

グローブボックスフィルターケーシングの腐食原因と補修技術

The cause of corrosion occurred in a glove box filter casing and its repair technique

日本原子力研究開発機構	森 英人	Eito MORI
日本原子力研究開発機構	山本 昌彦	Masahiko YAMAMOTO
日本原子力研究開発機構	田口 茂郎	Shigeo TAGUCHI
日本原子力研究開発機構	佐藤 宗一	Soichi SATO
日本原子力研究開発機構	北尾 貴彦	Takahiko KITAO
日本原子力研究開発機構	駿河谷直樹	Naoki SURUGAYA

Abstract

The contamination of the radioactive material was found on the filter casing surface of the glove box installed at the analytical laboratory in Tokai Reprocessing Plant. The cause of the contamination was investigated with visual inspection, penetrant testing and ultrasonic thickness measurement. It was found that a micro through-hole due to the corrosion of stainless-steel was generated in the glove box filter casing. The repair work of the filter casing was carried out keeping the glove box negative pressure. The corrosion part of filter casing was replaced and newly fabricated casing was connected to the glove box with Tungsten Inert Gas welding method.

Keywords: glove box, stainless-steel, corrosion, repair work, radioactive material

1. 緒言

日本原子力研究開発機構の東海再処理施設では、長期の使用により、グローブボックスや配管の一部にステンレス鋼の腐食が懸念される。万が一腐食が発生した場合、放射性物質を閉じ込める機能を維持できなくなる可能性があるため、腐食原因の究明は、施設の維持・管理を行う上で重要事項である。また、腐食が生じたグローブボックスを負圧などの安全機能を維持した状態において補修を行う技術の構築も必要である。

本稿では、放射性物質を取扱うグローブボックスに接続された排気用フィルターケーシングに生じたステンレス鋼の腐食事象について、その原因及びグローブボックスの負圧を維持した状態において腐食した部位を含む周辺部位を切断し撤去した後、溶接により補修した作業について報告する。

2. グローブボックスの概要と放射性物質の検出

腐食を確認したグローブボックスの概略図を図1に示

連絡先: 森 英人, 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33, 核燃料サイクル工学研究所 再処理技術開発センター, 電話: 029-282-1111, E-mail: mori.eito@jaea.go.jp

す。当該グローブボックスは昭和47年に設置され、その寸法は高さ1000mm、横2000mm、奥行き600mmであり、架台上に設置されている。本体の材質は再処理施設で使用頻度の高い硝酸による腐食を考慮して、SUS28(現在のSUS304L相当 [1])で製作されており、前面には6本のグローブが取り付けられたアクリルパネルが設置されている。グローブボックスの背面には、開閉扉が設置されており、使用済燃料溶解液、高レベル廃液等の高放射性物質を取り扱う試験セルと接続されている。このグローブボックスは、これまで主に試験セルの保守用として、セル内で実施する試験の補助作業(物品搬入、試料の調整、試験済み廃液の送液等)に使用してきた。また、グローブボックスは内部を常時負圧(300±50Pa)に維持している。さらに、ボックス上部の給気・排気用フィルターケーシング内には、高性能エアフィルター(HEPAフィルター)が設置されており、給気口からグローブボックスへ供給された空気はフィルターを通ったのち、フランジで接続された排気ダクトを介して排気設備へと排気される。

平成24年7月に、このグローブボックスの点検を実施していたところ、グローブボックスに接続された排気用フィルターケーシングの短管及びレデューサー部に放射

性物質を検出した(図2参照)。詳細な点検の結果、検出の範囲は10cm²程度であり、α線核種が170Bq、β、γ線核種が2×10⁻⁵Bqの放射性物質を確認し、その主成分は¹³⁷Csであることが判明した。水及びアルコールを含ませた布等で、放射性物質の拭き取りを試みたところ、レデューサー部は直ちに除去することができたが、短管部では除去した後、一定時間が経過すると再度、放射性物質が確認された。なお、グローブボックス及び周辺の点検を実施した結果、排気用フィルターケーシング表面の当該箇所以外に放射性物質は確認されなかった。

