PCB汚染土壌の浄化技術 ジオスチーム$_{TM}$法

Remediation Technology for PCB-Contaminated Soil

佐藤　岳史　　高柳　周二
■ SATO Takeshi　■ TAKAYANAGI Shuji

ポリ塩化ビフェニル（PCB）による土壌汚染の問題が顕在化するなかで，将来世代の負担を軽減するためにも，安全で確実な処理施設が求められている。

東芝は，PCB汚染土壌の浄化技術である“ジオスチーム$_{TM}$法”を独自に開発した。この技術は，水蒸気を用いた反応により汚染物質を確実に無害化できるのが特長で，環境省や国土交通省などの各種技術実証実験を通じて安全性や浄化性能について評価を得た。また，（株）テルムは，当社及び（株）鴻池組の支援を受けて，この技術を適用した国内初の拠点型(注1)PCB汚染土壌処理施設を北九州市に建設し，市と環境保全協定を2007年3月に締結した後，同年8月から操業を開始している。

当社の独自技術により散在するPCB汚染土壌の適正処理というソリューションを提供することで社会に貢献していく。

In recent years, problems related to polychlorinated biphenyl (PCB)-contaminated soil have been increasingly manifesting. Safe and dependable remediation technology is therefore required to reduce the burden of environmental protection borne by future generations.

Toshiba has developed a technology called "geosteam technology" for the remediation of PCB-contaminated soil. This technology realizes the dependable destruction of PCBs by a chemical reaction using steam. Following the step-by-step verification of this technology by public tests, Term Corporation, in cooperation with Toshiba and Konoike Construction Co., Ltd., has built Japan's first commercial plant for remediation of PCB-contaminated soil in Kitakyushu City. Term Corporation concluded an agreement on environmental protection with Kitakyushu City in March 2007, and started practical remediation in August of the same year.

We intend to continue our efforts for the development of remediation technology to reduce the future environmental burden.

1　まえがき

近年，地球温暖化などの地球環境問題，水環境資源の確保，及び環境修復など，多岐にわたる環境問題がクローズアップされている。そのなかで，環境問題の解決や環境修復への貢献に真摯（しんし）に取り組み，有効なソリューションを提供する企業活動が求められている。

環境修復の重要なテーマの一つに汚染土壌の浄化がある。環境省によるPCB（ポリ塩化ビフェニル）汚染土壌対策ガイドライン策定や，残留性有機汚染物質（POPs）に関するストックホルム条約による国際的な要請などにより，汚染土壌の中でもPCBによるものは，浄化の推進が急務である。PCBはかつて絶縁油や熱媒体として広く用いられていたが，その有害性が明らかになり使用禁止となった物質であり，PCB油やPCBを含む機器は，日本環境安全事業（株）（JESCO）の国内5か所の事業所で廃棄物として処理が進められている。

一方，汚染土壌は廃棄物処理法の対象外でありJESCOでは処理しないため，浄化施設の設立が求められている。しかし，PCBが難分解性であり，徹底した安全性が求められるため，技術的なハードルが高く，実用的な浄化技術が確立されていなかった。

浄化技術は海外でも多く検討されており，米国環境局からは，焼却法，溶媒抽出法，及び化学処理法などが示されている[1]。また，ほかの調査では，化学的脱塩素法などが紹介されている[2]。国内では，2005年度から環境省でPCB汚染土壌浄化技術の実証調査が進められている。しかし，実用化技術は限られており，これまでPCB汚染土壌を浄化できる施設は存在しなかった。

東芝は，PCB汚染土壌の浄化技術である“ジオスチーム$_{TM}$法”を独自に開発し，環境省の実証調査などを経て実用化することに成功した。この技術を適用して，（株）テルムは，当社及び（株）鴻池組の技術支援を受けて国内初のPCB汚染土壌浄化施設を建設し，操業を開始した。

