

令和 5 年度労災疾病臨床研究事業費補助金

ベリリウム等の低濃度管理物質に対する有効な曝露防止対策に関する研究 (211101-01)

研究代表者	石田尾 徹	産業医科大学	産業保健学部	作業環境計測制御学	講師
研究分担者	山本 忍	産業医科大学	産業保健学部	作業環境計測制御学	助教
研究分担者	保利 一	産業医科大学	名誉教授		
研究分担者	東 秀憲	産業医科大学	産業生態科学研究所	労働衛生工学	教授
研究分担者	大藪 貴子	産業医科大学	産業生態科学研究所	労働衛生工学	講師

研究の背景と目的

ベリリウム等の低濃度管理物質を製造、取り扱っている工程では、対策により室内への拡散をある程度抑えることができたとしても、特に発生源付近では管理濃度を超えることが考えられ、従来の工学的対策では第一管理区分にすることは困難になるといわれている。このような環境において、作業者の曝露による健康障害を防止するためには、発生状況を把握するとともに、状況に応じた適切な対策を実施する必要がある。従来、工学的対策としては、特化則や有機則等で、設備の密閉化、局所排気装置（局排）およびプッシュプル型換気装置の設置等が義務付けられ、局排等の性能要件も定められているが、低濃度管理物質については、作業環境管理のみで作業環境を十分低減することが困難な場合も多いと考えられ、個人保護具の使用等を含めた総合的な管理が必要になると考えられる。令和 3 年から特化則に追加された溶接ヒュームについては、個人サンプリング法によりマンガン濃度を測定し、吸入するマンガン濃度が管理濃度を超えないような防護係数を有する呼吸用保護具を選択し着用させるとともに、年 1 回保護具のフィットテスト実施し防護状態を確認することになっている。一方、平成 24 年の有機則等の改正で、局排等に替わる多様な発散防止抑制措置も認められるようになっており、対策の方法も多様化している。本研究では、ベリリウム等の低濃度管理物質を製造、取り扱う作業場において、作業者の健康障害を防止するために有効な曝露防止対策を検討するものである。ただし、現在、低管理濃度特定化学物質は 14 物質あり、物質ごとに作業の種類、作業内容、発生状況等は大きく異なる。そこで本研究では、対象物質としてベリリウムを選択し、これを取り扱う作業の実態を把握し、有効な曝露防止対策を提案することを目的とする。

研究結果の概要

本研究はベリリウム等の低濃度管理物質について、作業者の曝露を防止する方法を検討するものである。研究は、文献的研究、現場調査および実験室的研究からなる。令和 3 年度は、1)文献調査、2)現場アンケート調査案作成、3)模擬作業場の設計・施工および 4)フィットテスト機器の準備を行った。令和 4 年度は前年の知見をもとに、1)現場アンケート調査、2)フィットテスト、3)現場実態調査（濃度測定）および 4)模擬作業のための姿勢・動作確認

を行った。令和5年度は、前年までの成果を解析・検討し、学会等で報告するとともに、1) フィットテストの実施（継続）、2) 粉じんの湿式回収装置の作製を主に行った。以下に詳細を述べる。

1. フィットテストの実施（継続）

成人男女対象者に対して複数の使い捨て式あるいは半面形面体型取替え式呼吸用保護具に関する短縮定量的フィットテストを実施した。本研究でテストに用いたフィットテストは、短縮定量的フィットテストが可能な TSI PortaCount 8048 である。同意がえられた対象者は 2022 年度に 20 名（男性 12 名、女性 8 名）および 2023 年度に 16 名（男性 8 名、女性 8 名）であった。対象者が呼吸用保護具を装着してシールチェックをした後に短縮定量的フィットテストを行った。使い捨て式および半面形面体型呼吸用保護具のフィットテストの合格基準はフィットファクタが 100 以上である。フィットファクタ ($FF = C_{out}/C_{in}$) は、呼吸用保護具外（テスト環境中）の粒子濃度 C_{out} [個数濃度] と呼吸用保護具内部の粒子濃度 C_{in} の比で定義され、総合的な FF は 4 つの動作からそれぞれ得られるフィットファクタを用いて与えられる。静電フィルタを使用している呼吸用保護具については、装置に内蔵されている N95 コンパニオン機能を使うことで、フィルタを通過する粒子を無視できる状態で測定した。また、N95 コンパニオン機能を使用する場合の FF の上限値は 200 と設定されているため、本研究では、合格基準等を考慮し、すべてのテストにおいて FF の上限値を 200 で統一して解析を実行した。次に、フィットテストの実施と同時に正面および横からの顔写真と顔面 3D 画像を撮影した。得られたフィットファクタと対象者の顔写真および 3D 画像より得られる顔サイズパラメータを用いて多変量解析を実行した。具体的には、フィットテストで得られた呼吸用保護具のフィットファクタを、NIOSH のフィットパネルに使用されている 10 カ所に唇幅を加えた顔サイズパラメータの組み合わせでフィットファクタに影響を及ぼす因子として解析した。11 個の顔サイズパラメータの中で特にフィットファクタに影響の大きなパラメータを選定し、相関式を作成して呼吸用保護具のフィットテストの結果を推定し、テスト結果と比較した。さらに、作業者により適した（フィットファクタが大きいと予想される）呼吸用保護具を選定するための方法について検討するとともに、低濃度管理物質の曝露防止対策としての呼吸用保護具の有用性について検討した。解析の結果、顔の横幅、縦幅および唇幅から得られる情報がフィットファクタおよびフィットテストの合否判定結果に強く相関している傾向が示され、フィットファクタの推定式を 2 変数で表現することで、実験結果を概ね良好に再現できた。一方、顔の正面写真による顔認識機械学習によるフィットファクタの推定プログラムを Wolfram MathematicaTM により作成し実行した。この結果、推定式と同精度以上で学習データのフィットテストの判定結果を再現することが可能であり、未学習データも平均で概ね 7 割程度再現可能であった。今後、学習データの精査や相関法の改善により、特に未学習データのフィットテスト判定結果の推定精度向上等が課題である。各呼吸用保護具のフィットファクタの平均値とフィルタの透過率から

