

油汚染土壌に対する熱処理修復技術の応用

Application of the Thermal Remediation Technique for the Oil Contaminated Soil

神尾昌宏 Masahiro KAMIO (日工(株)技術本部研究開発センター)
 蓬萊秀人 Hideto HORAI (日工(株)技術本部研究開発センター)
 亀井健史 Takeshi KAMEI (宮崎大学工学部社会環境システム工学科)

一般に、油汚染土壌を修復する技術は、微生物処理・洗浄処理及び熱処理の三つに大きく分類される。その中で熱処理による方法は、他の工法と比較して短期間で浄化が可能であり、浄化能力が高いことがわかっている。しかしながら、加熱処理を行う工程において、多量のエネルギーを消費するため高い環境負荷が生じる。本研究では、従来開発されてきたシステムに土壌の加熱温度を高めることで浄化能力を改善し、さらに、高温の排気ガスから熱を回収することで省エネルギー化を推進した新たなシステムを開発した。また、本システムの実地盤への適用性を検討するため、実際の汚染土壌地盤に対して本土壌浄化システムを適用することにより、その工学的有用性を検討した。

キーワード：油汚染土壌，熱処理，酸化分解，修復，省エネルギー (IGC : T14)

1. 諸言

一般に、油汚染土壌の浄化方法としては、微生物処理、洗浄処理、加熱処理などが主に実際の浄化工事で適用されている。各手法は、油汚染の種類や濃度、汚染サイトの大きさや周辺環境によってその適用範囲が異なる¹⁾。表-1に各種浄化方法を比較した結果を示す。

微生物処理は、微生物によって油分を二酸化炭素と水に分解を行い無害化する方法である²⁾。この方法においては、浄化コストが低いが微生物の活性や油分分解能力が浄化に大きく影響するため、浄化工期や浄化の確実性は他の工法に比べて劣る¹⁾。また、洗浄処理は汚染土壌を洗浄プラントで分級することにより土壌の浄化を行う。このシステムでは、加熱処理と同様に短期間で浄化処理することが可能であるが、シルト分が多く含まれている土壌に対しては、洗浄残渣（汚染物質が濃縮された土壌

の細粒分）が多く排出されるため、その二次処理が必要不可欠となる。

一方、加熱処理については、洗浄処理と異なり汚染物質をすべて装置の系内において浄化処理ができることや短期間で確実に浄化できること等の特長がある。土壌の加熱温度を高温にすると浄化が困難と言われている重質油の汚染まで対応することが可能となるが、その反面多くのエネルギーを消費し、環境側面において課題が残る³⁾。

我が国では、土壌汚染の対策として2003年に土壌汚染対策法が施行された。その中で油に対する環境基準値は、ベンゼン(C₆H₆: 溶出基準 0.01mg/L)のみが第一種特定有害物質として規定されているが、その他の炭化水素の基準値は設けられていない。一方、「油汚染対策ガイドライン」は、生活環境の保全を目的としているため、油臭や油膜の有無で汚染の判断を行っている⁴⁾。

表-1 各種浄化方法の比較

浄化方法	原位置処理		掘削後場内処理 (オンサイト処理)				掘削後場外処理 (オフサイト処理)
	ガス吸引	微生物処理	微生物処理	洗浄処理	揮発処理	加熱処理	場外搬出
浄化性能	△	△	△	○	○	◎	◎
浄化工期	△	△	△	○	○	◎	◎
浄化コスト	◎	◎	○	△	○	△	×
環境負荷	◎	◎	○	△	○	△	×
後処理	吸引したガスの処理	無し	無し	洗浄残渣の処理	揮発したガスの処理	無し	オフサイトでの処理、産業廃棄物処分場での処理が必要
特徴	吸引したガスの処理が必要になる	微生物の油分解能力で浄化性能が支配される	微生物の油分解能力で浄化性能が支配される	シルト質の土壌においては多量の残渣が発生する	揮発性の高い汚染物質のみ処理可能である	土壌を加熱し汚染物質を強制的に脱着するので、浄化が確実に行える	最も確実に処理が可能であるが、浄化コストが最も高くなる

◎:非常に良好, ○:良好, △:普通, ×:不良

表-2 発癌性の高い多環芳香族炭化水素の毒性換算係数と沸点（一部追加）⁵⁾

化合物名 (-)	化学式 (-)	分子量 (g/mol)	毒性換算係数 (WHO) (TEF)	沸点 (°C)
Benz-(a)-anthracene	C ₁₈ H ₁₂	228.3	0.045	438
Benzo-(b)-fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252.3	0.120	481
Benzo-(k)-fluoranthene	C ₂₀ H ₁₂	252.3	0.032	480
Benzo-(a)-pyrene	C ₂₀ H ₁₂	252.3	1.000	495
Dibenz-(a,h)-anthracene	C ₂₂ H ₁₄	278.4	2.100	524
Indeno-(1,2,3-cd)-pyrene	C ₂₂ H ₁₂	276.3	0.120	536

大気汚染については、自動車や様々な燃焼設備から排出される多環芳香族炭化水素（Polycyclic Aromatic Hydrocarbon : PAHs）が存在するが、これらのヒトへの健康に対する影響が注目されている⁵⁾。多環芳香族炭化水素は非常に多くの種類があり、発癌性を示す可能性が高いものがある⁶⁾。表-2 に特に発癌性の可能性の高い多環芳香族炭化水素の化学式、分子量、世界保健機構（WHO）による毒性換算係数、沸点の一覧を示す。我が国においては、ベンゾ（a）ピレンは大気汚染防止法の「有害大気汚染物質」の「優先取り組み物質」の一つに指定されており、多環芳香族炭化水素の中で最も有害性が懸念されている。