ここでは，ジオスチーム$_{TM}$法及びそれを適用した浄化施設の概要について述べる。

2　ジオスチーム$_{TM}$法

2.1　概要

ジオスチーム$_{TM}$法は，土壌を処理する間接熱脱着プロセス

（注1）　拠点型とは，工場などの汚染土壌発生箇所から汚染土壌を施設に搬入して処理する形式のこと。

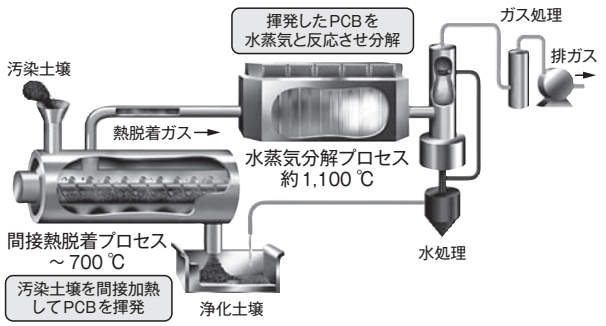


図1. ジオスチーム$_{TM}$法の概要 — 間接熱脱着プロセスで汚染土壌を浄化し，水蒸気分解プロセスでPCBを無害化している。

Outline of geosteam technology

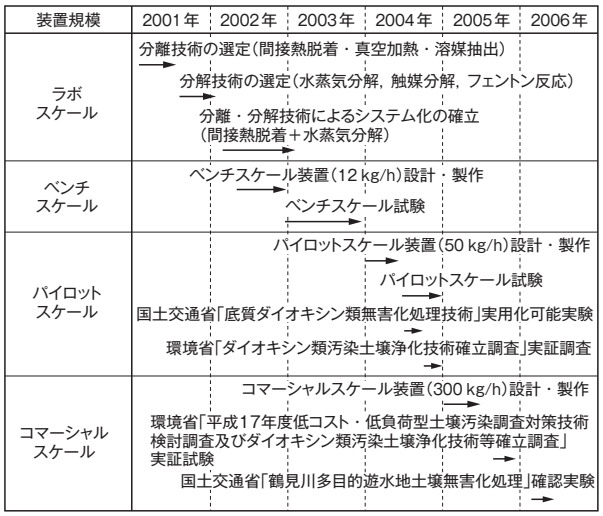


図2. 技術開発の経緯 — 2001年にラボスケールで開発を開始し，段階的に装置をスケールアップして検証を行った。

Progress of research and development of geosteam technology

と，PCBを無害化する水蒸気分解プロセスの主要な2工程から成る技術である（**図1**）。

第1工程の間接熱脱着プロセスでは，汚染土壌を最高700 ℃程度で加熱し，土壌中のPCBを揮発させて土壌を浄化する。土壌が通過する容器の外側から間接的に加熱を行うため，排気ガスの量が少なく，局部的に高温になる部分が生じないなどの特長がある。PCBの濃度や土壌の性状に適した処理条件を設定することで，浄化目標に応じた効率的で経済的な処理ができる。

第2工程の水蒸気分解プロセスでは，間接熱脱着プロセスで揮発したPCBを含むガスを1,100 ℃程度まで加熱する。この温度領域では，PCBは水蒸気と反応して一酸化炭素，水素，及び二酸化炭素などに分解され，無害化される。ガスの加熱は電気ヒータで行われるため，PCBの分解性能に重要な温度や反応時間の制御が容易で，安定した性能を発揮できる。また，反応に使用する水蒸気は，汚染土壌に含まれていた水分が間接熱脱着で揮発したものを利用するため，外部からPCB分解用の薬剤などを添加する必要がないシンプルなシステムとなっている。

2.2 開発の経緯

ジオスチーム$_{TM}$法の開発経緯を**図2**に示す。2001年に開発を開始し，PCBを土壌から分離する技術や，分離したPCBを分解する技術を選定する実験をラボスケールで行った結果を基に，分離技術として間接熱脱着プロセスを，分解技術として水蒸気分解プロセスを選定した。その後，間接熱脱着プロセスと水蒸気分解プロセスを接続した，処理量が1 kg/hのラボスケール装置を用いた実験でシステム検証を行い，良好な処理性能が発揮されることを確認した[3]。

