

再処理施設 分離建屋

高レベル廃液濃縮缶内の温度計保護管内への

高レベル廃液の漏えいについて

(報 告)

(改正版)

【公開版】

平成22年11月30日

平成23年 1月19日 (改正)

日本原燃株式会社

本書の記載内容のうち、内の記載事項は公開制限情報に属するものであり公開できませんので削除しております。

日本原燃株式会社

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. 件 名 .....	2
3. 発生日時 .....	2
4. 発生場所 .....	2
5. 発生事象の概要 .....	2
6. 濃縮缶の概要及び保護管、温度計の構造等 .....	4
6. 1 濃縮缶の概要 .....	4
6. 2 保護管、温度計の構造等 .....	6
7. 濃縮缶で処理する廃液に係る対応 .....	7
8. 原因究明 .....	8
8. 1 損傷状況調査 .....	8
8. 1. 1 現品調査 .....	8
8. 1. 2 模擬試験による確認 .....	15
8. 1. 3 調査結果に基づく評価 .....	22
8. 2 国内外の再処理施設における類似事例の調査 .....	23
8. 3 要因分析 .....	24
8. 4 要因分析に基づく調査 .....	27
8. 5 推定原因 .....	37
9. 復旧及び対策 .....	37
9. 1 保護管損傷の復旧措置 .....	37
9. 1. 1 復旧方策の選定 .....	37
9. 1. 2 加圧システムのシステム構成及び運転管理 .....	41
9. 1. 3 加圧システムに係る設計評価及び安全評価 .....	43
9. 1. 4 今後の損傷進展に対する対応 .....	45
9. 1. 5 加圧方式に対する評価のまとめ .....	47
9. 2 腐食環境緩和のための対策 .....	48
10. 類似機器での類似事象の発生防止 .....	49

## 添付資料

- 添付資料－１ 発生場所
- 添付資料－２ 時系列
- 添付資料－３ 漏えい事象発生時の作業状況
- 添付資料－４ 周辺環境への影響
- 添付資料－５ 温度計付着物の分析結果
- 添付資料－６ 濃縮缶の設備と運転の概要
- 添付資料－７ 濃縮缶及び保護管設置概要図
- 添付資料－８ 保護管製造工程
- 添付資料－９ トンネル腐食の発生条件等について
- 添付資料－１０ ESR 処理の概要
- 添付資料－１１ 廃液量低減対策の概要
- 添付資料－１２ 現品調査方法の検討整理表
- 添付資料－１３ 現品調査作業における現場の管理状況
- 添付資料－１４ 保護管の調査結果
- 添付資料－１５ 温度計の調査結果
- 添付資料－１６ 液垂れの痕跡に係る模擬試験による確認
- 添付資料－１７ 保護管に高レベル廃液が浸入したことに対する評価
- 添付資料－１８ 廃液浸漬による温度計表面の変化の評価
- 添付資料－１９ 仏国ラ・アグ再処理施設、英国セラフィールド再処理施設における温度計に係る類似事象
- 添付資料－２０ 要因分析図
- 添付資料－２１ 温度計保護管の機械的損傷に対する考慮の評価
- 添付資料－２２ 温度計保護管の磨耗に対する考慮及び析出物との接触によるエロージョンに対する評価
- 別紙 三次元熱流動解析結果
- 添付資料－２３ ネプツニウムによるステンレス鋼の腐食について
- 添付資料－２４ 温度上昇による温度計保護管とサポート溶接部の応力評価
- 添付資料－２５ 腐食速度から見たトンネル腐食の発生条件について
- 添付資料－２６ アクティブ試験のネプツニウム濃度実績を考慮した高レベル濃縮廃液の腐食性評価について
- 添付資料－２７ 硝酸中での応力腐食割れ発生感受性
- 添付資料－２８ 析出物存在下の模擬廃液中での腐食試験結果
- 添付資料－２９ 濃縮缶下部の温度上昇
- 別紙 堆積層内の温度分布の概略評価手法

- 添付資料－３０ 全面腐食速度と温度の関係
- 添付資料－３１ ネプツニウム及び温度上昇の影響を踏まえた腐食速度評価
- 添付資料－３２ 保護管内への漏えい事象に対する復旧方策比較評価
- 添付資料－３３ パージ式液位計と保護管加圧方式の比較
- 添付資料－３４ 加圧システムの設備概要図
- 添付資料－３５ 加圧方式に係る設計評価
- 添付資料－３６ 加圧方式に係る安全評価
- 別紙 保護管内に廃液が浸入した場合の水素濃度 4 vol%に至る時間について
- 添付資料－３７ 今後の損傷進展に対する対応
- 添付資料－３８ 簡易的な加圧システムの概要と使用に伴う対応
- 添付資料－３９ 腐食環境緩和のための対策
- 添付資料－４０ 類似機器での類似事象の発生防止に係る調査
  
- 別添資料                   トラブル時の通報連絡体制の点検について

## 1. はじめに

再処理施設分離建屋高レベル廃液濃縮缶第1セルに設置されている高レベル廃液濃縮缶Aの温度計交換作業（分離建屋地上2階南北第2廊下にて平成22年7月30日実施）において、温度計の先端が温度計保護管（以下、「保護管」という。）から作業エリア側に出た時点で線量当量率<sup>\*1</sup>が上昇した。

※1：人間が単位時間あたりに受ける放射線の影響の度合い

また、作業のための養生シート<sup>\*2</sup>上に表面汚染に係る管理基準値を超える汚染が確認された。また、当該作業に従事していた作業員のうち1名に表面密度限度<sup>\*3</sup>の10分の1未満の皮膚汚染が確認された。

※2：作業エリア床の汚染防止等の目的で敷いたシート

※3：放射線管理上定められた物の表面の放射性物質による汚染の上限

その後、汚染の発生源の調査を進めたところ、高レベル廃液濃縮缶内の保護管内に高レベル廃液が漏えいしている可能性があることを確認し、「使用済燃料の再処理の事業に関する規則」第19条の16第3号に該当すると判断し、平成22年8月2日に国へ報告した。

さらに、その後、保護管内から引き抜いた温度計表面の付着物を分析したところ濃縮缶内液に含まれている $\alpha$ 核種<sup>\*4</sup>及び核分裂生成物であるセシウムやユーロピウムが検出された。

※4： $\alpha$ 線を放出する核種であるアメリカシウムやキュリウム等

本報告では、保護管内に高レベル廃液が漏えいした事象に対する損傷状況調査、要因分析に基づく調査及び推定原因並びに復旧及び対策等を取り纏め報告する。

なお、本事象は当初、作業員の汚染に関する事象として、平成22年8月2日に通報連絡ルールに基づき情報発信したが、その後、汚染の発生源について調査を進めた結果、同日、高レベル廃液濃縮缶内の保護管内へ高レベル廃液が漏えいしている可能性があるとして判断し、「高レベル廃液漏えいのおそれ」として発信した。本事象に係る一連の情報発信において、「高レベル廃液漏えいのおそれ」としての通報が発生日から遅れたことについて、再発防止を図ることが必要と考え、通報連絡体制に対する点検を行った。この点検結果については、法令要求に係る報告事項ではないことから、別添資料として取り纏めた。（別添資料「トラブル時の通報連絡体制の点検について」参照）

## 2. 件名

再処理施設 分離建屋 高レベル廃液濃縮缶内の温度計保護管内への高レベル廃液の漏えいについて

## 3. 発生日時

作業エリアの線量当量率上昇発生：

平成22年7月30日（金） 15時50分

表面汚染密度確認 : 平成22年7月30日（金） 22時30分頃

「使用済燃料の再処理の事業に関する規則」第19条の16第3号

に該当と判断 : 平成22年8月 2日（月） 13時10分

## 4. 発生場所

再処理施設 分離建屋 高レベル廃液濃縮缶第1セル（添付資料-1 参照）

## 5. 発生事象の概要（添付資料-2 参照）

平成22年1月の高レベル廃液濃縮缶A（以下、「濃縮缶」という。）の運転時に、濃縮缶に設置されている3本の温度計（上部温度計、中部温度計、下部温度計）のうち、上部温度計が他の2本の温度計の指示値より1～2℃程度高めに出る傾向が見られたことから、温度計のループ試験<sup>※5</sup>を実施した。

その結果、上部温度計の計器誤差は許容される範囲であったが、念のため設備点検に合わせ3本とも交換することとし、平成22年7月30日、温度計交換作業を実施した。本作業において、温度計の最初の1m程度の引き抜き時には、半面マスクを着用し、サーベイメータ<sup>※6</sup>を用いたスミヤ法<sup>※7</sup>による汚染検査を実施しながら作業を実施し、汚染がないことが確認できた以降は、半面マスクを外してスミヤ法による汚染検査を継続しながら引き抜いていた。下部温度計の交換作業において、温度計の先端部が保護管から出た時点で放射線管理員が持っていたサーベイメータの指示値が上昇した。

引き抜いた温度計の先端部に汚染の疑いがあることから、汚染拡大を防止するため当該温度計の先端部を保護管に戻し、一時的な処置として開放部の養生を実施した。

※5：入力から出力間のループ全体の健全性を確認する試験であり、温度計のループ試験は、温度センサからの配線を制御盤入力点で外し、温度センサの模擬として模擬信号入力装置にて制御盤へ模擬信号を入力し、模擬信号に対する出力値が所定の精度内であることを確認する試験

※6：携帯用の放射線測定器

※7：床面等の測定対象の一定面積をろ紙片でこすり、このろ紙に付着した放射能を測定する方法

サーベイメータの指示値が上昇した後、現場の表面汚染を測定したところ、作業のための養生シート上で表面汚染に係る管理基準値（表面密度限度の10分の1<sup>※8</sup>である $\alpha$ ： $0.4\text{ Bq/cm}^2$ 、 $\beta$ （ $\gamma$ ）： $4\text{ Bq/cm}^2$ ）を超える汚染（最大 $\beta$ （ $\gamma$ ）：約 $710\text{ Bq/cm}^2$ 、 $\alpha$ については検出限界（ $1.7 \times 10^{-2}\text{ Bq/cm}^2$ ）未満）を確認した。

その後、周囲の除染措置を行った上で、温度計全体をビニール袋等で養生し、養生シート上に仮置きした。

※8：平成12年科学技術庁告示第13号第5条に定める値の10分の1を管理基準値としている。

当該作業に従事していた作業員4名、放射線管理員1名及び作業場所近傍で他の作業に従事していた作業員2名（計7名）に対して外部被ばく線量の確認を行った結果、当該作業に従事していた作業員のうち2名の外部被ばく線量は $0.01\text{ mSv}$ であり、法令で定める年間の線量限度である $50\text{ mSv}$ に比べて十分小さかった。

また、温度計交換作業に従事していた作業員のうち1名に表面密度限度の10分の1（ $\alpha$ ： $0.4\text{ Bq/cm}^2$ 、 $\beta$ （ $\gamma$ ）： $4\text{ Bq/cm}^2$ ）未満の皮膚汚染が確認されたことから、除染措置を行った上で管理区域から退域した。放射性物質の内部取り込みはなかった。（添付資料－3 参照）

なお、周辺環境への影響については、分離建屋内のダストモニタ、エリアモニタ、主排気筒モニタ及びモニタリングポストの指示値に有意な上昇はなく、周辺環境へ影響はないことを確認した。（添付資料－4 参照）

保護管は溶接で濃縮缶内に固定され、濃縮缶の管台を經由してセル（高レベル廃液濃縮缶第1セル）とグリーン区域（分離建屋地上2階南北第2廊下）の間のしゃへい壁（以下、「セル壁」という。）まで達しており、保護管の接続は溶接であることから、この間に液が浸入する経路は存在しない。

それにもかかわらず、引き抜いた温度計の先端部に汚染の疑いがあることから、温度計が挿入されていた保護管内に濃縮缶内の高レベル廃液がある可能性があり、さらには保護管が損傷していることが想定された。これは閉じ込め機能の喪失に当たることから、本件は「使用済燃料の再処理の事業に関する規則」第



19条の16第3号の「使用済燃料等を限定された区域に閉じ込める機能の喪失」に該当すると判断した（8月2日 13時10分）。

さらに、温度計の付着物を採取し、分析した結果、濃縮缶内液に含まれている $\alpha$ 核種及び核分裂生成物であるセシウムやユーロピウムが検出された。また、各核種の組成比率のうち、セシウムと $\alpha$ 核種の比率及びセシウムの同位体比率が、漏えい時の濃縮缶内液の放射能濃度の推定値から算出した比率と分析結果がほぼ一致したことから、濃縮缶から保護管内への漏えいにより保護管内に浸入した液は高レベル廃液であると判断した。（添付資料－5 参照）

## 6. 濃縮缶の概要及び保護管、温度計の構造等

### 6. 1 濃縮缶の概要（添付資料－6 参照）

濃縮缶は、液体廃棄物の容積を低減するため、分離施設の抽出廃液<sup>※9</sup>、分析施設の分析廃液<sup>※10</sup>、酸回収設備の蒸発缶の濃縮液<sup>※11</sup>等の放射性物質濃度が高い廃液（以下、「高レベル廃液」という。）を受け入れ、蒸発・濃縮する設備である。

※9：使用済燃料を硝酸で溶解した溶解液からウランとプルトニウムを分離する工程において発生する廃液で、主に核分裂生成物が含まれる

※10：高レベル廃液を取り扱う設備から採取した分析試料に関する廃液を高レベル廃液として分類しており、中には放射性物質濃度の低い廃液も含まれている

※11：濃縮缶から発生する凝縮液、分離建屋の塔槽類廃ガス処理設備廃ガス洗浄廃液等を酸回収設備の蒸発缶で処理することにより発生する廃液で、使用済燃料の処理を実施していない状態等、関連する設備の運転状態により放射性物質濃度が低い廃液が発生することがある

蒸発・濃縮は、約7 kPa（絶対圧力）の減圧下で、濃縮缶内に設置された加熱コイル及び濃縮缶底部外側に設置された加熱ジャケットに蒸気を供給し、濃縮缶内液を約50℃に加熱することで行い、処理する液は、濃縮缶の上流に設置されている高レベル廃液供給槽から移送機器で濃縮缶内の液位が一定になるように連続で供給される。

