放地研特別寄稿シリーズ

SCS-0119

宮城県における福島第一原子力発電所事故による 放射能及び放射線影響

石川陽一、高群富貴、木村昭裕、佐藤健一、榧野光永

宮城県環境放射線監視センター

(旧・宮城県原子力センター)



放射缘地学研究所、名古屋

2017

宮城県における福島第一原子力発電所事故による

放射能及び放射線影響

石川陽一、高群富貴、木村昭裕、佐藤健一、榧野光永

宮城県環境放射線監視センター

1 はじめに

宮城県は福島県の北側に隣接しており、2011年の東京電力福島第一原子力発電所(FDNPP)事故によって 環境の放射能及び放射線はかなりの影響を受けた。宮城県は東日本大震災に伴う大津波によって甚大な被 害を受け、東北電力女川原子力発電所周辺モニタリングのために有していた放射能・放射線測定器のほと んどを失ったが[1]、関係機関の協力も得ながら同事故直後から様々な分野にわたるモニタリング等を行っ てきた[2]。同事故関連のデータについてはこれまでにホームページ[3]や報道機関などを通じて公表して きたものの、解析までは行われていなかった。隣接の福島県における同事故によって、宮城県は過去の国 外の核実験やチェルノブイリ事故をはるかに上回る環境影響を受けたことから、これまでのデータを解析 し、今後に役立てるためにまとめておくこととした。

本報告では、同事故の前後の宮城県内の空間ガンマ線線量率、積算線量及び環境試料中の放射能濃度を 比較し、空間線量と環境放射能に与える同事故の影響を評価した。

2 方 法

データとしては、福島第一事故関連の調査結果[3]のほか、女川原子力発電所周辺モニタリング結果[4] も活用した。Fig.1 に線量測定及び環境試料の採取場所の配置を示す。1 - 27 の数字は線量測定地点を表 し、それぞれ1 - 6 はモニタリングカー(円筒形 3"×3"NaI(T1)検出器)またはサーベイメータ(円筒 形1"×1"NaI(T1)検出器)による移動測定場所、7 - 9 は固定式モニタリングポスト、10 - 16 はモニタ リングカー付属のNaI(T1)スペクトロメーター(円筒形 3"×3"検出器)による測定、17 - 23 は女川原子 力発電所周辺の固定式モニタリングステーション、24 - 27 は津波によって使用不能となったモニタリング ステーションを示す。また a - jのアルファベットは環境試料の採取地点を表す(試料の種類については 結果の項を参照)。環境試料の放射能測定は主に Ge 半導体検出器を用いた γ 線スペクトロメトリーによっ て行なった。

線量評価の際、固定地点において、同事故前の自然核種起因のバックグラウンド(BG)値が既知の TLD による積算線量の場合は、全線量から事故前の1年間(2009年4月・2010年3月)の平均値を差し引 くことによって事故影響の程度を評価した。BG値が未知の地点については、スペクトルデータがない場合 には BG値を一律に0.04 µ Sv/h と見なして全線量率から差し引くことにより[5]、また、NaI(T1)検出器の スペクトルデータがある場合には、湊[6]が開発した49行×49列応答行列を用いる解析プログラムで処理 することにより、自然核種と放射性セシウム起因分を弁別評価した。この解析プログラムにおいては検出 器に対する環境γ線入射方向を均等と仮定している。著者らの場合も含め、環境放射線モニタリングにお いては、円筒形検出器の軸方向から¹³⁷Csや²²⁶Ra等の標準線源によって線量率校正されるのが一般的であ る[7]。しかしながら、湊によれば[8,9]、低エネルギー散乱線成分が多くかつ主に水平に近い方向から均 等入射する環境γ線の場合、そのような校正方法に比べると1.34倍程度低めの値を示す。そこで、本稿に おいては、整合性をとるためスペクトル解析によって得た線量率に1.34を乗じ、一般的な方法によるもの に近い値に補正した。

