

EU 長期被ばく評価モデル (ERMIN) を用いた 住居地域における地域条件を反映した除染計画の策定

佐久間 一幸^{1*}、難波 謙二²、寺田 昭彦³、細見 正明³

¹東京農工大学大学院工学府応用化学専攻 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

²福島大学共生システム理工学類 (〒960-1296 福島県福島市金谷川 1)

³東京農工大学大学院工学研究院 (〒184-8588 東京都小金井市中町 2-24-16)

Development of Remediation/Decontamination Strategies Reflecting Local Conditions by the EU Long-term Radiation Exposure Model for Inhabited Areas (ERMIN)

Kazuyuki SAKUMA^{1*}, Kenji NANBA², Akihiko TERADA³, and Masaaki HOSOMI³

¹The Graduate School of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
(2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, Japan)

²Faculty of Symbiotic Systems Science, Fukushima University
(1 Kanayagawa, Fukushima-shi, Fukushima, Japan)

³Institute of Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology
(2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, Tokyo, Japan)

Summary

The European model for inhabited areas (ERMIN), developed for prediction of radioactive compounds towards Chernobyl accident, was applied at Tomioka in Fukushima Prefecture as a model region for decontamination to investigate its feasibility. The application of ERMIN to eight compartments with each 100 × 100 m in this region, where decontamination was actually performed, confirmed that observed air dose rates were within the calculated counterparts irrespective of presence or absence of a term on environment half life for two months. With simulation sets capable of reproducing an air dose rate during a decontamination term, decontamination strategies incorporating five evaluation items, i.e. reduction of radiation exposure to inhabitants, cost for decontamination, the amount of waste, work effort, and the amount of radiation exposure for a worker, were proposed and compared. By initiating decontamination 9 months after the accident in Fukushima, radiation exposure to inhabitants, who continue to live at the modeled region, is reduced by about 24 mSv for the ensuing 15 months. Furthermore, decontamination strategies were compared by prioritizing the five evaluation items.

Key Words: Decontamination strategy, Simulation, Radiation exposure to inhabitants, Decontamination cost

1. はじめに

3.11 福島第一原発事故後、森林や田畑、河川、湖沼等のみならず、住居地域においても放射能汚染が問題となっている。放射性物質による汚染地域を対象に除染が行われているが、当初は除染計画を立てる際に除染することが目的化され、除染効果やコスト、廃棄物等を総合的に考慮した検討が行われた例は少ないと推察される。また、除染計画策定段階から住民を交えた合意形成が十分になされていないため、住民との

信頼を築けていない地域が多く、除染した土壌等を一時的に保管しておく仮置き場の未決定等の問題がある。事故後、3年を経過した時点では住民を交えた合意形成の場が設けられているが、議論する際の材料として、空間線量がどの程度減少するのか、追加被ばく線量がどうなるのか将来予測も含めた除染効果、コスト、廃棄物量などに関する情報が必要と考えられる。

そこで、チェルノブイリ原発事故後欧州で開発された

*Corresponding author: TEL: 042-388-7731, E-mail: 50013642307@st.tuat.ac.jp

RODOS(Real Time Online Decision Support System)¹⁾に着目した。欧州においては原発事故後、放射性物質の大気拡散、沈着、環境媒体中における挙動、そして除染に対する様々な効果を計算するシステム(RODOS)の開発が行われ、原発事故後の緊急時、長期的な対策に備えている。RODOSの機能の1つであるERMIN(The European model for inhabited areas)²⁾では、住居地域に対しての除染による効果および住民が通常通り生活(都市部、屋外に8時間)した際の放射性物質からの被ばく量の低減、あるいは除染に伴うコストや廃棄物量等をシミュレーションすることができる。これまで我が国では、除染前後の空間線量率の減少率や表面汚染密度の減少率で除染が評価^{3,4)}されてきたが、このERMINでは住民の積算被ばく量で除染を評価できるだけでなく、除染に伴うコストや廃棄物量等を総合的に考慮して除染を評価することが可能である。さらに、除染後の積算被ばく量や空間線量率の推移等に関する将来予測を行う事が可能である。

しかし、チェルノブイリ原発事故後、ERMINを実際の事故等に適用した事例がないため、日本においてERMINの適用可能性や除染計画の評価方法の検討が課題として挙げられる。そこで本研究では、実際に除染が行われた地域に対してERMINを適用し、空間線量率の実測値と計算値との比較を行う事でERMINの適用可能性を検討した。また得られ

た計算結果を基に、意思決定支援ツールWeb-HIPRE(Hierarchical Preference analysis in the world wide Web)⁵⁾を用いて、除染計画をコスト、住民の被ばく量の低減、作業者の被ばく量、作業量、廃棄物量の5つの価値観からランキング化することによって除染計画の評価方法について検討した。

2. 方法

(1) 住居地域モデル ERMIN

Fig.1に住居地域モデル ERMINの概念図を示す。

ERMINへの入力データは、事故後放射性物質の降下初期段階における沈着量、土壌や建物といった環境媒体の割合(土地利用)と建物の立体配置等の環境設定、除染内容、の3つからなる。ERMINでは、入力した沈着量から、①各環境媒体への初期沈着量を推定する(湿性沈着の流出を含む)。そして、②放射性物質が保持(崩壊と流出)される量を計算する。次に、③各環境媒体の汚染濃度[Bq/m²]から計算グリッド(100 m メッシュ)内のある地点における線量率[Sv/h]への計算を行う。最後に、④除染効果とコスト等の計算を行う。ここで①~④の概略を以下に述べる(詳細はERMINのマニュアルを参照⁷⁾)。