蒸発・濃縮の運転は、液張り・減圧・濃縮・減酸・冷却・減圧解除・希釈・払出しという一連のサイクルで1バッチとなり、濃縮の部分では□倍程度まで廃液を濃縮する。なお、分析廃液、酸回収設備の蒸発缶の濃縮廃液等のよう

に高レベル廃液の中で比較的放射性物質濃度が低い廃液を処理する場合には、濃縮液の性状を所定の値とするため、倍以上の濃縮運転を行う場合がある。

また、濃縮液は、酸濃度等を調整した後、移送機器により高レベル廃液ガラス固化建屋の高レベル廃液貯蔵設備へ移送する。濃縮缶からの蒸気は、凝縮器で凝縮液とし、分離建屋に設置されている第1酸回収系へ移送する。

濃縮缶は、高レベル廃液を内蔵する機器であることから、閉じ込め機能を有する設備であり、閉じ込め機能を確保する方法のひとつとして、濃縮缶を減圧下で運転し、低い温度で蒸発・濃縮することにより腐食環境を低減させている。

上記に示したように腐食環境を低減させているものの、濃縮缶内の液は運転サイクルの中でmol/L程度の酸濃度に達するため、厳しい腐食環境であることを前提として設備の設計等を行っている。

濃縮缶の加熱・冷却に加熱コイル、加熱ジャケットを使用しており、濃縮缶における腐食環境を管理すること、及び適切な冷却の実施、濃縮運転中の温度分布を確認する目的で、濃縮缶内に温度計を上部・中部・下部の3本設置し、温度監視をすることとしている。

濃縮缶内液の中央部を測定している中部温度計の測定値を代表点として監視するとともに、濃縮缶内液は圧力の低い上部で蒸発することから、上部温度計の測定値に基づき濃縮缶内温度に係る温度高警報を発報する設計としている。運転管理として、濃縮缶を加熱している際には、中央部の硝酸温度（中部温度計の指示値）を65℃以下とし、これを満足していないと判断した場合は、65℃以下に回復させる措置を講じることとしている。

また、温度計の測定位置を安定させること、温度計の腐食防止、汚染防止を図ることを目的として、保護管を設けその中に温度計を挿入している。保護管及び温度計の構造等については、「6.2 保護管、温度計の構造等」に示す。

濃縮缶は、平成14年11月から化学試験において硝酸を使用した試験を行った後、平成18年4月からアクティブ試験において高レベル廃液の処理を行っており、アクティブ試験開始から現在まで10バッチ分の処理運転を行い、その間の処理時間（加熱運転時間）は約1.8年である。

濃縮缶で処理する高レベル廃液については、分離施設の抽出工程等の主工程が運転を行っていない期間においても発生するもので、上記のとおり一部には放射性物質濃度の低い廃液も含まれているが、大部分は放射性物質の濃度が高

いことから他の設備での代替処理は困難である。そのため、濃縮缶で廃液処理運転が実施できる状態になるまでの間は、発生した高レベル廃液の処理が行えないため貯槽で貯留を行うこととなる。濃縮缶で処理する廃液に係る対応については、「7. 濃縮缶で処理する廃液に係る対応」に示す。

また、濃縮缶については、使用の可能性は極めて少ないが、万一、使用中の設備・機器が故障した場合、再処理施設の長期停止を避けるため予備の濃縮缶（以下、「長期予備」という。）を設置している。

長期予備は、今回保護管内に漏えいが確認された濃縮缶と同じ構造で、当該濃縮缶が設置されているセルに隣接したセル内に既に設置（当該濃縮缶と異なり、高レベル廃液の液処理に使用していないため、セルの中に人が入ることが可能）しているが、塔槽類廃ガス処理設備の配管が接続されていない状態にある。

## 6. 2 保護管、温度計の構造等

保護管は、鍛鋼品であるキャップとシームレス管（継ぎ目（合わせ目）がない管）を溶接で接合した構造である。

また、保護管内に挿入されている温度計は、シースと呼ばれるステンレス鋼の被覆、絶縁体、白金抵抗素子及び導線で構成された測温抵抗体<sup>\*12</sup>である。（添付資料－7 参照）

※12：金属の電気抵抗率が温度に比例して変わることを利用した温度計

保護管のキャップの製作方法として、管材等から曲げ加工する方法と鍛鋼品から削り出し加工する方法が考えられるが、当該のキャップは厚さが6 mm程度であり、曲げ加工が困難なため鍛鋼品を削り出して製作する方法を採用した。（添付資料－8 参照）

この鍛鋼品の削り出し品を使用するにあたり、「6. 1 濃縮缶の概要」で述べたように濃縮缶が厳しい腐食環境であることを前提として、上記のとおり腐食環境を緩和するために減圧下で低い温度で沸騰させること以外に、以下の対応を行っている。

- ・不純物を低減し、耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼（R-SUS304ULC<sup>\*13</sup>）を採用
- ・キャップについて、鍛鋼品のトンネル腐食<sup>\*14</sup>対策として、E S R処理<sup>\*15</sup>材を使用<sup>\*16</sup>

・腐食試験の結果から設定した腐食速度に対して材料の厚みを設定<sup>\*17</sup>

- ※13：R-SUSは再処理用ステンレス鋼を、ULCは極低炭素を意味する。
- ※14：鍛鋼品のトンネル腐食（加工フロー腐食ともいう。以下、「トンネル腐食」という。）とは、鍛造によって鋼材中の非金属介在物や成分の偏析部（クロム濃度が低い部位やリンの偏析）が繊維状に引き伸ばされた材料において、その端面が腐食環境にさらされた場合に、その偏析部に沿って選択的に進行する局部腐食のことである。環境面から見た場合にトンネル腐食は、安定した酸化皮膜が形成されない過不動態領域で発生するといわれており、実験的にも確認されている。（添付資料－9 参照）
- ※15：ESR（Electro Slag Re-melting：エレクトロスラグ再溶解法）処理は、鋼材を再溶解精錬して、高品質の鋼塊を製造する特殊溶解法の一つである。（添付資料－10 参照）
- ※16：六ヶ所再処理施設における一般的なトンネル腐食対策は、鍛流線と直交する面を接液させないことであり、常圧沸騰状態で使用するウラン濃縮缶（分離建屋）の鍛鋼品は、使用温度が高いことからESR処理したR-SUS304ULCを使用することに加えて、鍛流線と直交する面にバタリング（肉盛溶接）等をしている。減圧沸騰状態で使用する高レベル廃液濃縮缶等の鍛鋼品で、構造上の理由等により鍛鋼品の鍛流線と直交する面が接液する場合には、使用温度が低いのでESR処理した耐食性に優れるR-SUS304ULCを使用している。
- ※17：保護管の板厚は、腐食試験の結果に基づき決められた設計時の腐食速度から算出した腐食代と耐圧強度上必要な厚さに、製作上の公差等を見込んだ裕度を加えて設定している。

また、保護管は、濃縮缶内に設置されており、「6. 1 濃縮缶の概要」で示したとおり濃縮缶は閉じ込め機能を有する設備であり、保護管の先端から管台までの部分は、閉じ込め機能を有する範囲である。

## 7. 濃縮缶で処理する廃液に係る対応（添付資料－11 参照）

「6. 1 濃縮缶の概要」に示したように濃縮缶で処理する高レベル廃液については、濃縮缶で廃液処理運転が実施できる状態になるまでの間は、貯槽で貯留を行うこととなるが、貯槽の容量は決まっていることから、必要な期間等を考慮し、発生量の低減対策を講じることとした。

具体的には、

- ・酸回収設備（第1酸回収系）に移送される廃液の一部の低レベル廃液処理設備への移送
- ・酸回収設備（第2酸回収系）の濃縮液の再蒸発処理
- ・分析廃液のうち放射性物質等の濃度が低い廃液の低レベル廃液処理設備への移送
- ・分析廃液の移送に伴い添加する試薬量を低減

を行うことにより、濃縮缶で処理する廃液量の低減を図る。

低減対策を講じない場合の廃液発生量が約49m<sup>3</sup>/1ヶ月に対し、低減対策を講じることで、発生量が約12m<sup>3</sup>/1ヶ月になる。

貯槽が満杯になった場合には、分析廃液の受け入れ不可に伴う分析停止や酸回収設備への廃液移送不可に伴う塔槽類廃ガス洗浄液の供給停止といった問題が発生するため、それらを考慮し、貯槽の容量に対して突発的な事象対応等を考慮した管理値を設け管理を行う。

上記の管理を行うことにより、管理値に達する時期は平成23年4月中旬頃となる見通しであるが、これからも、発生量の低減は継続して実施する。

## 8. 原因究明

### 8. 1 損傷状況調査

保護管内に高レベル廃液が漏えいしたことを受け、発生している事象を把握するため、損傷状況調査を行った。損傷状況調査として、高レベル廃液の漏えいが発生した保護管及びその保護管に挿入されていた温度計を対象とした現品調査及び現品調査の結果を裏付けるための模擬試験による確認を行った。

#### 8. 1. 1 現品調査

現品調査にあたっては、濃縮缶で既に放射性物質を取り扱っていること、セル内に濃縮缶が設置されており、セル壁外表面から保護管先端までの距離が約12mあること、さらに保護管内径が最も細い部分で約14mmであることから、アクセスが非常に難しい場所であることを考慮し、実施可能な調査方法及び確認可能な内容について検討を行い、以下の方法を採用することとした。（添付資料－12 参照）

調査対象	調査項目	調査方法
保護管	保護管内の液量	・ 液位測定治具表面の線量当量率測定による液位確認
	保護管内への液の浸入状態	・ 保護管の内部観察
	保護管内の損傷箇所及び損傷の大きさ、残肉厚	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 圧力降下確認（保護管内に液がある状態、保護管内に液がない状態）</li> <li>・ 減圧による液浸入確認</li> <li>・ 気泡による損傷箇所確認</li> <li>・ 保護管底部の残肉厚確認</li> </ul>
温度計	保護管内の液量、保護管内への浸入時期	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ <math>\gamma</math>線測定による汚染範囲確認</li> <li>・ 外観観察</li> <li>・ 表面詳細観察</li> <li>・ レプリカ採取による温度計表面の凹凸観察</li> <li>・ 断面マイクロ観察<sup>※18</sup></li> </ul> <p>※18：外観観察、表面詳細観察、レプリカ採取による温度計表面の凹凸観察により腐食や変色の痕跡が確認された場合に実施</p>

調査にあたって、保護管と作業エリアの取り合い部が開放状態になること、カメラや治具の保護管内への挿入、保護管内からの引き抜きを行うことから、作業員の汚染、外部被ばく及び放射性物質の内部取り込み等の作業上のリスクが想定される。

このため、保護管内の放射性物質が作業エリア外に移行することを防ぐことを目的としてグリーンハウスを設置する、グリーンハウス内の空気は局所排風機により高性能粒子フィルタを通して建屋換気系に排気し、グリーン区域に放出しない等の対応を図った。

また、作業時に放射性物質の飛散防止のため作業エリアを濡れウエス等による養生をする、作業時に保護管取り合い部にしゃへい体を設置する、空間線量モニタ及びダストモニタを設置し作業環境を連続監視する、作業内容に応じて全面マスク、タイベックスーツを着用する等の対応を図った。

さらに、作業員の装備が重装備になるため、熱中症対策として、クールベストを着用する、グリーンハウス内をスポットクーラーで冷却する等の対応を図った。（添付資料－13 参照）

(1) 保護管の調査 (添付資料-14 参照)

1) 保護管内の液量に関する調査

保護管内に浸入した液の高さ(液位)を測定し、その液位から保護管内の液量を算出した。

液位測定治具にノッチ(刻み)を設け、保護管内に挿入し、引き抜いた後、各ノッチ部分をスミヤロ紙でふき取り、スミヤロ紙の表面の線量当量率を測定することで、その変化から保護管内の液位の測定を行った。

その結果、保護管内の液位は、液位測定治具の先端から15～20mmの範囲にあると推定した。

その後4回の液位測定を実施し、これらの結果をもとに液位測定治具挿入時の液位変化分を考慮し、保護管内の液位はキャップとシームレス管の溶接線(以下、「キャップ溶接線」という。)よりも下であり、保護管内に浸入している液量は約3.5～約6.7cm<sup>3</sup>と推定した。

2) 保護管内への液の浸入状態に関する調査

保護管内への液の浸入状態を確認するため、ビデオスコープを用いて保護管の内部観察を行った。

その結果、以下のことが確認された。

- ・液は、黒ずんだものであり、液外周部は茶褐色で泡立ったものであった。
- ・液面は、キャップ溶接線の下方にあり、上記の保護管内の液量に関する調査結果と整合していた。
- ・キャップ溶接線付近及び上下のシーニング加工<sup>※19</sup>部には液垂れの痕跡は確認されなかった。

※19：管と管、または管と継手を溶接する場合に、溶接品質の向上のためできるだけ内径寸法をそろえることを目的として、溶接前に双方の内径を決められた寸法に削り合わせるために、必要肉厚を確保した上で適正な内径にする内面加工をシーニング加工という。

3) 保護管内の損傷箇所及び損傷の大きさ、残肉厚に関する調査

液量に関する調査の結果から推定した保護管内の液面高さ(キャップ溶接線よりも下)をもとに、保護管内の損傷箇所及び損傷の大きさ、残肉厚に関する調査を、下表に示すステップで行うこととした。

調査項目
①保護管内に液がある状態で圧力降下確認
②保護管内に液がない状態で圧力降下確認
③保護管内に液がない状態で保護管内を減圧し液浸入確認
④気泡による損傷箇所確認
⑤保護管底部の残肉厚確認

各調査項目における結果等を以下に示す。

①保護管内に液がある状態で圧力降下確認

保護管内部に圧力をかけ、損傷箇所からの気体の排出による圧力降下、液の流出による液位低下を確認することにより、損傷箇所の位置、概略の大きさを把握することを目的として圧力降下確認を実施した。

