101　福島県内除染作業員の作業内容別被ばく線量の分析	各務　竹康

【目的】福島県では、東京電力福島第一原子力発電所事故後、除染作業が行われている。除染作業は低線量の放射線被ばくをうける職業であるといえる。本研究は、除染作業における作業内容の違いが作業員の外部被曝線量にどのような差を与えるのか明らかにし、代表者による測定が妥当であるのか検討することを目的とした。

【方法】福島県の避難区域で除染作業を行う A 社およびその下請け企業を含めた企業群の従業員を対象として研究を行った。4 月から 12 月までの全期間通算して在籍した者について、作業内容は、従業員の所属する作業班別の作業記録を元に分類した。本研究の対象期間は農地除染を主に実施しており、作業内容を作業工程により、「事務局」、「表土および草木の除去」、「除去土壌等の集積」、「汚染土壌等の袋詰及び運搬」、「非汚染土壌による被覆」の 5 群に分類した。平成 28 年度に A 社にて除染作業に従事した 242 人の、作業期間である 4 月から 12 月における月別の従事者数および、外部被ばく線量を分析し、月別の被ばく線量の比較を行った。次に、4 月から 12 月までの全期間通算して在籍した者について、作業内容別に外部被ばく線量の比較を行なった。作業内容別の従事者数被ばく線量の分布を集計し、比較を行った。群内の比較は Kruskal-Wallis 検定、その後の多重比較は Steel-Dwass 法を用いた。

【結果】調査期間内に A 社の実施した除染作業に従事した 242 人のうち 215 人（88.8%）が男性であった。また、全体の 53.7%にあたる 130 人（うち女性 17 人）が期間全てにおいて作業に従事していた。その他の 112 人について、従事期間の中央値は 5 ヶ月であった。4 月が最も被ばく線量の中央値が大きく、範囲も分散していた。多重比較の結果では、6 月が、被ばく線量が最も少なく、ついで 12 月、8 月の被ばく線量が少なかった。調査対象期間 9 ヶ月における総外部被ばく線量の中央値（25～75 パーセンタイル）は 0.82（0.72～0.91）mSv であった。多重比較の結果、事務局と表土および草木の除去、除去土壌等の集積、汚染土壌等の袋詰及び運搬（$p < 0.01$）、非汚染土壌による被覆と除去土壌等の集積（$p < 0.05$）、非汚染土壌による被覆と表土および草木の除去、汚染土壌等の袋詰及び運搬（$p < 0.01$）、除去土壌等の集積と汚染土壌等の袋詰及び運搬（$p < 0.05$）の間に有意差を認めた

【考察】本研究の結果より、代表者による線量測定の結果を全員に当てはめた場合、被ばく線量の過大評価、過小評価が生じ、将来健康影響等が発生した際にその影響を正確に推定できない可能性が示唆された。低線量下での除染作業について、線量測定の方法は、現在認められている方法では必ずしも十分と言えず、個別の線量測定の必要性を示すための貴重な資料となると考えられる。職業性の低線量放射線被ばくについて、将来的な健康影響との関連性を検討するためには、就業時に正確に曝露量を測定していることが重要である。除染作業は、帰還困難区域での作業が本格的に始まるなど、今後も継続して行われる見込みであるが、空間線量の大小に関わらず、全ての作業場において個々の正確な被ばく量を測定し、記録することが望ましい。

多重比較による作業内容別総外部被ばく線量の比較

	被ばく線量(mSv)	1	2	3	4	5
1. 事務局	0.64 (0.57-0.71)	-				
2. 表土および草木の除去	0.88 (0.79-0.96)	<0.001	-			
3. 除去土壌等の集積	0.79 (0.75-0.90)	<0.001	0.313	-		
4. 汚染土壌等の袋詰及び運搬	0.96 (0.91-0.99)	<0.001	0.265	0.017	-	
5. 非汚染土壌による被覆	0.71 (0.65-0.77)	<0.226	<0.001	0.022	<0.001	-

