

除染効果評価システムCDEを用いた除染計画の検討 Decontamination Planning Based on Computer Simulation Code CDE

日本原子力研究開発機構 原子力基礎工学研究部門
佐藤 大樹、大泉 昭人、松田 規宏、小嶋 健介、久語 輝彦、坂本 幸夫⁺
遠藤 章、岡嶋 成晃

要旨

福島第一原子力発電所の事故により、環境中に放出された放射性物質に対する効率的な除染計画の立案を支援するため、原子力機構において除染効果評価システムCDEが開発された。CDEは、2011年11月に公開されて以来、政府、地方自治体、企業をはじめ多くのユーザーに利用されている。本稿では、CDEの概要とそれを用いた除染計画の検討方法の例について紹介する。

1. はじめに

コンピュータ・シミュレーションの大きな利点は、実際に『行動』を起こす前に、それがもたらす効果を『予測』できることである。特に、その行動に多大な費用と労力が伴い、また人々の生活に大きな影響を与えるような場合は、効果の予測とそれに基づく最善の行動選択が強く求められる。予測の方法には、実環境や小規模な実験室環境における測定データに基づくものがある。しかし、条件を変えた膨大な行動シナリオに対応する効果を短期間で予測するためには、コンピュータ・シミュレーションの利用が極めて有効であり、その担う役割は大きい。

2011年3月11日にマグニチュード9.0を記録した東北地方太平洋沖地震が発生した。この未曾有の大地震と、それに伴い発生した大津波により、東京電力(株)福島第一原子力発電所(福島第一原発)は全交流電源喪失という重大な事態に陥った。原子炉及び使用済み核燃料プールの冷却機能の維持に必要な電源をすべて失った施設では、異常な温度上昇が続き、炉心溶融及び被覆管と高温水との反応で発生した水素による水素爆発へと至った。こ

の爆発により、原子炉内部の放射性物質が環境中に放出され、その一部は広範囲にわたって土壌表面に沈着し、地表面近傍における空間線量率を上昇させている[1]、[2]。

政府はこの事態を受け、福島第一原発の半径20km以内を警戒区域及び1年間の積算線量が20mSvを超える可能性がある半径20km以遠の地域を計画的避難区域と設定し、住民の避難及び退去を勧告した[3]。空間線量率の低減をはじめとした安全性の確保に基づく避難解除[4]と、その後の住民帰還及び復興のためには、汚染環境に対する除染が喫緊の課題であり、政府を中心とした大規模な除染活動から各市町村及びボランティア団体による小規模除染も計画されている。

独立行政法人日本原子力研究開発機構(原子力機構)の原子力基礎工学研究部門は、コンピュータ・シミュレーションにより、様々な行動シナリオに基づく除染がもたらす効果を迅速かつ適切に評価し、合理的な除染計画の立案に資するシミュレーションコードCDE

⁺ 現所属：株式会社アトックス

(Calculation system for Decontamination Effect)[5]を開発した。CDEは、独自の線量計算アルゴリズムにより除染前後の空間線量率及び除染効果をシミュレーションし、除染対象地域の地形図上にその結果を可視化して表示する。コード、サンプルデータ及びユーザーマニュアルは、原子力機構のホームページ上で2011年11月2日から公開されており、登録ユーザーに対して無償提供される[6]。登録ユーザー数は、2012年3月末時点で452件を数え、実際の除染作業における除染効果の事前評価にも活用されている。

環境に分布した放射性物質から放出される放射線のうちガンマ線は大気中での飛程が長い、ある場所の放射性物質が思わぬ場所の空間線量率に寄与していることがある。望んだ場所の空間線量率を下げるために、どこをどの程度除染すればいいかの判断は、実は相当に難しく、感覚に頼ってやみくもに行うべきではない。CDEを用いたコンピュータ・シミュレーションにより、限られた予算と労力のなかで効率的な除染計画の立案が支援される。本稿では、CDEの概要を紹介するとともに、CDEによる除染効果の予測に基づいた除染計画の検討例について示す。

2. 除染効果評価システムCDEの概要

CDEの主な特徴を以下にまとめる。

- 使いやすさを重視し、汎用の表計算ソフトウェアであるMicrosoft® Excel®上で動作
- 専用のグラフィカル・ユーザー・インターフェース (GUI) を備え、操作の大部分をマウスによって実行
- 入力データには、利用者がインターネットなどを介して容易に入手可能な情報を利用
- 1回の評価計算は数秒程度で完了
- 除染効果を視覚的に捉えるため、評価結果を可視化して表示
- モンテカルロ法に基づく放射線挙動解析コ

ードと同程度の計算精度

GUIを含めたソフトウェアの本体は、Microsoft® Excel®のマクロであるVBA (Visual Basic for Applications) で記述した。ファイルの保存や数値のコピーなど基本的な操作はExcelの機能を使用するので、Excelの使用経験があれば馴染みのある操作で利用できる。また、線量計算を行う部分のプログラムは、高速化のためFortran90で記述している。CDEは、オープンソースソフトウェアとして配布されており、利用規約への合意の下で改変及び再配布が可能である。

図1にCDEを使った除染計画の検討の流れを示す。事前準備として、除染対象地域及びその周辺の地形画像、表面汚染密度データ及び除染係数 (DF: Decontamination Factor) データを用意する。これらのすべては、インターネットを介して比較的容易に入手できる。