①沈着量の計算について、福島事故で主な汚染源となっている放射性物質は、半減期が比較的短い¹³⁴Cs(2.06年)と半

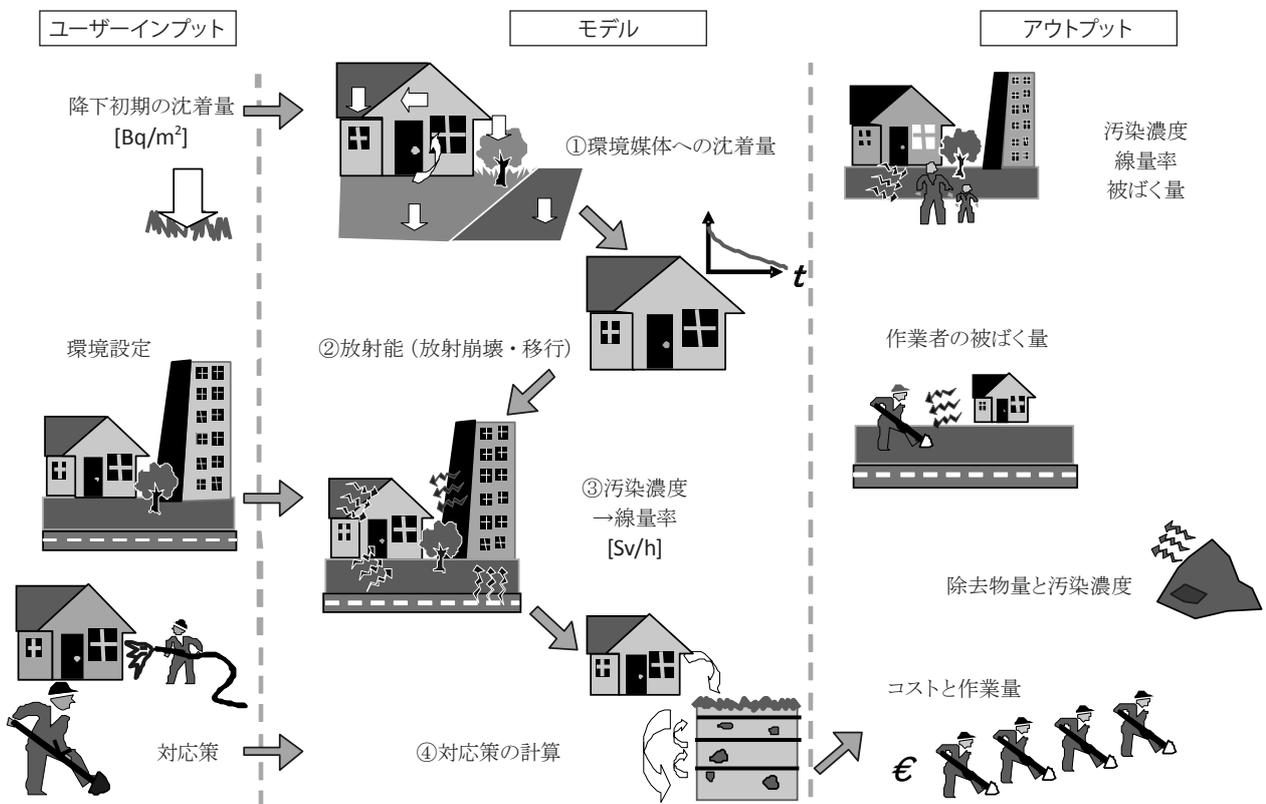


Fig.1 住居地域モデルERMINの概念図⁶⁾

Table 1 Cs の環境媒体間における沈着および流出割合

環境媒体	流出前における 環境媒体間の沈着割合	降雨による流出割合
道路	1	0.55
屋根	0.85	0.5
土壌	1	0

減期が長い¹³⁷Cs(30.2年)である。沈着条件は湿性沈着が主な沈着であったため湿性沈着を採用した⁸⁾。以上2つの条件の時、道路、屋根、土壌について沈着割合と湿性沈着時の流出割合の見解⁷⁾が得られているのでこれらのパラメータを採用した(Table 1)。

②放射能モデルについては、環境媒体各々に対し放射崩壊と天候による他媒体への移行を計算することによって、放射能の経時変化を算出した。土壌では式(1)の鉛直1次元移流分散式(線形吸着平衡⁷⁾)を解いた。道路・屋根では素材に放射性物質が堅く結合している部分と緩く結合している部分に分けることによって表現されている式(2)、(3)⁷⁾を解いた。堅い、緩いというのは、放射性物質の流出しやすさの事で、それらを分配することで表現している。

$$C(x, t) = C(0) \left[\frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} e^{-\frac{(x-t)^2}{4Dt}} - \frac{v}{2D} e^{-\frac{v}{D}x} \operatorname{erfc} \left(\frac{x+vt}{2\sqrt{Dt}} \right) \right] e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}t}} \dots\dots\dots (1)$$

$$C_{road}(t) = C_{road}(0) \left[a_{1,road} e^{-\frac{\ln(2)}{\tau_{1,road}t}} + a_{2,road} e^{-\frac{\ln(2)}{\tau_{2,road}t}} \right] e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}t}} \dots (2)$$

$$C_{roof}(t) = C_{roof}(0) \left[a_{1,roof} e^{-\frac{\ln(2)}{\tau_{1,roof}t}} + a_{2,roof} e^{-\frac{\ln(2)}{\tau_{2,roof}t}} \right] e^{-\frac{\ln(2)}{T_{1/2}t}} \dots (3)$$

ここで、

$C(x, t)$: 時刻 t における鉛直方向深さ x の放射能 [Bq]

$T_{1/2}$: 半減期 [s]

D : 土壌中の放射性核種の拡散係数 [m^2/s]

v : 土壌中の細孔内水の水速度 [m/s]

$C(t)$: 時刻 t における放射能 [Bq]

a_1, a_2 : 堅い結合と緩い結合をしている放射能の割合 ($a_1 + a_2 = 1$)

τ_1, τ_2 : a_1, a_2 に対する天候プロセスにおける半減期 [s]

道路・屋根の各パラメータについてもチェルノブイリ事故後のデータから算出されたもの⁷⁾を用いた。また土壌パラメータに関しては日本の川俣町におけるデータ⁹⁾から算出したものを用いた。使用した各パラメータの数値をTable 2に示す。また、

Table 2 放射能モデルのパラメータ

D [$m^2/year$]	0.3	V [$cm/year$]	0.06
$\tau_{1,road}$ [year]	0.4	$\tau_{1,roof}$ [year]	2
$\tau_{2,road}$ [year]	3	$\tau_{2,roof}$ [year]	35
$a_{1,road}$ [-]	0.7	$a_{1,roof}$ [-]	0.5
$a_{2,road}$ [-]	0.3	$a_{2,roof}$ [-]	0.5

想定した環境媒体は道路、屋根、土壌のみである。ERMINでは建物の外壁、屋内、樹木といった環境媒体を考慮することが可能であるが、線量への寄与が小さいと考えられるので、今回の計算では省略した。

