

福島第一原発事故による環境汚染とその生態系への影響

——長崎原爆の“黒い雨”と比べてみる——

山崎秀夫*

はじめに

わが国における環境放射能汚染は広島原爆に始まり、次いで長崎原爆、米ソの大気圏内核実験によるグローバル・フォールアウト（第五福竜丸の被曝）、チェルノブイリ事故、そして今回の福島第一原発事故によってもたらされてきた。さらに、1999年に起きた東海村JCO臨界事故では、放射線被曝により2名が亡くなったが、環境が放射能汚染することはなかった。環境放射能汚染の大きな特徴は、放射線作業従事者だけでなく、一般の住民も放射線に被曝する可能性があることである。福島第一原発事故の場合にも、住民の放射線被曝線量の推定が様々なシミュレーション手法を用いて行われているが、後でも述べるように、事故初期の実測データが殆ど存在していないために、住民の被曝線量に関する議論を行うことが難しく、本稿ではその詳細については取り上げない。ただ、最近の研究の中には、20年以上経過したチェルノブイリ事故による住民の被曝リスクに関して、低線量被曝の生体影響（主に発癌）が、従来考えられているよりも大きいとする報告もある¹⁻³⁾。これらの論文に対しては、様々な反論もあるが、既に福島県で多くの小児甲状腺癌が発見されていることも合わせて考えると、低線量被曝の影響を定量的に議論する必要性を強く感じる。しかし、公的な評価としては、福島県下における小児甲状腺癌の発生は、福島第一原発事故による放射線被曝の影響を受けていない

地域の罹患率と差異はないとしている^{4,5)}。現実には数十名以上の小児が甲状腺癌と確定診断され、手術を受けた。その結果は、1名の良性を除いて全て悪性腫瘍であった。さらに、経過観察中の小児も数多く存在している。チェルノブイリ事故と同様に⁶⁾、福島第一原発事故の場合にも、事故初期の放射線被曝の実態については不明な点が多く、“放射線被曝による健康影響を考える際には被曝初期の正確な実測データが重要である”というチェルノブイリ事故からの教訓を十分に生かすことができなかった。

一方、今回の事故では、過去の経験が生かされた事例もある。福島県下では、事故が起きた2011年に収穫されたコメが放射性セシウムで高濃度に汚染されたが、2012年以降は汚染の抑制に成功した⁷⁾。これは、1950～60年代の米ソの大気圏内核実験によるグローバル・フォールアウト^{137Cs}でコメが汚染され、当時の研究者がコメに対する^{137Cs}の吸収機構について精力的に研究、解明した成果が生かされた結果である。ちなみに、福島県では、2012～13年は米の全量（30kg入り約1,000万袋）をスクリーニング検査しているが、両年ともに食品規制値（100Bq/kg）を超過したものはわずかに数十袋であった。

福島第一原発事故による環境放射能汚染は、今後も長期間にわたって東日本一帯で続くと考えられる。また、自然循環や人為的な物流によって、わが国全体に放射性物質が拡散してい

*近畿大学理工学部生命科学科教授

く可能性が大きい。本稿では、かつて著者等が調査してきた長崎原爆による放射能汚染⁸⁻¹⁰⁾と比較することで、福島第一原発事故による環境放射能汚染の規模と影響の大きさを再認識する。