地形画像は、市販の電子地図データはもちろん、Google Maps™のようなインターネット上で提供されている地図データも各サービスの定める利用規約への準拠の下に利用できる。表面汚染密度は[Bq/cm²]単位で与えられ、文部科学省が行った航空機モニタリングの結果が利用できる[1]、[7]。また、除染対象地域においてサーベイメータを用いて測定した1cm高さ及び100cm高さの空間線量率[μSv/h]も、表面汚染密度の入力値として利用可能であり、空間線量率から表面汚染密度への換算はプログラム内で行われる。DFは、除染前後の表面汚染密度の比であり、採用した除染技術に依存する。CDEでは、DF入力の補助として日本原子力学会「原子力安全」調査専門委員会クリーンアップ分科会によって検討された典型的な除染技術に対応したDF値[8]を内蔵しているほか、除染作業において蓄積された知見を反映できるように利用者による直接入力も可能としている。

CDEにおける入力パラメータの設定画面

を図2に示す。ここで、地形毎に与えられた表面汚染密度とDFの組に対して、ID番号とID色を割り振る。CDEに取り込んだ地形画像上に設定したメッシュ（メッシュサイズは5m×5mから20m×20mまでで選択可能）をID色で塗ることにより、除染対象地域における表面汚染密度とDFのマップを作成する。図3にマップ作成画面の例を示す。設定画面で作成したIDテーブルが、入力補助としてパレットに表示されており、地形画像の半分程度が塗りつぶされている。マップも含めた入力データの作成には、除染対象地域の地形の複雑さにも依存するが、通常2～4時間程度かかる。

計算結果としては、除染前空間線量率分布、除染後空間線量率分布及び除染効果を表す線量率減少係数（DRRF：Dose Rate Reduction Factor）分布の3つが出力される。計算結果は、その値の大きさにより、地形図上にカラーマップとして可視化される。図4にカラーマップの例を示す。図中示された点線の内側が除染対象地域である。空間線量率分布図では、赤色が高線量、青色が低線量地域を表す。またDRRF分布図では、青色や緑色が除染効果のあった地域、黄色が除染効果のなかった地域を示す。図より、除染対象地域内の空間線量率が低減し、除染効果を示すDRRFが上昇していることが、視覚的に捉えられる。入力データを一度完成させていれば、その後のケーススタディはIDテーブルのパラメータを変更することで、1ケース当たり数秒で完了できる。このことは、目標とする空間線量率及び除染効果を達成するための検討において、様々な行動シナリオは短期間に試すことができ、非常に有益である。またCDEは、地形画像上で塗りつぶした領域の面積をID色ごとに出力する。ID色は適用する除染技術ごとに分かれているため、その除染技術の単価を考慮して、想定した除染計画のおおよそのコストが推定される。

3. 線量率評価手法

ここでは、CDEで採用している線量評価手法について簡単に解説する。ソースコードを含めたその詳細は、参考文献[5]にて述べられている。CDEは、現在環境に広く分布している放射性セシウム（ ^{134}Cs 及び ^{137}Cs ）に対して作成した単位放射能当たりの線量率寄与データベース（応答行列と呼ぶ）を利用して、入力した表面汚染密度データに基づき除染前の空間線量率を計算し、さらに除染の度合いを示すDFを用いて除染後の空間線量率を予測する。除染効果は、除染前後の空間線量率から求まるDRRFによって評価する。

図5に地表面に分布した ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の応答行列を示す。応答行列は、環境を模擬した半無限体系において粒子・重イオン輸送計算コードPHITS[9]を用いたガンマ線輸送計算により作成した。線量率寄与を考える範囲は、線源より500m以内とした。この距離は、 ^{137}Cs の壊変から放出される662keVガンマ線の空気中における平均自由行程の約5倍に相当し、図5からわかるように線量率寄与も中心部に比べ6桁程小さくなっている。よって、線量寄与を考える範囲としては十分であると言える。

除染前の空間線量率分布は、表面汚染密度分布に応答行列を乗じて求めた線量率を積算することで計算される。除染後の空間線量率分布は、除染前の表面汚染密度にDFを乗じて除染後の表面汚染密度を求め、それと応答行列により導出する。また、DRRFは除染前の空間線量率を除染後の空間線量率で除することで計算される。これらの評価において、 ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の放射能の時間減衰を考慮して、任意の評価日における結果を出力することができる。

さらにCDEは、「GPSによる位置情報付き線量データの取り込み機能」と「覆土を考慮した空間線量率の計算機能」を有する。GPS機能は、GPSを搭載した放射線モニタによる

位置情報付きの測定データを、表面汚染密度分布の入力値としてCDEに反映することができる。GPSとの連携により、表面汚染密度の測定と入力データ作成にかかる手間を著しく軽減できる。覆土機能は、除染後の対象エリアを任意の厚みの土で遮蔽することで更なる空間線量率の低減を意図したシナリオに対応する。さらに、覆土機能を応用すれば、除染作業によって生じた廃棄物の土中への貯蔵における周囲への線量率寄与の評価も可能となる。