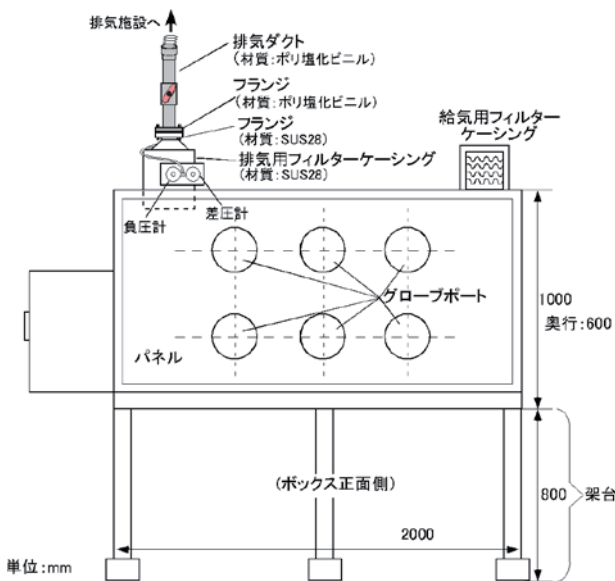


図1 グローブボックスの概要

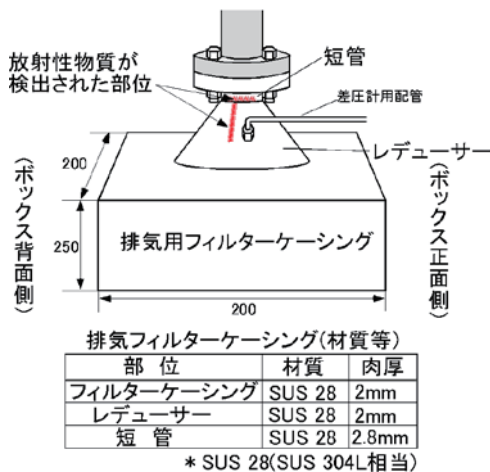


図2 排気用フィルターケーシングの概要

3.1 放射性物質の検出箇所周辺及び排気用フィルターケーシング内面の観察

グローブボックスの外側から目視により排気用フィルターケーシング表面の観察を行った。その結果、短管部では溶接線の間隔が18mm以下と極めて近接しており、溶接時の熱影響で鋭敏化が起こっている可能性が高いと疑われた。一方、短管部位上方のフランジ部には、緩みやゴムパッキンの劣化等もなく、フランジ接続箇所には放射性物質も確認されなかったことから、フランジ部からの放射性物質の漏出の可能性はないと判断した。

その後、当該グローブボックスから排気用フィルターケーシングの内部へ CCD カメラを挿入し、内面観察を実施した。内面観察の状況を図3に示す。その結果、短管部に腐食によると思われる肌荒れが認められるとともに、若干の減肉が生じている可能性があることがわかった。一方、レデューサー内部、排気用フィルターケーシング内部、及び各部の溶接線については、長期の使用による汚れが見られたが、金属光沢はあり、劣化等は確認されなかった。

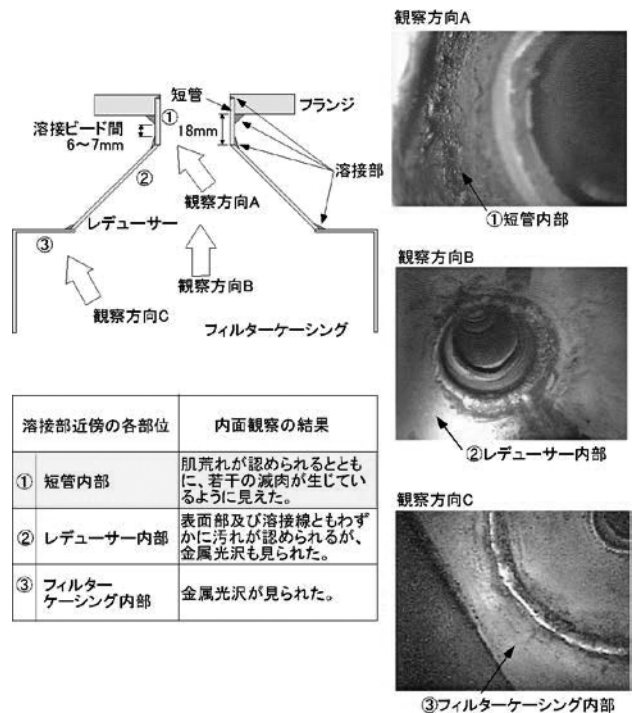


図3 内面観察の状況

3. 原因調査

排気用フィルターケーシング外面及び内面の外観検査、超音波肉厚測定、浸透探傷試験を実施し、放射性物質が検出された原因を調査した。

3.2 超音波肉厚測定

外観検査の結果、排気用フィルターケーシングの短管部分に減肉の可能性が見られたことから、超音波厚さ計(JFE アドバンテック製 TI-55K)を用いた部材の肉厚測定

