

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

2024年3月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
核燃料・バックエンド開発部門 核燃料サイクル工学研究所

Contents

I. プロジェクトの全体像

- 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

- ① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討
- ② ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上
- ③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認
- ④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化
- ⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良
- ⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発

III. 全体総括

おことわり

本報告では、原則として東京電力ホールディングス株式会社を「東京電力」、福島第一原子力発電所を「1F」と表記させていただきます。

I .プロジェクトの全体像

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する医療介入としてキレート剤投与が行われるなど、近年内部被ばくの対応はより複雑化
 - 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・下線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

以下の3点に着目した研究開発を行い燃料デブリ取り出し等の作業の安全実施に向けた課題の解決を図る。

- 内部取り込みに対する防護（発生防止及び被ばく線量の低減）
- 内部被ばく線量の測定（体外計測およびバイオアッセイ）・評価
- 内部被ばくへの対応全般（線量評価に基づく医療介入等を含む）

これにより、1F廃止措置に係る作業全般の安全性向上、被ばくトラブルの発生による対応業務・現場作業の停止等の長期化による廃止措置工程の進捗の障害リスクの低減などを実現する。

実施項目（全体）

公募要領で示された3項目（以下a～c）に対し、計6項目のサブテーマを実施する。

a) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

- ① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討
- ② ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上
- ③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認

b) 内部取り込みに対する防護に係る技術開発

- ④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化
- ⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

c) 内部被ばく対応システムの開発

- ⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び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研究でのサブテーマの関係 (1/3)

a) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

バイオアッセイによる摂取量の評価だけでなく、鼻スミヤを使用した内部取り込みの判断、ホールボディカウンタ・肺モニタ等の体外計測によるスクリーニング・線量評価（線量レベルの推定を含む。）については、いわゆる事故の初期段階での対応となることから、最新の知見を過去に発生した多数の事例にあてはめた適用性の検討（検討のための装置開発及び実証試験を含む。）を行う。

また、α核種等の内部取り込みに対する対応が必要となる原子力施設は国際的にも限定されていることから、この分野における新たな測定・評価等の装置及び手法及び規格・標準の開発（試験実施を含む。）を行う。

① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討

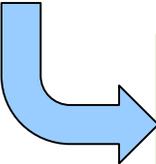
② ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上

③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認

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

b) 内部取り込みに対する防護に係る技術開発

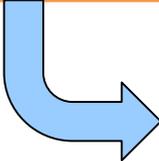
内部取り込みは、密封状態からの漏えいだけでなく、**汚染防護装備（手袋、呼吸保護具、タイベックスーツ等）からのクロスコンタミネーション**が原因となる場合があり、作業中及び作業終了時の汚染防護装備の表面・空气中濃度の管理が非常に重要となる一方、クロスコンタミネーションを防止するための手順に長時間を要し、作業員の**疲労によるトラブル・傷病発生のリスクや作業時間の制限が課題**となっている。そこで、汚染防護装備の高度化などによりクロスコンタミネーションを含む**汚染防止技術を開発**するとともに、**汚染の状況・レベル把握**の高度化（早期・高精度）及び**汚染防護装備**の選定・交換・脱装・除染等に**係る手順の最適化**に係る検討・開発（試験実施を含む。）を行う。

- 
- ④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化
 - ⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

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

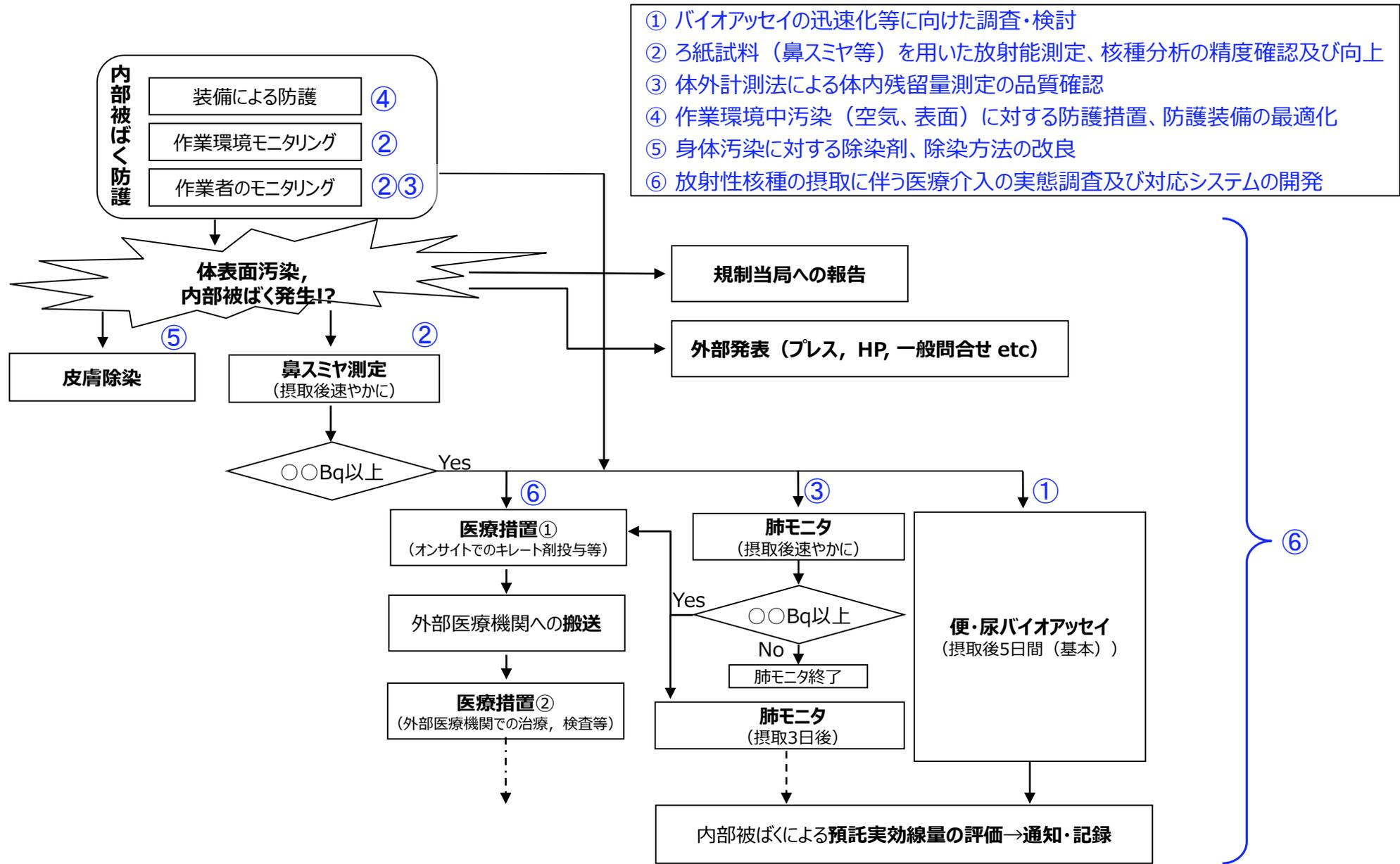
c) 内部被ばく対応システムの開発

内部被ばくの評価については、東京電力が責任をもって対応する責務を負う一方で、入院を伴う医療措置が必要な際には、医療機関が治療内容の検討、効果の確認等の目的で線量評価を行う場合がある。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評価する必要がある。本事業では、内部被ばくを伴う事象への総合的かつ科学的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。



⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発

実施項目・サブテーマ間の関連（イメージ）



東京電力からのインプット情報

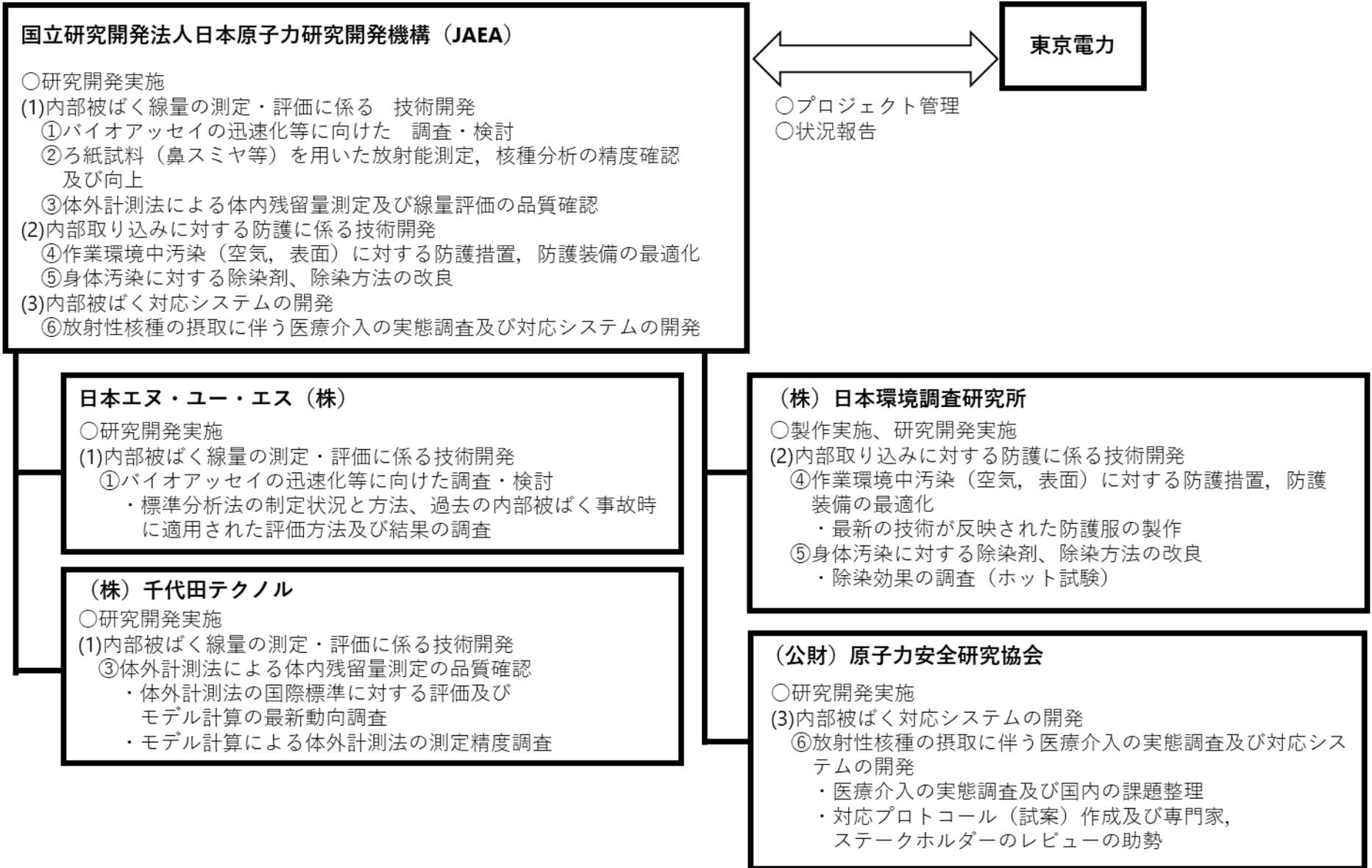
○内部被ばくに係る対象核種検討のプロセスとその結果等について
情報を受領し、検討に資した。

- ① **確認対象核種**（排水管理の評価対象核種を選定するに際して、確認すべき核種を選定するにあたり、安全側に仮定を行うため、炉心インベントリ等から被ばく評価上有意な核種として、主要核種を含み選定された、**48核種**）をベースとする。
- ② 実効線量への寄与率（ORIGEN2計算による核種組成ベース）及び燃料デブリ中の重量率を考慮。測定の容易さの点からスクリーニング用核種を設定。
- ③ 以下の核種を「分析対象核種」として決定

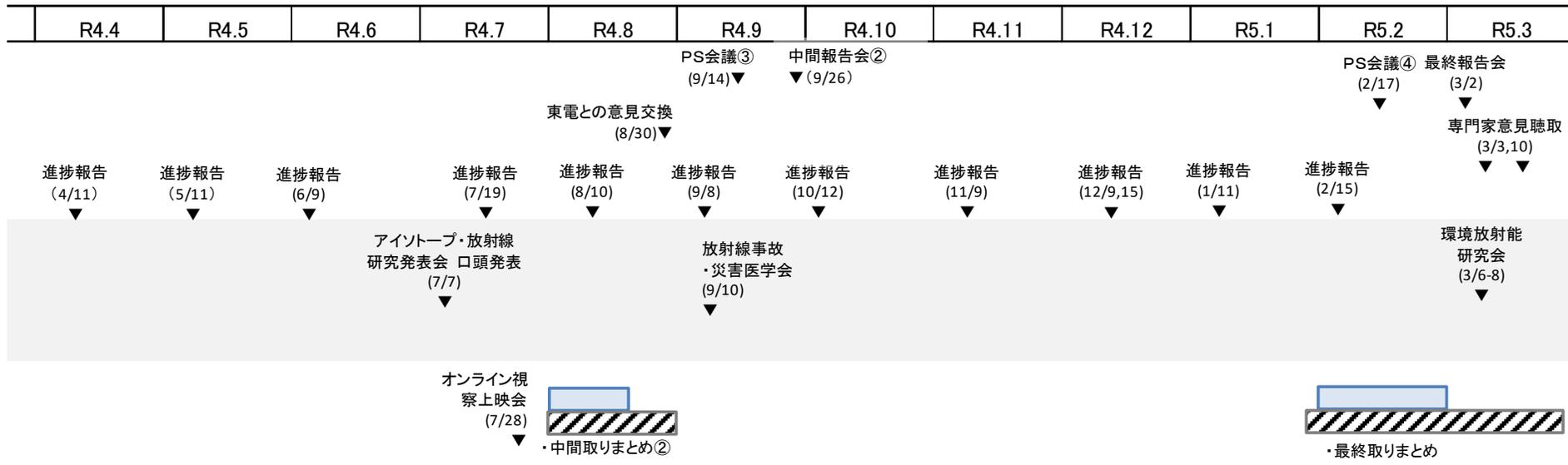
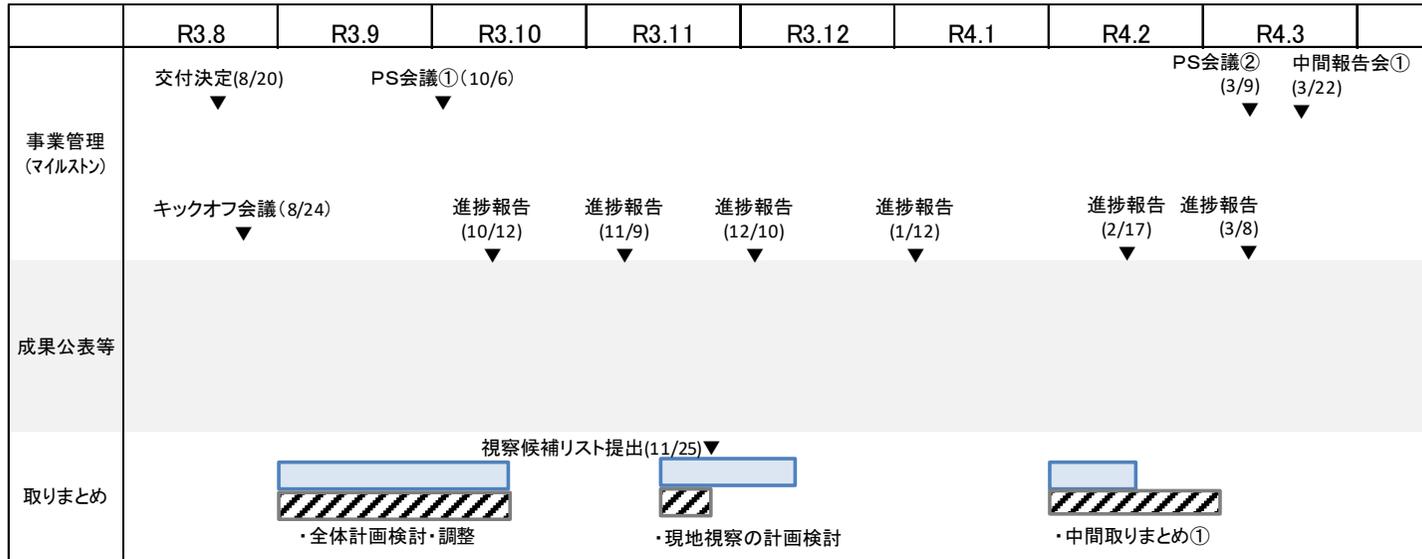
Pu-238,239,240,241, Am-241, Cm-244,
U-238(,235), Cs-137, Sr-90

○その他、汚染管理方法（エリア・動線、防護装備等）等の情報を得た。

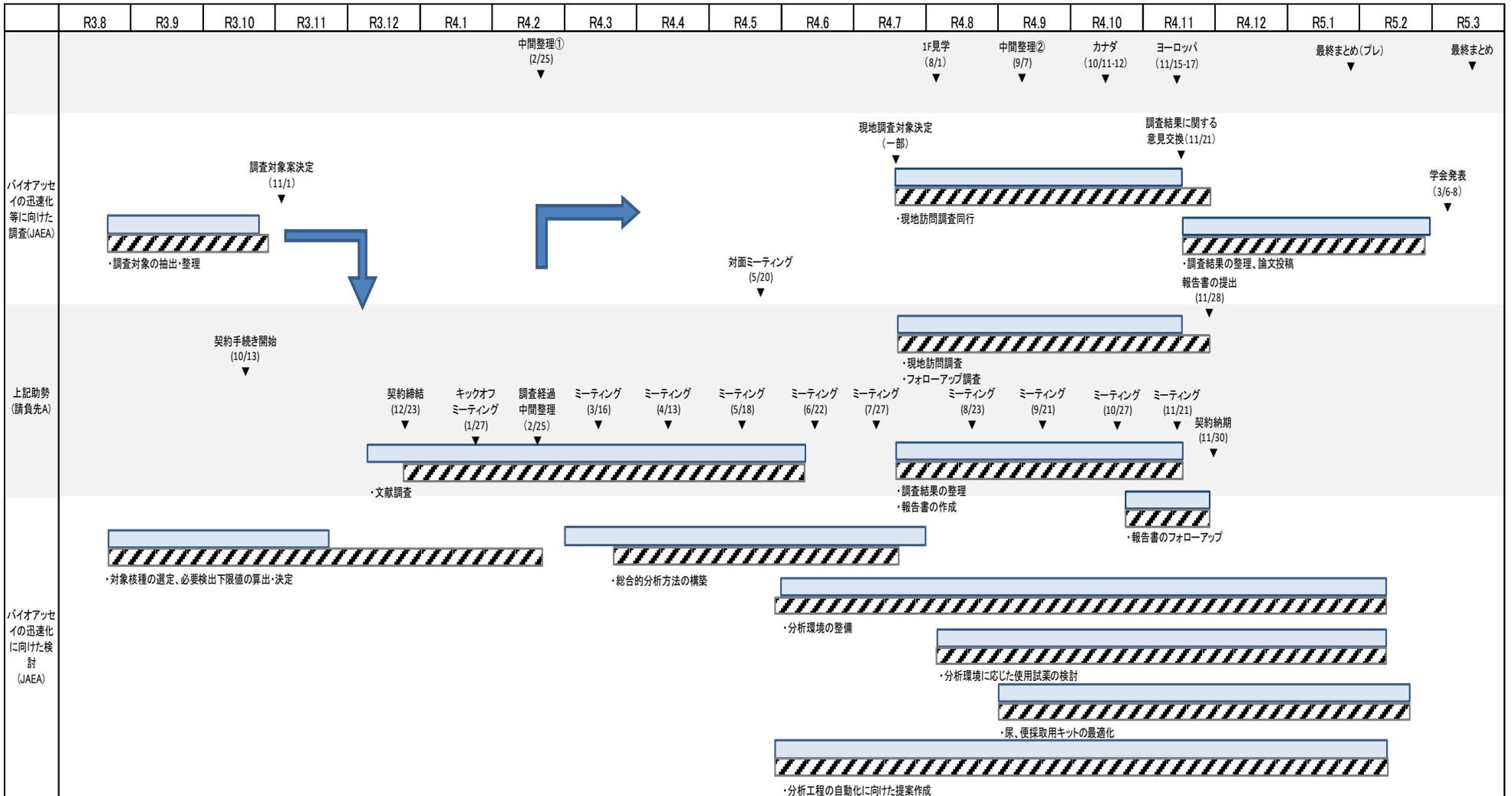
実施体制



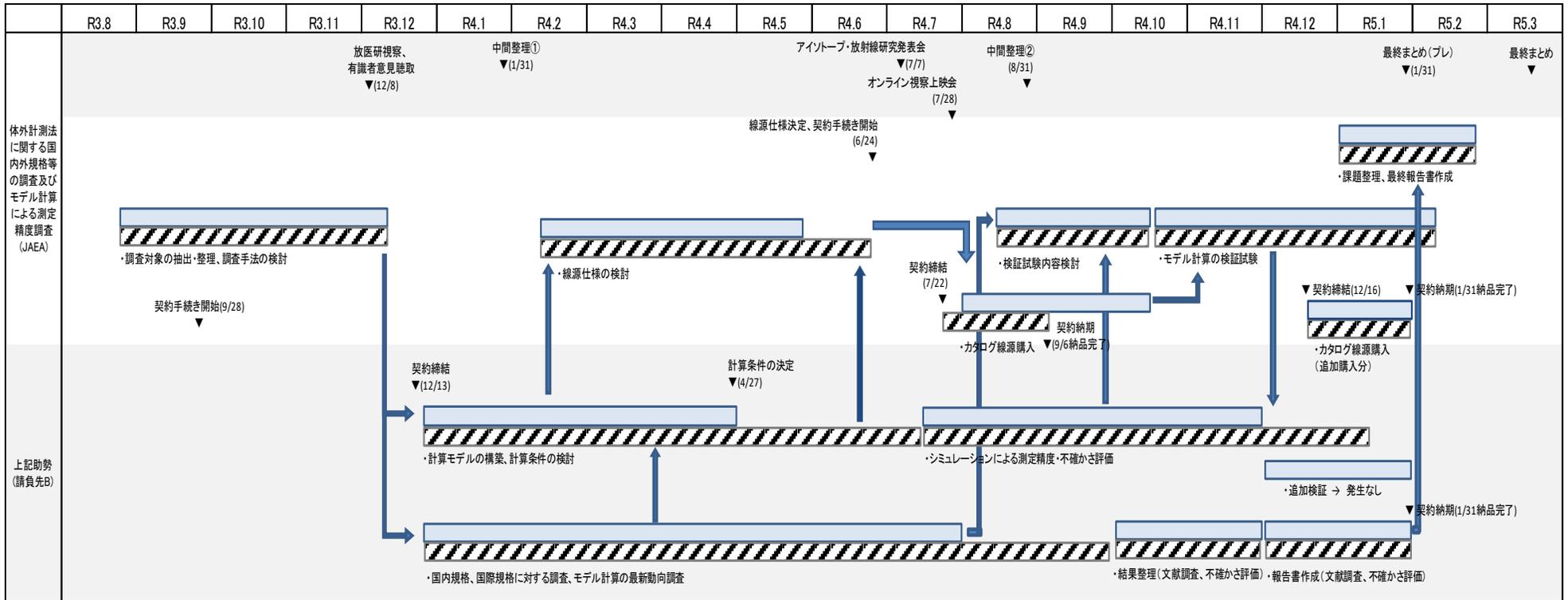
実施スケジュール（事業運営総括）



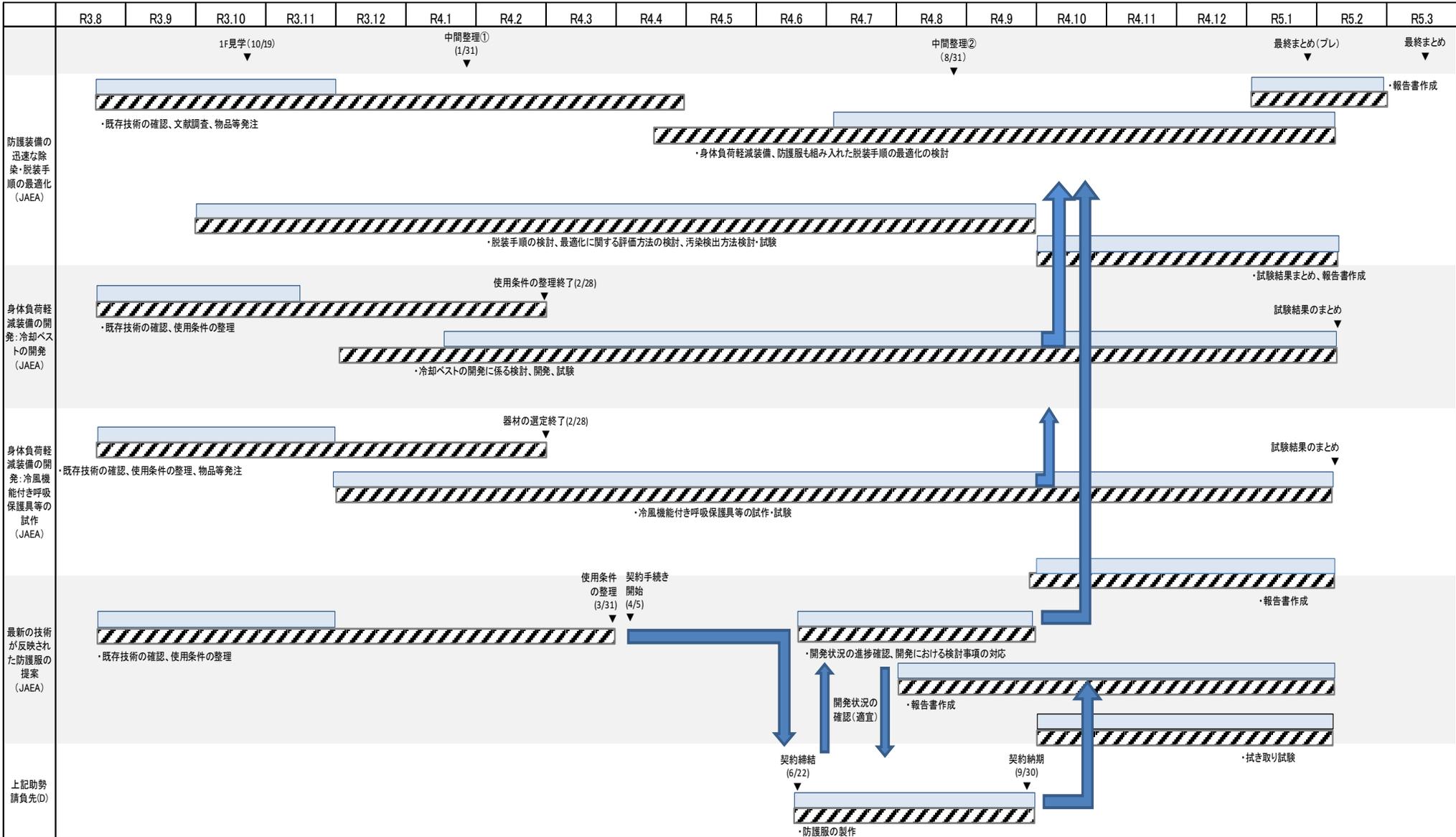
実施スケジュール（サブテーマ①バイオアッセイ関連）



実施スケジュール（サブテーマ③体外計測関係）



実施スケジュール（サブテーマ④防護装備関係）



Ⅱ. サブテーマ実績報告

1. 概要
 - 1.1 目的
 - 1.2 実施事項と目標
2. 実績
 - 2.1 得られた成果
 - 2.2 目標に照らした達成度
3. 今後の課題

事業内容

a) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討

- ② ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上
- ③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認

b) 内部取り込みに対する防護に係る技術開発

- ④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化
- ⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

c) 内部被ばく対応システムの開発

- ⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発

1.概要

1.1 目的

- 1Fの廃炉を進めるうえで必要となるバイオアッセイに関する情報を総合的に整理する。また、採取キット等の実用化試験を行う。これらにより、バイオアッセイを迅速かつ効率的に実現する採取・分析・測定方法及び分析設備の詳細を提案する。

1.2 実施事項と目標

内容	技術成熟度 (TRL)	
	現状評価	終了時目標
<ul style="list-style-type: none"> ・国内外における国際標準分析法、国内標準分析法の制定状況、放射線業務従事者の内部被ばく事故時に適用された評価方法及びその結果（科学論文、技術資料を含む）の調査 ・バイオアッセイに必要な採取、分析、測定に係る方法及び必要な設備に関する検討 	3 (応用研究)	4 (実用化研究)

終了時目標：

廃炉を進めるうえで必要となるバイオアッセイに関する情報を総合的に整理する。また、採取キット等の実用化試験を行う。これらにより、バイオアッセイを迅速かつ効率的に実現する採取・分析・測定方法及び分析設備の詳細を提案する。

2. 実績

2.1 得られた成果（概要）※詳細は次ページ以降

○国内外における国際標準分析法、国内標準分析法の制定状況、放射線業務従事者の内部被ばく事故時に適用された評価方法及びその結果（科学論文、技術資料を含む）の調査

- 内部被ばく及びバイオアッセイを扱った論文107件を収集し、整理した。
 - 国内外3つの研究機関に対し、オンラインで聞き取り調査を実施した。
 - 国内外6つの研究機関に対し、現地調査を実施した。
- バイオアッセイに必要な採取、分析、測定に係る方法及び必要な設備に関する検討
- 整理した文献ごとに検出下限値が比較可能なものを抽出し、整理した。
 - 分析・測定法を、妥当性・実現可能性の観点から評価した。
 - 尿・便試料採取キットを新規開発し、評価した。
 - 上記調査結果を取り入れ、採取・分析・測定方法及び分析設備の提案を作成した。

2.1 得られた成果 (1/13)

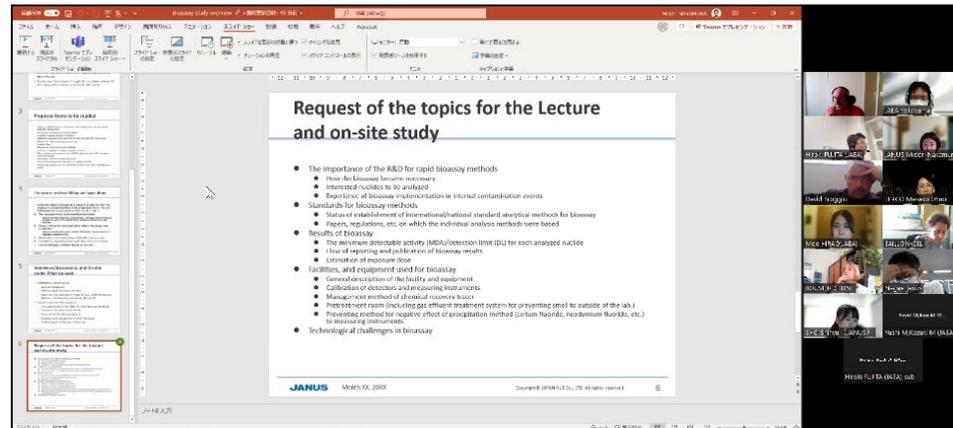
○内部被ばく及びバイオアッセイを扱った論文の収集・整理

- 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
 - 「bioassay」、「urine」、「f(a)eces」、「uranium」、「plutonium」、「americium」、「tritium」、「strontium」等の言葉の組み合わせ
 - 内部被ばくに関する文献を対象に、「internal exposure」、「radioisotopes」、「dose」、「dose assessment」等の言葉
 - 内部被ばく事例を対象に、「contamination」、「intake」、「wound」とも組み合わせ
- 「元素」、「核種」、「試料」、「供試量」、「分離法」、「検出下限値」等を整理
- 1Fの分析施設においては、フッ化水素酸（HF）の使用をしないとの情報が得られていたため、分析法においてフッ化水素酸の使用の有無についても、可能な範囲で整理
- 過去の内部被ばく事故事例の調査・整理
 - ロスアラモス国立研究所（2008年、2018年）
 - 核廃棄物隔離試験施設（2014年）

2.1 得られた成果 (2/13)

○オンライン聞き取り調査の実施

- 文献調査の結果からオンライン・現地聞き取り調査の候補を選定
- バイオアッセイ法の研究の実績があり、特に迅速化に取り組んでいる機関や、研究室間ネットワーク等、国際協力を含む他機関とのネットワーク構築に取り組んでいる機関を対象
- オンライン聞き取り調査
 - ヘルスカナダ（カナダ保健省） 2022年7月27日
 - 仏放射線防護・原子力安全研究所（IRSN） 2022年9月1日
 - 日本原燃（株） 2022年9月22日
- 聞き取り項目：バイオアッセイの迅速化、バイオアッセイ法の標準化、バイオアッセイ法の正確さ、バイオアッセイにおける課題
- ヘルスカナダ及びIRSNについては現地調査の実施を提案、スケジュールの調整も実施



オンライン会議システムを利用した聞き取り調査の様子

2.1 得られた成果 (3/13)

○現地調査の実施

- 文献調査・オンライン聞き取り調査の結果から候補を選定
- 現地調査
 - 量研*・放射線医学研究所 2022年7月26日
 - ヘルスカナダ（カナダ保健省） 2022年10月11日
 - カナダ チョーク・リバー研究所 2022年10月12日
 - 仏放射線防護・原子力安全研究所（IRSN） 2022年11月15日
 - デンマーク工科大学DTU Risø 2022年11月17日
 - （公財）日本分析センター千葉地区 2022年12月1日
- 調査項目：オンライン調査の項目に加え、
現地分析設備の見学、現地研究者との討論・情報交換
- バイオアッセイの運用、試料取り扱い上の注意点、
分析機器の校正・運用状況、線量評価方法やその取扱い、
現在抱えている問題点等、
様々な情報を入手することができた。



ヘルスカナダ ICP-MS

* 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構。以下同。

2.1 得られた成果 (4/13)

○現地調査で得られた情報・知見 (主なもの)

量研・放射線医学研究所

- ・ バイオアッセイの実施実績、バイオアッセイにおける技術的課題、バイオアッセイに関わるネットワーク構築状況に関する情報

ヘルスカナダ (カナダ保健省)

- ・ オンラインによる50名程度の意見交換と施設見学
- ・ バイオアッセイ対象核種、使用する分析設備の情報
- ・ 「緊急時のバイオアッセイでは、量よりも24時間回収することのほうが重要」
- ・ 「未知のバイオアッセイ試料*が到着したら、まず (試料の) 外部線量を測定し、 γ スペクトロメトリによる計測を行い、一定分量から液体シンチレーションカウンタを用いて α/β 核種の総量をスクリーニングする」

カナダ チョーク・リバー研究所

- ・ バイオアッセイ研究施設及び生物学研究施設を訪問
- ・ 「Puの分析に表面電離型質量分析装置 (TIMS) を用いて世界最小レベルの検出下限値を達成しており、フェントグラムレベルまで計測が可能。便中のPuも測定できる」
- ・ 「原子力発電所における α 線汚染事故に関する尿中Pu分析によるバイオアッセイを行ったことがある」

*未知のバイオアッセイ試料：試料中に含まれる放射性核種及びその放射能が不明なバイオアッセイ試料

2.1 得られた成果 (5/13)

○現地調査で得られた情報・知見 (一部)

仏放射線防護・原子力安全研究所 (IRSN)

- FONTENAY-AUX-ROSES地区のPARISIIプラットフォームとPATERSONプラットフォームの研究施設を見学
- 緊急時バイオアッセイの検出下限値は3日間あるいは5~6日間の迅速法を用いて2 mBq/sample、ルーチンは3週間で1 mBq/sample以下
- 「試料として尿と便のどちらを分析するかは、化学形態にもよるが、1F事故の場合は酸化物のため便のほうが良い」

デンマーク工科大学DTU Risø

- 重水炉の廃止措置やRI研究所の作業者の尿のルーチンバイオアッセイを行っており、スクリーニングとしての全 α 、全 β 、トリチウム (HTO、有機)、 γ 線放出核種 (I-125、Cs-137等)、 β 線放出核種 (C-14、Sr-90等)、 α 線放出核種 (まれに) を対象としている
- 検出下限値は要件によるが、トリチウム : 2 Bq/L、I-125 : 2~5 Bq /L、アクチニド : 0.1~1 mq/Lである

2.1 得られた成果 (6/13)

○収集した文献の整理

- 各文献で示された**検出下限値**のうち、尿ではBq/L、便ではBq/kgの単位で比較できるものを抽出し、核種毎に整理。
- 分析・測定法の妥当性を評価し、最も低い放射能濃度を測定可能な分析・測定法を集約。ただし文献に明示のないこともあるバックグラウンドや測定器の効率等の精査はしていない。

試料の種類	核種等	検出下限値 (文献)	検出下限値 (規格化)	文献
尿	トリチウム水	5 Bq/L	5 Bq/L	1-1
	有機トリチウム	1 Bq/L	1 Bq/L	1-1
尿	有機炭素-14	4 Bq/L	4 Bq/L	1-1
	無機炭素-14	1 Bq/L	1 Bq/L	1-1
便	Sr-90	8.00×10^{-2} Bq/sample	0.76 Bq/kg	1-2
尿	Sr-90	7.30×10^{-2} Bq/sample	0.146 Bq/L	1-2
便	I-131	0.058 Bq/g	58 Bq/kg	1-3
尿	I-131	12 Bq/L	12 Bq/L	1-4
便	Cs-137	0.062 Bq/g	62 Bq/kg	1-3
尿	Cs-137	7.2 Bq/L	7.2 Bq/L	1-5
便	U	1.0×10^{-3} Bq/sample	0.0095 Bq/kg湿	1-2
尿	U	0.1 mBq/L	1×10^{-4} Bq/L	1-6
尿	U-234	100 μ Bq/L	1.00×10^{-4} Bq/L	1-7
	U-235	2.4 μ Bq/L	2.4×10^{-6} Bq/L	1-7
	U-238	1.9 μ Bq/L	1.9×10^{-6} Bq/L	1-7

試料の種類	核種等	検出下限値 (文献)	検出下限値 (規格化)	文献
便	Pu	5.70×10^{-4} Bq/sample	5.43×10^{-3} Bq/kg湿	1-8
尿	Pu	0.005 Bq/sample	5.00×10^{-3} Bq/L	1-9
尿	Pu-238	5×10^{-3} Bq/L	5×10^{-3} Bq/L	1-6
	Pu-239	0.006 mBq/L	6×10^{-6} Bq/L	1-10
	Pu-240	0.015 mBq/L	1.5×10^{-5} Bq/L	1-10
	Pu-241	9.8 mBq/L	9.8×10^{-3} Bq/L	1-10
便	Am	1.20×10^{-3} Bq/sample	1.14×10^{-2} Bq/kg湿	1-2
尿	Am	1.2×10^{-3} Bq/sample	2.4×10^{-3} Bq/L	1-2
尿	Am-241	6×10^{-4} Bq/L	6×10^{-4} Bq/L	1-9
便	Cm-242	0.16 mBq	1.6×10^{-3} Bq/kg湿	1-11
	Cm-243+244	0.38 mBq	3.8×10^{-3} Bq/kg湿	1-11
尿	Cm-244	5 mBq/L	5×10^{-3} Bq/L	1-9

文献情報は次ページに記載

2.1 得られた成果 (7/13)

- 前ページの調査で対象とした文献

- 1-1 X. Hou, Health Phys. 101(2), 159-169 (2011)
- 1-2 J.-I. LEE, et al., Journal of Nuclear Science and Technology 45(S5), 205-208 (2008)
- 1-3 Y. Lee, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 243(2), 525-533 (2000)
- 1-4 B. M. Dantes, et al., Health Phys. 99(4),449-52 (2010)
- 1-5 J. Button, et al., Appl Radiat Isot. 175(1), 109824 (2021)
- 1-6 M. Vasile, et al., Appl Radiat Isot. 134(1), 455-460 (2018)
- 1-7 U. Oeu, et al., Radiat Prot Dosimetry 125(1-4), 444-8 (2007)
- 1-8 J. Klumpp, et al., Health Phys. 121(1), 73-76 (2021)
- 1-9 C. Li, et al., Health Phys. 99(5), 702-707 (2010)
- 1-10 F. Carvalho, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 280(2), 359-362 (2009)
- 1-11 A. Gagne, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 295, 477-482 (2013)

2.1 得られた成果 (8/13)

○収集した文献の整理

- 文献ごとの**迅速分析法の検出下限値**のうち、尿ではBq/L、便ではBq/kgの単位で比較できるものを抽出し、核種毎に整理。
- 分析・測定法の妥当性を評価し、迅速に分析が可能かつ低い放射能濃度を測定可能な分析・測定法を集約。(P28と同様、バックグラウンド等は未精査)

試料の種類	核種等	供試量	分析時間	測定時間 (分)	検出下限値	文献
尿	トリチウム	—	—	120	7 Bq/L	2-1
尿	C-14	—	90分	60	0.1 Bq/L	2-2
尿	Sr-90	—	2時間	—	68×10^{-3} Bq/L	2-3
便	U	0.15 g	11時間		0.7 mBq/Sample	2-4
尿	U	5 ml	24時間	—	2.8 (pg全ウラン)	2-5
便	Pu	-	5時間	—	0.018 Bq/L	2-6
尿	Pu	20 ml	8.5時間	30分	5.7×10^{-5} Bq/L (Pu-239)	2-7
					1.26×10^{-4} Bq/L (Pu-240)	
					7.68×10^{-2} Bq/L (Pu-241)	
便	Am	100 g	27時間	48時間	0.44×10^{-3} Bq	2-8
尿	Am	200 ml	8時間	240分	1.7×10^{-2} Bq/L	2-9
便	Cm	—	11時間		0.7 mBq/Sample	2-4
尿	Cm	—	2時間	数分	50 Bq/L (Cm-243)	2-10
					80 Bq/L (Cm-244)	