多環芳香族炭化水素は、元来原油に含まれていることから石油や石炭の残渣物による油汚染土壌にもこれらの汚染物質を含んでいる。土壌汚染対策法における他の特定有害物質と同様に、これらの物質を口や肌などから直接摂取することで、ヒトの健康へ悪影響をおよぼす恐れがある。種々の油汚染の中でも、発癌性の高いこれらの物質を浄化することは極めて重要である。また、沸点が高い多環芳香族炭化水素を浄化するためには、土壌の加熱温度を高める必要がある。

本研究では、土壌の処理温度を高めることにより浄化可能な油汚染の種類を拡大し、省エネルギー化を推進した新たな土壌浄化システムの開発を行った。さらに、実地盤の汚染土壌浄化に対して、その新たなシステムを適用し、浄化性能と有用性の検討を行った。

2. 本研究で開発した油汚染土壌浄化システム

2.1 概要

本土壌浄化システムは、土壌を加熱することにより汚染油を揮発させ、土壌から汚染油を脱着する工法である。土壌から揮発した油分を含む排気ガスは、二次燃焼室で800°C以上に加熱することで、熱分解し無害化する。

これまで筆者らが開発した従来の土壌浄化システム⁷⁾は、土壌の加熱温度が200~400°Cの比較的低温で処理を行うものであり、重油相当までの汚染を大量に浄化を行う工事に適したシステムである。軽質油・重質油・タール・ピッチ等の多くの種類の油汚染があるが、200~



写真-1 本研究で開発した油汚染土壌浄化システム

400°Cの加熱温度でこれらの汚染を浄化することができる。しかし、土質や油の種類さらには汚染濃度によって、十分な浄化性能が得られないことがある。従来のシステム⁷⁾では、土壌を処理温度まで加熱する一次処理キルンの排気ガスと混合して飛散する微細土粒子に関しては、加熱温度が低いために浄化状態が悪く、残留油分が多い傾向が認められた。従来のシステムではその対策として細粒分のみを再度集め、温度を高めて処理する微細土粒子キルンを用いることで、浄化能力を改善することが可能となった。

一方、上記したように油汚染土壌に含まれている多環芳香族炭化水素には沸点が400°C以上のものが多くあり、400°C以下の加熱温度で十分な浄化性能を期待することはできない。そのため、本システムではより高温条件下で汚染土壌の処理を可能とすることを目標とした。これが実現すれば、沸点の高い炭化水素まで浄化範囲が広がり、本システムの浄化性能をさらに高めることができる。

本研究で開発した油汚染土壌浄化システムを写真-1に示す。本システムの大きな特徴は、上記した浄化性能の向上に加えて、土壌予備乾燥装置と大型の熱交換器を新たに設けることで高温排気ガスからの熱回収を行う省エネルギー化である。土壌の高温処理による浄化性能の向

