

# 省エネルギー型油汚染土壌浄化プラントの開発と その変遷および将来展望

*Development of Energy-Saving Oil Contaminated Soil Remediation Plant,  
Its Transition and Future Prospects*

蓬萊 秀人

日工株式会社 技術本部

## 概要

環境基本法で定める大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音、振動、地盤沈下、悪臭の典型7公害の中で法整備が最も遅れていた土壌汚染対策法が2003年に施行されている。そして、この法律に基づき順次土壌の汚染対策が進められてはいるが、その特殊性や多様性から潜在的な公害としての特徴を有している。中でも、油による土壌汚染が少なくないことから、その経済的な浄化技術の開発が待ち望まれている。筆者らは、油汚染土壌に加熱技術を適用することにより、油の蒸気圧を高めて土壌から脱離を行うのと同時に、脱離した油を二酸化炭素と水とに酸化分解して排出ガスの無害化をはかる油汚染土壌浄化システムを開発し市場に投入している。本稿では、当社における油汚染土壌浄化システムの進化の足跡を辿ると共に、新たに開発した省エネルギー型油汚染土壌浄化システムを概観し、その省エネルギー化と浄化性能についての特徴ならびに将来技術への展望を紹介する。

キーワード: 土壌汚染対策法, 油汚染土壌, 脱離, 乾燥, 省エネルギー化

## 1.はじめに

我が国は、戦後の高度経済成長期を経てバブル経済期においては、GDPが米国をも凌駕する経済大国にまで成長してきた。そして、この経済成長により豊かさや利便性を我々国民が享受している。このことは、工業製品の大量生産、大量消費、大量廃棄によってもたらされた物質的な豊かさや利便性であって、これらの代償として公害や環境破壊、さらには地球温暖化などの課題を将来世代に担わせることになっている。

公害問題では、欧米に遅れること10年余り、典型7公害の中で最も対策が遅れていた土壌汚染に対して、2003年(平成15年)2月15日付けで「土壌汚染対策法」が施行されている。すでに施行済である他の6公害(大気汚染、水質汚濁、騒音、振動、臭気、地盤沈下)に関する法律は、経済活動に伴う副産物や廃棄物の排出濃度や排出量を規制することにより、公害の発生や被害の拡大を未然に防止することを目的としている。これらの法律に対して土壌汚染対策法は、第一に土壌汚染の状況を把握し、地下水の飲用や汚染土壌の直接摂取などによる人への健康被害の防止措置をはかることを最大の目的としている。この法律が「土壌汚染防止法」ではなく「土壌汚染対策法」となったことは、このことに起因している。

土壌汚染対策法では、国が定める土壌の環境基準として27種類の特有害物質を指定している。これらには、第一特有害物質としてVOC(Volatile Organic Compound:揮発性有機化合物)類12種、第二種特有害物質として重金属類10種、第三種特有害物質として農薬類5種の合計27種類が指定されている。

第一種特有害物質には、トリクロロエチレン( $\text{CHCl}=\text{CCl}_2$ 、溶出量基準:0.03mg/L)、テトラクロロエチレン( $\text{CCl}_2=\text{CCl}_2$ 、溶出量基準:0.01mg/L)、ジクロロメタン( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ 、溶出量基準:0.02mg/L)などの有機塩素化合物が含まれている。これらの有機塩素化合物は、分子内に塩素原子を含む有機化合物であって化学的に安定しており、非極性分子であることなどから、電子部品などの脱脂洗浄やドライクリーニングなどの溶剤として使用されている。身体への影響は、中枢神経を麻痺させ、蒸気を吸い込むと、めまい、頭痛、眠気、吐き気、言語障害、歩行困難、意識不明などの症状に陥ることがある。また、その物理特性は、水への溶解性はほとんどなく、密度は水よりも大きい。そして、常圧下での沸点は100℃以下である。したがって、加熱して蒸気圧を高めることにより、土壌から容易に脱離することができる。浄化方法としては、汚染土壌に生石灰を添加してその水和熱により、土壌を加熱する

ホットソイル工法などが知られている。これは、VOCの温度変化による物理的变化(液体→気体)を利用した土壌からの脱離方法である。その他、化学的分解法や微生物的分解法などが実用化されている。

第二種特有害物質には、水銀(Hg、含有量基準:15mg/kg、溶出量基準:0.005mg/L)、カドミウム(Cd、含有量基準:150mg/kg、溶出量基準:0.01mg/L)、鉛(Pb、含有量基準:150mg/kg、溶出量基準:0.01mg/L)、六価クロム( $\text{Cr}^{+6}$ 、含有量基準:250mg/kg、溶出量基準:0.05mg/L)などの重金属類が含まれる。身体への影響は、水銀による水俣病や、カドミウムによるイタイイタイ病などが公害病として国に認定されている。水俣病は、メチル水銀による中毒性中枢神経疾患であり、運動失調、感覚障害、聴力障害などの症状が現れる。イタイイタイ病は、多発性近位尿細管機能異常や骨軟化症が主な症状である。

また、これらの重金属類は、酸化物、水酸化物、硫化物などの化合物の形態で土壌中に存在しているものと考えられる。さらに、重金属類は、地下水の存在下でその水素イオン濃度の影響を受けて溶出し、原子単体のイオン状態でも存在していることが知られている。このように重金属類は、原子やイオン単独の状態でも有害であることから、第一種特有害物質のように分解して無害化することはできない。

したがって、土壌から重金属類を除去する方法として物理的特性(物質の三態変化など)を利用する場合は、比較的その融点や沸点が高温のものが多いことから、大量のエネルギーを消費し浄化コストが高むことになる。このことから、重金属類の化合物の多くは土粒子の表面に付着していることに着眼し、比表面積が大きいシルト質、粘土質を土壌から分級する洗浄工法などを適用して土壌中の重金属類を減じる方法が有効である。

第三種特有害物質には、PCB(ポリ塩化ビフェニル、溶出基準:不検出)やチウラム(テトラメチルチウラムジスルフィド、溶出量基準:0.006mg/L)、シマジン(6-クロロ-N,N-ジエチル-1,3,5-トリアジン-2,4-ジアミン、溶出量基準:0.003mg/L)などの殺虫剤や除草剤が含まれている。PCBは、毒性が強く発がん性物質として指定されており、難分解性であることからその取り扱いに関しては、国がPCB処理特別措置法を制定して令和5年(2023年)3月31日までに無害化処理を完了させる計画となっている。また、これらの第三種特有害物質は、有機化合物であることから一定の温度条件下で、熱分解により無害化することが可能である。

一方、戦後の我が国における高度経済成長の推進力となったのは石油であるといっても過言ではない。石油は、一次

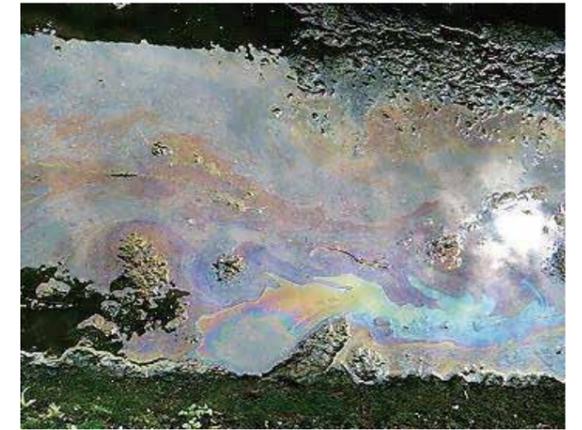


写真-1 油汚染土壌<sup>1)</sup>

エネルギーとしてのみならず化学製品の原料として、また、その経済性、安全性、ハンドリング性に優れていることから、工業製品の製造プロセスにおける洗浄液や溶媒として大量に使用され大量に廃棄されてきた。その代償として写真-1に示すような油汚染土壌という負の遺産を、将来の世代に担わせる最終局面に至りつつある。

油汚染土壌は、生産活動を行っていた工場跡地などからその多くが発見しており、土壌汚染全体の半数以上が、石油が介在する汚染であるといわれている。さらに、この油による土壌汚染は、写真-1のような油膜や油臭といった生活環境面における深刻な問題をも引き起こしている。しかしながら、本報告の浄化対象である油汚染土壌は、土壌汚染対策法で定める特有害物質の指定を受けていない。国が定める土壌の環境基準によると、土壌の油汚染に関しては、油の構成成分であるベンゼン( $\text{C}_6\text{H}_6$ :溶出量基準:0.01mg/L)が第一種特有害物質として規制の対象となっているのみである。また、ベンゼンは発がん性を示すことから、今現在は有機溶剤として使用されなくなっている。

これらのことに関して、平成18年(2006年)3月付けで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が、油汚染対策ガイドライン-鉱油類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応の考え方<sup>1)</sup>(以下、ガイドラインと記載)を作成している。このガイドラインは、油汚染問題に対応する際の考え方や、油汚染問題が生じている現場で、調査や対策を行う際に参考となる事項を取りまとめたものである。土壌汚染対策法は、人の健康被害の防止を最大の目的としているが、本ガイドラインでは、生活環境保全の支障を取り除くことを目的としているところが大きく異なる。

また、油汚染土壌の浄化対策は、土地売買に伴う汚染による土地評価額の減損を抑えるためのリスク回避措置として、「土壌汚染対策法」施行以前より民間ベースで自主的に実施

されてきた経緯がある。油汚染土壌の浄化技術としては、自然治癒力を利用したバイオレメディエーション(Bioremediation)、高温焼却技術を応用したセメントキルンでの浄化などが知られているが、確実性並びに経済性などから日本では普及に至っていない。このような時代の要請のもと、経済的で確実、スピーディに油汚染土壌の浄化と油の熱分解による無害化が可能で、浄化後の土壌は本来の機能を損なうことなく土としての本質を保持しながら、微生物や植物が早い段階で生息可能となる土壌浄化技術の確立が待ち望まれている。

本報告では、筆者らが開発した油汚染土壌浄化システムの進化の足跡を辿り、新たに開発した省エネルギー型油汚染土壌浄化システムを概観し、その省エネルギー化と浄化性能などの特徴ならびに将来技術への展望を紹介する。



写真-2 アスファルト舗装による遮蔽<sup>12)</sup>



写真-3 遮水壁<sup>1)</sup>

## 2. 既往の油汚染土壌の浄化技術

既往の油汚染土壌の対策技術には、油の拡散を防ぎ人畜に被害が及ばないようにする拡散防止対策と、油を土壌から積極的に取り除きそれを回収、または、分解して無害化をはかる浄化対策とに大きく分類することができる。

油の拡散防止対策には、油の地下水への浸透拡散がない場合、地表面での油膜遮断・油臭遮断対策を行う必要がある。この場合、最も安価な対策として、盛り土や舗装を挙げることができる。盛り土は、油含有土壌を上部より覆い油臭や油膜を遮断することができる。舗装は、写真-2に示すアスファルト舗装やコンクリート舗装などを挙げることができ、盛り土に比べ遮断効果に優れている。

油の地下水への浸透拡散がある場合、地下水への油分拡散防止対策を講じる必要がある。この場合、写真-3に示す遮水壁や、バリア井戸などの対策が有効である。遮水壁は、油が漏れ出たエリアを囲むように、矢板を不透水層まで打ち込み油の拡散を防止する対策法である。バリア井戸は、油が漏れ出たエリアを囲むように揚水井戸を掘り、油の拡散を防止する対策法である。揚水した油を含む地下水は、油を除去して自然放流される。また、油の地下水への浸透拡散のリスク評価システムとして、坂本らは、地下水における油の移動現象の解析を行うとともに、人への健康リスクを定量的に評価している<sup>2-5)</sup>。

一方、油汚染土壌の浄化技術には、土壌を掘削除去する工法と原位置で浄化する工法とに大きく分類することができる。掘削除去した油汚染土壌の浄化方法には、熱処理、土壌洗浄、バイオレメディエーション、セメント原料などを挙げることができる。また、橋本らは、市街地のガソリンスタンドの跡地などで最も多いガソリン、軽油、灯油などで汚染された土壌のオンサイト修復技術の実施例について詳細を報告している<sup>6)</sup>。これは、汚染土を掘削して取り出し、汚染サイト内で浄化処理を行った後、土壌を元の位置に埋め戻す浄化工法である。

熱処理は、土壌を加熱することにより油の蒸気圧を高め、土壌から油を脱離させる方法である。ほとんどの土壌は、水分を含んでおり、加熱プロセスにおいて、この水分が熱エネルギーを奪い加熱の妨げとなっている。土壌の加熱温度によって、200～400℃で油を土壌から揮発分離する乾燥加熱処理法、400～600℃で油を土壌から脱着する熱脱着処理法、600～1,000℃で油成分を分解する熱分解処理法に分類することができる。また、汚染土壌の加熱処理方式として連続加熱処理方式とバッチ加熱処理方式とに分類される。さらに、連続加熱処理方式には、処理土壌と熱媒体である熱風との流れの方向からカウンターフローとパラレルフローとに分かれる。前者は、汚

染土壌と熱風とが対向して流れる方式で、後者は並行して流れる方式である。本稿で述べる一連の油汚染土壌の浄化システムは、その土壌の加熱温度が200～400℃の範囲である加熱乾燥処理と、400～600℃の熱脱着処理の両処理法に該当し、そして、両処理法とも連続加熱処理方式に属する。