文献情報は次ページに記載

2.1 得られた成果 (9/13)

- 前ページの調査で対象とした文献

- 2-1 R.M. Mingote, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 269(2), 475-479 (2006)
- 2-2 J.-S. Oh, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 299, 187-191 (2014)
- 2-3 K. Shiraishi, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 273(2), 307-310 (2006)
- 2-4 S.L. Maxwell, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 298, 1533-1542 (2013)
- 2-5 U. Oeh, et al., Radiation Protection Dosimetry 125(1-4), 444-448 (2007)
- 2-6 C. Li, et al., J. Anal. At. Spectrom. 24(10), 1429-1433 (2009)
- 2-7 G. Yang, et al., Analytica Chimica Acta 1158, 338431 (2021)
- 2-8 A. Gagné, et al., J. Radioanal. Nucl. Chem. 295, 477-482 (2013)
- 2-9 X. Dai, et al., Health Phys. 101(2), 144-147 (2011)
- 2-10 M. Vasile, et al., Appl. Radiat. Isot. 134, 455-460 (2018)

2.1 得られた成果 (10/13)

○尿・便試料採取キットの新規開発

- 既存の採取キットについて、医療関係機関への聞き取りを実施
 - ✓ 全量採取を実施している機関は少ない
(放射能分析以外で全量が必要なケースはあまりない)
- 現在JAEAで使用している採取キットをベースにして改良を実施

改良のポイント (一部)

- ✓ 男女どちらも使用 (採取) が容易
- ✓ 分析作業者の (心理的) 負担軽減
- ✓ 前処理・分析における
安全性の担保およびコンタミ防止

既存のJAEA採取キット

- 和式/洋式トイレへ設置、男性メインの使用を想定



↑ 便試料採取キット



トイレ設置状態→
(便座の上の採取用PEシート)



↑ 尿試料採取キット

新規開発採取キット

便採取用磁製皿



バイオアッセイ対象者自身で便試料を封入することで外部から見えない運用を検討

黒ポリ袋↑

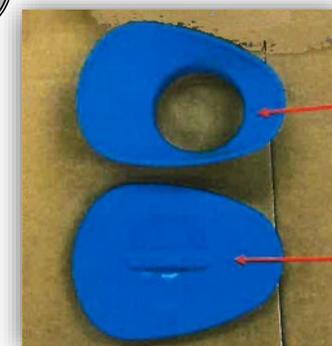
尿採取用PPボトル

新規開発アタッチメント(イメージ)



不透明PPボトル→

漏斗状の形状で男女ともに採取を容易に



アタッチメント

蓋

2.1 得られた成果 (11/13)

○分析設備の提案

試料の前処理

尿試料

- 通常の化学分析で使用する装置等があれば十分であり、特別なものは不要
- 前処理によって発生する臭気についても、環境試料によって発生する臭気と同等であり、特にその臭気を除去するための装置は不要

便試料

- 灰化が必要であり、このためには、600℃程度まで加熱できる電気炉あるいはマイクロウェーブ分解装置が必要
- 加熱途中で発生する臭気については悪臭の原因となるものであり、これらの排気が環境へ排出される前に、排ガス処理装置を設置する等の対策が必要
- 臭気対策を国内外の研究機関で調査したが、その対策が必要なことは認識しているものの、具体的な対策を行っている機関はなし
- JAEAサイクル研ではアフターバーナーにより臭気対策を実施
- 光触媒式排気ガス処理装置等も販売されており、これらの導入もその対策としては有効

2.1 得られた成果 (12/13)

○分析設備の提案

・ 設備：

- | | |
|------------------|----------------|
| ・ 排風機に接続された分析フード | ・ 冷暖房を具備した給気装置 |
| ・ (超) 純水の供給装置 | ・ 分析器具等を洗浄する流し |
| ・ 実験台等の大型設備 | |

- ・ **分析室**：目的核種毎に区別した部屋を用意することが理想的であるが、最低限としては α 線放出核種、 β 線放出核種の区別が必要
- ・ **ガラス器具等**：分析対象核種に応じて準備をすることが必要
- ・ **薬傷対策**：薬傷等の災害が発生した際に対処するための器具等の準備が必要
- ・ **火災対策**：消火器は、使用する薬品に適したものを整備
- ・ **安全データの整備等**：使用する化学薬品に応じて、安全データシートの整備、特殊健康診断や環境測定等が必要
- ・ **使用許可等**：放射性同位元素あるいは核燃料物質を使用することから、それらの手続き等は法令等に照らし合わせた対応が必要

2.1 得られた成果 (13/13)

○分析設備の提案

測定機器

- 化学分析回収率及び放射能濃度を定量的に評価するために、目的に応じて下記の測定機器等を整備することが必要

①電子天秤	⑧誘導結合プラズマ発光分光分析装置 (ICP-OESあるいはICP-AES)
②全α放射能測定装置	
③全β放射能測定装置	⑨原子吸光光度計 (AAS)
④Si半導体測定装置	⑩誘導結合プラズマ質量分析装置 (ICP-MS)
⑤β線スペクトロメーター	⑪表面電離型質量分析装置 (TIMS)
⑥液体シンチレーション測定装置	⑫加速器質量分析装置 (AMS)
⑦Ge半導体測定装置	⑬二次イオン質量分析装置 (SIMS)

2. 実績

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	
<ul style="list-style-type: none"> ・国内外における国際標準分析法、国内標準分析法の制定状況、放射線業務従事者の内部被ばく事故時に適用された評価方法及びその結果（科学論文、技術資料を含む）の調査 ・バイオアッセイに必要な採取、分析、測定に係る方法及び必要な設備に関する検討 	3 (応用研究)	4 (実用化研究)	4 (実用化研究)	○

目標：

廃炉を進めるうえで必要となるバイオアッセイに関する情報を総合的に整理する。また、採取キット等の実用化試験を行う。これらにより、バイオアッセイを迅速かつ効率的に実現する採取・分析・測定方法及び分析設備の詳細を提案する。

終了時自己評価：

バイオアッセイに関する情報を国内外から収集し、整理した。これをもとにバイオアッセイを迅速かつ効率的に実現する採取・分析・測定方法を評価検討し、1Fで実施可能な分析方法の詳細を提案できた。

3. 今後の課題

- 技術成熟度の更なる向上等のためには、以下の課題の解決が望まれる。
 - ・文献調査で選定された分析・測定法の実用性検証
 - ・便の前処理により発生する臭気対策の確立
 - ・自動系統分析システムの構築
 - ・様々な測定機器（例：小型加速器質量分析装置）の適用可能性の検証

事業内容

a) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

- ① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討
- ② ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上
- ③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認

b) 内部取り込みに対する防護に係る技術開発

- ④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化
- ⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

c) 内部被ばく対応システムの開発

- ⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発

1 概要

1.1 目的

- (1) ろ紙試料（空気ろ紙、スミヤろ紙等）に付着した α 核種や β 核種の放射能測定の精度を把握し、精度向上のための方法を検討
- (2) ろ紙の材質や形状の違いによる影響を評価するとともに測定の容易さ及び迅速性に重点を置いた新たな鼻スミヤろ紙のデザインを検討

1.2 実施事項と目標

内容	技術成熟度 (TRL)	
	現状評価	終了時目標
(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさ評価	1 (基礎研究)	3 (応用研究)
(2) 鼻スミヤ測定に係るデザインの検討	1 (基礎研究)	3 (応用研究)

終了時目標：

本事業の実施により、(1),(2)いずれの項目についても従来の経験、知見を踏まえた適切なエンジニアリングを進行させ、実用化の手前の段階まで到達することを目指す。

2. 実績

2.1 得られた成果（概要） ※詳細は次ページ以降

○ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価

- ・ろ紙の放射能測定におけるダスト・水の影響を評価し、ダスト量・水分量と放射能の減衰率の関係を求め、測定における不確かさを調査した。
- ・ろ紙試料を直接放射能測定装置で測定した値と試料を破壊分析後に測定した値を比較し、測定の不確かさがどれだけ変わるかを調査した。
- ・ γ 線核種分析装置を用いた混合汚染の測定及び核種判定に要する時間の目安を調査した。

○鼻スミヤ測定に係るデザイン検討

ろ紙の材質や形状の違いによる影響を評価するとともに測定の容易さ及び迅速性に重点を置いた新たな鼻スミヤろ紙のデザインを検討し、考案した。

2.1 得られた成果(1/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価

－1F 原子炉建屋内のモニタリング環境（ホコリ・水）の確認



1F 原子炉建屋で採取したスマヤろ紙の写真 → どれもホコリが目立つ

低レベルの α 線・ β 線の測定は困難か
→ γ 線核種分析装置の活用

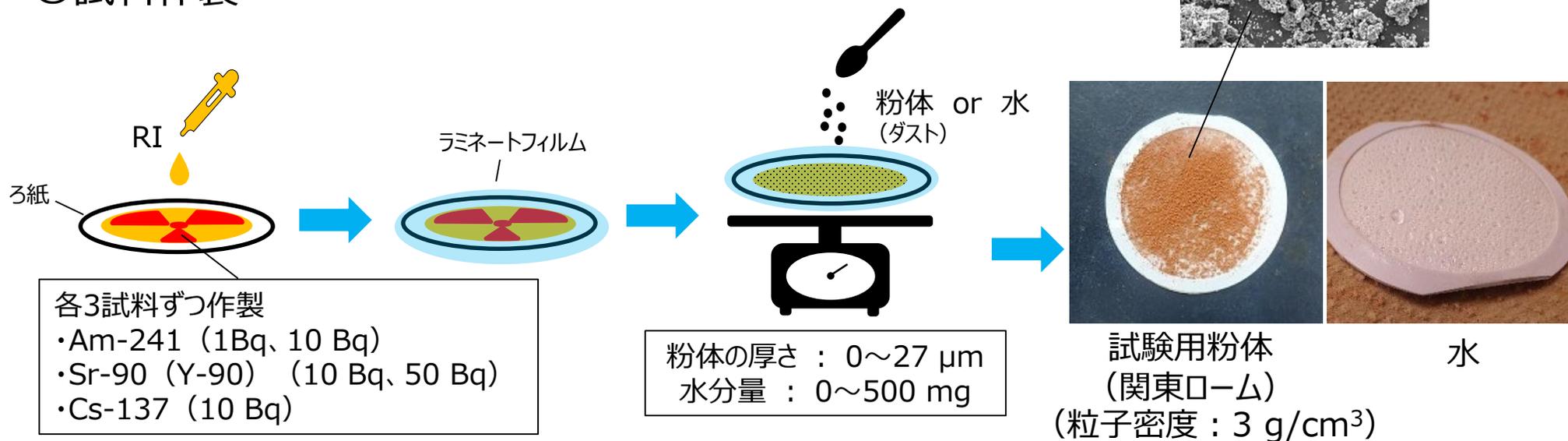
○素材，ふき取り方法等に起因するふき取り効率の差異については、
既存の研究*を参考とする。（本事業では新たな試験等を行わない）。

*杉浦紳之ら、表面汚染密度測定におけるスマア法のふき取り効率に影響する要因分析、保健物理42(3) 214-220,2007
など

2.1 得られた成果(2/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 －放射能測定におけるダスト・水の影響①

○試料作製



○使用線源

Am-241

半減期 : 432.6年

主なエネルギー (α) : 5.486 MeV

Sr-90 (Y-90)

半減期 : 28.79年

主なエネルギー (β) : 2.280 MeV

Cs-137

半減期 : 30.08年

主なエネルギー (β) : 0.514 MeV

2.1 得られた成果(3/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 －放射能測定におけるダスト・水の影響②

○測定方法

- ・型式：JDC-R74-3000R1
- ・機器効率： α -58.2%
 β -43.5%
- ・測定回数：各条件で5回
- ・測定時間：2分間（BG測定：10分間）



放射能測定装置

○評価方法

作製した模擬汚染試料を放射能測定装置で測定し、粉体・水分がない試料の計数値を100%とした際に、粉体・水分を塗付した試料の計数値がどのように変化するかを減衰率として算出し、ダスト・水の影響を評価した。

$$\text{減衰率} = \frac{\text{塗付量を変化させたろ紙の計数値}}{\text{塗付なしのろ紙の計数値}} \times 100(\%)$$

2.1 得られた成果(4/24)

- (1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価
－放射能測定におけるダスト・水の影響③

○検討した不確かさ

- ・計数に係る不確かさ

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{S}{t_s^2} + \frac{B}{t_b^2}} \times \frac{100}{E}$$

- ・ S : 試料の計数値 (count)
- ・ B : BG (count)
- ・ t_s : 試料の計数時間 (s)
- ・ t_b : BG計数時間 (s)
- ・ E : 機器効率×線源効率

- ・繰り返し測定による不確かさ

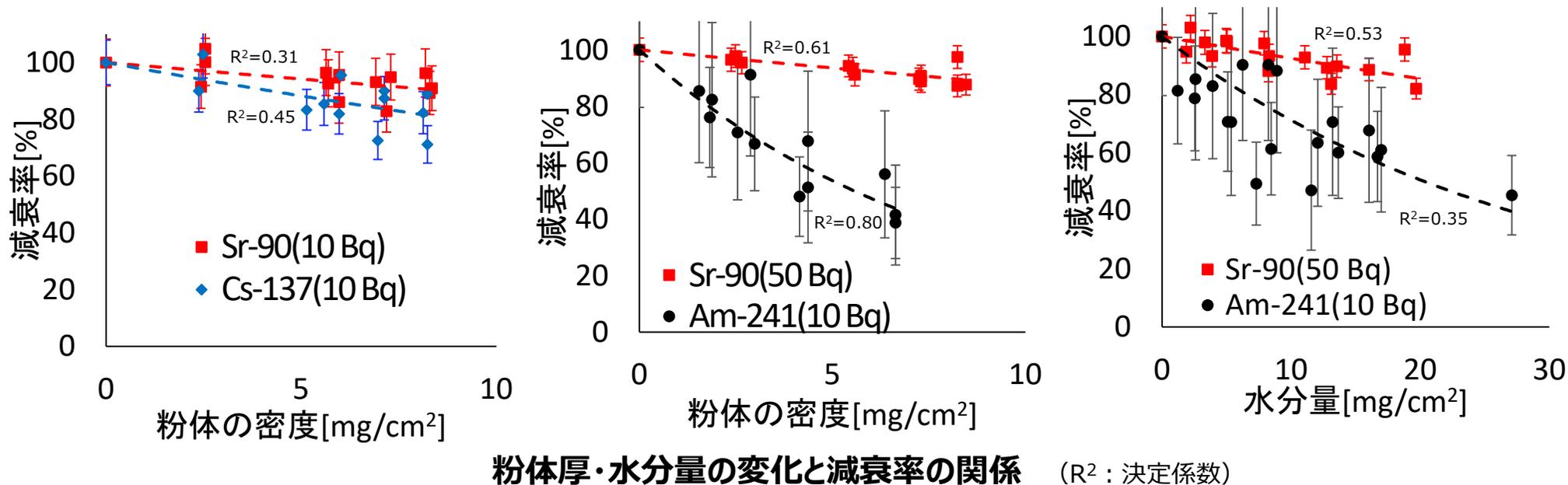
標準偏差を使用

- ・校正用線源の放射能の不確かさ

放射能測定装置の校正に使用した標準線源の校正証明書に記載

2.1 得られた成果(5/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 －放射能測定におけるダスト・水の影響④

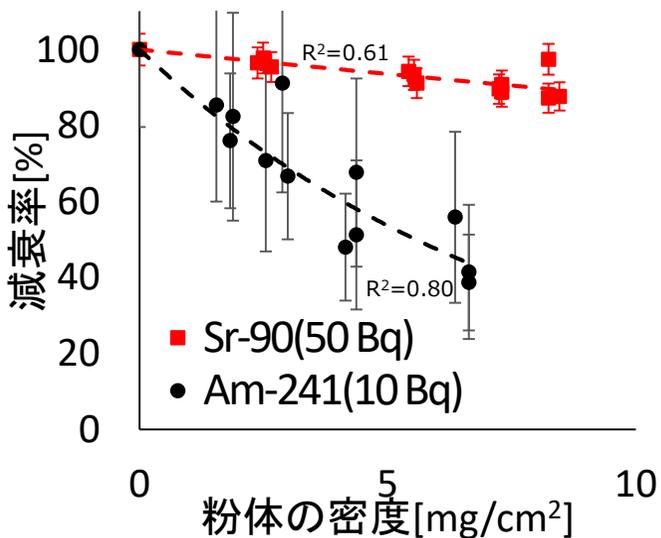


- Am-241 (1 Bq) に関しては少量の粉体で検出下限値 (0.2 Bq) 未満となった。
- α線測定はβ線測定と比べて、粉体・水分による影響を大きく受ける。
- β線はエネルギーが高いものほど粉体の影響を受けない。
- β線も減少傾向がみられることから、多量の粉体・水分ではその影響を考慮する必要がある。

2.1 得られた成果(6/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 – 放射能測定におけるダスト・水の影響⑤

粉体厚・水分量を変化させたる紙測定に係る相対不確かさの評価



粉体厚の変化と減衰率の関係
 (R²: 決定係数)

項目	α線測定 (Am-241)	β線測定 (Sr-90)
計数に係る 不確かさ	10.1～21.9%	1.7～4.4%
校正用線源に係る 不確かさ	1.1%	1.5%
合成拡張不確かさ (k=2)	20.4～43.9%	4.0～4.4%

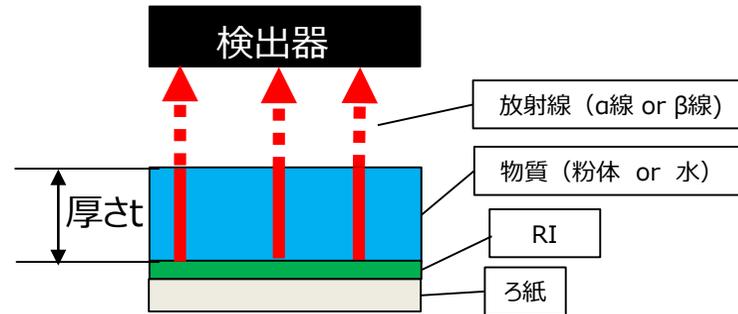
・α線測定はβ線測定と比べて、計数に係る不確かさによる不確かさが大きいいため、合成不確かさが大きい。

2.1 得られた成果(7/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 – 放射能測定におけるダスト・水の影響⑥

○測定試験結果と理論式の比較

理論式を用い、模擬汚染試料（ろ紙）の上にある厚さ t の物質（粉体or水）を放射線が透過したときの計数の減衰率 C_a を算出した。その結果と前ページの試験結果を比較した。



○理論式

α線の減衰率*1

$$C_a = 1 - (t/2R) \quad \cdot C_a : \text{減衰率} \quad \cdot R : \alpha\text{線}(Am-241)\text{の最大飛程} (mg/cm^2) \quad \cdot t : \text{物質の厚さ} (mg/cm^2)$$

$$R_1/R_0 \cong (\rho_0 \sqrt{A_1}) / (\rho_1 \sqrt{A_0}) \quad \cdot \rho : \text{密度} (g/cm^3) \quad \cdot A : \text{原子量} (\text{添字}0,1\text{はそれぞれの物質に対応})$$

$$R_c = M_c / \sum_i n_i \left(\frac{A_i}{R_i} \right) \quad \cdot R_c : \text{化合物材料中の飛程} (mg/cm^2) \quad \cdot R_i : \text{元素}i\text{中の飛程} (mg/cm^2)$$

$\cdot n_i : \text{分子中における元素}i\text{の原子数} \quad \cdot A_i : \text{元素}i\text{の原子量} \quad \cdot M_c : \text{化合物の分子量}$

β線の減衰率*2

$$C_a = e^{-\mu t} \quad \cdot C_a : \text{減衰率} \quad \cdot t : \text{物質の厚さ} (mg/cm^2)$$

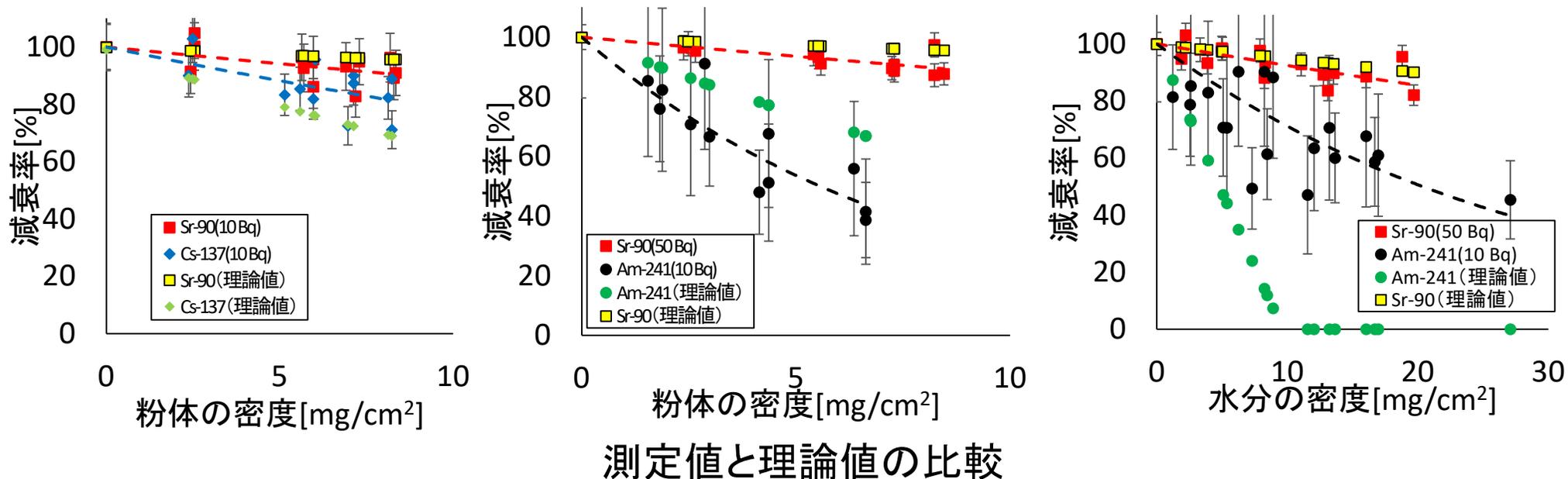
$$\mu = 0.017E^{-1.43} \quad \cdot \mu : \text{吸収係数} (cm^2/mg) \quad \cdot E : \text{最大エネルギー} (MeV)$$

*1 : 伊知地ら、炭素鋼及びステンレス鋼に発生したさびの放射線計数効率への影響、保健物理48(4) 171-179, 2013

*2 : 「アイソトープ手帳 12版」公共社団法人日本アイソトープ協会

2.1 得られた成果(8/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 －放射能測定におけるダスト・水の影響⑦



・β線の測定では、概ね理論値は測定値の不確かさの範囲内であったが、α線の測定では、測定値と理論値で大きく差が生じた。このことから、理論式で仮定したダストや水の状況と実際の測定状況が異なると考えられる。

⇒理論式から実際の測定結果を推定することは困難であることから、ろ紙試料の状態（ダスト・水の付着状況）をより正確に再現可能な計算コード等を用いた再検証が必要と考える。

2.1 得られた成果(9/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 －放射能測定におけるダスト・水の影響⑧

○成果

- α 線、 β 線ともに粉体・水分の量が大きくなるほど、放射能が減少することを確認した。
- α 線測定は β 線測定と比較して、計数に係る不確かさ及び繰り返し測定による不確かさが大きく、合成不確かさが大きくなることを確認した。

○考察

- α 線測定はわずかな水分量でも影響を受け、汚染を検出できない可能性があるため、試料を乾固させることが重要である。
- β 線測定では粉体・水分からの影響は小さいが、放射能は減衰は無視できないことから、粉体厚・水分量を加味した評価が必要である。

○課題

- 水、粉体が共存した場合の影響の評価。
- ろ紙試料の状態（ダスト・水の付着状況）をより正確に再現可能な計算コード等を用いた再検証。
- 今回得られた結果の現場（1F）での妥当性評価。

2.1 得られた成果(10/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価

－ γ 線核種分析装置を用いた混合汚染の測定①

**Am-241のスペクトルピークは、
Cs-137のスペクトルで隠れてしまわないか？**

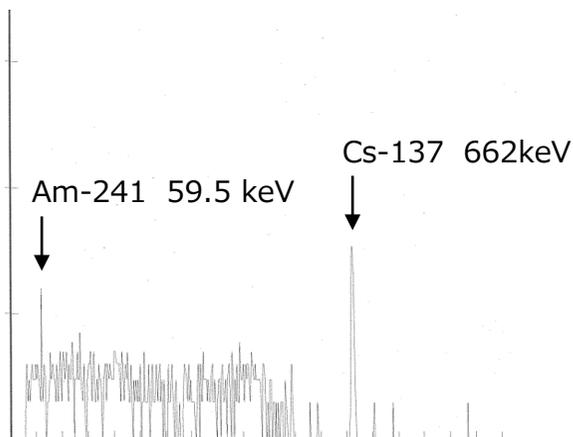
※ どのAm-241試料も単独では検出可能

使用した γ 線核種分析装置

型名：GL3825R

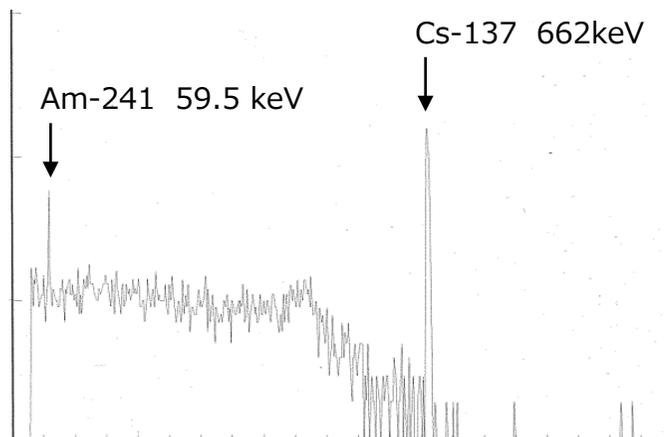
低エネルギー側：3keVから測定可能

Am-241試料 3.0 Bq
Cs-137線源 100 Bq



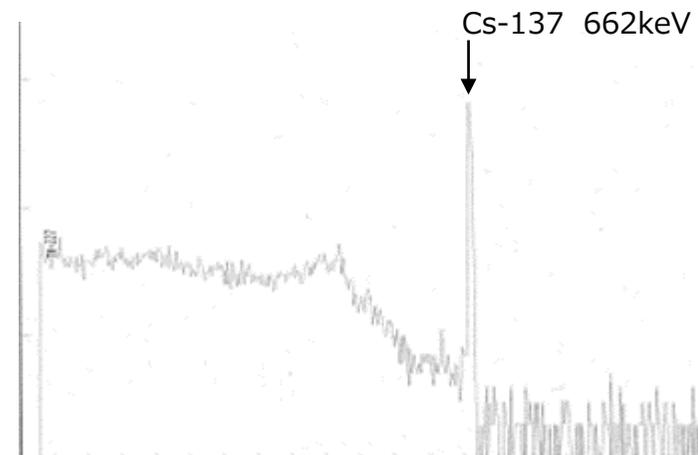
130秒で検出された

Am-241試料 1.5 Bq
Cs-137線源 100 Bq



642秒で検出された

Am-241試料 0.6 Bq
Cs-137線源 100 Bq



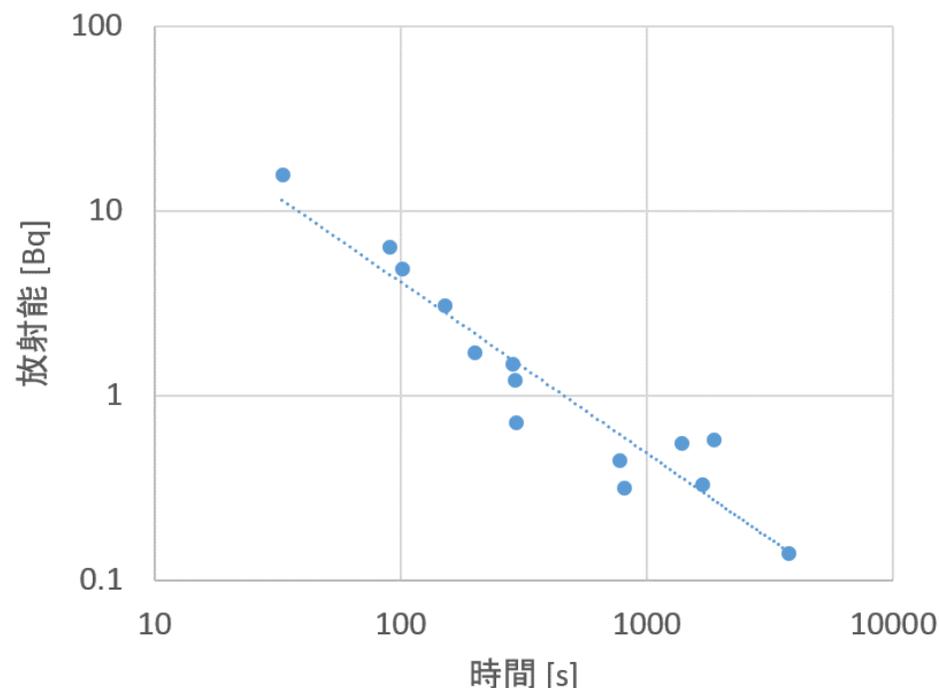
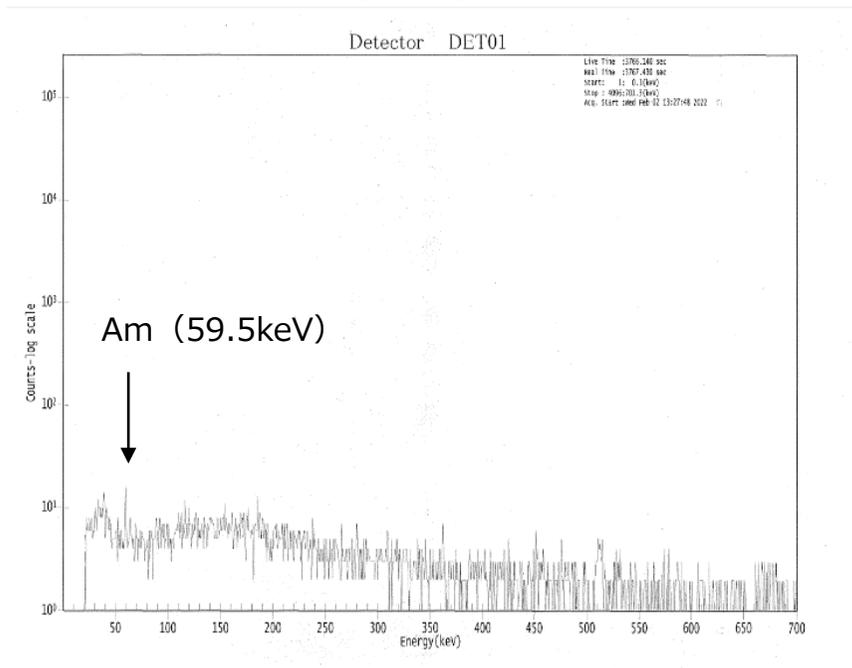
3000秒でも検出されず

2.1 得られた成果(11/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価

－ γ 線核種分析装置を用いた混合汚染の測定② 核種判定に要する時間調査

JAEAのMOX燃料取扱施設で採取した空気ろ紙試料（Am-241）を γ 線核種分析装置で測定し、ピーク判定に係る時間と放射能（ α 線）の関係を記録。



約0.2Bqの試料では、ピーク判定までに1時間以上（約4000秒）を要した。

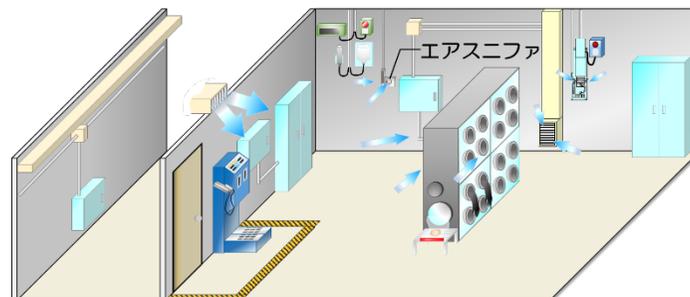
2.1 得られた成果(12/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 –破壊分析①

試料を直接放射能測定装置で測定した値と試料を破壊分析後に測定した値を比較し、測定の不確かさがどれだけ変わるかを調査する

分析試料情報

試料名	採取場所
スマヤろ紙A	床
スマヤろ紙B	
スマヤろ紙C	監視盤
空気ろ紙A	エアスニファに設置
空気ろ紙B	
空気ろ紙C	



ろ紙試料採取工程室イメージ（MOX燃料取扱施設）

空気ろ紙・スマヤろ紙

全α放射能測定※
（非破壊）
（ZnSシンチレーション検出器）

※採取後、時間を置いて測定しているため、ラドン・トリウム等の影響はない

α核種分析
（破壊分析）
（Si半導体検出器）

放射能及び不確かさの比較

不確かさの評価項目

評価項目	非破壊測定	破壊分析後の測定
計数に係る不確かさ	○	○
繰り返し測定による不確かさ	○	○
校正用線源の放射能の不確かさ	○	○
トレーサーの放射能の不確かさ	○	○
核種データの不確かさ	○	○

拡張不確かさはk=2とする

2.1 得られた成果(13/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 ー破壊分析②

○検討した不確かさ

• 計数に係る不確かさ

◎ 全α放射能測定

$$\sigma_A = \sqrt{\frac{S}{t_s^2} + \frac{B}{t_b^2}} \times \frac{100}{E}$$

- S : 試料の計数値 (count)
- B : BG (count)
- t_s : 試料の計数時間 (s)
- t_b : BG計数時間 (s)
- E : 計数効率

◎ α核種分析

$$\sigma_N = \sqrt{N}$$

- N : 試料のグロス計数値 (count)

• 繰り返し測定による不確かさ

標準偏差を使用

• 校正用線源の放射能の不確かさ

検出器の校正に使用した標準線源の校正証明書に記載

2.1 得られた成果(14/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 ー破壊分析③

○検討した不確かさ

- トレーサーの放射能の不確かさ

使用した標準線源の校正証明書に記載された不確かさと、測定時のトレーサーピークの計数値の不確かさの合成

- 核種データの不確かさ

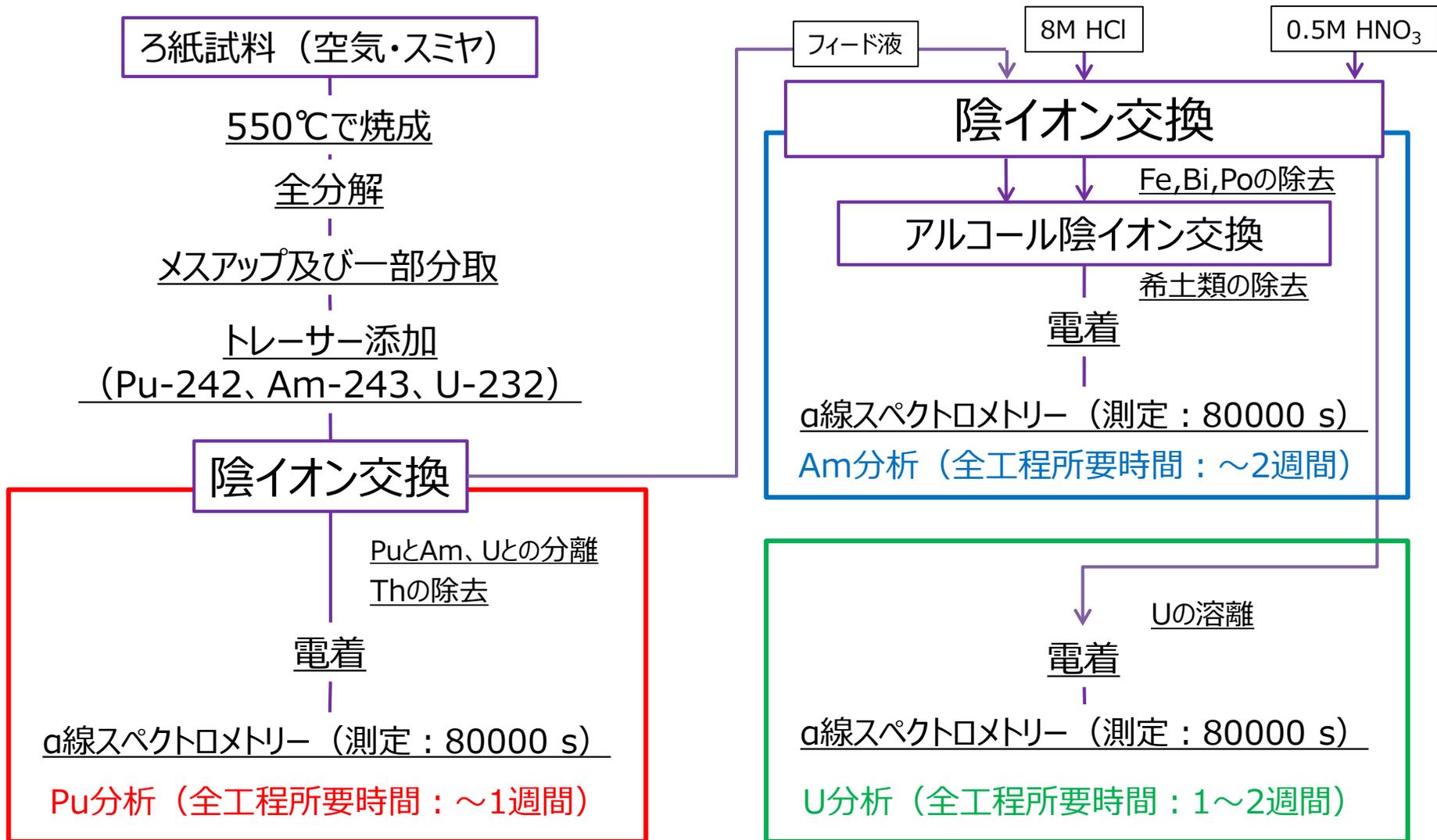
トレーサー核種を含む対象核種の半減期に係る不確かさ

※ENSDF(Evaluated Nuclear Structure Data File

<https://www.nndc.bnl.gov/ensdfarchivals/>) の値を使用

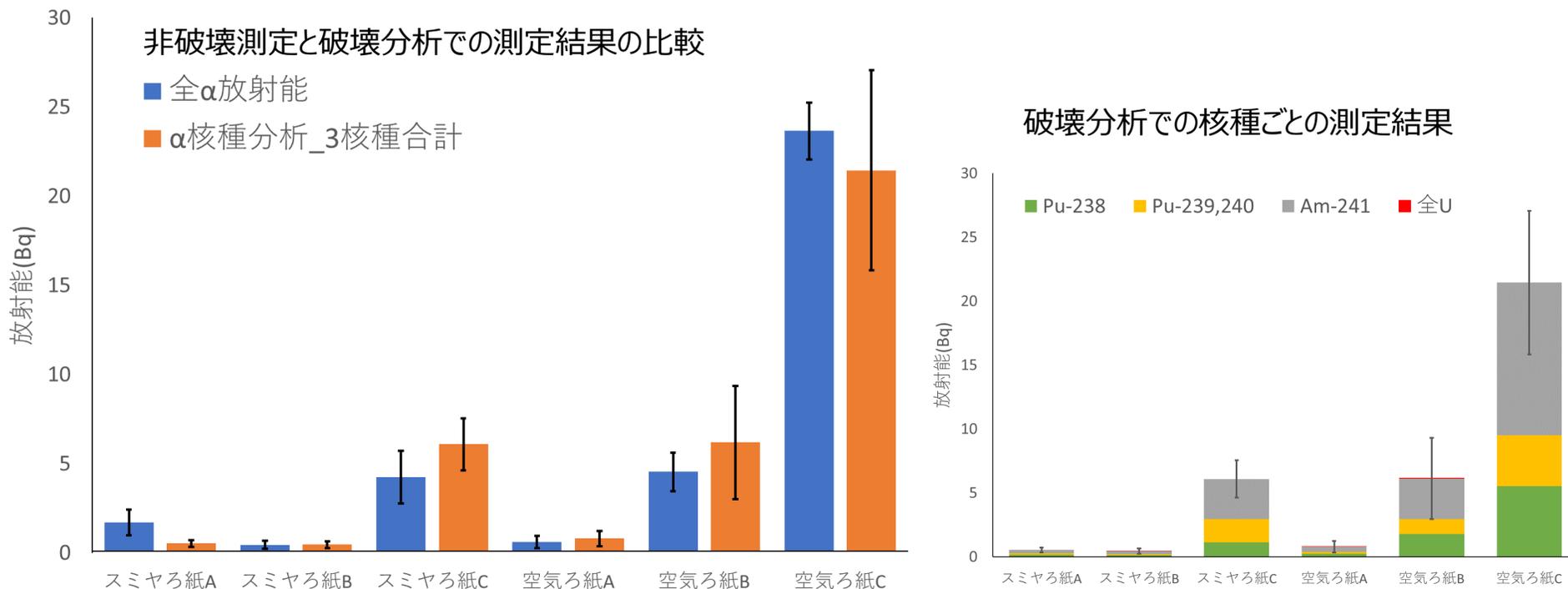
2.1 得られた成果(15/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 ー破壊分析④



2.1 得られた成果(16/24)

