

中国農用地の重金属汚染の現状と ハクサンハタザオを用いたファイトレメディエーションの適用について

北島 信行 張 文 宇^{*1}
飯野 浩成^{*1} 増田 圭司
常 文越^{*2} 趙 光輝^{*2}
劉 智^{*2} 張 依然^{*2}

概 要

農用地における重金属汚染の問題は、フードチェーンを通じた健康リスクの課題として世界的に認識されている。中国においても、土壤汚染の深刻性が意識されており、近年では全国的な調査による実態把握が行われるとともに、汚染の防止・修復に関わる政策目標が示されている。本報告では、近年の資料に見られる中国の土壤汚染状況を背景として、以下の内容について述べる。

- 1) 中国農産物の汚染状況に関する、「農用地」、「重金属汚染」、「修復技術であるファイトレメディエーション」をキーワードとした文献調査の結果
- 2) 中国の重要な工業基地である遼寧省瀋陽市における農用地、農産物の汚染状況
- 3) フジタが保有する浄化植物であるハクサンハタザオを用いたファイトレメディエーションの適用

Current status of heavy metal contamination in Chinese agricultural land and applicability of phytoremediation utilizing Cd hyperaccumulator *hakusan-hatazao* (*Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera*)

Abstract

Agricultural land contaminated with heavy metal is a recognized concern worldwide due to the health risks that it poses through the food chain. In China, there is an awareness of the growing severity of soil contamination, and within the last decade, governmental policy objectives to prevent and remedy contamination have been set based on the results of a national survey.

This report shows the followings:

1. The current status of contamination of agricultural products in China based on searches of recently published literature regarding the heavy metal impacted agricultural land and phytoremediation as a countermeasure.
2. The facts of contamination in the city of Shenyang in Liaoning Province, an important industrial area in northwest area of China.
3. The applicability of Fujita's cleaning crop, *hakusan-hatazao* for phytoremediation in China.

キーワード: 中国、重金属汚染、
ハクサンハタザオ、
ファイトレメディエーション

*1 建設本部 建築エンジニアリングセンター
環境技術部

*2 瀋陽環境科学研究院

§1. はじめに

1.1 背景

中国では工業活動に由来する汚染の激増及び農用化学物質種類・数量の増加に伴い、農用地土壌の重金属汚染が深刻化している。2004年の報告では、Cd、Pbなどの重金属に汚染された農用地面積は、約 2.00×10^7 ha であり、農用地総面積の 1/5 を占めている。そのうち、工業「三廃（廃ガス、廃水、固形廃棄物）」に汚染された農用地面積は、 1.00×10^7 ha であり、污水灌漑農用地の面積は、 3.30×10^6 ha となっている¹⁾。

中国環境保護部は、国土資源部と共同で初の全国土壌汚染状況調査を行った（2005年4月から2013年12月）。これは、統一の方法・基準が採用された調査であり、実際の調査面積は約 630 万平方キロメートルに及び、すべての耕地と一部の林地・草地・未利用地・建設用地をカバーしている。

この調査²⁾で把握された土壌汚染の状況は、総体として楽観できないものとなっている。土壌調査地点の基準超過率は 16.1% であり、中国の基準で分類すると、そのうち「軽微」「軽度」「中度」「重度」に相当する汚染地点はそれぞれ 11.2%、2.3%、1.5%、1.1% だった。また、汚染の類型は「無機型」が主で無機汚染物の基準超過地点数は、基準超過地点全体の 82.8% を占めており、「有機型」がこれに続き、「複合型」汚染の割合は比較的小さかった。

一方、汚染分布の状況から見ると、北方よりも南方の土壌汚染が深刻である。すなわち、長江デルタや珠江デルタ、東北旧工業基地などでは一部の地域の土壌汚染問題が目立つのに対して、西南地区や中南地区では土壌の重金属基準超過範囲が比較的に広い。また、Cd、Hg、As、Pb の 4 種の無機汚染物の含有量の分布では、北西から南東、北東から南西に向かうほど含有量が高くなる傾向が見られ、南方の土壌汚染が面積、汚染レベル共に大きいことが分かる。

更に物質別の基準超過率では、Cd、Hg、As、Cu、Pb、Cr、Zn、Ni の 8 種の無機汚染物に対して、それぞれ 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8% であり、Cd の超過率が高いことが特徴的である。