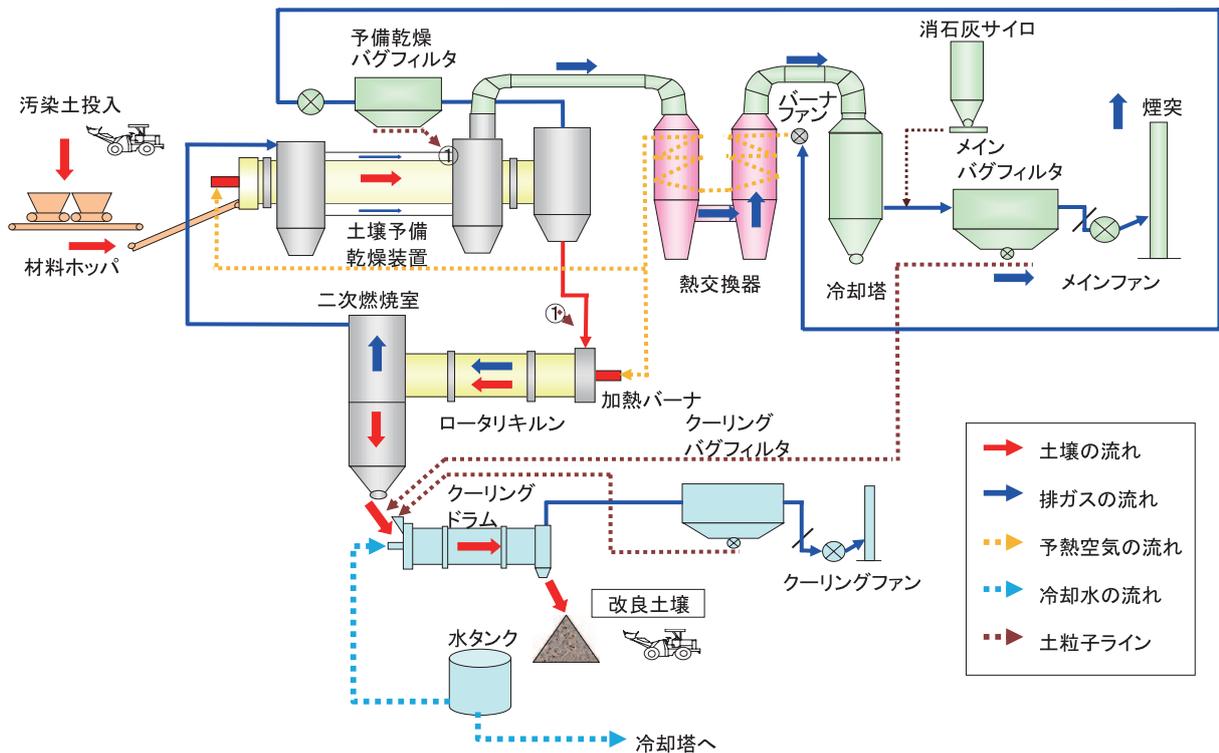


図-1 本研究で開発した油汚染土壌浄化システム

上によって、加熱に必要なエネルギーの使用量は増加するが、高温の排気ガスから熱回収を行うことでこれを改善し、浄化性能の向上と省エネルギー化の両立化を図っている。

本研究で開発した新たな省エネルギー機器を備えた油汚染土壌浄化システムを図-1 に示す。これまでに筆者らが開発してきたシステム⁷⁾の場合、土壌を加熱する一次処理キルンは、内部を鋼板製で断熱二重構造としていた。この場合 400℃まで土壌を加熱することができるが、それ以上の加熱温度になると鋼板製の装置では対応できなかった。そのため、今回のシステムではロータリキルンの内部に耐火材を施工することで、土壌の加熱温度を600℃以上まで高めることを可能とした。さらに、土壌の加熱温度が高まることで、加熱した土壌の搬送を行う装置に耐熱性を持たせる必要がある。これについては、装置の材質を耐熱性の高いものに変更することや、水冷式の構造とすることで対処した。

2.2 土壌処理の流れ

2.2.1 土壌予備乾燥装置（予備乾燥、排気ガス熱回収）

油汚染土壌は、重機によって材料ホッパに投入された後ホッパ下部に設けられたベルトフィーダによって、土壌予備乾燥装置に定量的に供給される。土壌予備乾燥装置は、間接加熱式のロータリキルン方式を採用しており、

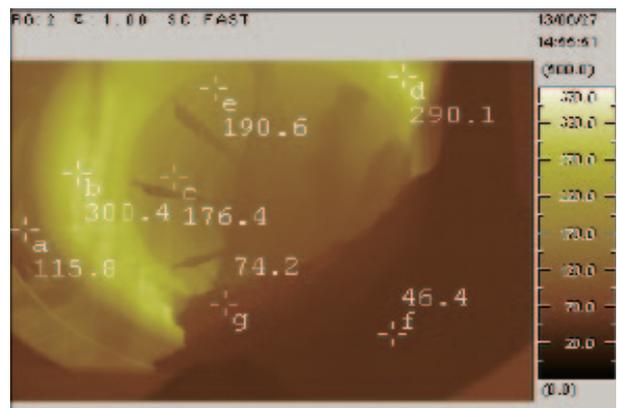


写真-2 土壌予備乾燥装置内部の熱画像（土壌入口側）

内筒の外側に通過する約 800℃の排気ガスと内側を移動する土壌を鋼板製のシェルを介して熱交換を行う。処理前における土壌の自然含水比は通常 30%近くあるが、間接加熱キルンの出口では本装置で乾燥されて 10%近くまで低下する。また、沸点の低い揮発性の高い VOC 等の汚染物質は、ここで土壌から熱脱着される。土壌予備乾燥装置において発生するオフガスは、汚染物質を含むため加熱バーナの燃焼用の空気として利用し、ロータリキルン・二次燃焼室において熱分解処理を行う。土壌予備乾燥装置内部の熱画像を写真-2 に示す。内筒の表面温度は高いところで 300℃を示していることが確認できる。

2.2.2 ロータリキルン（土壌の乾燥・加熱・分級）

ロータリキルンにおいてはバーナで発生させた熱エネ

ルギーと土壌を熱交換し、所定の処理温度まで加熱する。従来のシステム⁷⁾では、鋼板製のロータリキルンに羽根を設けて、土壌を掻き上げてペールを形成することで、熱風と土壌の熱交換を行っていた。本システムにおいては土壌の加熱温度が400℃以上になるため、上記したようにキルン内部に耐火材を施工し耐熱性を高めている。また、バーナ火炎による輻射によって耐火材を加熱し、土壌と耐火材の接触伝熱で土壌の加熱処理を行う。加熱バーナの燃焼量は、二次燃焼室が設定温度(820℃)になるように制御を行うが、土壌の加熱温度は、ロータリキルンの回転数を変化させることでコントロールする。土壌に含まれる微細土粒子は、排気ガスの流れに乗って飛散し、土壌予備乾燥装置の排気ガスが通過する滞留室や熱交換器、バグフィルタにおいて回収される。微細土粒子は150μm以下の粒径の土粒子であることから熱容量が小さい。そのため、二次燃焼室の排気ガス温度付近まで短時間で上昇し高温で加熱処理される。

2.2.3 クーリングドラム(土壌の冷却・調湿)

加熱された土壌は400℃以上の高温であるため、クーリングドラムにおいて水を噴霧することで冷却する。また、粉じんの発生を防止する目的で、冷却と同時に調湿も行う。装置の各所で回収された微細土粒子は、クーリングドラムへ供給されて土壌と一緒に混合を行ってから排出する。

2.3 排気ガス処理の流れ

2.3.1 二次燃焼室(汚染物質の熱分解)

二次燃焼室においては、ロータリキルンから排出された排気ガスの処理を行う。具体的には、排気ガスを800℃以上で2秒間滞留させて、揮発した汚染物質やダイオキシン等を熱分解する。

汚染土壌に含まれる油分の大半は、土粒子の表面に付着して存在しており、微細土粒子は粗粒土粒子に比較して単位重量当たりの表面積(比表面積)が大きいことから、油による汚染濃度が高い⁸⁾。微細土粒子は、ロータリキルンから排出される排気ガスの流れに乗って飛散するため、二次燃焼室において排気ガスと一緒に滞留し、800℃以上の高温雰囲気中で加熱処理される。

2.3.2 土壌予備乾燥装置(排気ガスからの熱回収)

