

無機溶媒を用いた水銀汚染土壌の洗浄処理工法の開発と現場適用

Development and Actual Application of On-site Mercury-contaminated Soils Remediation by Soil Washing Technology Using Inorganic Solvent

花木 陽人^{*1} 岩本 茂^{*2} 大山 将^{*1}
Akito Hanaki Shigeru Iwamoto Sho Oyama
田中 宏幸^{*1} 川上 嘉充^{*3} 島岡 隆行^{*4}
Hiroyuki Tanaka Yoshimitsu Kawakami Takayuki Shimaoka

要旨

一般的に重金属汚染土壌は、土壌洗浄処理工法により浄化が可能である。しかし、水銀汚染土壌については、従来の水のみを用いた土壌洗浄処理工法（湿式分級処理）では、浄化が難しいとされてきた。そこで水銀汚染土壌に対して無機溶媒を用いた洗浄処理工法（溶媒洗浄工法）を適用し、効果的な浄化手法の開発と現場への適用を試みた。室内試験の結果、土壌溶出量基準を約 17 倍超過する水銀汚染土壌に対して基準に適合するまで浄化が可能であることを確認した。この結果を踏まえ、九州大学箱崎キャンパスの移転に伴う解体工事に際して実施された土壌調査で確認された水銀汚染土壌に対して、溶媒洗浄工法を適用することとした。現在、当該現場における土壌溶出量基準 15 倍以下の水銀汚染土壌については、キャンパス内に設置した洗浄処理施設においてオンサイト処理を行っており、浄化土については分析確認後、場内埋戻し土として再利用している。

キーワード：水銀汚染土壌 オンサイト処理 溶媒洗浄処理 浄化土再利用

1. はじめに

土壌汚染対策法で定められる特定有害物質のうち、第 2 種特定有害物質（以下、重金属等）は土壌の細粒分に吸着される性質がある。一般的な重金属等汚染土壌については水のみを用いた土壌洗浄処理を行い、重金属等が吸着した細粒分を分離することによって浄化を行うことができる¹⁾。しかし、土壌洗浄処理による浄化効果は、重金属等の土壌中でさまざまな存在形態や化学特性等²⁾に依存するところが大きい。さらに、一般的に水銀汚染土壌は通常の土壌洗浄処理工法では浄化が困難であることが知られている³⁾。そのため、水銀汚染土壌が確認された場合は、敷地外へ搬出し、埋立処分等を行うことになり、汚染土壌の運搬・処分コストや汚染拡散リスクの増大につながる。

上記の背景から、水銀汚染土壌に対し、無機溶媒を用いた洗浄処理工法（以下、溶媒洗浄工法）による汚染土壌対策の高度化に取り組むこととした。まず、室内試験を実施し、その浄化効果を確認した。その結果を踏まえ、九州大学箱崎キャンパスの移転に伴う解体工事に先立ち実施された土壌調査で確認された水銀汚染土壌に対して、溶媒洗浄工法を適用した。現在、キャンパス内に設置した洗浄処理施設において溶媒洗浄工法を適用して水銀汚染土壌の浄化を実施しており、浄化土については分析確認後、場内埋戻

し土として再利用している。

本報告では、室内試験の結果および九州大学箱崎キャンパス内で稼働している洗浄処理施設の概要について報告する。

2. 溶媒洗浄工法

従来の水のみを用いた土壌洗浄処理工法は、重金属等が吸着した土壌中の細粒分が湿式分級により分離・除去される。しかしながら、水銀等の一部の重金属等については、従来の土壌洗浄処理工法では浄化が難しいことが知られている。

