



# 水蒸気改質処理法によるウランで汚染された 廃 TBP/n- ドデカン処理技術開発

Treatment Technology Development of Uranium Contaminated  
Spent TBP/n-dodecane Solvent by Steam Reforming

中川 明憲 曾根 智之 佐々木 紀樹 中澤 修 田代 清

Akinori NAKAGAWA, Tomoyuki SONE, Toshiki SASAKI  
Osamu NAKAZAWA and Kiyoshi TASHIRO

東海研究開発センター  
核燃料サイクル工学研究所  
環境技術管理部

Waste Management Department  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories  
Tokai Research and Development Center

June 2010

本レポートは独立行政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 (<http://www.jaea.go.jp>)  
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 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  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, 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, 2010

## 水蒸気改質処理法による ウランで汚染された廃 TBP/n-ドデカン処理技術開発

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター  
核燃料サイクル工学研究所 環境技術管理部  
中川 明憲・曾根 智之・佐々木 紀樹・中澤 修・田代 清

(2010年3月31日 受理)

焼却では装置を腐食させる、配管の閉塞を引き起こす、大量の二次廃棄物が発生する等の理由により処理することが困難なウランで汚染されたリン酸トリブチルの減容処理技術として、水蒸気改質処理法の開発を行った。

水蒸気改質処理法は、過熱された水蒸気との接触により難燃物の分解・ガス化を行う水蒸気改質プロセスと、水中で燃焼を行う液中燃焼プロセスを組み合わせた廃棄物処理法である。水蒸気改質処理法は、廃棄物の減容率が高く、二次廃棄物がほとんど発生しない等の特徴がある。

技術開発の結果を以下に示す。

- (1) 99.6%の廃棄物の減容率を達成した。
- (2) 排ガス処理系へのウランの移行を抑制し、排ガス処理系から発生する廃水のウラン濃度が放出基準(0.037mg/L)未満であることを確認した。
- (3) 排ガス中の CO 濃度及び NO<sub>x</sub> 濃度はそれぞれ茨城県条例等で定められた規制値(100ppm 及び 250ppm)以下であることを確認した。
- (4) 配管の閉塞抑制及び腐食対策技術を開発し、装置が長時間処理に耐えうることを確認した。

**Treatment Technology Development of Uranium Contaminated  
Spent TBP/n-dodecane Solvent by Steam Reforming**

Akinori NAKAGAWA, Tomoyuki SONE, Toshiki SASAKI,  
Osamu NAKAZAWA and Kiyoshi TASHIRO

Waste Management Department  
Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Tokai Research and Development Center  
Japan Atomic Energy Agency  
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 31, 2010)

Steam reforming technology has been developed to reduce the volume of liquid uranium waste such as Tri-n-butyl phosphate adding n-dodecane solvent, which is difficult to incinerate, due to generation of corrosive compounds, plugging materials, a large amount of secondary waste, etc.

The system has two main processes, the steam reforming process and the submerged combustion process. The former is to decompose and gasify incombustible organic wastes. The latter is to burn organic gas completely in the water to prevent corrosion of reactor wall by active gases.

The results are as follows:

- (1) The volume reduction rate of waste is over 99.6%.
- (2) The uranium concentration in the waste water is less than the regulation level(0.037mg/L).
- (3) The concentration of CO and NO<sub>x</sub> in the exhaust gas are less than 100ppm and 250ppm respectively.
- (4) Plugging and corrosion by reaction products could be prevented by controlling temperature for continuous operation.

Keywords : Steam Reforming, TBP, Gasification, Volume Reduction, Secondary Waste

目次

1.はじめに .....	1
2.水蒸気改質処理法 .....	1
2.1 水蒸気改質処理法の原理 .....	1
2.2 特徴 .....	4
3.水蒸気改質処理法の適用 .....	6
3.1 課題 .....	6
3.1.1 二次廃棄物の発生 .....	6
3.1.2 装置の基本性能と長期運転信頼性の確認 .....	7
3.2 開発項目 .....	11
3.2.1 二次廃棄物発生量の低減 .....	11
3.2.2 装置の基本性能と長期運転信頼性の確認 .....	11
4.試験方法 .....	13
4.1 水蒸気改質処理法による処理試験 .....	13
4.1.1 試験装置の概要 .....	13
4.1.2 試薬類 .....	15
4.1.3 試験条件 .....	15
4.1.4 分析方法 .....	17
4.2 材料腐食試験 .....	17
4.2.1 リン酸溶液流通試験 .....	18
4.2.2 リン酸溶液浸漬試験 .....	19
5.試験結果及び考察 .....	22
5.1 二次廃棄物発生量の低減 .....	22
5.1.1 ガス化率 .....	22
5.1.2 ウラン移行率 .....	24
5.1.3 リン酸ミストの回収 .....	27
5.1.4 メンテナンス廃棄物発生量 .....	30
5.2 装置の基本性能と長期運転信頼性の確認 .....	31
5.2.1 縮合リン酸による配管閉塞の抑制 .....	31
5.2.2 腐食対策 .....	33
5.2.3 燃焼安定性 .....	36
5.2.4 装置構成機器の寿命 .....	41
6.おわりに .....	43
参考文献 .....	45

Contents

1.Introduction.....	1
2.Steam Reforming System.....	1
2.1 Theory .....	1
2.2 Feature.....	4
3. Application to Spent TBP/n-dodecane .....	6
3.1 Issue .....	6
3.1.1 Secondary Waste Generation.....	6
3.1.2 Equipment Performance .....	7
3.2 Development .....	11
3.2.1 Reduction of Secondary Waste.....	11
3.2.2 Estimate of Equipment Performance .....	11
4.Experiment.....	13
4.1 Treatment of Spent TBP/n-dodecane .....	13
4.1.1 Equipment.....	13
4.1.2 Sample .....	15
4.1.3 Treatment Condition.....	15
4.1.4 Analysis Procedure.....	17
4.2 Corrosion Test.....	17
4.2.1 Circulation Test.....	18
4.2.2 Immersion Test.....	19
5.Results and Discussion .....	22
5.1 Reduction of Secondary Waste .....	22
5.1.1 Gasification Rate.....	22
5.1.2 Uranium Distribution .....	24
5.1.3 Phosphorous Distribution .....	27
5.1.4 Maintenance Waste.....	30
5.2 Estimate of Equipment Performance.....	31
5.2.1 Plugging Control .....	31
5.2.2 Corrosion Control.....	33
5.2.3 Combustion Stability .....	36
5.2.4 Lifetime of Equipment .....	41
6.Conclusion .....	43
References.....	45

表リスト

- 表 3.1.2-1 縮合リン酸の脱水の程度と化学種の関係
- 表 3.1.2-2 200℃及び 250℃における 75wt%リン酸溶液に対する金属材料の腐食速度
- 表 3.1.2-3 有害ガスの排出基準
- 表 4.1.1-1 水蒸気改質処理試験装置の主要構成機器の性能
- 表 4.1.2-1 試験に用いた模擬溶媒の化学的性質
- 表 4.1.2-2 試験に用いた TBP 廃溶媒の組成
- 表 4.1.3-1 試験で設定した主な運転条件
- 表 4.2.1-1 リン酸溶液流通試験条件
- 表 4.2.1-2 SUS310S 配管の組成
- 表 4.2.2-1 浸漬試験で使用した試薬の性質
- 表 4.2.2-2 リン酸溶液浸漬試験条件
- 表 4.2.2-3 浸漬試験供試材の組成
- 表 5.1.1-1 残渣の蛍光 X 線分析結果
- 表 5.1.2-1 各種集塵装置の使用温度
- 表 5.1.2-2 スクラバ洗浄水等のウラン濃度分析結果
- 表 5.1.3-1 ガラス繊維フィルタの仕様
- 表 5.1.3-2 フィルタの捕集効率の計算値
- 表 5.1.3-3 リンの装置内分布
- 表 5.1.4-1 短時間処理後のメンテナンス作業で発生した二次廃棄物の種類及び重量
- 表 5.1.4-2 長時間処理後のメンテナンス作業で発生した二次廃棄物の種類及び重量
- 表 5.2.2-1 リン酸溶液流通試験後の配管断面観察結果
- 表 5.2.2-2 リン酸溶液流通試験後の配管侵食深さ
- 表 5.2.2-3 リン酸溶液浸漬試験における各材料の腐食速度
- 表 5.2.3-1 放射性核種除去用フィルタ表面堆積物の蛍光 X 線分析結果
- 表 5.2.4-1 主要構成機器の使用時間及び交換状況

図リスト

- 図 2.2-1 水蒸気改質処理試験装置の構成図
- 図 2.2-2 煤の生成過程
- 図 2.2-3 液中燃焼処理装置の概要
- 図 4.1.3-1 水蒸気改質処理試験装置における温度計測位置
- 図 4.2.1-1 リン酸溶液流通試験装置の概要
- 図 4.2.2-1 リン酸溶液浸漬試験装置の概要
- 図 5.1.1-1 ガス化装置周辺の概要
- 図 5.1.1-2 ガス化配管昇温時の温度変化
- 図 5.1.2-1 球形粒子の重力による終末沈降速度
- 図 5.1.2-2 30wt%TBP 廃溶媒処理時の放射性核種除去用フィルタ前後の差圧の変化
- 図 5.1.2-3 残渣受容器に排出された残渣
- 図 5.1.3-1 模擬溶媒処理で発生するリン酸ミストの粒径分布
- 図 5.1.3-2 デミスタ前後のリン酸ミスト発生状況
- 図 5.2.1-1 ガス化装置の出口、配管及び放射性核種除去用フィルタの温度の経時変化
- 図 5.2.1-2 高温フィルタ内温度低下時に付着した縮合リン酸
- 図 5.2.2-1 リン酸溶液流通試験中の配管表面温度分布及び腐食状況
- 図 5.2.2-2 リン酸溶液浸漬試験における各材料の温度による腐食速度の変化
- 図 5.2.3-1 模擬溶媒処理時の空気当量に対する主反応器燃焼部の温度、CO 及び NO<sub>x</sub> 濃度の変化
- 図 5.2.3-2 模擬溶媒処理時の空気当量に対する排ガス中の粒子状物質濃度の変化
- 図 5.2.3-3 TBP 廃溶媒の長時間処理試験におけるガス化装置と放射性核種除去用フィルタ間の配管温度の変動
- 図 5.2.3-4 ガス化装置から放射性核種除去用フィルタへ抜ける配管への縮合リン酸の付着
- 図 5.2.3-5 処置後の TBP 廃溶媒の長時間処理試験におけるガス化装置と放射性核種除去用フィルタ間の配管温度の変動
- 図 5.2.3-6 処置後のガス化装置から放射性核種除去用フィルタへ抜ける配管
- 図 5.2.3-7 40wt%TBP 廃溶媒処理時の放射性核種除去用フィルタ前後の差圧の変化
- 図 5.2.3-8 放射性核種除去用フィルタ表面堆積物



## 1.はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という。）では、低レベル放射性廃棄物管理計画書<sup>1)</sup>において、廃棄物の廃棄体化処理にあたっては焼却、圧縮、熔融等により極力減容し、環境負荷の低減を図ることとしている。

JAEAでは、装置の腐食、配管の閉塞、大量の二次廃棄物が発生する等の理由で焼却では処理が困難な有機系廃棄物（リンやハロゲンを含む有機溶媒、機械油等）を保管しており、基本方策に従って、これらの廃棄物を分解・無機化処理し、減容することで環境負荷及び処分コストの低減を図る必要がある。

環境技術管理部処理技術課では、これらの焼却が困難な有機系廃棄物を適切に処理するため、水蒸気改質処理法の開発を行っている。水蒸気改質処理法とは、過熱された水蒸気との接触により難燃物の分解・ガス化を行う水蒸気改質プロセスと、水中で燃焼を行う液中燃焼プロセスを組み合わせた廃棄物処理法であり、上述した焼却処理の課題をすべて解決できる可能性を持った新規技術である。

本報告書は、水蒸気改質処理法によるウランで汚染された廃TBP(Tributyl-Phosphate, リン酸トリブチル)/n-ドデカン (TBPとノルマルドデカンの混合溶媒、以下、「TBP廃溶媒」という。)の減容処理技術開発の結果をまとめたものである。TBP廃溶媒を水蒸気とともに加熱してガス化しウランと分離する技術、排ガス中に有害物質を含まない運転方法等の開発を実施し、廃棄物を99.6%減容できる技術を開発した。

## 2.水蒸気改質処理法

### 2.1 水蒸気改質処理法の原理

水蒸気改質処理法とは、過熱された水蒸気との接触により難燃物の分解・ガス化を行う水蒸気改質プロセスと、水中で燃焼を行う液中燃焼プロセスを組み合わせた廃棄物処理法である。

水蒸気改質処理試験装置の構成を図2.2-1に示す。水蒸気改質処理試験装置は、水蒸気改質プロセスとして過熱水蒸気の改質と熱分解作用により有機系廃棄物を分解・ガス化するガス化装置、ガスに含まれる粒子状の放射性核種を取り除く放射性核種除去用フィルタ、液中燃焼プロセスとしてガス化した有機物の高温空気による酸化分解及び燃焼生成物の回収を行う主反応器及び急冷容器、排ガス処理を行うスクラバ等から構成されている。

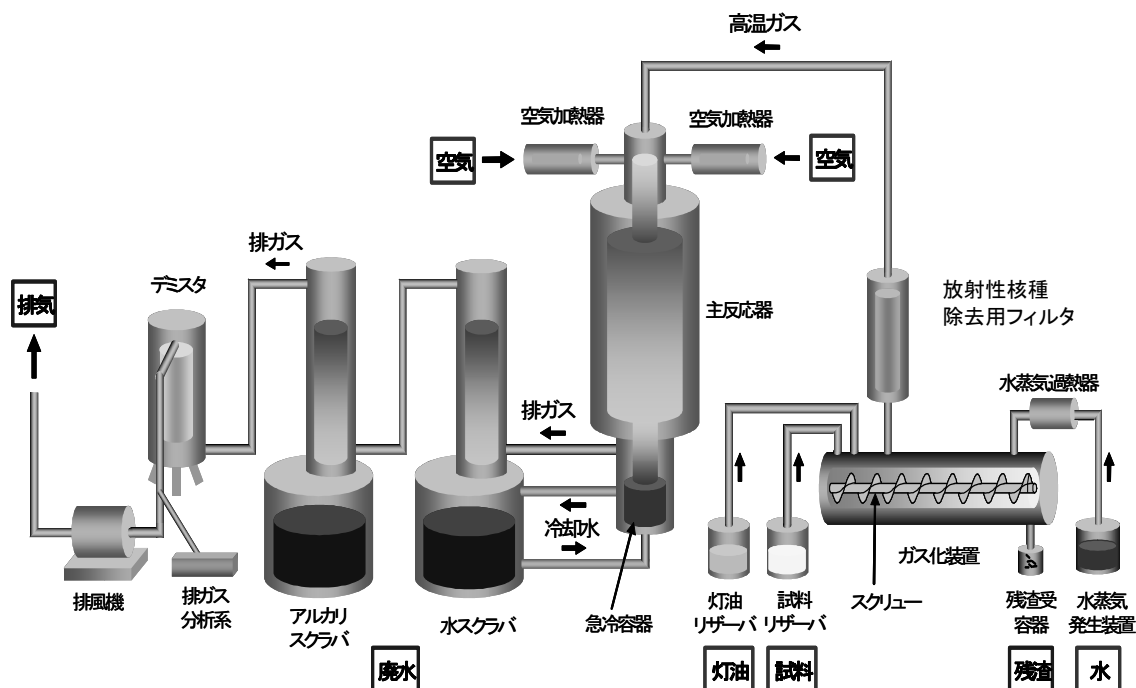
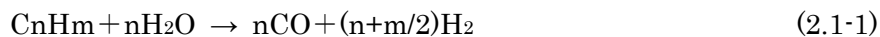


図 2.2-1 水蒸気改質処理試験装置の構成図

以下では、水蒸気改質プロセス及び液中燃焼プロセスの詳細について述べる。

(1)水蒸気改質プロセス

水蒸気改質反応は、過熱水蒸気と有機物を接触させ、水素、メタン等を生成する反応である。反応プロセスを以下に示す。



式(2.1-1)の場合、 $n=1$ 、 $m=4$  (メタン) を例にとれば、標準エンタルピーは+206kJ/mol であり、吸熱反応となっている。従って、低温では反応は進まず、高温で反応を行う必要がある。また、水蒸気改質反応は活性化エネルギーが大きく、反応が遅いことから、通常は触媒が使用される。なお、式(2.1-2)の標準反応エンタルピーは-41 kJ/mol、式(2.1-3)は-206 kJ/mol である<sup>2)</sup>。

