロリーメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
 - c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
 - d) 鼻スミヤ測定システムの検討
 - e) 皮膚汚染測定に関する検討
 - f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
 - g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
 - h) 創傷汚染測定に関する検討

実施項目 - 公募要領で示された項目と当事業でのサブテーマの関係 (3/3)

(3) 内部被ばく対応システムの開発

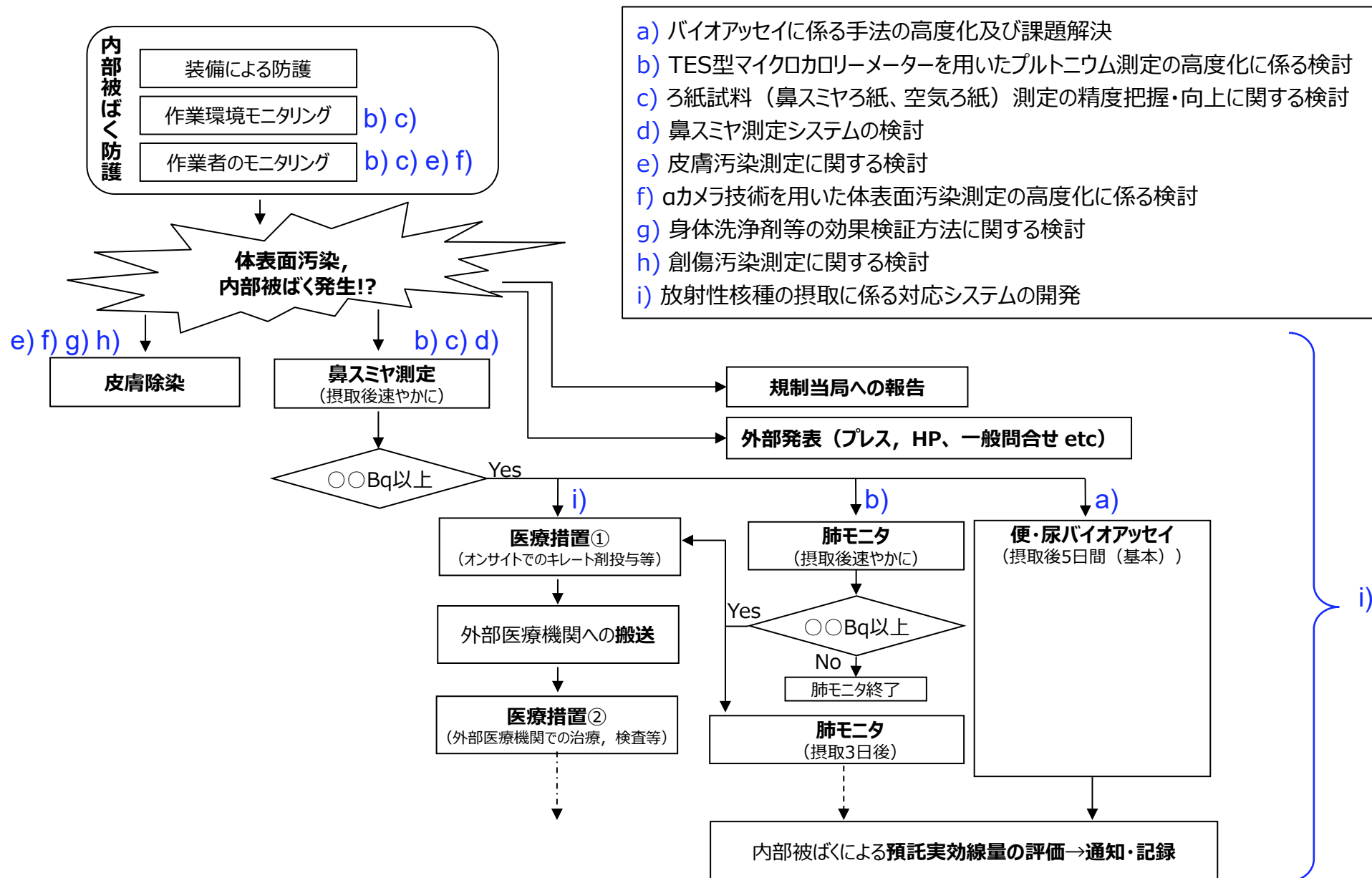
内部被ばくを伴う事象に対して、東京電力及び医療機関が医療介入の必要性などについて判断する際に、妥当性が検証された手法により線量を推定・評価し、それに基づき対応する必要がある。本事業では、**先行の事業で開発したプロトコル案について**、多数の内部被ばく者発生への対応など、**標準化に必要な課題解決を進める**こととする。

また、内部被ばく事象発生から内部被ばく線量評価、医療対応に至るまでのプロセスを**総合的に包括したシステム**について、欧州線量評価委員会（EURADOS）のIDEASガイドライン等の海外の手法・事例等も参考として、1Fの**現場への適用が可能な、JEAG等での標準化に資するドキュメント**を作成する。



i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

実施項目・サブテーマ間の関連



東京電力からのインプット情報

- 1 Fにおける内部被ばく管理の実際に関する情報を受領し、検討に資した。
 - 廃止措置における作業環境の状況（核種、汚染レベル、放射線レベル等の放射線状況及び温湿度等）、作業内容、放射線管理方法等
 - 現在実施中又は今後導入を予定している放射線管理用の装備・機器・設備（分析関連設備、除染設備、測定機器等を含む）
 - 過去に発生した、又は今後発生のおそれがある内部被ばく事象及び負傷事象の状況
 - 空気ろ紙、スミヤろ紙等の状況（ろ紙への埃、砂等の付着状況等）
 - 身体汚染事例及び汚染の性状、汚染現場の核種

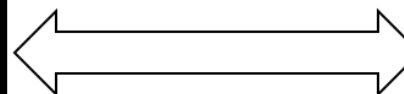
- その他、1 Fにおける放射線管理上の課題や研究開発ニーズ等の情報を得た。

実施体制

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（JAEA）

○研究開発実施

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発



- 事業進捗管理
- 状況報告

東京電力

日本エヌ・ユー・エス株式会社

○技術開発実施

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- ・分析・測定法の適用性検討に係る調査及び専門的な意見聴取

公益財団法人 原子力安全研究協会

○技術開発実施

- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発
- ・対応プロトコル（試案）の課題解決、線量評価の国内標準化等のための調査・検討

東芝エネルギーシステムズ株式会社

○技術開発実施

- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- ・αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の検討

日本エヌ・ユー・エス株式会社

○技術開発実施

- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発
- ・内部被ばく事象に係るリスク評価手法の検討

実施スケジュール（事業運営総括）

令和5年度

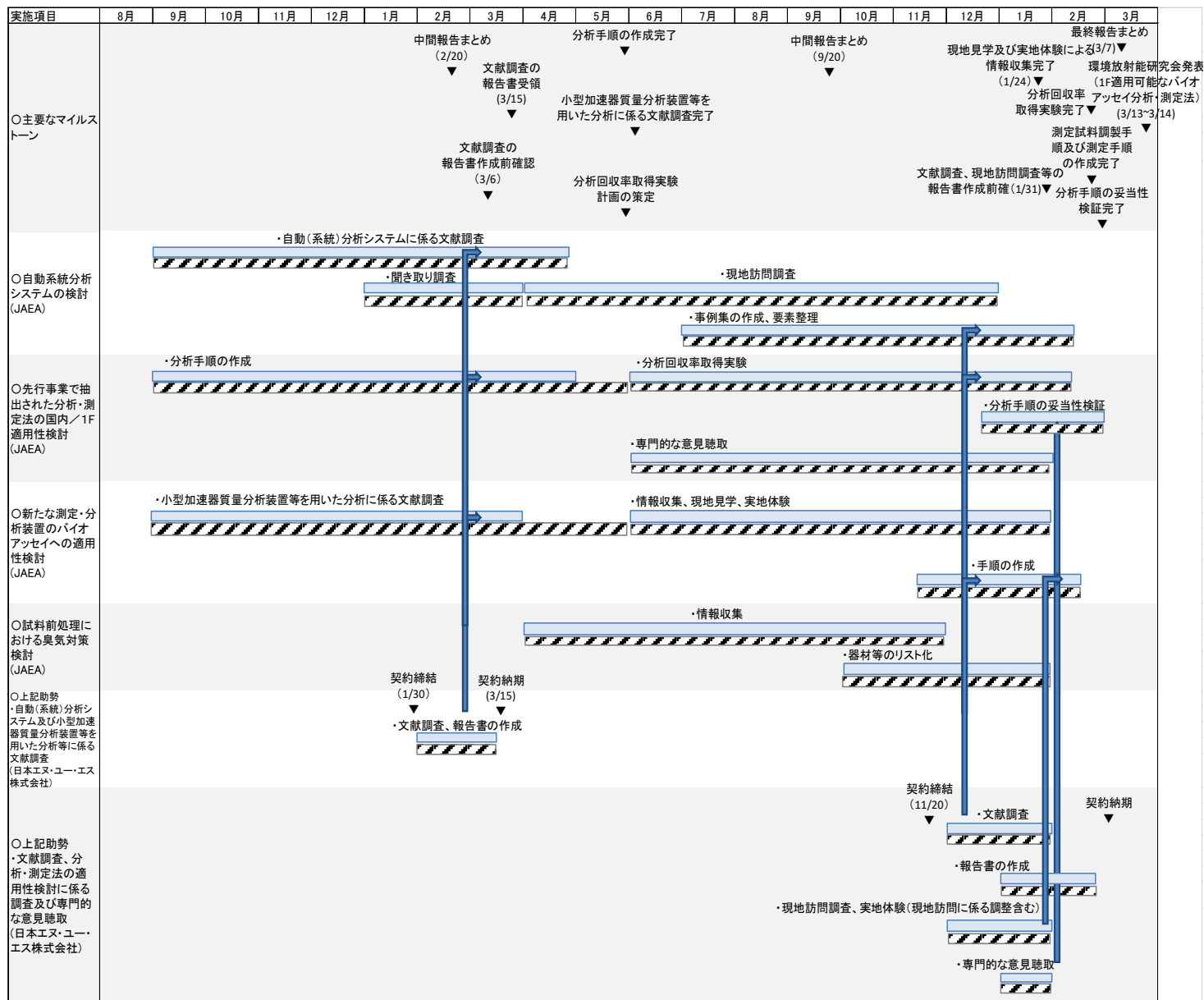
実施項目	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
○主要なマイルストーン	交付決定(8/30) ▼	関係機関会議① (10/20) ▼					中間報告会① (3/8) ▼	事業レビュー (3/29) ▼
○全体管理、取りまとめ	東電とのキックオフ打合 (9/11) ▼	進捗報告 (10/10) ▼	進捗報告 (11/6) ▼	進捗報告 (12/5) ▼	進捗報告 (1/11) ▼	進捗報告 (2/5) ▼	進捗報告 (3/5) ▼	進捗 (4/
○成果公表等	日本放射線事故・災害医学会 (9/16) ▼						原子力学会 春の大会 (3/28) ▼	

計画 実績 ▼ マイルストーン

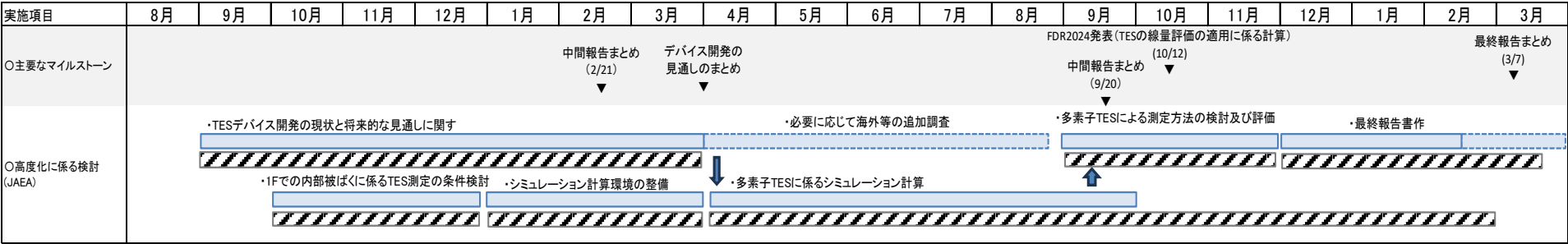
令和6年度

	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
	意見交換会(東電) (7/16)▼意見交換会(東電) (8/7)▼				中間報告会② (10/3) ▼				最終報告会 (3/19) ▼			
事業レビュー① (4/5) ▼	事業レビュー② (5/21) ▼	現地視察① (6/20) ▼	事業レビュー③ (7/29) ▼	進捗報告 (8/5) ▼	進捗報告 (9/3) ▼	進捗報告 (10/7) ▼	進捗報告 (11/8) ▼	進捗報告 (12/6) ▼	進捗報告 (1/10) ▼	現地視察② (2/6) ▼	進捗報告 (3/7) ▼	

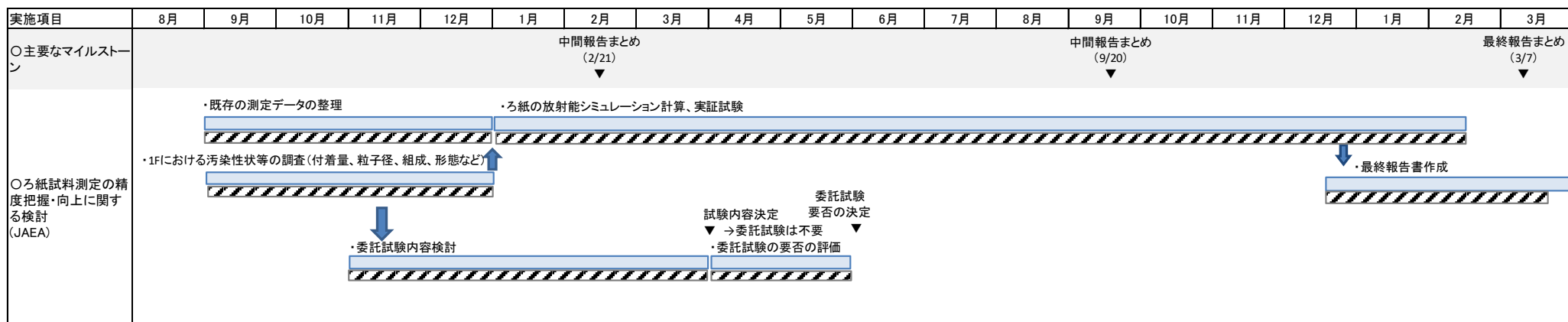
実施スケジュール：a) バイオアッセイ関連



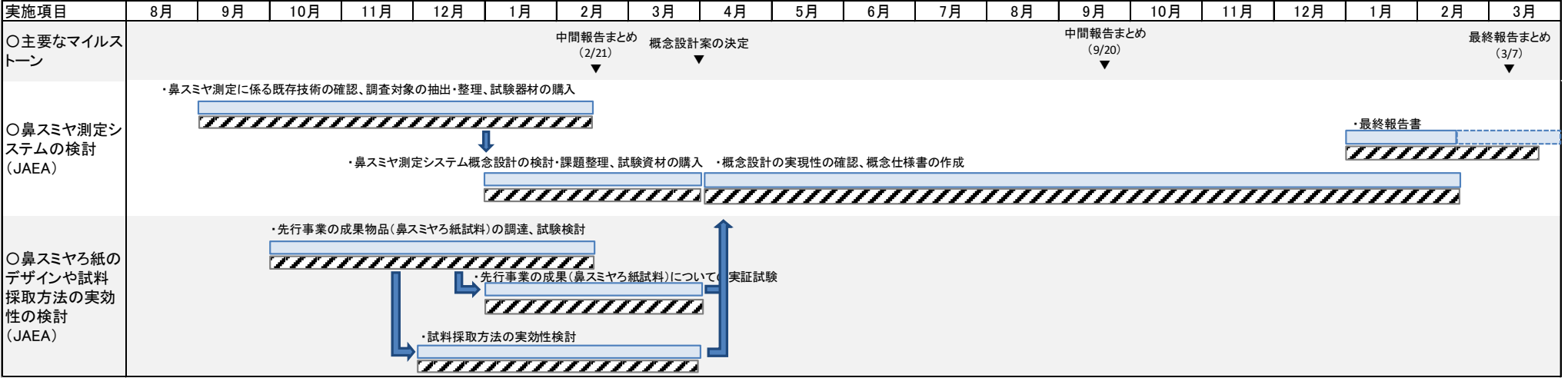
実施スケジュール：b) TES型マイクロカロリメーター関連



実施スケジュール：c) ろ紙試料測定関連



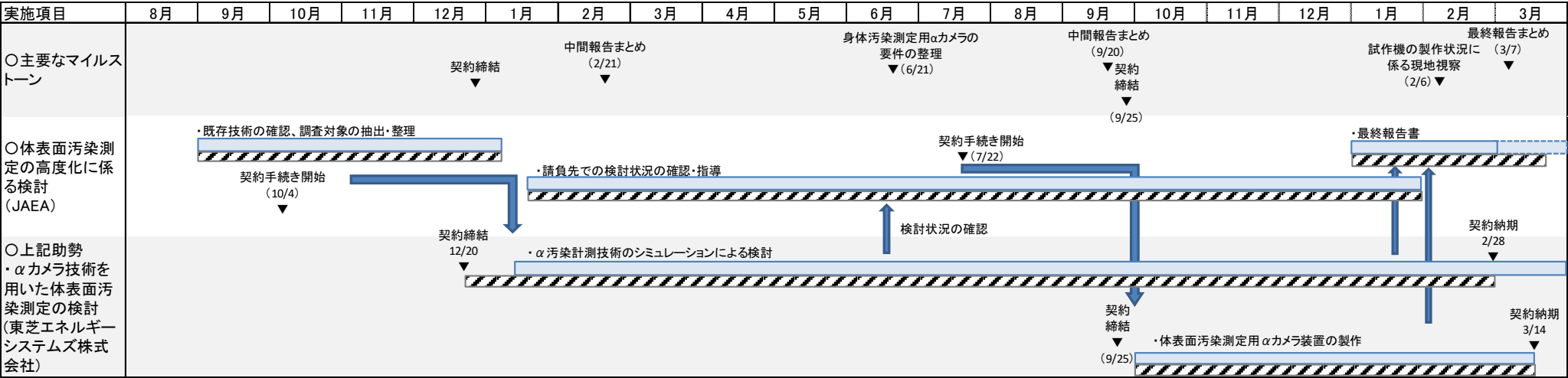
実施スケジュール：d) 鼻スミヤ測定関連



実施スケジュール：e) 皮膚汚染測定関連

実施項目	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
○主要なマイルストーン						β線用測定器の 購入契約締結 (1/26)	中間報告まとめ (2/21)	β線用測定器 の納品 (3/13)			β線用測定器の皮膚汚染測定に 対する性能試験計画の策定 ▼ (6/25)			中間報告まとめ (9/20)						最終報告まとめ (3/7)
○皮膚汚染測定 に対する測定手 法の検討 (JAEA)						・先行研究内容確認、皮膚測定条件の整理 (測定対象物の面積・距離、測定結果の評価方法など)														・最終報告書
						・PHITSによるβ線用測定器の最適条件検討														
						・先行事業の試作機(α線測定用)を使用し、標準線源を用いた試験を実施														
															・開発したβ線用測定器の性能試験					

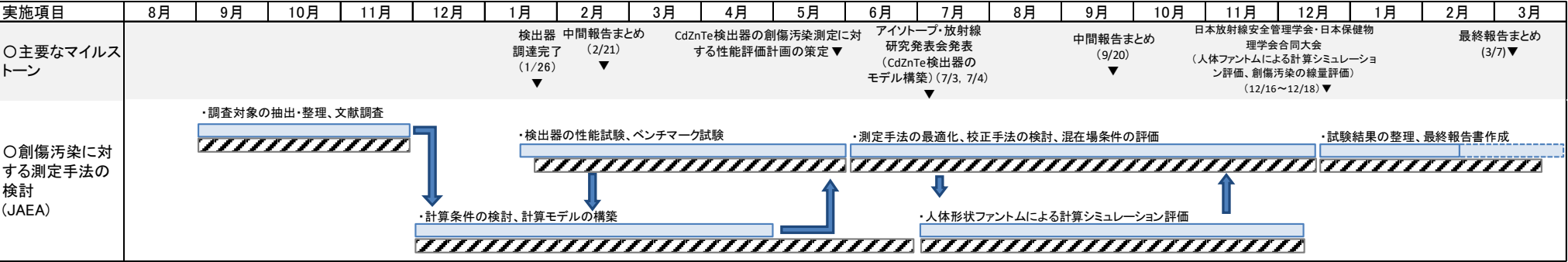
実施スケジュール：f) αカメラ関連



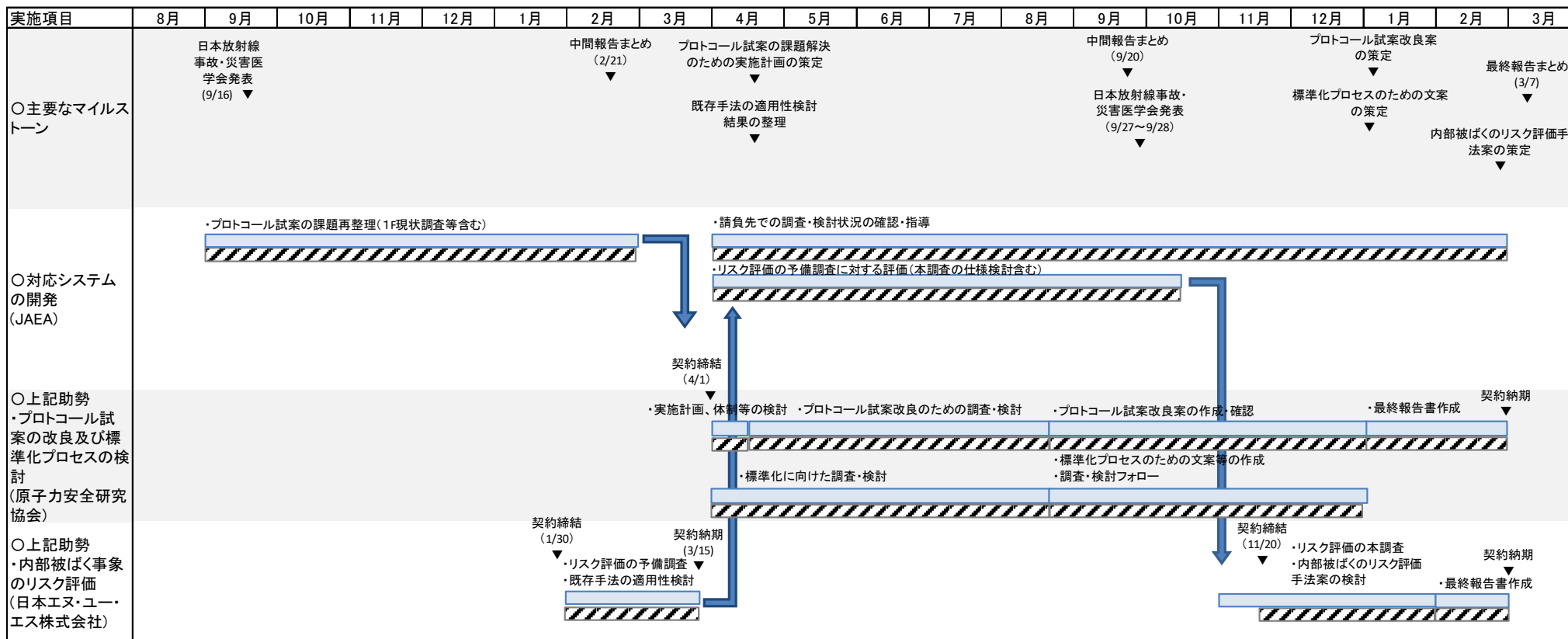
実施スケジュール：g) 身体洗浄剤関連

実施項目	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月
○主要なマイルストーン							中間報告まとめ (2/21)	原子力学会発表 (3/28)						中間報告まとめ (9/20)						最終報告まとめ (3/7)
身体洗浄剤等の 効果検証方法に 関する検討 (JAEA)	・文献調査及び検討(実際の汚染の化学的評価、除染(洗浄)メカニズム、試験方法、除染剤選択方法、人工皮膚の選定・購入、コールド・ホット比較試験) ・1Fにおける汚染性状等の調査 ・委託試験内容の検討 試験内容決定 ▼ → 委託試験は不要 委託試験 要否の最終判断 ・委託試験の要否の評価 ・最終報告書作成																			

実施スケジュール：h) 創傷汚染測定関連



実施スケジュール：i) 対応システム関連



Ⅱ．サブテーマ実績報告

1. 概要

- 1.1 背景（現状の課題）
- 1.2 目的（課題の解決策）
- 1.3 目標（技術成熟度）
- 1.4 研究フロー

2. 実績

- 2.1 得られた成果
- 2.2 目標に照らした達成度
- 2.3 成果の反映先とその寄与
- 2.4 現場への適用性（難易度）

3. 今後の課題

事業内容

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリーメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

略語・専門用語の説明

略語・専門用語	説明
固相抽出	溶液中の目的とする化合物と不純物とを物理的・化学的性質に基づいて分離する方法
レジン	放射性核種や金属イオンの分析、同位体の定量などの前処理に広く用いられる「抽出クロマトグラフィー樹脂」
電着	電気を流してステンレス板に α 線放出核種をメッキする方法
加速器質量分析装置	タンデム型加速器と質量分析計を組み合わせた分析装置

1. 概要

1.1 背景（現状の課題）

福島第一原子力発電所作業者を対象とした**バイオアッセイによる内部被ばく管理**を想定した場合、複数元素を対象とした分析手法の確立が必要である。しかし、現状では以下の問題がある。

- (1) 複数試料の分析を行う上で有用な自動分析システムは、複数元素を対象とした系統分析を可能とするシステムがほとんどない。
- (2) バイオアッセイ手法について、1F作業者を対象とした分析での再現性が検討できておらず、迅速性や検出下限値も検討できていない。
- (3) より少ない供試量で目的の検出下限を得られる可能性のある測定装置（小型加速器質量分析装置等）があるが、具体的な分析方法は不明である。
- (4) 便試料の前処理作業では悪臭が発生し、労働環境・生活環境が劣悪になる可能性があるため、対策が必要である。

1. 概要

1.2 目的（課題の解決策）

先述の課題を解決するために以下を実施する。

(1) 自動系統分析システムの検討

自動系統分析システムの事例集を作成する

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

文献調査及び実証実験に基づいた実用的な分析手順（定常及び非定常）を作成する

（定常とは定常的に放射線作業を行っている作業者を対象として行う分析、非定常とは事故時等に行う緊急性のある分析をいう。）

(3) 新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討

文献調査及び実技指導等に基づいた測定試料調製手順（小型加速器質量分析装置等）を作成して適用性を検討する

(4) 試料前処理における臭気対策検討

便試料の前処理に必要な臭気対策提案書を作成する

1.3 目標（技術成熟度）

実施項目と技術成熟度：

内容	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
①自動系統分析システムの検討	3（応用研究）	4（実用化研究）
②先行事業で抽出された分析・測定法の 国内／1F適用性検討	4（実用化研究）	5（模擬実証）
③新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの 適用性検討	3（応用研究）	4（実用化研究）
④試料前処理における臭気対策検討	3（応用研究）	4（実用化研究）

終了時目標：

国内／1Fへ適用可能なバイオアッセイ手法を提案する。

1.3 目標（技術成熟度）

終了時に得られる成果物：

(1) 自動系統分析システムの検討

複数元素分析が可能な自動系統分析システムを提案するための**事例集**（報告書）を作成する。

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

国内／1Fで適用するための妥当性確認まで実施した**実用的な分析手順**（報告書）を作成する。

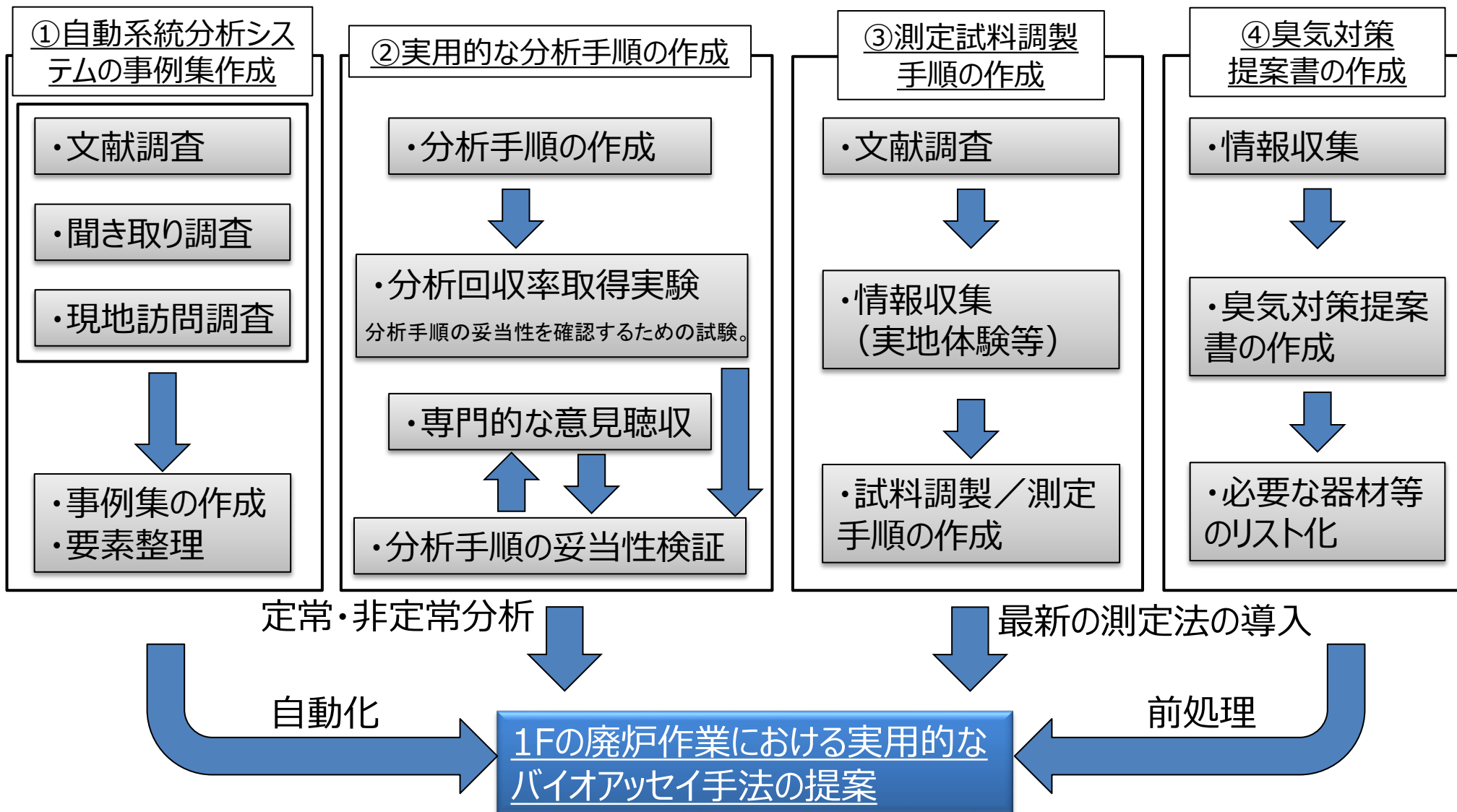
(3) 新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討

小型加速器質量分析装置等を用いて測定するための**測定試料調製手順**（報告書）を作成する。

(4) 試料前処理における臭気対策検討

便試料を対象とした臭気対策として必要な器材等をリスト化した**臭気対策提案書**（報告書）を作成する。

1.4 研究フロー



2. 実績

2.1 得られた成果 詳細は次ページ以降

(1)自動系統分析システムの検討

- 文献調査及び現地調査
- 調査結果を基に自動系統分析システムの事例集を作成

(2)先行事例で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

- 文献調査及び先行研究*を基に、実用的な分析手順を作成
- 分析回収率取得実験及び専門的な意見聴取による妥当性を確認

(3)新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討

- 文献調査及び先行論文研究者からの情報収集
- 文献調査結果及び作成した調製手順による分析手順の確認結果を踏まえ適用性を検討

(4)試料前処理における臭気対策検討

- メーカーカタログを含めた臭気対策に関する情報収集
- 臭気対策に必要な器材等をリスト化し、提案書を作成

2.1 得られた成果（1／45）

(1) 自動系統分析システムの検討

- 文献調査（文献のリストアップ、記載内容の確認）
- 学術文献データベース等によりバイオアッセイに関する文献を検索
（キーワード）「bioassay」、「urine」、「f(a)eces」、「uranium」、「plutonium」、
「americium」、「tritium」、「strontium」等の言葉の組み合わせ
- “Automatic” “Automation” “Automated” “Sequential”等で
検索して自動分析システムを用いた文献を整理・抽出
⇒ 16件の文献を抽出
- ✓ 核種の分離（固相抽出）過程の自動化が多数
- ✓ 固相抽出と誘導結合プラズマ質量分析装置（ICP-MS）等が連結された自動化システムが多い

2.1 得られた成果（2／45）

(1) 自動系統分析システムの検討

○ 文献調査（他機関の運用状況の調査）

<国内>

- （公財）日本分析センター
→ 放射性ストロンチウム自動分析装置
- （国研）量子科学技術研究開発機構
→ 自動迅速放射性核種抽出システム

⇒量子科学技術研究開発機構にて現地調査を実施
（次スライド）



量子科学技術研究開発機構が使用している自動迅速放射性核種抽出システム（桑和貿易（株）HPより）

2.1 得られた成果 (3/45)

(1) 自動系統分析システムの検討

○ 現地調査（自動系統分析システムに係る情報収集）

- ・ Q-ARE100PLUS(HIDEX社)：樹脂を用いた核種分離作業を自動化
⇒実物を見学しながら自動化について意見交換を実施



<意見交換によって得た自動化の課題>

- ・ 装置によっては溶離液の設置間違いなどのヒューマンエラーに気が付きにくい
- ・ 樹脂の連続処理等の複雑な工程が難しい
- ・ 前処理の自動化を考えるのであれば、試料ごとの成分の個体差が大きい点をどう対処するのかが課題 など
⇒ヒューマンエラーを起こしにくいシンプルなシステムが好ましい
⇒バイオアッセイ全行程ではなく一部に自動化システムを取り入れては など
⇒意見交換で得た視点を事例集の適用性評価シート作成に活用

2.1 得られた成果（4／45）

(1) 自動系統分析システムの検討

○ 事例集作成

- ・ 文献調査を基に自動化の要素を含む13の論文等について要点を抽出
⇒ 核種、対象試料、供試量、分離方法（イオン交換樹脂、レジン、等）
測定器（放射能測定装置、質量分析装置、等）
自動化されている範囲（分離方法のみ、分離から測定まで、等）
検出下限値、使用機器
- ・ パワーポイントで上記各事例(論文)をまとめた事例集を作成
⇒ 目次、事例リスト、各事例(論文)紹介で構成
- ・ 自動分析システムの検討に有用な情報について要素整理を行い適用性
評価シートを作成
⇒ 東京電力と打合せを実施し、バイオアッセイの頻度・規模感、作業者の
力量、想定している測定器などの情報を得て作成

2.1 得られた成果 (5/45)

(1) 自動系統分析システムの検討

○ 事例集作成

例)

事例リスト 1/3

各論文の要点を記載
気になる論文については事例紹介ページで
内容を確認

事例番号*	発表年	論文名	対象核種	検出下限値	試験サンプル	供試量	測定器	分離方法	自動化されている範囲	備考
①	2014	ICP-MS method for Pu and Np isotopes in population monitoring by a microflow injection sample introduction system	Np-237 Pu-239 Pu-240 Pu-241	Np-237 : 0.32fg Pu-239 : 1.00fg Pu-240 : 0.33fg Pu-241 : 0.26fg	ヒトの尿 ラット尿	50 ml	ICP-MS	陰イオン交換樹脂 (AGMP-1M)	分離後から測定まで 核種分離後、オートサンブラー等でICP-MSに導入、自動測定。	HF使用
②	2024	Simultaneous Determination of Transuranium Radionuclides in Urine by Tandem Quadrupole ICP-MS/MS with Mass-Shift Mode Combined with Chemical Separation	Np-237 Pu-239 Pu-240 Pu-241 Am-241 Cm-244	Np-237 : 1.03fg (0.03μBq) Pu-239 : 1.8fg (2.71μBq) Pu-240 : 0.69fg (5.85μBq) Pu-241 : 0.43fg (1.65mBq) Am-241 : 0.56fg (0.07mBq) Cm-244 : 0.03fg (0.09mBq)	ヒトの尿	20ml	ICP-MS/MS (タンデム四重極 ICP-MS)	DGA樹脂 (normal, 100-200 μm)	—	12サンプル2.5h (尿サンプル樹脂分離から測定まで)
③	2013	Sequential Injection Approach for Simultaneous Determination of Ultratrace Plutonium and Neptunium in Urine with Accelerator Mass Spectrometry	Np-237 Pu-239	【AMS】 Np-237 : 10 fg (20 fg) Pu-239 : 3 fg 【ICP-MS】 30-100fg	ヒトの尿	1L (鉄共沈)	加速器質量分析 (AMS) 又はICP-MS	水酸化鉄共沈 +TEVA樹脂 (粒径100- 150μm)	分離方法のみ SI-ECシステムによりクロマトグラフィーのみ自動	クロマトグラフィーによる分離1時間以内 AMS測定時間 20-30分
④	2004	Flow injection extraction chromatography with ICP-MS for thorium and uranium determination in human body fluids	Th-232 U-235 U-238	Th-232 : 0.06 ng ⁻¹ (150 fg) U-235 : 0.0014 ng ⁻¹ (3.5 fg) U-238 : 0.05 ng ⁻¹ (125 fg)	ヒトの尿 血液	尿 5ml 血液 1ml	ICP-MS (An automated flow injection extraction chromatography ICP-MS system(FI-EXC-ICPMS))	UTEVAレジソ	分離から測定まで フローインジェクションシステムにより試料のローディング、カラムへの試料注入、ICP-MSまで自動化	Th-232 と U-235,238の同時分析時間は7分 抽出クロマトグラフィーカラムは、200～250回使用可能
⑤	2008	Ultratrace Uranium Fingerprinting with Isotope Selective Laser Ionization Spectrometry	U-234 U-235 U-236	U-234 : 20 fg U-235 : 290 fg U-236 : 500 fg	REIMEP-18 から提供された ブラインドサンプル (0.5 M 硝酸)	5～50 μL	四重極質量分析計 (QMS)、連続ダイ ノード電子増倍イオン 検出器	レーザー同位 体分離	分離から測定まで 試料をフォアチャンバーに入れてから QMSで測定するところまで自動	測定は約8分

2.1 得られた成果 (6/45)

(1) 自動系統分析システムの検討

例)

○ 事例集作成

・ 事例紹介

事例番号ごとに、論文概要、
分析手順、自動化システム概
要図、構成機器を記載

事例紹介①

ICP-MS method for Pu and Np isotopes in population monitoring by a microflow injection sample introduction system

Youqin Shi, Xiongxin Dai, Chunsheng Li, Roxanne Collins, Sheila Kramer Tremblay, Remi Riopela, Carrie Broomea
Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2014, 29.9: 1708-1713.

(1) 基本情報

対象核種	検出下限値	試験サンプル	供試量	分離方法 (イオン交換樹脂、レジシ、等)	測定器 (放射能測定装置、質量分析装置、等)	自動化されている範囲 (分離方法のみ、分離から測定まで、等)
Np-237 Pu-239 Pu-240 Pu-241	Np-237: 0.32fg Pu-239: 1.00fg Pu-240: 0.33fg Pu-241: 0.26fg (U-238が含まれない場合)	ヒトの尿 ラット尿	50 ml	陰イオン交換樹脂 (AGMP-1M)	ICP-MS	分離後から測定まで 核種分離後、オートサンブラー等で ICP-MSに導入、自動測定。

(2) 概要

マイクロフローインジェクション(μ -FI)サンプル導入システムを使用したICP-MS分析法を、尿サンプル中のNp-237およびPu-239、240、241を測定する目的として開発した。

測定において、 ^{238}U イオン生成の低減を評価した結果、本研究で用いた組み合わせの中では、加熱とベルチェ冷却を伴う空気圧ネブライゼーションと膜脱溶媒を組み合わせた場合 (Apex-Q および Spiro TMDの組み合わせ) に、最も良好な低減が達成された。PuとNpの同位体に対するLODは、Uの含有量がさらに増加するにつれて上昇し始めたものの、30 pgまでのUの存在は分析法の検出限界に影響を及ぼさないことが示された (Table 3)。

また、分離および前濃縮手順で Pu-242がNp-237の回収モニターとして機能することが証明された。分離手順によって50mLの尿サンプルを処理するための全体的な化学回収率は、 $80\% \pm 10\%$ であった。

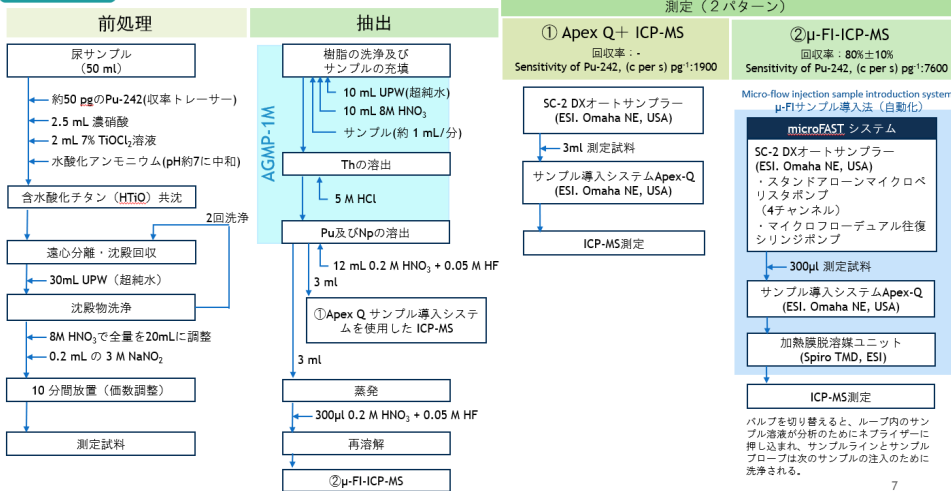
Table 3 LODs of the analytes with the presence of different amount of ^{238}U

Co-existing ^{238}U , pg	LOD, fg			
	^{237}Np	^{239}Pu	^{240}Pu	^{241}Pu
0	0.32	1.0	0.33	0.26
3	0.29	1.4	0.22	0.23
30	0.37	1.3	0.23	0.27
280	1.6	1.5	0.54	0.35
2500	10	8.6	7.3	2.6

6

事例紹介①

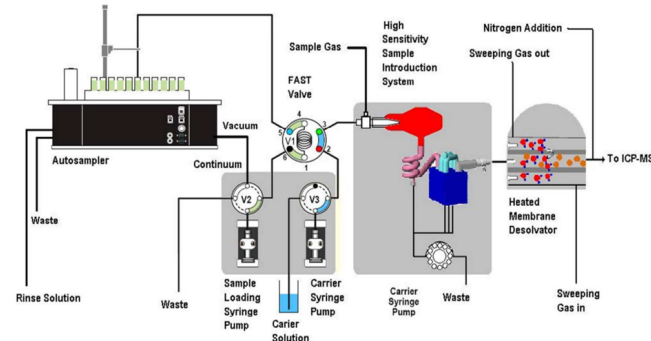
(3) 手順概要



7

事例紹介①

(4) 自動化システム概要図 (論文から引用)



A micro-flow injection ICP-MS method was applied to radiological emergency monitoring of Plutonium and Neptunium

構成機器

- 陰イオン交換カラム: 2mLカートリッジ+AGMP-1M樹脂
- SC-2 DXオートサンブラー (ESI, Omaha NE, USA)
- スタンドアロンマイクロペリスタポンプ (4チャンネル)
- マイクロフローデュアル往復シリンジポンプ
- サンプルループ (100 μ L 容量)
- サンプル導入システムApex-Q (ESI, Omaha NE, USA)
- PFA-STネブライザー
- CTFE フッ素ポリマー高流量 FAST パルプ
- 加熱膜脱溶媒ユニット: Spiro TMD (ESI)
- ICP-MS: セクター フィールド (SF) モデル Element XR (Thermal Scientific社)
- フェームフード アダプター

2.1 得られた成果 (7/45) ○ 事例集作成(適用性評価シート)

(1) 自動系統分析システムの検討

検討材料の提供としてヒューマンエラーの起こしやすさを工程の多さで見える化

例) Pu、Np等分析論文

事例番号	論文名	対象核種	コスト	所要時間 ◎:1日以内 ○:3日以内 △:1週間以内 ×:1週間以上	工程の多さ (煩雑さ)		手法の利点・特徴
					自動化工程	手動工程	
⑥	Determination of ²³⁹ Pu in urine by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry (SF-ICP-MS) using an automated offline sample preparation technique	Pu-239	・セクターフィールドICP-MS(Element XR) ・オートサンプラー(ASX-112) ・周辺機器 ・システム(preFAST) ・TEVA樹脂など	◎	・カラム自動洗浄 ・TEVA樹脂抽出 ・ICP-MSへのサンプル導入	・試料調製(ピペット操作) ・システムへのサンプルセット	・前処理工程が少なく1サンプルあたり約20分 ・prepFAST MC-4 シングルプローブシステムの利用 →1核種のみだが短時間で大量のサンプル測定が可能(抽出と分析の自動化で24時間以内に約70サンプル測定) ・CF-ThU-1000カラムを100回以上再利用した場合、平均Pu-242回収率は88%
⑦	Bead Injection Extraction Chromatography Using High-Capacity Lab on-Valve as a Front End to Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry for Urine Radiobioassay	Pu-239 Pu-242	・ICP-MS(XSeriesII) ・ラボオンバルブプラットフォーム ・周辺機器 ・TEVA樹脂など	◎	・樹脂の充填・除去 ・TEVA樹脂抽出 ・ICP-MSへのサンプル導入	・試料調製(ピペット操作) ・共沈・遠心 ・溶解 ・蒸発乾固 ・有機物分解 ・蒸発乾固 ・価数調整 ・遠心・沈殿回収 ・再溶解 ・価数調整 ・システムへのサンプルセット	・本自動化システムの利用 →カラム交換、核種分離、測定が自動化され、自動化部分については所要時間が約 1.5 時間と短時間(カラムの再利用は不可) ・1Lの尿処理が可能

導入コストやランニングコストに関係する機器等が見える化

各システムの利点を明示して欲しいという東京電力の要望に対応

2.1 得られた成果 (8/45)

(1) 自動系統分析システムの検討

○ 事例の適用性について (1/2)

東京電力からのインプット

- ①緊急時の検体者の人数は6名を想定。定常では燃料デブリ分析が開始したら数十名程度を想定。
→一度に大量のサンプルを処理するシステムでなくてもよい。
- ②作業者の力量は東京電力職員及び東京パワーテクノロジー（株）を想定しているためある程度力量はある。
→分析の簡単さや初心者でもできるかは考慮しなくてもよい。
- ③前処理以外の操作ではHFの使用はなし。できる限りHClの使用が少ない方がよい。→薬品の希望。

✓ 多核種分析が可能・迅速な測定・HClの利用は樹脂溶出のみ・HFが不要な事例 (一度に大量のサンプル処理は考えていない・力量考慮無し)

○事例②※ (測定器：ICP-MS/MS(Agilent8900 (アジレント・テクノロジー社)))

- ・ 酸分解、価数調整、DGA樹脂での分離のみで6核種（Np-237、Pu-239、Pu-240、Pu-241、Am-241、Cm-244）の同時測定が可能。
- ・ Pu-241、Am-241同重体の同時測定可能。
- ・ ウランのテーリング及びその水素化合物の干渉や血漿中に含まれるイオンの干渉抑制可能。
- ・ 検出下限値が比較的低い。
- ・ 自動化システム無しだが工程が少ない。
- ・ コストがかかる（コリジョンガスのランニングコスト、ICP-MS/MSの導入コスト）。

※ Peng, C, et al., Analytical Chemistry, 96:6(2024),2514-2523.

2.1 得られた成果 (9/45)

(1) 自動系統分析システムの検討

○ 事例の適用性について (2/2)

✓ 今後自動化システムの導入が検討しやすい測定器 (ICP-MS)

- ・ 多くの事例でICP-MSを用いた分析法が報告されている (自動化システムの導入例が多い)
- ・ 少ない試料量で迅速な測定が可能。
- ・ Apex-Q(高感度試料導入システム (エレメンタル・サイエンティフィック社))及びSpiro TMD(膜脱溶媒ユニット(エレメンタル・サイエンティフィック社))を前段に用いることでPu-239への干渉となるU-238・H⁺イオンを低減させることができる。
- ・ Apex-Qを用いることでバックグラウンドの低下、感度向上が期待できる。

✓ 自動化システム導入を検討する上での課題

- ・ 文献情報だけでは自動化システムの煩雑さや準備にかかる時間、コストなどがわからない。
→導入を検討する際は必要に応じて著者や販売元から情報収集をする必要がある。
- ・ 海外製品の場合日本で購入できるかどうかを調査する必要がある。

2.1 得られた成果 (10/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)

< 作製手順 >

1. ビーカーに規定量の水と右記の試薬を入れスターラーを用いて、攪拌しながら溶解
2. 試薬類が溶解したら、溶液をポリ瓶に移す
3. 冷蔵庫にて保管

< 試薬一覧 >

- 1) Urea 16.00 g
- 2) Sodium sulfate 4.31 g
- 3) Potassium chloride 3.43 g
- 4) Sodium dihydrophosphate 2.73 g
- 5) Sodium chloride 2.32 g
- 6) Creatinine 1.10 g
- 7) Ammonium chloride 1.06 g
- 8) Hippuric acid 0.63 g
- 9) Calcium chloride 0.63 g
- 10) Citric acid 0.54 g
- 11) Glucose 0.48 g
- 12) Magnesium sulfate 0.46 g
- 13) Sodium silicate 0.071 g
- 14) Pepsin 0.029 g
- 15) Oxalic acid 0.02 g
- 16) Lactic acid 0.094 g
- 17) Water 966.10 mL
(Total 1,000.00 g)

模擬尿作製法

2.1 得られた成果（11／45）

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

（分析フロー内で使用するレジンの概要）

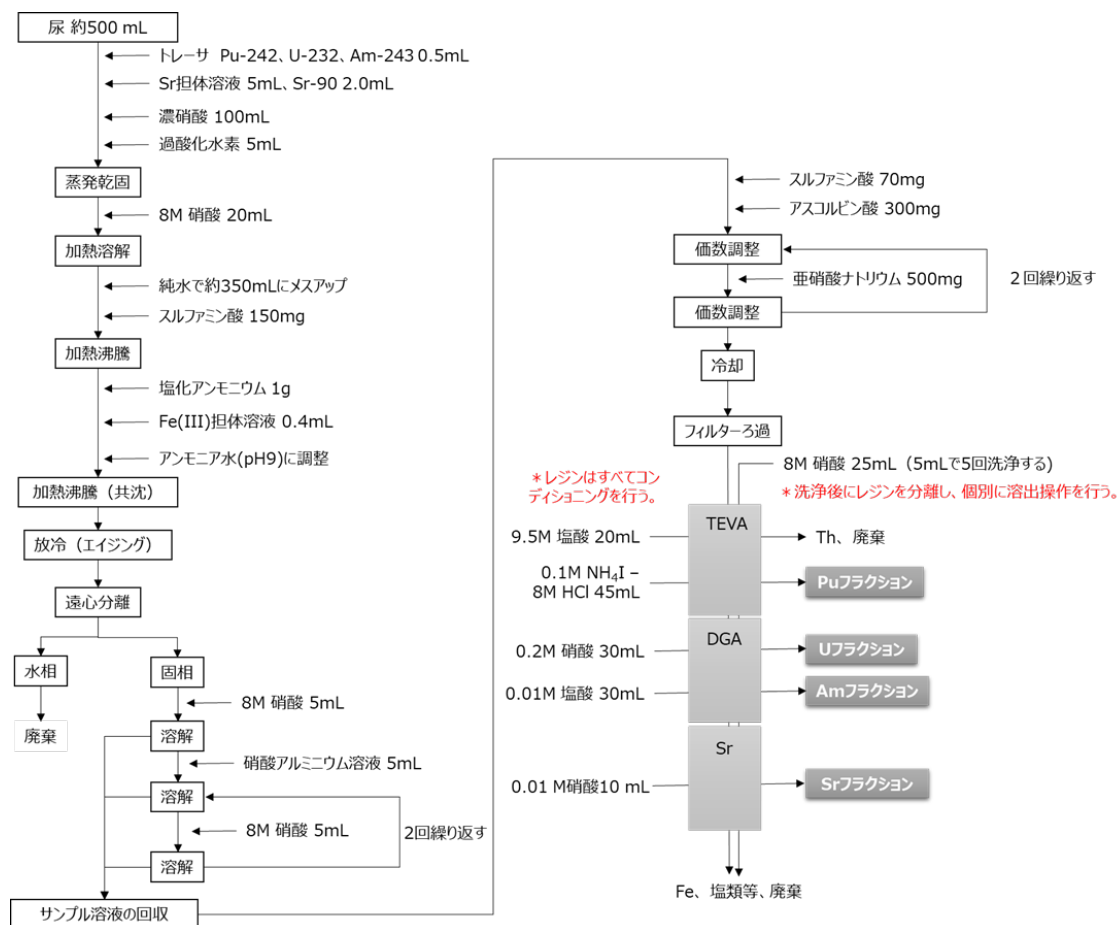
レジンの名称	主な機能・性質等
TEVALレジン	脂肪族第4級アミンを用いたレジンで、4価アクチノイドを高濃度（> 1 M）の硝酸下で特異的に吸着する性質をもつ
UTEVALレジン	抽出剤のジアミルアミルスルホン酸が硝酸イオン存在下でアクチノイドイオンと錯体を形成することで、レジンに吸着させる性質をもつ
DGALレジン	高濃度（> 1 M）の硝酸下で特異的にAmを吸着する性質をもつ抽出剤を用いており、硝酸濃度を変えることにより、Amイオンを吸着及び脱離させる性質をもつ
Srレジン	抽出剤としてクラウンエーテルを用いており、高濃度（> 1 M）の硝酸下で特異的にSrイオンを吸着する性質をもつ

a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決

2.1 得られた成果（12／45）

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

（分析手順の作成、回収率取得実験）

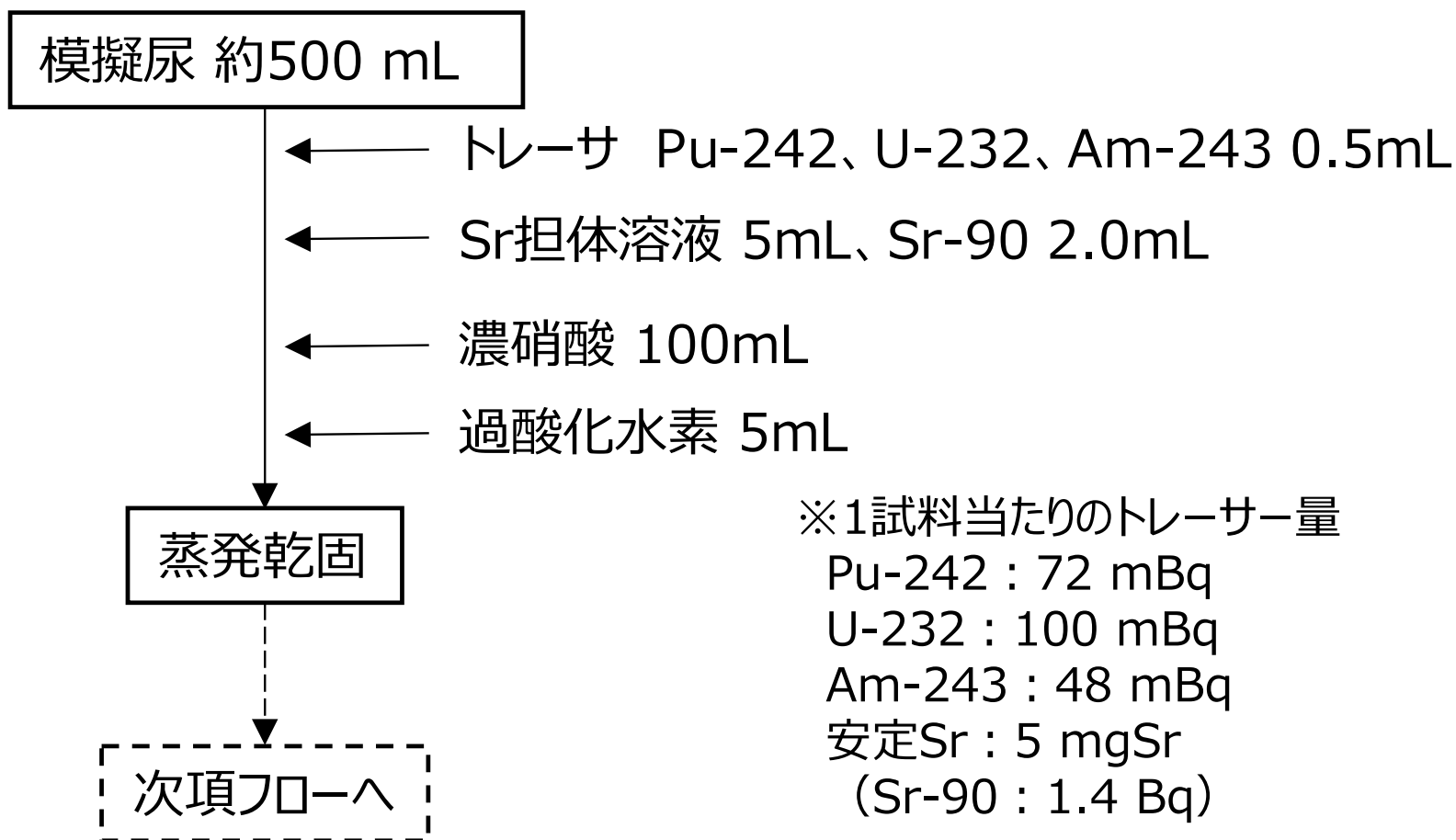


模擬尿分析フロー（前処理～核種分離まで）*

2.1 得られた成果 (13/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)

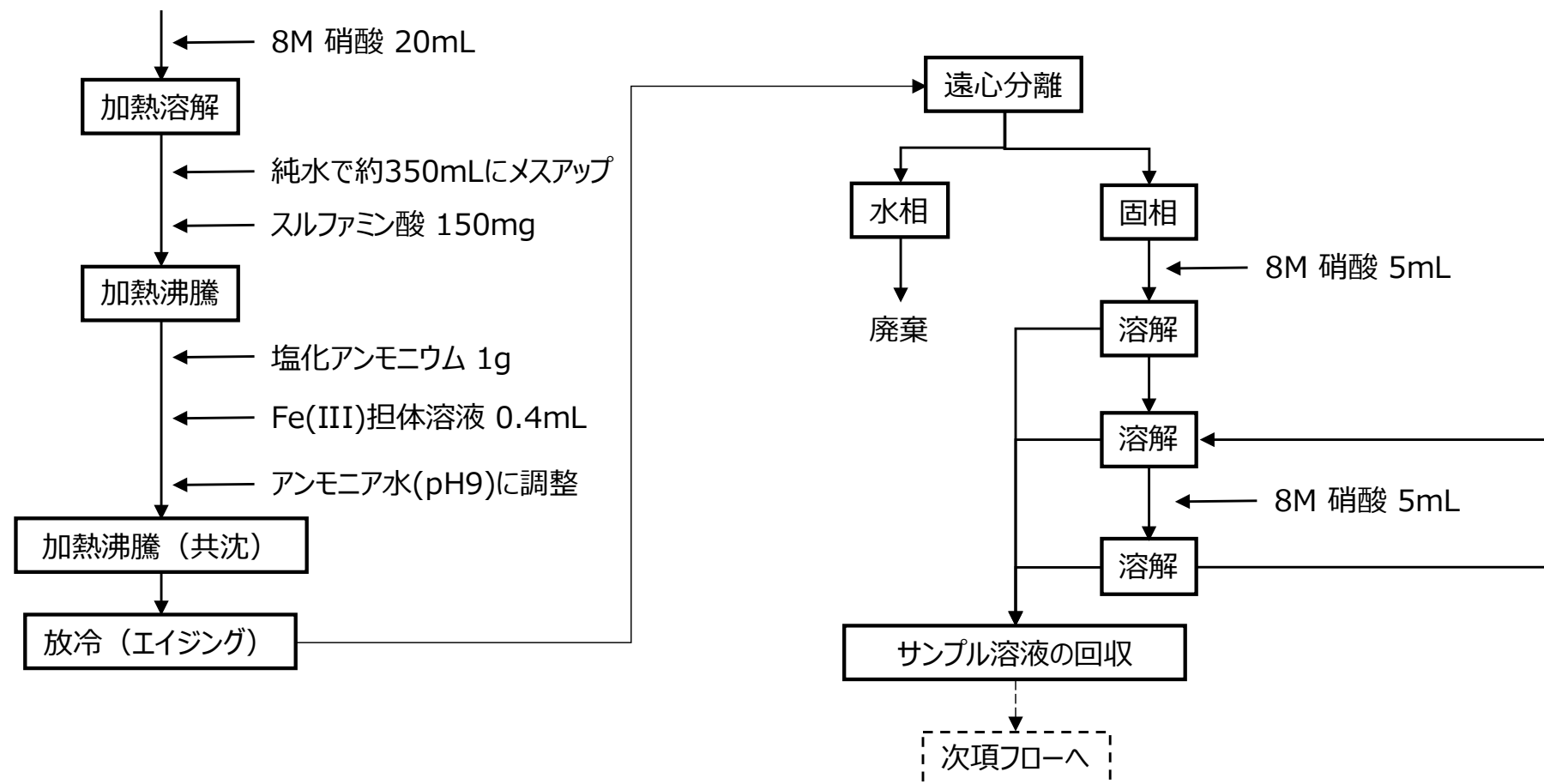


模擬尿分析フロー（抜粋）（試料の前処理）*

2.1 得られた成果 (14/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

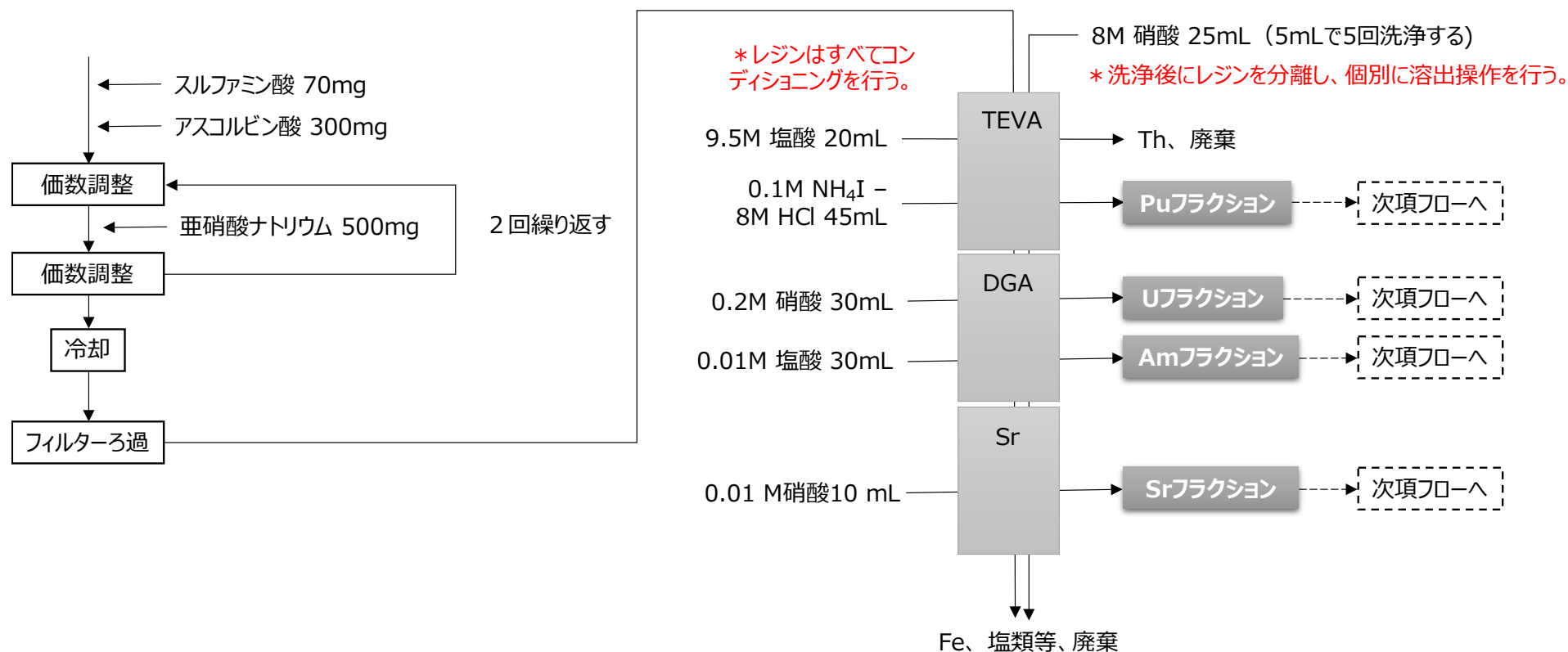
(分析手順の作成、回収率取得実験)



模擬尿分析フロー（抜粋）（鉄共沈・サンプル溶液作製）*

2.1 得られた成果 (15/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討 (分析手順の作成、回収率取得実験)

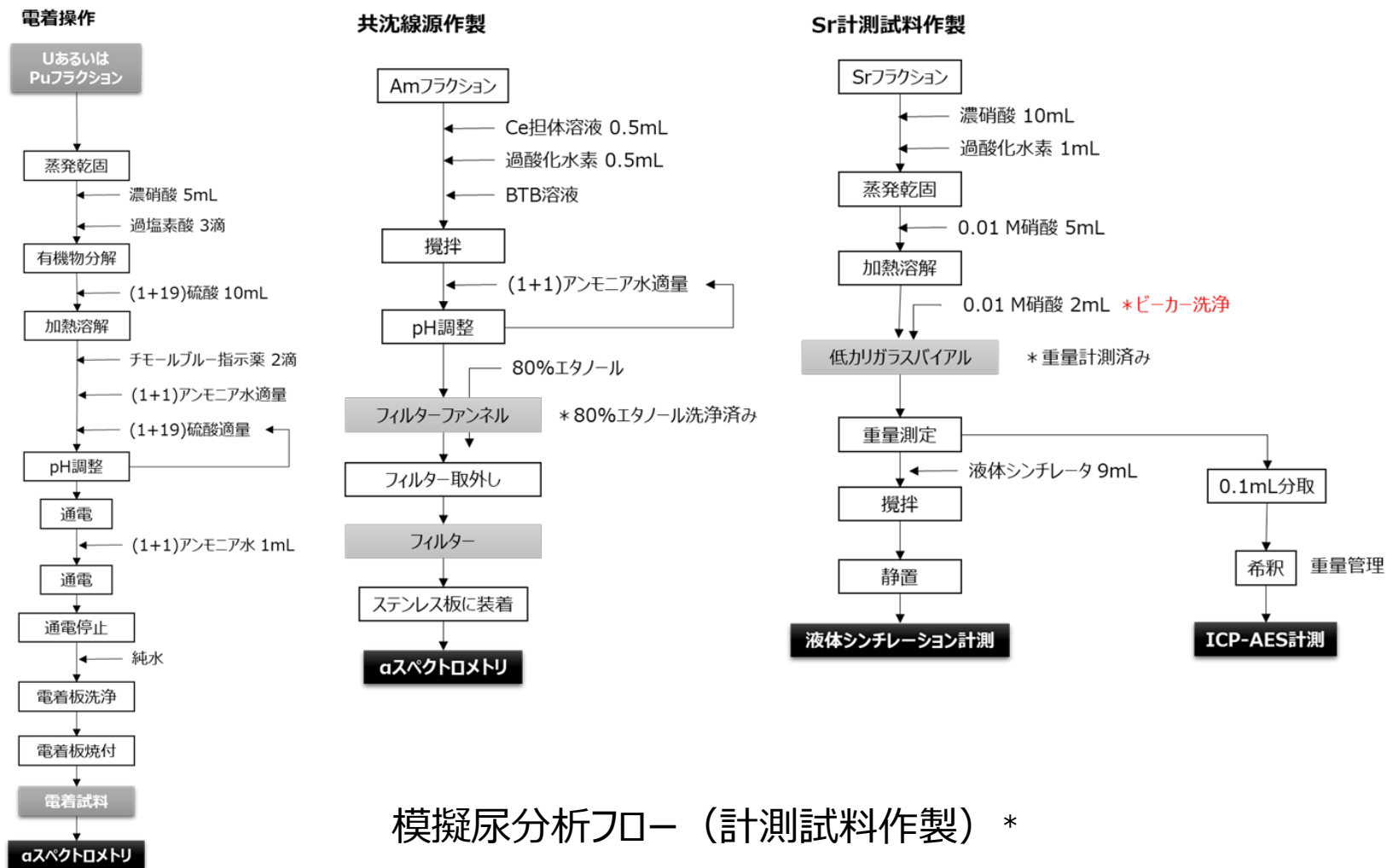


模擬尿分析フロー（抜粋）（核種分離）*

2.1 得られた成果 (16/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)



2.1 得られた成果 (17/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)

模擬尿に対する分析回収率試験の結果

試料名 ^{注1}	回収率(%)			
	Pu(電着)	U(電着)	Am(共沈)	Sr
模擬尿①	55.8	82.9	100.5 ^{注2}	55.8
模擬尿②	76.5	51.3	90.2	54.0
模擬尿③	68.7	47.9	90.2	49.9
平均値	67.0	60.7	93.6	53.2

注1 分析の試料管理上、便宜的に試料番号を付しているが、すべて模擬尿作製法に従い作製された模擬試料であり、成分等に違いはない。

注2 ここでの“回収率”とは、分析開始時に試料に添加したトレーサもしくは担体の量に対し、分析終了後、どれほど残っているかを割合としてあらわしたものである。
回収率を求める際に測定器を用いるが、その計数には不確かさが存在し、それらを考慮すると、100%を超過する可能性がある。

2.1 得られた成果 (18/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)

< 作製手順 >

1. ビーカーに規定量の水とゼラチンを入れ、ホットスターラー（約50℃）を用いて、攪拌しながらゼラチンを加熱溶解
2. ゼラチンが溶解した後、右記の試薬類をビーカーに入れて引き続き加熱攪拌
3. 試薬類が溶解したら、溶液を薄手のポリエチレン袋に移す
4. 冷蔵庫で半日間以上冷却

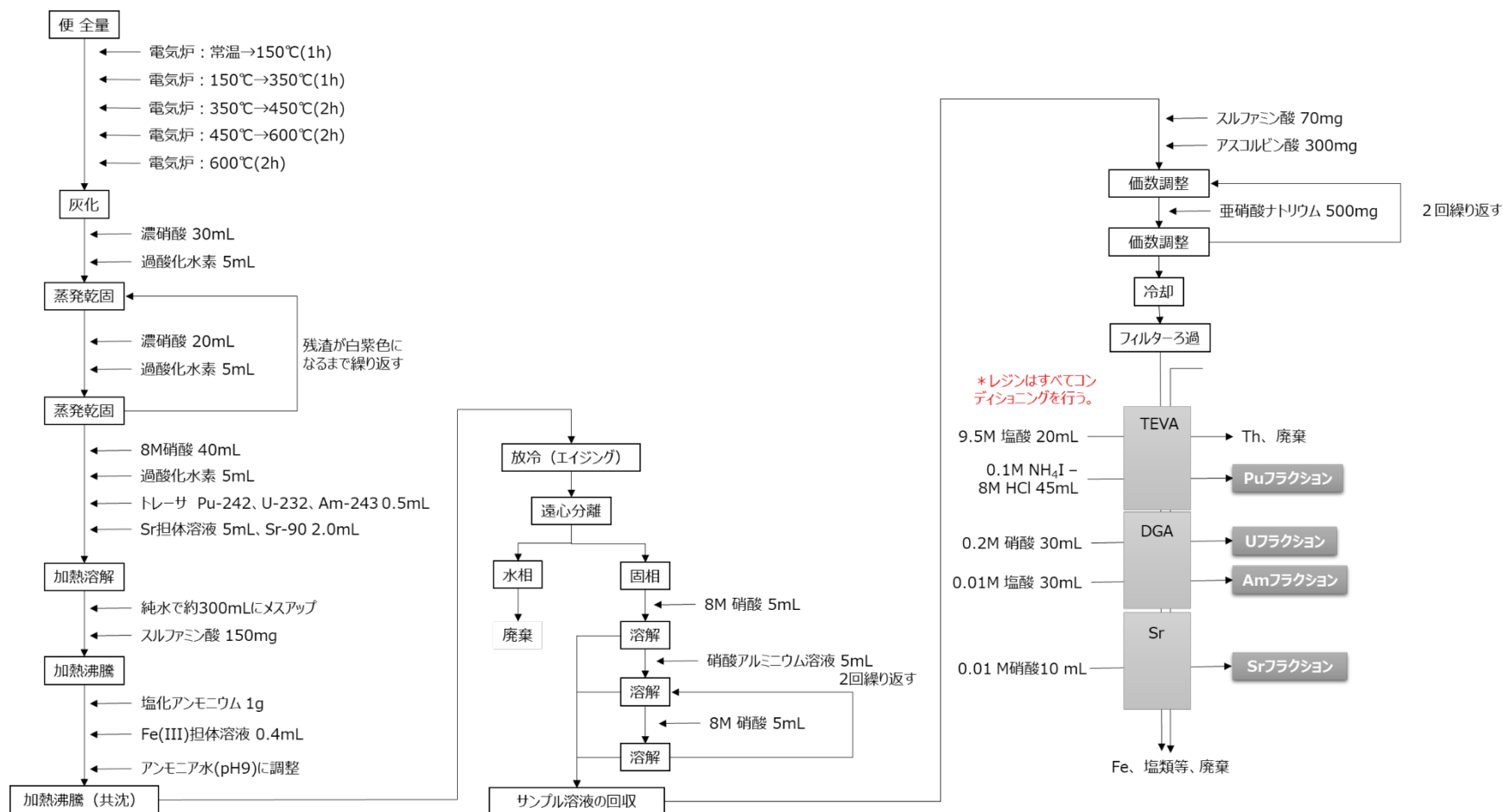
< 試薬一覧 >

- 1) Leucine : 7.10 g
 - 2) Lysine : 5.10 g
 - 3) Gelatine : 5.00 g
 - 4) Cellulose : 4.00 g
 - 5) Palmitic acid : 3.00 g
 - 6) Ammonium dihydrophosphate : 2.10 g
 - 7) Stearic acid : 2.00 g
 - 8) Threonine : 2.00 g
 - 9) Calcium hydroxide : 0.97 g
 - 10) Potassium carbonate : 0.83 g
 - 11) Methionine : 0.80 g
 - 12) Magnesium carbonate : 0.61 g
 - 13) Sodium sulfate : 0.37 g
 - 14) Ferric ammonium sulfate : 0.04 g
 - 15) Ammonium chloride : 0.04 g
 - 16) Stannous sulfide : 0.03 g
 - 17) Zinc sulfide : 0.01 g
 - 18) Oleic acid : 1.00 g
 - 19) Peanut oil : 1.50 g
 - 20) Water : 65.00 mL
- (Total 101.5 g)

模擬便作製法

2.1 得られた成果 (19/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討 (分析手順の作成、回収率取得実験)

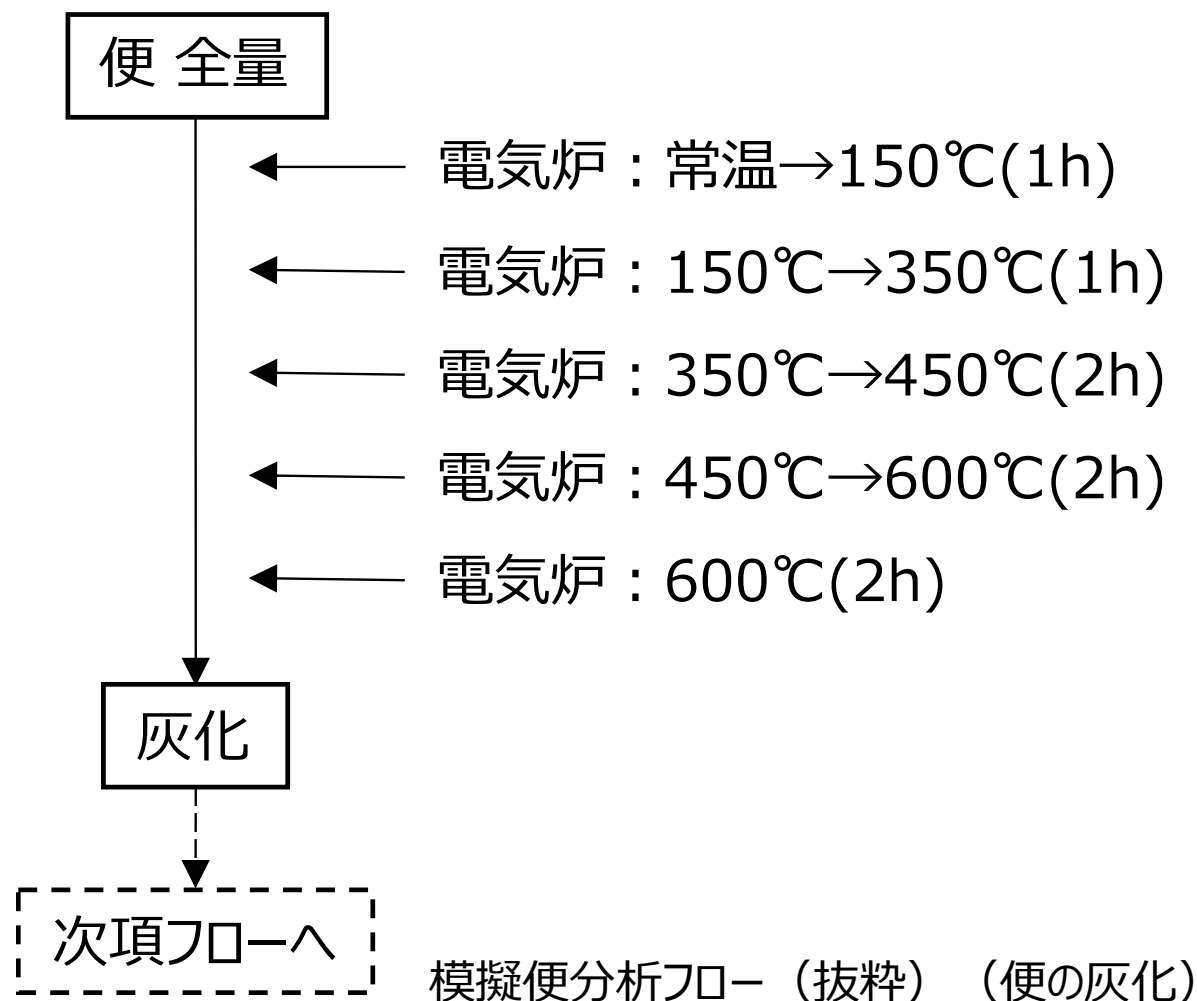


模擬便分析フロー (前処理～核種分離まで)

2.1 得られた成果 (20/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

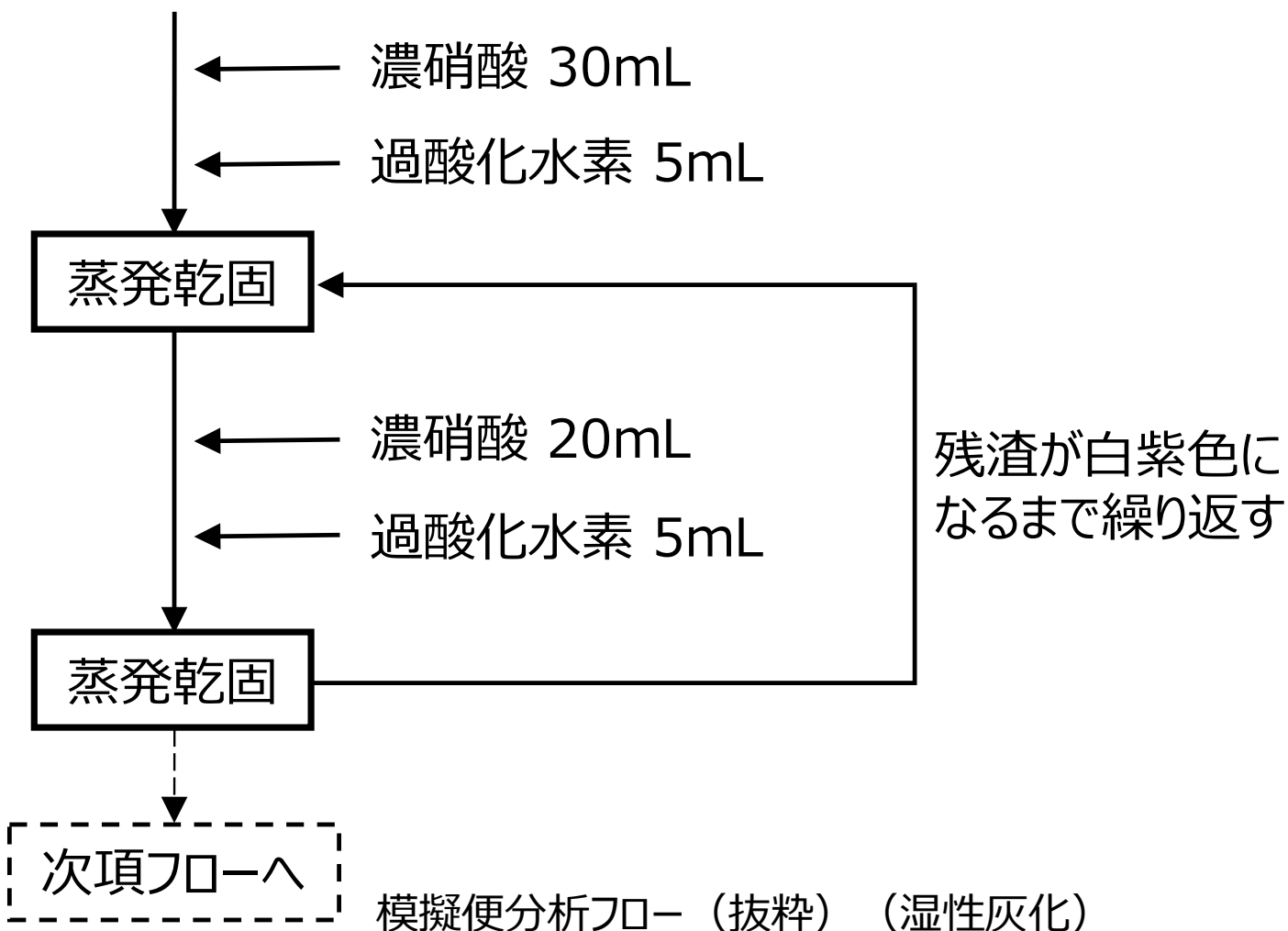
(分析手順の作成、回収率取得実験)



2.1 得られた成果 (21/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)



2.1 得られた成果 (22/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討 (分析手順の作成、回収率取得実験)

※1試料当たりのトレーサー量

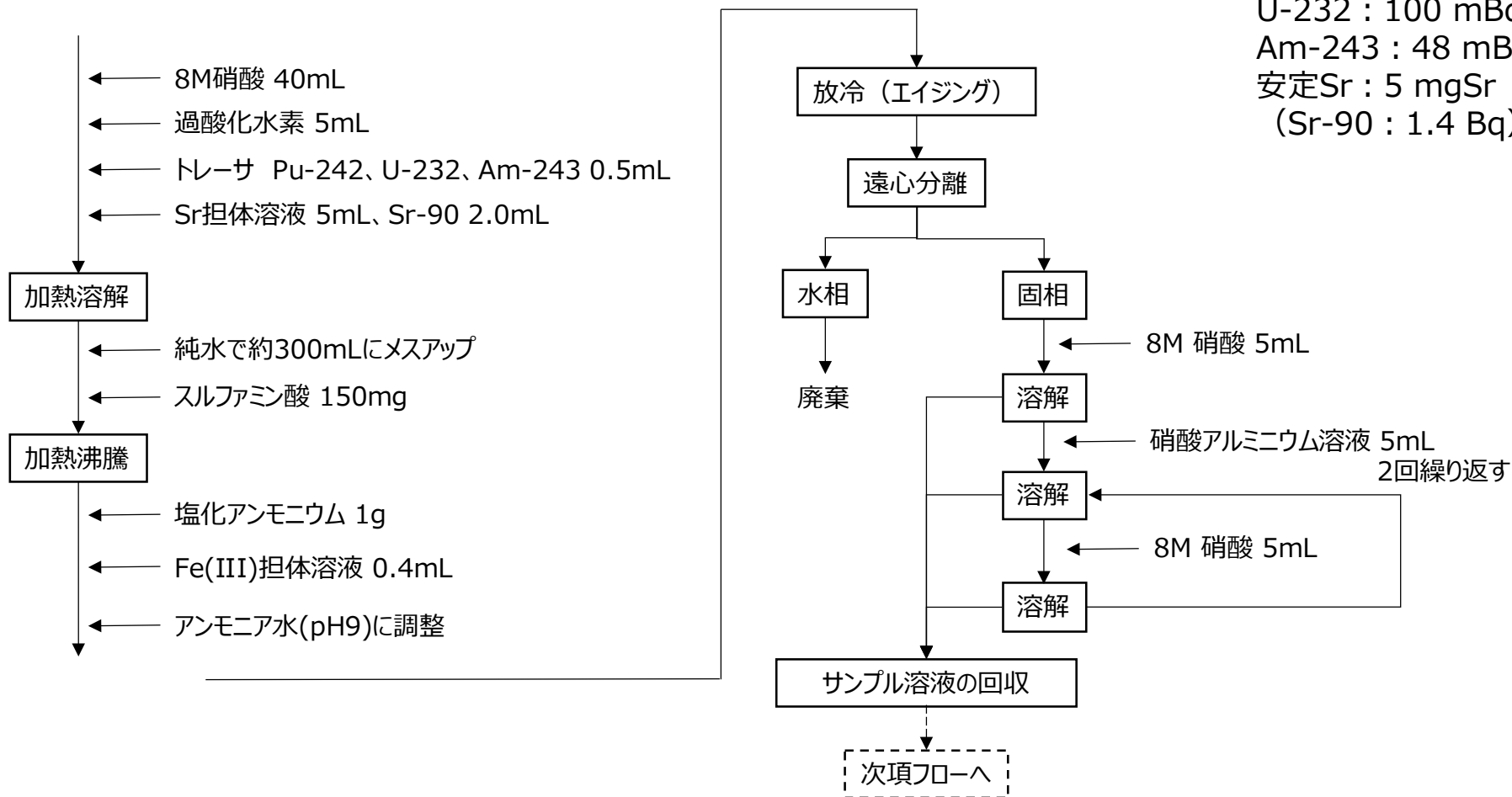
Pu-242 : 72 mBq

U-232 : 100 mBq

Am-243 : 48 mBq

安定Sr : 5 mgSr

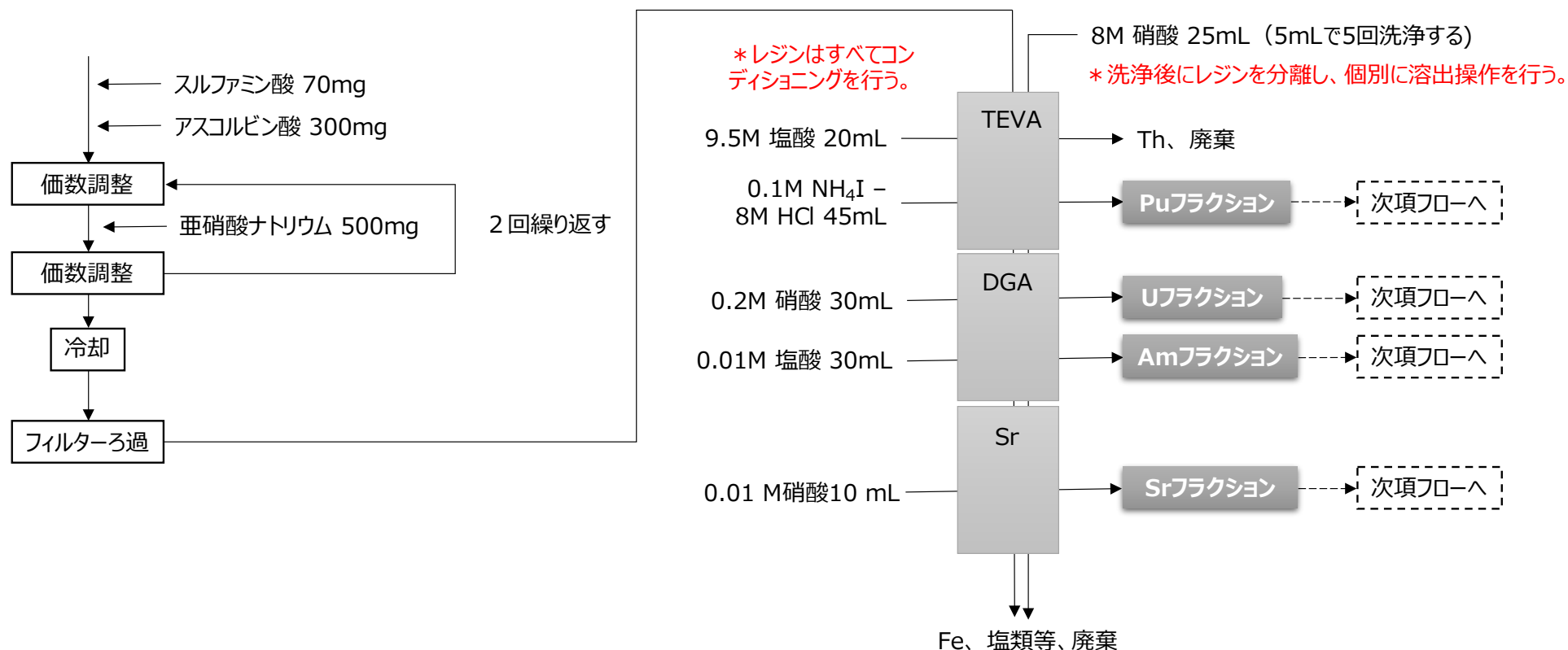
(Sr-90 : 1.4 Bq)



模擬便分析フロー（抜粋）（鉄共沈・サンプル溶液作製）

2.1 得られた成果 (23/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討
(分析手順の作成、回収率取得実験)

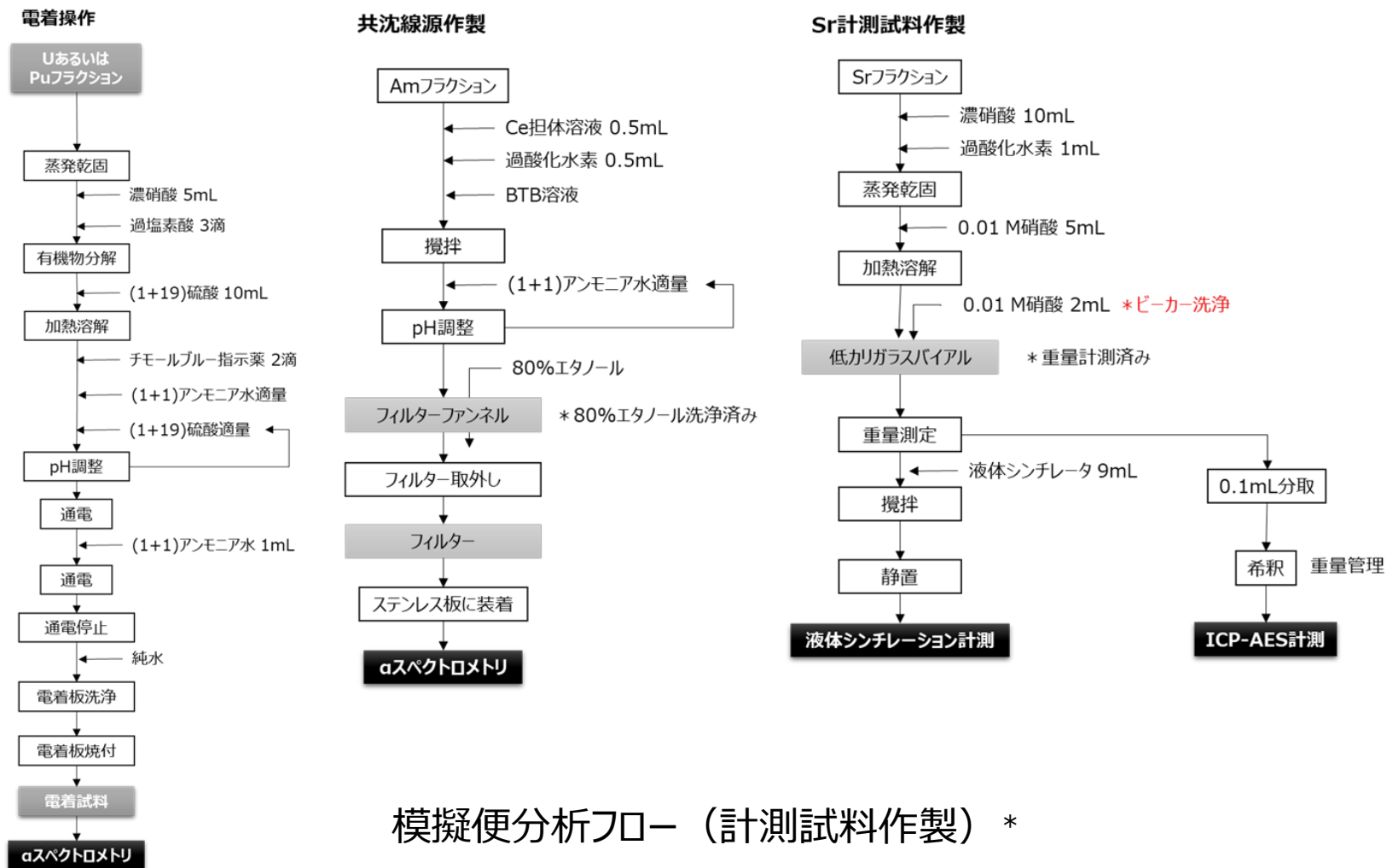


模擬便分析フロー（抜粋）（核種分離）

2.1 得られた成果 (24/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)



2.1 得られた成果（25／45）

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

（分析手順の作成、回収率取得実験）

模擬便に対する分析回収率試験の結果

試料名 ^{注1}	回収率(%)			
	Pu(電着)	U(電着) [※]	Am(共沈) ^{注2}	Sr
模擬便①	68.8	16.1	100.3	7.3
模擬便②	71.6	30.2	103.5	6.3
平均値	70.2	23.2	101.9	6.8

※次スライドで分析手順の改善

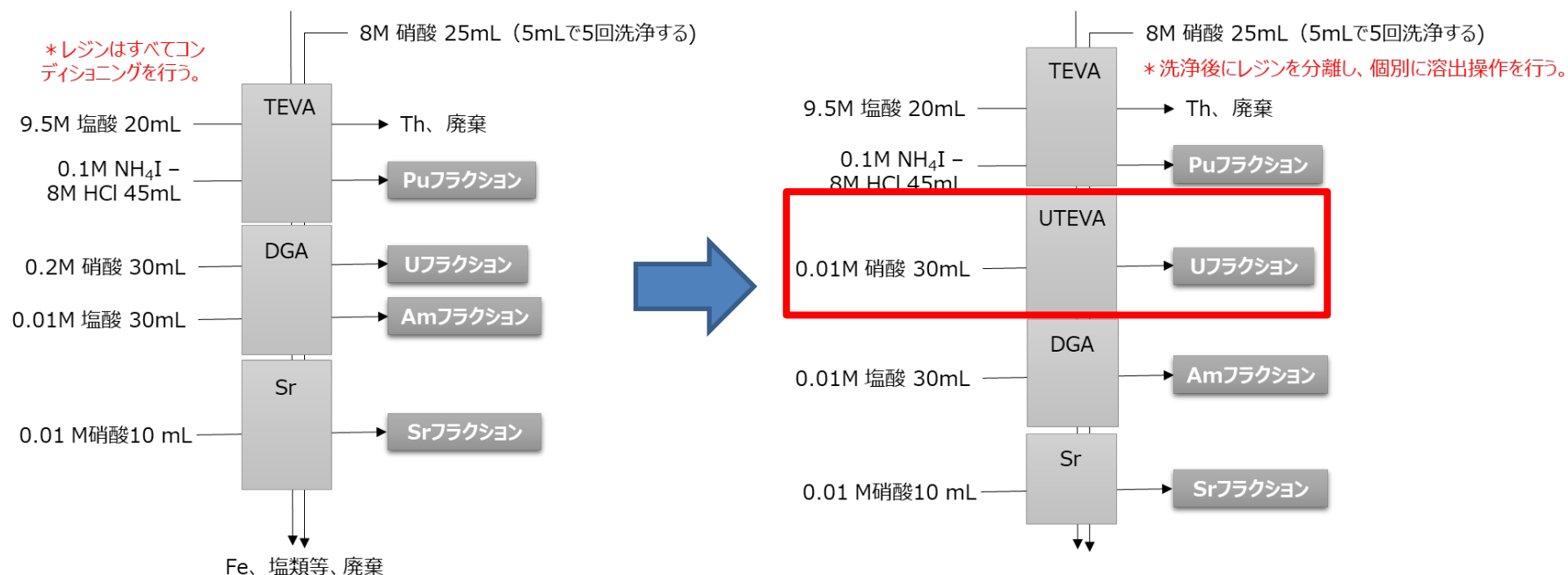
注1 分析の試料管理上、便宜的に試料番号を付しているが、すべて模擬便作製法に従い作製された模擬試料であり、成分等に違いはない。

注2 回収率を求める際に使用した検出器の計数の不確かさ等を考慮すると、100%を超過する可能性がある。

2.1 得られた成果 (26/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)



模擬便分析フロー（抜粋）の改善前後の比較^注

注 抜粋部分以外については、フローを変更していない。

2.1 得られた成果 (27/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)

模擬便に対する分析回収率試験の結果

試料名 ^注	回収率(%)			
	Pu(電着)	U(電着)	Am(共沈)	Sr
模擬便①	68.8	91.4	88.1	35.4
模擬便②	48.1	87.7	99.2	36.1
模擬便③	65.4	88.5	71.3	29.3
平均値	60.8	89.2	86.2	33.6

注 分析の試料管理上、便宜的に試料番号を付しているが、すべて模擬便作製法に従い作製された模擬試料であり、成分等に違いはない。

2.1 得られた成果（28／45）

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

（分析手順の作成、回収率取得実験）

- 電着線源を用いて回収率を取得したもののの中で、一部回収率が低いものがみられた。
- 電着効率が低下している可能性があったため、文献を調査し、条件が適切であるか確認した。
- 確認の結果、1Aで2h電着を行う方法は問題がないことを確認した。
- その条件に従い、電着効率（n=3）を求めたところ、下記の結果が得られた。

試料名 ^注	電着効率（％）
試料1	87.4
試料2	89.5
試料3	84.2

→回収率はやや低かったが、手法に大きな問題はないことを確認できた。

注 分析の試料管理上、便宜的に試料番号を付しているが、すべて模擬試料であり、成分等に違いはない。

2.1 得られた成果（29／45）

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

（分析手順の作成、回収率取得実験）

本分析での検出下限値（DL）（α核種）

核種	模擬尿のDL Bq/sample	模擬便のDL Bq/sample
Pu-239、240	$6.2 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$	$9.3 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$
Pu-238	$6.2 \times 10^{-4} \sim 1.4 \times 10^{-3}$	$1.0 \times 10^{-3} \sim 1.5 \times 10^{-3}$
U-238	$5.4 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$	$4.9 \times 10^{-4} \sim 8.2 \times 10^{-4}$
Am-241	$7.5 \times 10^{-4} \sim 1.1 \times 10^{-3}$	$7.4 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$

2.1 得られた成果 (30／45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(分析手順の作成、回収率取得実験)