一方、溶媒を用いた土壌洗浄処理工法は汚染土壌の洗浄に際し、溶媒を添加することによって土壌から洗浄水中への重金属等の溶出促進や重金属等の溶媒への吸着を期待するものである。水銀汚染土壌に対する溶媒洗浄工法では、硫酸アルミニウムを主成分とした無機溶媒を用いており、図 1 に示すように、汚染土壌の土粒子に吸着した重金属等を無機溶媒に吸着させるとともに湿式分級を行う。また、重金属等が吸着した細粒分および重金属等を吸着した無機溶媒、洗浄排水については、別途水処理を行うことによって、脱水ケーキとして濃縮・分離する。分離した脱水ケーキは、汚染土壌処理施設において適正に処理する。洗浄さ

*1 技術本部 環境エンジニアリング部 *2 九州支店 土木部 *3 エコサイクル(株) *4 九州大学大学院

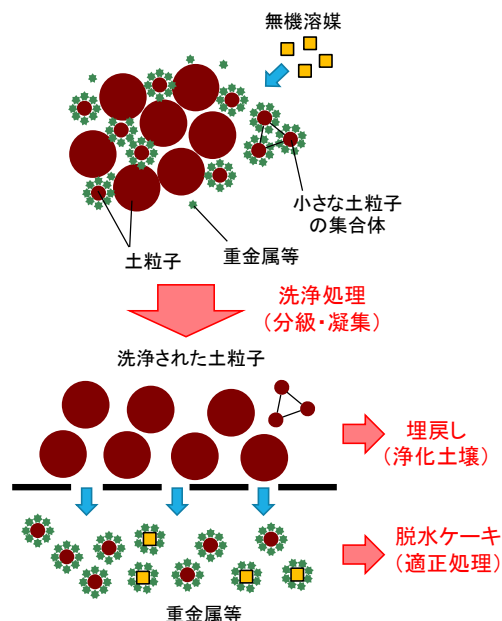


図1 溶媒洗浄工法概要図

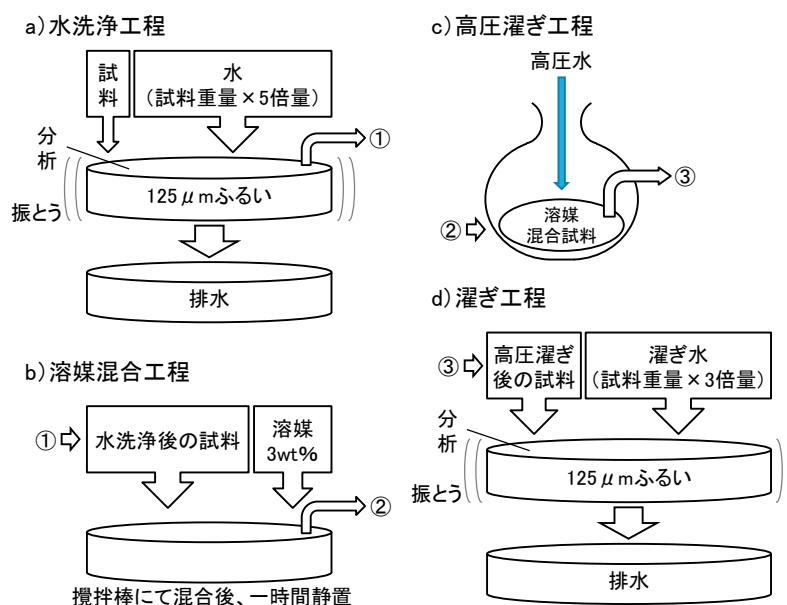


図2 洗浄試験概念図

れた土壌については、重金属等が除去され土壌溶出量基準に適合していることを確認した後、埋戻し土として再利用が可能となる。

なお、硫酸アルミニウムは、別名硫酸バンドと呼ばれ、上水、工業排水、下水等の処理用の凝集剤や農業分野における土壌改良剤として広く使用されているものである。毒物劇物取締法に定める毒物・劇物・特定毒物や化学物質排出把握管理促進法（PRTR法）に定める指定化学物質には該当しない。

