

福島第一原発事故影響の環境放射線モニタリング上の知見について

吉岡 満夫*、寺川 和良**、笠井 利浩***

A Knowledge on Environmental Radiation Monitoring about the Influence from Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident

Mitsuo Yoshioka, Kazuyoshi Terakawa, Toshihiro Kasai

放射能・放射線の国民の健康への影響、国民のその結果の受止め方等を知るために、福井県及び福島県内の一部地域で空間放射線及び環境試料の放射能モニタリングを実施した。また、影響の距離依存性を知るために全国各地の降下物(雨水及び底質泥)の放射能モニタリングを行った。それらから得た環境放射線モニタリング上の知見を報告するとともに、特に内部被ばく線量(評価)に若干の検討を加えたので報告する。

キーワード：環境モニタリング、放射能影響、放射線影響、距離依存性、内部被ばく、国民の放射線理解

1. はじめに

環境(放射線)モニタリングと原子力(発電)の安全確保・確認とは密接・不可分な関係にある。平成23年3月11日、東日本大震災・大津波が発生し、それを引き金に東京電力福島第一原子力発電所事故までに発展し、大量の放射性物質が放出され、国民の心身両面に大きな影響をもたらした。

本稿は、福井工業大学(福井工大)で行った福井、福島を中心とした環境(放射線)モニタリング¹⁾の結果の記録を残すとともに、それらから得られた若干の知見を整理することを目的としたものである。これらのモニタリングの中には、今回よりは規模の小さな事故が発生した場合に有用となる指標生物¹⁾の探索のための試料や震災・津波被災地からの持ち帰り松材、汚染土等も含まれている。全国的な展開としては、影響出現の一次試料として位置付けられる福島県～山口県までの降下物(雨水、底質泥)の累積試料を得る機会を得たので、発災地からの影響の距離依存性等を検討した。

主なモニタリングの実施項目、実施地域、実施時期、実施方法は表-1に示す通りである。

表-1 福井工大の行ったモニタリングの実施項目・実施方法等

	実施項目	実施地域	実施時期	実施方法
①	空間放射線(γ線)線量率	福島県内	5月4日	3"φ×3"NaIスペクトロメータ ²⁾ ・約300kmの区間移動測定
②	空間放射線(γ線)線量率	福井市(福井工大)	3月18日～4月24日	3"φ×3"NaIスペクトロメータ ²⁾ ・38日間連続測定
③	大気浮遊じん	福井市(福井工大)	3月28日～5月9日	HVサンプラ連続採取・Ge半導体検出器による核種分析 ^{3),4)} (一部LVサンプラ・活性炭カートリッジでガス状 ¹³¹ I採取)
④	(定時)雨水	福井市(福井工大)	3月下旬～4月下旬	間欠採取・Ge半導体検出器による核種分析 ^{3),4)}
⑤	環境試料の放射能濃度	福島県内	5月4日	バッチ採取試料のGe半導体検出器による核種分析 ^{3),4)} (⑦は、発災地からの影響の距離依存性検討試料)
⑥	環境試料の放射能濃度	福井市を中心に	3月下旬～12月	
⑦	降下物(雨水、底質泥)	全国各地	6月～1月(主は8月)	
⑧	指標生物 ¹⁾ 探索(苔、ヨモギ)	富山県、福井市	10月中旬～11月	
⑨	持ち帰り松材の放射能濃度及び放射線影響	鯖江市	11月	Ge半導体検出器による核種分析 ^{3),4)} ・ 3"φ×3"NaIスペクトロメータ ²⁾

*原子力技術応用工学科、**原子力技術応用工学科('11.5.15～)、***経営情報学科

次節で今回のモニタリングについての考え方を述べた後、第3節以下で、各区分毎のモニタリングの実施方法の詳細や測定結果、結果の見方等を順次示す。参考文献の多くは全体に係る。

2. モニタリングに対する考え方

福井工業大学(福井工大)はモニタリング機関ではないが、国民の放射線安全の確保・確認のため、今回の影響掌握と可能ならば人々への周知、今までの放射能・放射線に対する国民の誤解解消・理解深化を得ることを目的として、(環境放射線)モニタリング¹⁾を実施した。本学では、放射能・放射線測定に直接関わる教職員は5月中旬迄1名・それ以降2名と極めて少ない。今回、文部科学省の要請や自主的参加等により大学間の連携・協力で幾つか組織的なモニタリングが実施されたが、局部的なモニタリングが多く、影響の全容掌握及びその後の対策に役立ったものは多くはなかったため、本学ではむしろ、大学間協力・連携に加わる形でなく、速やかかつ可及的数多くのモニタリングは実施するものの、それへの貢献よりも集団の外から傍目的に今回実施されたモニタリングの全体掌握、問題点・課題の摘出に努めることとし、被ばく線量(評価)に目安を与えることに主眼を置いた。また、併せて、環境モニタリング実施上「最少人員で何ができ、何が優先され、どのような機器を用いるべきか、その際の留意点」等について述べることとし、各論(各節)にも示した。

福井市は、発災地の福島県から直線距離で約450kmの距離に位置している。福井市周辺及び発災地に近い福島県内では多くの地点で空間放射線測定や環境試料採取を実施したが、これらの地点で得られた測定結果は、大局的傾向は反映するものの、状況・条件によりたまたま高い或いは低いことがあり、必ずしも地域・地点を代表するものではない。しかし、相対値と今回の影響の例示的な概数は捉えることができる。福島県内では懸命なモニタリング活動を行っている福島県や支援した他自治体の活動は十分信頼に足るものであり、そのモニタリング結果と公表等への信頼を阻害しないよう警戒地域・計画的避難準備区域の外縁部を走行した。福井県内でも同様である。従って、後述する影響の距離依存性等の解析結果を見るには、そのことに留意する必要がある。