世界の原子力災害と環境放射能汚染の歴史

福島第一原発事故の直後に Science 誌は過去の原子力事故と放射線リスクの関係について、その概要を解説している¹¹⁾。そこで取り上げられた世界の主要な原子力災害としては、1945年の広島・長崎原爆（94,600人の生存者について、白血病と固形癌がそれぞれ45%、11%増加）、1950年代のネバダにおける核実験（米国人1億6千万人が被曝し、恐らく甲状腺癌が増加している）、1948~1972年の旧ソ連マヤーク核施設（従業員21,000人、住民30,000人がプルトニウムで被曝）、1979年のTMI原発事故（住民200万人が被曝したが直接的な影響は認められなかった）、1986年のチェルノブイリ事故（500万人が直接的に被曝し、汚染したミルクの飲用によって6,000人以上が甲状腺癌を発症している）、などを挙げている。この他にも、英国のウインズケール（後にセラフィールドと改称）で1957年に起きた原子炉火災事故や米国ハンフォード核施設（長崎原爆のプルトニウムもここで生産された）からの放射性物質の漏洩などによって大規模な環境放射能汚染が起きており、住民の発癌率が増加するなどの被害が出ていると言われている。これらの原子力災害では、いずれの場合も施設周辺の住民が放射線被曝の影響を直接受けている。また、原子力施設から漏洩した放射性物質は、地下水や河川を通して施設周辺の地域を汚染するだけでなく、大気や海洋を経由して地球全体に拡散し、最終的にはヒトを含む生態系に対して、放射線被曝

の影響を与える。

福島第一原発事故による環境放射能汚染

福島第一原発事故による放射性核種の放出量については、様々な機関や研究者が推定している。1号炉から3号炉までの核燃料の燃焼度や事故の様態が各炉で異なるので、推定者によって値が大きく異なり、福島第一原発事故による環境放射能汚染の実態は未だによく分かっていない。事故時に大気に放出された放射性核種の代表的な推定値を表1に示した。今回の事故で放出された放射性核種の中で、その半減期や生体影響に関連して問題になる核種は、¹³³Xe, ¹³¹I, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, ³H等である。また、表1には、原子力安全・保安院が推定した福島第一事故による放出量と広島原爆による生成量を、いくつかの放射性核種について対比した結果¹⁴⁾も合わせて示した。原子爆弾と原子力発電所の原子炉では、生成する核分裂生成物の量や割合が大きく異なるので、両者を直接比較することは科学的にはあまり意味はないが、環境への放射性物質の放出量や影響を直感的に理解するには有効である。福島第一原発事故では¹³¹Iや¹³⁷Csが大量に大気中に放出されたが、原子爆弾によるこれら核種の生成量は意外に少ない。

表1に示した放射性核種の中では、沸点の低い希ガス元素やヨウ素、セシウム等が最初の水素爆発（水蒸気爆発も起きていたと考える専門家も多い）で放出され、大気中を拡散した。その一部が東日本一帯の地表や沿岸域に沈着し、環境放射能汚染を引き起こしたことになる。チェルノブイリ事故のように、炉心が爆発的に破壊されることがなかったので、非揮発性の核分裂生成物の多くは炉内に留まったと考えられるが、現在も続いている炉心の冷却では、冷却

表1 福島第一原発事故と広島原爆による放射性核種の推定放出量

大気への放出量 (PBq)	
原子力安全委員会 (2011年5月)	^{131}I : 150, ^{137}Cs : 13
原子力安全・保安院 (2011年6月) ^{a)}	^{133}Xe : 1100, ^{131}I : 160, ^{134}Cs : 18, ^{137}Cs : 15, ^{90}Sr : 0.14, ^{95}Zr : 0.017
東京電力 (2012年5月)	希ガス: 500, ^{131}I : 500, ^{134}Cs : 10, ^{137}Cs : 10 (沈着量 ^{c)} ; 陸上: 1.1, 海上: 0.9)
A. Stohl <i>et al.</i> (2012) ¹²⁾	^{133}Xe : 15300, ^{137}Cs : 36.6 (沈着量 ^{c)} ; 陸上 (日本): 6.4, 陸上 (日本以外): 0.7)
Y. Morino <i>et al.</i> (2013) ¹³⁾	^{137}Cs : 8.8 (沈着量 ^{c)} ; 陸上: 2.1, 海上: 1.8)
広島原爆の放出量	
原子力安全・保安院 (2011年8月) ^{b), 14)}	^{131}I : 63, ^{137}Cs : 0.089, ^{90}Sr : 0.058, ^{95}Zr : 14

