

瓦礫等による放射線源の評価手法を反映した 線量評価システムの高度化

Improvement of dose evaluation system that reflects the evaluation method of radiation sources such as debris

川崎 郁夫 (Ikuo Kawasaki) *¹ 高木 俊弥 (Toshiya Takaki) *¹
久米 恭 (Kyo Kume) *² 河瀬 宇宙 (Uchuu Kawase) *³

要約 東京電力(株)福島第一原子力発電所事故の反映として、原子力災害時に発電所構内で瓦礫等による放射線源が出現した際の被ばく線量を評価するための手法を検討した。(公財)若狭湾エネルギー研究センターとの共同研究により、日本原子力発電(株)が上空からドローンを用いて測定した放射線データを活用して、(公財)若狭湾エネルギー研究センターにおいて上空での線量分布を地上における線量分布にする換算式を作成した。INSSにおいて、線量評価システムに発電所上空で測定した放射線量を地上1 mでの線量に換算する機能および線量率マップ上への放射線源表示機能を線量評価システムに追加し、線量評価システムの高度化を図った。

キーワード 線量評価システム, 放射線源, ドローン, 放射線測定, 線量率マップ

Abstract In a reflection on the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station of Tokyo Electric Power Company, we examined a method for evaluating the exposure dose when a radiation source such as debris would result on the premises of a power station during a nuclear accident. In collaboration the Wakasa Wan Energy Research Center, we developed a conversion formula for converting the dose distribution in the sky into the dose distribution on the ground utilizing radiation data that the Japan Atomic Power Company measured with a flying drone. We improved the dose evaluation system by adding two functions to this system; the first converts the radiation dose measured above the power plant into a dose at 1 m above the ground and the second provides a radiation source display for the dose rate map.

Keywords dose evaluation, Radiation source, Drone, Radiation measurement, Dose rate map

1. 緒言

(株)原子力安全システム研究所(以下、「INSS」という)では、平成13～19年度にかけて、原子力災害時における関西電力(株)の原子力発電所構内(建屋内・建屋外)の被ばく線量を評価するために、線量評価システム^{(1)～(5)}を開発した。

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故では、水素爆発により瓦礫等が大量に発生し、それが放射線源となり、復旧作業に影響を及ぼした。そのため、

原子力災害時の作業員の被ばく量を予測するためには、従来の線量評価システムの評価結果に瓦礫等による放射線源からの被ばく量を評価し、加える必要がある。

日本原子力発電(株)(以下、「原電」という)では、2016年3月に原子力緊急事態支援組織(原子力緊急事態支援センター)を設立し、従来からの緊急事態対応、要員訓練等に加え、活動拠点となる福井県美浜町の施設の建設、資機材の調達等を行ってきた。また、原子力緊急事態支援組織は、活動拠点となる

*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所
*2 (公財)若狭湾エネルギー研究センター
*3 関西電力(株)

福井県美浜町の施設の完成に伴い、2016年12月から美浜原子力緊急事態支援センター（以下、「支援センター」という）として本格運用を開始した。

支援センターの役割は、原子力災害発生時に速やかに発災事業所へ資機材、要員を派遣し、発災事業者と協働して高放射線量下での原子力災害に対応すること、および、通常時に原子力災害対応用遠隔操作ロボット等を集中的に配備・管理し、原子力事業者要員に対する操作訓練を実施することである。そして、原子力災害の対応として発電所構内で瓦礫等による放射線源が出現した場合に、上空からドローンを用いた放射線測定を実施する計画が進められている⁽⁶⁾。

（公財）若狭湾エネルギー研究センター（以下、「若狭エネ研」という）では、原子力事故への対応として、環境中に放出され、広範囲にわたって沈着している放射能の分布を、迅速かつ正確に把握するための技術を開発し、汚染された地域での測定試験を通して、評価対象場所の状況に即した測定方法やデータ解析法を検討している⁽⁷⁾。