- 模擬尿については、対象としたすべての核種について、おおむね50%以上の回収率が得られた。
- 回収率が試料によってばらついたものがあったが、その要因としては、測定やトレーサー溶液の不確かさに加え、分析操作上のずれや電着効率のばらつきなどがあったと考えられる。
- 模擬便については、当初のフローにおいては、U及びSrの回収率が低かったため、UTEVALレジンを追加した。その結果、Uの回収率が向上し、おおむね50%以上の回収率を得た。一方で、Srについては回収率が低いままであった。

→当該フローは、**α線放出核種については、適用できる**可能性がある一方、**便のSrについては、回収率が低かった**ため、課題が残った。

2.1 得られた成果 (31/45)

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

(専門家への意見聴取)

- 当該**分析フロー**は一部検討すべき点があるものの、分析回収率から、模擬便のSr分析以外については、**分析に適用することができ、おおむね問題はない**ということであった。
- 非定常時に用いる分析では、供試量を低減したり、対象核種をしばったりすることにより迅速に分析する方法が考えられるが、具体的な分析法については要検討。

2.1 得られた成果（32／45）

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

（作成したフローとイオン交換法の比較）

比較項目	今回のフロー	イオン交換法
分析時間 (α核種)	Pu、U、Am あわせて1週間	Pu : 1週間、U : 1週間、Am : 3週間 3週間（並行分析の場合）
試薬 (危険物、 毒劇物) 等	硝酸、塩酸、硫酸 過酸化水素水、 過塩素酸、アンモニア水 各種レジン	硝酸、塩酸、硫酸、過酸化水素水、過塩素酸、 アンモニア水、メタノール（Am）、 シュウ酸（Am）、 シュウ酸アンモニウム（Am）、 ヨウ化水素酸（Pu） 陰イオン交換樹脂（2種類）
分析機器	バキュームボックス、 真空ポンプ、遠心分離機	イオン交換用カラム（3種類）、真空ポンプ、 送液用ロータリーポンプ（Am）

→本フローは、従来法に比べ、遠心分離機や真空吸引システム（バキュームボックス及びその付属品）、また、レジン（1個3000円程度）を分析の都度消費するなど、**コスト面では不利**な部分があるが、**分析時間が大幅に短縮**され、**危険試薬の量も低減**できるというメリットがある。

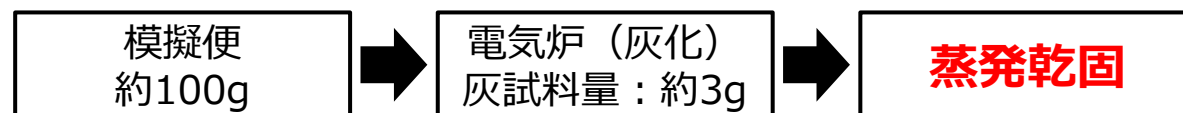
2.1 得られた成果（33／45）

(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

○便試料の前処理法の迅速化検討

便試料の前処理では、電気炉などを使用して灰化した後、酸性の化学薬品を加えて湿式灰化（従来法）をする。

従来法に替わるマイクロ波試料前処理装置（マイルストーン・ネラル（株）製）を用いた有機物分解方法を検討した。



前処理方法	従来方法の湿式灰化	マイクロ波試料前処理装置を用いた湿式灰化
試薬量	濃硝酸：計50mL 過酸化水素水：計10mL (残渣が白くなるまで繰り返す。)	濃硝酸：約10mL (便の灰試料が浸かる程度)
処理時間	約5～7時間	約1時間（加熱：約40分、放冷：約20分）
費用	ホットプレート：約5万円	マイクロ波試料前処理装置：約500万円

2.1 得られた成果 (34/45)

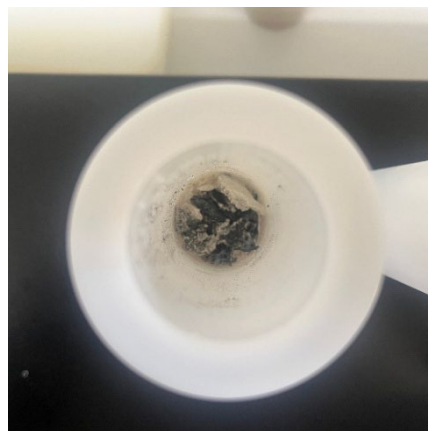
(2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討

○便試料の前処理法の迅速化検討

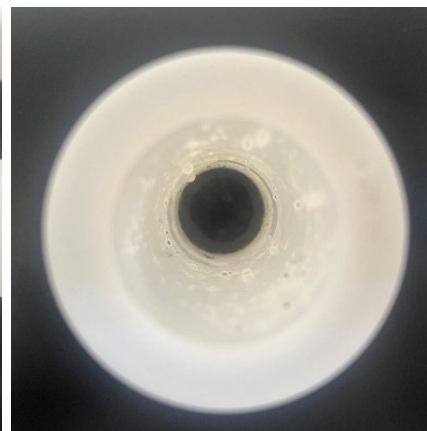
便試料を電気炉で灰化後、マイクロ波試料前処理装置を用いて有機物分解（試薬：濃硝酸10mL、処理時間：加熱約40分、放冷約20分）を実施した（n=3）。



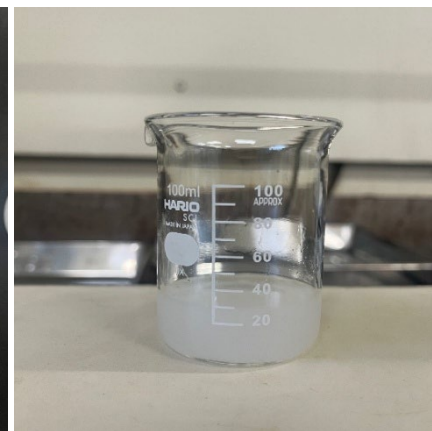
マイクロ波試料前処理装置



電気炉で灰化後の試料



濃硝酸添加後の試料



湿式灰化後の試料

当該装置を用いて有機物分解を実施した結果、短時間かつ安全に処理ができること、試薬の種類（濃硝酸のみ）・量（約50mL→約10mL）が減ることを確認した。

2.1 得られた成果 (35/45)

(3) 新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討

○文献のリストアップ、記載内容の確認

- 放射能の測定として従来用いられる、Ge半導体検出器、Si半導体検出器、ICP-MS、液体シンチレーションカウンタ等を除く測定装置を対象として、**利用の少ない新たな測定及び測定のための分析方法**に係る文献を調査

⇒ 10件の文献を抽出

「固体飛跡検出器 (SSNTD)」

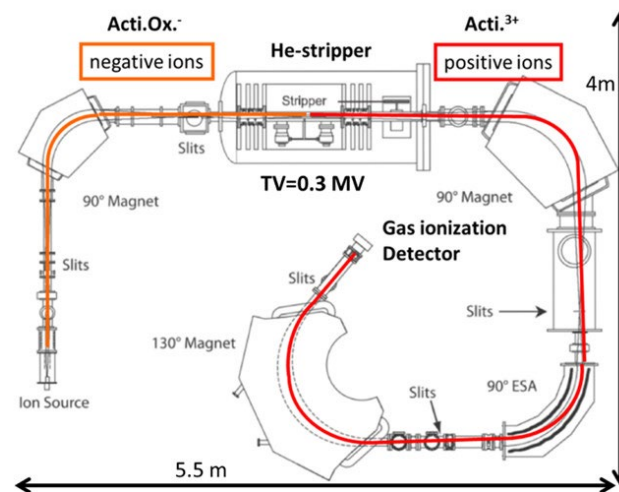
「小型加速器質量分析装置 (小型AMS)」

Table 1 Comparative MDA and time needed for sample preparation and determination of ^{239}Pu in human urine using mass spectrometric and radiometric techniques

Analytical Method	Sample Preparation time	Analysis time	MDA (fg/ μBq)	Reference (Instrument)
AS	2-3 days	4 days	87-130/200-300	Ref. 21
TIMS	3-4 days	20-30 min.	0.53/1.2	Ref. 7
			1.7/3.8	Ref. 23
ICP-MS	12 h	5-10 min.	130/300	Ref. 24 (Agilent HP-4500)
SF-ICP-MS	1-2 days	5-10 min.	16/37	Ref. 9 (Element-2/APEX nebulizer)
			1/2.2	Ref. 6 (Element-2/DWEN nebulizer)
AMS	1-2 days	30-40 min.	0.35/0.82	Ref. 26 (6.5 MV tandem accelerator)
			0.22/0.51	Ref. 25 (10 MV tandem accelerator)
			1/2.3	Ref. 14 (0.6 MV tandem accelerator)

This journal is © The Royal Society of Chemistry 2010

J. Anal. At. Spectrom., 2010, 25, 1410-1415 | 1411



The layout of compact AMS TANDY at ETH Zurich

小型加速器質量分析装置の一例
Anal. Chem. 88(5) (2016) 2832-2837

2.1 得られた成果（36／45）

(3) 新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討

○分析法実用化のための情報収集

- ・ [先行論文研究者に来訪頂き](#)（中国科学院所属）、小型AMSについて[インタビューを実施](#)。以下の点についてご教授頂いた。

- 1) 小型AMSによる測定の方法
- 2) 小型AMSの仕組み・難しいポイント（ハードル）
- 3) 分析手順のコツ

- ・ 原子力機構内で小型AMSの研究開発を行っている課室へのインタビュー
： C-14が対象元素となっている。現在は製品化までは至っていない。

・収集した情報の一例：AMSによるPuのバイオアッセイに係るハードル

- ①トレーサーと被測定核種の間と同位体比が既知の試料の調達
- ②多原子イオンによる妨害（小型AMSならではのハードル）
- ③Pu-238の測定が技術的に難しい

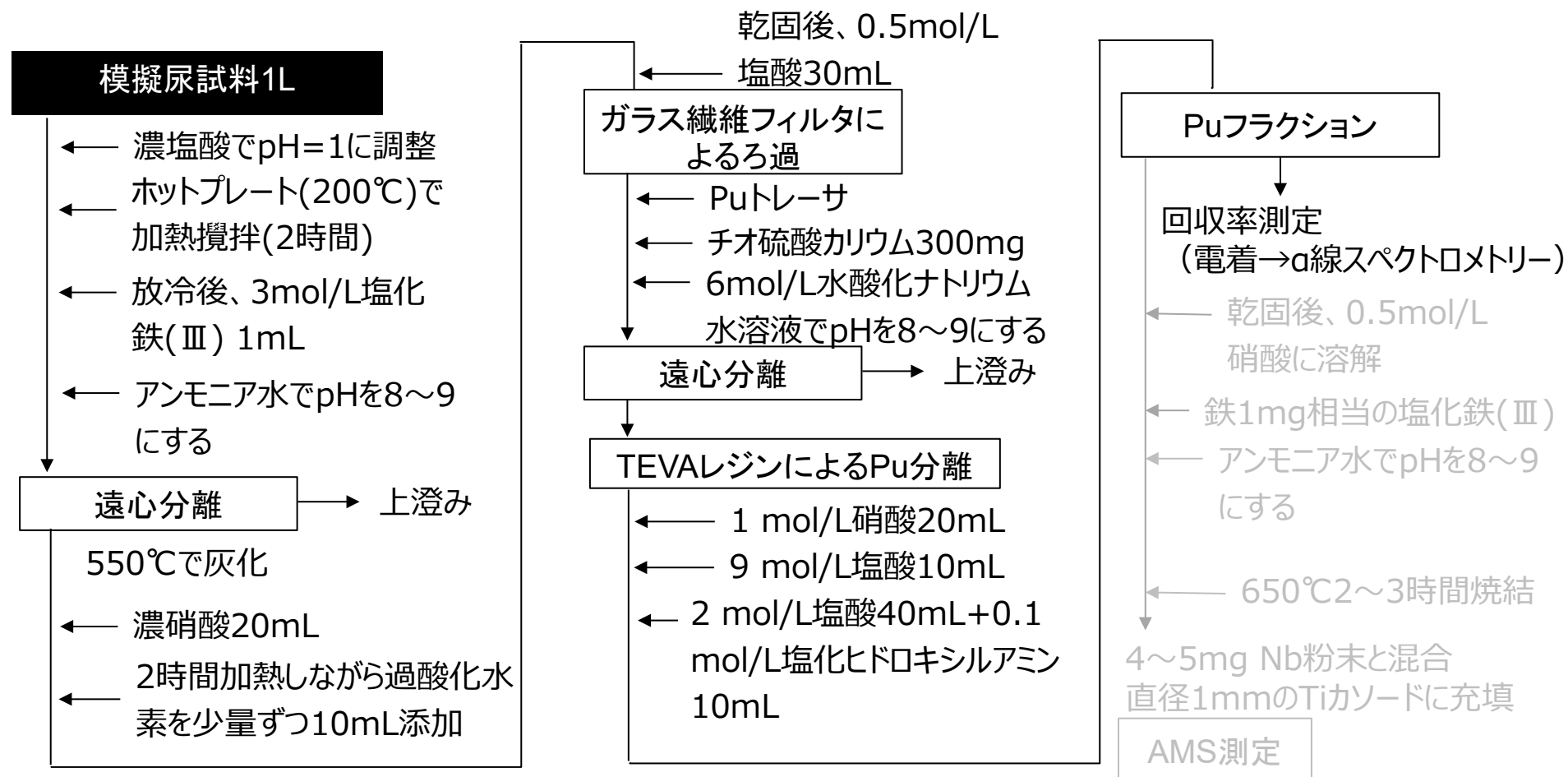
U-238との同重体干渉が厳しく、質量数の差もごくわずかであるため、運動エネルギーによる弁別が難しい。

2.1 得られた成果 (37/45)

(3) 新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討

○分析手順案(1)の作成・検討

・得られた情報をもとに、分析手順案を作成し、実際に分析を実施し手順を確認した。

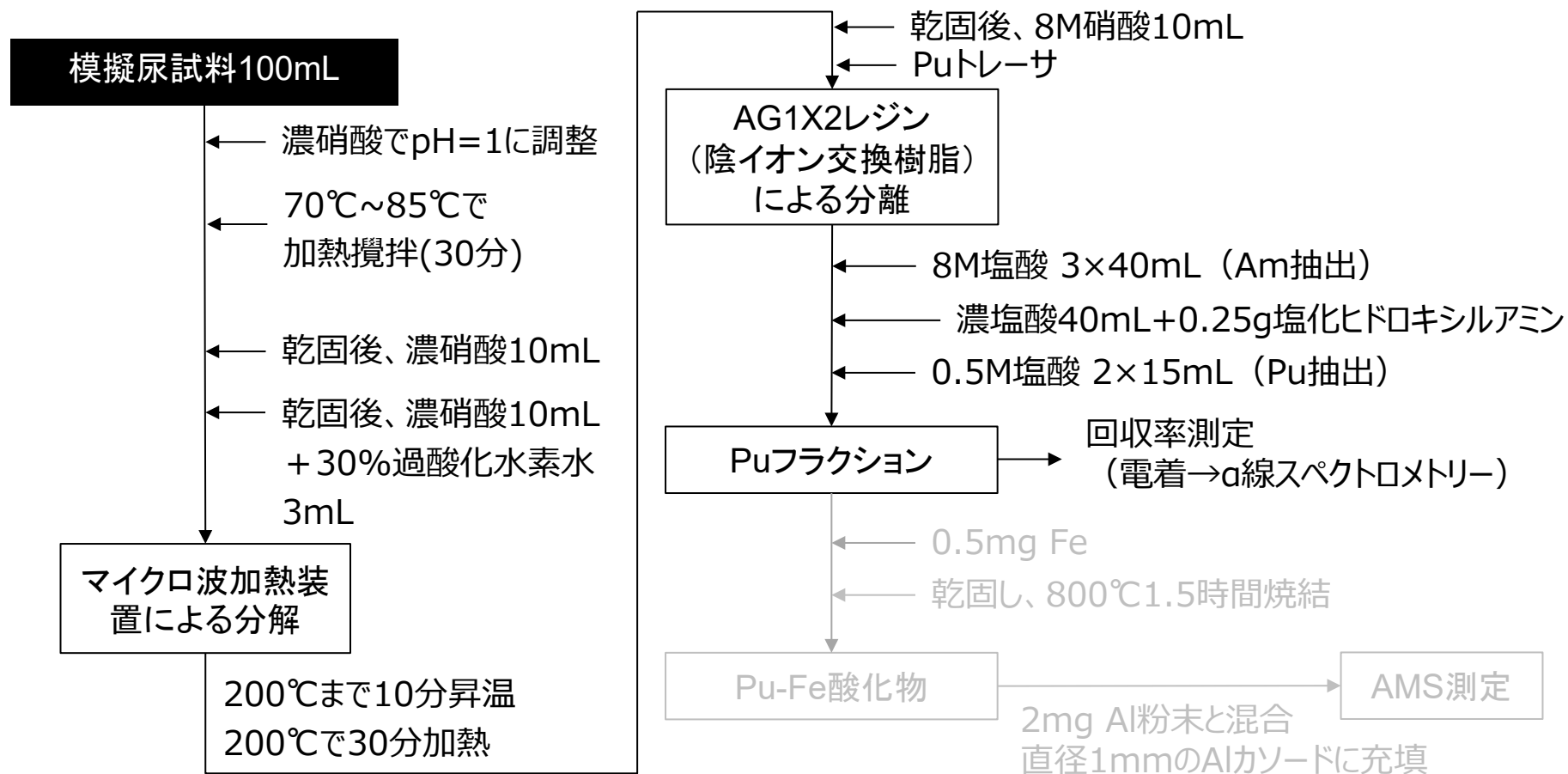


2.1 得られた成果 (38/45)

(3) 新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討

○分析手順案(2)の作成・検討

・得られた情報をもとに、分析手順案を作成し、実際に分析を実施し手順を確認をした。



2.1 得られた成果 (39/45)

(3) 新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討

○小型AMSのメリット・デメリット

・文献調査及び先行論文研究者からのインタビュー、実際の分析を実施したことにより得られた情報をまとめた。

表 a核種のバイオアッセイに係る分析法間の比較

分析法 項目	本事業で調査した分析法			従来法
	小型AMS	固体核飛跡検出器 (SSNTDs) [3]	誘導結合プラズマ質量分析 (ICP-MS・ICP-MS/MS)	α線スペクトロメリー※
機器の価格 (万円)	60,000	—	4,000～10,000	2,000
メンテナンスコスト (万円/年)	2,000	—	～300	～200
前処理で除去 しなければならない 物質	同重体 (多原子イオン含む)	—	同重体 (多原子イオン含む)、 多量の塩類	自己吸収を引き起こす物質 (塩類、有機物など)
分析に要する時間	3～5日 (Pu)	—	(未検証)	5日間 (Pu)
測定時間	24時間/50試料	曝露時間45日間	数時間/20試料	24時間～数日/20試料
²³⁹ Pu 検出下限値	0.57 μBq/試料[1] 0.88 μBq/試料[2]	0.18 mBq (²³⁹ Pu+ ²⁴⁰ Pu)	2.7 μBq/試料[4]	44μBq/試料[1]
測定可能核種の例	²³⁹ Pu、Cm、Am、Npなど	α線放出核種	非常に多くの核種 (長半減期核種・安定核種)	α線放出核種
測定が技術的に 難しい核種の例	²³⁸ Pu (²³⁸ Uとの同重体干渉 を除去するのが技術的に難し い)	核種の弁別が 不可能	ハロゲン、希ガス、短半減期核 種 (放射能に対して原子数が 少ないため)	長半減期核種 α線を放出しない核種、同エネ ルギーのα線間の弁別 (²³⁹ Pu + ²⁴⁰ Pu)
測定法のメリット・ デメリット	○検出下限の低さ △コストが高い	○複雑な機器を必要とせず、非常に コストが低い △分析に非常に長い時間を要する	○検出下限とコストのバランスが よい ○測定時間が短い △同重体干渉に弱く、 事前の化学分離が必須	○コストの低さ △検出下限を低くしようと すると測定時間が長くなる

※検出器20台で1ユニットとしたときの金額、時間。

[1] H. Hernandez-Mendoza, et al., Journal of analytical atomic spectrometry, 25(2010), 1410-1415. [2] X.Dai et al., Journal of analytical atomic spectrometry, 27(2012), 126-130.

[3] P.D.Sawant, et al., Applied Radiation and isotopes, 66(2008), 1945-1947. [4] C.Peng, et al., Analytical chemistry, 96(2024), 2514-2523.

2.1 得られた成果（40／45）

(3) 新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討

○まとめ

- ・本手順で小型AMSの測定用試料の調製が可能である。
 - ・小型AMSによって、従来法に比べて高感度で分析が行える。
 - ・一方で、運用コストが非常に高価、小型AMSによる測定を行うための機器のセットアップに非常に時間を要する（機器導入後、半年～数年）事例が多いなどのデメリットも存在する。
- コストは掛かるものの、**高感度の分析を行いたい場合には有用**な方法である。

2.1 得られた成果（41／45）

(4) 試料前処理における臭気対策検討

- 尿試料の前処理では、酸性の化学薬品を加えて有機物分解をする。
便試料の前処理では、電気炉などを使用して灰化した後、尿と同様に化学薬品と加熱により有機物を分解する。
これらの前処理では悪臭が発生し、周辺の労働環境・生活環境を劣悪にする。
以下の臭気対策を検討し、必要な器材のリスト化、提案書を作成した。

- ・採取試料を前処理するまでの臭気対策
- ・採取試料を前処理する際の臭気対策

2.1 得られた成果 (42/45)

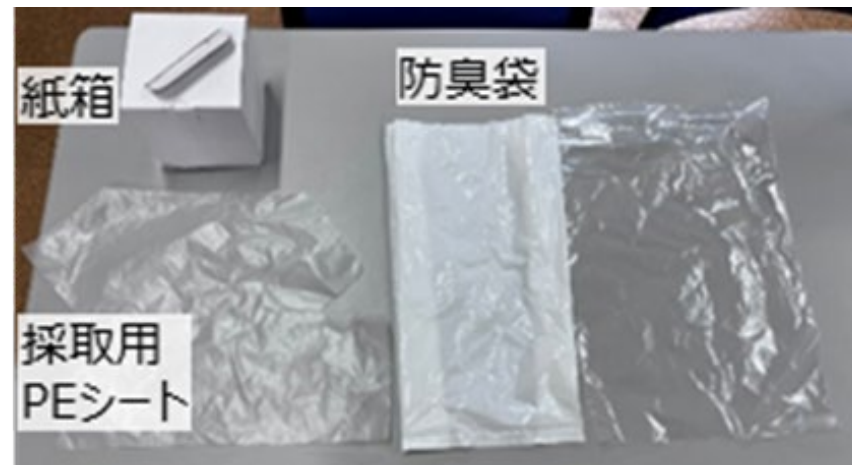
(4) 試料前処理における臭気対策検討

・採取試料を前処理するまでの臭気対策

尿試料は、ポリエチレン製容器などに直接採取、便試料は高密度ポリエチレン製シートに採取する。各試料を採取後、**防臭袋（クリロン化成社製 BOSシート等）に封入**する。便試料は、**冷凍保存**をすることで臭いをさらに抑制できると考える。



尿試料の採取用器材



便試料の採取用器材

2.1 得られた成果 (43/45)

(4) 試料前処理における臭気対策検討

・採取試料を前処理する際の臭気対策

環境省が発行した「ひと目で分かる「脱臭装置」選択ガイド」に従い、バイオアッセイ時に発生する臭い（アンモニア臭、薬品臭等）に対応する共通の脱臭方法の種類を選択した。

① オゾン脱臭法

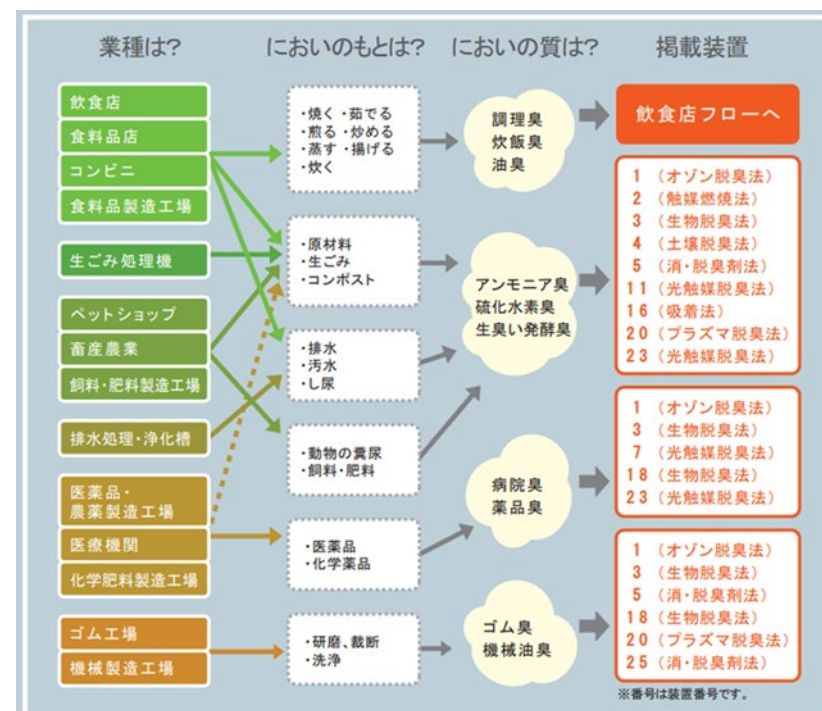
② 生物脱臭法

③ 光触媒脱臭法

なお、②生物脱臭法について、メーカーに問い合わせた結果、尿及び便の前処理を行う場合、高温ガスが発生（数百℃）することから安定的に脱臭を行うことが難しいとの情報を得た。

そこで、②生物脱臭法の代わりにメーカーより提案され

た**活性炭を用いた吸着法**の装置を提案する。



環境省,ひと目で分かる「脱臭装置」選択ガイド,
<https://www.env.go.jp/content/900397592.pdf> (2024年9月17日)

2.1 得られた成果 (44/45)

(4) 試料前処理における臭気対策検討

・採取試料を前処理する際の臭気対策

前処理の際に室内に各試料の臭気が充満することが考えられることから、室内用の脱臭装置を提案する（一部抜粋）。

株式会社カルモア
Goerlitz オゾン脱臭法

【装置外観】



【主な特徴】

1. 約1.8kg・W250×D200×H160mmのサイズで、1,500mg/hのオゾン発生を可能にした事で、同スペックの他社製品と比較しても圧倒的な脱臭効果がある。
2. タイマー設定からオゾンが発生するまでに、約1分間アイドリング時間を設けているため、オゾン発生前に退室が可能である。
3. 運転終了後も自動でオゾンの回収がスタートするため、オゾン発生中に入室する必要がない。

【主な仕様】

適用床面積 (m ²)	120
運転方式	単独制御
オゾン発生量 (mg/h)	1500
風量 (m ³ /min)	4
電源 (V)	AC100
消費電力 (W)	90
運転音 (dB)	約59
使用周囲温度 (°C)	0~40
使用周囲湿度 (%RH)	35~65 (結露なきこと)
寸法 (mm)	250×200×160
重量 (kg)	本体約1.8 (アダプタ約0.4)
タイマー設定	0~180/連続

【施行性】

設置場所	作業台上又は床置き
------	-----------

【経済性】

イニシャルコスト (円)	270,000円 (税別)
設備工事費	無
ランニングコスト (円/年)	電気代のみ
消耗品	放電板及びオゾン回収フィルター
消耗品交換頻度	約2~3年毎
消耗品交換費	オゾン放電板 24,000円/枚 オゾン回収フィルター 6,000円/枚

株式会社カルモア
〒104-0033 東京都中央区新川2-9-5
TEL : 03-5540-5851
FAX : 03-5540-5854
受付時間 9:00~17:30 (土日・祝祭日を除く)

株式会社JVCケンウッド
光触媒除菌脱臭機 光触媒脱臭法

【装置外観】



【特徴】

- ① 特許技術ALMIONフィルター搭載で、高速でニオイを分解する。
- ② ALMIONフィルターは自浄効果があるため、メンテナンスが容易であり、コストも少ない。
- ③ 付属のリモコンで離れたところからの操作も可能である。

【主な仕様】

適用床面積 (m ²)	8畳間を約19分で循環/25 畳間を約1時間で循環
運転方式	単独制御
風量 (m ³ /min)	0.27~1.35
電源 (V)	AC100
消費電力 (W)	23~50
運転音 (dB)	微弱: 32 dB 弱: 45 dB 強: 54 dB 急速: 60 dB
使用周囲温度 (°C)	0~40
使用周囲湿度 (%RH)	30~80
寸法 (mm)	307×460×80
重量 (kg)	本体3.0kg / スタンド0.5kg (計 3.5kg)

【施行性】

設置場所	床置き又は壁掛け
------	----------

【経済性】

イニシャルコスト	約120,000円
設備工事費	無
ランニングコスト	電気代のみ (約0.71~1.55円)
消耗品	フィルター
消耗品交換頻度	効果継続時間: 約26,000 時間
消耗品交換費	38,400円 (消耗品費: 26,400円、作業費: 12,000円) (税別)

株式会社JVCケンウッド
〒221-0022 神奈川県横浜市神奈川区守屋町3-12
TEL : 045-450-8950

オゾン脱臭法を用いた室内用の脱臭装置

光触媒脱臭法を用いた室内用の脱臭装置

2.1 得られた成果 (45/45)

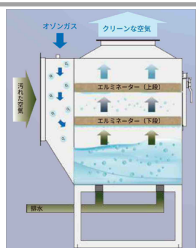
(4) 試料前処理における臭気対策検討

・採取試料を前処理する際の臭気対策

前処理するには、ドラフトチャンバーから排気ダクトを経由し、屋外に臭気が排気されることから屋外用の脱臭装置を提案する（一部抜粋）。

三協エアテック株式会社
アクアオゾンクリーンシステム オゾン脱臭法

【概略脱臭フロー】



【主な特徴】

1. アクアオゾン水を霧状にし、悪臭物質との接触効率を極めて高くする独自のバブリングシステムである。
2. 脱臭のコアとなる成分はオゾン（酸素）と水である。
3. 原料は常時新鮮であり、長期間使用しても脱臭効果が安定する。
4. アンモニア・硫化水素など気になる排気はコンパクトかつ持続しやすい除害装置である。

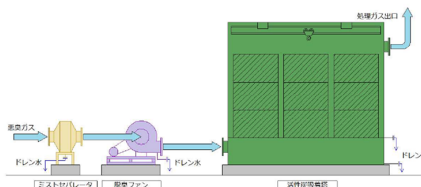
データである効果			
●脱臭効果			
試料名称	脱臭前臭気濃度	脱臭後臭気濃度	脱臭効率
コーヒー	1000	70	93%
食品香料	1800	85	95%
発酵ゴム	1300	130	93%
酢酸	3000	30	99%
●成分除去			
試料名称	脱臭前成分濃度	脱臭後成分濃度	除去率
アンモニア	5.5ppm	0.25ppm以下	93%
硫化水素	13ppm	0.5ppm	96%

装置名	アクアオゾンクリーンシステム
想定脱臭風量 (m³/min)	335
装置内訳	アクアオゾンフィルタ (型式: SAT-200AOFB3) イニシャルコスト (8,130,000×2台)
	制御盤 (型式: SAT-ACC05) イニシャルコスト (270,000×2台)
ランニングコスト	オゾンガス製造装置 (型式: SAT-300GCYL) イニシャルコスト (5910000×2台)
	水 (水道水又は井戸水) アクアオゾンフィルターの貯水量は約110L (1日1回、自動で入れ替え) 電気 (200V、消費電力1.8kW)

三協エアテック株式会社
〒111-0055 東京都台東区三筋2-6-11
TEL 03-5821-8021
FAX 03-5821-8027

扶桑ユニテック株式会社
カートリッジ式活性炭脱臭装置 吸着法

【概略脱臭フロー】



【主な特徴】

1. ガス中の有機溶剤や悪臭有害物質を活性炭層を通過させ吸着除去する。
2. 主に低濃度ガスを対象に除去する。
3. 運転管理・保守管理も容易で安全性も高い。
4. 活性炭吸着材は再生・再利用が可能である。

【その他の仕様】

- ①脱臭ファン：ダクトによって抵抗を受ける。（口径・長さ・材質等の条件で検討が必要）抵抗値から、ガスを引き込む力とガスを押し込む力を求める必要がある。
- ②ドレン水：ドレン水は常時流れるほど発生はしないと推測される。（ボタボタと出ているイメージ）貯留する場合は別途検討が必要
- ③接触時間：活性炭とガスが接触する時間である。
- ④カートリッジ（1400）の意味：活性炭カートリッジの寸法を意味しており、四角形の形状で縦横ともに1.4m
- ⑤電源電圧：200V・400Vどちらも選択可能である。
- ⑥消費電力：使用時電圧200V 使用時電流35.47A 電動機効率60%と仮定すると7.37kW
- ⑦ミストセパレーター：ガスに含まれるミストを除去する機械である。ミスト粒径 20µmで99%除去を仕様としている。

型式	カートリッジ式活性炭脱臭装置 (有効設備内蔵、三種汚染型)			
脱臭風量 (m³/min)	135標準			
収束臭気成分 (平均値)	臭気成分	濃度 (ppm)	処理量 (ppm)	対象臭気成分
	アセトン	2	1.0以下	アルカン成分
	硫化水素	0.6	0.02以下	酸性成分
	メチルメルカプタン	0.07	0.002以下	中性成分
	硫化メチル	0.04	0.01以下	中性成分
二酸化メチル	0.005	0.009以下	中性成分	
	0.3			
空塔速度 (m/s)	1.2以上			
最低接触時間 (sec)	8時間/日×365日			
収束臭気成分	上記成分にて1年以上			
材質	FRP+SS400補強材 (FRP: 6mm、補強材: FRP 2PLY)			
カートリッジ材質	FRP+SS400補強材 (FRP: 6mm、補強材: FRP 2PLY)			
装置外形寸法 (mm)	3300×7500×3200			
カートリッジ規格寸法 (mm)	1400×1400×460 (30個)			
付属品	標準品			
	電圧計 (三相電圧計・0.7V)			
	ドレン計 50A			
	装置内配管接続用			
	チェーンブロック (1.0t)			
取替材 (m³)	活性炭			
	活性炭カートリッジ (1400)			
	活性炭カートリッジ (1400)			
	活性炭カートリッジ (1400)			
	活性炭カートリッジ (1400)			
その他設備	活性炭カートリッジ (1400)			
	活性炭カートリッジ (1400)			
	活性炭カートリッジ (1400)			
	活性炭カートリッジ (1400)			
	活性炭カートリッジ (1400)			

扶桑ユニテック株式会社
〒115-0055
東京都北区赤羽西四丁目44番2号
TEL : 03-3900-8001
FAX : 03-3900-8002

オゾン脱臭法を用いた屋外用の脱臭装置

吸着法（活性炭）を用いた屋外用の脱臭装置

2.2 目標に照らした達成度

内容	技術成熟度（TRL）			
	現状評価	終了時目標	終了時自己評価	
①自動系統分析システムの検討	3（応用研究）	4（実用化研究）	4（実用化研究）	○
②先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討	4（実用化研究）	5（模擬実証）	5（模擬実証）	○
③新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討	3（応用研究）	4（実用化研究）	4（実用化研究）	○
④試料前処理における臭気対策検討	3（応用研究）	4（実用化研究）	4（実用化研究）	○

終了時目標：

国内／1Fへ適用可能なバイオアッセイ手法を提案する。

終了時自己評価：

国内／1Fへ適用可能なバイオアッセイ手法を提案した。

2.3 成果の反映先とその寄与

- 1Fにおけるバイオアッセイの検体者は、緊急時には6名、定常では燃料デブリ分析が開始したら数十名程度を想定している。バイオアッセイ手法が整備されることにより、作業の安全性や迅速性、同時分析できる試料件数等が向上する。結果として廃止措置等の円滑な進行を支援できる。
- 臭気対策の導入により、労働環境・作業環境が改善され、作業者の安全や健康を確保できる。

2.4 現場への適用性（難易度）

- 自動系統分析システムを導入するには、試作機の製作及び妥当性確認を実施する必要がある。
- 作成したバイオアッセイ分析手順を1Fで適用するには、核燃料物質を使用するため、核燃料物質の使用の許可を得る必要がある。
- 小型AMSを用いた測定を行うには、試料調製手順について回収率取得実験の実施及び妥当性確認が必要である。また小型AMSの導入も必要である。
- 臭気対策装置を導入するには、試作機の製作や妥当性検証の実施が必要である。

3. 今後の課題（1）

- 今回の得られた成果から、以下が今後の課題として抽出された。
 - 模擬便を対象としたSr分析の回収率が低かった（平均で約30%程度）ことから、原因を調査するとともに、調査結果に基づき最適条件を検討し、分析フローを改良する。
 - 模擬尿・模擬便を対象としたSr分析について、放射能測定を行い、DLを算出する。
 - 模擬尿を対象としたU・Pu分析（共に電着）、模擬便を対象としたPu分析（電着）の回収率のバラつきが大きかったことから、電着の最適条件を検討する。
 - バイオアッセイに要求される検出下限値を再確認し、得られた成果の適用性をさらに検討していく必要がある。

3. 今後の課題（2）

- 今回の成果を基に、より安全、迅速で、より多くの試料件数を分析するために、(1)～(3)を組み合わせた運用にまで発展させる必要があると考える。
 - 今回の成果として、1Fにおいて自動分析装置やレジンを使用した分析が利用可能であることが明らかとなった。さらなる改良に資するため、誘導結合プラズマ質量分析装置（ICP-MS）を導入し分析工程の効率化を図る。
 - 1Fにおいてバイオアッセイ分析を実施するには、分析作業者の訓練や技能レベルの確認、分析に係るノウハウの伝授等が必要であることから、分析作業者の養成方法（トレーニング方法）を確立する。

事業内容

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討**
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

略語・専門用語の説明

略語・専門用語	説明
TES	超伝導転移端センサ「Transition Edge Sensor」の略語
AIST	産業総合研究所「National Institute of Advanced Industrial Science and Technology」の略語
NIST	米国国立標準技術研究所「National Institute of Standards and Technology」の略語
SQUID	超伝導量子干渉計「superconducting quantum interference device」の略語
AMAD	空気力学的放射能中央径「Activity Median Aerodynamic Diameter」の略語

1.概要

1.1 背景（現状の課題）

内部被ばく線量評価や現場管理において重要となるプルトニウムの測定について、一般に普及している既存の測定装置（Ge半導体検出器など）ではエネルギー分解能の制約から他核種が混在した状態でプルトニウムを識別して測定することが困難である。1F廃炉作業のような複数核種が混在する作業場の放射線管理の安全性を強化するためには、化学分析による核種分離などの前処理を介さずにプルトニウム測定が可能となるような測定技術の高度化が必要と考えられる。

1.2 目的（課題の解決策）

既存のGe半導体検出器を凌駕する高分解能の超伝導転移端センサ(Transition Edge Sensor:TES)型マイクロカロリーメーターを肺モニタ、バイオアッセイ試料の分析及び鼻スミヤろ紙などのろ紙試料測定に適用することにより内部被ばく線量評価のためのプルトニウム測定の高度化について検討する。

1.3 目標（技術成熟度）

実施項目と技術成熟度：

実施項目	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
TES型マイクロカロリーメーターを用いたプルトニウム測定 の高度化に係る検討	1(基礎研究)	3(応用研究)

終了時目標：

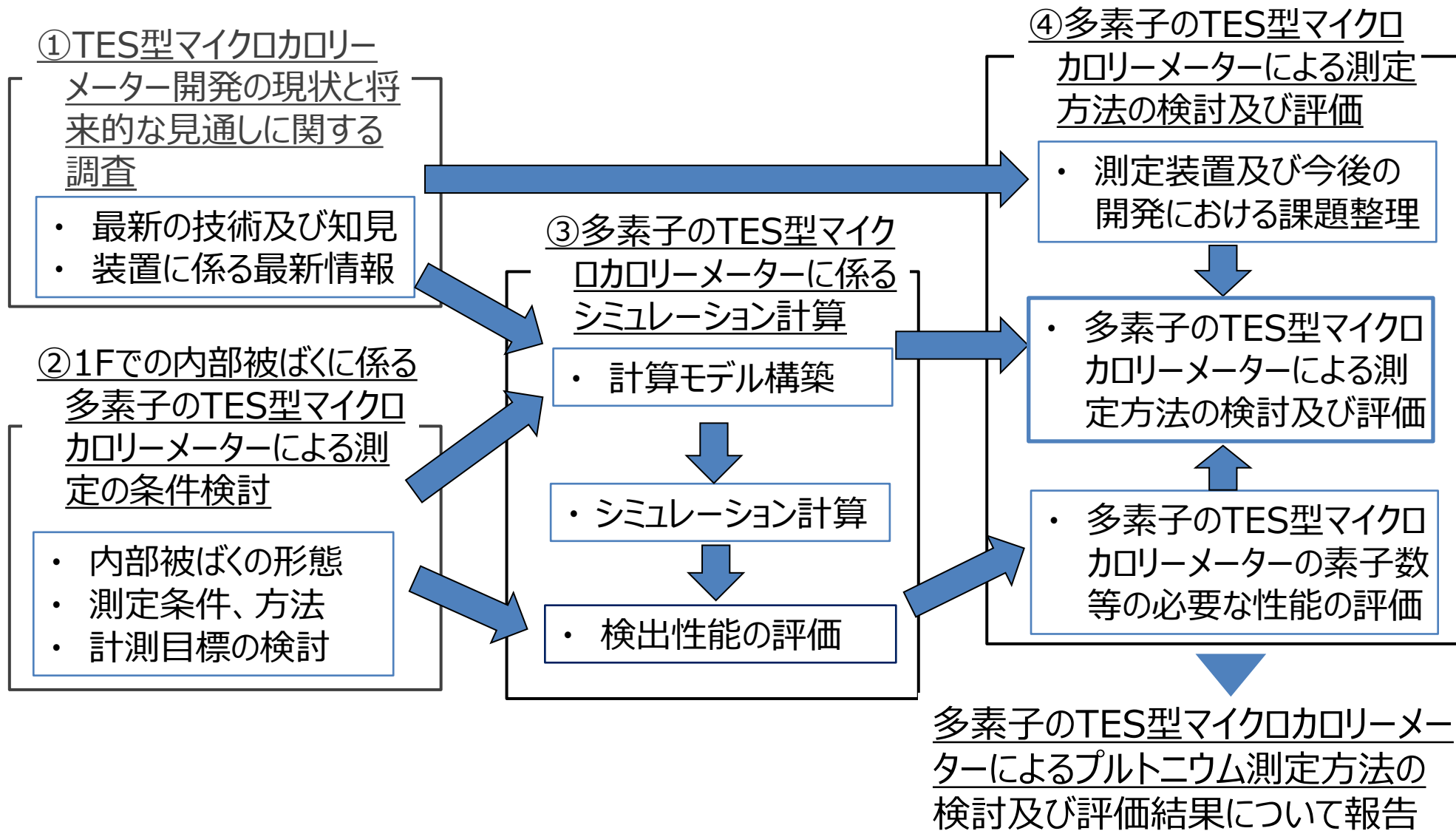
多素子のTES型マイクロカロリーメーターによるプルトニウム測定方法の検討及び評価結果について報告する。

終了時に得られる成果物：

○多素子のTES型マイクロカロリーメーターによるプルトニウム測定方法の検討及び評価結果（技術情報）

➤ 2024年度最終報告

1.4 研究フロー



2. 実績

2.1 得られた成果 詳細は次ページ以降

(1) TES型マイクロカロリーメーター開発の現状と将来的な見通しに関する調査

- 大学、研究機関等の調査を行い、多素子のTES型マイクロカロリーメーターの開発は進捗していると評価。
- 将来的に実用的な多素子のTES型マイクロカロリーメーターは利用化可能になるとの見通しが得られた。

(2) 1Fの内部被ばくに係る多素子のTES型マイクロカロリーメーターによる測定の条件検討

- 1 Fにおける内部被ばくの形態、評価条件等の整理し、バイオアッセイ、肺モニタ、空気ろ紙等測定に必要な検出目標を整理した。

(3) 多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

- バイオアッセイ、肺モニタ、空気ろ紙について計算。

(4) 多素子のTES型マイクロカロリーメーターによる測定方法の検討及び評価

- 多素子のTES型マイクロカロリーメーターによる高分解能LX線、 γ 線測定による線量評価への適用を検討した。

2.1 得られた成果 (1/29)

(1) TES型マイクロカロリーメーター開発の現状と将来的な見通しに関する調査

- 国内で、原子力産業に関連するガンマ線測定用のTES型マイクロカロリーメーターについて研究しているのは、産業技術総合研究所、東京大学、九州大学がある。立教大学では米国国立標準技術研究所（National Institute of Standards and Technology : NIST）のTES型マイクロカロリーメーターを用いた研究実施。
 - 東京大学、産業技術総合研究所（AIST）では、8素子（ $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ Sn吸収体）のTES型マイクロカロリーメーターからの信号を超伝導量子干渉計（superconducting quantum interference device : SQUID）により読み出すマイクロ波多重読出の研究を行っている。分解能は 40 eV @ 86.5 keV の成果が得られている。ただし、量子コンピュータの研究開発のため、TES型マイクロカロリーメーター開発の優先度は低い。
 - 九州大学では、ガンマ線測定用のTES型マイクロカロリーメーターの基礎的な汎用研究を実施中。また、TES型マイクロカロリーメーターによる人体測定のシミュレーションの計算を実施している。
 - 立教大学では、米国NISTとの共同研究により、J-PARCにおいて、米国NISTのTES型マイクロカロリーメーターがミュオン測定の実験で使用された。96素子（ $1.3 \times 1.3 \text{ mm}^2$ Sn吸収体）のTES型マイクロカロリーメーターとマイクロ波多重読出の回路がモジュール化された機器が使用された。分解能は $60 \sim 70 \text{ eV}$ @ 150 keV 。また、スノートなどの技術も適用されている。
- (※ 以降、産総研製のTES型マイクロカロリーメーターはAIST-TES、米国NIST製のTES型マイクロカロリーメーターをNIST-TESと略す。)

b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討

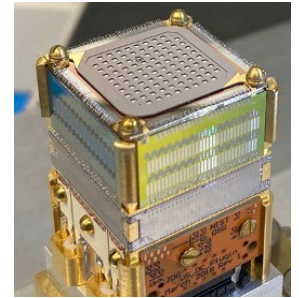
2.1 得られた成果 (2/29)

(1) TES型マイクロカロリメーター開発の現状と将来的な見通しに関する調査

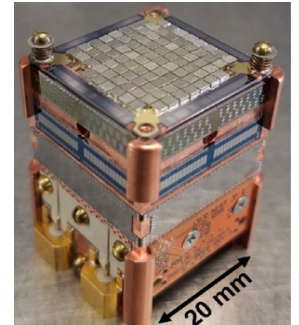
現状の多素子のTES型マイクロカロリメーター

	NIST-TES		AIST-TES
Saturation energy	70 keV	150 keV	150 keV
Readout system	microwave	microwave	microwave
Absorber thickness (material)	1.85 μm (Au) & 20 μm (Bi)	0.5 mm (Sn)	0.5 mm (Sn)
Absorber area	0.73 x 0.73 mm ²	1.3 x 1.3 mm ²	0.5 x 0.5 mm ²
Absorber collimated area	0.67 x 0.67 mm ²	(no collimator)	(no collimator)
Number of pixel	96	96	8
Total collection area	43.1 mm ²	162 mm ²	2 mm ²
ΔE (FWHM)	20 eV @40 keV (8 eV @17 keV)	60~70 eV @130 keV	40eV @86.5 keV

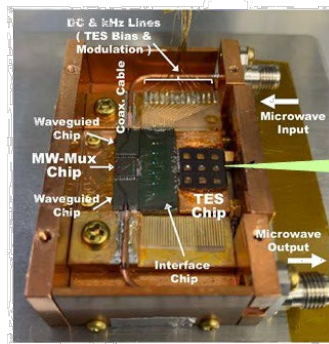
NIST-TES



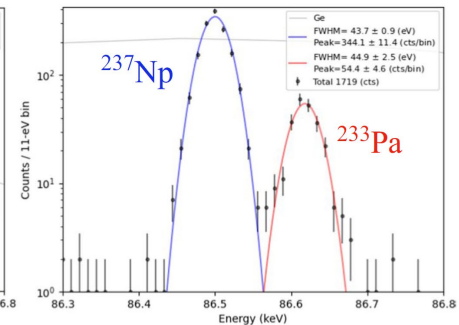
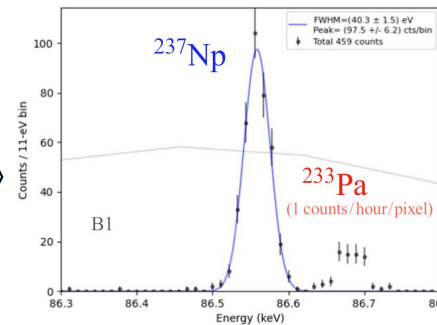
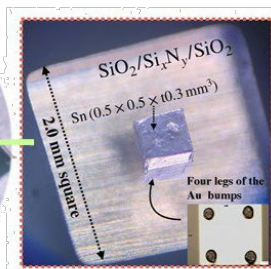
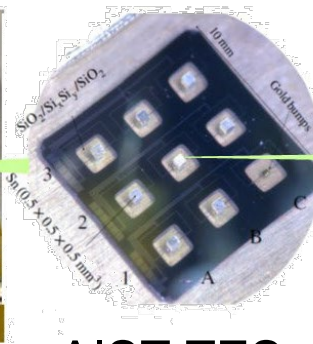
70 keV NIST-TES



150 keV NIST-TES



AIST-TES



AIST-TES によるNp-237 スペクトル測定例

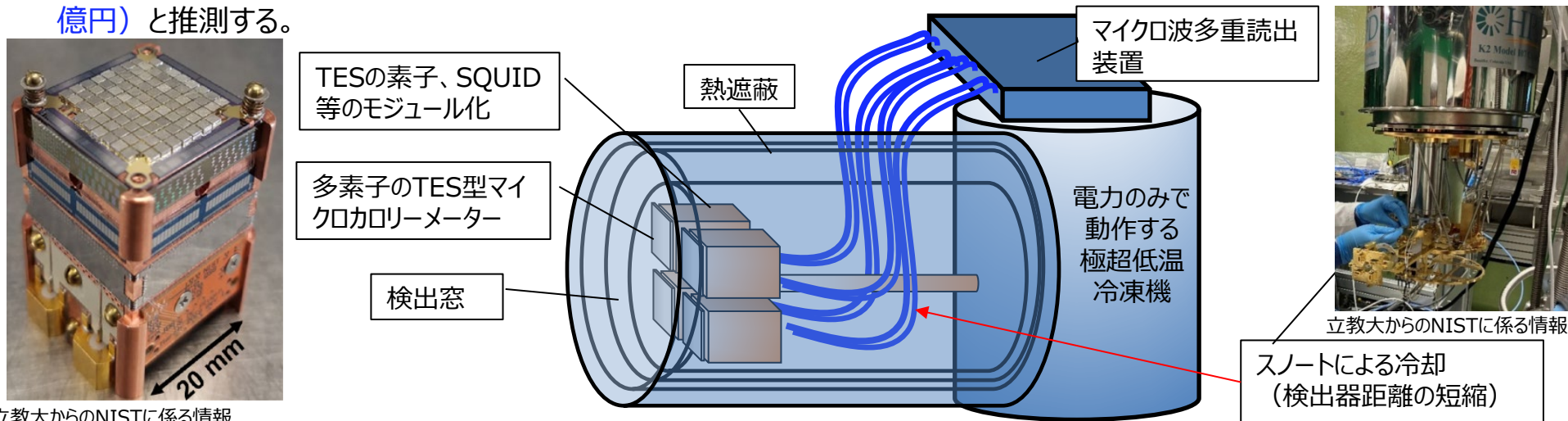
原子カシステム研究開発事業「超伝導量子計測技術を駆使したTRU核種迅速線量評価システムの開発」令和3年度報告書及び立教大からのNISTに係る情報から整理

2.1 得られた成果 (3/29)

(1) TES型マイクロカロリーメーター開発の現状と将来的な見通しに関する調査

まとめ及びTES型マイクロカロリーメーターの将来的な見通し

- TES型マイクロカロリーメーターのアレイ化（多素子化）、マイクロ波多重読出、これらデバイスのモジュール化、極超低温冷凍機、スノートによる測定効率化等、実用化に向けた技術はほぼ開発されていると考えられる。
- 多素子のTES型マイクロカロリーメーターの実用化は着実に進むと予想されるが、開発されたデバイスが安定的に動作するための製造技術の成熟など、製品化、現場への適用については時間的な予測は難しい。
- 断熱消磁冷凍機（ADR冷凍機）で立ち上げに1日、測定に数時間から数日間、再冷却に6時間ほど。希釈冷凍機で立ち上げに1週間、約6ヶ月間連続運転。普段からの放射線管理での使用が考えられる。
- サイズ及びは冷凍機にもよるが、希釈冷凍機では $2 \times 2 \text{ m}^2$ （+作業空間）が必要である。
- NIST-TES（94素子のTES型マイクロカロリーメーター）4セット、ADR冷凍機、マイクロ波多重読出（400ch以上）でのシステムが現実的に可能と考えられる。
- 多素子のTES型マイクロカロリーメーターのモジュールは製品化されておらず、コストは明確ではないが、冷凍機関連のコストが大きいと、多素子のTES型マイクロカロリーメーターの測定システムの製品化の当初はトータルで冷凍機の2倍程度（～2億円）と推測する。



立教大からのNISTに係る情報

2.1 得られた成果 (4/29)

(2) 1Fの内部被ばくに係る多素子のTES型マイクロカロリメーターによる測定条件検討

内部被ばくに係る想定 (多素子のTES型マイクロカロリメーターによる高分解能測定のための計算条件)

評価核種 : 1F2号機炉心のORIGEN計算*¹を基にα核種で被ばくの割合の高い核種を選定

- α核種: Pu-238、Pu-239、Pu-240、Am-241、Cm-244
- β核種: Pu-241 (同伴核種)、Cs-137、Cs-134 (妨害核種 α線の1000倍を想定)

粒径と化学形 : 空気力学的放射能中央径 (Activity Median Aerodynamic Diameter : AMAD) 及び吸収Type *²から内部被ばく評価の観点から2パターンについて評価

- AMAD 5μm、Type S (PuO₂等の酸化物で通常作業環境)
- AMAD 1μm、Type M (硝酸Pu等の酸化物以外で細かな粒径)

	Type	
AMAD	5μm、Type S	5μm、Type M
	1μm、Type S	1μm、Type M

吸入された核種の体内挙動 : 国際放射線防護委員会 (International Commission on Radiological Protection : ICRP) のPublication 68、78 *³を基に計算

- Puは便へ排泄 (バイオアッセイで評価)、Csは全身に分布 (肺モニタへの影響)
- Csは「尿中排泄と便中排泄の比として4 : 1」 (ICRP Publication 78)

Pu検出の目標

- 肺モニタ : 1時間で線量限度 (50mSv) レベルのPuのLX線検出
- バイオアッセイ : 1日測定で記録レベル (1mSv) のPuのLX線検出
- 空気ろ紙等 : γ線核種分析、Pu等の分離にイオン交換などの併用を検討する

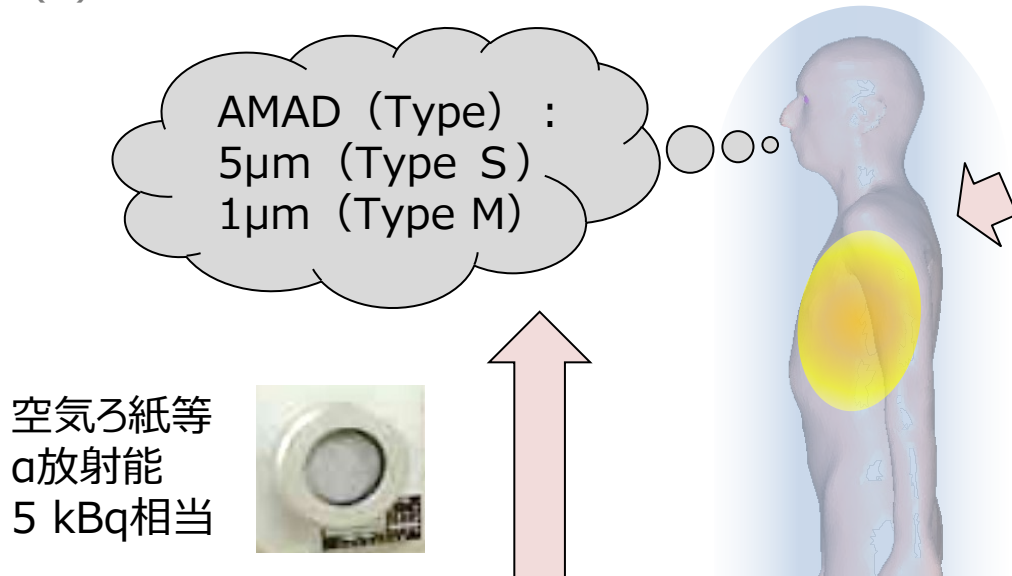
*¹ JAEA-Data/Code 2012-018 福島第一原子力発電所の燃料組成評価
ORIGEN code : 原子炉における核燃料の燃焼計算を行うためのコンピュータ計算コード

*³ ICRP Publication 68 作業による放射性核種の摂取についての線量係数, 1994
ICRP Publication 78 作業者の内部被ばくの個人モニタリング, 1997

*² 吸収Type: 肺から血液中への移行のしやすさ。化学形によってF[早い]、M[中程度]、S[遅い]がある

2.1 得られた成果 (5/29)

(2) 1Fの内部被ばくに係る多素子のTES型マイクロカロリーメーターによる測定条件検討



2号機炉心の
ORIGEN計算*1を基に
α核種で被ばくの割合の
高い核種
Cs-137、Cs-134はα核
種の1000倍の放射エネルギーが
同伴した場合を想定

核種	10年(割合)
U-235	0.0001%
U-238	0.0006%
Pu-238	2.54%
Pu-239	0.48%
Pu-240	0.56%
Pu-241	94.24%
Pu-242	0.002%
Am-241	2.16%
Am-243	0.016%
Cm-244	1.19%

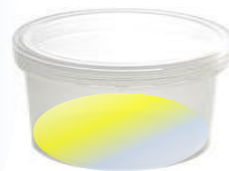
吸入された核種の体内挙動 (主たる排泄先)
ICRP Publication 68、78*2を基に計算

- Puは便へ排泄、Csは全身に分布
- Csは「尿中排泄と便中排泄の比として4:1」

		便中割合					肺中割合
		1日	2日	3日	4日	5日	1日
Pu	S	1.1E-01	1.6E-01	8.4E-02	3.5E-02	1.4E-02	6.4E-02
	M	1.1E-01	1.5E-01	8.0E-02	3.3E-02	1.3E-02	5.8E-02
Am	M	1.1E-01	1.5E-01	8.0E-02	3.3E-02	1.3E-02	5.8E-02
Cm	M	1.1E-01	1.5E-01	8.0E-02	3.3E-02	1.3E-02	5.8E-02

			1日	2日	3日	4日	5日
Cs	M	全身	6.00E-01	5.00E-01	4.60E-01	4.40E-01	4.30E-01
		尿	7.90E-03	1.10E-02	8.80E-03	6.80E-03	5.40E-03
		便	1.98E-03	2.75E-03	2.20E-03	1.70E-03	1.35E-03

肺モニタの検出目標 :
1時間で線量限度 (50mSv相当) レベルの
Pu、Am、CmのLX線検出



バイオアッセイの検出目標 :
1日測定で記録レベル (1mSv相当) の
Pu、Am、CmのLX線検出

*1 JAEA-Data/Code 2012-018 福島第一原子力発電所の燃料組成評価
ORIGEN code : 原子炉における核燃料の燃焼計算を行うためのコンピュータ計算コード

*2 ICRP Publication 68 作業による放射性核種の摂取についての線量係数, 1994
ICRP Publication 78 作業者の内部被ばくの個人モニタリング, 1997

2.1 得られた成果 (6/29)

(2) 1Fの内部被ばくに係る多素子のTES型マイクロカロリーメーターによる測定条件検討

AMAD 5 μ m、Type S

1mSv相当の便中排泄量*

50mSv相当肺中残存量*

核種	線量係数 (Sv/Bq)	摂取量 (Bq)	1日 (Bq)	2日 (Bq)	3日 (Bq)	4日 (Bq)	5日 (Bq)	線量 (mSv)	摂取量 (Bq)	1日 (Bq)	線量 (mSv)
Pu-238	1.1E-05	20.6	2.27	3.30	1.73	0.72	0.29	0.23	1032	66.0	11.4
Pu-239	8.3E-06	3.9	0.43	0.63	0.33	0.14	0.06	0.03	197	12.6	1.6
Pu-240	8.3E-06	4.6	0.50	0.73	0.39	0.16	0.06	0.04	229	14.7	1.9
Pu-241	8.4E-08	766.7	84.34	122.67	64.40	26.83	10.73	0.06	38335	2453.5	3.2
Am-241	2.7E-05	17.5	1.93	2.63	1.40	0.58	0.23	0.47	877	50.9	23.7
Cm-244	1.7E-05	9.7	1.06	1.45	0.77	0.32	0.13	0.17	483	28.0	8.2

α 核種放射エネルギーの1000倍を仮定した場合のCsの便中排泄量*

全身残存量*

Cs-137	6.7E-09	5.37E4	106.0	147.6	118.1	91.3	72.5	0.36	2.68E6	1.61E6	18.0
Cs-134	9.6E-09	2.68E3	5.3	7.4	5.9	4.6	3.6	0.03	1.34E5	8.05E4	1.3

AMAD 1 μ m、Type M

1mSv相当の便中排泄量*

50mSv相当肺中残存量*

核種	線量係数 (Sv/Bq)	摂取量 (Bq)	1日 (Bq)	2日 (Bq)	3日 (Bq)	4日 (Bq)	5日 (Bq)	線量 (mSv)	摂取量 (Bq)	1日 (Bq)	線量 (mSv)
Pu-238	4.3E-05	7.4	0.81	1.11	0.59	0.25	0.10	0.32	370	21.4	15.9
Pu-239	4.7E-05	1.4	0.16	0.21	0.11	0.05	0.02	0.07	71	4.1	3.3
Pu-240	4.7E-05	1.6	0.18	0.25	0.13	0.06	0.02	0.08	82	4.8	3.9
Pu-241	8.5E-07	275.0	30.25	41.25	22.00	9.35	3.57	0.23	13750	797.5	11.7
Am-241	3.9E-05	6.3	0.69	0.94	0.50	0.21	0.08	0.25	315	18.3	12.3
Cm-244	1.7E-05	3.5	0.38	0.52	0.28	0.11	0.05	0.06	173	10.1	2.9

α 核種放射エネルギーの1000倍を仮定した場合のCsの便中排泄量*

全身残存量*

Cs-137	6.7E-09	1.93E4	38.0	52.9	42.4	32.7	26.0	0.13	9.63E5	5.78E5	6.5
Cs-134	9.6E-09	9.63E2	1.9	2.7	2.1	1.6	1.3	0.01	4.82E4	2.89E4	0.5

* ICRP Publication 68 作業員による放射性核種の摂取についての線量係数, 1994

ICRP Publication 78 作業員の内部被ばくの個人モニタリング, 1997

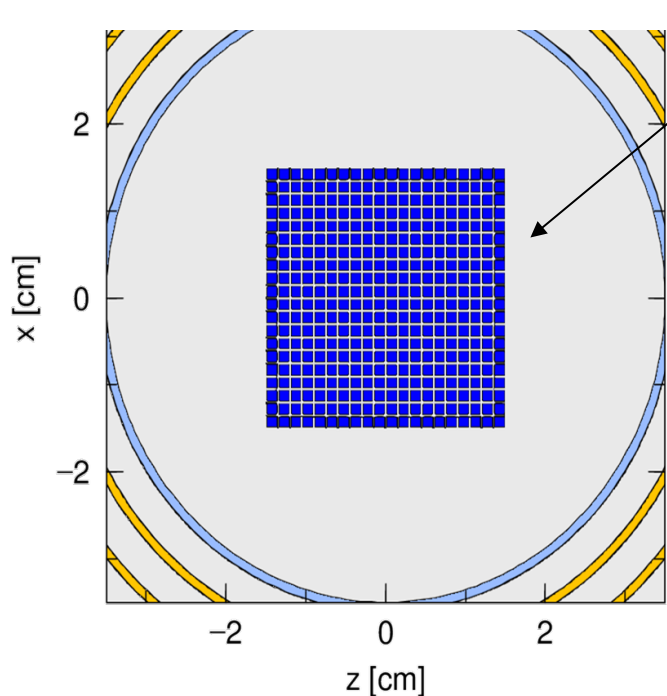
2.1 得られた成果 (7/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

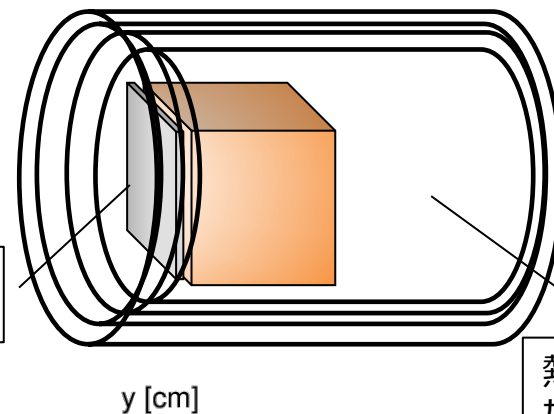
PHITSによるシミュレーション計算を行い、バイオアッセイ、肺モニタ、空気ろ紙について計算

PHITSによるシミュレーション計算体系

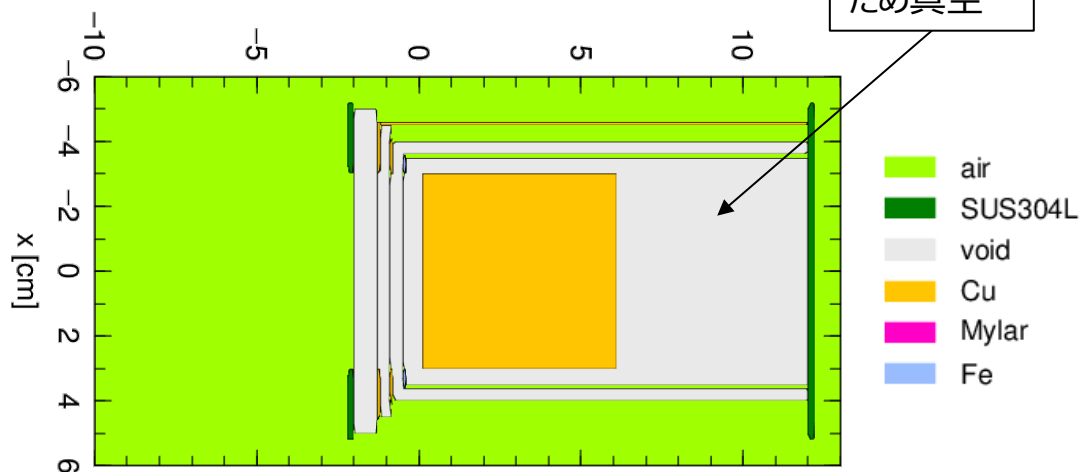
- ・NIST-TESの1モジュール：有感面積169mm²
(NIST-TES 約100素子、AIST-TES 676素子 相当)
- ・NIST-TESの複数 (4又は100) モジュール相当で試算
- ・分解能70eV at 20 KeV~100KeVを想定



多素子のTES型マイクロ
カロリーメーターは1面に配置



熱遮蔽の
ため真空

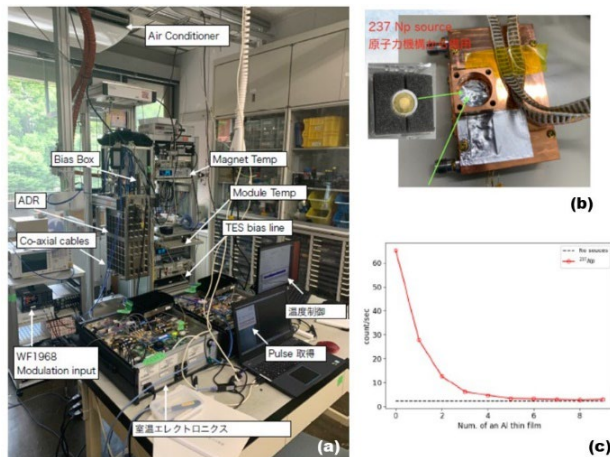


2.1 得られた成果 (8/29)

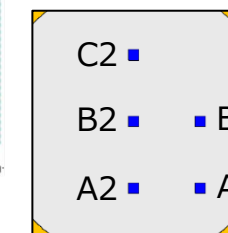
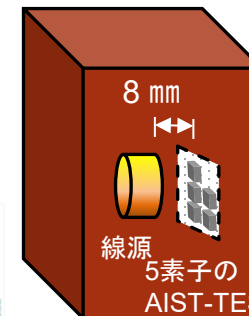
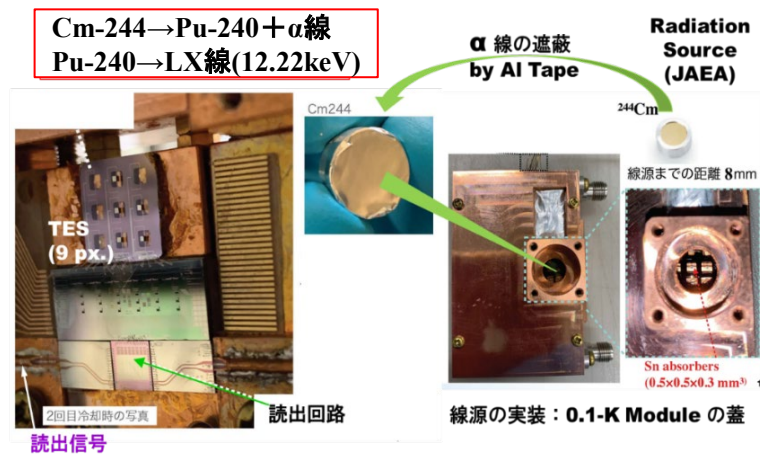
(3)多素子のTES型マイクロカロリメーターに係るシミュレーション計算

実測値とPHITSによる5素子のAIST-TESのシミュレーション計算の比較(1/2)

Np-237測定実験 (2021年)



Cm-244測定実験 (2020年)



A1、A2、B1、B2、C2 は、5素子のAIST-TESの素子の番号
次ページのスペクトルのデータに対応

計算モデルイメージ

Module @ 0.1-K Stage 内

出典：原子力システム研究開発事業「超伝導量子計測技術を駆使したTRU核種迅速線量評価システムの開発」令和3年度報告書

PHITSによる5素子(1.25mm²) [0.5×0.5(mm)×5]のAIST-TESのシミュレーション計算条件

Np-237標準線源(222±2 Bq 検定日 2013/12/19)

- 5素子のAIST-TESとNp-237線源間距離：8 mm、分解能：50eV
- 測定時間：平均285.4時間
- Np-237の線源前にアルミニウム箔(0.2 mm) 5枚(=1 mm)
- 子孫核種 Pa-233を半減期で考慮

Cm-244標準線源(4000±150 Bq 検定日 2014/2/14)

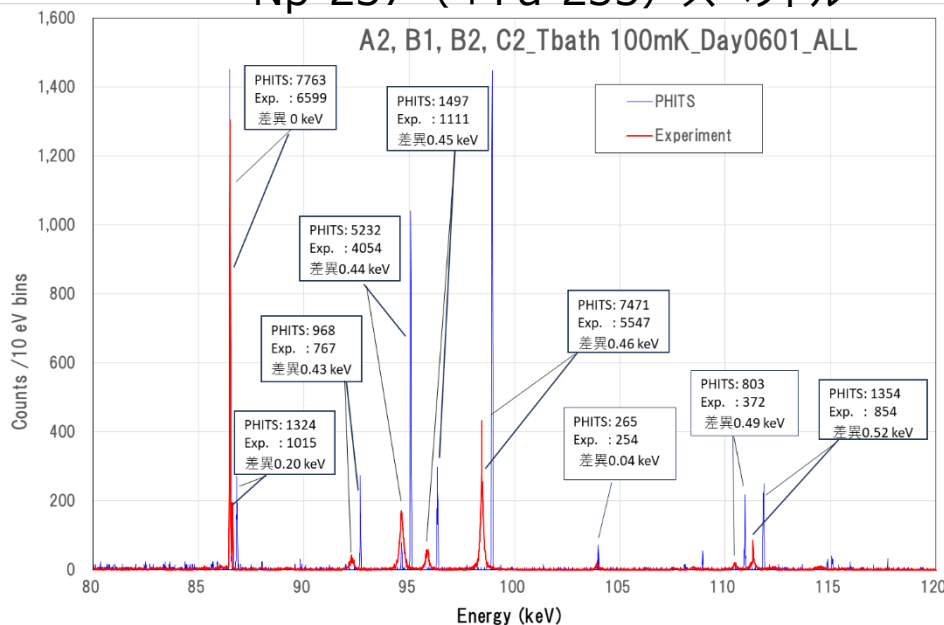
- 5素子のAIST-TESとCm-244線源間距離：8 mm、分解能：45eV
- 測定時間：11時間
- Cm-244の線源前にアルミニウム箔(0.2 mm)

2.1 得られた成果 (9/29)

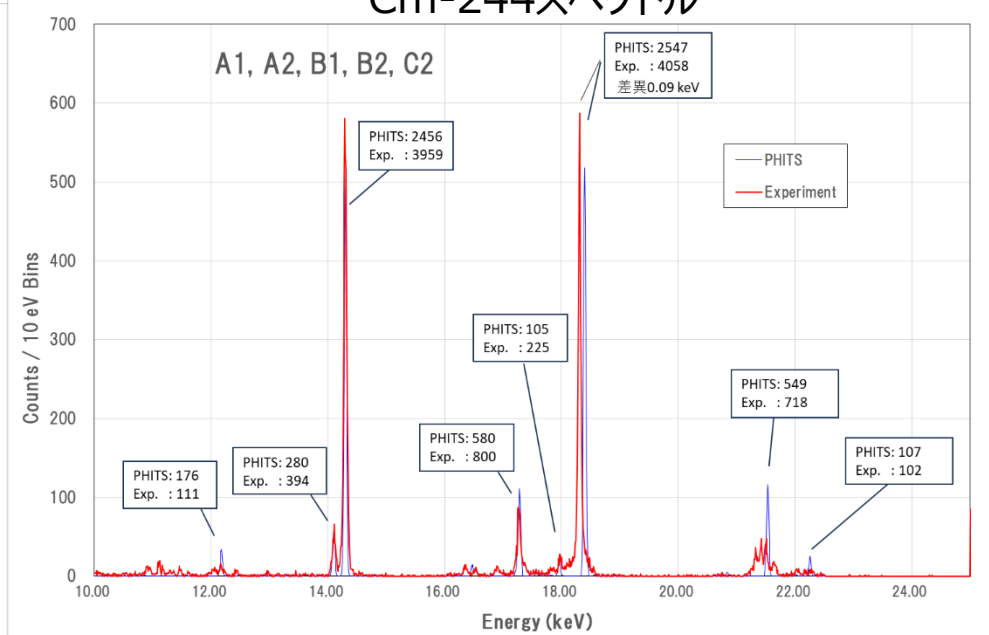
(3)多素子のTES型マイクロカロリメーターに係るシミュレーション計算

実測値とPHITSによる5素子のAIST-TESのシミュレーション計算との比較(2/2)

Np-237 (+ Pa-233) スペクトル



Cm-244スペクトル



Np-237のシミュレーション結果と実測データとの比較

- スペクトルのピークカウントに差があるが、ピークのプロスカウント（図中の□の中の数字）の違ひは大きくなく、実測データの分解能が影響していると思われる。**シミュレーション計算は概ね一致**していると考えられる。
- スペクトルのピークエネルギーにおいて、0.5keV程度の差異は、**実測データのエネルギー校正や参照した崩壊データベース*による差異**と考えられる。

Cm-244シミュレーション結果と実測データとの比較

- スペクトルのピークカウントは概ね一致。プロスカウント（図中の□の中の数字）の違ひはPHITSが少なめ。想定したアルミ箔厚さなどの影響が考えられるが、**シミュレーション計算は大きくは違っていない**ものと考えられる。
- スペクトルのピークエネルギーにおいて、0.1keV等の一部差異は、**実測データのエネルギー校正や参照した崩壊データベース*による差異**と考えられる。

* 使用した崩壊データベース: [計算] ICRP Publication 107 線量計算のための核壊変データ, 2008
[実測] Lawrence Berkeley National Laboratory ウェブサイト (現在閉鎖)

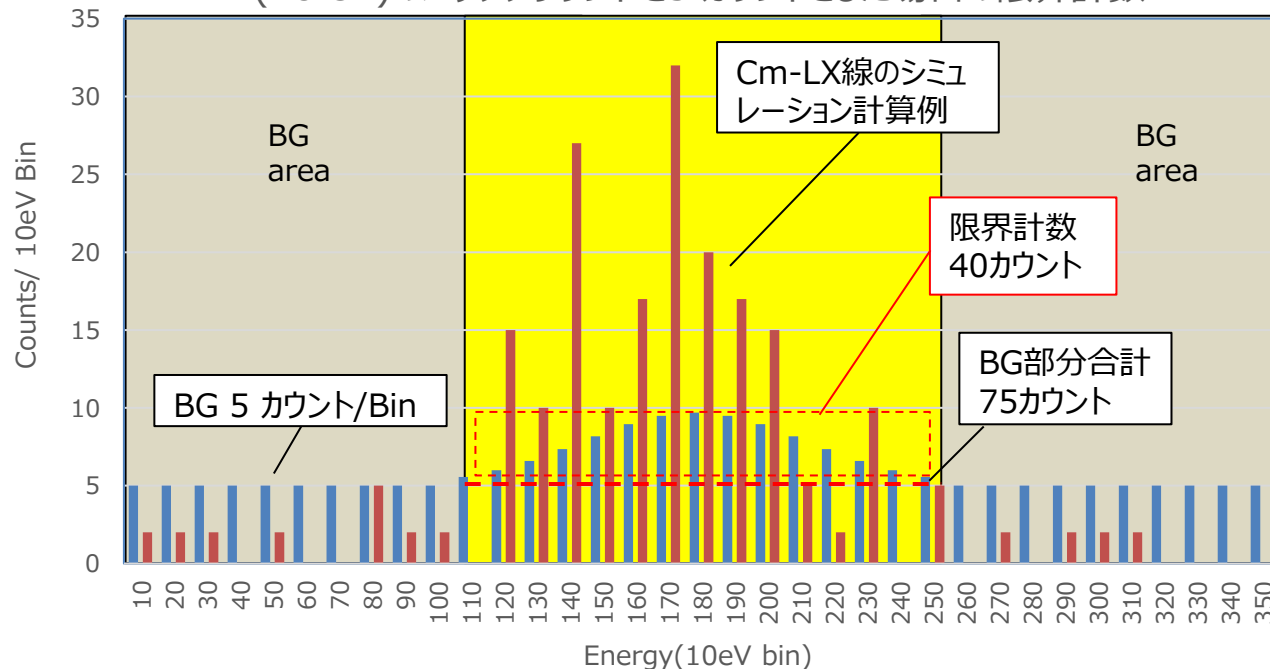
b) TES型マイクロカロリーメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討

2.1 得られた成果 (10/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

検出限界計数の考え方

Bin(10 eV)のバックグラウンドを5 カウントとした場合の限界計数



- L X線のピーク範囲のバックグラウンド (BG) をノイズ等を考慮して保守側に5カウント/Binとする。
- BGから評価した検出限界計数は、約40カウント (Cooper's method) となった。
- ROIの有意の計数は、BGの75カウント (5カウント×15ch) を合わせて、グロスカウントの検出限界を**115カウント**とする。

Bin: スペクトルのグラフで区切るエネルギーの区間。図では10eVごとに区切っている。

ROI: Region of Interest (関心領域)。スペクトルのグラフの中で特定のエネルギー範囲を選んで解析する領域。例えば図では黄色の領域。

BG 5カウント/10 eV Binの場合の限界計数の評価

Region of Interest		Gross Count	BG Count/Bin	Net count	Detectable Count Limit	
10 - 100 eV	BG	50	5	-	40 Cooper's method	41 ISO11929
110 - 250 eV	DL	115 (=75+40)	5	40		
260 - 350 eV	BG	50	5	-		

Cm-LX線のシミュレーション計算例

Region of Interest		Gross Count	BG Count/Bin	Net count	Detectable Count Limit	
14.14 - 14.23 keV	BG	17	1.7	-	24 Cooper's method	24 ISO11929
14.24 - 14.38 keV	Cm-LX	182	1.5	157		
14.39 - 14.48 keV	BG	13	1.3	-		

2.1 得られた成果 (11/29)

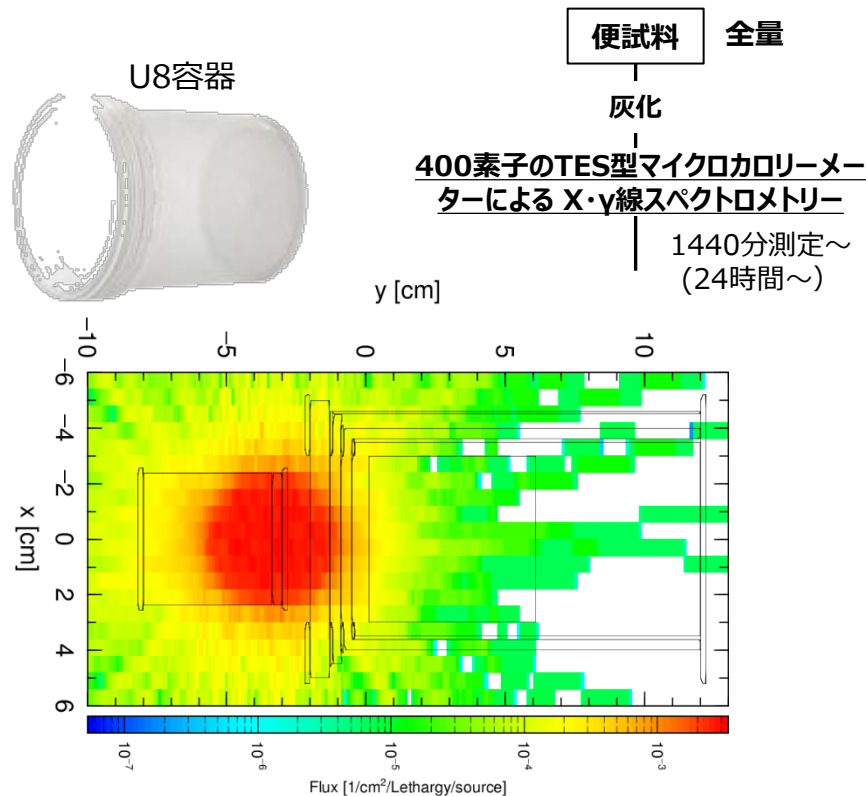
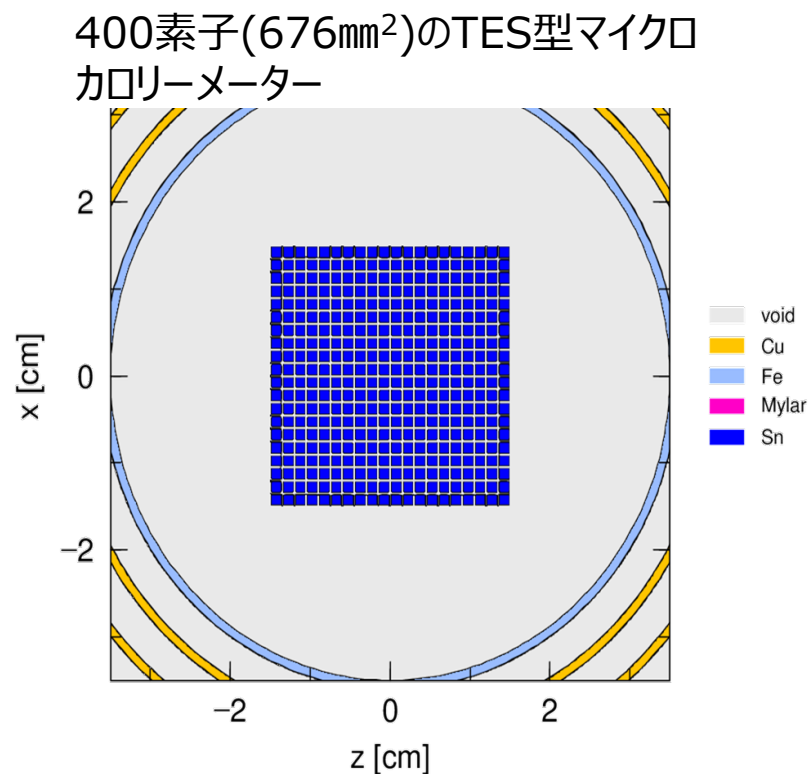
(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

バイオアッセイ試料の測定に係る400素子のTES型マイクロカロリーメーターの高分解能スペクトル(70eV)計算

多素子のTES型マイクロカロリーメーター: 400素子(676mm^2) [$1.3\times 1.3(\text{mm})\times 400$]

バイオアッセイ: U8容器 (内径 $47\text{mm}\phi$)、灰成分 (数mm厚)

試料中の放射エネルギー: 「(2) 1Fの内部被ばくに係るTES型マイクロカロリーメーターによる測定の条件検討」のとおり。



2.1 得られた成果 (12/29)

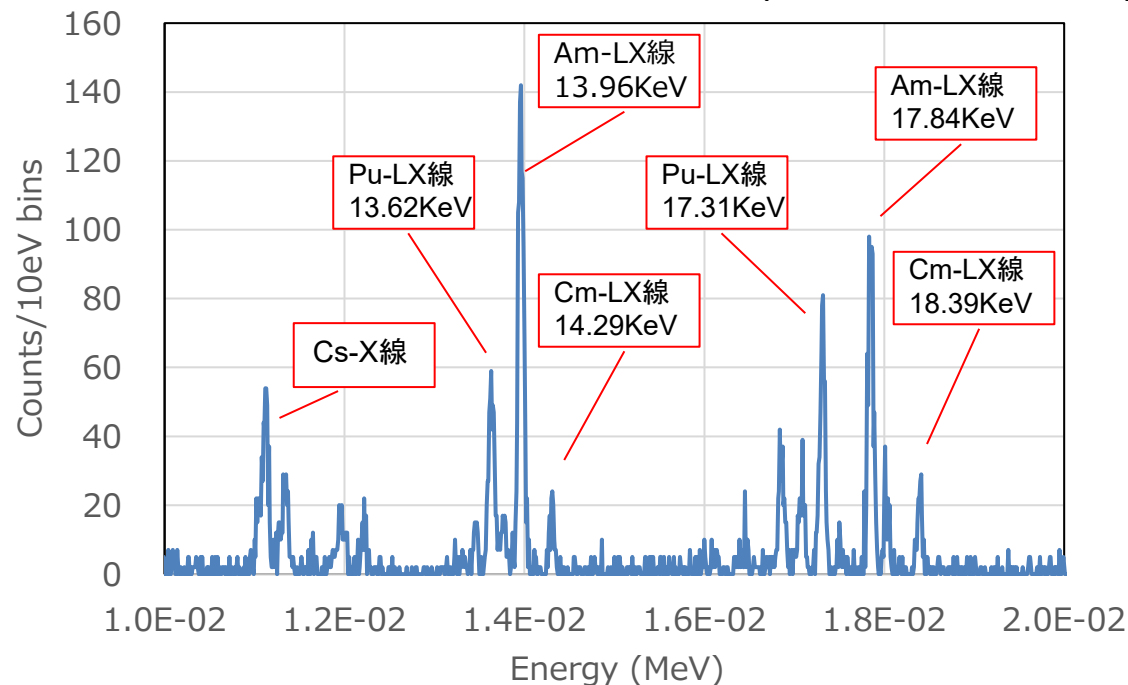
(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

バイオアッセイ試料分析測定に係る400素子のTES型マイクロカロリーメーターの高分解能スペクトル (70eV)計算

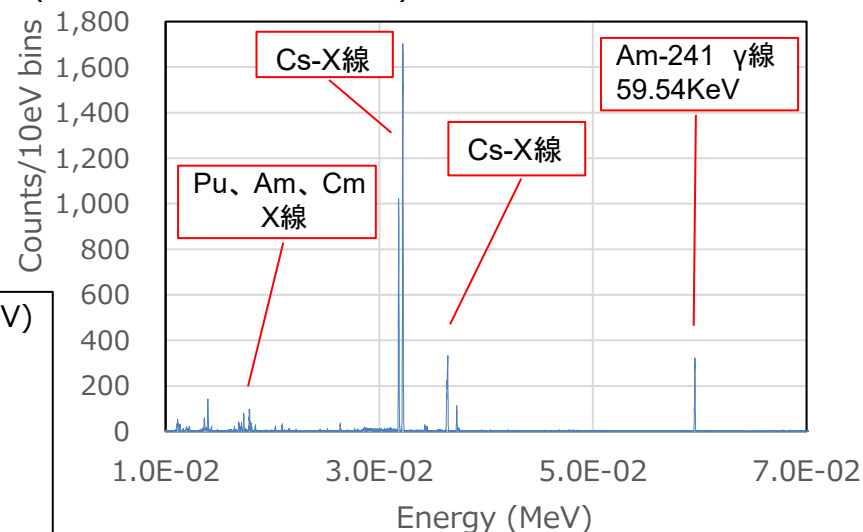
バイオアッセイ試料 (Type S、1日目)

- Pu-238(2.27Bq)、Pu-239(0.43Bq)、Pu-240(0.50Bq)、Pu-241(84.34Bq)
- Am-241(1.93Bq) Cm-244(1.06Bq)
- Cs-137(106.0Bq)、Cs-134(5.3Bq)

400素子のTES型マイクロカロリーメーターのスペクトルシミュレーション(10~20keV、分解能 70eV)



400素子のTES型マイクロカロリーメーターのスペクトルシミュレーション (10~70keV、分解能 70eV)



バイオアッセイ試料分析

- Pu、Am、CmのLX線の十分に優位なピークカウントが得られると推定された。
- Am-241以外のγ線は放出率が低く、ピークは得られなかった。
- Csの影響は大きくはなかった。

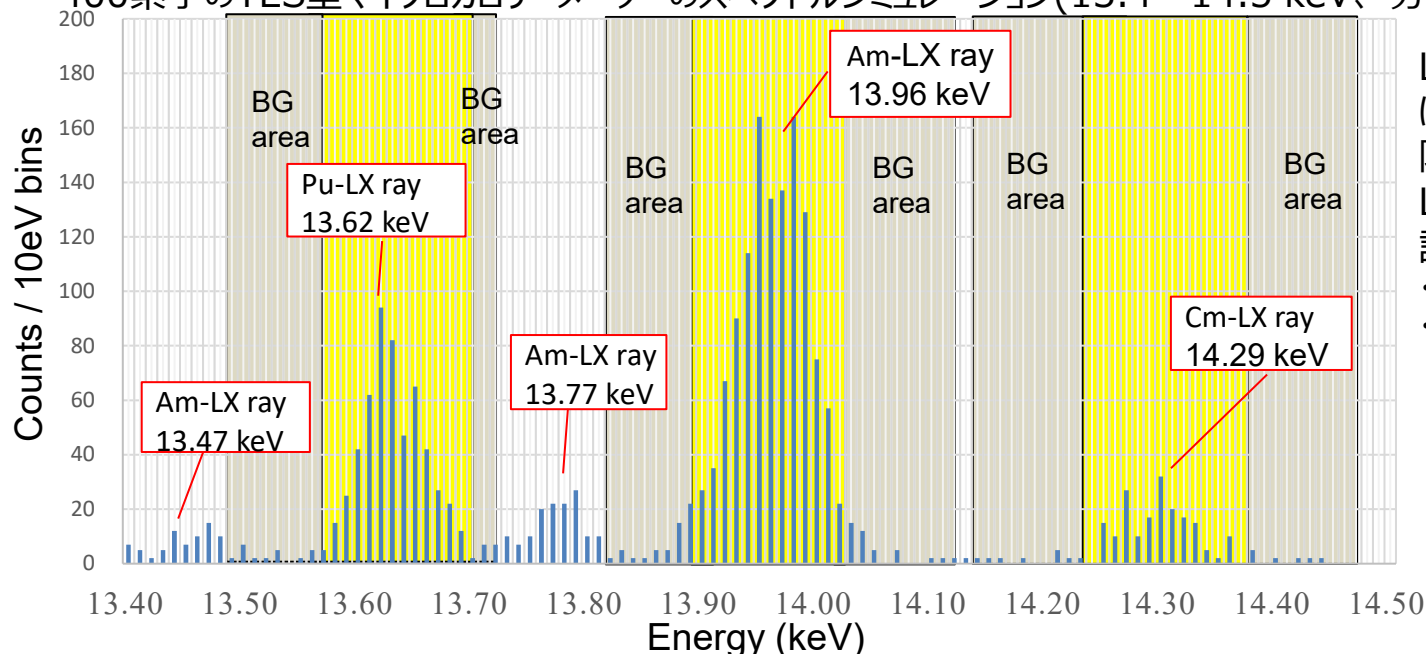
b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討

2.1 得られた成果 (13/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリメーターに係るシミュレーション計算

検出限界計数の評価

400素子のTES型マイクロカロリメーターのスペクトルシミュレーション(13.4～14.5 keV、分解能 70eV)



L X線のピーク範囲のBGを保守側に一律に10カウント/Binとして検出限界計数(Detectable Count Limit)を以下の2通りの方法*で評価した。

- Cooper's method
- ISO11929

* 原子力規制委員会、「ゲルマニウム半導体検出器によるγ線スペクトロメトリー」、放射能測定シリーズ No. 7 (2020)

Region of Interest		Gross Count	BG Count/Bin	Net count	Detectable Count Limit	
13.49 - 13.54 keV	BG	20	3.0	-	57 Cooper's method	38 ISO11929
13.55 - 13.69 keV	Pu-LX	547	4.9	473		
13.70 – 13.71 keV	BG	14	7.0	-		
Region of Interest		Gross Count	BG Count/Bin	Net count	Detectable Count Limit	
13.82 - 13.87 keV	BG	34	6	-	40 Cooper's method	34 ISO11929
13.88 - 14.02 keV	Am-LX	1252	4.3	1186		
14.03 – 14.12 keV	BG	28	3.0	-		
Region of Interest		Gross Count	BG Count/Bin	Net count	Detectable Count Limit	
14.12 - 14.21 keV	BG	17	1.7	-	24 Cooper's method	24 ISO11929
14.22 - 14.36 keV	Cm-LX	182	1.5	157		
14.37 – 14.46 keV	BG	13	1.3	-		

2.1 得られた成果 (14/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリメーターに係るシミュレーション計算

400素子のTES型マイクロカロリメーターによるバイオアッセイ試料分析測定シミュレーション計算結果について

- AMAD 5 μ m Type Sでは、Puは4日、Cmは2日まで、Amのみが5日まで有意のカウント。
- AMAD 1 μ m Type Mでは、Puは3日、Amは4日まで有意カウント。Cmはすべて判定以下。
- 4日～5日目になると放射エネルギーが低く、測定時間の延長、Am-241からの推定が考えられる。

バイオアッセイ試料分析シミュレーション計算結果 (AMAD 5 μ m、Type S)

核種	線種	測定時間	ピークエネルギー	グロスカウント（中央最大カウント）				
				1日目	2日目	3日目	4日目	5日目
Pu	L X線	86、400 sec （1日）	13.63 keV	418(59)	605(92)	338(52)	147(33)	63(11)
			17.31 keV	504(81)	780(129)	293(47)	166(39)	65(12)
Am-241	L X線		13.96 keV	995(142)	1363(204)	672(86)	331(48)	140(26)
			17.84 keV	698(98)	875(129)	476(81)	224(39)	72(12)
	γ線		59.54 keV	2091(323)	2824(378)	1146(222)	640(97)	259(38)
			Cm-244	L X線	14.29 keV	137(24)	166(34)	111(21)
18.39 keV	161(29)				217(44)	93(18)	42(10)	15(5)

1日測定の検出
下限(めやす)

Pu 1 Bq

Am 0.3 Bq

Cm 1 Bq

バイオアッセイ試料分析シミュレーション計算結果 (AMAD 1 μ m、Type M)

核種	線種	測定時間	ピークエネルギー	グロスカウント（中央最大カウント）				
				1日目	2日目	3日目	4日目	5日目
Pu	L X線	86、400 sec (1日)	13.63 keV	150(22)	203(30)	121(20)	65(14)	22(3)
			17.31 keV	187(27)	247(34)	154(22)	54(11)	29(4)
Am-241	L X線		13.96 keV	366(54)	504(71)	262(41)	130(24)	41(6)
			17.84 keV	246(32)	295(48)	154(23)	69(10)	34(5)
	γ線		59.54 keV	740(112)	1023(145)	497(82)	223(37)	102(15)
			Cm-244	L X線	14.29 keV	48(10)	71(15)	35(7)
18.39 keV	64(11)				55(10)	44(8)	10(3)	7(2)

Bin(10eV) の BGを一律 5 カウントと保守側に仮定した場合の限界計数 グロスで約115 カウント。

2.1 得られた成果 (15/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

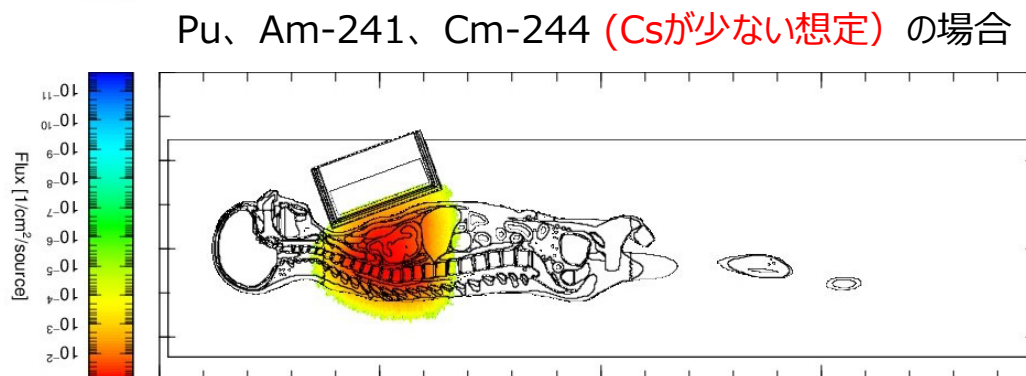
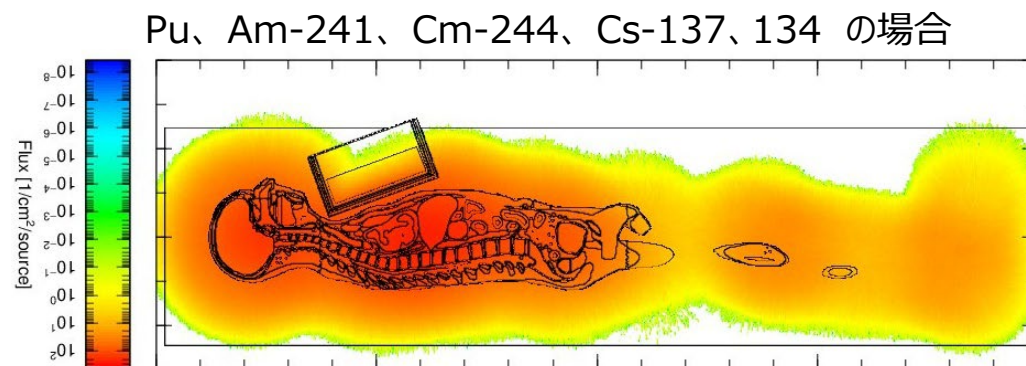
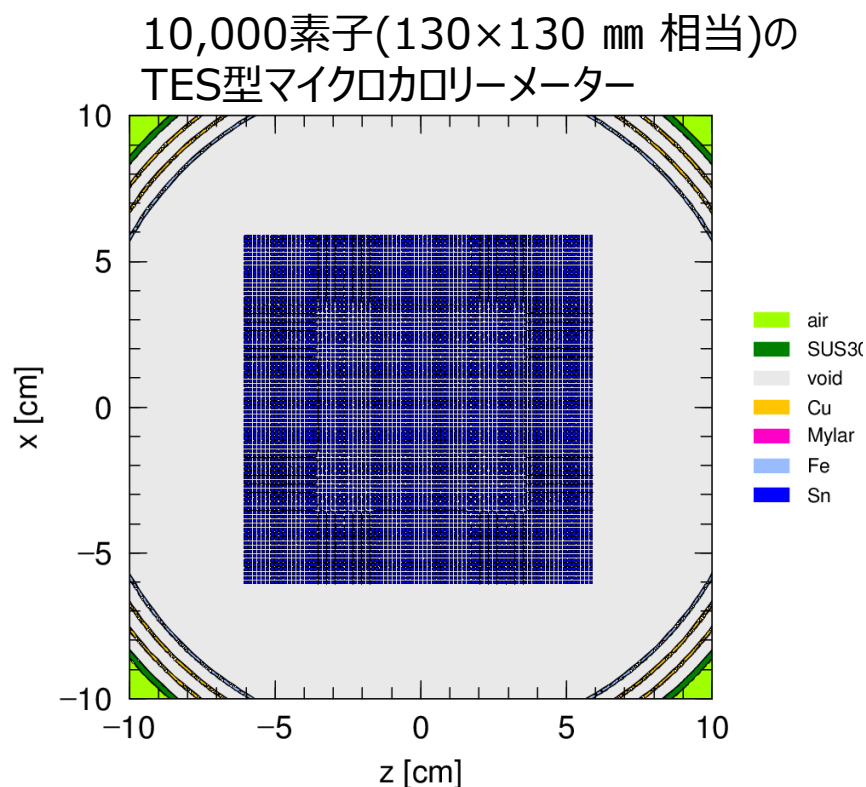
肺モニタ測定に係る10,000素子のTES型マイクロカロリーメーターの高分解能スペクトル (70eV)計算