CDEの計算精度の検証は、既にいくつか行われており、良好な結果を収めている。単純化した半無限平板体系において、汚染土壌に対する除染対象領域の範囲とDRRFの相関を、CDE及びPHITSで計算し比較したところ、両者の結果は極めてよく一致した[5]。単純化した体系に対する計算であるとはいえ、CDEは学術分野で広く利用されている汎用的なモンテカルロコードPHITSと同程度の精度を持ちつつ、はるかに短時間で除染効果を予測し得ることが分かった。また、実際に放射性物質が分布した集落に対し、測定で得られた表面汚染密度データを用いてCDEで除染前の空間線量率を計算した[10]。その計算結果を、集落内の複数地点で測定した空間線量率と比較したところ、概ね10%以内で一致した。この結果から、実際の汚染地域における空間線量率及び除染効果の予測にも、CDEが利用可能であると判断された。より複雑な地形を持つ地域や除染後の空間線量率の予測精度に対しても、引き続き検証を行っている。

4. CDEを用いた除染計画の検討方法の例

CDEを用いた除染計画の検討方法の例として、福島県伊達市下小国地区を対象としたケーススタディについて紹介する。図6に伊達市下小国地区の除染対象領域を示す。検討では、表1に示すケース1からケース7まで

のアクションに従い、順次除染対象領域を拡大していった際の除染効果について調べた。この際DFは、日本原子力学会「原子力安全」調査専門委員会クリーンアップ分科会が提示した値[8]を参照した。また、ケース5では、DFをそれぞれ「畑(耕作)=2.0」、「森林=5.0」、「地面=10.0」へ変更した場合の効果についても調べた。

その結果を、代表点における空間線量率の変化として、図7～9にまとめた。また図10には、各ケースにおける除染効果の違いが分かるように、CDEの出力したDRRFのカラープロットを示した。

図7より、家屋周辺と斜面上部の除染(ケース2)を実施した段階で、家屋周辺の空間線量率は未除染の6割程度まで低減することが分かる。さらに、斜面下部の除染(ケース3)を加えると、斜面下部に位置するグラウンドと家屋(HE)の空間線量率も効果的に下がる。ケース3までの除染で、除染対象領域の境界付近に位置する家屋(HE)を除く家屋(HA、HB、HC、HD)の空間線量率は、約 $1.0 \mu\text{Sv/h}$ まで低減することが期待できる。その後に森林の除染(ケース4)と道路の除染(ケース5)を実施しても空間線量率の低減に対する効果は小さい。

除染対象領域の拡張について調べた図8より、除染対象領域をさらに100m外側まで広げる(ケース6)と、当初の除染対象領域の境界付近に位置していた家屋(HE)における空間線量率も、未除染時の約半分($1.0 \mu\text{Sv/h}$)まで下がる。また、除染対象領域を地図上の全領域(600m×700m)にまで拡張しても(ケース7)、地図中心に位置する集落における空間線量率の低減効果は小さい。

除染方法の変更による効果については、図9に示している。ケース5-1～5-3で試算したDFの変更も、局所的には空間線量率を下げるものの、様々な地形に囲まれた家屋周辺の空間線量率を劇的に低減させることはで

きない。

よって、これらの検討から、家屋周辺の空間線量率を効果的に低減させるためには、通常の除染技術を用いて、まずその周辺部の除染から実施することが望ましい。その後、畑やグラウンドを除染することで集落全体の空間線量率を下げるができる。また、除染対象となっている集落東部の森林は、付近の家屋への線量寄与を考慮して、東側に除染対象領域を拡張することで、さらなる空間線量率の低減が期待できる。このように、CDEシミュレーションによるケーススタディにより、目標とする除染効果を合理的に達成するための計画の立案を、強力に支援することができる。

5. まとめ

原子力機構の原子力基礎工学研究部門は、除染効果を簡便かつ迅速に予測するシミュレーションコードCDEを開発し、ホームページ上で無償公開した〔6〕。CDEはGUIを通した操作で、除染前後の空間線量率と除染効果(DRRF)を計算し、結果を除染対象地域の地形図上に可視化する。その精度は、汎用モンテカルロコードPHITSの計算値や実地における測定値との比較から検証されている。また、高速アルゴリズムの採用により、PHITSなどの汎用コードでは膨大な計算時間のかかる集落全体を対象とした評価でも、数秒で完了することができる。このような利点を活かして、想定される様々なシナリオの除染効果を事前に予測し、最適な行動を選択することが可能となる。

今後の除染は、合理的なコスト内で早急かつ効率的に実施される必要がある。このためには、CDEのようなコンピュータ・シミュレーションによる予測を積極的に活用すべきであると考え。計算科学研究で培われてきた技術を応用することで、現在直面している未曾有の事態に、僅かでも貢献できることを

望む。一刻も早い環境修復と、それによる住民帰還及び復興のため、今後も尽力していきたい。

謝辞

米国Pacific Northwest National Laboratoryの大西康夫氏には、CDEの開発方針について貴重なご意見をいただきました。深く感謝いたします。高度情報科学技術研究機構の池島智氏、中村光行氏、仁井田浩二氏には、GUIの開発及びプログラムの高速化にご協力いただきました。感謝いたします。最後に、CDEのホームページ公開に際してご尽力いただきました当機構原子力基礎工学研究部門の中沢哲也氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 〔1〕 文部科学省、放射線量等分布マップ、文部科学省ホームページ、<http://ramap.jaea.go.jp/map/>、(2012).
- 〔2〕 文部科学省、東京電力株式会社福島第1及び第2原子力発電所周辺の放射線量等分布マップ、文部科学省ホームページ、http://radioactivity.mext.go.jp/old/ja/distribution_map_around_FukushimaNPP/、(2012).
- 〔3〕 経済産業省、警戒区域、計画的避難区域及び特定避難勧奨地点がある地域の概要図、経済産業省ホームページ、<http://www.meti.go.jp/earthquake/nuclear/pdf/20120401map.pdf>、(2012).
- 〔4〕 経済産業省、避難区域等の見直しに関する考え方について、経済産業省ホームページ、<http://www.meti.go.jp/press/2011/08/20110809006/20110809006.html>、(2011).
- 〔5〕 佐藤大樹、他、除染効果評価システム

