

**厚生労働科学研究費補助金**

**労働安全衛生総合研究事業**

# **除染等作業での内部被ばく防止措置等 の最適化のための研究**

**平成 25 年度 総括研究報告書**

**研究代表者 甲田 茂樹**

**平成 26 (2014) 年 5 月**

## 目 次

<b>・ 総括報告書</b>	
<b>除染等作業での内部被ばく防止措置等の最適化のための研究</b>	<b>1</b>
<b>甲田茂樹</b>	
<b>・ 研究成果の刊行に関する一覧表</b>	<b>7</b>
<b>・ 研究成果の刊行物・別刷</b>	<b>7</b>

厚生労働科学研究費補助金（労働安全衛生総合研究事業）  
総括研究報告書

除染等作業での内部被ばく防止措置等の最適化のための研究

研究代表者 甲田茂樹 独立行政法人労働安全衛生総合研究所 首席研究員

研究要旨

本研究は、東京電力福島第一発電所の事故により放射性セシウムで汚染された土壌等の収集、運搬、保管、処分の業務（以下、除染処理業務とする）を行う際に、作業者がセシウムを含む土壌の吸入による内部被ばくを予防するために、作業中に発生する土壌粉じんの濃度測定を実施し、作業者の内部被ばくに関与する土壌粉じんばく露を評価することを目的としている。

労働衛生上、健康障害が問題とされる粉じんのサイズはレスピラブルであるが、内部被ばくを考慮すれば粒径の大きなインハラブルの粉じんも測定する必要がある。本研究では、これらの粒径の異なる粉じんを測定する方法を確立するにあたって、広く用いられているデジタル粉じん計が活用できるかどうかを検証する。具体的には、デジタル粉じん計による簡易な粉じん濃度測定を実現するために、土壌取り扱い作業時に発生する粉じんに対する粉じん計の応答、特に質量濃度変換係数（K値）が作業の種類や土質の違いなどにどのように影響を受けるかを検討する。さらには、除染処理業務ごとの粉じん濃度、粒径分布の測定と共に、採取した粉じんの放射能を測定することで、発生する粉じんの粒子径と比放射能との実測データを求めていく。

研究所年度は様々な制約等があり、なかなか高汚染地域である帰還困難区域でのフィールド調査ができなかったが、そのかわりに、粉じん曝露による内部被ばくを評価するための土壌の違いによる粉じん曝露に係る有用な基礎的なデータが得られた。さらには、それらを元にした別のラボレベルの再発じん実験も実施できたので、2年目の研究成果と併せて、所期の研究目的を達成する予定である。

研究協力者指名・所属研究機関名及び所属研究機関における職名

菅野 誠一郎	独立行政法人労働安全衛生総合研究所	特任研究員
篠原 也寸志	独立行政法人労働安全衛生総合研究所	上席研究員
鷹屋 光俊	独立行政法人労働安全衛生総合研究所	上席研究員
中村 憲司	独立行政法人労働安全衛生総合研究所	研究員
山田 丸	独立行政法人労働安全衛生総合研究所	任期付研究員

## A．研究目的

除染作業者の健康障害防止を目的として制定された除染電離則では、汚染土壌の比放射能と作業に伴う粉じん濃度を基準として内部被ばくのリスク管理を行っている。しかしながら、これらが空気中の放射性物質濃度を推定する指標として適切であるかどうかを示すデータはない。本研究では、作業者の内部被ばくを防止するため、作業時に発生する粉じんに含まれる放射性物質濃度の測定・評価を簡易かつ適正に行えるようにすることを主たる目的とする。

作業環境測定における粉じん濃度測定は、レスピラブル粉じん質量濃度測定と粉じん計による相対濃度測定の併行測定から質量濃度変換係数（K値）を定め、粉じん計の指示値を質量濃度に換算するが、内部被ばくを考慮するためにはより大きなインハラブル粉じんの測定を行う必要がある。申請者らは、現地調査や模擬作業実験により、除染作業時に土壌から発生するインハラブル粉じんに対するK値を定める方法について検討を行った。現在のところ、除染作業時のインハラブル粉じんに対するK値の指定は可能であろうとの中間的な結果を得ている。ただし、内部被ばくのリスクを管理するためには、基準となる粉じん濃度  $10 \text{ mg/m}^3$  前後の高濃度粉じんが模擬作業実験データのみであることや、粉じん測定を対象として調査を行ったため発生した粉じんの比放射能に関するデータがないという点で不十分で