を実施した。排気用フィルターケーシングの本体及びレデューサー部の肉厚は、設計肉厚 2mm に対して 1.9～2.0mm であり、減肉は認められなかった。しかし、放射性物質が検出された短管部分は、上部のフランジと下部のレデューサーとの溶接線が近接しているため、幅が狭く、超音波探触子を接触させることができず、肉厚を測定することができなかった。

3.3 浸透探傷試験

放射性物質が検出された排気用フィルターケーシングの短管部、レデューサー部の一部、及びその近傍について表面の欠陥等を確認するため、浸透探傷試験を行った。浸透探傷試験の結果を図4に示す。短管表面部には全ての方向から赤色指示模様を確認し、表面に欠陥等の傷があることがわかった。

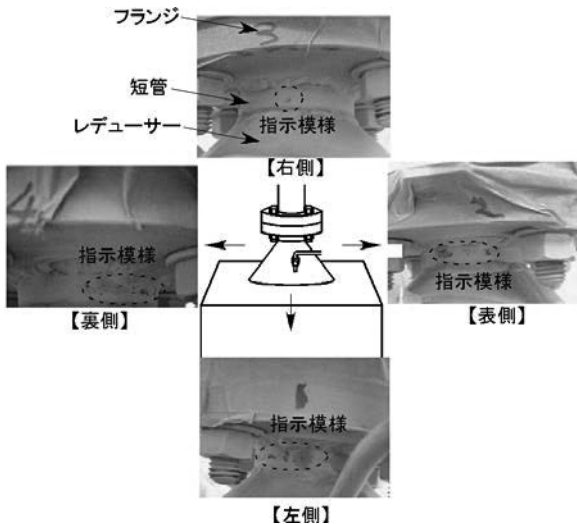


図4 浸透探傷試験の結果

4. 腐食原因

短管部に発生した放射性物質は拭き取り後も再度確認されたこと、浸透探傷試験の結果、短管表面部に赤色指示模様を確認したこと、及び内面観察の結果、腐食の痕跡がみられたことから、放射性物質の検出の原因はステンレス鋼の腐食により短管部に発生した微細な貫通孔による漏出と判断した。

4.1 腐食環境の調査

排気用フィルターケーシング短管部に貫通孔が見られたため、当該グローブボックスの設置箇所について環境調査を実施し、腐食に至った要因について考察した。

図5に示すように当該グローブボックスの設置されて

いる試験セル操作区域は空調設備（クーラー）が完備されている。当該グローブボックスに隣接する試験セルは空調設備の無い試験セル保守区域からの空気（外気）が入りこみ、その試験セル内の空気がグローブボックス内に流入することで、グローブボックス内外において温度差が生じていることが判明した。そのため、当該グローブボックス及び排気用フィルターケーシング内面は結露が生じやすく、腐食が生じやすい湿潤の状況であったと考えられる。