土壌洗浄は、溶剤や界面活性剤などを用いて土壌を分級することにより、土壌に含まれる油濃度を低減させる方法である。バイオレメディエーションなどの工法との組み合わせが有効である。また、分級による油濃度の低減を基本原理としていることから、シルト質や粘土質の多い土壌への適応は難しい。

掘削除去後のバイオレメディエーションは、バクテリアなどの微生物が持つ油分解能力を利用する浄化方法である。油汚染土壌中に生息する油を好む微生物に栄養塩などを与えて油の分解促進をはかるバイオスティミュレーション(Bio stimulation)と、油の分解性能の高い微生物を製剤として油汚染土壌に注入するバイオオーグメンテーション(Bio augmentation)などが実用化されている。

バイオレメディエーションは、浄化費用が他の浄化工法に比べて安価で、土壌の自然治癒力を活用した自然環境に最も優しい浄化工法であるが、微生物の活性が低下する冬季への適応が難しいなどの制約がある。森也らは、バイオスティミュレーションにおいて栄養塩の注入量や注入速度に関する研究を行っており、土壌を栄養塩が不飽和の状態に保つことが有効であると報告している<sup>7)</sup>。さらに、須藤らは、油汚染土壌に生石灰処理を適用した場合、土壌に生息する油分分解バクテリアに及ぼす影響を検討している<sup>8)</sup>。これによると、生石灰処理により土壌のpHが12以上にシフトしたにも拘わらず土中微生物は減少するものの残存し、生石灰処理後に残留する油の分解に寄与していることを確認している。なお、バイオオーグメンテーションを適用する場合には、微生物によるバイオレメディエーション利用指針(平成17年3月30日、経済産業省及び環境省告示)に沿って、事前に安全性を検討する必要がある。安全性の検討に関しては、北山らが灯油の分解に有効なバクテリアに関して、マウスを用いる慢性毒性ならびに急性毒性試験を実施し、その結果から、これらのバクテリアを屋外で用いることの安全性を確認した事例がある<sup>9)</sup>。

セメント原料は、掘削除去した油汚染土壌をセメント製造施設に搬入し、セメント原料として有効利用する方法である。セメントの化学成分であるカルシウム(Ca)、シリカ(SiO<sub>2</sub>)、アルミナ(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、鉄(Fe)などを含んでいるものはすべてセメント原料として有効利用することが可能で、土壌もこれら成分を多く含んでいる。ただし、セメントの品質を保つためには、これら化学成分の配合割合が重要な要素となることから、油汚染土壌の

受け入れ量に制約がある。

つぎに、原位置浄化には、土壌ガス吸引、原位置バイオレメディエーション、化学的酸化分解等の浄化工法を挙げることができる。

土壌ガス吸引は、地下に存在する油を減圧することにより、揮発させ抽出除去する方法である。地下水の揚水やエアースパーキング(地中曝気)などと併用させることで、その適用範囲を広げることができる。

原位置バイオレメディエーションは、建物があるために掘削できない場合や、大深度で掘削費用が莫大となる場合などに適応される。栄養塩(バイオスティミュレーション)や微生物製剤(バイオオーグメンテーション)を直接地中に注入し、油分の分解を促進させる浄化工法である。

化学的酸化分解は、過酸化水素などの酸化剤を、鉄を触媒として反応させることにより大量の酸素を発生させ、油を含む有機化合物を酸化分解する浄化工法である。酸化分解した油は、無害の二酸化炭素と水になる。

いずれの浄化工法に関しても、適用する前に実汚染土によるトリタビリティーテストを実施し、その有効性と副次的に生成される成分の環境への影響評価を十分に検討しておく必要がある。

## 3. 当社の油汚染土壌浄化システムの変遷

### 3.1 概要

当社は、1999年に油汚染土壌浄化装置(NTR:Nikko Thermal Remediation system, 以下、NTRシステムと記載)を開発し市場に投入している。このNTRシステムは、アスファルトプラントの骨材乾燥システムならびに直接燃焼式脱臭装置等で培ってきた技術を基盤としている。そして、社会の要請に応え多様化する汚染物質に適応する浄化性能を順次高めて行き、現在では浄化対象となる汚染物質の種類や処理能力ならびに廃熱回収の有無などの違いからNTR-StageIからNTR-StageVIまでの6機種をNTRシリーズとしてラインナップに揃えている<sup>10-15)</sup>。表-1にNTRシリーズのラインナップとその特徴および加熱処理温度と適応する浄化対象物質を示す。

これらのNTRシリーズは、油汚染土壌を150～600℃の温度範囲で加熱処理し、大量の同汚染土壌を低コストで確実に浄化することが可能である。さらに、土壌の融点温度以下で加熱処理を行うことから、土壌本来の性状が不変であることや、システム内で有害物質を分解し無害化するため、二次公害の恐れがないことなどが大きな特徴である。

一次処理装置である内熱式のロータリーキルンに関して、

表-1 土壤浄化設備(NTRシステム)のラインナップと浄化対象物質

機種	Stage I	Stage II	Stage III	Stage IV	Stage V	Stage VI
土壤加熱処理温度(°C)	150~250	150~300	150~400	150~600	150~1,000	150~1,000
一次処理装置排ガス温度(°C)	120~180	120~180	200~500	200~800	200~1,200	200~1,200
二次処理温度(°C)	~800	~800	~800	~1,200	~1,200	~1,200
三次処理温度(°C)	—	200~350	—	—	—	—
三次処理排ガス温度(°C)	—	250~400	—	—	—	—
冷却塔	—	—	○	○	○	○
熱交換器	○	○	—	—	○	○
プレヒートキルン	—	—	—	—	—	○
油類	ガソリン相当	○	○	○	○	○
	灯油相当油類	○	○	○	○	○
	軽油相当	△	○	○	○	○
	A重油相当	—	○	○	○	○
	マシン油	—	○	○	○	○
	C重油相当	—	△	○	○	○
	タール・ピッチ	—	—	○	○	○
第一種特定有害物質・VOC	—	—	○	○	○	○
水銀・シアン化合物・農薬類	—	—	—	○	○	○

※! ○: 適応 △: 条件付きで適応 —: 未適応

Stage IとStage IIではカウンターフロー方式を、Stage IIIからStage VIに至るNTRシリーズにはパラレルフロー方式を採用している。

前者のカウンターフロー方式は、熱媒体である熱風と被加熱物である土壤とがロータリーキルン内部で対向して流れる方式である。浄化対象物の沸点が比較的低い軽質油で、しかも、大量に土壤の処理を行う場合に有効な手段となる。

後者のパラレルフロー方式は、熱風と土壤とが同一方向へ流れる方式である。沸点が高い難分解性の浄化対象物を処理する場合に有効となる手段である。

さらに、土壤の加熱処理温度に応じてStage IからStage IIIに至るNTRシステムには、耐火材を施工しないメタリック構造のロータリーキルンを、Stage IVからStage VIに至る同システムには、耐熱性と蓄熱性に優れた耐火キャストブルを内面に施工した構造のロータリーキルンを搭載している。加えて、同システムのStage VIは、徹底した省エネルギー化をはかるために、廃熱を利用して一次処理装置の前工程で土壤の予備乾燥を行うための外熱式のプレヒートキルンを備えている。

そして、全てのNTRシステムには、土壤から脱離した油成分を酸化分解して無害化するための二次処理装置と、加熱処理した土壤の冷却と防塵対策を兼ねて湿潤状態に戻すための調湿ドラムとを備えている。

前者の二次処理装置は、汚染物質によっても異なるが、有

機化合物の酸化分解に必要な750~1,200°Cの温度範囲で、同分解反応が完結するのに必要な滞留時間を確保している。さらに、同システムのStage IIIを除く全ての二次処理装置には、廃熱を回収して省エネルギー化をはかるための熱交換器を備えている。

後者の調湿ドラムでは、加熱処理を施した土壤に直接散水を行い湿潤状態とするが、このとき、多量の水蒸気とこれに随伴する粉塵とが生成する。このことから、調湿ドラムは、これら粉塵を捕捉するための集塵装置を備えている。

さらに付け加えると、高温の処理温度を必要とする難分解性汚染物質に適応するStage III以上のシステムには、土壤の加熱温度を均熱化して土粒子内部に残留する油分を酸化し曝気することにより、浄化を促進させるためのストックピンを備えている。

以下、NTR-Stage IからNTR-Stage VIに至る6機種について、その概要と特徴に触れる。

### 3.2 NTR-Stage I

当社において油汚染土壤浄化装置の初号機となるNTR-Stage Iは、表-1に示すようにガソリンや灯油などの軽質油で汚染された土壤を浄化対象としている。これらの軽質油は、炭素数がC<sub>5</sub>~C<sub>18</sub>の脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素を主成分とする油に相当し、その沸点が常温から250°Cの範

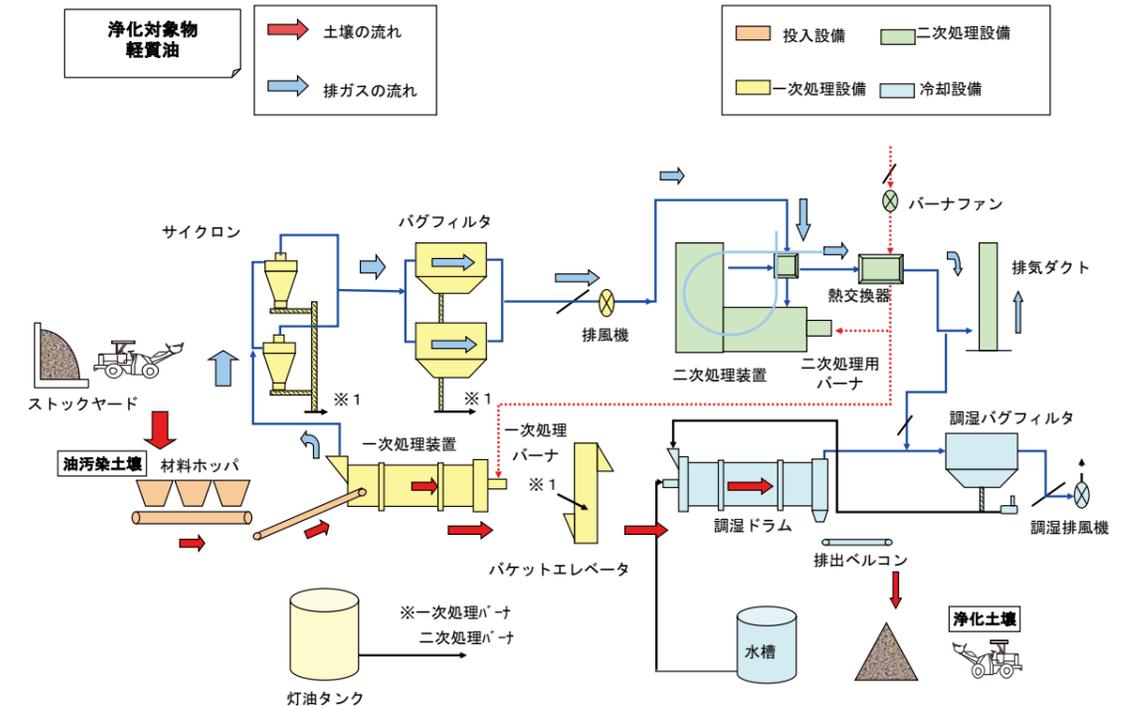


図-1 NTR-Stage Iの全体プロセスフロー(処理能力:毎時70トン)

囲の油を対象としている。図-1にNTR-Stage Iのプロセスフローを、写真-4にその全景を示す。以下では本図に基づき、土壤浄化のプロセスの概要を述べる。

まず、材料ホッパから油汚染土壤を連続的に切り出し一次処理装置であるカウンターフロー方式のロータリーキルンへ供給する。そして、ここで油汚染土壤を150~250°Cに加熱して含有油の蒸気圧を高め、気化蒸発を促進させることにより土壤から油を脱離している。

具体的には、大気圧下において水の沸点は100°Cであるが、水の沸点まで昇温しなくても洗濯物が乾くのと同様に、ガソリンや灯油などの軽質油に関しても、その構成成分の沸点にまで加熱する必要はなく、キルン内部における油成分の蒸気圧(分圧)によって、その蒸発の速度が支配される。このことから、ロータリーキルン内部での滞留時間が5~10分と比較的短時間で、なおかつ、土壤加熱温度が150~250°Cと油成分の沸点より低い温度であっても、土壤から軽質油を脱離することが可能となる。

ロータリーキルンの熱源としては、都市ガス、灯油、A重油などの化石燃料が一般的に使用され、これらの燃料をバーナで最適に燃焼することにより、熱媒体となる高温の熱風を生成している。また、メタリック構造のロータリーキルンは、その内部に土壤を効率よく掻き上げて分散落下させるためのリフターを備えている。このリフターにより、熱風との接触面積を増大させて



写真-4 NTR-Stage I(処理能力:毎時70トン)の全景

熱交換を向上させている。

ただし、土壤が含有する水分量が、その燃料消費量に大きく影響を及ぼすことに注意が必要である。すなわち、大気圧下で土壤中に水分が残留している限り、100°C以上に昇温することができないだけでなく、熱エネルギーが水の蒸発に率先して消費されるからである。

つぎに、土壤から気体として脱離した油成分は、排ガスと一緒に後段の集塵装置に導入される。この排ガスには、バーナの燃焼排ガスと侵入空気ならびに土壤から蒸発した水蒸気が含まれる。加えて、乾燥加熱により水分を失った土壤からは微細土粒子が飛散し、排ガスに随伴してロータリーキルンから排出される。このとき、微細土粒子は比表面積が極めて大きいことか