a) : 原子力安全・保安院は31核種について、大気放出量を推定している。

b) : 16核種について、広島原爆による生成量を推定している。

c) : 沈着量は ^{137}Cs の値。

水がメルトダウンした核燃料（デブリという）に直接接触しているため、 ^{90}Sr 等の核分裂生成物が冷却水に溶け出して炉外に漏洩することになる。福島第一原発が立地する地域は地下水脈が発達しているため、放射性物質の地下水への漏洩も問題になる。核燃料の酸化ウランや酸化プルトニウムは、純水に対する溶解度が極めて小さいので、通常なら水に対する溶脱を考慮する必要はない。しかし、今回の事故で形成されたデブリの表面状態が全く分かっていないので、例えば、冷却水と接触することでデブリ表面から核燃料の微細粒子が剥離し、冷却水と共に環境に漏洩する可能性を否定することはできない。さらに、核燃料の一部がメルトスルーしている可能性も指摘されており、ウランやプルトニウムが建屋基盤のコンクリート（アルカリ性）と反応して、水に対する溶解度が大きいカルボネート錯体として冷却水や地下水に溶解する可能性も考慮しておく必要がある。トリチウムも大量に存在する放射性核種であるが、物理的・

化学的に除去処理する方法がなく、希釈廃棄が減衰保管が唯一の処理法である。このようなことから、福島第一原発事故における環境放射能汚染を考える上で当面对象となる放射性核種としては、 ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^3H 等である。

原爆の“黒い雨”と福島第一原発事故

広島、長崎の被曝では、原爆の爆裂による放射線や衝撃波等による物理的な破壊の他に、中性子捕獲反応で生成した誘導放射性核種や核分裂生成放射性核種による二次被曝も問題になる。爆裂の直後に降ったいわゆる“黒い雨”にも大量の放射性物質が含まれていたと考えられている。その詳細な経緯については、「広島“黒い雨”放射能研究会」によって総括されている¹⁵⁾。“黒い雨”に含まれた放射性物質による原爆の痕跡の探査や被曝線量の推定が数多く行われてきたが、ウラン型原爆である広島原爆の場合には、土壤中に比較的高濃度に含まれる天然ウランとの分別が難しく、あまりうまくいっ

ていない。一方、長崎原爆はプルトニウム爆弾であるために、プルトニウムをトレーサーとして用いる探索が広く行われてきた¹⁶⁾。著者等も、被曝後55年以上が経過した2001年から、“黒い雨”が降ったと言われている長崎市西山地区を中心に、あらためて長崎原爆の痕跡を探索した^{8~10)}。一方、被曝後の1945年12月から翌年1月に長崎市や島原半島一帯の γ 線強度が測定され、長崎原爆による地表の残留放射線強度の地理的分布が記録されている¹⁷⁾。それによれば、長崎原爆の爆心地点や西山地区における

“黒い雨”が降った地域が精確に特定されている。また、長崎原爆の放射能は雲仙岳を越え、爆心から40km離れた島原半島先端でも検出されている。最近のプルトニウム同位体比を用いた研究では、長崎原爆の放射性核種は、さらに遠方の熊本県にまで到達したことが示されている⁸⁾。

本稿では、著者等が調査した長崎原爆の痕跡データから^{8~10)}、福島第一原発事故と長崎原爆の“黒い雨”による環境放射能汚染の程度を比較、検討した。表2に、長崎県内の原爆

表2 長崎原爆の“黒い雨”による¹³⁷Cs沈着量の推定

地 域	地点	¹³⁷ Cs 濃度 ^{a)} (Bq/kg)			¹³⁷ Cs 現存量 ^{a)} (kBq/m ²)	
		検出値 ^{a)}	原爆由来 ^{a)}	原爆由来 ^{c)}	現存量	“黒い雨”沈着量 ^{d)}
長崎県内土壌 ・原爆の影響を受けなかった地域 ・戦後のグローバルフォールアウトによる汚染	A		9.5		0.62	
	B		5.6		0.36	
	C		4.2		0.27	
	D		6.7		0.44	
	E		9.0		0.59	
	平均		7.0		0.455 ^{b)}	
長崎市西山地区土壌 ・“黒い雨”が降った地域 ・グローバルフォールアウトの汚染も受けている	1	86.5	79.5	290	18.8	118
	1'	77.0	70.0	255	16.6	104
	2	10.1	3.1	11.3	0.7	5
	3	12.8	5.8	21.1	1.4	9
	4	16.2	9.2	33.5	2.2	14
	5	8.5	1.5	5.5	0.4	2
	6	19.6	12.6	45.9	3.0	19
西山貯水池底質 ・深度445~425cm層に“黒い雨”の痕跡が記録されている	7	128 ^{e)}	128 ^{e)}	524 ^{f)}	54 ^{g)}	54 ^{g)}

