

平成 24 年 8 月 28 日

日本放射線安全管理学会
会長 野村 貴美 殿

日本放射線安全管理学会
放射性ヨウ素安全対策アドホック委員会
委員長 西澤邦秀

東京電力福島第一原子力発電所の事故に起因した
放射性物質による汚染被服の解析および除染

表記の件について、平成 23 年度放射性ヨウ素安全対策アドホック委員会（平成 23 年 3 月 15 日～平成 24 年 3 月 31 日）被服分析班 中里一久班長より別添のとおり報告書の提出がありましたので、ご報告いたします。

本報告書については、本学会のホームページへ掲載し学会員に対して周知するとともに関係機関等への適切な広報をお願い致します。

別添

平成 24 年 8 月 25 日

日本放射線安全管理学会
放射性ヨウ素安全対策アドホック委員会
委員長 西澤邦秀 殿

放射性ヨウ素安全対策アドホック委員会
被服分析班
班長 中里一久

東京電力福島第一原子力発電所の事故に起因した
放射性物質による汚染被服の解析および除染

福島第一原発事故によって放出された放射性物質（RI）により汚染された被服の汚染状況の調査結果，並びに被服から RI を除去するため市販の洗濯機による除染効果について平成 23 年 3 月 15 日～平成 24 年 3 月 31 日に実施した実験結果を別紙の通り報告いたします。

平成 24 年 8 月 25 日

東京電力福島第一原子力発電所の事故に起因した 放射性物質による汚染被服の解析および除染

放射性ヨウ素安全対策アドホック委員会 被服分析班

班員（五十音順：◎班長、副班長）

○北 実（鳥取大学生命機能研究支援センター）

木村 宏二（鳥取大学生命機能研究支援センター）

佐瀬 卓也（徳島大・アイソトープ総合センター）

現所属：（株）大塚製薬工場 研究開発センター 鳴門研究所

◎中里 一久（慶應義塾大学医学部放射線安全管理室）

桧垣 正吾（東京大・アイソトープ総合センター）

廣田 昌大（東京大・院・工学研究科）

現所属：信州大学 ヒト環境科学研究支援センター

松田 尚樹（長崎大学先端生命科学研究支援センター）

研究協力者

菊池 裕純（慶應義塾大学医学部 放射線安全管理室）

森 一幸（（株）イング）

概要

東京電力福島第一原子力発電所(東電福島原発あるいは原発と略す)の事故によって原発周辺の環境中に多量の放射性物質(RI)が放出された。事故直後に実施された汚染地域からの避難住民に対するスクリーニング検査時に住民の着衣が放射性物質によって高度に汚染されていることが報道された。原発からのRI放出が治まった以降も、福島県および周辺には放射線量の高い地域¹⁾ではRI汚染に対する不安のため、屋外に洗濯物を干すことができない住民も存在していた。

この事態に対処するために、日本放射線安全管理学会の放射性ヨウ素・セシウム安全対策アドホック委員会では被服分析班を立ち上げた。被服分析班の目的は、被服のRIによる汚染状況を解析するとともに、一般家庭でも実践可能な洗濯方法による除染効果及び洗濯に伴う2次汚染の有無、並びに屋外乾燥の安全性を調査することであった。

被服のRI汚染の状況および洗濯による除染の効果、被服に残留したRIによる被ばくの影響は、以下の通りであった。

(1)福島第一原発の事故により環境に放出されたRIに起因した被服への汚染状況を解析した。また、被服の汚染の市販洗濯機による除染の効果を調べた。その結果、事故原発周辺では事故直後には被服に放出RIによる汚染が検出された。しかし、3ヶ月経過した2011年6月以降では、着用被服にはGMサーベイでは汚染が検出されなかったが、Ge検出器により微量の汚染が検出された。

(2)被服の汚染は、市販の洗濯装置および洗剤による一般的な洗濯により除染された。2011年3月に着用された被服では、洗濯1回あたり約74%除染され、3回繰り返すと約84%除染された。2011年7月以降に着用された被服では、1回の洗濯により、約88%除染された。

(3)被服を洗濯後屋外において乾燥した場合、付着したCsによる放射線被ばく線量は、当該被服を1年間皮膚に密着し続けたときに皮膚が受ける等価線量が $28.7 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ であり、実効線量が $0.0884 \mu\text{Sv}\cdot\text{y}^{-1}$ であった。これらは、一般公衆に対する皮膚の等価線量限度 $50\text{mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ および実効線量限度 $1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ より小さかった。

(4)ズボン残留汚染レベルおよびタオル付着汚染レベルの被服を交互に着用した場合の実効線量は、算出モデルを変えても、一般公衆に対する線量限度以下であり、安全であった。

以上のことにより、洗濯は一般住民が特別な除染機器を用いることなく実行できる簡単で有効な除染方法であることを明らかにした。また、洗濯は、一般住民が着用被服のRI汚染に対する不安を取り除くのに有効であるとともに、洗濯された清潔な被服を着用できることによる安心感の醸成にも有用であると評価した。

目次

1. はじめに
2. 試料および方法
 - 2.1 被服試料
 - (1)被服試料1(慶応大学にて分析)
 - (2)被服試料2(長崎大学にて分析)
 - (3)被服試料3(鳥取大学にて分析)
 - (4)被服試料4(屋外での乾燥タオル)
 - 2.2 使用機器材
 - (1)測定器
 - (2)洗濯機・洗剤・漂白剤等
 - 2.3 作業着の汚染測定
 - (1)サーベイメータによる汚染分布の定性分析
 - (2)イメージングプレートによる汚染分布の定性分析
 - (3)Well型シンチレーションカウンタによる定量分析
 - (4)Ge検出器による定量分析
 - 2.4 除染機材および除染環境の安全性の確認
 - 2.5 被服試料4の屋外における乾燥処理の安全性に関する解析
 - 2.6 RIが付着した被服の着用による放射線被ばく線量の評価
3. 結果
 - 3.1 汚染分布の特徴
 - (1)3月の警戒区域における着用被服(被服試料1)
 - (2)3月における長崎大の医療支援チームの着用被服(被服試料2)
 - (3)ズボン
 - 3.2 洗濯による除染効果
 - (1)被服試料1
 - (2)2次元画像による除染分布の評価
 - (3)ズボン
 - 1)3月着用のズボン
 - 2)7月及び8月着用のズボン
 - 3.3 洗濯除染環境の安全性の評価
 - 3.4 タオル(被服試料4)の屋外での乾燥による汚染の程度
 - (1)サーベイメータによる汚染評価
 - (2)Ge検出器による汚染評価
 - (3)IP画像による汚染分布
 - 3.5 汚染被服着用時の被ばく線量
4. 考察
 - 4.1 福島県における事故直後の汚染の特徴
 - 4.2 洗濯の一般住民の放射線防護上の有効性
 - 4.3 洗濯物の屋外乾燥の影響
 - 4.4 被服の汚染に起因した一般住民の被ばく線量の推定
 - 4.5 一般住民が福島で今後も住み続けるための被服の問題点
5. まとめ
6. 謝辞

1. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(東電福島原発あるいは原発と略す)の事故によって原発周辺の環境中に多量の放射性物質(RI)が放出された。事故直後に実施された汚染地域からの避難住民に対するスクリーニング検査時に住民の着衣が放射性物質によって高度に汚染されていることが報道された¹⁾。原発からのRI放出が治まった以降も、福島県および周辺の放射線量の高い地域では^{2, 3)}、RI汚染に対する不安のため、屋外に洗濯物を干すことができない住民も存在していた。

この事態に対処するために、日本放射線安全管理学会の放射性ヨウ素・セシウム安全対策アドホック委員会では被服分析班を立ち上げた。

被服分析班の目的は、被服のRIによる汚染状況を解析するとともに、一般家庭でも実践可能な洗濯方法による除染効果及び洗濯に伴う2次汚染の有無、並びに屋外乾燥の安全性を調査することである。

2. 試料および方法

2.1 被服試料

分析に供した被服試料は、事故原発の復旧作業に直接従事した者が着用した被服ではなく、1) 事故原発から20km圏内の警戒区域内に事故直後の3月に待機のため一時的に滞在した者、および2) 事故直後から8月の間に緊急時避難準備区域内外において住民のRIによる汚染測定等に従事した者が着用した被服、ならびに3) 2011年7・8月に屋外で乾燥させたタオルである。調査した被服類は、ズボン、上着、シャツ、靴下、手袋の他、5種類の被服であり、計11品目であった。それらを、入手地域および入手時期等により分類すると、次の四種類となる。

(1) 被服試料1: 試料1は福島県大熊町(警戒区域)あるいは広野町(緊急時避難準備地域)において2011年3月11日から16日の間の活動時に着用された被服である。試料の経歴は、次の通りである。事故原発から約5km離れた位置にあるオフサイトセンターの施設等において待機した作業員が着用していた被服類であり、A社の社員が着用していたズボンおよび作業着、靴下、手袋、帽子ならびにT社社員が使用した防護衣および手袋、防護マスクであった。このうち、A社社員の被服試料は、3月11日事故当時から12日に大熊町周辺において、その後、3月13日から15日において広野町の社員自宅で使用した後、3月16日にいわき市を経由して茨城県水戸市に移動し

た際に着用していたものであった。T社社員より得られた防護衣および手袋等の使用履歴は明らかではない。汚染測定および洗濯除染は慶應大学において同年4月に実施され、一部のズボンについては鳥取大学においても分析された。