多素子のTES型マイクロカロリーメーター: 10,000素子(16,900mm²) [1.3×1.3(mm)×10,000]

人体モデル: ICRP Publication 145 ファントム*

肺中の放射エネルギー: 「(2) 1Fの内部被ばくに係るTES型マイクロカロリーメーターによる測定条件検討」
のとおり

肺モニタ測定
↓
10,000素子のTES型マイクロカロリーメーターによる X・γ線スペクトロメリー
↓
60分測定～



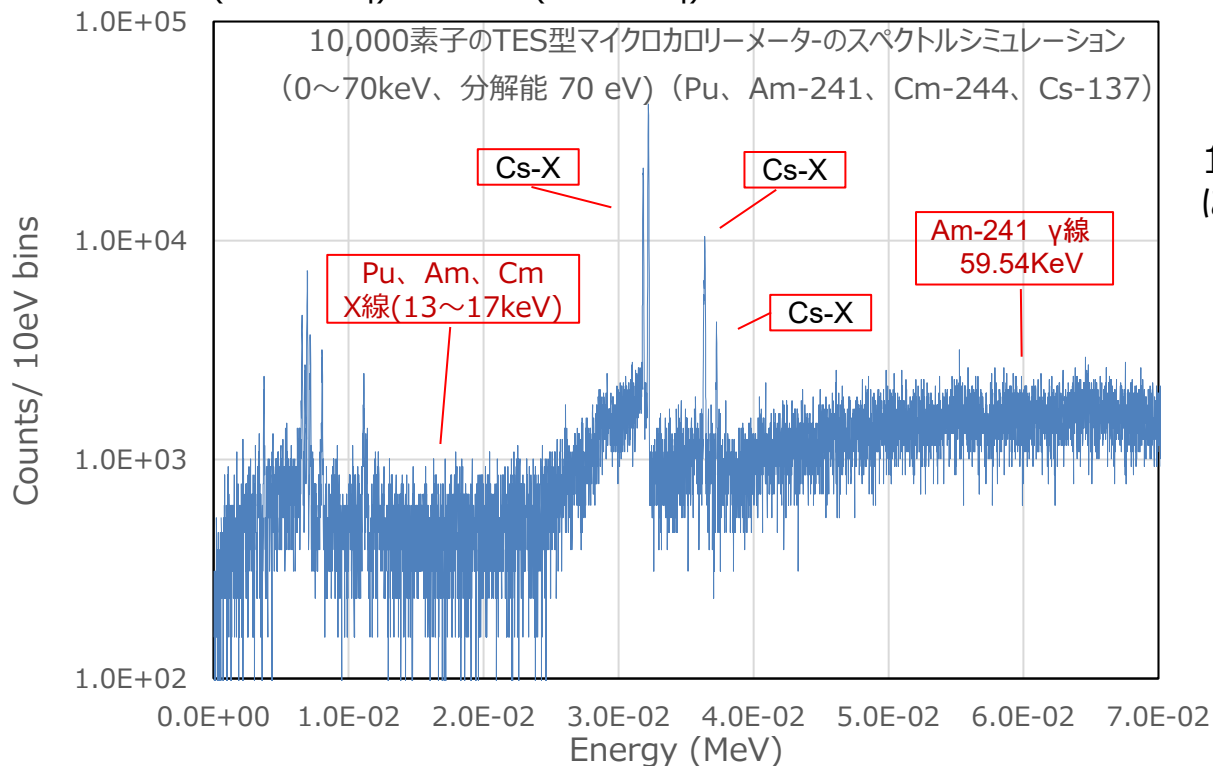
2.1 得られた成果 (16/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

肺モニタ測定に係る10,000素子のTES型マイクロカロリーメーターの高分解能スペクトル (70eV)計算結果 (Cs-137、134有りの場合)

肺モニタ測定 (Type S、1日目)

- Pu-238(66.0 Bq)、Pu-239(12.6 Bq)、Pu-240(14.7 Bq)、Pu-241(2453.5 Bq)
 - Am-241(50.9 Bq)、Cm-244(28.0 Bq)
 - Cs-137(1.61 MBq)、Cs-134(80.5 kBq)
- 肺内分布 50 mSv 相当
全身分布 19 mSv 相当



10,000素子のTES型マイクロカロリーメーターによる肺モニタ測定のシミュレーション結果

- Cs-137、134からの影響 (全身) が大きいため、Pu、Am、Cmのピーク判別不能。
- Pu、Am、CmのLX線のカウント自体が極めて少なく、10,000素子のTES型マイクロカロリーメーターでも検出面積は十分ではない。
- CsのMBqレベルの内部被ばくの想定も厳しい。

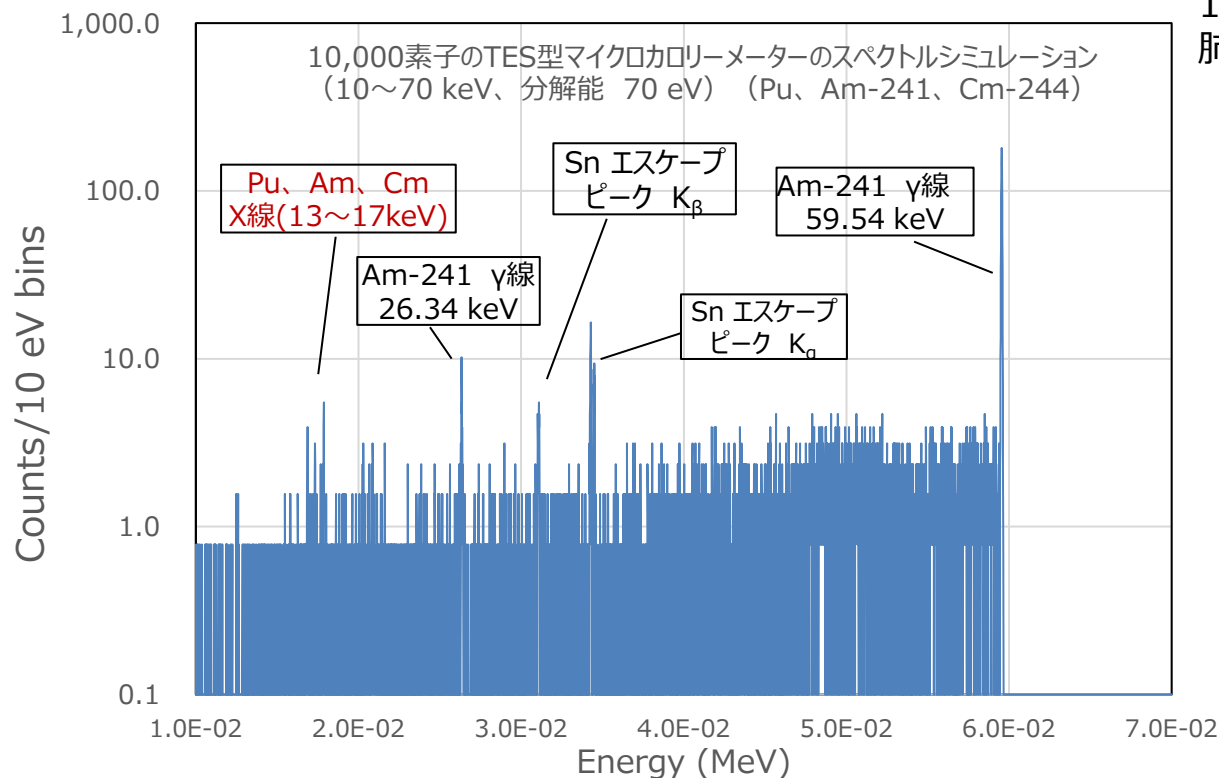
2.1 得られた成果 (17/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

肺モニタ測定に係る10,000素子のTES型マイクロカロリーメーターの高分解能スペクトル (70eV) 計算結果
(Cs-137、134無しの場合)

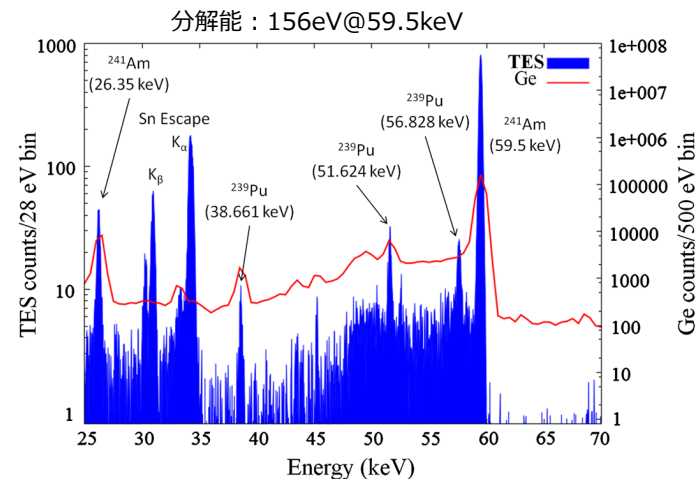
肺モニタ測定 (Type S、1日目)

- Pu-238(66.0 Bq)、Pu-239(12.6 Bq)、Pu-240(14.7 Bq)、Pu-241(2453.5 Bq)
 - Am-241(50.9 Bq)、Cm-244(28.0 Bq)
- 肺内に分布 50 mSv 相当



10,000素子のTES型マイクロカロリーメーターによる肺モニタ測定のシミュレーション結果

- Am-241のγ線のピークのみ。
- Pu、Am、CmのLX線のカウント自体が極めて少なく、判別困難。10,000素子のTES型マイクロカロリーメーターでも検出面積は十分ではない。



【参考】Pu、Am-241 線源のTES型マイクロカロリーメーターによる実測スペクトル S. Htakeyama *et al*, J Low Temp Phys (2014) 176:560–565 DOI 10.1007/s10909-014-1090-z

2.1 得られた成果 (18/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリメーターに係るシミュレーション計算

10,000素子のTES型マイクロカロリメーターによる肺モニタ測定のシミュレーション計算結果について

- Cs-137、134がある場合はCsの影響で有意なカウントは得られなかった。Cs-137、134が無い場合はAmのみ検出。
- Pu、Am、CmのLX線のカウントが極めて少ない。測定時間が1時間であり、10,000素子のTES型マイクロカロリメーターでも検出面積は十分ではない。
- 10,000素子以上の多素子のTES型マイクロカロリメーターがコスト的に利用できるようになるまでに、時間や新技術開発が必要と考えられる。

10,000素子のTES型マイクロカロリメーターによる肺モニタ測定のシミュレーション計算結果

核種	線種	測定時間	ピークエネルギー	グロスカウント(中央最大カウント)			
				AMAD 5μm Type S		AMAD 1μm Type M	
				Cs-137、134あり	Cs-137、134なし	Cs-137、134あり	Cs-137、134なし
Pu	L X線	3600 sec (1時間)	13.63 keV		0		0
			17.31 keV		15(2)		7(1)
Am-241	L X線		13.96 keV	Csのバックグラウンドによりピークの判別	0	Csのバックグラウンドによりピークの判別	0
			17.84 keV		19(3)		10(2)
	γ線		59.54 keV	不能	1200(159)	不能	713(95)
Cm-244	L X線		14.29 keV		0		0
			18.39 keV		7(1)		2(1)

Bin(10eV) の BGを一律 5 カウントと保守側に仮定した場合の限界計数 グロスで約115 カウント。

2.1 得られた成果 (19/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

空気ろ紙等試料測定シミュレーション

多素子のTES型マイクロカロリーメーター：

400素子(676 mm²) [1.3×1.3(mm)×400]

空気ろ紙：HE-40T (線源径25mmφ 0.4mmt)

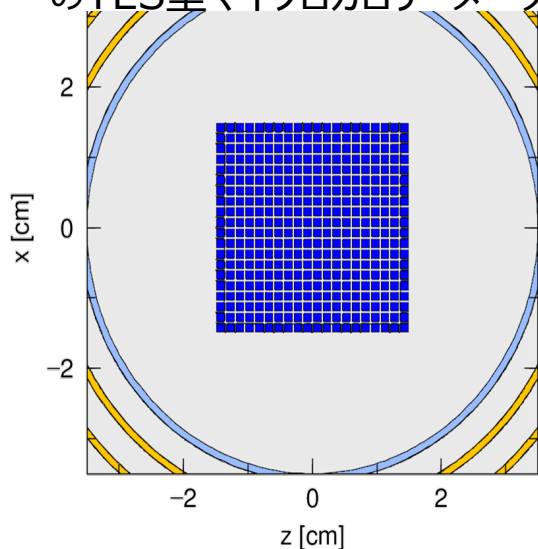
ろ紙の放射エネルギー：α核種 5kBq、Cs 5MBq (右の表参照)

「直接測定」、「Pu分離測定」、「Csが無い場合の直接測定」の3パターンについてシミュレーション計算を行う。

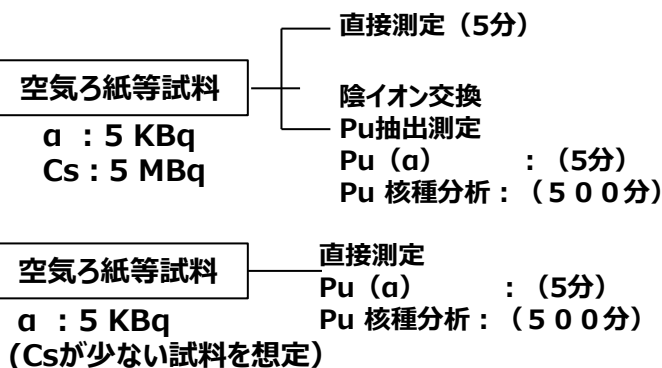
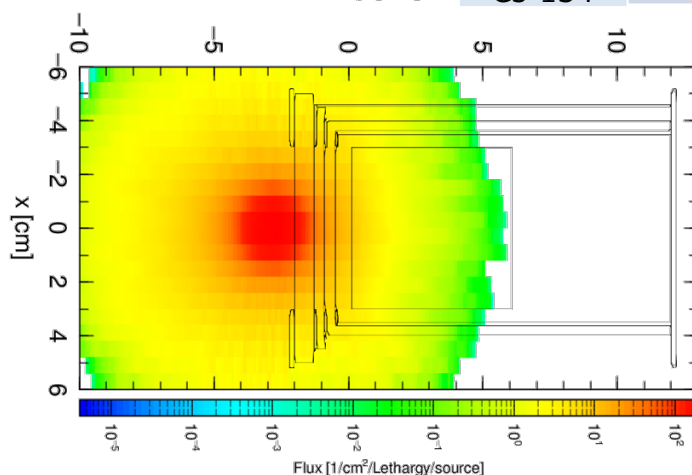
α放射能 5 kBqの場合の各核種の放射エネルギー

核種	10年(割合)	放射エネルギー (Bq)	備考
U-235	0.0001%	0	
U-238	0.0006%	0	
Pu-238	2.54%	1826	α線
Pu-239	0.48%	349	α線
Pu-240	0.56%	405	α線
Pu-241	94.24%	67835	β線
Pu-242	0.002%	1	
Am-241	2.16%	1552	
Am-243	0.016%	12	
Cm-244	1.19%	854	
Cs-137	α放射能の1000倍	4.76E+06	
Cs-134		2.38E+05	

400素子 (26×26 mm 相当)
のTES型マイクロカロリーメーター



HE-40T



2.1 得られた成果 (20/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

空気ろ紙等試料測定に係る400素子のTES型マイクロカロリーメーターの高解能スペクトル (70eV)計算 (直接測定)

Pu-238(1.83 kBq)、Pu-239(0.349 kBq)、Pu-240(0.405 kBq)、Pu-241(67.8 kBq)

Am-241(1.55 kBq)、Cm-244(0.854 kBq)

Cs-137(4.76 MBq)、Cs-134(0.238 MBq)

空気ろ紙等試料

a : 5 KBq

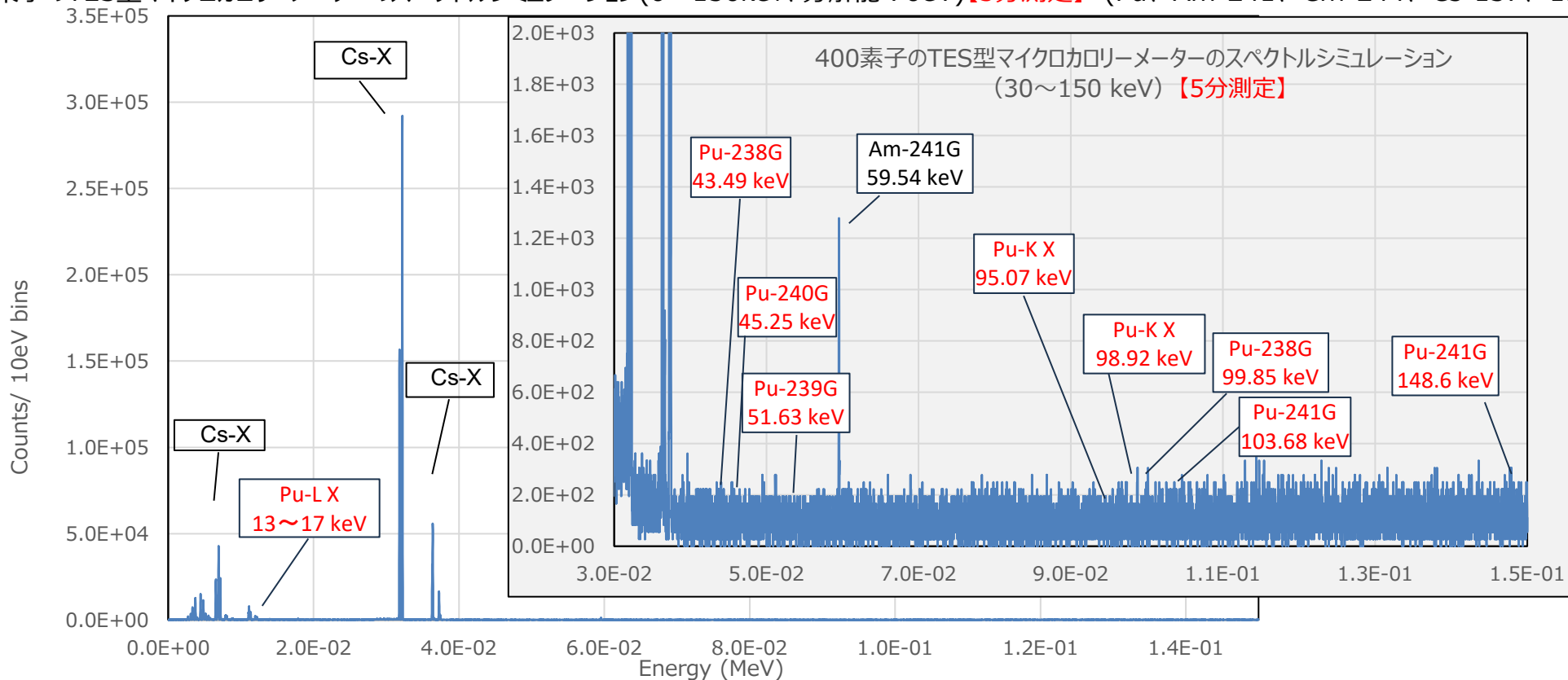
Cs: 5 MBq

直接測定

400素子のTES型マイクロカロリーメーターによる X・γ線スペクトロメトリー

5分測定～ Am-241

400素子のTES型マイクロカロリーメーターのスペクトルシミュレーション(0～150keV、分解能 70eV)【5分測定】 (Pu、Am-241、Cm-244、Cs-137、134)



2.1 得られた成果 (21/29)

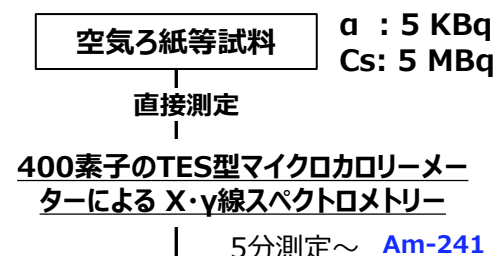
(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

空気ろ紙等試料に係る400素子のTES型マイクロカロリーメーターの高解能スペクトル (70eV)計算結果 (直接測定)

- ・Cs-137、134がバックグラウンドに影響 (CsのMBqレベルでは厳しい)
- ・Am-241の γ 線のピークのみ判別可
- ・Pu、Am、CmのLX線のピーク判別不能

400素子のTES型マイクロカロリーメーターによる空気ろ紙等試料のシミュレーション計算結果 (直接測定)

核種	線種	ピークエネルギー	グロスカウント(中央最大カウント)	備考
Pu	L X線	13.63 keV	-	
		17.31 keV	-	
		20.27 keV	-	
	K X線	95.07 keV	-	
		98.92 keV	-	
Pu-238	γ 線	43.49 keV	Csのバックグラウンドによりピークの判別不能	
		99.85 keV		
Pu-239	γ 線	38.66 keV	-	
		51.63 keV	-	
Pu-240	γ 線	45.25 keV	-	
Pu-241	γ 線	103.68 keV	-	
		148.57 keV	-	
Am-241	γ 線	59.54 keV	9370(1279)	



Bin(10eV) の BGはCsの影響で約200～300カウント

2.1 得られた成果 (22/29)

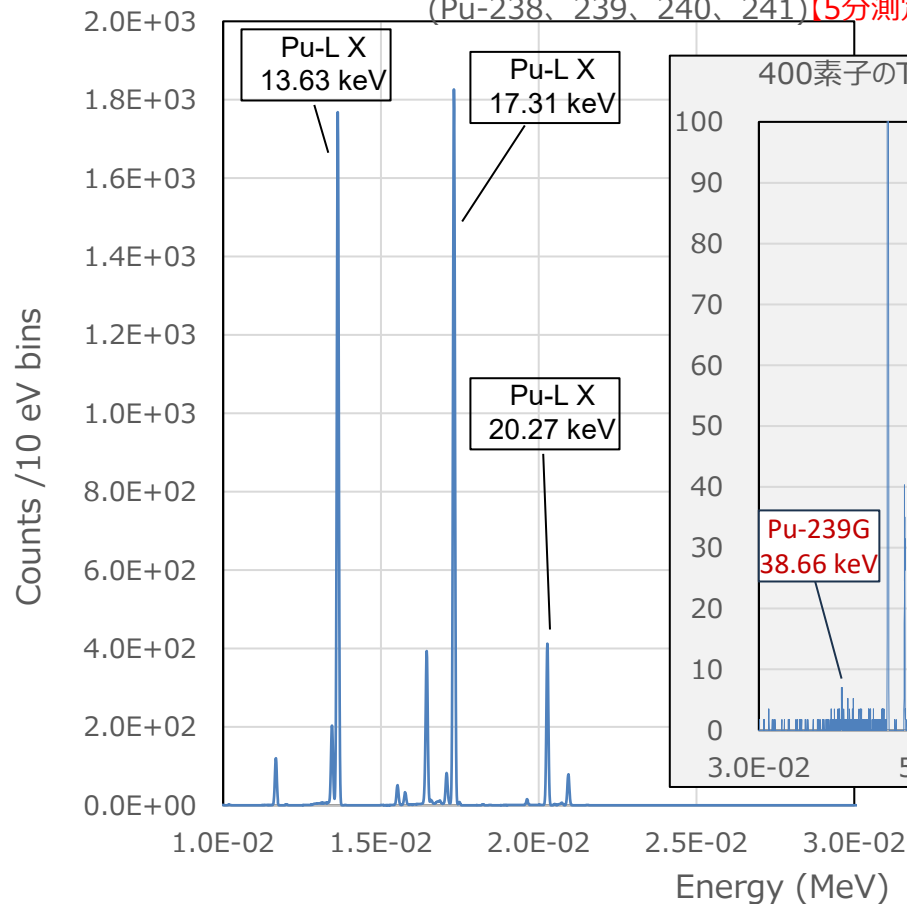
(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

空気ろ紙等試料に係る400素子のTES型マイクロカロリーメーターの高解能スペクトル (70eV)計算結果 (Pu分離測定)

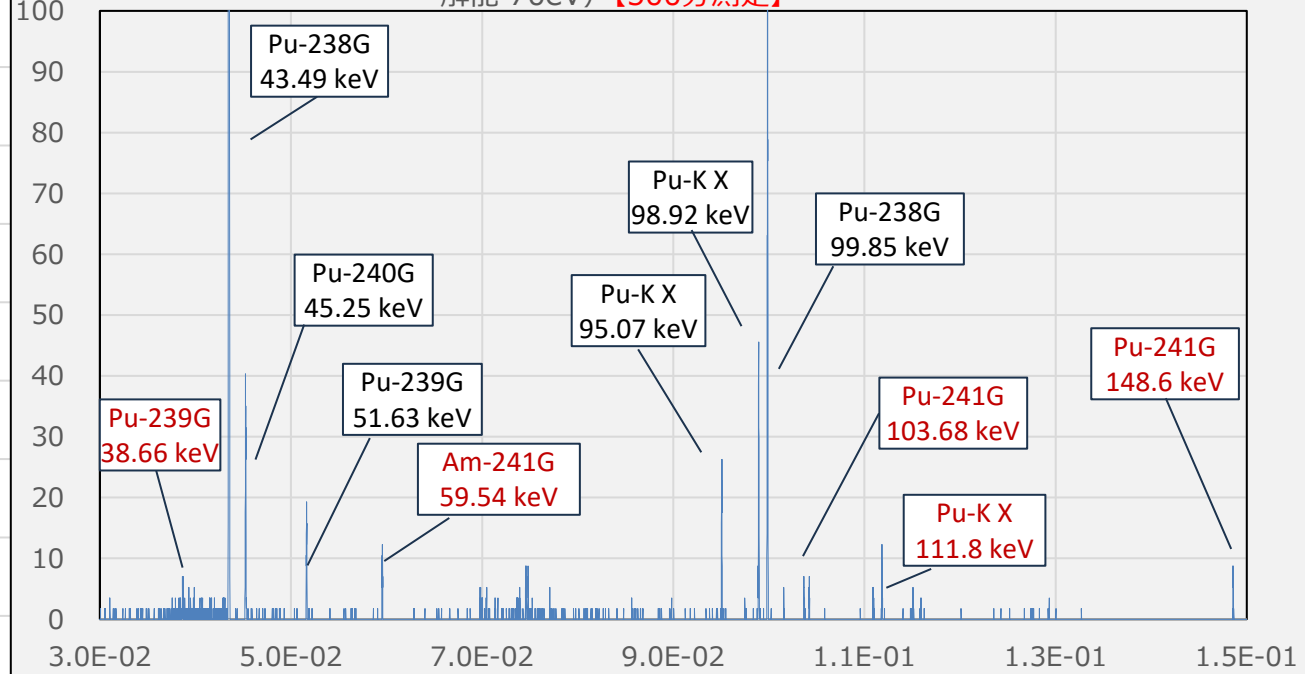
Pu-238(1.83 kBq)、Pu-239(0.349 kBq)、Pu-240(0.405 kBq)、Pu-241(67.8 kBq)

400素子のTES型マイクロカロリーメーターのスペクトルシミュレーション (10~30 keV、分解能70eV)

(Pu-238、239、240、241)【5分測定】



400素子のTES型マイクロカロリーメーターのスペクトルシミュレーション(30~150keV、分解能 70eV) 【500分測定】



空気ろ紙等試料

α : 5 KBq
Cs: 5 MBq

灰化、硝酸浸出

陰イオン交換

Pu成分

400素子のTES型マイクロカロリーメーターによる X・γ線スペクトロメトリー

5分測定 Pu (α)

500分測定 Pu核種分析

2.1 得られた成果 (23/29)

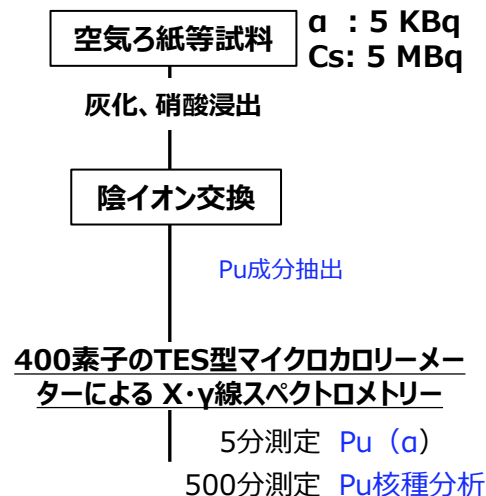
(3)多素子のTES型マイクロカロリメーターに係るシミュレーション計算

空気ろ紙試料に係る400素子のTES型マイクロカロリメーターの高解能スペクトル (70eV)計算結果 (Pu分離測定)

- ・ 5分測定の場合 PuのLX線のピーク検出可能
- ・ 500分測定の場合 Pu-238、239、240のγ線検出可能
Pu-241の検出は厳しい (液シンでの測定が効率的)

400素子のTES型マイクロカロリメーターによる空気ろ紙等試料のシミュレーション計算結果 (Pu分離測定)

核種	線種	ピークエネルギー	グロスカウント(中央最大カウント) 5分測定	グロスカウント(中央最大カウント) 500分測定
Pu	L X線	13.63 keV	13152(1768)	1315260(176800)
		17.31 keV	13589(1826)	1358949(182640)
		20.27 keV	3055(398)	305599(39813)
	K X線	95.07 keV	1	177(26)
		98.92 keV	2	285(46)
	γ線	43.49 keV	107(14)	10742(1458)
Pu-238		99.85 keV	8(1)	845(116)
Pu-239	γ線	38.66 keV	0	42(7)
		51.63 keV	1	124(19)
Pu-240	γ線	45.25 keV	2	276(35)
Pu-241	γ線	103.68 keV	0	47(7)
		148.57 keV	0	32(7)
Am-241	γ線	59.54 keV	0	81(12)



Bin(10eV) の BGを一律 5 カウントと保守側に仮定した場合の限界計数 グロスで約115 カウント。
Am-241はPu-241から生成

2.1 得られた成果 (24/29)

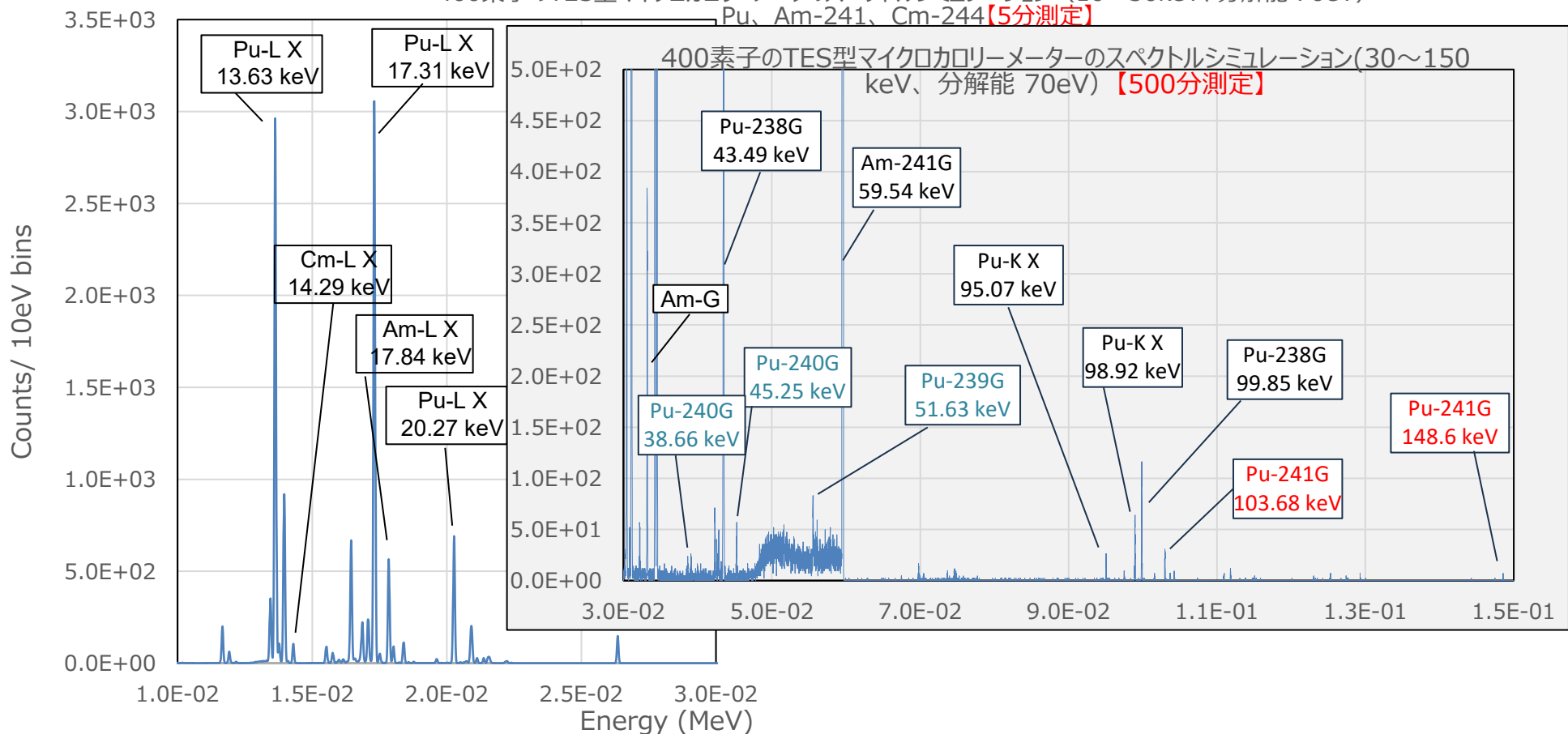
(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係る、ミュレーション計算

空気ろ紙等試料に係る400素子のTES型マイクロカロリーメーターの高解能スペクトル
(70eV)計算結果 (Csがない場合の直接測定)

Pu-238(1.83 kBq)、Pu-239(0.349 kBq)、Pu-240(0.405 kBq)、Pu-241(67.8 kBq)

Am-241(1.55 kBq)、Cm-244(0.854 kBq)

400素子のTES型マイクロカロリーメータのスペクトルシミュレーション (10~30keV、分解能 70eV)



空気ろ紙等試料 α: 5 KBq

直接測定

400素子のTES型マイクロカロリーメーターによるX・γ線スペクトロメトリー

5分測定 Pu (α)

500分測定 Pu核種分析

2.1 得られた成果 (25/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

空気ろ紙等試料に係る400素子のTES型マイクロカロリーメーターの高解能スペクトル (70eV)計算結果
(Csがない場合の直接測定)

- ・ 5分測定の場合 Pu、Am、CmのLX線のピーク検出可能
- ・ 500分測定の場合 Pu-238の γ 線検出可能
Pu-239、240はAm-241の影響がある
Pu-241の検出は確実ではない

400素子のTES型マイクロカロリーメーターによる空気ろ紙等試料のシミュレーション計算結果 (Csが無い場合の直接測定)

核種	線種	ピークエネルギー	グロスカウント(中央最大カウント) 5分測定	グロスカウント(中央最大カウント) 500分測定
Pu	L X線	13.63 keV	13188(1777)	1318811(177770)
		17.31 keV	13715(1834)	1371574(183400)
Am	L X線	13.96 keV	4105(551)	410509(55174)
		17.84 keV	2251(339)	251622(33929)
Cm	L X線	14.29 keV	467(63)	46747(6371)
		18.39 keV	474(67)	47407(6764)
Pu-238	γ 線	43.49 keV	113(14)	11375(1462)
		99.85 keV	1	818(116)
Pu-239	γ 線	38.66 keV	1	118(24)
		51.63 keV	0	536(47)
Pu-240	γ 線	45.25 keV	2	306(57)
Pu-241	γ 線	103.68 keV	0	52(7)
		148.57 keV	0	32(7)
Am-241	γ 線	59.54 keV	7645(1026)	764548(102620)

空気ろ紙等試料 α : 5 KBq
↓
直接測定
↓
400素子のTES型マイクロカロリーメーターによるX・ γ 線スペクトロメトリー
5分測定 Pu (α)
500分測定 Pu核種分析

Bin(10eV) の BGを一律 5 カウントと保守側に仮定した場合の限界計数 グロスで約115 カウント

Am-241の γ 線の影響でBGを一律50カウントと保守側に仮定した場合、59keV以下のグロスの限界計数 約880カウント

2.1 得られた成果 (26/29)

(3)多素子のTES型マイクロカロリーメーターに係るシミュレーション計算

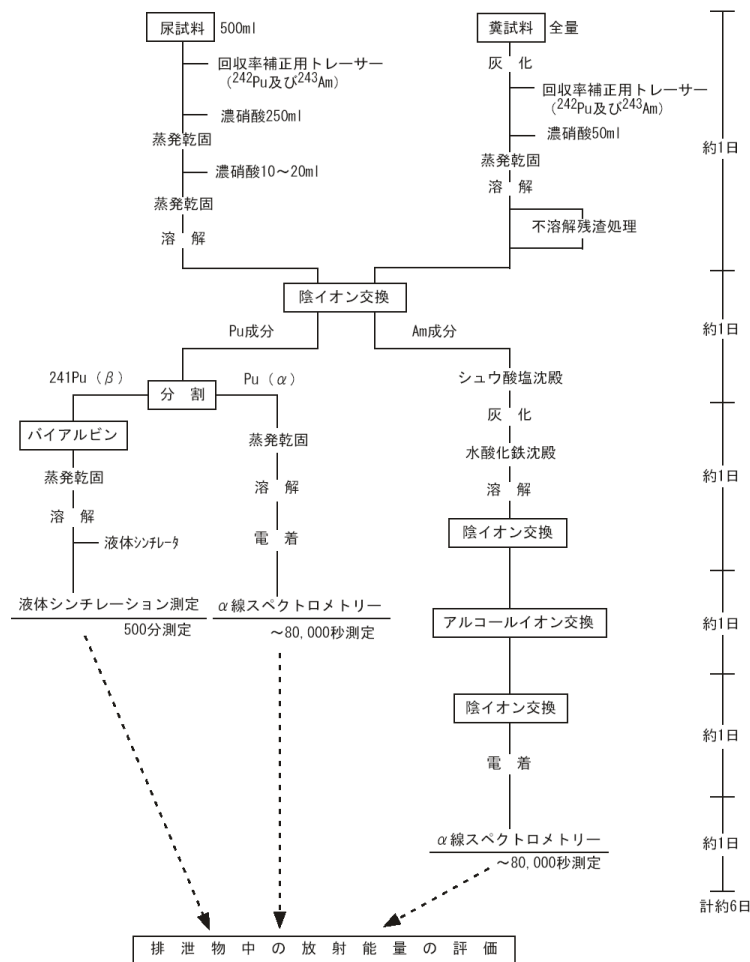
PHITSによる多素子のTES型マイクロカロリーメーター高分解能分析のシミュレーション計算結果のまとめ

- バイオアッセイ分析測定
 - Pu、Am、CmのLX線の十分に有意なピークカウントが得られ、3核種の同時測定が期待できる。
 - 放射エネルギーが微量なため、Am-241以外のγ線ピークは得られなかった。
 - Csの便への排泄割合が低いため、Csの影響は大きくない。
- 肺モニタ測定
 - Cs-137、134がある場合はCsの影響で有意なカウントは得られなかった。Cs-137、134が無い場合はAmのみ検出。
 - Pu、Am、CmのLX線のカウントが少ない。測定時間が1時間であり、10,000素子のTES型マイクロカロリーメーターでも検出面積は十分ではない。
 - 10,000素子以上の多素子のTES型マイクロカロリーメーターがコスト的に利用可能になるまでには、時間と新技術開発が必要と考えられる。
- 空気ろ紙等試料測定
 - Csが含まれる場合、Csの影響が大きく、Am-241以外の直接測定は困難。
 - 陰イオン交換によるPu分離測定が現実的である。α放射エネルギーで5 kBq程度あれば、5分測定でPu(α)放射エネルギーの測定、500分測定でPu-238、239、240の核種分析が期待できる。
 - Csがない場合（少ない場合）、直接測定も期待できる。
- 内部被ばく評価への適用
 - Cs-137の影響やPu-241の測定など多素子のTES型マイクロカロリーメーターだけでの測定では困難な点もあるので、空気ろ紙等試料の測定や他の既存測定方法（全身カウンタ、肺モニタ）との組み合わせが考えられる。

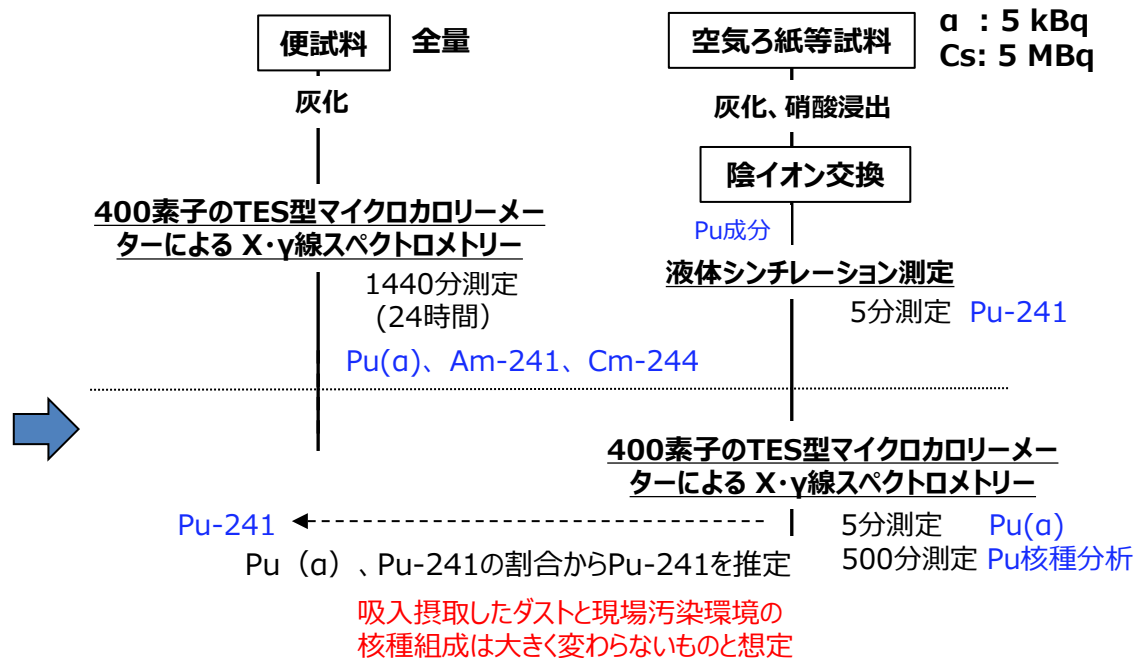
2.1 得られた成果 (27/29)

(4)多素子のTES型マイクロカロリーメーターによる測定方法の検討及び評価

バイオアッセイ分析への多素子のTES型マイクロカロリーメーターの適用に関する検討



従来のバイオアッセイ分析工程の例



バイオアッセイ分析への多素子のTES型マイクロカロリーメーターの適用

- Pu、Am-241、Cmの同時分析
- 化学分析に伴うPu-242、Am-243のトレーサ不要
- バイオ試料回収から3日程度で分析
- Pu-241やPu核種は空気ろ紙等の試料分析測定から推定

2.1 得られた成果 (28/29)

(4)多素子のTES型マイクロカロリーメーターによる測定方法の検討及び評価

バイオアッセイ分析への多素子のTES型マイクロカロリーメーターの適用に関する検討

- ・バイオアッセイ分析としては3日間短縮。
- ・400素子のTES型マイクロカロリーメーターによる簡易な測定で試料分析の作業を軽減。
- ・試料4、試料5は、Pu量が少ない可能性があり、測定時間を延ばす。もしくはAm-241 からの推定が考えられる。

バイオアッセイ分析に係るの従来の化学分析と400素子のTES型マイクロカロリーメーター適用による高分解能測定との比較

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
試料1		化学分析								
空気ろ紙等	▲	前処理 TES型マイクロ カロリーメーターで測定								
試料2		▲	前処理 TES型マイクロ カロリーメーターで測定							
試料3			▲	前処理 TES型マイクロ カロリーメーターで測定						
試料4				▲	前処理 TES型マイクロ カロリーメーターで測定					
試料5					▲	前処理 TES型マイクロ カロリーメーターで測定				

▲ : バイオアッセイ (便) 試料採取

TES型マイクロカロリー
メーター: 7日後に評価

化学分析: 10日後に評価

2.1 得られた成果 (29/29)

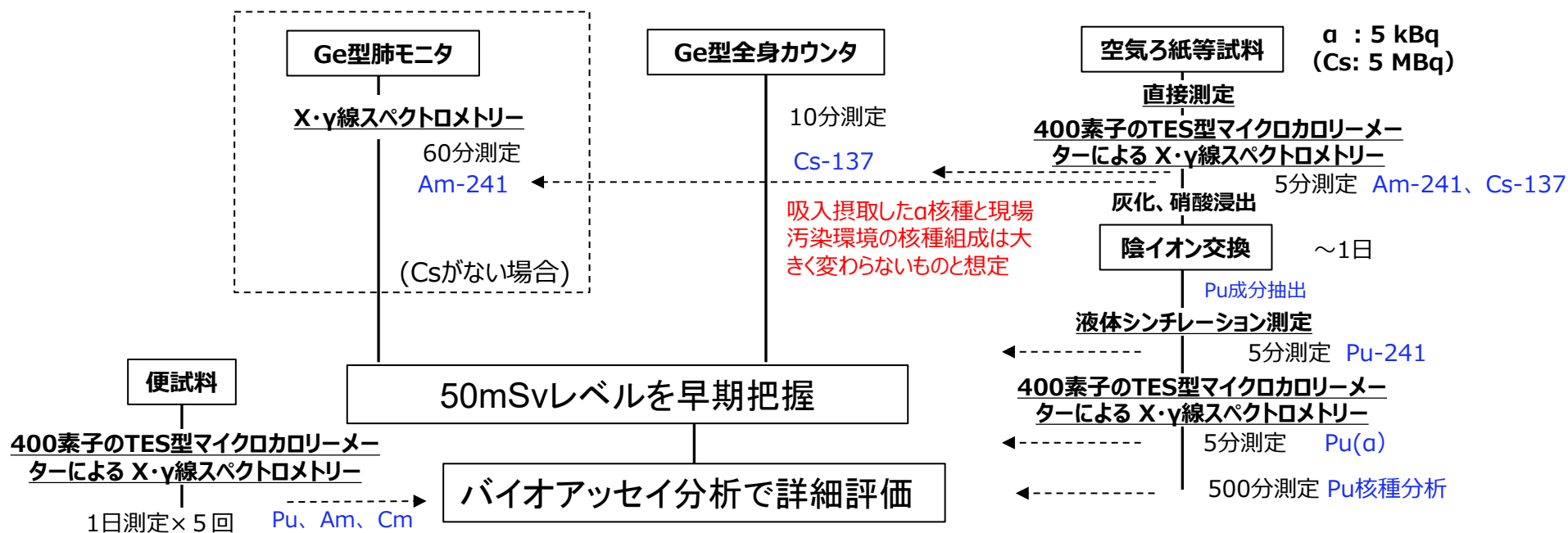
(4)多素子のTES型マイクロカロリーメーターによる測定方法の検討及び評価

Pu内部被ばくの検出精度向上への多素子のTES型マイクロカロリーメーターの適用に関する検討

- PuとCsを吸入した場合
 - Cs-137、134の影響のため肺モニタの直接測定は困難
- Pu等のα核種を吸入した場合(Csがない場合)
 - 既存の肺モニタからAm-241
 - 肺モニタ用TES型マイクロカロリーメーターは将来的な研究課題

➡ 既存WBCと空気ろ紙試料分析の測定結果からCs-137、134量を基にPu、Amを総合的に推定評価

➡ 既存肺モニタと空気ろ紙等試料分析の測定結果からAm-241量を基にPuを総合的に推定評価



2.2 目標に照らした達成度

実施項目	技術成熟度 (TRL)			
	現状評価	終了時目標	終了時自己評価	
TES型マイクロカロリーメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討	1 (実用化研究)	3 (応用研究)	3 (応用研究)	○

終了時目標：

多素子のTES型マイクロカロリーメーターによるプルトニウム測定方法の検討及び評価結果について報告する。

終了時自己評価：

多素子のTES型マイクロカロリーメーターの内部被ばく線量評価への適用についてシミュレーション計算によりの可能性を具体化、高度化の可能性を示すことができた。

2.3 成果の反映先とその寄与

- 多素子のTES型マイクロカロリメーター適用は内部被ばく線量評価におけるプルトニウム測定の高度化の応用研究を進めるための基礎となる。研究開発を進めることで最終的には、従来の内部被ばくプルトニウム測定手法の更なる効率化、合理化へつながることが可能と考える。
- 多素子化等のデバイスの開発の進捗がカギとなるが、実用化の可能性は高く、内部被ばく線量評価への適用のために実験確認等を着実に進めることが今後考えられる。

2.4 現場への適用性（難易度）

- 多素子のTES型マイクロカロリメーターの開発の実用化は着実に進むと予想されるものの、開発された機器が安定的に動作するための製造技術の成熟に時間が必要。現場への適用については時間の予測は難しい。
- 断熱消磁冷凍機で立ち上げに1日、測定に数時間から数日間、再冷却に6時間ほど。希釈冷凍機で立ち上げに1週間、約6ヶ月間連続運転。普段からの放射線管理での使用が考えられる。
- 測定装置は製品化されてないためコストは明確ではない。冷凍機関連のコストが大きい。ため、測定装置はトータルで冷凍機の2倍程度（～2億円）と推測するが、従来の化学分析のコストに対して工程数、人工数の削減等のメリットが考えられる。

3. 今後の課題

- 多素子のTES型マイクロカロリメーターのデバイス開発は進んでいるものの、国内外の超伝導デバイスの製作可能な組織は限られ、開発進捗や実用化時期の予測は難しい。また、世代交代の時期にも差し掛かっており、実用化開発や人材育成の着実な継続が課題として考えられる。
- 現状、 $13 \times 13 \sim 26 \times 26$ mm 面積相当のTES型マイクロカロリメーターの多素子化の見通しが得られているが、既存放射線検出器の検出面積に比べれば、十分ではない。TES型マイクロカロリメーターの大規模多素子化（大面積化）は段階的に研究開発されることが考えられる。継続的な研究が必要である。

事業内容

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

1.概要

1.1 背景（現状の課題）

管理区域内等で採取したろ紙試料には、放射性物質と共に塵埃や水分等が付着している。付着する物質や量によっては放射線が付着物により遮蔽され、正確な放射能測定ができなくなり、内部被ばく等の評価精度が低下してしまう可能性がある。

そのため実際のろ紙付着物の状態（ろ紙への付着状態・付着する物質・付着している核種・ろ紙への潜り込み等）を考慮した影響を評価し、現場の放射線管理へ反映させることが重要であるが、それらに関する具体的な評価などは行われていないのが現状である。

1.2 目的（課題の解決策）

実際のろ紙付着物の状態が放射能測定へ与える影響を評価するために以下を実施する。

・計算シミュレーションによるろ紙付着物が放射能測定へ与える影響の評価

水分や粉体などを含めたるろ紙試料の形状をモデリングした放射線輸送計算コードを用いて α 線及び β 線の検出器応答を計算し、放出される α 線・ β 線のエネルギーやろ紙上に蓄積した物質の厚さなどのパラメータサーベイを行うことで、実際のろ紙付着物の状態を考慮したろ紙測定に係る精度・不確かさを評価する。

また、ろ紙状線源を製作し、そのろ紙上に水分や粉体を模擬したシートの厚さを変化させて配置することで、全 α ・ β 放射能測定への影響を確認するとともに、前述の計算による評価のベンチマークを行う。

なお、ろ紙付着物による影響という観点では、空気ろ紙・鼻スミヤろ紙・スミヤろ紙とも、その影響は同じになると考えられるため、今回は空気ろ紙に主眼をおいて研究を進めた。

1.3 目標（技術成熟度）

実施項目と技術成熟度：

実施項目	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
計算シミュレーションによるろ紙付着物が放射能測定へ与える影響の評価	3(応用研究)	4(実用化研究)

終了時目標：

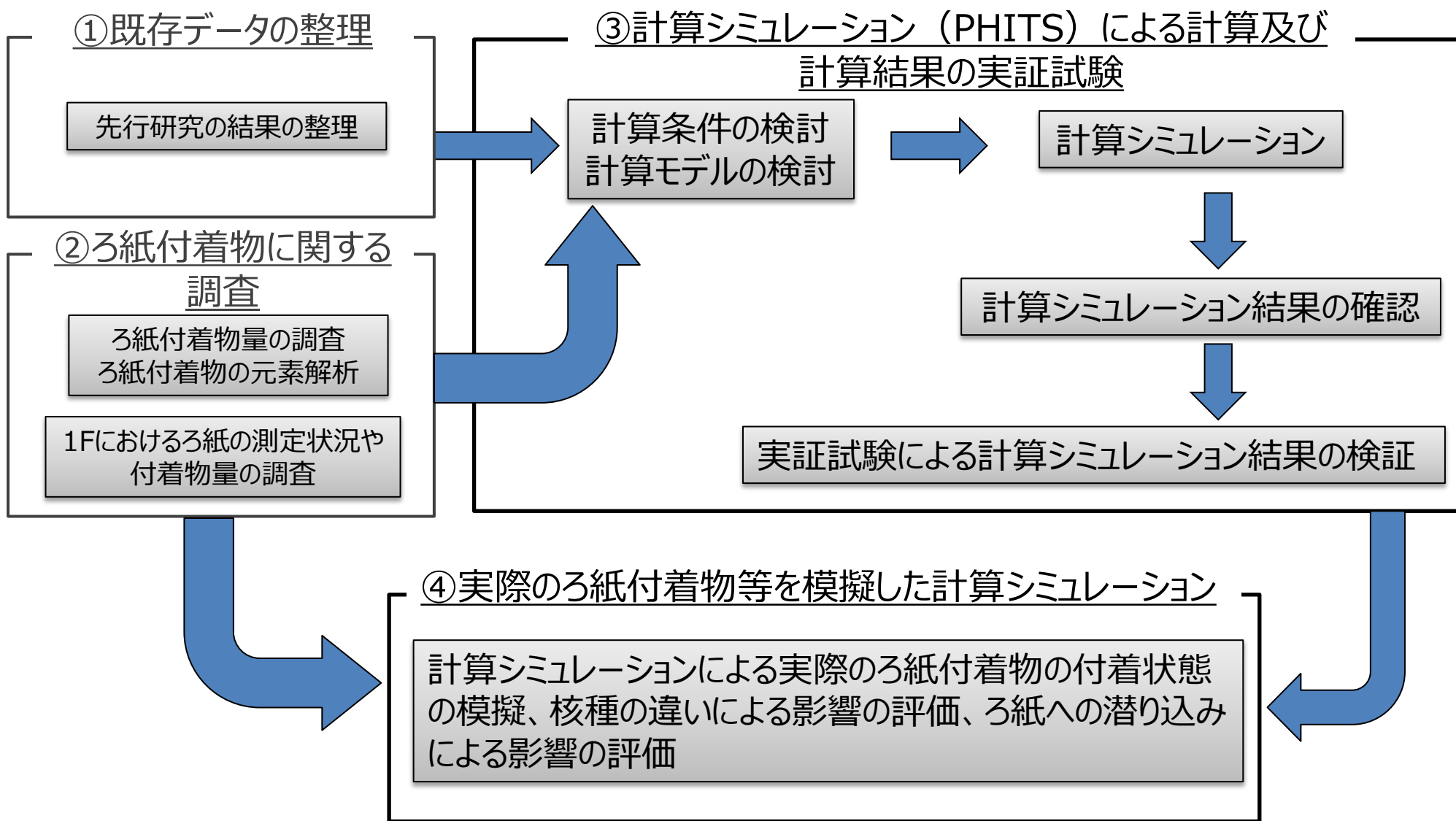
ろ紙付着物が、ろ紙の放射能測定に与える影響の評価結果（技術情報）を提供する。

終了時に得られる成果物：

ろ紙付着物が、ろ紙の放射能測定に与える影響の評価結果（技術情報）

- ▶ 実際のろ紙付着物の付着状態が放射能測定に与える影響の評価
- ▶ 付着している核種の違いによる影響の評価
- ▶ ろ紙付着物がろ紙へ潜り込むことによる影響の評価

1.4 研究フロー



2. 実績

2.1 得られた成果 詳細は次ページ以降

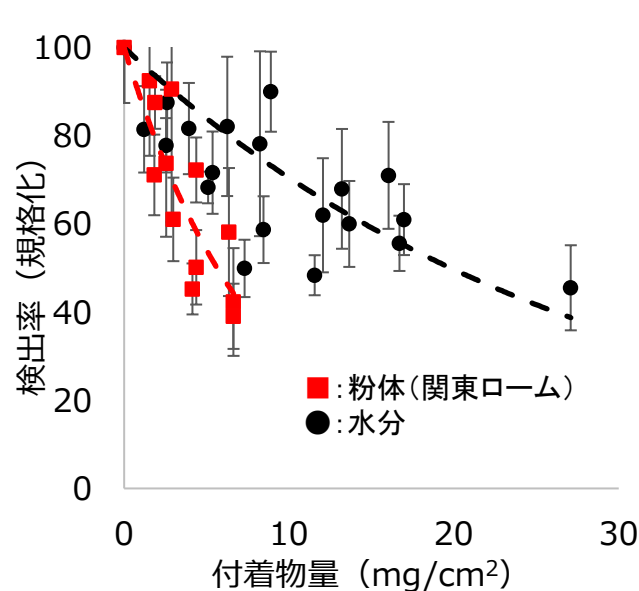
- (1) 既存データの整理
 - 既存データ（先行研究）の整理
- (2) ろ紙付着物に関する調査
 - ① ろ紙付着物量の調査
 - ② ろ紙付着物の観察（電子顕微鏡）
 - ③ 東電からのインプット
- (3) 計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験
 - ① PHITSによるろ紙付着物量と放射線の検出率の評価
 - ② 実証試験によるPHITS計算結果の検証
- (4) 実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション
 - ① 実際のろ紙付着物の付着状態を模擬した計算シミュレーション
 - ② 付着している核種の違いによる影響の検証
 - ③ ろ紙への潜り込みによる影響の検証

2.1 得られた成果（1／32）

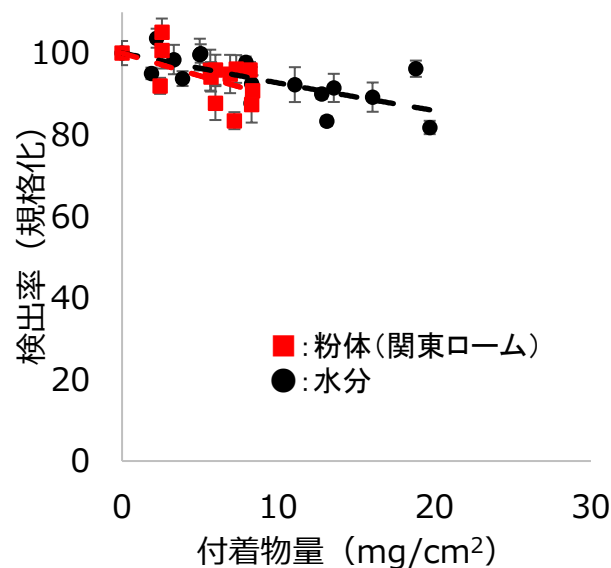
(1) 既存データの整理

● 既存データ(先行研究)の整理

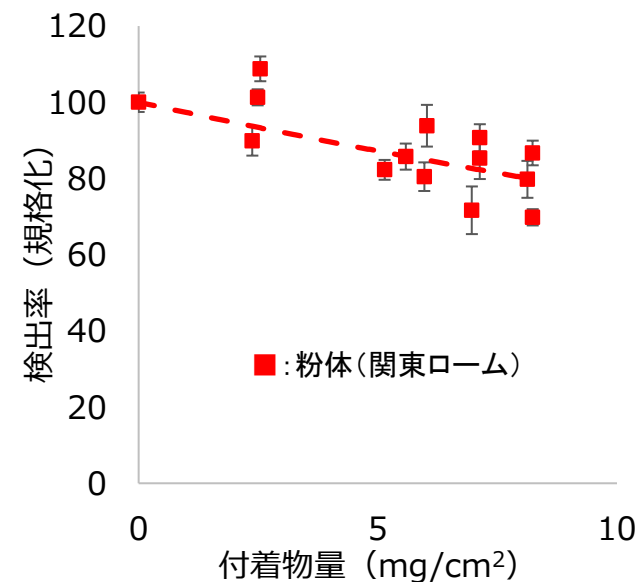
先行研究において測定したデータを再度整理し、粉体（関東ローム）及び水の付着物量（質量厚さ: mg/cm^2 ）と、Am-241（ α 線）、Sr-90/Y-90（ β 線）、Cs-137（ β 線）の放射線の検出率（付着物量が $0 \text{ mg}/\text{cm}^2$ の時の検出率を100と規格化したもの）の関係を求めた。この結果は、計算シミュレーションのベンチマークとして利用した。



Am-241 (α 線)



Sr-90/Y-90 (β 線)



Cs-137 (β 線) ※

2.1 得られた成果（2／32）

(2)ろ紙付着物に関する調査

①ろ紙付着物量の調査

ろ紙付着物量による影響評価のため、JAEA 核燃料サイクル工学研究所においてサンプリングした空気ろ紙試料（屋内：作業環境モニタリング用、屋外：環境モニタリング用）における、塵埃等の付着物量調査を実施した。

◎調査方法

- (1) サンプリング前の新品空気ろ紙（HE-40T）を乾燥させ、その重量を測定する（重量①）。
- (2) 所定のサンプリングポイントにてサンプリングを行う。
（核燃料サイクル工学研究所では採取期間：1週間、流量：約55 L/min）
- (3) サンプリング後の空気ろ紙の重量を測定する（重量②）。
- (4) サンプリング後の空気ろ紙を乾燥させ、その重量を測定する（重量③）。
- (5) 測定したろ紙の重量から、以下の式によりろ紙付着物量（mg/cm²）を算出する。

$$\text{ろ紙付着物量(塵埃)} [\text{mg}/\text{cm}^2] = \frac{\text{重量③ (mg)} - \text{重量① (mg)}}{\text{ろ紙面積 (cm}^2\text{)}}$$

$$\text{ろ紙付着物量(水分)} [\text{mg}/\text{cm}^2] = \frac{\text{重量② (mg)} - \text{重量③ (mg)}}{\text{ろ紙面積 (cm}^2\text{)}}$$

2.1 得られた成果（3／32）

(2)ろ紙付着物に関する調査

①ろ紙付着物量の調査

◎ 調査結果

ろ紙付着物量（塵埃）屋内

▶採取箇所

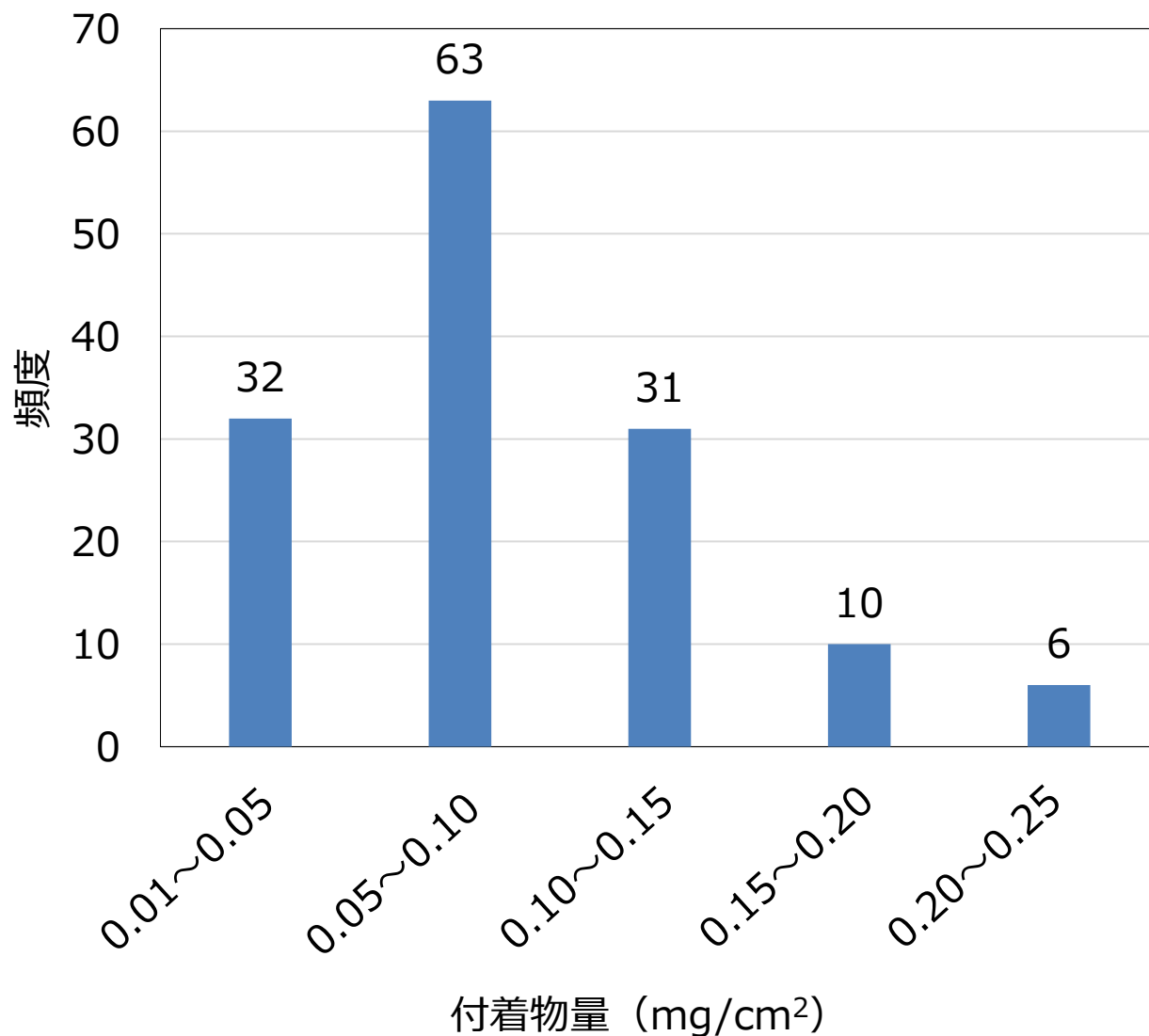
●核燃料サイクル工学研究所
管理区域内（採取期間：1週間）

調査数：142箇所

▶対数正規分布と仮定した場合、

平均値 0.08 mg/cm^2

（片側95%上限値 0.19 mg/cm^2 ）



2.1 得られた成果（4／32）

(2)ろ紙付着物に関する調査

①ろ紙付着物量の調査

◎調査結果

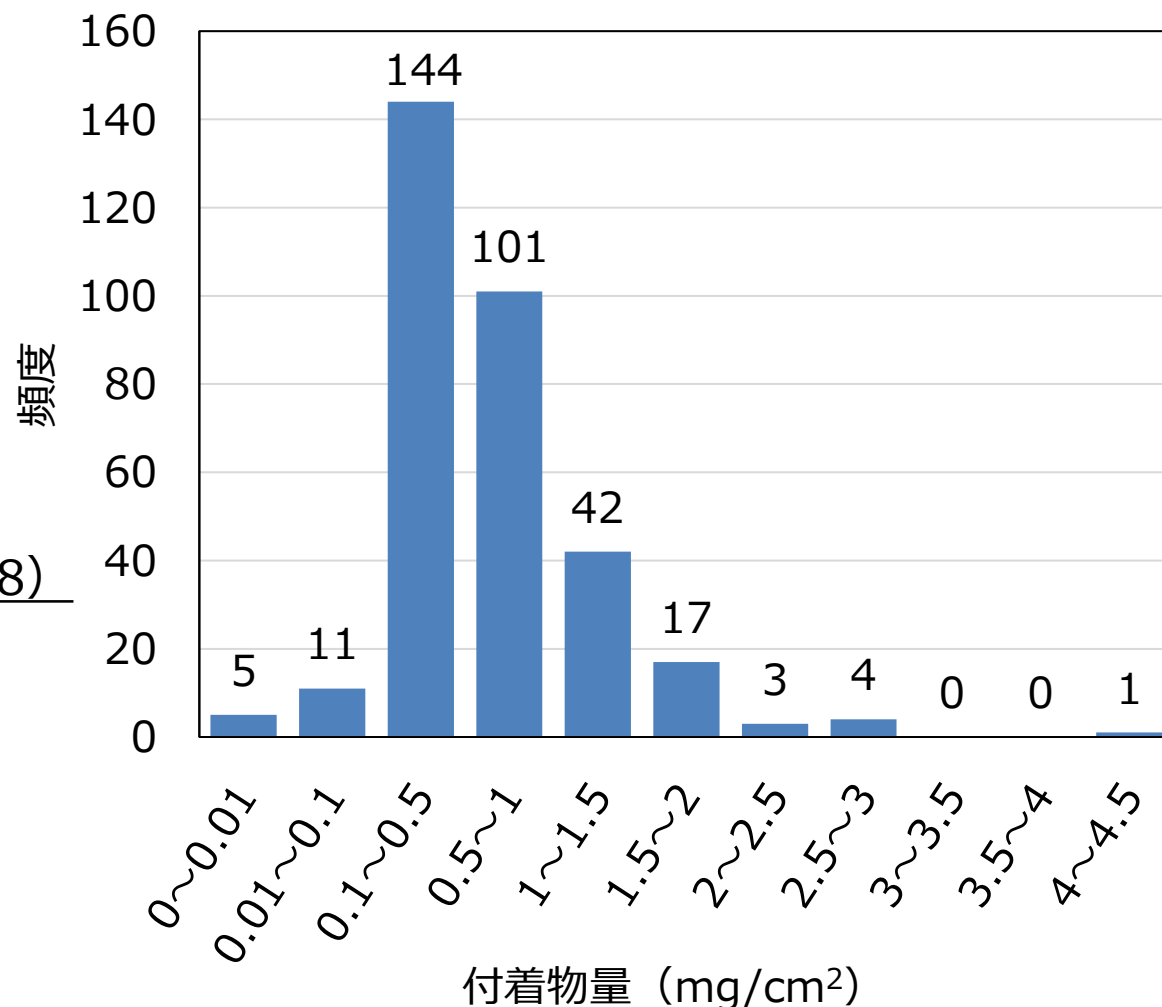
ろ紙付着物量（塵埃）屋外

▶採取箇所

●核燃料サイクル工学研究所

▶ 周辺監視区域内外(非管理区域)
(採取期間：1週間)

調査数：8箇所×41週分（計：328）



▶対数正規分布と仮定した場合、

平均値 0.49 mg/cm²

(片側95%上限値 2.05 mg/cm²)

屋内よりも屋外でサンプリングしたろ紙のほうが、ろ紙付着物が多いことが確認できた。

2.1 得られた成果（5／32）

(2)ろ紙付着物に関する調査

①ろ紙付着物量の調査

◎ 調査結果

ろ紙付着物量（水分）屋内

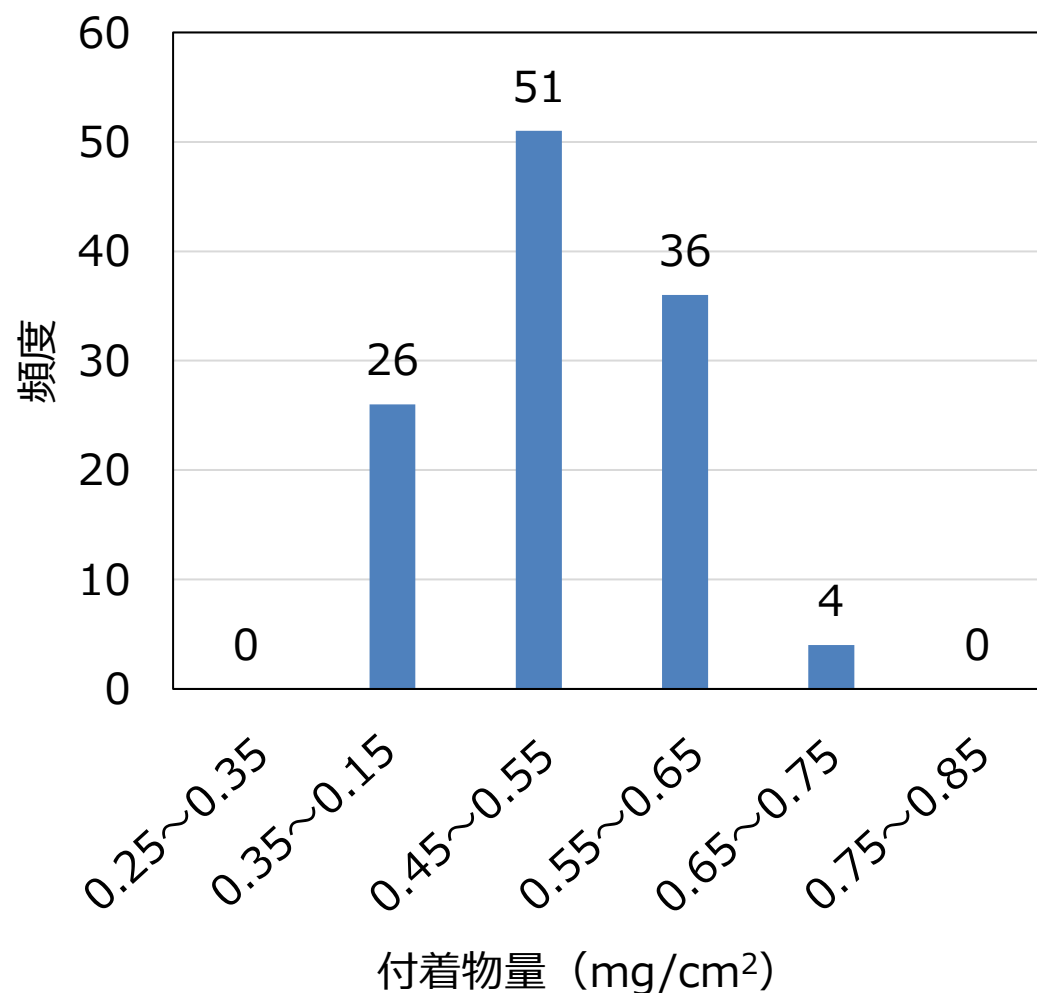
▶採取箇所

●核燃料サイクル工学研究所
管理区域内（採取期間：1週間）

調査数：117箇所

▶平均値 0.52 ± 0.08 mg/cm²

▶ろ紙のみに含まれる水分量(予備試験より)
 $\Rightarrow 0.50 \pm 0.08$ mg/cm²



本調査結果と、ろ紙のみに含まれる水分量(予備試験結果)がほぼ同等であるため、
塵埃に含まれる水分はほぼ存在しないと推定される。

2.1 得られた成果（6／32）

(2)ろ紙付着物に関する調査

②ろ紙付着物の観察（電子顕微鏡）

JAEA 核燃料サイクル工学研究所 管理区域内にてサンプリングした空気ろ紙試料の表面状態を走査型電子顕微鏡（SEM）により観察し、付着物の粒径等を調査した。

付着物量（塵埃）：0.04 mg/cm²

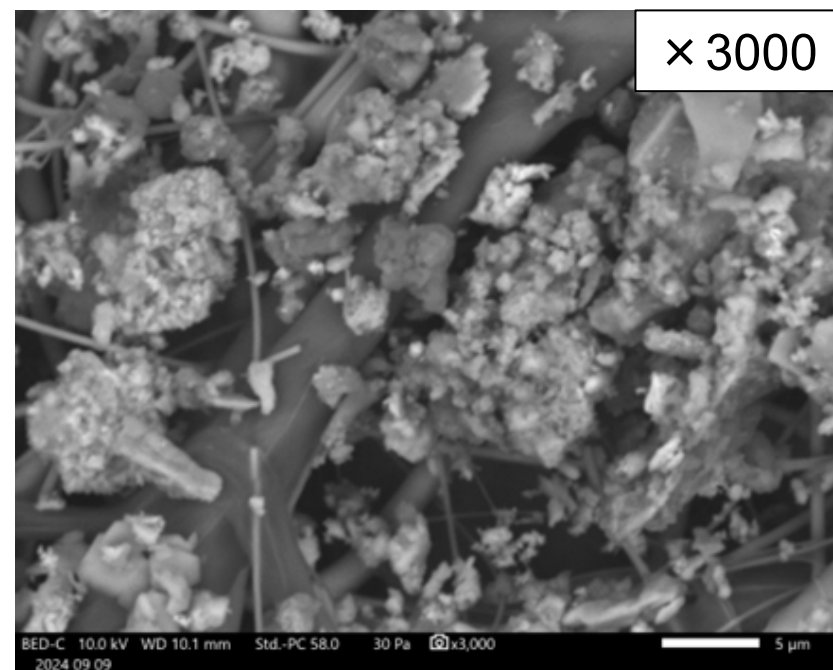
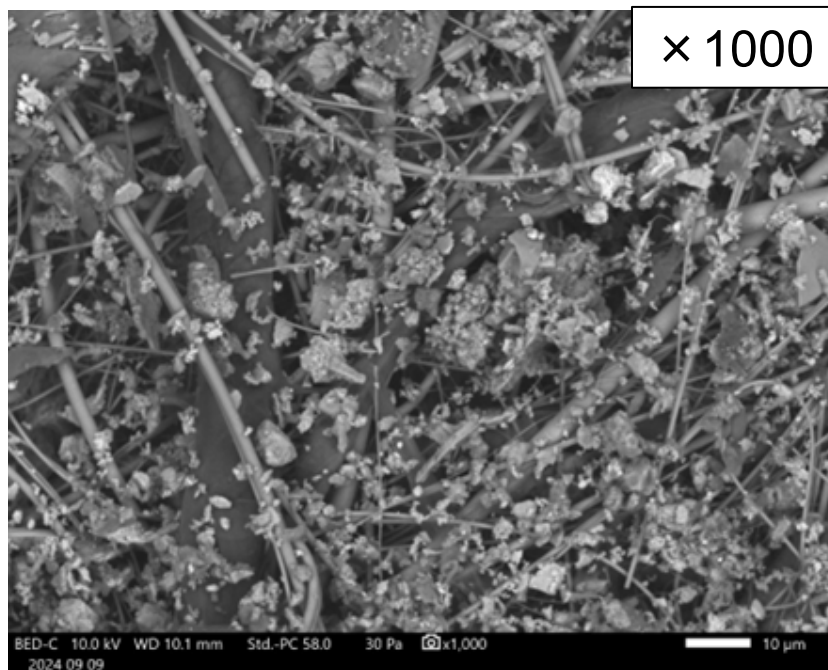


2.1 得られた成果（7/32）

(2)ろ紙付着物に関する調査

②ろ紙付着物の観察（電子顕微鏡）

付着物量（塵埃）：0.22 mg/cm²



粒径が2 μm～10 μm程度の粒子がろ紙表面全体に付着していることが確認できた。
（1Fにおける空気力学的放射能中央径（AMAD）は2 μm～7 μm）

2.1 得られた成果（8／32）

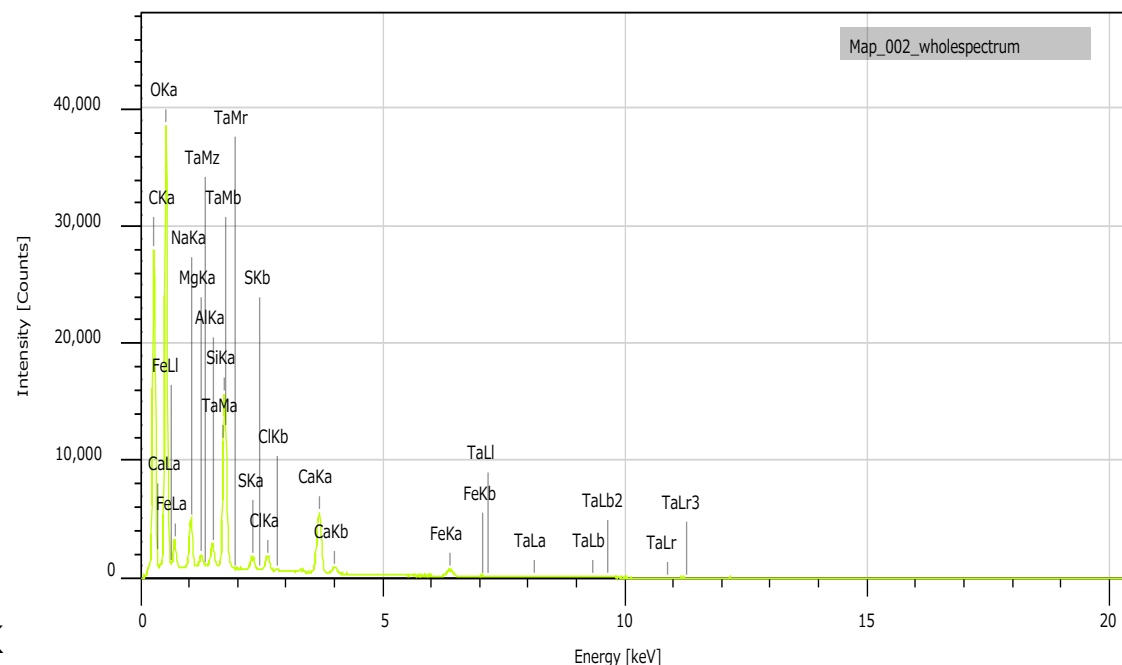
(2)ろ紙付着物に関する調査

②ろ紙付着物の観察（電子顕微鏡）

走査型電子顕微鏡（SEM）により、ろ紙付着物の元素解析（定性分析）を行った。



■ C-K ■ O-K ■ Na-K ■ Mg-K ■ Al-K ■ Si-K
■ S-K ■ Cl-K ■ Ca-K ■ Fe-K



定性分析の結果、SiやCa、Fe等のピークが確認された。
これらは、土壌や建屋構造物に含まれる成分がろ紙に付着したものであると推察される。

2.1 得られた成果（9／32）

(2)ろ紙付着物に関する調査

③東電からのインプット ●東電から以下の内容について情報提供していただいた。

測定に使用している放射能測定装置の型式、仕様等



- α線β線同時計数装置【αβ】
型式：JDC-5300
製造メーカー：日立製作所（アロカ）
- 測定線種：α線、β線
 - α線用にZnS(Ag)シンチレータ、β線用にGM計数管を用いたスクーラで、自動で試料を交換し、連続的にα線とβ線の同時測定を行う
 - 自動で汚染密度を計算するときのBG測定は測定皿を入れない状態での測定になっている



- β線自動測定装置【PLSC】
型式：JDC-5200
製造メーカー：日立製作所（アロカ）
- 測定線種：β線
 - 測定レンジ：0～999999カウント
 - プラスチックシンチレータ検出器を使用
 - 直径50.6 mm以内の試料皿及び直径60 mm以内の集じん用ろ紙などの試料を、サンプルチェンジャを使って最大50試料までβ線を自動的に測定可能

1Fにおけるろ紙付着物量の調査

『得られた成果（2／32）』に記載した方法で、1F構内の比較的付着物量が多い地点におけるろ紙付着物量の調査を東電に行っていただいた。

▶採取箇所 1F 2・3号西側交差点(屋外)：1箇所

▶ろ紙付着物量 塵埃：0.62 mg/cm²、水分 0.45 mg/cm²

塵埃については、1F構内と核燃料サイクル工学研究所の屋外での調査結果と近い値が得られた。したがって、核燃料サイクル工学研究所で取得した調査結果で代用できると考える。

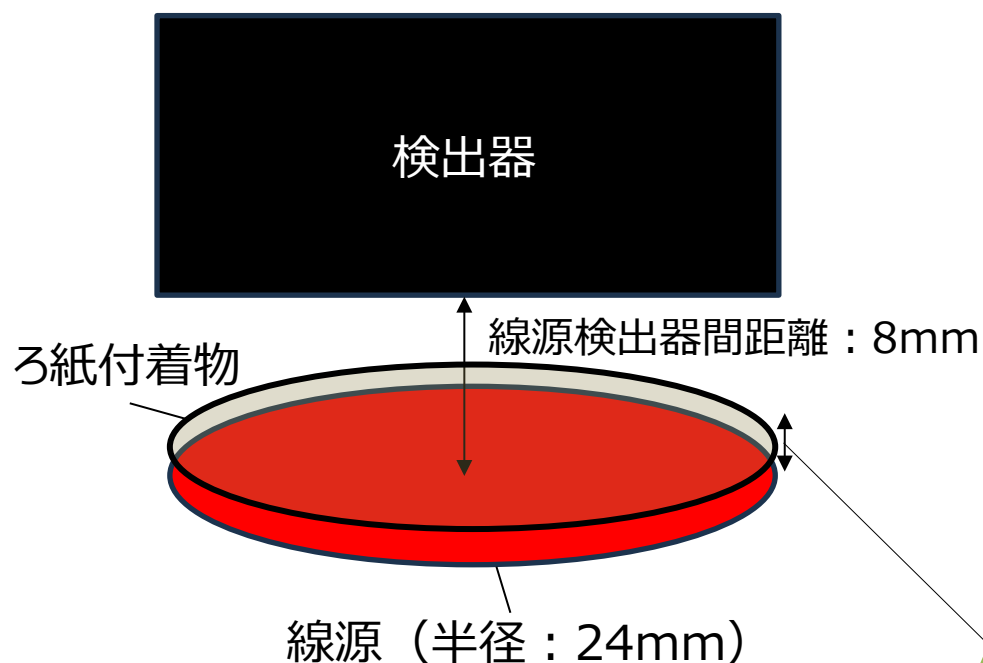
2.1 得られた成果（10／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

①PHITSによるろ紙付着物量と放射線の検出率の評価

PHITS（Ver.3.26）を用いて、ろ紙付着物量を変化させた場合の放射線の検出率を評価し、先行研究結果及び新たに行った実証試験の結果（後述）を用いてベンチマークを行った。

◎計算体系



○ろ紙付着物質の種類

- ・粉体 (SiO_2) : 3.0 g/cm^3
- ・水 (H_2O) : 1.0 g/cm^3

○核種

- ・ α : Am-241
- ・ β : Sr-90/Y-90、Cs-137

○検出器

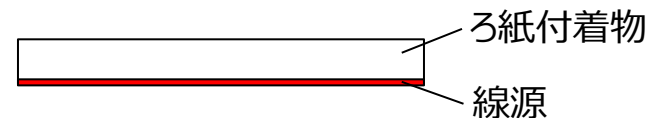
- ・ α : ZnS(Ag)シンチレータ
- ・ β : プラスチックシンチレータ

○シミュレーションの出力情報

エネルギーデポジット 10keV以上の反応数

○ろ紙付着物の配置

線源を一様に覆うように配置(下図)



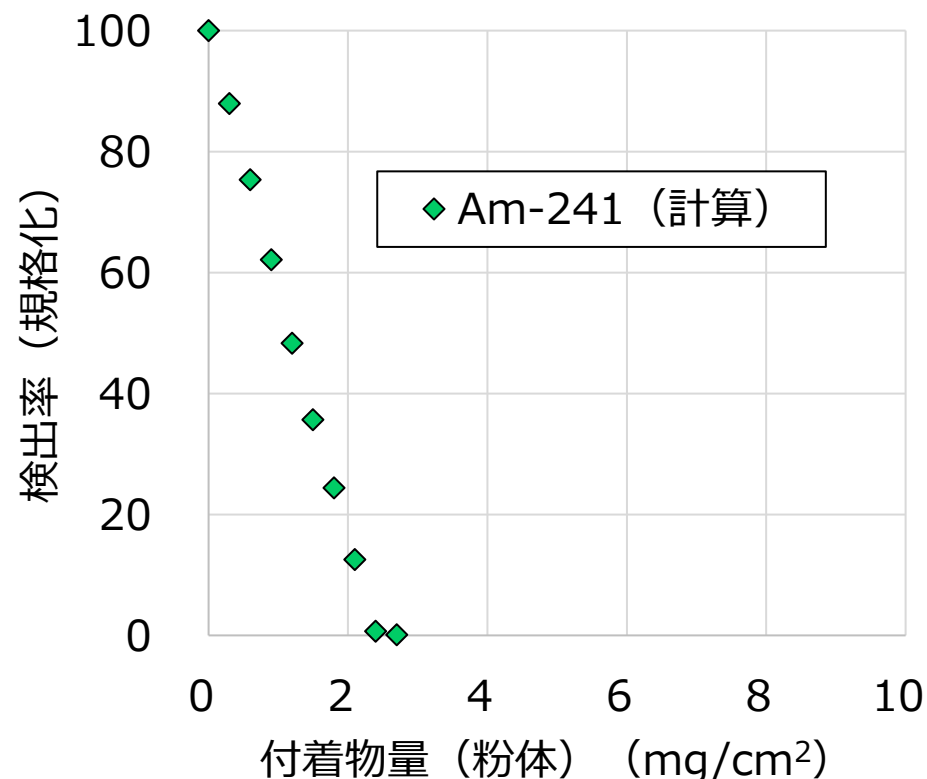
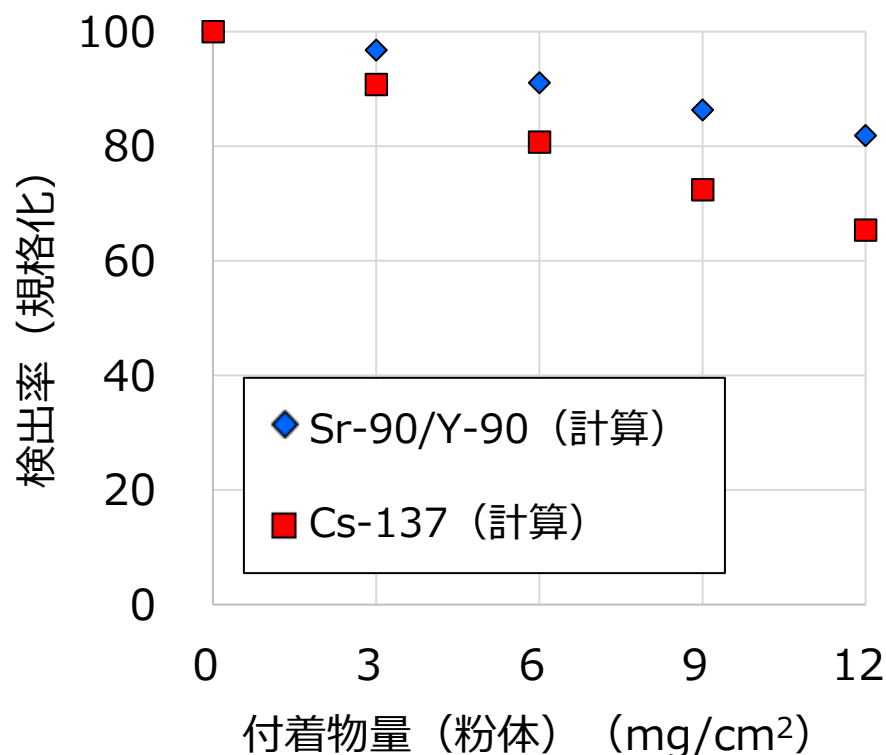
ろ紙付着物の厚さを変化させて計算

2.1 得られた成果（11／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

①PHITSによるろ紙付着物量と放射線の検出率の評価

◎計算結果 粉体（SiO₂）

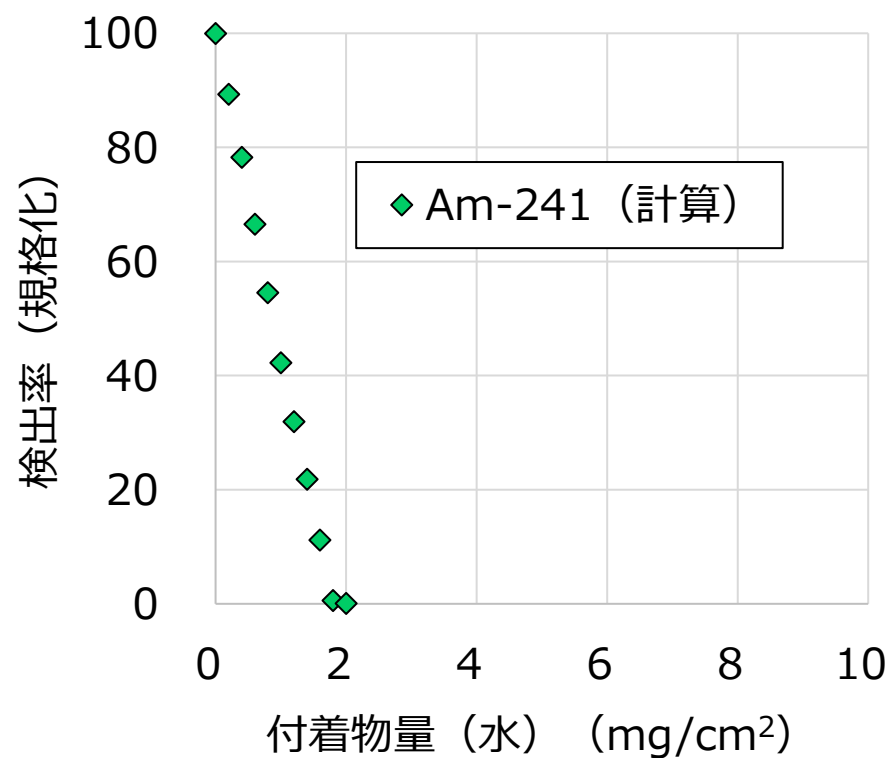
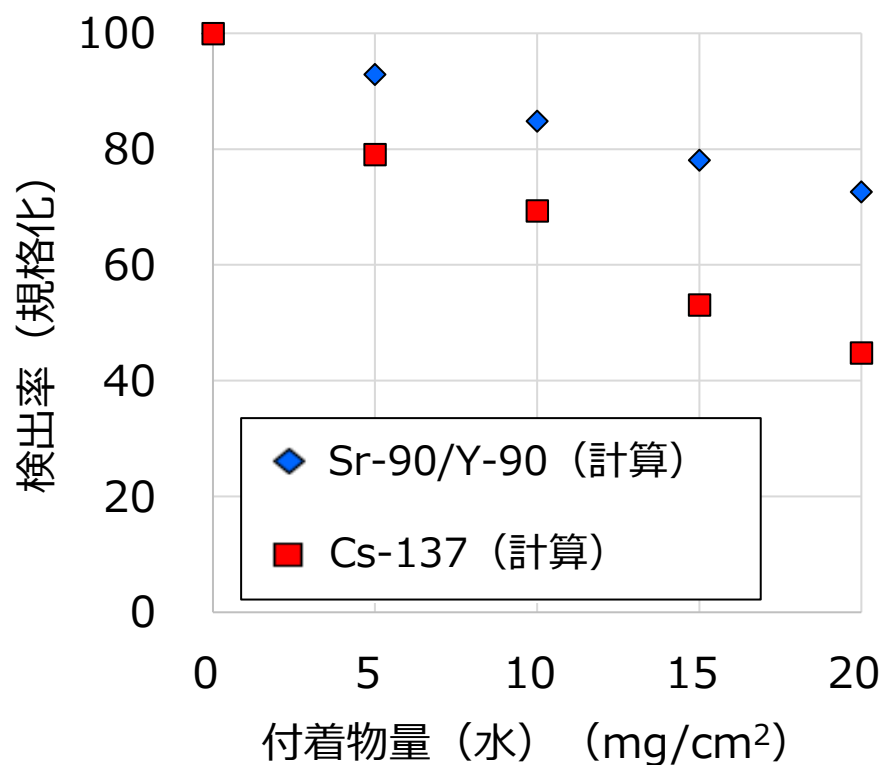


2.1 得られた成果（12／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

①PHITSによるろ紙付着物量と放射線の検出率の評価

◎計算結果 水



2.1 得られた成果（13／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

②実証試験によるPHITS計算結果の検証

実証試験により、『得られた成果（11／32）～（12／32）』で示したPHITS計算結果の検証を行った。

先行研究においては、RI溶液を浸透させたる紙を模擬汚染試料とし、その上に自己吸収体を想定した物体（粉体・水等）を載せて測定を行い、放射線の減衰等を確認した。しかし、課題として以下の項目が挙げられた。

- ▶ 模擬汚染試料上に粉体や水を均一に散布できなかった。
- ▶ RI溶液のろ紙への滴下が部分的であり、ろ紙全体に均一に浸透できていなかった。

そこで今回の研究では、以下の改善を行い実証試験を行った。

- ▶ 模擬汚染試料上に実際の粉体または水の代替として、質量厚さで模擬したシート状の物体を設置した。
- ▶ ろ紙全体に均一に浸透させることができる量のRI溶液をろ紙に滴下した。

先行研究時の
ろ紙付着物の状態



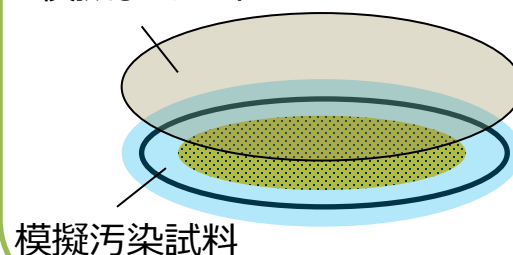
粉体



水

今回のろ紙状線源のイメージ

粉体または水を
模擬したシート



模擬汚染試料

2.1 得られた成果（14／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

②実証試験によるPHITS計算結果の検証

◎試験手順



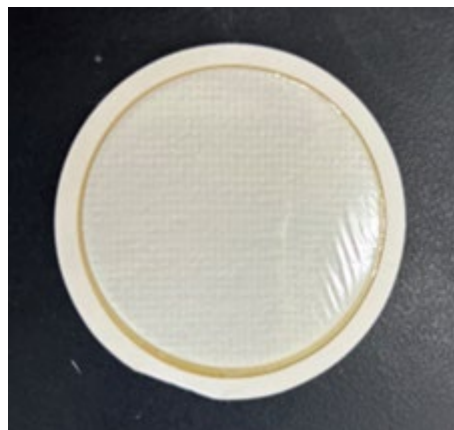
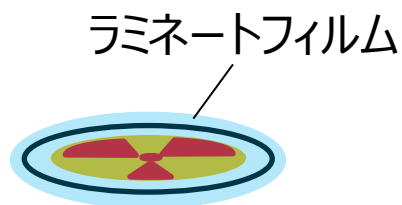
核種