ら、排ガス温度が低下することに伴い、一旦気化していた油成分が再び土粒子を核として凝縮してくることに留意する必要がある。

したがって、本システムでは、集塵機として乾式サイクロンとバグフィルタを備えているが、排ガス温度を集塵機の耐熱温度近くにまで高めて、油の蒸気圧が下がらない温度域で運用するようにしている。具体的には、バグフィルタの濾布に、テフロン系の耐熱濾布（商標：PTFE）を採用しており、排ガス温度を200℃で管理することができる。

なお、ロータリーキルンの排ガス温度のコントロール手法としては、リフターの脱着やキルンの回転数を変更して行うことが可能である。

最終的に、ロータリーキルンで加熱浄化した土壌と、乾式サイクロンならびにバグフィルタで捕捉した微細土粒子とをまとめて調湿ドラムに導入し、ここで冷却と防塵対策のため散水を施して湿潤状態とし外部へ排出している。

一方、バグフィルタで濾過した油成分を含む排ガスを二次処理装置に導入し、800℃前後の温度で無害の二酸化炭素と水とに酸化分解している。そして、エネルギーの有効利用の観点から2器の熱交換器を備え、廃熱を回収している。1段目の熱交換器で被処理ガスを予熱し、2段目で一次処理装置と二次処理装置のバーナ燃焼空気を予熱している。これらの廃熱回収により、30%以上の省エネルギー化を達成している。最後に、熱交換器で廃熱を回収された浄化ガスは、排気ダクトを通じて大気へ放出される。

### 3.3 NTR-Stage II

NTR-StageIIは、表-1に示すようにStageIの浄化対象である軽質油を始めとし、重油、マシン油などの重質油を浄化の対象に含めている。これらの重質油は、炭素数がC<sub>10</sub>～C<sub>28</sub>の脂肪族炭化水素や芳香族炭化水素を主成分とし、その沸点が150～350℃の範囲にある油に相当する。写真-5にNTR-StageIIの全景を、図-2にその全体プロセスフローを示す。

図より、NTR-StageIIシステムでは、一次処理装置から排ガスに伴って重質油を多く含んだ微細土粒子を集塵機で捕捉し、これを三次処理装置である小型のパラレルフロー方式のキルンで200～350℃に加熱処理を行っているのが特徴である。全体システムとしては、NTR-StageIに三次処理装置を増設した構成となっている。以下では、本図に基づき土壌浄化のプロセスの概要に触れる。

まず、NTR-StageIIにおいては、軽油やA重油相当の油で汚染された土壌を加熱処理した場合、集塵機であるサイクロン



写真-5 NTR-Stage IIの全景

ンやバグフィルタで捕捉した微細土粒子に、高濃度の油が残留しており、浄化レベルを満足しないことが課題であった。このことは、微細土粒子の比表面積は粒子が小さいほど大きくなり、汚染油が土粒子表面に付着して一定の被膜を形成しているものと考えれば、小さな土粒子ほど油の含有割合が増大することに起因している。

視座を変えると、ロータリーキルンは燃焼ガスを媒体とした分級機としての特性を有しているものと理解することができる。ロータリーキルン内部には、熱風との熱交換を促進するためのリフターが取り付けられており、これにより土壌を掻き揚げて分散落下させている。そして、一定の速度でロータリーキルン内部を通過してくる熱風と接触することにより熱の移動が起こっている。これと並行して、粒径が小さく軽い微細土粒子が熱風に随伴して飛散して行くものと考えられる。

このようにして、分級作用を受けた微細土粒子は、比表面積が大きいため、濃縮されて高濃度の油で汚染された土粒子と化している。さらに、キルン出口の排ガス温度は、バグフィルタ濾布の耐熱温度である200℃で制約を受けるため、この温度で気化蒸発しない油成分が微細土粒子に残留することになる。

なお、土壌の種類にもよるが、ロータリーキルンから飛散して排ガスに伴って微細土粒子の量は土壌全体の10～30%を占める。特に、シルト質や粘土質が多く含まれる関東ローム層などの場合では60～70%に及ぶこともある。

以上のことより、NTR-StageIIでは、集塵機で捕捉した高濃度の油で汚染された微細土粒子を、三次処理装置である小型のパラレルフロー方式のロータリーキルンに投入し、200～350℃で再加熱して浄化を促進させているのが特徴である。そして、このときの排ガス温度は、250～400℃の範囲でコントロールが可能である。このようにして、三次処理装置を設けることにより、微細土粒子に残留する油の高沸点成分を気化蒸発

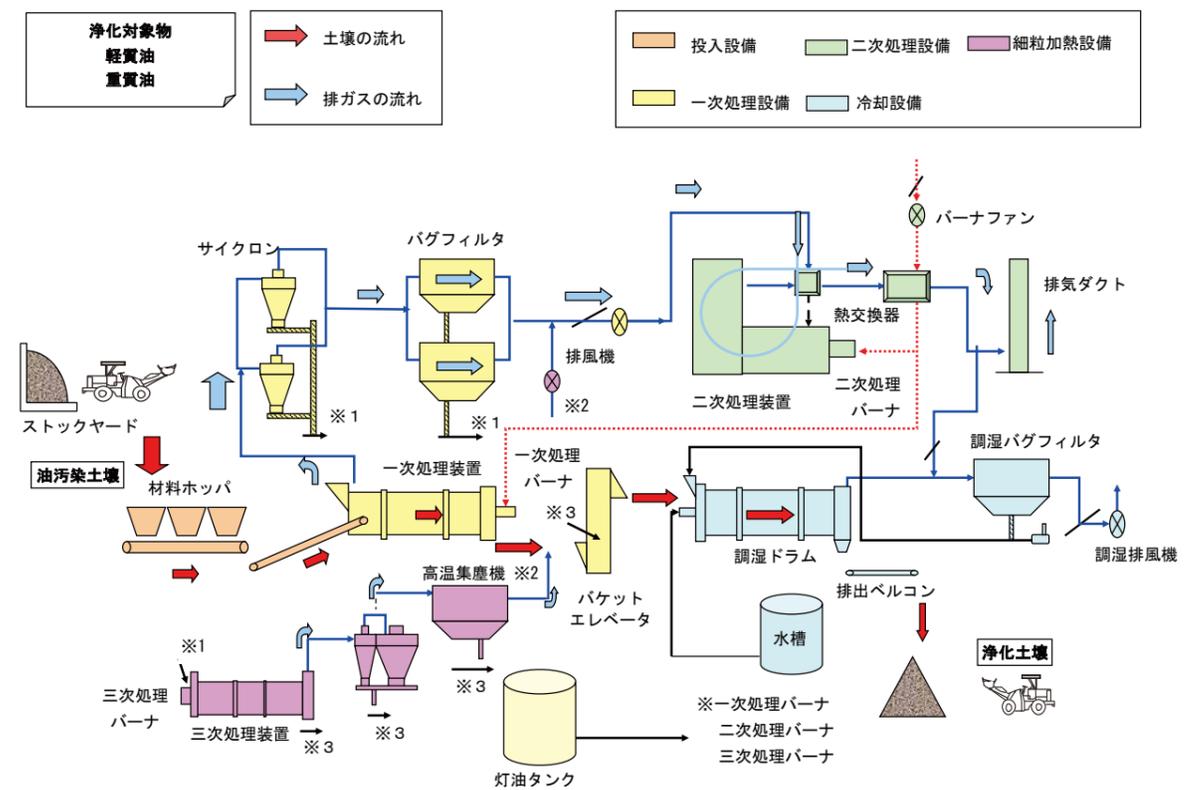


図-2 NTR-Stage IIの全体プロセスフロー

させて浄化を行うことを可能としている。

一方、この第三次処理装置から飛散する微細土粒子の捕捉には、耐熱温度400℃のセラミックスを濾材とする高温集塵機を採用している。高温集塵機で濾過処理後の油揮発成分を含んだ排ガスは、二次処理装置に導入して一次処理装置からの排ガスと共に熱分解により無害化している。

### 3.4 NTR-Stage III

NTR-StageIIIは、表-1に示すようにStageIIの浄化対象物に加えマシン油、タール・ピッチ、アスファルトなどの重質油や土壌汚染対策法の第一種特定有害物質であるVOC：Volatile Organic Compound（揮発性有機化合物）で汚染された土壌の浄化に対応している。図-3にNTR-StageIIIの全体プロセスフローを、写真-6にその全景を示す。以下では、本図に基づき土壌浄化プロセスの概要に触れる。

まず、一次処理装置としてパラレルフロー方式のロータリーキルンを採用し、汚染土壌を150～400℃の範囲で加熱処理することを可能としている。このとき、重質油が付着した微細土粒子がロータリーキルンから飛散して排ガスに伴って排ガス温度を250℃～500℃の範囲でコントロールすることにより、その浄化性能を高めている。

特に、パラレルフロー方式のロータリーキルンを適用していることから、バーナの燃焼量をコントロールすることにより排ガス温度のフィードバック制御が有効となる。排ガス温度をバーナの燃焼量でコントロールすることができないカウンターフロー方式のロータリーキルンのように、リフターの脱着や回転数変更による排ガス温度の管理が不要となる。

また、NTRシリーズのStageIからStageIIIに至る一次処理装置は、メタリック構造のロータリーキルンで、土壌を分散させるためのリフターを内部に備えていることは既に触れている。さらに、