「添付資料－12 現品調査方法の検討整理表」に示したように、圧力降下確認では、保護管内の液位の異なる状態で圧力降下確認を行うことにより、損傷箇所の評価が可能であることから、まずは保護管内に「2) 保護管内への液の浸入状態に関する調査」に示したように液がある状態で確認を行い、その後②に示す保護管内に液がない状態で確認した。

圧力降下確認により期待される確認結果として、以下を想定した。

- ・ 損傷箇所が液面よりも上：損傷箇所から濃縮缶側に空気が排出されることで圧力降下が確認され、その圧力降下量で損傷箇所の大きさが評価可能。
- ・ 損傷箇所が液面よりも下：損傷箇所から空気が排出されないため、圧力降下が確認されないか、又は損傷箇所が大きい場合には損傷箇所から濃縮缶側に液が流出されることによる液位低下で損傷箇所が評価可能。

圧力降下確認の方法としては、窒素による加圧（100kPa）を行い、加圧状態を24時間保持した状態で圧力変化を観察した。

その際、健全である上部保護管は損傷箇所からの空気の排出に伴う圧力降下がないことから、上部保護管を基準として、当該保護管との圧力変化の差により下部保護管の圧力降下を評価するとともに、圧力降下確認後に保護管内の液位の変化を確認した。



その結果、圧力降下による有意な差圧の変化はなく、また液位測定結果においても有意な液位変化は確認できなかったため、液面よりも下に損傷があり、損傷箇所が小さいことが考えられる。

## ②保護管内に液がない状態で圧力降下確認

「①保護管内に液がある状態で圧力降下確認」に続く確認ステップとして、保護管内の液を治具により抜き取り、さらに治具を用いた清掃、硝酸による洗浄作業を行い、保護管内に液がない状態で圧力降下確認を行った。

圧力降下確認の方法としては、「①保護管内に液がある状態で圧力降下確認」と同様に窒素による加圧（100kPa）を行い、上部温度計の保護管を基準として、当該保護管との圧力変化の差により圧力降下を評価した。

その結果、圧力降下による有意な差圧の変化はなかった。

清掃及び洗浄によって、保護管底面の金属加工面が確認可能となったことから、ビデオスコープにより保護管底面の観察を行った。底部にはセル内の保護管溶接部の裏波突起に治具及びビデオスコープのケーブル等が引っかかって削れることにより発生したと思われるゴミの散在は見られたが、損傷箇所を確認することはできなかった。

また、観察を行っている中で、保護管内への極少量の液の浸入が確認された。治具を用いた液抜き、拭取り作業後から液の浸入確認までの時間は20時間程度であった。再現性の確認のため、再度拭取りを行った後、液浸入の有無を確認したが、保護管内への液の浸入は確認できなかった。

ビデオスコープによる観察結果及び保護管先端部の形状から、保護管内へ浸入した液量は、約0.06cm<sup>3</sup>であると推定された。

## ③保護管内に液がない状態で保護管内を減圧し液浸入確認

圧力降下確認で圧力降下がなく損傷箇所の確認ができなかったことから、保護管内にビデオスコープを挿入した状態で真空ポンプにより保護管内を減圧することで液浸入箇所の確認を行うこととした。

液浸入確認の結果として、保護管内への液の浸入は確認されなかったが、その際の濃縮缶側の液位が保護管のキャップ溶接線よりも下に低下している可能性が確認されたことから、濃縮缶の液位を保護管のキャップ溶接線よりも上にし、再度減圧による液浸入確認を実施した。その結果、保護管内への液の浸入は確認されなかった。

#### ④気泡による損傷箇所確認

保護管内に少量の水（約20cm<sup>3</sup>）を張り、保護管内にビデオスコープを挿入した状態で真空ポンプにより保護管内を減圧（-40kPa）にし、気泡発生場所を観察することで損傷箇所の確認を行った。この結果、水の溶存空気による気泡の発生が確認されたが、同一場所からの気泡の発生がないことから、損傷からの気泡の発生ではないと考え、損傷箇所の特定には至らなかった。また、溶存空気の影響を確認するため、中部保護管を使用し同様の操作を実施したが、同じく気泡の発生が確認された。

#### ⑤保護管底部の残肉厚確認

下部保護管及び上部、中部保護管に対して、超音波肉厚測定により保護管底部の残肉厚を確認した。その結果は、以下のとおりであった。

- ・ 下部保護管の底部の残肉厚は、設計値を下回っていたが、上部、中部保護管共に底部の残肉厚は設計値以上であった。
- ・ 下部保護管に対する超音波肉厚測定のエコーと粒界腐食が生じた試験体の超音波肉厚測定のエコーとを比較した結果として、下部保護管は粒界腐食が生じた表面状態にあると考えられる。また、上部、中部保護管でも脱粒には至らないが、軽度の腐食が生じているものと推定された。
- ・ 上記から、下部保護管の底部では上部、中部保護管の底部と比較して腐食が進行していることが推定されるものの、全面腐食により損傷に至るような状態ではないと考えられる。

保護管の調査結果は、以下のとおりであった。

- ・ 保護管内の液は、液面はキャップ溶接線の下にあった。また、液は黒ずんだものであり、液外周部は茶褐色であった。
- ・ キャップ溶接線付近及び上下のシーニング加工部には液垂れの痕跡は確認されなかった。
- ・ 保護管内を加圧した圧力降下確認において、圧力降下は確認されなかった。
- ・ 減圧による液浸入確認において、液の浸入は確認されなかった。
- ・ 保護管底部の残肉厚確認において、下部保護管の底部の残肉厚は設計値を下回っていた。

(2) 温度計の調査（保護管内の液量、保護管内への浸入時期に関する調査）  
（添付資料－15 参照）

①  $\gamma$ 線測定による汚染範囲確認

漏えいした保護管内に挿入されていた温度計が保護管内に浸入した液と接触したと予想される範囲を推定するために、電離箱サーベイメータを用いて  $\gamma$ 線測定を実施した。

温度計が保護管内に浸入した液と接触したと予想される範囲の推定方法としては、一定間隔毎に温度計表面の  $\gamma$ 線を測定して汚染分布を特定することで行った。

その結果、温度計先端から約30mmまでが高い測定値を示し、約30～約100mmの範囲で減衰していく傾向が見られたことから、接液していた範囲は約30mm程度と推定した。

また、液位測定治具による液位の測定結果（「(1) 保護管の調査 1）保護管内の液量に関する調査」）の15～20mmとの違いは、当該測定前の温度計抜き取り時に、ウエスによる除染を実施していることから、除染により汚染範囲が広がった等の事後の操作による影響と考える。

② 外観観察

保護管内に挿入されていた状態で保護管内に浸入した液に浸漬したことにより発生すると考えられる腐食や変色の発生の有無を確認するため、温度計の外観観察を行った。また、未使用の温度計との比較観察を行った。

観察結果としては、研磨痕<sup>※20</sup>以外に、腐食や変色の痕跡等の表面状態の変化は確認されなかった。また、表面状態に若干の違いはあるものの、個体差の範囲と考えられ、未使用の温度計との有意な差は確認されなかった。

※20：温度計の先端部は溶接付けした後、研磨処理を行っているため、研磨処理により温度計先端表面には研磨痕が残る。また、研磨作業については手作業で行っているため個体差が見られる。

③ 表面詳細観察

目視による外観観察では確認できない詳細な表面状態の変化を確認するため、マイクロスコープによる表面詳細観察を行った。

その結果、「②外観観察」の結果と同様、研磨痕以外に腐食や変色の痕跡等の表面状態の変化は確認されなかった。

また、未使用の温度計との比較を行ったが、表面状態に若干の違いはあるものの、外観観察の結果と同様、個体差の範囲と考えられ、未使用の温度計との有意な差は確認されなかった。

#### ④レプリカ採取による温度計表面の凹凸観察

温度計にレプリカ材を押し付けることで温度計表面状態の型を取り、その断面を見ることで温度計表面状態の観察を行った。

その結果、研磨痕による凹凸が確認されたものの、腐食の痕跡は確認されなかった。

また、未使用の温度計のレプリカ採取による断面観察結果との比較を行ったが、有意な差は確認されなかった。

上記、②～④の結果を受け、外観観察、表面詳細観察、レプリカ採取による温度計表面の凹凸観察により腐食や変色の痕跡が確認された場合に実施する計画であった「断面マイクロ観察」は必要ないと判断した。

温度計の調査結果は、以下のとおりであった。

- ・  $\gamma$ 線測定による汚染範囲確認の結果、温度計先端から約30mmまでが高い測定値を示し、約30～約100mmの範囲で減衰していく傾向が見られた。
- ・ 研磨痕以外に、腐食や変色の痕跡等の表面状態の変化は確認されなかった。
- ・ 未使用の温度計との比較観察を行ったところ、表面状態に若干の違いはあるものの、外観観察の結果と同様、個体差の範囲と考えられ、未使用の温度計との有意な差は確認されなかった。

### 8. 1. 2 模擬試験による確認

#### (1) 液垂れ確認 (添付資料-16 参照)

保護管内で確認された黒ずんだ液が浸入した際に、損傷箇所が保護管側面の場合には液垂れの痕跡が残ることが想定されるため、液が浸入した状態で実際に液垂れの痕跡が残るかどうかについて、高レベル廃液模擬液を用いた模擬試験により確認した。

模擬試験は、キャップ溶接線付近から保護管内への廃液浸入を想定し、高レベル廃液模擬液を少量ずつ垂らして液垂れの傾向を確認するとともに、液が垂れた痕跡が残るか、ビデオスコープの映像で観察可能かを確認するという方法で行った。

また、液が垂れてから長時間経過し、乾いた状態の液垂れの痕跡が残るか、ビデオスコープの映像で観察可能かを確認した。

その結果、キャップ溶接線付近から液が浸入した場合にはシーニング加工部での液溜まりが残ること及び液垂れの痕跡が残り、さらにはその痕跡はビデオスコープによる観察で判別できる程度であることを確認した。

(2) 保護管への液浸入量等からの損傷の大きさ評価 (添付資料-17 参照)

保護管内の損傷箇所は確認できなかったものの、保護管内に浸入している液量約  $7 \text{ cm}^3$  (「8. 1. 1 現品調査 (1) 保護管の調査 1) 保護管内の液量に関する調査」に示したとおり、保護管内の液量は約  $3.5 \sim$  約  $6.7 \text{ cm}^3$  と評価したことから約  $7 \text{ cm}^3$  とした) 及び保護管内に液がない状態で圧力降下確認のために行った保護管内部の清掃等の際に確認された再浸入した液量約  $0.06 \text{ cm}^3$  と損傷の大きさの関係について、ビーカスケール及び実規模での模擬試験 (以下、「ビーカ試験」、「実規模試験」という。) を行い、確認した。

また、圧力降下確認で有意な差圧の降下が見られなかったことから、ビーカ試験、実規模試験を行い、損傷の大きさの関係について確認した。

保護管の損傷箇所から保護管内に液が浸入する可能性としては、毛細管現象によるものと保護管損傷箇所にかかる圧力上昇によるものが想定される。

このため、液体に係る評価 (濃縮缶の保護管への液浸入量に基づく損傷の大きさ評価) について、模擬試験の主な確認の手順は以下のとおりとした。

1) 液体に係る評価

- ①毛細管現象及び容器内への圧力による液の流入の確認
- ②濃縮缶の保護管への液浸入量に基づく液浸入時間と損傷の大きさの確認
  - a. ビーカ試験により孔径と加圧する圧力の違いによる液の流出流量の確認
  - b. 実規模試験により孔径と圧力の違いによる保護管への液の流入流量の確認
  - c. ビーカ試験結果が実規模試験に適用できることの確認
  - d. 試験結果と理論式の比較
  - e. 考察
  - f. 実機への適用性
- ③拭取り後に保護管内に浸入した液量の評価に基づく損傷の大きさの確認

次に、気体に係る評価（圧力降下確認結果に基づく損傷の大きさの確認）について、模擬試験の主な確認の手順は以下のとおりとした。

## 2) 気体（空気）に係る評価

### ①圧力降下確認で評価できる損傷の大きさの下限值の確認

- a. ビーカ試験による圧力降下量の確認
- b. 試験結果と理論式の比較
- c. 考察
- d. 実機への適用性

## 1) 液体に係る評価

試験装置での確認方法として、損傷の形状を円管状と仮定し、損傷の大きさを模擬するためにガラス管を用いた。このため、以下に示す試験結果において孔径としているものは、損傷の大きさを模擬したガラス管の内径を意味する。

### ①毛細管現象及び容器内への圧力による液の流入の確認

- ・孔径が100～250  $\mu\text{m}$ のガラス管を縦向き又は横向きに設置した水槽に水を入れ、毛細管現象により生じる圧力と同等の圧力をガラス管内に加えることにより、ガラス管が縦向きの場合はガラス管内の液がガラス容器の水面と同じ高さになった。ガラス管が横向きの場合は、水槽にガラス管と同じ高さまで液を入れた状態で、ガラス管内の液面がガラス管の先端まで移動した。
- ・毛細管現象による圧力を超える圧力をガラス管内に加えることにより、ガラス管が縦向きの場合はガラス管内の液はガラス容器の水面より押し下げることができ、ガラス管が横向きの場合は水槽の水面高さに応じてガラス管内に流入した液がガラス管の先端まで移動した。
- ・ガラス管の向きに関係なく、毛細管現象により生じる圧力は理論値と試験結果でほぼ一致すること、毛細管現象により生じる圧力とガラス容器内の液による圧力の合算値は理論値と試験結果でほぼ一致することを確認した。

