JAEA-Testing 2020-003 DOI:10.11484/jaea-testing-2020-003

STID



# 水蒸気改質処理法による廃油の処理試験結果 (平成30年度)

Treatment of Waste Oil with Steam Reforming System 2018

坂下 耒	讲一	石井	直之	木島	惇	青柳	義孝
萩原ī	E義	福嶋	峰夫				

Koichi SAKASHITA, Naoyuki ISHII, Jun KIJIMA, Yoshitaka AOYAGI Masayoshi HAGIWARA and Mineo FUKUSHIMA

> 核燃料・バックエンド研究開発部門 核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター 廃止措置技術部

Decommissioning Technology Department Nuclear Backend Technology Center Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development

July 2020

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>https://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方2番地4 電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency. Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2020

### 水蒸気改質処理法による廃油の処理試験結果(平成30年度)

日本原子力研究開発機構

核燃料・バックエンド研究開発部門

核燃料サイクル工学研究所 環境技術開発センター 廃止措置技術部

坂下 耕一・石井 直之・木島 惇・青柳 義孝・萩原 正義+・福嶋 峰夫

(2020年4月30日 受理)

難燃性の有機系廃棄物(フッ素系合成潤滑油(フッ素油)等)を含む使用済み油(廃油)の処理 技術として、水蒸気改質処理法の開発を実施している。

この処理法は、有機系廃棄物を過熱水蒸気で分解・ガス化し、ガス化した有機系廃棄物を高温 空気で酸化分解することにより有機系廃棄物の減容・無機化を行う処理技術である。

この処理法の主な特徴は、廃棄物のガス化プロセスにより後段にウラン等の個体の放射性物質 がほとんど移行しないため、排ガス処理系から発生する廃液の処理やメンテナンス作業の簡素化 が期待できることである。

平成 30 年度にハロゲン、溶媒及びウランを含む約 1,500L の廃油の処理試験を実施し、水蒸気 改質試験装置の処理性能を評価した。今回実施した試験で得られた成果は以下のとおりである。

(1)連続処理において、水蒸気改質処理試験装置の装置内温度は設計通りに制御した。(2)排 ガス中の CO 濃度及び NOx 濃度は、規制値(100ppm 及び 250ppm)未満に制御した。(3)ガス化プ ロセスにおける廃油の重量減少率は 99%以上を維持した。(4)フッ素油を安定的に連続処理する ためには廃油中のフッ素油濃度を 20wt%以下に制限する必要がある。

核燃料サイクル工学研究所:〒319-1194 茨城県那珂郡東海村大字村松 4-33

+計画管理課

### Treatment of Waste Oil with Steam Reforming System 2018

### Koichi SAKASHITA, Naoyuki ISHII, Jun KIJIMA, Yoshitaka AOYAGI, Masayoshi HAGIWARA<sup>+</sup> and Mineo FUKUSHIMA

Decommissioning Technology Department, Nuclear Backend Technology Center, Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Sector of Nuclear Fuel, Decommissioning and Waste Management Technology Development Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 30, 2020)

Steam reforming method has been developed for the treatment of organic wastes which are not suitable materials (halogenated oil) for the incineration. This method consists of the gasification process in which organics are vaporized and decomposed with superheated steam and the oxidation process in which vaporized organics are decomposed by oxidizing reaction with heated air. In the gasification process, nonvolatile radionuclides are separated from vaporized waste. Therefore, it can be expected that treatment of liquid waste generated from an off-gas treatment system and maintenance operation of the off-gas treatment system become easy to perform.

1,500L of waste oil contaminated with halogen, solvent and uranium was treated using the demonstration scale steam reforming system to examine the performance of the system in 2018. Results obtained this study were as follows:

(1) The temperature in the steam reforming system was controlled under the self-regulation temperature during treatment test. (2) The concentration of CO and NOx in the off-gas were controlled less than 100ppm and 250ppm respectively. (3) The gasification ratio of waste oil was more than 99%. (4) Concentration of fluorine oil in waste oil is needed to restrict less than 20wt% to carry out stable continuance treatment of fluorine oil.