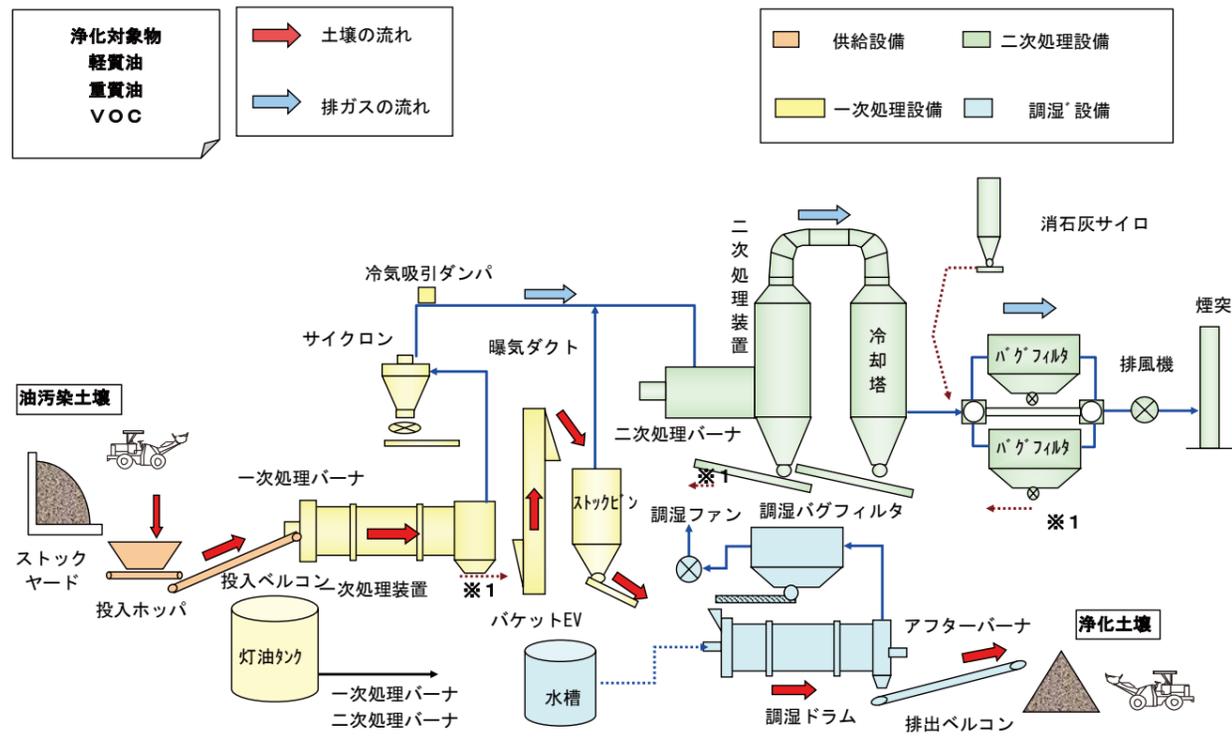


図-3 NTR-Stage IIIの全体プロセスフロー<sup>12)</sup>

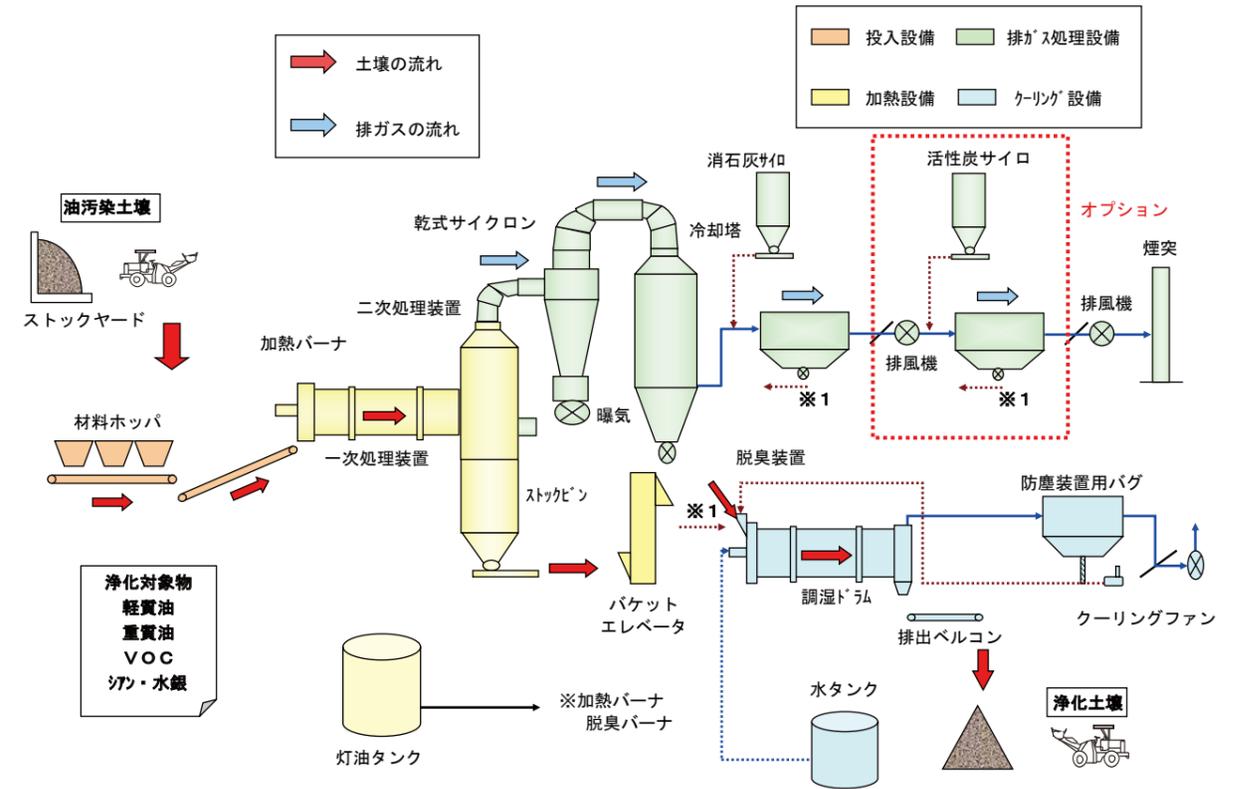


図-4 NTR-Stage IVの全体プロセスフロー

熱風との熱交換を促進するためにロータリーキルンの回転速度を高めている。このため、一次処理装置での土壌の滞留時間が5分不足らずと短くなることから、NTR-Stage IIIでは、加熱処理した土壌を30～60分間貯蔵し、均熱化をはかって残留油分の脱離と曝気を促進させることができるストックピンを備えている。

つぎに、土壌から脱離した油成分やVOCは、二次処理装置で酸化分解を受けて無害化される。このとき、重質油で汚染された土壌の場合には、主成分である炭化水素以外に硫黄分を含んでいるため、無害である二酸化炭素と水に加えて、大気汚染防止法の排出規制を受ける硫黄酸化物(SO<sub>x</sub>)が析出してくる。

他方のVOCで汚染された土壌の場合には、塩素成分を含んでいることから無害な二酸化炭素と水に加えて、排出規制の対象となる塩化水素(HCl)が生成してくる。さらに、これらの塩化物がダイオキシン類の合成因子となり得ることから、Stage IIIはダイオキシン類の再合成を抑制するための冷却塔を備えている。冷却塔では、二次処理装置から導入された800℃の分解浄化ガスを180℃にまで急冷することにより、デノボ合成反応によるダイオキシンの再合成を抑制している。

そして、この冷却塔で180℃にまで急冷した排ガスを、バグ

フィルタに導入して微細土粒子の捕捉ならびに硫黄酸化物や塩化水素などの酸性ガスを中和除去している。バグフィルタの濾布表面に消石灰をプレコーティングし、微細土粒子を捕捉し排ガスが濾布を通過する過程で、これら酸性ガスが消石灰と反応する。硫黄酸化物は硫化カルシウム(石膏:CaSO<sub>4</sub>)、塩化水素は塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)として微細土粒子と共に回収し、土壌に還元している。なお、硫酸カルシウムならびに塩化カルシウムは、中性無害であることから、土壌に還元しても安全である。

### 3.5 NTR-Stage IV

NTR-Stage IVは、表-1に示すように土壌の加熱温度を600℃にまで高めることにより、NTR-Stage IIIの浄化対象物に加え、水銀やシアン化合物などの第二種特定有害物質および、農薬類である第三種特定有害物質を浄化の対象としている。図-4にその全体プロセスフローを、写真-7にNTR-Stage IVの全景を示す。以下では、本図に基づき土壌浄化プロセスの概要を述べる。

図より、一次処理装置としてパラレルフロー方式のロータリーキルンを備えている。そして、材料投入部からキルン中央部に至っては耐火キャスタブルを施工しないメタリック構造とし、土



写真-7 NTR-Stage IVの全景

壌を掻き揚げて分散落下させるためのリフターを取りつけている。ここでは、積極的に土壌の分散を行い熱風との接触面積を稼ぐことにより熱交換効率を高めている。そして、キルン中央部から排出部に至っては、蓄熱性に優れた耐火キャスタブルを施工して土壌の加熱温度の高温化に対応している。

また、図に示すように一次処理装置と二次処理装置およびストックピンとを一体構造とし、内部には耐火キャスタブルを施工してシステムの合理化と省エネルギー化をはかっている。こ

のにより、二次処理装置に至る高温ダクトやストックピンに至る土壌搬送装置を不要としている。さらに、一次処理装置の排気室と二次処理装置とを兼ねることにより、微細土粒子の重力沈降の促進と排ガスの滞留時間の増大をはかることを可能としている。

加えて、本システムは難分解性の農薬類を浄化の対象としていることから、二次処理装置には、二次燃焼用バーナを設けて、1,200℃までの加熱分解温度にまで対応している。農薬類は、フッ素(F)、塩素(Cl)、臭素(Br)、ヨウ素(I)などのハロゲン化合物を含むことから、酸化分解を受けてフッ化水素(HF)、塩化水素(HCl)、臭化水素(HBr)などの酸性ガスを生成する。

これらの高温分解ガスは、ダイオキシン類が再合成するデノボ合成反応を抑制するためにNTR-Stage III同様、冷却塔で180℃まで急冷し、バグフィルタで微細土粒子の捕捉ならびに消石灰による酸性ガスの中和処理を施してから排気ダクトを通じて大気に放出している。バグフィルタで捕捉した微細土粒子ならびに酸性ガスを中和することにより生成するフッ化カルシウム、塩化カルシウム、臭化カルシウムなどは土壌に還元される。なお、これらの酸性ガスの中和物は全て中性で無害である。

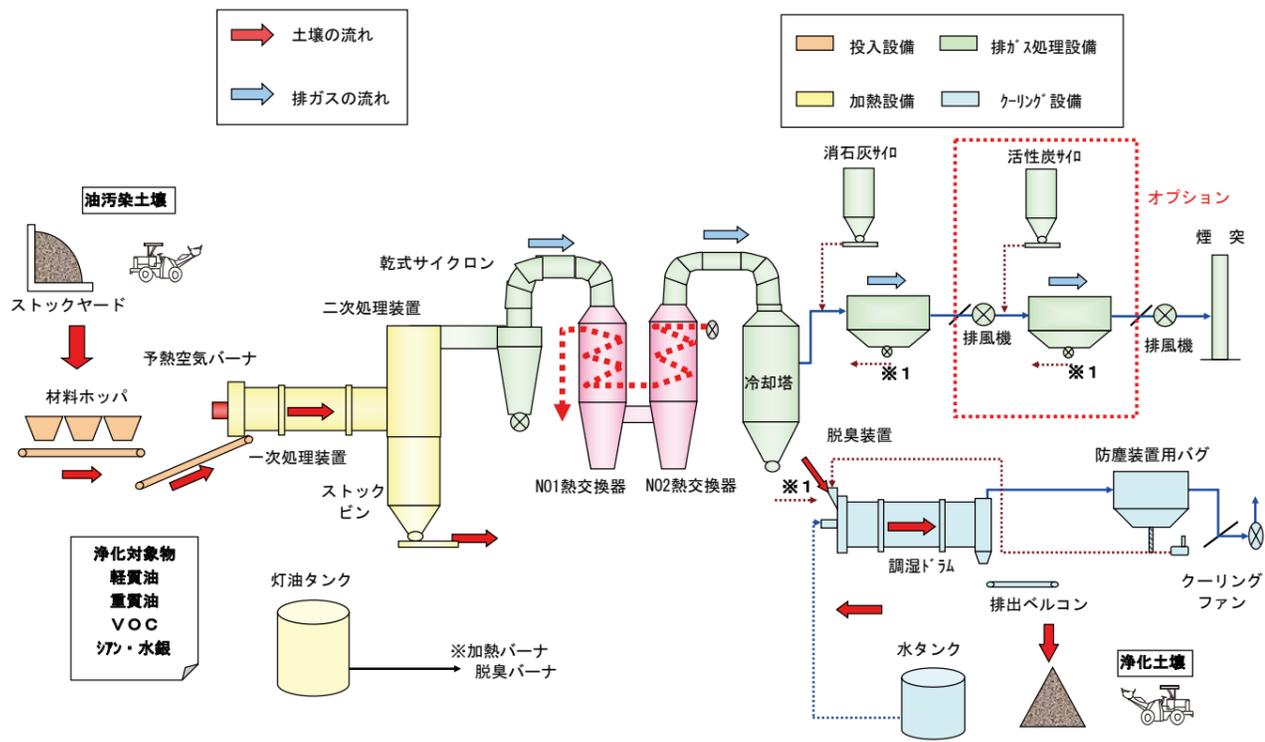


図-5 NTR-Stage Vの全体プロセスフロー

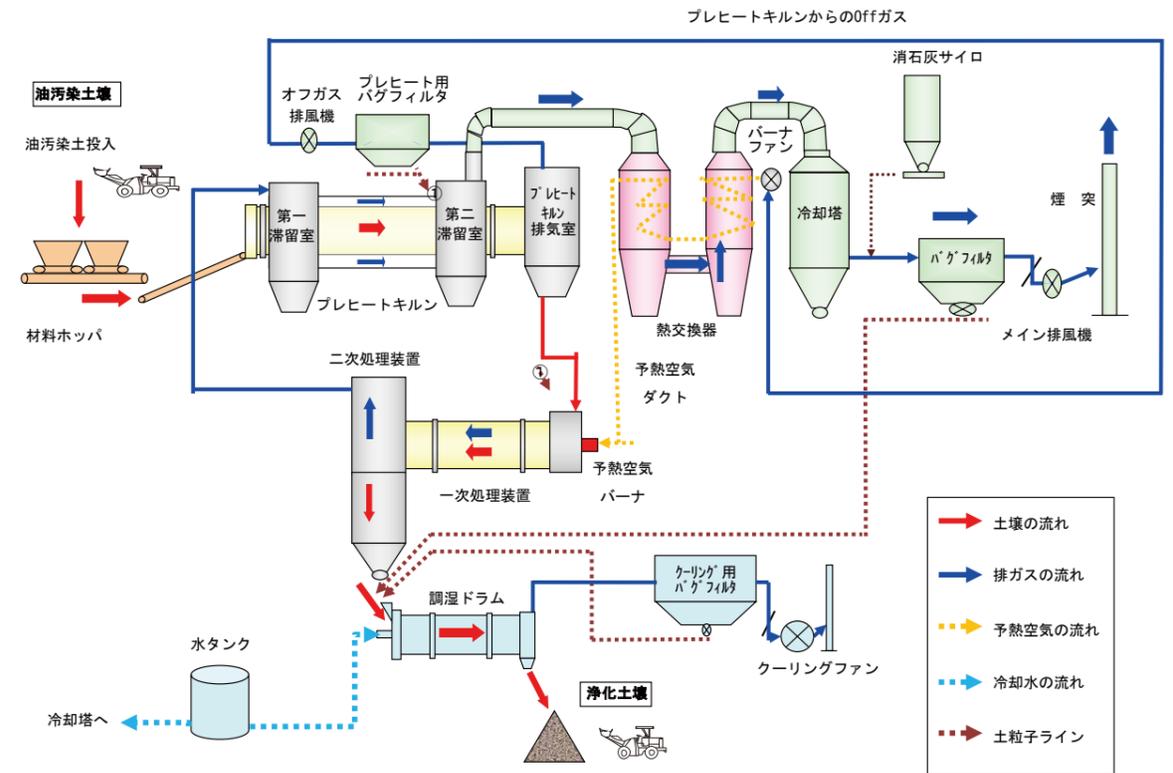


図-6 NTR-Stage VIの全体プロセスフロー



写真-8 NTR-Stage Vの社内実証機全景

### 3.6 NTR-Stage V

NTR-Stage Vは、表-1に示すように浄化対象物をNTR-Stage IVと同等とし、汚染物質を酸化分解する二次処理装置の下段に熱交換器を搭載して廃熱を回収し、一次処理装置用バーナの燃焼空気を予熱して省エネルギー化をはかっている。図-5にNTR-Stage Vの全体プロセスフローを、写真-8に社内実証機の全景を示す。以下では、本図に基づき土壌浄化プロセスの概要を述べる。