### ②濃縮缶の保護管への液浸入量に基づく液浸入時間と損傷の大きさの確認

- a. ビーカ試験により損傷の大きさと加圧する圧力の違いによる液の流出流量の確認

- ・ガラス管を用いて、ガラス管の孔径と加圧圧力の違いによる液の流出流量を確認する（保護管への液の浸入速度模擬）。
  - ・損傷が縦向きと横向きの場合を想定したケースとして、ガラス管を縦向きと横向きに設置して確認を行う。
    - i. 損傷が縦向き状態を模擬した確認
      - ・縦向き状態のガラス管の孔径（ $5 \sim 250 \mu\text{m}$ ）と加圧圧力（ $55 \text{ kPa}$ 、 $101 \text{ kPa}$ ）の条件を変化させ、ガラス管から出る水の量から流出流量を確認した。
      - ・流出流量は孔径の4乗におよそ比例することを確認した。また、孔径 $10 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ の場合を例にとって流出流量と加圧圧力の関係を確認したところ、いずれの場合も流出流量は加圧圧力にほぼ比例することを確認した。
      - ・ $5 \mu\text{m}$ の孔径では水の流出がなかった。
    - ii. 損傷が横向き状態を模擬した確認
      - ・横向き状態のガラス管の孔径を変化（ $10 \sim 250 \mu\text{m}$ ）させ、 $55 \text{ kPa}$ の加圧による水の流出流量を確認した。
    - iii. 損傷が縦向きと横向き状態を模擬した場合の確認結果の比較
      - ・損傷が縦向き、横向きの場合の流出流量の関係を比較し、いずれの孔径の場合においても、両者の流出流量はほぼ一致した。
    - iv. 損傷箇所が複数ある場合を模擬した確認
      - ・縦向き状態のガラス管の本数を変化（1、5、11本）させた保護管先端モデルを水に漬けた際に、ガラス管を通じてモデルに流入した水の高さから、水の流入流量を確認した。
      - ・流入流量はガラス管の本数におおよそ比例した。
- b. 実規模試験により孔径と圧力の違いによる保護管への液の流入流量の確認
- ・実規模試験でガラス管（ $10 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ の孔径）を縦向きに設置し、圧力の条件を変化（ $35 \text{ kPa}$ 、 $95 \text{ kPa}$ ）させ、保護管への液の流入流量を確認した。
- c. ビーカ試験結果が実規模試験に適用できることの確認
- ・ a. 及び b. の確認結果より、ビーカ試験と実規模試験の結果を比較したところ、ビーカ試験での加圧圧力及びガラス管長さの補正を行った後の流量と実規模試験での流量はほぼ同等と見なせること

を確認したことから、ビーカ試験の結果が実規模試験にも適用できることを確認した。

d. 試験結果と理論式の比較

- ・理論式としてハーゲン・ポアズイユの式を用い、ビーカ試験結果及び実規模試験結果との比較を行った。
- ・ビーカ試験結果と理論式によって得られた結果との比較において、孔径10～150  $\mu\text{m}$ 程度では流出流量は比較的差が小さく、孔径150  $\mu\text{m}$ よりも大きい場合ではその差が大きくなる傾向が見られた。
- ・実規模試験と理論式によって得られた結果との比較では、流出流量の試験結果に対して理論式の値は、ほぼ一致している結果となった。

e. 考察

- ・流出流量の試験結果に対して理論式の値は、孔径10～150  $\mu\text{m}$ の範囲において、ほぼ模擬できている結果となった。
- ・ビーカ試験において、孔径が小さいときには表面張力の影響によって流量が小さくなる傾向が見られ、孔径5  $\mu\text{m}$ のガラス管において水の流出がなかったこと及び加圧圧力が55 kPaのときには試験の流量が理論流量よりも小さくなる傾向を示した。なお、実機においては下から上に流れる方向であるため、保護管内に液がたまり、基本的には表面張力の影響はない。
- ・孔径200  $\mu\text{m}$ 以上の場合には、流出流量について差が大きくなる傾向が見られた。これは、ビーカ試験において、水を大きなチューブからガラス管の孔へ押し込んでいるため、縮流による抵抗が大きくなり、誤差も大きくなる傾向を示したと考える。
- ・複数本の孔があった場合、流量は本数に比例するので、1本の孔の等価直径として複数本の孔の大きさを評価できる。

f. 実機への適用性

- ・濃縮缶の保護管への液浸入の流量を保護管先端の圧力及び損傷の大きさの関係で算出し、保護管内に確認された約7  $\text{cm}^3$ の液が保護管内に浸入する時間と損傷の大きさの関係を評価した。
- ・算出には、円管を層流で流れる流量を表すハーゲン・ポアズイユの式を用いた場合の他に、損傷がオリフィス状であると仮定した場合



に適用すべき計算式について検討を行い、オリフィス流量計の計算式をオリフィスの式として用いることとした。

- ・評価の結果、損傷の形状を円管状と仮定した場合には、保護管内に確認された約  $7 \text{ cm}^3$  の液が浸入するのにかかる時間が  $100$  時間の場合には損傷の大きさは  $24 \mu\text{m}$ 、 $500$  時間の場合には損傷の大きさは  $16 \mu\text{m}$ 、 $5000$  時間の場合には損傷の大きさは  $9 \mu\text{m}$  という関係であった。
- ・また、損傷の形状をオリフィス状と仮定した場合には、保護管内に確認された約  $7 \text{ cm}^3$  の液が浸入するのにかかる時間が  $100$  時間の場合には損傷の大きさは  $2 \mu\text{m}$ 、 $500$  時間の場合には損傷の大きさは  $1 \mu\text{m}$ 、 $5000$  時間の場合には損傷の大きさは  $0.3 \mu\text{m}$  という関係であった。

### ③拭取り後に保護管内に浸入した液量の評価に基づく損傷の大きさの確認

- ・「8. 1. 1 現品調査 (1) 保護管の調査 3) 保護管内の損傷箇所及び損傷の大きさ、残肉厚に関する調査」に示したように、圧力降下確認において、保護管内の拭取り作業後から  $20$  時間後に約  $0.06 \text{ cm}^3$  の液が再浸入したことをふまえて、損傷箇所の開口の大きさを評価した。
- ・損傷の形状を円管状と仮定した場合には、ハーゲン・ポアズイユの式より開口の大きさは約  $40 \mu\text{m}$  ( $37.7 \mu\text{m}$ )、損傷の形状をオリフィス状と仮定した場合には、オリフィスの式より約  $2 \mu\text{m}$  ( $1.9 \mu\text{m}$ ) となった。

## 2) 気体 (空気) に係る評価

### ①圧力降下確認で評価できる損傷の大きさの下限値の確認

#### a. ビーカ試験による圧力降下量の確認

- ・ガラス管を用いて空気の排出流量を測定し、圧力降下量を評価する。
- ・損傷が縦向きと横向きの場合を想定したケースとして、ガラス管を縦向きと横向きに設置して確認を行う。

#### i. 損傷が縦向き状態を模擬した確認

- ・孔径の条件を変化 ( $10 \mu\text{m}$ 、 $30 \mu\text{m}$ ) させて、ガラス管を加圧 ( $55 \text{ kPa}$ ) した場合には、ガラス管から排出する空気の量から排出流量を算出し、排出流量から圧力降下量を確認した。

- 孔径  $10\ \mu\text{m}$  の場合は、空気は排出するものの有意な圧力降下を確認できなかった。一方、孔径  $30\ \mu\text{m}$  の場合は有意な圧力降下を確認できた。
  - ii. 損傷が横向き状態を模擬した確認
    - 孔径の条件を変化 ( $10\ \mu\text{m}$ 、 $30\ \mu\text{m}$ ) させて、ガラス管に加圧 ( $55\ \text{kPa}$ ) した場合に、ガラス管から排出する空気の量から排出流量を算出し、排出流量から圧力降下量を確認した。
    - 孔径  $10\ \mu\text{m}$  の場合は、空気は排出するものの有意な圧力降下を確認できなかった。一方、孔径  $30\ \mu\text{m}$  の場合は有意な圧力降下を確認できた。
  - iii. 損傷が縦向きと横向き状態を模擬した場合の確認結果の比較
    - ビーカ試験の縦向き、横向きの場合での孔径と空気の排出流量の関係は、ほぼ同等と見なせる結果であった。
- b. 試験結果と理論式の比較
  - 損傷の形状を円管状と仮定した場合、圧縮性流体においても圧力差が小さい局所的な部分についてはハーゲン・ポアズイユの式が適用できると考え、空気の圧力降下が大きい場合の粘性流れの式（以下、「粘性流れの式」という。）を導出した。
  - 損傷の形状をオリフィス状と仮定した場合、オリフィスとは管路のモデルが違うものの、先細ノズルの式が概算での開口の評価に適用できるとして選定した。
  - 試験での管路が円管の形状において、実験値は粘性流れの式から算定した流量とほぼ一致した。
- c. 考察
  - 圧力降下が大きい場合の粘性流れの式は、孔径が約  $100\ \mu\text{m}$  未満の範囲においては、実験値である流量から管路の流れが層流であること及び実験値が孔径のほぼ4乗に比例しており、粘性流れの式は円管状の管路を通じた流量を模擬できていると考える。
- d. 実機への適用性
  - 圧力降下が大きい場合の粘性流れの式から評価した圧力降下を確認できる開口は、損傷の形状を円管状と仮定した場合、約  $20\ \mu\text{m}$  ( $21.2\ \mu\text{m}$ )、損傷の形状をオリフィス状と仮定した場合、先細ノズルの式では約  $4\ \mu\text{m}$  ( $4.0\ \mu\text{m}$ ) であった。

(3) 廃液浸漬による温度計表面状態の変化の確認（添付資料－18 参照）

温度計表面が高レベル廃液と接することにより、表面状態がどのように変化するかを確認するため、廃液浸漬の模擬試験を行った。

保護管内への漏えいが確認された時点において濃縮缶内に保有していた廃液の性状を模擬した模擬廃液に、温度計シースと同一の材質の試験片を浸漬させ、温度を室温の場合と55℃（濃縮缶加熱運転時の濃縮缶内液温）の場合で、浸漬時間に対して表面状態がどのように変化するかを確認した。

その結果、室温の場合には100時間経過しても表面状態に変化は見られなかったが、55℃の場合には100時間で表面が茶褐色に変色し、一部で腐食痕が認められた。

### 8. 1. 3 調査結果に基づく評価

現品調査の結果及び模擬試験による確認結果から、保護管の損傷状況等に係る評価を以下に示す。

- ・現品調査の保護管内への液の浸入状態に関する調査においてキャップ溶接線、上下のシーニング加工部に液垂れの痕跡が確認されなかったこと及び模擬試験による確認の液垂れ確認でキャップ溶接線付近から液が浸入した場合には液垂れの痕跡が残りビデオスコープの映像から判別できる程度であることを確認したことから、損傷箇所は、保護管のキャップ部である可能性が高いと考える。
- ・現品調査、模擬試験で確認された以下の事実から、損傷箇所の大きさは、約30μm程度以下と推定される。ただし、損傷箇所が塞がっている可能性は否定できない。
  - 現品調査の圧力降下確認で圧力降下がなかったこと
  - 保護管内の液拭取り後の観察で保護管内への液の浸入が確認され、ビデオスコープによる観察結果及び保護管先端部の形状から推定した保護管内へ浸入した液量から、その液量が浸入するために必要な損傷の大きさを評価した結果、ハーゲン・ポアズイユの式では約40μm（37.7μm）、オリフィスの式では約2μm（1.9μm）の大きさであると推定されること
  - 現品調査の減圧による液浸入確認で液の浸入が確認できなかったこと
  - 模擬試験での確認の保護管への液浸入量等からの損傷の大きさ評価において、圧力降下が確認できる開口の大きさとしては、粘性流れの式では約20μm（21.2μm）、先細ノズルの式では約4μm（4.0μm）であったこと

- ・現品調査の温度計の外観観察において、特異な腐食や変色の痕跡等は確認されなかったこと及び模擬試験による確認の廃液浸漬による温度計表面状態の変化の確認において室温の場合には100時間経過しても表面状態に変化は見られなかったが、55℃の場合には100時間で表面が茶褐色に変色し、一部で腐食痕が認められたことから、長時間温度計が高レベル廃液に浸漬していた可能性は低いと考えられる。保護管内への液の浸入は、保護管内外の差圧に影響を受けるが、保護管側に圧力変化を与える要因がないことから、濃縮缶内の圧力に影響を受けると考えられる。濃縮缶内の圧力は、濃縮缶の運転における減圧解除後に濃縮缶内の圧力が負圧から常圧に戻る際にその変化が最も大きくなるため、保護管内へ液が浸入する可能性がある。温度計の汚染が確認される前の直近の濃縮缶の減圧解除時点から温度計の汚染が確認されるまでの期間は約500時間（添付資料－6 図5 参照）であり、長時間温度計が高レベル廃液に浸漬していた可能性は低いとの評価とも整合する。また、保護管への液浸入量等からの損傷の大きさ評価で、保護管内に確認された液量が浸入するのに必要な開口の大きさと時間の関係をハーゲン・ポアズイユの式、オリフィスの式を用いて評価した結果から、1～16 μmの開口の大きさにおいて500時間で約7 cm<sup>3</sup>の液が保護管内に浸入するという関係になり、液が保護管内に浸入することが十分に考えられる。
- ・現品調査の保護管底部の残肉厚確認において、下部保護管では設計値を下回っており、下部保護管の底部では上部、中部保護管の底部と比較して腐食が進行していることが推定されるものの、全面腐食により損傷に至るような状態ではないと考えられる。

## 8. 2 国内外の再処理施設における類似事例の調査（添付資料－19 参照）

今回の事象を受けて、これまでに入手していた国内外の再処理施設（国外：仏国ラ・アグ再処理施設、英国セラフィールド再処理施設、国内：東海再処理施設）の不具合情報から温度計に関する類似事例の整理及び一部追加的な調査を行った。

その結果、仏国ラ・アグ再処理施設では、保護管から漏えいが発生した事例があり、保護管先端部のトンネル腐食や機械的疲労が原因であると推定されていることを確認した。

また、英国セラフィールド再処理施設では、溶解槽の温度計交換時における作業者の汚染が確認された事例があり、保護管溶接部の腐食が原因であると推定されていることを確認した。

### 8.3 要因分析（添付資料－20 参照）

保護管内への漏えい事象に対する要因分析を以下の観点で実施した。

- (1) 設計の観点（材料、構造）（材料の選定が適切であったか、腐食に対する考慮が適切であったか等）
- (2) 製作・施工不良の観点（設計どおり製作されていたか、製作時に不備がなかったか、運搬、据付時に欠陥の発生がなかったか等）
- (3) 使用環境の観点（濃縮缶内の温度条件等が設計時の想定を上回っていなかったか等）

