

# 不燃液のリサイクル

## A Study on Recycle of a Non-flammable Fluid

田中 義久\*  
Y. Tanaka

板橋 悟\*\*  
S. Itahashi

神庭 勝\*\*  
M. Kamba

菅沼 紀美夫\*\*  
K. Suganuma

### Synopsis

We have been commercializing a non-flammable capacitor which uses SF<sub>6</sub> gas as an insulating gas, but it is well known that SF<sub>6</sub> gas is one of the greenhouse effect gases and the use of it will be restricted strictly. In order to develop a non-flammable capacitor without using SF<sub>6</sub> gas, we decided to choose a new fluid called "Perfluorinated polyether (PFPE)" as an impregnant. We believe our new all-film capacitor immersed by PFPE is most reliable for the high-voltage power applications.

In this paper, we will focus on the technologies regarding the recycle and recovery of PFPE from the capacitor.

## 1. ま え が き

フィルムコンデンサに用いられる含浸材には、アルキルジフェニルエタン（以下ADE）などの芳香族炭化水素系合成油、またはSF<sub>6</sub>ガスに代表される絶縁用ガスが使用されており、現在これらの含浸材を用いたコンデンサが市販されている。

芳香族炭化水素系合成油は、塩素を含まない純粋の芳香族炭化水素であるため、鉱物油、植物油と同様、自然界に放出された場合の生分解性が良い長所がある反面、可燃性の欠点を持つ。

一方、SF<sub>6</sub>ガスは不燃性の長所がある反面、自然界に放出された場合の生分解期間（大気中の寿命）が長期間である欠点を持ち、地球温暖化などの環境汚染の観点から、世界で使用を規制する動きが活発化し、地球温暖化防止京都会議（COP3）において、1995年を基準年として順次排出規制することが決定された<sup>(1)(2)(3)(4)</sup>。

このような情勢の中、当社では、不燃性で環境に影響を与えない含浸材を適用したコンデンサの開発を進め、このたび不燃液体パーフルオロポリエーテル（以下PFPE）を用いたフィルムコンデンサを開発した。

しかし、PFPEもまたSF<sub>6</sub>ガス同様に自然界に放出された場合の生分解性がなく、PFPEをリサイクル（回収

および再利用）することは自然界への放出を抑制し、環境を保護する観点から極めて重要である。

本稿では、コンデンサからの回収技術についての検討結果を報告する。

## 2. PFPE の一般特性

### 2・1 物理化学、電気特性

表1にPFPEの代表的特性値をADEならびにSF<sub>6</sub>ガスと比較して示す。

表1 PFPE, ADE ならびに SF<sub>6</sub> ガスの特性比較<sup>(5)</sup>  
(25℃, 0.1 MPa)

項目	PFPE	ADE	SF <sub>6</sub>
引火点(℃)	なし	148	なし
燃焼点(℃)	なし	160	なし
沸点(℃)	200	285	-
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.79	0.99	0.0061
動粘度(×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)	2.4	7.0	2.6
比熱(kcal/kg)	0.23	0.42	0.14
蒸発潜熱(kcal/kg)	15	83	13
比誘電率	1.9	2.5	1
誘電損失(1 kHz)	2 × 10 <sup>-4</sup>	2 × 10 <sup>-4</sup>	-

\* 技術開発センター 機能材料開発グループ  
\*\* エネルギー事業部 調相システム部

PFPE は一般的に次のような特徴を有している。

- (1) 引火・燃焼点がない(不燃性)。
- (2) 密度が大きい。
- (3) 動粘度が低い。
- (4) 蒸発潜熱が低い。
- (5) 誘電率が低い。

### 2・2 蒸気圧特性

図1にPFPEの蒸気圧曲線をADE, 水と比較して示す。

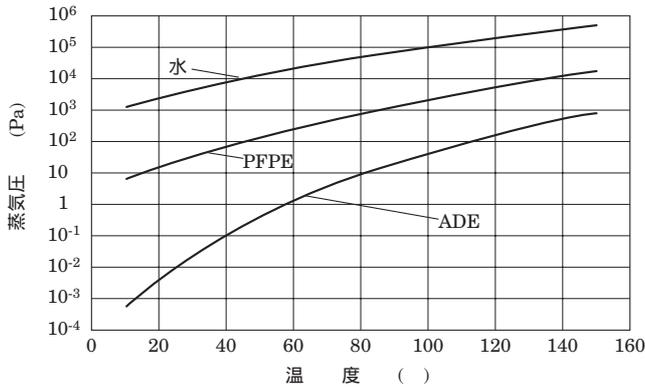


図1 蒸気圧曲線

図1より, 20 におけるPFPEの蒸気圧は, ADEに比べて3桁高く水に比べて2桁低く, 合成油と水の間に位置することがわかる。

## 3. PFPE の回収

### 3・1 PFPE のコンデンサ材料への作用形態

コンデンサ内部を構成する材料にはポリプロピレンフィルム(以下PPフィルム), アルミニウム箔, 絶縁補強紙, 対地絶縁材プレズボード(以下PB), 編組線, および放電抵抗があり, それぞれに対するPFPEの作用形