推定される防護係数を指定防護係数と比較した結果、推定される防護係数はいずれも指定防護係数（JIS）を上回っている（P-PAPR に関してはメーカーの保証値には達していない。これは、FF の上限値をすべて 200 で統一していることに加えて、単にファンを稼働させていない状態での全漏れ率から防護係数を算出しているためと考えられる）が、FF の平均値がいずれも合格値（100）を超えており、作業者に適した呼吸用保護具を適切に装着していることが前提になっており、当然フィットファクタの値が小さいものほど防護係数の推定値も小さくなる。このため、低濃度管理物質のように、より健康障害性の高い恐れのある物質を取り扱う場合には、作業者の顔に適した密着性の高いと予想される取替え式の呼吸用保護具あるいはファン稼働時には面体内が正圧に保たれるため隙間からの漏れを防ぐ効果の高い P-PAPR の使用を推奨し、適切に装着したうえで作業を実施していただくことがよいと考えられる。

2. 粉じんの湿式回収装置の試作

局所排気装置における二次的曝露を防止するための粉じん回収システムの試作を行った。ダクト内のエキシマランプを用いて金属粉じんをイオン化し、水と接触・吸収させる方法とした。モデル粉じんは、粒子サイズ $1\text{ }\mu\text{m}$ の銅および酸化第二鉄、 $3\text{ }\mu\text{m}$ のアルミニウムパウダーおよび α -アルミナパウダー、 $5\text{ }\mu\text{m}$ の酸化第二銅の計 5 物質とした。今回の装置の検証実験では、粒子サイズ $1\text{ }\mu\text{m}$ の銅を使用した。粉じん発生部には低濃度で発じんできる柴田科学製の間欠式ダストフィーダー（DF-3 型）を用いた。ターンテーブルに小さい穴が開いており、ダストホッパーの金属粒子が穴に入り、テーブルが回転することにより、エゼクターに移動し、空気を使って真上に上昇する仕組みである。粉じん希釈部にはプラスチック製のデシケータを用いた。粉じんは左サイドの入口から導入する。デシケータ下部に穴を開けることにより外部の空気を導入し、希釈する。希釈された粉じんはデシケータ上部へと移動させた。湿式粉じん回収部の水槽はプラスチック製で、中に 3 つの仕切りを作った。アルミダクト内にはウシオ電機製のエキシマランプ（172 nm, 14 W）を設置した。希釈部からの粉じんはこの装置内を通ることにより、エキシマランプと接触し、その後水と接触する。ファンおよびバックアップフィルター部では水槽内を通った空気はダクトを通してファンへと進む。ファンにはプレフィルターが内蔵されており、ファン通過後にさらに HEPA フィルターを通過する。ここまでの試作を行い、装置の改良を行った。粉じん発生部の標準装備のターンテーブルは、金属粒子をトラップする穴が大きいため、粒子個数が高くなり、パーティクルカウンターの測定限界を超えた。そのため、ターンテーブルの穴のサイズを数種類用意し、濃度調整をすることにした。また、HEPA フィルターを通過した空気を発生部へ導入した。粉じん希釈部の試作段階では大気じんの漏れが大きかったため、希釈用デシケータのフタにグリースを塗り、テープで補強した。希釈した粉じんを水槽へ送るアルミダクトはビニール袋で覆い、外部からの空気の侵入を遮断した。また、HEPA フィルターを通過した空気を希釈空気とした。湿式粉じん回収部では、漏れを防止するため水槽の本体とフタをテープ

で補強した。エキシマランプが内蔵されているアルミダクトはビニール袋で覆い、空気を遮断した。ファンおよびバックアップフィルター部においては、試作段階でのフィルター付き吸引ファンは、流量が $3.9 \text{ m}^3/\text{min}$ と固定値であり、希釈流量が大きかったため、制御が可能な旧吸入曝露室内の排気処理装置を使用し流量を調整することとした。次に検証実験を行った。まず、モデル粉じんを使用せず、大気じん（室内空気）のみで実験を行った。希釈部および水槽後方の粒子個数をパーティクルカウンター（Model 9306, ニッタ製）を用いて測定した。次に、粒子サイズ $1 \mu\text{m}$ の銅を用いて、同様の実験を行った。前述の漏れをなくす改良により、粒径区分 $0.3 \mu\text{m}$ で約 95%, $0.5 \mu\text{m}$ で約 93% の大気じんをカットすることができた。これは主に HEPA フィルターの効果であると考えられる。次に、粒子サイズ $1 \mu\text{m}$ の銅パウダーをダストフィーダーにセットし、湿式回収実験を行った。ターンテーブルは TA-35（特注）、排気流量は $0.54 \text{ m}^3/\text{min}$ とした。区分 $0.3 \mu\text{m}$ および $0.5 \mu\text{m}$ では粒子個数に差はみられなかったが、区分 $1 \mu\text{m}$ 以上の金属粒子は水中に比較的回収されることがわかった。このことから、サイズが小さい粉じんは水に回収されにくいことが考えられた。ランプ点灯時の結果では、全ての粒径区分において、出口の粒子個数が入口より減少した。特に、区分 $1 \mu\text{m}$ に着目すると、ランプ消灯時の回収率が 46.7% であるのに対して、ランプ点灯時の回収率は 60.0% と増加することがわかった。さらに回収率を増加させるためには、実験条件や照射条件等を検討する必要があると考える。