- CDEの開発、JAEA-Research 2012-020、(2012).
- [6] 日本原子力研究開発機構、除染効果評価システム、日本原子力研究開発機構ホームページ、
<http://nsed.jaea.go.jp/josen/>、(2011).
- [7] 文部科学省、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、文部科学省ホームページ、
<http://radioactivity.mext.go.jp/ja/list/258/list-1.html>、(2012).
- [8] 日本原子力学会、除染技術カタログ Ver.1.0、日本原子力学会ホームページ、
http://www.aesj.or.jp/information/fnp-p201103/chousacom/cu/catalog_ver1.0_20111024.pdf、(2011).
- [9] K. Niita, N. Matsuda, Y. Iwamoto, H. Iwase, T. Sato, H. Nakashima, Y. Sakamoto and L. Sihver, PHITS: Particle and Heavy Ion Transport code System, Version 2.23, JAEA-Data/Code, 2010-022、(2010).
- [10] 佐藤大樹、環境修復に向けた除染作業を支援する除染効果評価システムCDEの開発、Isotope News、696、14 - 19、(2012).

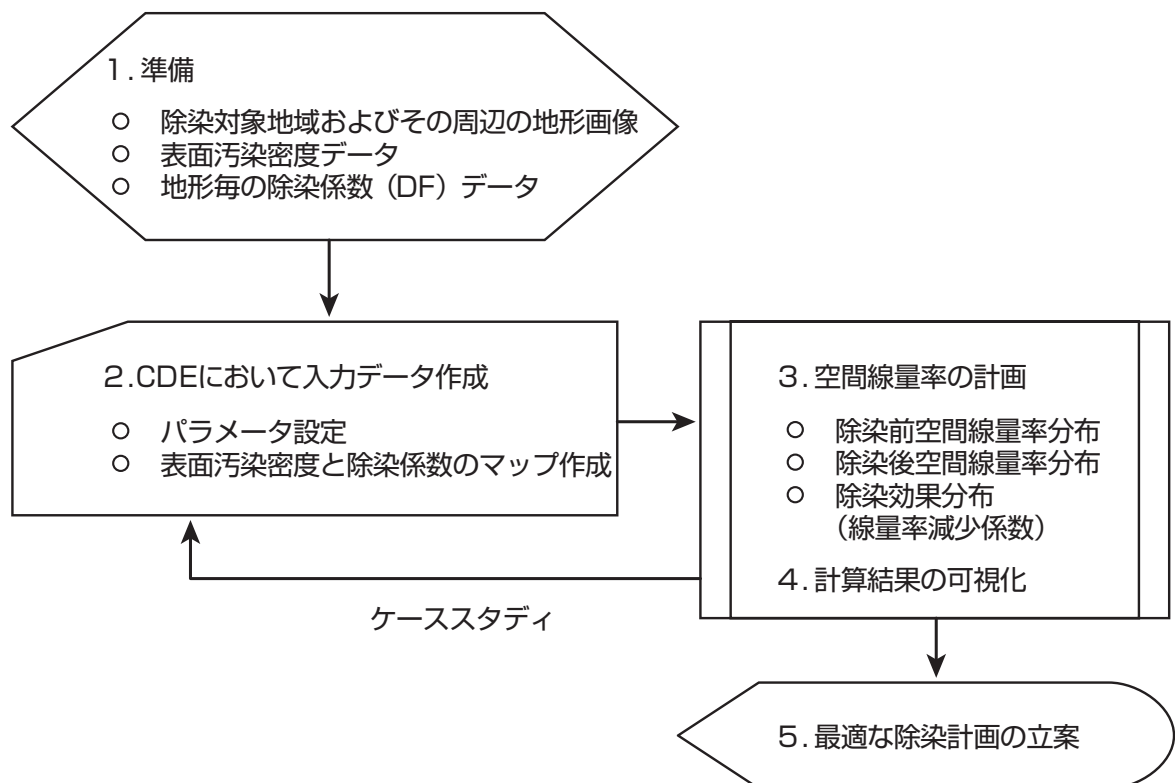


図1 CDEを利用した除染計画の検討の流れ

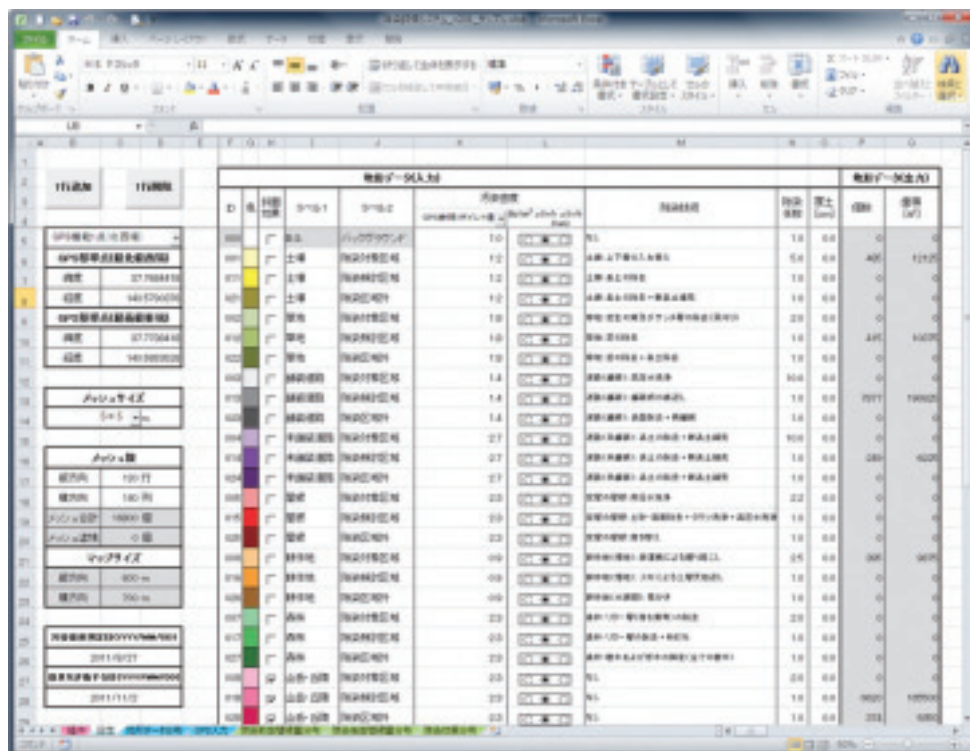


図2 パラメータの設定画面

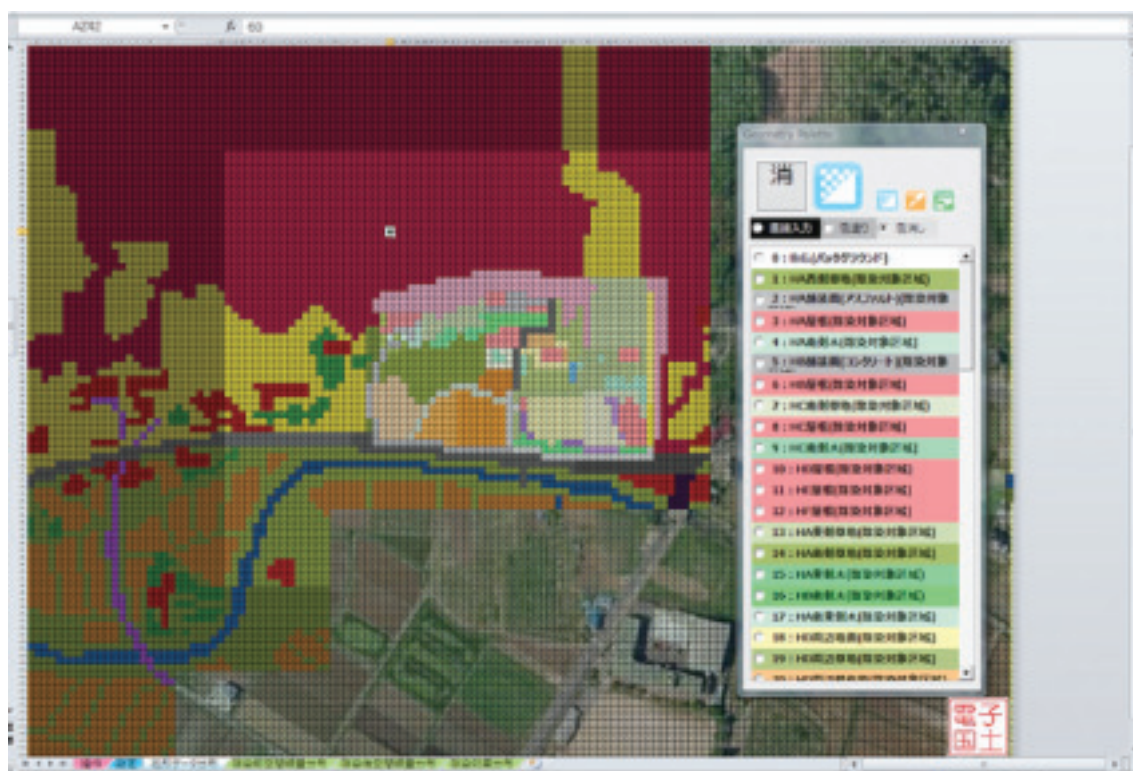


図3 地形データ分布の作成画面

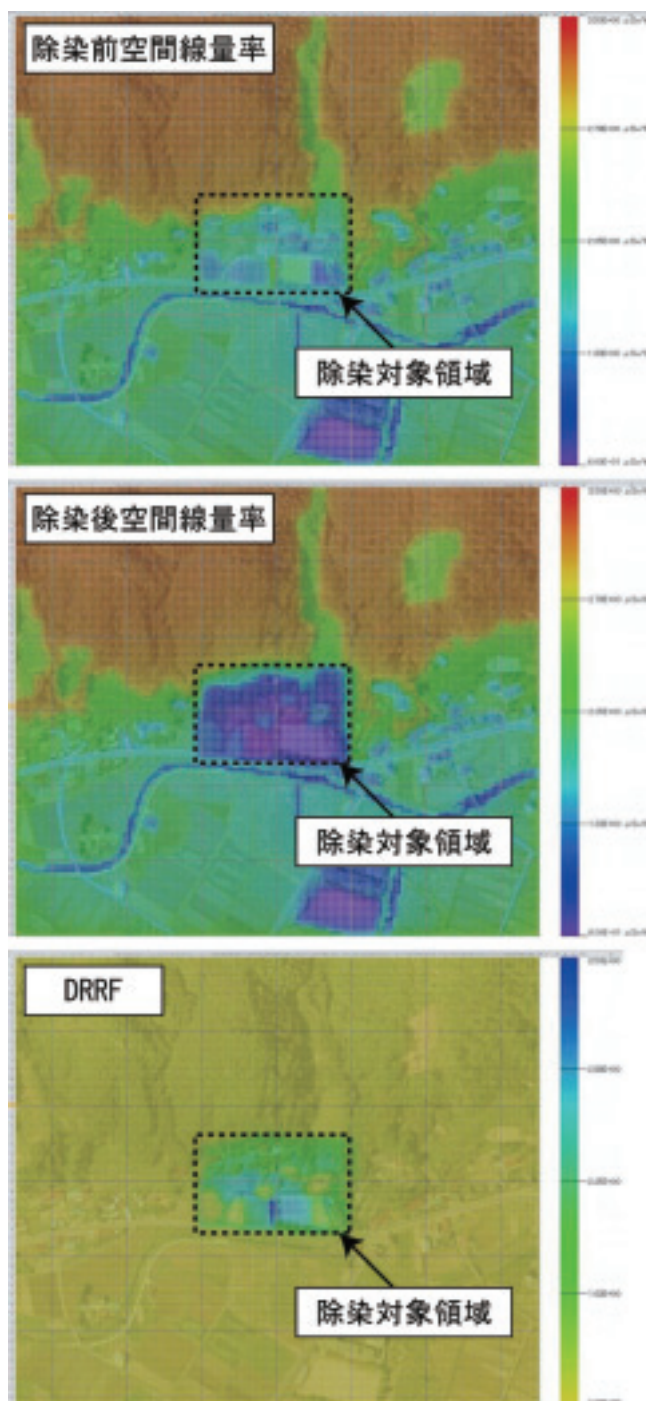