モニタリングに対する考え方としては、避難・退避等の防護対策²⁾が施されなければ誰もが被ばくを避けられず原子力防災の住民防護措置(避難・退避)³⁾の中心ともなっている空間放射線及び大気中放射性核種濃度を優先的・重点的に実施した。また、今後のために、今回よりは規模の小さな事故が発生した場合(際)に備え、何よりも早く・かつ高く影響が現れ、いつでも・どこでも採取が可能で、食品等他の環境試料の比較対照ともなる指標植物を模索するとともに、インターネットへの心ない書き込み・抗議等で放射線の国民理解が進んでいないことが現れた被災地よりの持ち帰り松材や汚染土についても放射能・放射線影響を調査した。放射性核種の分析結果では、通常は採取日に減衰補正した値を示すのが一般的であるが、 ^{131}I が検出された試料は多くはなく、殆どは半減期の長い ^{134}Cs 、 ^{137}Cs であったため、特に特記したものを除き本稿では測定した時点での値を示した。また、試料の測定形態としては、これも乾燥物等と特記したものを除き、いずれも採取試料を直接(従って生、土壌の場合は湿土)測定した。一部は測定時間の短い迅速測定である。

3. 福島県内における空間放射線(γ線)線量率測定結果²⁾

平成 23 年 5 月 4 日に福島県内で 3"φ×3"NaI スペクトロメータ²⁾を用い主に車内搭載・移動測定
の形で空間放射線(γ線)線量率の調査を行った。測定結果を図-1に示す。走行ルートは警戒地
域・計画的避難準備区域の外縁部に当たる「東北自動車道郡山 IC→福島 IC→伊達市→相馬市→伊
達市→川俣町→福島市」の約 300km であり、測定時間各 1 分で、保存不調時間を除き延べ 331 分間
測定した。走行速度は高速道では概ね 60km/h、一般道では概ね 40km/h である。スペクトロメー
タ測定であり、エネルギー別(即ち寄与γ線別)の測定結果も得られているが、最少値(0.108μ
Sv/h)を示した相馬市松川浦を含め線量構成成分に大きな違いはなく、0.05~3MeV までのエネル
ギー範囲の結果を線量率で示した。線量寄与γ線は¹³⁴Cs の 604keV、795keV、¹³⁷Cs の 662keV γ線
であり、¹³¹I は減衰し殆ど観測されなかった。¹³⁴Cs、¹³⁷Cs の線量寄与比は凡そ 2 : 1 である。

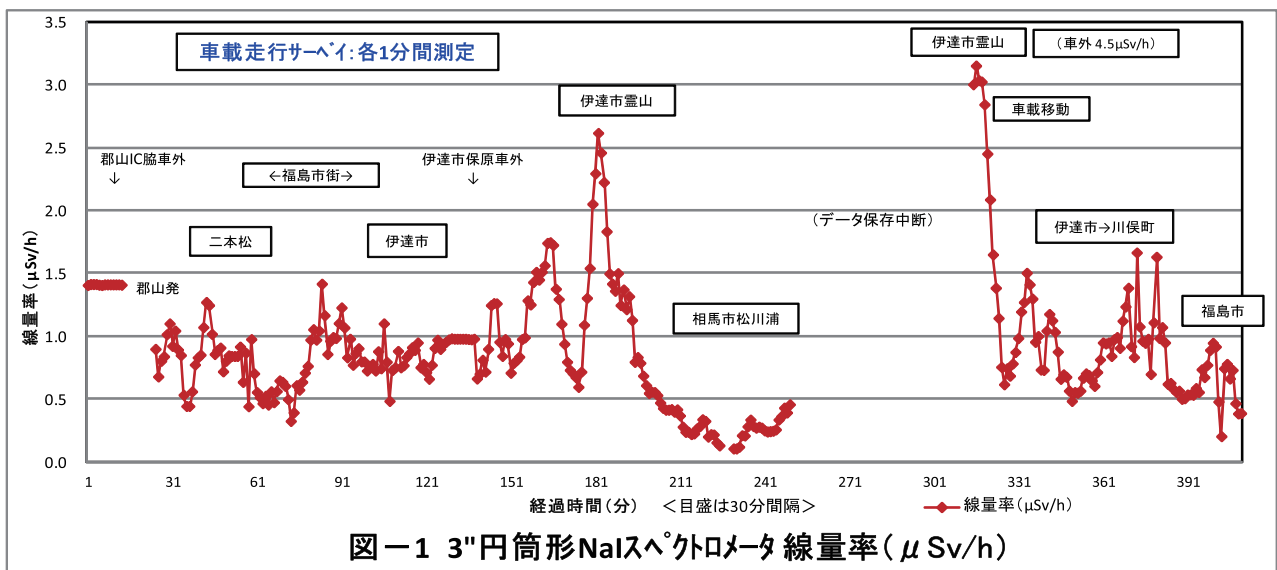


図-1 3"円筒形NaIスペクトロメータ線量率(μSv/h)