以下に要因の抽出に係る考え方を示す。

#### (1) 設計の観点

保護管の損傷に繋がる可能性のある設計上の要因を以下のとおり抽出した。

- ①保護管の腐食防止のための材料選定
- ②保護管の機械的損傷（割れ）に対する考慮
- ③保護管の磨耗に対する考慮
- ④保護管の腐食に対する考慮

さらに、上記各要因に対して、関連する要因を以下のとおり抽出した。

#### ①保護管の腐食防止のための材料選定

保護管には、シームレス管及びキャップとそれらを溶接する溶接金属が材料として関係するため、シームレス管、溶接金属、キャップの材料選定を要因として抽出した。

#### ②保護管の機械的損傷（割れ）に対する考慮

濃縮缶の設計時、その小型内部構造品である保護管に対しては、耐圧設計として、耐圧強度上必要な厚さに腐食代及び製作上の公差等を見込んだ裕度を加えて板厚寸法を設定した。また、耐震設計として、保護管が配管であることから、地震時に発生する応力が許容値を十分下回るよう配管の支持間隔を設定して剛構造となるよう設計した。これらにより、保護管の機械的損傷に対して十分余裕を見込んだ構造としている。

しかしながら、今回保護管に漏えいが発生したことから、保護管にかかる応力を算出し、機械的損傷に至った可能性について評価を実施した。

### ③保護管の磨耗に対する考慮

磨耗を発生させる要素として、濃縮缶の他の構成部品との接触と濃縮缶内の廃液中の固形分との接触（濃縮缶内の廃液が対流するため、廃液中の固形分が保護管に接触）が考えられることから、保護管と濃縮缶内の他構成部品との接触に対する考慮と廃液中の固形分との接触（エロージョン）に対する考慮を要因として抽出した。

### ④保護管の腐食に対する考慮

保護管の腐食に対する考慮として、材料選定以外に肉厚の設定が考えられ、また濃縮缶内の環境による腐食以外に想定される腐食として、溶接部のすき間腐食<sup>※2 1</sup>や温度計と保護管の接触により保護管に異材接触による電流が流れ電食が発生することが考えられることから、肉厚の設定に対する考慮、すき間腐食に対する考慮及び電食に対する考慮を要因として抽出した。

※2 1：材料の合わせ目、溶接部等のすき間の内部が腐食する現象

## (2) 製作・施工不良の観点

製作・施工不良に係る要因を以下のとおり抽出した。

- ①製作不良（シームレス管の不良、キャップの不良、溶接部の不良、温度計の不良）
- ②施工不良
- ③据付不良等（輸送中の損傷、据付時の損傷、保護管内への温度計の設置不良）

さらに、上記各要因に対して、関連する要因を以下のとおり抽出した。

### ①製作不良

保護管で製作不良が関係する部分としては、シームレス管、キャップ、溶接部があることから、各部分の製作不良を要因として抽出した。

さらにシームレス管については、製作不良という観点で設計どおりの材料を使用していない等の材料不良と製作過程での欠陥の発生等の製作不良を要因として分け、キャップについては、鍛鋼品を削り出し加工していることから材料不良と削り出し加工時の加工不良を要因として分けた。

また、溶接部については、製作不良という観点で設計どおりの材料を使用していない等の材料不良とシームレス管、キャップの溶接不良を要因として分け、温度計については、絶縁構造となっていることが保護管への電食の

発生を防止するために必要な事項であり、その観点で製作不良を要因として抽出した。

#### ②施工不良

施工については、保護管を濃縮缶の中に取り付ける段階の不良を想定し、保護管とサポートの溶接施工時の不良を要因として抽出した。

#### ③据付不良等

濃縮缶は工場で作成後、再処理工場内の建屋まで輸送し、据付を行うとともに、温度計については、現地で保護管内に設置を行うことから、輸送時、据付時の損傷及び保護管内への温度計の設置不良を要因として抽出した。

### (3) 使用環境の観点

使用環境に係る要因として、損傷した可能性のある保護管はサポートにより濃縮缶に固定されていることから、機械的な損傷、腐食という観点が考えられる。そのため、濃縮缶の使用環境が原因で保護管が損傷に至る可能性として、以下の要因を抽出した。

- ①濃縮缶内の機械的負荷
- ②濃縮缶内の磨耗影響
- ③濃縮缶内の腐食影響

さらに、上記各要因に対して、関連する要因を以下のとおり抽出した。

#### ①濃縮缶内の機械的負荷

濃縮缶内の機械的負荷として、保護管とサポートの接続部分において温度差が生じることにより応力が発生することを要因として抽出した。

#### ②濃縮缶内の磨耗影響

濃縮缶内の磨耗影響として、廃液中の固形分の接触によりエロージョンが発生することを要因として抽出した。

#### ③濃縮缶内の腐食影響

濃縮缶内の腐食影響については、腐食を促進する要素として考えられる腐食影響成分と温度を要因として抽出した。

腐食影響成分としては、酸化性イオン及び塩素イオンがあり、その他に析出物（高レベル廃液を処理する濃縮缶では酸濃度が高くなると析出物が発生する）の影響があると考えた。酸化性イオンについては、全面腐食、

トンネル腐食（局部腐食）、塩素イオンについては、孔食（局部腐食）、応力腐食割れ<sup>※22</sup>（Stress Corrosion Cracking：以下「SCC」という）、濃縮缶内の析出物については、全面腐食、孔食（局部腐食）が考えられるため、これらの要因を抽出した。

温度の影響としては、全面腐食、トンネル腐食及び溶接部における貫通欠陥の発生があるため、これらの要因を抽出した。

※22：引張り応力と腐食環境の相互作用で、材料にき裂が発生し、そのき裂が時間と共に進展するという現象

#### 8.4 要因分析に基づく調査

要因分析に基づき、以下の調査を行った。

##### (1) 設計の観点

設計の妥当性確認として、配管、キャップ等の材料選定の妥当性、構造上の考慮の妥当性、腐食に対する設計考慮の妥当性を確認した。

##### ①保護管の腐食防止のための材料選定

###### a. シームレス管の材料選定

第2回設計及び工事の方法に関する認可申請書（以下、「設工認申請書」という。）に記載されている「六ヶ所再処理施設の材料選定フロー<sup>※23</sup>」に基づき耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼を採用することとしていることを確認した。

※23：放射性物質を内包する容器等に対して、硝酸濃度、沸騰状態での圧力、使用温度等を条件として、使用する材料を選定するためのフローである。

当該シームレス管の場合は、硝酸濃度が0.2mol/L以上で且つ  
保守が実施できない機器として、耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼を使用する必要があることを材料選定フローに基づき選定した。

また、核分裂生成物を含む硝酸中において、ステンレス鋼の腐食は粒界腐食による脱粒を伴う全面腐食として進行し、局部的に進行することはないこと及びステンレス鋼の耐食性を高めているクロムと溶接時に結合して耐食性を低下させる要因となる炭素量が十分に少ない材料においては、SCCの発生や局部腐食の要因となる溶接時の熱影響による鋭敏化が起こりにくいことを文献により確認した。



#### b. 溶接金属の材料選定

第2回設工認申請書に記載されている「六ヶ所再処理施設の材料選定フロー」及び核燃料施設の技術基準に基づき耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼を採用していることを確認した。

また、核分裂生成物を含む硝酸中において、ステンレス鋼の腐食は粒界腐食による脱粒を伴う全面腐食として進行し、局部的に進行することはないことを文献により確認した。

#### c. キャップの材料選定

第2回設工認申請書に記載されている「六ヶ所再処理施設の材料選定フロー」に基づき、耐食性に優れた極低炭素ステンレス鋼を採用することとしており、さらにトンネル腐食の発生防止対策としてE S R処理を施していることを確認した。

また、核分裂生成物を含む硝酸中において、ステンレス鋼の腐食は粒界腐食による脱粒を伴う全面腐食として進行し、局部的に進行することはないこと及びステンレス鋼の耐食性を高めているクロムと溶接時に結合して耐食性を低下させる要因となる炭素量が十分に少ない材料においては、S C Cの発生や局部腐食の要因となる溶接時の熱影響による鋭敏化が起こりにくいことを文献により確認した。

### ②保護管の機械的損傷（割れ）に対する考慮

濃縮缶内部及び外部から保護管及びサポート溶接部に受ける負荷として保護管の内圧による応力、外荷重（地震、対流）による応力、運転時の熱応力が考えられる。

これらの応力を算出し、機械的損傷に至った可能性について評価を実施したところ、保護管及びサポート溶接部にかかる応力はいずれも許容応力より十分小さく、また、運転中の繰り返し応力を考慮しても疲労限度より十分小さいことを確認した。（添付資料－2 1 参照）

### ③保護管の磨耗に対する考慮

#### a. 保護管と濃縮缶内の他構成部品との接触に対する考慮

保護管はサポートにより溶接固定され、濃縮缶内の他の構成部品と接触しない設計としていることを設計図面により確認した。

b. 廃液中の固形分との接触（エロージョン）に対する考慮

濃縮缶は物理的なかくはんを行っていないことから、加熱による熱流動を考慮すると流速は1 m/s以下と考えられ、それに対して一般論ではあるが流速が6 m/s以下ではエロージョンは問題とならないということを確認した。また、今回の事象を受け、他の文献調査を行い、スラリーを含む水を用いた試験で3 m/sまでの流速でエロージョン速度が小さいという結果が得られていることを確認した。（添付資料-22 参照）

④保護管の腐食に対する考慮

a. 肉厚の設定に対する考慮（シームレス管、キャップ）

第4回設工認申請書に記載されている「腐食代に関する設計の基本方針」に基づき設計時の腐食速度から腐食代が算出されていること、耐圧強度上必要な厚さに腐食代及び製作上の公差等を見込んだ裕度を加えた肉厚に設定されていることを設計図書により確認した。

また、設計時の腐食速度を設定する際の前提となる腐食試験において、高レベル廃液に、腐食影響成分として代表的なものと考えていた鉄について、先行施設の実績をもとに設定した量を添加<sup>※24</sup>した条件での腐食速度等の評価を行っていることを確認した。

※24：腐食試験用に使用済燃料を硝酸で溶解した溶液からウラン、プルトニウムを除いた廃液に腐食生成物として発生する鉄の量を考慮して添加した。

設計当時の腐食試験後、平成8年から平成12年に行われた試験において、平成10年頃より、酸化性イオンであるネプツニウムが腐食に影響する（腐食速度を速める）ことが把握され始めた。

また、設計当時には、ネプツニウムが腐食に影響を与えるという知見がなかったため、濃縮缶へのネプツニウムの経路として、抽出廃液からの経路と精製施設を経由する経路があるが、抽出廃液からの経路で流入する分の量のみを考慮して腐食試験液を調整しており、精製施設を経由して流入する分のネプツニウムが加味されていなかった。ネプツニウム以外の元素については、使用済燃料中の含有量、分配係数及び腐食性を考慮して再検討したが、設計当時の考え方で考慮が不足していることはないことを確認した。

その後、平成14年からネプツニウムの効果を考慮に入れ、当社再処理工場の高レベル濃縮廃液を模擬した試験液を用いて腐食試験を実施し、その腐食速度が設計時に想定したよりも増加することが確認された。

(添付資料-23参照)

b. すき間腐食に対する考慮（溶接部）

キャップとシームレス管は突合せ溶接、シームレス管とサポートは全周隅肉溶接として、すき間腐食の発生の要因となるすき間構造を排除していることを設計図面により確認した。

c. 電食に対する考慮（温度計シースと測定素子の接触部）

温度計の測定素子（白金抵抗素子及びリード線）は絶縁体の酸化マグネシウムで絶縁された構造のものを採用し、温度計のシースと測定素子との間の絶縁性を確保していることを設計図面により確認した。

設計の観点での要因分析に基づく調査の結果から、濃縮缶の腐食環境を考慮した材料選定や濃縮缶運転時に発生する熱応力に対する考慮等、必要な設計上の考慮が行われていることは確認した。

腐食に対する考慮のうち、肉厚の設定に対する考慮に係る調査において、設計当時の知見として腐食に影響する部分を考慮した腐食試験は実施されているものの、その時点ではネプツニウムが腐食に影響を与えるという知見がなかったことから、ネプツニウムの影響を考慮した再確認が必要であることを確認した。

(2) 製作・施工不良の観点

製造履歴の確認として、配管、キャップ等の製作、施工、据付等の履歴を調査し、製作・施工時に欠陥が発生した可能性の有無について確認した。

①製作不良

a. シームレス管の不良

i. シームレス管の材料不良

材料確認記録により当該材料が設計どおりの材料を使用していること、検査証明書により規定の65%硝酸腐食試験<sup>\*25</sup>に合格している耐食性に優れた材料であること、材料の化学成分が規格範囲内であること、引張試験の結果により機械的性質が規定の範囲内であることを確認した。

※25：オーステナイト系ステンレス鋼の腐食試験として用いられるもので、65%硝酸中での腐食速度を測定

ii. シームレス管の製作不良

シームレス管の製作時に外観検査、超音波探傷試験（以下、「UT」という。）に合格し有意な欠陥がないことを、検査証明書により確認した。

b. キャップの不良

i. キャップの材料不良

材料確認記録により当該材料が設計どおりの材料を使用していること、材料試験成績書により規定の65%硝酸腐食試験に合格している耐食性に優れた材料であること、材料の化学成分が規格範囲内であること、引張試験の結果により機械的性質が規定の範囲内であることを確認した。また、UT・浸透探傷試験（以下、「PT」という。）に合格し、有意な欠陥がないこと及びESR処理を行っていることを確認した。

ii. キャップの加工不良

キャップの加工時に寸法検査を行い規定の寸法範囲内であること、外観検査、UT、PTに合格していることを検査成績書により確認した。

c. 溶接部の不良

i. 溶接金属の材料不良

材料確認記録により当該材料が設計どおりの材料を使用していること、材料証明書により規定の65%硝酸腐食試験に合格していること、材料の化学成分が規格範囲内であること、引張試験の結果により機械的性質が規定の範囲内であることを確認した。

ii. シームレス管とキャップの溶接不良

シームレス管とキャップの溶接箇所について、放射線透過試験成績書及び浸透探傷試験記録により放射線透過試験（以下、「RT」という。）、PTに合格していること、RTのフィルムにより欠陥がないことを確認した。