(2) 被服試料2: 試料2は医療支援のために長崎大学から派遣された5名の長崎大職員(医療支援チーム)が平成23年3月14日～19日に福島市内で着用した上着、ベスト、セーター、シャツ、ズボン、靴、帽子、および移動中に携帯した鞆である。試料は、3月14日～15日午前は福島市中心部、それ以降は福島市郊外の福島県立医科大学に滞在し、大部分の時間は屋内活動に従事したが、3月15日午後以降は屋外でフールアウトを含む雨、雪に暴露された。これらの被服等を着用したまま新幹線および飛行機に乗り、3月20日に長崎に帰着した後、すべての被服試料2はビニール袋内に保管され、3月22日に長崎大学において汚染測定および洗濯除染が行なわれた。

(3) 被服試料3: 試料3は鳥取大職員が、緊急時避難準備区域である南相馬市あるいは広野町において、2011年6月30日-7月3日(7月着用と記す)および7月29日から8月3日(8月着用)の間に、屋内外での汚染調査時に着用したズボンである。7月着用ズボンは、6月30日に鳥取市から、飛行機、鉄道により福島市内に到着し、7月1日から7月2日、南相馬市内で一時帰宅者のスクリーニング活動に従事した後(福島市で宿泊)、7月3日に、往路と同じく鉄道、飛行機により鳥取市へ帰宅するまでの間着用された。8月着用ズボンは、7月29日に鳥取市を出発し、7月30日から8月2日に福島県広野町にてスクリーニング活動に従事した後(宿泊は福島市、東京)、8月3日に鳥取市へ帰宅するまでの間着用された。両ズボン共に、福島県内に滞在した際に防護衣等を上掛けすることなく常に外気にさらされ、またベンチおよびコンクリートブロック、アスファルト道路等に直接着座する等の行為を行ったものである。8月着用ズボンは、7月29日から8月3日の間に降雨にも暴露された⁴⁾。汚染測定および洗濯除染は鳥取大学において行われた。

(4) 被服試料4: 試料4は屋外において乾燥処理した、木綿製の34cm×86cmのタオルである。これらのタオルは、2011年7月24日から8月9日の間に、事故原発から60km以上離れた福島市および郡山市、会津若松市、川口市において一般住民の協力の下、各協力者の自宅において原発事故前に行っていた通常の方法により洗濯

後屋外にて乾燥された。汚染測定等は東京大学において行われた。

2.2 使用機器等

(1) 測定器

表1は、被服試料を測定した放射線測定器の一覧である。GM式サーベイメータ、Well型シンチレーションカウンタ、ZnS(Ag)シンチレーションサーベイメータ、Ge半導体検出器、IP用フルオロイメージアナライザ、イメージングプレートを使用した。表中、GM式サーベイメータはGMサーベイ、ZnS(Ag)シンチレーションサーベイメータはZnS(Ag)サーベイ、Well型シンチレーションカウンタはWSC、Ge半導体検出器はGe検出器、イメー

表1 使用した放射線測定器

測定機関	放射線測定器	型名	製造者
慶應義塾大学	GMサーベイ	TGS-146	Aloka製
	WSC	AccuFLEX γ -7000	Aloka製
	Ge検出器	MCA7700	SEIKO EG&G製
鳥取大学	GMサーベイ	TGS-146	aloka製
	IP	BAS-IP MS 3543	富士フイルム製
	IP用フルオロイメージングアナライザ	FLA-5000,	富士フイルム製
長崎大学	GMサーベイ	TGS-133	Aloka製
	GMサーベイ	TGS-133	Aloka製
東京大学	Ge検出器	Princeton	Gamma-Tech製
	ZnS(Ag)サーベイ	TCS-222	Aloka製
	IP	BAS-MS3543	富士フイルム製
	IP用フルオロイメージングアナライザ	FLA-9000 STARION	富士フイルム製

ジングプレートはIP、と略記した。

GMサーベイおよびZnS(Ag)サーベイ、IPは、汚染分布の定性分析に使用した。WSCおよびGe検出器は定量分析に用いた。IPは汚染の2次元的な分布状態の解析に使用した。

測定に先立ち、GMサーベイおよび、ZnS(Ag)サーベイ、Ge検出器を校正した。GMサーベイは、Cs-137標準線源(740 MBq at 14Apr.1993, CDC26206, Amersham製)およびRa-226チェック線源(19 kBq, TGS-501, TGS-501S, Aloka製)により校正した。検出限界をBG計数値の2倍とした。

ZnS(Ag)サーベイは、チェック線源により校正した。

Ge検出器は、Ge検出器用校正線源(MX033U8TP, 45 mm ϕ x 65 mmH, 日本アイソトープ協会製)によりエネルギー校正し、あわせて検出効率を求めた。かさ高の低い試料は、Ge検出器用校正線源と同じ形状のプラスチック容器(U-8容器, 45 mm ϕ x 65 mmH)に収納して測定した。かさ高の大きい被服試料は、市販のポリエチレン製円筒形容器(1-4637-06, 114 mm ϕ x 197 mmH, アズワン(株)製)に収納して測定した。この場合、計数効率は、Cs-137標準線源(3.74 kBq at 13Jan.2004, No.72168-LU834, AEA Technology社製)を容器底面から0, および20, 50, 130, 197 mmの高さに固定して測定することにより算出し、それらの平均値とした。

(2) 洗濯機・洗剤・漂白剤等

表2-1は、除染効果を調べるために使用した洗濯機の一覧であり、表2-2は洗剤の一覧である。除染効果の調査には、洗濯機は渦巻き式およびドラム式の一般市販品を使用し、洗剤も一般市販品を使用した。漂白剤の効果进行调查するときは、漂白剤を含んだ頑固汚れ用洗剤を使用した。

洗濯は、洗濯機に備えられている自動洗濯機能を使用して実施した。洗濯処理時間は約10分

表2-1 除染用洗濯機

調査機関名	洗濯機・洗剤	型名・商品名	製造者
慶應大学	渦巻き式洗濯機	AW-A60(EG)	MITSUBISHI製
	回転ドラム式	ES-V510-NL	SHARP製
鳥取大学	渦巻き式	ASW-T3型	三洋電機製
	渦巻き式	AWD-TQ900	三洋電機製
長崎大学	回転ドラム式	BD-V1300	日立製
東京大学	渦巻き式	一般市販洗濯機	型名・製造者不明

表2-2 除染用洗剤

調査機関名	洗濯機・洗剤	型名・商品名	製造者
慶應大学	粉末洗剤(粉末)	アタック バイオEX	Kao製
	液体洗剤(液体)	シャボネットF	サラヤ製
鳥取大学	粉末洗剤	アリエール頑固汚れ用	P&G製
	液体洗剤	アタックneo	Kao製
長崎大学	粉末洗剤	アタック	Kao製
東京大学	液体洗剤	一般市販品	型名・製造者不明

であり、すすぎ時間が約 6 分、脱水時間が約 4 分であった。なお、被服試料4の洗濯では、一般市販品の洗濯機および洗剤を用いたが、洗濯時間等は協力依頼した家庭に委せたため不明である。

2.3 作業着等の汚染測定

(1) GM サーベイによる汚染分布の定性分析

図1は、被服試料を GM サーベイで測定している状況を示している。図の(A)は作業着を、(B)は靴下、(C)は手袋、(D)はズボンを測定している。図に示すように、GM サーベイの GM 管には汚染防止のためにサランラップで被覆した。時定数は 10 sec とし、GM管と試料表面との距離は1cm以下に保った。GM 管の移動速度は約 50 cm/10sec であった。GM サーベイの BG 計測値は 50-100 cpm であった。

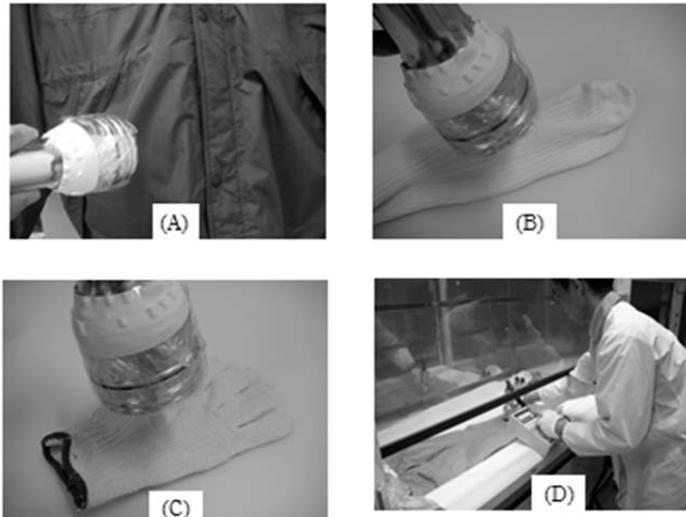


図1. GMサーベイメータによる汚染状況の測定

A:作業着 B:靴下 C:手袋 D:ズボン

(2) IPによる汚染分布の定性分析

図2は、IPによる露光の状況を示している。図の(A)は裾部分、(B)は膝部分、(C)は腰部分をそれぞれ露光している。露光時間は、ズボンでは、3月に着用したものでは 3h であり、7月および8月の着用品では 24h であった。被服試料4のタオルでは、140 h であった。