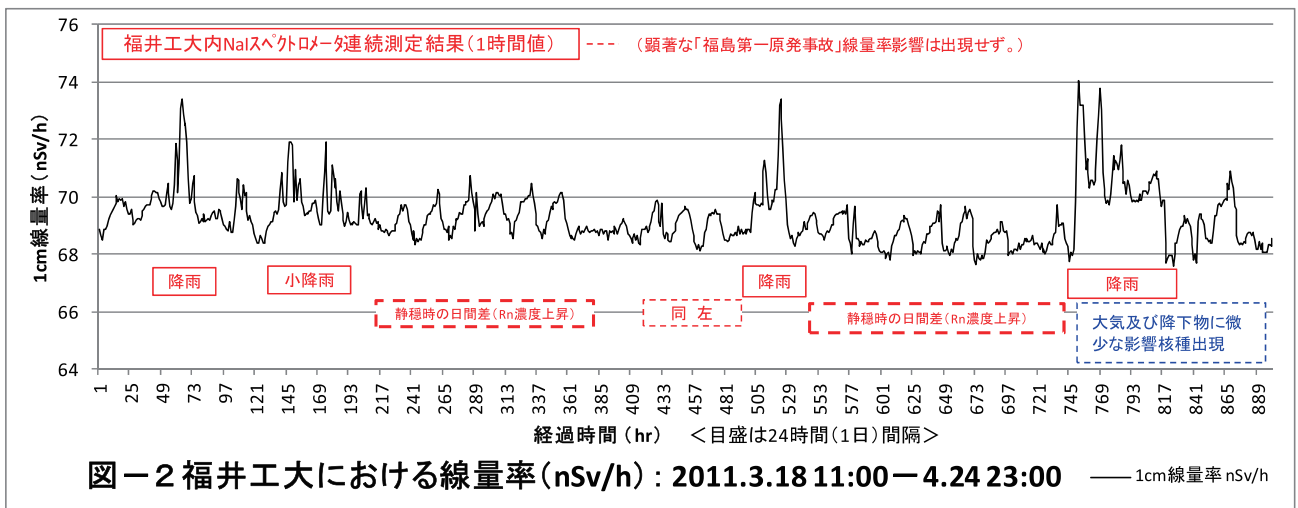
測定結果の数値は紙面の関係から省略した。図-1に示した線量率は、NaI スペクトルをアンフ
ォールディングして得られる前方照射に相当する 1cm 線量当量率(施設内では実効線量に相当)で
あり、外部被ばく線量として評価するには等方照射(又は回転照射体)として評価する必要があり、
それへの換算の比率は全エネルギー範囲で概ね 0.8、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs では 0.84 である。測定値の最少
~最大は 0.11 (相馬市松川浦、バックグラウンド線量率の約 3 倍) ~3.15 μSv/h (伊達市霊山)
と約 30 倍の開きがあった。伊達市霊山は後に特定避難勧奨地点(いわゆるホットスポット)とな
った地点である。また、この地域のバックグラウンド線量率は 0.04 μSv/h 前後と推定される。主
な測定は車載走行であり、車外/車内比を示せば 1.4~1.6 であった。他の機関のモニタリングカ
ー車体天井上に取り付けられた検出器と車外 1m の測定では車体上の方が高い結果が得られてい
るので、樹木の繁茂しているところでは、この比はもっと変わる可能性がある。後にデータが復元
された福島県環境放射線テレメータシステム大野局の測定結果によれば、100 μSv/h を超えた場
合は、高線量率用の電離箱では適切な値を示すものの、NaI シンチレーション検出器では飽和・数
え落としが起り、スペクトルもγ線ピークの現れないパイルアップスペクトルを呈するが、本
測定の測定結果は最高でも 3.15 μSv/h であり、そのような事態には至らず、ほぼ適正な値が示さ

れたものと推定される。図-1 の $3\mu\text{Sv/h}$ の地にずっと居続けた場合の年間の外部被ばく実効線量は 22mSv となるが、実際の生活では、家屋自体の遮蔽と居住時間比率で何割かの低減となる。また、 $^{134}\text{Cs} : ^{137}\text{Cs}$ の線量率寄与比が凡そ $2 : 1$ であり、 ^{134}Cs の半減期が2年であることから、2年後には仮に流亡等による減少がなくても、この時点の約 $2/3$ の線量率となる。

なお、社会科学的領域に属することであるが、 30km 迄 $+\alpha$ (飯館村等) の何らかの対策地域となった地域の外の住民からは、例え 1m 外側であっても「晴れて伸び伸びと日常の活動・生活ができる」という声が聞かれ、放射線影響と防護対策の本質をつき、印象的であった。

4. 福井市(福井工大)における空間放射線(γ 線)線量率連続測定結果²⁾

福井市(福井工大)における空間放射線(γ 線)線量率への影響を明らかにするために平成23年3月18日～4月24日の延べ38日間、前節と同じ $3''\phi \times 3''\text{NaI}$ スペクトロメータ²⁾を用い空間放射線(γ 線)線量率の「連続測定」を実施した。影響があったとしても多くはないと予想されたので、各測定時間は1時間とした。測定データの性格は前章に述べたとおりである。図-2に測定結果を図示する。前節と異なり、線量率的に低く、変化が微少なので、単位は nSv/h で表示した。



測定結果の数値は、前節同様、紙面の関係から省略した。測定器の設置場所は、風雨にも耐えられるよう大学3号館2階ベランダ前(ガラス窓内側)とした。測定結果の概要は、まず、大気浮遊じんや雨水に微少な影響が検出されたにも拘らず、空間線量率的には福島第一原発事故の影響は観測されなかった。測定結果及びスペクトルに表れたのはいずれも大地及び建屋・ベランダコンクリートや大気、雨水に含まれている天然放射性核種(カリウム-40、トリウム系列核種、ウラン系列核種)からの自然放射線であり、バックグラウンド(BG)である。非降雨時の周期的な変動とそれよりは大きな幾つかの降雨時の変動(3月20日、4月8～9日、4月18～19日)が見られるのは、前者は大地から散逸したラドンの壊変子孫核種である鉛-214、ビスマス-214の大気中濃度上昇(毎日明け方)によるもので、後者は大気中の鉛-214、ビスマス-214を雨水が洗い落とし地表やベランダ上に溜ることによってもたらされた変動であり、スペクトル的にもこれら核種からの γ 線の増加のみが観測されている。後述する松材周辺の放射線調査のところでも示すように、この方法による測定

では、対象物や影響到来期間前後のバックグラウンド(BG)測定を適切に選び、BG 減算スペクトルを得、それをアンフォールディングすることにより、凡そ BG の数十分の 1 の 1~2 nSv/h 迄の影響を識別することができる。移動測定実施上の注意点としては、運転、様々な記録及び電池交換やデータ保存不調等不測の事態のためにも 2 人以上の人員が必要だったことである。

5. 福井市における大気浮遊じん及び雨水の放射能濃度 ^{3), 4)}

物質移行の一次試料である大気浮遊じん及び雨水について、3 月 28 日~5 月 9 日の間、前者ではほぼ連日連続採取を行い、後者では降雨のあった時のみ採取を行った。大気浮遊じんの採取にはハイボリューム(HV)エアサンプラー・ガラス繊維ろ紙を用い、雨水は 0.2m² 及び 0.03m² ステンレス製水盤で採取した。浮遊じんの測定結果を表-2、雨水の結果を本節後半の表-3 に示す。

表-2 福井市(福井工大)における大気・浮遊じん中の放射性核種濃度(ほぼ連続採取)

