

ドイツにおける環境問題への取り組み

下村雅則

Keywords: Environment, Soil Flushing, Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, Surfactant

環境, 原位置土壌洗浄, 多環芳香族炭化水素, 界面活性剤

1. 序

平成12年1月から1年間ドイツ・シュツットガルト大学水理研究所に属する VEGAS(地下環境修復のための研究施設)に客員研究員として籍をおき, 界面活性剤を用いた PAH 原位置浄化の研究を中心に, 環境への取り組みについて学んできた。地理的にも経済的にもヨーロッパの中心となっているドイツ連邦共和国は人口 8,200 万人(日本の 2/3 程度), 面積は 35.7 万 km²(日本は 37.7 万 km²)であり日本よりもやや小さい。ドイツに対するイメージの一つとして環境先進国であるということが挙げられる。本報告は, ドイツにおける環境問題への取り組みおよびシュツットガルト大学での研究内容について述べるものである。

2. エネルギー

ドイツの環境政策は, 社会民主党と緑の党の連立政権のもと, これまでよりも積極的に進められている。例えば, エネルギー政策では, 現在稼働中の 19 基の原子力発電所を稼働 32 年で撤廃する方針を打ち出し, 再生可能エネルギー(風力, 太陽光, バイオマス, 地熱, 水力等)への転換を推進している。

発電電力量から見ると, 原子力による発電電力量は全発電電力の約 30%を占めており, 再生可能エネルギーは 5%しかないのが現状である。原子力発電所の撤廃による電力の不足は, 海外からの電力の輸入と再生可能エネルギーへの転換, 省エネルギー, エネルギー効率の改善等により補う計画である。再生可能エネルギーの中では風力発電が有効であると考えており, 丘の上の風車が日常的な風景となってきた。また, 脱原子力政策により, 9%を超える高い失業率をさらに押し上げることが懸念されている。これについては, 環境分野の産業によって新しい雇用が確保されるとしている。

使用済みの核燃料については, 各発電所に中間貯蔵施設を設けることになり, 放射性廃棄物の輸送に伴うリスクの低減を図っているが, 最終処分の問題は解決されていないのが現

状である。

3. 廃棄物

ドイツの廃棄物処理に関しては, 廃棄物の減量, リサイクルを推進するための法律「循環経済・廃棄物処理法」が施行されている。包装容器廃棄物については, ごみの発生量を減らしリサイクルを重視して循環型社会の構築をめざし, 製造・流通業者に包装容器の回収・リサイクルを義務づける包装容器廃棄物令を受け, 製造業者と流通業者により, 廃棄物の回収とリサイクルを代行する有限会社「デュアル・システム・ドイチュランド社」を 1991 年に設立した。

このシステムでは, 業者がデュアル・システム・ドイチュランド(DSD)社にライセンス料を支払うことによりグリーン・ポイントというマークを包装容器につける事ができ, 消費者はグリーン・ポイントのマークが付いている商品の包装廃棄物を指定の黄色いごみ袋(ゲルプザック)に入れることで定期的に回収される。DSD 社では, 回収した包装容器廃棄物を分別し, 原料としてリサイクルしている。対象としている包装容器の材料はガラス, ブリキ, アルミニウム, 紙・ダンボール, 複合材, プラスティックであり, ゲルプザックにはグリーン・ポイントが添付されたこれらの包装廃棄物を分別すること無く捨てればよい。

このシステムにより, 各業者はライセンス料を節約するために, 包装の簡略化が進んでいる。また, このシステムに乗らない廃棄物は自治体が回収する二重システム(デュアル・システム)となっており, 街角にはガラス用のごみ箱が置かれ(写真-1), ガラスの色により分別し, リターナルビンについてはデポジット制を採用して販売店で回収している。

ドイツのごみ政策は 3 つの段階に分かれており, ごみの回避, 再利用, 処分となっており, 再利用(リサイクル)の前にごみを回避することが重要視されている。



写真-1 ガラス用ごみ箱
Trash Can for Glasses

ごみの回避とは、減量ではなく、より積極的にごみを近づけないという意味で用いられる。ごみを回避する方策としては、ごみ処理に掛かる費用を排出量に応じて負担する方法をとっており、高い環境意識だけでなく極めて現実的なコスト意識が廃棄物対策に大きく貢献していると考えられる。

4. 土壌・地下水汚染

4.1 連邦土壌保護法

1980 年頃から土壌・地下水汚染が主要な環境問題の一つとして認識されるようになり、大気、水質同様に土壌・地下水汚染に対する調査、防止、浄化に関する法整備が求められ、1998 年には、これまで州ごとに定められていた土壌汚染対策に関する規制を統一基準とするドイツ連邦土壌保護法（Bundes-Bodenschutzgesetz; BBodSchG）を制定し、土地の汚染者、所有者、管理者に対する義務として、浄化義務、調査義務、土壌機能の回復および有害な土地変更の防止等の義務を定めている。