Keywords : Steam Reforming, Halogen, Gasification, Volume Reduction

<sup>+</sup>Planning and Management Section

# 目次

1. はじめに	1
2. 廃油の熱重量分析	1
2.1 廃油の概要	1
2.2 廃油の熱分解特性	1
3. 水蒸気改質処理による廃油の連続処理	8
3.1 水蒸気改質処理法の概要	8
3.2 試験条件	8
3.3 連続処理試験10	0
3.3.1 鉱物油を主成分とする廃油10	0
3.3.2 廃溶媒と鉱物油を含む廃油12	2
3.3.3 フッ素油を主成分とする廃油14	4
4. まとめ20	C
参考文献20	С

# Contents

1. Introduction	- 1
2. Thermal gravimetric analysis of Waste Oil	1
2.1 Properties of Waste Oil	1
2.2 Thermal chemical properties of Waste Oil	1
3. Treatment of Waste Oil by Steam Reforming System	8
3.1 Steam Reforming System	8
3.2 Treatment Conditions	8
3.3 Treatment Results	10
3.3.1 Mineral Oil	10
3.3.2 Mineral Oil containing fluorinate solvent	12
3.3.3 Fluorine Oil	14
4. Summary	20
Reference	20

## 図表リスト

表	1	廃油及びネオバック等の密度4
表	2	各廃油の主成分、構成原子及び密度7
表	3	連続処理試験の条件(主要項目)9
表	4	廃油(フッ素油)、ネオバック及び灯油の混合量並びに廃油(フッ素油)濃度10
表	<b>5</b>	処理試験前後の装置内圧(フッ素油濃度 10wt%)15
表	6	処理試験前後の装置内圧(フッ素油濃度 20wt%)15
表	7	処理試験前後の装置内圧(フッ素油濃度 30wt%)16
表	8	処理試験前後の装置内圧(フッ素油濃度 40wt%)16
义	1	廃油の TG 曲線(分類 1)2
义	2	廃油の TG 曲線(分類 2)2
义	3	廃油の TG 曲線(分類 3)3
义	4	ネオバック等の TG 曲線4
义	<b>5</b>	廃油(分類1)とネオバック等のTG曲線の比較5
义	6	廃油(分類 2) とネオバック等の TG 曲線の比較5
义	7	廃油(分類 3) とネオバック等の TG 曲線の比較6
义	8	SR 装置の構成図8
义	9	ガス化装置内圧力 (P1)、熱分解ガス圧力 (P2) 及び差圧 (P1-P2)の経時変化 (分類 1)・11
义	10	主反応器温度の経時変化(分類1)11
义	11	NOx 及び CO 濃度の経時変化(分類 1)12
义	12	ガス化装置内圧力(P1)、熱分解ガス圧力(P2)及び差圧(P1-P2)の経時変化(分類2)・13
义	13	主反応器温度の経時変化(分類 2)13
义	14	NOx 及び CO 濃度の経時変化(分類 2)14
义	15	ガス化装置内圧力(P1)、熱分解ガス圧力(P2)及び差圧(P1-P2)の経時変化(分類3)・17
义	16	主反応器温度の経時変化(分類3)18
义	17	NOx 及び CO 濃度の経時変化(分類 3)19

#### 1. はじめに

日本原子力研究開発機構(以下、JAEA という。)では、難燃性の有機系廃棄物(フッ素系合成潤 滑油(以下、「フッ素油」という。)等)を含む使用済み油(以下、「廃油」という。)を保管してお り、分解・無機化のための技術開発を実施している。廃止措置技術部 廃止措置技術課では、これ ら有機系廃棄物の分解・無機化及び減容化を行う処理技術として、水蒸気改質処理法(以下、「SR 法」という。)を選定し、実用化に向けた技術開発を行っている。SR 法は、過熱水蒸気による改質 と熱分解により有機系廃棄物の分解・ガス化を行う技術であり、諸外国においても放射性有機系 廃棄物の減容化・安定化処理技術として開発が進められている<sup>1)</sup>。

本報告では、SR法による廃油の連続処理に向け、廃油の熱分解特性を把握することによる廃油の成分の推定及びSR法による廃油の処理試験を実施し、重量減少率の把握及び安定した連続処理 を可能とする運転条件の確認を行った。