3. 室内試験³⁾

溶媒洗浄工法の適用性を確認するため、土壌洗浄処理工法および溶媒洗浄工法を模擬した室内試験を実施した。

3.1 試験方法

3.1.1 試験試料

本試験では、九州大学箱崎キャンパス移転に伴う解体工事に際して実施された土壌汚染状況調査により確認された水銀汚染土壌を採取し、試験試料（試料1～6）とした（表1参照）。

3.1.2 粒度試験

採取した試料のうち試料3について、土質の確認のために粒度試験（JIS A 1204）を実施した。

3.1.3 洗浄試験

採取した試料1～6に対して前処理として室温（24℃）で自然乾燥後、2mmのふるいに通し、ふるい下試料の水銀溶出量を求めた。なお、ふるいはステンレス製のものをを用い

た。以下のa)～d)の洗浄試験概念図を図2に示す。

- a) 水洗浄工程：125 μmのふるいに試料1,000g（乾燥重量）を投入し、試料重量の5倍の水を流しながら振とうして、ふるい上の土壌を回収・分析し、水洗浄時の水銀溶出量を確認した。
- b) 溶媒混合工程：無機溶媒を試料の3wt%添加し、攪拌棒で混合した後、反応・抽出のために1時間静置した。
- c) 高压濯ぎ工程：静置後の試料に高压水噴射を行った。
- d) 濯ぎ工程：高压水噴射後の洗浄土を125 μmのふるいに移し、試料重量の3倍の水を流しながら濯ぎを行った。その後、振とうしながら水を落とすことで脱水（無機溶媒混合液分離）した。最終的にふるいに残留した試料を回収して分析を行い、溶媒洗浄時の水銀溶出量を確認した。

なお、土壌溶出量試験は、平成15年環境省告示第18号にしたがって実施した。

3.2 試験結果

3.2.1 粒度試験

粒度試験結果による粒径加積曲線を図3に示す。礫分（2～75mm）：32.5%、砂分（0.075～2mm）：54.1%、シルト分・粘土分（0.075mm未満）：13.4%であり、細粒分まじり礫質砂（SG-F）と分類された。土壌洗浄処理工法では重金属等が吸着した細粒分を最終的に脱水ケーキとして分離し、汚染土壌として処分する。そのため、細粒分が少ない土質であるほど脱水ケーキの発生量が少なく、処分コストを削減することができ、細粒分が30%未満であればおおむね経済的に洗浄処理が可能であると言われている⁴⁾。

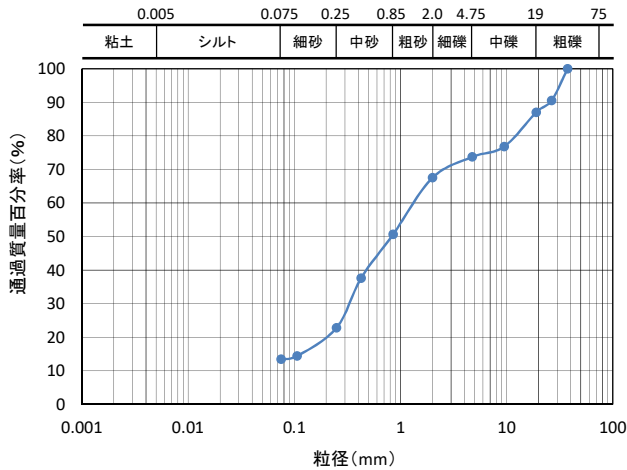


図3 粒径加積曲線

本試料は細粒分が比較的小さいことから、経済的に洗浄処理が可能な土質であることが確認された。

3.2.2 洗浄試験

試験結果を表1および図4に示す。表1および図4中の「原土」とは3.1.3における前処理後の試料、「水洗浄土」とは同項のa)工程後の試料、「溶媒洗浄土」とは、同項のd)工程後の試料である。