③汚染濃度 [Bq/m^2] から線量率 [Sv/h] の計算方法については、ERMINが想定している複数の住居地域における仮想空間において、モンテカルロシミュレーションを行い、汚染源から飛来する各放射線の空気減衰や物体による遮蔽を考慮し、放射線の種類 (γ 線、 β 線)、核種(66種類)、環境媒体(道路、屋根、壁、土壌等)、場所(建物の一階、二階、屋外等)毎における線量率を計算し、その値を用いる事によって計算を行っている。仮想空間は建物、道路、芝、土壌等といった環境媒体がどのような配置、割合で存在していて、また、建物の形状、屋根の形や窓の位置等といった項目を詳細に記述しているが、今回はその中でも2つの仮想空間を用いてモデル化を行った。一つは建物が存在している仮想空間であり、Fig.2に示すような建物の形状、屋根の形や窓の位置等(煉瓦と軽量コンクリートブロック、タイル屋根、コンクリート基盤の二階建て)である。仮想空間内における建物の配置は敷地16m×14m、道の同じ側の隣家までは2mで反対側の隣家までは20mであり、また環境媒体の割合は後述する。もう一つは建物が存在しない平坦な土壌の仮想空間を用いた。前者の仮想空間は仮想空間内における建物の割合を変更することができない。そのため、メッシュ内における建物と土壌等の割合をGISから得られた面積比に合わせるために後者の仮想空間を

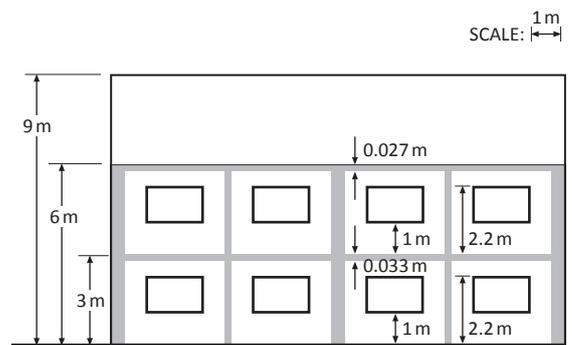


Fig.2 建物の構造⁷⁾

追加で設定し、建物と土壌の割合を調整した。以上の仮想空間と前述の計算された値を用いて、入力された汚染濃度、環境媒体の面積から3次元的に屋内・屋外における道路や屋根、土壌といった各環境媒体からの線量の算出を行った。

汚染濃度から線量率への計算について、屋内・屋外ともに国内のデータを用いて再現性向上を図ったパラメータを使用した。具体的には、屋外に関しては文科省が公表している表面汚染密度と空間線量率の相関係数¹⁰⁾より算出した値に合致するようにフィッティングを行った。屋内に関しては、日本における屋外の線量率に対する屋内の線量率が約3分の1という報告¹¹⁾がある。そこでERMINにおいても屋内における線量率が屋外の3分の1となるようにフィッティングを行った。

④除染等の対策を行った際の効果、除染に係る様々評価項目(廃棄物量、コスト、作業量、作業者の被ばく量)を同時に計算した。除染後の放射能はある時刻の放射能に対し、除染前後でどれだけ汚染が取り除かれるかを示す指標である除染係数(DF)で割ることで求めた(式(4))。

$$C_D(t, t_D) = \frac{C(t)}{DF(t_D)} \dots\dots\dots (4)$$

この除染係数は時間の関数で、例えば屋根等であれば緩い結合の放射性物質が流出し、事故後時間の経過とともに堅い結合の割合が増え、容易に除去できなくなるといった状況を反映することができる。

(2) 意思決定支援ツール Web -HIPRE

Web -HIPRE (Hierarchical Preference analysis in the world wide web) では複数の価値観に基づき、意思決定者が各々に対して設定した重みにより、複数の対策のランキング化

を行うツールである。本研究では、コスト、作業量、作業者の被ばく量、除染効果等の価値観に関して、それらの価値観に基づき複数の代替案を考え、比較・ランキング化を行った。このシステムを用いる事によって、複数の除染計画を比較した。

(3) ERMIN の適用箇所と環境設定

a) ERMIN 適用箇所

Fig.3は外側の紫色の線で囲われた部分が除染モデル実証事業対象地域(福島県富岡町夜ノ森地区)¹²⁾を示している。計算対象領域は内側の緑色の線で囲った部分(メッシュ ID=6-9, 12-15)である。計算対象領域を含むエリアをGISから作成したメッシュは、メッシュ ID を左下から右に向かって0-5、6-11、12-17、18-23とした。メッシュサイズは100 m×100 mである。また、赤色の括弧付きの数字は、後述するモニタリングデータと対応している。また、Fig.4の赤枠で囲われたポイントにおいて、Fig.5のようにモニタリングデータが取られている(環境省より取得)。

b) 環境設定

GISを用いることによって各メッシュ内の建物、道路の面積を算出し、その残りの面積を土壌と仮定した。その後、各メッシュ内の面積から比を算出し、メッシュ毎の環境媒体割合としてモデルに入力した。各値をTable 3に示す。

(4) 初期沈着量の推定

初期沈着量の推定方法として、モニタリングポイント各々に対してモニタリングデータ5点(2012年12月23日、2013年1月7日、1月8日、1月9日、1月10日)から推定し、その平均値を初期沈着量とした。ただし、二日目以降で明らかに空間線量率が下がっているポイントに関しては、除染が行われたと



