# 特 集 放射性物質と放射線 ―その基礎から除染まで-

放射性物質の陸域への影響

Impact on Terrestrial Region of Radioactive Substances

1. まえがき

2011年3月12日から22日(日本標準時)にかけて福島第 一原子力発電所(37.4214N,141.0336E)から飛散した放 射性物質の陸域への影響を説明する.放射性物質は放射線 と担体物質の物理,化学的性質を有する.同物質の拡散要 因は気象的要因と地形である.それらは複雑に絡み合い現 在の放射線環境を形成した.総説<sup>1)</sup>がある.

放射線には三種類 ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ) があるが,長期間か つ長距離に影響を与えるのは $\gamma$ 線である.  $\gamma$ 線は波長に相 当するエネルギー (単位 [eV])を持ち,その大きさによ り生体を損傷する度合い (単位 [Sv/h])が異なる.放射 性物質担体中の放射性核種の濃度単位は大気では [Bq/ m<sup>3</sup>],固体試料では [Bq/kg],液体試料では [Bq/L],表 面的汚染物では [Bq/m<sup>2</sup>] である.分母が担体の単位であ る.担体の分子数は10<sup>23</sup>のオーダである一方,崩壊する核 の単位 [Bq] は1秒当たりの核数であり比率は1/10<sup>23</sup>であ る.10<sup>6</sup> [Bq/kg] の試料は多量の放射性核を含むが,担 体の分子数と比較すると1/10<sup>17</sup>である.ゆえに放射性核の 濃度勾配が原因で拡散は起こらず担体の濃度が拡散を支配 する.

日本では自然の放射線源から0.05~0.1 [μSv/h] 程度 の外部被ばくを受けていた<sup>2)</sup>,現在は地域によりかなり異 なる.元の値からの差分が原子力規制委員会から放射線モ ニタリング情報<sup>3)</sup>として公開されている.

#### 2. 陸域の放射性物質の現況

## 2.1 飛散核種

2011年3月11日現在の原子炉内の核種と量が日本原子 力研究開発機構によりシミュレーションされ公表されて いる<sup>4)</sup>.原子力保安院の資料<sup>5)</sup>もある.半減期が20時間 以上,かつ飛散量が大きく環境に与える影響の大きい核

```
*筑波大学アイソトープ環境動態研究センター助教
E-mail:ywakazki@gmail.com
```

\*\*\*筑波大学アイソトープ環境動態研究センター研究員 E-mail:aoyama.tomoo@gmail.com

〒305-0006 茨城県つくば市天王台1-1-1

若月泰孝\*・青山智夫\*\* Yasutaka Wakazuki Tomoo Aoyama

種を**表**1に示す.これらの核が気体や粉塵(以下SPM) の一部に含まれて大気中を拡散した.SPMはSuspended Particulate Matterの略で太古から自然界に存在している. SPMを含む大気塊の流れをプルーム(Plume)という.自 然にあるSPMの粒子径はおおむね10 $\mu$ m以下で,最大分布 径は4 $\mu$ mと言われている.原発由来の放射性SPMの粒径 は0.5~2 $\mu$ mと考えられている<sup>6)</sup>.PM2.5粒子に近い.放 射性の核はSPM内部では塩(えん)と考えられていたが, 最近水に不溶のガラス固溶体も発見された<sup>7)</sup>.そのような 微粒子は吸引すると肺の深部に達し体外に排出されにくい.

表1 飛散放射性核の量と物性

核名称	記号	半減期	飛散量*	形態**
ヨウ素131	<sup>131</sup> I	8.03d	1	G/SPM
ヨウ素133	<sup>133</sup> I	20.8h	$0.26^{\Box}$	G/SPM
セシウム134	<sup>134</sup> Cs	2.07y	0.11	SPM
セシウム137	<sup>137</sup> Cs	30.1y	0.09	SPM
テルル132	<sup>132</sup> Te	78.2h	0.55	SPM
ストロンチウム90	<sup>90</sup> Sr	28.9y	$0.001^{ riangle}$	SPM

\*)<sup>131</sup>Iの量1.60×10<sup>17</sup> [Bq] を1とした比率,2014年1月 1日の残存核種は<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csで,比率は0.044,0.093である。 \*\*)Gは気体を表す.G/SPMの比率は国立環境研究所によ れば8:2である.

□)<sup>131</sup>I + <sup>132</sup>I + <sup>133</sup>I + <sup>135</sup>Iでは1.28である.<sup>135</sup>Iは多くなく娘核 種の<sup>135</sup>Cs汚染説の信頼性は低い.