ある。

本研究では上記の点を踏まえ、汚染地域内で模擬除染作業を行い、実際の汚染土壌由来の粉じんを測定することにより、以下の2点を明らかにすることを目標とする。

汚染の度合いや土質の違い等によりK値が影響を受けるかどうかについて、実際の除染作業現場における測定から検証する。粉じん濃度と比放射能を測定することにより、空气中放射性物質濃度の推定の精度を検証する。また、粒径別の比放射能を測定することにより、内部被ばく防止にはどの粒径の粒子の対策を重点的に行うべきかについての知見をえる。

本研究は、福島第一原子力発電所事故の汚染地域の復旧・復興に必要な情報をいち早く得ることを目的としており、粉じんの測定手法としては標準的であるが、国内外で測定例のない作業由来の粉じんの比放射能、特に粒径別の比放射能に着目することで、より的確な内部被ばくリスク管理を行う上で重要な知見が得られると考える

## B．研究方法

本研究では、(1)汚染土壌の処理業務における粉じんおよび放射能測定。(2)土壌取り扱い作業時に発生する粉じんの粒径分布、比放射能と粒径の関係を明らかにするための実験室内での再発じんを実施する。各内容の詳細



ならびに分担を以下に示す。

(1) 除染処理業務時に発生する粉じん並びに放射能の測定

模擬処理業務および実際の処理業務で発生する粉じん濃度・粒径分布、捕集した粉じんの放射能測定を行い、除染対象土壌の比放射能、作業により発生する粉じん濃度と気中放射能との関係および、作業におけるデジタル粉じん計の質量濃度変換係数(K値)についての知見を得る。

模擬処理業務

粉じん濃度と、放射能の関係を知るためには、土壌の汚染度(比放射能)が高く、粉じんの発生量も高い作業での測定が必要であるが、このような条件は汚染地全体の一部であること。このような厳しい条件での実除染業務に各種の測定機器を持ち込むことは困難である。そこで、関係省庁・自治体等の協力をえて、現場を確保し、模擬業務を行う。作業は除染の経験がある業者に委託する。粉じん測定・捕集は、現場での有害化学物質や粉じんの測定の経験をもつ労働安全衛生総合研究所(以下安衛研;甲田、菅野、中村)がそれぞれの専門知識により機器配置・測定時間の決定などを行い、必要に応じ安衛研の研究者が研究協力者として粉じん測定等に当たる。捕集した粉じんの放射能測定は日本原子力研究開発機構の研究協力者が担当する。その他、粒子の電子顕微鏡観察等の補助的測定・土質に関する鉱物学的解析も必要に応じ安衛研(鷹屋、篠原)が行う。

実処理業務

K値に関する測定データの蓄積のため、実処理業務での粉じん濃度の併行測定を行う。この測定および結果の解析は、安衛研(鷹屋、中村)が担当する。必要に応じ放射能測定・電子顕微鏡観察等も(ア)と同様に、各分担研究機関で行う。

(2) ラボレベルでの再発じん実験

非汚染土壌を用いて作業により発生する粒径分布に近い模擬粉じんの発生条件を検討する。本実験は安衛研(山田)が担当する。発生させた粉じんを用いて、粉じん測定、放射能測定を行う。K値の検証を行うとともに、汚染土壌を再発じんさせ、粒径別捕集することにより発生した粉じんの粒径と放射性セシウムの分布に関するデータが得られないか検討する。このデータは、保護具の選定など防護の方法をより効果的に行うために有用な情報となる。なお、粉じんの放射能測定は日本原子力研究開発機構の研究協力者が担当する。

(倫理面への配慮)