Fig.3 ERMIN 適用箇所のグリッド作成

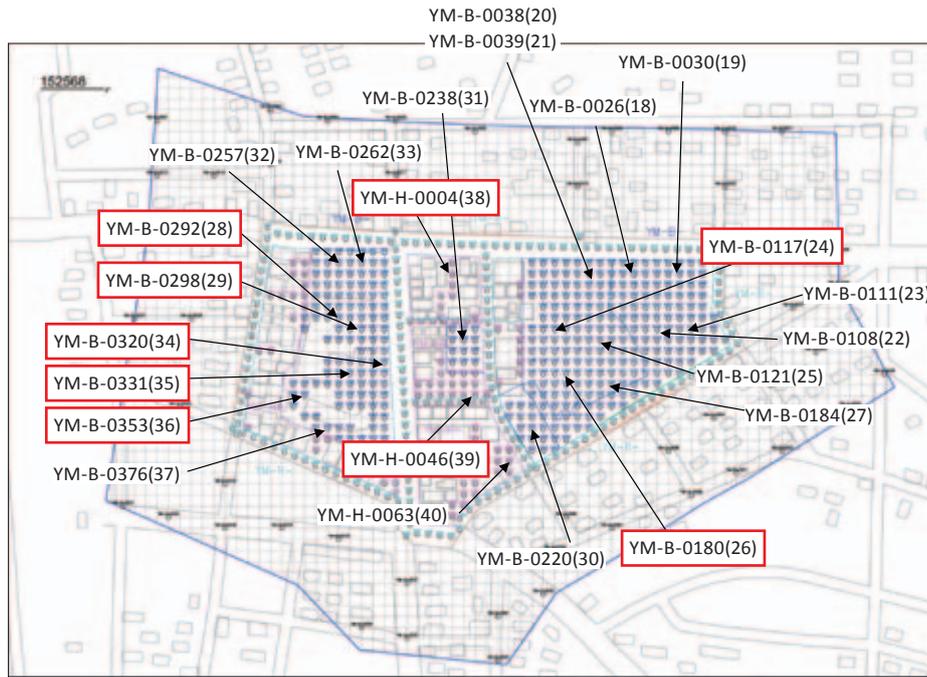


Fig.4 モニタリングポイント

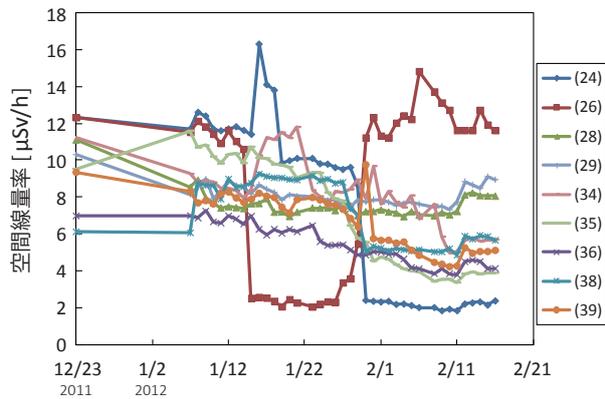


Fig.5 モニタリングデータ

考えられるため、それ以前のデータから初期沈着量を推定した。またメッシュ ID に対して測定点が 2 点の箇所については、2 つの箇所の平均値を初期沈着量とした。推定方法は換算係数 ($\mu\text{Sv/h} \rightarrow \text{MBq/m}^2$)¹³⁾を用いて、各測定日から沈着日(2011 年 3 月 15 日に全セシウムが降下したと仮定) までの経過日数から崩壊を逆計算し、求めた 5 点沈着量の平均値を初期沈着量とした。計算核種は ^{134}Cs 、 ^{137}Cs 、沈着条件は湿性沈着、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放出比率は 1:1¹⁴⁾を仮定した。また、自然由来の放射能の影響を考慮するために、実測値から 0.04 $\mu\text{Sv/h}$ ¹⁵⁾を引いた値を用いて推定した。また、物理減衰のみによる逆計算ではウェザリング効果を反映することが出来ないため、環境半減期を考慮した逆計算による初期沈着量の推定

Table 3 建物・道路・土壌の割合

メッシュ ID	建物 [-]	道路 [-]	土壌 [-]
6	0.281	0.016	0.703
7	0.191	0.213	0.597
8	0.115	0.134	0.750
9	0.024	0.102	0.874
12	0.474	0.000	0.526
13	0.329	0.198	0.473
14	0.208	0.122	0.670
15	0.000	0.131	0.869

Table 4 初期沈着量

メッシュ ID	物理減衰	物理減衰 + 環境半減期
	[Bq/m ²]	
6	1.41×10^6	2.41×10^6
7	1.79×10^6	3.07×10^6
8	1.31×10^6	2.24×10^6
9	1.91×10^6	3.27×10^6
12	1.71×10^6	2.93×10^6
13	1.72×10^6	2.95×10^6
14	1.23×10^6	2.11×10^6
15	1.96×10^6	3.36×10^6

Table 5 除染パラメータ

除染名称	廃棄物	廃棄物発生速度 [kg/m ²]	掘削深さ [m]	除染係数	チーム規模	作業効率 [m ² /team.hr]	作業器具コスト	必要物質 [€/m ²]	労働コスト [€/m ²]
機械による表土除去	土壌と芝	30	0.02	3	8	66	0.09	0	5.3
道路の切削	アスファルト	11.2	0.005	22	9	173	0.2	0.1	3.9
屋根のブラッシング	水	3	-	1.5	8	17.5	0	0	10.9

も行った。環境半減期はJAEAが公表している第1次及び第2次走行サーベリの測定結果を用いた (ln2/環境半減期) の分布のグラフから、都市地域における累積頻度分布の中央値 (ln2(環境半減期) = 0.9) を用いて初期沈着量を推定し

た¹⁶⁾。各メッシュの初期沈着量をTable 4に示す。

(5) 除染パラメータの入力

除染方法については、除染モデル実証事業で行われた除染内容は、樹木の除染、表土はぎとり、道路の切削ないし高圧水洗浄、宅地の屋根のブラッシング、雨どいの堆積物除去・拭き取り、たたきの高圧水洗浄ないし切削、庭の表土剥ぎ取りの7項目である。実際にERMINで計算しているのは、宅地(土面)の表土はぎとり、道路の掘削、屋根のブラッシングである。除染パラメータは欧州で得られたパラメータの一部を除染モデル実証事業で得られたデータ¹⁷⁾を基に算出した。機械による表土除去 (DF=1.1~10) および屋根のブラッシング (DF=1.1~2) の除染係数に関してのみ、値に幅があるため、任意に値を選択した (屋根のブラッシングについては、中間値付近の値を選択した。表土除去については、千葉県柏市においてERMINのテストランを行った結果より、環境媒体が土壌のみの場合、最も再現性が高かったDF=3を選択した)。各除染パラメータをTable 5に示す。

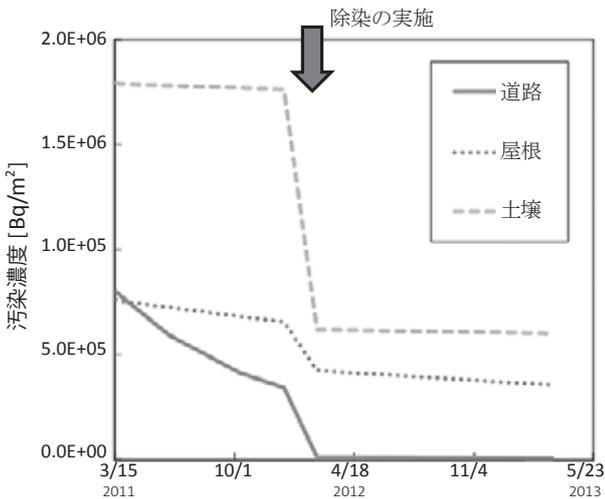


Fig.6 汚染濃度の推移 (¹³⁷Cs)