採取 地点	2011年 採取 月日	期間 (日)	2011年 測定 月日	測定 迄の 経過日 (日)	測定			採取・ 測定量 (m ³)	測定 時間 (ks)	放射性核種濃度(mBq/m ³)			減衰 補正後 の ¹³¹ I	ガス状 ¹³¹ I 採取 時間(h)	ガス状 ¹³¹ I 採取量 m ³	測定 月日	測定 迄の 経過日 (日)	測定 時間 (ks)	ガス状 ¹³¹ I 濃度	
					形態	容器 mm φ	試料高 mm			¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs								
福井 工大	3.28-29	1	4.4	6	(生)	95	1	1,660	80	0.75	* —	* —	1.26	(活性炭カートリッジ(CHC-50 TEDA10%添着)形状55mm φ20mmH)						
	3.29-3.30	1	4.1	2	(生)	95	1	(24h)1152	60	0.067	* —	* —	0.080	(以下、空欄及び採取月日欄の—は採取を実施せず)						
	3.30-3.31	1	3.31	0.17	(生)	95	1	(24h)1152	60	0.15	* —	* —								
	3.31-4.1	1	4.8	7	(生)	95	1	(24h)1152	30	* —	* —	* —		24	27		1	60	(¹³⁴ Cs 0.104)	
	4.1-4.2	1	4.10	8	(生)	95	1	(24h)1152	80	0.23	0.055	0.085	0.46							
	4.2-4.4	2	4.11	7	(生)	95	1	2,101	80	0.47	0.066	* —	0.86	44	53	4.6	2	80	1.70 #	
	—																		(↑ ¹³⁴ Cs 1.46)	
	4.7-4.8	1	4.12	4	(生)	95	1	1,100	80	0.39	1.08	1.05	0.66							
	4.8-4.9	1	4.13	4	(生)	95	1	960	56	* —	* —	* —								
	4.9-4.10	1	4.14	4	(生)	95	1	1,201	50	0.14	0.11	* —	0.20							
	4.10-4.11	1	4.15	4	(生)	95	1	1,200	50	0.21	0.18	0.91	0.30							
	—	(福島のように、濃度が高い場合は「ろ紙」の部分打ち抜き測定可)																		
	4.12-4.13	1	4.16	3	(生)	95	1	1,142	30	0.50	0.15	0.16	0.65	24	28	未測定				
	4.13-4.14	(24h)						1,152	未測定					24	28	4.15	1	20	* ND	
	4.14-4.15	(24h)						1,152	未測定											
	4.16-4.17	1	4.18	1	(生)	95	1	1,205	80	0.21	0.094	0.13	0.23							
	4.17-4.18	1	4.19	1	(生)	95	1	1,378	62	2.04	3.52	3.27	2.23	(注:最高濃度)						
	4.18-4.19	1	4.21	2	(生)	95	1	1,144	50	* —	* —	* —								
	4.19-4.20	1	4.23	3	(生)	95	1	827	75	0.51	0.79	0.74	0.66							
	4.20-4.21	1	4.29	8	(生)	95	1	1,536	80	0.17	* —	0.28	0.34							
	4.21-4.22	1	4.30	8	(生)	95	1	1,100	80	0.070	* —	0.15	0.14							
	4.22-4.23	1	5.1	8	(生)	95	1	1,010	76	* —	* —	0.101								
	4.23-4.24	1	5.3	9	(生)	95	1	1,100	80	* —	* —	* —								
	4.24-4.25	1	5.9	14	(生)	95	1	1,120	50	* —	* —	* —								
	4.25-4.27	2	5.14	17	(生)	95	1	2,319	74	* —	* —	* —								
	4.27-4.29	2	5.23	24	(生)	95	1	2,150	50	* —	* —	* —								
	4.29-4.30	1	5.24	24	(生)	95	1	1,000	50	* —	* —	* —								
	4.30-5.2	2	5.31	29	(生)	95	1	2,160	34	* —	* —	* —		68	79	未測定				
	5.2-5.3	1	5.31	28	(生)	95	1	1,047	50	* —	* —	* —								
	5.3-5.5	2	6.1	27	(生)	95	1	2,304	50	* —	* —	* —		68	78	未測定				
	5.5-5.9	4	5.13	4	(生)	95	1	4,801	80	* —	0.15	0.17							(⁹⁵ Nb 0.023)	
	累 積 濃 度										5.867	5.417	6.306	8.07	# (検出されたガス状 ¹³¹ I/粒子状 ¹³¹ I濃度比=3.62)					
	測定期間中平均濃度										0.16	0.15	0.18	0.23						

¹³¹I は大気中では上記採取装置で捕捉される浮遊じん(従って粒子状)だけでなく、ガス状でも存在し、1986 年のチェルノブイル事故影響到来時は ¹³¹I の粒子状：ガス状の比が 1：1~1：1.5 であった ⁶⁾ ので、間欠的で少数ではあるが、活性炭フィルター・低流量(LV)エアサンプラーによる採取も実施し、表-2 にはその結果も併記した。検出されたのは多くはないが、形態別比として 3.6 という比が観測されている。浮遊じんの ¹³¹I、¹³⁴Cs、¹³⁷Cs の最高値は 4 月 17~18 日の 2~3.5mBq/m³ と発災地の 10⁻⁶ 以下であった。線量に目安を与えれば、調査した期間中の成人の上記