図より、一次処理装置であるロータリーキルン内部の全面に蓄熱性に優れた耐火キャスタブルを施工し、土壌の高温加熱

処理に対応している。そして、土壌の加熱温度と滞留時間は、ロータリーキルンの回転数制御によりコントロールしている。土壌の加熱温度は、熱風との直接接触よりも蓄熱した耐火キャスタブルからの接触伝熱および耐火キャスタブルからの輻射伝熱に依存するところが大きい。

具体的には、ロータリーキルンの回転数を上げることで、土壌の滞留時間は短くなるが、耐火キャスタブルとの接触伝熱が増大して土壌の温度が上昇する。このことから、滞留時間の不足を補うために、ロータリーキルンで加熱した土壌を一旦ストックビンで貯留し、土壌の均熱化と曝気ならびに酸化分解の促進をはかっている。

また、ロータリーキルンから飛散した微細土粒子は、二次処理装置内部で重力沈降してストックビンに落下し、土壌と一緒に所定時間貯蔵される。そして、二次処理装置で、終端速度に満たない極微細土粒子は排ガスに随伴して下段の熱交換器に導入される。

熱交換器は、二次処理装置から随伴する極微細土粒子によるクリンカーの付着成長や摩擦による摩耗を抑制するために円筒チューブ式のエレメントとしている。特に、極微細土粒子を随伴した排ガスは、熱交換器の上部から鉛直下方向に、しかも、チューブ式エレメントの内側に導入している。このことにより、エレメント内部の流れを円滑にして、付着や摩耗の抑制をは

かっている。方や、熱交換器の受熱側(エレメントチューブの外側)には、クリーンなバーナ用燃焼空気を導入して予熱し、燃費の削減をはかっている。

以降の排ガスの流れは、NTR-Stage IVと同様に冷却塔で180℃まで冷却し、バグフィルタで微細土粒子の捕捉と酸性ガスを中和し、排ガスは大気に放出される。捕捉した微細土粒子と酸性ガスの中和物であるカルシウム化合物は土壌に還元して調湿ドラムで加湿される。

### 3.7 NTR-Stage VI

NTR-Stage VIは、表-1に示すように省エネルギー化をさらに推し進めるために、NTR-Stage Vに土壌の予備乾燥装置であるプレヒートキルンを追加したシステムである。二次処理装置の廃熱を外熱方式のプレヒートキルンに導入して、汚染土壌の含水を予め削減することにより、極めて大きな省エネルギー効果を実現している。

NTR-Stage VIの特徴に関しては、その浄化性能と省エネルギー性能を次章で詳しく触れる。

## 4. 新たに開発した省エネルギー型の油汚染土壌浄化システム(NTR-Stage VI)

### 4.1 概要

繰り返しになるが、加熱による油汚染土壌浄化システムは、土壌を加熱昇温することにより、対象とする汚染物質の蒸気圧を高めて土壌から脱離することを基本原理としている。このため、土壌を100℃以上に加熱するプロセスにおいては、土壌が水を含んでいる限り、水の蒸発でエネルギーが消費されるため、土壌が乾燥状態にならないと昇温することができない。したがって、土壌の水分を予め削減することができれば、本浄化システムのエネルギー消費量を大きく低減することが可能となる。

NTR-Stage VIでは、図-6の全体プロセスフローに示す通りNTR-Stage Vを基本ベースに、土壌の予備乾燥装置であるプレヒートキルンを追加したシステムであることは前章でも触れている。土壌から脱離した汚染物質を二次処理装置で無害化し、高温となった処理ガスをプレヒートキルンに導入して土壌の予備乾燥に有効利用していることが大きな特徴である。

さらに、同プレヒートキルンで回収し切れなかった余剰熱を熱交換器で回収し、バーナ燃焼空気の予熱に有効利用している。このようにして、廃熱をカスケード利用することにより、燃料消費量が半減する大幅な省エネルギー効果とCO<sub>2</sub>の削減を実現している。また、写真-9にNTR-Stage VIの全景を示す。

次項以下では、図-6に基づき土壌の流れとガスの流れとの二つの視点から、その浄化プロセスと廃熱回収メカニズムの



写真-9 NTR-Stage VIの全景

詳細について述べる。

## 4.2 土壌の流れからの視点

### 4.2.1 予備乾燥装置(土壌の乾燥・塊の除去)

前節の概要でも触れた通り、油汚染土壌浄化システムは土壌を加熱することにより、汚染物質である油の蒸気圧を高めて脱離することを基本原理としている。このため、土壌中の水分がエネルギー消費に大きな影響を及ぼしている。一例を挙げると、土壌中の水分1%を蒸発させるのに必要な熱エネルギー(潜熱)は、土壌を30℃上昇させる熱エネルギー(顕熱)に相当し、大気圧下で水が存在する限り土壌の温度は100℃以上には上昇しない。このように、加熱による油汚染土壌浄化システムでは、土壌中の水分がエネルギー消費量を増大させる大きな要因となっている。

さらに、土壌は極めて多様で細粒分であるシルト質や粘土質の割合が多い土壌の場合には30~50%の水分を含む。この場合、水の気化潜熱だけでもA重油換算で50リットル/トンを超える膨大なエネルギーを消費することになる。したがって、土壌の前処理工程で如何にして水分を減らすことができるかがエネルギー消費の観点から極めて重要となる。

たとえば、二次処理装置の850℃を超える排ガスが保有する廃熱を回収して、土壌の水分削減に利用することができれば省エネルギー化に極めて有効である。この廃熱を土壌の予備乾燥に利用する手段としては、直接加熱(内熱式)方式と間接加熱(外熱式)方式のキルンなどを挙げることができる。

前者の内熱式キルンは、熱風と土壌とを直接接触させて熱交換を行うことを基本原理としている。キルン内部に備わるリフターにより、土壌を掻き揚げて均一に分散落下させることにより、熱風との接触面積を増大させて熱交換効率を高めているのが特徴である。しかしながら、土壌に含有する油成分が水分と一緒に気化蒸発し、せっかく二次処理装置で無害化した

熱風(排ガス)を汚染させてしまうことになる。

後者の外熱式キルンは、無害化した高温の排ガスを熱風としてキルン外面に接触させてキルンの温度を上昇させ、内部の土壌を間接的に加熱することを基本原理としている。このため、揮発した油成分が熱風に混入しない構造となる。ただ、熱交換能力はキルンと土壌との接触面積に依存することから、内熱式キルンに比べ装置が大型化することは否めない。

以上の理由から、本システムの予備乾燥装置であるプレヒートキルンは、メタリック構造の外熱方式を採用している。

具体的には、プレヒートキルンの外部にはヒートキャリアー(熱媒体)である無害化した高温の排ガスが流入し、プレヒートキルンそのものを加熱する。一方、内部には土壌を投入して、プレヒートキルンの壁面を通じて熱エネルギーのみを伝熱する。このことにより、無害化した排ガスを汚染させることなく熱エネルギーのみを土壌に伝熱することが可能となる。以下では、**図-6**に基づき土壌の流れに沿って詳細を述べる。また、**写真-10**にプレヒートキルンの全景を示す。

まず、浄化対象とする油汚染土壌は、連続式のベルトフィーダで安定供給が可能な状態にまで前処理が施されていることを前提とする。具体的には、重機を用いて大きな異物の除去や、生石灰処理などを施して土壌の性状を改善する。そして、材料ホッパを経由してプレヒートキルンの内部に連続的に投入された土壌は、キルン壁面より接触伝熱を受けて加熱される。さらに、プレヒートキルンは、高温の排ガスにより400~600℃に加熱されていることから、内部の土壌に向かって遠赤外線や赤外線を放射している。特に、遠赤外線は被加熱物の内部にまで到達し、その伝達熱量は温度差の4乗に比例することから、キルンが高温の温度領域では放射伝熱が支配的となる。

前者のプレヒートキルン壁面から土壌への接触伝熱は、土壌とキルンとの接触面積と熱伝達係数に依存することから、土壌の滞留量を増大させて伝熱面積を拡大することが重要である。後者の放射伝熱に関しても、滞留土壌表面の見掛け面積と輻射率に依存することから、土壌の滞留量を増大させることは有効であり、その伝熱量は接触伝熱よりも大きい。

また、**写真-11**に示すように、プレヒートキルン内部には、土壌を反転させて均熱化と水分の脱気を促すためのリフターが備わっている。

なお、約1時間の滞留時間を経て乾燥工程が終了した土壌は、**写真-12**に示すようなプレヒートキルン出口に設けた Trommel により大きな異物を除去し、次の加熱工程である一次処理装置に搬送される。



写真-10 NTR-Stage VIのプレヒートキルンの全景



写真-11 NTR-Stage VIのプレヒートキルン内部



写真-12 NTR-Stage VIのプレヒートキルントロンメル部

### 4.2.2 一次処理装置(土壌の加熱)

一次処理装置であるロータリーキルンは、その内面に耐火キャスタブルを施工した蓄熱構造としている。蓄熱した耐火キャスタブルにより、汚染土壌を400~600℃に加熱することが可能である。**写真-13**と**写真-14**に一次処理装置とストックピンの全景を、**写真-15**にロータリーキルン内部の耐火キャスタブル施工状況を示す。



写真-13 NTR-Stage VIの一次処理装置とストックピン全景



写真-14 NTR-Stage VIの二次処理装置とストックピン全景



写真-15 NTR-Stage VIの一次処理装置内部

まず、バーナ燃焼で生成した高温の熱風により、ロータリーキルン内面の耐火キャスタブルが加熱されて蓄熱する。このときのキャスタブルへの蓄熱は、熱風との直接接触による伝熱と、熱風からの輻射による伝熱とが関与している。バーナの燃焼は、赤火炎となる拡散燃焼を基本としていることから、この火炎から赤外線および遠赤外線が放射され耐火キャスタブルを蓄熱させている。特に、接触伝熱は温度差に比例するのに対し

て、輻射伝熱は温度差の4乗に比例することから、温度差が大きくなるほど放射伝熱が支配的となる。

同様に、高温に蓄熱した耐火キャスタブルから温度の低い土壤へ接触伝熱と輻射伝熱により熱が移動する。耐火キャスタブルは、キルン底部に滞留している土壤と直接接触して伝熱することによりその分温度が低下するが、ロータリーキルンが回転していることにより、土壤と接触していない領域で再び熱風から受熱して高温に戻る。そして、耐火キャスタブルからも土壤に向けて輻射伝熱により熱が移動する。このようにして、耐火キャスタブルは、高温の熱風から受熱して低温の土壤へ伝熱するヒートキャリアとしての役割を担っている。なお、割合は大きくはないものの熱風から直接土壤へ伝熱していることも考慮に入れておく必要がある。

つぎに、二次処理装置における排ガス温度は、バーナ燃焼量のフィードバック制御により設定温度の850℃になるようにコントロールしている。たとえば、耐火キャスタブルを通じて土壤への伝熱量が多くなった場合、キャスタブル温度が低下すると共に、二次処理装置の温度も低下してくるので、バーナ燃焼量をその偏差に応じて増大させている。

土壤の加熱温度の制御は、ロータリーキルンの回転数を可変することにより行っている。たとえば、土壤供給量が一定の条件下において、ロータリーキルンの回転数を増大することにより、土壤の滞留量(質量)が減少に転じる。これと同時に、土壤と耐火キャスタブルとの接触面積も減少に転じるのであるが、その減少の割合が滞留量(質量)の方が大きいことに起因している。すなわち、ロータリーキルンの回転数を変化させることにより、土壤の単位接触面積当たりの滞留量(質量)が変化し、しかも、ロータリーキルンの回転数と負の相関関係となっている。

このことから、ロータリーキルンの回転数を増大すると単位接触面積当たりの滞留量(質量)が減少して土壤の温度が上昇し、逆に回転数を減じると滞留量(質量)が増大して土壤の温度が低下するのである。

ところで、キルンの回転数と滞留時間との関係については、一般的にキルンの回転数を増大すると滞留時間が短くなり、逆にキルンの回転数を減少すると滞留時間が長くなる関係にある。そして、土壤の加熱温度と滞留時間との間にはトレードオフの関係にあり、土壤の温度を上げるためにロータリーキルンの回転数を増大すると滞留時間が減少し、逆に土壤の温度を下げるためにロータリーキルンの回転数を減じると滞留時間が増大することになる。その影響度合い(感度)は滞留時間よりも回転数の方が大きい。

以上のことから、土壤浄化性能の主要な要因となる加熱温度と滞留時間に関して、ロータリーキルンでは、土壤の加熱温度の管理を主目的とし、滞留時間に関しては後段のストックビンにその役割を譲っている。

#### 4.2.3 ストックビン(土壤の均熱・曝気)

ストックビンでは、土壤の均熱化をはかることにより残留油分の曝気と酸化分解とを促進している。図-7にストックビン内部のイメージを示す。前節でも触れているが、ロータリーキルンでの土壤の加熱温度と滞留時間の間にはトレードオフの関係があり、高温に加熱された土壤ほどロータリーキルン内部での滞留時間が短くなっている。また、加熱の基本原則から、土粒子の外面から中心部に向かって伝熱が進むため、土粒子表面に付着した油やVOCは温度が高く気化蒸発し易いが、粒径が大きい土粒子ほど中心部分の温度が低くなっており、内部に含浸している残留油分は抜け難い。さらに、土粒子径の偏在や供給量の増減などにより、土壤の加熱温度が変動することも考えられる。