#### 2. 廃油の熱重量分析

2.1 廃油の概要

廃油は、過去のウラン濃縮技術開発において主にロータリーポンプの潤滑油として使用された もので、ウランを含んでいる。廃油の種類として、鉱物油;主に石油系炭化水素(製造メーカ: MORESCO、製品名:ネオバック®)とフッ素油;主にトリフロオロクロロエチレン(製造メーカ: ダイキン工業、製品名:ダイフロイル®)及びパーフルオロポリエーテル(製造メーカ:SOLVAY、 製品名:フォンブリン®)がある。ダイフロイルは、ポリ塩化ビニルの水素をフッ素で置換した重 合体であり、(-CF<sub>2</sub>-CFC1-)<sup>n</sup>の化学式で表される。フォンブリンは、炭素、酸素、フッ素から構 成される低重合体であり、CF<sub>3</sub>-(0-CFCF<sub>3</sub>-CF<sub>2</sub>)<sup>n</sup>-(0-CF<sub>2</sub>)<sup>n</sup>-0-CF<sub>3</sub>の化学式で表される。また、 装置等に付着した油の脱脂用として、ソルベント(製造メーカ:ダイキン工業、製品名:ダイフ ロンソルベント<sup>®</sup>(以下、「ソルベント」という。))も過去に使用されている。ソルベントは、炭 素、フッ素、塩素から構成され、化学式は(-CC1<sub>3</sub>F-)で表される。廃油は、これら油やソルベン トが装置メンテナンスや装置解体等に伴い、混合した状態で発生したものである。

2.2 廃油の熱分解特性

廃油を連続処理試験にて処理するにあたり、廃油をガス化するための加熱温度(ガス化温度) を決定する必要があり、示差熱・熱重量同時測定装置(製造メーカ:島津製作所、型番:DTG-60) を使用してガス化温度を評価した。測定は SR 法の条件に合わせて窒素雰囲気とし、試料重量 10 ~20 mg、昇温速度 5℃/min、窒素ガス流量 50~100 mL/min の条件にて行った。試料を白金合金 製の試料セルに入れ、室温から 700℃まで加熱して、その重量変化を調べた。

ガス化温度の評価は、測定により得た熱重量曲線(以下、「TG曲線」という。)より、加熱前の 重量に対して試料の重量減少率が100%となる温度を基準として実施した。また、全ての廃油に対 して TG 曲線を測定した結果から、重量変化の違いにより廃油を3種類に分類した。

分類1:約300℃から約400℃の温度範囲で重量減少が発生する廃油

分類 2:分類 1 に 100℃以下で重量減少が発生する物質が混在している廃油 分類 3:約 200℃から約 300℃の温度範囲において重量減少が発生する廃油 各分類のうち代表的な廃油の TG 曲線を図 1、図 2 及び図 3 に示す。



図2 廃油のTG曲線(分類2)



図3 廃油のTG曲線(分類3)

分類した廃油について、ネオバック、ダイフロイル、フォンブリン及びAK-225(製造メーカ: AGC、製品名:アサヒクリン<sup>®</sup>)(以下、「ネオバック等」という。)のTG曲線及び密度との比較か ら、分類1、分類2及び分類3の主成分を特定した。ここで、AK-225は、生産中止により入手で きないソルベントの代替品として使用した。

表1に廃油及びネオバック等の密度を、図4にネオバック等のTG曲線をそれぞれ示す。図5から図7に廃油のTG曲線(青色)と比較したものを示す。



図4 ネオバック等の TG 曲線

廃油 番号	密度 (kg/L)	廃油 番号	密度 (kg/L)	油等	密度 (kg/L)
1	0.857	9	0.885	ネオバック	0.883
2	0.871	10	0.908	AK-225	1.55
3	0.891	11	1.034	ダイフロイル	1.95
4	0.861	12	0.914	フォンブリン	1.95
5	0.859	13	1.298		
6	0.874	14	1.422		
7	0.832	15	1.958		
8	0.863				

表1 廃油及びネオバック等の密度



図5 廃油(分類1)とネオバック等のTG曲線の比較



図6廃油(分類2)とネオバック等のTG曲線の比較



図7 廃油(分類3)とネオバック等のTG曲線の比較

ネオバック等の密度及び TG 曲線と密度の比較から推測した廃油の主成分を表 2 に示す。分類 1 はネオバックを主成分とした廃油、分類 2 はネオバックとソルベントの混合物、分類 3 はフッ素 油を主成分とした廃油であった。

分類3の廃油については密度よりフッ素油と特定できた。しかし、TG曲線がダイフロイル及び フォンブリンのTG曲線の間に位置しており、フッ素油の種類を特定できなかった。