3核種を含む空気吸入による内部被ばく預託実効線量は $2.2 \times 10^{-5} \text{mSv}$ 、クリティカルな幼児の甲状腺等価線量は $1.1 \times 10^{-4} \text{mSv}$ と極めて小さなものであった。東電福島第一、第二敷地境界での3～4月の発表値からの成人の実効線量評価結果を示せば、それぞれ約 12mSv 、 3mSv である。線量評価上のパラメータは国の「環境放射線モニタリング指針」⁵⁾ に依った。採取、測定の一部が未実施なのは、少人数によるモニタリングの限界を示すものである。大気モニタリングとその結果は、対策がなければ誰もが吸入不可避であることから避難・退避の指標ともなっており、今回の場合は放出量推定にも用いられた極めて重要な項目であるが、元々人手を要することもあり、モニタリング実施上の弱点の1つでもあった。福島県や東電による測定も含めれば、大気浮遊じん等のモニタリングで最大の問題点は、まず各地点の採取時間が1地点1日20分であったことであり、連続採取がなされなかったことである。大気モニタリングの結果は発災地周辺では日あるいは地点間の濃度差は100～1,000倍に及んでおり、高濃度を逃してしまえばモニタリングと線量評価上の意味は極めて低くなる。少なくとも幾つかの方位的(・距離的)拠点では連続採取を実施すべきであった。国・東電は多数点測定と形態別に ^{131}I 等を逃さないことに重点を置いたようであったが、それは幾つかの拠点でよく、むしろ連続採取の方が優先されるべきであった。器材の低流量採取装置は専用装置がなければ、生活に使われている観賞魚飼育用ポンプ等が転用できる。なお、国民理解(特に内部被ばくに係る放射能摂取に対する誤解・恐れ)に関わることとして、表には示さなかったが、大気中には α 線放出核種も含めラドンと子孫核種が常時あり、それがどの大気浮遊じん試料からも、0.数～十数 Bq/m^3 検出され、人は誰でもそれを常時吸入していることを特に付記しておきたい。

表－3 福井工大における雨水中の放射性核種濃度(降下量)

試料区分	試料名	採取地点	採取年月日	測定年月日	測定形態	測定量 (m^2)	測定時間 (s)	放射性核種濃度(Bq/m^2)		
								^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
降下物	雨水	福井工大	11.4.8 10:00-18:30	11.4.8	(直接(生))	0.031 m^2 (238 mL)	63,000s	* ND	* ND	* ND
	雨水	福井工大	11.4.8 10:00-18:30	11.4.16	蒸発減容	0.2 m^2 (1.5 L)	80,000s	1.36	* ND	* ND
	雨水	福井工大	11.4.8-4.9 9:30	11.4.9	(直接(生))	0.031 m^2 (345 mL)	80,000s	* ND	* ND	* ND
	雨水	福井工大	11.4.18 12:00-19:00 (最高濃度)	11.4.21 (11.6.6)	蒸発減容	0.2 m^2 (1.7 L)	30,066s (80,000s)	23.1	11.9 (50日後)	15.1 (50日後)
				11.4.20	(直接(生))	0.031 m^2 -360 mL	80,000s	2.95 Bq/L	2.09 Bq/L	1.81 Bq/L
	雨水	福井工大	11.4.18-19	11.4.23	蒸発減容	0.2 m^2 (2.5 L)	21,000s	* ND	4.47 Bq/m^2	6.08 Bq/m^2
	雨水	福井工大	11.4.25-26	11.5.2	蒸発減容	0.031 m^2	80,000s	* ND	* ND	5.51 Bq/m^2

雨水は大気同様の一次試料で、上水(水道水)の元ともなる試料であり、濃度表現をすれば分布・他の試料への移行の指標ともなる。3月下旬からの調査期間中の最高値は、大気と同じ4月18日に出現している。この期間中、他にもここに示した以外の比較的少量の降雨があったが、低濃度まで測定しようとした場合は蒸発減容等の処理・手数が必要であり、未測定となった。ここにも少人数モニタリングの限界が現れている。但し、高濃度時期は抑えており、未測定はあるものの、降下量の数値自体を大きく変えるほどのことはなく、事実、文科省・福井県の月間降下物の報告値とほぼ同レベルの値となっている。なお、この文科省・福井県の報告値は第8節の降下物(雨水、底質泥)累積試料の測定結果との対比に有用である。水盤は直接測定用も含め2つあるとよいと思われる。

6. 福島県内の環境試料の放射能濃度^{3), 4)}

現地走行測定に併せ、平成 23 年 5 月 4 日に福島県内で環境試料を採取して持ち帰り、Ge 半導体検出器を用いた核種分析により放射能濃度を測定した。測定のおくは、前処理のない生試料測定・測定時間の短い迅速測定であり、測定結果は、一部は減衰補正し採取時濃度を示したもの、多くは検出限界を知る必要等もあることから測定日時点の濃度を示した。測定結果を表-4 に示す。

表-4 福島県内の環境試料中の放射性核種濃度 (測定時点での濃度。直接又は生或いは湿土等当りの濃度 *ーはND)