水蒸気改質反応は、一般産業界において、廃タイヤのガス化減容処理、フロン分解処

理、廃プラスチックの油化処理<sup>3)</sup>等に利用されており、原子力業界においても、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た<sup>4)</sup>。その他の分野では、アンモニア生産のような工業的利用<sup>5)</sup>の他に、燃料電池に使用する水素を合成する研究<sup>6)</sup>、植物、廃棄物、低品位炭等から水素を取り出す研究<sup>7)</sup>が行われている。

放射性廃棄物処理では、廃棄物から燃料ガスを回収するのが目的ではなく、減容することが目的である。そのため有機物のガス化後、触媒を使用して完全に  $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $CO$  に転換するプロセスの代わりに燃焼プロセスを採用している。有機物の燃焼時には大量の煤が発生する等の問題点があるが、有機物のガス化に水蒸気改質反応を用いることで煤の発生を防止することができる。ここで、煤の生成過程を図 2.2-2 に示す<sup>8)</sup>。

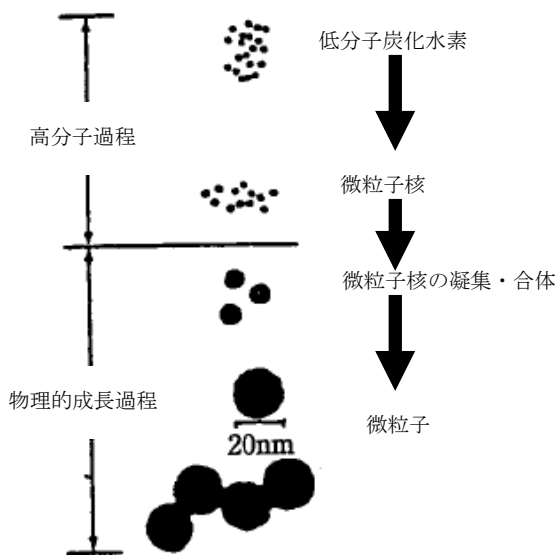


図 2.2-2 煤の生成過程<sup>8)</sup> (一部改訂)

煤の形成メカニズムについては諸説あり、詳細なメカニズムは解明されていないが、低分子炭化水素から微粒子の核が生成される高分子過程と生成した核が凝集または合体して微粒子となる物理的成長過程の二段階に分けることができると考えられている。低分子炭化水素から微粒子の核が生成する過程では、熱分解により炭化水素中の水素が脱離して炭化が進んでいくが、水蒸気改質処理法では、炭化反応のかわりに水蒸気改質反応が進んでいくことから煤の形成が抑制される。このため、ガス化プロセスの後段に放射性核種除去用のフィルタを置いても煤で閉塞することはなく、安定に長時間運転することが可能になる。

(2)液中燃焼プロセス

放射性有機液体廃棄物処理用に開発されていた液中燃焼処理装置の概略図を図2.2-3に示す<sup>9)</sup>。この装置では、有機廃液を焼却炉上部からミスト状にしてバーナーへ噴出させる。有機物は焼却炉内で燃焼・熱分解され、燃焼ガスは焼却炉下部のダウンカマーチューブを通して液中に噴出される。燃焼ガスは液温まで冷却され、炉外へ排出される。

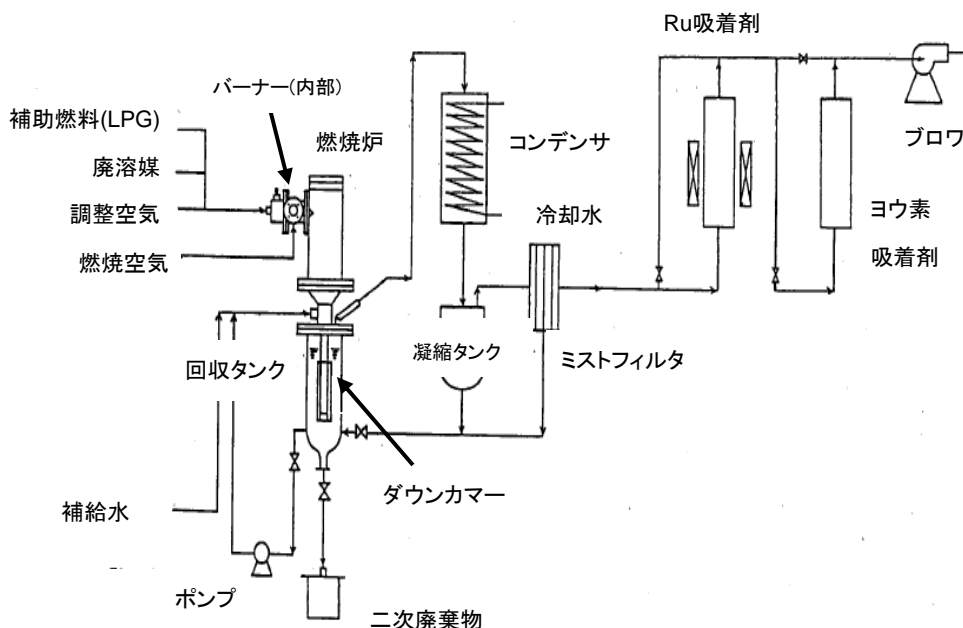


図 2.2-3 液中燃焼処理装置の概要<sup>9)</sup>(一部改訂)

液中燃焼プロセスでは、水中で燃焼を行うことにより、腐食性の燃焼生成物を溶液中に直ちに回収することができる。従って、焼却炉が腐食生成物に長時間さらされることがなく、炉壁の腐食を最小限に抑えることが可能であり、例えば焼却処理ではフッ素の発生により炉壁を傷めてしまうフロン等の分解に利用されている。ただし、水中で燃焼させるため、短い燃焼時間しかとることができず、固体廃棄物の処理はできない。また、放射性廃棄物を直接処理する場合には、水中で燃焼を行うことから、放射性核種で汚染された廃水が大量に発生する等の欠点がある。

2.2 特徴

水蒸気改質処理法は、既存の難燃物処理技術と比較して多くの優れた点を持っている。以下にその特徴を示す。

(1) 二次廃棄物発生量の低減

不揮発性の放射性核種は、ガス化装置における有機物のガス化の過程において揮発分と分離されることから、排ガスを洗浄するスクラバ水は、環境規制物質の処理さえ行えば放出することができる。したがって、放射性の液体の二次廃棄物はほとんど発生しない。

また、フィルタ以降の部分は放射性核種によって汚染されていないため、メンテナンス作業を容易に行うことができ、メンテナンス作業で発生した廃棄物も放射性廃棄物から除外できる可能性が高い。

(2) フィルタ及び配管の閉塞抑制

熱を加えるだけの通常の熱分解炉は煤やチャーが発生しやすいが、水蒸気改質処理法では水蒸気が水素の供給源となり、有機化合物の熱分解過程で起こる水素の脱離による炭化反応が抑制されるため、煤が発生しにくく、煤によるフィルタの閉塞が抑制される。

また、ガス化プロセス装置全体の加熱により、縮合リン酸等の配管内やフィルタ表面への付着が抑制される。

(3) 腐食抑制

ガス化プロセス装置全体の加温により、ハロゲン化水素による露天腐食を防止することができる。また、水中で燃焼を行うことにより、ハロゲン化水素等の腐食性の燃焼生成物による炉壁の腐食を防ぐことができる。

(4) コストの低減

放射性核種除去用のフィルタが燃焼部の前段に設置されているため(焼却炉では燃焼部の後段に設置されている)、放射性核種によりスクラバ等の排ガス処理系が汚染されることを防ぐことができる。そのため、排ガス処理系の設備コスト及びメンテナンスコストが低くなる。

(5) 多様な廃棄物に適用可能

廃棄物中の有機成分をガス化して分離した後、酸化分解するシステムであるため、廃棄物中に大量の不燃物や水が含まれるほか、固体廃棄物や不燃物と可燃物の混合物を処理することができる。

## 3.水蒸気改質処理法の適用

## 3.1 課題

前章では、焼却処理が困難な廃棄物の水蒸気改質処理法による処理技術について述べた。ここでは、水蒸気改質処理法をウランで汚染された TBP 廃溶媒の処理へ適用する際の課題を述べる。

## 3.1.1 二次廃棄物の発生

放射性のリン系有機難燃物である TBP 廃溶媒の処理方法には、焼却処理、酸化分解法、乾留固化法、プラスチック固化法等がある。焼却処理は減容率の高さから放射性可燃物の減容処理に使用されているが、TBP 廃溶媒の処理では、TBP の燃焼生成物であるリン酸ミストによるオフガス配管の閉塞や腐食が発生する。酸化分解法は、200～250℃の濃硝酸－濃硫酸混合溶液中で TBP 廃溶媒を分解する方法であるが、反応炉の材料選定が困難である。乾留固化法は、炉の腐食を避けるために中和剤として水酸化カルシウムを添加させ、400～650℃で反応させることにより TBP 廃溶媒を分解する手法であるが、二次廃棄物であるリン酸カルシウム塩が大量に発生する<sup>10)</sup>。プラスチック固化法は、TBP と PVC やエポキシ樹脂等を混合させ固化する手法であり、プロセスは非常に簡潔であるが、固化体が二次廃棄物として発生する<sup>11)</sup>。乾留固化法及びプラスチック固化法の欠点である大量の二次廃棄物の発生を解決するため、水蒸気改質処理法では、廃棄物中の有機物を水蒸気と反応させてガス化することにより、放射性核種と分離する方法を採用している。このガス化プロセスを実現するためには、以下に述べる課題を解決する必要がある。

## (1) TBP 廃溶媒のガス化

水蒸気改質処理法（図 2.2-1 参照）では、最初のガス化プロセスにおいて、廃棄物中の有機物と放射性核種を分離することから、このプロセスにおいてできるだけ高い割合で有機物をガス化することが二次廃棄物削減の鍵となる。

TBP は加熱により 269℃で熱分解し、リン酸とブテンが生成する<sup>12,13)</sup>。



TBP の熱分解温度で気体であるブテンは低分子化され、水蒸気とともに主反応器へ流れていくが、リン酸は一部が脱水縮合してポリマー化し、蒸発しにくくなることから、リン酸のガス化率を向上させることが二次廃棄物発生量削減のために必要となる。

## (2) ウラン移行率の低減

放射性核種が排ガス処理系へ移行してしまうと、汚染された廃水が大量に発生する。

このような放射性二次廃棄物の発生を防止するためには、放射性核種をガス化装置に留めておくことが必要となる。そのため、ガス化装置の後段に設置する放射性核種除去用フィルタの選定が重要となる。

### (3) リン酸ミストの回収

内山らは TBP の液中燃焼挙動に関する研究を実施し、TBP 処理時には粒径が  $1\mu\text{m}$  以下のリン酸ミストが大量に発生し、液中に回収できないため、ミストフィルタを用いて回収している<sup>14)</sup>。リン酸ミストが建屋排気系の HEPA フィルタまで到達すると HEPA フィルタの閉塞が問題となるため、リン酸ミストを何らかの方法で回収する必要がある。

### (4) メンテナンス廃棄物の発生

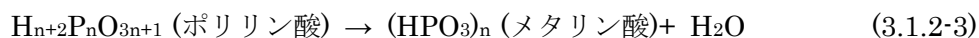
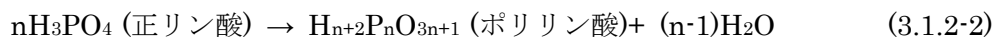
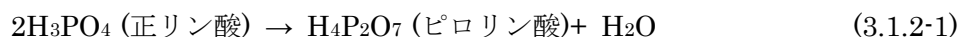
試料供給作業、残渣の排出作業等を含むメンテナンス作業において発生するウエス、RI 手袋、酢酸ビニルシート等は放射性二次廃棄物となり、その発生量が多い場合には、プロセスの減容効果を相殺してしまう可能性がある。従って、メンテナンス時の二次廃棄物の発生量を評価し、発生量が多い場合には低減策を検討する必要がある。

## 3.1.2 装置の基本性能と長期運転信頼性の確認

「2.2 水蒸気改質処理法の原理」で述べたように、水蒸気改質プロセスは、一般産業界では数多く使用されている。一方、放射性廃棄物の減容処理に関しては技術開発段階にあるため、水蒸気改質処理法の TBP 廃溶媒へ適用にあたっては、装置の基本的性能の確認と装置の長期運転に対する信頼性が重要となる。以下にこれらの項目に関する主な課題を述べる。

### (1) 縮合リン酸による配管閉塞

TBP の熱分解により生成するリン酸は、加熱により脱水縮合してピロリン酸 ( $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ )、ポリリン酸 ( $\text{H}_{n+2}\text{P}_n\text{O}_{3n+1}$ )、メタリン酸 ( $(\text{HPO}_3)_n$ ) へと変化する。さらに加熱するとメタリン酸が水分を放出して、五酸化二リン ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) が生じる<sup>15)</sup>。以下にその化学反応式を示す。



脱水縮合反応時、リン酸は脱水の程度により化学種が変化する。脱水の程度を、組成が $P_2O_5$ と $H_2O$ のみと仮定した場合の $P_2O_5$ 濃度で示すと、表3.1.2-1のようになる<sup>16)</sup>。

表3.1.2-1 縮合リン酸の脱水の程度と化学種の関係<sup>16)</sup>

$P_2O_5$ 濃度/wt%	化学種
72.4	$H_3PO_4$ (正リン酸)
79.8	$H_4P_2O_7$ (ピロリン酸)
82~84	$H_{n+2}P_nO_{3n+1}$ (ポリリン酸)
88.7	$(HPO_3)_n$ (メタリン酸)
92.0	$P_2O_5$ (五酸化二リン)

縮合リン酸の沸点は、脱水の進行とともに上昇していくことが知られている<sup>17)</sup>。このため、ガス化装置から主反応器までの間でガス化した温度よりも低い温度になる箇所があると脱水縮合したリン酸が付着することになる。配管、フィルタ等が縮合リン酸の付着により閉塞し、装置の運転が不可能になる。

## (2) リン酸による配管腐食

リン酸製造プラントでは、リン鉱石、硫酸、珪藻土を供給し、リン酸と石膏を生成させる反応槽での腐食が問題となっている。反応槽にはSUS316L鋼が使用されているが、材料片を用いた液温220℃、濃度1%リン酸の条件での腐食試験では、SUS316L鋼が溶解する結果が得られている<sup>18)</sup>。また、200℃及び250℃における75wt%リン酸溶液に対する種々の材料の腐食速度を測定した実験の結果を表3.1.2-2に示す<sup>19)</sup>。表を見ると、高温高濃度リン酸に対して耐食性が高い材料は、純金属では、白金、モリブデン、タンタル、銀及び銅である。合金では、ニッケル系のハステロイ及び銅系の白銅、アルミニウム青銅、シリコン青銅及びモネルである。

これらの腐食速度の文献値によれば、リン酸を加熱するガス化装置の材料にステンレス鋼を耐食材として使用することは難しく、腐食速度、価格、高温強度、脆化等を検討して材料を選択しなければならない。



表 3.1.2-2 200℃及び 250℃における 75wt%リン酸溶液  
に対する金属材料の腐食速度<sup>19)</sup> (一部抜粋)

材料	腐食速度(mm/year)		
	200℃	250℃	
純金属	白金	0	0.05
	モリブデン	0	0.20
	タンタル	0.05	0.13
	銀	0.41	1.27
	銅	1.12	2.79
	ニッケル	46.5	—
合金	ハステロイ B-2	0.18	0.53
	白銅 80-20	0.94	4.06
	白銅 70-30	1.02	4.98
	アルミニウム青銅	1.14	8.08
	シリコン青銅	1.17	4.01
	モネル K-500	4.65	13.1
	ハステロイ C276	6.35	8.61
	ハステロイ X	31.8	47.0
	SUS904L	37.3	—
	ハステロイ G	39.4	—
	SUS316L	127	391
	SUS304L	151	—

### (3) 燃焼安定性

一般廃棄物焼却炉では、ダイオキシン類、ばいじん等の発生量に関して排出基準が定められており、水蒸気改質処理法においてもこれらの排出基準を満たすことを確認する必要がある。主な排出基準を表 3.1.2-3 に示す。

### (4) 装置構成機器の寿命

水蒸気改質処理法の放射性廃棄物の減容処理への適用に関しては、技術開発段階にあるため、処理装置を構成する機器の寿命に関するデータが不足している。技術の評価を行うためには長期的な装置の運転を行い、機器寿命に関するデータを取得しておく必要がある。