態を知ることがPFPEの回収方法を選定する上で重要である。

それぞれの材料がPFPEと共存下で加熱された場合の形態変化について, 重量変化ならびに寸法変化により評価を行なった。

結果の一例を表2に示す。加熱温度80, 加熱時間30Hrの場合において絶縁補強紙, PB以外の材料はすべて0.0%の重量変化となっており, 材料内部への浸透はないと理解される。また, 寸法変化もすべて0.0%となっており, 材料分子への浸透(膨潤作用)もないと理解される。

表2 コンデンサ材料への作用

項目	重量変化(%)	寸法変化(%)
PPフィルム	0.0	0.0
アルミニウム箔	0.0	0.0
絶縁補強紙	+25.8	0.0
PB	+19.0	0.0
編組線	0.0	0.0
放電抵抗	0.0	0.0

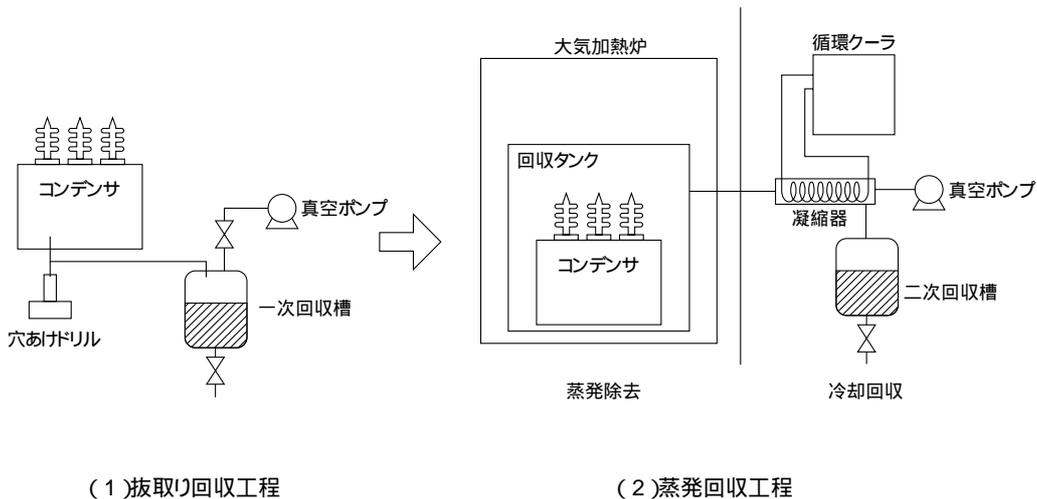
このように, コンデンサ材料への作用形態としては, 形態A: 材料表面への物理吸着 [PPフィルム, アルミニウム箔, 編組線, 放電抵抗]

形態B: 材料表面ならびに材料内部(繊維間)への物理吸着 [絶縁補強紙, PB]

の2形態があり, すべて物理吸着によるものである。

### 3・2 回収条件

PFPEの作用形態が物理吸着によるものであることから, その回収には前述した蒸気圧が高い特性を活かした方法が最も効率が良いと判断される。図2は蒸気圧を利



(1) 抜き取り回収工程

(2) 蒸発回収工程

図2 回収システム概略フロー

用した回収フローを示したものであるが、図から分かるように回収率を向上させるには、抜き取り回収に加えて蒸発回収を行い、物理吸着したPFPEを材料から蒸発除去（脱離）し、それを凝縮器において冷却回収（凝縮）する必要がある。

したがって、回収条件は、

- (1) 除去率：PFPEの吸着量に対する除去量の割合
  - (2) 回収率：PFPEの除去量に対する回収量の割合
- の両者（ともに重量法による）でコンデンサ材料の作用形態A、Bについて評価することとした。以下に試験結果を示す。図3に使用した試験装置を示す。

