

[総 説]

P C B の 处理 技術

Treatment Technologies of PCB

仲 山 伸 次*、小 澤 賢*、興 嶺 清 志*、野 村 寛*

Shinji NAKAYAMA, Masaru OZAWA
Kiyoshi OKIMINE and Hiroshi NOMURA

1. はじめに

PCBの環境汚染問題は、1966年にスウェーデンのS.Jensenが、国内の各地でとれたカワマスなどの魚類やワシなどの鳥類を分析して、その体内にPCBが含まれていることを報告したことに始まった。この報告がもととなって、DDT、HCH等の環境汚染を調査していた研究者たちがPCBの調査を開始し、ヨーロッパ、北米、中米、南米から北極、南極に至るまで各地の島、魚の肉や卵、さまざまな食品類及び人体組織にまでPCBの汚染が広まっていることが報告された。

日本では、1968年2月に鹿児島県日置郡のブロイラー団地で、飼育中の多数のニワトリが一斉に死ぬ事件が起きた。九州、四国、中国等の西日本一帯で同じような現象が起こった。これは米ぬか油の製造工程で副生する「ダーク油」が原因であった。同じ時期に、西日本の各地で身体に吹出物が生じ、手足の痛みやしづれを訴える人が続出し、この原因として北九州小倉区のカネミ倉庫が製造した米ぬか油（ライスオイル）が指摘された。カネミ油症事件である。この事件以降、にわかにPCBの環境汚染に関する関心が高まった。

このような状況下でアメリカのモンサント社は、回収不能な用途向けの出荷を1971年に自主的に停止した。また、1973年にはOECDの理事会に

おいて、PCBの使用を原則的に中止することを決定している。日本においても、1972年4月に三菱モンサント、6月に鐘淵化学工業が生産を中止することになった。また、PCB等の化学物質の安全確保対策を目的として、1973年10月には「化学物質の審査及び製造等の規制に関する法律」（化審法）が公布され、PCBが特定化学物質の第1号に指定された。これにより、PCBの製造及び輸入が禁止されることになった。

しかし、PCBの使用状況とその物理化学的性質のために、現在でもその環境汚染は続いている。また保管しているPCBもかなりの量にのぼり、その処理の問題もなお残されている現状である。厚生省は、1992年9月に各都道府県、保健所設置市に対し、①PCB使用機器（トランス、コンデンサ）、②PCB入り廃感圧複写紙、③廃PCB等を保管している事業所についての保管状況の調査を行った。トランス、コンデンサについては機器の台数において約7%、廃感圧複写紙については重量で約4%が不明及び紛失中であり、今後更に紛失する可能性が考えられる状況となっている。

このような状況下において、適正かつ確実な保管体制の充実が求められるとともに、全体的なリスクを低減するためのPCBの適正処理を進めることが重要となっている。本報告は、適正な処理技術についての知見を得ることを目的として、PCBの処理技術に関する文献をとりまとめたものである。

* (財)日本環境衛生センター東日本支局環境科学部
Department of Environmental Science, East Branch, Japan Environmental Sanitation Center

2. PCB の概要^{1), 2)}

PCB はビフェニルの水素が塩素で置換されたものの総称であり、置換塩素の数と位置によって、計算上 209 種の異性体が存在する。実際の市販品からも 100 を越える PCB の異性体が確認されている。市販品の PCB は全て各種の PCB 単体の混合物であって、単体の PCB とは性状も大きく異なる。アメリカのモンサント社はアロクロール (Arochlor)、フランスのプロデレ社がフェノクロール (Phenolor)、ドイツのバイエル社がクロフェン (Clophen) という商品名で販売を行い、日本では、鐘淵化学によりカネクロール (Kanechlor) の商品名で、またアメリカのモンサント社と提携した三菱モンサント化成からも、アメリカと同様にアロクロール (Arochlor) の商品名で市販されていた。

このような PCB は、①水には不溶性であるが、有機溶媒などとは相互に溶解する、②難燃ないし不燃性である、③化学的に非常に安定である、④絶縁性が高く、電気的特性に優れている、⑤蒸気圧が低い、⑥粘着性に富んでいる、というような性質を有するために、非常に多方面に利用された。まず、第一は電気絶縁性であり、そのために絶縁油としてトランス及びコンゼンサなどにきわめて広く利用された。また、熱媒体としても利用率が高く、200~400°C 程度の加熱を必要とするプロセスで広く用いられた。その他機械油、可塑剤、塗料、複写紙にも利用された。

3. PCB 処理技術の概要

PCB を含んだ廃棄物、排水、土壌等の処理方法は、熱により分解・処理する方法（熱処理方法）とそれ以外の方法（非熱処理方法）に大きく分類することができる。前者の方法は焼却あるいは高温下で PCB を分解する方法である。また後者の方法は、化学反応を利用する方法（化学的処理方法）、物理的方法により処理する方法（物理的処理方法）、生物的に処理する方法（生物的処理方法）等が報告されている。以下に、報告が行われている方法を示し、その概要を簡単に示す。

3. 1 热処理方法

(1) 焼却方法

焼却炉を用いて PCB を処理する方法で、最も広く用いられる商業的にも利用されている。焼却炉としては、ロータリーキルン、セメントキルン、流動床式焼却炉、循環層焼却炉等について、試験及び実稼働を行った結果が報告されている。ロータリーキルンについては、酸素による焼却試験や二次燃焼装置を備えたプラントについても報告されている。また、汚染現場での処理を目的とした、移動型の焼却炉及び洋上焼却についても報告されている。

(2) 触媒燃焼方法

アルミニウム金属及びその酸化物やクロム酸化物 (Cr_2O_3) 等の触媒を用いて、比較的低い温度で燃焼させる方法である。

(3) プラズマ分解方法

プラズマトーチを用いて、1,500°C 程度の高い温度で PCB を熱分解する方法である。

(4) 高温ガス化法

オートクレーブで気化後、1200~1650°F でガス化処理を行う方法である。

(5) 溶融塩 (Molten Salt) 法

廃棄物を炭酸ナトリウムまたはカリウムの溶融浴中に供給し、混合加熱により燃焼 (815~980°C) させる。炭酸塩は生成する塩化水素の除去等の排ガスの浄化の機能を持つ。

(6) 溶融ガラス (Molten Glass) 法

有機物を熱媒体としての溶融ガラスのプール中で分解する方法である。溶融ベット中に飛灰や無機物を取り込み、外部への溶出を防ぐ。

(7) 赤外線燃焼法

シルコ (Shirco) 赤外燃焼炉を用いた PCB 分解方法がある。

(8) 低温熱分解 (LTTS) 法

比較的低温で土壌中の有害物を気化させ、活性炭層に吸着させて処理する方法である。

(9) 水素熱分解法

水素気流中、900°C 以上で熱分解する方法である。

3. 2 非熱処理方法

3. 2. 1 化学的処理方法

(1) ナトリウム分解法

PCBを含む廃液に、ナトリウム懸濁液を加えて処理する方法である。PCB中の塩素をナトリウムで塩として固定することにより、高い分解率を得ることができる。

(2) 水酸化カリウム・PEG分解法

水酸化カリウムとポリエチレングリコール(PEG)を加熱し、PCBを含む土壤や廃油を処理する方法である。また、この方法でコンクリート中のPCBを除去している。

(3) ナトリウム抽出法

PCB含有のトランスを水酸化ナトリウムを用いて抽出し、油を再生する方法である。

(4) 過酸化水素分解法

第1鉄の触媒を用い、過酸化水素によりPCBを含む排水を分解する方法である。

(5) 超臨界水酸化法

超臨界水を反応触媒として、PCB等の有機物を二酸化炭素と水に分解する方法である。

(6) オゾン処理法

オゾンを用いて、有害物質を含む排水を酸化処理する方法である。

(7) 接触還元法

水素化を行い、それに伴う脱塩素化により、PCBを含む絶縁油を炭化水素として回収する方法である。

3. 2. 2 物理的処理方法

(1) 光分解法

光によりPCBを分解し、廃油を処理する方法である。太陽光を用いた方法、半導体(TiO₂)の光増感作用を利用した方法が報告されている。

(2) ガンマ線照射法

ガンマ線を用いてPCBを分解する方法。現在実験室レベルでの検証段階である。

(3) 界面活性剤洗浄法

汚染土壤水のPCBを界面活性剤により洗浄する方法である。

(4) 溶剤抽出法

トリエチルアミンを用いて、廃棄物、スラッジ、土壤からPCBを除去する方法である。

(5) 固型化・固定化法

PCBを含む廃棄物を、セメントキルンダスト

ト、石灰キルンダスト、フライアッシュ、石灰、石こう、ポルトランドセメント等と混和し、固型化・固定化を行い、地下水への溶出を防止する方法である。また、コンクリート中に土壤を埋め込み、土壤を処分する方法も報告されている。