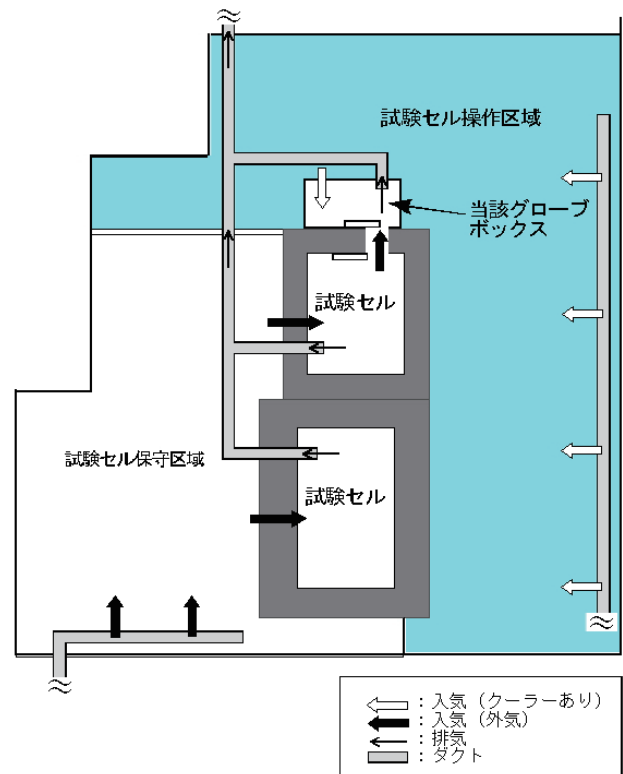


図5 小型試験設備換気系統概略

4.2 腐食促進因子の調査

スミヤろ紙により排気フィルター内外面の表面付着物の採取を実施し、その成分分析を行った。

採取したスミヤろ紙は純水で成分を溶出し、イオンクロマトグラフィーにより分析した。その結果、表1に示すように、硝酸イオン (NO_3^-)、硫酸イオン (SO_4^{2-}) をはじめ腐食の促進因子となる塩化物イオン (Cl^-) が検出された。

本グローブボックスの材質であるステンレス鋼は硝酸及び硫酸に対し常温においては十分な耐食性を有していることから、今回の腐食について、硝酸イオン及び硫酸イオンの影響は考え難い。

その一方、塩化物イオンについては、当該排気用フィ

ルターケーシング上部に接続された排気ダクト（ポリ塩化ビニル管）の内部に発生した硝酸分を含む結露水に塩化物が溶出し流下した可能性がある。ステンレス鋼は塩化物を含む湿潤環境において腐食を生じること[2]が知られており、さらに 3.1 で述べた溶接時の熱影響による鋭敏化が重畳し、今回の腐食が発生したと考えられる。

表1 グローブボックスの付着物の成分分析結果

測定箇所 【材質】	測定元素	F ⁻	Cl ⁻	Br ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
短管(外面) 【SUS28(SUS304L相当)】	検出限界値 未検出	5.6 × 10 ⁻²	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	5.2 × 10 ⁻¹	検出限界値 未検出	4.0 × 10 ⁻²
フランジ(内面) 【ポリ塩化ビニル】	検出限界値 未検出	2.9 × 10 ⁻²	5.1 × 10 ⁻²	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	1.6 × 10 ⁻¹	検出限界値 未検出	1.1 × 10 ⁻¹
短管(内面) 【SUS28(SUS304L相当)】	検出限界値 未検出	2.5 × 10 ⁻²	2.4 × 10 ⁻²	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	1.3 × 10 ⁻¹
レデューサー(内面) 【SUS28(SUS304L相当)】	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	7.1 × 10 ⁻²	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	8.6 × 10 ⁻¹	検出限界値 未検出	1.1 × 10 ⁻¹
パネル(外面) 【SUS28(SUS304L相当)】	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出	検出限界値 未検出

単位: mg/スミヤ
検出限界値: 2.0 × 10⁻² mg/スミヤ

4.3 腐食原因の推定

原因調査、腐食環境の調査、腐食促進因子の調査結果を基に、腐食により短管部の貫通孔が生じた原因として以下の3つの要因があげられる。

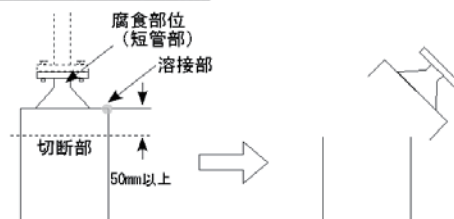
- ① フランジ下部の短管部は、溶接線が極めて近接（18mm）しており、少なくとも2回の溶接時の熱影響を受けたことにより、鋭敏化が進み耐食性が低下していた。
- ② グローブボックスは、隣接する試験セルの空気が流入する構造であるため、内部に頻繁に結露を生じ、腐食しやすい湿潤環境となっていた。
- ③ さらに、上部のポリ塩化ビニル管から硝酸分を含む結露水に塩化物イオンが溶出して、短管部に流下し腐食を促進する環境となっていた。

これら3つの要因が重なり、短管部の腐食が進行し、貫通孔を生じたため、放射性物質が漏出したと考えられた。なお、排気用フィルターケーシングの短管以外の部分及び溶接線には、設置から30年以上が経過した現時点において金属光沢が見られ有意な腐食の進行が見られないことから、上記②及び③の腐食環境は、溶接線の近接による影響を受けていない部材には影響を与えない程度のものであると考えられる。