本装置においては、排気ガスの熱エネルギーを利用することで、土壌の予備乾燥を間接的に行う。二次燃焼室で800℃に加熱された排気ガスは、600℃程度まで本装置

で熱回収される。土壌予備乾燥装置内部で発生した水蒸気や揮発した汚染物質を含むオフガスは、予備乾燥バグフィルタで微細土粒子を集塵した後に熱交換器に導入される。このオフガスは、ロータリキルンの加熱バーナの燃焼用空気として用いられる。

2.3.3 熱交換器(排気ガスからの熱回収)

土壌予備乾燥装置からの排気ガスは600℃程度あり、さらに熱エネルギーを回収することが可能である。そのため、熱交換器において排気ガスと加熱バーナ用の燃焼空気の熱交換を行う。熱交換後の排気ガスは400℃程度になる。一方、バーナ燃焼用空気は80℃から350℃程度に昇温される。

2.3.4 冷却塔(排気ガスの急冷却)

二次燃焼室において排気ガスは800℃以上で2秒間滞留し、ダイオキシンを熱分解する。ダイオキシンは、200~400℃の温度域で再合成するため、この温度域を冷却塔で急冷却し再合成を抑制する。排気ガス中に直接、2流体ノズルを用いて水を微粒化して散水し180℃まで冷却を行う。

2.3.5 バグフィルタ(微細土粒子の捕捉・排気ガスの中和)

冷却塔において冷却された排気ガスは、バグフィルタに導入されて、排気ガス中に含まれた微細土粒子を集塵した後に排気される。また、バグフィルタ入口側の煙道に消石灰と活性炭を吹き込み、乾式で酸性ガスの中和を行う。