(1) ろ紙測定に係る精度・不確かさの評価 ー破壊分析⑤



- 全α放射能とα核種分析の結果は、1試料を除き、不確かさの範囲で一致した。
 - 破壊分析により、含まれる核種は明確化できたが、分析時間を要する。
 - 放射能が高い試料では、α核種分析の方が不確かさが大きくなった。
- 試料の希釈により、不確かさが大きくなった。
濃度の高い試料では非破壊での測定が不確かさは小さい。

2.1 得られた成果(17/24)

(2) 鼻スミヤ測定に係るデザイン検討①

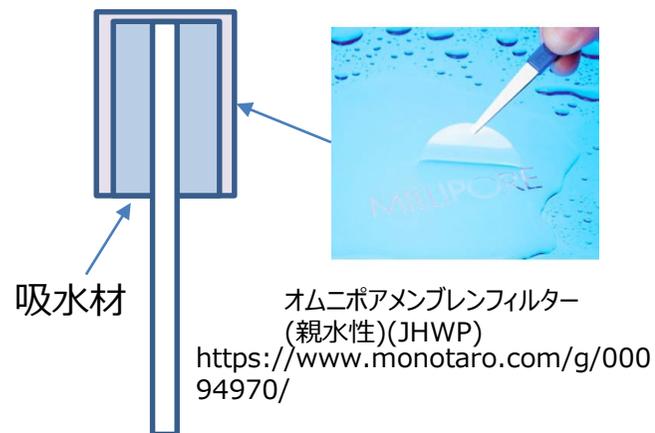
ろ紙の材質や形状の違いによる影響を評価するとともに測定の容易さ及び迅速性に重点を置いた新たな鼻スミヤろ紙のデザインを検討

- ・乾燥処理時間を軽減する素材等の検討
水分を容易に吸水
⇒ 吸水材
ダストをろ紙「表面」にとどめる
⇒ 親水性メンブレン

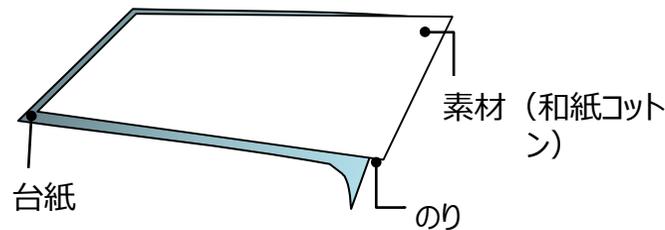


現在の鼻スミヤ試料採取

作製・成果：メンブレンが水を通し、吸水材による吸水は確認できたが鼻スミヤとして加工が困難



- ・ろ紙の試料調整を簡易化
⇒ ろ紙をシール化



2.1 得られた成果(18/24)

(2) 鼻スミヤ測定に係るデザイン検討②

考案した鼻スミヤろ紙と従来の鼻スミヤろ紙の比較を実施する。

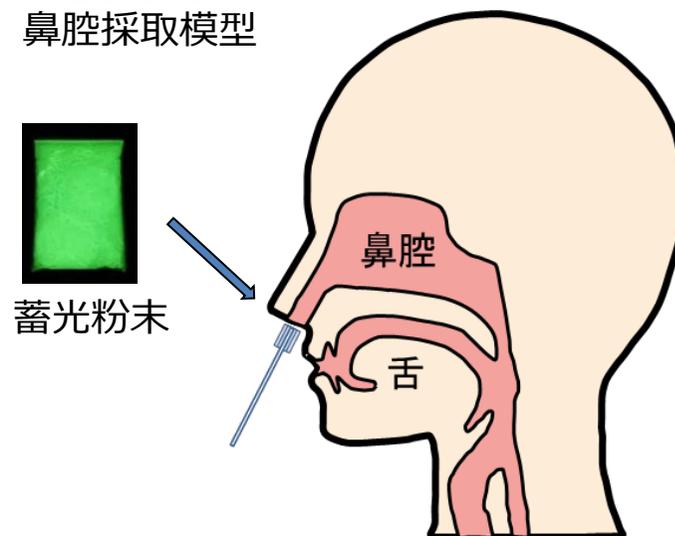
試験①：ろ紙乾燥時間の比較試験
⇒ろ紙を湿らせた時に乾燥するまでの時間を比較する。

試験②：ろ紙測定に要する時間の比較試験
⇒採取してから測定するまでに要する時間を比較する。

試験③：付着度合い比較試験
⇒鼻腔採取模型の鼻腔内に蓄光粉末を吹き付け、従来の鼻スミヤろ紙と考案した鼻スミヤろ紙で採取した時の付着度合いを比較する。



鼻腔採取模型

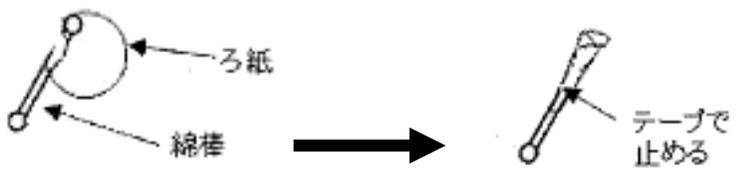
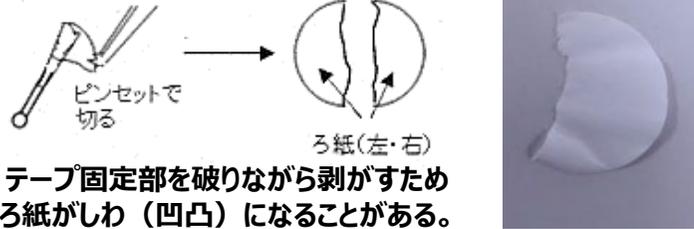


蓄光粉末

試験③のイメージ図

2.1 得られた成果(19/24)

(2) 鼻スミヤ測定に係るデザイン検討③

	鼻スミヤ作製	ろ紙測定のための調整
考案品	 <p>シール型ろ紙 (20mm×40mm×10枚 (1シート))</p>	
現行品		 <p>テープ固定部を破りながら剥がすためろ紙がしわ(凹凸)になることがある。</p>
成果	作製を容易にした	<ul style="list-style-type: none"> 綿棒から剥がしが容易。 しわ(凹凸)にならない。→精度高く測定可能

試験①：ろ紙の乾燥時間については、考案品と現行品ともに同等であった。

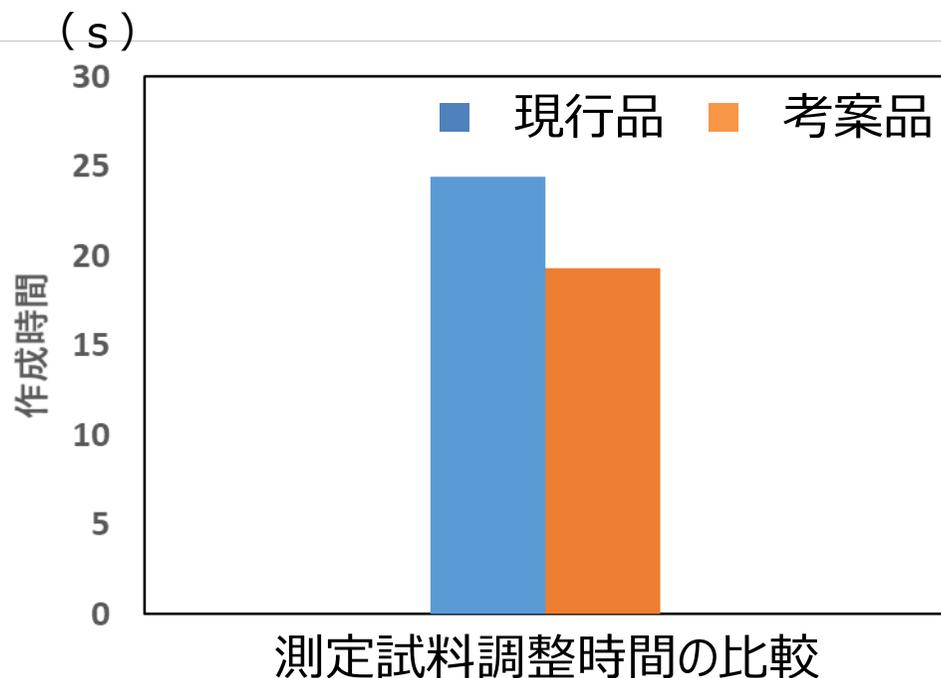
試験②：鼻スミヤろ紙の作製及び測定のための調整を容易にし、時間を短縮。

2.1 得られた成果(20/24)

(2) 鼻スミヤ測定に係るデザイン検討④

試験②（ろ紙測定のための調整時間の比較 I）

試験者30名の現行品と考案品それぞれの調整時間の平均値を比較した



測定試料調整時間の比較

	現行品	考案品
調整時間(s)	24.4	19.3
標準偏差	12.0	7.92
変動係数	0.49	0.41
n	30	

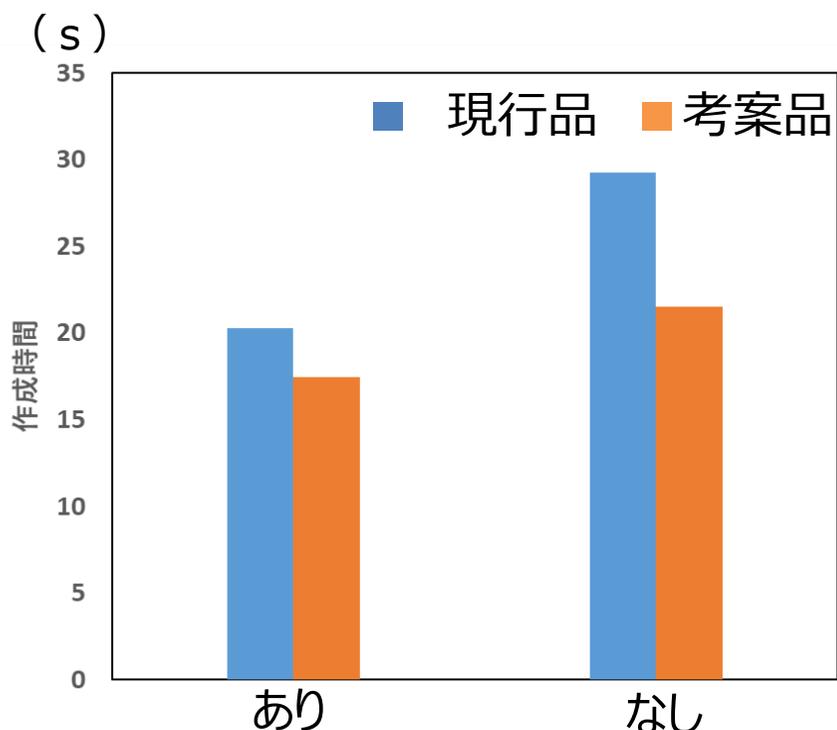
現行品と比較して考案品は測定試料の調整時間が短縮される結果となった

2.1 得られた成果(21/24)

(2) 鼻スミヤ測定に係るデザイン検討⑤

試験②（ろ紙測定のための調整時間の比較Ⅱ）

試験者を測定試料の調整経験の有無で分け、調整時間(平均値)を比較した



試料調整経験の有無による調整時間の比較

試料調整経験の有無による調整時間の比較

調整経験あり	現行品	考案品
調整時間(s)	20.3	17.4
標準偏差	9.91	8.83
変動係数	0.49	0.50
n	16	
調整経験なし	現行品	考案品
調整時間(s)	29.2	21.5
標準偏差	12.4	6.04
変動係数	0.42	0.28
n	14	

考案品は調整経験がない群においてある群と比較し大きく調整時間が短縮される結果となった

2.1 得られた成果(23/24)

(2) 鼻スミヤ測定に係るデザイン検討⑦

試験③（鼻腔採取模型を用いた試験）

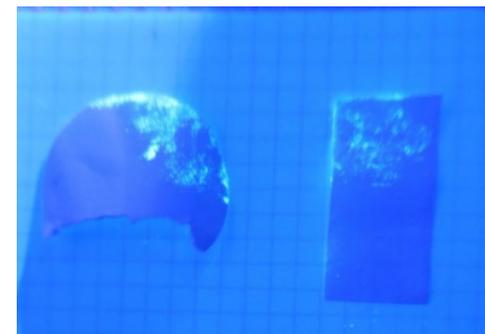


鼻腔採取模型



鼻腔に蓄光粉末を塗付

採取
➔



現行品

考案品
(シールろ紙)

ろ紙に付着した蓄光粉末の発光

ろ紙タイプ	発光量 (輝度)
現行品	19.853
考案品(シールろ紙)	20.190

- ・考案品の鼻スミヤは現行品の鼻スミヤと同程度に付着できることが確認できた。
- ・人による採取のばらつきは課題

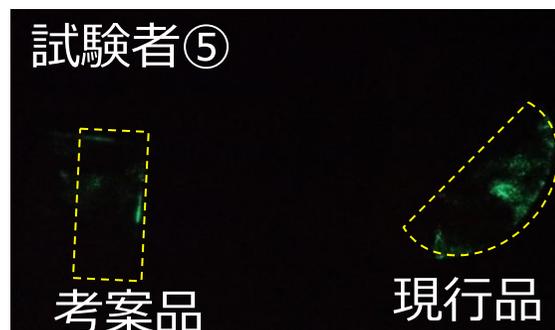
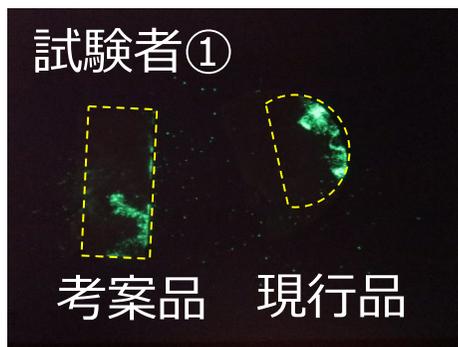
2.1 得られた成果(24/24)

(2) 鼻スミヤ測定に係るデザイン検討⑧

試験③（鼻腔採取模型を用いた試験の人によるバラつき）

試験者10名により現行品と考案品にて鼻スミヤ採取試験を実施し、蓄光粉末の付着量を発光量（輝度）として求めた

試験者	発光量(輝度)									
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
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

⇒ばらつきが少なくなるような採取方法の検討が必要

2. 実績

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) ろ紙測定に係る精度・不確かさ評価	1 (基礎研究)	3 (応用研究)	3 (応用研究)	○
(2) 鼻スミヤ測定に係るデザインの検討	1 (基礎研究)	3 (応用研究)	3 (応用研究)	○

目標：

本事業の実施により、(1)(2)いずれの項目についても従来の経験、知見を踏まえた適切なエンジニアリングを進行させ、実用化の手前の段階まで到達することを目指す。

終了時自己評価：

ろ紙測定における精度・不確かさを確認することができた。また、測定の容易さ及び迅速性に重点を置いた、新たな鼻スミヤろ紙のデザインを考案することができた。

内部被ばく評価において、ろ紙に付着した放射性物質の測定は必須のモニタリングであり、被ばく線量の測定・評価及び被ばく時の医療介入の観点から、その測定を迅速にかつ精度よく実施することは重要であることから、価値ある成果を得ることができた。

3. 今後の課題

○放射能測定におけるダスト・水の影響

- 水、粉体が共存した場合の影響の評価。
- ろ紙試料の状態（ダスト・水の付着状況）をより正確に再現可能な計算コード等を用いた再検証。
- 今回得られた結果の現場（1F）での妥当性評価。

○破壊分析

- 内部被ばく評価に係る核種組成の把握のための破壊分析が必要な場合は、その分析の迅速性の向上が求められる。

○鼻スミヤ

- 人によるばらつきが少なくなるような採取方法の検討。

事業内容

a) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

- ① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討
- ② ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上
- ③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認**

b) 内部取り込みに対する防護に係る技術開発

- ④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化
- ⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

c) 内部被ばく対応システムの開発

- ⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発

1.概要

1.1 目的

- (1) 体外計測に係る装置及び手法を対象とした国内外の規格等を調査し、装置の性能を評価するための試験方法、解析方法等を現場に適用するにあたっての課題を抽出し、体外計測器の運用に必要な情報を整理する。
- (2) 体外計測装置の計算モデルを構築し、シミュレーションにより体内に残留する核種の種類・強度・数・位置等のパラメータを変化させて体内残留量測定の不確かさ評価を実施し、測定における課題を整理する。

1.2 実施事項と目標

内容	技術成熟度 (TRL)	
	現状評価	終了時目標
(1) 体外計測法に関する国内規格、国際規格の整理及び課題抽出	3(応用研究)	4(実用化研究)
(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理	3(応用研究)	4(実用化研究)

終了時目標：

- (1) 体外計測装置の運用に関して必要な情報がレビューされ、整理されている。
- (2) 体内残留量測定に係る不確かさが評価され、測定における課題が整理されている。

2. 実績

2.1 得られた成果 ※詳細は次ページ以降

- (1) 体外計測法にする国内規格、国際規格の整理及び課題抽出
 - ・ 体外計測法に係る文献について調査し、体外計測装置の校正方法、解析方法等の運用に関して必要な情報を体外計測ハンドブック（仮称）として整理した。

- (2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理
 - ・ 測定に係る不確かさ評価のため、モンテカルロシミュレーションを用いたモデル計算及び検証試験を行った。
 - ・ 文献調査、モデル計算及び検証試験の結果をもとに、不確かさを整理し、寄与の大きい要因について肺モニタ測定における課題として整理した。

(1) 体外計測法に関する国内規格、国際規格の整理
及び課題抽出

2.1 得られた成果 (1/20)

(1) 体外計測法に関する国内規格、国際規格の整理及び課題抽出

○調査対象文献

以下の4編を調査し、体外計測装置の校正方法、解析方法等の運用に関して必要な情報を体外計測ハンドブック（仮称）として整理した。

• **In Vivo Monitoring Program Manual, PNL-MA-574, PNNL-19516, Rev.5**

⇒米国ハンフォードにおける体外計測法マニュアル。体外計測装置、測定手法、解析などが網羅的に記載されている。

• **ICRU REPORT 69, Direct Determination of the Body Content of Radionuclides**

⇒国際放射線単位測定委員会から出版された体外計測法のレポート。体外計測装置、測定手法、解析などが網羅的に記載されている。

• **ANSI/HPS N13.30 2011 Edition, Performance Criteria for Radiobioassay**

⇒米国国家規格協会・米国保健物理学会から出版された体外計測法及びバイオアッセイ法に係る規格。

• **IEC 61582, Radiation protection instrumentation – In vivo counters –**

⇒国際電気標準協会から出版された体外計測機器に係る規格。

以下の2編を調査し、先行研究にて得られているデータを本研究の不確かさ評価へ引用した。

• **EURADOS Report 2013-01 IDEAS Guidelines (Version 2) for the Estimation of Committed Doses from Incorporation Monitoring Data**

⇒欧州線量評価委員会から出版された内部被ばく線量評価のガイドライン。

• **NCRP REPORT No.164 UNCERTAINTIES IN INTERNAL RADIATION DOSE ASSESSMENT**

⇒米国放射線防護審議会から出版された内部被ばく線量評価における不確かさ要因をまとめたレポート。

2.1 得られた成果 (2/20)

(1) 体外計測法に関する国内規格、国際規格の整理及び課題抽出

○文献調査結果のまとめ方

- 東京電力のニーズ（不確かさ評価の結果や抽出された課題に加えて、技術的な提案や改善策などを盛り込み、より現場で活かせる形に整理したアウトプットが必要）を踏まえて、以下の文献調査のまとめ方を検討した。
- 文部科学省及び原子力規制庁制定の放射能測定法シリーズ「No.7 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」の構成を参考にし、ハンドブック形式に技術情報を整理



文書構成を
参考にする

本研究のアウトプット（技術情報の整理）のイメージ

体外計測ハンドブック（仮称）

- ・序論
- ・用語及び略語の解説
- ・γ線測定の基本原則
- ・測定機器
- ・検出器の構成
- ・核データ
- ・測定、解析手順
- ・検出限界値
- ・測定結果の高品質保証

(1) 体外計測法に関する国内規格、国際規格の整理及び課題抽出

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

2.1 得られた成果 (3/20)

(1) 体外計測法に関する国内規格、国際規格の整理及び課題抽出

○運用に必要な情報について、以下の内容・構成で「体外計測ハンドブック（仮称）」として整理した（約30ページ）。

第1章 序論

1. 1 全身カウンタ

1. 2 肺モニタ

第2章 用語及び略語の解説

第3章 光子測定の基本原則

3. 1 γ 線と物質の相互作用の種類及び性質

3. 2 各種補正（スペクトル解析に影響を与えるもの）

第4章 体外計測装置

4. 1 計測室

4. 2 機器構成

4. 2. 1 検出器

4. 2. 2 前置増幅器

4. 2. 3 主線形増幅器

4. 2. 4 多重波高分析器

4. 2. 5 遮蔽体

4. 2. 6 校正用ファントム

第5章 校正

5. 1 一次校正

5. 1. 1 全身カウンタの校正

5. 1. 2 肺モニタの校正

5. 2 校正の検証測定

5. 3 システム校正

5. 3. 1 ピーク分析法

5. 3. 2 関心領域分析法

5. 3. 3 最小二乗スペクトル分析法

第6章 計測・解析手順

6. 1 計測準備

6. 2 バックグラウンドの計測

6. 3 計測

6. 3. 1 全身カウンタ

6. 3. 2 肺モニタ

6. 4 スペクトル解析

6. 4. 1 ピークサーチ

6. 4. 2 核種同定

6. 4. 3 ピークエネルギーから放射能の算出

6. 5 解析結果の妥当性の確認

6. 6 解析結果の報告

第7章 検出下限値（MDA）

第8章 分析結果の高品質の保証

8. 1 機器の健全性確認

8. 2 不確かさ評価

8. 3 測定の特異性

第9章 引用文献

付録 不確かさ評価のバジェットシート（JAEA肺モニタの例）

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

2.1 得られた成果 (4/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○検証対象の選定

● 東京電力担当者との意見交換での成果 (R3.12月実施)

- 今後、1Fに導入する予定の体外計測装置は、全身ジオメトリに切り替えての測定は予定していない。
- 肺モニタ測定ではAm-241に着目する予定。
- 1F事故から約10年経過しており、Pu-241 (半減期 約14年) が壊変しAm-241の寄与が大きい。
⇒ 本研究では、肺モニタ測定の不確かさ評価に注力することとした。

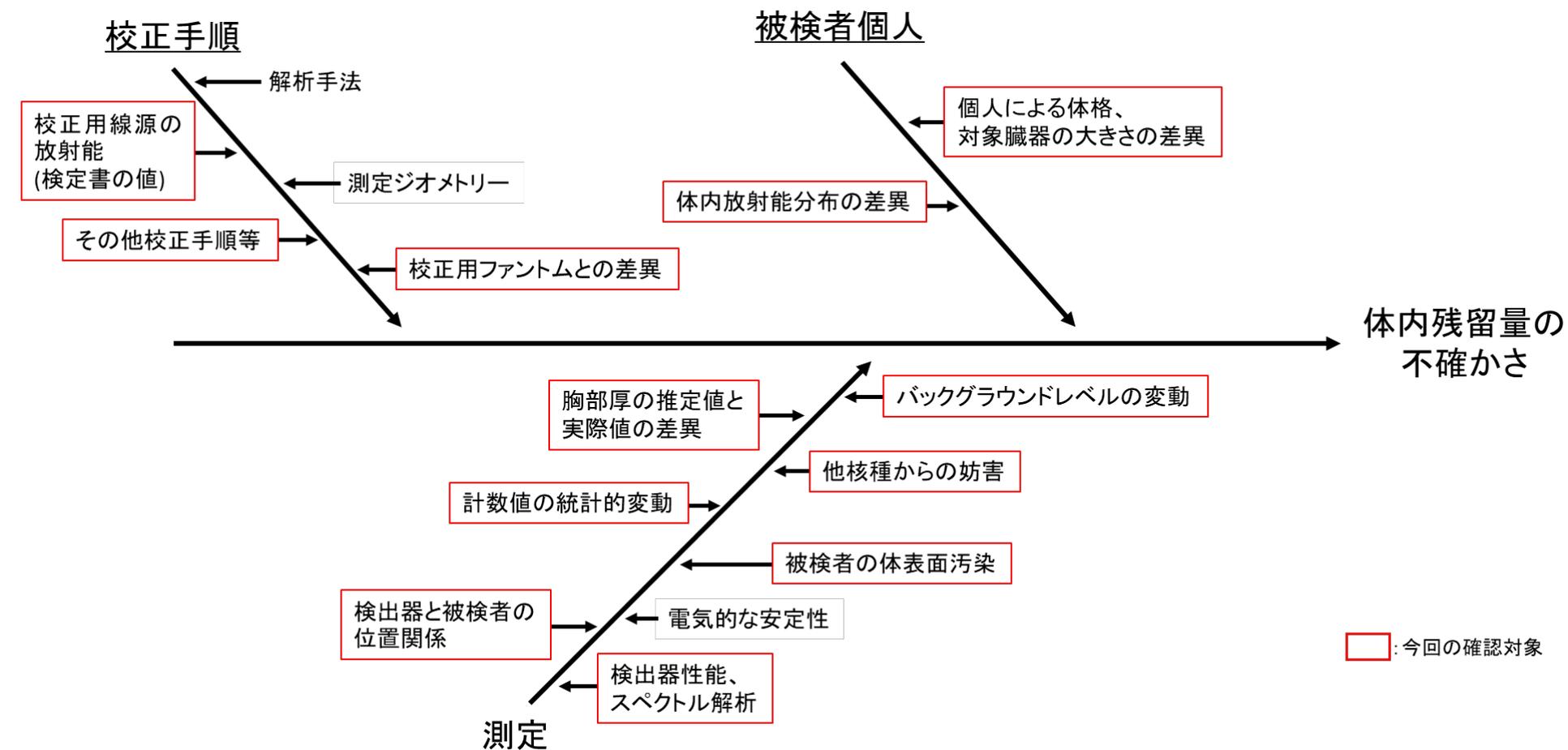
● QST放医研計測・線量評価部関係者との意見交換での成果 (R3.12月実施)

- ピークの形状から体表面汚染の影響を確認するため、実測のスペクトルデータを再現することを目指した方が良い。
- 低エネルギー光子の場合、各ピークの収量の比に着目すれば、減弱係数のエネルギー依存によって「体内から放出されたものか」「体表面から放出されたものか」を識別できるのではないか。
- 主な不確かさ要因の影響度合い
 - ・ 影響大：「被検者の体表面汚染」、「検出器と被検者の位置関係」、「体内放射能分布 (臓器分布)」、「肺モニタにおける胸部壁厚」
 - ・ 影響小：「肺モニタにおける対象臓器以外の臓器からの妨害」
- 体表面汚染で影響があると想定しておくべき核種について、肺モニタにβ線(Sr/Y-90などのβ線核種による体表面汚染)が入射するときの影響も評価したほうがよい。
⇒ 検出器モデルの作成において、実測のスペクトルデータの再現を目指すこととした。
⇒ 意見交換を踏まえて、着目すべき不確かさ要因を選定した。

2.1 得られた成果 (5/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○文献調査及び意見交換を踏まえて、肺モニタ測定における不確かさ要因図を整理した。



2.1 得られた成果 (6/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○研究フローの整理

各要因の測定値への影響度合をスクリーニング的に調べ、影響度に応じてシミュレーションによるパラメータの評価範囲、変化幅等を決定した。また、「被検者の体表面汚染」及び「他核種からの妨害」については、不確かさの寄与割合が大きいため、課題として整理することとした。

肺モニタ測定における不確かさ要因

- ・検出器と被検者の位置関係
- ・被検者の胸部壁厚
- ・体内放射能分布
- ・他核種からの妨害
(Cm-244, Cs-137, Sr/Y-90など)
- ・被検者の体表面汚染
- ・その他、検出器性能、統計量など

計算

- ・計算モデル構築
- ・モデルの最適化
- ・シミュレーション
- ・シミュレーション結果の検証

実測データ

ベンチマーク試験①
(点線源等)

ベンチマーク試験②
(体表面汚染を模擬した線源等)

要因ごとの測定結果への影響程度を評価

測定における課題を抽出

不確かさ評価のフロー図

2.1 得られた成果 (7/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理
モデル計算の対象とするモニタ・ファントムの主な仕様

肺モニタ兼精密型全身カウンタ

- 2式の検出器の配置を変更することで、肺モニタと全身カウンタの両用途に対応可能。

主な仕様

検出器	Ge半導体検出器×2式	
検出器サイズ	5000mm ² ×20mm(L)	
<u>肺モニタ</u>	測定エネルギー範囲	10～400 keV
	測定時間	30分間
	検出下限値	Pu-239:5 kBq, Am-241:11 Bq
<u>全身カウンタ</u>	測定エネルギー範囲	100～2000 keV
	測定時間	10分間
	検出下限値	Cs-137:100 Bq



Lawrence Livermore Realistic Phantom

(通称：リバモアファントム)

- 肺モニタにおいて、効率校正測定時に使用する物理ファントム。
- ポリウレタンを用いて人体組織（肺、肝臓、骨格等）を模擬。
- 厚みの異なる胸部プレートを用いることで、各胸部厚での計数効率を評価することが可能。

核種：Pu-239、Am-241、天然ウラン

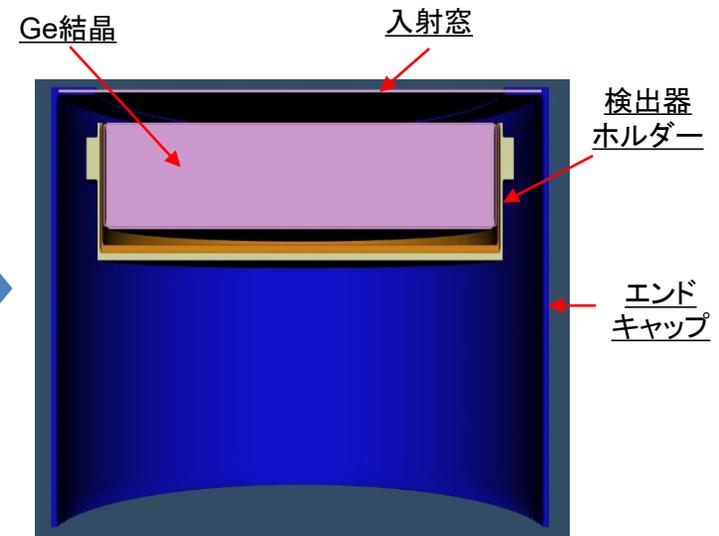
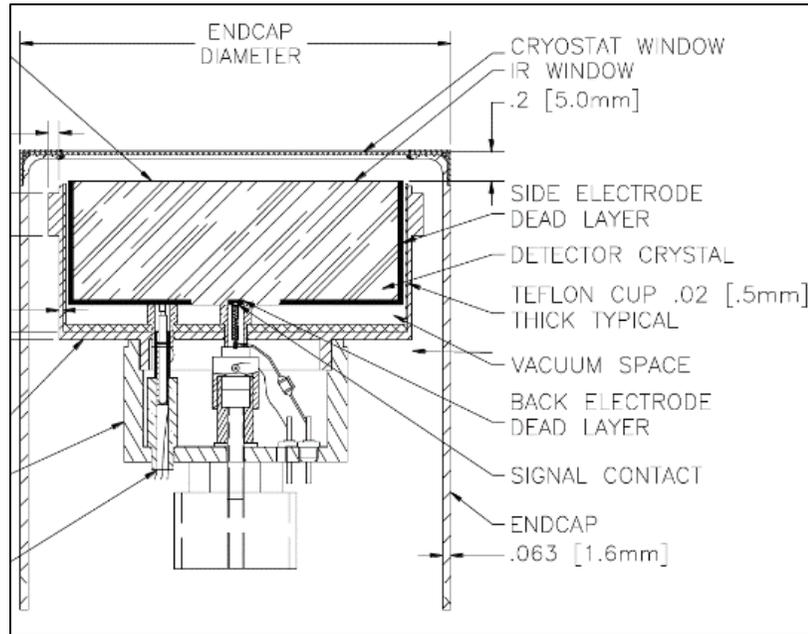


2.1 得られた成果 (8/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○シミュレーション体系の構築

JAEAが保有する体外計測装置のブロードエネルギーGe半導体検出器BEGe5020* (ミリオンテクノロジーズ・キャンベラ(株)製) の図面をメーカーから入手し、粒子・重イオン輸送計算コードPHITS(Particle and Heavy Ion Transport code System)**を用いて検出器モデルを構築した。



作成した検出器モデル(断面)

JAEA保有のBEGe5020検出器(左)及メーカー図面の一部(右)

* : 1F及びQSTに導入されているBEGe6530の同種モデル(サイズ違い)

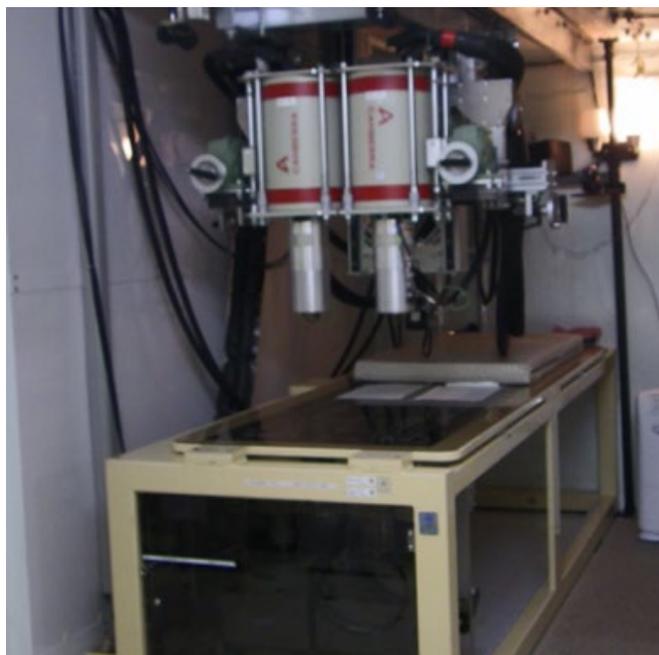
** : Sato et al., Particle and Heavy Ion Transport code System, J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018)

2.1 得られた成果 (9/20)

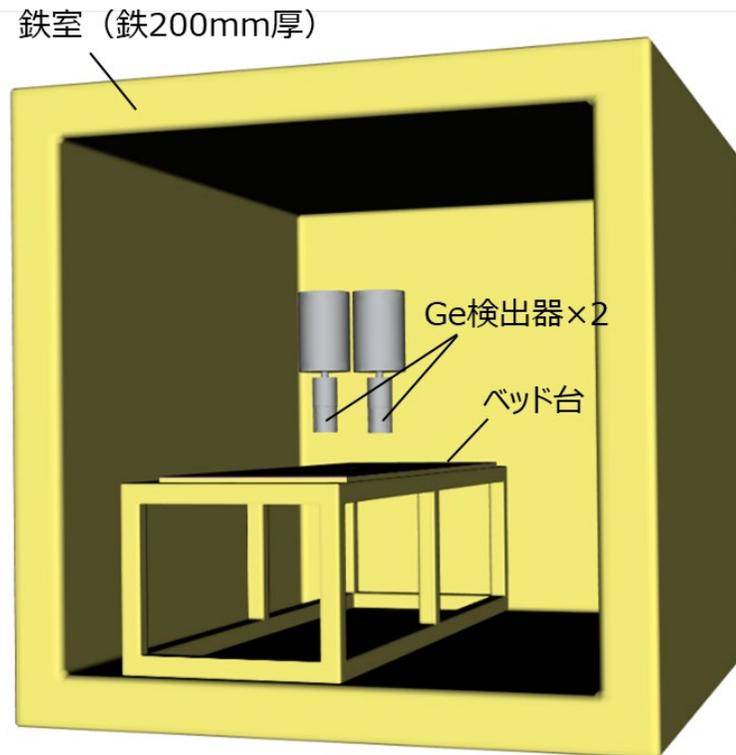
(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○シミュレーション体系の構築 (つづき)

検出器モデルに、鉄室とベッド台のモデルを組み合わせ、シミュレーション体系を構築した。



JAEAが保有する肺モニタの写真（鉄室内）



検出器（Ge結晶＋検出器筐体）、鉄室、ベッド台を含めた肺モニタの計算体系 ※鉄室の扉は非表示

2.1 得られた成果 (10/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

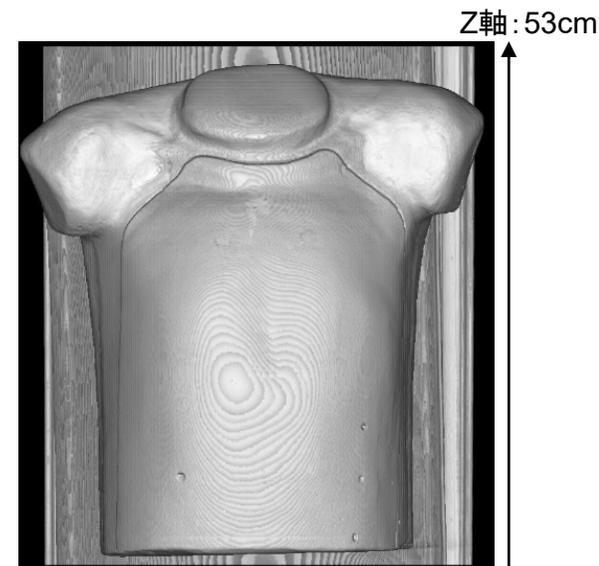
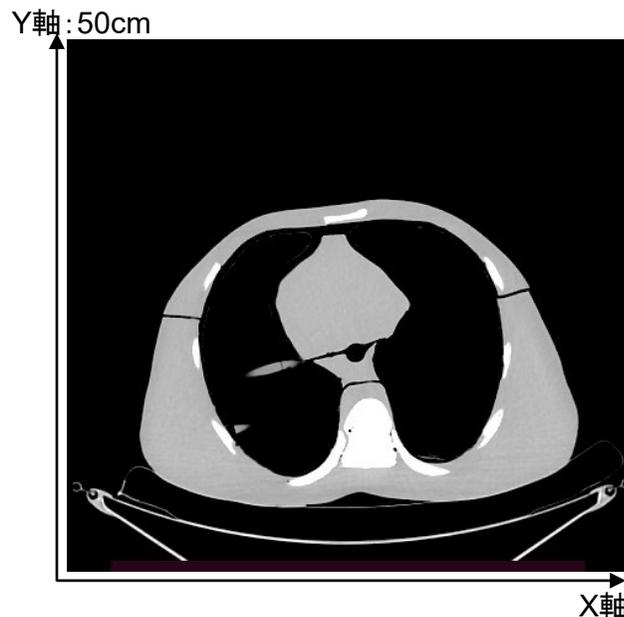
○シミュレーション体系の構築 (つづき)

リバモアファントムに放射性物質を含んでいない模擬の肺等価物質を挿入し、CT撮像を実施した。



駒澤大学X線CT装置
及び
リバモアファントム

撮影！



CT撮像で得られた軸位断面(左図)及び3D画像(右図)

- 軸位断面(x, y) : 50cm × 50cm
- 体軸方向(z) : 53cm(スライス厚 1.25mm × 425枚)

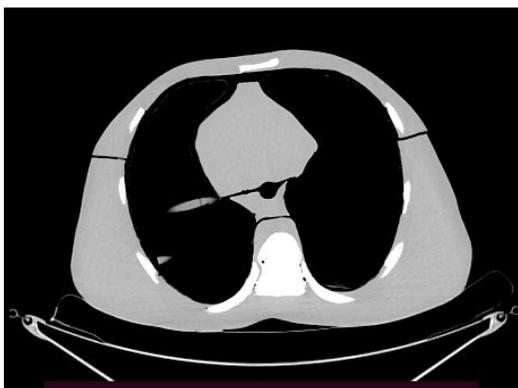
2.1 得られた成果 (11/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○シミュレーション体系の構築 (つづき)

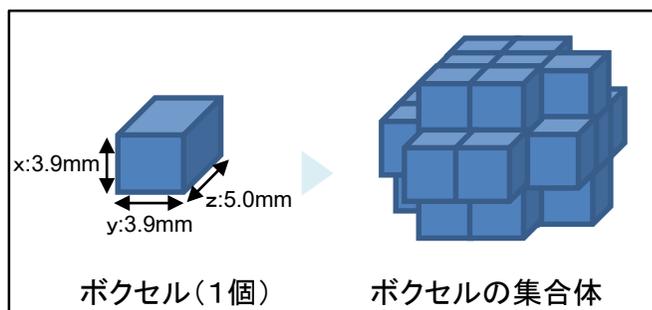
モンテカルロ計算コードPHITS¹⁾ 3.26 のRT-PHITS (RadioTherapy package based on PHITS) を用いて、CTデータをボクセルデータに変換した。

1個あたり 数mm単位の直方体(ボクセル)を用いることで、リバモアファントムの各組織・臓器を表現。⇒ ボクセルファントムの作成

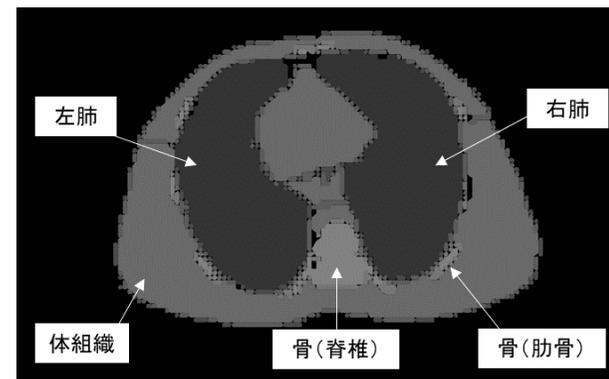


CTデータを
計算モデルへ!