INSSと若狭エネ研は、原電において上空で測定した放射線データを活用して、地上での被ばく線量の評価を実施することを目的として共同研究を行った⁽⁸⁾。

2. 原電美浜原子力緊急事態支援センターの放射線測定用ドローンの状況

支援センターには、原子力災害時に高所からの情報収集に使用する放射線災害対策用のドローンとしてDJI社製（（株）日本サーキット開発）のMatrice 210RTKが導入されている（図1）。モーターピッチ64 cm、最大幅89 cm、高さ41 cm、機体総重量5.2 kgであり、最大15分間の連続飛行が可能である。このドローンは、通常は可視カメラと赤外線カメラを搭載し、リモート操縦により高所からの現場撮影を行う用途に使用されることになっている。カメラと放射線測定器を交換することにより、放射線測定も可能である。支援センターは原電の一組織であるが、組織の内外を問わず、また炉型を問わず、原子力災害時に緊急運用される。

このドローンで放射線測定をする際は、上述のようにカメラと放射線測定器（図2）を交換して搭載し、運用することとなっている。この放射線測定システムは、機体制御から独立した単体のシステムで

あるため、機体制御に用いられるGPS信号を取り合うこともない。また、一定間隔でのデータ送受信を行うシステムである。そのため飛行状況によっては、意図する位置でデータを収集できない可能性がある。

放射線測定システムとは別に、機体寸法から生じる制約としては、機体の最大幅が89 cmであり、特に遠隔で操縦する場合には、対象箇所への近接が困難であるという点があげられる。このドローンの導入の主たる目的は、原子力発電所構内を効率よく俯瞰し、取り残されている作業員等を発見することである。したがって、できるだけ遠方から画像を提供できるかが主眼であり、線量値をピンポイントで取得することとは相反している。

これらのことから、このドローンに搭載する放射線測定システムで取得する線量値は、一定程度の高度で取得されるものであり、地表付近での線量値を必ずしも反映するものではないことがわかる。そこで、この放射線測定システムで取得する飛行高度での線量値を地上付近での線量値に変換する関数を導出しておく必要があり、これにより現有のドローンを有効活用して原子力発電所構内地表に出現する瓦礫等の放射線源分布を効率的に取得することが可能になるものと考えられる。



図1 支援センターに導入されたドローン



図2 ドローンに搭載される放射線線量計

3. 若狭エネ研による換算式作成

3.1 地上付近での線量値への変換方法

換算式を作成するにあたり，ドローンに搭載した放射線測定器が真下からの放射線のみ検知するという前提と，下方の全方位からの放射線を検出するという前提が考えられる．後者の方が精緻な計算ができると判断されるが，今回は線量評価システムへの線量換算機能の追加が可能であることが確認できた前者を採用することとする．

若狭エネ研では，モンテカルロ計算により，ガンマ線源として地上に落下した単体の瓦礫を模擬し，測定位置における線量値を瓦礫からの距離の関数として表現している．

モンテカルロ計算コードとしてはPHITS 3.0.2⁽⁹⁾を採用している．なおこの版のPHITSでは電磁シャワーカスケード計算コードEGSが組み込まれており，このEGSコードも利用するものとしている．

計算体系として，地表に原点を置き，原点から200 m以内のほぼ半球内を計算体系としている．計算体系のうち地表よりも上部は空気で満たされ，地表よりも下部は土壌としている．瓦礫は上述のように単体とし，原点に配置している．瓦礫は立方体で土壌と同一の化学成分とし，放射線源としてはセシウム137が均等に瓦礫中に配置されているものとしている．瓦礫の寸法は1 m×1 m×1 mとし，線源強度は可変としている．

3.2 線量値計算結果

まず線源強度を1 MBq/cm³としたとき（すなわち瓦礫全体の線源強度が1 TBq）の計算された出力を図3と図4に示す．図3は原点（瓦礫のある場所）を含む垂直断面における空間線量分布である．図4は原点（瓦礫のある場所）に直交する高度方向の空間線量分布である．