2002～2003年には，処理量が12 kg/hのベンチスケール装置を用いて総計2 tの処理試験を行った。また，2004年には，処理量が50 kg/hのパイロットスケール装置を用いて，国土交通省の「底質ダイオキシン類無害化処理技術」による実用化可能実験，及び環境省の「ダイオキシン類汚染土壌浄化技術確立調査」による実証調査を行い，公的な技術評価を得た。

2005年には，更に規模を拡大した処理量が300 kg/hのコマーシャルスケール装置を，北九州市エコタウン実証研究エリアに設置し，環境省の「平成17年度 低コスト・低負荷型土壌汚染調査対策技術検討調査 及び ダイオキシン類汚染土壌浄化技術等確立調査」により，土壌搬送から無害化処理，処理後土壌の再利用までを含めたトータルシステムとして，浄化技術が実用化レベルにあることを示した。また，国土交通省の「鶴見川多目的遊水地土壌無害化処理」では，有機物や含水率の多い土壌なども処理が可能であり，技術の適用範囲が広いことを明らかにした。

2.3 浄化性能

2.2節で述べた各装置のスケールに応じた処理性能を比較

表1. 各スケールでの装置処理性能の比較

Comparison of performance of test plants

項目		ラボスケール	ベンチスケール	パイロットスケール	コマーシャルスケール
装置規模	(kg/h)	1	12	50	300
間接熱脱着プロセス	汚染土壌 PCB濃度 (mg/kg)	100	60	1,200～11,000	9.3～11,000
	浄化土壌 PCB濃度 (mg/kg)	1.1	0.18	0.002～0.006	0.01～0.03
	除去率 (%)	98.9	99.7	99.9995～99.99998	99.89～99.9997
水蒸気分解プロセス	熱脱着ガス PCB濃度 (mg/m^3)	19	16.5	79～3,000	500～24,000
	水蒸気分解ガス PCB濃度 (mg/m^3)	0.00011	0.0011	0.0016～0.0051	0.0001～0.0021
	分解率 (%)	99.9994	99.9993	99.998～99.99993	99.99997～99.9999991

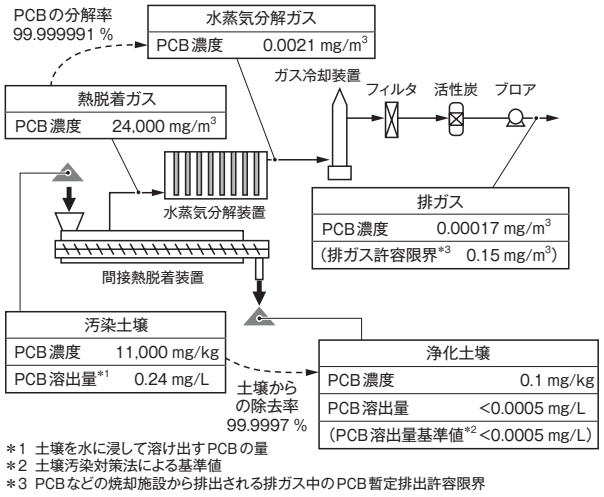
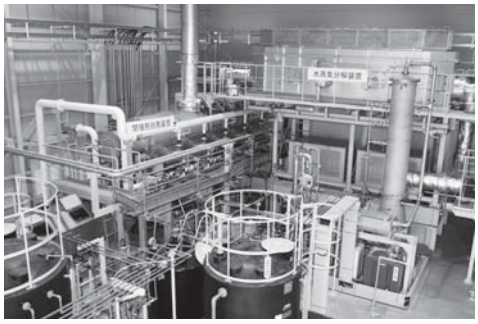