5. 排気用フィルターケーシングの補修

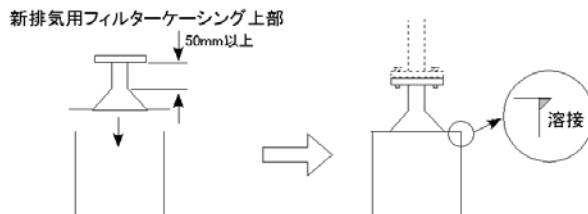
原因調査の結果、排気用フィルターケーシングには腐食による貫通孔が生じたことから、腐食箇所を含む排気用フィルターケーシングの一部を切断し、SUS304L鋼で新たに製作した排気用フィルターケーシング上部を溶接により接続して補修することとした。なお、本グローブボックスは試験セルと接続されており、設置場所から移動するのは不可能である。このため、補修にあたっては、グローブボックスは移動せず、負圧を維持した状態において、作業を実施した。以下、図6に補修工程の概要を示す。

1. 排気用フィルターケーシング内部の除染
・既設HEPAフィルターを外し遠隔により実施する。
2. 放射性物質拡散防止用テントの設置
・3室構造
3. 排気用フィルターケーシングの切断



- ・既存の排気用フィルターケーシング上面の溶接部から50mm以上離れた部位を切断する。
(溶接による熱影響を受けていない箇所に新規製作するフィルターケーシング上部を溶接するため)
- ・既存排気用フィルターケーシング上面を切断し撤去する。

4. 新排気用フィルターケーシング上部の溶接



- ・切断面に新規に製作した排気用フィルターケーシング上部を設置する。
- ・新規に製作する排気用フィルターケーシング上部の短管は、短管上方と下方の溶接間隔を50mm以上確保する長さとする。
- ・新排気用フィルターケーシング上部と既存の排気用フィルターケーシングを溶接する。

5. 溶接箇所の検査

- ・自主検査
- ・使用前検査

図6 排気用フィルターケーシング補修工程及び方法

5.1 排気用フィルターケーシング内部の除染

排気用フィルターケーシング切断後に開放系になることから、ダスト上昇(放射性物質の拡散)及び作業員への影響が懸念された。このため、事前に排気用フィルターケーシング内部の除染を行った。

作業に先立ち、調査用 CCD カメラの先端部に小型ライ

トを取り付け、内部を照らし、カメラの撮影画像を確認しながら除染を行えるようにした。調査用カメラにより撮影した排気用フィルターケーシング内部を図7に示す。



図7 排気用フィルターケーシング内部

除染前に排気用フィルターケーシング内面の側面、上部、レデューサー部、短管部についてスミヤ法による放射性物質の付着状況を確認した。その結果、全ての測定点で β 、 γ 線核種は5kcpm以上であり、短管部については100kcpm以上の放射性物質の付着があることが分かった。

除染方法は、図8に示すように内部にアクセスできる直棒の先端に水、アルコール、中性洗剤を湿らせた布及びメラニンスポンジを取り付け、拭き取りにより実施した。排気用フィルターケーシング内各部位の放射性物質の除染状況を図9に示す。