表 3.1.2-3 有害ガスの排出基準

項目	排出基準		
ダイオキシン類	大気	焼却能力4t/h以上	0.1 ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>
		焼却能力2t/h～4t/h	1 ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>
		焼却能力2t/h未満	5 ng-TEQ/Nm <sup>3</sup>
	水質	10 pg-TEQ/L	
	煤塵	3 ng-TEQ/g	
ばいじん*	焼却能力4t/h以上	0.04 g-TEQ/Nm <sup>3</sup>	
	焼却能力2t/h～4t/h	0.08 g-TEQ/Nm <sup>3</sup>	
	焼却能力2t/h未満	0.15 g-TEQ/Nm <sup>3</sup>	
一酸化炭素	100ppm(廃棄物処理法及び茨城県公害防止条例規制値)		
窒素酸化物	250ppm(廃棄物処理法及び茨城県公害防止条例規制値)		
塩化水素*	700 mg-TEQ/Nm <sup>3</sup> (O <sub>2</sub> 12%)(約430ppm)		
硫黄酸化物*	基準値(Nm <sup>3</sup> )=K×10 <sup>-3</sup> ×(煙突実高+煙上昇高) <sup>2</sup> Kは地域ごとに定める定数		
窒素酸化物*	連続炉	250ppm(O <sub>2</sub> 12%)	
	連続炉以外の炉 40,000 Nm <sup>3</sup> /h以上	250ppm(O <sub>2</sub> 12%)	
ダイオキシン類 削減のための 構造基準	(1)外気と遮断された状態で定量ずつ連続的に廃棄物を燃焼室に投入できる供給装置の設置 (2)次の要件を備えた燃焼室の設置 ・ 燃焼ガスの温度が 800℃以上の状態で 2 秒以上滞留 ・ 外気と遮断 ・ 助燃装置の設置 ・ 燃焼に必要な空気を供給できる設備の設置 (3)燃焼ガスの温度をおおむね 200℃以下に冷却できる冷却設備の設置 (4)ばいじんを除去する高度の機能を有する排ガス処理設備の設置 (5)燃焼ガス温度及び排ガス中の一酸化炭素濃度の連続測定・記録のための装置の設置 (6)ばいじんを焼却灰と分離して排出・貯留できる設備の設置		

\* 火格子面積2m<sup>2</sup>以上、または焼却能力200kg/h以上の炉に適用

## 3.2 開発項目

### 3.2.1 二次廃棄物発生量の低減

ここでは、「3.1.1.二次廃棄物の発生」で挙げられた課題の解決方法について述べる。課題解決のために以下の項目について技術開発を行い、処理時に発生する二次廃棄物量を低減させる。

#### (1) ガス化率の向上

これまでの水蒸気改質処理試験装置の運転経緯から、ガス化装置の温度を 600℃にすることにより、ほとんどの有機化合物はガス化することができる。リン酸ポリマーの沸点が不明であるが 600℃で試験を行い、リン酸ポリマーの蒸発が不十分であれば、温度を上げていく。TBP、n-ドデカンともに炭化の原因となる不飽和結合がないことから、ほぼ 100%のガス化率を目標とする。

#### (2) ウラン移行率の低減

ウランの排ガス処理系への移行を防止するためにガス化装置の後段にフィルタを設置する。適当な素材、構造及び穴径のフィルタの選定により排ガス処理系へのウランの侵入を防止し、TBP 廃溶媒の処理で発生する廃水中のウラン濃度を放出基準 (0.037mg/L)未満にする。

#### (3) リン酸ミストの回収

HEPAフィルタ閉塞の原因となるリン酸ミストの回収が課題であることから、リン酸ミストの粒径分布及び粒子密度を測定し、測定結果に基づいてミストフィルタの設計を行う。設計したミストフィルタを使用して、リン酸ミストの回収試験を行い、その効果を確認する。

#### (4) メンテナンス廃棄物発生量の低減

メンテナンス時に発生する放射性二次廃棄物量を低減するため、メンテナンス作業中に発生した廃棄物量を測定し、その結果をもとに低減策を検討する。

### 3.2.2 装置の基本性能と長期運転信頼性の確認

TBP 廃溶媒の短期試験 (連続処理時間約 10 時間) 及び長期試験 (連続処理時間約 100 時間)を行い、「3.1.2 装置の基本性能と長期運転信頼性の確認」で提示した課題を解決し、実機の製作及び運転に必要な技術開発を行う。短期試験では、主に縮合リン酸による配管閉塞の抑制、配管腐食対策及び燃焼安定性の確保に関する課題を解決する。長期試験では、燃焼安定性の確保及び装置の寿命についての課題を解決する。

(1) 縮合リン酸による配管閉塞の抑制

ガス化装置出口から主反応器までの配管類をガス化装置の温度より 50℃程度高い温度に加熱して、縮合リン酸の付着を防止する。

試験後の目視点検により縮合リン酸が付着していないことを目標とする。

(2) 配管腐食対策

文献調査等から高温リン酸に対して耐食性のある材料を選定し、材料腐食試験を実施する。その結果から耐食材料の選定を行う。

(3) 燃焼安定性の確保

空気当量をパラメータとして処理試験中のガス燃焼温度、排ガス中の有害物質濃度を測定し、燃焼部温度がダイオキシン類削減のための構造基準で定められた800℃以上で安定していること及び有害物質濃度が大気汚染防止法、ダイオキシン類対策特別措置法、廃棄物処理法及び茨城県公害防止条例で定められた規制値以下であることを確認する。また、排ガス中の粒子状物質濃度の測定を行い、粒子状物質濃度が大気汚染防止法施行規則における廃棄物焼却炉の排出基準のうち最も厳しい40mg/Nm<sup>3</sup>以下であることを確認する。

フィルタの目詰まりに関しては、放射性核種除去用フィルタの加熱温度をガス化温度より 50℃程度高くすることによる縮合リン酸の付着防止、水蒸気による煤形成の抑制等の対策により、長時間の連続使用においてその性能を維持できることを目標とする。

(4) 装置構成機器の寿命

装置構成機器の寿命を評価するため、処理試験における回転機器及び加熱機器の使用時間を記録する。その結果を基に機器類の寿命を算出し、長期的な運転に耐えうるかを検討する。

## 4. 試験方法

### 4.1 水蒸気改質処理法による処理試験

#### 4.1.1 試験装置の概要

「2.1 水蒸気改質処理法の原理」の図 2.2-1 に実証規模水蒸気改質処理試験装置の概要を示した。

水蒸気改質処理試験装置の主要構成機器の性能を表 4.1.1-1 に示す。

水蒸気発生装置は、ガス化装置へ供給する水蒸気を発生させる装置で、蒸発缶、蒸発缶へ水を供給するポンプ及び加熱用ヒータで構成されている。

水蒸気過熱器は、水蒸気発生装置で発生させた水蒸気をガス化装置に導入する前に約 400℃まで昇温させるための装置であり、U 字形管体及び管内に設置されたパイプヒータで構成されている。

ガス化装置は、廃棄物を搬送するスクリュー、水蒸気と廃棄物を反応させる配管及び 3 ゾーン式のヒータを備えた電気炉で構成されている。ガス化装置内に供給された廃棄物はスクリューで搬送され、配管内で水蒸気と向流接触して分解、ガス化される。ガスはガス化装置から排出され放射性核種除去用フィルタへ導入される。ガス化されない部分は残渣となり、スクリューで搬送され、残渣受け容器へ排出される。

放射性核種除去用フィルタは、ガス化装置から排出されたガス中に含まれる粒子等を除去するメッシュフィルタと、周囲をヒータで加温できるフィルタ容器で構成されている。

主反応器は、燃焼部、本体部、急冷容器等で構成されている。燃焼部では、放射性除去用フィルタに導入されたガスが加熱空気と混合され、酸化分解される。分解されたガスは、ダイオキシンの生成を抑制するため、本体部で 2 秒以上滞留された後、急冷容器内の冷却水中へ放出されて 80℃以下まで冷却される。冷却水は急冷容器と後述する水スクラバ間を循環しており、循環経路内の熱交換器及びチラーにより冷却される。

空気加熱器は、主反応器燃焼部へ供給する空気を加熱する円筒形のヒータである。

スクラバは、水スクラバ及びアルカリスクラバで構成されている。スクラバにより、排ガス中の酸性ガス（リン酸）は除去される。

デミスタは、排ガスに同伴する粉塵やスクラバで除去しきれなかったリン酸ミストを除去するガラス繊維をエレメントとするフィルタである。

排ガス分析系では、排ガス中の一酸化炭素濃度、窒素酸化物濃度等の測定、ガス中の粉塵量の測定等が行われる。処理試験中はサンプリングポートを通して排ガスの一部を連続的に分析している。

表 4.1.1-1 水蒸気改質処理試験装置の主要構成機器の性能

装置名	仕 様
水蒸気発生装置	型式：ヒータ加熱式（ヒータ 7kW） 容器：300mmφ 供給量：100ml/min
水蒸気過熱器	型式：ヒータ加熱式（パイプヒータ 3kW） 形状：U字形管体
ガス化装置	型式：外熱式スクリューフイダ方式（ヒータ 6kW×3ゾーン） 温度：750℃（最高使用温度） 容積：26L
放射性核種除去用 フィルタ	型式：メッシュフィルタ(穴径：10、40μm等) 温度：650℃（最高使用温度）
主反応器	型式：空気加熱式円筒形炉 容積：245L 温度：1,300℃(最高使用温度)
空気加熱器	型式：ヒータ加熱式（スーパーヒータ 12kW） 供給量：90Nm <sup>3</sup> /h（最大供給量） 温度：1,000℃（最高使用温度）
水スクラバ	型式：水洗浄型スクラバ 液量：50L～150L 温度：45℃(運転時) 液：イオン交換水
アルカリスクラバ	型式：アルカリ水中和型スクラバ 液量：350L～700L 温度：45℃以下 液：NaOH(5wt%以下)水溶液
デミスタ	型式：密閉式吸引型 処理ガス量：1.2 Nm <sup>3</sup> /min 温度：45℃以下
排ガス分析系	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 定電位電解方式ガス濃度計（TESTO 350XL） 測定対象：CO、O<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、H<sub>2</sub></li> <li>・ 光散乱式粉塵計（柴田科学 LD-2） 測定対象：粒子状物質</li> <li>・ ダストサンプラー {セルロース・ガラス繊維フィルタ（ADVANTEC 製 HE-40T）} 捕捉対象：ウラン</li> </ul>

#### 4.1.2 試薬類

##### (1) 模擬溶媒

試験に用いた模擬溶媒は、使用済み燃料の再処理事業において採用されているPurex法における代表的な組成を模擬したものとした。試験に用いた模擬溶媒の組成を表4.1.2-1に示す。TBP（大八化学工業）及びn-ドデカン（日鉱石油化学）は試薬特級を使用した。模擬溶媒は、後述する小型装置によるリン酸ミストの粒径測定、水蒸気改質処理試験装置によるリン回収率の測定、縮合リン酸による配管閉塞の抑制試験及び燃焼が安定する最小空気当量確認試験において使用した。

表4.1.2-1 試験に用いた模擬溶媒の化学的性質

名称	成分	沸点(°C)	密度(g/cm <sup>3</sup> )
TBP	[CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> O] <sub>3</sub> PO	269(分解)	0.979
n-ドデカン	CH <sub>3</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>10</sub> CH <sub>3</sub>	215	0.749

##### (2) TBP廃溶媒

核種を含むTBP/n-ドデカンは、再処理技術開発においてウラン試験の抽出剤として使用されたものを使用した。

ウラン試験において使用したTBP廃溶媒の分析値を表4.1.2-2に示す。これらの試料を用いて、廃棄物のガス化率、ウラン移行率及びリン回収率の測定を行い、メンテナンス廃棄物発生量を記録した。また、模擬溶媒の処理試験で確認した配管閉塞の抑制対策の効果、燃焼安定性及び装置寿命の確認を行った。

表4.1.2-2 試験に用いたTBP廃溶媒の組成

成分	30% TBP廃溶媒	40% TBP廃溶媒	41% TBP廃溶媒	48.5% TBP廃溶媒
TBP	30wt%	40wt%	41wt%	48.5wt%
n-ドデカン	70wt%	60wt%	59wt%	51.5wt%
天然ウラン	0.01g/L	0.08g/L	0.07g/L	0.07g/L
DBP	—	—	2.6g/L	0.23g/L
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	—	—	—	0.76g/L

#### 4.1.3 試験条件

試験において設定した主な運転条件を表4.1.3-1に、装置における温度測定位置を図4.1.3-1に示す。ここで、試験パラメータとしたガス化装置温度、水蒸気供給速度等は、試験に応じて適当な値を設定した。

表 4.1.3-1 試験で設定した主な運転条件

項目	図 4.1.3-1 中の記号	設定値
試料供給速度	—	3kg/h
水蒸気供給速度	—	4.5kg/h
空気比*	—	1.8
放射性核種除去用フィルタ穴径	—	10、40μm 等
ガス化装置出口温度	T2	600℃
ガス化装置中央温度	T3	600℃
ガス化装置入口温度	T4	600℃
蒸気過熱器出口蒸気温度	T1	400℃
ガス化装置出口配管温度	T5	600℃
放射性核種除去用フィルタ表面温度	T6	600℃
熱分解ガス配管温度	T7	600℃
主反応器燃焼用空気温度	T9	1,000℃
主反応器燃焼部温度	T10	<1,300℃

\* 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

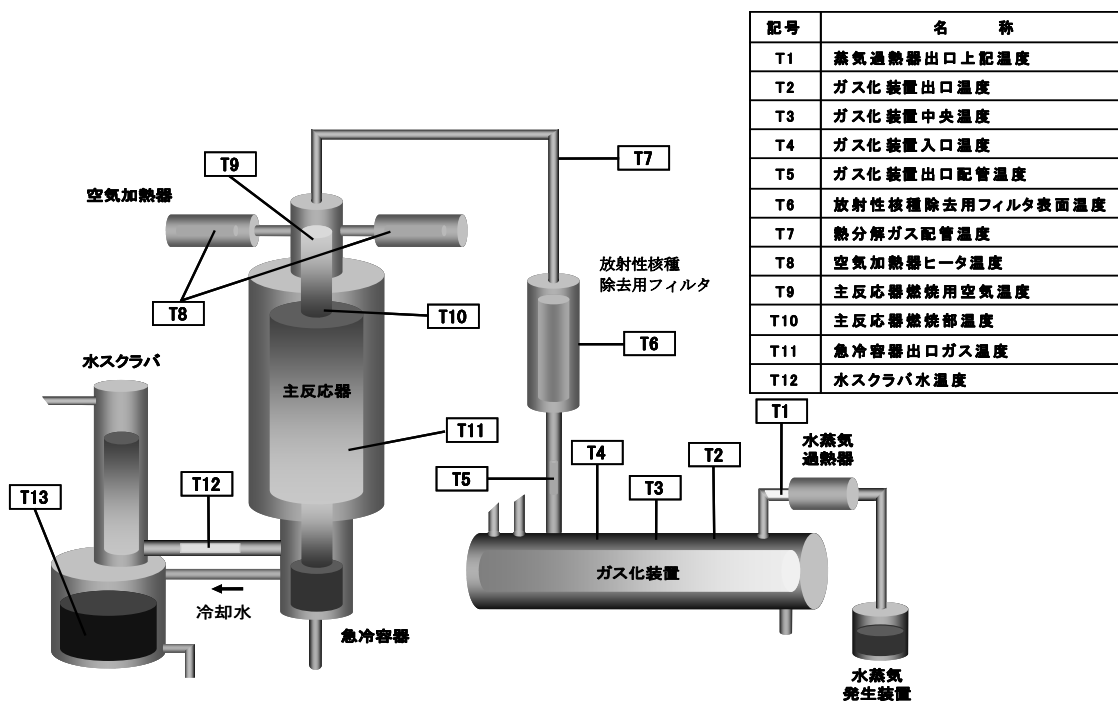


図 4.1.3-1 水蒸気改質処理試験装置における温度計測位置



#### 4.1.4 分析方法

ウラン移行率及びリン回収率の評価のため、水スクラバ液、アルカリススクラバ液等から分析用試料を採取し、ウラン濃度及びリン濃度の測定を行った。

スクラバ液中のウラン濃度の測定は、イミノ二酢酸型キレート樹脂からなる固相抽出ディスクを用いて溶液中のウランを濃縮分離し、ディスクからウランを溶出した溶離液の蒸発乾固物を対象に  $\text{ZnS(Ag)}$ シンチレーション検出器で  $\alpha$  放射能を測定する方法で行った。排ガス中のウラン濃度は、排ガス処理系に設置したダストサンプラー内のセルロース・ガラス繊維フィルタを  $\text{ZnS(Ag)}$ シンチレーション検出器で測定することにより評価した。TBP 廃溶媒、スクラバ液及び排ガスの各ウラン濃度からウラン移行率及び放射性核種除去用フィルタの性能を評価した。