図4 除染前空間線量率（上）、除染後空間線量率（中）及びDRRF（下）の計算結果を可視化したカラーマップの例（点線で囲まれた領域が除染対象地域）

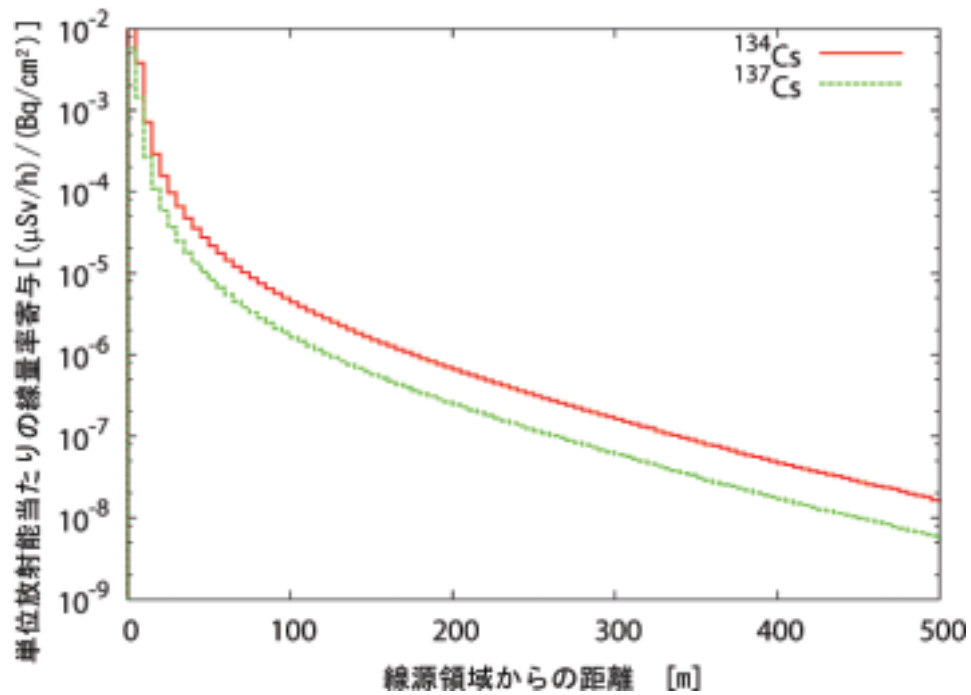


図5 地表面に分布した ^{134}Cs 及び ^{137}Cs の応答行列



図6 伊達市下小国地区における除染対象領域

表1 ケーススタディにおける各ケースとそれに対応するアクション（ケース番号横の色は図6における領域の色に対応する）

ケース	アクション	ケース	アクション
1 (赤)	家屋周辺の除染	5-1	畑（耕作）のDFを「2.0」に変更
2 (紫)	斜面上部の畑・草地の除染を追加	5-2	森林のDFを「5.0」に変更
3 (青)	斜面中部／下部の畑・草地の除染を追加	5-3	地面のDFを「10.0」に変更
4 (緑)	森林部の除染を追加	6	除染領域を100m外側まで拡張
5 (黄)	道路の除染を追加(除染区域内全除染)	7	除染領域を地図上の全領域に拡張

