

バイオオーグメンテーションを用いた重油付着土の処理

Disposal of Heavy Oil Component Soil Using the Bioaugmentation

井 垣 一 之^{*1} 中 原 博 史^{*2} 伊 藤 良 治^{*3}
Kazuyuki Igaki Hirofumi Nakahara Yoshiharu Itoh

【要旨】

原町火力発電所は、平成23年3月11日に発生した「東北地方太平洋沖地震」の津波により、構内全体に重油・軽油が流出し、土壤に浸透して油付着土（約21,000m³）が生じた。油付着土による場内の生活環境への影響を無くし、作業に支障のない環境復元が必要となった。

本現場は、福島第一原子力発電所から30km圏内にあり、油付着土を場外搬出処分することが困難であったため、場内で浄化処理し盛土材などに利用することとした。土壤調査及び工法等の検討を行った結果、C重油浄化の実績があるバイオオーグメンテーションによる混合攪拌処理を選定し、実施した。

油付着土の浄化は、完了基準を2,000mg/kgとし、低濃度油付着土（3,000mg/kg以下）は2カ月で、高濃度油付着土（3,000～60,000mg/kg）は6カ月で完了基準以下に低減した。

本稿では、土壤調査及び処理工法の選定、実施方法及び実施上の課題対応と浄化結果について報告する。

【キーワード】 バイオオーグメンテーション C重油 軽油 オッペンハイマー法

1. はじめに

原町火力発電所の岸壁近傍に設置されていた重油タンク（9,800kL×2基）、軽油タンク（900kL×2基）は、高さ18mを超える津波の襲来により被災し、構内に重油が流出した。流出した重油により広範囲にわたって油付着土が分布する状況であった。電力供給能力が大幅に落ち込み、原町火力発電所の早期復旧が求められる中、この油付着土を早期に処理する必要がある。しかし、対策の検討にあたり、地震、津波被害による混乱、福島第一原発事故による影響など様々な制約条件があった。

本現場は、福島第一原子力発電所から30km圏内にあり、放射性物質に関する対応が定められていないことから、油付着土の場外処分をせず、構内での処理を行うこととなった。これらを踏まえて以下の対応方針を定めた。

1.1 油付着土の処理目的

- ①発電所内の生活環境に影響が無い状態とすること。
- ②地下水など外部への油の流出・拡大を防止すること。

1.2 対応方針

- ・調査、対策は「環境省の油汚染対策ガイドライン」¹⁾（以下、ガイドラインという）に基づいて実施する。
- ・発電所内で完結する処理を行なう。（発電所外への搬出処分は行わない）
- ・処理土は、盛土材などの流用土として有効利用する。

2. 土壤調査

2.1 調査概要

(1) 調査範囲

調査範囲は、図-1に示す舗装がない露地部分とした。

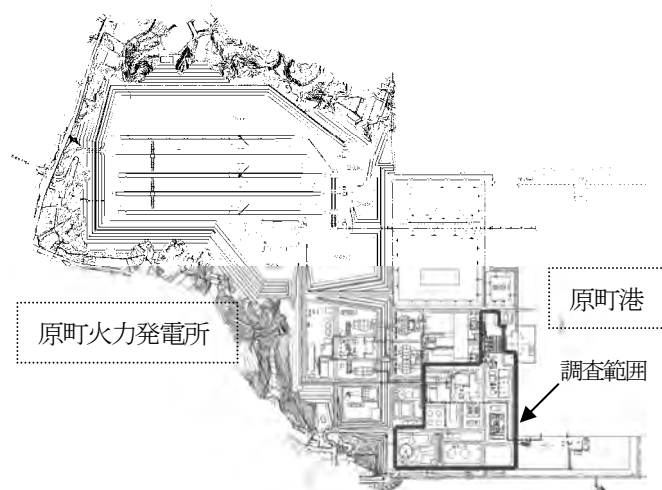


図-1 調査範囲

(2) 調査方法

油付着土の有無は、ガイドラインに基づいた方法で油臭、油膜の有無及び油分濃度（TPH濃度—TPH：Total Petroleum Hydrocarbon 全石油系炭化水素）を把握し、判定した。

