

植物の土壌浄化能力（ファイトレメディエーション）による 放射性同位体の回収および処理方法

Using Phytoremediation to Remove and Process Radioactive Isotopes

室 伏 祥 子	技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部
伊 藤 隆 政	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 博士（工学）
高 藤 誠	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 主査
須 田 俊 之	技術開発本部基盤技術研究所熱・流体研究部 課長 博士（工学）
久保田 伸 彦	技術開発本部基盤技術研究所応用理学研究部 部長 工学博士

東日本大震災の影響で福島第一原子力発電所から放射性同位体が、海水から土壌まで環境中に広範囲にわたり漏えいした。このなかには、土壌への吸着が強く、半減期が約 30 年の ^{137}Cs も含まれ、現状では長期にわたり汚染状態が続くことが予想される。この問題を解決するため、土壌からの放射性同位体除去の方法として植物を用いたファイトレメディエーションの利用および短期間で比較的安全に最終処分ができるプロセスの検討を実施したのでここに報告する。

Due to the effects of the Great East Japan Earthquake, radioactive isotopes from the Fukushima Daiichi nuclear power plant have leaked extensively into the environment, from land to sea. Because the affected soil has strongly absorbed this radiation, which includes ^{137}Cs isotopes with a half-life of 30 years, it is currently expected that there will be long term pollution. To solve this problem, the authors have investigated using the phytoremediation that plants use as a relatively safe and rapid disposal process for removing radioactive isotopes from the soil.

1. 緒 言

東日本大震災の影響によって福島第一原子力発電所から多量の放射性同位体が環境中に漏えいした。漏えいした放射性同位体のなかには半減期 30.1 年のセシウム 137（以下、 ^{137}Cs ）も多量に存在し、特に土壌中では拡散もしにくいため汚染状態が長期にわたり続くと考えられる。現状、一部地域では福島県の主要産業の一つである農業を行うことが難しくなる可能性があり、経済的な損失も懸念される。このため、土壌中の放射性同位体の処理を早急に行うことが必要である。放射性同位体の処理方法には幾つかあるが、ファイトレメディエーション（植物を用いた土壌の浄化法）技術は特に広範囲での処理に向いている。

本稿では、ファイトレメディエーション技術を紹介するとともに、今回の事故に対する放射性同位体の除去方法としての適用可能性について検討した結果を報告する。

2. ファイトレメディエーション技術

2.1 ファイトレメディエーション技術概要

植物は養分や水分を吸収するために土壌中に根を広げる

が、根は養分や水分だけでなく土壌中に存在するさまざまな元素吸収を行う。ファイトレメディエーション技術はこの植物の性質を利用し、放射性同位体や重金属などの汚染物質を土壌中から除去する技術である⁽¹⁾。汚染土壌の処理法には、ほかに①アスファルトなどで物理的に封じ込める方法②汚染土壌自体を掘削し除去・化学処理をする方法がある。これらの物理的・化学的方法とファイトレメディエーション法の性能比較を第 1 表に示す。物理的・化学的方法はファイトレメディエーション法と比較すると、処理時間は短いものの広範囲の処理には不向きである。

ファイトレメディエーションの汚染土壌修復機構を、第 2 表および第 1 図に示す。放射性同位体は、重金属と同様に植物体内に吸収、蓄積する機構（ファイトエクストラクション）によって土壌中から除去される。放射性同位体の吸収量、蓄積量は放射性同位体の種類および植物種や土壌環境によって異なる。

2.2 ファイトレメディエーション後の植物の処理方法

ファイトレメディエーション後、特にファイトエクストラクション後の植物の減容化などの処理方法についても考慮しなければ、汚染土壌修復は完了とはいえない。処理方

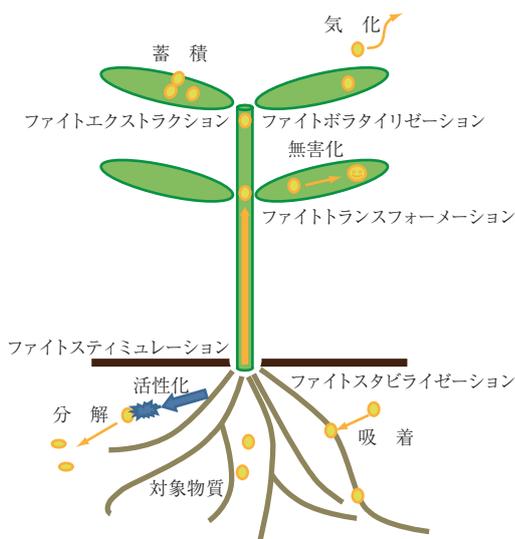
第1表 物理的・化学的方法とファイトレメディエーション法の性能比較^{(1)~(3)}
 Table 1 Comparison of physical and chemical methods and phytoremediation methods^{(1)~(3)}