* 除染係数DF：地面、草地、道路（未舗装）、畑（未耕作）＝5.0、道路（舗装）＝10.0、屋根＝2.2、畑（耕作）＝1.0、植栽＝2.0、森林＝2.0

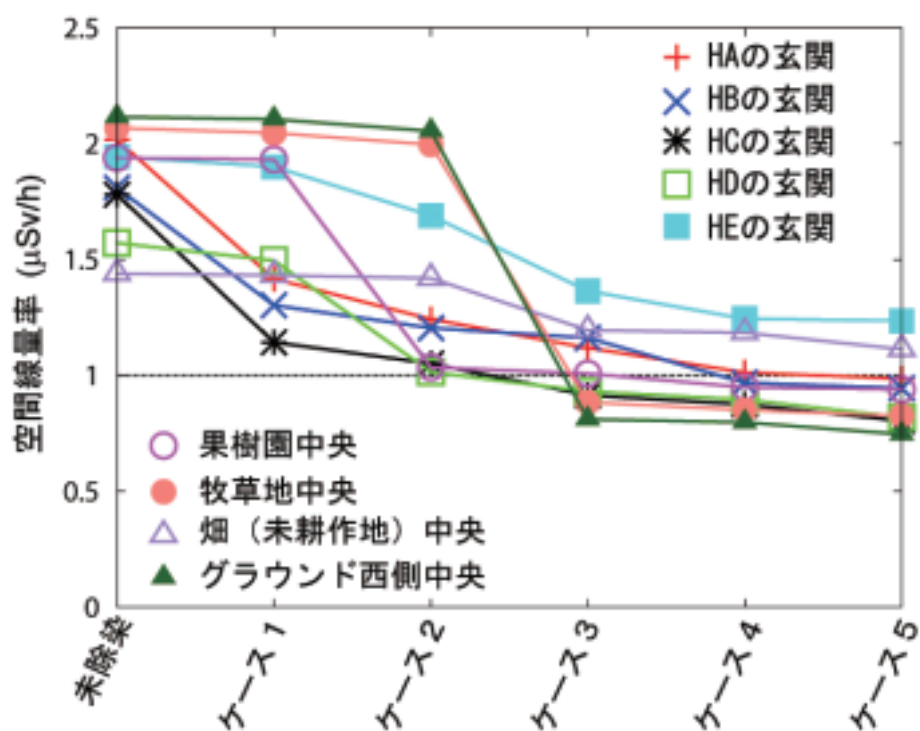


図7 順次除染対象領域を拡大していった場合の空間線量率の変化

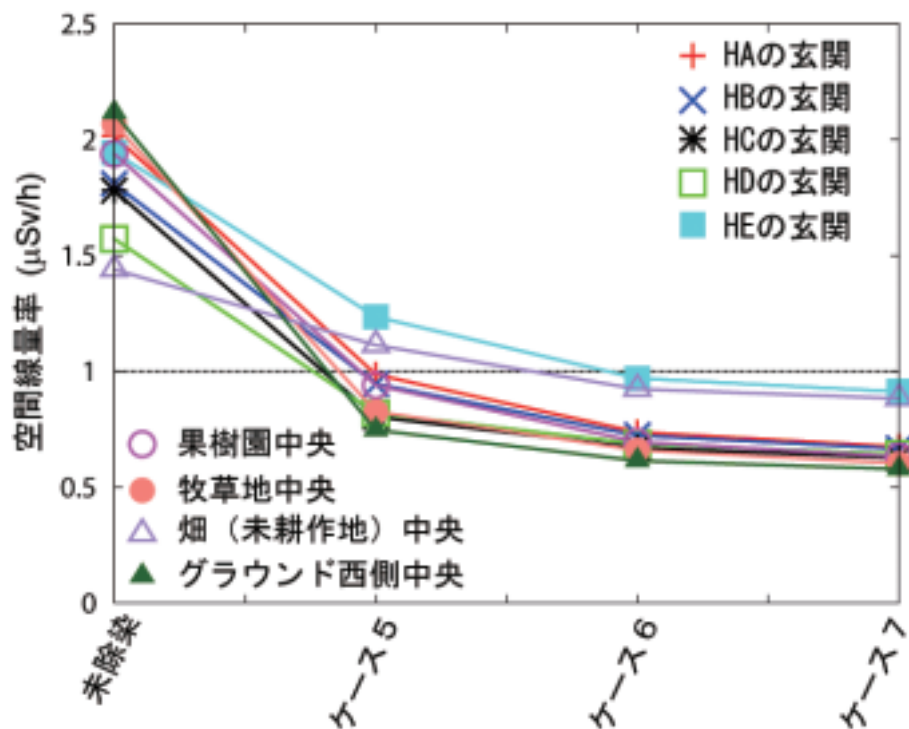