水のみを用いた洗浄処理において、水銀溶出量の低減効果が得られた。しかし、土壌溶出量基準において、6.2倍超過していた試料2（原土：0.0031mg/L）、3.2倍超過していた試料3（原土：0.0016mg/L）、1.4倍超過していた試料4（原土：0.0007mg/L）が基準に適合したのみであり、その他の試料は基準不適合となり、浄化の効果は限定的となった。一方、溶媒洗浄処理では、今回の試料中最大溶出量である土壌溶出量基準を17.6倍超過した試料6（原土：0.0088mg/L）についても基準に適合し、効果的な浄化が可能であることが確認された。

また、3.1.3のd)工程後、125 μ mふるい上に最終的に残留した試料は平均747g（乾燥重量）となった。試料の土質によりばらつきがあったものの、細粒分はおおむね30%未満であり、洗浄処理に適していることが確認された。

表1 洗浄試験結果（赤字は土壌溶出量基準超過）

区分	水銀溶出量(mg/L)					
	試料1	試料2	試料3	試料4	試料5	試料6
原土	0.0058	0.0031	0.0016	0.0007	0.0070	0.0088
水洗浄土	0.0007	0.0004	<0.0003	0.0003	0.0022	0.0027
溶媒洗浄土	<0.0003	<0.0003	<0.0003	<0.0003	0.0003	0.0003
備考	土壌溶出量基準					
	第二溶出量基準					

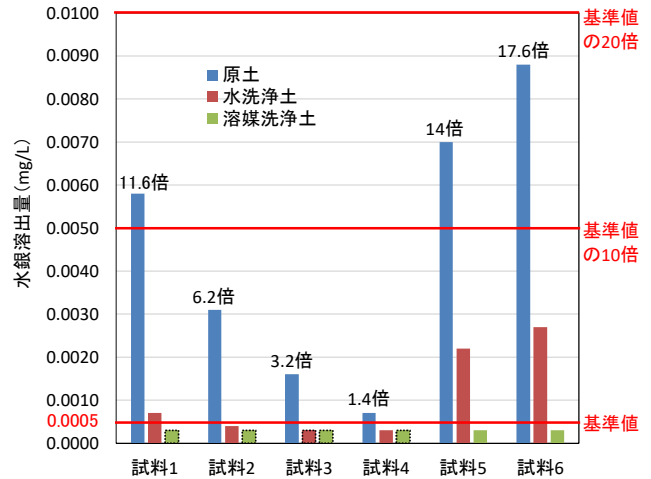


図4 洗浄試験結果

4. 溶媒洗浄工法の現場適用

室内浄化試験の結果を受け、九州大学箱崎キャンパス内において確認された水銀汚染土壌について、土壌溶出量基準15倍以下の水銀汚染土壌を対象に、キャンパス内に設置した洗浄処理施設による溶媒洗浄工法を適用した。また、浄化土については場内埋戻し土として再利用している。図5に九州大学箱崎キャンパス配置図を示す。