廃油 番号	主成分	主成分の 構成原子	分類
1	ネオバック	H, C	1
2	ネオバック	H, C	1
3	ネオバック	H, C	1
4	ネオバック	Н, С	1
5	ネオバック	H, C	1
6	ネオバック	H, C	1
7	ネオバック	H, C	1
8	ネオバック	H, C	1
9	ネオバック	H, C	1
10	ネオバック	H, C	1
11	ネオバック 及びソルベント	H、C、F、 C1	2
12	ネオバック 及びソルベント	Н, С, F, C1	2
13	ネオバック 及びソルベント	H、C、F、 C1	2
14	ネオバック 及びソルベント	H, C, F, Cl	2
15	フッ素油	C, F, C1*	3

表2 各廃油の主成分、構成原子及び密度

\* ダイフロイルの場合は Cl も構成原子となる。

### 3. 水蒸気改質処理による廃油の連続処理

#### 3.1 水蒸気改質処理法の概要

水蒸気改質処理試験装置(以下、「SR 装置」という。)は、過熱水蒸気による改質と熱分解を組 み合わせた有機系廃棄物の分解・ガス化を行うガス化装置、ガス化した有機系廃棄物の高温空気 による完全酸化分解を行う主反応器、排ガス処理を行うスクラバ等で構成されている。本装置の 構成図を図8に示す。

廃油は、加熱されたガス化装置内で水蒸気と向流接触され、低分子の有機ガスと無機固体等に 分解される。ガス化装置内で改質・分解された有機ガスは、放射性物質除去用フィルタ(以下、 「高温フィルタ」という。)を通って同伴した放射性物質や煤等を取り除いた後に主反応器に導入 される。主反応器に導入された有機ガスは、加熱された空気と混合されて、主に酸化反応により 燃焼し、水及び炭酸ガス等に分解される。燃焼ガスは、主反応器下部に設置された急冷容器内で 水中に噴出されて急冷される。急冷容器から排出された燃焼ガスは、水スクラバ、アルカリスク ラバを介して煤等が除去され、装置外に排出される。アルカリスクラバの後段では、排ガスの一 部がガス分析系に導入され、C0 濃度、NOx 濃度等の連続的な測定が行われる。



図8 SR 装置の構成図

### 3.2 試験条件

TG 曲線の測定により得た廃油のガス化温度は、500℃以下であることが確認された。ガス化装置 内の温度を上記のガス化温度以上に維持するため、ガス化装置の加熱温度を 600℃に決定した。

その他の主な処理条件は、過去に実施した模擬廃油試料の処理試験における処理条件を参考に 設定した。表3に連続処理試験の条件を示す。

本試験では、図8に示すガス化装置内圧力(P1)と熱分解ガス圧力(P2)の差圧(P1-P2)、主 反応器の温度、排ガス中のC0及びNOx濃度の変化を処理の安定性を評価する指標とした。

主な処理	条件	設定値
試料供給	量	3kg/h
水蒸気供給	給量	3kg/h 又は 4.5kg/h*1
空気比	*2	1.8~2.1
水蒸気加熱器出	口蒸気温度	400°C
	入口	600°C
ガス化装置温度	中央	600°C
	出口	600°C
ガス化装置出口	配管温度	600°C
高温フィルタ	表面温度	650°C
熱分解ガス酯	1管温度	650°C
主反応器	温度	800°C∼1, 200°C
主反応器燃焼用	空気温度*3	600°C∼995°C

表3 連続処理試験の条件(主要項目)

\*1 分類1の処理試験時: 3kg/h、分類2及び分類3の処理試験時: 4.5kg/h

\*2 ガス化装置に供給した試料の全てがガス化されると仮定したときに、 このガスを主反応器で完全燃焼させるのに必要な理論空気量に対して、 主反応器に供給する空気量の比

\*3 主反応器温度が 800℃~1,200℃になるように調整

分類1の廃油は主成分がネオバックであることから、水蒸気供給量は過去の模擬廃油試料の処 理試験で得た最適値である3kg/hとした<sup>1)</sup>。

分類 2 及び分類 3 の廃油は塩素を含んでいる可能性があり、過去の模擬廃油試料の処理試験で 得た結果からガス化に伴い生じる塩素ラジカルの影響により、高温フィルタの閉塞(ガス化装置 内圧: P1 の上昇)が懸念される。この対策として、水蒸気供給量を増加したことにより効果が確 認されたため、水蒸気供給量は、水蒸気供給装置の最大供給量である 4.5kg/h とした<sup>1)</sup>。