101. 福島県内除染作業員の作業内容別被ばく線量の分析

各務　竹康

福島県立医科大学 医学部 衛生学・予防医学講座

Key words：東日本大震災，東京電力福島第一原子力発電所事故，除染作業，リスクアセスメント

緒　言

平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災による東京電力福島第一原子力発電所事故により、福島県内に放射性物質が降下し、空間放射線量が上昇した。国は、福島第一原発事故由来の放射性物質による環境の汚染が、人の健康又は生活環境に及ぼす影響を速やかに低減することを目的として、「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」（放射性物質汚染対処特措法）を定め、平成 24 年 1 月より放射性物質の除染作業を開始した。

放射性物質汚染対処特措法では、警戒区域および計画的避難区域に指定されている地域を除染特別地域に、それ以外の地域で、年間の追加被ばく線量が 1 mSv 以上（空間放射線量 0.23 μSv 以上）の地域を汚染状況重点調査地域と指定した。除染特別地域は国が除染の計画を策定、汚染状況重点調査地域に指定された市町村では、年間の追加被ばく線量が 1 mSv 以上となる区域について、除染実施計画を定め、除染を実施する区域を決定することとしている。

現在福島県では福島県内外から多くの労働者が除染作業員として従事しており、その人数は 2 万人を超えるとも言われている。除染作業員の労働衛生管理は、除染電離則、除染ガイドラインなど定められているが、その現状については十分な検討がなされていない。福島産業保健総合支援センターが 2013 年に除染事業所および除染作業員に対して行った調査では、健康診断および保健指導が適切に行われていない、従事前教育で行われている被ばく対策が従業員に浸透していないなど、除染作業における労働衛生管理上の様々な課題が存在することが示唆された［1］。

除染作業は、低線量の放射線被ばくをうける職業であるといえる。一般的に職業被ばくは International Commission on Radiological Protection（ICRP）により、年間 20 mSv が上限とされており［2］、我が国においても電離放射線を扱う職業への被ばくについても同様に上限が定められている。現在職業性低線量被ばくの健康影響については十分に明らかになっておらず、今後発生する健康影響との関連を明らかにするためには、作業従事中の被ばく線量を記録する必要である。除染作業員は複数の事業所、現場で除染に従事するため、個人ごとに線量を管理する体制が構築された。除染作業員には放射線管理手帳が交付されており、雇用する企業が雇用期間内の放射線被曝量を記録する［3］。この手帳は雇用先が変わった場合も引き継がれ、作業従事期間の通算被ばく線量が保管される。

個別の被ばく線量の記録方法については、除染ガイドラインにおいて、空間放射線量が 2.5 μSv/h を下回る場所において、被ばく線量の記録のために個別の線量測定は必須とされておらず、空間放射線量からの推定もしくは代表者の被ばく線量測定でよいとされている。除染作業は農地除染、宅地除染、道路除染、森林除染に大きく分かれており［4］、農地除染の場合は重機による作業や現場の草刈り、宅地および道路除染の場合は高圧水洗浄やふき取りの他、放射性廃棄物の集積、運搬など、実際の業務は多岐に渡っている。作業内容により扱う放射線廃棄物は異なる他、同じ敷地内であっても場所によっては放射性物質が集積しているホットスポットが存在するため、代表者のみによる測定や空間放射線量からの推定では今後健康影響が生じた際に被ばく線量との影響を推定できない恐れがある。本研究は、除染作業における作業内容の違いが作業員の外部被曝線量にどのような差を与えるのか明らかにし、代表者による測定が妥当であるのか検討することを目的とした。

方　法

1.　対象

福島県の避難区域で除染作業を行う A 社およびその下請け企業を含めた企業群の従業員を対象として研究を行った。対象となる企業群は平成 25 年より空間放射線量が 2.5 μSv/h を下回る場所での除染作業を行っており、個別の線量測定は義務化されていないが、社の方針として、外部被ばく線量及び内部被ばく線量を個々に測定している。

2.　被ばく線量の測定と作業内容の記録

外部被ばく線量は作業員がポケット線量計を基準に則り男性は胸部、女性は腹部に装着して作業を行い、線量計に測定された線量を 1 ヶ月毎に集計、出力したものを保管している、内部被ばく線量は 3 ヶ月毎に Whole body counter による測定を実施している。A 社より、これらのデータおよび従事した作業内容についての情報を取得した。内部被ばく線量については、データ入力および集計の際に確認したところ、ほぼ全作業員が検出下限以下であったため、分析対象から除外した。