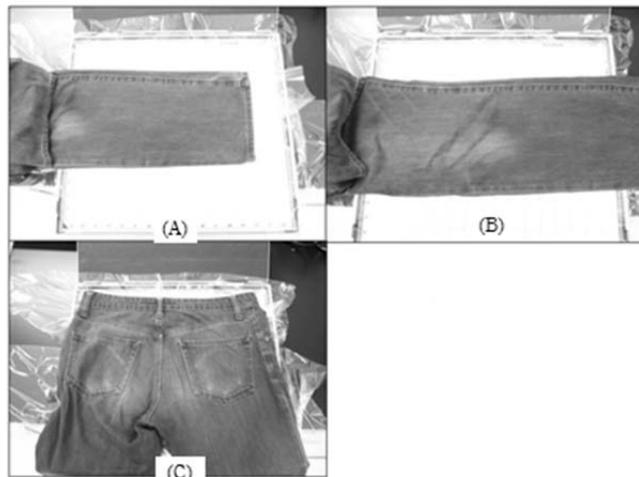


図2. IPによるRI汚染の2次元分布状況の測定

A:裾部分 B:膝部分 C:腰・臀部分

(3) WSCによる汚染測定

被服試料1のうち、綿製手袋および靴下のみ、WSCにより汚染測定した。被服試料は約3~5cmの長方形に切断し、測定用 20ml バイアルに封入して測定した。

図3は、WSCによる測定の状態を示している。図の(A)は、試料バイアルの形状を示した写真であり、(B)は複数のバイアルを設置したWSC用の自動試料交換機を示している。使用したWSCには多数の核種の混入を補完する機能が具備されていないので、WSCによる汚染は計数率(cps)で記述した。

(4) Ge 検出器による定量測定

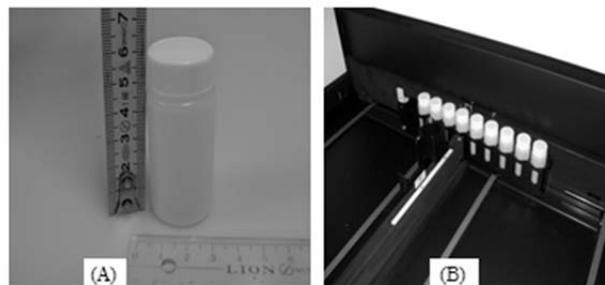


図3. 衣服片のウェル形シンチレーションカウンター (WSC)による汚染測定の状態

A: 試料用バイアル(容量:20ml)
B: 複数のバイアルを設置したWSC用自動試料交換機

図4は、Ge 検出器の外観および試料を収納した容器を用いた測定の状態を示している。図の(A)は検出器の外観を示している。(B)は、かさ高い大きい被服試料を収納した容器の形状を示している。(C)は、試料用容器をGe 検出器の上に乗せた状態を示している。

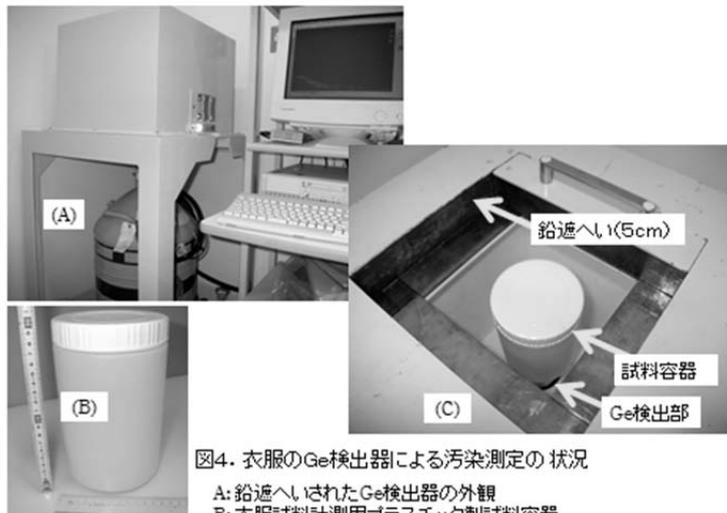


図4. 衣服のGe検出器による汚染測定の状態
 A: 鉛遮へいされたGe検出器の外観
 B: 衣服試料計測用プラスチック製試料容器
 C: Ge検出器の上に試料容器をのせた状態

2. 4 除染機材および除染環境の安全性の確認

洗濯機及び乾燥器(除染用機器)および除染用機器を設置した部屋の環境汚染は、直接測定法および間接測定法により、確認した。直接測定ではGMサーベイを使用し、間接測定にはスミア法濾紙(No63,東洋濾紙製)を使用し、GMサーベイにより測定した。内部被ばくの推定を行うための空気のモニタリングにはダストサンプラー(L30 MKIII, M&F Ltd製), 濾紙(GB100R,CP-20 活性炭濾紙, 東洋濾紙製)を使用した。得られた濾紙をWSCにより測定した。

2. 5 被服試料4の屋外における乾燥処理の安全性に関する解析

(1) 乾燥地点

図5は、被服試料4のタオルを屋外において洗濯し乾燥した地点を示している。調査地は、福島県福島市、郡山市、会津若松市および埼玉県川口市の4カ所であり、いずれも事故原発から直線距離で60km以上離れている。

(2) 洗濯および測定

上記の地域の住民に依頼し、Ge検出器によりBGを測定後のタオルを3枚ずつ配布し、自宅において洗濯し、屋外において乾燥した。洗濯方法、および乾燥場所、乾燥時間は、原発の事故が発生する前の普通の生活において実施していた洗濯と同じとした。

表3は、調査日時および調査場所、乾燥条件等を示している。洗濯乾燥は、2011年7月23日から8月9日にかけて実施され、乾燥場所は計12回の乾燥処理中、2回だけ2階の軒下で乾燥させたが、その他の乾燥は屋外の庭および1階軒下であった。乾燥日の天候は、郡山市での7月29日が雨時々曇りであっただけで他は曇りから晴れであり、気温は20.4℃～28.8℃であった。

乾燥後、タオルを回収し、GMサーベイ、およびZnS(Ag)サーベイ、Ge検出器を用いて測定した。Ge検出器による測定時間は洗濯前後とも13.9時間とした。

Ge検出器による測定でRIが付着していることが明らかになったタオルについて、IPを用いて140h露光して画像を取得した。

2. 6 RIが付着した被服の着用による放射線被ばく線量の評価。

RIが付着した被服の着用による被ばく線量は、以下の二通りの方法により算出した。

(1) 皮膚吸収線量率から実効線量を算出する方法(ICRU-R56法と略す)

ICRU Report 56⁵⁾により、¹³⁴Cs及び¹³⁷Csの皮膚吸収線量率は、表皮下70μmにおいて、それぞれ 1.000×10^3 および 1.432×10^3 (nGy・h⁻¹)・(Bq・cm⁻²)⁻¹である。これらの係数を使用することにより、汚染密度から皮膚の吸収線量率を求めた。この際、被服は頭部、手先および足先に接触しないと仮定して、被服が接触する面積の皮膚全面積に対する比率(R:皮膚接触面積率)を乗じた。さらに、組織荷重係数を考慮して実効線量を算出した。

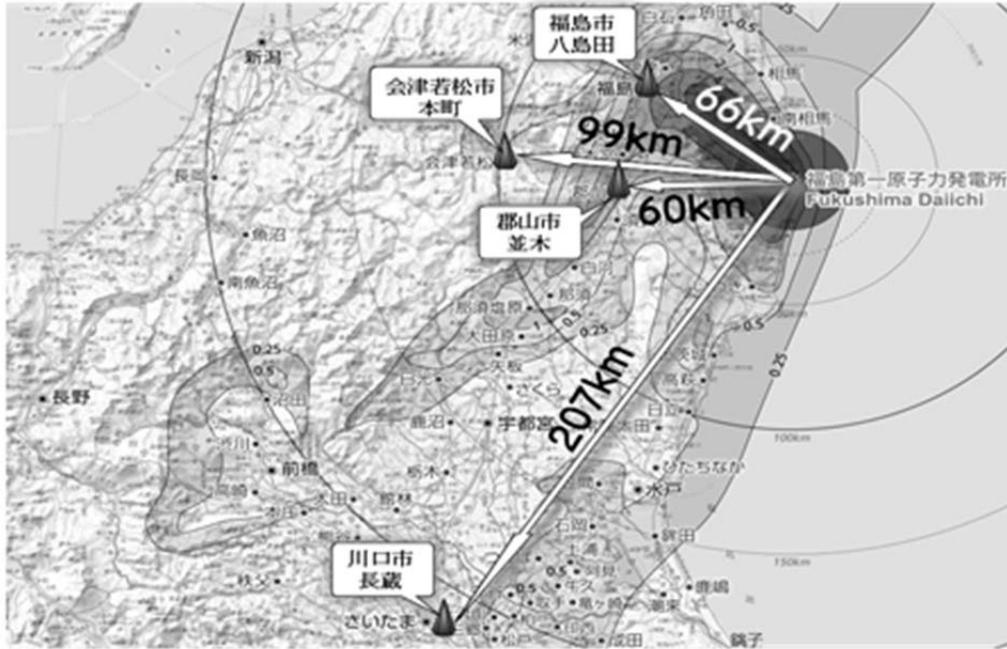


図5. 屋外でタオルの乾燥処理を実施した地点

表3. 被服試料4(タオル)の屋外における乾燥条件

乾燥地	回数	乾燥日時	天候*1, 気温	乾燥場所
福島県 福島市 八島田	1	2011.07.24 (8:30-15:20)	晴れ, 27.9℃	1階軒下
	2	2011.07.25 (7:10-13:00)	曇, 27.5℃	庭
	3	2011.07.26 (10:00-17:30)	時々晴, 28.8℃	2階軒下
福島県 郡山市 並木	1	2011.07.29(13:00-18:00)	雨時々曇24.7℃	1階軒下
	2	2011.08.01 (14:30-18:30)	曇り, 20.4℃	1階軒下
	3	2011.08.04 (12:00-16:50)	晴れ, 30.1℃	1階軒下
福島県 会津若松市 本町	1	2011.07.23 (9:15-15:35)	晴れ, 27.4℃	2階軒下
	2	2011.07.23(9:20-15:36)		庭
	3	2011.07.23 (9:21-15:37)		1階軒下
埼玉県 川口市 長蔵	1	2011.08.09 (6:20-10.40)	晴れ, 28.2℃ *2	1階軒下
	2			
	3			