<sup>△</sup>) <sup>89</sup>Sr(50.5d)を含めると0.013である. <sup>134</sup>Cs + <sup>137</sup>Csの 1/15である.

3 号炉はMOX (Mixed OXide) 燃料を使用している. プルトニウム (Pu) の飛散量は<sup>238~241</sup>Pu合計で<sup>131</sup>Iの8×10<sup>-6</sup> である.最大量の241Puの半減期は14.4yである.

水素の放射性同位体トリチウム(T)は18keVのβ線を 放射し半減期12.3yである.放射線のエネルギーは<sup>137</sup>Csの 667keVに比ベ小さく,透過力の小さいβ線でほぼ外部被 ばくを考えなくてよい.自然界にも数[mBq/m<sup>3</sup>]程度の Tが存在する.生物体の中では水の一種(HTO)として存 在し,濃縮されない.分布は原発汚染水の中に約4,000[Bq/ L]含まれているとされる.2011年3月中の福島市の大気 中の水には41 [mBq/m<sup>3</sup>] のTが含まれていた<sup>8)</sup>.このT 量に不安を感じるときは、人体(約70%が水)も自然界に 存在する放射性同位体(<sup>40</sup>K)を含み、約60 [Bq/kg]の 放射性であることを考慮すること.

キセノン133 ( $^{133}$ Xe) は量としては $^{131}$ Iの69倍放出されて いる $^{5)}$ . 測定はComprehensive nuclear Test-Ban-Treaty (CTBT) 高崎放射性核種観測所 (36.3023N, 139.0748E) で行っているがy線エネルギーが81keV $^{9}$ と低く,大気 中の到達半減距離が $9 m^{10}$ であり,かつ半減期5.25dの化 学的に不活性なガスで沈着しないのでTとともに**表1**の核 種に比べて環境に与える影響が少ないと判断する.

## 2.2 陸域分布

環境に重大な影響を与える<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの陸面分布は 文部科学省<sup>11)</sup>と米国核安全保障局(National Nuclear Security Administration, NNSA)<sup>12)</sup>のデータと地図が公表 されている.航空写真のような詳細沈着量を図1に示す.



 図1 NNSAのRAWデータから作成した2011年6月30日 換算の福島県<sup>134</sup>Cs+<sup>137</sup>Cs沈着量

明るく表示された場所が沈着量の多い所である. A, B 領域ではスケールが違う. B領域の最大がA領域の最小で ある. 両領域の境界は10<sup>6</sup> [Bq/m<sup>2</sup>] である. A領域の最大 沈着地点は {37.4846N, 140.8925E}, 2.44×10<sup>7</sup> [Bq/m<sup>2</sup>] である. B領域の最小沈着量は1.0×10<sup>4</sup> [Bq/m<sup>2</sup>] である. 2014年1月1日現在では両領域とも沈着量が当初の0.70以 下に減少している. 他県にはA領域は無い. 福島市に放射性プルームが到達した時刻は3月15日16: 00,最大空間線量率24.24 [ $\mu$ Sv/h]を記録した時刻は同 日18:40である.郡山市の最大値は8.26 [ $\mu$ Sv/h],時刻 は14:05である.それ以前の観測は13:00で0.06 [ $\mu$ Sv/h] である.白河市の到達時は13:15である.これらの観測か ら中通り地方を放射性プルームが南北方向へ流れたかのよ うに思える.しかし大気シミュレーションを行うと,放射 性プルームは二種あり,第1の流れが中通り地方を南北方 向へ流れ郡山市に達し,その後,高濃度の放射性物質を含 む第2の流れが原発から福島県を西北へ流れ,浪江町津島 地区を通り,山地の擾乱を受け一部が福島市に到達したこ とが分かる<sup>1)</sup>.その痕跡が図1である.放射線量は,沈着 した放射性物質の自然崩壊と降雨等の気象効果により刻々 変化している.<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csの2011年6月30日の分布のその 後の変化を,以下調べる.

放射性物質は三種類の放射線を出すが、各測定点では到 達半減距離70m(エネルギー300~800keV)の γ 線の流束 (flux)量を計測している. α, β 線の到達距離は γ 線と 比べると短く普通は計測しない.単位は模擬人体に与える 物理的仕事量に換算され [µSv/h]で示される.これが 空間線量率値である.時間の単位は [h]である.ゆえに 現在の空間線量率値を24×365倍すると、およそ1年間の 積算「外部」被ばく量になる.環境基準等の数値と比較が 可能である.正確な量は核種の崩壊を考慮する必要がある. 2014年1月1日現在の空間線量値から1年後の積算外部被 ばく量を見積もると**表2**を得る.