対策範囲を絞り込みやすくするため、調査範囲を30m格子で分割し、対象区画を192区画とした。

1. 東北支店 土木部 2. 大阪支店 原子力機構敦賀（作） 3. 建設事業本部 エンジニアリング事業推進部 環境・エネルギーG

(3) 表層調査

土壌調査は地表から-15cm、-50cmの表層土壌の調査を行い、油付着土の平面的分布状況を確認した。

(4) 深層部土壌調査

表層調査で油分濃度が検出された箇所について、ボーリングを行い、GL-15cm、GL-50cm、GL-1.0m、それ以上の深度は1.0mごとにGL-5.0mまで試料を採取し、深度方向の分布とそれによる地下水への油の溶出リスクについて検討した。

2.2 調査結果

(1) 表層調査結果

油付着土は倒壊した重油タンク、軽油タンクがあった防油堤から北側方向に一樣に分布しており、油膜・油臭の確認により192区画のうち、113区画を油付着土の区画と判定し、TPH濃度分析を行った。

(2) 深層部土壌調査結果

表層土壌調査結果において、GL-50cmの試料のTPH濃度が1,000mg/kgを超過した5区画において、油付着土の深度方向の分布を確認した。

TPH濃度が1,000mg/kg以上と確認された最大深度は、

GL-2mであった。

また、TPH濃度が2,000mg/kg未満となる深度は、平均GL-0.57mであった。

既往調査結果より、当該地における地下水位は最も浅くなる場合で概ねGL-3.0mであった。

油付着土の深度分布は、地下水位より浅い位置に分布していることから、油分による地下水溶出のリスクは低いものと判断した。

3. 土壌処理計画

3.1 対策工法の選定

(1) 1次選定

・発電所内で完結する処理の方針より、「油含有土壌の浄化工法（熱処理、土壌洗浄、バイオレメディエーション、セメント原材料化、土壌ガス吸引、化学的酸化分解）」を選定した。

・この内、C重油・軽油処理に適用可能で、費用、処理設備、土壌中の放射性物質の取扱いなどの観点から、バイオレメディエーションおよび化学的酸化分解の適用性が高いと判断した。

油付着土対策工法比較表（表-1参照）に示す油付着土処理工法から、対応方針に基づいて以下の手順で工法選定を行った。

表-1 油付着土対策工法 1次選定表

対策工法	場内処理	適用条件						本件への適用性					評価
		対象物質				工期	費用	油臭拡散	油膜拡散	地下水浄化	土壌浄化	配管等埋設物	
		高濃度汚染	ガソリン	軽油	重油								
盛土	○	△	○	○	○	○	◎	○	×	×	×	○	×
舗装	○	△	○	○	○	○	◎	○	×	×	×	○	×
遮水工	○	△	○	○	○	○	○	×	○	×	×	×	×
バリア井戸	○	△	○	○	×	×	○	×	○	△	×	○	×
地下水揚水	○	△	○	○	×	×	○	×	○	△	×	○	×
土壌ガス吸引	○	○	○	△	×	×	○	○	×	×	○	○	×
土壌洗浄	○	△	○	○	△	○	△	○	○	○	○	○	×
化学的酸化分解	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	△	△	○
バイオレメディエーション (ステイミュレーション)	○	△	○	○	△	△	○	○	○	○	○	○	○
バイオレメディエーション (オーグメンテーション)	○	△	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○
低温加熱処理 (100~600℃)	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	△	○	×
高温加熱処理 (800~1000℃)	×	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	×
セメント原材料化	×	×	△	△	△	○	△	○	○	○	○	○	×

(2) 2次選定

- ・バイオレメディエーション、および化学的酸化分解を対象として、トリータビリティ試験を実施した。

トリータビリティ試験に用いた油付着土浄化工法の概要を表-2に示す。

- ・TPH濃度、油膜、油臭の低減効果より、対策工法を選定した。

表-3にトリータビリティ試験結果を示す。

3.2 対策範囲の決定および基本処理工程の策定

(1) 対策範囲の決定

対策範囲については、石油業界等の自主基準値濃度がTPH濃度1,000~2,000mg/kgとされていることから、調査メッシュ箇所でも1,000mg/kg以上の箇所について処理を行うこととした。ただし、1,000mg/kg以下の箇所であっても、油付着土の状況が確認された箇所および高濃度の箇所と隣接する箇所についても実施することとした。

また、震災当初地表面の重油混じり土をすきとり、既に仮置きされている土砂(概算7,000m³)についても対象とした。

(2) 浄化処理の完了基準

石油業界等の自主基準値濃度、重油付着土対策工事の事例(盛土地盤)での目標値(TPH濃度1,000~2,000mg/kg)を引用し、2,000mg/kg以下を完了基準とした。

