解説

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

慶応義塾大学 中里 一久, 鳥取大学 北 実, 長崎大学 松田 尚樹

福島第一原発の事故により、環境に放出された放射性物質に起因した衣服への汚染状況を解析した。また、衣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衣服に核分裂物質による汚染が検出された。しかし、3ヶ月経過すると、衣服には、通常の放射線測定器では検出が困難な極めて微量の汚染しか検出されなかった。衣服の汚染は、市販の装置および洗剤による一般的な洗濯により、約9割除染されることがわかった。

I. はじめに

東京電力福島第一原子力発電所(福島原発)の事故によって多量の放射性物質(Radioisotope: RI)が一般環境に放出された。これにより、事故直後の即時対応のために待機した作業員が着用したり、あるいは事故直後および3~4ヶ月経過後に周辺地域において一般住民および環境の汚染状況を調べた研究員等が着用した衣服からRIが検出される事態が発生した。この汚染事態に対する安全対策を講じるために、着衣の汚染状況を解析するとともに、一般住民が各人の家庭において実行できる洗濯による除染とその効果等について検討した。

II. 試料および方法

1. 分析試料

分析に供した試料は、事故原発の復旧作業に直接従事した者ではなく、(1)事故原発から20 km 圏内の警戒区域内に事故直後に一時的に滞在した者、(2)事故直後から4月まで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、(3)事故後3ヶ月以上経過した6~8月に上記(2)と同様の作業に従事した者が着用した衣服類等である。

調査した衣服類は、ズボン、上着、シャツ、靴下、手袋のほか、5種類の衣料品であり、計10品目について調査した。そのうち、上着、ズボンの一部は、福島市内で

3月15日午後以降、屋外において降雨あるいは降雪に直接曝された経歴を有している。

2. 使用機器等

(1) 測定器

衣服試料の放射線等の測定に供した装置は、以下の通りである。スクリーニング測定には①広窓型のGM管式サーベイメータ(TGS-146, Aloka 製)(以下、GMサーベイと略)、精密測定には②Ge半導体検出器(MCA 7700, SEIKO EG&G 社製)(以下、Ge検出器と略)、③イメージングプレート(BAS-IP MS 3543, 富士フイルム製)(以下、IPと略)、IP解析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)等を使用した。

(2) 洗濯機・洗剤・漂白剤等

衣服類に付着したRIの除染効果を調べるために使用した洗濯機は、市販品であり、渦巻き式(ASW-T 3型, 三洋電機製)および回転ドラム式(BD-V 1300, 日立製)ほかを使用した。洗濯時間は約10分であった。使用した洗剤等は、粉末洗剤(アタック, Kao 製)および液体洗剤(アタック neo, Kao 製)ほかであった。

3. RIによる汚染状況の測定

(1) サーベイメータによる直接汚染測定

第1図は、GMサーベイにより衣服類の汚染状況を直接測定している状況を示している。衣服に接触しないようにならずに離して測定した。これは、衣服との接触によるGMサーベイへのRI汚染の移行を防止するためである。このため、GMサーベイによる測定はRI汚染の有無の判定に主眼を置いている。

Analysis of Radioactive Pollution on the Public's Clothes caused by Disaster of Fukushima Daiichi Nuclear Plant ; Effect of Wash on Decontamination : Kazuhisa NAKAZATO, Makoto KITA, Naoki MATSUDA.

(2011年 10月19日 受理)

第1図 GMサーベイによる汚染測定

(2) Ge 検出器による精密測定

衣服試料をプラスチック製の容器(U-8容器など)に詰め、Ge 検出器の上に置いて、RIを測定した。

(3) IP による汚染の画像化測定

衣服上の2次元的な汚染状況を調べるため、衣服を面状IPの上に置き、IPを長時間露光した。その状況を第2図に示す。露光時間は24hとした。

Ⅲ. 結果

1. GM サーベイによる RI 汚染測定

(1) 事故直後の3月に入手した衣服類

衣服一品ごとの最大計数値を集計した結果を第1表に

第2図 IPによるズボンの露光状態

第1表 GMサーベイによる測定の統計

品名	計数率	上着	ズボン	靴下裏	作業手袋	ベスト・セーター
サンプル数		8	9	10	6	7
最大値	(cpm)	1,700	5,430	14,700	4,500	250
最小値	(cpm)	100	130	330	200	100
平均値	(cpm)	453	1,347	6,203	2,600	156
中央値	(cpm)	235	910	5,050	2,900	140
品名	計数率	シャツ	防護衣	靴	帽子	マスク
サンプル数		4	1	6	2	3
最大値	(cpm)	520	600	500	240	260
最小値	(cpm)	130	600	100	100	100
平均値	(cpm)	283	600	260	170	153
中央値	(cpm)	240	600	250	170	100