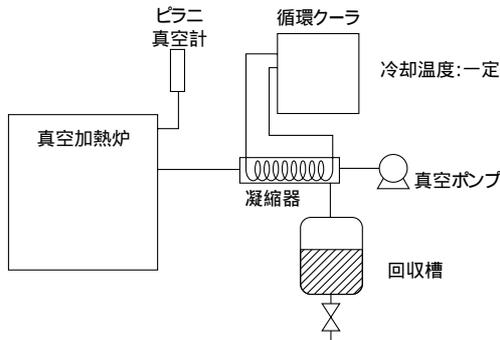


図3 試験装置

(1) 除去率

形態A：材料表面への物理吸着品の検討

図4に、PPフィルムならびにアルミニウム箔を巻回したコンデンサ素子、編組線、放電抵抗のPFPE吸着品の加熱時間と除去率の関係について試験した結果を示す。

除去率は100%に達する条件が最低限必要であると判断され、その条件は図4に示すように、加熱温度100、加熱時間2時間である。

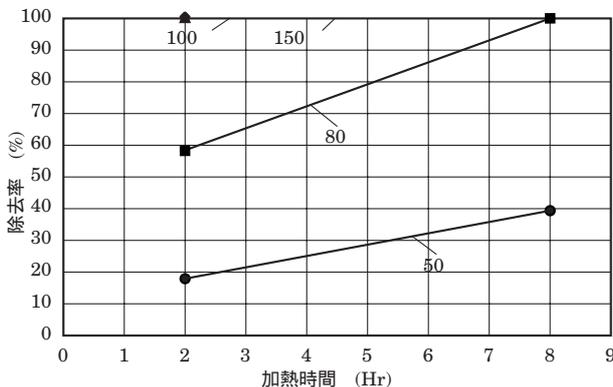


図4 (コンデンサ素子 + 編組線 + 放電抵抗) の除去率

形態B：材料表面ならびに材料内部への物理吸着品の検討

絶縁補強紙、PBでの加熱時間と除去率の関係を図5に示す。加熱温度100、加熱時間2時間で100%の除去率が得られた。

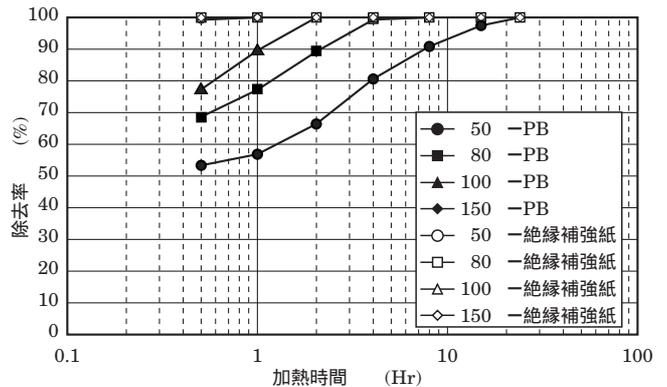


図5 PBおよび絶縁補強紙の除去率

また、図6に代表的な排気曲線のパターンを示す。PFPE付着の試料がある場合に変曲点A、Bが真空圧力100Pa近傍に見られ、これと図1との照合により、PFPEの蒸発除去が50Pa近傍から進行していることがわかる。