(3) 基本処理工程

処理工程については、トリータビリティ試験結果を基に、TPH濃度3,000mg/kgで区分して濃度に応じた処理を行うこととした。

低濃度土壌は、複合微生物製剤・栄養剤・栄養補助剤(以下、バイオ混合溶液という)の混合攪拌1回を基本とし、高濃度土壌は、その後、バックホウ攪拌と散水による酸素と水分の供給、栄養剤の混合攪拌を行って微生物の活

表-2 2次選定のトリータビリティ試験に用いた油付着土浄化工法

工法分類	工法名	工法概要
バイオレメディエーション	オープンハイマー法 (オーグメンテーション)	使用材料：複合微生物製剤：テラザイム、栄養剤：バイオニュートリエント ・油汚染土壌に微生物製剤、栄養剤混合し、生物的油分分解を行う工法。 1997年のナホトカ号重油流出事故など油汚染現場で実績がある。
	ナノ・アスリート工法 (スティミュレーション)	使用材料：油脂分解材：ナノ・アスリート ・油汚染土壌に息する油分解微生物を、油分散および栄養剤機能を持つ油分解材で活性化させる工法。ヤシ油脂肪酸アルカノールアミドを主成分としており、生分解性は98%以上。pH7.3で有害物質は含まれていない。
化学的酸化分解	ISOTEC フェントン法	使用材料：フェントン反応剤：ISOTEC浄化溶液 地下水に注入した二価鉄と過酸化水素水の反応で生成するヒドロキシラジカルにより汚染物質を分解するフェントン法を、キレート剤を用い中性域で反応する改良型フェントン法である。

表-3 2次選定のトリータビリティ試験結果

試験ケース			TPH濃度(mg/kg)		油臭		油膜	
			原土	完了	原土	完了	原土	完了
オープンハイマー法 微生物製剤：20g/kg 栄養剤：4g/kg 添加回数：1回 養生期間：4週間 ③、④は8週間	①	活性剤：無 攪拌：無	26,000	10,000	2	2	3	3
	②	活性剤：0.2g/kg 攪拌：無	26,000	10,000	3	2	3	3
	③	活性剤：無 攪拌：1回/日	26,000	5,900	3	2	3	3
	④	活性剤：0.2g/kg 攪拌：1回/日	26,000	5,500	3	2	3	2
ナノ・アスリート工法 油脂分解材：30L/m ³ 攪拌：無 養生期間：4週間	①	添加：初回のみ	6,900	6,800	3	3	3	3
	②	添加：2回(初回、1週)	6,900	7,600	3	3	3	3
ISOTEC法 養生期間：1週間	①	フェントン反応材：22mg/kg 触媒溶液：11mL/kg 添加；初回のみ、攪拌：無	19,000	18,000	4	4	3	3
	②	フェントン反応材：22mg/kg 触媒溶液：22mL/kg 添加；初回のみ、攪拌：無	19,000	18,000	4	4	3	3