CTデータから、リバモアファントムの肺、体組織及び骨格の範囲を選択。



作成したボクセルファントムの外観



ボクセルファントムの軸位断面

- リバモアファントムの形状を再現。ボクセルによりモデル化することができた。

1) Particle and Heavy Ion Transport code System, Sato et al., J. Nucl. Sci. Technol. 55(5-6), 684-690 (2018)

2.1 得られた成果 (12/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○シミュレーションの実施 1

構築したシミュレーション体系について標準線源によるベンチマーク試験を実施し、実測定とシミュレーション計算との差が最大で5%であることを評価した。

肺モニタの測定エネルギー範囲：
10 ~ 400 keV

標準線源によるベンチマーク試験結果（検出器直下に設置した条件）

核種	線種	出典	校正ライブラリ		Peak Area (counts)		計算/実測
			Energy[keV]	放出率	実測	計算	
Fe-55	X線	アイソトープ手帳11版	5.86	24.0%	207781	456396	2.20
Co-57	X線	アイソトープ手帳11版	6.36	48.9%	125581	230331	1.83
Fe-55	X線	アイソトープ手帳11版	6.45	2.90%	181818	334767	1.84
Co-57	X線	アイソトープ手帳11版	7.02	5.9%	113698	176835	1.56
Co-57	γ線	アイソトープ手帳11版	14.4	9.2%	179817	178308	0.99
Cd-109	X線	アイソトープ手帳11版	22.1	84.2%	2226199	2267290	1.02
Cd-109	X線	アイソトープ手帳11版	25.0	17.1%	479713	471984	0.98
Am-241	γ線	IAEA-TECDOC-619	59.54	36%	2591066	2604600	1.01
Cd-109	γ線	アイソトープ手帳11版	88.0	3.6%	105122	102854	0.98
Co-57	γ線	アイソトープ手帳11版	122	85.6%	2025940	2036226	1.01
Co-57	γ線	アイソトープ手帳11版	136	10.7%	235989	237088	1.01
Cs-137	γ線	Table of Radionuclides(2004)	661.66	85.99%	482623	507677	1.05
Co-60	γ線	アイソトープ手帳11版	1172	99.9%	97906	105116	1.07
Co-60	γ線	アイソトープ手帳11版	1333	100%	84280	89772	1.07

肺モニタ
の測定範
囲で5%
以内の差

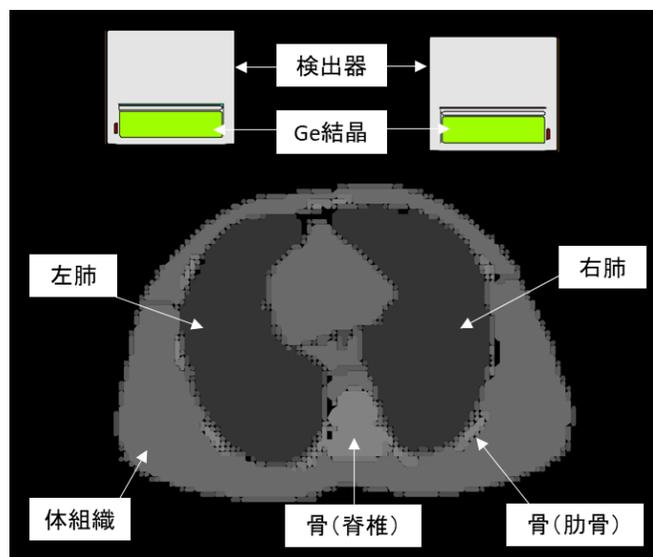
※ベンチマーク試験で変化させた測定条件：検出器と線源間の距離、線源の水平位置（斜め入射）、光子エネルギー

2.1 得られた成果 (13/20)

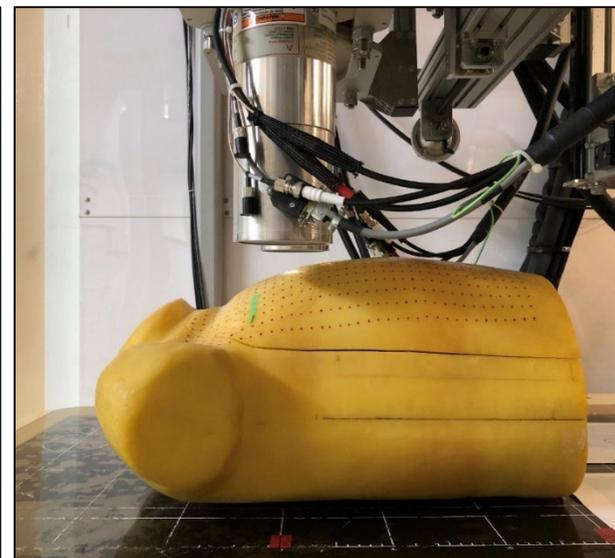
(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○シミュレーションの実施2

ボクセルファントムの肺部分に線源（Am-241、天然ウラン及びPu-239）を均一に分布させて計算を実施し、計算モデルと同様にファントムと肺モニタ検出器を配置した実測結果と比較した。



ボクセルファントム及び検出器モデル



肺モニタの実測試験の様子

2.1 得られた成果 (14/20)

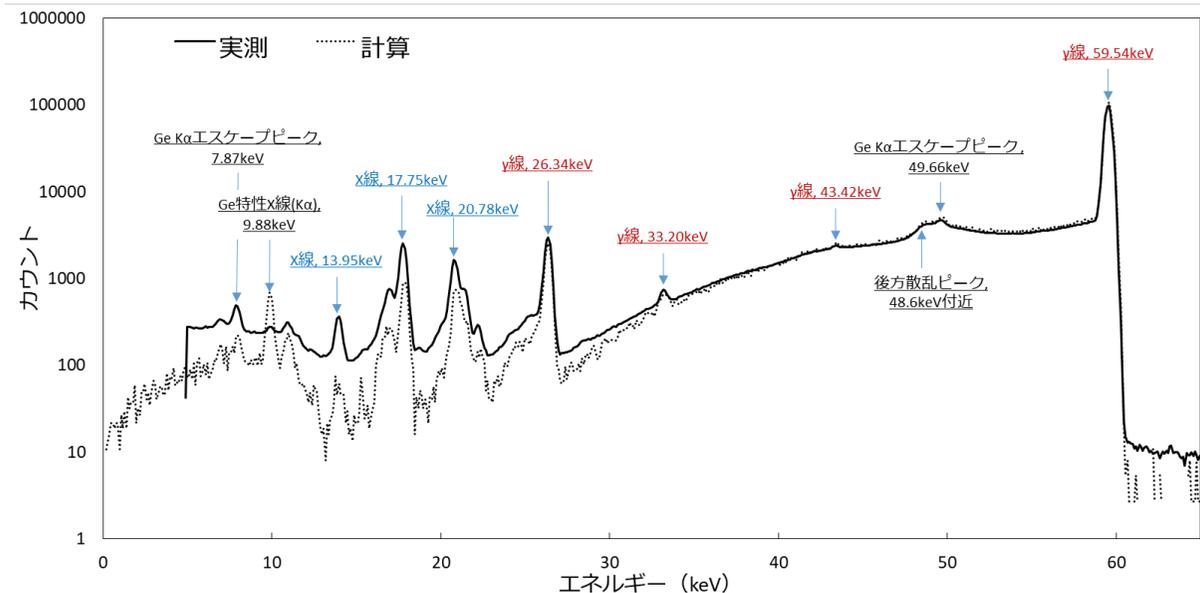
(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○シミュレーションの実施2 (結果)

- 30keV以下のX線領域では、計算値が実測値を大きく下回り、2倍以上の差があったものの注)、50keV以上のγ線ピークでは計算値と実測値は一部を除き、よく一致した。
- 天然ウラン中に存在するTh-234 (U-238)のピークでは一致せず、計算値が実測値を上回った。

→上記の特徴に留意することで、本研究の目的（体外計測による体内残留量測定の不確かさ評価）に十分使用可能である。

注) ボクセル表現による曲線部分のモデル化、参照した核データの精度等に起因すると考えられるが、1 F肺モニタはAm-241のγ線(59.54keV)を主眼に測定するとの情報から、本研究ではこの点のさらなる追求はしないこととした。



校正用ファントムによるベンチマーク試験 (Am-241 のスペクトル比較の例)

2.1 得られた成果 (15/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

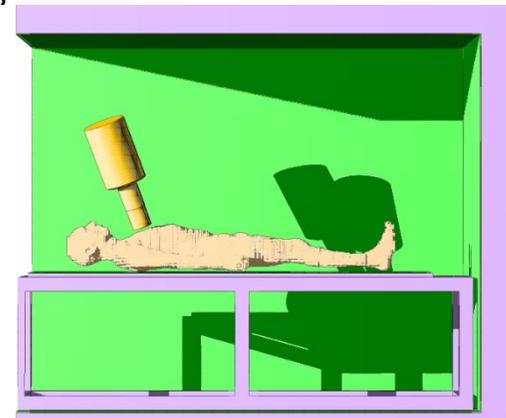
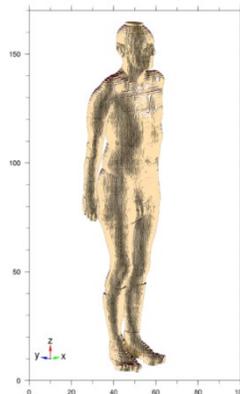
○シミュレーションの実施 3

構築したシミュレーション体系にICRP¹⁾ファントムを組み込み、肺モニタ測定のジオメトリを再現し、不確かさ評価のためのシミュレーション計算を行った。



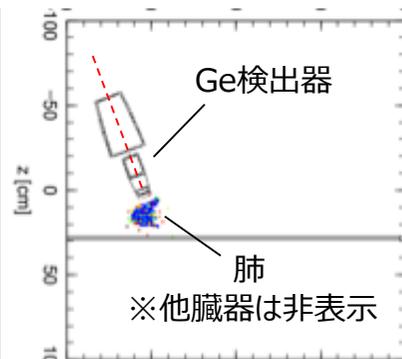
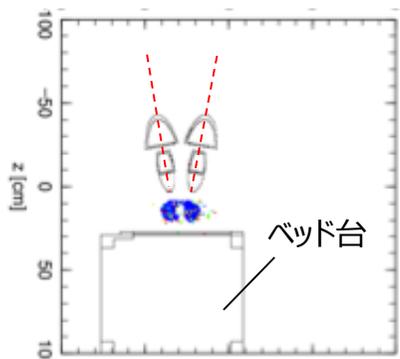
ICRP Phantom (ICRP Publ.110)²⁾

- ICRP Publ.110で定義された計算用のファントム。実測には用いることができないが、計算シミュレーションに用いられる。
 - 左図は西欧人のCT画像から作成されたボクセルファントム(※)である。
- ※ボクセルファントム：人体をボクセル（小さい直方体）の組み合わせにより表現したファントム。ボクセルのサイズは1辺が数mm単位。

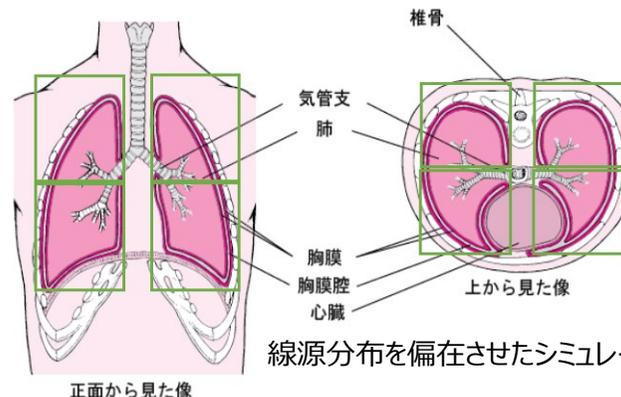


肺モニタの計算体系に、ICRP Publ.110にて提供されている計算用ファントムを組み合わせてシミュレーション体系として完成させた様子

【シミュレーション計算の例】



肺に対する検出器の位置と角度を変化させたシミュレーション
左図：上から見た図、右図：体側面から見た図



線源分布を偏在させたシミュレーションにおける肺の分割

- 1) INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION (国際放射線防護委員会)
- 2) ICRP, 2009. Adult Reference Computational Phantoms. ICRP Publication 110. Ann. ICRP 39 (2).

2.1 得られた成果 (16/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○バジェットシートの作成

体内に残留する核種の種類・強度・数・位置等のパラメータを変化させたシミュレーション計算結果と文献調査結果と合わせて肺モニタ測定に係る不確かさを評価した。

肺モニタによるAm-241測定に係る不確かさバジェットシート

不確かさの要因		標準不確かさ	寄与割合
校正	・校正用線源の放射能 (検定書の値)	0.7%	<1%
	・校正用ファントム (リバモアファントム) と標準人との差異	3.7%	1.2%
	・その他校正手順等	3.1%	<1%
被検者 個人	・ 個人による体格、対象臓器の大きさの差異	11.3%	10.8%
	・体内放射能分布の差異	4.9%	2.0%
測定	・ 胸部厚の推定値と実際値の差異	12.6%	13.4%
	・バックグラウンドレベルの変動	9.5%	7.6%
	・ 計数値の統計的変動	26.2%	58.0%
	・検出器と被検者の位置関係	6.9%	4.0%
	・検出器性能、スペクトル解析	4.9%	2.0%
体内残留量測定値に係る不確かさの合計		34.4%	

※評価条件：30分測定、検出下限値程度(～10Bq)の体内残留量

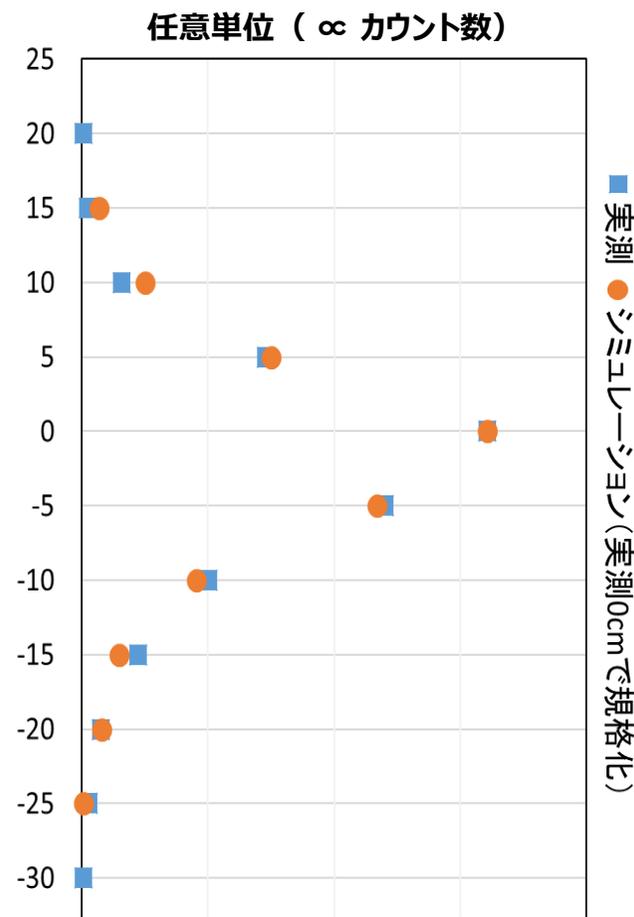
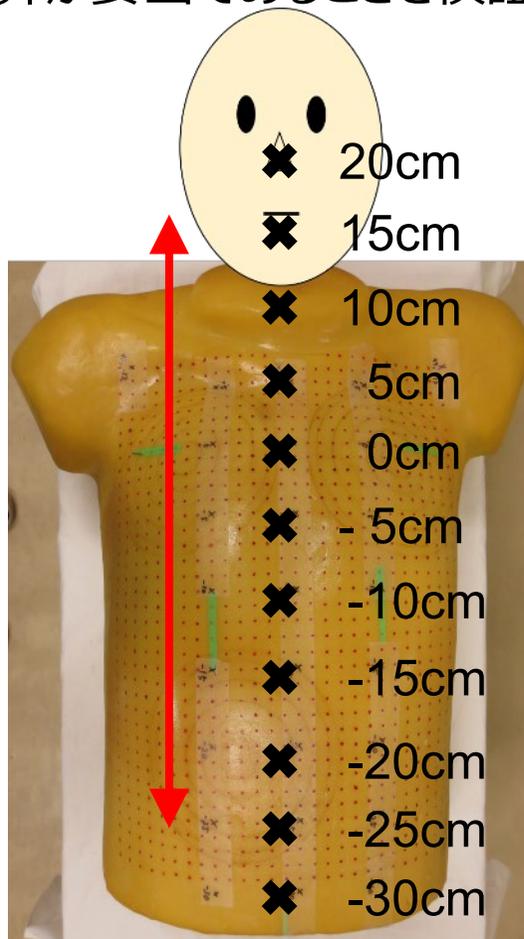
2.1 得られた成果 (17/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○シミュレーション結果の検証

体表面汚染については、標準線源を用いた模擬汚染による実測定とシミュレーション計算を比較し、シミュレーション計算が妥当であることを検証した。

- 人体表面を5cmのメッシュに区切り、1つの区画の中心に標準線源 (Active領域Φ数mm) を置いた条件について、シミュレーション計算と実測定を比較し、一致することを確認した。
- 汚染レベルにもよるが、体幹部において **顔下部～腹部中央の範囲** の表面汚染は、肺モニタ測定値に影響を及ぼす可能性があることが評価できた。

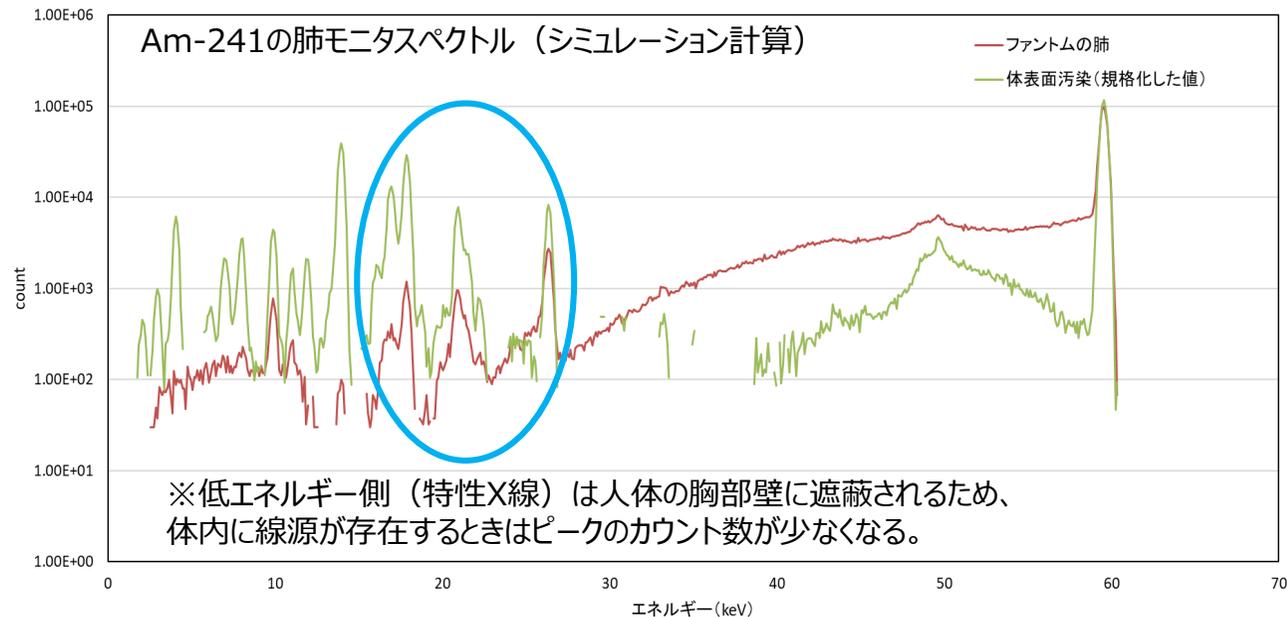
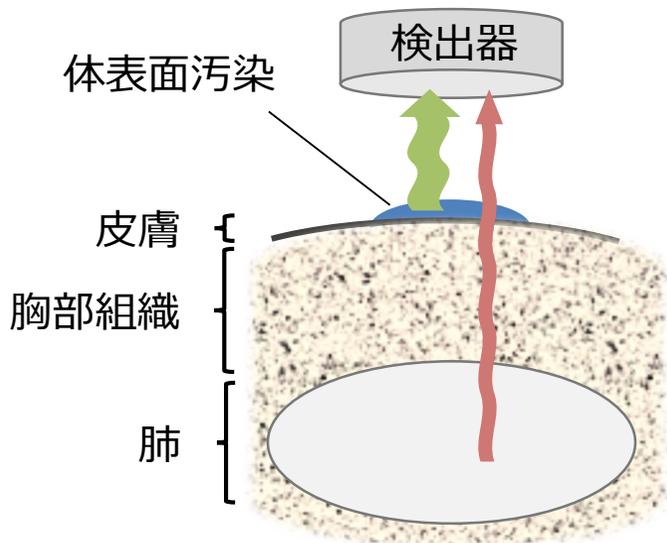


2.1 得られた成果 (18/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

○ 体表面汚染を伴うケースのシミュレーションの実施

体表面汚染の影響について、肺モニタスペクトルの同一核種から放出される異なるエネルギーピーク間のカウント数の比に着目し、肺内からの影響と識別することが可能か検証した。



Energy [keV]	Am-241		Peak Area (count)		ピークカウント数の比	
	放出率	放出率の比	肺	体表面汚染	肺	体表面汚染
17.75	11.6%	0.32	6608	152111	0.01	0.27
20.78	2.84%	0.08	7031	42661	0.01	0.08
26.35	2.4%	0.07	15887	33918	0.03	0.06
59.54	36%	1	559347	559347	1	1

➤ 異なるエネルギーピーク間のカウント数の比に着目することで、測定結果の妥当性を検証することが可能である。

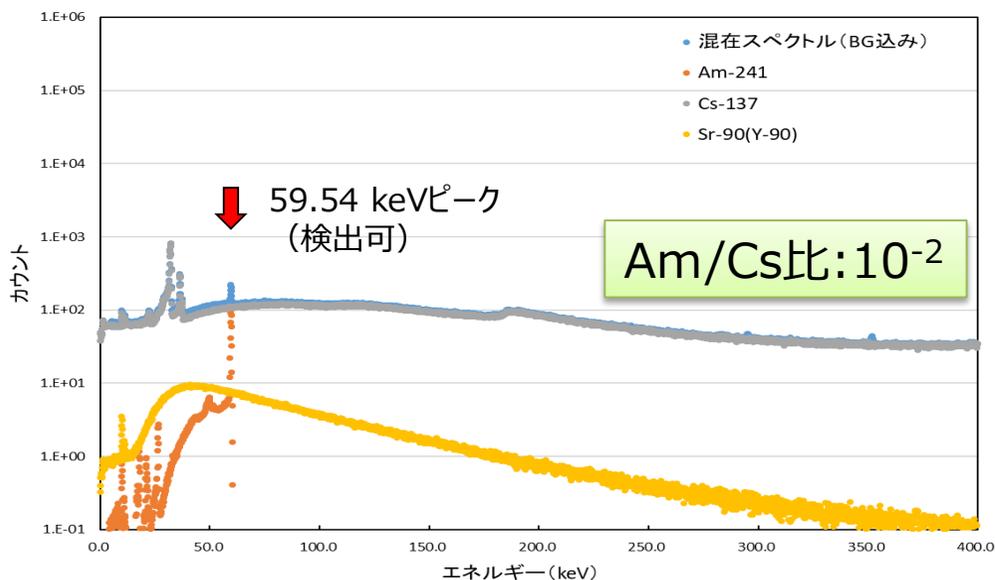
2.1 得られた成果 (19/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

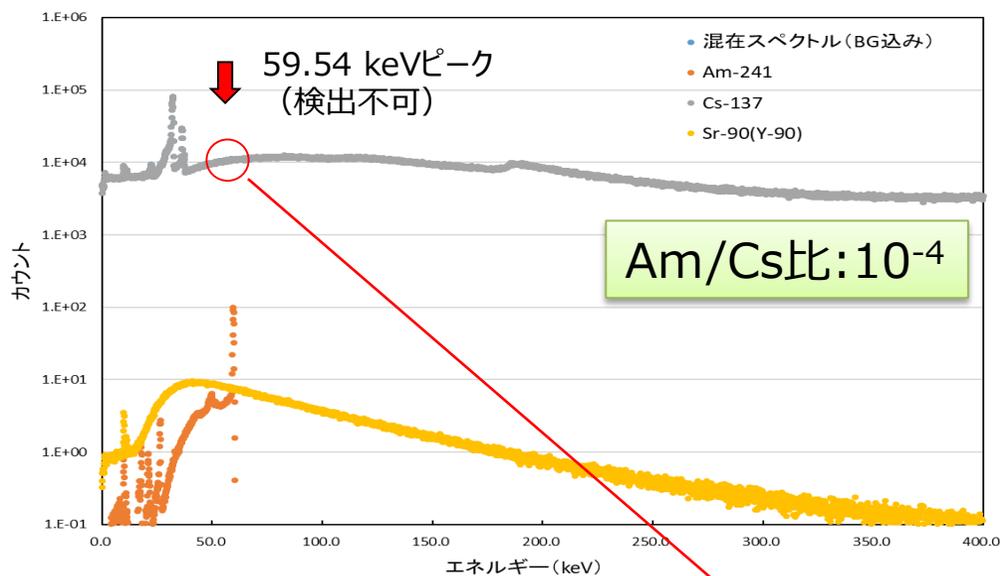
○ 複数核種を混在して摂取したケースの検討

肺の中に複数の核種が混在している条件での肺モニタ測定（着目核種：Am-241、30分測定）についてシミュレーション計算のスペクトルを基にケーススタディした。

Am-241: 100 Bq, Cs-137: 10 kBq, Sr/Y-90: 100 kBqのスペクトル



Am-241: 100 Bq, Cs-137: 1 MBq, Sr/Y-90: 100 kBqのスペクトル



- 着目領域のピークのカウント数が、ベースラインカウント数の3倍 (3σ) 以上になったときを有意検出とすると、検出下限(Bq)は右式で計算できる (Cooperの方法)。

$$\text{検出限界カウント数} = \frac{9}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{8}{9} \times \text{着目領域のカウント数}} \right)$$

$$\text{検出限界 (Bq)} = \text{検出限界カウント数} \times \text{換算係数 (Bq/counts)}$$

2.1 得られた成果 (20/20)

(2) モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理

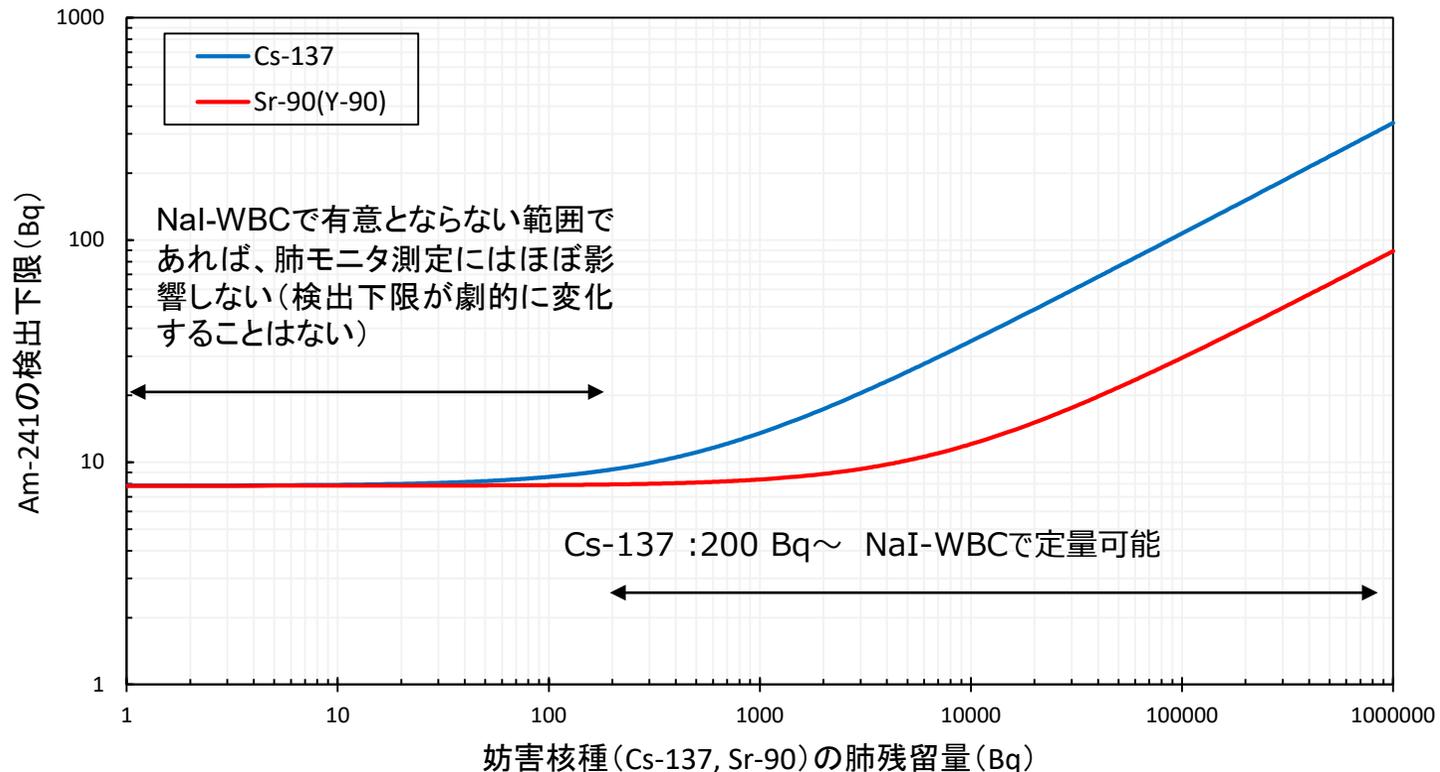
○複数核種を混在して摂取したケースの検討 (つづき)

肺の中のCs-137及びSr/Y-90は、Am-241 (59.54 keVピーク) のベースラインのカウン
ト数を増加させるため、Cs-137及びSr/Y-90の取り込み量によりAm-241の検出下限が変
化する。

⇒妨害核種の肺内残留量とAm-241の検出下限 (30分測定時) の関係をグラフ化した。

➤ Cs-137の妨害影響に
ついては、NaI検出器を
用いた全身カウンタ
(NaI-WBC)の測定結
果から予想することが可
能と考えられる。

➤ Sr/Y-90の妨害影響に
ついては、NaI -WBCで
は測定できないため、別
手段での予想が必要と
考えられる。



2. 実績

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	
a. 体外計測法に関する国内規格、国際規格の整理及び課題抽出	3 (応用研究)	4 (実用化研究)	4 (実用化研究)	○
b. モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理	3 (応用研究)	4 (実用化研究)	4 (実用化研究)	○

目標：

- a. 体外計測装置の運用に関して必要な情報がレビューされ、整理されている。
- b. 体内残留量測定に係る不確かさが評価され、測定における課題が整理されている。

終了時自己評価：

- a. 体外計測法に係る文献について調査し、体外計測装置の校正方法、解析方法等の運用に関して必要な情報を体外計測ハンドブック（仮称）として整理した。
- b. 文献調査及びモンテカルロシミュレーションによる体内残留量測定に係る不確かさ評価を実施し、不確かさへ寄与の大きい要因について肺モニタ測定における課題として整理した。

3. 今後の課題

1 Fにおける内部被ばく（おそれを含む）の事象における肺モニタ測定を想定した場合に考えられる課題を以下に示す。

○肺モニタ測定結果の妥当性の確認手順の検討

→肺モニタ実施前の身体サーベイで検出しきれなかった体表面汚染が残留した場合に測定結果に影響を及ぼす可能性があるため、各光電ピークの収量の比を確認することで体表面汚染による影響の有無を判断する手順を検討しておく必要がある。

○内部取り込みが発生した際の混在核種情報の把握手順の検討

→1 Fでは、 α 核種以外にCs-137、Sr/Y-90を同時に取り込む可能性が高いため、作業環境モニタリング（空気ろ紙）、鼻スミヤ、NaI検出器を用いた全身カウンタ（NaI-WBC）の測定結果から妨害核種の取り込み量を推定して、肺モニタのAm-241に対する検出下限がどの程度になるかを把握するための手順を検討しておく必要がある。

事業内容

a) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討

② ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上

③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認

b) 内部取り込みに対する防護に係る技術開発

④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化

⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

c) 内部被ばく対応システムの開発

⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発

1.概要

1.1 目的

1F廃炉作業において、作業者の作業安全と放射線安全の高いレベルでの両立を目指す。環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化を目的に、ア.防護装備の迅速な除染・脱装手順の最適化、イ.身体負荷軽減装備の開発、ウ.最新の技術が反映された防護服の提案の3つの観点から検討する。

1.2 目標（技術成熟度）

内容	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
(1) 防護装備の迅速な除染・脱装手順の最適化の提案	3（応用研究）	4（実用化研究）
(2) 身体負荷軽減装備（高性能冷却ベスト）の開発	3（応用研究）	5（模擬実証）
(3) 身体負荷軽減装備（冷風機能付き呼吸保護具）の試作・試験	3（応用研究）	4（実用化研究）
(4) 最新の技術が反映された防護服の提案	3（応用研究）	5（模擬実証）

終了時目標： いずれの項目についても本事業を通じたエンジニアリングの進行により、試作・試運用のレベルに到達することを目指す。

2. 実績

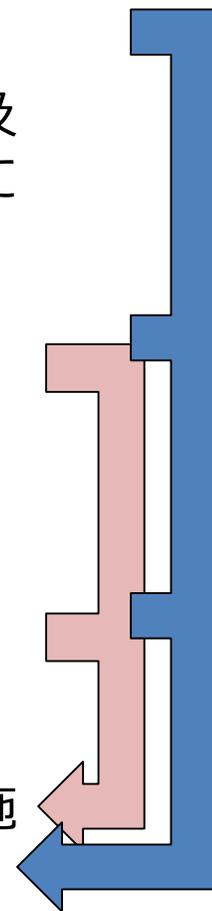
2.1 得られた成果（概要）※詳細は次ページ以降

(1)防護装備の迅速な除染・脱装手順の最適化に関して、1FのR区域でのアノラック装備の脱装手順を参考に、改善提案(排気弁カバー、マスクカバー及びプレフィルタの利用)を提示。また、R区域の高BG(β ・ γ 線)の影響を受けずに α 汚染をサーベイするための機器を提案。

(2)高性能冷却ベストの開発及び(3)冷風機能付き呼吸保護具の試作・試験に関して、冷却機構を共用した形での実装に向け試作を行った。

(4)最新の技術が反映された防護服の提案に関して、クロスコンタミネーションのリスクを減らすために脱装しやすい形状を考慮した、身体負荷軽減型の防護服を製作した。

【(2,3,4)高温多湿環境での身体負荷試験】を実施
【(1)新開発装備を用いた脱装手順】を考案



2.1 得られた成果（1/14）

(1) 防護装備の迅速な除染・脱装手順の最適化

→時間の短縮、汚染伝搬の防止 に着目

検討開始時点（R4年10月）の1Fの防護装備脱装手順に対する評価

→多数の作業者が実施することを念頭に良く考えられた手順

提案①

排気弁カバー、マスクカバー及びプレフィルタの利用



期待できる効果

- 排気弁カバー …マスクカバー内の曇り防止：視野確保
- マスクカバー …全面マスク（特にダストフィルタ部周辺）への汚染付着防止：除染時間の短縮、汚染伝搬の防止
- プレフィルタ …汚染確認に有効

排気弁カバー*

プレフィルタ

マスクカバー**

*JAEA プルトニウム燃料技術開発センター開発品（特許出願予定）

** JAEA プルトニウム燃料技術開発センター開発品

2.1 得られた成果（2/14）

(1) 防護装備の迅速な除染・脱装手順の最適化

→R区域の高BG(β ・ γ 線)の影響を受けずに α 汚染をサーベイするための機器を提案（提案②）

耐 $\beta\gamma$ バックグラウンド・ α 線位置検出サーベイメータ(α 位置検出器)※

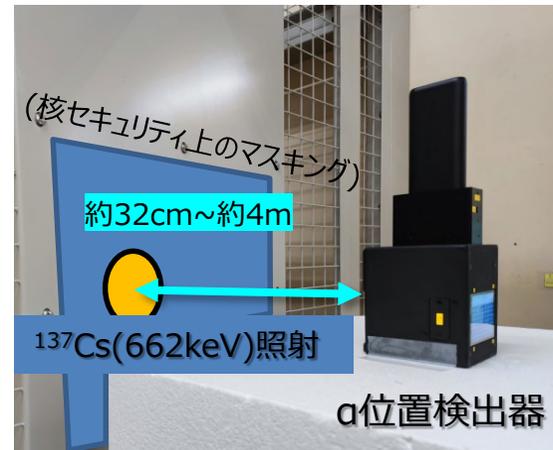
- ・用途：R区域退域前後にスーツやマスクフィルタ等の α 汚染の有無を判断する。
- ・対BG性能：約1Sv/hの ^{137}Cs による γ 線照射時でもBGの影響なく α 線を検出可能

建屋内線源からのBG γ 線
(通常のサーベイではBGと表面汚染の弁別が困難)



(左)開発した α 位置検出器による脱装前のマスクフィルタ上の α 汚染検査の例。
(上)汚染分布の2次元カウンター表示が可能。

課題 測定ヘッドの小型化・軽量化



JAEA核サ研のコリメート型 γ 線照射装置を使用した γ 線照射試験。約1Sv/hでも γ 線の影響なし。

※原理・機構は他事業で開発。薄膜シンチレータ、多チャンネル光電子増倍管等を使用。
参考: Y. Tsubota, 他、NIM-A vol. 1030, p. 166475 (2022)

2.1 得られた成果 (3/14)

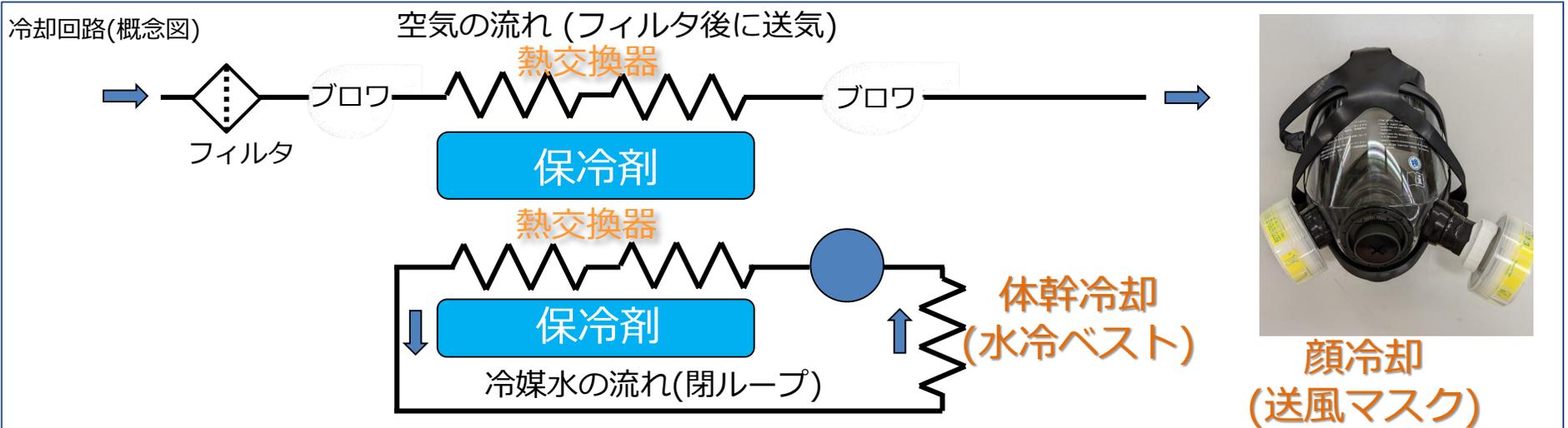
(2) 高性能冷却ベストの開発 及び (3) 冷風機能付き呼吸保護具の試作・試験

リュックサック型の冷却機構を冷却ベスト(水冷)及び呼吸保護具(空冷)で共用する構造(統合型)に関して試作。

- 冷却機構: **保冷剤交換式**とする。水冷チューブ内を循環する冷媒(閉ループ)と空冷用熱交換器(フィルタリング後の空気を送気)は**互いに独立**しており、汚染コントロール上の課題を最小化。



リュックサック式の冷却機構を有する市販の冷却ベスト。(本製品を基に改良・機能統合)



2.1 得られた成果（4/14）

(2) 高性能冷却ベストの開発 及び (3) 冷風機能付き呼吸保護具の試作・試験

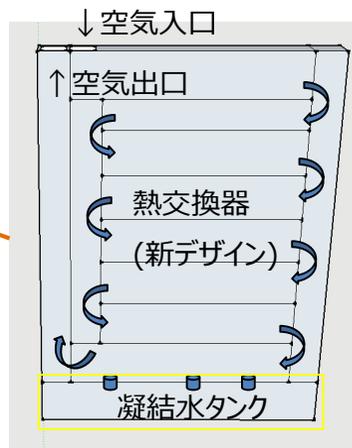
本タスクにおける**統合型装備**の構成



本タスクでは**機能試作**を実施。面体・チューブ接合部に関しては接着剤等による接合とし、抜け防止構造等はタスクの対象外（ただし、手による引っ張りで外れないことは確認済み）