3 結果及び考察

3.1 空間ガンマ線線量

Fig.2は、福島第一事故直後の2011年3月14日から仙台市及び宮城県南において移動式測定器(モニ



- Fig.1 Locations of air dose monitoring and sample collection sites in Miyagi Pref.
- 1 6 (ullet) : measuring points by mobile dosimeters
- 7 9 (O): monitoring posts
- 10 16 (O) : measuring points by the NaI (Tl) gamma-spectrometer
- 17 23 (▲, ■): monitoring stations in operation triangles; by the local government of Miyagi squares; by Tohoku Electric Power Co., Inc.
- 24 27 (×): lost monitoring stations by the tsunami caused by the earthquake at 11 Mar 2011
- a j (◆): environmental sample collection points for radioactivity monitoring

☆ Onagawa Nuclear Power Station

27

Samenoura Bay

5 km I

23

٩



Fig. 2 Comparison of daily air dose rates among several sites in Sendai (site 1) and in southern areas (sites $2 \cdot 6$) of Miyagi Pref. after the FDNPP accident.

タリングカーまたはサーベイメータ)で行なった空間線量率の測定結果[3]のうち、主な地点の初期の2 ヶ月間の値の変動を示す。最大値は3月16日に県南のsite2で観測され、1.6 µSv/hであった。3月15 日に福島第一事故起因の放射性プルームが宮城県に達し、かつ降水があったために放射性物質が地表に沈 着し、線量率が上昇したものである[10]。ただし、より県南のsite3と5においては、測定開始されたの は4月5日からのため初期の観測値は得られていない。

Fig.3は、Fig.2の地点のほか site 20-23の牡鹿半島周辺において、2011年1月以降翌年3月までの期間、3ヶ月毎の積算線量を比較したものである(自然ガンマ線 BG 値差し引き済み)。これらの期間の合計は site 5 において最大値を示し、約1.1 mSv であった(ただし、事故があった最初の3ヶ月間のデータは抜けている)。

Fig. 4 は、円筒形 3"×3" NaI (T1)検出器によるスペクトルを解析して得た、site 1 (仙台)、site 7-9 の県南及び site 10-15 の石巻周辺における地上1 m 高さ (site 15 のみ地上約 2 m の車上) における空間 線量率と、その自然起因及び福島第一事故由来 ¹³⁴Cs+¹³⁷Cs 起因の分離評価結果を示す (ただし、Gy 単位)。 なお、同事故前の表層 (0-5 cm) 土壌中の核実験起因 ¹³⁷Cs 濃度は約数+ Bq/kg (乾燥土) 程度以下であり、 空間線量に占める ¹³⁷Cs 寄与は自然起因分に比べて無視できる程度に小さい。図に示すように、2015 年 8 月時点においても、県南の site 8 では放射性セシウム寄与がかなり多かった。Site 15 のデータは、事故 の約 1 年余り後の 2012 年 6 月 4 日に、モニタリングカーによって牡鹿半島 (石巻市) で測った値であるが、 セシウム寄与が多く、139 Gy/h の線量率のうち 97 Gy/h が放射性セシウム起因であった。その理由は、こ の付近が福島第一原発 1 号機の水素爆発に伴うプルームによる汚染の影響が大きく、かつ後述のように地 形的・環境的要因も付加されたためと考えられる[10]。



Fig. 3 Comparison of cumulative air dose, after subtraction of natural background, among typical sites in Miyagi Pref. after the FDNPP accident.
There are no data during Jan - Mar, 2011 for sites 3 and 5.
site 1 ; Sendai, sites 2 - 6 ; southern areas, sites 20 - 23 ; around Oshika Peninsula







Measurement height above the ground: site 15; 2 m (on the rooftop of the car) other sites; 1 m