農用地土壌についてのデータをみると、調査地点における基準超過率は 19.4% で、そのうち「軽微」「軽度」「中度」「重度」の汚染地点の内訳はそれぞれ 13.7%、2.8%、1.8%、1.1% で、主要な汚染物は Cd、Ni、Cu、As、Hg、Pb、DDT、PAH だった。

近年の資料に見られる中国の土壌汚染状況は以上の通りである。これを背景として、本稿では次の内容について述べる。

1) 「農用地」、「重金属汚染」、「修復技術であるファイトレメディエーション」をキーワードとした文献調査によって、中国農産品の汚染状況を示し、次いで 2) 東北旧工業基地である遼寧省瀋陽市における農用地土壌汚染の現状、農作物の汚染現状を明らかにしたうえ、対策技術としてのファイトレメディエーションの必要性を述べる。さらに、3) フジタが保有する浄化植物であるハクサンハタザオを用いたファイトレメディエーションの適用について述べる。

§2. 中国土壌汚染に関する政策動向と農産品の汚染問題

2.1 中国土壌汚染の政策動向

2006 年以来、中国は、徐々に土壌汚染の深刻性を意識し、政府部門は、一連の政策を打ち出した。具体的には 2016 年 5 月に「土壌汚染防止行動計画」（土壌十条）、2017 年 2 月に「土地修復計画（2016-2020）」が公表され、以下の政策目標が示されている。

①2020 年、汚染農地安全利用率を約 90% にし、汚染エリア安全利用率を 90% 以上

②2030 年、汚染農地安全利用率を 95% 以上、汚染エリア安全利用率を 95% 以上

③耕地修復率は、60% に達成

④中・低汚染耕地 2 億ムー（1 ムー＝667m²）を改造

⑤4～6 万ムー高水準農用地に 0.72～1.08 億元を投資
また、2016 年 12 月の「農用地土壌環境管理弁法」（パブコメ版）と、2017 年 3 月に意見募集段階に入る「土壌汚染防止法」は、2017 年度内に公表・施行される見込みである。

2.2 中国農産品汚染の現状

天南京農業大学研究グループの研究³⁾では、中国市販米 91 のサンプルを収集し、それぞれの Cd、Zn、Se の含有量を分析した。

中国食品衛生基準（GB15201-2002）と農業部無公害食品—米基準（NY5115-2002）の規定では、米の Cd 含有量最大許容値は 0.2mg/kg、Se は 0.3mg/kg である。91 の米サンプルの中で、12 つのサンプルの Cd は、基準を超過し（超過率 13%）、最高値は、基準の 6 倍を超えたという結果になっている。また、重金属に汚染された食糧は、毎年約 1200 万トンに上るとの資料もある⁴⁾。

これらの調査結果に基づいて考えると、中国土壌汚染に起因して生じ食物摂取を経由した人体への健康リスクは非常に高いと判断されるため、リスク低減を目指した対策の必要性が認められる。

表1 中国国家土壤環境質基準値と張土灌漑地区における重金属総量(mg/kg)

基準	Cd	Zn	Cu	Pb	Cr
1 級基準	0.20	100	35	35	90
2 級基準	0.30	250	100	300	300
3 級基準	1.00	500	400	400	400
張土水準	2.41	48.9	21.9	34.1	12.58

2.3 瀋陽土壤汚染の現状と農産品の汚染問題

瀋陽市は中国の重要な重工業基地であり、旧工業基地である瀋陽市鉄西区では、金属製錬、化工、紡績、機械加工などの業種が生産活動を行っていた。過去の生産工程では環境面への配慮の立ち遅れにより、毎年大量の重金属を含有する工業「三廃」が排出された経緯がある。また、瀋陽市郊外地区の農用地では、1993年までの30年間に未処理の都市汚水が灌漑用水に用いられた結果として、農用地土壌が重金属に汚染されている実態があり、農産品の質の低下を招いている。

当該地域の土壤汚染は、梁らの研究⁴⁾(表1)に見られるように、Zn、Cu、Crは基準超過せず、Cdのみ大幅に超過している状況である。この数値は、10年前の張土地区のCdの平均含有量4.47 mg/kg⁵⁾よりは、低下しているものの、中国の基準を大幅に超過しているのが実態である。