動を促進し、継続的な分解によって図ることとした。

図-2に浄化処理フローを示す。

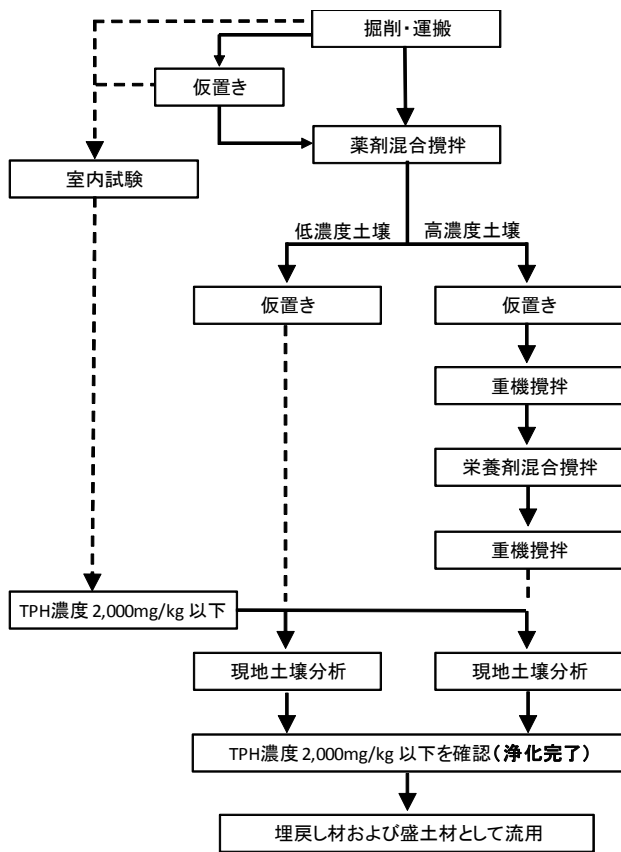


図-2 浄化処理フロー

4. 土壌処理実施に伴う施工上の課題対応

土壌処理の課題は、以下の4点であった。

- ①機電設備等優先工種の復旧工程を優先する。
- ②油付着土の油濃度が不均一かつ瓦礫類が混入する。
- ③対策範囲（深度方向）の拡大及び他復旧事で発生する油付着土受入による土量の増大。
- ④高濃度油付着土への対策方法

4.1 機電設備等優先工種の復旧工程短縮に向けた対策

機電設備で復旧の優先度が高い設備周辺に存在する油付着土の処理については、原位置攪拌処理ではなく、油付着土を掘削除去し、健全土に置換え、油付着土を別のヤードで処理することとして、機電設備復旧工事の支障とならないように工程調整を行った。

掘削した油付着土は、拡散することを防止するために、重油タンク跡地内に分別・仮置きした。高濃度、低濃度の油付着土を混合攪拌し、油分濃度を均一にするため、掘削場所、濃度別に管理できるよう保管した。

4.2 混合性能及び効率向上と混入瓦礫類への対策

油付着土は、区画毎の油分濃度は高低が混在していた。油付着土は固化し土塊状で、瓦礫類の混入もあり、確実な浄化を進めるには、これらに対応した混合性能とその性能を維持しつつ混合効率の向上を図る必要があった。

混合攪拌機に、コンクリート片や礫も破碎できる3軸のロータリーハンマーを備えた機械（コマツ：リテラBZ210）を採用した。破碎機能により細粒化し混合効率を高めて、均一な混合と安定した処理量の確保が実現できた。また、瓦礫類の混入による機械トラブルを抑制し、処理工程の安定化が図れた。

4.3 対象土量の増大への対策

処理計画の深度以深に油付着土が確認された場合は、処理対象としたため、対象土量が増大すると予想された。また、他復旧工事の残土には油が付着しているものが多く、さらに対象土量が増大することが予想された。また、発電所の復旧工程は前倒しを検討するほど切迫しており、日当りの処理量の向上は、工事の重要な課題であった。

油付着土の仮置き場と隣接する場所に混合攪拌ヤードを設け、バイオ混合溶液等を作成する設備と混合攪拌機を組み合わせプラント化し、バイオ混合溶液等を添加する混合攪拌の管理を一元化するとともに、混合攪拌機



写真-1 混合状況

にバイオ混合溶液等の定量添加を連続して行えるように工夫した装置を装着して、混合攪拌が連続してできる作業工程を組立てた(図-3参照)。これにより、混合攪拌機の処理能力を最大限活かせる状態となり、通常のミキシングバケットを使用した混合攪拌の処理量(150m³/日)に比べ2倍以上、日当りの処理量の向上が図れた。

4.4 油分濃度が高い土壌の濃度低減対策

微生物数は油の分解状態を判断する指標であり、微生物の活性化に必要な栄養分の補給を適切に行うために、これらを観測した。処理土の土質性状(含水率、微生物数、酸素量、窒素・リンの濃度)を定期的に測定し、微生物数の増大に対応したタイミングで中間の攪拌(バッ



図-3 微生物製剤および混合溶液作成状況

クハウ攪拌による水分と酸素供給)と栄養剤添加(混合攪拌機による混合)を行い、油濃度低下の促進を図った。

高濃度の油付着土では、初期に微生物数が爆発的に増大したため、中間攪拌や栄養剤添加時期を早めて分解の促進をし、順調な濃度低下を達成した。

また、日当りの処理量向上を図った効果で、対象土量の増大に対応するだけでなく、処理の迅速化により十分な養生時間が確保できたことで、全ての土壌の油濃度が完了基準以下にできた。