スペクトル解析による成分別線量率評価例として、Fig.5からFig.8に、上記 site 15における 2012年 6月4日のデータ等を示す。Fig.5は測定風景の写真である。Fig.6は、モニタリングカー屋根上(地上高約2m)に取り付けた3" $\phi \times 3$ "NaI(T1)検出器によって600秒間測定を行った時の、元の0-3 MeV領域 線スペクトルを示す。福島第一原発事故起因の¹³⁴Cs と¹³⁷Csのy線ピークが明瞭に認められている。なお、 この地点は福島第一事故以前からの測定定点であるが、標高が約100mとやや高く(Fig.1)、かつ樹木の 生えた斜面そばであるため(Fig.5)、比較的同事故起因の放射性セシウムの付着・蓄積の影響が強かった ものと考えられる。 Fig.7 はそのスペクトルを湊の方法によってアンフォルディングして得た入射γ線全 線束と自然線束のスペクトル、また Fig.8 はそれから更に¹³⁴Cs と¹³⁷Cs 寄与を分離した 0-1 MeV 領域の詳 細線束スペクトルを示す。Fig.4 に示す自然線量率と¹³⁴Cs+¹³⁷Cs 線量率寄与は、このようにして求めた成分 別線量率に前述の補正係数(1.34)を乗じて、一般的な G(E) 関数法による線量率に近い値に換算したもので ある。



Fig.5 A photograph of the monitoring car, at site 15.



Fig.6 A gamma-ray spectrum of a 3" x 3" NaI (Tl)-detector, which is equipped on the roof top of the monitoring car about 2 m above the ground, observed at site 15 on June 4, 2012.



Fig.7 Total fluxes and natural components of incident gamma-rays, obtained by unfolding the original spectrum shown in Fig.6.

Upper: Total Lower: Natural



Fig.8 A detailed incident gamma-ray spectrum, showing total, radiocesium and natural fluxes (0 - 1 MeV).

Upper (gray bold line): Total Middle (straight dark line): ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs Lower (broken line): Natural

3.2 環境放射能

a)陸 域

仙台市における福島第一事故起因の¹³⁷Cs 降下量は、2011 年 3 月 1 日~8 月 8 日の期間で積算値約 13,000Bq/m²であった[11]。東日本大震災による施設被災のために⁹⁰Sr 降下量は実測されていないものの、 同時期の近隣県の¹³⁷Cs 及び⁹⁰Sr 量[12]から推定して、恐らく数 Bq/m²程度であると考えられた。Fig.9は、 1981 年~2014 年までの約 30 数年の¹³⁷Cs 月間降下量(約 0.03-0.04 Bq/m²の検出下限値以上の値)と指 標植物である松葉及びヨモギ葉の¹³⁷Cs 濃度の経時変動を示す。降下量の 2011 年分及び全期間の松葉のデ ータは東北電力による測定値である[4]。図に示すように、同事故後の松葉とヨモギ中の Cs-137 濃度は顕 著に上昇したが、その後数年の間に著しく減少した。¹³⁷Cs 降下量の値が同事故後すぐに減少しないのは周 辺からの再浮遊寄与のためと考えられる[13]。

宮城県では1981年から継続して県北西部(site a)と牡鹿半島(site 27付近)で土壌の表層試料(深度 0-5 cm)を採取し、放射能を測定している。前者の地点における福島第一事故前5年間の平均の¹³⁷Cs 濃度は約4 Bq/kg(乾燥重量当り)であったのに対し、事故後の 2011年11月には2桁程度高くなり、約 500 Bq/kg(乾燥重量当り)となった。Site a の土壌採取場所周辺において指標植物のヨモギ(葉)も継続 的に採取しているが、福島第一事故前5年間の¹³⁷Cs 濃度は 0.1 Bq/kg(生重量当り)以下であったのに対 し、事故後の 2011年11月には約38 Bq/kg(生重量当り)に上昇した。牡鹿半島においても同様の傾向で あった。

b)沿岸海域

Fig. 10 は、1981 年から 2014 年までの海水及び指標試料の海藻(褐藻類のアラメ)中の¹³⁷Cs と ⁹⁰Sr 濃度の経時変動を示す。いずれの試料においても、¹³⁷Cs 濃度は福島第一事故後には事故前に比べて数十倍上昇



Fig.9 Comparison between monthly ¹³⁷Cs deposition (●) and concentrations of ¹³⁷Cs in bio-indicator leaves (△; pine trees, ○; wormwoods) observed in Miyagi Pref. before and after the FDNPP accident.
 * ¹³⁷Cs data of deposition in 2011 and all data of pinetrees are by Tohoku-Electric Power Co.,Inc. [4]