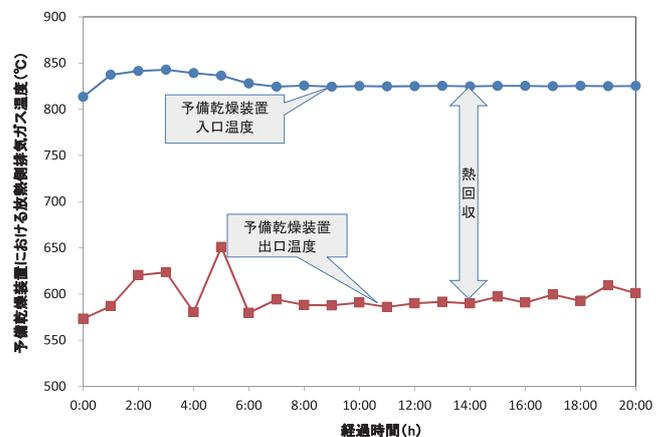


図-2 土壌予備乾燥装置における放熱側ガス温度の経時変化

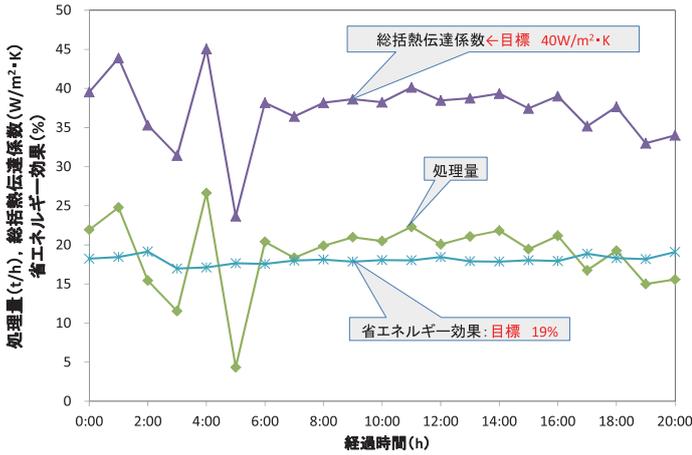


図-3 土壌予備乾燥装置における省エネルギー効果の経時変化

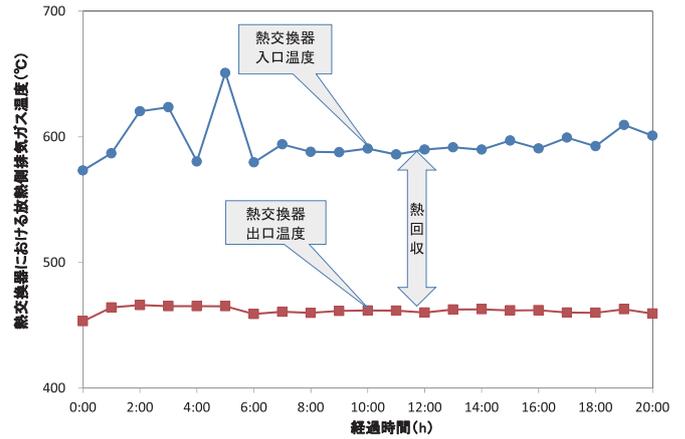


図-4 熱交換器における放熱側排気ガス温度の経時変化

3. 油汚染土壌浄化システムの性能評価と考察

3.1 省エネルギー性能

本システムでは、土壌予備乾燥装置と熱交換器によって、排気ガスから熱回収を行った。以下に各々の装置の性能について記す。

3.1.1 土壌予備乾燥装置

土壌予備乾燥装置における放熱側排気ガス温度の経時変化を図-2 に示す。土壌予備乾燥装置入口温度は 820°C であり、土壌予備乾燥装置による排熱回収後には 600°C まで低下している。この排気ガスの温度低下分が本装置で熱回収されたことになる。また、図-3 には同じ処理工程における経過時間当たりの処理量と省エネルギー効果を示しており、定格能力の 25t/h に対して若干少ない時間当たりの処理量ではあるが、目標値の 19%に近い省エネルギー効果の達成が確認できる。単位面積当たりの熱交換能力を示す総括熱伝達係数は、40W/m²・K を設計の基準目標値としていたが、ほぼ想定していた能力が得られていることが分かる。ここでの総括熱伝達係数は、キルン内部の土壌と伝熱面が接している部分を熱交換面積とするのではなく、キルン全体の表面積を熱交換面積として評価を行っている。土壌の加熱には、キルン内筒から土壌へ伝わる熱伝導以外に、土壌と接触していない高温になったキルン内筒からの輻射伝熱や、内筒内部を通過する蒸発ガスによる対流伝熱によっても熱交換が行われるためである。この総括熱伝達係数は、キルンの熱交換面積を決定する重要な値であり、土壌の状態やキルン内部の材料の滞留状態に大きく影響を受ける。

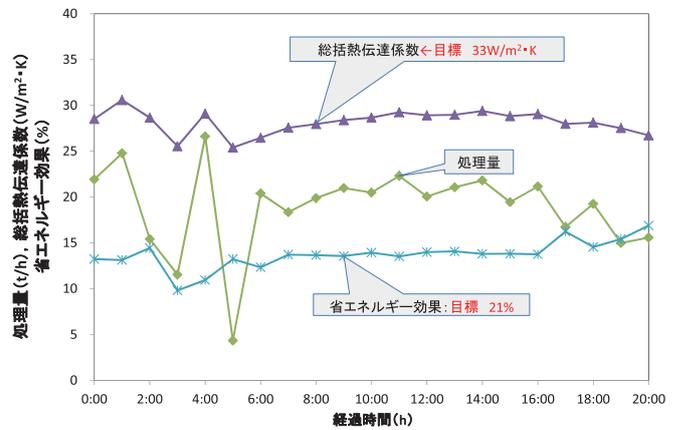


図-5 熱交換器における省エネルギー効果の経時変化

3.1.2 熱交換器

熱交換器における放熱側排気ガス温度の経時変化を図-4 に示す。熱交換器の放熱側排気ガスの入口温度は 590°C であり、熱交換器の出口で約 460°C になっている。この排気ガスの温度低下分が本装置で熱回収されたことになる。熱交換器で回収した後に 400°C 以上を維持しており、ダイオキシンのデノボ再合成温度以上であることが確認できる。

図-5 には同じ処理工程における経過時間当たりの処理量と省エネルギー効果を示している。定格能力に対して少ない処理条件であるが、省エネルギー効果が目標値の 21%に比較して、実績値が 14%程度の低い結果に留まっていることが確認できる。総括熱伝達係数は、33W/m²・K を基準目標値としていたが、平均でみると 29W/m²・K 程度であることが読み取れる。これは受熱側の予熱空気の流れが放熱側に比較して少なく、その対策として熱交換器の内部にバッフルプレート（流れ阻止板）を設けることにより受熱側の風速を高め、温度境界層を薄くするこ

とで熱伝達率を向上する構造としていたが、その効果が不十分であったことが要因として考えられる。

3.2 土壌の浄化性能

3.2.1 浄化性能評価方法

本研究で開発した土壌浄化システムを適用して浄化した土壌は、関東におけるガス工場跡地の実汚染土壌である。関東ロームの土壌であるためシルトおよび粘土の割合が高く、洗浄処理や加熱処理においては、浄化が難しい土壌である。

油分濃度に関する浄化性能の評価には、HORIBA 製の油分濃度分析装置 OC355 と、その溶媒として F997 を用い、全石油系炭化水素 (TPH) の測定を行った。また、多環芳香族炭化水素に関する浄化性能の評価には、ヘキササン/アセトン(1:1)溶媒を用いて試料土壌から多環芳香族炭化水素を抽出し、高速液体クロマトグラフ (HPLC) にて定量測定を行った。

指標として、処理前の汚染物質の濃度に対する処理後の低下濃度の割合を浄化率として評価した。

3.2.2 従来の加熱システムと本システムの比較

従来のシステム⁷⁾は一次処理キルンの排気ガス温度が約 200℃と低く、排気ガスと一緒に飛散する微細土粒子の処理温度が排気ガス温度と同程度になる。一次処理キルンから排出される揮発した油分を含む排気ガスは、バグフィルタで微細土粒子を集塵した後に、二次処理装置において 750℃の高温雰囲気中で酸化分解される。そのため、土壌の比表面積の関係上、油分濃度が高い微細土粒子は処理温度が低いため、十分な浄化性能が期待できない。この課題を改善する目的で、微細土粒子を集めて再度処理を行う微細土粒子キルンを設けて浄化性能を高め

た⁷⁾。従来システムの各装置の処理途中・処理後における油分濃度を表-3 に示す。表に示すバグフィルタ微細土粒子の汚染濃度が処理前以上に高くなっている理由は、上記したように微細土粒子は比表面積が大きく粒径が大きいものよりも一次処理キルン処理後においても残留油分を多く含んでいるが、排気ガスをバグフィルタで集塵することによる分級操作によって、油分を多く含む微細