5. 土壌処理結果

5.1 低濃度油付着土

油分濃度が低い土壌について、室内試験を行った。TPH濃度の推移を図-4に示す。

薬剤の添加・混合から2週間後には、全ての試料のTPH濃度が2,000mg/kgを下回った。計測のばらつきを考慮し、その後も1ヶ月後および2ヶ月後にモニタリングにより、TPH濃度が順調に低減していることが確認された。

2ヵ月後のモニタリング後、現地仮置き土壌を分析し、2,000mg/kg以下が確認されたため処理完了とした。

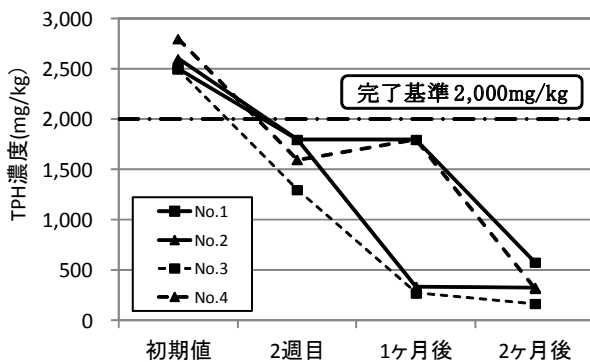


図-4 低濃度油含有土の室内試験結果

5.2 高濃度油付着土

油分濃度が高い土壌について濃度の異なる試料で室内試験を行った。TPH濃度の推移を図-5に示す。

試料の初期濃度は約3,000~60,000mg/kgであったが、6ヵ月後には全試料のTPH濃度が2,000mg/kgを下回り、現地仮置き土壌が完了基準を満足し処理完了とした。

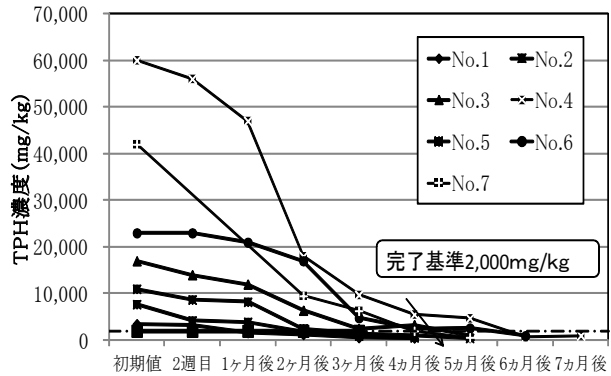


図-5 高濃度油含有土の室内試験結果

6. まとめ

混合効率の向上や連続して混合攪拌が出来る工夫により、処理土の不均一な状態や土量の増大を克服し、期間内に浄化を完了することができた。

高濃度の油付着土は、微生物の活動を促進する適切な処理により微生物数が爆発的に増加することに対応し、油濃度の低下を実現できることが分かった。

謝辞：東北電力(株)原町火力発電所の土木グループの皆様のご指導をいただきました。確実な処理を達成することができ、本誌面をかりまして、心より御礼申し上げます。

【参考文献】

- 1) 財団法人土壌環境センター：環境省の油汚染対策ガイドライン，2006

Summary In the Haramachi thermal power station, heavy oil, light oil began to flow in the whole yard by the tsunami of "Tohoku district Pacific offing earthquake" generated on March 11, 2011, and it penetrated in the soil, and oil adhesion soil (approximately 21,000m³) produced it. I got rid of influence on living environment of the hall with the oil component soil, and the environmental reconstruction without the trouble was necessary for work.

There was this spot within the range of 30km from Fukushima first Nuclear Power Plant and decided to process purification in the hall, and to use it to laying earth on the ground materials because it was difficult that outside export disposed of the oil adhesion soil. As a result of having examined soil investigation and the method of construction, I chose mixed stirring processing by the bio augmentation with the results of the fuel oil C purification and carried it out.

The purification of the oil adhesion soil assumed a completion standard 2,000 mg/kg, and the low-concentrated oil adhesion soil (3,000 mg/kg or less) reduced the highly-concentrated oil adhesion soil (3000-60,000 mg/kg) in lower than completion standard in six months in two months.

In this report, I report problem correspondence and a purification result in soil investigation and the choice of the processing method of construction, an enforcement method and the enforcement. In this paper, I report on the purification and the results support the implementation issues on the selection of treatment methods and soil investigation, and implementation methods.

Key Words : Bio-augmentation, Cheavy Oil, Light Oil, The Oppenheimer Formula