(6) イオン交換法

イオン交換樹脂を用いて、排水中のPCBを除去する方法である。

(7) 鉄沈殿法

第1鉄あるいは第2鉄水酸化物を用いて、排水中のフミン酸を沈殿させ、それへの吸着によりPCBを除去する方法である。

(8) 電解還元法

PCB等を融解させたジメチルホルムアミド溶液を、電解還元により過酸化ラジカルを発生させて酸化分解する方法。

(9) 吸着法

石灰より製造した吸着剤により、廃棄物中の有害物質を吸着し、その後熱分解処理を行う方法である。

3. 2. 3 生物的処理方法

活性汚泥処理、嫌気性消化法等による有害物質の除去及び木材腐朽菌による廃水処理等が報告されている。

4. PCB処理技術

3章の概要で示したPCB処理技術のうち、代表的な技術について以下詳細に示す。

4. 1 焼却処理方法

焼却処理方法は、有害物質を破壊し、また減量化、健康リスクの低減、エネルギー回収及び広い汎用性等の利点を挙げることができる。最も大きな利点は、処理時間が他の方法と比較できないほど短いということである。埋立地等の汚染土壤の処理についていえば、他の方法では何年かかるかわからないことになる。このような理由からアメリカのEPAは焼却法による廃棄物の処理を推進してきた。アメリカにおける焼却炉の数を表-1に示す³⁾。アメリカにおいては、有害廃棄物のう

石灰、
、固
止す
壤を
てい
Bを
、排
によ
ミド
発生
中の
う方
害物
が報
、代
減量
広い
大き
いほ
壤の
るか
アメ
推進
－1
のう

ち全体の1～3%しか焼却処理されていないが、埋立処分に際しては焼却後処分することとしている。現在アメリカにおいては、汚染土壌の処理を目的としたロータリーキルン型の焼却炉の増加がみられる。また、自動車移動型の焼却炉は土壤改良用に用いられ、今後30～40年間に 300×10^9 ドルの市場が見積もられている。

アメリカで最も一般的な有害廃棄物処理に用いられている焼却方法は、液体注入方式とロータリーキルン方式である。ロータリーキルン方式は装置規模が大きい為、固定型で用いられており、液体注入方式は移動型として現地で用いられている。ロータリーキルン方式は大気汚染管理装置を備えているが、液体注入方式はこれを42%の装置で備えているにすぎない。

Schlegel¹⁾らはオランダのラインモント(Rijnmond)に建設したロータリーキルン型の廃棄物焼却プラントについて報告を行っている。このプラントはロータリーキルン、2次燃焼室、熱回収システム及び排ガス処理装置から構成されている。ロータリーキルンにはドラム移送システムにより自動的に廃棄物が注入される。液体廃棄物は2次燃焼室へ液体バーナにより注入され、この注入により温度が制御される。キルンの温度は1,200°C、大きさは内径4.2m、長さ12mである。また、2

次燃焼室の温度は1,000°Cで容量が425m³、高さ15mである。この装置により年間21万トンを処理し、99.999%のPCB分解効率が得られている。

ベルギーの低レベル放射性廃棄物処理センターでは、1974年以来放射性廃棄物を処理するために高温スラグ化焼却プラントを操業してきたが、これを有害産業廃棄物に適用することを検討した。PCBを含む液体の処理に適用し、分解効率は99.9999%以上であった。同センターは新施設を建設し、放射性物質汚染廃棄物と有毒産業危険廃棄物との混合物を処理することを計画した。廃棄物は貯留槽に蓄えた後、コンベヤで破碎機に運ばれ5cm以下に粉碎される。その後混合器に運ばれ、ペーストや汚泥といっしょに攪拌される。混合された廃棄物は、高温スラグ化焼却炉において焼却される。焼却炉は主燃焼室、出口室及び後燃焼室より構成されている。主燃焼室出口の排ガス温度は1,700°Cまで上昇し、廃棄物の温度は1,450～1,650°Cとなる。焼却された溶融スラッジは、炉の底から貯水槽に落とされ粒子状となる。この粒子状スラッジは高温で処理されているために、シリカ、アルミナ、酸化鉄等のアモルファス構造となっており、有害物の溶出をなくすことができる。焼却条件及びPCBの処理結果を表-2²⁾に示す。

Table 1 Estimated numbers of operating U.S. incinerators, treatment capacities, and waste generated^{a)}

Type	Number	Capacity (MMT/year)	Generation (MMT/year)
Hazardous ^{b)}	175	2-3	265
Municipal ^{b)}	200-300	21-47	163
Medical ^{c)}	6850	6	0.7
Radioactive ^{d)}	8	0.007	NA
BLFs ^{e)}	200	1.8-3.8	265
Mobile ^{f)}	65	NA	NA

a: Million metric tons; some values have been converted to MMT/year using 300 operating days per year
b: Numbers operating in 1989
c: Numbers operating in 1991
d: Numbers operating in 1989
e: RCRA-regulated boilers and industrial furnaces expected to be operating after August 1991.
f: Numbers operating in 1990

Table 2 Operational Condition and Test Results of PCB's Incineration

Table 1: Experimental test results of PCB's incineration	
mass flow rate of PCB	248 g/h
air flow rate	1222Nm ³ /h
off-gas flow rate	1272Nm ³ /h
x H ₂ O in off-gases	7.81 x
x CO ₂ in off-gases	8.47 x
x N ₂ in off-gases	75.91 x
PCB mass flow rate in off-gases	0.55mg/h
residence time	1.92sec
combustion temperature	957°C
lambda air factor	1.635
off-gas O ₂ concentration	7.8 x
combustion efficiency	99.99977 x

Table 2:HAWAI operational conditions

main combustion chamber	
flame temperature	>2000°C
residence time at T	0.1sec
mean temperature in the combustion chamber	1700°C
mean residence time at T	0.5sec
corresponding efficiency	99.2%
outlet chamber	
temperature	1300°C
residence time	0.5sec
corresponding efficiency	93.7%
post-combustion chamber	
temperature in 1st zone	1700°C
residence time at T	1 sec
corresponding efficiency	99.99%
temperation in 2nd zone	1300°C
residence time at T	1 sec
corresponding efficiency	99.6%
overall efficiency of the global system:	99.9999998%

アメリカにおいては、トレーラを用いて、現地で廃棄物を処理する可動型焼却システム (Mobile Incineration System, MIS) が、EPAにより1982年から開発が行われてきた。その結果、改良された MIS がホスター・ホイーラエンバイレスポンス社 (Foster Wheeler Enviresponse Inc.) によって製造され、1988年2月から1989年4月にかけて8,930ポンドの汚染された固体及び30,500ポンドの液体廃棄物が処理された。この中には2,150,000ポンドのダイオキシンに汚染された汚泥も含んでいた。装置は4台のトレーラより構成され、焼却炉、サイクロン、2次燃焼室、スクラバ、湿式電気集じん器から構成されている。スクラバーから排出されたガスは、高さ40フィートの煙突から排出される構造となっている⁹⁾。

焼却の範囲に入るかは判断の分かれるところであるが、赤外線を利用した PCB 除去装置として、Wall¹⁰⁾はシルコ (Shirco) 赤外システムについて報告している。この装置は移動型であり、焼却設備、後燃焼設備、排ガス処理設備、煙突、コントロール室等より構成されている。廃棄物は金属で織んだベルトコンベヤで赤外線炉に搬入される。約18~19分で焼却は終了する。その後排ガスは後燃焼室で燃焼生成物等を焼却し、無害化する。後燃焼室の温度は1,900°Fで、滞留時間は

3秒間である。排ガス処理装置としては、ベンチュリースクラバ、吸着塔、ミスト除去装置を備えている。この装置の処理量は100トン/日であり、フルスケールのプラントである。PCBを5~100ppm含む原料を焼却し、生成した灰中の PCB は1ppm以下であり、分解除去効率は99.99931%であった。