図3. コマーシャルスケール装置での浄化試験結果 — PCB溶出量が環境基準値以下という高い浄化性能が証明された。

Results of remediation test of commercial-scale plant

(a) 施設全景



(b) 無害化棟内部

図4. 土壌浄化センター — (株) テルムが事業主体となって建設した，PCB汚染土壌を対象とする国内初の拠点型処理施設である。

Soil remediation center

した結果を**表1**に示す。一般に，各種のプラントではスケールアップに伴い，性能に対して想定外の影響が現れる可能性がある。この技術ではスケールアップ時の浄化性能の維持を図るため，装置の形状，大きさ，及びヒータ配置などを流れのシミュレーションによって最適に設計した。各スケールでの処理性能は，スケールが大きくなっても同レベル，又はより高い浄化能力を持っていることが実検証で確認された。更に大規模な設備になっても同様の設計手法を用いることで対応可能であり，処理規模に応じた設備の製作ができると考えられる。

次に，浄化性能の一例として，PCB濃度が11,000 mg/kgの汚染土壌を，コマーシャルスケール装置で浄化試験した結果を**図3**に示す。

第1工程の間接熱脱着プロセスでは，土壌からのPCB除去率が99.999 %以上と高い性能が発揮されており，PCB溶出量が0.0005 mg/L未満という環境基準値を満足する結果が得られている。第2工程の水蒸気分解プロセスでは，フィルタや活性炭を通過する前の水蒸気分解ガスの段階で，既にPCBの排ガス許容限界値を十分下回っており，熱脱着ガスと水蒸気分解ガスを比較したPCBの分解率も99.99999 %以上という高い性能を発揮している。

3　国内初の浄化施設 土壌浄化センター

3.1　概要

2章で述べた各種の実証試験で実用レベルと評価されたことから，(株) テルムは，ジオスチーム$_{TM}$法による汚染土壌処理施設として“土壌浄化センター”を北九州市に建設し，操業を開始した（**図4**）。PCB 汚染土壌を対象とした拠点型処理施設としては国内初となる。

受入れ対象はPCBやダイオキシン類などの汚染土壌で，処理規模は1日当たり約7.2 tである。施設内には汚染土壌保管庫，前処理棟，無害化棟，及び浄化土壌保管庫などがあり，前処理棟では汚染土壌の破砕などの前処理及び無害化装置への投入を，無害化棟では間接熱脱着装置や水蒸気分解装置による汚染土壌の浄化を行う。浄化された土壌は無害化されていることを成分分析などで確認し，セメント原料などにリサイクルされる。

操業開始後2007年12月末までに，全国の5か所から搬入された土壌の処理が完了している。

3.2　環境保全とリスクコミュニケーション

土壌浄化センターは北九州市との環境保全協定に基づいて，徹底した安全対策を実施するとともに，情報公開などによるリスクコミュニケーションに積極的に取り組んでいる。環境への汚染を未然に防止するとともに，地球環境の保全に貢献することがこの事業の目的であることから，環境保全協定では，大気や水質などの環境保全対策，環境モニタリング，及び情報公開などの実施が決められている。

環境保全対策の概略を**図5**に示す。

前処理棟は直接汚染土壌を扱うエリアであり，棟内の圧力を常に外気の圧力よりも低く保つ負圧管理を行い，棟内の空気は常に吸引され，フィルタや活性炭を通して浄化した後に外部に排気される。汚染土壌を棟内に運び込む際は，ドラム缶などの密閉容器に入れたまま運び込む。また，搬入口は同時に2枚以