また、分類3の廃油の主成分はフッ素油である。フッ素油は、主にフッ素原子(ダイフロイル の場合は塩素を含む)で構成されているため、その燃焼に対する負触媒作用により主反応容器に おける燃焼を維持できないことが予想される。このため、助燃剤としてネオバック及び灯油を混 合したものを試料とした。廃油(フッ素油)濃度(10wt%~40wt%)をパラメータにした処理試験 を実施し、最適な混合率を評価した。評価は、7時間の連続処理の可否を指標とした。表4に廃油 (フッ素油)、ネオバック及び灯油の混合量並びに廃油(フッ素油)濃度を示す。

廃油(kg) (フッ素油)	2.4	4.8	7.2	9.6
ネオバック (kg)	19.2	14.4	9.6	4.8
灯油(kg)	2.4	4.8	7.2	9.6
廃油濃度 (フッ素油濃度)	10wt%	20wt%	30wt%	40wt%

表4 廃油(フッ素油)、ネオバック及び灯油の混合量並びに廃油(フッ素油)濃度

3.3 連続処理試験

3.3.1 鉱物油を主成分とする廃油

一例として廃油番号1の処理試験時の差圧、主反応器温度、排ガス中のC0及びNOx 濃度をそれぞれ図9、図10及び図11に示す。

処理試験開始から約 33 時間後に P1 及び差圧の上昇が始まり、約 43 時間後の処理試験終了時 までに約 1kPa 上昇した。試験後の P1 の圧力は約-4kPa であり、十分な負圧を維持できた。

主反応器温度は、設計範囲内である約 900℃から約 1,150℃の範囲で制御できることを確認した。更に、排ガス中の C0 濃度は、1ppm 未満で安定しており、目標値である 100ppm (廃棄物処理 法及び茨城県公害防止条例規制値)より十分低い値となった。NOx 濃度は、最大約 140ppm 程度 であり、目標値である 250ppm (廃棄物処理法及び茨城県公害防止条例規制値)未満となった。

このことから、今回設定した処理条件にてネオバックを主成分とする廃油を安定的に連続処理できることを確認した。

重量減少率は、処理重量 225kg に対して、処理試験後に回収した残渣重量が約 135g であり、 式(1)より 99.94%であった。

重量減少率(%) = ((処理重量-残渣重量) / 処理重量) ×100 …式(1)



図9 ガス化装置内圧力(P1)、熱分解ガス圧力(P2)及び差圧(P1-P2)の経時変化(分類1)



図10 主反応器温度の経時変化(分類1)



図 11 NOx 及び CO 濃度の経時変化(分類 1)

3.3.2 廃溶媒と鉱物油を含む廃油

一例として廃油番号 11 の処理試験時の差圧、主反応器の温度、排ガス中の C0 及び NOx 濃度 をそれぞれ図 12、図 13 及び図 14 に示す。

処理試験開始から約 0.66 時間後に SR 装置の運転上の理由により処理試験を停止し、その後、 処理試験を再開した。処理試験再開後から P1 が上昇し、処理試験開始から約 1 時間後に P1 が約 -1kPa まで上昇し、負圧を維持することが困難と判断し、処理試験を停止した。

主反応器の温度は、設計範囲内である約 800℃から約 1,150℃の範囲で制御した。更に、排ガ ス中の C0 濃度は最大約 25ppm、Nox 濃度は最大約 45ppm であり、いずれも目標値以内となった。

P1の上昇は、高温フィルタに付着した煤を除去するため、ガス化装置から空気を供給し酸化させる作業(以下、「焼出作業」という。)を実施したところ、P1が回復したことから、高温フィルタに煤が付着し、閉塞したことが原因と判断した。3.2節にて述べたように、ガス化に伴い発生する塩素ラジカルの影響により、多量の煤が発生したと推測する。

今回の処理試験結果から、分類2の廃油は、連続処理に適さない廃油であることを確認した。



図 12 ガス化装置内圧力(P1)、熱分解ガス圧力(P2)及び差圧(P1-P2)の経時変化(分類2)



図13 主反応器温度の経時変化(分類2)



図 14 NOx 及び CO 濃度の経時変化(分類 2)

3.3.3 フッ素油を主成分とする廃油

フッ素油濃度 10wt%~40wt%の試料の処理試験時の差圧、主反応器の温度、C0 及び NOx 濃度を それぞれ図 15、図 16 及び図 17 に示し、各濃度における処理試験結果を以下に記載する。