作業内容は、従業員の所属する作業班別の作業記録を元に分類した。本研究の対象期間は農地除染を主に実施しており、作業内容を作業工程により、「事務局」、「表土および草木の除去」、「除去土壌等の集積」、「汚染土壌等の袋詰及び運搬」、「非汚染土壌による被覆」の 5 群に分類した。

3.　分析方法

平成 28 年度に A 社の実施した除染作業に従事した 242 人の、作業期間である 4 月から 12 月における月別の従事者数および、外部被ばく線量を集計した。途中退場した作業員と全期間通算従事作業員の被ばく線量を比較するため、中央値、最大値、最小値を記述した。また、月別の被ばく線量の比較を行った。作業内容別の外部被ばく線量の比較は、月途中の退場者は当該月の被ばく線量は他者よりも従事日数が少ない分低い値が出るため、その影響を除外するため、4 月から 12 月までの全期間通算して在籍した者を対象とした。作業内容別の従事者数被ばく線量の分布を中央値および 25～75 パーセンタイル値で記述し、比較を行った。全ての測定値において、正規分布が確認できなかったため、ノンパラメトリック解析を行った。群内の比較は Kruskal-Wallis 検定、その後の多重比較は Steel-Dwass 法を用いた。統計解析は R3.4.4 を使用した。

4.　倫理

本研究は福島県立医科大学倫理委員会の承認を得た上で実施しており（受付番号 2530）、対象者には研究内容を説明した後、研究に関わる情報の取得について同意を得た。

結　果

1.　月別の従業員数および外部被ばく線量

調査期間内に A 社の実施した除染作業に従事した 242 人のうち 215 人（88.8%）が男性であった。また、全体の 53.7%にあたる 130 人（うち女性 17 人）が期間全てにおいて作業に従事していた。その他の 112 人について、従事期間の中央値は 5 ヶ月であった。

月別の従事者数および外部被ばく線量を表 1a に示す。月別の被ばく線量について、当該月の従事者全てと全期間従事した 130 人の結果において、中央値、最小値、最大値を比較したところ、大きな差は認められず、全期間通算して在籍した作業員が、当該企業における作業員の被ばく線量を代表しているとみなして今後の解析を行った。月別の比較においては 7 月が最も従事者数が多く（202 人）、作業開始時である 4 月（175 人）および 12 月（167 人）は従業員が少ない傾向にあった。被ばく線量の分布では、4 月が最も被ばく線量の中央値が大きく、範囲も分散していた。調査期間における、多重比較の結果を表 2b に示す。多重比較の結果では、6 月が、被ばく線量が最も少なく、ついで 12 月、8 月の被ばく線量が少なかった。

2. 作業内容別の従業員数および外部被ばく線量

作業内容別従事者数および外部被ばく線量を表 2a に示す。調査対象期間 9 ヶ月における総外部被ばく線量の中央値（25～75 パーセンタイル）は 0.82（0.72～0.91）mSv であった。多重比較の結果、事務局と表土および草木の除去、除去土壌等の集積、汚染土壌等の袋詰及び運搬（$p < 0.01$）、非汚染土壌による被覆と除去土壌等の集積（$p < 0.05$）、非汚染土壌による被覆と表土および草木の除去、汚染土壌等の袋詰及び運搬（$p < 0.01$）、除去土壌等の集積と汚染土壌等の袋詰及び運搬（$p < 0.05$）の間に有意差を認めた。

表 1a. 月別総外部被ばく線量（全作業員従事者および、全期間通算従事作業員）

月	全作業員		全期間通算従事作業員(130 人)
	人数	外部被ばく線量 (mSv)	外部被ばく線量 (mSv)
4 月	175	0.11 (0.04-0.23)	0.12 (0.04-0.23)
5 月	186	0.09 (0.04-0.15)	0.10 (0.04-0.15)
6 月	187	0.06 (0.01-0.14)	0.06 (0.01-0.14)
7 月	202	0.09 (0.04-0.19)	0.10 (0.05-0.18)
8 月	198	0.07 (0.04-0.17)	0.08 (0.04-0.13)
9 月	190	0.09 (0.02-0.17)	0.09 (0.05-0.15)
10 月	190	0.09 (0.05-0.20)	0.09 (0.05-0.20)
11 月	192	0.09 (0.04-0.18)	0.10 (0.05-0.18)
12 月	167	0.07 (0.04-0.13)	0.07 (0.04-0.13)