発生ガスの2次燃焼を用いる逆燃焼ガス化法¹¹⁾は、廃棄物処理方法の Chem Char プロセスとして特許となっている。固体、液体、汚泥、土壤等の有害物質を含む廃棄物を熱化学的に処理する方法である。有機物は燃焼性ガスにより変化し、乾燥、不活性な炭素に富んだ固体となる。固体はセメントとすみやかに混合されて取り除かれる。なお連続式は現在開発中である。ガス化の為に、反応塔に石炭・木炭及び廃棄物の混合物を充てんする。脱塩化水素反応の水素源となる水を、蒸気として酸化塔に混入する。逆燃焼ガス化は酸化ガス層に移動と供に酸素表面で行われる。図-1は反応帯の先端及びその中で起こっている熱化学反応について示されている。

平山は燃焼法による有害廃棄物処理の総論の PCB 処理に関する項の中で、兵庫県高砂市の鐘淵化学高砂工業所内における PCB 処理の概要及び通産省の機械安全・無公害化委員会の PCB 使用電気機器の処理に関する分科会の報告について述べている^{9),10)}。高砂工業所における PCB 焼却実験については環境庁が報告した内容を引用している。

Combustion zone Oxidation, Pyrolysis	Carbon + O ₂ → CO Carbon + O ₂ → CO ₂ 2CO + O ₂ → 2CO ₂
Combustion/Starved Air Partial Oxidation, Pyrolysis	Volatile Wastes + O ₂ → CO ₂ + H ₂ O Volatile Wastes + Heat → Pyrolysis Products
Primary Reduction Zone Gasification, Pyrolysis	Carbon + H ₂ O → CO + 2H → CO + H ₂ Carbon + CO ₂ → 2CO CO + H ₂ O → CO ₂ + 2H Volatile Wastes + H → HX-Free Radical (ex: Halogenates Wastes) Carbon + 2H → CHH ^{2H} → CH ₄
Secondary Reduction Zone	

Figure 1: Thermochemical Reaction zone
Showing Pertinent Gasification
Reactions of the Oxidant with
Sorbed Wastes and Carbon

アメリカにおいて、近年の焼却処理技術は一般的に有害廃棄物に対して、99.99%の分解率、そしてPCB及びダイオキシンに対しては、99.9999%の分解効率が要求されている¹⁰。また、安価な装置の開発が現在の方向性でもある。EPAのリスクリダクション工学研究所（Risk Reduction Engineering Laboratory）では、有害廃棄物焼却について5種類の新しい技術について報告を行っている。それは酸素富化燃焼法（Oxygen-enriched incineration）、循環床燃焼法（Circulating bed combustion）、ロータリー樽焼却法（Rotary barrel combustion）、プラズマアーク焼却法（Plasma arc incineration）及び赤外焼却法（Infrared incineration）である。現在初めの2法は商品化され、限られた範囲ではあるが実際に稼働している。酸素富化燃焼法は、通常燃焼に用いている空気の代わりに酸素を用いる方法である。ユニオンカーバイド社（Union Carbide Corp.）は、酸素富化バーナーを開発し、このバーナーを用いての処理システムがアメリカンコンバッシュン社（American Combustion Inc.）により開発され、現在に至っている。この方法の利点は、焼却の滞留時間の増加、燃料消費の低減、排出管理の容易さ等を挙げることが出来る。循環床燃焼法は、従来ジーエー

テクノロジー社（GA Technologies）により開発されたが、現在オグデンエンバイロメンタルサービス社（Ogden Environmental Service Inc.）が所有している。この方法の利点は、ロータリーキルンや液体注入法より低い温度で稼働でき、NOx等の生成を少なくすることが可能である。現在オグデンは2つの移動型のプラントを保有し、1つは85,000トンのPCB汚染土を処理している。もうひとつは100～150トン/日の処理量で、土壤を処理している。

プラズマを熱源とした熱分解システムは、カナダのロイヤルミリタリー（Royal Military）大学で5年間にわたり、実験室レベルでのプラントを用いて検討が行われてきた¹¹。このシステムは、還元性の状態で高温（10,000°C）で熱分解を行う。そのために高い分解率を示し、また還元雰囲気での熱分解であるために、ダイオキシン等の酸素含有熱分解生成物の発生を防ぐことができる。また、熱分解であるために装置のスケールを小さくすることが可能であり、12kg/分程度の処理量のプラントを15mトレーラに積載することが可能となった。そのプラントの装置図を図-2に示す。1982年にカナダのパイロリシスシステム社（Pyrolysis Systems Incorporated, PSI）は、ニューヨーク

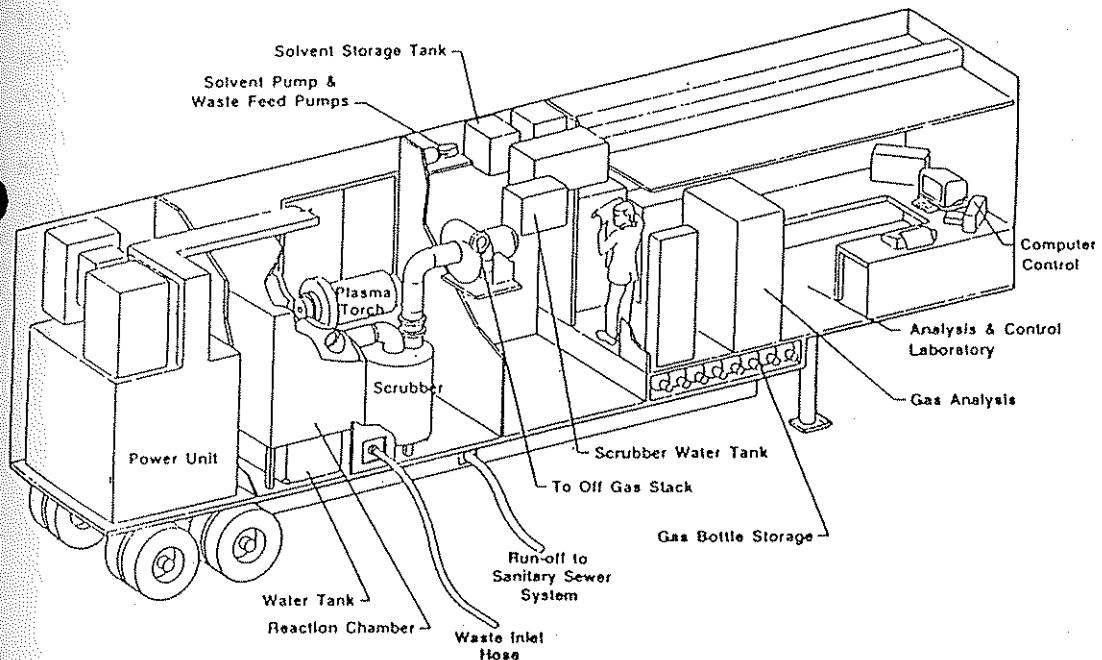


Figure 2. Pyroplasma Trailer Schematic

州環境保護部 (New York State Department of Environmental, NYS DEC) と共同で 4 kg/分規模のプラントを建設し、ラブキャナルにおいて実験を行った。1985 年に PSI はウエスチングエレクトリック社 (Westing Electric Company) と共同出資でウエスチングプラズマシステム社 (Westing Plasma Systems) を設立し、この技術の商業化を目指した。この装置は、プラズマトーチにより加熱される。75kW パワーの電極により低圧空気の媒体で電気アークが形成され、10,000°C の高温を得ることができる。廃棄物は直接このプラズマのフレーム中に投入される。この装置は比較的低いエネルギー (1 Kw/kg 以下) で高い分解効率を得ている。分解ガスは、50% が水素、30% が一酸化炭素、15% が窒素であり、残りはメタン、エチレン等の低濃度炭化水素である。この装置を用いてメチルエチルケトン/メタノール溶媒に溶かしたアスカレル (アロクロール 1254/1260、トリクロロベンゼン溶液) を用いて処理テストを行っている。結果及び生成ガス組成の測定結果を表-3 に示す。

Morris ら¹³は PCB 汚染土壤の処理について、低温熱分解 (Low Temperature Thermal Separation, LTTS) システムについて報告を行っている。本実験は、アメリカエネルギー省、マルチエンジニアリングシステム社 (The Martin Energy Systems) 及びアイティ社 (IT Corporation) の共同事業で行われたものである。LTTS システムは、汚染土壤を間接的に加熱して土壤中から有機物を分解するシステムで、焼却法と同等の結果が得られる報告