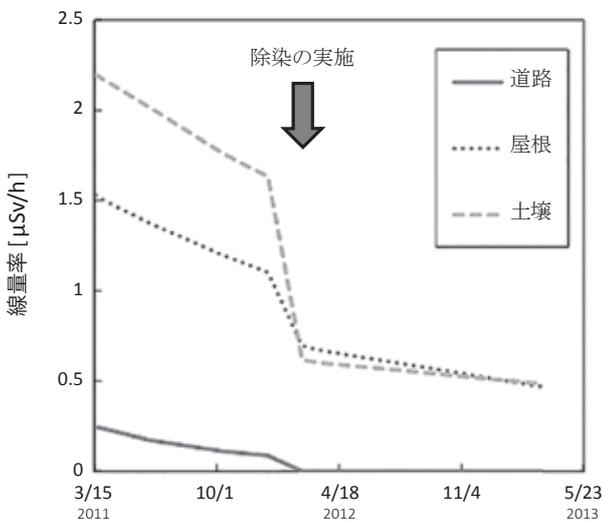


Fig.7 屋内における環境媒体からの線量率

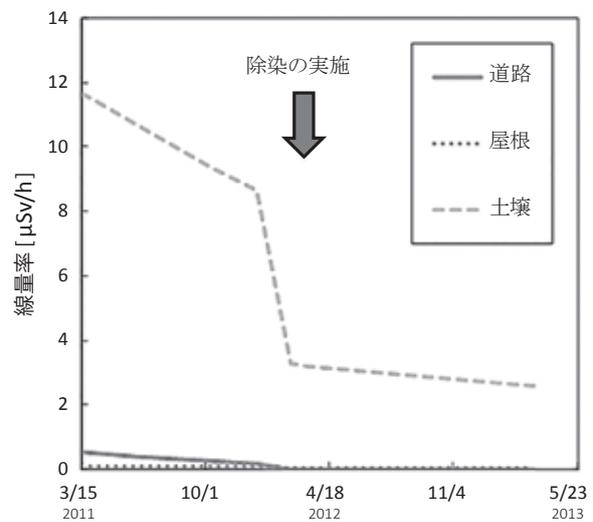


Fig.8 屋外における各環境媒体からの線量率

(6) 除染計画の設定

実際の除染計画といくつかの想定される除染計画を、線量の観点と経済的あるいは人的のような資源の観点から比較するために、以下の3つを検討した。1つ目は実際の除染計画にできるだけ沿う計画（表土除去、道路の切削、屋根のブラッシングを8つのメッシュすべて行う計画）、2つ目は様々な除染の経験から効果が薄いとされている屋根の除染¹⁸⁾を行わない計画（表土除去、道路の切削を8つのメッシュすべて行う計画）であり、3つ目は実測のモニタリングデータから最も除染効果の低かったメッシュに対して除染を行わなかった計画（表土除去、道路の切削をメッシュ ID=12 以外すべて行う計画）を想定した。各シナリオ毎の狙いは、実際の除染計画1に対して、2は除染内容の比較、3は除染場所の比較を考えた。以上より、複数の除染計画を、除染場所と除染方法、除染のレベルの違いを線量と資源の観点から比較した。

3. 結果と考察

(1) ERMIN 適用結果

富岡町夜ノ森地区の住居地域に対して、汚染濃度 [Bq/m²] 及び屋内・屋外における各環境媒体からの線量率 [μ Sv/h] の同定、実測値（空間線量率）と計算値の比較の計算結果を Fig.6 ~ Fig.9 に示す。各除染計画毎、各メッシュ毎に計算を行っているが、汚染濃度の推移および、屋内・屋外における各環境媒体からの線量率、住民の積算被ばく量については、除染計画1のメッシュ ID=7のみを示した。空間線量率に関しては、実測値と比較することが可能であるため、除染計画1の計算対象領域すべてのメッシュで比較を行った。また、空間線量率のみ環境半減期を考慮した初期沈着量も用いた計算を行った。

汚染濃度の推移に関しては、¹³⁴Cs および ¹³⁷Cs について放射崩壊と他媒体への移行・保持を計算した。道路は流出しやすいため、土壌と屋根に比べ傾きが急となっている。また、急激な減少が除染効果の計算結果である。このように環境媒体毎に特性を考慮したプロファイルを得た。

屋内については、汚染濃度、環境面積、3次元距離、空気減衰、遮蔽を考慮し、屋内における環境媒体からの線量率の同定を行った。その結果、除染前（2011年12月23日）において、屋内では土壌からの寄与が非常に大きく（約58%）、屋根からの寄与がそれに続き約39%であった（Fig.7）。しかし、ERMINの欠点として、屋内の線量率を計算する際に、住宅近辺からの土壌のみの寄与しか計算することができないため（建物が存在しない平坦な土壌の仮想空間からの寄与が考慮されない）、100 m以内の土壌からの線量率の寄与が過小評価されていることは今後の課題である。

同様な計算を屋外についても行った。除染前（2011年12月23日）において、屋外では土壌からの線量がほとんどを占め、約97%と見積もられた（Fig.8）。除染によって大幅に土

壌からの線量が減少した。これらの結果から、事故後の経過時間によって線量の寄与率を求めることによって、どの部分を除染するのが効率的であるかと行った議論を行うことができると考えられる。

