

論文の内容の要旨

論文題目 活性炭素繊維による土壌・地下水汚染浄化に関する
工学的研究

氏 名 三宅 酉作

本論文は「活性炭素繊維による土壌・地下水汚染浄化に関する工学的研究」と題し、有機物汚染地下水のエアーストリッピング処理法或いは有機物汚染土壌のガス吸引処理法において発生する高水蒸気含有ガスからの有機塩素化合物類の活性炭素繊維による吸着分離に関して、その基礎的現象の機構解明、ならびに実スケール実験を通じた知見収集と、装置設計のための基礎的情報の整理を行ったものであり、6章からなる。

第1章は緒言であり、近年の我国の地下水汚染・土壌汚染の状況とそれに対する法的な対応、浄化プロセスの変遷とその特徴を、特にトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどの有機塩素化合物に焦点を当てて述べた。その中で特に、汚染地下水を揚水し、向流式接触塔にて空気と接触させて揮発性汚染物質を除去するエアーストリッピング法、ならびに土壌間隙を直接ブローにて吸引し、揮発性汚染物質を除去する土壌ガス吸引法が処理効率が高く、掘削などの工事を伴わない現場処理浄化プロセスとして望ましいことを見出した。一方、同法の汚染土壌・地下水浄化プロセスとしての成否の鍵は、その排気ガスの処理方法の優劣に委ねられていることも指摘し、特に有害副生成物を産出しえない活

性炭吸着法が望ましいことを指摘した。しかしながらこれらの排気ガスには高濃度の水蒸気が含有されており、吸着条件としては過酷であることにも言及した。これらの状況から、本論文の目的をトリクロロエチレンやテトラクロロエチレンなどの揮発性汚染物質の活性炭吸着に対する水蒸気の影響の定量的評価やその軽減策の提案、ならびに実スケール装置を用いた実汚染現場での浄化処理の実証であるとし、そのアプローチのための本論文の構成を示した。

第2章は、実験装置を用いたモデル物質の吸着実験を通じて、活性炭素繊維によるトリクロロエチレンの水蒸気共存下の吸着特性を平衡論的に解明した章である。ここで取り上げた活性炭素繊維は、極めて細い繊維（直径7~15 μm ）からなり、微細な細孔（0.25~1.0 nm）を有するため吸着質の材内での拡散距離が短く、粒状の活性炭に比べて著しく吸脱着速度が高いことや、同様の利点を有する微粉末活性炭よりも著しくハンドリングが容易であることなどから、エアーストリッピングガスや土壌吸引ガスからの有機物除去に適しているものと判断したものである。本章ではまず各種活性炭素繊維に対する水蒸気の吸着平衡を、破過実験から求めた。その結果、相対湿度の増加に伴う水分吸着量の増加が、ある一定湿度から開始されるS字型となることを見出した。続いて、破過実験を行うことで水蒸気共存下でのトリクロロエチレンの破過時間を測定し、相対湿度の増加に伴いトリクロロエチレン破過時間、すなわち吸着容量が減少することを定量的に明らかとした。一方、この結果をDubinin-Radushkevich式により解析したところ、相対湿度の違いはトリクロロエチレンの飽和吸着量に影響を与えないことがわかった。本章の最大の目的は、揮発性汚染物質の活性炭素繊維への吸着に対する水蒸気の影響の定量化であるが、これらの結果をもとに任意の相対湿度下でのトリクロロエチレンの吸着量を予測する数理モデルを提唱していることで、この目的を達成した。さらにこの数理モデルが、Dubinin-Stoekli式を利用することにより、トリクロロエチレン以外の揮発性汚染物質（例えばテトラクロロエチレンなど）への拡張、ならびに任意の温度域への拡張が可能であることを示した。