比較項目	ファイトレメディエーション		物理的・化学的方法	
	特徴	評価	特徴	評価
処理時間	長時間	×	短時間	○
外部エネルギーの必要性	ほぼ不要	○	必要	×
土壌性能の維持	適切な植物の選択	○	維持されにくい	×
外部環境の影響	植物の生育に関係する	×	特に左右されない	○

第2表 ファイトレメディエーションの汚染土壌修復機構^{(1), (2), (4)} - その1
 Table 2 The contaminated soil repair system of Phytoremediation^{(1), (2), (4)} - No. 1

修復機構	説明	対象物質
ファイトエクストラクション	植物体内に対象物質を吸収・蓄積体内ではキレート化 ^{*1} もしくは液胞などに蓄積している場合が多い	金属, 放射性同位体, その他
ファイトスタビライゼーション	根および分泌物による対象物質の吸着・沈でん・固定	金属, 有機物
ファイトスティミュレーション	植物によって活性化した根圏微生物による対象物質の分解・無害化	有機物 (PAH, 石油など)
ファイトボラタイリゼーション	植物による気化, 放散, 除去	気化金属 (Hg など)
ファイトトランスフォーメーション	植物体内での対象物質の分解・転換・無害化	有機物

(注) *1: 中心金属イオンに対して別の分子やイオンがまるでカニのはさみのように結合しているもの。



第1図 ファイトレメディエーションの汚染土壌修復機構^{(1), (4)} - その2
 Fig. 1 The contaminated soil repair system of Phytoremediation^{(1), (4)} - No. 2

法には幾つかあり, 高温好気堆肥菌⁽⁵⁾のような微生物による植物の分解や抽出, 焼却などの方法がある。

3. ファイトレメディエーション技術を利用した放射性同位体除去プロセス

3.1 放射性同位体除去プロセス

今回の福島第一原子力発電所での事故によって半径 20 km 以上の広範囲の土壌に 1 ~ 14.7 MBq/m² 程度の放射性同位体が漏えいしている⁽⁶⁾。この範囲には農地も多く

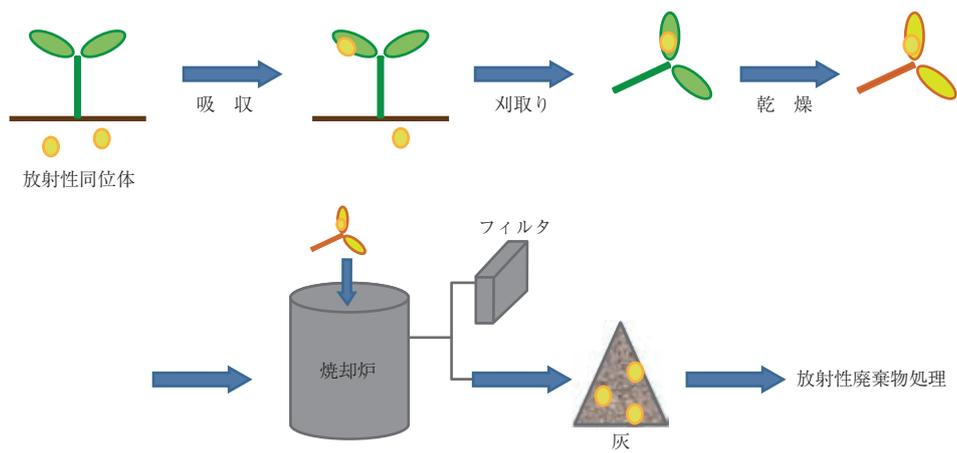
含まれるため, 土壌環境の維持能力が高く広範囲に向けたファイトレメディエーション技術の適用が良いと考える。