している。汚染土壤は 7 ~ 70kg/時の割合でスクリューフィーダにより熱分解器 (Thermal separator) に導入される。熱分解器は連続回転式の円筒 (室) より構成され、内径 6.5インチ、長さ 14 フィート 7/8 インチの大きさで 1.6 ~ 16 rpm で回転している。外部に炉室があり耐熱性の構造物で出来ており、14 本のバーナーが設置されている。燃料は天然ガスまたはプロパンガスを用いている。このバーナーによる熱量は、最大 340,000 k.joule / 時であり、熱分解器内部には最大 110,000 k.joule / 時の熱量が供給される。焼成温度として 760°C ~ 820°C となる。処理の滞留時間は 5 ~ 50 分であり、これは廃棄物中の水分等により異なる。処理後土壤はコンテナ中に排出され、また熱分解容器内には窒素ガスが封入され、PCB 等の有害物質は除去される。除去された有害物質はアルカリスクラバ、冷却コンデンサ、ミストセパレータ、ヘッフィルター吸着塔などの処理装置を経て、大気中に放出される。この装置は、50 ppm 程度 (37.35 μg/g) の汚泥土壤中の PCB を、2 ppm 以下に処理することが可能である。

Manahan ら¹⁴は石炭ガス化装置を用いて、PCB、重金属等を吸着した活性炭を処理し、この活性炭の再生利用する方法について報告している。このシステムにおいて発生するガスは一酸化炭素及び水素であり、これを熱源として用いることによりエネルギー収支はプラスになる。石炭ガス化システムで PCB を処理すると、99.95% 以上の分解率が得られ、また再生活性炭を価格は 0.20 ドル/ポンドであり、これは市販の価格の約 1/5 になると

Table 3. PCB Test Results of Pyroplasma Planet

Test (#)	Mass (%)	Input (kg/hr)	Air (mg/hr)	Output Water (mg/hr)	Total (mg/hr)	DRE (%)
3	14.1	23.9	0.65*	4.09	4.73	99.999997
4	14.1	18.8	2.00	10.16	12.16	99.999994
5	11.5	19.8	6.96	18.76	25.72	99.99996
6	14.3	18.0	0.43*	0.41	0.84	99.999998
7	12.5	17.5	0.02*	93.12	93.14	99.999999
8	12.8	16.9	0.03*	19.56	19.59	99.999999
9	17.5	26.7	0.33	0.75	1.08	99.999999

*number reported is analytical detection limit

報告している。

Moles ら¹⁵⁾は、ボルテックスコンバスター (Vortex Combustor) と呼ばれる FCT インシネレーション社 (FCT Incineration Ltd.) により開発された焼却炉について報告している。この装置は、空気、燃料、廃棄物の混合が充分に行われれば、焼却効率が高くなるという考え方に基づいて設計されている。空気が焼却炉の接線方向に導入され、燃料と廃棄物の混合物が炉内にスプレーで注入される構造となっている。(図-3 参照) これにより、炉内は焼却物が完全に混合される状態となる。また、炉室の壁は燃焼空気が壁伝いに流れることにより焼却物の付着物を除くことができ、このことは維持管理費の低減をもたらしている。この装置を用い、焼却温度 1,000°C、過剰空気 15%、滞留時間 2 秒の条件下で、燃焼ガス中の PCB 等の濃度は 1.5mg/m³ 以下であると報告している。

4. 2 化学的処理方法

Jain¹⁶⁾は超臨界流体を用いた有害廃棄物の処理について総説を書いている。その概要は次の通りである。

超臨界水による酸化反応器 (SWO) は、テキサコケミカル社 (Texaco Chemical Company) により有機有害物質処理用として初めて開発され、超臨界抽出法 (SFE) と並んで化学兵器、都市ゴミ、汚染土壌、化学工場からの廃棄物処理を目的としたパイロットプラントが、企業、大学等に設置されている。超臨界流体は高い溶解性および強い酸化作用に特徴があり、また SWO 反応器は反

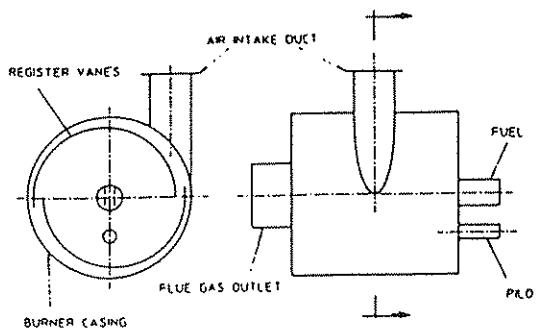


Figure 3. Schematic of the Essentials of Vortex Combustion

応生成物の排出を抑制でき、また有害な副生成物が少ないと報告の中で述べている。超臨界流体としては、水（臨界点 274°C、218 気圧）及び二酸化炭素（臨界点 31°C、73 気圧）が広く用いられている。SWO において、廃棄物は水が臨界状態になるまで加圧、加熱され、水に溶解した物質は酸素と結合する。(図-4 参照) 酸化プロセスの最終生成物は水と二酸化炭素であり、一酸化炭素は微量で、NOx、SOx は不検出である。SWO はダイオキシン、PCB、ベンゼン、DDT 等の有害物質を減少させ、その分解効率は 99.99% 以上である。このシステムはクローズドシステムであり、有機有害物質の排出抑制が可能である。

また、低い温度で操作 (500~600°C) するために、燃料費が少なくてすむ利点がある。

モダール社 (Modar Incorporated)、モデック社 (Modec Incorporated)、エコーウエイストテクノロジー社 (Eco-Waste Technologies) 等は SWO のパイロットプラントを作っている。中でもエコーウエイストテクノロジー社はアメリカ軍との共同事業により、24 時間稼業で 20 l/分規模のプラントを作り、化学兵器や固体ロケット燃焼の処理を行っている。

MODAR 酸化プロセスは、超臨界水を用いて、有機物を酸化する方法であり、酸化生成物は、二

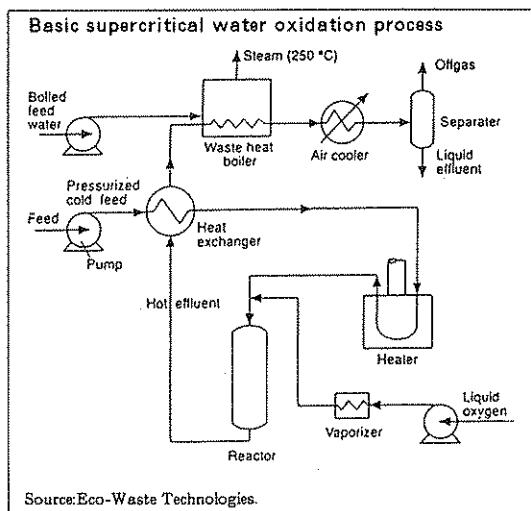


Figure 4. Basic Supercritical Waste Oxidation Process

酸化炭素と水である。ハロゲンはハロー酸に変化する。一方、無機物は塩類として安全に廃棄できる。本法の特徴はこのプロセス自体の酸化反応のエネルギーで反応が行われ、また窒素酸化物生成よりも低い温度である為に、NO_x等の汚染物質の排出を押さええることができる点にある。そして、この方法により化学的に安定なPCBも高率で分解することができる。1985年の夏にバッファロー(ニューヨーク州)のセコスインターナショナル社(CECOS International Inc.)及びヒューストン(テキサス)のモダー社は、廃棄物処理用のパイロットプラントを建設した。モダープロセスは次のようなプロセスから構成されている²¹⁾。

- (1) 水中の有機廃棄物を、大気圧下ポンプで反応容器に移す。
- (2) 液体酸素をポンプで反応容器に注入し、ガス化する。あるいは空気を圧力をかけて注入する。
- (3) 熱量を4200kJ/kgに最大値を保つために、希釈水を加えるか、廃棄物の発熱量調整を行う。
- (4) 水素の廃棄物で4200kJ/kg以下の場合、燃料を加える。
- (5) ヘテロ原子を含む有機廃棄物の場合、腐食剤を加える。
- (6) 水が超臨界状態の場合、酸化物は溶液と完全に混合する。
- (7) 塩類は、臨界水に対する溶解度が低い為、