表 2	1時間あたりの空間線量値から1年後の積
	算線量値を見積もる表

2014.1.1の線量値	積算線量值	
0.05 [ $\mu$ Sv/h]	0.417 [mSv]	
0.10	0.834	
0.15	1.25	
0.20	1.67	
0.25	2.08	
0.3	2.50	
0.5	4.17	
0.6	5.00	
0.8	6.67	
1.0	8.34	

事故当時の放射線核種の崩壊速度はこの表とは違い 適用できない.

## 2.3 福島市,郡山市の空間線量率の変化

福島市(県北保健福祉事務所; 37.7640N, 140.4678E;

地上1m)と郡山市(郡山合同庁舎; 37.3962N, 140.3772E; 地上1m)の空間線量率の時間変化を三期間に分けて示す.



図2 2011年3月15日0時から4月3日23時まで経過時間
 [h] で表示した福島市と郡山市の空間線量率

横軸の数字は3月15日0時からの経過時間[h]である. 目盛の間隔は2日である.縦軸は空間線量率値[μSv/h] である.

事故直後の空間線量率の急激な低下は短寿命の放射性核 種の崩壊を表す.放射性プルームが到着したあと48h以内 の外出は望ましくないように思われる.図2の期間480h, 20日間の福島市の外部被ばく量は2.98 [mSv] である.郡 山市では232hで測定場所を変えており,線量率に段差が 出ている(図の矢印)ので積算するのは適切でなく値は示 さないが福島市よりは小さい.

![](_page_2_Figure_6.jpeg)

で表示した福島市と郡山市の空間線量率 [µSv/h]

福島市と郡山市の図3の期間4,320h,約6か月の外部被 ばく量は5.69,5.28 [mSv] である.両市の線量値の曲線 が6月23日頃から離れていくのは地域固有の気象効果である.

図4の期間1年2ヶ月(19,008h)の福島市と郡山市の 外部被ばく量は11.5,8.85 [mSv]である.福島市では経 過時間2012年6月15日(11,000h)頃から12月15日(15,400h) まで線量率が増大している.郡山市でも2012年8月11日 (12,370h)から2013年3月25日(17,800h)の期間は線量率 が低下しない.気象効果により放射性物質が流入している と考えざるを得ない.この他,除染(図4の矢印)により

![](_page_2_Figure_10.jpeg)

過時間 [h] で表示した福島市と郡山市の空間線量 率 [µSv/h]

両市で線量値が急降下している.2013年11月30日現在の福 島と郡山市の空間線量率は約0.30,0.17 [µSv/h]である. 2011年3月15日から2013年11月30日までの福島市の外部被 ばく量は計20.2 [mSv]である.

#### 2.4 東京の空間線量率の変化

東京新宿(都健康安全研究センター;35.7061N, 139.6987E;地上22m)の空間線量率<sup>13)</sup>の時間変化を期間 に分けて示す.新宿の検出器が地上22mに設置されている ことについて,同研究センターは地上1mの線量値とほと んど同じ値になることを実験している.

![](_page_2_Figure_15.jpeg)

図5のピークP1,2,3の時刻は3月15日10:00, 19:00,16日5:00である.放射性プルームの福島県白河 市到達が15日13:15であるから,東京に到達した放射性プ ルームは福島県に拡散したものとは別のプルームである. 図5と図2の縦軸の数値(空間線量率)を比較すると状況 が相当に異なることが分かる.図5の期間480hの外部被 ばく量は0.047 [mSv] である.現在の東京の放射能汚染 を過大に報じるむきがあるが事実ではない.図5の縦軸の 数値と参考文献<sup>14)</sup>の諸地域の数値と比較すること.空間 線量率曲線の形がA,Bで違う点,特にプルーム通過後に 注目されたい. 放射性プルームと雨の相互作用がもたらし たものである.

![](_page_3_Figure_2.jpeg)

図6の期間,4,320hの外部被ばく量は0.27 [mSv] である. 線量率の先鋭なピークCは降雨による.このようなピーク は原発事故の放射性物質がほとんど飛散しなかった西日本 の観測点でも観測される.