 $\begin{array}{ll} \mbox{Fig.10} & \mbox{Comparison between ^{137}Cs and ^{90}Sr concentrations in coastal seawater (sites e,f) and brown algae (site g),$ *Eisenia byciclis* $, in Miyagi Pref. before and after the FDNPP accident. Straight and dotted lines show exponential fitting for ^{137}Cs in algae and seawater, respectively. Te means ecological half-life. \\ \end{array}$

し、その後は比較的速やかに減少した。⁹⁹Sr については同事故による顕著な値の上昇は観測されなかった。 およその傾向として、福島第一事故前の過去の核実験等起因(一部チェルノブイリ原発事故寄与も含む) の¹³⁷Cs は、これらの試料においては約20年程度(海藻24年、海水15年)の環境半減期で減衰していた。 一方、福島第一事故後の濃度はかなり速く約1年程度(各々約 0.8 年)の環境半減期で減少する傾向が見 られた。また、同図にデータは示していないものの、県北東部の地点(site b)及び牡鹿半島付近の地 点 (site e, f, i) において、海底土の¹³⁷Cs 濃度も 1981 年から継続的に測定している。事故後には事 故前に比べて値が約2桁程度上昇し、海水や海藻と同様に、約1年程度の環境半減期で減少した。海藻や 海底土中の¹³⁷Cs は海水からの取り込みや吸着によって濃縮されると考えられる[14,15]。福島第一事故後 のこれらの試料中の濃度が比較的速く減少した理由であるが、同事故起因の¹³⁷Cs は以前の核実験起因の ¹³⁷Cs とは異なり、地球規模で見れば環境への放出量及び汚染域が限定的であり、比較的速やかに周囲に拡 がり、周辺の低濃度海水と混合したためと考えられる[16,17]。事故前の宮城県海域について、及川ら[17] は海水や魚類等の¹³⁷Cs 濃度のみかけの半減期は物理学的半減期の 30 年より短いと述べており、著者らの 観測結果とも整合している。アラメはセシウム以外にプルトニウムなども濃縮する傾向があり[18]、環境 汚染の指標試料として有効であると考えられるが、海藻における海水からの取りこみメカニズムについて はまだ明確でないこと[14]、また、事故後の著者ら[19]の研究においてはアラメの個体内で¹³⁷Cs 濃度に分 布差が見られたことなどから、今後の研究の進展が待たれる。

4. まとめ

福島県の北隣に位置する宮城県は、2011年の福島第一原子力発電所(FDNPP)事故由来の放射性プルーム によって汚染を受けた。事故前後のガンマ線線量率、積算線量及び環境試料の放射能濃度を調べ、比較す ることによって事故影響を評価した。線量率または積算線量について、事故前のバックグラウンド(BG) 値が既知の場合は差し引きによって、また BG 値が未知の場合は49 行×49 列の応答行列を用いたスペクト ル解析で自然分と放射性セシウム寄与分を分離し、事故影響を評価した。仙台市における2011年3-8月 の約5ヶ月間の積算¹³⁷Cs降下量は、約13,000 Bq/m²であった。環境汚染の指標となる松葉、ヨモギ葉及び 海藻(アラメ)において、事故直後は事故前に比べて数十倍から数桁程度濃度が増加した。海水とアラメ 中の¹³⁷Cs濃度の環境半減期は、事故前と後とでそれぞれ約20年及び約1年程度であった。

謝 辞

東北電力株式会社の当時の御担当者の方々には、東日本大震災及び福島第一事故直後からの県南を主と した放射線モニタリングにおいて多大な御協力をいただきました。放射線地学研究所の湊 進博士には新 しい応答行列解析ソフトウェアを提供していただき、かつ貴重なご助言をいただきました。旧・宮城県原 子力センター並びに現・宮城県環境放射線監視センターの同僚諸氏には放射線・放射能測定において多く の尽力をいただきました。これらの関係各位に厚く感謝致します。