分離し除去する。

- (8) ガス状生成物は、上部より除く。
- (9) 残留物はCO₂と超臨界水であり、冷却後除く。

このシステムは、190lの有機性廃棄物及び950lの水溶性廃棄物(有機物10%)の処理が可能である。PCB含有の絶縁油の分解実験を行った。PCB(Aroclor 1260)濃度は1,600mg/lで、95時間の運転で330lの絶縁油の処理を行った。処理効率として、99.995%を得ている。

超臨界抽出(SFE)については、石油化学の分離・精製やコーヒー工場でのカフェインの抽出等で用いられてきたが、ウェスティングハウスハンフォード社(The Westing House Hanford Company)やフェイジャー社(The Phasey Corporation)は5kg程度の処理が可能なプラントを作り、PCBで汚染されたジーゼル油や土壤の処理に用いている。高温、高圧中でSCF(二酸化炭素)を汚染土壤と混合することにより、有害物質を溶かし出し、その後温度、圧力を低下させることにより二酸化炭素はガスとなり、汚染物は沈殿し除去される。このプラントを車で現場に運び、そこで処理された土壤を現場に再びもどすことができる。現在の問題点としては、スケールアップすることによる効率の低下がみられ、この方面での技術開発を必要としている。製造コストについては、反応容器に特別な合金を用いる為に高くなるが、焼却炉と同程度のコストであると報告している。

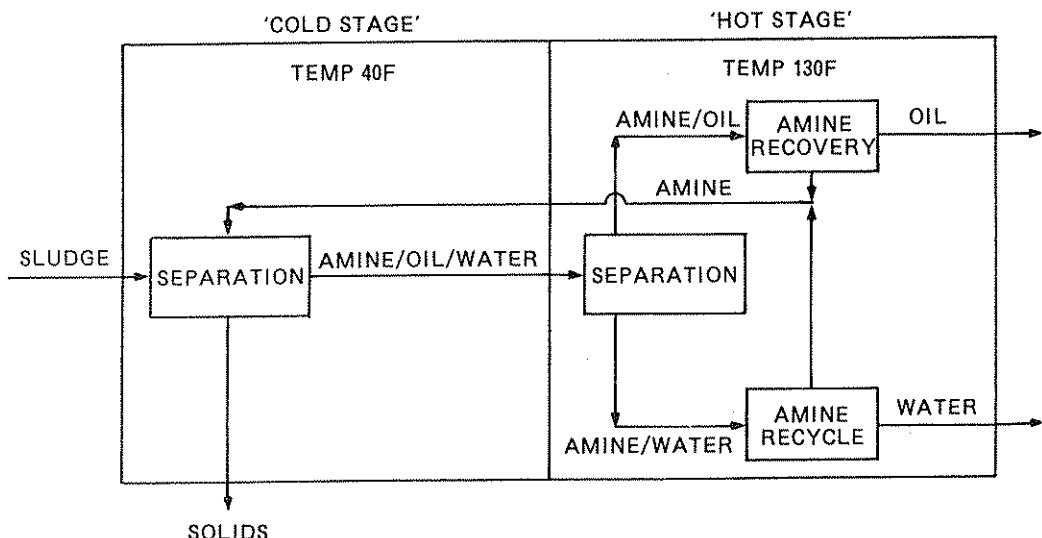


Figure 5. BEST™ Separation

有害物質を含む汚泥や汚染土壤を処理するための新しい方法として、脂肪族アミン（トリエチルアミン）を溶媒として用いて、処理水と再利用可能な乾燥土壤とに分離する方法として BESTTM 法¹⁷が報告されている。BESTTM法はリソーセスコンサザベーション社 (Resources Conservation Co., RCC) により開発、特許が得られた方法である。図-5に BESTTM 法の冷却段階と加熱段階の工程を示す。冷却段階で汚染土壤をアミンと低温下 (20°C以下) で混入する。この温度で、水と炭化水素はアミンに溶解する。固体は分離された後乾燥を行う。アミンはアルカリ性 (pH 約 10) があるので金属類は水酸化物として沈殿し、固体といっしょに排出される。加熱段階の初期ではアミン/水/オイル系は 70°C以上で加熱され、アミンとオイル/水層は分離される。RCC により作られたシステムは、70 トン/日の処理能力を持っている。この処理は、大気圧、pH、温度が通常に近い条件で設定され、またクローズドシステムで処理されるために、有害物質の環境への放出はない。本システムを用いて汚染土壤中の PCB を 99%以上処理することができたと報告されている。

PCB の化学処理法として古くから報告されている方法として、水酸化カリウム・PEG 法 (KPEG 法) を挙げることができる。この方法は 1978 年にフランクリンリサーチセンター (Franklin Research Center) により、新しい PCB 分解試薬として開発され、PCB 含有オイルの脱塩素化処理に用いられてきた。Lauch 等¹⁸は、水酸化カリウムとポリエチレンジリコール及びジメチルスルホキシドを助溶剤として用い、PCB 汚染土壤の処理実験を行い、95%以上の分解率を得ている。

THF 溶液中でナフタレンと金属ナトリウムを用いて PCB を処理するグッドイヤー (Good Year) プロセスは、金属ナトリウムを使用するために取り扱いに危険を伴う。ナイアガラモホーク社 (NMPC、請負はギャルソンリサーチ社) の開発した NMPC プロセスはグッドイヤープロセスと工程は同じであるが、金属ナトリウムを使用せずに水酸化ナトリウムを使用している。ゼネラルエレクトリック (GE) の研究者¹⁹は、アルカリ金属/アルコールの使用により PCB は分解できることを報告している。GRC によるテストでは水酸化カリウム/グ

リコール試薬を用いて、PCB 含有オイルを 2ppm 以下に処理することができた。しかしテストでの反応時間はおそい (6~7 時間、500 ppm → 2 ppm) 結果となり、採算性からは問題点が残っている。PCB を直接反応試薬に添加した場合と、トランスのオイルを添加した場合とを比較すると、反応時間は後者が遅くなる。これを振動させることにより反応率の向上が得られている。同様に、オイル層から試薬層への PCB の移行を進めるための添加剤についての検討も行っている。ジメチルスルホキシドのようなスルホキシド、スルホラン及びエチレンジアミンのようなアミンを検討対象とした。アミンは反応生成物等に毒性、発がん性の危険性があり、そのためにジメチルスルホキシドを添加剤として用いることとした。その結果、30 分で 2 ppm 以下に処理することが可能となった (図-6 参照)。これらの検討を基に、1 バッチ当たり 7600 l 処理可能なプラントを建設した。このプラントは 1985 年 12 月より稼働している。その概要を図-7 に示す。

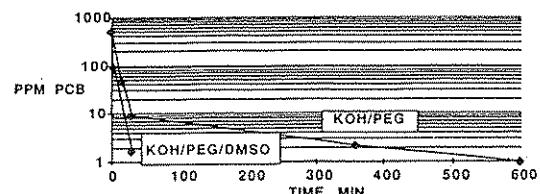
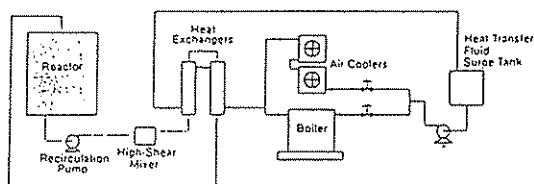


Figure 6. Effects of DMSO Addition on Reaction Rate of PCB 1254 in Transformer Oil



Basic diagram shows how Nipgara Mohawk PCB-removal process works. Heavy line at left traces path of PCB-contaminated oil, while lighter line at right shows cycle of heat transfer fluid.