※1日本の気象庁のデータによる。温度は乾燥処理中の平均値。
 ※2気象条件に関する値は、となりのさいたま市における公開値である。

以下に、ICRU-R56 法により、皮膚等価線量および実効線量を算出する式を示した。

$$H = Q_R \cdot A \cdot S^{-1} \cdot t \cdot 10^{-6} \text{ ---- (I)}$$

H: 皮膚等価線量

Q_R: 皮膚吸収線量率(nGy・h⁻¹)・(Bq・cm⁻²)⁻¹
¹³⁴Cs: 1.000x10³, ¹³⁷Cs: 1.432x10³

S: 面積 (cm²), t: 時間 (h)

A: RI 量 (Bq) (A の減衰は考慮しない)

$$E_I = H \cdot W_T \cdot R \text{ ---- (II)}$$

E_I: 実効線量, H: 皮膚等価線量(mGy),
 W_T: 組織荷重係数, R: 皮膚接触面積率

被服の RI 濃度から汚染密度を算出する際は、被服の比重が通常の被服に使用されている繊維では 1.2 - 1.5 と公表されているので⁶⁾, 1.3 とした。また、測定に供した被服の厚さを測定したところ

0.1 - 0.5mmであったので、被服の厚さは0.3mmとした。

皮膚等価線量の基となる皮膚吸収線量率は、 ^{137}Cs が $1.432 \times 10^3 \text{ (nGy} \cdot \text{h}^{-1}) \cdot \text{(Bq} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$ であり、 ^{134}Cs が $1.000 \times 10^3 \text{ (nGy} \cdot \text{h}^{-1}) \cdot \text{(Bq} \cdot \text{cm}^{-2})^{-1}$ である。 ^{137}Cs の方が ^{134}Cs より大きいので、全て ^{137}Cs による汚染として安全側に評価した。

(2) 米国 Federal Guidance Report No.12(1993)⁷⁾による方法(FGR12 法と略す)

皮膚全面にRIが付着した場合の被ばく線量の近似法として、プール等の汚染水の中で水泳した際の実効線量の計算法を使用した⁸⁾。米国 Federal Guidance Report No.12(1993)により、Cs水溶液に全身を浸漬したときの人体の実効線量率係数は、 ^{137}Cs の場合 1.49×10^{-20} 、 ^{134}Cs の場合 $1.60 \times 10^{-16} \text{ Sv} \cdot \text{(Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ とされている。そこで、被服の汚染と同濃度の汚染水に全身が浸漬したと仮定して、 ^{134}Cs および ^{137}Cs について実効線量をそれぞれ算出し、それらを合算して評価した。

以下に、FGR12法により、実効線量を試算する式を示した。

$$E_F = \Gamma \cdot [B \cdot t] \cdot 10^3 \text{ (mSv)}$$

Γ : FGRD法による実効線量率係数

$$\text{Sv} \cdot \text{(Bq} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$$

^{134}Cs : 1.60×10^{-16} , ^{137}Cs : 1.49×10^{-20}

B: RI濃度 ($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-3}$), t: 時間 (s),

3. 結果

3.1 汚染分布の特徴

(1) 被服試料1(3月度警戒区域における着用被服)

表4は、GMサーベイによる被服試料1の汚染状況の統計である。測定した品目およびサンプル数は、靴下が4足であり、以下同様に、ズボンが2本、上着が2着、作業手袋が2双、防護衣が1着、マスクが3枚、靴が1袋であり、合計7品目17ヶであった。各品目の汚染の最大値および平均値、最小値は、それぞれ靴下が4,200cpmおよび3,200cpm, 2,300cpmであり、ズボンが1,400cpm, 825cpm, 200cpmであり、上着が250cpm, 125cpm, ND(BGと同じ)、作業手袋が4,500cpm,

表4. 被服試料1のGMサーベイメータによる汚染測定の統計

品名	計数率 (cpm)						
	靴下(先端)	ズボン	上着	作業手袋	防護衣	マスク	靴
サンプル数	4	2	2	6	1	3	1
最大値	4,200	1,400	250	4,500	600	260	ND
平均値	3,200	825	125	2,600	600	153	ND
最小値	2,300	200	ND	200	600	150	ND

着用場所: 福島県大熊町オフサイトセンター(警戒区域)-
広野町(緊急時避難準備区域),
着用時期: 2011年3月11日~16日, 測定器: TGS-146
測定担当: 慶大

2,600cpm, 200cpm, 防護衣が総べて600cpm, マスクが260cpm, 153cpm, 150cpmであり、靴はNDであった。これらの汚染は、原子力安全委員会が定めたスクリーニングレベル(100,000cpm)⁸⁾以下であった。

測定値の高かった靴下および作業手袋について、汚染の特徴をGMサーベイにより調査した。

表5は、靴下の先端と踵の汚染の比較である。全ての靴下において、底面の先端部分の汚染が踵部分のそれよりも大きかった。

表6は、インナー用木綿製手袋および木綿製軍手、ゴム手袋について、指先の汚染状況の相違を示している。木綿製手袋では、1つのサンプルの例外を除いて、第2指(人差し指)部分の汚染が他の指の部分の汚染より大きく、最大3,600cpmであった。ゴム製手袋では第2指部分の汚染が木綿製手袋と同じ程度に汚染していたことに加えて、第4指の部分の汚染も大きく、手袋サンプルでの最大汚染値4,500cpmであった。

表5. 靴下における先端とかかととの汚染の比較

種類等	試料番号	最大計数率 (cpm)	
		先端	かかと
綿製白色靴下	1	2,300	1,900
	2	3,400	2,300
綿製黒色靴下	1	4,200	1,900
	2	2,900	1,800

靴下: 被服試料1,
着用場所: 福島県大熊町(警戒区域)-広野町(緊急時避難準備区域)
着用時期: 2011年3月11日~16日
測定器: TGS-146(慶大)

表6. 手袋のGMサーベイメータによる汚染測定

種類	測定した指の位置	計数率 (cpm)	種類	測定した指の位置	計数率 (cpm)
綿製インナ手袋1	1	150	綿製軍手	1	185
	2	ND		2	2,600
	3	200	同上	1	1,300
	4	200		2	1,500
綿製インナ手袋2	1	ND	ゴム製手袋	1	1,600
	2	3,600		2	2,700
綿製インナ手袋3	1	1,800		3	2,300
	2	3,200		4	4,500
	3	2,200			
	4	2,300			

手袋: 被服試料1
 着用場所: 福島県大熊町(警戒区域)~
 広野町(緊急時避難準備区域),
 着用時期: 2011年3月11-16日

GMサーベイでの測定により汚染が検出された手袋および靴下について、高汚染部位を切り取り、それらをWSCおよびGe検出器により測定した。

図6はGe検出器による靴下のスペクトルである。¹³¹Iおよび¹³²I, ¹³⁴Cs, ¹³⁶Cs, ¹³⁷Cs, ¹²⁹Te, ^{129m}Te, ¹³²Teの、²³⁵Uの核分裂に由来する核種が8核種検出された。

表7は、WSCによる計測値とGe検出器による¹³¹Iおよび¹³⁴Cs, ¹³⁷Csの定量結果である。WSC計測によるRI濃度(cpm・g⁻¹)は、手袋の場合ゴム手袋247cpm・g⁻¹で最も高く、以下、インナ手袋(2) 236cpm・g⁻¹、インナ手袋(3) 109cpm・g⁻¹であった。靴下の場合、黒靴下(1)が99cpm・g⁻¹であり、白靴下(2)が168cpm・g⁻¹であった。次に、Ge検出器による計測では、¹³¹Iの濃度は、2011年4月13日測定日において、手袋で最大48Bq・g⁻¹が、靴下で最大18Bq・g⁻¹が検出された。¹³¹Iの濃度は、3月15日時点に半減期補正すると17.3倍になるので、手袋で最大48Bq・g⁻¹は830Bq・g⁻¹であり、靴下で311Bq・g⁻¹であった。¹³⁴Csと¹³⁷Csの合計量は、

手袋で最大550Bq・g⁻¹、靴下で最大376Bq・g⁻¹であった。

ズボンの汚染測定の結果は、後述する。

(2)被服試料2(3月における長崎大の医療支援チームの着用被服)

表8は、GMサーベイによる被服試料2の汚染状況の統計である。測定品目およびサンプル数は、ズボンが7本であり、以下同様に、上着が6着、シャツが4枚、ベスト・セーターが7枚、帽子が2ヶ、靴が5ヶ、靴の裏が7足であり、合計7品目38ヶであった。各品目の汚染の最大値および