更に、図1に示すように、土壌中に含まれるCdの多くが、植物に吸収されやすいとされる化学形態であり、瀋陽張土地区で生産される農作物のCd濃度を上昇させる要因になっていると考えられる。

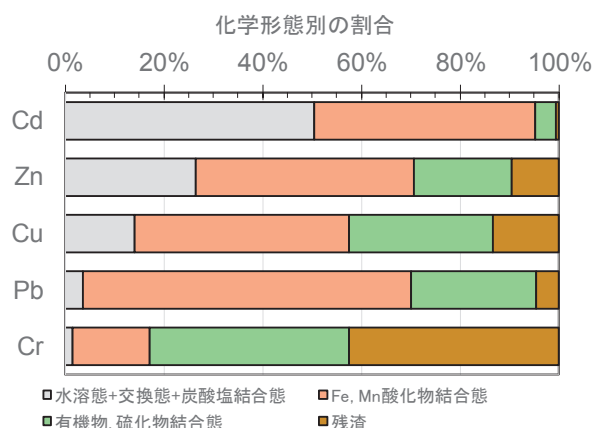


図1 土壌中の重金属の化学形態

梁ら(2006) ⁴⁾より作成

実際に、瀋陽市張土地区の玄米のCd含有量は、0.435～0.855 mg/kg⁶⁾と高い値を示しており、レタス、トウガラシ、ナスの食用部分のCd含有量は、それぞれ4.01、1.78、1.24 mg/kgである。コメについては、基準値(0.2 mg/kg)の2～4

倍、野菜は基準値(葉野 0.20 mg/kg、果菜 0.05 mg/kg)の2倍程度となる水準である⁷⁾。

このように瀋陽市張土地区において未処理の汚染水が灌漑されていた農用地の土壌と農作物のCd汚染状況は深刻である。その原因は、汚水排出・固形廃棄物、リン酸肥料・窒素肥料、冶金・電気メッキ・ステンレス産業からの排出による複合的なものと考えられる。

Cd汚染については、基準値を大きく超過するレベルである一方で、土壌に含まれるCdの化学形態は水に溶けやすく移動性の高い、従って植物に吸収されやすいものであるため、ファイトレメディエーションによる修復効果が期待できる。そこで、典型的な汚染サイトである瀋陽張土地区での修復効果の検証を通じて、中国汚染農用地の修復に対するファイトレメディエーション適用のさきがけとすることが考えられる。

§3. 中国のファイトレメディエーションの進展とフジタのファイトレメディエーションに関する研究成果

中国においても、ファイトレメディエーション技術の研究開発が行われている。既往の報告の中で Cd 汚染農地に対して、最も効果の大きいのが中国語名は「伴鉍景天」というセダム属の植物(*Sedum plumbizincicola*)である。

劉玲ら⁸⁾は、Cd濃度3.04±0.11 mg/kgの土壌において、異なる密度でこの植物を栽培した。4つのサイトでの栽培後の土壌中 Cd濃度は、それぞれ2.94、2.67、2.40、2.61 mg/kgまでに低下し、最も高い土壌中 Cdの低減率は21.1%であったと報告している。4サイトでの植物体中のCd濃度は、46.6、47.0、52.6、56.2 mg/kgであり、植物によって除去されたCd量は、208～646 g/haに達した。

一方、龍らの研究⁹⁾では、Cd濃度1.72 mg/kgの土壌で栽培し、収穫した植物体中のCd濃度は7.06～12.51 mg/kg(平均8.80 mg/kg)との結果を得ている。各サイトの全体の除去量は、669 g/haを達成した。また、任らの研究¹⁰⁾では、伴鉍景天による修復効果は、それぞれ28、48、53、27 mg/kgと示されている。

これに対して、フジタが保有するCdの超集積植物ハクサンハタザオを用いた実証試験の結果では、ハクサンハ

タザオ植物体において、200～900 mg/kg DW の Cd 吸収能力を確認し、試験区の土壌 Cd 濃度は、試験前の 4.7mg/kg から試験後の 2.6mg/kg に低下したことを示している。また、Cd の除去量は、3000 g/ha となっている¹¹⁾。従って、中国での伴鉱景天を用いた研究例と比較して、ハクサンハタザオの Cd 除去能力が優れているものと判断された。