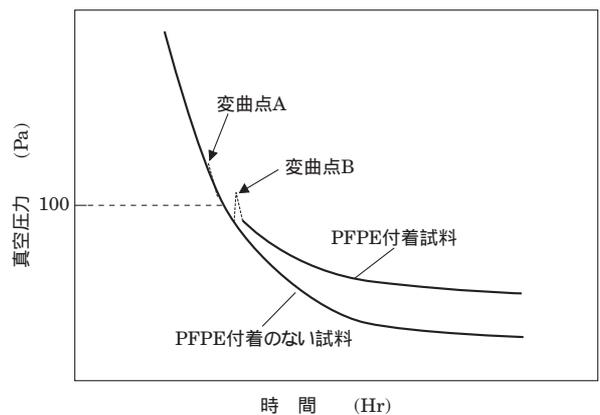


図6 代表的な排気曲線

以上から、100%の除去率を得る最適条件は100以上であるとの結論を得た。

(2) 回収率（凝縮器の冷却温度を15一定とした場合の回収）

形態A：材料表面への物理吸着品の検討

図7にコンデンサ素子、編組線、放電抵抗の加熱時間と回収率の関係を示す。

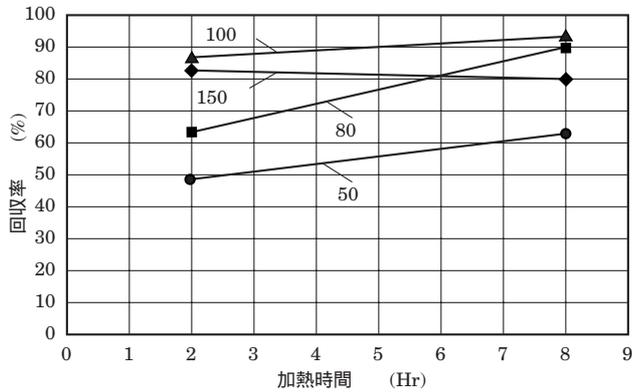


図7 (コンデンサ素子 + 編組線 + 放電抵抗) の回収率

回収率を少なくとも90%以上にする条件は加熱温度100, 加熱時間8時間であった。

形態B: 材料表面ならびに材料内部への物理吸着品の検討

図8に絶縁補強紙, PBの加熱時間と回収率の関係を示す。

加熱温度100, 加熱時間24時間で90%近い回収率が得られた。表面のみに吸着した形態Aに比べて, 長時間の加熱が必要であることが判明した。

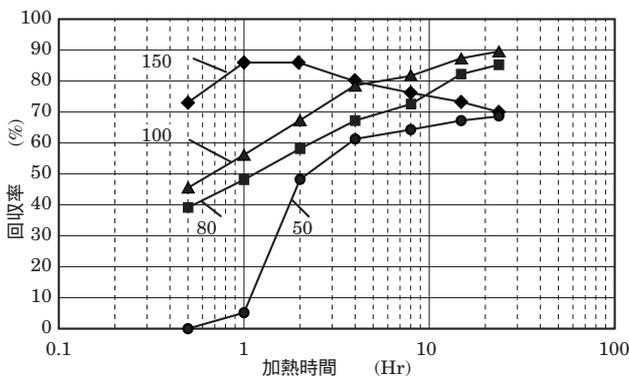


図8 (絶縁補強紙 + PB) の回収率

(1)(2)より, 除去率, 回収率の両者に最適な温度条件は100 であるとの結論を得た。

### 3・3 コンデンサからの回収

コンデンサからの回収は,

工程1 コンデンサからの液抜取り

工程2 コンデンサからの蒸発回収

に分けられ, 後者は前述の回収方法により行う。

#### (1) コンデンサからの液抜取り

抜取りにより回収されるPFPEは全量に対して50%強と少ないため, 工程2における回収が非常に重要となる。

#### (2) コンデンサからの蒸発回収

大気加熱炉内のコンデンサと図3に示す真空加熱炉を配管で接続し, その加熱時間と除去率, 回収率の関係を求めた。図9に結果の一例を示す。蒸発回収工程における除去率は100%, 回収率は90%近くに達している。

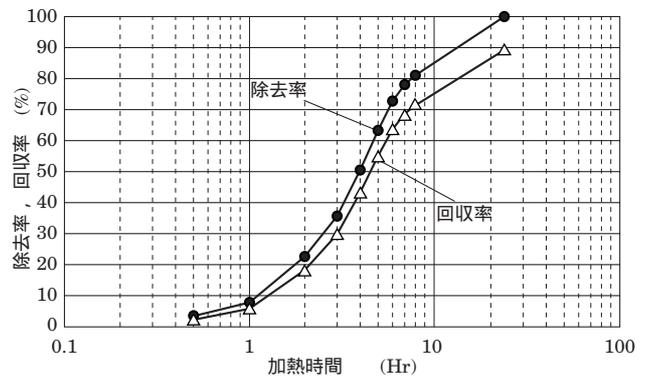


図9 コンデンサの蒸発回収工程における除去率, 回収率

表3は工程1, 2をまとめて示したものである。コンデンサからの回収率はPFPE全量に対して94%にまで達していることが確認できた。

表3 コンデンサからの回収 (重量法により評価)

工程	PFPE全量に対する回収率(%)
コンデンサからの液抜取り	55.4
コンデンサからの蒸発回収	38.4
+	93.8

除去率が100%であることから, 残る6%の未回収分は, 凝縮器等の表面に物理吸着している以外に, 真空ポンプの油に混入・凝縮していると理解される。

さらには回収装置を, 図10に示すように

(1) 凝縮器の段数を2段以上にする

(2) 凝縮器の冷却温度を下げる

(3) 二次回収槽を凝縮器の冷却温度以下で冷却することにより (真空ポンプへ到達するPFPEを減らす) 回収率は100%近くにまで向上し, PFPE全量に対して99%以上の回収が実現可能であると考えられる。