リン濃度の測定は、残渣、水スクラバ液、アルカリススクラバ液、デミスタ液及びデミスタ後段の排ガスの各サンプルについて行った。

残渣については、試験後に残渣受け容器及びガス化装置内に残留した固体を回収し、乾燥重量を測定後、回収された残渣を均一化し、代表サンプルをエネルギー分散型蛍光 X 線分析（以下、蛍光 X 線分析）により測定して固体中のリン濃度を推定した。残渣が液体状であった場合には、イオンクロマトグラフィにより測定を行った。

水スクラバ及びアルカリススクラバのリン濃度については、それぞれの液を十分に攪拌し、分析用サンプルを採取した後、液体クロマトグラフィにより測定を行い、得られたリン酸濃度からリン量を求めた。

排ガス系でのリン濃度については、粉塵計で連続的に測定したデミスタ後段における排ガス中の粒子状物質濃度から排ガス中の粒子状物質の平均値を算出し、排ガスに含まれる粒子状物質をすべてリン酸と仮定して、リン酸の平均濃度を求めた。リン酸の平均濃度からリン濃度を算出し、処理期間中における平均排ガス量及び処理時間から排ガスへのリンの移行量を計算した。

デミスタにおけるリン濃度は、ガス化装置、水スクラバ、アルカリススクラバ及び排ガス系へ移行しなかったリンがすべてデミスタに捕捉されたと仮定して計算した。

## 4.2 材料腐食試験

TBP の熱分解により発生するリン酸による材料腐食の影響を評価するために、2 種類の材料腐食試験を実施した。

1 つは、腐食の激しくなる温度を特定するためのリン酸溶液流通試験である。リン酸による腐食は、表 3.1.2-2 で示したように溶液温度が高温であるほど激しくなるという特徴がある。リン酸は脱水縮合により沸点が上昇していくこと及び蒸発と脱水縮合が同時に起こっていることから、リン酸が完全に蒸発する温度が不明である。そのため、腐食の激しい温度領域を明確にする必要がある。

もう 1 つは、リン酸溶液流通試験により特定された腐食の激しい温度領域における腐食速度を測定し、耐食性を持つ材料を選定するためのリン酸溶液浸漬腐食試験である。以下では、それぞれの試験の概要を示す。

#### 4.2.1 リン酸溶液流通試験

水蒸気改質処理試験装置の構成材料の一つである SUS310S のリン酸による腐食が激しくなる温度領域を推定するために、SUS310S 配管を 650℃に加熱し、リン酸を 7 日間(168h)連続で流通する腐食試験を実施した。

##### (1)試験装置の概要

リン酸溶液流通試験装置は、外直径 27.2mm、肉厚 5mm の SUS310S 配管を有効加熱長が 300mm の管状炉で約 30 度傾けてリン酸が流れ入るように設置した試験体加熱炉、窒素ガスまたは乾燥空気をポンベより 100mL/min で通気するガス流量調整装置、シリンジポンプを用いて 1mL/h で通液するリン酸供給装置及びアルカリトラップから構成される。図 4.2.1-1 に試験装置の概要を示す。

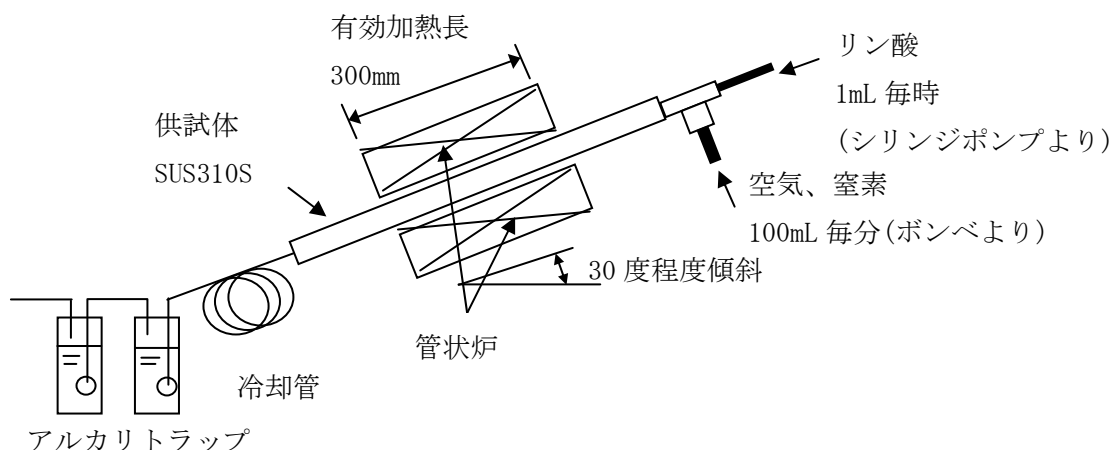


図 4.2.1-1 リン酸溶液流通試験装置の概要

##### (2)試薬類

試験には試薬特級のリン酸を使用した。

##### (3)試験条件

試験条件を表 4.2.1-1 に、試験に供した SUS310S 配管の組成を表 4.2.1-2 に示す。

表 4.2.1-1 リン酸溶液流通試験条件

試験 No.	流通ガス	流通液体
1	空気 100mL/min	リン酸 1mL/h
2	窒素 100mL/min	リン酸 1mL/h

表 4.2.1-2 SUS310S 配管の組成

材料名	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Cu	Si	P	C	S
SUS310S	53	25	20	1.5	-	-	<1.5	<0.045	<0.080	<0.030

#### 4.2.2 リン酸溶液浸漬試験

「4.2.1 リン酸溶液流通試験」において明らかにした、リン酸による腐食が激しくなる温度領域における腐食速度を推定するために、リン酸溶液浸漬試験を行った。以下では、その概要について述べる。

##### (1) 試験方法の概要

浸漬試験に供する試験片は、15mm×25mm×3mm程度とし、前処理として#320及び#400のサンドペーパーで表面が金属光沢を呈するまで研磨し、その後アセトン中で脱脂した。

浸漬試験は、テフロン製フラスコ中でリン酸溶液 100ml に試験片 2 個を浸漬し、アルミナバス中で加熱した。なお、試験中に蒸発した成分は、フラスコ上部に取り付けた冷却管で液化してフラスコ内に戻している。

試験期間は、1日5時間×3日とし、5時間毎にリン酸溶液を交換し、試験片は取り出してイオン交換水中で超音波洗浄を実施した。洗浄後、40℃恒温槽内で乾燥させた後に重量及び寸法を測定した。測定した重量及び試験片の表面積から単位時間当たりの腐食速度を以下の計算式により計算した。

$$\text{腐食速度(mm/year)} = \frac{1000 \times 24 \times 365 \times \text{重量減少(g)}}{\text{浸漬時間(h)} \times \text{表面積(mm}^2\text{)} \times \text{密度(g/cm}^3\text{)}}$$

試験装置の概要を図 4.2.2-1 に示す。

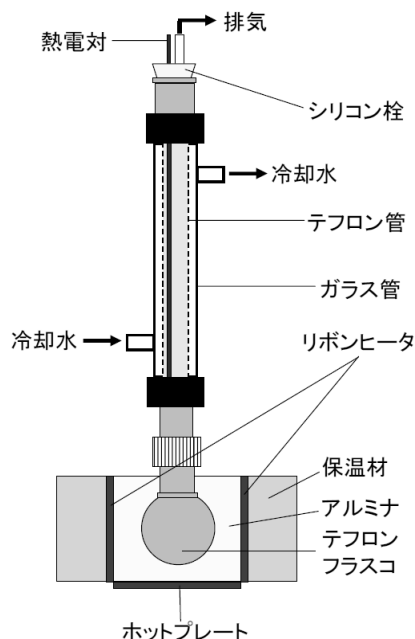


図 4.2.2-1 リン酸溶液浸漬試験装置の概要

(2) 試薬類

試験で使用するリン酸溶液は、腐食の激しくなる温度まで加熱する必要がある。そのためには沸点の高い、高濃度のリン酸が必要となるため、特級リン酸及び五酸化二リンを混合し、市販のリン酸よりも高濃度のリン酸溶液を使用した。試験に使用したリン酸及び五酸化二リンの性質を表 4.2.2-1 に示す。

表 4.2.2-1 浸漬試験で使用した試薬の性質

試薬名	濃度	沸点(°C)
リン酸	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 85wt%	158
五酸化二リン	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> >97wt%	360(昇華)

(3) 試験条件

試験条件を表 4.2.2-2 に、試験に供した材料の組成を表 4.2.2-3 に示す。リン酸溶液の温度条件は、腐食の激しい温度領域を推定するリン酸溶液流通試験の結果から決定することとした。試験に供した材料は、リン酸溶液流通試験に使用した SUS310S の他に、文献調査で耐食性が高かった高ニッケルステンレス鋼、ニッケル系合金ハステロイ C22 及びハステロイ C276 を選定した。

表 4.2.2-2 リン酸溶液浸漬試験条件

浸漬液	浸漬時間	浸漬液交換頻度
リン酸 100ml	15 時間(1 日 5 時間×3 日)	1 回/5 時間

表 4.2.2-3 浸漬試験供試材の組成

材料名	Fe	Cr	Ni	Mn	Mo	Cu	Si	P	C	S
SUS310S	53	25	20	1.5	-	-	<1.5	<0.045	<0.080	<0.030
高ニッケル ステンレス鋼	37	27	31	3.5	1.0	<2.0	<0.6	<0.025	<0.020	<0.015
ハステロイ C22	3	22	56	<0.5	13	3	<2.5	<0.35	<0.08	<0.01
ハステロイ C276	5	16	57	<1.0	16	4	<2.5	<0.35	<0.08	<0.01

純金属類のうち耐食性が高い白金、モリブデン、タンタル、銀及び銅は、文献調査により、以下のような問題があると考えられたため、試験から除外した。

(1) 白金

白金はリン酸に対して高い耐食性があるが、非常に高価である。

(2) モリブデン

モリブデンは、酸化性雰囲気では高温中での劣化が著しい。

(3) タンタル

タンタルは水素による脆化が激しく、炭化水素の分解により水素が発生する箇所の材質には適さない。

(4) 銀及び銅

銀及び銅は、ステンレス系合金との接触により腐食速度が大きくなる可能性が高い。

5.試験結果及び考察

5.1 二次廃棄物発生量の低減

5.1.1 ガス化率

TBP 廃溶媒のガス化を行うガス化配管の概要を図 5.1.1-1 に示す。図 5.1.1-1 では、配管の試料供給口側の開口端を原点として水蒸気供給口側への距離（単位：cm）をプラス側にとっている。図中の丸数字は、図 5.1.1-2 のガス化配管昇温時に温度を測定した箇所である。

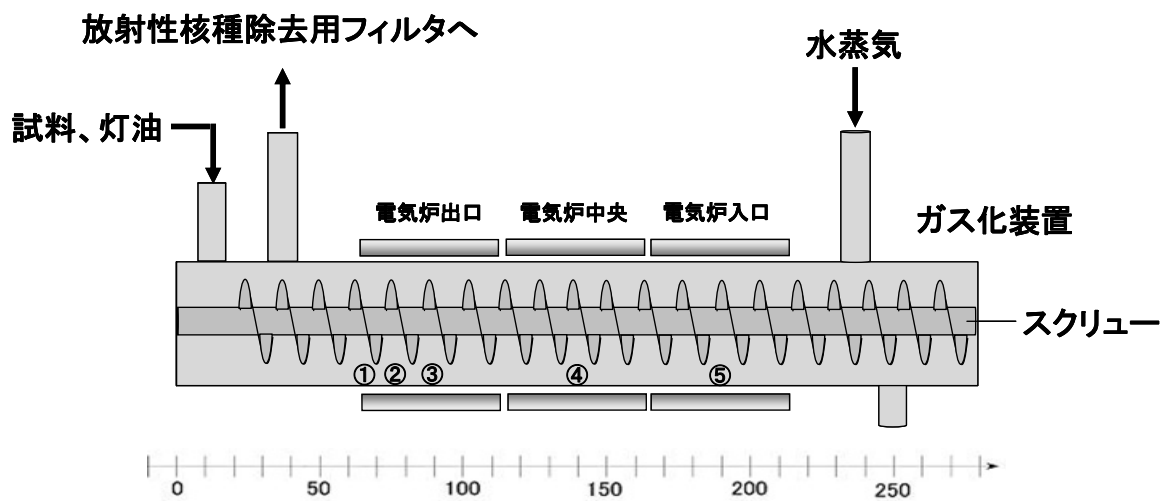


図 5.1.1-1 ガス化装置周辺の概要

図 5.1.1-2 にガス化配管の温度分布を示す。電気炉入口、電気炉中央、電気炉出口の温度はそれぞれの電気炉の中央の温度を測定した。丸数字とともに示した距離は、図 5.1.1-1 において丸数字で示した点であり、配管の試料供給口側を原点とした距離である。測定箇所はいずれも配管の真下とした。

図 5.1.1-2 を見ると、電気炉の端面に近い部分(①65cm)では温度上昇が鈍く、電気炉の設定温度である 600℃まで到達しなかった。これは、電気炉の端面では、電気炉に覆われていない部分の放熱による熱損失の影響が大きいためと考えられるが、リン酸をガス化させるには十分な温度である。このため、ガス化装置内を 600℃に設定して約 100 時間の TBP 廃溶媒の連続処理試験 (TBP 廃溶媒処理量 274kg) を実施し、以下の式から求めたガス化率は、99.6%となった。

$$\text{ガス化率(\%)} = \left\{ 1 - \frac{\text{ガス化装置内の残留物重量(kg)}}{\text{処理した廃棄物重量(kg)}} \right\} \times 100$$

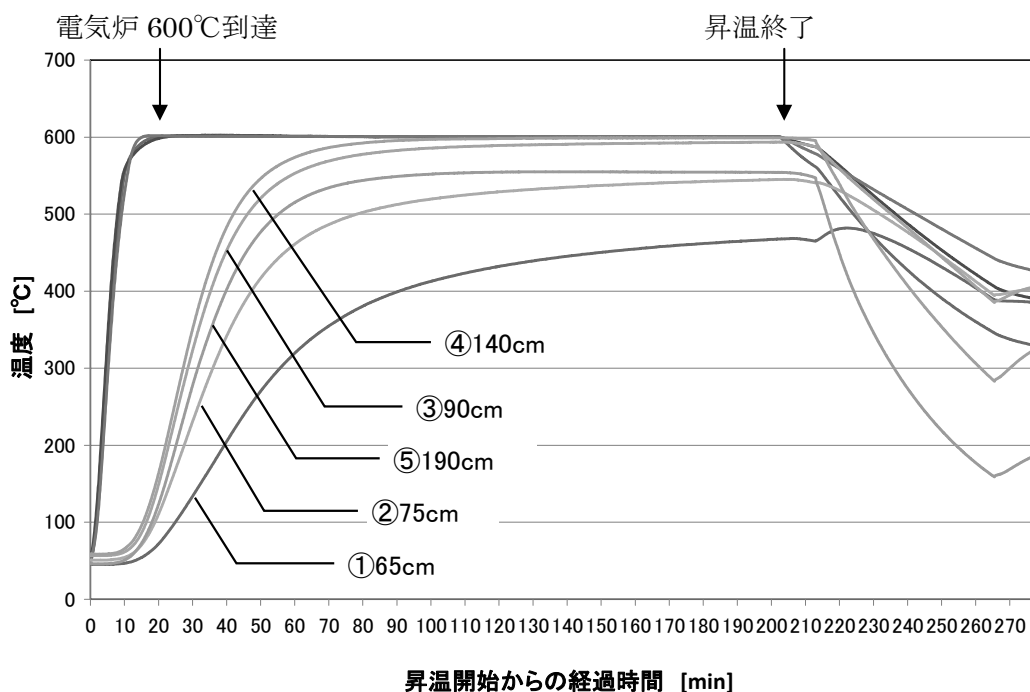


図 5.1.1-2 ガス化配管昇温時の温度変化

TBP 廃溶媒処理試験後の残渣を蛍光 X 線分析した結果を表 5.1.1-1 に示す。残渣からは、Fe、Cr、Ni 等の配管、スクリー等の装置材料と同様の成分が検出されたため、残渣の大部分は腐食生成物であると考えられる。高耐食性の材料を選定することにより放射性廃棄物の発生量を低減することができ、ガス化率を改善させることが可能であると考えられる。「5.2.2 腐食対策」で述べる各材料の腐食速度の結果から、配管材料を SUS310S から耐食性のあるハステロイへ変更することで、単位時間当たりの腐食速度を 1/34 程度にすることができる。この腐食速度の減少率を単純に腐食量の減少率とすると、腐食生成物を 97%削減することができ、ガス化率を 99.9%以上にすることが可能と考えられる。