4.1 工事概要

工事名：九州大学（箱崎）旧工学部2号館等跡地汚染土壌処理他工事

工事場所：福岡県福岡市東区箱崎6丁目10番1号（九州大学構内）

完成期限：2020年10月30日（金）

発注者：国立大学法人 九州大学

工事目的：①箱崎キャンパス敷地内の汚染土壌を土壌汚染対策法に基づき全て浄化する。

②洗浄可能な汚染土壌は敷地内に設置した洗浄処理施設で浄化する。

③洗浄処理により基準に適合した土壌は敷地内に埋戻す。

④処理が困難な汚染土壌や基準値内に処理できなかった土壌は構外の土壌汚染対策法に基づく汚染土壌処理施設へ搬出し、適切に処理する。

⑤埋設物、構造物、基礎、その他工作物およびインフラ関係（配管など）は、撤去・搬出する。

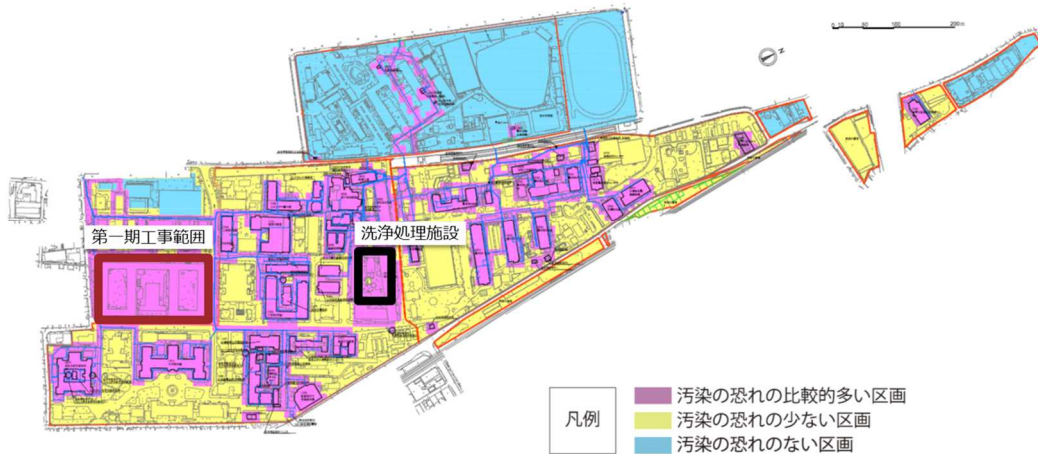


図5 九州大学箱崎キャンパス配置図



写真1 仮設テント内全景

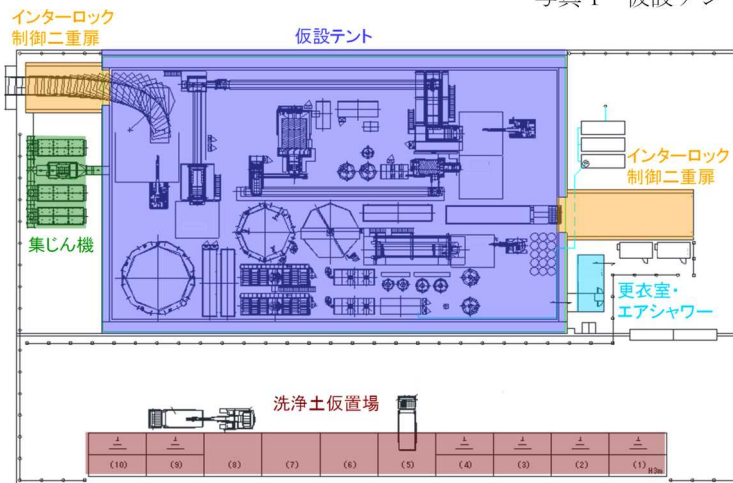


図6 洗浄処理施設平面図

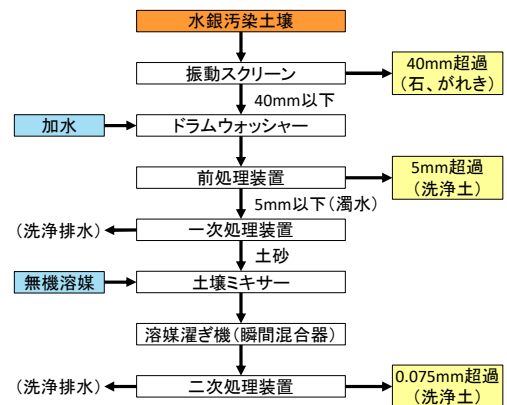


図7 溶媒洗浄処理フロー

4.2 洗浄処理施設

4.2.1 施設概要

洗浄処理施設の平面図を図6に示す。また、仮設テント内全景を写真1に示す。箱崎キャンパス内で掘削された水銀汚染土壌(土壌溶出量基準15倍以下)を、飛散養生措置をしたうえで洗浄処理施設へと運搬する。搬入された水銀汚染土壌は、図7に示す処理フローにより溶媒洗浄処理を行う。