また、耐圧・漏えい試験記録により耐圧、漏えい検査に合格していること、仕上がり検査記録により形状寸法、溶接部外観が溶接の技術基準に適合していることを確認した。

d. 温度計の不良

取扱説明書により、温度計は絶縁された構造のものであること、試験成績書により温度計のシースと測定素子の間に設計どおりの絶縁性が確保されていることを確認するための絶縁抵抗試験に合格していることを確認した。

②施工不良

保護管とサポートの溶接箇所について、すき間構造を排除した適切な溶接施工を行っており、PTに合格していることを溶接作業記録票及び浸透探傷試験記録により確認した。また、漏えい・変形がなく設計どおりの施工となっていることを耐圧・漏えい試験記録及び仕上がり検査記録により確認した。

③据付不良等

a. 輸送中における損傷

耐圧・漏えい試験成績書により据付後の耐圧・漏えい検査に合格していることを確認した。

b. 据付時における損傷

耐圧・漏えい試験成績書により据付後の耐圧・漏えい検査に合格していることを確認した。

c. 保護管内への温度計の設置不良（摺動の発生）

温度計据付チェックシートにより温度計の長さ及び保護管の長さ、温度計挿入後の絶縁抵抗に問題がないことを確認した。

製作・施工不良の観点での要因分析に基づく調査の結果から、製作段階において設計で要求されている材料が使用され、必要な試験、検査に合格し、さらには据付後の検査にも合格しており、製作、施工不良に係る要因により保護管の損傷に至ったものではないことを確認した。

### (3) 使用環境の観点

使用環境の調査として、濃縮缶内の温度、高レベル廃液に含まれる腐食影響成分等の使用環境を調査し、使用環境が設計時の想定を超えた状況であった可能性等について確認した。

#### ①濃縮缶内の機械的負荷

##### a. 温度上昇による保護管とサポート溶接部の損傷

濃縮缶下部の温度上昇が発生した場合に、その温度差によって発生する熱応力を解析により算出した結果、最大応力の発生箇所は保護管の先端サポート溶接部であり、その応力に地震・対流等により発生する応力を組み合わせても、疲労限度より十分小さいことを確認した。(添付資料-24 参照)

#### ②濃縮缶内の磨耗影響

##### a. 廃液中の固形分との接触によるエロージョン

実運転条件を模擬した熱流動解析の結果から、最大の流速の場合でも、文献で示されているエロージョンの発生する流速の領域よりも十分に小さい値であることを確認した。(添付資料-22 参照)

#### ③濃縮缶内の腐食影響

##### a. 濃縮缶内における腐食影響成分の影響

廃液中の腐食影響成分として、「(1) 設計の観点 ④保護管の腐食に対する考慮」において示したとおり、酸化性イオンのうち、考慮が必要なものはネプツニウムであるため、「8.3 要因分析 (3) 使用環境の観点 ③濃縮缶内の腐食影響」で要因として示した酸化性イオンについては、以降、ネプツニウムに対して評価を行う。

##### i. 酸化性イオンによる全面腐食(シームレス管、溶接部、キャップ)

「8.1.1 現品調査」の保護管底部の残肉厚確認により当該保護管は肉厚が設計値を下回っていたものの、当該保護管の肉厚は損傷に至るような状態ではないことから、全面腐食によって保護管が損傷した可能性はない。

なお、保護管と同等の環境にある加熱コイルの肉厚をアクティブ試験において測定した結果、減肉量は0.1~0.2 mm程度であった。

ii. 酸化性イオンによるトンネル腐食（局部腐食）（キャップ）

トンネル腐食が発生する環境は、過不動態領域にある場合であり、ステンレス鋼の硝酸環境中の分極曲線<sup>※26</sup>によれば不動態領域と過不動態領域の遷移境界は、腐食速度で 0.5 mm/年の腐食速度に相当すると考えられる。

しかし、保守的な考え方にに基づき、実験的にトンネル腐食が発生しないことが確認されている 0.1 mm/年以下の腐食速度を、トンネル腐食が発生しない領域と考えた。（添付資料-9 参照）（添付資料-25 参照）

※26：金属材料を溶液中に浸漬した結果、溶液と金属の間に生じる電位差を専用の装置を用いて上昇させていくと、電位に応じた電流密度が得られる。それをプロットしたものが分極曲線であり、硝酸環境中においては鋼種により固有の曲線となる。

アクティブ試験の廃液中のネプツニウム濃度実績からその腐食速度を評価すると 0.04 mm/年程度となり、過不動態領域には到達しないことを確認した。（添付資料-26 参照）

このことから、ネプツニウムの影響により、設計時に実施した腐食試験において評価した腐食速度よりも増加しているものの、ネプツニウム単独の影響でトンネル腐食が発生した可能性はない。

iii. 塩素イオンの存在による孔食（局部腐食）（シームレス管、溶接部、キャップ）

硝酸イオン濃度がある濃度以上になると孔食に対して腐食を抑制する作用があるため、塩素イオンの有無に関わらず、孔食が発生しないことを文献により確認した。

iv. 塩素イオンの存在による SCC（シームレス管、溶接部、キャップ）

濃縮廃液中の塩素イオン濃度について分析実績はないものの、塩素イオンが多量に存在した場合でも、硝酸環境中では粒界腐食が支配的で SCC は発生しないことを文献により確認した。（添付資料-27 参照）

v. 濃縮缶内の析出物の存在による全面腐食及び孔食（局部腐食）（シームレス管、溶接部、キャップ）

濃縮缶内の析出物の存在下の模擬廃液中での腐食試験において、全面腐食の腐食速度は析出物の有無によってほとんど変化しないこと、孔食等の局部腐食は認められなかったことを試験評価により確認した。（添付資料－２８ 参照）

b. 濃縮缶内における温度による腐食影響

濃縮缶の運転は、海外施設で実績のある減圧蒸発法を採用し、運転温度を下げた運転することにより、約□mol/Lの硝酸溶液に対する腐食環境を緩和することとしている。

しかし、運転実績では、平成19年3月頃のアクティブ試験第5バッチから、蒸発・濃縮運転サイクルの後半において濃縮缶下部の温度が中部、上部に比べ上昇する現象が確認されており、その後、抽出廃液の処理を行った第10バッチまでの各バッチで下部温度の上昇が発生し、上昇した温度は64℃～105℃程度であった。この温度上昇は、濃縮缶底部に発生した析出物が濃縮缶内の対流に影響して発生したものであった。（添付資料－２９ 参照）

i. 温度による全面腐食（シームレス管、溶接部、キャップ）

設計時の腐食速度に対して温度上昇の効果等を考慮した腐食量を算出しても約0.2mmであり、「8.1.1 現品調査」の保護管底部の残肉厚確認により当該保護管は肉厚が設計値を下回っていたものの腐食代は残っていること、また、当該保護管の肉厚は損傷に至るような状態ではないことから、全面腐食によって保護管が損傷した可能性はない。

なお、保護管と同等の環境にある加熱コイルの肉厚をアクティブ試験において測定した結果、減肉量は0.1～0.2mm程度であった。

ii. 温度によるトンネル腐食（局部腐食）（キャップ）

アクティブ試験時において濃縮缶下部温度上昇が発生したことを踏まえ、酸化性イオンの効果が顕著に現れるとされる80℃以上の温度である90℃での評価を実施した結果、温度上昇が発生した際の腐食速度は約0.28mm/年となり、上述の指標である0.1mm/年を上回ることを確認した。（添付資料－３０ 参照）



このことから、温度上昇の影響により、過不動態領域に到達してトンネル腐食が発生したものと考える。

### iii. 温度による溶接部における貫通欠陥の発生

保護管の材料の溶接部については、規定の65%硝酸腐食試験の結果、母材と同等の耐食性であることが示されており、今回の濃縮缶下部で見られたように温度が上昇しても、鋭敏化により溶接部が優先的に腐食し貫通に至ることはない。

また、保護管内の漏えい痕跡確認でキャップ溶接線、上下のシーニング加工部に液垂れの痕跡が確認されなかった。なお、液垂れ確認の模擬試験で、キャップ溶接線付近から液が浸入した場合には液垂れの痕跡が残り、ビデオスコープによる観察で判別できる程度であることを確認している。以上より、貫通欠陥が溶接部にある可能性は低い。

上記の要因分析に基づく調査では、ネプツニウムの影響と温度上昇の影響を個別に評価し、温度上昇によりトンネル腐食が発生した可能性があることを示したが、実際の腐食環境としては、温度上昇の影響とネプツニウムの影響の双方が発生しており、これを考慮するとこの時期の腐食速度は約0.5 mm/年と試算される。

トンネル腐食に関してR-SUS304ULC、SUS310Nb等に関する文献調査を実施した結果をもとに評価したトンネル腐食の進展速度とキャップ底部の肉厚（呼び厚さ）約6.4 mmを底部の温度上昇が生じた期間のうち、酸化性イオンの効果が顕著に現れるとされる80℃以上の時間における平均的な進展速度を試算した結果を比較し、後者の評価結果が前者の評価結果よりも大きめとなった。腐食環境の違いやトンネル腐食の進展速度のバラツキ及び実機での大きな進展速度等を考慮すると、ある程度の差はあり得るものと考えられ、今回の漏えいが下部保護管キャップ部でのトンネル腐食による可能性はあるものとする。

また、今回の文献調査の知見は、コリオ試験によるものであり、今回の高レベル廃液濃縮缶実機での条件と異なる条件で評価しているため、より実機条件に近い条件で、トンネル腐食の進展速度の温度依存性、 $\gamma$ 線や $\delta$ フェライトの影響などについても考慮した腐食データの取得を今後検討する。（添付資料-31 参照）

使用環境の観点での要因分析に基づく調査の結果により、濃縮缶内の機械的負荷について濃縮缶運転中に発生する応力により保護管が損傷に至らないことを確認した。濃縮缶の磨耗影響については濃縮缶運転中の最大流速においてもエロージョンは発生しないことを確認した。

濃縮缶の腐食影響については、腐食影響成分の影響により全面腐食等が発生し保護管の損傷に至る可能性やトンネル腐食が発生した可能性はないが、温度による腐食影響として温度上昇によりトンネル腐食が発生した可能性があることを確認した。

## 8. 5 推定原因

「8. 1. 3 調査結果に基づく評価」から、漏えいが発生した箇所は、キャップ溶接線付近または上下のシーニング加工部の可能性は低く、キャップ部である可能性が高い。また、キャップ部に損傷が発生した原因は、要因分析に基づく調査の結果、析出物の発生が濃縮缶内の対流に影響し、想定した以上の濃縮缶下部温度の上昇が発生したことにより鍛鋼品であるキャップ部でトンネル腐食が発生したものと推定する。

## 9. 復旧及び対策

### 9. 1 保護管損傷の復旧措置

#### 9. 1. 1 復旧方策の選定（添付資料－32 参照）

原因究明からキャップ部に損傷が発生している可能性が高いことが判っており、この状態で濃縮缶の運転を行った場合、濃縮缶内液が保護管内に浸入し、作業エリアの線量当量率の上昇、保護管内に挿入する温度計の汚染といった影響が想定されることから、これらを防止することを目的として、濃縮缶の運転を行うために必要な復旧措置を講じることとし、そのための方策について評価を行った。

評価にあたっては、以下を考慮した上で、技術的成立性の観点で復旧方策の比較を行った。

- ・濃縮缶が設置されているセル内は高い放射線環境にあり、人が直接保守することはできないことから、遠隔による保守作業の実施が必要となる。
- ・遠隔による保守作業において、以下の理由から保守に使用する機器の選定等に制約がある。
  - セル外から保護管先端までの距離が約12mあり、また保護管の内径が管台付近で最も小さく約14mmでアクセスが困難

- ▶  保修対象となる保護管は高レベル廃液を処理する濃縮缶内に設置されており、濃縮缶内液位が低い状態で保護管先端部付近における放射線量が約250 Sv/hと保護管内部の放射線量が高い

復旧方策の評価対象及び技術的成立性に関する評価結果を以下に示す。

## (1) 溶接による閉止方式

### 1) 概要

  損傷が生じている可能性がある先端部近傍を肉盛溶接し欠陥部分を塞ぐか、濃縮缶の管台部分で溶接し閉止する。

### 2) 技術的成立性

  当初保護管に期待していた静的閉じ込め機能を溶接により確保するものであるが、高放射線下のセル内のため、いずれの方式についても遠隔操作となり、作業性が最も大きな問題であることから、技術的に不確定要素が多い。

  先端部近傍を溶接する場合、濃縮缶の管台付近で保護管の内径が最も小さく、当該部を通過することが可能な溶接機器の開発が必要なこと、セル外から保護管先端までの距離が約1.2mあり、当該部位に直接アクセスできないため、遠隔操作による溶接方法の確立が必要である。また、保護管は、濃縮缶内に設置されており、濃縮缶が閉じ込め機能を有する設備であることから、現状の閉じ込め機能を要求される範囲を変えずに閉じ込め機能を担保するためには、濃縮缶の境界である管台で溶接が必要であり、その場合は、濃縮缶管台までの距離は近いものの、当該部位に直接アクセスできないため、セル開口を行った上で、遠隔操作にて配管の切断、閉止栓取り付け、溶接作業を行う必要がある。なお、本方式を採用した場合には下部温度計は使用できない。

## (2) 充填材による閉止方式

### 1) 概要

  損傷が生じている可能性がある先端部近傍に充填材を注入し、閉止する。

### 2) 技術的成立性

  当初保護管に期待していた静的閉じ込め機能を充填材により確保するもので、閉じ込めが維持できることを担保するために、耐硝酸性、耐放射線性、耐久性等を考慮した充填材を選定する必要がある。