試料区分	試料名	採取地点	採取年月日	測定年月日	測定形態	測定重量等 (g等)	測定時間 (s)	放射性核種濃度(Bq/kg)			その他の核種(Bq/kg)				
								¹³¹ I	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	^{129m} Te	¹³⁶ Cs	^{110m} Ag	⁹⁵ Nb	¹⁴⁰ La
陸 水	河川水	郡山IC横	11.5.4	11.5.16	(生)	326mℓ	80,000s	*—	1.61	1.76	*—	*—	*—	*—	*—
	池水	伊達市保原	11.5.4	11.5.15	(生)	67mℓ	50,000s	*—	12.3	14.9	*—	*—	*—	*—	*—
	雨溜り水	伊達市霊山	11.5.4	11.5.15	(生)	69 mℓ	2,000s	31.3	30.4	29.4	*—	*—	*—	*—	*—
	池水	飯館村長泥	11.5.4	11.5.16	(生)	49 mℓ	10,000s	*—	*—	7.96	*—	*—	*—	*—	*—
陸 土	土壌A	飯館村赤宇木手七郎(R399号線 飯館・浪江町村境)	11.5.4	11.5.15	(生)	5.5 g	1,000s	7,730	258,000	320,000	87,700	1,420	各核種ともND (付近の簡易測定線量率約30 μ Sv/h)		
	土壌B	郡山IC横	11.5.4	11.5.21	(生)	5.2 g	80,000s	2,170	132,000	165,000	38,800	716	259	176	116
	土壌	郡山IC横	11.5.4	11.5.15	(生)	5.5 g	1,000s	525	12,900	16,100	#(3,420)	*—	*—	*—	*—
	底質泥	伊達市保原	11.5.4	11.5.15	(湿土)	6.8 g	1,000s	2,370	42,300	49,300	20,700	*—	*—	*—	*—
植物	スギナ	郡山IC横	11.5.4	11.5.17	(生)	13 g	4,300s	*—	336	396	*—	*—	*—	*—	*—
	セリ	郡山IC横	11.5.4	11.5.19	(生)	1.54 g	50,000s	*—	8,080	9,590	*—	*—	*—	*—	*—
	ヒオトリソク	郡山IC横	11.5.4	11.5.18	(生)	18g	4,800s	*—	11,700	14,300	2,110	*—	*—	64	*—
	モチグサ	郡山IC横	11.5.4	11.5.20	(生)	3.4 g	80,000s	63	10,800	12,900	1,140	89	*—	40	*—
	レンゲ草	郡山IC横	11.5.4	11.5.18	(生)	13 g	5,000s	*—	1,260	1,520	*—	*—	*—	*—	*—
	野草種子	郡山IC横	11.5.4	11.5.17	生	0.96 g	50,000s	*—	8,730	10,500	*—	*—	*—	*—	*—
	野草混合	郡山IC横	11.5.4	11.5.15	生	132 g	1,000s	*—	10,200	11,400	*—	76	*—	*—	*—
	指標植物	ヨモギ	伊達市保原	11.5.4	11.5.15	生	142 g	1,300s	66	4,220	4,470	1,550	37	*—	*—
植物	ヨモギ(根)	伊達市保原	11.5.4	11.5.15	(生)	15 g	1,000s	*—	4,310	4,970	*—	*—	*—	*—	*—
	単子葉草	伊達市霊山	11.5.4	11.5.15	(生)	4.3 g	1,000s	*—	30,900	36,500	*—	420	*—	*—	*—
指標植物	ヨモギ	伊達市霊山	11.5.4	11.5.15	生	100 g	1,000s	*—	12,600	13,500	4,450	196	*—	*—	*—
大気	福島往復活性炭(未吸引)		11.5.4	11.5.8	カードリッジ	1個	80,000s	*—	0.134/個	0.125/個	*—	*—	*—	*—	*—
車体汚染	福島往復車両屋根拭取りウェス		11.5.4	11.5.5	ウェス	約1m2	14,000s	*—	5.73/m2	5.78/m2	*—	*—	*—	*—	*—

一般的に用いられる不確かさ(いわゆる測定誤差 σ)からの検出限界は 3σ (γ 線ピーク計数誤差 33%)であり、本節以降の核種分析結果では基本的にこれを適用した。採取地点は第 3 節の走行サーバイルート上の位置が特定しやすい地点であり、伊達市霊山はいわゆるホットスポットで後に特定避難勧奨地点となったところである。退避・避難等のいわゆる防災対策が施された 30km 迄 + α (飯館村等)の濃度が極めて高い地域のデータは少ないものの、その外縁部の概ねの放射能(汚染)状況が把握できる地点・試料となっているものと考えられる。河川水は小河川の流水であり、放射能濃度は雨溜り水 > 池水 > 流水となっている。土壌は、今回のような事故影響出現形態では、後に詳細分布調査や全国的な航空機サーベイが行われる等、外部線量評価や汚染除去等に係る試料として重要性が再認識され、線量寄与・濃度の高低・分布・移行等のあらゆる点で指標性のあることが再確認された。R399 号上の飯館村赤宇木の土壌(A)の ¹³⁴Cs、¹³⁷Cs は、両者合わせて約 58 万 Bq/kg と本稿の測定結果中最高であり、福島県に行った緊急時モニタリング結果の土壌での最高値に近い値である。初期の ¹³⁴Cs、¹³⁷Cs 濃度比はほぼ 1 : 1 で、チェルノブイリ事故時の 1 : 2 とは大きく異なる⁶⁾。野菜や他の食品試料は得られなかったが、野草では指標生物探索の観点から雑多に混ざったものから種類別により分け測定した。スギナ・レンゲ草等低い濃度を示した 2 品目を除き、同じ地点であればいずれの野草も ¹³⁴Cs、¹³⁷Cs の和で概ね 2 万 Bq/kg 前後とほぼ同じ濃度となっており、福島県調査での最高値の約 300 分の 1 となっている。単子葉的野草の放射性セシウムが約 7

万 Bq/kg と比較的高いのは意外であり、このことが稲藁→牛肉問題の解釈に繋がる可能性がある。

現地及び関東各地では農畜産物や食品の摂取制限・出荷流通制限の基準値を超える結果が頻発した。厚労省の10月初頭までの約27,000件の発表値から基準値超過のものを除外したいわゆる流通食品とみなせる全食品の放射性セシウム($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$)平均濃度は23Bq/kgであり、線量に目安を与えれば、事故後7ヶ月間の流通食品摂取による内部被ばく預託実効線量は0.18mSvとなる。

なお、外部被ばくと異なり内部被ばくは、体内摂取された放射性核種が減衰・代謝し尽す迄の比較的長期間にわたるその核種からの放射線(主として β 線・自然放射能では α 線)による被ばくの総量である。最長50年迄の「預託線量」として算定・表記されるため、短期間的には大きいものとはならないが、このことに対する理解不足と「放射能はどんなに少なくても影響がある」との思い込み・誤解が今回の事故の特に「放射能による影響」への恐れ・不安を招いた最大の原因だと思われる。

7. 福井市周辺における環境試料の放射能濃度^{3), 4)}

表-5に福井市周辺における環境試料中の放射性核種濃度を示す。

表-5 福井市周辺における環境試料中の放射性核種濃度 (特記以外の放射性核種濃度(Bq/kg生)は測定時における濃度)