3.3 換算式の考察

図3，図4により，ドローンにより計測した上空での線量値を瓦礫周囲での線量値に換算することが可能となる．

図4から，高度 Z [m] と線量値 D [μ Sv/h] の相関は，指数関数的なものではなく，高度のべき乗

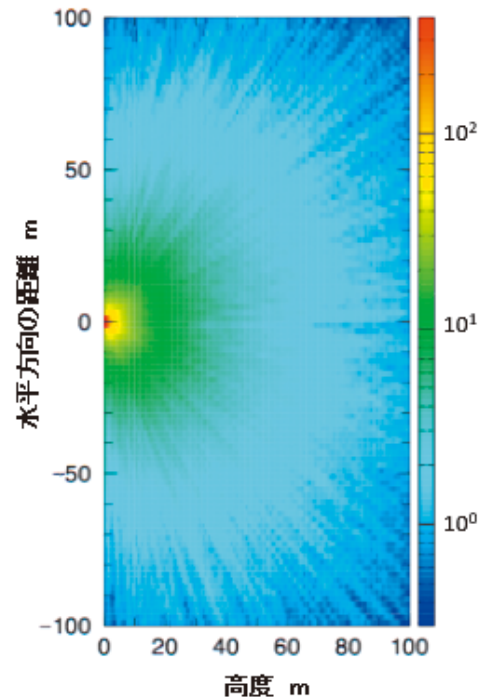


図3 瓦礫寸法1 m×1 m×1 m，強度1 MBq/cm³の場合の瓦礫の場所を含む垂直断面線量分布（カラーマップの単位は μ Sv/h）

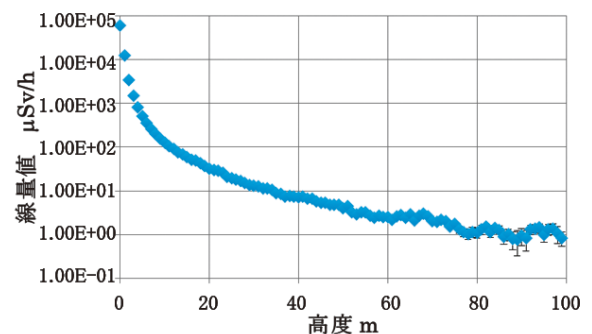


図4 瓦礫上空（原点に直交する高度方向）の空間線量分布（対数表示）

によるものであると推定し，式(1)を換算式としている．

$$D = A Z^{-B} \quad (1)$$

ここで A [μ Sv/h] は定数， B は変数である．地上における線量値により A を決定することにし，残る B については χ 二乗検定（図5，図6）により， $A = 5.893 \mu$ Sv/h， $B = 2.533$ としている．この結果を図7に示す．

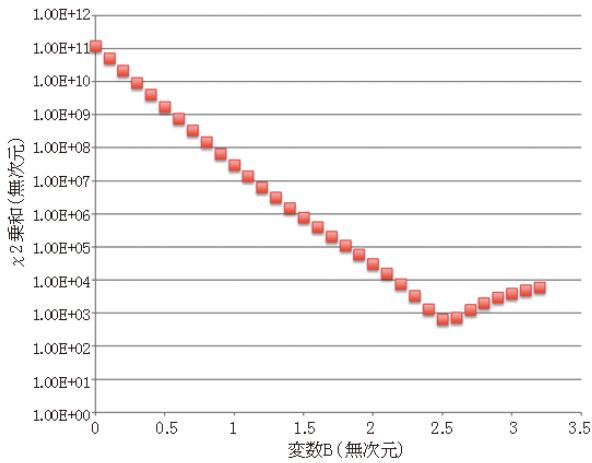


図5 変数Bと χ^2 乗和

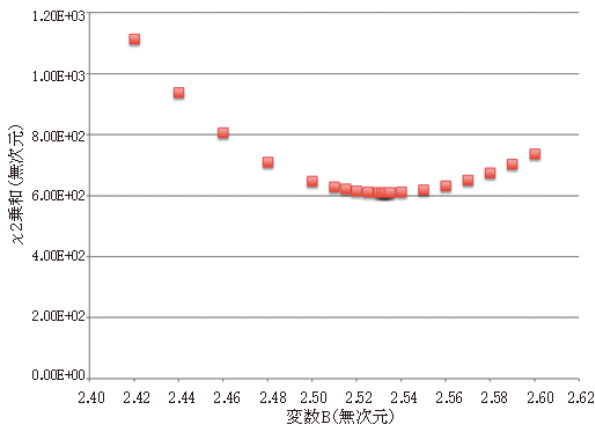


図6 変数Bと χ^2 乗和 (χ^2 乗和の極小値付近を拡大)