以上のことから、図に示すようにして一次処理装置で加熱した土壤をストックビンで所定の時間貯蔵することにより、温度の低い大きな土粒子が、温度の高い小さな土粒子から伝熱を受けて均熱化をはかることができる。そして、このことにより土粒子内部に含浸している温度が低い残留油分の気化蒸発を促進させている。さらに、高温に加熱した土壤を貯蔵することで、外気との温度差により煙突効果が生じ、ストックビン下部の排出ゲート間隙から侵入する空気により、土壤の残留油分が酸化分解を受けて浄化の進行を加速している。



図-7 ストックビン内部のイメージ<sup>12)</sup>

図-8は、NTR-Stage IIIにおける土壤の加熱時間(ロータリーキルン滞留時間+ストックビン貯蔵時間)と土壤の油含有濃度との関係を示したものである。このときの土壤加熱温度は200℃、排ガス温度は300℃、浄化基準は1,000ppmである。また、図-9は、土壤の加熱時間と油含有濃度を無次元化した油残留率との関係を示したものである。さらに、図-10は、浄化前の油含有濃度を基準とした土壤の加熱時間と浄化効率との関係を示している。

これらの図より、ロータリーキルンでの加熱時間に相当する5minに着目すると、軽質油である灯油相当の油含有濃度は、浄化基準である1,000ppmをクリアしないまでも1,440ppmまで減少しており、これに基づく油残留率は15.7%にまで低下し、浄化効率は84.3%を示している。方や、重質油であるマシン油相当の油含有濃度は、4,840ppmまで減少し、これに基づく油残留率は32.0%に、浄化効率は68.0%に留まっていることがわかる。

つぎに、ロータリーキルンの加熱時間にストックビンの貯蔵時間を加えた30minに着目すると、灯油相当の油含有濃度は、浄化基準である1,000ppmを大きく下回って92ppmまで減少しており、これに基づく油残留率は1.0%に、浄化効率は99.0%に達している。他方のマシン油相当の油含有濃度は、浄化基準を下回る670ppmまで低下しており、これに基づく油残留率は4.5%に、浄化効率は95.5%に達している。これらの結果から、土壤の加熱温度が200℃と低いにも拘わらず、酸化分解反応や曝気作用を受けて残留油分が減少しているものと推察される。

以上のことから、ストックビンで加熱土壤を所定の時間貯蔵することは、土壤の均熱化をはかって残留油分の曝気や酸化分解を促進するために、極めて有効な手段であると考えられる。また、無闇に土壤の加熱温度を高めて浄化レベルを高めるのではなく、ストックビンでの貯蔵時間を稼ぐことにより浄化レベルが高まるので、省エネルギー化とCO<sub>2</sub>排出量削減に極めて有効であると考えられる。

#### 4.2.4 調湿ドラム(土壤の調湿)

図-6に示す調湿ドラムでは、冷却と防塵のために散水を施して土壤を湿潤状態に戻している。このとき、調湿ドラム内部に取り付けたリフターにより、土壤を掻き揚げて分散落下することでその冷却効果を高めている。

また、散水により発生する水蒸気を除去するために、大量の外気を調湿ドラムに導入し、それをバグフィルタへ吸引している。そして、調湿ドラムは、この外気と土壤との流れが対向する

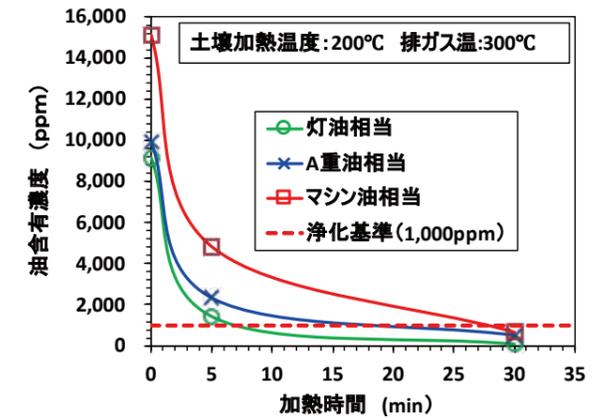


図-8 土壤の加熱時間と油含有濃度との関係<sup>12)</sup>

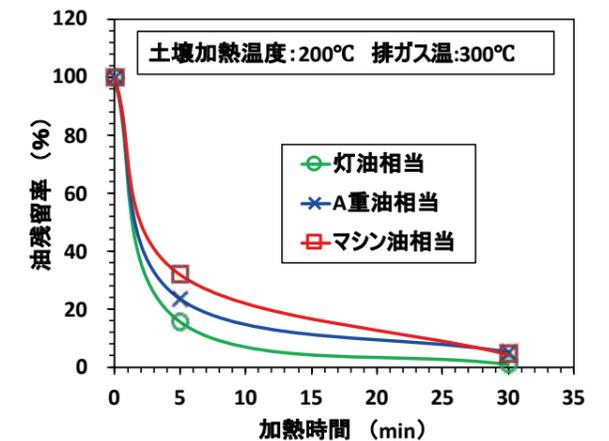


図-9 土壤の加熱時間と油残留率との関係<sup>12)</sup>

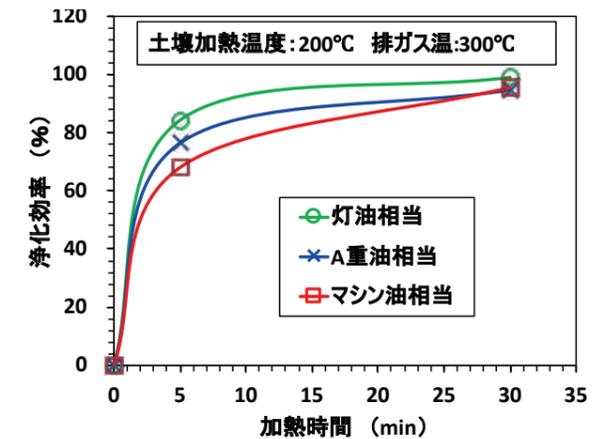


図-10 土壤の加熱時間と油浄化効率との関係<sup>12)</sup>

カウンターフロー方式としている。このことにより、調湿ドラムでの散水量と外気導入量を制御することにより、バグフィルタ入口の処理ガス温度の制御を可能としている。この処理ガス温度は、バグフィルタでの低温腐食や結露を避けるために120℃以上から濾布の耐熱温度である200℃以下の範囲で制御している。

なお、このとき水蒸気と外気に随伴してくる微細土粒子をバグフィルタで捕捉回収し、これを再度調湿ドラムに還元して土壌と一緒に浄化土壌として排出している。さらに、調湿ドラムの排出口には、排出ゲートを備えた溜めホッパを設置し、土壌を搬送する重機との受け渡しのタイミングを調整できるようにしている。

### 4.3 ガスの流れからの視点

以下では、**図-6**に示すNTR-StageVIのプロセスフローに基づき、上流側からガスの流れを辿る。

#### 4.3.1 予備乾燥装置の受熱側(プレヒートキルン内部)

4.2.1項で土壌の流れを視点としてプレヒートキルンの説明を加えているが、本項では、ガスの流れを視点にその特徴に触れる。

**図-6**に示すようにガスの流れの起点となるのが、プレヒートキルンの土壌投入部である。ここから一次処理装置用バーナの燃焼に必要な空気を吸引している。そして、プレヒートキルン内部には、油汚染土壌が滞留し加熱されていることから、土壌に含有している水分と油の揮発成分とが気化蒸発し、この燃焼空気に混入してくる。加えて、プレヒートキルン内部には**写真-11**に示すリフターを取り付けて土壌を攪拌しているため、乾燥した微細土粒子が飛散し、この燃焼空気に随伴してくる。また、このときの燃焼空気の温度は、プレヒートキルン排出側の乾燥土壌の温度である100～200℃の範囲にまで上昇している。

つぎに、このプレヒートキルン内部を通過した燃焼空気は、プレヒート用バグフィルタで微細土粒子を集塵濾過し、熱交換器の受熱側へと吸引される。プレヒート用バグフィルタで捕捉回収した微細土粒子は、土壌と一緒に一次処理装置に送られ加熱処理を受けて浄化される。

熱交換器の詳細に関しては、4.3.6項で記述しているので、ここでは概要のみを述べる。本熱交換器は、低温側と高温側に分かれる2パス方式とし、**写真-16**に示すような円筒チューブ式のエレメントを採用している。微細土粒子を随伴する放熱側の排ガス(二次処理装置からプレヒートキルン放熱側を経てきた排ガス)は、チューブ式エレメントの内部側に導入し、受熱



写真-16 NTR-StageVIの熱交換器側面の受熱ガス導入口



写真-17 NTR-StageVIの一次処理装置用の予熱空気バーナ

側の燃焼空気(プレヒートキルン用バグフィルタで濾過された燃焼空気)は構造が複雑に入り組んでいるエレメントの外部側に導入している。そして、この燃焼空気は、廃熱を吸収して300～500℃に昇温され、次項で説明する一次処理装置用の予熱空気バーナへと供給される。

#### 4.3.2 一次処理装置用の予熱空気バーナ

水蒸気と油の揮発成分を含んだ燃焼空気は、熱交換器で300～500℃に予熱され**写真-17**に示す一次処理装置用の予熱空気バーナに供給される。本バーナでは、省エネルギー化をはかるために予熱空気温度を500℃まで高めていることから、サーマルNOxの対策が必要となる。

そのため、NTR-StageVIでは、燃焼排ガス再循環(EGR: Exhaust Gas Recirculation, 以下、EGRと記載)システムを導入している。このEGRシステムは、燃焼排ガスの一部を燃焼空気として再循環させることで、燃焼空気中の酸素濃度を低減している。このことにより、急速燃焼を抑制して局部的に出現す

る高温領域を抑え込みサーマルNOxの析出を減じている。

具体的には、燃焼排ガスの一部を煙突から抜き出し、プレヒートキルン用バグフィルタを通過してきた燃焼空気に導入し混合している。そして、EGRの混合割合は、本バーナに至る燃焼空気ダクトに設けた酸素濃度計を介して燃焼空気中の酸素濃度を21～17%の範囲で任意に制御している。この酸素濃度の設定値は、煙突に設けた連続式のNOx濃度計により排ガス中のNOx濃度を常時監視し、NOxの排出規制値に応じて変更している。酸素濃度を下げるとNOxの値は低下するが、一酸化炭素(CO)濃度が上昇してくる。とくに、CO濃度が上昇し過ぎると不完全燃焼に至り省エネルギー化には逆効果となる。

すなわち、NOx濃度とCO濃度との間には、トレードオフの関係にあることから、両者の値を勘案しながら最適な酸素濃度を設定するようにしている。

また、**写真-18**は、本予熱空気バーナのミックスチャンバー内部を示している。写真のように、燃料ガス噴射ノズルを放射状に6ヶ所取り付けて分割火炎とし、火炎の局部的な高温部分の生成を防ぎ、サーマルNOxの析出を抑制している。

このようにして、本NTR-StageVIではEGRシステムと分割火炎の効果により窒素酸化物の排出量規制に対応している。なお、本バーナで使用する燃料は、化石燃料で最もCO2の排出量が少ないメタンガスを主成分とする都市ガス13Aを推奨している。

一方、予熱空気バーナは、常温から500℃までの燃焼空気に対応していることから、その空気容積は2.7倍まで変化する。また、燃焼範囲がTDR=1.5であることや、空気比を1から2まで可変としていることから、バーナを通過する風量(風速)は、1～27倍まで変化するようになる。さらに、風量(風速)は、圧力の二乗に比例することから、このときの燃焼静圧は、1～729倍まで変化するようになる。



写真-18 NTR-StageVIの一次処理装置用バーナの内部

とりわけ、燃焼静圧は、都市ガス13Aの燃焼に最適な値が存在し、これが低いと燃焼空気が失速し燃料ガスとのミキシングが悪化して緩慢な火炎形状となる。逆に燃焼静圧を高めると、燃料ガスとのミキシングが促進されてシャープな火炎形状となる。さらに、燃焼静圧が一定の値をこえると、異常燃焼(デトネーション)による燃焼振動が発生する。これが発生すると、バーナ本体の振動やロータリーキルンとの共振による機中振動などの現象が生じ、機器へのダメージが及ぶことになる。

バーナにおける燃焼空気のミキシング速度と燃焼静圧の要因は、デフューザ(保炎器)の大きさで支配される。通常のバーナでは、燃焼空気温度が最高のときに最大燃焼量に必要な空気量が供給できるように、デフューザの大きさを調整する。このことから、常温空気で燃焼量が少ない状態では、燃焼空気が失速して燃焼状態が悪化してしまう。

この課題を解決するために、**図-11**に示すデフューザスライド機構を搭載している。この機構は、デフューザが連続的に前後にスライドすることにより、ミックスチャンバーとデフューザ外周との間で形成される間隙(断面積)を連続的に変化させることができる。