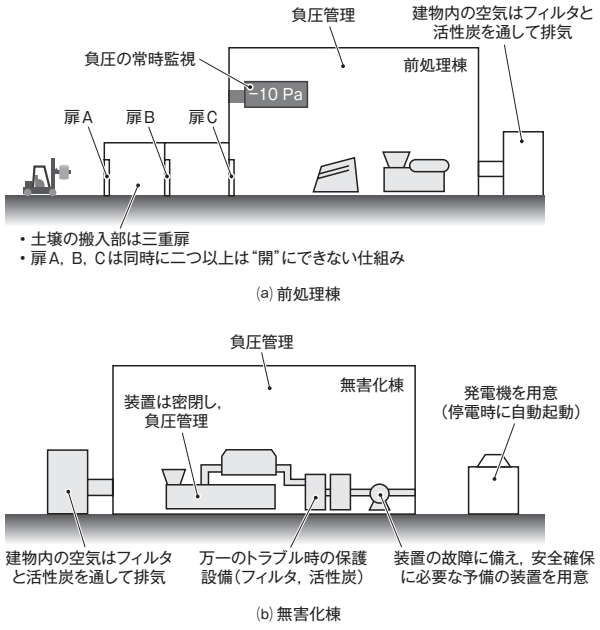


図5. 環境保全対策の概要 — 前処理棟と無害化棟は，汚染土壌やPCBを含むガスが外部に漏えいしないように，各種の環境保全対策が取られている。

Outline of environmental protection countermeasures

上の扉が開かないインタロック機能が作動し，前処理棟の密閉性が確保されている。

無害化棟では，ブロアにより無害化装置内部を負圧に維持し，PCBを含むガスが外部へ漏えいすることを防止している。更に，前処理棟と同様に，建物自体も負圧管理し二重に漏えいを防止している。また，万一の機械故障に備えて排気ブロアなどの重要設備は二重化するとともに，非常用発電機で停電時でも停止しないように対策している。

情報公開に関しては，処理実績や環境モニタリングの結果などをインターネットで公開し，誰でも自由に閲覧できる（**図6**）。また，処理施設を一般公開し，見学者を多数受け入れている。このように，情報公開を積極的に行うことでリスクコミュニケーションを図っている。

図6. インターネットによる情報公開の例 — 運転状況や環境モニタリング結果を公開している。画面は2007年12月現在の内容を示す。

Example of public information dissemination via website

4 あとがき

当社が開発した独自技術であるジオスチーム$_{TM}$法と，その技術を適用したPCB汚染土壌の国内初の拠点型浄化施設である土壌浄化センターについて述べた。

土壌汚染対策法の施行や，CSR (Corporate Social Responsibility)意識の高まり，環境債務計上の義務化などに伴い，土壌汚染に対する社会的な関心が高まってきている。土壌汚染は，重金属や揮発性有機化合物などの化学物質管理が不適切であることから発生する問題である。工場などで特定の施設を改造や廃止する場合には，土壌汚染についての調査が義務付けられており，各企業にとって重要なリスク管理項目となっている。

今後，CSR重視の社会的要求や環境省による対策ガイドラインの策定が進むことにより，PCB汚染土壌浄化のニーズ拡大が進み，安全かつ確実な浄化への対応が急務になると予測される。ジオスチーム$_{TM}$法によるソリューションを提供し環境修復を先導することで，PCB汚染土壌浄化のトップランナーとして，これからも社会の要請に応えていきたい。

文 献

(1) 細見正明. PCBで汚染された土壌や底質の処理技術. 用水と廃水. **35**, 12, 1993, p.37－46.
(2) Smith, M. "Comparative International Study of Soil and Groundwater remediation technologies". Proc. 6th International FZK/TNO Conference on Contaminated Soil. London, 1998-05, American Society of Civil Engineers. 1998, p.9－18.
(3) 轟木朋浩，ほか. 間接熱脱着＋水蒸気分解法によるダイオキシン類汚染土壌浄化技術. 土壌環境センター技術ニュース. **9**, 2004, p.24－29.

佐藤 岳史 SATO Takeshi
社会システム社 水・環境システム事業部 環境システム技術部 主務。環境プラントの設計に従事。化学工学会会員。
Environmental Systems Div.

高柳 周二 TAKAYANAGI Shuji
(株)テルム 環境エンジニアリング本部 環境保全部参事。拠点型PCB汚染土壌処理の業務に従事。環境化学会，エコケミストリー研究会会員。
Term Corp.