図8 排気用フィルターケーシング内部の除染の様子

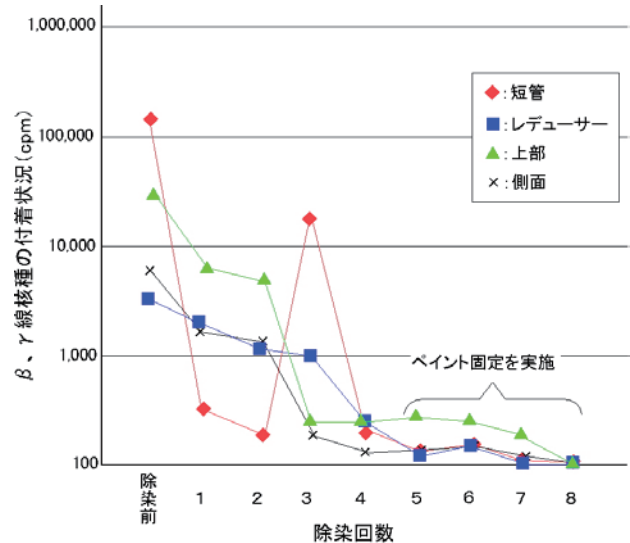


図9 排気用フィルターケーシング内各部位の放射性物質の除染状況 (β 、 γ 線核種) の推移

除染の都度、スミヤろ紙を用いて放射性物質の除染状況の測定を行い、その結果、除染4回目の確認において、短管部を含む全ての測定点において β 、 γ 線核種による放射性物質は1kcpm以下まで除染することができた。さらに、切断予定箇所である短管部、レデューサー部、上部については、切断時の放射性物質の広がりを防止するため、除染5回目以降は耐熱塗料（カンペハピオ製）による放射性物質のペイント固定を繰り返し実施し、除染8回目の確認において全ての測定点の β 、 γ 線核種の付着は100cpm以下 (α 線核種の付着についても100cpm以下) に抑えることができた。

この除染作業により、当初、切断・溶接作業において作業者は、エアラインマスクの装備を想定していたが、より装備の容易な全面マスクでの作業が可能となった。

5.2 放射性物質拡散防止用テントの設置

排気用フィルターケーシングの切断、溶接にあたって、グローブボックス内部からの放射性物質の拡散を防止するため、排気用フィルターケーシングの補修にはグローブボックス周辺を囲うように鋼管パイプと酢ビシートを用いて、図10に示す放射性物質拡散防止用テント（グリーンハウス、以下GHとする）を設置した。GHは、GH-1、GH-2、GH-3の3室からなり、GH-1は排気用フィルターケーシングの切断・溶接を実施するエリアであり、3室の中でも一番放射性物質の拡散が大きい。そのため、GH-1内の排気用フィルターケーシング周辺にフードを設置し、GH-1内のフード以外のエリアに出来る限り放射性物質が拡散しないようにした。GH-1の排気はフード内に排気ホ

ースを取り付け、HEPA フィルターを介し排気設備に排気した。GH-2、GH-3 は GH-1 から退出する作業員及び GH-1 で使用した物品等の放射性物質の付着検査をそれぞれ行うことで二重に管理した。また、GH での作業員の装備は、全面マスク、タイベックスーツ、RI ゴム手袋、アームカバー、シューズカバーとすることで、作業員の身体への放射性物質の付着を防止した。なお、GH 内における放射性物質はフード開口部をシートにより閉めることで内部に閉じ込めて管理できるようにした。それ以外のエリアについては放射性物質が付着していない状態で作業を行った。

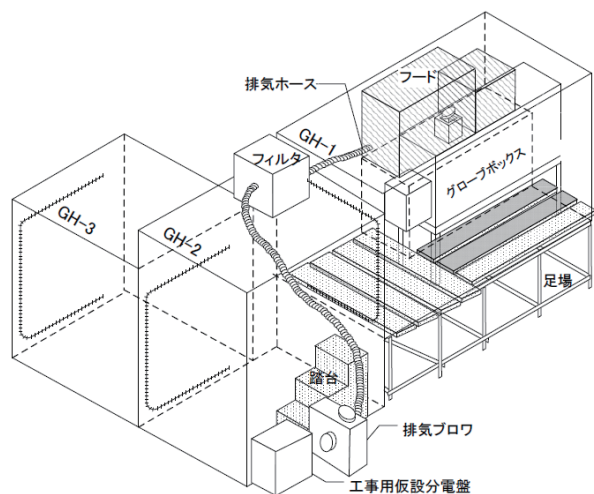


図10 グリーンハウス概要

5.3 排気用フィルターケーシングの切断

排気用フィルターケーシングの切断で使用する切断工具は、火花の発生、切粉の発生を考慮し、高速回転機器ではなくレシプロソー（往復運動する鋸刃により、切断する動力のこぎり）により切断した。切断面は新規に製作した排気用フィルターケーシング上部を溶接により接続することから、水平になるよう切断する必要があった。

そこで、図11に示す水平切断用治具を考案した。以下、水平切断治具の特徴を示す。

- ① 排気用フィルターケーシングにボルトにより固定できる機構とした。
- ② 高さを微調整できる機構とした。
- ③ レシプロソーの固定バイス部をスライドできる機構とし、固定バイス部を軸にして、水平に切断できるようにした。