二重反転ファン(37Wタイプ)×2基搭載。
非常に**軽量(計220g)**で十分な**冷風量(30L/min)**を確保。



熱交換器は**総アルミ製**とし、2個の保冷剤で挟む構造。下部に凝結水タンクを有し、同タンク内には**吸水スポンジ**を導入可能。
(吸水スポンジは本タスクの対象外であるが、取出して乾燥させ、再利用可。)

ベスト・冷却装置の**総重量は6kg**程度。



95Whの**大容量リチウムイオンバッテリー**。
重量は750g。

2.1 得られた成果（5/14）

(2) 高性能冷却ベストの開発 及び (3) 冷風機能付き呼吸保護具の試作・試験

温室内(30~31℃、湿度65~75%)



(左) 試作した高性能冷却ベスト及び冷風機能付き呼吸保護具統合型装備。

(右) 高温多湿環境での連続稼働試験時の写真(面体内への送風及び周囲温度による冷却ベストの加熱)。冷風動作: 1h40m持続。送風終了後、保冷材は約半分が溶解。

暑さ指数(屋内WBGT値、近似計算)

40	27.0	27.7	28.5	29.2	30.0	30.7	31.5	32.2	33.0	33.7	34.5	35.2	36.0	36.7	37.5	38.2	39.0	39.7	40.5
39	26.2	27.0	27.7	28.4	29.2	29.9	30.6	31.4	32.1	32.8	33.6	34.3	35.0	35.8	36.5	37.2	38.0	38.7	39.4
38	25.5	26.2	26.9	27.7	28.4	29.1	29.8	30.5	31.2	32.0	32.7	33.4	34.1	34.8	35.6	36.3	37.0	37.7	38.4
37	24.8	25.5	26.2	26.9	27.6	28.3	29.0	29.7	30.4	31.1	31.8	32.5	33.2	33.9	34.6	35.3	36.0	36.7	37.4
36	24.1	24.8	25.4	26.1	26.8	27.5	28.2	28.9	29.5	30.2	30.9	31.6	32.3	33.0	33.7	34.3	35.0	35.7	36.4
35	23.4	24.0	24.7	25.4	26.0	26.7	27.4	28.0	28.7	29.4	30.0	30.7	31.4	32.0	32.7	33.4	34.0	34.7	35.4
34	22.6	23.3	23.9	24.6	25.2	25.9	26.6	27.2	27.8	28.5	29.1	29.8	30.4	31.1	31.8	32.4	33.0	33.7	34.4
33	21.9	22.5	23.2	23.8	24.5	25.1	25.7	26.4	27.0	27.6	28.3	28.9	29.5	30.2	30.8	31.4	32.1	32.7	33.3
32	21.2	21.8	22.4	23.0	23.7	24.3	24.9	25.5	26.1	26.8	27.4	28.0	28.6	29.2	29.9	30.5	31.1	31.7	32.3
31	20.5	21.1	21.7	22.3	22.9	23.5	24.1	24.7	25.3	25.9	26.5	27.1	27.7	28.3	28.9	29.5	30.1	30.7	31.3
30	19.8	20.3	20.9	21.5	22.1	22.7	23.3	23.9	24.4	25.0	25.6	26.2	26.8	27.4	28.0	28.5	29.1	29.7	30.3
29	19.0	19.6	20.2	20.7	21.3	21.9	22.4	23.0	23.6	24.2	24.7	25.3	25.9	26.4	27.0	27.6	28.1	28.7	29.3
28	18.3	18.9	19.4	20.0	20.5	21.1	21.6	22.2	22.7	23.3	23.8	24.4	24.9	25.5	26.1	26.6	27.2	27.7	28.3
27	17.6	18.1	18.7	19.2	19.7	20.3	20.8	21.3	21.9	22.4	23.0	23.5	24.0	24.6	25.1	25.6	26.2	26.7	27.3
26	16.9	17.4	17.9	18.4	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.6	22.1	22.6	23.1	23.6	24.2	24.7	25.2	25.7	26.2
25	16.2	16.7	17.2	17.7	18.2	18.7	19.2	19.7	20.2	20.7	21.2	21.7	22.2	22.7	23.2	23.7	24.2	24.7	25.2
24	15.4	15.9	16.4	16.9	17.4	17.9	18.4	18.8	19.3	19.8	20.3	20.8	21.3	21.8	22.3	22.7	23.2	23.7	24.2
23	14.7	15.2	15.7	16.1	16.6	17.1	17.5	18.0	18.5	18.9	19.4	19.9	20.4	20.8	21.3	21.8	22.3	22.7	23.2
22	14.0	14.4	14.9	15.4	15.8	16.3	16.7	17.2	17.6	18.1	18.5	19.0	19.4	19.9	20.4	20.8	21.3	21.7	22.2
21	13.3	13.7	14.2	14.6	15.0	15.5	15.9	16.3	16.8	17.2	17.7	18.1	18.5	19.0	19.4	19.8	20.3	20.7	21.2
20	12.6	13.0	13.4	13.8	14.2	14.7	15.1	15.5	15.9	16.3	16.8	17.2	17.6	18.0	18.5	18.9	19.3	19.7	20.1
温度/湿度	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
(°C) (%)																			

面体内の暑さ指数(WBGT値)は、周辺に比べて約 4 低減

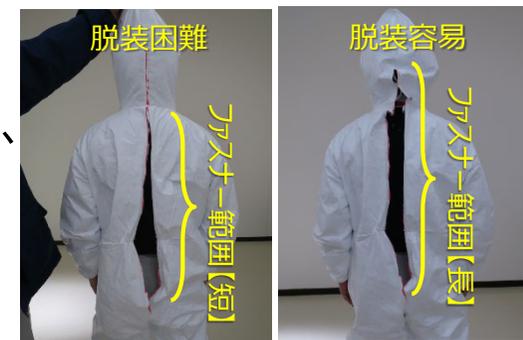
→ 身体負荷試験にて効果測定

2.1 得られた成果（6/14）

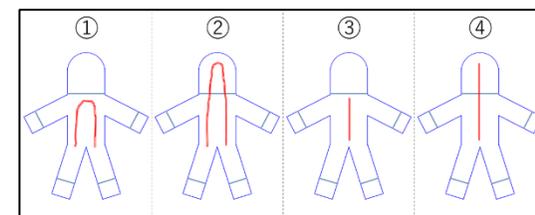
(4) 最新の技術が反映された防護服の提案

十分な防水性、透湿性を有し、かつ現在使用されている透湿防水スーツに比して**身体負荷を軽減**させた高性能な防護服を提案する。具体的には、スーツの材質、脱装の仕組み、顔面部の防護、臀部保護等について検討を実施。

- スーツの材質：国内メーカーの透湿防水素材を使用。「JIS Z 4809: 2012 放射性物質による汚染に対する防護服」に準拠。**耐水圧：98kPa以上、透湿性：300g/(m²・h)以上。**
- 脱装の仕組み：**背中部分にファスナー**を設け、脱装時のクロスコンタミネーション(スーツ→身体、ハサミ)を低減する構造。ファスナーの数や形状についても考慮し、「一本線」型を主軸に開発。(右図)
- 臀部保護：**臀部(おしり)部分は二重生地**とし、しゃがみこみ時の汚染の浸透を低減。



市販のタイベックスーツを用いたファスナー長さに関する検討。一本のファスナーを尾椎骨付近～首部分まで設けることで、容易に脱装可能。



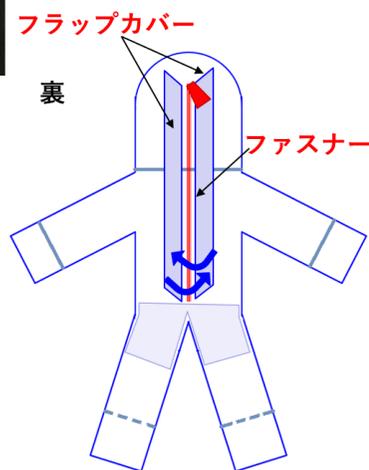
ファスナーの形状の検討例。④の形状が最も低コストかつ、ファスナー部分の養生が容易と判断。

2.1 得られた成果（7/14）

（4）最新の技術が反映された防護服の提案



水散布による防水試験例
(メーカー工場にて)



製造メーカーの国内工場において、透湿防水素材を用いた防護服を試作し、マスク面体との取り合いや縫い目処理に、背中のファスナー形状等について課題抽出・改良を実施。

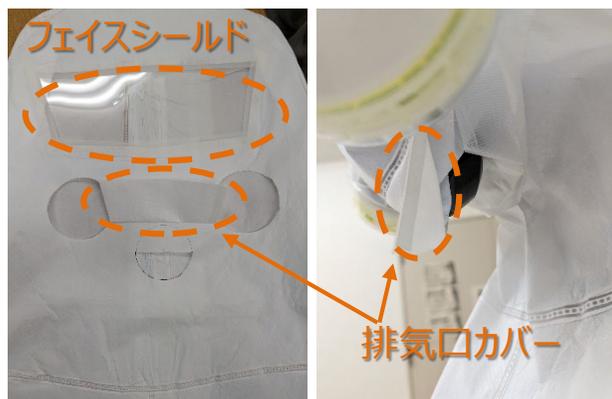
- マスク面体との取り合い：S社製全面マスクを想定し、視界を遮らないように窓を設置。排気口(顎下部に配置)からの排気が防護服内にこもらない設計とした。
- 縫い目処理：防水性が高いが、施工費の高いシームテープ加工箇所を最適化。(防水試験を実施)
- 背中のファスナーに2枚のフラップカバーを取り付けることで、防水性を確保。脱装時のクロスコンタミネーションも低減。

2.1 得られた成果（8/14）

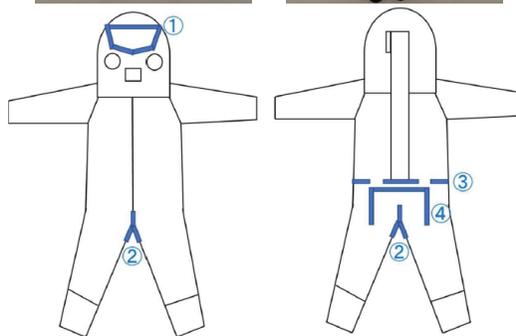
(4) 最新の技術が反映された防護服の提案

作製した透湿防水スーツの構成

- ・ 生地は多孔性フィルムを不織布で挟んだ**透湿防水素材**(湿気がこもりにくい)
- ・ 縫製部は**超音波縫製**。防水強化箇所は**シームテープ加工**(イラスト青線部)



- ・ フェイスシールドによる視界の確保
- ・ 排気口からの排気がこもらない
- ・ 排気口カバーで汚染防止



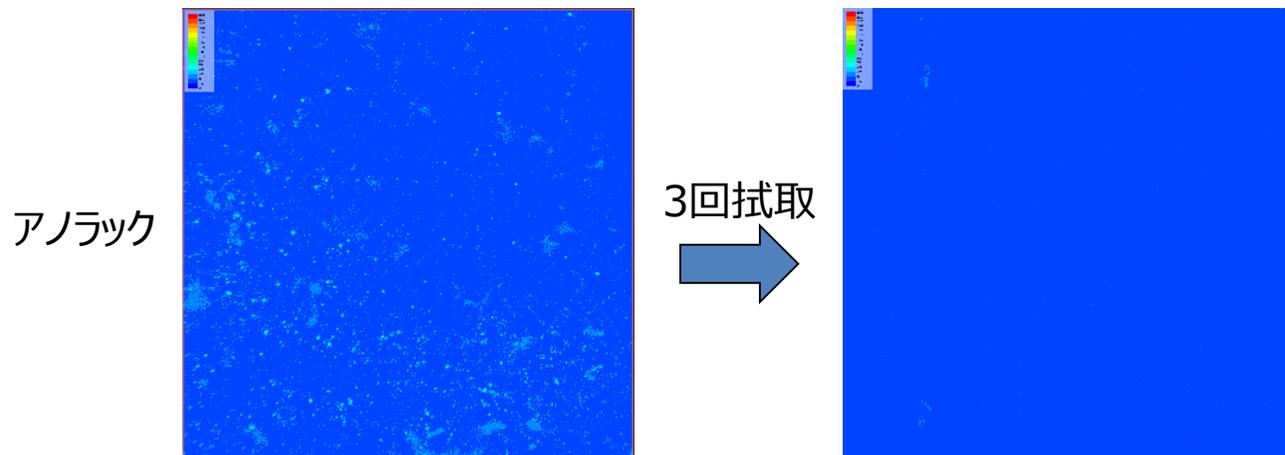
- ・ 2枚のフラップカバーで防水性確保
- ・ ファスナーにより、脱装時のクロスコンタミネーションを低減。フラップカバーを開くことでファスナーを下ろせる構造

➡ 身体負荷試験にて効果測定

2.1 得られた成果（9/14）（参考）

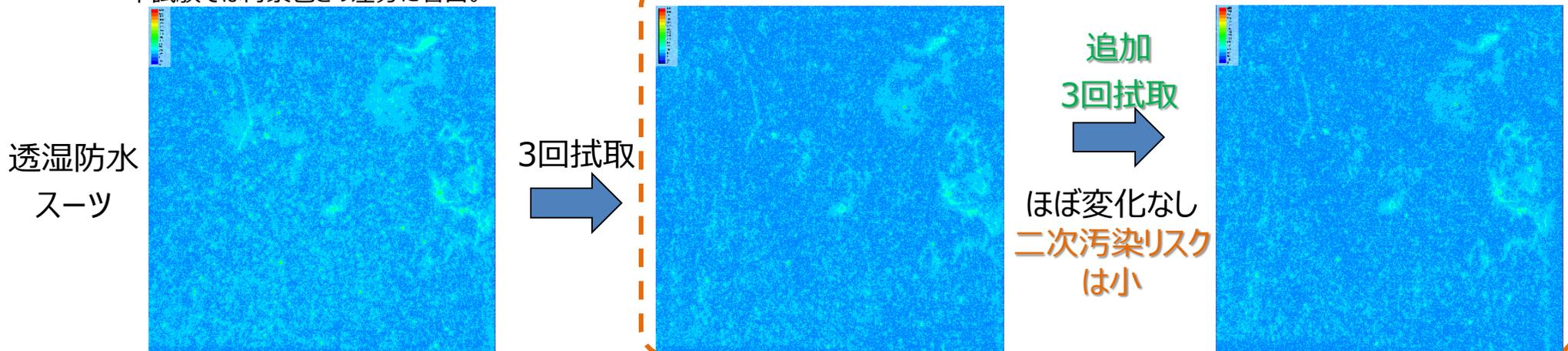
（4）最新の技術が反映された防護服の提案

ふき取り度合いの素材比較（蛍光粉末と緑色レーザーを使用） 可視化手法は「身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良」を参照



- アノラックは3回拭き取りでほぼ全てを拭き取れる
- 透湿防水スーツはアノラックと比べて除染効果は低い。(拭き取っても残るため二次汚染リスクは小さい)

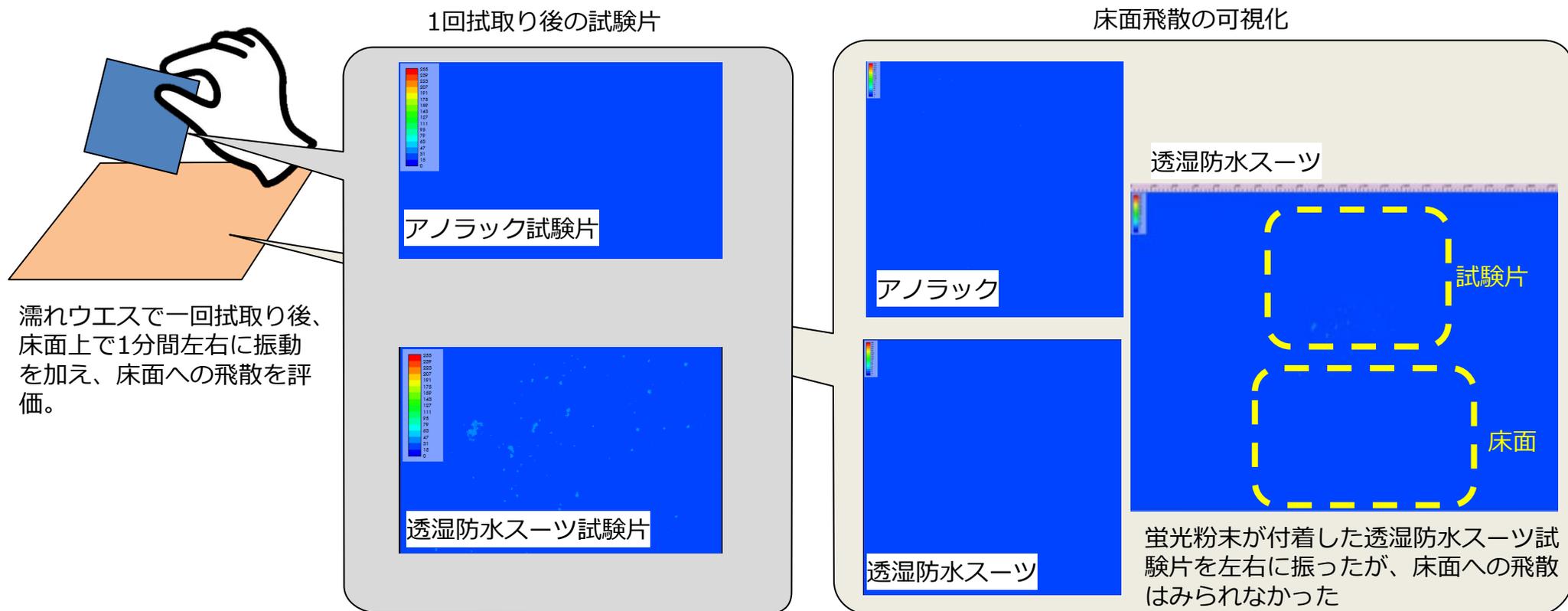
※背景色の違いは、素材の違いによるもの。
本試験では背景色との差分に着目。



2.1 得られた成果（10/14）（参考）

(4) 最新の技術が反映された防護服の提案

1回拭取り後の周辺への飛散の素材比較（蛍光粉末を緑色レーザーを使用）



本測定方法・体系での判別できる範囲において、
拭取り後に振動が加わった場合の飛散はアノラック、透湿防水スーツともに無い。

④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化

2.1 得られた成果（11/14）

(2) (3) (4) 高温多湿環境での身体負荷試験

装備条件

不織布インナー上下、カバーオール、タイベックに加え、以下の装備を着装

条件1	アノラック		全面マスク	
条件2		透湿防水スーツ	全面マスク	
条件3	アノラック			冷風マスク・冷却ベスト
条件4		透湿防水スーツ		冷風マスク・冷却ベスト



アノラック



透湿防水スーツ（開発品）



全面マスク



冷風マスク・冷却ベスト

2.1 得られた成果（12/14）

(2) (3) (4)高温多湿環境での身体負荷試験

条件

- 被験者4人(20代前半、20代後半、30代、40代)
- エアロバイクを10分間漕ぐ ≒ 8.0METs (鉛板の運搬作業相当)
- 暑さ指数(WBGT値) 31以上の高温多湿環境 (例：温度34℃、湿度70%相当)

測定項目

・深部体温
・心拍数

作業者に計器を装着し、身体負荷を実測

・スーツ内温度
・スーツ内湿度

アノラックと透湿防水
スーツの違いを計測



事後解析

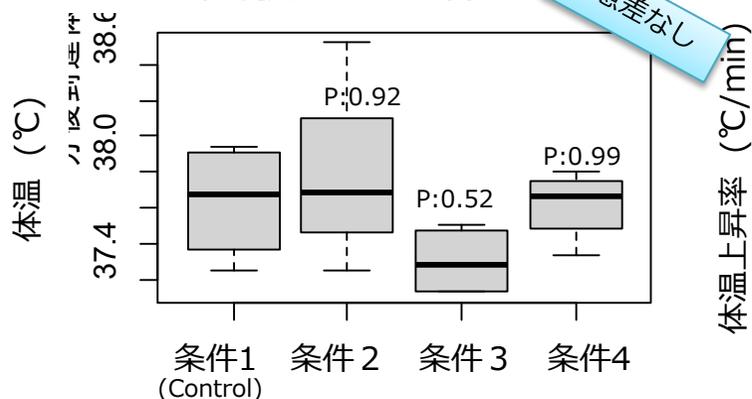
- ・箱ひげ図にプロット
- ・検定(Tukey-Kramer法)で有意差の有無を判定

2.1 得られた成果（13/14）

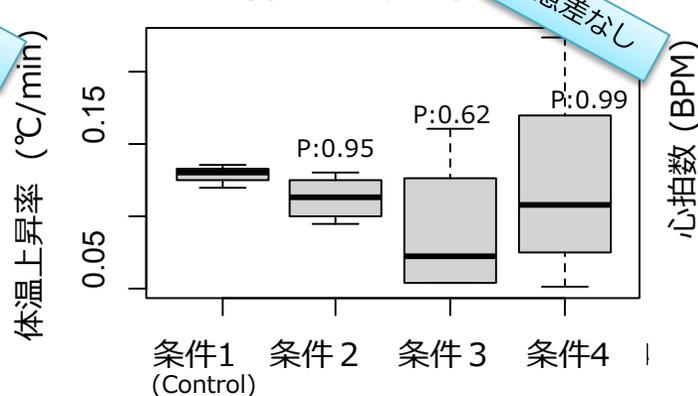
(2) (3) (4)高温多湿環境での身体負荷試験

結果

試験後到達体温



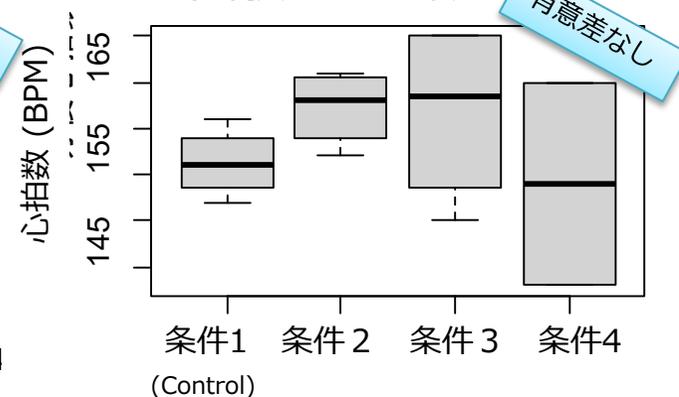
体温上昇率



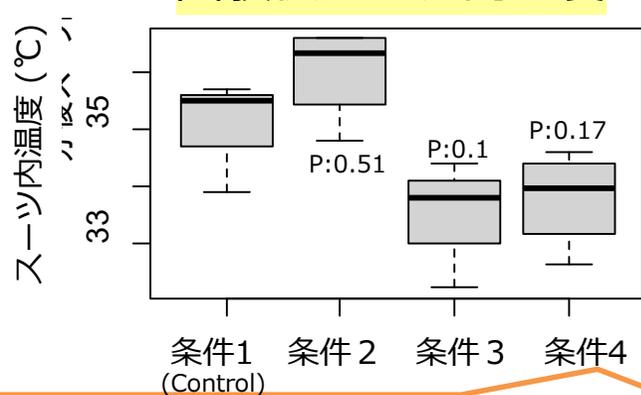
条件1: アノラック+全面マスク…Control
 条件2: 透湿防水+全面マスク
 条件3: アノラック+冷風冷却
 条件4: 透湿防水+冷風冷却

P値は条件1(Control)に対するもの

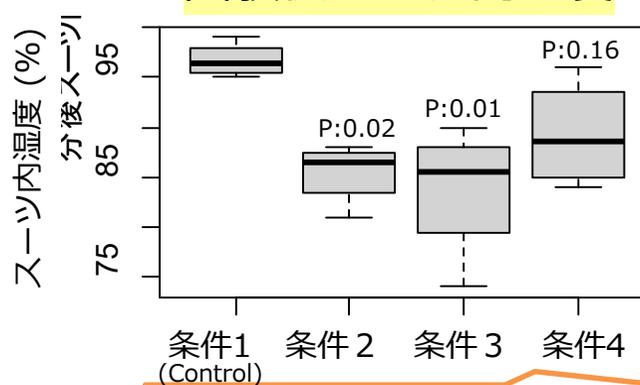
試験後心拍数



試験後スーツ内温度



試験後スーツ内湿度



解釈

- 冷風マスク・冷却ベストはスーツ内温湿度を抑制。
- 透湿防水スーツはスーツ内の湿度上昇を抑制。

個人の感想

- 冷風マスク・冷却ベストの装備は楽だった。
- アノラックでの長時間の着装は暑さと蒸れが辛い。

条件3(アノラック+冷風マスク・冷却ベスト)と条件4(透湿防水+冷風マスク・冷却ベスト)はControlに対して低い温度。

条件2(透湿防水+全面マスク)と条件3(アノラック+冷風冷却)はControlに対して低い湿度。

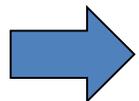
2.1 得られた成果（14/14）

(1) 新開発装備を用いた脱装手順



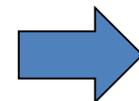
末端部

- ・マスク、袖口、裾部のシールテープをはがす



上半身

- ・頭部から腰方向へファスナーを下す



下半身

- ・腰から足元方向へハサミ等で切る

課題 裾は2重構造にしたが、もう少し短い方が脱装させやすい。

- **全面マスクへの汚染付着防止**：除染時間の短縮、汚染伝搬の防止、負担低減
- **ハサミの使用箇所が大幅に減少**：安全、汚染伝搬の防止
- 汗や湿気等の濡れによる張り付きが少なく**脱装が容易かつ迅速**：負担低減

2. 実績

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) 防護装備の迅速な除染・脱装手順の最適化の提案	3 (応用研究)	4 (実用化研究)	4 (実用化研究)	○
(2) 身体負荷軽減装備（高性能冷却ベスト）の開発	3 (応用研究)	5 (模擬実証)	5 (模擬実証)	○
(3) 身体負荷軽減装備（冷風機能付き呼吸保護具）の試作・試験	3 (応用研究)	4 (実用化研究)	4 (実用化研究)	○
(4) 最新の技術が反映された防護服の提案	3 (応用研究)	5 (模擬実証)	5 (模擬実証)	○

目標：

いずれの項目についても本事業を通じたエンジニアリングの進行により，試作・試運用のレベルに到達することを旨とする。

終了時自己評価：

いずれの項目についても当初目標のTRLを達成した。

3. 課題

○最新の技術が反映された防護服の提案

- ・ 透湿防水スーツのサイズ展開、構造の改良が必要
(フリーサイズ→S/M/L、裾の構造等の見直し)

○身体負荷軽減装備の開発

- ・ 開発したマスクとホースのアタッチメント部の改良が必要
(抜け防止・抜けた場合に汚染した空気を吸わない対策)
- ・ 冷風機能付き呼吸保護具のリュックサック部の改良が必要
(よりコンパクトかつ容易に使える構造にする必要がある。)

○防護装備の迅速な除染・脱装手順の最適化検討のための高BG(β ・ γ 線)下で使用可能な α 汚染をサーベイメータの開発

- ・ α 位置検出器の測定ヘッドの小型化と軽量化

※以上、本プロジェクト終了後、現場実証(TRL:6～)に向けた課題として整理した

事業内容

a) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討

② ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上

③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認

b) 内部取り込みに対する防護に係る技術開発

④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化

⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

c) 内部被ばく対応システムの開発

⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発

1.概要

1.1 目的

- (1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
- (2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

1.2 目標（技術成熟度）

内容	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
(1) 防護装備に付着した汚染の広がりに関する評価	1 (基礎研究)	3 (応用研究)
(2) 新規除染方法の検討、確立	3 (応用研究)	4 (実用化研究)

終了時目標：

- (1) 従来経験、他分野の既存技術等の組み合わせ及び放射性汚染の特徴を考慮したエンジニアリングを進行させる。
- (2) より効率的な除染方法・除染剤を適用とした新たな除染技術を試験し、模擬実証につなげるための結果を得る。

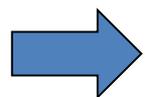
2. 実績

2.1 得られた成果（概要） ※詳細は次ページ以降

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価

⇒ 蛍光塗料と専用カメラを用いたコールド試験を通じて以下を実施した。

- ・全面マスクやアノラックスーツの拭き取りにおいて残存しやすい箇所の明確化（実験1・2）
→残存しやすい箇所を可視化できた。
- ・汚染の飛散が少ないゴム手袋の脱装方法の検討（実験3）
→複数の脱装方法を試験し、最適な脱装方法を選定した。
- ・除染効果の確認方法の標準化検討



定量的リスク評価にインプットするためのリスクの特定と分析を実施した

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

⇒ コールド試験及び放射性物質を用いたホット試験を実施し、市販の洗浄剤、マイクロバブルシャワーヘッド、拭き取りなどによる皮膚汚染に対する除染効果を確認した。（実験4～8）

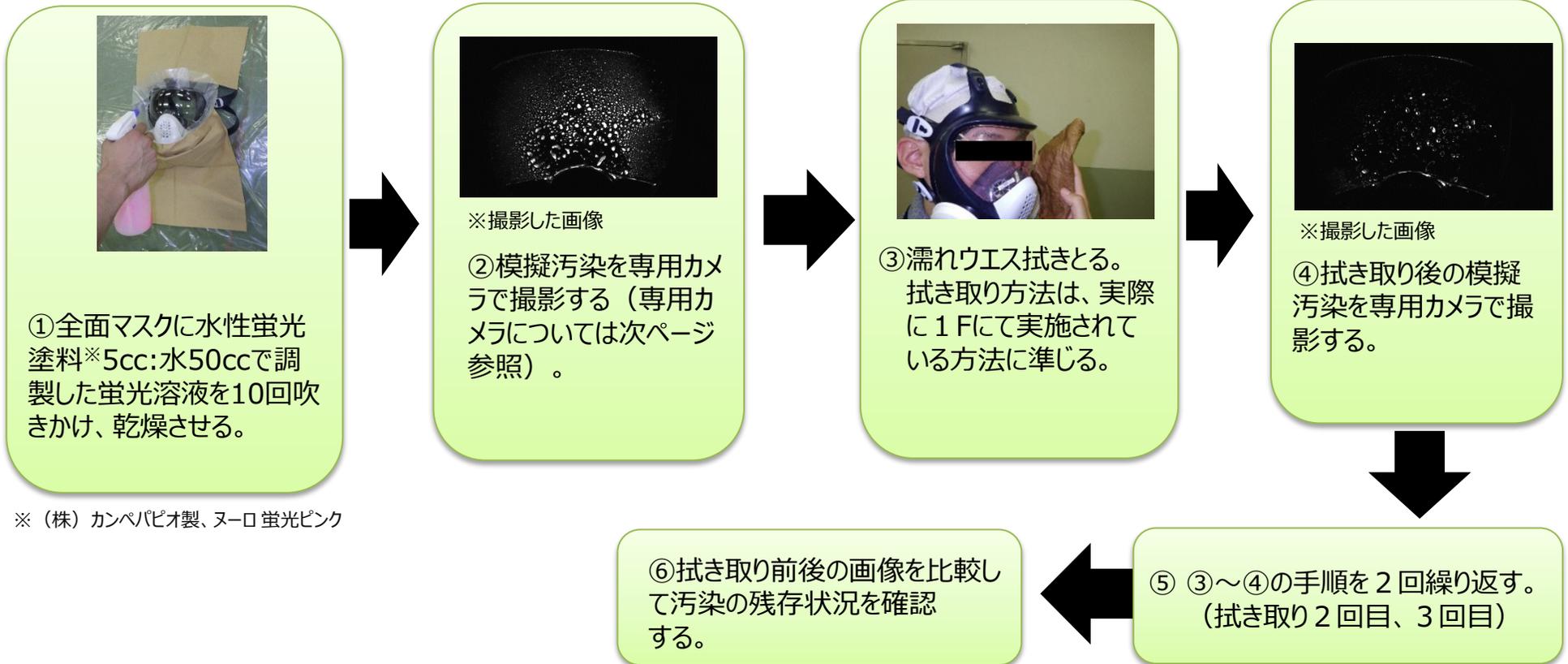
→除染率の高い洗剤やマイクロバブルシャワーの除染効果を試験的に証明できた。

- (1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における
二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価

2.1 得られた成果 (1/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験1.全面マスク拭き取り試験】

● 試験方法



2.1 得られた成果 (2/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験1.全面マスク拭き取り試験】

● 試験方法 (つづき)

・専用カメラ

微粒子可視化システム

Particle Viewer PV2-IV (カトウ光研 (株))

→レーザーを照射し、蛍光画像を撮影する。

粒子 (最小径 : 1 μm) の動く様子を撮影するとともに、その個数を定量測定することができる。



実験の様子

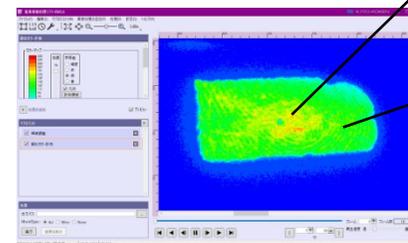
・カラーマップの作成

汚染を蛍光塗料で模擬し、上記カメラで撮影した静止画像を「画像処理ソフトKM2.0」にて解析し、汚染の面積・強度にあたるカラーマップを作成した。

→発光量(0~255)を16段階の発光レベルに分割して表示する。

発光量が多い (汚染が多い) ほど暖色になり、

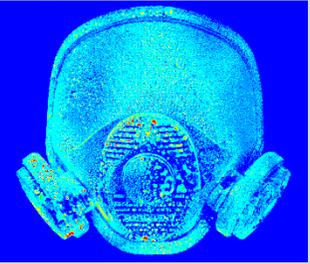
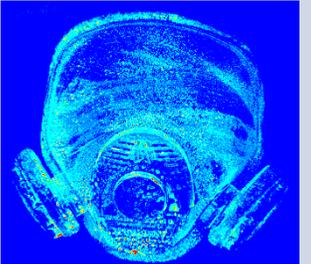
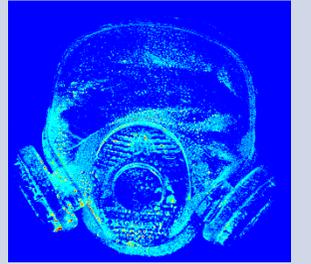
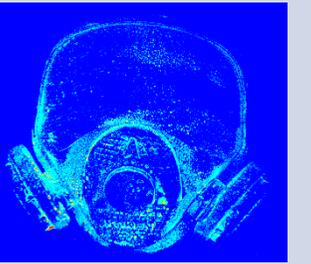
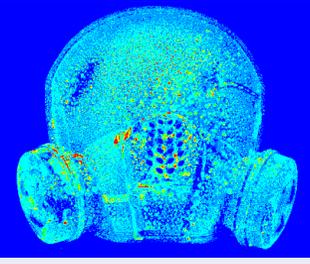
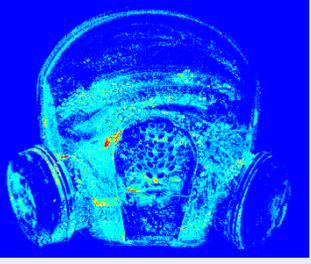
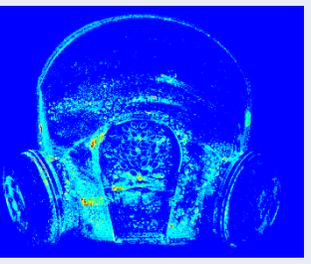
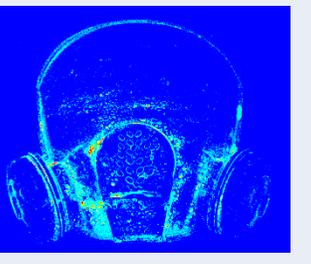
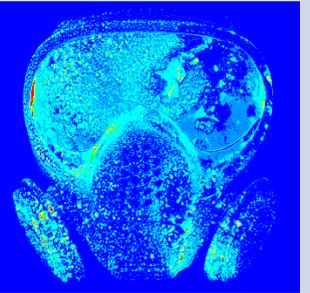
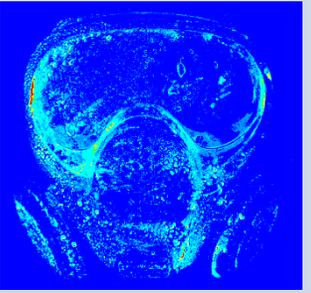
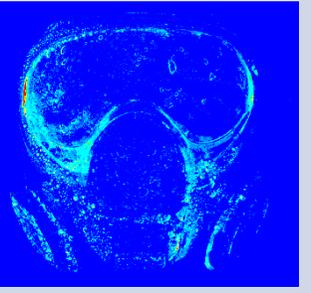
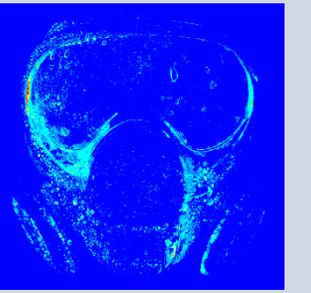
発光量が少ない (汚染が少ない) ほど寒色になる。



KM2.0解析画面
カラーマップの例

2.1 得られた成果 (3/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験1.全面マスク拭き取り試験（3回拭き取り後）】

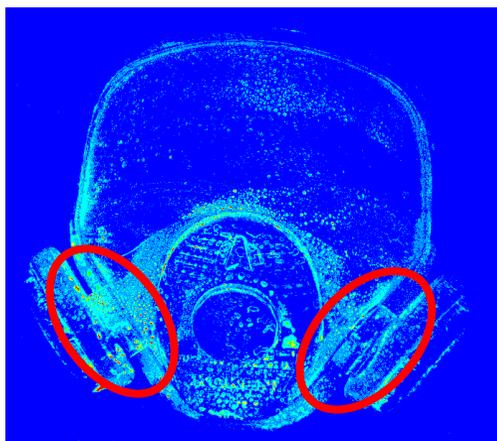
全面マスク種類	除染前	除染1回目	除染2回目	除染3回目
タイプA				
タイプB				
タイプC				

2.1 得られた成果 (4/51)

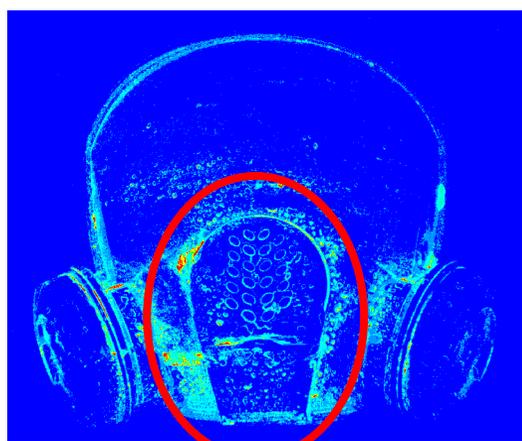
(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価

【実験1.全面マスク拭き取り試験】

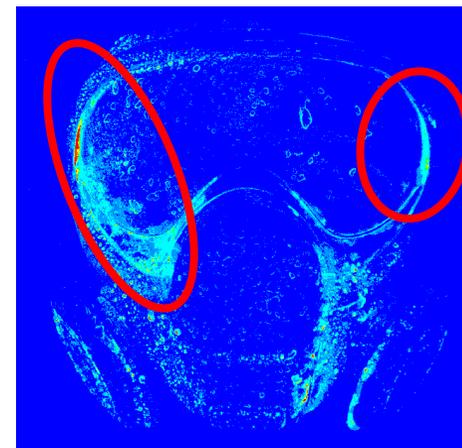
実験結果 (3回拭き取り後)



タイプA



タイプB



タイプC



- ・マスク表面は拭き取られている一方、面体の端部や凹部は拭き取りにくく、除染しきれない可能性がある。
- ・汚染が残りやすい箇所は、各メーカーで異なるため、形状に合わせた拭き取り方法を決め、教育することが望まれる。

2.1 得られた成果 (5/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験2.アノラックスーツ拭き取り試験（方法）】



①アノラックスーツに蛍光溶液※1を吹きかける
（身長168cm LLサイズ着用）。



撮影した画像
②模擬汚染を専用カメラ※2
で撮影する。



③濡れウエスで
拭きとる。※3

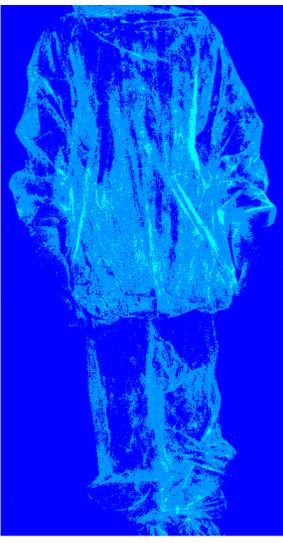
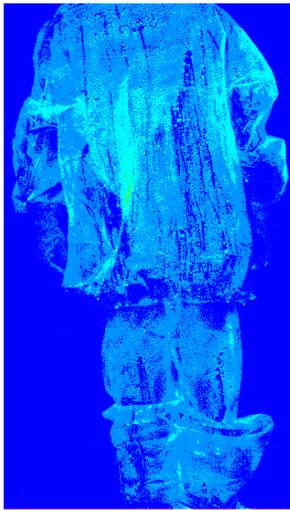
⑤拭き取り前後の画像を比較し
て汚染の残存状況を確認する。