まず、水銀汚染土壌を40mm網目の振動スクリーンに投入

する。ここで、40mm超過のもの(石やレンガ等のがれき類)は、一旦水槽に貯留し、水洗いをして付着した土砂を落とした後、産業廃棄物として処分する。40mm以下の土砂については、ドラムウォッシャーへと移送して加水・洗浄した後、前処理装置において5mmのふるいで選別する。5mm超過の土砂は洗浄土として取り扱い、5mm以下となった土砂は濁水とともに一次処理装置へと移送し、ここで濁水中の土砂のみを掻き出す。掻き出した土砂を、土壌ミキサーへと移送し、無機溶媒を添加・混合する。無機溶媒が添加・

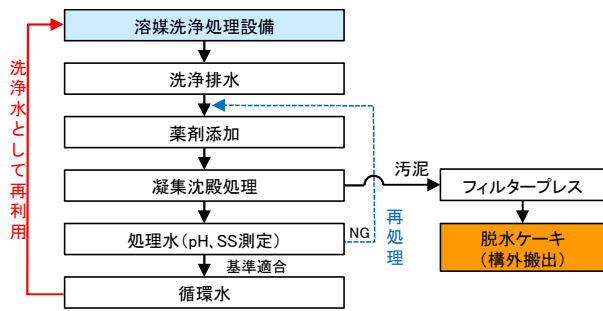


図 8 洗浄排水の水処理フロー



写真 4 インターロック制御二重扉



写真 2 仮設テント



写真 5 エアシャワー付き更衣室



写真 3 集じん機



写真 6 洗浄土仮置場

混合された土砂を溶媒濯ぎ機（瞬間混合器）へと移送し、高圧水を噴射することにより土砂中の水銀が吸着した溶媒を濯ぎ落とす。その後、二次処理装置において 0.075mm 超過の土砂を洗浄土として回収し、5mm 超過の洗浄土と混合する。混合した土砂は、100m³ 毎に公定法分析を実施して、水銀の浄化が行われたことを確認した後に、場内埋戻し土として利用した

溶媒洗浄処理の工程で発生した排水は、全て併設の水処理設備に移送し、図 8 に示す水処理フローにより凝集沈殿処理を行う。凝集沈殿処理により発生した汚泥は、フィルタープレスにより脱水処理し、脱水ケーキとして排出する。脱水ケーキ中には、水銀が吸着した土砂や溶媒が含まれるため、構外の汚染土壌処理施設に搬出し、適正に処分する。また、凝集沈殿処理により浄化された水は、処理水槽において pH および SS（濁度計指示値から換算）をリアルタイムで測定する。自主管理基準に不適合の場合は自動的に再処理を行い、適合の場合は溶媒洗浄処理設備において洗浄水として再利用する。したがって、洗浄処理施設を稼働さ

せている期間において、洗浄水は全量循環利用することになり、系外への排水は発生しない。

4.2.2 環境保全対策

洗浄処理施設は箱崎キャンパス跡地に設置しているが、施設稼働当初には学生や大学職員がキャンパスを利用していた。また、周辺には民家も多くあるため、汚染物質の拡散防止や騒音・振動・粉じん対策に特に留意する必要があった。

まず、溶媒洗浄処理設備と水処理設備は仮設テント（W38m×L64m×H9.5m）（写真 2）により全て覆い、粉じんや汚染物質の拡散防止を図ることに加え、仮設テント内面には防音シートを設置し、騒音の低減を図った。

仮設テントには集じん機（写真 3）を接続し、洗浄処理施設の稼働中は常に仮設テント内を負圧に保つことにより汚染物質の拡散を防いだ。集じん機により吸引した空気は HEPA フィルターおよび水銀吸着用の活性炭により浄化し、排出した。また、仮設テント内の負圧状態は仮設テント内外に設置した差圧計により常時監視した。負圧管理値（気