グリーンハウス内における既設排気用フィルターケーシングの切断は、排気用フィルターケーシング上面から50mmのところに線を引き、線に沿ってレシプロソーの刃

先が当たるよう、水平切断用治具の高さを調整した後、水平切断用治具を排気用フィルターケーシングに固定した。レシプロソーによる切断は固定バイス部を軸にして一方向からスライドさせて切断した。この方法により排気用フィルターケーシングを水平に切断することができた。なお、切断作業に先立ち、負圧を維持するため、グローブボックス内の排気フィルターケーシング部に内蓋を設置した。切断により発生した切粉は放射性物質の付着の可能性があるため、フード内で全て回収した。また、切断後に溶接準備として、切断面の除染、開先加工を実施した。



水平切断治具 レシプロソーを取付た様子
図11 水平切断治具

5.4 排気用フィルターケーシングの溶接

当該排気用フィルターケーシングを溶接する上で溶接線が近接しないよう改善を図るため、「加工施設及び再処理施設に係る溶接の方法の認可について（平成12年12月27日付け12安局第212号）」を準拠し、溶接線の間隔は50mm〔3〕を担保することとした。溶接線の間隔を考慮して設計した排気用フィルターケーシング上部を図12に示す。

当該排気用フィルターケーシングは SUS304L の薄鋼（2mm）であるため、薄板突き合わせ溶接に適している TIG 溶接により補修を行うこととした。なお、溶接の熱によ

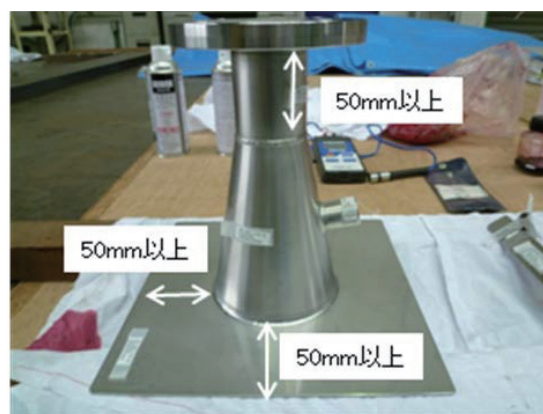


図12 溶接線の間隔が50mm以上となるように製作した排気用フィルターケーシング上部（鋼種：SUS304L）

る SUS 鋼のひずみを防止するため溶接部の近傍に銅板を設置し、熱が速やかに放熱される状態で行うと伴に、また、放射性物質を拡散するリスクがあるため、溶接士の装備についても全面マスク、タイベックスーツ、RI ゴム手袋、アームカバー、シューズカバーを着装した状態で作業を実施した。これらのことを踏まえ、実施した排気用フィルターケーシングの溶接作業の様子を図13に示す。この作業の結果、溶接時の熱影響によるひずみも無く、放射性物質の拡散も無く溶接作業を終了することができた。また、溶接後、排気用フィルターケーシング溶接部を電解研磨により仕上げを行うと共に不動態化処理を行い、SUS 表面に不動態皮膜を形成し、腐食を防止する処置を施し、補修を完了した。



図 13 溶接部の近傍に銅板を設置し TIG 溶接を実施

5.5 補修後の検査

補修終了後、自主検査として外観検査、浸透探傷試験、負圧検査を実施した。

また、使用前検査において、材料検査、寸法検査、外観検査、浸透探傷試験、負圧検査に全て合格し、原子力規制委員会より合格証の交付を受けた。

6. 結言

グローブボックス排気用フィルターケーシングに腐食が生じた原因を検討し、近接した溶接線によるステンレス鋼の鋭敏化、結露による湿潤環境、塩化物イオンの存在、これら 3 つの要因が重なり、短管部の腐食が進行し、貫通孔が生じたと考え、主原因の溶接線が近接しないよう改善を図った排気用フィルターケーシング上部を考案した。

補修作業では、グローブボックスの負圧を維持した状態において貫通孔を含む周辺部位を撤去したのち、新たに製作した排気用フィルターケーシング上部を TIG 溶接

により接続することができた。

今回の事象において、ステンレス鋼の腐食原因、薄鋼の溶接、負圧を維持した状態での補修などの貴重な知見を得ることができた。

参考文献

- [1] SUS28：旧 JIS における鋼種番号であり、1972 年の規格改正時に SUS304L に切り替えられた。
- [2] 杉本克久著“金属腐食工学”、内田老鶴圃、p.173(2009)
- [3] 科学技術庁原子力安全局長通知「加工施設及び再処理施設に係る溶接の方法の認可について(平成12年12月27日付け12安局第212号)」