a) : 2001年に採取した時の値。

b) : 減衰補正した1954年から2001年までのグローバルフォールアウト沈着量は、2.78kBq/m²。

c) : 1945年に被曝した時の値。

d) : 57年間で全沈着量の84% $\{(2.78-0.455)/2.78 = 0.836\}$ が土壌から流出したと仮定した。

e) : 2006年に採取した時の値。

f) : ¹³⁷Cs濃度がピークを示した1946年の堆積層の値。

g) : 1944~1950年の堆積層に蓄積していた¹³⁷Csの積算沈着量。

の影響を受けていない地域（被曝時の風向きを考慮して、主に県西部から2001年に採取した）の地点A～Eの5種の土壤中の ^{137}Cs 濃度とその平均値を示した。この値は、採取時点で土壤中に残存していた、米ソの大気圏内核実験に由来するグローバル・フォールアウト ^{137}Cs 濃度である。長崎県下の過去のグローバル・フォールアウトによる ^{137}Cs 沈着量は分からないので、1954年以降から継続して測定されている放医研のデータを使用して沈着量を推定した¹⁸⁾。その2001年までの全沈着量は $6.73\text{kBq}/\text{m}^2$ であり、各年度の沈着量を減衰補正して、現在量に換算すると $2.78\text{kBq}/\text{m}^2$ となる。土壤中の平均濃度から計算される、長崎地方のグローバル・フォールアウト ^{137}Cs 沈着量の現存量は $0.455\text{kBq}/\text{m}^2$ となり、1954年から2001年の間に沈着したグローバル・フォールアウト ^{137}Cs の83.4%が土壤から流出したことになる。一方、長崎原爆の“黒い雨”が降った長崎市西山貯水池周辺の土壤採取地点を図1に示した。地点1と1'は同じ地点であり、中根（2000年）の論文¹⁷⁾で“黒い雨”が降ったと特定され、最も高線量を示した場所である。地理的に隣接する地点1～6は“黒い雨”によ

る放射能汚染の影響を受けていたと考えられる。これらの地点の土壤は、“黒い雨”とグローバル・フォールアウトによる ^{137}Cs の汚染を受けている。そこで表2に示したように、検出された ^{137}Cs 濃度からグローバル・フォールアウト濃度を差し引いた値が“黒い雨”に由来する ^{137}Cs であると考えた。1945年に減衰補正して沈着量を計算し、グローバル・フォールアウトの場合と同様に83.6%が既に土壤から流出したと仮定して、“黒い雨”が降下した時の ^{137}Cs 沈着量を試算した。最も高濃度に“黒い雨”が沈着した地点1の ^{137}Cs 沈着量は $104\sim 118\text{kBq}/\text{m}^2$ となった。西山貯水池周辺の他の地点は、地点1に比べて沈着量は極めて低く、“黒い雨”は狭い地域に降ったことが示唆される。また、地点7は地点1の下流に当たる西山貯水池の底質コア採取地点である。この底質コアでは、深度425～442 cmの堆積層で極めてシャープな ^{137}Cs と $^{239+240}\text{Pu}$ のピークが見出され、そのプルトニウム同位体比から、このピークは、長崎原爆起源のこれら核種が堆積したものと判断された¹⁰⁾。この原爆堆積層の ^{137}Cs 沈着量は $54\text{kBq}/\text{m}^2$ であり、定量的な評価は難しいが、“黒い雨”として地表に沈着した ^{137}Cs の多くが、比較的短期間の内に雨水に流されて西山貯水池に流入し、その底質に固定、保持されたと考えることができる。