中央値（最小値-最大値）で表記

$P < 0.001$（Kruskal-Wallis法）

表 1b. 多重比較による月別外部線量の比較

	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
4 月	-								
5 月	<0.001	-							
6 月	<0.001	<0.001	-						
7 月	0.002	1.000	<0.001	-					
8 月	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-				
9 月	0.002	0.999	<0.001	1.000	<0.001	-			
10 月	0.002	0.999	<0.001	1.000	<0.001	1.000	-		
11 月	<0.001	1.000	<0.001	0.999	<0.001	0.994	0.994	-	
12 月	<0.001	<0.001	0.336	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	-

表内にP値記載（Steel-Dwass法）

表 2a. 作業内容別総外部被ばく線量の比較

作業内容	人数	外部被ばく線量 (mSv)
1. 事務局	15	0.64 (0.57-0.71)
2. 表土および草木の除去	60	0.88 (0.79-0.96)
3. 除去土壌等の集積	23	0.79 (0.75-0.90)
4. 汚染土壌等の袋詰及び運搬	11	0.96 (0.91-0.99)
5. 非汚染土壌による被覆	21	0.71 (0.65-0.77)
合計	130	0.82 (0.72–0.91)

中央値（25～75 パーセンタイル）で表記

P < 0.001（Kruskal-Wallis法）

表 2b. 多重比較による作業内容別総外部被ばく線量の比較

		1	2	3	4	5
1.	事務局	-				
2.	表土および草木の除去	<0.001	-			
3.	除去土壌等の集積	<0.001	0.313	-		
4.	汚染土壌等の袋詰及び運搬	<0.001	0.265	0.017	-	
5.	非汚染土壌による被覆	<0.226	<0.001	0.022	<0.001	-

表内にP値記載（Steel-Dwass法）

考 察

本研究の結果では、同一作業場、同一作業時間での除染作業について、作業内容によって期間内の総外部被ばく線量に有意な差が認められた。また、月別の比較では、作業開始月では被ばく線量の個人差が大きい結果となった。除染作業は多くの行程に分かれており、同一区域で作業を行っても空間線量からの推定、作業員を代表する者の測定による方法では、過大もしくは過小評価をする可能性を示したものと考えられる。低線量放射線被ばくの健康影響については、十分に明らかになっていないとの意見や［5］、ICRP の採用する linear no-threshold model は、低線量には適用できないのではないかとの意見もある［6］。除染作業は、避難区域の中でも比較的低線量の箇所、もしくは避難区域外から開始されており、一般的な除染作業において、被ばく線量は上限以下となるが、被ばくによる健康影響は長期の経過をたどることが予測されるため、長期の観察が必要となる［7］。本研究はその線量測定の方法について、現在認められている方法では必ずしも十分と言えず、個別の線量測定の必要性を示す貴重な資料であると考えられる。

当該企業において除染作業に従事したうち、期間を通算して従事した人は 53.7%であった。除染作業員は入れ替わりが多いとも言われているが、その実態は明らかになっていない。今回作業内容別の被ばく線量の分析は全期間通算して従事した人のみを対象としたが、月別の被ばく線量の分布がその月に従事した全従業員の値と全期間通算して在籍した従業員の値で大差がなかったことから、被ばく線量が極端に高いため、作業を継続できなくなった者は当該企業の行った除染作業においては発生しなかったと考えられる。また、今回の結果より、期間を通算して在籍した作業員の結果を用いて当該企業の結果を代表しているとみなした。

月別の分析では、4 月が最も被ばく線量が大きく、ばらつきが大きかった。除染作業の開始時は本来の作業以外の準備作業に携わる人も多かったためと考えられる。また、作業の初期段階では、作業に必要な重機などの搬入作業の手順確認のため、徒歩で除染作業未実施の場所を歩き回ることも多く、結果として被ばく線量が高くなったと考えられる。6 月、8 月で比較的線量が低い結果となったのは、6 月は梅雨のため、8 月は夏季休暇のため、他の月と比較して作業日数が短