表 5.1.1-1 残渣の蛍光 X 線分析結果

検出成分	P	Fe	Cr	Ni	U	Si	Mo	Mn
含有率 (%)	51.902	20.963	6.922	8.815	3.614	4.543	0.363	1.563

### 5.1.2 ウラン移行率

水蒸気改質処理試験装置においてガス化装置から後段へのウランによる汚染を防止するためには、ガス化装置配管と主反応器の間にフィルタを設置することが有効であると考えられる。以下では、ウランを捕集するためのフィルタの検討を行った結果を示す。

#### (1) フィルタの選定

「3.1.2 運転時の装置性能」で述べたように、フィルタの温度をリン酸がガス化する温度よりも高い温度に設定しないとフィルタに脱水縮合したリン酸が付着することが考えられる。そのため、このような高温でも使用可能なフィルタを導入する必要がある。表 5.1.2-1 に各種集塵装置の使用温度についてまとめたものを示す<sup>20,21)</sup>。

表 5.1.2-1 各種集塵装置の使用温度<sup>20,21)</sup>

種類	最高使用温度	備考	
金属メッシュフィルタ	650°C*1	電気炉設定温度である 600°C程度で使用可能	
セラミックフィルタ	1,100°C*2	600°C以上では集塵性能が不安定となる	
サイクロン	400°C	さらに高温(<1,000°C)の場合は耐火材を内張りする必要がある	
バグ フィルタ	普通ろ布	80~130°C	材質により温度が異なる
	ガラスろ布	250°C	テフロンろ布も同程度である
電気集塵	乾式	400°C	温度による粒子の電気抵抗変化が問題
	湿式	80°C	発生蒸気による絶縁部分の劣化が問題
洗浄集塵	400°C	さらに高温のときは入口を耐火材で内張りする必要がある	

\*1 650°C : 富士フィルター工業(株)『フジロイ』

\*2 1,100°C : イソライト工業(株)製『イソフィル』

ガス化装置電気炉の温度を 600°Cに設定していることから、その温度で使用可能な金属メッシュフィルタ及びセラミックフィルタが候補に挙げられた。セラミックフィルタは、600°C以上の領域で使用すると逆洗の効果が小さくなり、寿命が短くなる等の報告がある<sup>21)</sup>ことから、ガス化装置配管と主反応器の間に設置するフィルタには、金属メッシュフィルタを採用した。



(2) フィルタ穴径の検討

図5.1.2-1に球形粒子の重力による終末速度の関係<sup>22)</sup>を示す。残渣の主成分であると推定されるリン酸鉄の比重2.7を残渣粒子の比重と仮定すると、ガス化装置内の気体の流速0.05m/sと沈降速度が一致する粒子直径は25 $\mu\text{m}$ となる(図5.1.2-1中に矢印で示す)。このことから、残渣中の粒子は少なくとも25 $\mu\text{m}$ 以上の直径を持っていなければ舞い上がらないこととなる。すなわち、TBP廃溶媒をガス化した際に粒径25 $\mu\text{m}$ 未満の粒子はガス化したリン酸とともに後段へ送られ、それ以上の大きさに成長した粒子はガス化装置内に留まることになる。そのため、処理試験開始時のガス化装置の後段に設置した放射性核種除去用フィルタの穴径は、粒子直径が25 $\mu\text{m}$ 未満のリン酸の金属塩粒子に同伴するウランを捕捉し、かつ「5.1.3 リン回収率」で述べる粒径分布が0.06~1.1 $\mu\text{m}$ のリン酸ミストを通過させるため、10 $\mu\text{m}$ とした。

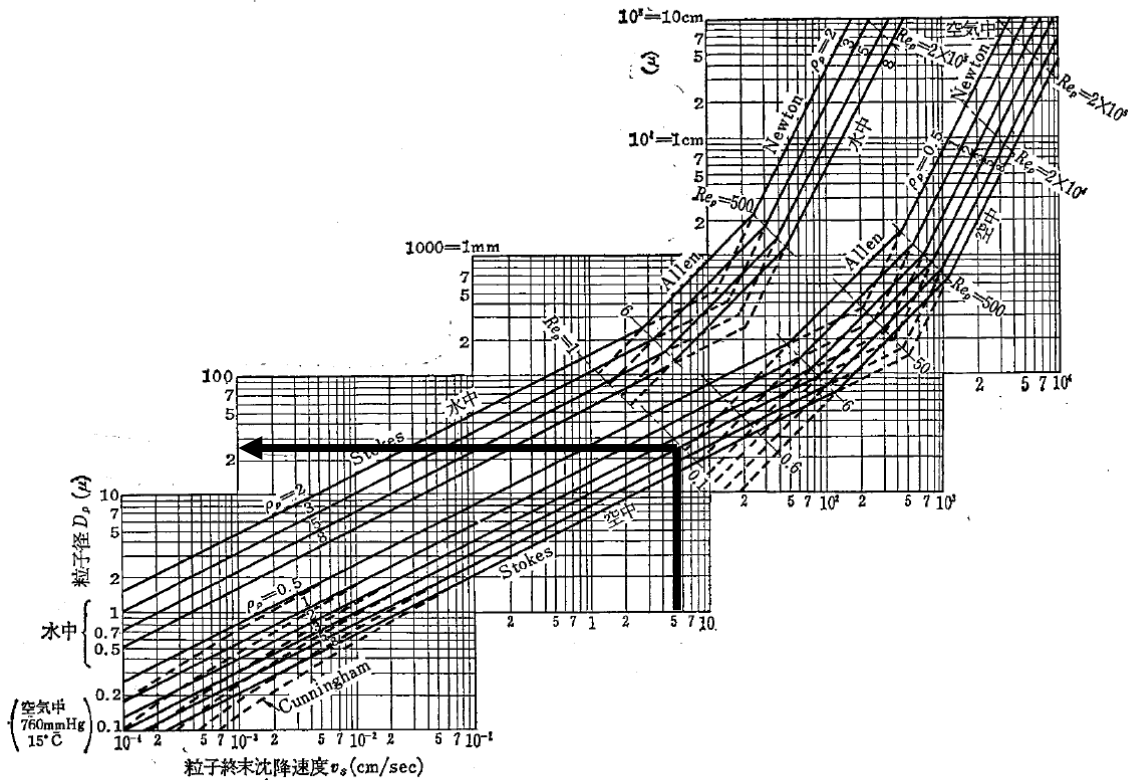


図 5.1.2-1 球形粒子の重力による終末沈降速度<sup>22)</sup>

10 $\mu\text{m}$ の穴径のフィルタを用いた場合の30wt%TBP廃溶媒処理時の放射性核種除去用フィルタ前後の差圧の変化を図5.1.2-2に示す。TBP廃溶媒処理開始から18時間では、フィルタ前後の差圧は0kPa付近にあり、フィルタの初期性能が維持されたと考えられる。

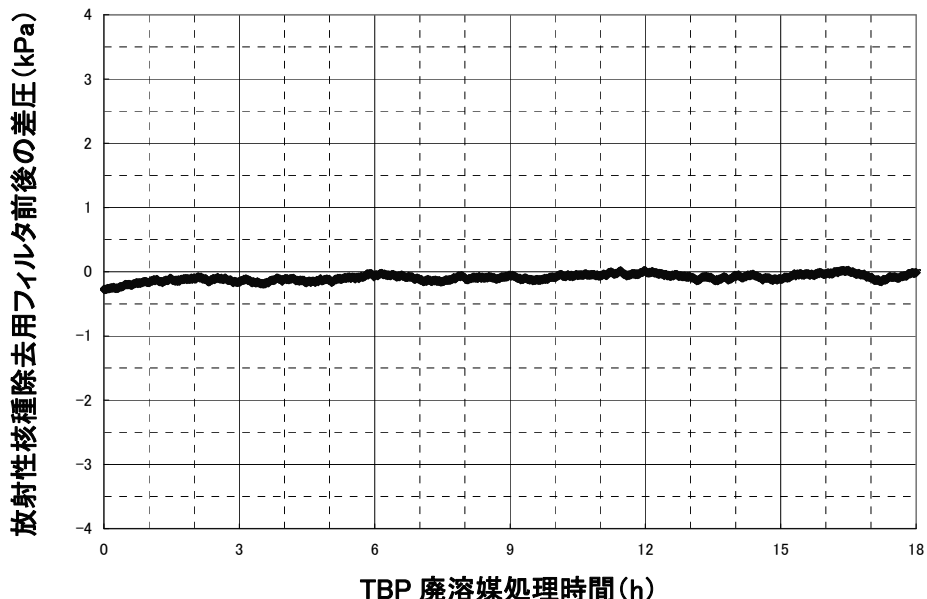


図 5.1.2-2 30wt%TBP 廃溶媒処理時の放射性核種除去用フィルタ前後の差圧の変化

(3) 放射性核種の除去性能確認

TBP廃溶媒の処理後に排ガス及び廃水へのウランの移行率を測定することにより、放射性核種の除去性能の確認を行った。表5.1.2-2 に排ガス及びスクラバ洗浄水等のウラン濃度の分析結果を示す。アルカリスクラバ廃水を除き、環境へ放出可能なウラン濃度 (0.037mg/L未満) となっている。アルカリスクラバ廃水については、炭酸イオン濃度が高く、試料からウランを抽出する操作において、炭酸イオンがウランと錯体を作って吸着材へのウランの吸着を妨害することから分析が困難になっており、検出下限値が他の試料と比べて高いことが、ウラン濃度が高いことの原因となっている。5.1.1 節で述べたようにTBP廃溶媒のガス化率は99.6%であり、燃焼後の排ガス及びスクラバ洗浄水は全て環境へ放出可能なことから、ガス化率99.6%がそのまま減容率となる。従って、水蒸気改質処理法によるTBP廃溶媒の減容率は99.6%と非常に高い。

表5.1.2-2 スクラバ洗浄水等のウラン濃度分析結果

分析試料	排ガス	デミスタ廃水	アルカリスクラバ廃水	水スクラバ廃水
分析結果	< 1.4×10 <sup>-7</sup> mg/L 検出下限値 未満	< 0.03mg/L 検出下限値 未満	< 0.1mg/L 検出下限値 未満	< 0.03mg/L 検出下限値 未満

処理試験においては、フィルタの閉塞の調査のため、穴径 10 $\mu\text{m}$  のフィルタだけでなく、穴径 40 $\mu\text{m}$  等のフィルタに変更して試験を行っているが、どの条件でもウランの濃度は検出下限値未満であった。TBP 廃溶媒に含まれる天然ウランは、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  の化学形態をとり、 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  は加熱されると  $\text{UO}_3$  に転換され、 $\text{UO}_3$  は 520 $^{\circ}\text{C}$  で  $\text{UO}_{2.90}$ 、610 $^{\circ}\text{C}$  で  $\text{U}_3\text{O}_8$  に転換される<sup>23)</sup>。ウラン酸化物は 600 $^{\circ}\text{C}$  では揮発しないこと、ガス化装置内の気体の流速が 0.05m/s 程度と遅いこと及び図 5.1.2-3 に示すように残渣が塊状であることから、ウランを含む粉末状の粒子は発生しないか、発生してもほとんど飛散せず、ウラン濃度が検出下限値未満になったと考えられる。

以上の結果から、ウランで汚染された TBP 廃溶媒を処理する場合は放射性核種除去用フィルタの導入は不要であると考えられるが、微粒子を含む多種多様な廃棄物の処理やスクラバ等後段での二次廃棄物の処理を考慮すれば、ガス化装置の後段への放射性核種除去用フィルタの設置は必要と考えられる。

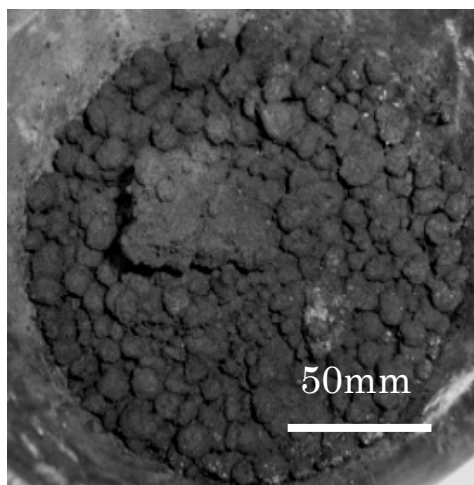


図 5.1.2-3 残渣受容器に排出された残渣

### 5.1.3 リン酸ミストの回収

「3.1.1. 二次廃棄物の発生」で述べたように、TBP 廃溶媒の処理により発生するリン酸ミストが建屋 HEPA フィルタを閉塞させる可能性があることから、小型の処理装置を使用して、模擬溶媒の処理中に発生するリン酸ミストの粒径分布の測定を行い、測定結果を基に粒径分布に合わせたミストフィルタの設計を行った。

リン酸ミストの粒径分布をエレクトロカルロープレッシャーインパクト（以下、ELPI）によって測定した。ELPIでは、0.03~10 $\mu\text{m}$ の粒径範囲を13段階に分級して測定している。その結果を図5.1.3-1 に示す。リン酸ミストの99.9%以上が0.06~1.1 $\mu\text{m}$ に分布しており、この範囲のミストを除去出来ればほとんどのリン酸ミストを除去できることが明らかとなった。

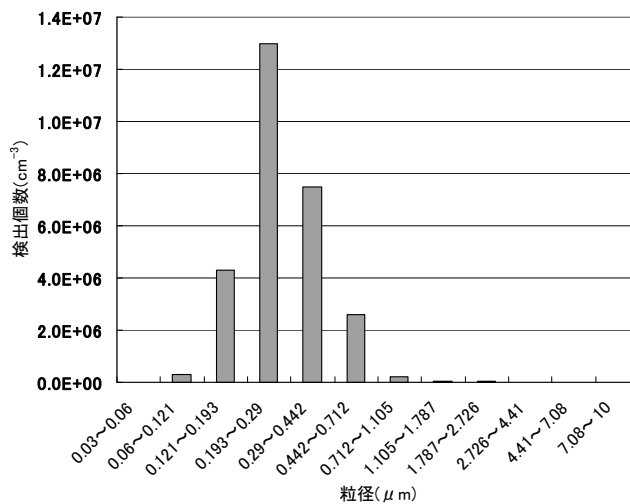


図 5.1.3-1 模擬溶媒処理で発生するリン酸ミストの粒径分布

模擬溶媒処理時に使用したガラス繊維フィルタの仕様を表5.1.3-1に示す。単一繊維捕集効率 $E$ は、繊維1本が粒子を捕集する効率であり、ガス流速に依存した値である。繊維層フィルタの捕集効率 $E$ は、以下の式で表すことができる<sup>24)</sup>。

$$E = [1 - \exp\{-4(1 - e)L\eta / \pi e \times df\}] \times 100$$

ここで、 $e$ は繊維層の空間率、 $L$ は繊維層の厚み、 $\eta$ は単一繊維捕集効率、 $\pi$ は円周率、 $df$ は繊維の直径である。

表5.1.3-2にフィルタの捕集効率の計算値を示す。ガラス繊維フィルタは、直径 $0.5\mu\text{m}$ 以下の粒子に対しては、ファン・デル・ワールス力が効果的に働くために99.97%の粒子を捕集することができる。また、直径 $2\mu\text{m}$ 以上の粒子に対しても、物理的濾過作用により99.99%の粒子を捕集することができる。ファン・デル・ワールス力及び物理的ろ過作用の効果が小さくなる直径が $0.5\sim 2\mu\text{m}$ の粒子であっても、捕集効率は99.8%以上となり、ほぼ全量のリン酸ミストを回収できると推測される。

小型の処理装置を用いて行ったリン酸ミストの粒径測定結果及びガラス繊維フィルタの捕集効率の計算結果の結果を踏まえて、ガラス繊維を捕集材とするデミスタを排ガス処理系に追加した水蒸気改質処理試験装置を用いて模擬溶媒の処理を行った。図5.1.3-2にデミスタ前後のリン酸ミスト発生状況を示す。模擬溶媒の処理後に、ガス化装置内の残渣、スクラバ液、デミスタ液及び排ガス中に含まれるリン濃度を測定した。その結果を表5.1.3-3に示す。排ガス処理系に移行したリン量は、0.1%未満であり、ほぼ全量のリンを回収できることを確認した。

表 5.1.3-1 ガラス繊維フィルタの仕様

	粒子径( $\mu\text{m}$ )	捕集効率
単一繊維捕集効率* (流速0.03m/s)	0.3	0.018
	0.5	0.01
	0.7	0.0078
	1.0	0.0085
	2.0	0.017
繊維層の空間率	0.9016	
繊維の直径	12 $\mu\text{m}$	
繊維層の厚み	70mm	