また、土壌保護と汚染地に対する命令（Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung; BBodSchV）により、汚染調査を実施するか否かを判断する検査値（Prüfwert）、浄化命令が発動される措置値（Masnahmenwert）が定められ、これらは土地用途により異なる値となっている。

4.2 浄化対策

ドイツにおける土壌・地下水汚染対策を浄化対策と汚染防止対策に分類すると、浄化対策については、土壌洗浄、加熱処理、微生物処理、土壌ガス吸引、水理学的浄化、汚染防止に関しては、固化、封じ込め、水理学的処置が主要な対策となっており、日本における対策法と同様であり、比較的新しい技術として、透過性浄化壁工法、自然減衰、界面活性剤、

熱を利用した高効率 SVE 等の研究が進められている。

界面活性剤を使用した浄化手法は、土粒子間に残留している汚染物質に対して、溶解するか界面張力を低下させて移動性を与えて帯水層から除去する方法であり、汚染源処理に適している。具体的には、汚染源に注入井戸と揚水井戸を設置し、注入井戸から界面活性剤を注入し、揚水井戸から汚染物質を含む地下水を揚水するものである。

熱を利用した高効率 SVE は、土壌ガス吸引法（SVE）の効率を上げるために、汚染地盤の温度を上昇させて回収する方法で、高温蒸気の注入や電気、電磁加熱等で地盤の不飽和帯を高温にする。

これらの技術は、ドイツ固有のものではないが、パイロットテストが行われており、研究開発段階にある。

5. VEGAS での取り組み

5.1 VEGAS の概要

シュツットガルトはドイツ南西部に位置する都市で、フランスとスイスの国境に接したバーデン・ビュルテンベルク州の州都で、ドイツ有数の経済都市である。シュツットガルト大学は 1829 年に創立され、現在は 14 学部、140 研究所で構成されている。学生数は 16,000 人のうち約 2,800 人が外国からの留学生である。水理研究所は土木工学部に属しており、水理研究所内の VEGAS はドイツ連邦教育研究省（BMBF）とバーデン・ビュルテンベルク州環境交通省（UVM）の基金で設立された地下環境修復のための研究施設である。

VEGAS の目的は土壌・地下水汚染を浄化する事であり、研究内容は、地盤内の汚染物質の挙動に関する基礎的な研究から、計測技術、調査技術、浄化手法の適用までの広範に渡っている。



写真-2 VEGAS の実験施設
Research Facility in VEGAS

VEGAS の研究施設の特徴は、実験室レベルの基礎的な研究から実際のスケールに適用するため、中規模・大規模の実験装置を保有していることである。

5.2 界面活性剤を使用した浄化手法の例

5.2.1 研究の背景

19 世紀中ごろから天然ガスに変わるエネルギーとして石炭から精製したガスが利用されるようになり、主に照明、調理、暖房用に 100 年以上に渡り利用され、当時のドイツには約 1,000 箇所のガスワークスが存在していた。ガス精製プロセスは、石炭を加熱し発生したガスを冷却して収集するもので、汚染された冷却水は直接地下浸透させていた。また、石炭からガスを精製する際には、タール、アンモニア、フェノール、ベンゼン、トルエン、キシレンなどの副生成物も発生し、これらの物質も廃棄され、地下水汚染を引き起こす場合もある。タールには 10,000 種以上の物質が含まれており、これらの物質を総称して PAH(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons)「多環芳香族炭化水素」という。PAH は難水溶性であるため、従来の揚水による対策では十分な効果が得られず、地下に残留している PAH は長期的な地下水汚染の供給源となる。このため、水に溶解し有機物を溶解する材料や移動性を与える材料を使用して揚水による浄化効果を改善する方法が求められている。

5.2.2 界面活性剤による原位置浄化

この方法は、揚水対策を基本としたもので、注入井戸から界面活性剤を注入し、土粒子間に残留している有機汚染物質を土粒子から引き剥がして移動性を与え、揚水井戸から界面活性剤と一緒に抽出するものである。ドイツのケールにおける同工法のパイロットテストでは、3 週間におよぶ界面活性剤の注入によって、推定存在量の 30～50%の汚染物質を抽出することしかできなかったが、当初 100～680 $\mu\text{g/L}$ であった地下水濃度が活性剤注入後には基準値(0.2 $\mu\text{g/L}$)以下にまで低下したことが報告されている。