福島第一原発事故後に福島県と首都圏で著者が測定した土壤中の放射性セシウム濃度を表3に示した。福島県下だけでなく首都圏においても長崎原爆の“黒い雨”と同程度かそれ以上の ^{137}Cs 沈着量を示す地点がある。“黒い雨”には ^{137}Cs 以外の核分裂生成物や誘導放射性核種も含まれていたので、放射能強度や被曝線量を直接比較することはできないが、首都圏が長崎原爆と同程度の放射能汚染を受けていた可能性が



図1 土壤試料（地点1～6）と底質コア試料（地点7）の採取地点

表3 福島第一原発事故による福島県及び首都圏の土壤中の放射性セシウム濃度と沈着量

採取地点 (深さ0~1cmから採取)	採取日	濃度 (Bq/kg)			沈着量 ^{b)} (kBq/m ²)			
		¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	Total Cs	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	Total Cs	
福島県	福島市	2011.03.19	14,000	14,200	28,200	182	185	367
	(同一地点)	2011.03.26	13,200	13,700	26,900	172	178	350
	伊達市 ^{c)}	2013.03.20 ^{a)}	48,900	96,000	145,000	1,271	2,496	3,770
	皇居外苑	2011.04.10	956	961	1,920	12	12	25
	(同一地点)	2013.05.02 ^{a)}	171	379	550	4	10	14
東京都	中央区	2011.04.10	575	579	1,150	7	8	15
	千代田区	2011.06.02	1,660	1,760	3,420	22	23	44
	港区	2011.06.02	1,150	1,220	2,370	15	16	31
	江東区1	2011.04.15	1,620	1,610	3,230	21	21	42
	江東区2	2011.04.27	3,420	3,590	7,010	44	47	91
	葛飾区	2011.05.19	3,090	3,230	6,320	40	42	82
	杉並区	2011.05.19	407	440	847	5	6	11
千葉県	柏市1	2011.05.19	4,970	5,310	10,300	65	69	134
	柏市2	2011.06.11	16,100	17,600	33,700	209	229	438
	柏市3	2011.06.11 ^{a)}	480	594	1,070	12	15	28
埼玉県	朝霞市	2011.04.10	236	252	488	3	3	6
	東松山市	2011.04.28	190	207	397	2	3	5

a) : 採取深さ0~2cm.

b) : 土壌の密度を1.3g/cm³と仮定して計算した値(文科省の方法).

c) : 現在も住民が居住している民家の庭から採取した.

あることを指摘できる.

まとめ

福島第一原発事故は、発生から3年以上が経過したが、原子炉自身の事故の収束には程遠い。環境放射能汚染についても、コメの放射性セシウム汚染については抑制の目途がついたものの、他の作物や魚類(特に淡水魚)の放射能汚染は楽観を許さない状況にある。森林に沈着した放射性セシウムの今後の動きにも注意しなければならない。各地で行われている除染作業も期待通りの成果を上げることができていないのが実情であろう。環境放射能汚染を起こしてしまうと、その修復には多大な努力と経済的負担が必要となる。広島・長崎の被爆から福島第一原発事故まで67年が経過し、その間には

様々な放射能汚染事故を経験してきた。福島第一原発事故ではその経験を有効に生かすことができたのか、もう一度、振り返って過去を見直すことも必要であろうと考えている。

謝辞：首都圏、福島県で採取した土壌試料の放射能測定は、著者の研究室の院生石田真展君、学部卒研究生の協力を得ました。本研究は、下記の科学研究費補助金によって実施した。平成19~20年度基盤研究B(課題番号19310013)、平成24~28年度基盤研究B(課題番号24310014)。

参考文献

- 1) Tondel, M., Hjalmarsson, P., Hardell, L., Carlsson, G., and Axelson, O.: Increase of