本研究は人を対象とした研究ではないが、除染対象となる汚染地域で除染処理業務の模擬作業を業者に委託することになる。当該作業においては、除染電離則を遵守するにとどまらず、比放射能、粉じん濃度より最大限の防護(防塵マスクや保護衣等)を必要としない場合においても作業の特殊性(実際の除染と異なり粉じんがより発生する作業だけを繰り返し実施してもらう可能性など)に鑑み、除染電

離則で規定されている最も高リスク作業を想定した管理を委託業者に指示して実施させる。さらには、この模擬作業に従事する作業者の防護対策や安全管理、被ばく状況の測定について研究所内部の研究倫理審査委員で審査していただく。

また、除染処理業務の模擬作業等で粉じん測定等を実施する場合や汚染地より高濃度土壌を実験室で取扱う場合、研究者の安全管理や被ばくの測定などについても万全を期した上で研究を遂行する。

### C. 研究結果

高濃度の放射線に汚染されている地域、すなわち、帰還困難区域における除染処理作業や模擬作業の実施による測定評価が複数回可能であると考えていたが、この地域における除染処理業務の遅れ、模擬実験を実施する重機や研究機材の持ち込みの困難さなどから、研究所年度においては、当初の研究計画を十分に遂行できなかった。結果的に、研究所年度に予定していた内容を研究次年度への宿題となったり、一部研究計画の変更をせざるを得ない部分が出てきた。しかしながら、今後も関係省庁の協力を得て、高濃度の放射線に汚染されている地域における除染処理業務における粉じんばく露の測定評価の実施は追求するものの、これらが困難であることも想定し、当初計画していた実験室実験を綿密に行う予定である。

研究初年度において実施し得た内

容は測定評価系の準備・確立、非汚染土壌における模擬的な除染処理業務に伴う粉じんばく露の測定評価の実施、当該土壌（非汚染土壌）を用いた発じん装置による実験室実験等であり、これらの結果を帰宅困難区域とまでは汚染されていない地域（福島県楢葉町）における除染等業務での粉じんばく露測定及び評価と併せて検討を行った。本稿では、これらの調査結果のうち、分析結果の得られているものを報告する。

#### （１）測定評価系の確立

除染当業務あるいは除染作業を模した作業を対象として、その際に発生する土壌粉じんの質量濃度測定（インハラブル、レスピラブル）、粒径分布測定（アンダーセンサンプラー）および粉じん計による計測を行い、作業に伴う粉じん濃度とその際の粉じん計の応答に関する情報を収集し、作業者あるいは作業に伴う粉じんばく露の可能性や程度を測定・評価しようとするというのである。使用する機器は大きく分けると、粉じんサンプラー（質量濃度測定用）およびポンプ及び粉じんサンプラー（質量濃度測定用）およびポンプ、粉じん計に分けられる。

粉じん用サンプラ - には、柴田科学粉じんサンプラーA型 + ロウボウリウムサンプラーポンプ LV-40（AC100V）+ 面積流量計（定点でのインハラブル粒子質量濃度測定用）、柴田科学粉じんサンプラーNW354 + ロウボウリウムサンプラーポンプ LV-40（AC100V）+ 面積流量計（

定点でのレスピラブル粒子質量濃度測定用)、IOM サンプラー+サンプリングポンプ(重機オペレーターなどの移動しながらのインハラブル粒子質量濃度測定用)、NWPS254 サンプラー+サンプリングポンプ(重機オペレーターなどの移動しながらのレスピラブル粒子質量濃度測定用)、\*IOM サンプラーは粉じん計(Split2)などを用いた。粉じんサンプラー(質量濃度測定用)にはアンダーセンサンプラー(AN-200)を用いた。粉じん計にはSKC SPLIT-2 個人ばく露用ポンプ外付け(粒径選択ノズルはインハラブル用を設置)、柴田科学 LD-5、LD-5D、LD-6N を用いて、測定評価系を確立した。

## (2) 非汚染土壌を用いた除染業務の模擬的な実験

本調査は平成26年2月3日~6日に群馬県前橋市柏倉町の私有地(耕作地等)において実施した。受託業者は株式会社ジオデザインであり、用意した土壌は山砂、畑を想定した耕作地の土壌、水田を想定した土壌の三種類である。ドラッグシャベルによって、通常の除染作業で用いられるフレコンバックに土壌を詰める模擬的な除染作業を行い、前述した測定評価系を用いて土壌の発じん状況及び作業等への粉じんばく露状況を測定評価した。