ドイツとルクセンブルグの国境付近の町トリアー(Trier)は、ローマ帝国時代の遺跡が数多く残っている。現在この街の駅前にある旧ガスワークの跡地をショッピングセンターにするための工事が行われており、敷地内の汚染土壌は掘削処理をしている(写真 3)。また、敷地外の汚染は市の土地である公道にあり、VEGAS では基礎的な室内試験および現地調査による、界面活性剤を用いた原位置浄化手法の検討を行っていた。



写真3 PAH 汚染サイト
PAH Contaminated Site



写真4 汚染サイトの地下水
Groundwater in the Contaminated Site



写真5 現地調査
Field Test

敷地内では、地盤を掘削すると写真4に示したように、浸出した地下水に油膜が見られる。また、現地調査ではトレーラーでポンプ、水処理装置、廃液タンク等の実験装置を牽引して、地下水のサンプリング及び、透水試験を実施している（写真5）。

5.2.3 室内試験

界面活性剤の注入による浄化効果を確認するため、現地の汚染土を使用した二次元土槽試験を行っている。

実験土槽を写真6に示した。土槽内はサイトの地質状況に併せて上部から砂、PAH 汚染土、粘性土で構成されており、土槽の両端で水位をコントロールして界面活性剤を浸透させるものである。PAH の分析は高速液体クロマトグラフィーを使用。



写真6 実験装置

Test Equipment

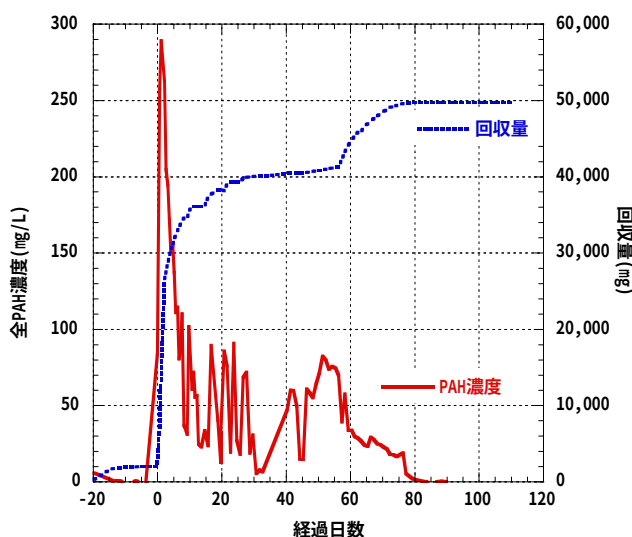


図1 実験結果

Test Result

図1に、実験結果の一例として全 PAH 濃度と累積回収量の関係を示した。

界面活性剤を通水する前（経過日数が負）には界面活性剤が含まれていない水を通水しており、この間に排出された水の全 PAH 濃度は1mg/L 以下であった。界面活性剤を注入した後、全 PAH 濃度は300mg/L 程度まで上昇し、界面活性剤による PAH 移動性の増加効果が伺える。その後 100 日間の通水で地盤内の汚染物質の 90%を除去する結果が得られており、界面活性剤を使用した PAH 汚染土壌の原位置浄化手法の効果を確認している。

また、PAH および界面活性剤を含む排水は、活性炭処理により PAH を除去して再利用をし、現地への適用時の廃水処理および界面活性剤のコストについての考慮もされている。

5.3 研究への取り組み

土壌地下水汚染に関する環境関連技術の習得の他、環境先進国ドイツでの研究姿勢について学ぶことも研修目的の一つであった。研修先の VEGAS での研究の大きな流れは現地への適用を目標として、室内試験による基礎的な研究から、開発へと進み、技術センターでの研究と同様である。VEGAS では幾つかのプロジェクトが並行して行われており、他の研究機関との共同研究という形で進められている。プロジェクトは各種の専門家で構成され、役割の分担がはっきりし、責任範囲が明確になっている。その中で現実的な目標を目指してじっくり議論をして研究を進めていく姿勢が特徴的である。

具体的な目標に向かい、組織的に、まじめに取り組む環境が効率的に研究をすることができる理由だろう。

6. まとめ

ドイツはどのようにして環境先進国となったのか？環境問題に対する意識の高さは、政府が行ってきた環境教育にあり、環境教育を受けてきた世代が行政を動かし、先進的な環境保全政策を推進していると言われている。確かに、全体に環境意識は高いのだが、特別高いのではなく、多くの人たちは極めて経済的な理由で行動していると思う。例えば、ごみを回避することは個人の負担が減るということである。

研究に対する姿勢に関しては、積極的に議論を行い、意見交換をすることで、質の高い成果を上げることができるのだと思う。

このような環境で研修を行い、ドイツの文化、人を知り、日本を再度理解する貴重な体験ができたと思う。