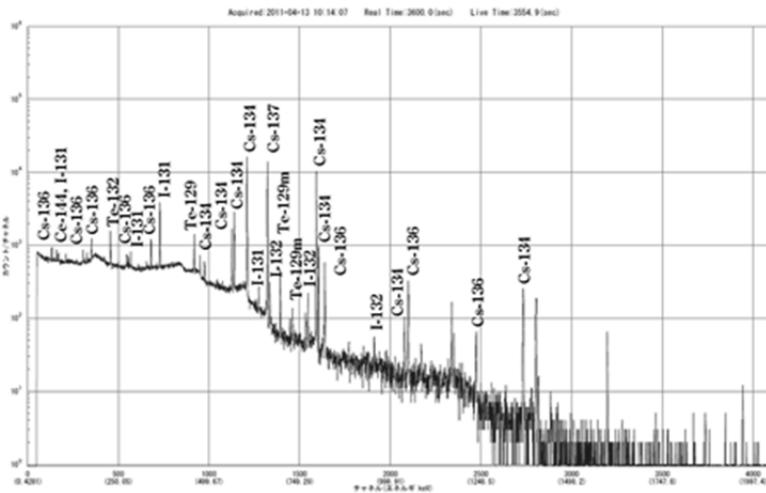


図6. 被服試料1の靴下のスペクトル
 靴下:洗濯前, 測定器:Ge検出器, 測定日:2011年4月13日

表7. 手袋および靴下のWSC・Ge検出器による測定結果

測定試料	WSC Net (cps/g)	Ge半導体検出器 RI濃度 (Bq・g ⁻¹)					
		I-131			Cs-134 & Cs-137		
		4月13日時	3月15日時 点への補正 値	Cs-134	Cs-137	Cs合計	
ゴム手袋	4.4g	247	27	467	254	296	550
インナ手袋 2	3.4g	236	48	830	242	286	528
インナ手袋 3	5.5g	109	35	605	109	128	237
靴下 黒1	5.6g	99.1	11	190	106	125	231
靴下 白2	2.7g	168	18	311	173	203	376

手袋・靴下:被服試料1, 測定日:2011年4月13日

表8. 被服試料2のGMサーベイメータによる汚染測定の結果

衣服品名	ズボン	上着	シャツ	ベスト・セーター
サンプル数	7	6	4	7
最大値 (cpm)	5,430	1,700	520	250
平均値 (cpm)	1,500	550	280	160
最小値 (cpm)	130	110	130	100
衣服品名	帽子	靴	靴裏	
サンプル数	2	5	7	
最大値 (cpm)	240	500	14,700	
平均値 (cpm)	170	290	7,360	
最小値 (cpm)	100	130	330	

着用時期: 2011年 3月14日～19日, 着用者: 長崎大学派遣団
 着用場所: 福島市光が丘(事故原発から北西, 約50km以遠),
 測定器: TGS-133

び平均値, 最小値は, それぞれ, ズボンが 5,430 および 1,500, 130 cpm であり, 上着が 1,700, 550, 110 cpm, シャツが 520, 280, 130 cpm, ベストとセーターが 250, 160, 100 cpm, 靴が 500, 290, 130 cpm であり, 靴の裏面が 14,700, 4,360, 330 cpm であった。これらの被服の汚染は, 原子力安全委員会が定めたスクリーニングレベル (100,000 cpm)⁸⁾ 以下であった。

(3) ズボン.

ズボンは, 3月着用の被服試料に2本あり, 7月および8月着用の被服試料にそれぞれ1本ずつあり, 合計4本であった。3月着用ズボンでは, 2本のうちGMサーベイによる汚染が大きかったズボンを汚染分布分析の対象とした。

表9は, GMサーベイおよびGe検出器によるズボンの汚染状況である。GMサーベイによる測定では, 3月着用のズボンでは腰部分および裾部分のいずれにも汚染が検出され, 腰部分で200-250cpm, 裾部分で1,400cpmであったのに対し, 7月および8月着用のズボンには汚染が検出されなかった。しかし,

Ge検出器により測定すると, 7月および8月着用のズボンに¹³⁴Csおよび¹³⁷Csがいずれも検出され, 7月着用のズボンでは¹³⁴Csが0.034 Bq・g⁻¹, ¹³⁷Csが0.037 Bq・g⁻¹であり, 8月着用のズボンではいずれも0.011 Bq・g⁻¹であった。

図7は, IPによりズボンの汚染の2次元分布状態を調査した映像である。図7の(A)は3月着用のズボンの汚染状況を示し, (B)は7月着用, (C)は8月着用のズボンの汚染状況である。(A)ではスポット状の汚染が顕著に多

表9. ズボンの汚染測定

ズボン	GMサーベイによる計数値 (cpm)		Ge検出器によるRI濃度 (Bq・g ⁻¹)	
	腰付近	裾付近	Cs-134	Cs-137
3月着用	200～250	1,400	****	****
7月着用	ND	ND	0.034	0.037
8月着用	ND	ND	0.011	0.011

ズボンの着用期間, および着用場所, 材質

ズボン	着用期間	着用場所	材質	備考
3月	3月11-16日	福島県大塚町・広野町 (警戒区域～緊急時避難準備区域)	綿 100%, 590g	被服試料1
7月	6月30日-7月3日	福島県東相馬市 (緊急時避難準備区域)	綿 95%, ポリエステル 5%, 610g	被服試料3
8月	7月29日-8月3日	福島県広野町 (緊急時避難準備区域)	綿 100%, 470g	

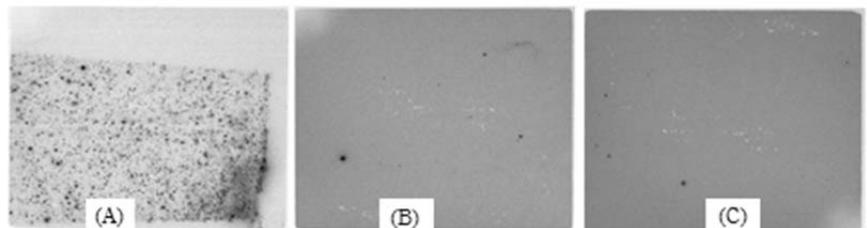


図7. ズボンのRI汚染の2次元分布状況

A: 被服試料1 (3月着用, 露光時間: 3h)
 B: 被服試料3-1 (7月着用, 露光時間: 24h)
 C: 被服試料3-2 (8月着用, 露光時間: 24h)

数検出された。(B)および(C)では, IP により少量の汚染が検出された。

図8は7月着用のズボンのGe 検出器によるスペクトルである。7月着用のズボンにはCs に特有のピークのみ検出され, 3月着用のズボンに検出された¹³¹Iは検出されなかった。

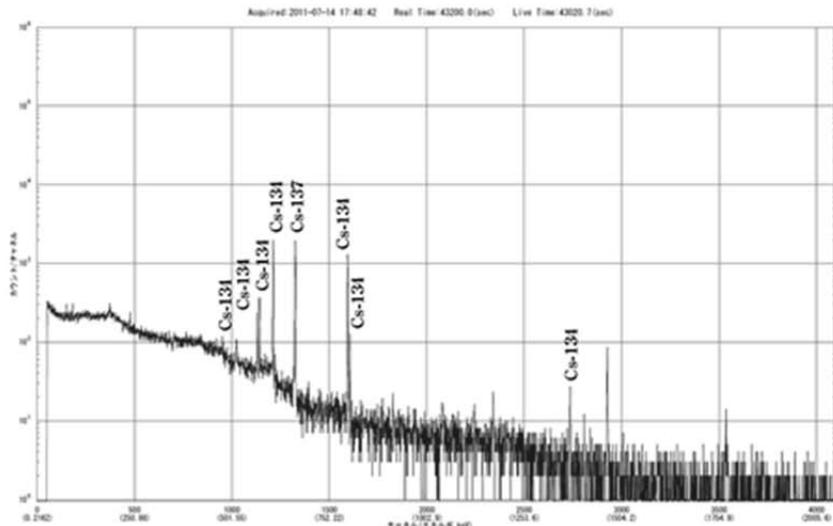


図8. 被服試料3(7月着用ズボン)のスペクトル
ズボン:洗濯前, 測定: Ge検出器

3. 2 洗濯による除染効果 (1)被服試料 1

3月に着用された被服試料1のうち,ズボン, および靴下, 手袋を洗濯機により除染したところ, 洗濯後も汚染がGM サーベイによりBG 計数の2倍以上の約200 cpm が検出された。GM サーベイによる汚染の平均値が最も大きかった靴下について, 洗濯を3回繰り返した。

図9は, Ge 検出器を用いて調査した靴下の洗濯による除染効果を示している。除染率は1回の洗濯で74±8%であり, 2回繰り返すと80±6%になり, 3回では84±5%になった。