縮されていた影響が考えられる。

今回分類した 5 作業について、事務局は室内勤務、管理的業務が中心、非汚染土壌による被覆は汚染土壌等を除去した箇所での作業が中心であり、他の業務と比較して被ばく線量が低い結果は予測されたものであった。残りの比較的線量が高い状態での 3 作業について、汚染土壌等の袋詰及び運搬が最も被ばく線量が高く、除去土壌の集積が最も被ばく線量が低かった。除去土壌の集積は、仮置場等一時的な集積箇所に除去土壌を積み上げる行程であるが、積み上げる際集積土壌からの放射線を遮断するため、その周囲に非汚染土壌の入ったフレックスコンテナを積み上げる。そのような非汚染土壌との接触が比較的大きいため、比較的被ばく線量が低くなったのではないかと考える。また、汚染土壌等の袋詰及び運搬については、汚染土壌等をフレックスコンテナに詰める作業において汚染土壌等に直接触れる機会が多いため、重機等の作業が主となる表層土壌の除去に比べて被曝が多くなったのではないかと考えた。また、ホットスポット等の存在により、局地的に被ばく線量が高くなる場所も存在するため、作業場所によってはさらにばらつきが大きくなると考えられる。

本研究の結果より、代表者による線量測定の結果を全員に当てはめた場合、被ばく線量の過大評価、過小評価が生じ、将来健康影響等が発生した際にその影響を正確に推定できない可能性が示唆された。電離放射線に限らず全ての職業性曝露については、長期的な影響を及ぼす因子もある。現在のところ、低線量放射線ひばくと短期的健康影響の関連については明らかになっていないが、長期的影響を検討する試みも行われているなど［8］、今後さらなる研究が期待されており、その一環として除染作業員を含む福島で復興に関わる労働者の情報を現在取得することも大切な資料となると考えられる。低線量放射線被ばくについて、将来的な健康影響との関連性を検討するためには、就業時に正確に曝露量を測定していることが重要である。除染作業は、帰還困難区域での作業が本格的に始まるなど、今後も継続して行われる見込みであるが、空間線量の大小に関わらず、全ての作業場において個々の正確な被ばく量を測定し、記録することが望ましい。

共同研究者・謝辞

本研究の共同研究者は、福島県立医科大学医学部衛生学・予防医学講座の福島哲仁である。

文　献

1) 福島産業保健総合支援センター産業保健調査研究報告書(主任研究者 : 各務竹康).　除染等作業における労働衛生管理の実態と今後の課題.　2014

2) ICRP. The 2001 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 103. Ann ICRP 2007; 37 (2-4)

3) 厚生労働省. 除染等業務に従事する労働者の放射線障害防止のためのガイドライン. URL: http://www.mhlw.go.jp/new-info/kobetu/roudou/gyousei/anzen/dl/120118-01.pdf

4) Cost and effectiveness of decontamination strategies in radiation contaminated areas in Fukushima in regard to external radiation dose. Yasutaka T, Naito W, Nakanishi J. PLoS One. 2013 Sep 17;8(9):e75308. doi: 10.1371/journal.pone.0075308. eCollection 2013.

5) Radiation occupational health interventions offered to radiation workers in response to the complex catastrophic disaster at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. Shimura T, Yamaguchi I, Terada H, Okuda K, Svendsen ER, Kunugita N. J Radiat Res. 2015 May;56(3):413-21. doi: 10.1093/jrr/rru110.

6) Biological Effects from Low Doses and Dose Rates of Ionizing Radiation: Science in the Service of Protecting Humans, a Synopsis. Feinendegen LE, Cuttler JM. Health Phys. 2018 Mar 8. doi: 10.1097/HP.0000000000000833.

7) Meeting report: suggestions for studies on future health risks following the Fukushima accident. Inamasu T, Schonfeld SJ, Abe M, Bidstrup PE, Deltour I, Ishida T, Ishikawa T, Kesminiene A, Ohira T, Ohto H, Suzuki S, Thierry-Chef I, Yabe H, Yasumura S, Schüz J, Yamashita S. Environ Health. 2015 Mar 19;14:26. doi: 10.1186/s12940-015-0013-z.
8) Assessing the health effects associated with occupational radiation exposure in Korean radiation workers: protocol for a prospective cohort study. Seo S, Lim WY, Lee DN, Kim JU, Cha ES, Bang YJ, Lee WJ, Park S, Jin YW. BMJ Open. 2018 Mar 30;8(3):e017359. doi: 10.1136/bmjopen-2017-017359.