試料区分	試料名	採取地点	採取年月日	測定年月日	測定形態	測定重量等(g等)	測定時間(ks)	放射性核種濃度(Bq/kg生)			備考
								^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs	
陸水 或いは 降下物	水道水	福井工大	11.3.22	11.3.22	(生)	0.3ℓ	50 ks	＊－	＊－	＊－	
	地下水	福井工大	11.3.22	11.3.23	(生)	0.3ℓ	50 ks	＊－	＊－	＊－	
	河川水	敦賀市浦底	11.11.19	11.12.15	イオン交換	40ℓ	80 ks	／	＊－	＊－	
	池水	敦賀市明神町	11.11.19	11.12.15	樹脂(濃縮)	40ℓ	80 ks	／	0.034mBq/ℓ	0.030mBq/ℓ	猪ケ池、陰陽樹脂混床ハッチ法
	雨水(累積)	福井東安居小	11.6.18	11.6.27	(生)	0.34ℓ	80 ks	／	＊－	＊－	他に全国多数→別記
	降下物	福井工大	11.11.15	11.12.15	葉＋雨水	0.2 m ²	80 ks	／	12.0Bq/m ²	11.2Bq/m ²	葉＋雨水
陸土 (土壌 或いは 底質泥)	土壌	工大付近民有地	11.6.29	11.6.30	(生)	217g	80 ks	＊－	4.32	5.54	
	土壌	工大横神社	11.11.25	11.12	乾燥物	122g	80 ks	／	8.02	11.8	
	土壌	足羽川土手	11.11.25	11.12	乾燥物	111g	80 ks	／	2.13	3.44	
	雨水貯留槽底質	福井東安居小	11.6.18	11.6.25	(湿土)	605g	25.1ks	＊－	39.5	43.0	他に全国多数→別記
				11.6.25	(湿土)	562g	80 ks	＊－	52.5	57.4	
農産物	大根葉	福井市開発	11.4.13	11.4.17	乾燥物	生 320g (33g乾)	80 ks	採取日1.46 測定日1.03	0.715	0.541	
	アブラナ	福井工大	11.5.5	11.5.18	乾燥物	生 166g	50 ks	＊－	0.62	0.77	(26g乾)
	米	京都府木津市	11.9.25	11.9.28	生	生 187g	80 ks	＊－	＊－	＊－	(後日の福島米検出に関連)
指標植物	ヒメカシノミ	福井市開発	11.4.19	11.5.5	乾燥物	生 244g (34g乾)	62.5ks	採取日3.02 測定日0.75	4.80	5.17	
	オオマツヨイグサ	福井市開発	11.4.19	11.5.6	生	生 162g	80 ks	採取日3.28 測定日0.73	2.51	3.10	
指標植物探索	苔(コシギョウ)	工大付近	11.11.12	11.11.12	乾燥物	生 244g (10g乾)	80 ks	／	14.8 [#]	14.8	他に多数→別記、 [#] 荷重平均
水草又は 海藻	メカブ	福井市鮎川町	11.5.7	11.5.12	乾燥物	生1054g	80 ks	＊－	＊－	＊－	
	ワカメ	福井市鮎川町	11.5.7	11.5.11	乾燥物	生131g	80 ks	＊－	＊－	＊－	
	マツモ	琵琶湖	11.5.8	11.5.10	乾燥物	生 285g	70 ks	＊－	＊－	0.55	(43g乾)
	ヨレモク (ホンダワラ)	福井市小丹生	11.4.17	11.4.23	乾燥物	生589g (205g乾)	80 ks	採取日5.77 測定日3.43	＊－	＊－	
	マメダワラ (ホンダワラ)	福井市小丹生	11.4.17	11.4.24	乾燥物	生853g (152g乾)	80 ks	採取日0.75 測定日0.41	＊－	＊－	他に ^{140}La 0.56Bq/kg生

一過性の大气試料での発災地との概ね $10^{-6} \sim 10^{-7}$ という濃度比と異なり、比較的蓄積性がある植物では、発災地との濃度比は凡そ 10^{-4} とその開きは小さくなり、最も蓄積性が高いと推定される土壌では $10^{-3} \sim 10^{-4}$ と発災地との濃度の開きは更に縮まっていると解釈される。葉菜では先に述べた流通食品の平均濃度の約30分の1で、それからの内部被ばくも年間で0.01mSv(実際には葉菜のみとすれば更に1/20)以下と問題となるものではなかった。海藻ではごく僅かな ^{131}I が観測されただけで、 ^{134}Cs 、 ^{137}Cs は検出されなかった。大学研究室横ベランダの水盤(防腐剤無添加)では少面積であるため底質は観測されず、むしろ藻が発生し、それへの濃縮が観測された。他の節で示した降下量との差は、5階建て建屋横ベランダ設置であり雨水をすべて捉えなかったため

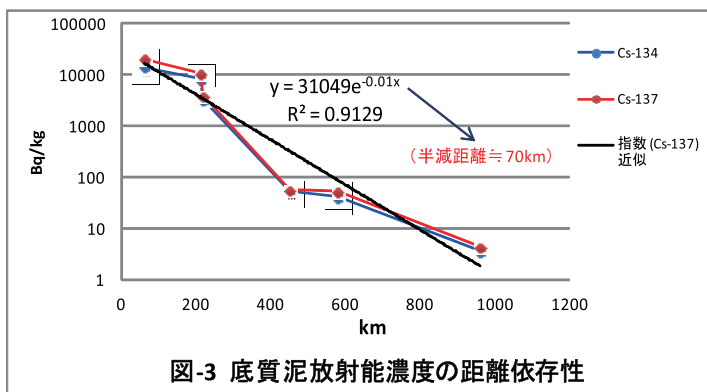
と考えられる。猪ヶ池は河川の流入出のない池であり、発災地対比は凡そ 10^{-6} である。

8. 降下物(雨水、底質泥)の放射能濃度^{3), 4), 7)}

この調査は、モニタリング用の(定時)雨水や(月間)降水量測定用の水盤と異なり、大面積の小学校体育館や民家屋根等に降った降下物(雨水、底質泥)を樋を通じタンクに溜めておいた試料(累積試料)である⁷⁾。従って、試料・その採取の状況・条件は雑多であるが、通常これ程のモニタリングは実施し得ない。事故後、採取時(主に 8 月中旬)迄タンク清掃されていないものであり、水は花壇の水遣り等に利用されている。測定結果を表-6 に、その発災地からの距離依存性を図-3 に示す。

表-6 底質泥放射能濃度と発災地からの距離

採取地点	距離 (km)	Cs-134 (Bq/kg)	Cs-137 (Bq/kg)
福島県	60	14000	20500
千葉県	210	8150 (雨水 ND)	10800 (雨水 1.2)
東京都	220	3270 (雨水 1.0)	3840 (雨水 1.8)
福井県	450	55	57
兵庫県	580	42	52
山口県	960	3.6	4.3