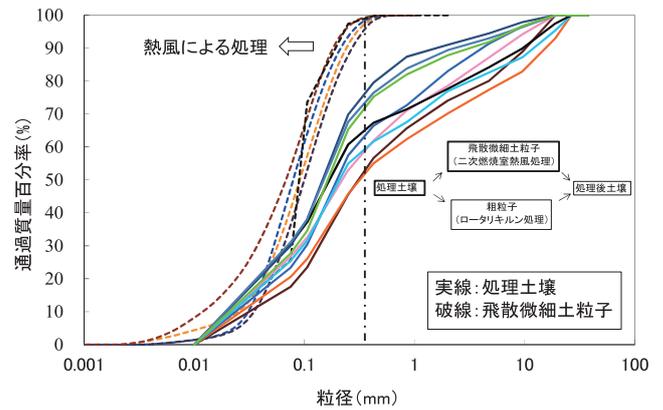


図-6 江東区における処理土壌と飛散微細土粒子の粒度の比較

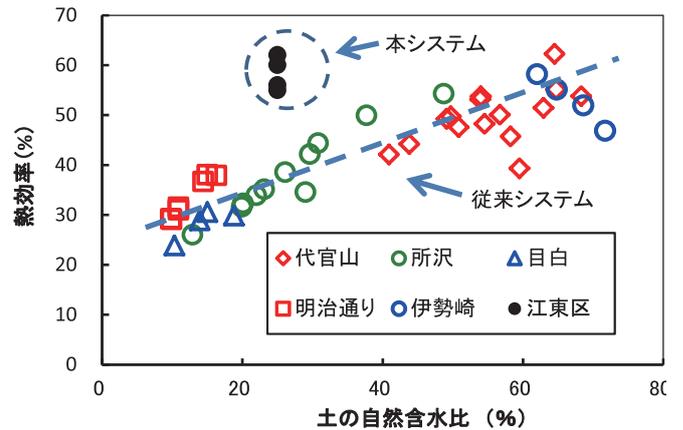


図-7 本システムと従来システムの熱効率の比較³⁾

表-3 従来システムの各装置の処理途中・処理後における油分濃度⁷⁾

土の種類	処理前		バグフィルタ微細土粒子	微細土粒子キルン処理後		処理後		
	油分濃度 (ppm)	含水率 (%)	油分濃度 (ppm)	油分濃度 (ppm)	浄化率 (%)	油分濃度 (ppm)	浄化率 (%)	含水率 (%)
横浜①	7,300	22.2	30,000	40	99	1,300	82	15.6
横浜②	6,800	21.3	27,000	690	90	1,100	84	10.7
大阪	4,300	13.8	23,000	250	94	570	87	8.5

表-4 新たなシステムの処理途中・処理後における油分濃度

土の種類	処理前		予備乾燥機出口		バグフィルタ微細土粒子			処理後		
	油分濃度 (ppm)	含水率 (%)	油分濃度 (ppm)	含水率 (%)	油分濃度 (ppm)	浄化率 (%)	含水率 (%)	油分濃度 (ppm)	浄化率 (%)	含水率 (%)
A	277	19.8	311	11.6	18	94	0	22	92	21.5
B	344	23.5	403	5.0	4	99	0	11	97	24.0
C	336	23.2	411	14.8	158	53	0	21	94	25.7

土粒子が集合し、油分濃度が処理前よりも高くなったためである。

これに比較して新たなシステムの処理途中・処理後における油分濃度の一例を表-4 に示す。この表の土の種類 A・B・C は、同一の汚染サイトにおける汚染土壌であるが、掘削位置が異なることから処理前の油分濃度や汚染油の状態に違いがある。全ての汚染土壌においてバグフィルタ微細土粒子の浄化率は高く、従来システムに比較して油分濃度が大きく低下しており、C 土壌を除いては処理後の浄化率近くまで浄化できていることがわかる。各掘削位置によって浄化性能に差がある一つの要因としては、各汚染場所において油分の変質具合が異なり浄化の難易度に相違があることが挙げられる。しかし、C 土壌においても従来システムと比較すると大きく低下しており、十分な浄化性能が得られている。これは、ロータリキルンの出口側に二次燃焼室があり、排気ガスと一緒に飛散する微細土粒子を、まず 800℃以上で 2 秒間滞留させて高温で処理するためである。従来システムにおいては、一次処理キルンの排気ガス温度が低く、飛散する微細土粒子の加熱温度も同等となり、その状態でバグフィルタにて微細土粒子を捕捉するため、微細土粒子の浄化性能は期待出来なかった。そのため、微細土粒子キルンを設けて微細土粒子の追加処理を行っていた。新たなシステムにおいては追加処理を行うことなく、微細土粒子の浄化率を高めることができていたことがこの結果

から確認できる。従来に対して新たなシステムにおいて処理後の含水率が高くなっている理由については、最終的に土壌を粉塵が出ない程度の湿潤状態に調湿を行ってから排出を行うが、新たなシステムで処理した土壌の方がシルトの割合が高く前処理において土壌の含水調整を行ったことや、処理後に最適な湿潤状態になるまで多くの水分を含む必要性があったこと等が挙げられる。

図-6 に今回処理を行った実汚染土壌の処理土壌と排気ガスの流れに乗って処理される飛散微粒子の粒度分布を示す。土壌の種類によって異なるが、シルト分と粘土分が 20~30%程度の割合の土壌である。図中の一点鎖線付近の 0.5mm 以下の粒度のものが、排気ガスと一緒に飛散し微細土粒子として処理されるが、重量割合では 50~70%程度の量になる。これは、ロータリキルンから排出される土壌よりも、排気ガスと一緒に飛散する微細土粒子の割合が高いことを示している。

従来システムにおいては、このような 0.5mm 以下の粒径が多い土壌の場合は、上記した理由から浄化性能を高めることが難しかった。新たなシステムにおいては、細かい粒度のものが排気ガスと同じ高温雰囲気で行うことが可能なため、シルトや粘土の割合が高く粒径が細かい土壌に対しても十分な浄化性能を得ることができる。排気ガスが 800℃以上の温度で維持される時間は 2 秒間と短い、微細土粒子は比表面積が大きいため熱風により熱交換されやすく、また、熱容量も小さいため短