④拭き取り後の模擬汚染を
専用カメラで撮影する。

- ※1 実験1と同じものを使用
- ※2 実験1と同じものを使用
- ※3 1Fで実施されている方法

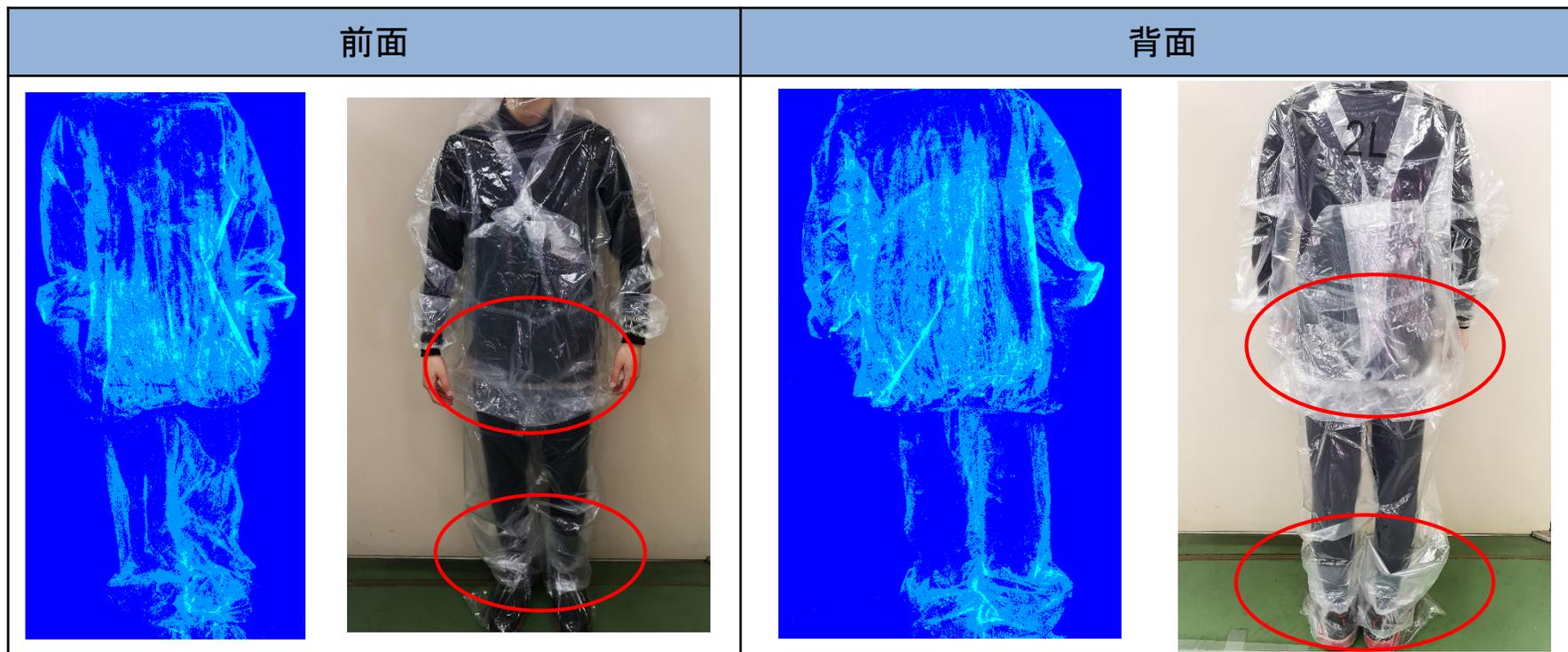
2.1 得られた成果 (6/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験2.アノラックスーツ拭き取り試験】

	拭き取り前	拭き取り1回目	拭き取り2回目	拭き取り3回目
前面				
背面				

2.1 得られた成果 (7/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験2.アノラックスーツ拭き取り試験（拭き取り3回目）】

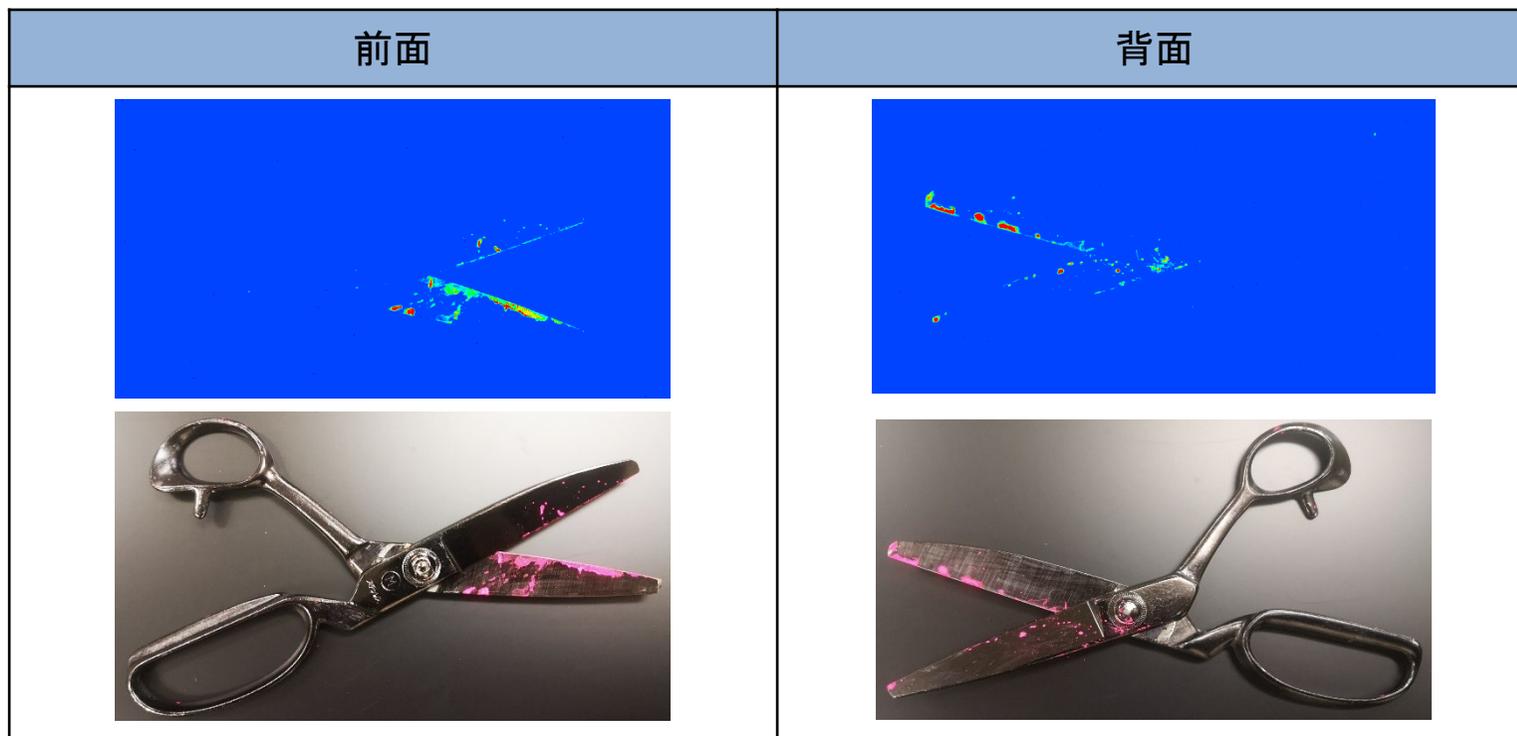


- 前面、背面共に肩部及び脚部付近は良く拭き取られている。
- アノラックの裾には汚染が残存しやすいことが確認された。
- 体型に合わないサイズを着用している場合、アノラックスーツがだぶつき、拭き取りづらく、汚染が残存しやすくなることが推測される。また、下腹部周辺の拭き取りは、除染者が力をいれにくいことも、要因の一つであると考えられる。

2.1 得られた成果 (8/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験2.アノラックスーツ拭き取り試験（補足）】

汚染が残存している状態で使用したハサミの汚染拡散状況



- 刃全体に汚染が付着していることが確認できるため、脱装に使用したハサミは、使用の都度、濡れウエス等で除染することが推奨される。

2.1 得られた成果 (9/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価

【実験3.ゴム手袋脱装試験】

汚染が飛散しにくいゴム手袋の脱装方法を検討した。（パターン①～⑤）



①ゴム手袋の両面に蛍光溶液※1を吹きかける。

※1 実験1と同じものを使用



②ゴム手袋を脱装した際の模擬汚染の飛散具合を専用カメラ※2で撮影する。

※2 実験1と同じものを使用

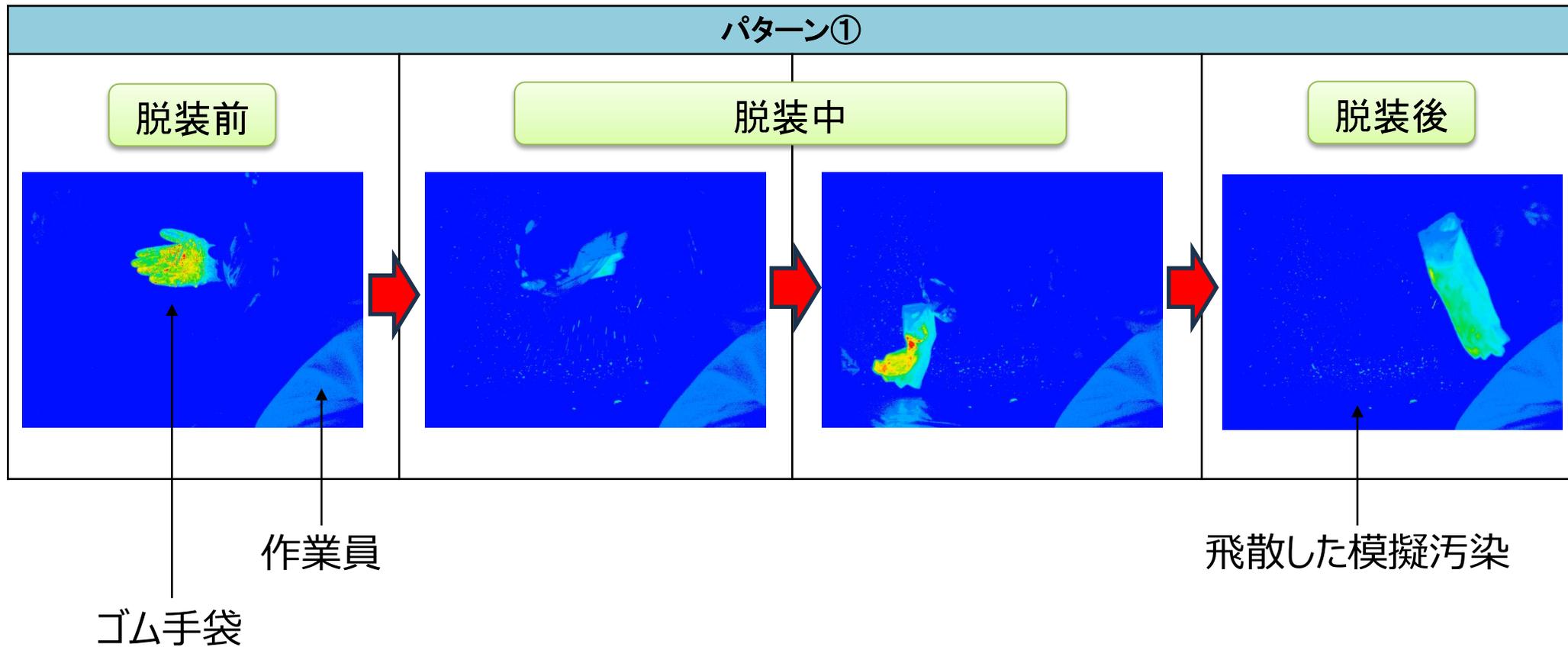
パターン①	パターン②	パターン③	パターン④	パターン⑤
 <p>手を開いた状態で脱装</p>	 <p>親指を中に入れた状態で脱装</p>	 <p>指先をすぼめた状態で脱装</p>	 <p>指先を上向きにすぼめ、ゴム手袋装着側の手を抜くように脱装</p>	 <p>指先を下向きにすぼめ、ゴム手袋装着側の手を抜くように脱装</p>

2.1 得られた成果 (10/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価

【実験3.ゴム手袋脱装試験】

● 模擬汚染の飛散状況

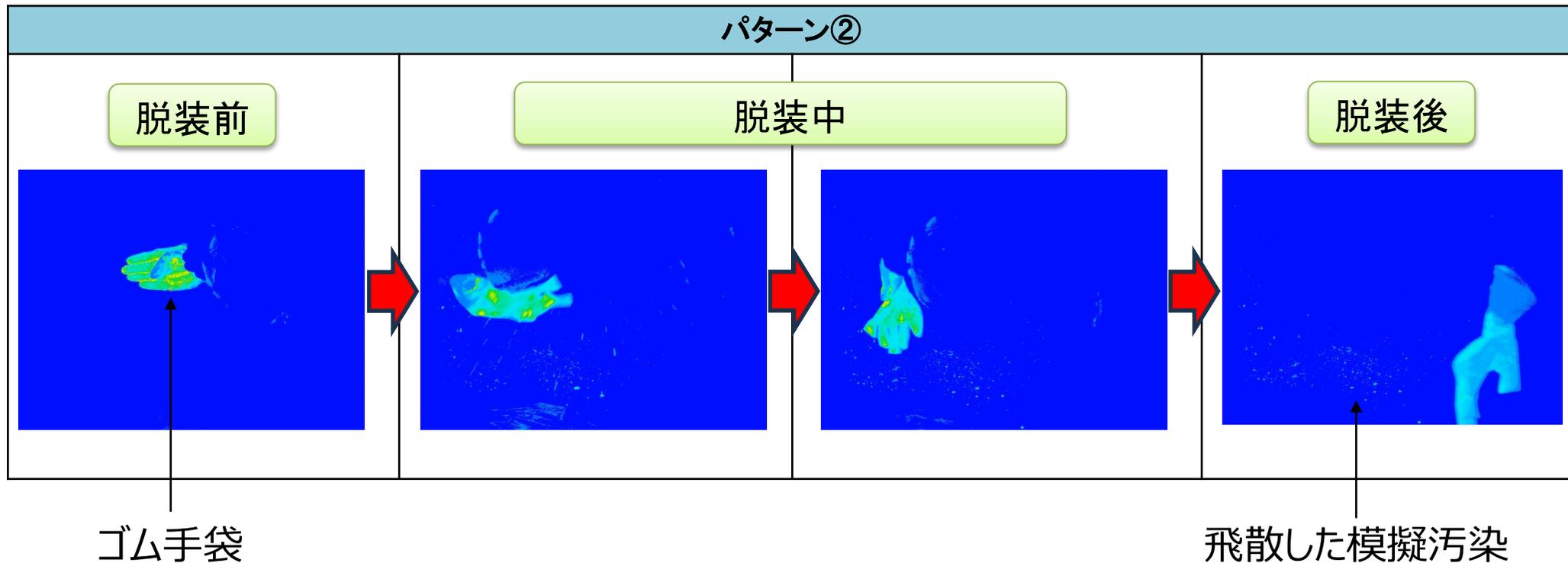


2.1 得られた成果 (11/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価

【実験3.ゴム手袋脱装試験】

● 模擬汚染の飛散状況

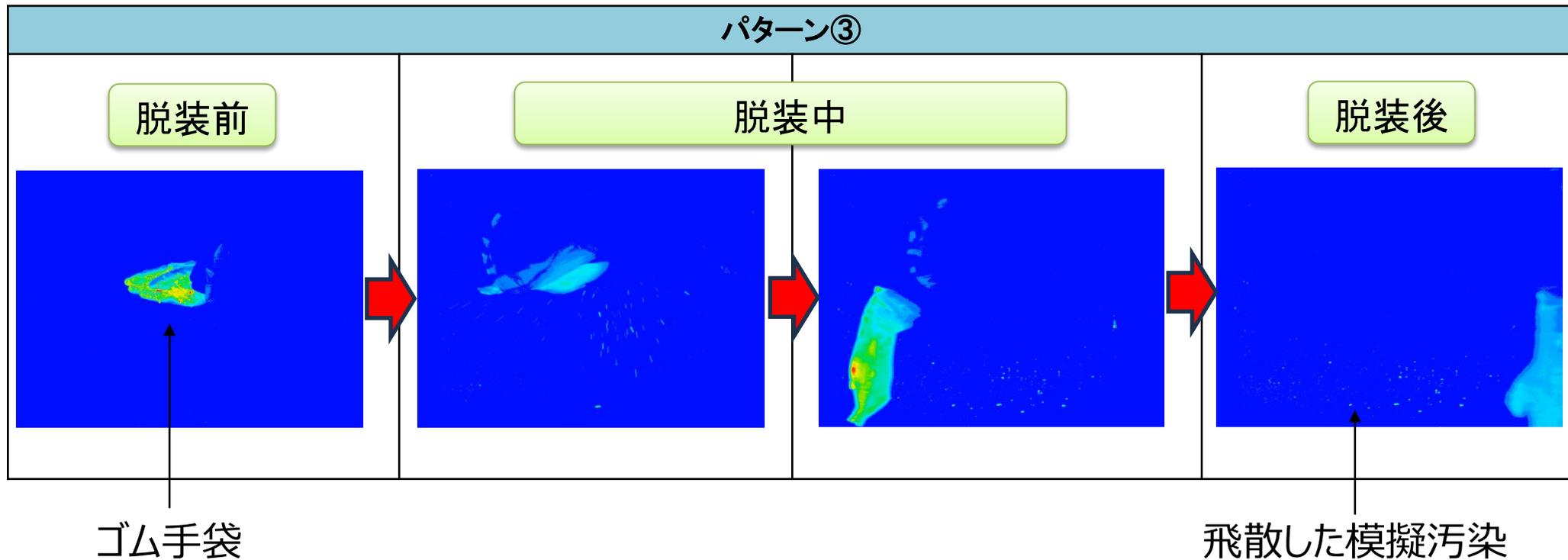


2.1 得られた成果 (12/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価

【実験3.ゴム手袋脱装試験】

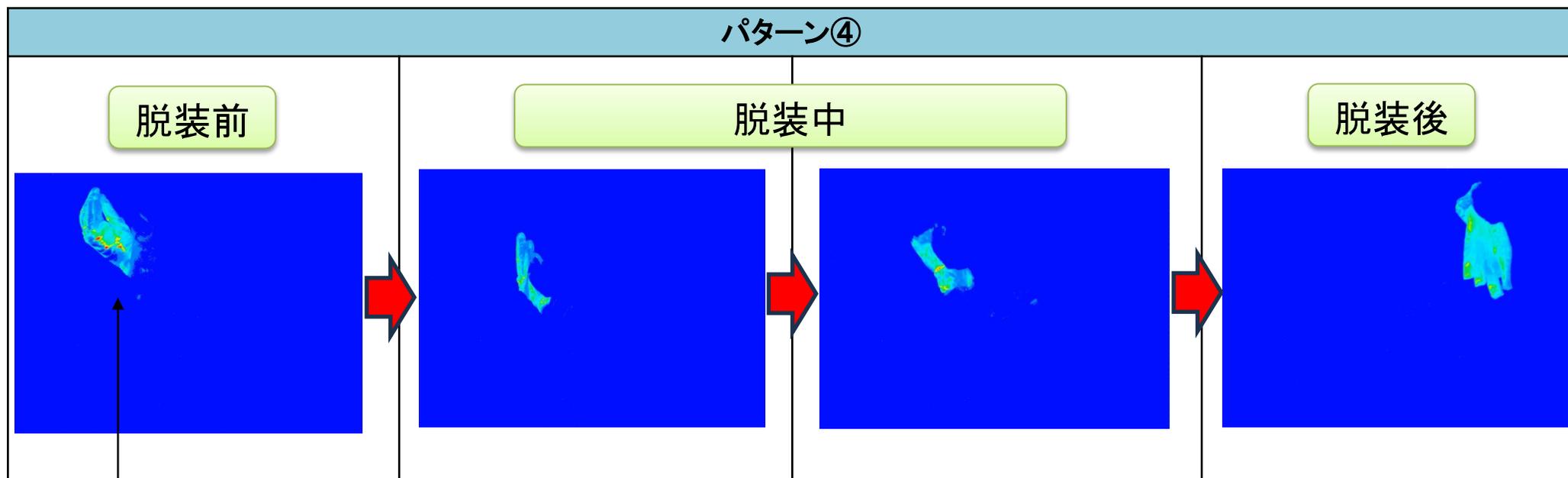
● 模擬汚染の飛散状況



2.1 得られた成果 (13/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験3.ゴム手袋脱装試験】

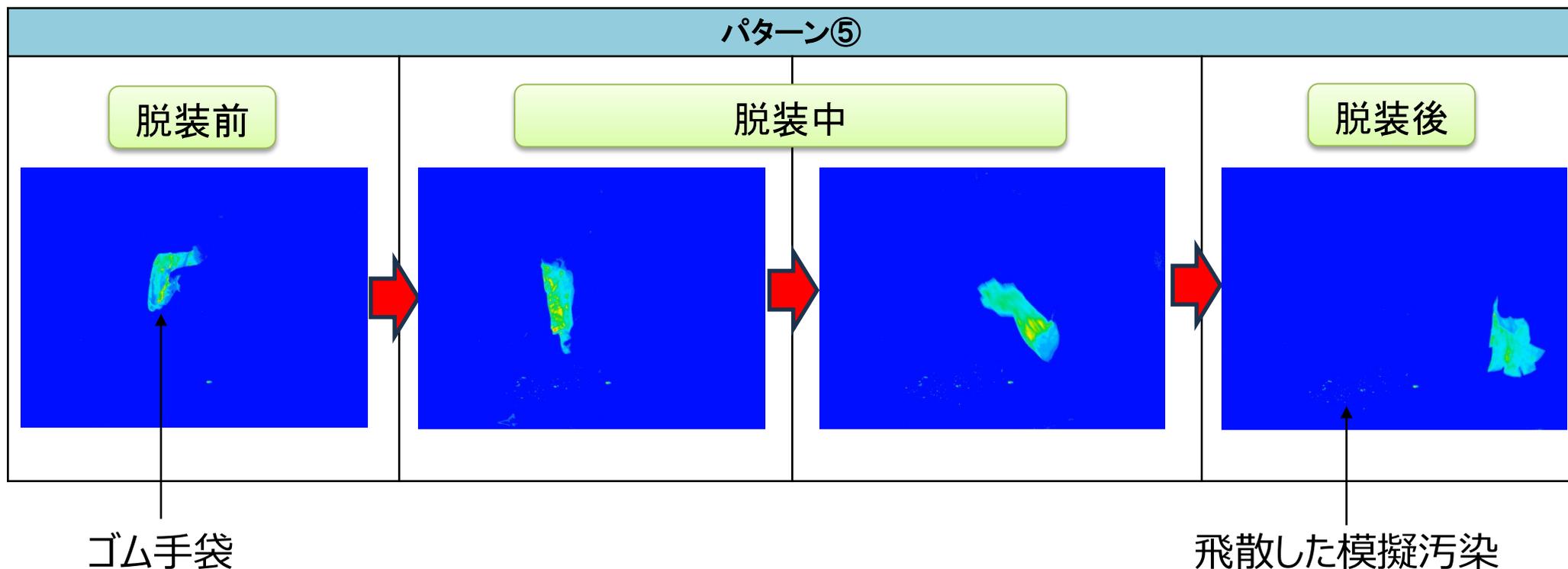
● 模擬汚染の飛散状況



2.1 得られた成果 (14/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験3.ゴム手袋脱装試験】

● 模擬汚染の飛散状況



2.1 得られた成果 (15/51)

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価
【実験3.ゴム手袋脱装試験】

- 指先を上向きにすぼめ、ゴム手袋装着側の手を抜くように脱装する方法（パターン④）が最も汚染の飛び散りが少ない脱装方法であることが確認できた。

パターン①	パターン②	パターン③	パターン④	パターン⑤
				
手を開いた状態で脱装	親指を中に入れた状態で脱装	指先をすぼめた状態で脱装	指先を上向きにすぼめ、ゴム手袋装着側の手を抜くように脱装	指先を下向きにすぼめ、ゴム手袋装着側の手を抜くように脱装

2.1 得られた成果（16/51）

(1) 濡れウエスによる拭き取り効果及び脱装時における二次汚染（除染補助者、除染エリア周辺等）リスクの評価

【実験1～3の結果まとめ】

● 実験1. 全面マスク拭き取り試験

面体端部や凹部に、汚染が残留しやすいことが確認できた。

また、メーカーによって汚染が残留しやすい場所に違いがあることも確認できた。

● 実験2. アノラックスーツ拭き取り試験

裾部に汚染が残存しやすいことが確認できた。

● 実験3. ゴム手袋脱装試験

指先を上向きにすぼめ、ゴム手袋装着側の手を抜くように脱装する方法（パターン④）

が最も汚染の飛散が少ない脱装方法であることが確認できた。

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、
検討及び除染効果の評価

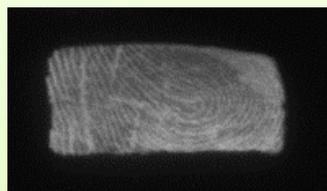
2.1 得られた成果 (17/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【コールド試験における試験フロー (実験4～7)】



① 指先に模擬汚染として、水性塗料※1又は油性塗料※2を塗布（1.5cm程度の長さで2往復塗布）し、所定の時間放置する。



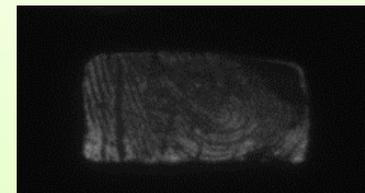
※撮影した画像

② 模擬汚染を専用カメラ※3で撮影する。

※3 実験1と同じものを使用



③ 各種方法で除染する。（除染方法は次ページにて説明）



※撮影した画像

④ 除染後の模擬汚染を専用カメラで撮影する。

⑤ ③～④の手順を計3回繰り返す。

⑥ 除染前後の画像を解析し、除染率を算出する。

※1 三菱鉛筆（株）製、ポスターカラーマーカー 角芯・極太もも PC-17K

※2 三菱鉛筆（株）製、ペイントマーカー 角芯 太字 ピンク PX-30

2.1 得られた成果 (18/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【コールド試験における実験内容】

試験のポイント	洗浄剤	シャワー	模擬汚染	放置時間*2	除染方法
実験4. 洗浄剤の違い	市販洗浄剤 6種*1	ノーマルシャワー	水性塗料 又は 油性塗料	5分間	洗浄剤塗布、1分間放置 → 1分間シャワー → 乾燥
実験5. シャワーヘッドの違い	使用せず	ノーマルシャワー、 マイクロバブル噴出タイプ のシャワーヘッド 3種	水性塗料	5分間	1分間シャワー → 乾燥
実験6. その他の方法	使用せず	使用せず	水性塗料	5分間	①アルコールティッシュ拭き取り ②温タオル*3拭き取り ③パック剤A (毛穴汚れ除去用) ④パック剤B (スキンケア用) ⑤ウォーターピーリング (超音波洗浄)
実験7. 放置時間の違い	(実験4に同じ)	(実験4に同じ)	(実験4に同じ)	40分間	(実験4に同じ)

*1 ハンドクリーナーを中心に、皮膚への悪影響の無い洗剤を選定し、試験を行った。

*2 模擬汚染 (塗料) 塗布後、除染までの放置時間

*3 約40度の温水で濡らして絞ったキムタオル

2.1 得られた成果 (19/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験4.洗剤の違いによる除染能力の比較 (放置時間5分・水性塗料)】

実験結果 (カラーマップ)

洗剤	洗浄前	洗浄1回目	洗浄2回目	洗浄3回目
洗剤A (ハンドソープ泡タイプ)				
洗剤B (弱酸性ボディソープ)				
洗剤C (中性食器用洗剤)				
洗剤D (工業用ハンドソープ)				
洗剤E (オレンジオイル系)				
洗剤F (オレンジオイル系 クレンザー)				

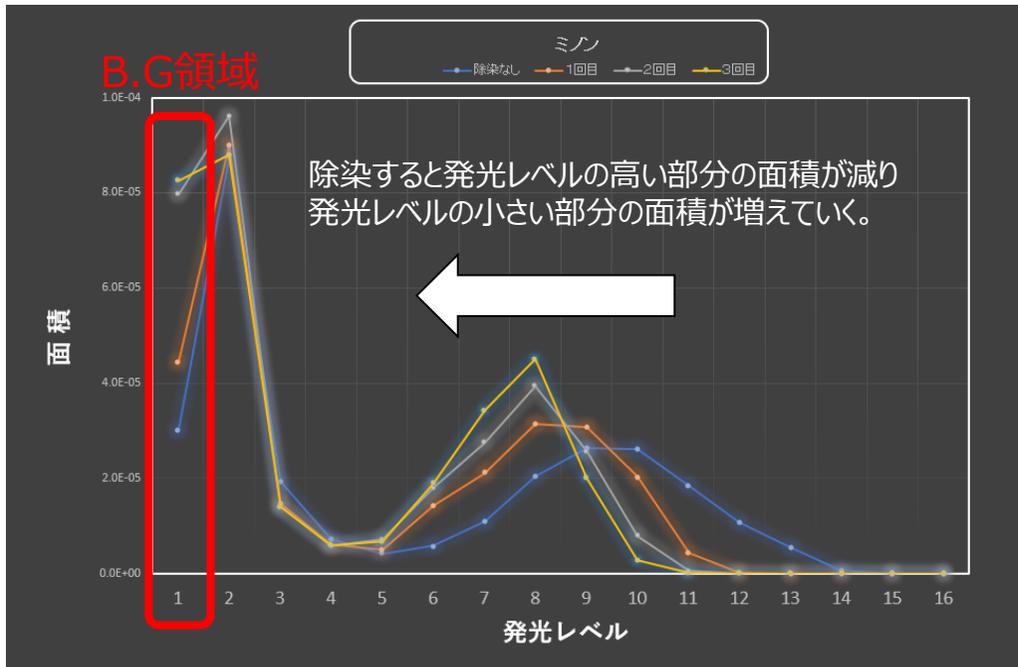
⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

2.1 得られた成果 (20/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【データ解析方法】

撮影した画像を、以下のように解析する。



B.G領域 →

発光レベル	除染前の面積	除染3回目の面積
1(計算からは除外)	3.02E-05	8.25E-05
2	8.74E-05	8.79E-05
3	1.93E-05	1.39E-05
4	7.20E-06	5.96E-06
5	4.20E-06	6.64E-06
6	5.76E-06	1.88E-05
7	1.10E-05	3.43E-05
8	2.04E-05	4.51E-05
9	2.62E-05	2.00E-05
10	2.61E-05	2.72E-06
11	1.84E-05	1.12E-07
12	1.07E-05	0
13	5.35E-06	0
14	6.32E-07	0
15	2.76E-09	0
16	0	0
【各発光レベルの面積 × 発光レベル】の総和	1.46E-03	1.20E-03
除染率(%)		18

本試験においては、除染率を以下のように定義する。

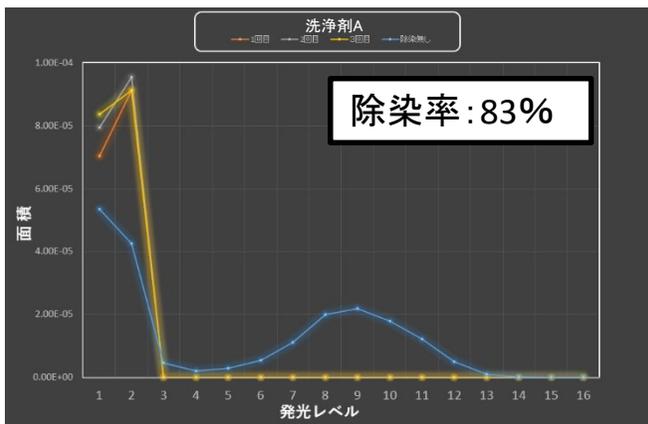
$$\text{除染率(\%)} = \left(100 - \frac{\text{除染3回目の【各発光レベルの面積} \times \text{発光レベル】の総和}}{\text{除染前の【各発光レベルの面積} \times \text{発光レベル】の総和}} \right) \times 100$$

⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

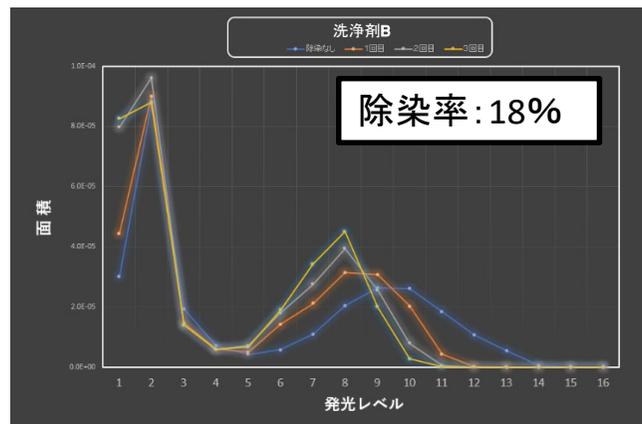
2.1 得られた成果 (21/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

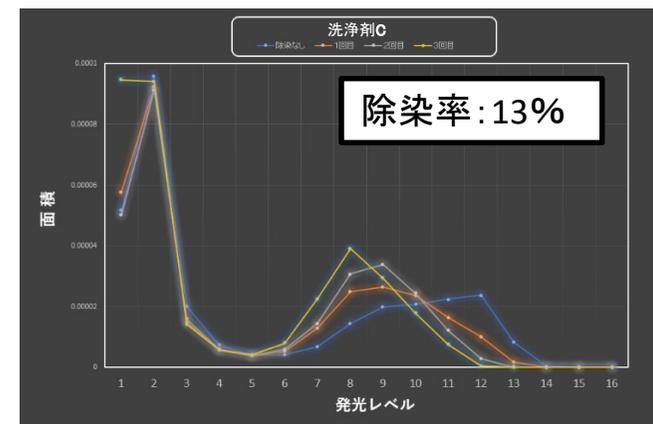
【実験4.洗浄剤の違いによる除染能力の比較 (放置時間5分・水性塗料)】



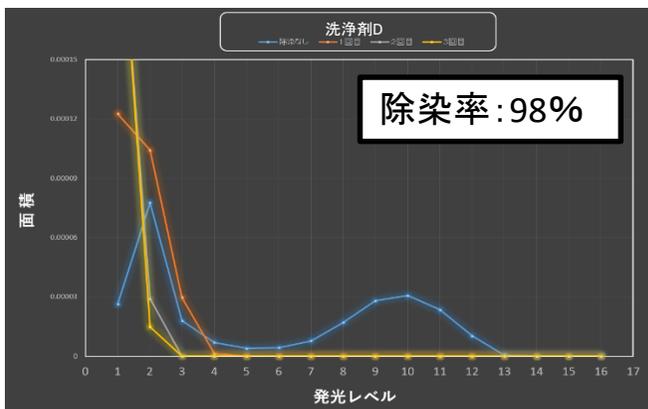
洗浄剤A



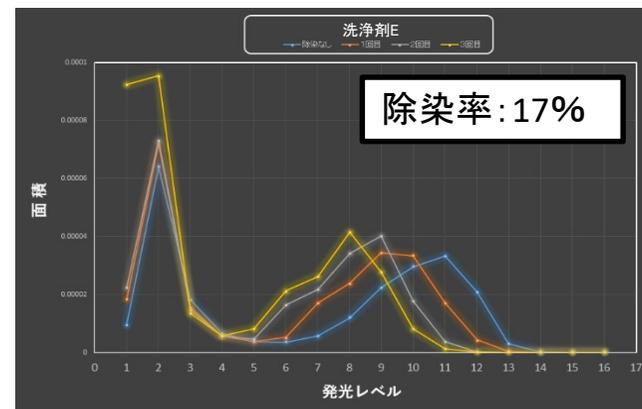
洗浄剤B



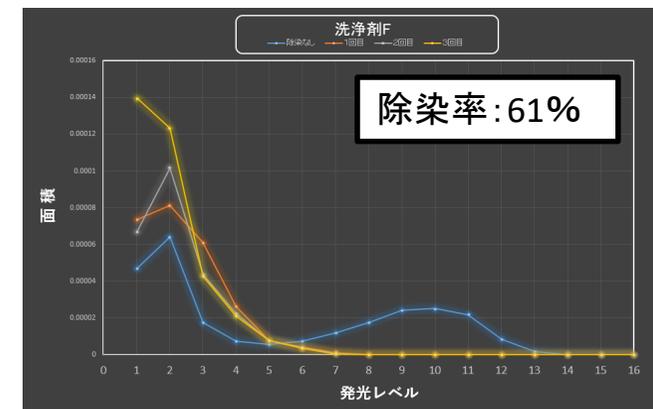
洗浄剤C



洗浄剤D



洗浄剤E

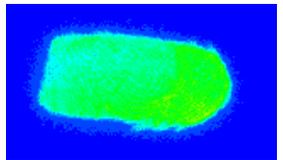
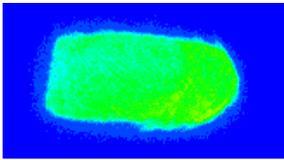
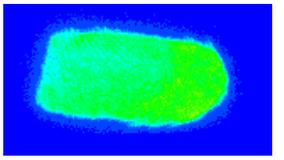
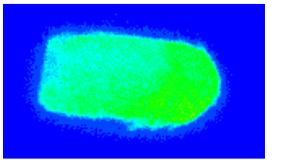
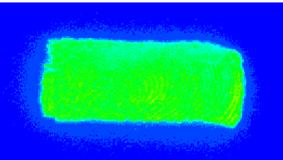
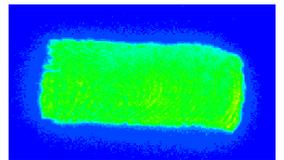
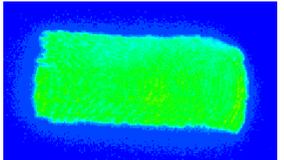
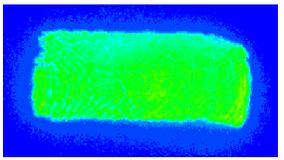
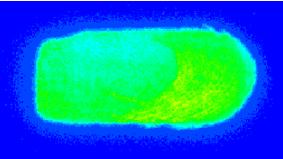
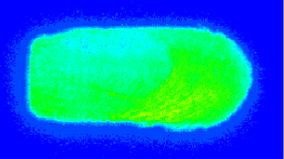
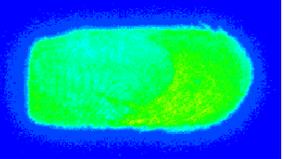
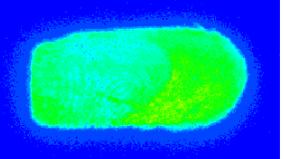
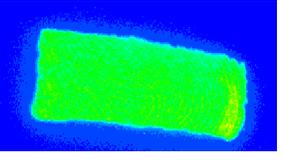
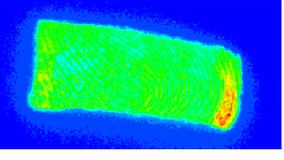
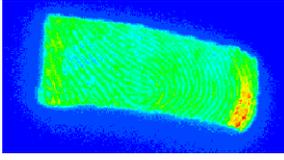
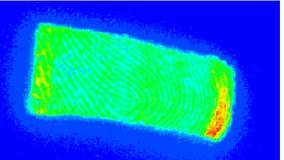
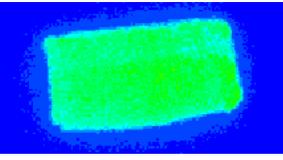
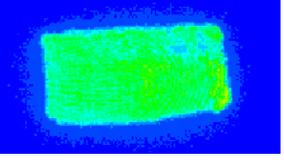
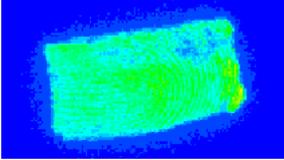
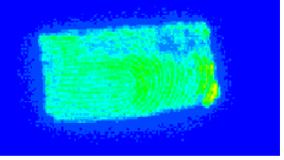
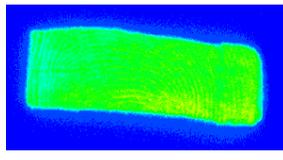
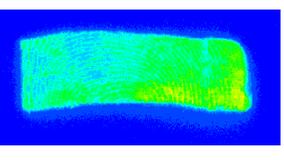
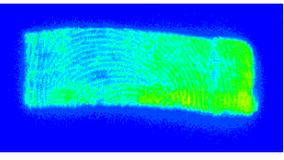
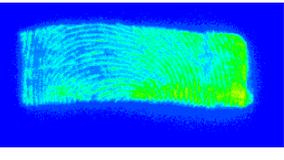


洗浄剤F

2.1 得られた成果 (22/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

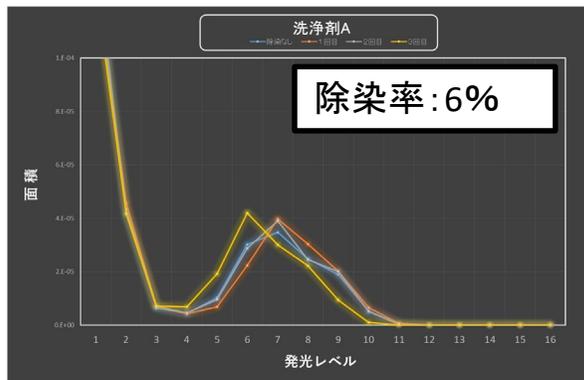
【実験4.洗剤の違いによる除染能力の比較 (放置時間5分・油性塗料)】

種類	除染前	除染1回目	除染2回目	除染3回目
洗剤A (ハンドソープ泡タイプ)				
洗剤B (弱酸性ボディソープ)				
洗剤C (中性食器用洗剤)				
洗剤D (工業用ハンドソープ)				
洗剤E (オレンジオイル系)				
洗剤F (オレンジオイル系 クレンザー)				