2011年10月1日以降,空間線量率は極めてゆっくり減少 して2013年11月30日現在0.035 [µSv/h] である. 放射性 物質の移動等の気象効果は見いだせない. 放射性物質中の 核種について東京都産業労働局が世田谷区深沢(35.623N, 139.662E)<sup>15)</sup> で地上1m高の大気を吸引して測定している. **図6**の経過時間3,781h(8月19日13時)の鋭いピークの空 間線量率は0.0826 [µSv/h] である. そのとき1m高の 大気中には<sup>134</sup>Csが0.1 [mBq/m<sup>3</sup>] 存在し,それ以外の<sup>131</sup>I, <sup>137</sup>Csは計器の検出限界以下である. **図6**の鋭いピークに神 経質になる必要はない.

図5の経過時間0~96hの部分の空間線量率と空中の<sup>131</sup>I と<sup>137</sup>Csの濃度[Bq/m<sup>3</sup>]の1/2乗値と空間線量率[µSv/h] ×30を図7,8に示す.

図7の期間に世田谷アメダス(35.6267N, 139.62E)で は降雨は無かった.線量率のback ground線はほとんど上 昇していない,すなわち放射性物質が地上に沈着していな い.放射性物質を含む大気塊が3回飛来しているが,放 射性ヨウ素とセシウムの比率はそれぞれ異なる.原発か ら235km移動した間に核種の異なる大気塊に分離したと考 えられる.世田谷の3月15日0:00~7:12の大気中の <sup>89</sup>Sr,<sup>90</sup>Sr濃度は20,2.2 [mBq/m<sup>3</sup>] であり,最大濃度は 10:00~11:00の120,11 [mBq/m<sup>3</sup>] である.放射性セ シウム濃度の1/89である.

線量率のback ground線が経過時間120hと192hでは 3 [µSv/h] 上昇している. 図7の期間にその現象は起 こらなかった.両者の相違は降雨の有無である. ピーク P1のとき,大気中には放射性ヨウ素が0.67 [Bq/m<sup>3</sup>]存在 している.その量は図7の経過時間12hのピーク時の1/35

![](_page_3_Figure_8.jpeg)

×30値 横軸は3月15日0時からの経過時間[h]である.縦軸 は現象により単位が異なるが数値を共用する.放射性物質 の濃度測定値は約2hの区間データである.空間線量率も 濃度測定の区間に換算しているので曲線の形状が図5とは 異なる.線量率値を30倍したのは濃度値変化と対照するた めである.1/2乗したのは低線量部分を見るためである.

1/2乗値と新宿の空間線量率(黒線Dose) [µSv/h]

![](_page_3_Figure_10.jpeg)

である.しかし沈着量は逆で,線量率の変化に顕著に顕れている.<sup>131</sup>Iの半減距離は56mである.ゆえに上空100m以上の大気塊中の放射性ヨウ素は地上では検出しにくいことになる,これは雨粒が相当上空の放射性ヨウ素を付着させて降下したことを示す.

P1通過後,放射性物質を3 [Bq/m<sup>3</sup>] 以上含むP2,P3 ピークが通過したが降雨が無いために線量率には変化がほ とんど無い.放射性物質が地上に沈着した後の大気中の放 射性物質は y 線モニタリングでは検出しにくいことを示し ている.2012~2013年,関東地方の大気中の放射性物質量 で目立つ変化は以下である.

2013年4月5日にCTBT高崎放射性核種観測所で0.165, 0.305 [mBq/m<sup>3</sup>] の<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Csを検出し, 4月8~9日に は<sup>133</sup>Xeを2.08, 3.05 [mBq/m<sup>3</sup>] 検出した. 4月23日, CTBTの暫定技術事務局は2月12日の北朝鮮の核実験に起因する可能性を示唆した.2011年4月1日以降,東京の大気中に図8レベルの放射性物質が飛来した事実を確認できない.