Figure 7. Schematic of Full-scale Oil-treatment Prototype

Table 4. Hazardous Waste Treatment Results with Sodium

	before the treatment	after
chlorinated benzenes from this trichlorobenzenes	98.7 % 83.2 %	<0.1ppm
chlorinated phenols	0.51%	
PCDD's	250.32ppm	
PCDF's	19.72ppm	<0.5ppb
water	0.8 %	

	before the treatment	after
chlorinated benzenes	3.1 %	
HCH	0.3 %	<0.1ppm
PCB	200 ppm	
Sum DD	0.1 ppm	<0.5ppb
Sum PCDD/PCDF	65 ppm	

Bilger²⁰は、金属ナトリウムを用いたPCB分解技術について報告している。有機塩素化合物は、生成した塩化水素と金属ナトリウムが反応し、塩化ナトリウムを生成する。この反応を利用して、廃油等の処理に適用することができる。適用例としては、埋立地からの流出油、トランス油、分解油、ブレーキ油、切削油、廃油、残渣等を挙げている。処理例とし化学工場の反応残渣及び埋立処分場の油に対して適用した結果を表-4に示す。この方法は5%以下の水分含有量ならば処理が可能であり、水分が多い場合でも適当な抽出方法との組合せにより適用できる。

Zhangら²¹は、触媒を用いて電気化学的に還元性脱塩素化を行うことによりPCBを分解する方法について報告を行っている。触媒の存在下で界面活性剤によりミセル状となった塩素化合物は、電気化学的に脱塩素化をもたらす。この界面活性剤としてセチルトリメチルアンモニウムプロマイド(CTAB)を用いた報告もされているが、Zhangらはより疎水性のジドデシルジメチルアンモニウムプロマイド(DDAB)を界面活性剤として用いて検討を行っている。触媒としては亜鉛フタロシアニン(ZnPc)を用いているが、ニッケルフタロシアニンテトラスルホン酸(NiPcTs⁴⁺)等につ

いても検討を行っている。電気分解は鉛電極を用い、超音波で混合し25℃に保温可能な容器内で行った。この中に20mlのDDAB、ドデカン、水の混合物(21、57、22%、マイクロエマルジョン)及び触媒を入れて実験を行った。脱塩素化率として99~99.8%を得ている。

4. 3 物理的処理方法

紫外線照射によるPCB、農薬及びその他の有機化合物の処理について、分解生成物、溶媒効果、反応性等についての実験室レベルでの研究が報告されている。Ruzo他²²はPCBの多くの異性体のうち、テトラクロロビフェニルについての光分解実験を行っている。0.005モルのヘキサンあるいはメタノール溶液を、298~310℃で10~15時間照射を行った。塩化水素の生成が認められ、脱塩素化PCBのメタノール誘導体の生成が確認できた。またメトキシ化したPCBの生成は5%以下であった。

J.F.Kitchens²³らは、アトランティックリサーチ社(Atlantic Research Corporation)により開発された方法であるが、PCBを含む溶媒中に水素雰囲気下の還元状態で、赤外線(254nm)を用いてPCBを脱塩素化しビフェニールとする方法を、LARCプロセスとして報告している。土壤はメタノールあるいはプロパンノールで3回抽出した後、水酸化ナトリウムを0.1%溶解させた後処理する。抽出効率は1,100μg/gのPCBを含む試料に対して、アロクロール1242については88%の効率で、また3回抽出を行うことにより99.8%の抽出効率を確保できた。純PCBはアルカリイソプロパノールに溶解した後処理を行っている。2,000ppmのPCBを含む液を840ガロン/日で処理できるパイロットプラントを試作した。処理コストについては、焼却法と同等であると報告している。

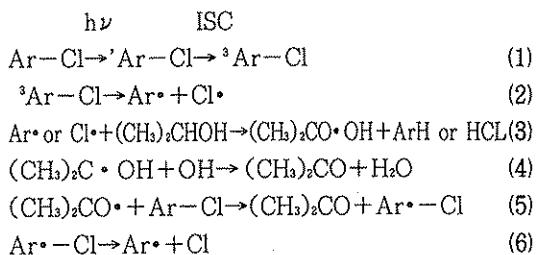
また西脇は²⁴は、KC-300を2-プロパンノール中で100W高圧水銀灯を用いて照射実験を行った。反応生成物としてビフェニル、塩化ナトリウム、アセトン、ピナコールが認められている。PCBに対するアルカリの相対濃度は1以上ある必要があり、中性状態に比べて、アルカリ添加により量子収率が0.1から40と400倍になった。この西脇

の方法を基にして、Hawari らは光増感剤としてフェノチアジンを添加することにより、太陽光でも分解できることを報告している。PCB は 300nm 以上の波長では高い吸収帯がない。従って通常の状態では、太陽光では低い分解率しか得られない。従来より、アミン、ホウ素水素化物、アルカリアルコール、ハイドロキノン等が光脱塩素反応の光増感剤として用いられてきた。光増感剤を用いることにより長い波長域において高い収率を得ることが可能となる。Hawari ら²⁶は、PCB に汚染した土壤 5 g を内径 2 cm のカラムに充てんし、この中をアルカリ性 2-プロパノール溶液 40 mL を、1 mL/分の流速で流すことにより、土壤中の PCB を抽出している。この抽出液に 5 ミリモルのフェノチアジンを添加し、太陽光あるいは 350nm の光反応装置 (Rayonet photoreactor, RPP-100) を用いて光照射を行っている。太陽光では 20 時間で分解し、光反応装置では 2 時間で分解している。結果を表-5 に示す。なお、土壤においてはフルボン酸やフミン酸が同様に抽出され、これらの成分は 0.1 モル/L 濃度の水酸化ナトリウムであらかじめ洗浄することとしている。この

Table 5. Photolysis of PCBs in Alkaline/2-Propanol

substrate ^{a,b}	time, h	λ , nm	quantum yield, (dechlorination%)	Φ
Aroclor1254	sun	20	(25)	
Aroclor1254 ^d	sun	4	(100)	
Aroclor1254	254	0.5	(100)	35.0
Aroclor1254 ^d	350	1	(100)	2.33
soil	350			0.02
soil ^d	350	2		0.28
soil	254	55		0.67
soil	sun	20	(30)	
soil ^d	sun	20	(100)	

^aAroclor 1254 was a commercial sample (1000 mg/L). ^bThe soil was contaminated with 730 mg/L Aroclor 1254. ^cCalculated at 20% conversion and based on the Cl⁻ release. ^dIn the presence of phenothiazine (5 mM).



方法による生成物はビフェニルであり、また反応に用いた 2-プロパノールは広く溶剤として利用されているものであり、また生物分解する物質であることから、環境保全の意味で安全な処理法であると報告している。この光反応については、次のような反応式で説明している。

このように光分解については、多くの増感剤の存在下により有機塩素化合物が脱塩素化を起こすことが報告されている。Ohashi ら²⁷は、脂肪族アミン（トリエチルアミン）を用いて 4-クロロビフェニルを 300nm の紫外光により、70 時間で 71% の分解率が得られたことを報告している。また Nordblom ら²⁸は、芳香族アミン、トソプトファン、エチルアミンを光増感剤として用い、4, 4'-ジクロロビフェニルを 310nm の紫外光を用いて分解している。Occhinocci ら²⁹はトリエチルアミンを同様に用い、254nm の紫外光に還元分解することを報告している。その他 Chaudhary ら³⁰は、ハイドロキノンを用いた報告を行っている。また Stallard ら³¹は、増感剤としてメチレンブルー やトルイジンブルー等のチアジン化合物を用い、反応促進剤として、強いアルカリ金属の水酸化物（水酸化カリウム）、溶剤として N,N-ジメチルホルムアルデヒド (DMF) 又はジメチルスルホキシド (DMSO) を用いて、また還元反応の水素供与体としてプロパンを用いて実験を行っている。図-8 に PCB 分解の実験の結果を示す。この実験の反応については、図-9 に示す反応式が報告されており、この実験を基に計画しているトランク油中の PCB 処理装置の工程図を図-10 に示す。

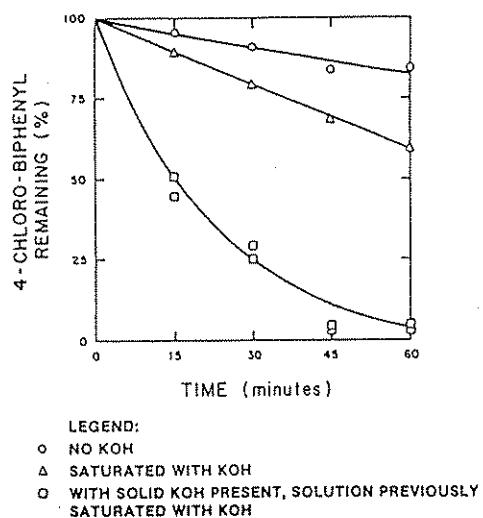


Figure 8. Effects of Sensitized Photolysis

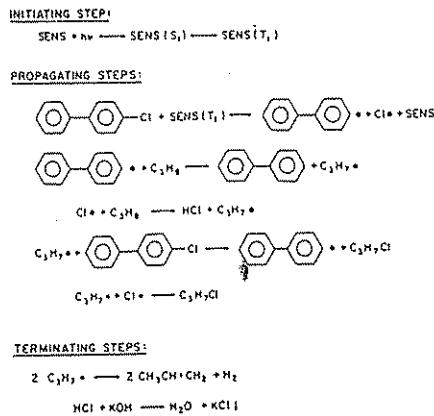


Figure 9. Proposed Mechanism for Photochemical Dehalogenation of 4-Chlorobiphenyl in Polar Aprotic Solvent