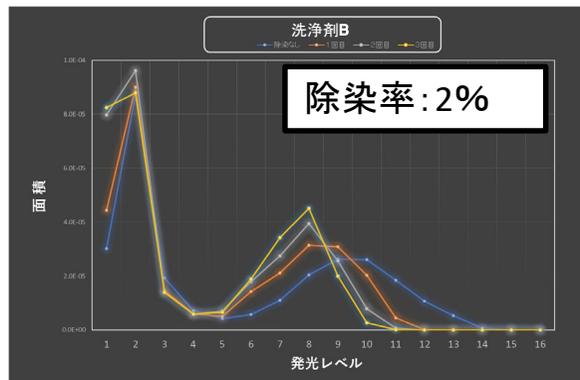
2.1 得られた成果 (23/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

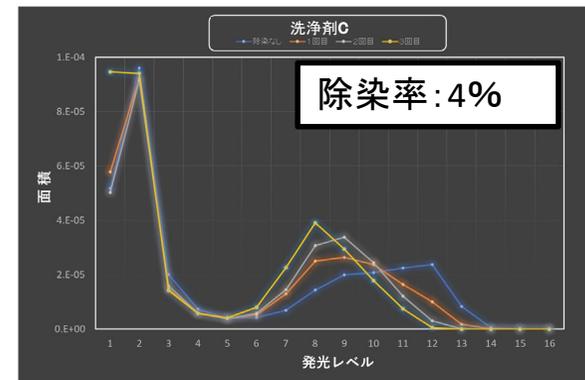
【実験4.洗浄剤の違いによる除染能力の比較 (放置時間5分・油性塗料)】



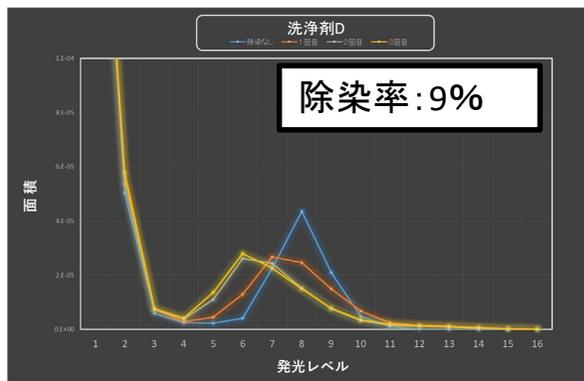
洗浄剤A



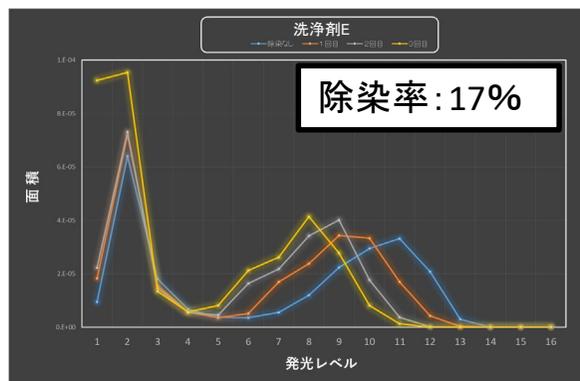
洗浄剤B



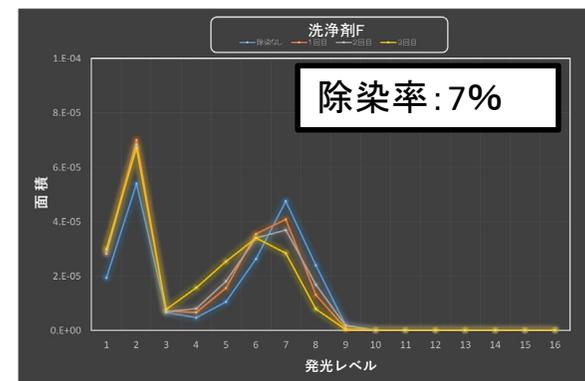
洗浄剤C



洗浄剤D



洗浄剤E



洗浄剤F

2.1 得られた成果 (24/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験4の試験結果】

3回除染後

		除染剤、機器					
実験4 (洗浄剤の違い)		洗浄剤A	洗浄剤B	洗浄剤C	洗浄剤D	洗浄剤E	洗浄剤F
除染率	水性	83	18	13	98	17	61
	油性	6	2	4	9	17	7

洗浄剤によって除染効果に顕著な違いがみられた。

また、油性塗料に対する除染試験においては、水性塗料による試験と比べ、除染率は低くなることが確認された。(水性塗料の場合の除染率は、洗浄剤Dの98% が最大だが、油性塗料の場合、最大でも洗浄剤Eの20%程度であった。)

2.1 得られた成果 (25/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験5.シャワーヘッドの違いによる除染能力の比較】

実験結果 (カラーマップ)

シャワーヘッドの種類	洗浄前	洗浄1回目	洗浄2回目	洗浄3回目
ノーマル				
マイクロバブルA				
マイクロバブルB				
マイクロバブルC				

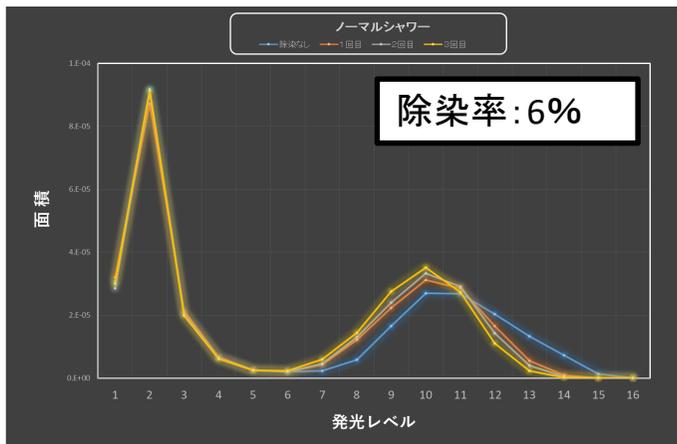
2.1 得られた成果 (26/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

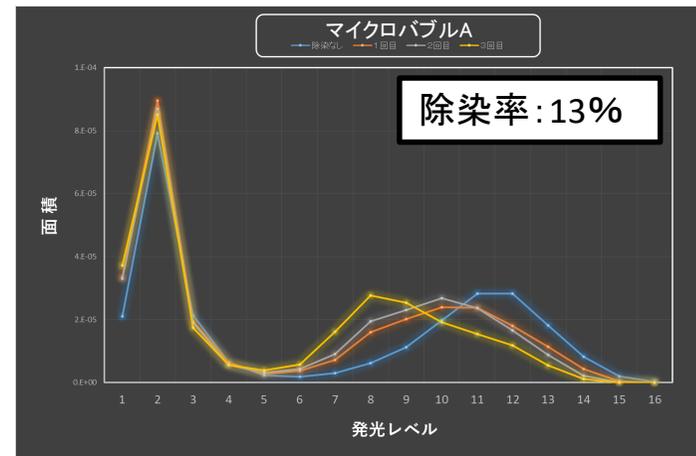
【実験5.シャワーヘッドの違いによる除染能力の比較】

実験結果

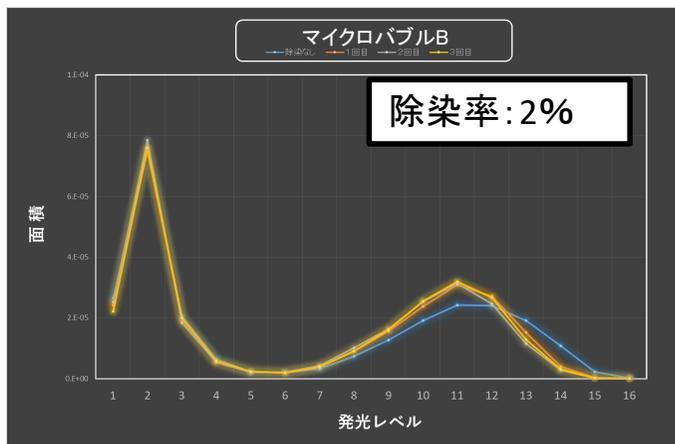
(データ解析)



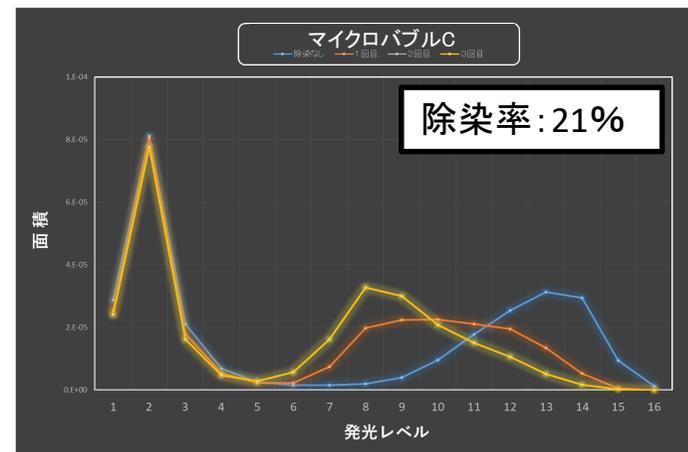
ノーマル



マイクロバブルA



マイクロバブルB



マイクロバブルC

2.1 得られた成果 (27/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験5の試験結果】

3回除染後

		除染機器			
実験5 (シャワーの違い)	ノーマル	マイクロバブルA	マイクロバブルB	マイクロバブルC	
除染率	6	13	2	21	

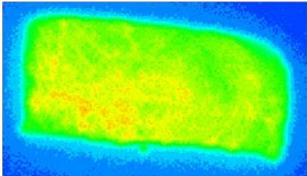
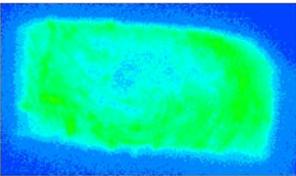
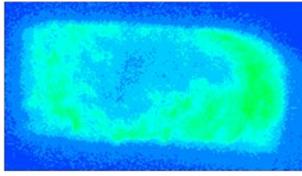
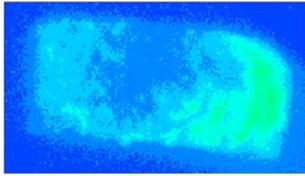
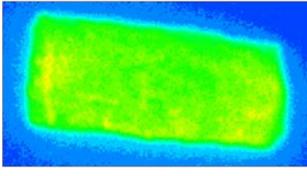
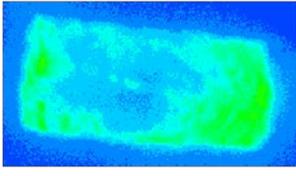
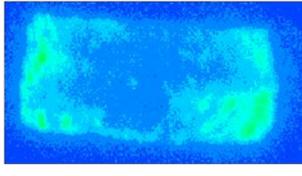
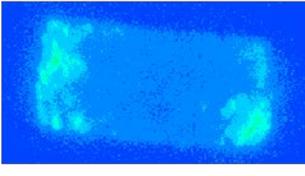
→マイクロバブルを噴出するシャワーヘッドの一部は、ノーマルシャワーヘッドに比べ除染率が高いことが確認された。

2.1 得られた成果 (28/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験6.その他の除染方法による除染能力の確認 ①拭き取り材】

実験結果 (カラーマップ)

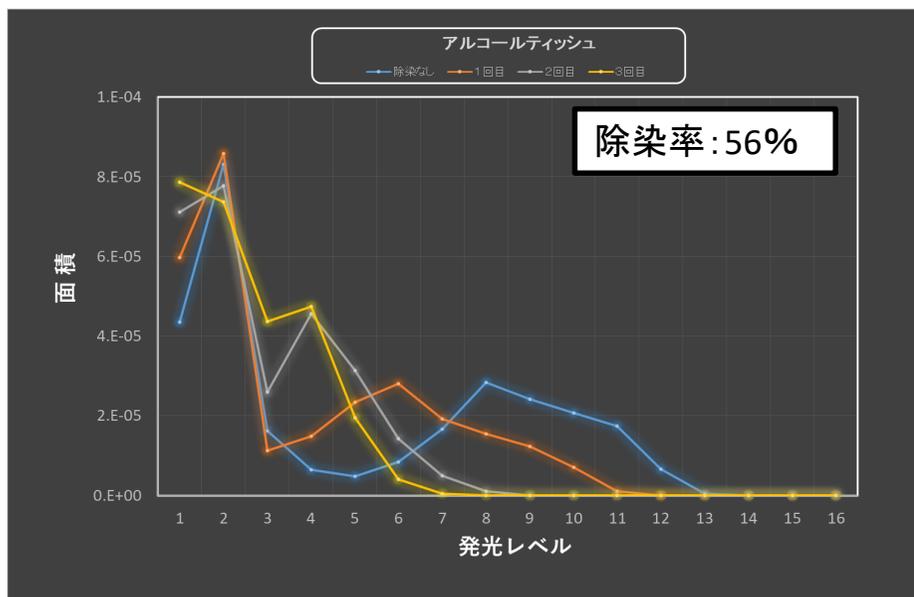
種類	除染前	除染1回目	除染2回目	除染3回目
アルコール ティッシュ				
温タオル (約40度の温水で濡らして絞った紙タオル)				

2.1 得られた成果 (29/51)

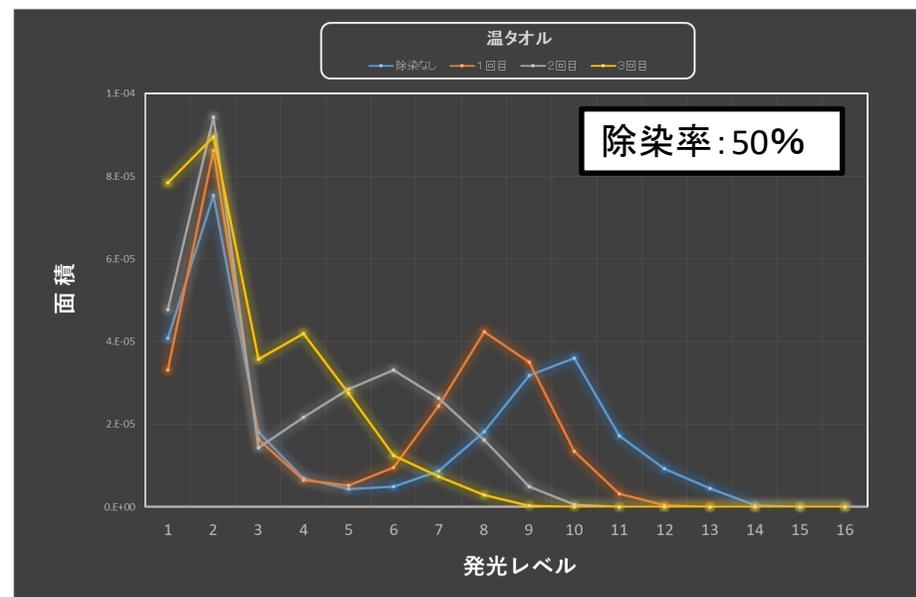
(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験6.その他の除染方法による除染能力の確認 ①拭き取り材】

実験結果 (データ解析)



アルコールティッシュによる拭き取り



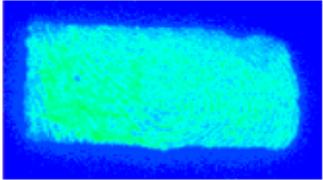
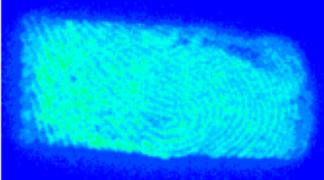
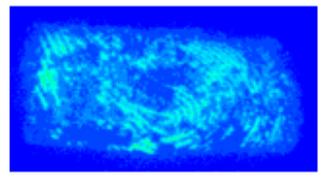
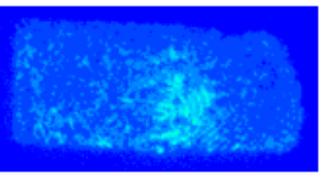
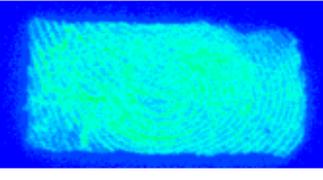
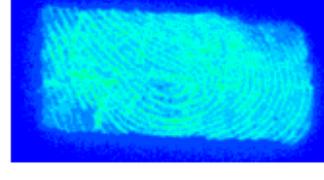
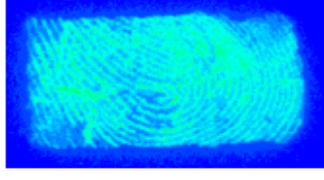
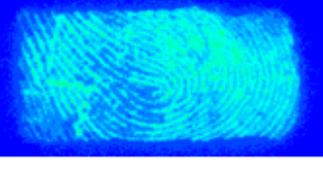
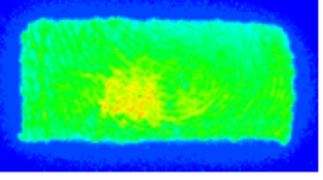
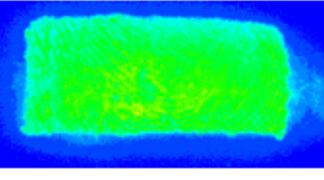
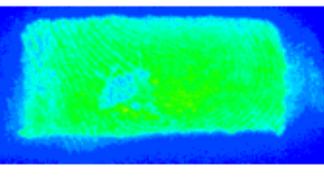
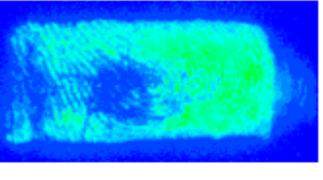
温タオルによる拭き取り

2.1 得られた成果 (30/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験6.その他の除染方法による除染能力の確認 ②美顔用市販品】

実験結果 (カラーマップ)

種類	除染前	除染1回目	除染2回目	除染3回目
パック剤A				
パック剤B				
ウォーターピーリング				

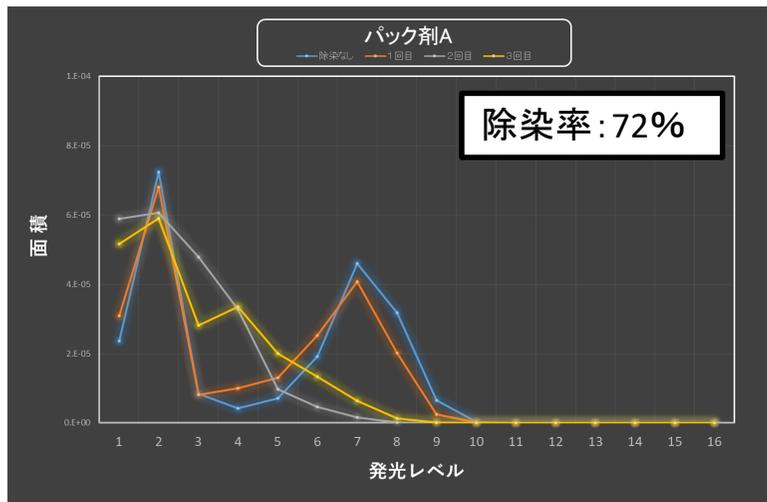
⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

2.1 得られた成果 (31/51)

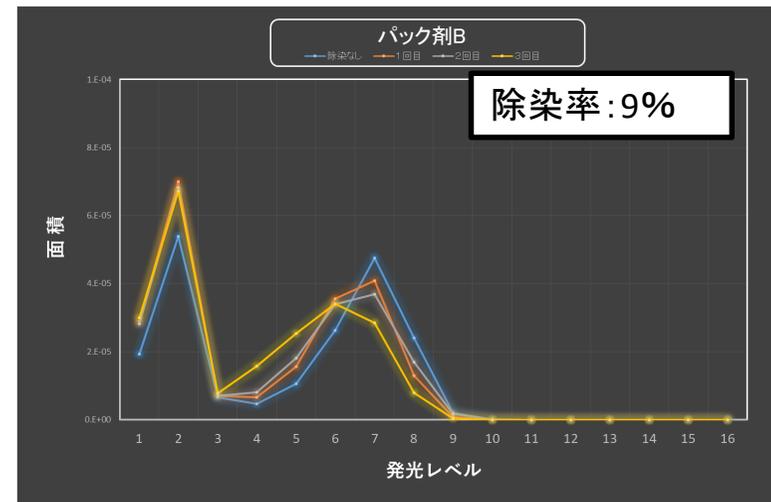
(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験6.その他の除染方法による除染能力の確認 ②美顔用市販品】

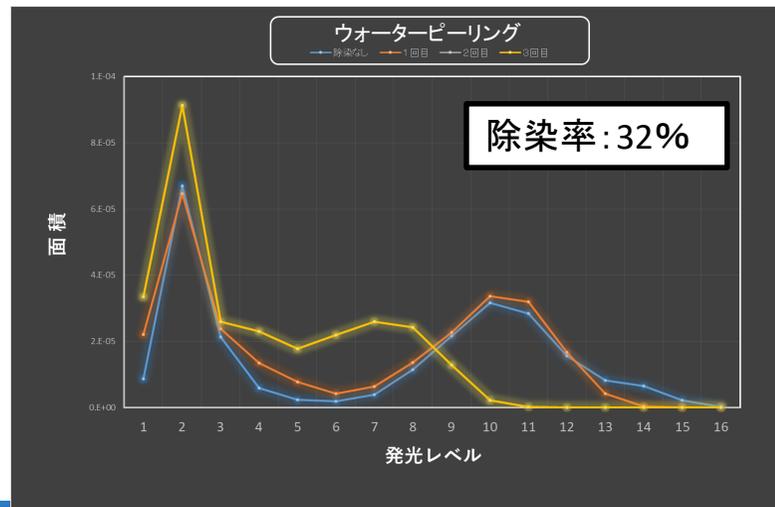
実験結果 (データ解析)



パック剤A



パック剤B



ウォーターピーリング

2.1 得られた成果 (32/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験6の試験結果】

3回除染後

		除染剤、機器			
実験6 (除染方法)	アルコール ティッシュ	温タオル	パック剤A	パック剤B	ウォーター ピーリング
除染率	56	50	72	9	32

→アルコールティッシュと温タオルは同程度（約50%）の除染効果がみられた。

→パック剤Aはパック剤Bと比較して高い除染効果がみられたが、

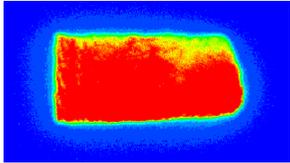
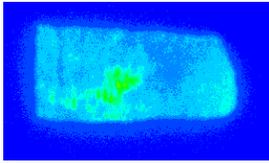
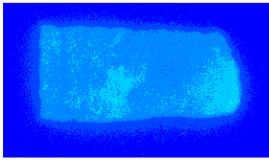
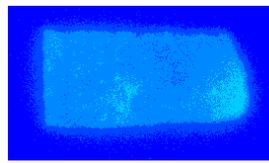
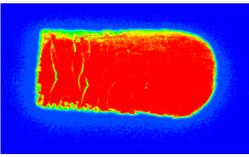
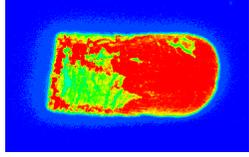
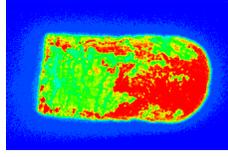
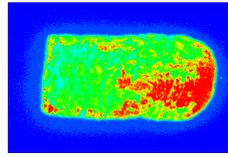
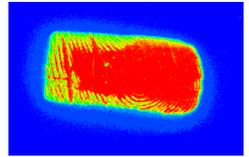
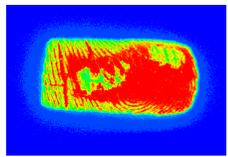
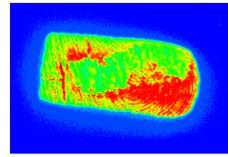
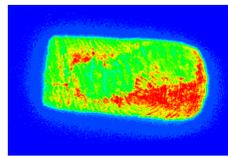
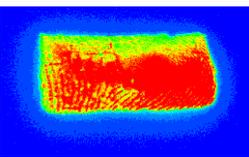
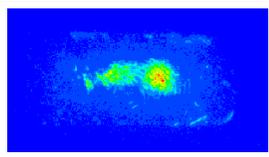
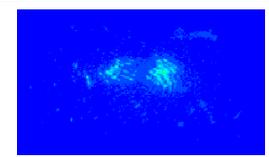
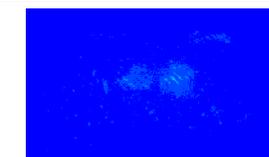
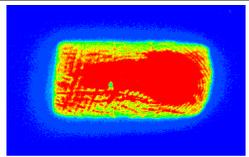
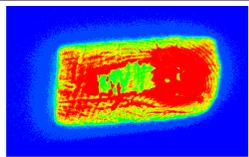
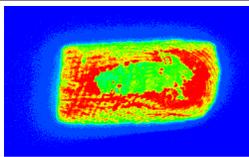
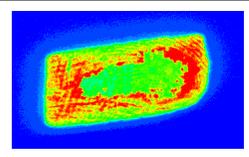
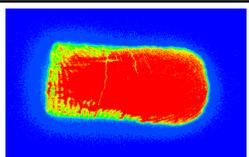
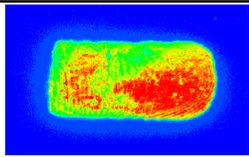
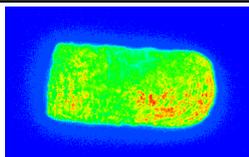
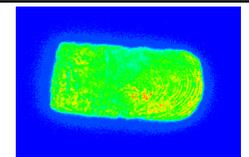
乾燥するまでに20分以上の時間を要するため、緊急時における除染作業には適さないと考えられる。

2.1 得られた成果 (33/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験7. 放置時間の違いによる除染能力の比較 (放置時間40分・水性塗料)】

実験結果
(カラーマップ)

種類	除染前	除染1回目	除染2回目	除染3回目
洗淨剤A (ハンドソープ泡タイプ)				
洗淨剤B (弱酸性ボディソープ)				
洗淨剤C (中性食器用洗剤)				
洗淨剤D (工業用ハンドソープ)				
洗淨剤E (オレンジオイル系)				
洗淨剤F (オレンジオイル系 クレンザー)				

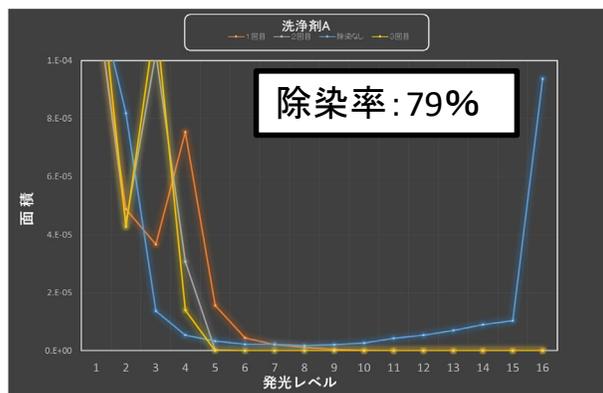
⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

2.1 得られた成果 (34/51)

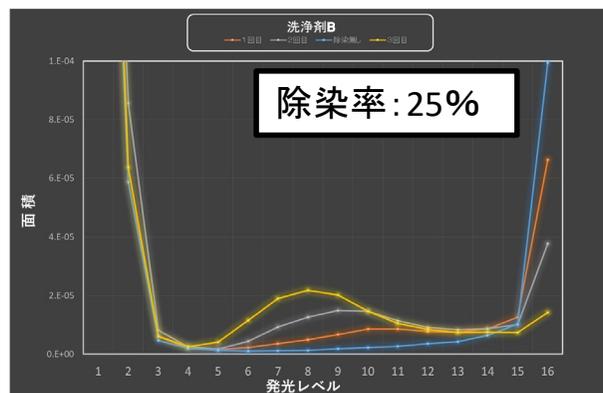
(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験7. 放置時間の違いによる除染能力の比較 (放置時間40分・水性塗料)】

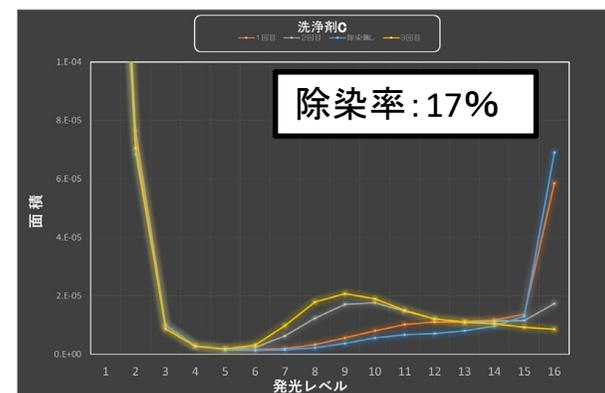
実験結果 (データ解析)



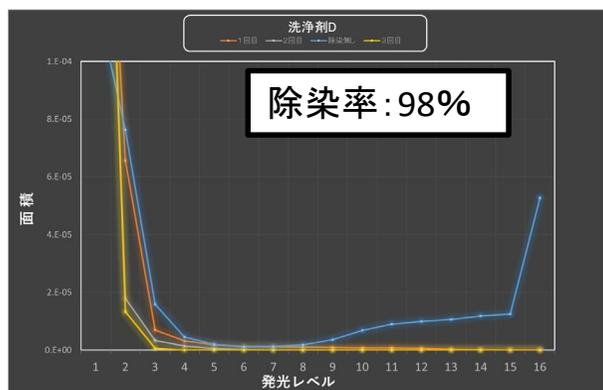
洗剤A



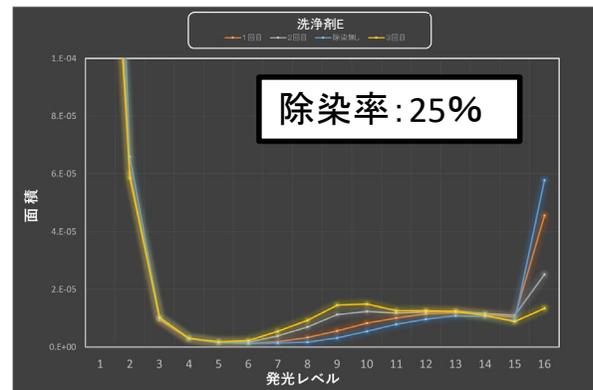
洗剤B



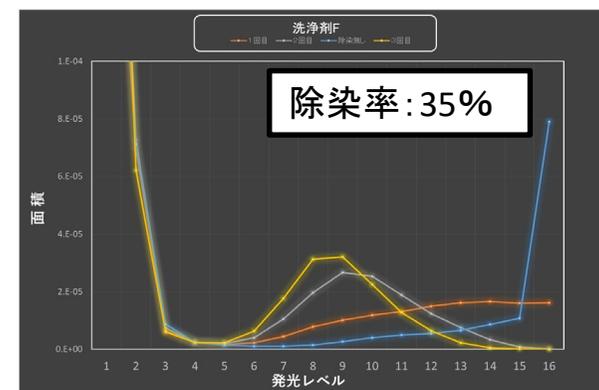
洗剤C



洗剤D



洗剤E



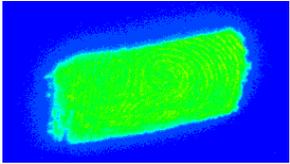
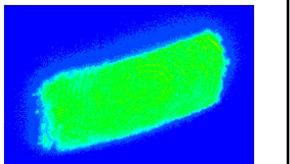
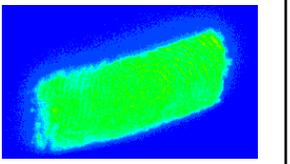
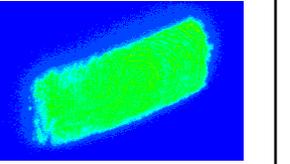
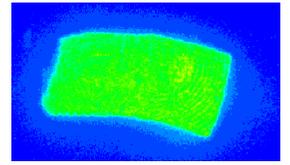
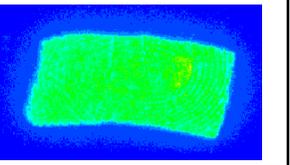
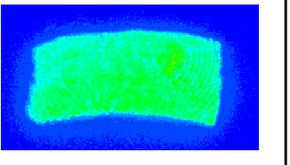
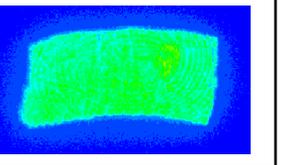
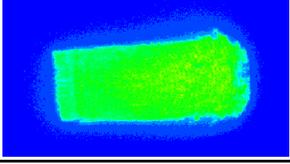
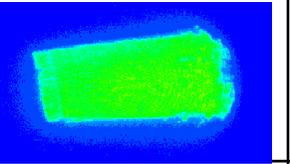
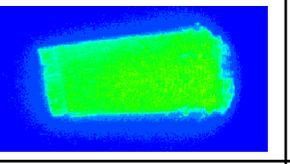
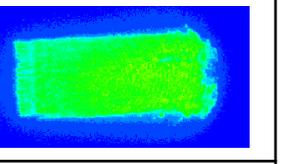
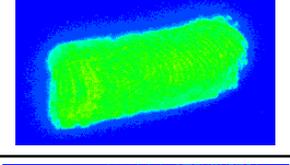
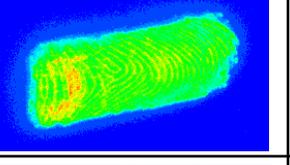
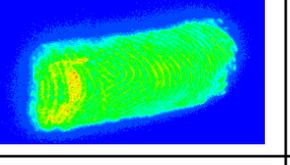
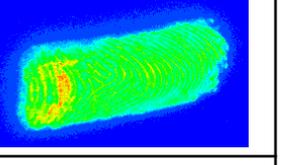
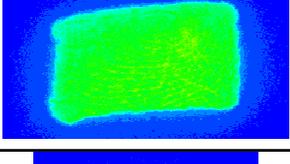
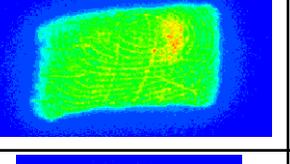
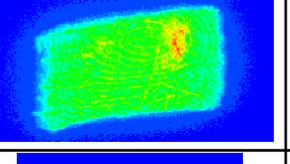
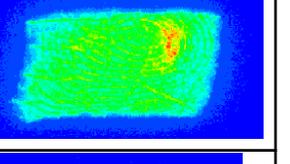
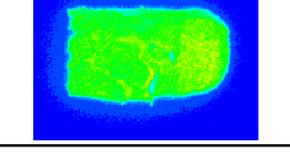
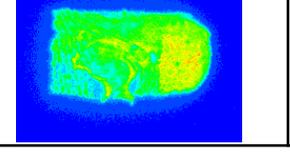
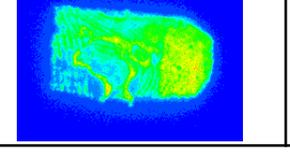
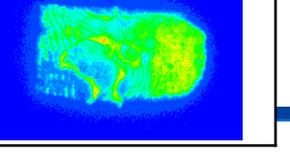
洗剤F

2.1 得られた成果 (35/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験7. 放置時間の違いによる除染能力の比較 (放置時間40分・油性塗料)】

実験結果
(カラーマップ)

種類	除染前	除染1回目	除染2回目	除染3回目
洗淨剤A (ハンドソープ泡タイプ)				
洗淨剤B (弱酸性ボディソープ)				
洗淨剤C (中性食器用洗剤)				
洗淨剤D (工業用ハンドソープ)				
洗淨剤E (オレンジオイル系)				
洗淨剤F (オレンジオイル系 クレンザー)				

⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

2.1 得られた成果 (36/51)

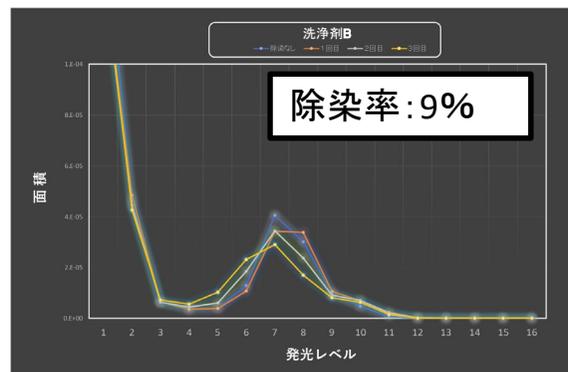
(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験7. 放置時間の違いによる除染能力の比較 (放置時間40分・油性塗料)】

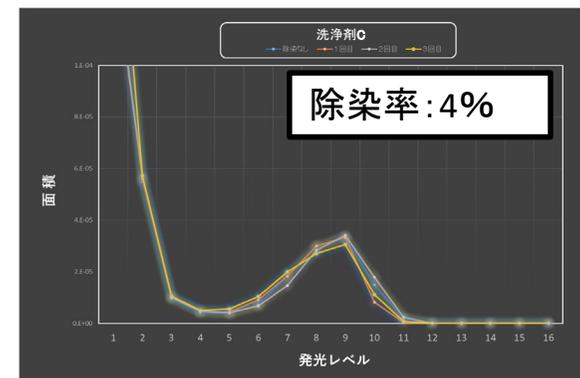
実験結果 (データ解析)



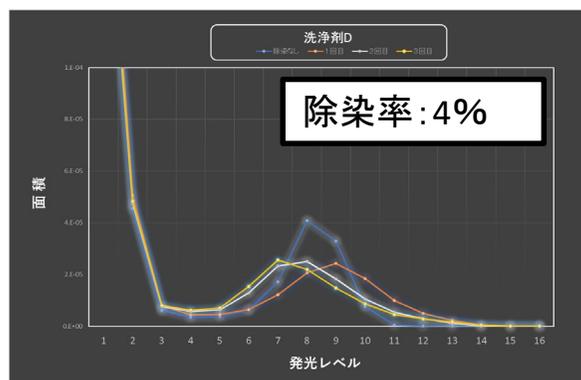
洗淨剤A



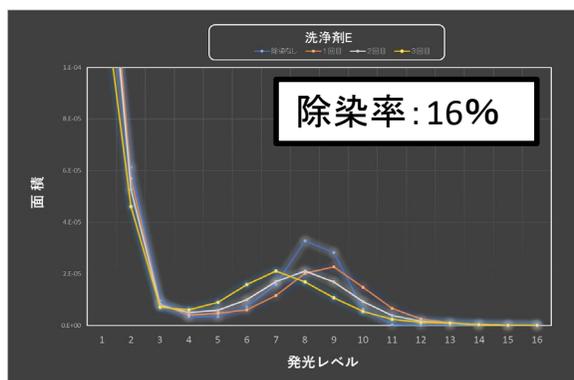
洗淨剤B



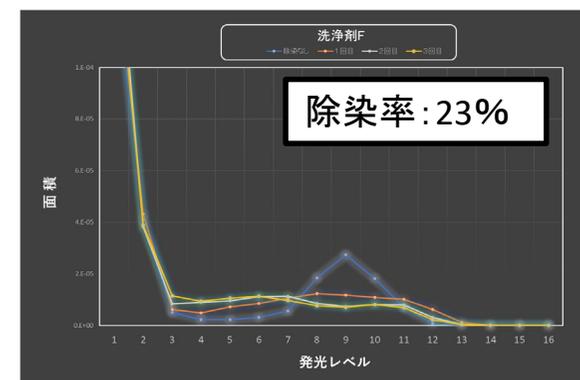
洗淨剤C



洗淨剤D



洗淨剤E



洗淨剤F

2.1 得られた成果 (37/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験7の試験結果】

		除染剤、機器					
実験7 (放置時間40分)		洗淨剤A	洗淨剤B	洗淨剤C	洗淨剤D	洗淨剤E	洗淨剤F
除染率	水性	79	25	17	98	25	34
	油性	20	9	4	4	16	23

参考：放置時間5分での結果(実験4)

除染率	水性	83	18	13	98	17	61
	油性	6	2	4	9	17	7

→洗淨剤Fにおいては、放置時間による除染率の変化が確認されたが、その他の洗淨剤では大きな変化はみられなかった。

2.1 得られた成果 (38/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験4～7の結果まとめ】

- 実験4. 洗剤の違いによる除染能力の比較 (水性・油性)

洗剤によって除染効果に顕著な違いがみられた。また、油性塗料における除染試験においては、水性塗料による試験と比べ、除染率は低くなることが確認された。(最大98% ⇒最大20%程度)

- 実験5. シャワーヘッドの違いによる除染能力の比較

ノーマルシャワーヘッドに比べ、一部のマイクロバブルシャワーヘッドでは高い除染率が得られることが確認された。

- 実験6. その他の除染方法による除染能力の確認

→ アルコールティッシュと温タオルの比較では、同程度 (約50%) の除染効果がみられた。

→ パック剤Aはパック剤Bと比較して、除染効果がみられたが、乾燥するまでに20分以上の時間を要するため、緊急時における除染作業には適さないと考えられる。

- 実験7. 放置時間の違いによる除染能力の比較 (水性・油性)

洗剤 1 種では除染率の変化が確認されたが、その他の洗剤では大きな変化はみられなかった。

2.1 得られた成果 (39/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

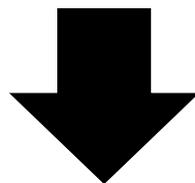
コールド試験で除染効果の高かった除染剤及びシャワーヘッド

✓ 洗剤

- ・洗剤A
- ・洗剤D

✓ シャワーヘッド

- ・マイクロバブルA



これらを使用したホット試験 (放射性物質を用いた除染試験) を実施した。

2.1 得られた成果 (40/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

試験準備①～試験片の作製～

本試験では、人体の皮膚構造に近いとされている豚皮に、以下の処置を行い試験片とした。

①不要箇所切除

⇒購入した豚皮の表面を水洗した後、余剰箇所を切除した。

②豚皮洗浄

⇒豚皮に付着した余分な脂肪分等をブラシ等で洗浄した。

③剃毛処理

⇒豚皮表面の体毛を電動バリカンで剃毛し、再度水洗し付着した毛を取り除いた。

④試験片調整

⇒豚皮を約4×6 cmに切り出し、試験片とした。

なお、模擬汚染溶液滴下箇所に直径1cm丸印を描いた。



処置前(購入直後)