参考文献

- [1] 宮城県原子力センター年報,第28巻(2010),1-4,2012年.
- [2] 安藤孝志,石川陽一,宮城県原子力センター年報,第 29 巻 (2011), 3-24, 2013 年.
- [3] 宮城県ホームページ, 放射能情報サイトみやぎ. http://www.r-info-miyagi.jp/r-info/
- [4] 宫城県, 女川原子力発電所周辺環境放射能調査結果, 1981 年度分-2014 年度分.
- [5] 環境省,平成23年10月10日 災害廃棄物安全評価検討会・環境回復検討会資料,追加被曝線量年間 1ミリシーベルトの考え方,2011年.
- [6] 湊 進,環境γ線解析用 49×49 応答行列の紹介 (2015), 放射線地学研究所ホームページ http://www1.s3.starcat.ne.jp/reslnote/
- [7] 日本の環境放射能と放射線ホームページ,連続モニタによる環境 y 線測定法 No. 17, 1996 年.

http://www.kankyo-hoshano.go.jp/series/pdf_series_index.html

- [8] 放射線地学研究所ホームページ,旧号一覧,正面入射と等方入射(四方山話#291). (2017年1月現在は表題のみの記載につき,内容はホームページ管理者へ請求必要.)
- [9] 湊 進, 私信.
- [10] 鶴田治雄, 中島映至, 地球化学, 46, 99-111, 2012.
- [11] 宮城県原子力センター年報,第 29 巻 (2011),52-58,2013年.
- [12] 原子力規制委員会ホームページ,放射線モニタリング情報,定時降下物のモニタリング. http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/list/195/list-1.html
- [13] 永岡美佳,藤田博喜,中野政尚,渡辺 均,住谷秀一, Jpn. J. Health Phys., 48, 104-113, 2013.
- [14] H. Kawai, A. Kitamura, M. Mimura, T. Mimura, T. Tahara, D. Aida, K. Sato, H. Sasaki, J. Plant Res., 127, 23-42, 2014.
- [15] 神田穣太, エネルギー・資源, 35, 105-109, 2014.
- [16] 中野政尚, 日本原子力学会誌, 53(8), 559-563, 2011.
- [17] 及川 真司, 渡部 輝久, 高田 兵衛, 鈴木 千吉, 中原 元和, 御園生 淳, 分析化学, 62, 455-474, 2013.
- [18] 原子力環境整備センター,環境パラメータシリーズ 6,海洋生物への放射性物質の移行, pp. 15, 1996.
- [19] 阿部郁子,新井康史,石川陽一,安藤孝志,藤原秀一,宮城県原子力センター年報,第30巻(2012), 42-45, 2014年.

Radiological Impact in Miyagi Prefecture following the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant

Yoichi Ishikawa, Tomitaka Takamure, Ken-ichi Sato, Mitsunaga Kayano Miyagi Prefecture Environmental Radiation Monitoring Center

Miyagi Prefecture, located to the north of Fukushima Prefecture, has been contaminated with radioactive materials transported by the plumes from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant (FDNPP) accident, occurred on March, 2011. In the present study, gamma-ray air dose rates, cumulative air doses and radioactivity concentrations in environmental samples were compared before and after the accident, and then the extent of impact of the accident was evaluated. Radiocesium contribution to the air dose rate or cumulative air dose was evaluated by subtracting the natural background (BG) from each observation when feasible, or by analyzing the spectrum of a NaI (Tl) scintillator, using a response matrix of 49×49 developed by Minato. Cumulative ¹³⁷Cs fallout deposition during about five months from March 1 to August 8, 2011, observed in Sendai City was about 13,000 Bq/ m^2 , which is thought to be almost entirely due to the FDNPP accident. In pine tree needles, wormwoods and seaweeds collected as bio-indicators of radioactive pollution of the environment, the ¹³⁷Cs concentrations after the accident were elevated markedly, by about several ten to several orders of magnitude, compared to those before the accident. The ¹³⁷Cs concentrations of brown algae (*Eisenia byciclis*) and seawater after the accident decreased rapidly with ecological half-life of about 1 year or less, whereas the concentrations before the accident decreased slowly with half-life of about 20 years.