§4. Cd、Znの超集積植物 -ハクサンハタザオ-

4.1 超集積植物とは

超集積植物(hyperaccumulator)は、重金属元素を高効率で吸収し、根から地上部へ輸送して、高濃度で体内に蓄積しながらその生活環を完結し得る特殊な植物種である。1970 年代の半ばに Ni を高濃度に集積する植物に対して超集積植物、超集積(hyperaccumulation)という用語が用いられた¹²⁾。以降、この奇妙ともいえる現象について精力的に研究が行われ、Ni 以外の元素についても超集積性を示す植物種の存在が報告され、併せて、超集積の定義や超集積植物の判断基準を明確にしようとする議論も行われてきた。現在、提案されている超集積植物の判断基準は、以下の通り(数値は全て、葉の乾燥重量当り)であり、実験条件下ではなく自然に生育している状態で、基準となる濃度を越えるものを超集積植物とするべきだとしている^{12,13)}。

- Cd, Se, Tl : 100 µg/g
- Co, Cr, Cu : 300 µg/g
- As, Ni, Pb : 1000 µg/g
- Zn : 3000 µg/g
- Mn : 10000 µg/g

こうした判断基準に基づくと、おおよそ 500 種が超集積植物に該当するとされている¹²⁾。Pollard ら¹³⁾は、総説の中で、この種数が地球上の維管束植物の 0.2%に満たないことから超集積はまれな現象であると述べている。超集積は根での吸収、体内の輸送、地上部での蓄積(解毒)というプロセスから構成され、植物生理としても興味深い現象であり、それぞれの機能をにう器官・組織で超集積を可能にしている機構について基礎的な研究が行われている¹⁴⁻¹⁶⁾。

植物を利用した汚染除去では、植物体中に蓄積された対象物質の濃度とバイオマス生産量の積によって除去量が決まる。超集積植物は野草であり、生育速度が遅く植物体の生産性が低いことが実際の汚染浄化への適用時に重金属除去の効率を制限することが多いとされ、よりバイオマス生産性の高い植物種を選択する必要がある。ま

た、作物と異なり安定的なバイオマス生産を確保するための栽培手法が確立されておらず、かつ個体ごとの形質に大きなばらつきがあることから、発見された超集積能を有する植物種を直ちに実用的に利用することは難しい。

ハクサンハタザオについては、“栽培植物化”を目標とした研究開発によって、採種・育苗を含む基本的な栽培体系が確立できている。更に、選抜・交配によって形質の均一化を行い(品種名「AHG347 ウィンタークリーン」として品種登録の審査中)、併せて発芽促進方法を検討して種子の直播による栽培が可能となる処理条件を見出している超集積植物である。

4.2 Cd汚染の浄化植物：ハクサンハタザオ

ハクサンハタザオ(*Arabidopsis halleri* ssp. *gemmifera*)は、Cd と Zn の超集積植物として 2003 年に Kubota ら¹⁷⁾によって報告されたものである。この植物は、極東ロシア、中国東北部、韓国、日本の山地に分布するアブラナ科シロイヌナズナ属の植物である。日本におけるハクサンハタザオには、かつて *Arabis gemmifera* の学名が与えられていたが、2000 年前後に *Arabidopsis* 属の再編が行われ、ヨーロッパに分布する *Cardaminopsis halleri* と共に *A. halleri* の亜種として分類された¹⁸⁾。

Kubota ら¹⁷⁾は自生地から採取したハクサンハタザオ個体を分析して葉での Cd 濃度は 1810 mg/kgDW であり、同地点から採取されたヘビノネゴザでの値(510 mg/kgDW)の 3.5 倍であったことを示している。この時点では、ハクサンハタザオのバイオマス生産性については未知数であったが、筆者らが別途採取した個体を栽培したところ、施肥による生育量の増大が認められ栽培植物化が可能であると判断された。また、自生地においては春から秋にかけて発芽し、(節間の短縮した)ロゼット状態で冬を越し、翌春に伸長・開花する生育パターンを持つ。このため、農用地の Cd 対策への適用を考えた場合に、春から秋に栽培される作物の裏作としてハクサンハタザオを栽培することで、リスクの低減を図りつつ現行の農業生産を継続できる可能性がある。また、他の浄化用植物との組み合わせによって Cd 除去効率を向上させることもできる。