しかしながら、現時点で相当のものが確保できないため、各種試験を行い必要な条件を満足する充填材を検証することが必要であり、技術的に不確定要素が多い。

### (3) 二重管方式

#### 1) 概要

保護管内部へ保護管の内径に合せた配管を施工し、二重管とする。

#### 2) 技術的成立性

保護管の内径は細く、さらに保護管は曲げ管部があることから、損傷した保護管の中に配管を挿入するための施工方法の確立、保護管材料の開発が必要である。具体的には、曲げ管部を通すためにある程度柔軟性のある材料であり、且つ静的閉じ込め機能を確保するために耐食性に優れた材料が必要である。

また、保護管は、濃縮缶内に設置されており、濃縮缶が閉じ込め機能を有する設備であることから、現状の閉じ込め機能を要求される範囲を変えずに挿入された二重管で閉じ込め機能を確保するためには、濃縮缶の境界である管台で溶接が必要である。この際、施工として、遠隔操作による溶接方法の確立が必要である。これらの条件を考慮に入れると技術的に不確定要素が多い。

### (4) 加圧方式

#### 1) 概要

セル壁貫通部のプラグ近傍より圧縮空気により加圧する。

#### 2) 技術的成立性

保護管内に圧縮空気を供給し、濃縮缶側から保護管内先端部にかかる圧力以上に保護管の内部を加圧する方式である。

この方式は、圧力を監視する必要があるものの、パージ式液位計<sup>※27</sup>のような既存技術の応用であり、システムとして対応可能である。

※27：管を通して液体中に空気を連続的に吹き込む（パージ）ことにより生じる背圧が管先端部の液体の圧力に等しくなることを利用し液位を測定する計器

なお、パージ式液位計の先端は開放状態であり、圧縮空気の圧力変動等による作業エリアでの線量当量率の上昇や汚染の発生防止を目的に必要な

高低差を確保しているのに対し、加圧方式は、パージ式液位計に比べて高低差が小さい分、保護管に対して常時圧縮空気を供給することにより、濃縮缶側からの圧力以上の圧力をかけ、パージ式液位計と同程度の高低差を確保している。（添付資料－３３ 参照）

上記の検討の結果、保護管の損傷箇所を直接復旧するものではないが、運転時に圧縮空気で保護管内部を加圧することにより保護管内へ廃液が浸入しないことを実規模試験等により確認したこと及び現状採用しているパージ式液位計等の他のシステムで用いている技術で既にその実効性等が確立されており、技術的に成立性が十分にあることから、当該保護管復旧の方策として、加圧方式を採用することとした。

さらに、加圧方式において、万一濃縮缶内に液が入っている状態で、加圧するための圧縮空気の供給が停止した場合には保護管内に濃縮缶内液が浸入することが想定される。温度計は人による手作業で交換を行うことを想定したものであり、温度計が高レベル廃液に接し汚染している状態では、交換時の作業員の被ばくが問題となることから、液が浸入した場合の温度計の汚染防止の観点で、温度計汚染防止用管を保護管内に挿入する方式について検討した。

#### 1) 概要

保護管内部へ温度計を保護する管を汚染防止用管として挿入する。

また、本方式は加圧方式と併せて使用するため「二重管方式」のように管台出口等で溶接を行わない方式である。

#### 2) 技術的成立性

保護管の内径は上記のとおり細く、さらに保護管には曲げ管部があることから、損傷した保護管の中に温度計汚染防止用管を挿入するための施工方法の確立、及び曲げ管部を通すためにある程度柔軟性のある材質であることが必要であるが、加圧方式と併せて実施するものであることから板厚は薄くても問題なく、保護管内への挿入性についても確認されていることから、技術的な成立性はあると考える。

上記検討の結果、技術的成立性があること及び温度計の汚染防止に効果があることから、加圧方式に加えて温度計汚染防止用管挿入方式を実施することとした。

復旧方策の比較評価の結果、採用することとした加圧方式に関するシステム構成及び運転管理を次節に示す。

## 9. 1. 2 加圧システムのシステム構成及び運転管理

### (1) 加圧方式のシステム構成 (添付資料-34 参照)

保護管内を加圧するための空気は、一般圧縮空気系から配管により圧縮空気を取り入れ、減圧弁を経由して保護管内に供給し、供給する圧縮空気の圧力は、保護管内の圧力が濃縮缶側から保護管先端部にかかる圧力 (最大約 50 kPa) よりも高い状態になる圧力 (60 kPa 以上) まで減圧弁にて減圧する。

減圧弁については、継続的に圧縮空気の供給を行うことができるよう、単体での故障、定期的な保守を考慮し、二重化する。

また、加圧システムはパージ式液位計に比べ常時加圧の要求が高いことから、一般圧縮空気系の供給が停止した場合を考慮し、空気貯槽を設けるとともに、加圧状態を維持するために、加圧システムに圧縮空気を供給するコンプレッサを設ける。

加圧システムは、グリーン区域からレッド区域へ空気を供給する設備であるため、保護管取り合い部 (止め弁、排気弁) において、保護管内の放射性物質の万一の移行等を考慮して、ボックスを設け、ボックスからの排気は高性能粒子フィルタを通して、セル換気系へ接続する。

また、温度計の汚染を防止するために、汚染防止用管 (ステンレス鋼を使用し、直径約 10 mm、厚さ約 1 mm の管) を設置する。

保護管と温度計汚染防止用管の間は適切なシールを設置し、圧縮空気による加圧を継続したまま温度計のみが引き抜ける構造とする。

壁から換気ボックスの間の配管については溶接構造としているほか、換気ボックス、保護管及び汚染防止用管の接合には適切なシールを設けている。シールから保護管内雰囲気のリークがあったとしても、保護管内雰囲気は換気ボックスに排出され、その後セル換気系へ排気されることから、汚染が生じないような安全防護策となっている。

ボックスには、ボックス内の雰囲気を測定するためのダストモニタ、 $\gamma$ 線モニタを設置する。

また、保護管取り合い部にセルからの放射線に対するしゃへいのため、しゃへい体を設置する。

さらに、損傷箇所が拡大した場合等に保護管内部を観察できるように、温度計汚染防止用管を引き抜くことが可能な構造とする。

## (2) 加圧システムの運転管理

(1) に示すようなシステム構成であること及び本システムが保護管内先端部にかかる圧力以上に保護管の内部を常時加圧することを要求されること等を考慮し、加圧システムの圧力、流量及び線量当量率等を1日1回以上点検することにより、保護管への必要な加圧が維持されていることを確認する。

また、加圧システムに供給する圧縮空気の供給元である一般圧縮空気系の圧力が低下し、設定値を下回った場合は、制御室において一般圧縮空気系の圧縮空気供給設備の供給圧力低警報が発報するため、その際は濃縮缶の減圧解除を確認するとともに、空気貯槽の圧力、濃縮缶、保護管の圧力状況を確認し、コンプレッサへの切り替え作業を実施する。

## (3) 加圧システム等の保守管理

### ①加圧システムの保守管理

加圧システムを構成する圧力計、流量計等の計器、減圧弁及びボックス内の止め弁、排気弁等の弁、止め弁及び排気弁に設置されているフィルタに対する点検、保守、交換の際の管理として、圧力計、流量計については、隔離弁を閉止し、仮設の計器を設置することで保守中においても圧力等の監視を行い、保護管への加圧を継続した状態で保守を行う。

減圧弁については、もう一方の減圧弁に切り替えることで加圧システムから保護管への加圧を継続した状態で保守を行い、その他の弁（減圧弁及びボックス内の止め弁、排気弁以外）については、仮設の空気ポンペを加圧システムの予備タップに接続し、保守用閉止弁を閉止することにより、保護管への加圧を継続した状態で保守を行う。

また、ボックス内の止め弁、排気弁については、分解点検、保守を行う際には、加圧システムは開放状態になることから、保護管内の圧力は大気圧となるため、濃縮缶内液を払出し、濃縮缶を減圧状態にした後、加圧システムを停止し、分解点検、保守を行い、排気弁に設置されているフィルタについては、保護管への加圧を継続した状態で交換を行う。

止め弁に設置されているフィルタ、保守用閉止弁及び空気ポンペ用予備タップ弁については、排気弁のフィルタを外して仮設の空気ポンペ等を接続し、止め弁を閉止することにより、保護管への加圧を継続した状態で交換を行う。

なお、加圧システムを構成する設備の点検頻度については、保護管の内部を常時加圧するシステムであるという重要度に応じ計画する。

## ②温度計の保守管理

温度計交換作業において、作業上、換気ボックスの開放を行うため、汚染拡大防止を目的として、作業エリア設定、グリーンハウス設置等、必要な防護措置を実施する。また、作業の際には、作業計画段階で十分な汚染対策を考慮するとともに、作業実施前には作業手順及び本作業におけるリスクの再確認を徹底する等、安全に対する取組みを継続する。

## ③温度計汚染防止用管の保守管理

温度計汚染防止用管交換作業時は、先端部等が高レベル廃液により汚染している可能性があるため、作業エリア設定・グリーンハウス設置等必要な防護措置を実施するとともに、作業員の汚染防止のための十分な防護装備の着用を徹底する。

また、保護管から温度計汚染防止用管を引き抜く際は、作業性の観点から温度計汚染防止用管を切断しながら引き抜く必要があり、その治具の開発を検討する。

なお、温度計汚染防止用管を引き抜く際には加圧を停止する必要があるため、濃縮缶内の濃縮液を移送し、濃縮缶内を減圧状態とする等、濃縮缶内の廃液が保護管内に浸入しない措置を講じてから温度計汚染防止用管を交換する。

温度計汚染防止用管を引き抜いた場合、ビデオスコープ等を用いて内部観察を行い、保護管内に廃液が浸入していないことを確認する。

## 9. 1. 3 加圧システムに係る設計評価及び安全評価

### (1) 加圧システムに係る設計評価（添付資料－35 参照）

加圧システムに要求される保護管内先端部にかかる圧力以上に保護管の内部を加圧する機能について、想定される以下の状態に対する有効性を評価し、本設備が十分な安全裕度を有した設計であることを確認した。

#### 1) 濃縮缶の各運転状態における濃縮缶内の圧力変化

濃縮缶の各運転状態における濃縮缶側からの圧力の変化を考慮し、液張り、減圧～濃縮前半、濃縮後半～減酸、冷却・減圧解除、希釈の運転状態での濃縮缶側からの圧力に対して保護管への液浸入の有無を評価し、その結果、濃縮缶のいずれの運転状態においても保護管内先端部の圧力が濃縮缶側からの圧力を上回り、保護管内へ廃液が浸入しないことを評価及び実規模試験により確認した。



## 2) 濃縮缶と加圧方式の圧力バランスの変動

加圧システムは、濃縮缶側から保護管内先端部にかかる圧力以上に保護管の内部を加圧するシステムであるため、この圧力バランスに影響する要因について、設備構成等を考慮して洗い出し、「圧縮空気設備からの圧縮空気の供給停止」、「塔槽類廃ガス処理設備による圧力変動」等の要因に対して本加圧方式が有効に機能し、保護管内へ廃液が浸入しないことを確認した。

## 3) 保護管先端部の損傷箇所の腐食による損傷の進展

損傷進展の評価条件として、保護管の内径まで進展した場合においても保護管内へ廃液が浸入しないことを評価及び実規模試験により確認した。

また、保護管の損傷が保護管の内径まで進展した場合の加圧方式への影響として、安全性、運転の成立性について評価を行い、問題ないことを確認するとともに、保護管内の圧縮空気の流れが大きくなった際には温度計測へ影響を及ぼすことから、温度計指示値に対する補正等の圧縮空気の流量に合わせた対応方法について検討を行うこととした。

## 4) 加圧システムを構成する設備の保守

加圧システムにおけるボックス内の止め弁、排気弁を分解点検、保守を行う際には、加圧システムは開放状態になることから、保護管内の圧力は大気圧となるこのため、濃縮缶内の液を払出し、濃縮缶を減圧状態にした後、加圧システムを停止し、圧力バランスを維持した状態で分解点検、保守を実施する手順を採用することにより、保護管内へ廃液が浸入しないことを実規模試験で確認した。

また、作業エリアに対するしゃへいについては、ストリーミングによる線量率、放射性物質が移行するとした場合の線量率及びセル壁透過成分による線量率を加えても、当該部屋の基準線量率を満足していることを確認した。

さらに、保護管が損傷している状態であることから、損傷箇所にある廃液から発生する水素に対して評価した結果、水素の発生量は十分小さく、火災及び爆発の防止の観点で問題ないことを確認した。

同様に保護管内に放射線分解の影響で発生することが想定されるNO<sub>x</sub>についても評価を行い、発生量は十分小さく、爆発が発生するような状況ではないことを確認した。

ただし、NO<sub>x</sub>ガスは有害な物質であることから、念のため、グリーン区域への影響がないことを確認する目的で、換気ボックス内にNO<sub>x</sub>ガスモニ

タを設置することを検討するとともに、保護管内部については、止め弁の保守時等、濃縮缶を減圧状態にする時に併せてサンプリングを実施することとする。

#### (2) 加圧方式に係る安全評価（添付資料－36 参照）

再処理事業指定申請書における安全評価の考え方にに基づき加圧方式の安全設計の妥当性の確認を行うために、「(1) 加圧システムに係る設計評価」で示したような機能が期待できないような状態を想定して、仮に保護管内に高レベル廃液が浸入したとし、浸入した高レベル廃液からの「水素発生」、「気相への放射性物質の移行」について評価を行った。

評価の結果、水素発生及び廃液から気相への放射性物質の移行については、いずれについても影響は十分小さく、加圧方式の安全設計は妥当である。

#### 9. 1. 4 今後の損傷進展に対する対応（添付資料－37）

保護管の損傷の進展に対しては、加圧システムの運転管理において、定期的なデータ取得を行う保護管内に供給する圧縮空気の圧力及び空気流量の変化により、トンネル腐食の進展による損傷の拡大か、それ以外の要因による損傷の発生かの判別を行うことが可能と考える。