模擬除染作業の作業手順等は以下の通りである。

フレコンバックスタンドにフレコンバックを設置する。

ドラッグシャベルにより、フレコンバ

ックに土砂を投入する。

フレコンバックに詰め込まれた土砂を現況に戻す。

~ を繰り返す。

フレコンバック内より、土の物理特性試験用サンプルを採取する。

- ・土粒子の密度試験
- ・土の粒度試験
- ・土の含水比試験
- ・土の液性限界・塑性限界試験

~ を繰り返す。

現況に戻した土砂に、散水し、攪拌する。

~ を繰り返す。

なお、模擬作業状況等は後に示す写真を参考にしてほしい。

今回の模擬的作業で用いた土壌については実験後に持ち帰り、土壌試験(土粒子の密度試験、土の含水比率、土の粒度試験、土の赤誠限界・塑性限界試験)を実施して相互に比較検討した。その結果、土粒子の密度 $\rho_s$ は、水田が最も小さく $2.620\text{g/cm}^3$ で、山砂は $2.681\text{g/cm}^3$ 、耕作地は $2.727\text{g/cm}^3$ であった。

含水比 $w$ の分布では、山砂が最も低く、 $6\% \sim 9\%$ であった。一方、耕作地は $39\% \sim 46\%$ 、水田は $55.6\%$ で、これらは塑性限界 $w_p$ に近い値である。粒径加積曲線でみると、山砂の曲線は勾配がなだらかで、広い範囲の粒径から成る細粒分まじり礫質砂(SG-F)に分類される。一方、耕作地、水田はいずれも細粒分を $50\%$ 以上含む細粒土で、液性限界 $w_L$ が $50\%$ を超えていることから、塑性図より高液性限界の砂質シ

ルト (MHS) に分類される。ただし、水田の方がやや粒径が細かく、コンシステンシー限界も全体的に高い。細粒土の硬軟や安定を表すコンシステンシー指数  $I_c$  は両者とも 1 に近く、液性指数  $I_L$  は 0 に近い値を示していることから、現在の含水比において硬い安定した状態にあると言える。なお、山砂の液性限界試験では、試料を黄銅皿に所定の厚さに入れることができなかったため、NP (non-plastic) とした。

これらの模擬的な除染作業時に粉じんばく露量を測定評価すると、

・山砂の場合

総粉じん量：1.1mg/m<sup>3</sup>

吸入性粉じん量：0.1～0.4mg/m<sup>3</sup>

・耕作地の場合

総粉じん量：10.9mg/m<sup>3</sup>

吸入性粉じん量：5.1mg/m<sup>3</sup>

・水田の場合

総粉じん量：6.0mg/m<sup>3</sup>

吸入性粉じん量：0.6mg/m<sup>3</sup>

であった。

さらに、模擬的な除染作業におけるアンダーセンサンプラーの結果を表 1～3、及び図 1 に示す。また、参考として、榑葉町において実施した除染作業時のアンダーセンサンプラー測定結果も併記した。

これらの結果を見ると、土壌の種類、すなわち、土壌の起源が山砂なのか、耕作地なのか、水田なのか、によって総粉じん量に占める吸入性粉じん量に比率に違いが生じる可能性のあることがわかる。ただし、今回の模擬的な除染作業を水田時実施した際に、作

業中常時数～十数メートルの強風が吹いたため、結果的に粒径の大きな土壌が舞い、サンプラーに飛び込んだ形跡も認められるため水田の場合のデータは過小評価している可能性が強い。これらを検証する意味で、現在、模擬的な除染作業で用いた土壌を研究所に持ち帰り、再発じん実験を行い、フィールドで得られたデータを確認しているところであり、来年度の研究報告書ではその結果を述べる予定である。