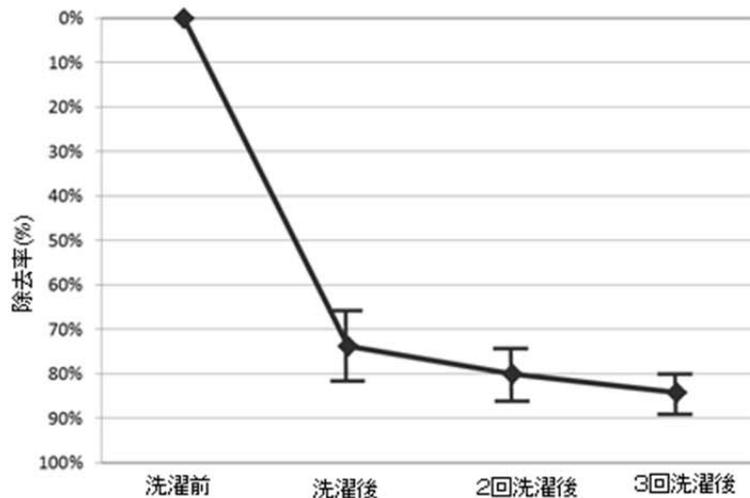


図9. 洗濯による除染効果

試料: 被服試料1の靴下

(2)被服試料 2

長崎大学において得られた被服試料2では, 洗濯機による除染後は, GM サーベイによる測定では汚染が検出されなくなった。

(3)ズボン

被服試料1の3月着用のズボン, および被服試料3の7月と8月に着用されたズボンについて, 洗濯による除染効果を調べた。

1) 3月着用のズボン

図10は,ズボンの裾部分の洗濯前後のIPによる画像である。図10の(A)は図7の(A)と同一の洗濯前の画像で

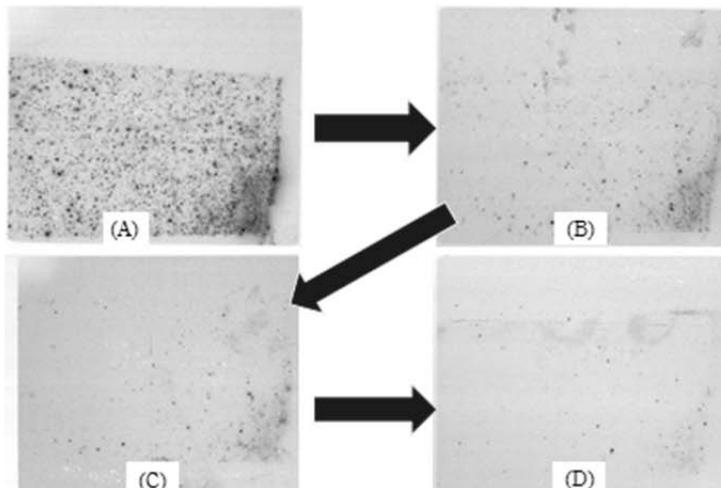


図10.ズボンの裾部分の洗濯による除染後のIP画像の一覧

A:洗濯前 B:洗濯後 C:漂白剤処理後 D:洗濯板による押し洗い後
ズボン:被服試料1の3月着用品 露光時間: A-D共に3h

あり、(B)が洗濯後の、(C)は漂白剤入り洗剤による洗濯を追加した後の、(D)は洗濯板を用いた押し洗いを再度追加処理した後のIP画像である。洗濯後に漂白剤入り洗剤で再度洗濯しても、スポット状の汚染が少量検出され、その汚染はその後押し洗いしても残存していた。

表10は、漂白剤での洗浄後に押し洗いを追加することによる除染効果である。漂白剤処理後も ^{134}Cs が $0.095 \pm 0.013 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ で残存していたが、その後洗濯板により押し洗いしても、 ^{134}Cs 濃度は $0.097 \pm 0.013 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であり、同様に ^{137}Cs 濃度は、押し洗い前が $0.110 \pm 0.013 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であり、押し洗い後も $0.11 \pm 0.014 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であった。押し洗いによる除染効果は認められなかった。

表10. 洗濯板を用いた押し洗いによる除染処理の効果

除染処理	Cs-134		Cs-137	
	濃度 ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	濃度比	濃度 ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	濃度比
未洗濯	****	****	****	****
1回洗濯	****	****	****	****
漂白剤入り洗剤での洗濯	0.095 ± 0.013	1.0	0.11 ± 0.013	1.0
洗濯板による押し洗い	0.097 ± 0.013	1.02 ± 0.20	0.11 ± 0.014	1.0 ± 0.17

測定試料: 被服試料1の3月着用ズボン
測定器: Ge検出器

2) 7月および8月着用のズボン

表11は、 ^{134}Cs および ^{137}Cs による汚染の1回の洗濯による除染効果である。 ^{134}Cs の汚染は、7月着用のズボンにおいて洗濯前の濃度 $0.034 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ が洗濯後に $0.004 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ と減少し、除染率は88%であった。同様に、8月着用のズボンにおいても洗濯前が $0.011 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であり、洗濯後が $0.001 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ となり、除染率が91%であった。 ^{137}Cs の汚染についても、7月着用のズボンにおいて洗濯前が $0.037 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 、洗濯後が $0.004 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ となり、除染率が89%であり、8月着用のズボンについても、洗

濯前が $0.011 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 、洗濯後が $0.002 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ となり、除染率が89%であった。 ^{134}Cs と ^{137}Cs の除染率の平均が89%であった。これは、上述の3.2(1)において靴下で得られた3回洗浄後の除染率の平均84%と近似していた。

3.3 洗濯除染環境の安全性の評価

洗濯後の洗濯機内および乾燥機内、排水ホースの先端について、GMサーベイによりモニタリングしたが、汚染は検出されなかった。同様の箇所を拭き取ったスミア濾紙をWSCにより測定したが、汚染は検出されなかった。また、洗濯により被服試料の除染を実施している作業環境の空気を捕集して得た活性炭濾紙をWSC計測したが、汚染は検出されなかった。

3.4 被服試料4(タオル)の屋外での乾燥による汚染の程度

(1) 屋外乾燥タオルのサーベイメータによる汚染評価

乾燥させたタオルをZnS(Ag)サーベイおよびGMサーベイにより計測した。その結果、4箇所のいずれの地域で屋外乾燥したタオルには、何れも計数値はバックグラウンドレベルであり、有意な量の α 線及び β 線放出核種は検出されなかった。

(2) Ge検出器による汚染評価

表12は、タオルに付着したCs

表11. 7月および8月着用ズボンの洗濯による除染効果

ズボンの着用月	除染処理	Cs-134		Cs-137	
		濃度 ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	除染率 (%)	濃度 ($\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)	除染率 (%)
7月	なし	0.034	***	0.037	***
	洗濯	0.004	88	0.004	89
8月	なし	0.011	***	0.011	***
	洗濯	0.001	91	0.002	82

測定器: Ge検出器

表12. 屋外での乾燥後のタオルへの放射性セシウムの付着量.

乾燥地	回数	風速/(m・s ⁻¹) ^{※1} , 空气中 ¹³⁴ Cs/ ¹³⁷ Cs量 (kBq・km ⁻³) ^{※2}	セシウム付着量(Bq) ^{※4}			周辺での放射 線量率 ^{※5} (μSv・h ⁻¹)
			¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	総量	
福島県 福島市 八島田	1	2.0 (南風) N.D./N.D.	0.433	0.489	0.931	2.7 (0 m) 0.7 (1 m)
	2	1.6 (南風) 13 / 13	0.216	0.207	0.423	
	3	2.0m/s(北風) 85/100	0.268	0.226	0.494	
	平均		0.306	0.31	0.616	
福島県 郡山市 並木	1	1.8 (南風) 未測定	1.07	1.22	2.29	0.5 (0 m) 0.3 (1 m)
	2	2.4 (北風) 未測定	0.27	0.371	0.641	
	3	2.9 (南風) 未測定	N.D.	N.D.	---	
	平均		0.447	0.53	0.977	
福島県 会津若 松市 本町	1	1.5 (北風) 未測定	N.D.	N.D.	---	0.3 (0 m) 0.1 (1 m)
	2		0.072	0.102	0.174	
	3		0.023	0.086	0.06	
	平均		0.032	0.047	0.078	
埼玉県 川口市 長町	1-3	0.94 (北風) ^{※3} N.D./N.D. ^{※3}	N.D.	N.D.	---	0.1 (0 m) 0.08 (1 m)

※1 日本の気象庁のデータによる。風速・風向は乾燥処理中の平均値。 ※2 降下量は大気科学庁による9時から24時間の積算値。 ※3 気象条件およびCs
降下量に関する値は、どりのさいたま市における公算値である。 ※4 検出限界値は、表中でN.D.と記し、¹³⁴Csおよび¹³⁷Csについては、各々1.1×10⁻⁴および
1.2×10⁻⁴Bqである。 ※5 福島県内の各市における線量率は2011年7月24日における測定値であり、さいたま市の値は同年8月9日の測定値である。また
本欄の()中の記号は、測定日の地域からの高さを示している。

核種と量を示し、あわせて気象庁により公開された乾燥時の風速と空気中のCs量を示している。表には、乾燥地点の近隣において計測した放射線量率も示されている。福島県内での調査では郡山市と会津若松市における2回の調査を除き、7回の調査でいずれもCsの付着が認められた。最も多くCsが付着したのは福島県郡山市市内でのタオルであり、¹³⁴Csが1.07 Bqで、¹³⁷Csが1.22 Bqであり、合計2.29 Bqであった。タオルへのCsの平均付着量は0.557 Bqであり、¹³⁴Csが0.261 Bqであり、¹³⁷Csが0.296 Bqであった。埼玉県川口市ではCsは検出されなかった。また、タオルに付着した放射性Cs量と、風速および空気中Cs量、周辺地域の空間線量との間に明確な相関関係は認められなかった。

0.931 Bqの放射性Csが付着していた福島市のタオルのIP画像である。黒いスポットの位置に放射性Csが付着していると考えられる。タオルからは、図中の2つを加えた合計4つのスポットが検出された

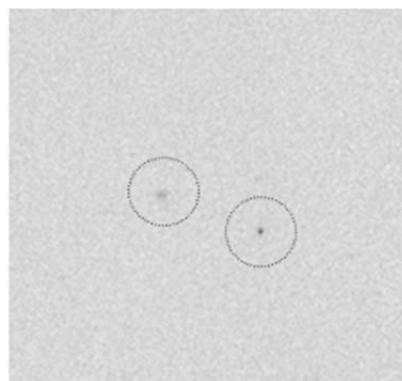


図11 屋外乾燥タオルに付着した放射性セシウムの画像

(3) IP画像による汚染分布
図11は、Ge検出器により

露光時間: 140 h

3.5 汚染被服着用時の被ばく線量

RIが付着した被服の着用による被ばく線量の評価基準は明示されていないので、ICRU-R56法およびFGR12法により、皮膚等価線量および実効線量を算出した。計算にあたり、一日あたりの被服の着用状況を次の通り仮定した。1日あたり、昼間用被服としてズボンと同レベルに汚染された被服を16時間着用し、夜間用被服として屋外で乾燥させたタオルと同レベルに汚染された被服を8時間着用するものとした。ズボンの汚染は、緊急時避難準備地域において着用した後洗濯しても残留する汚染として、表11に示した7月着用ズボンの洗濯後のRI濃度を採用した。