図 2 には、実際の農用地を対象とした試験(1000 m²)の状況を示した。試験地は、水田から転換されて 2 年を経過した畑地である。試験開始時の作土層(地表から 15 cm 深さまでの範囲)中の土壌カドミウム濃度は、4.19 mg/kgDW(0.1M HCl 抽出)であった。プラグ苗の植え付けは 10 月初旬にレタス苗移植機を用いて行い、刈り取りは翌年 4 月中旬の開花期中に実施した(約 6 か月半の栽培期間)。刈取時に植物体地上部を採取し収穫量とカドミ



図2 農用地における実証試験の状況

ウム濃度を測定したところ、収穫量は 0.28 kgDW/m^2 、植物体中カドミウム濃度は 325 mg/kgDW という結果が得られ、ハクサンハタザオによるカドミウム除去量は 91 mg/m^2 と算出された。また、同時に採取した土壌試料の分析結果から 1 回の栽培で作土層中の土壌カドミウム濃度が 25% 低下(試験開始時: 4.19 mg/kgDW → 試験終了時: 3.15 mg/kgDW)したことが判った。従って、実際の農用地において超集積植物であるハクサンハタザオを用いて土壌中のカドミウムを除去できることが明らかとなった。

元来が野草であるハクサンハタザオを浄化植物として活用する際の大きな課題は、発芽率の低さであった。採取した種子の発芽率(シャーレ試験)は、2 週間で 20-30% であり、当初の栽培体系の検討で苗移植を選択した

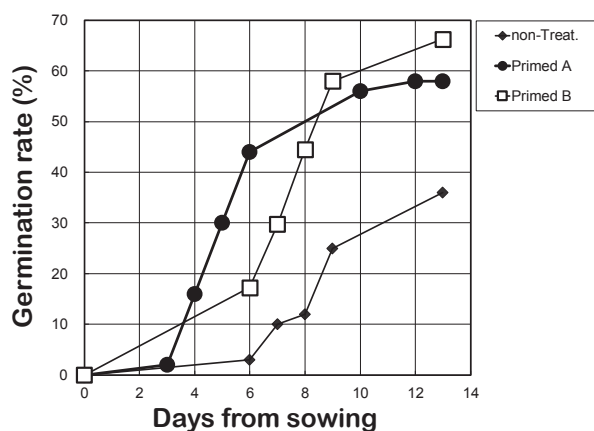


図3 発芽促進処理の効果

プライミング処理(Primed A, B)によって発芽率が大きく向上している

理由もこの発芽率の低さにある。

将来的な栽培規模の拡大に対しては、栽培に要する労力を軽減するために種子の直播による栽培を可能とする必要があると考えられた。そこで、発芽促進方法の検討を行い、発芽率を向上させるプライミング処理条件を見出した(図 3)。処理済の種子を圃場に播種して栽培を行ったところ、翌年の刈り取り時には苗移植のものと同等の生育量が得られ、処理種子によって直播栽培が可能となったことを確認できた。

§5. 中国の農用地を対象としたファイトレメディエーションの適用について

以上のような中国全体、及び瀋陽地区の深刻な土壌・農産品の Cd 汚染状況を背景として、中国での Cd 浄化植物の先行研究との比較から見れば、フジタのファイトレメディエーション技術の中国での有効性の検証と中国への技術移転は、大きな意義を持つ。

2014 年から株式会社フジタと瀋陽環境科学研究院は、共同研究開発を始めた。まずは、文献調査を行い、中国で自生するハクサンハタザオの状況を調査した。文献上では、中国のハクサンハタザオの自生地は、吉林省長白山地区のみと記載されているので、2014~2015 年にかけて、吉林省抚松県仙人橋鎮、長白県馬鹿溝鎮、長白山西面坂などの自生可能な場所で探索したが、それらの範囲内でハクサンハタザオを発見できなかった。

そこで、瀋陽環境科学研究院が実施する検証のために、フジタが開発したハクサンハタザオ種子を中国へ輸出することとした。2017 年にフジタの開発した種子を中国に輸出し、瀋陽市において、フィールド試験(1800m² 既存汚染土壌)、小規模試験(50m² 人工汚染土壌)及びポット栽培を実施し、ファイトレメディエーション技術の現地での適用可能性を検証する予定である。