#### D. 考察

除染等業務における粉じんばく露の測定評価系については、当研究所が以前より実施してきた調査研究を引き継ぎ、構築したものであるが、今回は粉じんの粒度分布による比放射能の違いを計測するため、アンダーセンサンプラーを用いた計測を実施した、榑葉町の除染現場では細かい粒度分布が得られなかった。今後は、アンダーセンサンプラーの計測面を工夫することで粒度分布の採取範囲を広げて測定評価することを考えていきたい。

また、榑葉町における除染作業時の粉じんデータはさほど高いものではなかったが、測定時期が 12 月でもあり、前日まで雨天と発じんが多くなる環境に無かったことによる。

模擬的な除染作業に比較した土壌について、地域的な偏り、すなわち、関東特有の土壌である可能性の有無について考察した。

山砂の土質の粒径加積曲線は、全国に分布するまさ土（風化花崗岩）の粒径加積曲線と、一致していた。耕作地（畑）の土質の粒径加積曲線、「ローム+鹿沼土」の粒径加積曲線と、粒径が細粒分（シルト以下）では一致した。粒径が礫以上の粒度分布に違いがあるが、これは、耕作地（畑）の性質上、礫以上の粒径が少ないと思われる。水田の土質の粒径加積曲線は、ロームの粒径加積曲線と、粒径が粗粒分（シルト以下）では一致した。粒径が礫以上の粒度分布に違いがあるが、これは、水田の性質上、礫以上の粒径が少ないと思われる。耕作地（畑）と水田の土質は、細粒分を50%以上含むため細粒土と分類し、液性限界試験、塑性限界試験を実施し、各地の火山灰質粘性土の塑性図にプロットした結果、各地の火山灰質粘性土と同等の性状であった。以上の結果より、模擬除染作業で使用した山砂、耕作地（畑）、水田の土質は、全国に分布している、まさ土、火山灰質粘性土と同様な性質を持った土質と判断できる。

従って、今回の模擬的な除染作業において得られた発じん状況、あるいは作業者等への粉じんばく露状況、粉じんばく露測定評価等は福島県における除染等業務における粉じんばく露測定評価の基礎的な資料として活用しうると推察される。

#### E．結論

本報告書は2年の研究期間における1年目の報告書であり、様々な事情から予定していた調査研究を完了でき

なかったこともあり、結論を述べる状況にはない。しかしながら、今回の模擬実験で得られた土壌の発じん状況、ひいては作業者等への粉じんばく露状況や粉じんばく露測定評価等は福島県における除染等業務における粉じんばく露測定評価の基礎的な資料として活用しうることが期待できる。今後は、模擬実験で使用した土壌を元にラボレベルで再発じん実験を行い、粒度分布の違いを明らかにし、研究2年目に実施する予定の高濃度に汚染された地域における除染等業務での粉じんばく露状況の測定評価結果や汚染土壌を用いたラボレベルの再発じん実験の結果から、土壌の粒度分布別の比放射能の計測結果を基にした内部被ばくの測定評価、さらにはその結果から考えられる内部被ばくを防止するための対策の構築等につなげていきたい。

#### F．健康危機情報

なし

#### G．学会発表

現段階ではなし

#### H．知的財産権の出願・登録状況

##### 1．特許取得

なし

##### 2．実用新案登録

なし

##### 3．その他

なし

・研究成果の刊行に関する一覧表  
現段階で刊行物なし

・研究成果の刊行物・別刷  
現段階で刊行物なし

**檜葉町における除染等業務での粉じんばく露測定評価**





写真1 重機によって汚染土壌がフレコンバックに回収される



写真2 定点における粉じん計測（赤丸はアンダーセンサンプラー）





写真 3・4 個人ばく露測定の装備



非汚染土壌を用いた除染業務の模擬的な実験（群馬県）



写真5 山砂を用いた模擬的な除染作業風景



写真6 耕作地における模擬的な除染作業風景





写真7 水田における模擬的な除染作業風景



写真8 個人ばく露測定の装備

## 模擬的な除染作業におけるアンダーセンサンプラー結果

ステージ	粒径 [ $\mu\text{m}$ ]	捕集量 [ $\mu\text{g}$ ]			
		山砂_乾燥	山砂_湿潤	畑	水田
0	> 11	142.1	110.4	129.3	39.3
1	7.0-11	95.4	40	114.2	17.8
2	4.7-7.0	75.3	43.1	42.5	17
3	3.3-4.7	45.8	24.4	28.1	18.7
4	2.1-3.3	33.2	9.3	2.4	12.9
5	1.1-2.1	23.1	2.5	-12.8	5
6	0.65-1.1	77.7	22.9	-18.1	11.8
7	0.43-0.65	84.8	25.6	-8.5	5.7
バックアップ	< 0.43	87.8	21.3	8.5	0.4