α : Am-241

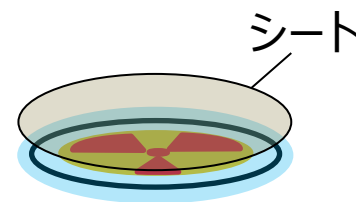
β : Sr-90/Y-90, Cs-137

放射性溶液を3ml滴下※し、ろ紙全体に均一に浸透させる。

※ ϕ 50 mmのろ紙全体に浸透する量



汚染拡大防止のため、ろ紙をラミネートフィルムで覆い、模擬汚染試料とする。



模擬汚染試料上に、粉体または水を模擬したシートを載せ、放射能測定を行う（5回繰り返し測定）。シートの枚数（付着物量）を増やしていき、測定値の変化を確認する。



使用した放射能測定装置
型式：JDC-R74-3000R1

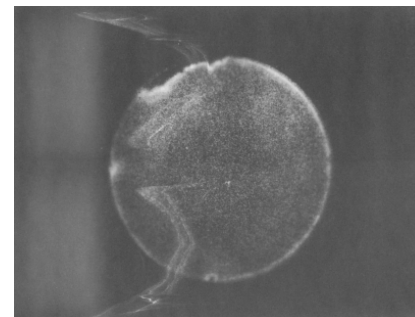
2.1 得られた成果（15／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

②実証試験によるPHITS計算結果の検証

◎使用した放射性溶液の放射能濃度

・Cs-137	: 16.8 Bq/mL
・Sr-90/Y-90	: 6.94 Bq/mL
・Am-241	: 16.8 Bq/mL



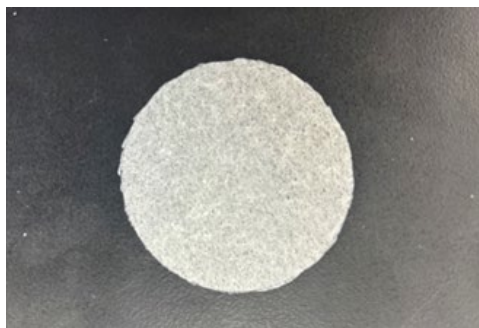
作製した模擬汚染試料の
オートラジオグラフィ写真（Am-241）

注) 画面左側の上部及び下部の筋状の発光は、シンチレータの傷によるもの

◎選定したシート

粉体を模擬したシート

アルミナ・シリカ混合シート



水を模擬したシート

ポリエチレンシート



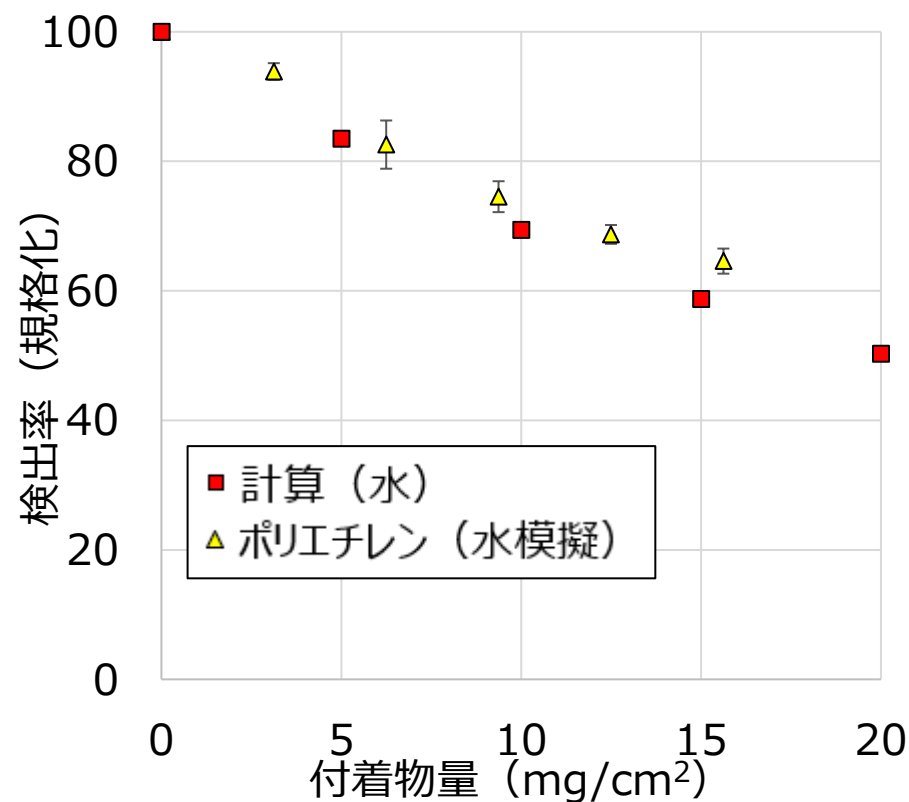
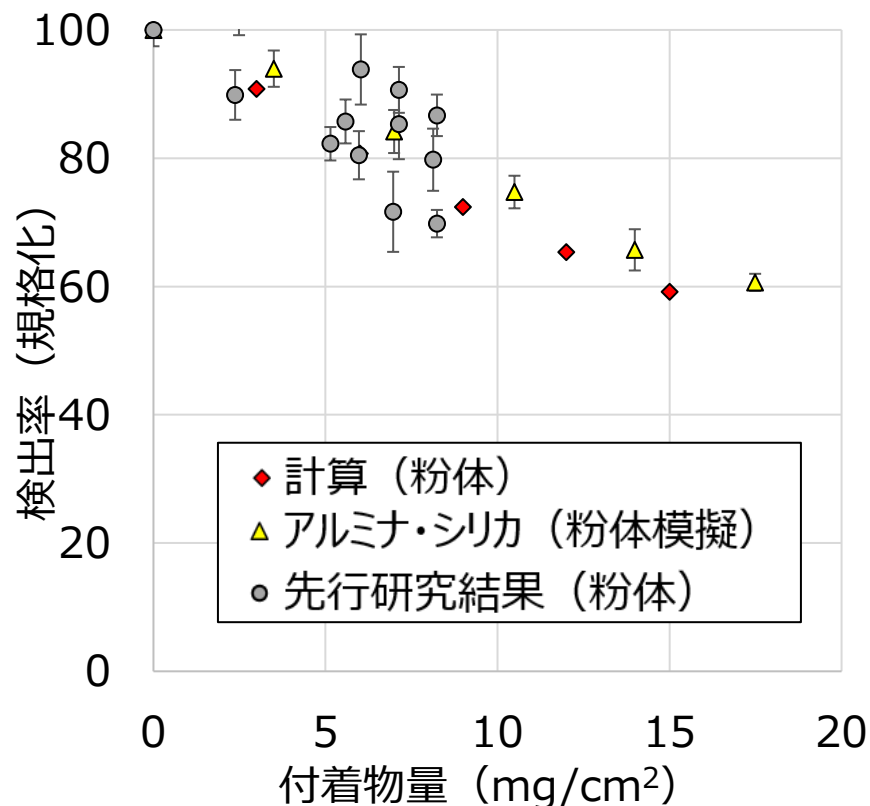
2.1 得られた成果（16／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

②実証試験によるPHITS計算結果の検証

・『得られた成果（11／32）～（12／32）』で示した計算シミュレーション結果と、実証試験結果及び先行研究結果を比較した。

◎ 試験結果 **Cs-137**※ 測定条件：2分間 5回測定

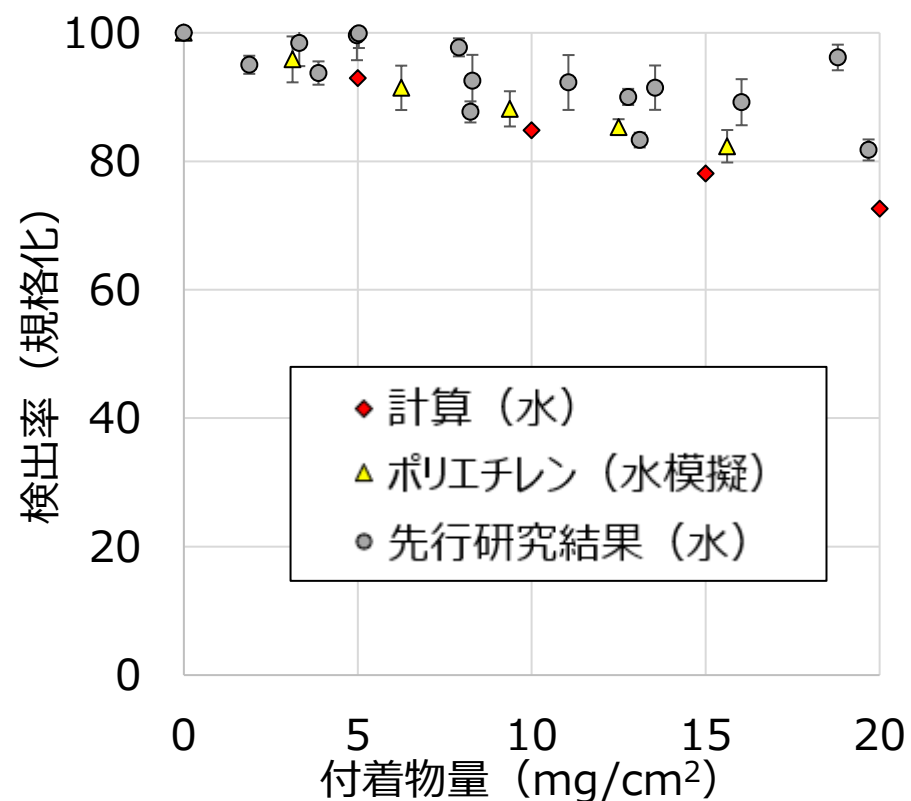
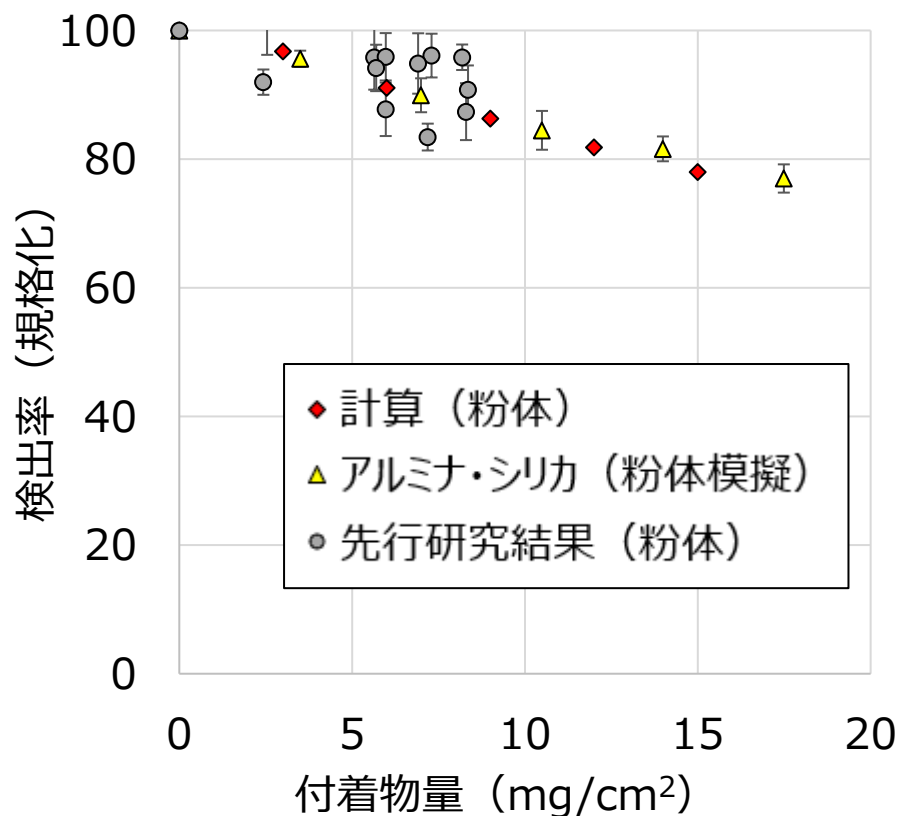


2.1 得られた成果（17／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

②実証試験によるPHITS計算結果の検証

◎試験結果 **Sr-90/Y-90** 測定条件：2分間 5回測定

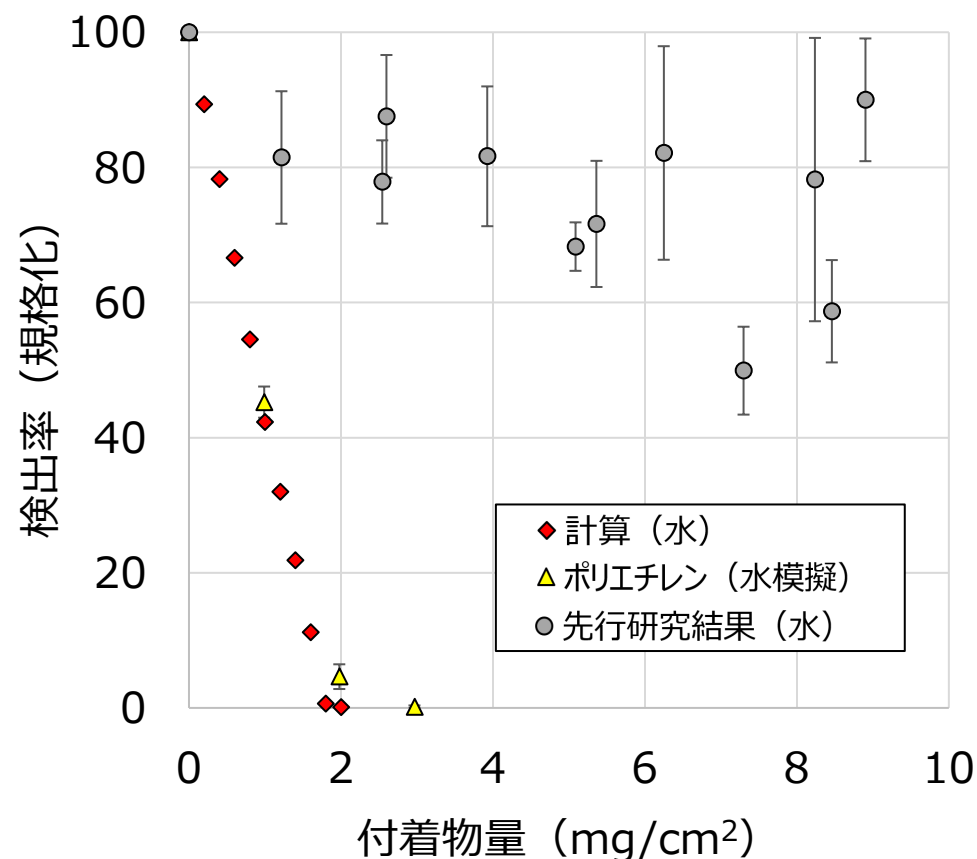
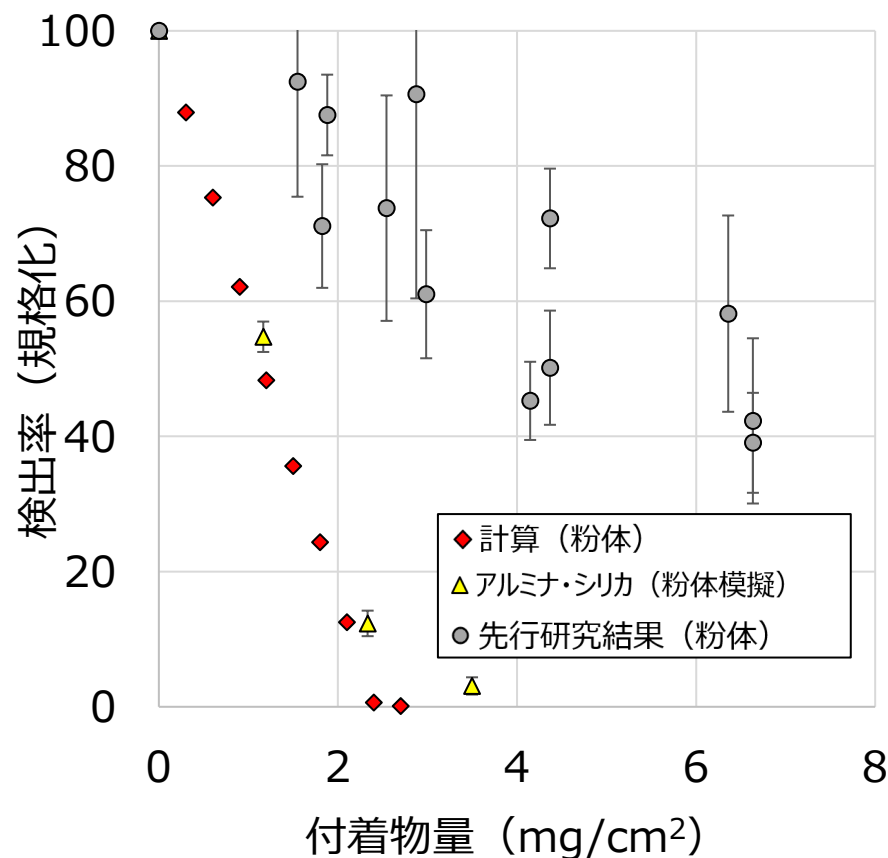


2.1 得られた成果（18／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

②実証試験によるPHITS計算結果の検証

◎試験結果 **Am-241** 測定条件：10分間 5回測定



2.1 得られた成果（19／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

②実証試験によるPHITS計算結果の検証

◎考察

- ▶計算シミュレーション（PHITS）による計算結果と実証試験結果がよく一致しているため
計算シミュレーションによる付着物の影響評価の手法は有効であると評価した。
- ▶Am-241の計算及び実証試験の結果に対して、先行研究結果は大きな差異が生じているが、これは先行研究においてはろ紙付着物を線源上に均一に散布できておらず、放射線がろ紙付着物により均一に遮蔽されていなかったためであると考えられる。
⇒ろ紙付着物が線源を一様に覆っていない（均質体系ではない）条件にて計算シミュレーションを行った（『得られた成果（20／32）～（21／32）』にて説明）。

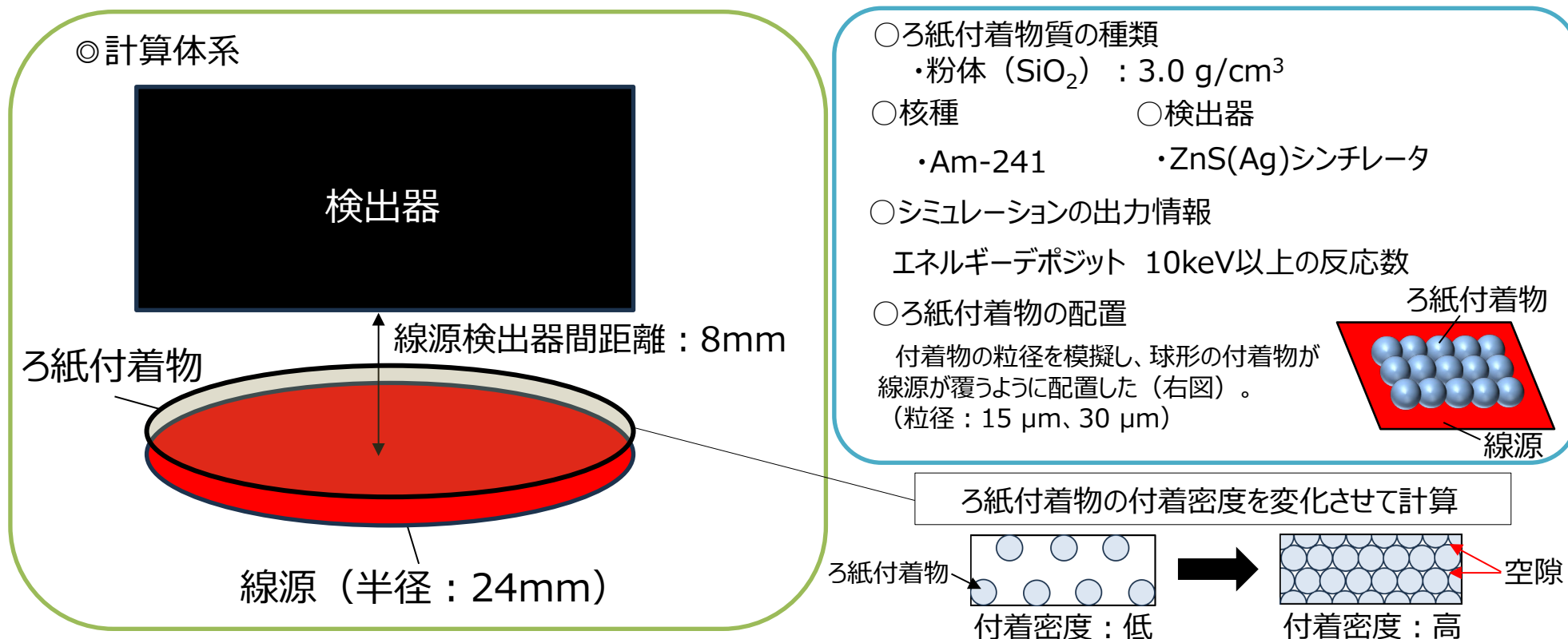
2.1 得られた成果（20／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

②実証試験によるPHITS計算結果の検証

◎付着物の粒径を模擬した計算シミュレーション（Am-241）

▶先行研究で用いた粉体は、線源上に均質に存在せず粒子間に隙間が生じているため、ろ紙付着物の粒径を模擬した体系（付着物が線源上に一様ではなく球状で並んでおり、空隙が生じている状態）にて計算シミュレーションを行った。

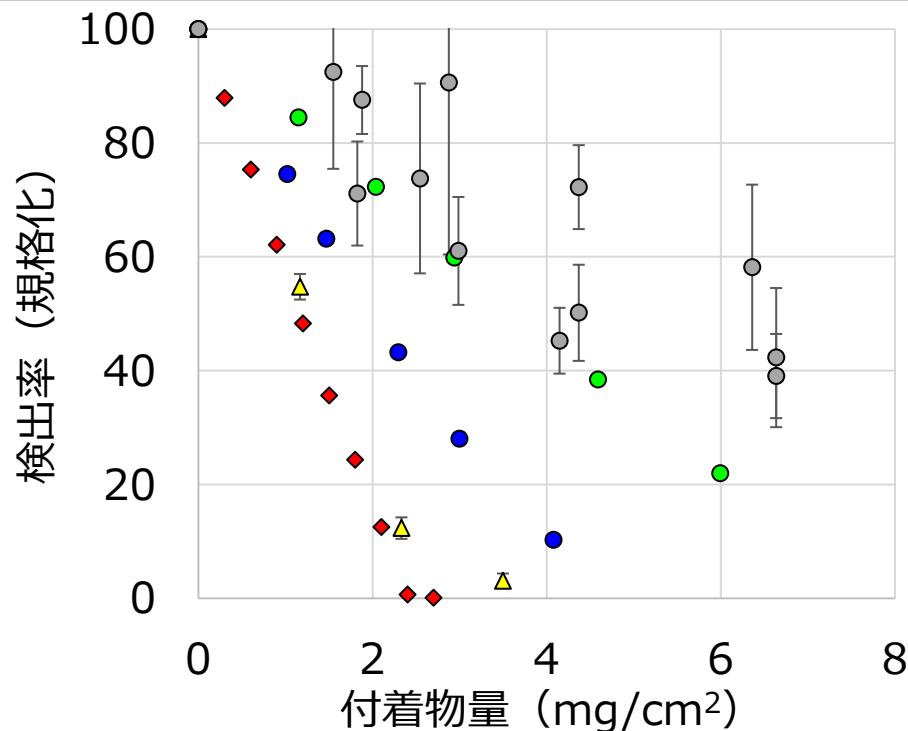
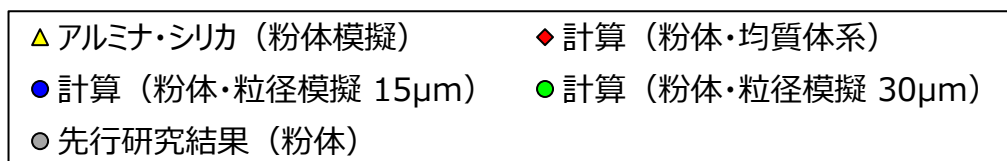


2.1 得られた成果（21／32）

(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験

②実証試験によるPHITS計算結果の検証

◎付着物の粒径を模擬した計算シミュレーション結果（Am-241）



▶付着物を均質体系で計算した時と比較して、検出率の減少傾向に緩やかになっていることが確認できる。これは、粒径を模擬した場合には付着物同士の上に空隙が生じ、その部分では放射線が遮蔽されていないためであると考えられる。

先行研究においても、付着物を線源上に均一に散布できていなかったため、均質体系での計算結果と差が生じたと考えられる。

⇒ただし、走査型電子顕微鏡（SEM）での観察結果では、ろ紙付着物はろ紙上に均一に採取されていることが確認されており、また、均質体系で評価した方がより保守的な評価となるため、本研究では均質体系を前提に評価を行うこととした。

2.1 得られた成果（22／32）

(4)実際のろ紙付着物を模擬した計算シミュレーション

実際のろ紙付着物の付着状態や核種等を考慮した計算シミュレーションを実施した。

①実際のろ紙付着物の付着状態を模擬した計算シミュレーション

▶ 先行研究及び『(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験』においては、平板線源上にろ紙付着物を配置し、付着物量の増加に伴う放射線の検出率の評価を行った。しかし、**実際には放射性のろ紙付着物がろ紙表面に堆積している状態である**と考えられる。また、走査型電子顕微鏡（SEM）によるろ紙付着物の元素解析（定性分析）の結果、**Si以外の物質**も確認されている。そのため、それらを模擬した計算体系を組み計算を行った。



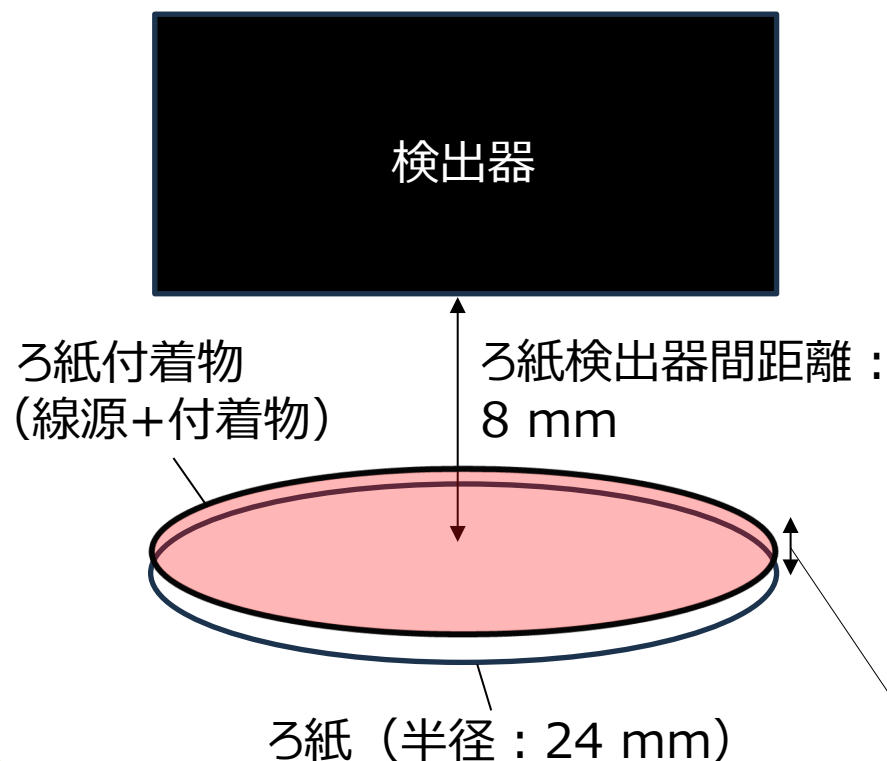
実際のろ紙付着物の状態
付着物量：0.22 mg/cm²

2.1 得られた成果（23／32）

(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

①実際のろ紙付着物の付着状態を模擬した計算シミュレーション

◎計算体系



○ろ紙付着物質の種類

- ・粉体 (SiO_2) : 3.0 g/cm^3
- ・粉体 (Fe_2O_3) : 3.0 g/cm^3
- ・水 (H_2O) : 1.0 g/cm^3

○核種

- ・ α : Am-241
- ・ β : Sr-90/Y-90、Cs-137

○検出器

- ・ α : ZnS(Ag)シンチレータ
- ・ β : プラスチックシンチレータ

○シミュレーションの出力情報

エネルギーデポジット 10keV以上の反応数

○ろ紙付着物の配置

ろ紙上に放射性の付着物（線源+付着物）を配置

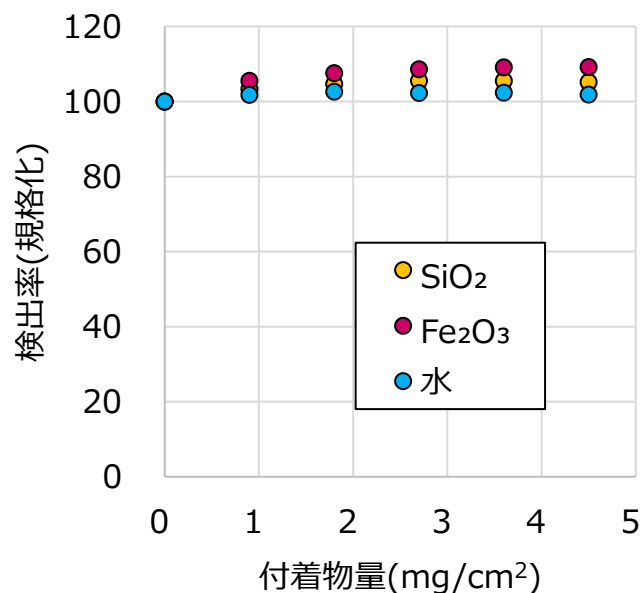
ろ紙付着物の厚さを変化させて計算

2.1 得られた成果（24／32）

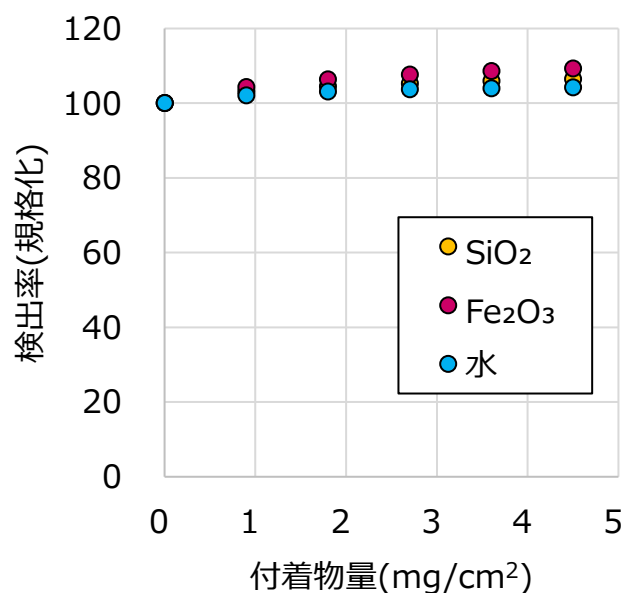
(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

①実際のろ紙付着物の付着状態を模擬した計算シミュレーション

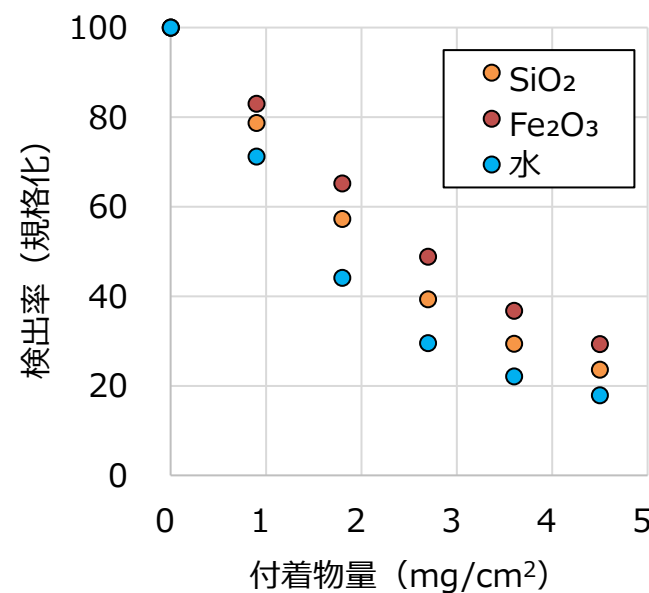
◎試験結果



Cs-137 (β 線)



Sr-90/Y-90 (β 線)



Am-241 (α 線)

- ▶ Cs-137及びSr-90/Y-90においては、ろ紙付着物量の増加に伴う検出率の減少は見られなかった（自己吸収と後方散乱・ビルドアップによるトレードオフによる影響と考えられる）。
- ▶ Am-241においては検出率の減少が確認されたが、『得られた成果（18／32）』で示した結果と比べ、検出率の減少傾向が緩やかとなった。

2.1 得られた成果（25／32）

(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

②付着している核種の違いによる影響の検証

▶ 先行研究及び『(3)計算シミュレーション（PHITS）による計算及び計算結果の実証試験』においては、1Fにおける主要核種であるCs-137、Sr-90/Y-90、Am-241を選定したが、実際にはそれ以外にも多くの核種が1Fに存在している。

そこで、1Fに存在していると考えられる核種（1F ALPSにて除染を行っている核種）のうち、東海再処理施設における受け入れ時の使用済み燃料（燃焼度 28GWD/ t、冷却期間13年）のORIGEN計算を参考にし、核種存在比が比較的高い核種からβ線最大エネルギーでバリエーションが出るように、以下の核種を選定して計算を行った。

核種	β線最大エネルギー（MeV）
Pm-147	0.224
Eu-154	0.25～0.84
Cs-137	0.514
Sr-90/Y-90	2.282
Ru-106/Rh-106	3.541

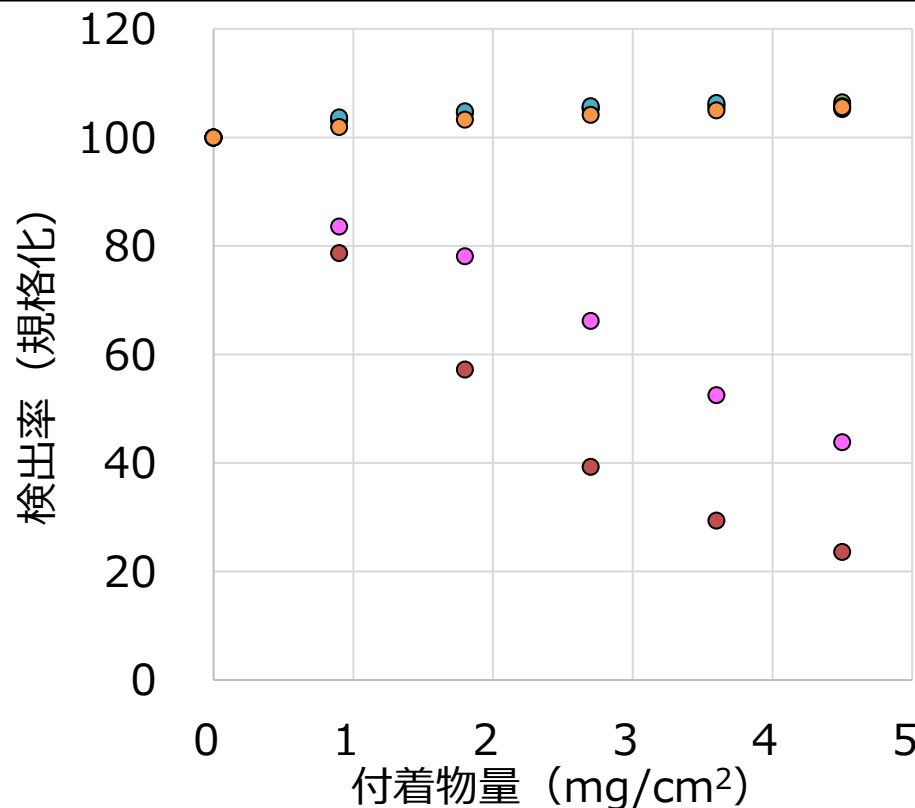
2.1 得られた成果（26／32）

(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

②付着している核種の違いによる影響の検証

◎ 計算結果 計算体系は『得られた成果（23／32）』と同様、ろ紙付着物質は SiO_2 を選定した。

● Am-241	● Cs-137	● Sr-90/Y-90
● Pm-147	● Eu-154	● Ru-106/Rh-106



▶ エネルギーが高いβ線核種においては、付着物量の増加による検出率の減少は見られなかった。

▶ 一方、エネルギーが低いβ線核種（Pm-147）においては、付着物量の増加による検出率の減少が確認された。

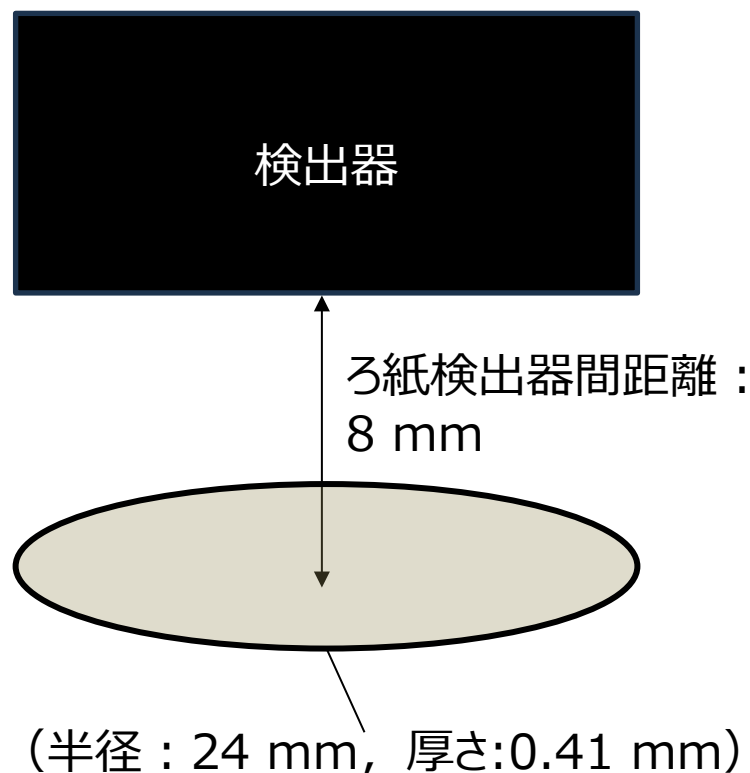
2.1 得られた成果（27／32）

(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

③ろ紙への潜り込みによる影響の検証

▶ろ紙付着物（核種）のろ紙への潜り込みによる影響について計算し評価を行った。

◎計算体系



○ろ紙付着物質の種類

・セルロース($C_6H_{10}O_5$) : 0.35 g/cm³

○核種

・ α : Am-241

・ β : Sr-90/Y-90、Cs-137

○検出器

・ α : ZnS(Ag)シンチレータ

・ β : プラスチックシンチレータ

○シミュレーションの出力情報

エネルギーデポジット 10keV以上の反応数

○線源の配置

放射性の付着物（線源）の位置をろ紙表面からろ紙内部方向（深さ方向）へ拡大させて計算を行った。

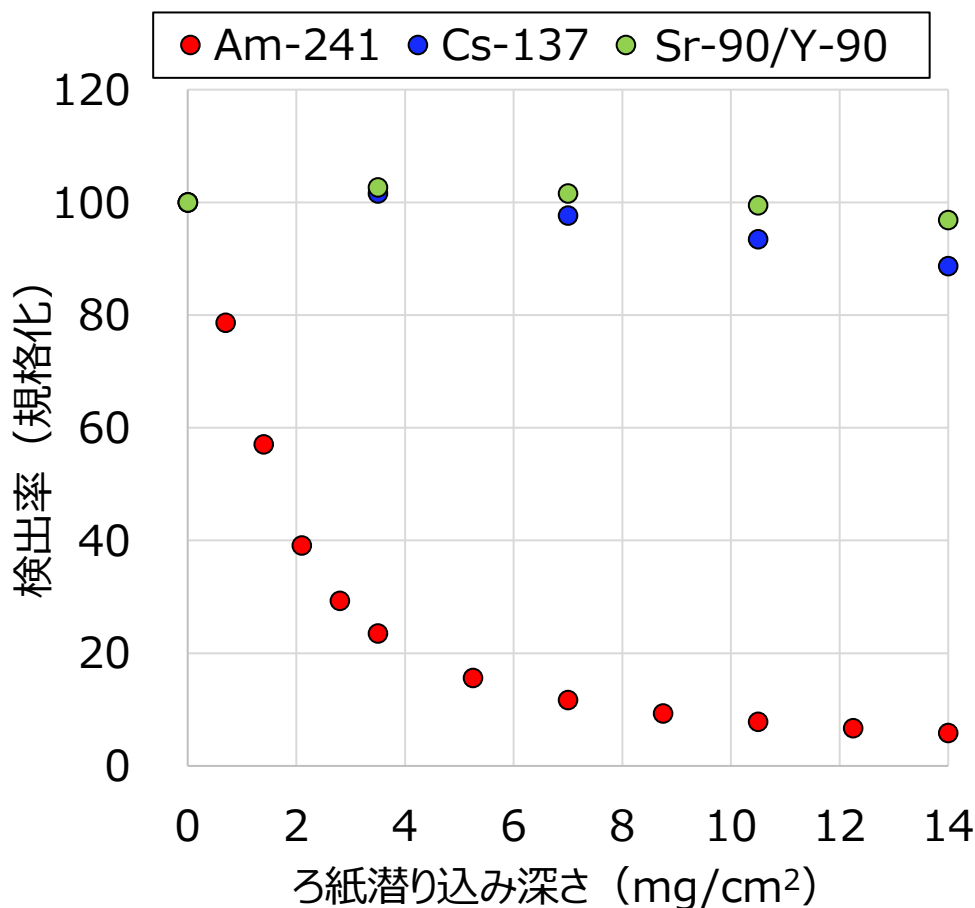


2.1 得られた成果（28／32）

(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

③ろ紙への潜り込みによる影響の検証

◎計算結果



▶β線（Cs-137、Sr-90/Y-90）においては、ろ紙の最も深い部分（ろ紙厚さ：14 mg/cm³、0.41 mm）の位置でも、約90%以上の検出率が確認できた。

▶α線（Am-241）においては、線源がろ紙の深さ方向へ広がるにつれて、検出率が大きく減少する傾向が見られた。

⇒HE-40Tの表面捕集率は、粒径約0.1 μmの粒子による評価では約40%とされている。
捕集する粒子の粒径が大きければ、表面捕集率も高くなり、走査型電子顕微鏡（SEM）によるろ紙の観察結果及び1 Fにおける粒子径（AMAD）を踏まえると、放射性物質は主にろ紙表面に捕集されていると考えられる。

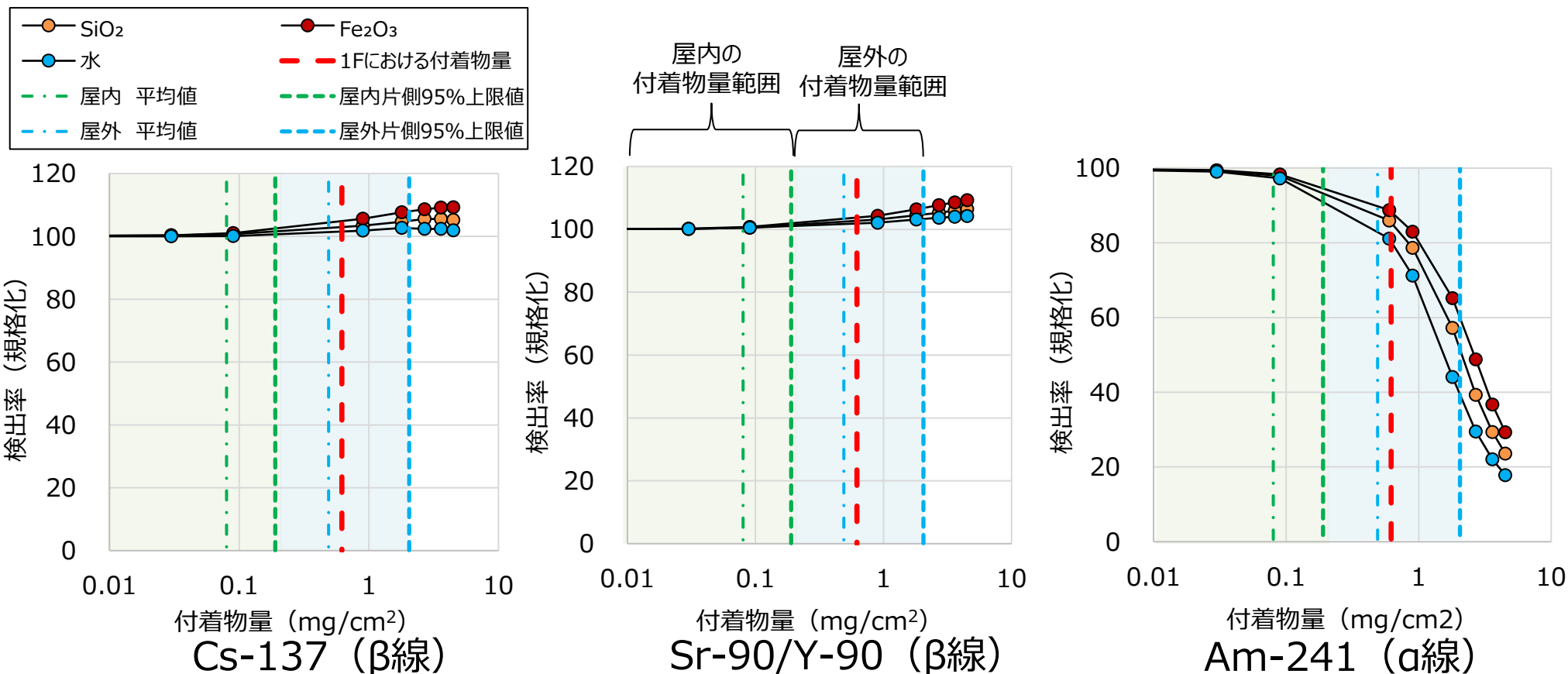
2.1 得られた成果（29／32）

(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

◎まとめ・考察①

▶実際のろ紙付着物の付着状態を模擬した計算シミュレーション

・『得られた成果（24／32）』で示した計算シミュレーション結果に、
『(2)ろ紙付着物に関する調査』において調査したろ紙付着物量をプロットして整理したものを以下に示す。



2.1 得られた成果（30／32）

(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

◎まとめ・考察②

▶実際のろ紙付着物の付着状態を模擬した計算シミュレーション

計算結果と付着物量をプロットしたグラフより、1Fにおける付着物量及び屋外でのろ紙付着物量片側95%上限値における核種ごとの検出率を算出した。

核種	付着物	検出率（規格化）	
		1Fにおけるろ紙付着物量 (0.62 mg/cm ²)	屋外 片側95%上限値 (2.05 mg/cm ²)
Cs-137	SiO ₂	103	105
	Fe ₂ O ₃	105	108
	水	102	103
Sr-90/Y-90	SiO ₂	103	105
	Fe ₂ O ₃	104	107
	水	102	103
Am-241	SiO ₂	85	52
	Fe ₂ O ₃	88	60
	水	80	39

2.1 得られた成果（31／32）

(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

◎まとめ・考察③

▶実際のろ紙付着物の付着状態を模擬した計算シミュレーション

・**α線（Am-241）においては**、1 F において得られたろ紙付着物量における検出率は約80%、屋外でのろ紙付着物量片側95%上限値の範囲では、**検出率が約50%まで減少することが確認できた。**

⇒今回の結果からα線は検出率が約50%となる可能性があり、その際は使用する測定器の検出下限値が2倍となる。

しかし、測定器の検出下限値がAm-241の空气中濃度限度の100分の1（DAC ※1/100：年間実効線量0.5 mSv）を超えることはない。

※1 誘導空气中放射能濃度

（参考）■Am-241の空气中濃度限度（一週間平均）： 8×10^{-7} （Bq/cm³）

■測定器（JDC-5300）の検出下限値（一週間平均）α線： 2.5×10^{-10} （Bq/cm³）※2

⇒α線の汚染が発生する場所では基本的に全面マスク等の着用が必要となるため、作業計画策定時におけるマスク選定の際には防護係数を踏まえた上で、裕度をもって選択することを推奨する（呼吸保護具は、空气中濃度に安全係数2を乗じたものと呼吸保護具の着用限度濃度を比較した上で選定するなど）。

一方で、万が一内部被ばくが生じ、空気濃度から被ばく量の評価をしなければならない場合には、Ge半導体検出器による測定や採取ろ紙の破壊分析により正確な放射エネルギーの評価が可能である。さらに内部被ばくの評価は、基本的にバイオアッセイにて行われることから、内部被ばくの評価上の問題はないと考える。

2.1 得られた成果（32／32）

(4)実際のろ紙付着物等を模擬した計算シミュレーション

◎まとめ・考察④

▶実際のろ紙付着物の付着状態を模擬した計算シミュレーション

- ・**β線（Cs-137、Sr-90/Y-90）**においては、1 Fにおけるろ紙付着物量及び屋外でのろ紙付着物量片側95%上限値の範囲では、**ろ紙付着物の影響を考慮する必要がない**ことが確認できた。

▶付着している核種の違いによる影響の検証

- ・核種を数種類選定して計算シミュレーションを行った結果、低エネルギーβ線核種（Pm-147）においては、付着物量の増加による検出率の減少が確認された。
ただし、1FにおいてPm-147等の低エネルギーβ線核種は単独では存在せず、Sr-90/Y-90等の高エネルギーβ線核種と同伴していると考えられるため、放射線管理上の問題はない。

▶ろ紙への潜り込みによる影響の検証

- ・ろ紙への線源の潜り込みによる影響の検証を行った結果、α線（Am-241）においては、線源がろ紙の深さ方向へ広がるにつれて、検出率が大きく減少する傾向が確認された。
ただし、走査型電子顕微鏡（SEM）によるろ紙付着物の観察画像及び1 Fにおける粒子径（AMAD）を踏まえれば、放射性物質は主にろ紙表面に捕集されていると考えられるため、実際の測定においては、ろ紙の自己吸収による大きな影響はないと推定される。

2.2 目標に照らした達成度

実施項目	技術成熟度（TRL）			
	現状評価	終了時目標	終了時自己評価	
計算シミュレーションによるろ紙付着物が放射能測定へ与える影響の評価	3 (応用研究)	4 (実用化研究)	5 (模擬実証)	◎

終了時目標：

ろ紙付着物が、ろ紙の放射能測定に与える影響の評価結果（技術情報）を提供する。

終了時自己評価：

ろ紙付着物が、ろ紙の放射能測定に与える影響の評価結果（技術情報）を提供することができた。

2.3 成果の反映先とその寄与

ろ紙測定における精度・不確かさを評価したことで、1Fの廃炉作業における放射線管理に係る測定結果の妥当性を確認することができた。

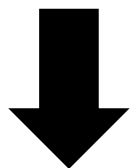
その結果、最適な防護装備の選定等によって信頼性の高い作業管理を行うことができ、現場作業員の内部被ばくの防止等に寄与することができる。

2.4 現場への適用性（難易度）

最適な防護装備の選定について、作業管理に関連するマニュアルを整備することにより導入が可能であることから、現場適用にあたってのハードルは低いと評価する。

3. 今後の課題

- 1Fにおけるろ紙付着物量のデータについては、核燃料サイクル工学研究所のデータをもって代用できると考えるが、今回入手できた1Fにおけるろ紙付着物量のデータは少なかったため、本報告に示すよりも多く付着する評価地点があると考えられる場合には、追加的な付着物量の調査を行うことを推奨する。



1Fにおけるろ紙付着物による影響評価が、より正確にできるようになると考える。

参考

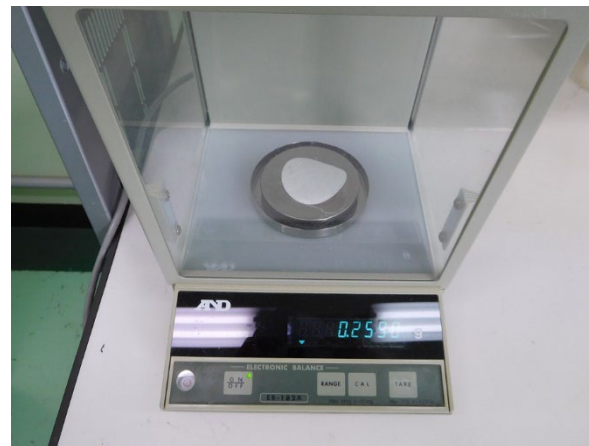
●ろ紙付着物量調査方法（詳細）

◎調査方法

(1) サンプルング前の新品空気ろ紙を乾燥させ、その重量を測定する（重量①）。



核燃料サイクル工学研究所では、シリカゲルが入った密閉容器内にて空気ろ紙を24時間以上乾燥させた。



重量測定の様子

- (2) 所定のサンプルングポイントにてサンプルングを行う。
- (3) サンプルング後の空気ろ紙の重量を測定する（重量②）。
- (4) サンプルング後の空気ろ紙を乾燥させ、その重量を測定する（重量③）。
- (5) 測定したろ紙の重量から、『得られた成果（2／32）』に示した式によりろ紙付着物量（mg/cm²）を算出する。

参考

●予備試験 ろ紙に含まれる水分量の調査

予備試験として新品の空気ろ紙に含まれる水分量を調査した。

◎調査方法

- (1) 新品空気ろ紙（HE-40T）の重量を測定する。（重量①）。
- (2) 空気ろ紙を乾燥させその重量を測定する（重量②）。
- (3) 以下の式により、ろ紙に含まれる水分量（mg/cm²）を算出する。

$$\text{ろ紙に含まれる水分量 (mg/cm}^2\text{)} = \frac{\text{重量① (mg)} - \text{重量② (mg)}}{\text{ろ紙面積 (cm}^2\text{)}}$$

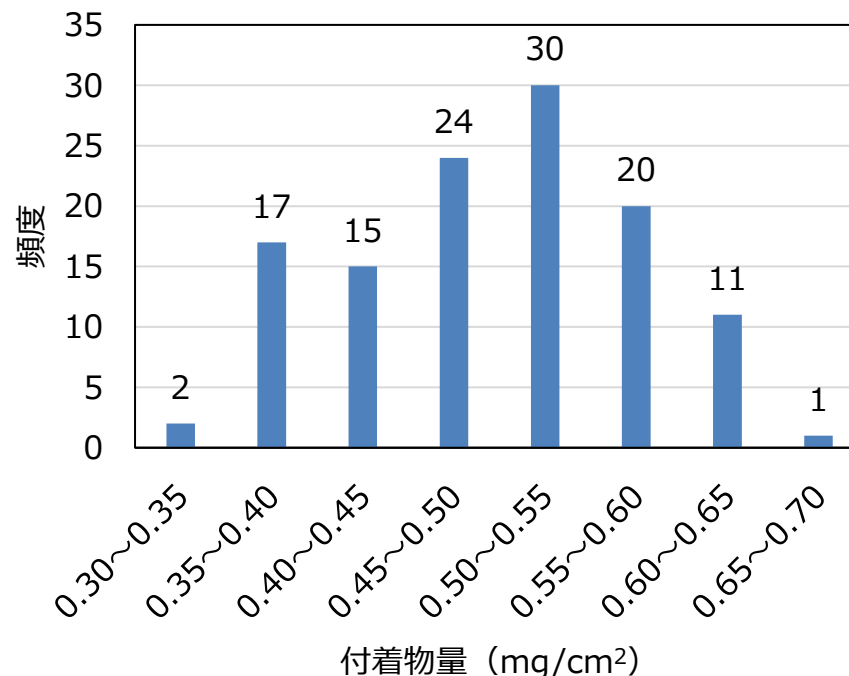
◎結果

▶測定枚数

●新品空気ろ紙（HE-40T）：120枚

▶平均値：0.50 mg/cm²

標準偏差：0.08 mg/cm²



参考

●ろ紙付着物量のカラーチャート作成①

ろ紙付着物の濃淡から付着物量の概算ができるように、カラーチャートの作成を行った。

◎調査方法

- (1) サンプリング前の空気ろ紙の重量を測定する。
- (2) ダストサンプラーにろ紙をセットし、微量の関東ローム（JIS 8種）をサンプリングする。



- (3) サンプリング後の空気ろ紙の重量を測定する。
- (4) サンプリング前後のろ紙の重量から、以下の式により付着物の重量を算出する。
- (5) (2) ～ (4) を複数回繰り返す。

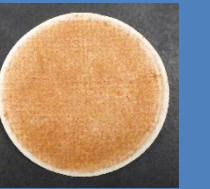
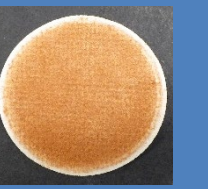
$$\text{ろ紙付着物量 (mg/cm}^2\text{)} = \frac{\text{サンプリング後ろ紙重量 (mg)} - \text{サンプリング前ろ紙重量 (mg)}}{\text{ろ紙面積 (cm}^2\text{)}}$$

参考

●ろ紙付着物量のカラーチャート作成②

◎結果

ろ紙の状態						
付着物量 (mg/cm ²)	0.00 (サンプリング前)	0.03	0.10	0.15	0.25	0.29

ろ紙の状態						
付着物量 (mg/cm ²)	0.39	0.57	0.61	0.88	1.05	1.51

本カラーチャートからろ紙付着物の濃淡で、視覚的にろ紙付着物量の概算ができるようにした。

事業内容

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

1.概要

1.1 背景（現状の課題）

作業者の内部被ばくスクリーニングに用いられる鼻スミヤについては、試料調製時、丸めた状態で採取したろ紙を放射線管理員の手技により放射能測定装置の試料皿に皺なく広げて固定する、濡れていれば乾燥させる等の処置が必要であり、短時間で多くの作業者の鼻スミヤ測定を実施することに課題があった。

1.2 目的（課題の解決策）

誰もが鼻スミヤ測定を簡便、迅速かつ適切に行なえるようにするため、採取した鼻スミヤ試料を乾燥から放射能測定まで行う鼻スミヤ測定システムの概念を検討した。また、鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の実効性（採取者による拭き取りの差異等を含む）等についても合わせて検討する。

1.3 目標（技術成熟度）

実施項目と技術成熟度：

実施項目	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討	2 (応用研究)	3 (応用研究)

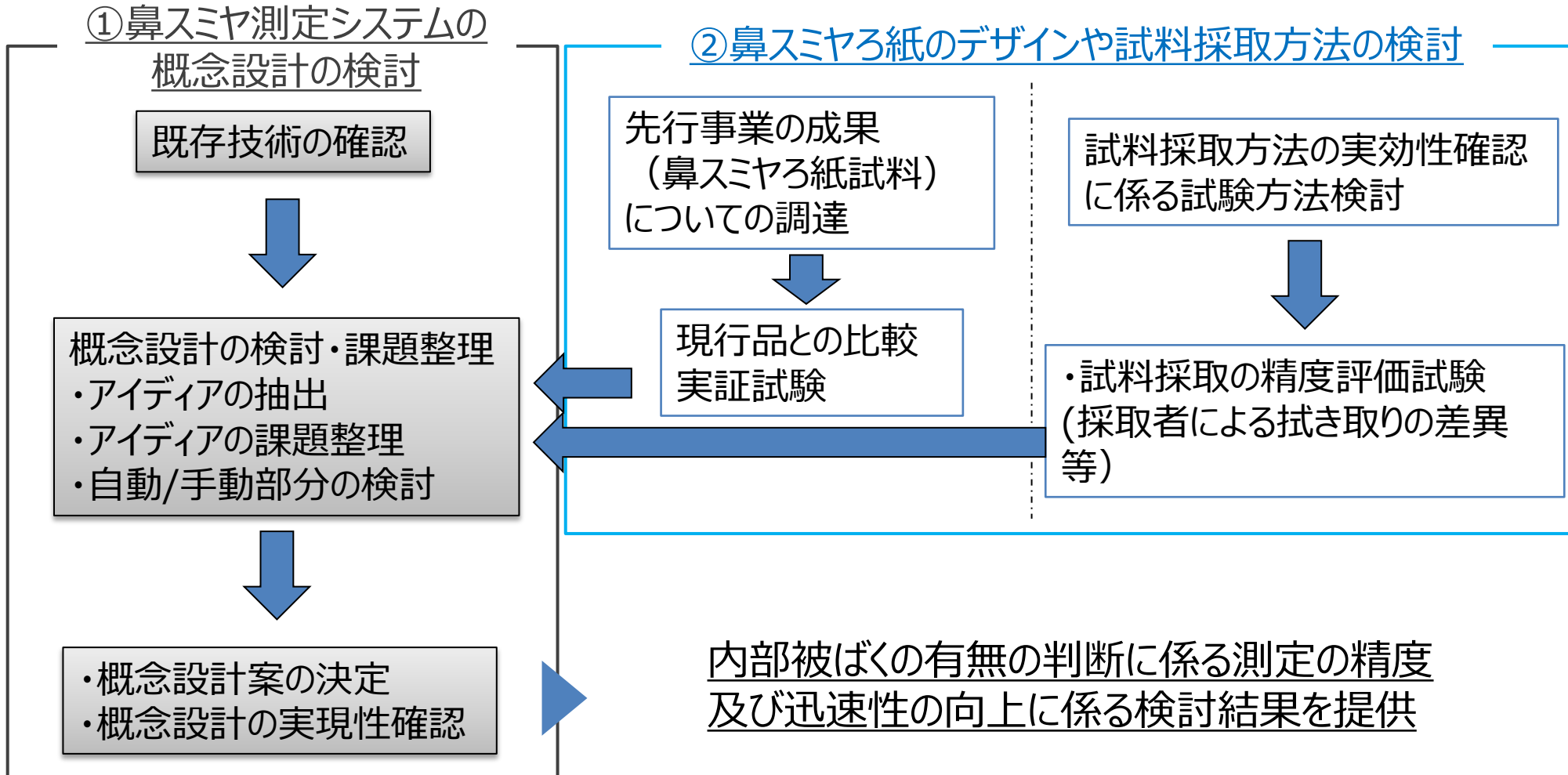
終了時目標：

内部被ばくの有無の判断に係る測定の精度及び迅速性の向上に係る検討結果を提供する。

終了時に得られる成果物：

- ・鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討結果（技術情報）
- ・鼻スミヤ測定の精度向上に係る検討結果（技術情報）

1.4 研究フロー



2. 実績

2.1 得られた成果 詳細は次ページ以降

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

- 鼻スミヤ測定システムに係るアイデアの抽出および課題整理を行い、概念設計案を決定した。
- 製作した試作機を用いて鼻スミヤ測定システムの概念設計案に係る実現性確認を行い、概念設計案の実現が可能であることを確認した。
- 上記を踏まえ、概念設計としての要求仕様を整理した。

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

- 鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討のため予備試験を行い、問題点や課題を整理し、対応策を検討した。
- 対応策を踏まえ、鼻スミヤろ紙の材料及び試料採取方法の検討のため試験を行い、最適な材料及び試料採取方法を整理した。

2.1 得られた成果（1／30）

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

- ・概念設計案の決定に向けたアイディアの抽出及び課題整理を行った。

検討テーマ「多人数の鼻スミヤ測定を誰もが簡便、迅速かつ適切に行なえる方法」

	抽出したアイディアの一例	主な課題事項
試料調整	試料調整を不要とするため、採取した鼻スミヤをそのまま測定する。 先端が平らな形状のスワブを使う。	<u>鼻スミヤの全周測定ができるか</u> 検討が必要。
採取	付着量を増やすために鼻スミヤのろ紙（もしくは綿棒）をあらかじめ湿らせる。	<u>湿らせたときの効果</u> について検討が必要。
乾燥	加熱ランプで乾燥させる。	<u>乾燥の自動化ができるか</u> 検討が必要。
	ろ紙の水分を吸水素材で吸水させる。	<u>吸水速度や材料の加工</u> について検討が必要。
測定	検出器（サーバイメータ等）2台で試料を挟み込み測定する。	<u>汚染の有無を判断できるか</u> 検討が必要。
	円筒形の測定器で測定する。	<u>実現可能か</u> 検討が必要。
装置動作	回転テーブル式	<u>実現可能か</u> 検討が必要。
	ベルトコンベア式	<u>実現可能か</u> 検討が必要。

2.1 得られた成果（2 / 30）

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

- ・抽出したアイディアをもとに鼻スミヤ測定システムの概念設計案を決定した。

システム設計仕様（要求仕様）

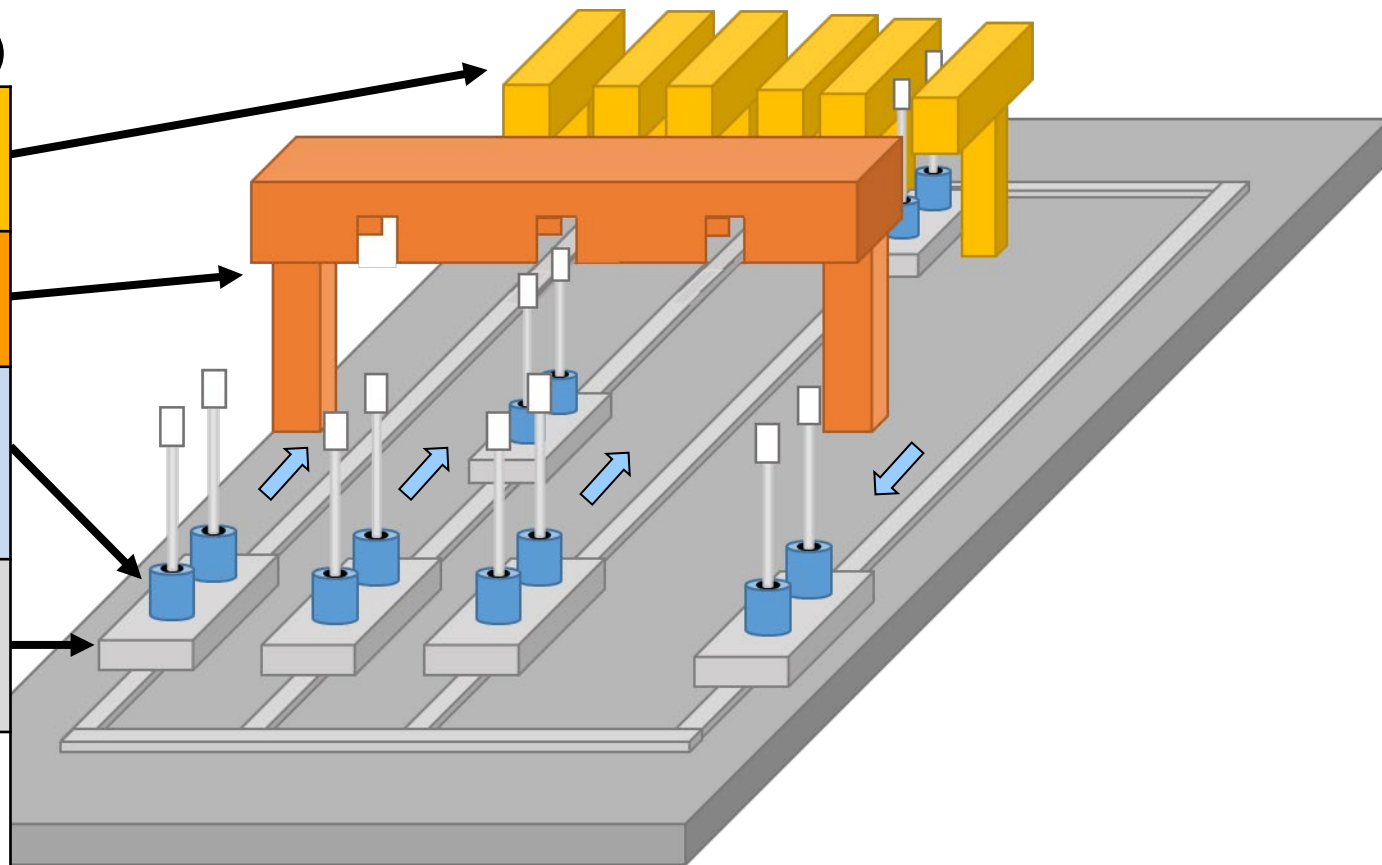
【測定部】
検出器（ $\alpha\beta$ 同時）で挟み測定する。

【乾燥部】
赤外線ランプで自動乾燥する。

【試料セット部】
採取した鼻スミヤろ紙をセット
鼻スミヤろ紙が回転動作する。

【装置動作部】
独立駆動テーブルがレールを移動する
（レールとテーブル数は増減可）。

【自動／手動部分】
試料セット及びボタン操作以外を自
動化する。



鼻スミヤ測定システムの概念設計案のイメージ図

2.1 得られた成果（3／30）

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

現状の問題と鼻スミヤ測定システムで得られる効果を整理した。

東京電力 1 Fにおける現状の問題	鼻スミヤ測定システムで得られる効果
被汚染者自身で両鼻を採取した後、放管員が試料皿にセットするための 試料調整 に 約 5 分／1名 掛かる。	採取した後、 試料調整不要 で測定装置にそのままセットできるため、試料調整に掛かる時間を短縮（ 約5分削減／1名分 ）できる。
1名分の鼻スミヤの 測定 に時間が掛かる。 ・1次測定(サーベイメータ)： 約 2 分 ・2次測定(オートサンプルチェンジャー)：約15分	1次測定としてα線とβ線を同時に測定可能な検出器で複数試料を同時に測定するため、測定に掛かる時間を短縮（ 約5分減／1名分* ）できる。
試料採取後から調整、乾燥及び測定の作業を、全て放管員が 手作業 で実施する必要がある。	採取した後、試料調整不要で測定装置にセットし、スタートスイッチを押すことで、乾燥及び測定を 自動 で行うことができる。
手作業で行う必要があるため、 複数試料の同時測定 を実施する場合、煩雑化し ミスが発生 する可能性が高い。	独立駆動テーブルが自動制御で移動するため、 容易に複数試料の同時測定 をすることができる。

* 測定部が5式ある時に5名分を測定した場合を想定

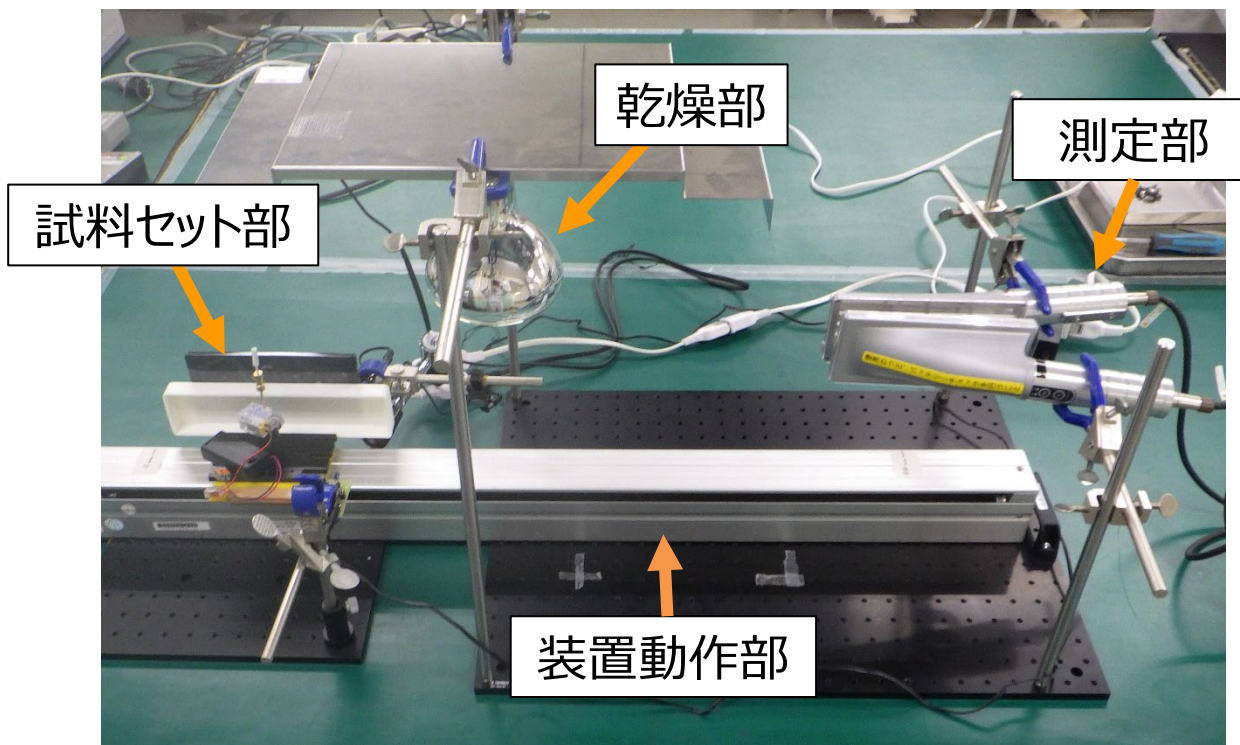
多人数の鼻スミヤ測定を誰もが簡便、迅速かつ適切に行うことが可能になる。

2.1 得られた成果（4 / 30）

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

・鼻スミヤ測定システムの概念設計案のイメージ図をもとに概念設計案の実現性確認を行うための試作機を製作し、試験体系を構築した。



構築した試験体系

構築した試作機の仕様

【測定部】
α/β線用サーベイメータ2台で挟んで測定する。

【乾燥部】
通過センサーを使用し、赤外線ランプを作動させ、乾燥させる。

【試料セット部】
採取した鼻スミヤをそのままセットし、回転動作する。

【装置動作部】
電動アクチュエーターにより試料テーブルの動きを自動制御する。

2.1 得られた成果 (5 / 30)

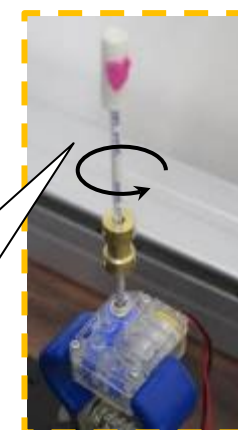
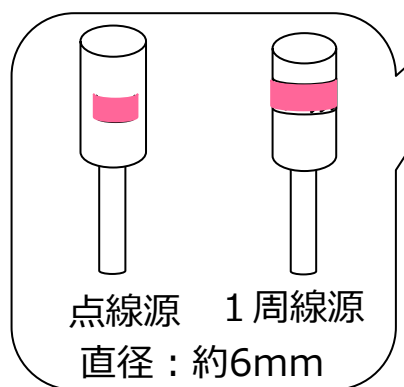
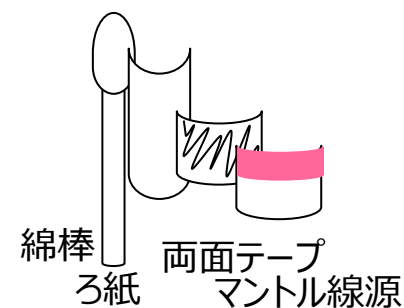
鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

① 鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

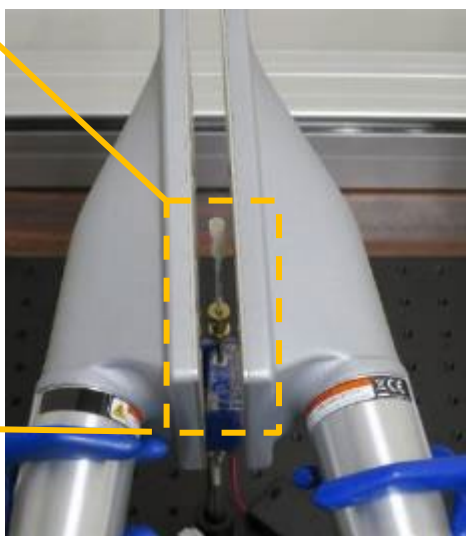
【鼻スミヤ測定システム (測定部) の実現性確認】

■ 以下の方法により、ろ紙部を回転させながら挟み測定をすることによりスクリーニング（汚染の有無の確認）が可能であることを確認した。

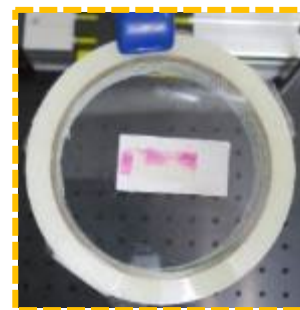
■ ランタン用マントル(Th系列)を使用して2種類の鼻スミヤ試料を模擬した線源を作成し、回転数を変化させた時の挟み測定結果と平面測定結果を比較した。（測定時間1分間、線源-検出器面の距離：5mm）



点線源取付時



挟んで測定している時の様子
(挟み測定)



上から見た様子
(1周線源)



広げて測定している時の様子
(平面測定)

鼻スミヤ試料を模擬した線源

2.1 得られた成果（6／30）

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

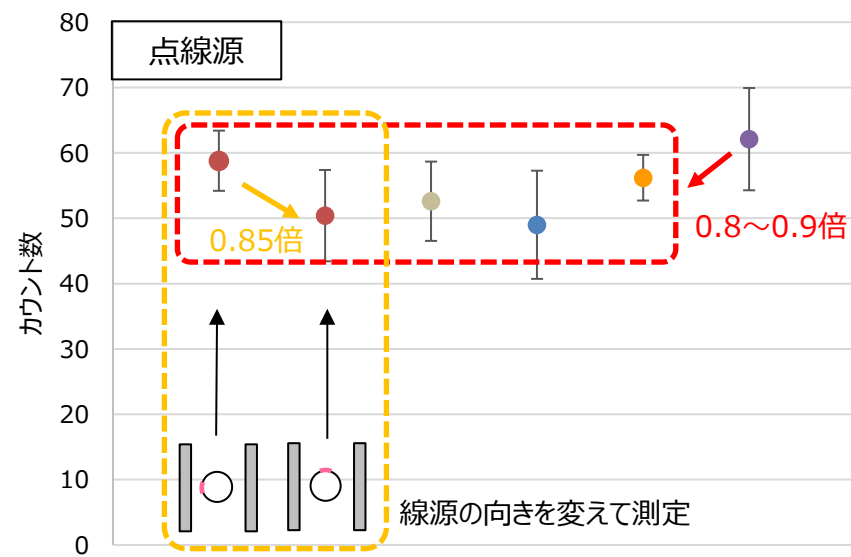
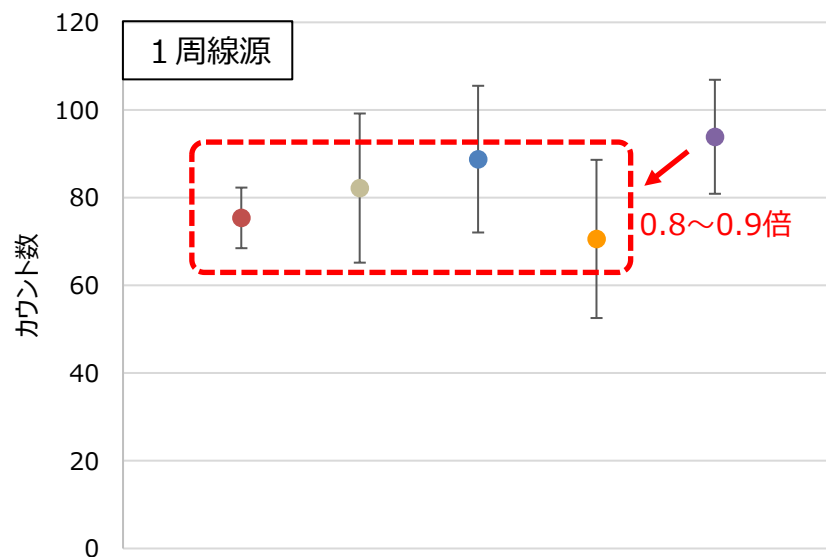
■ 挟み測定は検出器2台の合計値を、平面測定は検出器1台の測定値を示す。

・平面測定に比べて挟み測定では測定値が低い結果となった。

→線源と検出器の距離が5mm以上離れる箇所がある影響と考えられる。

・点線源の場合、検出面に向いていない場合は、検出面に向いている場合よりも計数が低下した。

→線源を回転させながら測定すると平面測定の結果に近い傾向が見られた。



凡例 ● 回転無し (0rpm) ● 回転低速 (9rpm) ● 回転中速 (20rpm) ● 回転高速 (42rpm) ● 平面

α線の測定結果

2.1 得られた成果（7／30）

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

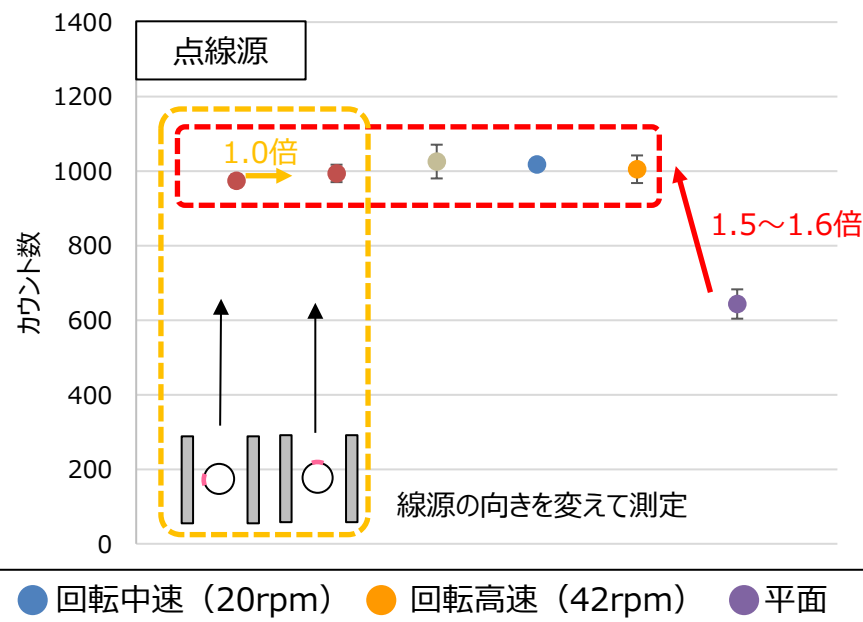
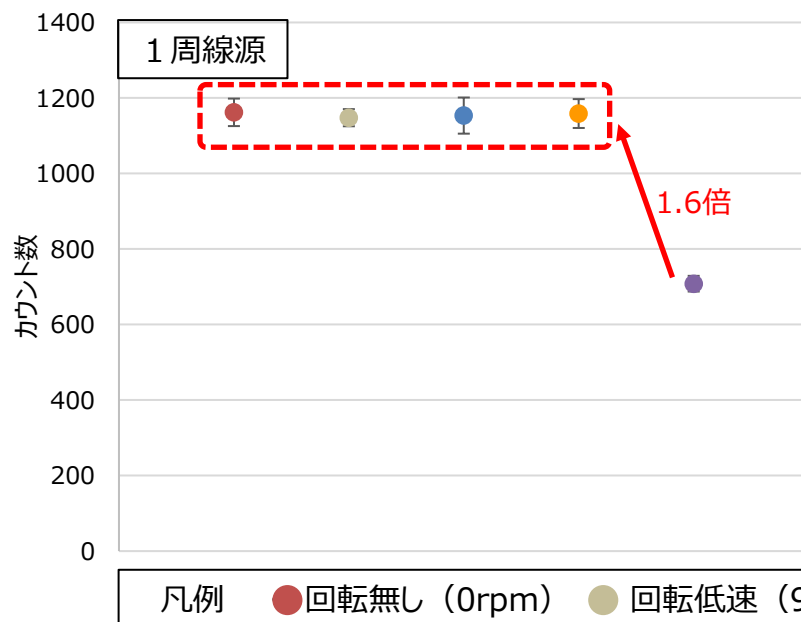
①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

■ 挟み測定は検出器2台の合計値を、平面測定は検出器1台の測定値を示す。

・平面測定に比べて挟み測定では測定値が高い結果となった。

→挟み測定は両面測定であるため、約2倍の測定値が得られると考えられるが、幾何学的配置（線源が円筒形）の影響で測定系外へ放出される割合が増える。

・回転の有無及び点線源の向きによらず同等の測定値が得られた。



β線の測定結果

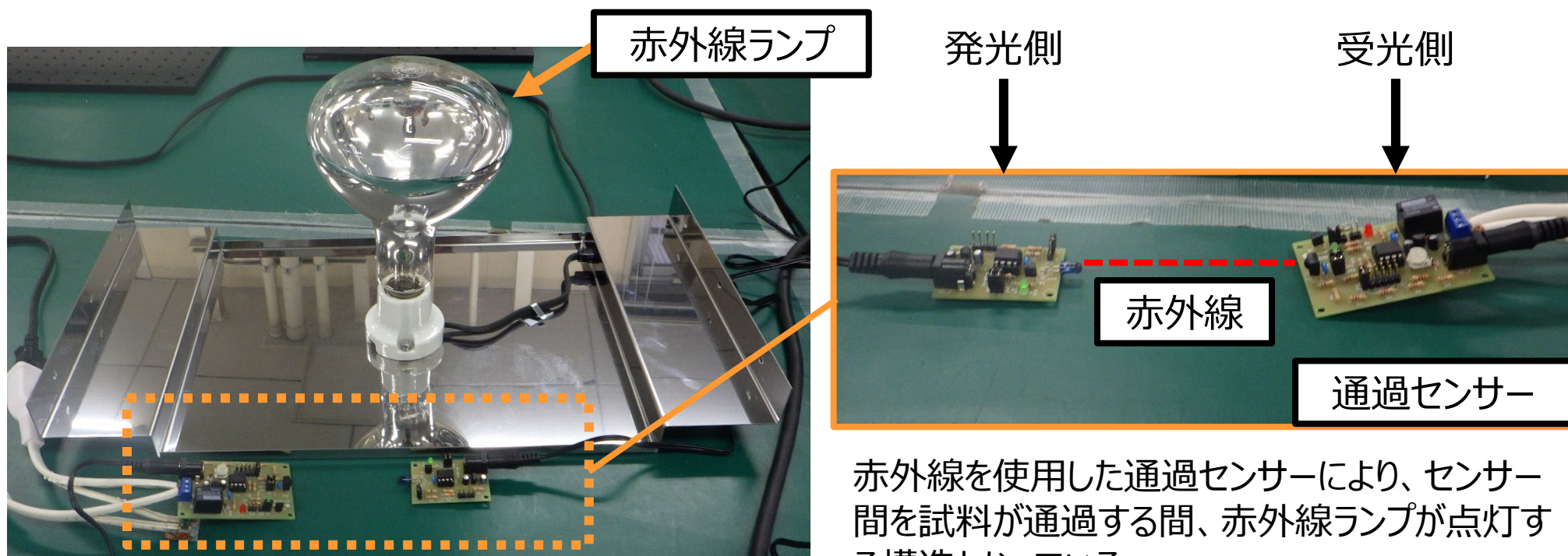
2.1 得られた成果（8／30）

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

【鼻スミヤ測定システム（乾燥部）の実現性確認】

■通過センサーを使用し、試料が乾燥部に近づく自動的に赤外線ランプが点灯することを確認した。



赤外線を使用した通過センサーにより、センサー間を試料が通過する間、赤外線ランプが点灯する構造となっている。

2.1 得られた成果（9／30）

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

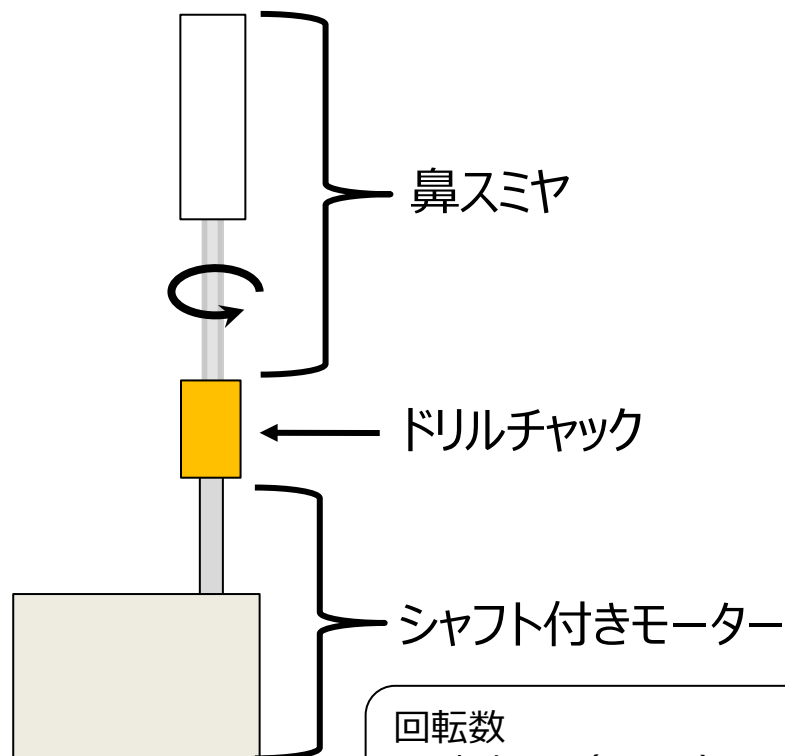
①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

【鼻スミヤ測定システム（試料セット部）の実現性確認】

■ドリルチャックにより採取した後の鼻スミヤをそのままセットすることができ、モーターによりろ紙部を回転させることができることを確認した。



試料セット部



回転数

- ・回転無し（0rpm）
- ・回転低速（9rpm）
- ・回転中速（20rpm）
- ・回転高速（42rpm）

2.1 得られた成果 (10/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

【鼻スミヤ測定システム（装置動作部）の実現性確認】

■ 電動アクチュエータの制御部により指定した位置で減速・加速をすることができ、任意の時間の乾燥及び測定ができることを確認した。

■ 複数のキャリア（台）を独立して動かすことのできるリニア搬送システムを応用することで、複数試料の同時測定が可能と考えられる。



電動アクチュエータ



マルチキャリア式のリニア搬送システム
(シュナイダーエレクトリック)

<https://www.proface.com/ja/product/linear/mc12/top>

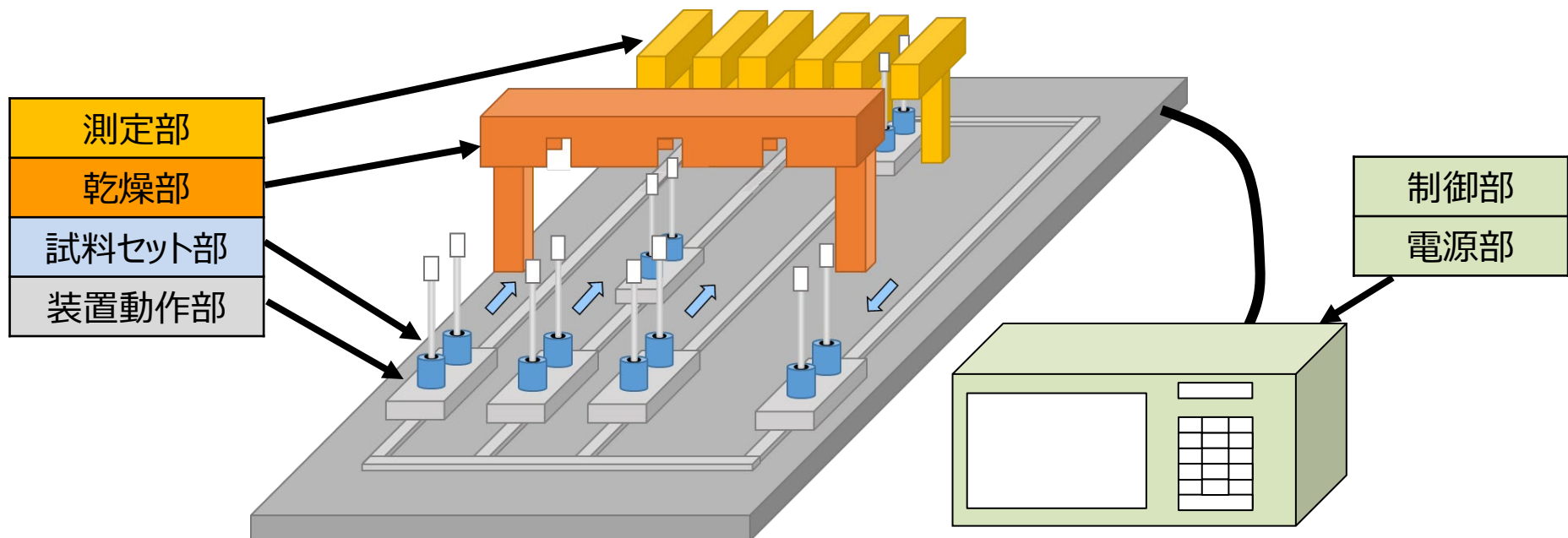
2.1 得られた成果 (11/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

- ・鼻スミヤ測定システムの概念設計案について、各部の実現性確認を行った結果、概念設計案の実現が可能であることを確認した。
- ・鼻スミヤ測定システムの要求仕様を整理し、概念設計仕様書としてとりまとめた。

鼻スミヤ測定システムの概念設計仕様書 (抜粋)



鼻スミヤ測定システムの外観イメージ図

2.1 得られた成果 (12/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

①鼻スミヤ測定システムの概念設計の検討

鼻スミヤ測定システムの概念設計仕様書 (抜粋)

構成	各部の要求仕様
測定部	α/β 線用検出器2台で測定試料を一定の距離をあけて挟んで測定する構造とし、検出器は測定試料よりも大きい形状とする。各検出器の測定結果は、制御部に表示されるものとする。センサー等を利用して測定試料が2台の検出器間に入ったことを検知し、測定開始動作を行うものとする。
乾燥部	測定対象と一定の距離をあけて赤外線ランプで乾燥させる構造とし、赤外線ランプから発せられる熱が周辺機器に影響しないようカバーを設けるものとする。センサー等を利用して測定試料が赤外線ランプの付近に入ったことを検知し、赤外線ランプの電源入切を行うものとする。
試料セット部	採取した後の鼻スミヤをそのままセットすることができる構造とし、モーターによりろ紙部を一定の速さ(9～42rpm)で回転させることができるものとする。ろ紙部から付着物が落下してしまうことを考慮し、受け皿を設けるものとする。試料セット部は付外し可能であり、モーターは単独で電源を有する構造とする。
装置動作部	独立駆動の複数のキャリア(台)がレール上を移動する構造とする。レール及びキャリアは任意の数量に増減することができるものとする。制御部の設定により任意の位置及び任意の時間で停止できるものとする。
制御部	測定部の設定、測定値の表示及び装置動作部の制御を行うものとする。測定部の数量及び装置動作部の数量に応じて制御対象を増減可能なものとする。
電源部	測定部、乾燥部、装置動作部及び制御部の各種電源供給を行うものとする。

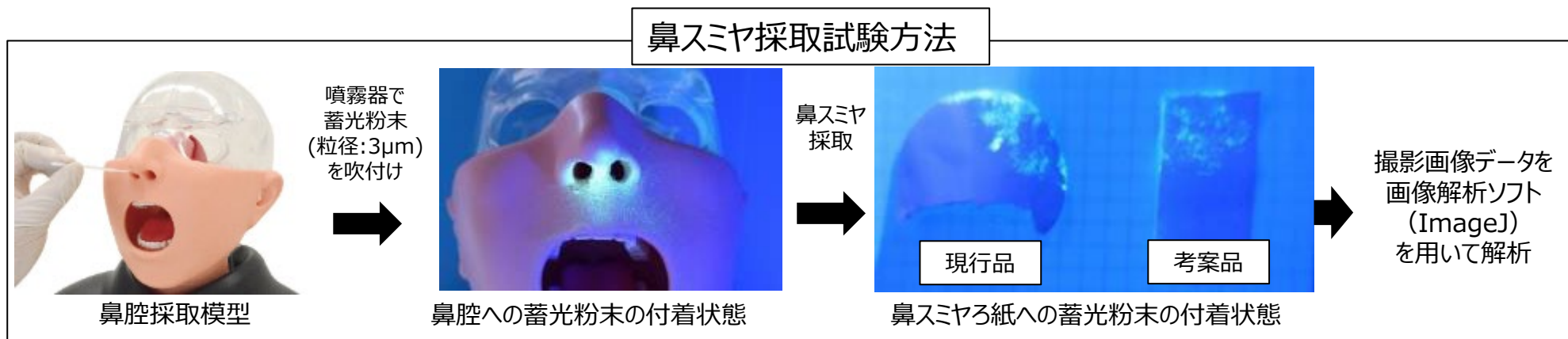
2.1 得られた成果 (13/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

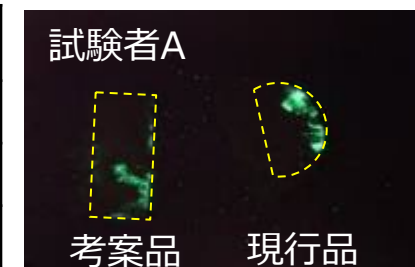
②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

【参考：先行事業の成果】

試験者10名（A～J）に現行品と作成時間の短縮のため試作した考案品にて鼻スミヤ採取試験を実施してもらい、画像解析ソフトを用いて画像データの輝度（光の明るさ）を算出し、蓄光粉末の付着量（＝拭き取り量）として求めた。



	輝度（光の明るさ）									
試験者	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
現行品	50.2	53.9	43.4	47.9	25.0	28.2	54.2	31.1	26.9	42.2
考案品	47.9	51.9	39.8	45.1	29.2	35.5	52.4	31.3	34.1	50.7



現行品も考案品も、**採取する人により付着量にバラつきがみられる**結果となった。

2.1 得られた成果 (14/30)

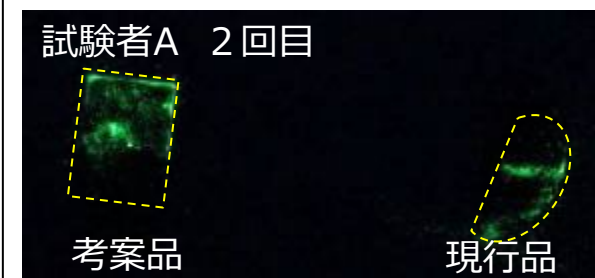
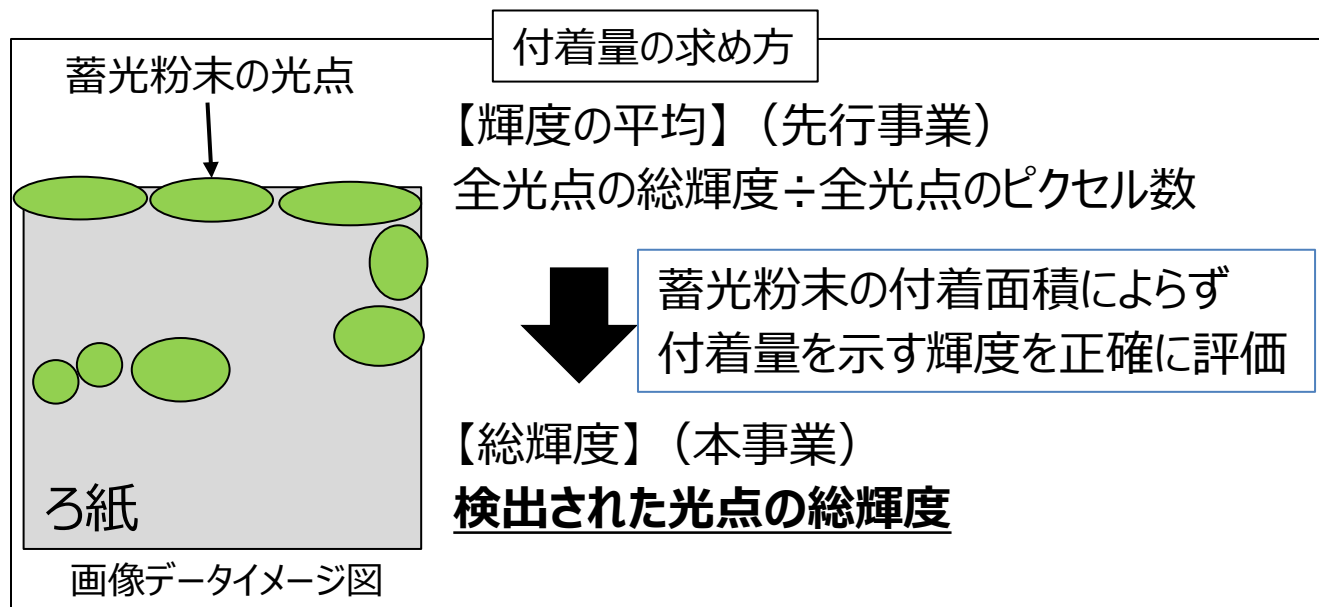
鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