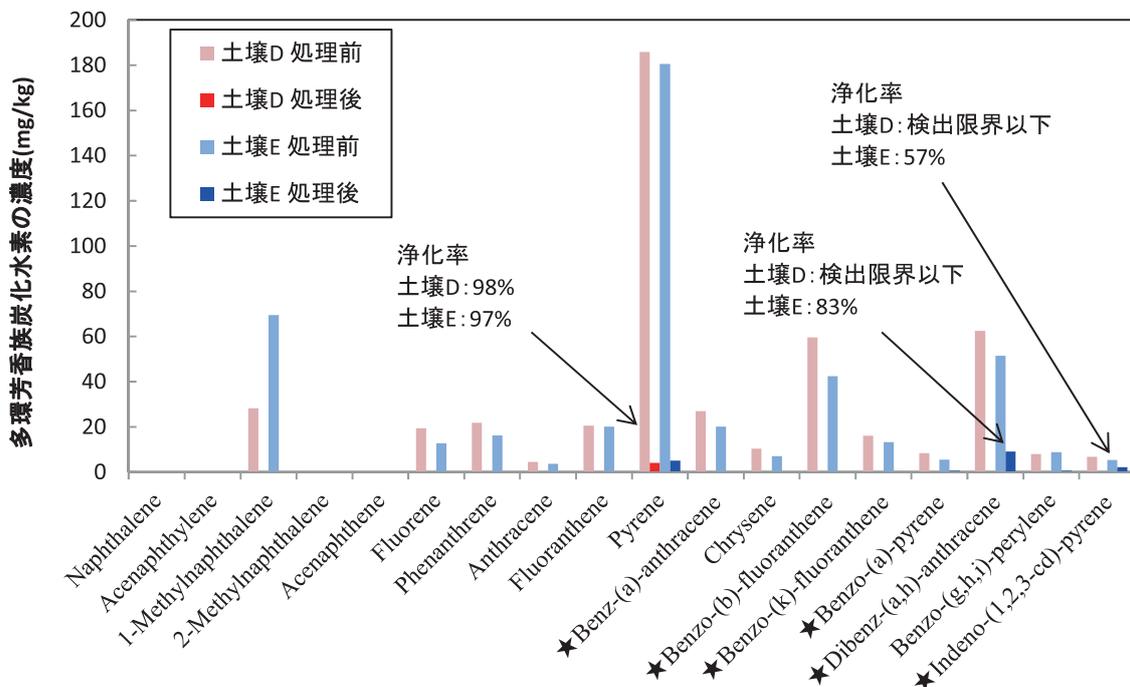


図-8 多環芳香族炭化水素の浄化性能

時間で高温まで加熱処理することが可能である。さらに、実汚染土壌における多量の浄化処理についても、本システムの浄化性能が安定していることを確認している。

一方、洗浄処理の場合、シルトや粘土の割合が高い細かい粒径の土壌については、分級操作によって回収される微細土粒子の集合体である洗浄残渣を多く排出する。また、この洗浄残渣については残留油分を多く含むために二次処理が必要となり、洗浄処理の課題となっている。このような観点から、細かい粒径の土壌に対しては、他の工法に比較して今回のシステムは極めて有効であると言える。

図-7 に熱回収機器を装備しない従来のシステム³⁾と今回の省エネルギー化を図ったシステムの実運用上における熱効率の比較を示す。今回のシステムで処理を行った土壌は、土壌浄化システムの供給前に生石灰を用いて前処理を行っており、土壌の含水比は 25%前後である。この含水比における今回のシステムの熱効率は約 60%であるが、それに対して従来のシステムにおいては 38%の低い値に留まっていることがわかる。この結果から、今回新たに設けた土壌予備乾燥装置と熱交換器の省エネルギー効果が実運用上においても明確に確認できる。

3.2.3 多環芳香族炭化水素の浄化

従来のシステムでは、土壌の加熱温度が最大 400℃までの加熱処理であるためタール・ピッチや高沸点の多環芳香族炭化水素の浄化性能を期待できなかった。今回のシステムでは、加熱装置であるロータリキルンに耐火材を施工することで土壌の加熱温度を 600℃以上に加熱することが可能となり、それらの浄化にも対応することができる。

図-8 は、本システムにおける多環芳香族炭化水素の浄化性能を示している。評価方法は処理前後の実汚染土壌を 5g サンプルングし、その土壌から汚染物質をヘキサソラン/アセトン(1:1)溶媒に溶出させて高速液体クロマトグラフ (HPLC) で定量分析することで行った。土壌 D, E の 2 種類の土壌に対して、浄化性能の評価を行ったが、それぞれの土壌加熱平均処理温度は、土壌 D: 522℃、土壌 E: 460℃である。上記したように多環芳香族炭化水素は 100 以上の多くの種類があるが、本研究では、18 種類に絞って分析を行った。特に発癌性を示す可能性が高く有害な物質に関しては、図中の名称の前に星印を付けている。浄化後の溶出濃度は 18 種類の物質のすべてが、10mg/kg 以下であることがわかる。その中で比較的、残留した炭化水素濃度が高かった物質は、ピレン、ジベン

ズ (a,h) アントラセン、インデノ (1,2,3-cd) ピレンである。それぞれの浄化率を図中に示しているが、土壌の加熱処理温度が低い土壌 E の方が、浄化率が低くなっていることが確認できる。