雨水に検出された濃度は()内に示した。これ以外では東京の泥 1 試料にのみ ^{110m}Ag が検出されている。底質泥／水の分配係数は 2,100～9,000 であり、雨水から底質泥への移行後の天水は飲用するとしても何ら問題はない濃度であった。距離依存性の指数近似曲線から得た影響の半減距離は約 70km である。この値は、一般の土壌を含めれば複数データのある発災地(福島)・東京・福井のデータの吟味・選択次第で、1～2 割と少し小さく変わる可能性があり、今後更に検討していきたい。

9. 指標植物の検討・苔、ヨモギの放射能濃度^{1), 3), 4)}

指標植物⁵⁾の意義は第 1～2 節に述べた。新たな指標植物探索のための測定結果として 10～11 月に、富山県、福井市で実施した苔、ヨモギの ^{137}Cs 濃度測定結果を表-7 に示す。

表-7 指標植物の検討：苔、ヨモギの放射能濃度の比較

苔(コスギゴケ)			ヨモギ		
場所	核種	放射能濃度 [Bq/kg]	場所	核種	放射能濃度 [Bq/kg]
布施川 (富山県黒部市)	Cs-137	39.5	布施川 (黒部市)	Cs-137	0.73
生地 (富山県黒部市)	Cs-137	25.4	生地 (黒部市)	Cs-137	0.76
富山県魚津市	Cs-137	3.23	魚津市	Cs-137	0.75
福井工業大学	Cs-137	14.8	福井工業大学	Cs-137	0.18

苔／ヨモギの ^{137}Cs 濃度比は調査した 4 地点平均で 44 であり、雑草刈りされないためか苔が高い濃度を示した。苔はコンクリート上も含めどこでも生息し、刈り取られないことがないことから累積影響を反映する。食品とは、ブロッコリー・カリフラワー等の花蕾類に形状が似ており、指標植物として、従来からモニタリングに用いられていたヨモギより、より適切ではないかと考えられる。

10. 被災地からの持ち帰り松材の放射能濃度及び周辺の放射線測定結果

震災・津波被災地(陸前高田市)からのボランティアお礼持ち帰り松材(トラック 1 台分)の放射能濃度及び放射線影響測定結果を表-8、表-9 に示す。NaI スペクトロメータによる現地線量率測定までを行ったのは、松材中の放射性セシウムの分布が皮に偏っており、また、現地積上げ形状がやや複雑で、放射能濃度からの数値計算で寄与線量率を算出するのは適切でないと判断されたためである。

表-8 松材の放射性核種濃度

	測定形態	放射性核種濃度(Bq/kg)	
		¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs
松皮	生 (乾燥物)	95.7	116
	灰化物	2,190Bq/kg (灰分1kg当り)	3,110Bq/kg (灰分1kg当り)
松(木質)	生	-	5.37

表-9 松材周辺の放射線測定結果 (11月18日測定、単位: μ Sv/h)

測定No.	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
	BG(17m)	1m	5m	密着	後方	左方	右方
全線量率(μ Sv/h): (殆ど自然放射線)	0.0418	0.0428	0.0446	0.0406	0.0378	0.0443	0.0450
放射性セシウムからの 線量率(μ Sv/h)	/	0.0018	0.00045	0.0025	0.00089	0.0023	0.0018
全線量率に占める 放射性セシウム寄与比率	/	4.2%	1.0%	6.2%	2.4%	5.2%	4.0%

灰化後の測定結果も示したが、灰化は放射性セシウムが揮散しないよう 450℃で行った。測定結果では、明らかに福島影響の ¹³⁴Cs、¹³⁷Cs が検出され、現地での BG 減算スペクトルでもこれらからの γ 線が認められたものの、その線量率影響はいずれの場所でも 0.0025 μ Sv/h 以下と極めて小さく、付近で遊ぶ児童等への影響は全く問題となるものではなかったといえることができる。

11. 結言

以上、モニタリングに対する考え方・優先性・必要な人員及び用いるべき機器(への示唆)、今回の事故に関連する測定結果、その結果の見方・解釈、被ばく線量的な面からの捉え方(目安)、モニタリング上の留意点・問題点・課題(への提言)、国民理解・受止め方的な側面等を各節で示してきた。本稿で示した規模・程度のモニタリングで、特に必要な機材は、NaI スペクトロメータと Ge 半導体検出器(各種サーベイメータ)、大気試料採取装置等であり、人員的には 2 名以上必要である。

発災地から約 450km 離れた福井周辺における発災地対比を総括的に示せば、項目や試料毎に異なるが概ね $10^{-3} \sim 10^{-6}$ であり、線量的には極めて微少で放射線安全上問題となるものはなかった。

なお、施設内(・近傍)で適用されるべき「放射線はできるだけ低く」がいつの間にか社会に流布し、放射能・放射線に対する思い込み・誤解の原因となっており、このことの解消が社会全体の課題でもあろう。

参考文献:

- 1) 原子力安全委員会；環境放射線モニタリング指針，平成 20 年 3 月
- 2) 文部科学省 放射能測定法シリーズ 20；空間 γ 線スペクトル測定法，1990
- 3) 福井県衛生研究所 調査研究報告第 10 集，吉岡満夫；Ge(Li)検出器による環境試料の核種分析法，1975
- 4) 文部科学省 放射能測定法シリーズ 7；ゲルマニウム半導体検出器によるガンマ線スペクトロメトリー，1992
- 5) 原子力安全委員会；原子力発電所等周辺の防災対策について，昭和 55 年 6 月、平成 20 年 10 月一部改訂
- 6) 科学技術庁；第 28 回環境放射線調査研究成果論文抄録集，1986
- 7) 笠井利浩・吉岡満夫；福島第一原子力発電所事故による雨水活用装置内の放射性物質による汚染の実態調査，日本雨水資源化システム学会第 19 回研究発表会講演要旨集，p.67-71，2011

(平成 24 年 3 月 31 日受理)