表13は、皮膚等価線量を成人男性について試算した結果である。皮膚等価線量の計算に先立ち、汚染密度は、ズボンでは、表11の濃度(^{134}Cs および ^{137}Cs 共に $0.004\text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$)ならびに被服の比重1.3と被服の厚さ0.03cmを基にして、 ^{134}Cs および ^{137}Cs 共に、 $1.9 \times 10^{-4}\text{ Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ を得た。また、タオルでは ^{134}Cs と ^{137}Cs が合計で最大2.29 Bqが付着し、タオルの面積が $2,924\text{ cm}^2$ であったことから、汚染密度 $7.8 \times 10^{-4}\text{ Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ を算出した。これらの汚染密度に基づいて、汚染が被服にスポット状に付着している場合および均一に付着している場合について、ICRU-R56法により皮膚等価線量を計算した。表13に示したように、皮膚等価線量は、スポット状汚染と仮定した場合には $45.3\text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ であり、均一汚染と仮定した場合には $4.9 \times 10^{-3}\text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ となった。

表14は、実効線量を成人男性について試算した結果である。計算に必要なRI濃度は、ズボンでは上述の通り ^{134}Cs および ^{137}Cs 共に $0.004\text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ であり、タオルでは表12から、 ^{134}Cs で $9.4 \times 10^{-3}\text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ であり、 ^{137}Cs で $1.1 \times 10^{-2}\text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$ であった。この濃度を基にして、実効線量を、

^{134}Cs および ^{137}Cs 毎に算出して合計したところ、ICRU-R56法によると $3.7 \times 10^{-2}\text{ }\mu\text{Sv}\cdot\text{y}^{-1}$ であり、FGR12法では $30\text{ }\mu\text{Sv}\cdot\text{y}^{-1}$ であった。FGR12法による評価はICRU-R56法に比べ約810倍大きな被ばく線量となった。

4. 考察

4.1 福島県における事故直後の汚染の特徴。

福島県による緊急被ばくスクリーニングの結果では、初期(2011年3月31日まで)において、100人を超える一般住民の被服表面で100,000cpm以上の汚染が検出されていると報じられている⁹⁾。筆者らがGMサーベイにより汚染調査した被服類には100,000cpmを超える汚染被服はなかった。筆者らの調査での最大の汚染値は、靴下におい

表13. 成人男性の皮膚等価線量の推定

着用衣服	着用時間 (h/day)	Cs密度 ($\text{Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$)	皮膚等価線量(*1) ($\text{mSv}\cdot\text{y}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$)		備考
			スポット状汚染 (*2)	均一汚染	
ズボン	16	1.9×10^{-4} (*3)	36	1.6×10^{-3}	ズボン平均重量: 540g
タオル	8	7.8×10^{-4} (*4)	9.3	3.3×10^{-3}	
年間合計線量			45.3	4.9×10^{-3}	

- *1: 皮膚1cm²あたりのICRU-R56法による等価線量である。皮膚吸収線量率は、Cs-137; 1.432×10^8 , Cs-134; 1.000×10^8 (Gy/h) (Bq/cm^2)⁻¹であるから、Cs-137換算で算出した。
- *2: 汚染が一箇所にスポット状に付着していると仮定した。
- *3: Cs濃度($0.008\text{ Bq}\cdot\text{g}^{-1}$)から、衣料比重=1.3、衣料の厚さ=0.03cmとして、算出した。
- *4: 最大2.29Bqの汚染核種をCs-137とし、面積2924cm²のタオルに付着したことから算出した。

表14. 成人男性の実効線量の推定

着用衣服	時間 (h/day)	RI濃度 ($\text{Bq}\cdot\text{g}^{-1}$)		実効線量 ($\mu\text{Sv}\cdot\text{y}^{-1}$) (*1)	
		Cs-134	Cs-137	ICRU-R56法(*2)	FGR12法(*3)
ズボン	16	Cs-134	0.004	4.9×10^{-3}	1.3×10^{-3}
		Cs-137	0.004	7.0×10^{-3}	14
タオル	8	Cs-134	9.4×10^{-3} (*4)	9.3×10^{-3}	1.7×10^{-3}
		Cs-137	1.1×10^{-2} (*4)	1.6×10^{-2}	16
年間合計線量				3.7×10^{-2}	30

- *1: 汚染が均一の場合における実効線量である。
- *2: 皮膚吸収線量率(Cs-137; 1.432×10^8 , およびCs-134; 1.000×10^8 を基に皮膚等価線量を求め、さらに組織荷重係数0.01および成人男性の皮膚接触面積率0.9を用いて算出した。
- *3: 全身を水に浸漬すると仮定し、実効線量率係数(Cs-134; 1.6×10^{-16} およびCs-137; $1.49 \times 10^{-20}\text{ Sv}$ ($\text{Bq}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-2}$)⁻¹)を用いて算出した。
- *4: 面積2,924cm²のタオルの重量を比重1.3および厚さ0.3cmから114gとし、汚染Cs量(Cs-134; 1.07 Bq, Cs-137; 1.22 Bq)を用いて算出した。

て 14,700 cpm であった。その汚染位置を詳しく調べたところ、足の甲の部分より底面であり、しかも底面のつま先部分に最大汚染が認められた。これを、靴下を提供した作業員の事故後における行動記録と照合すると、住居内の床面等に発生していた汚染面の上を作業員が歩行移動したことにより発生したのであろうと推察される。さらに、東電福島原発における爆発事故により環境中に放出された RI が周辺の住居の建屋内にも及んでいたことを示唆している。

一方、福島県の被災現地では地震直後には断水状態となり、その復旧は早くとも 2011 年 3 月 18 日以降であったため、地震後、約 1 週間あるいはそれ以上にわたって、洗濯による除染は不可能であった。この断水事態を考慮すると、震災後初期に住民が屋外において汚染した被服の RI は、屋内の生活環境に接触移行することにより希釈、拡散し、さらに一般公衆および車両の移動とともに広域に広がったものと推察される。その後、断水状況が解消され洗濯が可能となってからは、生活環境全体の汚染が徐々に低減の方向に向かう中で、被服の洗濯による除染の効果が大きかったであろう。

4. 2 洗濯の一般住民の放射線防護上の有効性

事故直後に 20 km 圏内の警戒区域内で得られた高レベル汚染被服も、2012 年 6 月以降 20～30km 圏（緊急時避難準備区域）内で得られた低レベル汚染被服も、一般家庭用の洗濯機により洗浄すると、図 9 に示したように、RI 汚染が約 87% 除去された。これにより、洗濯は一般住民が特別な除染機器を用いることなく実行できる簡単で有効な除染行動であることが明らかとなった。また、洗濯は、一般住民が着用被服の RI 汚染に対する不安を取り除き、衣服の汚染に起因した被ばく線量の低減にも有効である。さらに、洗濯された清潔な被服を着用できることによる安心感の醸成にも有用である。しかし、洗濯しても付着 RI の約 13% が残留するともいえる。この原因は、事故直後に空气中を浮遊し拡散した RI 化合物の一部に、被服にスポット状に付着し、繊維と堅固に結びつく特性を持つ化合物が混在していたためであろう。

4. 3 洗濯物の屋外乾燥の影響

屋外での乾燥によりタオルに付着した放射性 Cs 量を基にして、一般住民が洗濯後に屋外乾燥した被服を着用した場合における安全性を放射

線防護的に検討する。衣類やタオルは皮膚に密着させて使用するため、洗濯物に付着した放射性 Cs からの被ばくは、皮膚の表面汚染と同様、皮膚の被ばくが主になると考えられる¹⁰⁾。確定的影響は、皮膚 1 cm² にわたって平均された等価線量を用いて評価される^{5, 12)}。洗濯物に付着している放射性 Cs の放射エネルギーが同じである場合、スポット状に付着していると被ばくが集中するため、分散して付着している場合よりも等価線量は大きくなる。図 11 の様に、放射性 Cs が洗濯物にスポット状に付着していることから、放射性 Cs は洗濯物上の 1 点に付着していると仮定して確定的影響を安全側に評価することが合理的であると考えられる。一般公衆に対する皮膚等価線量の線量限度は、皮膚表面から深さが 70 μm、面積が 1 cm² の皮膚について一年について 50 mSv である¹¹⁾。皮膚等価線量は、皮膚の吸収線量に放射線荷重係数を乗ずることによって算出される¹¹⁾。¹³⁴Cs 及び ¹³⁷Cs に関する皮膚の吸収線量率は、深さが 70 μm のとき、それぞれ 1.000×10³ (nGy・h⁻¹)・(Bq・cm⁻²)⁻¹ および 1.432×10³ (nGy・h⁻¹)・(Bq・cm⁻²)⁻¹ である⁵⁾。β線及びγ線とも放射線荷重係数が 1 であることから、1 Bq・cm⁻² あたりの皮膚等価線量は、¹³⁷Cs の方が ¹³⁴Cs よりも大きくなる¹²⁾。単純に、放射性 Cs の全てが ¹³⁷Cs であると仮定して、2.29 Bq の放射性 Cs が 1 点上に付着した衣類が 1 年間皮膚に密着したときの皮膚等価線量は 28.7 mSv・y⁻¹ となり、一般公衆に対する線量限度である 50 mSv・y⁻¹ を下回った。