これは、トンネル腐食による開口部の発生が、粒界腐食／脱粒によるものであることから、その大きさは結晶粒の大きさが一つの目安となり、その結晶粒は大きいもので100 $\mu$ m程度であるため、仮に幾つかの結晶が一度に脱落した場合でも、開口部は200 $\mu$ m程度と考えられる。これに対し、熱影響部の腐食による損傷が発生したと仮定した場合は薄肉となったある程度の範囲が損傷することで開口が急激に拡大することが予想され、数mmオーダーの大きなものになる可能性があるとの考えから想定したものである。

さらに、開口部の大きさを200 $\mu$ mとした場合の推定流量は、約40L/h[normal]程度と考えられるため、圧縮空気の流量等の変化の様相がこれとは明らかに異なる場合（急激に流量が増加することを想定）には、トンネル腐食の進展とは別の要因が考えられるため、保護管内部の状態を調査・確認することとする。

保護管内部の状況確認を行うためには、ビデオスコープ等で目視可能な開口に至っているかを概略評価する必要がある。

開口の大きさの算定方法については、ビーカ試験及び実規模試験として実施した圧力降下確認の結果について、損傷の形状を円管状とした場合の粘性流れ

の式及び損傷の形状をオリフィス状と仮定した場合の先細ノズルの式のそれぞれとの比較を行い、適用可能な評価式の評価を行った(添付資料-17 参照)。

この結果、粘性流れの式については、孔径が $100\mu\text{m}$ 未満の範囲において理論式から算定した値と実験結果とが一致した。先細ノズルの式については、損傷の形状がオリフィス状であるとの仮定に基づき流量を算定するものであるため、円管状の管路での実験値と比較するものではないが、孔径が $100\mu\text{m}$ 以上の範囲では、実験値は先細ノズルの式から算定した流量に漸近することを確認した。

上記関係に基づき、開口部の大きさに係る概略評価は以下のとおり実施する。なお、トンネル腐食での開口における流れは複雑であり、空気流量から開口の大きさを理論的に求めるのは困難であるため、開口の大きさに関する概略評価においては、損傷の形状が円管状である、またはオリフィス状であるとの仮定に基づき算定を行う。

#### ①流量が小さい場合

孔径と流量の関係から、粘性流れの式と先細ノズルの式が交差する点の流量未満(約 $10\text{L/h}$ [normal]未満)の場合は、以下の二通りの式から、流量計の指示値を用いて、開口の大きさの範囲を算定する。

- ・円管状での開口の大きさ評価として粘性流れの式を用いる。
- ・オリフィス状での開口の大きさ評価として先細ノズルの式を用いる。

#### ②流量が大きい場合

上記①よりも流量が大きい場合、円管状の損傷であったとしても、円管状の管路での試験結果が先細ノズルの式から算定した流量に漸近するので、先細ノズルの式のみを用いて、開口の大きさを算定する。なお、先細ノズルの式に代入する流量については以下のとおりであり、算定される開口の大きさは範囲をもつ。

- ・円管状での開口の大きさ評価として用いる流量は、円管状の管路を用いた試験での流量が先細ノズルの式での流量に対して小さくなる結果を得ており、流量計の指示値を用いると先細ノズルの式からの開口は小さくなるので、その試験結果との差異を考慮して、流量計の指示値を補正した値とする。
- ・オリフィス状での開口の大きさ評価として用いる流量は、先細ノズルの式がそもそもオリフィス状での開口を想定して採用した式であるので、流量計の指示値とする。

### 9. 1. 5 加圧方式に対する評価のまとめ

保護管の損傷に対する復旧方策としての加圧方式に対して、

- ・圧縮空気により濃縮缶側からかかる圧力以上の圧力で保護管内部を加圧することにより必要な機能を確保する方式は、他のシステムで用いている技術で既にその実効性等が確立されており、技術的な成立性は十分にあること
- ・加圧方式により空気が供給されている状態で、保護管内へ廃液が浸入しないこと
- ・加圧方式への圧縮空気供給停止、保護管の損傷箇所の進展を想定したとしても保護管内へ廃液が浸入しない設計であり、作業エリアに対するしゃへい、火災及び爆発の防止の観点でも問題ないこと
- ・加圧方式の機能が期待できないような状態を想定して、保護管内に高レベル廃液が浸入した状態の評価を行った結果、水素発生及び廃液から気相への放射性物質の移行については、いずれについても影響は十分小さく、当該加圧方式の安全設計は妥当であること

を確認し、想定される状態に対して加圧方式で十分に安全性を確保できることから、保護管の損傷に対する復旧方策として加圧方式を採用することにより、当該濃縮缶を使用することは可能であると考ええる。

また、当該濃縮缶の上部と中部の温度計が挿入されている保護管についても、万一保護管に損傷が発生した場合の対策として、加圧方式のシステムを製作し、保護管に損傷が発生した場合に加圧を行うことができるよう対策することとする。

なお、上記の通り復旧方策の対応が完了する前までには、廃液貯留の管理値（添付資料－11 図－2 参照）に達するおそれはないものの、万が一想定外の廃液発生等で廃液貯留量が管理値に達するおそれが生じた場合には、ポンベ等を用いた簡易的な加圧システムを設置し、保護管内に濃縮缶側から保護管先端部にかかる圧力（最大約50kPa）よりも高い圧力をかけた状態で廃液処理を行う。（添付資料－38 参照）この廃液の処理量は、本来の加圧方式の使用開始までの期間に発生する廃液を受け入れられる程度の必要最低限の量とする。

この廃液処理運転の際にも濃縮缶下部の温度計は設置し、3本の温度計の温度監視等の「9. 2 腐食環境緩和のための対策」に示す管理を行うとともに、加圧システムの圧力を確認し、廃液処理後には保護管内の観察を行う。また、放射線分解等によるNO<sub>x</sub>ガス等の発生等に関しては、廃液処理終了後に簡易

的な加圧システムを取り外し、内部の気体を処理する際にガスモニタ等で測定することを検討する。

## 9. 2 腐食環境緩和のための対策（添付資料－39 参照）

「8. 4 要因分析に基づく調査（3）使用環境の観点 ③濃縮缶内の腐食影響 b. 濃縮缶内における温度による腐食影響」において示したように、アクティブ試験第5バッチからの濃縮運転において濃縮缶下部の温度が上昇する現象が確認され、それにより腐食環境が厳しくなり、トンネル腐食が発生したと考えられることから、今後の運転に対して、温度上昇に対する対策として以下の項目について検討した。なお、下記対応は長期予備の運転に対しても実施することとする。

### ① 濃縮缶下部の温度上昇の抑制

アクティブ試験において発生した濃縮缶下部の温度上昇は、濃縮缶下部における析出物の堆積が進んだことにより温度上昇が発生しやすくなっていたことから、先行施設でも実施している定期的な洗浄運転を行うことで析出物を除去し、下部温度が上昇するタイミングが早くなることを抑制する。

具体的には、濃縮缶に酸濃度の低い硝酸を供給・加熱及び払出しを行うことで、高酸濃度の環境下で発生した析出物を再溶解するとともに濃縮缶から払出す。なお、第10バッチの濃縮廃液払出し後に洗浄運転を行い、洗浄操作が実施できることを確認している。

### ② 濃縮缶の温度管理

「①濃縮缶下部の温度上昇の抑制」に示した対策により濃縮缶下部の温度上昇の抑制を図るものの、濃縮運転を実施する中で温度上昇が発生する可能性があることから、濃縮缶の温度管理を以下のとおり行う。

なお、減酸運転中は、廃液の処理が行えないため、温度状況に応じて減酸運転を開始できるよう通常の運転時から廃液を貯留する貯槽の容量管理を行う。

- ・ これまで濃縮缶の温度管理は、濃縮缶に設置されている3本の温度計のうち1本の温度計の指示値のみを用いて行っていたが、濃縮缶全体の温度状態を把握する目的で、3本の温度計により管理を行う。
- ・ 温度上昇が発生し、3本の温度計の平均値が5.5℃に達した場合には、温度を下げるための操作（減圧度を深くする操作または減酸運転）を実施する。

具体的には、先ず減圧度を深くする操作により温度を下げ、並行して上流工程の運転調整により廃液発生量を低減した上で、減酸運転を実施する。

なお、減酸運転では、濃縮液の酸濃度を引き下げることにより高酸濃度下で析出した析出物の再溶解及び沸点の低下により温度を下げる。

- ・ 3本の温度計のいずれかの値が65℃を超えた場合には直ちに濃縮のための廃液供給を停止し、濃縮液の払出しに向けた減酸運転（通常のバッチ運転中の減酸運転の位置付け）を行い、濃縮液を払出す。濃縮液の払出し後、洗浄運転を実施する。

#### 10. 類似機器での類似事象の発生防止（添付資料－40 参照）

「8.5 推定原因」で述べているとおり、今回の事象の直接的な原因は、想定した以上の濃縮缶下部温度の上昇と考えられ、厳しい腐食環境となったことにより、鍛鋼品であるキャップ部でトンネル腐食が発生したものと推定しており、これを踏まえ、類似事象の発生防止に係る調査を実施した。

また、当該保護管が損傷した直接的な原因ではないものの、設計時に腐食への影響の知見がなかったネプツニウムに対する腐食への考慮ができなかったことを受け、他の設備においてネプツニウムの影響による類似事象の発生の可能性についての調査を上記調査と併せて実施した。

さらに、上記のとおり、腐食環境が厳しくなったことが確認されていることから、全面腐食の観点でもその影響を調査することとし、対象範囲は、腐食環境とみなされる0.2mol/L以上の硝酸溶液に常時接液するステンレス鋼製の機器とし、以下の観点を考慮した類似事象の発生防止に係る調査フローを作成し、予防処置が必要な機器の抽出を行うこととした。

- ・ 想定以上の温度上昇（通常運転温度を超える可能性があるものも含む）、腐食影響成分としてのネプツニウムの影響度の観点で、設計時の腐食速度への影響
- ・ 「通常運転温度を超える可能性がある」については、温度上昇の要因を検知し確実に除去する措置がインターロックにより行われるか、その措置をマニュアル類に規定しているか（当該機器の運転開始前までに整備する計画を確認できたものを含む）により評価
- ・ トンネル腐食の観点で、鍛鋼品を使用している部位の腐食速度が0.1mm/年を超える可能性
- ・ トンネル腐食対策としてESR処理のみの鍛鋼品の使用

- ・全面腐食の観点で、設計寿命中に腐食量が腐食代を超える可能性

調査結果により予防処置が必要と判定された機器等に対する予防処置に係る考え方を以下に示す。

- ・トンネル腐食が生じる可能性があるとして判定された機器等については、その部位の温度を管理する措置を検討することとする。
- ・全面腐食の観点で、腐食代以上の全面腐食が生じる可能性があるとして判定された機器等については、減肉管理を検討することとする。

上記調査は実施中であるが、現時点での調査状況は以下のとおりである。

- ・トンネル腐食の観点での評価において、鍛鋼品を使用している長期予備の加熱コイル接続管台、ウラン濃縮缶（分離施設）の保護管キャップ、管台、管板については、ネプツニウムの影響により腐食速度が0.1 mm/年を超える可能性があるため、ESR処理以外のトンネル腐食対策が施されているかを確認した。これらについては、鍛流線制御鍛鋼品の使用や鍛流線に直交な面へのバタリング施工を確認した。
- ・全面腐食の観点から、当該濃縮缶下部の温度上昇の影響により腐食速度の大きかった当該濃縮缶加熱ジャケット部の底面について、アクティブ試験期間中の腐食量は、腐食代の5 mmを超えていないことを確認した。今後は当該濃縮缶に対して、「9.2 腐食環境緩和のための対策」に示したとおりの対策を行うため、大きな腐食は生じないものと見込まれる。
- ・設計時に考慮した以上のネプツニウムの影響があり、設計寿命中に、腐食代以上の全面腐食が生じる可能性がある機器として、長期予備、ウラン濃縮缶（分離施設）、第2酸回収蒸発缶が見込まれる。これらについては、減肉管理を検討することで対応を図ることとする。

さらに、今回の漏えい事象に鑑み、今後、必要性を検討すべき技術開発課題として以下が考えられる。

- ① 今回の温度計保護管内部のように、アクセスが困難な箇所での損傷検出手法
- ② 損傷の原因究明のための非破壊試験手法
- ③ 損傷箇所の保修手法

再処理工場の主要機器はほとんどがセル内に設置されているため、これらの技術開発には、遠隔技術をはじめとして新たな要素技術が必要であり、実機適用までには非常に長期間を要することが予想される。

そのため、長期的視点に立った当社の自主的活動として技術開発を進めていくこととしたい。

また、当該濃縮缶と同じ設備である長期予備については、「9. 2 腐食環境緩和のための対策」に示したとおりの対策を実施するが、運転する際には、念のための対応として、長期予備はセル内に人が入って作業が実施できることを考慮し、保護管に対して、二重管方式等の他の方策についてモックアップにより検証を実施した上で対応を検討することとする。

なお、長期予備については、「6. 1 濃縮缶の概要」で示したように塔槽類廃ガス処理設備の接続を行っていない状態であるため、使用が必要な段階で直ぐに接続作業が実施できる状態とし、この接続作業の期間においては、高レベル廃液の処理ができないことから、「7. 濃縮缶で処理する廃液に係る対応」及び「9. 2 腐食環境緩和のための対策」に記した廃液貯留に係る管理を行う。

また、保護管の損傷事象の発見の発端となった、温度計交換作業に伴う汚染の発生に鑑み、当該保護管に係る保守作業時のみならず、保護管内に挿入された温度計のように、放射性物質を内包する機器に間接的に挿入されている計器等の交換作業を実施する場合には、作業に伴い汚染が発生する可能性がある作業として、事前に対応方法（グリーンハウス要否、局所排風機の設置要否、作業に対する適切な防護装備の着用、専用治具の開発検討を含む）を検討する。

また、放射性物質を扱う作業の基本を習熟させる努力として、放射線作業について、作業計画の作成段階及びチェック段階において、個々の作業者に理解させ浸透させる活動を継続して実施する。

以 上