また、屋外における線量の合計に、自然由来の放射線量を加えたものを空間線量率とし、実測値と比較した（Fig.9）。除染前の空間線量率と除染効果が再現できれば、実測値を正確に再現することが出来るため、除染前の空間線量率と除染効果に着目し考察を行った。まず除染前についてであるが、物理減衰のみの逆計算による初期沈着量を用いた場合とよく一致している場所（Fig.9 (a)）と、物理減衰と環境半減期を考慮した逆計算による初期沈着量を用いた場合とよく一致している場所（Fig.9 (c)）、物理減衰のみと環境半減期を考慮した場合の間の値の場所（Fig.9 (b)、(d)、(e)、(f)、(g)、(h)）が存在した。つまり、環境半減期を導入することによって、除染前の空間線量率の値の幅を把握することができる。従って、各メッシュによって実際の環境半減期は異なるにもかかわらず、一律の値を考慮することによって、ERMINの空間線量率に関する再現性は十分に確保することができることがわかった。次に除染効果についてであるが、概ね一致している場所（Fig.9 (a)、(b)、(c)、(f)、(g)）と過大評価している場所（Fig.9 (e)）と過小評価している場所（Fig.9 (d)、(h)）が存在した。今回は一律の除染係数を用いてシミュレーションを行っているが、メッシュ ID=12（Fig.9 (e)）は大きな建物があり、除染効果はあまり望めないため、除染効果を下げる必要があったと言える。逆に土壌しかないようなメッシュ ID=9、15（Fig.9 (d)、(h)）については、除染効果が望めるため、除染係数を上げる必要があったといえる。

次に屋内・屋外における環境媒体からの線量の計算結果から、住民が通常通り生活することを前提（屋内に16 h）に、住民の移動範囲は1つのグリッド内等の条件のもと、除染による追加被ばく量の低減効果（Fig.10）を計算した。それに加え、除染に係る評価項目（コスト、廃棄物量、作業量、作業員の被ばく量）についての計算結果を得た（Table 6）。

このシナリオでは事故後約9か月後に除染を行い、その後約1年3か月後で、約24 mSvの低減効果が見込まれることがわかった。これによって、除染のタイミングによる被ばく量の違いを推定することができ、事故後、どの程度経過してから除染するかによって、その後の被ばく量にどの程度違いが生じるかを計算することができる。また帰還を考慮している地域に対して、何年後に帰還することができるのか、といった議論も行う事ができると考えられる。

Table 6より、作業量について、除染計画1は、2、3に比べ約6倍、コストについては約2倍かかるが、住民の被ばく量は約10%程の違いであった。また除染計画2と3については、どの評価項目においても大きな違いはなかった。これは今回のシナリオの場合、除染場所の変更よりも除染方法の変更（屋

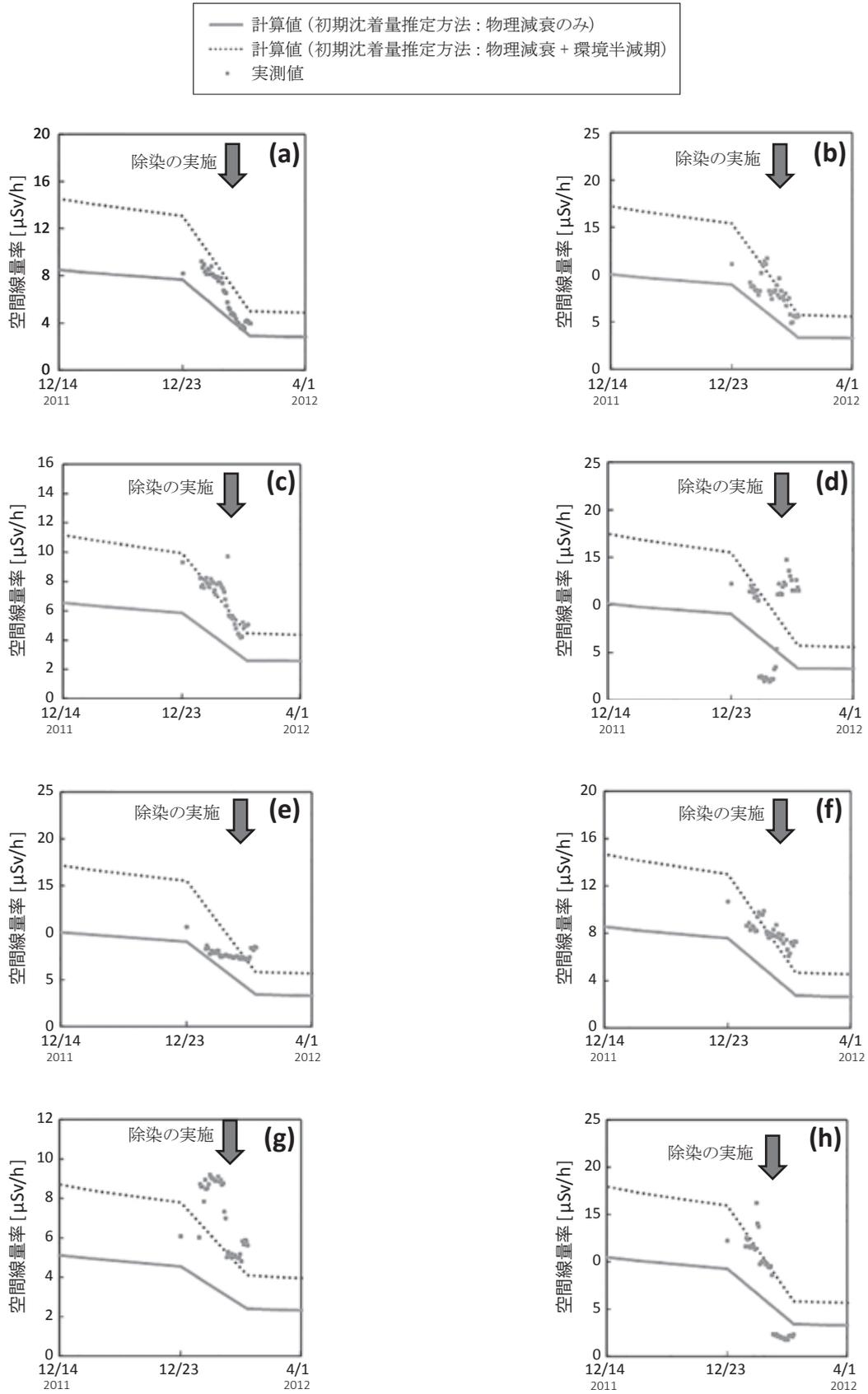


Fig.9 空間線量率の計算値と実測値の比較

- (a) : メッシュ ID= 6, (b) : メッシュ ID= 7,
- (c) : メッシュ ID= 8, (d) : メッシュ ID= 9,
- (e) : メッシュ ID=12, (f) : メッシュ ID=13,
- (g) : メッシュ ID=14, (h) : メッシュ ID=15