(1) フッ素油濃度 10wt%

処理試験前後の P1、P2 および差圧を表 5 に示す。処理試験の開始から終了までの約 7 時間で P1 の上昇は+0.3 kPa、圧力上昇率にして+5.6%、圧力上昇速度は 0.01kPa/h とわずかに上昇したが、P2 もほぼ同じ範囲で上昇していることから、差圧はほぼ一定となった。

主反応器部温度は、設計範囲内の約1,000℃から約1,180℃の範囲で制御した。更に、排 ガス中の CO 濃度は最大1ppm、NOx 濃度は最大約70ppm であり、いずれも目標値以内となった。

以上より、フッ素油濃度10wt%は、安定した連続処理ができることを確認した。

圧力	開始時(kPa)	終了時 (kPa)
P1	-5.3	-5.0
P2	-5.6	-5.2
差圧	0.3	0.2

表5処理試験前後の装置内圧(フッ素油濃度10wt%)

(2) フッ素油濃度 20wt%

処理試験前後の P1、P2 および差圧を表 6 に示す。処理試験の開始から終了までの約7時間で P1 の上昇は+0.2kPa、圧力上昇率にして+5.9%、圧力上昇速度は 0.03kPa/h と わずかに上昇したが、P2 もほぼ同じ範囲で上昇していることから、差圧はほぼ一定となった。

主反応器温度は、設計範囲内の約 1,000℃から約 1,200℃の範囲で制御した。更に、 排ガス中の C0 濃度は最大 1ppm、NOx 濃度は最大約 55ppm であり、いずれも目標値以 内となった。

以上より、フッ素油濃度 20wt%は、安定した連続処理ができることを確認した。

圧力	開始時(kPa)	終了時 (kPa)
P1	-3.4	-3.2
P2	-3.6	-3.5
差圧	0.2	0.3

表6処理試験前後の装置内圧(フッ素油濃度20wt%)

(3) フッ素油濃度 30wt%

処理試験前後の P1、P2 および差圧を表 7 に示す。処理試験開始から 6 時間までは差 圧がほぼ一定であり、安定した処理を継続していた。しかし、処理開始 6 時間後から、 P1 が、30 分間で約 0.5 kPa (圧力上昇速度:1kPa/h)、次の 10 分間で約 0.5 kPa (圧力 上昇速度:3kPa/h)と上昇した。P1 が 3kPa/h で上昇を継続した場合、処理試験開始か ら約 7 時間後に P1 を負圧に維持できなくなる可能性があったため、安全上の理由によ り処理試験開始から約 6.8 時間後に処理試験を停止した。

処理試験の開始から終了までの約6.8時間でP1の上昇は+2.8 kPa、圧力上昇率にして+73.4%、圧力上昇速度は0.41kPa/hとフッ素濃度10wt%、20wt%の処理試験結果と比較して短時間で圧力が大きく上昇した。一方でP2はほぼ変化が無く、そのため差圧も短時間で上昇した。

主反応器温度は、設計範囲内の約 995℃から約 1,170℃の範囲で制御した。更に、排 ガス中の CO 濃度は最大 1ppm、NOx 濃度は最大約 50ppm であり、いずれも目標値以内 となった。 以上より、フッ素油濃度 30wt%は、処理試験開始後約 6 時間で高温フィルタの閉塞 が始まり、7 時間の連続処理ができない廃油であることを確認した。

圧力	開始時(kPa)	終了時 (kPa)
P1	-3.8	-1.0
P2	-3.2	-3.4
差圧	0.1	2.4

表7 処理試験前後の装置内圧(フッ素油濃度 30wt%)

(4) フッ素油濃度 40wt%

処理試験前後の P1、P2 及び差圧を表 8 に示す。処理試験開始から約 3.8 時間までは 差圧がほぼ一定であり、安定した処理を継続していた。しかし、処理開始約 3.8 時間 後から、P1 が、30 分間で約 2.7kPa(圧力上昇速度:5.4kPa/h)上昇し、-1.1kPaとな った。P1 を負圧に維持できなくなる可能性があったため、処理試験開始から約 4.3 時 間後に処理試験を停止した。

処理試験の開始から終了までの約4.3時間でP1の上昇は+2.7kPa、圧力上昇率にして+71%、圧力上昇速度は0.63kPa/hとフッ素濃度30wt%の処理試験結果と比較して短時間内に圧力が上昇した。一方でP2はほぼ変化が無く、そのため差圧も短時間で上昇した。