第3章は、実際の地下水汚染サイトに設置したエアーストリッピング装置の排ガス処理部分に試験装置を設置し、活性炭素繊維によるエアーストリッピング排ガス中のトリクロロエチレンの吸着を解明した章である。ここでは、実汚染サイトからのエアーストリッピングガスからの活性炭素繊維によるトリクロロエチレン除去の実証を第一の目的としたが、その除去が良好に起こることを、連続流通実験の結果として得られるト

トリクロロエチレンの破過挙動から定量的に示した。続いて、第2章の知見をもとに加温による相対湿度低下操作を実施し、湿度低下による吸着容量の増大が温度上昇による吸着容量の減少を上回り、見かけ上吸着容量が増大すること、すなわち加温による湿度低下が吸着容量増大において有効であることを、同様にトリクロロエチレンの破過挙動から定量的に示した。また、活性炭素繊維吸着塔内でのトリクロロエチレンの総括物質移動が軸方向拡散によって支配されることを見出し、ペクレ数によってトリクロロエチレン破過挙動が表現できることを、実測値との比較によって明確に示した。

第4章は、高濃度トリクロロエチレン汚染地下水サイトに設置したエアーストリッピング装置の排ガス処理部分に試験装置を設置し、活性炭素繊維によるエアーストリッピング排ガス中のトリクロロエチレンの吸着とスチーム再生について解明した章である。本章の主目的は、この高濃度ガスの加温調湿－活性炭素繊維吸着処理の実証のみならず、活性炭素繊維の再生・繰り返し利用方法の提案と、吸着したトリクロロエチレン回収の可能性の検討である。まず、高濃度トリクロロエチレン含有エアーストリッピングガスの処理において加温調湿－活性炭素繊維吸着処理が有効であることを、トリクロロエチレン破過挙動をもとに定量的に示した。また、スチーム再生の適用によって吸着したトリクロロエチレンの **9割程度** が極めて速やかに脱着され、さらには高濃度故に相分離した難水溶性液体として回収できることを、破過挙動ならびに回収液の機器分析結果から定量的に示した。さらにこの相分離した難水溶性液体のトリクロロエチレン純度が高いことから、溶媒回収法としての有効性を示した。

第5章は、テトラクロロエチレンをはじめとした多数の揮発性有機炭素成分にて汚染された土壤実サイトに設置した土壤吸引装置に活性炭素繊維吸着装置を設置し、活性炭素繊維による吸引土壤ガス中のテトラクロロエチレンの吸着とスチーム再生を実証した章である。本章は、前章までに発案された加温調湿－活性炭素繊維吸着－スチーム再生法の吸引土壤ガス処理への適用性検討といった側面と併せて、共存する揮発性有機炭素成分のテトラクロロエチレン吸着に対する影響やスチーム再生への影響の評価という側面も有している。まず、テトラクロロエチレンに関する破過挙動を追跡することで、吸引土壤ガスからのテトラクロロエチレン吸着除去が可能であることを定量的に明らかとした。続いて、スチーム再生によって、テトラクロロエチレンの **7割程度** が極めて速やかに脱着されていることを定量的に示しており、テトラクロロエチレンの回収の可能性を示唆した。一方で、実測されたテトラクロロエチレンの吸

着容量が、第2章にて提案した方法によって予想されるテトラクロロエチレン吸着容量に比して明らかに低いことや、脱着時に得られた難水溶性液体の機器分析結果からテトラクロロエチレン以外の多数の揮発性有機炭素成分が見られることから、テトラクロロエチレン以外の揮発性有機炭素成分がテトラクロロエチレンの吸着座を奪い、テトラクロロエチレンの吸着容量が減少したことを定性的に示した。他方、同法の長時間（500時間）連続運転を実証した。また、これらの結果をもとに加温調湿-活性炭素繊維吸着-スチーム再生プロセスの経済性評価を行い、粒状活性炭処理を用いた吸着除去プロセスと比較して有利であることを示した。

第6章では、総括として、本研究全体を通じた総括と本研究で得られた指針の整理、ならびに今後の研究課題と将来展望を記述した。