処置後(試験片調整後)

2.1 得られた成果 (41/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

試験準備②～模擬汚染溶液の調製～

購入した放射能標準溶液を、0.1Mの塩酸で2倍希釈したものを、模擬汚染溶液とした。

放射能標準溶液諸元

核種	^{90}Sr (^{90}Y)	^{137}Cs
線源番号	0201	0170
校正年月日	2022年9月20日	2022年9月16日
基準日時	2022年10月11日 12時00分	2022年10月11日 12時00分
放射能濃度	$2.002 \times 10^5 \text{ Bq/g}$	$2.004 \times 10^5 \text{ Bq/g}$
拡張不確かさ	1.3 %	1.8 %
放射性核種純度	99 %以上	99 %以上
質量	5.0 g	5.0 g

2.1 得られた成果 (42/51)

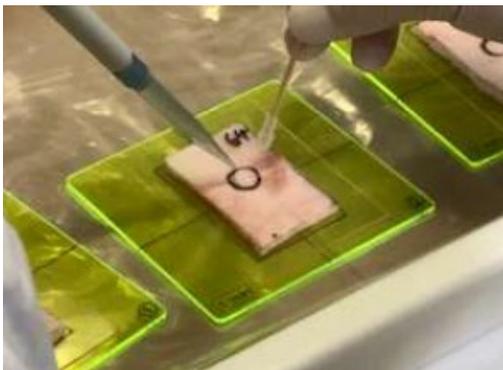
(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

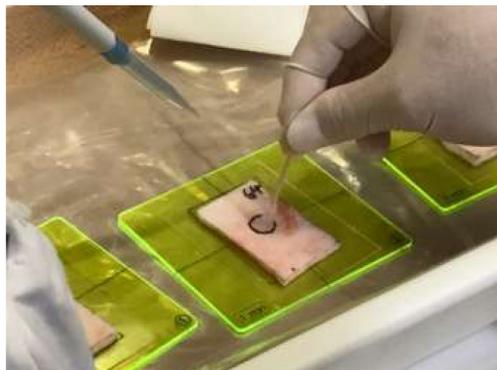
試験準備③～模擬汚染溶液の滴下～

試験片に用いる豚皮の滴下箇所デジタルピペットで模擬汚染溶液 0.15mL滴下し、5分（短時間曝露を想定）または40分（長時間曝露を想定）曝露して、汚染溶液を浸透させた。なお、滴下直後から15秒間はポリスマンを用いて、模擬汚染を試験片表面に馴染ませた。

所定の曝露時間経過後、直ちに滴下箇所をろ紙（東洋濾紙製、型式：5A）で、余分な汚染溶液を吸い取った。



溶液滴下



馴染ませ操作



吸い取り

2.1 得られた成果 (43/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

除染試験

① GM計数管 (日本レイテック株式会社製、型式: GM-5004)、及びベータシックスケーラ (日本レイテック株式会社製、型式: TDC-105B) を用いて、試験片の除染前の表面計数率を測定した。なお、GM計数管検出窓と試験片表面との距離は、測定治具を用い、10 mmに保持されるようにした。

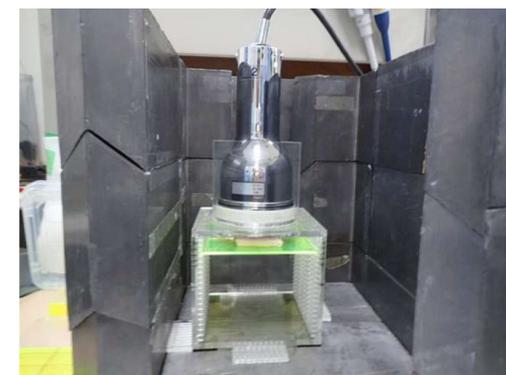
② 各種除染方法により除染した (除染方法は次ページ参照)。

③ ②と同様の方法で、除染後の試験片の表面計数率を測定し、以下の式より除去率を算出した。

$$\text{除去率(\%)} = \left(1 - \frac{\text{除染後放射能}}{\text{除染前放射能}}\right) \times 100$$



放射能測定器



測定治具

2.1 得られた成果 (44/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

試験項目 ・・新除染技術や現場で運用されている方法を試験項目として選定。

1. シャワー除染：2種類 (ノーマルシャワー or マイクロバブルA)
⇒模擬汚染滴下部位にシャワーを当てることにより除染する。
2. 拭き取り試験：3種類 (洗浄剤A or 洗浄剤D or 洗剤無し)
⇒模擬汚染滴下部位を濡れキムタオルによりふき取り除染する。
3. 複合除染：1種類 (洗浄剤A + ブラシ + ノーマルシャワー)
⇒模擬汚染滴下部位を洗浄剤とブラシにより除染した後、シャワーにより洗い流す。

次ページより、各々の除染方法の詳細について記載する。

2.1 得られた成果 (45/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

試験項目1. シャワー除染：2種類 (ノーマルシャワー or マイクロバブルA)

性能の異なる下記シャワーヘッドで除染試験を実施した。

条件名	ノーマルシャワー	マイクロバブルシャワー
ヘッド種類	ノーマル	マイクロバブル
散水口配置	外周	不均一
外観		
吐水方式	ストレート	ミスト吐水
流量	0.23 L/min	0.06 L/min
給湯温度	40 °C	40 °C
距離	5 cm	5 cm

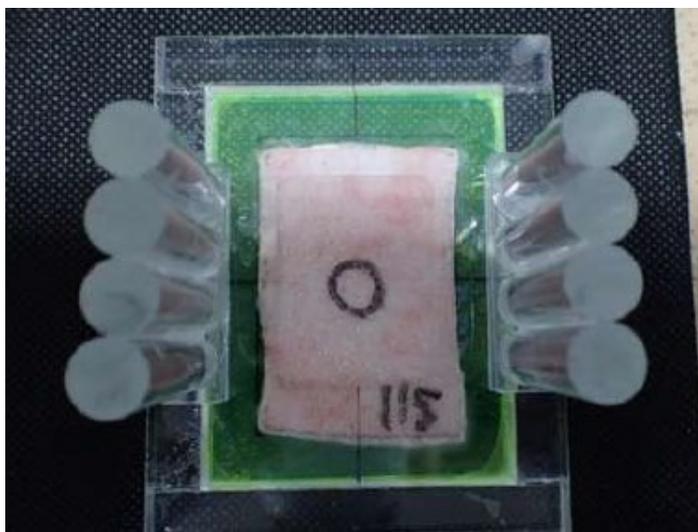
2.1 得られた成果 (46/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

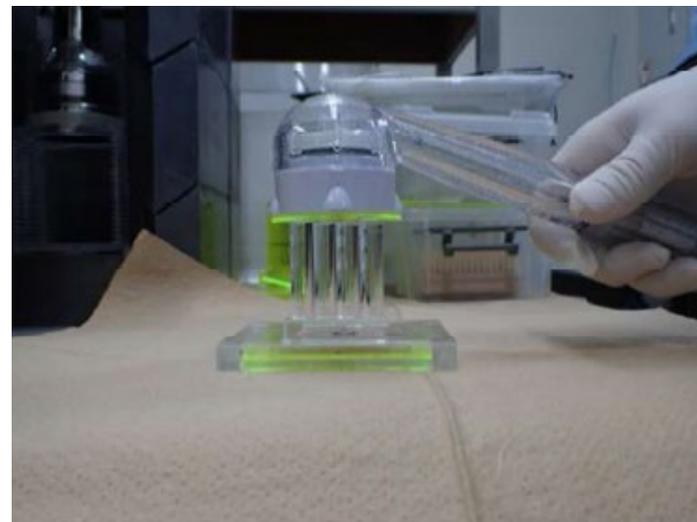
【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

試験項目1. シャワー除染：2種類 (ノーマルシャワー or マイクロバブルA)

シャワーヘッド散水口と試験片汚染面との距離を一定(5cm)に保つための治具の上にシャワーヘッドを固定し、水温40℃にて1分間、模擬汚染滴下部位をシャワーし、除染効果を確認した。



面間距離5cm用治具



洗浄時の試験片とシャワーヘッドの距離

2.1 得られた成果 (47/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

試験項目2. 拭き取り試験：3種類 (洗浄剤A or 洗浄剤D or 洗剤無し)

拭き取り条件一覧

模擬汚染滴下部位に洗浄剤を1プッシュし、40℃に保温された濡れキムタオルで1方向に1回拭き取り、除染効果を確認した (洗剤無しは拭き取りのみ実施)。

また、各条件における拭き取り圧力がばらつかないように、拭き取り除染を行う試験者を固定した。

条件名	家庭用洗浄剤	業務用洗浄剤	洗浄剤なし
商品名	洗浄剤A	洗浄剤D	—
製造元	ライオン株式会社	鈴木油脂工業株式会社	—
成分*1	イソプロピルメチルフェノール、PG、ソルビット液、ラウリン酸、水酸化 K、ヤシ油脂脂肪酸アシルグリシン K 液、ミリスチン酸、モノエタノールアミン、香料、ポリオキシエチレントリデシルエーテル、EDTA、塩化ジメチルジアリルアンモニウム・アクリルアミド重合体液、ベンジルアルコール、赤 106	シリカ、有機炭酸エステル、アルコール系溶剤、グリコールエーテル系溶剤、高級アルコール、保湿剤、油溶解剤、増粘剤、香料、染料、精製水	—
除染方法	1プッシュ (約 0.96g) を試験片に塗布	1プッシュ (約 2.36g) を試験片に塗布	—
商品名	キムタオル		
製造元	日本製紙クレシア株式会社		
作成方法	水に浸したキムタオルを恒温槽内で 40℃に保温		
実測温度*2	37.8～39.4℃ (平均 38.6℃)		
除染方法	1方向に1回拭き取り (拭き取り圧力を均一に保つため、試験者を固定)		



洗浄剤塗布



拭き取り

※1 成分は、製造元の Web サイトに記載されたものを列挙した。

※2 実測温度は、拭き取り直前に測定した。

2.1 得られた成果 (48/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

試験項目3. 複合除染：1種類 (洗浄剤A+ブラシ+ノーマルシャワー)

複合除染については、模擬汚染溶液滴下部位に洗浄剤Aを1プッシュ塗布し、ブラシ((株)オキナ製、型式:BG-21)で一定の方向に10回擦った。その後、シャワーヘッド散水口と試験片汚染面との距離は1cmとし、水温40°Cで1分間シャワーすることで除染した。

なお本項目ではブラッシングの圧力がばらつかないように、同一の者が試験した。



洗浄剤塗布



ブラッシング



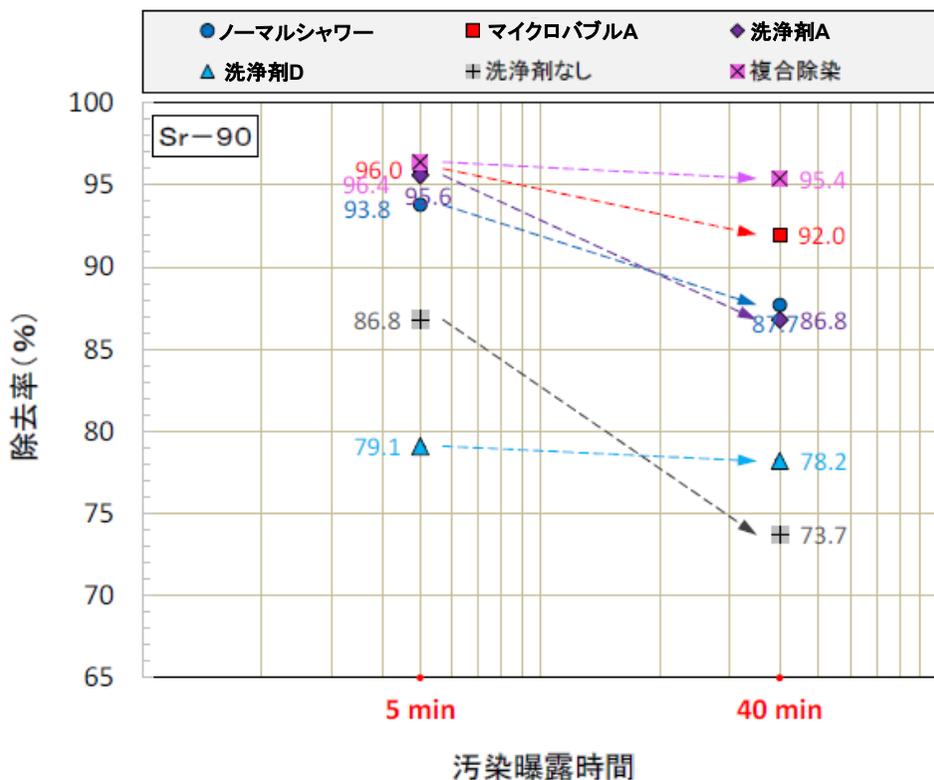
シャワー

2.1 得られた成果 (49/51)

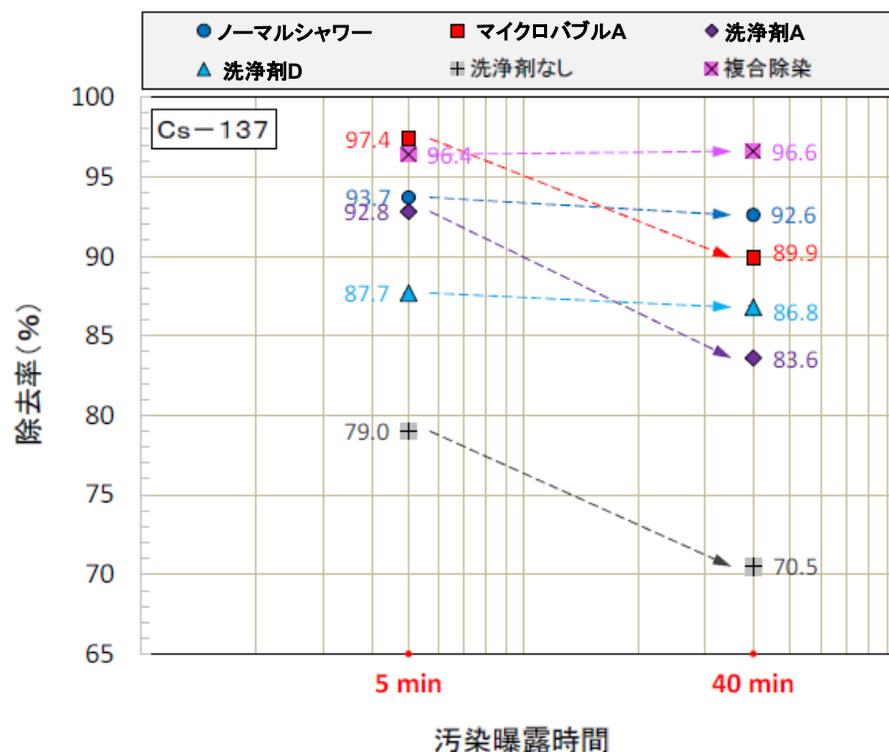
(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

試験結果



Sr-90 汚染の曝露時間と除染率



Cs-137 汚染の曝露時間と除染率

2.1 得られた成果 (50/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

試験結果

① シャワー除染

短時間曝露の場合、ノーマルシャワーよりマイクロバブルAの方が、Sr-90及びCs-137の両者において除去率が高いことが確認された（除去率95%以上）。

長時間曝露の場合では、Sr-90ではノーマルシャワーよりマイクロバブルAの方が除去率が高かったが、Cs-137においてはノーマルシャワーの方が除去率が高いという結果となった。

② 拭き取り除染

洗浄剤Aの場合、短時間曝露では90%以上の除去率ではあるものの、長時間曝露では除去率が低下することが確認された。

洗浄剤Dの場合、洗浄剤Aと比較して除去率が低めではあるが、短時間曝露と長時間曝露での除去率に、あまり差がないことが確認された。

洗剤無しでの拭き取りの場合、短時間曝露でも除去率が比較的低めであり、長時間曝露時では除去率が低下することが確認された。

③ 複合除染

洗浄剤A＋ブラシ＋ノーマルシャワーによる複合除染を行った場合、短時間曝露で95%以上の除去率が確認され、長時間曝露における除去率の低下も小さいという結果が得られた。

2.1 得られた成果 (51/51)

(2) 新たな除染技術による除染方法の選定、検討及び除染効果の評価

【実験8.放射性物質を用いた除染試験 (ホット試験)】

まとめ

- 短時間曝露において、マイクロバブルAによるシャワー除染が複合除染 (洗淨剤A + ブラシ + ノーマルシャワー) と同程度の除去率であったため、マイクロバブルによる除染が、体表面除染として有効であることが示唆された。
また、マイクロバブルAのシャワーヘッドには節水効果 (ノーマルシャワーの約30%程度の流量) があることから、除染に使用する放射性廃液の発生量低減に寄与できると考えられる。
- 洗淨剤Dによる拭き取り除染は、洗淨剤Aによる拭き取り除染と比較して、除去率が低めではあるが、短時間曝露と長時間曝露での除去率の差がほぼないので、現場における長時間汚染に対して有効である可能性が示唆された。

2. 実績

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	
a. 防護装備に付着した汚染の広がりに関する評価	1 (基礎研究)	3 (応用研究)	3 (応用研究)	○
b. 新規除染方法の検討、確立	3 (応用研究)	4 (実用化研究)	4 (実用化研究)	○

目標：

- 従来 of 経験，他分野の既存技術等の組み合わせ及び放射性汚染の特徴を考慮したエンジニアリングを進行させる。
- より効率的な除染方法・除染剤を適用とした新たな除染技術を試験し，模擬実証につなげるための結果を得る。

終了時自己評価：

- 現場で行われている作業、脱装や除染時における汚染の拡散状況等を可視化出来たことで、今後効率的な拭き取り方法や脱装方法を提案出来ると考えられる。
- 新たな除染技術（マイクロバブルシャワー）や除染率の高い洗剤を試験的に証明できたことで、より効果的な除染方法を提案できると考えられる。

3. 今後の課題

- 可視化技術を用いた除染方法の検証等の具体的な提案
- 除染における水の適用判断の検討
- (水圧やマイクロバブル等による効果を期待した) シャワー使用時の飛散対策の検討
- 試験用皮膚の検討 (豚皮の取り扱い、代替素材等)
- ホット試験における、放射性溶液の液性が試験に与える影響の検討
(液性 (酸性、アルカリ性) が異なることで汚染の皮膚への沈着具合が変化し除染効果にも影響があると考えられるため)

事業内容

a) 内部被ばく線量の測定・評価に係る技術開発

- ① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討
- ② ろ紙試料（鼻スミヤ等）を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上
- ③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認

b) 内部取り込みに対する防護に係る技術開発

- ④ 作業環境中汚染（空気、表面）に対する防護措置、防護装備の最適化
- ⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良

c) 内部被ばく対応システムの開発

- ⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発

1.概要

1.1 目的

- (1) 海外のPu同位体による内部被ばく（創傷汚染含む）の事例に係る対応実績に加え，発生前後のマニュアルの状況等を含めた調査を実施する。
- (2) 近年の国内状況を踏まえた国レベルでの課題整理及び標準プロトコール開発を行う。

1.2 目標（技術成熟度）

内容	技術成熟度（TRL）	
	現状評価	終了時目標
(1) 海外の原子力事業者等におけるキレート剤投与・肺洗浄事例、キレート剤投与を想定したマニュアル等の整備状況及び記載内容の調査	3 (応用研究)	4 (実用化研究)
(2) 海外事例の国内適用に係る課題の整理、国内標準プロトコールの試案作成	1 (基礎研究)	3 (応用研究)

終了時目標：

- (1) 本事業の調査により必要な情報はほぼ収集され調査完了のレベルに到達する。
- (2) 標準プロトコールの試案を完成させる。
(実用標準とするためには学協会等の団体との協力が必要であり，本事業の範囲外とする)

2. 実績

2.1 得られた成果（概要） ※詳細は次ページ以降

(1) 海外の原子力事業者等におけるキレート剤投与・肺洗浄事例、キレート剤投与を想定したマニュアル等の整備状況及び記載内容の調査

- 文献6編（NCRP、IAEA、REAC/TSのマニュアル類及び事例報告論文）を調査し、概要・ポイントをまとめた。
- 米・仏・中の専門家に対し、メール及びWeb会議によるインタビューを実施し、概要・ポイントをまとめた。

(2) 海外事例の国内適用に係る課題の整理、国内標準プロトコールの試案作成

- 医療分野（被ばく医療、救急、放射線、薬学、看護学等）、社会・人文科学分野（リスクコミュニケーション、マスコミ、個人情報保護等）、放射線管理・計測分野の専門家による検討体制を構築し、海外事例及び近年の国内状況を踏まえた国レベルでの課題整理及び標準プロトコール開発を目指し、プロトコールの素案を完成させた。

2.1 得られた成果 (1/7)

(1) 海外の原子力事業者等におけるキレート剤投与・肺洗浄事例、キレート剤投与を想定したマニュアル等の整備状況及び記載内容の調査

(1)-1. 文献調査 : 以下 6 編を調査し、概要・ポイントをまとめた。⇒適宜プロトコールに反映

【1】National Council on Radiation Protection and Measurements, NCRP report No.161 (2008) Management of Persons Contaminated with Radionuclides : Handbook

NCRPによる、放射性核種による汚染事故への対応のガイダンス。NCRP報告書No.65の改定と内容の拡充を目的としている。

【2】International Atomic Energy Agency, IAEA EPR-INTERNAL CONTAMINATION (2018) Medical Management of Persons Internally Contaminated with Radionuclides in a Nuclear or Radiological Emergency

IAEAによる、放射線緊急時における放射線による体内汚染に対する医学的管理のマニュアル。

【3】Radiation Emergency Assistance Center / Training Site, REAC/TS (2017), The Medical Aspects of Radiation Incidents rev.02

米国エネルギー省により管理運営され、緊急被ばくの教育訓練、放射線被ばく医療に関する専門家の派遣、事故の記録の所有、キレート剤等の保管管理などを行っているREAC/TSの研修テキスト。

2.1 得られた成果 (2/7)

(1)-1. 文献調査 (つづき)

【4】 L. GRAPPIN et al., Exposure to actinides: report on Ca-DTPA injections in CEA-AREVA centres, Radioprotection Vol.42;2007

フランス原子力庁とAREVAの施設におけるアクチノイド被ばく患者に対するCa-DTPA静脈内投与の報告。Ca-DTPAの特性について解説するとともに、548件の事象に対する1,158回のCa-DTPA投与経験について詳細に報告している。

【5】 Takako Tominaga et al., Effects of the chelating agent DTPA on naturally accumulating metals in the body, Toxicology Letters 350, pp 283-291

ヘルシー・ボランティアを対象にCa-DTPAとZn-DTPAを投与し、必須金属である亜鉛等の血中濃度、尿中排泄率などを測定してその効果や副作用の可能性、製剤や投与方法による効果の違い、必須金属不足の監視方法等を評価している。

【6】 Hideo Tatsuzaki et al., An accident of internal contamination with plutonium and americium at a nuclear facility in Japan : a preliminary report and the possibility of DTPA administration adding to the diagnosis, Radiation Protection Dosimetry, doi:10.1093/rpd/ncy145 (2018)

2017年のJAEA大洗の内部被ばく事故の汚染の状況や治療経過の報告。肺モニタによる預託実効線量評価、シャワー洗浄、暫定評価段階でのDTPA投与の問題点などについて考察がなされている。

2.1 得られた成果 (3/7)

(1)-2. 聞き取り調査

米・仏・中の専門家に対し、メール及びWeb会議によるインタビューを実施した。

⇒ 適宜プロトコールに反映

インタビュー対象者の所属機関

- アメリカ エモリー大学 (メール+Webインタビュー)
- フランス CEA (メール+Webインタビュー)
- 中国 北京放射線医学研究所 (メールのみ)

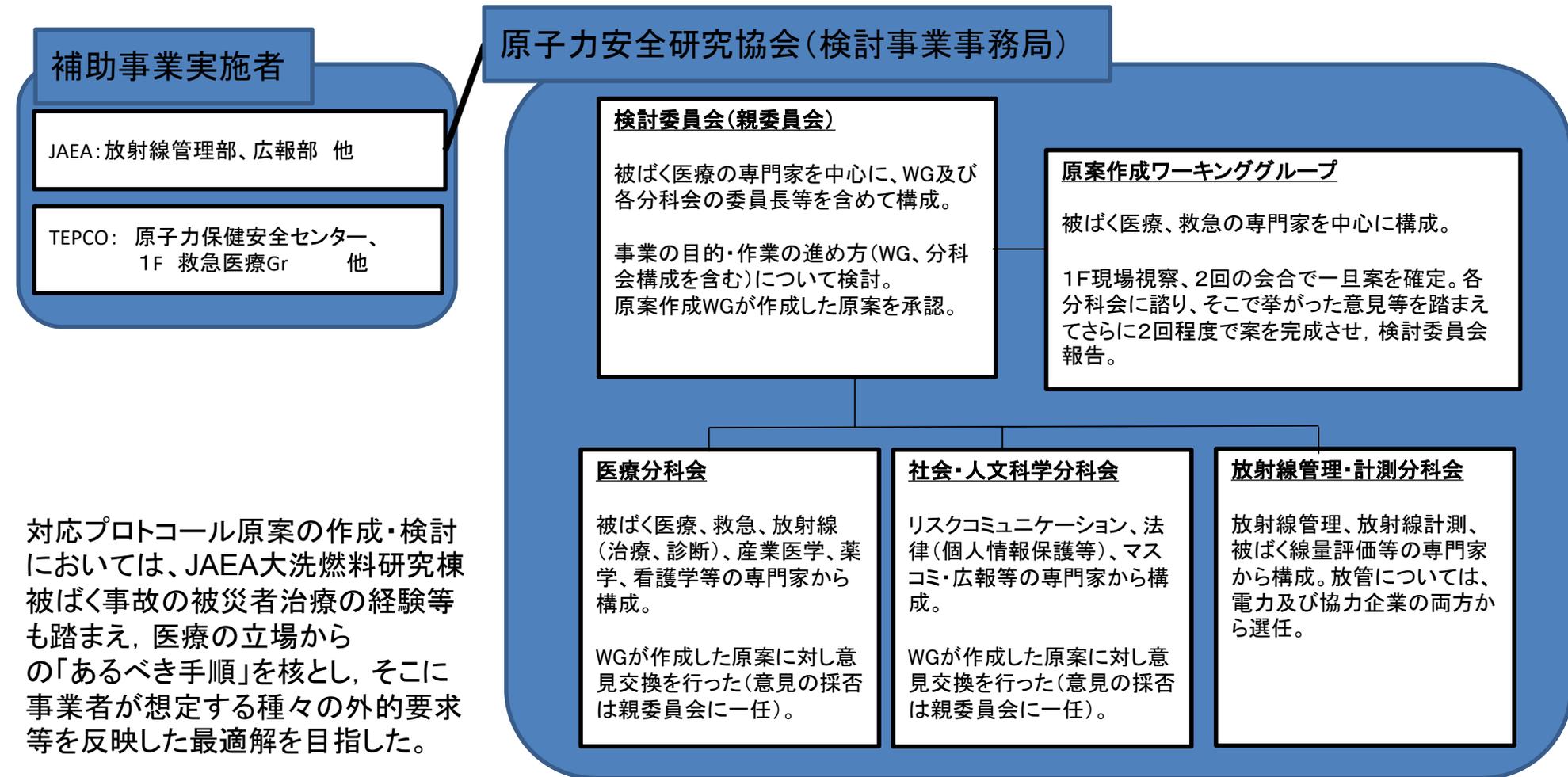
主な聴取項目

- ・被ばく医療に係る医療体制、搬送体制
- ・内部被ばくに対する診療プロトコールの有無・制定元
- ・内部被ばくの治療に対応できる専門家や薬剤の原子力事業所内での配備状況
- ・内部被ばくの事件事例、医療対応例、社会的関心の状況
- ・キレート剤投与のタイミング、方法、治療継続等に対する意見
- ・純β核種 (Sr-90等)、セシウム等による内部被ばくに対する治療の経験
- ・患者のプライバシー保護、メンタルケアについて (ルール等の有無)

2.1 得られた成果 (4/7)

(2) 海外事例の国内適用に係る課題の整理、国内標準プロトコールの試案作成

○専門家による検討体制を構築し、試案のもととなる原案を作成した。

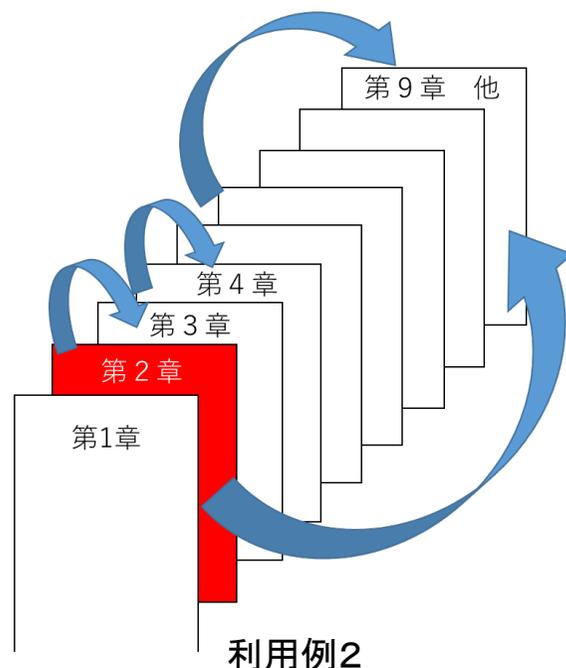
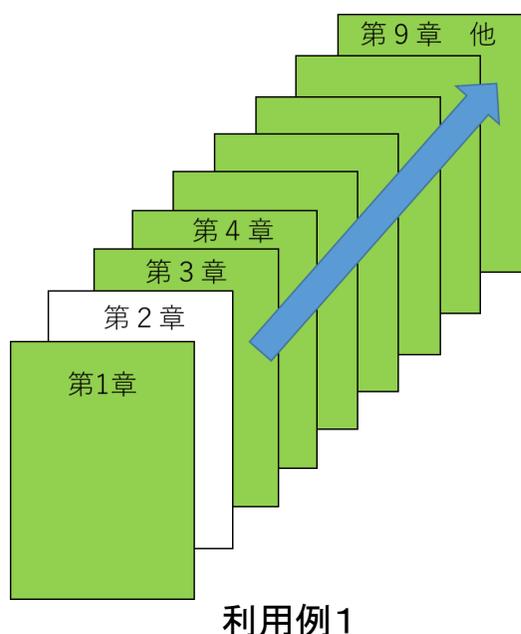


2.1 得られた成果 (5/7)

(2) 海外事例の国内適用に係る課題の整理、国内標準プロトコルの試案作成

○原案作成WGが作成した試案をもとに、関係者の意見交換を重ね、約70ページにわたるプロトコル原案として完成させた。(目次を次ページに示す)

→ 今後、研究開発報告書 (JAEA-Review) などでの公表を検討する



本プロトコルの読み手には、**救急処置室の医療スタッフ、発電所の医療班員、放射線管理要員およびそれらの傷病者を受け入れる医療機関のスタッフ等**を想定。

利用例1) 第1章および第3章以降を通読して特に原子炉事故時の傷病者に対する初期対応の概要を理解する。

利用例2) 第2章の想定の中で類似したケースの部分を確認し、必要に応じて第3章以降の関連部分を確認する。

2.1 得られた成果 (6/7)

○プロトコールは以下のような内容・構成とした。

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 ALI(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医療処置
4. 3 放射性ヨウ素に対する医療処置
4. 4 その他の放射性物質に対する医療処置
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 除染薬投与が想定される状況
8. 1. 4 除染薬の投与
8. 1. 5 除染薬投与後の対応
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
第9章 今後の検討課題
9. 1 多数傷病者発生時の対応
9. 2 オンサイト対応医師のためのアドバイザー組織
9. 3 東京電力ホールディングス株式会社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
9. 4 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
9. 5 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

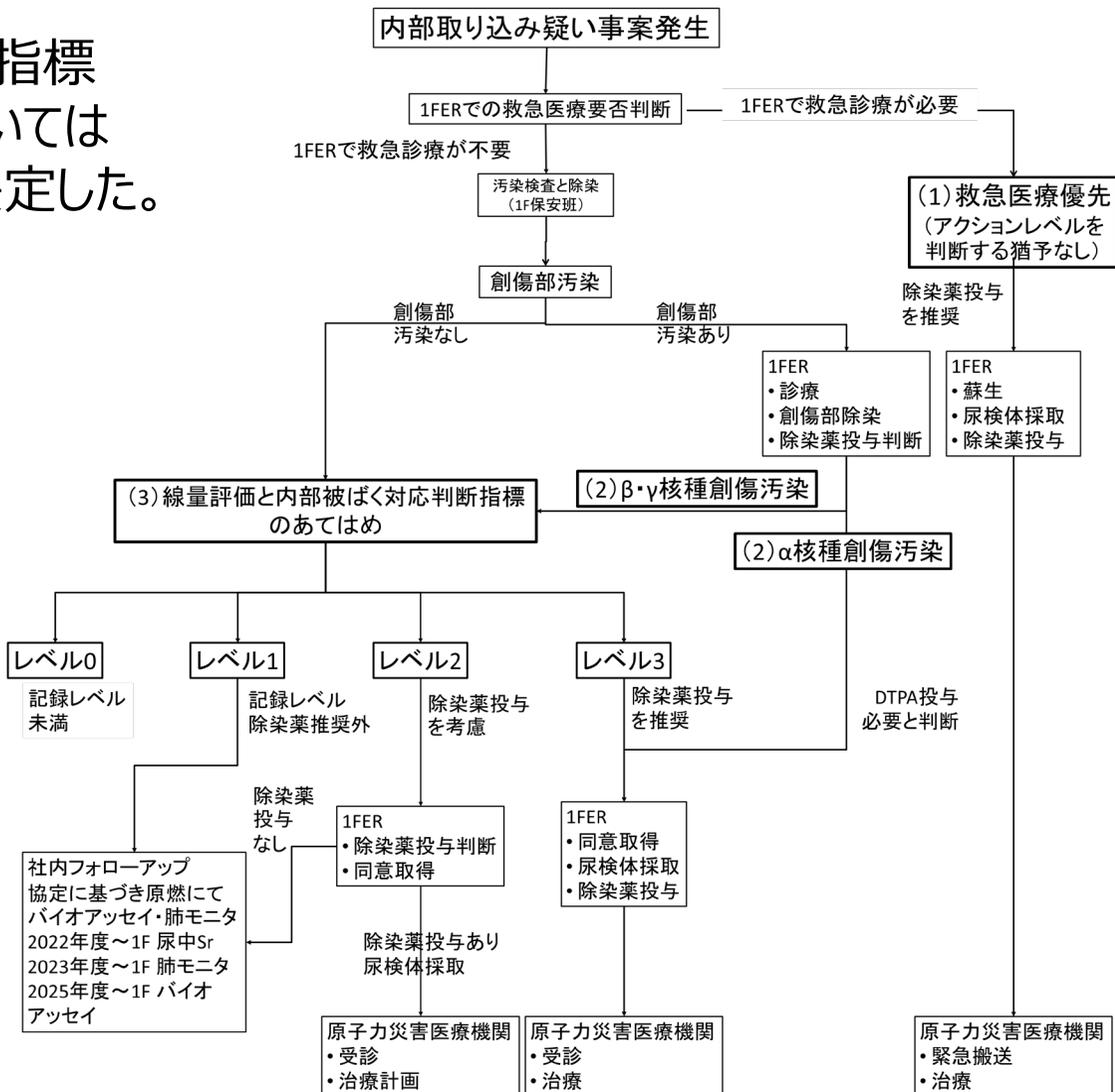
2.1 得られた成果 (7/7)

(2) 海外事例の国内適用に係る課題の整理、国内標準プロトコルの試案作成

○内部被ばくが発生した場合の判断指標及び指標を用いた対応フローについては1Fの検討状況等も参考にして決定した。

放射性核種の内部取り込み事象における対応判断指標

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



2. 実績

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) 海外の原子力事業者等におけるキレート剤投与・肺洗浄事例、キレート剤投与を想定したマニュアル等の整備状況及び記載内容の調査	3 (応用研究)	4 (実用化研究)	4 (実用化研究)	○
(2) 海外事例の国内適用に係る課題の整理、国内標準プロトコルの試案作成	1 (基礎研究)	3 (応用研究)	3 (応用研究)	○

目標：

- (1) 本事業の調査により必要な情報はほぼ収集され調査完了のレベルに到達する。
- (2) 標準プロトコルの試案を完成させる。
(実用標準とするためには学協会等の団体との協力が必要であり、本事業の範囲外とする)

終了時自己評価：

- (1) 本事業により、海外のキレート剤投与・肺洗浄事例、キレート剤投与を想定したマニュアル等の整備状況等、プロトコルの検討に必要な情報は十分収集できた。
- (2) 海外事例の国内適用等を含めた課題を整理し、標準プロトコルの試案を完成することができた。

3. 今後の課題

○ 審査委員からのコメント（※）への対応

※廃炉作業特有の内部被ばく事象についてリスク分析的なアプローチ（イベントツリーあるいはフォールトツリーの提示とリスク評価など）が必要ではないか。課題の現状認識の明確化を図るべき。（報告者による要約）

この分野でのリスク分析的なアプローチの前例はない模様。実施可否・要否検討要。

○ 社会・人文科学分野、放射線管理・線量評価分野の議論の継続

[社会・人文科学] 原子力分野の中でもマイナーな課題を対象としており、同一分野の専門家間のコンセンサスの獲得が困難。より多数の専門家で時間をかけた議論が必要。

[放管・線量評価] 他サブグループで実施した測定に係る課題（所要時間、不確かさ等）の検討結果をプロトコールに取り込むことが望まれる。

○ 海外のキレート剤投与・肺洗浄事例、キレート剤投与を想定したマニュアル等の整備状況等、検討に必要な情報は十分収集できたが、海外でも検討・整備の途上の分野であり今後も継続的な調査が望まれる。

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ほぼ達成できた。
- 共同実施者である東京電力殿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。

成果公開の状況（本報告公開日までの実績）

学会口頭発表

○放射線事故・災害医学会（2022）

- ・総合的内部被ばく対応システム開発への取り組み

○アイソトープ・放射線研究発表会（2022）

- ・体外計測法の高度化のための肺モニタ校正用ファントムの計算モデル化

○環境放射能研究会（2023）

- ・バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討*1

○日本保健物理学会(2023)

- ・最新の分析・測定技術によるバイオアッセイ手順の整備に向けた文献調査

- ・高汚染・高温多湿な作業場における身体負荷を軽減する防護装備の開発*3

- 1 冷氣送風全面マスクの開発

- 2 透湿性防護服の開発及び試作装備の効果検証

- ・ろ紙の放射能測定におけるダスト・水の影響及び不確かさの評価*3

- ・福島第一原子力発電所廃炉作業を想定した複数核種の同時摂取に対する肺モニタ測定の適用性評価

○放射線事故・災害医学会（2023）

- ・内部被ばく対応システムの開発*3

*1 KEK Proceedings 2023-2に原著論文として掲載

*2 同タイトルで日本原子力学会北関東支部リモート若手研究者・技術者発表会でも発表

*3 論文投稿準備中

TRLに基づく目標設定と終了時の自己評価（まとめ）

実施項目	内容	技術成熟度 (TRL)			
		現状	目標	終了時 自己評価	
① バイオアッセイの迅速化等に向けた調査・検討	・国内外における国際標準分析法、国内標準分析法の制定状況、放射線業務従事者の内部被ばく事故時に適用された評価方法及びその結果(科学論文、技術資料を含む)の調査	3	4	4	○
	・バイオアッセイに必要な採取、分析、測定に係る方法及び必要な設備に関する検討				
② ろ紙試料(鼻スミヤ等)を用いた放射能測定、核種分析の精度確認及び向上	・ろ紙測定に係る精度・不確かさ評価	1	3	3	○
	・鼻スミヤ測定に係るデザインの検討	1	3	3	○
③ 体外計測法による体内残留量測定の品質確認	・体外計測法に関する国内規格、国際規格の整理及び課題抽出	3	4	4	○
	・モデル計算及び検証試験を踏まえた課題の抽出・整理	3	4	4	○
④ 作業環境中汚染(空気、表面)に対する防護措置、防護装備の最適化	・防護装備の迅速な除染・脱装手順の最適化の提案	3	4	4	○
	・身体負荷軽減装備(高性能冷却ベスト)の開発	3	5	5	○
	・身体負荷軽減装備(冷風機能付き呼吸保護具)の試作・試験	3	4	4	○
	・最新の技術が反映された防護服の提案	3	5	5	○
⑤ 身体汚染に対する除染剤、除染方法の改良	・防護装備に付着した汚染の広がりに関する評価	1	3	3	○
	・新規除染方法の検討、確立	3	4	4	○
⑥ 放射性核種の摂取に伴う医療介入の実態調査及び対応システムの開発	・海外の原子力事業者等におけるキレート剤投与・肺洗浄事例、キレート剤投与を想定したマニュアル等の整備状況及び記載内容の調査	3	4	4	○
	・海外事例の国内適用に係る課題の整理、国内標準プロトコールの試案作成	1	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	従来経験を活用、組み合わせによる開発、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