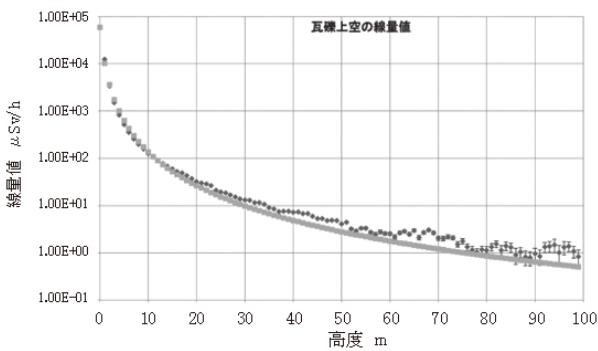


図7 瓦礫上空の線量高度分布 (黒丸) と近似式 (灰色)

4. 線量評価システムの高度化

4.1 線量評価システムの概要

INSSでは、平成13～19年度にかけて、関西電力(株)の発電所構内(建屋内・建屋外)の被ばく線量を評価するために、線量評価システムを開発した。

本システムは過酷事故時の原子力施設内及び敷地

内の線量率を迅速に評価し、事象緩和措置を講じる場合の従業員被ばく線量を推定できるほか、環境への放出放射エネルギーを評価することができ、原子力発電所緊急時に電力会社における対策立案の判断を支援することが期待され、現在でも原子力防災訓練等で活用されている。

図8に線量評価システムの概要を示す。炉内の蓄積放射エネルギーをデータベースから与え、事象進展解析をMAAP4コードで実施する。その結果、発電所内にどのくらいの強度の線源が分布するのか分かる。AutoCADにより、線源と評価点との距離等を算出し、被ばく計算コードを利用して線量率を計算し、滞在時間から被ばく線量を計算する。最終的に、従業員の被ばく線量結果や線量率マップを出力する。

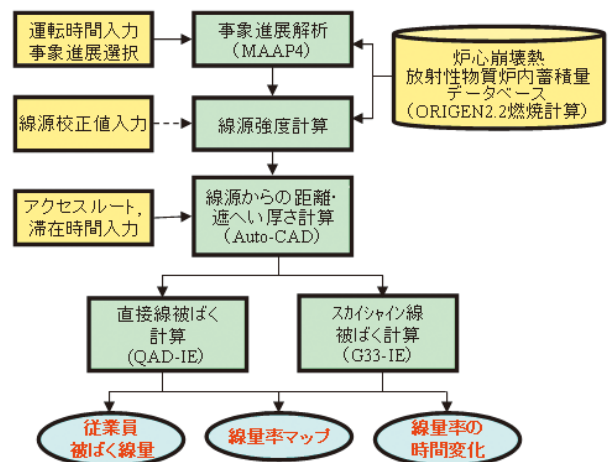


図8 線量評価システムの概要

4.2 線量評価システムへの線量換算機能および放射線源表示機能の追加

若狭エネ研が作成した換算式を用いて、発電所上空で測定した放射線量を地上1 mでの線量に換算する機能を線量評価システムに追加するにあたり、線量評価システム(敷地周辺線量)画面(図9)に「上空→地上1 mの線量計算」を追加し、測定した線量、高度等のデータを入力したCSVファイル(図10)を読み込み、指定した換算式を用いて線量換算を自動計算できるようにした。