主反応器温度は、設計範囲内の約980℃から約1,150℃の範囲で制御した。更に、排 ガス中のCO濃度は最大1ppm、NOx濃度は最大約55ppmであり、いずれも目標値以内 となった。

以上より、フッ素油濃度 40wt%は、主反応器温度及び CO 濃度等は設計及び基準値範 囲内であるが、処理試験開始後約 3.5 時間で高温フィルタの閉塞が始まり、7 時間の連 続処理ができない廃油であることを確認した。

圧力	開始時(kPa)	終了時 (kPa)
P101	-3.8	-1.1
P103	-4.1	-4.1
差圧	0.3	3. 0

表8 処理試験前後の装置内圧(フッ素油濃度 40wt%)

今回の処理試験から安定した連続処理なフッ素油濃度は、20wt%となった。また、重量減少率は、 処理に供した合計重量約120kgに対して、処理試験後に回収した残渣重量は約25gであり、式(1) より99.98%であった。



図 15 ガス化装置内圧力(P1)、熱分解ガス圧力(P2)及び差圧(P1-P2)の経時変化(分類3)



図 16 主反応器温度の経時変化(分類 3)



図 17 NOx 及び CO 濃度の経時変化(分類 3)

#### 4. まとめ

ネオバックを主成分とする廃油(分類 1)について、今回設定した連続処理試験の条件におい て、約 43 時間の連続処理を行い、その間、差圧はほとんど上昇することなく、主反応器温度を設 計温度範囲で制御し、排ガス中の C0 及び NOx 濃度を目標値である廃棄物処理法及び茨城県公害防 止条例規制値未満となった。分類 1 の廃油は、安定した連続処理が可能であることを確認した。

ネオバックとソルベントを主成分とする廃油(分類2)について、処理試験開始後から1時間後 にガス化装置内圧力(P1)が上昇したため、負圧の維持が困難と判断し、処理試験を中断した。 焼出作業にてP1が回復したことから、高温フィルタに煤が付着し、閉塞したと考えられる。煤の 発生原因は、ソルベントのガス化に伴い発生する塩素ラジカルの影響により、多量の煤が発生し たと推測する。今回の処理試験結果から、分類2の廃油は、連続処理に適さない廃油であると確 認した。

フッ素油を主成分とする廃油(分類3)について、フッ素油濃度20wt%までは今回の連続処理の 目標時間である7時間の連続処理が可能であることを確認した。フッ素油濃度30wt%、40wt%は、 処理試験中においてP1を負圧に維持できなくなる可能性があったため、試験開始後からそれぞれ 6.8時間、3.8時間で処理試験を停止した。フッ素油濃度をパラメータにした処理試験から、フッ 素油を安定的に連続処理可能な濃度は20wt%以下であることを確認した。フッ素油を主成分とし た廃油のSR法による連続処理・減容に寄与するデータの取得ができた。

重量減少率は、廃油の成分に依らず、99%以上を維持することを確認した。

#### 参考文献

1) 曽根智之,野中一晴,佐々木紀樹,山口大美: "水蒸気改質処理法による模擬 TBP/n-ドデカン及 びフッ素系油の処理試験", JAEA-Technology 2007-063, (2008), 42p.

\_

表 1. SI 基本単位					
甘大昌	SI 基本単位				
本平里	名称	記号			
長さ	メートル	m			
質 量	キログラム	kg			
時 間	秒	s			
電 流	アンペア	Α			
熱力学温度	ケルビン	Κ			
物質量	モル	mol			
光度	カンデラ	cd			

表 2. 基本単位を用いて表されるSI組立単	位の例				
AI 立長 SI 組立単位	SI 組立単位				
名称	記号				
面 積 平方メートル	m <sup>2</sup>				
体 積 立方メートル	m <sup>3</sup>				
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s				
加 速 度メートル毎秒毎秒	$m/s^2$				
波 数 毎メートル	m <sup>-1</sup>				
密度,質量密度キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
面 積 密 度 キログラム毎平方メートル	kg/m <sup>2</sup>				
比体積 立方メートル毎キログラム	m <sup>3</sup> /kg				
電 流 密 度 アンペア毎平方メートル	A/m <sup>2</sup>				
磁 界 の 強 さ アンペア毎メートル	A/m				
量 濃 度 <sup>(a)</sup> , 濃 度 モル毎立方メートル	mol/m <sup>8</sup>				
質量濃度 キログラム毎立方メートル	kg/m <sup>3</sup>				
輝 度 カンデラ毎平方メートル	cd/m <sup>2</sup>				
屈 折 率 <sup>(b)</sup> (数字の) 1	1				
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1				
(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度					