グレーの項目は、目に見える粒子を取り除いた後の値

作業	サンプリング時刻 (時間)
山砂_乾燥	10:01-11:59 (118min), 13:21-14:32 (71min)
山砂_湿潤	15:12-16:01(48 min)
畑	9:48-11:53 (125min)
水田	13:30-15:11(101min)

ステージ	粒径 [ $\mu\text{m}$ ]	粉じん濃度 [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]			
		山砂_乾燥	山砂_湿潤	畑	水田
0	> 11	26.6	81.3	36.6	13.7
1	7.0-11	17.8	29.4	32.3	6.2
2	4.7-7.0	14.1	31.7	12.0	5.9
3	3.3-4.7	8.6	18.0	7.9	6.5
4	2.1-3.3	6.2	6.8	1.4	4.5
5	1.1-2.1	4.3	1.8	0.0	1.7
6	0.65-1.1	14.5	16.9	0.0	4.1
7	0.43-0.65	15.9	18.8	0.0	2.0
バックアップ	< 0.43	16.4	15.7	2.4	1.7

注) 捕集量がマイナスの値は0 [ $\mu\text{g}$ ], 0-5 [ $\mu\text{g}$ ]の値は5 [ $\mu\text{g}$ ]として濃度算出

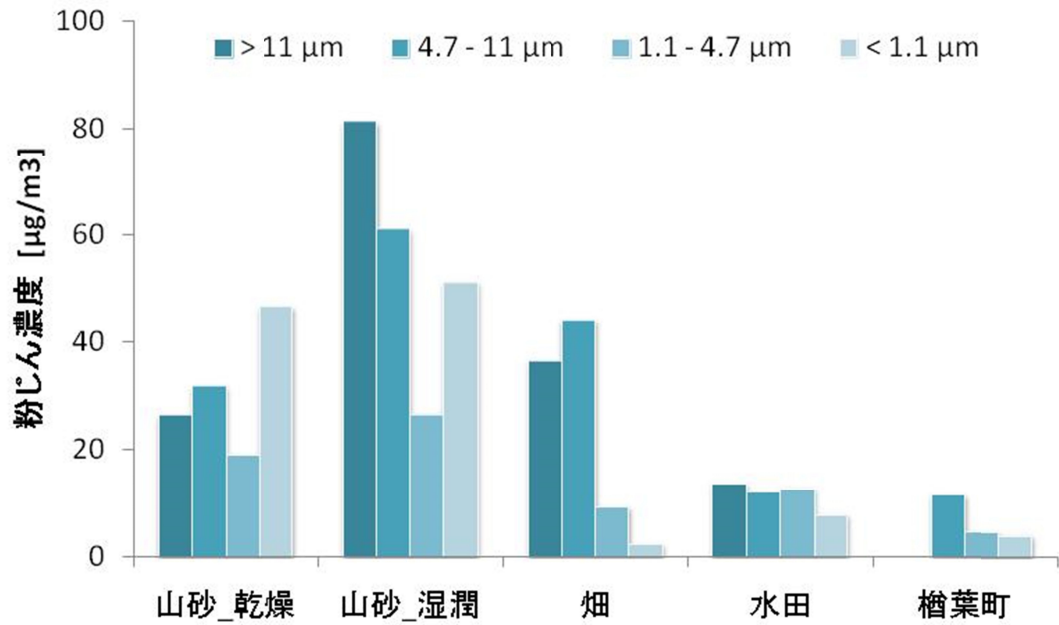


図 1 . 各作業に対応した粒径別粉じん濃度

檜葉町の 11 µm 以上の濃度は、砂粒の入り込みによる過大評価の可能性があるので省いた。