## 3. まとめ

福島第一原子力発電所から飛散した放射性物質が陸域の y 線放射線量に及ぼした影響を福島県と東京都で概説し た.他の地域の方は原子力規制委員会<sup>16)</sup>や農林水産省<sup>17)</sup> の最近の県別汚染図と現在の空間線量率<sup>3)</sup>から現況を把 握し、今後の外部被ばく予測量を表2から見積もっていた だきたい、その見積値+2.4 [mSv](自然の放射線分)が 年間外部被ばく量である、外部被ばく量の人体に与える影 響は報告書<sup>18)</sup>から判断されたい、諸外国の空間線量率<sup>19)</sup> も公表されているので参考にすると状況が把握できる、

2013年12月末現在,残留している放射性の核のほとんど は<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csで,土壌等のケイ素原子と結合しつつある. そうなると降水等では容易に移動せず,作物等への移行係 数も小さくなる.汚染土壌から作物への放射性物質の移行 については農業環境技術研究所のデータベース<sup>20)</sup>を参考 にされたい.今回の事故では陸域に拡散した蓄積性の放射 性ストロンチウム量が同セシウムの10<sup>-3~-2</sup>(文部科学省 の沈着量測定では-3乗<sup>21)</sup>)と小さいことが特徴である.

## 参考文献

- Geochemical Research Department and Atmospheric Environment and Applied Meteorology Research Department, Meteorological Research Institute; Artificial Radionuclides in the Environment 2011, http://www. mri-jma.go.jp/Dep/ge/ge\_report/2011Artifi\_Radio\_ report/2011Artifi\_Radio\_report.pdf
- 2) 今井登,日本地質学会;日本の自然放射線量, http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html
- 原子力規制委員会;放射線モニタリング情報 http://radioactivity.nsr.go.jp/map/ja/area.html
- 4)西原健司,岩元大樹,須山賢也;福島第一原子力発電所の燃料組成評価,JAEA-Data/Code 2012-018, http://jolissrch-inter.tokai-sc.jaea.go.jp/pdfdata/JAEA-Data-Code-2012-018,pdf
- 5)経済産業省 原子力安全・保安院 原子力安全広報課 平成23年 6月6日(10月20日付訂正);東京電力株式会社福島第一原

子力発電所の事故に係る1号機,2号機及び3号機の炉心 の状態に関する評価について,http://www.meti.go.jp/pre ss/2011/06/20110606008/20110606008.html

- 6) B. Sportisse; A review of parameterizations for modeling dry deposition and scavenging of radionuclides, Atmospheric Environment, 41, pp.2683-2698, 2007.
- 7) Kouji Adachi, Mizuo Kajino, Yuji Zaizen, Yasuhito Igarashi; Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident, Scientific Reports 3, Article number: 2554, doi:10.1038/srep02554, 2013.8.30.
- 福島県;原子力発電所の環境放射能測定結果平成23年3月 11日~3月31日(東日本大震災発生以降)http://www.cms. pref.fukushima.jp/download/1/post-oshirase.pdf
- 9) National Nuclear Data Center (NNDC), Brookhaven National Laboratory, USA; Chart of Nuclides, http://www. nndc.bnl.gov/
- 10) IAEA;放射線緊急事態時の評価および対応のための一般的 手順,www.nirs.go.jp/hibaku/kenkyu/te\_1162\_jp.pdf
- 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(平成23年5月5日~平成25年3月1日 公表); http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/258/list-1.html
- 12) An official web site of the USA government; US DOE/ NNSA Response to 2011 Fukushima Incident, https:// explore. data.gov/Geography-and-Environment/US-DOE-NNSA-Response-to-2011-Fukushima-Incident-Ra/prrn-6s35.
- 13) 東京都健康安全研究センター,環境放射線測定結果; http://monitoring.tokyo-eiken.go.jp/
- 14) Dose rate in Korea, IERNet (Integrated Environmental Radiation monitoring Network); http://iernet.kins.re.kr/
- 15) 東京都產業労働局; http://www.sangyo-rodo.metro.tokyo. jp/whats-new/measurement-kako.html
- 原子力規制委員会;避難指示区域における航空機モニタリン グの測定結果について平成25年5月13日, http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/362/list-1.html
- 17)農林水産省,農林水産技術会議;農地土壌放射性物質濃度分 布図,農地土壌放射性物質濃度分布図(各県別) http://www.s.affrc.go.jp/docs/map/240323.htm
- 18) 小林純也;スペシャルセッション放射線,その人体影響と防護,京都大学附置研究所センターシンポジウム (2012),
  6: p.79-86, http://hdl.handle.net/2433/179442
- 19) Japan National Tourism Organization, Dose of Radiation in the World (Weekly Update), http://www.jnto.go.jp/eq/eng/04\_recovery.htm#city
- 10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000)
   10.1000 (19.1000
- 21) 文部科学省 平成24年 9 月12日報道発表;
   http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/contents/7000/6213/24/
   6213\_20120912\_rev20130701.pdf