§6. おわりに

今後の試験によって、中国での効果を検証しながら、同時に中国での低コスト化、発芽率向上による種子の直播方法、大規模なプライミング処理の効率化、浄化後の植物処理、大規模な中国輸出システムの構築など、様々な課題を解決しなければならない。瀋陽のみならず、中国全体の農地の土壌汚染問題を解決するために、日本から中国へのファイトレメディエーション技術の移転と普及による修復効果に期待することができであろう。



図4 吉林省での浄化植物探索の状況
瀋陽環境科学研究院による撮影

参 考 文 献

- 1) 林强：我国的土壤污染现状及其防治对策，福建水土保持，No16(1)，pp.25-28, 2004
- 2) 中华人民共和国环境保护部主页：
http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014
- 3) 甄燕红，成颜君，潘根兴，李恋卿：中国部分市售大米中的含量及其食品安全评价 安全与环境学报，Vol.8, No.1 ,pp.119-122, 2008
- 4) 梁彦秋、潘伟、刘婷婷、邢志强、臧树良：沈阳张士污灌区土壤重金属元素形态分析，环境科学与管理，Vol.31, No.2, pp.43-45, 2006
- 5) 王凯荣，我国农田镉污染现状及其治理利用对策，农业环境保护， Vol.16, No.6, pp.274-278, 1997
- 6) 徐晟徽、郭书海、胡筱敏、李凤梅、王玥弘、叶汉峰、钟爱平、史长华：沈阳张士灌区重金属污染再评价及镉的形态分析，应用生态学报， Vol.30, No.9, pp.2144-2148, 2007
- 7) 刘杨、张薇、吉普辉、杨晓霞、曹秀凤、宋玉芳、沈阳张士灌区六种蔬菜的镉污染、生态学杂志， Vol.30, No.6, pp.1229~1233, 2011
- 8) 刘玲、吴龙华、李娜、崔立强、李柱、蒋金平、蒋玉根、裘希雅、骆永明：种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响，环境科学， Vol.30, No.1, pp.3422-3426, 2009
- 9) 龙家寰、刘鸿雁、赵志鹏、涂刚琴、刘艳萍：污灌地重金属镉污染的伴矿景天修复试验研究，环保科技，Vol.21, No.1, pp.6~11, 2015
- 10) 任静，污泥土地处置土壤锌镉污染及植物修复研究，贵州大学博士论文，2012
- 11) 農村工学研究所、株式会社フジタ、三菱マテリアル株式会社：アブラナ科の植物(ハクサンハタザオ)がため池底泥土のカドミウム濃度を低減させる効果を確認(プレスリリース)， 2007
- 12) A. van der Ent, A. J. M. Baker, R. D. Reeves, A.J. Pollard, H. Schat: Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Fact and fiction. Plant Soil, 362, 319-334, 2013
- 13) A. J. Pollard, R. D. Reeves, A. J.M. Baker: Facultative hyperaccumulation of heavy metals and metalloids. Plant Science, 217-218, 8-17, 2014
- 14) G. DalCorso, A. Manara, A. Furini: An overview of heavy metal challenge in plants: from roots to shoots. Metallomics, 5, 1117-1132, 2013
- 15) B. Leitenmaier, H. Küpper: Compartmentation and complexation of metals in hyperaccumulator plants. Frontiers in Plant Science, 4, 374, 1-13, 2013
- 16) S. Clemens, M. G. M. Aarts, S. Thomine, N. Verbruggen: Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning. Trends in Plant Science, 18, 92-99 , 2013
- 17) H. Kubota, C. Takenaka: Arabis gemmifera is a hyperaccumulator of Cd and Zinc. International Journal of Phytoremediation, 5(3), 197-201, 2003
- 18) S.L O'Kane Jr. and I. A. Al-Shehbaz: A synopsis of *Arabidopsis* (Brassicaceae). Novon 7, 323-327, 1997

ひ と こ と

ファイトレメディエーションは、比較的低レベルの汚染が広範囲に拡散している状況下でのリスク低減に対して有効な対策技術として位置づけられます。

国内外の関係者との協働によって、農用地の汚染対策としての適用を進めています。



北島 信行