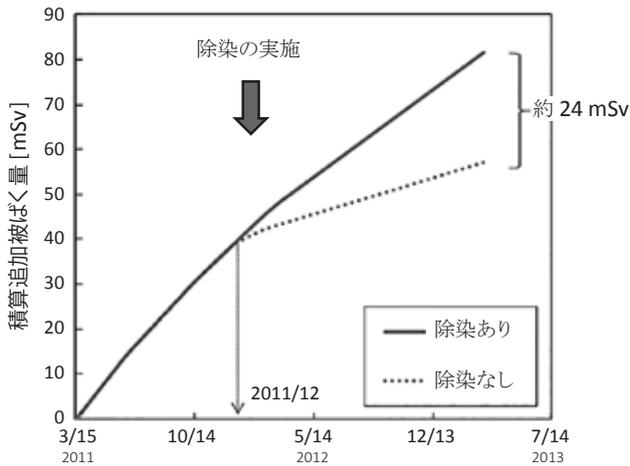


Fig.10 除染による住民の積算追加被ばく量の低減効果

根のブラッシングの除去) が効いているためと考えられる。

(2) Web-HIPRE による除染計画のランキング化

Web-HIPRE による除染計画の比較・ランキング化を行った。実際に定められた除染計画を比較する際の考え方の概念図を Fig.11 に示す。除染計画 1、2、3 は基準 2 の 5 つの価値観で表せられ、またこれらは線量と資源 (経済的あるいは人的等) といった 2 つの基準でまとめることができる。この各段階において重みづけを行うことでランキング化を行う。重み付

けの方法は、点線左から 2 つについては、計算結果から求めるものではなく、計画策定者自身が重みを決定する。本来はステークホルダー同士で、あるいは計画策定者自身が決めるが、今回は便宜的に Fig.11 の値を採用した。点線左から 3 番目については、ERMIN の計算結果から重みを算出する。たとえばコストに関して得られた結果を横軸、重みを縦軸としたとき、除染をしていない場合はコストがゼロであり、重みもゼロとなる。一方、最も除染コストのかかる除染計画 1 は重みが 1 となり、その間のコストの除染計画は、線形的に評価することによって、重みを算出した。全ての価値観に関して同様の重みづけを行った結果を Fig.12 に示す。Fig.12 より、例えば住民への被ばく量は除染計画 2、3 に比べ 1 の方が優れているが、コストや作業量に関しては除染計画 1 の方がかかる。この重みづけに関しては、5 つの評価項目に関して総合的に見れば、除染シナリオ 2、3 の方が優れているということが言える。

一方、Fig.11 の基準 1 の線量と資源の重みを 9:1 にし、さらに基準 2 の住民の被ばく量と作業者の被ばく量の重みを 9:1 にし計算してみると Fig.13 となる。この重み付けに関しては、総合的に見ると除染計画 1~3 は Fig.12 程の大きな差はなく、住民の被ばく量を重視するならば、除染計画 1 が優れているとみることができる。

このように 5 つの価値観から除染方法、除染場所、除染のレベルに関して比較検討することによって、地域条件を反映した除染計画を策定することが可能になると考える。例えば、コ

Table 6 実際の除染計画との比較

評価項目	除染なし	除染計画 1	除染計画 2	除染計画 3
住民の被ばく量 [man-Sv]	1.39	0.918	0.961	1.02
作業者の被ばく量 [man-Sv]	0	0.120	0.0216	0.0179
コスト [€]	0	6.6×10 ⁵	2.1×10 ⁵	1.9×10 ⁵
廃棄物量 [kg]	0	2.61×10 ⁶	2.57×10 ⁶	2.27×10 ⁶
作業量 [man-days]	0	943	166	141

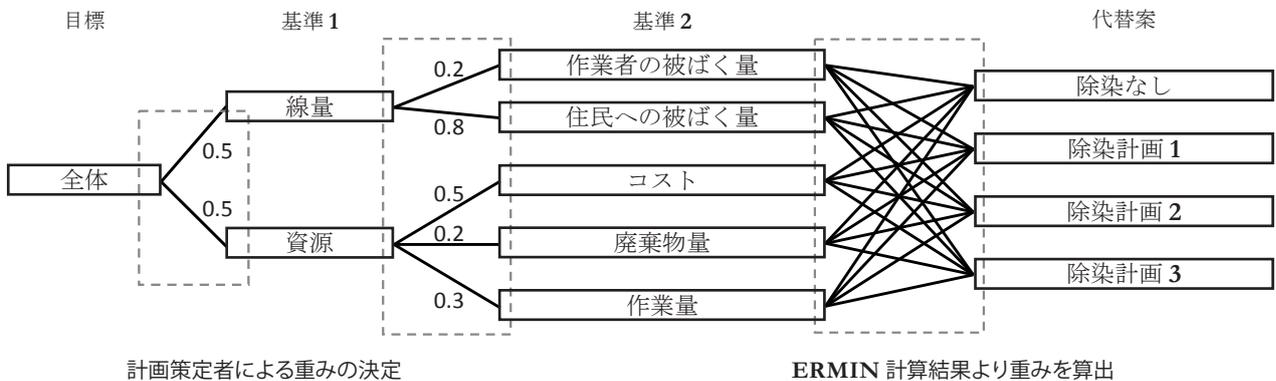


Fig.11 複数の除染計画を比較する際の考え方の概念図

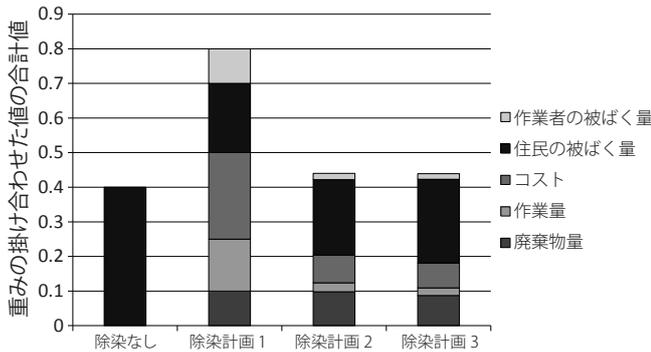
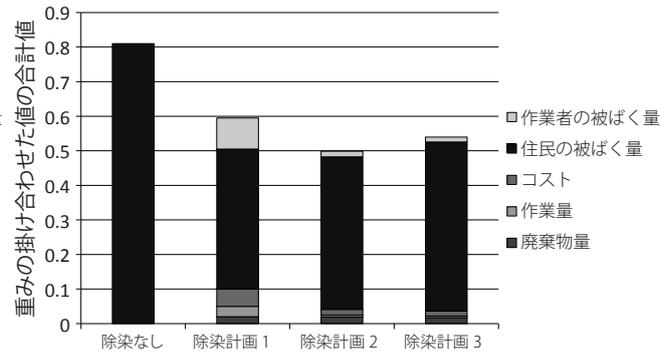