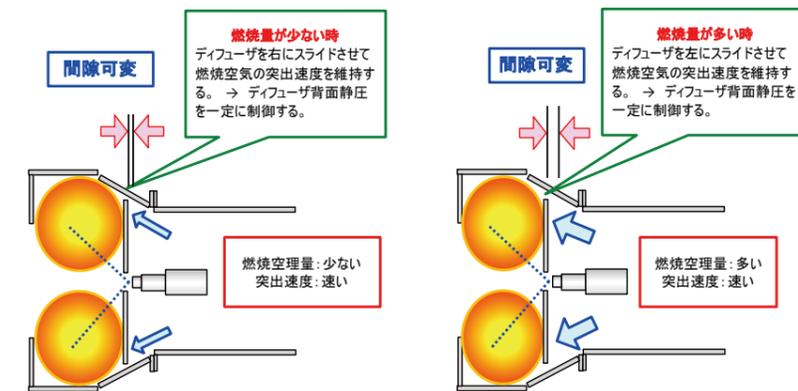


図-11 NTR-StageVIの一次処理装置用バーナのデフューザスライド機構

燃焼空気温度が高温で、かつ、燃焼量が多い場合には、ディフューザを前方にスライドさせて、間隙(断面積)を大きくし、燃焼静圧(ミキシング速度)が一定以上に上昇しないようにして異常燃焼を防いでいる。逆に、燃焼空気温度が低く、かつ、燃焼量が少ない場合には、ディフューザを後方にスライドさせて、間隙(断面積)を小さくし、燃焼静圧(ミキシング速度)が一定以下に低下しないようにして燃焼空気の失速(緩慢燃焼)を防いでいる。

#### 4.3.3 一次処理装置(ロータリーキルン)

土壌の流れに視点をおいた4.2.2項で一次処理装置(ロータリーキルン)の詳細に触れた通り、予熱空気バーナの燃焼により発生した熱風が、ロータリーキルン内面の耐火キャスタブルを加熱する。そして、高温に蓄熱した耐火キャスタブルから、接触や輻射による伝熱メカニズムを通じて土壌は加熱されている。

また、バーナ燃焼ガスは、プレヒートキルンで発生した水蒸気と油の揮発成分ならびにEGRガスを含んでいる。このことから、バーナの燃焼により多くの熱風が生成し、これがロータリーキルン内部を通過することにより、土壌の微細土粒子を巻き揚げ、これらを随伴して二次処理装置に導入される。

なお、ロータリーキルンは、回転シール部からの侵入空気量を低減するために、内部圧力を外部より少しだけ下げることができ、静圧コントロールを導入している。このことにより、バーナ燃焼量や土壌の供給量が変化しても、常にロータリーキルン内部の静圧を一定に制御し、バーナ燃焼の安定化に寄与している。

#### 4.3.4 二次処理装置(二次燃焼装置)

二次処理装置での熱分解処理温度は、フィードバック制御によりバーナ燃焼量でコントロールしている。そして、ダイオキシン類を含む可能性のある排ガスを無害化するために、同二次処理装置は、850℃以上の温度で2秒の滞留時間を保持する焼却炉の設備基準に準拠している。なお、一次処理装置であるロータリーキルンでの土壌加熱温度は、ロータリーキルンの回転数により制御していることは、4.2.2項で触れた通りである。

図-12は、左軸に油の揮発成分である全炭化水素(THC: Total Hydro Carbons 以下、THCと記載)の濃度と二次処理装置の分解温度との関係を示し、右軸にTHCの分解効率と二次処理装置の分解温度との関係を示している。何れも滞留時間は2秒である。

この図より、二次処理温度が550℃を超えて650℃に至るまでは急激にTHC濃度が低下し、右軸の分解効率は急激に増大している。そして、650℃を超えて800℃に至るまでは漸近

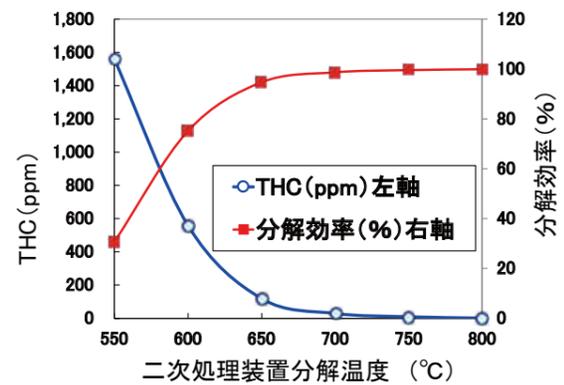


図-12 THCおよび分解効率に及ぼす二次処理装置分解温度

的にTHC濃度が0ppmに近づき、方や、分解効率は漸近的に100%に近づいていることがわかる。これらのことから、油の揮発成分を二酸化炭素と水とに酸化分解する要因として、その分解温度が極めて重要であることが裏付けられる。なお、THCの分解効率に関しては、温度以外にも、滞留時間、酸素濃度、攪拌速度などの要因が考えられる。

そして、ロータリーキルンから飛散した微細土粒子には、難分解性の有機化合物などが付着し、内部にまで含浸しているものもある。この内、比較的大きな微細土粒子は、重力沈降により600℃に加熱された土壌と一緒にストックビンに落下し、均熱化を受けて酸化分解と曝気作用により浄化される。他方、比較的小さく排ガスに随伴する微細土粒子は、二次処理装置で2秒間850℃以上の温度で晒されることにより浄化される。いずれにしても、ストックビンの土壌や飛散する微細土粒子から脱離した有機化合物は、最終的に二酸化炭素と水とに酸化分解を受けて無害化される。

また、ハロゲン元素を含むVOCなどは、酸化分解の過程で水蒸気と反応し、フッ化水素(HF)、塩化水素(HCl)、臭化水素(HBr)などの酸性ガスを生成する。これらの酸性ガスは、後段のバグフィルタで濾布にプレコートしている消石灰(Ca(OH)<sub>2</sub>)により中和され、中性で無害のフッ化カルシウム(CaF<sub>2</sub>)、塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)、臭化カルシウム(CaBr<sub>2</sub>)として回収し土壌に還元している。

一方、油汚染土壌は、鉱物油を含め動植物由来の有機物などを含んでいる。これらには、硫黄化合物や窒素化合物が含まれ、二次処理装置で酸化分解を受けて硫黄酸化物と窒素酸化物が析出する。

前者の硫黄酸化物は、汚染土壌の前処理段階で添加している生石灰(CaO)やプレヒートキルンの投入側で土壌に添加している消石灰(Ca(OH)<sub>2</sub>)により、高温の二次処理装置内

で中和(石灰-石膏法)され、無害の石膏(CaSO<sub>4</sub>・2H<sub>2</sub>O)として最終工程のバグフィルタで捕捉回収し土壌に還元している。さらに、前述のバグフィルタの濾布にプレコートしている消石灰によっても中和され石膏を得る。バグフィルタおよび土壌への消石灰の添加量は、煙突に取り付けたSO<sub>x</sub>濃度計により排ガス中のSO<sub>x</sub>濃度を連続で測定し、その値に応じて添加量を決定している。

後者の窒素酸化物は、その発生源が土壌由来であることから、バーナの分割火炎やEGRによるNO<sub>x</sub>低減効果は期待できない。このことから、二次処理装置で尿素水(CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>O)を燃焼ガスに添加してNO<sub>x</sub>を低減している。具体的には、尿素の加水分解によりアンモニア(NH<sub>3</sub>)を合成し、NO<sub>x</sub>と反応させてN<sub>2</sub>とH<sub>2</sub>Oに還元している。このときの反応を式(1)~(2)に示す。



また、4.3.2項で詳細に触れたが、煙突に取り付けたNO<sub>x</sub>濃度計により排ガス中のNO<sub>x</sub>濃度を連続で測定し、一次処理装置のサーマルNO<sub>x</sub>の析出量と総合的に評価して、尿素水の添加量を決定している。

#### 4.3.5 予備乾燥装置放熱側(プレヒートキルン外側)

4.2.1項で詳細に触れているが、二次処理装置で無害化された850℃以上の高温処理ガスは、予備乾燥装置であるプレヒートキルンの放熱側(外部)に導入される。本キルンでは、キルン外部の熱風が流れる方向と、内部の汚染土壌が流れる方向とが同一方向であるパラレルフロー方式としている。このことにより、プレヒートキルンの鉄皮温度の上昇を抑制している。

また、プレヒートキルンは、オーステナイト系の耐熱鋼で構成しており、鉄皮温度を600℃以下で管理している。具体的には、プレヒートキルンの表面温度を放射温度計で常時監視し、設定温度以上となった場合は、高温処理ガスをバイパスして鉄皮温度の上昇を防ぐようにしている。

なお、熱風ガスに随伴している微細土粒子がプレヒートキルンの各部に沈降してくる。これらの微細土粒子をスクリュコンベアで回収して、調湿ドラムへ浄化土壌として還元している。

#### 4.3.6 熱交換器

本熱交換器は、図-6に示すように低温側と高温側に分かれる2パス方式とし、両者ともガスの流れが鉛直方向となるように設置している。授熱側のバーナ燃焼空気は、低温側から導入して高温側に至り、一方の放熱側の排ガスは、高温側から



写真-19 熱交換器上部(チューブ内部に放熱側ガスが流入)



写真-20 左より、プレヒートキルン、熱交換器、冷却塔

導入して低温側に至る。このように、全域にわたって温度効率を高く採ることができるカウンターフロー方式としている。

そして、排ガスに随伴する微細土粒子によりクリンカーが付着成長してくることや、それによる摩耗の影響を軽減するために写真-19に示す円筒チューブ式のエレメントを採用している。当然のことながら、流れの障壁が少ないエレメントの内側に微細土粒子を随伴した放熱側ガスを通すようにしている。最終的に、随伴する微細土粒子は、熱交換器下部に設けたホッパに沈降堆積し、それをスクリュコンベアで回収して調湿ドラムに搬送し、土壌へ還元している。

他方の、受熱側となるバーナ燃焼空気は、写真-16に示すようにエレメントの外側から導入している。そして、受熱側エレメントには、バブルプレート为数カ所に設けて乱流を発生させ、ガス温度の均熱化と熱交換効率を向上させている。また、円筒チューブの下部には、エキスパンションを設け、エレメントの熱による伸縮を吸収するように工夫している。

加えて、エレメント鉄皮の過度な温度上昇や、受熱側である

予熱空気温度の上昇を抑制することと、放熱側の排ガス温度が400℃を下回らないようにコントロールするために、排ガスをバイパスさせる回路を設けている。このことは、ダイオキシンの再合成反応であるデノボ合成反応が、350～300℃の温度範囲で進行することに起因している。

#### 4.3.7 冷却塔(排ガスの冷却)

**写真-20**は、左より、プレヒートキルンの排気ダクトが熱交換器の上部に連結し、写真中央に見える二本の鉛直方向のダクトを水平方向に連結しているのが熱交換器のバイパスダクト、そして、写真右側が冷却塔を示している。

冷却塔は、前項で述べたダイオキシン類の再合成を回避するために排ガスの急冷を担っている。排ガスの冷却原理は、水を直接高温ガスに噴霧して水の気化潜熱により冷却している。冷却塔内部の排ガスの滞留時間を4秒以上とし、500℃前後から一気に180℃にまで急冷している。このため、噴霧する水の平均粒子径を50ミクロン以下にする必要があることから、二流体噴霧ノズルを採用している。

また、本冷却塔は、排ガスが上部から下部の鉛直方向に流れるダウンドラフト方式とし、水噴霧を上部から行い冷却塔底部に到達するまでに水の蒸発が完了する完全蒸発型としている。このことにより、冷却塔下部にはドレンが発生しない。さらに、冷却塔下部のテーパー部には、加熱ヒータを施工し運転初期段階のドレン発生に対応している。

加えて、ダウンドラフト方式により、冷却塔底部に微細土粒子が沈降してくるが、冷却塔下部から外気を吸引して微細土粒子をブローアップし、バグフィルタへ飛ばしている。なお、これらの冷却塔に関する基本的な考え方は、NTR-StageⅢからStageⅥに至るまで共通している。

#### 4.3.8 バグフィルタ(酸性ガスの中和・捕捉)

バグフィルタは、冷却塔で180℃まで温度低下した排ガスから微細土粒子を捕捉回収してばい塵濃度を規制値に適合させている。それと共に、回収した微細土粒子は、調湿ドラムに搬送し土壌として還元している。

前項でも触れているが、油成分を二次処理装置で酸化分解することにより、生成する硫酸酸化物やその他の酸性ガスを中和するために、消石灰を濾布表面にプレコートしている。排ガスが濾布を通過するときに、この消石灰と中和反応している。酸性ガスは、汚染物質にもよるが、硫酸酸化物、フッ化水素、塩化水素、臭化水素などが想定される。これらの酸性ガスが消石灰と反応して、硫酸カルシウム(CaSO<sub>4</sub>)、フッ化カルシ

ウム(CaF<sub>2</sub>)、塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)、臭化カルシウム(CaBr<sub>2</sub>)などとして回収する。これらの中和物は無害であるため、微細土粒子と一緒に回収され土壌として調湿ドラムへ還元している。

なお、バグフィルタでは、消石灰と中和反応した時に塩化カルシウム(CaCl<sub>2</sub>)のように潮解性を示すものも生成することから、本浄化プラントが一時停止する場合においても濾布の目詰まりを防止するために、バグ集塵ホップの電熱ヒータに通電して温度を調節している。運用中は、処理ガス温度が180℃であることから、これら電熱ヒータには通電されることはない。

#### 4.4 省エネルギー性能

**表-2**に、NTR-StageⅣ、NTR-StageⅤ、NTR-StageⅥの主要な仕様と省エネルギー性能に関する比較を示す。表より、汚染土壌の処理能力を25t/h、含水比を30%、加熱温度を600℃、排ガスの浄化温度を850℃、年間の稼働時間を7,200時間、燃料である都市ガス13Aの単価を100円/Nm<sup>3</sup>として年間の燃料費用の差額を試算すると、StageⅥはStageⅣに比較して5億1,984万円、StageⅤに比較して3億2,688万円の省エネルギー効果による燃料差額が生じる。