示す。各品目の汚染の中央値は、靴下が5,050 cpmであり、手袋で2,900 cpm、ズボンで910 cpm、その他の衣服では600~100 cpmであった。また、最大値は靴下において14,700 cpm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(100,000 cpm)以下であった。

(2) 事故後3ヶ月経過後に入手したズボン

この時期に得たズボンにおいては、GMサーベイによる測定では計数は、いずれも認められなかった。

2. Ge 検出器によるスペクトル測定

GMサーベイによる測定において、汚染の大きかった手袋と靴下をスペクトル解析した。

第3図は、靴下において検出されたスペクトルである。図から、測定日時点(4月13日)で汚染核種として、I-131およびCs-134, Cs-137, Cs-136, Te-132等が検出されていることがわかった。

次に、第3図を解析し、各核種の量を求めた。第2表は、I-131, Cs-134およびCs-137の比放射能を調べた結果である。

汚染核種I-131の比放射能は、半減期が8.02日であるから、汚染発生直後の3月15日時点にさかのぼると、第2表に示された値の17.3倍になる。このため、例えば、ゴム手袋の比放射能は、27→468 Bq・g⁻¹であった。

第3図 Ge 検出器によるスペクトル

第2表 汚染衣服類の比放射能

調査品目	放射性同位元素濃度(Bq・g ⁻¹)		
	I-131	Cs-134	Cs-137
ゴム手袋	27	254	296
インナー手袋 No.1	48	242	286
インナー手袋 No.2	35	109	128
靴下 黒	11	106	125
靴下 白	18	173	203

測定日: 手袋 ——— 2011/4/13

靴下 ——— 2011/4/15

第4図 ズボンのIPによる2次元画像

3. IPによるRI汚染の2次元分布状況の測定

RI汚染計数が多く、汚染面が大きいズボンについて、IPにより汚染の2次元イメージングを実行した。その結果を第4図に示す。図から、RI汚染が衣服試料に均一に付着しているのではなく、スポット状に点在して付着していることが明らかとなった。

4. 洗濯による除染効果

(1) GMサーベイでの測定による除染効果の判定

衣服試料を一般家庭に普及している洗濯機により除染を試みた。その結果、靴下と手袋を除き、いずれの衣服試料においても洗濯後は、汚染が検出(バックグラウンド計数値の2倍以下)されなくなった。

(2) IP画像による除染状況の2次元測定

上記の第4図の汚染状況であったズボンを洗濯した後、さらに漂白剤処理した。洗濯および漂白剤処理後の各段階で、IPにより2次元汚染状況の変化を調査した。第5図は、洗濯および漂白剤処理後のイメージング画像である。第5図から、漂白剤処理後においても、わずかながらスポット状に汚染が残存していることがわかった。

(3) Ge検出器による除染率の測定

(a) 3月度に入手した靴下の除染効果

GMサーベイによる測定により、最大の汚染を示した靴下について、洗濯を3回繰り返した。第6図は洗濯ごとの除染率をGe検出器により調べた結果である。除染率は、1回の洗濯後に74±8%となり、2回目に80±6%、3回目に84±5%となることがわかった。

次に、第5図に示したズボンの漂白剤処理後にも残留

第5図 洗濯後の2次元画像

第6図 洗濯による除染効果

しているRI量をGe検出器により定量した。その結果、Cs-134が $0.009 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ で、Cs-137が $0.106 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であった。

(b) 6月以降に入手したズボン

上述したように、6月以降に入手したズボンにおいてはGMサーベイによる測定ではRIは検出されなかった。しかし、放射線安全の観点から、Ge検出器による精密な測定と除染率の調査を試みた。その結果、2本のズボンあたり、洗濯前には、Cs-134が 0.034 および $0.011 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であり、Cs-137が 0.037 および $0.011 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ であった。洗濯後、Cs-134が 0.004 および $0.001 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ となり、Cs-137が 0.004 および $0.002 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ となった。Csの除染率は平均89%であった。これは、上述の靴下において得られた除染率(3回後で平均84%)と近似していた。