- regional total cancer incidence in north Sweden due to the Chernobyl accident?, *J. Epidem. Comm. Health*, **54**, 1011-1016, 2004.
- 2) Tondel, M., Lindgrem, P., Hjalmarsson, P., Hardell, L., and Persson, B.: Increased incidence of Malignancies in Sweden after the Chernobyl accident – A promoting Effect?, *Amer. J. Indus. Med.*, **49**, 159-168, 2006.
 - 3) Busby, C.: The health outcome of the Fukushima catastrophe – Initial analysis from risk model of the European Committee on Radiation Risk, ECCR, *Green Audit*, Aberystwyth UK, 30th March, 2011.
 - 4) 最近の甲状腺検査を巡る報道について, 環境省総合環境政策局, 平成 26 年 3 月, http://www.env.go.jp/chemi/rhm/hodo_1403-1.html
 - 5) ふくしま国際医療科学センター, 放射線医学県民健康管理センター HP, <http://fukushima-mimamori.jp/>
 - 6) Environmental consequences of the Chernobyl accident and their remediation: Twenty years of experience, *Radiol. Assess. Rep. Ser.*, IAEA (2006).
 - 7) 全量全袋検査の検査結果, 福島県 HP, <http://www.fukushima.lg.jp/sec/36035b/zenryoizenhukurokensa-kensakekka.html#1>
 - 8) Saito-Kokubu, Y., Yasuda, K., Magara, M., Miyamoto, Y., Sakurai, S., Usuda, S., Yamazaki, H., and Yoshikawa, S.: Geographical distribution of plutonium derived from the atomic bomb in the eastern area of Nagasaki, *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, **273**, 183-186 (2007).
 - 9) Saito-Kokubu, Y., Esaka, F., Yasuda, K., Magara, M., Miyamoto, Y., Sakurai, S., Usuda, S., Yamazaki, H., Yoshikawa, S., and Nagaoka, S.: Plutonium isotopes derived from Nagasaki atomic bomb in the sediment of Nishiyama reservoir at Nagasaki, Japan, *Appl. Radiat. Isotop.*, **65**, 465-468 (2007).
 - 10) Saito-Kokubu, Y., Yasuda, K., Magara, M., Miyamoto, Y., Sakurai, S., Usuda, S., Yamazaki, H., Yoshikawa, S., Nagaoka, S., and Mitamura, M.: Depositional records of plutonium and ¹³⁷Cs released from Nagasaki atomic bomb in sediment of Nishiyama reservoir at Nagasaki, *J. Environ. Radioact.*, **99**, 211-217 (2008).
 - 11) Kaiser, J.: Radiation risks outlined by bombs, weapons work, and accidents, *Science, News & Analysis*, 331, 1504-1505 (2011).
 - 12) Stohl, A., Seibert, P., Wotawa, G., Arnold, D., Burkhardt, J. F., Eckhardt, S., Tapia, C., Vargas, A., and Yasunari, T. J.: Xe-133 and caesium-137 releases into the atmosphere from the Fukushima Dai-ichi nuclear power plant: determination of the source term, atmospheric dispersion, and deposition, *Atms. Chem. Phys.*, **12**, 2313-2343 (2012).
 - 13) Morino, T., Ohara, T., Watanabe, M., Hayashi, S., and M. Nishizawa, M.: Episode analysis of deposition of radiocesium from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident, *Environ. Sci. Tech.*, **47**,

- 2341-2322 (2013).
- 14) 東京電力株式会社福島第一原子力発電所及び広島に投下された原子爆弾から放出された放射性物質に関する試算値について, 原子力安全・保安院, News Release (2011年8月26日).
 - 15) 広島原爆“黒い雨”にともなう放射性降下物に関する研究の現状, 広島“黒い雨”放射能研究会 (2010年5月).
 - 16) 馬原保典, 工藤章: 長崎原爆によるPuフォールアウトの環境中での分布と挙動
長崎でのローカル・フォールアウト調査とアガシ・アイス・キャップでのグローバル・フォールアウト調査, *KUR Report (KURRI-KR)*, **114**, 169-183 (2005).
 - 17) 中根良平: 長崎原爆被爆調査—ネーヤ電位計による γ 線計測—, *RADIOISOTOPES*, **49**, 376-384 (2000).
 - 18) Radioactivity Survey Data in Japan, to the current from Number 1(1963), NIRS, Chiba, Japan.