図8 除染対象領域を広げた場合の空間線量率の変化

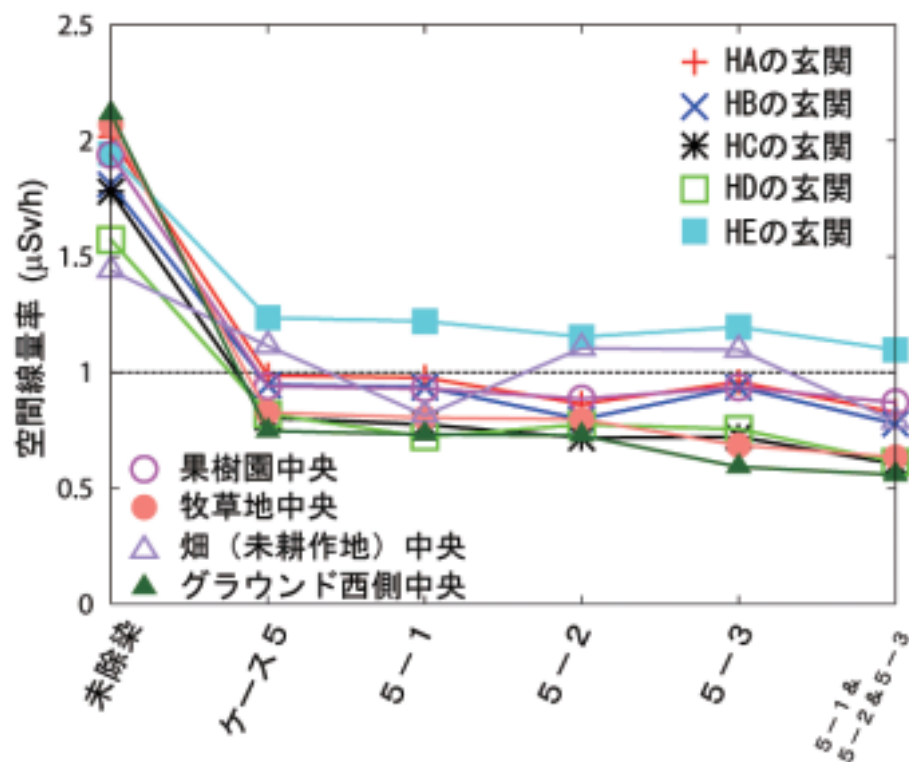


図9 除染方法を変更した場合の空間線量率の変化

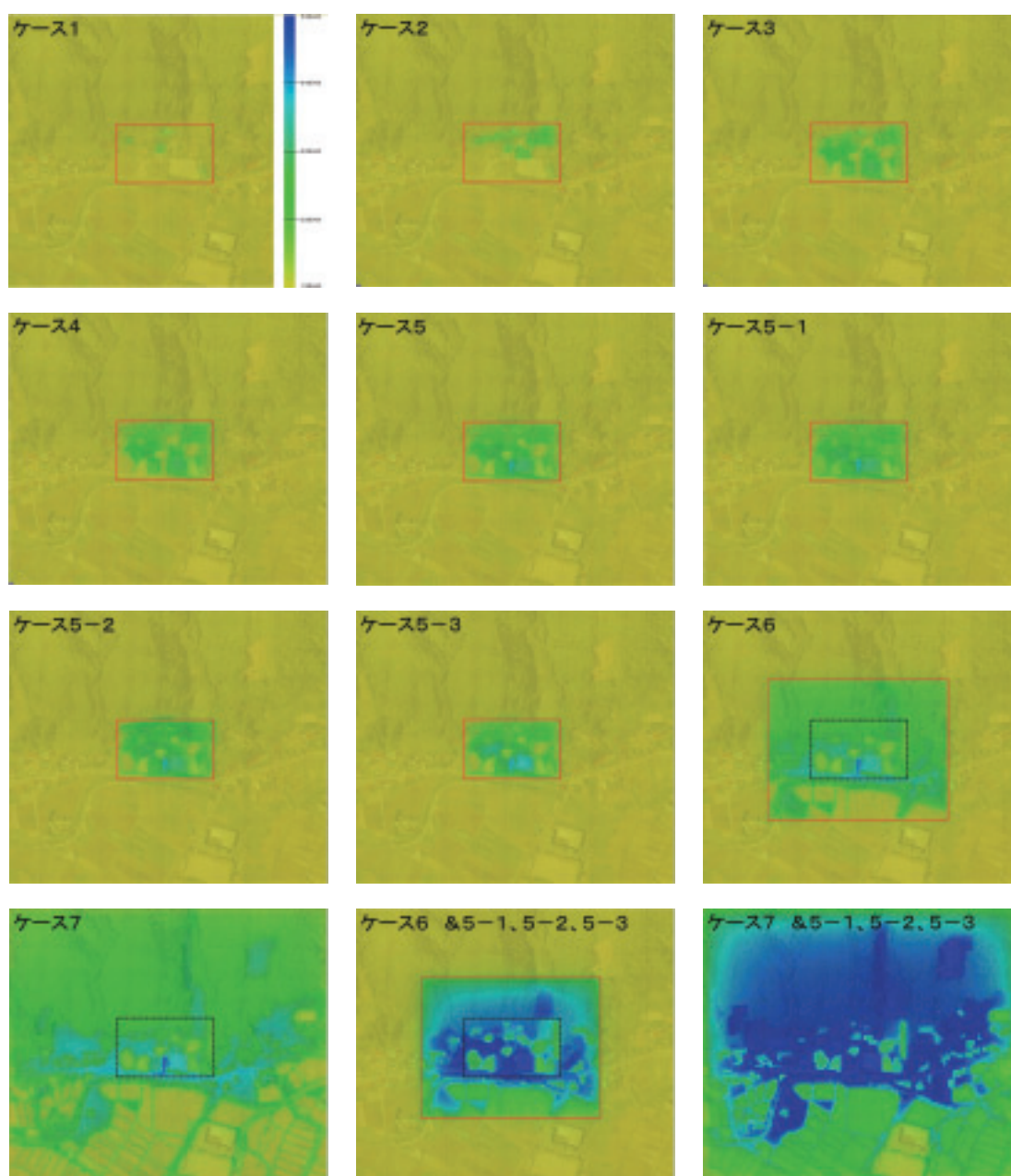


図10 DRRF分布図（各ケースにおける除染効果の違いを表示）