そこで, ファイトレメディエーション技術を利用した第2図に示す放射性同位体除去プロセスを検討した。ファイトレメディエーションによって土壌中の放射性同位体を除去した後, 植物を乾燥, 焼却によって減容化させる。その後, 放射性同位体を含んだ焼却灰を, 所定の放射性廃棄物と同様の処理を行うプロセスである。

3.2 ファイトレメディエーション技術に適応する植物

今回の事故で最も問題とされている放射性同位体は半減期 30.1 年と長い ¹³⁷Cs および半減期 2.1 年の ¹³⁴Cs である。¹³⁷Cs の除去で現在一般に知られている植物はヒマワリであるが⁽⁷⁾, 実際にはそのほかの植物でも十分に適用できる可能性がある。ファイトレメディエーションの利点の一つは, 土壌性能の維持など環境性の高さにある。しかし, 土壌環境と合わない植物を用いれば, その利点は全く発揮されず放射性同位体除去後の土壌環境, 生態に悪影響を与えかねない。そのため, その土地の土壌環境に適し, さらには根絶も容易である植物を選ぶと良いと考える。

また, セシウムイオン (以下, Cs⁺) は土壌に吸着しやすく, 今回の事故で汚染された土壌では現在のところ表層から 5 cm の深さに 90%程度が残留しているとみられ, 根が深く張る植物である必要はない。土壌中の放射性同位体除去終了後の植物自体の除去作業も考慮すると, Cs⁺ が



第2図 放射性同位体除去プロセス
Fig. 2 Radioactive isotope removal process

高濃度に存在する深さ（5～10 cm 程度まで）に根を張る植物で十分である。

そのほか、一度の¹³⁷Cs吸収量には限界があると考えられる。そのため、たとえば、地上部が刈り取られても何度か再生すること、同時に植物の地上部（茎、葉）に¹³⁷Csが集積され刈り取りやすい形状であることが理想的な条件である。

これらの条件を満たす植物の一つに芝が考えられる。芝の特徴をヒマワリの特徴と合わせて第3表に示す。ヒマワリの根とは異なり、芝は広がった根を張るなどの特徴がみられる。また、多年草であり、度重なる種まきの必要があまりないことも作業性の面で有利になると考える。

植物自体の種類とは別に、育成環境も植物のCs吸収量に影響があるため、肥料などを与える際には注意が必要である。たとえば、土壌中にカリウムイオン（以下、K⁺）が多く存在している場合、植物のCs吸収量は減る傾向に

ある⁽⁹⁾。これは放射性同位体¹³⁷Csの植物体内への吸収には、主にK⁺トランスポーターがかかわっているためである⁽⁹⁾。K⁺トランスポーターとは、エネルギー貯蔵にかかわる分子（ATP：アデノシン三リン酸）の作用によって開閉する細胞膜上に存在するK⁺の能動的な輸送体である⁽¹⁰⁾。CsとKはともにアルカリ金属であるため、植物が誤って取り込んでいると考えられる。また、アンモニウムイオン（以下、NH₄⁺）が多い場合は逆にCs吸収量が増加する。これは、Cs⁺は-に帯電した土壌に吸着しているが、そこへNH₄⁺が置換することでCs⁺の土壌への吸着が妨げられるためと考えられている⁽⁷⁾。

3.3 焼却による植物の減容化

放射性同位体を集積した植物を減容化する方法は幾つかある。今回の事故では、大量の放射性同位体を含む植物体が発生すると思われる。この場合、長期にわたる処理では保管場所の問題が生じ、保管地域には大きな負担が生

第3表 ヒマワリと芝の特徴比較^{(7), (8)}
Table 3 Comparison of sunflowers and grass^{(7), (8)}

項目		ヒマワリ	芝
		キク科	イネ科
入手性		容易に入手可	容易に入手可
種のまき方		2～3 cmの深さに埋める	まくだけで可
生育	時期	夏季	通年
	特徴	耐寒性が弱い	冬型、夏型芝の利用で可能
刈取り可能回数		1回/年 一年草	3～4回/年 多年草
根の深さ		1 m長	5 cm程度
¹³⁷ Csに対するファイトレメディエーション能力（参考値）	除去率	12%	24.5～99.7%
	土壌、水の初期放射線量	5 MBq/l	400 kBq/l
	栽培方法	水耕栽培によって、32日間栽培	2か月おきに3回地上部を刈取り 吸収量は種類による