換算式は、地上1 mの線量を D_1 [mSv/h]、高度 Z [m]の線量を D_z [mSv/h]として、式(1)を D_1 を求める式に書き直すと式(2)になる。

$$D_1 = D_z / 5.893 Z^{-2.533} \quad (2)$$

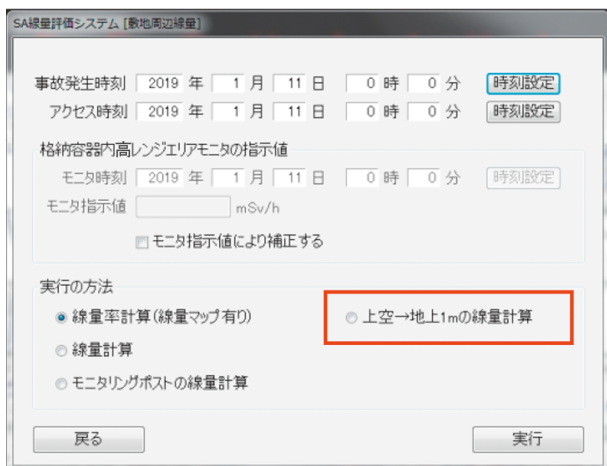


図9 線量評価システム (敷地周辺線量) 画面

線量評価システムにおいて、発電所構内の線量率マップは、構内配置図の図面をAutoCADに取り込み、AutoCADにおいて位置座標を設定している。原電のドローンによる放射線測定的位置座標は、GPS機能により経度および緯度で表示されるが、線量評価システムにおける評価点の位置座標 (X, Y, Z) は、格納容器中心を (0, 0, 0) とし、Y軸の正方向をPN (プラント北) とする右手直交座標系としている。Z座標については、区画内道路の高さの平均値や代表値を取るようにしている。

また、線量評価システムには事故発生時に発電所構内 (建屋内、建屋外) の線量が一目でわかるよう線量率マップを表示する機能がある。今回の放射線源について、線量の地上1 mの線量計算結果で最も線量の高い地点を線量率マップ上に表示できるようにした。なお、線量率マップは100 m四方のメッシュで区画を設定し、各々の区画の中心位置を基準点として設定しているため、線源表示箇所はこの基準点を使用することとした。

線量換算機能の検証については、検証用データを用いて、線量評価システムによる出力結果とエクセルによる計算結果の比較を実施し、線量値に差異がないことを確認した。結果を図11に示す。

5. 今後の課題

今回の線源表示箇所の設定において、線量評価システムの区画基準点を使用することとしたが、以下の課題がある。

- ①原電の放射線測定では位置座標はGPS機能により経度および緯度で表示されているが、線量

位置(座標)	線量(測定値)Dz	高度Z	地上1mの線量(換算値)D1

図10 読み込み用CSVファイル

位置(座標)	線量(測定値)Dz	高度Z	地上1mの線量(換算値)D1		換算値の差 (SADOSE-エクセル)
			SADOSE	エクセル	
A-05	4.00E-02	21	1.52E+01	1.52E+01	0.00
B-01	1.64E-03	3.71	7.70E-03	7.70E-03	0.00
B-02	5.89E-03	4.5	4.51E-02	4.51E-02	0.00
B-06	1.78E-03	3.49	7.16E-03	7.16E-03	0.00
C-02	1.05E-01	10.11	6.25E+00	6.25E+00	0.00
C-03	3.20E-04	4.3	2.18E-03	2.18E-03	0.00
C-06	5.46E-03	4.65	4.54E-02	4.54E-02	0.00
C-07	4.12E-03	8.53	1.59E-01	1.59E-01	0.00
D-02	2.22E-03	5.4	2.70E-02	2.70E-02	0.00
D-03	2.09E-02	6.66	4.32E-01	4.32E-01	0.00
D-04	6.68E-02	4.9	6.35E-01	6.35E-01	0.00
D-05	5.30E-01	4.36	3.75E+00	3.75E+00	0.00
D-06	5.94E-01	4.51	4.58E+00	4.58E+00	0.00
D-07	2.14E-02	5.5	2.73E-01	2.73E-01	0.00
E-01	1.06E-01	8.84	4.49E+00	4.49E+00	0.00
E-02	2.04E-01	7.68	6.05E+00	6.05E+00	0.00
E-03	9.87E-02	4.72	8.53E-01	8.53E-01	0.00
E-04	5.63E-01	3	1.54E+00	1.54E+00	0.00
E-05	7.01E-02	3.58	3.01E-01	3.01E-01	0.00
E-06	2.30E-01	2.2	2.88E-01	2.88E-01	0.00
E-07	5.75E-01	3.36	2.10E+00	2.10E+00	0.00
E-08	6.31E-01	3.89	3.34E+00	3.34E+00	0.00
F-02	4.79E-02	4.6	3.88E-01	3.88E-01	0.00
F-03	7.50E+00	5	7.50E+01	7.50E+01	0.00
F-04	8.21E+00	4.88	7.72E+01	7.72E+01	0.00
F-05	1.26E-01	5.14	1.35E+00	1.35E+00	0.00
F-06	2.48E-01	7.63	7.24E+00	7.24E+00	0.00
F-07	4.58E-03	5.89	6.94E-02	6.94E-02	0.00
G-02	9.70E-04	1.85	7.82E-04	7.82E-04	0.00
G-03	2.14E-02	2.69	4.45E-02	4.45E-02	0.00
G-04	2.49E-01	2.47	4.17E-01	4.17E-01	0.00
H-02	1.23E-01	5.23	1.38E+00	1.38E+00	0.00
H-03	8.52E-02	4.67	7.17E-01	7.17E-01	0.00
H-04	4.56E-03	8.89	1.96E-01	1.96E-01	0.00