・先行事業と同様な方法で、試験者4名が1人あたり2回、試料採取方法の検討のための予備試験を実施した。

また、蓄光粉末の付着量の評価方法を変更した。

⇒先行事業では、画像解析ソフトを用いて画像データ内の輝度の平均を求めていたが、画像データ内の光点の総輝度から求めた。



・同じ人が繰り返した場合も、付着量にバラつきが見られた。

⇒採取時の付着量のバラつきを少なくするため、**採取方法等の検討が必要**である。

2.1 得られた成果 (15/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

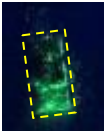
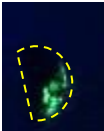
・採取材料や採取方法を変えたときの蓄光粉末の付着量について比較評価を実施した。

【採取材料を変えて試料採取】



ろ紙を用いた現行品や考案品よりも、綿棒や平型スワブで採取した方が付着量が多く見られた。
⇒表面材質が繊維質のものが良いと考えられる。

【現行品や考案品を湿らせてから試料採取】

		総輝度(×10 ⁴)	
状態		乾燥	湿潤
現行品		869	2,181
考案品		1,433	3,140

あらかじめ、ろ紙を湿らせた方が付着量が多くなった。

・鼻スミヤに用いる採取材料について、東京電力にニーズを聞いたところ、鼻スミヤろ紙の測定後、Ge半導体検出器による核種分析（定量）をすることから、ジオメトリに配慮する必要があるため、左右のろ紙を合わせたときに円形状（50φ以下）であることが望ましいとの回答があった。

→東京電力のニーズを踏まえ、鼻スミヤに用いる採取材料については、綿棒や平型スワブを用いるのではなく、ろ紙を用いることとした。

2.1 得られた成果（16／30）

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

予備試験の結果を踏まえ、現状の問題と課題を整理し、対応策を検討した。

東京電力 1 Fにおける 現状の問題	課題	対応策
鼻スミヤは採取者により 付着する量にバラつきが 生じるため、汚染（内部 被ばく）の見逃しにつな がる懸念される。	ろ紙部の材質について検討し、付着 量を増やす。	ろ紙部の材質による検出効率、 採取効率の比較試験を行う。
	試料採取を誰でも一定の付着量が 採取ができるようにする。	鼻スミヤ採取装置を製作し、付着 量を一定にすることができるか試験 を行う。
	付着量を増やす採取方法を検討する。	ろ紙部をあらかじめ湿らせてから採 取する方法について実証試験を 行う。
鼻スミヤは手作業で作成 するため、一定の形状に することが困難である。	鼻スミヤは誰でも同一形状のものが作 れるようにする。	・鼻スミヤのろ紙部を半円形状の シールタイプのものにし、巻き付け するときの目印を付ける。

2.1 得られた成果 (17/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

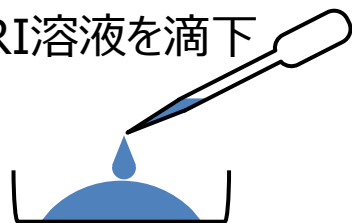
②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

・鼻スミヤに用いる最適な採取材料及び試料採取方法の検討のため以下の試験を実施した。

標準RI溶液を用いた試験

【採取効率試験】

RI溶液を滴下



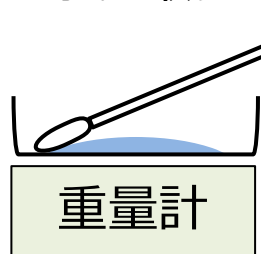
乾燥



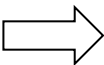
測定



拭き取り



電動
アクチュエータ



測定



重量計

試験方法 (イメージ図)

試験方法

- ①試料皿に放射能既知の標準RI溶液 (Am-241) を滴下し、乾燥させた後に放射能測定装置で正味計数率を測定する。
- ②様々な材質のろ紙 (乾燥状態及びあらかじめ湿らせた状態のろ紙*) で拭き取る力 (拭き取り圧)、方向、速さ、距離を一定にして乾燥後の標準RI試料を拭き取る。
- ③拭き取った後の試料皿について放射能測定装置で正味計数率を測定する。
- ④拭き取り前後の正味計数率から採取効率を求め、採取材料 (材質) 及び採取方法の違いによる結果を比較する。

* 小型スプレーで水を噴霧し、湿らせたろ紙

2.1 得られた成果 (18/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

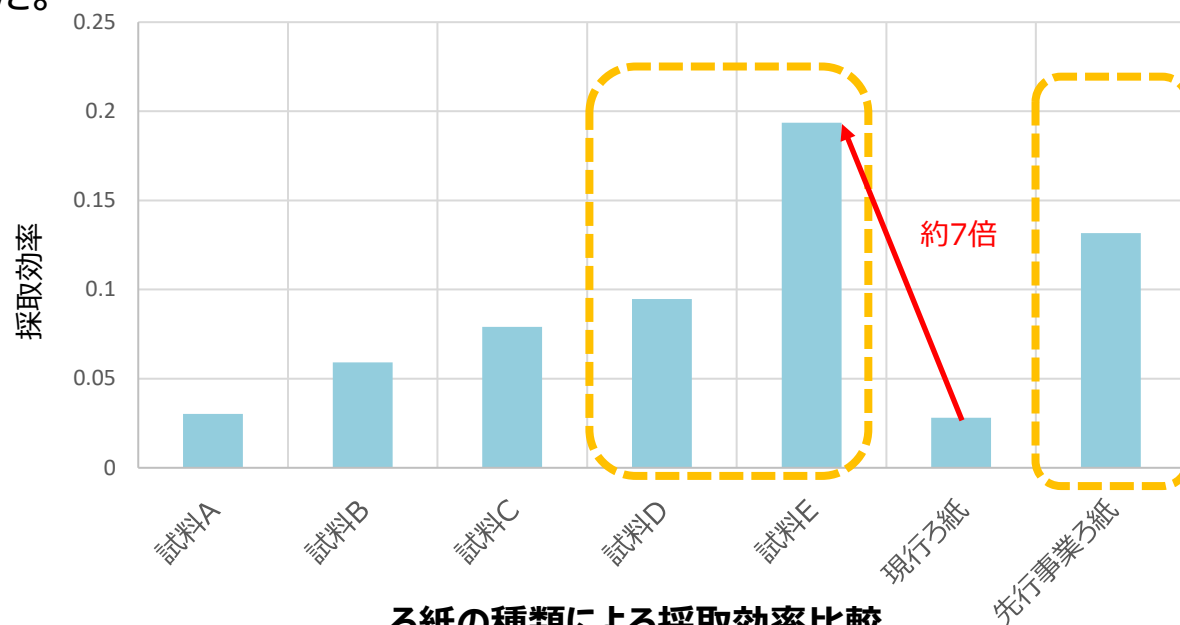
【採取効率試験結果】

■ 現行のろ紙と先行事業ろ紙を含む全7種類のろ紙を用いて採取効率試験を行った。

・乾燥した状態の各ろ紙を用いて1回採取・測定を行い、採取効率をグラフ化した。

→試験の結果、試料D（和紙素材）、試料E（和紙素材）、先行事業ろ紙（和紙素材）の3つが他のろ紙に比べて良い結果が見られた。

→最も良い結果が見られた試料E（和紙素材）は、現行ろ紙に比べて約7倍の採取効率の向上が見られた。



ろ紙の種類による採取効率比較

～試験条件～
測定機器：放射能測定装置
測定時間：1分間
採取時のろ紙状態：乾燥
拭き取り圧：250 g
○滴下した標準RI溶液（Am-241）
・放射能：2 Bq
・滴下量：0.1 ml

2.1 得られた成果 (19/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

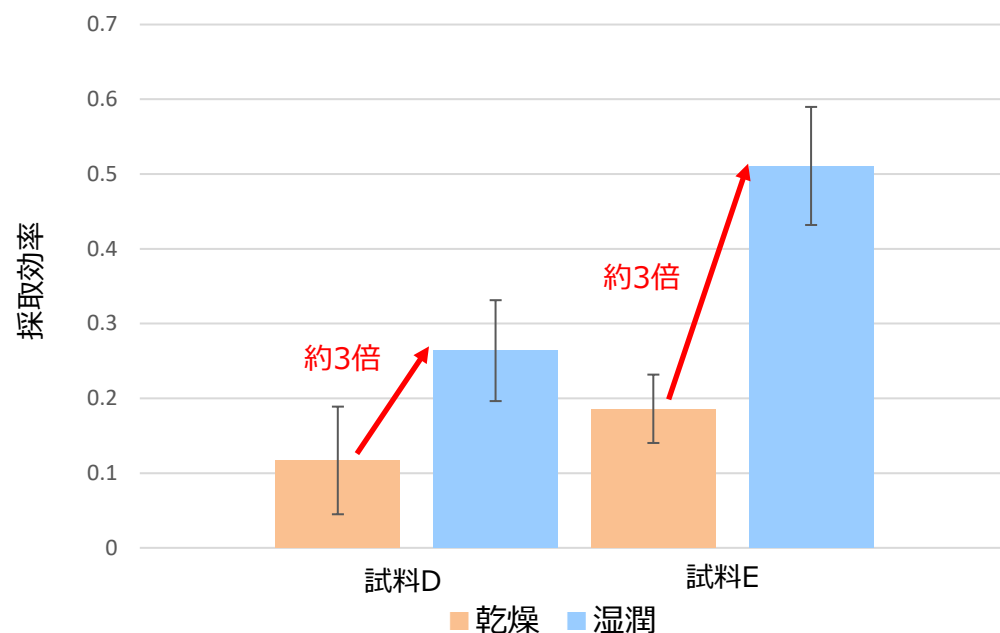
②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

【採取効率試験結果】

■ 乾燥状態で行った試験にて良い結果だった試料D（和紙素材）と試料E（和紙素材）について、乾燥状態と湿潤状態それぞれの採取効率を比較する試験を行った。

・乾燥状態と湿潤状態の各ろ紙を用いて3回採取・測定を行い、採取効率をグラフ化した。

→試験の結果、あらかじめ湿らせたろ紙の方が、約3倍の採取効率の向上が見られた。



～試験条件～
測定機器：放射能測定装置
測定時間：1分間
採取時のろ紙状態：乾燥と湿潤
拭き取り圧：250 g
○滴下した標準RI溶液（Am-241）
・放射能：2 Bq
・滴下量：0.1 ml

ろ紙の乾湿状態による採取効率比較

2.1 得られた成果 (20/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

・鼻スミヤに用いる最適な採取材料及び試料採取方法の検討のため以下の試験を実施した。

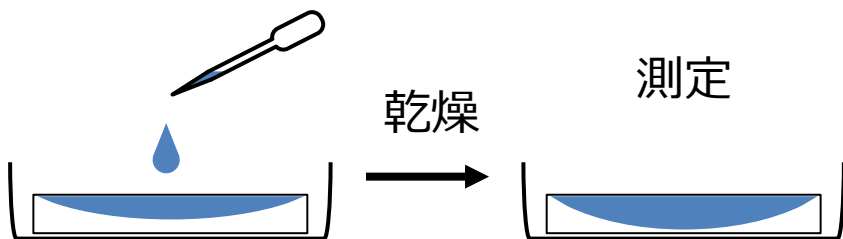
標準RI溶液を用いた試験

【検出効率試験】

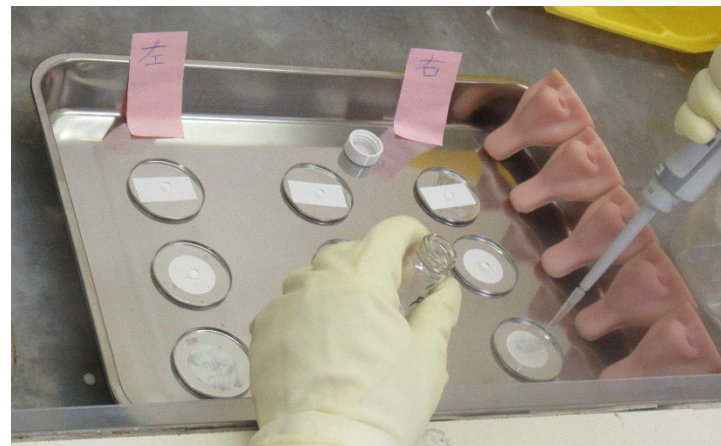
試験方法

- ①試料皿に様々な材質のろ紙を置き、放射能既知の標準RI溶液 (Am-241) をろ紙上に滴下する。
- ②乾燥後、放射能測定装置で正味計数率を測定する。
- ③ろ紙の種類 (材質) の違いによる検出効率を比較する。

ろ紙上にRI溶液を滴下



試験方法 (イメージ図)



試験風景 (RI溶液滴下の様子)

2.1 得られた成果 (21/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

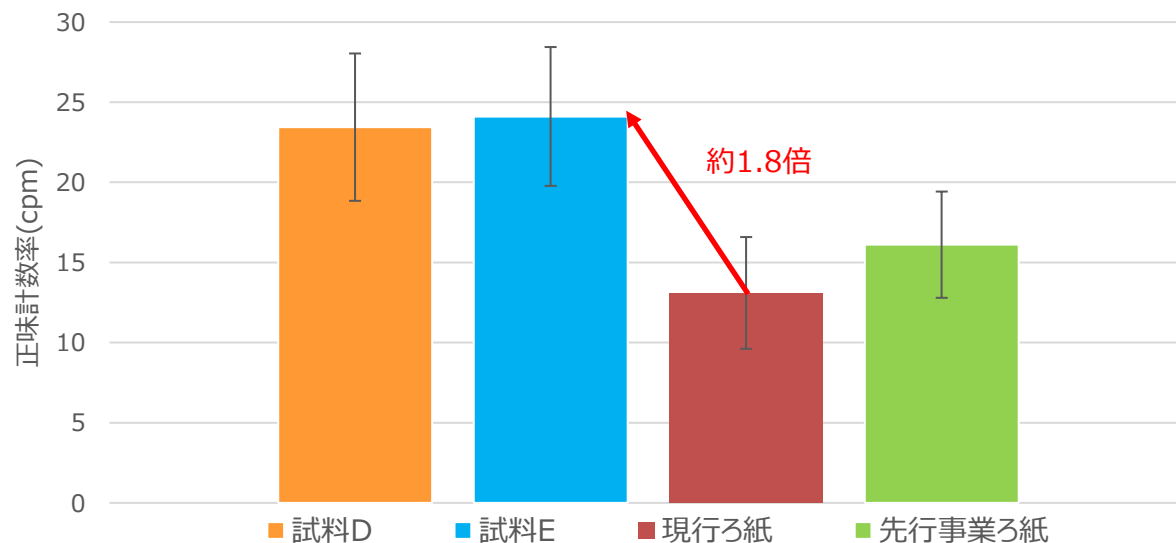
【検出効率試験結果】

■採取効率試験にて良い結果だった試料D（和紙素材）、試料E（和紙素材）、現行ろ紙、先行事業ろ紙（和紙素材）について、検出効率を比較する試験を行った。

・各ろ紙で3回ずつ行い、平均をグラフ化した。

→試験の結果、試料D（和紙素材）と試料E（和紙素材）の検出効率が同程度であり、先行事業ろ紙（和紙素材）及び現行ろ紙に比べて良い結果が見られた。

→最も良い結果が見られた試料E（和紙素材）は、現行ろ紙に比べて約1.8倍の検出効率の向上が見られた。



～測定条件～
測定機器：放射能測定装置
測定時間：1分間
○滴下した標準RI溶液（Am-241）
・放射能：2 Bq
・滴下量：0.1 ml

ろ紙の種類による検出効率比較試験

2.1 得られた成果 (22/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

・鼻スミヤに用いる最適な採取材料及び試料採取方法の検討のため以下の試験を実施した。

標準RI溶液を用いた試験

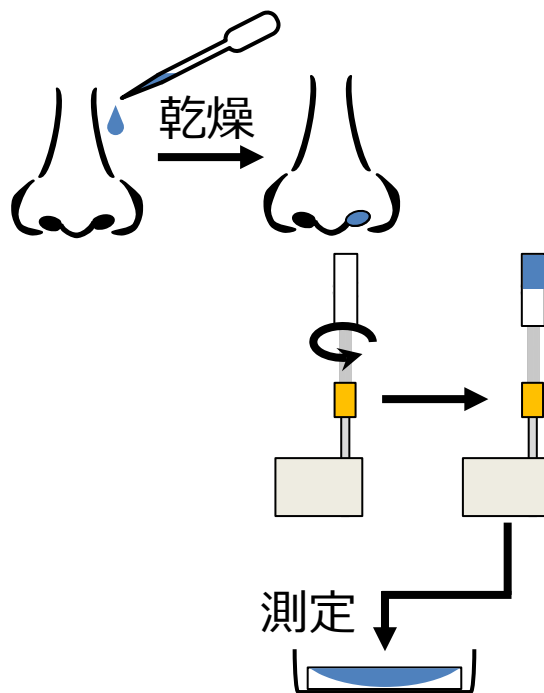
【鼻スミヤ採取装置による採取試験】



鼻スミヤ採取装置
(試作機)



鼻模型
(シリコン製)



試験方法 (イメージ図)

試験方法

- ①鼻模型の鼻腔内に放射能既知の標準RI溶液 (Am-241) を滴下する。
- ②乾燥させた後、鼻スミヤ採取装置で一定の回転速度 (42rpm)、一定の採取時間 (3秒間) で採取する。
- ③採取後、ろ紙を広げて試料皿に置き、放射能測定装置で正味計数率を測定する。
- ④同様な手順を繰り返し行い、一定の結果が得られるか確認する。

2.1 得られた成果 (23/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

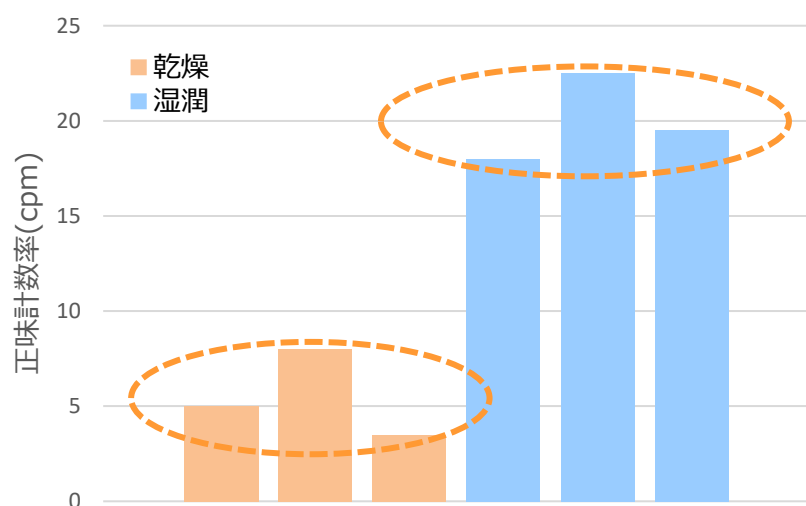
【鼻スミヤ採取装置による採取試験結果】

■ 試験条件を一定にするため先行事業ろ紙（和紙素材）を用いて、鼻スミヤ採取装置による採取試験を行った。

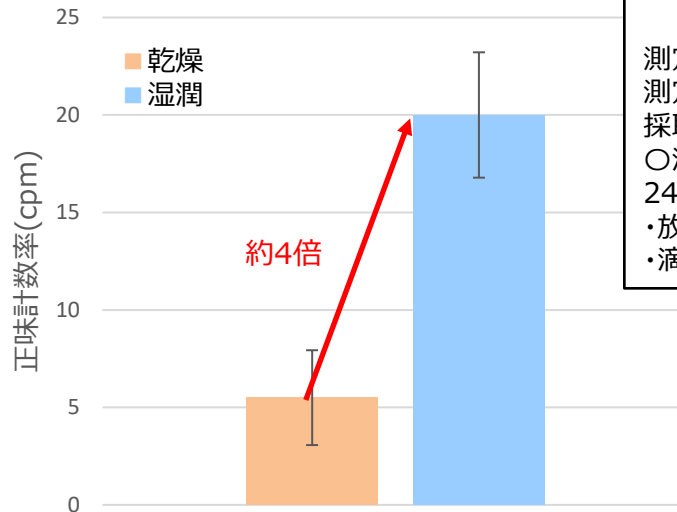
・乾燥状態と湿潤状態のろ紙を用いてそれぞれ3回ずつ測定した。

→試験の結果、鼻スミヤ採取装置による採取をした場合、付着量が同程度となる結果が見られた。

また、あらかじめ湿らせたろ紙の方が、付着量が多くなる（約4倍）結果が見られた。



鼻スミヤ採取装置による採取試験
(3回繰り返した結果)



鼻スミヤ採取装置による採取試験
(平均)

～測定条件～
測定機器：放射能測定装置
測定時間：1分間
採取時のろ紙状態：乾燥と湿潤
○滴下した標準RI溶液（Am-241）
・放射能：2 Bq
・滴下量：0.1 ml

2.1 得られた成果 (24/30)

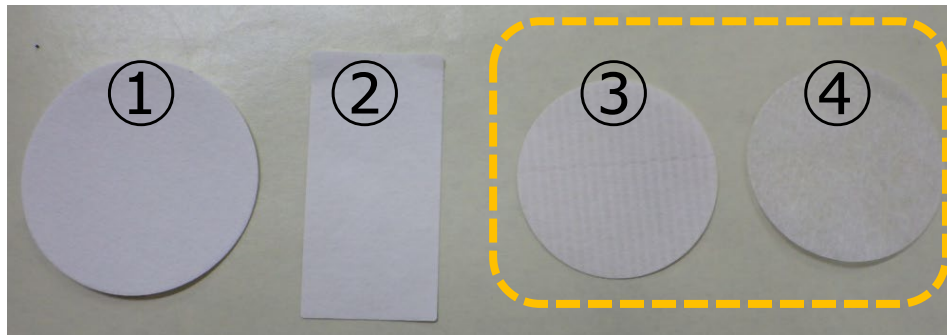
鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

【試験結果まとめ】

付着量を増やし測定の精度を向上させるために
最適な材質は、

試料D (和紙素材)、試料E (和紙素材)



- ①現行ろ紙 : 厚さ約210 μm
- ②先行事業ろ紙 (和紙素材) : 厚さ約155 μm
- ③試料D (和紙素材) : 厚さ約128 μm
⇒薄いストライプがあり、表面に凸凹がある。
- ④試料E (和紙素材) : 厚さ約128 μm
⇒レーヨン繊維を配合しており、多孔性で柔らかい。

■ 試料D (和紙素材)、試料E (和紙素材)
の採取効率および検出効率が高い要因を以下の
とおり考察した。

～採取効率が高い要因～

ろ紙表面の材質 (繊維状または凸凹) により良
い結果がみられたと考えられる。

～検出効率が高い要因～

ろ紙の厚みが薄いことや多孔性があることにより自
己吸収が軽減され良い結果がみられたと考えられ
る。

2.1 得られた成果 (25/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

【試験結果まとめ】

付着量を増やし測定の精度を向上させる
ために最適な試料採取方法は、

あらかじめろ紙を湿らせる。



■ あらかじめろ紙を湿らせる方法を実際に運用に取り入れる場合を以下のとおり考察した。

・あらかじめろ紙を湿らせる方法については、小型スプレーや点鼻スプレーで水を噴霧することで湿らせすぎず、容易にできると考えられる。

・鼻スミヤを乾燥させる工程を取り入れることで、湿った状態で測定することはない。

2.1 得られた成果 (26/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

・鼻スミヤ採取時の付着量のばらつきを低減させるため、誰でも同一形状の鼻スミヤろ紙が作れるよう鼻スミヤろ紙のデザインを検討し、製作した。



製作した鼻スミヤろ紙

材質：試料D（和紙素材） シールタイプ
形状寸法：45 mmφの円形を2等分した半円形状
左鼻と右鼻の識別を容易にするため、赤と青に色付け。



【鼻スミヤの作成方法】

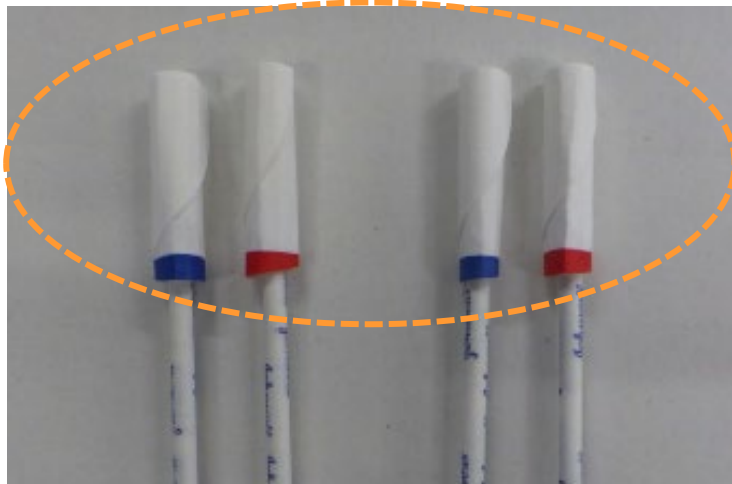
- ・ろ紙の平らな方を綿棒の先端側にして巻き付ける。
 - ・巻き付けの際、ろ紙の先端側がずれないように平行に巻き付ける。
- ⇒誰でも同一形状の鼻スミヤを作成することができる。

2.1 得られた成果 (27/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

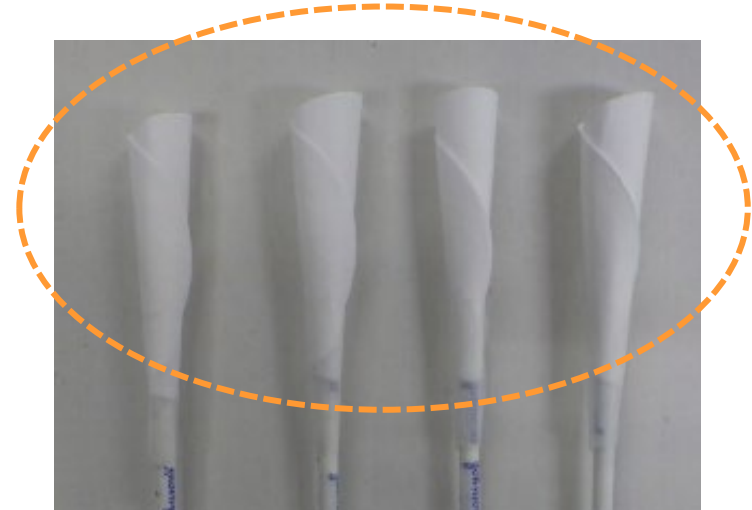
②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

・現行ろ紙に比べて、製作品のろ紙は、誰でも容易に同一形状の鼻スミヤを作成することができる。



- ・先端の大きさが同一形状であり、鼻スミヤ採取時の付着量のばらつきを低減することができる。
- ・巻き付けたろ紙の折り重なる部分に隙間が生じない。

製作品のろ紙を用いて作成した鼻スミヤ



- ・先端の大きさが若干異なり、鼻スミヤ採取時の付着量のばらつきの要因になると考えられる。
- ・巻き付けたろ紙の折り重なる部分に隙間が生じることがあるため、拭き取り採取時に隙間に入りこみ、正確に測定できない可能性がある。

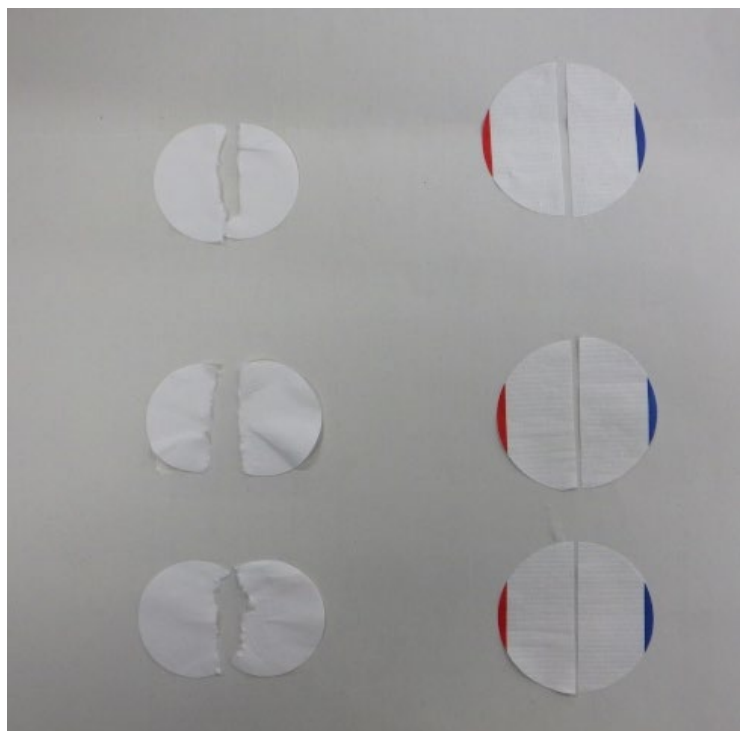
現行ろ紙を用いて作成した鼻スミヤ

2.1 得られた成果 (28/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

②鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

・製作品のろ紙は、半円形状であり、かつシールタイプのものであることから、スクリーニング後の詳細な測定が必要な場合において、試料皿にセットするときに、ろ紙のたわみが生じることが少なく、きれいな円形状にすることができる。



- ・シールタイプにすることで、鼻スミヤの試料調整時のろ紙のたわみによる自己吸収を低減し、鼻スミヤの測定精度を向上させることができる。
- ・ろ紙は左右のろ紙を合わせたときに円形状（45 mmφ）となることから東京電力 1 Fで実施する Ge半導体検出器による核種分析（定量）に要求されるジオメトリにおいても問題ないと考えられる。

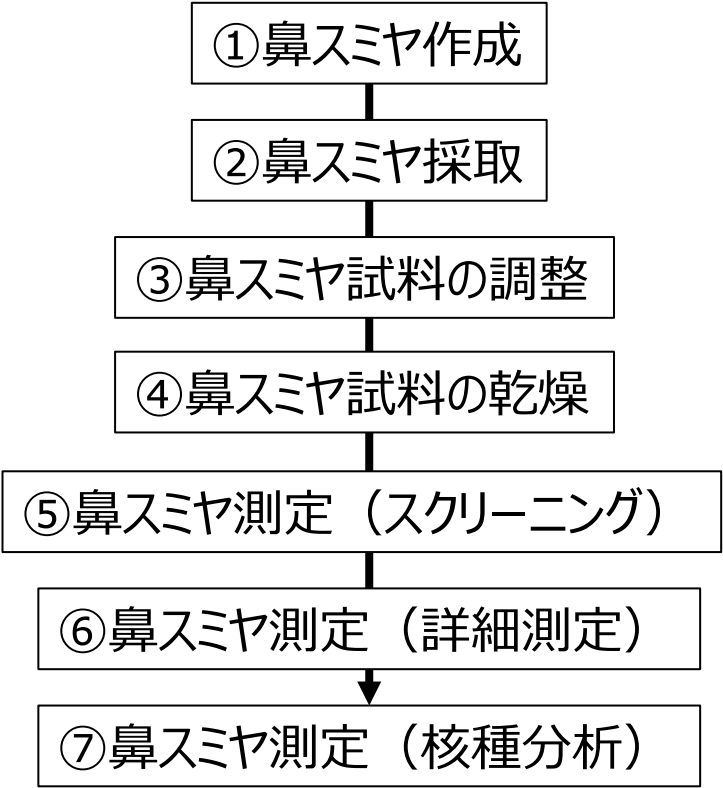
鼻スミヤの試料調整後のイメージ

2.1 得られた成果 (29/30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

まとめ

・鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討結果を踏まえ、鼻スミヤの各フローにおいて得られる効果を示す。

フロー	得られる効果
 <pre> graph TD A[①鼻スミヤ作成] --> B[②鼻スミヤ採取] B --> C[③鼻スミヤ試料の調整] C --> D[④鼻スミヤ試料の乾燥] D --> E[⑤鼻スミヤ測定 (スクリーニング)] E --> F[⑥鼻スミヤ測定 (詳細測定)] F --> G[⑦鼻スミヤ測定 (核種分析)] </pre>	①：誰でも同一形状の鼻スミヤを作成でき、付着量のばらつきを低減し測定の精度を向上させることができる。 ②：誰でも一定の力で採取でき、かつ、あらかじめろ紙を湿らせてから採取することで付着量を増やし、測定の精度を向上させることができる。 ③：試料調整を不要とし、採取した鼻スミヤをそのまま測定することで迅速性を向上させることができる。 ④、⑤：乾燥及び測定を自動化し、複数試料を同時に測定することで迅速性を向上させることができる。 ⑥：鼻スミヤの試料調整時のろ紙のたわみによる自己吸収を低減し、測定の精度を向上させることができる。 ⑦：ジオメトリを一定にすることで精度を向上させることができる。

2.1 得られた成果 (30／30)

鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法の検討

まとめ

- ・本検討の目標に照らして、東京電力 1 F現場への適用をした場合に得られる効果がどの程度になるかを示す。

適用項目	本検討の目標	東京電力 1 F現場への適用をした場合に得られる効果の程度
鼻スミヤ測定システム	内部被ばくの 有無の判断に 係る測定精度 及び迅速性の 向上	【迅速性の向上】 ・試料調整不要とすることで、従来1名あたり約5分掛かる試料調整時間をゼロにできる。 ・α線とβ線を同時に測定及び複数試料を同時に測定することができるため、測定部が5式あることを想定した場合、従来1次測定（サーベイメータ測定）において1名あたり約2分（α線測定とβ線測定で各1分）掛かることから、5名分の場合は、5分短縮、10名分の場合は、10分短縮することができる。
鼻スミヤろ紙のデザインや試料採取方法		【測定の精度向上】 ・鼻スミヤ用のろ紙を試料E（和紙素材）にした場合、鼻スミヤ採取時の付着量を現行のろ紙の約7倍にすることができる。また、測定時の検出効率を現行のろ紙の約1.8倍にすることができる。 ・鼻スミヤ用のろ紙を試料E（和紙素材）にし、あらかじめろ紙を湿らせた場合、鼻スミヤ採取時の付着量をろ紙が乾燥した状態で採取する場合よりも約3倍にすることができる。 ・その他、鼻スミヤ採取装置の使用及び誰でも同一形状の鼻スミヤを製作できるろ紙を使用することで、採取者による付着量のばらつきや詳細測定時におけるろ紙のたわみによる自己吸収を低減することができる。

2.2 目標に照らした達成度

実施項目	技術成熟度（TRL）		
	現状評価	終了時目標	終了時自己評価
鼻スミヤ測定システムの概念設計及び鼻スミヤろ紙のデザインの検討	2 (応用研究)	3 (応用研究)	3 (応用研究) ○

終了時目標：

内部被ばくの有無の判断に係る測定の精度及び迅速性の向上に係る検討結果を提供する。

終了時自己評価：

- ・鼻スミヤ測定システムの概念設計について検討し、要求仕様（装置の構成、動作原理などの満たすべき要件）を技術情報（概念設計仕様書）として整理した。
- ・鼻スミヤの採取者による付着量の差異を減らすとともに付着量を増やすことで汚染の見逃し（内部被ばくの見逃し）を防止することに寄与できる鼻スミヤ材料及び試料採取方法について検討し、結果を整理した。

2.3 成果の反映先とその寄与

- ・本研究で検討した成果は鼻スミヤ測定システムに要求される仕様として利用することができ、今後、詳細設計を行い、開発することで1Fの廃炉作業において内部被ばく事象が発生した場合、迅速性、正確性を確保しつつ多人数への対応ができる。
- ・採取者による付着量の差異を減らし、付着量を増やすことで鼻スミヤ測定の精度を向上させることができる。

2.4 現場への適用性（難易度）

- ・鼻スミヤ測定システムを運用面において導入することは可能であると考えられるものの、製作設計等の詳細設計に加え、特注生産が必要になるため、コスト面や開発期間のハードルがある。
- ・鼻スミヤ材料や試料採取方法の変更については、資材の調達、マニュアルの整備により現場に適用することは容易にできると考える。

3. 今後の課題

- ・鼻スミヤ測定システムは、概念設計として要求事項を整理し、既存の機器を組み合わせで試作した段階であり、今後、詳細な設計や機能確認を行うにあたっては、測定部や乾燥部、試料セット部などは既存技術を応用することで比較的容易に開発することが可能と考えられるが、複数試料を同時に動作させ、かつ、同時に測定することを可能とする制御プログラムの開発が本検討を通じて新たに抽出された課題であり、検討の余地がある。
- ・鼻スミヤ測定の結果は、放射性物質吸入の有無の確認（スクリーニング）に用いられるが、放射性物質吸入の有無を判断するための鼻スミヤ測定の検出限界レベルは、過去に測定技術及び線量評価の観点から導出したものである。本検討で考案した鼻スミヤ測定システムは、そのレベルを満足する仕様を考慮したが、現代の要求に照らして整理・検討する必要があると考える。

事業内容

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

1. 概要

1.1 背景（現状の課題）

- ・皮膚の等価線量は単位面積当たりの放射能から評価
- ・皮膚汚染の面積がサーベイメータの検出面積よりも小さい場合、汚染面積を正確に評価することは困難。
- ・保守的な評価として汚染面積を小さく取らざるを得ず過大評価となる可能性が高い。

1.2 目的（課題の解決策）

皮膚汚染に対する測定手法を提案するために以下を実施する。

(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

皮膚汚染の面積と放射能の測定・評価の精度向上を図るため、先行事業で提案した α 線位置検出サーベイメータを応用し、どの部位でも測定が可能な β 線用ハンディー型測定器の開発のための要求事項を整理し、試作機を製作する。

(2) 汚染密度の評価精度が向上した場合の効果を評価

1 Fの主要な核種について、この測定器により汚染密度の評価精度が向上した場合の効果を測定器の効率、等価線量等も加味して評価する。

1.3 目標（技術成熟度）

実施項目と技術成熟度：

実施項目	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
皮膚汚染に対する測定手法の検討	2(応用研究)	3(応用研究)

終了時目標：

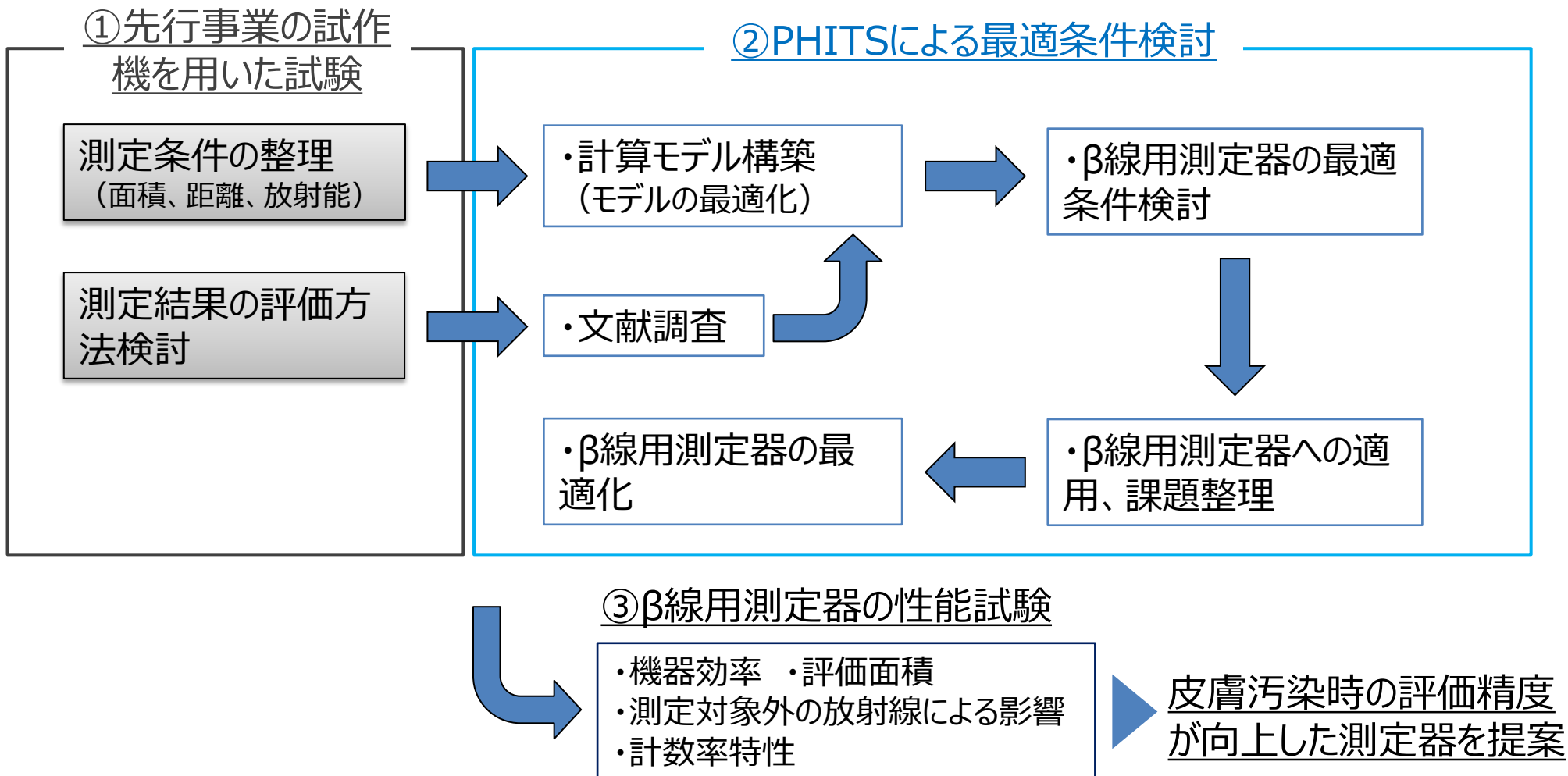
新たな測定器の開発により、1Fにおいて皮膚汚染が発生した場合の汚染面積、放射能の測定・評価の精度向上を提供する。

終了時に得られる成果物：

○皮膚汚染時の皮膚等価線量評価精度が向上した試作機

- 今回製作したβ線測定器の検出面積は約2300 mm²であり、既存のβ線サーベイメータ（GM管式）の検出面積2000 mm²よりも大きく、汚染を検出し易い。また、位置検出型光電子増倍管を使用することによって、最小36 mm²の評価面積になる。

1.4 研究フロー



2. 実績

2.1 得られた成果 詳細は次ページ以降

(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

- 皮膚汚染時の等価線量評価方法について文献調査し、評価ポイントを整理した。
- 皮膚測定条件を整理し、 β 線用ハンディー型測定器の試作機を製作した。

(2) 汚染密度の評価精度が向上した場合の効果を評価

- 「JIS Z 4329:2004 放射線表面汚染サーベイメータ」を基に試作機の性能評価を実施し、性能上問題ないことを確認した。
- 試作機と既存の β 線用サーベイメータ（GM管式）を比較し、汚染面積、放射能の測定・評価の精度向上が図られたことを確認した。

2.1 得られた成果 (1/14)

(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

○皮膚測定条件の整理 (文献調査)

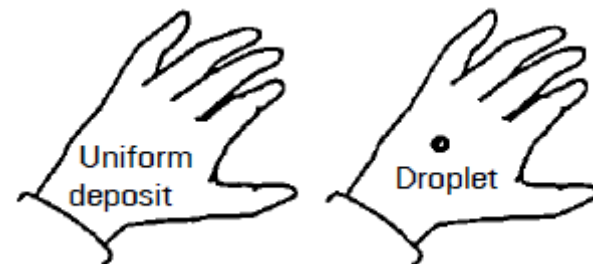
- ・皮膚の等価線量は単位面積当たりの放射能から評価
- ・皮膚の等価線量への寄与が大きい β 線核種(Sr-90/Y-90、Cs-137等)を対象

参考文献

『RADIONUCLIDE AND RADIATION PROTECTION DATA HANDBOOK 2nd Edition (2002)』(Radiation Protection Dosimetry Vol.98 No.1 2002)

例) Sr-90/Y-90 Contamination skin dose ($\text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}$)

Uniform deposit ($1 \text{ kBq}\cdot\text{cm}^{-2}$)	3.51E+0
0.05 ml droplet (1 kBq)	1.96E+0



均一な汚染(面汚染)と液滴汚染(スポット汚染)を想定

皮膚汚染時の評価方法

等価線量皮膚 (mSv) =

放射能 (kBq) $\times$ 換算係数 ($\text{mSv}\cdot\text{h}^{-1}/\text{kBq}$) $\times$ 汚染継続時間 (h)

2.1 得られた成果 (2/14)

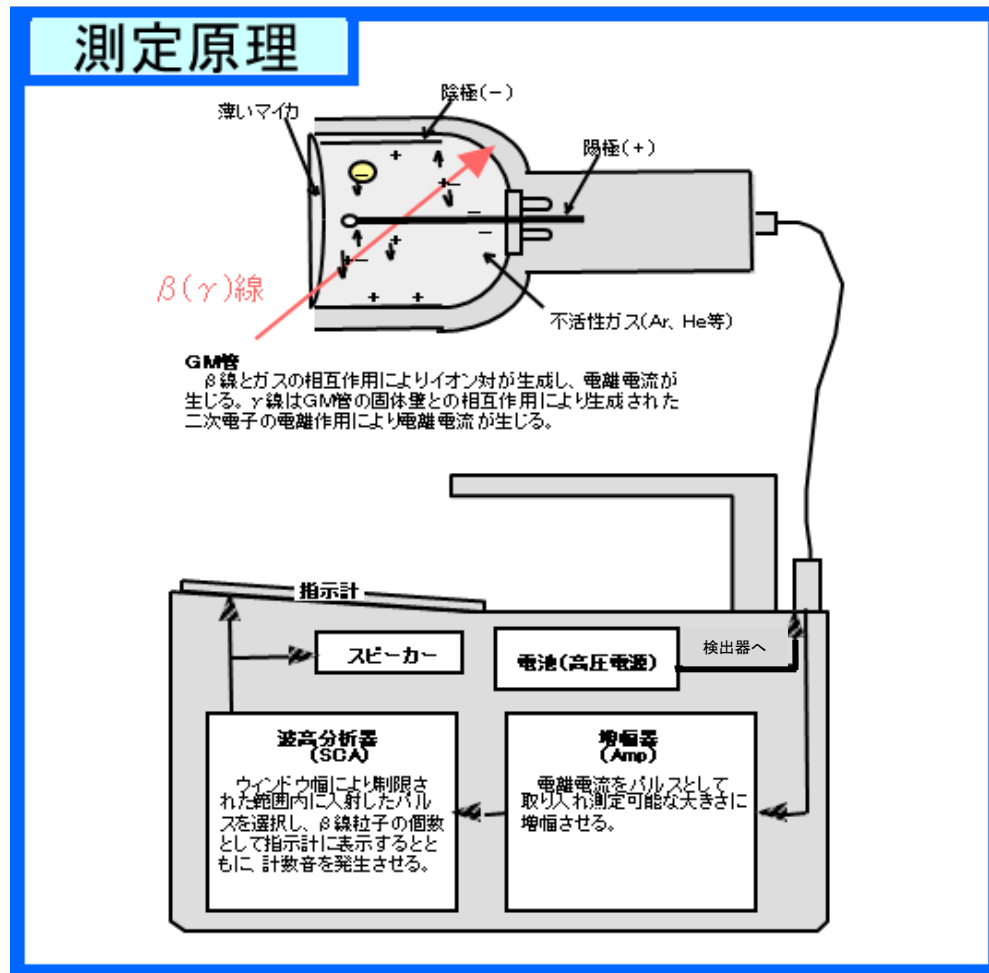
(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

○皮膚測定条件の整理 (既存測定器の仕様)

- ・機器効率：25%以上
- ・測定レンジ：0～100 kcpm
- ・有効面積：2000 mm²



既存の β 線用サーベイメータ (GM管式)



2.1 得られた成果 (3/14)

(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

○皮膚測定条件の整理 (試作機の仕様検討)

皮膚汚染の面積がサーベイメータの検出面積よりも小さい場合、汚染面積を正確に評価することは困難であるため、保守的な評価としては汚染面積を小さく取らざるを得ず過大評価となる可能性が高い。

位置検出型光電子増倍管 (PSPMT)

型式 : H12700(浜松ホトニクス製)

プラスチックシンチレータ(= β 線測定)

型式 : BC-400(サンゴバン製)

アルミ膜(= 遮光、 α 線遮蔽)

測定距離 : 10 mm

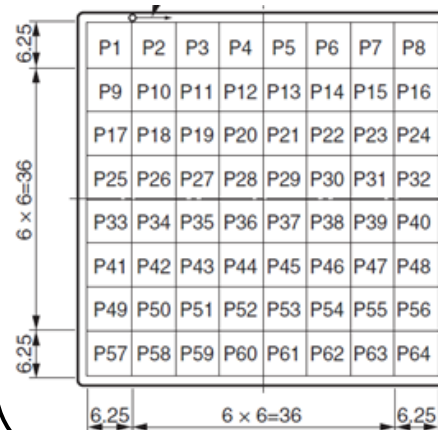
汚染

β 線

光

既存サーベイメータで汚染の有無を確認し、BG等の低い作業エリアで精度良く汚染の面積、放射能を測定することを想定

検出面積の小さな
PSPMTを採用
(1chが約6 mm四方)



汚染-検出器の位置関係図

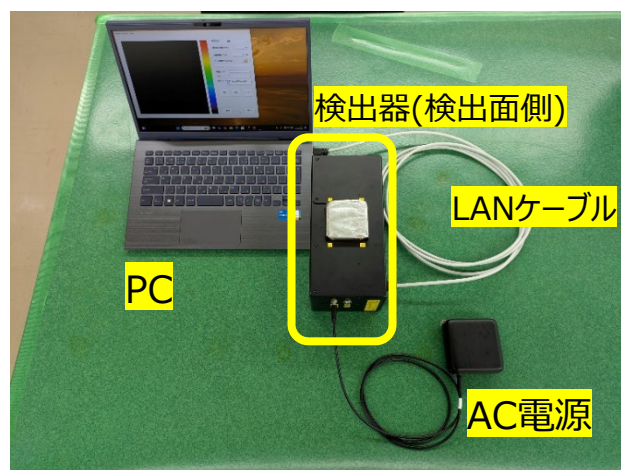
2.1 得られた成果 (4/14)

(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

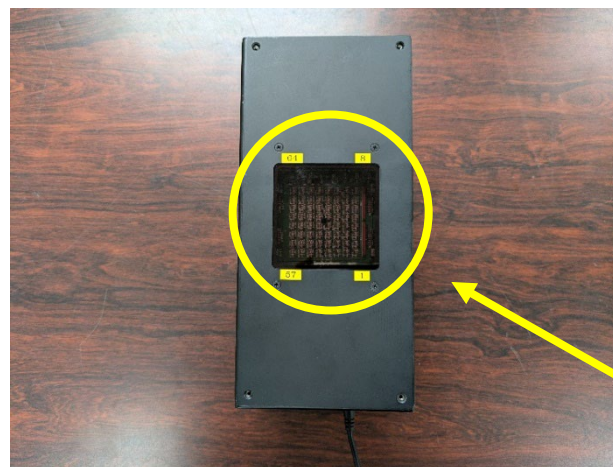
○ β 線用ハンディー型測定器の試作機

【調整項目】

- ・ アルミ膜厚さ
 - ・ プラスチックシンチレータ厚さ
 - ・ 印加電圧 (最大1000 V)
 - ・ コンパレータ閾値 (波高)
 - ・ メッシュ状コリメータの有無
- 最適厚検討 (計算)
- 出力波形確認試験、機器効率試験
- 評価面積の検討



装置全体図



検出器(表示部側)

64chと1対1に対応したLEDディスプレイを持ち、イベントに対応してLEDが点灯する。

2.1 得られた成果 (5/14)

(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

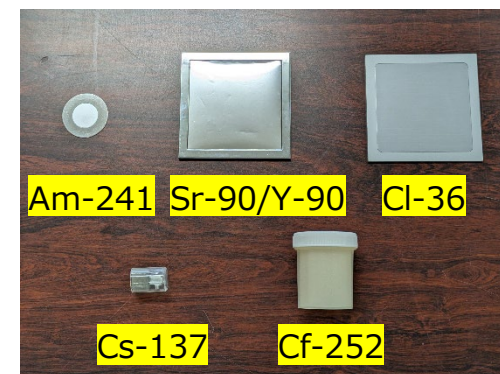
○ β 線用ハンディー型測定器の試作機



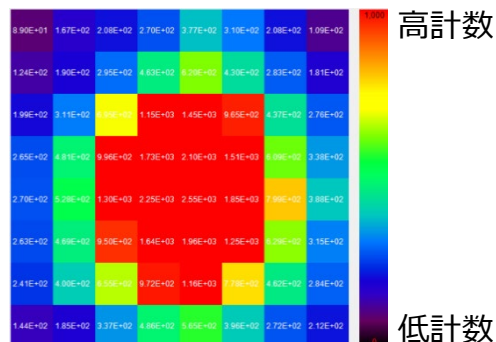
試作機使用イメージ



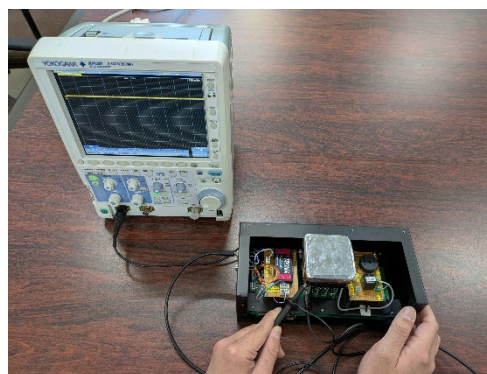
測定用治具を用いた測定風景



標準線源例



Sr-90/Y-90線源測定時の測定画面例
(1ch毎に計数値に応じ色別表示可能)



オシロスコープによる波形取得風景



コリメート γ 線照射装置

2.1 得られた成果 (6/14)

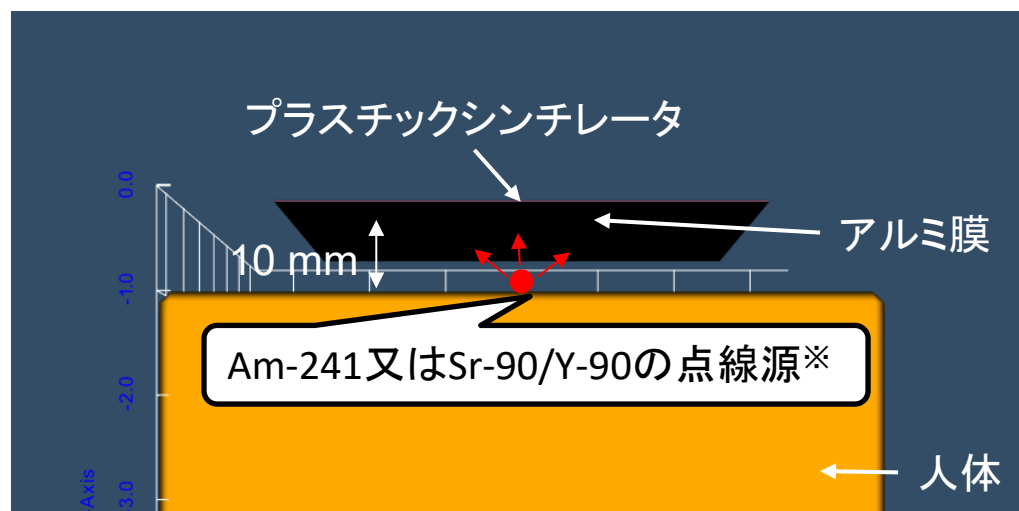
(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

○アルミ膜の最適厚検討

β 線放出核種を測定対象とした皮膚汚染測定用の検出器を製作するにあたり、 α 線による影響を低減化する必要がある。

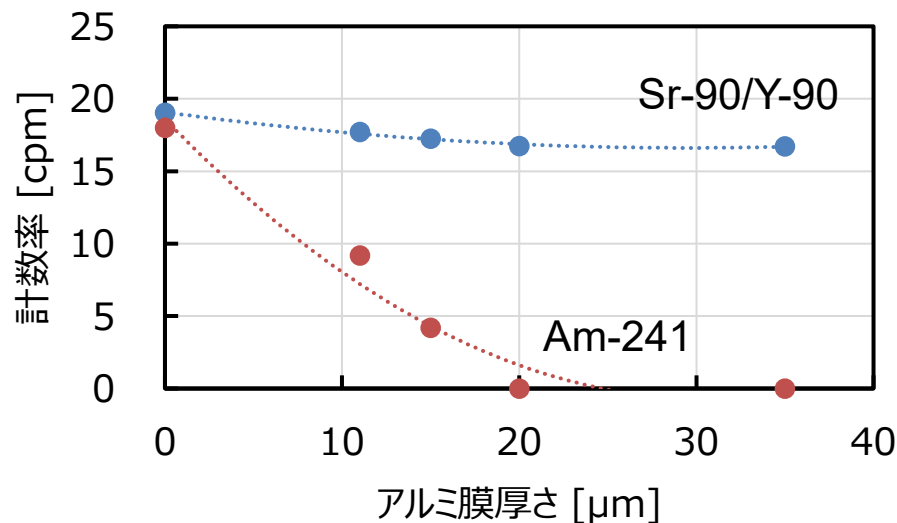
- PHITSを用いて、検出器表面を覆うアルミ膜の適切な厚さを求めた。また、アルミ膜による β 線の減衰影響を確認した。

人体表面に線源があると想定



PHITSにおける体系図

アルミ膜厚さ20 μm で α 線を遮蔽可能であり、 β 線が約12%減衰する。



アルミ膜厚さに対する計数率の関係図

※シミュレーション上は、体積・面積を持たない点として線源を想定

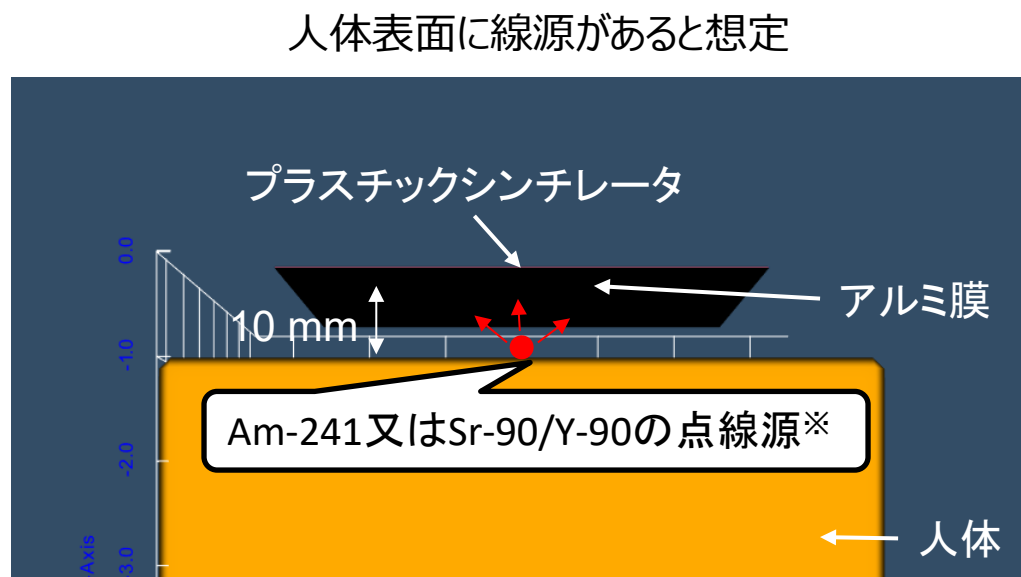
2.1 得られた成果 (7/14)

(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

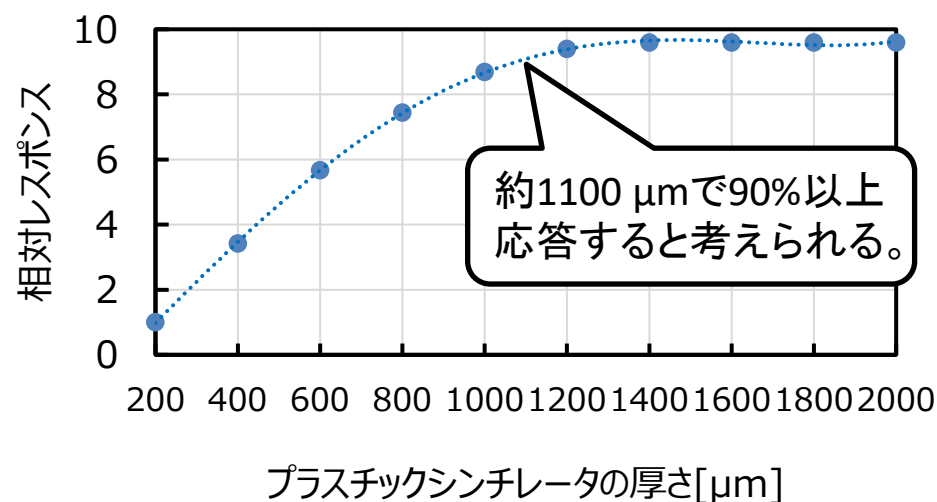
○プラスチックシンチレータの最適厚検討

測定対象であるSr-90/Y-90の β 線を十分に計数可能であるプラスチックシンチレータの厚さを有する必要がある。しかし、厚くなると外部放射線の影響を受けやすくなる。

➤ PHITSを用いて、Sr-90/Y-90に対するプラスチックシンチレータ厚さごとの応答を調べた。



PHITSにおける体系図



Sr-90/Y-90に対する
プラスチックシンチレータ厚さごとの応答
(厚さ200 μm のときの応答を1とする。)

※シミュレーション上は、体積・面積を持たない点として線源を想定

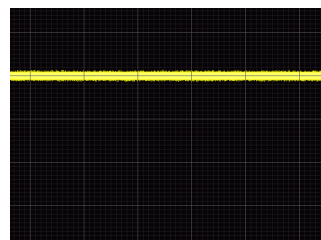
2.1 得られた成果 (8/14)

(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

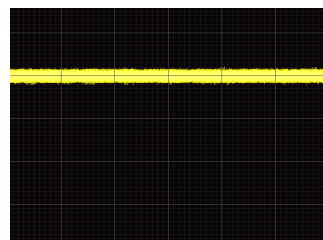
○出力波形確認試験 (α 線・中性子線の影響)

BG(線源なし)、標準線源による α 線(Am-241線源)、 β 線(Sr-90/Y-90線源、Cl-36線源)、 γ 線(Cs-137線源)、中性子線(Cf-252線源)を照射した際のPSPMT出力波形を確認した。

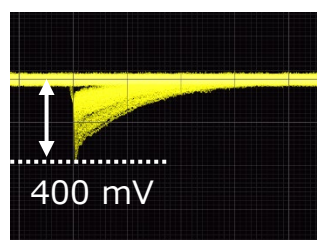
また、そのときの計数率も測定し、 β 線以外の放射線の影響を確認した。なお、BGについては「JIS Z 4329:2004 放射線表面汚染サーベイメータ」を基に、 $0.2 \mu\text{Gy/h}$ 以下の環境において、10分以上の計数時間における積算の自然計数を測定し、その結果から自然計数率を求めた。



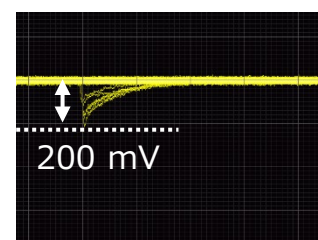
BG



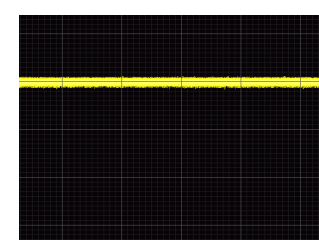
α 線(Am-241)



β 線(Sr-90/Y-90)



β 線(Cl-36)



中性子線(Cf-252)

印加電圧 : 800 V

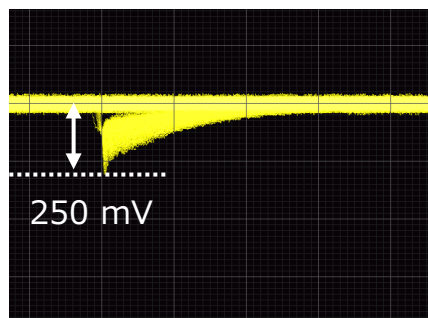
- α 線はBGと同程度。⇒ アルミ膜で α 線は計数しない。
- β 線の波高はBGに対して十分大きかった。⇒ β 線を検出できる。
- 中性子線はBGと同程度。⇒ 中性子線の影響は $3.5 \mu\text{Sv/h}$ ではほとんどない。

2.1 得られた成果 (9/14)

(1) β 線用ハンディー型測定器の試作機製作

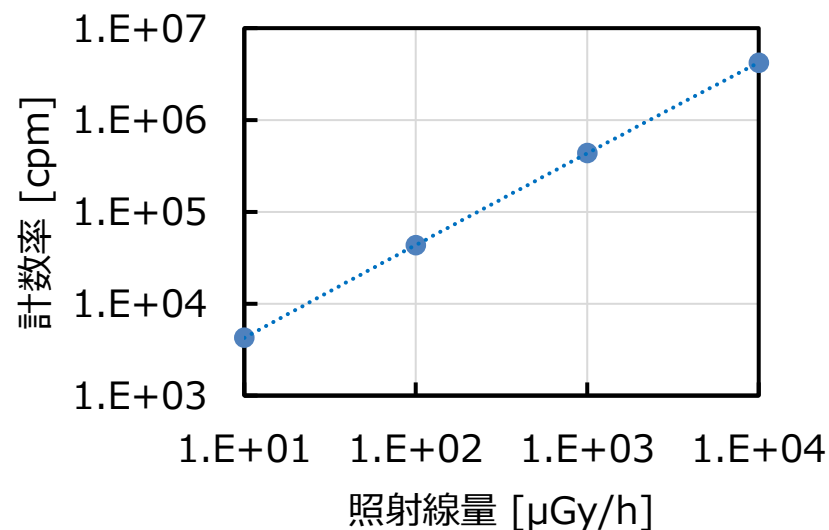
○出力波形確認試験 (γ 線の影響)

γ 線について、「JIS Z 4329:2004 放射線表面汚染サーベイメータ」を基に、照射装置による $10 \mu\text{Gy/h}$ 以上の γ 線(Cs-137)を照射した際の計数率から $10 \mu\text{Gy/h}$ あたりの計数率を求めた。



γ 線(Cs-137)

印加電圧 : 800 V



γ 線の影響が見られた。

⇒ γ 線環境下で使用する場合は
正味計数率を算出する必要がある。

γ 線の影響は照射線量に対して
比例関係であった。

2.1 得られた成果 (10/14)

(2)汚染密度の評価精度が向上した場合の効果を評価

○機器効率試験

「JIS Z 4329:2004 放射線表面汚染サーベイメータ」を基に、Sr-90/Y-90線源及びCl-36線源(JISに記載)を測定した際の機器効率を以下の式より算出した。

$$\varepsilon_i = \frac{N}{\varphi \times A}$$

ε_i : 機器効率
 N : 正味計数率 (s^{-1})
 φ : 線源の単位面積当たりのβ線表面放出率 (s^{-1}/cm^2)
 A : 検出器の入射窓面積 (cm^2)

【測定条件】

プラスチックシンチレータ厚さ … 1090 μm

印加電圧 … 800 V

コンパレータ閾値 … 150 mV

線源からの距離 … 5 mm(JISに記載)

10 mm

測定時間 … 60秒

	距離	機器効率
Sr-90/Y-90	5 mm	56%
Cl-36		34%
Sr-90/Y-90	10 mm	55%
Cl-36		32%

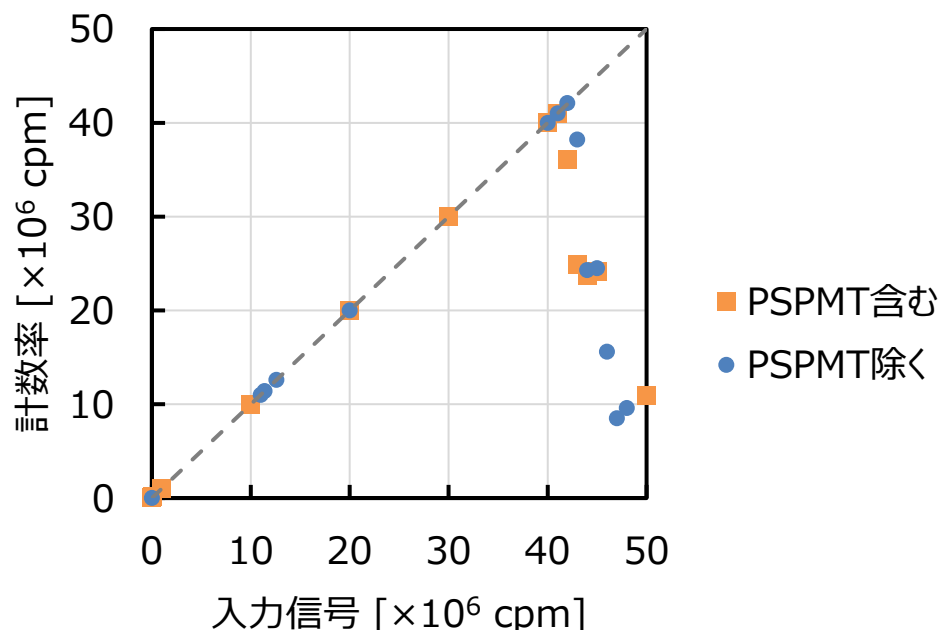
既存β線用サーベイメータと同等の機器効率であることを確認した。

2.1 得られた成果 (11/14)

(2)汚染密度の評価精度が向上した場合の効果を評価

○直線性試験

「JIS Z 4329:2004 放射線表面汚染サーベイメータ」を参考に、計数回路(測定部)にパルス発生器からパルス信号を入力した際の計数率を確認した。また、検出器(PSPMT)を含む計数回路にLEDを用いて放射線を模擬した信号を入力した際の計数率を確認した。



測定器の計数率上限は41 Mcpm

PSPMTの有無に関わらず41 Mcpmまでは直線性があり、41 Mcpmを超える信号を入力した場合、数え落としがあることを確認した。



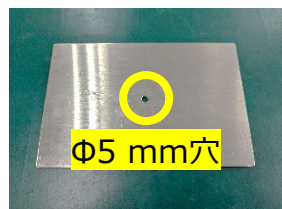
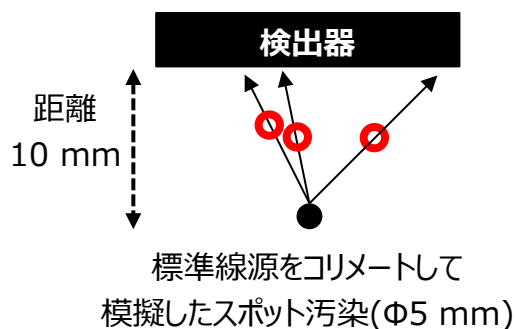
Sr-90/Y-90の機器効率を55%とした場合、約1.2 MBqまで測定可能だと考えられる。

2.1 得られた成果 (12/14)

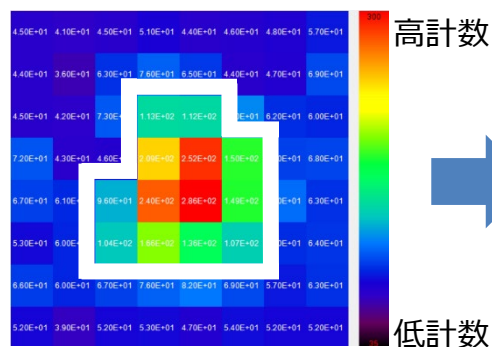
(2)汚染密度の評価精度が向上した場合の効果を評価

○評価面積の検討 (その1)

Sr-90/Y-90の標準線源に穴空きコリメータを用いてスポット汚染を模擬し、検出面積を確認した。
また、検出器(PSPMT)にメッシュ状コリメータを用いて、検出器に斜めに入射するβ線を抑制することで、更に検出面積の向上が図れるかを確認した。

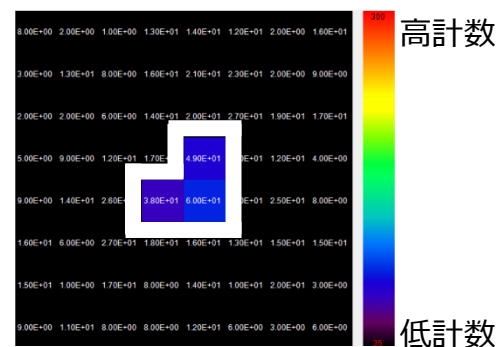


穴空きコリメータ

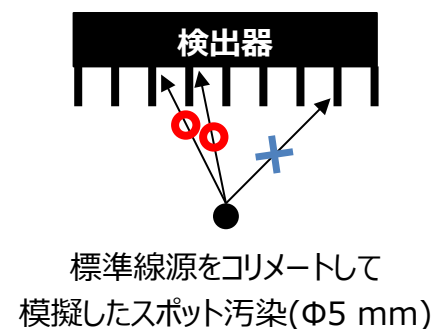


メッシュ状コリメータ：なし

模擬したスポット汚染の検出面積を白枠内と想定した場合、
1ch平均計数率は5.4 cpmから1.6 cpmに低下した。



メッシュ状コリメータ：あり



メッシュ状コリメータ

メッシュ状コリメータを用いることで、検出面積が抑えられ、
評価面積の精度が向上した。

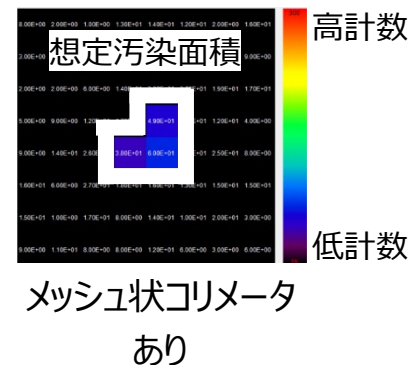
2.1 得られた成果 (13/14)

(2)汚染密度の評価精度が向上した場合の効果を評価

○評価面積の検討 (その2)

穴空きコリメータを用いてΦ5 mmのスポット汚染を模擬したSr-90/Y-90の標準線源に対して、距離を10 mm離して、既存β線用サーベイメータ(GM管式)及びメッシュ状コリメータを用いた試作機で計数率を測定し、単位面積当たりの放射能を算出した。

	既存β線用サーベイメータ(GM)	試作機(メッシュ状コリメータあり)
計数率	199 cpm	5 cpm (3ch合計)
機器効率	48%	4.5%
検出面積	2000 mm ²	108 mm ² (3ch合計)
単位面積当たりの放射能	0.4 Bq/cm ²	1.7 Bq/cm ²



既存サーベイメータと比較して、単位面積当たりの放射能の測定・精度が向上した。

2.1 得られた成果 (14/14)

(2)汚染密度の評価精度が向上した場合の効果を評価

○既存β線用サーベイメータ (GM管式) と試作機の比較

	既存β線用サーベイメータ(GM)	試作機(プラスチックシンチレータ)
自然計数率	約100 cpm	約140 cpm
機器効率	25%以上 (Cl-36)	55% (Sr-90) 32% (Cl-36)
最小検出面積	2000 mm ²	36 mm ² (1ch)
測定レンジ	0～100 Kcpm (～6.7 KBq) 機器効率25%の場合	0～41 Mcpm (～1.2 MBq) 機器効率55%の場合

- ・ 自然計数率、機器効率は既存β線用サーベイメータと同等であった。
- ・ 位置分解能(最小検出面積)は既存β線用サーベイメータより向上した。



単位面積当たりの放射能の測定・評価の精度が向上したため、
皮膚等価線量の評価精度も向上したといえる。

2.2 目標に照らした達成度

実施項目	技術成熟度 (TRL)		
	現状評価	終了時目標	終了時自己評価
皮膚汚染に対する測定手法の検討	2 (応用研究)	3 (応用研究)	4 (実用化研究) ○

終了時目標：

新たな測定器の開発により、1Fにおいて皮膚汚染が発生した場合の汚染面積、放射能の測定・評価の精度向上を提供する。

終了時自己評価：

新たな測定器の開発により、1Fにおいて皮膚汚染が発生した場合の汚染面積、放射能の測定・評価の精度向上を提供した。

2.3 成果の反映先とその寄与

- 1F及びその他の原子力施設において皮膚汚染事象が発生した場合、この測定器を用いることで、より正確な汚染密度を評価することが可能となる。
- 正確な汚染密度を評価することで、皮膚等価線量の被ばく線量評価の精度を向上させることができる。

2.4 現場への適用性（難易度）

- 従来のサーベイメータと同様に使用することができ、取り扱いに特殊な技術を要しないことから、現場への適用性は高い。

3. 今後の課題

- ・本測定器は試作段階であり、現場への適用には使いやすさやメンテナンスの点で改善の余地があることから、最適なデザインを検討した上で、1Fまたはその他の原子力施設に適用可能な測定器とする必要がある。
- ・皮膚汚染時の皮膚等価線量評価精度をさらに向上させるための測定方法を検討する余地がある。
- ・本測定器は β 線のみ測定可能だが、 α 線及び β 線の混在環境下で各線種を判別可能な測定技術（測定器）とする検討の余地がある。

事業内容

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

略語・専門用語の説明

略語・専門用語	説明
αカメラ	2022年度までの国プロ ^{[1][2][3]} で研究開発を行った装置。 α線による空気中の窒素の紫外線発光を計測することにより、 0.5～3.0m離れた距離からα核種を検知する。
Gゾーン	福島第一原子力発電所では、放射性物質の汚染状態に応じて以下の ようにエリアを区分している。 ・ G (Green) ゾーン：最も汚染の低いエリア ・ R (Red) ゾーン：最も汚染の高いエリア ・ Raゾーン：Rゾーンのうちα汚染のリスクが高いエリア (https://www.tepco.co.jp/decommission/progress/environment/)
Rゾーン	
Raゾーン	
PMT	光電子増倍管「Photomultiplier Tube」の略語
HWHM	半値半幅「half width at half maximum」の略語

[1]平成30年度補正予算「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発）」2020年度最終報告

[2]令和3年度開始「廃炉・汚染水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発）」2021年度最終報告

[3]令和4年度開始「廃炉・汚染水・処理水対策事業費補助金（固体廃棄物の処理・処分に係る研究開発（セシウム吸着塔からの吸着材採取技術および固体廃棄物の分別に係る汚染評価技術の開発）」
最終報告（その1）

1. 概要

1.1 背景（現状の課題）

- 内部取り込みは、作業終了後の汚染防護装備脱装時のクロスコンタミネーションが原因となる場合があり、汚染防護装備脱装中の汚染コントロールが重要となる。
- 脱装後に行う身体汚染検査は、身体表面に汚染がないことを確認する重要なプロセスであり、特にα核種の汚染に対してサーベイメータを用いる場合、検出器を身体表面にほぼ密着させた状態でゆっくりと動かす必要があり**検査に時間を要するとともに、狭隘で検出器の密着が困難な部位**や、レベルが小さい汚染を確実に検出するには、**測定者に高度な技量が求められる。**
- **遠隔でα汚染を検出することによりクロスコンタミネーションの可能性を低減させることが考えられる。**過去に開発された、α線による空気の窒素発光を検出することで遠隔測定を可能とする技術(αカメラ技術)を用いることで**網羅的な測定が考えられる。**
- αカメラ技術は建屋内部や構築物を測定することを目的として研究開発を行っていたため**体表面汚染測定に適用することが可能か検討**を行う必要がある。

1.2 目的（課題の解決策）

- α線による空気中の窒素の紫外線発光を計測することにより1 m以上離れてもα核種の汚染を検知することのできるαカメラ技術の身体表面汚染測定への適用を検討する。
- αカメラ技術の測定体系を検討するとともに、人体の狭隘部の測定可能性について基礎データの取得等を実施する。

1.3 目標（技術成熟度）

実施項目と技術成熟度：

内容	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討	1(基礎研究)	2(応用研究)

終了時目標：

- ・身体表面汚染測定への適用を検討する。
- ・人体の狭隘部の測定の可能性について基礎データの取得を実施する。

終了時に得られる成果物：

- ・ αカメラ技術の身体表面汚染測定への適用を検討する際の
技術的課題の整理
- ・ αカメラ技術の身体表面汚染測定試作機

1.4 研究フロー

①身体α汚染計測技術の シミュレーションによる検討

α線汚染測定を行うプロセスの特定

身体汚染計測可能性の検証

測定精度の向上

②身体汚染測定用αカメラ (試作機)の製作

センサー

測定回路

手

暗箱+治具

手を測定する試作機のイメージ

αカメラ技術の身体表面汚染測定への適用を提案

2. 実績

2.1 得られた成果 詳細は次ページ以降

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

- 身体汚染測定用αカメラの要件の整理
- 基礎データの取得
- 狭隘部測定可能性の評価
- 体表面全身測定体系の素案作成

(2) 身体汚染測定用αカメラ（試作機）の製作

- α線源を測定可能な試作機の製作
- シミュレーションと試験結果の比較による測定方法の検証
- 検出器を利用した検出可能な汚染密度の評価

2.1 得られた成果（1/40）

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

α核種汚染検査が必要なプロセスについての整理

- ・（ヒアリング結果から）1 Fにおいて身体表面へのα核種付着測定を行うプロセスとして二つのパターンがありうる。

1. Raゾーン退出時

- ・アノラックや全面マスクのスミヤでは採取した箇所のα核種の有無しかわからないため網羅的に身体表面の付着を確認できるとよい。
- ・空間線量率が高いため、短時間での測定が必要。

2. 出入管理所の汚染検出

- ・現行ではZnSサーベイメータによる測定を行っており、時間がかかっている
- ・出入管理を行うため、 0.4 Bq/cm^2 （表面密度限度の1/10）のα核種汚染の有無を厳密に測定する必要がある。
- ・キーマトリックとして①検出感度②可搬性③動力源④高線量γ線の影響⑤測定時間⑥設置スペースを評価する必要がある。

これらのヒアリング結果をもとに研究開発の目標とするプロセス、評価項目について整理を行うこととした。

2.1 得られた成果 (2/40)

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

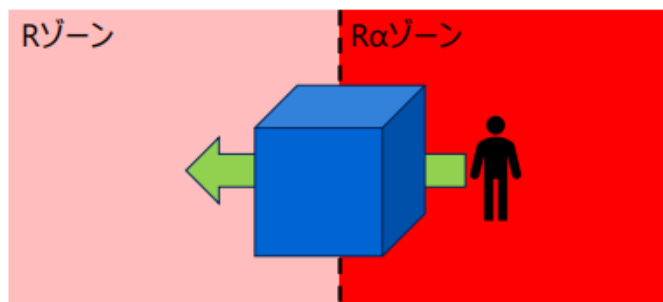
○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

・ヒアリングからの運用方法の想定

1.Rαゾーン退出時

- ・アノラックや全面マスクのスミヤでは採取した箇所のα核種の有無しかわからないため網羅的に身体表面の付着を確認できるとよい。
- ・空間線量率が高いため、短時間での測定が必要。

想定する運用



課題

- ・常にα汚染があると考えられるため一度測定したら中身を除染する必要がある。
- ・ポリエチレンなどによる養生も考えられるが過年度の試験から養生シート自体が発光源となるため検出下限を下げるためには 長時間の測定が必要。
- ・β汚染を考慮する必要がある。
- ・（体ごと全部暗箱に入る必要がある。）

2.1 得られた成果 (3/40)

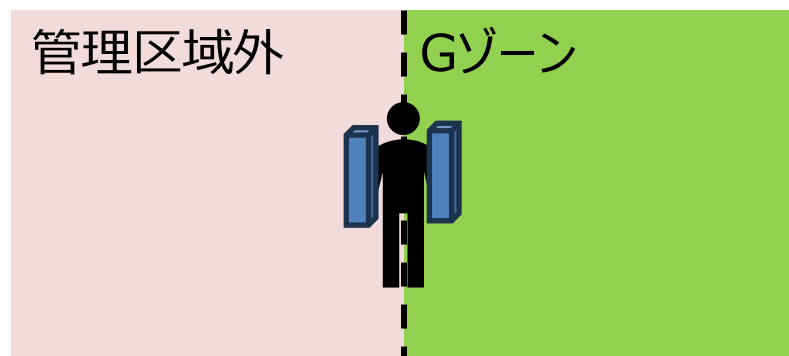
(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

・ヒアリングからの運用方法の想定

2. 出入管理所の汚染検出

- ・現行ではZnSサーベイメータによる測定を行っており、時間がかかっている。
- ・出入管理を行うため、 0.4 Bq/cm^2 （表面密度限度の1/10）のα核種汚染の有無を厳密に測定する必要がある。



- ・防護服を脱いで管理区域外に出るときの最終チェックに使用
- ・防護装備の隙間の養生から漏れていることが想定されるため、手首回り・足首回りが特に確認が必要となる箇所である。

課題

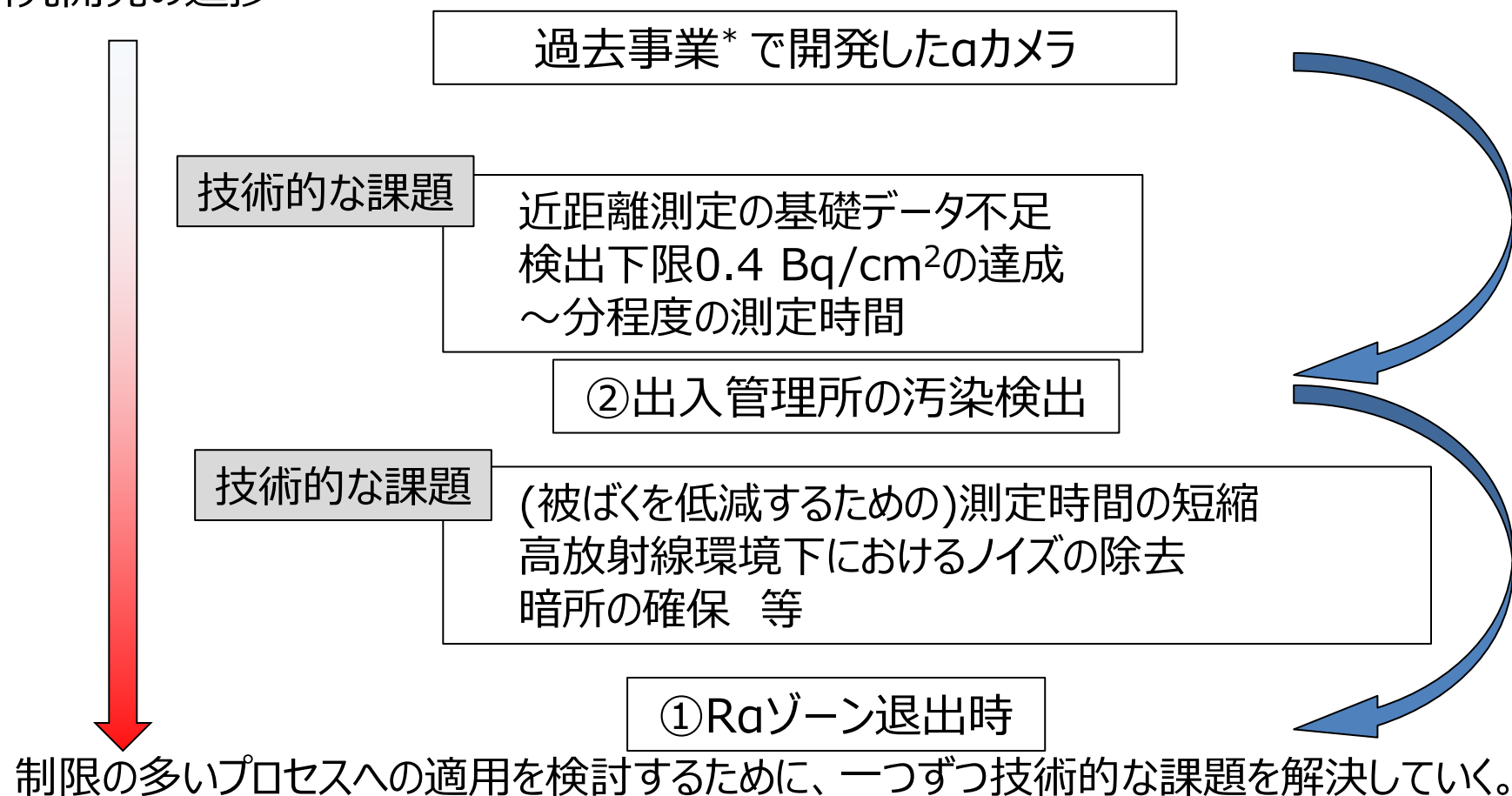
- ・検出下限を尤度を持って達成する必要がある。
- ・ZnSサーベイメータに比べて十分に測定時間が短い必要がある。

2.1 得られた成果（4/40）

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

研究開発の進捗

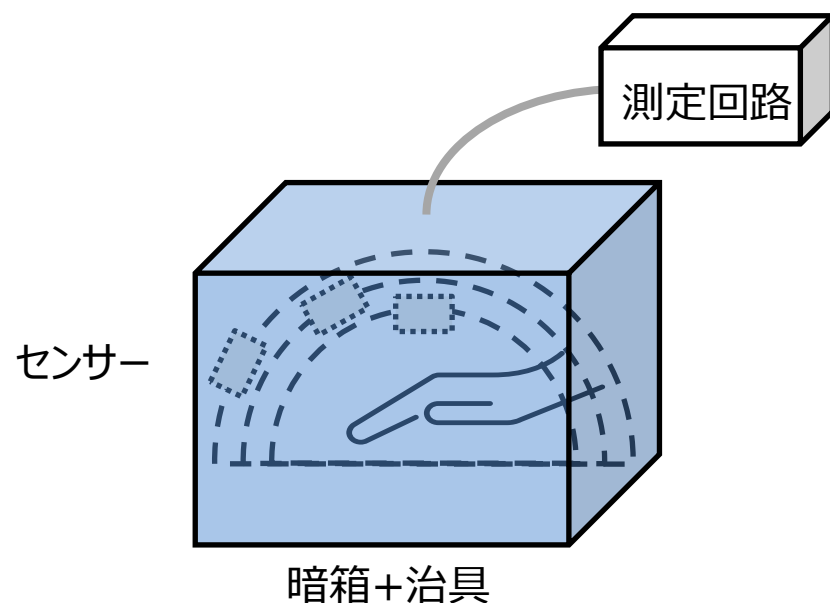


2.1 得られた成果 (5/40)

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

・試作機の概要



- ・センサーを位置を自由に変更できるような治具を設計し
複数方向からの窒素発光測定が可能な装置を試作
- ・暗箱内部から発光体を排除
- ・測定箇所→手を想定
その他の測定箇所や物品が測定可能な形状とする
- ・測定距離→～20 cm
- ・集光系→着脱可能(測定距離に制約あり)
- ・測定角度→0～180度
- ・センサー→四つ
- ・測定回路→閾値を決めて波高弁別
計数率を取得できるような回路

2.1 得られた成果（6/40）

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○基礎データを取得するための試験手法の検討

遠隔α汚染計測技術の身体表面検査への適用検討に際し、以下二つの大項目について試験を計画した。

(a) 身体測定時の基礎データの取得

開発する測定装置を運用するモデルケースを検討し、その条件で運用するための基礎的なデータを取得し、シミュレーションによる模擬を行う。

(b) 身体を模擬した形状の測定データの取得

身体表面や指の間・脇の下等狭隘部のα汚染を模擬した体系を様々な角度から測定し、概念設計に必要な基礎データを取得する。

項目	実施項目	概要
(a) 身体測定時の基礎データの取得	(1)距離依存性測定試験	近距離測定時における計数率の距離依存性を測定
	(2)角度依存性測定試験	汚染を測定する際の測定角度が計数率に与える影響を測定
	(3)汚染サイズの測定への影響確認試験	汚染サイズと測定距離が計数率に与える影響を測定
(b) 身体を模擬した形状の測定データの取得	(1)防護装備の影響評価試験	測定時に装着していることが想定される材質の発光量を評価
	(2)測定方向の影響評価試験	α汚染が検出器の死角にある時の計数率を評価
	(3)狭隘部測定試験	線源を板等で挟み計数率への影響を確認

2.1 得られた成果（7/40）

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

・試験結果の試作品仕様への反映

実施項目	評価するパラメータ	αカメラの値	試作機の値
(1)距離依存性測定試験	測定距離	0.5 ～ 3.0 m	本報告における 試験結果から決定
(2)角度依存性測定試験	測定角度	未検証	
(3)汚染サイズの測定への影響確認試験	汚染サイズ	未検証	

測定距離　－　想定される検出器のサイズと検出装置一式の大きさに反映

測定角度　－　検出器の配置と個数の関係に反映

汚染サイズ　－　想定される検出器のサイズと検出装置一式の大きさに反映

2.1 得られた成果 (8/40)

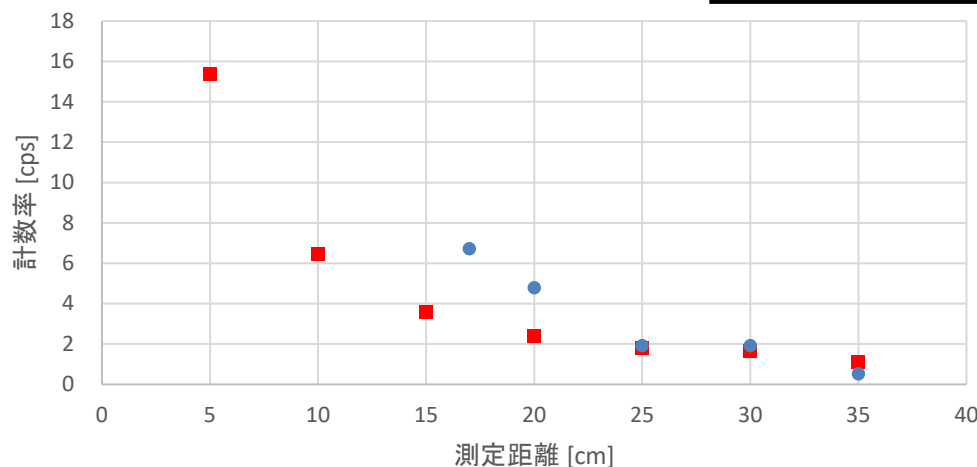
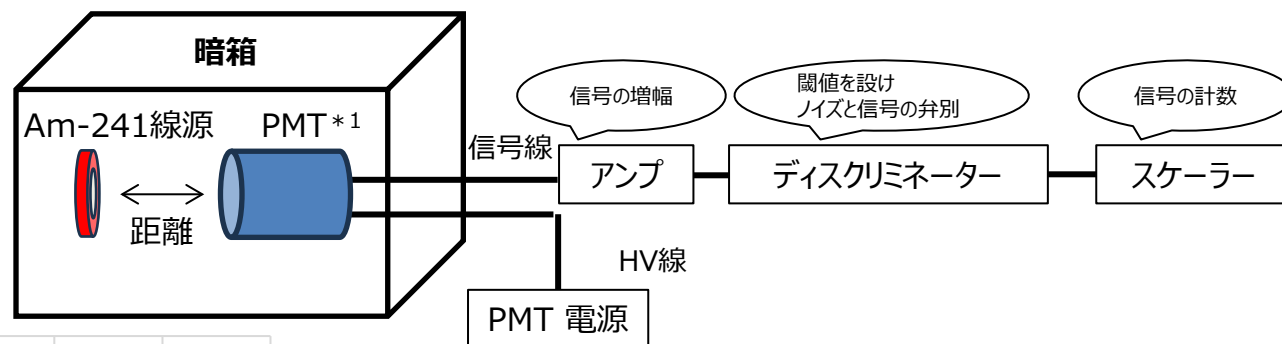
(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

・距離依存性測定試験

試験概要

- ・暗箱内部に線源とPMTを設置
- ・線源強度は 4.36×10^3 α emission (2π)
- ・距離を変えながら計数率を測定
- ・線源なしの状態での測定を行いBGを差し引く
- ・集光レンズを装着した状態での測定も実施



■ 集光レンズなし ● 集光レンズあり
測定距離と計数率の関係 (測定試験)

- ・0.5～3.0 mの結果度同様に距離の二乗に反比例
- ・集光系を装着することで約二倍の集光効率の増加
 - └ 一方で、光線追跡による解析と比べて集光率低。これは測定距離が短いため、焦点距離を短く設定する必要があり、角度をつけて集光しているため反射が起こっていると考察される。

* 1 光電子増倍管 (Photomultiplier Tube)

2.1 得られた成果 (9/40)

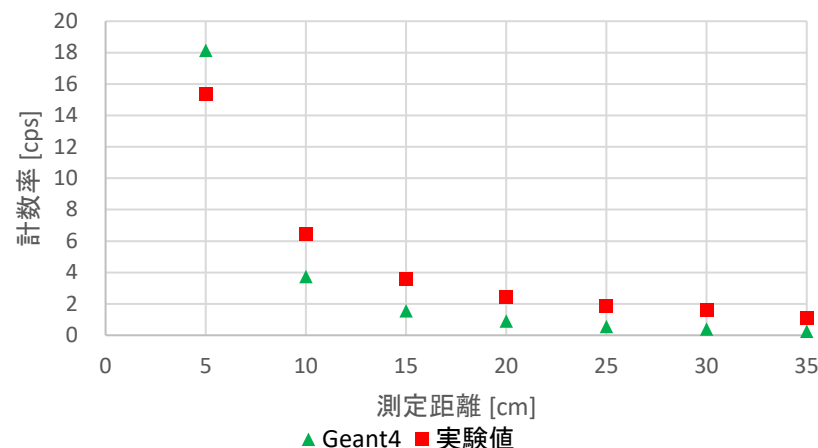
(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

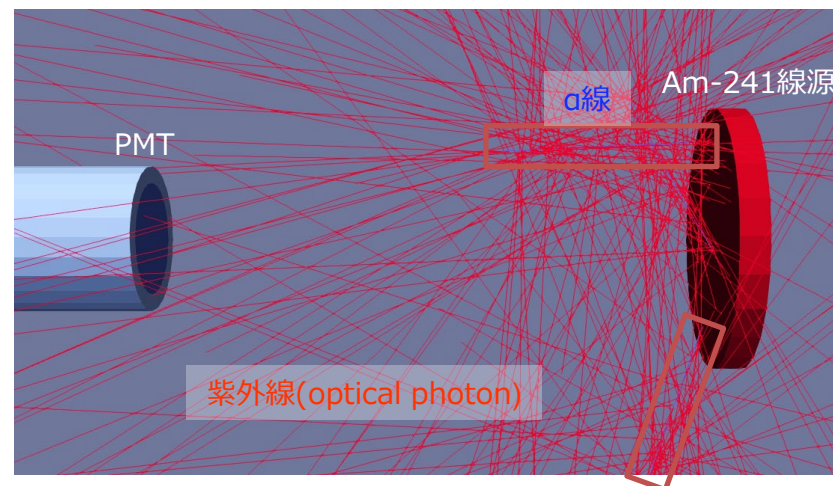
・距離依存性試験のシミュレーション

シミュレーション概要

- ・Geant4^[1] [2] [3]を用いたモンテカルロシミュレーションを実施
 - ・線源ホルダーとPMTをモデリング
 - ・窒素によるシンチレーションを模擬
 - ・発生した光子が光電面に到達した数をカウント
 - ・到達した光子数に量子効率をかけて計数率を推定
 - ・ 10^6 eventのα線(5.4 MeV)を発生させてシミュレーション
- その後を使用した線源の放射能(4.36 alpha emission)にスケーリング



測定距離と計数率の関係 (シミュレーション)



- ・既存のαカメラではFactor 2程度で計数率を再現。それと比較し、近距離測定に対しても同程度に再現が可能であることを確認
- ・今後集光系の体系を作成し、光学系有の場合についてもシミュレーションを行う予定

参考文献

- [1] "Geant4—a simulation toolkit". Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 506 (3): 250
- [2] "放射線シミュレーションのためのツールキットGeant4", 放射線 Ionizing radiation 43(2), 59-68, 2017-05
- [3] <https://geant4.org>

2.1 得られた成果 (10/40)