\* アイシーイー (株) ミスト除去装置の捕集効率計算書による

表 5.1.3-2 フィルタの捕集効率の計算値

粒子の直径( $\mu\text{m}$ )	捕集効率(%)
0.3	99.99
0.5	99.97
0.7	99.82
1.0	99.80
2.0	99.99



デミスタ通過前



デミスタ通過後

図 5.1.3-2 デミスタ前後のリン酸ミスト発生状況

表 5.1.3-3 リンの装置内分布

ガス化装置	水スクラバ	アルカリススクラバ	デミスタ	排ガス
2.9 wt%	41.8 wt%	1.0 wt%	54.2 wt%	<0.1 wt%

#### 5.1.4 メンテナンス廃棄物発生量

メンテナンス廃棄物の発生量を評価し、二次廃棄物発生量の低減策を検討するため、2つの試験結果を比較した。

試験 1：処理時間 135 時間、処理量 135kg(処理速度約 1kg/h)

試験 2：処理時間 960 時間、処理量 2,633kg(処理速度約 3kg/h)

##### (1)試験 1 のメンテナンス廃棄物発生量

8 回の試料供給作業、2 回の残渣排出作業、2 回のスクラバ及びデミスタ廃液の排出作業等のメンテナンス作業で発生した二次廃棄物は、ウエス、綿手袋、酢酸ビニルシート(以下、酢ビシート)、RI ゴム手袋、レガーテープ、ポリエチレン袋等であり、その重量は 20.4kg であった。メンテナンス作業で発生した廃棄物の種類及び重量を表 5.1.4-1 に示す。処理した試料の重量に対して発生する二次廃棄物の重量の割合は約 16%となった。紙類、酢ビシート及びレガーテープの発生量が多くなっているが、これはメンテナンス作業時にガス化装置配管の分解点検を行ったためである。具体的には、ガス化装置配管内の洗浄作業並びにスクリーフィーダの抜出し及び洗浄作業を開放系で行っており、汚染拡大防止のための養生として酢ビシート及びレガーテープが、配管及びスクリーフィーダの洗浄のために紙類が使用されている。通常の処理運転におけるメンテナンス作業においては、試料供給作業、残渣排出作業及び廃液排出が主な作業となり、分解点検に係る作業頻度は大幅に少なくなる。そのため二次廃棄物発生量は、今回測定した廃棄物量よりも大幅に少なくなると考えられる。

表 5.1.4-1 短時間処理後のメンテナンス作業で発生した二次廃棄物の種類及び重量

廃棄物名称	廃棄物発生量	
	カートンボックス数	重量 (kg)
紙類 (ウエス、綿手袋)	3 個	6.7
酢ビシート	6 個	7.8
ポリエチレン袋	1 個	1.3
レガーテープ	2 個	2.6
RI ゴム手袋	1 個	2.0

(2)試験 2 におけるメンテナンス廃棄物発生量

90 回の試料供給作業、16 回の残渣排出作業、98 回のスクラバ及びデミスタ廃液の排出作業等のメンテナンス作業で発生した二次廃棄物は、ウエス、綿手袋、酢酸ビニルシート、RI ゴム手袋、レガータープ、ポリエチレン袋等であり、カートンボックスで 50 個、その重量は 72.5kg であった。メンテナンス作業で発生した廃棄物の種類及び重量を表 5.1.4-2 に示す。処理した試料の重量に対して発生する二次廃棄物の重量の割合は約 3%となった。長期連続処理におけるメンテナンス作業では、試料供給作業、残渣排出作業及び廃液排出作業が主な作業となり、分解点検作業がないため、処理重量の 3%程度の二次廃棄物しか発生しなかったと考えられる。

表 5.1.4-2 長時間処理後のメンテナンス作業で発生した二次廃棄物の種類及び重量

廃棄物名称	廃棄物発生量	
	カートンボックス数	重量 (kg)
紙類 (ウエス、綿手袋)	13 個	27.6
酢ビシート	9 個	10.8
ポリエチレン袋	20 個	22.0
レガータープ	7 個	8.1
RI ゴム手袋	2 個	4.0

長時間処理時のメンテナンス作業は、試料供給作業、残渣排出作業及び廃液排出作業が主となり、短時間処理で発生するメンテナンス廃棄物発生量よりも、処理した試料の重量に対して発生する二次廃棄物の重量の割合を非常に小さくすることが可能であることが明かとなった。メンテナンス廃棄物をさらに低減するためには、ポンプによる試料供給、廃液排水の自動化等のメンテナンス廃棄物を発生させる作業の効率化が必要になると考えられる。

5.2 装置の基本性能と長期運転信頼性の確認

5.2.1 縮合リン酸による配管閉塞の抑制

ここでは、模擬溶媒を使用した短時間処理の場合について述べる。TBP 廃溶媒を使用した長時間処理の場合については、「5.2.3 燃焼安定性」で述べる。

ガス化装置の出口及び放射性核種除去用フィルタと主反応器間の配管温度の経時変化を図 5.2.1-1 に示す。ガス化装置の出口から放射性核種除去用フィルタを経て主反応器までの配管は、ほぼ同じ温度になるように配管をヒータで加熱し、その温度を制御

した。その結果、処理試験後の目視確認により、装置内には縮合リン酸の付着がないことが確認された。

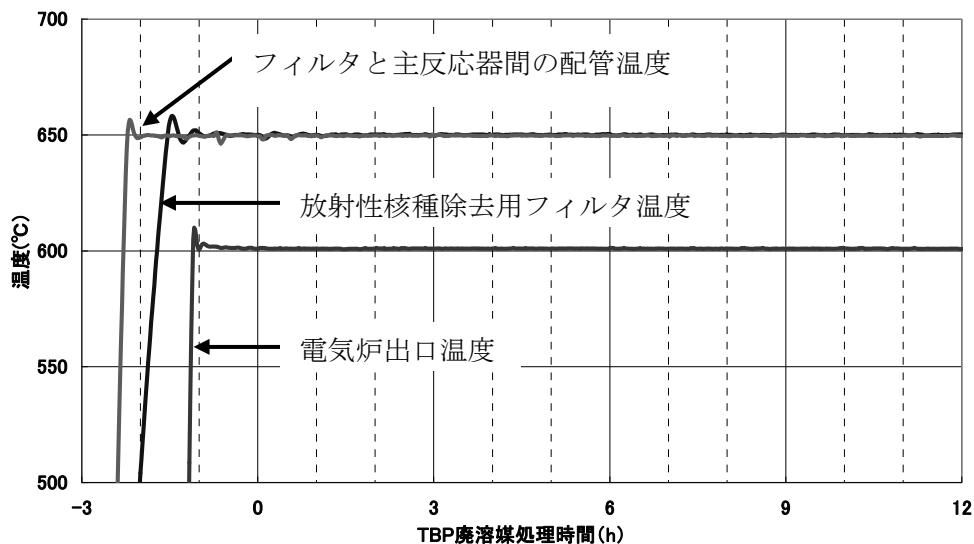


図5.2.1-1 ガス化装置の出口、配管及び放射性核種除去用フィルタの温度の経時変化 (TBP廃溶媒処理時間のマイナス側は装置が昇温中であることを示す)

配管加熱については、加熱の効果を確認するため、放射性核種除去用フィルタ内の温度を50°C低下させて運転した。その結果、フィルタには水あめ状の縮合リン酸が付着した。その様子を図5.2.1-2 に示す。

以上のことから、放射性核種除去用フィルタの設定温度をガス化温度(600°C)+50°C以上とすることで縮合リン酸によるフィルタの閉塞を抑制できることが明らかとなった。



図5.2.1-2 高温フィルタ内温度低下時に付着した縮合リン酸



5.2.2 腐食対策

(1) リン酸溶液流通試験結果

TBP 廃溶媒の熱分解で発生するリン酸による配管の腐食が、最も激しくなる温度領域を推定するためのリン酸溶液流通試験を行った。雰囲気の違いによる影響を調査するため、空気及び窒素の 2 種類のガスを選定し、空気を 100mL/min 流通する試験を試験 No.1、窒素を 100mL/min 流通する試験を試験 No.2 とした。

この試験で使用した SUS310S 配管の試験中の表面温度分布及び腐食状況の概要を図 5.2.2-1 に示す。管状炉内の温度は 650°C に設定し、管状炉中心付近では 650°C、管状炉の端面付近では熱損失により温度が低下している。

腐食状況に関しては、管状炉内はほとんど浸食が見られなかったが、管状炉中心部からリン酸溶液供給側へ 200mm 及び排ガス系側へ 200mm の位置の配管が大きく浸食された。浸食が大きかった管状炉中心部からリン酸溶液供給側へ 200mm 及び排ガス系側へ 200mm の位置での配管断面の観察結果を表 5.2.2-1 に、浸食深さを表 5.2.2-2 に示す。リン酸溶液供給側 200mm と排ガス系側 200mm の位置での浸食を比較すると、リン酸溶液供給側 200mm の位置の浸食が大きく、空気雰囲気では 1 週間(168h) で最大 1.7mm 浸食された。流通ガスを空気から窒素に換えることにより、減肉速度は緩和され、1 週間の最大浸食深さは、1.7mm から 0.6mm へ減少した。

大きく腐食した、管状炉中心部からリン酸溶液供給側へ 200mm 及び排ガス系側へ 200mm の位置の配管温度は、図 5.2.2-1 からそれぞれ 250°C 及び 230°C と推定された。以上の結果から、SUS310S では、リン酸が 200~250°C の温度領域で腐食が最も激しくなることが明かとなった。この温度領域内において耐食性のある材料を選定するため、濃度 95wt% のリン酸による浸漬腐食試験を行うこととした。

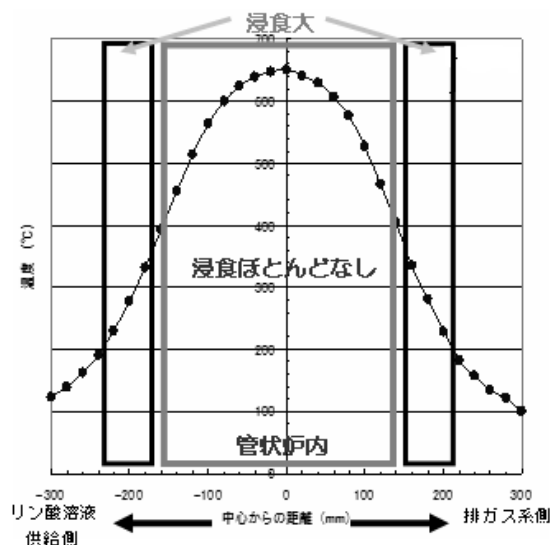


図 5.2.2-1 リン酸溶液流通試験中の配管表面温度分布及び腐食状況

表 5.2.2-1 リン酸溶液流通試験後の配管断面観察結果

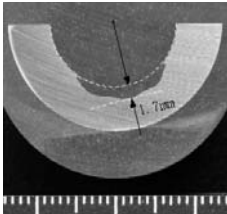
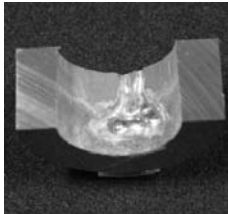
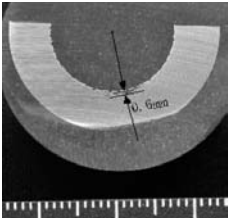
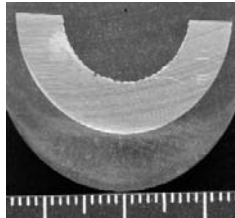
試験 No.	流通 ガス	腐食状況	
		管状炉中心より リン酸溶液供給側 200mm	管状炉中心より 排ガス系 200mm
1	空気		
			

表 5.2.2-2 リン酸溶液流通試験後の配管侵食深さ

試験 No.	流通 ガス	最大侵食深さ/mm	
		管状炉中心より リン酸溶液供給側へ 200mm	管状炉中心より 排ガス系側へ 200mm
1	空気	1.7	0.8
2	窒素	0.6	0.0

(2) リン酸溶液浸漬試験結果

「5.2.2 腐食対策①リン酸溶液流通試験」において明らかにしたリン酸による腐食が最も激しい温度領域において、リン酸溶液浸漬試験を行った。

腐食が最も激しい温度領域を 200～250℃と推定したため、リン酸溶液温度を 200、230、250℃に設定して、それぞれの温度において腐食速度を測定した。測定した腐食速度の結果を表 5.2.2-3 に示し、腐食速度の温度による変化を図 5.2.2-2 に示す。SUS310S に関しては、200℃でのみ腐食速度の測定を行った。

表 5.2.2-3 リン酸溶液浸漬試験における各材料の腐食速度

リン酸溶液 温度(°C)	腐食速度(mm/year)			
	SUS310S	高ニッケル ステンレス鋼	ハステロイ C22	ハステロイ C276
200	685.0	35.57	27.16	9.461
230	—	78.58	29.08	10.69
250	—	164.8	43.01	20.41

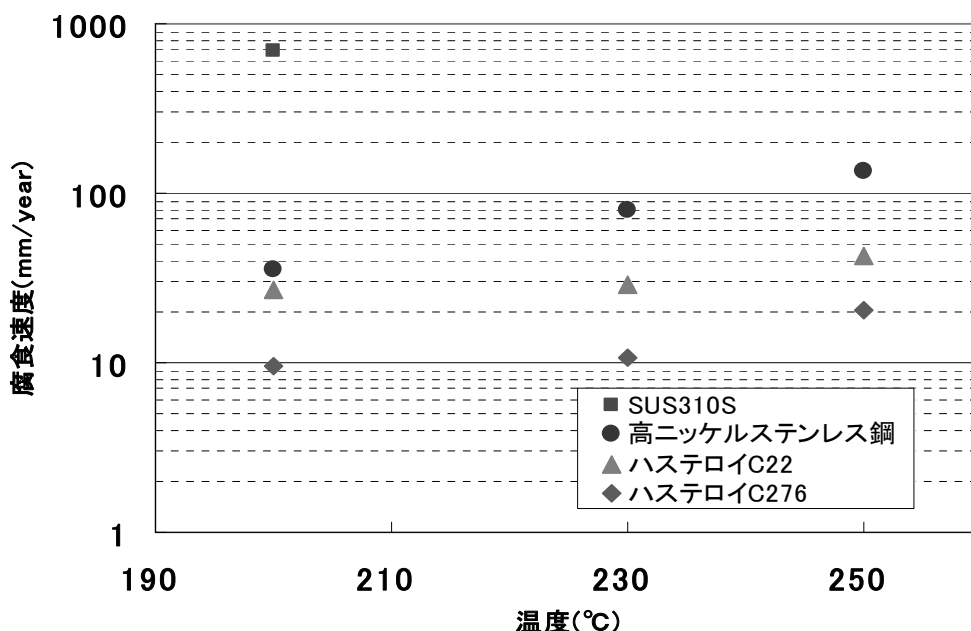


図 5.2.2-2 リン酸溶液浸漬試験における各材料の温度による腐食速度の変化

(3) 腐食対策

リン酸溶液浸漬試験の結果から、溶液温度 250°Cにした場合、最も高耐食であるハステロイ C276 でも年間 20mm 程度腐食により減肉することが明らかとなった。従って、肉厚 6mm の配管を使用したとすると 110 日程度の運転で肉厚が 0mm になると計算される。そのため、実用にあたってはさらなる高耐食性材料が必要であると考えられる。

しかし、「3.1.2. 運転時の装置性能」で述べたように、文献調査において最も高耐食である白金は非常に高価（平成 21 年現在 500 万円/kg）であり、モリブデン、タンタル等の高耐食金属も脆化等の問題を抱えていることから、ある程度の耐食性を持ち

リーズナブルな価格で購入できるハステロイ C276（平成 21 年現在 1 万円/kg）を使用し、定期的に交換することで腐食対策とする。

また、今後、TBP 廃溶媒以外の放射性廃棄物へ水蒸気改質処理法を適用するにあたっては、廃棄物の性状に応じた腐食対策が必要であり、例えば、廃フッ素油の処理においては、耐ハロゲン性を検討する必要があると考えられる。

### 5.2.3 燃焼安定性

#### (1) 最小空気当量の確認

模擬溶媒の処理において、空気当量を随時変化させて得られた主反応器燃焼部の温度、CO 及び NO<sub>x</sub> 濃度の変化並びに粒子状物質濃度の変化を図 5.2.3-1 及び図 5.2.3-2 に示す。