(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

#### 表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

			SI 租立单位	
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
平 面 角	ラジアン <sup>(b)</sup>	rad	1 <sup>(b)</sup>	m/m
立体鱼	ステラジアン <sup>(b)</sup>	$sr^{(c)}$	1 (b)	$m^2/m^2$
周 波 数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz	-	s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	Ν		m kg s <sup>-2</sup>
E 力 , 応 力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	$m^{-1} kg s^{-2}$
エネルギー,仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$
仕 事 率 , 工 率 , 放 射 束	ワット	W	J/s	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
電 荷 , 電 気 量	クーロン	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m <sup>2</sup>	$kg s^{-2} A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光東	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
照度	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> cd
放射性核種の放射能 <sup>(f)</sup>	ベクレル <sup>(d)</sup>	Bq		s <sup>-1</sup>
吸収線量,比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2 s^2$
線量当量,周辺線量当量, 方向性線量当量,個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	$m^2 s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

酸素活性(1) ダール kat [s<sup>1</sup> mol]
 (w)SH接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (h)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明 示されない。
 (a)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)へルツは周期現象についてのみ、ペラレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。 セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)放射性核種の放射能(activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205) についてはCIPM物告2(CI-2002)を参照。

#### 表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	S	[ 組立単位	
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	$rad/s^2$	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	$W/m^2$	kg s <sup>-3</sup>
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^{2} s^{2} K^{1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2 s^2$
熱伝導率	「ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s <sup>-3</sup> K <sup>-1</sup>
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>-3</sup> s A
表面電荷	「クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>-2</sup> s A
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2 kg s^{-2} K^{-1} mol^{-1}$
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
吸収線量率	ダレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{3}$
放 射 強 度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	$m^{-3} s^{-1} mol$

表 5. SI 接頭語							
乗数	名称	記号	乗数	名称	記号		
$10^{24}$	<b>э</b> 9	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d		
$10^{21}$	ゼタ	Z	$10^{-2}$	センチ	с		
$10^{18}$	エクサ	E	$10^{-3}$	ミリ	m		
$10^{15}$	ペタ	Р	$10^{-6}$	マイクロ	μ		
$10^{12}$	テラ	Т	$10^{-9}$	ナノ	n		
$10^{9}$	ギガ	G	$10^{-12}$	ピコ	р		
$10^{6}$	メガ	М	$10^{-15}$	フェムト	f		
$10^3$	+ 1	k	$10^{-18}$	アト	а		
$10^{2}$	ヘクト	h	$10^{-21}$	ゼプト	z		
$10^{1}$	デカ	da	$10^{-24}$	ヨクト	v		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位				
名称	記号	SI 単位による値		
分	min	1 min=60 s		
時	h	1 h =60 min=3600 s		
日	d	1 d=24 h=86 400 s		
度	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm <sup>2</sup> =10 <sup>4</sup> m <sup>2</sup>		
リットル	L, 1	1 L=1 l=1 dm <sup>3</sup> =10 <sup>3</sup> cm <sup>3</sup> =10 <sup>-3</sup> m <sup>3</sup>		
トン	t	$1 t=10^3 kg$		

### 表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で

表される数値が実験的に得られるもの					
名称			記号	SI 単位で表される数値	
電子	ボル	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J	
ダル	- F	$\sim$	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg	
統一原	子質量単	単位	u	1 u=1 Da	
天 文	単	位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 <sup>11</sup> m	

#### 表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 <sup>-10</sup> m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	dB -	

#### 表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値		
エルグ	erg	1 erg=10 <sup>-7</sup> J		
ダイン	dyn	1 dyn=10 <sup>-5</sup> N		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm <sup>-2</sup> =10 <sup>4</sup> lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T		
エルステッド <sup>(a)</sup>	Oe	1 Oe ≙ (10 <sup>3</sup> /4 π)A m <sup>-1</sup>		
(a) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」				

は対応関係を示すものである。

			表	10.	SIに 尾	<b>属さないその他の単位の例</b>
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
$\scriptstyle  u$	$\sim$	ŀ	ゲ	$\sim$	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				k	rad	1 rad=1cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
$\scriptstyle  u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 <sup>-4</sup> kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$