さらに、都市ガス13AのCO<sub>2</sub>排出原単位を2.36kg-CO<sub>2</sub>/Nm<sup>2</sup>とすると、StageⅥはStageⅣに比較して12,268t/年、StageⅤに比較して7,714t/年のCO<sub>2</sub>排出量の削減効果がある。

また、表の排ガス量相対比較より、StageⅥはStageⅣに比較して53%の排ガス量に留まっている。このことは、加熱による土壌浄化装置は、二次処理装置、冷却塔、集塵装置、煙突にいたる排ガス処理設備の設備費が全体の7割を占めることから、排ガス量を減じることによるコストダウン効果の影響が大きくなる。さらに、このことにより、電力消費量も相対的に削減することができる。

以上のことから、加熱による土壌浄化装置において、土壌の含水比がその処理能力、燃料消費量、設備費、ランニングコスト、CO<sub>2</sub>排出量に大きな影響を及ぼすことが裏付けられる。土壌の含水比を処理ガスの廃熱を利用して事前に削減することは、設備費や運用費を含めて経済合理性に優れる極めて有効な手段であると考えられる。

#### 5. 油汚染土壌浄化システムの将来技術への展望

以下では、第二種特定有害物質である重金属類で汚染された土壌の加熱技術による浄化の可能性と、省エネルギー化

**表-2** 土壌浄化システムの性能比較

比較項目	Stage Ⅳ	Stage Ⅴ	Stage Ⅵ
処理能力 (t/h)	25	←	←
含水比 (%)	30	←	←
土壌加熱温度 (℃)	600	←	←
排ガスの浄化温度 (℃)	850	←	←
燃料種類 (-)	13A	←	←
低位発熱量 (Kcal/Nm <sup>3</sup> )	9,970	←	←
年間稼働時間 (時間)	7,200	←	←
燃料単価 (Nm <sup>3</sup> /円)	100	←	←
プレヒート伝熱面積 (m <sup>2</sup> )	0	←	80
土壌予熱温度 (℃)	10	10	75
土壌残留水分 (%)	30	←	20
熱交換器伝熱面積 (m <sup>2</sup> )	0	250	200
予熱空気温度 (℃)	15	480	341
予熱空気量 (Nm <sup>3</sup> /min)	440	335	273
燃料消費量 (Nm <sup>3</sup> /h)	1,898	1,444	1,176
トン当たり燃費 (Nm <sup>3</sup> /t)	75.9	57.8	47.0
排ガス温度 (℃)	180	←	←
排ガス量 (Nm <sup>3</sup> /min)	917	673	488
排ガス量 ac (Nm <sup>3</sup> /min)	1,521	1,117	811
冷却塔散水量 (L/h)	13,076	6,400	2,947
燃料消費量相対比較 (%)	100.0	76.1	62.0
排ガス量相対比較 (%)	100.0	73.4	53.3
散水量相対比較 (%)	100.0	48.9	22.5
年間燃料費差額 (万円)	0	-32,688	-51,984
年間CO <sub>2</sub> 削減量 (t/年)	0	-7,714	-12,268

ならびにCO<sub>2</sub>排出量削減技術について展望する。

#### 5.1 加熱による重金属類汚染土壌の浄化技術

土壌汚染対策法に基づく第一種(VOC類)および第三種(農薬類)特定有害物質に関しては、熱分解による無害化が可能で、その有効性が明らかになっている。しかし、第二種特定有害物質のほとんどは重金属類であり、その元素そのものが有害物質の対象であることから、これを熱分解して無害化することは不可能である。核分裂や核融合などにより、無害な元素に変換する技術が将来実用化されるであろうが、ここでは時間軸が大きく隔たるのでその議論は割愛する。

したがって、重金属類で汚染された土壌の実用的な浄化方法としては、洗浄方式が主流を占めている。これは、分級作用

により、土壌から比表面積の大きいシルト質や粘土質などの微細土粒子を抜き取ることにより、土壌の浄化をはかるものである。重金属類は、土粒子表面に付着しているために、土壌から抜き取ったこれらの微細土粒子は重金属で濃縮されることになる。そして、これらの微細土粒子は別途、特別な処理を施して有効利用もしくは最終処分する必要がある。具体的には、セメントキルンに一定量混入して焼成し、セメント原料として有効利用する方法や、不溶化処理を行い管理型の最終処分場へ処分しているのが実情である。

一方、加熱技術により、土壌から重金属類を除去する実用的な手段として、アルカリ金属や塩化物を汚染土壌に添加して、その融点や沸点を低下させて揮発除去する方法がある。とりわけ、この技術を応用した塩化揮発法には、銅、鉛、亜鉛などの非鉄金属類の製錬や、焼却灰などの廃棄物から重金属類を除去し、焼却灰を熔融スラグ化して土木資材として有効利用するなどの技術として用いられている。

したがって、前述の洗浄法により分級した微細土粒子に、この技術を適用して重金属類を除去することにより、これら微細土粒子を土木資材として有効利用することなどが期待される。

さらに、2011年に発生した東日本大震災により福島第一原発がメルトダウンし、放射性物質であるセシウム137を周辺にまき散らし放射能汚染という人災をもたらした。これらの放射能で汚染された震災ガレキなどを減容化するために焼却処分し、放射能レベルが高い焼却灰を仮置場に一時保管している。同様に、宅地や農地などの放射能汚染レベルが高い表層土を除去し、仮置場に一時保管している。その仮置場所数は1,118箇所に及び、その総量は1,650万m<sup>3</sup>に上っている。

これらの焼却灰や汚染土壌からセシウム137を分離濃縮して減容化する方法の一つとして、上記で述べた塩化揮発法が有効である。汚染土壌や焼却灰に塩化カルシウムを添加して塩化セシウム137を生成させる。つぎに、これを加熱することにより揮散してくる塩化セシウム137を冷却凝縮させて、バグフィルタで捕捉回収する方法である。

このように、加熱による重金属類で汚染された土壌の浄化は、1,000℃を超える温度レンジでの浄化プロセスとなり、クリンカーや熔融スラグが生成し、これらの土木資材としての用途開発も同時に進めて行く必要がある。

#### 5.2 省エネルギー技術の深耕によるCO<sub>2</sub>の削減

加熱を基本原理とする油汚染土壌浄化装置は、その熱源として化石燃料を多用していることから、二酸化炭素や燃料コスト削減の観点から省エネルギー化技術を深耕して行くことは

極めて重要である。なかでも、土壌の水分がエネルギー消費に極めて大きく影響を及ぼすことから、高温排ガスの廃熱などを回収して土壌の予備乾燥に利用することは、省エネルギー化技術として極めて有効である。NTR-StageVIでは、排ガスの廃熱を回収して間接加熱方式のプレヒートキルンで土壌の予備乾燥を行うことにより、一定の省エネルギー化を達成することができた。

さらに、省エネルギー化を推し進めるためには、現在のシステムでは加熱浄化後の高温の土壌に散水を施して、防塵対策と土壌本来の姿である湿潤状態にして埋め戻している。この加熱土壌が保有している顕熱を回収して有効利用することなどが考えられる。例えば、600℃の加熱土壌が保有する顕熱は、含水比を約10%低減させることができる熱エネルギーに匹敵する。このことから、高含水比な汚染土壌のさらなる予備乾燥に有効利用できることが期待される。

## 6. おわりに

2003年に施行された土壌汚染対策法により、潜在的な土壌汚染の対策が講じられ、国内の土壌汚染が徐々にではあるが減少している。また、2018年(平成30年)4月1日改正の土壌汚染対策法においては、900m<sup>2</sup>を超える面積の土地を改変する場合に、地歴を調査しその経歴から土壌汚染の可能性が疑われる場合、実際にボーリング調査を実施してその有無を確認する必要がある。

土壌環境基準を超える汚染が発覚した場合は、行政にその旨を報告すると共に汚染の拡散の恐れがある場合はその防止策を講じる義務が土地の所有者に生じる。さらに、その汚染区域は指定区域に指定されて改変が難しくなり、土地の評価額も低下する。

このようなことから、土壌汚染が発覚した場合には、掘削除去か原位置浄化をおこなうのが通常の対策となっている。そして、掘削除去する場合は、法律で定められた指定工場に搬出する必要がある。

一方、海外へ目を転じれば、急速に経済成長を続けている新興国などに、我が国と同様の土壌汚染が潜在しているものと考えられる。特に、急激な経済成長の背後で、過去の日本同様、環境を犠牲にして経済成長を優先する政策の下、大気や水質、騒音、震動などは法律により規制されているものの、対策が手薄になるのが土壌汚染である。

当社は、1999年からAPの乾燥加熱技術と脱臭技術を基本ベースにして、より難易度の高い油汚染土壌の浄化システ

ムを順次開発してきた。そして、その分解が極めて困難であるPCBやダイオキシン類の土壌浄化の実績までには至らないものの、着実にそれらを処理するための技術力を高めてきている。今後も、当社は、絶え間なく浄化技術の研鑽を推進し、企業活動を通じて、土壌汚染の修復と環境負荷を低減する新たなシステムの構築に惜しみなく経営資源を投入して行く所存である。

## 参 考 文 献

- 1) 油汚染対策ガイドライン-鉛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-, 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, pp.1~21, 2006.
- 2) 坂本靖英, 西脇淳子, 原淳子, 川辺能成, 菅井裕一, 駒井武: 鉛物油に起因した土壌・地下水汚染を対象としたリスク評価システムの開発-土壌・地下水環境における油の移動現象の解析と複合成分に起因したリスクの定量的評価-, 土木学会論文集G, Vol.66, No.3, pp.159-178, 2010.
- 3) 川辺能成, 原淳子, 坂本靖英, 駒井武: 地圏環境リスク評価システムによる油汚染土壌の暴露・リスク評価-BTEXおよび脂肪族TPHの懸念レベルの推定-, 土木学会論文集G, Vol.63, No.2, pp.87-92, 2007.
- 4) 川辺能成, 西脇淳子, 坂本靖英, 原淳子, 竹内美緒, 駒井武: 地圏環境リスク評価システムによる油汚染土壌の暴露・リスク評価-芳香族TPHの懸念レベルの推定-, 土木学会論文集G, Vol.64, No.2, pp.144-150, 2008.
- 5) 川辺能成, 西脇淳子, 坂本靖英, 原淳子, 駒井武: 地圏環境における鉛物油のヒトへ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.
- 6) 橋本久義, 須藤孝一, 井上千弘, 千田信: 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.
- 7) 森也寸志, 松田真伊: 油汚染土壌の浄化における栄養塩注入速度の効率化, 環境技術, Vol.38, No.8, pp.566-572, 2009.
- 8) 須藤孝一, 平川貴也, 中川勇樹, 関野聡, 橋本久義, 井上千弘, 千田信: 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, Vol.71, No.5, pp.513-521, 2006.

- 9) 北山茂一, 原宏哉, 岩城美朝, 長里千香子, 本村泰三, 遠山忠, 張容器, 菊池新太郎: 石油系燃料油汚染土壌のバイオレメディエーション-特に環境微生物学的なアプローチ-, 環境技術, Vol.38, No.4, pp.275-282, 2009.
- 10) 蓬萊秀人: 油汚染土壌浄化プラント, 環境浄化技術, Vol.3, No.10, pp.59-64, 2004.
- 11) 蓬萊秀人: 注目される油汚染土壌汚染対策関連技術 加熱工法による油汚染土壌浄化プラント, 月刊資源環境対策, Vol.41, No.4, pp.80-81, 2005.

- 12) 蓬萊秀人, 神尾昌宏, 亀井健史: 加熱による油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.
- 13) 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.
- 14) 神尾昌宏, 蓬萊秀人, 亀井健史: 油汚染土壌に対する熱処理修復技術の応用, 地盤と建設, Vol.32, No.1, pp.87-95, 2014.
- 15) 神尾昌宏, 蓬萊秀人, 亀井健史: 熱脱着処理による実汚染地盤の修復, vol.11, No.3, pp.247-258, 2016.

## Development of Energy-Saving Oil Contaminated Soil Remediation Plant, Its Transition and Future Prospects

Hideto HORAI

Nikko Co. Ltd. Engineering Division

### Abstract

In 2003, the Soil Contamination Countermeasures Law was enacted, which had been the slowest in developing a law among the seven typical types of pollution specified in the Basic Environment Law: air pollution, water pollution, soil pollution, noise, vibration, ground subsidence, and offensive odor. Although soil pollution countermeasures have been implemented based on this law, soil pollution is characterized as a potential pollution due to its uniqueness and diversity. Among them, the development of an economical remediation technology for oil-contaminated soil is long awaited, since oil contamination is not uncommon. We have developed and introduced to the market a remediation system for oil-contaminated soil, in which heating technology is applied to oil-contaminated soil to increase the vapor pressure of oil for thermal desorption from the soil, and at the same time, the oil is oxidized and decomposed into carbon dioxide and water to detoxify the exhaust gas. This paper traces the evolution of our company's oil-contaminated soil purification system, reviews our newly developed energy-saving oil-contaminated soil remediation system, and introduces its energy-saving features, purification performance, and future technological prospects.

Key words: Oil contaminated Soil, Oxidative decomposition, Drying, Heat treatment, Remediation

### 筆者紹介



HORAI Hideto

蓬萊 秀人  
博士(工学)

1986年入社  
技術本部