IV. 考察

1. 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衣服も、6月以降20~30 km圏(緊急時避難準備区域)内で得られた低レベル汚染衣服も、一般家庭用の洗濯機により洗浄すると、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有効で簡単な除染行動であることが明らかとなった。また、洗濯は、一般住民が着用衣服に対するRI汚染の不安を取り除くのに極めて有用な方法でもある。洗濯された清潔な衣服を着用することによる一般住民の安心感も、放射線防護上重要な一面である。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、空気中を浮遊したCs化合物が衣服にスポット状に付着したので、中には繊維と堅固に結びつく特性を持つ汚染も混在していたためであろう。

また、6月以降に入手したズボンの汚染は、GMサーベイでは検出されずに、Ge検出器での測定により極めて微量のRIがわずかに検出される程度であった。このため、GMサーベイによる測定だけでは衣服に微量のRIが付着・残留しているの見落とす可能性があることも

明らかとなった。そこで、残留 RI 量を追跡したところ、洗濯後の残留 Cs-137 および Cs-134 汚染量はいずれも $0.01 \text{ Bq} \cdot \text{g}^{-1}$ 以下であると判定できた。

ところで、微量の RI が付着した衣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。そこで、皮膚全面に RI が付着した場合の被ばく線量評価の近似事例として、プールにおける水泳時の線量算定法を参考にして評価の一例とする。Cs 水溶液に全身が浸されたときの人体の実効線量率係数は、米国 Federal Guidance Report No.12(1993)により、Cs-137 の場合 1.49×10^{-20} 、Cs-134 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、全身の皮膚表面が上述の汚染濃度の衣服により覆われ続けたと仮定すると、実効線量は、Cs-137 起因量が 4.7×10^{-3} となり、Cs-134 起因量が減衰を考慮しないで $50.5 \mu\text{Sv} \cdot \text{y}^{-1}$ とそれぞれ推定される。この推定線量の合計は、一般公衆に対する年線量限度 1 mSv の約 $1/20$ 以下であるから、安全であると判定できる。

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、今後、土壌の付着による衣服の汚染が発生すると予想される。衣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。

2. 一般住民が福島で今後も住み続けていく上での衣服の観点からの問題点

洗濯された清潔な衣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であろう。また、洗濯された衣服の繰り返し着用により、汚染衣服を主たる内容物とした放射性固体廃棄物の発生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 の大部分が衣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。

3. 福島県における初期段階の汚染の実態と洗濯による除染の効果。

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(3月31日まで)において、100人を超える一般住民の衣服表面で $100,000 \text{ cpm}$ 以上の汚染が検出されていると報じられている。一方、福島県の被災現地では地震直後より断水が続いており、その復旧は早くとも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。

以上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衣服の 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、さらに人や車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、衣服の洗濯による除染の効果が大きかったと推察される。

筆者らは、本研究の遂行にあたり、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による支援と、同委員会長の西澤邦秀名古屋大学名誉教授のご指導に深謝します。また、ご協力頂いた鳥取大学の木村宏二博士および慶応義塾大学の菊地裕純、片岡賢英の両氏に感謝いたします。

— 参 考 資 料 —

- 1) 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).
- 2) 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, p.51-53(2011).
- 3) 松野良穂, “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), p.20-24, (2011).
- 4) K. F. Eckerman, J. C. Ryman, *External exposure to radionuclides in air, water, and soil*, Federal Guidance Report No.12, (EPA-402-R-93-081), (1993).
- 5) 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, (2011).
<http://www.jrsm.jp/shinsai/0520 vegetables.pdf>

著 者 紹 介

中里一久(なかざと・かずひさ)

慶応義塾大学
(専門分野/関心分野)放射線防護学・衛生学・安全管理学/環境放射線・放射能, 安全安心科学

北 実(きた・みのる)

鳥取大学
(専門分野/関心分野)放射線施設管理/放射線法制度

松田尚樹(まつだ・なおき)

長崎大学
(専門分野/関心分野)放射線生物学・安全管理学/放射線リスク認知