模擬溶媒を処理対象にした試験における排ガス中の CO 濃度は、空気当量 1.5 から 1.2 まで 2ppm 以下で安定していたが、空気当量 1.1 では 10~20ppm 程度のピークが確認された。さらに、空気当量を 1.0 に低下させると CO 濃度は急激に上昇し最大で約 1,300ppm のピークが確認され、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）を大きく上回った。

模擬溶媒の処理試験中の NO<sub>x</sub> 濃度は、空気当量に依存することなく 120ppm 程度で安定しており、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）を上回ることにはなかった。また、主反応器燃焼部の温度も、空気当量に依存することなく、1,100℃から 1,200℃の範囲で安定して制御できることが確認された。

図 5.2.3-2 から分かるように、排ガス中の粒子状物質濃度は、大気汚染防止法施行規則における廃棄物焼却炉の排出基準のうち最も厳しい 40mg/Nm<sup>3</sup> を大きく下回っている。また、空気当量の低下に従って段階的に減少する傾向が確認された。一般的に空気当量の低下に従って燃焼は不安定になることから煤の発生量は増加する傾向にあることから、計測された粒子状物質のほとんどはリン酸ミストであり、煤は含まれていなかったと考えられる。なお、空気当量の低下に従って排ガス中のリン酸ミスト濃度が減少した要因は、空気当量の低下にともない排ガスの流速が低下し、スクラバ及びデミスタにおけるリン化合物の捕捉効率が上昇したためと考えられる。以上の結果から模擬溶媒の安定した処理が行える空気当量は CO 濃度が規制値を超えていない 1.1 以上であることが確認された。

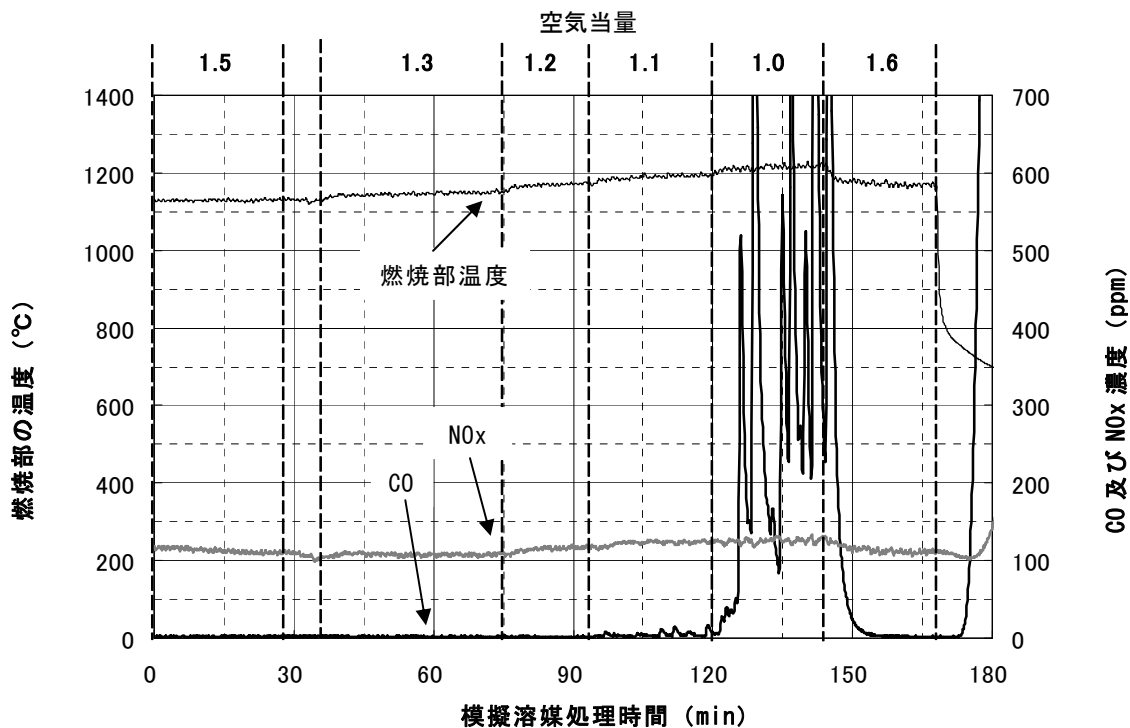


図 5.2.3-1 模擬溶媒処理時の空気当量に対する主反応器燃焼部の温度，CO 及び NO<sub>x</sub> 濃度の変化

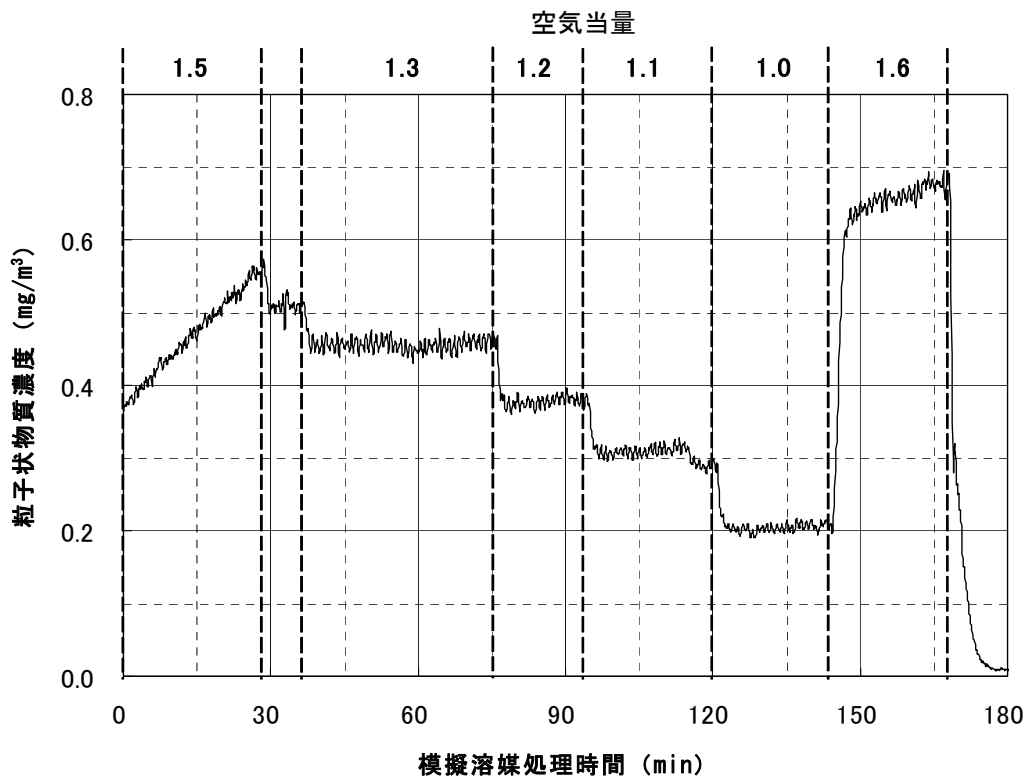


図 5.2.3-2 模擬溶媒処理時の空気当量に対する排ガス中の粒子状物質濃度の変化

(2)ガス化装置配管への縮合リン酸の付着

「5.2.1.リン酸化合物による配管閉塞の抑制」で述べたように、配管類の加熱によって模擬溶媒の短時間処理での縮合リン酸の配管への付着抑制に成功した。その条件を用いて TBP 廃溶媒の長時間処理試験を行ったところ、ガス化装置と放射性核種除去用フィルタ間の配管温度が $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度変動する現象が発生した。その様子を図 5.2.3-3 に示す。この温度変動に伴い、主反応器燃焼温度が $\pm 50^{\circ}\text{C}$ 程度変動し、燃焼状態が不安定となった。試験後、装置のメンテナンスを実施したところ、ガス化装置から放射性核種除去用フィルタへ抜ける配管に縮合リン酸の付着が見られた。その様子を図 5.2.3-4 に示す。

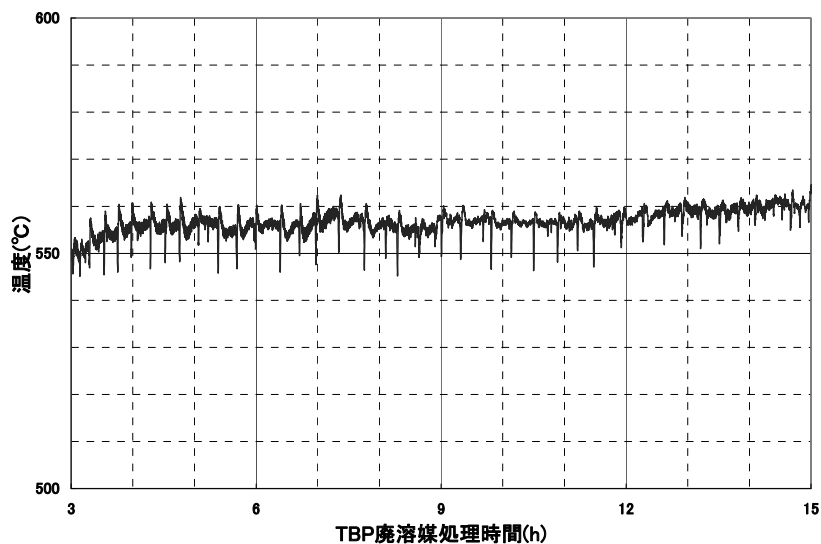


図 5.2.3-3 TBP 廃溶媒の長時間処理試験における  
ガス化装置と放射性核種除去用フィルタ間の配管温度の変動

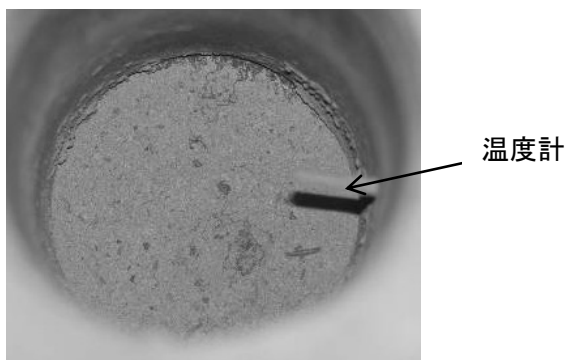


図 5.2.3-4 ガス化装置から放射性核種除去用フィルタへ抜ける  
配管への縮合リン酸の付着

このことから、ガス化装置と放射性核種除去用フィルタ間の配管温度の変動は、配管への縮合リン酸の付着し、ガス化が抑制されるため温度が上昇するプロセスと、ある程度付着したところで付着物が脱落し、脱落した付着物がガス化して温度が低下するプロセスが繰り返し行われることにより発生したものと推定された。

そのため、ガス化装置配管の放射性核種除去用フィルタへ抜ける配管周辺部へシースヒータを緻密に設置する対策を行った。その結果、長時間処理試験におけるガス化装置と放射性核種除去用フィルタ間の配管温度は図 5.2.3-5 のように安定し、主反応器燃焼温度も安定した。試験後の装置のメンテナンスにおいて配管への縮合リン酸の付着状況を確認したところ、図 5.2.3-6 のように縮合リン酸の付着は見られなかった。

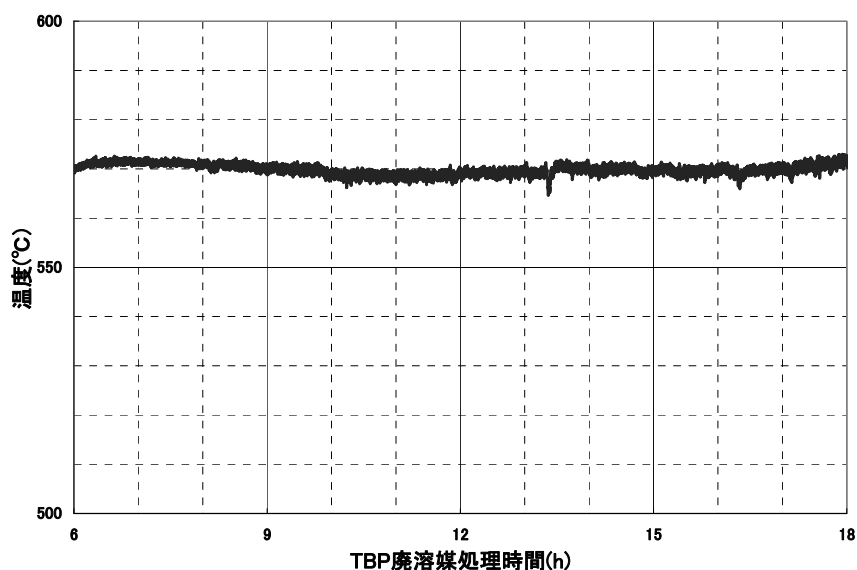


図 5.2.3-5 処置後の TBP 廃溶媒の長時間処理試験における  
ガス化装置と放射性核種除去用フィルタ間の配管温度の変動

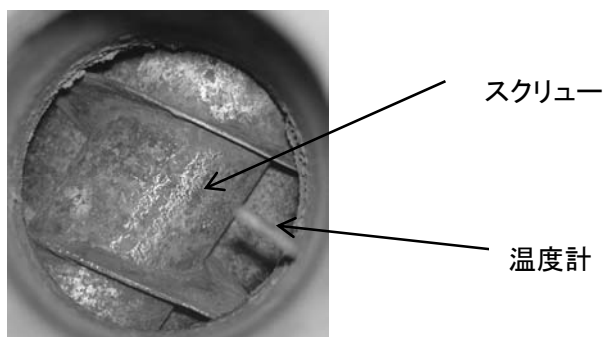


図 5.2.3-6 処置後のガス化装置から放射性核種除去用フィルタへ抜ける配管  
(配管への縮合リン酸の付着は無く、スクリューが見えている)

(3)放射性核種除去用フィルタの差圧上昇

長時間の処理試験中に放射性核種除去用フィルタの前後の差圧上昇が上昇する現象が見られた。40wt%TBP 廃溶媒処理時の放射性核種除去用フィルタ前後の差圧の変化の一例を図 5.2.3-7 に示す。フィルタ前後の差圧は、処理時間の経過とともに連続的に約 0.2kPa/h の速度で上昇した。

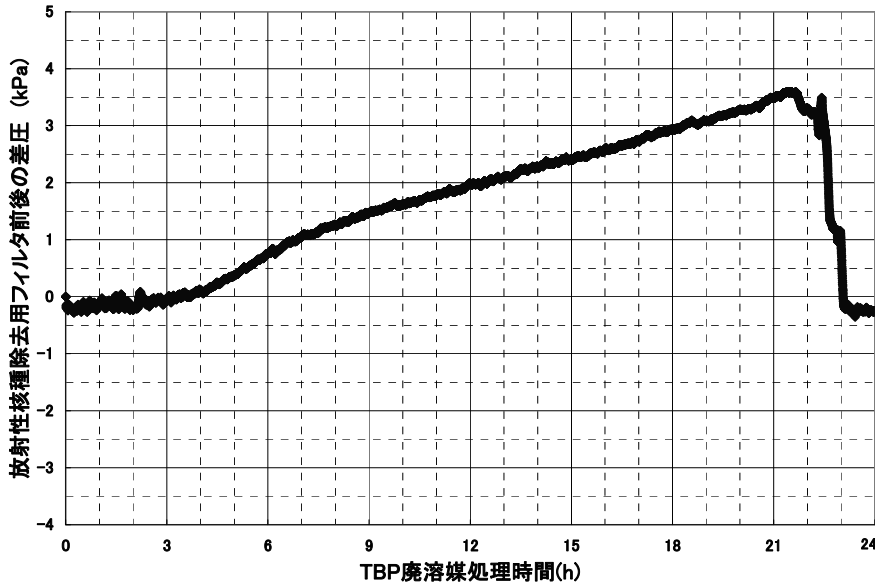


図 5.2.3-7 40wt%TBP 廃溶媒処理時の放射性核種除去用フィルタ前後の差圧の変化

フィルタ差圧上昇の原因を調査するために、192 時間の連続処理試験後にフィルタを取り出し、その表面の堆積物をナイロンブラシで剥離させ、採取した。その堆積物の拡大写真を図 5.2.3-8 に示す。採取した堆積物に対して蛍光 X 線分析を行い、表 5.2.3-1 のような結果を得た。TBP 廃溶媒に含まれるリン及び配管の構成成分であるクロム、ニッケル、鉄がフィルタ堆積物の主成分である。これらの粉末は、蒸発したリン酸がフィルタ表面でステンレスと反応して生成した  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ 、 $\text{Cr}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{Ni}_3(\text{PO}_4)_2$  等と考えられる。しかし、ケイ素に関しては、配管構成材料には含まれていないため、TBP 廃溶媒に含まれていたものであると考えられる。有機ケイ素化合物の熱分解により生成されるケイ素化合物が装置に付着する事例がある<sup>25)</sup>こと及びTBP 廃溶媒中の粒子状物質はフィルタで除去していることから、シリコンオイル等の液体有機ケイ素化合物が放射性核種除去用フィルタの閉塞の原因であると考えられる。