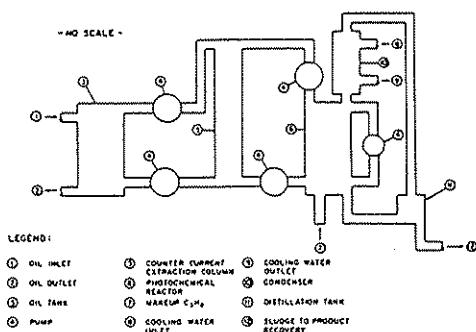


Figure 10. Simplified Schematic of PCB-Contaminated Transformer Oil Processing Facility

PCBを含む廃棄物の処理技術としては、埋立処分及び焼却処理が広く用いられているが、これらの方法は、完全に汚染を取り除くことは困難であり、100%保障することはできない。また焼却方法は、管理が不充分な場合に、より有害な物質を排出するおそれがある存在する。ソリデック社(Soliditec Inc.)の廃棄物固定化技術は、スーパー・ファンド改善技術検討(SITE)プログラムの一環として行われた。PCB等で汚染された土壤や廃棄物スラッジケーキ等にポゾラン物質と水を加えて混合し、固定化する方法である。汚染土及びスラッジケーキとオイルスラッジを等量に混合した後、スクリーンにかけ大きな石等を取り除く。水を加えてさらに均一に混合し、ポルトランドセメントや他の添加剤を加える。ミキサーから1ヤード四方の合板ヤードに移され固形化される。この固形化物は23日間室内に静置後、埋立処分される。この実験は1989年の12月から始まり、5日間で14year^dの土壤を処理した。固形化物に対して短期間抽出試験、長期浸出試験等を実施し、PCBは0.21～0.90 μg/l以下で検出されなかった。

有害物質で汚染された土壤やスラッジを改質するために、次のような新しい方法が報告されている。装置は土壤乾燥機とガス分離システムより構成されている。乾燥機はロータリーキルン中で、土壤を200～450°Cで直接加熱し、水分や有機物を蒸発させ分離する。乾燥した土壤等はそのまま排出される。ガスはガス分離システムに送られ、有害物質は濃縮、凝縮される。乾燥機を出たガスは、水スクラバーでダストが取り除かれ、そして熱回収装置で冷却(4°C)されて水分や有機物は凝縮する。水分は排出されまた有機物は後処理のために排出される。115トン/日規模の処理プラントを用いてPCB汚染土壤を処理した。このプラントでの処理効率は、99.3～99.4%であった。この装置の概要を図-11²²に示す。

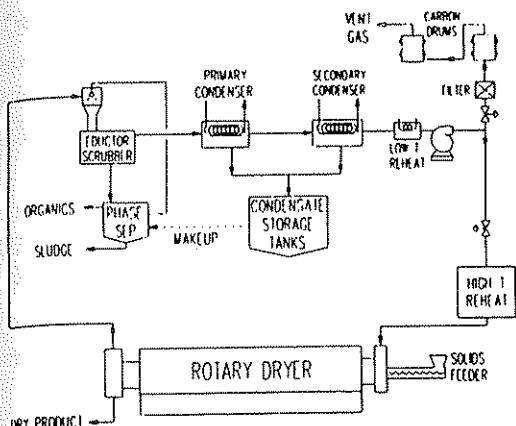


Figure 11. Process flow Diagram of Soil Treatment Facility

4.4 生物的処理方法

生物的に有害有機物質を無機化し、二酸化炭素や水に分解するために、微生物（バクテリア、菌類、藻類）が用いられている。特にバクテリアが用いられてきたが、DDTやPCBについては、それほど効果的ではなかった。PCB等については脱ハロゲン化を促進する菌として、白腐敗菌 (*Phanerochaete chrysosporium*) が有効であるとの報告が行われてきた。Lueyら³³には、この菌を木材のチップの上に増殖させ、それを土壤と混合して処理を行う実験を行っている。この方法の利点は、①混合することにより土壤が好気性となる、②汚染質と菌との接触を効率よく行う、③栄養源を添加する、の3点である。

和田³⁴は、バイオテクノロジーによる廃棄物処理方法について総論の中で PCB の処理技術として、シュードモナス菌の遺伝子操作による PCB の安息香酸への分解について報告している。Flanaganら³⁵は、嫌気性下での PCB の微生物分解について報告を行っている。ハドソン川の PCB で汚染された底質の分析を行い、クロロ安息香酸 (CBAs) や 2, 3-ジハイドロ-2, 3-ジハイドロキシ-2'-クロロビフェニルや 2, 3-ジハイドロキシ-2'-クロロビフェニルを検出し、これらが PCB 分解の中間生成物であるとし、その分解過程を図-12に示した経路により説明している。すなわち生分解のメカニズムの初めは、2, 3 位の 2 酸化物生成があり、クロロ-2, 3-ジハイドロ-2, 3-ジハイドロキシフェニルを生成する。さらに分解し、クロロ-2, 3-ジハイドロビフェニルを生成し、次いで水酸化リングの開裂により、クロロ安息香酸及び 5 炭素フラグメントを生成する。

Kirkら³⁶は、活性汚泥法及び嫌気性消化を備えた廃水処理システムにおける微量汚染物の挙動について報告を行っている。水中の PCB の除去率は 90%以上であり、活性汚泥における濃縮率は 15.2 倍以上であった。回収汚泥の PCB の分布は次の通りであった。

原汚泥 mg/kg ($\mu\text{g/l}$)	遠心分離汚泥 mg/kg ($\mu\text{g/l}$)	上澄み液 mg/kg ($\mu\text{g/l}$)	ろ液 mg/kg
2.55(57.1)	2.67(169)	2.24(3.1)	0.37(0.8)

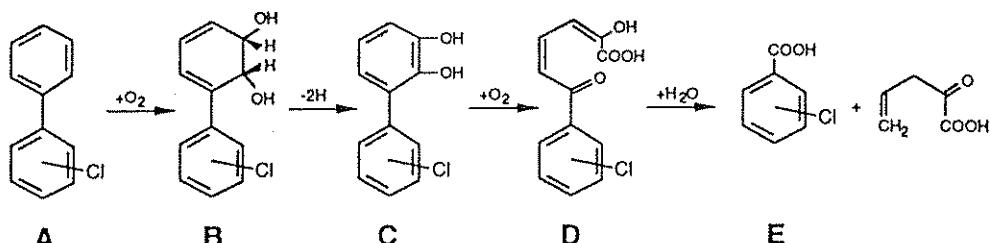


Figure 12. Biodegradation of Chlorobiphenyls by the 2,3-Dioxygenase Pathway

PCBは水に対する溶解度が低く、また蒸気圧も低いために、生物あるいは非生物粒子に多く分配されることになり吸着等により底質に沈着する。Brownらは、ハドソン川の底質から塩素位の転移し、メタ、パラ位の塩素が取れてオルト位に塩素が結合した低塩素化物のPCBを検出している。Alderら²⁰は、実験室レベルでのPCBの生物的脱塩素化について報告している。PCBの脱塩素化は、主に還元雰囲気のメタル発酵条件下において起こる。硫酸塩還元雰囲気下では脱塩素化は起こらないという報告もあるが、例えばクロロフェノールの生物分解は硫酸塩の存在下で起こるとの報告もある。これについてAlderらは、その場の炭化水素等の条件により選択性が生じるとの意見を述べている。ハドソン川の底質等を用い、メタン発酵条件、硫酸塩条件を変えて、100～400ppmのアロクロール1242及び1260を添加し、この挙動について検討を行った。その結果、1～2ヶ月後にアロクロール1242の脱塩素化がみられ、トリ、テトラ、ペンタクロロビフェニルの減少、ジ、モノクロロビフェニルの増加が認められている。