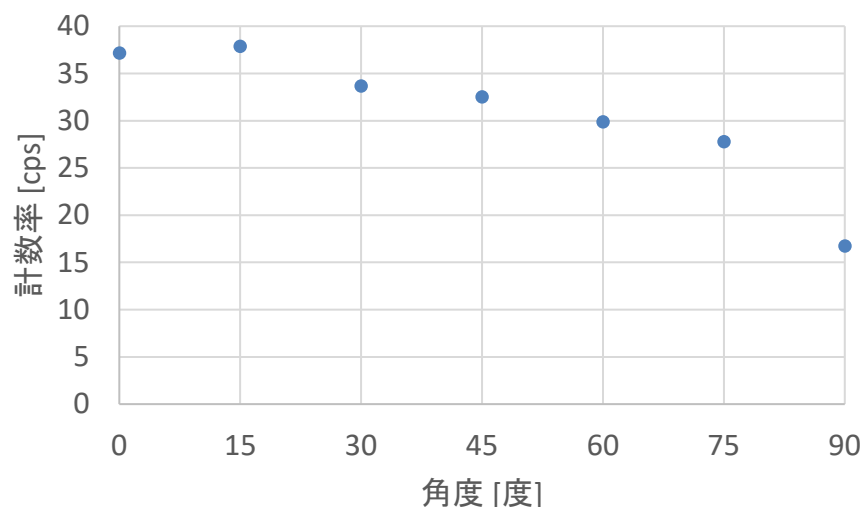
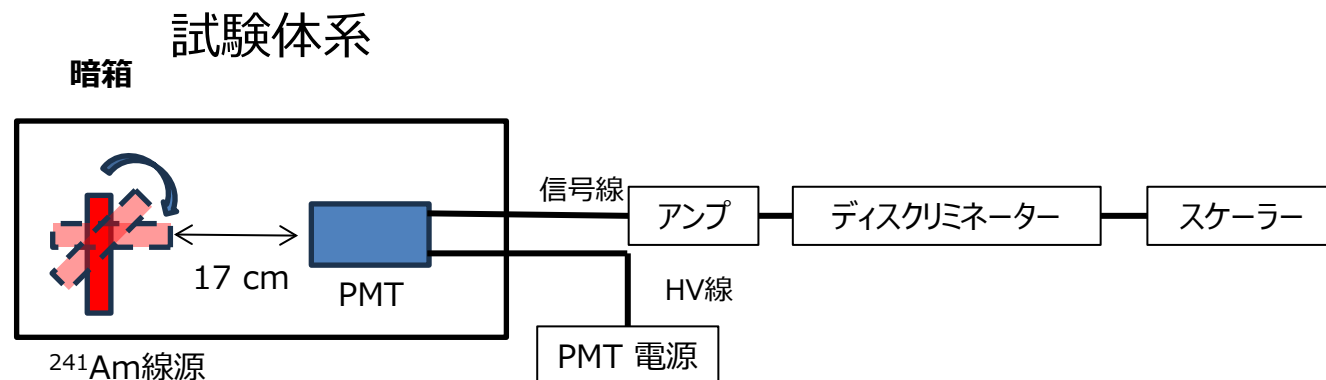
(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○ 身体汚染測定用αカメラの要件の整理

・ 角度依存性測定試験

試験概要

- ・ 暗箱内部に線源とPMTを設置
- ・ 線源強度は 4.36×10^3 α emission (2π)
- ・ 角度を変えながら計数率を測定
- ・ 線源なしの状態で行いBGを差し引く
- ・ 集光レンズを装着した状態で測定



角度と計数率の関係 (測定試験)

- ・ 正面からの測定に対して、
45度の測定で約87%、90度(真横から)の測定で約42%の減少
└ 視野の変化により発光率の変動。体表面の測定には
～45度程度の検出器角度による測定が望ましい。

2.1 得られた成果 (11/40)

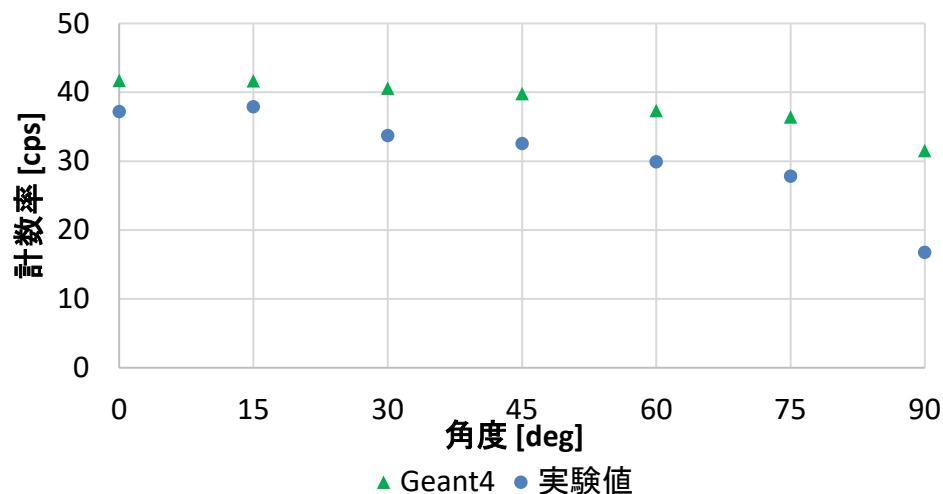
(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

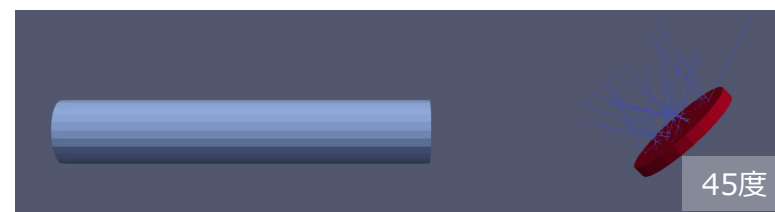
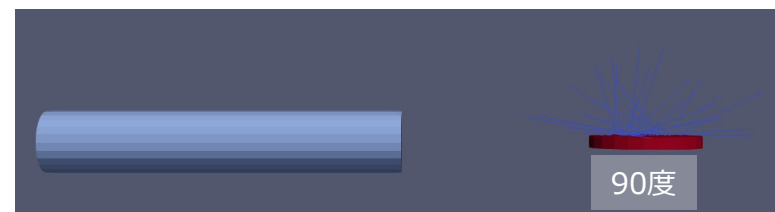
・角度依存性測定試験のシミュレーション

シミュレーション概要

- ・Geant4を用いたモンテカルロシミュレーションを実施
 - ・線源ホルダーとPMTをモデリング
 - ・窒素によるシンチレーションを模擬
 - ・発生した光子が光電面に到達した数をカウント
 - ・到達した光子数に量子効率をかけて計数率を推定
 - ・ 10^6 eventのα線(5.4 MeV)を発生させてシミュレーション
- その後使用した線源の放射能(4.36 alpha emission)にスケーリング



角度と計数率の関係 (シミュレーション)



検出器と線源角度の位置関係

- ・正面からのシミュレーション結果に対して、45度の測定で約95%、90度(真横から)の測定で約75%の減少
└ 視野の変化により発光率が減少する傾向は再現できたものの、変化率については(Factor 2の範囲内で)差が見られたものの、測定で得られた。「～45度程度までの測定では変動幅が小さい」結果については肯定的であると考えられる。

2.1 得られた成果 (12/40)

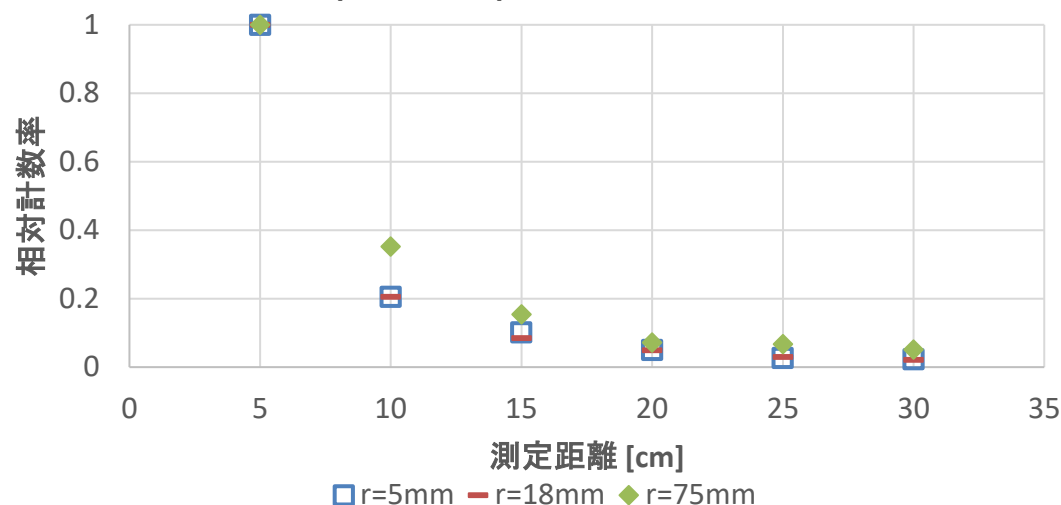
(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

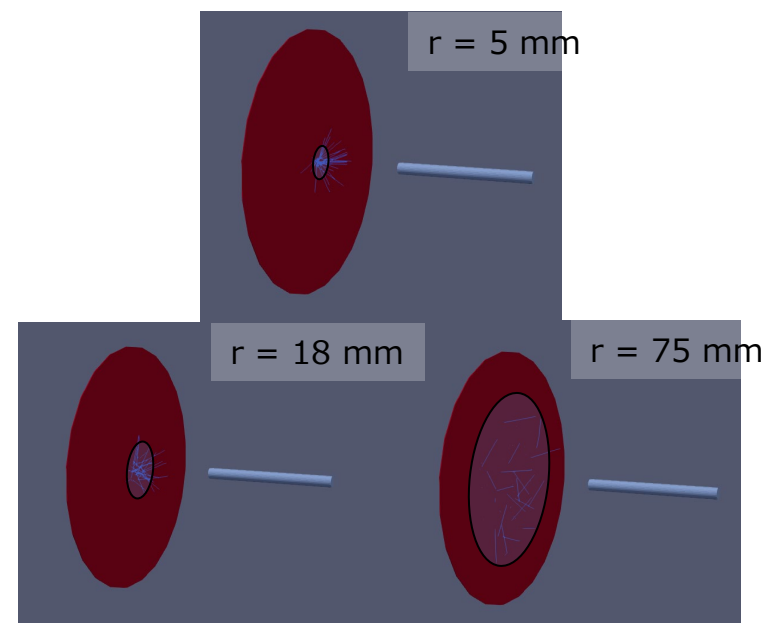
・汚染サイズの測定への影響確認試験のシミュレーション

シミュレーション概要

- ・同一面積の円盤状に線源のサイズを変化させて配置
- ・距離を変えながら各サイズごとに測定し傾向の違いがあるかを確認
- ・窒素によるシンチレーションを模擬
- ・発生した光子が光電面に到達した数をカウント
- ・到達した光子数に量子効率をかけて計数率を推定
- ・ 10^5 eventのα線(5.4 MeV)を発生させてシミュレーション



汚染サイズと計数率の関係 (シミュレーション)



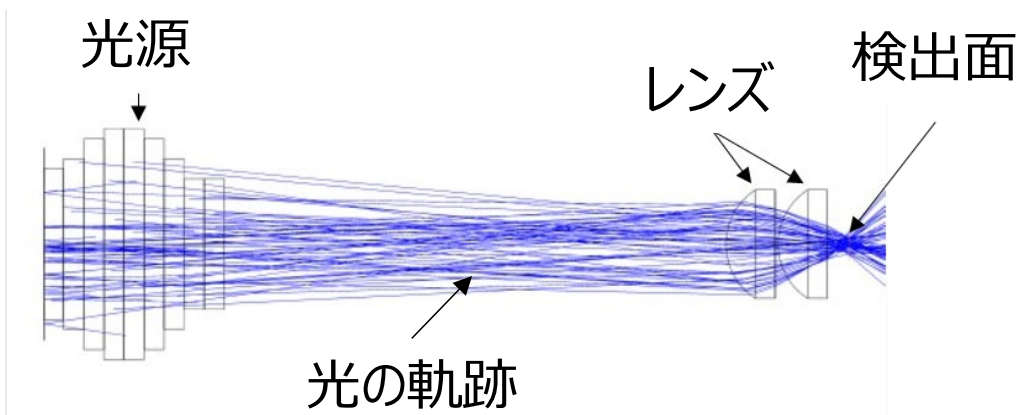
検出器と線源 (サイズ別) の位置関係

- ・線源サイズによらず計数率の減衰傾向が変わらないことを確認。

2.1 得られた成果 (13/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

光学系のシミュレーションを行うため、
Geant4に追加しZemax OpticStudioによるシミュレーションを実施



Geant4

- ・物質中における粒子の飛跡をシミュレーション
- ・放射線輸送における物理現象を模擬可能
- ・光学系の光線追跡において
レンズや曲面ミラー等の効果を組み込むことが困難

Zemax OpticStudio (以下、Zemax)

- ・幾何光学に基づいた光線追跡により
光学設計を行うためのソフトウェア
- ・光学系の計算に信頼性がある
- ・特定の物理過程(例：窒素発光)を
模擬できるわけではない

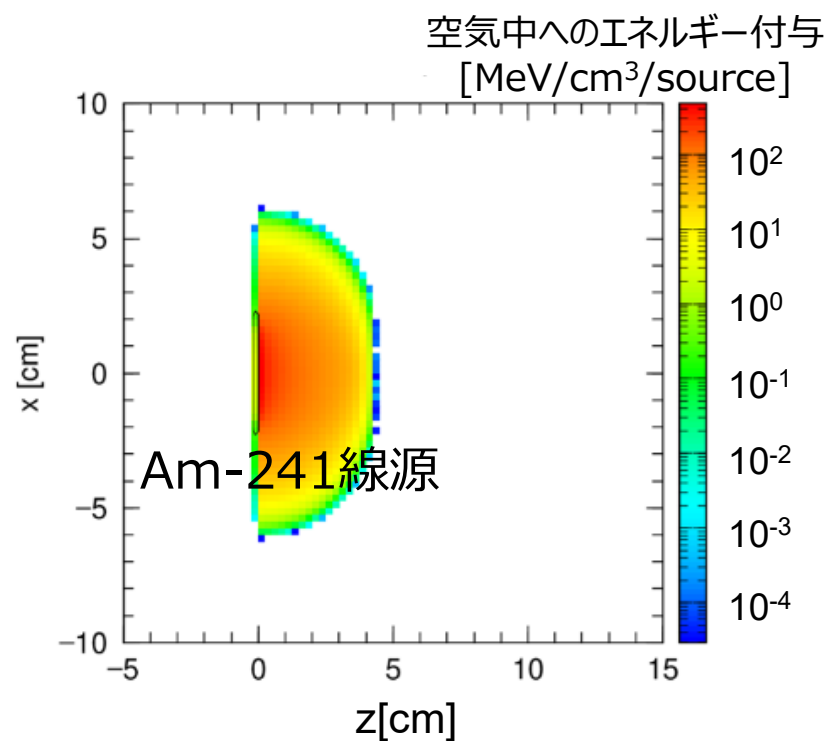
→PHITSと組み合わせてZemaxによる窒素発光の
計算を実行

2.1 得られた成果 (14/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

3つのステップでZemaxによる窒素発光の解析を実施

【STEP1】 PHITSによりAm-241線源の空気へのエネルギー付与の計算



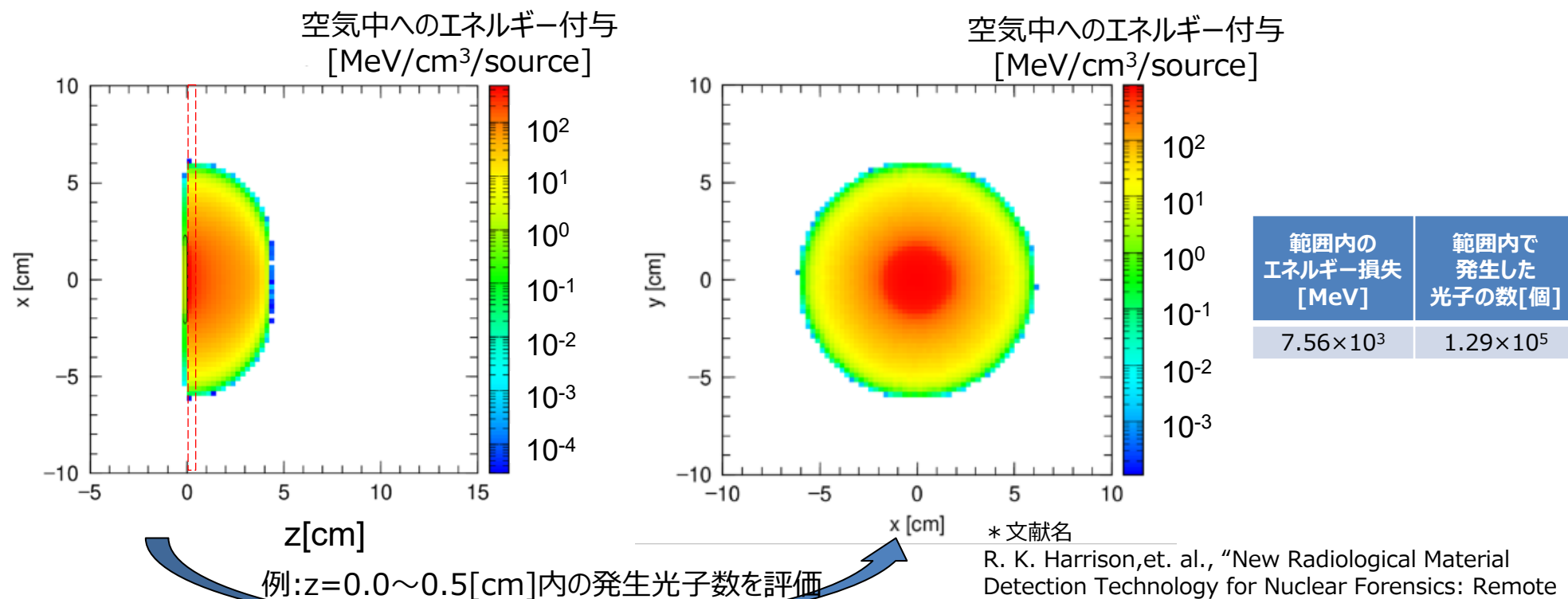
PHITSによるAm-241線源の空気への
エネルギー付与の計算

2.1 得られた成果 (15/40)

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

【STEP2】 発光量の計算

0.25 mm×0.25 mm×5mmのメッシュに対し、そのメッシュ内のエネルギー損失から発光量を計算。エネルギー損失から発光量への変換は文献値* より1 MeVのエネルギー損失あたり17.0 個の光子が発生するとして計算した。



*文献名

R. K. Harrison, et. al., "New Radiological Material Detection Technology for Nuclear Forensics: Remote Optical Imaging and Graphene-Based Sensors", SAND2015-7567, 2015

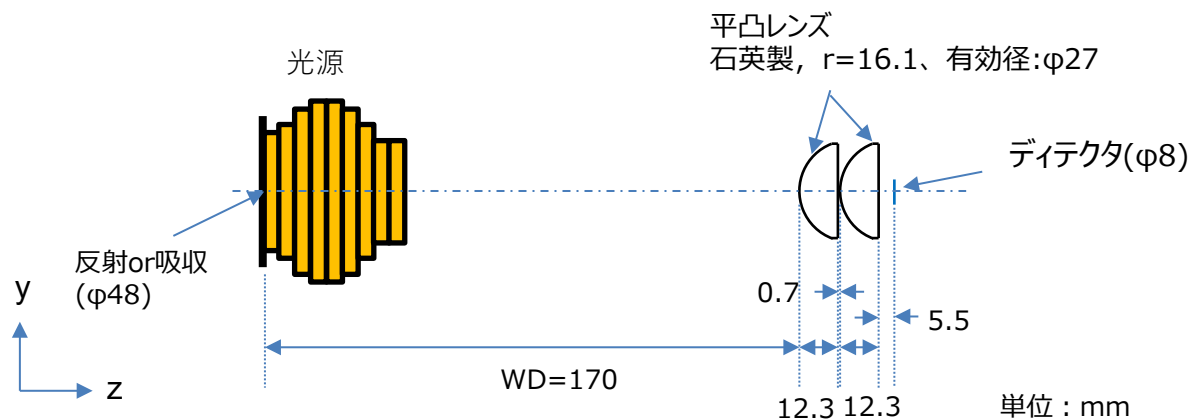
2.1 得られた成果 (16/40)

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

【STEP3】 Zemax光源の作成

STEP2で作成した離散化した発光分布をもとに、円柱状の発光分布を作成

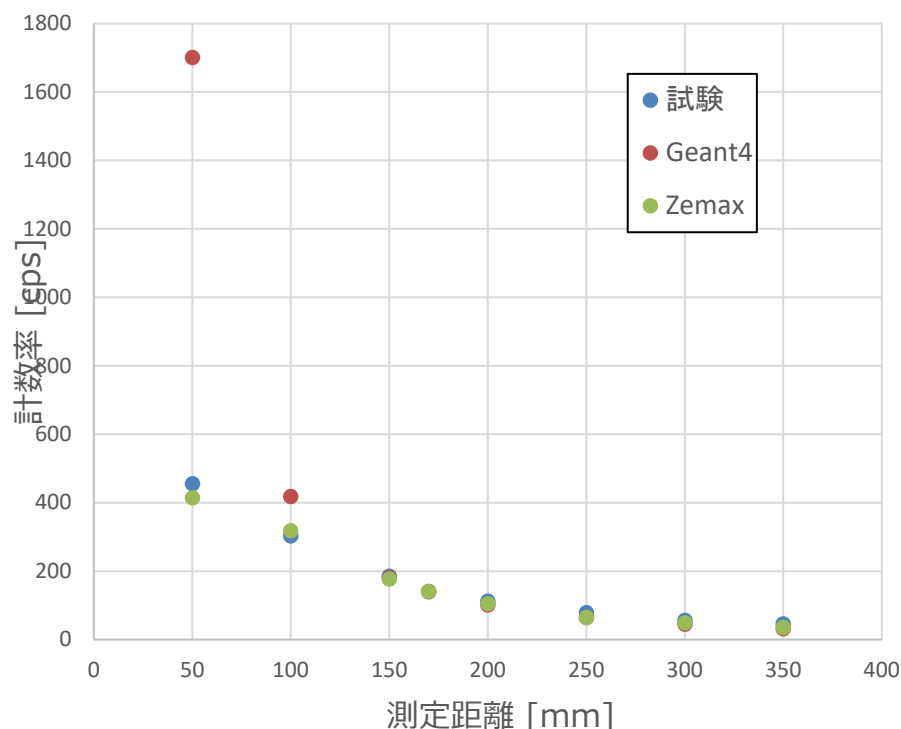
アルファ線源の表面から距離	範囲内で発生した光子の数 [個]	発生量の割合	半値半径 [mm] (ピーク値の1/2をとる半径)
0～5mm	1.29×10^5	31.2%	18.8mm
5～10mm	8.18×10^4	19.9%	21.3 mm
10～15mm	6.25×10^4	15.2%	26.3 mm
15～20mm	4.88×10^4	11.8%	28.8 mm
20～25mm	3.77×10^4	9.1%	28.8 mm
25～30mm	2.76×10^4	6.7%	26.3 mm
30～35mm	1.76×10^4	4.3%	21.3 mm
35～40mm	6.95×10^3	1.7%	16.3 mm
40～45mm	3.28×10^2	0.1%	16.3 mm



2.1 得られた成果 (17/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

光学系(レンズ)を付けた状態の距離依存性測定試験の結果と
Geant4とZemaxのレンズ有でのシミュレーション結果を比較



測定距離と経緯数率の関係
(測定試験、Geant4、Zemaxの比較)

条件

- ・レンズはSLSQ-30-35P(シグマ光機社製、焦点距離 170 mm)を使用
- ・シミュレーション結果をそれぞれ170 mmの測定結果で規格化

結果

- ・測定距離150 mm以降の計算結果は Geant4、Zemaxともに同じ傾向を示す。
- ・近距離においてはGeant4において測定結果を再現せず Zemaxは試験の結果をよく再現した。

評価

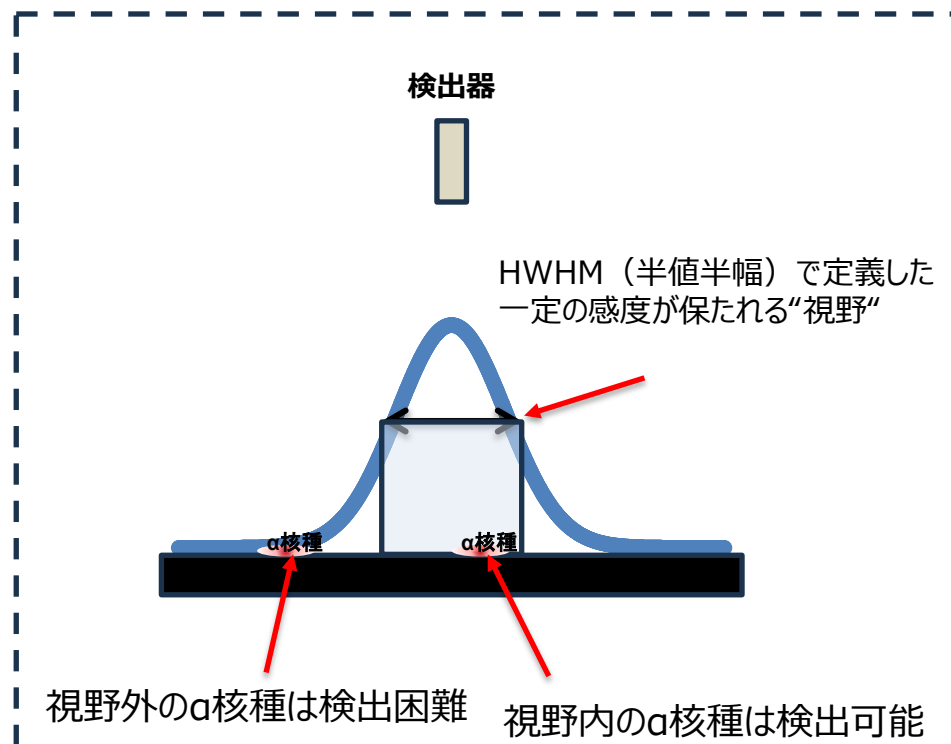
- ・光学系を入れた設計ではGeant4のみによる評価ではなく Zemaxのような光学設計ソフトによる相補的な評価が要
- ・一方で、光学設計ソフトでは窒素発光を再現できないため Geant4等による評価も必要となる。

2.1 得られた成果 (18/40)

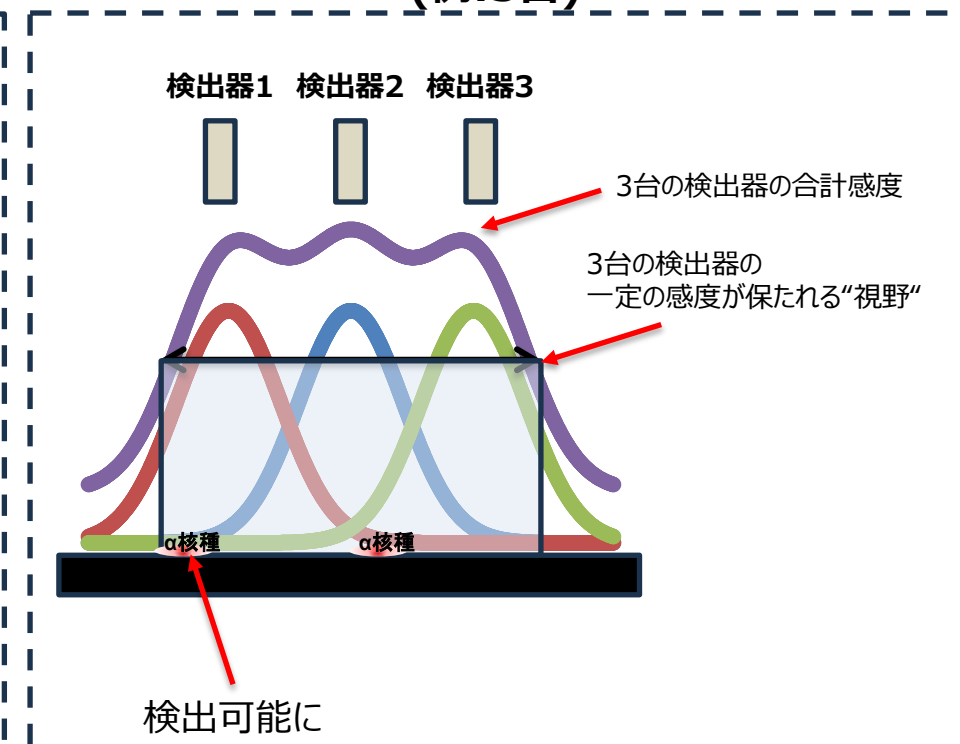
(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

汚染サイズが大きい場合、一台の検出器では感度がある“視野”が測定範囲をカバーできず見落とす可能性がある。そこで、複数台の検出器で測定範囲をカバーする方法について検討する

検出器一台の測定



検出器複数台の測定 (例:3台)

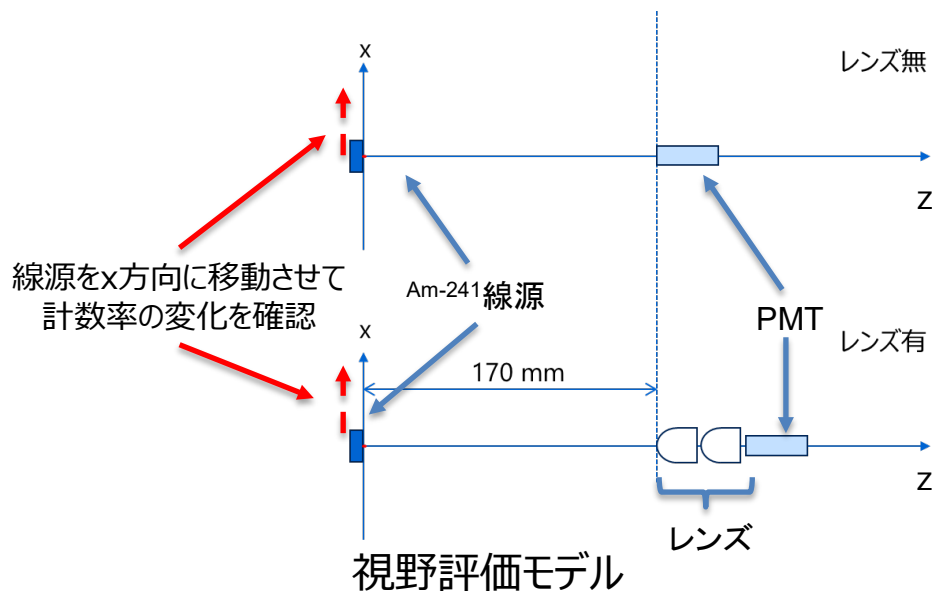


検出器の視野をシミュレーションにより評価

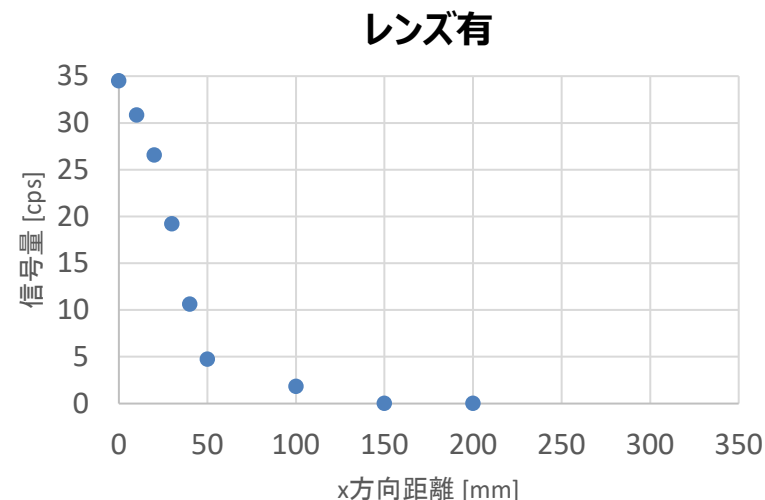
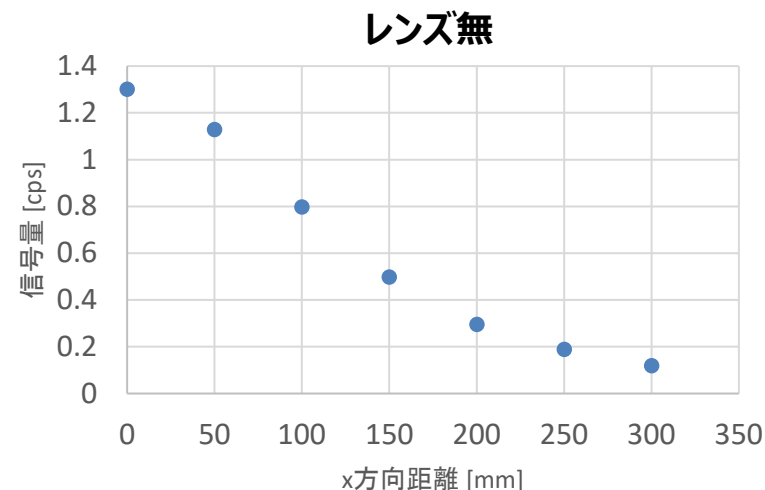
2.1 得られた成果 (19/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

Am-241の点汚染に対する感度を確認するため、Zemaxを用いて視野を計算



- ・PMTの光軸から線源を移動させ計数率の変化を確認
- ・計数率は実験値を用いて規格化

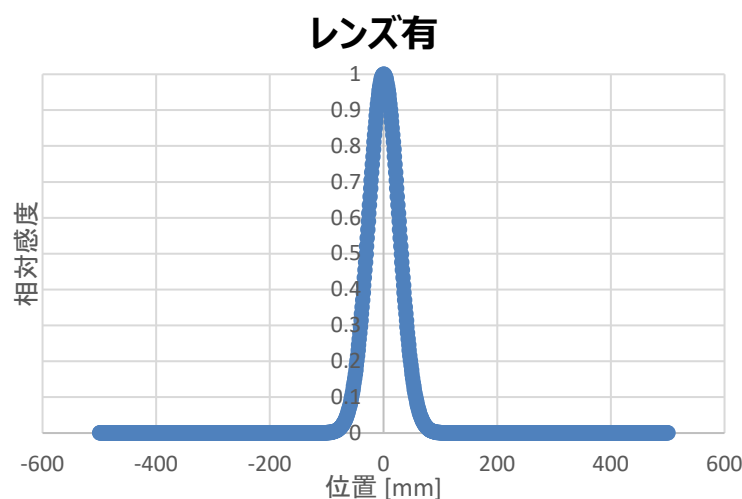
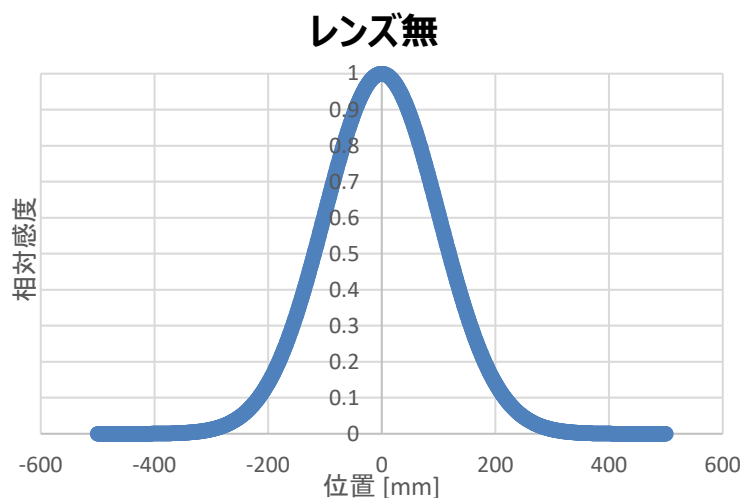


2.1 得られた成果 (20/40)

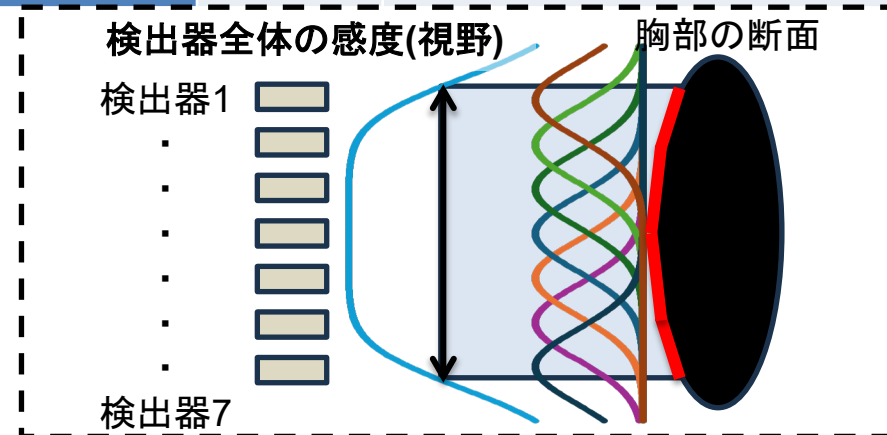
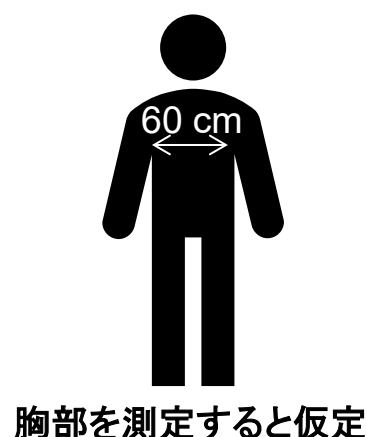
(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

評価方法

- ・視野評価から、感度分布をガウス関数と仮定しフィッティング
- ・相対感度が半分になる幅 (HWHM; 半値半幅) を評価し、検出器を並べる間隔を設定



体系	HWHM [cm]	60 cmの胸囲を測定する際に必要な本数
レンズ無 PMT(H14601-200)のみ	11.9	$[60/11.9] + 2 = 7$
レンズ有 PMT(H14601+200)+レンズ(SLSQ-30-35P)	3.1	$[60/3.1] + 2 = 21$



- ・レンズ有で並べると一つ一つの集光効率が増加するが、視野が狭くなるため複数台の設置が必要
- ・複数台並べることから位置分解能の向上に寄与

2.1 得られた成果 (21/40)

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○身体汚染測定用αカメラの要件の整理

・試験結果の試作品仕様への反映

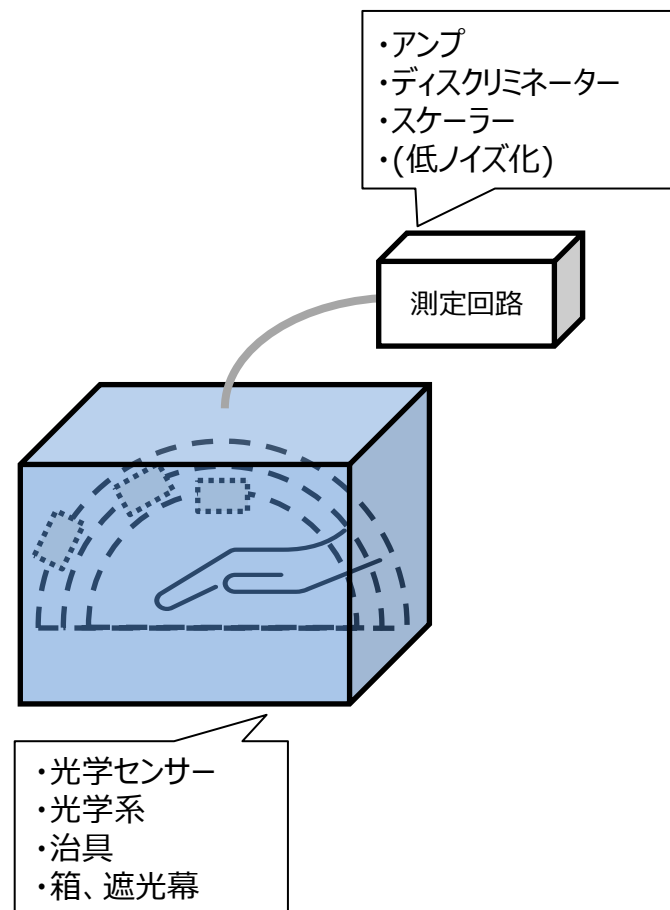
実施項目	評価するパラメータ	実験から決定した試作機の値
(1)距離依存性測定試験	測定距離	5 cm ～20 cmを測定距離とする 光学系を選定し、着脱可能とする
(2)角度依存性測定試験	測定角度	45度までの測定角度を 許容するとして 四つのセンサーを配置
(3)汚染サイズの測定への影響確認試験	汚染サイズ	一つ検出器がカバーする測定面のサイ ズ10cm□として、 センサーを四つ配置して 最大20cm□を測定対象とする

2.1 得られた成果 (22/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

試作機の仕様概要まとめ

要素	仕様
光学センサー	種類：紫外光領域に感度を持つPMT 個数：4つ
治具	センサー治具 測定距離：5 cm ～ 20 cmで固定可能 角度：0度 ～ 180度で固定可能 同一距離に4つのセンサーを保持可能とする 試料治具 個数：一式
光学系	20 cm測定時に装着可能な集光レンズ 個数：4つ
箱	最小60 cm × 60 cm × 60 cm程度 遮光幕付き (最終的な作業効率を考慮し決定する)
測定回路	従来の回路を踏襲予定



2.1 得られた成果 (23/40)

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

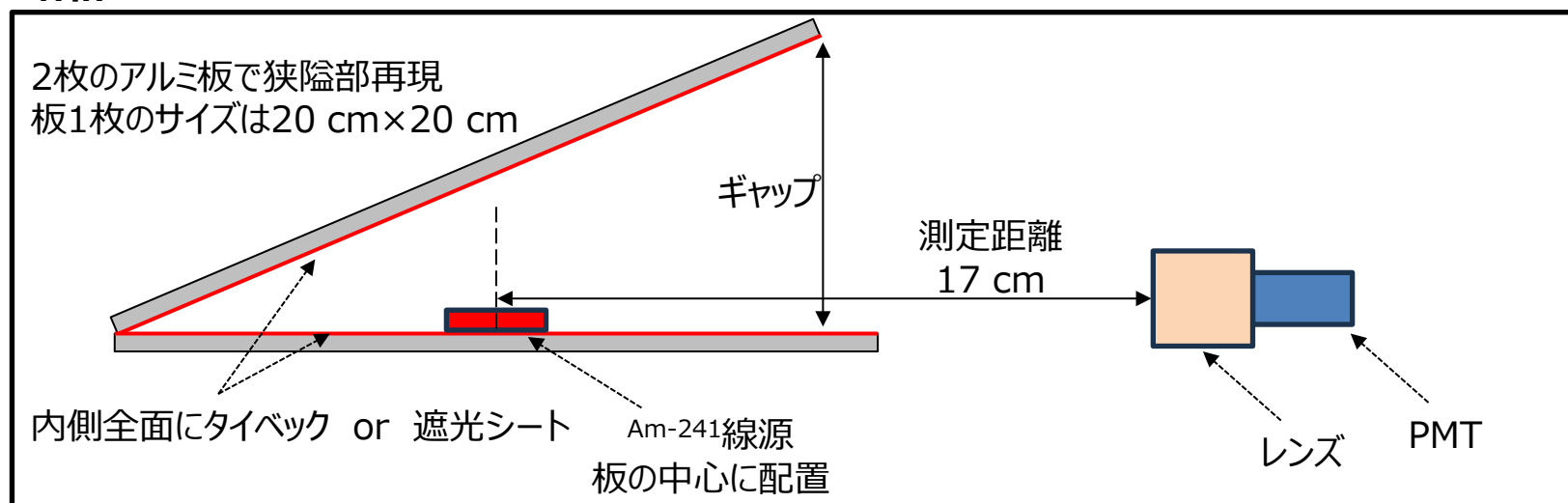
○身体を模擬した形状の測定データの取得

・狭隘部測定試験 + 防護装備（素材）の影響評価試験

試験概要

- ・暗箱内部に線源とPMTと狭隘部模擬する板を設置
- ・線源強度は 4.36×10^3 α emission (2π)
- ・ギャップを変えながら計数率を測定
- ・集光レンズを装着した状態で測定
- ・測定距離は17 cmで固定
- ・タイベックスーツが汚染したことを想定してタイベック生地、狭隘部の効果のみを確認するため遮光シートを内側に張った状態で測定

暗箱

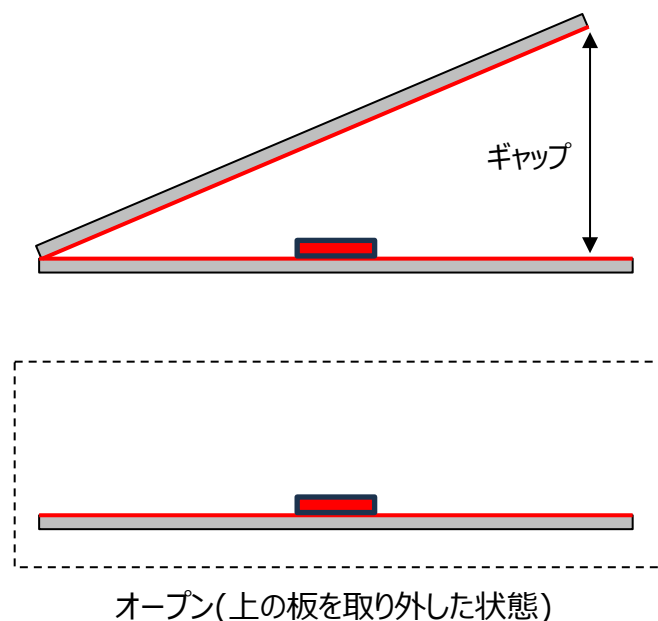
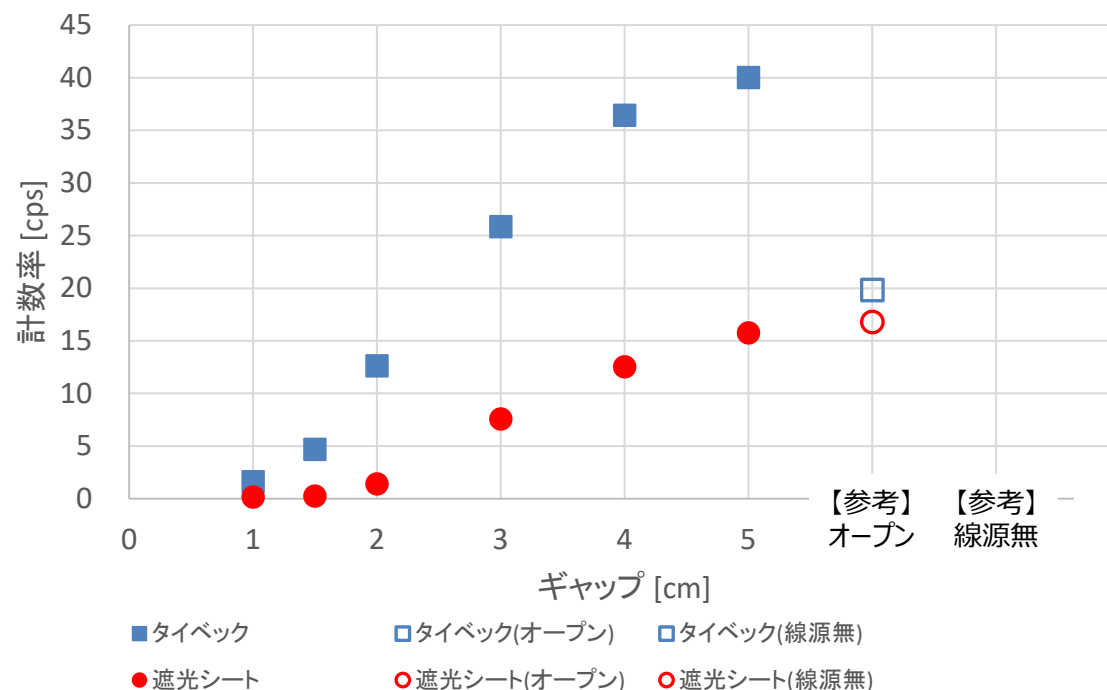


2.1 得られた成果 (24/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

○ 身体を模擬した形状の測定データの取得

・ 狭隘部測定試験 + 防護装備 (素材) の影響評価試験



- ・ α線の飛程が確保されていれば狭隘部でも測定が可能と考えられる。
- ・ α線の飛程が～4 cmであるため、それより狭いと計数効率が低下。
- ・ オープンと比較し、ギャップが2cmだと計数効率は8%まで低下。
- ・ タイベックを装着するとタイベック自体の発光/反射の効果により計数率が増加する。

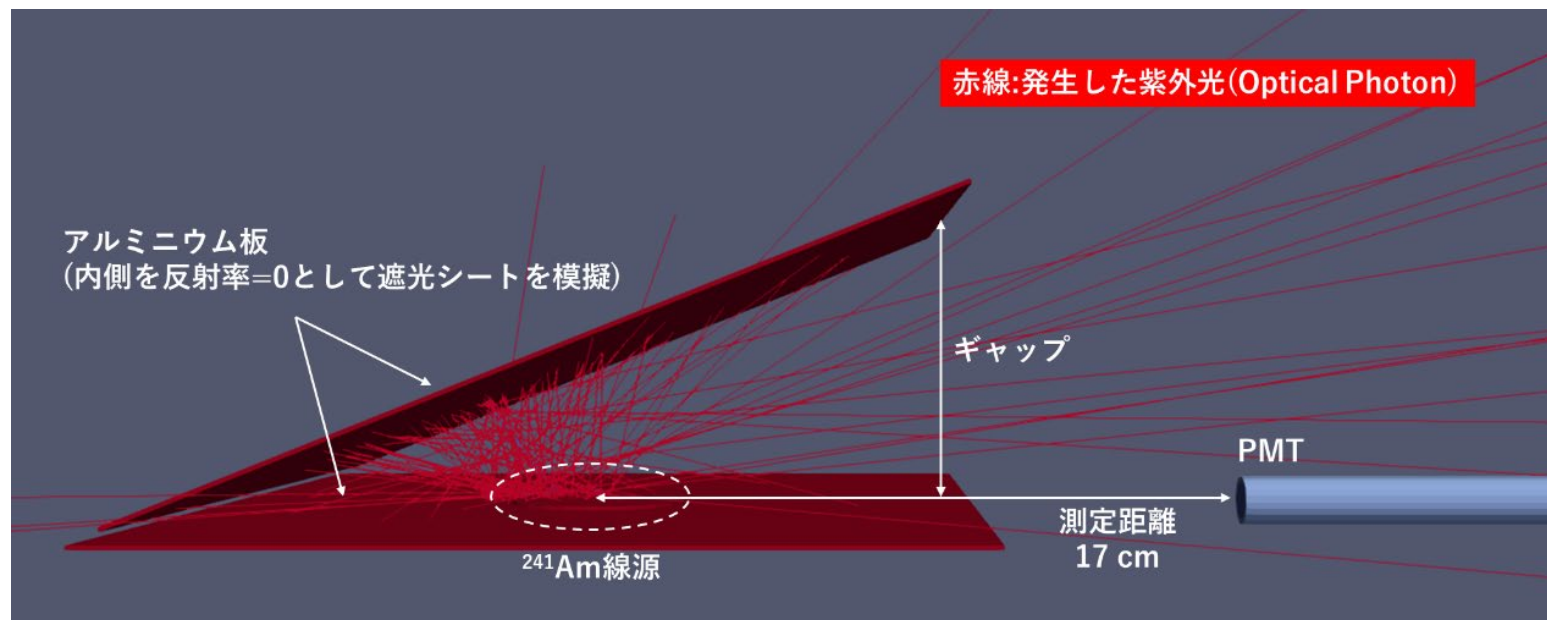
2.1 得られた成果 (25/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

・狭隘部測定試験のシミュレーション

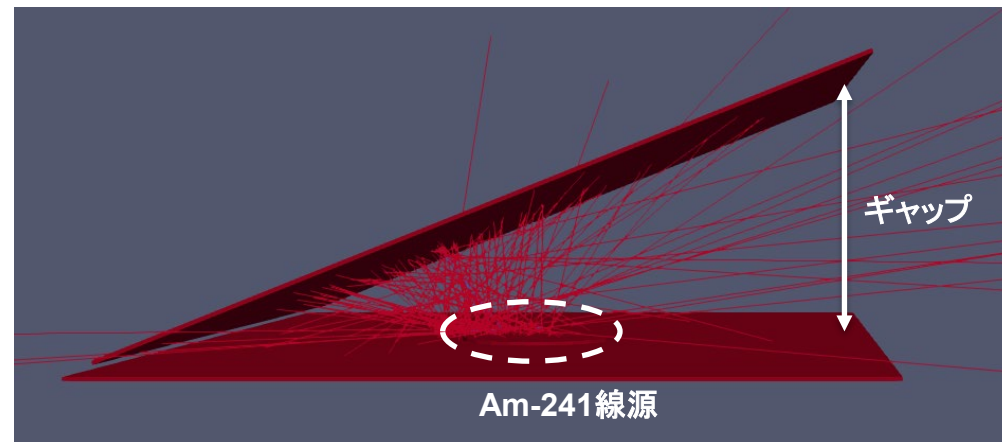
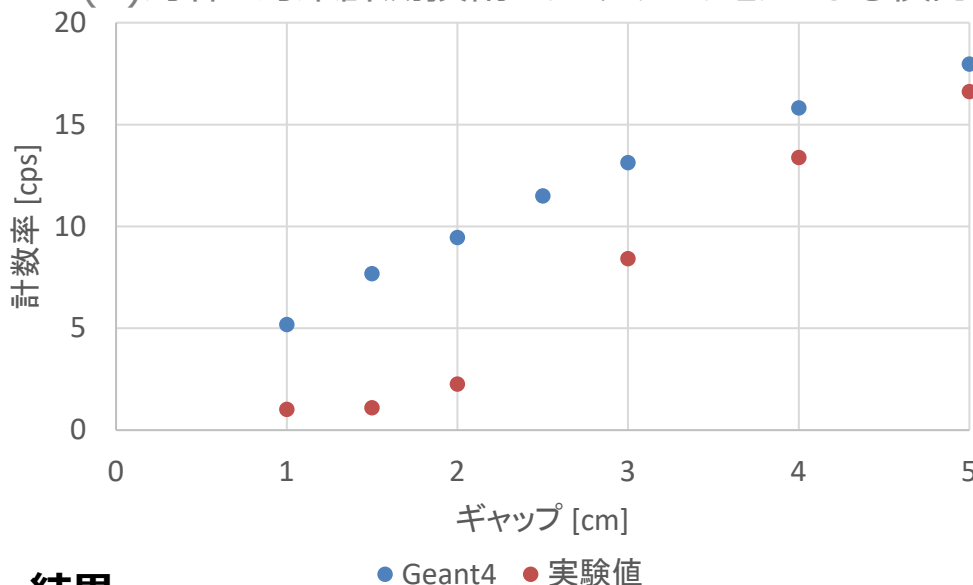
シミュレーション概要

- ・アルミニウム板に挟まれた線源とPMTをモデリング
- ・測定距離を固定し、ギャップを変えながら開き具合と計数率の相関を確認
- ・窒素によるシンチレーションを模擬
- ・発生した光子が光電面に到達した数をカウント
- ・到達した光子数に量子効率(0.39)とレンズの倍率(28.8)をかけて計数率を推定
- ・ 10^6 eventのα線(5.4 MeV)を発生させてシミュレーション



2.1 得られた成果 (26/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討



結果

- ・全体としてシミュレーション結果が実験値を上回った。
- ・ギャップが大きくなるにつれ計数率が大きくなる傾向は一致。
- ・5 cmの点では8%の精度でシミュレーション結果と試験結果が一致していたが、1 cmの点ではシミュレーション結果が4倍以上の値であった。

考察

- ・焦点距離の前後におけるフォーカスがずれを完全に再現できていないため、焦点距離以外の点における集光を過大評価したと考える。
→Geant4における光学系の再現性の高度化もしくはZemaxによる評価との相補的な評価が必要。
- ・試験セットアップにおいて、線源やアルミニウム板が傾き、検出が阻害されていた可能性がある。
→角度の変化による計数率の変化を考慮した定量化ロジックが必要。

2.1 得られた成果 (27/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

令和6年5月21日に実施した国プロ内の事業者レビューで以下の3つのコメント

現場への適用方法について	(1) 現場での使い方（目的、設置場所、スペース、その他）に関して、 どのように使うか、どういうシチュエーションで使うか ということを東京電力と協議し、それを踏まえて進めていただきたい。
	(2) αカメラについて、装置化する時には大きさや外部の紫外線など、様々な影響があると思うので、 現場に則した形で使える開発 をしていただきたい。
α・β・γの混在した環境について	(3) αカメラでは、外部からの放射線を遮蔽したとしても、 測定対象物自体からα線以外にも、β線、γ線が出てくるケースがあるので事前に性能を確認してから次のステップに進んでいただきたい。

そこで、東京電力にご協力いただき

①どのようなプロセスにおいて、どの箇所を測定すると効果的か

②使用が想定される環境において、α・β・γ核種の混合比率はどのような割合か

についてヒアリングを実施した。

2.1 得られた成果 (28/40)

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

東京電力への主なヒアリング内容

①どのようなプロセスにおいて、どの箇所を測定すると効果的か

【αカメラのメリット】

- ・触れることなく離れて測定できること（**クロスコンタミの低減**）
- ・ZnSシンチレータと比較し、αカメラは広い面で汚染源を捉えることができるため**汚染を見落としてしまうリスクの低減が期待**できる。
- ・現場適用を考えると、Raエリアに近接するところにチェンジングプレイスが設けられているため、強い汚染（βやγ）と混在しているα核種を見つけることに価値がある。
- ・スポット的に付着しているアルファ汚染をスクリーニングで見つけるために使えるとよい。
その際場合には検出下限値として0.4 Bq/cm²にこだわる必要はないと考える。
- ・ZnSと比較すると検出下限の観点で負けてしまうので、網羅的に測定できる点が活用できるとよい。
- ・多少α核種があってもアノラックは脱げばよく、下に着ているタイベックに汚染がついているかを見わけられた方がよい。その場合はほぼついていないことが考えられるため、0.4 Bq/cm²を検知できるというのも重要と考える。
- ・暗室中で測定することになると作業員の負担も大きい。

上記のコメントを受け、測定手法や適用プロセスについて整理を行う。

2.1 得られた成果 (29/40)

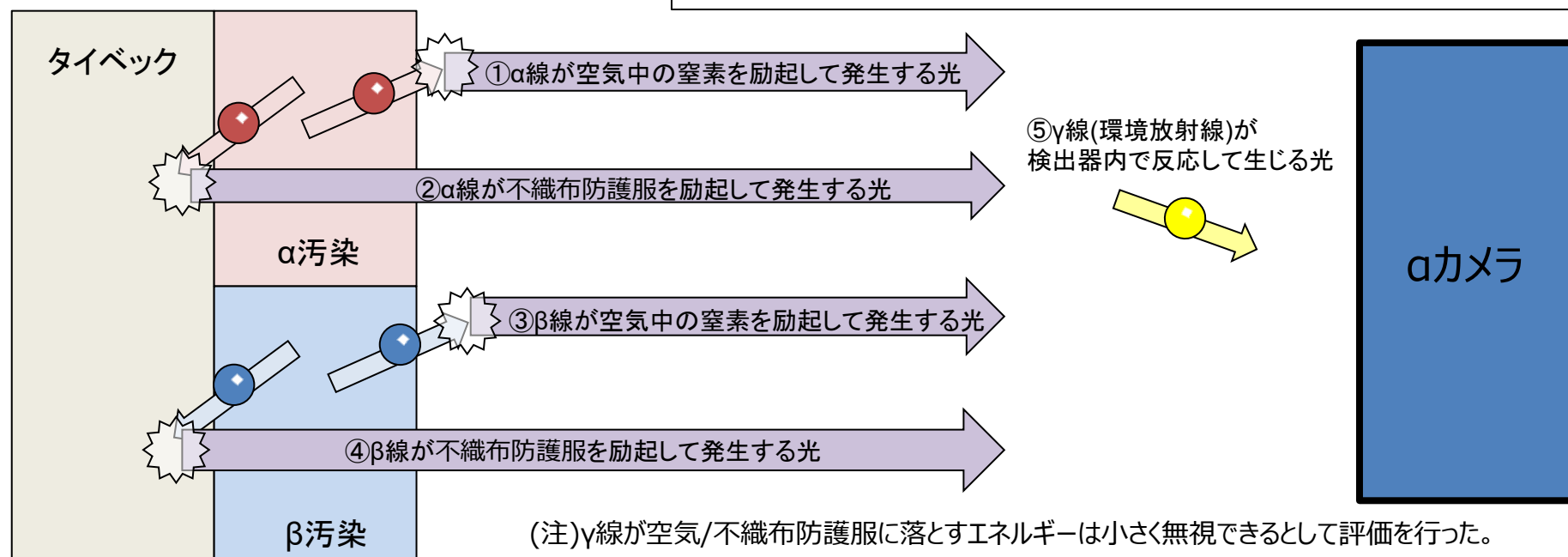
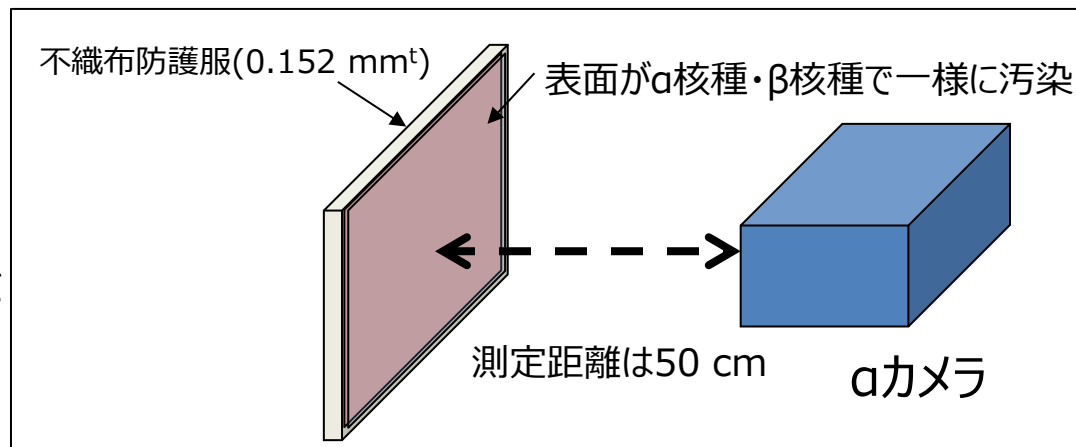
(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

②使用が想定される環境において、α・β・γ核種の混合比率はどのような割合か

α・β・γ核種が混在する環境下における
身体表面汚染の検出可能性について
過去に実施した実測・シミュレーションの結果を
用いて評価

下図の①～⑤のプロセスを考慮し検討

想定条件



(注)γ線が空気/不織布防護服に落とすエネルギーは小さく無視できるとして評価を行った。

2.1 得られた成果 (30/40)

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

東京電力から入手したインプット

項目	強度
全α線(表面汚染密度)	0.16 [Bq/cm ²] 未満
全β線(表面汚染密度)	7.3 [Bq/cm ²]
環境放射線(γ線)	0.16 [mSv/h]

0.4 [Bq/cm²] の表面汚染について評価を行った。

過去の実測/シミュレーションによる評価から得られている値

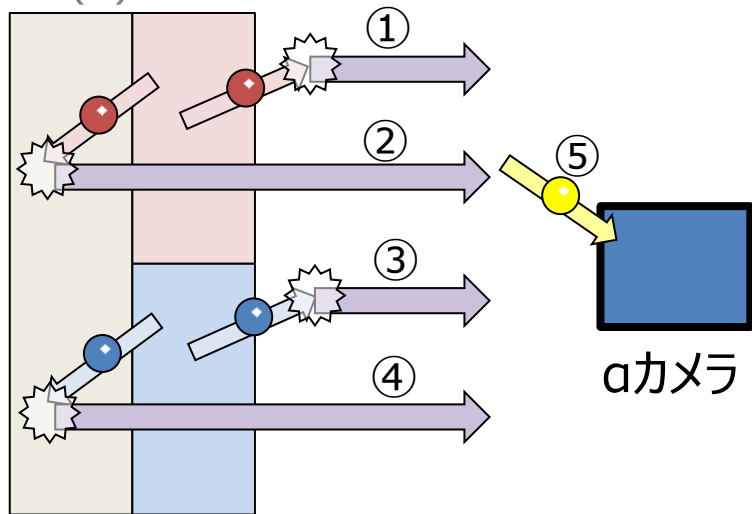
汚染核種	100 cm先の単位汚染密度 あたりの平均計数率 [cps/ (Bq/cm ²)]
Am-241 (α線) (φ36mmのチェッキングソース利用した実測値)	4.7×10^{-1}
Sr-90、Y-90 (β線) (壁汚染体系の値)	2.0×10^{-3}

核種	単位空間線量率 あたりの平均計数率 [cps/ (mSv/h)]
Cs-137 (γ線)	2.8

- ・ポリエチレンは 1 MeVのエネルギー損失に対して2500個の光子が発生
- ・100 cm先のポリエチレンは付着したβ汚染に対して、 1.1×10^{-2} cps/(Bq/cm²) の妨害光

2.1 得られた成果 (31/40)

(1) 身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討



【評価結果】

α汚染からの信号強度 (①+②)	2.5	[cps]
ノイズ (β・γ) 強度 (③+④+⑤)	8.3×10^{-1}	[cps]

→計算では1Fにおけるα・β・γ核種混在の環境下でも
タイベック表面のα汚染を測定できると推定される。

①α線が窒素発光によって放出する光子の計数率

$$4.7 \times 10^{-1} [\text{cps}/(\text{Bq}/\text{cm}^2)] \times 0.4 [\text{Bq}/\text{cm}^2] \times \frac{(100/50)^2}{\text{距離による補正}} \div 7.5 \times 10^{-1} [\text{cps}]$$

距離による補正

②α線がタイベックにエネルギーを落とすことによって発生する光子の計数率

$$2.5 \times 10^3 [\text{photon}/\text{MeV}] \times 5.486 [\text{MeV}/\alpha] \times 0.4 [\alpha/\text{cm}^2] \times 1 [\text{cm}^2] \times \frac{(2\pi/4\pi)}{\text{片面}} \times \frac{6.2 \times 10^{-4}}{\text{検出効率}} = \div 1.7 [\text{cps}]$$

③β線が窒素発光によって放出する光子の計数率

$$2.0 \times 10^{-3} [\text{cps}/(\text{Bq}/\text{cm}^2)] \times 7.3 [\text{Bq}/\text{cm}^2] \times (100/50)^2 \div 5.8 \times 10^{-2} [\text{cps}]$$

④β線がタイベックにエネルギーを落とすことによって発生する光子の計数率

$$1.1 \times 10^{-2} [\text{cps}/(\text{Bq}/\text{cm}^2)] \times 7.3 [\text{Bq}/\text{cm}^2] \times (100/50)^2 \div 3.2 \times 10^{-1} [\text{cps}]$$

⑤空間線量率(γ線)に起因するノイズの計数率

$$0.16 [\text{mSv}/\text{h}] \times 2.8 [\text{cps}/(\text{mSv}/\text{h})] \div 0.45 [\text{cps}]$$

片面

検出効率

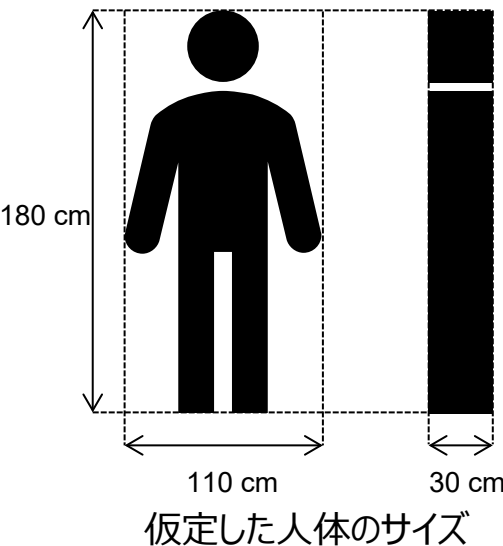
距離依存性測定試験の測定試験より
170mmにおける検出効率が0.54%であったため
500mm距離から測定したときの幾何学効率に変換し
 $5.4 \times 10^{-3} \times (170/500)^2 = 6.2 \times 10^{-4}$

2.1 得られた成果（32/40）

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討

取得した基礎データより全身測定体系の仕様を検討

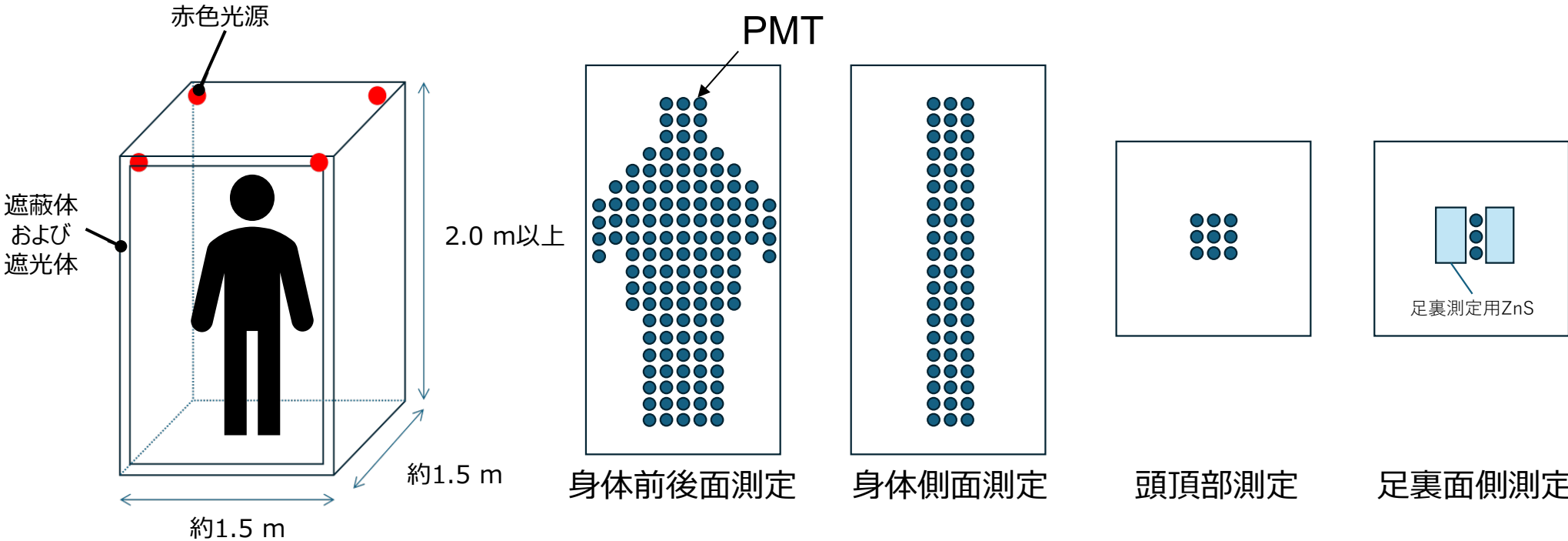
- ・人のサイズを右図のように仮定
- ・レンズ無の視野から必要個数を計算



	検討方法	検討結果
サイズ	体表面汚染を短時間で検出可能な距離による測定を算出	距離依存性試験から測定距離を50 mm以下とすることが望ましいと判断。
遮蔽	γ線の影響下でのノイズ評価	γ線による環境放射線の遮蔽するため50 mmの遮蔽体（鉛）を仮定。
狭隘部	狭隘部測定試験から評価	狭隘部測定試験から2cm未満の狭い空間を生じないことが必要。脇、股下の空間を確保するための支持具。
安全性	ヒアリングから運用において重要な作業員の安全性確保方法について討議	窒素発光波長と混在しない光源（例：赤色）を装置内に設置。作業員の視認性を確保する。

2.1 得られた成果 (33/40)

(1)身体α汚染計測技術のシミュレーションによる検討



測定面	備考	PMT (H14601-200) の 場合の個数
身体前後測定面	作業員は腕と脚を多少開いた状態で静止 全身を覆うようにおおよその配置として決定	128
身体側面測定面	3個の検出器の並列配置が最低限必要と想定	60
頭頂部測定面	頭頂部を30cm×30cmと想定	9
足裏面側測定面	股下測定エリアは幅30cm程度と想定	3 + (ZnS)

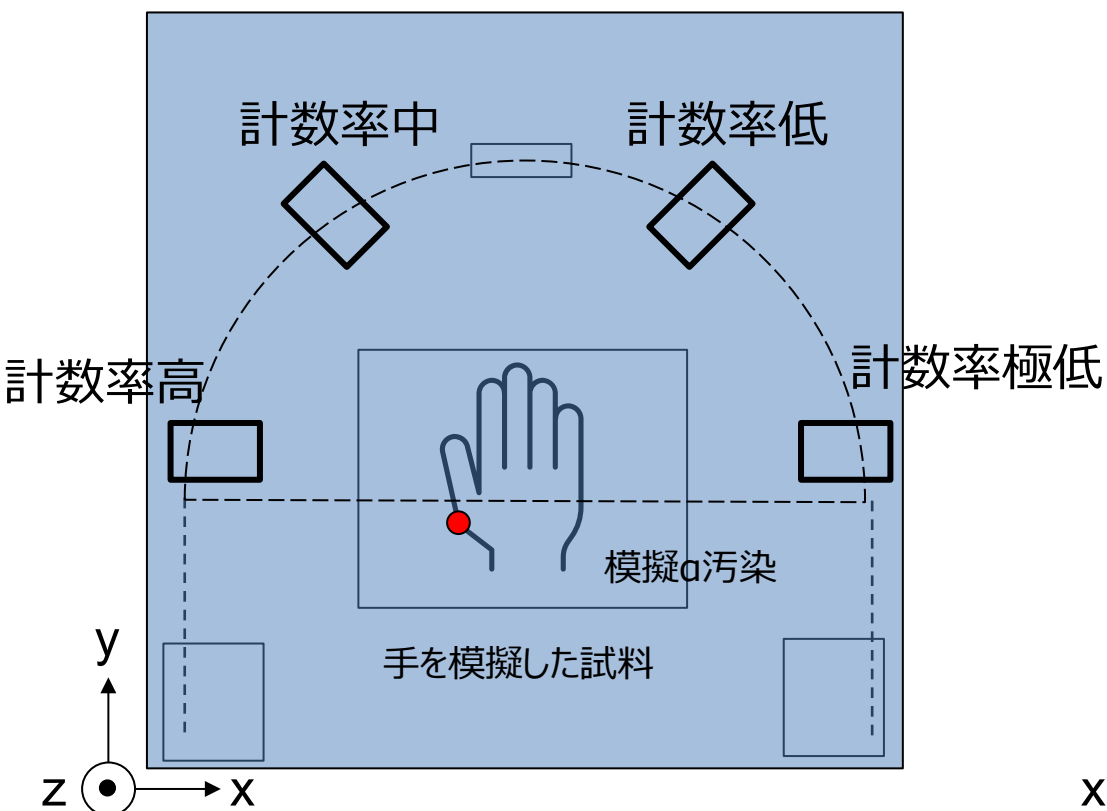
2.1 得られた成果 (34/40)

(2)身体汚染測定用αカメラ (試作機) の製作

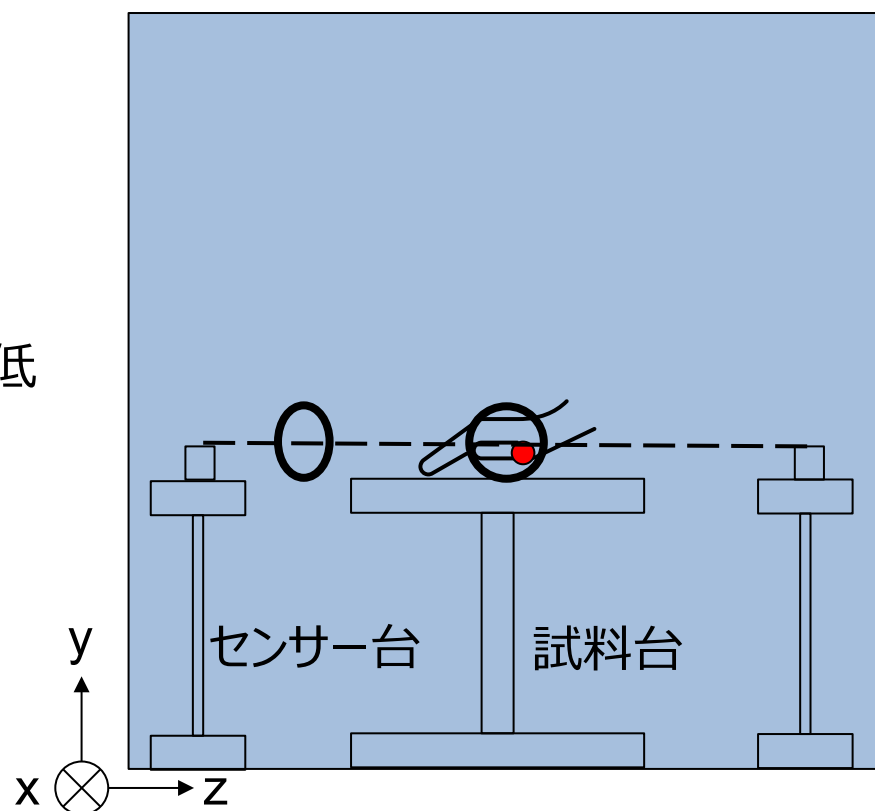
試作機の測定イメージ

- ・複数個所の計測から汚染の分布を推定

上から見た図



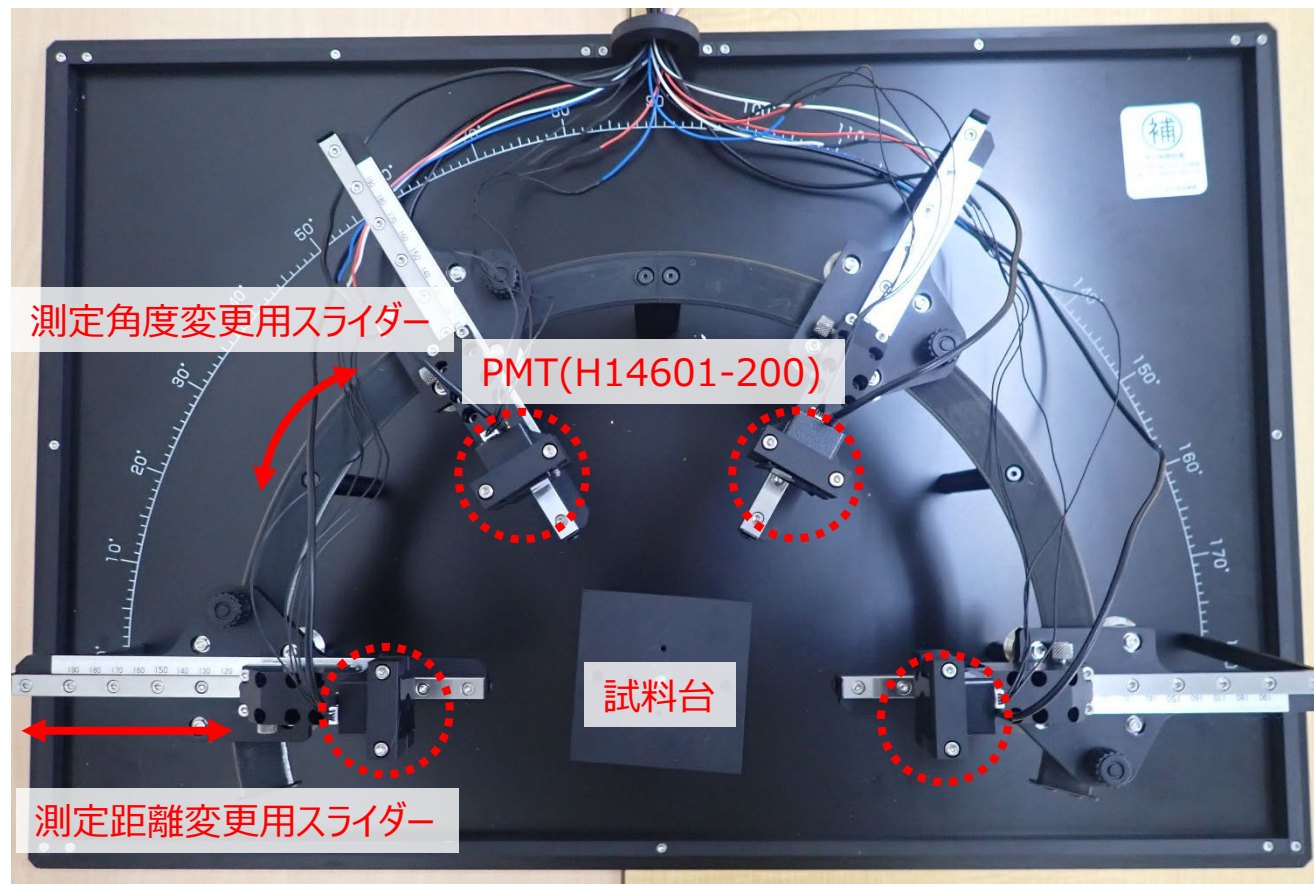
横から見た図



2.1 得られた成果 (35/40)

(2)身体汚染測定用αカメラ (試作機) の製作

試作機の外観



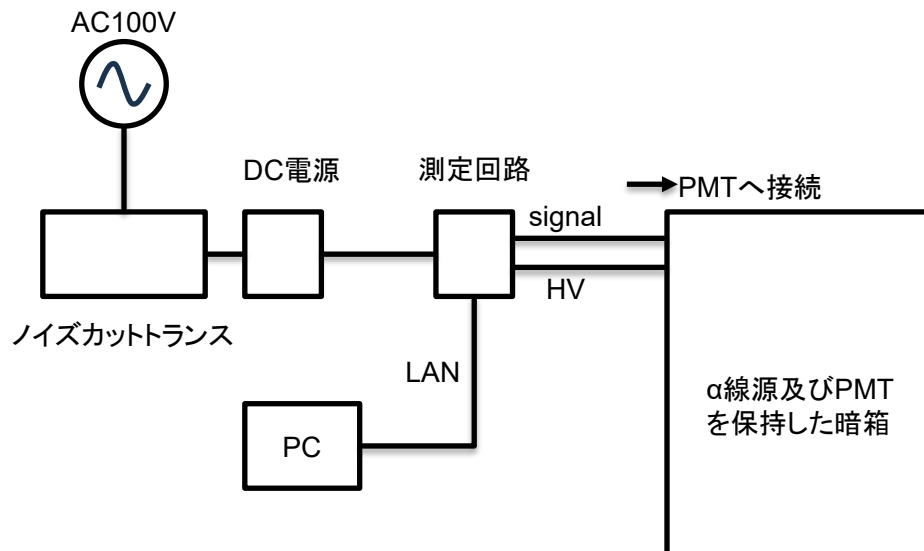
測定回路



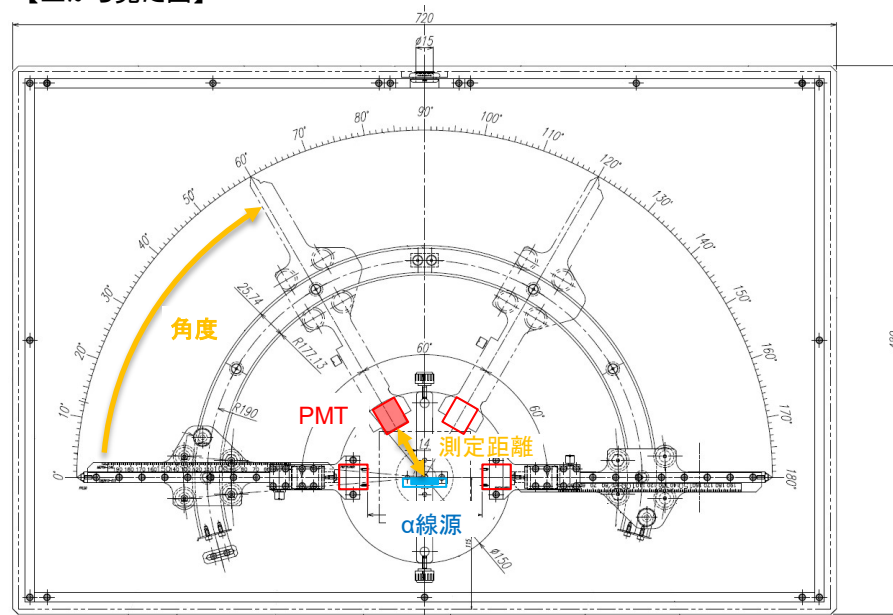
2.1 得られた成果 (36/40)

(2)身体汚染測定用αカメラ (試作機) の製作

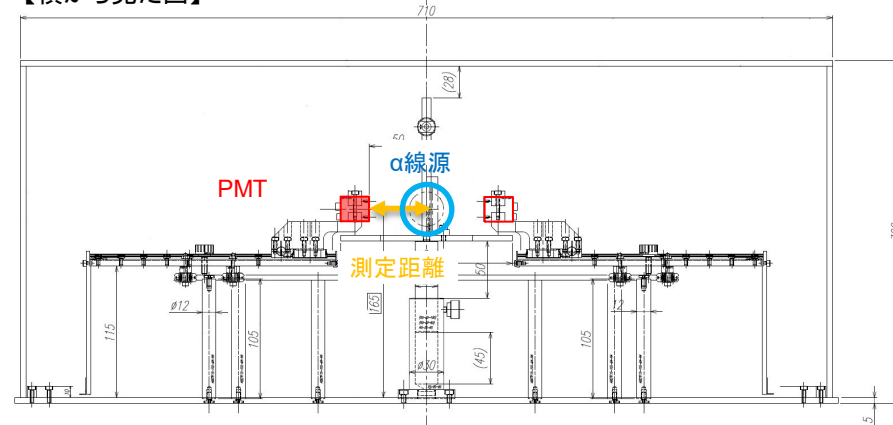
試作機のAm-241線源測定試験を実施



【上から見た図】

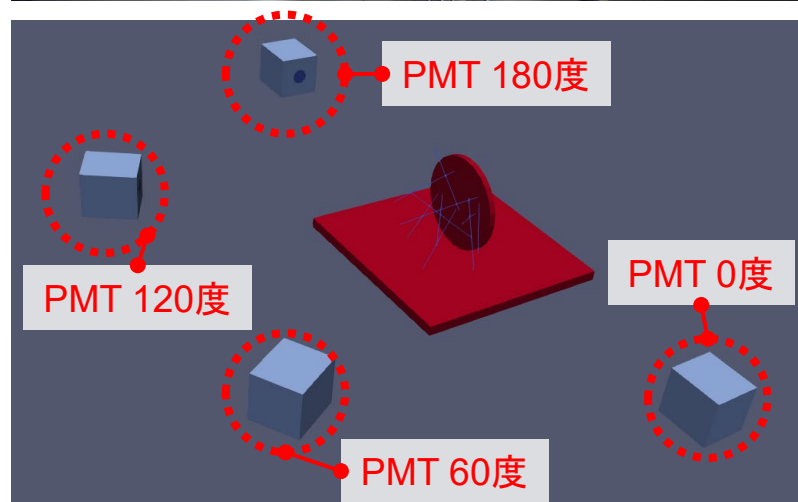
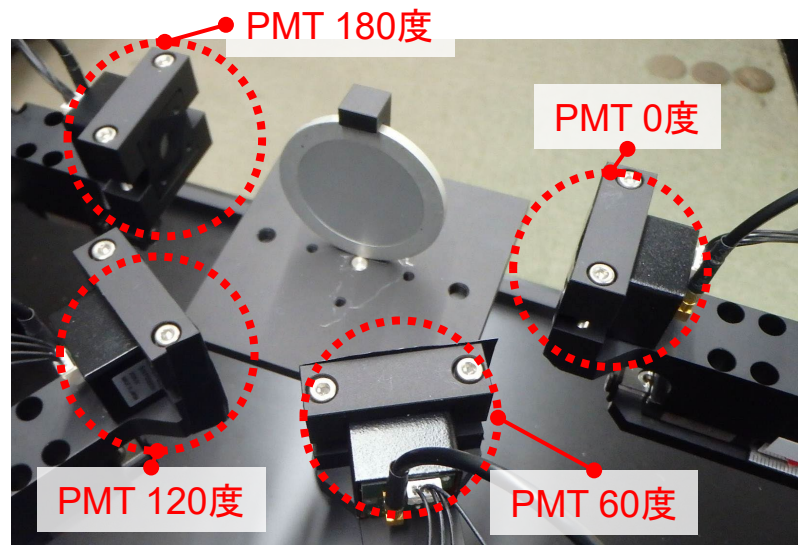


【横から見た図】

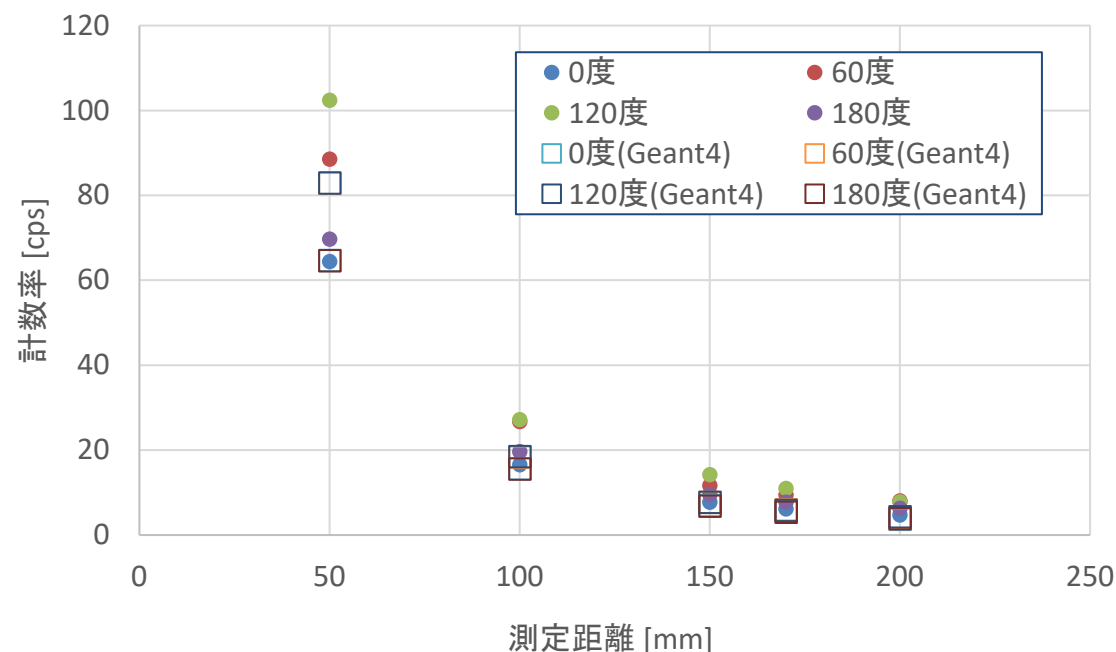


2.1 得られた成果 (37/40)

(2)身体汚染測定用αカメラ (試作機) の製作



- ・試験結果とGeant4によるシミュレーションを比較
- ・Geant4ではPMT、Am-241線源、試料台を模擬

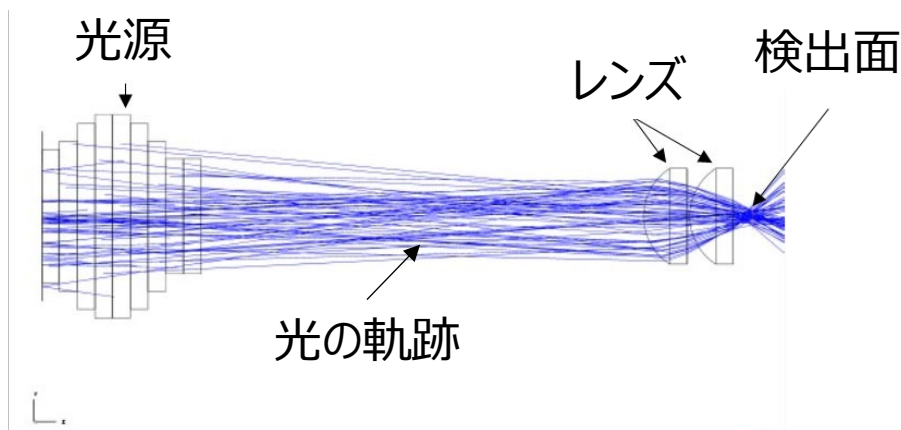


評価結果

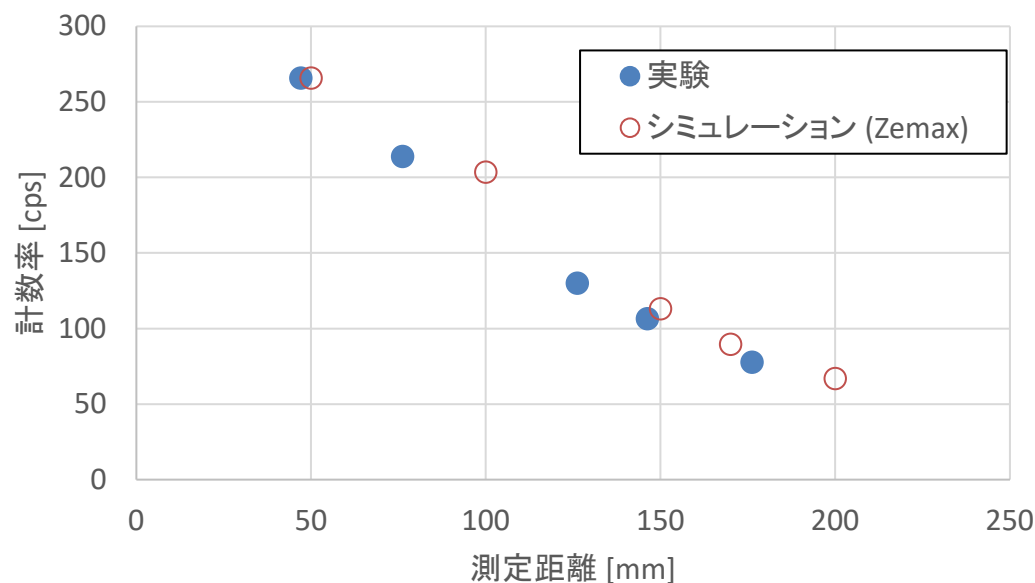
- ・従来の評価結果通り距離の二乗に反比例する信号が計数可能。
- ・正面方向からの測定結果がシミュレーションより増。
→試料台、線源の反射率の組み合わせによる増加と考察。

2.1 得られた成果 (38/40)

(2)身体汚染測定用αカメラ (試作機) の製作



- ・試験結果とZemaxによるシミュレーションを比較
- ・ZemaxではPMT、Am-241線源を模擬
(試料台における反射及び、発生が阻害される光子数は少ないものと仮定して計算)



評価結果

- ・解析による予想と同じ傾向で測定が可能であることを確認。
- ・焦点距離の170 mmの点ではレンズ無と比較して1桁大きい計数率で測定が可能に。
→回路系のノイズに勝つために集光による計数率の増加が有効。

2.1 得られた成果 (39/40)

(2)身体汚染測定用αカメラ (試作機) の製作

試作機を用いたAm-241の50 mmに対する
測定結果から、今回の構成で検出可能な
α汚染密度を評価

使用した数値

項目	計数 [cps]
レンズ無	103.5
レンズ有	267.1
BGノイズ	1.12

現状の構成で40 Bq/cm²の汚染密度を
3分の測定で10%の精度で検出可能見込み
(赤○)

0.4Bq/cm²に対して

・相対誤差1未満を基準

・1分間測定を制約条件とすると

①S/Nを11倍にすることで成立

(青○ 相対誤差 78%)

②上記条件で、測定時間を長くすると、

3分測定 → 相対誤差 45%

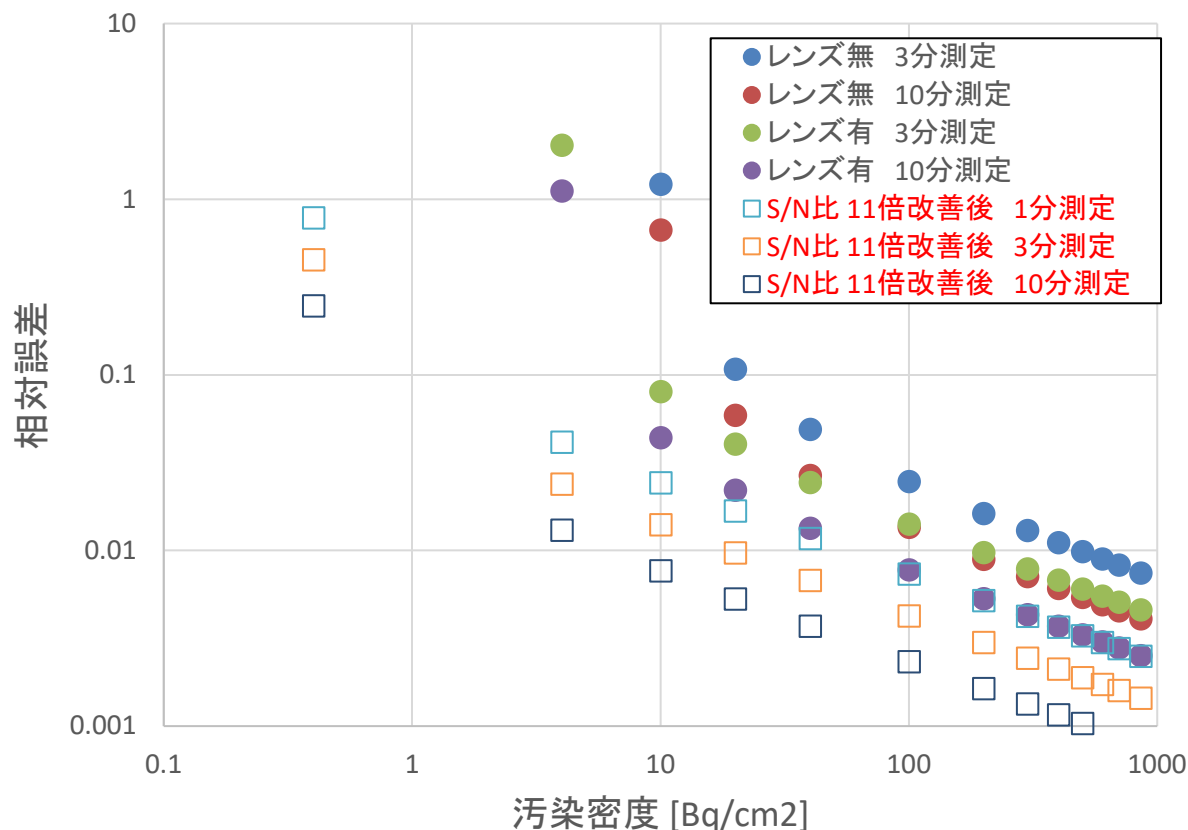
10分測定 → 相対誤差 25%

計数効率改善策

・測定距離の近距離化 (50 mm未満)、光学系最適化による集光効率改善 見込み改善：計数率2倍以上 (S)

BGノイズ低減策

・BG平均値の差分処理、デジタイザーによるノイズ弁別で時間変動ノイズを低減 目標改善として5分の1以下に低減 (N)