圧差 2Pa 以上) を下回った場合は、仮設テント内と現場事務所に設置した回転灯で警報を発することにより異常を知らせることとした。

仮設テントの車両出入口には二重扉(写真 4)を設置することで車両出入りの際に汚染物質が拡散しないよう配慮した。なお、二重扉には片方の扉が開いているときにはもう片方の扉が開かないようにロックをかけるインターロック制御を行い、作業員の誤作動により両方の扉が開くことを防いだ。

仮設テント内で作業する作業員は、エアシャワー付きの更衣室(写真 5)を通して出入りし、仮設テントから外に出る際にはエアシャワーで衣服についた粉じんを払い落とすことにより仮設テント外への汚染物質の拡散を防いだ。

洗浄処理施設において処理された洗浄土は洗浄土仮置場(写真 6)まで運搬し、100m³毎に公定法分析を実施して、水銀の浄化が行われたことを確認した後に、場内埋戻し土として利用した。ただし、洗浄土を仮置きしてから分析結果が判明するまでの期間は、仮置きした土をシート養生することによって雨水との接触や粉じんの飛散を防止した。

これらの環境保全対策の有効性を確認するため、洗浄処理施設用地の敷地境界 3ヶ所で、騒音・振動・粉じんのリアルタイム監視を行った。さらに、3ヶ月に一度、洗浄処理施設用地の敷地境界 4ヶ所および集じん機の排気口において大気(水銀、浮遊粒子状物質(敷地境界のみ))のモニタリングを実施した。なお、これまでのリアルタイム監視および大気のモニタリングの測定結果は全て管理基準値以下であった。

5. まとめ

従来の水のみを用いた土壌洗浄処理工法(湿式分級処理)では浄化が難しいとされた水銀汚染土壌に対して、溶媒洗浄工法を適用して室内浄化試験を実施し、土壌溶出量基準

を 17.6 倍超過した土壌に対して基準に適合するまで浄化できることを確認した。その結果を踏まえ、九州大学箱崎キャンパスの移転に伴う解体工事に際して実施された土壌調査で確認された水銀汚染土壌に対して、溶媒洗浄工法による浄化処理を実施している。浄化土については、場内の埋戻し土として再利用している。

現在、溶媒洗浄工法による水銀汚染土壌の浄化対象範囲を土壌溶出量基準 15 倍以下までと設定している。今後は、さらに浄化対象範囲を拡大し、これまで浄化に適さないと判断された高濃度汚染土壌も浄化対象とし、構外に搬出して処分するコストを削減することが望まれている。浄化対象範囲拡大に向けて、今後、九州大学および協力会社であるエコサイクル株式会社と協働し、汚染土壌中の水銀の存在形態や溶出特性、溶媒洗浄工法のメカニズム解明などに取り組み、溶媒洗浄工法を高度化することを目指すとともに、現場に適用していく。得られた成果を活かし、全国の大学用地およびその跡地等において顕在化している水銀汚染土壌などの土壌汚染問題の解決に貢献するため、技術開発に注力していく所存である。

参考文献

- 1) 大北康治、伊藤克彦、鈴木重孝ほか：土壌洗浄法の概要とその適用について—革新的な土壌汚染浄化工法の前処理工法—、廃棄物学会誌、Vol.5、No.1、pp.79-86、1994.1
- 2) 和田信一郎：土壌中における重金属類の動態、地球環境、Vol.15、No.1、pp.15-21、2010
- 3) 川上嘉充、武島俊達、富士田浩二ほか：水銀汚染土壌に対する溶媒洗浄工法の適用性について、第 24 回地下水・土壌汚染とその防止対策に関する研究集会講演集、pp.105-110、2018.10
- 4) 地盤工学会：続・土壌・地下水汚染の調査・予測・対策、丸善出版株式会社、2008.4