Baxterら²¹は、生物分解と光分解を組み合わせたPCBの分解についての報告を行っている。生物分解には分解菌ショーダモナス(菌種7509)を用い、生物分解後水銀ーキセノンランプを用いて光分解を行っている。生物分解において2,4'-ジクロロビフェニルは、ジハイドロジオール(I)→ジフェノール(II)→ハイドロキシオキソ(クロロフェニル)クロロヘキサジエン酸(II)→クロロ安息香酸(IV)に変化する。この過程で光分解が関与するとIIIの生成物から塩素化アセトフェノンが生成する。この反応は自然界でも起こっているのではないかと推定している。

参考文献

- 1) PCB: 日本化学会編, 丸善, 昭和55年
- 2) 環境化学物質要覧: 環境庁環境化学物質研究会編, 丸善, 昭和63年
- 3) E·Malone Stevenson: Provoking a Firestorm: Waste Incineration, Environ. Sci. Technol., 25, 1808-1814
- 4) R.Schlegel: Rotary Incineration for Low Emissions, Mod. Power Syst., 8, 23-25 (1988)
- 5) R.Vanbrabant, N.Van de Voorde: High temperature slagging incineration of hazardous waste, P0999A PB Rep., No. PB-88-113360 PAGE, 35-42 (1987)
- 6) Gopal Gupta: Mobile incinerator for toxic waste, Environ. Sci. Technol., 24, 1776-1777 (1990)
- 7) H.O.Wall: SITE demonstration of Shirco Infrared Incinerator, P0999A PB Rep., No. PB-89-118335, 1~16 (1988)
- 8) L.L.Klnner, A.McGowin, S.E.Manahan, D. W.Larsen: Reverse-Burn Gasification for Treatment of Hazardous Wastes: Contaminated Soil, Mixed Wastes, and Spent Activated Carbon Regeneration, Environ. Sci. Technol., 27, 482-488 (1993)
- 9) 平山直道: 燃焼・有害物質から見た廃棄物処理技術, 第2回環境工学連合講演会講演論文集, 52-58, 昭和62年
- 10) 平山直道: 日本における有害物質を含む廃棄物の処理技術に関する最近の諸問題, 都市清掃, 40, 15-21, 昭和62年
- 11) D.Fusaro: Incineration technology: Still hot, getting hotter, Chemical Processing, 26-32 (1991)
- 12) Michael F.Joseph, Thomas G.Barton: Pyrolysis of Hazardous Wastes with a Mobile Plasmas ARC System.
- 13) M.I.Morris, E.S.Alperin, R.D.Fox: Physical /Chemical Treatment of Mixed Waste Soil's.
- 14) Stanley E.Manahan, Shubhender Kapila, Chris Cady: Destruction and Immobilization of Metal-Contaminated PCB Sludges by Gasification on an Activated Char from Subbituminous Coal
- 15) F.D.Moles, E.H.Matthews, B.G.Jenkins, P. J.Mullinger: The Destruction of Hazardous Wastes in a Mobile Incinerator, 47-52 (1991)
- 16) V.K.Jain: Supercritical Fluid Tackle Hazardous Waste, Environ. Sci. Technol., 27, 806-808 (1993)
- 17) H.O.Wall, S.Rosenthal: SITE (Superfund

- Innovative Technology Evaluation) Demonstration of the Shirco Infrared Incinerator, PB89-118335, 1-12 (1989)
- 18) R.Lauch, B.B.Locke, M.Dosani : Evaluation of Treatment Technologies for Contaminated Soil and Debris, P099A PB Rep., PB-90-127200, 1-12 (1989)
- 19) G.P.Adams, R.L.Peterson : Non-sodium Process for Removal of PCBs from Contaminated Transformer Oil, Presentation at the 79th Annual Meeting of Air Pollution Control Association, 86-88. 4, (1986)
- 20) Dr.Bilger : Detoxification of Organic Liquids Using Sodium/Dehalogenation of Harmful Substances, Contaminated Soil, 943-94 (1988)
- 21) Cal N.Staszak, William R.Killilea : The Destruction of Hazardous Organic Waste Materials Using the MODAR Oxidation Process.
- 22) Shiping Zhang, James F.Pusling : Dechlorination of Polychlorinated Biphenyls by Electrochemical Catalysis in a Bicontinuous Microemulsion, Environ. Sci Technol., 27, 1375-1380 (1993)
- 23) E.M.Sworzyn, D.G.Ackerman : Interim guidelines for the disposal/destruction of PCBs and PCB items by non-thermal methods, PB Rep No PB-82-217498, (1982)
- 24) J.F.Kitchens, G.L.Anspach and W.E.Jones, III : LARC for destruction of PCBs in oil and soil, Am. Chem. Soc. Natl. Meet. Div. Environ. Chem., 21, 93, (1981)
- 25) 西脇徹 : 光を利用した PCB の分解 : 有機合成化学, 39, 228, (1981)
- 26) Jalai Hawar, Attila Demeter, Rojean Samson : Sensitized Photolysis of Polychlorobiphenyls in Alkaline 2-Propanol : Dechlorination of Aroclor 1254 in Soil Samples by Solar Radiation, Environ. Sci. Technol., 26, 2022-2027 (1992)
- 27) M.Ohashi, K.Tsujimoto, K.Seki : Photoreduction of 4-Chlorobiphenyl by aliphatic amine, J.Chem. Soc., 12, 384 (1973)
- 28) G.D.Nordblom, L.L.Miller : Photoreduction of 4,4'-Dichlorobiphenyl, J.Agr. Food Chem., 22, 57-58 (1974)
- 29) G.Occhiucci, A.Patacchiola : Sensitizer Photodegradation of Adsorbed Polychlorobiphenyls (PCBs), Chemosphere, 11, 255-262 (1982)
- 30) S.K.Chaudhary, R.H.Mitchell, P.R.West : Photodechlorination of Polychlorinated Biphenyls in the Presence of Hydroquinone in Aqueous Media, Chemosphere, 13, 1113-1131
- 31) Robert M. Baxter, Dale A. Sutherland : Biochemical and Photochemical Process in the Degradation of Chlorinated Biphenyls, Environ. Sci. Technol., 18, 608-610 (1984)
- 32) W.E.Grude, Jr : Evaluation of the Soliditech Solidification/Stabilization Technology, P0999A PB Rep, PB-90-127200, 176~188 (1989)
- 33) R.J.Ayen, C.Swanstrom : Development of a Transportable Thermal Separation Process, Environ. Progress, 10, 175-181 (1991)
- 34) J.Luey, T.M.Broans, M.L.Elliott : Biodegradation of Hazardous Waste Using White Rot Fungus : Project Planning and Concept Development Document, P0998A US DOE Rep., PNL-7534, 1-29 (1990)
- 35) 和田安彦 : バイオテクノロジーによる廃棄物の処理, 環境技術, 16, 306-311 (1987)
- 36) William P.Flanagan, Ralph J.May : Metabolite Detection as Evidence for Naturally Occurring Aerobic PCB Biodegradation in Hudson River Sediments, Environ. Sci. Technol., 27, 2207-2212 (1993)
- 37) P.W.W.Kirk, J.N.Lester : The Behaviour of Chlorinated Organics During Activated Sludge Treatment and Anaerobic Digestion, Wat. Sci. Tech, 20, 335-359 (1988)
- 38) Alfredo C.Alder, Max M.Haggblom, Stephanie R.Oppenheimer, L.Y.Yong : Reductive Rechlorination of Polychlorinated Biphenyls in Anaerobic Sediments, Environ. Sci. Technol., 27, 530-538(1993)

Summary

Polychlorinated biphenyls (PCBs) possess many useful characteristics. But unfortunately, these chemicals can enter the human body by the food chain and cause adverse reproductive effects, developmental toxicity and tumor development in humans. And because of these health and environmental hazards, the use and disposal of PCBs is stringently regulated.

But in 1992 Ministry of Health and Welfare of Japan has reported that about 7% of storaged transformers and electrostaic capacitors were missing. Therefore the establishment of PCB Treatment Technology has became emergency measures.

This paper describes the outline of PCB Treatment Technologies to be of help to evaluate these technologies. Typical treatment options and examples listed in this paper are as follows : thermal incineration treatment options, physical treatment options, chemical treatment options and biological treatment options.