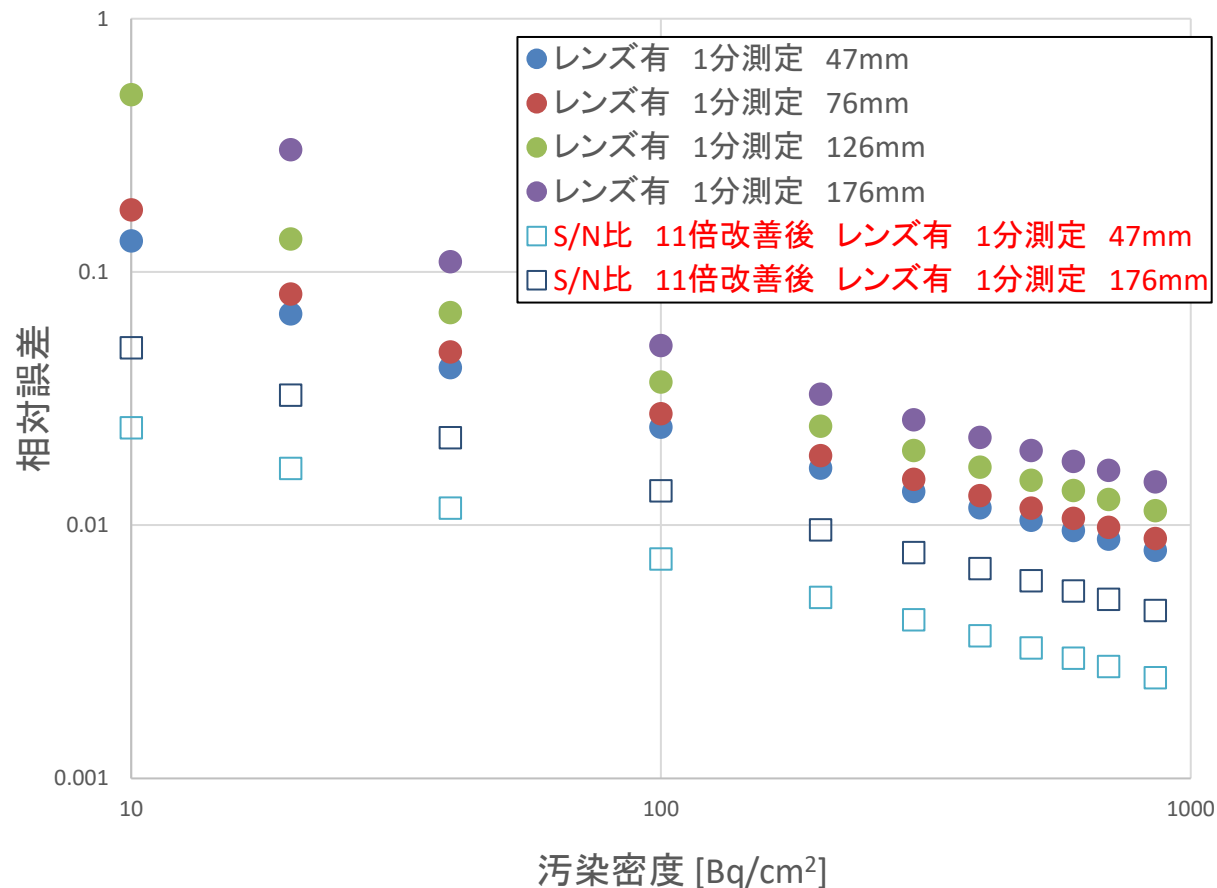


2.1 得られた成果 (40/40)

(2)身体汚染測定用αカメラ (試作機) の製作

測定距離による検出性能の依存性を
レンズ有の測定結果から評価

測定距離 [mm]	計数率 [cps]
47	267.1
76	215.3
126	131.4
176	79.1
BGノイズ	1.12



100 Bq/cm²の汚染密度を

1分の測定で10%の精度で検出可能見込み

(S/N比を11倍に改善すると10 Bq/cm²の汚染密度に対しても適用できる見込み有)。

→測定距離を離しても、～200 mm程度であれば同程度の検出性能を満たせる範囲あり。

一方で、検出器の個数やサイズへの影響があるため、適用個所に応じた検討が必要。

2.2 目標に照らした達成度

実施項目	技術成熟度（TRL）		
	現状評価	終了時目標	終了時自己評価
創傷汚染に対する測定手法の検討	1 (基礎研究)	2 (応用研究)	2 (応用研究) ○

終了時目標：

- ・身体表面汚染測定への適用を検討する。
- ・人体の狭隘部の測定可能性について基礎データの取得を実施する。

終了時自己評価：

- ・身体表面汚染測定への適用を検討した。
- ・人体の狭隘部の測定の可能性について基礎データの取得を実施した。

2.3 成果の反映先とその寄与

身体汚染検査の特徴（使用場所、要求性能等）に適した測定体系を検討するとともに、人体の狭隘部の測定可能性について基礎データ等を取得したことで、αカメラ技術の身体表面汚染測定への適用につながる。

2.4 現場への適用性（難易度）

（技術的な課題については次ページに記載）

現場における汚染検出の適用性については、①Raゾーン退出時・
②出入管理所とも技術課題が残った。

どちらのプロセスにおいてもS/N比を改善をすることで解決する見込みである。

また、体表面汚染測定の適用場所に応じて検出下限の目標となるα核種汚染の濃度が異なるため、適用プロセスを決定したうえで装置設計を行う必要がある。

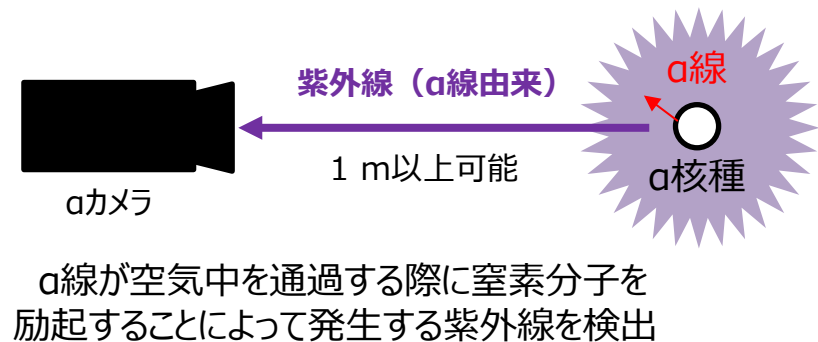
3. 今後の課題

全身サイズとして電話ボックス型の測定システムを前提としたときの技術開発項目について整理

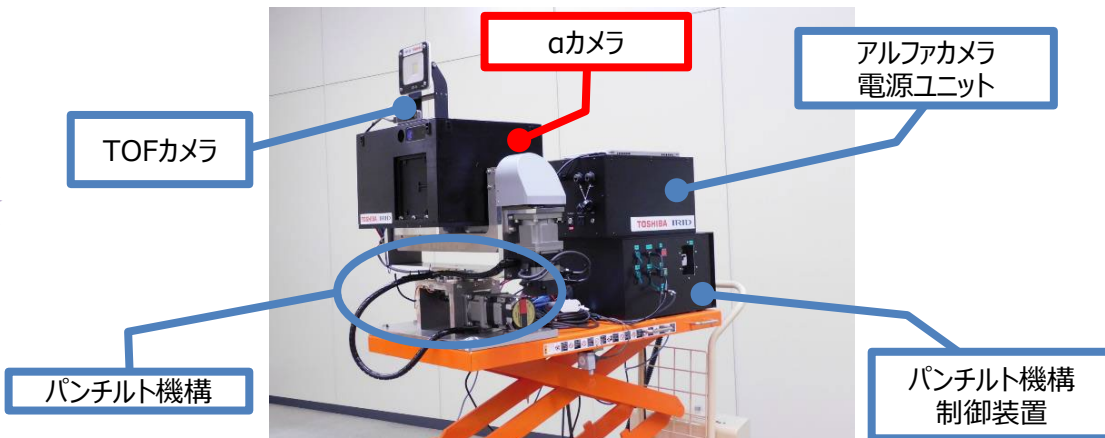
項目	課題
検出器の選定	光学系との組み合わせにより計数率を向上させるための最適化が必要。 視野や感度を指標として検出器の再選定。
暗室内光源導入方法	暗室内の測定のため、単色光源下の測定体系の構築が必要。 遠隔α汚染計測への干渉がないか、検出効率への影響評価。
測定回路の低ノイズ化	BGノイズを低減させることを目的とした回路の波形弁別手法の開発が必要。
定量化アルゴリズム	湾曲部や防護装備の影響を加味した汚染密度定量化のアルゴリズム開発が必要。 複数台の検出器の信号を利用した解析手法の検討。 現場適用にあたり、測定対象から放出されるγ線の影響評価が必要。 α線に寄与する計数率に対するノイズ量の定量的な評価が必要。

(参考) αカメラの概要

αカメラの原理

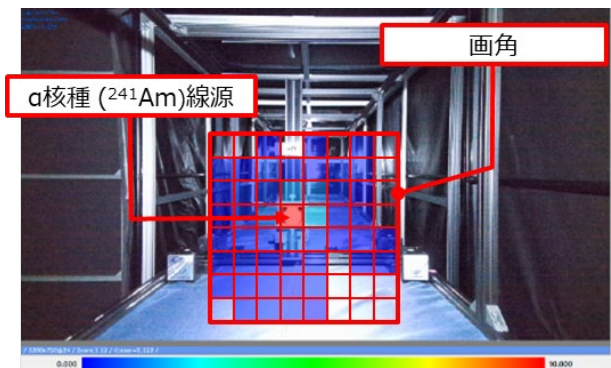


昨年度までに試作したアルファカメラシステムの外観*1



令和4年度の国プロ
建屋内解体等に伴う固体廃棄物表面のα汚染の測定

測定のイメージ*1

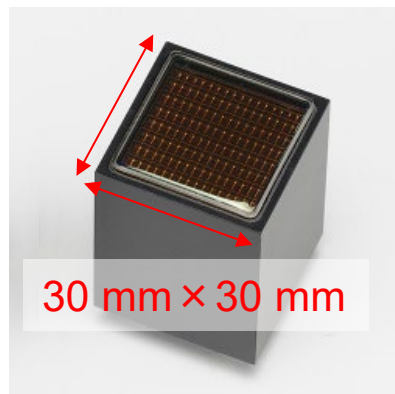


8×8の各ピクセルで計数率を同時に取得
α核種線源を置いたピクセルの窒素発光を検出

アルファカメラの主な性能*1

項目	値	備考
α線に対する感度	0.47 [s ⁻¹ /(Bq/cm ²)]	100cm先のAm-241測定時
α線の測定想定距離	70~300 [cm]	70cmは画像合成上の都合 300cmをこえてもα線のへの感度は有する
β線に対する感度	0.09 [s ⁻¹ /kBq]	75cm先のSr-90、Y-90測定時
γ線に対する感度	2.8 [s ⁻¹ /(mSv/h)]	空間線量率に対して発生するノイズへの感度

(参考) 検出器の選定



固体廃棄物PJで使用したPMT

H12428-100(浜松ホトニクス)

- ・受光面サイズは30 mm × 30 mm
- ・1ピクセルは2.88 mm × 2.88 mm × 64チャンネル
- ・光学系込みで1000 mm先の測定対象に対して
約600 mm × 600 mmの視野
- ・感度は1000 mm先の Am-^{241} 線源に対して0.47 cps / (Bq/cm²)

<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/pmt-assembly/metal-package-type/H12428-100.html>



試験で使用したPMT

H14601-200(浜松ホトニクス)

- ・受光面サイズはφ8 mm
- ・以下の理由から小型のPMTを選定
 - └ 複数の検出器を並べた試作機を想定していたため
 - └ BGの低減
- ・本試験では基礎データの取得、シミュレーションとの比較を主とし得られたデータから設計を行うプロセスの検討が目的であったため、単純な構造のH14601-200を使用した。

<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/pmt/pmt-module/current-output-type/H14601-200.html>

事業内容

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

1.概要

1.1 背景（現状の課題）

身体汚染に対しては、アルコールティッシュによる拭き取りや洗剤とシャワー及びブラシによる除染が行われるが、これらの方法は長年の経験により適宜組み合わせて実施されてきたもので、洗浄分野での技術進歩を適用・反映した事実は確認できない。

先行事業では、近年普及している洗浄剤やナノバブル技術を用いたシャワーによる除染効果を微粒子可視化システムを使用した模擬汚染に対する試験及び豚皮と放射性物質を使用した試験により、市販洗浄剤の除染剤としての適用性の検討を進めてきた。しかし、汚染の形態・性状が現場と試験では異なる可能性や豚皮試験片の表面状態の個体差による除染率のバラつきなどの課題が抽出された。

1.2 目的（課題の解決等）

汚染性状に適した除染方法及び除染剤を選定するための効果検証方法の検討するため、以下を実施する。

・実際の現場で発生する汚染の物理化学的性状について調査を行うとともに、その性状に適した除染メカニズム（界面化学的除去、化学的除去、物理的除去など）を踏まえた除染方法及び除染剤を検討する。

・実験的検証を行うことで、より最適な除染方法及び除染剤を選定するための検証方法について整理する。

1.3 目標（技術成熟度）

実施項目と技術成熟度：

実施項目	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
汚染性状に適した除染方法及び除染剤を選定するための効果検証方法の検討	2(応用研究)	3(応用研究)

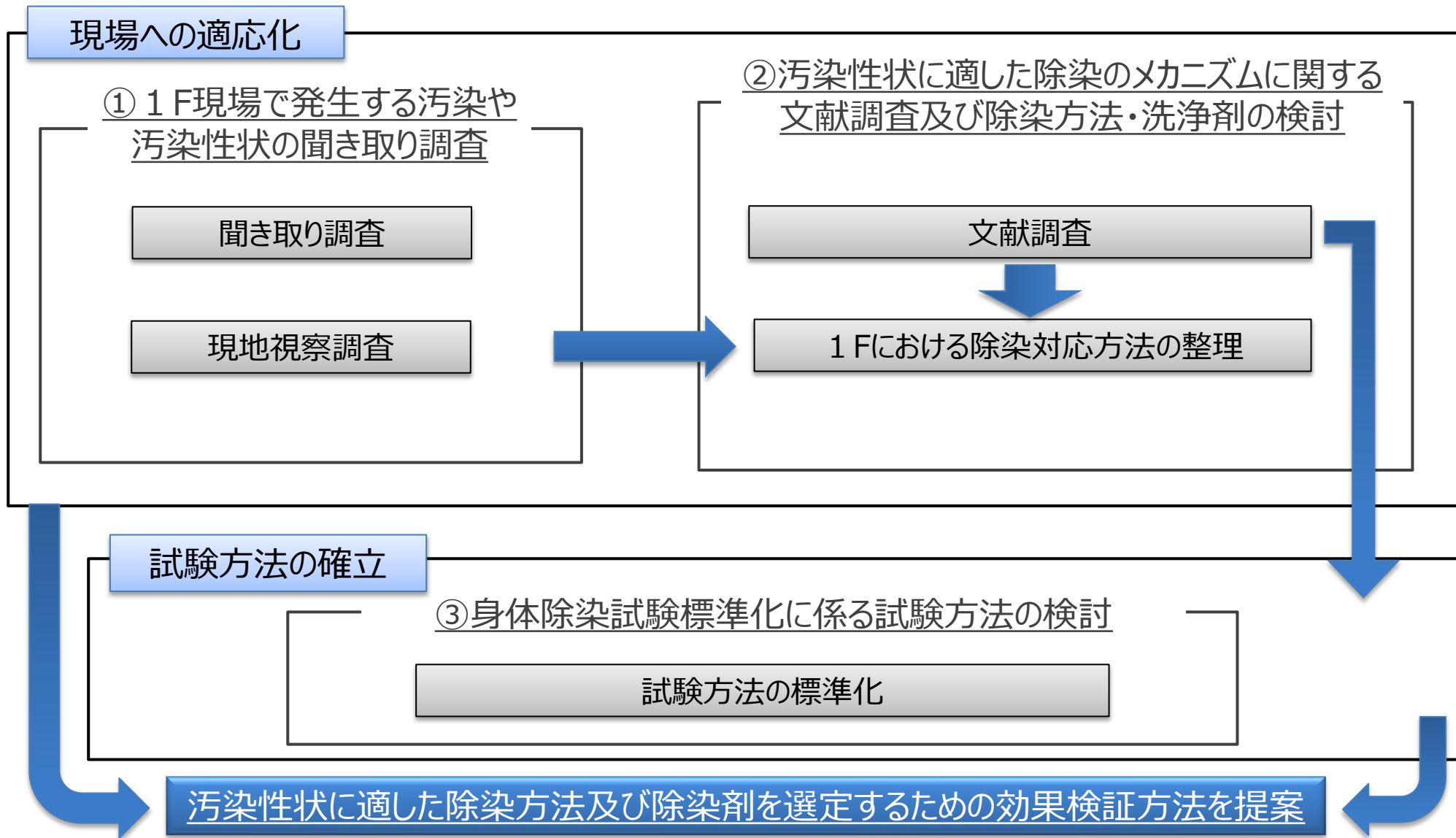
終了時目標：

汚染性状に適した除染方法及び除染剤を選定するための効果検証方法を提案する。

終了時に得られる成果物：

本研究において、汚染性状に合わせた最適な除染方法を明らかにすることで、今後、1Fにおける廃炉事業の中で、作業員の身体汚染発生した際に、作業環境に合わせた最適な除染剤の選定及び除染方法を実施することができる。

1.4 研究フロー（各実施項目の関係）



2. 実績

2.1 得られた成果 詳細は次ページ以降

(1) 1 F現場で発生する汚染や汚染性状の聞き取り調査

- a. 1 F現場における身体除染の現状及び汚染事例等の聞き取り調査

(2) 汚染性状に適した除染のメカニズムに関する文献調査

- a. 身体除染関連の文献調査
- b. 1 Fにおける汚染核種、汚染形態ごとの除染対応方法の提案

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

- a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

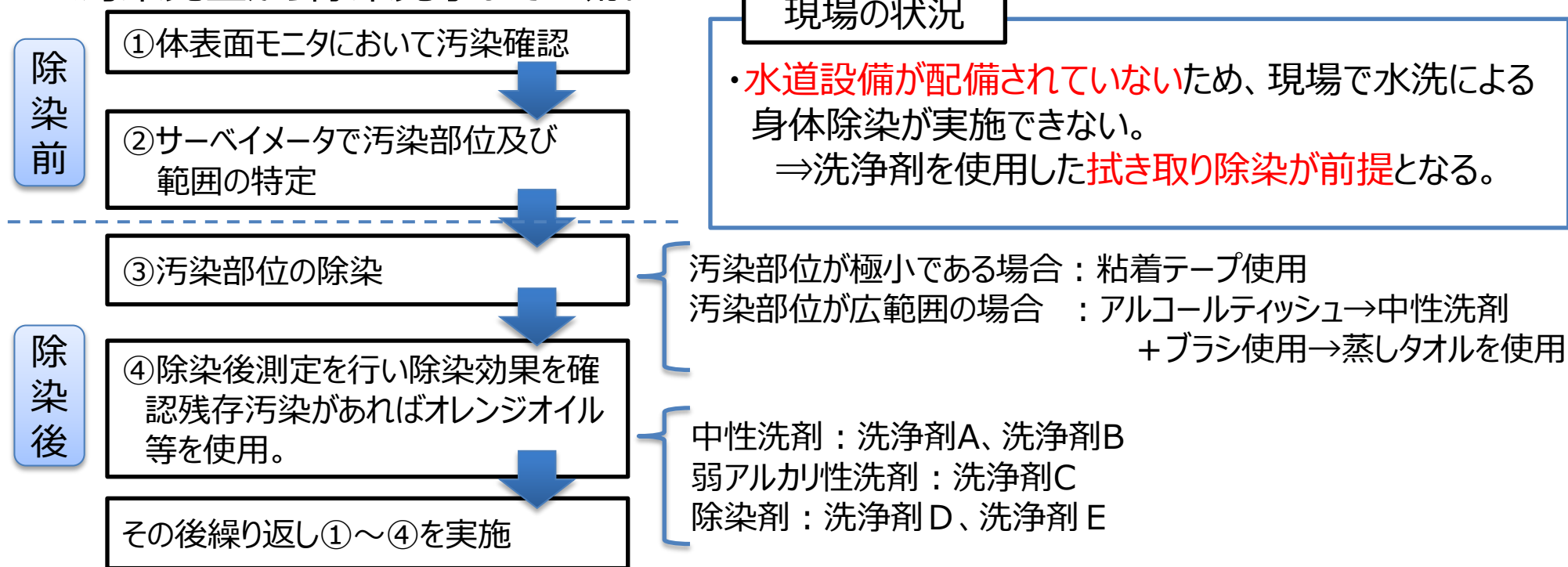
2.1 得られた成果 (1/29)

(1) 1F現場で発生する汚染や汚染性状の聞き取り調査

a. 1F現場における身体除染の現状及び汚染事例等の聞き取り調査

- 現地視察及び聞き取り調査より 1F現場における身体除染及び汚染事例の概要を確認した。

＜汚染発生から除染完了までの流れ＞



- ・ 除染は、kBqオーダーの汚染がB Gレベルになるまで実施する。
- ・ 除染開始まではおおむね数分ほど。第一選択でアルコールティッシュを使用し中性洗剤を併用する。

2.1 得られた成果 (2/29)

(1) 1F現場で発生する汚染や汚染性状の聞き取り調査

a. 1F現場における身体除染の現状及び汚染事例等の聞き取り調査

- 現地視察及び聞き取り調査より 1F現場における身体除染及び汚染事例の概要を確認した。

JAEA質問事項	東京電力HD回答
福島第一原子力発電所の放射性汚染事例における発生場所の詳細及び汚染発生時の作業員の身体状態や汚染部位、汚染形態について。	発生場所…主に8.5m盤の1～4号機及びその他建屋 作業員の装備…Y 装備。足裏汚染が主。
作業員の放射性汚染において主要となる核種(CsやRhなど)並びにそれらの物理的形態(固体、液体、気体)、化学的形態(例えば、CsOHやH ₂ SO ₄ のような化学組成及び液性)の詳細について。	放射性核種：Cs、Srが主 物理的形態：固体、液体が主 化学的形態：不明
先行研究において東京電力 1Fでは、皮膚の放射性汚染に対する除染方法について、アルコールティッシュによる拭き取り→温タオルによる拭き取り→洗浄剤＋ブラシと伺ったが、現在でもこの方法・順番で行われているのか。	①表面モニタで汚染が確認された場合は、汚染部位を特定するためGMサーベイメータで測定し汚染範囲を特定 ②汚染部位除染。 健康な皮膚で汚染している部位が極小…粘着テープを貼り・剥がして除染 汚染部位が広範囲…アルコールティッシュ→中性洗剤＋ブラシ使用→蒸しタオルを使用 ③除染後、一度測定を行い除染効果を確認。残存汚染があればオレンジオイル等を使用。 ④その後繰り返し除染を実施
実際事例において、どの程度の汚染をどのくらい除染することができたのか。	キロオーダー汚染がB Gレベルまで除染（除染前はまちまち）
汚染発生から除染開始までどれだけの時間を有したのか、除染開始から完了までのプロセスについて。	汚染発生から除染開始までは数分に対応
除染時に使用している中性洗剤及び除染剤。	中性洗剤：A、B、C 除染剤：D、E
放射性汚染の実事例における除染効果(除染前後のカウント)及び除染対応時間について。	除染効果および除染対応時間は汚染部位や浸透具合によるが、おおそ以下のとおり。 例示) 除染効果 除染時間 Aさん： 700cpm → 50cpm (アルコールティッシュ) 3分 Bさん： 500cpm → 400cpm (アルコールティッシュ) 4分 400cpm → 50cpm (中性洗剤) 5分

2.1 得られた成果 (3/29)

(1) 1F現場で発生する汚染や汚染性状の聞き取り調査

a. 1F現場における身体除染の現状及び汚染事例等の聞き取り調査

- 現地視察及び聞き取り調査より1F現場における身体除染及び汚染事例の概要を確認した。

<1F現地視察による調査>

- ・ 放射性汚染の発生は主に8.5m盤の1～4号機およびその他建屋（右図参照）
- ・ **主要核種はCs-137、Sr-90/Y-90**
- ・ 物理的形態は概ね固体、液体で化学的形態は不明
- ・ 作業員の装備は、Y 装備であり足裏汚染が多い

<多核種除去施設（ALPS）での汚染事例>

- ・ 硝酸処理を行った液体による汚染が発生
- ・ 処理工程において**酸性、アルカリ性の両性とも存在し、多くは酸性処理された液体**
- ・ 主要核種としては**Cs-137、Sr-90/Y-90**が想定



福島第一原子力発電所の構内図

2.1 得られた成果 (4/29)

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査

- ALPS汚染事例に焦点を当てた核種（Cs-137、Sr-90/Y-90）並びに身体除染に係る文献調査を実施し概要・ポイントを整理した。

I. 汚染の性状に関する文献

- ・和達 嘉樹、田代 晋吾、田島 雄三、他：皮膚の放射性アイソトープによる汚染(I) 生豚皮の ^{90}Sr - ^{90}Y および ^{32}P による汚染、日本原子力学会誌、5 巻、11 号、p.938-943 (1963)
- ・和達 嘉樹、田代 晋吾、田島 雄三、他：皮膚の放射性アイソトープによる汚染、(II) 生きている兎の皮膚の ^{90}Sr - ^{90}Y および ^{32}P による汚染、日本原子力学会誌、5 巻、12 号、p.994-996 (1963)
- ・和達 嘉樹、田代 晋吾、井上 義教、他：皮膚の放射性アイソトープによる汚染、(III) ^{137}Cs , ^{60}Co および ^{131}I の汚染に対する考察、日本原子力学会誌、7 巻、9 号、p.492-495 (1965)
- ・田代 晋吾、和達 嘉樹、村松 三男：皮膚の放射性アイソトープによる汚染、(IV) ^{35}S , ^{125}Sb , ^{147}Pm , ^{204}Tl , ^{210}Po の汚染に対する考察、日本原子力学会誌、8 巻、12 号、p.642-644 (1966)
- ・田代 晋吾：皮膚除染剤としての次亜塩素酸ナトリウム、保健物理、6巻、p.189-191 (1971)
- ・小山 睦夫：各種原子価のルテニウムの溶存条件と水酸化第二鉄への共同沈殿、日本化学雑誌、82 巻、9 号、p.1182-1186 (1961)
- ・高崎 浩司、宮部 賢次郎、泉 雄一、他：市販洗浄剤の放射性皮膚汚染に対する除染効果の比較、保健物理、38巻、2号、p.140-147 (2003)
- ・草間 朋子、伊藤 成、吉澤 康雄：放射性物質による皮膚汚染の除染方法に関する実験的考察、保健物理、21巻、p.127-131 (1986)

2.1 得られた成果 (5/29)

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査

- ALPS汚染事例に焦点を当てた核種（Cs-137、Sr-90/Y-90）並びに身体除染に係る文献調査を実施し概要・ポイントを整理した。

Ⅱ. 除染（洗浄）に関する文献

- ・ 坂本 一民：やさしい洗浄の基礎、日本化粧品技術者会誌, 46 巻, 1 号, p. 7-16(2012)
- ・ 日本界面活性剤工業会:界面活性剤って何だろう？ 界面活性剤の主な性質と種類、日本界面活性剤工業会、<https://jp-surfactant.jp/surfactant/nature/index.html>、(参照 2025-05-15)
- ・ 杉田 和之 高分子表面の濡れと接着、日本ゴム協会誌、60 巻, 5 号, p. 246-255(1987)
- ・ Spagnul A, Bouvier-Capely C, Phan G at : A new formulation containing calixarene molecules as an emergency treatment of uranium skin contamination. Health Phys. Sep;99(3):430-4. (2010)

Ⅲ. 人体の皮膚に関する文献

- ・ 和達 嘉樹、田代 晋吾、田島 雄三、他：皮膚の放射性アイソトープによる汚染(I) 生豚皮の⁹⁰Sr-⁹⁰Yおよび³²Pによる汚染、日本原子力学会誌、5 巻、11 号、p.938-943 (1963)
- ・ L.A. ILYIN、A.T. IVANNIKOV、Yu. D. PARFENOV and V. P. STOLYAROV : Strontium absorption through damaged and undamaged human skin、Health Phys.、29、75 (1975).
- ・ 白浜 博幸：合成高分子表面へのタンパク質の吸着、膜、18 巻, 1 号, p. 53-63 (1993)
- ・ 草間 朋子、大柿 一史、吉澤 康雄：創傷の放射能汚染に対する応急的な除染方法に関する実験的研究、保健物理、17 巻、2 号、p. 151-155(1982)
- ・ 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 大洗原子力工学研究所：身体汚染が発生した場合の措置に関するガイドライン、<https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/information/2018/011605.pdf>、(参照 2025-05-15)

2.1 得られた成果 (6/29)

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査

[I .汚染の性状に関する文献]

◎液性による除染難易度の変化

液性(pH)が酸・アルカリいずれかに傾いたとき、
同じ核種でも除染難易度が変化する。

・陽イオン性核種
Cs-137、Sr-90等 → アルカリ性の方が
除染難易度が高い

除染効果高※（アルカリ性の場合）
次亜塩素酸ナトリウム < 中性洗剤

・陰イオン性核種
P-32、S-35等 → 酸性の方が
除染難易度が高い

除染効果高※（酸性の場合）
中性洗剤 < 次亜塩素酸ナトリウム

※文献に基づいた除染結果

◎不溶性の水酸化物形成

加水分解に伴う不溶性水酸化物の形成が除染難易度を上昇させる。

・Cs-137等アルカリ金属
⇒広いpH域でイオン性を有するが、強アルカリ領域で水酸化物形成
・Ce-144、Co-60等
⇒中性領域で水酸化物形成

◎取りうる化学形の種類

水酸化物形成の他に化学形が多様であることも除染難易度の上昇に関係
・Ru-106
⇒0～+8の価数をとる（取りうる化学形が多岐）

- ・放射性核種ごとに比較的除染を困難とする液性（pH）の傾向をもつ。
- ・加水分解に伴う不溶性の水酸化物形成によって除染困難となる場合がある。
- ・放射性核種自体が様々な化学形をとる場合除染困難となる場合がある。

2.1 得られた成果 (7/29)

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査

[Ⅱ.除染（洗浄）に関する文献(洗浄方法)]

◎界面化学的除去（ハンドソープ、シャンプーなどの界面活性剤を用いた市販洗剤）

界面活性効果(乳化・浸潤・分散等)に物理的、化学的除去要素を加えて汚染物質の付着物における付着エネルギーを弱体化させることができる。

◎化学的除去（酸・アルカリ、溶剤等）

強酸性、アルカリ性⇒除去効果は高いが負荷が大きい。

弱酸性、弱アルカリ性⇒市販洗剤に活用可能。

◎物理的除去（マイクロバブルシャワー(流体力学)・超音波洗浄機・研磨等）

物理的刺激は限界があるが、マイクロバブルシャワーやスクラブ剤等

一部洗剤に応用した技術も存在する。

◎生物的除去

市販の洗剤ではこのような製品がない。

身体除染では除染効果が高い洗浄方法が求められるが、前提として人体皮膚への負荷が少ない洗浄方法であり人体皮膚へ適用可能か選択する必要がある。

2.1 得られた成果 (8/29)

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査

[Ⅱ.除染（洗浄）に関する文献(界面化学的除去について)]

界面活性剤の種類

○アニオン界面活性剤

疎水基のついている部分がマイナス（負）イオンに電離する界面活性剤。
用途⇒衣服用洗剤、シャンプー、ボディソープ

○カチオン界面活性剤

疎水基のついている部分がプラス（正）イオンに電離する界面活性剤
用途⇒ヘアリン、衣服用柔軟剤、殺菌剤

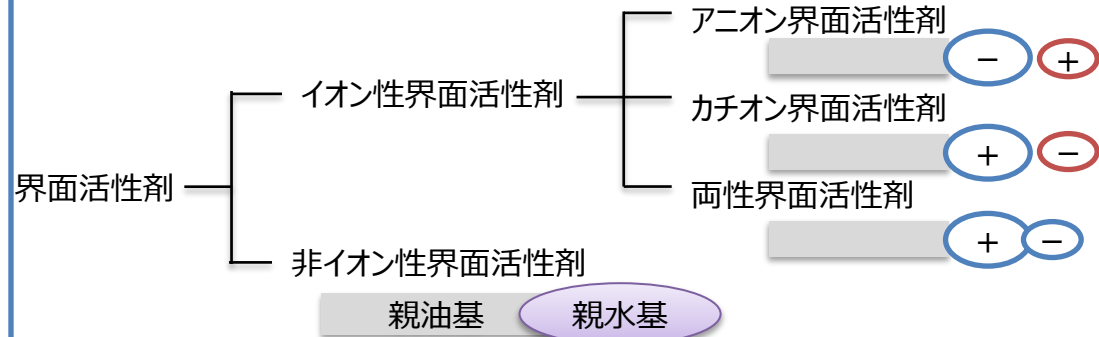
○両性界面活性剤

アルカリ性領域ではアニオン界面活性剤の性質
酸性領域ではカチオン界面活性剤の性質を示す界面活性剤
用途⇒シャンプー、ボディソープ、台所洗剤

○非イオン性界面活性剤

イオン化しない親水基をもっている界面活性剤
用途⇒衣服用洗剤、乳化・可溶化剤、分散剤、
金属加工油

界面活性剤の分子構造



界面活性剤の分子構造が異なると洗浄剤の使用用途が変わる。

放射性核種の液性等に応じて界面活性剤の種類を変化させることで除染効果が得られる可能性がある。

2.1 得られた成果 (9/29)

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗淨）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査

[Ⅱ.除染（洗淨）に関する文献(マイクロバブルシャワー(流体力学)について)]

◎「ファインバブル」(ISO 20480-1、JIS B 8741-1)

気泡の直径によりマイクロサイズの「マイクロバブル (Micro Bubble : MB) 」と、ナノサイズの「ウルトラファインバブル (Ultrafine Bubble : UFB) 」の2種類に分類

- ・ファインバブルの効果は様々で、一般的に広く利用されている（インフラ、工業、農林水産食品分野、医療薬品分野、一般生活分野等）。
- ・ファインバブルの効果において、微細な泡が汚れを浮かせるだけでなく、吸着、浮遊させる物理的作用があり、水の洗淨効果を高めることができる。

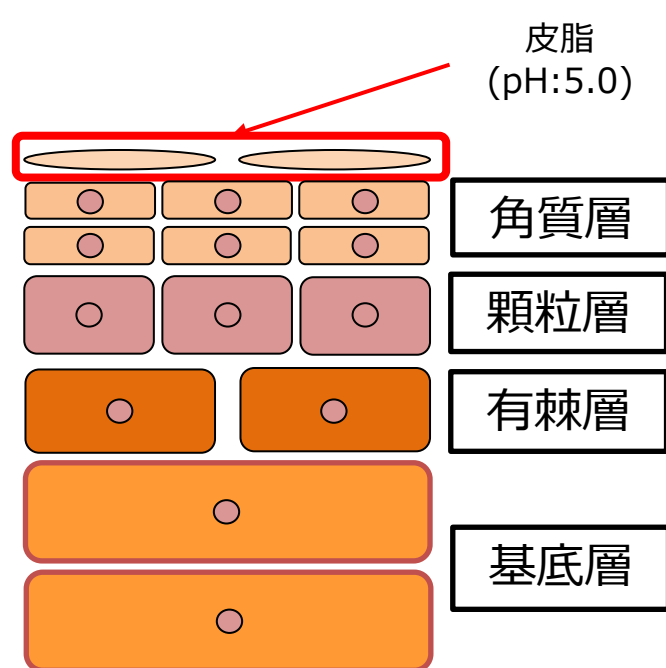
バブル名	ファインバブル		ミリバブル
	ウルトラファインバブル (ナノバブル)	マイクロバブル	
直径	1μm未満	1μm以上100μm未満	100μm以上
目視	不可能	可能	可能

2.1 得られた成果 (10/29)

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査

[Ⅲ.人体皮膚に関する文献(人体皮膚の構造について)]



表皮

4層で構成され、40～50日周期で細胞が分化を繰り返す。(角質層は約0.02mm)
化粧水等の液体は角質層までしか届かない。

◎ 洗浄に係る物理的要因

皮丘（皮膚表面の小さな隆起）から構成される皮構（表面のシワ）が存在する。
⇒汚染物質の入り込みが考えられる。

◎ 洗浄に係る化学的要因

角質層表面に存在する「**皮脂(弱酸性)**」が外部からの細菌に対するバリア機能を担っている(生理的障壁)。
⇒**汚染物質と化学的な結合を伴う**可能性がある。

身体除染時は人体皮膚の物理的構造や化学的結合を考慮した洗浄を行う必要がある。

2.1 得られた成果（11／29）

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査

[Ⅲ.人体皮膚に関する文献(創傷汚染について)]

身体汚染発生後速やかに除染措置を実施することが非常に重要である。

⇒以下のように創傷の種類、程度によって対処方法が異なる。

◎物理的創傷（切傷、擦過傷および刺傷等）の場合

- ・ 汚染直後から放射性物質の体内吸収が急速に起こる（15～60分後にほぼ飽和）。
- ・ 無傷での汚染と比較して200倍程度汚染が進む。
- ・ 体内吸収率の飽和値は初期汚染量の約30～60%（創傷の種類により異なる）。

◎化学的創傷（酸・アルカリ等）の場合

- ・ 汚染直後～汚染後30分
⇒放射性物質の体内吸収はほぼ無視できる（無傷の皮膚の場合と同程度）。
- ・ 30分後以降
⇒急速な体内吸収が起こる。
- ・ 60分後の体内吸収率は、酸による火傷で0.6%、アルカリによる火傷で0.2%であり、物理的創傷と比較して1/100程度。したがって、酸およびアルカリなどによる化学的創傷（化学熱傷）の場合、火傷に対する一般的な処置を先行すべきである。

2.1 得られた成果（12／29）

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査

[Ⅲ.人体皮膚に関する文献]

JAEAにおける身体汚染が発生した場合の措置に関するガイドラインでは以下の対応が推奨されている。

◎多数箇所汚染

⇒原則として創傷部、顔面、頭部、首の順とする。

◎出血を伴う汚染

⇒絞るように血を出し流水等で洗い流し、タオルで水分を拭き取る。

◎酸・アルカリ、熱傷を伴う汚染

⇒大量の水で流し、その後除染剤を使用し、熱傷を伴うなら水洗。

◎粉末による汚染

⇒飛散防止のため、除染剤をしみこませたタオルで拭き取る。

◎有機溶剤、油による汚染

⇒水洗を先に行うと、不溶性の水酸化物を形成し除染を困難とさせるため、水洗に先行し除染剤を塗布し1分放置後、水洗しながらブラシで2分こする。

2.1 得られた成果（13／29）

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査のまとめ

I. 汚染の性状に関する文献

- 放射性核種の液性によっては同じ核種でも除染の難易度が変化する。
- Cs-137、Sr-90/Y-90などの皮膚表面（弱酸性）に結合しやすいアルカリ性汚染の場合、特に迅速な対応が必要である。
- 不溶性の水酸化物の形成によって除染難易度が上がるため、同一方法によって得られる除染効果が異なる可能性があることを考慮しなければならない。

II. 除染（洗浄）に関する文献

- 洗浄方法には、界面化学除去（市販洗浄剤等）・物理的除去（超音波や研磨等）・化学的除去（酸・アルカリ性洗剤等）、生物学的除去があるが、実際に使用できるのは皮膚に害のない、市販洗浄剤による界面化学除去による方法に限られる。
- 界面化学除去効果を利用した洗浄剤の中には、界面活性効果に物理的・化学的効果が付与されて洗浄効果が得られるようになっているものもある。
- 界面活性効果にも種類があり、汚染形態によって界面活性剤の種類を考慮する必要がある。

2.1 得られた成果（14／29）

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

a. 身体除染関連の文献調査のまとめ

Ⅲ．人体皮膚に関する文献

- 皮構(表面のシワ)への汚染物質の入り込みが考えられる。
- 角質層表面に存在する「皮脂(弱酸性)」が外部からの細菌に対するバリア機能を担っている一方で汚染物質と化学的に結合し、汚染が凝集する可能性がある。
- 物理的創傷汚染**では、皮膚表面の表皮のバリア機能が失われ、無傷の場合と比較して200倍程度皮膚への浸透及び体内吸収が進むため、**迅速に水洗による除染が必要とされる**
- 化学的創傷汚染**では、酸・アルカリによる**火傷（化学熱傷）**に対する一般的な**処置（水洗等）が優先的に必要とされる**
- 広範囲にわたる身体汚染の場合、創傷部は優先的に除染対象となる



上記の文献調査を踏まえ、**ALPS汚染事例に焦点を当てた核種（Cs-137、Sr-90/Y-90）**について汚染形態ごとの除染対応方法を提案する。

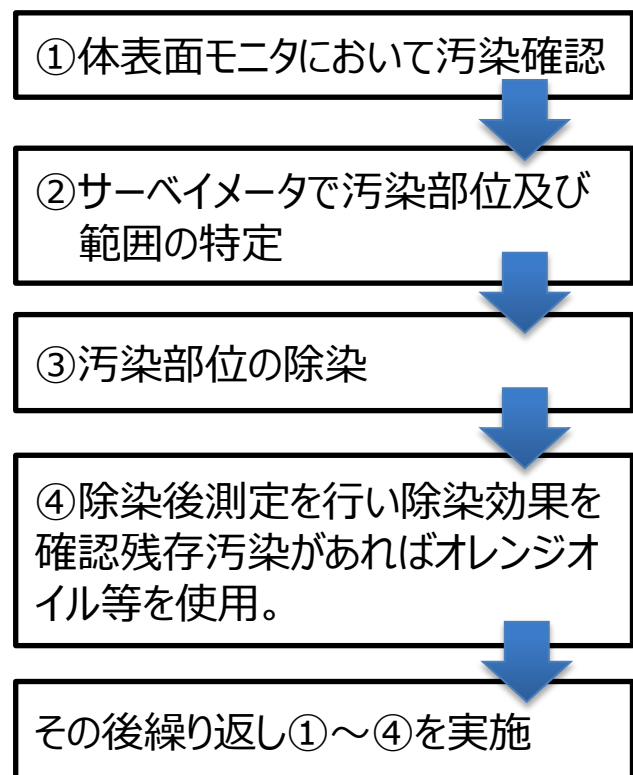
2.1 得られた成果（15／29）

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

b. 1 Fにおける汚染核種、汚染形態ごとの除染対応方法

- ALPS汚染事例（主要核種：Cs-137、Sr-90/Y-90）並びに1 Fにおける汚染想定核種等について、汚染形態ごとの除染対応方法を整理した。

＜汚染発生から除染完了までの流れ＞



◎ Cs-137、Sr-90/Y-90(主要核種)

【酸性汚染の場合】

弱アルカリ性洗剤＋拭き取り

**ALPS汚染事例では
この除染方法が選択される**

【アルカリ性汚染の場合】

中性洗剤＋拭き取り

その他 1 Fにおける汚染想定核種の中には、液性によって不溶性の水酸化物形成により除染を困難にするものもある(主に陽イオン核種)。

➡ 水洗に先行し速やかに中性洗剤を使用し除染する。

2.1 得られた成果（16／29）

(2)国内外の放射性汚染の化学的評価及び除染（洗浄）のメカニズムに関する文献調査

b. 1 Fにおける汚染核種、汚染形態ごとの除染対応方法

➤ ALPS汚染事例並びに 1 Fにおける身体除染において考慮すべき点について整理した。

◎酸性・アルカリ性溶液による皮膚へのダメージ

比較的化学的創傷の体内吸収は少ないが、酸性・アルカリ性溶液では化学熱傷が生じるため、薬傷のおそれがある場合は、**水洗を先行すべき**である。

◎粉末による汚染

飛散防止のため、除染剤をしみこませたタオル（**温タオル+洗浄剤**）で拭き取る。

◎汚染部位の創傷、熱傷等

体内吸収考慮し皮膚表面の変成を伴う場合は物理的創傷・熱傷のいずれにおいても**水洗**が推奨される。

◎有機溶剤、油による汚染

不溶性水酸化物形成を防ぐため、**中性洗剤を使用後に水洗**を実施。



身体除染を要する状況において水洗は効果的な手段であり、水洗を可能とする環境整備（可搬型のシャワー設備など）について検討の余地がある。



可搬型シャワーの例

2.1 得られた成果（17／29）

(3)身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

- 除染効果の検証方法の開発にあたり、試験者によって拭き取り方が異なること、試験試料によるばらつき等が測定結果に影響を及ぼす等の課題を抽出し試験方法を標準化した。

試験手順

①試料に模擬汚染（蛍光塗料）を塗布



②模擬汚染にレーザー照射



③模擬汚染拭き取り



④拭き取り後の模擬汚染にレーザー照射

蛍光塗料に対してレーザーを使用することで簡易的に視覚評価することができる。

均一化における課題

試料の表面状態

拭き取り圧力

試料位置

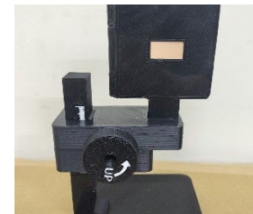
対策案



工業的に生産するため、表面状態が安定したものが入手できることから人工皮膚を選定。



フォースゲージ使用により拭き取りにおける個人間の圧力のバラつき低減。



台座や固定治具など位置を固定化できる方法として、専用治具を作製し評価した。

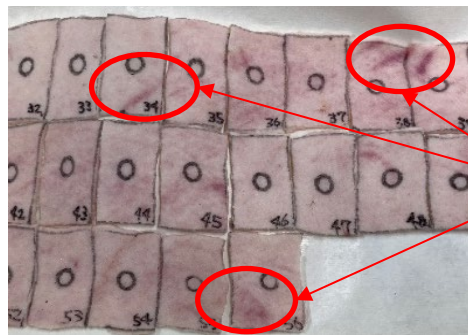
2.1 得られた成果 (18/29)

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

- 従来除染試験に使用されてきた豚皮のデメリットを解消できる人工皮膚が試験試料として代替可能であることを拭き取り試験（コールド試験）を通して確認した。

豚皮



傷等による
表面状態の
個体差

先行研究で用いた豚皮の試験片

豚皮は経皮吸収率において人体皮膚との近似性が評価されており、従来除染試験に使用されてきた。

＜豚皮のデメリット＞

- ・傷等の個体差が大きいため再現性のある試験の実施が難しい
- ・入手が困難。
- ・冷凍保存が原則、在庫コストが発生。
- ・生体試料のため廃棄が制限される。

人工皮膚



20代の肌モデル



20～70代の各肌モデル

＜人工皮膚のメリット＞

- ・人体皮膚をモデルに作成しているため構造が人体に近い
- ・工業的に生産するため、表面状態が安定したものを入手できる。
- ・シリコン製のため長期間保存できる。
- ・可燃で廃棄可能。

2.1 得られた成果 (19/29)

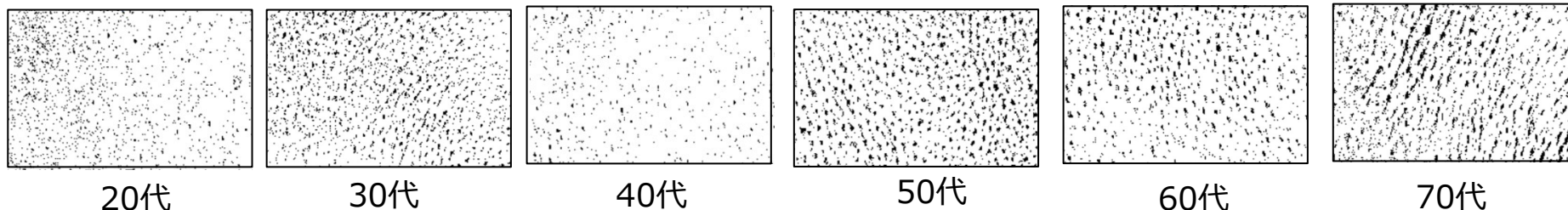
(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

人工皮膚の特徴

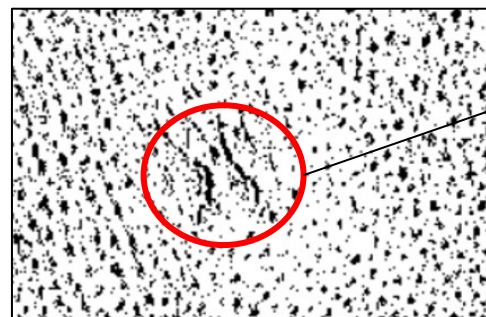
○サンプルごとの皮膚構造の違い

20代～70代の肌モデルにおいて、年代ごとに毛穴やシワの数、大きさが異なる。
特に50代以上では、毛穴が大きく、シワが多く出ていることが特徴である。



○取り扱い上の注意点

試料を繰り返し使用することで、表面に傷が生じ汚染が残りやすくなる。



洗浄により生じた表面の傷

50代のモデル

2.1 得られた成果 (20/29)

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

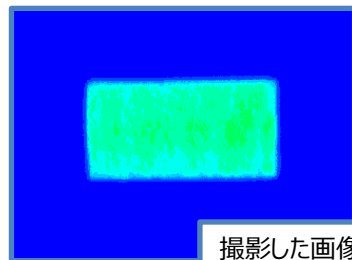
【実験-1：人工皮膚と人体皮膚等のコールド試験】

- 試験試料としての人工皮膚の代替性を確認するため、人体皮膚等とのコールド比較試験を行い除染率を評価した。

コールド試験方法・手順



① 試料に模擬汚染（蛍光塗料）を塗布し、40分間放置する。

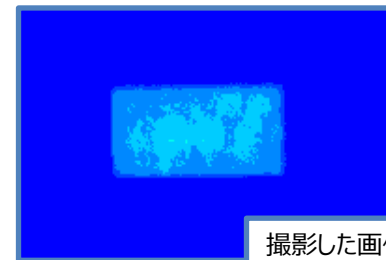


撮影した画像

② 模擬汚染を専用カメラで撮影する※1。



③ アルコールティッシュ、温タオル、温タオル+洗浄剤aで一回拭き取る※2。



撮影した画像

④ 拭き取り後の模擬汚染を専用カメラで撮影する。

⑤ ②～④の手順を2回繰り返す。
(拭き取り2回目、拭き取り3回目)

⑥ 洗浄前後の画像を解析し、除染率を算出する。人の皮膚でも試験を実施する。

◎ 試験対象 ・人体皮膚（前腕部、前膝部、足底部）
・人工皮膚（20～70代の各肌モデル）
・豚耳

※1. 3Dプリンタで作成した治具により評価面積を固定化。

※2. フォースゲージを使用し拭き取り圧力を一定にした。

2.1 得られた成果 (21/29)

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

【蛍光面積測定・解析】

・微粒子可視化システム Particle Viewer
PV2-IV (カトウ光研 (株))



専用カメラ

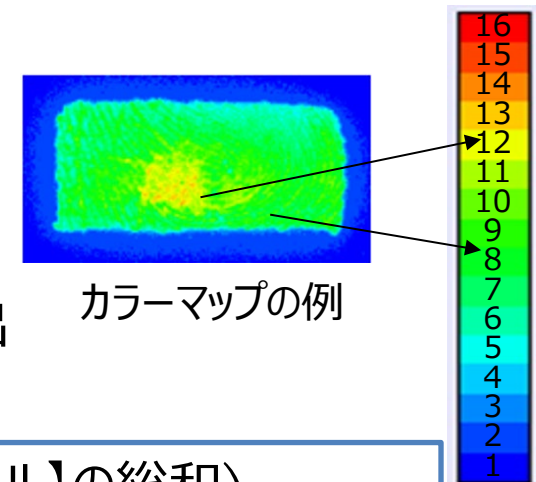


レーザー照射装置

①レーザーを照射し、皮膚に塗布した蛍光塗料
の蛍光画像を専用カメラで撮影

②蛍光画像の解析後、発光量(0~255)に応じて16段階に
分割したカラーマップを作成

③カラーマップから得られた各発光レベルとその面積から除染率を算出



カラーマップの例

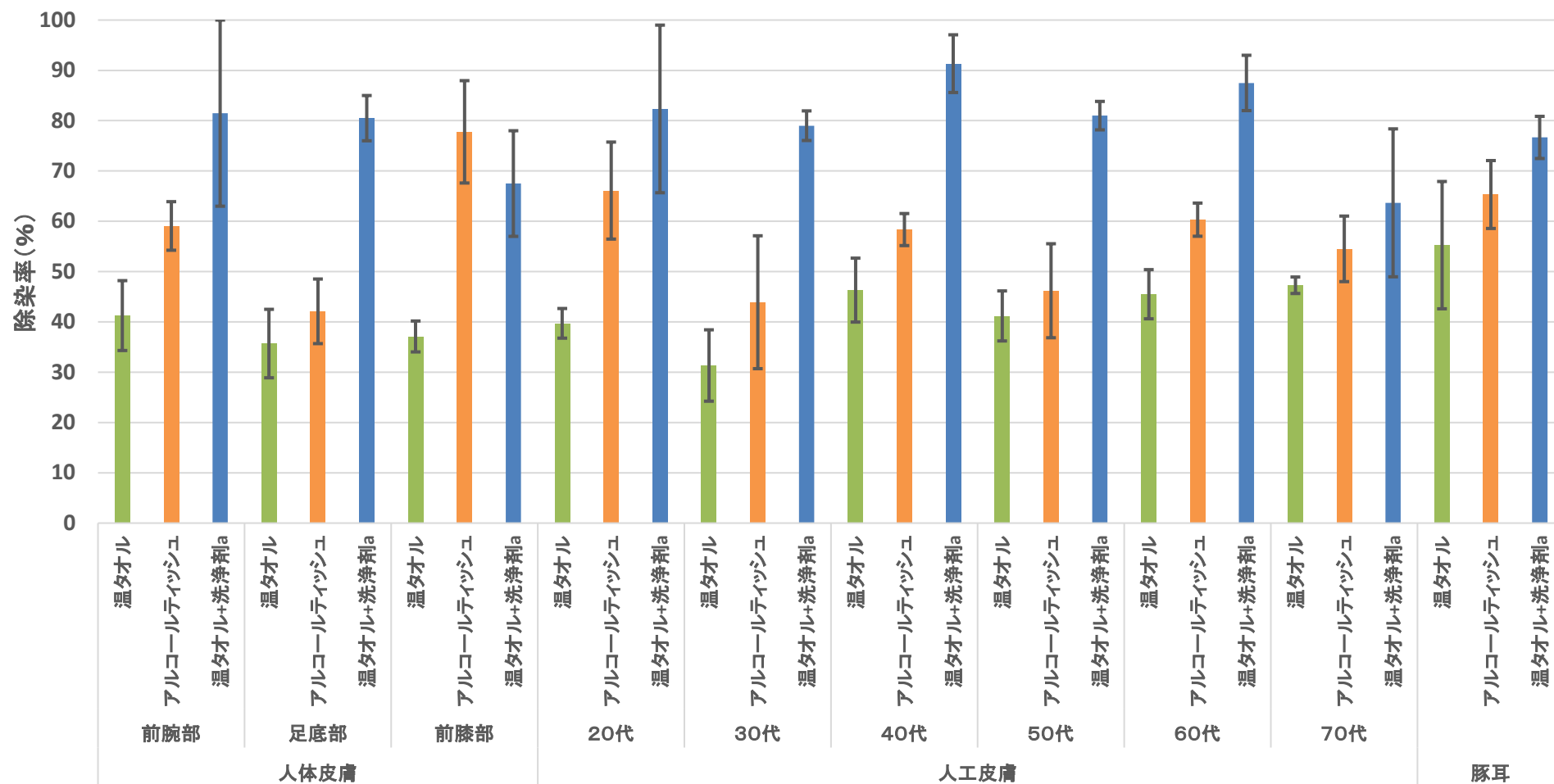
$$\text{除染率(\%)} = \left(1 - \frac{\text{除染3回目の【各発光レベルの面積} \times \text{発光レベル】の総和}}{\text{除染前の【各発光レベルの面積} \times \text{発光レベル】の総和}} \right) \times 100$$

2.1 得られた成果 (22/29)

(3)身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

【実験-1：人工皮膚と人体皮膚等のコールド試験比較結果】



2.1 得られた成果（23／29）

(3)身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

【実験-1：人工皮膚と人体皮膚等のコールド試験比較結果】

- 前腕部
人工皮膚モデルに比較的近い表面構造として選定。除染率は人工皮膚とほぼ同等。
- 足底部
表皮が厚く皮溝も深いため蛍光塗料が残りやすく、除染率も比較的低かった。
- 前膝部
表皮が比較的薄く、膝蓋骨の硬さも相まって安定した圧力をかけることができた。
- 温タオルと比較しアルコールティッシュ（1Fの除染でも使用）による除染率が高いことが確認された。人工皮膚と人体皮膚の除染率は除染率に大きな差はない（約40%～60%）。
⇒人工皮膚は人体皮膚と代替可能であることが確認できた。
- 人工皮膚では表面構造（年代別）による明確な除染率の違いは確認できなかったが、人体部位においては除染率の変化がみられた。

2.1 得られた成果 (24/29)

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

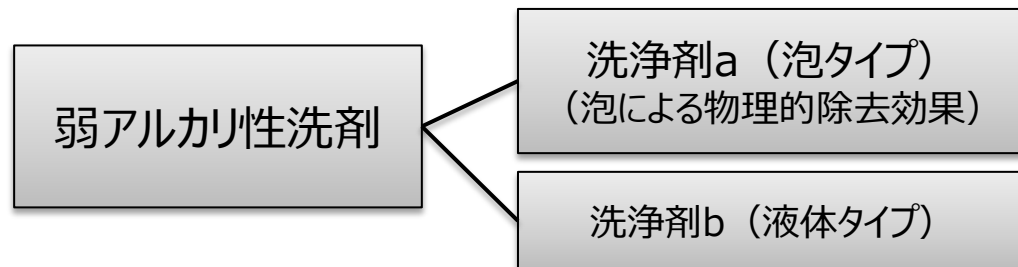
a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

【実験-2：人工皮膚を用いた効果的な洗剤及び洗剤方法による試験】

- 標準化した試験方法を用いて、文献調査を踏まえた効果的な洗剤及び洗剤方法の除染効果を検証した。(試験方法は実験 1 と同様)

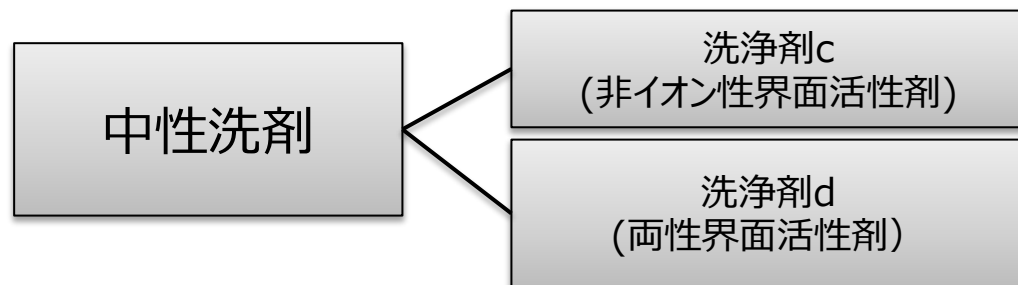
◎ 洗剤の形態による洗剤効果の比較

⇒同一洗剤のタイプ別洗剤力を比較



◎ 同系統洗剤の成分比較

⇒界面活性剤分子構造の違いによる洗剤効果の比較



◎ ナノバブル効果を利用した除染力検証

シャワーヘッドでの弱点（水が飛び散るなど）を克服したタイプでの比較



前回事業で使用したシャワーヘッド

本事業で使用したアダプタタイプ
(シャワーヘッドの根元に装着する)

2.1 得られた成果 (25/29)

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

【実験-2：人工皮膚を用いた効果的な洗剤及び洗浄方法による試験】

種類	洗剤a (泡タイプ) 	洗剤b (液体タイプ) 	洗剤c (非イオン性) 	洗剤d (両性) 
ナノバブルアダプタ未装着時	73±4	47±15	60±4	21±9
ナノバブルアダプタ装着時	73±23	51±25	91±6	17±17

- 前回事業同様、洗剤a、洗剤cで比較的高い除染効果が得られた。
- 今回試験では、非イオン性及び両性の界面活性剤の比較において非イオン性界面活性剤の効果の方が除染率が高い傾向にあることを確認した。(1Fで使用されている洗剤Aの成分も非イオン性界面活性に該当)
- ナノバブルの洗浄作用により除染効果を高めることを確認した。



本試験より、洗浄効果の高い除染方法と洗剤を併用することで高い除染効果が得られることを確認した。

2.1 得られた成果 (26/29)

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

【実験-3：人工皮膚と豚皮を用いたホット試験】

- 人工皮膚が試験試料として使用できることを放射性物質を用いたホット試験においても実施した。
- 標準化された方法で試験を実施し、試験精度を確認した。

◎ 試験条件

- | | | |
|-----------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| ・試験試料 | ・検出器 | ・試験方法 |
| 人工皮膚50代モデル(NO.10I) | α : ZnS(Ag)シンチレータ | 放射性溶液の滴下後、40分放置させたのち、 |
| ・RI溶液0.5 mL | β : GM管式サーベイメータ | 拭き取り試験を実施 (温タオル、洗浄剤a+温タオル) |
| Cs-137 (1M硝酸)、Sr-90/Y-90 (0.1M塩酸) | | |
| 、Am-241 (0.1M硝酸) | | |

◎ ホット試験手順



① 人工皮膚に溶液を滴下
(静置時間：40分間)



② 拭き取り前にサーベイメータで測定



③ 拭き取り除染実施
温タオル、洗浄剤a+温タオル



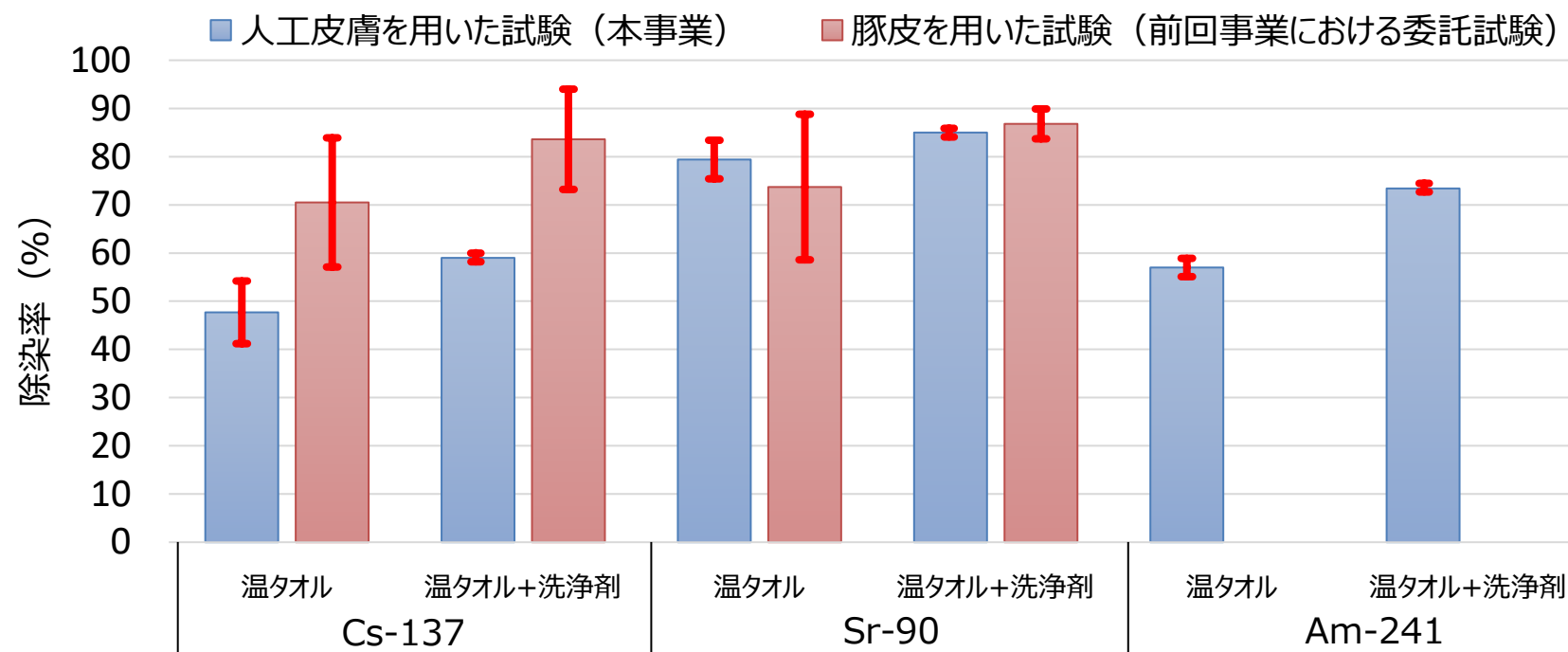
④ 拭き取り後にサーベイメータ
で測定

2.1 得られた成果 (27/29)

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

【実験-3：人工皮膚と豚皮を用いたホット試験】



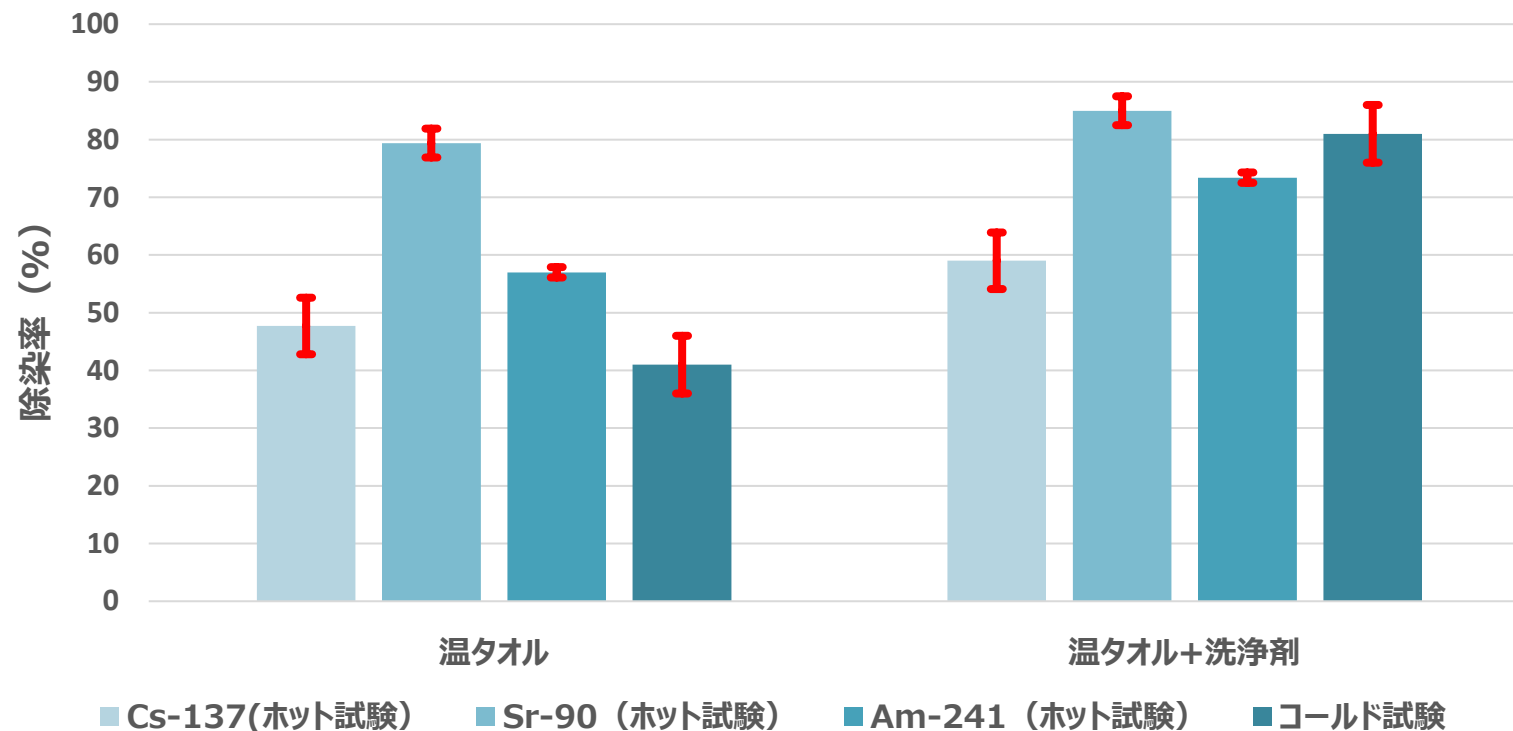
- 豚皮を用いて同様の試験を実施した先行研究での試験結果と比較すると、除染の傾向は同様の傾向にあり、人工皮膚の有用性を確認できた。
 - 標準化された方法で試験を実施したことで、試験精度が向上した。
- ⇒新規洗浄剤導入時の最適な除染効果の検証方法として有用であることが確認できた。

2.1 得られた成果 (28/29)

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

a. 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

【実験-3：人工皮膚と豚皮を用いたホット試験】



- 湿タオルによる拭き取り結果と比較して、湿タオル+洗剤による拭き取りの除染率が高い傾向にあることが確認でき、コールド試験結果と同等の試験結果が得られたことから、放射性物質を用いた試験においても人工皮膚の有効性が確認できた。

2.1 得られた成果（29／29）

(1) 1F現場で発生する汚染や汚染性状の聞き取り調査

(2) 汚染性状に適した除染のメカニズムに関する文献調査

- ・文献調査を通して汚染性状に応じた除染方法及び除染剤の選択方法について整理した。
- ・1Fでの聞き取り調査を実施し、1FでのALPS汚染事例に焦点を当てた核種（Cs-137、Sr-90/Y-90）について汚染形態ごとの除染対応方法を提案した。

(3) 身体除染試験標準化に係る試験方法の検討

- ・人工皮膚が豚皮に代わり試験試料として使用できることを、コールド、ホット試験を通して確認した。
- ・標準化された方法で試験を実施したことで、試験精度が向上した。
- ・新規洗浄剤導入時の除染効果検証方法を整理した

2.2 目標に照らした達成度

実施項目	技術成熟度（TRL）			
	現状評価	終了時目標	終了時自己評価	
汚染性状に適した除染方法及び除染剤を選定するための効果検証方法の検討	2 (応用研究)	3 (応用研究)	5 (模擬実証)	◎

終了時目標：

汚染性状に適した除染方法及び除染剤を選定するための効果検証方法を提案する。

終了時自己評価：

汚染性状に適した除染方法及び除染剤を選定するための効果検証方法を提案した。

2.3 成果の反映先とその寄与

本研究において、汚染性状に合わせた最適な除染方法を明らかにすることで、今後、1Fにおける廃炉事業の中で、作業員の身体汚染発生した際に、作業環境に合わせた最適な除染剤の選定及び除染方法を実施することができる。さらに、本手法を他の原子力事業所へ導入することで、除染技術の向上に資することができる。

2.4 現場への適用性（難易度）

特に支障はない。

3. 今後の課題

放射性物質を用いたホット試験において、人体皮膚により近い豚耳や豚皮を用いた試験を実施できれば、人工皮膚の有用性についてより詳細に評価できる可能性がある。

事業内容

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

略語・専門用語の説明

略語・専門用語	説明
CdZeTe検出器	「テルル化カドミウム亜鉛を使用した半導体検出器」の略語
VARSKIN	皮膚線量評価のための計算コード※の名称 ※Hamby, C.D., et al., VARSKIN+ 1.0: A computer Code for Skin Contamination and Dosimetry Assessments, Revision 4, U.S. NRC, 2021. Report number: NUREG/GR-6918. (https://ramp.nrc-gateway.gov/codes/varskin)
ICRP OIR DataViewer	ICRP 2007年勧告*に基づく実効線量係数を表示するためのシステム OIRは「Occupational Intakes of Radionuclides（邦訳：放射性核種の職業上の摂取）」の略語 (https://icrp.org/page.asp?id=505)

1. 概要

1.1 背景（現状の課題）

創傷汚染では、創傷部に付着した放射性物質が皮下組織に達しそのまま血中に取り込まれることから、同じ作業環境で吸入摂取した場合に比べ内部被ばく線量が大きくなるおそれがあるが、国内外において創傷汚染に対する測定手法は明確化されていない。

皮膚を貫通したα線核種による汚染の場合、皮膚でα線が遮蔽されるためZnS(Ag)サーベイメータで検出することは困難であり、γ (X)線を対象とした測定が必要となるが、精密型全身カウンタを応用させた測定や血液採取による評価などの先行研究で示されている方法は、作業場等で迅速に適用可能なものではない。

1.2 目的（課題の解決策）

創傷汚染に対する測定手法を提案するために以下を実施する。

(1) 計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

汚染事故時の初動対応での使用を想定し、可搬性が高く、γ(X)線のエネルギースペクトルが測定可能な検出器と計算シミュレーションを用いた測定手法を検討する。

(2) 創傷汚染に対する線量評価に係る検討

創傷部の放射能(Bq)と先行事業*で作成した対応手順に係るプロトコル試案で示されたアクションレベルとの関係等を評価する。

1.3 目標（技術成熟度）

実施項目と技術成熟度：

実施項目	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
創傷汚染に対する測定手法の検討 ・計算シミュレーションを用いた測定手法の検討 ・創傷汚染に対する線量評価に係る検討	4(実用化研究)	6(フィールド実証)

終了時目標：

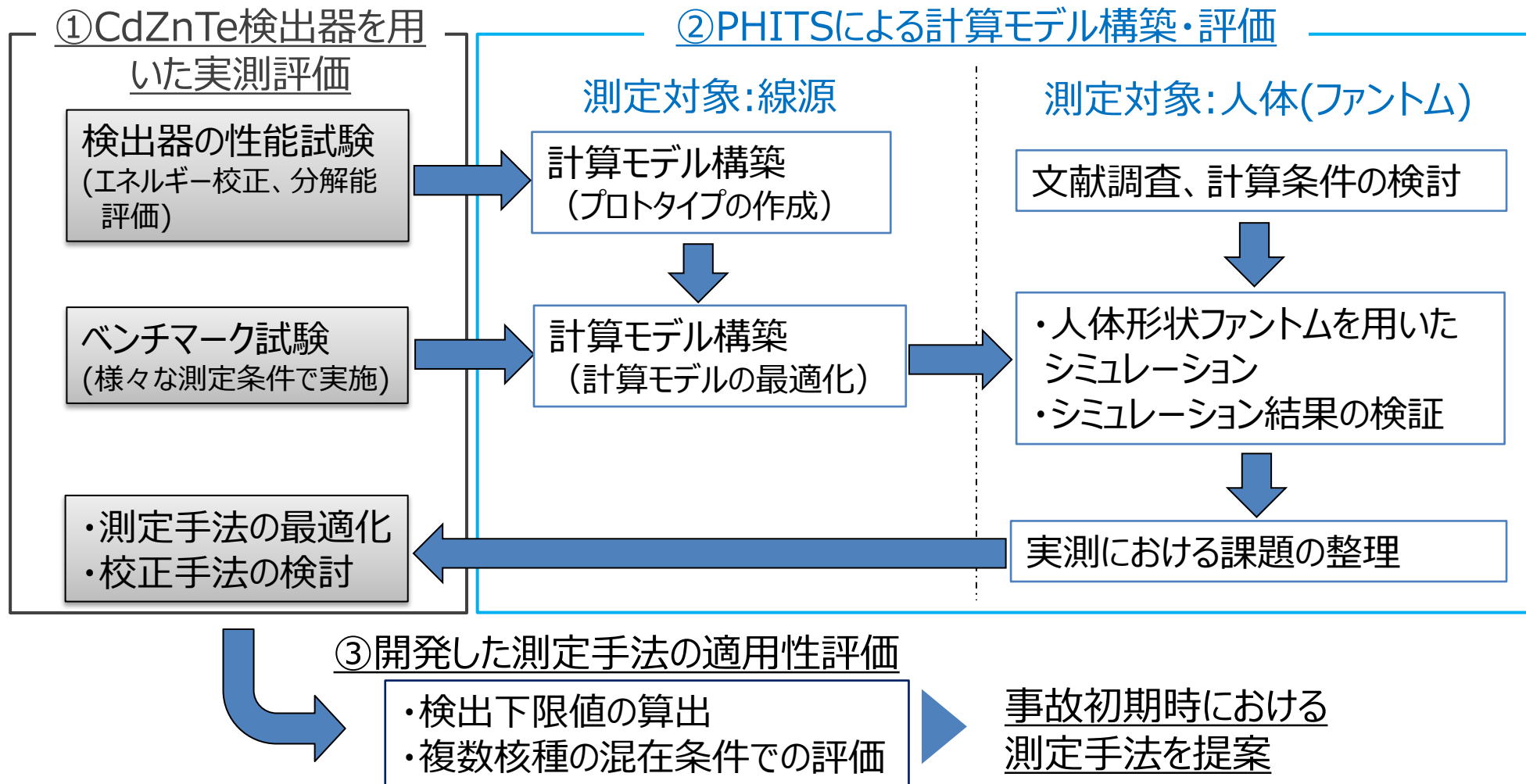
創傷汚染が発生した際に、現場においてスクリーニング測定を実施し、キレート剤投与などの医療措置の要否を迅速に判断できるよう、創傷汚染に対する事故初期時の測定手法を提案する。

終了時に得られる成果物：

○創傷汚染に対する測定手法

- 創傷汚染が発生した際に、現場での事故初期時における線量評価が実施可能
- 事故時の初動対応を想定した可搬性の高い測定器を使用（1F現場に適用可）
- 複数の核種が混在するケースにも適用可（検出下限値、測定条件、留意点等が評価済）

1.4 研究フロー



2. 実績

2.1 得られた成果 詳細は次ページ以降

【計算シミュレーションを用いた測定手法の検討】

① CdZnTe検出器を用いた実測評価

- ・ γ (X)線のエネルギースペクトルが測定可能かつ可搬性の高いCdZnTe検出器を調達し、性能試験（エネルギー校正、分解能評価）を実施した。
- ・計算モデルの最適化のためベンチマーク試験を実施した。

② PHITSによる計算モデル構築・評価

- ・CdZnTe検出器を用いた測定手法の適用性を評価するため、計算シミュレーションを用いて、検出器の計算モデルを試作した。
- ・①のベンチマーク試験の結果から計算モデルの改良を行った。

③ 機器の校正手法の検討

【創傷汚染に対する線量評価に係る検討】

④ 開発した測定手法の適用性評価

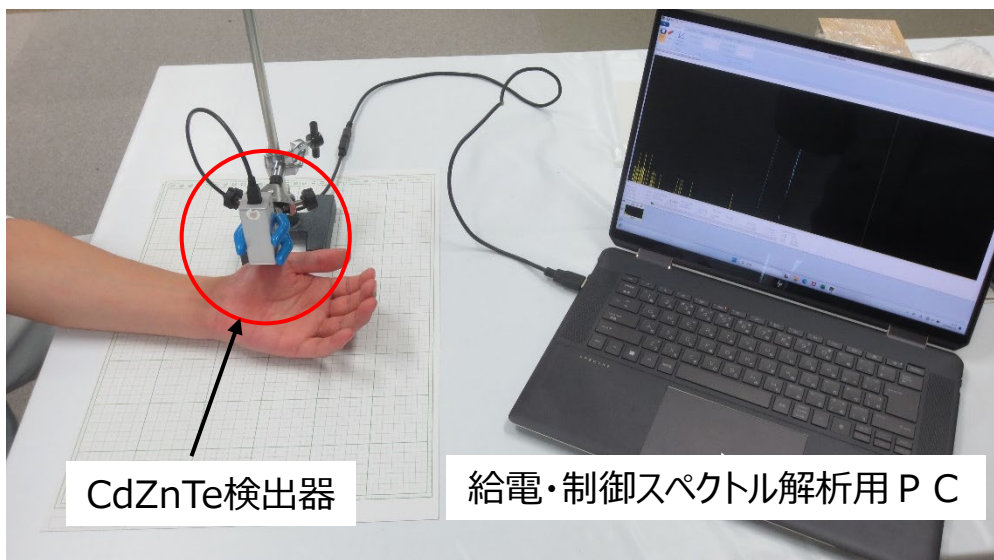
- ・作成した計算モデルにて傷形状ごとの検出下限値及び複数核種が混在した場合の検出下限値を評価した。
- ・創傷汚染が発生した際のCdZnTe検出器を用いた現場での対応フローを検討した。

2.1 得られた成果 (1/22)

計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

① CdZnTe検出器を用いた実測評価 –検出器の性能試験–

γ (X)線エネルギースペクトルが測定可能かつ可搬性の高いCdZnTe検出器 (Kromek社GR1) を選定した。



GR1の仕様

検出素子	: CdZnTe半導体
検出素子サイズ	: 10 mm x 10 mm x 10 mm
エネルギー分解能 (662keV)	: < 2.5% (約17 keV)
測定エネルギー範囲	: 30 keV – 3000 keV
外形寸法	: 25 mm x 25 mm x 63 mm
重量	: 約60 g
使用温度	: 0～50 °C

被検者測定の場合
(左手部の創傷汚染を想定)

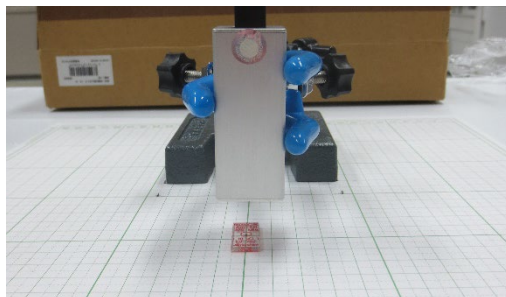
- 本検出器は小型であり、PCからのUSB電源給電で動作し、 γ (X)線のエネルギースペクトルが測定可能。
- Ge半導体検出器とは異なり冷却不要であり、使用場所に大きな制限が生じない。

2.1 得られた成果 (2/22)

計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

① CdZnTe検出器を用いた実測評価 –検出器の性能試験–

CdZnTe検出器の計算シミュレーションのパラメータ算出のため、性能試験（エネルギー校正、分解能評価）を実施した。



実測試験の様子

○測定条件

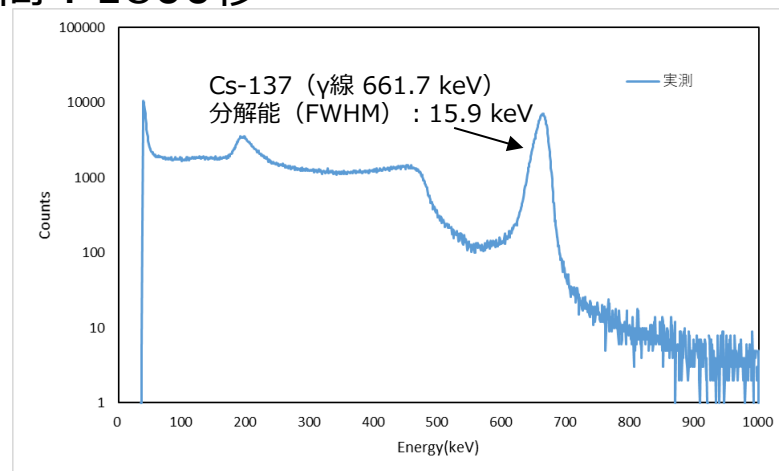
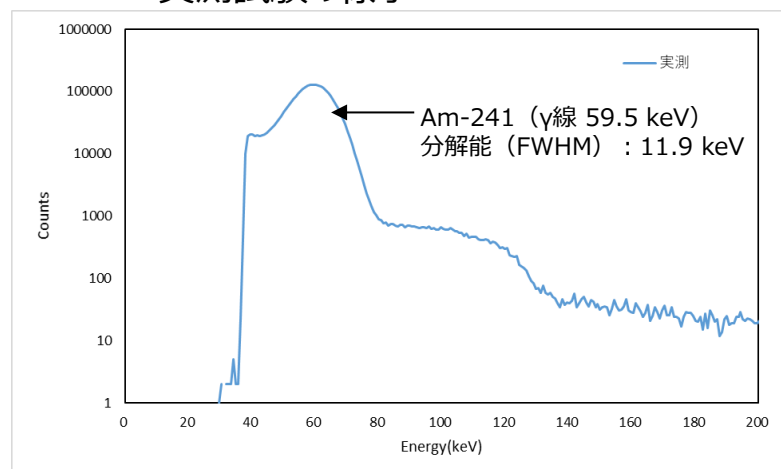
線源から検出器までの距離：2.0 cm

使用核種：Am-241 (γ線 59.5 keV)

Cs-137 (γ線 661.7 keV)

Ba-133 (γ線 81.0、356.02 keV)

測定時間：1800秒



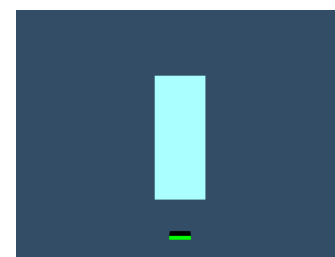
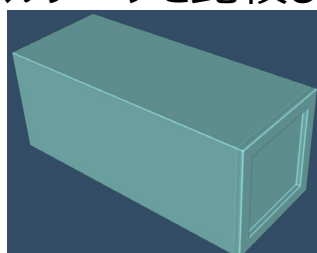
Am-241 (左図) 及びCs-137 (右図) のスペクトルデータ

2.1 得られた成果 (3/22)

計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

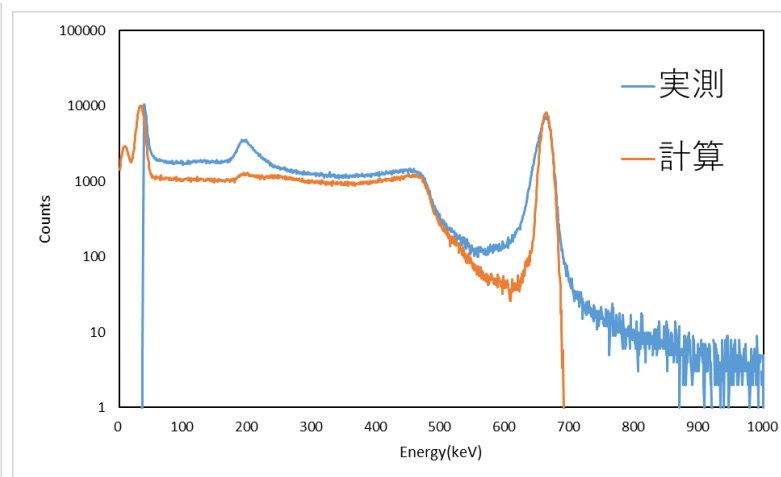
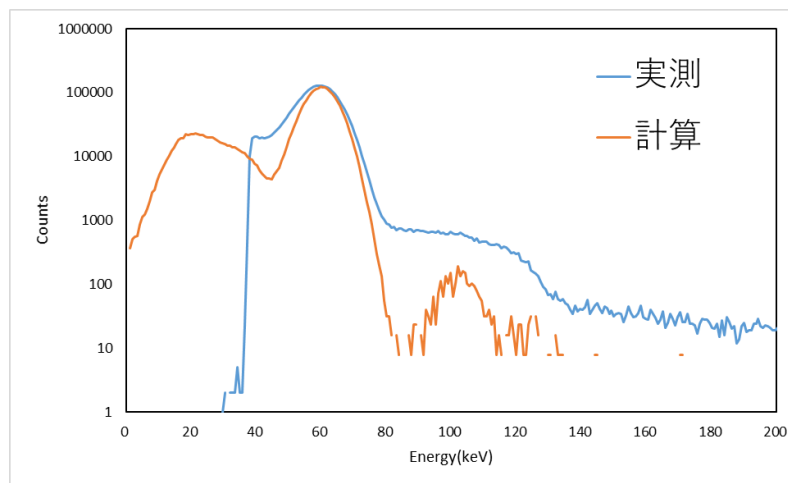
② PHITS による計算モデル構築・評価

計算シミュレーション(PHITS)を用いてGR1の簡易的な計算モデル（外形、CdZnTe素子のみで構築）を試作し、スペクトルデータを比較した。



実機（左図）及び計算モデル（右図）

実測試験（左図）をPHITSで再現（右図）



Am-241（左図）及びCs-137（右図）のスペクトルデータ

➤ 実測値と計算値のピーク位置のカウントは、10%程度の差で一致した。

2.1 得られた成果 (4/22)

計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

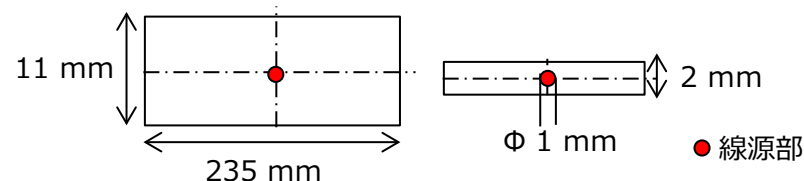
② PHITS による計算モデル構築・評価

計算モデルの最適化のため、線源位置や深さ方向等を変化させた測定条件でベンチマーク試験を実施した。

使用線源：Am-241 (367.19 kBq*) 点線源 右図参照

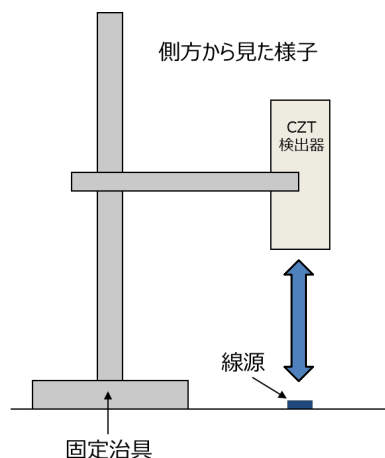
測定時間：300秒

59.54 keVのピークを実測値と計算値で比較



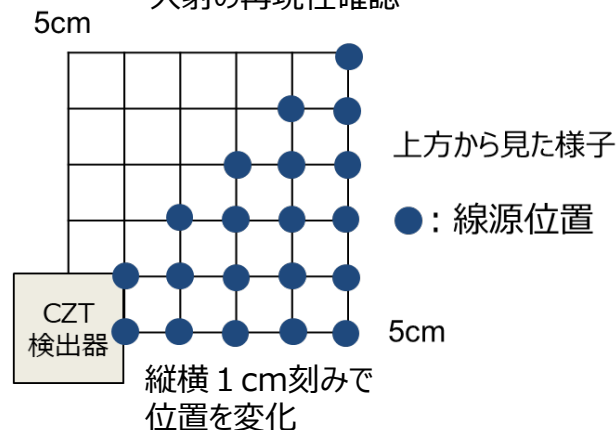
STEP 1 検出器の高さを変化

検出器の正面方向からの放射線の入射の再現性確認



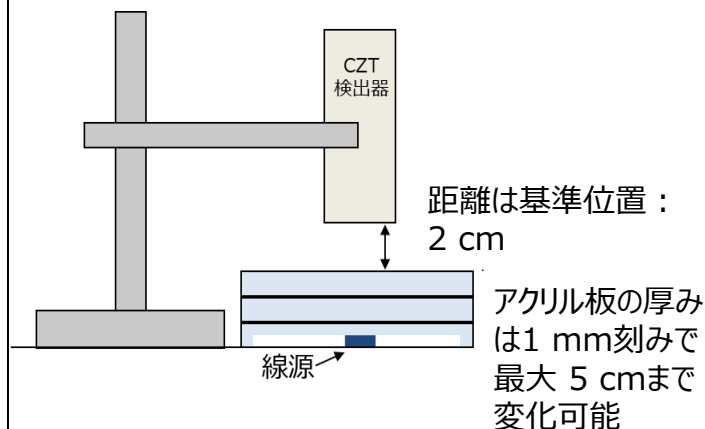
STEP 2 線源位置を変化 (水平方向の変化)

検出器の横、斜め方向からの放射線の入射の再現性確認



STEP 3 アクリル板で深さ方向を変化

傷の深さ方向の変化に対する応答の再現性確認



STEP1及びSTEP3について実測値と計算値は約15%以内の差で一致したがSTEP2は線源が検出器から離れるほど、差が大きくなり、最大で約50%であった。詳細な試験結果は次頁以降に示す。

* 試験当時の放射能 (計算値)

2.1 得られた成果 (5/22)

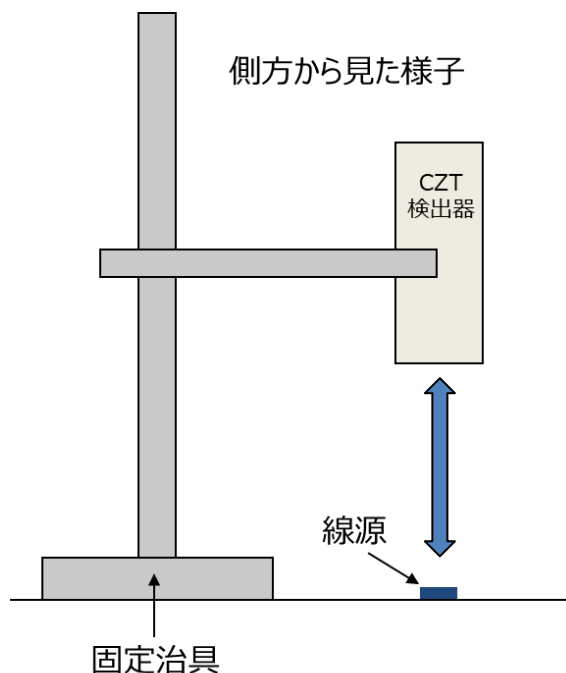
計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

② PHITS による計算モデル構築・評価

計算モデルの最適化のため、線源位置や深さ方向等を変化させた測定条件でベンチマーク試験を実施した。

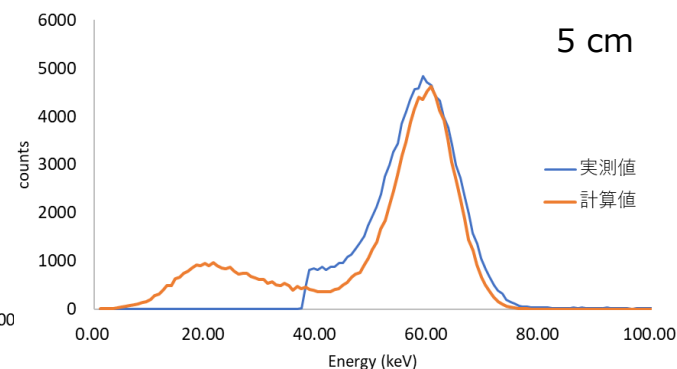
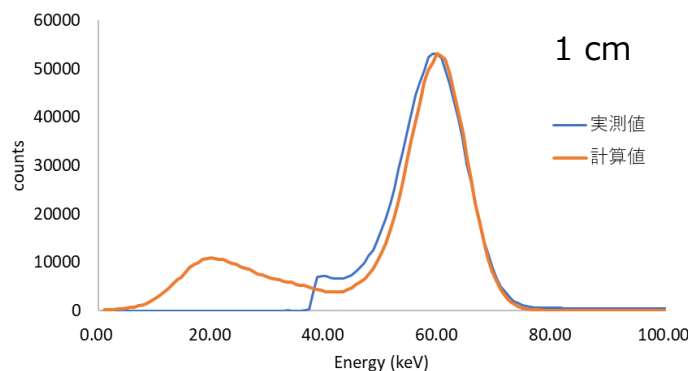
STEP 1 検出器の高さを変化：検出器の正面からの放射線の入射による応答の再現性確認

1 cm刻みで検出器の位置を変化



検出器から線源までの高さ変化における計算値と実測値の比較

線源から検出器 までの高さ(cm)	実測値 (counts)	計算値 (counts)	計算値/実測値
1	553046	552948	1.00
2	242292	216993	0.90
3	123181	114081	0.93
4	82392	70279	0.85
5	50607	47628	0.94



高さ 1 cm (左図) 及び高さ 5 cm (右図) のスペクトルデータ

2.1 得られた成果 (6/22)

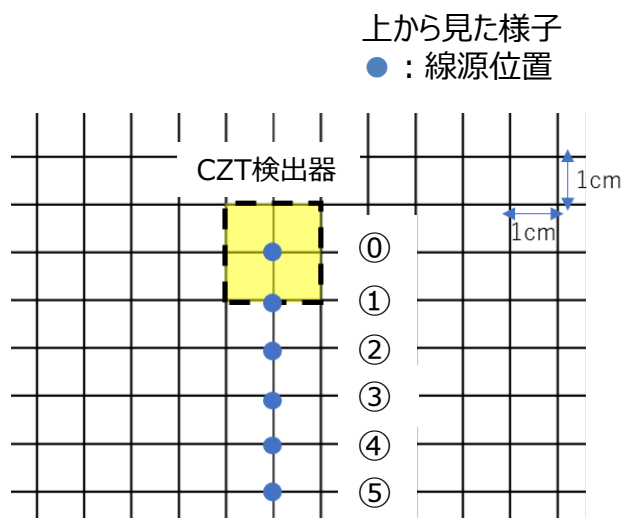
計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

② PHITS による計算モデル構築・評価

計算モデルの最適化のため、線源位置や深さ方向等を変化させた測定条件でベンチマーク試験を実施した。

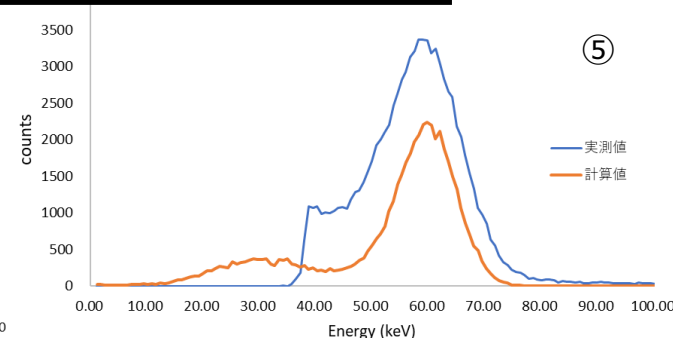
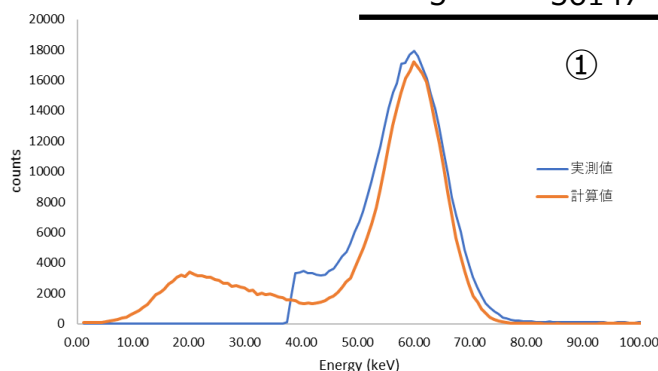
STEP 2 線源位置を変化（面積方向の変化）：検出器の横、斜め方向からの放射線の入射による応答の再現性確認

検出器中心から 1 cm 刻みで位置を変化
検出器から線源までの高さは 2 cm で固定



線源位置変化における計算値と実測値の比較

線源位置	実測値 (counts)	計算値 (counts)	計算値 / 実測値
0	242292	216993	0.90
1	189682	178452	0.94
2	121455	109216	0.90
3	77925	61851	0.79
4	52504	36010	0.69
5	36147	22259	0.62



線源位置①（左図）及び線源位置⑤（右図）のスペクトルデータ

2.1 得られた成果 (7/22)

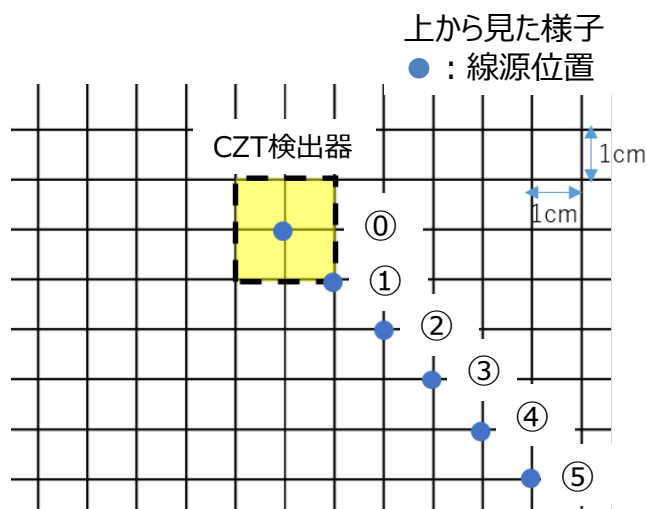
計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