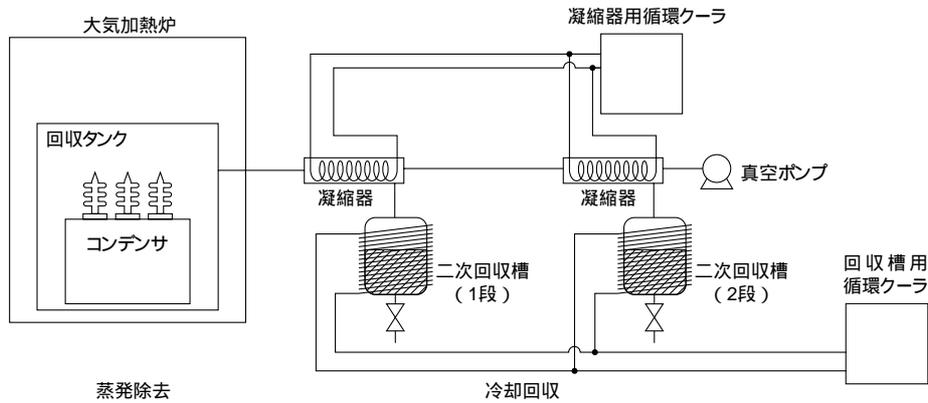


図 10 回収装置（蒸発回収工程）

### 3・4 回収 PFPE の物性

コンデンサから回収した PFPE について未供試品と比較して評価した結果を表 4 に示す。平均分子量，分子量分布ともに未供試品，回収品に差はなく，また物性への影響も見られない。

表 4 回収 PFPE の物性評価結果

項目	GPC(*)による測定		密度 (g/cm <sup>3</sup> )	動粘度 (×10 <sup>-6</sup> m <sup>2</sup> /s)	比誘電率	誘電損失 (1 kHz)
	平均分子量	分子量分布				
未供試品	1.00	1.00	1.79	2.4	2.1	2 × 10 <sup>-4</sup>
供試品(100 回収)	1.00	1.00	1.79	2.4	2.1	2 × 10 <sup>-4</sup>

注(\*)GPC:Gel Permeation Chromatography, 未供試品を基準1.0として比較

## 4. PFPE のリサイクル

図 11 にリサイクル（回収および再利用）システムの概略フローを示す。

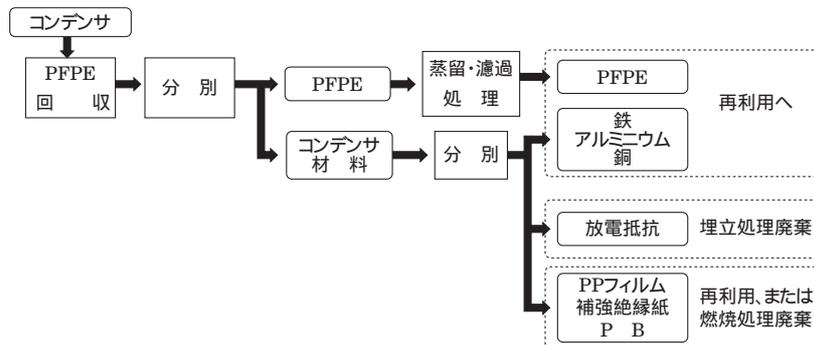


図 11 リサイクルシステムの概略フロー

## 5. あとがき

以上、不燃液体PFPEのリサイクルについて、その回収技術の概略を紹介した。

将来、地球環境保全の立場から規制の強化がさらに進むことは避けられない。したがって、今後は使用後のコンデンサについてマテリアルリサイクルを行うための技術を確認するとともに、製造・使用・廃棄のライフサイクルにおける環境汚染を最低限にとどめることが求められよう。

そして、さらなるリサイクル率向上を追求するため、リサイクルが容易に行えるような材料開発が今後加速していくものと思われる。

### 参考文献

- (1) 日本電機工業会編：「電機業界の環境への取り組み」(1999)
- (2) 宅間：電気学会誌 Vol.119, No.4 (1999)
- (3) 電気協同研究 Vol.54, No.3 (1998)
- (4) 月刊地球環境 No.12 (1997)
- (5) 野間編：電気絶縁油ハンドブック 講談社刊 (1987)

### ◆ 執筆者紹介



**田中 義久**

1988年入社。主として、高圧コンデンサの誘電体研究および生産技術業務に従事。現在、技術開発センター機能材料開発グループ。



**板橋 悟**

1995年入社。主として、誘電・絶縁材料の研究開発および各種コンデンサの開発・設計に従事。現在、エネルギー事業部調相システム部。



**神庭 勝**

1973年入社。主として、誘電・絶縁材料の研究開発および予測保全装置の開発に従事。現在、エネルギー事業部調相システム部主任。



**菅沼 紀美夫**

1978年入社。主として、誘電・絶縁材料の研究開発および電力用コンデンサの予防保全、開発・設計に従事。現在、エネルギー事業部調相システム部課長。