じるため現実的には難しいと考えられる。その点、焼却処理は短時間で減容化できる点が有利である。減容化後は、植物生重量の約 60 分の 1 程度となる。ただし、Cs 化合物は沸点が焼却温度（およそ 1 000℃）よりも低い 500℃前後のため、焼却時に揮発もしくは軽い灰（フライアッシュ）に付着して炉から排出され、後流の冷却プロセスで凝縮することになる。そのため、排気口にフィルタを設置するなど、焼却炉からの ^{137}Cs の漏出を防止する対策が必要になる。また、 ^{137}Cs が灰中に濃縮されることになるため、取扱い方法など十分に注意することが必要になる⁽¹¹⁾。

以上のように焼却炉の設計にはある程度考慮すべき点があるものの、 ^{137}Cs の漏出防止策を施した焼却炉はほかの汚染廃棄物を焼却することも可能である。このため、植物の処理だけでなく、ほかの廃棄物の処理も可能という汎用性は、ほかの処理方法と比較しても有利な点であり、経済的にも現実的な方法であると考えられる。

4. 結 言

今回、福島第一原子力発電所の事故によって放射性同位体に汚染された土壌に関して、ファイトレメディエーション技術を利用した処理方法を検討した。農地の多い福島県などでは、復興後の土地利用を考えると環境性も高く、広範囲の処理に向けたファイトレメディエーション技術は有望な対策の一つである。また、放射性同位体を含んだ大量の植物体の処理には、短時間で実施できる焼却処理が現状最適と考える。今後は、焼却炉から放射性同位体が漏えいしない設計の検討が重要である。

なお、最終処分までには、廃棄物の移動など法的な問題も解決する必要があり、公的機関との連携が必要である。

— 謝 辞 —

本件に関しアドバイスをいただきました学習院大学の村松康行教授、北海道大学の渡部敏裕助教に感謝申し上げます。

参 考 文 献

(1) 王 効拳, 李 法雲, 岡崎正規, 杉崎三男: ファイトレメディエーションによる汚染土壌修復 埼

玉県環境科学国際センター報 第 3 号 2002 年 pp. 114 - 123

(2) 長谷川功: 植物と重金属—その多様性・その利用— 第 147 回 生存圏シンポジウム要旨集 2010 年 1 月 pp. 1 - 8

(3) 社団法人日本機械工業連合会: 平成 19 年度土壌汚染対策に関する動向調査報告書 日機連 19 環境安全-2 2008 年 3 月 pp. 1 - 36

(4) 田元修一: ファイトレメディエーション(植物を用いた地盤の浄化法)について 寒地土木研究所月報 第 646 号 2007 年 3 月 pp. 42 - 44

(5) 独立行政法人宇宙航空研究開発機構: ISAS メールマガジン 第 342 号 (オンライン) 入手先 <<http://www.isas.jaxa.jp/j/mailmaga/backnumber/2011/back342.shtml>> (参照 2011-04-12)

(6) 文部科学省: 文部科学省及び米国エネルギー省航空機による航空機モニタリングの測定結果について 2011 年 5 月

(7) P. Soudek, S. Valenova, Z. Vavrikova and T. Vanek : ^{137}Cs and ^{90}Sr uptake by sunflower cultivated under hydroponic conditions Journal of Environmental Radioactivity 88 (2006) pp. 236 - 250

(8) James A. Entry, Lidia S. Watrud and Mark Reeves : Influence of Organic Amendments on the Accumulation of ^{137}Cs and ^{90}Sr from Contaminated Soil by Three Grass Species Water, Air, & Soil Pollution Vol. 126 No. 3 - 4 (2001) pp. 385 - 398

(9) Y-G, Zhu and E. Smolders : Plant uptake of radiocaesium: a review of mechanism, regulation and application Journal of Experimental Botany Vol. 51 No. 351 (2000. 11) pp. 1 635 - 1 645

(10) 著 GERALD KARP 監訳 山本正幸, 渡辺雄一郎: カープ分子細胞生物学(原著第 2 版) 東京化学同人 2000 年 3 月 pp. 137 - 140

(11) 災害廃棄物安全評価検討会(第 2 回)資料: 環境省 (オンライン) 入手先 <<http://www.env.go.jp/jishin/index.html#haikibutsu>> (参照 2011-06-13)