確率的影響は、全皮膚面積にわたって平均された皮膚等価線量に皮膚の組織荷重係数である 0.01 を乗じた実効線量を用いて評価される¹¹⁾。したがって、洗濯物に付着した放射性 Cs の放射エネルギーが同じであれば、分布に関係なく実効線量は同じ値になる。2.29 Bq の放射性 Cs が付着したタオルの汚染密度は 7.83×10⁻⁴ Bq・cm⁻² である。衣類が接触する部分の体表面積（衣類接触面積）は、全体表面積から頭部と手部の表面積を差し引いた面積であるとする、標準的な日本人成人男性の体表面積は 16,900 cm² であり、また頭部及び手掌部の表面積はそれぞれ全体表面積の 9% 及び 1% であることから、衣類接触面積は 15,210 cm² となる¹³⁻¹⁶⁾。確定的影響を評価した場合と同様に放射性 Cs が全て ¹³⁷Cs であるとする、汚染密度が 7.83×10⁻⁴ Bq・cm⁻² の衣類が 1 年間皮膚に密着したときの実効線量は 0.0884 μSv・y⁻¹ となり、一般公衆に対する線量限度である 1 mSv・y⁻¹ の 1/10,000 であった。この実効線量の値は日本人成

人男性のものであるが、体表面積が小さい女性や子どもの実効線量は、さらに小さい値となる^{13,15,16)}。

以上のことから、福島県福島市および郡山市、会津若松市においては、洗濯物を屋外に干しても、RIの被服への付着により健康に影響を及ぼされることはないと考えられる。

4. 4 被服の汚染に起因した一般住民の被ばく線量の推定

被服試料3のズボンでは、表9によりGMサーベイにより汚染は検出されないが、Ge検出器等で測定すると微量のRIが検出される事がわかった。このため、GMサーベイによる測定だけでは検出できない微量のRIが付着した被服を着用し続ける一般住民の安全性を評価するには、被服試料3のズボンの洗濯後に残留する¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの濃度を基にして被ばく線量を評価すれば十分である。表11により、7月着用ズボンの洗濯後における¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの濃度は、共に0.004 Bq・g⁻¹であった。表12により、屋外で乾燥させたタオルに付着したCs量は、¹³⁴Csが1.07 Bq、¹³⁷Csが1.22Bqであった。そこで、一般住民の被服の着用モデルとして、外装用の一般被服として¹³⁴Csおよび¹³⁷Cs濃度が共に0.004 Bq・g⁻¹の被服を日常の活動のために16時間着用し、寝具用に洗濯乾燥し、¹³⁴Csが1.07 Bq、¹³⁷Csが1.22Bq付着した被服を8時間着用するものとした。

表13より、皮膚等価線量は、汚染がスポット状であるとした場合45.3 mSv・y⁻¹であり、また均一汚染であるとした場合4.9 x 10⁻³ mSv・y⁻¹であり、いずれの場合でも一般公衆の皮膚等価線量の線量限度50 mSv・y⁻¹¹⁰⁾以下であり、安全であると評価された。さらに、表14より、実効線量は、ICRU-R56法に比べ大きい計算値を示したFGR12法でも30 μSv・y⁻¹と評価され、一般公衆の実効線量の線量限度1,000 μSv・y⁻¹以下であり、十分安全である。筆者らは、¹³⁴Csおよび¹³⁷Csの合計濃度をより安全側に設定して、0.01 Bq・g⁻¹の濃度で汚染された被服を着用し続けた場合における実効線量が、FGR12法により評価すると50 μSv・y⁻¹であると報告している¹⁷⁾。以上のことから、洗濯後の被服を着用する一般住民の被ばく線量はいずれも一般公衆に対する線量限度以下であり、安全であることが検証された。

放射性Csに起因する実効線量の評価法に関しては、FGR12法の計算値がICRU-R56法の値に比べ約810倍大きくなっているため、FGR12法

は過大評価法になっているといえる。被ばく線量の評価にはICRU-R56法の方が現実的であろう。

原発事故により環境中に放出されたRIが降下するなどの原因により、土壌の汚染が報告されているので^{18,19)}、今後、土壌の付着による被服の汚染が発生すると予想される。被服に付着した汚染土壌は通常の洗濯により除去できるので、この面からも、洗濯は一般住民の無用の被ばくの低減および被ばく不安に起因した精神的ストレスの解消に有効であろう。

4. 5 一般住民が福島で今後も住み続けるための被服の問題点

洗濯された清潔な被服の着用を心がけることにより、放射線被ばくの防護を特別に意識することなく、放射線防護が結果的に達成できることになる。また、洗濯された被服の繰り返し着用により、汚染被服を主たる内容物とした放射性固体廃棄物の発生量の減容化が図られるであろう。この面からも洗濯は有用な除染法である。

洗濯による洗浄液は、排水溝、下水道等を経て下水処理場に集積される。あるいは、排水溝から漏れて一般河川に流出するかもしれない。この観点では、洗濯によりRIの大部分が被服から除去されたが、RIは下水処理場や環境をわずかに汚染させることになるかもしれない。この問題は、福島県および地域環境全域における放射線防護問題として捉え、長期的に研究していく必要がある。

5. まとめ

(1)福島第一原発の事故により環境に放出されたRIに起因した被服への汚染状況を解析した。また、被服の汚染の市販洗濯機による除染の効果を調べた。その結果、事故原発周辺では事故直後には被服に放出RIによる汚染が検出された。しかし、3ヶ月経過した2011年6月以降では、着用被服にはGMサーベイでは汚染が検出されなかったが、Ge検出器により微量の汚染が検出された。

(2)被服の汚染は、市販の洗濯装置および洗剤による一般的な洗濯により除染された。2011年3月に着用された被服では、1回あたり約74%除染され、3回繰り返すと約84%除染された。2011年7月以降に着用された被服では、1回の洗濯により、約88%除染された。

(3)被服を洗濯後屋外において乾燥した場合、付着したCsによる放射線被ばく線量は、当該被

服を1年間皮膚に密着し続けたときに皮膚が受ける等価線量が $28.7 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ であり、実効線量が $0.0884 \mu\text{ Sv}\cdot\text{y}^{-1}$ であった。これらは、一般公衆に対する皮膚の等価線量限度 $50\text{mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ および実効線量限度 $1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ より小さかった。

(4)ズボン残留汚染レベルおよびタオル付着汚染レベルの被服を交互に着用した場合の被ばく線量は、算出モデルをICRU-R56法あるいはFGR法のいずれにしても、実効線量が一般公衆に対する線量限度以下であり、安全であった。

6. 謝辞

本研究に御協力いただきました慶應義塾大学医学部、片岡 賢英 氏に深謝いたします。

7. 参考資料

- 1) 桧野良穂;福島第一原発の事故とサーベイメータを用いた放射能汚染測定について, Isotope News, No.690(Oct.2011),p20-24,(2011)
- 2) 文部科学省, 放射線モニタリング情報, 都道府県別環境放射能水準調査結果. (http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_by_prefecture/)など
- 3) 文部科学省, 放射線モニタリング情報, 文部科学省(米国エネルギー省との共同を含む)による航空機モニタリング結果. (http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_around_FukushimaNPP_MEXT_DOE_airborne_monitoring/)など
- 4) 気象庁, 過去の気象データ. (<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)より.
- 5) ICRU Report 56 “Dosimetry of External Beta Rays for Radiation Protection”, Oxford University Press, 1997.
- 6) 神山征彦;繊維の基礎知識 -天然繊維からスーパー繊維まで-, 蔵前工業会関西5支部第11会関西蔵前懇話会,(2008)
- 7) Keith F. Eckerman and Jeffrey C. Ryman; External exposure to radionuclides in air, water, and soil, Federal Guidance Report No.12, (EPA - 402 -R-93-081), (1993)
- 8) 厚生労働省健康局総務課地域保健室;放射線の影響に関する健康相談について(依頼), 事務連絡(平成23年3月21日), (2011)
- 9) 森剛, 前島秀幸;東日本大震災 被ばく医療調査活動報告, 日本放射線技術学会東京部会雑誌, No.119, p51-53,(2011)
- 10) 財団法人原子力安全研究協会”緊急被ばく医療のための基礎資料“2003
- 11) ICRP Publication 60. ”Recommendation of International Commission on Radiological Protection”, Pergamon Press, 1990.
- 12) ICRP Publication 103. “The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”, Pergamon Press, 2007.
- 13) 平成20年国民健康・栄養調査報告書 (<http://www.mhlw.go.jp/bunya/kenkou/eiyoudl/h20-houkoku-03.pdf>).
- 14) 藏澄美仁, 堀越哲美, 土川忠浩, 松原斎樹. 日本人の体表面積に関する研究. 日本生気象学会雑誌, 31(1): 5-19 (1994).
- 15) 多久和 善子. 災害急性期における外傷患者の看護② 広範囲熱傷. Nursing Today, 24(9): 31-34 (2009).
- 16) 藤本薫喜, 渡邊孟, 坂本淳, 湯川幸一, 森本和枝. 日本人の体表面積に関する研究 第18篇 三期にまとめた算出式. 日本衛生学雑誌, 23(5):7-14 (1968).
- 17) 中里一久, 北実, 松田尚樹. 東京電力福島第一原子力発電所の事故による衣服の放射性汚染 -汚染状況の測定と簡易除染法の検討-. 日本原子力学会誌, 53(12): 17-20 (2011).
- 18) 文部科学省, 放射線モニタリング情報, 定時降下物モニタリング. (http://radioactivity.mext.go.jp/ja/monitoring_by_prefecture_fallout/)より.
- 19) 日本放射線安全管理学会 放射性ヨウ素・セシウム安全対策アドホック委員会 野菜班(柴和弘他);福島第一原発事故によって汚染された野菜に付着した放射性物質の除去法に関する中間報告書, (<http://www.jrsm.jp/shinsai/0520vegetables.pdf>).(2011)