図11 出力結果の確認

計算の際には位置座標を線量評価システムで設定している区画番号に変更しなければならない。

- ②線量率マップでは1つの区画の範囲を100 m四方のメッシュとしているため、線量率マップの区画基準点を線源表示箇所とすると、上空から測定した地点と線量率マップの表示地点にかなり差が出てしまう。

そのため、今後の課題として線量評価システムが経度および緯度に対応できるようにシステムを変更する必要がある。

6. 結言

東京電力(株)福島第一原子力発電所事故の反映として、原子力災害時に発電所構内で瓦礫等による放射線源が出現した際の被ばく線量を評価するための手法を検討した。

INSSと若狭エネ研は、原電において上空で測定した放射線データを活用して、地上での被ばく線量の評価を実施することを目的として共同研究を行った。若狭エネ研において、上空での線量分布を地上における線量分布に換算する試みを行い、モンテカルロ計算により単体の瓦礫についてはべき乗の形で上空と地上の線量値を紐付けできることを明らかにし、換算式を作成した。また、INSSにおいて、線量評価システムに発電所上空で測定した放射線量を地上1 mでの線量に換算する機能および線量率マップ上への放射線源を表示する機能を追加し、線量評価システムの高度化を図った。

文献

- (1) 吉田至孝, 入江隆, 郡山民男, 工藤清一, 西村和哉, “シビアアクシデント時の発電所内被ばく線量評価手法の検討”, INSS Journal, Vol.8, P.174 (2001).
- (2) 吉田至孝, 入江隆, 郡山民男, 工藤清一, 西村和哉, “シビアアクシデント時原子力発電所内被ばく線量評価手法の検討”, 日本原子力学会和文論文誌, Vol.1, pp.85-95 (2002).
- (3) 恩田隆司, 吉田至孝, 工藤清一, 西村和哉, “シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価システムの改良”, INSS Journal, Vol.10, p.241 (2003).
- (4) 佐々木泰裕, 南則敏, 吉田至孝, “シビアアクシデント時原子力発電所内線量評価システムの改良－線量率換算係数の導入とアクセスルート編集機能の追加－”, INSS Journal, Vol.13, P.296 (2006).
- (5) 川崎郁夫, 吉田至孝, “シビアアクシデント時発電所内被ばく線量評価技術の開発と適用～アクシデントマネジメントガイドライン知識ベースの整備～”, INSS Journal, Vol.20, P.236 (2013).
- (6) 日本原子力発電株式会社ホームページ, “美浜原子力緊急事態支援センター” <http://www.japc.co.jp/emergency-support/index.html>
- (7) 公益財団法人若狭湾エネルギー研究センターホームページ, “原子力事故への対応” http://www.werc.or.jp/outline/soshiki/kenkyu/leaflets/leaflet_Medic_6.pdf
- (8) 久米恭, 川崎郁夫, 中村晶, “瓦礫等による放射線源出現に対する評価手法の検討”, 若狭湾エネルギー研究センター研究年報(平成29年度), 第20巻, P89 (2018).
- (9) T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver, Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).