② PHITS による計算モデル構築・評価

計算モデルの最適化のため、線源位置や深さ方向等を変化させた測定条件でベンチマーク試験を実施した。

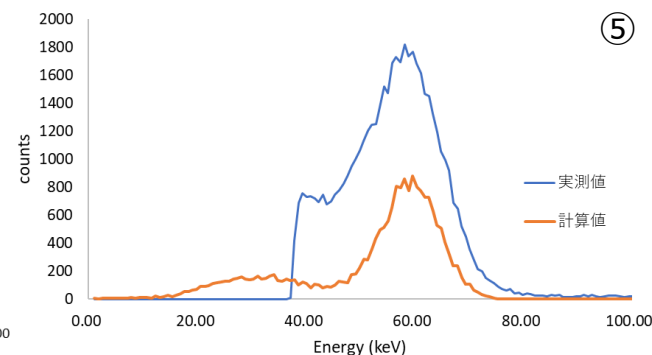
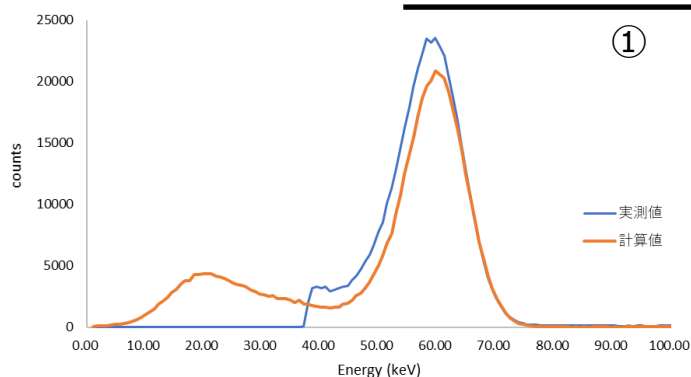
STEP 2 線源位置を変化（水平方向の変化）：検出器の横、斜め方向からの放射線の入射による応答の再現性確認

検出器中心から 1 cm 刻みで位置を変化
検出器から線源までの高さは 2 cm で固定



線源位置変化における計算値と実測値の比較

線源位置	実測値 (counts)	計算値 (counts)	計算値/実測値
0	242292	216993	0.90
1	163026	148546	0.91
2	85175	67129	0.79
3	47531	29552	0.62
4	28750	14622	0.51
5	18537	8815	0.48



線源位置①（左図）及び線源位置⑤（右図）のスペクトルデータ

2.1 得られた成果 (8/22)

計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

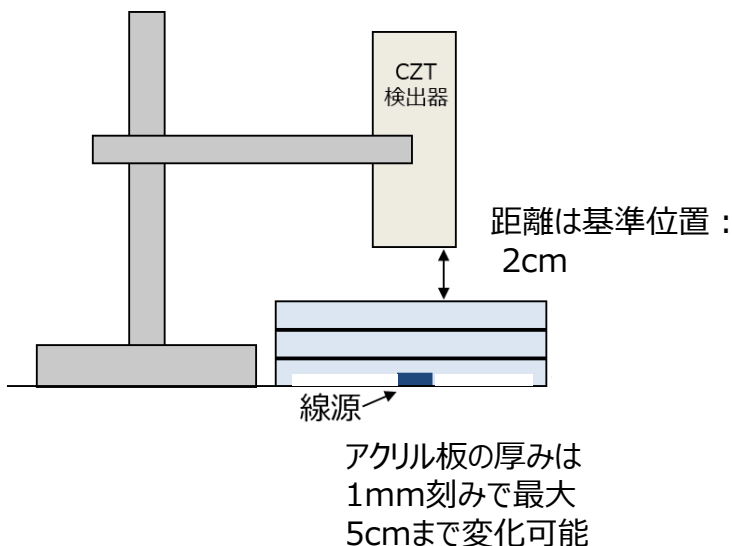
② PHITS による計算モデル構築・評価

計算モデルの最適化のため、線源位置や深さ方向等を変化させた測定条件でベンチマーク試験を実施した。

STEP 3 アクリル板で深さ方向を変化

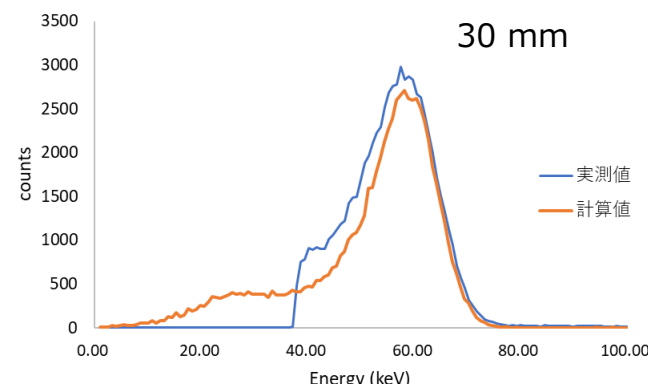
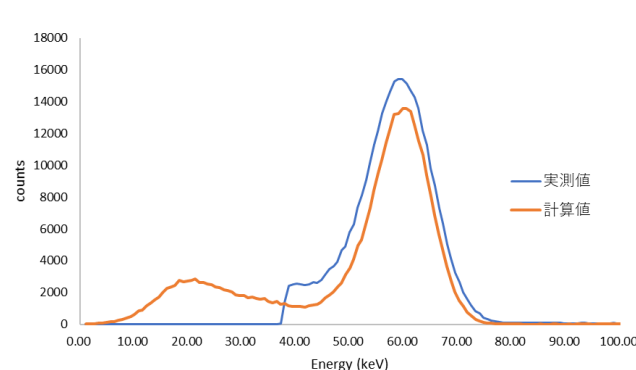
傷の深さ方向の変化に対する応答の再現性確認

アクリル板の厚さを変化させる
(10 mmまでは1 mm刻み、それ以上は
5 mm刻みで変化させる)



線源位置変化における計算値と実測値の比較

アクリル板厚さ (mm)	実測値 (counts)	計算値 (counts)	計算値/実測値
0	245062	217009	0.89
⋮	⋮	⋮	⋮
5	125034	108364	0.87
10	88569	78903	0.89
15	62520	59188	0.95
20	48047	45304	0.94
25	38198	35004	0.92
30	29430	27728	0.94



厚さ1 mm (左図) 及び厚さ30 mm (右図) のスペクトルデータ

2.1 得られた成果 (9/22)

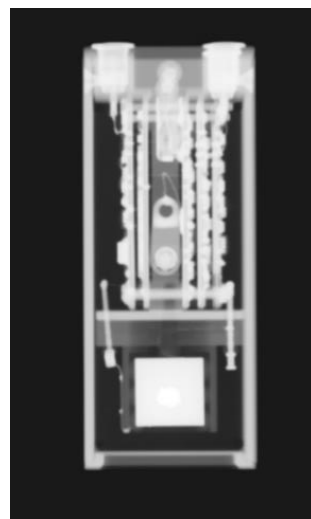
計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

② PHITS による計算モデル構築・評価

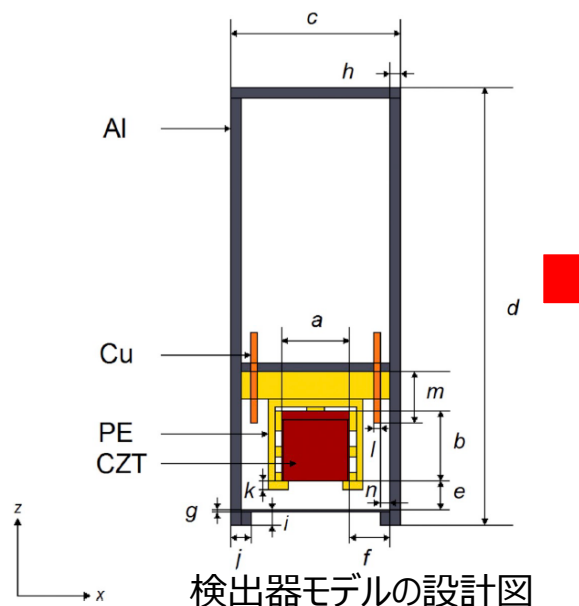
横、斜め方向の再現性に課題があるため、同型機種種のX線撮影画像と論文を参考に、計算モデルの検出器内部を詳細に再現するとともに、CdZnTe素子の不感層の厚みを調整した。

不感層の調整

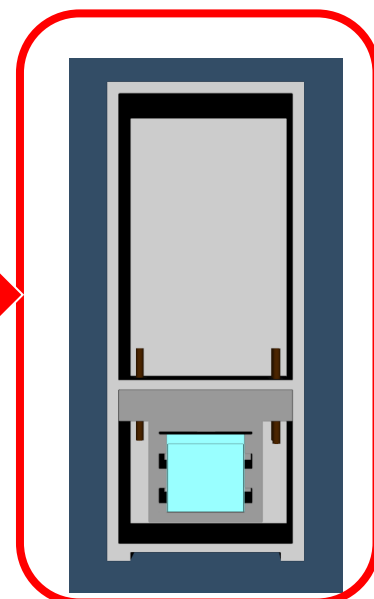
後面は1250 μm で固定し、側面は100～150 μm 、前面は30～40 μm の範囲で数 μm 単位調整し、ベンチマーク試験結果を最も良く再現する厚みを採用した（側面：125 μm 、前面：34 μm ）。



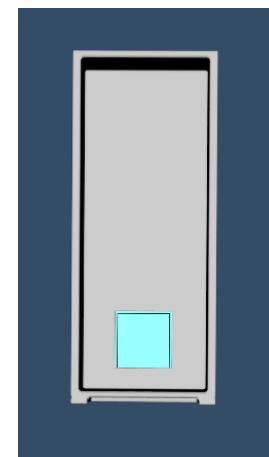
Kromek社
同型機種種のX線撮影画像



検出器モデルの設計図
(Selivanova et al., 2019)



CdZnTe検出器モデル
(改良後)



CdZnTe検出器モデル
(改良前)

2.1 得られた成果 (10/22)

計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

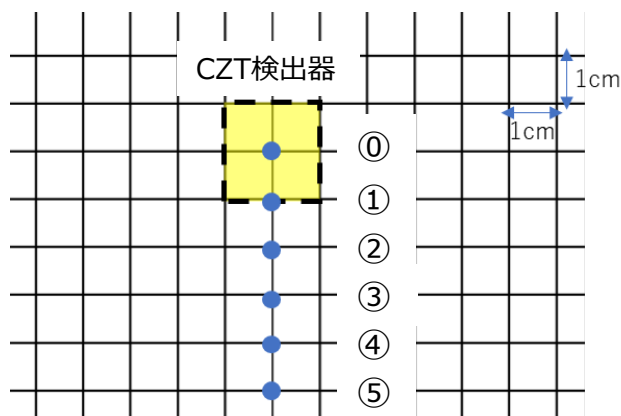
② PHITS による計算モデル構築・評価

改良した計算モデルの再現確認のため、線源位置を変化させた測定条件でベンチマーク試験を実施した。

STEP 2 線源位置を変化（水平方向の変化）：検出器の横、斜め方向からの放射線の入射による応答の再現性確認

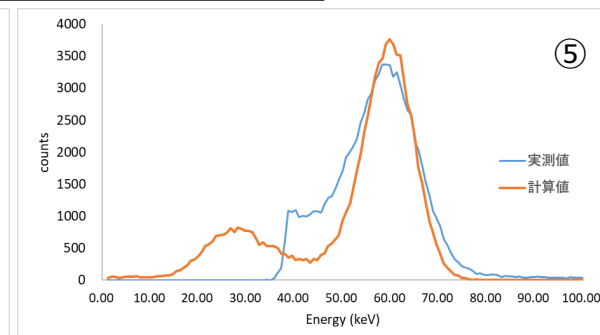
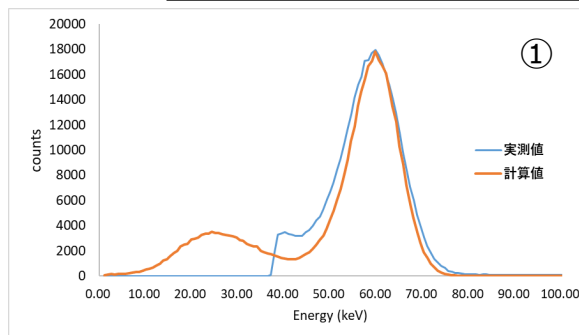
検出器中心から1 cm刻みで位置を変化
検出器から線源までの高さは2 cmで固定

上から見た様子
●：線源位置



線源位置変化における計算値（改良後）と実測値の比較

線源位置	実測値 (counts)	計算値 (counts)	計算値 / 実測値
0	219816	221959	1.01
1	189682	182587	0.96
2	121455	125596	1.03
3	77925	81765	1.05
4	52504	54809	1.04
5	36147	37448	1.04



線源位置①（左図）及び線源位置⑤（右図）のスペクトルデータ

2.1 得られた成果 (11/22)

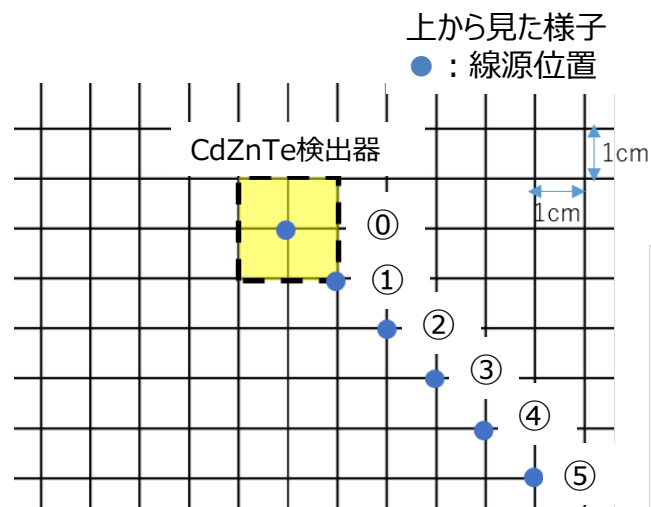
計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

② PHITS による計算モデル構築・評価

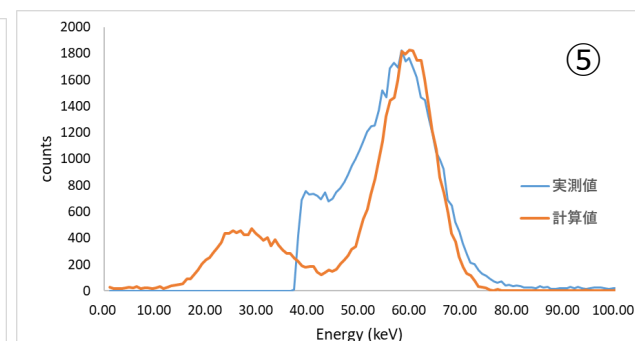
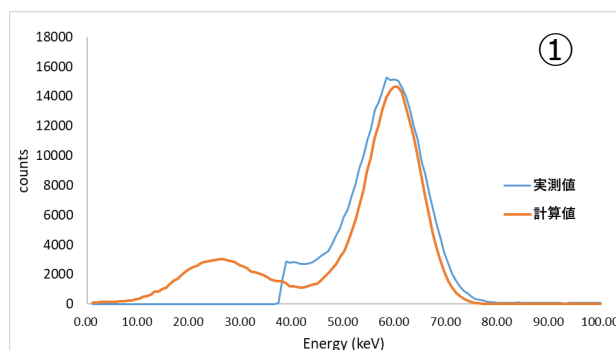
改良した計算モデルの再現確認のため、線源位置を変化させた測定条件でベンチマーク試験を実施した。

STEP 2 線源位置を変化（水平方向の変化）：検出器の横、斜め方向からの放射線の入射による応答の再現性確認
線源位置変化における計算値（改良後）と実測値の比較

検出器中心から 1 cm 刻みで位置を変化
検出器から線源までの高さは 2 cm で固定



線源位置	実測値 (counts)	計算値 (counts)	計算値/実測値
0	219816	221959	1.01
1	163026	152844	0.94
2	85175	82666	0.97
3	47531	45384	0.95
4	28750	28035	0.98
5	18537	19102	1.03



線源位置①（左図）及び線源位置⑤（右図）のスペクトルデータ

➤ 改良した計算モデルは横、斜め方向の計算値と実測値のピーク位置のカウントは5%程度の差で一致した。

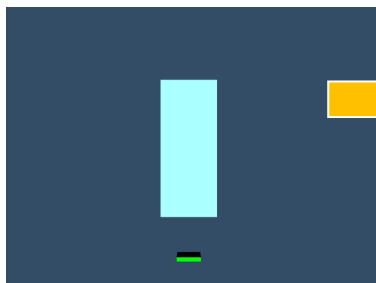
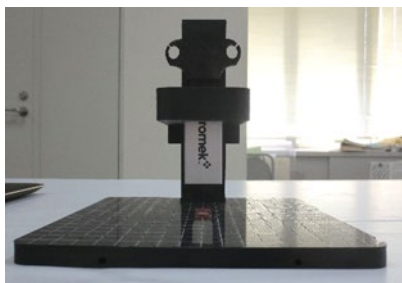
2.1 得られた成果 (12/22)

計算シミュレーションを用いた測定手法の検討

③ 機器の校正方法の検討

ベンチマーク試験の結果より実測とシミュレーションの差は5%以内とよく一致したため
今回作成した計算モデルを用いたCdZnTe検出器の効率校正が可能である。

【基準条件】検出器から線源までの距離：2 cm
測定時間：10分



効率補正係数 = 実測での効率 / シミュレーションでの効率

効率補正係数を今回評価したシミュレーションでの
計数効率に乗じることで現場で使用する実機の
計数効率に換算することが可能

現場で使用する実機での 今回作成した計算モデルでの
校正用線源測定 シミュレーションによる校正用線源測定

実際の活用

1. シミュレーションにより創傷パターン（傷形状、傷の深さ、傷の面積）に対する計数効率を事前に取得しておく。
2. 事故発生時には傷形状を確認し、それに合う創傷パターンの計数効率と効率補正係数を用いて実際の計数効率として評価する。

2.1 得られた成果 (13/22)

創傷汚染に対する線量評価に係る検討

④ 開発した測定手法の適用性評価

ICRPファントム*の左手部を組み合わせて創傷汚染測定を模擬した条件にてシミュレーションを実施した。



計算条件

- ・身体表面から検出器の距離：2 cm
- ・測定時間：600 s
- ・核種：Am-241（放射能 1 kBq）
- ・傷形状：1mm角の針状の刺し傷
正方形の擦り傷
深さ0.5 mmの切り傷

傷に均一に汚染が分布していると仮定

刺し傷の深さを変化させる（0.1 cm、0.5 cm、1.0 cm、1.5 cm、2.0 cm、2.5 cm、3.0 cm）

擦り傷の面積を変化させる（1×1 cm²、2×2 cm²、3×3 cm²、4×4 cm²、5×5 cm²）

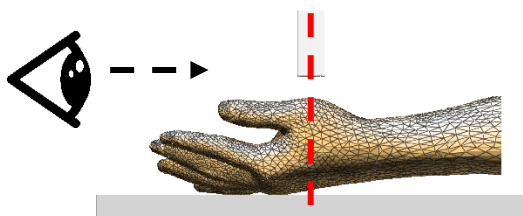
切り傷の幅（長さ）を変化させる（1.0 cm、2.0 cm、3.0 cm）

2.1 得られた成果 (14/22)

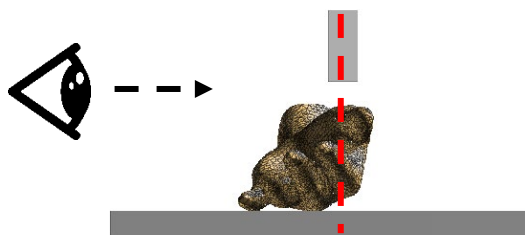
創傷汚染に対する線量評価に係る検討

④ 開発した測定手法の適用性評価

xy平面

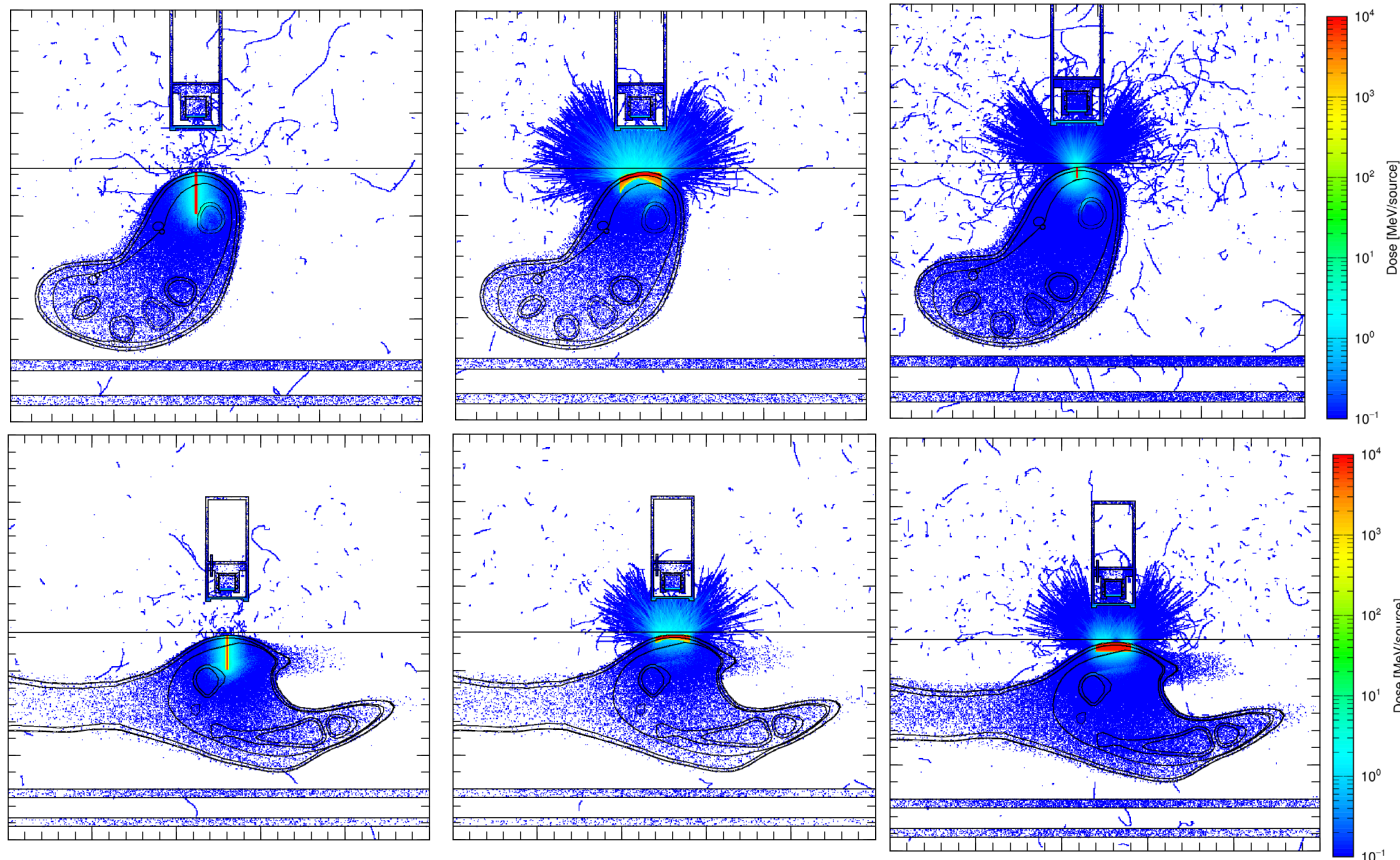


xz平面



CdZnTe 検出器モデルと
ICRP ファントムの左手部
(上: xy平面 下: xz平面)

刺し傷 (深さ2 cm) 擦り傷 (面積2×2 cm²) 切り傷 (幅2 cm)



Am-241の線源発生の様子 (上: xy平面 下: xz平面)

2.1 得られた成果 (15/22)

創傷汚染に対する線量評価に係る検討

④ 開発した測定手法の適用性評価

シミュレーションによる計算結果から式1を用いて計数効率を算出した。

$$\varepsilon = N / A \cdot I_{\gamma} \quad \cdots \text{式1}$$

ε : 計数効率 N : 計数率 (cps)
 A : 放射能 (Bq) I_{γ} : 放出率 (Am-241:0.359)

刺し傷 傷の深さ	0.1 cm	0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0 cm
計数効率 (cps/Bq)	4.8×10^{-3}	4.2×10^{-3}	3.6×10^{-3}	3.1×10^{-3}	2.7×10^{-3}	2.4×10^{-3}	2.2×10^{-3}

擦り傷 傷面積	1×1 cm ²	2×2 cm ²	3×3 cm ²	4×4 cm ²	5×5 cm ²
計数効率 (cps/Bq)	4.5×10^{-3}	3.9×10^{-3}	3.2×10^{-3}	2.8×10^{-3}	2.3×10^{-3}

切り傷 傷の幅(長さ)	1.0 cm	2.0 cm	3.0 cm
計数効率 (cps/Bq)	4.1×10^{-3}	4.0×10^{-3}	3.8×10^{-3}

2.1 得られた成果 (16/22)

創傷汚染に対する線量評価に係る検討

④ 開発した測定手法の適用性評価

式2を用いて検出下限値 (DL) と測定可能な最小の預託実効線量を算出した。

検出下限値 (Bq)

$$DL = \frac{4.65\sqrt{N_b} + 3}{\varepsilon \cdot T \cdot I_\gamma} \quad \dots \text{式2}$$

N_b : BGカウント (counts)

T : 測定時間 (sec)

ε : 計数効率

I_γ : 放出率 (Am-241:0.359)

BG測定条件

・身体表面から検出器までの距離 : 2 cm

・測定時間 : 600 s

測定可能な最小の預託実効線量 (mSv)

- ・ 算出した検出下限値にAm-241の実効線量係数 **$1.2 \times 10^{-1} \text{ mSv/Bq}$** (ICRP OIR DataViewer [Material : injection]) を乗じて算出
- ・ VARSKIN (Wound Dose モード)にて計算

2.1 得られた成果（17／22）

創傷汚染に対する線量評価に係る検討

④ 開発した測定手法の適用性評価

式2を用いて検出下限値（DL）をICRP 2007年勧告^{*1}に基づく実効線量係数を使用した場合の測定可能な最小の預託実効線量を算出した。

刺し傷 傷の深さ	0.1 cm	0.5 cm	1.0 cm	1.5 cm	2.0 cm	2.5 cm	3.0cm
検出下限値（Bq）	51	59	70	80	91	100	120
測定可能な最小の 預託実効線量(mSv)	6.2	7.1	8.4	9.7	11	12	14

擦り傷 傷面積	1×1 cm ²	2×2 cm ²	3×3 cm ²	4×4 cm ²	5×5 cm ²
検出下限値（Bq）	55	64	78	89	110
測定可能な最小の 預託実効線量(mSv)	6.6	7.6	9.3	11	13

切り傷 傷の幅(長さ)	1.0 cm	2.0 cm	3.0 cm
検出下限値（Bq）	60	63	66
測定可能な最小の 預託実効線量(mSv)	7.2	7.5	7.9

先行事業^{*2}で作成した対応手順に係るプロトコルの試案で示された医療介入を判断するアクションレベル（20 mSv 以上）に達するかどうかをスクリーニング測定可能であることを示唆している。

* 1 ICRP Publication 103 国際放射線防護委員会の2007年勧告, 2007

* 2 令和3年度開始廃炉・汚染水対策事業費補助金（安全システムの開発（被ばく線量評価のための分析手法の技術開発））2022年度最終報告

2.1 得られた成果（18／22）

創傷汚染に対する線量評価に係る検討

④ 開発した測定手法の適用性評価

預託実効線量についてVARSKIN（WoundDoseモード）にて評価した。



汚染形状：「Point Source」、「Line Source」のみ
 移行モデル：汚染が傷に沈着する時間に関する情報
 核種の可溶性、粒子径等から選択

対象核種：Am-241

線源形状：Line Source（刺し傷）

傷の深さ：0.1、0.5、1.0（cm）

移行モデル：Strong（可溶性、傷中の保持時間が長い）

刺し傷 傷の深さ	0.1 cm	0.5 cm	1.0 cm
検出下限値（Bq）	51	59	70
測定可能な最小の 預託実効線量(mSv)	6.2	7.1	8.4
VARSKINで計算した 預託実効線量(mSv)	20	23	27

ICRP2007年勧告*¹に基づく換算係数から算出した結果と比較すると約3倍ほど高い結果となった。VARSKINで用いられている換算係数はICRP1990年勧告*²に基づくものであり、両者の換算係数の違いにより預託実効線量に差が生じたものと考えられる。

2.1 得られた成果 (19/22)

創傷汚染に対する線量評価に係る検討

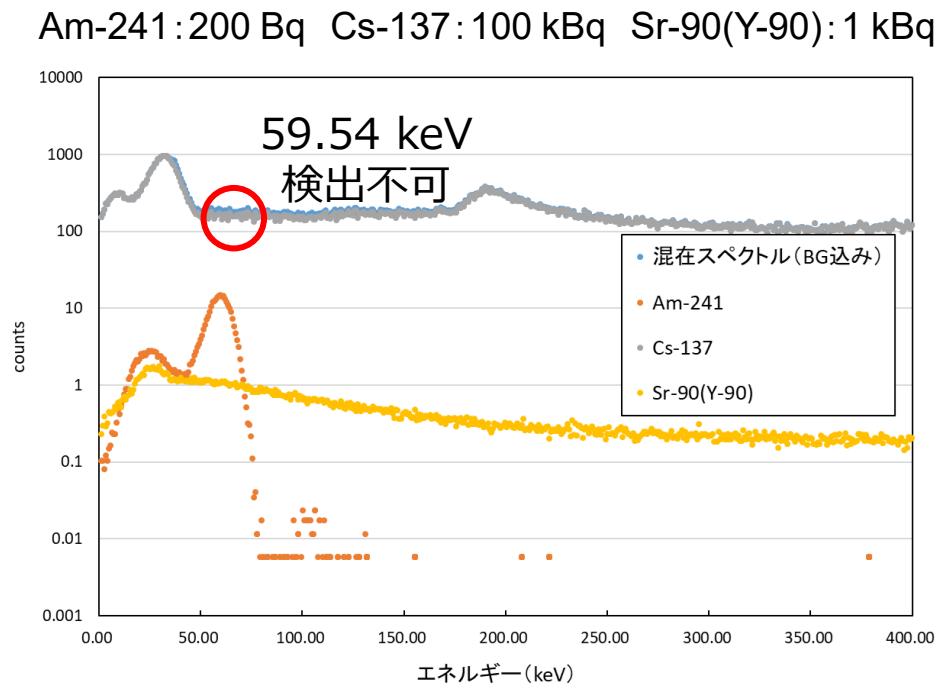
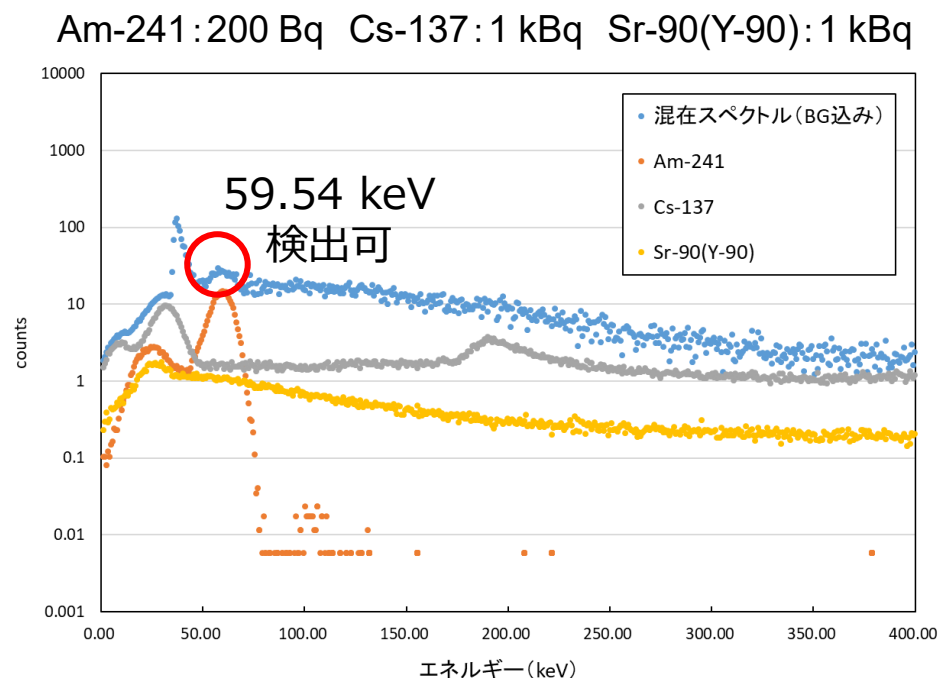
④ 開発した測定手法の適用性評価

複数核種が混在した場合を評価した。

Am-241を測定対象核種とし、Cs-137、Sr-90(Y-90)が混在した場合
測定対象核種の影響をシミュレーションにて計算し、評価した。

計算条件

- ・身体表面から検出器までの距離：2 cm
- ・測定時間：600 s
- ・傷形状：深さ1 cmの刺し傷



Cs-137とSr-90(Y-90)が混在した場合、そのカウント数がAm-241のベースラインに影響を与える

2.1 得られた成果 (20/22)

創傷汚染に対する線量評価に係る検討

④ 開発した測定手法の適用性評価

混在する核種のカウント数がAm-241のベースラインに影響を与えることから、式2を用いて

Cs-137とSr-90(Y-90)の混在する量が増加した場合、Am-241の検出下限値の変化を評価し、グラフに示した。

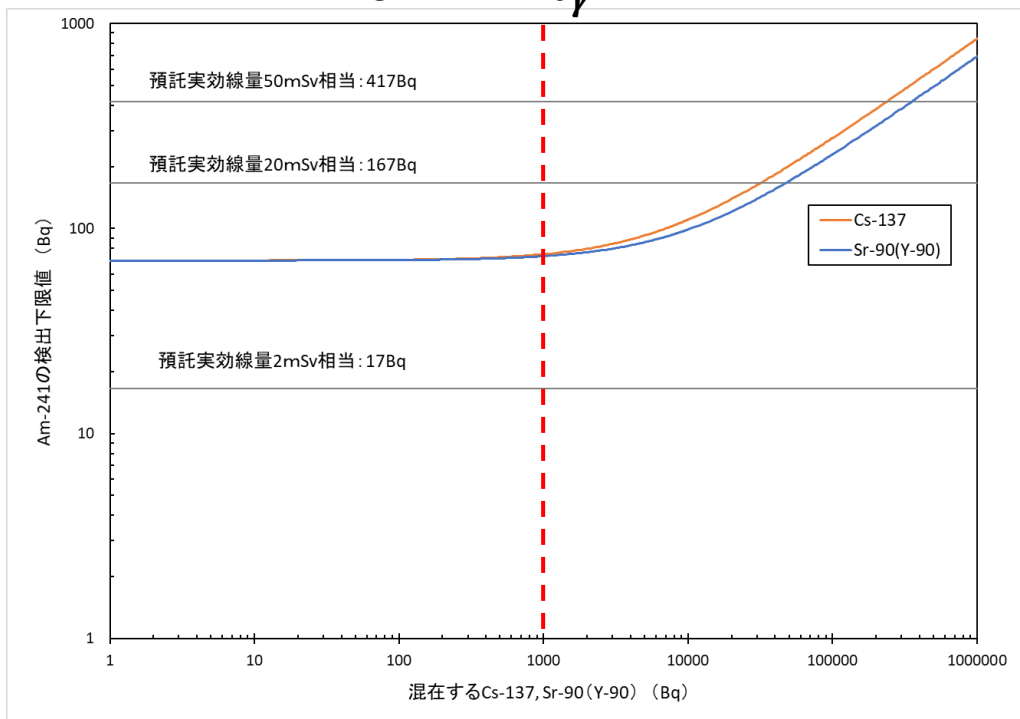
$$DL = \frac{4.65\sqrt{N_b} + 3}{\varepsilon \cdot T \cdot I_\gamma} \quad \dots \text{式2}$$

N_b : BGカウントにAm-241のピーク (59.54 keV) における
Cs-137、Sr-90(Y-90)のカウントを加えた値 (counts)

ε : 計数効率

T : 測定時間 (sec)

I_γ : 放出率 (ここでは考慮しない)



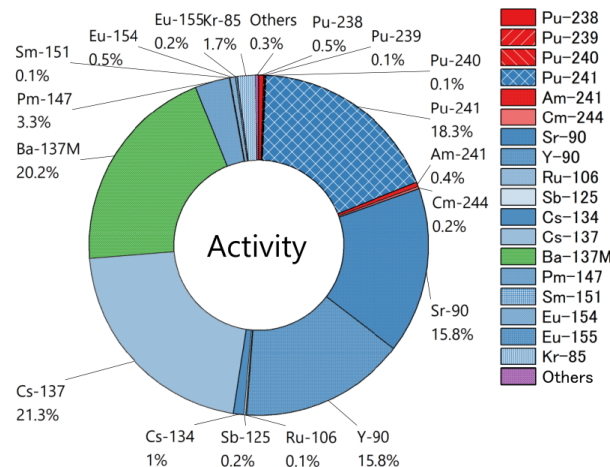
Cs-137、Sr-90(Y-90) または合わせて
1000 Bq以上混在した場合、Am-241の
検出下限値に影響することが考えられる。

2.1 得られた成果 (21/22)

創傷汚染に対する線量評価に係る検討

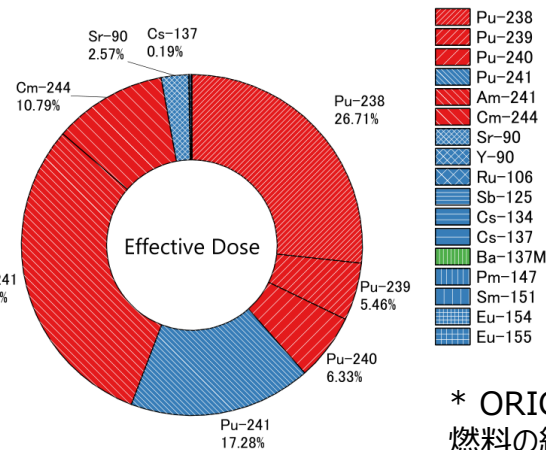
④ 開発した測定手法の適用性評価

CdZnTe検出器ではPu-239等の低エネルギー光子を放出するα線核種の測定は困難である。そのため、核種存在比とAm-241の測定結果から評価を行う必要がある。



原子炉燃料の組成比

全α : Am-241 = 3 : 1



預託実効線量の比

全α : Am-241 = 2.6 : 1

* ORIGENデータより算出した1F2号炉の燃料の組成比 (事故後10年経過時点)

現場における比率も同等と仮定した場合はAm-241の測定結果に対してPuを含む全α放射能は約3倍程度、預託実効線量は約2.6倍となる。

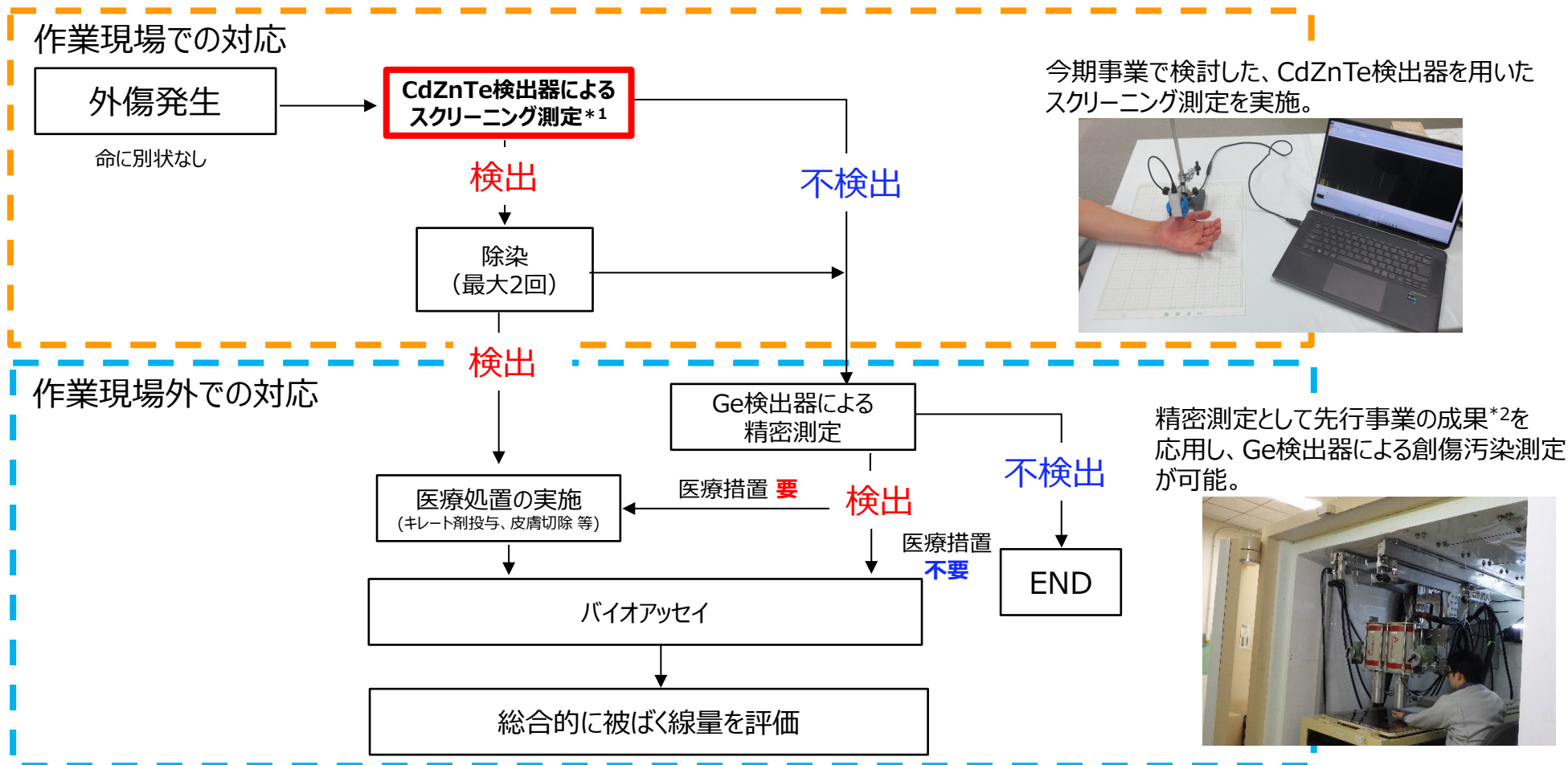
➤ 正確な線量評価には作業現場における核種の存在比を把握しておく必要がある。

2.1 得られた成果 (22/22)

創傷汚染に対する線量評価に係る検討

④ 開発した測定手法の適用性評価

創傷汚染測定の対応フロー



*1 Am-241を測定し、作業現場におけるAm : Puの存在比なども活用して、皮膚下に潜り込んだα線核種を評価する。

*2 令和3年度開始廃炉・汚染水対策事業費補助金（安全システムの開発（被ばく線量評価のための分析手法の技術開発））2022年度最終報告

2.2 目標（技術成熟度）に照らした達成度

内容	技術成熟度（TRL）			
	現状評価	終了時目標	終了時自己評価	
創傷汚染に対する測定手法の検討 ・計算シミュレーションを用いた測定手法の検討 ・創傷汚染に対する線量評価に係る検討	4 (実用化研究)	6 (フィールド実証)	6 (フィールド実証)	○

終了時目標：

創傷汚染が発生した際に、現場においてスクリーニング測定を実施し、キレート剤投与などの医療行為の要否を迅速に判断できるよう、創傷汚染に対する事故初期時の測定手法を提案する。

終了時自己評価：

γ (X)線のエネルギースペクトルが取得可能な小型検出器(CdZnTe検出器)を用いて実測とシミュレーションによる評価を行い、創傷汚染に対する事故初期時の測定手法（校正方法や測定結果の評価方法などの実運用の方法も含む）を提案した。

2.3 成果の反映先とその寄与

- 創傷汚染に対する測定手法が整備されることにより、創傷を伴う汚染事故対応の円滑性が向上し、収束までの期間短縮につながる。結果として廃止措置等の円滑な進行を支援できる。
- 現場でのスクリーニング測定が可能になり、その結果を基に医療措置の要否判断を迅速に行うことで被災者の内部被ばく低減につながる。

2.4 現場への適用性（難易度）

- 本検討には、既製品の測定器（CdZnTe検出器）を用いており、既に1F現場でも作業場を測定するために使用されていることから、現場適用にあたってのハードルは低いと考えられる。

3. 今後の課題

○今後の課題

- 10分間の測定時間はスクリーニング測定としては比較的長いと考えられるため、CdZnTe検出器を複数台（2台～4台）を1組として計数効率を向上させることで測定時間をより短くする検討が必要である。
- 現状、VARSKINで評価可能な傷形状は刺し傷のみであるため、その他の傷形状（擦り傷や切り傷）についても評価できるようにVARSKINの開発元へ要望を伝えていく必要がある。

事業内容

- a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決
- b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討
- c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討
- d) 鼻スミヤ測定システムの検討
- e) 皮膚汚染測定に関する検討
- f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討
- g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討
- h) 創傷汚染測定に関する検討
- i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発

略語・専門用語の説明

略語・専門用語	説明
PRA	確率論的リスク評価「Probabilistic Risk Assessment」の略語
SNS	ソーシャルネットワーキングサービス「Social Networking Service」の略語
NUSC	一般社団法人 日本電気協会 原子力規格委員会 「Nuclear Standards Committee of JEA」の略語 (https://nusc.jp/)
R-map	危険の起こりやすさと影響の大きさを見える化して、安全対策を考えるための図や表「Risk Map」の略語

1. 概要

1.1 背景（現状の課題）

廃止措置にて内部被ばくが発生した場合に適切な対応がとれるように、国内外の専門家によるレビューも含めて検討し、内部被ばく線量評価から医療対応までのプロセスを総合的に包括したシステムを開発する。先行事業では、**様々な立場の関係者が参照可能な「プロトコール」の試案を完成**させた。

一方で、以下の課題が抽出された。

- 多数の被ばく者が発生した場合の対応、
- 個人情報保護、マスコミ対応、リスクコミュニケーション等の社会・人文分野のさらなる合意形成
- 本プロトコールの活用に向けた取り組み（国内標準化に関する検討）
- 内部被ばく事象の発生頻度と影響に関するリスク評価

1.2 目的（課題の解決策）

- ① 先行事業の**プロトコールの試案をベース**に多数被ばく者対応、社会・人文分野等の**課題の解決**を目指し、さらに調査・検討を行い対応システムの開発を進める。また、国内標準として認定されるために必要となる**プロセスの明確化**を図る。
- ② 内部被ばく事象に係る**リスクを分析・評価する手法の検討を開始**し、発生頻度や影響度の評価方法の提案を目指す。

1.3 目標(技術成熟度)

実施項目と技術成熟度：

実施項目	技術成熟度 (TRL)	
	現状評価	終了時目標
a. 対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討	3(応用研究)	4(実用化研究)
b. 内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討	2(応用研究)	3(応用研究)

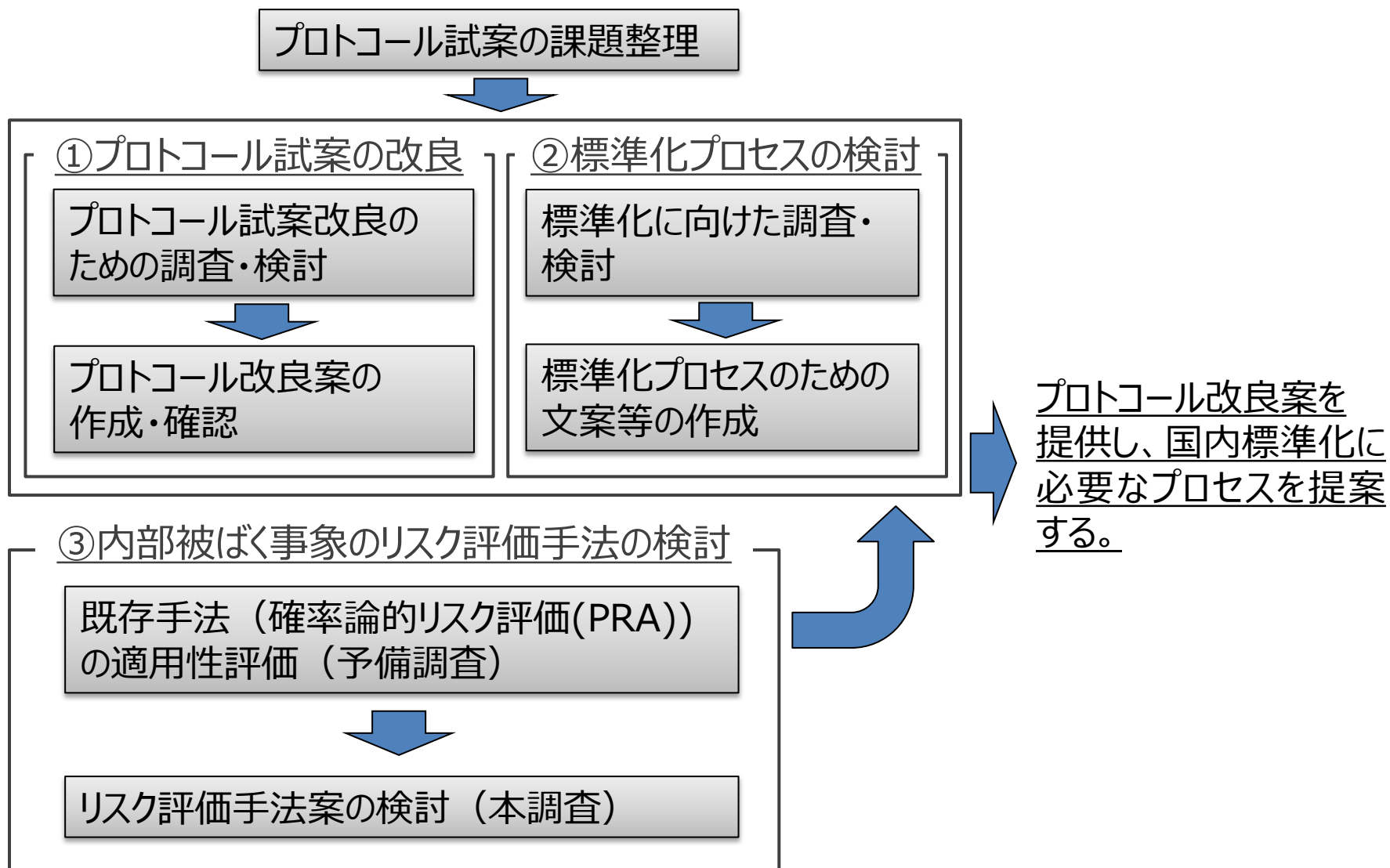
終了時目標：

- a. 先行事業のプロトコールをベースに、多数被ばく者対応、社会人文分野等の課題について検討を行い、プロトコール改良案を提供する。また、国内標準として認定されるために必要となるプロセスを提案する。
- b. 既存手法の適用性確認や 1 F被ばく事例を用いた調査を実施し、内部被ばく事象に係るリスク分析・評価手法の枠組みを基礎情報として提供する。

終了時に得られる成果物：

- a. 多数被ばく者対応などが拡充されたプロトコール及び国内標準化に必要なプロセスの検討結果
 - 本事業で開発したプロトコールは研究開発報告書類（JAEAレポート）等で公表する。
- b. 内部被ばく事象に係るリスク分析・評価手法の枠組み及びその調査結果

1.4 研究フロー



2. 実績

2.1 得られた成果 詳細は次ページ以降

(1) 対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討

- 先行事業の課題解決に向け、検討組織を立ち上げて調査検討を進めるとともに、国内標準化に向けた調査・検討を実施し、プロトコール改良案を作成した。
- 関連する学会における標準、プロトコール又はガイドライン等の文書の制定を視野に調査・検討を行い、本事業で開発したプロトコールを研究開発報告書類（JAEAレポート）等で公表する方針とした。
- 社会・人文分野等の課題解決のため専門家への意見聴取を実施し、留意点を洗い出した。

(2) 内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

- 確率論的リスク評価（以下、「PRA」という。）が内部被ばく事象のリスク評価へ応用可能か予備調査を行い、評価のポイントをまとめた。
- 予備調査で策定したリスク分析・評価手法を用いてケーススタディを実施し、内部被ばく事象に対するPRAの適用を検討した。

2.1 得られた成果(1/21)

(1)対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコル試案の改良及び標準化プロセスの検討

- 関連学会での意見聴取や先行事業の課題整理を踏まえて、多数被ばく者対応、社会・人文分野等の課題の解決及び標準化プロセスの検討を行うための進め方を検討し、下記2項に沿って調査、検討会の開催及び専門家へ意見聴取を行った。
 - 検討会構成は先行事業と同様に、検討委員会(被ばく医療、線量評価及び放射線管理等の専門家 10名程度)及び分科会(医療系の専門家 6名程度)とする。

○プロトコル改良のための調査・検討及び改良案の作成

- 多数被ばく者発生時の対応について、医療系の専門家による分科会にて検討を行った。
- 個人情報保護やマスコミ対応等の社会・人文分野について、当該分野の意見をさらに掘り下げるため、専門家らを対象として意見聴取を実施した。

○プロトコルの国内標準化に向けた調査及びプロセスの検討

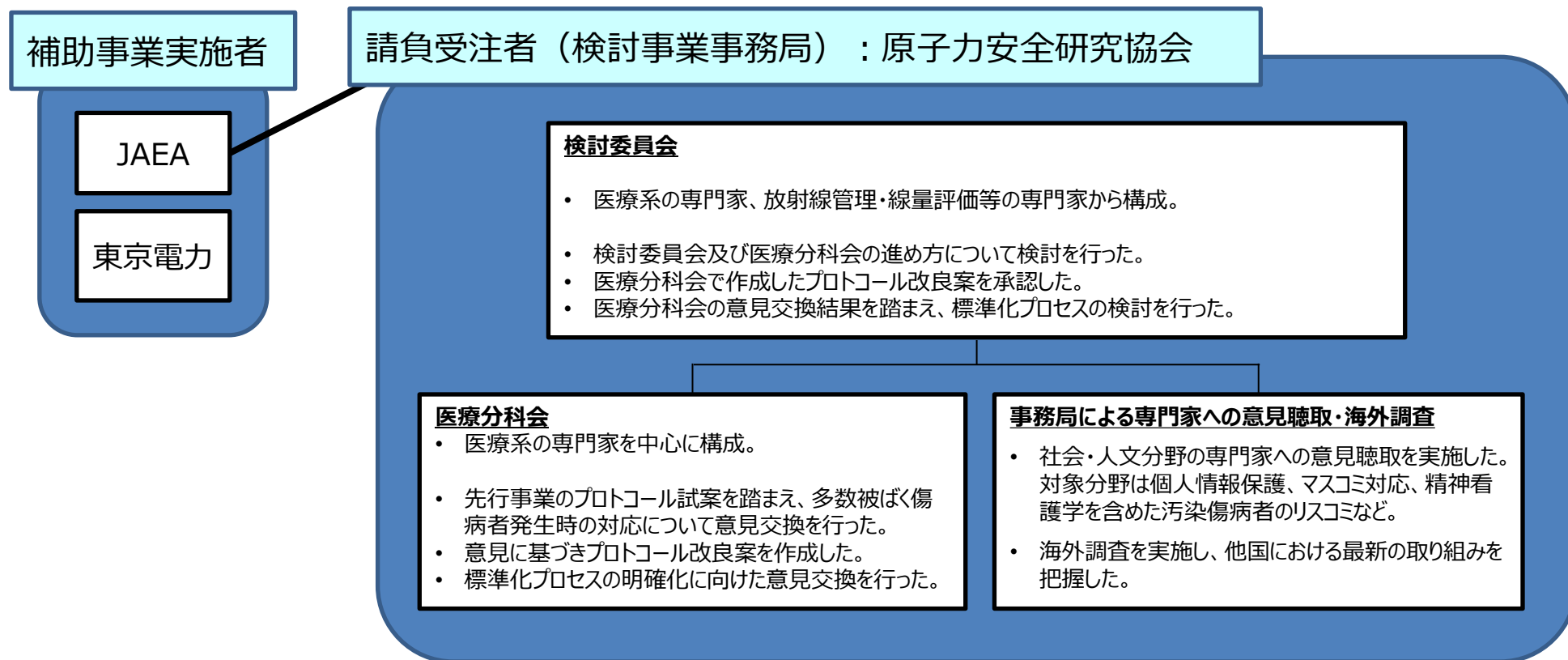
- 既存の標準文書の制定状況等に関する調査を実施し、国内標準化に向けたプロセスの明確化を図った。

⇒上記の検討項目を外部委託し、JAEAは請負先が実施する事業に関与、指導する形で検討を進めた。

2.1 得られた成果 (2/21)

(1) 対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討

- 以下の検討組織を立ち上げて、課題解決に向けた調査・検討を行った。



2.1 得られた成果 (3/21)

(1) 対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討

○プロトコール改良のための調査・検討及び改良案の作成

- 多数被ばく者発生時の対応について、医療系の専門家による分科会にて検討を行い、以下の追記を行った。特に救急の専門家の意見により、一般救急における考え方を取り入れた。

- 多数傷病者発生時の基本的な考え方

- 過去の事故事例

- ✓ これまでに我が国の原子力事業所で発生した主な多数傷病者事故について示した。
- ✓ 原子力事業所に限定する場合、傷病者の概ねの数は作業単位等から一定の傾向が見られた。
- ✓ 線量があまり高くない環境では1単位10名程度の場合もある。
- ✓ 高線量環境では個々の作業員の作業時間管理が必要であるため、10名を超えることはほとんどない。

- 1Fにおいて多数傷病者が発生した際の対応案

- ✓ 現場～1F構内の救急医療室（以下、「1FER」という。）まで及び1FER～外部医療機関搬送までのTriage、Treatment、Transportを以下の場合ごとに示す。

- ① 救急医療が不要で、内部被ばく者が多数発生した場合
- ② 救急医療が必要で、搬送対象者が少数の場合
- ③ 救急医療が必要で、搬送対象者が多数の場合

2.1 得られた成果 (4/21)

(1)対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討

○プロトコール改良のための調査・検討及び改良案の作成

- ・ プロトコールに赤字部分の項目が追加された。

第1章 はじめに
第2章 内部被ばく／創傷部汚染を起こす状況の想定
第3章 放射性物質による内部被ばく／創傷部汚染対応 概説
3. 1 内部被ばくの線量評価における注意点
3. 1. 1 内部被ばくの経路
3. 1. 2 核種による違い
3. 1. 3 化学形や粒子径による違い
3. 1. 4 A L I (年摂取限度) について
3. 1. 5 内部被ばく線量評価のための測定方法
3. 2 創傷部汚染における注意点
3. 2. 1 核種による違い
3. 2. 2 創傷の種類による違い
3. 3 皮膚等の汚染から医療者が受ける二次被ばく
第4章 放射性物質による内部被ばく／創傷部汚染対応
4. 1 超ウラン元素 (Pu、Am、Cm等) に対する医療処置
4. 1. 1 適応
4. 1. 2 Ca-DTPAとZn-DTPAの効果
4. 1. 3 投与方法
4. 1. 4 初回投与の時期と生体試料採取
4. 1. 5 医療機関での投与とモニタリング
4. 1. 6 吸入摂取時の全肺洗浄
4. 2 放射性ストロンチウムに対する治療
4. 3 放射性ヨウ素に対する治療
4. 4 放射性セシウムに対する治療
第5章 インフォームド・コンセントとメンタルヘルスケア
第6章 個人情報保護に関する本人の同意

第7章 社会への説明の支援

7. 1 事業所が実施する事項

7. 1. 1 クライシス・コミュニケーションのための平時の準備

7. 1. 2 クライシス発生時に必要な早期 (3時間以内) 対応

7. 2 医療スタッフが行うべきこと

第8章 内部被ばく発生時の対応フロー

8. 1 内部被ばく (疑い、創傷部汚染含む) 患者への対応フロー

8. 1. 1 基本方針

8. 1. 2 放射性物質の内部取り込みに対する薬剤投与の基本方針

8. 1. 3 除染のための薬剤投与が想定される状況

8. 1. 4 除染のための薬剤の投与

8. 1. 5 除染のための薬剤投与後の対応

8. 1. 6 後送医療機関とその役割

8. 1. 7 診療記録等の帰属

8. 2 診療録と関連する記録について

8. 2. 1 背景

8. 2. 2 傷病者記録表のデザインコンセプト

8. 2. 3 電離放射線障害防止規則44条の3に基づく診療の場合

第9章 多数傷病者発生時の対応

9. 1 多数傷病者発生時の対応

9. 1. 1 多数傷病者発生時の基本的な考え方

9. 1. 2 これまでの多数傷病者事故例

9. 1. 3 多数傷病者発生時の対応案

第10章 その他の留意事項

10. 1 東京電力ホールディングス (株) 福島第一原子力発電所における
廃炉作業に伴う汚染・被ばく以外 (核テロ、原子力災害医療等) との関連

10. 2 原子力災害時の医療における「緊急被ばく医療のあり方」との関連

10. 3 オンサイト対応医師のためのアドバイザー組織

10. 4 除染や内部被ばくに対する処置を行う場合の医療費について

2.1 得られた成果 (5/21)

(1) 対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討

○プロトコールの国内標準化に向けた調査及びプロセスの検討

関連する学会や、その学会における標準、プロトコール又はガイドライン等の文書の制定を視野に調査・検討を行った。

- **内部被ばく線量評価**については、「個人線量モニタリング指針 (JEAG 4610)」が制定され、日本電気協会の原子力規格委員会が定期的に改訂を行っている。
 - 原子力発電所等の放射線業務従事者及び一時立入者に対する個人線量モニタリングの基本的な考え方を示している。
 - 緊急時も含めた線量評価の基礎的な事項が記載されているが、応用的な考え方については記載が無いため、本プロトコールの内容等を踏まえて内容を拡充することを視野に検討を進めることが想定される。
- **線量評価を除く部分**については、国内に相当する規格が制定されていない。
 - 被ばく医療分野に関連する各学会へ文書制定に必要な手続き等について調査した結果から、相当な時間を要することが想定される。
- 本事業で開発したプロトコールはJAEAのホームページから閲覧・入手が可能な研究開発報告書類 (JAEAレポート) として公表する方針とした。
 - 検討会に参画した専門家から、本プロトコールを公表することで各学会へ更なる働きかけや、今後、手続きを踏んだ上で学会内で改訂策定する文章に引用・参考文献として挙げることが可能になるなどの前向きな意見あり。
 - 本プロトコールを公表することで原子力規格委員会へ更なる働きかけも可能となる。



2.1 得られた成果（6／21）

(1)対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討

○プロトコールの国内標準化に向けた調査及びプロセスの検討

個人情報保護やマスコミ対応等の社会・人文分野の専門家らを対象として、専門家間でも意見が分かれる部分について、論点確認のため意見聴取を行い留意点を洗い出した。

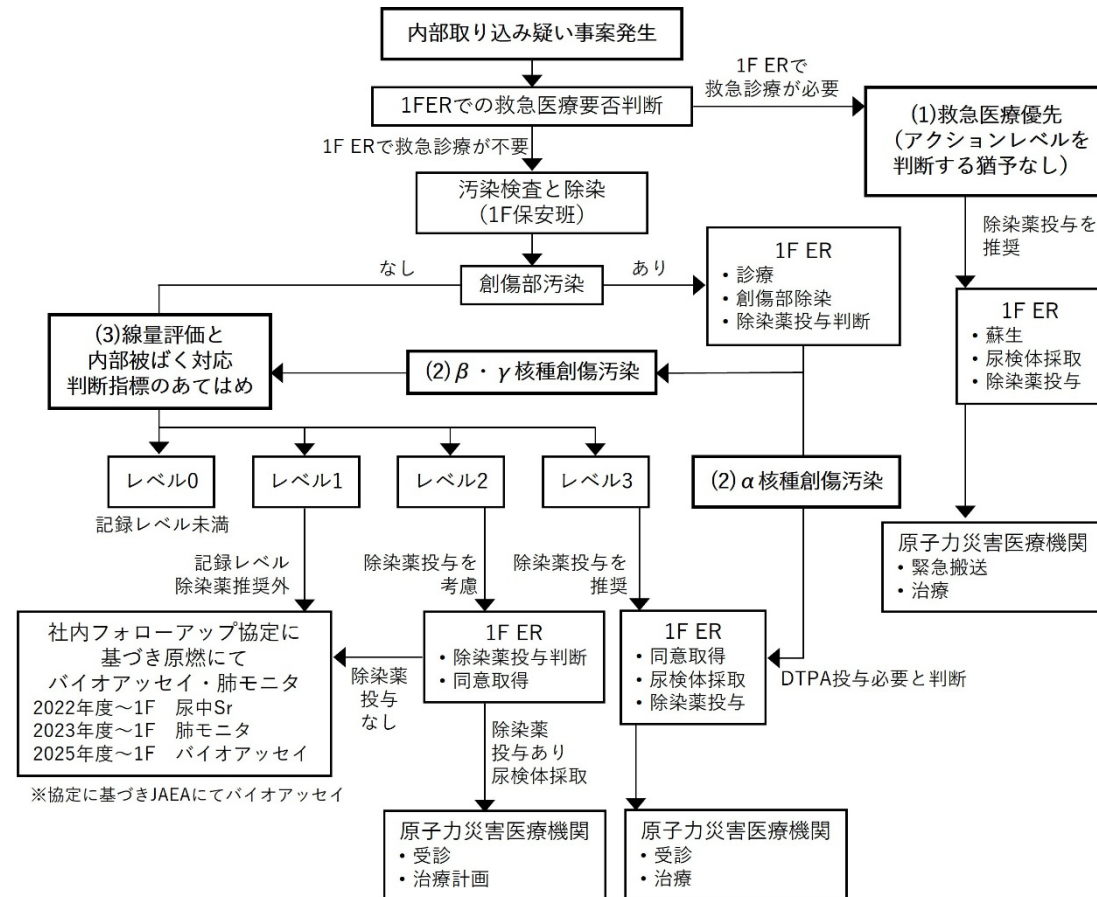
・ 主な意見

- 薬剤投与や情報公開に関する同意書（インフォームドコンセント）について、口頭でどのように説明するかについて検討を進めるとよい。
- 事故原因や被ばく線量は公表までに時間を要する場合、取り急ぎ精査中であるとし、判明してから公表することよい。急ぎ公表して間違えることが無いようにする方がよい。
- SNSの発達により、現在どのような誹謗中傷が起こりうるか、認識しておく必要がある。

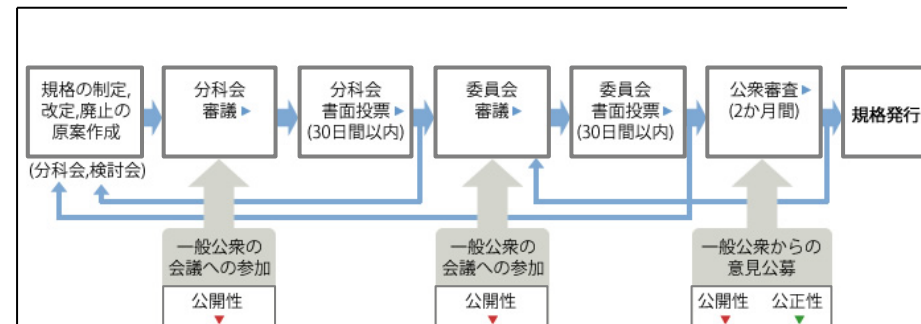
2.1 得られた成果（7／21）

(1)対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討

参考 先行事業と標準化



判断指標	アクション	参考値(預託実効線量)
救急医療優先 (アクションレベルを判断する猶予なし)	除染薬投与、内部被ばくの治療 高度被ばく医療支援センターに搬送	バイタルサインが不安定で救急医療を優先させるためにアクションレベルを判断する猶予なし
α核種創傷汚染	DTPA投与、内部被ばくの治療 高度被ばく医療支援センターを受診	α核種創傷汚染の疑いが強い
アクションレベル3	除染薬投与、内部被ばくの治療 高度被ばく医療支援センターを受診し治療	>200mSv
アクションレベル2	除染薬投与、内部被ばくの治療を考慮 原子力災害拠点病院、原子力災害医療協力医療機関を受診	20～200mSv(1～10ALI)
アクションレベル1	除染薬投与なし、内部被ばくの治療を考慮しない 記録レベルの線量 医療機関受診なし。	2～20mSv(<1ALI)
アクションレベル0	除染薬投与なし、内部被ばくの治療を考慮しない 記録レベル未満の線量	<2mSv



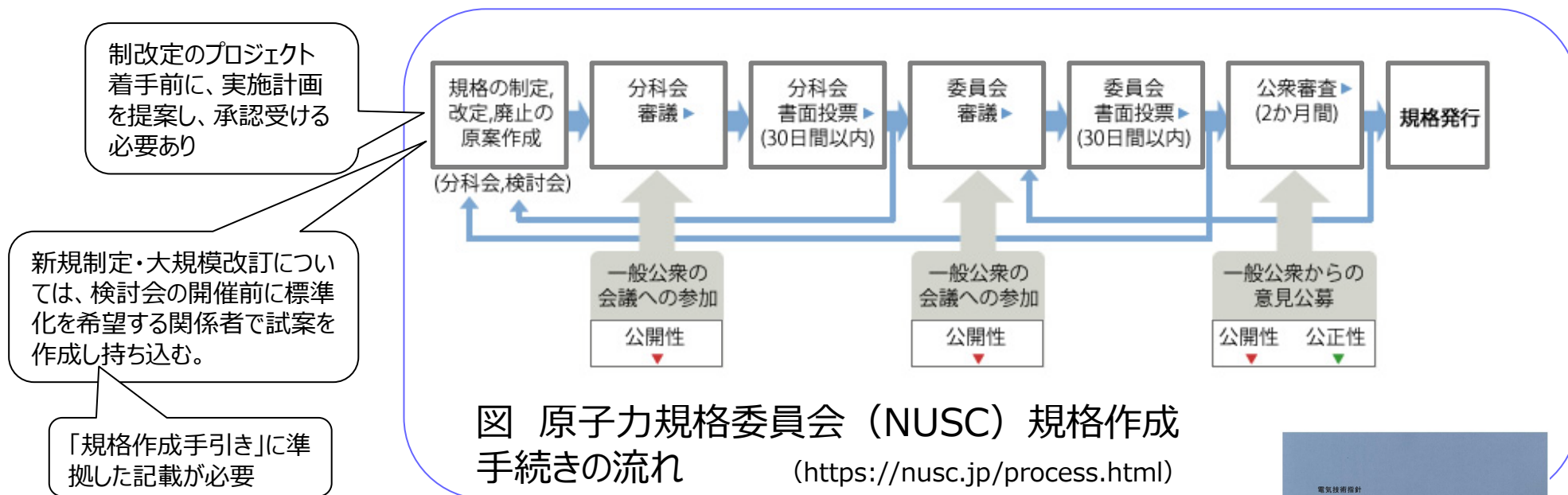
先行事業成果：プロトコール試案で示された内部被ばくが発生した場合の判断指標を用いた対応フロー

図 原子力規格委員会（NUSC）の規格作成手続きの流れ
(<https://nusc.jp/process.html>)

2.1 得られた成果 (8 / 21)

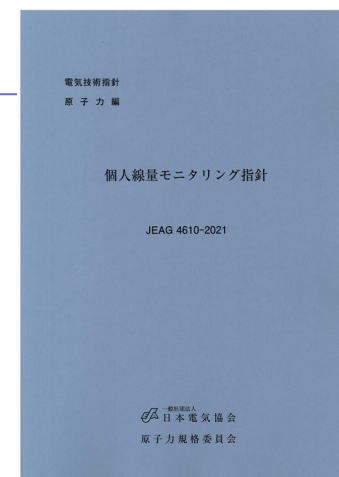
(1) 対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討

参考 標準化開発に係る作業のイメージ



- 2021年の眼の水晶体の等価線量限度の引き下げに伴う改訂以降、JEAGの改訂は行われていない。

- 本事業で開発したプロトコールは研究開発報告書類 (JAEALレポート) 等で公表する。
 - ✓ 公表された本プロトコールを参照することが想定される。



2.1 得られた成果（9／21）

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○既存手法の適用性検討（予備調査）

- ・ 既存手法の適用性評価として、原子力発電所の重大事故リスクを対象とした安全性評価で用いられるPRAを内部被ばく事象のリスク評価へ応用可能か予備調査を行った。

STEP 1 リスク評価事例の調査

リスク情報を用いた保守・安全評価・事故解析等の事例を調査した。

STEP 2 リスク評価事例を踏まえた内部被ばく事象への適用検討

事例調査を踏まえて、既存のリスク評価で用いられるパラメータや考え方を整理した。既存手法を内部被ばく事象へ適用する場合の課題や、その実現可能性について以下の手順で検討するために必要な情報を洗い出した。

- (1) PRAの考え方と内部被ばく事象のリスク評価への適用
- (2) 内部被ばくリスク評価に必要なパラメータの抽出
- (3) 内部被ばくリスク評価を行う場合の課題の整理
- (4) 実現可能性の検討

2.1 得られた成果 (10/21)

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○既存手法の適用性検討 (予備調査)

予備調査の結果を踏まえて、以下のように評価した。

- PRAは、原子力発電所のような複雑なシステムにおける事故の発生メカニズムをモデルで表し、起因事象や故障等の発生確率を設定することで、リスクの発生可能性と影響の大きさを定量評価することができる。
 - リスクの観点異なるが、内部被ばく事象へ適用する場合も発生確率の評価が起点となることは同様であり、適用を試みる価値はあると判断
- PRAは、多様な事故シーケンスを網羅的に検討できることが特徴である。
 - 吸入、経口や創傷等の様々な内部被ばくに適用可能
- PRAでは、原子力発電所のプラント固有設備による安全機能が重要となるが、内部被ばく事象では安全機能の他に、サーバイメータによる身体汚染検査や除染等の作業者の操作が重要となる。
 - 実際の作業状況を想定し、内部被ばくに至る過程（シナリオ）を明確にする必要がある

⇒ **1F被ばく事例を対象にケーススタディを実施**し、本リスク評価手法の実現可能性について、さらなる調査（本調査）を行った。

2.1 得られた成果（11／21）

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討（本調査）

- 予備調査で検討したPRAの内部被ばくのリスク評価への適用結果から、以下の手順を進めて適用を検討した。
 - ① 作業手順・作業場インベントリを特定・仮定
 - 公開されている情報及び東京電力から提供された情報から特定・仮定した。
 - ② 類似事例からエラーシナリオを特定
 - 溶液輸送に関する事故事例、現場作業のリスクアセスメント及び過去事例の洗い出しにより特定した。
 - ③ エラーシナリオの確率検討
 - 公共事業の建設工事の事故数に関する主な論文及び医療現場における防護服からの汚染に関する報告書からエラーの確率を仮定した。
 - ④ 影響の検討（作業におけるインベントリと影響の仮定）
 - インベントリを4つのレベル、エラーの確率を6つのレベルに区分し、R-mapでリスク評価の指標を仮定した。
 - ⑤ リスク評価
 - エラー確率が0%以上でインベントリが存在すると仮定した作業手順について、リスク評価を行った。
 - ⑥ 評価結果の適用
 - 本検討では、主にインベントリが内部被ばくのリスク評価へ影響する要因である。
 - ⑦ 資材優先度の検討

2.1 得られた成果 (12/21)

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討 (本調査)

① 作業手順・作業場インベントリを特定・仮定

- 2023年10月に発生した、東京電力1FのALPS処理装置について配管洗浄時のホースからの液体飛散インシデントを参考に、作業手順を仮定し本検討を行った。
- 公開されている情報および東京電力から提供された情報から特定・仮定した。
- 分析の対象者は以下3名とし、リスク評価検討対象者はCのみとする。
 - A：作業責任者：全体の指揮、安全確認、作業手順の指示
 - B：ポンプ操作担当：ポンプの操作、流量調整
 - C：タンク担当：ホース・タンクの接続・状態監視、移送状況の確認
- 作業場Cの防護装備
 - 全面マスク+カバーオール+アノラック上下+ゴム手袋3重とする。
- リスク評価の対象は、以下の範囲とする。
 - 防護服等の装着⇒ホース設置後に洗浄液移送⇒移送完了⇒ホース洗浄完了⇒防護服等の脱装
- 作業場等におけるインベントリについて、増設ALPS処理水の処理前濃度の半分と仮定した。



試験装置全景

図：作業が実施された試験装置全景

2.1 得られた成果（13／21）

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討（本調査）

② 類似事例からエラーシナリオを特定

- 溶液輸送に関する事故事例、現場作業のリスクアセスメント及び過去事例の洗い出しにより特定した。
- 転倒による創傷：転倒し、防護服が損傷し、創傷から内部被ばくが生じる。
- 転倒による吸入：転倒し、防護服・マスク等に損傷・はずれが生じ、吸入から内部被ばくが生じる。
 - 水が漏れていたのに気づかず足を滑らせて転倒する。
 - ホース片づけ時にホース端部がサポートに引っ掛かったのを無理に引っ張り反動でホースが身体にあたる。
 - 重量物（薬注ポンプ）運搬時にバランスを崩し転倒する。
 - 薬注時のホースにつまづき転倒する。
- 漏洩による吸入・摂取：漏洩が生じ、防護服・手袋の損傷により、吸入し内部被ばくが生じる。
- 誤った手順による防護服着脱による吸入・摂取：漏洩もしくは環境表面から汚染された防護服・防護具の誤った手順による吸入・摂取から内部被ばくが生じる。

2.1 得られた成果 (14/21)

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討 (本調査)

③ エラーシナリオの確率検討

- 公共事業の建設工事の事故数に関する主な論文及び医療現場における防護服からの汚染に関する報告書からエラーの確率を仮定した。
 - 重大な事故については飯森らの論文より、0.28%とする。
 - 手指から顔面付近へ汚染する確率については「医療従事者における手指汚染のリスク因子」より、0.5%とする。
- 上記を踏まえ、各作業手順におけるエラーの確率は以下のとおり。
 - 1. 防護服等の装着：0%
 - 2. 作業開始：0%
 - 3. 薬注ポンプの試運転：0.28%
 - 4. 廃水の移送：0.28%
 - 5. 移送量の確認：0.28%
 - 6. 作業終了：0.28%
 - 7. 防護服等の脱衣：0.5%
 - 8. 管理対象区域からの退域：0%

高インベントリ量の放射性物質と接触がある作業
- エラーの確率より、「高インベントリ量の放射性物質と接触がある作業」と「作業終了後の防護服等の脱衣」の2つがリスクが高い。

2.1 得られた成果 (15/21)

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討 (本調査)

④ 影響の検討 (作業におけるインベントリと影響の仮定)

- インベントリを4つのレベル、エラーの確率を6つのレベルに区分し、R-mapでリスク評価の指標を仮定した。

表：インベントリによる影響度の仮定

		Cs-137	Sr-90	Co-60
3	多い	1万 Bq以上	1000 Bq以上	1万 Bq以上
2	中程度	1万 Bq未満	1000 Bq未満	1万 Bq未満
1	少ない	1000 Bq以下	100 Bq以下	1000 Bq以下
0	ない	0	0	0

表：R-mapにおける影響度の区分

リスク影響区分	相対的尺度または数値尺度				
	非常に低い 1 (C2以下)	低い 2 (C3～B1)	普通 3 (B2)	高い 4 (B3～A1)	非常に高い 5 (A2～A3)
個人への影響	治療時間が短く(又は必要がなく)、健康影響もない	治療時間が長い、健康影響の可能性は低い	治療時間が短いが、健康影響が懸念される	治療時間が長く、健康影響が懸念される	治療時間が長く、健康影響がある

表：インベントリによるR-mapの区分

5	頻発する 2%以上	C0	B3	A2	A3
4	しばしば発生する 0.2%～2%	C0	B2	A1	A2
3	時々発生する 0.2%以下	C0	B1	B3	A1
2	起こりそうにない 0.1%以下	C0	C1	B2	B3
1	まず起こり得ない 0.01%以下	C0	C1	B1	B2
0	考えられない 0.001%以下	C0	C1	C2	C3
	Cs-137	0	1	2	3
	Sr-90	0	1	2	3
	Co-60	0	1	2	3

2.1 得られた成果（16／21）

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討（本調査）

⑤ リスク評価

- エラー確率が0%以上でインベントリが存在すると仮定した作業手順について、リスク評価を行う
- 例：作業手順4：廃水の移送（エラーの確率0.28%）

➤ エラーシナリオは以下のとおり。

➤ 「転倒による創傷」、「転倒による吸入」

（該当シナリオ：水が漏れていたのに気づかず足を滑らせて転倒する。薬注時のホースにつまずき転倒する。）

「漏洩による吸入・摂取」

（防護服等損傷のある該当シナリオ：ホースの固定不十分による漏洩。人為的ミス（手順間違い）による過剰送液による漏洩。手順書の不足によるミスによる漏洩。）

➤ インベントリは以下のとおりと仮定した。

Cs-137 5万Bq、Sr-90 50万Bq、Co-60 5千Bq

➤ 仮定したインベントリ及びエラー確率から、作業手順4におけるリスク評価は以下のとおりである。

➤ Cs-137→A2、Sr-90→A2、Co-60→A1

表：作業手順4における内部被ばくリスク評価

5	頻発する 2%以上	C0	B3	A2	A3
4	しばしば発生する 0.2%～2%	C0	B2	A1	A2
3	時々発生する 0.2%以下	C0	B1	B3	A1
2	起こりそうにない 0.1%以下	C0	C1	B2	B3
1	まず起こり得ない 0.01%以下	C0	C1	B1	B2
0	考えられない 0.001%以下	C0	C1	C2	C3
	Cs-137	0	1	2	3
	Sr-90	0	1	2	3
	Co-60	0	1	2	3

2.1 得られた成果 (17/21)

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討 (本調査)

⑥ 評価結果の適用

- 本検討では、主にインベントリが内部被ばくのリスク評価へ影響する要因である。
 - 作業手順 4 ～ 6 の内部被ばくリスクが高いことから、作業手順 4 ～ 6 におけるエラーシナリオに対する対策を作業手順へ優先的に反映することにより、内部被ばく事象に至るリスクを低減することが可能である。

表：内部被ばくリスク評価の検討結果まとめ

作業 手順	作業内容等	インベントリ			エラー 確率	評価結果		
		Cs-137	Sr-90	Co-60		Cs-137	Sr-90	Co-60
1	防護服等の装着	なし			0%	リスクなし		
2	作業開始	なし			0%	リスクなし		
3	薬注ポンプの試運転	なし			0.28%	リスクなし		
4	廃水の移送	5万 Bq	50万 Bq	5千 Bq	0.28%	A2	A2	A1
5	移送量の確認	5万 Bq	50万 Bq	5千 Bq	0.28%	A2	A2	A1
6	作業終了	5万 Bq	50万 Bq	5千 Bq	0.28%	A2	A2	A1
7	防護服等の脱衣	50 Bq	500 Bq	5 Bq	0.5%	B2	A1	B2
8	管理区域からの退域	なし			0%	リスクなし		

2.1 得られた成果（18／21）

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討（本調査）

⑦ 資材優先度の検討

- 今回の事象の場合、リスクが高いと評価されたSr-90のための資材が最も優先度が高く、その次に共通の資材が優先されるべきである。

表：内部被ばくリスク評価のまとめと資材等

	評価結果	バイオアッセイ資材	体外計測	治療剤
Cs-137	A2、B2	—	WBC・サーバイメータ	プルシアンブルー
Sr-90	A2、A1	尿試料用バイオアッセイ設備	—	体内除去剤（硫酸バリウム）
Co-60	A1、B2	—	WBC・サーバイメータ	—

- 優先度 1：尿試料用バイオアッセイ設備、体内除去剤（硫酸バリウム）
 - 優先度 2：WBC、サーバイメータ
 - 優先度 3：プルシアンブルー
- Sr-90のための資材については、以下のように想定した。
 - Sr-90：Sr-90（Y-90）がβ線放出核種であるため、WBCは適用できず、尿バイオアッセイを実施する。
また、経口摂取した可能性がある場合には、体内除去剤として硫酸バリウムを内服することで消化管からの吸収を阻害することが可能である。

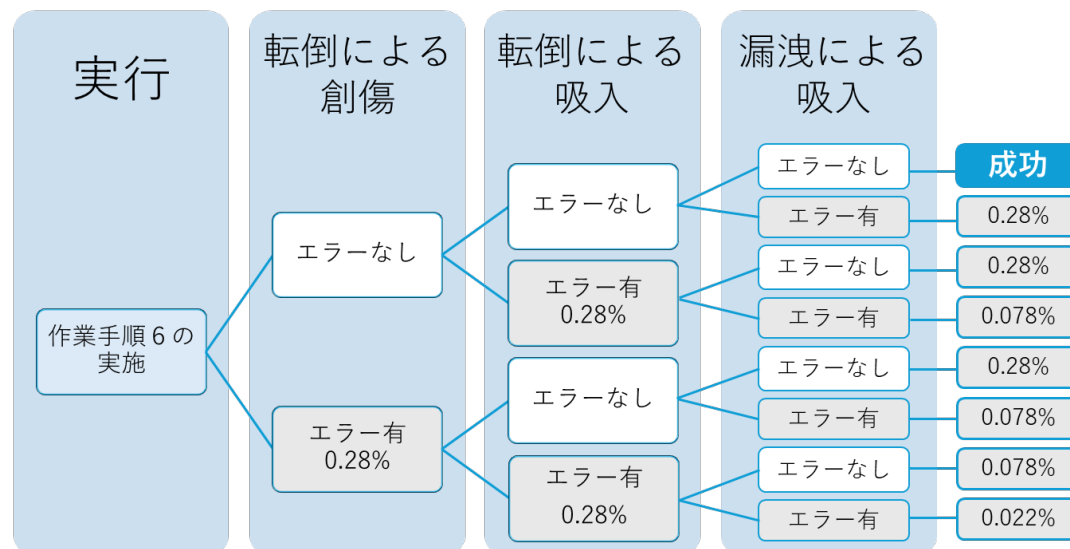
2.1 得られた成果 (19/21)

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討 (本調査)

- 本調査において最も影響の大きい要因は、インベントリとエラーシナリオの確率と考えられる。
- 本調査結果の課題として、以下の検討が必要である。
 - 治療や健康影響度の区分との現実的な整合性、R-map区分のA3～C0の区分（緊急度と影響度の組み合わせ）を検討する。
 - 各手順におけるエラー確率を検討したうえで、シナリオの組み合わせによるエラー確率を算出しリスク評価につなげる必要がある。
 - 例えば作業手順6では、図のようにシナリオごとのエラーを0.28%として、より詳細なリスク評価が可能である。

手順6



図：作業手順6における詳細なリスクの検討例

2.1 得られた成果 (20/21)

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討 (本調査)

PRAの将来的な廃炉プロジェクトへの適用可能性を検討した。

表：ALPS処理装置の配管洗浄 (本調査) 及び将来的な廃炉プロジェクトへ適用にあたり必要となる情報

	ALPS処理装置の配管洗浄 (本調査)	将来的な廃炉プロジェクト
作業手順	- 公開された情報 - 東京電力が提供する情報	- 公開された情報 - 東京電力が提供する情報
作業場 インベントリ	当該事象の溶液中のインベントリが不明 →増設ALPS処理水の処理前濃度の半分と仮定	当該作業場で試料を採取し、インベントリを決定
エラーシナリオ の特定	- 溶液輸送に関する事故事例の整理 - 現場作業におけるリスクアセスメントによる洗い出し - 過去事例からの洗い出し	- 類似作業に関する事故事例の整理 - 現場作業におけるリスクアセスメントによる洗い出し - 過去事例からの洗い出し
エラー確率の 検討	使用される機器の故障確率、人的過誤確率に関する詳細な情報 (作業者の習熟度、作業の複雑さ、手順書、人間工学、業務プロセス等) が不明 →類似する事例に関連した文書から仮定	使用される機器の故障確率、人的過誤確率に関する詳細な情報 (作業者の習熟度、作業の複雑さ、手順書、人間工学、業務プロセス等) が不明

• 将来的な廃炉プロジェクトへの適用にあたり、エラー確率をどのように評価するかが課題となる

- エラー確率の検討にあたり、使用される機器の故障確率、人的過誤確率に関する情報 (作業者の習熟度、作業の複雑さ、手順書、人間工学、業務プロセス等) が必要となるが、前例がほとんどないと言っても過言ではない将来的な廃炉プロジェクトについてそれらの情報が入手可能か、その確度や妥当性は十分かが未知。
- 本評価手法は評価に必要な情報の種類が多く、またその多くは情報収集のみならずその確度や妥当性の評価に時間を要することから、廃炉作業に係る内部被ばく事象へ即座に適用することは難しいと考えられる。
- 廃炉作業に係る内部被ばく事象へ適用するうえで、今後想定される作業のイベントツリーを作成し検討する必要がある。

2.1 得られた成果 (21/21)

(2)内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討

○1Fの被ばく事例を対象としたケーススタディの検討 (本調査)

参考

PRAを将来的な廃炉プロジェクトへ適用させるために必要となる調査・検討事項は、以下のよう
に整理される。

- ・ エラーシナリオに関連する素材
- ・ エラーシナリオに関連する素材のメーカー情報
- ・ 実際の作業で用いる溶液中の濃度
- ・ 実際の作業の周囲のインベントリ状況の詳細
- ・ 類似事例の大規模調査
- ・ 検討作業場もしくは作業現場監督組織からのヒヤリハット事例の収集
- ・ 現場作業員・関係者からの聞き取り
- ・ 専門家からの意見聴取
- ・ 類似事例における事故数のデータ収集
- ・ 作業現場の作業員・関係者からの聞き取り

2.2 目標に照らした達成度

実施項目	技術成熟度（TRL）			
	現状評価	終了時目標	終了時自己評価	
a. 対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコル試案の改良及び標準化プロセスの検討	3(応用研究)	4(実用化研究)	4(実用化研究)	○
b. 内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討	2(応用研究)	3(応用研究)	3(応用研究)	○

終了時目標：

- 先行事業のプロトコルをベースに、多数被ばく者対応、社会人文分野等の課題について検討を行い、プロトコル改良案を提供する。また、国内標準として認定されるために必要となるプロセスを提案する。
- 既存手法の適用性確認や 1 F被ばく事例を用いた調査を実施し、内部被ばく事象に係るリスク分析・評価手法の枠組みを基礎情報として提供する。

終了時自己評価：

- プロトコル試案の改良（多数被ばく者対応、社会・人文分野等の課題解決）及び標準化プロセスの検討のため、有識者による検討会の開催や社会人文分野の専門家への意見聴取等を実施し、プロトコル改良案の提供及び国内標準化プロセスの提案を行った。
- 内部被ばく事象に係るリスク分析・評価手法の枠組みを基礎情報として提供するとともに、より詳細な評価を実施するために必要な情報（課題）を整理した。

2.3 成果の反映先とその寄与

- 東京電力 1 F において内部被ばくが発生した際の対応マニュアルをより適切なものに改訂するにあたり、プロトコール改良案を基礎情報として提供する。
- 本事業で開発したプロトコールは研究開発報告書類（JAEAレポート）等で公表する。
 - 関連学会への周知が可能となり、学会の指針制定時に引用の可能性が考えられる。

2.4 現場への適用性（難易度）

- 本検討は内部被ばく事象に対する考え方を整理するものであり、設備投入とは異なるため、現場適用にあたってのハードルは低いと考えている。

3. 今後の課題

- 社会・人文分野の専門家からの意見聴取で洗い出した留意点は、専門家間でも意見が分かれる部分であったため、議論をさらに深めていく必要がある。
 - 本プロトコルを研究開発報告書類（JAEAレポート）として公表することで、様々な専門家が閲覧できるようにする。
 - 閲覧した専門家が各々で意見を持つことで、今後プロトコルの記載内容について更に議論を深めることができる。
- リスク分析・評価手法について、フィージビリティスタディとして検討した結果から、評価に必要な情報の種類が多く、またその多くは情報収集のみならずその確度や妥当性の評価に時間を要することから、廃炉作業に係る内部被ばく事象へ即座に適用することは難しいことが分かった。今後については、本検討結果を踏まえて、PRA手法による研究を更に進めていくのがよいのか、より短期間で廃炉作業へ適用させることに主眼をおいて別の方法を検討するのがよいかを再検討する必要がある。

Ⅲ. 全体総括

全体まとめ

- 期間中のスケジュール遅延や外注予定の事項を内作で実施するなど多少の計画変更はあったが、全体には概ね計画通りに進捗し当初の目標は達成できた。
- ろ紙試料測定、皮膚汚染測定、身体洗浄剤等の効果検証のサブテーマについては、シミュレーション評価・模擬実証試験・試作機試験等による更なる検討を進めたことにより当初目標よりも高いTRLを達成できた。
- 共同実施者である東京電力の協力のもと必要十分なインプットを得るとともに、アウトプットが現場のニーズに即したものとなるよう適宜意見交換等を実施した。
- 有識者の意見聴取・関与により、適宜実施内容・評価の改善等を図った。
- 事業終了後も、成果公表や課題検討等に努めるとともに、本成果を基にして東京電力において進められるエンジニアリングを支援する。

サブテーマ間の成果の相互連携について

本事業で研究開発を行った9つのサブテーマについては、個別に、1F現場での被ばく管理等へ適用させることが可能であるが、複数のサブテーマの成果を組み合わせることで更なる成果が期待できることも考えられる。可能性のある相互連携について、いくつか検討したものを以下に示す。

- 「a)バイオアッセイ手法の高度化」と「b)TES型マイクロカロリメーター」との連携
⇒TESにより実現できる光子の精密測定を念頭において、バイオアッセイ試料の前処理方法や分析方法を検討することで、バイオアッセイ手法の精度向上や効率化ができる可能性がある。
- 「e)皮膚汚染測定」と「f)αカメラ技術」との連携
⇒αカメラ技術によりα核種による体表面汚染の大まかな強度及び位置を測定し、汚染面積を精密に測定する技術で、身体汚染の状態を詳細に評価するなど相補的なα汚染管理ができる可能性がある。
- 「e)皮膚汚染測定」と「g)身体洗淨剤等の効果検証」との連携
⇒人工皮膚を用いたホット試験に、汚染面積を精密に測定する技術を適用することで、除染効果の検証精度を向上させられる可能性がある。
- 「e)皮膚汚染測定」と「h)創傷汚染測定」との連携
⇒除染し切れない皮膚汚染の範囲と表面密度を高精度で測定することで、創傷部汚染に対して創傷部以外からの妨害影響を差し引いた測定・評価ができる可能性がある。

先進的な技術を用いた被ばく管理システムについて

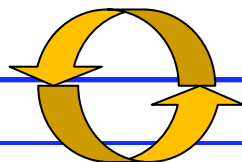
- 被ばく管理のベースは放射線の測定・評価であり、その点は従前から変わることがない。
- しかし、1 Fのように測定・評価が難しいα核種が存在することに加えて、その他の核種が混在することにより測定・評価がさらに難しくなる作業環境においては、一般的な原子力施設等での長年にわたる運用実績の中で確立されてきた既存の測定・評価技術に加えて、本事業で研究開発を行ったような高度な測定・評価技術が必要となる。
- これら高度技術については先進的な技術となることから、研究開発過程における模擬実証等で良好な結果が得られたとしても、その反面として、実運用における経験や実績は原子力業界全体においては十分とは言えない状況となってしまうことが潜在的なリスクと考えられる。
- 高度技術を採用した被ばく管理システムの設計・運用においては、この潜在的リスクへの対策として、ベースとなる高度技術を日常的な被ばく防護対応と緊急時における対応の両方で使用できるようにし、日常的な運用において経験と実績を溜めつつ、その結果を適宜システムへフィードバックして継続的改善が行える自己循環型の仕組みを意識すべきと考えられる。

日常的な被ばく防護対応

- ・使用頻度は極めて高い。
- ・確実性は必要となるものの、緊急時に比べると対応の迅速性の要求は下げられるため、実運用においてシステム改良のための試験や検証等を行える猶予がある。

緊急時における対応

- ・使用頻度は極めて少ない。
- ・迅速かつ確実であることが要求されるため、試験的なことは行うのは困難。



ベースとなる測定技術、評価技術（ハードウェア、ソフトウェアの両方）
⇒ 日常的な対応及び緊急時における対応で共通にする。

成果公開の状況（本報告公開日までの実績）

学会口頭・ポスター発表

○アイソトープ・放射線研究発表会（2024.7）

- ・体外計測機器を応用した創傷汚染測定法の開発（ポスター）
- ・CdZnTe検出器を用いた創傷汚染測定法の開発に向けた計算シミュレーション（口頭）

○放射線事故・災害医学会（2024.9）

- ・総合的内部被ばく対応システム開発への取り組み（ポスター）

○International Topical Workshop on Fukushima-Daiichi Decommissioning Research 2024（2024.10）

- ・STUDY ON APPLICATION OF SUPERCONDUCTING TRANSITION EDGE SENSOR TO INTERNAL DOSE ASSESSMENT FOR DECOMMISSIONING OF FUKUSHIMA-DAIICHI NUCLEAR POWER STATION（口頭）

○保健物理学会（2024.12）

- ・皮膚線量評価計算コード VARSKIN を用いた創傷汚染時の被ばく線量の評価（ポスター発表）
- ・創傷汚染測定に対する CdZnTe 検出器の適用性評価（口頭）

○環境放射能研究会（2025.3）

- ・バイオアッセイ迅速分析法の確立に向けた検討*1（口頭）

* 1 KEK Proceedingsに投稿中

TRLに基づく目標設定と終了時の自己評価（まとめ） 1/2

サブテーマ	実施項目	技術成熟度（TRL）			
		現状	目標	終了時自己評価	
a) バイオアッセイに係る手法の高度化及び課題解決	a-1) 自動系統分析システムの検討	3	4	4	○
	a-2) 先行事業で抽出された分析・測定法の国内／1F適用性検討	4	5	5	○
	a-3) 新たな測定・分析装置のバイオアッセイへの適用性検討	3	4	4	○
	a-4) 試料前処理における臭気対策検討	3	4	4	○
b) TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討	・TES型マイクロカロリメーターを用いたプルトニウム測定の高度化に係る検討	1	3	3	○
c) ろ紙試料（鼻スミヤろ紙、空気ろ紙）測定の精度把握・向上に関する検討	・ろ紙へ付着している汚染の状況を考慮した測定の精度把握及び向上に係る検討	3	4	5	◎
d) 鼻スミヤ測定システムの検討	・鼻スミヤろ紙のデザイン、鼻スミヤ測定システムの概念設計	2	3	3	○
e) 皮膚汚染測定に関する検討	・皮膚汚染に対する測定手法の検討	2	3	4	◎

TRLに基づく目標設定と終了時の自己評価（まとめ） 2/2

サブテーマ	実施項目	技術成熟度（TRL）			
		現状	目標	終了時自己評価	
f) αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討	・αカメラ技術を用いた体表面汚染測定の高度化に係る検討	1	2	2	○
g) 身体洗浄剤等の効果検証方法に関する検討	・汚染性状に適した除染方法及び除染剤を選定するための効果検証方法の検討	2	3	5	◎
h) 創傷汚染測定に関する検討	・創傷汚染に対する測定手法の検討	4	6	6	○
i) 放射性核種の摂取に係る対応システムの開発	・対応システムの課題解決策の検討、海外状況の調査等を踏まえたプロトコール試案の改良及び標準化プロセスの検討	3	4	4	○
	・内部被ばく事象に係るリスクを分析・評価する手法の検討	2	3	3	○

参考：技術成熟度（TRL）の定義

レベル	本事業に対応した定義	フェーズ
7	実用化が完了している段階。	実運用
6	現場での実証を行う段階。	フィールド実証
5	実機ベースのプロト機を製作し、工場等で模擬環境下での実証を行う段階。	模擬実証
4	開発、エンジニアリングのプロセスとして、試作レベルの機能試験を実施する段階。	実用化研究
3	従来の経験を応用、組合せによる開発、エンジニアリングを進めている段階。又は、従来経験のほとんど無い領域で基礎データに基づき開発、エンジニアリングを進めている段階。	応用研究
2	従来経験として適用できるものがほとんど無い領域の開発、エンジニアリングを実施し、要求仕様を設定する作業をしている段階。	応用研究
1	開発、エンジニアリングの対象について、基本的内容を明確化している段階。	基礎研究