フィルタの閉塞を完全に抑制するには、廃棄物受入時点で廃棄物の性状を把握し、基準を満たさない廃棄物の受入を制限する等の措置が必要になると考えられる。



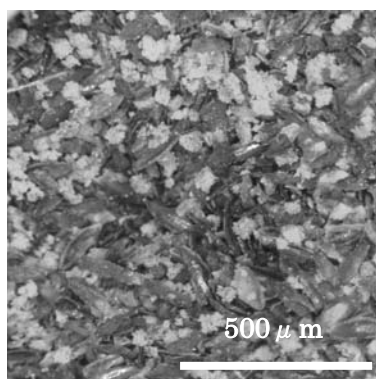


図 5.2.3-8 放射性核種除去用フィルタ表面堆積物

表 5.2.3-1 放射性核種除去用フィルタ表面堆積物の蛍光 X 線分析結果

検出成分	含有率(wt%)
Fe	59.6
P	32.6
Si	2.2
Ni	1.9
Cr	1.4
U	1.2

#### 5.2.4 装置構成機器の寿命

装置構成機器のうち加熱機器及び回転機器の使用時間を記録し、寿命の評価を行った。装置の主要な加熱機器及び回転機器の使用時間及び交換理由を表 5.2.4-1 に示す。

空気加熱器の交換は A 及び B あわせて 5 回あり、原因はヒータであるニクロム線の断線によるものが 4 件で、昇温性能劣化によるものが 1 件であった。空気加熱器の平均寿命は約 436 時間であるが、最短で 144 時間、最長で 903 時間と交換時期に差があり、交換時期を予測することは困難であると考えられる。現在使用しているヒータの使用時間は空気加熱器 A が 1,148 時間、B が 568 時間である。

水スクラバ循環ポンプの交換は 1 回あり、運転時間は 475 時間である。しかし、これは、水スクラバ循環ポンプに主反応器の耐火材（アルミナ粒子）が混入したために発生した故障によるものであり、耐火材の混入防止対策を施した後は、水スクラバ循環ポンプに不具合は発生していない。ポンプ交換後の運転時間は、今回の処理試験終了までで 1,471 時間である。

アルカリススクラバ循環ポンプ及び排風機の交換は、これまでの処理試験では行っていない。今回の処理試験終了までアルカリススクラバ循環ポンプは 1,946 時間、排風機は 4,678 時間運転しており、その間の不具合は発生していない。

空気加熱器の断線による交換頻度が多い原因は、加熱温度が 800℃と高く、ニクロム線の最高使用温度である 900℃に近い温度で常に使用していることと考えられる。従って、最高使用温度が 1,200～1,400℃のカンタル線等の発熱体を使用することによって交換頻度を下げることができると考えられる。それ以外の機器に関しては、長期間の使用に耐えうる性能を保持していると考えられる。

表 5.2.4-1 主要構成機器の使用時間及び交換状況

	機器名	使用時間(h)	交換状況
加熱機器	空気加熱器 A*1	No.1	144 断線
		No.2	654 断線
		No.3	1,148 使用中
	空気加熱器 B*1	No.1	144 断線
		No.2	331 昇温性能低下
		No.3	903 断線
		No.4	568 使用中
		水蒸気発生装置ヒータ*1	1,946 使用中
		水蒸気過熱器ヒータ*1	1,946 使用中
		残渣受容器ヒータ*1	1,946 使用中
		ガス化装置ヒータ（出口/中央/入口）*1	1,946 使用中
		放射性核種除去用フィルタヒータ*1	1,946 使用中
		ガス化装置出口ガス配管ヒータ*1	1,946 使用中
		熱分解ガス配管ヒータ*1	1,946 使用中
回転機器	水スクラバ循環ポンプ*1	No.1	475 故障 (異物混入)
		No.2	1,471 使用中
		アルカリススクラバ循環ポンプ*1	1,946 使用中
		試料供給ポンプ*2	1,094 使用中
		灯油供給ポンプ*3	80 使用中
		スクリーフィーダ*1	1,094 使用中
		排風機*4	4,678 使用中

\*1 使用時間はヒータ通電時間より算出した。

\*2 使用時間は水蒸気改質処理時間より算出した。

\*3 使用時間は灯油処理時間より算出した。

\*4 使用時間は排風機運転時間より算出した。

## 6.おわりに

二次廃棄物が大量に発生する、配管が閉塞する等の課題により、焼却処理が適さないウランで汚染された TBP 廃溶媒を処理する手法として、水蒸気改質処理法による減容技術の開発を行い、二次廃棄物の低減、配管閉塞防止等の観点から既存技術の課題を解決する優れた減容処理技術を確立した。

以下に、その結果をまとめる。

### (1)二次廃棄物発生量の低減

TBP 廃溶媒の処理時における二次廃棄物発生量を低減するため以下の技術開発を行い、TBP 廃溶媒の 99.6%を減容するとともに処理時に発生する排気及び排水を環境に放出することが可能となった。

#### ① ガス化率の向上

廃棄物中の有機物をガス化し、放射性核種と分離するガス化プロセスにおいて、ガス化装置を 600℃に加熱することにより、TBP 廃溶媒を 99.6%ガス化できることを確認した。また、ガス化しなかった残渣の大部分は、リン酸による腐食生成物であると推定されることから、耐食材の使用によりガス化率を 99.9%以上にすることが可能と考えられる。

#### ② ウラン移行率の低減

ウランで汚染されたTBP廃溶媒を処理する場合には、ガス化装置後段にフィルタを設置することで、飛散した微量のウランを捕集することが必要であると考えられる。また、処理装置から発生する全ての排ガス及び排水は環境への放出が可能であることから、TBP廃溶媒のガス化率の99.6%がそのまま減容率となった。

#### ③ リン酸ミストの回収

リン酸ミストの粒径分布を測定し、粒径分布に対応した高捕集効率のガラス繊維フィルタを設計することにより、スクラバで捕集されないリン酸ミストのほぼ全量を回収できることを確認した。

#### ④ メンテナンス廃棄物発生量の低減

メンテナンス時に発生する放射性二次廃棄物量を測定し、TBP 廃溶媒の処理量の約 3wt%の可燃物が二次廃棄物として発生することが分かった。二次廃棄物の発生源となる作業の分析から、TBP 廃溶媒供給作業、残渣排出作業、廃水排出作業の自動化によって更なる低減が可能であると考えられる。

(2)運転時の装置性能の確保

TBP 廃溶媒の短時間処理試験（連続処理時間約 10 時間）及び長時間処理試験（連続処理時間約 100 時間）を行い、縮合リン酸による配管閉塞防止及び燃焼の安定化に関する技術開発を行うとともに、装置構成機器の寿命に関する評価を行った。

① 縮合リン酸による配管閉塞の抑制

ガス化装置から主反応器までの間をガス化温度である 600℃よりも 50℃高い 650℃にすることにより、配管、フィルタ等に脱水縮合したリン酸が付着することを抑制した。

② 配管腐食対策

リン酸溶液流通試験により、腐食が最も激しいと予想される 200～250℃における金属材料の腐食速度を測定した。その結果から、耐食材としてハステロイ C276 を使用し、定期交換を行うことが現実的な腐食対策であることを示した。

③ 燃焼安定性の確保

TBP 廃溶媒処理試験中のガス燃焼温度、排ガス中の CO 濃度、NO<sub>x</sub> 濃度及び排ガス中粒子状物質濃度を測定し、燃焼部温度が 1,100～1,200℃で安定していること及び排ガス中の CO 濃度及び NO<sub>x</sub> 濃度がそれぞれ廃棄物処理法及び茨城県公害防止条例で定められた規制値(100ppm 及び 250ppm)以下であることを確認した。

④ 装置構成機器の寿命

処理試験における装置構成機器の使用時間を記録した結果、回転機器は長期的な運転に耐えうることを確認した。加熱機器は、使用温度が高い空気加熱器のヒータが頻繁に断線していることから、発熱体を最高使用温度が 900℃のニクロム線から 1,200～1,400℃のカンタル線にすることが望ましい。

参考文献

- 1) JAEA:“低レベル放射性廃棄物管理計画書”,p.13-16,(2007)
- 2) G.Babieri, et al:“Conversion-Temperature Diagram for a Palladium Membrane Reactor. Analysis of an Endothermic Reaction: Methane Steam Reforming”,  
Ind.Eng.Chem.Res.40,P.2017,(2001)
- 3) 吉田 隆:“過熱水蒸気技術集成”,(株)エヌ・ティー・エス,p.130,(2005)
- 4) DOE:“Alternative to Incineration Technical Area Status Report”,DOE/MWIP-26,  
p.7-50,(1995)
- 5) (社)化学工業会:“プロセス設計シリーズ 3 分解・加熱・蒸留を中心にする設計”,丸善株式会社,p.75-110,(1974)
- 6) C.Pereira, et al:“Liquid Fuel Reformer Development :Autothermal Reforming of Diesel Fuel”,Proceedings of the 2000 Hydrogen Program Review NREL/CP-570-28890,  
(2000)
- 7) S.Czernik,et al:“Production of Hydrogen from Biomass by Catalytic Steam Reforming of Fast Pyrolysis Oil”,Proceedings of the 1998 U.S. DOE Hydrogen Program Review NREL/CP-570-25315,(1998)
- 8) 新井 紀男:“燃焼生成物の発生と抑制技術”,株式会社テクノシステム,p.153-154, (1997)
- 9) 内山 軍蔵,他:“廃溶媒の液中燃焼挙動”,JAERI-M93-191,p.24,(1993)
- 10) 内山 軍蔵,他:“廃溶媒の液中燃焼挙動”,JAERI-M93-191,p.1,(1993)
- 11) 動力炉・核燃料開発事業団: “動燃三十年史” ,p.457,(1998)
- 12) L. Salomon, et al: “Treatment and Disposal of Tributyl Phosphate-Kerosene Waste by the Eurowatt Process”, Trans. Am. Nucl. Soc., Vol.20, p.663-666 (1975)
- 13) K. Paciorek, et al: “Thermal oxidative degradation studies of phosphate esters”,  
Am.Ind.Hyg.Assoc.J, Vol.39, p.633-639 (1978)
- 14) 内山 軍蔵,他:“廃溶媒の液中燃焼挙動”,JAERI-M93-191,p.6-8,(1993)
- 15) 千石 利三:“新版 無機化学 (中巻)”,産業図書(株),p.685-745(1986)
- 16) D. Corbridge: “Phosphorus 2000”, Elsevier, p.168 (2000)
- 17) D. Corbridge: “Phosphorus 2000”, Elsevier, p.1218 (2000)
- 18) 田仲 良雄,“リン酸系におけるオーステナイト系ステンレス鋼の腐食問題”,  
J.Soc.Mat.Sci,Vol.42,No.479,p.923-929,(1993)
- 19) F.N.Smith and H.V.Droffelaar:“Corrosion behavior of materials in the syrupy liquid obtained by prolonged heating of orthophosphoric acid”,Br.Corros.J,Vol.26, No.4,  
p.265-267,(1991)
- 20) 井伊谷 鋼一:“集塵技術マニュアル”,日刊工業新聞社,p.15,(1974)
- 21) 金岡 千嘉男:“高温集塵に関する最近の研究”,J.Aerosol Res.,Vol20(1),p.10,(2005)

- 22) 井伊谷 鋼一：“集塵技術マニュアル”，日刊工業新聞社,p.26,(1974)
- 23) J.J.Katz and E.Rabinowitch：“The Chemistry of Uranium”，Dover, p.311 (1951)
- 24) 井伊谷 鋼一：“集塵技術マニュアル”，日刊工業新聞社,p.74,(1974)
- 25) 渡邊 信昭,他：“燃焼式排ガス処理装置の開発”，太陽日酸技法 No.23,p.38,(2004)

# 国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
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

組立量	SI基本単位	
	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>
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s <sup>2</sup>
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>3</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
比透磁率 <sup>(b)</sup>	(数字の)	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

組立量	SI組立単位			
	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
立体角	ステラジアン <sup>(b)</sup>	sr <sup>(c)</sup>	1 <sup>(b)</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>
周波数	ヘルツ <sup>(d)</sup>	Hz		s <sup>-1</sup>
力	ニュートン	N		m kg s <sup>-2</sup>
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m <sup>2</sup>	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-2</sup>
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
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	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
静電容量	ファラド	F	C/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup> A <sup>-2</sup>
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m <sup>-2</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>3</sup> A <sup>2</sup>
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
磁束密度	テスラ	T	Wb/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-2</sup> A <sup>-1</sup>
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
セルシウス温度	セルシウス度 <sup>(e)</sup>	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd sr <sup>(c)</sup>	cd
放射線量	ルクス	lx	lm/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> cd
放射線種の放射能 <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 <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
線量当量, 周辺線量当量, 方向線量当量, 個人線量当量	シーベルト <sup>(g)</sup>	Sv	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
酸素活性化	カタール	kat		s <sup>-1</sup> mol

(a) SI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。  
 (b) 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。  
 (c) 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) ヘルツは周期現象についての、ベク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。  
 (e) 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。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。  
 (f) 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勧告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

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m <sup>-1</sup> kg s <sup>-1</sup>
表面張力	ニュートンメートル	N m	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup>
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s <sup>-2</sup>
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> =s <sup>-1</sup>
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s <sup>2</sup>	m m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> =s <sup>-2</sup>
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m <sup>2</sup>	kg s <sup>-3</sup>
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup>
体積エネルギー	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>
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> kg s <sup>-2</sup>
電荷密度	ボルト毎メートル	V/m	m kg s <sup>-3</sup> A <sup>-1</sup>
表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s A
電束密度, 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
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s <sup>4</sup> A <sup>2</sup>
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s <sup>-2</sup> A <sup>-2</sup>
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> mol <sup>-1</sup>
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m <sup>2</sup> kg s <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> mol <sup>-1</sup>
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg <sup>-1</sup> s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup>
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m <sup>3</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =m <sup>2</sup> kg s <sup>-3</sup>
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m <sup>2</sup> sr)	m <sup>2</sup> m <sup>-2</sup> kg s <sup>-3</sup> =kg s <sup>-3</sup>
	カタール毎立方メートル	kat/m <sup>3</sup>	m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 <sup>24</sup>	ヨタ	Y	10 <sup>-1</sup>	デシ	d
10 <sup>21</sup>	ゼタ	Z	10 <sup>-2</sup>	センチ	c
10 <sup>18</sup>	エクサ	E	10 <sup>-3</sup>	ミリ	m
10 <sup>15</sup>	ペタ	P	10 <sup>-6</sup>	マイクロ	μ
10 <sup>12</sup>	テラ	T	10 <sup>-9</sup>	ナノ	n
10 <sup>9</sup>	ギガ	G	10 <sup>-12</sup>	ピコ	p
10 <sup>6</sup>	メガ	M	10 <sup>-15</sup>	フェムト	f
10 <sup>3</sup>	キロ	k	10 <sup>-18</sup>	アト	a
10 <sup>2</sup>	ヘクト	h	10 <sup>-21</sup>	ゼプト	z
10 <sup>1</sup>	デカ	da	10 <sup>-24</sup>	ヨクト	y

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=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) 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, l	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 <sup>3</sup> 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
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 <sup>-19</sup> J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 <sup>-27</sup> kg
統一原子質量単位	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=0.1 MPa=100 kPa=10 <sup>5</sup> Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 <sup>-10</sup> m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm <sup>2</sup> =(10 <sup>-12</sup> cm) <sup>2</sup> =10 <sup>-28</sup> m <sup>2</sup>
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	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	P	1 P=1 dyn s cm <sup>-2</sup> =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> =10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup>
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> cd m <sup>-2</sup>
ファ	ph	1 ph=1 cd sr cm <sup>-2</sup> 10 <sup>4</sup> lx
ガル	Gal	1 Gal=1 cm s <sup>-2</sup> =10 <sup>-2</sup> ms <sup>-2</sup>
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm <sup>2</sup> =10 <sup>-8</sup> Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm <sup>-2</sup> =10 <sup>-4</sup> T
エルステッド <sup>(c)</sup>	Oe	1 Oe ≐ (10 <sup>3</sup> /4π) A m <sup>-1</sup>

(c) 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に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 <sup>10</sup> Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 <sup>-4</sup> C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 <sup>-2</sup> Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 <sup>-2</sup> Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 <sup>-9</sup> T
フェルミ	f	1 f=1 fm=10 <sup>-15</sup> m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 <sup>-4</sup> kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 <sup>-6</sup> m