Fig.12 Web-HIPREによる除染計画の比較

Fig.13 Web-HIPREによる除染計画の比較
(住民の被ばく量重視の重み付け)

コストの制限が無いのであれば、被ばく量の効果を最大にする除染計画を考えることが可能であるし、あるいは仮置き場に制限がある場合は、廃棄物量を押しさえつつ最大効果のある除染計画を立てることが可能である。

4. 総括

ERMINを除染モデル実証事業対象地域に適用し、空間線量率の実測値と計算値との比較を行った結果、概ねERMINの再現性を確認した。また、空間線量率の減少率から除染を評価するのではなく、住民の被ばく量の低減効果とコストや作業量等の価値観から除染を評価することが可能となった。さらに、除染による被ばく量の低減効果、コスト、廃棄物量、作業量、作業者の被ばく量といった5つの価値観から除染方法、除染場所、除染のレベルに関して比較検討することによって、地域条件を反映した除染計画を策定することが可能になった。

謝 辞

本研究は、環境省環境研究総合推進費(1ZE-1203)の助成を得て行われた。ERMIN習得のためにご協力頂いた、カールスルーエ工科大学のWolfgang Raskob教授、Claudia Landman博士、Dmytro Trybushnyi博士、環境研究総合推進費のプロジェクト代表(プロジェクト名:FairDo)の鈴木浩博士、研究の支援を頂いた公益財団法人地球環境戦略研究機関、FairDo関係者の方々に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) RODOS-homepage (<http://www.rodos.fzk.de/>)
- 2) T.W. Charnock: The European model for inhabited areas (ERMIN) — developing a description of the urban environment. *Radioprotection* **45**, n° 5 S55-S61 (2010)
- 3) 「国及び自治体ごとがこれまでに実施した除染事業に

おける除染手法の効果について」環境省HP (<http://www.env.go.jp/jishin/rmp/conf/08/mat07.pdf>)、2013年3月閲覧

- 4) 佐藤 大樹、小嶋 健介、大泉 昭人、松田 規宏、久語 輝彦、坂本 幸夫、遠藤 章、岡島 成晃: 除染効果評価システムCDEの開発。*JAEA-Research*, 2012-020 (ドラフト) (2012)
- 5) J. Mustajoki: Web-HIPRE — A Multiattribute Decision Support System on the Internet (1999) (<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.16.3499&rep=rep1&type=pdf>)
- 6) W. Raskob, D. Trybushnyi, I. Ievdin and M. Zheleznyak: JRODOS: Platform for improved long term countermeasures modelling and management. *Radioprotection* **46**, n° 6 S731-S736 (2011)
- 7) A. Jones, T. W. Charnock, L. Singer: Description of the Modelling of Transfer and Dose Calculations within ERMIN v1.0 and associated data libraries (all v1.0). UK (2009)
- 8) 「福島第一原子力発電所事故に伴うCs137の大気降下状況の試算 — 世界版SPEEDI (WSPEEDI) を用いたシミュレーション —」(独) 日本原子力研究開発機構HP (<http://nsed.jaea.go.jp/fukushima/data/20110906.pdf>)、2012年12月閲覧
- 9) (独) 日本原子力研究開発機構: 平成24年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書 pp.217-227 (2013) <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf05/03-2.pdf>
- 10) 「文部科学省による放射線量等分布マップ(放射性セシウムの土壌濃度マップ)の作成について」文部科学省HP (http://radioactivity.nsr.go.jp/ja/content/6000/5043/24/11555_0830.pdf)、2012年8月閲覧

- 11) (独) 日本原子力研究開発機構:平成 23 年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の第二次分布状況等に関する調査研究」成果報告書 pp.69-91 (2011) <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf05/01-05.pdf>
- 12) (独) 日本原子力研究開発機構:福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務 報告書 (2012) <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf/2.2-130624.pdf>
- 13) SECTION E Dose Assessment. 81-122, “IAEA-TECDOC-1162 Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency”. IAEA, Vienna Austria (2000)
- 14) 「福島第一原子力発電所事故における放射性物質の大気中への放出量の推定について」東京電力株式会社 HP (http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu12_j/images/120524j0105.pdf), 2013 年 8 月閲覧
- 15) 「追加被ばく線量年間 1 ミリシーベルトの考え方」環境省 HP (http://www.env.go.jp/press/file_view.php?serial=18437&hou_id=14327), 2012 年 7 月閲覧
- 16) (独) 日本原子力研究開発機構:平成 24 年度放射能測定調査委託事業「福島第一原子力発電所事故に伴う放射性物質の長期的影響把握手法の確立」成果報告書 pp.53-70 (2013) <http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat03/pdf05/02-3.pdf>
- 17) (独) 日本原子力研究開発機構:福島第一原子力発電所事故に係る避難区域等における除染実証業務 報告書 (2012) http://fukushima.jaea.go.jp/initiatives/cat01/pdf/2.4_2-130624.pdf
- 18) 朝日新聞 (2012 年 1 月 12 日)
- 2014 年 11 月 5 日受付
2014 年 12 月 24 日受理

和 文 要 約

チェルノブイリ事故後、欧州で開発された住居地域モデル ERMIN を、福島県富岡町の除染モデル実証事業対象地域に適用し、ERMIN の適用可能性を検討した。具体的には、ERMIN を除染が実施された富岡町の 8 つの 100 × 100 m の区画に適用した。その結果、除染開始から終了までの約 2 か月の期間で実測された空間線量率は、環境半減期を考慮したもの、しなかったものによって得られた各区画の計算値の範囲の中に入ることが確認された。除染実施期間中の空間線量率において空間線量率を再現できた ERMIN を用いて、除染に伴う住民の被ばく量の低減や除染に伴うコスト、廃棄物量、作業量、作業者の被ばく量といった 5 つの評価項目から除染計画を検討した。事故後約 9 か月に除染を行った際の計算結果では、モデル区域に住み続けた住民の被ばく量は、15 か月の期間において約 24 mSv 低減されることが推定された。また、除染に伴う前述した 5 つの評価項目の重みづけをすることで複数の除染計画の比較を行った。