多環芳香族炭化水素の沸点と浄化率の関係を図-9 に示す。上記したように発癌性を示す可能性が高い物質は、多環芳香族炭化水素の中でも沸点が高く 400℃以上のものである。522℃で処理した土壌 A は 500℃以上の沸点の物質においても 100%近い浄化率を達成できている。一方、処理温度が低い 460℃で処理した土壌 E に関しては、470℃以上の沸点の物質においては、浄化率が低下し 55~95%の値を示していることが確認できる。また、この中で 536℃の沸点を持つ Indeno-(1,2,3-cd)-pyrene においては、浄化率が 57%と際立って低くなっているが、この要因としては本物質の加熱前の汚染濃度が元々低いために、処理後に残った低濃度の残存 (2.26mg/kg) においても除去率の値としては悪くなったことが挙げられる。

加熱処理による土壌の浄化においては、汚染物質を加熱し蒸気圧を高めて土壌から揮発させて行う。浄化性能には、加熱温度と加熱時間が大きく影響し、必ずしも物質の沸点以上の温度まで加熱処理する必要はない。今回の結果においては、加熱温度を高めると浄化性能が高まる傾向が確認でき、多環芳香族炭化水素の沸点温度域まで処理温度を上昇すると浄化率が 100%近くまで上昇する結果が得られた。

4. 結言

本研究では、従来のシステムに比較して土壌の加熱温度を高めることにより浄化性能を改善し、更に高温の排気ガスから熱を回収し省エネルギー化を図った新たな土壌浄化システムの開発を行った。また、実地盤の汚染土壌浄化に対して、本システムを適用し、土壌の浄化性能とその有用性を明らかにした。以下に本研究で得られた主要な結果を列記する。

- (1)土壌の予備乾燥を高温の排気ガスから間接加熱方式で行う土壌予備乾燥装置を新たに開発し、本装置において 19%程度の省エネルギー化を実証した。
- (2)新たに開発した熱交換器を用いて、微細土粒子が多く含まれた高温の排気ガスからバーナ燃焼用空気を予熱することで、熱エネルギーの回収を行った。この結果、本システムによって 14%程度の省エネルギー化を実現した。

油汚染土壌に対する熱処理修復技術の応用

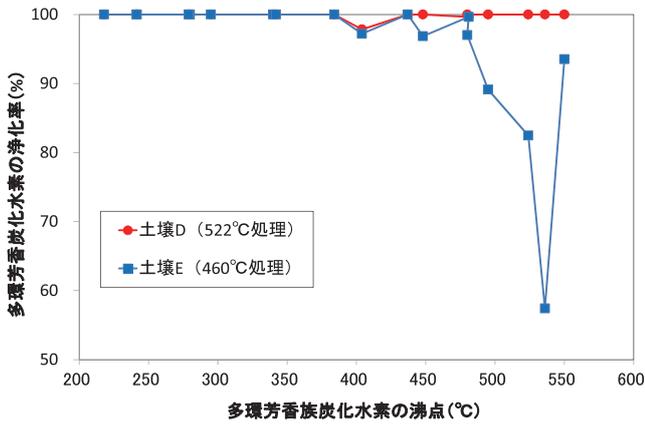


図-9 多環芳香族炭化水素の沸点と浄化率の関係

(3)従来のシステムから土壌浄化システムの処理フローを見直し、土壌加熱用のロータリキルンの排出側に二次燃焼装置を設けた。この改良によって、微細土粒子の加熱処理温度が高まり、浄化性能が向上した。このシステムにおいては、粘土・シルトの割合が多い汚染土壌に対して、他の工法に比較して浄化性能に優位性がある。

(4)本システムでは、油汚染土壌に含まれた400°C以上の沸点を持つ発癌性の可能性がある多環芳香族炭化水素を浄化処理できる。また、浄化対象物質をその物質の沸点近くの温度で処理すると、十分な浄化性能が得られることが確認できた。

今後については、異なる手法と浄化性能や浄化期間、

浄化機構などの比較研究を行うことにより、本手法の適用範囲を工学的知見から検証を行う予定である。

参考文献

- 1) 橋本久義, 須藤孝一, 井上千弘, 千田 侑: 油汚染土壌のオンサイト修復技術, 石油技術協会誌, Vol.71, No.1, pp.131-138, 2006.
- 2) 須藤孝一, 平川貴也, 中川勇樹, 関野聡, 橋本久義, 井上千弘・千田 侑: 生石灰混合処理による油汚染土壌浄化と浄化処理の汚染サイトに棲息する油分解微生物に及ぼす影響, 石油技術協会誌, 第71巻, 第5号, pp.513-521, 2006.
- 3) 蓬萊秀人, 神尾昌宏, 亀井健史: 加熱による汚染土壌の修復技術, 地盤工学ジャーナル, Vol.8, No.2, pp.297-310, 2013.
- 4) 中央環境審議会土壌農薬部会, 土壌汚染技術基準等専門委員会, 油汚染対策ガイドライン - 鉱油を含む土壌に起因する油臭・油膜問題への土地所有者等による対策の考え方 -, pp.1~21, 2006.
- 5) 久保隆, 小野敏路, 浦野紘平, : 多環芳香族炭化水素類による大気汚染特性, 大気環境学会誌, Vol.37, No.2, pp.131-140, 2002.
- 6) 川辺能成, 西脇淳子, 坂本靖英, 原淳子, 駒井武: 地球環境における鉱物油のヒトのリスク評価に関する研究, 石油技術協会誌, Vol.73, No.3, pp.225-231, 2008.
- 7) 神尾昌宏, 蓬萊秀人, 亀井健史: 熱処理による油汚染地盤の修復, 地盤と建設, Vol.31, No.1, pp.29-36, 2013.
- 8) 大北康治, 伊藤克彦, 鈴木重孝, 久保孔明: 土壌洗浄法の概要とその適用について, 廃棄物学会誌, Vol.5, No.1, pp.79-86, 1994.

(2014年6月23日 受付)

